



Hochschule für
Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät für Technik und Informatik

Analyse und Minimierung magnetischer Felder um 110-kV-Muffenstandorte

vorgelegt von

Lukas Lehmann

Matrikelnummer: XXXXXXXXXX

Erstgutachter: **Prof. Dr. Frerk Haase**

Zweitgutachter: **Dr. C. Claudius J. Noack**

Hamburg, 28. Februar 2025

Lukas Lehmann

**Analyse und Minimierung magnetischer Felder um
110-kV-Muffenstandorte**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Elektro- und Informationstechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Hamburger Energienetze GmbH
Bramfelder Chaussee 130
22177 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Frerk Haase
Zweitprüfer: Dr. C. Claudius J. Noack

Abgabedatum: 28.02.2025

Kurzreferat

Lukas Lehmann

Thema der Arbeit

Analyse und Minimierung magnetischer Felder um 110-kV-Muffenstandorte

Stichworte

magnetische Flussdichte, Magnetfelder, Minimierungsmaßnahmen, 110kV-Muffen, Hochspannung, Magnetfeldmessung, Magnetfeldsimulation

Kurzzusammenfassung

In der Arbeit wird die magnetische Flussdichte mithilfe von Messungen und Simulationen an 110-kV-Muffen durchgeführt. Die Ergebnisse werden analysiert und mit den Forderungen der 26. BImSchV verglichen. Darüber hinaus werden Minimierungsmaßnahmen zur Reduzierung der magnetischen Flussdichte dargestellt.

Lukas Lehmann

Title of Thesis

Analysis and minimization of magnetic fields around 110-kV-Cable-Joint-Locations

Keywords

magnetic flux density, magnetic fields, minimization measures, 110-kV-cable-joints, High Voltage, Magnetic field measurement, magnetic field simulation

Abstract

In this thesis, the magnetic flux density is determined through measurements and simulations at 110-kV-cable-joints. The results are analyzed and compared with the requirements of the 26. BImSchV. Furthermore, minimization measures for reducing the magnetic flux density are presented.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abkürzungsverzeichnis	iii
Symbolverzeichnis	iv
Glossar	v
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung	1
1.3 Vorgehensweise	2
2 Grundlagen	3
2.1 Beschreibung des Strom- und Hochspannungsnetzes	3
2.1.1 Steuerung, Überwachung und Sicherheit	4
2.1.2 (n-1)-Kriterium	4
2.2 110-kV-Leitungen	5
2.2.1 110-kV-Kabeltypen	5
2.2.2 Verlegung von Hochspannungskabeln	7
2.2.3 Muffen	9
2.3 Magnetische Felder	12
2.3.1 Entstehung magnetischer Felder	13
2.3.2 Wechselwirkung mit Materialien	13
2.3.3 Relevante Größen und Maßeinheiten	14
2.3.4 Magnetische Felder bei Hochspannungsleitungen und Muffen	14
2.3.5 Magnetische Felder und deren Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt	16
2.4 Berechnungsmethodik der magnetischen Felder (WinField)	20
2.5 Gesetze und Vorschriften	22
2.5.1 ICNIRP-Richtlinien	23
2.5.2 Die EMFV	23
2.5.3 Die 26. BImSchV	23
2.6 Wissenschaftlicher Stand zu Magnetfeldern um 110-kV-Muffe	25
3 Magnetfeldberechnung um 110kV-Muffen	26
3.1 Vorgehen in der Simulation	26
3.2 Muffen von 300-mm ² -Kabelanlagen	27
3.3 Muffen von 1000-mm ² -Kabelanlagen	30
3.4 Muffen von (2x)1800-mm ² -Kabelanlagen	32
4 Magnetfeldmessung um 110kV-Muffen	35
4.1 Messverfahren	35
4.1.1 Messsystem und Messprinzip	35
4.1.2 Messaufbau	36

4.1.3	Messdurchführung und -auswertung	37
4.2	Messergebnisse	38
4.2.1	Messung der magnetischen Flussdichte von Muffen einer 300-mm ² -Kabelanlage	38
4.2.2	Messung der magnetischen Flussdichte von Muffen einer 1000-mm ² -Kabelanlage	39
5	Vergleich von Berechnung und Messung	45
5.1	Vergleich der Leitung 47 / Muffenstandort (300-mm ² -Kabelanlage) mit Be- rechnung	46
5.2	Vergleich der Leitung 33/Muffenstandort 1 (1000-mm ² -Kabelanlage) mit Berechnung	49
5.3	Vergleich der Leitung 33/Muffenstandort 2 (1000-mm ² -Kabelanlage) mit Berechnung	51
5.4	Einflussfaktoren für die Diskrepanzen	53
6	Minimierung der Magnetfelder um Muffenstandorte	54
6.1	Identifizierung der Minimierungsmaßnahmen	54
6.2	Bewertung der Minimierungsmaßnahmen	55
6.3	Praktische Umsetzbarkeit der Minimierungsmaßnahmen	58
7	Fazit und Ausblick	60
	Literatur	62
	Anhang	64
A.1	Messwerte	65
A.1.1	Messwerte Leitung 47	65
A.1.2	Messwerte Leitung 33	66
A.2	Stromstärkemessung	70
A.2.1	Leitung 47	71
A.2.2	Leitung 33	72
A.3	Weitere Anhänge	74
	Selbstständigkeitserklärung	75

Abkürzungsverzeichnis

26. BImSchV 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

26. BImSchVVwV Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder

BUKEA Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft

EMF Elektromagnetische Felder

EMFV Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern

EMV Elektromagnetische Verträglichkeit

EMVU Elektromagnetische Verträglichkeit Umwelt

HGÜ Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen

IARC Internationalen Agentur für Krebsforschung

ICNIRP Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

PP Polypropylen

SAR Spezifische Absorptionsrate

VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik

VPE-Kabel Vernetztes-Polyethylen-Kabel

WHO Weltgesundheitsorganisation

WLAN Wireless Local Area Network

Symbolverzeichnis

A	Querschnitt
H	Magnetische Feldstärke
I	Stromstärke
I_{ind}	Induzierte Wirbelströme
R	Elektrischer Widerstand
S	Scheinleistung
U	Spannung
Δx	Absolute Abweichung
Φ	Magnetischer Fluss
δ	Eindringtiefe beim Skin-Effekt
\hat{I}	Spitzenwert der Stromstärke
λ	Wellenlänge
μ	Magnetische Permeabilität
μ_0	Magnetische Feldkonstante
ω	Kreisfrequenz
ρ	Spezifischer Widerstand
σ	Elektrische Leitfähigkeit
f	Frequenz
k	Belastungsfaktor
l	Leiterlänge
r	Radius
s	Standardabweichung
ε	Relative Abweichung

Glossar

(n-1)-Kriterium Sicherheitskriterium im Stromnetz, das den Ausfall einer Komponente erlaubt, ohne dass die Versorgung unterbrochen wird.

110-kV-Leitungen Hochspannungsleitungen mit einer Nennspannung von 110 kV.

110-kV-Muffe Hochspannungsmuffen, dessen Leiter eine Nennspannung von 110 kV haben.

Ampère'sches Gesetz Physikalisches Gesetz, das den Zusammenhang zwischen elektrischem Strom und Magnetfeldern beschreibt.

Biot-Savart-Gesetz Gesetz zur Berechnung magnetischer Felder von stromdurchflossenen Leitern.

Cross Bonding Technik zur Reduzierung von Schirmströmen in Hochspannungskabeln.

Eindringtiefe (δ) Maß für das Eindringen elektromagnetischer Wellen in ein Material.

Lenz'sche Regel Gesetz, das die Richtung von Induktionsströmen beschreibt.

Muffe Verbindungselement in Hochspannungskabelsystemen.

Schirmströme Ströme, die in der Abschirmung eines Kabels fließen und magnetische Felder beeinflussen.

Skin-Effekt Effekt, der bewirkt, dass Wechselstrom mit zunehmender Frequenz stärker an der Oberfläche eines Leiters fließt.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Hamburgs Übertragungs- und Verteilungsnetz	3
2.2	Verlegeart der Kabelanlage (1 Leiter mit seinen 3 Phasen)	8
2.3	Verlegeart einer (2x)1800-mm ² -Kabelanlage	8
2.4	Muffengrube eines Leiters	9
2.5	Aufbau einer Muffe	10
2.6	Montageskizze 300- bis 1000-mm ² -Muffe - Draufsicht	11
2.7	Montageskizze 300- bis 1000-mm ² -Muffe - Seitenansicht	11
2.8	Montageskizze 1800-mm ² -Muffe - Draufsicht	11
2.9	Montageskizze 1800-mm ² -Muffe - Seitenansicht	11
2.10	Magnetfeld eines geraden Leiters [29]	13
2.11	resultierendes Magnetfeld von drei Phasen eines Leiters in Dreiecksanordnung am Beispiel eines 1000-mm ² -Kabelsystems (S = 150 MVA) - simuliert mit Cableizer	15
2.12	Magnetfeld eines Leiters [39]	20
2.13	Teilleiter im Koordinatenursprung [39]	21
2.14	Rotationsellipse des B-Vektors [39]	22
3.1	WinField-Simulation der 300- bis 1000-mm ² -Muffe - Draufsicht	27
3.2	WinField-Simulation der 300- bis 1000-mm ² -Muffe - Seitenansicht	27
3.3	WinField - Simulation im Worst-Case (75 MVA) - 300-mm ² -Kabelquerschnitt	28
3.4	Magnetische Flussdichte über einer 110kV-Kabelanlage/Muffe (75 MVA)-300-mm ² -Kabelquerschnitt	29
3.5	Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Muffe je nach Abstand zur Trassenachse (75 MVA) 300-mm ² Kabelquerschnitt	29
3.6	WinField - Simulation im Worst-Case (150 MVA) - 1000-mm ² -Kabelquerschnitt	30
3.7	Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe (150 MVA) - 1000-mm ² -Kabelquerschnitt	31
3.8	Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Muffe je nach Abstand zur Trassenachse (150 MVA) - 1000-mm ² -Kabelquerschnitt	31
3.9	WinField-Simulation der 1800-mm ² -Muffe - Draufsicht	32
3.10	WinField-Simulation der 1800-mm ² -Muffe - Seitenansicht	32
3.11	WinField - Simulation im Worst-Case (360 MVA) - 1800-mm ² -Kabelquerschnitt	33
3.12	Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe (360 MVA) - 1800-mm ² -Kabelquerschnitt	33
3.13	Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Muffe je nach Abstand zur Trassenachse (360 MVA) - 1800-mm ² -Kabelquerschnitt	34
4.1	Wandel & Goltermann: EFA-3	35
4.2	Messraster eines 13 m x 7 m - Messaufbaus	36
4.3	Messraster der magnetischen Flussdichte von der Muffe am 300-mm ² -Kabelsystem (Leitung 47)	39
4.4	WinField - Simulation mit Werten zum Zeitpunkt der Messung (36,08 MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 1 (20 cm Abstand zwischen Phasen an der Muffe)	41
4.5	Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe mit Werten zum Zeitpunkt der Messung (36,08 MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 1 (20 cm Abstand zwischen Phasen an der Muffe)	41

4.6	WinField - Simulation der Muffe mit Werten zum Zeitpunkt der Messung (35,64 MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 2 (40 cm Abstand zwischen Phasen an der Muffe)	42
4.7	Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe mit Werten zum Zeitpunkt der Messung (35,64 MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 2 (40 cm Abstand zwischen Phasen an der Muffe)	42
4.8	Messung der magnetischen Flussdichte am 1000-mm ² -System (Momentane Leistung zum Zeitpunkt der Messung: 36,08 MVA) - Muffenstandort 1 dieser Leitung	43
4.9	Messung der magnetischen Flussdichte am 1000-mm ² -System (Momentane Leistung zum Zeitpunkt der Messung: 35,64 MVA) - Muffenstandort 2 dieser Leitung	44
5.1	Vergleich der Messergebnisse mit der theoretischen Berechnung der Muffe der Leitung 47 in Abhängigkeit des Belastungsfaktors $k_{Ltg.47}$	46
5.2	magnetische Flussdichte im axialen Abstand zur Muffe parallel zur Trassenachse im Vergleich der Theorie und der Praxis eines Muffenstandortes der Leitung 47	48
5.3	Vergleich der Messergebnisse mit der theoretischen Berechnung des Muffenstandortes 1 der Leitung 33 in Abhängigkeit des Belastungsfaktors $k_{Ltg.33,M1}$	49
5.4	Vergleich der Messergebnisse mit der theoretischen Berechnung je nach Abstand zur Trasse des Muffenstandortes 1 der Leitung 33	50
5.5	Vergleich der Messergebnisse mit der theoretischen Berechnung des Muffenstandortes 2 der Leitung 33 in Abhängigkeit des Belastungsfaktors $k_{Ltg.33,M2}$	51
5.6	magnetische Flussdichte im axialen Abstand zur Muffe parallel zur Trassenachse im Vergleich der Theorie und der Praxis des Muffenstandortes 2 der Leitung 33	52
6.1	Magnetische Flussdichte über einer 1000-mm ² -Kabelanlage je nach Leiterabstand zueinander	55
6.2	Magnetische Flussdichte über einer 1000-mm ² -Kabelanlage je nach Verlegetiefe	56
6.3	Magnetische Flussdichte über einer 1000-mm ² -Kabelanlage je Anordnung - quer zur Trassenachse	57

Tabellenverzeichnis

2.1	Anlagendaten der Einleiterkabel im 110-kV-Netz.	6
2.2	Übersicht der Muffenkomponenten	10
2.3	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom Abstand zu verschiedenen Haushaltsgeräten [18]	19
2.4	Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP)-Grenzwerte für elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte	23
2.5	Auslöseschwellen der Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Fel- dern (EMFV) für niederfrequente Felder (50 Hz)	23
2.6	Grenzwerte für elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte	24
6.1	Maximale Flussdichte und relative Abweichung für verschiedene Abstände .	56
6.2	Maximale Flussdichte und relative Abweichung für verschiedene Abstände .	57
6.3	Maximale Flussdichte und relative Abweichung für verschiedene Abstände .	58

1 Einleitung

Die Hamburger Energienetze GmbH ist für die Verteilung des Stroms in Hamburg verantwortlich. Das Leitungsnetz misst in etwa 30.000 km, wodurch ca. 11 TWh elektrischer Energie jährlich durchfließt [37]. Außerdem kommen jährlich immer mehr Kilometer an Kabelanlagen hinzu. Durch den Anstieg der Projekte, die die Kabelerneuerung von alten Kabelanlagen sowie den Neubau von ihnen beinhalten, resultiert ein Anstieg von Muffenstandorten. Eine Muffe ist ein Bauteil zur unterbrechungsfreien Verbindung zweier Kabel und ist unumgänglich bei der Realisierung eines Projektes mit mehreren Kabelkilometern.

Aufgrund der Anordnung der Kabel an den Muffenstandorten sind die Menschen in der Umgebung dieser Standorte stärkeren magnetischen Feldern ausgesetzt als auf der übrigen Kabelstrecke. Das bezieht sich besonders auf die Muffen der Hochspannungsebene (110 kV), weil die Magnetfelder dort so stark werden, dass diese bei dauerhafter Aussetzung schädliche Wirkungen auf den Menschen sowie auf die Umwelt haben können [9]. Aus diesem Grund muss die Hamburger Energienetze GmbH darauf achten, die Grenzwerte der Magnetfelder einzuhalten und die Muffenstandorte an Orten zu platzieren, von denen wenig bis gar keine Gefahr für den Menschen ausgeht. Die maximalen Werte der elektromagnetischen Felder sind durch Vorschriften und Richtlinien in der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) geregelt [11]. Die Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA) empfiehlt für die Magnetfelder um Muffenstandorte noch einen deutlich niedrigeren Wert als vorgeschrieben. [1]

Diese Arbeit dient dazu, die magnetischen Felder der Muffen in der Hochspannungsebene zu untersuchen, anhand von Simulationen und Messungen. Darüber hinaus wird geschaut, ob es eine Möglichkeit gibt, die Magnetfelder, die von den Muffengruben hervorgehen, zu minimieren.

1.1 Motivation

Die Untersuchung der Magnetfelder in der Umgebung von Muffenstandorten ist bei der Hamburger Energienetze GmbH bisher noch nicht konkret ausgeführt worden. Dennoch ist es im Rahmen der Planung und Bewertung gemäß der 26. BImSchV unerlässlich, die Magnetfelder stets angemessen zu berücksichtigen. Dazu liegen auch viele Muffenstandorte in der Nähe von Wohneinheiten, wodurch es immer wieder Ängste und Sorgen auf Seiten der Bevölkerung gibt. Deshalb ist der Besitzer des Hamburger Stromverteilungsnetzes daran interessiert, zu den Fragen rund um die Magnetfelder konkrete Antworten geben zu können.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist, die Magnetfelder im Bereich der Muffengruben der Hochspannungsebene (110 kV) zu untersuchen. Dazu werden sowohl Simulationen als auch Messungen durchgeführt, um eine detaillierte Analyse der Magnetfelder zu ermöglichen. Zunächst werden die Magnetfelder mithilfe des Simulationsprogramms „WinField“ unter „Worst-Case-Szenarien“ simuliert. Diese Simulationen werden durch Messungen vor Ort ergänzt. Ein weiterer Bestandteil der Arbeit ist der Vergleich der gemessenen Daten mit den simulierten Werten, um Diskrepanzen zu identifizieren und die Verlässlichkeit des Simulationsmodells zu bewerten. Darüber hinaus wird untersucht, ob die ermittelten Magnetfeldstärken innerhalb der gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte der 26. BImSchV liegen. Schließlich werden potenzielle Maßnahmen zur Reduzierung der Magnetfelder in

den Muffengruben analysiert und auf ihre praktische Umsetzbarkeit hin geprüft. Ziel ist es, durch diese Untersuchung ein fundiertes Verständnis der Magnetfeldverteilung zu erlangen und mögliche Lösungsansätze zur Minimierung der Feldstärken zu entwickeln.

In dieser Arbeit wird nicht konkret auf die Auswirkungen auf den Menschen eingegangen. Des Weiteren wird sich nicht auf die Kabelanlage außerhalb der Muffe fokussiert. Zudem können die Minimierungsmaßnahmen nur mit Hilfe von Simulationen dargestellt werden. Die Validierung der Minimierungspotenziale mittels Messungen können aus praktischen Gründen nicht gemacht werden.

1.3 Vorgehensweise

Zu Beginn werden die Grundlagen beschrieben. Die Grundlagen umfassen den Aufbau des Hamburger Verteilungsnetzes, wobei dann noch einmal genauer auf das Hochspannungsnetz eingegangen wird. Des Weiteren werden die magnetischen Felder erläutert und die Berechnungsmethodik des Simulationsprogramms erklärt. Neben dem Simulationsprogramm wird auch näher drauf eingegangen, mit welchem Messgerät die magnetischen Felder gemessen werden und wie das Messgerät funktioniert. Hinzu wird auf die Gesetze und Vorschriften zu den elektromagnetischen Emissionen und auf den bisherigen wissenschaftlichen Stand zu Magnetfeldern um 110-kV-Muffen eingegangen. Im nächsten Kapitel werden die Magnetfeldberechnungen für Muffen mit verschiedenen Querschnitten der Kabelanlagen mithilfe des Programms „WinField“ durchgeführt. Daraufhin folgen die Messungen an den Muffenstandorten und der Vergleich der Praxis und der Theorie. Im letzten Kapitel wird auf die Minimierung der Magnetfelder um Muffenstandorte eingegangen wird. Es werden Minimierungsmaßnahmen identifiziert, bewertet und auf ihre praktische Umsetzbarkeit untersucht.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über den grundlegenden Aufbau des Verteilungsnetzes und den Kabelanlagen der Hochspannungsebene. Dabei wird erläutert, wie Magnetfelder entstehen, welche Auswirkungen sie auf Mensch und Umwelt haben und welche Magnetfelder um die Kabelanlage, besonders über der Muffe, zu erwarten sind. Zudem werden die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte für Magnetfelder thematisiert. Außerdem wird gezeigt, wie das verwendete Simulationsprogramm „WinField“ funktioniert und der wissenschaftliche Stand zu Magnetfeldern um 110-kV-Muffen wird erläutert.

2.1 Beschreibung des Strom- und Hochspannungsnetzes

Die Hamburger Energienetze GmbH ist ein Verteilungsnetzbetreiber. Den Strom erhalten die Verteilungsnetzbetreiber von den vier Übertragungsnetzbetreibern. In Hamburg ankommend, geht der Strom über drei Spannungsebenen zu den verschiedenen Kunden. Über die drei Hauptumspannwerke (siehe Abbildung 2.1, rote Punkte) kommt die elektrische Energie mit 380 kV in Hamburg an. Dort wird die Spannung von der Höchstspannungsebene (380 kV) auf die Hochspannungsebene (110 kV) mit Hilfe von Leistungstransformatoren heruntertransformiert. In 55 weiteren Umspannwerken (siehe Abbildung 2.1, gelbe Punkte) wird weiter in die Mittelspannungsebene (10 kV - 25 kV) heruntertransformiert. Von den Umspannwerken geht die elektrische Energie weiter in rund 7800 Kunden- und Netzstationen, in denen kleinere Transformatoren die Spannung auf die Niederspannungsebene von 0,4 kV bringen. Je nach benötigter Leistung sind die Kunden an das Hochspannungs-, Mittelspannungs- oder an das Niederspannungsnetz angeschlossen. Die Kunden sind größere Unternehmen, wie beispielsweise Aurubis und der Hamburger Flughafen bis hin zum Bewohner einer Wohnung. Die drei Hauptumspannwerke bilden eine Trennung der Hochspannungsebene in drei Bereiche und zwar in Hamburg-Süd, Hamburg-Ost und Hamburg-Nord. [37]

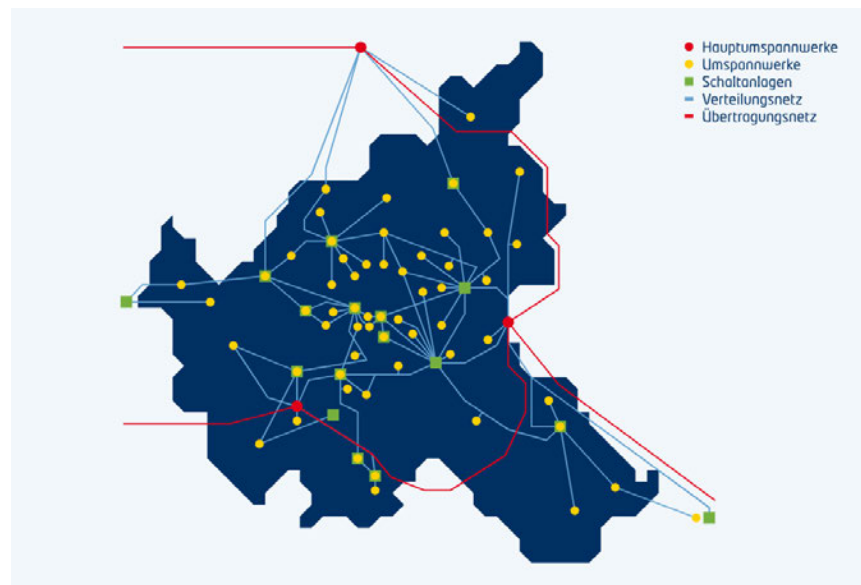


Abbildung 2.1: Hamburgs Übertragungs- und Verteilungsnetz

Das 110-kV-Netz ist in drei galvanisch getrennte Teilnetze aufgeteilt, wodurch man den Vorteil erlangt, dass Ausfälle in einem Gebiet nicht ein anderes beeinflussen können. Des

Weiteren sorgt man dafür, dass im Fall eines Kurzschlusses der Kurzschlussstrom begrenzt wird, und das Netz im Allgemeinen stabiler ist.

Ein zentraler Aspekt des Hochspannungsnetzes ist seine Funktionsweise. Das Netz ist darauf ausgelegt, große Mengen elektrischer Energie über weite Entfernungen mit minimalen Verlusten zu transportieren. Um dies zu erreichen, wird die elektrische Energie in hohen Spannungen transportiert, da bei höheren Spannungen die Verluste durch Wärmeentwicklung verringert werden. Über Transformatoren in den Umspannwerken wird die Spannung dann sukzessiv reduziert, um die Energie für den Endverbraucher nutzbar zu machen.

2.1.1 Steuerung, Überwachung und Sicherheit

Die Kontrolle und Überwachung des Netzes erfolgt zentral durch die Netzleitstelle der Hamburger Energienetze GmbH. Schaltanlagen und Umspannwerke sind automatisiert betrieben und ermöglichen so eine Fernsteuerung aller Prozesse im Netzwerk. Dies bietet den Vorteil einer schnellen Reaktion auf Netzstörungen und schnellen Problembehebungen. Systeme zur Fernsteuerung sind sowohl für das 110-kV-Hochspannungsnetz als auch für die Schaltanlagen des 10-kV-Niederspannungsnetzes an den Umspannwerken verfügbar. Zudem wird die Fernsteuerung von Kundenstationen im Mittelspannungsnetz kontinuierlich verbessert, damit die Zuverlässigkeit der Energieversorgung weiter gestärkt wird.

Das System verfügt über diverse Sicherheitskomponenten, die eine kontinuierliche Energieversorgung sicherstellen sollen. Darunter fallen Schaltanlagen, Transformatoren, Schutzsysteme sowie Überwachungseinrichtungen. Schaltanlagen sind die Knotenpunkte, an denen Leitungen zusammenlaufen und die Energieverteilung gesteuert wird. Transformatoren wandeln die Spannungen in die verschiedenen Spannungsebenen, während Schutzsysteme Störungen erkennen und den betroffenen Teil des Netzes automatisch abschalten, um größere Ausfälle zu vermeiden. Überwachungssysteme erfassen den Zustand der Anlagen in Echtzeit, um Störungen frühzeitig zu erkennen und um eine schnelle Reaktion zu gewährleisten. [23]

2.1.2 (n-1)-Kriterium

Das Netz ist darauf ausgelegt, das sogenannte (n-1)-Kriterium zu erfüllen. Das bedeutet, dass auch bei einem Ausfall einer wichtigen Leitung oder eines Transformators die Stromversorgung ohne Unterbrechung aufrechterhalten werden kann. Hierzu werden redundante Leitungen und Transformatoren eingesetzt. Für die Transportleitungen im Stadtgebiet gilt eine Mindestkapazität von 150 MVA pro Leitung, wobei eine Reservekapazität von 300 MVA vorgesehen ist, um Versorgungsausfälle zu vermeiden. [23]

2.2 110-kV-Leitungen

Die 110-kV-Leitungen im Hamburger Verteilungsnetz sind eine zentrale Komponente der elektrischen Energieversorgung und eines der Hauptbestandteile dieser Arbeit. Diese Leitungen umfassen Freileitungen und unterirdische Kabelsysteme.

Auch unterscheidet man zwischen Verbindungs- und Transportleitungen. Verbindungsleitungen verbinden die 380/110-kV-Umspannwerke mit 110-kV-Schaltanlagen, und Transportleitungen verbinden 110-kV-Schaltanlagen und die 110/10-kV-Umspannwerke.

Jede Leitung, die zwischen den 380/110-kV-Umspannwerken und den 110-kV-Schaltanlagen sowie zu den 110/10-kV-Umspannwerken liegt, soll mindestens eine Leistung von 360 MVA übertragen können.

Die Struktur der 110-kV-Leitungen basiert auf einer vermaschten Netzstruktur (siehe Abbildung 2.1). Dabei sind die Verbindungsleitungen zwischen den 380/110-kV-Transformatoren und den 110-kV-Schaltanlagen so ausgelegt, dass sie auch bei Störfällen mit einer Leistung von 420 MVA für Zeiträume unter 30 Minuten betrieben werden können. Um im Fall von Leistungsausfällen die Versorgung sicherzustellen, sind die Transportleitungen zwischen den Schaltanlagen doppelt ausgelegt (siehe Kapitel 2.2.2). Die Transportleitungen, die zu den Transformatoren führen, sind auf einen Bemessungskurzzeitstrom von 40 kA sowie einen Stoßstrom von 100 kA dimensioniert. Dies ermöglicht es, auch bei extremen Netzbelastungen eine sichere Stromübertragung zu gewährleisten.

Ein weiteres wichtiges Element der 110-kV-Leitungen sind die Anschlüsse zu den Umspannwerken. Die Verbindungsleitungen zu den Umspannwerken müssen so dimensioniert sein, dass sie die Last eines 63-MVA-Transformators mit einer maximalen Überlastfähigkeit von 75 MVA über einen Zeitraum von mindestens zwei Stunden übertragen werden kann. Dies ist notwendig, um auch bei unvorhergesehenen Belastungsspitzen eine stabile Versorgung sicherzustellen. Die Verbindungen erfolgen ausschließlich über Schaltanlagen, wodurch eine bessere Steuerung und Sicherung des Netzes ermöglicht wird. Die 110-kV-Leitungen sind mit Schutzsystemen ausgestattet, die auf Störungen wie Überlastungen oder Kurzschlüsse reagieren. Die Schutzsysteme schalten die betroffenen Abschnitte der Leitungen automatisch ab, um eine Ausbreitung der Störung auf andere Teile des Netzes zu verhindern. [23]

2.2.1 110-kV-Kabeltypen

Die Hamburger Energienetz GmbH hat größtenteils unterirdische Leitungen verlegt, welche je nach Betriebszustand Einfluss auf die magnetische Flussdichte haben. Da sich diese Arbeit mit Muffen um 110-kV-Kabelanlagen befasst, wird auf die Freileitung des Hamburger Stromnetzes nicht weiter eingegangen. Es wird zwischen drei Kabeltypen unterschieden:

- Ölkabel
- gasisolierte Kabel
- Vernetztes-Polyethylen-Kabel (VPE-Kabel)

Dies sind die Kabeltypen, die in der 110-kV-Ebene verwendet werden bzw. wurden. Nach aktuellem Stand der Technik werden bei Neuerrichtung ausschließlich VPE-Kabel eingesetzt. Denn diese sind im Vergleich zu den Ölkabeln umweltfreundlich, und die Instandhaltung und der Betrieb im Vergleich zu den gasisolierten Kabeln sind einfacher. Deshalb ist die Hamburger Energienetz GmbH bereits dabei, die Kabel auf VPE-Kabel umzurüsten. Neben der Umweltfreundlichkeit des VPE-Kabels bietet das Kabel weitere Vorteile. Zum

einen hat es eine gute Übertragungsleistung und kann bis 420 MVA pro Leitung übertragen. Zum anderen hat es eine sehr hohe mechanische Stabilität und Biegefestigkeit. Diese Arbeit fokussiert sich grundsätzlich auf die VPE-Kabel, da diese Kabel nur noch verwendet werden sollen. [20] [21]

Neben den verschiedenen Isolationsmöglichkeiten der Kabel ist auch die Wahl des Leitermaterials ein wichtiger Punkt. Dabei wird sich jedoch meist auf zwei Materialien für die Kabel beschränkt. Nämlich Kupfer und Aluminium. Dabei zu beachten ist, dass die Leitfähigkeit des Kupferkabels besser ist als die eines Aluminiumkabels. Das liegt daran, dass der spezifische Widerstand von Kupfer ($1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$) geringer ist als der von Aluminium ($2.82 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$). Andererseits ist Aluminium leichter und günstiger als Kupfer, jedoch nicht so robust. Aluminium wird aus diesem Grund eher für die Freileitungen verwendet. Kupfer ist stabil, robust und korrosionsbeständig, weswegen es oft bei Erdkabeln zum Einsatz kommt. So ist das auch bei der Hamburger Energienetze GmbH, wo das Hochspannungsnetz größtenteils aus Kupferleitern besteht.

Die Standardkabel, die beim Hamburger Energienetz verwendet werden, sind [20] [21]:

- **N2XS(FL)2Y >c< 1x300/50 64/110 kV**: Einleiterkabel mit einem Kupferleiter und einem Querschnitt von 300 mm^2 .
- **NA2XS(FL)2Y >c< 1x400/50 64/110 kV**: Einleiterkabel mit einem Aluminiumleiter und einem Querschnitt von 400 mm^2 . Dieses wird im Stromnetz jedoch kaum verbaut und aus diesem Grund ist das Kabel kein Bestandteil dieser Arbeit.
- **2X(FL)2YVFST2Y 3x800RM 64/110 kV**: Dreileiterkabel mit Kupferleiter und einem Querschnitt von $3 \times 800 \text{ mm}^2$. Dieses Kabel ist lediglich in 2 Leitungen im Stromnetz verbaut und ist ebenfalls kein Bestandteil dieser Arbeit.
- **N2XS(FL)2Y >c< 1x1000/70 64/110 kV**: Einleiterkabel mit einem Kupferleiter und einem größeren Querschnitt von 1000 mm^2 für höhere Strombelastungen.
- **N2XS(FL)2Y >c< 1x1800 rms/70 64/110 kV**: Ein Kabel mit einem Kupferleiter und einem großen Querschnitt von 1800 mm^2 , geeignet für höchste Strombelastungen.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den drei wichtigsten Kabelsystemen des Stromnetzes in Hamburg. Diese sind in folgender Tabelle 2.1 aufgelistet.

Anlagendaten	300mm ² -Kabelsystem	1000mm ² -Kabelsystem	(2x)1800mm ² -Kabelsystem
Querschnitt	300mm ²	1000mm ²	2x 1800mm ²
Scheinleistung	75 MVA	150 MVA	360 MVA
Nennspannung	110 kV	110 kV	110 kV
Nennstrom	393.6 A	787.3 A	1889.51 A
Obergrenze	≥ 1.3 m	≥ 1.3 m	≥ 1.3 m

Tabelle 2.1: Anlagendaten der Einleiterkabel im 110-kV-Netz.

Durch die höheren Querschnitte ist es möglich, mehr Leistung zu transportieren. Das liegt daran, dass der elektrische Widerstand R des Leiters geringer wird, desto höher der

Querschnitt A wird.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (1)$$

Der Widerstand ist antiproportional zum Querschnitt A . ρ steht dabei für den spezifischen Widerstand und l für die Leiterlänge. Durch den niedrigeren Widerstand erhöht sich der Strom I , welcher antiproportional zum Widerstand ist:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2)$$

U ist die Spannung. Durch den erhöhten Strom steigt die Scheinleistung S im System:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (3)$$

Die Hamburger Energienetze GmbH verwendet, je nach Nachfrage der Leistung, eines der drei oben genannten Kabelsysteme (siehe Tabelle 2.1). Die Verlegetiefe ist bei jedem dieser Kabel tiefer als 1,3 m. [22]

2.2.2 Verlegung von Hochspannungskabeln

Dieses Unterkapitel widmet sich der Verlegung von 110-kV-Leitungen, der Definition und Funktion von Muffen sowie deren Notwendigkeit und Aufbau. Es soll ein umfassendes Verständnis für die strukturellen und technischen Aspekte dieser zentralen Komponenten in Hochspannungskabelsystemen vermittelt werden.

Die Hochspannungskabel verbinden größtenteils 110-kV Schaltanlagen und Umspannwerke sowie Schaltanlagen untereinander und Freileitungsmasten. Die Kabel werden über Endverschlüsse mit den Schaltanlagen verbunden. Diese sind wiederum in Umspannwerken mit Transformatoren oder einem Leistungsschalter verbunden und in den Schaltanlagen mit einer Sammelschiene. Über die Schaltanlage gelangt das Kabel über Schutzrohre in die Erde und verläuft bspw. zu einem anderen Umspannwerk, in dem das Kabel ebenfalls über Endverschlüsse an der Schaltanlage verbunden wird.

Die Schutzrohre sind Polypropylen (PP)-Rohre und dienen zum Schutz der Kabel und zum Schutz von Personen, die in unmittelbarer Nähe zum Kabel arbeiten müssen. Zum einen sollen die Rohre das Kabel vor mechanischen Belastungen (Belastung durch Schwerverkehr, Erdbewegungen, usw.) schützen, zum anderen vor Umwelteinflüssen.

Ein weiterer Vorteil des Schutzrohrs ist, dass das Kabel einfacher verlegt und gewartet werden kann, denn es kann jederzeit durch das Rohr wieder herausgezogen werden. Dadurch ist es möglich, den Tiefbau immer nur abschnittsweise durchzuführen und damit keinen kilometerlangen Graben zu öffnen. Die Standardrohre sind:

- **300-mm²- und 1000 mm²-Querschnitte:** PP-Rohr mit einem Außendurchmesser von 160 mm und einem Innendurchmesser von 145,5 mm verwendet [20].
- **1800 mm²-Querschnitte:** PP-Rohr mit einem Außendurchmesser von 180 mm und einem Innendurchmesser von 166,2 mm zum Einsatz [21].

In der Erde sind die Kabel in der Dreiecksanordnung verlegt (siehe Abbildung 2.2). Um die Phasen des Leiters sind die PP-Rohre zu sehen. Durch diese Rohre haben die Phasen

gezwungenermaßen einen Abstand von 160 mm in den PP-Rohren mit dem Außendurchmesser von 160 mm und einen Abstand von 180 mm bei den PP-Rohren mit 180 mm Außendurchmesser. Dieser Abstand beeinflusst maßgeblich die magnetische Flussdichte.

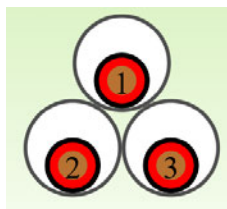


Abbildung 2.2: Verlegeart der Kabelanlage (1 Leiter mit seinen 3 Phasen)

Diese Verlegeart hat den Vorteil, dass das Magnetfeld, durch den geringen Abstand und die Phasenverschiebung von 120° in den drei Phasen des Leiters, reduziert wird. Das liegt daran, dass sich das Magnetfeld außerhalb der Dreiecksanordnung bei näherem Abstand teilweise besser auslöschen lässt [22]. Eine flache Anordnung wäre aus thermischer Sicht vorteilhafter. Ausschlaggebend für die kompakte Anordnung ist die mechanische Stabilität, welche zu einer längeren Lebensdauer der Kabel führt.

Bei den $(2x)1800\text{-mm}^2$ -Kabelanlagen sind zwei solcher Systeme, wie in Abbildung 2.2 zu sehen, nebeneinander. Auf Grundlage der 26. BImSchV und des Minimierungsgebots (siehe Kapitel 2.5.3) werden die neuen $(2x)1800\text{-mm}^2$ -Kabelanlagen wie folgt verlegt (siehe Abbildung 2.3).

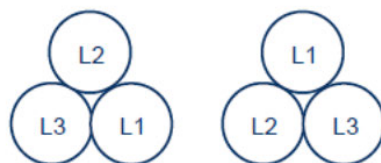


Abbildung 2.3: Verlegeart einer $(2x)1800\text{-mm}^2$ -Kabelanlage

Ein Kabelsystem davon bleibt identisch, das zweite Kabelsystem ändert seine Anordnung. L1 befindet sich an der Stelle von L3, L2 an der Stelle von L1 und L3 an der Stelle von L2. Diese Anordnung bietet den Vorteil, dass die magnetischen Felder sich optimaler überlagern, sodass die resultierende Flussdichte B kleiner wird. [26]

Die Kabel werden häufig über mehrere Kilometer gezogen. Das Ziehen übernimmt eine Kabelzugmaschine, die enorme Zugkräfte aufweist. Somit ist das Kabel großen Kräften ausgesetzt. Damit das Kabel bei dem Kabelzug nicht beschädigt wird, gibt es eine zulässige Zugkraft, die aus dem Querschnitt und der maximalen Zugspannung des Leitermaterials berechnet wird. Bei einem 300-mm^2 -Querschnitt beträgt die maximale zugelassene Zugkraft 15000 N. Da auf den Strecken zwischen den Umspannwerken oft auch Kurven enthalten sind, wobei das Kabel gebogen wird, überschreitet das Kabel die zugelassene Zugkraft erfahrungsgemäß nach ca. 600-700 m. Aus diesem Grund wird das Kabel in mehreren Teilabschnitten verlegt und gezogen. Diese Teilabschnitte werden über sogenannte „Muffen“ in Muffengruben verbunden. [23]

2.2.3 Muffen

Hochspannungsmuffen sind Verbindungselemente in Kabelsystemen, die zur mechanischen, elektrischen und thermischen Verbindung von Hochspannungskabeln eingesetzt werden. Sie gewährleisten die zuverlässige Übertragung elektrischer Energie, indem sie die elektrischen Leiter verbinden, eine sichere Isolation bieten und äußere Einflüsse wie Feuchtigkeit oder mechanische Belastungen abwehren [33]. Um die Muffen zu montieren, werden Muffengräben ausgegraben, in denen die Monteure genug Platz haben, die Muffen zu montieren. In der Abbildung 2.4 ist eine Muffengrube zu sehen, in der drei Phasen eines Leiters verbunden wurden. Diese Muffengrube ist nur während der Verlegung und der Montage offen. Für den regulären Betrieb wird die Muffengrube wieder zugeschüttet.



Abbildung 2.4: Muffengrube eines Leiters

Eine gängige Muffe, die verwendet wird, ist beispielsweise die „KSM-145“ von NKT. In folgender Abbildung 2.5 ist der Aufbau einer solchen Muffe zu sehen. Einige Sachen wurden farbig markiert, um die Position der Bauteile besser zu verdeutlichen. Bei der Abbildung 2.5 handelt es sich lediglich um eine modifizierte und veränderte Darstellung, welche die wesentlichen Bauteile einer Muffe darstellt. Die originale technische Zeichnung ist urheberrechtlich von der Firma NKT geschützt.

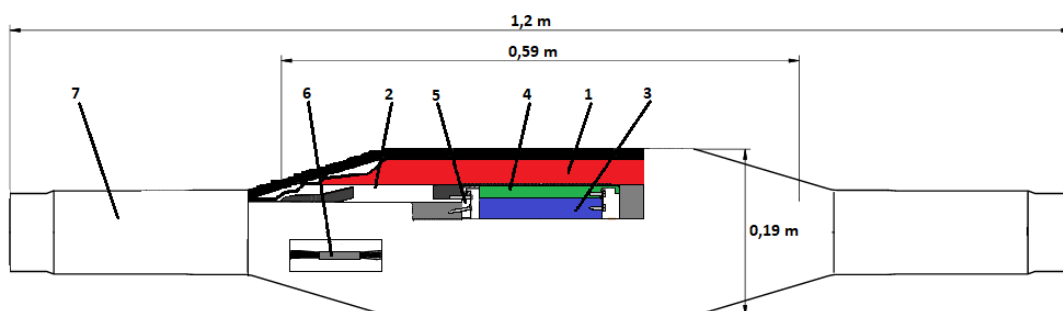


Abbildung 2.5: Aufbau einer Muffe

Pos.	Bezeichnung
7	Schrumpfhülle mit Dampfsperre
6	Kabelschirmverbindung
5	Zugentlastungsring
4	Kontakthülse
3	Leiterverbindung
2	Adapter
1	Muffenhauptkörper

Tabelle 2.2: Übersicht der Muffenkomponenten

Diese Verbindungsmuffe ist für Spannungen bis zu 145 kV ausgelegt. Die Bezeichnungen für die Position sind der Tabelle 2.2 zu entnehmen. Sie besitzt den Muffenhauptkörper, welcher für die mechanische Stabilität sorgt und die Grundlage für die elektrische Isolation bildet. Des Weiteren gibt es den Adapter. Damit kann die Muffe an unterschiedliche Kabeldurchmesser angepasst werden. Die Leiterverbindung verbindet die beiden Leiterenden miteinander. Dies erfolgt meistens durch eine Press- oder Schraubverbindung. Um die Verbindung liegt eine Kontakthülse, welche eine zusätzliche Isolations- und Schutzschicht bietet. Der Zugentlastungsring entlastet die Leiterverbindung mechanisch, indem er die Zugkräfte aufnimmt, die bei der Verlegung oder im Betrieb entstehen. Dies erhöht die Lebensdauer der Verbindung. Außerdem besitzt die reguläre Muffe eine Kabelschirmverbindung, welche die Schirme der beiden Kabel miteinander verbindet und für den Potentialausgleich sorgt. Zum Schluss der Montage wird die Muffe mit einer Schrumpfhülle umhüllt. Sie sorgt dafür, dass die Muffe vor äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit, Staub und mechanischen Belastungen geschützt wird. Die Muffen sind je nach Kabelquerschnitt zwischen 1,2 und 1,7 m groß. [32]

Bei der Hamburger Energienetze GmbH wird zwischen drei Kabelsystemen in der Hochspannung unterschieden. Das 300-mm²-, 1000-mm²- und das (2x)1800-mm²-Kabelsystem. Unterschiede in der Auslegung der Muffen gibt es lediglich zwischen dem (2x)1800-mm²-Kabelsystem und den zwei kleineren Querschnitten. Diese sind in den folgenden Abbildungen 2.6 bis 2.9 zu sehen. Da die Montageskizzen für Hochspannungsmuffen urheberrechtlich geschützt sind, wurde stattdessen eine Skizze erstellt, die einen kleinen Überblick über eine typische Muffe gibt. Orientiert wurde sich dabei an der Muffengrubenabmessung von NKT.

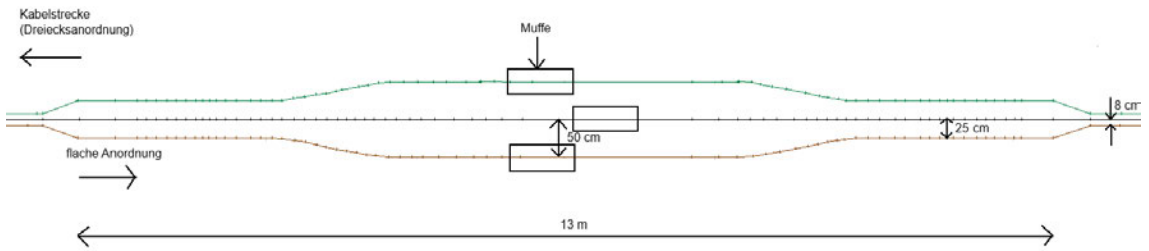


Abbildung 2.6: Montageskizze 300- bis 1000-mm²-Muffe - Draufsicht

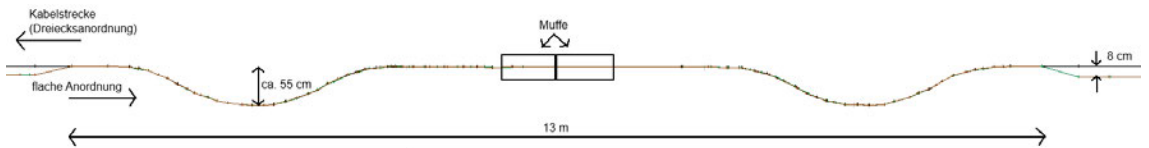


Abbildung 2.7: Montageskizze 300- bis 1000-mm²-Muffe - Seitenansicht

Die Kabelanlage, die zunächst in Dreiecksanordnung verlegt ist, wird in den Muffengräben flach angeordnet (siehe Abbildung 2.4). Zudem wird der Abstand zwischen den Phasen erhöht, um die Montage der Muffen für die Monteure zu erleichtern. Die Muffengrube ist bei einem 300-mm²- oder 1000-mm²-Kabelsystem ca. 13 m und die Breite in etwa 2,5 m. Die Muffen bzw. die Leiter an der Verbindungsstelle sind laut der Muffenskizze 50 cm voneinander entfernt.

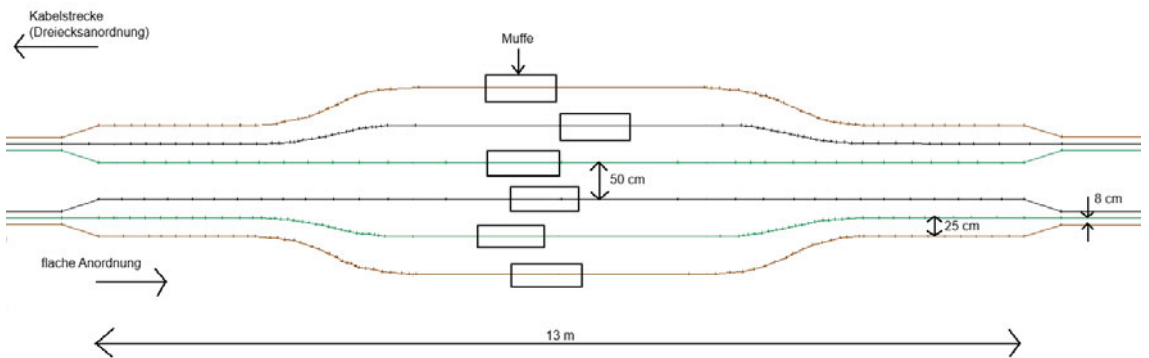


Abbildung 2.8: Montageskizze 1800-mm²-Muffe - Draufsicht

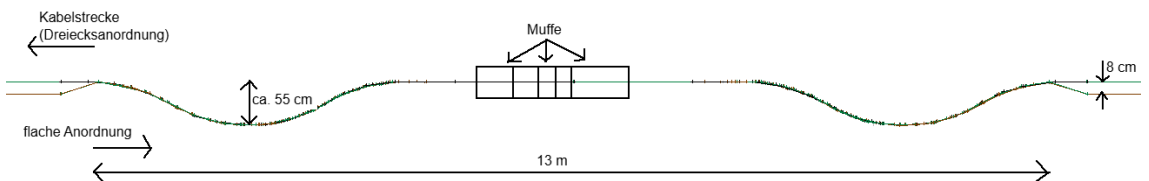


Abbildung 2.9: Montageskizze 1800-mm²-Muffe - Seitenansicht

Bei dem (2x)1800-mm²-Kabelsystem bleibt die Länge des Grabens gleich. Nur die Breite erhöht sich auf etwa 3,5 m - 4 m. Der Abstand zwischen den Phasen beträgt hierbei ebenfalls 50 cm.

Diese Montageskizzen dienen als Grundlage für die Simulation und Berechnung der magnetischen Flussdichte. Der in den Seitenansichten (siehe Abbildungen 2.7 und 2.9) dargestellte Bogen dient der Bereitstellung einer Kabelüberlänge. Diese Überlänge ermöglicht zum einen eine flexiblere Handhabung des Kabels während der Verlegung und zum anderen stellt sie sicher, dass bei der Montage zusätzliche Kabelreserven verfügbar sind, um unvorhergesehene Herausforderungen oder Fehler ausgleichen zu können.

2.3 Magnetische Felder

Magnetische Felder sind Felder, die durch bewegte elektrische Ladungen oder magnetische Materialien erzeugt werden. Das Magnetfeld ist ein Feld, das jedem Punkt im Raum eine Richtung und eine Stärke zuordnet. Magnetische Felder sind allgegenwärtig und spielen eine zentrale Rolle in zahlreichen Anwendungen. Sie tauchen überall im Alltag auf wie beispielsweise in Elektromotoren, Transformatoren aber auch in Hochspannungskabeln. Auch in der Natur begegnen uns Magnetfelder in Form vom Erdmagnetfeld. In der Elektrotechnik entstehen magnetische Felder insbesondere durch den Stromfluss in Leitungen, wie etwa bei den 110-kV-Leitungen und den dazugehörigen Muffen, die den Fokus dieser Arbeit bilden. [28]

Elektrische und magnetische Felder sind miteinander verknüpft, wenn sich die elektrischen Ladungen zeitlich verändern, insbesondere bei wechselnden Strömen. In diesem Fall erzeugt ein zeitlich veränderliches elektrisches Feld ein magnetisches Feld, und umgekehrt kann ein zeitlich veränderliches magnetisches Feld ein elektrisches Feld induzieren. Dies ist belegt durch die Maxwell-Gleichung und tritt typischerweise bei hochfrequenten Feldern auf.

In quasistationären Feldern hingegen sind elektrische und magnetische Felder nur schwach miteinander gekoppelt. Das ist der Fall, wenn die Frequenz des Stroms so niedrig ist, dass die Veränderung des Feldes nahezu keinen Einfluss hat. Das Besondere an quasistationären Feldern ist, dass die Wechselwirkungen zwischen den beiden Feldern stark vereinfacht sind, so dass sie unabhängig voneinander betrachtet werden können. Das ist beispielsweise bei niederfrequenten Wechselströmen, wie sie im Stromnetz (50 Hz) vorkommen, der Fall. [35] Das magnetische Feld wird durch den Stromfluss erzeugt und das elektrische Feld durch die angelegte Spannung. Damit werden Analyse und Berechnung technisch einfacher. [31]

Man unterscheidet zwischen drei verschiedenen elektromagnetischen Feldern [36]:

Hochfrequente elektromagnetische Felder:

Diese Felder haben eine Frequenz von 100 kHz - 300 GHz.

Niederfrequente elektromagnetische Felder:

Hier liegt die Frequenz bei ca. 0,1 Hz - 100 kHz.

Statische elektromagnetische Felder:

Diese Felder haben keine Frequenz, da sie nicht zeitveränderlich sind.

Im weiteren Teil wird sich grundsätzlich auf die niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder bezogen, da sich diese Arbeit auf die Hochspannungskabel und Muffen bezieht, die einer Frequenz von 50 Hz ausgesetzt sind.

2.3.1 Entstehung magnetischer Felder

Die Entstehung eines magnetischen Feldes wird durch elektrische Ströme beschrieben. Nach dem Ampère'schen Gesetz erzeugt ein Strom I , der durch einen Leiter fließt, ein Magnetfeld \vec{B} , dessen Stärke und Richtung von der Stromrichtung und der Geometrie des Leiters abhängen. Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen, geraden Leitung hat einen kreisförmigen Verlauf und wird durch die folgende Formel beschrieben:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r} \quad (4)$$

Hierbei ist die magnetische Flussdichte in Tesla (T), μ_0 die magnetische Feldkonstante $\mu_0(4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A})$, I die Stromstärke in Ampere (A) und r der Abstand von der Leitung in Metern (m). Dieses Verhältnis zeigt, dass die Stärke des Magnetfeldes mit zunehmendem Abstand r abnimmt und direkt proportional zur Stromstärke I ist. Ergänzend kann das Biot-Savart-Gesetz auf beliebige Stromgeometrien angewendet werden. Im Gegensatz zum Ampère'sches Gesetz wird das Magnetfeld punktwise durch Integration über kleine Leiterstücke berechnet.

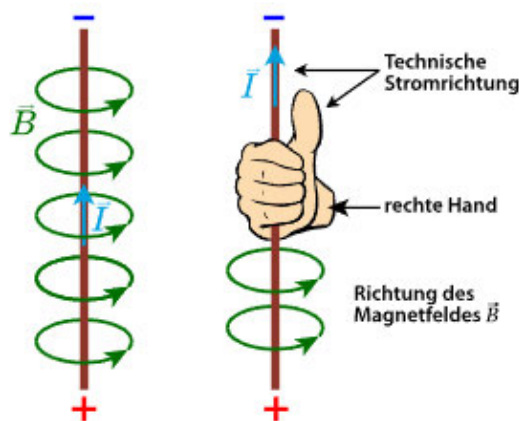


Abbildung 2.10: Magnetfeld eines geraden Leiters [29]

Am Beispiel des geraden Leiters (siehe Abbildung 2.10), welcher auch ein Hochspannungskabel sein könnte, lässt sich die Form des magnetischen Feldes besser beschreiben. Die Feldlinien umkreisen den elektrischen Leiter und verlaufen senkrecht zum Leiter. Die Orientierung des Feldes wird mit der Rechten-Hand-Regel bestimmt. Dazu hält man den Daumen der rechten Hand in Richtung der elektrischen Stromrichtung. Die vier weiteren Finger der Hand legen sich ringförmig um den Leiter. Diese zeigen dann die Richtung der magnetischen Feldlinien [29].

Jedoch ist das Magnetfeld einer Hochspannungsleitung in der Praxis komplexer, da es durch zusätzliche Komponenten, wie benachbarte Leiter beeinflusst wird. Bei Muffen, die mehrere Leiter miteinander verbinden, überlagern sich die Magnetfelder der einzelnen Leiter, wodurch die Geometrie des resultierenden Feldes von der Anordnung der Muffe abhängt.

2.3.2 Wechselwirkung mit Materialien

Magnetische Felder interagieren mit unterschiedlichen Materialien auf vielfältige Weise [34]. Materialien werden basierend auf ihrem Verhalten in ferromagnetische, paramagnetische

und diamagnetische Stoffe unterteilt. Ferromagnetische Materialien (z. B. Eisen) verstärken ein Magnetfeld erheblich, während paramagnetische Stoffe es leicht verstärken und diamagnetische Stoffe das Feld leicht abschwächen. In der Nähe von leitenden Materialien, wie den Abschirmungen von Hochspannungskabeln oder Muffen, entstehen zusätzlich Schirmströme, wenn magnetische Wechselfelder vorhanden sind [24]. Man unterscheidet zwischen Wirbelströmen und Kreisströmen. Wirbelströme sind induzierte elektrische Ströme, die durch zeitlich veränderliche magnetische Felder entstehen [30]. Da beim Stromnetz von einem quasistationären Feld gesprochen wird, sind diese vernachlässigbar klein. Kreisströme entstehen, wenn der Schirm einen durchgehenden geschlossenen Stromkreis bildet. In diesem Fall wird der sogenannte Kreisstrom erzeugt. In Muffen können Kreisströme durch den metallischen Schirm entstehen, wenn die Schirme nicht korrekt miteinander verbunden sind. Sie verursachen zusätzliche Verluste und Erwärmung. Durch den Einsatz von Querverbindungen (Cross Bonding) können beispielsweise Kreisströme minimiert werden. [23]

2.3.3 Relevante Größen und Maßeinheiten

Zur Beschreibung magnetischer Felder werden folgende Größen verwendet:

- **Magnetische Flussdichte (B):** Die Stärke des Magnetfeldes in Tesla (T), definiert durch

$$B = \mu \cdot H \quad (5)$$

mit der magnetischen Feldstärke H und der magnetischen Permeabilität μ Bei geraden Leitern durch

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r} \quad (6)$$

- **Magnetische Feldstärke (H):** Ein Maß für die Intensität des Feldes in Ampere pro Meter (A/m), definiert als

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (7)$$

wobei μ die Permeabilität des Materials ist.

- **Magnetischer Fluss (Φ):** Der durch eine Fläche hindurchtretende magnetische Fluss, gemessen in Weber (Wb), berechnet durch:

$$\Phi = B \cdot A \quad (8)$$

2.3.4 Magnetische Felder bei Hochspannungsleitungen und Muffen

Magnetische Felder bei Hochspannungsleitungen entstehen durch den Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz und sind vergleichbar mit dem Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters. Diese Felder sind sinusförmig und ändern ihre Richtung und Stärke periodisch. Die Stärke des Magnetfeldes hängt dabei direkt von der Stromstärke und der Entfernung zur Leitung ab. Der Querschnitt der Leitungen beeinflusst das Magnetfeld nicht, da die Leiter als quasistationär angenommen werden. [5] In folgender Abbildung 2.11 ist das resultierende Magnetfeld von drei Phasen eines Leiters in der typischen Dreiecksanordnung zu sehen. Je weiter sich von der Kabelanlage entfernt wird, umso kleiner wird das Magnetfeld.

Im Zentrum der Anlage gibt es eine magnetische Flussdichte von $500 \mu\text{T}$. In der für den Netzbetreiber wichtigen Höhe von 1 m über der Oberfläche (siehe Kapitel 2.5.3) beträgt die magnetische Flussdichte lediglich $5 \mu\text{T}$.

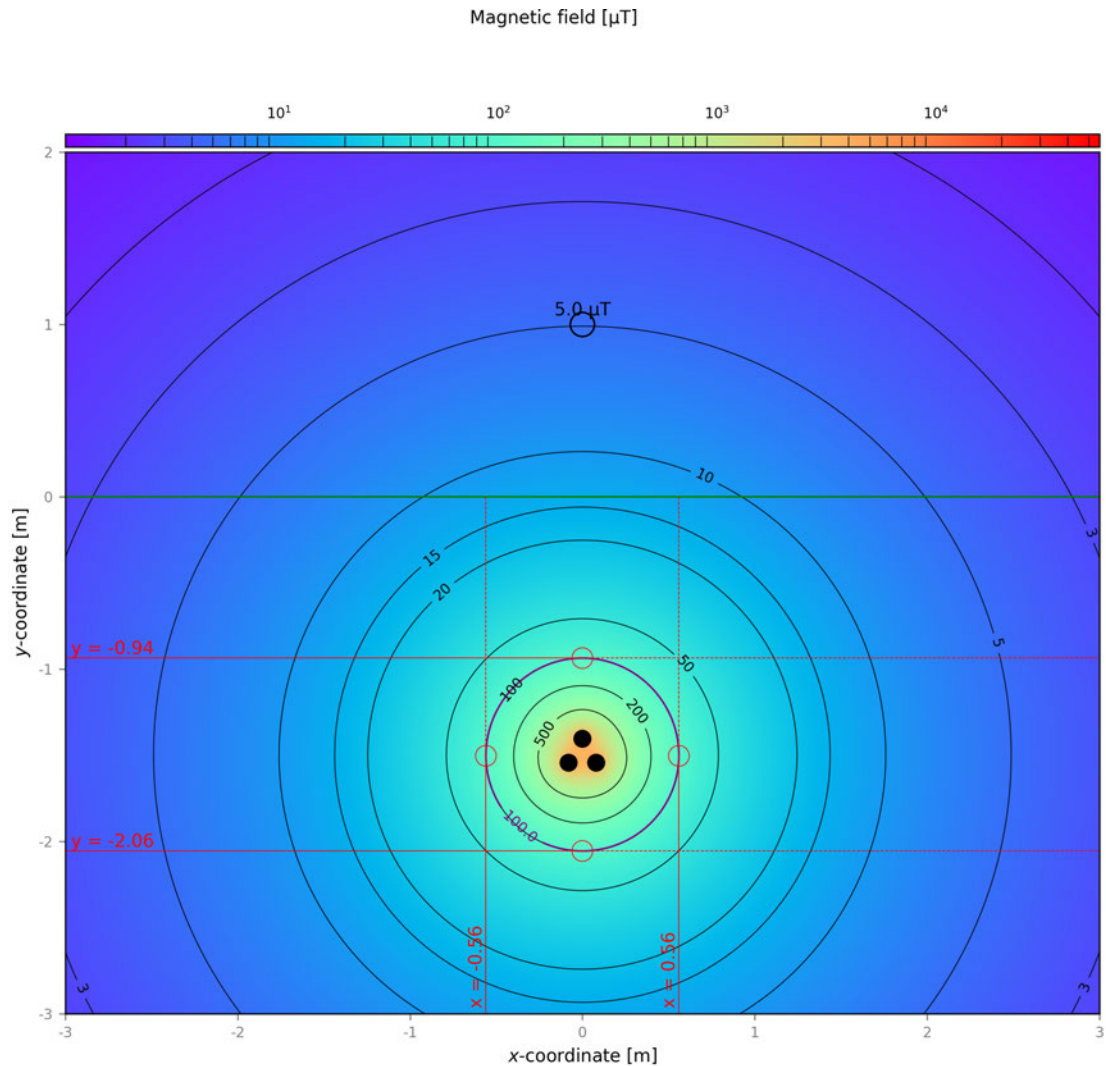


Abbildung 2.11: resultierendes Magnetfeld von drei Phasen eines Leiters in Dreiecksanordnung am Beispiel eines 1000-mm^2 -Kabelsystems ($S = 150 \text{ MVA}$) - simuliert mit Cableizer

Bei Muffen wird die Situation durch die abweichende Anordnung komplizierter. Die Magnetfelder an den Muffen werden in den weiteren Kapiteln weiter ausgeführt. Die magnetischen Felder um 110-kV -Leitungen und Muffen können durch ihre Intensität Wechselwirkungen mit der Umgebung hervorrufen. Daher sind präzise Berechnungen und Maßnahmen zur Feldreduzierung, wie durch die Anordnung der Phasen, dessen Abstand und durch Abschirmungen, notwendig.

Die Herausforderung im 50 Hz -Bereich ist, dass sich magnetische Felder deutlich schwieriger abschirmen lassen als bei hohen Frequenzen. Zum einen liegt das am Skin-Effekt [17]. Dieser besagt, wie tief ein magnetisches Wechselfeld in ein leitfähiges Material eindringen kann. Da wird von der Eindringtiefe (δ) gesprochen. Die Eindringtiefe ist abhängig von der Frequenz f , der Permeabilität μ und der elektrischen Leitfähigkeit σ des Materials. Die

Eindringtiefe δ lässt sich durch folgende Formel berechnen:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \sigma \cdot \omega}} \quad (9)$$

Hierbei ist $2\pi f$ die Kreisfrequenz ω . Bei niedrigen Frequenzen wie 50 Hz ist die Eindringtiefe deutlich größer als bei höheren Frequenzen [14]. Das bedeutet, dass magnetische Felder tief in das Material eindringen können, was die Effektivität einer Abschirmung reduziert. Im Hochfrequenzbereich ist die Eindringtiefe wesentlich kleiner, wodurch die Abschirmung effizienter gestaltet werden kann. [2]

Ein weiterer Faktor ist die geringe Induktionswirkung bei niedrigen Frequenzen. In leitfähigen Abschirmmaterialien wie Kupfer oder Aluminium werden durch magnetische Wechselfelder Wirbelströme induziert. Diese erzeugen ein sekundäres Magnetfeld, das dem ursprünglichen Magnetfeld entgegenwirkt und es abschwächt (Lenz'sche Regel) [15]. Die Stärke der induzierten Wirbelströme I_{ind} ist proportional zur Frequenz f :

$$I_{\text{ind}} \propto f \quad (10)$$

Da die Frequenz im 50-Hz-Bereich vergleichsweise niedrig ist, sind die induzierten Ströme schwächer, und somit ist auch die Abschirmwirkung geringer. Im Hochfrequenzbereich hingegen können die induzierten Ströme das Magnetfeld wesentlich effektiver kompensieren. Ein weiterer Faktor ist die magnetische Permeabilität (μ) der verwendeten Abschirmmaterialien. Materialien wie Mu-Metall oder Siliziumstahl, die eine hohe Permeabilität aufweisen, werden häufig zur Abschirmung magnetischer Felder eingesetzt. Sie leiten die Magnetfeldlinien durch sich selbst und reduzieren so die Feldstärke in der Umgebung [3]. Jedoch arbeiten diese Metalle deutlich schlechter bei niedrigen Frequenzen. Außerdem sind diese Materialien sehr kostspielig.

Die Wellenlänge eines elektromagnetischen Feldes, die antiproportional zur Frequenz ist, stellt eine weitere Herausforderung dar. Für 50 Hz ergibt sich eine Wellenlänge λ von:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (11)$$

Mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8$ m/s und $f = 50$ Hz beträgt die Wellenlänge etwa 6000 km. Diese große Wellenlänge führt dazu, dass das magnetische Feld im 50-Hz-Bereich quasi-statisch wirkt. Das bedeutet, dass es sich eher wie ein statisches Magnetfeld verhält, und statische Felder dringen viel leichter durch Materialien durch [25]. Diese ganzen Faktoren tragen dazu bei, dass das Abschirmen der Hochspannungsleitungen bzw. der Muffen nicht nur kostspielig, sondern auch der Aufwand enorm ist. [40]

Den Abstand, die Verlegart oder die Phasenlage zu variieren, bietet sich ökonomisch deutlich besser an.

2.3.5 Magnetische Felder und deren Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt

Magnetische Felder, wie sie beispielsweise im Bereich der Hochspannungstechnik auftreten, können sowohl auf den Menschen sowie auf die Umwelt einwirken. Die Einwirkung magnetischer Felder auf den Menschen hängt von der Stärke des Feldes, der Dauer des Aussetzens des magnetischen Feldes und der Frequenz ab [9]. Besonders die Frequenz ist maßgebend für die Auswirkungen des magnetischen Feldes. Deshalb werden die Auswirkungen von statischen, hochfrequenten und niederfrequenten Magnetfeldern an betrachtet:

1. Statische magnetische Felder

Statische magnetische Felder sind zeitlich unveränderlich und entstehen durch Gleichströme oder Permanentmagnete. Sie treten auch in der Natur auf, z.B. durch das Erdmagnetfeld.

Auswirkungen auf den Menschen:

Sehr starke statische Magnetfelder, wie sie bspw. beim Magnetresonanztomographie (MRT) zum Einsatz kommen, können Schwindel oder metallischen Geschmack auslösen. Dies ist auf die Beeinflussung des Blutflusses im Körper zurückzuführen [19]. Langfristige Gesundheitsrisiken wurden bisher nicht nachgewiesen. Die ICNIRP empfiehlt Grenzwerte von 40 mT für die allgemeine Bevölkerung und 200 mT für Personen, die während ihres Berufs magnetischer Strahlung ausgesetzt ist. [24]

Auswirkungen auf die Umwelt: Einige Tiere wie Vögel, Fische und Insekten nutzen das Erdmagnetfeld zur Orientierung. Künstliche statische Magnetfelder, wie sie von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ) erzeugt werden, können die Navigation dieser Tiere beeinflussen. Auch können statische Magnetfelder Kompasssysteme, Messgeräte und Sensoren stören, die auf das Erdmagnetfeld angewiesen sind. [9] [27]

2. Hochfrequente magnetische Felder

Hochfrequente magnetische Felder entstehen durch elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich von 9 kHz bis 300 GHz. Typische Quellen sind Mobilfunkmasten, Funksender, Wireless Local Area Network (WLAN)-Systeme und andere drahtlose Kommunikationstechnologien. [8]

Auswirkungen auf den Menschen: Hochfrequente magnetische Felder können Gewebe erwärmen, da die elektromagnetische Energie von wasserhaltigem Gewebe absorbiert wird. Dieser Effekt wird durch die Spezifische Absorptionsrate (SAR) beschrieben, welche aufgenommene Energie im Körper misst [4]. Grenzwerte liegen bei 2 W/kg für Mobiltelefone. Des Weiteren wird erforscht, ob hochfrequente Felder das Risiko bestimmter Krebserkrankungen erhöhen können. Die ICNIRP hat für Mobiltelefone und WLAN Grenzwerte für die SAR-Belastung festgelegt. [24]

Auswirkungen auf die Umwelt: Einige Insekten reagieren auf hochfrequente elektromagnetische Felder. Es gibt Hinweise darauf, dass die Orientierung und das Kommunikationsverhalten gestört werden können, insbesondere durch Mobilfunkmasten. [7]

3. Niederfrequente magnetische Felder

Niederfrequente magnetische Felder entstehen aufgrund von Wechselströmen im Frequenzbereich von 1 Hz bis 9 kHz und treten insbesondere in 50-Hz-Netzen auf, wie es bspw. bei Hochspannungskabeln der Fall ist. [5]

Auswirkungen auf den Menschen: Niederfrequente Magnetfelder induzieren elektrische Ströme im menschlichen Körper. Bei hohen Feldstärken kann dies zur Reizung von Nerven und Muskeln führen. Außerdem ist es möglich, dass in der Nähe von Hochspannungsleitungen bei sehr starken Feldern Effekte wie Lichtblitze oder Muskelzuckungen auftreten können. Außerdem untersuchen wissenschaftliche Studien den Zusammenhang zwischen niederfrequenten Magnetfeldern und Leukämie bei Kindern. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat niederfrequente Magnetfelder daher als „möglicherweise krebserregend“

eingestuft. Die Grenzwerte der ICNIRP liegen bei 100 μT für die Allgemeinbevölkerung und 500 μT für beruflich exponierte Personen. Jedoch gibt es auch Vorsorgewerte von vielen Städten. Die Stadt Hamburg hat bspw. einen Vorsorgewert von ca. 0,2 μT ausgerufen. Die Stadt bezieht sich damit auf verschiedene Studien, die zeigen, dass besonders niederfrequente magnetische Felder schädlich sind. Zudem existieren mehrere epidemiologische Studien, die auf ein erhöhtes Auftreten von Leukämie im Kindesalter und niederfrequenten magnetischen Flussdichten deutlich unterhalb der festgelegten Grenzwerte hindeuten. Laut dieser Studien erhöht bereits eine zeitlich gemittelte Immission von 0,3 bis 0,4 Mikrottesla das Risiko, dass ein Kind an Leukämie erkrankt. Bisher werden diese Ergebnisse nicht durch experimentelle Studien gestützt, und es ist kein biologischer Wirkmechanismus bekannt, der ein erhöhtes Auftreten von Leukämie im Kindesalter im Zusammenhang mit niederfrequenten magnetischen Feldern erklärt. Der Zusammenhang von niederfrequenten Magnetfeldern und Leukämie im Kindesalter ist noch nicht abschließend geklärt und bedarf weiterer Untersuchungen. Ebenfalls laut der Internationalen Agentur für Krebsforschung (IARC) gelten niederfrequente Magnetfelder als möglicherweise krebserregend, jedoch sind die Befunde für eine Grenzwertanpassung laut der ICNIRP nicht ausreichend. Der gesetzliche Grenzwert bleibt demnach bei 100 μT . [9] [1]

Auswirkungen auf die Umwelt: Zugvögel, Fische und Bienen nutzen das Magnetfeld der Erde zur Navigation. Auch niederfrequente Magnetfelder, die von Hochspannungsleitungen ausgehen, können die Orientierung dieser Tiere stören. Des Weiteren zeigen einige Studien, dass niederfrequente Felder das Zellwachstum und die Zellteilung von Pflanzen beeinflussen können. Allerdings sind die Effekte meist lokal begrenzt. Außerdem können in der Nähe von Hochspannungsleitungen niederfrequente Magnetfelder elektronische Geräte und Messinstrumente beeinflussen. [27]

Es gibt also durchaus negative Auswirkungen, verursacht durch magnetische Felder aller Art. Wie bereits erwähnt, sind Magnetfelder allgegenwärtig. In der Tabelle 2.3 wird veranschaulicht, wie groß die magnetische Flussdichte von Alltagsgegenständen ist. [6]

Gerät	Magnetische Flussdichte [μT] bei 3 cm Abstand	Magnetische Flussdichte [μT] bei 30 cm Abstand	Magnetische Flussdichte [μT] bei 1 m Abstand
Haarföhn	6 – 2000	0,01 – 7	0,01 – 0,3
Rasierapparat	15 – 1500	0,08 – 9	0,01 – 0,3
Bohrmaschine	400 – 800	2 – 3,5	0,08 – 0,2
Staubsauger	200 – 800	2 – 20	0,13 – 2
Leuchtstofflampe	40 – 400	0,5 – 2	0,02 – 0,25
Mikrowellengerät	73 – 200	4 – 8	0,25 – 0,6
Radio (tragbar)	16 – 56	1	<0,01
Elektroherd	1 – 50	0,15 – 0,5	0,01 – 0,04
Waschmaschine	0,8 – 50	0,15 – 3	0,01 – 0,15
Bügeleisen	8 – 30	0,12 – 0,3	0,01 – 0,03
Geschirrspüler	3,5 – 20	0,1 – 0,3	0,07 – 0,3
Computer	0,5 – 30	< 0,01	<0,01
Kühlschrank	0,5 – 1,7	0,1 – 0,25	<0,01
Fernsehgerät (Röhren)	2,5 – 50	0,04 – 2	0,01 – 0,15

Tabelle 2.3: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom Abstand zu verschiedenen Haushaltsgeräten [18]

Die Magnetfelder der oben genannten Geräte sind niederfrequente Magnetfelder. Sie werden meist durch das Stromnetz mit einer Frequenz von 50 Hz betrieben. Der Grenzwert von 100 μT , auf den im weiteren Verlauf noch weiter eingegangen wird, gilt zwar nicht für Haushaltsgeräte, aber im Vergleich wird sichtbar, dass dieser bei den Geräten bei 30 cm oder mehr eingehalten wird. Bei geringem Abstand von 3 cm wird der Grenzwert jedoch nicht mehr eingehalten, und der Mensch ist zu diesem Zeitpunkt gefährdet. In der Praxis ist eine Person meist weiter entfernt als 3 cm. Lediglich bei dem Haarföhn oder Rasierapparat ist der Abstand zum menschlichen Körper geringer.

Bei der Aussetzung von Magnetfeldern spielt der Begriff Elektromagnetische Verträglichkeit Umwelt (EMVU) eine große Rolle. Dieser beschreibt die elektromagnetische Einflüsse auf biologische Systeme, wie Menschen oder Tiere. Der Begriff Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bezieht sich auf Störfestigkeit und Störabstrahlung von technischen Geräten.

2.4 Berechnungsmethodik der magnetischen Felder (WinField)

Es wird erläutert, wie das Simulations- und Berechnungsprogramm „WinField“ die magnetische Flussdichte bestimmt. Die Grundlagen der magnetischen Flussdichte wurden bereits in Kapitel 2.3 geklärt. In diesem Kapitel wird noch einmal kurz auf die Grundlagen eingegangen in Zusammenhang mit der Berechnungsmethodik des verwendeten Simulationsprogramms.

Jeder stromdurchflossener Leiter ist von einem magnetischen Feld umgeben (siehe Abbildung 2.12). Das Feld, was sich aus dem stromdurchflossenen Leiter ergibt, wird durch Feldlinien in „WinField“ veranschaulicht. Die Richtung dieser Linien ist durch die Linke-Hand-Regel (physikalisch) gegeben. Der Daumen zeigt dabei in die technische Stromrichtung (Ursache), der Zeigefinger in die Magnetfeldrichtung (Vermittlung) und der Mittelfinger in die Richtung der Lorentz-Kraft (Wirkung). Jedoch ist zu berücksichtigen, dass „WinField“ die physikalische Stromrichtung verwendet. Somit ist die Stromrichtung der technischen entgegengesetzt.

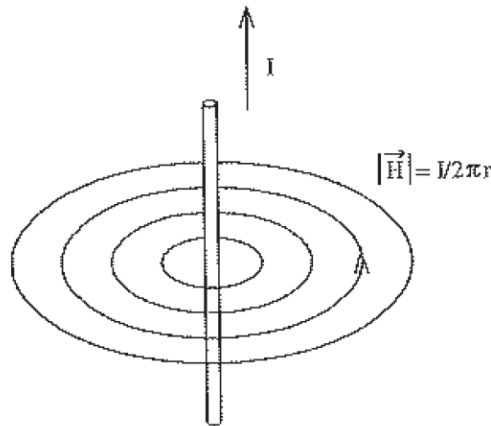


Abbildung 2.12: Magnetfeld eines Leiters [39]

„WinField“ berechnet die magnetische Flussdichte auf Grundlage des Biot-Savart-Gesetzes. Dabei wird die magnetische Flussdichte einer Leiterkonfiguration als Superposition von Teilfeldern einzelner Leitersegmente betrachtet. Jeder infinitesimale Teilleiter trägt zum Gesamtfeld den Anteil

$$d\vec{\mathbf{B}}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{\mathbf{l}} \times \vec{\mathbf{r}}}{r^3} \cdot I(t) \quad (12)$$

bei. $d\mathbf{B}$ und I sind dabei im Allgemeinen zeitabhängig und werden zur vereinfachten Berechnung in komplexe Größen transformiert. Legt man den (i)-ten Teilleiter der Länge L in den Ursprung des Koordinatensystems parallel zur x -Achse, berechnet sich sein Feldbeitrag im Aufpunkt $P(x,y,z)$ zu:

$$|\vec{\mathbf{B}}_i(t)| = \frac{\mu_0}{4\pi r} \cdot I_i(t) \cdot \left[\frac{L_i - x_p}{\sqrt{(L_i - x_p)^2 + r^2}} + \frac{x_p}{\sqrt{x_p^2 + r^2}} \right] \quad (13)$$

mit den Vektorkomponenten:

$$B_{xi}(t) = 0 \quad (14)$$

$$B_{yi}(t) = -\frac{z_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \cdot |\vec{\mathbf{B}}_i(t)| \quad (15)$$

$$B_{zi}(t) = \frac{y_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \cdot |\vec{\mathbf{B}}_i(t)| \quad (16)$$

Jedes Leiterseil wird nach dieser Methode in eine, vom Anwender vorzugebende Anzahl, Teilleiter segmentiert. Falls die Leiterseile einen Durchhang besitzen (z.B. Hochspannungsleitung), werden sie durch eine Parabel mit n Segmenten nachgebildet. In der Regel wird durch die Auswahl von 10-20 Segmenten eine ausreichende Genauigkeit erzielt. Grundsätzlich ist die physikalische Genauigkeit der Methode nur durch die Fließkomma-Arithmetik bestimmt. Der Fehler zwischen der Realität und dem Modell beruht im Wesentlichen auf der Unterteilung der Leiterseile in eine endliche Anzahl von Segmenten.

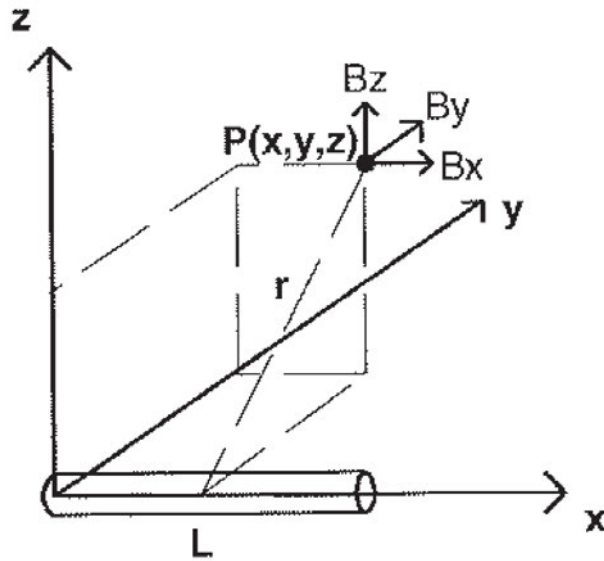


Abbildung 2.13: Teilleiter im Koordinatensprung [39]

Für die Berechnung der Feldstärke wird der betrachtete Aufpunkt in das lokale Koordinatensystem des jeweiligen Segmentes transformiert. Dies geschieht durch eine Verschiebung und anschließende Rotation. Damit erhält man den Anteil des Segmentes zum gesamten Feldvektor, der noch in das Weltkoordinatensystem zurücktransformiert werden muss (siehe Abbildung 2.13).

Vektorielle Addition der Feldbeträge liefert den Feldvektor:

$$\vec{\mathbf{B}}(t) = \begin{pmatrix} B_x(t) \\ B_y(t) \\ B_z(t) \end{pmatrix} \quad (17)$$

Im Falle eines sinusförmigen Stromes mit fester Frequenz

$$I(t) = \hat{I} \cdot \sin(\omega t) \quad (18)$$

wird für den Effektivwert (RMS) die Beziehung

$$I = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} \quad (19)$$

zugrunde gelegt. Dabei ist \hat{I} der Spitzenwert der Stromstärke. Der Feldvektor beschreibt in diesem Fall eine feststehende Rotationsellipse, deren große Halbachse den Spitzenwert darstellt (siehe Abbildung 2.14). Wenn ein Gemisch verschiedener Frequenzen vorliegt, werden die Feldbeträge der einzelnen Segmente zeitlich entwickelt, aufaddiert und anschließend über die Zeit integriert.

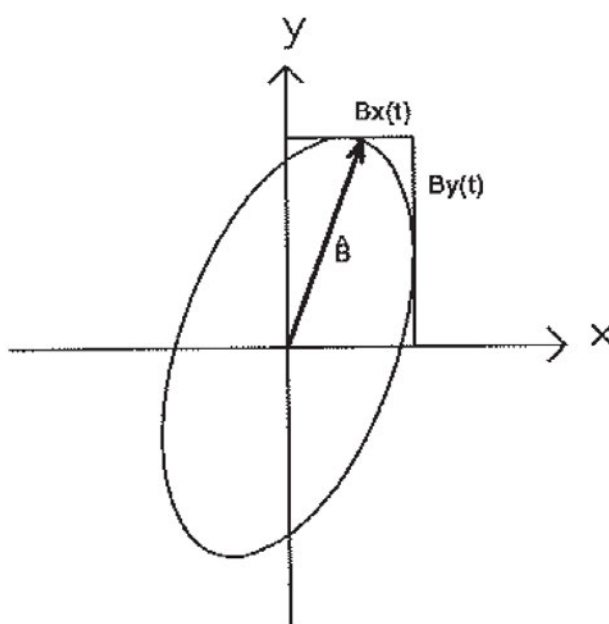


Abbildung 2.14: Rotationsellipse des B-Vektors [39]

„WinField“ berechnet den Betrag, die Einzelkomponenten und den Spitzenwert. [39]

2.5 Gesetze und Vorschriften

Im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern existieren sowohl nationale als auch internationale Regelwerke, die den Schutz der Bevölkerung und der Beschäftigten gegenüber elektromagnetischen Feldern gewährleisten sollen. Hierbei spielt die „Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung“ (ICNIRP) eine zentrale Rolle. Die ICNIRP gibt weltweit anerkannte Expositionsgrenzwerte vor, die auf dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen Forschung zu den gesundheitlichen Auswirkungen elektromagnetischer Felder basieren. Diese Forschungen bilden auch die Grundlage für nationale Gesetzgebungen, wie die 26. BImSchV und die EMFV in Deutschland. Besonders die 26. BImSchV spielt eine wichtige Rolle bei den Stromnetzen in den Städten sowie auch in der Hamburger Energienetze GmbH. Aus diesem Grund liegt der Fokus dieser Arbeit auf der 26. BImSchV.

2.5.1 ICNIRP-Richtlinien

Die ICNIRP ist eine unabhängige wissenschaftliche Organisation, die weltweit anerkannte Expositionsgrenzwerte festlegt. Diese Werte sollen den Schutz der Gesundheit gewährleisten und mögliche Risiken durch elektromagnetische Felder minimieren. Die ICNIRP bewertet regelmäßig neue wissenschaftliche Erkenntnisse und passt die Expositionsgrenzwerte entsprechend an. Zum einen die Grenzwerte für Personen, die im Rahmen ihrer Arbeit, elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind und zum anderen die Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung. Dies sind meist striktere Grenzwerte, um auch besonders empfindliche Gruppen zu schützen. Die Grenzwerte sind in folgender Tabelle 2.5.1 zu sehen.

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke (V/m)	Magnetische Flussdichte (μT)	SAR-Wert (W/kg)
0 Hz (statische Felder)	—	40 000	—
50 Hz (Niederfrequenz)	500	100	—
10 MHz – 400 MHz	28	—	2
2 GHz – 300 GHz	—	—	2

Tabelle 2.4: ICNIRP-Grenzwerte für elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte

Die ICNIRP-Richtlinien garantieren, dass akute Effekte, wie Nervenreizungen bei niederfrequenten Feldern und thermische Erwärmung bei hochfrequenten Feldern, vermieden werden. Andere Auswirkungen, wie in Kapitel 2.3.4 beschrieben, sollten ebenfalls vermieden werden. [24]

2.5.2 Die EMFV

Die EMFV (Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern) setzt die europäische Richtlinie 2013/35/EU in deutsches Recht um. Sie schützt Beschäftigte vor möglichen Gesundheits- und Sicherheitsgefährdungen durch Elektromagnetische Felder (EMF). Die EMFV kommt bei einem Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz zum Einsatz. Der Arbeitgeber muss eine Gefährdungsbeurteilung durchführen, Expositionsgrenzwerte einhalten und Schutzmaßnahmen ergreifen. In der folgenden Tabelle 2.5 ist der Unterschied zu sehen, wie die Grenzwerte für die berufliche Exposition aussehen und wie sie für die allgemeine Bevölkerung aussehen. Bei der elektrischen Feldstärke gibt es gegenüber der allgemeinen Bevölkerung eine Erhöhung um den Faktor 2 und bei der magnetischen Flussdichte eine Erhöhung um den Faktor 5. [13]

Tabelle 2.5: Auslöseschwellen der EMFV für niederfrequente Felder (50 Hz)

Parameter	Berufliche Exposition	Allgemeine Bevölkerung
Elektrische Feldstärke (V/m)	10 000	5 000
Magnetische Flussdichte (μT)	500	100

2.5.3 Die 26. BImSchV

Die 26. BImSchV regelt den Schutz der Allgemeinheit vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch elektromagnetische Felder. Sie legt Immissionsgrenzwerte für ortsfeste Anlagen, wie

Hochspannungsleitungen und Mobilfunkstationen fest. Diese Verordnung gilt für Frequenzen im Bereich von 0 Hz und 300 GHz. Die Referenzwerte stellen sicher, dass es nach dem aktuellen Stand der Forschung zu keiner gesundheitlichen Einschränkung für den Menschen kommt. Die im Bereich der Energieverteilung eingesetzten Anlagen werden mit einer Frequenz von 50 Hz betrieben, wodurch sie laut §1 der 26. BImSchV in den Bereich der Niederfrequenzanlagen (1 Hz bis 9 kHz) fallen. In diesem Bereich beschränkt sich die Verordnung auf ortsfeste Anlagen mit einer Nennspannung von 1000 V oder mehr, die der Um- und Weiterleitung elektrischer Energie dienen. Die Anlagen sind so zu betreiben, dass die in Tabelle 2.6 aufgeführten Grenzwerte an Orten, welche für den nicht nur vorübergehenden Aufenthalt bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung eingehalten werden. Dies ist wichtig, da das magnetische Feld abhängig vom Strom ist. Je höher die Stromstärke wird, umso größer wird auch die magnetische Flussdichte. Das elektrische Feld bleibt im Gegensatz dazu gleich, da es nicht von der Stromstärke abhängig ist.

Zusätzlich zur 26. BImSchV gibt es die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchVVwV). Diese ist eine Verwaltungsvorschrift, die als Leitfaden für Behörden dient, um die 26. BImSchV einheitlich anzuwenden und zu überwachen.

Außerhalb dieses Grenzwertes gibt es außerdem das Minimierungsgebot (§4 Anforderungen zur Vorsorge, 26. BImSchV). Es besagt, dass bei der Errichtung und wesentlicher Änderungen von Niederfrequenzanlagen, die elektromagnetischen Felder, soweit es finanziell und technisch möglich ist, zu minimieren sind. In der 26. BImSchVVwV wird auf die Durchführung konkreter eingegangen [12]. Dies ist auch ein zentraler Punkt dieser Arbeit, da die Minimierung von der magnetischen Flussdichte rundum 110-kV-Muffe untersucht wird.

Frequenz (f)	Elektrische Feldstärke in Kilovolt pro Meter (kV/m) (effektiv)	Magnetische Flussdichte in Mikrottesla (μT) (effektiv)
0	–	500
1 – 8	5	$40\,000/f^2$
8 – 25	5	$5\,000/f$
25 – 50	5	200
50 – 400	$250/f$	200
400 – 3 000	$250/f$	$80\,000/f$
3 000 – 10 000 000	0,083	27

Tabelle 2.6: Grenzwerte für elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte

Laut der 26. BImSchV beträgt der Grenzwert für die magnetische Flussdichte bei einer Anlage mit einer Frequenz von 50 Hz 200 μT (Mikrottesla). Allerdings ist in § 3 Absatz 1 und 2 festgelegt, dass Niederfrequenzanlagen mit einer Frequenz von 50 Hz nur die Hälfte dieses Grenzwerts einhalten dürfen. Der für die Anlagenbetreiber und für diese Arbeit wichtige Grenzwert ist somit 100 μT (bei 1 m über der Oberfläche). [11]

2.6 Wissenschaftlicher Stand zu Magnetfeldern um 110-kV-Muffe

Der aktuelle wissenschaftliche Stand zu Magnetfeldern um 110-kV-Muffe ist begrenzt. Es konnten keine spezifischen Studien zu diesem Thema gefunden werden. Jedoch gibt es einige wissenschaftliche Studien, die sich mit niederfrequenten Magnetfeldern von Hochspannungsleitungen beschäftigen.

Ein Beispiel ist die Studie, durchgeführt vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), aus Jahre 2009. Dort wurden die Feldstärken in der Umgebung von Wechselstrom-Freileitungen und -Erdkabeln der Hoch- und Höchstspannungsebene gemessen. Auch wenn diese Studie hauptsächlich höhere Spannungsniveaus untersucht, liefert sie wertvolle Daten zum magnetischen Feld in der Nähe von Hochspannungsleitungen. [5]

Ebenfalls gibt diese Studie an, dass Personen, die in der Nähe von Hochspannungsleitungen wohnen, nur geringfügig höheren Magnetfeldern ausgesetzt sind als andere. Die Hauptquelle für Magnetfelder im Alltag sind oft elektrische Geräte im Haushalt. Dennoch ist es wichtig, die Feldstärke um Hochspannungsleitungen zu überwachen und zu minimieren, um Risiken zu verringern. [5]

Des Weiteren haben epidemiologische Studien Hinweise gefunden, dass niederfrequente Magnetfelder mit einem erhöhten Risiko für bestimmte Erkrankungen, insbesondere Leukämie bei Kindern, verbunden sein könnten. Eine Risikoerhöhung wurde bei zeitlich gemittelten Flussdichten von ca. 0,3 - 0,4 μT beobachtet. Jedoch ist ein Zusammenhang bislang nicht eindeutig nachgewiesen. [10]

Trotz der vorhandenen Studien gibt es weiterhin Forschungsbedarf, besonders im Hinblick auf die langfristigen Auswirkungen niederfrequenter Magnetfelder auf den Menschen. Das Bundesamt für Strahlenschutz betont die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen, um offene wissenschaftliche Fragen zu klären. [16]

3 Magnetfeldberechnung um 110kV-Muffen

In diesem Kapitel wird die magnetische Flussdichte um 110-kV-Muffen auf theoretischer Basis untersucht. Wie in Kapitel 2.5.3 bereits erklärt, sind die Grenzwerte bei maximaler betrieblicher Anlagenauslastung bei 1 m über der Oberfläche einzuhalten. Diese „Worst-Case“-Betrachtung wird auch im Folgenden gemacht. In den Abbildungen 2.6 - 2.9 sind die typischen Muffen der drei Kabelsysteme zu sehen, wobei die typische Muffe bei dem Leiterquerschnitt von 300-mm^2 und 1000-mm^2 identisch ist. Das $(2x)1800\text{-mm}^2$ -System besitzt die doppelte Anzahl an Leitern, weswegen sich der Aufbau unterscheidet. Mithilfe dieser Montageskizzen wurden die Simulation und somit die Berechnung durchgeführt. Die Simulation beruht auf der Berechnungsmethodik nach 2.4 und wird mit „WinField“ gemacht.

3.1 Vorgehen in der Simulation

Mit „WinField“ lassen sich die elektromagnetischen Felder, die von elektrischen Leitern emittiert werden, simulieren. Dadurch können realistische Erwartungswerte für entsprechende Messungen in der Praxis gewonnen werden. Wichtig anzumerken ist, dass in der Simulation nur die Hochspannungskabel berücksichtigt werden. Die elektromagnetischen Felder, die von Nieder- und Mittelspannungskabeln ausgehen, werden nicht berücksichtigt. Das liegt daran, dass es keine konkreten Daten zu der Phasenlage und der Stromrichtung dieser Systeme gibt.

In „WinField“ kann ganz einfach ein neues Projekt geöffnet werden. Da es sich um die Simulation von Kabelanlagen handelt, wird die Standard-WinField-Vorlage „Cable“ gewählt. In dieser werden lediglich die Leiter gezeichnet. Die einzige Herausforderung hierbei ist, dass es sich bei „WinField“ um eine 3D-Konstruktion handelt. Jedoch gibt es die Möglichkeit ein Bild in den Hintergrund einzufügen, um die Arbeit zu vereinfachen. Dies wurde dann auch mit den gegebenen Montageskizzen gemacht. So konnten die Kabelsysteme in der Drauf- und in der Seitenansicht gezeichnet werden. Die Muffen wurden in den Simulationen als durchgehende Leiter modelliert. Das liegt daran, dass zum einen eine Muffe ein elektrisch leitendes Verbindungselement ist, und zum anderen würde eine detaillierte Modellierung der Muffe das resultierende Magnetfeld außerhalb kaum verändern. Die Leitergeometrie an der Muffe würde nur lokale Feldverzerrungen verursachen. Außerdem werden die Kabelschirme vernachlässigt. In einem Editor können den Leitern ihre spezifischen Werte zugewiesen werden.

Damit sind folgende Werte gemeint:

- Material
- Querschnitt
- Spannung
- Strom

Ist die Konstruktion fertiggestellt, wird durch die Prüfung der Kirchhoffschen Gesetze sichergestellt, dass es keine Fehler in der Konstruktion gibt. Ist nun alles sichergestellt, wird anschließend die Berechnung gestartet. Das Ergebnis kann je nach Wunsch als 2D-Plot, 3D-Plot oder mit ISO-Linien angezeigt werden.

In der Simulation wurde der Erdboden vernachlässigt, da er die Magnetfelder kaum beeinflusst. Das liegt daran, dass die magnetische Permeabilität des Erdbodens nahezu identisch mit der von Luft ist, und daher die Magnetfelder kaum leitet oder abschirmt.

3.2 Muffen von 300-mm²-Kabelanlagen

Zu Beginn werden Muffen von 300-mm²-Kabelanlagen untersucht. Die Konstruktion ist in der Abbildung 3.1 von der Draufsicht und in Abbildung 3.2 von der Seitenansicht zu sehen. Die Muffe ist genau von den Abbildungen 2.6 und 2.7 nachgestellt worden. Die wesentlichen Anlagendaten, die auch in die Simulation mit eingepflegt wurden, sind die Folgenden:

- Scheinleistung $S_{\max,300 \text{ mm}^2} : 75 \text{ MVA}$
- Strom $I_{\max,300 \text{ mm}^2} : 393,6 \text{ A}$
- Spannung $U_{\max} : 110 \text{ kV}$
- Querschnitt A: 300 mm² (Kupfer)
- Mindestverlegetiefe: 1,3 m

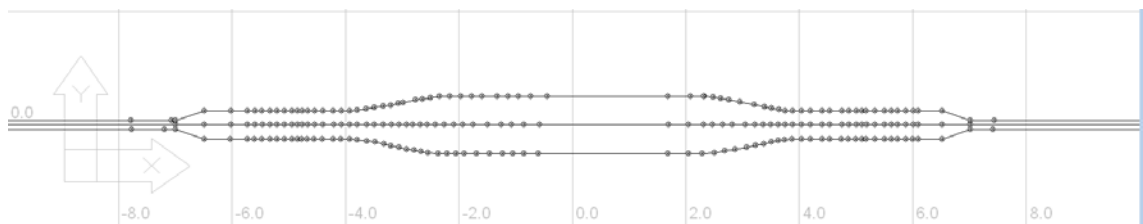


Abbildung 3.1: WinField-Simulation der 300- bis 1000-mm²-Muffe - Draufsicht

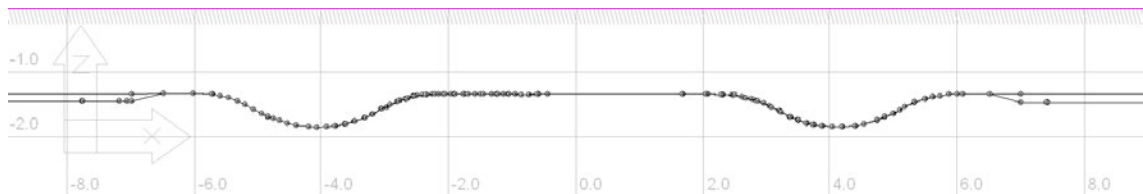


Abbildung 3.2: WinField-Simulation der 300- bis 1000-mm²-Muffe - Seitenansicht

Nach der Konstruktion der Kabelanlage wurde die Simulation gestartet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.3 visualisiert.

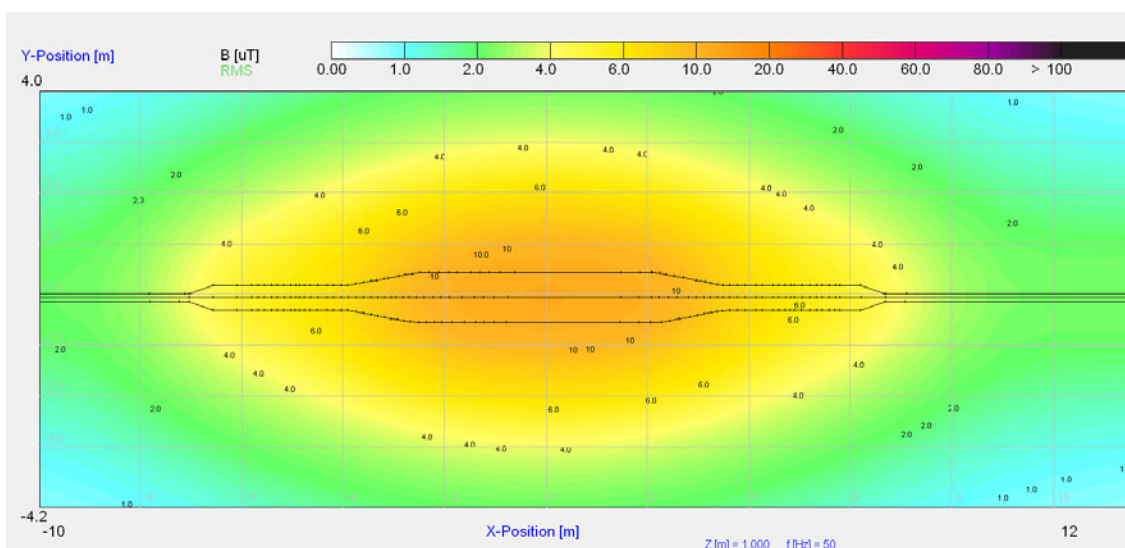


Abbildung 3.3: WinField - Simulation im Worst-Case (75 MVA) - 300-mm²-Kabelquerschnitt

Die horizontale Achse (X-Achse) zeigt den Abstand entlang der Kabelachse in Metern an. Die vertikale Achse (Y-Achse) zeigt die Entfernung quer zu der Kabeltrasse in Metern an.

Zu beobachten ist, dass die magnetische Flussdichte zentral über der Muffe am größten ist und mit größerem Abstand entlang der vertikalen Achse kleiner wird. Bei der Kabelanlage (in der Dreiecksanordnung) werden die Werte von ca. 2 μT und zentral der Muffe ca. 12 μT erreicht. Je weiter die Kabel entfernt sind, umso geringer wird die magnetische Flussdichte. Beim Übergang der Kabel von den Kabelschutzrohren, wo die Kabel noch in Dreiecksanordnung liegen, zur eigentlichen Muffe, wo sie dann flach nebeneinander gelegt werden, wird eine Erhöhung von 2 μT auf etwa 4 μT beobachtet. Das liegt daran, dass die Leiter weiter voneinander entfernt liegen (vorher: 16 cm Abstand, nachher: 25 cm Abstand zueinander). Durch diesen Abstand überlagern sich die Magnetfelder stärker und die magnetische Flussdichte erhöht sich. Näher am Zentrum, ist der Abstand zwischen den Leitern 50 cm und die magnetische Flussdichte erhöht sich erneut auf ca. 12 μT .

Des Weiteren ist eine Symmetrie erkennbar. Die magnetische Flussdichte ist symmetrisch zur x-Achse und zur y-Achse.

In den folgenden Abbildungen 3.4 und 3.5 wurde das Verhalten der magnetischen Flussdichte über dieser Muffe zweidimensional dargestellt. Die Werte wurden dabei von WinField exportiert und die Grafiken mithilfe von Excel erstellt.

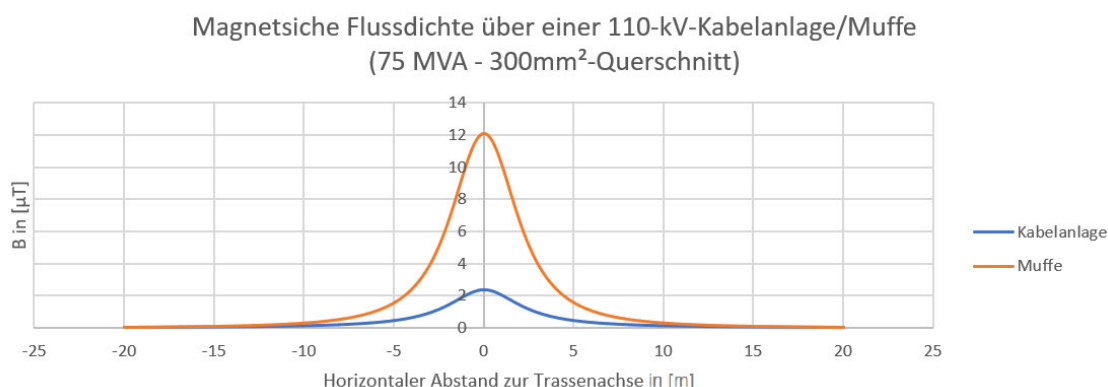


Abbildung 3.4: Magnetische Flussdichte über einer 110kV-Kabelanlage/Muffe (75 MVA)-300-mm²-Kabelquerschnitt

In Abbildung 3.4 ist die magnetische Flussdichte über der Kabelanlage und über der Muffe in Abhängigkeit von dem horizontalen Abstand zur Trassenachse dargestellt. Bei der Muffe wird ein Maximum von 12,108 μT und über der Kabelanlage ein Maximum von 2,363 μT erreicht. Dies ist ein Anstieg von 512,4 %. Das zeigt besonders die Auswirkungen einer solchen Muffe für die magnetische Flussdichte. Mit größerer Entfernung zur Trassenachse sinkt die magnetische Flussdichte bei der Muffe sowie bei der Kabelanlage. Ab ca. 9 m ist die magnetische Flussdichte in beiden Fällen in etwa gleich groß.

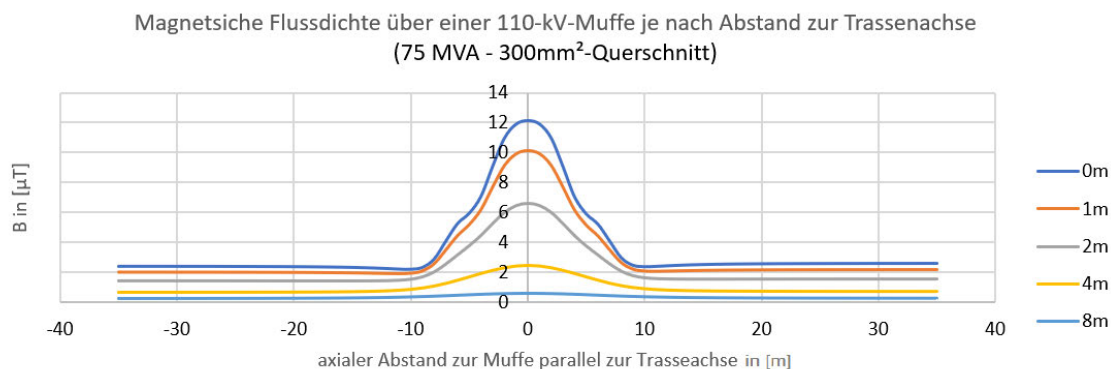


Abbildung 3.5: Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Muffe je nach Abstand zur Trassenachse (75 MVA) 300-mm² Kabelquerschnitt

In Abbildung 3.5 ist nur die 110-kV-Muffe dargestellt. In dieser wird die magnetische Flussdichte je nach Abstand zur Trassenachse in Abhängigkeit zum axialen Abstand zur Muffe parallel zur Trassenachse dargestellt. Der Graph „0 m“ zeigt die magnetische Flussdichte direkt über der Muffe an. Der Graph „8 m“ hingegen zeigt die magnetische Flussdichte in 8 m Entfernung quer zur Trassenachse an. Die Angabe der magnetischen Flussdichte erfolgt stets in einer Höhe von 1 m über der Oberfläche. An den Graphen ist zu sehen, dass mit weiterem Abstand die magnetische Flussdichte kleiner wird. Der Knick, der bei „0 m“, „1 m“ oder auch „2 m“ zu erkennen ist, lässt sich durch die Anordnung erklären. Das ist der Punkt, an dem die Leiter von der Dreiecksanordnung in die flache Anordnung übergehen. Dieser Übergang ist nicht sprunghaft, sondern ein stetiger Übergang. Dadurch überlagern sich die magnetischen Felder ein wenig anders, und dieser Knick kommt zustan-

de. Bei ca. 8 m Abstand zur Muffe bzw. zur Kabelanlage ist der Abstand so groß, dass die magnetische Flussdichte nahe zu Null ist.

Es ist eine deutliche Steigerung von der Kabelanlage in Dreiecksanordnung zur Muffe in flacher Anordnung erkennbar.

3.3 Muffen von 1000-mm²-Kabelanlagen

Als Nächstes werden die Muffen von 1000-mm²-Kabelanlagen untersucht. Die Konstruktion der Muffe für die Simulation ist dieselbe wie aus Kapitel 3.2. Die wesentlichen Anlagendaten für diese Simulation sind die Folgenden:

- Scheinleistung $S_{\max,1000 \text{ mm}^2}$: 150 MVA
- Strom $I_{\max,1000 \text{ mm}^2}$: 787,3 A
- Spannung U_{\max} : 110 kV
- Querschnitt A: 1000 mm² (Kupfer)
- Mindestverlegetiefe: 1,3 m

Das resultierende Magnetfeld der 1000-mm²-Muffe ist in der Abbildung 3.6 zu sehen.

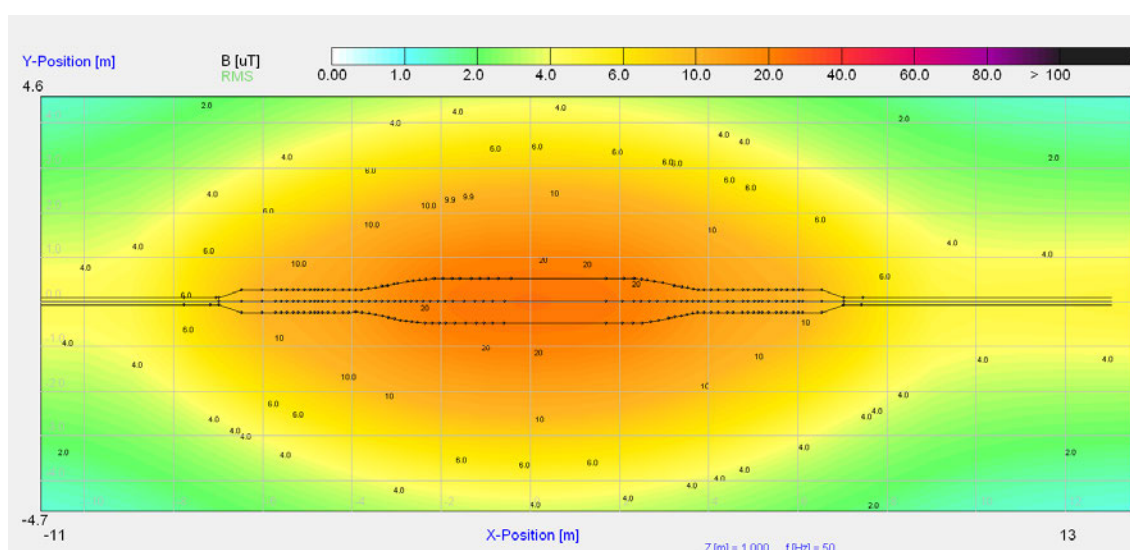


Abbildung 3.6: WinField - Simulation im Worst-Case (150 MVA) - 1000-mm²-Kabelquerschnitt

Zu sehen ist, im Vergleich zur 300-mm²-Muffe ein deutlicher Anstieg der magnetischen Flussdichte. Ausschlaggebend dafür ist der Anstieg der Stromstärke und der daraus resultierenden Leistung. Bei der 300-mm²-Kabelanlage ist eine Scheinleistung von 75 MVA und eine Stromstärke von 393,6 A. Bei der 1000-mm²-Kabelanlage hingegen beträgt die Scheinleistung 150 MVA und die Stromstärke 787,2 A. Nach der Formel (6) würde man auch diese Verdopplung der magnetischen Flussdichte erwarten. Diese Erwartung wird durch die Berechnungsergebnisse bestätigt (siehe Abbildung 3.6). Über der Kabelanlage (Dreiecksanordnung) ergibt sich ein Wert von ca. 4 µT (im Vgl.: 300-mm²-Kabelanlage: ca. 2 µT). Über dem Zentrum der Muffe beträgt der maximalen Wert ca. 24 µT (im Vgl.:

300-mm²-Muffe: ca. 12 μT).

Auch hier ist eine symmetrische Verteilung um die Kabelachse zu sehen. In den weiteren Abbildungen 3.7 und 3.8 ist die Verteilung der magnetischen Flussdichte in einer anderen Darstellung zu sehen.

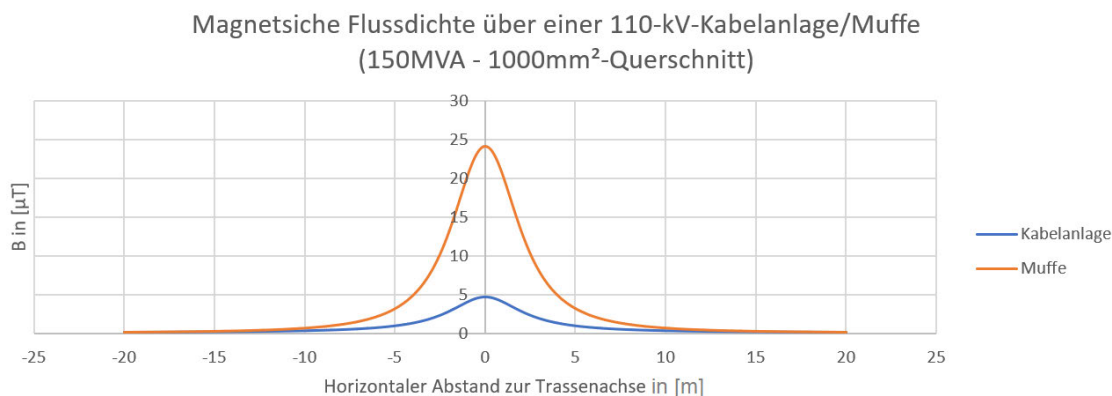


Abbildung 3.7: Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe (150 MVA) - 1000-mm²-Kabelquerschnitt

Über der Muffe wird ein Maximum der magnetischen Flussdichte von 24,218 μT und über der Kabelanlage ein Maximum von 4,727 μT erreicht. Das zeigt einen Anstieg von 512,33 %. Dies ist dem 300-mm²-Kabelsystem nahezu gleichgesetzt. Die kleine prozentuale Abweichung lässt sich auf Modellierungsungenauigkeiten zurückführen.

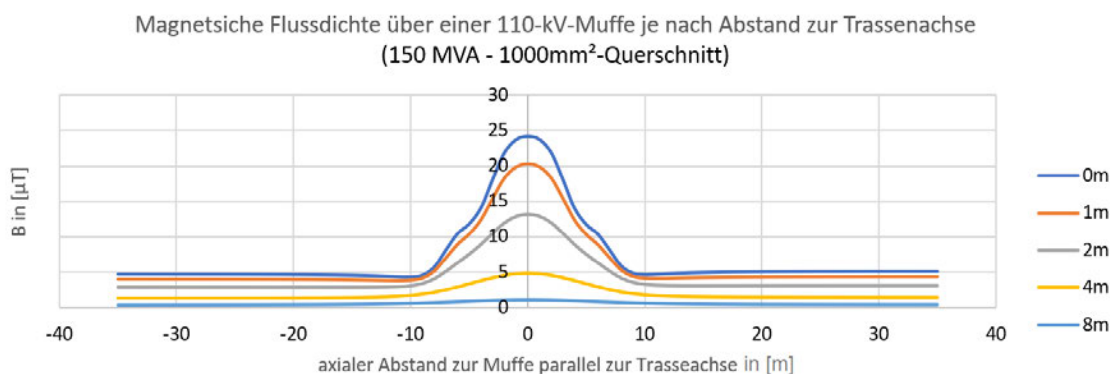


Abbildung 3.8: Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Muffe je nach Abstand zur Trassenachse (150 MVA) - 1000-mm²-Kabelquerschnitt

Auch in der Abbildung 3.8, die die Muffe des 1000-mm²-Kabelsystems in verschiedenen Abständen zur Trassenachse zeigt, ist zu sehen, dass der Verlauf der magnetischen Flussdichte mit der des 300-mm²-Kabelsystems identisch ist. Lediglich die Stärke ist verändert, und zwar um den Faktor 2. Der Faktor 2 ergibt sich daraus, dass die Stromstärke bei dem 300-mm²-Kabelsystem 393,6 A beträgt und bei dem 1000-mm²-Kabelsystem sich die Stromstärke auf 787,3 A verdoppelt. Nach Formel (6) ist die Stromstärke proportional zu der magnetischen Flussdichte bei konstantem Abstand. Daraus lässt sich schließen, dass sich die magnetische Flussdichte um das Doppelte erhöht, wenn sich die Stromstärke um das Doppelte erhöht.

Zusammengefasst verhält sich die magnetische Flussdichte zu dem 1000-mm²-Kabelsystem genauso wie zu dem 300-mm²-Kabelsystem. Der Unterschied ist, dass sich durch die Verdopplung der Leistung die magnetische Flussdichte, aufgrund der Proportionalität zur Stromstärke ebenfalls verdoppelt hat. Der Grenzwert von 100 µT wird auch hier eingehalten.

3.4 Muffen von (2x)1800-mm²-Kabelanlagen

Nun wird die Muffe von einer (2x)1800-mm²-Kabelanlage simuliert. Aufgrund der hohen Last von 360 MVA, die das System übertragen muss, werden zwei Systeme mit jeweils drei Phasen eingesetzt. Dadurch ist, die bereits in Kapitel 2.2.3 vorgestellte Muffenskizze, anders als die bei den 300-mm²- und 1000-mm²-Kabelanlagen. Die Phasenordnung der Kabelsysteme ist wie in Abbildung 2.3 (siehe Kapitel 2.2.2). Die Konstruktion des Systems in das Simulationsprogramm ist in den Abbildungen 3.9 und 3.10 zu sehen und wurde nachkonstruiert von den Abbildungen 2.8 und 2.9.

Die wesentlichen Anlagendaten für die Kabelanlage:

- Scheinleistung $S_{\max,1800 \text{ mm}^2} : 360 \text{ MVA} (2 \cdot 180 \text{ MVA})$
- Strom $I_{\max,1800 \text{ mm}^2} : 1889,5 \text{ A} (2 \cdot 944,75 \text{ A})$
- Spannung $U_{\max} : 110 \text{ kV}$
- Querschnitt A: 1800 mm² (Kupfer)
- Mindestverlegetiefe: 1,3 m

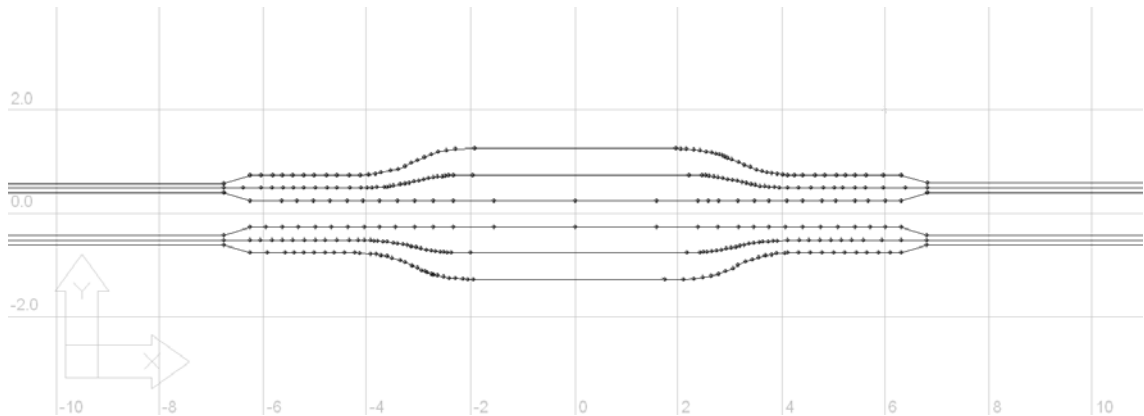


Abbildung 3.9: WinField-Simulation der 1800-mm²-Muffe - Draufsicht

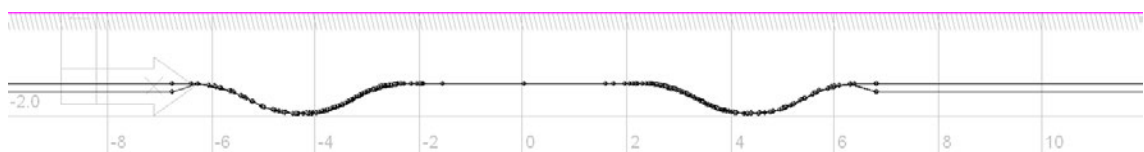


Abbildung 3.10: WinField-Simulation der 1800-mm²-Muffe - Seitenansicht

Nach dem Einpflegen der Konstruktion und der Anlagendaten des Kabelsystems wurde die Simulation durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.11 zu sehen.

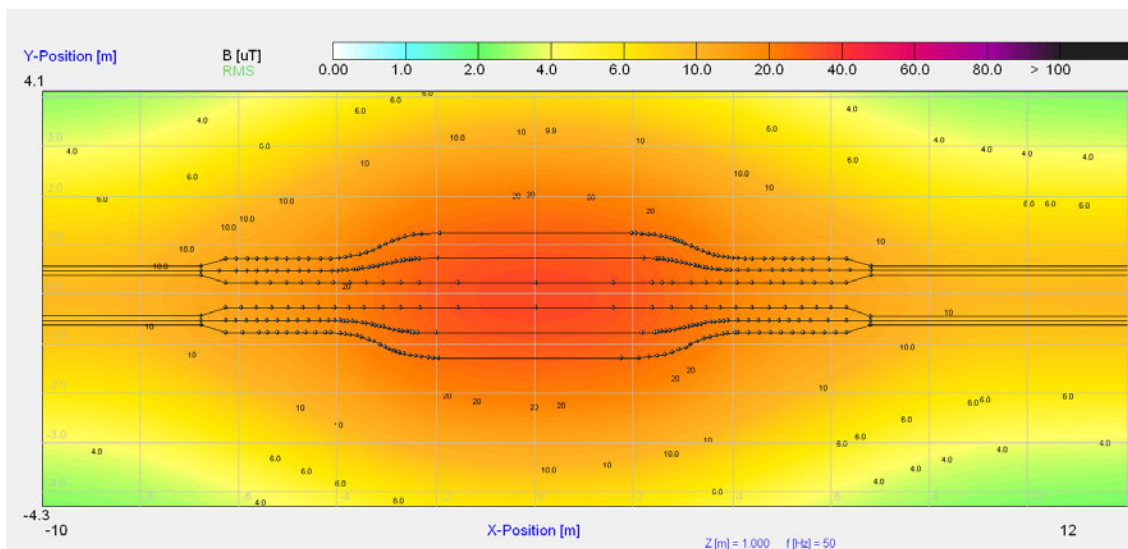


Abbildung 3.11: WinField - Simulation im Worst-Case (360 MVA) - 1800-mm²-Kabelquerschnitt

Trotz des unterschiedlichen Aufbaus der Muffe wird ein ähnliches Muster zu den vorherigen Muffen erkannt. Auch hier ist die magnetische Flussdichte im Zentrum der Muffe am größten und nimmt mit vertikalem und horizontalem Abstand zur Muffe ab. Zwischen den Leitern in der Dreiecksanordnung besteht ein Abstand von ca. 16 cm. Bei der flachen Anordnung an der Muffe beträgt der Abstand 50 cm. Die Abstände zwischen den Phasen der Leitern sind gleich zu den der vorherigen Kabelanlagen. Das Maximum der magnetischen Flussdichte bei der Kabelanlage in Dreiecksanordnung befindet sich genau zwischen den beiden Leitern und hat einen Wert von ca. 10 µT. Das Maximum über der Muffe ist ca. 30-40 µT nach der Abbildung 3.11. Auch bei dieser Konstruktion ist eine symmetrische Verteilung um die Kabelachse zu sehen.

Das Verhalten des Magnetfeldes ist in den Grafiken 3.12 und 3.8 genauer dargestellt.

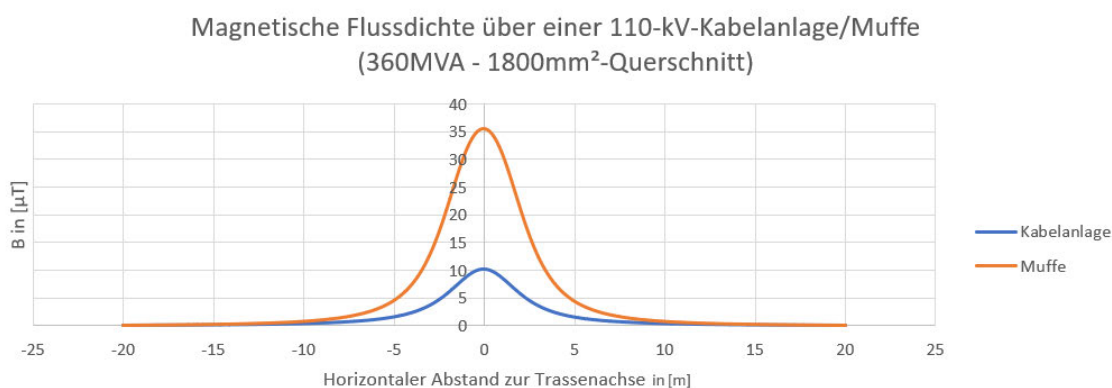


Abbildung 3.12: Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe (360 MVA) - 1800-mm²-Kabelquerschnitt

Mit Hilfe der exportierten CSV-Datei aus WinField lässt sich das Maximum der magnetischen Flussdichte genau bestimmen. Das liegt bei der Kabelanlage (Dreiecksanordnung) bei 10,175 µT und bei der Muffe bei 35,488 µT. Dies ist ein Anstieg von 348,78 %. Im

Vergleich zu den vorherigen zwei Kabelanlagen sehen wir bei dieser Kabelanlage einen kleineren Anstieg der magnetischen Flussdichte.

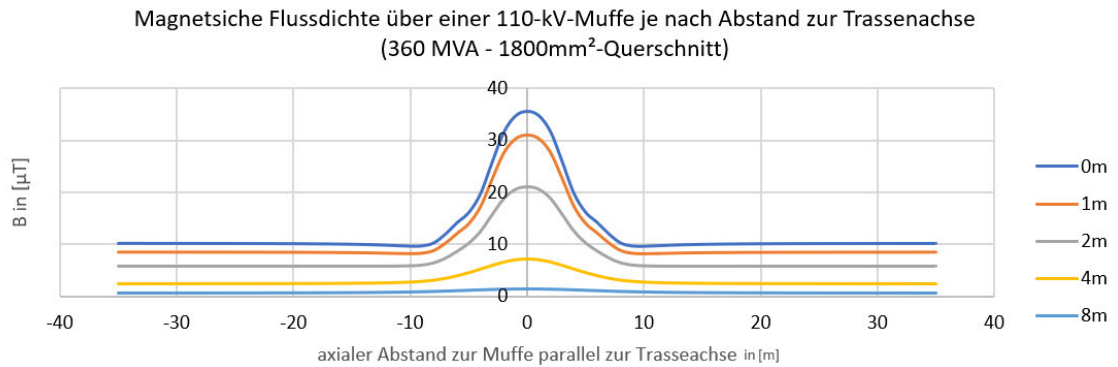


Abbildung 3.13: Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Muffe je nach Abstand zur Trassenachse (360 MVA) - 1800-mm²-Kabelquerschnitt

In der Abbildung 3.13 ist ebenfalls ein ähnliches Muster zu den Grafiken der vorherigen Kabelanlagen zu sehen (siehe Abbildung 3.5 und 3.8). Bei genauerem Hinschauen ist zu erkennen, dass die minimalen Einbrüche der magnetischen Flussdichte im Vergleich zu den vorherigen zwei Kabelsystemen unterschiedlich sind.

Die erkennbaren Unterschiede liegen an der etwas anderen Anordnung der Kabelanlage und an dem zusätzlichen System, wodurch mehrere Magnetfeldquellen existieren. Die Folge ist, dass sich die Magnetfelder etwas anders überlagern. Aus diesem Grund kann man bei diesem Kabelsystem nicht annehmen, dass obwohl sich die Scheinleistung von bspw. 75 MVA zu 360 MVA (Faktor 4,8) erhöht hat, sich die magnetische Flussdichte ebenfalls um diesen Faktor erhöht. In Anbetracht des Grenzwertes der 26. BImSchV ist zu erkennen, dass der Grenzwert von 100 μ T hier ebenfalls nicht überschritten wurde.

Die Simulationen der drei meistbenutzten Kabelsysteme zeigt, dass in allen drei Fällen der Grenzwert eingehalten wird. Jedoch ist anzumerken, dass es sich bei den Simulationen zum einen um Idealfälle handelt, und zum anderen wurden diese Systeme mit maximaler Belastung simuliert. Im Normalbetrieb werden die Systeme zum Schutz der Anlage und des Stromnetzes mit maximal 70 % belastet, wodurch auch geringere Magnetfelder erwarten werden.

4 Magnetfeldmessung um 110kV-Muffen

In diesem Kapitel werden die bisher nur simulierten magnetischen Felder und dessen magnetische Flussdichte in der Praxis gemessen. Dies bietet die Grundlage dafür, dass man die Theorie und die Praxis miteinander vergleichen kann. Es wurden insgesamt drei verschiedene Muffenstandorte für die Messungen ausgewählt. Dabei konnte leider das (2x)1800-mm²-Kabelsystem nicht berücksichtigt werden, da zum Zeitpunkt der Messungen kein aktives System zur Verfügung stand. Aus diesem Grund wurden hier das 300-mm²- und das 1000-mm²-Kabelsystem berücksichtigt.

4.1 Messverfahren

Zunächst wird erläutert, wie der gesamte Prozess der Messung, einschließlich Aufbau und Methodik, abläuft. Dazu wird das Messsystem und die Messumgebung genauer erklärt.

4.1.1 Messsystem und Messprinzip

Für die Messung der magnetischen Flussdichte wurde das Messgeräte EFA-3 von Wandel & Goltermann verwendet. Dieses Messgerät ermöglicht die Messung von nieder- und hochfrequenten elektromagnetischen Feldern. Für die Magnetfeldmessung steht eine Magnetfeldsonde zur Verfügung mit einer Fläche von 100 cm². Dieses erfüllt die Anforderungen, die den Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE)-Standards und den Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)-Standards entsprechen. Die spezifische Norm ist die VDE-0848. Der Messbereich liegt zwischen 5 nT - 10 mT. Darüber hinaus kann das Messgerät die Messungen speichern und es besteht die Möglichkeit die Messdaten auf den Computer zu übertragen. Das Messgerät mit der Sonde ist in der Abbildung 4.1 zu sehen.



Abbildung 4.1: Wandel & Goltermann: EFA-3

Das Messprinzip des Messgerätes ist auf Basis des Induktionsgesetzes. Eine Spule im Sensor des EFA-3 misst die durch Änderungen des magnetischen Flusses induzierte Spannung. Die gemessene magnetische Flussdichte wird dann auf dem Display angezeigt. [38]

4.1.2 Messaufbau

Die Messung wurde an drei verschiedenen Muffenstandorten durchgeführt. Für die Messung wurden zwei Leitungen ausgewählt. Die Messung erfolgt in einem Messraster (13 m x 7 m oder 21 m x 7 m), um eine qualitative Aussage über die Verteilung der magnetischen Flussdichte zu erhalten.

Um die magnetische Flussdichte einer Muffe eines 300-mm²-Kabelsystems zu messen, wurde die Leitung 47 in Sülldorf ausgewählt. Die Leitung wurde im Jahre 2023 verlegt. Dabei handelt es sich um ein Kabel vom Typ "N2XS(FL)2Y>c<2FO 1x300RM/50 64/110 (123)kV" vom Hersteller "TFKable". Die Messung erfolgte über ein 13 m x 7 m - Raster. Der Abstand der Messpunkte längs und quer zur Trassenachse beträgt jeweils 1 m. Für das 300-mm²-Kabelsystem wurde nur ein Muffenstandort untersucht.

Für das 1000-mm²-Kabelsystem wurde die Leitung 33 in Harburg ausgewählt. Diese wurde im Jahre 2011 verlegt. Dabei handelt es sich um den Kabeltypen "N2XS(FL)2Y 1x1000 RM/70 64/110kV" von dem Hersteller "NKT". Bei dieser Leitung wurde ein Messraster für zwei Muffenstandorte erstellt. Zum einen ein 13 m x 7 m - Raster und zum anderen ein 21 m x 7 m - Raster, um das Verhalten der magnetischen Flussdichte besser über der Kabelanlage in der Dreiecksanordnung zu sehen.

Das Messraster für das 13 m x 7 m - Raster ist in folgender Abbildung 4.2 zu sehen. Das 21 m x 7 m - Raster sieht genauso aus, mit dem Unterschied, dass die x-Achse erweitert wurde. Das Zentrum der Muffe befindet sich somit auf dem Punkt (0,0) im Raster.

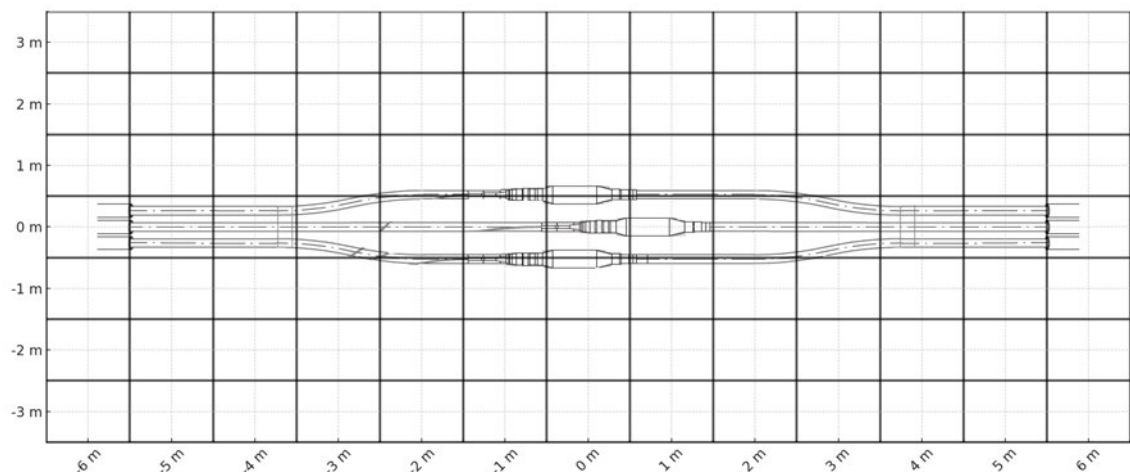


Abbildung 4.2: Messraster eines 13 m x 7 m - Messaufbaus

4.1.3 Messdurchführung und -auswertung

Die Messungen wurden an den bereits erwähnten Leitungen (siehe Kapitel 4.1.2) mit Hilfe eines Rollmaßbandes, eines Zollstocks und Kreide durchgeführt. Die Legungs- und Montageskizzen dienten der Orientierung, wo sich die Muffen befinden. Mit der Kreide wurde das Zentrum der Muffe markiert, von dem aus gearbeitet werden konnte. Mit dem Rollmaßband wurde das Raster bestimmt und die Messorte im Raster auf dem Boden markiert. Das Messgerät wurde in 1 m Höhe über dem Boden in der Hand gehalten (wie es laut 26. BImSchV gefordert wird). Zur Orientierung wurde der Zollstock vom Boden aus vertikal gehalten, um die 1 m einzuhalten.

Es ließ sich nicht vermeiden, dass einige Messpunkte im Raster nicht gemacht werden konnten, da die Muffenstandorte oft auf Gehwegen, Fahrradwegen, Parkbuchten oder auf Privatgrundstücken liegen.

Da die Stromstärke einen großen Einfluss auf die magnetische Flussdichte hat, ist es auch von großer Bedeutung zu wissen, wie groß die Stromstärke ist, die die Leitungen zum Zeitpunkt der Messung hat. Da das Messgerät auch das Datum und die Zeit der jeweiligen Messwerte speichert, konnte die Stromstärke bei der Netzführung der Hamburger Energiewerke GmbH in diesem Zeitraum nachgefragt werden.

Die Messwerte, die sich auf dem Messgerät befinden, können dann in eine Tabelle im CSV-Format exportiert werden und ausgewertet werden.

4.2 Messergebnisse

Die folgenden Unterkapitel 4.2.1 und 4.2.2 zeigen die Messergebnisse der Muffen einer 300-mm²- und einer 1000-mm²-Kabelanlage.

4.2.1 Messung der magnetischen Flussdichte von Muffen einer 300-mm²-Kabelanlage

Zuerst wird die magnetische Flussdichte einer Muffe eines 300-mm²-Kabelsystems untersucht. Aus den Daten der Netzführung zur Stromstärke (siehe Anhang) ist während des gesamten Messzeitpunktes eine konstante Stromstärke von 64,7 A zu erkennen. Die Scheinleistung beträgt somit

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (20)$$

$$S_{\text{Ltg.47}} = \sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV} \cdot 64,7 \text{ A} = 12,33 \text{ MVA} \quad (21)$$

Im Vergleich zum maximal belastbaren Zustand von 75 MVA läuft die Anlage mit dem folgenden Belastungsfaktor k

$$k = \frac{S_{\text{Ltg.47}}}{S_{\text{max,300 mm}^2}} \quad (22)$$

$$k_{\text{Ltg.47}} = \frac{12,33 \text{ MVA}}{75 \text{ MVA}} = 0,1644 = 16,44 \% \quad (23)$$

Da die Spannung gleich bleibt und lediglich die Stromstärke variiert, ist diese auch bei $k = 16,44\%$ („ k “ für den Belastungsfaktor) der Stromstärke bei maximaler Anlagenauslastung. Dies liegt an der Proportionalität zwischen der Scheinleistung und der Stromstärke (siehe (20)). Ebenfalls ist in Formel (6) zu erkennen, dass die magnetische Flussdichte proportional zur Stromstärke ist. Somit müsste sich die magnetische Flussdichte ebenfalls bei 16,44% der maximalen Anlagenauslastung befinden. Dies wäre mit dem Maximum der magnetischen Flussdichte aus der Simulation (siehe Kapitel 3.2) vergleichbar. Es beträgt in der Simulation 12,108 μT und liegt im Zentrum der Muffe. Aus dem errechneten Prozentsatz ergibt sich eine magnetische Flussdichte von

$$B_{k_{\text{Ltg.47}}} = 0,1644 \cdot 12,108 \mu\text{T} = 1,99 \mu\text{T} \quad (24)$$

Für diese Muffe gibt es keine Montageskizze, weshalb von dem typischen Aufbau der Muffe auszugehen ist (siehe Abbildung 2.6 und 2.7). Der Wert von 1,99 μT ist der Wert, der im Zentrum der Muffe bei der Messung erwartet wird. In folgender Darstellung ist die Magnetfeldmessung zu sehen (siehe Abbildung 4.3).

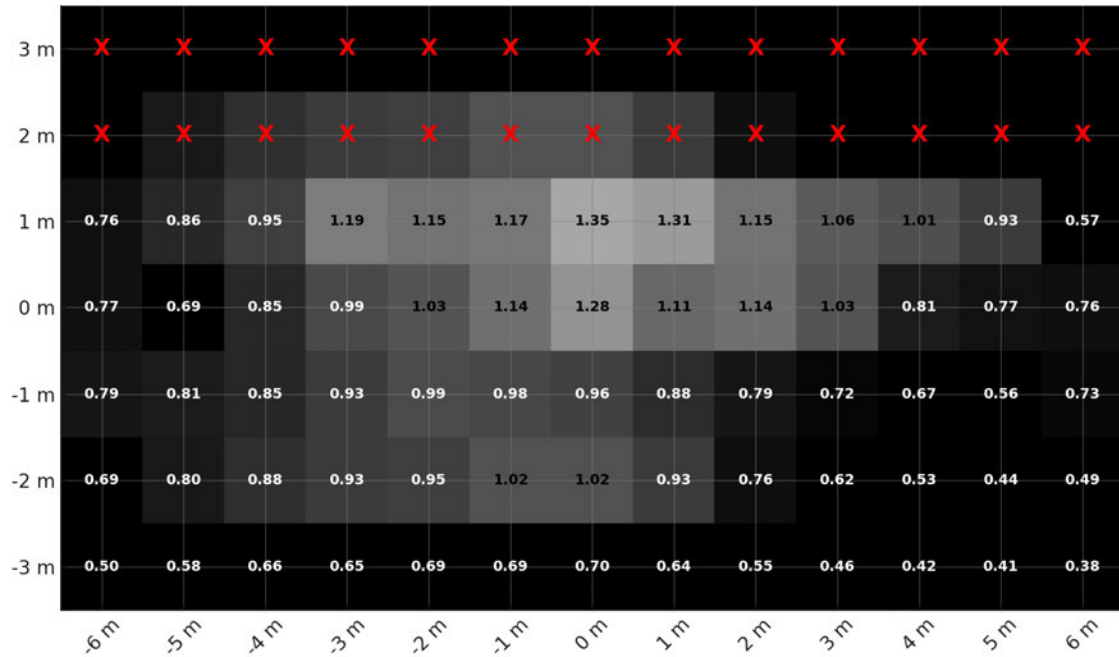


Abbildung 4.3: Messraster der magnetischen Flussdichte von der Muffe am 300-mm²-Kabelsystem (Leitung 47)

Das Bild zeigt ein Raster von Messdaten, das Daten in Form von farblich codierten Werten visualisiert. Die Werte sind numerisch dargestellt, und die Farbkodierung reicht von hellen (hohen Werten) bis dunklen (niedrigen Werten) Schattierungen in Grautönen. Der hellste Bereich zeigt den höchsten Messwert von etwa 1,35 µT, während die dunkelsten Bereiche die niedrigsten Messwerte um 0,4 µT - 0,5 µT darstellen. Aufgrund eines Privatgeländes konnten zwei Zeilen (dargestellt durch ein rotes X) nicht gemessen werden. Zu sehen ist, wie die Werte im Zentrum am höchsten sind und mit horizontalem Abstand zur Trassenachse abnehmen. Jedoch liegt der höchste Wert nicht im Zentrum, sondern 1 m in Richtung der vertikalen Achse nach oben verschoben. Auch eine leichte Symmetrie ist in den Messergebnissen zu sehen.

Nun gilt es festzustellen, ob die Kabelanlage den Grenzwert der 26. BImSchV einhält. Dazu wird das gemessene Maximum auf die maximal betriebliche Anlagenauslastung hochgerechnet.

$$B_{\text{MessMax,Ltg.47}} = \frac{B_{\text{MessMax},k_{\text{Ltg.47}}}}{k_{\text{Ltg.47}}} \quad (25)$$

$$B_{\text{MessMax,Ltg.47}} = \frac{1,35 \mu\text{T}}{0,1644} = 8,21 \mu\text{T} \quad (26)$$

Damit liegt der Muffenstandort unter dem Grenzwert von 100 µT.

4.2.2 Messung der magnetischen Flussdichte von Muffen einer 1000-mm²-Kabelanlage

Im nächsten Schritt wird der Blick auf die Muffen der 1000-mm²-Kabelanlage geworfen. Der Durchschnitt der Stromstärke wurde auch hier aus den Daten der Netzführung (siehe Anhang) ermittelt. Da zwei Messungen gemacht wurden und diese nicht zeitgleich erfolgt

ist, gibt es zwei unterschiedliche Durchschnittswerte für die Stromstärke.

$$I_{\text{Ltg.33,M1}} = 189,39 \text{ A} \quad (27)$$

$$I_{\text{Ltg.33,M2}} = 187,04 \text{ A} \quad (28)$$

Der Fehler, der durch die Mittelwertbildung entsteht, lässt sich durch die Standardabweichung s ermitteln:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2} \quad (29)$$

Dabei ist I_i der jeweilige Messwert, \bar{I} der Mittelwert der Messreihe und N die Anzahl der Messwerte. Bei dem Muffenstandort 1 gibt es 17 Messungen zur Stromstärke und bei dem Muffenstandort 2 15 Messungen. Die berechnete Standardabweichung beträgt somit:

$$s_{\text{Ltg.33,M1}} = 3.53 \quad (30)$$

$$s_{\text{Ltg.33,M2}} = 1.9 \quad (31)$$

$$(32)$$

Die Standardabweichungen der Messreihen sind gering, was für eine hohe Präzision der Messungen spricht. Mit den Durchschnittswerten wird dann die Scheinleistungen unter Anwendung der Formel (20) berechnet.

$$S_{\text{Ltg.33,M1}} = \sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV} \cdot 189,39 \text{ A} = 36,08 \text{ MVA} \quad (33)$$

$$S_{\text{Ltg.33,M2}} = \sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV} \cdot 187,04 \text{ A} = 35,64 \text{ MVA} \quad (34)$$

Daraus folgt der Belastungsfaktor für die beiden Messzeitpunkte.

$$k = \frac{S_{\text{Ltg.47,M1}/2}}{S_{\text{max},1000 \text{ mm}^2}} \quad (35)$$

$$k_{\text{Ltg.33,M1}} = \frac{36,08 \text{ MVA}}{150 \text{ MVA}} = 0,2405 = 24,05\% \quad (36)$$

$$k_{\text{Ltg.33,M2}} = \frac{35,64 \text{ MVA}}{150 \text{ MVA}} = 0,2376 = 23,76\% \quad (37)$$

Anders als bei den vorherigen Muffen gibt es für die zwei Muffen der Leitung 33 durchaus Montageskizzen. Da sie nur für den internen Gebrauch bestimmt sind, dürfen sie hier nicht veröffentlicht werden. Der entscheidende Unterschied bei den Muffen ist jedoch der, dass bei dem ersten Muffenstandort der Abstand zwischen den Phasen bei der Muffe lediglich 20 cm beträgt. Bei dem zweiten Muffenstandort beträgt der Abstand 40 cm. Der Aufbau der Muffen wurde im Simulationsprogramm nachkonstruiert und ist in den Abbildungen 4.4 und 4.6 dargestellt. Im Vergleich liegt der Abstand bei der typischen Muffe bei 50 cm (siehe Kapitel 2.2.3). Dadurch ist zu erwarten, dass das resultierende Magnetfeld geschwächt wird. Die Schwächung kommt durch den verringerten Abstand und die resultierende verstärkte Feldkompensation zustande. Durch diesen Unterschied muss das magnetische Feld komplett neu berechnet werden. Die Anordnung wurde anhand der Pläne modelliert, mithilfe des Simulationsprogramms simuliert und in den folgenden Abbildungen dargestellt.

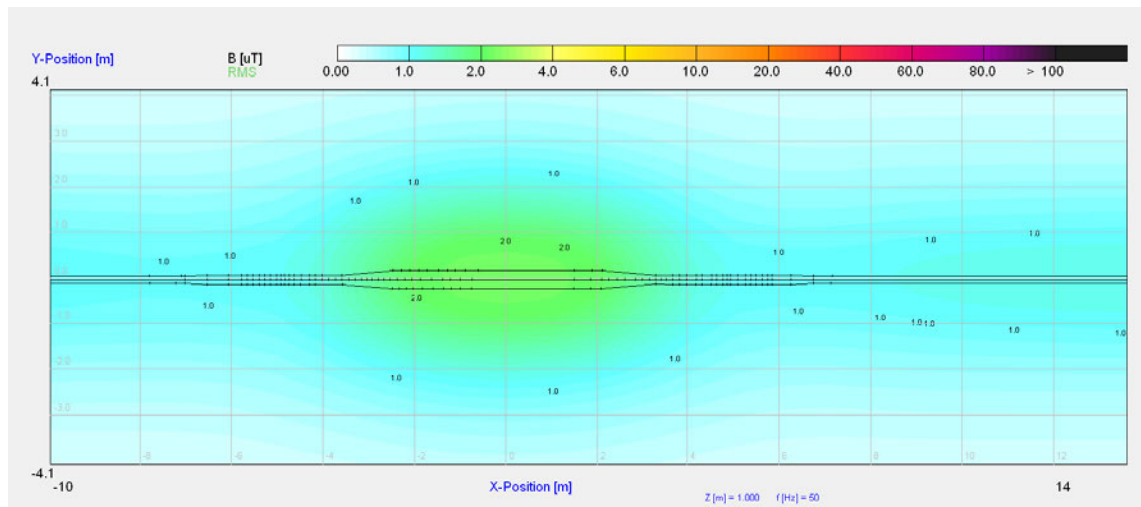


Abbildung 4.4: WinField - Simulation mit Werten zum Zeitpunkt der Messung (36,08 MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 1 (20 cm Abstand zwischen Phasen an der Muffe)

Die Simulation (siehe Abbildung 4.4) zeigt ein deutlich geschwächtes Magnetfeld im Vergleich zur Berechnung (siehe Abbildung 3.6), an. Über der Kabelanlage in Dreiecksanordnung beträgt die magnetische Flussdichte $1 \mu\text{T}$ und über der Muffe selbst $2 \mu\text{T}$.

Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe
(36,08MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 1

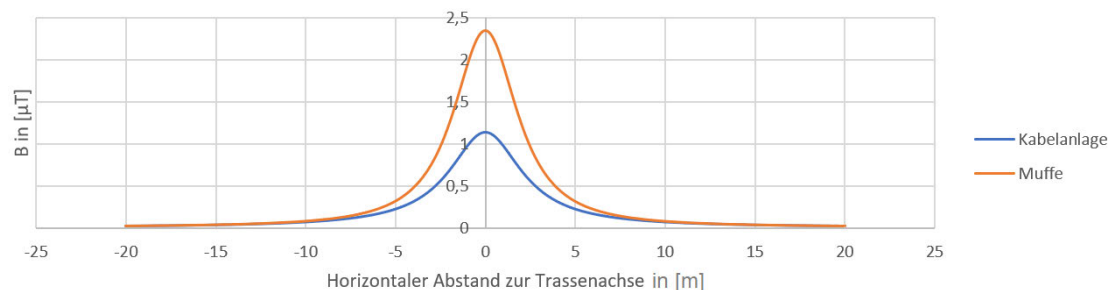


Abbildung 4.5: Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe mit Werten zum Zeitpunkt der Messung (36,08 MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 1 (20 cm Abstand zwischen Phasen an der Muffe)

Die Abbildung 4.5 zeigt das Maximum der magnetischen Flussdichte über der Muffe an. Dieser beträgt bei dem Muffenstandort 1 der Leitung 33 $2,35 \mu\text{T}$.

Für den Muffenstandort 2 der Leitung 33 wird auch eine zusätzliche Berechnung durchgeführt. Dafür wird in „WinField“ die Konstruktion so verändert, dass der Abstand zwischen den Phasen bei der Muffe 40 cm beträgt.

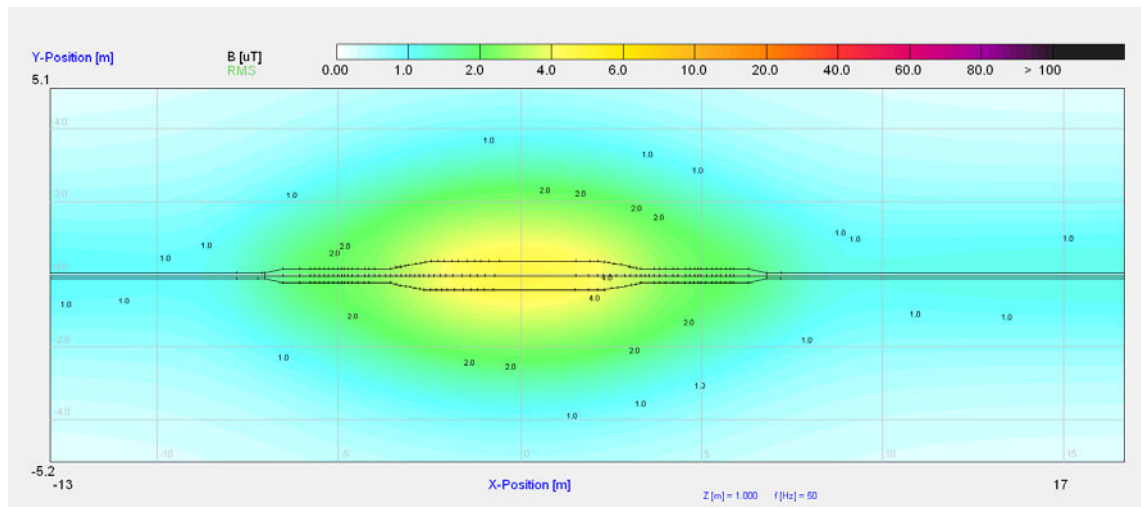


Abbildung 4.6: WinField - Simulation der Muffe mit Werten zum Zeitpunkt der Messung (35,64 MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 2 (40 cm Abstand zwischen Phasen an der Muffe)

Im Vergleich zur Abbildung 4.4 ist in Abbildung 4.6 eine Erhöhung der magnetischen Flussdichte zu sehen. Über der Kabelanlage in Dreiecksanordnung wird derselbe Wert von 1 μT erwartet. Im Zentrum über der Muffe ein Wert von ca. 5 μT .

Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe
(35,64MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 2

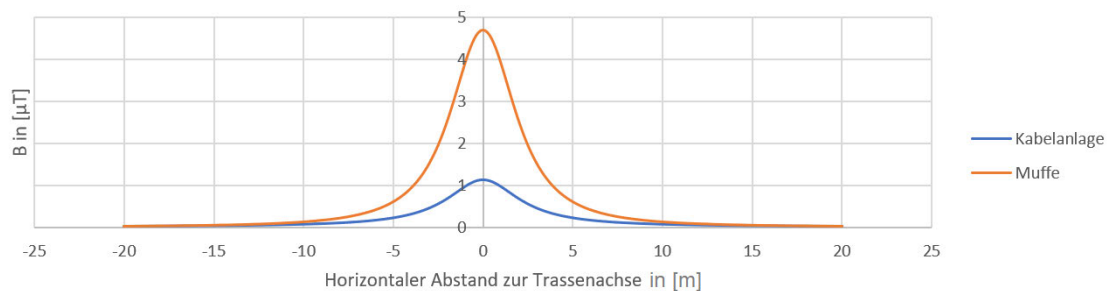


Abbildung 4.7: Magnetische Flussdichte über einer 110-kV-Kabelanlage/Muffe mit Werten zum Zeitpunkt der Messung (35,64 MVA) - Leitung 33 - Muffenstandort 2 (40 cm Abstand zwischen Phasen an der Muffe)

Die Abbildung 4.7 zeigt auch beim Muffenstandort 2 das Maximum der magnetischen Flussdichte der Muffe genauer an. Für die Messung ergibt sich ein maximaler Wert von 4,684 μT . Damit ist für die Messung eine magnetische Flussdichte von 2,35 μT für den Muffenstandort 1 und von 4,684 μT für den Muffenstandort 2 zu erwarten.

Die Messergebnisse im Messraster der beiden Muffenstandorte der Leitung 33 sind in den Abbildungen 4.8 und 4.9 zu sehen.

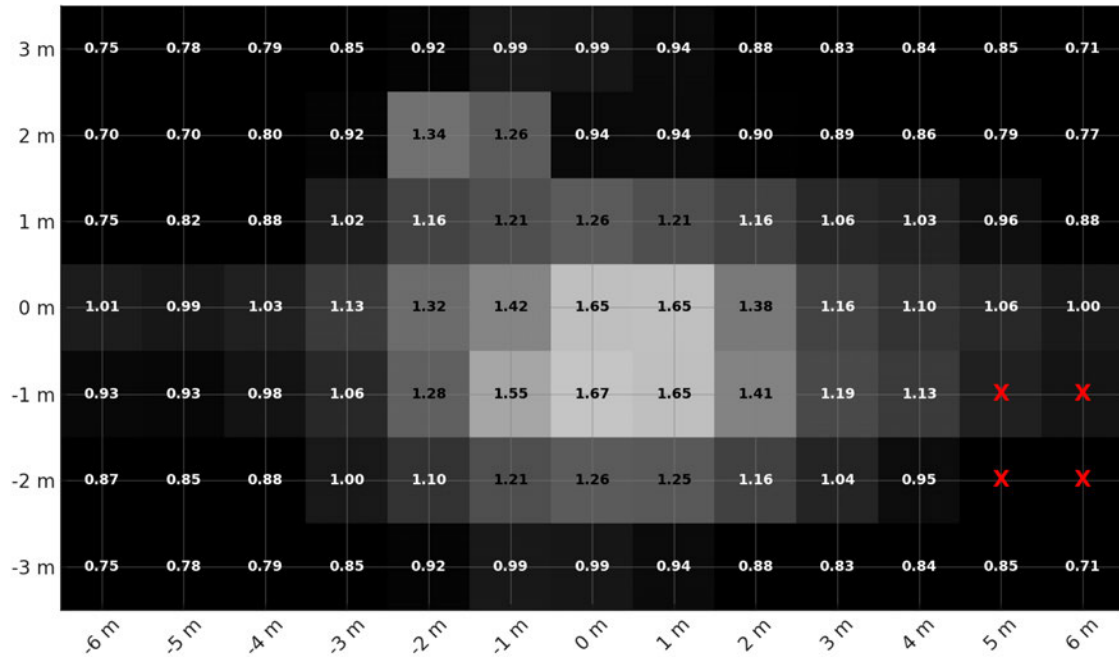


Abbildung 4.8: Messung der magnetischen Flussdichte am 1000-mm²-System (Momentane Leistung zum Zeitpunkt der Messung: 36,08 MVA) - Muffenstandort 1 dieser Leitung

Ebenfalls hier ist die Messung im selben Format realisiert, wie in Abbildung 4.3. Die roten Kreuze zeigen an, dass an diesem Ort keine Messung möglich ist. Die Werte reichen von 1,67 μT (um das Zentrum herum) bis hin zu ca. 0,7 μT (an den Rändern des Messbereichs). Ebenso, wie in Abbildung 4.3, ergibt sich der höchste Wert nicht direkt im Zentrum über der Muffe, sondern ist um 1 m auf der vertikalen Achse verschoben. In diesem Messraster ist die Symmetrie der magnetischen Flussdichte etwas besser sichtbar als in Abbildung 4.3, was mit der theoretischen Vorüberlegung übereinstimmt. Auch hier wird, wie im Vorkapitel, überprüft, ob der Grenzwert eingehalten wird.

$$B_{\text{MessMax,Ltg.33,M1}} = \frac{B_{\text{MessMax}, k_{\text{Ltg.33,M1}}}}{k_{\text{Ltg.33}}} \quad (38)$$

$$B_{\text{MessMax,Ltg.33,M1}} = \frac{1,67 \mu\text{T}}{0,2405} = 6,94 \mu\text{T} \quad (39)$$

Damit wird der Grenzwert der 26. BImSchV von 100 μT eingehalten.

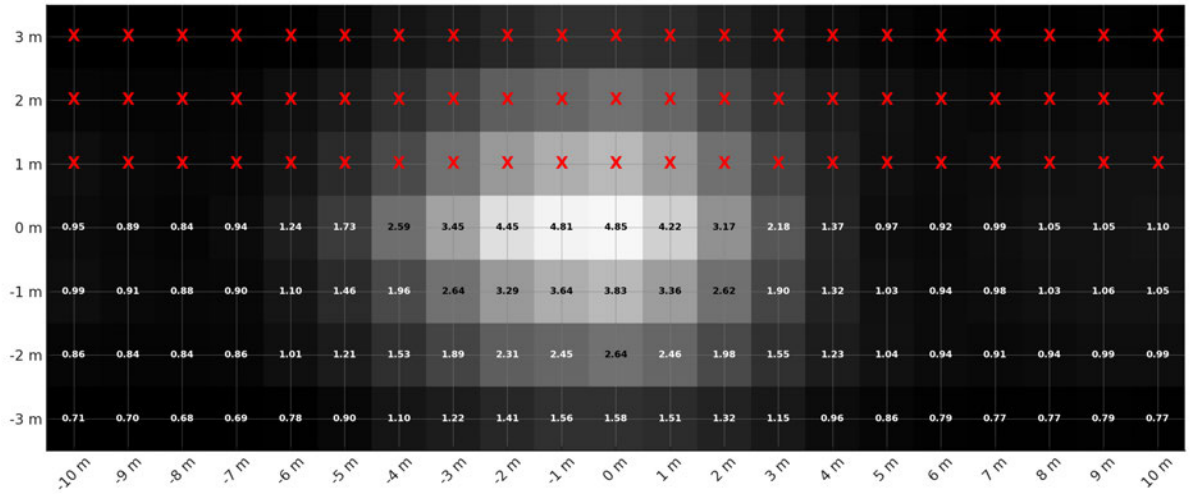


Abbildung 4.9: Messung der magnetischen Flussdichte am 1000-mm²-System (Momentane Leistung zum Zeitpunkt der Messung: 35,64 MVA) - Muffenstandort 2 dieser Leitung

In Abbildung 4.9 ist nun ein weiterer Muffenstandort derselben Leitung veranschaulicht. Um auch die Kabelanlage in Dreiecksanordnung näher zu betrachten, wurde hier das Raster um 4 m auf beiden Seiten verlängert. Leider ist es nicht möglich, das ganze Raster abzudecken, da sich die obere Hälfte des Rasters auf Privatgelände befindet. Die Werte reichen bei dieser Messung von 4,85 μT (im Zentrum über der Muffe) bis 0,95 μT (über der Kabelanlage in Dreiecksanordnung, Punkt(-10 m, 0 m) bis zu 0,71 μT in den Ecken. Eine Symmetrie ist ebenfalls in der vertikalen Achse zu erkennen. Die maximale magnetische Flussdichte anhand der Messung ist

$$B_{\text{MessMax,Ltg.33,M2}} = \frac{B_{\text{MessMax},k_{\text{Ltg.33,M2}}}}{k_{\text{Ltg.33}}} \quad (40)$$

$$B_{\text{MessMax,Ltg.33,M2}} = \frac{4,85 \mu\text{T}}{0,2376} = 20,41 \mu\text{T} \quad (41)$$

Damit liegt dieser Muffenstandort ebenfalls unter dem Grenzwert von 100 μT .

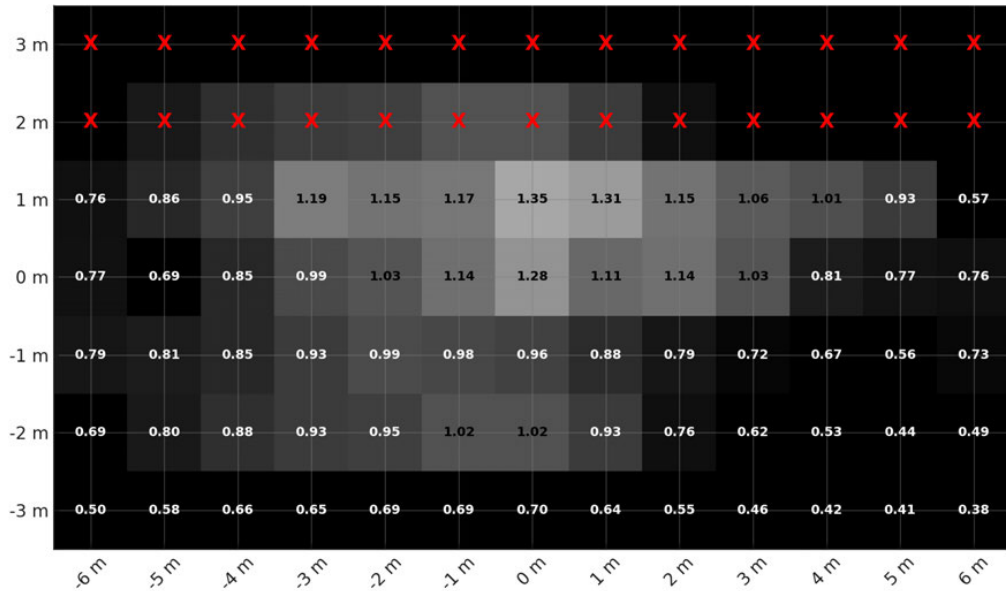
5 Vergleich von Berechnung und Messung

In diesem Kapitel wird die Theorie und die Praxis der Magnetfelder um 110-kV-Muffen verglichen. Dazu werden die Simulationen und Berechnungen, die mittels „WinField“ gemacht wurden, den Messungen gegenübergestellt. Ziel ist es, die Übereinstimmung, sowie Abweichungen zwischen Theorie und Praxis zu untersuchen und potenzielle Ursachen für Differenzen zu identifizieren.

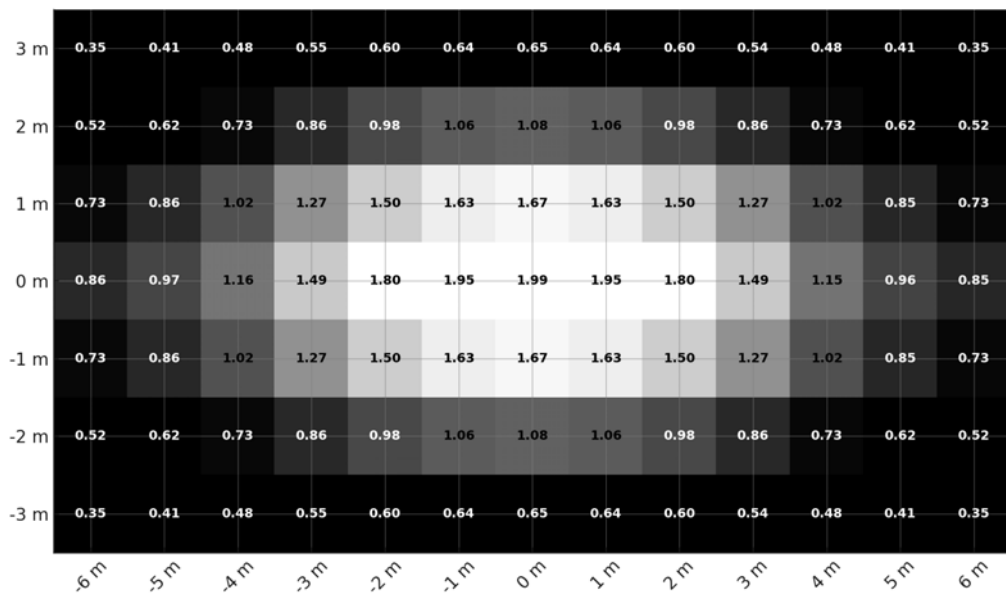
Für den besseren Vergleich werden die Berechnungen aus „WinField“ in das Format des Messrasters (wie in den Abbildungen 4.3, 4.8 und 4.9) übertragen. Der Vergleich wird unter den gleichen Belastungsfaktoren durchgeführt.

Zunächst werden die drei Messungen mit den dazugehörigen Simulationen separat miteinander verglichen und die Unterschiede ausschließlich benannt. Am Ende des Kapitels folgt eine Zusammenfassung der Faktoren für die Abweichung der magnetischen Flussdichte. Die Unterkapitel befinden sich auf den nachfolgenden Seiten.

5.1 Vergleich der Leitung 47 / Muffenstandort (300-mm²-Kabelanlage) mit Berechnung



(a) Raster der Messung der Muffe von Leitung 47



(b) Raster der Berechnung der Muffe von Leitung 47

Abbildung 5.1: Vergleich der Messergebnisse mit der theoretischen Berechnung der Muffe der Leitung 47 in Abhängigkeit des Belastungsfaktors $k_{Ltg.47}$

An Abbildung 5.1 werden die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Simulation deutlich erkennbar. Zu sehen ist, dass die Messwerte kleiner sind als in der theoretischen Berechnung. Wird der höchste Wert der beiden Raster entnommen, so ergibt sich folgende Abweichung:

- absolute Abweichung Δx :

$$\Delta x = x_{\text{mess}} - x_{\text{ref}} \quad (42)$$

$$\Delta x_{\text{Ltg.47}} = 1,35 \mu T - 1,99 \mu T = -0,64 \mu T \quad (43)$$

- relative Abweichung ε :

$$\varepsilon = \frac{x_{\text{mess}} - x_{\text{ref}}}{x_{\text{ref}}} \quad (44)$$

$$\varepsilon_{\text{Ltg.47}} = \frac{1,35 \mu T - 1,99 \mu T}{1,99 \mu T} = -0,3216 = -32,16 \% \quad (45)$$

Damit liegt der gemessene Wert 32,16 % unter dem theoretischen Wert. Es gibt auch Werte, die keine so starke Abweichung zeigen. Wird der Blick zum Beispiel auf den Punkt (0 m, -2 m) der beiden Abbildungen geworfen, ergibt das eine Abweichung von (unter Anwendung von (42) und (44)):

- absolute Abweichung Δx :

$$\Delta x_{\text{Ltg.47,(0 m, -2 m)}} = 1,02 \mu T - 1,08 \mu T = -0,06 \mu T \quad (46)$$

- relative Abweichung ε :

$$\varepsilon_{\text{Ltg.47,(0 m, -2 m)}} = \frac{1,02 \mu T - 1,08 \mu T}{1,08 \mu T} = -0,0556 = -5,56 \% \quad (47)$$

An diesem Punkt ist die Abweichung deutlich geringer. Jedoch ist nur der höchste Wert der magnetischen Flussdichte relevant, da dieser die Referenz für den Grenzwert der 26. BImSchV bildet. Des Weiteren liegt der größte Wert in der Theorie immer im Zentrum der Muffe (siehe Abb. 5.1b), weil das resultierende Magnetfeld dort am größten ist. In der Messung ist das Maximum jedoch ein wenig verschoben und liegt nicht im Punkt(0 m, 0 m), sondern im Punkt (0 m, 1 m) (siehe Abb. 5.1a).

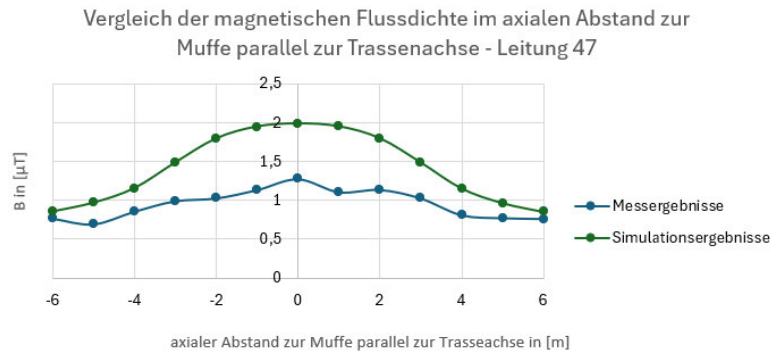
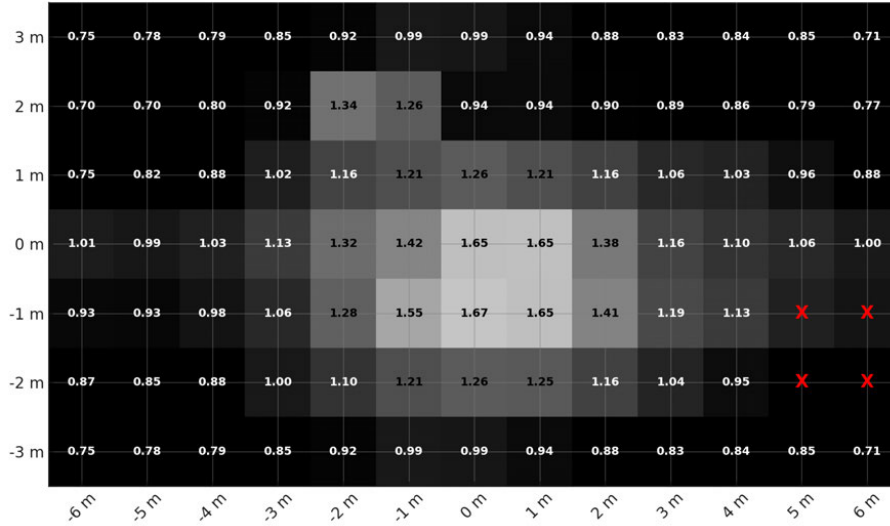


Abbildung 5.2: magnetische Flussdichte im axialen Abstand zur Muffe parallel zur Trassenachse im Vergleich der Theorie und der Praxis eines Muffenstandortes der Leitung 47

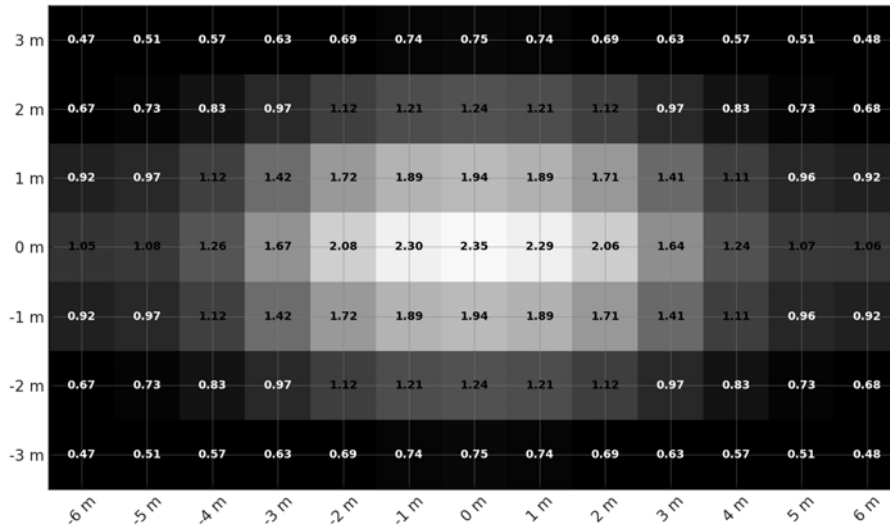
In Abbildung 5.2 ist die Symmetrie der magnetischen Flussdichte genauer zu sehen. Aufgrund der fehlenden Werte im horizontalen Abstand zur Trassenachse, kann nur die Symmetrie im axialen Abstand zur Muffe entlang der Trassenachse untersucht werden.

Die Simulationsergebnisse haben eine sehr deutliche Symmetrie aufzuweisen. Ebenfalls bei den Messergebnissen ist diese Symmetrie, auch wenn nicht so stark, zu erkennen. Der Verlauf ist dabei nicht so flüssig wie bei den Simulationsergebnissen.

5.2 Vergleich der Leitung 33/Muffenstandort 1 (1000-mm²-Kabelanlage) mit Berechnung



(a) Raster der Messung der Muffe von Leitung 33 / Muffenstandort 1



(b) Raster der Berechnung der Muffe von Leitung 33 / Muffenstandort 1

Abbildung 5.3: Vergleich der Messergebnisse mit der theoretischen Berechnung des Muffenstandortes 1 der Leitung 33 in Abhängigkeit des Belastungsfaktors $k_{\text{Ltg.33,M1}}$

Abbildung 5.3 zeigt den Vergleich der Messung und der Berechnung am Muffenstandort 1 der Leitung 33. Ebenfalls in dieser Abbildung ist zu erkennen, dass ein Großteil der Messwerte (siehe Abb. 5.3a) kleiner sind als die Simulationswerte (siehe Abb. 5.3b). Die Abweichung zwischen dem höchsten Simulationswert und dem Messwert beträgt (unter Anwendung der Formeln (42) und (44)):

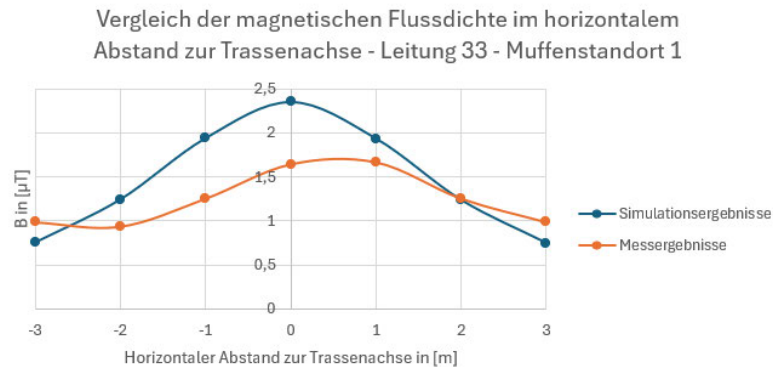
- absolute Abweichung Δx :

$$\Delta x_{\text{Ltg.33, M1}} = 1,67 \mu T - 2,35 \mu T = -0,68 \mu T \quad (48)$$

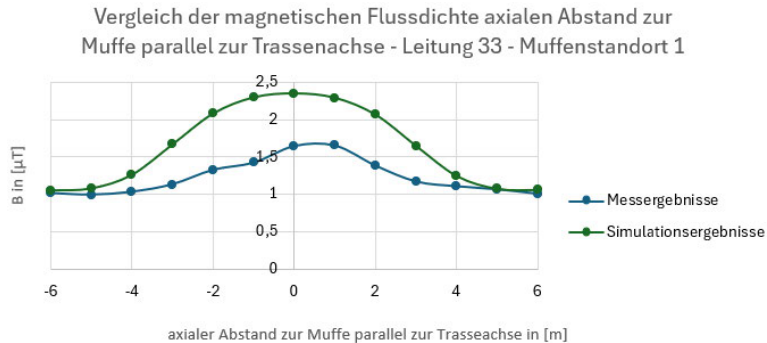
- relative Abweichung ε :

$$\varepsilon_{\text{Ltg.33, M1}} = \frac{1,67 \mu\text{T} - 2,35 \mu\text{T}}{2,35 \mu\text{T}} = -0,289 = -28,9 \% \quad (49)$$

Damit ist der Messwert um 28,9 % geringer als der theoretische Wert. Auch bei dieser Messung ist ein verschobenes Maximum zu sehen und der höchste Wert befindet sich nicht direkt über der Muffe. Anhand der nächsten Abbildung 5.4 lässt sich die Symmetrie der magnetischen Flussdichte mit dem Abstand quer und längs der Trassenachse analysieren.



(a) magnetische Flussdichte im horizontalem Abstand zur Trassenachse

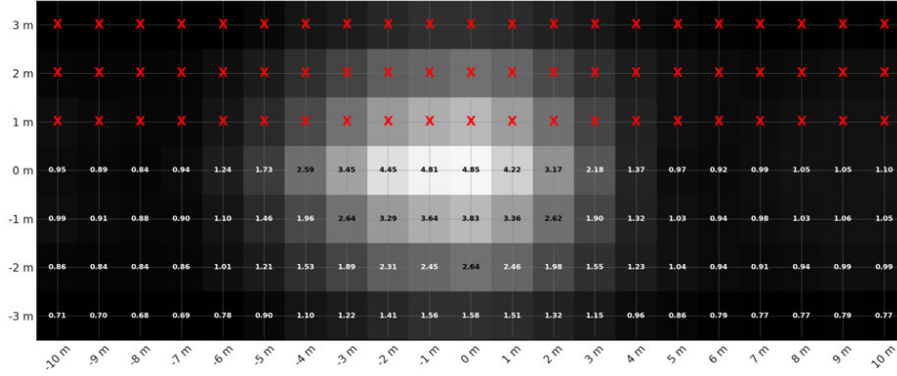


(b) magnetische Flussdichte im axialen Abstand zur Muffe parallel zur Trassenachse

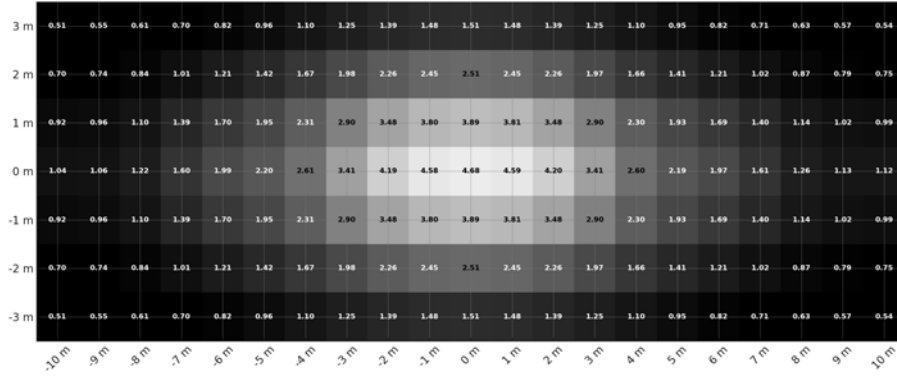
Abbildung 5.4: Vergleich der Messergebnisse mit der theoretischen Berechnung je nach Abstand zur Trasse des Muffenstandortes 1 der Leitung 33

In der Abbildung 5.4a ist zu erkennen, dass das Maximum um 1 m im axialen Abstand parallel zur Trassenachse verschoben ist. Aufgrund dessen ist in diesem Abstand keine wirkliche Symmetrie bei den Messergebnissen zu erkennen, bei den Simulationsergebnissen hingegen schon. An der Abbildung 5.4b ist eine leichte Symmetrie sichtbar. Das Simulationsergebnis weist erneut eine Symmetrie auf.

5.3 Vergleich der Leitung 33/Muffenstandort 2 (1000-mm²-Kabelanlage) mit Berechnung



(a) Raster der Messung der Muffe von Leitung 33 / Muffenstandort 2



(b) Raster der Berechnung der Muffe von Leitung 33 / Muffenstandort 2

Abbildung 5.5: Vergleich der Messergebnisse mit der theoretischen Berechnung des Muffenstandortes 2 der Leitung 33 in Abhängigkeit des Belastungsfaktors $k_{\text{Ltg.33,M2}}$

In Abbildung 5.5 ist der Vergleich der Messung und der Berechnung am Muffenstandort 2 der Leitung 33 zu sehen. Im Vergleich zu den vorherigen Muffenstandorten gibt es besonders um das Zentrum herum Werte, die in etwa in der gleichen Größenordnung liegen. Die relevante Abweichung zwischen dem höchsten Simulationswert und dem Messwert beträgt (unter Anwendung der Formeln (42) und (44)):

- absolute Abweichung Δx :

$$\Delta x_{\text{Ltg.33, M1}} = 4.85 \mu T - 4.68 \mu T = 0.17 \mu T \quad (50)$$

- relative Abweichung ε :

$$\varepsilon_{\text{Ltg.33, M1}} = \frac{4.85 \mu T - 4.68 \mu T}{4.68 \mu T} = 0.0363 = 3.63\% \quad (51)$$

Im Vergleich zu den vorherigen Muffenstandorten gibt es an diesem Muffenstandort eine positive Abweichung, welche aussagt, dass der theoretische Wert geringer ist, als der Messwert. In Abbildung 5.5a ist eine stärkere Abnahme mit größerem Abstand längs der Trassenachse, als in der Berechnung (siehe Abb. 5.5b), zu erkennen. Beispielsweise ist im

Punkt (-6 m, 0 m) der Messwert 1,24 μT , während der Berechnungswert an diesem Punkt noch bei 1,99 μT liegt.

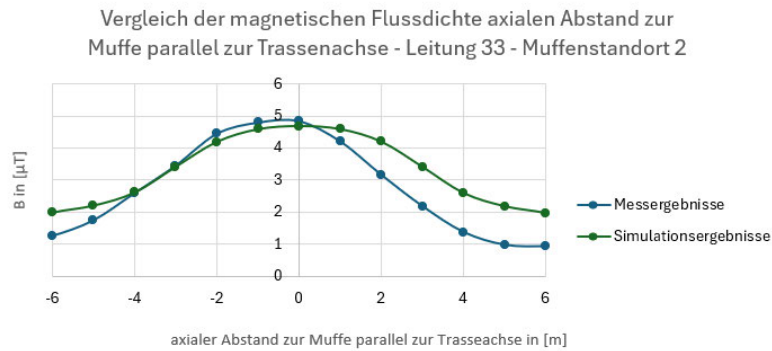


Abbildung 5.6: magnetische Flussdichte im axialen Abstand zur Muffe parallel zur Trassenachse im Vergleich der Theorie und der Praxis des Muffenstandortes 2 der Leitung 33

Aufgrund der fehlenden Werte im horizontalen Abstand zur Trassenachse, kann nur die Symmetrie im axialen Abstand zur Muffe entlang der Trassenachse untersucht werden (siehe Abbildung 5.6). Das Simulationsergebnis ist, wie erwartet, symmetrisch. Das Messergebnis hingegen lässt nur eine schwache Symmetrie erkennen. Außerdem ist erkennbar, dass die Messergebnisse zwischen -3 m und 0 m größer oder gleich der Simulationsergebnisse sind.

5.4 Einflussfaktoren für die Diskrepanzen

In den vorherigen Unterkapiteln wurden die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen Theorie und Praxis aufgezeigt. In diesem Abschnitt sollen die Ursachen der Diskrepanzen analysiert werden.

- **Fehlerhafte Dokumentationen**

Die Simulation und der Vergleich mit der Praxis sind auch sehr abhängig von der Korrektheit der Dokumentationen über die tatsächliche Konstruktion der Muffe. Bei der Leitung 47, zum Beispiel, gibt es keine vollständige Dokumentation über die Konstruktion der Muffe. Deshalb wurde angenommen, dass der typische Muffenaufbau erfolgt ist. Durch diese Annahme kann es zu Diskrepanzen kommen. Bei der Leitung 33 gibt es zwar eine Dokumentation über den Aufbau der Muffe, jedoch kann diese auch von dem tatsächlichen Aufbau abweichen. Schon wenige Zentimeter sind entscheidend für die Stärke des Magnetfeldes (siehe Kapitel 6). Zudem lässt sich oft nicht ermitteln, wie tief die Kabelanlage liegt. Liegt sie bspw. tiefer als angenommen, wird eine kleinere magnetische Flussdichte erwartet. Ohne korrekte Dokumentation muss jedoch von der typischen Verlegetiefe ausgegangen werden.

- **Ungenauere Positionierung des Sensors**

Ein Faktor ist die Positionierung des Sensors. Bereits kleine Abweichungen darin können Unterschiede in der gemessenen Magnetfeldstärke bewirken, da die magnetische Flussdichte mit dem Abstand abnimmt (siehe (6)).

- **Umliegende Kabelsysteme der Mittel- und Niederspannung**

Des Weiteren wird in der Simulation die Muffe als alleinstehend betrachtet. In der Praxis stehen sie jedoch nur sehr selten allein. Meistens gibt es in der Nähe noch Kabel der Nieder- und Mittelspannungsebene, die das resultierende Magnetfeld beeinflussen.

- **Einfluss von Störfeldern**

Zum Anderen handelt es sich bei dem Messgerät, um eine dreidimensionale Magnetfeldsonde, wodurch Störfelder die gemessenen Werte beeinflussen können.

- **Idealisierte Geometrien und perfekte Materialien**

WinField geht von idealisierten Geometrien und perfekten Materialien aus, die in der Realität Abweichungen aufweisen können.

6 Minimierung der Magnetfelder um Muffenstandorte

In diesem Kapitel werden Minimierungsmaßnahmen für die magnetischen Felder um 110-kV-Muffe identifiziert, bewertet und im Anschluss auf ihre praktische Umsetzbarkeit überprüft.

6.1 Identifizierung der Minimierungsmaßnahmen

Die magnetische Flussdichte lässt sich durch diese Maßnahmen verringern:

- **Reduzierung des Leiterabstands an der Muffe**

Eine Minimierungsmaßnahme ist, den Abstand der Leiter an der Muffe zu verringern. Der Grund hierfür ist die Überlagerung der Magnetfelder in einem Dreiphasensystem. Die Phasen sind um 120° phasenverschoben, und jede Phase erzeugt ein eigenes Magnetfeld gemäß dem Biot-Savart-Gesetz. Dieses Magnetfeld ist bei allen drei Phasen in der Richtung identisch. Dadurch zeigt das Magnetfeld lokal, also zwischen den Leitern, in eine andere Richtung, wodurch die Magnetfelder sich etwas aufheben und die magnetische Flussdichte geringer wird. Die magnetische Flussdichte ist jedoch antiproportional zum Abstand r (siehe (6)). Das heißt, je näher die Leiter beieinander liegen, desto stärker überlappen sich die Magnetfelder, und die resultierende magnetische Flussdichte außerhalb der Muffe nimmt ebenfalls ab.

- **Erhöhung der Verlegetiefe**

Eine weitere Minimierungsmaßnahme ist die Erhöhung der Verlegetiefe. Dadurch erhöht sich der Abstand r und die resultierende magnetische Flussdichte ist am Betrachtungspunkt 1 m über der Oberfläche geringer.

- **Änderung der Verlegeanordnung in die Dreiecksanordnung**

Die letzte untersuchte Minimierungsmaßnahme ist die Variation der Verlegeanordnung an der Muffe. Wie in Kapitel 2.2.2 erklärt, wird die Kabelanlage außerhalb der Muffe in einer Dreiecksanordnung verlegt, wodurch die magnetische Flussdichte verringert wird. Die Leiter bei der Muffe sind typischerweise in einer flachen Anordnung. Würden die Leiter an der Muffe jedoch auch in der Dreiecksanordnung liegen, ergäbe sich eine effektivere Kompensation der Magnetfelder, da sich die Magnetfelder besser überlagern können und das resultierende Magnetfeld schwächen kann.

Die Abschirmung fällt in dieser Arbeit nicht unter die Minimierungsmaßnahmen, da es technisch (siehe Kapitel 2.3.4) nicht gut realisierbar ist. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es ebenfalls nicht sinnvoll. Gute Materialien für die Abschirmung sind, aufgrund ihrer hohen Permeabilität, bspw. Mu-Metall oder Siliziumstahl. Diese sind jedoch kostspielig.

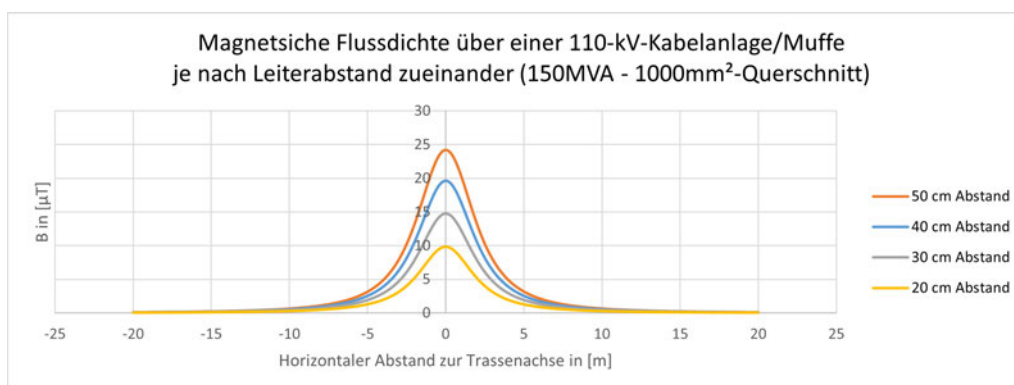
In dem nächsten Schritt werden die drei genannten Minimierungsmaßnahmen bewertet und auf ihre Effektivität geprüft.

6.2 Bewertung der Minimierungsmaßnahmen

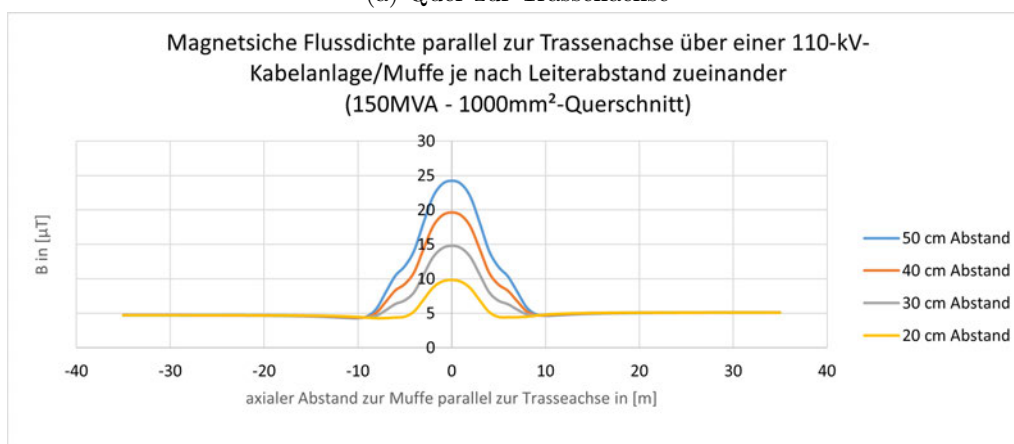
In diesem Unterkapitel werden die Minimierungsmaßnahmen aus Kapitel 6.1 bewertet. Für eine aussagekräftige Bewertung werden die Minimierungsmaßnahmen in dem Simulationsprogramm „WinField“ angewendet. Da die praktische Umsetzung aufgrund des viel zu hohen Aufwands nicht möglich ist, werden die Maßnahmen nur auf theoretischer Basis ausgewertet. Die Simulationen werden auf maximal betrieblicher Anlagenlast durchgeführt. Die Bewertung erfolgt bei der 1000-mm²-Kabelanlage (150 MVA). Ähnliche Auswirkungen der Minimierungsmaßnahmen sind ebenfalls bei den anderen Kabelanlagen zu erwarten. Für die Kabelanlage werden die drei Maßnahmen in die Simulation übernommen und im Anschluss analysiert:

- **Reduzierung des Leiterabstands an der Muffe**

In folgender Abbildung 6.1 ist die magnetische Flussdichte in vier verschiedenen Abständen (50 cm, 40 cm, 30 cm und 20 cm) quer und längs der Trassenachse zu sehen. 50 cm stellt damit den typischen Aufbau dar. In 10-cm-Schritten wird der Abstand in der Simulation bis zum Abstand von 20 cm verringert. Die Breite einer Hochspannungsmuffe beträgt ca. 20 cm. Der Abstand kann deshalb nicht kleiner sein als 20 cm zwischen den Leitermittelpunkten.



(a) Quer zur Trassenachse



(b) Längs zur Trassenachse

Abbildung 6.1: Magnetische Flussdichte über einer 1000-mm²-Kabelanlage je nach Leiterabstand zueinander

Abbildung 6.1a zeigt, dass die magnetische Flussdichte mit geringerem Abstand zwi-

schen den Phasen der Kabelanlage abnimmt. Dies stimmt mit der Vorüberlegung aus Kapitel 6.1 überein. In Abbildung 6.1b sind ebenfalls die positiven Auswirkungen der Abstandsverringering auf die magnetische Flussdichte erkennbar. In Tabelle 6.1 ist der relative Wert zwischen den Maxima der verschiedenen Abstände mit dem typischen 50-cm-Abstand zu sehen.

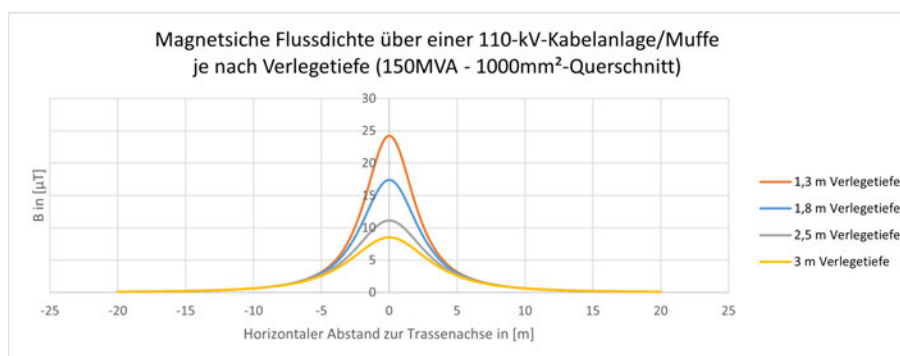
Abstand	Max. Flussdichte [μT]	Relativer Wert [%]
50 cm	24,218	100,000
40 cm	19,617	81,002
30 cm	14,778	61,021
20 cm	9,842	40,639

Tabelle 6.1: Maximale Flussdichte und relative Abweichung für verschiedene Abstände

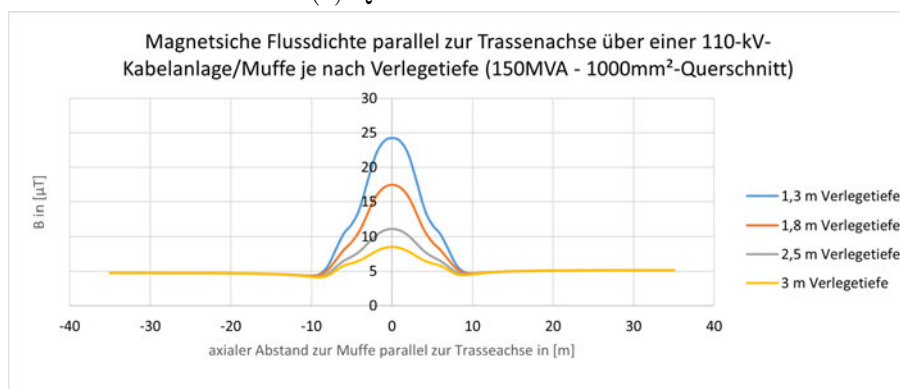
Anhand dieses Vergleichs ist deutlich zu sehen, wie stark das Magnetfeld um 110-kV-Muffe gesenkt werden kann, indem der Abstand der Phasen zueinander verringert wird. Die Abstandsverringering der Phasen bietet folglich, zunächst theoretisch, eine sehr gute Möglichkeit, die magnetische Flussdichte zu reduzieren.

- **Erhöhung der Verlegetiefe**

In der Abbildung 6.2 ist die magnetische Flussdichte je nach Verlegetiefe zu sehen. Der Betrachtungspunkt hierbei ist 1 m über der Oberfläche.



(a) Quer zur Trassenachse



(b) Längs zur Trassenachse

Abbildung 6.2: Magnetische Flussdichte über einer 1000-mm²-Kabelanlage je nach Verlegetiefe

In den Abbildungen 6.2a und 6.2b ist die Muffe in vier verschiedenen Tiefen verlegt. Dabei bildet 1,3 m den Standard. Hinzu kommt die Muffe in 1,8 m, in 2,5 m und in 3 m Tiefe. In beiden Abbildungen ist zu sehen, dass die maximale magnetische Flussdichte mit größerer Verlegetiefe abnimmt. Dies stimmt ebenfalls mit der theoretischen Vorüberlegung aus Kapitel 6.1 überein. In Tabelle 6.2 ist der relative Wert der maximalen magnetischen Flussdichte der Verlegetiefen zu der typischen Tiefe von 1,3 m zu sehen.

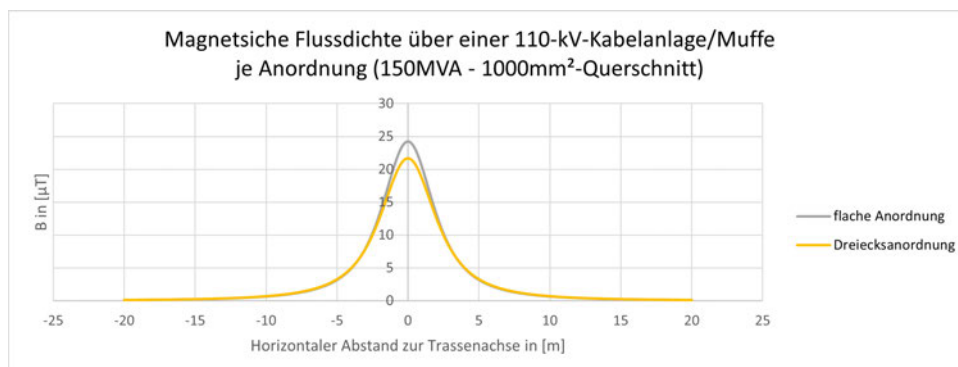
Verlegetiefe	Max. Flussdichte [μT]	Relativer Wert [%]
1,3 m	24,218	100,000
1,8 m	17,421	71,934
2,5 m	11,154	46,057
3 m	8,533	35,234

Tabelle 6.2: Maximale Flussdichte und relative Abweichung für verschiedene Abstände

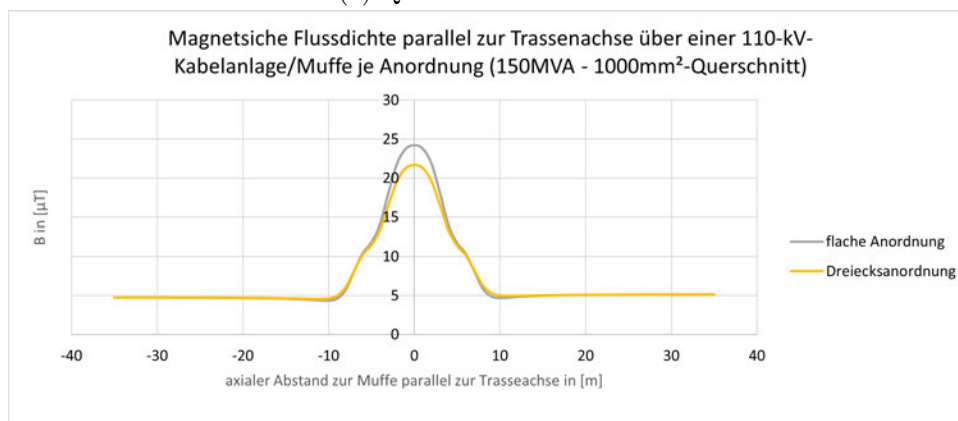
Ebenfalls gibt es bei der Erhöhung der Verlegetiefen eine Reduzierung der magnetischen Flussdichte über der Muffe. Daraus ergibt sich eine gute Minimierungsmaßnahme, das Magnetfeld um die Muffe zu reduzieren.

- **Änderung der Verlegeanordnung in die Dreiecksanordnung**

Anhand Abbildung 6.3 wird die Bedeutung der Anordnung auf die Minimierung analysiert.



(a) Quer zur Trassenachse



(b) Längs zur Trassenachse

Abbildung 6.3: Magnetische Flussdichte über einer 1000-mm²-Kabelanlage je Anordnung - quer zur Trassenachse

Durch die Änderung der Anordnung in die Dreiecksanordnung ist die resultierende magnetische Flussdichte über der Muffe nur leicht gesunken. Die Vorüberlegung basiert auf dem Verlauf der Kabel außerhalb der Muffe. Diese sind mit nur einem Abstand von 8 cm in einer Dreiecksanordnung verlegt. Bei dieser Simulation liegen die Phasen an der Muffe ebenfalls in der Dreiecksanordnung, haben aber trotzdem noch einen Abstand von 50 cm zueinander. Durch die Änderung der Anordnung können sich die Magnetfelder zwar etwas stärker kompensieren, der Abstand von 50 cm sorgt aber dafür, dass die magnetische Flussdichte noch recht hoch ist. In Tabelle 6.3 ist der relative Wert der maximalen magnetischen Flussdichte in Dreiecksanordnung zur flachen Anordnung zu sehen.

Anordnung	Max. Flussdichte [μT]	Relativer Wert [%]
Flach	24,218	100,000
Dreieck	21,696	89,586

Tabelle 6.3: Maximale Flussdichte und relative Abweichung für verschiedene Abstände

Die relative Abweichung beträgt lediglich 89,586 % und fällt im Vergleich zu den zwei anderen Minimierungsmaßnahmen geringer aus. Diese Maßnahme ebenfalls eine Magnetfeldreduzierung zur Folge. Damit stimmt auch dieses Ergebnis ebenfalls mit der theoretischen Vorüberlegung überein.

6.3 Praktische Umsetzbarkeit der Minimierungsmaßnahmen

Nachdem die Minimierungsmaßnahmen zur Reduzierung der magnetischen Flussdichte an Muffenstandorten identifiziert und bewertet wurden, ist es entscheidend, ihre praktische Umsetzbarkeit zu analysieren.

- **Reduzierung des Leiterabstands an der Muffe**

Die Verringerung des Abstands zwischen den Phasen an der Muffe führt zu einer besseren Kompensation der Magnetfelder.

Technisch gesehen ist diese Maßnahme jedoch nicht ohne Herausforderungen. Eine zu starke Annäherung könnte elektrische Überschläge (z.B. bei einer fehlerhaften Isolation) verursachen. Außerdem wird die Montage durch den reduzierten Abstand etwas herausfordernder, da die Monteure weniger Platz für die Arbeit haben.

Praktisch ist diese Maßnahme durchaus realisierbar und die Muffen der Leitung 33 aus Kapitel 4.2.2 zeigen bereits diese Minimierung der magnetischen Flussdichte auf. Dort haben die Phasen der Muffen (laut Dokumentation) einen Abstand von 40 cm und 20 cm.

- **Erhöhung der Verlegetiefe**

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine größere Verlegetiefe eine effektive Maßnahme zur Reduzierung des Magnetfeldes darstellt. Allerdings bringt diese Umsetzung höhere Tiefbaukosten mit sich, da tiefere Muffengruben ausgehoben werden müssen. Auch die Wartung wird dadurch erschwert, da zunächst tiefer gegraben werden muss, um zur Muffe zu gelangen. Zusätzlich würde die Temperatur in den Kabelsystemen durch die erhöhte Verlegetiefe zunehmen. Die maximale Temperatur für ein Kabelsystem beträgt 90°C und darf nicht überschritten werden.

Diese Maßnahme führt zwar dazu, dass die magnetische Flussdichte reduziert wird, jedoch steigen damit der Arbeitsaufwand sowie der finanzielle Aufwand. Die 26. BImSchV fordert die Minimierung der Magnetfelder, jedoch müssen sich die Maßnahmen im Rahmen der finanziellen und technischen Möglichkeiten bewegen (26. BImSchVVwV). Technisch ist es möglich, finanziell ein eher zu großer Aufwand.

- **Änderung der Verlegeanordnung in die Dreiecksanordnung**

Die Umstellung von einer flachen Anordnung auf eine Dreiecksanordnung an der Muffe hat ebenfalls eine Reduzierung der magnetischen Flussdichte zur Folge. Die Umstellung auf diese Anordnung stellt keine große Herausforderung dar. Lediglich die Halterungen der Kabel müssen etwas angepasst werden, wodurch die Montage etwas erschwert werden kann.

Von den drei Minimierungsmaßnahmen ist diese wohl am einfachsten zu realisieren, auch wenn die Reduzierung, im Vergleich zu den anderen Maßnahmen, am geringsten ist.

- **Kombination der Maßnahmen**

Die Simulationen basieren nur auf einer Maßnahme zur Minimierung der Magnetfelder. Mit der Kombination der Maßnahmen lässt sich ein noch besseres Ergebnis erzielen. Die Kombination aus Dreiecksanordnung und Verringerung des Abstands der Phasen an der Muffe ist praktisch und ohne sehr großen Aufwand realisierbar. Ob die Verlegetiefe ebenfalls erhöht werden muss, hängt vom Unternehmen ab, ob diese Maßnahme sich im Rahmen ihrer finanziellen Möglichkeit bewegt und ob es sich um einen vertretbaren Aufwand handelt.

7 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Analyse und Minimierung magnetischer Felder an 110-kV-Muffenstandorten untersucht. Die magnetische Flussdichte wurde dabei mithilfe von Simulationen sowie durch Messungen ermittelt und miteinander verglichen. Die Ergebnisse beweisen, dass die magnetische Flussdichte an Muffenstandorten deutlich höher ist, als entlang der übrigen Kabelstrecke. Dies ist insbesondere auf die veränderte Anordnung der Phasen an der Muffe zurückzuführen, wodurch die Feldkompensation schwächer ist als bei dem regulären Kabelverlauf.

Die durchgeführten Simulationen mit „WinField“ konnten die Messergebnisse weitgehend bestätigen. Allerdings gab es auch Abweichungen, die auf Messunsicherheiten, Umwelteinflüsse und die Dokumentationen zurückzuführen sind. Es zeigte sich, dass insbesondere der Leiterabstand, die Verlegetiefe sowie die Verlegeanordnung maßgebliche Einflussfaktoren auf das Magnetfeld darstellen.

Die 26. BImSchV setzt einen klaren Grenzwert von 100 μT für Hochspannungsanlagen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde überprüft, ob der Grenzwert sowohl in der Messung als auch in der Simulationen eingehalten wurde. Dieser Grenzwert wurde in beiden Fällen eingehalten. Neben dem Grenzwert beschreibt die 26. BImSchV das Minimierungsgebot, welches eine Reduzierung der magnetischen Flussdichte nach dem Stand der Technik, sofern diese wirtschaftlich und technisch vertretbar ist, fordert.

In der Arbeit wurden verschiedene Maßnahmen zur Reduktion der magnetischen Flussdichte untersucht. Eine Verringerung des Abstands zwischen den Phasen stellt eine effektive Möglichkeit dar, ist jedoch durch mechanische und thermische Anforderungen begrenzt. Eine größere Verlegetiefe bewirkt eine deutliche Reduktion der magnetischen Flussdichte, ist aber mit erheblichen baulichen und wirtschaftlichen Herausforderungen verbunden. Die Dreiecksanordnung der Kabel an der Muffe zeigte ebenfalls eine leichte Verbesserung der Feldkompensationen und ist mit nicht so großem Aufwand realisierbar. Letztlich ergibt sich, dass die Dreiecksanordnung und die Verringerung des Abstands der Phasen an den Muffen durchaus legitime Maßnahmen zur Minimierung der magnetischen Flussdichte sind. Die Erhöhung der Verlegetiefe ist mit hohen Kosten verbunden und bietet keine gute Maßnahme für das Unternehmen. Um eine signifikante Reduktion des Magnetfeldes zu erreichen ist es möglich, die Minimierungsmaßnahmen zu kombinieren.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen somit, dass die magnetischen Felder an 110-kV-Muffenstandorten durch gezielte Maßnahmen reduziert werden können. Weitere Forschungsarbeiten könnten sich auf die experimentelle Validierung über längere Zeiträume konzentrieren. Zudem könnten alternative Muffenkonstruktionen weiterentwickelt werden, um die magnetische Flussdichte zu reduzieren. Ein weiteres relevantes Forschungsgebiet ist die gesellschaftliche Wahrnehmung und Akzeptanz elektromagnetischer Felder. Eine verständliche Kommunikation der Messergebnisse könnte dazu beitragen, Bedenken in der Bevölkerung zu reduzieren.

Somit gibt es Minimierungsmaßnahmen, um das Magnetfeld weiterhin zu reduzieren, die aber teilweise technische und wirtschaftliche Probleme mit sich bringen. Die durchgeführten Analysen und Untersuchungen liefern wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Planungen im Bereich der Hochspannungsanlagen und können als Grundlage weiterer Optimierungs-

maßnahmen dienen.

Literatur

- [1] Energie und Agrarwirtschaft (BUKEA) Behörde für Umwelt Klima. *Vorsorgeempfehlung zu niederfrequenten magnetischen Feldern(NF-Vorsorgeempfehlung)*. 2022.
- [2] Belgian BioElectroMagnetics Group. *How to weaken electric and magnetic fields at home?* Zugriff am 23. Februar 2025. URL: <https://www.bbemg.uliege.be/how-to-weaken-electric-and-magnetic-fields-at-home/#:~:text=A%20first%20remark%20is%20necessary%3A,will%20create%20an%20impenetrable%20barrier>.
- [3] Belgian BioElectroMagnetics Group. *How to weaken electric and magnetic fields?* Zugriff am 23. Februar 2025. URL: <https://www.bbemg.uliege.be/files/EN/mf-home-en.pdf#:~:text=This%20is%20the%20magnetic%20permeability,for%20this%20type%20of%20shielding>.
- [4] Bundesamt für Strahlenschutz. *Biologische Wirkungen hochfrequenter Felder durch Energieabsorption und Erwärmung*. Zugriff am 23. Februar 2025. URL: https://www.bfs.de/DE/themen/emf/hff/wirkung/hff-nachgewiesen/hff-nachgewiesen_node.html.
- [5] Bundesamt für Strahlenschutz. *Feldbelastungen durch Hochspannungsleitungen: Freileitungen Erdkabel*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: https://www.bfs.de/DE/themen/emf/netzausbau/basiswissen/feldbelastungen/feldbelastungen_node.html.
- [6] Bundesamt für Strahlenschutz. *Haushaltsgeräte und Elektroinstallationen*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: https://www.bfs.de/DE/themen/emf/nff/anwendung/haushalt-elektro/haushalt-elektro_node.html.
- [7] Bundesamt für Strahlenschutz. *Mögliche Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Tiere und Pflanzen*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/emf/stellungnahmen/emf-tiere-und-pflanzen.html>.
- [8] Bundesamt für Strahlenschutz. *Quellen statischer und niederfrequenter Felder*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/nff/anwendung/anwendung.html>.
- [9] Bundesamt für Strahlenschutz. *Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: https://www.bfs.de/DE/themen/emf/nff/wirkung/wirkung_node.html.
- [10] Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE). *Elektrische und magnetische Felder der Stromversorgung*. Zugriff am 19. Februar 2025. 2017. URL: https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Asse/Wesentliche_Unterlagen/Archiv_Downloads/BfS_nicht_relevant/DE/broschueren/emf/stko-strom0d31.pdf.
- [11] Bundesministerium der Justiz. *26. BImSchV*. Zugriff am 19. Februar 2025. 2016. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/.
- [12] Bundesministerium der Justiz. *26. BImSchVVwV*. Zugriff am 19. Februar 2025. 2016. URL: https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund_26022016_159820101.htm.
- [13] Bundesministerium der Justiz. *EMFV*. Zugriff am 19. Februar 2025. 2016. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/emfv/>.

- [14] C.Y.Tan. Zugriff am 23. Februar 2025. URL: <https://beamdocs.fnal.gov/AD/DocDB/0046/004663/001/u.pdf#:~:text=But%20first%2C%20let%20me%20calculate,HZ%2C%20C%2B5%20is%20the%20permeability.>
- [15] Deutsche Gesellschaft für EMV-Technologie e.V. *Wirbelstrom*. Zugriff am 23. Februar 2025. URL: <https://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectid=ba9c0189%5Fe081%5F515d%5F74de9d04a55ddb16#:~:text=Durch%20Induktion%20in%20einem%20leitf%C3%A4higen,Die%20Eisenkerne%20von%20Elektromotoren%2C%20Transformatoren.>
- [16] Diagnose-Funk e.V. *BfS empfiehlt Vorsorgemaßnahmen*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://www.diagnose-funk.org/basiswissen/weitere-strahlungsquellen/hochspannungsleitungen/bfs-empfiehl-vorsorgemassnahmen.>
- [17] Elektronik Kompendium. *Skineneffekt*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/1102141.htm>.
- [18] EMF-Portal. *Felder im Haushalt*. Zugriff am 20. Februar 2025. URL: <https://www.emf-portal.org/de/cms/page/home/technology/low-frequency/exposure-sources-at-home.>
- [19] Forschungsinstitut Strom und Mobilkommunikation. *Magnetresonanztomographie*. Zugriff am 23. Februar 2025. URL: <https://www.emf.ethz.ch/de/emf-info/themen/technik/ausgewahlte-anwendungen/magnetresonanztomographie-mrt.>
- [20] Hamburger Energienetze GmbH. *110-kV-Kabelsysteme und Garnituren bis 1000 mm² Cu*. 2022.
- [21] Hamburger Energienetze GmbH. *110-kV-Kabelsysteme und Garnituren für 1800 mm² Cu*. 2022.
- [22] Hamburger Energienetze GmbH. *26. BImSchV Standardkatalog*. 2024.
- [23] Hamburger Energienetze GmbH. *Planungsgrundsätze für das Verteilungsnetz Hamburg*. 2023.
- [24] ICNIRP. *Richtlinien für die Begrenzung der Exposition durch zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (bis 300 GHz)*. Zugriff am 19. Februar 2025. 1998. URL: <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdlger.pdf>.
- [25] IEEE. *Magnetic field shielding concepts for power transmission lines*. Zugriff am 23. Februar 2025. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/668061/metrics#metrics.>
- [26] Marvin Jürgensen. *Vergleich der Magnetfelder um 360 MVA Leitungen in Abhängigkeiten der Leiteranordnung*. 2021.
- [27] Kompetenzinitiative e.V., Dr. rer. nat. Ulrich Warnke. *Die Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf Tiere*. Zugriff am 19. Februar 2025. 2009. URL: https://kompetenzinitiative.com/wp-content/uploads/2019/08/warnke_tiere-forschungsbericht.pdf.
- [28] LEIFI Physik. *Magnetfeld und Feldlinien*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/permanentmagnetismus/grundwissen/magnetfeld-und-feldlinien.>
- [29] LEIFI Physik. *Magnetfeld von geraden Leitern*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/stroeme-magnetisches-feld/grundwissen/magnetfeld-eines-geraden-leiters.>

- [30] Lernhelfer. *Wirbelströme*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/wirbelstroeme>.
- [31] Marlene Marinescu. *Elektrische und magnetische Felder*. Springer, 2012.
- [32] NKT. *Pre-moulded three-piece joint with heat-shrink outer protection*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: https://nkt.widen.net/content/46klskqea4/pdf/KSM_145-300_kV_DS_ENACC_HVACC_DS_EN.pdf?u=gjOnly.
- [33] Pfisterer. *Kabelgarnituren für Energienetze*. Zugriff am 19. Februar 2025. 2024. URL: <https://www.pfisterer.com/sites/default/files/downloads/HV-Cable-Catalog-2of3-DE-WEB.pdf>.
- [34] Physikerinnen. *Elektromagnetismus und seine Anwendung*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://physikerinnen.de/elektromagnetismus-und-seine-anwendungen>.
- [35] Stephan Rupp. *Angewandte Feld- und Potentialtheorie*. 2020. URL: https://www.srupp.de/ENT/TM20104_2_Angewandte_Feld_und_Potentialtheorie.pdf.
- [36] Umwelt-Sachsen. *Elektromagnetische Felder*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://www.umwelt.sachsen.de/elektromagnetische-felder-6276.html#:~:text=Elektromagnetische%20Felder%20werden%20anhand%20ihrer,elektrische%20und%20magnetische%20Gleichfelder%20unterschieden..>
- [37] *Verteilungsnetzbetreiber - Aufgaben*. Zugriff am 19. Februar 2025. URL: <https://www.hamburger-energienetze.de/energie-der-zukunft/stromnetz-der-zukunft/verteilstromnetzbetreiber>.
- [38] Wandel Goltermann. *EFA-3*. Zugriff am 23. Februar 2025. URL: https://www.promete.it/scheda_efa3.pdf.
- [39] WinField. *WinField-Benutzerhandbuch - Berechnungsmethodik*. 2016.
- [40] Hans A. Wolfsperger. *Elektromagnetische Schirmung*. Springer, 2008.

A Anhang

A.1 Messwerte

A1.1 Messwerte Leitung 47

Wert	Zeit	Datum	Filter
1.1670E-06	10:00:27	07.10.24	50Hz
1.1100E-06	10:00:34	07.10.24	50Hz
1.1399E-06	10:00:41	07.10.24	50Hz
1.0293E-06	10:00:48	07.10.24	50Hz
8.1010E-07	10:00:55	07.10.24	50Hz
7.7170E-07	10:01:01	07.10.24	50Hz
7.6202E-07	10:01:07	07.10.24	50Hz
1.2787E-06	10:02:57	07.10.24	50Hz
1.1373E-06	10:03:05	07.10.24	50Hz
1.0292E-06	10:03:12	07.10.24	50Hz
9.9217E-07	10:03:17	07.10.24	50Hz
8.5451E-07	10:03:23	07.10.24	50Hz
6.9072E-07	10:03:28	07.10.24	50Hz
7.6647E-07	10:06:18	07.10.24	50Hz
7.6298E-07	10:06:24	07.10.24	50Hz
8.5595E-07	10:06:30	07.10.24	50Hz
9.4729E-07	10:06:36	07.10.24	50Hz
1.1893E-06	10:06:44	07.10.24	50Hz
1.1512E-06	10:06:50	07.10.24	50Hz
1.1679E-06	10:06:56	07.10.24	50Hz
1.3541E-06	10:07:39	07.10.24	50Hz
1.3062E-06	10:07:45	07.10.24	50Hz
1.1520E-06	10:07:51	07.10.24	50Hz
1.0585E-06	10:07:58	07.10.24	50Hz
1.0120E-06	10:08:04	07.10.24	50Hz
9.3231E-07	10:08:09	07.10.24	50Hz
5.6700E-07	10:10:18	07.10.24	50Hz
7.8959E-07	10:10:21	07.10.24	50Hz
8.1111E-07	10:10:26	07.10.24	50Hz
8.5276E-07	10:10:30	07.10.24	50Hz
9.3436E-07	10:10:35	07.10.24	50Hz
9.9357E-07	10:10:39	07.10.24	50Hz
9.8063E-07	10:10:44	07.10.24	50Hz
9.5602E-07	10:10:49	07.10.24	50Hz
8.7767E-07	10:10:54	07.10.24	50Hz
7.8905E-07	10:10:59	07.10.24	50Hz
7.2450E-07	10:11:03	07.10.24	50Hz
6.7234E-07	10:11:07	07.10.24	50Hz
5.5621E-07	10:11:11	07.10.24	50Hz
7.3147E-07	10:12:57	07.10.24	50Hz

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung der Tabelle

Wert	Zeit	Datum	Filter
6.8501E-07	10:13:02	07.10.24	50Hz
7.9855E-07	10:13:07	07.10.24	50Hz
8.8459E-07	10:13:11	07.10.24	50Hz
9.3413E-07	10:13:16	07.10.24	50Hz
9.4773E-07	10:13:22	07.10.24	50Hz
1.0234E-06	10:13:27	07.10.24	50Hz
1.0198E-06	10:13:32	07.10.24	50Hz
9.3404E-07	10:13:36	07.10.24	50Hz
7.6206E-07	10:13:41	07.10.24	50Hz
6.1809E-07	10:13:45	07.10.24	50Hz
5.3404E-07	10:13:49	07.10.24	50Hz
4.4323E-07	10:13:53	07.10.24	50Hz
4.9053E-07	10:14:57	07.10.24	50Hz
5.0382E-07	10:15:02	07.10.24	50Hz
5.7901E-07	10:15:06	07.10.24	50Hz
6.5644E-07	10:15:10	07.10.24	50Hz
6.4809E-07	10:15:13	07.10.24	50Hz
6.9402E-07	10:15:17	07.10.24	50Hz
6.8926E-07	10:15:21	07.10.24	50Hz
6.9678E-07	10:15:27	07.10.24	50Hz
6.3750E-07	10:15:31	07.10.24	50Hz
5.4717E-07	10:15:36	07.10.24	50Hz
4.5994E-07	10:15:40	07.10.24	50Hz
4.1751E-07	10:15:45	07.10.24	50Hz
4.1455E-07	10:15:50	07.10.24	50Hz

A1.2 Messwerte Leitung 33

Wert	Zeit	Datum	Filter
6.9971E-07	12:16:45	15.10.24	50Hz
7.0159E-07	12:16:52	15.10.24	50Hz
7.9706E-07	12:17:00	15.10.24	50Hz
9.1883E-07	12:17:07	15.10.24	50Hz
1.3421E-06	12:17:14	15.10.24	50Hz
1.2607E-06	12:17:22	15.10.24	50Hz
9.3785E-07	12:17:30	15.10.24	50Hz
9.3988E-07	12:17:35	15.10.24	50Hz
9.0411E-07	12:17:39	15.10.24	50Hz
8.9225E-07	12:17:43	15.10.24	50Hz
8.6393E-07	12:17:48	15.10.24	50Hz
7.9389E-07	12:17:52	15.10.24	50Hz
7.6611E-07	12:17:57	15.10.24	50Hz
7.4548E-07	12:19:02	15.10.24	50Hz
8.1625E-07	12:19:08	15.10.24	50Hz
8.8014E-07	12:19:13	15.10.24	50Hz
1.0199E-06	12:19:19	15.10.24	50Hz
1.1619E-06	12:19:29	15.10.24	50Hz
1.2093E-06	12:19:35	15.10.24	50Hz
1.2564E-06	12:19:45	15.10.24	50Hz
1.2119E-06	12:19:54	15.10.24	50Hz
1.1551E-06	12:19:59	15.10.24	50Hz
1.0631E-06	12:20:05	15.10.24	50Hz
1.0337E-06	12:20:10	15.10.24	50Hz
9.6233E-07	12:20:14	15.10.24	50Hz
8.8035E-07	12:20:19	15.10.24	50Hz
1.0123E-06	12:21:17	15.10.24	50Hz
9.9013E-07	12:21:22	15.10.24	50Hz
1.0279E-06	12:21:28	15.10.24	50Hz
1.1300E-06	12:21:34	15.10.24	50Hz
1.3249E-06	12:21:40	15.10.24	50Hz
1.4216E-06	12:21:48	15.10.24	50Hz
1.6467E-06	12:21:53	15.10.24	50Hz
1.6523E-06	12:21:59	15.10.24	50Hz
1.3785E-06	12:22:11	15.10.24	50Hz
1.1647E-06	12:22:16	15.10.24	50Hz
1.1020E-06	12:22:21	15.10.24	50Hz
1.0595E-06	12:22:26	15.10.24	50Hz
1.0001E-06	12:22:30	15.10.24	50Hz
9.3345E-07	12:24:13	15.10.24	50Hz
9.2771E-07	12:24:20	15.10.24	50Hz
9.7585E-07	12:24:27	15.10.24	50Hz
1.0571E-06	12:24:32	15.10.24	50Hz

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung der Tabelle

Wert	Zeit	Datum	Filter
1.2773E-06	12:24:38	15.10.24	50Hz
1.5500E-06	12:24:43	15.10.24	50Hz
1.6697E-06	12:24:48	15.10.24	50Hz
1.6474E-06	12:24:53	15.10.24	50Hz
1.4134E-06	12:24:58	15.10.24	50Hz
1.1927E-06	12:25:03	15.10.24	50Hz
1.1299E-06	12:25:10	15.10.24	50Hz
8.6943E-07	12:26:10	15.10.24	50Hz
8.4683E-07	12:26:18	15.10.24	50Hz
8.8162E-07	12:26:23	15.10.24	50Hz
9.9682E-07	12:26:30	15.10.24	50Hz
1.0960E-06	12:26:36	15.10.24	50Hz
1.2076E-06	12:26:42	15.10.24	50Hz
1.2571E-06	12:26:47	15.10.24	50Hz
1.2525E-06	12:26:52	15.10.24	50Hz
1.1604E-06	12:27:58	15.10.24	50Hz
1.0446E-06	12:27:03	15.10.24	50Hz
9.4770E-07	12:27:08	15.10.24	50Hz
7.5323E-07	12:28:54	15.10.24	50Hz
7.8293E-07	12:29:00	15.10.24	50Hz
7.8961E-07	12:29:04	15.10.24	50Hz
8.4777E-07	12:29:09	15.10.24	50Hz
9.1648E-07	12:29:13	15.10.24	50Hz
9.9414E-07	12:29:18	15.10.24	50Hz
9.8790E-07	12:29:23	15.10.24	50Hz
9.4371E-07	12:29:28	15.10.24	50Hz
8.8427E-07	12:29:32	15.10.24	50Hz
8.3371E-07	12:29:37	15.10.24	50Hz
8.4310E-07	12:29:41	15.10.24	50Hz
8.4768E-07	12:29:45	15.10.24	50Hz
7.1048E-07	12:29:50	15.10.24	50Hz
7.4625E-07	12:30:54	15.10.24	50Hz
7.7612E-07	12:31:00	15.10.24	50Hz
7.8422E-07	12:31:04	15.10.24	50Hz
8.4777E-07	12:31:09	15.10.24	50Hz
9.2456E-07	12:31:13	15.10.24	50Hz
9.9142E-07	12:31:18	15.10.24	50Hz
9.9423E-07	12:31:23	15.10.24	50Hz
9.3952E-07	12:31:28	15.10.24	50Hz
8.8130E-07	12:31:32	15.10.24	50Hz
8.3461E-07	12:31:37	15.10.24	50Hz
8.3842E-07	12:31:41	15.10.24	50Hz
8.5431E-07	12:31:45	15.10.24	50Hz
7.1422E-07	12:31:50	15.10.24	50Hz
9.4606E-07	12:53:46	15.10.24	50Hz

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung der Tabelle

Wert	Zeit	Datum	Filter
8.9063E-07	12:53:57	15.10.24	50Hz
8.4314E-07	12:54:02	15.10.24	50Hz
9.3772E-07	12:54:07	15.10.24	50Hz
1.2444E-06	12:54:12	15.10.24	50Hz
1.7335E-06	12:54:16	15.10.24	50Hz
2.5884E-06	12:54:23	15.10.24	50Hz
3.4527E-06	12:54:28	15.10.24	50Hz
4.4549E-06	12:54:34	15.10.24	50Hz
4.8074E-06	12:54:41	15.10.24	50Hz
4.8506E-06	12:54:47	15.10.24	50Hz
4.2168E-06	12:54:56	15.10.24	50Hz
3.1650E-06	12:55:07	15.10.24	50Hz
2.1811E-06	12:55:13	15.10.24	50Hz
1.3680E-06	12:55:20	15.10.24	50Hz
9.6898E-07	12:55:25	15.10.24	50Hz
9.2471E-07	12:55:31	15.10.24	50Hz
9.9083E-07	12:55:36	15.10.24	50Hz
1.0547E-06	12:55:41	15.10.24	50Hz
1.0489E-06	12:55:46	15.10.24	50Hz
1.0963E-06	12:55:50	15.10.24	50Hz
9.8885E-07	12:59:21	15.10.24	50Hz
9.1378E-07	12:59:32	15.10.24	50Hz
8.8099E-07	12:59:41	15.10.24	50Hz
8.9732E-07	12:59:45	15.10.24	50Hz
1.1039E-06	12:59:49	15.10.24	50Hz
1.4610E-06	12:59:53	15.10.24	50Hz
1.9642E-06	12:59:57	15.10.24	50Hz
2.6400E-06	13:00:03	15.10.24	50Hz
3.2943E-06	13:00:07	15.10.24	50Hz
3.6432E-06	13:00:13	15.10.24	50Hz
3.8321E-06	13:00:20	15.10.24	50Hz
3.3618E-06	13:00:25	15.10.24	50Hz
2.6162E-06	13:00:29	15.10.24	50Hz
1.9024E-06	13:00:33	15.10.24	50Hz
1.3216E-06	13:00:38	15.10.24	50Hz
1.0306E-06	13:00:42	15.10.24	50Hz
9.3967E-07	13:00:47	15.10.24	50Hz
9.8130E-07	13:00:52	15.10.24	50Hz
1.0296E-06	13:00:56	15.10.24	50Hz
1.0572E-06	13:01:00	15.10.24	50Hz
1.0542E-06	13:01:05	15.10.24	50Hz
8.6440E-07	13:01:33	15.10.24	50Hz
8.3905E-07	13:01:39	15.10.24	50Hz
8.3636E-07	13:01:48	15.10.24	50Hz
8.6389E-07	13:01:54	15.10.24	50Hz

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Fortsetzung der Tabelle

Wert	Zeit	Datum	Filter
1.0053E-06	13:01:59	15.10.24	50Hz
1.2143E-06	13:02:04	15.10.24	50Hz
1.5342E-06	13:02:12	15.10.24	50Hz
1.8901E-06	13:02:17	15.10.24	50Hz
2.3123E-06	13:02:23	15.10.24	50Hz
2.4547E-06	13:02:29	15.10.24	50Hz
2.6370E-06	13:02:34	15.10.24	50Hz
2.4586E-06	13:02:39	15.10.24	50Hz
1.9846E-06	13:02:46	15.10.24	50Hz
1.5535E-06	13:02:52	15.10.24	50Hz
1.2303E-06	13:02:56	15.10.24	50Hz
1.0352E-06	13:03:02	15.10.24	50Hz
9.3662E-07	13:03:07	15.10.24	50Hz
9.1193E-07	13:03:13	15.10.24	50Hz
9.4329E-07	13:03:19	15.10.24	50Hz
9.9263E-07	13:03:24	15.10.24	50Hz
9.9375E-07	13:03:29	15.10.24	50Hz
7.1437E-07	13:04:09	15.10.24	50Hz
7.0534E-07	13:04:16	15.10.24	50Hz
6.8114E-07	13:04:28	15.10.24	50Hz
6.9546E-07	13:04:38	15.10.24	50Hz
7.8109E-07	13:04:47	15.10.24	50Hz
8.9730E-07	13:04:55	15.10.24	50Hz
1.1038E-06	13:05:02	15.10.24	50Hz
1.2234E-06	13:05:12	15.10.24	50Hz
1.4088E-06	13:05:18	15.10.24	50Hz
1.5631E-06	13:05:27	15.10.24	50Hz
1.5787E-06	13:05:32	15.10.24	50Hz
1.5053E-06	13:05:39	15.10.24	50Hz
1.3165E-06	13:05:45	15.10.24	50Hz
1.1523E-06	13:05:51	15.10.24	50Hz
9.6081E-07	13:05:57	15.10.24	50Hz
8.5726E-07	13:06:02	15.10.24	50Hz
7.8693E-07	13:06:07	15.10.24	50Hz
7.6604E-07	13:06:13	15.10.24	50Hz
7.7329E-07	13:06:18	15.10.24	50Hz
7.8819E-07	13:06:22	15.10.24	50Hz
7.6995E-07	13:06:31	15.10.24	50Hz

A.2 Stromstärkemessung

A.2.1 Leitung 47

		T1 I2
07.10.2024	09:55	64.70
07.10.2024	09:56	64.70
07.10.2024	09:57	64.70
07.10.2024	09:58	64.70
07.10.2024	09:59	64.70
07.10.2024	10:00	64.70
07.10.2024	10:01	64.70
07.10.2024	10:02	64.70
07.10.2024	10:03	64.70
07.10.2024	10:04	64.70
07.10.2024	10:05	64.70
07.10.2024	10:06	64.70
07.10.2024	10:07	64.70
07.10.2024	10:08	64.70
07.10.2024	10:09	64.70
07.10.2024	10:10	64.70
07.10.2024	10:11	64.70
07.10.2024	10:12	64.70
07.10.2024	10:13	64.70
07.10.2024	10:14	64.70
07.10.2024	10:15	64.70
07.10.2024	10:16	64.70

A.2.2 Leitung 33

33 12	
15.10.2024 12:00	100.80
15.10.2024 12:01	100.80
15.10.2024 12:02	100.80
15.10.2024 12:03	100.80
15.10.2024 12:04	100.80
15.10.2024 12:05	101.77
15.10.2024 12:06	100.80
15.10.2024 12:07	104.47
15.10.2024 12:08	105.60
15.10.2024 12:09	106.96
15.10.2024 12:10	105.60
15.10.2024 12:11	165.38
15.10.2024 12:12	184.23
15.10.2024 12:13	187.20
15.10.2024 12:14	187.20
15.10.2024 12:15	185.25
15.10.2024 12:16	183.97
15.10.2024 12:17	187.03
15.10.2024 12:18	183.85
15.10.2024 12:19	187.13
15.10.2024 12:20	189.75
15.10.2024 12:21	186.72
15.10.2024 12:22	187.20
15.10.2024 12:23	194.50
15.10.2024 12:24	194.36
15.10.2024 12:25	192.86
15.10.2024 12:26	194.23
15.10.2024 12:27	193.35
15.10.2024 12:28	192.00
15.10.2024 12:29	187.86
15.10.2024 12:30	188.97
15.10.2024 12:31	187.20
15.10.2024 12:32	188.67
15.10.2024 12:33	196.27
15.10.2024 12:34	187.86
15.10.2024 12:35	190.51
15.10.2024 12:36	193.30
15.10.2024 12:37	193.05
15.10.2024 12:38	188.52
15.10.2024 12:39	189.31
15.10.2024 12:40	188.62
15.10.2024 12:41	190.25
15.10.2024 12:42	191.61
15.10.2024 12:43	192.92
15.10.2024 12:44	189.08
15.10.2024 12:45	193.99
15.10.2024 12:46	192.00
15.10.2024 12:47	190.22

33 I2	
15.10.2024 12:43	192.92
15.10.2024 12:44	189.08
15.10.2024 12:45	193.99
15.10.2024 12:46	192.00
15.10.2024 12:47	190.22
15.10.2024 12:48	191.56
15.10.2024 12:49	187.20
15.10.2024 12:50	188.48
15.10.2024 12:51	188.32
15.10.2024 12:52	188.27
15.10.2024 12:53	187.41
15.10.2024 12:54	189.79
15.10.2024 12:55	187.20
15.10.2024 12:56	183.93
15.10.2024 12:57	189.08
15.10.2024 12:58	188.00
15.10.2024 12:59	183.82
15.10.2024 13:00	185.93
15.10.2024 13:01	185.94
15.10.2024 13:02	187.59
15.10.2024 13:03	189.21
15.10.2024 13:04	184.40
15.10.2024 13:05	187.20
15.10.2024 13:06	188.81
15.10.2024 13:07	187.23
15.10.2024 13:08	187.80
15.10.2024 13:09	188.24
15.10.2024 13:10	187.20
15.10.2024 13:11	188.51
15.10.2024 13:12	187.20
15.10.2024 13:13	187.97
15.10.2024 13:14	190.07
15.10.2024 13:15	189.98
15.10.2024 13:16	186.88
15.10.2024 13:17	188.16
15.10.2024 13:18	185.88
15.10.2024 13:19	184.49
15.10.2024 13:20	183.93
15.10.2024 13:21	182.40
15.10.2024 13:22	182.40
15.10.2024 13:23	185.05
15.10.2024 13:24	142.48
15.10.2024 13:25	105.60
15.10.2024 13:26	104.40
15.10.2024 13:27	106.22
15.10.2024 13:28	105.60
15.10.2024 13:29	105.60
15.10.2024 13:30	105.60

A.3 Weitere Anhänge

Der Anhang zur Arbeit befindet sich auf CD und kann beim Erstgutachter eingesehen werden. In dieser Arbeit befinden sich lediglich die Messwerte im Anhang des Haupttextes. Auf der CD sind die Messwerte, die Simulationsdateien, Simulationsergebnisse sowie die Excel-Dateien.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

Analyse und Minimierung magnetischer Felder
um 110-kV-Muldenstandorte

selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und die den verwendeten Quellen und Hilfsmitteln wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Hamburg, 26.02.2025
Ort, Datum



Unterschrift