

Fachhochschule Lausitz  
Studiengang Elektrotechnik

# Diplomarbeit

Thomas Kretschmer

Matrikel Nr. 992459

Thema: Magnetische Flussdichte an MS-Schaltanlagen

Diplombetreuer: Prof. Stein  
Dipl.-Ing. Messerschmidt  
Dr. rer. nat. Plotzke

Abgabe der Arbeit: 16.10.2003

---

## **Zielsetzung:**

Basierend auf einer Arbeit zur "Optimierung der magnetischen Flussdichte an Netzstationen" werden einzelne Anlagenkomponenten im Detail untersucht. Unterschiedliche Schaltanlagen werden mittels Berechnungsverfahren verglichen, um Empfehlungen für eine EMV-gerechte Konstruktion zu erarbeiten.

## **Inhaltliche Schwerpunkte:**

- 1) Theorie der numerischen Berechnung der magnetischen Flussdichte; Einführung in die Theorie der Schirmwirkung; Berechnungsgrundlagen der verwendeten Software; Einsatzgebiete und Sicherheitsanforderungen für MS-Schaltanlagen.
- 2) Statistische Analyse und Bewertung der maximal auftretenden magnetischen Flussdichten ausgewählter Mittelspannungsschaltfelder gleichen Typs.
- 3) Untersuchung grundlegender und spezifischer Konstruktionsmerkmale.
- 4) Einfluss von Kabelbelegung und Sammelschienenkapselung auf die magnetische Flussdichte.
- 5) Beurteilung und Zusammenfassung der einzelnen konstruktiven Maßnahmen an einer feldoptimierten Mittelspannungsschaltanlage.

Dieses Thema ist ein Forschungsthema und wurde von der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie - FGEU mbH gestellt und von Herrn Dr. Olaf Plotzke betreut.

---

Berlin 2003, (C) Copyright FGEU mbH.

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

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>VERZEICHNIS DER VERWENDETEN SYMBOLE .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>VII</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN DER FELDBERECHNUNG .....</b>	<b>2</b>
2.1 Maxwell'sche Gleichungen .....	2
2.2 Das quasistationäre Feld.....	3
2.3 Berechnungsverfahren .....	3
2.3.1 Numerische Verfahren.....	4
2.3.2 Analytische Verfahren (Biot-Savart'sches Gesetz).....	5
2.4 WinField®- Programmbeschreibung .....	7
2.5 Theorie der Schirmwirkung .....	9
<b>3 SYSTEMATISIERUNG VON MS-SCHALTANLAGEN .....</b>	<b>13</b>
3.1 Einsatzgebiete, Aufgaben und Betriebsweise .....	13
3.2 Unterscheidungskriterien.....	14
3.2.1 Nach den Mindestabständen.....	14
3.2.2 Nach der Prüfspannung .....	15
3.2.3 Nach der Konstruktion .....	15
3.3 Komponenten einer MS-Schaltanlage.....	17
3.4 Vorteile unterschiedlicher Bauartvarianten.....	18
<b>4 RECHTSGRUNDLAGEN UND BESTIMMUNGEN.....</b>	<b>19</b>
4.1 Sicherheitsanforderungen an MS-Schaltanlagen .....	20
4.1.1 26. Bundes-Immissionsschutzverordnung.....	20
4.1.2 Anforderungen an die Arbeitssicherheit .....	21
4.1.3 Schweizer NISV.....	22
<b>5 ANALYSE DER MAGNETISCHEN FLUSSDICHTEN TYPISCHER MITTELSPANNUNGSSCHALTFELDER.....</b>	<b>24</b>
5.1 Vorbetrachtungen.....	24
5.2. Darstellung und Bewertung .....	25
5.2.1 Abgangsfelder .....	26

---

5.2.2	Leistungsschalterfelder .....	28
5.2.3	Trafofelder .....	30
5.3.	Auswertung .....	32
<b>6</b>	<b>EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE MAGNETISCHE FLUSSDICHTE HINSICHTLICH DER 26. BIMSCHV .....</b>	<b>35</b>
6.1	Auswirkung der gesamten Konstruktion .....	35
6.1.1	Abstand der Sammelschienen.....	38
6.1.2	Anordnung der Sammelschienen .....	42
6.1.3	Schaltfeldtiefe, -breite, -höhe .....	44
6.2	Auswirkung konstruktiver Einzelelemente von Schaltfeldern .....	45
6.2.1	Bewertung der Berechnungsergebnisse .....	46
6.2.2	Schaltgeräte .....	46
6.2.3	Sicherungen .....	48
6.2.4	Messwandler .....	50
6.3	Einfluss von Kabeln.....	53
6.3.1	Einspeisekabel .....	53
6.3.2	Anschlusshöhe des Kabels im Schaltfeld.....	56
6.3.3	Anzahl der einspeisenden Kabel.....	58
6.3.4	Alternative Verwendung von Stromschienen.....	59
6.4	Einfluss der Materialien für Gehäuse und Sammelschienenkapselung.....	60
6.4.1	Gehäuse.....	62
6.4.2	Sammelschienenkapselung .....	64
<b>7</b>	<b>OPTIMIERUNGSMABNAHMEN AN MS-SCHALTANLAGEN HINSICHTLICH DER 26. BIMSCHV UND SCHWEIZER NISV .....</b>	<b>66</b>
7.1	Vorbetrachtungen.....	66
7.2	Analyse des lokalen Maximums der magnetischen Flussdichte.....	68
7.3	Art der Optimierungsmaßnahme .....	69
7.3.1	Konstruktive Maßnahmen.....	70
7.3.2	Aufstellung und Positionierung der Anlage.....	75
7.3.3	Schirmung .....	77
7.4	Schlussfolgerung.....	81
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>82</b>

---

<b>9</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>83</b>
9.1	Immissionsgrenzwerte der Schweizer NISV .....	83
9.2	Herstellerliste der untersuchten Schaltfelder .....	84
9.3	Berechnungsergebnisse, Diagramme, Darstellungen zu Kapitel 5.....	85
9.3.1	Abgangsfelder .....	85
9.3.2	Leistungsschalterfelder .....	88
9.3.3	Trafofelder .....	91
9.4	Berechnungsergebnisse zu Kapitel 6 .....	94
9.5	Darstellungen zu Kapitel 7 .....	96
9.6	12 kV-Übergabestation.....	97
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>VIII</b>

## Verzeichnis der verwendeten Symbole

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m <sup>2</sup>
a <sub>s</sub>	Schirmdämpfung	dB
B	magnetische Flussdichte	T, Vs/m <sup>2</sup>
d	Abstand	m
ds	infinitesimales Wegelement	m
δ	Eindringtiefe	m
E	elektrisches Feld	V/m
ε	Dielektrizitätskonstante	F/m
f	Frequenz	Hz
H <sub>a</sub>	äußere Störfeldstärke	A/m
H <sub>i</sub>	Restfeldstärke	A/m
H	magnetische Feldstärke	A/m
I	Strom	A
κ	spez. Leitfähigkeit	m/Ωmm <sup>2</sup> , MS/m
r	Radius	m
S	Schirmfaktor	—
S	Scheinleistung	VA
s	Wegstrecke	m
t	Zeit	s
U	Spannung	V
μ	Permeabilität	Vs/Am
μ <sub>0</sub>	magnetische Feldkonstante	4 · π · 10 <sup>-7</sup> Vs/Am
μ <sub>r</sub>	Permeabilitätszahl	—

---

## Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
HS	Hochspannung
INIRC	International Non-Ionizing Radiation Committee
IRPA	International Radiation Protection Association
LS	Leistungsschalter
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
NH	Niederspannung-Hochleistung
NVT	Niederspannungsverteilung
NISV	Schweizer Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung
SA	Schaltanlage
SS	Sammelschiene
SI	Sicherung
St	Stahl
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
PVC	Polyvinylchlorid
VPE	Vernetztes Polyethylen

# 1 Einleitung

Durch die fortschreitende Industrialisierung und den damit verbundenen Einsatz von elektrischen und elektronischen Geräten entstehen zunehmend elektromagnetische Felder. Diese künstlich erzeugten Felder können Werte aufweisen, die eine Gefährdung für die Gesundheit des Menschen darstellen. Daher wurde am 1. Januar 1997 die 26. Bundes-Immissionschutzverordnung (26. BImSchV) erlassen, welche die Emissionen elektromagnetischer Strahlung, durch Festlegung gesetzlich bindender Grenzwerte, limitiert.

Die 26. BImSchV verlangt vom Betreiber niederfrequenter Energieversorgungsanlagen einer Betriebsspannung größer 1000 V eine Anzeige bei den zuständigen Umweltbehörden. Einen Hauptteil der anzeigepflichtigen Anlagen stellen die weit verbreiteten Netzstationen dar, welche bereits in einer Vorgängerarbeit untersucht wurden. Dabei stellte sich heraus, dass die Mittelspannungsschaltanlage mit 37,5 % der zweitgrößte Verursacher des Maximums der magnetischen Flussdichte ist. Aus diesem Grund ist es das Ziel dieser Arbeit, Schaltfelder von Mittelspannungsschaltanlagen hinsichtlich ihrer Konstruktion und des Einflusses der eingebauten Sekundärtechnik zu untersuchen. Diese Ausarbeitung soll insbesondere zeigen, dass eine Reduktion der magnetischen Flussdichte durch konstruktive Maßnahmen sowie durch gezielte Positionierung und Aufstellung möglich ist. Motivation dieser Arbeit ist vor allem die Aussicht, dass auch in Deutschland aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse in Zukunft mit einer Grenzwertsenkung gerechnet werden muss, wie dies bereits in der Schweiz erfolgt ist.

Untersuchungsschwerpunkt dieser Diplomarbeit bildet die Analyse der maximal auftretenden magnetischen Flussdichten typischer Mittelspannungsschaltfelder verschiedener Hersteller. Hierzu folgt eine Prüfung der Konstruktion sowie konstruktiver Einzelemente von Schaltfeldern hinsichtlich der Genauigkeit der Nachbildung für die Feldberechnung mit der Software WinField<sup>®</sup>, der Forschungsgesellschaft für Energie- und Umwelttechnologie mbH, welche Berechnungen und Messungen zur Elektromagnetischen Umweltverträglichkeit (EMVU) durchführt. Abschließend werden Möglichkeiten zur Verringerung des Magnetfeldes anhand von Beispielberechnungen und Darstellungen der magnetischen Flussdichte an drei optimierten MS-Schaltanlagen dargestellt.

## 2 Theoretische Grundlagen der Feldberechnung

Die Einteilung der elektrischen und magnetischen Felder erfolgt in *zeitlich konstante* (stationäre) und *zeitlich veränderliche* Felder. Letztere werden wiederum in *langsam veränderliche* (quasistationäre) und *schnell veränderliche* Felder (nichtstationäre) unterschieden. Bei Feldern, die durch Anlagen der Energieversorgung entstehen, handelt es sich um langsam verändernde, also quasistationäre Felder. Das theoretische Fundament der gesamten Feldberechnung bilden die Maxwell'schen Gleichungen.

### 2.1 Maxwell'sche Gleichungen

Die Maxwell'schen Gleichungen beschreiben die Ausbreitung elektromagnetischer Felder. Die Feld-, Diffusions- und Materialgleichungen in Differentialform lauten:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Feldgleichungen:} & \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad \text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\
 \text{Diffusionsgleichungen:} & \text{div } \vec{D} = \rho \qquad \text{div } \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \qquad \text{div } \vec{B} = 0 \qquad (2.1) \\
 \text{Materialgleichungen:} & \vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \qquad \vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \qquad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}
 \end{array}$$

Diese Gleichungen gelten für relativ zum Beobachter ruhende Körper in linearen und isotropen Medien. [1, S. 50 f]

Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder sind Vektorfelder. Es kann somit mit Hilfe der Rotation und Divergenz (räumliche Differentiationen) eine lokale Aussage über einzelne Feldpunkte des betrachteten Feldes gemacht werden. Die Quellenstärke des Vektorfeldes beschreibt die Divergenz, sie ist eine skalare Größe. Die Rotation ist eine vektorielle Größe und gibt die Wirbelstärke des Vektorfeldes an.

In Abhängigkeit vom zeitlichen Verhalten der Felder ist eine Vereinfachung der Gleichungen möglich. [2, S. 42]

## 2.2 Das quasistationäre Feld

Im quasistationären Feld erfolgen die zeitlichen Änderungen der Feldgrößen, im Gegensatz zur Ausbreitungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit) des elektrischen und magnetischen Feldes so langsam, dass diese Änderungen in allen betrachteten Punkten als gleichzeitig angesehen werden können [1, S. 52]. Die quasistationären Felder werden in Abhängigkeit von der Frequenz der treibenden Spannung in Felder mit bzw. ohne Stromverdrängung unterschieden. Bei sich zeitlich langsam ändernden Feldern, wie sie z.B. im Bereich der Energieversorgung vorkommen, kann der Skineffekt (Stromverdrängungseffekt) vernachlässigt werden. Bei geringen Änderungsgeschwindigkeiten des Feldes bzw. niedrigen Frequenzen kann das vom Magnetfeld des Leitungsstromes induzierte elektrische Wirbelfeld gegen das den Leitungsstrom erzeugende äußere Quellenfeld vernachlässigt werden. Somit ist der Anteil der Verschiebungsstromdichte gegenüber der Leitungsstromdichte innerhalb von Leitern, die in der Energieversorgung Anwendung finden, vernachlässigbar klein. Es gilt:

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0 \quad \text{und somit} \quad \text{rot } \vec{H} = \vec{J} = \kappa \cdot \vec{E} \quad (2.2)$$

Gleichung 2.2 beschreibt die Wirbelstärke des Magnetfeldes für quasistationäre Felder. Die magnetische Flussdichte kann nun mit

$$B = \mu \cdot H \quad \text{und} \quad \mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.3)$$

unter Verwendung verschiedener Verfahren berechnet werden. [2, S. 131]

## 2.3 Berechnungsverfahren

Die Berechnung elektromagnetischer Felder kann auf der Basis verschiedener Verfahren erfolgen. Im Einzelnen wird zwischen *analytischen Verfahren*, *analytisch-numerischen Verfahren* und *numerischen Verfahren* unterschieden. Bei analytischen Verfahren wird das Ergebnis generell mit Mitteln der Analysis gewonnen und somit durch eine Funktion beschrieben. Berechnungsverfahren werden als numerisch bezeichnet, wenn ihnen eine Raum- bzw. Zeit-Diskretisierung zugrunde liegt, aufgrund derer das Ergebnis aus einer großen,

aber endlichen Zahl diskreter Werte besteht. Bei analytisch-numerischen Verfahren wird die Differentialgleichung durch analytische Lösungsansätze exakt beschrieben, während die Rand- bzw. Übergangsbedingungen nur näherungsweise erfüllt werden. Welches Verfahren zur Feldberechnung Anwendung findet, ist somit immer von der Problemstellung abhängig. Für die Anwendung der analytischen Verfahren sprechen vor allem die deutlich geringere Rechenzeit und der niedrigere Aufwand für die Modellimplementierung. Der Vorteil der numerischen Verfahren liegt vor allem darin, dass die Berechnung *aller* auftretenden elektromagnetischen Felder möglich ist.

### 2.3.1 Numerische Verfahren

Durch die Anwendung von numerischen Berechnungsverfahren ist es möglich, genaue Feldberechnungen komplizierter Geometrie und Materialverteilungen, wie sie komplexe Konstruktionen aufweisen, vorzunehmen. Sie sind auf die gesamte Feldtheorie anwendbar, d.h. es können statische sowie zeitabhängige Probleme berechnet werden. Aufgrund der explosionsartigen Entwicklung der Leistungsfähigkeit moderner Computer hat die Bedeutung der numerischen Berechnungsverfahren in den letzten Jahren sehr stark zugenommen. Derzeitige Rechnerprogramme verwenden u.a. folgende Methoden:

- *Methode der Finiten Elemente*
- *Finite-Differenzen-Verfahren*
- *Boundary-Element-Methode*

Da die Beschreibung der einzelnen Methoden sehr umfangreich ist, wird an dieser Stelle nur das Grundprinzip, auf welchem die meisten numerischen Verfahren beruhen, beschrieben. Die Problemstellung liegt meist als Randwertproblem vor. Hieraus entsteht je nach Wahl eines geeigneten Vorgehens eine Differential- oder Integralformulierung. Die meisten Verfahren wandeln die zugrunde liegende Funktionalgleichung in eine Matrixgleichung bzw. in ein lineares Gleichungssystem um, welches auf einem Rechner gelöst wird. Am häufigsten kommen die *Laplace-* oder die *Poisson-Gleichung* als Funktionalgleichungen in Frage.

$$\text{Laplace-Gleichung:} \quad \Delta\varphi(r) = 0 \quad (2.4)$$

$$\text{Poisson-Gleichung:} \quad \Delta\varphi(r) = \frac{-\rho(r)}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

Das Randwertproblem wird dann durch diese Gleichungen beschrieben, wobei das Einbringen der Randbedingungen auf verschiedene Weise erfolgen kann. Zur genaueren Beschreibung der einzelnen Methoden sei jedoch auf weiterführende Literatur, i.e. KOST [3], LEHNER [4] und SCHWAB [2] verwiesen.

### 2.3.2 Analytische Verfahren (Biot-Savart'sches Gesetz)

Die Berechnung quasistationärer magnetischer Felder linearer, stromdurchflossener Leiter (Stromfäden), ist durch die Ampère'sche Formel (Biot-Savart'sches Gesetz Gl. 2.6) möglich [5, S. 506], [1, S. 154], [6, S. 285].

$$dB = \mu_0 \cdot \frac{I}{4\pi} \cdot \frac{ds \times r}{r^3} \quad (2.6)$$

Nach Gleichung 2.6 ist die magnetische Feldstärke eines Stromfadens die Summe, der von den einzelnen Längenelementen  $ds$  herrührenden Anteile  $dB$ . Jeder Teilvektor  $dB$  steht senkrecht auf der durch  $ds$  und  $r$  aufgespannten Fläche und bildet mit dieser ein Rechtssystem [1, S. 154].

Die Gleichung 2.6 lässt erkennen, dass die magnetische Flussdichte eines Leiters nur von der Stromstärke, dem Abstand und der Orientierung abhängig ist.

Alle Berechnungen der magnetischen Flussdichte in dieser Arbeit wurden mit dem Programm WinField<sup>®</sup> der FGEU mbH durchgeführt. Die Berechnung erfolgt nach dem Gesetz von Biot-Savart, welches wie nachfolgend beschrieben implementiert ist. [7, S.13]

Da  $dB$  und  $I$  zeitabhängige Größen sind, werden diese zur vereinfachten Berechnung in komplexe Größen transformiert. Wird der ( $i$ )-te Teilleiter der Länge  $l_i$  in den Ursprung des Koordinatensystems parallel zur x-Achse gelegt, dann berechnet sich sein Feldbeitrag im Aufpunkt  $P(x,y,z)$  zu:

$$|\vec{B}| = \frac{\mu_0}{4\pi r} I_i \left[ \frac{l_i - x_p}{\sqrt{(l_i - x_p)^2 + r^2}} + \frac{x_p}{\sqrt{x_p^2 + r^2}} \right] \quad (2.7)$$

mit den Vektorkomponenten:

$$\vec{B}_{xi} = 0 \quad (2.8)$$

$$\vec{B}_{yi} = -\frac{z_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} |\vec{B}_i| \quad (2.9)$$

$$\vec{B}_{zi} = \frac{y_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} |\vec{B}_i| \quad (2.10)$$

Die vektorielle Addition der Feldbeiträge liefert den Feldvektor:

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Im Falle eines sinusförmigen Stromes mit fester Frequenz

$$I(t) = \hat{I} \sin(\omega t) \quad (2.12)$$

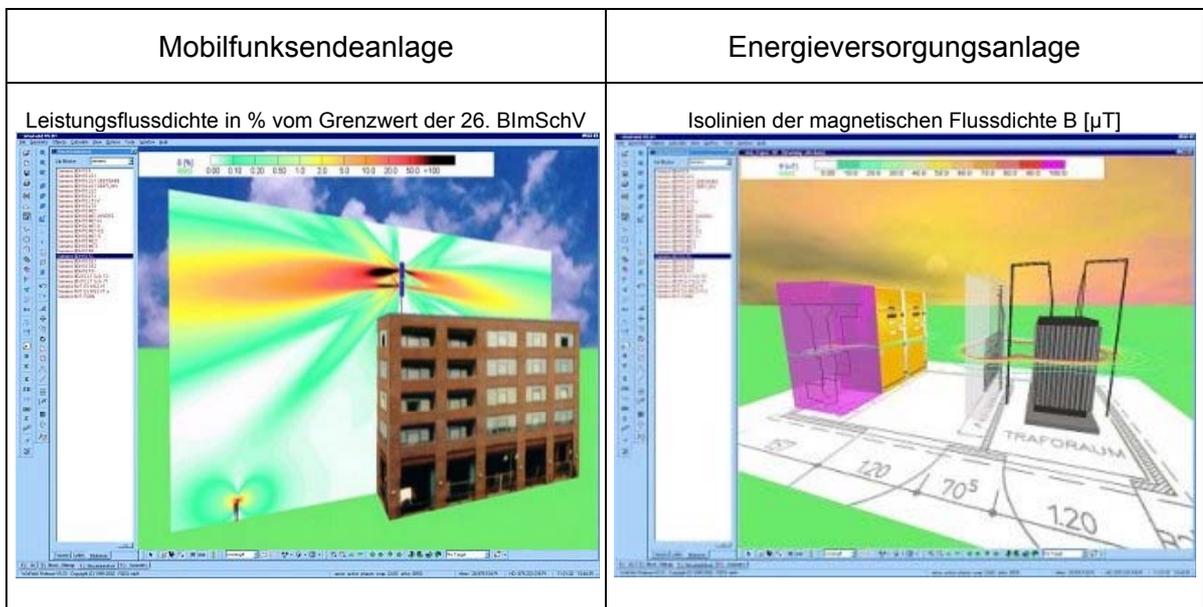
wird für den Effektivwert (RMS) die Beziehung

$$I_{eff} = \hat{I} / \sqrt{2} \quad (2.13)$$

zugrunde gelegt.

## 2.4 WinField® - Programmbeschreibung

WinField® wurde entwickelt, um elektrische und magnetische Felder in einem Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz zu berechnen. Somit ermöglicht es Feldberechnungen für den Bereich der Energieversorgung sowie der Telekommunikation, auch hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte der 26. BImSchV. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Beispiel für die Berechnung und Darstellung der Ergebnisse für eine Mobilfunksende- sowie eine Energieversorgungsanlage in WinField®.



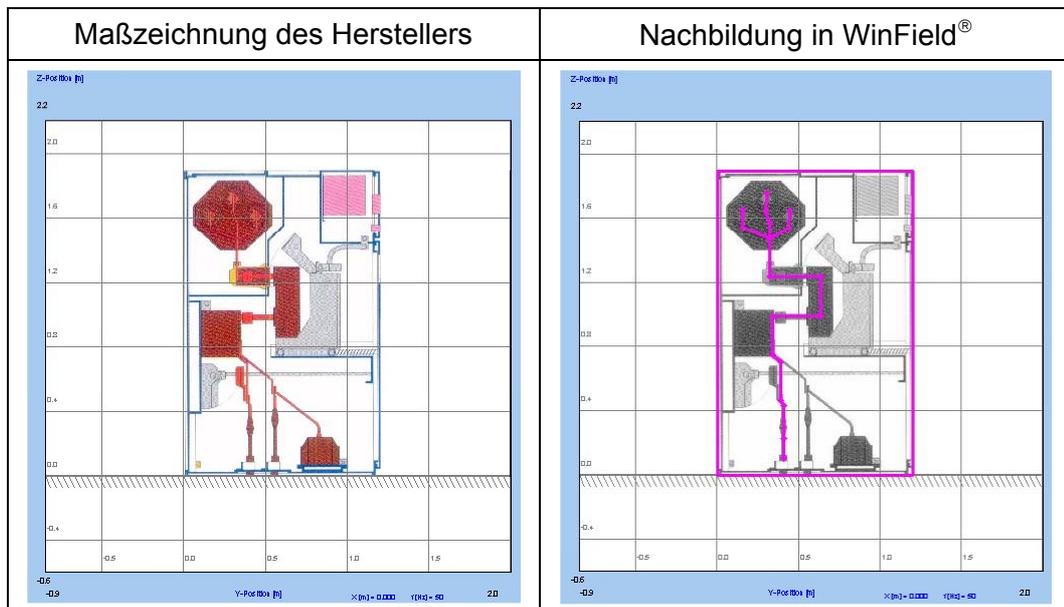
**Abbildung 2.1:** Anwendungsbeispiele für die Simulationssoftware WinField®

Der Berechnungsalgorithmus für niederfrequente Felder beruht, wie unter 2.3.2 beschrieben, auf dem Gesetz von Biot-Savart. Da das elektrische und magnetische Feld ein Vektorfeld ist, werden alle zu berechnenden Elemente im dreidimensionalen Raum in einem kartesischen Koordinatensystem konstruiert. Die stromführenden Elemente werden als fadenförmige Elemente dargestellt und können berechnet werden, indem die elektrotechnischen Parameter wie z.B. Stromstärke, Spannung usw. angegeben werden. Komplexe Geometrien werden im Programm mit Hilfe von Grundelementen nachgebildet, wodurch in Abhängigkeit von der Segmentierung in Teilleiter geringe Berechnungsfehler entstehen. Eine höhere Anzahl von Segmenten verringert die Berechnungsfehler. Die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse ist weiterhin auch vom

Berechnungsraster abhängig. Es ist möglich, die Größe des Rasters bis auf 1 x 1 mm zu verkleinern, wodurch die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse erhöht wird. Die Berechnungszeiten nehmen jedoch extrem zu, so dass es in den meisten Fällen sinnvoll ist, mit einem Raster vom 5 x 5 cm zu rechnen (Voreinstellung im Programm).

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte kann im „worst case“ (Vernachlässigung des schirmenden Materialeinflusses) oder auch unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften und der Induktion (Schirmung) erfolgen. Hierbei sind Berechnungsebene und -abstand frei wählbar. Unter der Annahme von sinusförmigen Strömen können die Spitzen- und Effektivwerte der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte berechnet werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Beispiel für die Nachbildung der stromführenden Elemente eines MS-Abgangsfeldes mit Leistungsschalter, Strom- und Spannungswandler anhand der Maßzeichnung des Herstellers in WinField®.

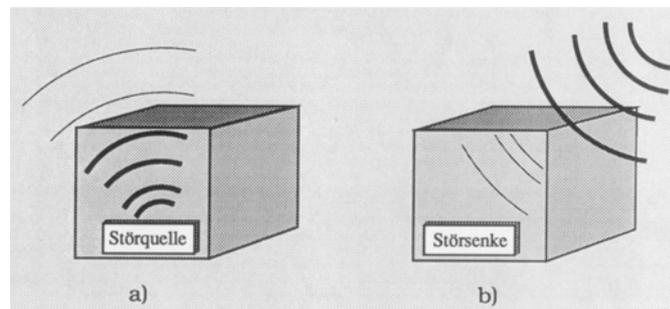


**Abbildung 2.2:** Nachbildung der stromführenden Elemente eines Schaltfeldes in WinField® anhand der Maßzeichnung des Herstellers

## 2.5 Theorie der Schirmwirkung

Die Wirkungsweise elektromagnetischer Schirme beruht darauf, dass elektromagnetische Felder in einen Schirm eindringen und somit je nach der Art des Schirmmaterials zwei verschiedene Effekte hervorgerufen werden, die zur Schwächung des Feldes beitragen.

Hierbei ist es *zunächst* nicht relevant, ob sich die zu schwächenden Felder innerhalb oder außerhalb der Schirmhülle befinden. Abbildung 2.3 zeigt die Reziprozität der Schirmwirkung schematisch [8, S. 188].



**Abbildung 2.3:** a) Abschwächung der Störstrahlung einer Störquelle  
b) Schutz einer Störsenke vor Störstrahlung [8, S. 188]

Das Maß der Schirmwirkung wird durch den Schirmfaktor  $S$  definiert. Dieser errechnet sich nach Gleichung 2.14 aus dem Verhältnis der äußeren Feldstärke  $H_a$  (in Abwesenheit des Schirms) und der im Inneren des Schirms auftretenden Feldstärke  $H_i$ .

$$S = \frac{H_a}{H_i} \quad (2.14)$$

Nur für einfache Raumformen kann der Schirmfaktor nach Gleichung 2.14 mit vertretbarem Aufwand berechnet werden. Die Berechnung tatsächlicher Schirmgeometrien erfolgt durch die Annäherung der Schirmhülle an einfache Geometrien, wie z.B. eine dünnwandige Hohlkugel oder einen langen Zylinder. Hierfür sei jedoch auf weiterführende Literatur, i.e. KADEN [9], verwiesen.

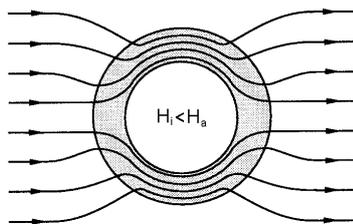
Der Schirmfaktor kann auch im logarithmischen Maßstab als Schirmdämpfung  $a_s$  in  $dB$  angegeben werden.

Es besteht folgender Zusammenhang zwischen  $S$  und  $a_s$ :

$$a_s = 20 \lg \cdot S \quad (2.15)$$

Der Einsatz von speziellen Schirmwänden bedingt in vielen Fällen eine erhebliche Reduktion der magnetischen Flussdichte. Bei der Schirmung gegen magnetische Wechselfelder ist es jedoch notwendig, die einzelnen Wände eines Gehäuses niederohmig miteinander zu verbinden, da hier die Schirmwirkung von den Strömen in der Schirmwand abhängt. Als Schirmmaterialien kommen ferromagnetische und unmagnetische elektrisch leitfähige Stoffe zum Einsatz.

Bei der Verwendung von ferromagnetischen Schirmmaterialien beruht die Schirmwirkung auf der Ablenkung der *längs* zur Schirmplatte verlaufenden Feldlinien in die Schirmwand. Ferromagnetische Materialien besitzen eine Permeabilität  $\mu_r > 1$ , wodurch die Schirmwand hier als magnetischer Kurzschluss wirkt und die Feldlinien in den Schirm gelenkt werden, da hier der magnetische Widerstand geringer als in Luft ( $\mu_r \approx 1$ ) ist.



Nebensiehende Abbildung stellt die Ablenkung der Feldlinien in die Schirmwand dar, wobei die Feldstärke im Raum innerhalb der Schirmung geringer ist als außerhalb.

**Abbildung 2.4:**

Ablenkung der Feldlinien in den Schirm [10, S. 6]

Prinzipiell nimmt die Schirmwirkung mit steigender Permeabilität zu, hierbei ist jedoch zu beachten, dass diese nicht konstant ist, da eine Abhängigkeit von der magnetischen Feldstärke und der Frequenz vorhanden ist.

Ferromagnetische Materialien besitzen eine bestimmte Anfangspermeabilität, die mit zunehmender Feldstärke ansteigt, bis sie einen Maximalwert erreicht, danach fällt sie wieder ab. Es kommt also beim Erreichen von  $\mu_{max}$  zur Sättigung der

magnetischen Flussdichte im Material. Wird die magnetische Feldstärke dennoch weiter erhöht, fließen die Feldlinien auch außerhalb des Schirmes.

Werden unmagnetische, elektrisch leitfähige Stoffe zur Schirmung verwendet, tritt der Effekt der Erzeugung eines Gegenfeldes in Erscheinung. Befindet sich ein solcher Stoff in einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld, so werden in ihm Spannungen induziert, die Ströme zur Folge haben. Die induzierten Spannungen sind am größten, wenn die Feldlinien senkrecht zur Schirmplatte verlaufen. Das Magnetfeld der induzierten Ströme ist dem verursachenden Feld entgegengerichtet. Aus diesem Grund entsteht durch Überlagerung der beiden Felder ein resultierendes Feld geringerer Feldstärke.

Dieser Effekt überwiegt aufgrund der höheren spezifischen Leitfähigkeit bei unmagnetischen Materialien. Es gilt somit, je höher die Leitfähigkeit des Schirmmaterials, desto größer sind die bei gleicher Feldstärke fließenden Wirbelströme und desto höher ist die Schirmdämpfung.

Allgemein wird der Einfluss der Schirmdämpfung mittels der Eindringtiefe  $\delta$  beschrieben, welche die Tiefe angibt, bei der das eindringende Feld auf  $-\frac{1}{e}$  abgefallen ist.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \kappa}} \quad (2.16)$$

Mit zunehmender Frequenz wird die Eindringtiefe geringer, so dass die Schirmdämpfung zunimmt, bzw. es möglich ist, mit geringeren Materialdicken zu arbeiten.

Für große Abschirmungen im Niederfrequenzbereich ist es oft sinnvoll, Eisen-, Stahl- oder Aluminiumplatten zu verwenden, da  $\mu$ -Metalle sehr teuer sind. Aufgrund des hohen Gewichts von Eisen und Stahl ist es meist günstiger, Aluminiumplatten zu verwenden. Gleichung 2.16 lässt erkennen, dass zur Abschirmung niederfrequenter Felder besonders hochpermeable Stoffe von Vorteil sind. Bei hohen Frequenzen ist die Eindringtiefe hingegen so gering, so dass sich hochfrequente Felder schon mittels dünner Folien oder Beschichtungen abschirmen lassen.

In der Praxis werden zur Schirmung von 50 Hz - Magnetfeldern auch häufig hochpermeable Werkstoffe wie z.B. Mumetall eingesetzt. Bei diesen Materialien ist die Eindringtiefe des magnetischen Feldes in die Schirmwand sehr gering, daher ist es möglich, durch sehr dünne Wandstärken eine hohe Schirmwirkung zu erreichen. Hierbei beruht die Reduktionswirkung des Magnetfeldes auf dem als Kurzschlusswindung wirkenden Schirm.

In Abbildung 2.5 ist die Verwendung von hochpermeablen  $\mu$ Shield<sup>®</sup> - Abschirmplatten der Firma CFW EMV - Consulting AG innerhalb einer Ortsnetzstation dargestellt. Im Einzelnen handelt es sich um Schirmplatten vom Typ *Trafoman*<sup>®</sup> für den Transformator sowie *Powerman*<sup>®</sup> für die MS-Schaltanlage und die Niederspannungsverteilung.

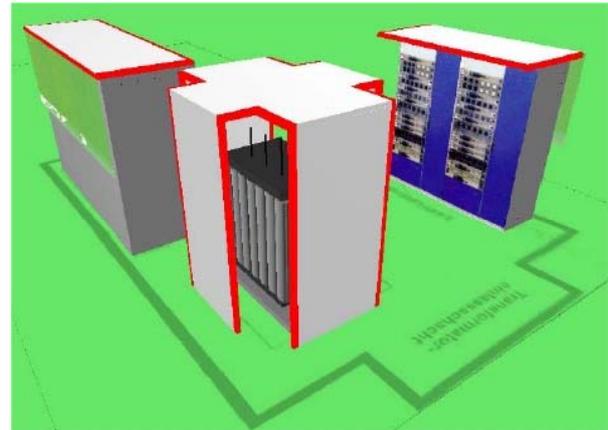


Abbildung 2.5: Verwendung von Abschirmplatten in einer Ortsnetzstation

In WinField<sup>®</sup> kann die Schirmung von Gehäusematerialien bei der Berechnung berücksichtigt werden. Für Stahl und Aluminium erfolgt die Berechnung des resultierenden Feldes über die Induktion, d.h. es wird der Effekt der Gegenfelderzeugung angewendet. Es können jedoch auch Schirmfaktoren verschiedener (auch ferromagnetischer) Materialien aus einer Bibliothek (Abbildung 2.5) entnommen und als isotroper Schirmfaktor zur Berechnung benutzt werden. Des Weiteren ist auch die Verwendung von messtechnisch ermittelten Schirmfaktoren möglich.

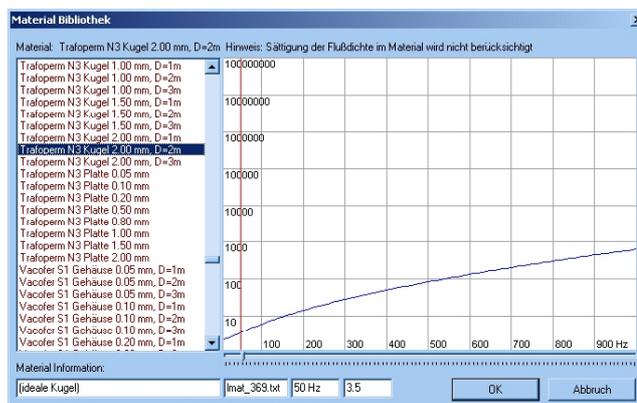


Abbildung 2.6: WinField<sup>®</sup>-Materialbibliothek

Nebenstehende Abbildung stellt die Bibliothek der verschiedenen Schirmmaterialien in WinField<sup>®</sup> dar. Hierbei ist es möglich, den Schirmfaktor für unterschiedliche Frequenzen zu ermitteln und diesen bei der Berechnung zu verwenden.

### **3 Systematisierung von MS-Schaltanlagen**

Um Mittelspannungsschaltanlagen hinsichtlich ihrer magnetischen Felder im Betriebszustand untersuchen zu können, ist es notwendig, Kenntnisse und Informationen zu einzelnen Typen von Schaltfeldern, deren Komponenten, Bauausführungen, Wirkungsweise und Funktion zu haben.

Grundsätzlich ist es möglich, Schaltanlagen nach verschiedenen Kriterien zu unterscheiden, worauf speziell im Abschnitt 3.4 eingegangen wird. An dieser Stelle soll die Klassifizierung nach der Netzebene stattfinden. Es gibt HS-, MS- und NS-Schaltanlagen, von denen in dieser Diplomarbeit nur MS-Schaltanlagen mit einer Bemessungsspannung von 12 kV betrachtet werden.

Unter einer Schaltanlage werden die an einer Stelle zusammengefassten elektrischen Betriebsmittel zur Verteilung, Steuerung oder Regelung des Energieflusses verstanden. Sie dienen der Verbindung bzw. Trennung von Kabeln und Freileitungen und können somit im elektrischen Netz als Knotenpunkt betrachtet werden [12, S. 206].

MS-Schaltanlagen sind Anlagen, die in einem Spannungsbereich von 1 kV bis 36 kV eingesetzt werden. Für sie gelten die Bestimmungen der DIN VDE 0670 Teil 6 und DIN VDE 0101. Moderne MS-Schaltanlagen werden aus fabrikgefertigten Schaltfeldern vor Ort zu einer kompletten Anlage zusammengesetzt.

#### **3.1 Einsatzgebiete, Aufgaben und Betriebsweise**

Eine MS-Schaltanlage ist eine Anlage des Elektroenergieverkehrs. Daher erstrecken sich die Einsatzgebiete von MS-Schaltanlagen vom Bereich der öffentlichen und industriellen Energieversorgung und -verteilung bis hin zu Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken. Sie finden beispielsweise in Ortsnetzstationen sowie Industrietransformatorstationen ihre Anwendung, wobei hier in der Regel eine MS- und eine NS-Ebene vorhanden sind. Bei der Verwendung von MS-Schaltanlagen als Kraftwerksschaltanlagen (meist 10 kV oder 6 kV) dienen diese dem Eigenbedarf der Kraftwerksblöcke (Generator und Transformator) sowie dem allgemeinen Bedarf.

Die Aufgabe einer Schaltanlage ist es, Stromkreise eines Elektroenergiesystems je nach Anforderungen des Netzbetriebes zu verbinden oder zu trennen. Sie muss jeglichen betriebsbedingten Anforderungen im Normal- und Fehlerfall an ihrem Einsatzort gewachsen sein. Dazu zählen: 1. betriebsmäßig erforderliche Schaltzustände herstellen und 2. im Fehlerfall über Schutzeinrichtungen die gestörte Leitung bzw. den gestörten Teil der Anlage automatisch abschalten zu können. Aus diesem Grund sind Mess-, Zähl-, Steuer- bzw. Regelungseinrichtungen vorgesehen, um Ströme, Spannungen, Leistungen und Energiemengen zu überwachen. Diese Automatisierungseinrichtungen werden als Sekundärtechnik bezeichnet, worauf im Abschnitt 3.3 näher eingegangen wird. Für den energetischen Stromkreis wird die Bezeichnung Primärtechnik verwendet. [13, S. 2 ff].

Welche Sekundärtechnik zum Einsatz kommt, ist vom Einsatzgebiet und der Aufgabenstellung der jeweiligen Anlage abhängig.

## **3.2 Unterscheidungskriterien**

Eine grundsätzliche Unterscheidung von MS-Schaltanlagen wird nach den Isolationsabständen der spannungsführenden Teile vorgenommen. Das heißt, es gibt eine Unterscheidung in Anlagen, welche nach Mindestabständen errichtet werden und in Anlagen, deren dielektrische Dimensionierung nach Prüfspannungen erfolgt. Unabhängig davon, ob die Anlage nach Mindestabständen oder nach Prüfspannungen gebaut wird, kann im konstruktiven Aufbau zwischen offenen, geschützten und gekapselten Anlagen unterschieden werden. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Unterscheidungskriterien genauer spezifiziert. [14, S. 460]

### **3.2.1 Nach den Mindestabständen**

Für Anlagen, die nach Mindestabständen gebaut werden, gelten die Bestimmungen der DIN VDE 0101, in denen alle erforderlichen Mindestmaße angegeben sind. Internationale Vorschriften für diese Anlagenform gibt es nicht. Die vorgeschriebenen Mindestabstände sind einzuhalten für unter Spannung stehende Teile gegeneinander und gegen Erde sowie für die Ausführung von Wegen und Gängen. Gefertigt werden diese Arten von Anlagen in Fabriken. Da in der DIN VDE 0101 keine weiteren Festlegungen zur Gestaltung dieser Anlagen

getroffen sind, gibt es eine sehr große Anzahl von Bauausführungen aufgrund der verschiedenen Hersteller [14, S. 460].

### 3.2.2 Nach der Prüfspannung

Als „typgeprüfte Anlagen“ werden Anlagen bezeichnet, deren elektrische Dimensionierung nach der Prüfspannung erfolgt. Für sie gelten die Bestimmungen der DIN VDE 0670 Teil 6 und Teil 7, welche mit den IEC-Publikationen 298 und 466 harmonisieren. Vorgeschrieben ist bei diesem Anlagentyp nicht nur die Einhaltung der Isolationswerte, sondern auch die Einhaltung anderer Werte und Bedingungen, wie z.B. für die Kurzschlussfestigkeit, Schutz gegen äußere Einflüsse und Berühren sowie die Stromtragfähigkeit.

Der Nachweis für die Einhaltung der Bestimmungen der zugehörigen Vorschriften wird durch eine Typprüfung an einem Prototyp eines Schaltfeldes erbracht. Zusätzlich wird eine Stückprüfung an jedem einzelnen gefertigten Schaltfeld vorgenommen. [14, S. 460], [15 S. 325]

### 3.2.3 Nach der Konstruktion

Die Schaltfelder einer MS-Schaltanlage können nach der Art der Abdeckung in zwei Kategorien unterteilt werden:

- offene Schaltfelder
- metallgekapselte Schaltfelder

Nach DIN VDE 0101 ist bei einem offenen Schaltfeld die Vorderseite bis zu einer Höhe von 1,80 m mit Blech abzudecken, die Seitenwände sind ebenfalls mit Blech oder Hartgipsplatten zu verschließen. Die Rückseite ist mit einer Gitter- oder Blechtür abzudecken. Schottwände im Inneren der Anlage sind nicht üblich.

Aufgrund dieses relativ geringen konstruktiven Aufwandes werden offene Schaltfelder nur in **abgeschlossenen** elektrischen Betriebsräumen aufgestellt, um den Personenschutz zu gewährleisten, da nur technisch versiertes Personal Zugang hat. [15, S. 329]

Metallgekapselte Schaltfelder stellen einen erhöhten Schutz gegen direktes Berühren dar und werden nach DIN VDE 0670 Teil 6 in drei Hauptarten unterteilt: [15, S. 329]

- geschottete
- teilgeschottete und
- metallgeschottete Anlagen.

Bei einer geschotteten Anlage bestehen alle *Zwischenwände* aus nichtmetallischem Material. Bei teilgeschotteten Anlagen sind hingegen nicht alle funktionell zusammengehörigen Zellen eines Schaltfeldes durch Zwischenwände getrennt. Die Bezeichnung „metallgeschottete Anlage“ erhält eine Schaltanlage, wenn die Zwischenwände aus Metall bestehen und diese geerdet sind.

Des Weiteren ist eine Unterscheidung in Abhängigkeit vom Einbau der Schaltgeräte möglich:

- Anlagen in Festeinbau-Technik
- Anlagen in Schaltwagen-Technik

Anlagen in Festeinbau-Technik werden nur als offene oder metallgekapselte (geschottet und teilgeschottet) Anlagen ausgeführt. In den Schaltfeldern sind alle Betriebsmittel fest eingebaut oder höchstens herausziehbar (Leistungsschalter). Anlagen nach der Festeinbau-Technik werden nach Mindestabständen nach DIN VDE 0101 oder als typgeprüfte Anlagen nach DIN VDE 0670 Teil 6 gebaut.

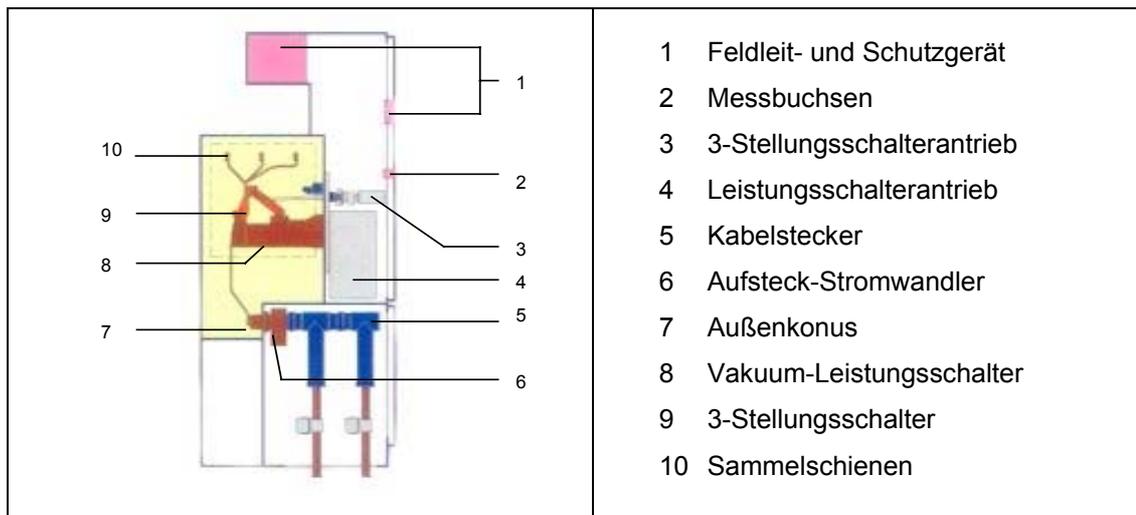
Bei Anlagen in Schaltwagen-Technik ist hauptsächlich der Leistungsschalter auf einem ausfahrbaren Schaltwagen angeordnet, somit wird eine sichtbare Trennstrecke hergestellt. Diese Art von Anlagen werden als typgeprüfte, fabrikfertige Schaltanlagen nach DIN VDE 0670 Teil 6 bzw. 7 gebaut.

### 3.3 Komponenten einer MS-Schaltanlage

Unabhängig von ihrem Einsatz sind prinzipiell alle MS-Schaltanlagen nach den gleichen Gesichtspunkten aufgebaut, wobei sich zusätzliche Anforderungen, welche sich aus der Aufgabenstellung ergeben, durch Variationen der Grundtypen oder durch den Einbau zusätzlicher Teile realisieren lassen.

Die Primärtechnik besteht aus Stromschiene und Sammelschienen. Des Weiteren sind je nach Anforderung verschiedene Schaltgeräte wie z.B. Leistungsschalter, Lasttrennschalter, Erdungsschalter, Sicherungen u.a. eingebaut. Welche Sekundärtechnik verwendet wird, ist individuell von der Aufgabenstellung abhängig. Häufig finden Strom- und Spannungswandler Anwendung, um eine Messung der Energiemengen zu ermöglichen.

Die nachfolgende Abbildung stellt den Aufbau eines typischen MS-Leistungsschalterfeldes an einem Beispiel dar.



**Abbildung 3.1:** MS-Leistungsschalterfeld, ABB ZX0, SF<sub>6</sub>-isoliert [16]

Im Abschnitt 6.2 wird der Einfluss ausgewählter konstruktiver Einzelelemente auf die magnetische Flussdichte untersucht.

### 3.4 Vorteile unterschiedlicher Bauartvarianten

Aufgrund der historischen Entwicklung gibt es viele Arten von MS-Schaltanlagen. Die luftisolierten, offenen Schaltanlagen werden ausschließlich in **geschlossenen** elektrischen Betriebsräumen verwendet und sind die kostengünstigste Variante. Metallgekapselte Schaltfelder zeichnen sich durch einen vollständigen Berührungsschutz aus und sind somit auch außerhalb abgeschlossener elektrischer Betriebsstätten einsetzbar.

Ein großer Vorteil von Anlagen mit SF<sub>6</sub>-Isolierung ist, dass diese sehr kleinräumig gebaut werden können, da SF<sub>6</sub> eine höhere Durchschlagsfestigkeit als Luft besitzt. Die Anlagen werden auch häufig als Kompaktschaltanlagen bezeichnet und an Orten mit geringer Stellfläche verwendet. Allgemein ist ein deutlicher Trend zur metallgekapselten, druckgasisolierten (meist SF<sub>6</sub>) Schaltanlage zu verzeichnen.

## 4 Rechtsgrundlagen und Bestimmungen

Beim Betrieb von elektrischen und elektronischen Anlagen werden künstliche magnetische, elektrische und elektromagnetische Felder erzeugt. Elektrische Felder treten jedoch nur auf, wenn Anlagen offen sind, d.h. beispielsweise an blanken Stromschienen oder Trafokerzen.

Betrachtungsgegenstand dieser Diplomarbeit sind die magnetischen Felder, welche durch MS-Schaltanlagen künstlich erzeugt werden und somit eine Beeinflussung der Umwelt und des Menschen bedingen. Diese können die natürlich vorkommenden Felder in ihrer Intensität bei weitem übertreffen. Daher wurden Grenzwerte geschaffen, um den Schutz von Personen zu gewährleisten.

Die in den nachfolgenden Abschnitten aufgeführten Gesetze und Bestimmungen bezüglich des Personenschutzes sollen einen Überblick über die derzeit in der Bundesrepublik Deutschland geltenden Rechtsgrundlagen geben. Da es zahlreiche Ausnahmeregelungen gibt, sind sie aus Umfangsgründen nur auszugsweise aufgeführt.

Die für diese Arbeit wichtigen Grenzwerte sind in den Tabellen jeweils grau unterlegt. Nachfolgende Abbildung zeigt die WinField<sup>®</sup>-Grenzwertbibliothek. Sie beinhaltet nationale sowie internationale Richtlinien. Über diese Bibliothek kann der Grenzwert der magnetischen Flussdichte für verschiedene Frequenzen ermittelt werden.

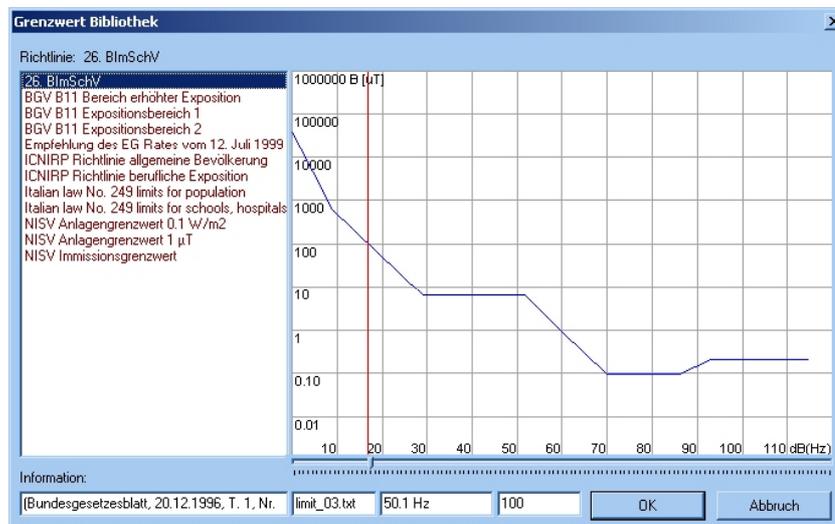


Abbildung 4.1: WinField<sup>®</sup>-Grenzwertbibliothek

## 4.1 Sicherheitsanforderungen an MS-Schaltanlagen

Für MS-Schaltanlagen gelten je nach Klassifizierung (siehe Abschnitt 3.2) die Bestimmungen der DIN VDE 101 bzw. DIN VDE 0670 Teil 6 und 7. Des Weiteren sind die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik einzuhalten. Hierbei sind besonders die Festlegungen der VBG4 sowie die DIN VDE 105 maßgebend, welche für alle Anlagenformen und Spannungsbereiche gelten [14, S. 413].

Weitere Grundanforderungen von Schaltanlagen bestehen darin, sie so zu konstruieren, dass sie dem Betreiber ein hohes Maß an Sicherheit bieten. Dazu gehören unter anderem Sicherheit gegen und bei Fehlbedienung sowie ausreichender Schutz gegen Berühren.

### 4.1.1 26. Bundes-Immissionsschutzverordnung

Die Verordnung wurde am 20. Dezember 1996 verkündet und trat am 1. Januar 1997 in Kraft. Sie gilt für die Errichtung von Hoch- und Niederfrequenzanlagen und enthält Anforderungen zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch elektromagnetische Felder. Die Wirkungen elektromagnetischer Felder auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate werden durch diese Verordnung nicht berücksichtigt. Hierfür ist die DIN VDE 0848 Teil 3-1, Entwurf Juni 1999 zuständig. Weiterhin gilt sie nicht für Beschäftigte, die Arbeiten an den Anlagen durchführen. Hier gelten die Regeln des Arbeitsschutzes und der Arbeitssicherheit, welche Betrachtungsgegenstand des nächsten Abschnittes sind.

Die folgenden Tabellen zeigen die festgelegten Expositionsgrenzwerte der magnetischen Flussdichte für Niederfrequenz- und Hochfrequenzanlagen. Diese Grenzwerte basieren auf den Empfehlungen der INIRC und der IRPA.

**Tabelle 4-1:** Grenzwerte für Niederfrequenzanlagen [17, S.1968]

Frequenz (Hz)	Effektivwert der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte	
	elektrische Feldstärke (kV/m)	magnetische Flussdichte ( $\mu\text{T}$ )
50-Hz-Felder	5	100
$16^{2/3}$ -Hz-Felder	10	300

**Tabelle 4-2:** Grenzwerte für Hochfrequenzanlagen [17, S.1968]

Frequenz (MHz)	Effektivwert der Feldstärke (quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle)	
	elektrische Feldstärke (V/m)	magnetische Feldstärke (A/m)
10 – 400	27,5	0,073
400 – 2000	$1,375 \cdot \sqrt{f}$	$0,0037 \cdot \sqrt{f}$
2000 – 300000	61	0,16

Einzuhalten sind diese Grenzwerte an Orten, die nicht nur dem vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen, wie z.B. Wohngebäuden, Schulen und Kindergärten.

Für die Einhaltung der Grenzwerte der 26. BImSchV ist eine Entfernung zwischen der *berühmbaren* und *zugänglichen* Oberfläche einer Anlage und einer Bezugsebene im Abstand von 20 cm gefordert. Die Bezugsebene stellt die Fläche dar, in der die Grenzwerte eingehalten werden müssen. Der Nachweis muss durch Messung oder mit Hilfe anerkannter Berechnungsverfahren unter *höchster* Anlagenauslastung erfolgen. [18, S. 31]

#### 4.1.2 Anforderungen an die Arbeitssicherheit

Hinsichtlich der Arbeitssicherheit stellt die Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit (BGV B11) die Rechtsgrundlage dar.

Sie trat am 1. Juni 2001 in Kraft und dient dem Schutz von Personen gegen die Einwirkung von elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz, aber nicht für die gewollte medizinische Einwirkung auf Patienten.

Maßgebend sind vor allem die Expositionsbereiche 1 und 2, sowie der Bereich erhöhter Exposition, die wie folgt definiert sind:

**Der Expositionsbereich 1** umfasst kontrollierte Bereiche, sowie Bereiche, in denen aufgrund der Betriebsweise oder aufgrund der Aufenthaltsdauer sichergestellt ist, dass eine Exposition oberhalb der zulässigen Werte von Expositionsbereich 2 nur vorübergehend erfolgt [19, S. 6].

**Der Expositionsbereich 2** umfasst alle Bereiche eines Unternehmens, sofern sie nicht dem Expositionsbereich 1, dem Bereich erhöhter Exposition oder dem Gefahrenbereich (Bereich, in dem die Werte für Bereiche erhöhter Exposition überschritten werden), zuzuordnen sind [19, S. 6].

**Der Bereich erhöhter Exposition** ist ein kontrollierter Bereich, in dem die Werte des Expositionsbereiches 1 überschritten werden [19, S. 6].

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die festgelegten Grenzwerte für die magnetische Flussdichte für den Expositionsbereich 1 und 2 sowie den Bereich erhöhter Exposition, die am Arbeitsplatz einzuhalten sind.

**Tabelle 4-3:** Grenzwerte für den Expositionsbereich 1 und den Bereich erhöhter Exposition [19, S. 16]

Frequenzbereich $f$ (Hz)	Effektivwert der magnetischen Flussdichte in mT <sup>(1)</sup>	
	Expositionsbereich 1	Bereich erhöhter Exposition 2 h/d
0-1	67,9	127,3
1-1000	$67,9/f$	$127,3/f$
⇒ 50	1,358	2,546
1000-29000	$67,9 \cdot 10^{-3}$	$127,3 \cdot 10^{-3}$

<sup>(1)</sup> über Flächenelemente von 100 cm<sup>2</sup> zu mitteln

**Tabelle 4-4:** Grenzwerte für den Expositionsbereich 2 [19, S. 16]

Frequenzbereich $f$ (Hz)	Effektivwert der magnetischen Flussdichte in mT <sup>(1)</sup>
0-1	21,22
1-1000	$21,22/f$
⇒ 50	0,4244
1000-29000	$21,22 \cdot 10^{-3}$

<sup>(1)</sup> über Flächenelemente von 100 cm<sup>2</sup> zu mitteln

### 4.1.3 Schweizer NISV

Die Schweizer Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung stützt sich auf das Umweltschutzgesetz vom 7. Oktober 1983 und auf das Raumplanungsgesetz vom 22. Juni 1979. Sie trat am 1. Februar 2000 in Kraft.

Ziel dieser Verordnung ist es, Menschen vor schädlicher oder lästiger nichtionisierender Strahlung zu schützen. Sie regelt die Begrenzung der Emissionen von elektrischen und magnetischen Feldern mit Frequenzen von 0 Hz bis 300 GHz, die beim Betrieb von ortsfesten Anlagen erzeugt werden sowie die Ermittlung und Beurteilung der Immissionen von Strahlung. Maßgebend für Schaltanlagen und Unterwerke ist der Punkt 3 dieser Verordnung.

Der Anlagengrenzwert (Emissionswert) für den Effektivwert der magnetischen Flussdichte beträgt für diese Anlagen 1  $\mu\text{T}$  in 20 cm Abstand von der Stationsbegrenzung. Für die von einer Anlage allein erzeugte Strahlung stellt der Anlagengrenzwert die Emissionsbegrenzung dar. Der Anlagengrenzwert muss an Orten mit „empfindlicher Nutzung“ eingehalten werden.

Als Orte mit empfindlicher Nutzung gelten:

- a) Räume in Gebäuden, in denen sich Personen regelmäßig während längerer Zeit aufhalten
- b) öffentliche oder private, raumplanungsrechtlich festgesetzte Kinderspielplätze
- c) diejenigen Flächen von unüberbauten Grundstücken, auf denen Nutzungen nach den Buchstaben a) und b) zugelassen sind.

Es werden Ausnahmen bewilligt, wenn der Anlagenbetreiber nachweist, dass alle Maßnahmen zur Begrenzung der Strahlung, welche technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar sind, getroffen wurden. Unter diesen Maßnahmen wird z.B. die Wahl eines anderen Standortes oder Abschirmungen verstanden. [20, S. 213 ff]

Die Tabelle 9-1 im Anhang 9.1 stellt die Immissionsgrenzwerte für den Effektivwert der elektrischen- und magnetischen Feldstärke sowie der magnetischen Flussdichte dar. Diese müssen überall dort eingehalten werden, wo sich Menschen aufhalten können und gelten nur für Strahlung, die gleichmäßig auf den menschlichen Körper einwirkt.

## 5 Analyse der magnetischen Flussdichten typischer Mittelspannungsschaltfelder

### 5.1 Vorbetrachtungen

Bei dieser Analyse werden drei Arten von Schaltfeldern unterschiedlicher Hersteller mittels Berechnungsverfahren hinsichtlich ihrer maximal auftretenden magnetischen Flussdichten untersucht. Im Anhang 9.2 sind die Hersteller der untersuchten Schaltfelder aufgelistet. Die Berechnung erfolgt mit dem Simulationsprogramm WinField<sup>®</sup>, in welchem die stromführenden Elemente, wie z.B. die Stromschienen der einzelnen Schaltfelder, implementiert und als fadenförmige Leiter dargestellt wurden. Die Nachbildung der Schaltzelle in WinField<sup>®</sup> erfolgte anhand der Konstruktionspläne der Hersteller, womit eine Berechnungsgrundlage geschaffen wurde. Die Schirmwirkung des Gehäuses wird bei der Berechnung nicht mit berücksichtigt, d.h. die Ergebnisse stellen den „worst case“ dar. Eine messtechnische Untersuchung ist nicht vorgesehen. Das Ergebnis zeigt eine Übersicht über die Größenordnung und die Unterschiede der maximal auftretenden magnetischen Flussdichten der verschiedenen Schaltfeldtypen.

Bei den untersuchten Schaltfeldern handelt es sich um Abgangsfelder, Leistungsschalterfelder und Trafofelder mit einer Bemessungsspannung von 12 kV. Eingesetzt werden diese Schaltfelder unter anderem in Netzstationen und Industrieschaltanlagen.

Die einzelnen Felder unterscheiden sich in ihren Abmessungen, in der Anordnung der Stromschienen und der Sammelschienenkonstruktion. Diese Faktoren haben erheblichen Einfluss auf das resultierende Magnetfeld. Durch Modifikation dieser Faktoren können die Hersteller somit das entstehende Magnetfeld reduzieren. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, wurden alle Anlagen unter gleichen Randbedingungen berechnet, d.h. mit gleichem Strom und gleicher Spannung.

Die Untersuchung soll zeigen, inwieweit die Schaltfelder den Grenzwerten der 26. BImSchV genügen. Ob Veränderungen in der Konstruktion eine Verringerung der Emissionen bedingen, wird im nächsten Kapitel untersucht.

In den Hinweisen zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder wird ein Abstand von 20 cm zwischen der berührbaren und zugänglichen Oberfläche der Anlage und einer Bezugsebene für die Grenzwertberechnung gefordert. Das heißt, in diesem Abstand müssen die Grenzwerte der 26. BImSchV eingehalten werden. Aus diesem Grund wird die maximale magnetische Flussdichte in einem Abstand von 20 cm von der Rück- und der Seitenwand eines Schaltfeldes ermittelt. Hinsichtlich der Grenzwertbetrachtung der 26. BImSchV spielen diese eine entscheidende Rolle, da die Schaltfelder in Netzstationen und anderen Betriebsräumen zu Schaltanlagen zusammengebaut und üblicherweise mit der Rückseite an die Wand des Raumes gestellt werden. Aus Platzgründen ist es durchaus üblich, eine Seitenwand der Schaltanlage an die Begrenzung des Raumes zu stellen. Daher entsteht auf der anderen Seite der Gebäudewand ein Bereich mit einer erhöhten magnetischen Feldstärke. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Einhaltung der Grenzwerte auch für diesen Fall zu untersuchen. Für Bereiche in der unmittelbaren Umgebung einer Schaltanlage, an denen Arbeiten ausgeführt werden (z.B. die Vorderwand), gelten die Bestimmungen der BGV B11, daher wird an dieser Stelle auf die Berechnung und Darstellung der magnetischen Flussdichten verzichtet.

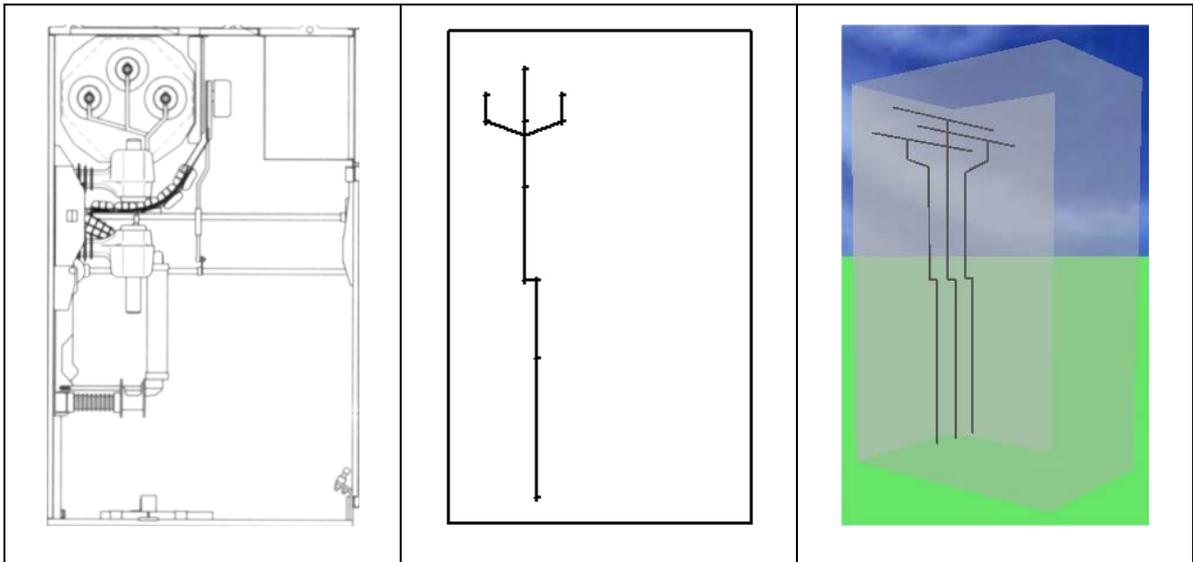
## **5.2. Darstellung und Bewertung**

Die Ermittlung der magnetischen Flussdichte erfolgt in einem Abstand von 20 cm und 40 cm zur Gehäusewand. Hierbei werden die Abstände zu den aktiven Teilen, welche das Feld erzeugen, nicht berücksichtigt. Somit treten Unterschiede auf, da die Entfernungen von den stromführenden Elementen bis zur Gehäusewand je nach Hersteller, Baureihe und Schaltfeldtyp unterschiedlich sind.

Die Darstellung der maximal auftretenden magnetischen Flussdichten der Seitenwände sowie alle Berechnungsergebnisse sind im Anhang 9.3 dargestellt, da hier ein ähnliches Verhalten wie bei den Berechnungen der Rückwand zu beobachten ist. Des Weiteren befindet sich im Anhang 9.3 für jeden untersuchten Schaltfeldtyp eine grafische Darstellung der magnetischen Flussdichteverteilung für ein berechnetes Schaltfeld.

### 5.2.1 Abgangsfelder

In der nachfolgenden Abbildung ist ein typisches MS-Abgangsfeld dargestellt, wobei die zwei rechten Bilder die Nachbildung des Abgangsfeldes in WinField® zeigen.



**Abbildung 5.1:** Beispiel eines MS-Abgangsfeldes

Untersucht wurden 30 Abgangsfelder. Um die Schaltfelder der verschiedenen Hersteller, mit den somit unterschiedlichen konstruktiven Lösungen, vergleichen zu können, ist es nötig, die Randbedingungen festzulegen.

Abgangsfelder mit einer Bemessungsspannung von 12 kV besitzen üblicherweise einen Bemessungsstrom von 630 A. Als Betriebsspannung werden 10 kV verwendet. Da in den Hinweisen für die Durchführung der 26. BImSchV die Berechnung der magnetischen Flussdichte bei maximaler Anlagenauslastung gefordert ist, werden die Randbedingungen wie folgt festgelegt:

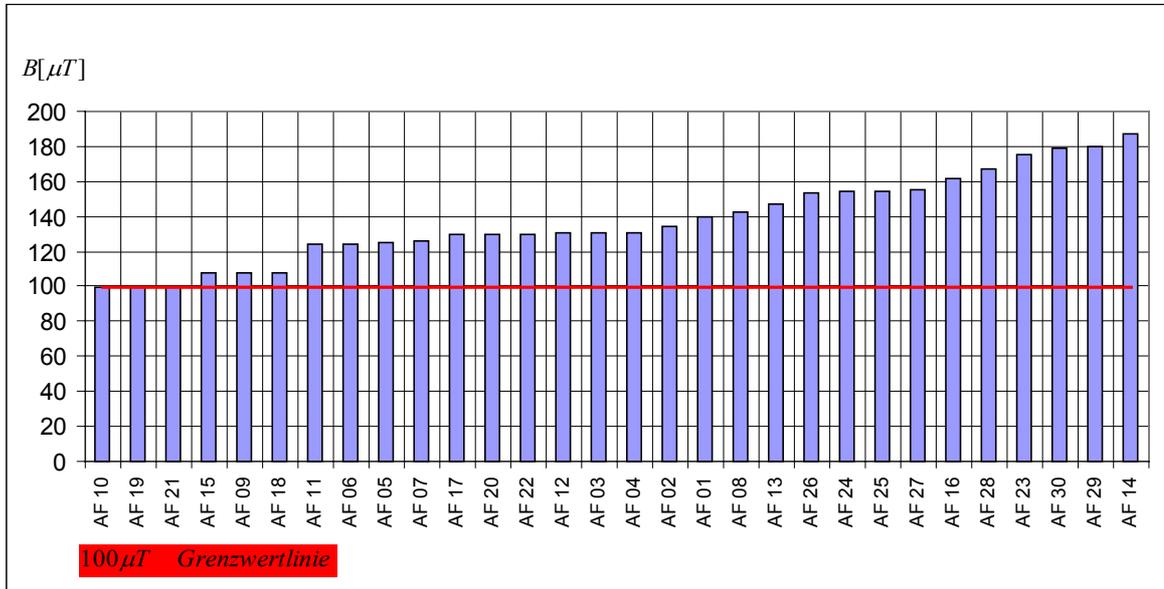
$$I = 630 A \text{ (Bemessungsstrom des Schaltfeldes)}$$

$$U = 10 kV \text{ (Betriebsspannung)}$$

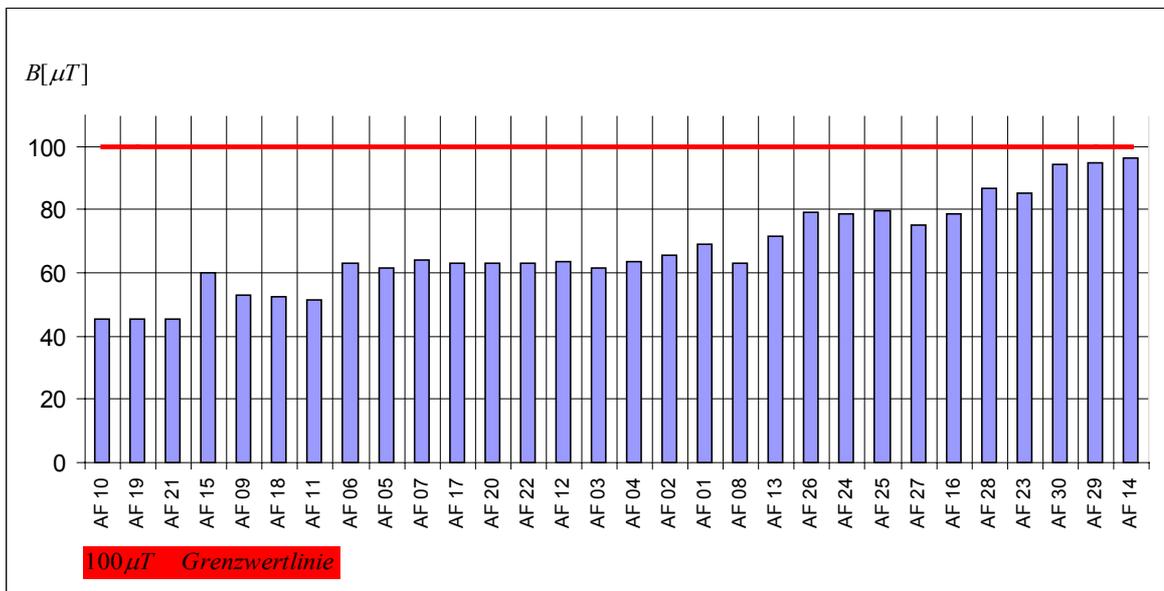
$$f = 50 Hz \text{ (sinusförmig)}$$

Die Abgangsfelder sind mit AF01 bis AF30 bezeichnet.

Die Diagramme 5.1 und 5.2 zeigen die Maximalwerte der auftretenden magnetischen Flussdichten der untersuchten Abgangsfelder.



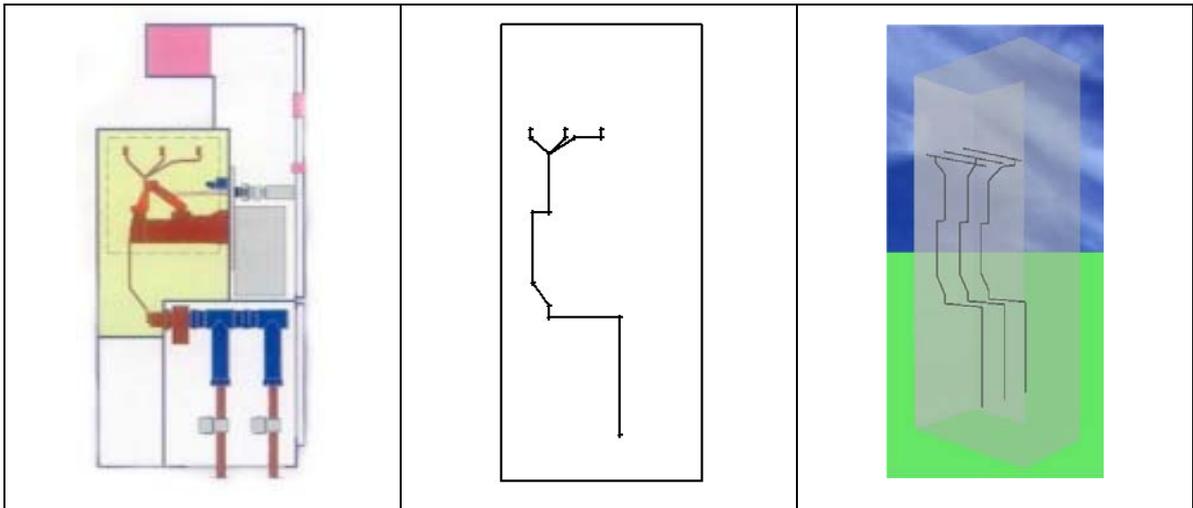
**Diagramm 5.1:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Abgangsfelder im Abstand von 20 cm zur Rückwand



**Diagramm 5.2:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Abgangsfelder im Abstand von 40 cm zur Rückwand

### 5.2.2 Leistungsschalterfelder

In der nachfolgenden Abbildung ist ein typisches MS-Leistungsschalterfeld dargestellt, wobei die zwei rechten Bilder die Nachbildung des Leistungsschalterfeldes in WinField<sup>®</sup> zeigen.



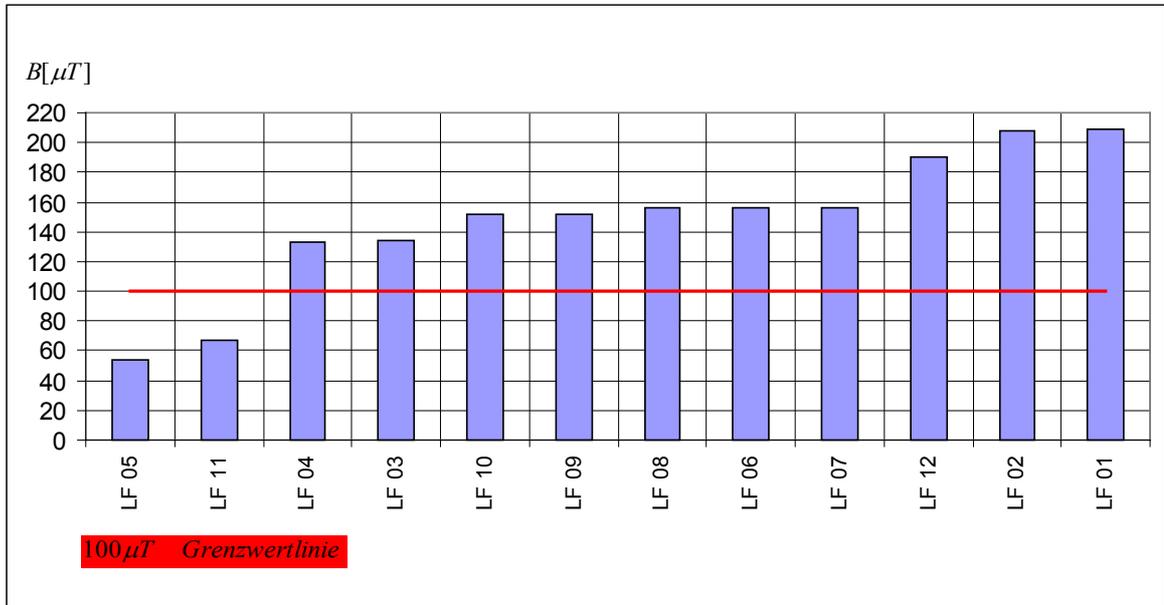
**Abbildung 5.2:** Beispiel eines MS-Leistungsschalterfeldes

12 Leistungsschalterfelder wurden hinsichtlich der maximalen magnetischen Flussdichte untersucht.

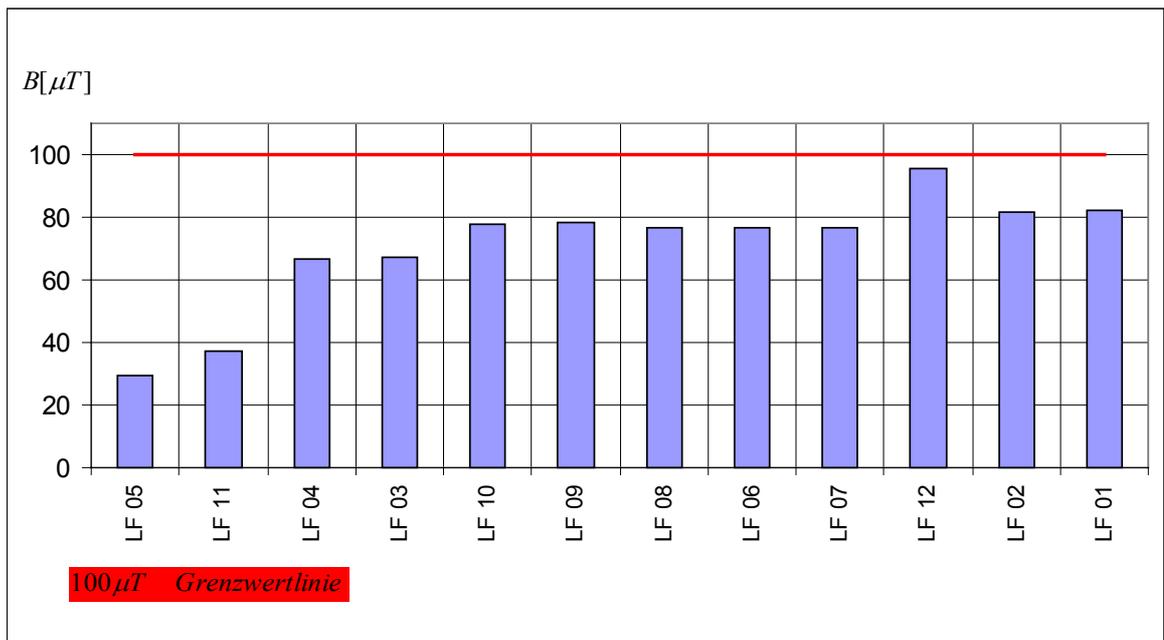
Die Randbedingungen entsprechen denen des Abschnitts 5.2.1.

Die Leistungsschalterfelder sind mit LF01 bis LF12 bezeichnet.

Die Diagramme 5.3 und 5.4 zeigen die Maximalwerte der auftretenden magnetischen Flussdichten der untersuchten Leistungsschalterfelder.



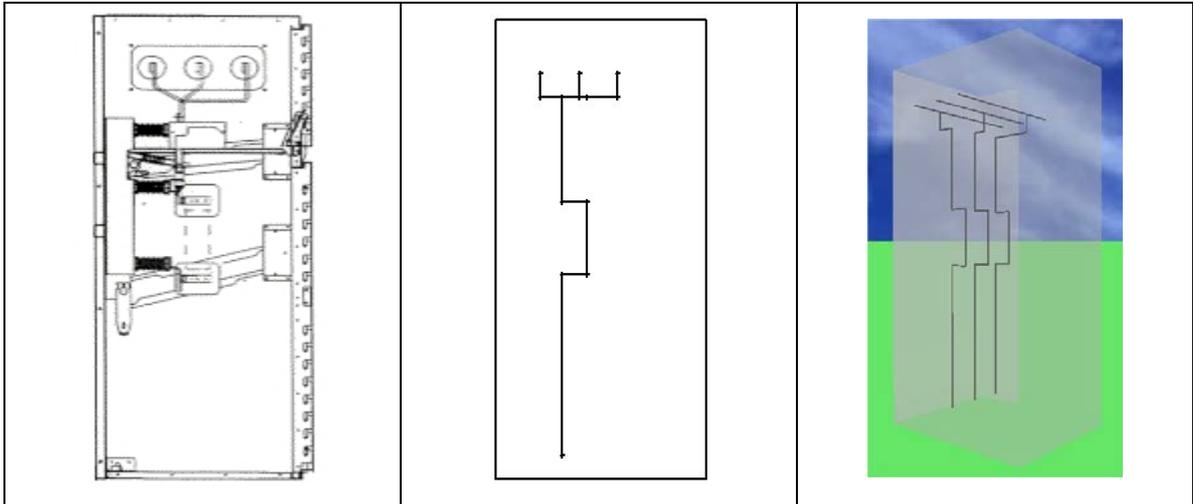
**Diagramm 5.3:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Leistungsschalterfelder im Abstand von 20 cm zur Rückwand



**Diagramm 5.4:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Leistungsschalterfelder im Abstand von 40 cm zur Rückwand

### 5.2.3 Trafofelder

In der nachfolgenden Abbildung ist ein typisches MS-Trafofeld dargestellt, wobei die zwei rechten Bilder die Nachbildung des Trafofeldes in WinField® zeigen.



**Abbildung 5.3:** Beispiel eines MS-Trafofeldes

Untersucht wurden 21 Trafofelder, bei denen sich die Festlegung der Randbedingungen darauf stützt, dass der angeschlossene Transformator eine Leistung von  $S = 2000 \text{ kVA}$  besitzt und die Trafo-Felder einheitlich mit dieser, bei einer Betriebsspannung von  $U = 10 \text{ kV}$ , belastet werden.

Daraus ergibt sich der Strom  $I$  pro Phase nach Gleichung 5.1:

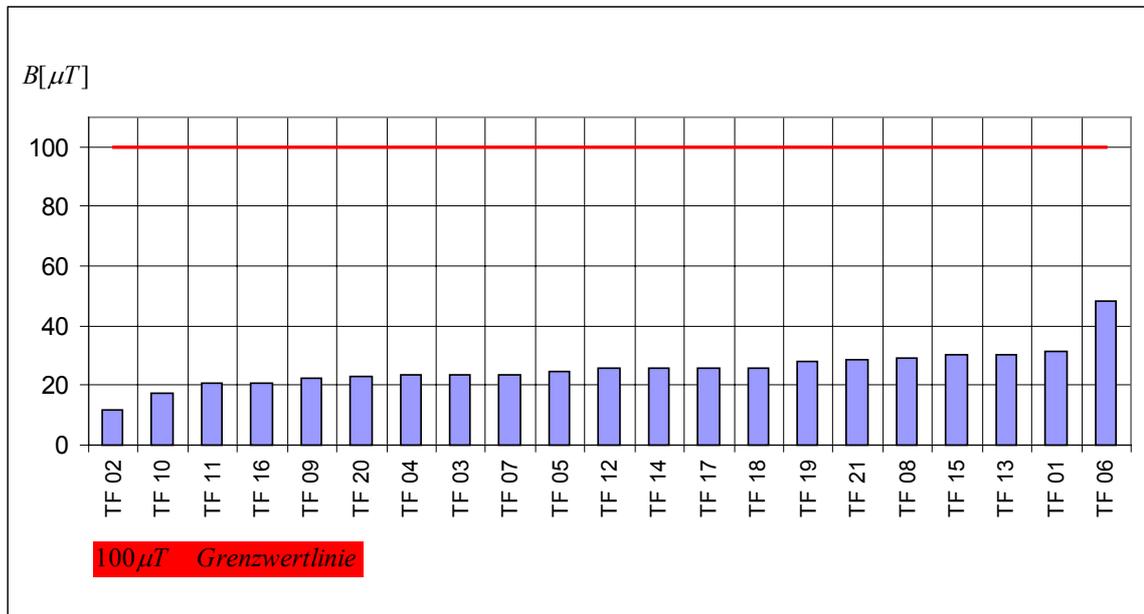
$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{2000 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ kV}} = 115,5 \text{ A} \quad (5.1)$$

Somit wurden die Randbedingungen wie folgt festgelegt:

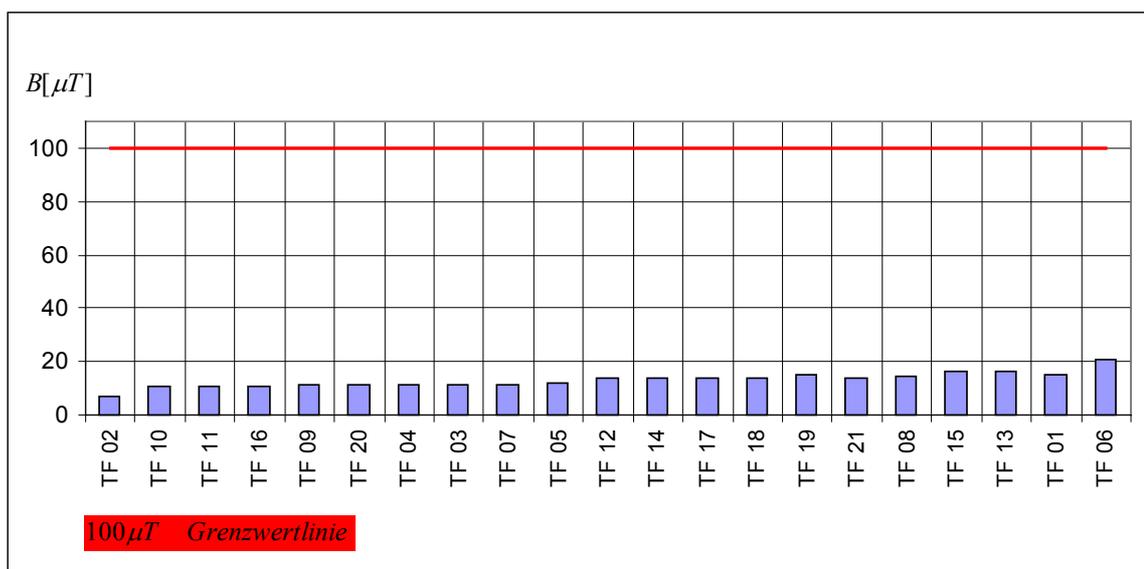
$$\begin{aligned} I &= 115,5 \text{ A} \quad (\text{Betriebsstrom}) \\ U &= 10 \text{ kV} \quad (\text{Betriebsspannung}) \\ f &= 50 \text{ Hz} \quad (\text{sinusförmig}) \end{aligned}$$

Die Trafo-Felder sind mit TF01 bis TF21 bezeichnet.

Die Diagramme 5.5 und 5.6 zeigen die Maximalwerte der auftretenden magnetischen Flussdichten der untersuchten Trafofelder.



**Diagramm 5.5:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Trafofelder im Abstand von 20 cm zur Rückwand



**Diagramm 5.6:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Trafofelder im Abstand von 40 cm zur Rückwand

### 5.3. Auswertung

Aus den Diagrammen 5.1 und 5.3 ist zu entnehmen, dass nur eine sehr geringe Anzahl von Abgangs- bzw. Leistungsschalterfeldern den Grenzwert von  $100 \mu\text{T}$  in einem Abstand von 20 cm von der Rückwand des Gehäuses einhalten, wobei die Schirmwirkung des Gehäuses bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurde. Die wesentliche Ursache der unterschiedlich hohen magnetischen Flussdichten ist auf die Konstruktion der jeweiligen Schaltzelle zurückzuführen.

Aufgrund der Anordnung der Strom- und Sammelschienen kommt es zu teilweise sehr hohen Werten in einem Abstand vom 20 cm zur Rückwand des Schaltfeldes. Der Grund dafür liegt darin, dass die Montage der stromführenden Elemente innerhalb des Schrankes zur Rückwand hin erfolgt, wie in den Abbildungen 5.1 und 5.2 gut zu erkennen ist. Dies ist bedingt durch den Platzbedarf innerhalb einer Schaltzelle und entspricht der derzeitigen Montagetechnik. Auch die Anordnung der Sammelschienen hat einen Einfluss auf die Höhe der magnetischen Flussdichte. Zwei unterschiedliche Anordnungen zeigen wieder die Abbildungen 5.1 und 5.2. Ein weiteres wichtiges Einflusskriterium ist das geometrische Abmaß des Schaltfeldes. Es beeinflusst in sehr hohem Maße die Intensität der magnetischen Flussdichte bei sonst gleicher Sammel- und Stromschienenkonstruktion. Die soeben beschriebenen Einflussfaktoren werden im Kapitel 6 näher untersucht.

Um für die Praxis relevante Werte zu erhalten, wurden die Berechnungen zusätzlich für einen Abstand von 40 cm von der Gehäusewand und somit unter Berücksichtigung der Wandstärke der Netzstation oder des Betriebsraumes, in welcher die MS-Schaltfelder untergebracht sind, vorgenommen.

Die Diagramme 5.2 und 5.4 geben einen Überblick über die maximal auftretenden magnetischen Flussdichten der untersuchten Abgangs- bzw. Leistungsschalterfelder in einem Abstand von 40 cm zur Gehäusewand. Es ist zu erkennen, dass alle Schaltfelder in diesem Abstand den Grenzwert von  $100 \mu\text{T}$  einhalten. Die Ergebnisse der Berechnungen der magnetischen Flussdichte für den Fall, dass ein Abgangs- bzw. Leistungsschalterfeld als Außenfeld Verwendung findet, sind in den Diagrammen 9.1 und 9.2 sowie 9.3 und 9.4 im Anhang 9.3 dargestellt. Bei Betrachtung der Diagramme ist ein ähnliches Verhalten wie bei den

Untersuchungen an der Rückwand festzustellen. Es ist zu erkennen, dass alle untersuchten Abgangs- und Leistungsschalterfelder in dem für die Praxis relevanten Abstand von 40 cm den Anforderungen hinsichtlich der 26. BImSchV genügen.

Das Diagramm 5.5 zeigt die maximal auftretenden magnetischen Flussdichten der untersuchten Trafofelder, wobei hier keine Grenzwertüberschreitung selbst in einem Abstand von 20 cm zu bemerken ist. Dies ist auf den wesentlich geringeren Strom zurückzuführen, mit dem dieses Feld für die Berechnung belastet wurde. Es ist aber auch zu erkennen, dass es Unterschiede zwischen den verschiedenen Trafofeldern der verschiedenen Hersteller gibt, die auch wieder durch dieselben Einflussfaktoren wie die der Abgangs- und Leistungsschalterfelder entstehen.

Mit welcher Intensität die Amplitude einer Feldgröße mit dem Abstand abnimmt, wird durch die „Entfernungsgesetze“ beschrieben [21].

Für unendlich lange, geradlinige Leiter gilt, dass der Exponent  $x$  der Abnahmefunktion  $1/r^x$  ganzzahlig auftritt. Für einen unendlich langen, geradlinigen Leiter gilt  $x=1$  und bei einem symmetrisch belasteten Drehstromsystem gilt für den Exponenten  $x=2$ . Bei Schaltfeldern kann nicht davon ausgegangen werden, dass Exponenten auftreten, welche den analytischen Lösungsansätzen entsprechen, da sich die Berechnungsabstände im unmittelbaren Nahbereich endlicher und teilweise sehr komplexer Leiteranordnungen befinden. Auch ist eine gleichmäßige Belastung des Drehstromsystems in der Praxis kaum zu erreichen. Somit ist die Abnahme der magnetischen Flussdichte vom jeweiligen Schaltfeld abhängig. Es lässt sich nur allgemein sagen, dass der Exponent des Abstandes  $r$  nicht ganzzahlig auftritt [22, S. 32]. Aus diesem Grund sind die Verringerungsfaktoren zwischen der 20 cm- und der 40 cm-Anordnung nicht für alle Schaltfelder gleich. Die Exponenten, welche die Verringerung der Flussdichte mit dem Abstand bedingen, sind sehr unterschiedlich. Die nachfolgenden Tabellen geben einen Überblick.

**Tabelle 5-1:** Exponenten der Abnahme der magnetischen Flussdichte mit Vergrößerung des Abstandes für die Rückwand der untersuchten Schaltfelder

	Abgangsfeld	Leistungsschalterfeld	Trafofeld
$x_{\max}$	2,2	2,5	2,3
$x_{\min}$	1,8	1,8	1,6
$\bar{x}$	2,0	2,1	1,9

**Tabelle 5-2:** Exponenten der Abnahme der magnetischen Flussdichte mit Vergrößerung des Abstandes für die Seitenwand der untersuchten Schaltfelder

	Abgangsfeld	Leistungsschalterfeld	Trafofeld
$x_{\max}$	2,6	2,6	2,4
$x_{\min}$	1,9	1,9	2,1
$\bar{x}$	2,1	2,2	2,4

Aufgrund der unterschiedlichen Exponenten wird deutlich, warum die Höhe der Balken der Diagramme für die 40 cm-Anordnung nicht exakt denen der 20 cm-Anordnung, nur mit einem durch den Abstand geringeren Wert, entsprechen.

*In einer Entfernung von 40 cm von der Gehäuseoberfläche halten alle untersuchten Schaltfelder den Grenzwert von 100  $\mu$ T ein.*

Die Untersuchung hat gezeigt, dass es sehr große Unterschiede in der Höhe der maximalen magnetischen Flussdichte der verschiedenen Schaltfeldvarianten, bezogen auf die zwei unterschiedlichen Berechnungsabstände, gibt. Aus diesem Grund findet im nächsten Kapitel eine Untersuchung von Einzelementen statt, um genauere Informationen über die einzelnen Einflussfaktoren auf die magnetische Flussdichte zu erhalten.

## **6 Einflussfaktoren auf die magnetische Flussdichte hinsichtlich der 26. BImSchV**

### **6.1 Auswirkung der gesamten Konstruktion**

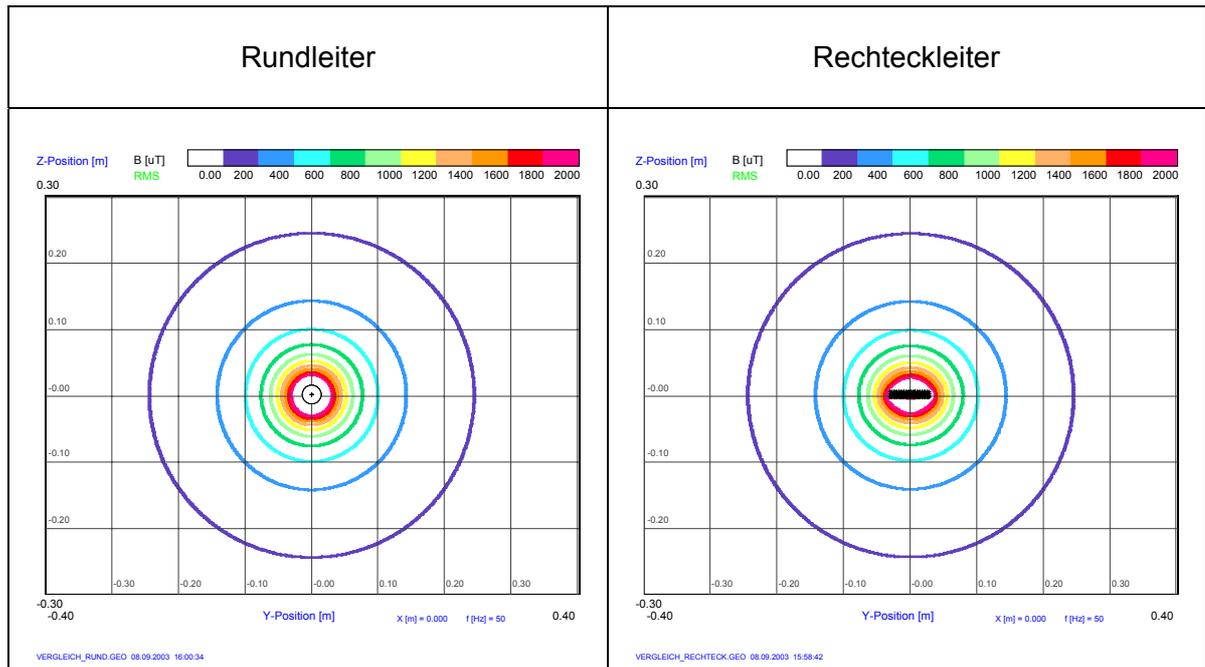
Wie im Kapitel 5 festgestellt wurde, hat neben der Stromstärke auch die Geometrie der Leiteranordnung einen erheblichen Einfluss auf die magnetische Flussdichte. Untersuchungsgegenstand dieses Abschnitts sind primäre Maßnahmen am Ort der Entstehung des magnetischen Feldes und die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen zur Verringerung der magnetischen Flussdichte. Betrachtet wird der Einfluss der Schaltfeldkonstruktion hinsichtlich einer Verringerung, der für den Bereich des Personenschutzes maßgebenden Werte, der magnetischen Flussdichte. Sekundäre Maßnahmen, wie z.B. die Abschirmung des Magnetfeldes durch das Material, welches für die SS-Kapselung und das Schaltfeldgehäuse verwendet wird, werden im Abschnitt 6.4 untersucht.

Aufgrund der verschiedenen Einsatzgebiete bzw. -orte der MS-Schaltfelder sind unterschiedliche konstruktive Lösungen der einzelnen Hersteller vorhanden, um den jeweiligen Anforderungen gerecht zu werden. Der Einbau diverser Sekundärtechnik sowie die Art des verwendeten Isoliermediums haben maßgeblichen Einfluss auf die Konstruktion des gesamten Schaltfeldes.

Ob die Leitergeometrie der Strom- und Sammelschienen einen entscheidenden Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat, wird nachfolgend geklärt.

In MS-Schaltanlagen finden meist Rechteckprofilleiter mit Abmaßen von 60 x 10 mm Anwendung. Um die magnetische Flussdichte einer solchen Geometrie in WinField® zu berechnen, kann ein Rechteck durch mehrere fadenförmige Leiter nachgebildet werden.

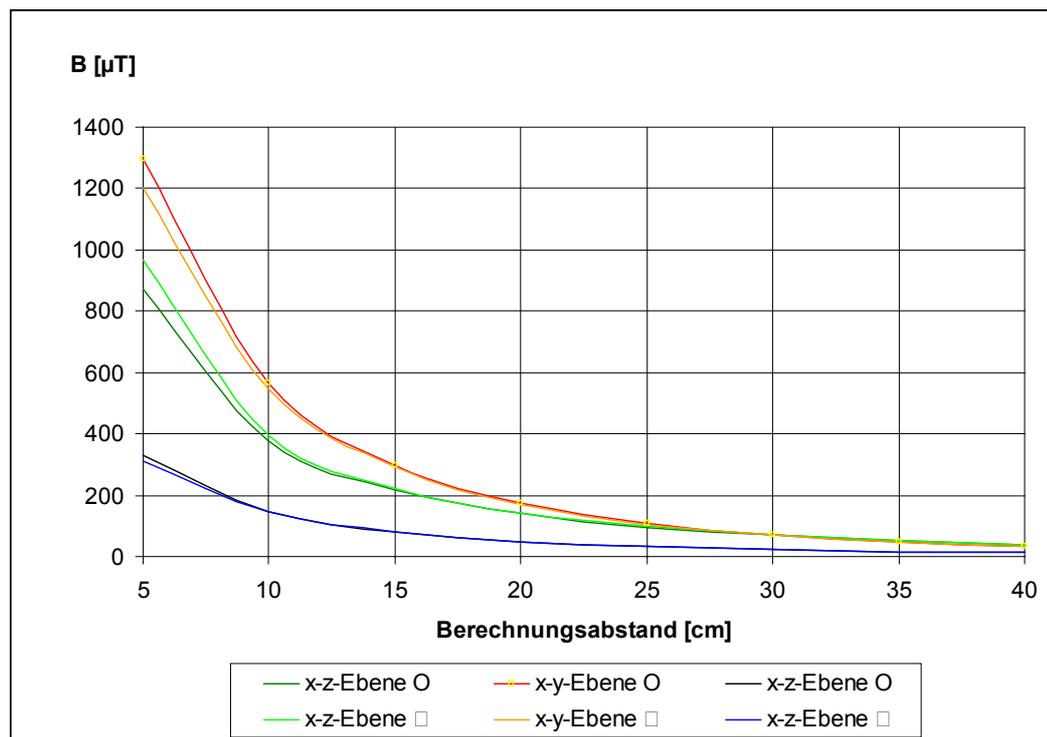
Im Nahbereich eines Leiters passen sich die Isolinien der magnetischen Flussdichte der Querschnittsform an. Das Fernfeld ist jedoch unabhängig von der Geometrie des Leiters. Abbildung 6.1 zeigt den Verlauf der Isolinien eines Rundleiters und eines Rechteckleiters. Beide besitzen einen Querschnitt von 600 mm<sup>2</sup>.



**Abbildung 6.1:** Isolinien der magnetischen Flussdichte um einen Rund- und Rechteckleiter

Die nachfolgenden Berechnungen an einem ebenen Drehstromsystem mit einem SS-Abstand von 90 mm für einen Rund- und einen Rechteckleiter sollen zeigen, wie groß die Abweichungen der Berechnungsergebnisse sind. Es soll die Frage geklärt werden, ob ein Rechteckleiter durch einen Rundleiter ersetzt werden kann, wenn Berechnungen in den Abständen vorgenommen werden, welche für den Personenschutz hinsichtlich der 26. BImSchV relevant sind.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die grafische Darstellung der Berechnungsergebnisse, wobei der Rund- bzw. Rechteckleiter jeweils mit einem Strom von 315 A belastet wurde. Die Zahlenwerte sind der Tabelle 9-6 im Anhang 9.4 zu entnehmen.



**Diagramm 6.1:** Vergleich der maximalen magnetischen Flussdichte einer Rund- und einer Rechteckleiteranordnung

⇒ Dem Diagramm 6.1 ist zu entnehmen, dass sich nur im Nahfeld eine bemerkenswerte Differenz zwischen den beiden untersuchten Leiterformen ergibt. Ab einem Berechnungsabstand von 20 cm liegt der prozentuale Fehler unter 1,3 %.

*Das Verfahren der Nachbildung von rechteckigen Strom- und Sammelschienen durch Rundleiter ist exakt genug, wenn nur der Bereich, welcher für den Personenschutz relevant ist, betrachtet wird (Fehler unter 1 %). Es sollte jedoch zumindest der Radius des Rundleiters der Querschnittsfläche angepasst werden, um den Berechnungsfehler zu verringern. Aufgrund dessen werden alle nachfolgenden Betrachtungen und Berechnungen der Einfachheit halber mit der Nachbildung von Rechteckschienen durch Rundleiter vorgenommen.*

### 6.1.1 Abstand der Sammelschienen

In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit der Abstand der Sammelschienen die Höhe der magnetischen Flussdichte beeinflusst. Es ist jedoch darauf zu achten, dass der Sammelschienenabstand nicht beliebig verändert werden kann, da die Bestimmungen der DIN VDE 101 (für Anlagen, die nach Mindestabständen gebaut werden) bzw. der DIN VDE 0670 Teil 6 und Teil 7 (für Anlagen, die nach Prüfspannung errichtet werden) eingehalten werden müssen.

Anhand der analytischen Lösungsansätze für Grundanordnungen ist zu erkennen, dass sich das magnetische Feld eines in der Ebene verlegten Drehstromsystems auf die Hälfte reduziert, wenn der Abstand der Leiter halbiert wird. Die Abnahme erfolgt nach Gleichung 6.1 mit  $\frac{1}{r^2}$ . Voraussetzung ist jedoch ein gleich bleibender Berechnungsabstand und Belastungsstrom [21, S. 454].

$$B = \mu_0 \frac{\sqrt{3} \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{a}{r^2} \quad (6.1)$$

Diese Annahme gilt jedoch nur im geometrischen Fernbereich einer idealen Grundanordnung. Inwieweit eine Abstandsverringerung für die hier vorliegende Problematik, dem geometrischen Nahbereich komplexer Leiteranordnungen, eine Verringerung der magnetischen Flussdichte bewirkt, wird nachfolgend untersucht.

Für MS-Schaltanlagen, die nach Mindestabständen gebaut werden, gelten Werte für die Mindestabstände zwischen spannungsführenden Teilen und gegen Erde nach DIN VDE 0101. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick, wobei die grau unterlegte Zeile für Betrachtungen in dieser Arbeit relevant ist, da nur Anlagen mit einer Bemessungsspannung von  $U_m=12$  kV untersucht werden.

**Tabelle 6-2:** Mindestabstände aktiver Teile eines Systems gegeneinander und gegen Erde nach DIN VDE 0101 [15, S. 158]

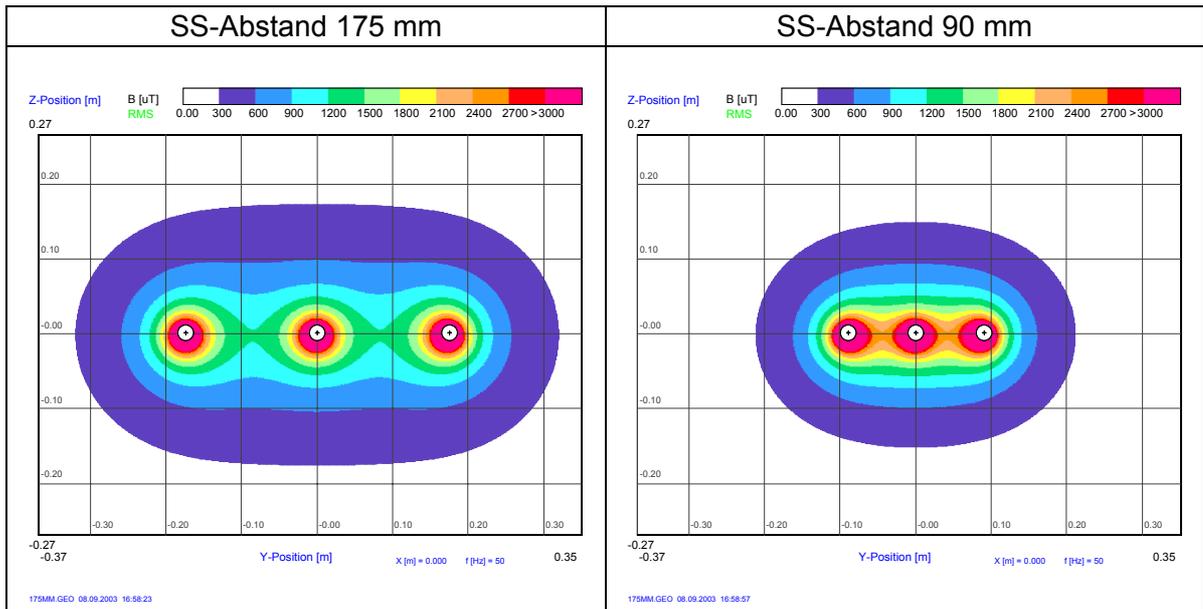
Nennspannung $U_n$ [kV]	Höchste Spannung für Betriebsmittel $U_m$ [kV]	Nicht herabgesetzte Werte			Herabgesetzte Werte		
		Nenn-Steh-Blitz-Stoß-Spannung $U_{NB}$ [kV]	Mindestabstände Leiter-Leiter Leiter-Erde		Nenn-Steh-Blitz-Stoß-Spannung $U_{NB}$ [kV]	Mindestabstände Leiter-Leiter Leiter-Erde	
			Innenraum N[mm]	Freiluft N[mm]		Innenraum S[mm]	Freiluft S[mm]
3	3,6	40	65	150	20	60	150
6	7,2	60	90	150	40	65	150
10	12	75	115	150	60	90	150
20	24	125	215		95	160	
30	36	170	325		145	270	

Die Spalte „*Herabgesetzte Werte*“ wird verwendet, wenn die Schaltanlage keinen atmosphärischen Überspannungen ausgesetzt, oder gegen diese durch Ableiter geschützt ist.

Die Spalte „*Nicht herabgesetzte Werte*“ wird verwendet, wenn die Schaltanlage atmosphärischen Überspannungen, z.B. durch den direkten Anschluss an Freileitungen, ausgesetzt ist.

Durch den Einsatz von Überspannungsableitern, für Anlagen die atmosphärischen Überspannungen ausgesetzt sind, kann somit ein geringerer SS-Abstand für Innenraumschaltanlagen mit  $U_m=12$  kV verwendet werden. Die meisten der im Kapitel 5 untersuchten Schaltfelder besitzen einen SS-Abstand von 175 mm, daher wird im Folgenden die Veränderung der magnetischen Flussdichte untersucht, wenn der SS-Abstand von 175 mm auf 90 mm verringert wird.

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Feldbild der ebenen Sammelschienenanordnung für die SS-Abstände von 175 mm und 90 mm in der y-z-Ansicht (Seitenansicht).

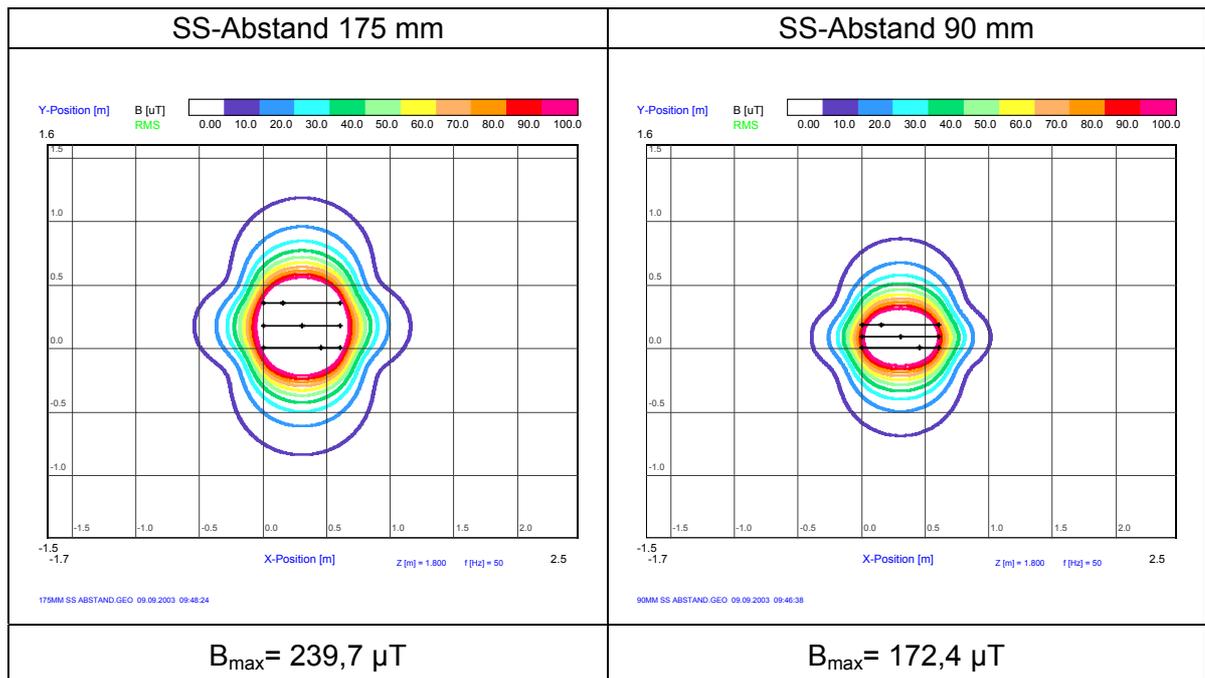


**Abbildung 6.2:** Feldbilder der ebenen Sammelschienenanordnung mit den SS-Abständen von 175 mm und 90 mm

Anhand von Abbildung 6.2 ist zu erkennen, dass die Feldamplitude der Anordnung mit 90 mm SS-Abstand geringer ist, als die der 175 mm-Anordnung. Daher lässt sich darauf schließen, dass die magnetische Flussdichte hinsichtlich einer gewählten Bezugsebene auch geringer ist.

Um dies nachzuweisen, wird für die Berechnung ein ebenes Sammelschienensystem mit einem Strom von 315 A belastet. Die Berechnung der magnetischen Flussdichte erfolgt in einem Abstand von 20 cm von den Sammelschienen in der x-y-Ebene (Abbildung 6.3).

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Verteilung der Isolinien mit Angabe der maximalen magnetischen Flussdichte (x-y-Ebene) für die Sammelschienenabstände von 175 mm und 90 mm.



**Abbildung 6.3:** Isolinien und  $B_{\max}$  der ebenen Sammelschienenanordnung im Abstand von 20 cm von der x-y-Ebene mit den SS-Abständen von 175 mm und 90 mm

*Durch die Verringerung des SS-Abstandes von 175 mm auf 90 mm ist es möglich, die magnetische Flussdichte im 20 cm-Abstand von der x-y-Ebene um 28,1 % zu verringern.*

Um einen Vergleich zwischen den analytischen Lösungsansätzen und einem praxisrelevanten Beispiel herzustellen, wurde nachfolgend die magnetische Flussdichte eines eben verlegten Sammelschienensystems mit einem SS-Abstand von 90 mm bzw. 180 mm für alle drei Berechnungsebenen ermittelt. Es wurde darauf geachtet, dass durch die Änderung des SS-Abstandes der Abstand zur Berechnungsebene nicht verändert wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-2 aufgeführt.

**Tabelle 6-2:** Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte für einen SS-Abstand von 90 mm und 180 mm an einem ebenen Drehstromsystem

SS-Abstand	$B_{\max}$ [ $\mu\text{T}$ ] im Abstand von 20 cm zur		
	x-z-Ebene (Frontansicht)	x-y-Ebene (Draufsicht)	y-z-Ebene (Seitenansicht)
180 mm	189,1	241,6	70,4
90 mm	140,4	172,4	49,6
prozentuale Abnahme	25,7 %	28,6 %	29,5 %

⇒ Es ist zu erkennen, dass sich im hier untersuchten geometrischen Nahbereich keine Abnahme der maximalen magnetischen Flussdichte um 50 % bei halbem Leiterabstand einstellt (analytische Lösung). Die durchschnittliche Abnahme für einen Berechnungsabstand von 20 cm beträgt nur ca. 28 % im Gegensatz zum geometrischen Fernbereich einer idealen Leiteranordnung. Mit zunehmendem Berechnungsabstand nähern sich die Ergebnisse denen der analytischen Lösung an.

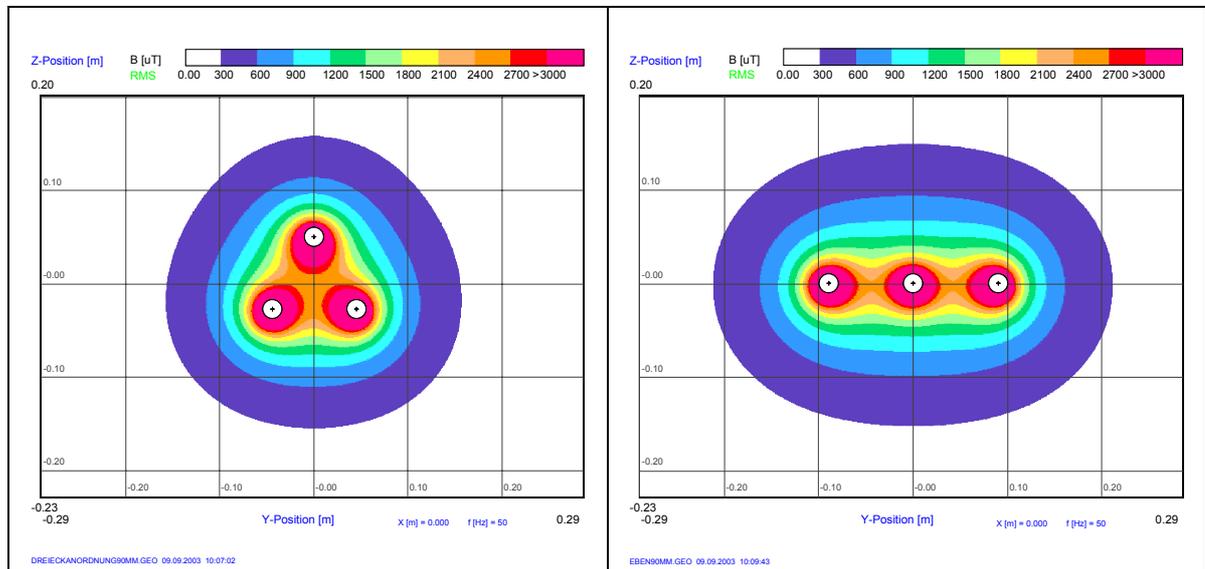
*Die Reduktion des Sammelschienenabstandes ist eine wirksame Maßnahme, um die magnetische Flussdichte zu verringern. Sie ist jedoch begrenzt durch die Mindestabstände, die je nach Klassifizierung der Schaltanlage durch die zuständige Norm eingehalten werden müssen.*

### 6.1.2 Anordnung der Sammelschienen

Welchen Einfluss die Anordnung der Sammelschienen auf die magnetische Flussdichteverteilung hat, ist Untersuchungsgegenstand dieses Abschnitts.

Im Folgenden wird analysiert, welche Auswirkungen die Symmetrierung der Leiteranordnung eines ebenen Drehstromsystems in eine gleichseitige Dreiecksanordnung, bei gleich bleibendem Isolationsabstand, auf die magnetische Flussdichte hat.

Abbildung 6.4 zeigt das Feldbild einer gleichseitigen Dreiecksanordnung (Links) und eines in der Ebene verlegten Drehstromsystems (Rechts) mit einem SS-Abstand von 90 mm.



**Abbildung 6.4:** Feldbild einer Dreiecksanordnung und eines ebenen Sammelschienensystems mit einem SS-Abstand von 90 mm

Im Vergleich der Feldbilder ist zu erkennen, dass die räumliche Ausdehnung der Feldlinien der Dreiecksanordnung deutlich geringer ist. Die nachfolgenden Berechnungen geben einen Überblick über die Unterschiede der maximal auftretenden magnetischen Flussdichte.

Welche Veränderung hinsichtlich der maximalen magnetischen Flussdichte durch die Symmetrierung der ebenen Leiteranordnung in eine Dreiecksanordnung bei gleichem SS-Abstand erreicht wird, zeigen die Berechnungen der Tabelle 6-3, für einen Strom von 315 A je Phase.

**Tabelle 6-3:** Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte für ein ebenes Drehstromsystem und eine gleichseitige Dreiecksanordnung

Drehstromsystemtyp (SS-Abstand 90 mm)	$B_{\max}$ [ $\mu$ T] im Abstand von 20 cm zur			
	x-z-Ebene (Frontansicht)	x-y-Ebene (Draufsicht) <sup>1</sup>		y-z-Ebene (Seitenansicht)
ebenes Drehstromsystem	140,4	172,4		49,6
gleichseitige Dreiecksanordnung	112,4	über	unter	38,5
		110,5	126,1	
prozentuale Abnahme	19,9 %	35,9 %	26,9 %	22,4 %

<sup>1)</sup> In der x-y-Ebene gibt es für die gleichseitige Dreiecksanordnung zwei verschiedene Berechnungsmöglichkeiten (vgl. Abbildung 6.3). Zum einen kann die magnetische Flussdichte unter, zum anderen über der Anordnung berechnet werden.

Anhand der Berechnungsergebnisse der Tabelle 6-3 wird deutlich, dass die Symmetrierung in eine gleichseitige Dreiecksanordnung eine wirksame Maßnahme ist, um die magnetische Flussdichte zu reduzieren. Die magnetische Flussdichte verringert sich um bis zu 35,9 % in der x-y-Ebene (über der Anordnung) im Vergleich zur ebenen Anordnung mit demselben SS-Abstand.

*Bei alleiniger Betrachtung der Symmetrierung der Leiteranordnung eines SS-Systems in eine gleichseitige Dreiecksanordnung bedingt diese in jedem Fall eine Verringerung der magnetischen Flussdichte.*

### 6.1.3 Schaltfeldtiefe, -breite, -höhe

Je nach Einsatzgebiet und Aufgabenstellung gibt es verschiedene Schaltfeldvarianten und somit unterschiedliche Konstruktionen des Gehäuses. Eine kompakte Bauweise ist dort gefordert, wo das Platzangebot gering ist. Schaltfelder mit größeren Abmessungen sind oft durch den Einbau der Sekundärtechnik unvermeidlich, da diese einen gewissen Platzbedarf innerhalb des Schaltfeldes haben. Die Abmessungen eines Schaltfeldes haben aufgrund der unterschiedlichen Anordnung der stromführenden Elemente innerhalb des

Schaltfeldes einen Einfluss auf die magnetische Flussdichte. Es ist daher prinzipiell möglich, mit einer größeren Abmessung des Schaltfeldes bei gleicher Konstruktion der stromführenden Elemente, eine Abstandsvergrößerung zur Gehäusewand zu erreichen. Durch diese primäre Maßnahme ist die magnetische Flussdichte an der Gehäusewand geringer, im Gegensatz zu einem Schaltfeld mit geringeren Abmessungen. Wird ein Schaltfeld kleinräumig gestaltet, so wie es der derzeitige Trend zeigt, haben auch die stromführenden Elemente einen geringen Abstand zur Schaltfeldbegrenzung und es kann somit zu hohen magnetischen Flussdichten im Grenzwertbereich, d.h. im Abstand von 20 cm von der berührbaren Oberfläche der Anlage kommen.

Im Einzelnen hat die Schaltfeldtiefe Einfluss auf die magnetische Flussdichte an der Vorder- und Rückseite eines Schaltfeldes, die Breite auf die magnetische Flussdichte auf der Seitenwand und die Höhe auf die magnetische Flussdichte auf der oberen Abdeckung.

Wie groß jedoch der Einfluss ist, hängt von der Konstruktion der stromführenden Elemente innerhalb des Schaltfeldes ab.

## 6.2 Auswirkung konstruktiver Einzelelemente von Schaltfeldern

Der Einbau von Sekundärtechnik, wie z.B. von Schaltgeräten, Sicherungen und Messwandlern, gibt den *Verlauf der Strombahn* innerhalb des Schaltfeldes vor. Inwieweit diese Elemente Auswirkungen auf die magnetische Flussdichte haben und wie exakt diese für die Feldberechnung, zum Nachweis der Konformität mit den Grenzwerten der 26. BImSchV nachgebildet werden müssen, wird in diesem Abschnitt untersucht. Alle Berechnungsergebnisse stellen den „worst case“ dar, da die Schirmwirkung des Schaltfeldgehäuses sowie der Gehäuse der Einzelelemente keine Berücksichtigung finden. Somit sind die tatsächlich auftretenden magnetischen Flussdichten geringer. Für die Berechnungen wurden die gleichen Randbedingungen wie unter Kapitel 5 festgelegt. Die Ermittlung der Flussdichten erfolgt zur linken, rechten, Rück- und Vorderseite in einer Entfernung von 20 cm und 40 cm von der Gehäusewand.

### 6.2.1 Bewertung der Berechnungsergebnisse

Für Berechnungsergebnisse, die aufgrund der angenäherten Nachbildung der stromführenden Elemente entstehen, ist eine prozentuale Genauigkeit von 1 % bis 2 % aus nachfolgend aufgeführten Gründen ausreichend:

- Metalle im Schaltfeld sowie die Gehäuse von Einzelelementen werden nicht berücksichtigt.
- Durch die Aufstellung des Schaltfeldes innerhalb des Gebäudes kommt es zu Differenzen, die im cm-Bereich liegen können. Diese können bei der Berechnung nicht mit berücksichtigt werden.
- Wird anstatt einer Berechnung eine Messung vorgenommen, um die Einhaltung der Grenzwerte nachzuweisen, entstehen allein nur durch das Messgerät Fehler von bis zu 5 %. Aus diesem Grund ist bei einer Berechnung ein Fehler von 2 %, welcher durch die Modellimplementierung entsteht, vertretbar.

### 6.2.2 Schaltgeräte

Die unterschiedlichen Anforderungen an eine MS-Schaltanlage bedingen den Einsatz von Schaltgeräten verschiedener Art. Am häufigsten kommen Leistungsschalter und Lasttrennschalter zum Einsatz. Lastschaltgeräte werden aus wirtschaftlichen Gründen anstelle von Leistungsschaltern eingesetzt, soweit dies möglich ist. Den Kurzschlusschutz übernehmen hierbei Sicherungen oder übergeordnete Leistungsschalter, da Lasttrennschalter im Gegensatz zum Leistungsschalter kein Ausschaltvermögen im Fehlerfall (Kurzschluss) besitzen.

Da der Lasttrennschalter im Gegensatz zum Leistungsschalter geringere Abmessungen hat, wird an dieser Stelle der Leistungsschalter näher betrachtet.

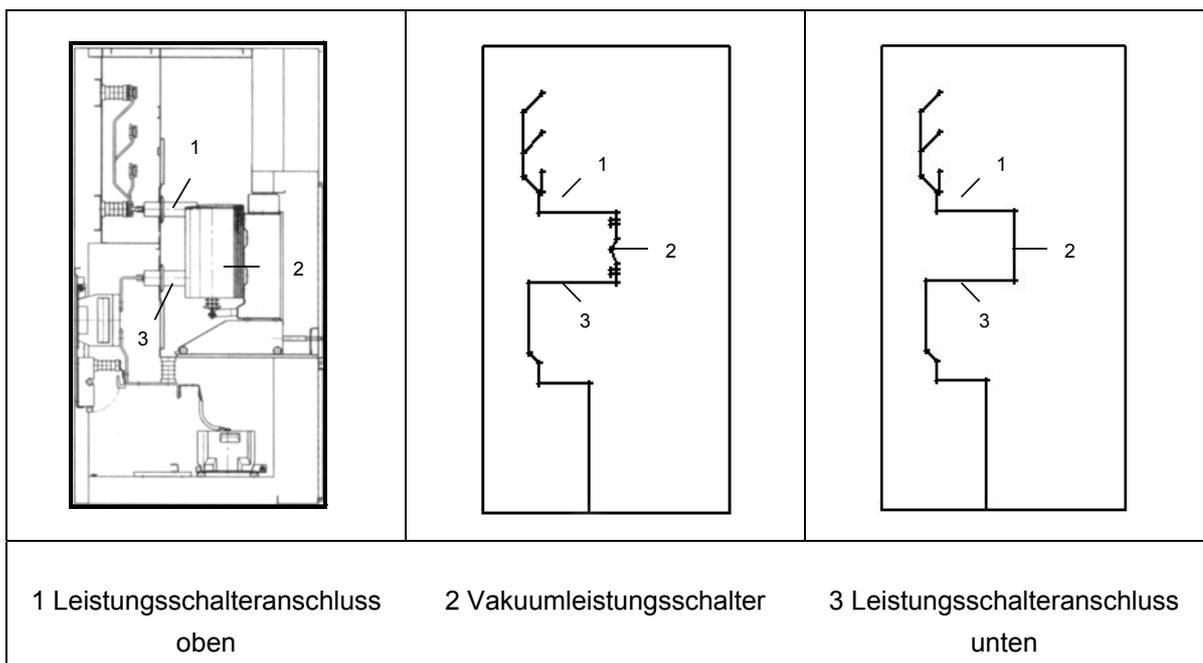
Die Anwendungsgebiete eines Leistungsschalters sind vielfältig. Sie dienen als Einspeiseschalter, Abgangsschalter und Kuppelschalter und sind in der Lage, Betriebs- und Kurzschlussströme zu schalten [12, S. 246].

Der Einspeiseschalter befindet sich in einem Einspeisefeld einer MS-Schaltanlage und hat die Aufgabe, den Betriebsstrom zu schalten und im Fehlerfall den Fehlerstrom zu führen und abzuschalten. Der Abgangsschalter wird innerhalb eines Abgangsfeldes für große Lasten verwendet. Durch einen Abgangsschalter

wird eine hohe Versorgungssicherheit erreicht und es kann auf den Einsatz einer Sicherung verzichtet werden. Der Kuppelschalter findet Verwendung, um Sammelschienen zu verbinden bzw. zu trennen.

Die Unterscheidung der Leistungsschalter erfolgt nach dem zur Lichtbogenlöschung verwendeten Medium in Druckluftschalter, Flüssigkeitsschalter (ölarmer Schalter), SF<sub>6</sub>-Schalter und Vakuumschalter. Im Mittelspannungsbereich werden vorzugsweise öllöse Leistungsschalter eingesetzt.

In nachfolgender Abbildung ist das Vakuumleistungsschalterfeld der Baureihe WBB 12 kV der Firma ALSTOM dargestellt. Das linke Bild zeigt die Maßzeichnung des Herstellers. Die Nachbildung des Leistungsschalterfeldes in WinField<sup>®</sup> stellen das rechte und das mittlere Bild dar, wobei der Stromweg des Leistungsschalters einmal exakt (mittleres Bild) und andernfalls durch eine gekrümmte Stromschiene nachgebildet wurde (rechtes Bild).



**Abbildung 6.5:** Vakuumleistungsschalterfeld der Firma ALSTOM Typ WBB 12 kV

Die Berechnungsergebnisse und den prozentualen Fehler zwischen beiden Nachbildungen zeigt Tabelle 6-4.

**Tabelle 6-4:** Berechnungsergebnisse und prozentualer Fehler für die Nachbildung der Strombahn eines Leistungsschalters exakt und als gekröpfte Stromschiene

Berechnungs- ort	LS exakt nachgebildet		LS durch gekröpfte Stromschiene		Fehler [%]	
	B [ $\mu$ T]		B [ $\mu$ T]			
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Links	143,4	62,3	143,3	62,3	-0,1	0,0
Rechts	217,0	94,1	217,0	93,9	0,0	-0,2
Hinten	133,5	66,9	133,4	66,8	-0,1	-0,1
Vorn	32,2	21,5	32,5	21,6	0,9	0,4

Den Berechnungsergebnissen der Tabelle 6-4 ist zu entnehmen, dass ein vernachlässigbar kleiner Fehler entsteht, wenn der durch den Leistungsschalter vorgegebene Stromweg durch eine gekröpfte Stromschiene nachgebildet wird. Es ist jedoch durch den Einbau des Leistungsschalters möglich, das resultierende Magnetfeld zu beeinflussen. Das heißt, der wie in diesem Beispiel in der Mitte des Schaltfeldes eingebaute Leistungsschalter bewirkt, dass die maximale magnetische Flussdichte der Vorderseite durch dessen Stromweg erzeugt wird.

*Durch die Auswahl und die **Anordnung** der Schaltgeräte innerhalb des Schaltfeldes ist es möglich, das Gesamtmagnetfeld zu beeinflussen. Die Untersuchung hat gezeigt, dass es ausreichend ist, den Stromweg des Leistungsschalters durch eine gekröpfte Stromschiene nachzubilden.*

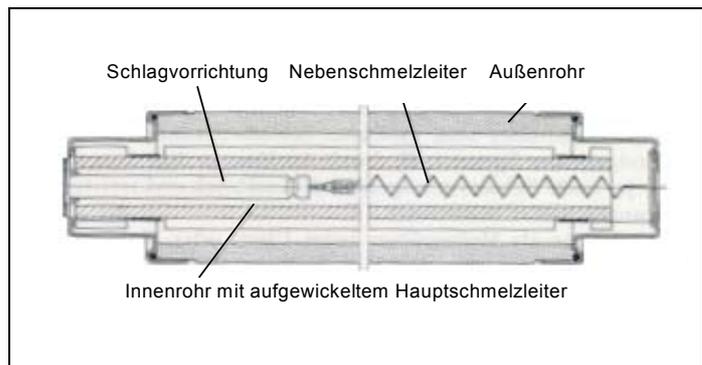
### 6.2.3 Sicherungen

Im Mittelspannungsnetz werden HH-Sicherungen als Kurzschlussschutz für Transformatoren, Kondensatoren, Kabelabzweige und Spannungswandler eingesetzt. Der Überlastschutz muss z.B. von einem Lasttrennschalter übernommen werden. Aus diesem Grund werden in Schaltanlagen häufig Sicherungslasttrennschalter eingesetzt. Sicherungen sind Schaltgeräte, die Stromkreise durch selbstständiges Abschmelzen einer dafür vorgesehenen

Strombahn trennen. Eine Sicherung löst aus, wenn der durch sie fließende Strom bestimmte Stromwerte für entsprechende Zeiten übersteigt. Nach jedem Ansprechen muss eine Sicherung ausgewechselt werden.

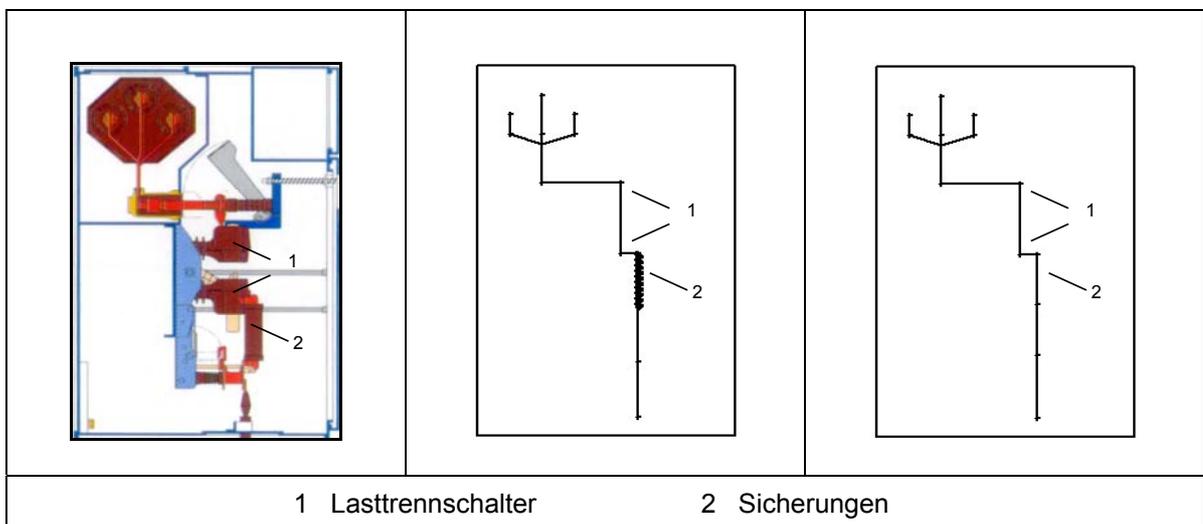
Den prinzipiellen Aufbau einer Hochspannungssicherung zeigt die Abbildung 6.6. Es ist zu erkennen, dass der Schmelzleiter eine bestimmte Form mit Engstellen und Stufen besitzt. Diese sind für die Ansprecheigenschaften der Sicherung ausschlaggebend [14, S. 407].

Anhand nebenstehender Abbildung wird deutlich, dass der Stromweg innerhalb einer Sicherung nicht geradlinig ist. Daher werden nachfolgend die Sicherungen durch Spulenobjekte nachgebildet.



**Abbildung 6.6:** Prinzipieller Aufbau einer HH-Sicherung [14, S. 408]

In Abbildung 6.7 ist das Sicherungslasttrennschalterfeld ZS8.4 12 kV der Firma ABB dargestellt. Das linke Bild zeigt die Maßzeichnung des Herstellers. Die Nachbildung des Schalterfeldes in WinField<sup>®</sup> stellen das Bild in der Mitte sowie das Rechte dar, wobei der Stromweg der Sicherungen einmal durch eine Spule mit 10 Windungen nachgebildet wurde (mittleres Bild) und andernfalls nur durch eine gerade Stromschiene (rechtes Bild).



**Abbildung 6.7:** Sicherungslasttrennschalterfeld der Firma ABB Typ ZS8.4 12 kV

Die Berechnungsergebnisse und den prozentualen Fehler zwischen beiden Nachbildungen zeigt Tabelle 6-5.

**Tabelle 6-5:** Berechnungsergebnisse und prozentualer Fehler für die Nachbildung der Strombahn einer Sicherung innerhalb eines Schaltfeldes als Spule und gerade Stromschiene

Berechnungs- ort	Sicherung durch Spule		Sicherung durch Stromschiene		Fehler [%]	
	B [ $\mu$ T]		B [ $\mu$ T]			
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Links	160,2	74,5	160,2	74,4	0,0	-0,1
Rechts	129,1	60,4	130,9	60,9	1,4	0,8
Hinten	99,5	45,5	99,5	45,5	0,0	0,0
Vorn	57,3	32,0	57,3	32,0	0,0	0,0

Die Ergebnisse der Tabelle 6-5 zeigen, dass es keinen Unterschied in den Berechnungsergebnissen der Vorder- und Rückseite gibt. Eine Differenz von 1,4 % ist bei der Berechnung an der rechten Seite in einem Abstand von 20 cm zu bemerken. Hierbei ist der Wert für die Berechnung mit der Nachbildung der Sicherung als gerade Stromschiene höher als mit der Nachbildung als Spule. Für Berechnungen in geringeren Abständen erzielt die Nachbildung der Sicherungen als Spulenobjekt jedoch ein genaueres Ergebnis.

*Es ist für Grenzwertberechnungen hinsichtlich der 26. BImSchV ausreichend, die in Schaltanlagen eingesetzten Sicherungen durch eine gerade Stromschiene nachzubilden.*

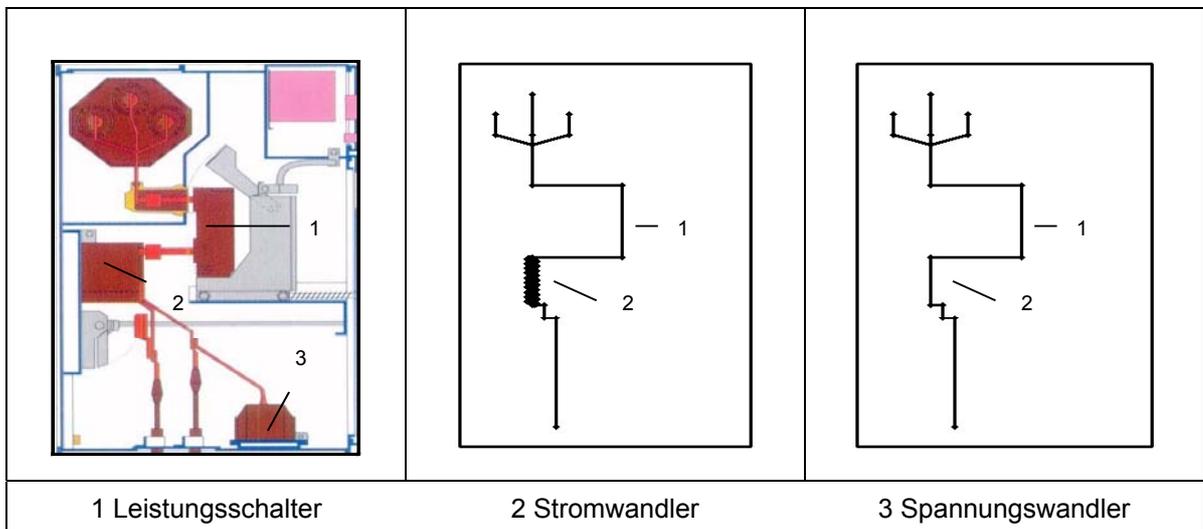
#### 6.2.4 Messwandler

Weitere Komponenten von Schaltfeldern sind Strom- und Spannungswandler. Sie haben die Aufgabe, hohe Ströme bzw. Spannungen auf einheitliche und ungefährliche Werte zu transformieren. Dabei ist eine nach Betrag und Winkel genaue Übersetzung der Mittelspannungsgrößen in die Nenn-Sekundärwerte 1 A bzw. 5 A und 100 V gefordert. Die Aufgabe von Messwandlern ist die Lieferung von Strom- und Spannungswerten für Schutzeinrichtungen und für Messzwecke.

Stromwandler arbeiten auf induktiver Basis, wobei die Primärwicklung im Zuge der Leitung liegt und den fließenden Strom der Mittelspannungsseite führt. Spannungswandler arbeiten entweder nach dem induktiven oder dem kapazitiven Prinzip, wobei letzteres nur in Höchstspannungsnetzen angewendet wird. Induktive Spannungswandler sind Transformatoren geringer Leistung, bei denen die Primär- und die Sekundärwicklungen galvanisch voneinander getrennt sind. [14, S. 692], [15, S. 389 ff]

In Bezug auf die Berechnung der magnetischen Flussdichte kommt somit nur die genauere Untersuchung des Stromwandlers in Betracht.

In Abbildung 6.8 ist das Abgangsfeld ZS8 mit Leistungsschalter sowie Strom- und Spannungswandler der Firma ABB dargestellt. Das linke Bild zeigt die Maßzeichnung des Herstellers. Die Nachbildung des Schaltfeldes in WinField® stellen das Bild in der Mitte sowie das Rechte dar, wobei der Stromweg der Sicherungen einmal durch eine Spule mit 10 Windungen nachgebildet wurde (mittleres Bild) und andernfalls nur durch eine gerade Stromschiene (rechtes Bild).



**Abbildung 6.8:** Abgangsfeld der Firma ABB Typ ZS8

Die Berechnungsergebnisse und den prozentualen Fehler zwischen beiden Nachbildungen zeigt Tabelle 6-6.

**Tabelle 6-6:** Berechnungsergebnisse und prozentualer Fehler für die Nachbildung der Strombahn des Stromwandlers innerhalb eines Schaltfeldes als Spule und gerade Stromschiene

Berechnungs- ort	Stromwandler als Spule		Stromwandler als Stromschiene		Fehler [%]	
	B [ $\mu$ T]		B [ $\mu$ T]			
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Links	133,9	58,9	134,6	59,2	0,5	0,5
Rechts	103,6	49,3	104,2	49,2	0,6	-0,2
Hinten	109,3	53,5	109,0	53,4	-0,3	-0,2
Vorn	33,8	20,8	33,8	20,8	0,0	0,0

Der prozentuale Fehler der Berechnungsergebnisse an allen vier Berechnungsorten und Abständen liegt deutlich unter 1 %. Die Berechnung der maximalen magnetischen Flussdichte zur linken Seite mit der Nachbildung des Stromwandlers als Spule, ergibt in beiden Berechnungsabständen einen um 0,5 % geringeren Wert. Das heißt, das Ergebnis ist genauer. Die Berechnung an der Rückwand ergibt für die Nachbildung des Stromwandlers als gerade Stromschiene einen um 0,3 % geringeren Flussdichtewert in einem Berechnungsabstand von 20 cm. Es ist somit nur eine genaue Nachbildung des Stromwandlers notwendig, wenn Berechnungen in geringen Abständen erforderlich sind.

*Für Feldberechnungen an der 100  $\mu$ T-Isolinie ist es nicht nötig, den Stromwandler durch ein Spulenobjekt nachzubilden, da der Berechnungsfehler in den Abständen, die für den Personenschutz maßgebend sind, unter 1 % liegt.*

## 6.3 Einfluss von Kabeln

Für Industrie- und Schaltanlagen sowie in Verteilnetzen im Mittelspannungsbereich kommen meist Rundleiterkabel der Bauart N2XSY bzw. NA2XSY für die Einspeisung und teilweise auch zur Verbindung von Schaltfeldern zum Einsatz. Diese Bauart ist durch eine Aderisolierung aus VPE und eine Mantelumhüllung aus PVC gekennzeichnet. Die Verlegung kann in Innenräumen, im Freien und in der Erde erfolgen. Ausgeführt werden sie als ein- und dreiadrige Kabel, wobei einadrige Kabel am häufigsten Verwendung finden. Die Vorteile einadriger Kabel sind z.B. die höhere Strombelastbarkeit sowie eine größere Biegsamkeit und ein geringeres Gewicht, wodurch die Verlegung erleichtert wird. Nachteilig ist jedoch, dass nebeneinander in einem Kabelgraben verlegte Einleiterkabel mehr Platz benötigen. Daher ist es in der Praxis auch aus Übersichtlichkeitsgründen üblich, die Verlegung der Kabel in einer Dreiecksanordnung zu realisieren. [12, S. 83]

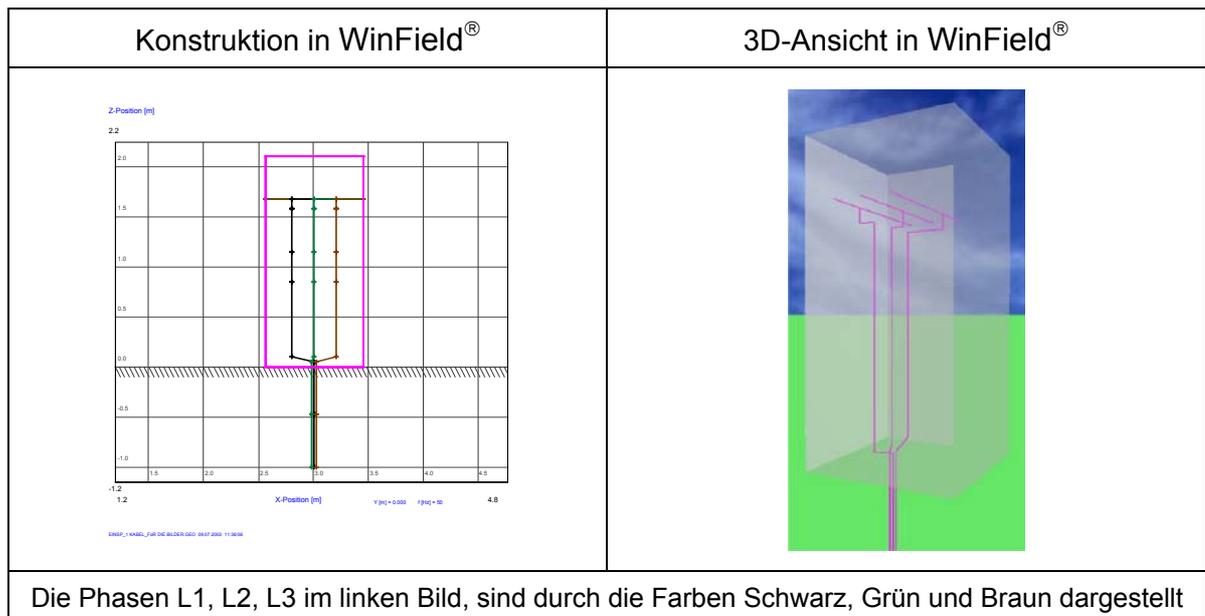
Aus diesem Grund werden die nachfolgenden Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses auf die magnetische Flussdichte nur an im Dreieck verlegten Einleiterkabeln vorgenommen.

### 6.3.1 Einspeisekabel

Untersucht wird im Folgenden die magnetische Flussdichte am Einspeisefeld der Firma HORLEMANN Typ HR 10 N 12 kV im Zusammenhang mit dem Einspeisekabel. Der Bemessungsstrom dieses Feldes beträgt 630 A und somit wird das zur Einspeisung verwendete Einleiterkabel nach Tabelle 13-46 [15, S. 557] ausgewählt. Verwendung findet das VPE-Kabel N2XSY 6/10 kV 1 • 300/RM 25 zur Einspeisung jeder Phase. Die Verlegung der Kabel erfolgt in einer Dreiecksanordnung, die Verlegung in der Ebene wird aufgrund der Erkenntnisse des Abschnitts 6.1.2 nicht untersucht.

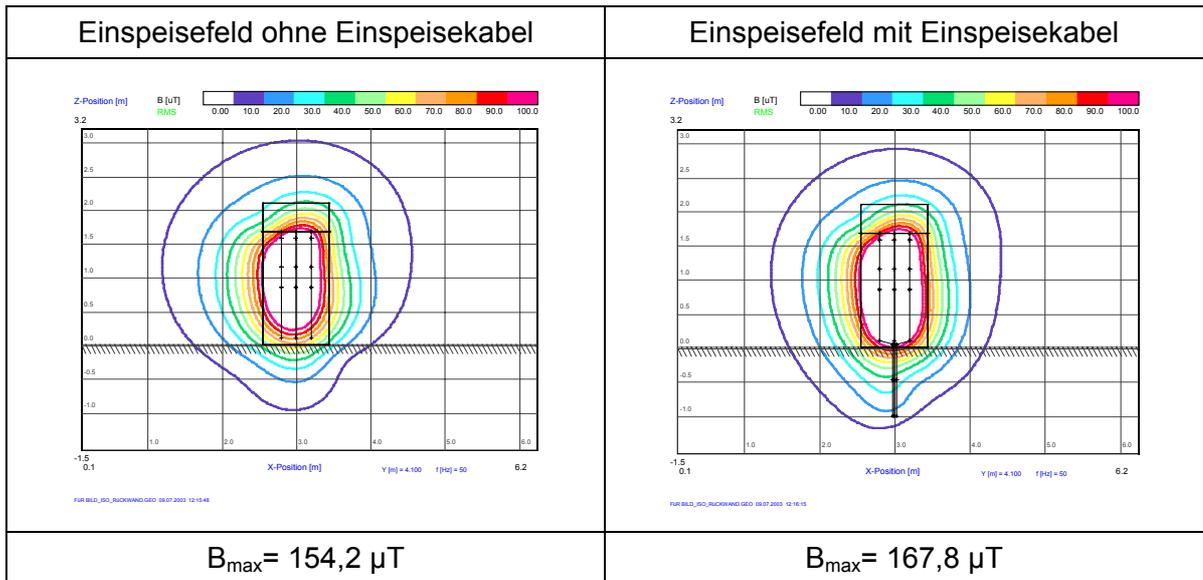
Die Kabel besitzen eine Länge von 1,1 m, wobei 1 m senkrecht unter der Aufstellungsebene verläuft. Dies ist eine in der Praxis übliche Länge und wird somit als Grundlage der folgenden Betrachtungen verwendet.

Der Anschluss an die Stromschielen erfolgt innerhalb des Schaltfeldes in einer Höhe von 5 cm, wobei nur weitere 5 cm zur Belegung der hochflexiblen Kabel verwendet werden. Die Konstruktion ist in Abbildung 6.9 einmal als zweidimensionale Ansicht (Frontansicht, x-z-Ebene, links) und einmal als dreidimensionale Ansicht (rechts) dargestellt.



**Abbildung 6.9:** Einspeisefeld der Firma HORLEMANN Typ HR 10 N 12 kV mit Einspeisekabel Typ N2XSY 6/10 kV 1 • 300/RM 25

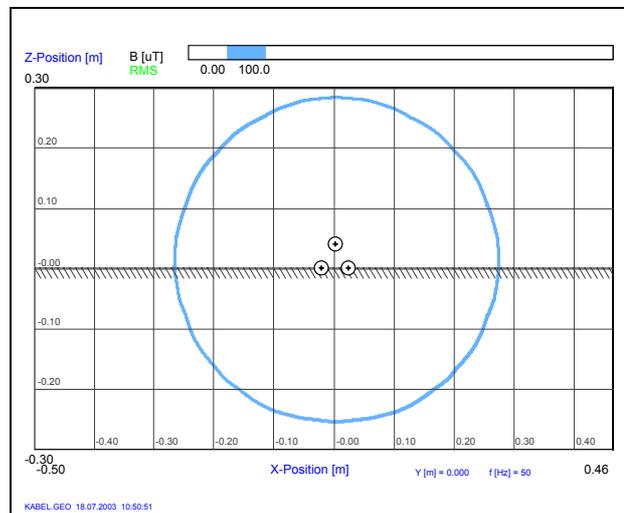
Welchen Einfluss das Einspeisekabel auf das Magnetfeld des Schaltfeldes im Vergleich zum Schaltfeld ohne Kabel hat, zeigt Abbildung 6.10. Die Darstellung der Isolinien sowie die maximal ermittelte magnetische Flussdichte erfolgten im Abstand von 20 cm zur Rückwand des Einspeisefeldes.



**Abbildung 6.10:** Isolinen der magnetischen Flussdichte des Einspeisefeldes der Firma HORLEMANN Typ HR 10 N 12 kV in einem Abstand von 20 cm zur Rückwand mit und ohne Einspeisekabel

Abbildung 6.10 zeigt, dass die  $100 \mu\text{T}$ -Isolinie nur bis zum Anschluss des Einspeisekabels ausgedehnt ist.

Wie in nebenstehender Abbildung zu erkennen ist, hält das Kabel selbst den  $100 \mu\text{T}$ -Grenzwert in einem Abstand von 0,26 m bei einer Belastung mit einem Strom von 630 A ein.

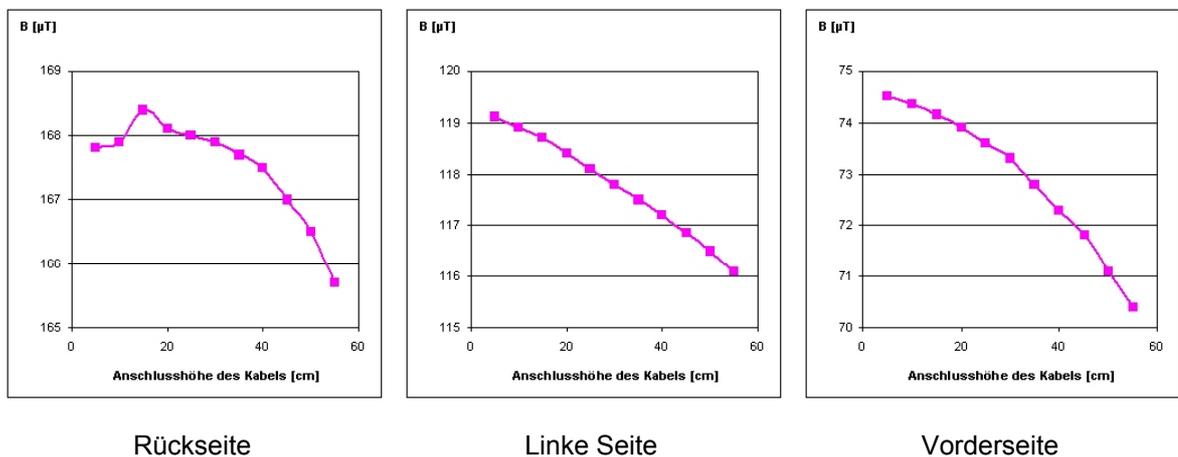


**Abbildung 6.11:**  $100 \mu\text{T}$ -Isolinie des MS-Kabels N2XSY 6/10 kV 1 • 300/RM 25

Welchen prozentualen Anteil der magnetischen Flussdichte das Einspeisekabel an den jeweiligen Berechnungsorten hat, ist der Tabelle 9-7 im Anhang 9.4 zu entnehmen.

### 6.3.2 Anschlusshöhe des Kabels im Schaltfeld

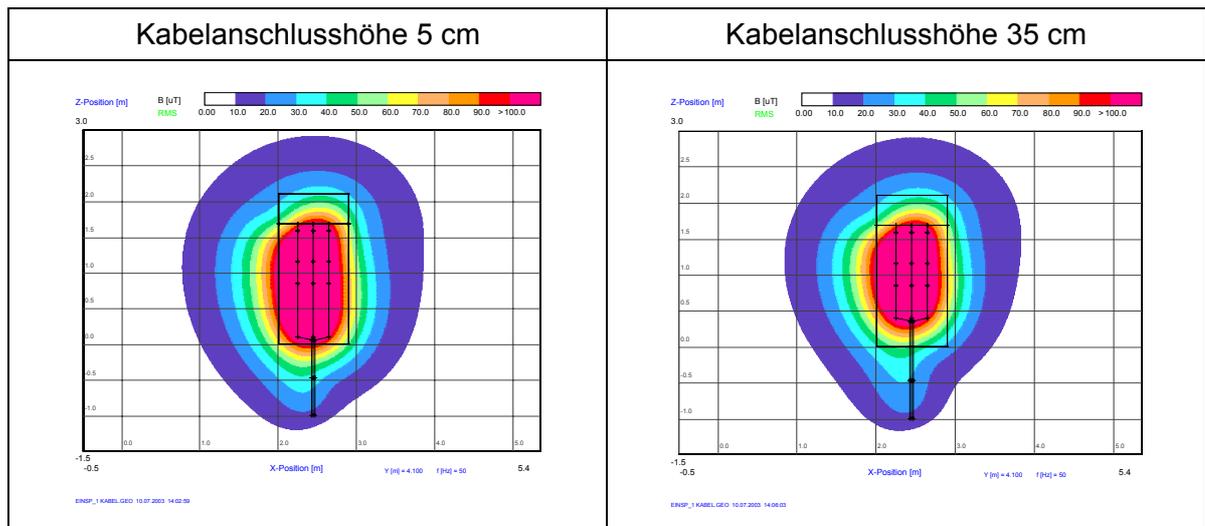
Diese Untersuchung soll zeigen, wie sich die magnetische Flussdichte ändert, wenn die Anschlusshöhe des Kabels innerhalb des Schaltfeldes verändert wird. Das bedeutet, dass im Einzelnen die Länge des Kabels zu- und die der Stromschiene abnimmt. Grenzen sind dieser Maßnahme jedoch durch den Einbau der Sekundärtechnik gesetzt, daher wurden im Folgenden nur realistische Anschlusshöhen von 5 cm bis 55 cm betrachtet. Diagramm 6.2 stellt die Berechnungsergebnisse, der im Abstand von 20 cm von der Rück-, Seiten- und Vorderwand berechneten magnetischen Flussdichte, in Abhängigkeit von der Anschlusshöhe des Kabels dar.



**Diagramme 6.2:** Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Anschlusshöhe des Einspeisekabels in 20 cm Abstand hinter dem Einspeisefeld

Die Diagramme 6.2 zeigen, dass die maximale magnetische Flussdichte mit zunehmender Anschlusshöhe des Kabels im Abstand von 20 cm zu den drei Berechnungsorten abnimmt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die magnetische Flussdichte im Abstand von 20 cm zur Rückwand des Einspeisefeldes für zwei unterschiedliche Kabelanschlusshöhen.



**Abbildung 6.12:** Magnetische Flussdichte im Abstand von 20 cm zur Rückwand des Einspeisefeldes für zwei unterschiedliche Kabelanschlusshöhen

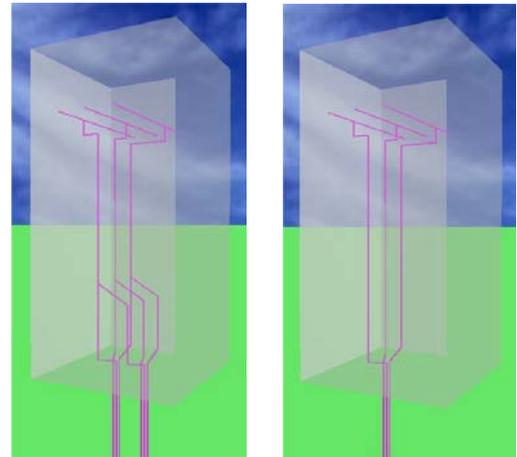
Es ist zu erkennen, dass die Fläche, die den Bereich der magnetischen Flussdichte mit  $> 100 \mu\text{T}$  kennzeichnet, bei Veränderung der Kabelanschlusshöhe von 5 cm auf 35 cm deutlich kleiner geworden ist.

Bei Vergrößerung der Anschlusshöhe um 50 cm erfolgte eine Abnahme der maximalen Flussdichte um 1,3 % zur Rückseite, um 2,5 % zur linken Seite und um 5,5 % zur Vorderseite. Grundsätzlich ist die Reduktion der magnetischen Flussdichte relativ gering, was unter anderem auf den größeren Einfluss der Strom- und Sammelschienen zurückzuführen ist.

### 6.3.3 Anzahl der einspeisenden Kabel

Bei einigen Schaltfeldern besteht die Möglichkeit, die Einspeisung über zwei Kabel pro Phase zu realisieren.

Die nebenstehende Abbildung zeigt den konstruktiven Unterschied zwischen der ein- und zweifachen Einspeisung in 3D-Ansicht. Hierfür wurde, um eine Vergleichbarkeit der Werte zu erhalten, das unter 6.3.1 untersuchte Einspeisefeld (rechtes Bild) so modifiziert, dass es zwei Einspeisungen erhält (linkes Bild).



**Abbildung 6.13:** Einspeisefeld mit zwei unterschiedlichen Einspeisevarianten

Wird das hier untersuchte Einspeisefeld mit zwei Kabeln pro Phase eingespeist, trägt jedes Kabel nur einen Strom von 315 A. Somit kann das Kabel im Querschnitt verringert werden. Es werden Kabel mit einem Querschnitt von  $120 \text{ mm}^2$  verwendet.

**Tabelle 6-7:** Berechnungsergebnisse und prozentualer Unterschied für die Berechnung der magnetischen Flussdichte mit ein- oder zweifacher Einspeisung

Berechnungsort	einfache Einspeisung		Zweifache Einspeisung		Unterschied [%]	
	B [ $\mu\text{T}$ ]		B [ $\mu\text{T}$ ]			
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Links	119,2	55,7	119,1	55,7	-0,1	0,0
Rechts	138,1	61,2	139,1	62,0	0,7	1,3
Hinten	167,8	90,1	162,4	85,6	-3,2	-5,0
Vorn	74,5	46,1	80,0	49,2	7,4	6,7

Auf die Darstellung der magnetischen Flussdichten wird an dieser Stelle verzichtet, da optisch kein gravierender Unterschied zu erkennen ist.

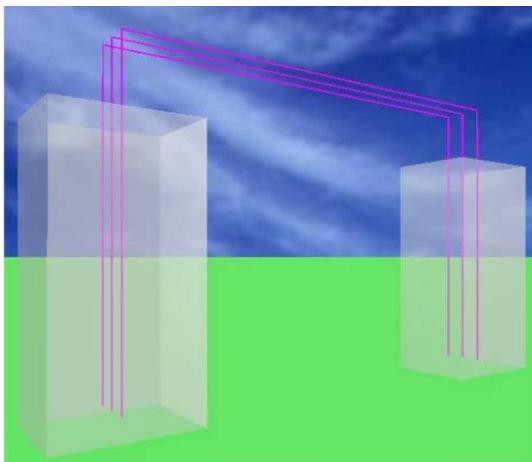
Tabelle 6-7 zeigt, dass der prozentuale Unterschied der linken und rechten Seite unter 1 % liegt. Bei zweifacher Einspeisung verringert sich die magnetische Flussdichte um bis zu 5 % in einem Abstand von 40 cm zur Rückseite, was auf den geringeren Einspeisestrom, welcher auch auf einem Teil der Stromschienen fließt, zurückzuführen ist. Zur Vorderseite erhöhte sich der Flussdichtewert um rund 7 %. Grund hierfür ist die, durch die zweifache Einspeisung näher zur Vorderseite bedingte Konstruktion der Stromschienen.

#### 6.3.4 Alternative Verwendung von Stromschienen

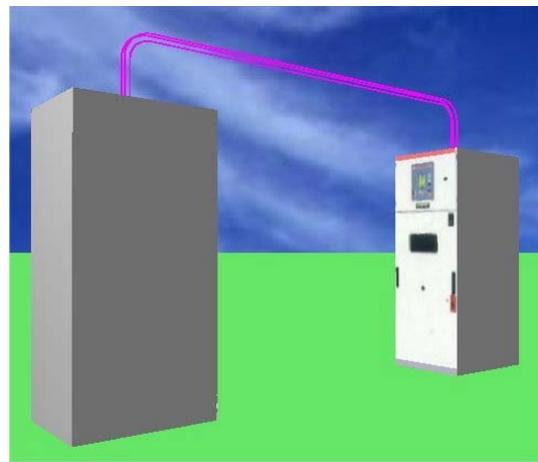
Oftmals werden die Schaltfelder von MS-Schaltanlagen aus Platzgründen in einem Betriebsraum gegenübergestellt. Somit ist es nötig, eine Verbindung zwischen den beiden Schaltfeldreihen herzustellen. Dafür kommen Kabel oder Stromschienen zum Einsatz. Die Verlegung kann auf dem Boden meist bis zu 1 m unter der Schaltanlage oder an der Decke realisiert werden.

Im Folgenden wird die Verlegung an der Decke untersucht (ungünstigster Fall). Diese Möglichkeit der Verlegung besteht, wenn die Schaltanlage als Einbaustation ausgeführt ist. Hierbei ist es möglich, dass in den darüber liegenden Räumen ein Bereich mit erhöhter Feldstärke entsteht, daher wird dieser Fall genauer untersucht.

Stromschienenverbindung



Kabelverbindung



**Abbildung 6.14:** Verbindung zweier Schaltfelder mittels Stromschienen bzw. Kabel

In Abbildung 6.14 ist die Verbindung zweier Schaltfelder, welche einen Abstand von 2,9 m besitzen, mit Stromschienen (linkes Bild) bzw. mit Kabeln vom Typ N2XSY 6/10 kV 1 • 300/RM dargestellt. Die Verlegung der Kabel erfolgt in einer Dreiecksanordnung. Die Ermittlung der magnetischen Flussdichte (Tabelle 6-8) erfolgt über der Anordnung.

**Tabelle 6-8:** Berechnungsergebnisse und prozentualer Unterschied für die Berechnung der magnetischen Flussdichte der Stromschienen- bzw. Kabelverbindung

Berechnungsort	Stromschienen		Kabel		Unterschied [%]	
	B [ $\mu$ T]		B [ $\mu$ T]			
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
x-y-Ebene (über der Anordnung)	563,4	176,2	152,7	39,6	-72,9	-77,5

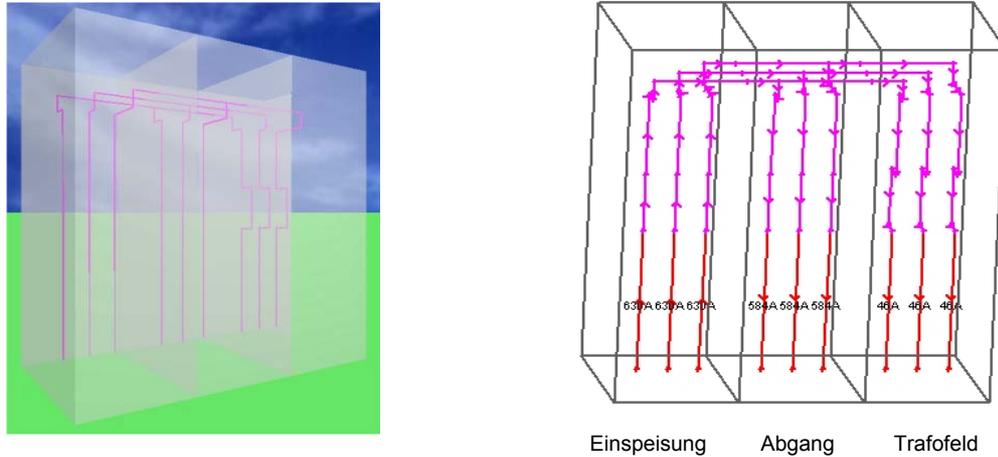
Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine Kabelverbindung eine erhebliche Reduktion der magnetischen Flussdichte erzielt werden kann. Im vorliegenden Berechnungsbeispiel ist eine Reduktion der magnetischen Flussdichte von bis zu 77,5 % erreicht worden. Durch die Verwendung der Kabelverbindung wird der Grenzwert von 100  $\mu$ T im Abstand von 25 cm über der in Abbildung 6.14 dargestellten Anlage eingehalten. Bei der Verwendung von Stromschienen ist dies erst in einem Abstand von 54 cm der Fall.

Die Verwendung von Stromschienen ist aus diesem Grund nur dann sinnvoll, wenn ein ausreichender Abstand zu einem maßgebenden Immissionsort besteht.

## 6.4 Einfluss der Materialien für Gehäuse und Sammelschienenkapselung

Das Gehäuse und die oftmals in Schaltfeldern vorhandene Sammelschienenkapselung bewirken eine Abschirmung des magnetischen Feldes aufgrund der unter 2.5 aufgeführten Effekte. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde eine Schaltanlage mit drei Schaltfeldern (Einspeise-, Abgangs- und Trafofeld) konstruiert. Es handelt sich um eine 12 kV-Schaltanlage der Firma ALSTOM, Baureihe PI104. An das Trafofeld ist ein Transformator mit einer Leistung von 800 kVA angeschlossen, wodurch bei einer Betriebsspannung von 10 kV ein Strom von 46,2 A fließt und somit die Stromverteilung der Schaltanlage bei einer

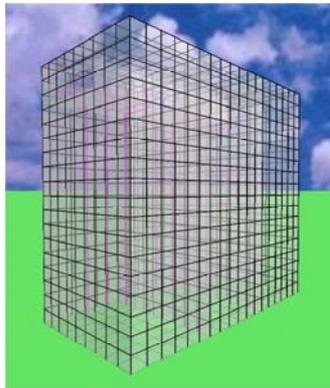
Durchleitung von 630 A bestimmt ist. Abbildung 6.15 zeigt die Darstellung der Anlage in WinField® (angeschlossener Transformator nicht dargestellt).



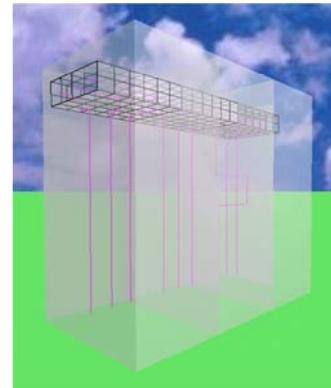
**Abbildung 6.15:** Darstellung einer 3-feldrigen 12 kV-Schaltanlage der Firma ALSTOM, Baureihe PI104 in WinField®

In WinField® wird das Gehäuse oder auch die Sammelschienenkapselung, aus Platten konstruiert, welche aus mehreren Leiterschleifen bestehen. Diese Maßnahme ist notwendig, da das Programm zur Berechnung geschlossene Stromkreise benötigt. Durch diese Maßnahme sehen die Platten wie ein Maschennetz aus (Abbildung 6.16). Das äußere Feld induziert in den Leiterschleifen Spannungen, welche Wirbelströme zur Folge haben, die nach der LENZ'schen Regel ein Gegenfeld erzeugen, wodurch das erzeugende Feld geschwächt wird. Als Materialien können Stahl oder Aluminium, unter der Angabe von Größe und Dicke, ausgewählt werden. Die Maschenweite des Netzes beträgt 10 cm, da sich bei einer Verringerung auf 5 cm die Rechenzeiten erheblich verlängern. Die Genauigkeit der Berechnung wird durch ein 5 x 5 cm Raster jedoch vervierfacht. In Abbildung 6.16 ist die Konstruktion des Maschennetzes für das Gehäuse und die Sammelschienenkapselung dargestellt.

Gehäuse als Maschennetz

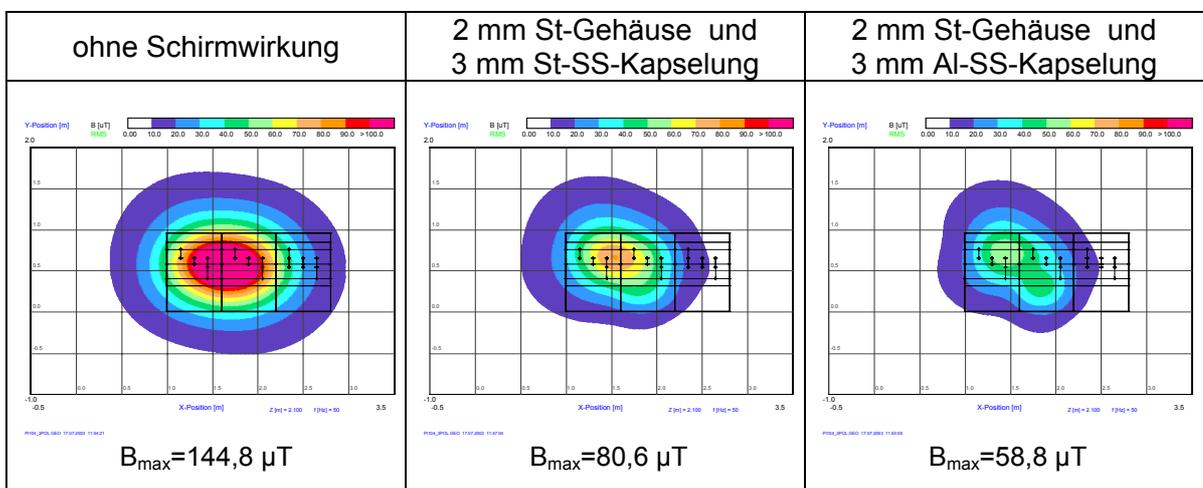


SS-Kapselung als Maschennetz



**Abbildung 6.16:** Darstellung von Gehäuse und SS-Kapselung als Maschennetz (10 cm Maschenweite) in WinField®

Die Darstellung der magnetischen Flussdichte mit Angabe des Maximalwertes, im Berechnungsabstand von 20 cm über der Anlage, mit und ohne Schirmwirkung, zeigt Abbildung 6.17. Den Darstellungen ist zu entnehmen, dass Gehäuse und SS-Kapselung eine Dämpfung des Magnetfeldes bewirken. Daher wird der Einfluss auf die Schirmwirkung in den nächsten Abschnitten genauer untersucht.

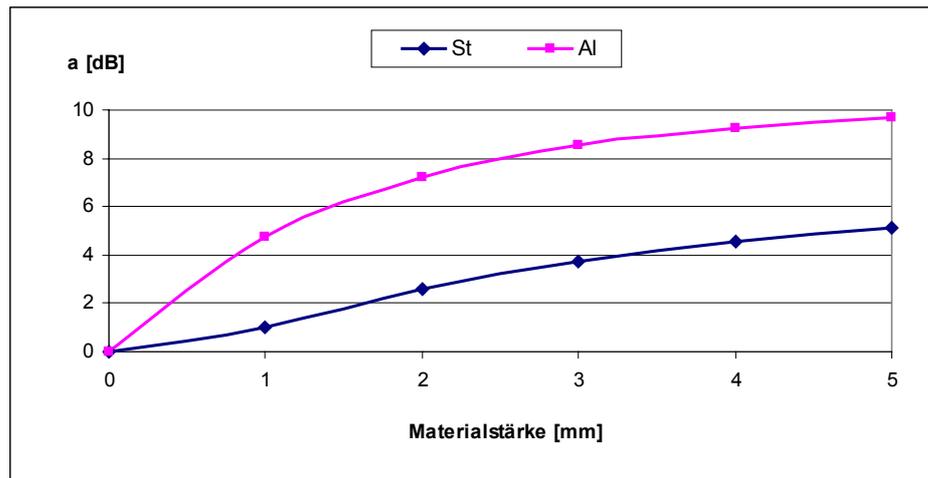


**Abbildung 6.17:** Magnetische Flussdichte mit und ohne Schirmwirkung im Abstand von 20 cm über der untersuchten Schaltanlage

### 6.4.1 Gehäuse

Für das Schaltfeldgehäuse wird üblicherweise Stahl als Werkstoff verwendet. Untersucht wird außerdem die Verwendung von Aluminium, um die Unterschiede in der Schirmwirkung darzustellen. Das folgende Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Schirmdämpfung von der Materialstärke. Die Berechnungswerte sind in

Tabelle 9-8 im Anhang 9.4 zu finden. Die Berechnung der magnetischen Flussdichte erfolgt am Beispiel der unter 6.4 konstruierten Schaltanlage im Abstand von 20 cm zur Rückwand, wobei die Materialstärke des Gehäuses von 0 mm bis 5 mm in 1 mm Schritten verändert wurde. Eine Betrachtung von Materialstärken > 5 mm erscheint nicht sinnvoll, da hier die Schirmdämpfung nicht mehr so stark ansteigt.



**Diagramm 6.3:** Dämpfung des Magnetfeldes durch Aluminium- und Stahlgehäuse

Dem Diagramm 6.3 ist zu entnehmen, dass beide Materialien mit zunehmender Stärke das erzeugende Magnetfeld reduzieren und dass die Schirmwirkung des Aluminiumgehäuses im Gegensatz zum Stahlgehäuse größer ist. Dies ist auf die bessere Leitfähigkeit von Aluminium zurückzuführen. Die entstehenden Wirbelströme werden somit nicht so stark durch den elektrischen Widerstand gedämpft und das magnetische Gegenfeld ist stärker. Auch praktische Messungen an Stahl- und Aluminiumplatten zeigen, dass bei Netzfrequenz der Schirmfaktor für Aluminium größer ist als für Stahl. Im Schaltanlagenbau wird das Gehäuse aus Stahlblech mit einer Stärke von 1 mm bis 2,5 mm gefertigt. Der Grund dafür ist erstens die konstruktive Festigkeit und zweitens die Verringerung der Gefahr des Durchschmelzens beim Auftreten eines Lichtbogens.

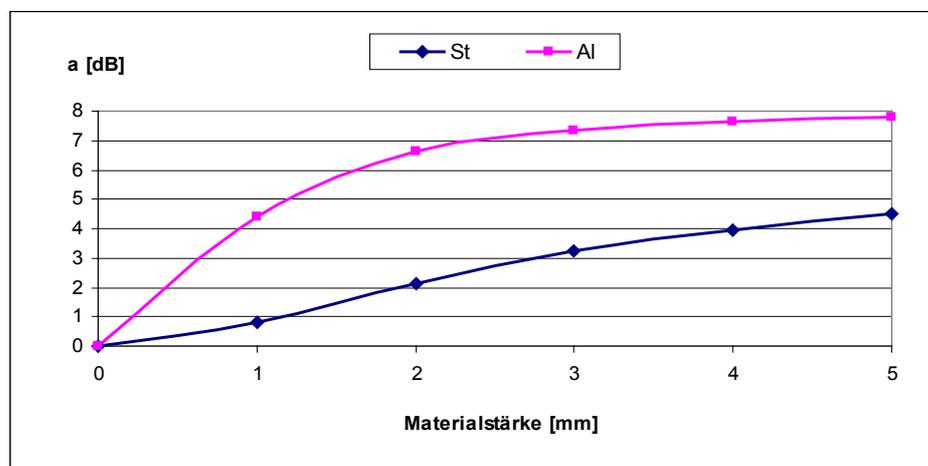
Bei der untersuchten Anlage, welche eine Gehäusewand aus 2 mm Stahlblech besitzt, wird eine Dämpfung der magnetischen Flussdichte von ca. 2,2 dB erreicht. Die Verwendung von Materialstärken > 2 mm ist nicht üblich, da sich das Gewicht der Schaltanlage erhöht.

### 6.4.2 Sammelschienenkapselung

Viele MS-Schaltanlagen werden mit Kapselungen versehen, d.h. es werden unter Spannung stehende Betriebsmittel und Leiter von einer Metallhülle umschlossen. Es wird zwischen der einpoligen und der dreipoligen Kapselung unterschieden. Bei der dreipoligen Kapselung befinden sich alle drei Leiter eines Drehstromsystems in einer gemeinsamen Hülle, wogegen bei der einpoligen Kapselung jeder Leiter einzeln umhüllt wird. Für MS-Schaltanlagen wird hauptsächlich die dreipolige Kapselung der Sammelschienen angewendet, wobei als Material meist Stahlblech mit einer Dicke von 2 bis 3 mm verwendet wird.

Im Folgenden wird untersucht, inwieweit die dreipolige SS-Kapselung der untersuchten Schaltanlage zur Schwächung des Magnetfeldes beiträgt. Zuerst wurde das lokale Maximum der magnetischen Flussdichte zu allen Berechnungsorten bestimmt. Es hat sich gezeigt, dass es nur über der Anlage durch die Sammelschienen bestimmt wird. Die Verursacher der lokalen Maxima der anderen Berechnungsorte waren meist die Stromschienenverbindungen zu den Sammelschienen, daher ist es nicht sinnvoll, die Untersuchung auch auf diese auszudehnen, obwohl ein Einfluss nicht ausgeschlossen ist. Die magnetische Flussdichte über der Schaltanlage kann auch von entscheidender Bedeutung hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte der 26. BImSchV sein, wenn die Schaltanlage als Einbaustation ausgeführt ist. In diesem Fall müssen die Grenzwerte auch in den darüber liegenden Räumen eingehalten werden.

Im Diagramm 6.4 sind die Berechnungsergebnisse, welche im Einzelnen der Tabelle 9-9 im Anhang 9.4 entnommen werden können, dargestellt.



**Diagramm 6.4:** Dämpfung des Magnetfeldes durch SS-Kapselung mit unterschiedlichen Materialien

Die Dämpfung des Magnetfeldes durch die SS-Kapselung zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Untersuchung in Abschnitt 6.4.1. Grundsätzlich ist es möglich und in der Praxis auch üblich, die Kapselung der Sammelschienen mit Aluminium zu realisieren. Die Berechnungen haben gezeigt, dass somit eine mehr als doppelt so große Dämpfung des Magnetfeldes erreicht werden kann.

*Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Materialien für Gehäuse und Sammelschienenkapselung eine Dämpfung des Magnetfeldes bewirken. Hierbei erzielt Aluminium grundsätzlich eine bessere Schirmung des magnetischen Feldes als Stahl. In einigen Fällen ist die Beachtung der Schirmwirkung für Grenzwertberechnungen durchaus notwendig, um die Konformität hinsichtlich der 26. BImSchV nachweisen zu können.*

## **7 Optimierungmaßnahmen an MS-Schaltanlagen hinsichtlich der 26. BImSchV und Schweizer NISV**

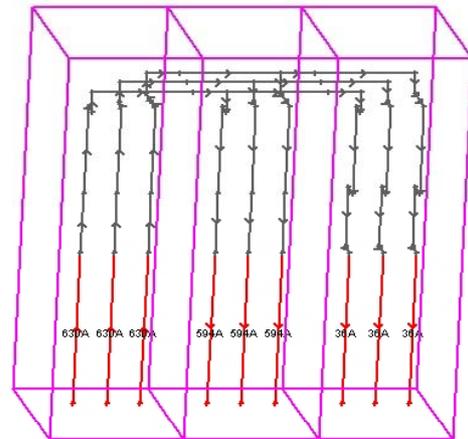
### **7.1 Vorbetrachtungen**

MS-Schaltanlagen stellen das Bindeglied zwischen der HS- und der MS-Ebene, sowie der MS- und der NS-Ebene dar. Sie werden auch als Übergabestationen innerhalb derselben Spannungsebene ausgeführt, wobei häufig Transformatoren angeschlossen sind, welche Spannungen innerhalb des MS-Netzes (z.B. von 20 kV auf 6 kV) umspannen. Diese Anlagen werden oftmals im industriellen Bereich eingesetzt. Um die Versorgung der Endverbraucher der NS-Ebene sicherzustellen, werden MS-Schaltanlagen in Ortsnetzstationen eingesetzt. Hierbei werden die meisten Anlagen im Ringnetz betrieben.

Die Einbindung der MS-Schaltanlagen in das Energieversorgungsnetz bedingt somit die Betriebsweise und die Anzahl der verwendeten Schaltfelder und Schaltfeldtypen. Die Unterbringung der Schaltanlagen erfolgt in dafür vorgesehenen Stationen, wobei auch die Unterbringung in einer Einbaustation sehr häufig Anwendung findet (z.B. im Keller eines Gebäudes). Daher sind verschiedene Varianten von MS-Schaltanlagen denkbar, die den jeweiligen Anforderungen im Netzbetrieb angepasst sind.

Die nachfolgenden Untersuchungen und Optimierungsmaßnahmen der Abschnitte 7.2 bis 7.3.2 werden an zwei unterschiedlichen Schaltanlagen vorgenommen. Im einzelnen handelt es sich um eine typische MS-Schaltanlage, die in Ortsnetzstationen eingesetzt wird (Abbildung 7.1, im weiteren als SA 1 bezeichnet) und um eine Anlage zur Energieübergabe und -verteilung (Abbildung 7.2, im weiteren als SA 2 bezeichnet). Die Untersuchung wird auf diese beiden Schaltanlagentypen beschränkt, da diese in der Praxis Verwendung finden und somit ein typisches Beispiel darstellen. Der Aufbau der beiden MS-Schaltanlagen in WinField® ist in den Abbildungen 7.1 sowie 7.2 dargestellt.

Nebenstehende Abbildung zeigt den Aufbau einer typischen im Ring betriebenen 12 kV-MS-Schaltanlage, wie sie in Ortsnetzstationen eingesetzt wird. Die Einspeisung und der Abgang werden über Lasttrennschalterfelder realisiert. Das Trafofeld enthält zusätzlich zum Lasttrennschalter Sicherungen, die eine Abschaltung bei Umkehr des Stromflusses ermöglichen.



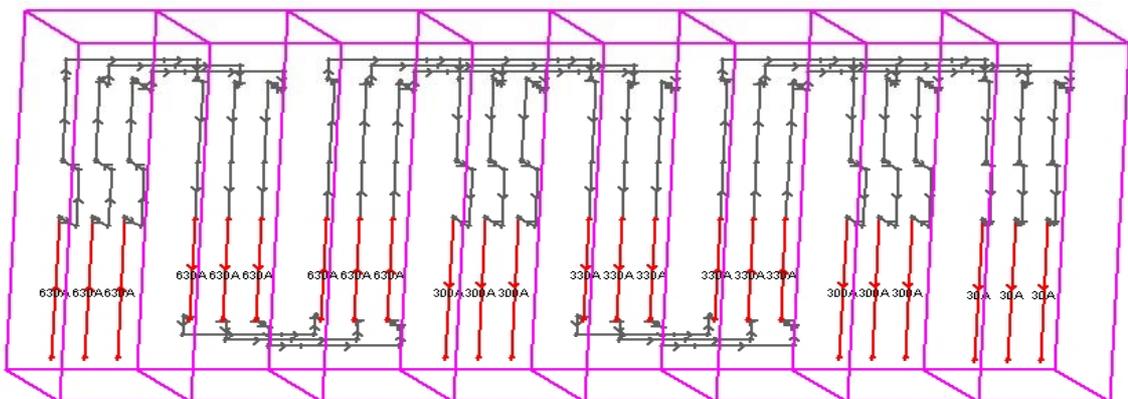
SA 1: Einspeisung Abgang Trafofeld

**Abbildung 7.1:** 3-feldrige 12 kV Schaltanlage der Firma ALSTOM, Baureihe PI104 in WinField®

Der an das Trafofeld angeschlossene Transformator besitzt eine in der Praxis übliche Leistung von 630 kVA. Somit fließt bei einer Betriebsspannung von 10 kV und einer Durchleitung von 630 A ein Strom von 36,4 A durch das Trafofeld und ein Ringstrom von 593,6 A durch das Abgangsfeld.

Die in Abbildung 7.2 dargestellte 8-feldrige 12 kV-MS-Schaltanlage dient der Energieverteilung. Sie besitzt neben Einspeise- und Abgangsfeldern auch Mess- sowie Übergabefelder zur Erfassung von Energiemengen.

An das Trafofeld ist ein Umspanner mit einer Leistung von 300 kVA 10/6 kV angeschlossen, wodurch die Stromverteilung der einzelnen Schaltfelder bei Durchleitung von 630 A bestimmt ist.

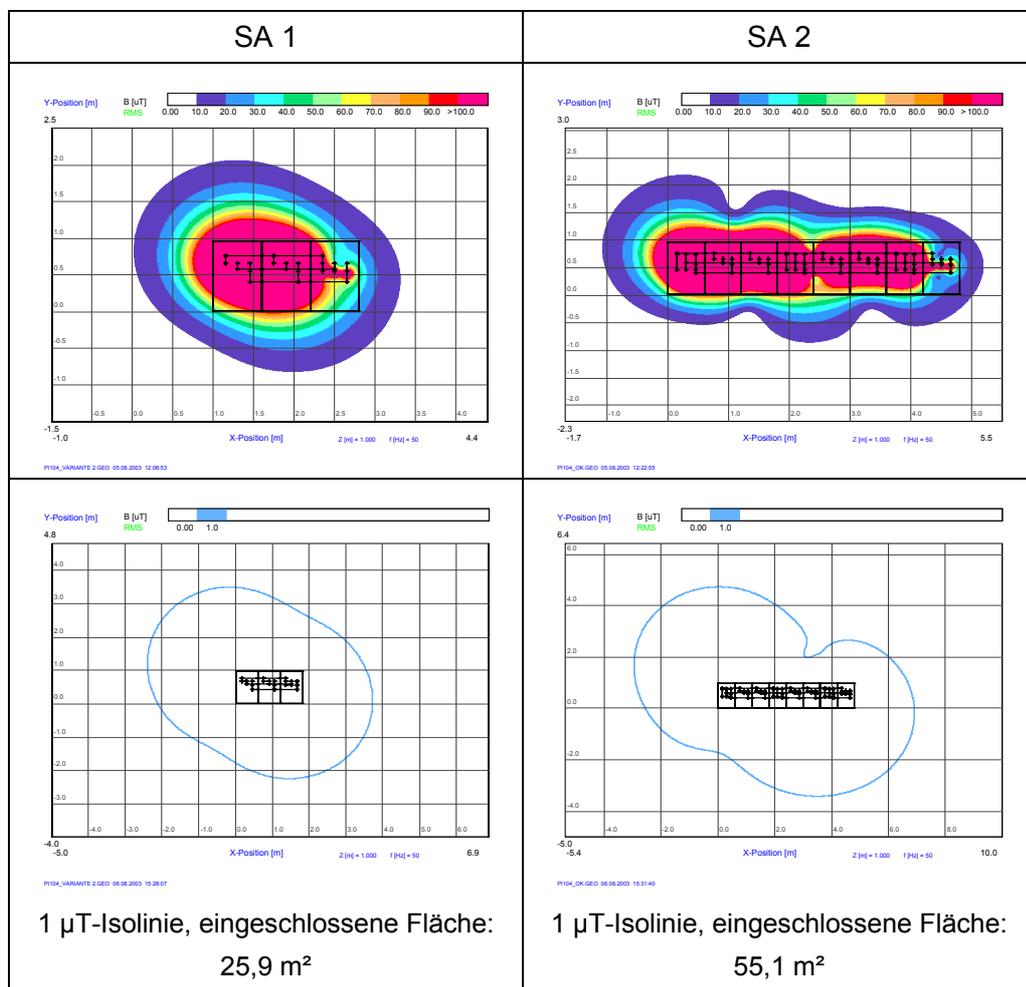


SA 2: Einspeisung Messung Übergabe Abgang Kupplung Hochführung Abgang Trafofeld

**Abbildung 7.2:** 8-feldrige 12 kV-Schaltanlage der Firma ALSTOM, Baureihe PI104 in WinField®

## 7.2 Analyse des lokalen Maximums der magnetischen Flussdichte

Um Optimierungsmaßnahmen an den zwei unter 7.1 betrachteten Schaltanlagen vornehmen zu können, ist es wichtig, das auftretende Maximum der magnetischen Flussdichte zu lokalisieren. Die Darstellung der Flussdichteverteilung erfolgt hierbei in einem Höhenschnitt von 1 m (Abbildung 7.3), wobei für die Berechnung der „worst case“ angenommen wurde, d.h. der Einfluss des Gehäusematerials sowie die SS-Kapselung wurde nicht berücksichtigt.



**Abbildung 7.3:** Magnetische Flussdichte und 1 µT-Isolinie im Höhenschnitt von 1 m bei Berechnung im „worst case“

Die Berechnung der Fläche, welche die 1 µT-Isolinie im Höhenschnitt von 1 m einschließt, erfolgte mit dem Programm AutoCAD LT<sup>®</sup>.

Die lokalen Maxima der magnetischen Flussdichte im Abstand von 20 cm von der Rückseite und über der Anlage sind in Abbildung 9.4 im Anhang 9.5 dargestellt.

Anhand der Abbildungen 7.3 und 9.4 ist zu erkennen, dass das Maximum der magnetischen Flussdichte hauptsächlich durch die Einspeisung hervorgerufen wird. In welcher Größenordnung sich die Werte der magnetischen Flussdichte im Berechnungsabstand von 20 cm bewegen, zeigen die Werte der Tabelle 7-1. Alle weiteren Berechnungen dieses Kapitels erfolgen ebenfalls im Abstand von 20 cm.

**Tabelle 7-1:** Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte im Abstand von 20 cm

Schaltanlage	B [ $\mu$ T]				
	Hinter	Vor	Rechts	Links	Über
SA 1	162,4	52,7	21,6	125,2	143,9
SA 2	169,1	49,4	16,1	128,1	163,4

### 7.3 Art der Optimierungsmaßnahme

Um eine MS-Schaltanlage hinsichtlich der Verringerung des Magnetfeldes zu optimieren, kann von zwei verschiedenen Ansätzen ausgegangen werden. Bei der Untersuchung von Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der 26. BImSchV ist es das Ziel, die Einhaltung des 100  $\mu$ T-Grenzwertes, in einem Abstand von 20 cm von der berührbaren Oberfläche einer Anlage, an einem maßgebenden Immissionsort zu gewährleisten. Somit ist immer nur die magnetische Flussdichte der Seite einer Anlage relevant, die einem Immissionsort laut 26. BImSchV zugewandt ist. Es ist somit die *Unterbringung* der Schaltanlage maßgebend. Häufig werden Schaltanlagen in elektrischen Betriebsräumen mit der Rück- und auch oftmals mit einer Seitenwand zur Stationsbegrenzung aufgestellt, somit sind diese Seiten häufig für den Personenschutz relevant. Ist eine Anlage als Einbaustation ausgeführt, kann sowohl das resultierende Magnetfeld über als auch unter der Anlage von Bedeutung sein.

Werden Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Schweizer NISV betrachtet, ist es erforderlich, die Emission der gesamten Anlage zu verringern, d.h. es gilt die Fläche, die von der 1  $\mu$ T-Isolinie aufgespannt wird, zu verringern. Es soll nach Möglichkeit eine Verringerung des Magnetfeldes hinsichtlich jeder Seite einer Anlage erreicht werden. Im nachfolgenden werden verschiedene Optimierungen an den Anlagen SA 1 und SA 2 vorgenommen, wobei die Verringerung des gesamten Magnetfeldes angestrebt wird.

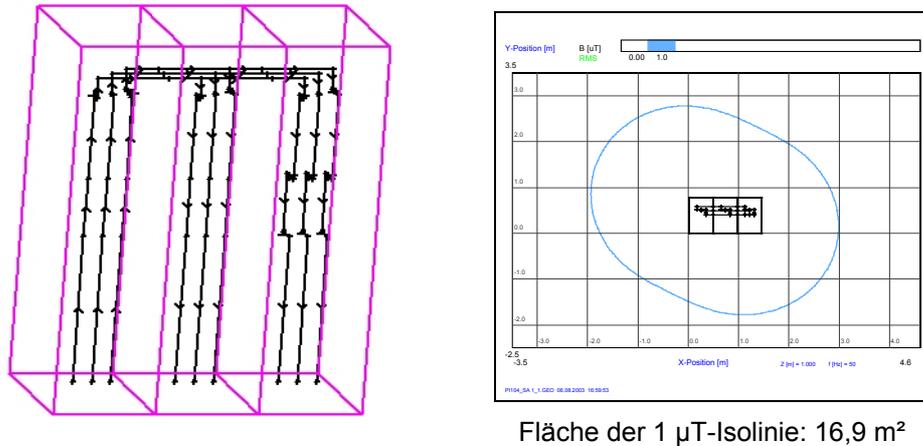
### 7.3.1 Konstruktive Maßnahmen

Wie im Abschnitt 6.1 festgestellt wurde, ist durch konstruktive Maßnahmen eine Reduktion des Magnetfeldes möglich. Am Beispiel der Schaltanlage SA 1 werden anschließend konstruktive Maßnahmen unter Berücksichtigung der Erkenntnisse des Kapitels 6 vorgenommen, die eine Verringerung der magnetischen Flussdichte bewirken.

#### a) *Abstandsverringering*

Die Schaltanlage SA 1 besitzt einen SS-Abstand von 175 mm, der Abstand der Stromschienen beträgt 150 mm. Jedes Schaltfeld der Anlage besitzt die Maße 600 x 950 x 1900 mm. Für die nachfolgende Untersuchung wurde der Abstand der Sammel- und Stromschienen auf 90 mm verringert. Die Maßnahme der Abstandsverringering der stromführenden Elemente untereinander und gegen Erde ist jedoch nur begrenzt möglich, da für Schaltanlagen unterschiedlicher Bauart verschiedene Normen für die Mindestabstände einzuhalten sind (vgl. Kapitel 3). Daher wird bei dieser Untersuchung nur exemplarisch gezeigt, welche Auswirkungen eine Abstandsverminderung auf die magnetische Flussdichte mit sich bringt. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, wurden die Abmaße des Gehäuses so verändert, dass die Abstände der stromführenden Elemente zur Gehäusewand denen der Anlage SA 1 entsprechen. Somit besitzt das neue Gehäuse eines jeden Schaltfeldes die Maße 480 x 780 x 1900 mm, die Anlage ist somit kompakter. Für die Berechnungen wurde, wie auch für die Abschnitte 7.2 bis 7.3.2, der „worst case“ angenommen. Die veränderte Schaltanlage ist in Abbildung 7.4 dargestellt.

SA 1\_A



Hinter	Vor	Rechts	Links	Über
114,3 µT	39,0 µT	17,4 µT	88,8 µT	75,5 µT
-29,6 %	-25,9 %	-19,4 %	-29,1 %	-47,6 %

**Abbildung 7.4:** SA 1\_A mit Abstandsverringering der stromführenden Elemente bei Angabe der prozentualen Differenz der Flussdichte gegenüber SA 1.

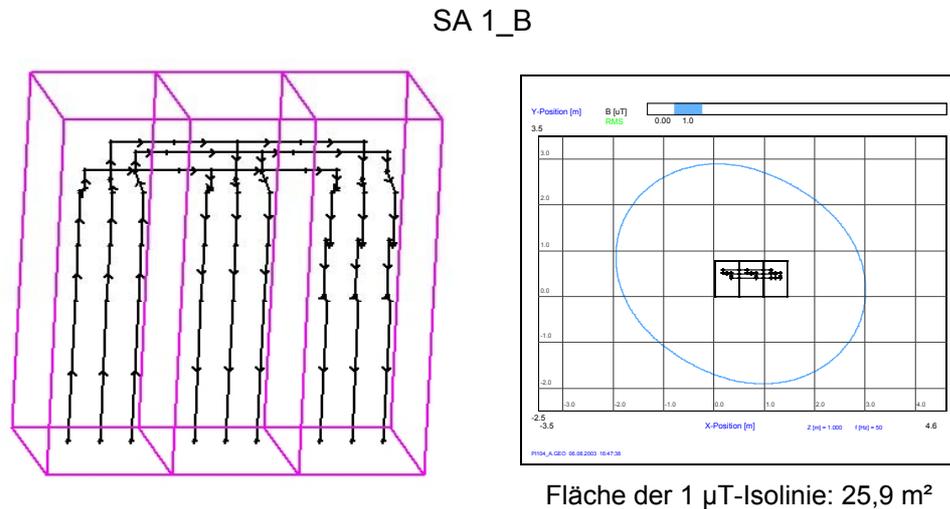
Das magnetische Feld wurde durch die Maßnahme der *Abstandsverringering* zu allen Berechnungsorten hin bedeutend reduziert. Hinsichtlich der Schweizer NISV konnte somit auch die Fläche, welche die 1 µT-Isolinie einschließt, um 34,7 % reduziert werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass es durch die Maßnahme der Abstandsverringering möglich ist, eine sehr starke Reduktion der magnetischen Flussdichte zu allen Berechnungsorten hin zu erreichen. Es sollten somit die Abstände der stromführenden Elemente so weit wie *möglich* verringert werden, bei jedoch gleichzeitiger Einhaltung der für den jeweiligen Anlagentyp gültigen Bestimmungen.

#### b) Anordnung der SS im Dreieck

Abbildung 7.5 zeigt die Anlage SA 1\_B, bei welcher die ebene SS-Anordnung der Anlage SA 1 in eine Dreiecksanordnung überführt wurde. Alle anderen konstruktiven Eigenheiten entsprechen denen der Anlage SA 1. Bei Betrachtung der Abbildung 9.4 im Anhang 9.5 ist zu erkennen, dass das Maximum der magnetischen Flussdichte nur über der Anlage von den Sammelschienen gebildet wird, hinter der Anlage entsteht es durch die Stromschienen. Aus diesem Grund

kann für die Maßnahme der Dreiecksanordnung der SS nur eine deutliche Reduktion der magnetischen Flussdichte über der Anlage erwartet werden. Die nachfolgende Abbildung stellt die modifizierte Anlage unter Angabe der Berechnungsergebnisse dar.



Hinter	Vor	Rechts	Links	Über
163,9 µT	53,4 µT	21,3 µT	124,3 µT	98,7 µT
0,9 %	1,4 %	-1,2 %	-0,7 %	-31,4 %

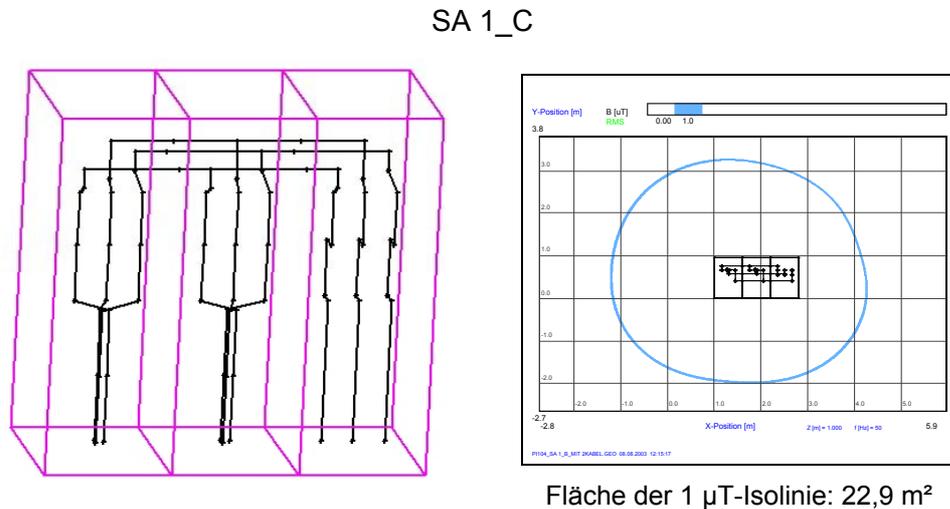
**Abbildung 7.5:** SA 1\_B mit SS-Dreiecksanordnung bei Angabe der prozentualen Differenz der Flussdichte gegenüber SA 1.

Wie erwartet, ist nur über der Anlage eine deutliche Verringerung der magnetischen Flussdichte (-31,4 %) gegenüber der Anlage SA 1 festzustellen. Vor und hinter der Anlage ist sogar eine geringe Zunahme zu verzeichnen. Die Berechnung der Fläche, welche die 1 µT-Isolinie einschließt, zeigt jedoch, dass keine Veränderung zur Anlage SA 1 besteht. Somit ist die Anordnung der SS im Dreieck eine wirksame konstruktive Maßnahme, um das entstehende Magnetfeld über der Schaltanlage zu verringern.

### c) Verwendung von Anschlusskabeln

Um eine weitere Verringerung der magnetischen Flussdichte zu erreichen, werden für die nachfolgende Optimierungsmaßnahme die *Kabelfelder* der Anlage SA 1\_B so modifiziert, dass VPE-Kabel vom Typ N2XSY 6/10 kV 1 • 300/RM 25 für das Einspeise- und Abgangsfeld Verwendung finden. Diese werden direkt am

Lasttrennschalter angeschlossen. In Abbildung 7.6 ist die Anlage SA 1\_C bei Angabe der Berechnungsergebnisse dargestellt.



Hinter	Vor	Rechts	Links	Über
158,6 $\mu\text{T}$	47,0 $\mu\text{T}$	13,5 $\mu\text{T}$	90,0 $\mu\text{T}$	98,7 $\mu\text{T}$
-2,3 %	-10,7 %	-37,5 %	-28,1 %	-31,4 %

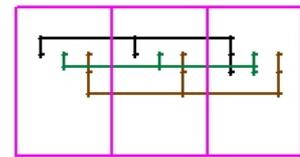
**Abbildung 7.6:** SA 1\_C mit Einspeise- und Abgangskabeln zusätzlich zur Anordnung der SS im Dreieck bei Angabe der prozentualen Differenz der Flussdichte gegenüber SA 1.

Durch die Verwendung von Anschlusskabeln zusätzlich zur Anordnung der SS im Dreieck ist es möglich, das magnetische Feld vor allem zur Vorderseite und den Seitenwänden zu verringern. Somit ist auch die Fläche, welche von der 1  $\mu\text{T}$ -Isolinie eingeschlossen wird, um 11,6 % geringer im Vergleich zur Anlage SA 1. Durch diese Maßnahmen ist für den Berechnungsabstand von 20 cm nur noch für die Rückseite des Schaltfeldes eine Grenzwertüberschreitung zu bemerken.

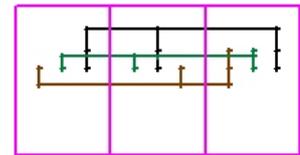
#### d) Änderung der Phasenabnahme

Die Analyse des Maximums der magnetischen Flussdichte hat für die Schaltanlage SA 1 die Rückwand als Ort des Maximums lokalisiert. Aus diesem Grund wird folgend gezeigt, wie sich durch die gezielte Änderung der Phasenabnahme die magnetische Flussdichte zur Rückwand verringern lässt.

Nebenstehende Abbildung zeigt die Anordnung der Strom- und Sammelschienen der Anlage SA 1 und der für diese Optimierungsmaßnahme umkonstruierten Anlage SA 1\_D in der Draufsicht. Auf dem Sammelschienenabschnitt des Einspeise- und Abgangsfeldes fließt der größte Strom. Um eine Verringerung der magnetischen Flussdichte hinter diesen Schaltfeldern zu erreichen, wurde die Länge der Sammelschienen, welche zur Rückwand des Schaltfeldes hin montiert sind, bis zur nächsten Abnahme verkürzt. Durch diese Maßnahme fließt der hohe Einspeisestrom auf einem geringeren Wegstück und bewirkt somit ein geringeres Magnetfeld, wobei jedoch die Reihenfolge der Phasenabnahme innerhalb der einzelnen Schaltfelder durch diese Maßnahme unterschiedlich ist.



SA 1



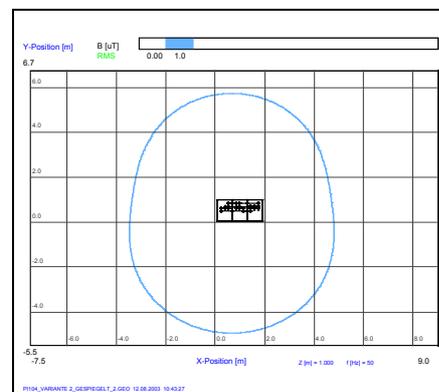
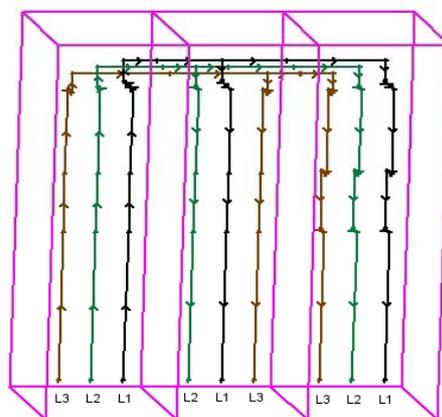
SA 1\_D

**Abbildung 7.7:**

Draufsicht von SA 1 und SA 1\_D

Abbildung 7.8 zeigt die Darstellung der Anlage SA 1\_D bei Angabe der Berechnungsergebnisse sowie der Darstellung der 1  $\mu$ T-Isolinie.

SA 1\_D



Fläche der 1  $\mu$ T-Isolinie: 71,3 m<sup>2</sup>

Hinter	Vor	Rechts	Links	Über
87,1 $\mu$ T	77,8 $\mu$ T	22,2 $\mu$ T	157,1 $\mu$ T	159,1 $\mu$ T
-46,4 %	47,6 %	2,7 %	25,5 %	10,5 %

**Abbildung 7.8:**

SA 1\_D mit geänderter Phasenabnahme bei Angabe der prozentualen Differenz der Flussdichte gegenüber SA 1.

Bei Betrachtung der Berechnungsergebnisse wird deutlich, dass nur hinter der Schaltanlage eine Verringerung der magnetischen Flussdichte erreicht werden

konnte. An allen anderen Berechnungsorten ist zum Teil eine extrem starke Zunahme festzustellen. Daher ist die von der 1  $\mu$ T-Isolinie eingeschlossene Fläche auch um 175,3 % *größer*, als die der Anlage SA 1. Das bedeutet, dass diese Optimierungsmaßnahme nur hinsichtlich der 26. BImSchV einen positiven Effekt haben kann, nicht aber hinsichtlich der Schweizer NISV. Speziell in diesem Beispiel bringt die Verringerung der magnetischen Flussdichte hinter dem Schaltfeld eine sehr starke Erhöhung der selbigen zur linken Seite und über dem Schaltfeld mit sich. Dies kann wiederum zu Grenzwertüberschreitungen führen. Somit ist für die Bewertung und die Anwendung dieser Optimierungsmaßnahme die Unterbringung der Schaltanlage innerhalb der Station maßgebend.

*Durch konstruktive Maßnahmen kann eine Verringerung der magnetischen Flussdichte erreicht werden. Die Realisierbarkeit hängt jedoch von den Schaltanlagenherstellern ab. Im Weiteren werden deshalb Optimierungsmaßnahmen dargestellt, die nicht direkt die Konstruktion verändern.*

### 7.3.2 Aufstellung und Positionierung der Anlage

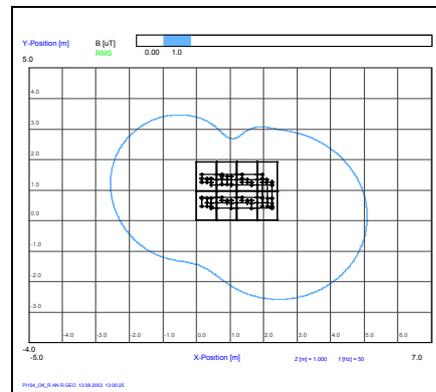
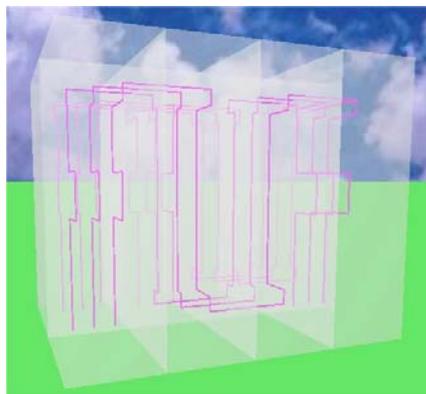
Hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte der 26. BImSchV ist die Abstandsvergrößerung der Schaltanlage zur Stationsbegrenzung die einfachste Methode (z.B. Aufstellung der Anlage in Raummitte). Meist ist es jedoch der Fall, dass nur sehr begrenzte Räumlichkeiten zur Aufstellung der Schaltanlagen zur Verfügung stehen, da wie z.B. in Ortsnetzstationen auch die Unterbringung der NVT und des Transformators realisiert werden muss. Daher sind nachfolgend aufgeführte Maßnahmen zur Aneinanderreihung und Aufstellung der Schaltfelder üblich und sinnvoll, um das entstehende Magnetfeld von vornherein möglichst gering zu halten.

- ⇒ Positionierung der Schaltfelder mit dem größten Abgangsstrom direkt neben der Einspeisung, Felder geringerer Leistung sollen daran anschließen
- ⇒ Symmetrierung des Sammelschienenstromes durch mittige Einspeisung, soweit aufgrund der Zusammenstellung der Anlagenkomponenten die Möglichkeit besteht

⇒ Realisierung der Verbindung zweier gegenüber aufgestellter Schaltfelder mit Kabeln anstatt mit Stromschienen

Für gewöhnlich erfolgt die Aufstellung von Schaltanlagen mit der Rückwand zur Stationsbegrenzung. Im Folgenden werden nun die einzelnen Schaltfelder der Anlage SA 2 mit der Rückwand aneinander aufgestellt. Ziel ist es, das Gesamtmagnetfeld der so aufgestellten Schaltanlage (Abbildung 7.9) zu verringern.

SA 2\_R



Fläche der 1  $\mu\text{T}$ -Isolinie: 34,0  $\text{m}^2$

Hinter	Vor	Rechts	Links	Über
26,4 $\mu\text{T}$	42,3 $\mu\text{T}$	103,7 $\mu\text{T}$	123,9 $\mu\text{T}$	171,1 $\mu\text{T}$
-84,4 %	-14,4 %	84,5 %	-3,3 %	4,5 %

**Abbildung 7.9:** SA 2\_R mit Aufstellung der Schaltfelder mit der Rückseite aneinander bei Angabe der prozentualen Differenz der Flussdichte gegenüber SA 2

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die magnetische Flussdichte zur Rück- und Vorderseite durch diese Aufstellungsvariante erheblich reduziert werden konnte. Weiterhin ist festzustellen, dass die von der 1  $\mu\text{T}$ -Isolinie eingeschlossene Fläche um 38,3 % geringer ist, als die der Anlage SA 2. Somit ist durch diese Aufstellungsart eine deutliche Optimierung hinsichtlich der Schweizer NISV zu verzeichnen.

Nachteilig ist jedoch, dass die Positionierung der Schaltanlage mittig im Raum, oder wenigstens mit einer Seitenwand zur Stationsbegrenzung erfolgen muss, um die Bedienbarkeit zu gewährleisten. Somit ist diese Art der Positionierung nicht in allen Fällen möglich. Ein weiterer Nachteil ist auch die erschwerte Zugänglichkeit zu den einzelnen Anlagenkomponenten aufgrund der Kompaktheit der Anlage.

Vor allem wenn Arbeiten, wie beispielsweise Revisionen, an der Anlage notwendig sind, kann dies einen höheren Zeit- und somit auch Kostenaufwand bedeuten.

*Besteht die Forderung nach geringeren Werten der magnetischen Flussdichte, so ist es durchaus nötig, die derzeit übliche Positionierung und Aufstellung von Schaltanlagen zu modifizieren und die dadurch entstehenden Nachteile, wie z.B. erschwerte Zugänglichkeit, in Kauf zu nehmen.*

### 7.3.3 Schirmung

Ist es durch primäre Maßnahmen nicht möglich, die Einhaltung der Grenzwerte zu gewährleisten, so kann die Sekundärmaßnahme „Schirmung“ angewandt werden, um eine Reduktion der magnetischen Flussdichte durch das Einbringen von Metallplatten zu erreichen. Der Einsatz von Schirmplatten kann vor allem dann sinnvoll sein, wenn das magnetische Feld nur zu einer Seite hin abgeschwächt werden soll. Dies kann der Fall sein, wenn z.B. eine Schaltanlage aus Platzgründen mit der Rückwand zur Stationsbegrenzung aufgestellt werden muss und somit eine Grenzwertüberschreitung eintritt. Hierfür wird am Beispiel einer in der Praxis existierenden Station gezeigt, dass die Maßnahme der Schirmung in diesem speziellen Fall einfach zu realisieren ist und dadurch die Einhaltung des 100  $\mu\text{T}$ -Grenzwertes erreicht wird. In den nachfolgenden Abbildungen sind der Grundriss der Station sowie die komplette Schaltanlage (3D-Ansicht) dargestellt. Die Beschreibung der Stationskomponenten befindet sich im Anhang 9.6.

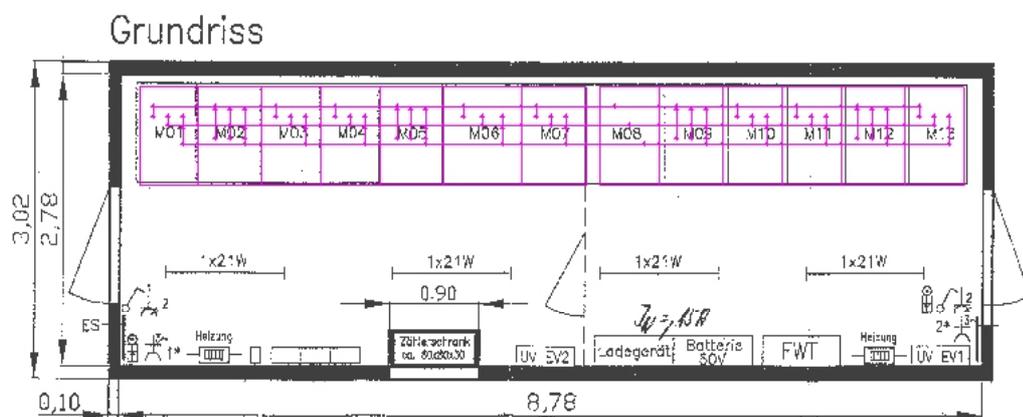


Abbildung 7.10: Stationsgrundriss



**Abbildung 7.11:** 13-feldrige 12 kV-Übergabestation (3D-Ansicht)

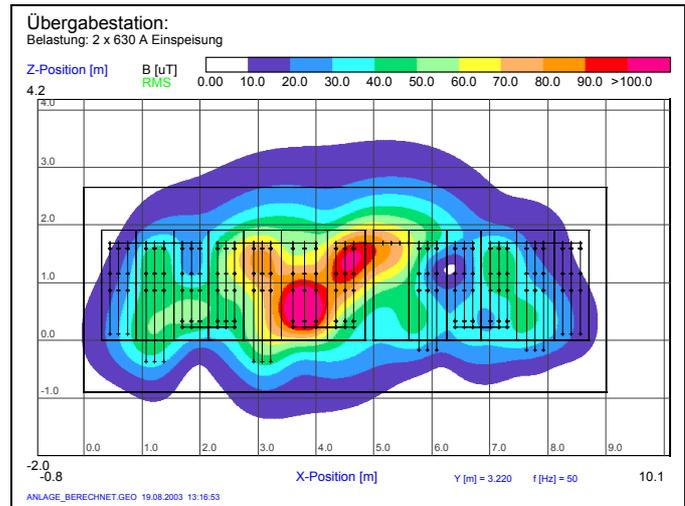
Es handelt sich um eine 12 kV-Übergabestation, mit einer Belastung von max.  $2 \times 315$  A. Hierbei tritt bei keinem Berechnungsort eine Grenzwertüberschreitung auf (siehe Tabelle 9-10 im Anhang 9.6). Heutzutage wird jedoch eine möglichst hohe Auslastung aller Betriebsmittel angestrebt, um höchste Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Daher ist es durchaus denkbar, dass die Anlagenauslastung in Zukunft erhöht wird und es so zu einer Grenzwertüberschreitung kommt. Um diesen Fall darzustellen, erfolgt die Berechnung der magnetischen Flussdichte unter der Annahme einer maximalen Anlagenbelastung von  $2 \times 630$  A und unter Berücksichtigung des Gehäusematerials (Stahlblech) mit einer Dicke von 2 mm. Tabelle 7-2 zeigt die Berechnungsergebnisse der mit  $2 \times 630$  A belasteten Schaltanlage.

**Tabelle 7-2:** Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte der Übergabestation

Magnetische Flussdichte am jeweiligen Berechnungsort im Abstand von 20 cm zur Stationsbegrenzung				
Hinter	Vor	Rechts	Links	Über
123,5 $\mu$ T	3,3 $\mu$ T	7,5 $\mu$ T	9,8 $\mu$ T	32,4 $\mu$ T

Den Berechnungswerten ist zu entnehmen, dass bei einer Anlagenbelastung von  $2 \times 630$  A der Grenzwert von  $100 \mu$ T hinter der *Station* überschritten wird. Die Abbildung 7.12 zeigt die Verteilung der magnetischen Flussdichte hinter der Station.

Anhand nebenstehender Abbildung ist es möglich, das Maximum der magnetischen Flussdichte zu lokalisieren. Es sind zwei Bereiche zu erkennen, bei denen der 100  $\mu\text{T}$ -Grenzwert überschritten wird. Zum einen hinter dem Messfeld (M06), zum anderen hinter dem Übergabefeld (M07). Somit erscheint es sinnvoll, eine Metallplatte hinter M06 und M07 anzubringen um das Magnetfeld zu reduzieren. Für die folgenden



**Abbildung 7.12** Magnetische Flussdichte im Abstand von 20 cm hinter der Station

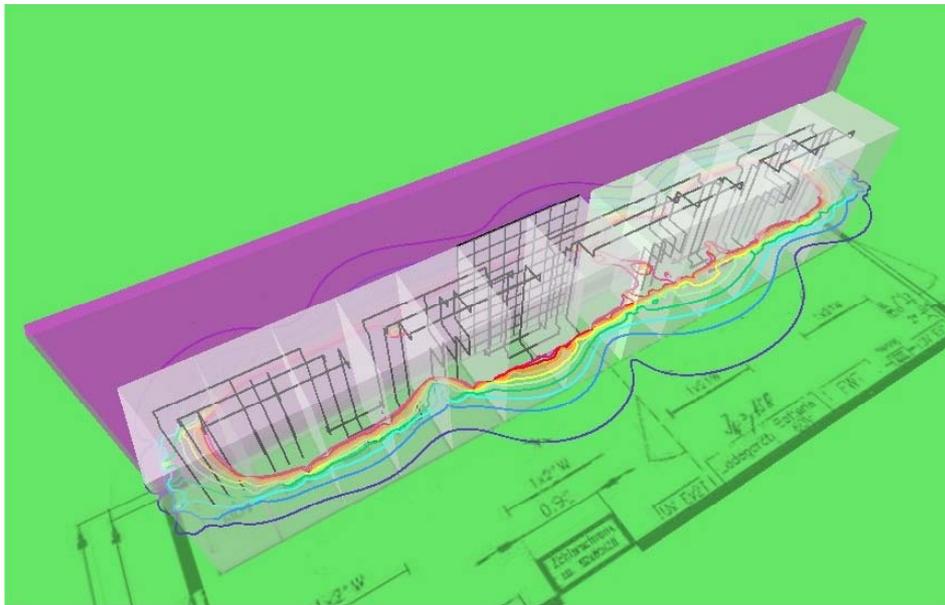
Berechnungen wird eine WinField<sup>®</sup>-Metallplatte aus 10 Segmenten mit einer Maschenweite von 15 cm x 19 cm und damit einer Größe von 1,5 m x 1,9 m konstruiert und hinter dem Mess- und Übergabefeld angebracht. Für die Positionierung der Metallplatte gibt es im vorliegenden Beispiel zwei Varianten. Einmal wird die Platte direkt an der Rückwand der Schaltanlage (Position 1) und andernfalls an der Innenseite der Stationswand (Position 2) angebracht. Für die Metallplatte kommt als Material Stahl oder Aluminium, mit einer Dicke von 1 mm bis 5 mm in 1 mm-Schritten, zum Einsatz. Die Tabelle 7-3 beinhaltet die Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte im Abstand von 20 cm hinter der Übergabestation, welche durch den Einsatz der unterschiedlichen Schirmmaterialien ermittelt wurden. Weiterhin ist die Dämpfung des Magnetfeldes angegeben, welche durch die jeweilig verwendeten Metallplatten erreicht wurde.

**Tabelle 7-3:** Magnetische Flussdichte und Schirmdämpfung der Übergabestation bei Verwendung von Metallplatten aus Stahl bzw. Aluminium

Position	Material Dicke →	Stahl					Aluminium
		1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	1mm
1	B [ $\mu\text{T}$ ]	115,5	107,7	103,3	100,6	99,1	93,8
2		113,9	104,4	99,2	96,4	94,7	87,6
1	a <sub>s</sub> [dB]	0,58	1,19	1,55	1,78	1,91	2,39
2		0,70	1,46	1,90	2,15	2,31	2,98

Die grau hinterlegten Bereiche der Tabelle 7-3 zeigen, durch welche Positionierung der Metallplatte und durch welche verwendeten Materialstärken der 100  $\mu$ T-Grenzwert eingehalten werden kann. Die Betrachtung der Schirmdämpfung macht deutlich, dass die Positionierung der Schirmplatte an der Innenseite der Stationswand günstiger ist, da hier in jedem Fall höhere Dämpfungswerte erreicht werden. Laut Tabelle 7-3 ist es bei Verwendung der Positionierungsvariante 2 notwendig, eine 3 mm St-Platte oder eine 1 mm Al-Platte zu verwenden, um die Einhaltung des Grenzwertes zu erreichen.

Werden auch die Kosten für das Schirmmaterial mit in die Betrachtung einbezogen, so ist es in diesem Fall, trotz des in etwa doppelt so hohen Preises für Al /  $m^3$  günstiger, eine 1 mm Al-Platte zu verwenden. Grund dafür ist der 3-mal größere Materialaufwand bei Verwendung einer 3 mm dicken St-Platte und die damit höheren Kosten im Vergleich zur 1 mm Al-Platte. Abbildung 7.13 stellt die komplette Anlage, unter Angabe der Isolinien der magnetischen Flussdichte im 1 m Höhenschnitt, in der 3D-Ansicht dar. Für die Berechnung und Darstellung wurde eine 1 mm dicke Al-Platte an der Innenseite der Stationswand angebracht.



**Abbildung 7.13:** Isolinien der Übergabestation im 1 m Höhenschnitt bei Verwendung einer 1 mm Al-Platte

## 7.4 Schlussfolgerung

Die Optimierungsmaßnahmen dieses Kapitels haben verschiedene Möglichkeiten zur Reduktion des Magnetfeldes an Schaltanlagen aufgezeigt. Hierbei wurden primäre und sekundäre Maßnahmen vorgestellt. Grundsätzlich sind primäre Maßnahmen zu bevorzugen, da die Sekundärmaßnahme „*Schirmung*“ oftmals mit hohen Kostenaufwendungen verbunden ist. Schirmungsmaßnahmen sind jedoch für bereits bestehende Anlagen oftmals unumgänglich, wenn deren Anlagenauslastung erhöht wird, da hier primäre Maßnahmen nicht mehr möglich sind. Die Untersuchung von konstruktiven Maßnahmen hat gezeigt, dass zum Teil eine große Reduktion der magnetischen Flussdichte erreicht werden kann. Die Realisierbarkeit dieser Maßnahmen liegt jedoch beim Schaltanlagenhersteller. Im Abschnitt 7.3.2 wurde daher eine Schaltanlage dargestellt, die aufgrund ihrer Aufstellung nicht nur eine Verringerung der magnetischen Flussdichte hinsichtlich der 26. BImSchV bewirkt, sondern auch in Hinblick auf die Schweizer NISV.

Die vorgestellten Optimierungsmaßnahmen betreffen nur die MS-Schaltanlagen. Diese werden jedoch meist mit weiteren Komponenten, wie Transformatoren und Niederspannungsverteilungen, in einer Station verbunden und aufgestellt. Aus diesem Grund ist es in der Praxis üblich, nachfolgend aufgeführte Maßnahmen zu berücksichtigen, soweit die Möglichkeiten bestehen:

- ⇒ Realisierung der Verbindungen zwischen den einzelnen Stationskomponenten auf dem Boden und nicht unter der Decke
- ⇒ Verbindung mit Kabeln anstatt mit Stromschienen
- ⇒ Anstreben möglichst kurzer Verbindungen der Komponenten
- ⇒ Aufstellung der MS-Schaltanlage und der NVT möglichst in Raummitte sowie Realisierung der Einspeisung von unten und nicht von oben
- ⇒ Einsatz von EMV-Transformatoren

Durch diese Maßnahmen ist es möglich, das entstehende Magnetfeld der gesamten Station zu verringern.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Analyse verschiedener Schaltfelder zeigte, dass das resultierende magnetische Feld stark von den Strombahnen der Leiter abhängt. Bei der Untersuchung konstruktiver Einzelelemente stellte sich heraus, dass die im Programm WinField® angenommene Genauigkeit der Nachbildung für Magnetfeldberechnungen im Hinblick auf die 26. BImSchV ausreichend ist.

Schaltfelder werden im Allgemeinen mit Hilfe von Stromschienen oder Kabeln eingespeist bzw. verbunden. Bei der Untersuchung stellte sich heraus, dass das Magnetfeld bei der Verwendung von Kabeln deutlich schwächer ist. Die weitere Analyse des Einflusses der Schaltanlagegehäuse und der Sammelschiene-kapselung zeigten, dass beide einen schirmenden Effekt auf das magnetische Feld haben, dessen Größe materialabhängig ist.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurden drei typische MS-Schaltanlagen durch verschiedene primäre sowie sekundäre Maßnahmen verändert, wodurch eine Reduktion der magnetischen Flussdichte erreicht wurde. Hierbei war durch einige Maßnahmen nicht nur eine Optimierung hinsichtlich der 26. BImSchV, sondern auch hinsichtlich der Schweizer NISV, möglich.

Als Schwerpunkte für weitere Untersuchungen bleiben noch die Fragen der Auswirkungen von Doppelsammelschienen in Schaltanlagen auf die magnetische Flussdichte sowie die Beurteilung von Stationen zur Versorgung von Gleichstrombahnen offen.

Abschließend kann gesagt werden, dass es anhand der in dieser Arbeit aufgeführten Optimierungsmaßnahmen möglich ist, die magnetische Flussdichte an MS-Schaltanlagen zu verringern. Einerseits wurden primäre Maßnahmen untersucht, deren konstruktive Realisierbarkeit durch die Schaltanlagenhersteller zu überprüfen ist. Andererseits wurden Möglichkeiten zur Anordnung und Aufstellung der Schaltanlagen innerhalb der Station aufgezeigt, durch welche sich eine deutliche Reduktion des Magnetfeldes erreichen lässt. Weiterhin wurde klar, dass die Sekundärmaßnahme „Schirmung“ in einigen Fällen unumgänglich ist und sinnvoll sein kann, um die Konformität der magnetischen Flussdichte mit den Grenzwerten der 26. BImSchV zu gewähren.

## 9 Anhang

### 9.1 Immissionsgrenzwerte der Schweizer NISV

**Tabelle 9-1:** Immissionsgrenzwerte der Schweizer NISV [20, S. 229]

Frequenz	Immissionsgrenzwert für den Effektivwert der			Mittlungsdauer (Minuten)
	elektrischen Feldstärke $E_{Gf}$ (V/m)	magnetischen Feldstärke $H_{Gf}$ (A/m)	magnetischen Flussdichte $B_{Gf}$ ( $\mu$ 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	$250/f$	$4/f$	$5/f$	
$\Rightarrow$ 50 Hz	5000	80	100	
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	
3-100 kHz	87	5	6,25	
100-150 kHz	87	5	6,25	6
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	6
1-10 MHz	$87/\sqrt{f}$	$0,73/f$	$0,92/f$	6
10-400 MHz	28	0,073	0,092	6
400-2000 MHz	$1,375 \cdot \sqrt{f}$	$0,0037 \cdot \sqrt{f}$	$0,0046 \cdot \sqrt{f}$	6
2-10 GHz	61	0,16	0,20	6
10-300 GHz	61	0,16	0,20	$68/f^{1,05}$

$f$  bedeutet die Frequenz in der in der ersten Tabellenspalte angegebenen Einheit.  
Ist eine Mittlungsdauer festgelegt, werden die Immissionen während der Mittlungsdauer quadratisch gemittelt. Andernfalls ist der höchste Effektivwert maßgebend.

## 9.2 Herstellerliste der untersuchten Schaltfelder

**Tabelle 9-2:** Untersuchte Schaltfeldtypen und zugehörige Hersteller

Hersteller	untersuchte Schaltfeldtypen		
	Abgangsfeld	Leistungsschalterfeld	Trafofeld
ABB	•	•	•
Ernst Elley	•		
GEC Alsthom	•	•	•
Peters&Thieding	•		•
Moeller/F&G	•		•
Wagner	•		•
Driescher	•		•
Natus	•		
Alstom		•	•
Altmann			•
Eltroin			•

## 9.3 Berechnungsergebnisse, Diagramme, Darstellungen zu Kapitel 5

### 9.3.1 Abgangsfelder

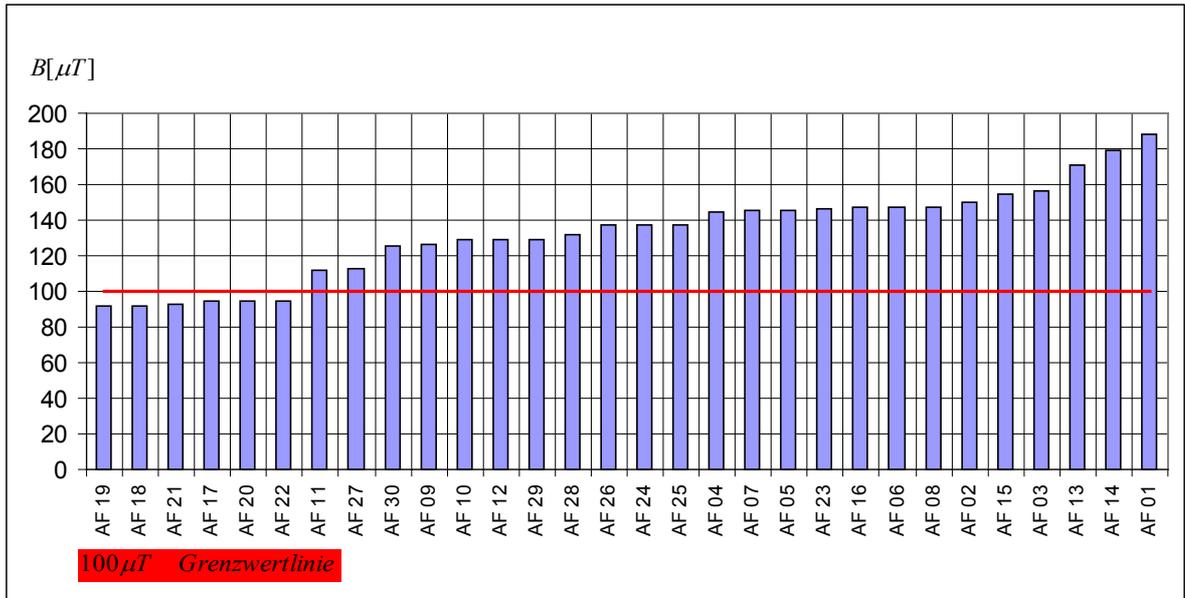
#### Berechnungsergebnisse zu Abschnitt 5.2.1

**Tabelle 9-3:** Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte der untersuchten Abgangsfelder

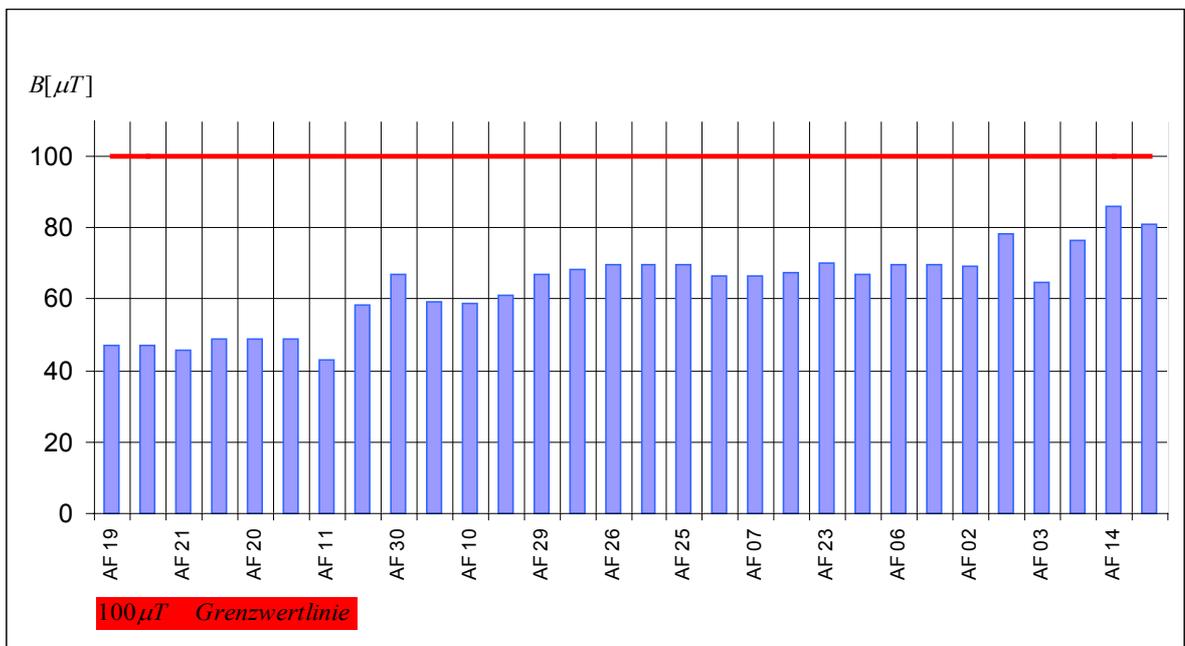
Typ	B [ $\mu$ T]			
	Abstand zur Rückwand		Abstand zur Seitenwand	
	d=20 cm	d=40 cm	d=20 cm	d=40 cm
ABB_ZS8.4_AB2_AS_650x1200	99,5	45,5	128,7	58,7
ABB_ZS8.4_AB2_AS_800x1200	99,6	45,2	91,9	46,9
ABB_ZS8_AB_LT_TK_800x1200	99,6	45,2	92,8	45,9
Ernst Elley ESS_20_1200_K	107,6	60,1	154,6	78,1
ABB_ZS8.4_AB_650x1000	108,1	53,1	126,1	59,3
ABB_ZS8.4_AB1_AS_800x1200	108,1	52,5	91,9	46,9
ABB_ZS1_KABELFELD	123,9	51,7	111,7	43,1
ALSTHOM_PN600_K_600x750	124,3	63,0	147,7	69,9
Ernst Elley ESS_12_600_K	124,8	61,6	145,9	67,5
Peters&Thieding_ZK8_Kabelfeld	126,17	64,3	145,1	66,5
ABB_ZS8.4_AB1_800x1200	129,5	63,1	94,4	48,9
ABB_ZS8_AB_LT_800x1200	129,6	63,1	94,4	48,9
ABB_ZS8_AB_LT_Si_Wa_800x1200	129,6	63,1	94,4	48,9
ABB_ZS8.1_AB1_650x800	130,3	63,5	128,7	61,3
Moeller/F&G_EA10_Kabelfeld	130,5	61,4	156,6	64,9
ABB_ZS8_AB_ES_Wa_600x600	130,7	63,7	144,3	66,5
Wagner_GVP_K_530x710	134,4	65,7	149,8	69,4
DRIESCHER_LDTM_KABELFELD	139,3	69,3	187,9	81,2
ALSTHOM_P1104_K_600x950	142,3	63,0	147,7	69,9
Wagner_GVP_K_LS_670x710	146,8	71,4	170,9	76,7
ALSTHOM_PN600_K_800x985	153,8	79,3	137,6	69,5
ALSTHOM_PN600_K_800x750	154,4	78,5	137,6	69,5
ALSTHOM_P1104_K_800x950	154,4	79,5	137,6	69,6
ABB_ZS8.1_AB_900x1000	155,4	75,1	112,8	58,6
Moeller/F&G_EA20_Kabelfeld	161,8	78,6	147,1	67,1
ALSTHOM_PN600_K_900x985	167,1	87,0	131,7	68,5
NATUS_NES8001_AB	174,9	85,3	146,4	70,1
ALSTHOM_PN600_K_1000x985	179,3	94,5	125,8	67,1
ALSTHOM_P1106_K_1000x1150	179,9	94,7	128,9	67,2
DRIESCHER_LDTM_KABELFELD	187,3	96,5	179,0	85,8

### Diagramme zu Abschnitt 5.2.1

Diagramme der Maximalwerte der auftretenden magnetischen Flussdichten der untersuchten Abgangsfelder zur Seitenwand.

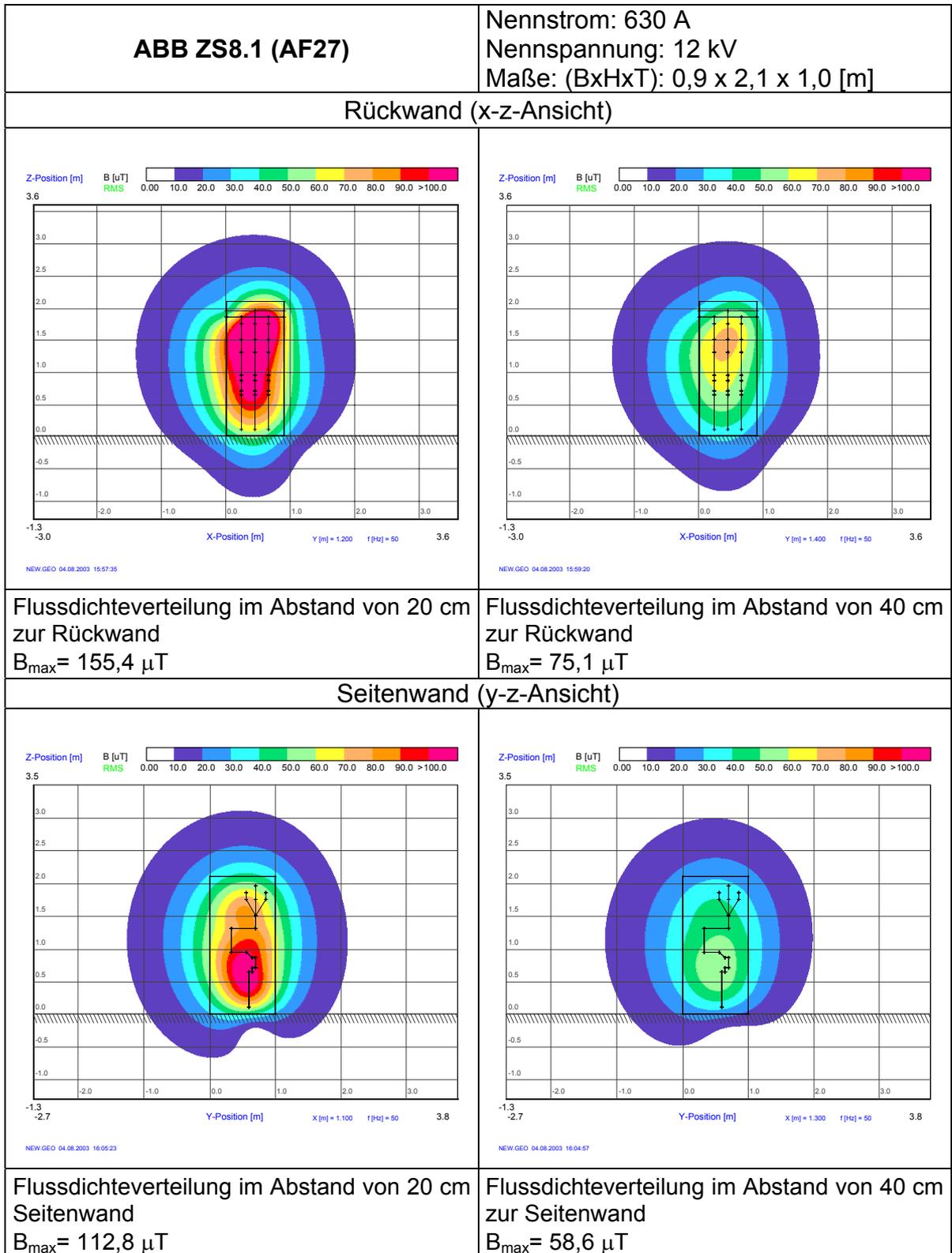


**Diagramm 9.1:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Abgangsfelder im Abstand von 20 cm zur Seitenwand



**Diagramm 9.2:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Abgangsfelder im Abstand von 40 cm zur Seitenwand

Darstellung der magnetischen Flussdichte am Beispiel von AF27 (Abschnitt 5.2.1)



**Abbildung 9.1:** Technische Daten und Darstellung der magnetischen Flussdichteverteilung am Beispiel des Abganzfeldes AF 27.

### 9.3.2 Leistungsschalterfelder

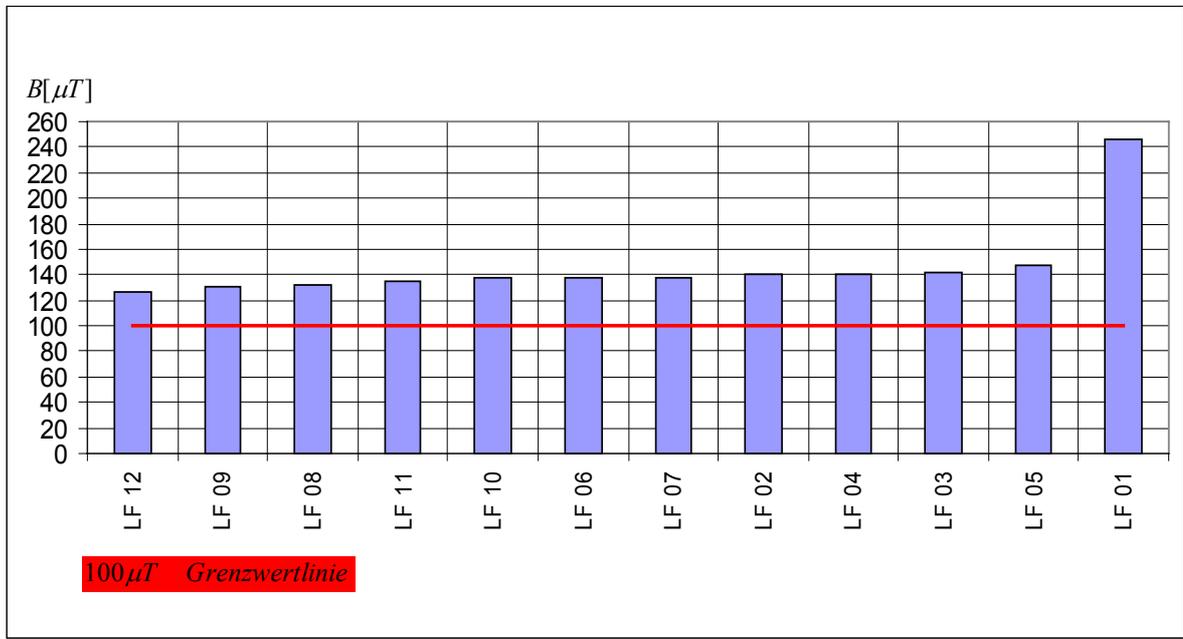
#### Berechnungsergebnisse zu Abschnitt 5.2.2

**Tabelle 9-4:** Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte der untersuchten Leistungsschalterfelder

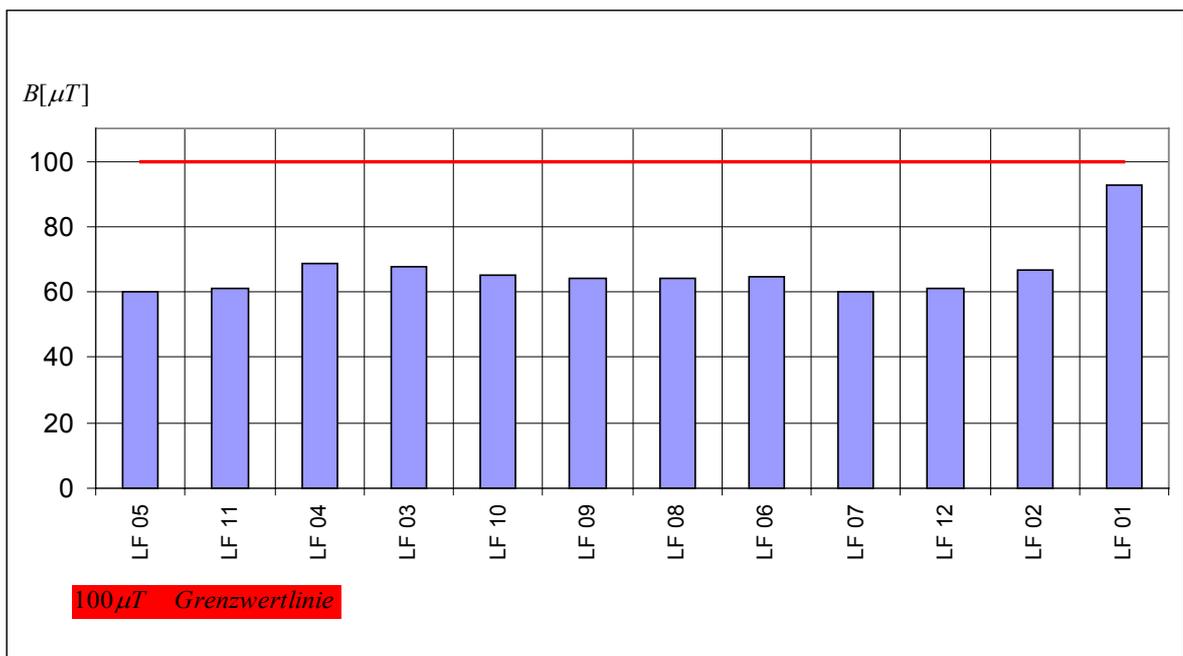
Typ	B [ $\mu$ T]			
	Abstand zur Rückwand		Abstand zur Seitenwand	
	d=20 cm	d=40 cm	d=20 cm	d=40 cm
ALSTOM WBD 12kV 600 LS	53,4	29,3	146,9	66,8
ALSTOM WBD 12kV 800 LS	67,3	37,4	135,5	67,6
ALSTOM WBB 12kV 600 LS	133,4	66,8	141,1	60,2
ALSTOM WBA 12kV 600 LS	133,8	67,2	141,3	60,9
ALSTOM WBB 12kV 800 LS	151,3	77,6	137,0	65,4
ALSTOM WBA 12kV 800 LS	152,0	78,4	130,1	61,3
ALSTHOM_PN600_LS_650x750	155,8	76,8	132,5	69,0
ALSTHOM_PN600_LS_600x750	155,9	76,9	137,5	64,0
ALSTHOM_PI104_LS_600x950	156,0	76,9	137,5	64,0
ALSTHOM_PN600_LS_800x750	189,8	95,4	127,0	60,1
ABB ZX0_LS_600x1100	208,0	81,7	140,9	64,6
ABB ZX0_LS_400x850	208,9	82,1	245,8	92,5

### Diagramme zu Abschnitt 5.2.2

Diagramme der Maximalwerte der auftretenden magnetischen Flussdichten der untersuchten Leistungsschalterfelder zur Seitenwand.

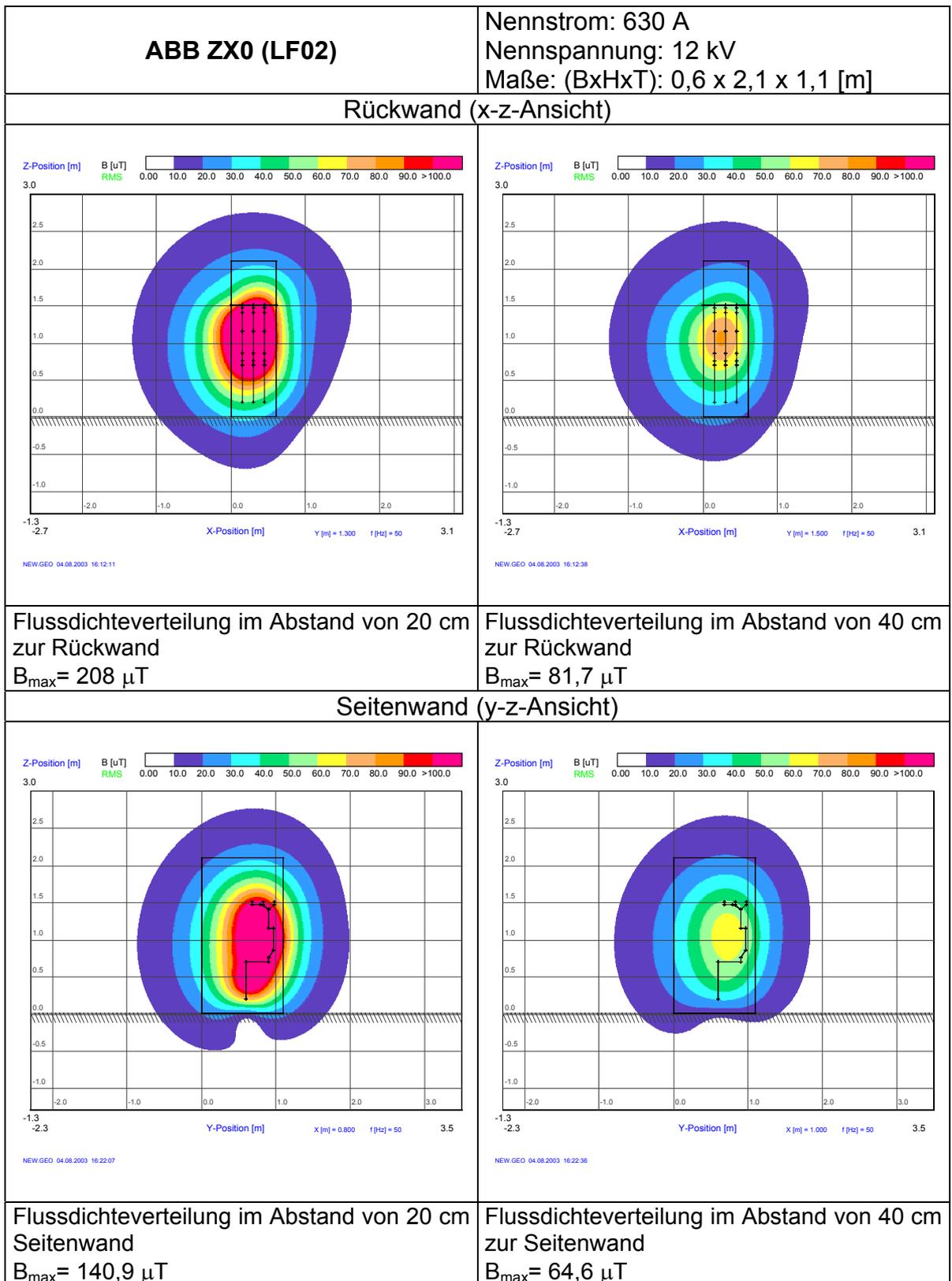


**Diagramm 9.3:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Leistungsschalterfelder im Abstand von 20 cm zur Seitenwand



**Diagramm 9.4:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Leistungsschalterfelder im Abstand von 40 cm zur Seitenwand

Darstellung der magnetischen Flussdichte am Beispiel von LF02 (Abschnitt 5.2.2)



**Abbildung 9.2:** Technische Daten und Darstellung der magnetischen Flussdichteverteilung am Beispiel des Leistungsschalterfeldes LF 02.

### 9.3.3 Trafofelder

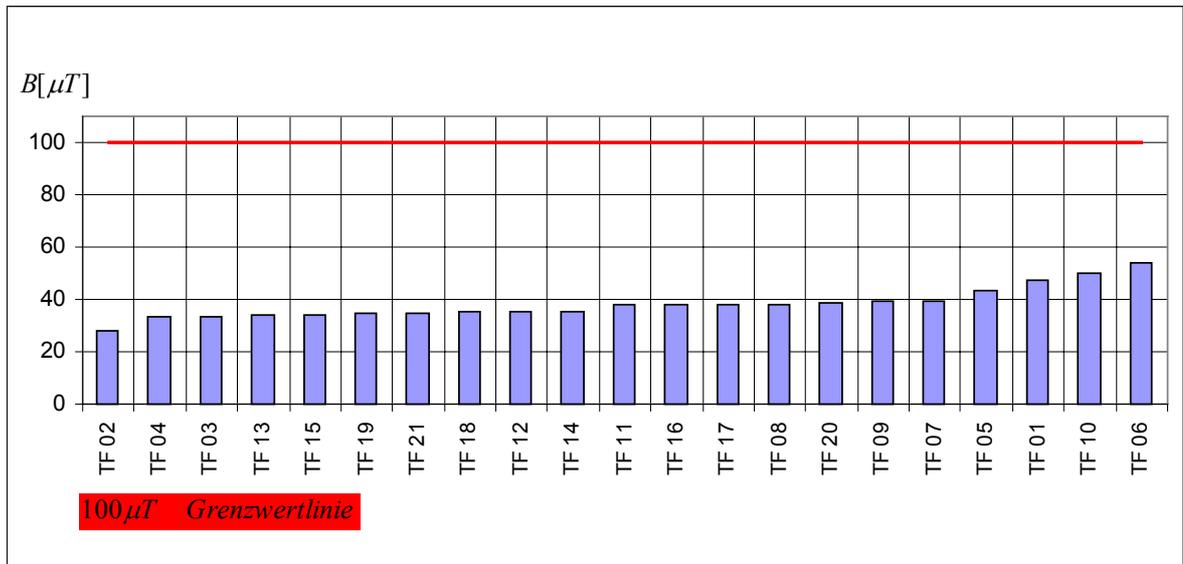
#### Berechnungsergebnisse zu Abschnitt 5.2.3

**Tabelle 9-5:** Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte der untersuchten Trafofelder

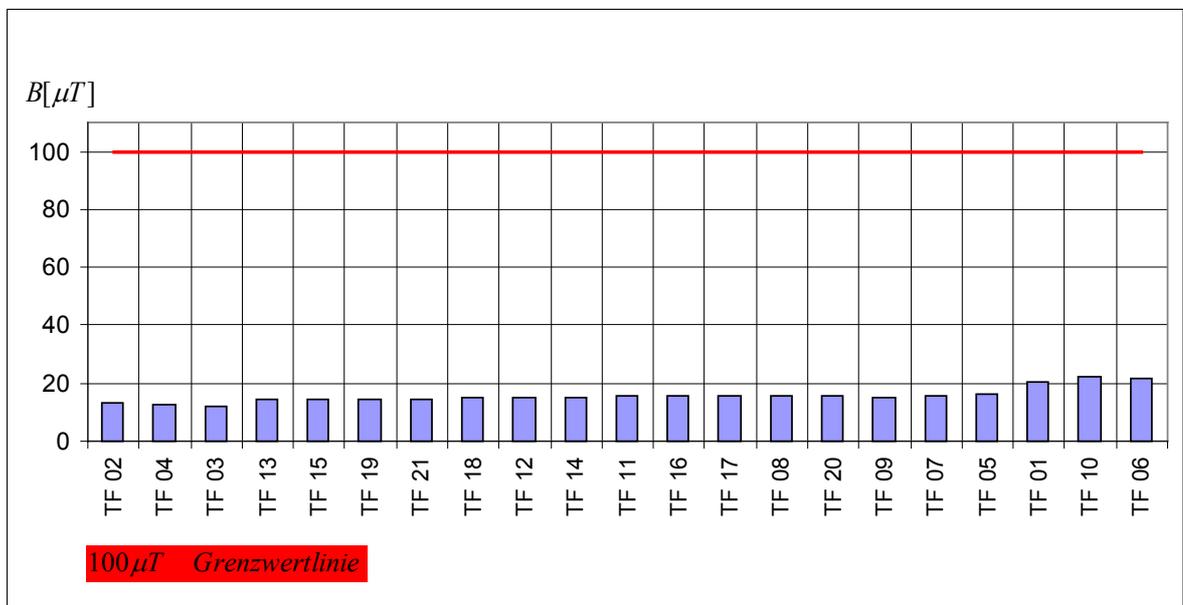
Typ	B [ $\mu$ T]			
	Abstand zur Rückwand		Abstand zur Seitenwand	
	d=20 cm	d=40 cm	d=20 cm	d=40 cm
ALSTOM Visax S Trafofeld	11,6	7,1	28,3	13,2
EV_Halle_CSIM_20_500_Trafo	17,6	10,6	49,8	22,2
ALSTHOM_PI104_T_600x950	20,9	10,8	37,7	15,4
ALSTHOM_PN600_T_600x750	20,9	10,8	37,7	15,4
Peters&Thieding_ZK8_Trafofeld	22,6	11,2	39,2	15,1
Wagner_GVP_T_530x710	23,0	11,3	38,6	15,4
Altmann 20.0/20.R TR	23,5	11,1	33,6	12,6
Altmann 20.0/20.R TR mit LS	23,6	11,6	33,6	12,3
Moeller/F&G_EA10_Trafofeld	23,7	11,2	39,3	15,6
DRIESCHER LDTM TRAFOFELD	24,7	12,2	43,4	16,2
ALSTHOM_PI104_T_800x950	25,9	13,6	35,6	15,0
ALSTHOM_PI106_T_800x1150	25,9	13,6	35,6	15,0
ALSTHOM_PN600_T_800x750	25,9	13,6	37,7	15,4
ALSTHOM_PN600_T_800x985	25,9	13,6	35,4	15,0
ALSTHOM_PN600_T_900x985	28,1	14,8	34,6	14,7
Wagner_GVP_T_670x710	28,5	13,8	35,0	14,3
Moeller/F&G_EA20_Trafofeld	29,4	14,2	37,8	15,7
ALSTHOM_PN600_T_1000x985	30,2	16,1	34,1	14,5
ALSTHOM_PI106_T_1000x1150	30,3	16,2	34,0	14,5
ABB ZS1 TRAFOFELD	31,5	15,2	47,2	20,3
Eltroin GSAII Trafoschaltfeld	48,1	20,7	53,7	21,7

### Diagramme zu Abschnitt 5.2.3

Diagramme der Maximalwerte der auftretenden magnetischen Flussdichten der untersuchten Trafofelder zur Seitenwand.

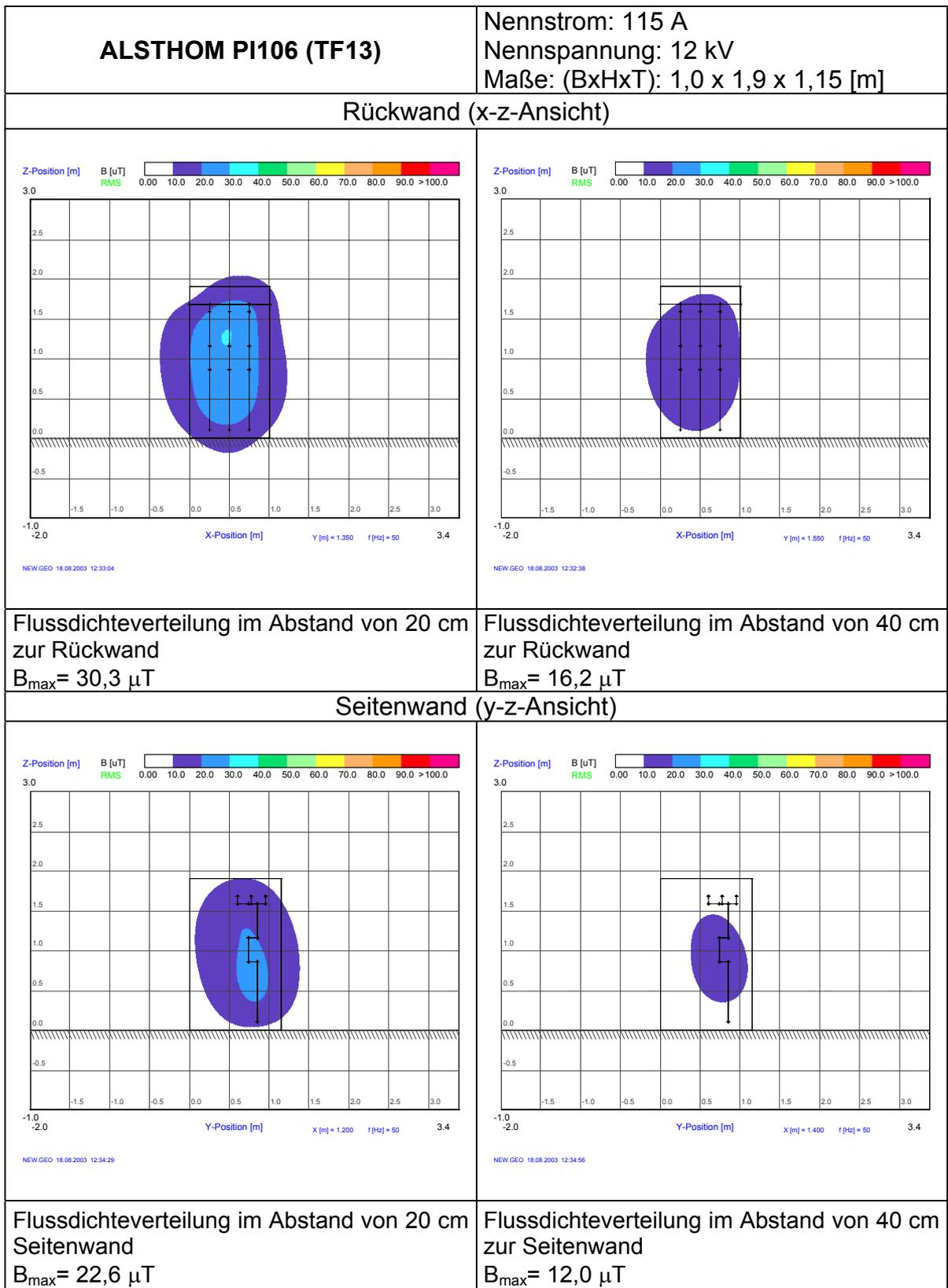


**Diagramm 9.5:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Trafofelder im Abstand von 20 cm zur Seitenwand



**Diagramm 9.6:** Magnetische Flussdichte typischer MS-Trafofelder im Abstand von 40 cm zur Seitenwand

Darstellung der magnetischen Flussdichte am Beispiel von TF13 (Abschnitt 5.2.3)



**Abbildung 9.3:** Technische Daten und Darstellung der magnetischen Flussdichteverteilung am Beispiel des Trafefeldes TF 13.

## 9.4 Berechnungsergebnisse zu Kapitel 6

**Tabelle 9-6:** Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte für eine Rund- und Rechteckleiteranordnung

d [cm]	x-z-Ebene			x-y-Ebene			x-z-Ebene		
	B [ $\mu$ T]		Fehler	B [ $\mu$ T]		Fehler	B [ $\mu$ T]		Fehler
	○	□	[%]	○	□	[%]	○	□	[%]
5	873,1	964,9	9,5	1294,1	1200,8	-7,8	329,4	311,1	-5,9
10	379,1	394,3	3,9	568	548,4	-3,6	147,9	144,8	-2,1
15	216,4	220,9	2,0	297,4	290,2	-2,5	80,9	79,5	-1,8
20	139,3	141,2	1,3	172,2	169,2	-1,8	49,1	48,5	-1,2
25	95,8	96,8	1,0	107,4	106	-1,3	32,2	31,9	-0,9
30	68,8	69,4	0,9	70,8	70,1	-1,0	22,4	22,3	-0,4
35	51,1	51,4	0,6	48,9	48,5	-0,8	16,3	16,2	-0,6
40	38,8	39	0,5	35	34,8	-0,6	12,3	12,2	-0,8

**Tabelle 9-7:** Berechnung der magnetischen Flussdichte mit und ohne Einspeisekabel

Berechnungsort	ohne Einspeisekabel		mit Einspeisekabel		Unterschied [%]	
	B [ $\mu$ T]		B [ $\mu$ T]			
	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm	20 cm	40 cm
Links	142,9	62,8	119,2	55,7	-16,6	-11,3
Rechts	142,0	66,0	138,1	61,2	-2,7	-7,3
Hinten	154,2	79,4	167,8	90,1	8,8	13,5
Vorn	67,3	40,8	74,5	46,1	10,7	13,0

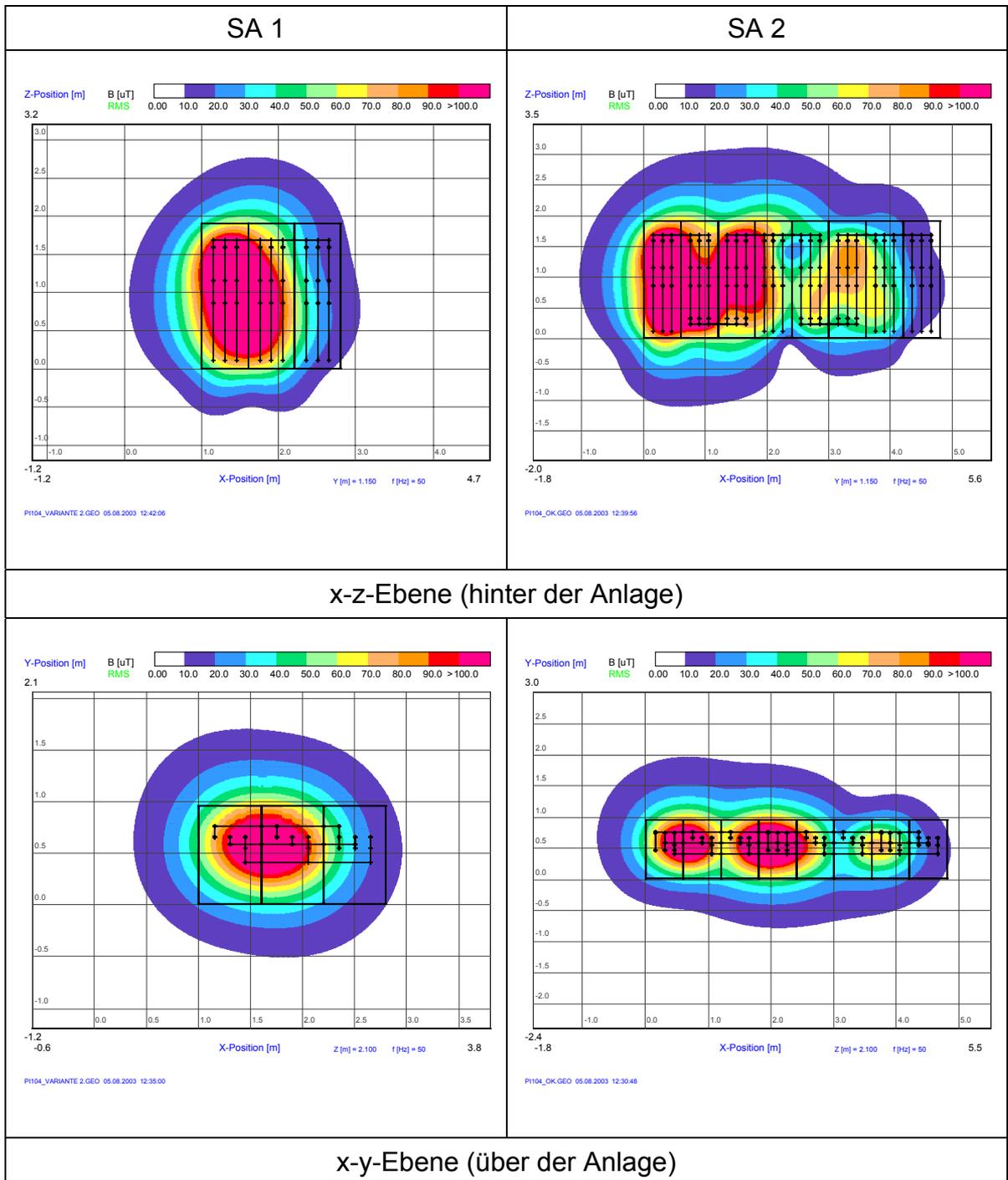
**Tabelle 9-8:** Schirmfaktor und Dämpfung in Abhängigkeit von Gehäusematerialart und Materialdicke

d [mm]	Stahlgehäuse				Aluminiumgehäuse			
	B [ $\mu$ T]	B <sub>Diff</sub> [ $\mu$ T]	S	a <sub>s</sub> [dB]	B [ $\mu$ T]	B <sub>Diff</sub> [ $\mu$ T]	S	a <sub>s</sub> [dB]
0	144,35	0	1,00	0,00	144,35	0	1,00	0,00
1	128,89	15,46	1,12	0,98	83,64	60,71	1,73	4,74
2	107,42	36,92	1,34	2,57	62,88	81,47	2,30	7,22
3	93,65	50,70	1,54	3,76	54,17	90,18	2,66	8,51
4	85,33	59,02	1,69	4,57	49,96	94,39	2,89	9,22
5	79,90	64,45	1,81	5,14	47,32	97,03	3,05	9,69

**Tabelle 9-9:** Schirmfaktor und Dämpfung in Abhängigkeit von Materialart und Materialdicke der SS-Kapselung

d [mm]	Stahl-SS-Kapselung				Aluminium-SS-Kapselung			
	B [ $\mu$ T]	B <sub>Diff</sub> [ $\mu$ T]	S	a <sub>s</sub> [dB]	B [ $\mu$ T]	B <sub>Diff</sub> [ $\mu$ T]	S	a <sub>s</sub> [dB]
0	144,35	0	1,00	0,00	144,35	0	1,00	0,00
1	131,71	12,64	1,10	0,80	86,95	57,40	1,66	4,40
2	112,79	31,56	1,28	2,14	67,24	77,11	2,15	6,64
3	99,66	44,69	1,45	3,22	61,86	82,49	2,33	7,36
4	91,38	52,96	1,58	3,97	59,90	84,45	2,41	7,64
5	86,13	58,21	1,68	4,48	58,84	85,51	2,45	7,80

### 9.5 Darstellungen zu Kapitel 7



**Abbildung 9.4:** Lokales Maximum der magnetischen Flussdichte im Berechnungsabstand von 20 cm

## 9.6 12 kV-Übergabestation

Stationskomponenten:

Die 13-feldrige 12 kV-Schaltanlage besteht aus luftisolierten Schaltfeldern der Firma Alstom, Baureihe PI104. Für die Felder M02, M05, M07, M09 und M12 werden Schaltfelder mit Leistungsschalter verwendet. Alle anderen sind mit einem Lasttrennschalter ausgestattet. Der Bemessungsstrom der Schaltfelder beträgt 630 A.

M01-Kupplung	M06-Messung	M10-Kupplung
M02-Einspeisung	M07-Übergabe	M11-Hochführung
M03/04-Kupplung	M08-Spannungsmessung	M12-Abgang
M05-Einspeisung	M09-Abgang	M13-Kupplung

Abmessung der Station: 8,98 x 2,64 x 3,02 m

Belastung: max. 2 x 315 A Einspeisung

Tabelle 9-8 zeigt die Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte bei Belastung der Anlage mit max. 2 x 315 A und unter Berücksichtigung des Gehäusematerials.

**Tabelle 9-10:** Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte der Übergabestation

Magnetische Flussdichte am jeweiligen Berechnungsort im Abstand von 20 cm zur Stationsbegrenzung				
Hinter	Vor	Rechts	Links	Über
61,7 $\mu$ T	1,7 $\mu$ T	3,7 $\mu$ T	4,9 $\mu$ T	16,2 $\mu$ T

---

## Literaturverzeichnis

- [1] von Weiss, Alexander: *Die elektromagnetischen Felder*, Vieweg-Verlag, Braunschweig-Wiesbaden 1983
- [2] Schwab, Adolf, J.: *Begriffswelt der Feldtheorie*, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1998
- [3] Kost, Arnulf: *Numerische Methoden in der Berechnung elektromagnetischer Felder*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1994
- [4] Lehner, Günther: *Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker*, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1996
- [5] Lindner, H.: *Physik für Ingenieure*, 16. Auflage, Fachbuchverlag, Leipzig 2001
- [6] Philippow, E.: *Grundlagen der Elektrotechnik*, 10. Auflage, Verlag Technik, Berlin 2000
- [7] WinField<sup>®</sup> - *Electric and Magnetic Field Calculation*, FGEU mbH 1994-2003, (R) WinField is a registered trademark of FGEU mbH
- [8] Schwab, Adolf, J.: *Elektromagnetische Verträglichkeit*, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 1991
- [9] Kaden, H.: *Wirbelströme und Schirmung in der Nachrichtentechnik*, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1959
- [10] VAC Vacuumschmelze GmbH, Firmenschrift: *Magnetische Abschirmungen FS-M 9*, Hanau 1988
- [11] Habiger, Ernst: *Handbuch Elektromagnetische Verträglichkeit*, 2. Auflage, Verlag Technik GmbH, Berlin-München 1992

- 
- [12] Knies, Wilfried; Schierack, Klaus: *Elektrische Anlagentechnik*, Hanser-Verlag, München-Wien 1991
- [13] Lehrbriefe für das Hochschulfernstudium: *Elektroenergiesysteme 4. Lehrbrief*, 2. Auflage, Zwickau 1984
- [14] HÜTTE e.V., Hosemann G.: *Elektrische Energietechnik Band 3 Netze*, Springer-Verlag, Berlin 1988
- [15] ABB-Taschenbuch (Asea Brown Boveri Taschenbuch): *Schaltanlagen*, 9. Auflage, Cornelsen Verlag 1992
- [16] o.V. Kundenkatalog: *ZX0 Gasisolierte Mittelspannungs-Schaltanlagen*, Fa. ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH
- [17] *26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes* (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV), Bundesgesetzblatt Jahrgang 1996 Teil I Nr. 66. ausgegeben zu Bonn am 20. Dezember 1996
- [18] *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder* (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung), Entwurf des LAI-AK.; 15. September 1997
- [19] Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik (BGFE): *Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit* (BGV B11 – Unfallverhütungsvorschrift für elektromagnetische Felder), ausgegeben zu Bonn am 7. Mai 2001
- [20] *Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung* (NISV), der Schweizerische Bundesrat, 23. Dezember 1999
- [21] Hadrian, W.; *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 115. Jg. (1998), H. 9 „Entfernungsgesetze in der Energietechnik“

- [22] Kupke, Stephan; Diplomarbeit: *Optimierung der magnetischen Flussdichte an Netzstationen*, FGEU mbH, Berlin 1999
- [23] Faesing, Markus; Diplomarbeit: *Magnetische Flussdichte an Niederspannungsverteilungen*, FGEU mbH, Berlin 2000
- [24] Genz, Daniel; Diplomarbeit: *Magnetische Flussdichte an Kabeltrassen der elektrischen Energieversorgung*, FGEU mbH, Berlin 1999
- [25] o.V. Kundenkatalog: *ZS8 Luftisolierte Mittelspannungs-Schaltanlagen*, Fa. ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH
- [26] o.V. Kundenkatalog: *Mittelspannungs-Schaltanlagen HR 10 N 12 kV, 630A, 350 MVA*, Fa. HORLEMANN
- [27] o.V. Kundenkatalog: *Mittelspannungs-Schaltanlage WBB bis 12 kV*, Fa. ALSTOM

---

## Selbstständigkeitserklärung

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

Berlin, den 16.10.2003

Thomas Kretschmer