

Magnetische Flußdichte an Niederspannungsverteilungen

Diplomarbeit

im Studiengang Elektrische Energietechnik

an der

Fachhochschule für Technik
und Wirtschaft

vorgelegt von

Markus Faesing

Berlin, 30.08.2000

Berlin 2000, © Copyright FGEU mbH.

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

Die Diplomarbeit ist nur den Korrektoren sowie den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Diagrammverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	IX
<u>1 Einleitung</u>	<u>1</u>
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Grenzwerte	2
1.3 Das Simulationsprogramm	5
<u>2 Grundlagen der Meßtechnik</u>	<u>6</u>
2.1 Physikalische Meßprinzipien	6
2.1.1 Induktionsspule	7
2.1.2 Flux-Gate-Sensor	8
2.1.3 Optisches Pumpen	9
2.1.4 Atomkern-Sensor	11
2.1.5 SQUID-Sensor	12
2.1.6 Hall-Sensor	14
2.1.7 Feldplatte	16
2.1.8 Magnetdiode	16
2.1.9 Magnettransistor	18
2.1.10 Lichtwellen-Sensor	19
2.2 Meßgeräte	20
2.2.1 EM Field Analyzer EFA 3	20
2.2.2 Digitales Teslameter FM 210	22
<u>3 Anwendung von Niederspannungsverteilungen</u>	<u>23</u>
3.1 Allgemeine Einsatzgebiete von NS-Verteilungen	23
3.2 Die Niederspannungsverteilung Typ ELEK	25

4 Analyse verschiedener Verteilungen	29
4.1 Grundlagen der Untersuchung	29
4.2 Auswertung und Datendarstellung	31
4.3 Schlußfolgerung	37
5 Einflußfaktoren auf die Flußdichteverteilung	38
5.1 Komponenten und Geräte	38
5.1.1 Stromschienen	38
5.1.2 Leistungsschalter	48
5.1.3 Sicherungen	53
5.1.4 Montageplatte und Gehäuse	58
5.1.4.1 Gehäuse	62
5.1.4.2 3 x 2 m Metallplatte	63
5.1.4.3 1 x 1 m Metallplatte	65
5.1.4.4 Monetärer Vergleich der Abschirmungen	67
5.1.5 Kabelabgang	70
5.2 Betriebszustände	72
5.2.1 Ungleichmäßige Lastverteilung	72
5.2.2 Unsymmetrische Phasenbelastung	78
5.2.2.1 Unsymmetrische Belastung der Einspeisung	78
5.2.2.2 Unsymmetrische Belastung der Abgangskabel	85
6 Betrachtung von ausgewählten Optimierungsmaßnahmen	88
7 Beispiel der Optimierung einer modernen NS-Anlage	96
8 Zusammenfassung	99
Anhang	X
Literaturverzeichnis	XXIII

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
GaAs	Galliumarsenid
InSb	Indiumantimonid
InAs	Indiumarsenid
LS	Leistungsschalter
MS	Mittelspannung
NH	Niederspannung-Hochleistung
NS	Niederspannung
NiSb	Nickelantimonid
NVT	Niederspannungsverteilung
OPV	Operationsverstärker
oG	obere Grenze
pM	Punktmessung
PTSK	Partiell typgeprüfte Schaltgerätekombination
Si	Silizium
SI	Sicherung
St	Stahl
TSK	Typgeprüfte Schaltgerätekombination
uG	untere Grenze

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Grundriß eines Raumes für eine Netzstation.....	4
Abbildung 2.1 Prinzipieller Aufbau der Suchspule	7
Abbildung 2.2 Schematischer Aufbau zum optischen Pumpen	10
Abbildung 2.3 Energieniveauschema.....	10
Abbildung 2.4 Schematische Darstellung des SQUID-Sensors	13
Abbildung 2.5 Entstehung der Hallspannung.....	14
Abbildung 2.6 Feldplatte	16
Abbildung 2.7 Aufbau der Magnetdiode.....	17
Abbildung 2.8 Aufbau des Magnettransistors	18
Abbildung 2.9 Beschaltung des Magnettransistors mit einem OPV	18
Abbildung 2.10 Lichtwellensensor.....	19
Abbildung 2.11 Unterschied zwischen Punkt- und Flächenmessung	21
Abbildung 3.1 Übersichtsschaltplan einer NS-Schaltanlage.....	23
Abbildung 3.2 NS-Verteilung Typ ELEK.....	25
Abbildung 3.3 Transformatoreinspeisefeld vom Typ ELEK	26
Abbildung 3.3 Abgangsfeld vom Typ ELEK.....	26
Abbildung 4.1 Beispiel einer NS-Verteilung in WinField	29
Abbildung 5.1 Isolinien der magn. Flußdichte um einen rechteckigen Leiter	40
Abbildung 5.2 Drei unterschiedliche Leiterformen	41
Abbildung 5.3 Vergleich zwischen Rundleiter und Stromschiene.....	43
Abbildung 5.4 Nachbildung einer Stromschiene durch mehrere Rundleiter	46
Abbildung 5.5 Strombahn eines Leistungsschalters	49
Abbildung 5.6 NVT 21 mit eingebautem Leistungsschalter	50
Abbildung 5.7 Strombahn einer Sicherungsleiste	54
Abbildung 5.8 NVT 21 mit eingebauter Sicherungsleiste	56
Abbildung 5.9 Ablenkung der Feldlinien durch Abschirmung	58
Abbildung 5.10 Reduktion des Magnetfeldes durch Wirbelströme	60
Abbildung 5.11 NVT 21	62
Abbildung 5.12 NVT 21 mit 3 x 2 m Metallplatte als Abschirmung	64
Abbildung 5.13 NVT 21 mit 1 x 1 m Metallplatte als Abschirmung	66
Abbildung 5.14 NVT 21 mit nummerierten Abgängen	73
Abbildung 5.15 NS-Verteilung mit Belastung des ersten bzw. letzten Abgangs	74
Abbildung 5.16 NS-Verteilung mit unterschiedlich belasteten Abgängen.....	77
Abbildung 5.17 NVT 21 mit unsymmetrischen Eingangsströmen.....	79
Abbildung 5.18 Feldverteilung bei unsymmetrischen Eingangsströmen	82
Abbildung 5.19 NS-Verteilung mit ungleichmäßig belasteten Phasen	84
Abbildung 6.1 NVT 21 mit LS und SI-Leisten	89

Abbildung 6.2 NVT 21 mit Leitungen in der Einspeisung	90
Abbildung 6.3 NVT 21 mit mittiger Einspeisung.....	91
Abbildung 6.4 NVT 21 mit mittiger Einspeisung und Kabeln	92
Abbildung 6.5 NVT 21 mit vorder- und rückseitigen Abgängen.....	93
Abbildung 6.6 NVT 21 mit beidseitigen Abgängen und mittiger Einspeisung.....	94
Abbildung 6.7 NVT 21 mit eingezeichneten Isolinien.....	95
Abbildung 7.1 "alte" Bewag-Standardverteilung	96
Abbildung 7.2 "neue" Bewag-Standardverteilung	97

Diagrammverzeichnis

Diagramm 2.1	Empfindlichkeit verschiedener Sensortypen	6
Diagramm 2.2	Hystereseschleife	8
Diagramm 4.1	Vergleich von B_{max} 20 cm vor den Verteilungen	32
Diagramm 4.2	Vergleich von B_{max} 20 cm hinter den Verteilungen	32
Diagramm 4.3	Vergleich von B_{max} 20 cm an der linken Seite der Verteilungen	32
Diagramm 4.4	Vergleich von B_{max} 20 cm an der rechten Seite der Verteilungen.....	32
Diagramm 4.5	Vergleich von B_{max} 40 cm vor den Verteilungen	36
Diagramm 4.6	Vergleich von B_{max} 40 cm hinter den Verteilungen	36
Diagramm 4.7	Vergleich von B_{max} 40 cm an der linken Seite der Verteilungen	36
Diagramm 4.8	Vergleich von B_{max} 40 cm an der rechten Seite der Verteilungen.....	36
Diagramm 5.1	Feldstärkeverlauf im Querschnitt eines Leiters	39
Diagramm 5.2	Vergleich zwischen Linienleiter und Stromschiene	43
Diagramm 5.3	Proz. Abweichung zwischen Linienleiter und Stromschiene	43
Diagramm 5.4	Proz. Differenz zwischen Linienleiter und Stromschiene	44
Diagramm 5.5	Absolute Diff. mehrerer Leiter, die eine Stromschiene nachbilden	45
Diagramm 5.6	Proz. Diff. mehrerer Leiter, die eine Stromschiene nachbilden.....	46
Diagramm 5.7	Permeabilität μ als Funktion von B	59
Diagramm 5.8	Dämpfung des Magnetfeldes durch Metallgehäuse	63
Diagramm 5.9	Dämpfung des Magnetfeldes durch 3 x 2 m Metallplatte	65
Diagramm 5.10	Dämpfung des Magnetfeldes durch 1 x 1 m Metallplatte	66
Diagramm 5.11	Dämpfung des Magnetfeldes als Funktion des Materials	68
Diagramm 5.12	Dämpfung des Magnetfeldes als Funktion des Materialpreises	68
Diagramm 5.13	Magn. Flußdichte als Funktion der Kabellängen.....	70
Diagramm 5.14	NVT 21 mit jeweils nur einem belasteten Abgang	73
Diagramm 5.15	Abschalten der Abgänge von links nach rechts	75
Diagramm 5.16	Abschalten der Abgänge von rechts nach links	76
Diagramm 5.17	Feldstärkenquotient.....	81
Diagramm 5.18	Unsymmetrische Ströme in den Einspeisekabeln	82
Diagramm 5.19	Unsymmetrische Ströme in den Abgangskabeln	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1	Grenzwerte der 26. BImSchV	2
Tabelle 2.1	Frequenzbereiche des Meßgerätes EFA3	20
Tabelle 2.2	Meßfehler des Meßgerätes EFA3	21
Tabelle 2.3	Differenz zwischen Punkt und Flächenmessung	22
Tabelle 5.1	Flußdichte oberhalb einer Strombahn eines LS.....	50
Tabelle 5.2	Flußdichte einer NS-Verteilung mit LS.....	51
Tabelle 5.3	NH-Sicherungsgrößen.....	54
Tabelle 5.4	Flußdichte von SI-Leisten.....	55
Tabelle 5.5	Flußdichte einer NS-Verteilung mit SI-Leiste	57
Tabelle 5.6	Eindringtiefe magn. Felder in St und Al.....	61
Tabelle 5.7	Phasen, deren Ströme ungleichmäßig belastet werden	86

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m^2
a	Abstand zwischen zwei Phasen	m
a_s	Schirmdämpfung	dB
B	magnetische Flußdichte	T, Vs/m ²
d	Dicke	m
δ	Eindringtiefe	m
E	elektrisches Feld	V/m
f	Frequenz	Hz
H	magnetische Feldstärke	A/m
I	Strom	A
K_H	Hallkonstante	m ³ /C, m ³ /As
κ	spez. Leitfähigkeit	m/Ωmm ² , MS/m
n	Anzahl	
N	Windungsanzahl	
p	Reduktionsfaktor	%
ϕ	magnetischer Fluß	Wb, Vs
r	Abstand vom Leitermittelpunkt	m
r_0	Radius eines Leiters	m
S	Scheinleistung	VA
s	Wegstrecke	m
t	Zeit	s
U	Spannung	V
U_H	Hallspannung	V
u_{ind}	Induktionsspannung	V
μ	Permeabilität	Vs/Am
μ_0	magnetische Feldkonstante	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am
μ_r	Permeabilitätszahl	

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Seit dem 1. Januar 1997 sind Energieanlagen ab einer Betriebsspannung von 1000 V konform zur 26. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) zu errichten und zu betreiben. Einen Großteil dieser Anlagen bilden Netzstationen, die bereits in einer Vorgängerarbeit untersucht wurden¹, wobei festgestellt wurde, daß gerade die Niederspannungsverteilungen innerhalb der Netzstationen die maßgeblichen Quellen für magnetische Felder sind. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die einzelnen Komponenten einer Niederspannungsverteilung genauer zu untersuchen und die felderzeugenden Elemente im Detail zu ermitteln. Am Schluß dieser Arbeit wird sich herausstellen, daß eine Optimierung dieser Elemente möglich ist und die magnetische Flußdichte der Verteilung erheblich reduziert werden kann.

Die Grundlage dieser Arbeit bildet hierzu eine Analyse der Flußdichteverteilung verschiedener Niederspannungsverteilungen, anhand derer nachgewiesen wird, daß eine genauere Betrachtung der Niederspannungsverteilungen vorgenommen werden muß.

Die Untersuchungen werden mit dem Programm WinField der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH durchgeführt. Die angegebenen Werte für die magnetische Flußdichte beruhen auf Berechnungen dieses Programms. Eine Überprüfung der Ergebnisse durch Messungen ist nicht vorgesehen. Um aber auch Aussagen über realistische Anlagen zuzulassen, befaßt sich ein großer Teil dieser Arbeit mit der Frage, wie detailliert die einzelnen Komponenten einer Niederspannungsverteilung nachgebildet werden müssen, um die Flußdichteverteilung an realen Anlagen nachzuvollziehen.

Zur Herstellung des Praxisbezugs wird in dieser Arbeit abschließend eine Niederspannungsverteilung mit allen Betriebsmitteln vorgestellt, und Optimierungsmaßnahmen an weiteren Niederspannungsverteilungen erläutert.

¹ vgl. **Kupke**

1.2 Grenzwerte

Seit dem 01. Januar 1997 ist die 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) in Kraft. Die Verordnung enthält Anforderungen zum Schutz von Personen vor schädlichen Umwelteinwirkungen elektrischer und magnetischer Felder durch Nieder- und Hochfrequenzanlagen. Folgende Grenzwerte werden für Niederfrequenzanlagen mit dieser Verordnung festgelegt²:

	Effektivwert der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flußdichte	
	elektrische Feldstärke E [kV/m]	magnetische Flußdichte B [μ T]
50 Hz – Felder	5	100
16 2/3 Hz – Felder	10	300

Tabelle 1.1: Grenzwerte der 26. BImSchV

Diese Grenzwerte sind durch die 26. BImSchV noch an einige Einschränkungen gebunden. Die Erläuterungen zu diesen Einschränkungen sind in verschiedenen Dokumenten aufgeführt^{3,4}. Es soll im weiteren auf einzelne Besonderheiten eingegangen werden, die sich auf Netzstationen beziehen und häufig zu Mißverständnissen führen:

- *Beschränkung auf ortsfeste Anlagen.*
Mobile Umspannanlagen sind nicht automatisch ausgenommen, weil diese auch über einen längeren Zeitraum an einem Ort stehen können.
- *Beschränkung auf Anlagen >1000 V.*
Bei Elektromspspannanlagen ist die Niederspannungsverteilung ein Bestandteil der Anlage, obwohl die Spannung auf der NS-Seite häufig nur 400 V beträgt.
- *Beschränkung auf Orte die nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt sind.*
Die Grenzwerte sind nur an Orten einzuhalten, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt bestimmt sind. An Orten, an denen dagegen die Verweilzeit einzelner Personen in der Regel gering ist, wie z.B. Gänge, Flure, Treppenhäuser u.ä. ist es nicht erforderlich die Grenzwerte einzuhalten.
- *Die Überprüfung einer Anlage erfolgt bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung.*
Die höchste betriebliche Anlagenauslastung muß nicht unbedingt durch der Nennstrom des Transformators gegeben sein. In einigen Fällen können die Leitungen der Umspannstation nur einen geringeren Strom tragen, so daß der Nennstrom der Leitung

² vgl. **26. BImSchV**

³ vgl. **Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder** S.2 f.

⁴ vgl. **VDEW** S.3 f.

zu Grunde gelegt werden kann. Auch durch die Auswahl der Sicherungen oder durch die Einstellung anderer Überwachungseinrichtungen kann der maximal mögliche Betriebsstrom herabgesetzt werden.

➤ *Die Grenzwerte dürfen kurzzeitig und kleinräumig überschritten werden.*

Eine kurzzeitige Überschreitung der Grenzwerte von elektrischen und magnetischen Feldern ist erlaubt, wenn diese Überschreitung nicht größer als 100% ist und nicht länger als 5% eines Tages (d.h. 1h und 12min) vorliegt. Eine kleinräumige Überschreitung gilt nur für elektrische Felder.

➤ *Die Grenzwerte müssen innerhalb eines maßgebenden Immissionsortes eingehalten werden.*

Die Überschneidung eines Ortes, der nicht nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Personen bestimmt ist, mit dem Einwirkungsbereich einer Anlage wird als maßgebender Immissionsort bezeichnet. Der Einwirkungsbereich ist ein Bereich, in dem eine Anlage einen signifikanten sich von der Hintergrundbelastung abhebenden Immissionsbeitrag verursacht. Zur Vereinfachung wird der Einwirkungsbereich einer Netzstation auf 1 m um die Station begrenzt.

Zur Beurteilung einer Anlage ist eine Bezugsebene im Abstand von 20 cm von der berührbaren und zugänglichen Oberfläche anzunehmen. Innerhalb dieser Bezugsebene müssen die Grenzwerte eingehalten werden. Der Abstand von der Niederspannungsverteilung zur Bezugsebene ist aber häufig größer als 20 cm, weil die Verteilung meistens in einem geschlossenen Raum steht und die Wandstärke des Raumes zu den 20 cm addiert werden muß.

Abbildung 1.1 zeigt den Grundriß eines Raumes, in dem eine Netzstation aufgestellt werden soll. Die rote Linie stellt die Bezugsebene dar. Außerhalb dieser Linie liegen maßgebende Immissionsorte in denen die Grenzwerte der 26. BImSchV eingehalten werden müssen.

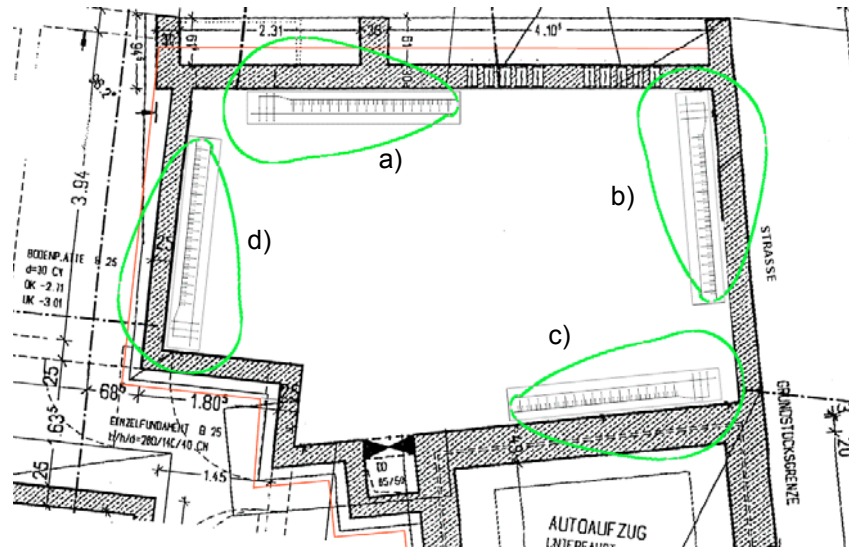


Abbildung 1.1: Grundriß eines Raumes für eine Netzstation. Außerhalb der roten Linie müssen die Grenzwerte eingehalten werden. Die Niederspannungsverteilungen sind mit Positionsnummern gekennzeichnet. Um jede Verteilung ist die 100 μT Isolinie als grüne Linie eingezeichnet.

Im Kapitel 6 "Betrachtung von ausgewählten Optimierungsmaßnahmen" wird empfohlen von jeder Niederspannungsverteilung ein Diagramm anzufertigen, in dem die Isolinien der entsprechenden Grenzwerte eingetragen sind. Mit Hilfe dieses Diagramms kann man dann die Anlage so aufstellen, daß die Grenzwerte in einem maßgebenden Immissionsort nicht überschritten werden. Für den Raum in Abbildung 1.1 wurde diese Vorgehensweise exemplarisch durchgeführt. Eine Niederspannungsverteilung wurde an vier verschiedenen Positionen im Raum aufgestellt. Mit der eingezeichneten 100 μT Isolinie kann festgestellt werden, an welcher Position eine Aufstellung möglich ist. Die Positionen a) und d) sind ungünstig, weil dort die grüne Isolinie die rote Bezugsebene schneidet und somit der Grenzwert in dem maßgebenden Bezugsort überschritten wird. Es ist besser, die Niederspannungsverteilung an den Positionen b) und c) aufzustellen, weil die angrenzende Straße und der Autoaufzug keinen maßgebenden Immissionsort darstellen. Die Grenzwerte der 26. BImSchV von 100 μT und 5 kV/m müssen hier also nicht eingehalten werden.

Es müssen in dem Raum aber auch die anderen Anlagenteile, wie die MS-Schaltanlage und der Transformator, aufgestellt und deren Einhaltung der Grenzwerte nachgewiesen werden. Weil aber die Ströme und damit auch die Flußdichten dieser Komponenten geringer sind als bei NS-Verteilungen, ist die Einhaltung der Grenzwerte häufig leichter zu erfüllen.

1.3 Das Simulationsprogramm

Das Windows-Programm WinField wurde entwickelt, um quasistationäre, elektrische und magnetische Felder an Einrichtungen der Energieversorgung zu berechnen. Die Berechnung erfolgt nach dem Gesetz von Biot-Savart, wobei die felderzeugenden Elemente zu fadenförmigen Leitern reduziert werden. Es lassen sich damit zylinderförmige Elemente exakt berechnen. Bei Elementen die eine andere Form haben, werden die Felder näherungsweise berechnet.

Die Konstruktion einer Anlage erfolgt, ähnlich einem CAD-Programm, mit einem Editor in einem kartesischen Koordinatensystem. Es ist hierbei möglich, die einzelnen Komponenten einer Netzstation (wie z.B. NS-Verteilung, MS-Schaltanlage und Transformator) getrennt voneinander zu erstellen und in Bibliotheken zu speichern.

Dadurch stehen die Komponenten übersichtlich geordnet zur Verfügung und man kann sie beliebig zur Erstellung eigener Netzstationen kombinieren. Es besteht die Möglichkeit auf bereits bestehende Bibliotheken zurückzugreifen, eigene Bibliotheken anzulegen oder zu erweitern.

In den mitgelieferten Bibliotheken befinden sich vorgefertigte Komponenten von verschiedenen Anlagenherstellern. Mit diesen Komponenten kann man sehr einfach eine Netzstation erstellen, ohne vorher die einzelnen Anlagenteile zu konstruieren. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, sich sehr schnell in das Programm einzuarbeiten, weil man mit Hilfe der vorgefertigten Komponenten gute Beispiele für fertige Anlagenteile hat. Weitere Beispiele und Anleitungen zur Konstruktion von Anlagen hält das Tutorial bereit. Man bekommt mit diesem Tutorial sehr schnell einen Einstieg in WinField, so daß man schon nach kurzer Zeit eigene Netzstationen, Freileitungen, Erdkabel oder auch Streckenführungen der Bahn konstruieren und berechnen kann.

Die Berechnung der magnetischen Flußdichte oder der elektrischen Feldstärke erfolgt in einer frei wählbaren Ebene, die parallel zur konstruierten Anlage liegt. In dieser Ebene werden mit Hilfe verschiedener Farben die Bereiche der unterschiedlichen Flußdichten oder Feldstärken gekennzeichnet.

Der Vorteil der den Ausschlag für den Einsatz des Simulationsprogramms im Rahmen dieser Arbeit gab, ist die Möglichkeit, innerhalb kürzester Zeit eine Vielzahl von Varianten zu vergleichen. Dieses kann geschehen ohne einen experimentellen Aufbau, wie bei einer Messung, realisieren oder konkrete konstruktive Änderungen an Niederspannungsverteilungen vornehmen zu müssen.

2 Grundlagen der Meßtechnik

2.1 Physikalische Meßprinzipien

Dieses Kapitel befaßt sich mit den grundlegenden physikalischen Meßprinzipien zur Erfassung magnetischer Felder. Die Prinzipien sind der IEEE-Publikation von James E. Lenz entnommen⁵ und beruhen auf theoretischen Erkenntnissen, von denen lediglich einige als Laboraufbau realisiert wurden. In der Praxis spielen diese Verfahren bei der Magnetfeldmessung nur eine untergeordnete Rolle.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die in diesem Kapitel genannten Sensoren deshalb ausschließlich schematisch, hinsichtlich ihrer Wirkungsweise, vorgestellt und erklärt. Auf die Herleitung der Formeln wird weitestgehend verzichtet. In der Praxis sind nur einige Meßverfahren relevant. Diese Meßverfahren werden in den heutigen Meßgeräten verwendet und werden im nachfolgenden Kapitel 2.2 "Meßgeräte" detailliert erläutert.

Das Diagramm 2.1 stellt eine Übersicht der aufgeführten Meßverfahren dar und zeigt, in welchen Empfindlichkeitsbereichen die einzelnen Sensoren einsetzbar sind.

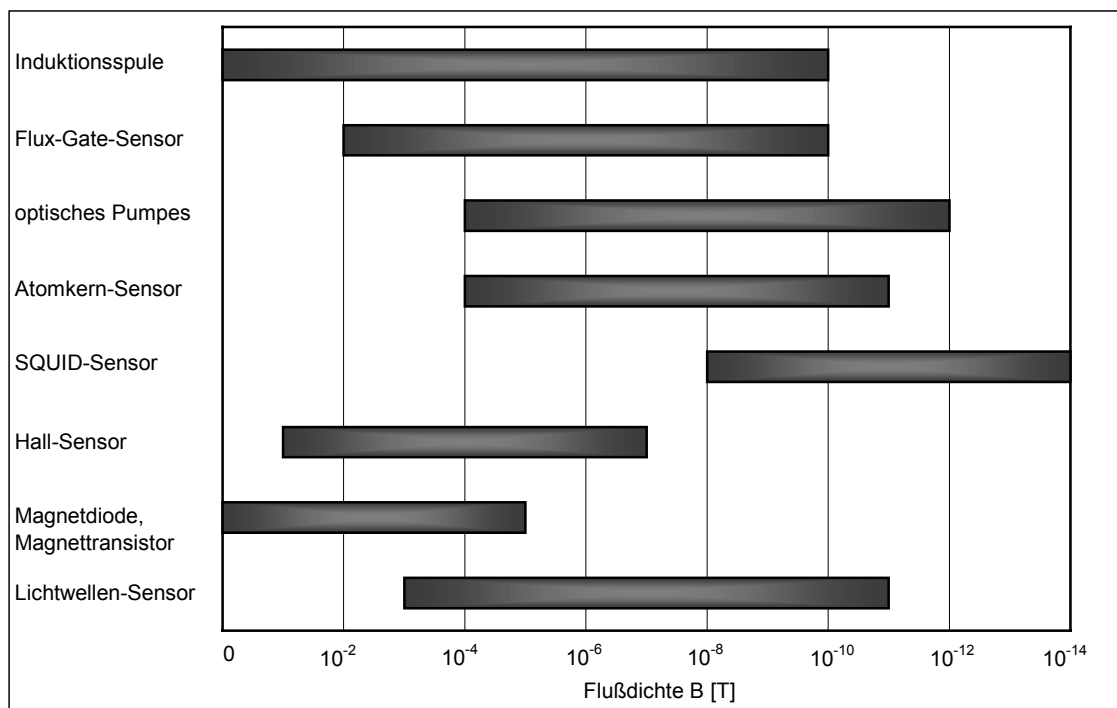


Diagramm 2.1 : Empfindlichkeitsbereiche verschiedener Sensortypen⁶

⁵ vgl. Lenz S. 973 f

⁶ vgl. Lenz S. 974

2.1.1 Induktionsspule

Die Funktionsweise der Induktionsspule beruht auf dem Prinzip der Ruheinduktion. Ein Leiter wird fest in einem Magnetfeld positioniert. Wird nun die magnetische Flußdichte verändert, d.h. eine Änderung des magnetischen Flusses pro Flächenelement verursacht, wird im Leiter eine Spannung induziert, die aufgrund der Impedanz des Leiters einen Stromfluß im Leiter zur Folge hat.

Nachfolgende Abbildung stellt den prinzipiellen Aufbau der Induktionsspule dar:

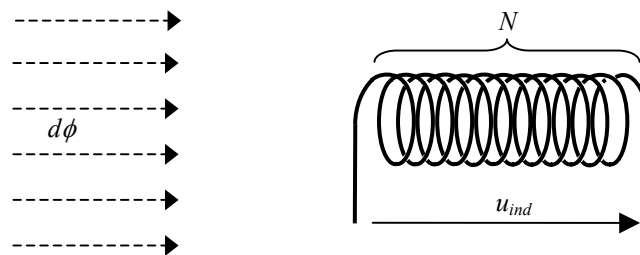


Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau der Suchspule

Wie das Induktionsgesetz nach Gleichung 2.1 ausdrückt, hängt die induzierte Spannung der Induktionsspule von der Windungszahl des Leiters und der Frequenz des Magnetfeldes ab:

$$u_{ind} = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Gleichung 2.1}$$

mit:

- u_{ind} - Induktionsspannung [V]
- N - Anzahl der Spulenwindungen
- $d\Phi$ - magnetische Flußänderung [Vs]
- dt - Zeitdifferenz [s]

Der Empfindlichkeitsbereich von aktuellen Sonden beginnt bei ca. 10^{-10} T und hat keine obere Grenze. Im hochfrequenten Bereich wird die Induktionsspule als Rahmenantenne bezeichnet und hat einen Frequenzbereich bis >1 GHz. Die untere Frequenzgrenze hat nur eine theoretische Bedeutung, weil die induzierte Spannung reziprok zur Frequenz ist. Damit ist bei niedrigen Frequenzen und konstanter Windungszahl ebenfalls die Spannung klein.

Zur Erhöhung der Empfindlichkeit kann man in die Spule einen Eisen- oder Ferritkern einbringen, der aufgrund seiner Permeabilität die induzierte Spannung verstärkt. Der Eisenkern verringert aber damit den Frequenzbereich auf ca. ≤ 1 MHz.

2.1.2 Flux-Gate-Sensor

Der Flux-Gate-Sensor besteht aus einem Kern mit ferromagnetischem Material, um den eine Erzeuger- und eine Meßspule gewickelt sind. Der Sensor nutzt dabei zwei Effekte aus. Zum einen ist dies die magnetische Induktion und zum anderen die Hysterese des magnetischen Materials.

Die Hystereseschleife (Diagramm 2.2) stellt den Zusammenhang zwischen der magnetische Feldstärke H und der magnetischen Flußdichte B dar.

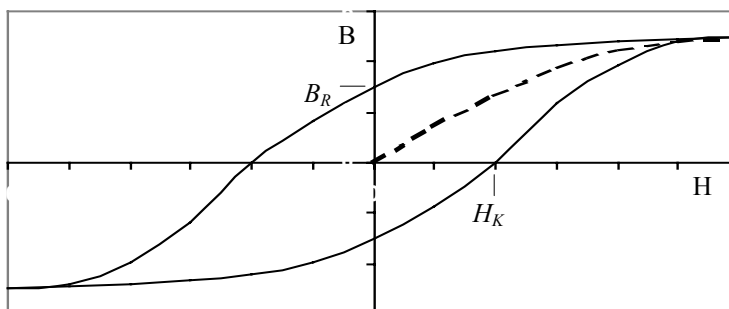


Diagramm 2.2:

Zusammenhang zwischen Feldstärke H und Flußdichte B . In der Hystereseschleife sind die Remanenzflußdichte B_R und die Koerzitivfeldstärke H_K eingezeichnet.

Beim Einbringen eines ferromagnetisches Materials in ein Magnetfeld, nimmt die magnetische Flußdichte mit der Feldstärke zu. Der Funktionsverlauf ist im Diagramm 2.2 als gestrichelte Linie dargestellt. Dieser Verlauf wird als Neukurve bezeichnet, weil das Material vorher noch nicht magnetisiert wurde. Ab einer bestimmten Feldstärke nimmt die Flußdichte nicht mehr überproportional zu und die Anwesenheit des Materials hat auf die Zunahme der Flußdichte keinen Einfluß mehr. In diesem Punkt ist das Material magnetisch gesättigt.

Bei Abnahme der Feldstärke durchläuft die Flußdichte die Neukurve nicht in umgekehrter Richtung, sondern sie verläuft oberhalb der Neukurve, so daß bei einer Feldstärke von 0 A/m daß Material teilweise magnetisiert bleibt. Die verbleibende Flußdichte wird als Remanenzflußdichte B_R bezeichnet. Um diese Flußdichte aufzuheben, muß das Material entgegengesetzt magnetisiert werden. Bei einer Flußdichte von 0 T liegt die Koerzitivfeldstärke H_K vor. Eine weitere Erhöhung der Feldstärke in diese Richtung führt wieder zur Sättigung des Materials, diesmal aber bei umgedrehter Feldstärke. Die Werte für die Remanenzflußdichte B_R und die Koerzitivfeldstärke H_K sind materialabhängig und bestimmen den Einsatzbereich des Materials.

Die Fläche innerhalb der Hysteresekurve stellt die Verluste dar, die aufgrund der Ummagnetisierung in Wärme umgewandelt werden. Für einen Sensor ist es daher besser, ein Material einzusetzen, welches kleine Werte für die Remanenzflußdichte und die Koerzitivfeldstärke aufweist, wodurch die Hysteresekurve schmal erscheint.

Der Flux-Gate-Sensor besteht aus zwei Spulen, die um einen ferromagnetischen Kern gewickelt sind. Ein Strom durch die Erzeugerspule bewirkt hierbei eine Magnetisierung des

Kerns. Bei Wechselstrom durchläuft die Magnetisierungskurve die Hystereseschleife während einer Periode, wobei in jeder Stromhalbwelle das Material ummagnetisiert wird. Ab einem bestimmten Spulenstrom tritt die Sättigung in jeder Amplitude der Stromhalbwelle auf, so daß die Flußdichte nur noch im Stroman- und -abstieg dem Stromverlauf folgt. Im Sättigungsbereich ist die Flußdichte konstant.

Die Meßspule mißt die Flußdichte des Kerns, die aus dem Erregerfeld und dem externen, zu messenden Feld entsteht. Die Spannung, die durch diese Felder in der Meßspule induziert wird, beinhaltet also zwei Signale: Zum einen das des Erregerfeldes und zum anderen das des Meßfeldes. Das Signal des externen Meßfeldes wird ermittelt, indem von der Spannung der Meßspule die zweite Oberschwingung herausgefiltert und gleichgerichtet wird. Diese so gewonnene Spannung ist proportional zur Größe des externen Magnetfeldes.

Die Empfindlichkeit des Flux-Gate-Sensors ist abhängig von der Form der Hystereseurve und damit vom Material. Eine quadratische Hystereseform ist dabei ideal.

Für einen geringen Energiebedarf sollte der Kern leicht umzumagnetisieren sein und eine geringe Sättigung aufweisen.

Die Bandbreite ist abhängig von der Frequenz des Erzeugerfeldes und der Fähigkeit des Kerns, die Magnetisierung zu ändern. Die Obergrenze der nachweisbaren Frequenz liegt bei ca. 10 kHz.

Die Empfindlichkeit des Flux-Gate-Sensors liegt zwischen 10^{-10} T und 10^{-2} T.

2.1.3 Optisches Pumpen

Das optische Pumpen basiert auf dem Zeeman-Effekt. Der holländische Physiker Peter Zeeman fand 1896 heraus, daß bei Atomen die Valenzelektronen unterschiedliche Energieniveaus einnehmen können. Die Besetzung der Niveaus kann mittels elektromagnetischer Strahlung wie z.B. Hochfrequenz oder Licht verändert werden. Den Elektronen wird hierdurch Energie zugeführt, woraufhin diese ein höheres Energieniveau annehmen können.

Um diesen Effekt auszunutzen, wird ein durchsichtiges Gefäß benötigt, vor dem eine Lichtquelle mit einer festgelegten Wellenlänge und dahinter eine Fozelle angeordnet wird. Um das Gefäß wird eine Spule gewickelt, und im Gefäß befindet sich ein bestimmtes Gas. Als Gas eignet sich z.B. Cäsium, welches unter Vakuum verdampft. Abbildung 2.2 zeigt diesen Aufbau des Sensors.

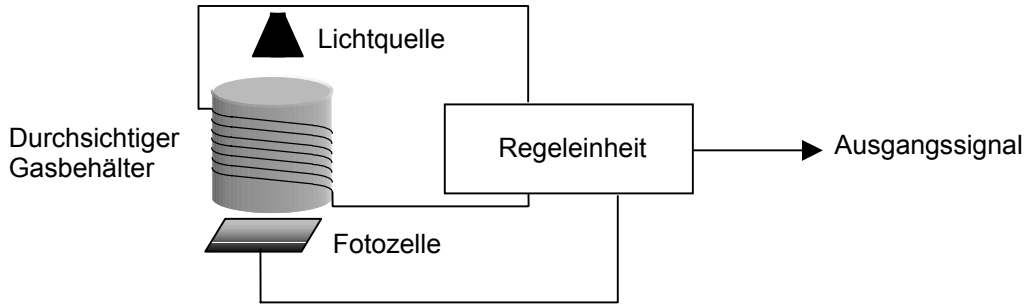


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau zum optischen Pumpen

Die Cäsium-Valenzelektronen können zwei stabile, niedrige Energieniveaus und ein instabiles, höheres Niveau einnehmen. Die unteren beiden Niveaus werden als Niveau eins und zwei bezeichnet und das höhere als Niveau drei. Wie aus Abbildung 2.3 ersichtlich ist, entspricht die Energiedifferenz zwischen den beiden unteren Niveaus der Energie, die durch das Magnetfeld der Spule zugeführt wird. Die Energiedifferenz zwischen dem zweiten und dem dritten Niveau entspricht der zugeführten Lichtenergie.

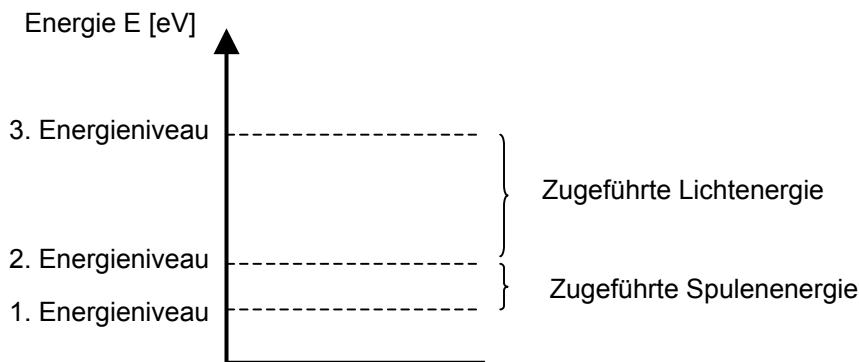


Abbildung 2.3: Energieniveauschema

Am Anfang sind die Valenzelektronen der einzelnen Atome auf die Level eins und zwei gleichmäßig verteilt.

Ein Teil der Photonen aus dem Lichtstrahl wird vom Cäsium-Gas absorbiert, weil die Energie der Photonen auf die Valenzelektronen übergeht. Die Transmission des Cäsium-Gases nimmt hierdurch ab, was eine Verringerung der Photonenzahl an der Photodiode bewirkt.

Die Valenzelektronen haben aber Energie durch die Photonen aufgenommen und werden dadurch energiereicher. Für die Elektronen des ersten Energieniveaus ist diese Energie zu gering, um auf das dritte Niveau zu gelangen, sie verbleiben auf dem niedrigsten Level. Aber die Elektronen des zweiten Niveaus bekommen ausreichend Energie und springen auf das dritte Energieniveau. Diesen Zustand können sie jedoch nicht lange halten und fallen unverzüglich wieder herunter auf das erste oder zweite Niveau. Die Elektronen, die

vom dritten auf das zweite Niveau fallen, werden diesen Vorgang noch einmal wiederholen. Die Elektronen auf dem ersten Level hingegen verbleiben dort. Irgendwann sind alle Elektronen auf dem ersten Level, dann werden keine Photonen mehr absorbiert und das Gas erscheint vollständig transparent. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer "selektiven Be- oder Entvölkerung von Energieniveaus".

Das Magnetfeld der Spule führt dem System jetzt eine definierte Menge von Energie zu. Diese magnetische Energie reicht gerade aus, um die Elektronen vom ersten auf das zweite Level zu heben. Wenn die Magnetfeldstärke groß genug ist, sorgt sie dafür, dass alle Elektronen vom ersten auf das zweite Level gehoben werden. Dadurch werden mehr Photonen absorbiert und das Gas erscheint undurchsichtig. Dieser Wechsel in der Trübung des Gases wird vom Fotosensor gemessen. Ist das Gas undurchsichtig, so wird der Strom in der Spule verringert und dadurch das Magnetfeld geschwächt. Ist das Gas transparent, so wird das Magnetfeld erhöht. Das Magnetfeld wird aber nicht nur von der Spule erzeugt, sondern es wirkt auch das umgebende, zu messende Feld. Dadurch werden die Valenzelektronen von zwei Feldern beeinflusst.

Durch einen Regelkreis kann man die Stromzufuhr der Spule so regeln, daß das Gas immer eine bestimmte Trübung hat. Bei dieser Trübung liegt ein definiertes Magnetfeld vor, von dem das erzeugte Spulenfeld abgezogen wird und so wird sehr präzise das umliegende, magnetische Feld gemessen. Ein Vorteil ist die Schnelligkeit, mit der dieser Sensor arbeitet. Die Anregung der Elektronen erfolgt meistens schon bei einem geringen Anstieg des Magnetfeldes, so daß die Regelung schnell erfolgen kann. Ein anderer Vorteil ist die Richtungsunabhängigkeit des Sensors, denn es ist unerheblich in welcher Richtung das Magnetfeld wirkt, um die Elektronen zu beeinflussen.

Die Empfindlichkeit des Meßverfahrens liegt zwischen 10^{-12} T und 10^{-4} T. Der Frequenzbereich liegt bei Verwendung von Cäsium bei 700 MHz/T und bei Helium bei 28 GHz/T.

2.1.4 Atomkern-Sensor

Die Atomkernsensoren nutzen die Reaktion von Atomkernen auf Magnetfelder aus. Dabei sind besonders Kohlenstoffflüssigkeiten interessant, wie z.B. Benzol. Atomkerne sind als Dipole vorstellbar, weil sie eine elektrische Ladung besitzen, sich drehen und ein magnetisches Moment aufweisen. Eine Spule mit einem magnetischen Gleichfeld um diese Flüssigkeit, bewirkt ein Ausrichten der Atomkerne in der Flüssigkeit. Wenn das künstliche Magnetfeld abgeschaltet wird, richten sich die Kerne nach dem umliegenden Feld (z.B. Erdmagnetfeld) aus und vollführen eine Präzession um dieses Feld. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Kerne die Präzession vollführen, wird Kreisfrequenz genannt und ist abhängig von der Stärke des Magnetfeldes. Diese Kreisbewegung kann durch eine Spule gemessen werden. Auch dieser Sensor mißt das Magnetfeld richtungsunabhängig. Die

Empfindlichkeit liegt zwischen 10^{-11} T bis 10^{-4} T. Die Frequenz ist durch die Schwingungsfrequenz der Kohlenwasserstoffatome begrenzt.

2.1.5 SQUID-Sensor

Der empfindlichste Sensor ist der SQUID-Sensor (SQUID: superconducting quantum interference device; supraleitende Quanteninterferenzdetektoren). Er basiert auf den Phänomenen von Strömen und Feldern bei supraleitenden Materialien. Jedes Material hat beim absoluten Nullpunkt supraleitende Eigenschaften. Der absolute Nullpunkt liegt bei $-273,15^{\circ}\text{C}$ oder 0°K . Spezielle Materialien sind schon bei viel höheren Temperaturen supraleitend. Supraleitende Materialien haben keinen elektrischen Widerstand, womit ein ungehinderter Stromfluß möglich ist. Wird ein supraleitender Ring in ein Magnetfeld plaziert, so wird in diesem Ring ein Strom induziert, der aufgrund der Widerstandslosigkeit auch noch fließt, wenn das Magnetfeld nicht mehr anliegt.

Der induzierte Strom ist ein präziser Indikator für das erzeugende Magnetfeld.

1962 untersuchte D. Jephson die Auswirkungen einer kleinen Unterbrechung in diesem Ring. Diese Unterbrechung kann ein dünner Isolator oder eine Querschnittsverringeringung sein und wird als "Jephsonkontakt" oder "weak-link" bezeichnet. Jephson entdeckte, daß der Strom diese Stelle überwindet, dabei aber anfängt zu schwingen. Bei Abnahme des äußeren Feldes, steigt der Strom auf einen Spitzenwert an und fällt danach auf Null zurück, danach steigt er wieder bis zum Spitzenwert an, usw.

In einem SQUID-Sensor wird diese periodische Veränderung genutzt, um den Strom im Supraleiter zu messen und damit auch das erzeugende Magnetfeld. Dies geschieht einfach durch das Zählen der Hoch- und Tiefpunkte des Stromes. Alternativ dazu kann der supraleitende Ring mit einer Hochfrequenzspule verbunden werden. Dieses Feld beeinflusst den Ringstrom ebenfalls. Er kann z.B. durch eine Rückkopplung dafür sorgen, den Strom immer auf einen festgelegten Spitzenwert einzustellen. Wenn sich das äußere Magnetfeld ändert, muß sich auch das Feld der Hochfrequenzspule ändern. Dadurch kann man den Strom der Rückkopplung als Maß für die Stärke des Magnetfeldes nehmen.

Es ist auch möglich einen Gleichstrom-SQUID-Sensor herzustellen. Bei diesem Sensortyp werden zwei Unterbrechungen eingebaut. Wenn diese beiden Unterbrechungen im geeigneten Abstand zueinander liegen, fließt in dem Ring ein Gleichstrom, der auf das magnetische Feld reagiert.

Der supraleitende Ring ist üblicherweise kleiner als ein Millimeter und besteht aus Niob oder Blei. Die Empfindlichkeit kann vergrößert werden, wenn der Ring mit einem zweiten, größeren supraleitenden Ring verbunden wird. Dieser zweite Meßring hat keine Unterbrechung und dient nur als Antenne, um das Magnetfeld zu messen. Im Grunde stellt der SQUID-Sensor dann ein sehr genaues Amperemeter dar, welches den Strom in der Meßspule mißt. Dieser Sensor hat damit drei Komponenten, die in Abbildung 2.4 dargestellt sind: Den SQUID-Ring selber, die Hochfrequenzspule und die große Meßspule.

Diese drei Komponenten müssen auf die supraleitende Temperatur gekühlt werden, was sehr aufwendig ist.

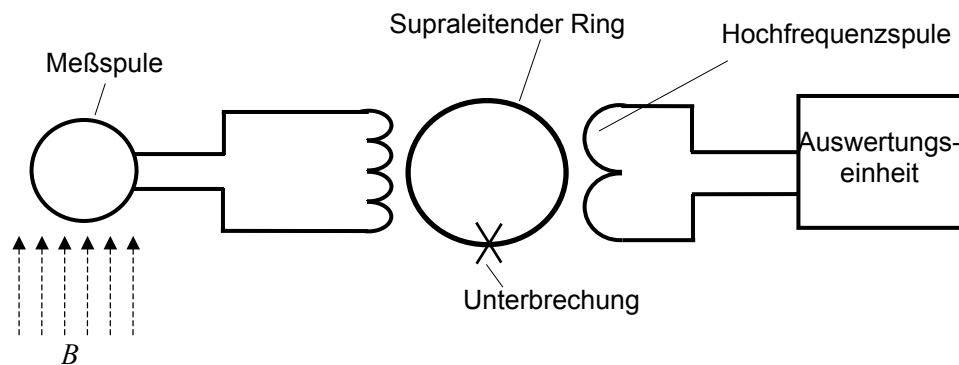


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des SQUID-Sensors

Die Empfindlichkeit des SQUID-Sensors liegt zwischen 10^{-14} T und 10^{-8} T. Dadurch daß man die Hochfrequenzspule verändern kann, ist es möglich den Sensor auf genau eine Frequenz einzustellen. Dies nutzt man, um das Erdmagnetfeld zu messen. Hierbei wird die Spulenfrequenz so eingestellt, daß sie bei der Erdmagnetfeldstärke einen bestimmten Strom hervorruft. Bei Abweichungen im Erdmagnetfeld, weicht auch der Strom ab und die Hochfrequenzspule muß nachregeln. So können kleinste Feldänderungen sofort erfaßt werden.

Wegen des Kühlaufwandes ist der Energiebedarf sehr groß und der Sensoraufbau aufwendig.

2.1.6 Hall-Sensor

Die Bezeichnung Hall-Sensor geht auf seinen Erfinder Edwin Hall zurück. Dieser machte 1879 den in Abbildung 2.5 dargestellten Versuch. Dabei nahm er ein Plättchen aus Gold und befestigte an jeder Kante eine Elektrode. Durch zwei gegenüberliegende Elektroden ließ er einen Strom fließen und an die beiden anderen Elektroden schloß er ein Voltmeter an. Beim Anlegen eines Magnetfeldes, senkrecht zu der Fläche des Plättchens, zeigte das Voltmeter eine Spannung an. Diese Spannung wird Hallspannung genannt und ist proportional zum angelegten Magnetfeld.

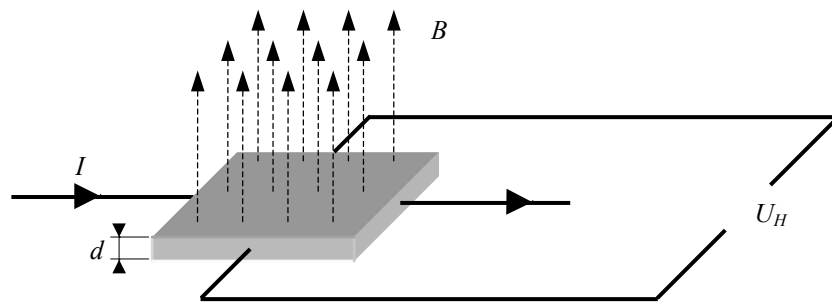


Abbildung 2.5: Entstehung der Hallspannung U_H in einem Metallplättchen durch ein Magnetfeld mit der Flußdichte B . Durch das Plättchen mit der Dicke d fließt der Strom I .

Die Hallspannung U_H entsteht durch die Kraft, die das Magnetfeld auf die Elektronen ausübt. Diese Kraft wird als Lorentz-Kraft bezeichnet und treibt die Elektronen des Stromes an eine Längsseite. Dadurch entsteht an einer Seite ein Elektronenüberschuß und an der anderen Seite ein Elektronenmangel. Diese Elektronendifferenz ist als Spannung zu messen.

Die Hallspannung kann mit folgender Gleichung⁷ berechnet werden:

$$U_H = K_H \cdot \frac{B \cdot I}{d} \quad \text{Gleichung 2.2}$$

mit:

- U_H - Hallspannung [V]
- K_H - material- und formabhängige Hallkonstante [$\text{m}^3/\text{C}=\text{m}^3/\text{As}$]
- B - magnetische Flußdichte [$\text{T}=\text{Vs}/\text{m}^2$]
- I - Strom durch das Plättchen [A]
- d - Dicke des Plättchens [m]

Damit die Hallspannung möglichst groß ist, müssen die Elektronen sehr beweglich sein. Dazu sind Leitermaterialien ungeeignet. Deshalb verwendet man gegenwärtig Halbleitermaterialien wie Silizium (Si), Galliumarsenid (GaAs), Indiumantimonid (InSb) oder Indiumarsenid (InAs). Sie können mit herkömmlichen Technologien für die Herstellung von integrierten Schaltungen gefertigt werden. Die Hall-Sensoren aus diesen Materialien haben eine Stärke von 10 μm und eine Kantenlänge von einigen 100 μm . Der Empfindlichkeitsbereich liegt bei Silizium zwischen 10^{-3} T und 10^{-1} T.

Für InSb liegt die Empfindlichkeit bei 10^{-7} T. Hall-Sensoren können entweder Gleichfelder oder wechselnde Magnetfelder messen, wobei die Frequenz auf 1 MHz begrenzt ist. Die Leistungsaufnahme liegt bei ca. 0,1 W.

⁷ vgl. Böger S. 477

2.1.7 Feldplatte

Feldplatten bestehen aus einer Indiumantimonidschicht (InSb), die auf einer Keramikplatte liegt. Im InSb befinden sich kleine Nadeln aus Nickelantimonid (NiSb), deren elektrische Leitfähigkeit besser ist als die des InSb. Diese Nadeln sind quer zur Stromrichtung angeordnet und haben im feldlosen Zustand keine Wirkung. Beim Wirken eines magnetischen Feldes werden die Elektronen durch die Lorentz-Kraft abgelenkt und fließen schräg zur ursprünglichen Richtung. Dadurch verlängert sich der Weg der Elektronen und der Widerstand der Feldplatte erhöht sich. Abbildung 2.6 zeigt, wie sich aufgrund der Ausrichtung der NiSb-Nadeln der Stromweg verlängert.

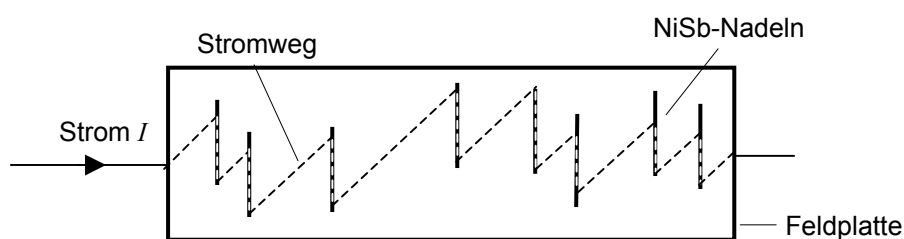


Abbildung 2.6: Feldplatte mit NiSb-Nadeln und Stromweg

2.1.8 Magnetdiode

Eine Magnetdiode besitzt, genauso wie eine herkömmliche Halbleiterdiode, zwei Gebiete aus Silizium (Abbildung 2.7). Ein Gebiet ist n-dotiert und eines p-dotiert. Bei der Magnetdiode ist der pn-Übergang noch von einer undotierten Siliziumschicht getrennt. Diese drei Bereiche sind auf einer Saphirschicht aufgebracht, das als Trägermaterial dient. Über der Siliziumschicht befindet sich eine Deckschicht aus Siliziumdioxid. Die dotierten Bereiche werden mit Metallkontakten versehen.

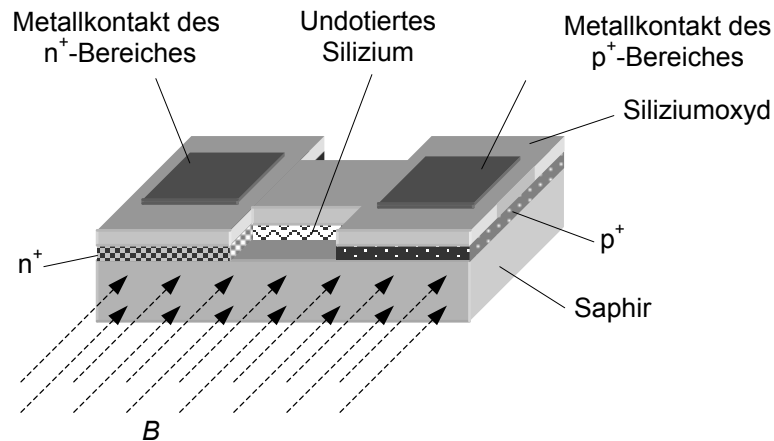


Abbildung 2.7: Aufbau der Magnetdiode

Durch Anlegen einer negativen Spannung an den Kontakt des n-dotierten Bereiches entsteht ein negatives Potential und eine entsprechend positive Spannung an den p-dotierten Bereich bewirkt ein positives Potential. Diese Potentiale sorgen dafür, daß die Löcher des p-Bereiches und die Elektronen des n-Bereiches in den undotierten Siliziumbereich wandern (injizieren). Der Stromfluß der jetzt stattfindet, ist die Summe aus dem Lochstrom des p-Bereiches und der Elektronen aus dem n-Bereich.

An den Grenzflächen zum Saphir und zum Siliziumdioxid rekombinieren einige Ladungsträger. Durch den Verlust dieser Ladungen erhöht sich der Widerstand der Magnetdiode. Wenn kein äußeres Magnetfeld einwirkt, rekombinieren an beiden Grenzflächen Ladungsträger. Durch ein äußeres Feld, welches senkrecht zur Ladungsträgerbewegung steht, werden beide Ladungsträgerströme in die gleiche Richtung abgelenkt. Diese Ablenkung erfolgt deshalb in die gleiche Richtung, weil der Lochstrom und der Elektronenstrom unterschiedlich gepolt sind und in entgegengesetzter Richtung verlaufen.

Ladungsträger nahe der Grenzfläche zwischen dem Silizium und dem Saphir besitzen eine größere Tendenz zu rekombinieren, als jene nahe der Grenze zwischen dem Silizium und dem Siliziumdioxid. Deshalb vergrößert sich der Widerstand, wenn die Ladungsträgerströme nach unten, in Richtung Saphir, abgelenkt werden. Entsprechend ist der Widerstand kleiner, wenn die Ströme nach oben, zum Siliziumdioxid, abgelenkt werden.

Die Feldempfindlichkeit der Magnetdiode gegenüber dem Silizium-Hall-Sensor ist zehn mal größer. Dafür ist die Herstellung der Magnetdiode problematischer, weil das Silizium auf eine Isolierschicht aufgebracht werden muß.

2.1.9 Magnettransistor

Der Magnettransistor ist, genauso wie die Magnetdiode, ein Halbleiterbauelement aus Silizium. Im Unterschied zur Diode hat der Transistor drei Siliziumschichten, welche npn-dotiert sind.

Der Emitter ist n-dotiert, die Basis ist p-dotiert und der Kollektor ist wiederum n-dotiert. Beim Magnettransistor sind, wie dies in Abbildung 2.8 dargestellt ist, zwei Kollektoren vorhanden, die den gleichen Strom führen, wenn kein Magnetfeld einwirkt. Ein Magnetfeld senkrecht zur Richtung der Ladungsträgerbewegung bewirkt ein Ablenken des Ladungsträgerstromes in eine Richtung und damit zu einem Kollektor. Die Kollektorspannungen werden von einem Differenzverstärker ausgewertet, dessen Ausgangsspannung proportional zur Magnetfeldstärke ist.

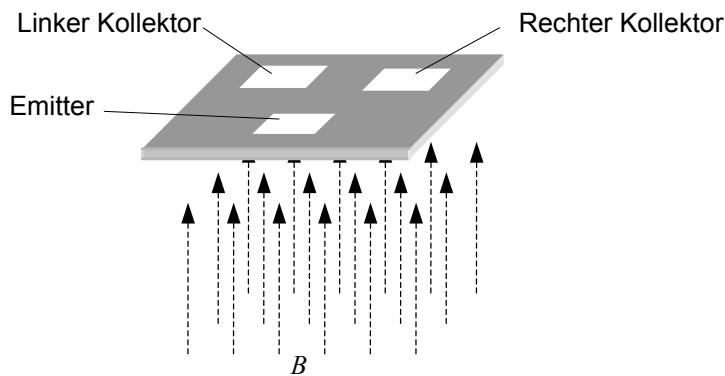


Abbildung 2.8: Aufbau des lateralen Magnettransistors

Beim Magnettransistor sind zwei physikalische Mechanismen wirksam, um den Ladungsträgerstrom zu beeinflussen. Zum einen ist dies die Lorentz-Kraft, die den Ladungsträgerstrom ablenkt und zum anderen die Hall-Spannung, die eine Spannungsdifferenz zwischen den Kollektoren herstellt. Beide Mechanismen sind für unterschiedliche Feldausrichtungen sensibel. Je nach Anordnung der dotierten Bereiche überwiegt eines dieser Mechanismen, so daß es dadurch zwei Arten von Magnettransistoren gibt⁸: Zum einen die lateralen Magnettransistoren, bei denen der Hall-Effekt überwiegt und die nur für Felder empfindlich sind, welche senkrecht zur Oberfläche anliegen. Und zum anderen gibt es die vertikalen Magnettransistoren, bei denen die Feldempfindlichkeit in der Chipebene liegt. Durch eine räumliche Anordnung der dotierten Bereiche ist es schon gelungen Transistoren zu entwickeln, die alle Feldkomponenten messen können.

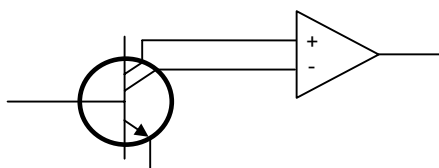


Abbildung 2.9:

Beschaltung des Magnettransistors mit einem Differenzverstärker

⁸ vgl. Hauptmann S. 57.

Wie Abbildung 2.9 zeigt, kann man mit einem nachgeschalteten Differenzverstärker die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Kollektoren verstärken und so die Empfindlichkeit des Magnettransistors erhöhen.

2.1.10 Lichtwellen-Sensor

Der Lichtwellen-Sensor verwendet ein Material (z.B. Nickel), welches seine Länge in Abhängigkeit vom Magnetfeld ändert. Diese Längenänderung ist sehr gering (ca. 1 pm) und kann deshalb von herkömmlichen, technischen Systemen nur schwer erfaßt werden. Deshalb besitzt der Lichtwellen-Sensor zwei Lichtwellenleiter, die in Form eines Mach-Zender-Interferometers angeordnet sind. Abbildung 2.10 zeigt die Anordnung der einzelnen Komponenten.

Bei diesem Interferometer werden zwei Lichtwellenleiter nebeneinander gelegt und ihre Enden über Lichtkoppler miteinander verbunden. An dem einen Ende der Leiter wird ein Laser angeschlossen, an das andere Ende Fotosensoren. Der eine Lichtwellenleiter ist mit dem magnetisch veränderbaren Material umhüllt oder überzogen. Beim Eintritt des Laserstrahls in die Lichtwellenleiter wird dieser an dem Lichtkoppler getrennt und durch jeden Leiter einzeln weitergeleitet. Am Ende wird der geteilte Strahl wieder über den zweiten Lichtkoppler vereinigt und auf die Fotosensoren projiziert.

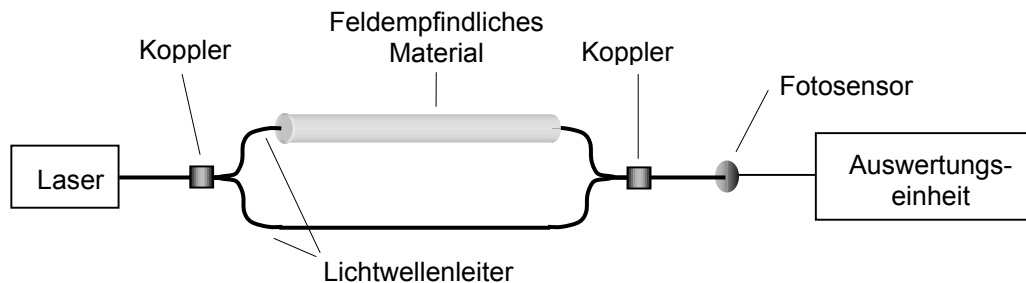


Abbildung 2.10: Lichtwellensensor, bestehend aus zwei Lichtwellenleitern von denen einer mit einem Material umhüllt ist, dessen Länge sich in Abhängigkeit vom Magnetfeld ändert

Wenn ein Magnetfeld die Länge des Materials ändert, so wird dadurch auch die Lichtwellenleiterlänge verändert. Dadurch kommt der Laserstrahl im Vergleich zum zweiten Strahl zeitlich versetzt am Lichtkoppler an. Die beiden Laserstrahlen werden wieder vereinigt, ergeben zusammen aber ein anderes Lichtspektrum als das Ausgangslicht, was wiederum vom Fotosensor erfaßt wird. Der Lichtwellen-Sensor hat aufgrund des sensiblen Verhaltens des magnetischen Materials eine Empfindlichkeit von 10^{-11} T bis 10^{-3} T. Der Frequenzbereich beginnt bei Gleichfeldern und endet bei ca. 60 kHz.

2.2 Meßgeräte

Nur wenige der im vorhergehenden Kapitel 2.1 "Physikalische Meßprinzipien" vorgestellten Meßprinzipien sind als Meßgerät realisiert worden. Zwei typische Meßgeräte, die in der Praxis Verwendung finden, sind im folgenden dargestellt:

2.2.1 EM Field Analyzer EFA 3

Das Meßgerät EFA 3 wird von der Firma Wandel&Goltermann hergestellt und kann sowohl elektrische als auch magnetische Felder messen. Als Meßsonden dienen Suchspulen mit unterschiedlichen Durchmessern. Im Gerät selber ist eine Spule integriert, die aufgrund der geringen Abmessungen einen Meßfehler von 6% aufweist. Zusätzlich kann eine externe Meßsonde mit einem Spulendurchmesser von $d=3$ cm auf das Gerät gesteckt werden. Die Meßgenauigkeit dieser Sonde liegt in dem Bereich der eingebauten Spule. Mit dieser Sonde ist es möglich gezielt Messungen an schlecht zugänglichen Stellen durchzuführen. Eine zweite, aufsteckbare Meßsonde hat die von der DIN VDE 0848 geforderte wirksame Querschnittsfläche von 100 cm^2 und dadurch eine hohe Meßgenauigkeit von ca. 3%. Weil Spulen aufgrund des Induktionsgesetzes (Gleichung 2.1) nur Wechselfelder messen können, liegt die kleinste Meßfrequenz bei 5 Hz. Durch die normkonforme, obere Grenzfrequenz von 30 kHz ist dieses Gerät für den gesamten niederfrequenten Frequenzbereich ausgelegt.

Das Gerät besitzt einen eingebauten Frequenzzähler, mit dem es möglich ist bei breitbandiger Messung die Frequenz des größten Feldanteils zu ermitteln. Bei Bedarf kann mit einem Selektivfilter die Frequenz des größten Feldanteils detailliert ausgewertet werden. Tabelle 2.1 gibt die Frequenzbereiche der Breitbandmessung und die einzelnen Frequenzen des Selektivfilters an.

Breitbandfilter	5 Hz...2 kHz, 30 Hz...2 kHz, 5 Hz...30 kHz, 30 Hz...30 kHz
Selektivfilter	16,7 Hz, 33,3 Hz, 50 Hz, 60 Hz, 100 Hz, 120 Hz, 150 Hz, 180 Hz, 400 Hz, 800 Hz, 1200 Hz

Tabelle 2.1: Frequenzbereiche bzw. Frequenzen des Meßgerätes EFA3

Durch die isotrope Meßart der Sonden werden Felder aus allen möglichen Richtungen gemessen. Somit ist das Meßergebnis unabhängig von der Orientierung der Sonde. Das Meßgerät zeigt bei der Messung die Feldkomponenten in den drei Raumachsen x , y , z an. Der Meßbereich des Gerätes liegt zwischen 100 nT und 10 mT.

Externe 100 cm ² -Sonde	±3% ±1 nT bis ±5% ±1 nT.
Externe Sonde mit d=3 cm	±4% bis ±6%
Interne Sonde	±5% bis ±8%

Tabelle 2.2: Meßfehler des Meßgerätes EFA3

Zusätzlich muß man bei Meßgeräten beachten, daß normgerechten Meßverfahren die Feldstärken über eine Fläche von 100 cm² mitteln (über drei orthogonale Achsen). In inhomogenen magnetischen Feldern, wie in der Energieversorgung üblich, kommt es dabei zu einer Erhöhung der ermittelten Flußdichte gegenüber einer punktuellen Messung oder Berechnung. Die Erhöhung ist hierbei vom Exponenten des Feldverlaufes und von der Entfernung zur Feldquelle abhängig.

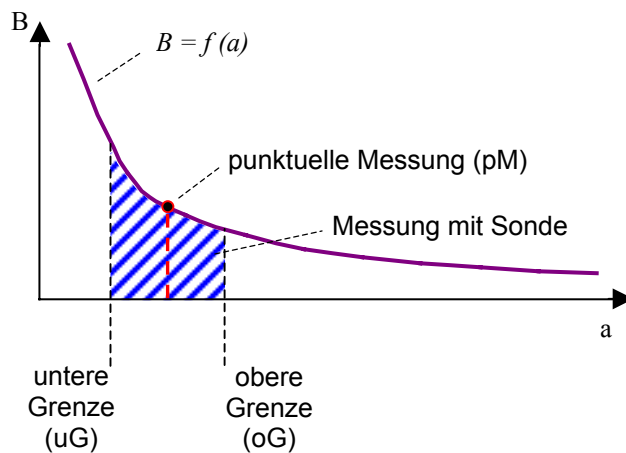


Abbildung 2.11:

Unterschied zwischen punktueller Messung und Messung mittels Sonde mit 100 cm²

Der Unterschied der beiden ermittelten Werte liegt in der Differenz zwischen dem Mittelwert des Integrals der blau gekennzeichneten Fläche und dem rot markierten Meßwert (Abbildung 2.11).

Die prozentuale Differenz errechnet sich folgendermaßen:

$$p = \frac{F_{oG,uG}(a) - f_{pM}(a)}{f_{pM}(a)} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 2.3}$$

mit:

- $F_{oG,uG}(a)$ - Integral der Funktion $f(a)$ in den Grenzen von oG bis uG
- $f_{pM}(a)$ - Funktionswert der Funktion $f(a)$ an der Stelle pM
- a - Abstand von der Feldquelle [cm]

Der Abstand zwischen den Grenzen oG und uG entspricht dem Durchmesser der Meßsonde und beträgt für die 100 cm² Sonde 11,28 cm. In Tabelle 2.3 ist die prozentuale Abweichung für Funktionsverläufe mit unterschiedlich starkem Abfall dargestellt.

Funktionsverlauf $f(a)$	$F_{oG,uG}(a)$	p im Abstand a		
		10 cm	20 cm	40 cm
$\frac{1}{a}$	$[ln a]_{uG}^{oG}$	9,9%	2,2%	0,5%
$\frac{1}{a^2}$	$\left[-\frac{1}{a}\right]_{uG}^{oG}$	33,3%	6,7%	1,6%
$\frac{1}{a^3}$	$\left[-\frac{1}{2 \cdot a^2}\right]_{uG}^{oG}$	77,8%	13,8%	3,2%

Tabelle 2.3: Prozentuale Differenz zwischen den Meßwerten einer Meßsonde und der punktuellen Ermittlung des Mittelwertes

Es sind deutliche Unterschiede zwischen der Messung mit einer punktuellen und einer räumlich ausgedehnten Meßsonde zu erkennen. Bei einem Funktionsverlauf $B=f(1/a^3)$ kann die Differenz bis zu 77,8% betragen.

2.2.2 Digitales Teslameter FM 210

Das Meßgerät FM 210 der Firma Projekt Elektronik GmbH verfügt über einen Hall-Sensor als Meßwertaufnehmer. Dieser Sensor ist besonders gut geeignet, um Gleich- und Niederfrequente Felder zu messen. Der Frequenzbereich des Meßgerätes FM 210 beginnt deshalb bei 0 Hz. Die obere Frequenzgrenze ist mit 35 kHz höher als die des EM Field Analyzer EFA 3. Der Meßbereich beträgt 10 μ T bis 2 T bei einer Toleranz von $\pm 1\%$.

Die Meßsonde wird senkrecht zu den Feldlinien eines magnetischen Feldes eingebracht und mißt nur in eine Richtung. Das Meßgerät kann aus den aufgenommenen Meßwerten den positiven bzw. negativen Spitzenwert gegenüber dem Mittelwert bestimmen.

Das Meßgerät FM 210 ist damit für Messungen im technischen Bereich ausgelegt. Das EFA 3 hingegen ist aufgrund der Sondengröße, des Frequenzbereiches und der Auflösung, für Messungen im Personenschutz einsetzbar.

3 Anwendung von Niederspannungsverteilungen

3.1 Allgemeine Einsatzgebiete von NS-Verteilungen

Niederspannungsverteilungen haben die Aufgabe den Strom innerhalb des Niederspannungsnetzes auf mehrere Abnehmer zu verteilen⁹.

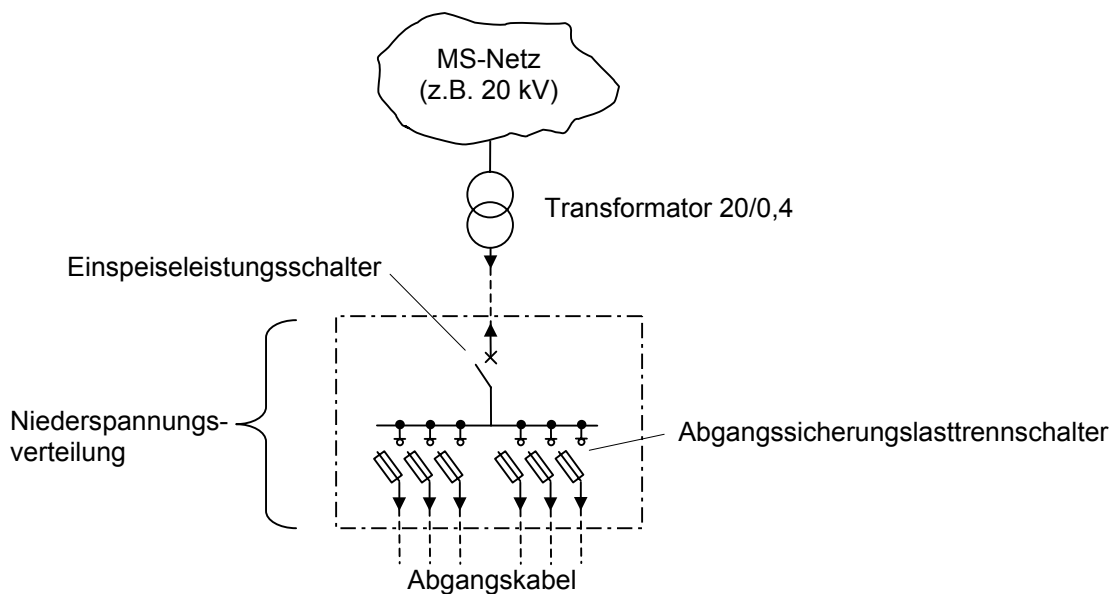


Abbildung 3.1: NS-Schaltanlage

Als Abnehmer können wieder Niederspannungsverteilungen angeschlossen werden, die dann als "Unterverteilungen" bezeichnet werden. Wird eine Verteilung direkt von einem Transformator gespeist, so nennt man diese "Hauptverteilung"¹⁰.

Einige Abnehmer sind z.B.:

- Maschinen und Beleuchtungen im industriellen Bereich
- Bürogeräte und Kommunikationsanlagen in Bürogebäuden
- Haushaltsgeräte im privaten Bereich
- Straßenbeleuchtungen
- Schiffseinrichtungen

Aufgrund der Vielzahl von Abnehmern sind Niederspannungsverteilungen, den unterschiedlichen Erfordernissen entsprechend, aufgebaut. In allen Verteilungen sind aber

⁹ vgl. **ABB** S. 319

¹⁰ vgl. **Knies** S. 207

mindestens Schutzgeräte und stromführende Elemente vorhanden. Die Schutzgeräte, wie z.B. Schmelzsicherungen, Leitungsschutzschalter und Leistungsschalter, kommen in der Einspeisung und in den Abgängen zum Einsatz. In der Einspeisung soll das Schutzgerät die gesamte Verteilung vor zu hohen Strömen schützen und in den Abgängen sollen die Abnehmer bzw. die Leitungen zu den Abnehmern geschützt werden. Die stromführenden Elemente können aus Stromschienen oder Kabeln bestehen.

Zusätzlich können in Niederspannungsverteilungen noch folgende Geräte vorhanden sein:

- Schalt- und Steuerelemente (Taster, Schalter, Relais, etc.)
- Meßeinrichtungen (Meßwandler, Meßmodule)
- Anzeigen (Leuchtmelder, Zeigerinstrumente, Stellungsmelder, etc.)

Eine Niederspannungsverteilung kann nach DIN VDE 0660 Teil 500 entweder als "Typgeprüfte Schaltgerätekombination" (TSK) oder als "Partiell typgeprüfte Schaltgerätekombination" (PTSK) gefertigt werden. Bei den TSK-Verteilungen wird eine Musterverteilung hergestellt. Diese wird nach den geltenden Vorschriften geprüft und beim Bestehen der Prüfung in gleicher Weise nachgebaut. Die Nachbauten gelten dann als TSK-geprüfte Verteilungen.

Eine PTSK-Verteilung besteht aus Geräten, die typgeprüft oder nicht typgeprüft sind. Die Verteilung wird für jeden Anwendungsfall individuell hergestellt und die Einhaltung der Vorschriften nachgewiesen¹¹.

¹¹ vgl. **Knies** S. 260

3.2 Die Niederspannungsverteilung Typ ELEK

Die Niederspannungsverteilung Typ ELEK wird von der Firma Altmann&Böhning hergestellt. Die in Abbildung 3.2 dargestellte Anlage ist ein Teil einer größeren Niederspannungsverteilung mit insgesamt 27 Schaltfeldern.

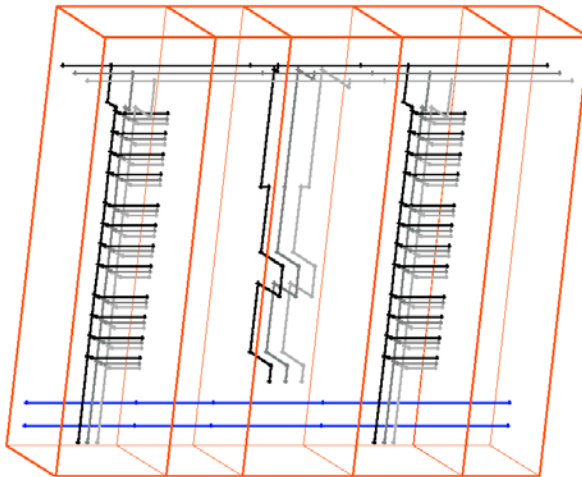


Abbildung 3.2:

Niederspannungsverteilung Typ ELEK. In der Mitte befindet sich das Einspeisefeld mit dem Leistungsschalter. Links und rechts sind die Abgangsfelder mit jeweils 12 Abgängen.

Die abgebildete Anlage besteht aus einem Transformatoreinspeisefeld (in der Mitte) und zwei Abgangsfeldern (links und rechts). Alle Felder sind in drei voneinander abgeschottete Räume unterteilt:

- Sammelschienenraum zur Aufnahme des waagerechten Haupt-Schienensystems im oberen Teil des Feldes.
- Kabelanschlußraum zum Anschluß der Einspeise- bzw. Abgangskabel und zur Durchführung der PE, N oder PEN-Schiene im unteren Teil des Feldes.
- Schaltgeräteraum zum Einbau der Schaltgeräte (z.B. Leistungsschalter, Sicherungsleisten, usw.) im mittleren Teil des Feldes.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Beschreibung der Felder¹².

¹² vgl. **ELEK** S. 18 f.

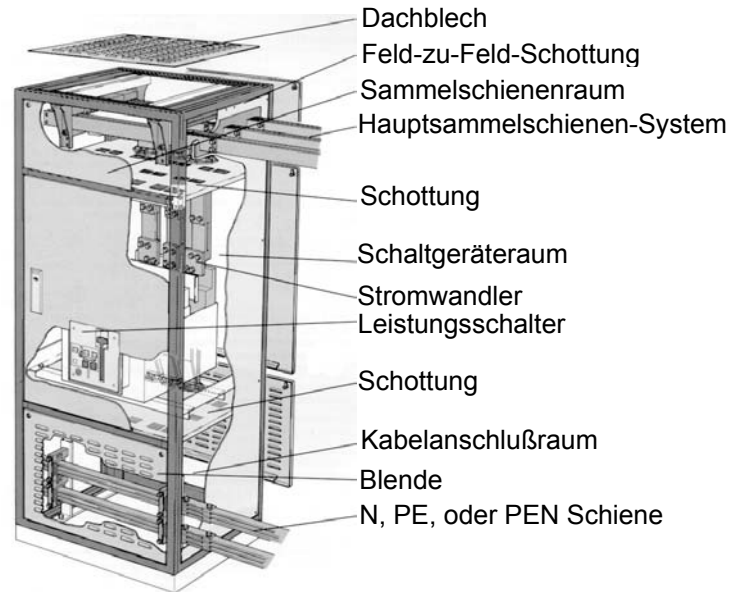


Abbildung 3.3: Transformatoreinspeisefeld

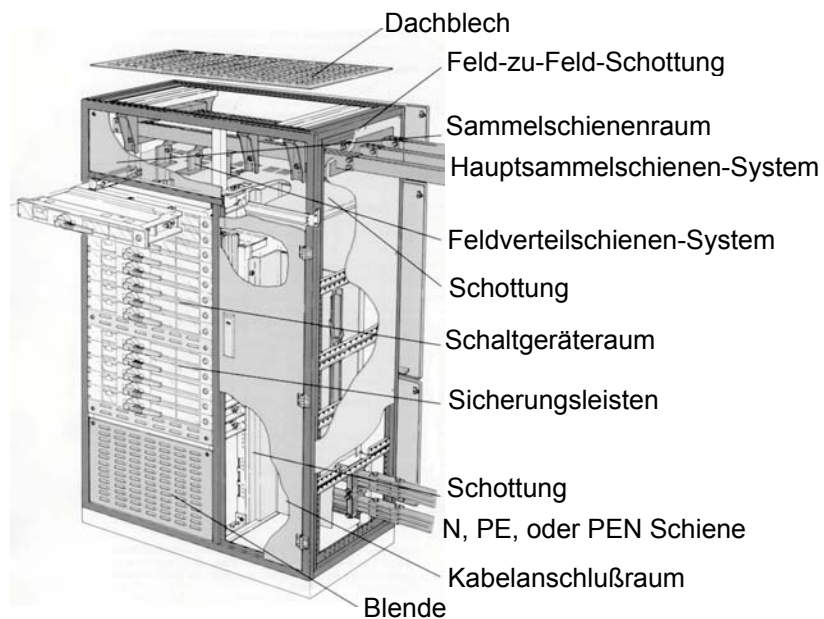


Abbildung 3.4: Abgangsfeld

Das Einspeisefeld ist mit einem 1600 A Einschub-Leistungsschalter der Firma Siemens Typ 3WN6 ausgerüstet. Das elektrische Betätigen des Leistungsschalters erfolgt über Taster in der Schaltfeldtür. Weiterhin kann der Leistungsschalter auch über ein entsprechendes Signal von einer Schaltwarte aus ferngesteuert werden.

In der Schaltfeldtür des Einspeisefeldes sind eingebaut:

- Energiemeßmodule zur Anzeige verschiedener Meßgrößen
- Stellungsmelder Betriebszustand des Leistungsschalters
- Leuchtmelder Schutzauslösung
Störung
- Taster Leistungsschalter EIN
Leistungsschalter AUS
- Fallklappenmelderelais Transformator-Temperatur-Warnung
Transformator-Temperatur-Auslösung
Schutzspannung fehlt

Im Geräteraum des Einspeisefeldes befindet sich der Leistungsschalter sowie:

- Div. Feldbusmodule zur Ankopplung der Energiemeßmodule und des
Leistungsschalters an die Schaltwarte
- Sicherungsautomaten Absicherung Steuerstromkreis des Leistungsschalters
Absicherung Versorgungsspannung der Meßmodule
- Relaiskoppler Erfassung der Schutzauslösung
- Hilfsschütze Selbsthaltung von Meldungen

Im Kabelanschlußraum sind Klemmleisten vorhanden, die zum Anschluß der Steuerleitungen dienen.

Die Abgangsfelder bestehen aus zwei getrennten Feldern die nebeneinander stehen. Im linken Feld sind die Sicherungsleisten, in waagerechter Anordnung, eingebaut. Das rechte Feld dient zur Aufnahme der Abgangskabel, die an der rechten Seite der Sicherungsleisten angeschlossen werden. Der Kabel-Anschlußraum der Abgangsfelder wird also nicht benötigt und kann zum Einbau einer Lüftung genutzt werden.

In der Schaltfeldtür des Abgangsfeldes sind eingebaut:

- Strommesser zur Anzeige des Abgangsstromes in den einzelnen Abgangskabeln

Im Geräteraum des Abgangsfeldes sind eingebaut:

- Stromwandler Messung des Abgangsstromes in den Kabeln
- Klemmleisten Anschluß der Meßleitungen der Stromwandler

Es können NH-Sicherungsleisten der Größen 00 (160 A), 1 (250 A), 2 (400 A) und 3 (630 A) eingebaut werden.

4 Analyse verschiedener Verteilungen

4.1 Grundlagen der Untersuchung

Diese Untersuchung liefert als Ergebnis eine Übersicht, die Aussagen über die Größenordnungen und die Unterschiede in der Flußdichteverteilung an realen Niederspannungsverteilungen zuläßt. Die Flußdichten werden nicht meßtechnisch erfaßt, sondern mit Hilfe des Programms WinField berechnet. Als Grundlage zur Berechnung werden die Verteilungen, nach den Plänen der Hersteller, in WinField konstruiert. Die Geometrie enthält dabei nur die stromführenden Elemente wie Stromschienen und Kabel.

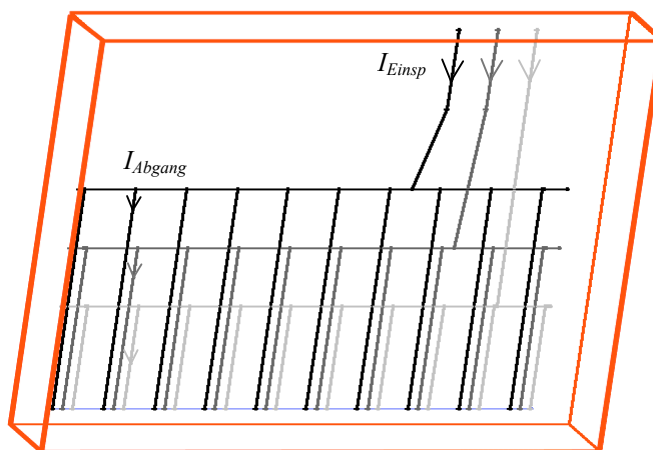


Abbildung 4.1:

Beispiel einer Verteilung, wie sie in WinField konstruiert wurde

Abbildung 4.1 zeigt eine Niederspannungsverteilung, die in WinField dargestellt ist. Die Verteilung wird von oben eingespeist und hat zehn Abgänge. Weil bei den Anlagen keine Kabel zu den Einspeisungen oder den Abgängen vorhanden sind, können die Verteilungen direkt miteinander verglichen werden, ohne daß andere Feldquellen auf die Berechnungsergebnisse Einfluß haben.

Bei den Verteilungen handelt es sich um die Niederspannungsverteilungen mit der Bezeichnung NVT 00 bis NVT 21. Diese Anlagen sind im Anhang auf den Seiten XI bis XXI in der Vorder- und Draufsicht dargestellt. Sie werden überwiegend in Netzstationen eingesetzt und unterscheiden sich in folgenden Punkten voneinander:

- Anzahl und Art der Einspeisungen
- Anzahl der Abgänge
- Nennstrom bzw. Nennleistung
- Abmessungen
- Anordnung der Stromschienen
- Ausstattung (Leistungsschalter, Wandler, Sicherungsleisten, etc.)

Diese Faktoren beeinflussen das resultierende Magnetfeld. Deshalb können die Hersteller die genannten Faktoren bei der Entwicklung gezielt verändern, um die Anlage im Hinblick auf die magnetischen Felder zu optimieren. Daß einige Faktoren hierbei einen großen Einfluß haben, wird sich in diesem und den folgenden Kapiteln herausstellen. So bewirkt z.B. eine Verlagerung der Einspeisung von der Seite in die Mitte, daß die Fläche, die die 100 µT Isolinie einschließt, auf ca. 38% gegenüber der ursprünglichen Fläche, reduziert wird¹³.

Um die Verteilungen miteinander vergleichen zu können, wurden sie unter den gleichen Bedingungen, wie z.B. gleicher Strom und gleiche Spannung, analysiert. Hierzu wurden alle Anlagen mit einer einheitliche Leistung von 630 kVA belastet. Diese Leistung entspricht einem Strom I von:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{630 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 909,33 \text{ A} \quad \text{Gleichung 4.1}$$

pro Phase. Der Strom ist sinusförmig mit der Frequenz $f=50$ Hz und wird nicht von Oberwellen überlagert. Die Berechnung der Felder, welche von Oberwellen herrühren, ist grundsätzlich möglich. Die Oberwellen sind aber von den angeschlossenen Geräten abhängig und deshalb nicht konstant. Aus diesem Grund werden die Oberwellen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Bei Anlagen mit doppelter Einspeisung wurde jede Einspeisung mit dem Strom $I=454,66$ A versorgt. Dieser Strom verteilt sich gleichmäßig auf alle Abgänge, was in der Realität dem seltenen Fall der gleichmäßigen Belastung entspricht.

Der einheitliche Laststrom erlaubt es, die Anlagen unter den gleichen Bedingungen zu vergleichen. Einige Anlagen sind aber für einen größeren oder kleineren Strom ausgelegt und die Verteilungen werden unter realen Bedingungen auch nicht mit dem Nennstrom belastet. Weil die Flußdichte direkt proportional zum Strom ist, kann man für diese Fälle die Flußdichte ermitteln, indem die berechneten Werte linear mit dem Strom skaliert werden.

Diese Untersuchung soll Aussagen über die Qualität der Verteilungen, hinsichtlich der Grenzwerte nach der 26. BImSchV, liefern.

In den Hinweisen zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder ist die Entfernung zwischen der berührbaren und zugänglichen Oberfläche der Anlage und einer Bezugsebene im Abstand von 20 cm gefordert¹⁴. Die Bezugsebene ist die Fläche, in der die Grenzwerte der 26. BImSchV eingehalten werden müssen. Deshalb wurden innerhalb dieser Bezugsebene alle 5 cm die Flußdichten errechnet und der maximale Wert der Bezugsebene notiert. Auf diese Weise wurden für die vier Seiten einer Verteilung die maximalen Flußdichten ermittelt.

¹³ vgl. Kupke S. 66

¹⁴ vgl. Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder S. 31

4.2 Auswertung und Datendarstellung

Die Diagramme 4.1 bis 4.4 geben eine Übersicht über die Flußdichteverteilung der untersuchten Niederspannungsverteilungen. Die dargestellten Feldstärken wurden in einem Abstand von 20 cm von der Gehäuseaußenseite ermittelt. Daraus resultiert, daß der Abstand zu den felderzeugenden Elementen größer ist als die angegebenen 20 cm, weil die Abstände innerhalb der Verteilung nicht berücksichtigt wurden. Die Strecke zwischen der Gehäusewand und dem Element wird also nicht zu dem angegebenen Abstand addiert. Dadurch treten auch beim Vergleich der Anlagen Unterschiede auf, weil je nach Hersteller die Anlagen unterschiedlich konstruiert sind.

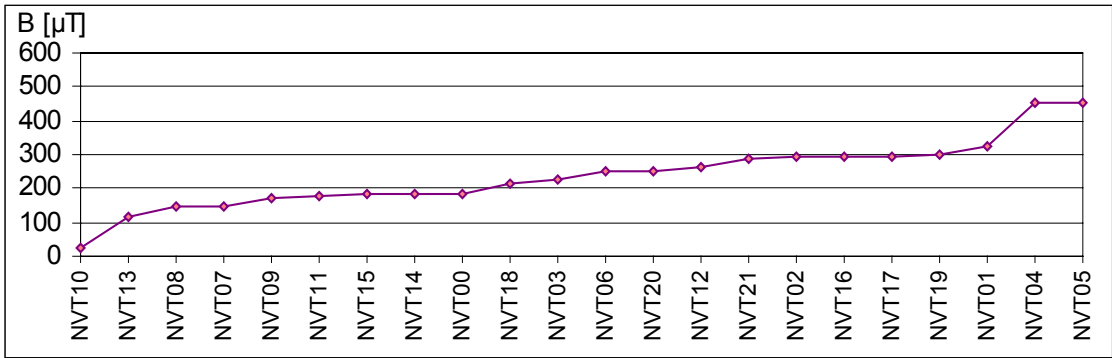


Diagramm 4.1: Maximale Feldstärken der Verteilungen im Abstand von 20 cm zur Vorderseite

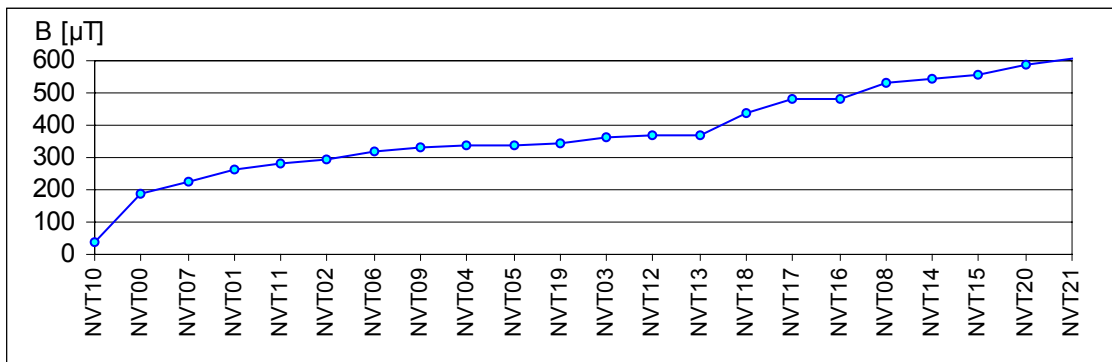


Diagramm 4.2: Maximale Feldstärken der Verteilungen im Abstand von 20 cm zur Rückseite

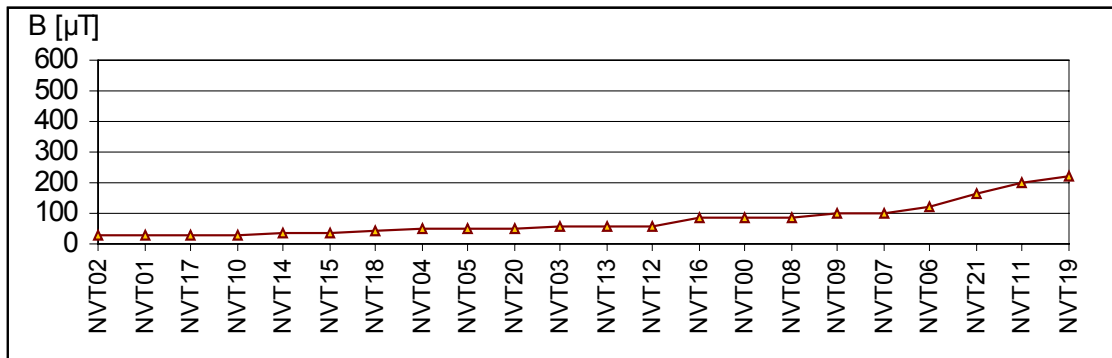


Diagramm 4.3: Maximale Feldstärken der Verteilungen im Abstand von 20 cm zur linken Seitenwand

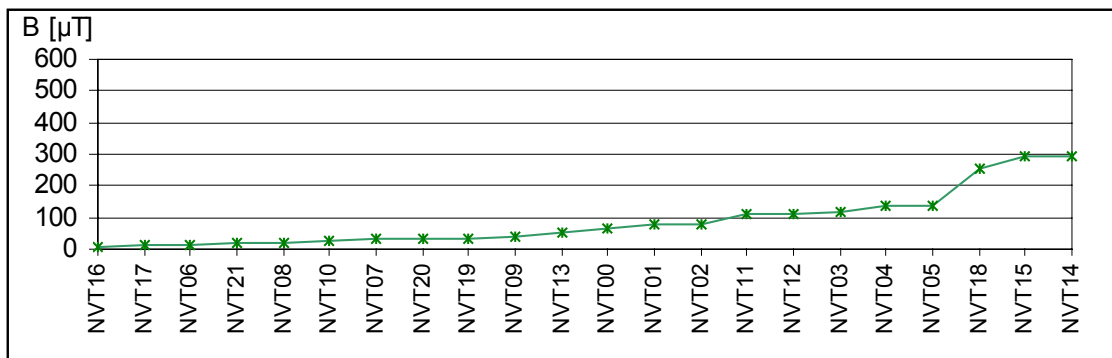


Diagramm 4.4: Maximale Feldstärken der Verteilungen im Abstand von 20 cm zur rechten Seitenwand

Bei Betrachtung der Diagramme 4.1 bis 4.4 fällt auf, daß nur ein geringer Teil der Anlagen die Grenze von $100 \mu\text{T}$ einhält. Insbesondere trifft dies auf die Feldstärken an Vorder- und Rückseite zu, die deutlich größer als die Feldstärken zu den Seiten sind. Dieses ist im wesentlichen auf die Bauart der Niederspannungsverteilungen zurückzuführen, weil die Stromschienenanordnung längs zur Verteilung verläuft. Dieses betrifft vor allem die Hauptstrombahn, was zur Folge hat, daß diese Schienen senkrecht zur Oberfläche, nämlich nach vorne und hinten, abstrahlen und nicht an deren Enden zu den Seiten hin. Zum zweiten befinden sich die Einspeisungen nicht unmittelbar an einer Seite der Verteilung, sondern mehr in die Mitte versetzt, was wiederum eine Feldminimierung an den Seiten zur Folge hat. Die erhöhten Felder an der Rückseite sind dadurch zu erklären, daß die Schienenanordnung innerhalb des Schaltschranks zur Rückwand hin montiert ist. Dies entspricht der momentanen Montagepraxis und ist bedingt durch den Platzbedarf einer Niederspannungsverteilung.

Beim Betrachten der Diagramme heben sich einige Niederspannungsverteilungen durch hohe Feldstärken von den anderen Verteilungen ab. Diese Verteilungen werden anschließend genauer betrachtet und die Entstehung der hohen Feldstärken erklärt.

Vorderseite:

- NVT04 & NVT05 werden oben rechts eingespeist. Die Einspeisung verläuft dabei nah an der Vorderseite der Verteilung. Das Feldmaximum wird daher durch die Einspeiseleitungen hervorgerufen.

Rückseite:

- Im Diagramm ist keine Niederspannungsverteilung vorhanden, die eine hohe Flußdichte aufweist. Bei den Verteilungen NVT18 bis NVT21 sind die Stromschienen besonders nah an die Rückwand montiert, so daß die oben angesprochenen Aspekte, wie Einbauanordnung und Stromschienenlage, zu den hohen Flußdichten von über $400 \mu\text{T}$ führen.

Linke Seitenwand:

- NVT21: Einspeisung erfolgt linksseitig. Die Sammelschienen vom Leistungsschalter verlaufen in einem Bogen zur Verteilerschiene. Dadurch überlagern sich die Feldanteile der Stromschienen und es kommt so zu der Erhöhung.
- NVT11: Einspeisung erfolgt mittig, von unten. Die Stromaufteilung ist zu beiden Seiten gleichmäßig. Die Felderhöhung an der linken Seite ist auf die geringe Schrankbreite zurückzuführen. Die Abgänge sind nahe an der linken Außenwand angeordnet.
- NVT19: Einspeisung erfolgt linksseitig. Die Einspeiseschienen sind lang und verlaufen an der linken Seitenwand herunter, bis auf Höhe der untersten Verteilerschiene. Durch diese Anordnung ist eine Erhöhung der Flußdichte an der linken Seitenwand unvermeidlich.

Rechte Seitenwand:

- NVT14, NVT15 & NVT18: Einspeisung erfolgt rechtsseitig. Die Einspeisung ist sehr nah an der rechten Seitenwand angeordnet. Dadurch ist die Felderhöhung an der rechten Außenwand zu erklären.

Die angegebenen Abstände von 20 cm sind von der Gehäuseoberfläche aus gemessen. Die dort ermittelten Flußdichten liegen, mit einigen Ausnahmen, alle über dem Grenzwert von 100 μT . Der Abstand von 20 cm ist allerdings sehr gering, wenn man die Wanddicke der Netzstationen mitberücksichtigt. Deshalb wurde die gleiche Untersuchung noch einmal in einem Abstand von 40 cm durchgeführt.

Die Feldstärke eines geraden, unendlich langen Leiters fällt von der Leiteroberfläche nach folgender Funktion ab:

$$B = \frac{K}{r} \quad \text{Gleichung 4.2}$$

mit:

- B - magnetische Flußdichte [T]
- K - konstanter Faktor
- r - Entfernung vom Leiter [m]

Für diese einfachste Form eines elektrisch aktiven Elementes kann man aus der Gleichung 4.2 einen Faktor berechnen, um den sich die Flußdichte verringert, wenn der Abstand von 20 cm auf 40 cm vergrößert wird.

$$B_1 = \frac{K}{r_1} \quad \text{Gleichung 4.3}$$

$$K = B_1 \cdot r_1 \quad \text{Gleichung 4.4}$$

$$B_2 = \frac{K}{r_2} = \frac{B_1 \cdot r_1}{r_2} \quad \text{Gleichung 4.5}$$

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{20 \text{ cm}}{40 \text{ cm}} = \frac{1}{2} \quad \text{Gleichung 4.6}$$

Die Flußdichte im Abstand von 40 cm beträgt also, gegenüber der Flußdichte bei 20 cm, nur die Hälfte. Diesen Faktor kann man auch für Funktionen berechnen, deren Flußdichteabnahme nicht mit der Funktion nach Gleichung 4.2 abnimmt. So fällt z.B. die Flußdichte eines 3-Phasen-Systems nach der folgenden Funktion ab:

$$B = \frac{K}{r^2} \quad \text{Gleichung 4.7}$$

Der Faktor für diese Funktion kann, genauso wie der Faktor nach Gleichung 4.6 errechnet werden:

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2} = \frac{(20 \text{ cm})^2}{(40 \text{ cm})^2} = \frac{1}{4} \quad \text{Gleichung 4.8}$$

Die Feldabnahme einer Niederspannungsverteilung ist von der jeweiligen Verteilung abhängig. Es läßt sich allgemein nur sagen, daß der Exponent des Abstandes r nicht ganzzahlig ist¹⁵. Aus diesem Grund sind die Verringerungsfaktoren zwischen der 20 cm- und der 40 cm-Anordnung nicht für alle Verteilungen gleich.

Die maximalen Flußdichten der Niederspannungsverteilungen in einem Abstand von 40 cm sind in den Diagrammen 4.5 bis 4.8 aufgeführt. Die Diagrammverläufe sind prinzipiell die gleichen wie die in der ersten Untersuchung. Hier sind die Feldstärken nur im Mittel um den Faktor 2,5 kleiner. Es macht sich bei dieser Entfernung schon eine Verschmelzung der einzelnen Feldanteile bemerkbar. Im Abstand von 20 cm kann genau festgestellt werden, welche Komponente felderzeugend ist. Im Abstand von 40 cm werden, z.B. auch bei der rückwärtigen Messung, Feldanteile von Komponenten mitgemessen, die seitlich angeordnet sind und überwiegend ein Feld zur Seite erzeugen. Deshalb ist der Verringerungsfaktor nicht bei allen Anlagen gleich, sondern variiert zwischen den einzelnen Verteilungen. Die größte Verringerung der magn. Flußdichte tritt bei der NVT08 an der Rückwand mit einer Verringerung um das 4-fache auf, und die geringste Verringerung wird mit dem 1,4-fachen bei der NVT06 an der rechten Seite festgestellt. Die größten Unterschiede in den Verringerungsfaktoren sind zwischen der Vorder- und Rückseite zu verzeichnen. Hier macht sich wieder die Einbauanordnung der Stromschienen bemerkbar. Weil die Schienen näher zur Rückwand montiert sind, ist dieser Abstand geringer, als von den Schienen zur Vorderseite. Deshalb verringert sich das Feld an der Rückwand im Schnitt um das 2,8-fache, an der Vorderseite aber nur um das 2,5-fache.

¹⁵ vgl. Kupke S. 32

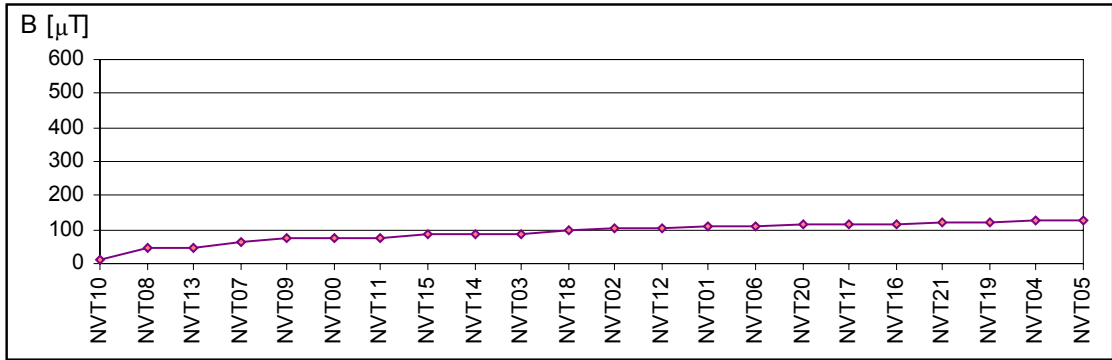


Diagramm 4.5: Maximale Feldstärken der Verteilungen im Abstand von 40 cm zur Vorderseite

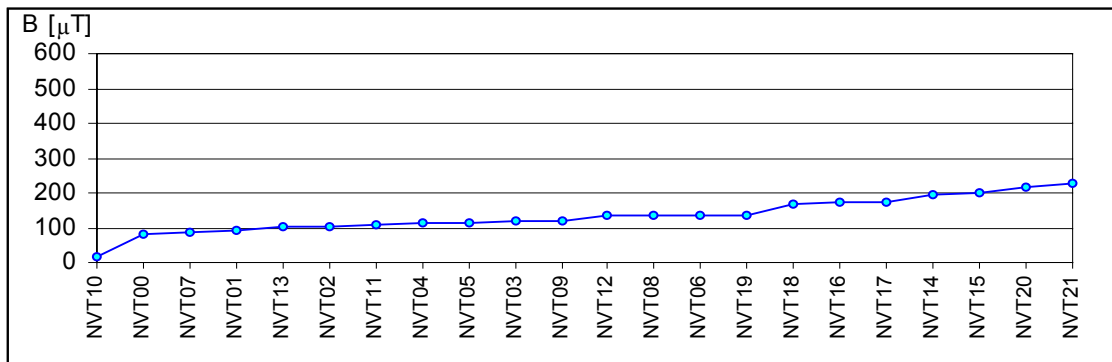


Diagramm 4.6: Maximale Feldstärken der Verteilungen im Abstand von 40 cm zur Rückseite

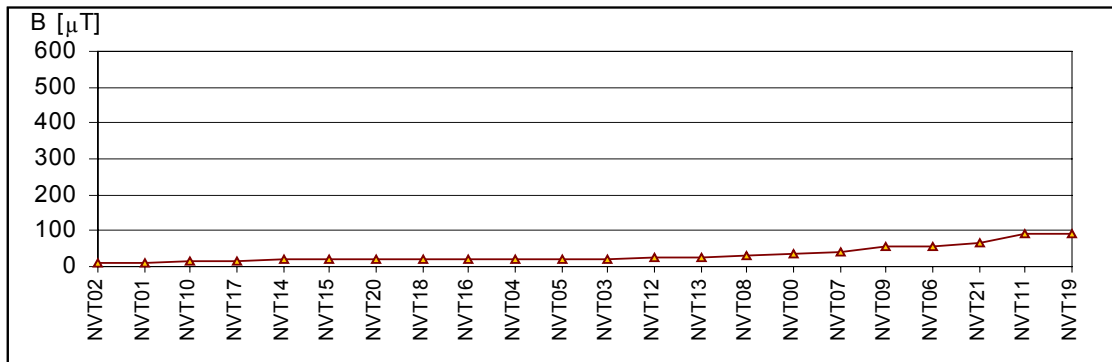


Diagramm 4.7: Maximale Feldstärken der Verteilungen im Abstand von 40 cm zur linken Seitenwand

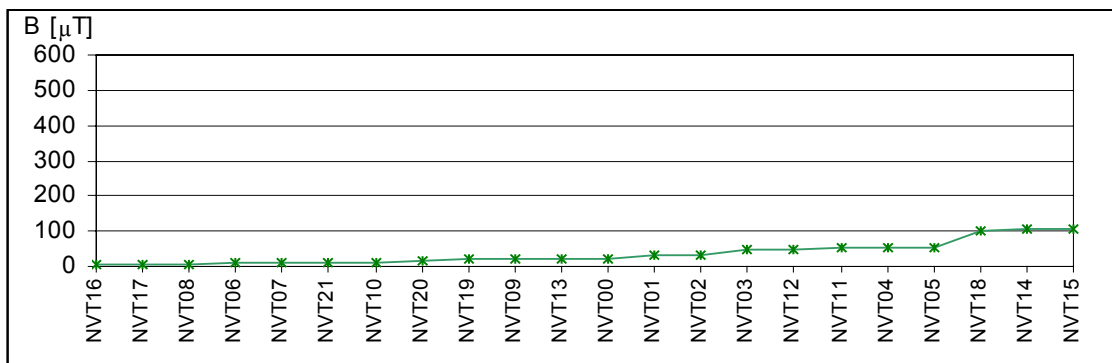


Diagramm 4.8: Maximale Feldstärken der Verteilungen im Abstand von 40 cm zur rechten Seitenwand

4.3 Schlußfolgerung

In der Untersuchung kommt zum Ausdruck, daß die Feldstärken an der Vorder- und Rückseite im Vergleich zu den Feldstärken an den Seitenwänden erheblich größer sind. Vor allem die Rückseite weist große Werte auf. Das ist deshalb problematisch, weil die meisten Anlagen mit der Rückseite an der Wand stehen und dadurch auf der anderen Seite der Wand ein Bereich mit einer erhöhten magnetischen Flußdichte entsteht. Nach den hier vorliegenden Erkenntnissen ist es also besser die Anlage seitlich an die Wand zu stellen. Jedoch sollte nicht die Seite der Verteilung gewählt werden, in der die Einspeisung liegt, weil man beim Betrachten der Verteilungen feststellt, daß die größten Flußdichten an der Einspeisung entstehen¹⁶.

Durch diese Erkenntnisse ist es möglich, von den 22 untersuchten Anlagen 18 so aufzustellen, daß der Grenzwert von 100 μT im Abstand von 20 cm nicht überschritten wird.

Ist diese Maßnahme nicht ausreichend, so kann man nach Kapitel 5 "Einflußfaktoren auf die Flußdichteverteilung" einige Faktoren gezielt beeinflussen oder nach Kapitel 6 "Betrachtung von ausgewählten Optimierungsmaßnahmen" versuchen, die Verteilung zu optimieren.

¹⁶ vgl. Kupke S.72

5 Einflußfaktoren auf die Flußdichteverteilung

5.1 Komponenten und Geräte

5.1.1 Stromschienen

Innerhalb von Niederspannungsverteilungen bestehen die stromführenden Teile überwiegend aus Stromschienen und Kabeln. Die Kabel sind entweder an der Einspeisung oder an den Sicherungstrennleisten angeschlossen und sorgen so für den Energiefluß zur Anlage hin und von der Anlage weg.

Die Stromschienen leiten den Strom innerhalb der Anlage, wobei eine waagerechte als auch eine senkrechte Anordnung möglich ist.

In dem Berechnungsprogramm WinField werden Leiter mit einem runden Querschnitt dargestellt. Es wird also das räumliche Feld eines Leiters mit rundem Querschnitt exakt berechnet. Bei der Konstruktion von Anlagen kann man deshalb die Stromschienen nur als runde Leiter mit den Koordinaten und der Querschnittsfläche eingeben und nicht die Form des Querschnitts bestimmen. Die Stromschienen in Niederspannungsverteilungen haben aber überwiegend einen rechteckigen Querschnitt. Deshalb soll in diesem Kapitel untersucht werden, wie groß die Differenzen zwischen runden und rechteckigen Querschnitten sind und ob man die rechteckige Form der Schienen durch Rundleiter nachbilden kann.

Außerhalb des Leiters fällt die Flußdichte B mit der Entfernung r nach der Funktion¹⁷

$$B = \mu \frac{I_0 \cdot K}{r^x} \quad \text{für } r > r_0 \quad \text{Gleichung 5.1}$$

mit:

K - Formabhängige Konstante

I_0 - Strom des Leiters [A]

μ - Permeabilität $\left[\frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \right]$

r_0 - Radius des Leiters [m]

r - Abstand vom Mittelpunkt des Leiters [m]

ab, wobei der Exponent x im Nahbereich mehrerer Leiter nicht ganzzahlig ist.

¹⁷ vgl. Kupke S.27

Die Formel zur Berechnung der Feldstärke H innerhalb eines Rundleiters stellt sich wie folgt dar¹⁸:

$$H_{(r)} = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot r_0^2} \cdot r \quad \text{für } r \leq r_0 \quad \text{Gleichung 5.2}$$

mit:

- $H_{(r)}$ - Feldstärke [A/m]
- I_0 - Strom des Leiters [A]
- r_0 - Radius des Leiters [m]
- r - Abstand vom Mittelpunkt des Leiters [m]

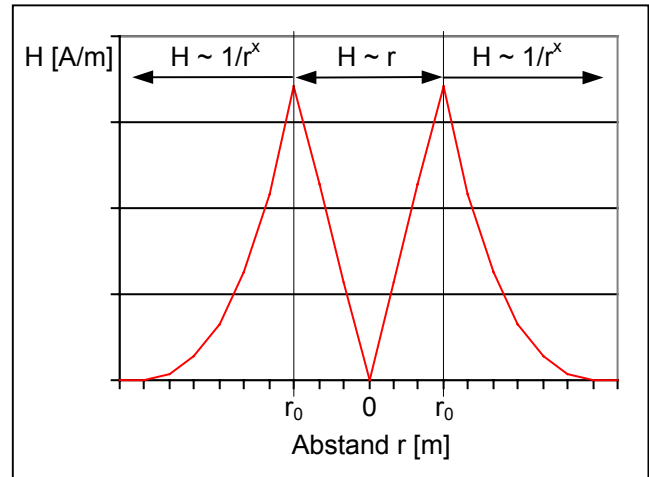


Diagramm 5.1: Feldstärkeverlauf eines Leiters mit dem Radius r_0

Die Flußdichte B entspricht der Feldstärke multipliziert mit der Permeabilität μ .

Die Permeabilität ist das Produkt¹⁹ aus der Permeabilitätszahl μ_r und der magnetischen Feldkonstanten $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$.

$$B_{(r)} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_{(r)} \quad \text{Gleichung 5.3}$$

$$B_{(r)} = \mu_r \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot r_0^2} \cdot r \quad \text{Gleichung 5.4}$$

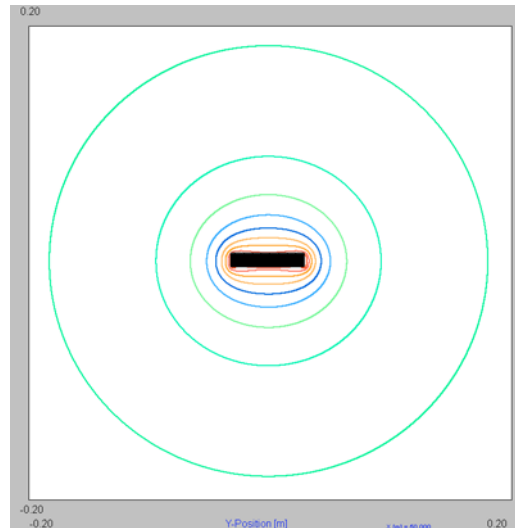
$$B_{(r)} = \mu_r \cdot \frac{2 \cdot I_0}{r_0^2} \cdot r \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \right] \quad \text{Gleichung 5.5}$$

Innerhalb eines Leiters, auf das kein externes Feld einwirkt, ist die Flußdichte im Zentrum gleich Null, weil der Abstand r hier ebenfalls Null ist. Zum Rand steigt die Flußdichte nach Gleichung 5.5 linear an, um dort den Maximalwert zu erreichen. Vom Rand aus fällt die Flußdichte wieder hyperbelförmig nach Gleichung 5.1 ab.

WinField unterscheidet bei der Berechnung der Felder zwischen dem Feld außerhalb und innerhalb des Leiters. Innerhalb des Leiters wird das Feld nach Gleichung 5.5 berechnet und außerhalb nach Biot-Savart als Linienleiter.

¹⁸ vgl. Ose S.165

¹⁹ vgl. Ose S.156

**Abbildung 5.1:**

Isolinien der magnetischen Flußdichte um einen Leiter mit rechteckigem Querschnitt

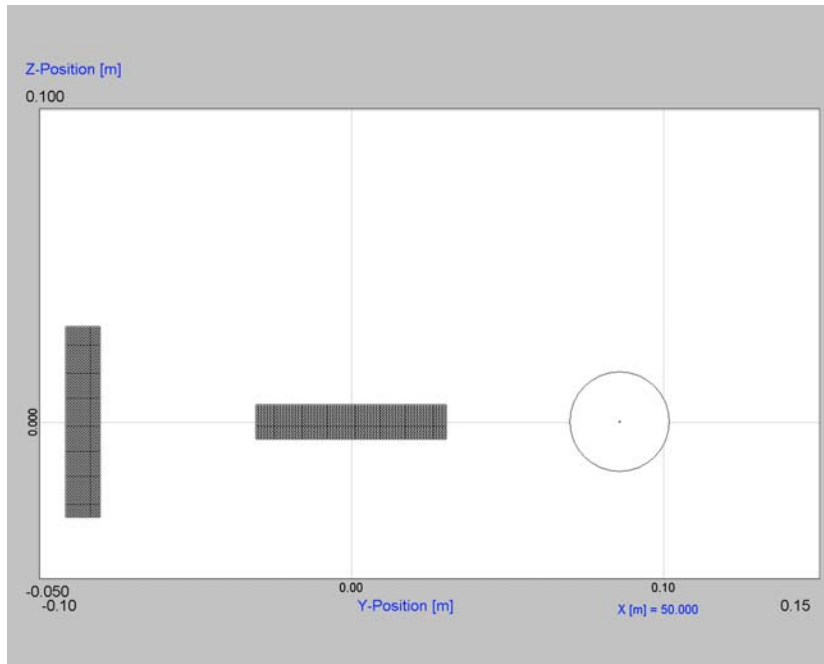
Das Fernfeld eines Leiters ist unabhängig von der Form des Querschnitts. Im Nahbereich kommt es jedoch zu Differenzen. Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, passen sich die Isolinien der magnetischen Flußdichte in der direkten Umgebung des Leiters der Querschnittsform an.

Dieses Kapitel soll sich deshalb mit der Frage befassen, wie groß die Abweichungen der Berechnungsergebnisse sind, wenn ein Leiter mit rechteckigem Querschnitt durch einen Rundleiter ersetzt wird.

Es werden dazu drei Leiterformen (Abbildung 5.2) miteinander verglichen: Ein Rundleiter, eine waagerechte und eine senkrechte Stromschiene. Alle Leiter sind 100 m lang und mit einem Strom von 909 A belastet.

Der Rundleiter besteht aus einem Leiter mit einem Querschnitt von 600 mm^2 und trägt einen Strom von 909 A.

Um die Stromschienen zu modellieren, wird die rechteckige Form der Stromschiene durch mehrere Rundleiter nachgebildet. Dadurch wird die Stromverteilung und die Stromdichte im Leiter approximiert. Dieses gelingt um so genauer, je mehr Einzelleiter verwendet werden. Deshalb wird die Stromschiene aus 671 runden Einzelleitern zusammengesetzt. Der Abstand zwischen den Leitern beträgt jeweils 1 mm, wobei 61 Leiter neben- und 11 Leiter untereinander angeordnet sind. Daraus ergibt sich ein Rechteck mit einer Kantenlänge von $60 \times 10 \text{ mm}$. Jeder Einzelleiter hat einen Querschnitt von $0,894 \text{ mm}^2$ und trägt einen Strom von 1,355 A. Damit haben auch die Stromschienen einen Gesamtquerschnitt von 600 mm^2 und einen Gesamtstrom von 909 A.

**Abbildung 5.2:**

Drei unterschiedliche
Leiterformen:

Links:
Stromschiene senkrecht,
60 x 10 mm

Mitte:
Stromschiene waagrecht,
60 x 10 mm

Rechts:
Linienleiter rund, 600 mm²

Die senkrechte Stromschiene ist 90° gegenüber der waagerechten Ausführung gedreht. Die Drehachse entspricht dem Mittelpunkt des Leiters.

Diese Untersuchung soll zeigen wie groß die Differenz zwischen der Feldverteilungen eines Rundleiters und einer Stromschiene ist. Um die Ergebnisse mit realen Anordnungen vergleichen zu können, werden jeweils drei Leiter zu einem Drehstromsystem kombiniert (Abbildung 5.3) und deren Magnetfelder verglichen. Dazu werden die Leiter im Querschnitt betrachtet und die Feldverteilung in der Umgebung des Leiters untersucht. Der Abstand der drei Schienen zueinander beträgt 86 mm.

Verglichen wird die Flußdichte des Rundleiters mit der Flußdichte der waagerechten Stromschiene entlang einer Bezugslinie. Die Bezugslinie (in Abbildung 5.3 die gestrichelte Linie) ist 800 mm lang und verläuft durch den Mittelpunkt der Leiter. Der Nullpunkt der Linie liegt auf dem Mittelpunkt der mittleren Schiene (Phase L2) und ist zu jeder Seite 400 mm lang. Die seitlichen Schienenkanten liegen 116 mm vom Mittelpunkt entfernt und die Ober- bzw. Unterseite jeweils 5 mm. Diese Werte werden vom Abstand l subtrahiert, um die Entfernung von der Schienenoberseite zu errechnen. Entlang der Bezugslinie wurden die Flußdichten für den Rundleiter und für die waagerechte Stromschiene getrennt voneinander berechnet (Diagramm 5.2).

Den Funktionsverlauf aus Gleichung 5.5 erkennt man im Diagramm 5.2. In der Mitte der Leiter ist die Flußdichte am kleinsten, steigt dann zu den Rändern linear an und fällt von dort hyperbelförmig ab. Weil sich die Felder der drei Leiter überlagern, ist in der Mitte der Leiter die Flußdichte nicht Null.

Die Differenz zwischen der Flußdichte des Rundleiters und der Flußdichte der Stromschiene ist in unmittelbarer Nähe des Leiters am größten (Diagramm 5.3). Mit zunehmendem Abstand von den Leitern nimmt die Differenz der Flußdichten ebenfalls ab. Eine vertretbare Differenz von 1% tritt bei einem Abstand $l=340$ mm auf.

Dieser Abstand entspricht einer Entfernung von 224 mm von den Kanten der äußeren Stromschienen (Phase L1 oder L3). Möchte man die Flußdichte in einem geringeren Abstand zur Stromschiene berechnen, dabei die Differenz zwischen den Feldern aber nicht vergrößern, so kann man Stromschienen nicht durch Rundleiter ersetzen. In diesem Fall muß die rechteckige Stromschiene durch mehrere Rundleiter ersetzt werden, was einem erhöhten Aufwand entspricht, die Berechnungsfehler aber verringert.

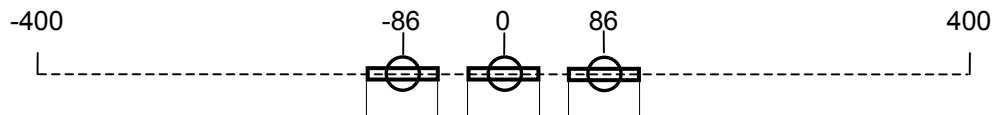


Abbildung 5.3: Die Rechtecke stellen ein 3-phases Stromschienensystem dar, die Kreise ein 3-phases Linienleitersystem. Die Werte entsprechen den Abständen l [mm], entlang der gestrichelten Bezugslinie.

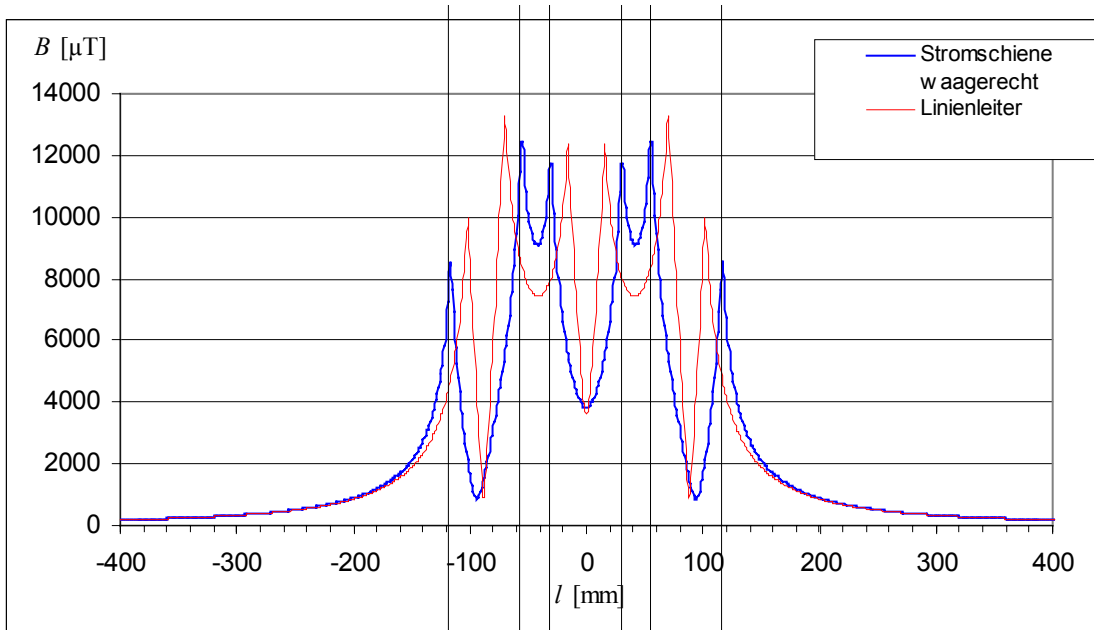


Diagramm 5.2: Vergleich der Flußdichte zwischen Linienleiter und Stromschiene

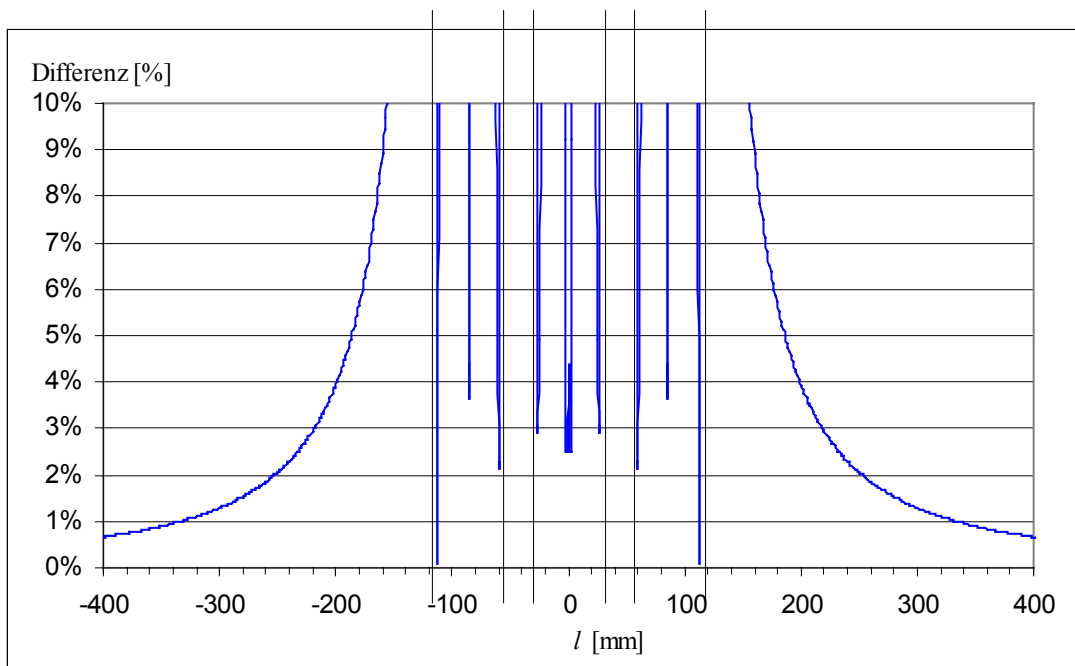
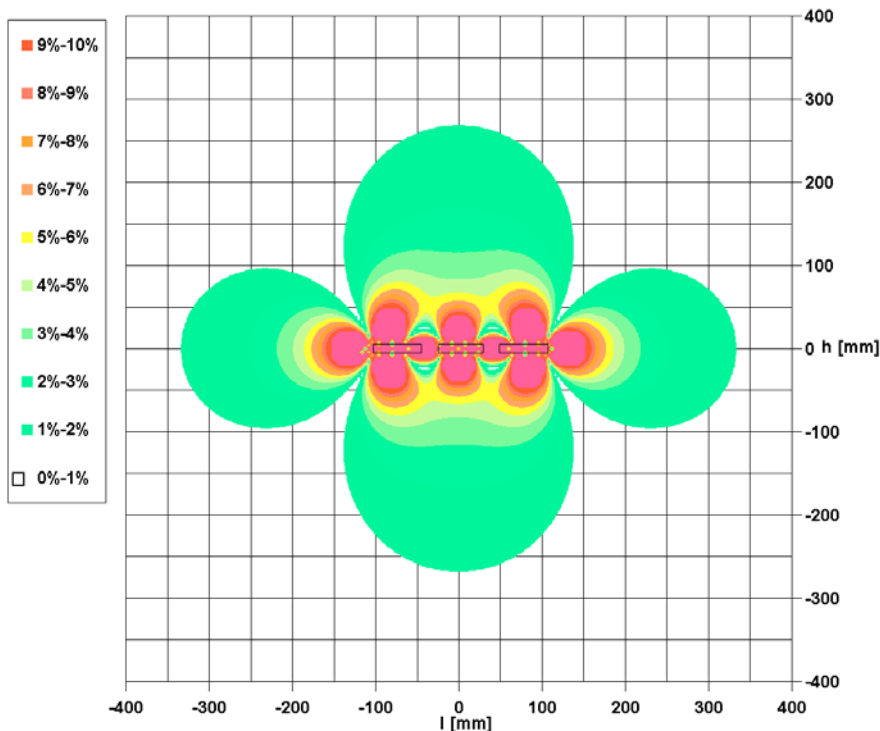


Diagramm 5.3: Prozentuale Abweichung zwischen Stromschiene und Linienleiter

**Diagramm 5.4:**

Prozentuale Differenz der Flußdichten zwischen einem 3-phasigen Rundleitersystem und einem 3-phasigen Stromschienensystem

Um die Differenz der Felder in der Querschnittsfläche beurteilen zu können, werden die Felder in einer Ebene um die Leiter berechnet. Dazu wurde auf einer Fläche von 400 x 400 mm das Magnetfeld für die Rundleiter und für die Stromschienen ermittelt. Die prozentuale Abweichung dieser Felder stellt das Diagramm 5.4 dar.

Die Werte der Linie bei $h=0$ mm entsprechen den Werten aus Diagramm 5.3, weil diese Linie der Bezugslinie der vorhergehenden Untersuchung gleichkommt.

Wurde bei der Auswertung des Diagramms 5.3 noch festgestellt, daß die Flußdichtedifferenz in einem Abstand von $l=340$ mm unter ca. 1% liegt, so ist diese Aussage in Bezug auf Diagramm 5.4 nicht mehr uneingeschränkt richtig, weil die Differenz vom Ort der Berechnung abhängig ist. So kann die Differenz in der Nähe der Ecken des Leiters 0% sein und an den Kanten des Leiters $\geq 10\%$. Bei der Beurteilung der berechneten Magnetfelder muß man also die Fehler abwägen, die entstehen, wenn man Stromschienen durch Rundleiter ersetzt. Bei waagerechten Stromschienen ist der Fehler stets kleiner als 1%, wenn man die Berechnungen der Felder in einer Entfernung von 220 mm seitlich zur Schiene oder 270 mm ober- bzw. unterhalb der Schiene vornimmt.

D.h. in den Entfernungen die im Personenschutz berücksichtigt werden, ist das Verfahren der Nachbildung von Stromschienen mit rechteckigem Querschnitt durch Rundleiter exakt genug, weil der Grenzwert von $100 \mu\text{T}$ erst in einem Abstand von 51 cm eingehalten wird.

Falls man sich jedoch aus technischen Gründen für die Feldstärken im Nahbereich der Stromschienen interessiert, ist es ratsam, die Stromschiene durch mehrere Einzelleiter nachzubilden.

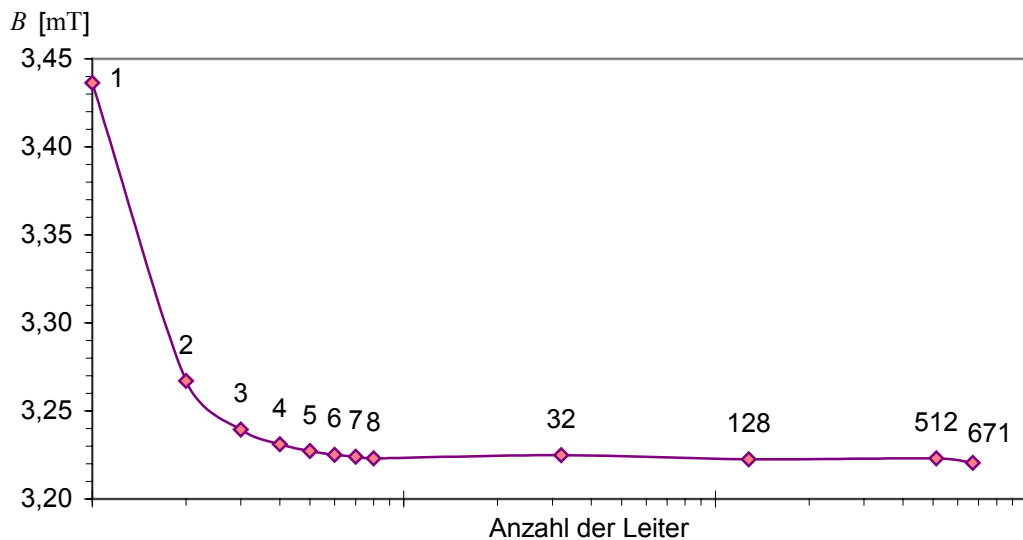
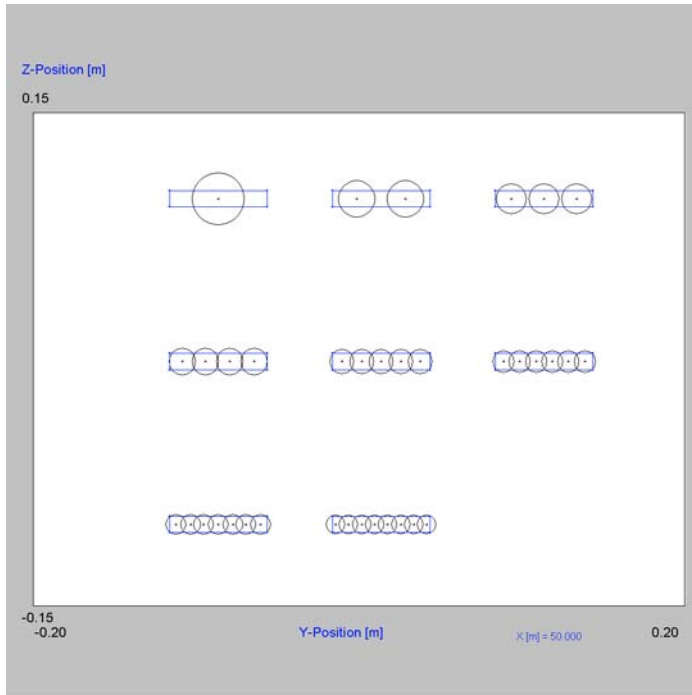


Diagramm 5.5: Feldstärke einer Stromschiene, die durch eine Anzahl von Rundleitern modelliert wird

Bei der vorhergehenden Untersuchung wurden die Stromschienen durch jeweils 671 Rundleiter modelliert. Die nächste Untersuchung soll klären, ob auch eine geringere Anzahl von Rundleitern die Stromschienen nachbilden kann, ohne den dadurch entstehenden Fehler unnötig zu vergrößern. Es zeigte sich schnell, daß die Zahl von 671 Einzelleitern sehr hoch war. Eine Verringerung der Anzahl der Leiter auf 512 oder 128 veränderte die Flußdichte nur wenig (Diagramm 5.5). Deshalb wurde untersucht, ob die Stromschiene auch durch wenige Leiter nachzubilden ist, wobei die geringste Anzahl ein einzelner Leiter ist. Dieses ist, wie oben erklärt wurde, die herkömmliche Art der Leiterdarstellung in WinField. Danach wurde die Anzahl der Leiter um jeweils einen Leiter erhöht, bis insgesamt acht Leiter die rechteckige Stromschiene nachbildeten (Abbildung 5.4).

Bei dieser Untersuchung wurde auch wieder die Flußdichteverteilung eines Drehstromsystems mit jeweils 909 A berechnet. Die Stromschienen haben ebenfalls eine Querschnittsfläche von 600 mm². Genauso wie bei den 671 Einzelleitern, müssen auch hier die Leiter in der Summe eine Fläche von 600 mm² haben und einen Strom von 909 A tragen.

**Abbildung 5.4:**

Anordnung der runden Linienleiter, die eine rechteckige Stromschiene nachbilden

Mit der Erhöhung der Anzahl von Leitern, die eine Stromschiene bilden, vergrößert sich die Flußdichte nur gering. Sie strebt dabei einen Grenzwert an, der mit 671 Leitern annähernd erreicht ist (Diagramm 5.5). Deshalb wird in dieser Untersuchung davon ausgegangen, daß die Stromschiene aus 671 Einzelleitern die reale Stromschiene darstellt. Die Flußdichte, die diese Stromschiene in einem Abstand von 5 cm oberhalb der Schiene erzeugt, wird als Grundlage für diese Untersuchung genommen. Zu dieser Flußdichte wird die prozentuale Abweichung zu den Flußdichten, die die Einzelleiter nach Abbildung 5.4 erzeugen, errechnet. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Diagramm 5.6 zu sehen.

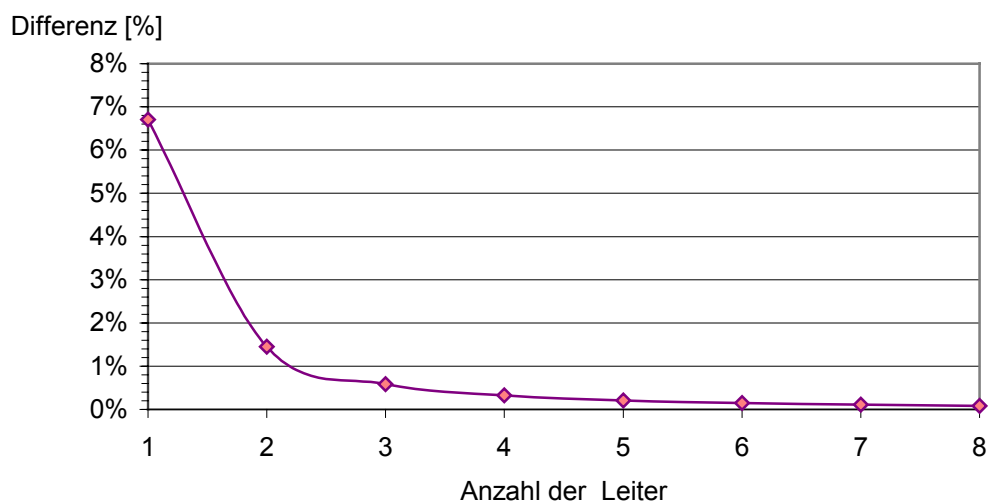


Diagramm 5.6: Differenz der Flußdichte einer 600 mm² Stromschiene, zur Flußdichte einer Anzahl von Leitern deren gesamte Fläche ebenfalls 600 mm² beträgt.

Es zeigt sich, daß die Differenz mit der Anzahl der Leiter schnell abnimmt (Diagramm 5.6). Die geringste Differenz bei acht Leitern beträgt 0,08%, die größte Differenz tritt bei einem Leiter auf und kann auch im Diagramm 5.4 (bei $l=0$ mm, $h=55$ mm) mit ca. 7% abgelesen werden.

Wenn man eine Stromschiene aus 671 Einzelleitern oder aus nur zwei Leitern nachbildet, beträgt die Differenz der Flußdichten, in einem Abstand von 5 cm, nur 1,5%. Dieser Fehler ist geringer als ein Fehler der durch das Messen an einer realen Anordnung entsteht (s. a. Kapitel 2.2 "Meßgeräte"). Es ist also nicht unbedingt nötig einen Leiter, der keinen runden Querschnitt hat, exakt nachzubilden. Es genügt schon, mit wenigen Leitern die Querschnittsfläche ungefähr anzupassen. Die Form wird dabei nicht korrekt nachgebildet, der entstehende Fehler ist aber so gering, daß sich der Arbeitsaufwand nicht lohnt, mit mehreren Leitern die genaue Form nachzubilden.

Für eine Niederspannungsverteilung wurde die Verdopplung der Leitungen einmal exemplarisch vorgenommen. Dazu wurde die Flußdichte der NVT 21 in einem Abstand von 20 cm mit $478,6 \mu\text{T}$ ermittelt. Danach wurden die Leiterquerschnitte und die Ströme der Verteilung halbiert und die Leitungen über die Funktion 'Leitung kopieren' um 2 cm neben die ursprüngliche Geometrie kopiert. Eine anschließende Berechnung ergab eine Flußdichte von $485,8 \mu\text{T}$, was einer Differenz von 1,5% entspricht. Man erkennt also, daß mit einem geringen Aufwand die Flußdichte noch genauer berechnet werden kann. Dieser Aufwand ist aber nicht nötig, wenn man an der $100 \mu\text{T}$ Isolinie Berechnungen vornimmt, weil die Isolinie 58 cm von der Rückseite der Verteilung entfernt ist. Die Differenzen in dieser Entfernung sind kleiner als 0,1% und damit bedeutungslos.

5.1.2 Leistungsschalter

Leistungsschalter werden in Niederspannungsverteilungen als Einspeiseschalter, Kuppelschalter oder Abgangsschalter eingesetzt²⁰.

Die Abgangsschalter werden in den Abgängen anstelle einer Sicherung verwendet. Sie kommen bei großen Lasten zum Einsatz oder zur Gewährleistung einer erhöhten Versorgungssicherheit.

Kuppelschalter werden an der Verbindungsstelle zwischen zwei Verteilungen eingesetzt, um die Verteilungen bei Bedarf zu trennen oder zu verbinden. Sie haben damit eine Kupplungsfunktion zwischen zwei Verteilungen.

Einspeiseschalter werden direkt in den Einspeiseweig einer Niederspannungsverteilung gebaut. Dort haben sie die Aufgabe, den Strom zur Verteilung zu schalten oder im Fehlerfalle den Fehlerstrom zu führen und abzuschalten.

Aufgrund dieser vielfältigen Aufgaben haben Leistungsschalter einen einstellbaren Auslöser und werden mit einer Hilfskraft geschaltet. Diese Hilfskraft kann durch Motor-, Magnet- oder Druckluftantriebe zur Verfügung gestellt werden und erlaubt es, den Leistungsschalter ferngesteuert zu schalten.

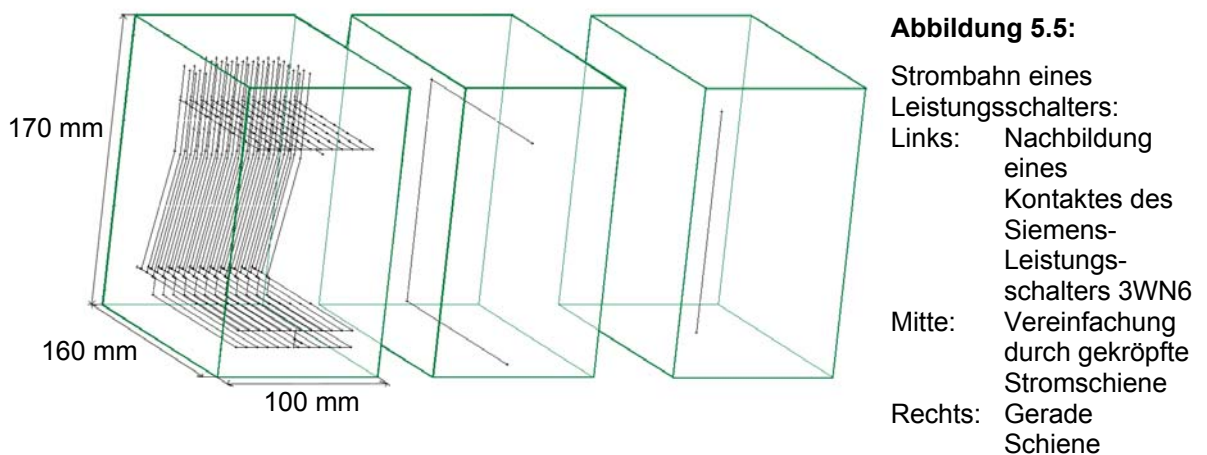
Bei den Verteilungen die im Kapitel 4 "Analyse verschiedener Verteilungen" untersucht wurden, kam der Leistungsschalter als Einspeiseschalter zum Einsatz. Aufgrund des hohen Stromes erzeugt die Einspeisung die größten magnetischen Feldstärken. Deshalb wird an dieser Stelle der Leistungsschalter genauer untersucht. Dabei soll aufgezeigt werden, wie groß der Feldanteil des Leistungsschalters am Gesamtfeld ist und ob man zur Berechnung der Feldstärken den Leistungsschalter in einer vereinfachten Form darstellen kann.

Hierzu wurden von der Firma Siemens Unterlagen zur Verfügung gestellt, die den konstruktiven Aufbau des Leistungsschalters 3WN6 enthalten. Anhand der Unterlagen wurden die stromführenden Teile des Leistungsschalters in WinField nachgebildet. Andere Elemente des Schalters, wie Antriebe aus Metall oder das Gehäuse, wurden nicht berücksichtigt. Das hat zur Folge, daß die errechneten Flußdichten vor dem Gehäuse größer sind, als bei einem realen Leistungsschalter.

Als erste Untersuchung wurde ein Vergleich zwischen der Nachbildung einer realen Strombahn, einer gekröpften Stromschiene und einer geraden Stromschiene vorgenommen. Dieser Vergleich soll Aussagen über die Vereinfachung von Leistungsschaltern zulassen. Denn es ist unkomplizierter bei der Konstruktion einer Anlage den Leistungsschalter durch eine gerade Stromschiene nachzubilden, als durch mehrere, die die Strombahn exakt wiedergeben. Abbildung 5.5 zeigt die drei untersuchten Anordnungen.

²⁰ vgl. **Knies** S.246

Die Nachbildung der Strombahn (in Abbildung 5.5 links) wurde nach den Unterlagen der Firma Siemens vorgenommen. Es handelt sich hierbei um einen Kontakt des Leistungsschalters 3WN6 mit 3200 A Nennstrom. Die Strombahn ist insgesamt 80 mm breit, 140 mm tief und 130 mm hoch. Bei der Strombahn erkennt man die waagerechten, festen Anschlußschienen und die senkrechten, beweglichen Kontakthebel. Die Anschlußschienen- und Kontakthebel haben eine Querschnittsfläche von 30 x 80 mm. Die Nachbildung erfolgte nach den Erkenntnissen des Kapitels 5.1.1 "Stromschienen". Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die Strombahn aus mehreren Rundleitern zusammengesetzt. Die untere Anschlußschiene besteht aus 24 Einzelleitern, die in zwei Ebenen angeordnet sind. Die obere Anschlußschiene wurde aus 12 Leitern nachgebildet und die insgesamt 12 Kontakthebel aus jeweils drei Leitern.



Die in der Mitte dargestellte, gekrüpfte Stromschiene besteht aus drei Rundleitern mit einem Querschnitt von 2400 mm^2 . Der erste Leiter verläuft 140 mm waagrecht nach hinten, daran schließt ein 130 mm langer senkrechter Leiter an, von dem wiederum ein 140 mm langer, waagerechter Leiter nach vorne führt. Der in der Abbildung links dargestellte, gerade Leiter hat ebenfalls eine Querschnittsfläche von 2400 mm^2 und ist 130 mm hoch.

Um einen realen Leistungsschalter nachzubilden, wurde jede dieser drei Anordnungen zu einem 3-phasigen System erweitert. Der mittlere Abstand der drei Phasen betrug dabei 120 mm. Jede Phase wurde mit 909 A belastet. Die Berechnung der Flußdichten erfolgte zur linken, rechten, Vorder- und Rückseite in einer Entfernungen von 10 cm zur Kontaktfläche. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Berechnungs-ort	Nachgebildete Strombahn	Gekröpfte Stromschiene	Gerade Stromschiene
Vorne	428,2 μT	342,2 μT	309,7 μT
Hinten	433,2 μT	342,2 μT	309,7 μT
Links	524,3 μT	864,7 μT	827,9 μT
Rechts	524,3 μT	864,7 μT	827,9 μT

Tabelle 5.1: Flußdichte B in einem bestimmten Abstand zur Oberfläche der Strombahn

Es sind große Differenzen in den Flußdichten zu erkennen. Die berechneten Werte zur Vorder- bzw. Rückseite der Anordnungen sind bei der nachgebildeten Strombahn größer als bei der gekröpften bzw. geraden Stromschiene. Zu den Seiten ist dieses Verhältnis umgekehrt. Die Flußdichten der nachgebildeten Strombahn sind zu den Seiten deutlich geringer als bei den Stromschienen. Diese Differenz in den Flußdichten zwischen Anordnungen, die aus mehreren Leitern zusammengesetzt sind und Anordnungen, die nur aus einem Leiter bestehen, wurde schon in dem Kapitel 5.1.1 "Stromschienen" festgestellt. Dort ist auch eingehend erläutert, daß die Berechnungsergebnisse genauer sind, wenn man die Elemente einer Niederspannungsverteilung aus mehreren Leitern zusammensetzt. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, daß die Kontakte eines realen Leistungsschalters ein Feld erzeugen, welches dem berechneten Feld der nachgebildeten Strombahn gleichkommt.

Die nächste Untersuchung soll zeigen, wie groß der Einfluß eines Leistungsschalters auf das Gesamtfeld der Verteilung ist. Dazu wurden die drei Anordnungen der vorhergehenden Untersuchung (Abbildung 5.5) in die Niederspannungsverteilung NVT 21 eingesetzt. Abbildung 5.6 zeigt dazu die Verteilung mit eingebautem Einspeiseleistungsschalter.

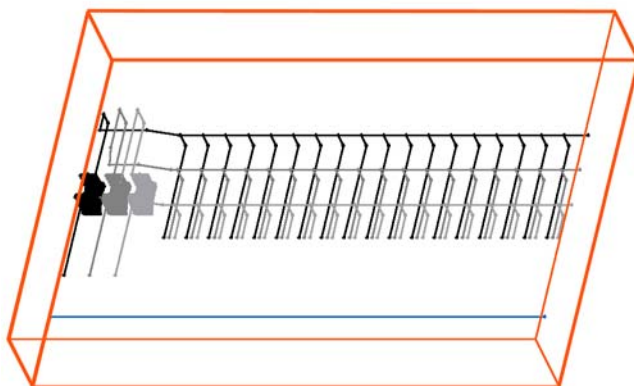


Abbildung 5.6:

NVT 21 mit eingebautem
Einspeiseleistungsschalter

Die Berechnung der magnetischen Flußdichte erfolgte in den Abständen 20 cm und 40 cm zu allen vier Seiten der Verteilung. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Tabelle 5.2 zu sehen.

	Nachgebildete Strombahn	Gekröpfte Stromschiene		Gerade Stromschiene	
Berechnungsort	20 cm Abstand				
Vorderseite	327,8 μT	342,9 μT	4,6%	288,0 μT	-12,1%
Rückseite	487,1 μT	486,9 μT	-0,1%	487,4 μT	0,1%
Linke Seite	220,7 μT	218,9 μT	-0,8%	228,3 μT	3,5%
Rechte Seite	19,5 μT	19,5 μT	0,0%	19,5 μT	0,0%
Berechnungsort	40 cm Abstand				
Vorderseite	138,3 μT	140,0 μT	1,3%	133,2 μT	-3,7%
Rückseite	190,3 μT	190,2 μT	-0,1%	190,7 μT	0,2%
Linke Seite	86,1 μT	85,5 μT	-0,8%	88,4 μT	2,7%
Rechte Seite	10,5 μT	10,5 μT	0,0%	10,5 μT	0,0%

Tabelle 5.2: Flußdichte B der Verteilung NVT 21 mit eingesetztem Leistungsschalter der als nachgebildete Strombahn, gekröpfte oder gerade Stromschiene dargestellt wurde. Die Differenzen zur nachgebildeten Strombahn sind als prozentuale Werte angegeben.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Tabelle 5.1 sind die Unterschiede zwischen der nachgebildeten Strombahn und der gekröpfen Stromschiene nicht sehr groß. Die Unterschiede zwischen der Strombahn und der geraden Stromschiene sind schon größer. Vor allem die Differenzen an der linken Seite und zur Vorderseite der Verteilung sind auffällig.

Die Unterschiede an der linken Seite der Verteilung sind durch den Einbauort des Leistungsschalters zu erklären. Durch die linksseitige Anordnung der Einspeisung und damit des Schalters kommt es hier zu den Differenzen. Die gerade Stromschiene erzeugt hierbei eine größere Flußdichte als die nachgebildete Strombahn, weil die Strombahn durch die Aufteilung des Stromes auf mehrere Leiter ein gleichmäßigeres Feld erzeugt.

Der Abstand zwischen Schalter und Gehäuse innerhalb der Verteilung erklärt die unterschiedlichen Flußdichtewerte zur Vorderseite. Der Abstand zwischen der geraden Stromschiene und dem Gehäuse ist größer als zwischen dem Leistungsschalter und dem Gehäuse. Die gerade Stromschiene verläuft ca. 19 cm hinter der Vorderseite des Gehäuses. Die gekröpfte Stromschiene und der nachgebildete Leistungsschalter haben aber nur einen Abstand von ca. 4 cm zum Gehäuse, so daß durch die weiter entfernte, gerade Stromschiene eine kleinere Flußdichte berechnet wird.

Aus diesen Gründen reicht es nicht aus, den Leistungsschalter durch eine durchgehende Stromschiene zu ersetzen. Mit ein wenig mehr Aufwand kann man die gekrümmte Strombahn des Leistungsschalters nachbilden. Dadurch wird ein Feld erzeugt das dem Feld des Leistungsschalters gleichkommt.

Der Vergleich der nachgebildeten Strombahn mit der durchgehenden Stromschiene entspricht in der Praxis dem Vergleich einer Verteilung mit eingebautem Leistungsschalter

und einer Verteilung ohne Schalter. Die Verteilung ohne Leistungsschalter hat anstelle des Leistungsschalters durchgehende Stromschienen. Bei diesem Vergleich kann man den Anteil des Feldes vom Leistungsschalter am Gesamtfeld der Verteilung erkennen.

Dieser Anteil ist nach hinten und zur rechten Seite mit ca. 0,2% gering. Der Einfluß zur linken Seite ist mit 3,5% bzw. 2,7% ebenfalls nicht sehr groß. Zur Vorderseite ist die Differenz je nach Abstand mit ca. 12% bzw. 3,7% am größten. Diese Werte sind berechnet worden, ohne die Eisenanteile und das Gehäuse des Leistungsschalters zu berücksichtigen. Die realen Werte sind deshalb insgesamt kleiner als die in Tabelle 5.2 angegebenen. Dieser Einfluß wird sich vor allem auf das Feld zur Vorderseite auswirken, weil die Mechanik zur Bewegung der Kontakthebel aus Metall besteht und vor den Kontakten angeordnet ist. Dadurch wird die Flußdichte an der Vorderseite der Verteilung weiter geschwächt und der Anteil des Feldes vom Leistungsschalter am gesamten Feld der Verteilung wird verringert.

Bei der Konstruktion einer Niederspannungsverteilung kann man also durch die Auswahl des Leistungsschalters die auftretenden Magnetfelder beeinflussen. Denn der Leistungsschalter bestimmt die maximalen Flußdichten an den Seiten, die in der Nähe des Schalters liegen. Bei dieser Untersuchung wurde die maximale magnetische Flußdichte an der Vorderseite der Verteilung vom Leistungsschalter erzeugt.

Der Einfluß des Schalters ist aber nur in dessen unmittelbarer Umgebung von Bedeutung. Nach den Erkenntnissen des Kapitels 4 "Analyse verschiedener Verteilungen" sollte eine Niederspannungsverteilung so aufgestellt werden, daß die Seite mit der Einspeisung nicht an einer Wand steht. Dadurch ist der Einfluß des Leistungsschalters im allgemeinen gering, weil dieser immer in der Einspeisung liegt und damit nicht in der Nähe einer Außenwand angeordnet sein sollte.

Aus Platzgründen werden Verteilungen aber, in großen, begehbaren Stationen, überwiegend mit der Rückseite an die Wand gestellt. Dieses ist problematisch, weil an der Rückseite der Verteilung die größten Flußdichten auftreten. Auf die Flußdichten an der Rückseite hat der Leistungsschalter nur einen geringen Anteil, so daß hier die Auswahl des Leistungsschalters unbedeutend ist.

In kleinen, bzw. Kompaktstationen können Niederspannungsverteilungen aber auch so angeordnet sein, daß die Verteilungen von außen zugänglich sind. Dann ist die Tür der Verteilung gleichzeitig eine Wand der Netzstation. In diesem Fall hat die Lage des Leistungsschalters einen entscheidenden Einfluß auf die magnetische Flußdichte vor der Niederspannungsverteilung.

5.1.3 Sicherungen

Sicherungen haben die Aufgabe Geräte vor zu hohen Strömen zu schützen. Dazu besitzen Sicherungen einen oder mehrere thermische Schmelzleiter, die bei Überschreitung eines bestimmten Stromes innerhalb einer festgelegten Zeit abschmelzen. Damit stellen sie innerhalb eines Stromkreises eine "Sollbruchstelle" dar²¹. Das zeitliche Verhalten der Sicherungen in Abhängigkeit vom Ausschaltstrom wird in Zeit-Strom-Kennlinien dargestellt²². Mit Hilfe dieser Kennlinien ist es möglich Sicherungen, den Anforderungen entsprechend, auszuwählen.

Sicherungen unterscheiden sich in den folgenden Punkten von Leistungsschaltern, welche im vorhergehenden Kapitel untersucht wurden:

- Das Auslösen einer Sicherung bedeutet deren Zerstörung und muß anschließend ausgewechselt werden.
- Sicherungen haben eine festgelegte Zeit-Strom-Charakteristik und können nicht eingestellt werden, sondern müssen für jeden Anwendungsfall entsprechend ausgewählt werden.
- Sicherungen haben nur optische Kennmelder. Dadurch steht kein Signal zur Verfügung, welches weiterverarbeitet werden kann. Eine Sicherungsüberwachung wird deshalb oftmals mit einem nachgeschalteten Amperemeter realisiert.
- Sicherungen sind preiswerter als alle anderen Schutzgeräte, können aber nicht überall eingesetzt werden.

Sicherungen kommen in Niederspannungsanlagen als Schutz der Abgangskabel zum Einsatz. Dazu werden auf die waagerechten Stromschienen Sicherungsleisten montiert, in denen die Sicherungshalter integriert sind. An der Unterseite der Sicherungsleisten befinden sich die Kabelanschlüsse. Sicherungsleisten stellen somit das Bindeglied zwischen den Stromschienen und den Abgangskabeln dar. Meistens besitzen Sicherungsleisten noch eine Schaltfunktion. Damit ist es möglich beim Öffnen der Sicherungsleiste die Sicherungen aus den Sicherungshaltern zu ziehen und so den Stromkreis zu unterbrechen. Diese Leisten werden dann als Sicherungstrennleisten bezeichnet.

In die Sicherungstrennleisten werden Niederspannungs-Hochleistungssicherungen (NH-Sicherungen) eingesetzt. Diese gibt es in fünf verschiedenen Größen (Tabelle 5.3)²³, wobei der maximale Nennstrom von NH-Sicherungen bei 1250 A (Größe 4a) und für Sicherungsleisten bei 630 A (Größe 3) liegt.

²¹ vgl. **Knies** S.231 f.

²² vgl. **ABB** S. 305 f.

²³ vgl. **ABB** S. 308

Größe	00	1	2	3	4a
NH-Sicherungsunterteil	160 A	250 A	400 A	630 A	1250 A
NH-Sicherungsleisten	160 A	250 A	400 A	630 A	-

Tabelle 5.3: NH-Sicherungsgrößen

Bei den bisher untersuchten Niederspannungsverteilungen wurden die Sicherungstrennleisten meistens durch gerade Leiter realisiert. Der interne Aufbau der Sicherungsleisten ist aber sehr viel komplexer, so daß an dieser Stelle untersucht werden soll, wie sich die genaue Nachbildung einer Sicherungstrennleiste auf die magnetische Flußdichte auswirkt.

Die erste Untersuchung hierzu soll sich mit der Vereinfachung einer Sicherungstrennleiste befassen. Es wurde schon bei der Nachbildung eines Leistungsschalters gezeigt, daß es nicht unbedingt nötig ist, die genaue Strombahn nachzubilden, sondern, daß es ausreichen kann, diese als gekröpfte Stromschiene zu vereinfachen. Ob und in welcher Form man eine Sicherungstrennleiste vereinfachen kann, ist deshalb Gegenstand dieser Untersuchung. Es wurden hierzu drei Varianten miteinander verglichen. Die erste Variante besteht aus der exakten Nachbildung einer handelsüblichen Sicherungstrennleiste (Abbildung 5.7 links) mit einem Nennstrom von 250 A und NH-Sicherungen der Größe 1. Die zweite Variante besteht aus drei abgewinkelten Leitern (Abbildung 5.7 Mitte) und die dritte Variante aus geraden Leitern (Abbildung 5.7 rechts).

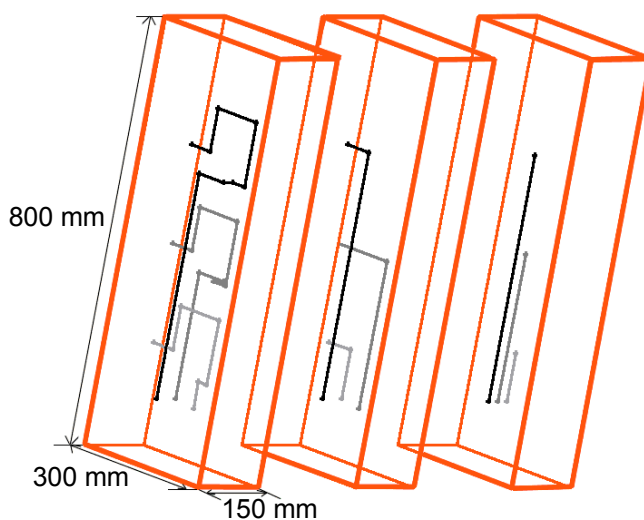


Abbildung 5.7:

Nachbildung einer Sicherungstrennleiste:

Links: Exakte Nachbildung

Mitte: Nachbildung durch abgewinkelte Stromschiene

Rechts: Nachbildung durch gerade Stromschiene

Zu Beginn der Untersuchung wurden die drei Varianten mit einem einheitlichen Strom von 250 A belastet. Anschließend erfolgte die Berechnung der Flußdichte im Abstand von 10 cm und 20 cm zur Leiteroberfläche zu allen vier Seiten. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 5.4 wiedergegeben. Die Differenzen zwischen der exakten Nachbildung und

der abgewinkelten Stromschiene und zwischen der exakten Nachbildung und der geraden Stromschiene sind als prozentuale Werte angegeben.

	Exakte Nachbildung	Abgewinkelte Stromschiene		Gerade Stromschiene	
Berechnungsort	10 cm Abstand				
Vorderseite	296,1 μT	271,6 μT	-8,3%	173,5 μT	-41,4%
Rückseite	175,5 μT	193,1 μT	10,0%	188,8 μT	7,6%
Linke Seite	434,0 μT	437,6 μT	0,8%	388,8 μT	-10,4%
Rechte Seite	397,7 μT	316,5 μT	-20,4%	242,1 μT	-39,1%
Berechnungsort	20 cm Abstand				
Vorderseite	128,2 μT	119,8 μT	-6,6%	85,6 μT	-33,2%
Rückseite	67,1 μT	78,8 μT	17,4%	91,1 μT	35,8%
Linke Seite	159,1 μT	161,4 μT	1,4%	149,0 μT	-6,3%
Rechte Seite	131,2 μT	119,3 μT	-9,1%	103,5 μT	-21,1%

Tabelle 5.4: Flußdichte B einer Sicherungstrennleiste, die einmal als exakte Nachbildung, einmal als abgewinkelte Stromschiene und einmal als gerade Stromschiene dargestellt wurde. Die Differenzen zur exakten Nachbildung sind als prozentuale Werte angegeben.

Die Unterschiede in den Flußdichten sind erheblich. Die größten Unterschiede sind hierbei zwischen der exakten Nachbildung und der geraden Stromschiene festzustellen. Die Differenzen zwischen der abgewinkelten Stromschiene und der exakten Nachbildung sind dagegen etwas geringer. Mit zunehmenden Abstand werden die Unterschiede zwischen den Flußdichten geringer. Eine Ausnahme bildet hier die Rückseite. Die Differenzen in der Flußdichte steigt hier bei der abgewinkelten Stromschiene von 10% auf 17,4% und bei der geraden Stromschiene von 7,6% auf 35,8%, weil die Flußdichte an der Rückseite der exakt nachgebildeten Sicherungstrennleiste stärker abfällt, als bei den beiden anderen Nachbildungen.

Es ist also zu erkennen, daß die Feldverteilungen der abgewinkelten und der geraden Stromschiene einige Unterschiede zur Feldverteilung der exakt nachgebildeten Sicherungstrennleiste aufweisen. Die Unterschiede sind bei der Feldverteilung der geraden Stromschiene größer als bei der abgewinkelten Stromschiene, weil der Strombahnverlauf der abgewinkelten Stromschiene dem Verlauf der exakten Nachbildung genauer entspricht.

Der Berechnungsabstand von 10 cm kommt nur für technische Berechnungen in Frage. Denn im eingebauten Zustand haben die Sicherungstrennleisten einen Abstand von 8,4 cm, so daß man vielleicht bei der Konstruktion einer solchen Leiste die Flußdichte zwischen den Leisten berechnen möchte. In diesem Fall müssen die Sicherungstrennleisten exakt nachgebildet werden.

In Bezug auf den Personenschutz betragen die Abstände mindestens 20 cm. In dieser Entfernung sind die Unterschiede zwischen der exakten Nachbildung der Strombahn und der abgewinkelten Stromschiene unerheblich. Deshalb wird man bei realen Anordnungen die Sicherungstrennleisten als abgewinkelten Leiter darstellen können. Wie groß die Unterschiede dann tatsächlich sind, soll die nächste Untersuchung klären. Hierzu wurden die Sicherungstrennleisten in die NVT 21 eingebaut (Abbildung 5.8).

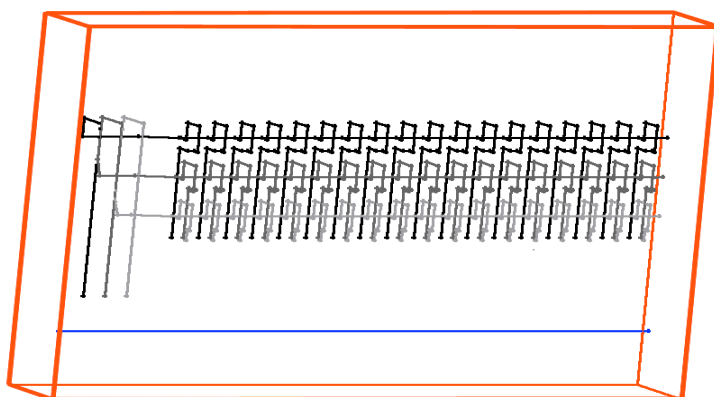


Abbildung 5.8:

Niederspannungsverteilung NVT21
mit eingebauten Sicherungsleisten

Die Flußdichte wurde im Abstand von 20 cm und 40 cm zu allen vier Seiten der Verteilung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.5 dargestellt.

	NVT 21 mit Sicherungstrennleiste dargestellt als:				
	exakte Nachbildung	abgewinkelte Stromschiene		gerade Stromschiene	
Berechnungsort	20 cm Abstand				
Vorderseite	479,8 μT	479,6 μT	0,0%	485,5 μT	1,2%
Rückseite	308,2 μT	311,4 μT	1,0%	306,9 μT	-0,4%
Linke Seite	166,2 μT	166,6 μT	0,2%	166,9 μT	0,4%
Rechte Seite	21,9 μT	21,8 μT	-0,5%	16,5 μT	-24,7%
Berechnungsort	40 cm Abstand				
Vorderseite	185,7 μT	185,4 μT	-0,2%	187,9 μT	1,2%
Rückseite	129,6 μT	131,7 μT	1,6%	129,3 μT	-0,2%
Linke Seite	68,2 μT	68,3 μT	0,1%	68,2 μT	0,0%
Rechte Seite	11,7 μT	11,6 μT	-0,9%	9,3 μT	-20,5%

Tabelle 5.5: Flußdichte B der Verteilung NVT 21 mit eingesetzten Sicherungstrennleisten die als exakte Nachbildung, abgewinkelte oder gerade Stromschiene dargestellt wurden. Die Differenzen zur nachgebildeten Strombahn sind als prozentuale Werte angegeben.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Flußdichten sind sehr gering. Nur die gerade Stromschiene erzeugt im Abstand von 20 cm, an der rechten Seite mit 16,5 μT eine Flußdichte, die um 24,7% geringer ist als die Flußdichte der exakten Nachbildung. Die rechte Seite ist auch die einzige Seite an der die Sicherungstrennleisten einen entscheidenden Einfluß auf die Flußdichte haben. Zur linken Seite wird die Flußdichte von der Einspeisung erzeugt, zur Vorder- und Rückseite sind die Stromschiene die Hauptverursacher. An der rechten Seite beeinflussen aber nur die Sicherungstrennleisten die Flußdichte, weshalb hier die Unterschiede in der Nachbildung der Sicherungstrennleisten besonders auffallen. Die Flußdichten sind an der rechten Seite aber so gering, daß deren Unterschiede, in Bezug auf den Personenschutz, unbedeutend sind.

Man sieht also, daß keine Notwendigkeit besteht die Sicherungstrennleisten exakt nachzubilden, wenn an Niederspannungsverteilungen die Flußdichten in Bezug auf den Personenschutz ermittelt werden sollen. Es ist hierzu ausreichend, die Leisten durch einfache, abgewinkelte Leiter zu ersetzen. Eine Vereinfachung durch gerade Leiter sollten, wenn möglich, vermieden werden, weil es dann zu größeren Unterschieden kommen kann.

5.1.4 Montageplatte und Gehäuse

Montageplatten und Gehäuse bewirken eine Abschirmung des magnetischen Feldes. Diese Schirmung führt dazu, daß das magnetische Feld der Niederspannungsverteilung verringert wird.

Die Wirksamkeit einer Schirmung basiert darauf, daß die äußere Feldstärke H_1 innerhalb des Schirms auf die Feldstärke H_2 reduziert wird. Der Quotient aus H_1 und H_2 ist dabei der Schirmfaktor S , der wie folgt definiert ist:

$$S = \frac{H_1}{H_2} \quad \text{Gleichung 5.6}$$

Die Schirmdämpfung

$$a_S = 20 \cdot \lg S = 20 \cdot \lg \frac{H_1}{H_2} \quad [\text{dB}] \quad \text{Gleichung 5.7}$$

bewertet ebenfalls die Wirkung der Abschirmung.

Als nächstes soll die Wirkungsweise einer Abschirmung erklärt werden. Es gibt Schirme aus ferromagnetischem Material und aus unmagnetischem Material.

Die Schirme aus ferromagnetischem Material besitzen eine Permeabilität $\mu_r \gg 1$ und eine spez. Leitfähigkeit, die kleiner ist, als bei unmagnetischen Materialien. Durch die große Permeabilität sorgen sie für einen magnetischen Nebenschluß, der das Feld in den Schirm lenkt. Die magnetischen Feldlinien bevorzugen den Weg im Inneren der Schirmwandung, weil hier der magnetische Widerstand kleiner als in Luft ist. Abbildung 5.9 zeigt dazu, wie die Feldlinien in die Schirmwandung gelenkt werden. Der Raum innerhalb der Schirmung weist deshalb eine geringere Feldstärke auf, als außerhalb.

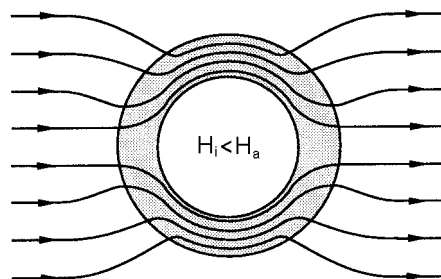
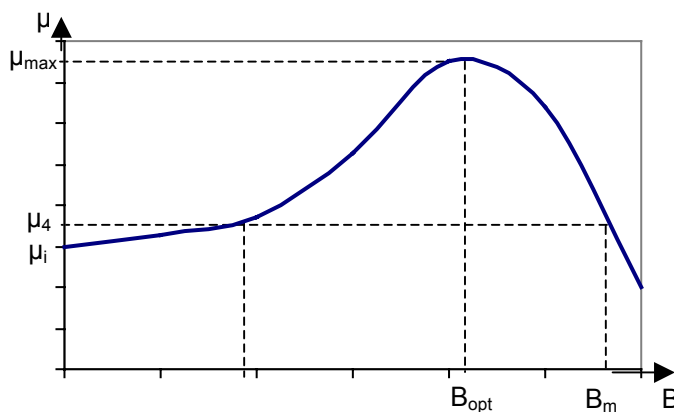


Abbildung 5.9:

Ablenkung der Feldlinien in die Schirmwandung²⁴

Der Effekt und damit die Schirmwirkung ist umso größer, je höher die Permeabilität ist. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Permeabilität eines Materials nicht konstant ist, sondern von Feldstärke und Frequenz abhängt. Der Zusammenhang zwischen Permeabilität und Feldstärke ist in Diagramm 5.7 dargestellt.

²⁴ vgl. VAC S. 6

**Diagramm 5.7:**

Permeabilität μ in Abhängigkeit von der Flußdichte B^{25}

Mit zunehmender Feldstärke wird die Permeabilität größer, bis sie einen Maximalwert erreicht, danach fällt sie wieder ab. Der Wert μ_i ist die Anfangspermeabilität bei $H = 0$ A/m und μ_4 ist die Permeabilität bei $H = 4$ mA/cm. An dem Hochpunkt μ_{max} ist die maximale Permeabilität erreicht. Hier ist die Flußdichte in dem Material am größten und wird deshalb als optimale Flußdichte B_{opt} bezeichnet. Die Flußdichte B_m kennzeichnet den Punkt, an dem die Permeabilität wieder auf μ_4 abgesunken ist.

Weil der Kurvenverlauf nach B_{opt} wieder abfällt, kann die magnetische Flußdichte in einem Material nicht beliebig groß werden, sondern strebt einen Grenzwert an. Wenn dieser Grenzwert μ_{max} erreicht ist, ist das Material magnetisch gesättigt. Eine zusätzliche Erhöhung der Feldstärke bewirkt nur noch, daß die Feldlinien auch außerhalb des Materials vorbeifließen.

Der zweite Effekt, der bei der Abschirmung von magnetischen Feldern auftritt, ist die Erzeugung eines Gegenfeldes. Dieser Effekt überwiegt bei unmagnetischen Schirmmaterialien, deren spez. Leitfähigkeit besser ist, als bei magnetischen Materialien. Die Permeabilität ist bei unmagnetischen Materialien konstant, mit $\mu_r \approx 1$. Die Wirkung beruht auf der Erzeugung eines Feldes, welches dem eigentlichen Feld entgegengesetzt ist.

Zur Vereinfachung kann man sich die Abschirmung als eine geschlossene Leiterschleife vorstellen, die vom verursachenden Magnetfeld durchsetzt wird. Nach der 2. Maxwell Gleichung

$$u = \oint E ds = A \frac{dB}{dt} \quad \text{Gleichung 5.8}$$

mit :

- u - Spannung [V]
- E - elektrisches Feld [V/m]
- ds - Wegdifferenz [m]
- A - Fläche [m²]
- dB - magnetische Flußdichtenänderung [T=Vs/m²]
- dt - Zeitdifferenz [s]

²⁵ vgl. VAC S. 8

umgibt jedes zeitlich veränderliche Magnetfeld, ein geschlossenes elektrisches Feld²⁶. Dieses Feld erzeugt eine Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten, welche einer induzierten Spannung entspricht. Diese Spannung wird in der Leiterschleife induziert, welche aus einem elektrisch leitfähigen Material besteht. Dort ruft sie, aufgrund der spez. Leitfähigkeit, einen Stromfluß hervor. Dieser Stromfluß erzeugt ebenfalls ein magnetisches Feld, welches nach der Regel von Lenz, der Ursache und damit dem erzeugenden Magnetfeld entgegengesetzt ist. Wenn man die Leiterschleife durch eine massive Platte ersetzt, sind die Vorgänge in der Platte mit denen in der Leiterschleife vergleichbar.

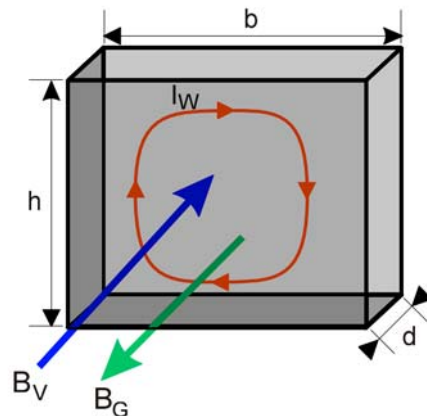


Abbildung 5.10:

Dämpfung des verursachenden Feldes B_V , durch Erzeugung eines Gegenfeldes B_G , mittels des Wirbelstromes I_W , in einer Metallplatte mit der Höhe h , der Breite b und der Stärke d .

Die Abbildung 5.10 veranschaulicht die Zusammenhänge noch einmal am Beispiel einer Metallplatte. Das verursachende Feld B_V induziert in der Platte Spannungen. Aufgrund der Leitfähigkeit des Schirmes, bilden sich in der Metallplatte Kreisströme (Wirbelströme) aus, die wiederum ein Magnetfeld erzeugen, welches dem äußeren Feld entgegengesetzt ist und dieses dadurch schwächt. Das Prinzip der Abschirmung beruht also auf der Abschwächung des verursachenden Feldes durch ein Gegenfeld. Die Schirmwirkung ist damit vom erzeugten Gegenfeld abhängig, welches wiederum vom Schirmmaterial, der Frequenz des erzeugenden Feldes, der Schirmdicke und der Schirmgeometrie abhängig ist. Die Formel zur Berechnung der Eindringtiefe δ von magnetischen Feldern in Materie, faßt beide Schirmwirkungen zusammen²⁷:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \kappa}}$$

Gleichung 5.9

mit :

δ – Eindringtiefe [m]

f – Frequenz [Hz]

μ_0 – Magnetische Feldkonstante: $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

μ_r – Permeabilitätszahl

κ – spez. Leitfähigkeit $\left[\frac{\text{m}}{\Omega \text{ mm}^2} = \frac{\text{MS}}{\text{m}} \right]$

²⁶ vgl. Lindner S. 456

²⁷ vgl. Schwab S.227

Gleichung 5.9 beschreibt, wie tief ein magnetisches Feld bei einer bestimmten Frequenz in ein Material eindringt, um auf 37% des einfallenden Wertes abzufallen. Das Material ist durch die Konstanten der spez. Leitfähigkeit und der Permeabilität festgelegt. Beim Vergleich ausgewählter Materialkonstanten zeigt sich, daß das Produkt aus Permeabilität und Leitfähigkeit bei magnetischen Stoffen größer ist, als bei unmagnetischen. Weil dieses Produkt reziprok zur Eindringtiefe ist, dringt das magnetische Feld in unmagnetische Stoffe tiefer ein, als in magnetische. Tabelle 5.6 vergleicht dazu Aluminium und Stahl miteinander. Es zeigt sich, daß die Eindringtiefe δ von Aluminium mit 11,86 mm größer ist, als bei Stahl mit 2,12 mm.

	Stahl	Aluminium
μ_r	450	1,000022
κ [MS/m]	2,5	36
δ [mm]	2,12	11,86

Tabelle 5.6:

Eindringtiefen von Aluminium und Stahl bei $f=50$ Hz

Bei niedrigen Frequenzen ($f < 100$ kHz) ist die Eindringtiefe meistens größer als die Wandstärke der Schirmung. Wenn die Eindringtiefe aber größer als die Wandstärke ist, kann der Effekt der magnetischen Abschirmung nicht zum tragen kommen²⁸ und es wirkt nur noch der induzierte Wirbelstrom, mit dem Gegenfeld als schirmender Effekt. Deshalb haben unmagnetische Materialien, gegenüber den magnetischen, bei niedrigeren Frequenzen eine bessere Schirmwirkung, als bei höheren Frequenzen. Praktische Messungen an Stahl- und Aluminiumplatten ergeben auch, daß bei Netzfrequenz der Schirmfaktor für Stahl kleiner ist als für Aluminium.

Die abschirmende Wirkung einer Metallplatte kann mit WinField berechnet werden, wobei nur der Effekt des erzeugten Gegenfeldes realisiert werden kann. Das Programm berücksichtigt nicht die magnetische Ableitung aufgrund der Permeabilität von Abschirmungen.

Mit der WinField Option "Metallplatte" kann man eine Platte aus Stahl oder Aluminium einbringen, die eine bestimmte Größe und Stärke aufweist und damit ein bestimmtes Volumen hat. Weil das Programm als Berechnungsgrundlage geschlossene Stromkreise benötigt, ist diese Platte aus mehreren Leiterschleifen zusammengesetzt. Die Volumen dieser Schleifen ergeben zusammen das Volumen der Metallplatte. In den Schleifen werden durch das äußere Feld Spannungen induziert, die Wirbelströme zur Folge haben. Diese Wirbelströme erzeugen ein Gegenfeld, welches das äußere Feld schwächt.

Zur exakten Simulation müßte man mit unendlich kleinen Stromschleifen rechnen, um die Wirbelströme in der Metallplatte genau berechnen zu können. Dieses ist in der Praxis natürlich nicht möglich, weil man dazu unbegrenzte Rechenkapazitäten benötigen würde. Deshalb wird bei der Simulation mit WinField die Metallplatte durch ein Gitter, mit einer Maschenweite von 10 cm, realisiert. Die WinField-Metallplatte sieht dadurch wie ein Metallgitter aus.

²⁸ vgl. Schwab S. 227

Diese WinField-Metallplatte wurde als Abschirmung einer Niederspannungsverteilung eingesetzt. Dazu wurde die Untersuchung an der NVT 21 vorgenommen. Diese Niederspannungsverteilung hat eine linksseitige Einspeisung mit einer Stromaufnahme von 909 A. Die insgesamt 18 Abgänge führen einen Abgangsstrom von je 50,5 A. Die Verteilung hat die Abmessungen 2,45 m Breite, 1,75 m Höhe und 0,37 m Tiefe. Abbildung 5.11 zeigt die Verteilung in 3D-Ansicht wie sie in WinField als Grundlage der Berechnung konstruiert wurde.

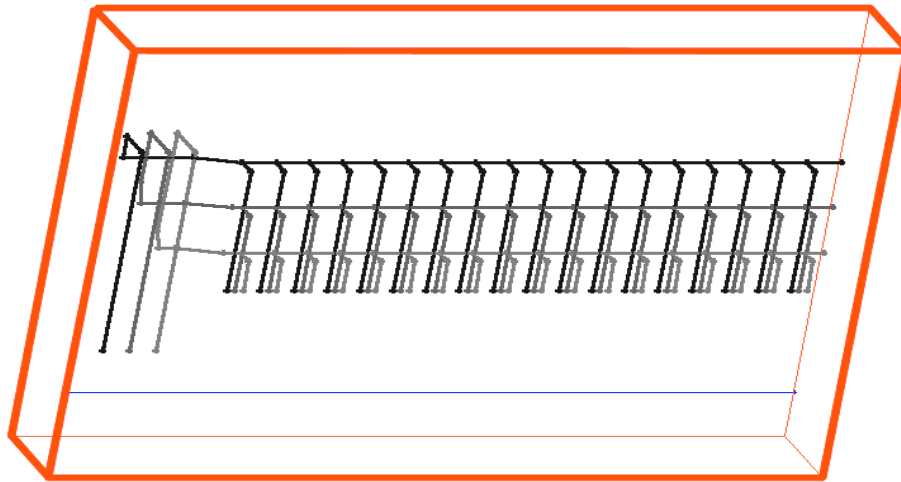


Abbildung 5.11: Niederspannungsverteilung NVT 21. Es sind die linksseitige Einspeisung und die 18 Abgänge zu erkennen. Der Rahmen deutet nur die Verteilungsgröße an und soll kein Gehäuse darstellen.

5.1.4.1 Gehäuse

Die Abschirmung wird als erstes durch ein Metallgehäuse realisiert, weil hier die größte Feldschwächung zu erwarten ist.

Das Gehäuse entspricht, mit den Abmessungen von 2,45 m Breite, 1,75 m Höhe und 0,37 m Tiefe, der Größe der Verteilung. Es besteht aus WinField-Metallplatten mit einer Maschenweite von 10 cm.

Das Gehäuse umschließt die Niederspannungsverteilung zu allen Seiten hin und hat damit vier Seitenwände, einen Boden und ein Dach. Türen oder andere Öffnungen sind nicht vorgesehen. Die einzelnen Gehäuseteile sind elektrisch miteinander verbunden, so daß Ausgleichsströme fließen können.

Als Gehäusematerialien werden Aluminium und Stahl in den Stärken 1 bis 5 mm in jeweils 1 mm Schritten verwendet. Damit die Untersuchung nicht zu umfangreich ausfällt, wird nur die maximale Flußdichte, im Abstand von 20 cm hinter der Gehäuserückwand, berechnet. Ohne Gehäuse beträgt dort die Flußdichte 478,6 μT . Das Diagramm 5.8 zeigt das Ergebnis der Untersuchung. Es ist die Dämpfung a , als Funktion von der Gehäusestärke aufgetragen. Die zwei Kurven geben jeweils den Dämpfungsverlauf für das Aluminiumgehäuse (Al) und für das Stahlgehäuse (St) wieder.

Der Verlauf der Kurven wird mit zunehmender Gehäusestärke flacher, deshalb ist es nicht sinnvoll die Metallplatten des Gehäuses noch dicker auszuführen.

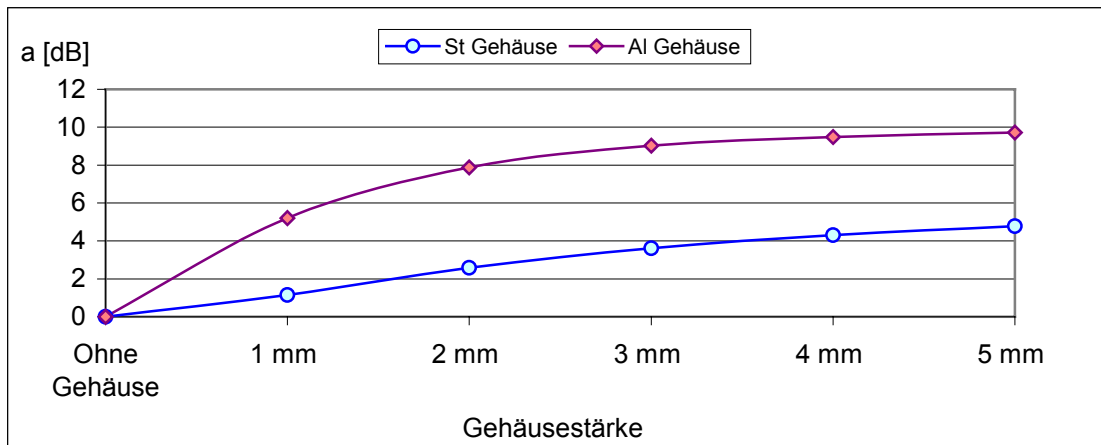


Diagramm 5.8: Dämpfung des Magnetfeldes durch Aluminium oder Stahlgehäuse

Man erkennt an dem Diagramm 5.8, daß das Aluminiumgehäuse eine bessere Dämpfung des verursachenden Feldes aufweist. Dies läßt sich durch die bessere Leitfähigkeit von Aluminium erklären, denn in Stahl werden die Wirbelströme stärker durch den höheren Widerstand gedämpft.

Beide Materialien reduzieren das erzeugende Feld. Die Dämpfung liegt hier aber bei höchstens 10 dB, bei einer minimalen Flußdichte von $156 \mu\text{T}$ (5 mm Aluminiumgehäuse). Diese Dämpfung erscheint sehr niedrig, ist aber im Vergleich zur Schirmgröße eher als gute Dämpfung zu bewerten, weil die Dämpfung mit der Größe des zu schützenden Volumens abnimmt. So kommt man z.B. bei einem 10 m großen Raum, mit einer 1 mm starken Mu-Metallverkleidung nur auf eine Schirmdämpfung von 6 dB. Eine Monitorverkleidung aus dem gleichen Material hingegen dämpft das Feld bis zu 40 dB²⁹.

5.1.4.2 3 x 2 m Metallplatte

In dem vorhergehenden Kapitel wurde untersucht, in welcher Form ein Magnetfeld, welches von einer Niederspannungsverteilung ausgeht, durch ein Metallgehäuse abzuschirmen ist. Die Abschirmung des Feldes erfolgte dabei zu allen Seiten hin. Wenn man das Feld aber nur zu einer Seite abschwächen möchte, so kann man eine Metallplatte an diese Seite anbringen und die übrigen Seiten offen lassen. Dadurch wird das Feld überwiegend zu der Seite geschwächt, an der sich die Platte befindet. Es erfolgt aber, aufgrund des Gegenfeldes, eine Reduzierung des Feldes insgesamt.

²⁹ vgl. Habiger S. 342

Bei der allseitigen Abschirmung wird viel Material benötigt, denn die NVT 21 hat eine Gehäuseoberfläche von $1168,3 \text{ dm}^2$.

Für die Rückseite hingegen benötigt man lediglich $428,75 \text{ dm}^2$ Material. Es ist also nur noch ein Materialeinsatz von 37% notwendig.

Wenn es also nicht unbedingt notwendig ist, das gesamte Feld optimal zu allen Seiten abzuschirmen, sondern nur zu einer Seite, weil die Verteilung dort vielleicht an einer Außenwand steht, kann man viel Material einsparen (s. a. Kapitel 5.1.4.4 "Monetärer Vergleich der Abschirmungen").

In dieser Untersuchung soll es darum gehen das Feld der NVT 21 nur zu einer Seite zu schwächen. Als Bezugsfläche wird wieder die Rückseite im Abstand von 20 cm gewählt. Die Flußdichte ohne Abschirmung beträgt $478,6 \mu\text{T}$. Die Metallplatte wird wieder durch eine WinField-Metallplatte, mit der Maschenweite $10 \times 10 \text{ cm}$, realisiert. Diese Platte wird in einem Abstand von 5 cm zentriert, hinter die Verteilung montiert, was ungefähr dem Abstand zwischen der Niederspannungsverteilung und der Wand entspricht. Die Platte hat die handelsüblichen Maße 3 m Breite und 2 m Höhe und ist damit an den Seiten 27,5 cm und oben 25 cm größer als die Verteilung. Nach unten schließt die Platte mit der Verteilung bündig am Boden ab. Die anderen Seiten der Verteilung werden nicht abgeschirmt. Als Schirmmaterialien kommen wieder Aluminium und Stahl zum Einsatz. Die Materialstärken betragen wieder 1 mm bis 5 mm, in jeweils 1 mm Schritten. Die Abbildung 5.12 veranschaulicht die Aufstellung der Verteilung und die Anordnung der Metallplatte.

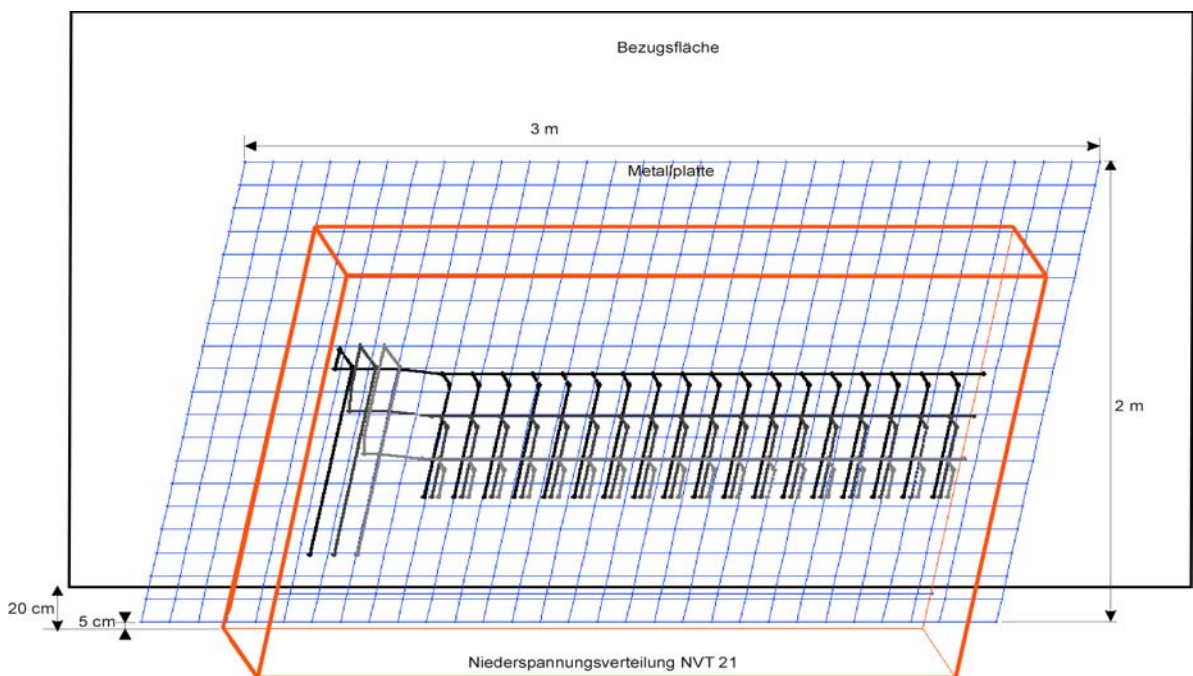


Abbildung 5.12: NVT 21 mit Metallplatte als Abschirmung. Die Bezugsfläche stellt den Ort der Messung dar.

Die Metallplatte schwächt das Feld insgesamt. Durch die einseitige Schirmung ist aber die größte Reduktion an der Rückseite zu erwarten, so daß hier ähnliche Dämpfungswerte wie beim Gehäuse auftreten.

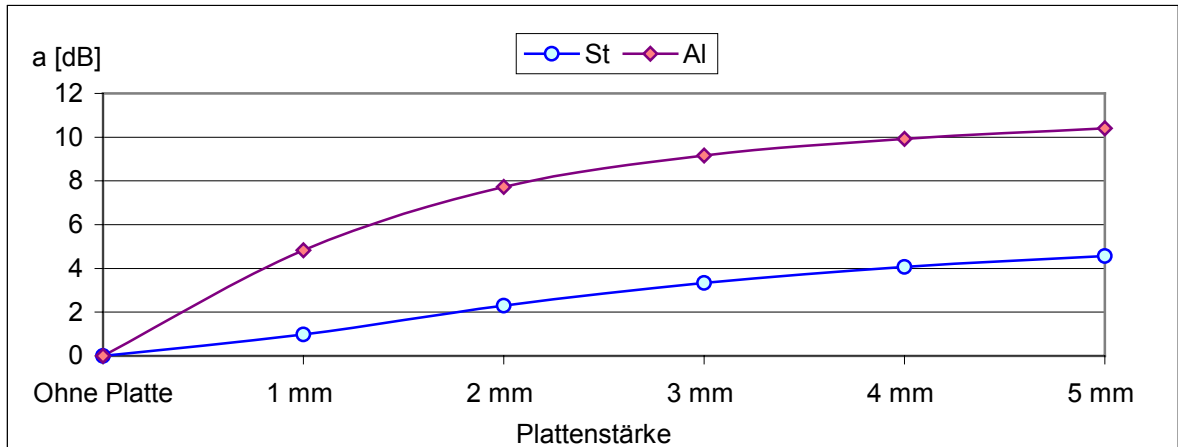


Diagramm 5.9: Dämpfungsverlauf des Magnetfeldes der NVT 21, bei Reduktion durch eine Metallplatte von 3 x 2 m.

Diagramm 5.9 stellt den Zusammenhang zwischen der Dämpfung a und der Plattenstärke dar. Wie schon erwähnt wurde, ist die Reduzierung des Feldes ähnlich wie beim Gehäuse. Die minimale Flußdichte ist mit ca. $144 \mu\text{T}$ (10,4 dB) sogar etwas geringer als beim Aluminiumgehäuse. Die Schirmwirkung ist auch hier bei der Aluminiumplatte besser als bei der Stahlplatte.

Die Kurvenverläufe der Dämpfung entsprechen auch denen des Gehäuses, wobei die Dämpfung der Aluminiumplatte etwas besser ist, als die des Aluminiumgehäuses.

5.1.4.3 1 x 1 m Metallplatte

In den vorhergehenden Kapiteln wurde festgestellt, daß eine Feldreduktion zu einer Seite nicht nur durch ein Gehäuse, sondern auch durch eine einfache Platte zu realisieren ist. Die Dämpfung durch eine Platte kann dabei genauso gut sein, wie die Dämpfung durch ein Gehäuse.

Aufgrund dieser Tatsache, kann man also davon ausgehen, daß einfache Platten auch wirkungsvolle Feldreduktionen zur Folge haben. Daher soll dieses Kapitel die Frage klären, ob eine weitere Verkleinerung der Platte das Feld noch ausreichend schwächt. Dazu wird untersucht, wie sich eine Platte mit den Maßen 1 x 1 m auf das magnetische Feld auswirkt. Um eine möglichst große Wirkung zu erzielen, wird diese Platte auf die Rückseite der Verteilung, unmittelbar hinter die Einspeisung angebracht.

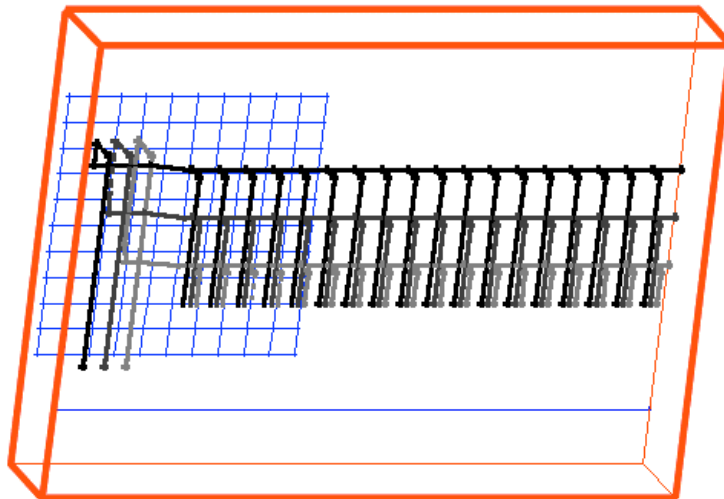


Abbildung 5.13: Die Verteilung NVT 21 mit einer 1 x 1 m Metallplatte hinter der Einspeisung.

Abbildung 5.13 zeigt die Anordnung der Metallplatte an der Verteilung. Die Metallplatte wurde so angebracht, daß sie das Feld dort abschirmt, wo es am größten ist. Dieses ist an der Einspeisung der Fall, weil der Strom am größten ist. Das Diagramm 5.10 zeigt wieder die Kurvenverläufe der Felddämpfung in Abhängigkeit von der Plattenstärke.

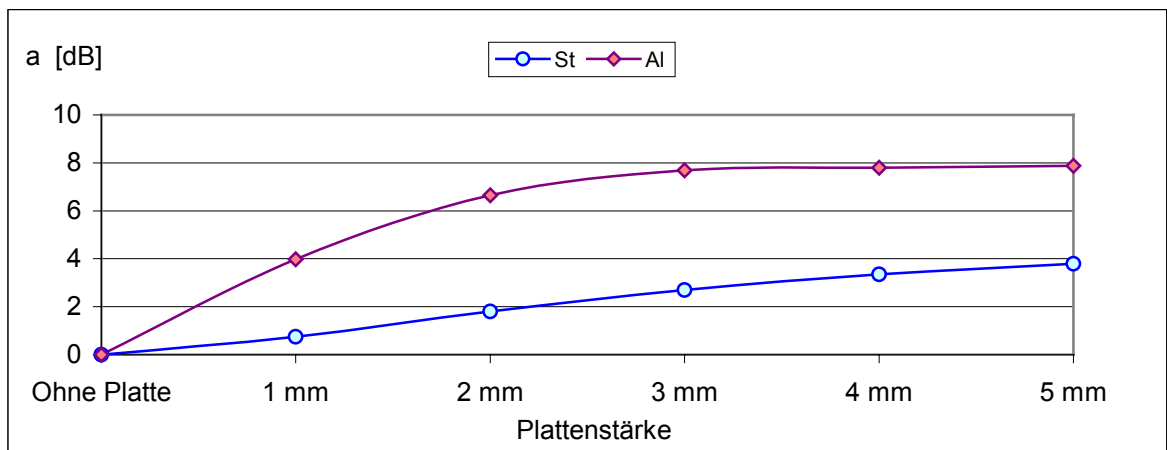


Diagramm 5.10: Dämpfung der Feldstärke durch eine 1 x 1 m Metallplatte.

Der Verlauf der Feldreduktion ist etwas flacher als beim Gehäuse oder der 3 x 2 m großen Platte. Man erkennt auch, daß eine Aluminiumplatte mit einer Stärke von 3 mm ausreichen würde. Die Stärken 4 mm und 5 mm bringen kaum noch eine zusätzliche Reduktion. Bei der Stahlplatte hingegen ist noch kein eindeutiger Grenzwert zu erkennen. Es scheint so, als ob dickere Platten das Feld noch weiter reduzieren würden. Nachträgliche Berechnungen ergaben auch, daß eine 8 mm starke Stahlplatte das Feld auf $286,3 \mu\text{T}$ schwächt, dieses entspricht einer Dämpfung von 4,5 dB. Eine 10 mm starke Stahlplatte

wies eine Feldstärke von 280,5 μT auf (4,6 dB). Man könnte also noch Stahlplatten mit einer Stärke von 7 mm oder 8 mm einsetzen, um das verursachende magnetische Feld weiter zu reduzieren. Dickere Stahlplatten haben dann aber kaum noch eine zusätzliche, reduzierende Wirkung.

Wie zu erwarten war, werden durch eine 1 x 1 m große Metallplatte nicht die Werte erreicht, die eine Platte mit der Größe 3 x 2 m erreicht, oder ein geschlossenes Gehäuse. Ein 5 mm starkes Aluminiumgehäuse reduzierte die Flußdichte auf 156 μT (9,7 dB). Mit einer 5 mm starken und 1 x 1 m großen Aluminiumplatte erreicht man hingegen nur eine minimale Flußdichte von 193 μT (7,9 dB). Weil dadurch die Plattengröße aber auf ca. 9% reduziert wird, ist dieses Ergebnis immer noch akzeptabel. Man könnte die Platte deshalb als zusätzliches Mittel einsetzen, um die reduzierende Wirkung eines Gehäuses zu verbessern. Dieses ist jedenfalls preiswerter als ein Gehäuse zu konstruieren, welches aus einem stärkeren Material besteht. Die kleine Platte muß aber dort angebracht werden, wo das Feld am größten ist. Dazu kann man die Feldstärken an der Verteilung messen oder mit WinField berechnen und so den Ort der größten Immission ermitteln.

5.1.4.4 Monetärer Vergleich der Abschirmungen

In den vorhergehenden Kapiteln wurde die Wirksamkeit von Abschirmungen mit unterschiedlicher Größe und aus unterschiedlichen Materialien untersucht. Dabei wurde als Kriterium die Reduzierung des magnetischen Feldes einer Niederspannungsverteilung zu Grunde gelegt. Es stellte sich bei allen Untersuchungen heraus, daß Aluminium eine bessere Schirmwirkung als Stahl hat. Vergleicht man aber die Kosten für diese Materialien, so stellt man fest das Stahl gegenüber dem Aluminium wesentlich preiswerter ist. So kostet³⁰ Stahl 9,70 DM/dm³ und Aluminium 23 DM/dm³. Nachfolgend soll jetzt also die Frage geklärt werden, ob es nicht vielleicht sinnvoller ist eine Stahlplatte einzusetzen, die das Feld genauso stark reduziert wie eine dünnere Aluminiumplatte, aber weniger kostet. Hierzu gibt Diagramm 5.11 eine Übersicht über die untersuchten Abschirmungen.

³⁰ Materialpreise der Firma Heinrich Murjahn vom 20.04.2000

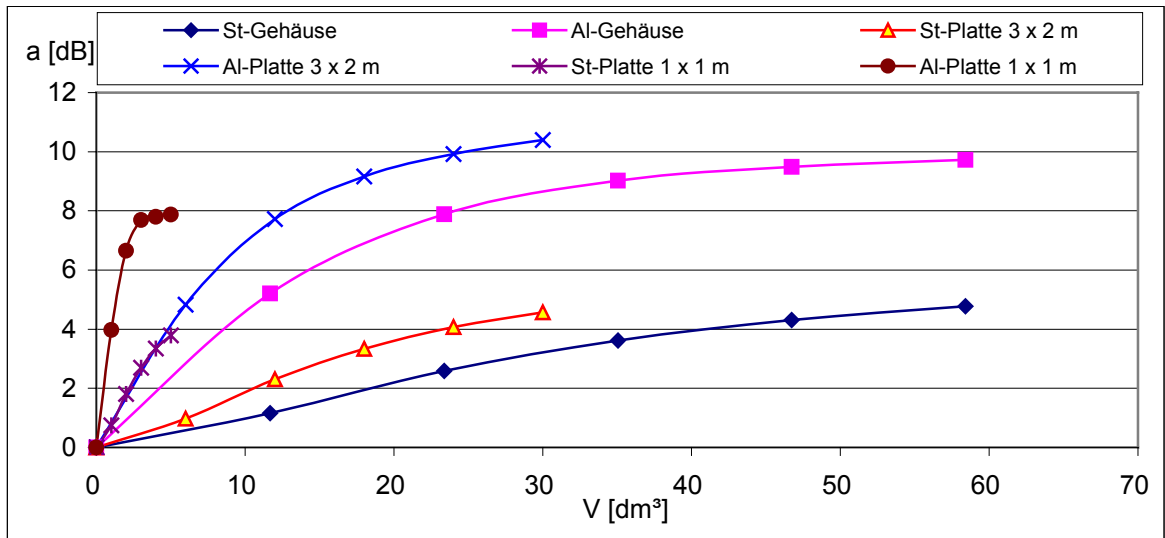


Diagramm 5.11: Dämpfung des verursachenden Magnetfeldes in Abhängigkeit vom benötigten Materialvolumen

In dem Diagramm 5.11 ist die Dämpfung des Magnetfeldes in Abhängigkeit vom benötigten Materialvolumen aufgetragen. Der Kostenfaktor bleibt also noch unberücksichtigt. Man erkennt, daß die größten Felddämpfungen mit den Aluminiumschirmen erreicht werden. Die dicksten Aluminiumabschirmungen dämpfen das Feld um mindestens 8 dB. Die Stahlabschirmungen hingegen erreichen nur Werte um ca. 5 dB. Das Volumen der einzelnen Schirme ist dabei gleich. Ein 5 mm starkes Aluminiumgehäuse hat natürlich das gleiche Materialvolumen wie ein 5 mm starkes Stahlgehäuse.

In diesem Diagramm ist also nur die Ordinate von Interesse. Das Materialvolumen, welches die Schirme benötigen, scheint erst einmal uninteressant zu sein.

Das ändert sich, wenn man die Materialpreise für die einzelnen Schirme vergleicht. Eine Übersicht gibt Diagramm 5.12.

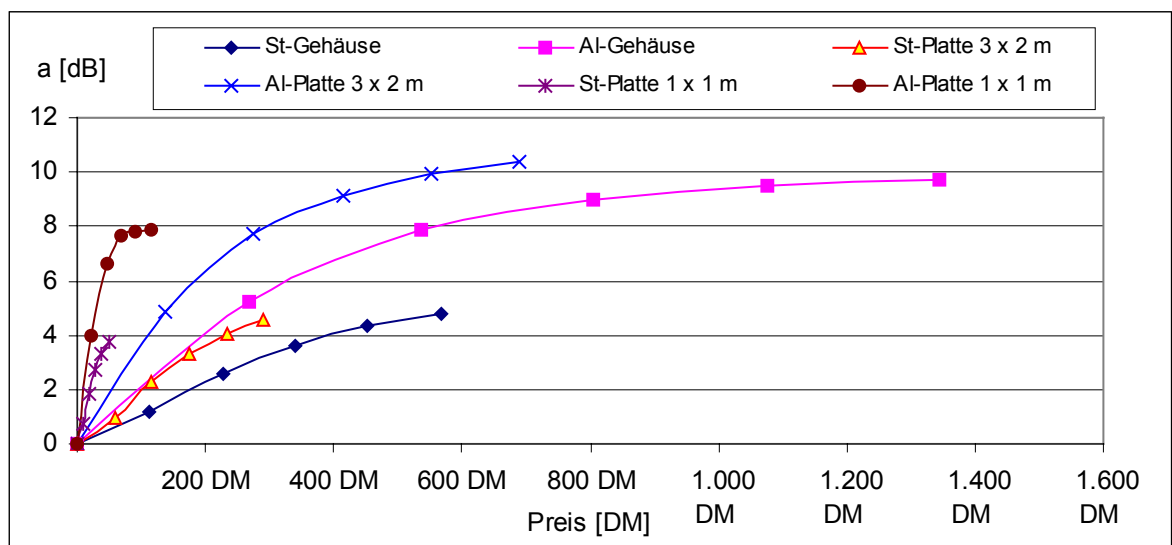


Diagramm 5.12: Dämpfung des verursachenden Magnetfeldes in Abhängigkeit vom Materialpreis der Abschirmung

Die Kurvenverläufe im Diagramm 5.12 sind in y-Richtung gleich geblieben. Nur die Ausdehnung in x-Richtung hat sich verändert. Man stellt in diesem Diagramm immer noch fest, daß die Aluminiumschirme die größte Felddämpfung bewirken. Aber man erkennt auch, daß das Aluminiumgehäuse und die 3 x 2 m große Aluminiumplatte auch am teuersten sind. Preiswerter, aber auch nicht so wirksam, sind die Stahlabschirmungen. Ein um ca. 5 dB dämpfendes Stahlgehäuse kostet z.B. 600 DM. Preiswerter ist dann noch eine Stahlplatte im Format 3 x 2 m für ca. 300 DM. Diese Platte hat eine vergleichbare Dämpfung wie das entsprechende Stahlgehäuse, schirmt das Feld aber hauptsächlich zu einer Seite ab. Der Vorteil eines Gehäuses ist natürlich die Abschirmung des Feldes zu allen Seiten. Das zuvor erwähnte Stahlgehäuse hat eine Dämpfung von 5 dB. Wenn diese Dämpfung ausreichen sollte, dann kann man aber auch ein Aluminiumgehäuse in der Stärke 1 mm (270 DM) oder eine 1 x 1 m große und 2 mm starke Aluminiumplatte (23 DM) verwenden, die beide noch preiswerter als das Stahlgehäuse sind.

Die Auswertung des Kostendiagramms (Diagramm 5.12) ergibt also auch einen Vorteil der Aluminiumabschirmungen gegenüber den Stahlabschirmungen. Der mehr als doppelt so hohe Preis für Aluminium hebt die Vorteile, die dieses Material gegenüber Stahl hat, nicht auf. Diese Aussage kann auch für die gesamten Untersuchungen des Kapitels 5.1.4 "Montageplatte und Gehäuse" getroffen werden. Es zeigte sich, daß die Aluminiumabschirmungen das Feld, welches von der untersuchten Niederspannungsverteilung ausgeht, am besten reduzieren.

Die maximale Reduktion liegt mit einer Flußdichteverringerng um ca. 334,1 μT vor. Das entspricht einer Dämpfung um 10,4 dB. Diese Werte wurden mit einer 5 mm starken Aluminiumplatte erreicht, die die Abmessungen 3 x 2 m hat. Des weiteren wurde auch festgestellt, daß Aluminium teurer als Stahl ist, dieser Nachteil aber nicht so schwer wiegt.

5.1.5 Kabelabgang

Im Kapitel 4 "Analyse verschiedener Verteilungen" wurden die magnetischen Felder mehrerer Niederspannungsverteilungen miteinander verglichen. Die Verteilungen wurden dabei nach den Plänen der Hersteller konstruiert. Dadurch sind leichte Differenzen hinsichtlich der Kabelanschlüsse möglich, weil diese unterschiedlich hoch liegen. Unterschiede in den Anschlußhöhen bedeutet aber, daß die Stromschiene zu den Anschlüssen unterschiedlich lang sind. Damit haben Verteilungen, deren Kabelanschlüsse sehr tief liegen einen Nachteil, weil sie ein größeres Feld erzeugen als Anlagen deren Anschlüsse weiter oben angeordnet sind. In der Praxis führt zu den Anschlüssen aber ein Kabel, welches ebenfalls ein Feld erzeugt. Dieses Kabel ist bei den Verteilungen mit höheren Anschlüssen länger und bei den Anlagen mit tieferen Anschlüssen kürzer, so daß hierbei die Verteilungen mit den tieferen Anschlüssen Vorteile haben.

Dieses Kapitel befaßt sich aus diesem Grunde mit dem Einfluß der Kabellängen auf die Änderung der magnetischen Flußdichte. Dazu wurden an die Verteilung unterschiedlich lange Kabel angeschlossen, wobei die Änderung der Länge getrennt zwischen Einspeise- und Abgangskabel vorgenommen wurde. Die Längenänderung betrug 1 m, 2 m und 3 m und die Kabelführung war senkrecht nach oben oder unten ausgerichtet.

Die Untersuchung wurde an den vier Niederspannungsverteilungen NVT00, NVT01, NVT08 und NVT21 durchgeführt, die mit einem Einspeisestrom von 909 A belastet wurden. Die Berechnung der Flußdichte fand in einem Abstand von 20 cm hinter der Niederspannungsverteilung statt.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Diagramm 5.13 dargestellt.

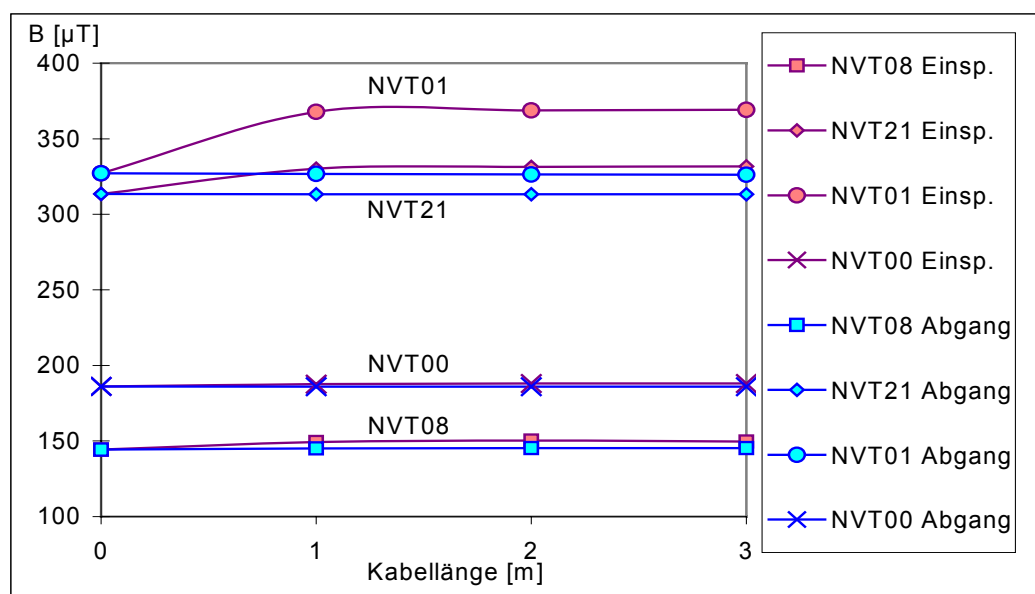


Diagramm 5.13: Flußdichteänderung verschiedener Verteilungen mit unterschiedlich langen Einspeise- und Abgangskabeln

Der Kurvenverlauf der Abgangskabel ist fast waagrecht. Bei den Verteilungen NVT01 und NVT00 fällt die Kurve mit zunehmender Kabellänge sogar leicht ab. Die beiden anderen Verteilungen bleiben von den Kabellängen nahezu unbeeinflusst. Das von den Abgangskabeln erzeugte Feld schwächt das Feld der Verteilung also etwas ab oder beeinflusst dieses nur mäßig.

Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Ströme in den Abgängen kann man diesen Einfluß auch nachvollziehen. Die größten Feldstärken werden von den Stromschienen der Einspeisung verursacht, weil hier auch die größten Ströme fließen. Der Strom in den Abgangskabel ist, je nach Anzahl der Abgänge, um das 10 bis 20-fache kleiner als im Einspeisekabel. Deshalb sind die Feldkomponenten der Abgangskabel im Verhältnis zum Einspeisekabel auch um das 10 bis 20-fache kleiner und beeinträchtigen daher das Gesamtfeld nur wenig.

Die Einflüsse der Einspeisekabel sind dagegen schon erheblich. Bei allen Verteilungen steigt die Flußdichte mit der Länge der Kabel an. Den größten Feldanstieg verursacht dabei ein 1 m langes Kabel. Alle weiteren Längen bewirken nur noch einen geringen Anstieg. Ab einer Länge von 3 m ist die Zunahme der Flußdichte so gering (von 3 m auf 4 m nur 0,1% bei der NVT01), daß eine weitere Betrachtung mit noch längeren Kabeln unnötig ist.

Bei einem direkten Vergleich mehrerer Niederspannungsverteilungen kommt es also zu Abweichungen, weil die angeschlossenen Kabel nicht berücksichtigt werden. Diese Untersuchung hat gezeigt, daß durch die Abgangskabel das magnetische Feld der Verteilungen nur wenig beeinflusst wurde. Eine größere Wirkung hatten die Einspeisekabel, die das Gesamtfeld der Verteilungen stärker veränderten.

Um die unterschiedlichen Einflüsse der Kabel zu minimieren, kann man an alle Verteilungen lange Kabel anschließen und so die Anlagen unter den gleichen Bedingungen beurteilen. Die Kabellänge muß dabei mindestens 3 m betragen. Bei Längen über 3 m wirken sich die Felder der Kabel nur noch wenig auf das Gesamtfeld der Verteilung aus, so daß die berechnete Gesamtflußdichte nur noch minimal zunimmt.

5.2 Betriebszustände

5.2.1 Ungleichmäßige Lastverteilung

Dieses Kapitel befaßt sich mit den Auswirkungen auf die Flußdichte bei ungleichmäßiger Lastverteilung an den Abgängen.

In den vorhergehenden Untersuchungen wurde an verschiedenen NS-Verteilungen die magnetische Flußdichte unter der Voraussetzung berechnet, daß jedes Abgangskabel den gleichen Strom führt. Dieser Zustand, der gleichmäßigen Lastverteilung, tritt aber an realen Verteilungen praktisch nicht auf.

Hierzu wurde auch der Extremfall betrachtet, daß die Verteilung auf der einen Seite eingespeist wird und ein einzelner Abnehmer auf der anderen Seite der Verteilung den Strom abnimmt. In diesem Fall fließt der gesamte Strom durch die Verteilung und erzeugt so ein hohes magnetisches Feld. Ob dieses Feld auch den maximalen Wert darstellt, oder ob ein anderer Betriebszustand ein noch größeres Feld erzeugt, wird im Folgenden geklärt.

Die Untersuchungen wurden exemplarisch an der Niederspannungsverteilung NVT 21 vorgenommen. Der eingespeiste Strom betrug einheitlich 909 A. In der Praxis wird der Strom in der Einspeisung nicht vorgegeben, sondern von den angeschlossenen Abnehmern bestimmt. Bei den hier stattfindenden Untersuchungen soll aber ein Vergleich zwischen verschiedenen Lastfällen erfolgen, so daß der Strom der Einspeisung bei allen Untersuchungen als konstant vorgegeben werden muß. Das führt aber dazu, daß bei einigen Lastfällen dieser Strom nur über einen Abgang entnommen wird. Dieser Abgang wäre in der Praxis überlastet, weil handelsübliche Sicherungsleisten höchstens einen Nennstrom von 630 A führen können³¹. Um diese theoretischen Lastfälle aber, unter Beibehaltung des Praxisbezuges, mit in die Untersuchung einzubeziehen, sind sie in den Diagrammen durch graue Flächen gekennzeichnet.

Die Berechnung der magnetischen Flußdichten wurde in einem Abstand von 20 cm hinter der Verteilung vorgenommen. Der Maximalwert in diesem Abstand wurde berechnet, notiert und mit den unterschiedlichen Lastfällen verglichen. Diese Untersuchungen geben also keine Auskunft über die Fläche, die von der Isolinie einer bestimmten Flußdichte umschlossen wird.

Zum besseren Verständnis, welche Abgänge belastet sind und welche nicht, wurden die Abgänge numeriert. Abbildung 5.14 zeigt die Niederspannungsverteilung mit den Nummern der Abgänge von 1 bis 18. Die Einspeisung ist mit "E" bezeichnet und der Anfang der Sammelschiene mit "S".

³¹ vgl. Kapitel 5.1.3 "Sicherungen"

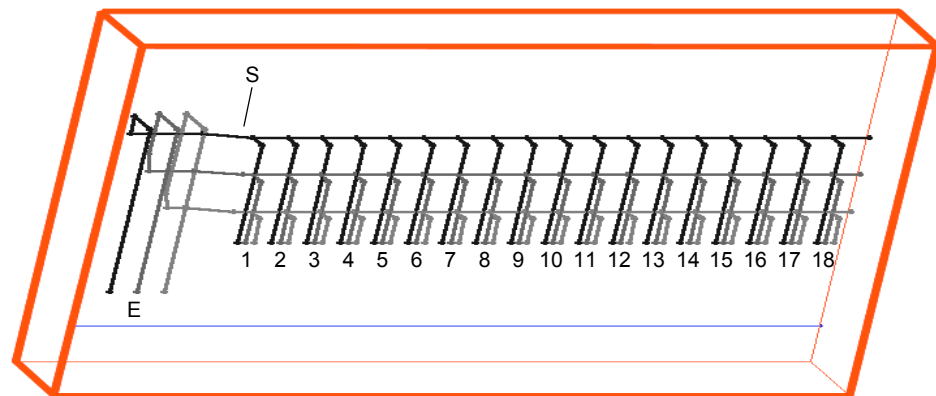


Abbildung 5.14: Verteilung NVT 21 mit 18 Abgängen.
 E – Einspeisung
 S – Anfang der waagerechten Sammelschiene

Als erstes wurde untersucht, an welchem Abgang ein Abnehmer mit einem großen Laststrom anzuschließen ist, um die Feldstärken zu minimieren. Daher wurden zuerst alle Abgangsströme auf 0 A gesetzt und dann nacheinander jeweils nur ein Abnehmer eingeschaltet. Diese Untersuchung ist nur von theoretischer Bedeutung, weil ein einzelner Abgang mit dem Strom überlastet ist. Sie erklärt aber, an welchem Abgang eine große Last am günstigsten anzuschließen ist.

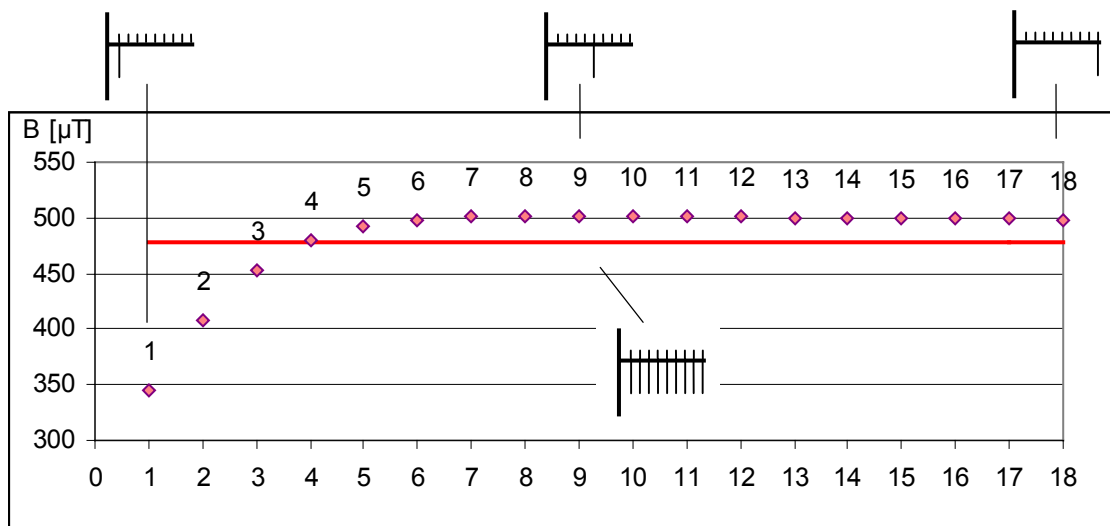


Diagramm 5.14: NVT 21 mit jeweils nur einem belasteten Abgang.
 Die Flußdichte der Verteilung mit Belastung aller Abgänge ist zum Vergleich als waagerechte Linie dargestellt.

Bei einer Niederspannungsverteilung mit nur einem belasteten Abgang wirken hauptsächlich drei Feldquellen. Zum einen ist dies die Einspeisung mit den langen, senkrechten Anschlußleisten, zum zweiten der belastete Abgang und die dritte Quelle ist die waagerechte Sammelschiene, welche die Abgänge verbindet. Der Feldanteil der Einspeisung ist, bei konstantem Strom, gleichbleibend. Der Feldanteil des Abganges

ändert sich in der Größe ebenfalls nicht. Als variable Feldquelle tritt also nur die Sammelschiene auf, weil die Länge der stromdurchflossenen Strecke vom belasteten Abgang abhängt. Ist der erste Abgang belastet, ist der Stromweg durch die Schiene am kürzesten. Bei Belastung des letzten Abganges ist dieser Weg am längsten.

Die Ströme der Einspeisung und der Abgänge sind identisch, wenn nur ein Abnehmer angeschlossen ist. Legt man diesen Abnehmer an den ersten Anschluß neben die Einspeisung, so ist die Flußdichte mit $344 \mu\text{T}$ am geringsten.

Durch den Anschluß der Last an den zweiten Abgang steigt die Flußdichte auf $408 \mu\text{T}$, weil der Stromweg durch die Sammelschiene länger geworden ist und sich dadurch nicht nur die Felder der Einspeisung und des Abganges überlagern, sondern auch noch der Feldanteil der zusätzlichen Sammelschiene hinzukommt.

Je weiter der Abnehmer von der Einspeisung entfernt ist, desto länger ist das Teilstück der Sammelschiene, welches vom Strom durchflossen wird. Durch das Feld dieser Sammelschiene steigt die berechnete Flußdichte weiter an. Man könnte daher annehmen, daß der Kurvenverlauf linear zunimmt, so daß man den größten Wert ermittelt, wenn der letzte Abgang aktiv ist. Daß dieses nicht der Fall ist kann man ebenfalls aus Diagramm 5.14 ersehen. Wenn der Abnehmer am 8. bzw. 9. Abgang angeschlossen wird, ist der Hochpunkt mit $500 \mu\text{T}$ erreicht. Durch ein verlagern des Abnehmers an einen Anschluß, der weiter von der Einspeisung entfernt ist, sinkt die Flußdichte wieder ab.

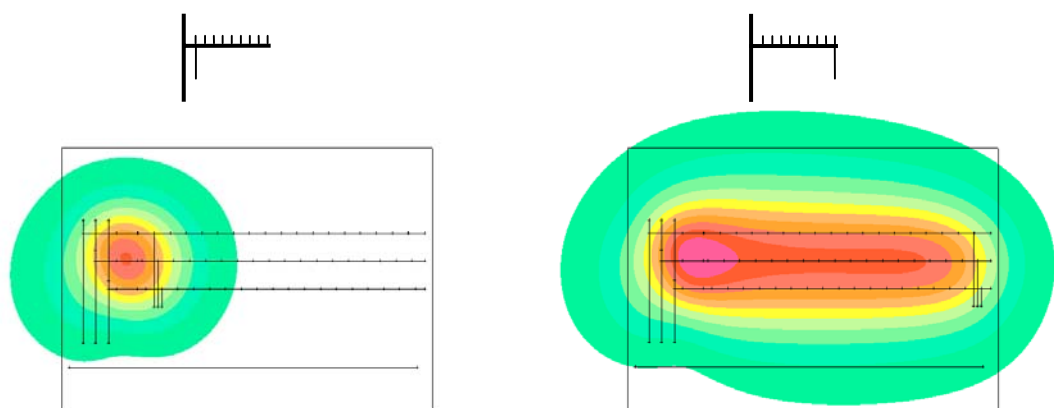


Abbildung 5.15: Magnetische Flußdichte mit belastetem ersten Abgang (linkes Bild) und letzten Abgang (rechtes Bild). Die farbigen Bereiche stellen die unterschiedlichen Flußdichten dar.

Dieser Effekt begründet sich durch den Abstand des Einspeisefeldes zum Abgangsfeld. Sind die Abgänge 2 bis 9 belastet, so liegen diese beiden Felder sehr dicht zusammen und es entsteht eine Überlagerung der Feldanteile (Abbildung 5.15, linkes Bild). Beim Belasten der Abgänge 10 bis 18 sind die Felder weiter voneinander entfernt und es kommt zu einem

gleichmäßigeren Feldverlauf mit einem geringeren Maximalwert (Abbildung 5.15, rechtes Bild). Dadurch ist das Feld aber räumlich ausgedehnter und beeinflusst einen größeren Bereich.

Es ist also besser eine einzelne Last an eine Niederspannungsverteilung so anzuschließen, daß der Abgang möglichst in der Nähe der Einspeisung liegt.

Diese Untersuchung hat aber nur theoretische Bedeutung, weil an einer Verteilung meistens mehrere Lasten angeschlossen sind. An welche Abgänge diese angeschlossen werden sollten, will die nächste Untersuchung klären.

Dabei wurden alle Abgänge eingeschaltet und mit dem gleichen Strom belastet. Danach erfolgte ein Abschalten der einzelnen Abgänge von links (Abgang 1) nach rechts (Abgang 18). Der Einspeisestrom von 909 A wurde gleichmäßig auf die Abgänge aufgeteilt. In der Realität tritt diese Lastverteilung auf, wenn neben der Einspeisung die ersten Abgänge abgeschaltet sind, oder wenn diese Abgänge ungenutzt als Reserve verbleiben.

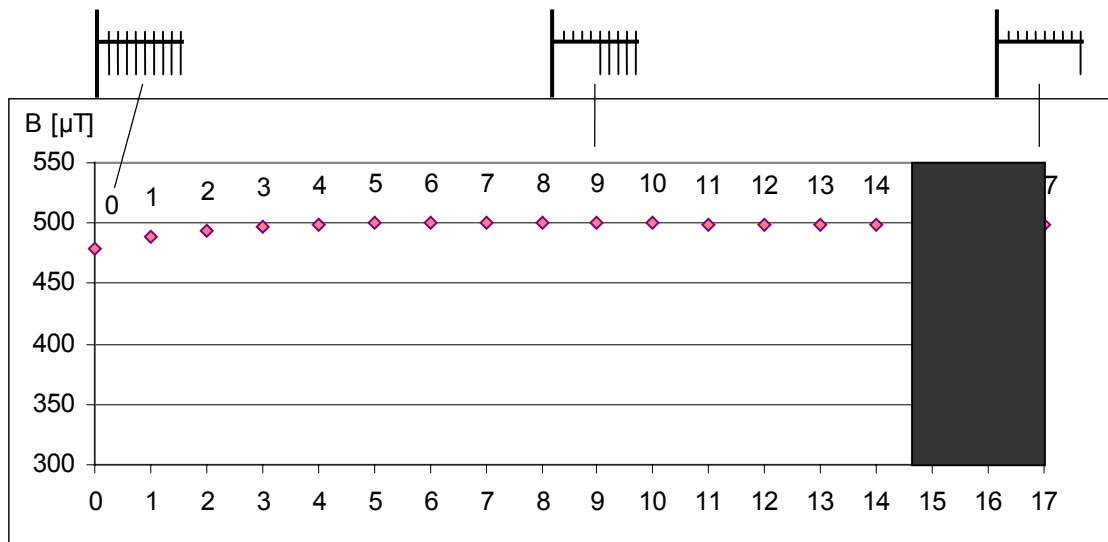


Diagramm 5.15: Abschalten der Abgänge von links nach rechts. Die Zahlen geben die Anzahl der abgeschalteten Abgänge an.

Wenn alle Abgänge eingeschaltet sind, fließen durch jeden Abgang 50,5 A und die Flußdichte ist mit 478 µT am niedrigsten (Diagramm 5.15, "0"). Wird der erste Abgang abgeschaltet (Diagramm 5.15, "1") erhöht sich der Strom in jedem Abgang auf 53,5 A und die Flußdichte steigt auf 488 µT. Der Kurvenverlauf erreicht den Hochpunkt mit einer Flußdichte von 500 µT beim Abschalten der ersten sieben Abgänge. Es sind dann noch die Abgänge 8 bis 18 mit einem Strom von 82,6 A belastet. Nach dem Hochpunkt fällt die Kurve wieder leicht ab und endet mit einer Flußdichte von 498,5 µT beim Belasten des letzten Abganges mit 909 A.

Die Erklärung für diese Kurvenform entspricht der vorangegangenen Untersuchung. Am Anfang überlagern sich die Felder der Einspeisung, der Sammelschiene und der Abgänge.

Sind nur die hinteren Abgänge eingeschaltet, so wird das gesamte Feld vergleichmäßig und der Maximalwert sinkt ab.

Die letzten 13 Werte von Diagramm 5.15 und Diagramm 5.14 sind nur um ca. $<0,3\%$ verschieden. Es ist also unbedeutend, ob der eingespeiste Strom von 909 A über einen Abgang entnommen wird (Diagramm 5.14) oder über mehrere (Diagramm 5.15). Es ist von größerer Bedeutung wie lang der Weg des Stromes durch die Sammelschienen bis zu den Abgängen ist. Der eigentliche Feldanteil der Abgänge ist nicht ausschlaggebend. Deshalb ist es auch bei dieser Lastverteilung ratsamer die belasteten Abgänge in die Nähe der Einspeisung zu legen und damit den Weg des Stromes durch die Sammelschienen zu verkürzen.

Die folgende Untersuchung soll deshalb diesen Fall genauer betrachten. Es wurden wieder alle Abgänge eingeschaltet und mit jeweils 50,5 A belastet. Die Abschaltung erfolgte aber diesmal von rechts (Abgang 18) nach links (Abgang 1).

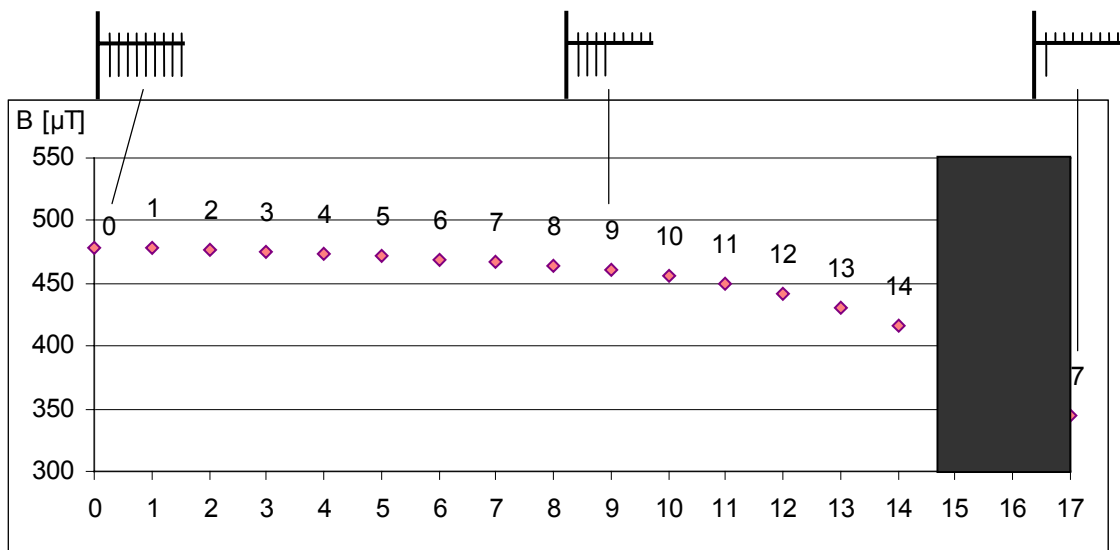


Diagramm 5.16: Abschalten der Abgänge von rechts nach links. Die Zahlen geben die Anzahl der abgeschalteten Abgänge an.

Das Diagramm 5.16 bestätigt die vorherigen Aussagen. Beim Abschalten der Abgänge, die am weitesten von der Einspeisung entfernt sind, fließt der Strom einen kürzeren Weg durch die Sammelschienen und das magnetische Feld wird kleiner. Die maximale Flußdichte von 478,6 μT tritt in Diagramm 5.16 auf, wenn kein Abgang abgeschaltet ist. Beim Abschalten der äußeren Abgänge, verringert sich die Flußdichte und erreicht den kleinsten Wert, der praktisch möglich ist, beim Abschalten von 15 Abgängen mit 399 μT . Der theoretisch kleinste Wert, tritt bei nur einem belasteten Eingang auf. Die Flußdichte beträgt dann 344 μT .

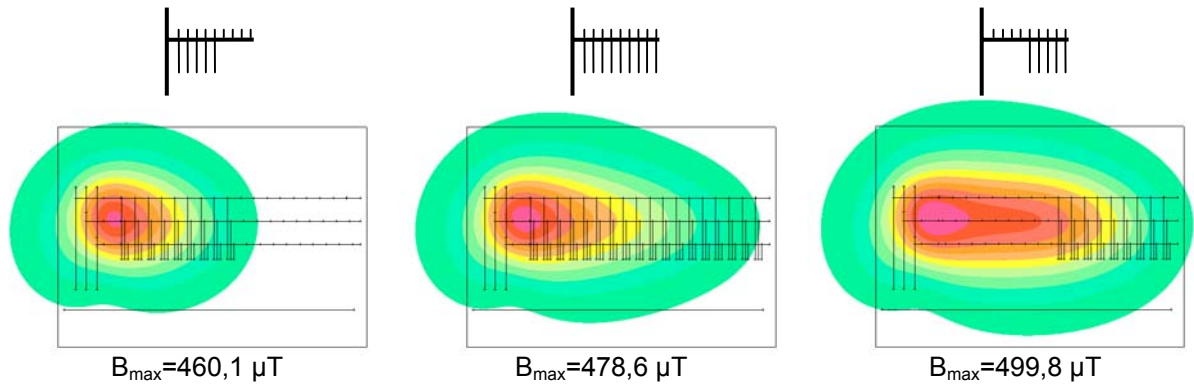


Abbildung 5.16: Links: Die ersten neun Abgänge sind mit jeweils 101 A belastet
Mitte: Alle Abgänge sind mit jeweils 50,5 A belastet
Rechts: Die letzten neun Abgänge sind mit jeweils 101 A belastet

Abbildung 5.16 stellt noch einmal drei verschiedene Lastverteilungen exemplarisch dar. Das Zentrum der maximalen Flußdichte liegt bei allen drei Fällen neben der Einspeisung. Der Ort, an dem die größte Flußdichte auftritt, wird also nur wenig von der Lastverteilung beeinflusst. Die Flußdichte wird aber größer, je weiter die Lastabnahme von der Einspeisung entfernt ist.

Die größte Differenz in der Flußdichte erhält man bei der geringsten Anzahl von belasteten Abgängen. Unter realistischen Bedingungen ist die Differenz also am größten, wenn man die drei Abgänge direkt neben der Einspeisung oder die letzten drei Abgänge belastet.

Wenn man die Abgänge 1 bis 3 mit jeweils 101 A belastet, beträgt die Flußdichte 398,8 µT. Die Belastung der Abgänge 16 bis 18 ergibt eine Flußdichte von 498,8 µT. Wenn man also die Abgänge dieser Niederspannungsverteilung ungünstig belegt, kann die Flußdichte um 100 µT bzw. 25% ansteigen.

Diese Werte wurden durch die gleichen Untersuchungen an weiteren Niederspannungsverteilungen bestätigt. Die Erhöhung der Flußdichte beträgt dabei bis zu 50%.

Allgemein kann man aus den Untersuchungen dieses Kapitels schlußfolgern, daß es am besten ist, wenn man die größten Lastabgänge direkt neben die Einspeisung legt. Kleinere Lasten sollten daran anschließen. Weiterhin ist es von Vorteil zwischen belasteten Abgängen und der Einspeisung keine Reserveplätze oder offene Abgänge zu legen.

Durch diese Maßnahmen kann man das magnetische Feld einer Niederspannungsverteilung optimieren.

5.2.2 Unsymmetrische Phasenbelastung

Unter unsymmetrischen Phasenbelastungen versteht man die ungleichmäßige Belastung einzelner Phasen eines Drehstromsystems. Unsymmetrien können bei Niederspannungsverteilungen in den Abgängen oder auch in den Einspeisekabeln auftreten.

Die Ursachen für Unsymmetrien können ungleichmäßige Belastungen oder Fehler sein. Eine Unsymmetrie, die durch einen Fehler verursacht wird ist z.B. ein Phasenausfall. Hierbei wird der Strom einer Phase um 100% reduziert. Dieser Fehler ist aber sehr selten und wird durch Schutzgeräte innerhalb kürzester Zeit abgeschaltet, so daß dieser Fehler nicht sehr lange vorliegt.

Ein Fall der häufiger auftritt, ist die ungleichmäßige Belastung. Denn nur ein angeschlossener Drehstromabnehmer entnimmt dem Netz einen symmetrischen Strom. Im gewerblichen oder häuslichen Bereich gibt es aber viele Wechselstromabnehmer. Diese sollten so auf die einzelnen Phasen aufgeteilt werden, daß man eine gleichmäßige Belastung der Phasen erzielt. Das wird aber niemals zu 100% gelingen, so daß immer ein unsymmetrischer Strom in den einzelnen Phasen einer Verteilung fließt. In Niederspannungsnetzen werden deshalb Stromsummen von bis zu 3 A angenommen³².

Im folgenden sollen die Zusammenhänge zwischen unsymmetrischen Phasenbelastungen und der magnetischen Flußdichte genauer untersucht werden.

5.2.2.1 Unsymmetrische Belastung der Einspeisung

Die größten Auswirkungen sind bei der unsymmetrischen Belastung in der Einspeisung zu erwarten, weil dort der größte Strom fließt. Deshalb ist dieses Gegenstand der ersten Untersuchung.

³² vgl. **Genz** S. 69

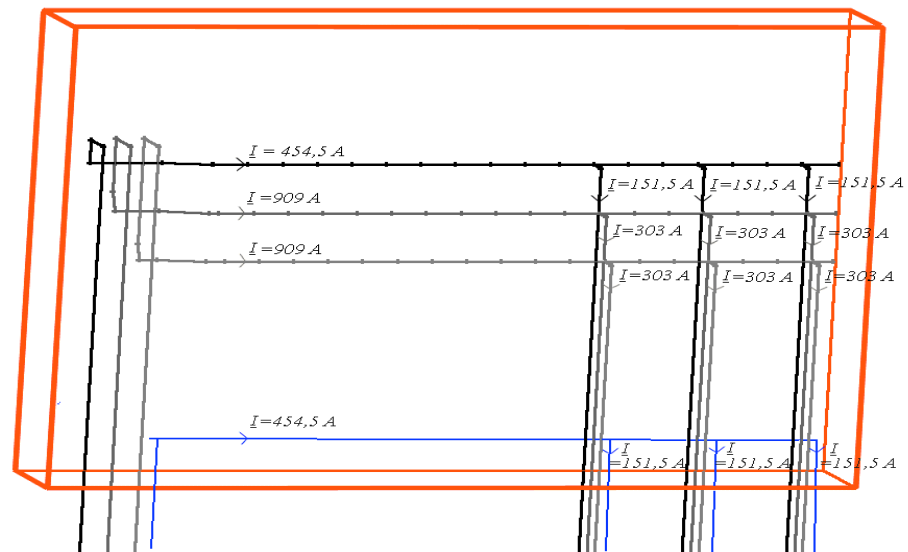


Abbildung 5.17: NVT 21 mit unsymmetrischer Belastung der Phase L1 in den Abgängen. Die Unsymmetrie wirkt sich auch auf die Sammelschienen und die Einspeisung aus.

An die Niederspannungsverteilung NVT 21 wurden drei Abgangskabel mit gleicher Belastung angeschlossen. Danach wurde der Strom der ersten Phase in allen drei Abgängen stufenweise um 3%, 10%, 25%, 50% und 100% reduziert. Die Unsymmetrie setzt sich entsprechend Abbildung 5.17 auf den Sammelschienen und der Einspeisung fort. Die Ströme in den anderen beiden Phasen wurden nicht verändert. Die Vorgehensweise war dann bei den Phasen L2 und L3 die gleiche. Erst wurden alle Phasen gleich belastet, dann wurde eine Phase reduziert und die anderen Phasen blieben unverändert. Man könnte also erwarten, daß die Flußdichten insgesamt geringer werden, weil die Ströme sinken. Diese Annahme ist aber aus zwei Gründen nicht richtig:

1. Durch die ungleichmäßige Belastung kompensieren sich die Felder der einzelnen Phasen nicht mehr und es kommt dadurch zu einer Erhöhung der Feldstärke.
2. Bei ungleichmäßiger Belastung eines Drehstromsystems fließen Ausgleichsströme durch den Neutralleiter, wenn das System sternförmig betrieben wird.

Zu 1.: Die magnetische Flußdichte B_3 eines ebenen, symmetrischen Drehstromsystems nimmt mit der Entfernung r nach folgender Funktion ab³³:

$$B_{3(r)} = \mu_0 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{a}{r^2} \quad \text{Gleichung 5.10}$$

mit:

- $B_{3(r)}$ - Flußdichte [μT]
- I - Strom pro Phase [A]
- a - Abstand zwischen den Phasen [m]
- r - Entfernung vom Mittelpunkt [m]

Bei ungleichmäßiger Belastung kann nicht mehr von einem symmetrischen Drehstromsystem ausgegangen werden. Es kommt der Einfluß der PEN-Schiene hinzu, so daß zur Flußdichte der Verteilung der Feldanteil eines Einzelleiters hinzu addiert wird, der wie folgt berechnet wird³⁴:

$$B_{1(r)} = \mu_0 \cdot \frac{I_0}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad \text{Gleichung 5.11}$$

Zum Vergleich der beiden Felder wird der Quotient der Beträge aus beiden Gleichungen gebildet:

$$\frac{B_{1(r)}}{B_{3(r)}} = \frac{I_0}{I} \cdot \frac{r}{\sqrt{3} \cdot a} \quad \text{Gleichung 5.12}$$

Das Diagramm 5.17 zeigt den Verlauf der Funktion nach Gleichung 5.12. Bei Erhöhung des Nulleiterstromes I_0 im Verhältnis zum 3-phasigen Strom I überwiegt das Feld des Nulleiters B_1 im Gegensatz zum Drehstromfeld B_3 . Dieser Zusammenhang bewirkt, daß mit zunehmender unsymmetrischer Belastung eines Drehstromsystems die Feldstärken größer werden.

³³ vgl. Kupke S. 29

³⁴ vgl. Kupke S. 28

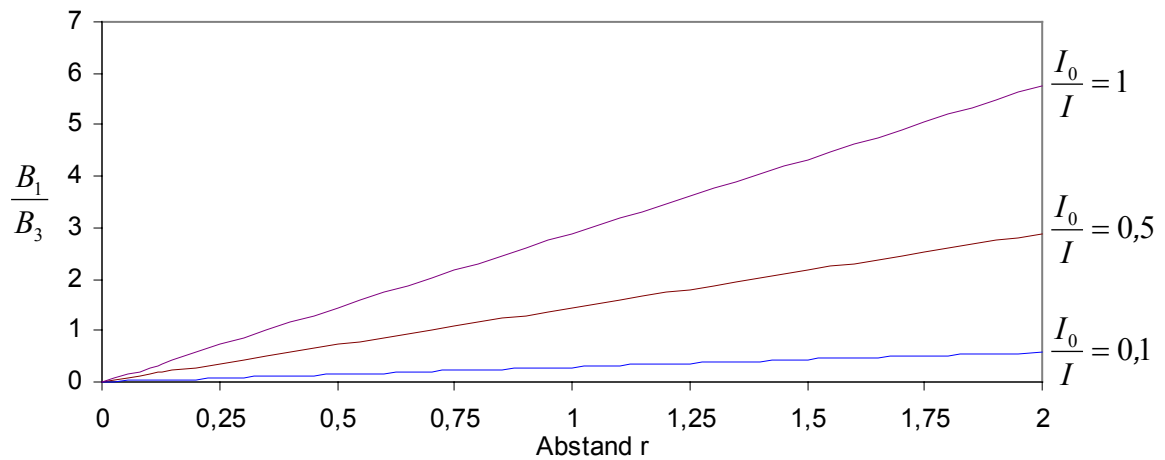


Diagramm 5.17: Feldstärkenquotient in Abhängigkeit vom Verhältnis der Ströme und des Abstandes

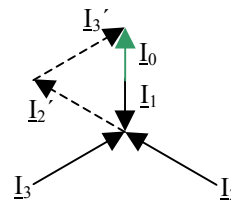
Die Flußdichte nimmt also mit der Entfernung nicht mehr nach der Funktion $1/r^2$ ab, sondern nur noch mit $1/r$. Dadurch sind bei ungleichmäßig belasteten Drehstromsystemen größere Feldstärken zu erwarten als bei symmetrisch belasteten.

Zu 2.: Bei diesen Untersuchungen wird davon ausgegangen, daß die Abnehmer aus reinen Wirkwiderständen bestehen und sternförmig angeschlossen sind. Dadurch fließt, bei ungleichmäßiger Belastung der Phasen im Neutralleiter ein Ausgleichsstrom über die PEN-Schiene. Dieser Strom verursacht auch ein magnetisches Feld, welches sich auf die maximale Feldstärke der Verteilung auswirkt. Der Neutralleiterstrom I_0 errechnet sich aus der geometrischen Addition der drei Phasenströme I_1 , I_2 , I_3 :

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = I_1 \cdot e^{j\varphi_1} + I_2 \cdot e^{j\varphi_2} + I_3 \cdot e^{j\varphi_3} \quad \text{Gleichung 5.13}$$

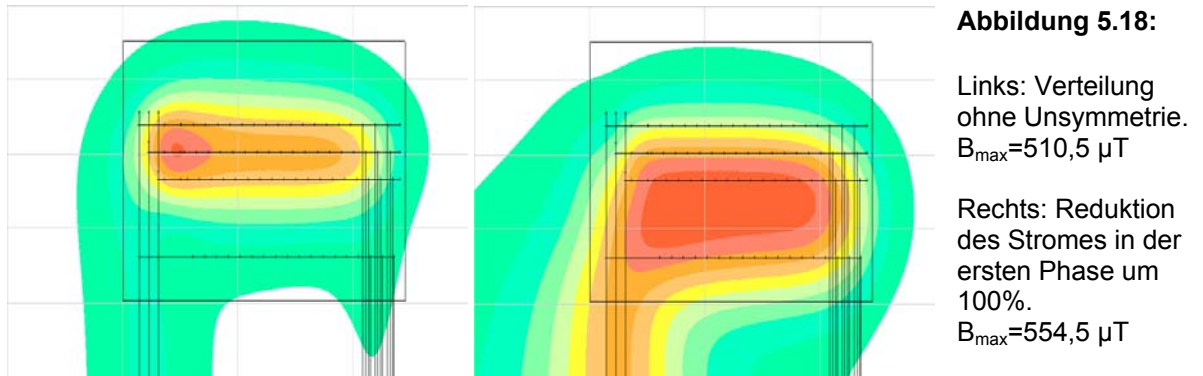
mit:

\underline{I}_0 - Neutralleiterstrom [A]
 $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3$ - Phasenströme [A]



Insgesamt sind bei dieser Untersuchung an der Verteilung drei Abnehmer angeschlossen, die alle die gleiche Unsymmetrie aufweisen. Dadurch addieren sich auf der PEN-Schiene die Neutralleiterströme der Abnehmer. In die Abbildung 5.17 sind dazu die Ströme eingezeichnet worden, die in der Niederspannungsverteilung fließen, wenn die erste Phase mit 50% unsymmetrisch belastet wird. Die Stromrichtung und Stromstärke sind in diesem Fall in der Phase L1 und in der PEN-Schiene identisch. Dadurch wird ein zusätzliches Magnetfeld von der PEN-Schiene erzeugt.

Weil sich die Felder nicht mehr kompensieren und die PEN-Schiene ein zusätzliches Magnetfeld aufbaut, kommt es bei unsymmetrischen Drehstromsystemen zu einer Veränderung der magnetische Flußdichte. Die Auswirkungen dieser Einflüsse sind in Abbildung 5.18 dargestellt:



Die maximale Flußdichte erhöht sich in diesem Beispiel nur um $44 \mu\text{T}$ auf $554,5 \mu\text{T}$. Dieser geringen Differenz steht eine starke Vergrößerung des Bereiches, auf den die Flußdichte einwirkt, gegenüber. Mit der Vergrößerung dieses Bereiches verlagert sich auch die maximale Flußdichte. In dieser Arbeit ist aber die Fläche, auf die eine bestimmte Flußdichte einwirkt, nicht relevant. Deshalb wird im weiteren nur die Auswirkung verschiedener Belastungsfälle auf den Maximalwert der Flußdichte untersucht.

Diagramm 5.18 zeigt hierzu die Veränderung der maximalen Flußdichte bei unsymmetrischer Belastung der einzelnen Phasen.

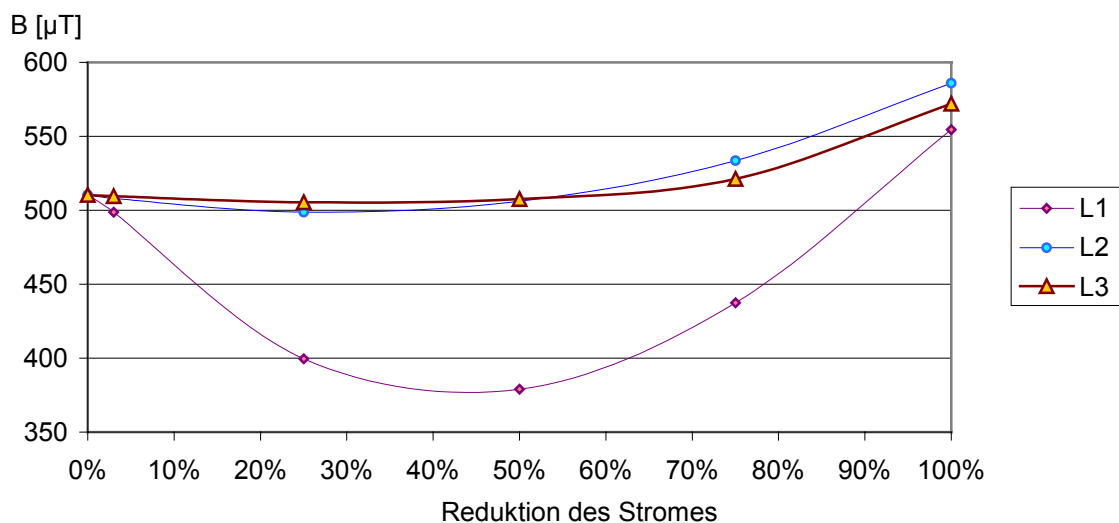


Diagramm 5.18: Flußdichte B in Abhängigkeit von der Reduktion des Stromes einer Phase

Die Flußdichte fällt anfänglich mit zunehmender Unsymmetrie leicht ab, wobei es zwischen den einzelnen Phasen zu Unterschieden kommt. Der größte Abfall ist bei unsymmetrischer Belastung der Phase L1 zu verzeichnen. Dagegen haben Unsymmetrien bis 50% der anderen beiden Phasen nur eine geringe Auswirkung auf die Flußdichte.

Bei Phasenreduktionen von über 50% nimmt die Flußdichte zu und erreicht bei 100% eine Erhöhung der Flußdichte um 9,8% auf ca. 560 μT .

Die Zunahme der maximalen Flußdichte ist bei einer unsymmetrischen Belastung der Einspeisekabel also nicht so gravierend, wie dieses angenommen wurde. Es kann sogar zu einer Abnahme der Flußdichte kommen. Warum die Flußdichte kleiner wird, wenn die erste Phase unsymmetrisch belastet wird, soll im folgenden erklärt werden.

Auffällig in Diagramm 5.18 ist der starke Abfall der Flußdichte bei der Reduktion des Stromes in der ersten Phase. Die Kurve erreicht ihr Minimum bei ca. 50% mit einer Verringerung der Flußdichte um 131,4 μT . Die Ursache für diesen Effekt liegt in der Anordnung der Stromschienen. Denn der Abstand von den einzelnen Stromschienen zur PEN-Schiene hat einen Einfluß auf die Flußdichte, weil der Strom in der PEN-Schiene von der reduzierten Phase abhängt.

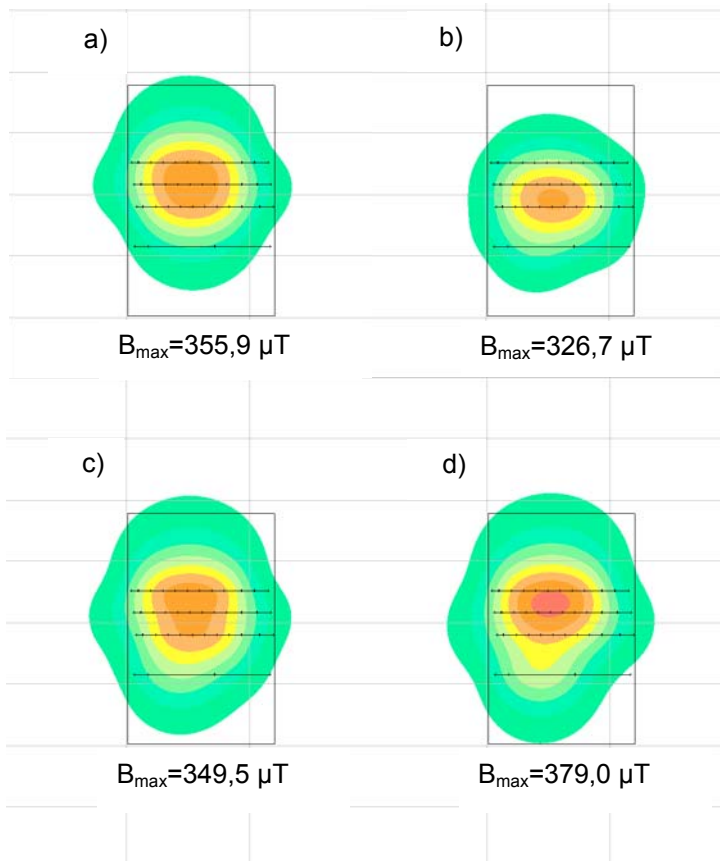
Die Abbildung 5.19 a) zeigt hierzu eine Niederspannungsverteilung mit Belastung der Stromschienen von jeweils 800 A. Es werden nur die Stromschienen berücksichtigt, weil die Feldkomponenten der Einspeisung und der Abgänge einen störenden Einfluß auf das Feld der Stromschienen haben und der Effekt deshalb nicht so deutlich auftritt.

In der Abbildung 5.19 a) ist das Feld der Verteilung symmetrisch, weil alle Phasen gleich belastet sind und somit kein Ausgleichsstrom fließt. Das Zentrum der maximalen Flußdichte liegt zwischen den drei Phasen in der Mitte der Verteilung.

Die unterschiedlichen Lastfälle stellt Abbildung 5.19 b) bis d) dar, wobei der Strom einer Phase um jeweils 400 A verringert wurde. Die beiden verbleibenden Phasen mit unvermindertem Strom trugen weiterhin einen Strom von 800 A.

Die geringste Flußdichte wird hierbei von dem Fall b) hervorgerufen. Die Reduktion des Stromes in der Phase L1 bewirkt zum einen, daß der Feldanteil der Phase L1 geringer wird und sich dadurch das Zentrum nach unten verlagert (Abbildung 5.19. b). Der Strom der PEN-Schiene senkt zudem die maximale Flußdichte des Zentrums. Den umgekehrten Fall stellt die Verringerung des Stromes in der dritten Phase dar. Hier wird das Zentrum nach oben verlagert, weil der Strom den Feldanteil der dritten Phase verringert und durch den Einfluß der PEN-Schiene verstärkt (Abbildung 5.19. d).

Die Verringerung des Stromes in der zweiten Phase hat nur geringe Auswirkungen auf die Flußdichte (Abbildung 5.19. d), weil das Zentrum der maximalen Flußdichte auf Höhe der mittleren Stromschiene liegt. Durch eine Verringerung des Stromes in der mittleren Schiene, wird das Zentrum deshalb nicht verlagert sondern nur reduziert.

**Abbildung 5.19:**

Niederspannungsverteilung ohne Abgänge und Einspeisung mit ungleichmäßig belasteten Stromschienen.

- a) ohne Reduktion
- b) L1 um 50% reduziert
- c) L2 um 50% reduziert
- d) L3 um 50% reduziert

In diesem Kapitel wurden Unsymmetrien untersucht, die von den Abnehmern verursacht wurden und sich durch die Niederspannungsverteilung auf das Einspeisekabel übertrugen. Eine deutliche Vergrößerung der Flußdichten wurde hierbei nicht festgestellt (Diagramm 5.18). Bei einer günstigen Verteilung der unsymmetrischen Belastung kann die Flußdichte sogar abnehmen.

Die untersuchten Fälle sind aber insgesamt nicht sehr realistisch, weil die Wahrscheinlichkeit, daß alle Abnehmer auf der gleichen Phase eine Unsymmetrie aufweisen äußerst gering ist. Es ist viel wahrscheinlicher, daß die Abnehmer auf verschiedenen Phasen unsymmetrisch belastet werden und sich diese Unsymmetrien auf der Sammelschiene ausgleichen. Diese Unsymmetrien treten dann nicht mehr in der Einspeisung auf, sondern nur noch in den Abgängen und auf den Stromschienen. Welche Auswirkungen unsymmetrische Belastungen der Abgangskabel haben, wird im folgenden untersucht.

5.2.2.2 Unsymmetrische Belastung der Abgangskabel

Die nächste Untersuchung soll die Auswirkungen von Unsymmetrien in den Abgangskabeln analysieren. Dazu wurde von jedem Abgang eine bestimmte Phase mit einem geringeren Strom belegt. Die verbleibenden Phasen trugen den gleichen Strom. Die Unsymmetrien in den Abgangskabeln gleichen sich dabei in den Stromschienen aus und führt so zu einer gleichmäßigen Stromverteilung in den Einspeisekabeln. Dazu gibt es unendlich viele Möglichkeiten von unsymmetrischen Belastungsfällen. Deshalb müssen in dieser Untersuchung einige exemplarische Fälle analysiert werden, um dann Aussagen zu treffen über die Auswirkungen von realistischen Fällen.

Die Untersuchung wurde an den 18 Abgängen der NVT 21 durchgeführt. Es wurde dabei an jeweils sechs Abgängen der Strom der gleichen Phase reduziert.

Die Ströme in den reduzierten Phasen waren bei jeder Untersuchung um jeweils 3%, 10%, 50% und 100% geringer als in den nicht reduzierten Phasen. Damit man die verschiedenen Untersuchungen vergleichen kann, müssen die Ströme in der Einspeisung einheitlich sein. Hierbei wurde der Strom in der Einspeisung auf 909 A festgesetzt. Der Strom der Abgänge muß dazu für jeden Lastfall neu berechnet werden. Mit Hilfe der Gleichung 8.1 und der Gleichung 8.2 (auf S.XXII im Anhang b) ist es möglich den verminderten und den unverminderten Strom zu errechnen.

Als nächstes soll die Frage geklärt werden, an welchen Abgängen welche Phase den verringerten Strom führen soll. Hierzu gibt es eine Vielzahl von möglichen Kombinationen, die nicht alle überprüft werden können. Es werden deshalb nur drei Kombinationen untersucht. Eine Kombination führt zu einer Erhöhung der Flußdichte gegenüber einer gleichmäßig belasteten Verteilung. Eine andere Kombination senkt die Flußdichte ab. Die dritte Kombination verteilt die Stromsummen gleichmäßig auf die Abgangskabel und entspricht der schlechtesten Verteilung der Phasen auf den Abgangskabeln³⁵.

³⁵ vgl. Genz S. 49

Abgangsnummer	Absenkung	Erhöhung	Gleichmäßige Anordnung
1	L3	L2	L1
2	L3	L2	L2
3	L3	L2	L3
4	L3	L2	L1
5	L3	L2	L2
6	L3	L2	L3
7	L1	L3	L1
8	L1	L3	L2
9	L1	L3	L3
10	L1	L3	L1
11	L1	L3	L2
12	L1	L3	L3
13	L2	L1	L1
14	L2	L1	L2
15	L2	L1	L3
16	L2	L1	L1
17	L2	L1	L2
18	L2	L1	L3

Tabelle 5.7: An den aufgeführten Abgängen werden die angegebenen Phasenströme reduziert um die Flußdichte der Verteilung zu beeinflussen.

Die in der Tabelle 5.7 angegebenen Phasen wurden mit dem verminderten Strom belegt. Alle anderen Phasen erhielten den unverminderten Strom. Mit diesen Strömen wurden die Flußdichten berechnet, welche im Diagramm 5.19 dargestellt sind.

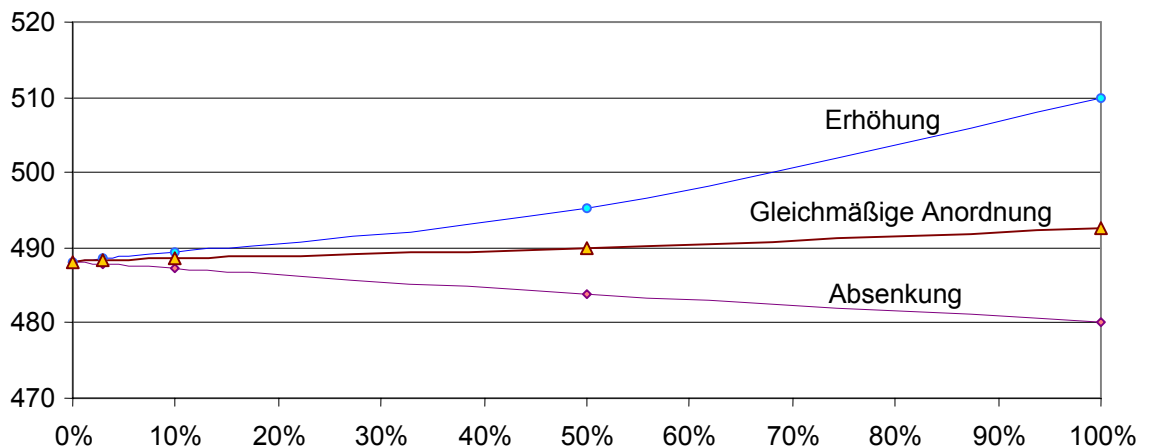


Diagramm 5.19: Beeinflussung der magnetischen Flußdichte durch Unsymmetrien in den Abgangskabeln.

Man erkennt, daß die Flußdichte durch diese Kombinationen bei einer Verminderung der Phasen um 100% nur um 21,8 μT erhöht oder um 8,1 μT abgesenkt wurden. Das entspricht einer Differenz von 3,0% bei Erhöhung und 0,8% bei Absenkung. Diese Werte werden aber nur bei extremen Unsymmetrien erzeugt. Bei realistischen Unsymmetrien von ca. 10% sinken die Differenzen auf $<2 \mu\text{T}$ bzw. $<0,1\%$ ab.

Realistische Belastungsfälle verursachen Unsymmetrien, die der gleichmäßigen Anordnung entsprechen. Bei dieser Anordnung sind die Abgänge mit vermindertem Strom regelmäßiger aufgeteilt, was zu einer Erhöhung der Flußdichte um 17,3 μT (0,9%) bei 100%iger Unsymmetrie führt.

Die in den Niederspannungsverteilungen auftretenden Unsymmetrien beeinflussen nach den Ergebnissen dieses Kapitels das magnetische Feld der Verteilungen. Der Einfluß ist aber mit höchstens 3% Erhöhung nicht sehr groß, so daß man bei der Berechnung von Niederspannungsverteilungen die Unsymmetrien in der Regel nicht berücksichtigen muß. Wenn aber leistungsstarke Abnehmer an der Verteilung angeschlossen sind, die eine große unsymmetrische Belastung darstellen, dann müssen diese bei der Berechnung der Flußdichte berücksichtigt werden. Diese Abnehmer können z.B. einphasige Maschinen oder leistungsstarke Werkzeuge sein, die vor allem im industriellen Bereich anzutreffen sind.

6 Betrachtung von ausgewählten Optimierungsmaßnahmen

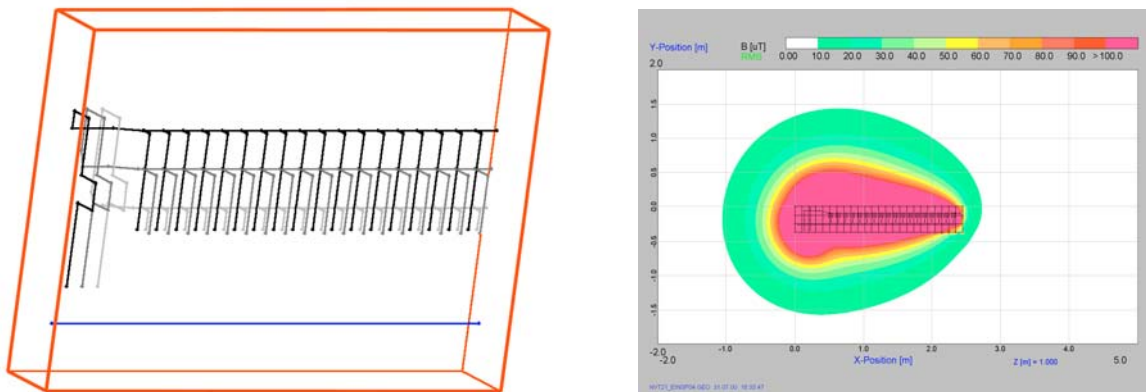
Bei den Untersuchungen dieses Kapitels sollen zusammenfassend die Erkenntnisse des vorhergehenden Kapitels an einer Niederspannungsverteilung angewendet werden. Hierbei werden nur Fälle betrachtet, die technisch machbar sind. Denn es ist sicherlich möglich, Gehäuse zu konstruieren, die die Flußdichte auf ein Minimum absenken, oder aber die Verteilung in einem großen Abstand zu einer Wand aufzustellen, so daß an der Außenseite der Wand die Flußdichte weit abgefallen ist. Diese Fälle sind theoretisch möglich, aber entweder technisch nicht realisierbar oder finanziell nicht umsetzbar. Deshalb soll dieses Kapitel aufzeigen, welche Maßnahmen sinnvoll sind, welche technischen Möglichkeiten bestehen und wie weit sich die Flußdichte, unter voller Anlagenauslastung, absenken läßt.

Die erste Maßnahme hierzu ist, die Niederspannungsverteilung NVT 21 unter Berücksichtigung der folgenden Kapitel zu modifizieren:

- 5.1.2 "Leistungsschalter"
- 5.1.3 "Sicherungen"
- 5.1.4 "Montageplatte und Gehäuse"

Abbildung 6.1 stellt die Verteilung mit dem Leistungsschalter und den Sicherungstrennleisten in 3D Ansicht (links) und als Draufsicht (rechts) dar. Die unterschiedlichen Flußdichtewerte sind als farbige Bereiche gekennzeichnet. Die Skala am oberen Rand der rechten Abbildung (Draufsicht) stellt den Zusammenhang zwischen den Farben und den Flußdichtewerten dar.

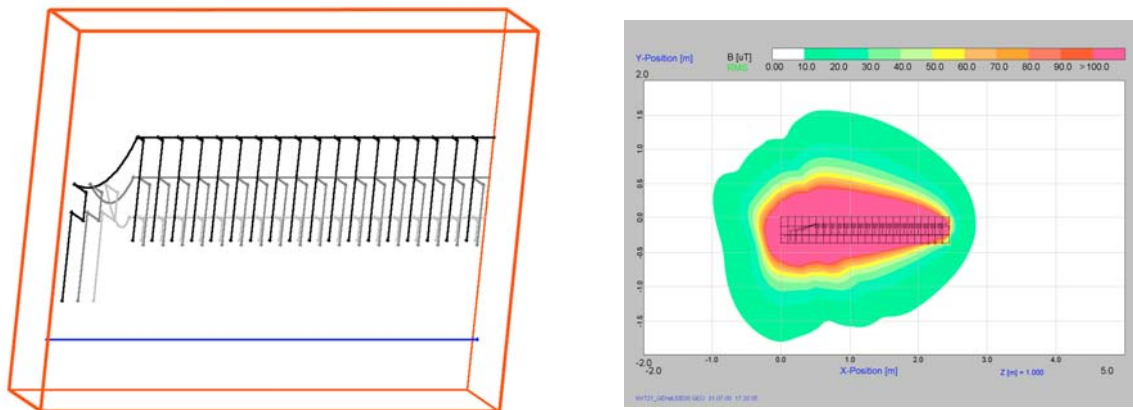
Das Gehäuse der Verteilung besteht aus 2 mm Stahl und wurde bei den Berechnungen berücksichtigt. Zur besseren Ansicht wurde das Gehäuse aber bei den folgenden Abbildungen nicht mit dargestellt. Die Tabellen geben die Flußdichten in 20 cm Abstand von der Verteilung wieder.



Rückseite:	Vorderseite:	Linke Seite:	Rechte Seite:
514,7 μT	238,8 μT	135,5 μT	13,6 μT

Abbildung 6.1: NVT 21 mit Leistungsschalter und Sicherungstrennleisten. Die Flußdichten wurden im Abstand von 20 cm von der Gehäuseaußenseite berechnet.

Das Zentrum der maximalen Flußdichte liegt auf der Höhe der mittleren Stromschiene, rechts von der Einspeisung. Die größten Feldanteile liefern hierzu die Stromschienen der Einspeisung. Durch die umständliche Schienenführung wird ein hohes Feld erzeugt. Es ist günstiger, wenn ein direkter Anschluß zwischen den Kontakten des Leistungsschalters und den waagerechten Sammelschienen besteht. Diese Verbindung läßt sich mit Kabeln realisieren, die hinsichtlich ihrer Strombelastbarkeit und Kurzschlußfestigkeit den Stromschienen gleichwertig sind. Ein Beispiel für dieses Kabel ist das NSGAFÖU 1x240 mm² 3kV. Mit diesem flexiblen, einadrigen Kabel kann man eine sehr kurze Verbindung zwischen dem Leistungsschalter und den Stromschienen realisieren. Die veränderte Niederspannungsverteilung zeigt Abbildung 6.2:



Rückseite:	Vorderseite:	Linke Seite:	Rechte Seite:
298,3 μT	209,9 μT	119,6 μT	17,0 μT
-42,0%	-12,1%	-12,0%	25%

Abbildung 6.2: NVT 21 mit flexiblen Leitungen in der Einspeisung anstelle der festen Stromschienen. Die Prozentwerte geben die Differenz der Flußdichte gegenüber der Verteilung nach Abbildung 6.1 wieder.

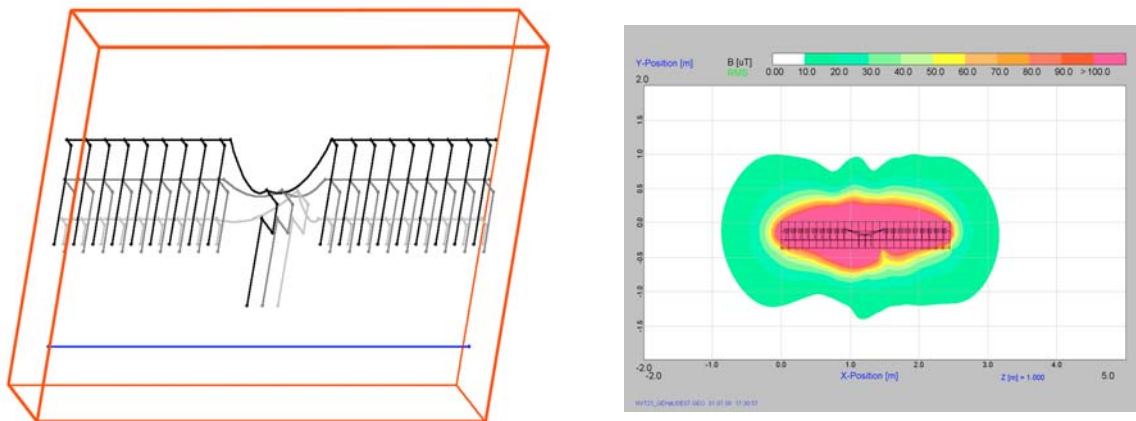
Die Flußdichte zur Rückseite ist mit einer Reduktion um 42% erheblich kleiner, als bei der vorhergehenden Verteilung. Die Werte zur Vorderseite und zur linken Seite sind ebenfalls geringer geworden.

Die Kabelführung hat bei dieser Untersuchung einen wesentlichen Einfluß auf die Flußdichteverteilung. Bei dieser Untersuchung führten die Leitungen direkt vom Leistungsschalter auf die Sammelschienen. Durch eine Bündelung der Leitungen kann die Flußdichte aber noch weiter reduziert werden.

Die nächste Maßnahme betrifft den Ort der Einspeisung. In der Diplomarbeit von S. Kupke³⁶ wurde festgestellt, daß eine Verlagerung der Einspeisung, von der Seite in die Mitte, die Flußdichten um ca. 30% reduziert.

Um diesen Fall zu konstruieren, wurde die Verteilung getrennt und die Einspeisung in die Mitte verlegt. Die Verbindung zwischen dem Leistungsschalter und den Stromschienen besteht wiederum aus flexiblen Leitungen (Abbildung 6.3).

³⁶ vgl. Kupke S.65



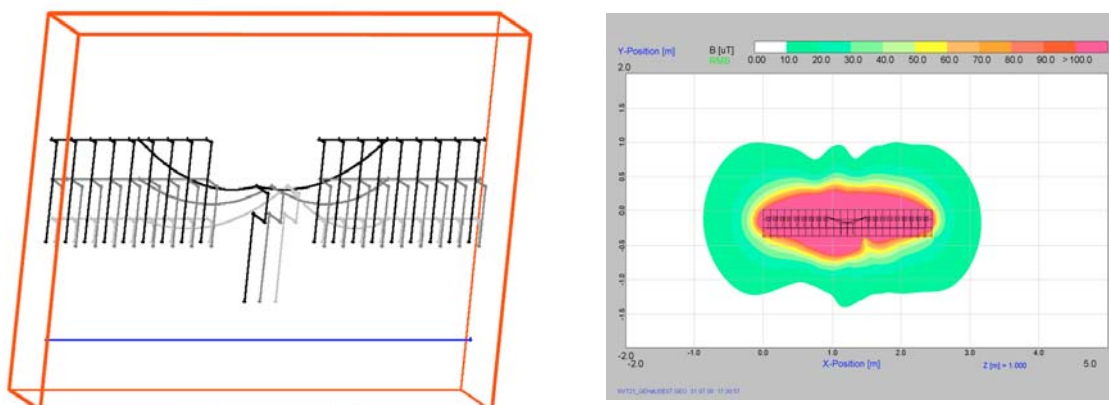
Rückseite:	Vorderseite:	Linke Seite:	Rechte Seite:
167,8 μT	176,7 μT	47,7 μT	28,7 μT
-67,4%	-26,0%	-64,8%	111,0%

Abbildung 6.3: NVT 21 mit mittiger Einspeisung und flexiblen Leitungen. Die Prozentwerte geben die Differenz der Flußdichte gegenüber der Verteilung nach Abbildung 6.1 wieder.

Die Verlegung der Einspeisung in die Mitte ist nicht immer möglich. Man erkennt aber, daß die Feldverteilung insgesamt gleichmäßiger ist. Das wird auch bei den berechneten Werten deutlich. Die Flußdichte zur Rückseite, Vorderseite und linken Seite sind gegenüber der ursprünglichen Verteilung (Abbildung 6.1) wesentlich geringer.

Zusätzlich tritt hier eine Besonderheit auf, die vorher noch nicht abzusehen war. Bei dieser Anordnung ist die Flußdichte an der Vorderseite der Verteilung größer als an der Rückseite! Bei den untersuchten Verteilungen im Kapitel 4 "Analyse verschiedener Verteilungen" kam dies insgesamt nur bei drei Verteilungen vor (NVT 01, NVT 04 und NVT 05). Ob diese Verlagerung der maximalen Flußdichte einen Vorteil darstellt, ist von der Aufstellung der Verteilung und den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Üblich ist es aber, die Verteilung mit der Rückseite an eine Wand zu stellen, so daß die Flußdichte zur Vorderseite, in Bezug auf den Personenschutz, uninteressant ist.

Zur weiteren Minimierung der maximalen Flußdichte, kann man die Stromaufteilung weiter vergleichmäßigen. Die Leitungen wurden bei der vorhergehenden Untersuchung auf dem kürzesten Weg, zwischen dem Leistungsschalter und den Stromschienen, verlegt. Man kann die Leitungen aber auch in der Mitte der Sammelschiene anschließen, so daß die Ströme auf der Sammelschiene weiter aufgeteilt werden. Die Abbildung 6.4 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

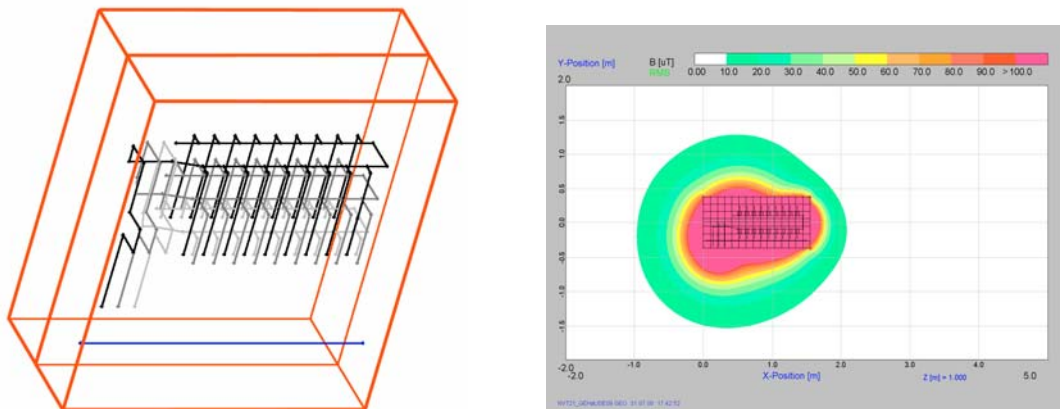


Rückseite:	Vorderseite:	Linke Seite:	Rechte Seite:
138,6 μT	191,9 μT	43,1 μT	26,2 μT
-73,1%	-19,6%	-68,2%	92,6%

Abbildung 6.4: NVT 21 mit mittiger Einspeisung und flexiblen Leitungen, die in der Mitte der Sammelschiene angeschlossen sind. Die Prozentwerte geben die Differenz der Flußdichte gegenüber der Verteilung nach Abbildung 6.1 wieder.

Die Flußdichte ist, im Vergleich zur Untersuchung nach Abbildung 6.3, zur Rückseite weiter abgefallen und zur Vorderseite angestiegen. Das Zentrum der maximalen Flußdichte wurde folglich weiter nach vorne verlagert, während die Flußdichten zur linken und rechten Seite nahezu konstant geblieben sind.

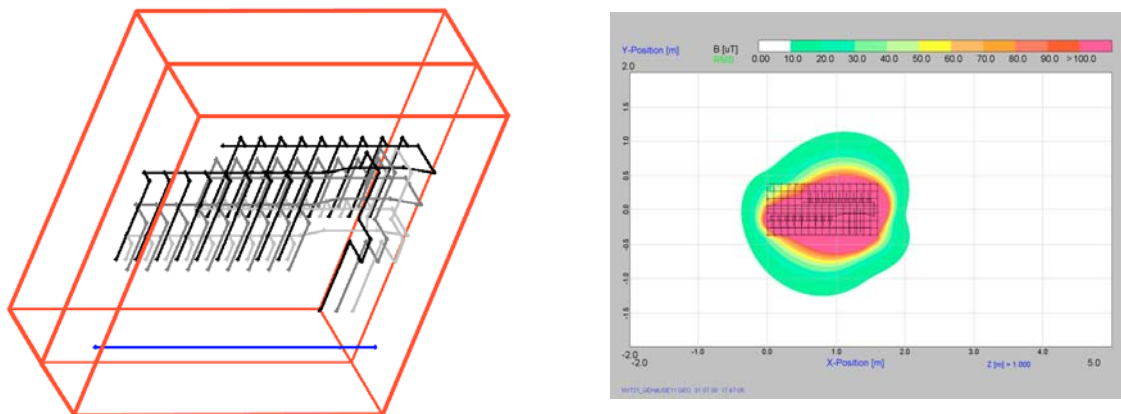
Mit einem etwas größeren Konstruktionsaufwand kann man die Flußdichte weiter senken. Hierzu wird die Niederspannungsverteilung "halbiert" und mit den Rückseiten zusammengestellt. Dadurch entsteht eine Verteilung, die an der Vorderseite und an der Rückseite Abgänge besitzt (Abbildung 6.5). Dieses hat den Vorteil, daß das Feld der Sammelschienen, aufgrund der entgegengesetzten Stromrichtung, minimiert wird.



Rückseite:	Vorderseite:	Linke Seite:	Rechte Seite:
73,8 μT	245,9 μT	131,2 μT	59,4 μT
-85,7%	3%	-3,2%	336,8%

Abbildung 6.5: NVT 21 mit neun Abgängen an der Vorderseite und neun Abgängen an der Rückseite. Die Einspeisung erfolgt von Links. Die Prozentwerte geben die Differenz der Flußdichte gegenüber der Verteilung nach Abbildung 6.1 wieder.

Das Feld der Rückseite ist um 85,7% reduziert worden. Die maximalen Flußdichten der Vorder- und linken Seite unterscheiden sich jedoch kaum von den Werten der ursprünglichen Verteilung nach Abbildung 6.1. Die Ursache für die hohen Flußdichten zur linken Seite, ist die linksseitige Einspeisung. Dieses Problem kann man lösen, indem die Einspeisung nach Rechts verlagert wird. Dadurch werden die Stromschienen gleichmäßiger belastet (Abbildung 6.6).



Rückseite:	Vorderseite:	Linke Seite:	Rechte Seite:
67,7 μT	155,1 μT	28 μT	64,2 μT
-86,8%	-35,1%	-79,3%	372,1%

Abbildung 6.6: NVT 21 mit Abgängen an der Vorder- und Rückseite. Einspeisung befindet sich in der Mitte. Die Prozentwerte geben die Differenz der Flußdichte gegenüber der Verteilung nach Abbildung 6.1 wieder.

Die Flußdichten sind jetzt an allen Seiten, mit Ausnahme der Vorderseite, kleiner als der Grenzwert von 100 μT . Aber auch die Werte der Vorderseite lassen sich noch senken, indem man flexible Leitungen anstelle der Stromschienen einsetzt, oder die Einspeisung anders gestaltet.

Der Nachteil dieser Konstruktion sind die eingeschränkten Möglichkeiten bei der Aufstellung. Die Verteilung kann nicht, so wie es üblich ist, mit der Rückseite an die Wand gestellt werden, sondern sie muß seitlich zu einer Wand stehen. Dieses kann in kleinen Räumen zu Problemen führen. Ein weiterer Nachteil dieser Verteilung ist die aufwendige Konstruktion. Diese Verteilung ließe sich nur mit einem zusätzlichen technischen Aufwand realisieren.

Den konstruktiven Nachteilen stehen die geringen Flußdichten als großer Vorteil gegenüber. Die Verteilung hält bereits im Abstand von 20 cm die Grenzwerte der 26. BImSchV ein. Der Abstand zu einem maßgeblichen Immissionsort beträgt aber üblicherweise mindestens 40 cm (inkl. der üblichen Wandstärke von 20 cm), so daß die Flußdichten dieser Verteilung an diesem Ort noch sehr viel geringer sind. Deshalb ist die Bauweise dieser Verteilung interessant, wenn der Grenzwert von 100 μT weiter gesenkt werden sollte.

Besteht der Bedarf, eine vorhandene Niederspannungsverteilung so umzubauen, daß die Grenzwerte eingehalten werden, kann dies durch die hier beschriebenen Konstruktionsmaßnahmen realisiert werden.

Sind die magnetischen Flußdichten weiterhin zu groß und ein Umbau nicht erwünscht, so kann der Grenzwert an einem bestimmten Ort nur noch durch das Vergrößern des Abstandes eingehalten werden. Die Flußdichte einer Niederspannungsverteilung fällt mit $B \sim \frac{1}{r^2} ab^{37}$. Dadurch haben geringe Vergrößerungen des Abstandes eine große Verminderung der Flußdichte zur Folge.

Sinnvoll erscheint deshalb ein Diagramm, indem die Isolinien 100 μT und 10 μT einer Niederspannungsverteilung eingetragen sind, um den entsprechenden Abstand für den Aufstellungsort zu bestimmen. Für die Niederspannungsverteilung NVT 21 wurde dieses Diagramm exemplarisch angefertigt (Abbildung 6.7):

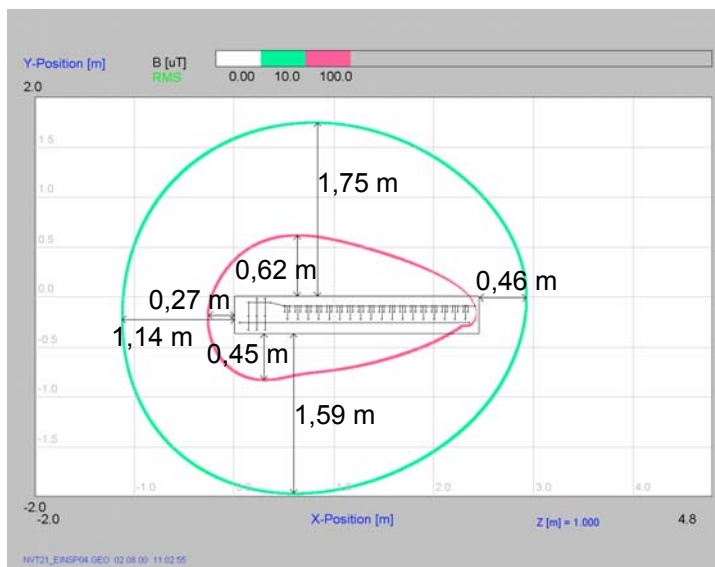


Abbildung 6.7:

NVT 21 mit eingezeichneten 100 μT und 10 μT Isolinien.

Die Flußdichten sind auf der Höhe der mittleren Stromschiene berechnet worden.

Aus der Abbildung 6.7 kann man ersehen, wie groß die Flußdichte der Verteilung in einem bestimmten Abstand ist. Wenn man diese Anlage in einem bestimmten Raum aufstellen möchte, kann man schon aus der Abbildung ersehen, an welcher Position die Flußdichte wie groß ist und die Anlage entsprechend plazieren.

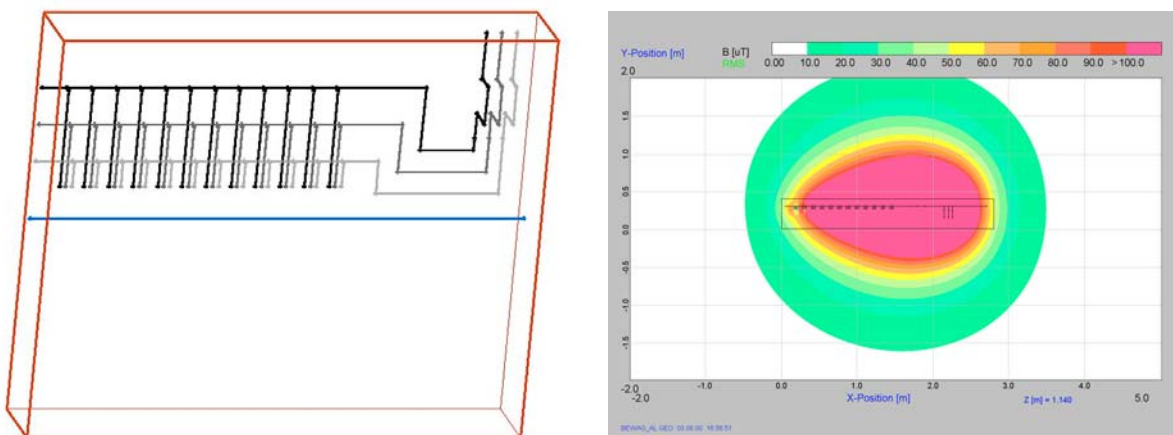
Die Untersuchungen dieses Kapitels haben gezeigt, daß es möglich ist die magnetische Flußdichte durch konstruktive Maßnahmen zu senken. Wie groß die Absenkung der Flußdichte ist, hängt dabei vom Umfang der Umbaumaßnahmen ab. Das Ersetzen der Stromschienen in der Einspeisung durch flexible Leitungen verringerte die Flußdichte zur Rückseite von 514,7 μT auf 298,3 μT . Dieser geringe Eingriff bewirkt also eine Reduktion um 42%. Ist das nicht ausreichend, kann die Einspeisung in die Mitte verlegt werden, dadurch wird die Flußdichte zur Rückseite auf 167,8 μT reduziert. Die größten Verringerungen sind mit der Niederspannungsverteilung nach Abbildung 6.6 erreicht worden. Die Flußdichte erreichte bei dieser Verteilung an der Rückseite einen Wert von 67,7 μT . Hiermit ist die Niederspannungsverteilung bestmöglich optimiert und kann an jedem beliebigen Aufstellungsort eingesetzt werden.

³⁷ vgl. VDEW S. 18

7 Beispiel der Optimierung einer modernen NS-Anlage

Die Bewag hat vor der Einführung der 26. BImSchV eine "Standardanlage" mit der Bezeichnung "N-Tafel 1000A / 1500A offene Bauweise" eingesetzt. Diese Verteilung wird von rechts eingespeist und hat insgesamt 12 Abgänge. Als Leistungsschalter kommen zwei Varianten mit 1250 A bzw. 1600 A zum Einsatz.

Abbildung 7.1 zeigt den Aufbau der Verteilung, sowie in der Draufsicht die magnetische Flußdichte 1 m über dem Boden. Die Tabelle in Abbildung 7.1 enthält die Werte in 20 cm Abstand von der Verteilung. Der eingespeiste Strom beträgt 909 A.



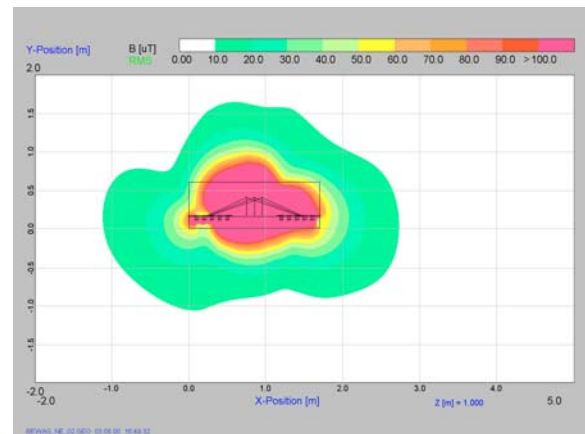
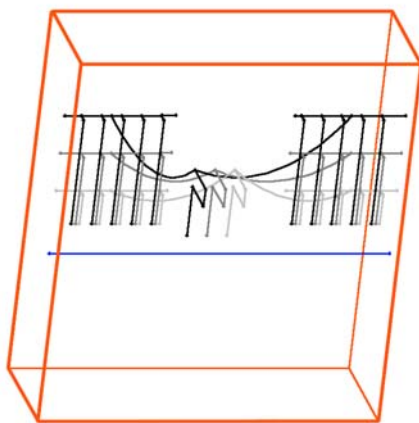
Rückseite:	Vorderseite:	Linke Seite:	Rechte Seite:
519,2 μT	214,2 μT	27,3 μT	31,4 μT

Abbildung 7.1: Standard Niederspannungsverteilung der Bewag vor Einführung der 26. BImSchV mit Flußdichten im Abstand von 20 cm

Die Flußdichten sind vor allem zur Rück- und Vorderseite sehr hoch. Der Grenzwert von 100 μT wird hinter der Verteilung erst in einem Abstand von 60 cm eingehalten. Diese Verteilung muß also weit von einem maßgeblichen Immissionsort abstehen, um den Grenzwert einzuhalten.

Mit dem Inkrafttreten der 26. BImSchV hat die Bewag eine neue Verteilung als "Standardanlage" eingesetzt. Diese als "EMV / NS-Schaltanlage" bezeichnete Verteilung wurde komplett neu entwickelt. Bei der Entwicklung stand dabei die größtmögliche Verringerung der magnetischen Feldstärke im Vordergrund. Folgende Eigenschaften charakterisieren die Verteilung, die in Abbildung 7.2 dargestellt ist:

- Einspeisung mittig
- Keine Stromschienen in der Einspeisung sondern flexible Leitungen
- Leistungsschalter möglichst niedrig, um den Kabelweg bis zum Schalter zu verkürzen
- Große Lastabgänge in der Nähe der Einspeisung



Rückseite:	Vorderseite:	Linke Seite:	Rechte Seite:
127,9 μT	87,4 μT	66,4 μT	68,2 μT
-75,4%	-59,2%	143,2%	117,2%

Abbildung 7.2: Standard Niederspannungsverteilung der Bewag nach Einführung der 26. BlmSchV mit Flußdichten im Abstand von 20 cm. Die Prozentwerte geben die Differenz der Flußdichte gegenüber der Verteilung nach Abbildung 7.1 wieder.

Die berechneten Flußdichten zeigen, daß bei dieser Niederspannungsverteilung, die vorgenommenen Maßnahmen sehr wirksam sind. Die Flußdichte an der Rückseite dieser Verteilung ist im Vergleich zur "alten" Standard-Verteilung von 519,2 μT auf 127,9 μT reduziert worden. Die Flußdichte zur Vorderseite ist von 214,2 μT auf 87,4 μT verringert worden. Die Anhebungen zur linken und rechten Seite sind für den Personenschutz nicht relevant, weil hier die Flußdichten sehr gering sind. Es können aber empfindliche Geräte gestört werden.

Die hier vorgestellte "neue Standardanlage" der Bewag vereinigt viele Optimierungsmaßnahmen, die im Kapitel 6 "Betrachtung von ausgewählten Optimierungsmaßnahmen" erläutert wurden, so daß die Verteilung sich, aufgrund der geringen Flußdichte, überall einsetzen läßt. Weitere Maßnahmen, wie Schirmung mit Metallplatten oder Vergrößerung des Abstandes zu einem maßgebenden Immissionsort, sind nicht mehr nötig.

Diese Maßnahmen, welche im Kapitel 6 "Betrachtung von ausgewählten Optimierungsmaßnahmen" dargestellt wurden, sind also technisch sinnvoll und lassen sich auch realisieren.

Die angesprochenen Optimierungsmaßnahmen beziehen sich nur auf die Niederspannungsverteilung. Um die gesamte Flußdichte einer Netzstation zu minimieren, werden zusätzlich die folgenden Veränderungen vorgenommen³⁸:

- Verbindung zwischen Transformator und NS-Verteilung mit Kabeln und nicht mit Stromschienen.
- Verbindung zwischen Transformator und NS-Verteilung möglichst auf dem Stationsboden verlegt und nicht unter der Decke.
- Verbindung zwischen Transformator und NS-Verteilung so kurz wie möglich.
- Einsatz von EMV Transformatoren mit tiefliegenden Anschlüssen.

Mit diesen Maßnahmen, die die gesamte Netzstation betreffen, wird die Flußdichte der Station so weit reduziert, daß zusätzliche Maßnahmen nicht mehr nötig sind.

³⁸ Nach Informationen von Herrn Klotz, Bewag, Abteilung NOsG

8 Zusammenfassung

Die Analyse von 22 verschiedenen Niederspannungsverteilungen zeigte, daß bei jeder untersuchten Anlage an mindestens einer Gehäusesseite der Grenzwert der 26. BImSchV von $100 \mu\text{T}$ in einem Abstand von 20 cm nicht eingehalten wird. Diese Anlagen sind dadurch nicht beliebig einsetzbar und müssen entsprechend optimiert werden. Dieser Optimierung geht eine umfassende Analyse der einzelnen Komponenten an einer beispielhaften Verteilung voraus.

Die Untersuchungen zu den Leistungsschaltern und Sicherungen ergaben nur einen relevanten Einfluß in deren unmittelbarer Umgebung. Der Leistungsschalter erhöhte hierbei die Flußdichte an der Rückseite in einem Abstand von 20 cm um 12,5% gegenüber einer geraden Stromschiene. Die Sicherungsleisten senkten die Flußdichte an der Rückseite um 0,2% ab. Bei den Untersuchungen wurde des weiteren festgestellt, daß eine Nachbildung der Sicherungsleisten bzw. Leistungsschalter durch gerade bzw. gekröpfte Stromschienen ausreichend ist. Die Nachbildung einer rechteckigen Stromschiene durch zwei Rundleiter ergibt einer Differenz in der Flußdichteverteilung von 1,5% in einem Abstand von 5 cm zur Schienenoberkante.

Als weitere Maßnahme wurde die Abschirmung des magnetischen Feldes durch Gehäuse oder Metallplatten mit den Materialien Stahl und Aluminium untersucht. Die maximale Reduktion wurde mit einer 3×2 m großen und 5 mm starken Aluminiumplatte erreicht, die direkt hinter der Verteilung angebracht war. Dadurch erfolgte eine Reduktion der magnetischen Flußdichte 20 cm hinter der Platte um 69,8%. (Ein 5 mm starkes Aluminiumgehäuse brachte demgegenüber keinen Vorteil.)

Preiswertere Stahlabschirmungen ergaben nur eine geringe Reduzierung der Flußdichte. (5 mm Stahlgehäuse reduziert um 43,8%.)

Der Einfluß der Kabellängen auf die Flußdichte der Niederspannungsverteilung ist insgesamt gering. Eine Variierung der Kabellänge der Abgangskabel verursachte nur eine geringe Änderung der Flußdichte. Bei den Einspeisekabeln wurde nur ein Einfluß auf die Flußdichte festgestellt, wenn die Kabel bis zu 3 m lang waren. Längere Kabel führten zu keiner weiteren Erhöhung der magnetischen Flußdichte der Verteilung.

Eine weitere Untersuchung befaßte sich mit der ungleichmäßigen Belastung der Abgänge. Bei Belastung der ersten drei Abgänge direkt neben der Einspeisung, betrug die Flußdichte $398,8 \mu\text{T}$. Wurden die drei Abgänge belastet, die am weitesten von der Einspeisung entfernt sind, so stieg die Flußdichte auf $498,8 \mu\text{T}$ an. Daraus resultiert die Forderung die leistungsstärksten Abnehmer möglichst direkt neben die Einspeisung zu legen und daran folgend die leistungsschwächeren Abnehmer.

Die vorherigen Ergebnisse werden dabei nur unwesentlich von unsymmetrischen Strömen in den Einspeise- bzw. Abgangskabeln beeinflusst. Bei Ausfall einer Phase in der Einspeisung stieg die Flußdichte um 9,8% an. Wurde hingegen eine Phase der Einspeisung um 50% weniger belastet, so sank die Flußdichte insgesamt etwas ab.

Die Differenzen waren noch geringer, wenn die Unsymmetrien nur in den Abgangskabeln auftraten. Hierbei wurde eine maximale Erhöhung von 3% festgestellt.

Abschließend wurde festgestellt, daß es durch die Kombination verschiedener Maßnahmen problemlos möglich ist, die magnetische Flußdichte einer Niederspannungsverteilung so weit zu reduzieren, daß diese unterhalb des Grenzwertes der 26. BImSchV liegen. Bereits das Ersetzen der Stromschiene in der Einspeisung durch Kabel bewirkte eine Reduktion der Flußdichte auf der Rückseite der Verteilung um 42%. Eine zusätzliche Verlagerung der Einspeisung in die Mitte reduzierte die Flußdichte sogar um 67,4%. Als Anregung für zukünftige Konstruktionen wurde die Verteilung vollständig umgestaltet, woraus sich eine Reduktion von 86,8% gegenüber der ursprünglichen Variante ergab. Hierbei wurde die Anlage zweigeteilt und die Hälften mit den Rücken gegeneinander gestellt, wodurch die Verteilung Abgänge an der Vorder- und Rückseite besitzt.

Als weiterführende Untersuchungen kann eine Überprüfung der berechneten Werte durch entsprechende Messungen stattfinden. Hierbei sollte in Kooperation mit einem Hersteller von Niederspannungsverteilungen die hier untersuchten Verteilungen nachgebaut und entsprechend den hier vorgestellten Optimierungsmaßnahmen verändert werden. Vom besonderen Interesse könnte hierbei die Anlage mit den vorder- und rückseitigen Abgängen sein, weil bei der Konstruktion dieser Anlage der Konstruktionsaufwand mit einbezogen wird und dadurch eine Kontrolle der Realisierbarkeit stattfindet.

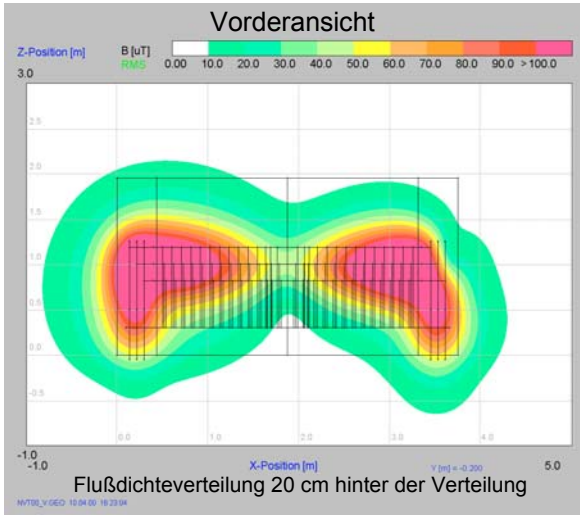
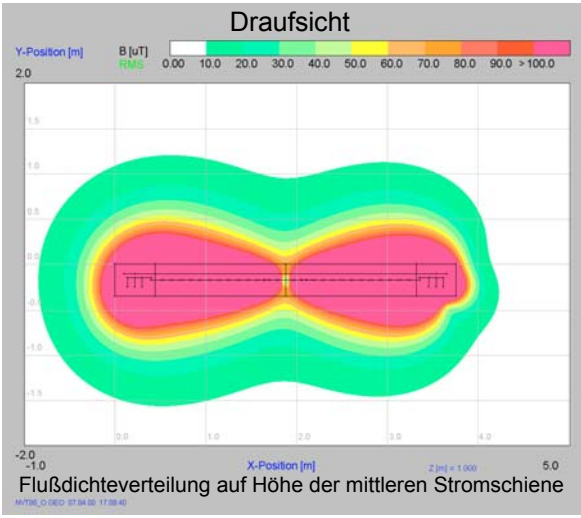
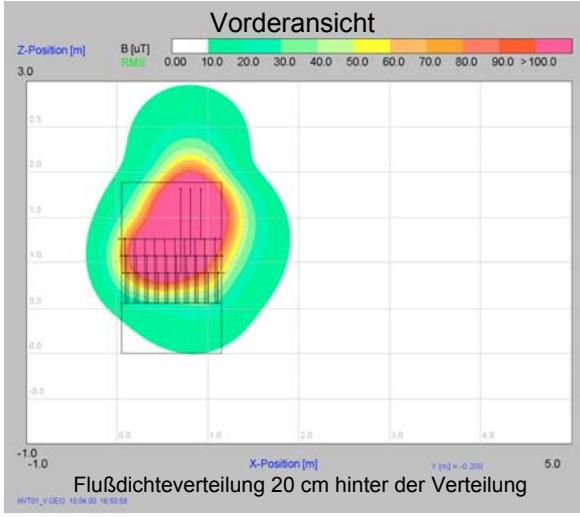
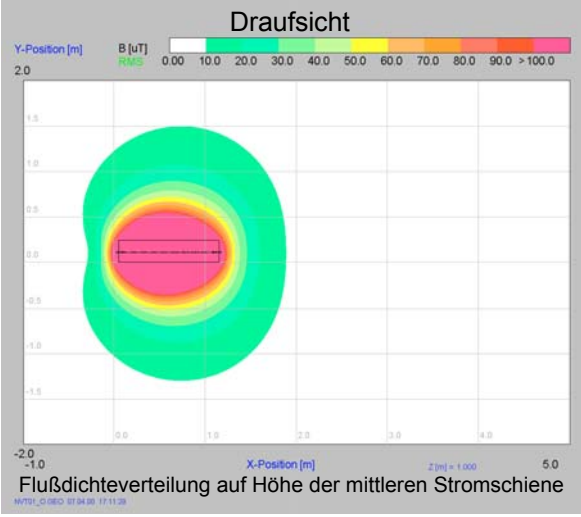
Bei den Messungen ist aber unbedingt auf die hier erläuterten Unterschiede zwischen einer flächenhaften Messung und einer punktuellen Berechnung zu achten. Aus diesem Grund ist eine Überprüfung der berechneten Werte nur schwer möglich. Eine meßtechnische Kontrolle der prozentualen Unterschiede im Zuge einer Optimierung wird die hier berechneten Unterschiede aber bestätigen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Ergebnisse dieser Arbeit sowohl für Konstrukteure von Niederspannungsverteilungen als auch für den wissenschaftlichen Bereich relevant sind. Für viele Aspekte einer Niederspannungsverteilung gab es bisher nur Vermutungen, aber keine durch systematische Untersuchungen gewonnenen quantitativen Erkenntnisse. Diese sind aber gerade für planende Ingenieure wichtig, weil diese bestrebt sein müssen nicht irgendeine aus Sicht der theoretischen Wissenschaft "wohlklingende" Maßnahme umzusetzen, die unter Umständen mit einem hohen, konstruktiven Aufwand verbunden ist, sondern im Rahmen der begrenzten Mittel genau die Maßnahmen umzusetzen, die mit dem geringsten Aufwand verbunden sind, um die magnetische Flußdichte unter die Grenzwerte der 26. BImSchV zu reduzieren.

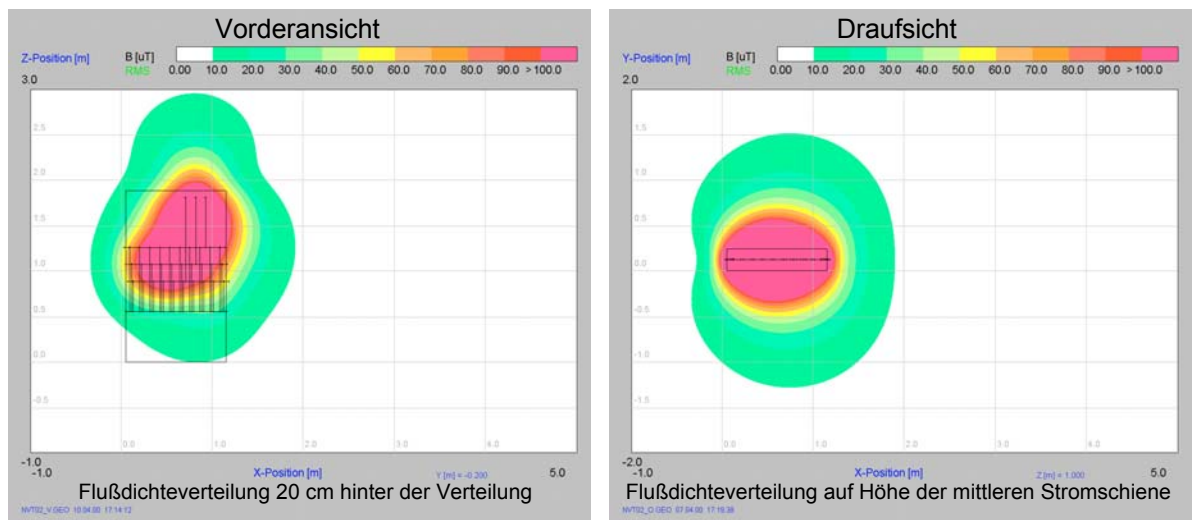
Anhang

- a) Technische Daten und Flußdichten der analysierten NS-VerteilungenXI
- b) Formelherleitung zur Berechnung des verminderten Stromes..... XXII

a) Technische Daten und Flußdichten der analysierten NS-Verteilungen

NVT 00	
 <p style="text-align: center;">Vorderansicht</p> <p style="text-align: center;">Flußdichteverteilung 20 cm hinter der Verteilung</p>	 <p style="text-align: center;">Draufsicht</p> <p style="text-align: center;">Flußdichteverteilung auf Höhe der mittleren Stromschiene</p>
<p>Nennstrom der Einspeisung: 2 x 577 A Anzahl der Abgänge: 28 Maße (B x H x T): 3,75 x 1,95 x 0,35 [m]</p>	<p>Flußdichten (20 cm Abstand):</p> <p>Vorderseite: 186,0 µT Linke Seitenwand: 84,7 µT Rechte Seitenwand: 66,2 µT Rückseite: 189,8 µT</p>
NVT 01	
 <p style="text-align: center;">Vorderansicht</p> <p style="text-align: center;">Flußdichteverteilung 20 cm hinter der Verteilung</p>	 <p style="text-align: center;">Draufsicht</p> <p style="text-align: center;">Flußdichteverteilung auf Höhe der mittleren Stromschiene</p>
<p>Nennstrom der Einspeisung: 909 A Anzahl der Abgänge: 28 Maße (B x H x T): 1,10 x 1,88 x 0,24 [m]</p>	<p>Flußdichten (20 cm Abstand):</p> <p>Vorderseite: 325,4 µT Linke Seitenwand: 30,1 µT Rechte Seitenwand: 80,7 µT Rückseite: 261,9 µT</p>

NVT 02

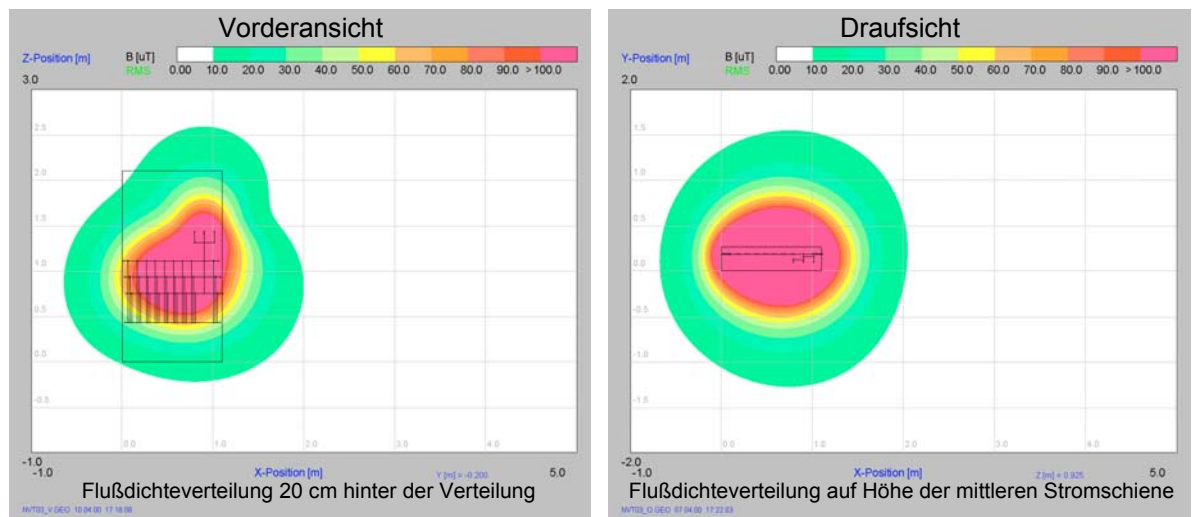


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,10 x 1,88 x 0,24 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 291,2 μT
Linke Seitenwand: 28,4 μT
Rechte Seitenwand: 80,7 μT
Rückseite: 291,2 μT

NVT 03

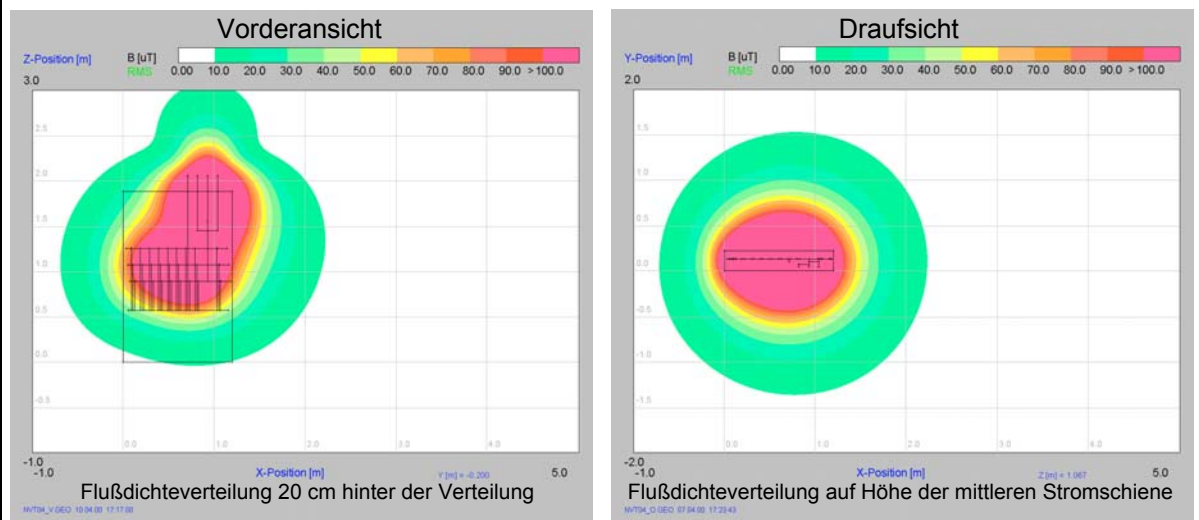


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,10 x 2,10 x 0,26 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 229 μT
Linke Seitenwand: 53,7 μT
Rechte Seitenwand: 119,7 μT
Rückseite: 363,4 μT

NVT 04

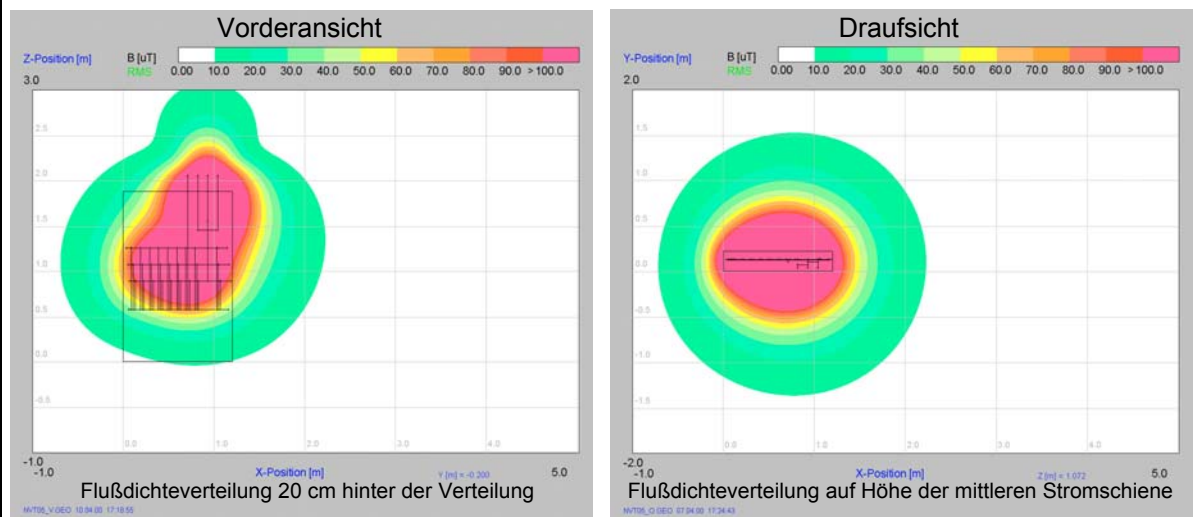


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,20 x 1,88 x 0,22 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 453,8 μT
Linke Seitenwand: 49,1 μT
Rechte Seitenwand: 135,7 μT
Rückseite: 337,6 μT

NVT 05

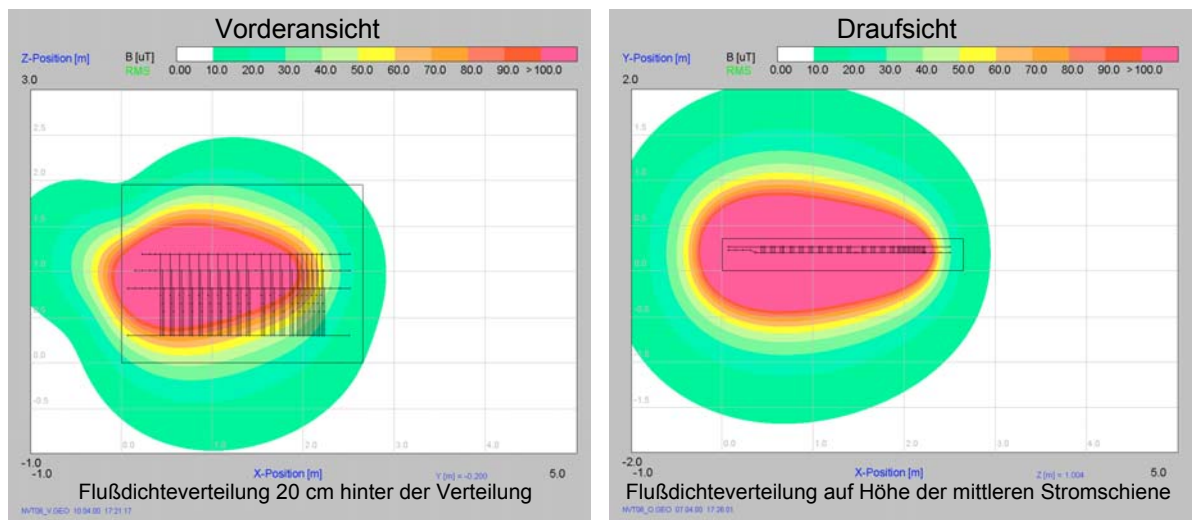


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,20 x 1,88 x 0,22 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 453,8 μT
Linke Seitenwand: 49,1 μT
Rechte Seitenwand: 135,7 μT
Rückseite: 337,8 μT

NVT 06

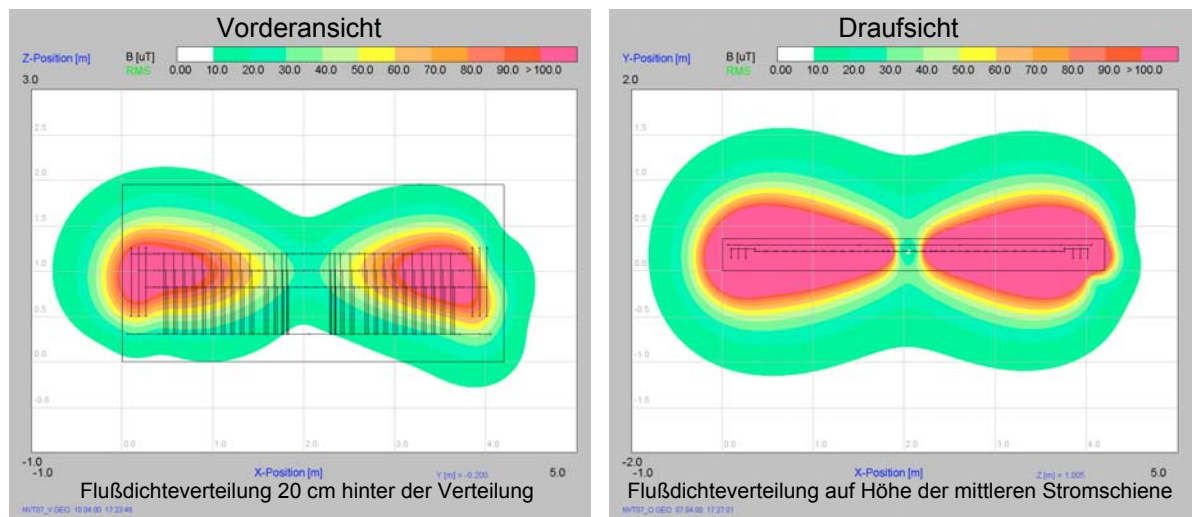


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 2,65 x 1,95 x 0,35 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 250,3 μT
Linke Seitenwand: 122,4 μT
Rechte Seitenwand: 11,9 μT
Rückseite: 319,7 μT

NVT 07

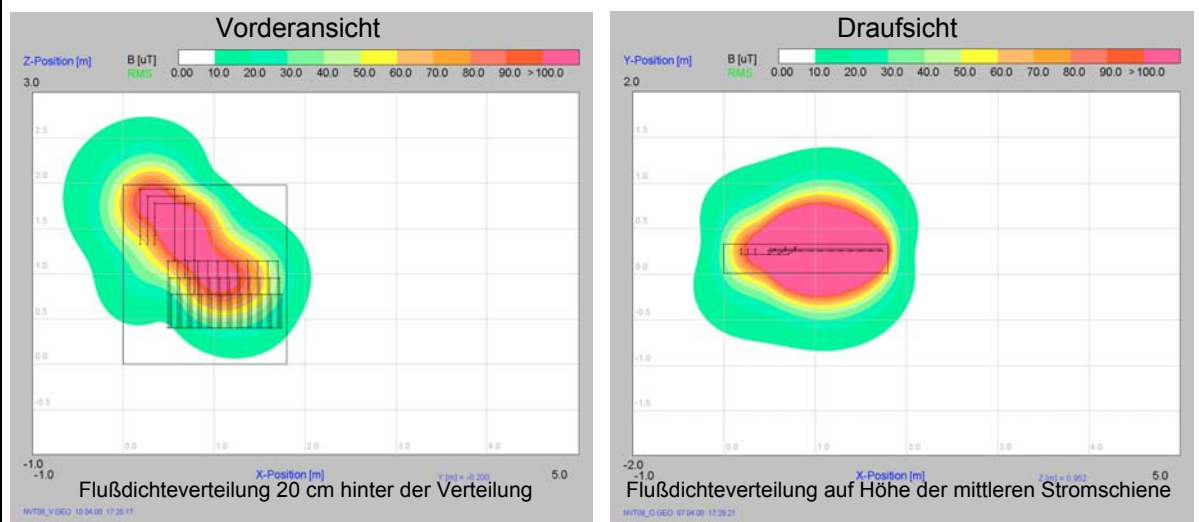


Nennstrom der Einspeisung: 2 x 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 4,20 x 1,95 x 0,35 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 149,2 μT
Linke Seitenwand: 102,6 μT
Rechte Seitenwand: 30,4 μT
Rückseite: 226,1 μT

NVT 08

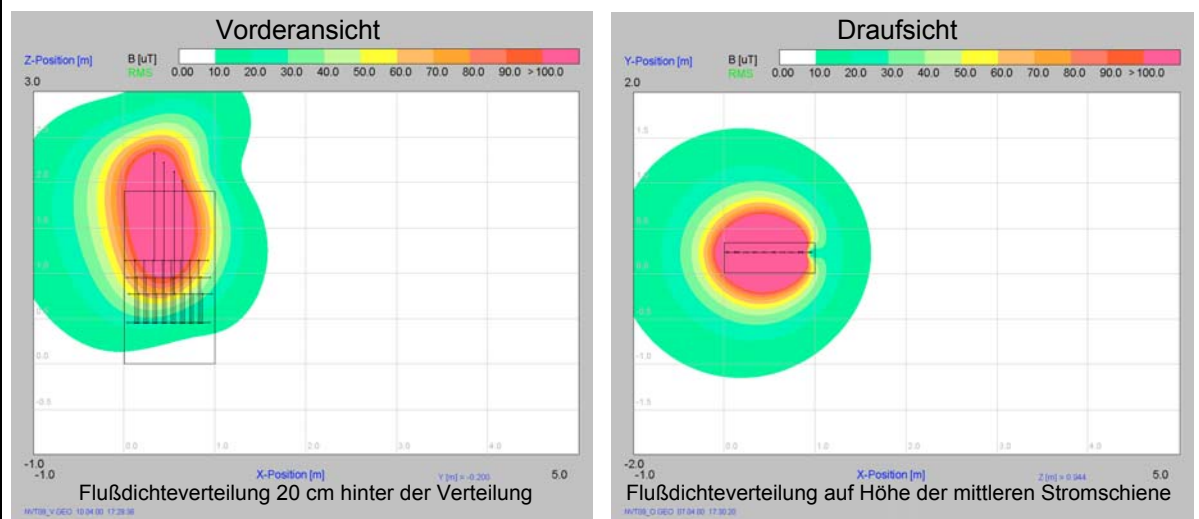


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,8 x 1,98 x 0,32 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 144,3 µT
Linke Seitenwand: 85,4 µT
Rechte Seitenwand: 19,0 µT
Rückseite: 529,6 µT

NVT 09

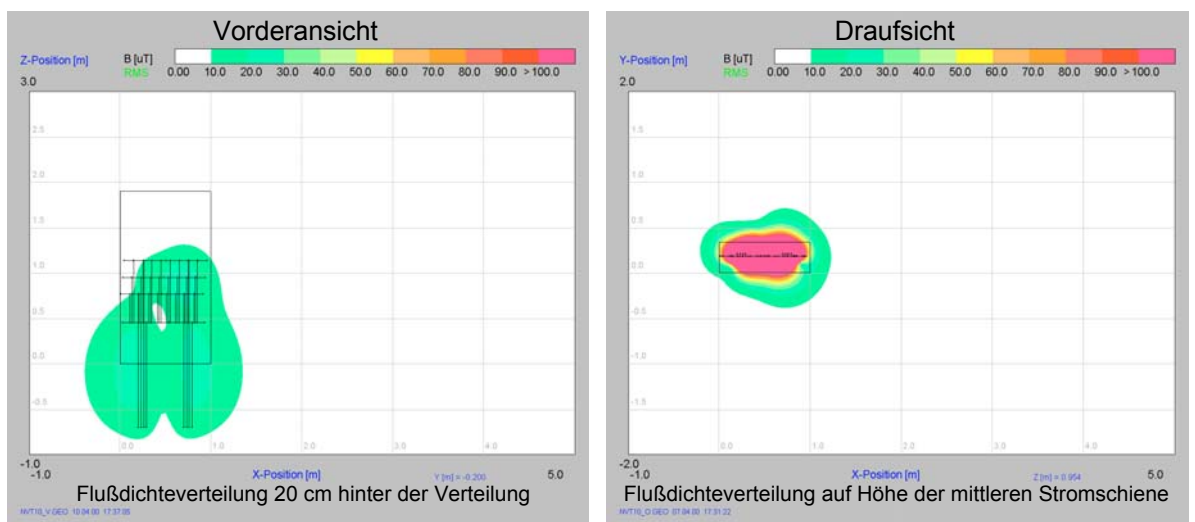


Nennstrom der Einspeisung: 1443 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,00 x 1,90 x 0,34 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 168,9 µT
Linke Seitenwand: 100,4 µT
Rechte Seitenwand: 38,0 µT
Rückseite: 331,0 µT

NVT 10

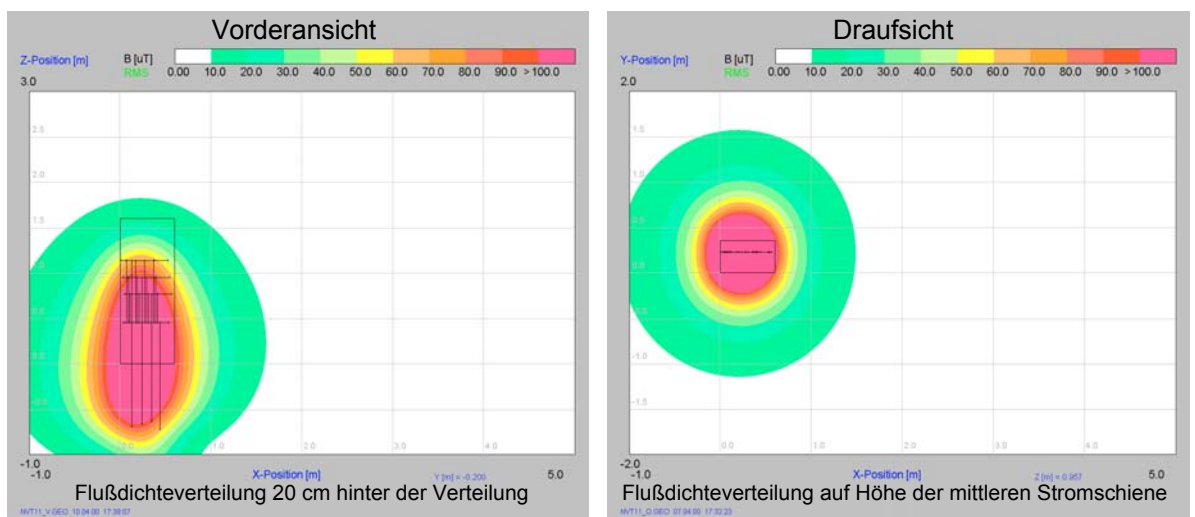


Nennstrom der Einspeisung: 1443 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,00 x 1,90 x 0,34 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 25,6 μT
Linke Seitenwand: 31,8 μT
Rechte Seitenwand: 27,0 μT
Rückseite: 37,4 μT

NVT 11

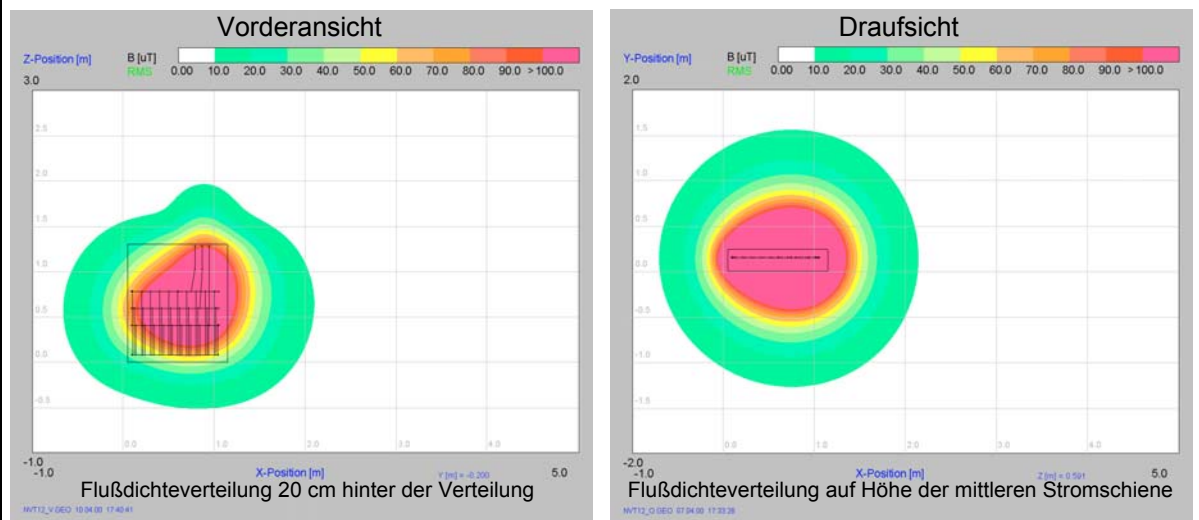


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 0,60 x 1,60 x 0,35 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 174,8 μT
Linke Seitenwand: 203,4 μT
Rechte Seitenwand: 109,7 μT
Rückseite: 280,0 μT

NVT 12

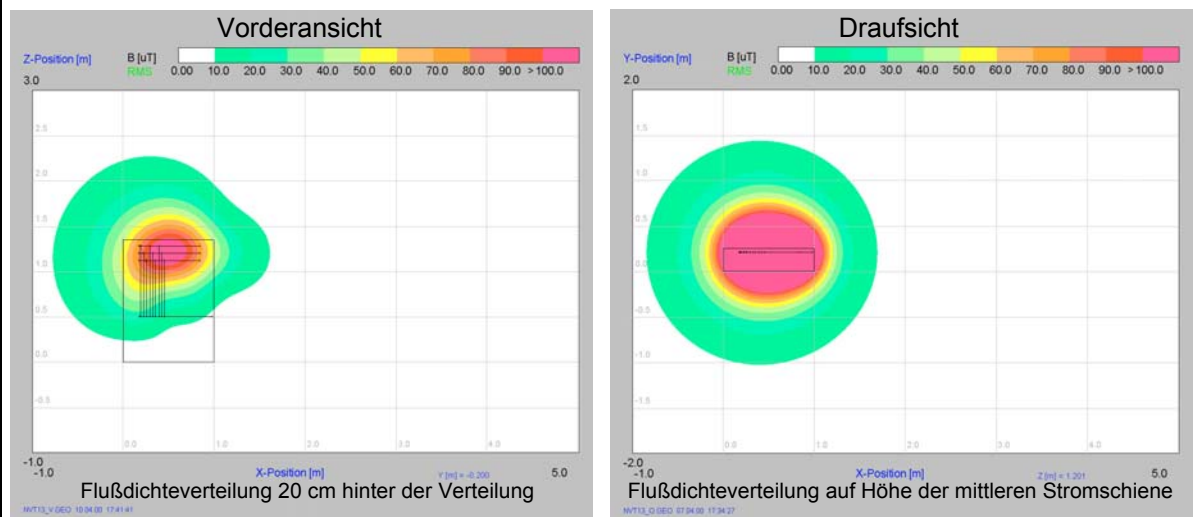


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,10 x 1,30 x 0,24 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 261,7 μT
Linke Seitenwand: 59,7 μT
Rechte Seitenwand: 110,3 μT
Rückseite: 367,1 μT

NVT 13

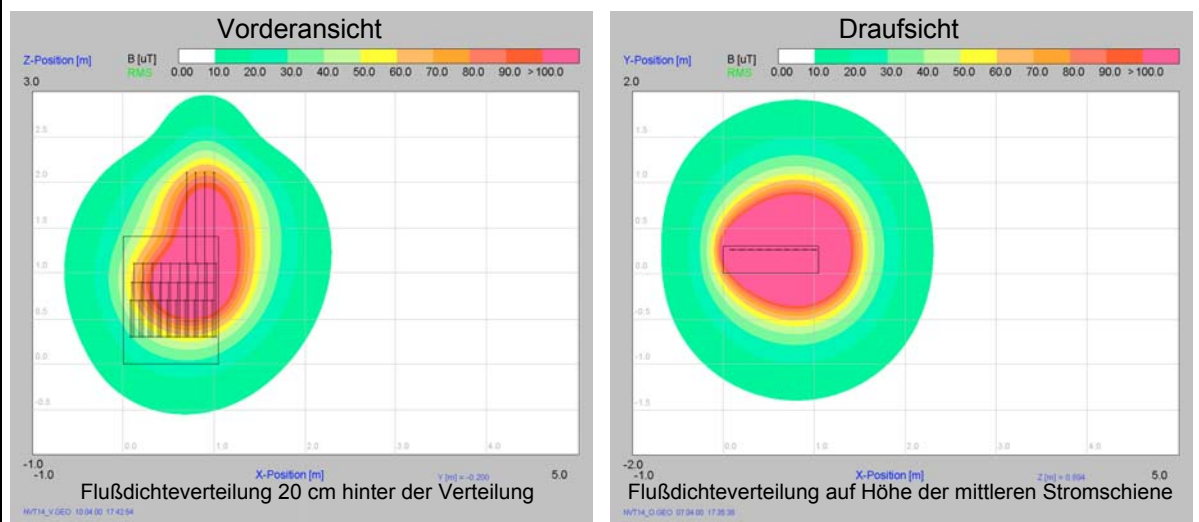


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,00 x 1,35 x 0,25 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 116,9 μT
Linke Seitenwand: 53,7 μT
Rechte Seitenwand: 49,6 μT
Rückseite: 369,3 μT

NVT 14

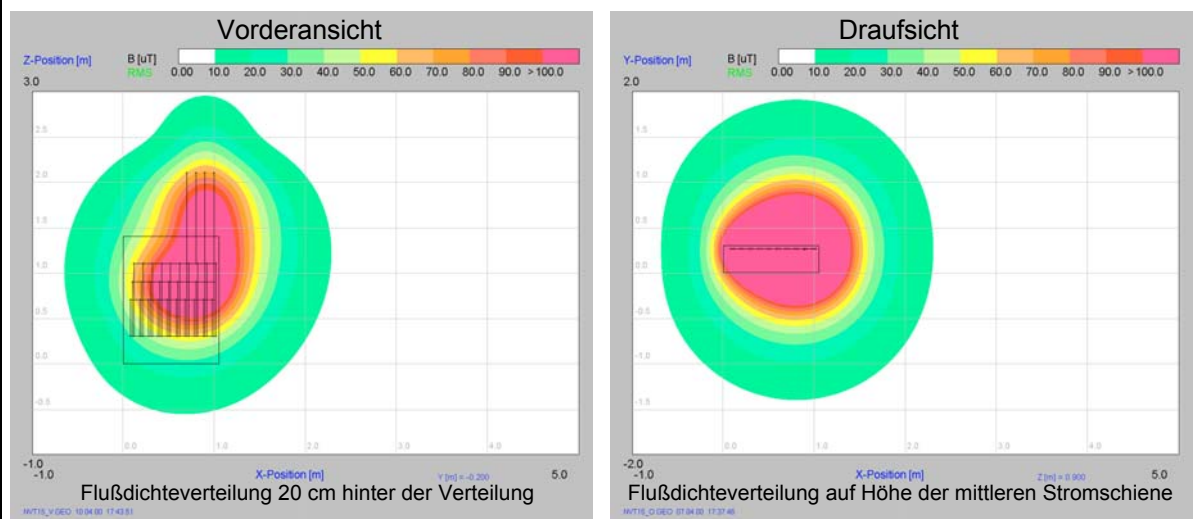


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,05 x 1,40 x 0,30 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 185,7 μT
Linke Seitenwand: 38,8 μT
Rechte Seitenwand: 292,6 μT
Rückseite: 541,0 μT

NVT 15

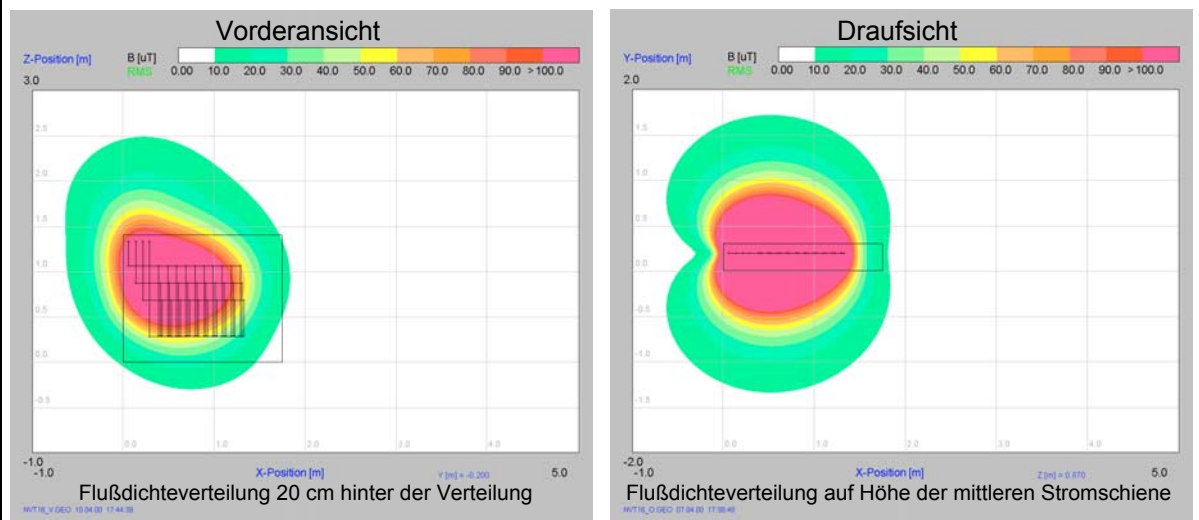


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,05 x 1,40 x 0,30 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 181,8 μT
Linke Seitenwand: 38,8 μT
Rechte Seitenwand: 292,3 μT
Rückseite: 557,9 μT

NVT 16

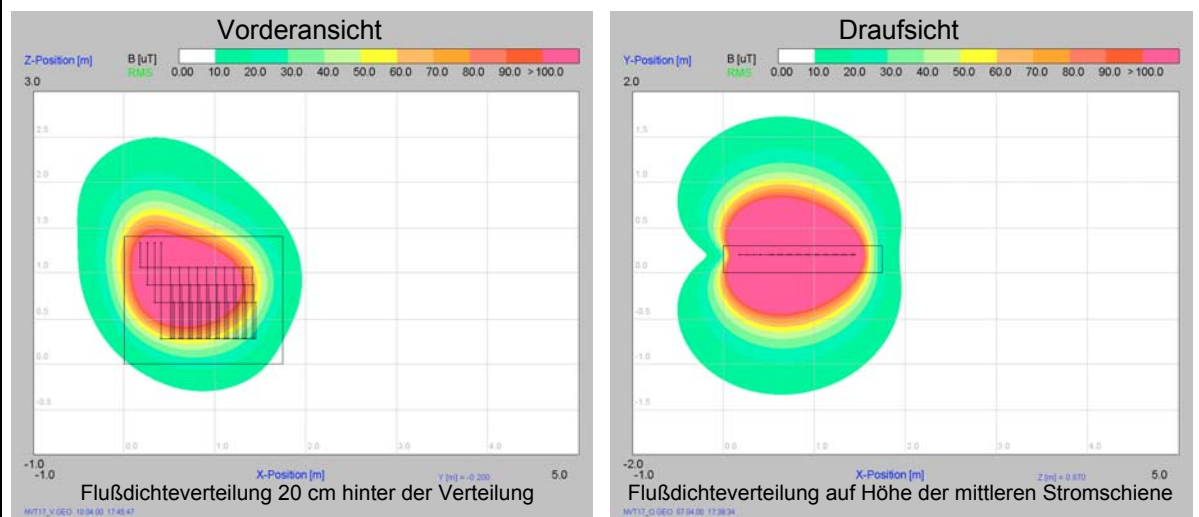


Nennstrom der Einspeisung: 577 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,75 x 1,40 x 0,30 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 291,9 μT
Linke Seitenwand: 82,2 μT
Rechte Seitenwand: 7,0 μT
Rückseite: 483,4 μT

NVT 17

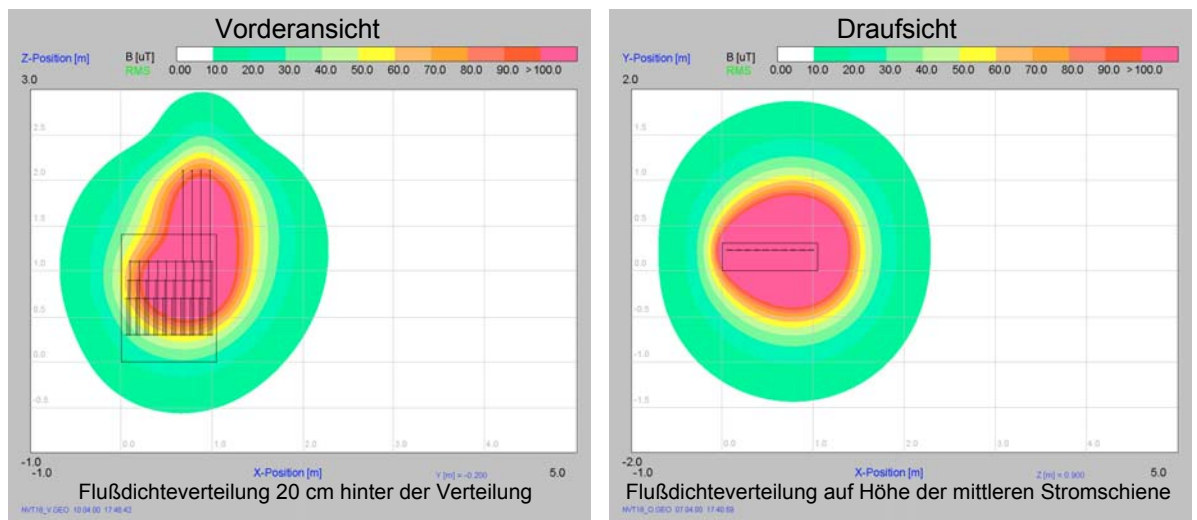


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,75 x 1,40 x 0,30[m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 291,9 μT
Linke Seitenwand: 31,4 μT
Rechte Seitenwand: 10,0 μT
Rückseite: 482,1 μT

NVT 18

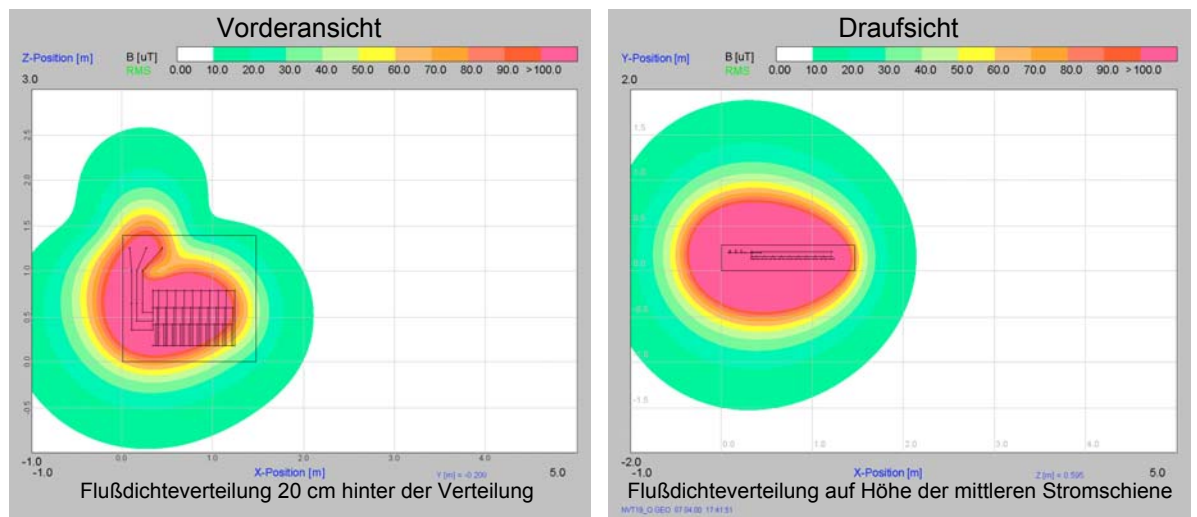


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,40 x 1,05 x 0,30 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 216,7 μT
Linke Seitenwand: 42,3 μT
Rechte Seitenwand: 257,4 μT
Rückseite: 439,6 μT

NVT 19

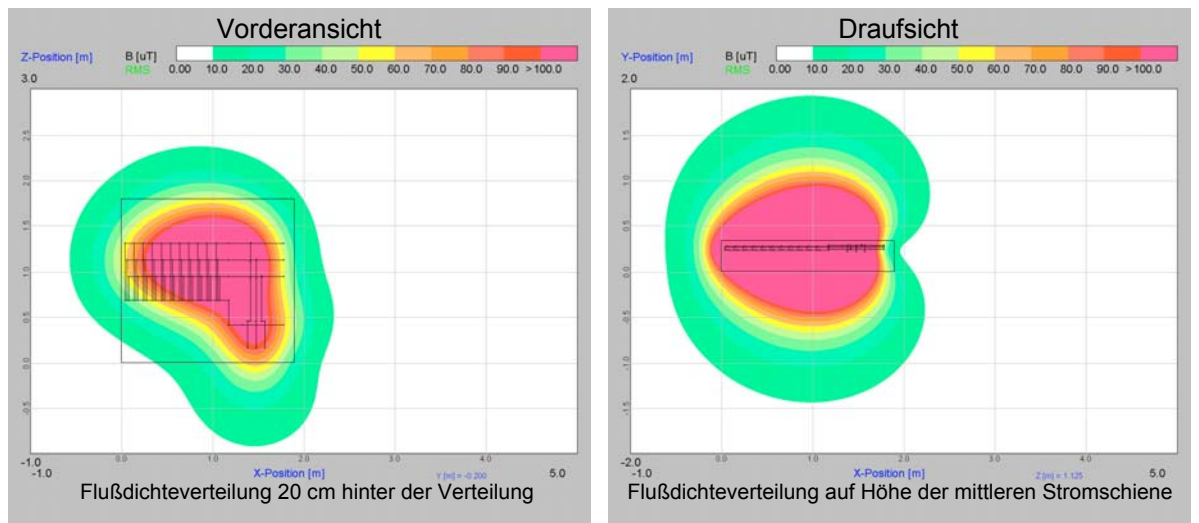


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,47 x 1,39 x 0,28 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 297,1 μT
Linke Seitenwand: 223,9 μT
Rechte Seitenwand: 34,6 μT
Rückseite: 344,0 μT

NVT 20

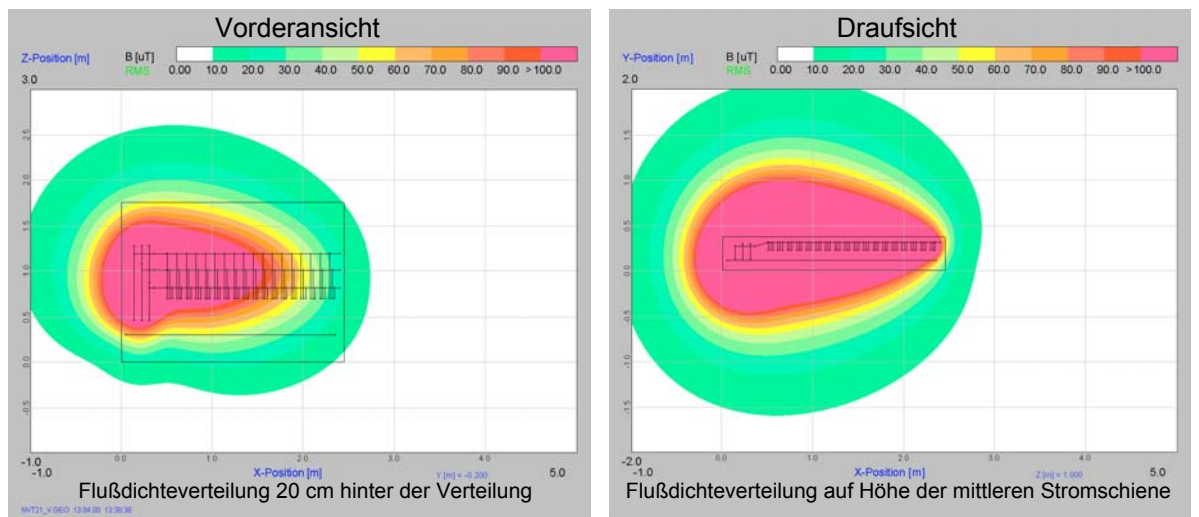


Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 28
Maße (B x H x T): 1,90 x 1,80 x 0,34 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 252,3 μT
Linke Seitenwand: 52,1 μT
Rechte Seitenwand: 34,3 μT
Rückseite: 588,6 μT

NVT 21



Nennstrom der Einspeisung: 909 A
Anzahl der Abgänge: 18A
Maße (B x H x T): 2,45 x 1,75 x 0,37 [m]

Flußdichten (20 cm Abstand):

Vorderseite: 312,8 μT
Linke Seitenwand: 166,4 μT
Rechte Seitenwand: 19,2 μT
Rückseite: 478,6 μT

b) Formelherleitung zur Berechnung des verminderten Stromes

Im Kapitel 5.2.2.2 "Unsymmetrische Belastung der Abgangskabel" muß für jede Untersuchung die Strombelegung neu errechnet werden. Die folgende Formel berechnet hierzu den unverminderten Strom I_{unver} für jede Phase:

$$I_{unver} = \frac{I_r}{n_{unver} + n_{ver} \cdot \left(1 - \frac{p}{100\%}\right)} \quad \text{Gleichung 8.1}$$

mit:

- I_{unver} - unverminderter Strom [A]
- I_r - Nennstrom der Einspeisung [A]
- n_{unver} - Anzahl der unverminderten Abgänge pro Phase
- n_{ver} - Anzahl der verminderten Abgänge pro Phase
- p - Reduktionsfaktor [%]

Der verminderte Strom I_{ver} soll gegenüber dem unverminderten Strom I_{unver} um den Prozentwert p verringert werden:

$$I_{ver} = I_{unver} \cdot \left(1 - \frac{p}{100\%}\right) \quad \text{Gleichung 8.2}$$

mit:

- I_{ver} - verminderter Strom [A]
- I_{unver} - unverminderter Strom [A]
- p - Reduktionsfaktor [%]

Literaturverzeichnis

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

ABB-Taschenbuch (Asea Brown Boveri Taschenbuch): *Schaltanlagen*. 9.Auflage. Düsseldorf: Cornelsen Verlag, 1992

Böger, H.; Kähler, F.; Weigt, G.: *Bauelemente der Elektronik und ihre Grundsaltungen*. 8. Aufl. Köln; München: Stam-Verlag, 1986

ELEK Produktkatalog: *Hochstrom-Energie-Verteiler*. ELEK GmbH, 1999

Genz, Daniel: Diplomarbeit: *Magnetische Flußdichte an Kabeltrassen der elektrischen Energieversorgung*. Berlin: FGEU mbH, 1999

Habiger, Ernst; u.a.: *Elektromagnetische Verträglichkeit*. 2. Aufl. Berlin; München: Verlag Technik, 1992

Hauptmann, Peter: *Sensoren: Prinzipien und Anwendung*. 1.Aufl. München; Wien: Carl Hanser Verlag, 1991

Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung). Entwurf des LAI-AK. 15.09.97

Knies, Wilfried; Schierack, Klaus: *Elektrische Anlagentechnik*. München; Wien: Hanser-Verlag, 1991

Kupke, Stephan: Diplomarbeit: *Optimierungsmaßnahmen der magnetischen Flußdichte an Netzstationen*. Berlin: FGEU mbH, 1999

Lenz, James E: *Proceedings of the IEEE*. Vol. 78. No. 6. Juni 1990

Lindner, Helmut: *Physik für Ingenieure*. 14. Aufl. Leipzig; Köln: Carl Hanser Verlag, 1993

Ose, Rainer: *Elektrotechnik für Ingenieure Band 1*. München; Wien: Fachbuchverlag Leipzig, 1996

Rodewald, Arnold: *Elektromagnetische Verträglichkeit*. 1. Aufl. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg 1995

Schwab, J. Adolf: *Elektromagnetische Verträglichkeit*. 3. Aufl. Berlin; Heidelberg; New York; u.a.: Springer-Verlag, 1993

VAC Vacuumschmelze: Firmenschrift: *Magnetische Abschirmung FS-M 9*. Hanau: 1988

WinField, *Electric and Magnetic Field Calculation*. FGEU mbH. 1994-2000

VDEW: *Umsetzung der 26. BImSchV in Mittelspannungsanlagen*. 1. Ausgabe.
Frankfurt am Main: VDEW-Verlag, 1999

Erklärung zur Diplomarbeit

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

Berlin, den 30.08.2000

Markus Faesing