

Fachhochschule Lausitz
Studiengang Elektrotechnik

Diplomarbeit

Stefan Urbank

Magnetisches Restfeld von Transformatoren und
Kabelverbindungen

Fachhochschule Lausitz
Studiengang Elektrotechnik

Diplomarbeit

Stefan Urbank

Matrikel Nr. 202709

Thema:

Magnetisches Restfeld von Transformatoren und
Kabelverbindungen

Diplombetreuer: Prof. Dr.- Ing. Lehmann
Prof. Dr.- Ing. Schwartz
Dr. rer. nat. Plotzke

Abgabe der Arbeit: 01. November 2004

Zielsetzung:

Zur Beurteilung der elektromagnetischen Verträglichkeit von Netzstationen ist das niederfrequente magnetische Feld von Transformatoren und Kabelverbindungen zu untersuchen. Aus den Ergebnissen sollen die feldarme Verlegung der Kabelverbindungen hervor gehen und Schlussfolgerungen zum Einsatz feldarmer Transformatoren in Netzstationen getroffen werden. Dabei ist zu klären inwieweit dies in Berechnungsverfahren berücksichtigt werden kann.

Inhaltliche Schwerpunkte:

- 1) Theoretische Grundlagen niederfrequenter magnetischer Felder und deren Wirkung auf Mensch und Umwelt; gesetzlich festgelegte Grenzwerte in Deutschland und der Schweiz.
- 2) Reduktion des Feldbeitrages von Transformatoren und Kabeln in Netzstationen hinsichtlich der 26. BImSchV und Schweizer NISV
- 3) Berechnung magnetischer Felder von Transformatoren und Kabelverbindungen mit dem Feldberechnungsprogramm WinField - Electric and Magnetic Field Calculation.
- 4) Besonderheiten feldarmer Transformatoren.
- 5) Beurteilung der Feldoptimierung, durch den Einsatz von EMV - Transformatoren und differierende Anordnungen von Kabelverbindungen an ausgewählten Beispielen.

Es handelt sich um ein Forschungsthema der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie - FGEU mbH.

Berlin 2004, (C) Copyright FGEU mbH.

Alle Angaben und Daten dieser Diplomarbeit sind vertraulich. Vervielfältigung, Reproduktion und Weitergabe an dritte Personen, Unternehmen und Instituten, auch Auszugsweise, nur mit Genehmigung der FGEU mbH.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Symbole	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	2
2.1 Entstehung und Darstellung niederfrequenter magnetischer Wechselfelder	2
2.2 Wirkungen magnetischer Wechselfelder auf Menschen	3
2.3 Grenzwerte niederfrequenter magnetischer Felder	4
2.4 Entfernungsgesetze von Leitersystemen	5
2.4.1 Einzelleiter	5
2.4.2 Zweileiteranordnung	6
2.4.3 Drehstromsysteme	7
2.5 Simulationsansatz in WinField®	8
2.5.1 Einfluss der Leiterquerschnittsform	8
2.5.2 Einfluss des Neutralleiters bei symmetrischer Last	10
2.5.3 Einfluss unsymmetrischer Last	11
2.6 Vergleich von Messung und Berechnung	13
3 Reduktion des Feldbeitrages von Kabeln in Netzstationen hinsichtlich der 26. BImSchV und Schweizer NISV	14
3.1 Verlegungsarten der Kabel	15
3.1.1 Verlegung nach den die Station umgebenden Räumen	15
3.1.2 Verlegung mit Abstand zur Stationseinhausung	17
3.2 Einfluss der Kabelbefestigungen	19
3.2.1 Tragseile und Schellen	19
3.2.2 Kabelwannen und Kabelpitschen	20
3.2.3 Installationskanäle und Installationsrohre	20
3.3 Einfluss unterschiedlicher Anordnungen von Kabeln	23
3.3.1 Kabel in unterschiedlichen Ebenen	23
3.3.2 Unterschiede der Kabeltypen	25
3.3.3 Abstand zwischen Kabeln	27
3.3.4 Verdrillte Kabel	28
3.3.5 Verflochtene Kabel	30
3.3.6 Punktsymmetrische Kabelanordnung	33

4	Reduktion des Feldbeitrages von Transformatoren in Netzstationen hinsichtlich der 26. BImSchV und Schweizer NISV	38
4.1	Aufstellung und Positionierung	40
4.2	Abschirmung.....	40
5	Besonderheiten feldarmer Transformatoren	43
5.1	Das Joch	43
5.2	Punktsymmetrische NS- Durchführung	44
5.3	Position der Durchführungen	44
5.4	Schirmwirkung.....	45
6	Optimierung von Netzstationen hinsichtlich der 26. BImSchV und Schweizer NISV	47
6.1	Beschreibung und Darstellung der Netzstationen.....	47
6.2	Gegenüberstellung optimierter Versionen der Netzstationen	48
6.3	Auswertung	49
7	Zukunft der Transformatoren und Kabel in Netzstationen.....	51
7.1	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	51
7.2	Ausblick	55
8	Zusammenfassung.....	56
9	Anhang	57
9.1	Auszug der 26. Bundes-Immissionsschutzverordnung.....	57
9.2	Auszug der Schweizer NISV	59
9.3	Berechnungen zum Abschnitt 3.1.2.....	61
9.4	Kabelbezeichnungen	63
9.5	Berechnungen zum Abschnitt 6.1.....	64
	Literaturverzeichnis	VII

Verzeichnis der verwendeten Symbole

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
a, ρ	Abstand	m
B	magnetische Flussdichte	T
d	Eindringtiefe, Materialstärke	m
f	Frequenz	Hz
H	magnetische Feldstärke	A/m
I	Strom	A
n	Anzahl	—
r_0	Schirmradius	m
S	Scheinleistung, Schirmfaktor	VA, —
U	Spannung	V
u_k	Kurzschlussspannung	%
μ	Permeabilität	Vs/Am
μ_0	magnetische Feldkonstante	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am
μ_r	Permeabilitätszahl	—
ρ	Spezifischer Widerstand	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
Cu	Kupfer
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
engl.	englisch
LAI	Länderausschuss für Immissionsschutz
Ni-Fe (E3)	Nickel-Eisen-Legierung mit ca. 75 % Nickel
NISV	Schweizer Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung
OS	Oberspannung
St (C2)	Stahl mit 3,5 ... 4,5 % Si, Trafoperm
US	Unterspannung

1 Einleitung

Der Einsatz elektrischer Energie ist immer mit der Entstehung elektromagnetischer Felder verbunden. Diese können sich in Abhängigkeit ihrer Frequenz stark voneinander unterscheiden. Beim Betrieb energietechnischer Anlagen mit Spannungen bis zu 380 kV, Strömen bis zu einigen kA und einer Frequenz um 50 Hz können erhebliche niederfrequente elektrische und magnetische Wechselfelder entstehen.

Durch den steigenden Einsatz immer modernerer elektrischer Anlagen und elektronischer Systeme, werden immer höhere Anforderungen an die EMV aller Komponenten der Elektrotechnik gestellt, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten und diesen für die Zukunft zu sichern.

Auch die Auswirkungen niederfrequenter elektromagnetischer Wechselfelder auf Menschen und Tiere sind stark umstritten, da es keine natürlichen elektromagnetischen Wechselfelder gibt und man eventuelle negative Beeinträchtigungen der Organismen nicht ausschließen kann. Daher ist man bestrebt die Beeinflussung durch elektromagnetische Wechselfelder, solange es wirtschaftlich realisierbar bleibt, so gering wie möglich zu halten.

Da in Umspannstationen die sekundärseitigen Wicklungen der Transformatoren und die damit verbundenen Kabel mit hohen, dem elektromagnetischen Wechselfeld proportionalen, Strömen beansprucht werden und diese Stationen im Einzugsbereich der 26. BImSchV liegen, werden im Folgenden Kenntnisse über niederfrequente elektromagnetische Wechselfelder der Transformatoren und Kabelverbindungen in Netzstationen vermittelt, um präventive Maßnahmen ergreifen zu können, welche Beeinflussung elektronischer Systeme, des Menschen und seiner Umwelt minimieren und die Einhaltung der Grenzwerte hinsichtlich der 26. BImSchV gewährleisten.

2 Grundlagen

Zur Präzisierung der Aufgabenstellung, zum besseren Verständnis von Zusammenhängen und zum Verdeutlichen der Bedeutung der Betrachtungen ist es sinnvoll, einige theoretische Grundlagen voranzustellen, so dass in diesem Kapitel Vororientierungen zu den folgenden Kapiteln gegeben werden.

2.1 Entstehung und Darstellung niederfrequenter magnetischer Wechselfelder

Jeden stromdurchflossenen Leiter umgibt ein Magnetfeld. Handelt es sich bei dem elektrischen Strom um einen Gleichstrom, so liegt ein magnetisches Gleichfeld vor. Ist der Verursacher ein Wechselstrom, so spricht man von einem magnetischen Wechselfeld. Als niederfrequente oder auch quasistationäre Felder werden Felder bezeichnet, deren Frequenzen kleiner als 30 kHz sind.

Das magnetische Feld kann mit Hilfe von Feldlinien, dessen Richtungen sich aus der Rechten-Hand-Regel ergeben, dargestellt werden. Da die Feldlinien stets in sich geschlossen sind und es keine magnetischen Ladungen gibt, gilt das magnetische Feld als quellenfrei [01, S. 236].

Dennoch kann der vom Strom durchflossene Leiter als eine Quelle des magnetischen Feldes

verstanden werden. Der Betrag der Feldstärke entlang einer Feldlinie ist konstant, so dass jede Feldlinie einer Isogone entspricht. Da die magnetische Flussdichte der Feldstärke proportional ist, werden in den Untersuchungen dieser Arbeit die Berechnungsergebnisse des Programms WinField[®] in gleicher Form dargestellt. Unter den magnetischen Feldern wird im Folgenden der Effektivwert der magnetischen Flussdichte B in Tesla verstanden.

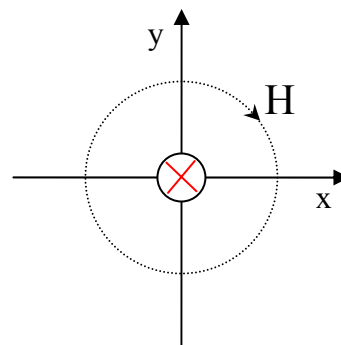


Abbildung 2.1: Feldlinie der magnetischen Feldstärke außerhalb eines geraden Leiters

2.2 Wirkungen magnetischer Wechselfelder auf Menschen

Die Wirkung elektromagnetischer Wechselfelder auf den Menschen ist ein umstrittenes Thema. Es kann zwischen direkten und indirekten Wirkungen unterschieden werden.

Als direkt können mechanische Wirkungen auf Magnetkristalle in biologischen Zellen und Ströme im Inneren des Körpers infolge der magnetischen Induktion verstanden werden. Da der Anteil an Magnetpartikeln in den meisten Zellen sehr gering ist, wird die Beeinträchtigung auf die Zellen nach dem bisherigen Wissensstand als gering befunden. Die Dichte der Körperströme ist für eine gesundheitliche Bewertung die entscheidende Größe. Als natürliche Körperstromdichte wird im Mittel der Bereich von 1 bis 10 mA/m² definiert. Werden zusätzlich Ströme im Körper induziert, kommt es etwa ab einer Stromdichte von 10 mA/m² zunächst zu biologischen Effekten und bei höheren Strömen auch zu gesundheitlichen Gefahren. Diese können von der Stimulation von Nerven bis zum Herzkammerflimmern reichen. [02, S. 2]

Indirekte Wirkungen entstehen durch Berühren oder im Fall der Funkenentladung durch Annähern von Personen an Gegenstände mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen, bei denen deren Potentialdifferenz auf Induktionsvorgänge infolge des Wechselfeldes zurückzuführen ist. Die durch den Ausgleichstrom verursachten Wirkungen können von der Stimulation von Nerven über Unbehagen bis hin zu schweren körperlichen Schädigungen reichen. [02, S. 3]

Um möglichen negativen Beeinträchtigungen von Menschen vorzubeugen, sollen sich Immissionen elektromagnetischer Felder in gesetzlich definierten Größenordnungen bewegen, welche sich an den natürlichen Körperstromdichten und an den Schwellenwerten für nachgewiesene gesundheitliche Wirkungen orientieren. Alle bisherigen Studien bezüglich krebsfördernder Wirkungen oder Elektrosensibilität führten nicht zu übereinstimmenden und gesicherten Aussagen über deren Wirkung.

2.3 Grenzwerte niederfrequenter magnetischer Felder

Liegt eine Niederfrequenzanlage im Anwendungsbereich der 26. BImSchV müssen die Grenzwerte bei maximaler Anlagenauslastung in Bereichen, in denen sich Menschen nicht nur vorübergehend aufhalten, in der Regel eingehalten werden. Ausnahmen sind zugelassen für eine Grenzwertüberschreitung von nicht mehr als 100 %, falls die Dauer von 5 % des Beurteilungszeitraumes von einem Tag nicht überschritten wird oder es sich um kleinräumige Überschreitungen der elektrischen Feldstärke außerhalb von Gebäuden handelt. Die Grenzwerte müssen jedoch stets eingehalten werden, wenn sich Wohnungen, Krankenhäuser, Schulen, Kindergärten, Spielplätze oder ähnliche Einrichtungen im Einwirkungsbereich der niederfrequenten Anlage befinden. [03, S. 613 ff]

Tabelle 2-1: Effektivwerte der Immissionsgrenzwerte von Niederfrequenzanlagen nach der 26. BImSchV [03, S. 616]

Frequenz in Hz	elektrische Feldstärke in kV / m	magnetische Flussdichte in μT
50	5	100
16 $\frac{2}{3}$	10	300

Gemäß den Hinweisen zur Umsetzung der 26. BImSchV ist bei den Netzstationen der Bereich in 1 m angrenzend an die Einhausung der Station, bei Erdkabeln der Bereich in 1 m Radius um das Kabel und bei Umspannanlagen 5 m angrenzend an die Anlage zu beachten [04, S. 74]. Hierbei wird das Einhalten der Grenzwerte in einem Abstand von 20 cm zu berührbaren und zugänglichen Oberflächen einer Anlage gefordert [05, S. 21].

Unterschiede der Schweizer Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) bestehen zum einen in der Ausnahmeregelung der Grenzwertüberschreitungen und zum anderen in der Angabe von Anlagengrenzwerten. Für Netzstationen beträgt der Anlagengrenzwert für den Effektivwert der magnetischen Flussdichte 1 μT . Zur Anlage gehören alle stromführenden Teile der Transformatorstation. Die Immissionsgrenzwerte der

in Tabelle 2-1 angegebenen Frequenzen unterscheiden sich in beiden Verordnungen nicht voneinander.

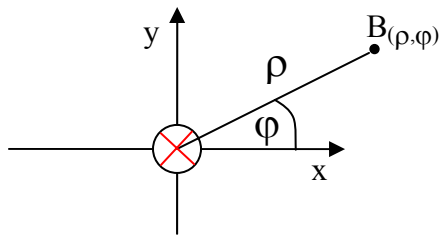
Da es sich bei Netzstationen um abgeschlossene elektrische Betriebsstätten handelt und damit der für Personen zugängliche Bereich durch Wände, metallische Absperrungen und Gehäuse abgegrenzt wird, geht die elektrische Feldstärke außerhalb der Station gegen Null. Daher beziehen sich die Schwerpunkte dieser Arbeit ausschließlich auf die Grenzwerteinhaltung der magnetischen Flussdichte. Obwohl bei der Grenzwertbetrachtung von Niederfrequenzanlagen grundsätzlich eine Summenbetrachtung aller relevanten Immissionen durchzuführen ist, soll im Rahmen der Diplomarbeit vorrangig die Immission einzelner Summanden betrachtet werden um deren Beitrag am resultierenden Feld abschätzen zu können. Da die Grenzwerte in Bereichen, in denen sich Menschen „nicht nur vorübergehend aufhalten“, eingehalten werden müssen, werden in der Arbeit die Problematik der Dauerbeeinflussung sowie die Theorie möglicher Methoden der Feldreduzierung geschildert.

2.4 Entfernungsgesetze von Leitersystemen

Um die magnetische Flussdichte in der Umgebung einer Feldquelle abschätzen zu können, ist deren Abnahme mit dem Abstand von Interesse. Die Abnahme der Feldintensität mit wachsendem Abstand folgt in Abhängigkeit der Feldquelle unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten. Die einzelnen Leiteranordnungen können mit Hilfe der Entfernungsgesetze und dem Einsatz von Zylinderkoordinaten beschrieben werden. Dabei ist es sinnvoll, unendlich lange in z-Richtung ausgedehnte Leiter zu betrachten [06, S. 452].

2.4.1 Einzelleiter

Wird Luft als das den Leiter umgebende Medium vorausgesetzt und werden der Leiterstrom und die berechnete magnetische Flussdichte als Effektivwerte angenommen, gilt für einen Einzelleiter unter Berücksichtigung der Abbildung 2.2 folgende Gleichung:



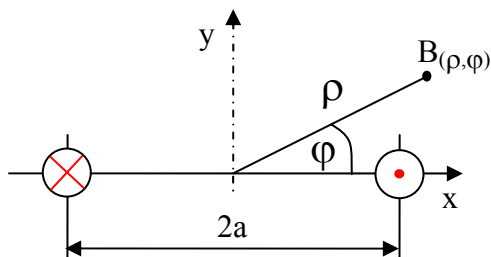
$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot \rho} \quad (2.1)$$

Abbildung 2.2: Einzelleiteranordnung

Somit verhält sich die magnetische Flussdichte proportional dem Reziproken des Abstandes ρ und ist unabhängig vom Winkel φ [06, S. 453].

2.4.2 Zweileiteranordnung

Für Zweileiteranordnungen die wie in Abbildung 2.3 aus einem Hin- und Rückleiter in symmetrischer Lage zum Ursprung bestehen, muss die Überlagerung der Felder von zwei Einzelleitern berücksichtigt werden. Aus einer Reihenentwicklung und unter Vernachlässigung der höheren Glieder folgen Gleichung 2.2 und 2.3.



$$B_{(\rho)} = -\mu_0 \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{2a}{\rho^2} \cdot \sin \varphi \quad (2.2)$$

$$B_{(\varphi)} = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{2a}{\rho^2} \cdot \cos \varphi \quad (2.3)$$

Abbildung 2.3: Zweileiteranordnung
[06, S. 454]

$$B = \sqrt{B_{(\rho)}^2 + B_{(\varphi)}^2} = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \cdot \frac{2a}{\rho^2} \quad (2.4)$$

Der Betrag der magnetischen Flussdichte nimmt mit ρ^{-2} ab und ist für einen konstanten Abstand ρ unabhängig vom Winkel φ . Weiterhin ist den Gleichungen zu entnehmen, dass eine Vergrößerung des Leiterabstandes $2a$ einen Anstieg der Flussdichte zufolge hat [06, S. 454].

2.4.3 Drehstromsysteme

Um die Flussdichte von Dreiphasenanordnungen bestimmen zu können, müssen die Phasenunterschiede der einzelnen Leiterströme bei der Überlagerung berücksichtigt werden. Für $\rho \gg a$, $\sum_{1 \rightarrow n} I_n = 0$ mit $n = 3$ und einer komplexen Darstellung der Leiterströme ergeben sich für die Leiteranordnung nach Abbildung 2.4 folgende Gleichungen der Feldkomponenten [06, S. 454].

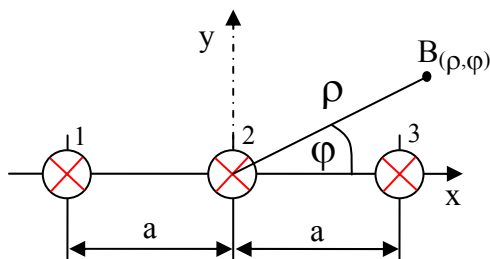


Abbildung 2.4: Drehstromanordnung
[06, S. 454]

$$\underline{B}_{(\rho)} = -\mu_0 \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{a}{\rho^2} \cdot (I_1 - I_3) \cdot \sin \varphi \quad (2.5)$$

$$\underline{B}_{(\varphi)} = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{a}{\rho^2} \cdot (I_1 - I_3) \cdot \cos \varphi \quad (2.6)$$

Aus den Gleichungen 2.5 und 2.6 lässt sich durch eine geometrische Addition der Betrag der Flussdichte bestimmen. Da bei einem symmetrischen Drehstromsystem die Beträge der Ströme gleich groß sind kann die Gleichung wie folgt beschrieben werden [06, S. 454].

$$B = \sqrt{B_{(\rho)}^2 + B_{(\varphi)}^2} = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{a}{\rho^2} \cdot \sqrt{3} \cdot I \quad (2.7)$$

Sind die einzelnen Leiter im Dreieck angeordnet, halbiert sich die Flussdichte und kann über Gleichung 2.8 bestimmt werden [06, S. 454].

$$B = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{a}{\rho^2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \quad (2.8)$$

Auch bei den Dreiphasenanordnungen nimmt der Betrag der magnetischen Flussdichte mit ρ^{-2} ab, er ist für einen konstanten Abstand ρ unabhängig vom Winkel φ und eine Vergrößerung des Leiterabstand a hat einen Anstieg der Flussdichte zufolge [06, S. 454].

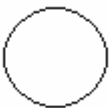
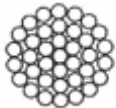
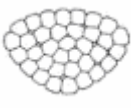
2.5 Simulationsansatz in WinField®

In diesem Abschnitt wird geklärt, inwieweit sich vereinfachte Annahmen bei der Berechnung durch das Programm auf das Berechnungsergebnis auswirken. Die Belastungen im Kurzschlussfall werden nicht in die Untersuchungen eingebunden da sie nur kurzzeitige Grenzwertüberschreitungen zufolge haben. Um die niederfrequenten Felder der Komponenten Transformatoren und Kabel beurteilen zu können, bleiben Oberschwingungen infolge der Lastabnahme unberücksichtigt. Alle Ströme werden als sinusförmig angenommen. Die Beeinflussung des Magnetfeldes infolge von Wand- und Deckenbewehrungen wird im Abschnitt 3.2.2 beurteilt.

2.5.1 Einfluss der Leiterquerschnittsform

In Abhängigkeit von der Belastung der Kabel unterscheiden sich dessen Leiterquerschnittsformen. Die Modellbildung der Leiter im Programm WinField® erfolgt durch stromfadenartige Elemente. Daher soll in der folgenden Untersuchung geklärt werden, ob man bei der Bestimmung der magnetischen Flussdichte über das Berechnungsprogramm die unterschiedlichen Leiterformen durch Stromfäden mit hinreichender Genauigkeit, in Bezug auf die 26. BImSchV, nachbilden kann. In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Leiterformen aufgeführt.

Tabelle 2-2: Typische Leiterquerschnittsformen von Starkstromkabeln [07, S. 233] und Darstellung eines Stromfadens in WinField®

Rund eindrahtig (RE)	Rund mehrdrahtig (RM)	Sektorförmig mehrdrahtig (SM)	Stromfaden in WinField® (SF)
			+

Als Berechnungsgrundlage werden ein Strom von 10 A und ein Leiterquerschnitt von 240 mm² angenommen. Abbildung 2.5 beinhaltet die Darstellung der magnetischen Flussdichte in Form von Isogonen. Daraus geht

hervor, dass sich die Form der Isogonen in unmittelbarer Nähe der Leiterform angleicht und mit der Entfernung in konzentrische Kreise übergeht. Der Einfluss auf die Berechnungsergebnisse wird im Folgenden geklärt.

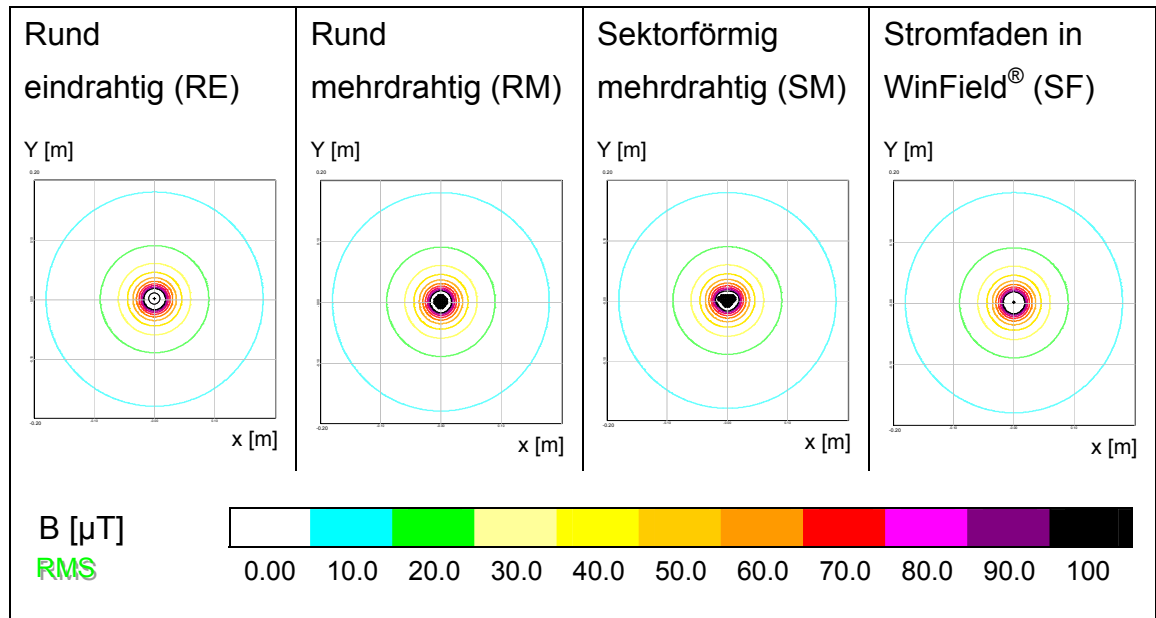


Abbildung 2.5: Darstellung der Isogonen unterschiedlicher Leiterformen

Nur in unmittelbarer Nähe des Leiters treten in Abhängigkeit von der Leiterform deutliche Abweichungen in den Berechnungsergebnissen auf. Bereits bei einem Berechnungsabstand von 10 cm liegen die prozentualen Abweichungen aller untersuchten Leiterformen unter 0,6 %. Die Probe mit erhöhten Leiterströmen ergab dass die Abweichungen mit steigender Stromstärke zusätzlich abnehmen. Da in der 26. BImSchV das Einhalten der Grenzwerte in einem Abstand von 20 cm zu berührbaren und zugänglichen Oberflächen einer Anlage gefordert wird, kann die Modellierung der Leiter durch Stromfäden als ausreichend betrachtet werden.

Bei der Bestimmung der magnetischen Flussdichte mittels des Berechnungsprogramm WinField® lassen sich die unterschiedlichen Leiterformen durch Stromfäden mit hinreichender Genauigkeit, in Bezug auf die 26. BImSchV, nachbilden.

2.5.2 Einfluss des Nullleiters bei symmetrischer Last

Da in Abhängigkeit der verwendeten Netzform Transformatoren mit oder ohne herausgeführten Nullleiter zum Einsatz kommen, kann die Verbindung zwischen dem Transformator und der Niederspannungsverteilung aus Drei- oder Vierleitern bestehen. Um die Auswirkung des Nullleiters auf das resultierende Feld abzuschätzen, werden beide Kabel mit einem symmetrischen Drehstrom von 361 A belastet und deren Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte verglichen. Hierbei liegen die Phasenwinkel des Stromes für die Phasen L1 von 0° , L2 von 120° und L3 von 240° vor. Aufgrund der symmetrischen Belastung fließt kein Nullleiterstrom.

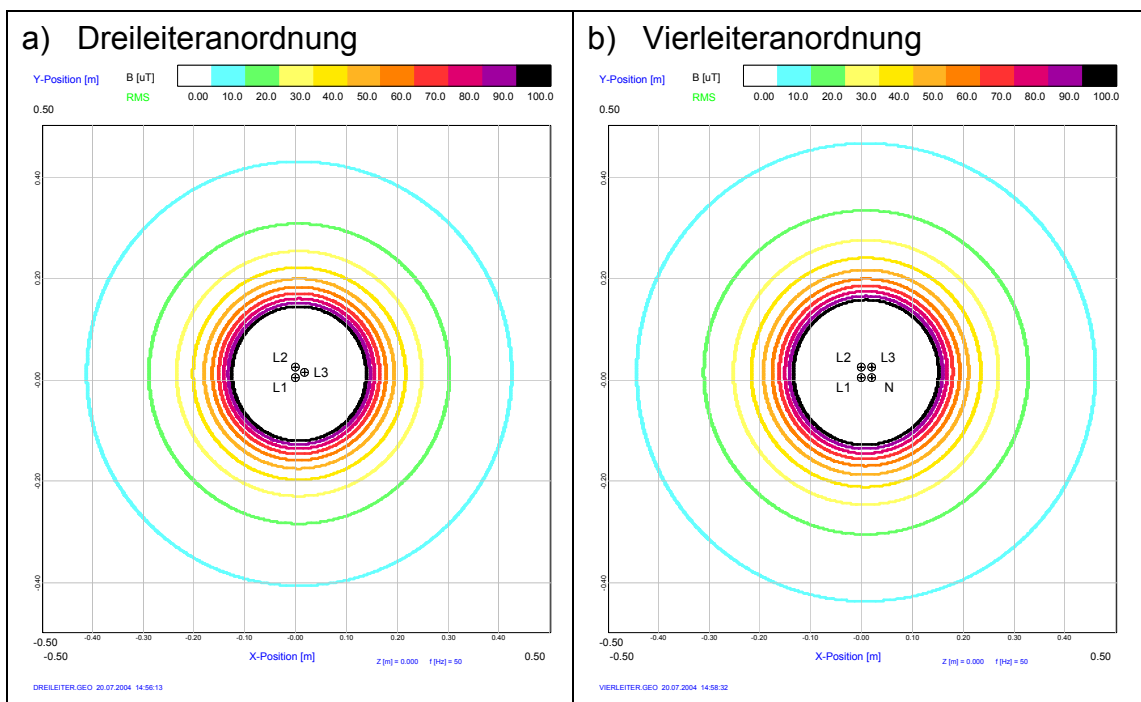


Abbildung 2.6: Darstellung der Isogonen unterschiedlicher Kabel

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass sich die Anordnung der Phasen vom gleichseitigen zu einem rechtwinkligen Dreieck ändert, so dass sich durch den zusätzlichen Leiter der Abstand zwischen den Phasen L1 und L3 vergrößert. Die damit veränderte Feldüberlagerung der einzelnen Leiter führt zur Vergrößerung des magnetischen Feldes. Um die Abweichungen im Umfeld der Leiter zu bestimmen, werden in einem definierten Abstand vom Koordinatenursprung die maximalen Effektivwerte der Flussdichte ermittelt.

Tabelle 2-3: Prozentuale Abweichung der Vier- von der Dreileiteranordnung bei einem Berechnungsabstand von 20 cm

	X-Position (positiv)	X-Position (negativ)	Y-Position (positiv)	Y-Position (negativ)
$B_{\max, \text{Dreileiter}} [\mu\text{T}]$	46,5	41,5	48,6	39,8
$B_{\max, \text{Vierleiter}} [\mu\text{T}]$	55,2	47,5	58,2	45,3
Abweichung [%]	15,8	12,6	16,5	12,1

Die größte Abweichung tritt in positiver Y-Richtung auf. Wird statt einer Dreileiter- eine Vierleiteranordnung benötigt, ändert sich in der ungünstigsten Richtung der Abstand, ab dem die Flussdichte den Grenzwert von $100 \mu\text{T}$ unterschreitet, von $14,3 \text{ cm}$ auf $15,6 \text{ cm}$. Damit vergrößert sich der Einwirkungsbereich der Flussdichten $> 100 \mu\text{T}$ um ca. 9 %. Die Probe der Berechnung einer Dreileiteranordnung, in der die Phasen so wie bei der Vierleiteranordnung positioniert sind, führte exakt zu den gleichen Berechnungsergebnissen wie bei der Vierleiteranordnung mit Neutralleiter. In dem Fall hat der Neutralleiter bedingt Einfluss auf das magnetische Feld der Kabelverbindung. Der Einfluss des Neutralleiters bei unsymmetrischer Belastung ist Betrachtungsgegenstand des nächsten Abschnittes.

Solange die Anordnung der Phasen unverändert bleibt, hat der Neutralleiter bei symmetrischer Last keine Auswirkungen auf das resultierende Feld.

2.5.3 Einfluss unsymmetrischer Last

Die Netzbetreiber sind bestrebt, in Niederspannungsnetzen eine symmetrische Auslastung der Phasen zu erreichen, dennoch treten in den Phasen, infolge der variierenden Lastabnahme, Unsymmetrien der Stromstärke auf. Diese haben einen Stromfluss im Neutralleiter zufolge. Die Simulation des Vierleiterkabels NA2XY 4x150 mit Winfield[®] unter der Annahme einer Unsymmetrie von 10 % soll deren Einfluss auf das magnetische Feld im Folgenden klären.

Der Effektivwert des Stromes je Außenleiter soll im symmetrischen Fall 100 A betragen. Um Randeffekte auszuschließen werden die Berechnungen in der Mitte des 300 m langen Kabels durchgeführt.

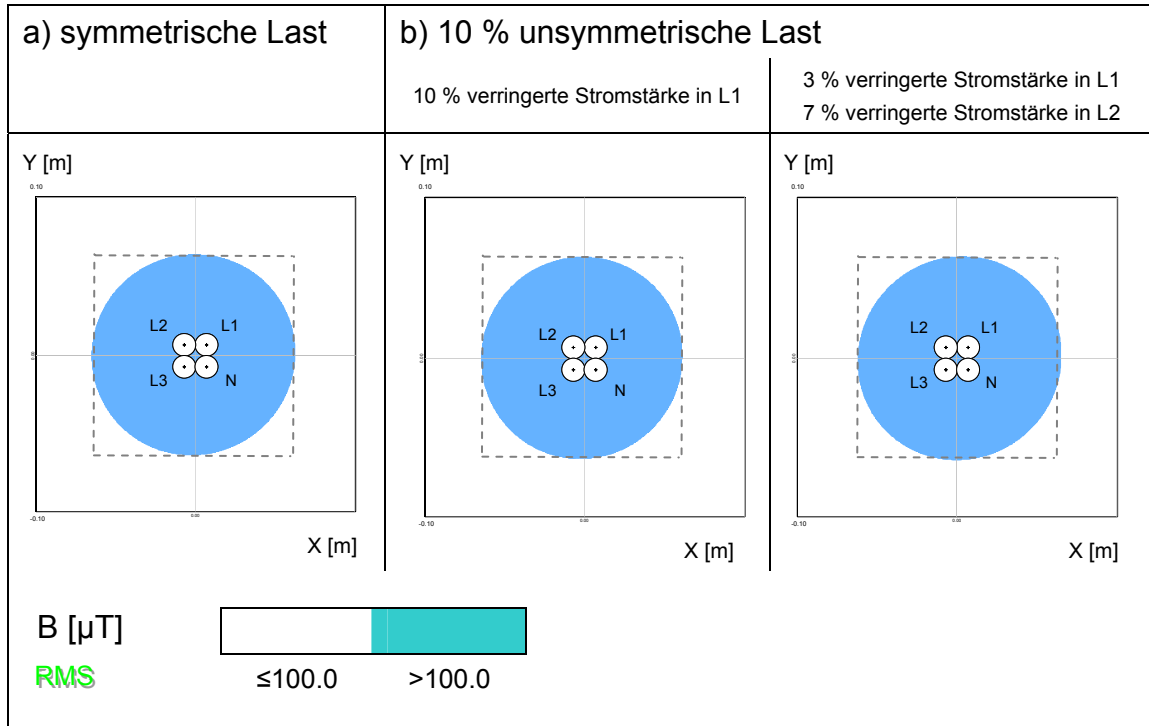


Abbildung 2.7: Gegenüberstellung der Flussdichte symmetrisch und unsymmetrisch belasteter Kabel

Durch die identischen gestrichelten Quadrate wird deutlich, dass die Fläche, in der der Grenzwert überschritten wird, annähernd gleich bleibt, so dass der im Neutralleiter fließende Strom den in den Außenleitern verringerten Anteil kompensiert.

Gemäß der 26. BImSchV müssen die Grenzwerte bei voller Anlagenauslastung eingehalten werden. Da hieraus eine symmetrische Belastung der Phasen folgt, wird diese allen weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt.

2.6 Vergleich von Messung und Berechnung

Die allgemeine Verunsicherung gegenüber elektromagnetischen Feldern und die Festlegungen von Grenzen maximaler Feldstärken führte in den letzten Jahrzehnten zu ausgereiften Mess- und Berechnungsmethoden zur Ermittlung der magnetischen Flussdichte niederfrequenter Felder. Messungen und Berechnungsverfahren besitzen für den Anwender verschiedene Vor- und Nachteile. [08, S. 1]

Tabelle 2-4: Vor- und Nachteile von Messung und Berechnung von niederfrequenten magnetischen Feldern [08, S. 1]

	Messung	Berechnung
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - In-Situ-Erfassung der tatsächlich vorhandenen Feldgrößen - Zeitaufwand proportional zu den Messpunkten und unabhängig von der Feldquelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Bei korrekten Modellen ist eine beliebige Präzision möglich - Zeitaufwand proportional zur Komplexität aber unabhängig vom ausgewerteten Feldbereich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Einschränkungen durch Frequenzbereich und Dynamik - Unsicherheit im gemessenen Wert im Prozentbereich - Notwendigkeit der Registrierung von Strömen und Spannungen an den Quellen. Mehrere zeitlich variierende Betriebsströme können eine befriedigende Auswertung unter Umständen verhindern - Fehlinterpretationen bei unbekanntem Einflüssen bzw. Feldquellen 	<ul style="list-style-type: none"> - Einschränkungen durch die Komplexität des Modells bzw. den Modellierungsaufwand - Einschränkungen durch komplexe, nichtlineare physikalische Effekte: Materialeinflüsse, Polarisation, Magnetisierung - Verhältnismäßig lange Einarbeitungszeit, ggf. Einsatz eines Spezialisten notwendig - Falschwerte bei unbekanntem Einflüssen bzw. unbekanntem Feldquellen

„Soweit anwendbar sind die Mess- und Berechnungsverfahren des Normentwurfs DIN VDE 0848 Teil 1, Ausgabe Mai 1995, einzusetzen.“ Messungen sind nicht erforderlich, wenn die Einhaltung der Grenzwerte durch Berechnungsverfahren festgestellt werden kann. [03, S. 614]

Zur Bewertung von Feldemissionen sind beide Verfahren unentbehrlich da sie sich gegenseitig ergänzen und somit eine sicherere Beurteilung der Feldgrößen ermöglichen.

3 Reduktion des Feldbeitrages von Kabeln in Netzstationen hinsichtlich der 26. BImSchV und Schweizer NISV

Ein einfacher Stromkreis besteht aus einer Spannungsquelle, den Leitern und einem Verbraucher. In den Netzwerken der Energieversorgung übernimmt das Kabel die Aufgaben der Leiter und ist daher neben den Freileitungen eine unerlässliche Komponente der Energieübertragung bzw. -verteilung. Wird im Folgenden der Ausdruck Kabel verwendet, können darunter ein- oder mehradrige isolierte Leiter verstanden werden. Kabel werden heute für alle Spannungsebenen und mit einer Lebensdauer von 20 bis 30 Jahren hergestellt [07, S. 232].

Da Kabel aufgrund ihrer Isolierung einen wesentlich geringeren Platzbedarf gegenüber den Freileitungen benötigen und im Erdreich verlegt werden können, werden sie vorwiegend in Ballungsgebieten und elektrischen Anlagen mit geringem Raumbedarf eingesetzt. Einem flächendeckenden Einsatz von Kabeln steht der höhere Preis entgegen.

In den folgenden Ausführungen werden speziell die Kabelverbindungen zwischen den sekundären Transformatorwicklungen und den Niederspannungsverteilungen in Netzstationen untersucht, da diese infolge des hohen Stromflusses relevante magnetische Feldquellen darstellen, im Anwendungsbereich der 26. BImSchV liegen und Orte, an denen sich Menschen nicht nur vorübergehend aufhalten, beeinflussen können. Es werden die verursachten Magnetfelder verschiedener Verlegungsarten, Kabelbefestigungen und Kabelanordnungen verglichen und bewertet.

3.1 Verlegungsarten der Kabel

Für Kabel darf jede Verlegungsart angewendet werden, wobei die Verlegung auf Isolatoren nicht üblich ist. Die DIN VDE 0100-520 beschreibt ausführlich die Auswahl und Errichtung von Kabelanlagen und beinhaltet die Gesamtheit aller Verlegungsarten. Demnach ist die Verlegung der Kabel in Netzstationen

- | | | |
|-----------------------|---------|--------------------------------|
| - in und auf Wänden | mittels | - Installationsrohren/-kanälen |
| - in und unter Decken | | - Kabelwannen/-pools |
| - in und auf Fußböden | | - Tragseilen |
| - in Luft | | - Schellen |
| | | - Mauerwerk |

möglich. [09, S. 31 ff]

3.1.1 Verlegung nach den die Station umgebenden Räumen

Die Auswahl der Verlegung nach den die Station umgebenden Räumen in denen sich Menschen nicht nur vorübergehend aufhalten, kann durch eine Abstandsvergrößerung eine Möglichkeit entstehen, den Grenzwert zu gewährleisten. In dem Berechnungsbeispiel der Abbildung 3.1 wird angenommen, dass sich eine Station im Keller befindet und über ihr ein Schulraum liegt. Die jeweiligen Stromstärken der Außenleiter ergeben sich aus der Transformatornennscheinleistung von 630 kVA, einer Betriebsspannung von 0,4 kV und der Gleichung 3.1.

Strom je Außenleiter:
$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (3.1)$$

Bei einer Stationshöhe von 2,30 m und einer Deckendicke von 0,25 m, kann die magnetische Flussdichte auf der Fußbodenebene des Schulraumes bei einer Kabelverlegung am Boden der Station gegenüber der Kabelführung an deren Decke von 148,1 μT auf 55,2 μT verringert werden. Das entspricht einer prozentualen Verringerung der magnetischen Flussdichte um 62,7 %.

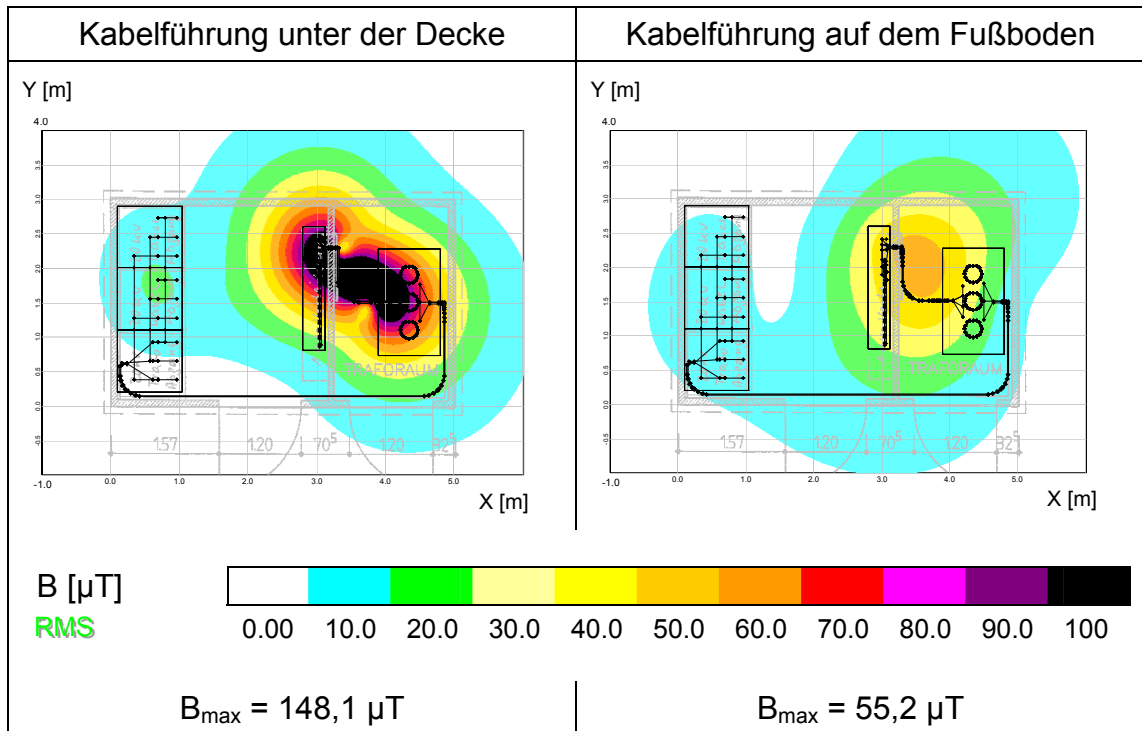


Abbildung 3.1: Draufsicht der Netzstation und deren magnetische Flussdichte in horizontaler Schnittebene bei einer Berechnungshöhe von 2,55 m

Je länger ein Kabel gewählt wird umso größer ist der Einflussbereich seines magnetischen Feldes. Dennoch ist im Hinblick auf das Einhalten der Grenzwerte im Schulraum die Kabelverlegung auf dem Fußboden der Station mit einem etwa 2 m längeren Verbindungskabel günstiger als die kürzere Verbindung an deren Decke. Tabelle 3-1 enthält Beispiele mit von einem bis zu vier an die Station angrenzenden Räumen und den daraus folgenden günstigsten Orten der Kabelführung.

Tabelle 3-1: Beispiele der Verlegung von Kabel hinsichtlich der die Station umgebenden Räume

Lage der Räume in denen sich Menschen nicht nur vorübergehend aufhalten	Optimale Verlegung der Kabelverbindung in der Station
oben	unten (links, rechts, vorn, hinten)
oben, hinten	unten, vorn (links, rechts)
oben, hinten, rechts	unten, vorn, links
oben, hinten, rechts, links	Raummitte, unten, vorn

Da sich Umspannstationen in der Regel unmittelbar auf dem Erdreich befinden, ist hinsichtlich der 26. BImSchV in den meisten Fällen eine Kabelverlegung auf oder besser noch im Fußboden der Stationsmitte zu wählen, um so den Feldbeitrag der Kabel zu minimieren.

3.1.2 Verlegung mit Abstand zur Stationseinhausung

Um generell einen Abstand von der Stationseinhausung zu wählen bei dem der Feldbeitrag der Kabel den 100 μT -Grenzwert außerhalb der Station nicht überschreitet, kann mit Hilfe der Entfernungsgesetze des Abschnittes 2.4 oder dem Berechnungsprogramm Winfield[®] der Mindestabstand zur Stationswand ermittelt werden. Im Folgenden wird für ein Drehstromkabel untersucht, ab welchem Abstand die magnetische Flussdichte den Grenzwert von 100 μT einhält. Die jeweiligen Stromstärken der Außenleiter ergeben sich aus den in der Praxis üblichen Transformatornennscheinleistungen, einer Betriebsspannung von 0,4 kV und der Gleichung 3.1. Die Ergebnisse der Untersuchung werden in Tabelle 3-2 zusammengefasst und deren Berechnung im Anhang 9.3 dargestellt.

Tabelle 3-2: Ergebnisse der Entfernungsgesetz- und Programmberechnung für den Abstand der Kabel zur Stationswand, ab dem der 100 μT -Grenzwert eingehalten wird

Strom je Außenleiter / A	Abstand nach dem Entfernungsgesetz / m	Abstand nach dem Programm / m
361	0,11	0,13
577	0,14	0,17
909	0,18	0,21
1155	0,20	0,24
1443	0,22	0,26
1732	0,24	0,28
1804	0,25	0,29
2309	0,28	0,33

Da die ermittelten Abstände der Programmberechnung durchschnittlich 19 % größer sind, kann davon ausgegangen werden das sie sich hinsichtlich der 26. BImSchV auf der „sicheren Seite“ befinden. Durch die Berücksichtigung der Dicke der Stationswand können die Abstände um diese verringert werden. Messungen und Erfahrungen zeigen eine unkritische Annäherung an Kabel, mit Strömen von einigen 100 A, bis zu 1 m [13, S. 314].

Besteht die Möglichkeit der Verlegung im Fußboden, kann durch den Abstand zur Fußbodenebene das Einhalten der Grenzwerte in diesem Bereich gesichert werden. Tabelle 3-2 gibt einen Überblick über Abstände, bei denen die magnetische Flussdichte den Grenzwert von 100 μ T einhält. Damit lassen sich die der Stromstärke entsprechenden minimalen Verlegungstiefen im Fußboden ableiten.

Im Hinblick auf die Grenzwerte der 26. BImSchV

- ist die Verlegung in bzw. an Decken und Wänden aufgrund des geringen Abstandes zur Umgebung der Station die ungünstigste Variante der Verlegung.
- kann durch die an das Umfeld der Netzstation angepasste Verlegung der Kabel deren Feldbeitrag bemerkenswert reduziert werden.
- ist die kürzeste Kabelverbindung nicht zwingend am günstigsten.
- sollten die Verlegungsabstände zur Stationseinhausung entsprechend Tabelle 3-2 eingehalten werden.
- sind Kabel in der Regel unten, wenn möglich mit entsprechender Verlegungstiefe im Fußboden, zu führen.

3.2 Einfluss der Kabelbefestigungen

Im folgenden Abschnitt wird geklärt, welchen Einfluss die unterschiedlichen Kabelbefestigungen auf das magnetische Feld der Kabelverbindung haben. Um die unterschiedlichen Befestigungen der Kabel zu vergleichen wird das Drehstromkabel NAKBA 0.6/1 kV 3*95 SM an einen Transformator mit einer Scheinleistung von 250 kVA angeschlossen. Bei einer Betriebsspannung von 0,4 kV folgt aus Gleichung 3.1 der im Nennbetrieb maximal erzeugte Stromfluss von 361 A durch die Außenleiter des Kabels. Es werden ausschließlich leitfähige Materialien der untersuchten Befestigungen vorausgesetzt.

3.2.1 Tragseile und Schellen

Tragseile und Schellen können in Form einer um das Kabel geführten Leiterschleife ausgeführt werden. Das durch den im Kabel fließenden Strom verursachte magnetische Wechselfeld induziert in den einzelnen Befestigungen dennoch kaum einen Wirbelstrom, dessen Magnetfeld dem des Kabels entgegengesetzt ist, da die vom Magnetfeld durchflutete Fläche der Leiterschleife gegen Null geht und die Materialstärken und die zeitlichen Änderungen des Feldes gering sind. Der Einsatz permeabler Materialien wie z.B. Eisen führt über den magnetischen Nebenschluss zu einer lokalen Feldverringerng, welche infolge der Sättigung begrenzt wird.

Die Einflüsse der Abstände einzelner Befestigungen untereinander und der Sättigung können mit Hilfe des Berechnungsprogramms nicht untersucht werden. Aufgrund der in der Praxis verwendeten Mindestabstände der Tragseile und Schellen nach den Richtlinien der DIN VDE 0298, wird ein unbedeutender Einfluss auf das magnetische Feld der Kabelanordnungen angenommen.

3.2.2 Kabelwannen und Kabelpritschen

Kabelwannen bestehen aus durchgehenden Tragplatten mit hochgezogenen Kanten. Sie besitzen keine Abdeckung und können mit oder ohne Löcher ausgeführt werden. Kabelpritschen haben die Form einer Leiter. Jeweils zwei Sprossen und die Haupttragelemente ergeben eine in sich geschlossene Leiterschleife.

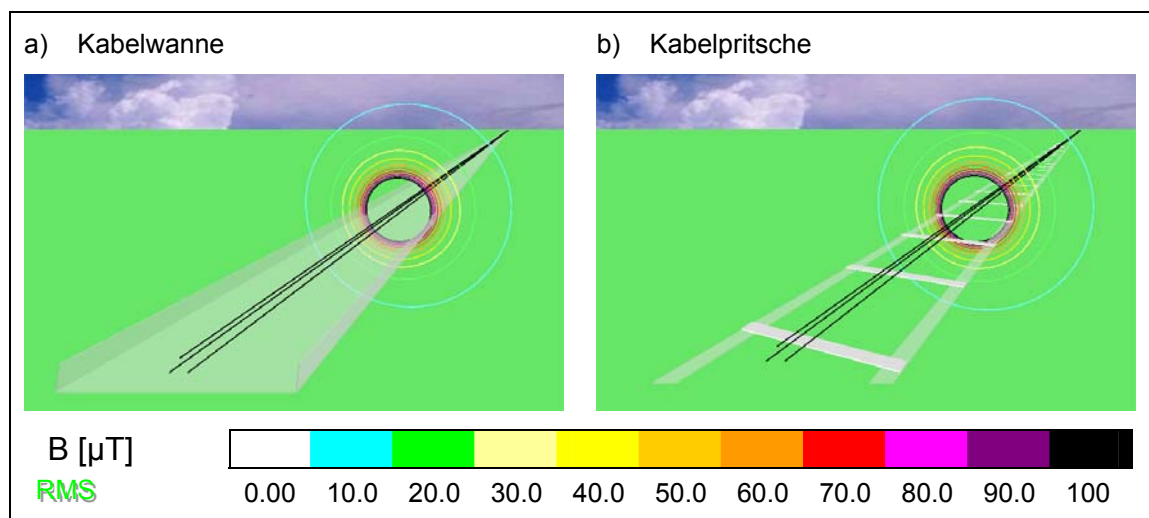


Abbildung 3.1: 3D-Darstellung von Kabelwannen und Kabelpritschen im Berechnungsprogramm WinField® und deren magnetischen Flussdichte in vertikaler Schnittebene in Form von Isogonen

Die Leiterschleifen haben keine nennenswerte Wirkung, da durch das niederfrequente magnetische Feld nur geringe Ströme induziert werden. Beide Befestigungen umgeben das Kabel nicht vollständig. Diese Teilabschirmungen führen zu einer geringen Feldverzerrung aber nicht zu erwähnenswerten Schirmwirkungen. Damit kann auch eine Beeinflussung des Magnetfeldes infolge von Wand- und Deckenbewehrungen als gering eingeschätzt werden.

3.2.3 Installationskanäle und Installationsrohre

Installationskanäle umgeben das Kabel vollständig. Sie können aus einer Reihe von unterschiedlichen Materialien hergestellt werden. Die für eine Schirmwirkung interessanten, in der Praxis häufig verwendeten Materialien

sind Aluminium und verzinktes Stahlblech. Der Vergleich zwischen dem Kabel ohne und mit den Installationskanälen aus diesen Materialien, soll klären wie groß deren Einfluss auf das magnetische Feld des Kabels ist. Als Abmessung der Kanäle werden $0,4 \times 0,15 \times 150$ [m] (B \times H \times T) und eine Materialstärke von 2 mm angenommen. Die jeweiligen isotropen Schirmungsfaktoren werden über die Materialbibliothek des Berechnungsprogramms WinField[®] bestimmt.

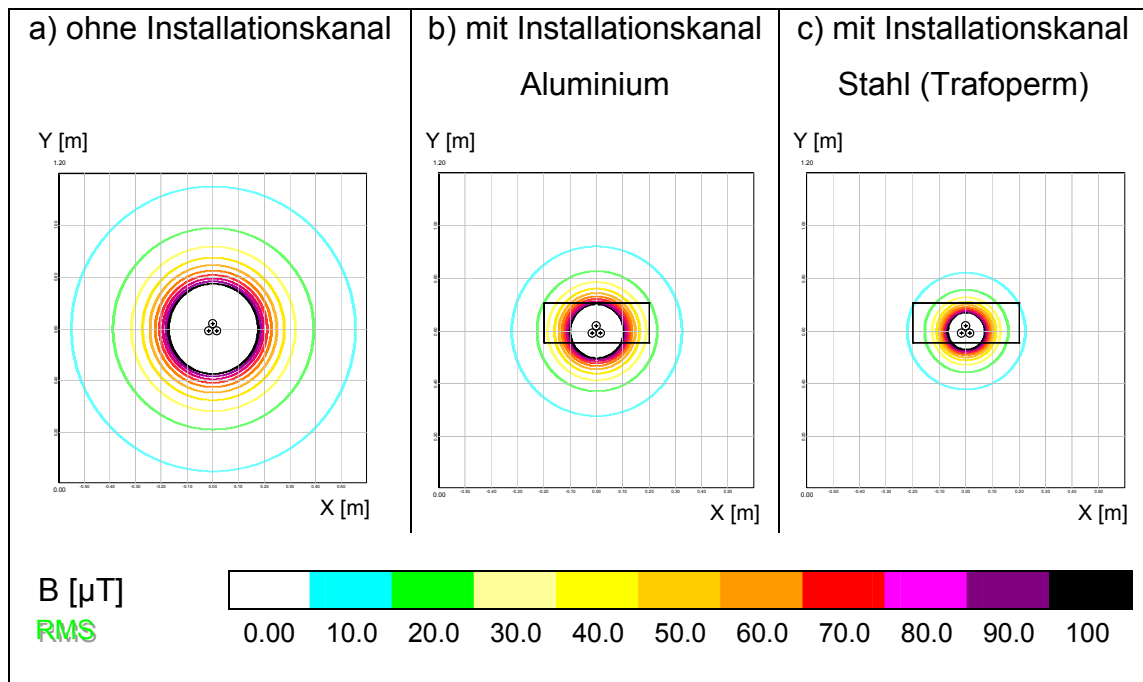


Abbildung 3.2: 2D-Darstellung eines Dreileiterkabels mit und ohne Installationskanal und deren magnetischer Flussdichte in vertikaler Schnittebene

In einem Berechnungsabstand von 20 cm zur Kanaloberfläche beträgt die prozentuale Verringerung der magnetischen Flussdichte in den untersuchten Fällen für Aluminium 56,5 % und für Stahl (Trafosperm) 76,9 %. Zum einen haben die Kanäle eine Abstandsvergrößerung zu berührbaren und zugänglichen Oberflächen der Feldquelle zufolge und zum anderen wird das Feld in Abhängigkeit der Schirmwirkung der Materialien abgeschwächt. Ein Maß für die Schirmwirkung ist die Eindringtiefe des Feldes in das Material. Sie hat einen entscheidenden Einfluss auf die Dämpfung der magnetischen Flussdichte. Die Eindringtiefe wird für zylindrische Leiter als die Wandstärke eines Rohres definiert, dessen Gleichstromwiderstand dem wirksamen Wechselstromwiderstand des Leiters entspricht und kann nach Gleichung 3.2 berechnet werden [07, S. 148].

$$d = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} \quad (3.2)$$

Der Gleichung 3.2 ist zu entnehmen, dass die Permeabilität einen starken Einfluss auf die Eindringtiefe hat. Über die Materialeigenschaften der Tabelle 3.3 können die Eindringtiefen verschiedener Werkstoffe abgeschätzt und dargestellt werden.

Tabelle 3-3: Stoffwerte [10, S. 292]

Stoff	μ_r (abgeschätzt)	ρ in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$
Cu	0,9	0,0179
Al	1,1	0,0278
St (C2)	1000	0,5
Ni-Fe (E3)	10000	0,5

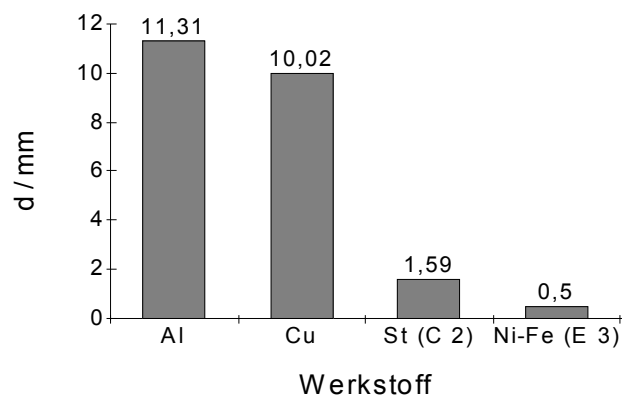


Abbildung 3.3: Eindringtiefen verschiedener Stoffe bei einer Frequenz von 50Hz

Mit steigender Temperatur nehmen die Permeabilität ab und die Eindringtiefe zu [07, S. 148].

Durch die vollständige Ummantelung kann eine bemerkenswerte Reduktion der magnetischen Flussdichte und das Einhalten der Grenzwerte in einem Abstand von 20 cm zu berührbaren Oberflächen erreicht werden. Zur Abschirmung quasistationärer Felder eignen sich vor allem Materialien, die eine hohe Permeabilität besitzen. Die Sättigung der Materialien und der Grenzübergang der Kabeleinführungen können im Berechnungsprogramm nicht berücksichtigt werden.

3.3 Einfluss unterschiedlicher Anordnungen von Kabeln

Da einzelne Kabel infolge ihrer Strombelastbarkeit für einen größeren Transport von Energie nicht ausreichen, muss dieser mittels Mehrfachverbindungen realisiert werden. Um eine Anordnung von Kabeln zu finden, bei der sich die Feldlinien so überlagern, dass das resultierende Feld minimal wird, ist Untersuchungsgegenstand der folgenden Abschnitte.

3.3.1 Kabel in unterschiedlichen Ebenen

Bei dem Einsatz von Kabeln mit Einzelleitern können die Phasen eines Drehstromsystems entweder in einer oder zwei Ebenen angeordnet werden. Da die Verlegung in drei Ebenen eine identische Anordnung der Phasen zur Einebenenordnung darstellt und nur im Nahfeld Abweichungen aufweist, wird auf deren Darstellung verzichtet. Entsprechend den Entfernungsgesetzen des Abschnittes 2.4.3 tritt durch die Abstandsverringering zwischen L1 und L3 bei der Anordnung der Phasen in zwei Ebenen bzw. im gleichseitigen Dreieck und bei konstantem Berechnungsabstand vom Koordinatenursprung eine geringere Flussdichte auf.

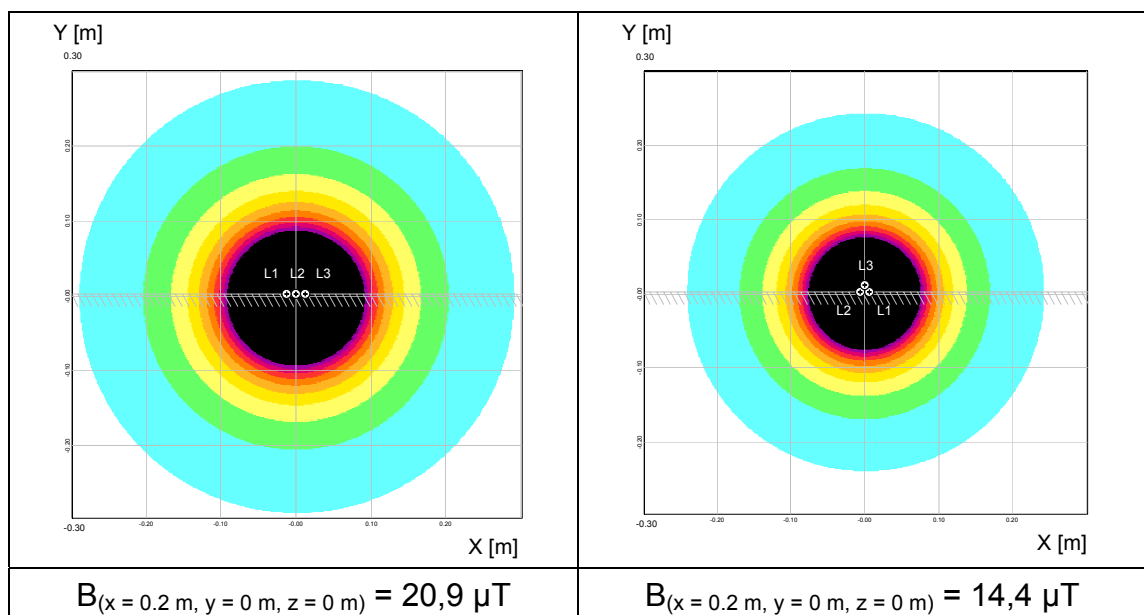


Abbildung 3.4: Feldbilder der in der Ebene und im Dreieck angeordneten Leiter bei einem Leiterabstand von 12 mm

Da schon die unterschiedliche Anordnung der Leiter in verschiedenen Ebenen zur Reduktion des Feldes führen kann, wird im Folgenden die Anordnung für drei bis sechs Drehstromsysteme untersucht. Hierzu wird eine Verbindung zwischen einem 1600 kVA Transformator und der Niederspannungsverteilung simuliert. Bei maximaler Anlagenauslastung ergibt sich aus einer Betriebsspannung von 0,4 kV und der Gleichung 3.1 ein Strom von 2309 A je Außenleiter. Die Strombelastbarkeit typischer Starkstromkabel kann in Abhängigkeit des Nennquerschnitts, der Häufung, der Verlegungsart und der Umgebungstemperatur bis zu 830 A betragen [11, S. 89]. Als konstanter Berechnungsabstand wird 1 m vom geometrischen Schwerpunkt der Kabelbündel gewählt. Dieser wird in den Koordinatenursprung gelegt, so dass die y-Achse stets eine Symmetrieachse der Anordnung bildet. Der Abstand der Systeme untereinander beträgt 250 mm.

Tabelle 3-4: Berechnungsergebnisse der maximalen Effektiven magnetischen Flussdichte

Anzahl der Drehstromsysteme	Anordnung	Effektivwert der magnetischen Flussdichte [μT]			
		$B_{\max(x)}$	$B_{\max(+y)}$	$B_{\max(-y)}$	$\bar{B}_{\max(x,y)}$
3	⊗ ⊗ ⊗	32,2	25,1	25,1	28,6
	⊗ ⊗ ⊗	28,5	27,9	28,4	28,3
4	⊗ ⊗ ⊗ ⊗	36,7	22,7	23,0	29,8
	⊗ ⊗ ⊗ ⊗	28,2	28,2	28,2	28,2
5	⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗	44,5	20,5	20,5	32,5
	⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗	29,6	26,1	27,6	28,2
6	⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗	59,9	18,1	18,3	39
	⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗	30,3	26	26	28,2
	⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗ ⊗	28,4	29,5	27,2	28,4

Die grau unterlegten Zeilen der Tabelle 3-4 markieren die Anordnungen mit den im Mittel geringsten Flussdichten. Je kompakter die Anordnung der Systeme ist desto geringer ist der Einwirkungsbereich des Feldes auf die Umwelt. Dennoch besteht im speziellen Fall die Möglichkeit, durch die Wahl einer Einebenenordnung das Feld in einer bestimmten Richtung noch stärker zu reduzieren. Unabhängig von der Systemanzahl werden bei günstiger Anordnung und konstantem Berechnungsabstand gleiche mittlere Flussdichten generiert.

Für die untersuchte Anzahl der Systeme ist die Anordnung in zwei Ebenen hinsichtlich der Ausdehnung ihres Einwirkungsbereiches die günstigste Variante. Bezüglich des Immissionsgrenzwerts der 26. BImSchV und der NISV kann die Anordnung in einer Ebene parallel zu Orten empfindlicher Nutzung eine noch größere Feldreduktion bewirkt werden.

3.3.2 Unterschiede der Kabeltypen

Jedes nach dem Stand der Technik gefertigte Kabel besitzt eine Kabelbezeichnung, welche z.B. Auskunft über dessen Bemessungsspannung, Isolierwerkstoff und Aderzahl gibt. Ein Auszug der Aufschlüsselung der Kennzeichnung von harmonisierten Starkstromleitungen kann dem Anhang 9.4 entnommen werden. Aufgrund der hohen Eindringtiefen der 50 Hz-Felder gemäß Abschnitt 3.2.3 kann die Abschirmung durch die sehr dünnen Leitschichten einzelner Kabel vernachlässigt werden. Die Isoliermedien haben praktisch keinen direkten Einfluss auf das magnetische Feld. Indirekt jedoch können sich die Flussdichten symmetrischer Drehströme durch die isolationsbedingten Leiterabstände nicht aufheben und führen bei variierenden Isoliermedien zu unterschiedlichen Leiterabständen. Die für das magnetische Feld relevanten Kenngrößen sind die Aderzahl, die maximale Strombelastbarkeit und der Leiterabstand. Da dieser der Kabelkennzeichnung nicht entnommen werden kann, müssen detaillierte Herstellerangaben herangezogen werden.

Durch die Simulation der Belastung unterschiedlicher Kabeltypen mit konstanter Stromstärke und bei gleichem Berechnungsabstand, können differierende Aderzahl und Leiterabstände für ein symmetrisches Drehstromsystem untersucht werden.

Tabelle 3-2: Ergebnisse der magnetischen Flussdichte typischer Niederspannungskabel in einem Berechnungsabstand von 20 cm, $I = 200 \text{ A}$

Kabelbezeichnung	Leiterabstand a [mm]	B [μT]
NA2XY 0.6/1kV 4*95SE	11	14,9
NA2X2Y 0.6/1 kV 4*95SE	13	17,5
NAKBA 0.6/1kV	4*95SM	16,2
	3*95SM	13,9
NKBA 0.6/1kV	4*95SM	16,2
	3*95SM	13,9
NYCWY 0.6/1kV	4*95SM/50	16,2
	3*95SM/50	13,9

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die geringeren Leiterabstände entsprechend Abschnitt 2.4.3 eine schwächere Feldintensität verursachen und die dreiadrigen Kabeltypen gegenüber den vieradrigen aufgrund des Einflusses des Nullleiters nach Abschnitt 2.5.2 ein geringes Feld aufweisen. Einen wesentlichen Einfluss auf den Leiterabstand hat die Ausführungsform als Gürtelkabel oder Höchststädter Kabel, durch die radiale Verteilung des elektrischen Feldes im Höchststädter Kabel können Isoliermedien dünner und damit die Leiterabstände geringer gewählt werden.

Die Verringerung der Leiterabstände um 1 mm, hat eine Absenkung der Flussdichte um ca. 7,4 % zufolge. Die dreiadrigen Kabeltypen verursachen gegenüber den vieradrigen ein geringeres Feld.

3.3.3 Abstand zwischen Kabeln

In der Praxis werden Kabel dicht beieinander geführt. Die Vermutung, dass ebenso wie in den vorherigen Abschnitten eine kompaktere Anordnung der Kabel zu einem geringeren Feld führt, wird nun geprüft werden. Hierzu wird die Anordnung von 6 Drehstromsystemen in zwei Ebenen der Abbildung 3.1 und deren Parameter nach Abschnitt 3.3.1 angenommen.

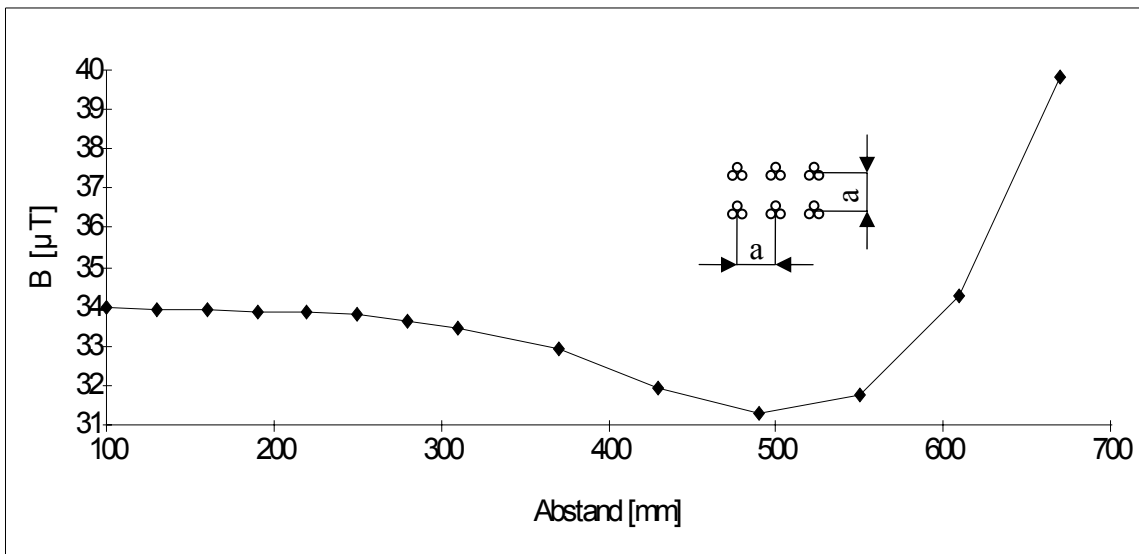


Diagramm 3.1: Mittelwert der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von dem Abstand a der Kabel bei einem Berechnungsabstand von 1 m zum geometrischen Schwerpunkt der Anordnung

Durch die Darstellung der mittleren Flussdichte in Abhängigkeit vom Abstand der Systeme wird deutlich, dass nicht die kompakteste Anordnung die geringste Flussdichte erzeugt, sondern dass es einen idealen Abstand gibt bei dem die Flussdichte minimal wird. Der Flussdichteunterschied kleinerer Abstände ist mit bis zu 8,5 % relativ gering. Bei größeren Abständen ist dagegen ein quadratischer Anstieg der Flussdichte zu erkennen. Dicht beieinander geführte Kabel sind somit eine für das Feld günstige Variante der Anordnung. Die Grenzen liegen im Außendurchmesser der Kabel und der veränderten Strombelastbarkeit infolge der Häufung.

Im speziellen Fall, z.B. bei einer geringen Grenzwertüberschreitung, kann die Optimierung des Abstandes einen Beitrag zur Feldreduktion leisten.

3.3.4 Verdrillte Kabel

Da Kabel der Energieversorgung im Niederspannungsbereich häufig verdrillt ausgeführt werden, lassen sich basierend auf der Arbeit „Magnetische Flussdichte an Kabeltrassen der elektrischen Energieversorgung“ die wesentlichsten Aussagen zusammenfassen [02, S. 24 ff].

Ein Vergleich der analytisch exakten und der approximativen Lösung mit der Simulation durch WinField[®] führte zu dem Ergebnis, dass die Simulation der Verdrillung mittels 16 geradliniger Teilleiter zu besserer Übereinstimmung mit der exakten Lösung führt, als die Approximation, deren Fehler mit 10 % angegeben wird. Somit kann die magnetische Flussdichte an verdrillten Leitern mit dem Berechnungsprogramm WinField[®] bestimmt werden. [02, S. 26]

Bei einem verdrillten Kabel bilden die Leiter drei ineinander versetzte lang gezogene Spulen. Die Verseilschlaglänge p entspricht der Strecke, in der die Leiter das Zentrum des Kabels einmal umrunden und wird, als Grad der Verdrillung verstanden. Damit sind die für das magnetische Feld relevanten Kenngrößen die Aderzahl, die Stromstärke, der Leiterabstand und der Verseilschlag. Für die magnetische Flussdichte von symmetrischen Drehstromleitungen gilt unter den Bedingungen $r \gg a$, $2\pi r \gg p$, $a \ll p$ und einer symmetrischen Belastung in erster Näherung:

$$B = \frac{3\mu_0 I a}{4\sqrt{\pi} \cdot r^2} \left(\frac{2\pi r}{p} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\left(\frac{2\pi r}{p} \right)} \quad (3.3)$$

Für das verdrillte Drehstromkabel NA2XS(F)2Y mit einer theoretischen Belastung der Außenleiter von jeweils 2309 A, einem Leiterabstand von 0,05 m und einer Verseilschlaglänge von 1,5 m ergibt sich der magnetische Flussdichteverlauf mit dem Abstand wie folgt.

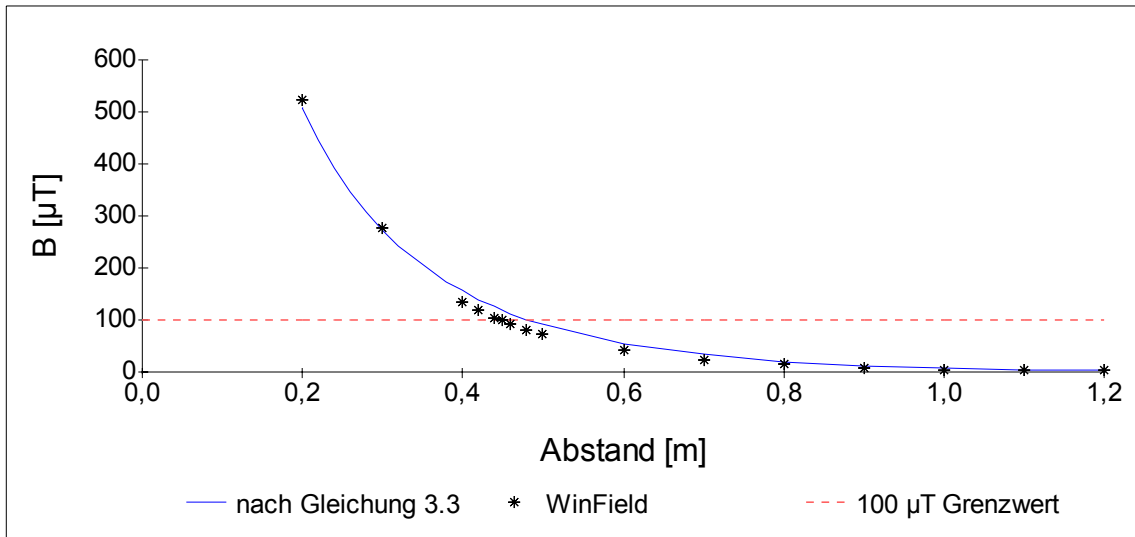


Diagramm 3.2: Flussdichte in Abhängigkeit des Abstandes vom geometrischen Schwerpunkt des verdrehten Kabels NA2XS(F)2Y

Bei der Bestimmung des Abstandes, ab dem die Flussdichte $100 \mu\text{T}$ unterschreitet, beträgt der Unterschied der Programmberechnung zur Nährungsformel ca. 6,5 %. Um den Einfluss des Verseilschlages zu beurteilen, wird unter den gleichen Randbedingungen bei einem konstanten Berechnungsabstand von 1,5 m die Verseilschlaglänge variiert und im folgenden Diagramm der Flussdichte des geraden Kabels gegenübergestellt.

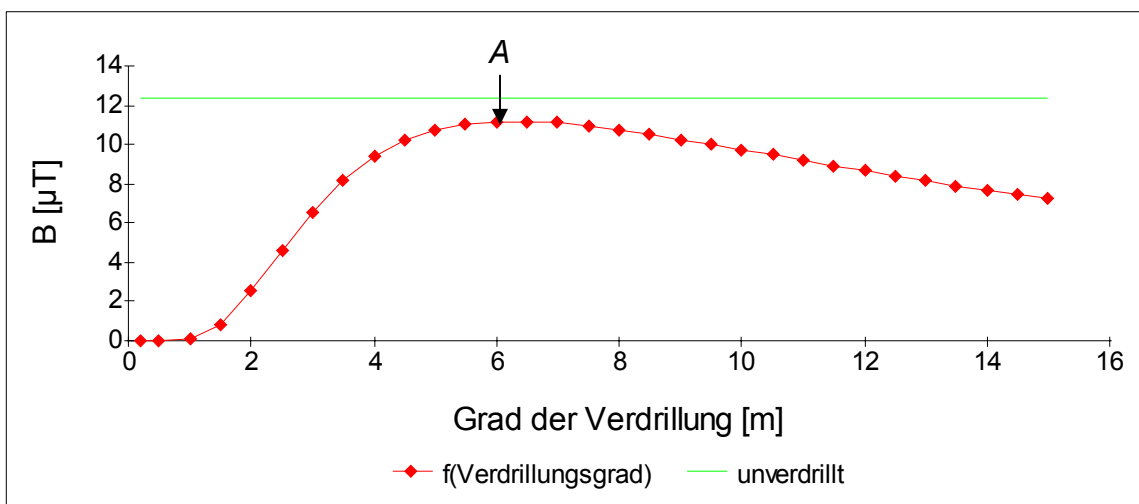


Diagramm 3.3: Flussdichte in Abhängigkeit des Verdrillungsgrades des verdrehten Kabels nach Gleichung 3.3 und Flussdichte des geraden Kabels

Da für ein unverdrilltes Kabel die Verseilschlaglänge gegen unendlich geht, wäre eine asymptotische Annäherung an dessen Flussdichte zu erwarten. Ab dem Maximum A wird der Einfluss der Bedingung $2\pi r \gg p$ deutlich. Der Unterschied der Flussdichten im Maximum ist so gering, dass größere Verseilschlaglängen in Bezug auf die Reduktion der Flussdichte unberücksichtigt bleiben können.

Einen entscheidenden Einfluss auf die Feldabnahme mit dem Abstand hat der Schlagwechsel der Gegenschlagverseilung. An diesem Teilabschnitt des Kabels entspricht die Feldabnahme der eines geraden Kabels, dessen Leiter im Dreieck angeordnet sind. Ein Schlagwechsel erfolgt ca. alle 20 m, so dass für die in der Regel kürzeren Kabelverbindungen zwischen den Transformatoren und den Niederspannungsverteilungen entweder Kabel mit einer Gleichschlagverseilung verwendet werden oder das genau der Teil des gegenschlagverseilten Kabels Verwendung findet, in dem kein Schlagwechsel vorliegt. [02, S. 32]

Die Verringerung der Verseilschlaglänge hat eine Reduktion der Flussdichte zufolge. Die Feldabnahme erfolgt exponentiell und damit stärker als jede Potenz. Durch die begrenzte Anzahl von 50000 Teilleitern in WinField® wird eine beliebige Erweiterung von Anordnungen eingeschränkt.

3.3.5 Verflochtene Kabel

Das Verflechten von Kabeln stellt eine komplexere Form der Verdrillung dar. Auch bei einem verflochtenen Kabel bilden die Leiter drei ineinander versetzte, lang gezogene Spulen. Die Schlaglänge der Verflechtung w (engl.: weave) wird im folgendem als die Strecke bezeichnet, in der die Leiter eine Periode durchlaufen und kann als Grad der Verflechtung verstanden werden.

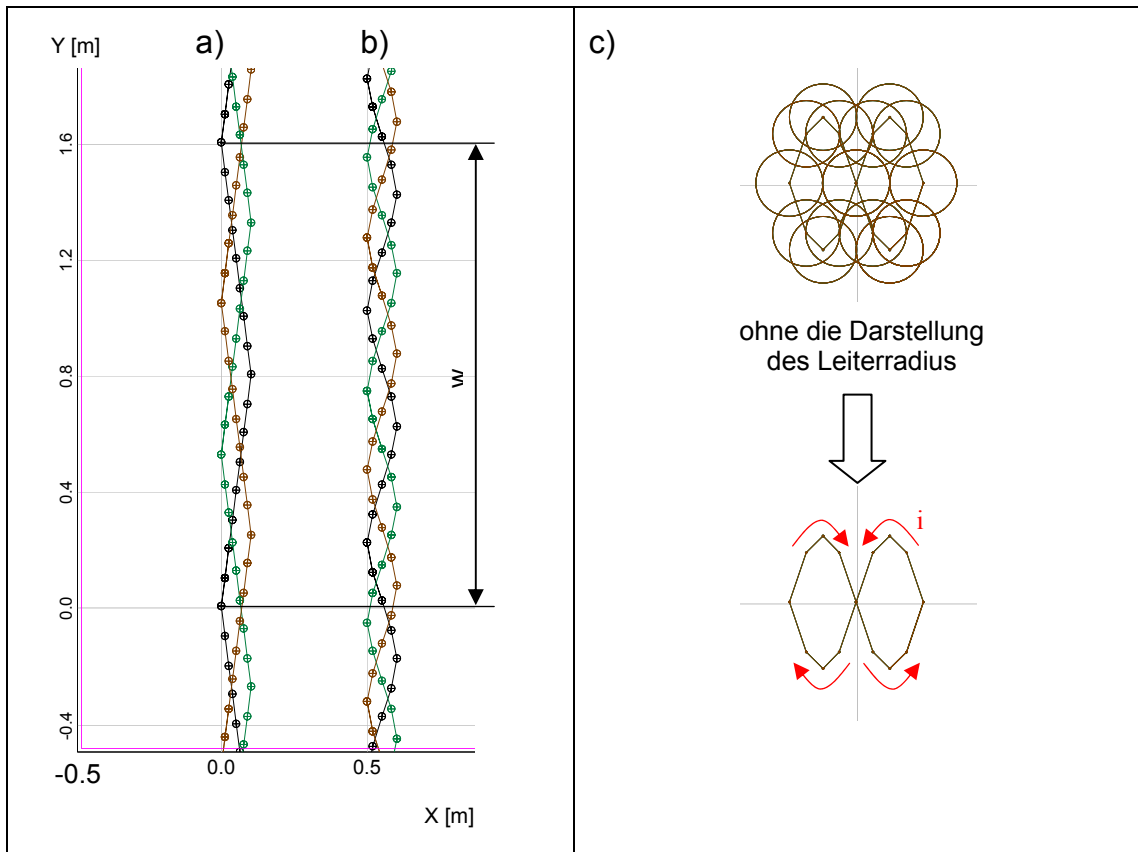


Abbildung 3.4: Schläglänge der Verflechtung $w = 1,6 \text{ m}$
eines Dreileiterkabels

a) Draufsicht
b) Seitenansicht
c) Frontansicht

Besonderheiten der Verflechtung sind zum einen, dass bei der Bestimmung der Schläglänge in der Draufsicht eine Periode und in der Seitenansicht zwei Perioden je Leiter durchlaufen werden, und zum anderen dass jeder Leiter in einer Schläglänge der Verflechtung eine in sich gedrehte Leiterschleife bildet. Da die Stromrichtungen in den zwei Teilstücken der Leiterschleife entgegengesetzt sind, werden auch die die Teilstücke umgebenden magnetischen Felder gegeneinander gerichtet. Die Nachbildung der Schläglänge eines Leiters erfolgt durch 16 Teilleiter. Daraus ergibt sich für die Nachbildung in WinField[®] die maximale Kabellänge zu:

$$l_{\max} = w \cdot \frac{3125}{n_{\text{Kabel}} \cdot n_{\text{Leiter}}} \quad (3.4)$$

In der folgenden Untersuchung wird die Schlaglänge w des verflochtenen Kabels variiert, um dessen Einfluss auf die Feldabnahme zu untersuchen.

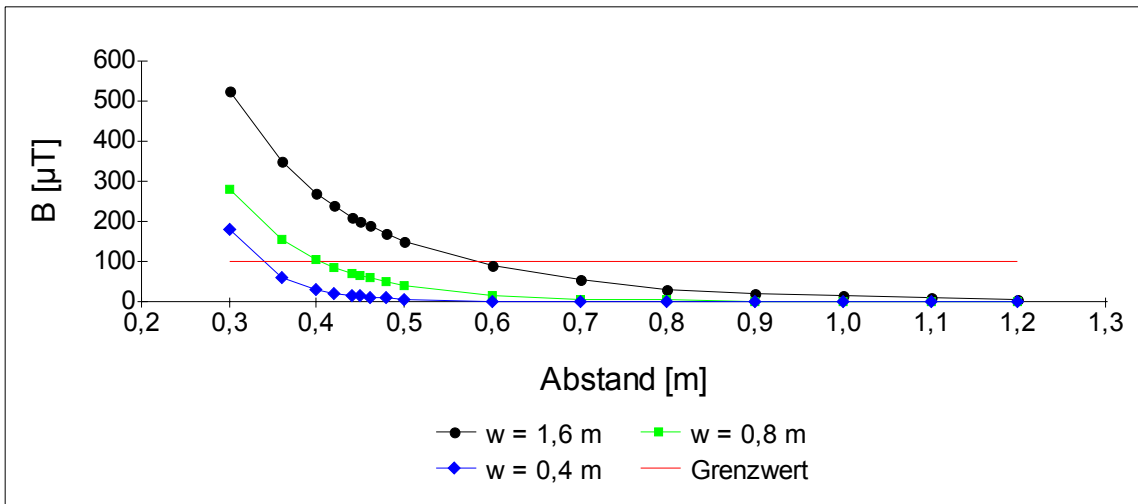


Diagramm 3.4: Flussdichte in Abhängigkeit des Abstandes und des Grades der Verflechtung

Die Verringerung der Schlaglänge w , hat eine stärkere Feldabnahme mit dem Abstand zufolge. Der Abstand, ab dem der Grenzwert unterschritten wird, kann somit ebenfalls verringert werden. Aus einem Vergleich der Feldabnahme mit dem Abstand eines geraden, verdrehten und verflochtenen Kabels wird der Einsatz der Verflechtung bezüglich der Feldreduktion klar.

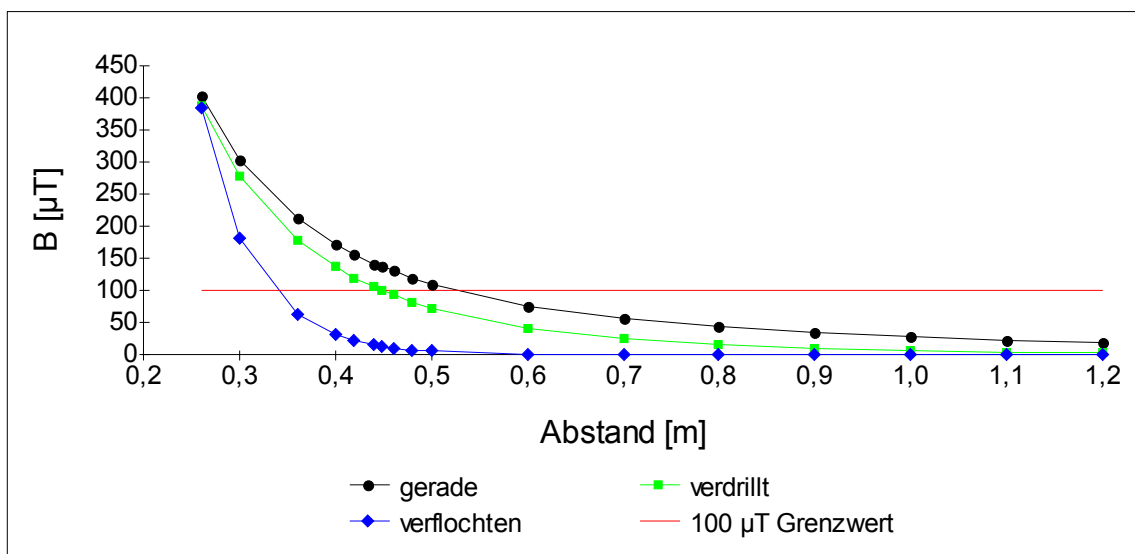


Diagramm 3.5: Flussdichte in Abhängigkeit des Abstandes

Bei einem Verflechtungsgrad von 0,4 m kann der Abstand ab dem der Grenzwert unterschritten wird gegenüber der geraden Anordnung bei gleichem Leiterabstand um ca. 35 % verringert werden. Weiterhin führt bei konstanten Verflechtungsgrad die Verringerung des Leiterabstandes von 0,05 m auf 0,025 m zu einer weiteren Reduktion um ca. 10 %. Ein großer Verflechtungsgrad z.B. 1,6 m führt gegenüber der geraden Anordnung der Leiter zur Vergrößerung des Abstandes, ab dem der Grenzwert unterschritten wird.

Die Verringerung des Verflechtungsgrades hat eine Reduktion der Flussdichte zufolge. Die Feldabnahme erfolgt exponentiell und damit stärker als jede Potenz. Die Leiter sind eng und mit möglichst geringem Abstand zu einander zu verflechten. Durch die begrenzte Anzahl von 50000 Teilleitern in WinField® wird eine beliebige Erweiterung von Anordnungen eingeschränkt.

3.3.6 Punktsymmetrische Kabelanordnung

Unter punktsymmetrischen Kabelanordnungen sind parallel geschaltete Kabel zu verstehen, deren Phasenleiter zueinander räumlich symmetrisch angeordnet werden (engl. phase-splitting). Hierbei hat die Parallelschaltung der Kabel unabhängig von der Stromstärke eine konstante bleibende Symmetrie der Leiter gleicher Phasenlage zufolge. [06, S. 455]

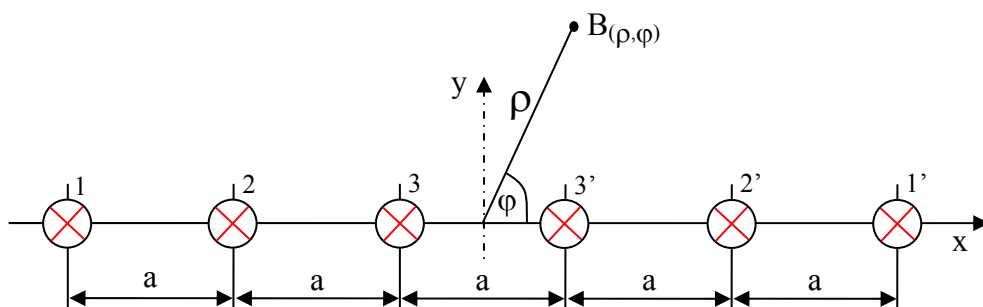


Abbildung 3.5: Aufspaltung der Phasen in punktsymmetrischer Anordnung [06, S. 455]

Unter Berücksichtigung der Abbildung 3.5 gilt folgende Gleichung [06, S. 455]:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi \cdot \rho^3} \cdot 2 \cdot \sqrt{7} \cdot a^2 \quad (3.5)$$

Bei der Nachbildung in WinField® passen sich die Feldlinien in unmittelbarer Nähe der Leiteranordnung an. Daraus folgen ein ovales Feldbild und leicht differierende Werte der Flussdichte bei gleichem Berechnungsabstand in x- und y-Richtung. Durch die Mittelwertbildung des maximalen und des minimalen Wertes der Flussdichte lassen sich die Berechnungsergebnisse der Gleichung 3.5 mit der Programmberechnung vergleichen. Die daraus folgende Abweichung von ca. 0,6 % ist gering. Dennoch ist mit dem Programm eine genauere Bestimmung der Flussdichte in alle Richtungen der Leiter möglich. Werden die Leiter im Dreieck angeordnet kann das Ergebnis nach Gleichung 3.6 unter der Bedingung $5 \text{ mm} \leq a \leq 50 \text{ mm}$ und mit einer prozentualen Abweichung von $< 10 \%$ gegenüber der Programmberechnung abgeschätzt werden. Durch die Anordnung der Leiter im Dreieck lässt sich die Flussdichte ungefähr um den Faktor 2,71 verringern.

$$B = \mu_0 \cdot \frac{I}{e \cdot 2\pi \cdot \rho^3} \cdot 2 \cdot \sqrt{7} \cdot a^2 \quad (3.6)$$

Werden mit dieser Erkenntnis die Phasen mehrerer parallel geschalteter Systeme optimiert, lassen sich unabhängig von der Anzahl der verwendeten Ebenen, starke Reduktionen des magnetischen Feldes in eine bestimmte oder geringere Reduktion in alle Richtungen der Feldquelle realisieren. In der Nähe mehrerer stromdurchflossener Leiter überlagern sich deren Felder nach Phasenlage und Richtung zu einer Gesamtflussdichte. Durch eine günstige Wahl der Phasenordnung heben sich die Flussdichten der einzelnen Leiter zu einem größeren Teil auf. Die Feldabnahme mit dem Abstand erfolgt mit der dritten Potenz. Der Unterschied der Flussdichte einer phasenoptimierten Anordnung zu der ungünstigsten Anordnung an einem Ort der Berechnung kann bis zu 6000 % betragen. [02, S. 36 ff]

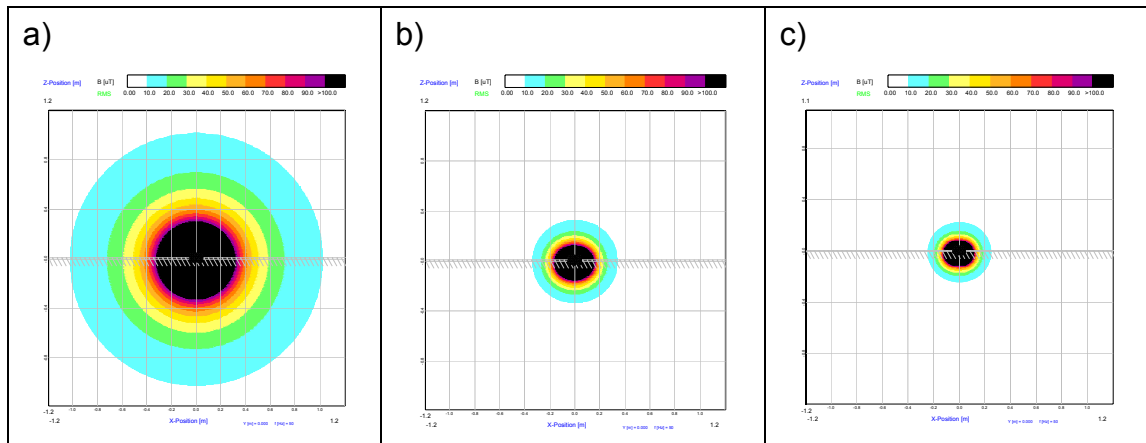


Abbildung 3.6: Feldbilder des Starkstromkabels NAKBA 0.6/1kV 3*240SM in

- a) unsymmetrischer Anordnung
- b) axialsymmetrischer Anordnung
- c) punktsymmetrischer Anordnung

Parameter: $I = 2309 \text{ A}$, $a = 0,018 \text{ m}$, $n_{\text{Kabel}} = 6$

Zur detaillierten Erläuterung der Phasenoptimierung herkömmlicher Starkstromkabel in verschiedenen Ebenen wird auf die Diplomarbeit „Magnetische Flussdichte an Kabeltrassen der Energieversorgung“ verwiesen [02, S. 36 ff].

Durch die Aufspaltung der Ströme verringern sich die Leiterquerschnitte und es können geringere Leiterabstände verwendet werden. Dies wiederum führt dazu, dass sich die Felder der einzelnen Leiter stärker überlagern und somit das resultierende Feld verringern. In der folgenden Untersuchung wird geklärt inwieweit sich durch den Einsatz flexibler Vielfachverbindungen mit geringen Leiterquerschnitten die Flussdichte in einem Abstand von 0,2 m verringern lässt. Bei einem Strom je Außenleiter von 2309 A ergibt sich durch die Parallelschaltung von Leitern mit einem Querschnitt von 2,5 mm² und einer Strombelastbarkeit von 30 A eine Anzahl von 78 Drehstromsystemen in punktsymmetrischer Anordnung. Unter der Annahme der Leiterquerschnitte nach Tabelle 3-3 und einer durchschnittlichen Isolationsdicke von 1 mm werden die resultierenden Flussdichten in einem Berechnungsabstand von 0,2 m ermittelt.

Tabelle 3-3: Strombelastbarkeit ausgewählter Leiterquerschnitte nach der DIN VDE 0298-4 und die daraus folgende Anzahl der Drehstromsysteme in punktsymmetrischer Anordnung bei einer Stromsumme von 2309 A je Außenleiter

Nennquerschnitt der Leiter [mm ²]	Strombelastbarkeit [A]	Systemanzahl	Leiteranzahl
2,5	30	78	234
10	74	32	96
25	131	18	54
70	250	10	30
150	404	6	18
240	386 ^(*)	6	18

(*) Strombelastbarkeit des Starkstromkabels NAKBA 0.6/1kV 3*240SM der Kabelbibliothek in WinField

Die jeweiligen Flussdichten in einem Berechnungsabstand von $r = 0,2$ m werden im folgenden Diagramm zusammengefasst.

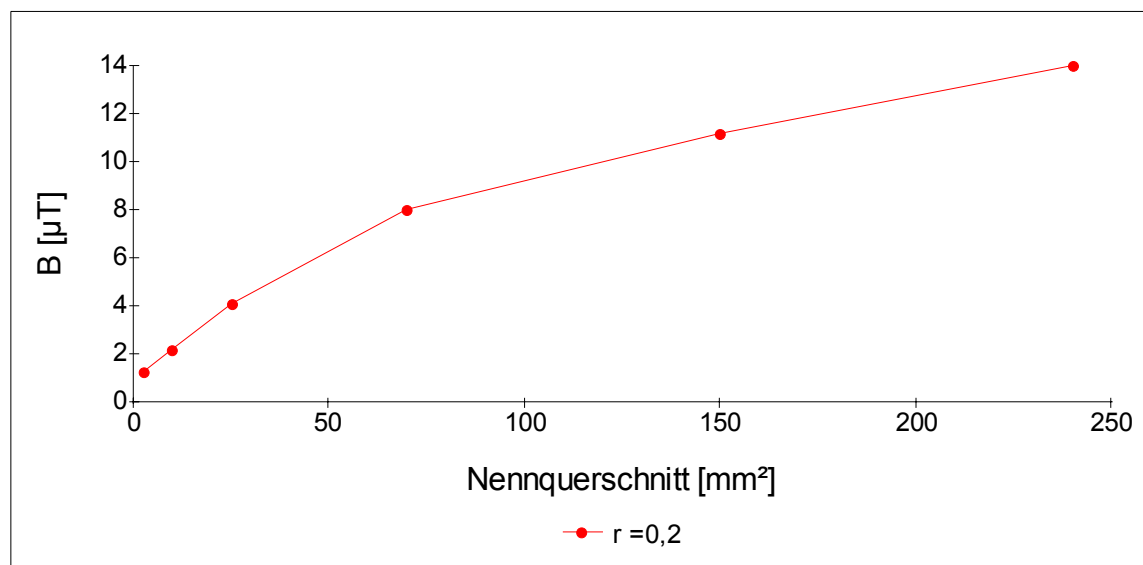


Abbildung 3.7: Flussdichte in Abhängigkeit des Leiterquerschnittes punktsymmetrisch angeordneter flexibler Kabel, $I = 2309$ A

Durch die Symmetrisierung der 6 Starkstromkabel ist gegenüber deren unsymmetrischer Anordnung eine Reduktion der Flussdichte um ca. 94 % erreicht worden. Werden zusätzlich durch einen Leiterquerschnitt von $2,5$ mm² die Abstände zwischen den Leitern verringert, beträgt die Reduktion 99,5 %.

Wird ein Strom durch die Parallelschaltung von flexiblen Leitern aufgeteilt, sind durch die Kombination aus punktsymmetrischer Anordnung und der Verringerung des Leiterquerschnittes erhebliche Feldreduktionen möglich. Da die Reduktion in alle Richtungen des Kabels erfolgt ist die Optimierung im Hinblick auf die Immissionsgrenzwerte der 26. BImSchV und NISV, aber auch des Anlagengrenzwertes der NISV möglich.

4 Reduktion des Feldbeitrages von Transformatoren in Netzstationen hinsichtlich der 26. BImSchV und Schweizer NISV

Um einen wirtschaftlichen Energietransport von den Kraftwerken zu den Verbrauchern zu gewährleisten, ist es notwendig die erzeugte Energie so umzuwandeln, dass für die Energieübertragung über größere Entfernungen eine hohe Spannung einen kleinen Strom treibt und dem Verbraucher wiederum eine definierte Spannung mit größeren Stromstärken zur Verfügung steht, so dass sich der Übertragungsweg der Energie in verschiedene Spannungsebenen einteilen lässt. Das Bindeglied zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen stellt der Transformator dar. Transformatoren sind elektrische Maschinen ohne ständig in Bewegung befindliche aktive Teile, die elektrische Energie mittels elektromagnetischer Induktion aus elektrischen Systemen bestimmter in elektrische Systeme gewöhnlich anderer Strom- und Spannungswerte gleicher Frequenz übertragen. Sie stellen entscheidende Übertragungselemente zwischen den Generatoren der Kraftwerke und den Verbrauchern dar. Bei Drehstromtransformatoren sind die Oberspannungswicklung (OS) und die Unterspannungswicklung (US) einer Phase jeweils auf einem Schenkel des Eisenkerns angeordnet, wobei die US- Wicklung aus Isolationsgründen unter der OS- Wicklung liegt. Die Wicklungsein- und Wicklungsausgänge werden über Durchführungen herausgeführt und mit 1U, 1V, 1W für die Oberspannungs-, bzw. 2U, 2V, 2W für die Unterspannungswicklungen gekennzeichnet (alte Kennzeichnung R, S, T). Damit ergibt sich der Verlauf des Streuflusses nach Abbildung 4.1.

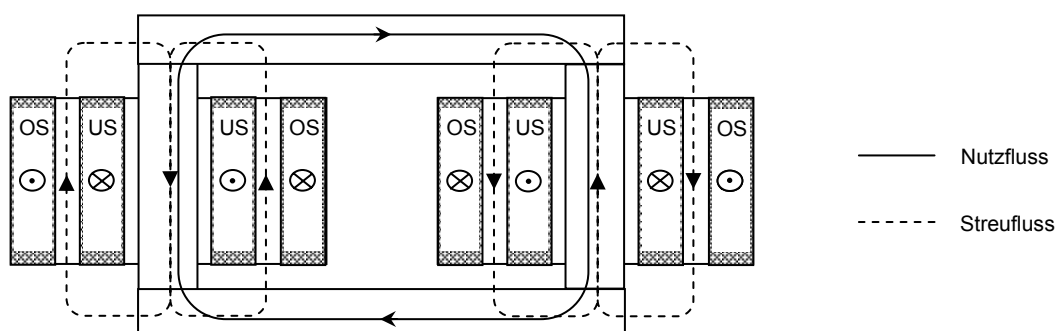


Abbildung 4.1: Streufluss bei innen liegender Unterspannungswicklung für zwei bewickelte Schenkel in schematischer Darstellung [14, S. 192]

Die jeweils drei OS- und US- Wicklungen werden zu zwei Drehstromwicklungen verschaltet (Stern-, Dreieck-, Zickzackschaltung). In der Praxis wird für Verteilungstransformatoren mit voll belastbaren Nulleiter, gewöhnlich die Schaltgruppe *Dyn5* gewählt. Wobei *D* für die in Dreieck verschaltete OS-Wicklung, *y* für die Sternverschaltung der US- Wicklung steht und *n* die Herausführung des Nulleiters angibt. Die 5 entspricht dem Vielfachen von 30°, um den die Spannung der Unterspannungsseite der Spannung der Oberspannungsseite nacheilt.

Die Nachbildung in WinField[®] beruht auf den Abmessungen und den Betriebsdaten der Hersteller und darauf, dass der Streufluss von drei Luftspulen verursacht wird. Der jeweilige Strom der einzelnen Spulen ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$I_{Wicklung} = I_n \cdot \frac{u_k}{S} \quad (4.1)$$

Der Einsatz von Öltransformatoren hat gegenüber dem von Trockentransformatoren den Vorteil, dass der Streufluss zum Teil von der Kesselwand geführt wird und somit zur Senkung des resultierenden Feldes beiträgt. In WinField[®] kann dies über einen bestimmten Schirmfaktor des Transformatorgehäuses oder über eine differierende Stromstärke auf den Wicklungen simuliert werden.

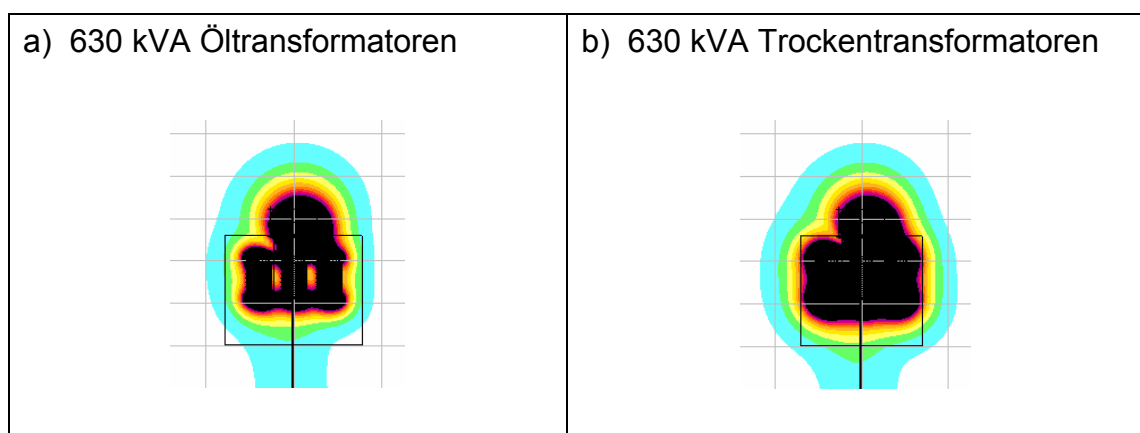


Abbildung 4.2: Feldbilder der Transformatoren in einer Schnittdarstellung

4.1 Aufstellung und Positionierung

Um generell den Einflussbereich des Streuflusses im Umfeld der Station gering zu halten, muss die Aufstellung der Transformatoren möglichst im Zentrum der entsprechenden Räumlichkeiten oder gemäß Abschnitt 3.1.1 mit möglichst großem Abstand zu Orten empfindlicher Nutzung erfolgen. Zusätzlich sind folgende Punkte zu beachten:

- Sicherheitsabstände
- Ausführung der Hochspannungsverbindung
- Zugänglichkeit für Betrieb und Wartung
- Transportwege
- Kühlung, Lüftung
- Vorbeugender Brandschutz
- Hilfseinrichtungen
- Montage
- Ausfahrmöglichkeiten für Transformatorentausch [15, S. 175]

4.2 Abschirmung

Bei der Abschirmung des Streuflusses der Transformatoren kann in drei Varianten unterschieden werden.

1. Die Schirmung des kompletten Aufstellungsraumes
2. Die Schirmung des kompletten Transformators
3. Die Schirmung der Niederspannungsdurchführungen

Die magnetostatische Schirmwirkung S ergibt sich annähernd wie folgt:

$$S \approx 1 + \frac{2 \cdot \mu_r \cdot d}{3 \cdot r_0} \quad (4.1)$$

„Schirmwirkung und Schirmabmessung verhalten sich nahezu umgekehrt proportional, so dass besonders die Schirmwirkung großer Räume schwierig ist. Eine nennenswerte Schirmwirkung ist nur für $\mu_r \cdot d > r_0$ zu erreichen. Bei begehbaren Räumen mit $r_0 > 1\text{ m}$ kann diese Bedingung nur bei extrem hoher Permeabilität des Schirmmaterials erfüllt werden.“ [16, S. 3]

Da die 1. Variante stark abhängig von den entsprechenden Räumlichkeiten ist, wird in diesem Abschnitt nicht näher darauf eingegangen.

Eine komplette Schirmung des Transformators ist ebenso wie die Abdeckung der Niederspannungsdurchführungen mit Hilfe einer speziell für diesen Zweck entwickelten Abschirmkonstruktion möglich. Eine Vergleichsuntersuchung soll die Reduktionswirkung der Abschirmungen deutlich machen. Hierzu wird ein 630 kVA Transformator mit und ohne Abschirmung bei einem konstanten Berechnungsabstand von 1 m zu den Transformatoraußenseiten unter voller Auslastung berechnet. Der Schirmungsfaktor $S = 12$ der Abdeckhaube wird dem Berechnungsprogramm WinField[®] entnommen. Zusätzlich wird das Transformatorgehäuse mit einem Schirmungsfaktor $S = 5$ simuliert, um so den 1 μT Verlauf des Herstellers ALSTOM nachzubilden. Die komplette Abschirmung des Transformators kann durch die Schirmungsfaktoren nur begrenzt nachgebildet werden. Daher werden die aus den Messdaten der EMV-Consulting AG hervorgehenden prozentualen Reduktionen der Flussdichte auf die entsprechenden Maximalwerte umgerechnet.

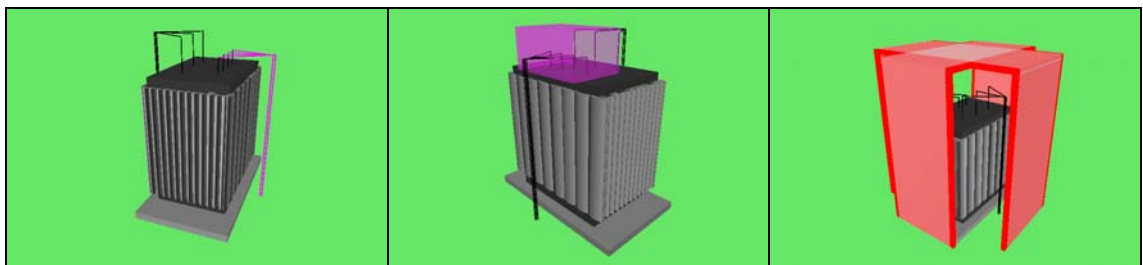


Abbildung 4.3: Darstellung des 630 kVA Öltransformators und ausgewählter Abschirmungen

Tabelle 4-1: Flussdichte eines 630 kVA Öltransformators in Abhängigkeit von der Berechnungsrichtung, der Abschirmung und eines konstanten Berechnungsabstandes von 1 m zu den Transformatorseiten

	$B_{\max(+x)}$ [μT]	$B_{\max(-x)}$ [μT]	$B_{\max(+y)}$ [μT]	$B_{\max(-y)}$ [μT]	$B_{\max(+z)}$ [μT]
ohne Abschirmung	2,2	9,5	1,5	2,5	14,4
mit Teilabschirmung	1,2	5,9	1,7	1,7	3,2
prozentuale Reduktion	45,5 %	37,9 %	-	32 %	77,8 %
mit kompletter Abschirmung	0,4	1,4	0,4	0,7	1,4
prozentuale Reduktion	81 %	84 %	72 %	71 %	90 %

Durch die speziellen Abschirmungen können Reduktionen der Flussdichte im Umfeld des Transformators von 32 % bis 90 % erreicht werden.

5 Besonderheiten feldarmer Transformatoren

Aufgrund der Unsicherheiten über die Wirkungen der niederfrequenten magnetischen Felder auf den Menschen und den kleinen Anlagengrenzwerten der NISV haben Hersteller durch konstruktive Maßnahmen auf diese Problematik reagiert und strahlungsreduzierte Transformatoren entwickelt. In diesem Kapitel werden einige dieser Maßnahmen zusammengetragen und kurz erläutert. Zur Nachbildung in WinField[®] werden die Datenblätter, die Abmessungen und die Messdaten der Flussdichte im Umfeld des Transformators benötigt.

5.1 Das Joch

Die Grundregeln der Hersteller des strahlungsreduzierten Transformators sind:

- Den Streufluss dort verringern, wo er entsteht.
- Den Streufluss führen und nicht verdrängen. [17, S. 24]

Der durch die Primärwicklungen erzeugte Hauptfluss wird mit der Hilfe des Eisenkerns in die Sekundärwicklungen geleitet. Aufgrund der Sättigung des Kernmaterials und der entstehenden Wirbelströme im Kern wird ein Feld verursacht, dessen Fluss sich nicht über den Eisenkern schließt, so dass neben der inneren Flussführung des Hauptflusses eine äußere Flussführung des Streuflusses notwendig ist, um die Flussdichte im Umfeld des Transformators zu verringern. Die Entstehungsorte des Streuflusses sind die Wicklungen und die Stellen des Kernes, in denen vermehrt Wirbelströme entstehen. Eine davon stellt die Verbindungen des Schenkels mit dem Joch dar. Durch die Anpassung der Jochblechschnitte an eine ovale Form können magnetische Querflüsse verringert werden [14, S. 49]. Aufgrund dieser ovalen Form (Abbildung 4.1) werden sie auch als Flachjoch bezeichnet [17, S. 25]. Der Hauptfluss kann besser geführt werden, wodurch sich der Streufluss verringert.

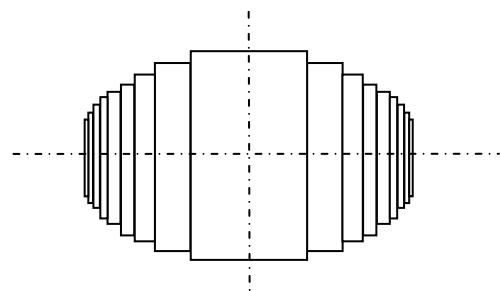


Abbildung 5.1: Querschnitt des Joches

5.2 Punktsymmetrische NS- Durchführung

Da niederspannungsseitig höhere Ströme vorliegen und diese ein dem Strom proportionales Magnetfeld verursachen, sind die Durchführungen der Niederspannungsseite in der Praxis von besonderen Interesse. Dennoch treffen sämtliche Überlegungen bezüglich der Feldreduktion auch auf die Primärdurchführungen des Transformators zu. Ebenso wie die punktsymmetrische Anordnung der Kabel des Abschnittes 3.3.6, führt auch eine punktsymmetrisch angeordnete Verbindung der Unterspannungswicklungen zu den Durchführungen zur Reduktion der Flussdichten mit dem Abstand. Dazu werden die Wicklungsstränge aufgeteilt und möglichst dicht am Sternpunkt entlang über die Durchführungen 2U1, 2V1, 2W1 und 2U2, 2V2, 2W2 herausgeführt. Die Anordnung der Durchführungen erfolgt punktsymmetrisch zu deren geometrischen Schwerpunkt (Abbildung 4.2) und durch den Einsatz hochwertiger Isolierstoffe möglichst eng.

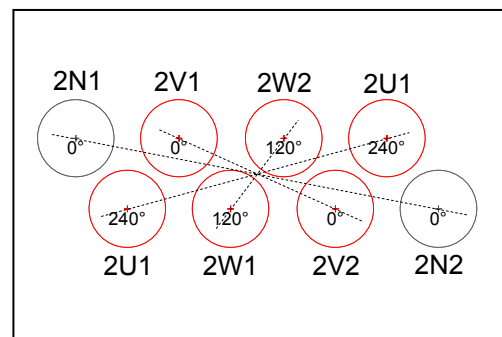


Abbildung 5.2: Draufsicht der punktsymmetrischen NS-Durchführungen

5.3 Position der Durchführungen

Die Frage über die Positionierung der Durchführungen folgt aus praktischen Überlegungen bezüglich der Haupteinsatzorte der Transformatoren. Umspannstationen und Einbaustationen grenzen in der Regel unmittelbar an das Erdreich an, daher ist es sinnvoll die Felder der Transformatoren nach unten zu verlagern. Einen entscheidenden Beitrag leistet die punktsymmetrische Anordnung der Durchführungen im unteren Drittel des Transformators. Zur Nachbildung in WinField[®] werden die Datenblätter und die Abmessungen benötigt.

5.4 Schirmwirkung

Um die Ausdehnung des Streufeldes zu verringern, werden zur Führung des Streuflusses die Kesselwände in horizontaler und/oder vertikaler Richtung aus hochpermeablen Materialien gefertigt. Eine weitere entscheidende Schirmwirkung wird durch die Abdeckung der Niederspannungsdurchführungen erreicht. Die Nachbildung in WinField® erfolgt durch den abgestimmten Schirmfaktor der Gehäuse. Hierzu werden die Messdaten der Flussdichte des EMV-Transformators benötigt. Der Vergleich von drei verschiedenen Ausführungsformen eines 630 kVA Öltransformators macht die abschirmende Wirkung deutlich. Um den Einfluss der niederspannungsseitig angeschlossenen Kabel gering und konstant zu halten, werden zwei Kabel parallel und punktsymmetrisch angeordnet und nur deren Anschlusshöhe den einzelnen Transformatoren angepasst.

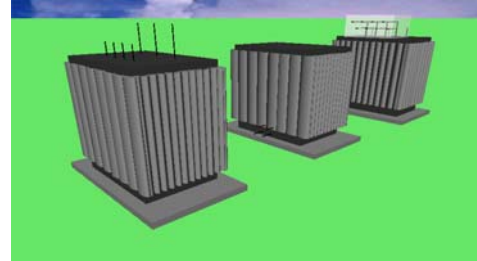


Abbildung 5.3: Darstellung der verglichenen Transformatoren in WinField®

Tabelle 5-1: Flussdichte verschiedener 630 kVA Öltransformatoren in Abhängigkeit von der Berechnungsrichtung und einem Berechnungsabstand von 1 m zu den Transformatorwänden

	$B_{\max(+x)}$ [μT]	$B_{\max(-x)}$ [μT]	$B_{\max(+y)}$ [μT]	$B_{\max(-y)}$ [μT]	$B_{\max(+z)}$ [μT]
Drehstromtransformator	1,68	5,66	1,54	1,45	15,3
EMV-Version 1, Durführungen unten	0,79	3,93	1,2	1,33	0,74
<i>prozentuale Reduktion</i>	53 %	31 %	22 %	8 %	95 %
EMV-Version 2, Durführungen punkt- symmetrisch, Abdeckhaube	0,42	1,24	0,55	0,52	4,27
<i>prozentuale Reduktion</i>	75 %	78 %	64 %	64 %	72 %

Während die Verlegung der Durchführungen nach unten eine starke Reduktion der Flussdichte über dem Transformator zufolge hat, können durch eine Kombination aus punktsymmetrischer Anordnung der Durchführungen und dem Einsatz hochpermeabler Abschirmmaterialien annähernd gleichmäßige Reduktionswirkungen der Flussdichte in alle Richtungen des Transformators erreicht werden.

Durch den Einsatz schirmender Materialien können Feldoptimierungen im Hinblick auf die Immissionsgrenzwerte der 26. BImSchV und NISV, aber auch des Anlagengrenzwertes der NISV realisiert werden.

6 Optimierung von Netzstationen hinsichtlich der 26. BImSchV und Schweizer NISV

Um die Maßnahmen der Reduktion der einzelnen Komponenten im Zusammenwirken mit den restlichen Komponenten zu beurteilen, wird in den folgenden Abschnitten durch die Nachbildung von Umspannstationen in WinField® eine Summenbetrachtung aller relevanten Immissionen durchgeführt.

6.1 Beschreibung und Darstellung der Netzstationen

Da in der Praxis auch Netzstationen mit zwei Verteiltransformatoren Anwendung finden, werden die im Folgenden dargestellten Beispielstationen untersucht.

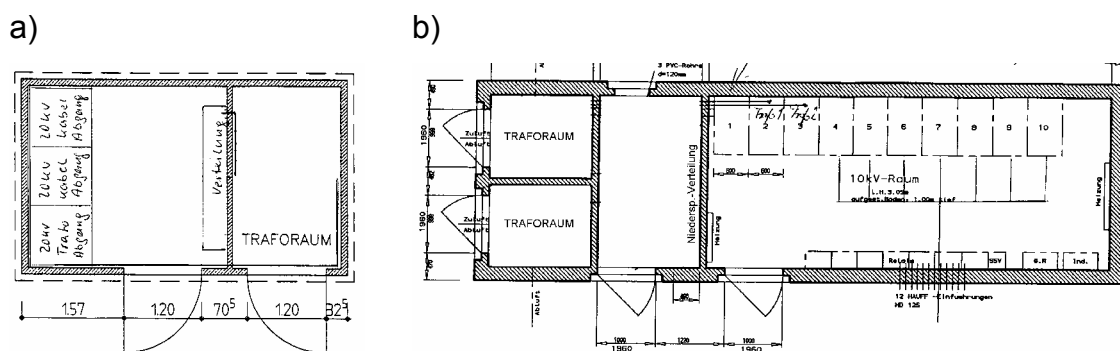


Abbildung 6.1: Umspannstationen a) mit einem 630 KVA Verteiltransformator
b) mit zwei 400 KVA Verteiltransformatoren

Bei beiden Stationen handelt es sich um bestehende Anlagen welche in WinField® als Beispiele implementiert sind. Dabei werden die Komponenten der Stationen wie Einspeisefeld und Niederspannungsverteilung nach Herstellerdaten generiert. Zur ausführlichen Beschreibung der Nachbildung dieser Komponenten wird auf die Diplomarbeit „Magnetische Flussdichte an MS-Schaltanlagen“ verwiesen [05, S. 35 ff]. In der Station a) wird über die 20 kV Einspeisung der Transformator versorgt, welcher entsprechend seiner Bemessungsleistung und einer Betriebsspannung von 0,4 kV einen Stromfluss durch die niederspannungsseitigen Kabel, der Niederspannungsverteilung und deren Abgängen zufolge hat. Der Unterschied der zweiten Station ist neben der

doppelten Anzahl an Transformatoren und Niederspannungsverteilungen die Versorgung der Transformatoren mittels zwei 12 kV Einspeisungen. Zur Ermittlung des Ist-Zustandes werden die maximalen Flussdichten an den Seiten und über der Decke der Stationen in einem Berechnungsabstand von 0,2 m bei voller Anlagenauslastung bestimmt.

Tabelle 6-1: Maximale Flussdichte der Umspannanlage in Abhängigkeit von der Berechnungsrichtung und eines konstanten Berechnungsabstandes von 1 m zu den Stationsseiten

	$B_{\max(+x)}$ [μT]	$B_{\max(-x)}$ [μT]	$B_{\max(+y)}$ [μT]	$B_{\max(-y)}$ [μT]	$B_{\max(+z)}$ [μT]
Station a)	48,00	57,28	73,04	25,73	59,41
Station b)	0,13	7,87	25,95	44,77	51,36

Die Feldbilder der einzelnen Seiten können dem Anhang 9.5 entnommen werden. Daraus geht hervor, dass an einigen Seiten die Felder der Verteilungen dominieren. Ob die Optimierung der Kabelverbindung und die Abschirmung der Transformatoren dennoch einen Einfluss auf die Flussdichten an diesen Seiten haben, wird im folgenden Abschnitt geklärt.

6.2 Gegenüberstellung optimierter Versionen der Netzstationen

Um die jeweiligen Maßnahmen der Reduktion des magnetischen Feldes im Außenbereich der Stationen zu beurteilen, werden die maximalen Flussdichten ebenfalls in einem Berechnungsabstand von 0,2 m zu den Außenwänden der Stationen ermittelt und mit den Werten der Tabelle 6.1 verglichen. Hierzu werden folgende Varianten erstellt:

1. Variante: Kabel punktsymmetrisch
2. Variante: Kabel punktsymmetrisch 0,8 m tief im Boden
3. Variante: Kabel punktsymmetrisch, EMV-Trafo
4. Variante: Raumschirmung

Um die Kabelverbindungen punktsymmetrisch anzuordnen, werden sie über eine Parallelschaltung in jeweils zwei Drehstromsysteme aufgeteilt. Der EMV-Transformator wird entsprechend der EMV-Version 2 des Abschnittes 5.4 eingesetzt. Die entsprechenden Schirmungsfaktoren der Raumschirmung werden der Materialbibliothek aus WinField® entnommen. Als Schirmmaterial findet Cfw μ -schild Gehäuse mit einer Materialstärke von $d = 2,1$ mm Anwendung.

Tabelle 6-2: Flussdichte der Stationen in Abhängigkeit von der Berechnungsrichtung, der Abschirmung und eines konstanten Berechnungsabstandes von 0,2 m zu der Stationseinhausung

Variante	Station	$B_{\max(+x)}$ [μ T]	$B_{\max(-x)}$ [μ T]	$B_{\max(+y)}$ [μ T]	$B_{\max(-y)}$ [μ T]	$B_{\max(+z)}$ [μ T]
1	a)	20,73	60,2	63,6	8,2	34,44
	b)	0,13	7,77	25,94	44,66	31,4
2	a)	20,7	60,15	63,58	8,2	34,42
	b)	0,13	6,13	25,99	41,57	13,37
3	a)	10,2	60,5	63,4	6,9	32,8
	b)	0,13	1,8	26,1	43,5	30,64
4	a)	28,18	25,36	56,5	16,5	34,3
	b)	0,12	4,4	25,2	40,6	45,48

6.3 Auswertung

Zur Station a) lassen sich folgende Besonderheiten festhalten:

In der negativen X-Richtung dominiert die Flussdichte der Hochspannungsverteilung. Das durch die Optimierungsmaßnahmen veränderte Feldverhältnis führt bis auf die Variante der Raumschirmung zu einer geringen Erhöhung der Flussdichte in dieser Richtung. Die punktsymmetrische Anordnung der Kabelverbindung zwischen dem Transformator und der

Niederspannungsverteilung hat Reduktionen von 13 % bis 68 % in den anderen Richtungen zufolge. Durch die zusätzliche Verlegung der Kabel im Boden der Station kann der Einfluss der Kabel auf das resultierende Feld bis auf die Verbindung vom Boden zu den Durchführungen und der vom Boden zu den Anschlüssen der Niederspannungsverteilung verringert werden. Da sich die Reduktionen der Flussdichte nur unwesentlich von der ersten Variante unterscheiden, ist in diesem Fall eine Verlegung im Boden nicht erforderlich. Der Einsatz des EMV-Transformators führt nur in der positiven X- und negativer Y-Richtung zu einer bemerkenswerten Reduktion. In alle anderen Richtungen sind somit die Felder der anderen Betriebsmittel wie z.B. der Niederspannungsverteilung dominant. Durch eine komplette Raumschirmung können in Abhängigkeit von dem verwendeten Material und der Materialstärken Reduktionen in alle Richtungen erreicht werden.

Station b) lässt sich folgendermaßen beurteilen:

Auch in diesem Fall werden an bestimmten Stationsbegrenzungen dominante Felder der anderen Betriebsmittel deutlich. Durch eine punktsymmetrische Anordnung der Kabel und deren Verlegung im Boden lässt sich nur die Flussdichte über der Station bemerkenswert reduzieren. Der Einsatz des EMV-Transformators hat nur in der negativen X-Richtung, eine erwähnenswerte Reduktion zufolge. Ebenso wie bei der Station a) kann nur durch die komplette Raumschirmung eine Reduktion der Flussdichte in alle Richtungen erreicht werden.

Da die Felder der Einspeisung und der Niederspannungsverteilung an einigen Seiten der Station dominieren, kann infolge der Optimierung der Kabelverbindung und der Abschirmung der Transformatoren keine nennenswerte Reduktion an diesen Seiten erreicht werden. Bei der Optimierung von Umspannstationen müssen immer die Fragen gestellt werden, welche Stationsbegrenzungen bezüglich der 26. BImSchV und der NISV relevant sind und welches Betriebsmittel für den großen Wert der Flussdichte an einem relevanten Ort verantwortlich ist.

7 Zukunft der Transformatoren und Kabel in Netzstationen

Da Transformatoren zu Betriebsmitteln mit einer langen Lebensdauer zählen ist es sinnvoll, über neue Technologien einen zukunftssicheren Betrieb zu gewährleisten. Zum einen Teil liegt die Realisierung bei den Herstellern und zum anderen bei den Anlagenbauern.

7.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Zur Analyse der Wirtschaftlichkeit einzelner Maßnahmen werden auch in diesem Abschnitt die Kabel den Transformatoren vorangestellt. Die räumliche Abstandsvergrößerung stellt die günstigste Maßnahme zur Reduktion der Flusssichte an Orten empfindlicher Nutzung dar und sollte bei der Planung von Neuanlagen immer berücksichtigt werden. Bei der Auswahl der Kabel ist darauf zu achten, dass die Leiterabstände möglichst gering gehalten werden, so dass ein Optimum zwischen hochwertiger Isolation und deren Preis gefunden werden muss. Da sich die Anordnung der Leiter im Dreieck günstiger auf das resultierende Feld auswirkt, ist es sinnvoll, diese über Einzelleiter oder über Dreileiterkabel mit zusätzlichem Neutralleiter zu realisieren. Auch die Verlegung in zwei Ebenen ist mit einem geringen Mehraufwand und ohne zusätzliche Kosten zu realisieren. Bei dem Auftreten von Fehlern können die unteren Ebenen noch günstig erreicht werden. Für die Verflechtung der Kabel kommt neben einem größeren Aufwand bei der Herstellung bzw. Installation ein zusätzlicher Materialaufwand pro Leiter hinzu. Dieser kann über die Gleichungen 7.1 und 7.2 ermittelt werden und ist für kleine Verbindungsstrecken gering.

$$l_{\text{zusätzlich, verdrillt}} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot a}{\cos 30^\circ}\right)^2} - p \quad (7.1)$$

$$l_{\text{zusätzlich, verflochten}} = 4 \cdot \sqrt{\left(\frac{w}{4}\right)^2 + \left(\frac{\pi \cdot a}{\cos 30^\circ}\right)^2} - w \quad (7.2)$$

Da eine Verfechtung nur sinnvoll ist, wenn sie möglichst eng mit einem kleinen Verflechtungsgrad ausgeführt wird, tritt eine starke mechanische Beanspruchung der Isolierungen und Leiter auf. Daher ist von einer beschleunigten Alterung der Kabelverbindung auszugehen. Weiterhin ist beim Auftreten von Fehlern ein einzelner Leiter schlecht zu erreichen. Die punktsymmetrische Anordnung herkömmlicher Starkstromkabel setzt eine sorgfältige Installation und den Einsatz von Einzelleitern oder die Kennzeichnung der Leiterposition auf der Isolation des Starkstromkabels voraus. Eine Kombination der Punktsymmetrie und dem Einsatz flexibler Vielfachverbindungen ist nur denkbar, wenn die Hersteller diese speziellen Kabel entwickeln und zu vergleichbaren Preisen auf den Markt bringen. Durch das Zusammenfassen der vorangestellten Aussagen lassen sich die Vor- und Nachteile der einzelnen Maßnahmen wie folgt darstellen.

Tabelle 7-1: Vor- und Nachteile verschiedener Maßnahmen der Feldoptimierung von Kabeln

Massnahmen	Feldreduktion bzgl. der 26. BlmSchV	Vorteile	Nachteile
Verlegungsart: - nach den umgebenden Räumen - mit Abstand zur Stationswand	stark	- <i>keine zusätzlichen Kosten</i> - kein wesentlicher Mehraufwand bei der Planung, Installation und Wartung	- evtl. Raumnutzungsänderungen - Ausschachtung bei Verlegung im Fußboden
Kabelbefestigungen: - Installationskanäle, -rohre	stark		- <i>hohe zusätzliche Kosten</i> - Mehraufwand bei der Planung, Installation und Wartung - Verringerung der Strombelastbarkeit
Anordnungen der Kabel: - Kabeltypen - Ebenen - Abstand - Verdrillt - Punktsymmetrisch	gering mittel stark stark sehr stark	- <i>geringe zusätzlichen Kosten</i> - kein wesentlicher Mehraufwand bei der Planung, Installation und Wartung	- genaue Herstellerdaten benötigt - Verringerung der Strombelastbarkeit - Schlagwechsel der Gegenschlagverseilung
- Vielfachverbindungen - Verflochten	sehr stark stark		- <i>zusätzliche Kosten</i> - hoher Aufwand und hohe Präzision notwendig - Mehraufwand bei der Installation und Wartung - Hersteller nicht verfügbar

Zur Beurteilung verschiedener Optimierungsmaßnahmen der Transformatoren werden deren Kosten gegenübergestellt. Die grau markierten Zellen der Tabelle stehen für die Maßnahmen und die notwendigen Kosten zur Optimierung bestehender Anlagen. Die hellen Zellen dagegen lassen den Preisvergleich der Optimierung neuer Anlagen zu.

Tabelle 7-2: Vergleich der Kosten von zwei verschiedenen Varianten der Optimierung des 1000 kVA Transformators [18, S. 6]

Variante 1		Variante 2	
Drehstromtransformator (*)	9000,00 €	EMV-Drehstromtransformator	18500,00 €
Trafoabschirmung, TRM 185/LC	6750,00 €		
Allgemeine Anpassungsarbeiten	ca. 5000,00 €	Allgemeine Umbauarbeiten	15000,00 €
	Σ 11750,00 €		Σ 33500,00 €
	Σ 15750,00 €		Σ 18500,00 €

(*) nach telefonischer Auskunft von Herrn Herziger der Siemens AG

Durch die Nachrüstung von Transformatoren mit hochpermeablen Abschirmungen lassen sich Emissionen bestehender Anlagen ohne größeren Installationsaufwand stark reduzieren. Die Raumschirmung ist mit einem relativ großen Aufwand und hohen Materialkosten verbunden. Der entscheidende Punkt ist der Preis hochpermeabler Materialien. Der Anbieter EMV-Tech gibt als Orientierung folgende Übersicht über die Preise von hochpermeablen Abschirmungen mit Materialstärken zwischen 3 mm und 7 mm.

Tabelle 7-3: Orientierungsrahmen der Kosten hochpermeabler Flächenabschirmungen [19]

Fläche in m ²	~Kosten in EUR/m ²
1 - 9	280,- - 310,-
10 - 24	230,- - 280,-
25 - 49	205,- - 230,-
50 - 99	180,- - 205,-
100 - 249	155,- - 180,-
250 +	140,- - 155,-

Die Optimierung von Transformatoren ist nur sinnvoll, wenn dessen Feld gegenüber dem der anderen Betriebsmittel dominant ist. Die Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der einzelnen Maßnahmen ergibt sich wie folgt.

Tabelle 7-4: Vor- und Nachteile verschiedener Maßnahmen der Feldoptimierung von Transformatoren

Massnahmen	Feldreduktion bzgl. der 26. BImSchV	Vorteile	Nachteile
Aufstellung: - nach den umgebenden Räumen - im Zentrum der Station	stark	- <i>keine zusätzlichen Kosten</i> - kein wesentlicher Mehraufwand bei der Planung, Installation und Wartung	- evtl. Raumnutzungsänderungen
Abschirmung: - Abdeckhaube - Transformator-schirmung, komplett - Raumschirmung	stark		- <i>hohe zusätzliche Kosten</i> - Mehraufwand bei der Planung, Installation und Wartung - Verringerung der Strombelastbarkeit
EMV-Transformator:	stark	- kein wesentlicher Mehraufwand bei der Planung, Installation und Wartung	- <i>hohe zusätzliche Kosten</i>

Grundsätzlich sollten bei Grenzwertüberschreitungen bestehender Anlage folgende Überlegungen angestellt werden:

- Können angrenzende Räume mit empfindlicher Nutzung umgenutzt werden, z.B. Büroraum mit Lagerraum tauschen?
- Besteht die Möglichkeit, dass durch Abschränkungen wie z.B. Zäunen oder Mauern die Grenzwerte eingehalten werden?
- Sind die Kosten für Schirmungsmaßnahmen günstiger als Sanierungsmaßnahmen?
- In welchem Verhältnis steht der Bau einer neuen optimierten Version der Anlage zu den notwendigen Schirmungs- und Sanierungsmassnahmen der bestehenden Anlage? [20, S. 10]

7.2 Ausblick

Bei den vorangegangenen Untersuchungen wurde die Strombelastbarkeit infolge der Häufung nicht berücksichtigt. Doch gerade das Verlegen der Kabel mit gegenseitigem Berühren, hat durch die verursachte Verlustwärme einen starken Einfluss auf deren Belastbarkeit. Weiterhin wurden keine messtechnischen Untersuchungen zur Sicherung der Berechnungen durchgeführt. Ausstehende Untersuchungen sind z.B. die Analyse bezüglich des Einflussbereiches auf magnetisch empfindliche Geräte wie z.B. EKG und der Einfluss auf die Kosten bei größerer Distanz der Stationen von den Verbrauchern. Um generell die Felder im Umfeld von Stationen gering zu halten, müssen die Maßnahmen der Reduktion in zwei Aufgabenbereiche unterteilt werden.

1. Aufgaben der Anlagenplanung:

- Abstandsvergrößerung der Station oder der einzelnen Betriebsmittel zu Orten mit empfindlicher Nutzung
- Kabel punktsymmetrisch in zwei Ebenen anordnen
- Kabel möglichst im Boden führen

2. Aufgaben der Hersteller:

- Anschlüsse der Transformatoren aber auch der Niederspannungsverteilung soweit wie möglich nach unten verlegen
- Möglichst starke räumliche Vereinigung zu- und abfließender Ströme, wie z.B. die Anordnung der Einspeisung der Niederspannungsverteilung in der Mitte zwischen gleich stark belasteten Abgängen
- Entwicklung flexibler mehradriger Kabel in punktsymmetrischer Anordnung
- Fertigungsrationalisierung der EMV Komponenten

8 Zusammenfassung

Die Arbeit beschreibt die Möglichkeiten, Beeinflussungen des Menschen durch magnetische Felder von Starkstromkabeln und Transformatoren auf ein unkritisches Maß zu reduzieren. Neben Berechnungen möglicher Feldreduktionen durch den Vergleich verschiedener Anordnungen von Kabeln und Transformatoren der Energieversorgung werden diese auf wirtschaftliche Aspekte verglichen und durch die Integration in ausgewählte Beispielstationen der Einfluss im Zusammenwirken mit allen Komponenten der Station beurteilt. Alle untersuchten Maßnahmen der Feldreduktion sollen die Emissionen der magnetischen Flussdichte der Anlage und somit Immissionen auf Orte empfindlicher Nutzung senken. Um einen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten, ist es notwendig gerade bei der Planung von Umspannstationen und bei Grenzwertüberschreitungen bestehender Anlagen durch die beschriebenen Maßnahmen den Einflussbereich hoher Flussdichten so zu manipulieren, dass im Umfeld der Stationen besonders an Orten empfindlicher Nutzung die Grenzwerte bei voller Anlagenauslastung eingehalten werden können.

Grundsätzlich kann eine Vielzahl verschiedener Möglichkeiten der Feldreduktion bzgl. der 26. BImSchV und der Schweizer NISV von Kabeln und Transformatoren angewendet werden. Sind sehr starke Feldreduktionen erforderlich, kann durch die Kombination der verschiedenen Möglichkeiten die Reduktionswirkungen stark erhöht werden.

Das Simulationsprogramm WinField[®] stellt eine sehr gute Möglichkeit dar, verschiedene Varianten zu vergleichen und somit Umspannstationen bzgl. der Grenzwerte der 26. BImSchV und der Schweizer NISV zu optimieren. Weiterhin kann bei der Planung neuer Anlagen die Feldausbreitung sehr gut abgeschätzt werden. Leider muss aus wirtschaftlichen und physikalischen Gründen eine gewisse magnetische Flussdichte hingenommen werden, so dass immer ein magnetisches Restfeld im Umfeld einer Station besteht.

9 Anhang

9.1 Auszug der 26. Bundes-Immissionsschutzverordnung

Die 26. BImSchV - Verordnung über elektromagnetische Felder, vom 16. Dezember 1996 nimmt sowohl Bezug auf Niederfrequenzanlagen als auch auf Hochfrequenzanlagen. Sie enthält Anforderungen zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen und zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektromagnetische Felder. Die Verordnung berücksichtigt nicht die Wirkungen elektromagnetischer Felder auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate. Im Folgenden wird nur auf die niederfrequenten Anlagen eingegangen.

§1 Anwendungsbereich

Im Sinne dieser Verordnung sind Elektromsppannanlagen einschließlich der Schaltfelder mit einer Frequenz von 50 Hertz und einer Oberspannung von 1000 Volt oder mehr.

§ 3 Niederfrequenzanlagen

Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen sind Niederfrequenzanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass in ihrem Einwirkungsbereich in Gebäuden oder auf Grundstücken, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung von Immissionen durch andere Niederfrequenzanlagen die im Anhang 1 bestimmten Grenzwerte der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte nicht überschritten werden. Dabei bleiben außer Betracht kurzzeitige Überschreitungen der in Satz 1 angegebenen Werte um nicht mehr als 100 vom Hundert, deren Dauer insgesamt nicht mehr als 5 vom Hundert eines Beurteilungszeitraums von einem Tag ausmacht, kleinräumige Überschreitungen der in Satz 1 angegebenen Werte der elektrischen Feldstärke um nicht mehr als 100 vom Hundert außerhalb von Gebäuden, soweit nicht im Einzelfall hinreichende Anhaltspunkte für insbesondere durch Berührungsspannungen hervorgerufene Belästigungen bestehen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer für die Nachbarschaft unzumutbar sind.

§ 5 Ermittlung der Feldstärke- und Flussdichtewerte

Soweit anwendbar sind die Mess- und Berechnungsverfahren des Normentwurfs DIN VDE 0848 Teil 1, Ausgabe Mai 1995, einzusetzen. Messungen sind am Einwirkungsort mit der jeweils stärksten Exposition durchzuführen, an dem mit einem nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen gerechnet werden muss. Sie sind nicht erforderlich, wenn die Einhaltung der Grenzwerte durch Berechnungsverfahren festgestellt werden kann.

Anhang 2
(zu § 3)

Niederfrequenzanlagen

Tabelle 9-1: Immissionsgrenzwerte nach der 26. BImSchV

Frequenz in Hertz (Hz)	Effektivwert der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte	
	elektrische Feldstärke in Kilovolt pro Meter (kV/m)	magnetische Flussdichte in Mikrottesla (μT)
50-Hz-Felder	5	100
16 _{2/3} -Hz-Felder	10	300

9.2 Auszug der Schweizer NISV

Die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung vom 23. Dezember 1999, soll Menschen vor schädlicher oder lästiger nichtionisierender Strahlung schützen.

Art. 2 Geltungsbereich

Diese Verordnung regelt die Begrenzung der Emissionen von elektrischen und magnetischen Feldern mit Frequenzen von 0 Hz bis 300 GHz (Strahlung), die beim Betrieb ortsfester Anlagen erzeugt werden.

Art. 13 Geltung der Immissionsgrenzwerte

Die Immissionsgrenzwerte müssen überall eingehalten sein, wo sich Menschen aufhalten können. Sie gelten nur für Strahlung, die gleichmäßig auf den ganzen menschlichen Körper einwirkt.

Art. 14 Ermittlung der Immissionen

Das BUWAL empfiehlt geeignete Mess- und Berechnungsmethoden.

Transformatorstationen

Anlagen zur Transformation von Hoch- auf Niederspannung. Als Anlage gelten die stromführenden Teile einer Transformatorstation einschließlich der Niederspannungsverbindungen und des Niederspannungsverteilers. Als maßgebender Betriebszustand gilt der Betrieb mit Nennleistung. Der Anlagegrenzwert für den Effektivwert der magnetischen Flussdichte beträgt 1 μ T. Neue und alte Anlagen müssen im maßgebenden Betriebszustand an Orten mit empfindlicher Nutzung den Anlagegrenzwert einhalten. Die Behörde bewilligt Ausnahmen, wenn der Inhaber der Anlage nachweist, dass alle Maßnahmen zur Begrenzung der Strahlung, wie ein anderer Standort oder Abschirmungen, die technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar sind, getroffen wurden.

Die Immissionsgrenzwerte für den Effektivwert der elektrischen Feldstärke, der magnetischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte bei Niederfrequenz betragen:

Tabelle 9-2: Immissionsgrenzwerte nach der NISV

Frequenz	Immissionsgrenzwert für den Effektivwert der		
	elektrischen Feldstärke $E_{G,f}$ (V/m)	magnetischen Feldstärke $H_{G,f}$ (A/m)	magnetischen Flussdichte $B_{G,f}$ (μ T)
< 1 Hz	–	32 000	40 000
1 ... 8 Hz	10 000	$32\,000 / f^2$	$40\,000 / f^2$
8 ... 25 Hz	10 000	$4000 / f$	$5000 / f$
0,025 ... 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$
0,8 ... 3 kHz	$250 / f$	5	6,25
3 ... 100 kHz	87	5	6,25

Dabei bedeutet f die Frequenz in der in der ersten Tabellenspalte angegebenen Einheit. Maßgebend ist der höchste Effektivwert.

9.3 Berechnungen zum Abschnitt 3.1.2

Berechnung der typischen Ströme in Netzstationen bei voller Anlagenauslastung nach Abschnitt 3.1.2 und Gleichung 2.1.

Beispiel:
$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{250 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,4 \text{ kV}} = \underline{\underline{361 \text{ A}}}$$

Tabelle 9-3: Berechnungsergebnisse der Ströme je Außenleiter in Abhängigkeit von der Transformatornennscheinleistung

S/kVA	250	400	630	800	1000	1200	1250	1600
I/A	361	577	909	1155	1443	1732	1804	2309

Bestimmung des Abstandes eines Drehstromkabel zur Stationswand über die Annahme von Strömfäden, nach dem Entfernungsgesetz Gleichung 2.8 und mittels Berechnungsprogramm Winfield®.

Randbedingungen: Leiteranordnung im Dreieck gesucht: ρ in m (*)
 Ströme I der Tabelle 9-3
 Leiterabstand a = 0,02 m
 Grenzwerte B = 100 μ T

Entfernungsgesetzberechnung:

Beispiel:
$$B = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{a}{\rho^2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I$$

$$\rho = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot \mu_0 \cdot a \cdot I}{B \cdot 4 \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am} \cdot 0,02 \text{ m} \cdot 361 \text{ A}}{100 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{m^2} \cdot 4 \cdot \pi}} = \underline{\underline{0,11 \text{ m}}}$$

(*) hierbei entspricht ρ dem Abstand vom Mittelpunkt der Leiteranordnung in Meter

Programmberechnungen:

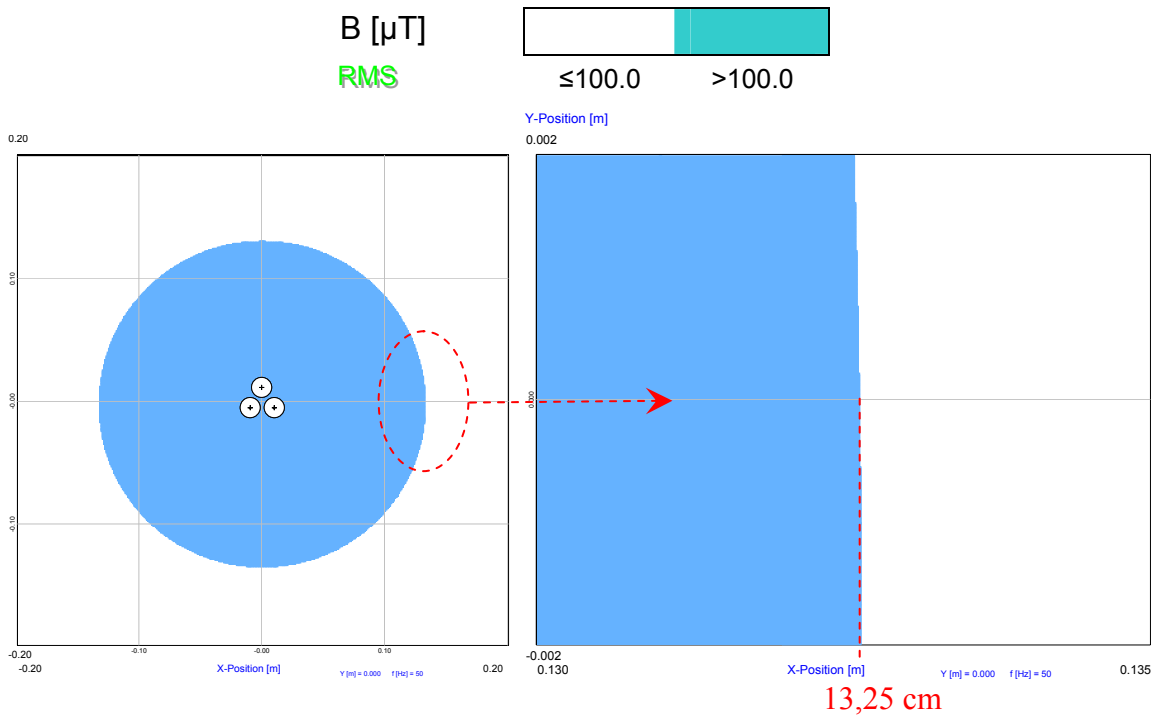


Abbildung 9.1: Feldbild der Dreileiteranordnung

Tabelle 9-4: Ergebnisse der Entfernungsgesetz- und Programmberechnung für den Abstand der Kabel zur Stationswand, ab dem der 100 μ T-Grenzwert eingehalten wird.

Strom je Außenleiter/ A	Abstand nach dem Entfernungsgesetz / m	Abstand nach dem Programm / m
361	0,11	0,1325
577	0,14	0,166
909	0,18	0,209
1155	0,20	0,236
1443	0,22	0,263
1732	0,24	0,289
1804	0,25	0,295
2309	0,28	0,333

9.4 Kabelbezeichnungen

Tabelle 9-5: Auszug aus dem Schlüssel für harmonisierte Starkstromleitungen [12, S. 236]

		1. Teil	2. Teil	3. Teil
Kennzeichnung des Standards				
Harmonisierter Standard_____	H			
Anerkannter nationaler Typ_____	A			
Bemessungsspannung				
100 / 100 V_____	01			
300 / 300 V_____	03			
300 / 500 V_____	05			
450 / 750 V_____	07			
Isolierwerkstoff				
PVC_____	V			
PVC, wärmebeständig (90 °C)_____	V2			
PVC, kältefest (-25 °C)_____	V3			
Ethylen-Propylen-Kautschuk für 60 °C Betriebstemperatur_____	R			
Kautschuk, wärmebeständig (110 °C)_____	G			
Silikon-Kautschuk_____	S			
Mantelwerkstoff				
PVC_____	V			
Ethylen-Propylen-Kautschuk für 60 °C Betriebstemperatur_____	R			
Chloroprenkautschuk_____	N			
Glasfasergeflecht_____	J			
Textilgeflecht_____	T			
Polyurethan_____	Q			
Besonderheiten im Aufbau				
flache, aufteilbare Leitung_____	H			
flache, nicht aufteilbare Leitung_____	H2			
flache PVC-Leitung mit drei oder mehr Adern mit Zugentlastungselement / Tragorgan_____	H6			
Kerneinlauf (kein Tragelement)_____	D3			
	D5			
Leiterart				
eindrätig_____	-U			
mehrdrätig_____	-R			
feindrätig bei Leitungen für feste Verlegung_____	-K			
feindrätig bei flexiblen Leitungen_____	-F			
feinstdrätig bei flexiblen Leitungen_____	-H			
Lahnlitze_____	-Y			
Aderzahl _____ ...				
Schutzleiter				
ohne Schutzleiter_____	X			
mit Schutzleiter_____	G			
Nennquerschnitt des Leiters _____ ...				

9.5 Berechnungen zum Abschnitt 6.1

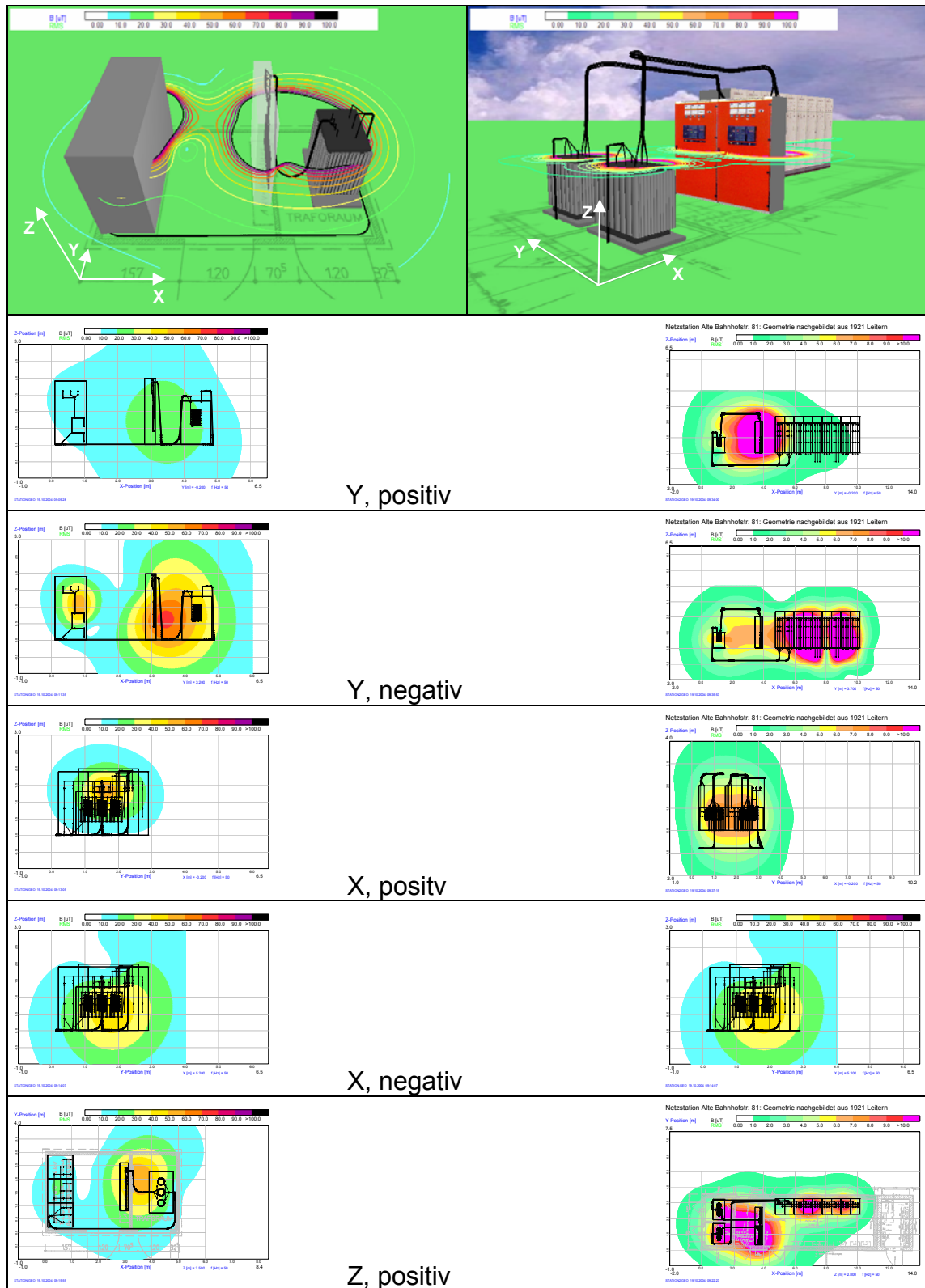


Abbildung 9.2: Flussdichte der Umspannanlagen in Abhängigkeit von der Berechnungsrichtung und eines konstanten Berechnungsabstandes von 0,2 m zu den Stationswänden

Literaturverzeichnis

- [01] Pregla, Reinhold.: Grundlagen der Elektrotechnik, 5. Auflage, Hüthig GmbH, Heidelberg 1998
- [02] Genz, Daniel; Diplomarbeit: Magnetische Flussdichte an Kabeltrassen der Energieversorgung, FGEU mbH, Berlin 1999
- [03] Beck, C.H.: Umweltrecht, 14. Auflage, Deutscher Taschenbuchverlag GmbH & Co. KG, München 2001
- [04] Mildenerger, Otto: EMVU-Messtechnik, Vieweg-Verlag, Braunschweig-Wiesbaden 2000
- [05] Kretschmer, Thomas; Diplomarbeit: Magnetische Flussdichte an MS-Schaltanlagen, FGEU mbH, Berlin 2003
- [06] Hadrian, W.: Elektrotechnik und Informationstechnik, 115. Jg.(1998), H. 9 „Entfernungsgesetze in der Energietechnik“
- [07] Herold, Gerhard: Elektrische Energieversorgung II, J. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt 2001
- [08] Bräunlich, Reinhold: Vergleich zwischen Berechnungs- und Messmethoden, Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH, Zürich
- [09] Hochbaum, A.: Kabel und Leitungsanlagen, 2. Auflage, VDE Verlag GmbH, Berlin-Offenbach 2003
- [10] Verlag Europa-Lehrmittel: Tabellenbuch Elektrotechnik, 15. Auflage, Nourney Vollmer GmbH & Co., Wuppertal 1994
- [11] Heinhold, Lothar: Kabel und Leitungen für Starkstrom, 4. Auflage, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin-München 1987

-
- [12] Seib, G. Günter: Elektrische Installationstechnik, 4. Auflage, Publicis MCD Verlag, München 2000
- [13] Wilhelm, Rudolph.: EMV nach VDE 0100, 3. Auflage, VDE Verlag GmbH, Berlin-Offenbach 2000
- [14] Dietrich, W.: Transformatoren, VDE Verlag GmbH, Berlin-Offenbach 1986
- [15] ABB-Taschenbuch (Asea Brown Boveri Taschenbuch): Schaltanlagen, 9. Auflage, Cornelsen Verlag 1992
- [16] Hoffmann, Eckhard; Pasel, Klaus; Schwetz, Peter: Die elektrische Beeinflussung durch magnetische Felder von Starkstromanlagen, Elektrizitätswirtschaft, Sonderdruck Nr. 3041, Jg. 77, H. 12, Frankfurt am Main 1978
- [17] Wruss, Gerhard: Umweltfreundliche, strahlungsreduzierte Verteiltransformatoren, Bulletin SEV/VSE, lfd. Nr. 18/03, Fehrlortorf 2003
- [18] Fischbacher, Christian.: EMV Abschirmungen versus „Strahlungsreduzierte Komponenten“, CFW EMV-Consulting AG, 2004
- [19] EMV-Tech: Kosten, <http://www.emv-tech.de/Magnetfeldabschirmung%20Kosten.htm>, 2001
- [20] Lowack, Henrik; Arnold, Martin: Optimierung im Trafostationenbau, ARNOLD Engineering und Beratung, Opfikon-Zürich 2002

Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich meine Diplomarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe.

Senftenberg, den 01. November 2004

Stefan Urbank