

# **Diplomarbeit**

zum Thema

## **Magnetische Flußdichte an Kabeltrassen der elektrischen Energieversorgung**

im Wintersemester 1999/2000

Technische Universität Berlin

Fachbereich Elektrotechnik

Institut für Elektrische Energietechnik

Prof. Dr.-Ing. B. Kulicke; Prof. Dr.-Ing. A. Kost

vorgelegt

von

Daniel Genz

Matr.Nr.: 147325

Coppistraße 14 09/40

10365 Berlin

im 13. Fachsemester des Studiengangs Wirtschaftsingenieurwesen

Berlin, den 19. November 1999

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eidesstatt, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt und ohne Benutzung anderer als die der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Ich bin mir bewußt, daß eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Berlin, den 19. November 1999

Ich danke:

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Kost

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Kulicke

Herrn Dr. rer. nat. Olaf Plotzke

Herrn Dipl.-Ing. J. Ringler

Anke Lindemann

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Verzeichnis der verwendete Formelzeichen</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Ziel der Ausarbeitung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Auswirkungen magnetischer Felder</b> .....	<b>2</b>
1.2.1 Auswirkungen auf biologische Organismen.....	2
1.2.2 Auswirkungen auf technische Apparaturen .....	3
1.2.3 Begrenzung der Exposition magnetischer Felder.....	4
<b>2 Grundlagen der Feldberechnung</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1 Das quasistationäre magnetische Feld</b> .....	<b>7</b>
2.1.1 Die Zeitabhängigkeit elektromagnetischer Felder .....	7
2.1.2 Mathematische Beschreibung magnetischer Felder.....	8
<b>2.2 Berechnungsverfahren</b> .....	<b>9</b>
2.2.1 Das Gesetz von Biot-Savart .....	9
2.2.2 Numerische Berechnungsverfahren .....	10
2.2.2.1 Methode der Finiten Differenzen (FDM) .....	10
2.2.2.2 Methode der Finiten Elemente (FEM).....	11
2.2.2.3 Boundary Element Methode (BEM) .....	11
2.2.2.4 Finite Integrations Theorie (FIT) .....	12
2.2.2.5 Allgemeiner Vergleich der beschriebenen Verfahren .....	13
<b>2.3 Feldberechnung mit WinField</b> .....	<b>14</b>
2.3.1 Programmbeschreibung .....	14
2.3.2 Berechnungsmethoden.....	15
2.3.3 Beschreibung der Optimierungs- und Randomalgorithmen.....	15
2.3.3.1 Phasenoptimierung in Winfield .....	15
2.3.3.2 Ermittlung zufälliger Phasenordnungen in WinField .....	16
2.3.4 Berechnungsgenauigkeit und Fehlerbetrachtung .....	17
<b>3 Auslegung und technische Besonderheiten von Kabelanordnungen</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1 Arten der Energieversorgungskabel</b> .....	<b>18</b>
<b>3.2 Technische Besonderheiten</b> .....	<b>19</b>
3.2.1 Der Skineneffekt und der Proximityeffekt .....	19
3.2.2 Mantelströme .....	22
3.2.3 Induktive Kopplung und Nullströme .....	23

---

<b>3.3 Berücksichtigung der Verdrillung.....</b>	<b>24</b>
3.3.1 Analytische Lösung für ein im Dreieck verlegtes Drehstromsystem.....	24
3.3.2 Vergleich der analytischen Berechnung mit der Simulation durch WinField .....	26
3.3.3 Nachbildung der Verdrillung des NS-Kabel NA2XY 4x150 0,6/1kV .....	29
<b>3.4 Kabelanordnungen.....</b>	<b>32</b>
3.4.1 Berücksichtigung der Erwärmung.....	32
3.4.2 Die Standardverlegearten der Bewag.....	33
3.4.3 Möglichkeiten der Feldreduktion.....	34
<b>4 Magnetische Flußdichte an idealisierten Kabeltrassen .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1 Vorbetrachtungen.....</b>	<b>36</b>
4.1.1 Annahmen .....	36
4.1.2 Das Magnetfeld einer Dreiecksanordnung .....	36
4.1.3 Möglichkeiten der geometrischen Anordnung .....	38
4.1.4 Das zeitpunktbezogene Magnetfeld von zwei Systemen .....	39
<b>4.2 Phasenoptimierung der Einebenenordnung .....</b>	<b>43</b>
4.2.1 Phasenoptimierung auf die geringste Flußdichte .....	43
4.2.1.1 Phasenoptimierung der <i>geraden</i> Anordnung.....	43
4.2.1.2 Phasenoptimierung der <i>gestützten</i> Anordnungen .....	46
4.2.1.3 Vergleich der Anordnungen mit <i>guter</i> Feldreduktion .....	47
4.2.2 Phasenoptimierung auf die größte Flußdichte.....	48
4.2.3 Reduktionseffekte durch Beachtung der Phasenfolge.....	50
<b>4.3 Optimierung der Zwei- und Dreiebenenanordnung .....</b>	<b>51</b>
4.3.1 Phasenoptimierung auf die geringste Flußdichte .....	51
4.3.1.1 Phasenoptimierung der <i>geraden</i> Anordnung.....	51
4.3.1.2 Phasenoptimierung der <i>gestützten</i> Anordnung .....	53
4.3.2 Phasenoptimierung auf die größte Flußdichte.....	53
4.3.3 Reduktionseffekte durch Beachtung der Phasenfolge.....	54
<b>4.4 Statistische Betrachtungen.....</b>	<b>55</b>
4.4.1 Vorbetrachtungen .....	55
4.4.2 Test auf Normalverteilung.....	56
4.4.3 Der Kolmogoroff-Smirnov-Anpassungstest .....	57
4.4.4 Empirische Verteilung der magnetischen Flußdichte .....	59
<b>5 Grenzbetrachtungen bei erweiterten Anordnungen.....</b>	<b>61</b>
<b>5.1 Theoretische Überlegungen zur maximalen Flußdichte .....</b>	<b>61</b>
<b>5.2 Berechnungsbeispiele .....</b>	<b>63</b>
5.2.1 Anordnungen mit großer Feldreduktion .....	63
5.2.2 Anordnungen mit geringer Feldreduktion .....	65

---

<b>6</b>	<b>Untersuchung der magnetischen Flußdichte an realen Kabeltrassen .....</b>	<b>67</b>
<b>6.1</b>	<b>Besonderheiten in realen Anordnungen .....</b>	<b>67</b>
6.1.1	Hin und Rückströme .....	67
6.1.2	Unterschiedliche Belastungen der Kabel.....	67
6.1.3	Abschätzung der Stromsummen .....	68
6.1.4	Phasendrehungen durch die Umspannung .....	72
6.1.5	Das Magnetfeld von Anordnungen mit mehreren verdrehten NS-Kabeln .....	72
<b>6.2</b>	<b>Untersuchungen der Standardtrassen .....</b>	<b>74</b>
6.2.1	Erläuterungen .....	74
6.2.2	10 kV-Ringkabeltrassen.....	74
6.2.2.1	Randbedingungen.....	74
6.2.2.2	Anordnung mit acht Systemen in zwei Ebenen .....	74
6.2.2.3	Anordnung mit 15 Systemen in drei Ebenen .....	76
6.2.2.4	Anordnung mit 24 Systemen in drei Ebenen .....	77
6.2.3	Kabeleinführungen in eine Netzstation .....	79
6.2.3.1	Randbedingungen.....	79
6.2.3.2	Stationseinführungstrassen mit NS-Kabeln mit Gleichschlagverseilung .....	79
6.2.3.3	Stationseinführungstrassen mit NS-Kabeln mit Wechselschlagverseilung .....	80
6.2.4	110 kV-Trassen .....	83
6.2.4.1	Randbedingungen.....	83
6.2.4.2	110 kV-Trasse mit gleichmäßiger Belastung der Systeme.....	84
6.2.4.3	110 kV-Trasse mit ungleichmäßiger Belastung der Systeme.....	86
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>88</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>X</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>XXIII</b>

---

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BEM	Boundary Element Methode
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMVG	Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten
FDM	Methode der Finite Differenzen
FEM	Methode der Finite Elemente
FIT	Finite Integration Theory
Gl.	Gleichung
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
INIRC	International Non-Ionizing Radiation Committee
IRPA	International Radiation Protection Association
NS-Kabel	Niederspannungskabel
Tab.	Tabelle
UW	Umspannwerk
VPE	vernetztes Polyethylen

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Basisgrenzwerte und Referenzwerte der ICNIRP.....	5
Abbildung 3.1	Geschätzte Stromverteilung aufgrund des Skineffekts.....	21
Abbildung 3.2	Leiteranordnung bei Berechnung der Verdrillung.....	25
Abbildung 3.3	Nachbildung der Verdrillung eines Dreileiterkabels.....	27
Abbildung 3.4	Vergleich des Verlaufs der magnetischen Flußdichte.....	28
Abbildung 3.5	Vergleich des Verlaufs der magnetischen Flußdichte.....	29
Abbildung 3.6	Magnetische Flußdichte bei Abbruch der Anordnung.....	30
Abbildung 3.7	Magnetische Flußdichte im Bereich des Schlagwechsels.....	31
Abbildung 3.8	Verlauf der magnetischen Flußdichte beim Schlagwechsel.....	31
Abbildung 3.9	Standardtrassen der Bewag.....	33
Abbildung 4.1	Phasenordnung eines Drehstromsystems.....	37
Abbildung 4.2	Flußdichtevektoren eines Drehstromsystems.....	37
Abbildung 4.3	Möglichkeiten der geometrischen Anordnung der Kabelbündel.....	XVI
Abbildung 4.4	Anordnungen von Kabelbündeln mit Darstellung der Zeiger.....	38
Abbildung 4.5	Flußdichtevektoren bei unterschiedlicher Phasenfolge.....	40
Abbildung 4.6	Flußdichte an zwei Kabelbündeln in gerader Anordnung.....	41
Abbildung 4.7	Flußdichtevektoren an zwei Kabelbündeln in gestützter Anordnung...	42
Abbildung 4.8	Flußdichte bei optimaler Phasenfolge (3-8 Systeme/ 1 Ebene).....	XVII
Abbildung 4.9	Flußdichte bei optimaler Phasenfolge (9-14 Systeme/ 1 Ebene)....	XVIII
Abbildung 4.10	Flußdichte bei optimaler Phasenfolge (15-20 Systeme/ 1 Ebene)....	XIV
Abbildung 4.11	Magnetische Flußdichte einer guten Anordnung mit 21 Systemen.....	45
Abbildung 4.12	Vergleich der geraden und gestützten Anordnung.....	47
Abbildung 4.13	Flußdichte bei gleicher Phasenfolge.....	49
Abbildung 4.14	Flußdichte bei stückweise gleicher Phasenfolge.....	49
Abbildung 4.15	Vergleich der Anordnungen mit optimaler / geringer Feldreduktion...	50
Abbildung 4.16	Flußdichte bei optimaler Phasenfolge (4-14 Systeme/ 2 Ebenen).....	XX
Abbildung 4.17	Flußdichte bei optimaler Phasenfolge (16-20 Systeme/ 2 Ebenen)....	XXI
Abbildung 4.18	Flußdichtevektoren der optimierten Anordnung für sechs Systeme.....	52
Abbildung 4.19	Flußdichte bei optimaler Phasenfolge (6-18 Systeme/ 3 Ebenen)....	XXII
Abbildung 4.20	Vergleich der Anordnungen mit optimaler / geringer Feldreduktion...	54
Abbildung 4.21	Vergleich der Anordnungen mit optimaler / geringer Feldreduktion...	55
Abbildung 4.22	Verteilungsdichten ausgewählter Anordnungen.....	57
Abbildung 4.23	Normierte Verteilungsdichten der Anordnungen mit 9-12 Systemen...	58

---

Abbildung 5.1	Berechnungsparameter bei Abschätzung des Grenzwertes.....	61
Abbildung 5.2	Flußdichte bei optimaler / guter Phasenfolge.....	64
Abbildung 5.3	Flußdichte bei schlechter / schlechtester Phasenfolge.....	65
Abbildung 6.1	Unterschiedliche Auslastung der Kabel vor einem UW der Bewag.....	68
Abbildung 6.2	Anordnung zur Bestimmung der Felder durch Nullströme.....	70
Abbildung 6.3	Bezeichnung und Anordnung der 15 Systeme in drei Ebenen.....	76
Abbildung 6.4	Flußdichte bei gleicher / ungleicher Belastung.....	77
Abbildung 6.5	Flußdichte bei Belastung der Grundanordnungen.....	78
Abbildung 6.6	Belastungen der Systeme der 0,4/ 10 kV-Beispieltrasse.....	79
Abbildung 6.7	Flußdichte der Stationseinführungstrasse mit und ohne NS-Kabel.....	80
Abbildung 6.8	Zufällige Verschiebung und Drehung der NS-Kabel.....	81
Abbildung 6.9	Flußdichte der NS-Kabel mit Wechselschlagverseilung.....	81
Abbildung 6.10	Flußdichte der 0,4/ 10 kV-Systeme der Stationseinführungstrasse.....	82
Abbildung 6.11	Flußdichte des 6. und 8. NS-Kabel.....	83
Abbildung 6.12	gleichmäßige Belastungen der Systeme der 110 kV-Beispieltrasse.....	84
Abbildung 6.13	Flußdichte bei gleichmäßiger Belastung.....	85
Abbildung 6.14	Verteilungsdichte der Anordnungen der 110 kV-Trasse.....	85
Abbildung 6.15	ungleichmäßige Belastungen der Systeme der 110 kV-Beispieltrasse..	86
Abbildung 6.16	Flußdichte bei ungleichmäßiger Belastung.....	87

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Zusammenfassung der Eigenschaften der Berechnungsverfahren.....	13
Tabelle 3.1	Aufstellung der verwendeten Kabeltypen.....	18
Tabelle 3.2	Vergleich der Flußdichte mit und ohne Stromverdrängung.....	21
Tabelle 3.3	Übertragungsfähigkeit neu verlegter Kabel der Bewag.....	33
Tabelle 4.1	Vergleich der optimalen Anordnungen mit erstellten Anordnungen....	46
Tabelle 4.2	Relative Felderhöhung der schlechten Anordnung in einer Ebene....	XXI
Tabelle 4.3	Relative Felderhöhung der schlechten Anordnung in 2 / 3 Ebenen....	XXI
Tabelle 4.4	$\chi^2$ -Anpassungstest für die permutierbaren Anordnungen.....	56
Tabelle 4.5	Ergebnisse des Kolmogoroff-Smirnov-Anpassungstest.....	59
Tabelle 4.6	Berechnung der Quantile der Verteilungen.....	XXII
Tabelle 5.1	Vergleich der theoretischen und ermittelten max. Flußdichte.....	63
Tabelle 5.2	Erstellte Phasenfolgen mit guter Feldreduktion.....	XXIII
Tabelle 5.3	Erstellte Phasenfolgen mit schlechter Feldreduktion.....	XIV
Tabelle 6.1	Stichproben zur Bestimmung des Einflusses von Nullströmen.....	XV
Tabelle 6.2	Untersuchung der Phasenfolgen der Ringkabeltrasse.....	75
Tabelle 6.3	Zufällige Stromverteilung bei ungleichmäßiger Belastung.....	76

---

## Verzeichnis der verwendete Formelzeichen

Die aufgeführten Formelzeichen werden für die nebenstehenden Größen verwendet. Vektorielle Größen werden mit einem Zeiger dargestellt. Die verwendeten Einheiten entsprechen dem SI-System.

$A$	Fläche
$B$	magnetische Flußdichte
$D$	Verschiebungsstromdichte
$E$	elektrische Feldstärke
$\varepsilon$	Permittivität
$\Phi$	magnetischer Fluß
$H$	magnetische Feldstärke
$I$	Strom
$J$	Stromdichte
$\kappa$	elektrische Leitfähigkeit
$l$	Länge
$\mu, \mu_0, \mu_r$	Permeabilität, Permeabilität des freien Raumes, relative Permeabilität
$r$	Radius
$\rho$	Ladungsdichte
$p$	Verseilschlaglänge
$t$	Zeit
$U$	Spannung
$v$	Ausbreitungsgeschwindigkeit
$V$	Volumen
$\omega$	Kreisfrequenz

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Ziel der Ausarbeitung

Elektromagnetische Felder stellen heute eine zivilisationsbedingte Erscheinung in der Umwelt dar. Neben den natürlich vorkommenden elektromagnetischen Feldern entstanden im Zuge des Fortschreitens der technologischen Entwicklung eine Vielzahl von zusätzlichen Feldquellen.

„Seit Jahren wird über mögliche gesundheitliche Auswirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern im Bereich der Stromversorgungsanlagen auf den Menschen sehr kontrovers diskutiert.“<sup>1</sup> Die Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV legt seit dem 01. Januar 1997 Grenzwerte für die Immission elektromagnetischer Strahlung fest. Betreiber von Kabelanlagen sind verpflichtet, das Einhalten der Grenzwerte für Neuanlagen und bei der Modifikation bestehender Anlagen zu belegen.

An den meisten Kabelanlagen werden die Grenzwerte eingehalten. Trotzdem kann eine Reduktion der Belastung durch magnetische Felder wünschenswert sein, da die Grenzwerte den heutigen Wissensstand wiedergeben und eine weitere Reduktion der Grenzwerte aufgrund neuer Erkenntnisse nicht ausgeschlossen werden kann. In diesem Zusammenhang sind Langzeitbeeinflussungen von Personen durch magnetische Felder erst unzureichend untersucht. Darüber hinaus liegt die Schwelle der Beeinflussung elektrischer Geräte und Anlagen zum Teil deutlich unter den Grenzwerten.

In dieser Arbeit werden die magnetischen Felder in der Umgebung von Energieversorgungskabeln betrachtet und schlußfolgernd Hinweise, insbesondere zur Verlegung von Energieversorgungskabeln, gegeben. Die herausragende Rolle nimmt die Anordnung der Phasen der Drehstromsysteme ein. Diese Ausarbeitung soll zeigen, daß mit der Beachtung der Phasenordnung die Belastung durch magnetische Felder von Energieversorgungsanlagen reduziert werden kann.

An Beispielberechnungen realer Konfigurationen von Kabelanlagen soll die Wirksamkeit der empfohlenen Maßnahmen überprüft werden. Hierbei wird versucht, den Einfluß realer Gegebenheiten weitgehend mit einzubeziehen.

---

<sup>1</sup> Thiem S. 1143.

---

## 1.2 Auswirkungen magnetischer Felder

### 1.2.1 Auswirkungen auf biologische Organismen

Es existieren verschiedene Wirkungsmechanismen niederfrequenter Magnetfelder auf biologische Organismen.<sup>2</sup> Zum einen ist das die mechanische Wirkung magnetischer Felder auf Magnetitkristalle in biologischen Zellen. Allerdings ist der Anteil der Magnetitpartikel in den meisten Zellen sehr gering, so daß der Effekt nach bisherigem Wissensstand keine Beeinträchtigung der Zellen bedingen sollte.<sup>3</sup> Zum anderen induzieren zeitlich veränderliche Magnetfelder nach dem Faradayschen Gesetz elektrische Felder und damit elektrische Wirbelströme in Organismen mit elektrisch leitendem Gewebe. Dieser Mechanismus besitzt im Bereich niederfrequenter Magnetfelder den größten Einfluß auf biologische Organismen. Er hat Beeinflussungen des Elektrolytflusses, sowie die Entstehung elektrischer Potentiale und Ströme im Gewebe zur Folge.

Die Arbeitsgruppe INIRC (International Non-Ionizing Radiation Committee) der IRPA (International Radiation Protection Association) wertete 1998 weltweite Studien zu den Gesundheitsfolgen elektromagnetischer Felder aus.<sup>4</sup>

Ein Ergebnis dieser Auswertung der epidemiologischen Studien ist eine mögliche Krebspromotion niederfrequenter elektromagnetischer Felder. So weisen zwar Personen, die in der Nähe von Hochspannungsfreileitungen leben kein erhöhtes Krebsrisiko aus. Bei Kindern aber kann insgesamt von einer schwachen Korrelation zwischen niederfrequenten Feldern und Leukämieerkrankungen ausgegangen werden. Auch für Werktätige in elektrotechnischen Berufen ergeben die meisten Studien ein erhöhtes Risiko karzinomer Erkrankungen. Weiterhin konnten Laboruntersuchungen in Tierversuchen eine Erhöhung des Brustkrebsrisikos nachweisen, wogegen Untersuchungen am Menschen bisher keine konsistenten Ergebnisse brachten.

Hinweise für den Einfluß niederfrequenter elektromagnetischer Felder auf genetische Effekte und zelluläre Veränderungen dagegen reichen derzeit nicht aus, um von konsistenten Schädigungen auszugehen.<sup>5</sup>

Unstrittig ist die physiologische Reaktion auf induzierte Ströme, die die Stärke bioelektrischer Signale übersteigen. Diese Beeinflussungen beginnen etwa ab einer Stromdichte von  $10 \text{ mA m}^{-2}$  und führen über Veränderungen der kognitiven Fähigkeiten

---

<sup>2</sup> Vgl. Suess S. 203.

<sup>3</sup> Zu Untersuchungen des Einflusses auf Gehirngewebe vgl. Kirschvink.

<sup>4</sup> Vgl. ICNIRP.

<sup>5</sup> Die geringe Photonenenergie reicht nicht für relevante Temperaturerhöhungen und Aufspaltungen chemischer Verbindungen aus. Allerdings scheint der interzelluläre Kalziumionen-Transport Beeinträchtigungen unterworfen zu sein. Vgl. Tenforde S. 288 ff.

bis hin zu Herzkammerflimmern, unkontrollierten Muskelkontraktionen und Atemstillstand ab  $1 \text{ A m}^{-2}$ . Diese Schwellenwerte gelten für einen Bereich von wenigen Hz bis 1 kHz und steigen oberhalb und unterhalb dieser Frequenzen an.

Neben den mittelbaren Einwirkungen existieren unmittelbare Einwirkungen niederfrequenter magnetischer Felder auf Organismen. Sie entstehen durch Berühren oder im Fall der Funkenentladung durch Annähern von Personen an Gegenstände mit verschiedenen elektrischen Potentialen. Die Potentiale werden durch Induktionsvorgänge aufgebaut und durch Ausgleichsströme beim Berühren wieder abgebaut. Die Beeinträchtigungen reichen von Unbehagen bis hin zu schweren körperlichen Schädigungen, wie Verbrennungen und Herzkammerflimmern.<sup>6</sup>

### 1.2.2 Auswirkungen auf technische Apparaturen

Die Auswirkungen elektromagnetischer Feldern auf technische Anlagen fallen in das Arbeitsgebiet der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV).

Grundsätzlich wirken dabei magnetische Felder auf Ladungsträger ein. Sie bedingen durch Induktion eine Beschleunigung der Ladungen. Dieser Effekt wird durch das Induktionsgesetz beschrieben:

$$U = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial (\vec{B} \times \vec{A})}{\partial t}. \quad [1]$$

Niederfrequente Magnetfelder, wie sie in der Umgebung von Energieversorgungskabeln auftreten, induzieren Spannungen in offene Leiterschleifen, die beim Schluß der Leiterschleife zur Ausbildung von Stromflüssen führen. Ein typisches Beispiel induktiver Beeinflussungen durch Starkstromanlagen besteht für Fernmeldeanlagen.<sup>7</sup>

Andererseits lenken bereits statische magnetische Felder bewegte Ladungen ab. Auch niederfrequente Magnetfelder beeinflussen bewegte Ladungsträger innerhalb und außerhalb von Leitern. Die Lorentzkraft erklärt die Kraftwirkung zwischen Leitern und die Ablenkung von Teilchenstrahlen:

$$\vec{F} = e \cdot (\vec{v} \times \vec{B}). \quad [2]$$

Somit beeinträchtigen niederfrequente Magnetfelder Elektronenstrahlbildröhren in einem hohen Maße. Die Felder bewirken je nach ihrer Einfallrichtung Ablenkungen des Elektronenstrahls und somit Verschiebungen oder Rotationen der Bildpunkte. Dadurch

---

<sup>6</sup> Vgl. ICNIRP S. 22.

<sup>7</sup> Vgl. z.B. DIN VDE 0228 Teil 2.

---

entstehen bereits bei einer magnetischen Flußdichte von 10 bis 20  $\mu\text{T}$  intolerierbare Farbverfälschungen und Bildverzerrungen auf den Bildschirmen. Weiterhin erzeugen die niederfrequenten Wechselfelder bereits ab 1  $\mu\text{T}$  ein merkliches Zittern des Bildes.<sup>8</sup>

Allgemeine Aussagen über zulässige Beeinflussungen niederfrequenter magnetischer Felder lassen sich den Fachgrundnormen der Störfestigkeit entnehmen. Danach müssen elektrische Geräte magnetischen Feldstärken im Haushaltsbereich von mindestens 1  $\text{A m}^{-1}$  und im Industriebereich von mindestens 30  $\text{A m}^{-1}$  standhalten.<sup>9</sup> Im Umkehrschluß könnten Gerätebesitzer entsprechende Emissionen untersagen.

### 1.2.3 Begrenzung der Exposition magnetischer Felder

Die Festlegung der Grenzwerte seitens des ICNIRP-Komitees<sup>10</sup> und der zuständigen Bundesministerien<sup>11</sup> bezieht sich explizit auf die Gefährdung des Menschen durch die Exposition gegenüber elektromagnetischer Strahlung. Das ICNIRP-Komitee legte Basisgrenzwerte fest. Die Schwelle der Basisgrenzwerte, bei der akute Beeinflussungen des Nervensystems mit Frequenzen von 4 Hz bis 1 kHz auftreten, entspricht einer Stromdichte von 100  $\text{mA m}^{-2}$ . Das INCIRP-Komitee empfahl, die berufsbedingte Exposition auf 1/10 und die Exposition der Normalbevölkerung auf 1/50 dieses Wertes zu beschränken.

Aus den frequenzabhängigen Basisgrenzwerten können mit Hilfe homogener isotroper Magnetfeldmodelle<sup>12</sup> die maximal zulässigen magnetischen Flußdichten als Referenzwerte bestimmt werden. Die Basisgrenzwerte und Referenzwerte der ICNIRP bis 100 Hz sind in *Abb. 1.1* dargestellt.

In der Bundesrepublik Deutschland müssen Betreiber von Niederfrequenzanlagen die immissionschutzrechtlichen Pflichten gemäß der 26. Bundes-Immissionsschutzverordnung (26. BImSchV)<sup>13</sup> erfüllen. Die 26. BImSchV dient primär dem Schutz von Personen vor Schädigungen durch elektromagnetische Felder. Anderen Beeinträchtigungen durch die Emission elektromagnetischer Felder werden durch andere Gesetze Einhalt geboten, wie z.B. der Schutz von elektronischen Geräten durch das Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG).

---

<sup>8</sup> Vgl. Kohling, Zimmer S. 758 f.

<sup>9</sup> Vgl. DIN EN 50 082 Teil 1 und 2.

<sup>10</sup> Vgl. ICNIRP S.34 ff.

<sup>11</sup> Vgl. 26. BImSchV.

<sup>12</sup> Vgl. ICNIRP S. 39 und Suess S. 203.

<sup>13</sup> Zu den folgenden Aussagen vgl. Hinweise zur Durchführung der 26. BImSchV.

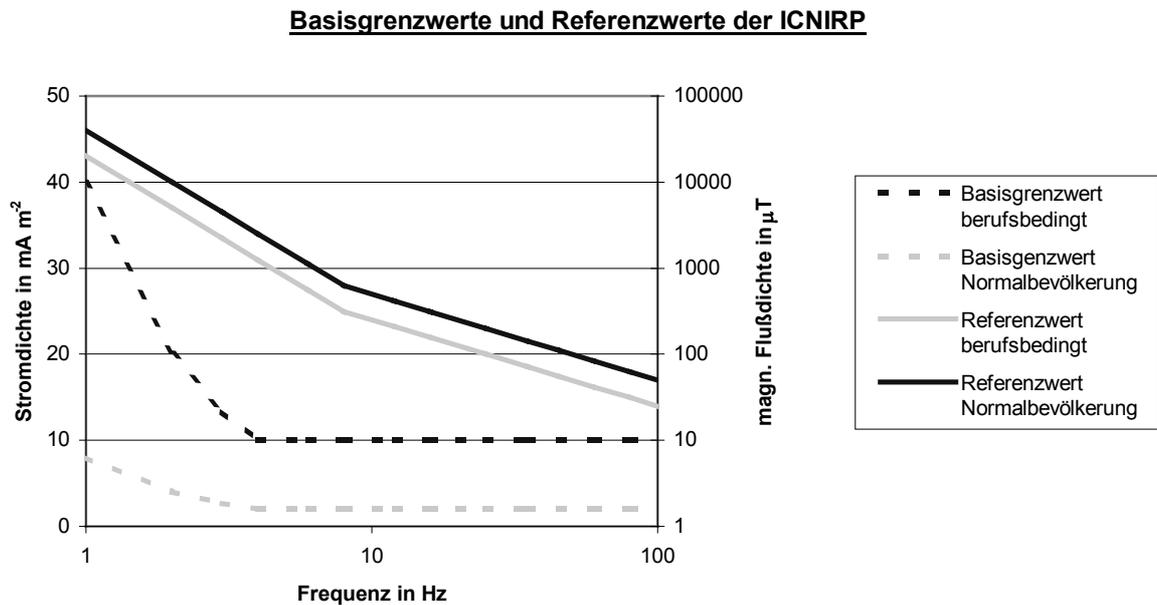


Abbildung 1.1: Basisgrenzwerte und Referenzwerte festgelegt durch ICNIRP

Die festgelegten Grenzwerte der 26. BImSchV für die magnetische Flußdichte von  $300 \mu\text{T}$  bei  $16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$  und  $100 \mu\text{T}$  bei  $50 \text{ Hz}$  entsprechen den Referenzwerten des ICNIRP-Komitees für die Normalbevölkerung. Betreiber von Niederfrequenzanlagen müssen Sorge dafür tragen, daß diese Grenzwerte in Bereichen, die nicht nur dem vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen, nicht überschritten werden. Die Nachweispflicht für Neuanlagen und Veränderungen an bestehenden Anlagen liegt beim Betreiber. Zur Einhaltung der Meßwerte kann der Nachweis durch Messung oder mittels Berechnungsverfahren erfolgen. Dabei ist von der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung auszugehen, anderenfalls sind die Meßwerte hochzurechnen. Für die Berechnung magnetischer Felder entspricht diese Auslastung dem maximalen betrieblichen Dauerstrom, der z.B. durch die thermische Dauerstrombelastung oder die maximale Erzeugerleistung festgelegt wird. Bei der Bestimmung der Feldstärken wird von einem symmetrischen Drehstromsystem ausgegangen. Hier wird die Annahme zugrundegelegt, daß unsymmetrische Zustände die Emission magnetischer Felder bei maximaler symmetrischer Belastung nicht überschreiten.

Im Fall inhomogener Felder dürfen die über eine Fläche von  $100 \text{ cm}^2$  gemittelten Feldstärken den zulässigen Wert nicht überschreiten. Treten schließlich Felder mit den Frequenzen  $16 \frac{2}{3} \text{ Hz}$  und  $50 \text{ Hz}$  nebeneinander auf, gilt für die Grenzwerteinhaltung:

$$\frac{B_{\text{gesamt}(16 \frac{2}{3} \text{ Hz})}}{300 \mu\text{T}} + \frac{B_{\text{gesamt}(50 \text{ Hz})}}{100 \mu\text{T}} \leq 1.$$

---

Schon vorhandene Anlagen sind bei der Bestimmung der Vorbelastung mit einzubeziehen. Die 26. BImSchV unterscheidet hier zwischen Hochspannungs- und Niederspannungsanlagen. Niederspannungsanlagen unter 1000 V tragen nicht relevant zur Vorbelastung bei (< 10 % des Grenzwertes) und machen eine Vorbelastung entbehrlich, sofern keine gegenteiligen Anhaltspunkte bestehen.

## 2 Grundlagen der Feldberechnung

### 2.1 Das quasistationäre magnetische Feld

#### 2.1.1 Die Zeitabhängigkeit elektromagnetischer Felder

Elektrische und magnetische Felder sind „...letzlich nur Erscheinungsformen eines einzigen, in der Umgebung elektrischer Ladungen beobachtbaren Naturphänomens...“<sup>14</sup> Die Feldausbreitung elektromagnetischer Felder wird durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben.<sup>15</sup> Die Feld-, Diffusions- und Materialgleichungen in Differentialform lauten:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \operatorname{rot} \vec{H} &= \kappa \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & [3] \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho & \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \vec{D} &= \varepsilon \vec{E} & \vec{H} &= \mu \vec{B}. \end{aligned}$$

Sie gelten für relativ zum Beobachter ruhende Körper in linearen und isotropen Medien. Je nach dem zeitlichen Verhalten der Feldgrößen sind Vereinfachungen dieser Gleichungen möglich. Auftretende elektromagnetische Felder können dabei in stationäre, quasistationäre und nichtstationäre Felder unterschieden werden.<sup>16</sup>

Bei den stationären Feldern unterliegt keine Größe einer zeitlichen Änderung. Für das elektrostatische Feld und das magnetostatische Feld lassen sich die Feldgleichungen vereinfachen:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0 \qquad \operatorname{rot} \vec{H} = 0. \qquad [4]$$

Sie beschreiben die Quellenfreiheit des magnetischen Feldes und die Wirbelfreiheit des elektrischen Feldes. In diesem Fall sind das elektrische und magnetische Feld nicht miteinander gekoppelt. Die Feldstärken können unabhängig voneinander variiert werden und sind daher getrennt betrachtbar.

Das stationäre Strömungsfeld läßt bewegte Ladungen zu. Sie erzeugen ein Magnetfeld, was durch Änderung der Feldgleichung zum Ausdruck gebracht wird:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \kappa \cdot \vec{E} = \vec{J}. \qquad [5]$$

<sup>14</sup> Schwab S. 184.

<sup>15</sup> Vgl. u.a. Purcell S. 215 ff.

<sup>16</sup> Vgl. Schwab 117 ff. und von Weiss S. 50 ff.

Das elektrische Feld ist mit dem magnetischen Feld insofern gekoppelt, als daß die durch das elektrische Feld bewirkte Ladungsbewegung ein magnetisches Feld erzeugt. Doch weiterhin können beide Felder durch Beeinflussung der Leitfähigkeit  $\kappa$  unabhängig voneinander variiert werden.

Quasistationäre Felder sind sich langsam verändernde Felder. Für sie gelten noch angenähert die Gesetze der stationären Felder, wodurch das magnetische Feld ohne Berücksichtigung des Einflusses auf das elektrische Feld betrachtet werden kann. Voraussetzung dafür ist, daß die elektromagnetische Wirkung annähernd gleichzeitig an der gesamten Anordnung auftritt. Dazu muß der Quotient der Länge  $l$  der Anordnung zur Anstiegszeit  $T_A$  der Feldänderung wesentlich die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  des Feldes im Medium übertreffen. Dies ist bei üblichen Anordnungen in der Energietechnik des Fall:

$$\frac{l}{T_A} = v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}. \quad [6]$$

Die Auswirkungen des veränderlichen magnetischen Feldes, wie Induktionsvorgänge und das Auftreten des Skineffekts, werden bei quasistationären Feldern berücksichtigt, die magnetische Wirkung der Verschiebungsstromdichte dagegen nicht:<sup>17</sup>

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \kappa \cdot \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{mit} \quad \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \equiv 0. \quad [7]$$

Bei nichtstationären Feldern mit sich schnell ändernden Feldgrößen sind das Magnetfeld und das elektrische Feld miteinander gekoppelt. Magnetfelder erzeugen durch Induktion elektrische Wirbelfelder, deren Verschiebungsströme wiederum Magnetfelder erzeugen. Das Feld trennt sich vom Leiter und es kommt zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Raum. Im freien Raum sind die Leitungsströme vernachlässigbar. Die Maxwellschen Feldgleichungen lauten dann:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \operatorname{rot} \vec{H} = \kappa \cdot \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{mit} \quad \kappa \cdot \vec{E} \equiv 0. \quad [8]$$

### 2.1.2 Mathematische Beschreibung magnetischer Felder

Wie bereits erwähnt, lassen sich für energietechnische Anwendungen zeitpunktbezogen die Gleichungen des statischen magnetischen Feldes verwenden. Hieraus können Potentialfunktionen für das magnetische Feld bestimmt werden.

<sup>17</sup> Die Verschiebungsstromdichte ist im Leiter gegenüber der Leitungsstromdichte vernachlässigbar.

Das magnetische Skalarpotential  $\varphi_m$  kann in wirbelfreien Gebieten des magnetischen Feldes aus der Feldgleichung für die magnetische Feldstärke berechnet werden:<sup>18</sup>

$$\vec{H} = -\text{grad}\varphi_m. \quad [9]$$

Aufgrund der geforderten Wirbelfreiheit darf das berechnete Volumen aber keine Stromlinien vollständig umschließen. Somit ist es nicht möglich, mit dem Skalarpotential das Feld innerhalb von Leitern oder Abschirmungen zu berechnen.

Neben dem skalaren Potential kann das Magnetfeld auch durch ein magnetisches Vektorpotential  $\vec{A}_m$  dargestellt werden.<sup>19</sup> Das Vektorpotential erlaubt die Feldberechnung innerhalb von Leitern und Abschirmungen. Die magnetische Flußdichte wird durch die Wirbel des Vektorpotentials bestimmt, wovon die Quellenfreiheit des magnetischen Feldes unberührt bleibt:

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}_m \quad \text{mit} \quad \text{div}\vec{B} = \text{div}(\text{rot}\vec{A}_m) = 0. \quad [10]$$

Zur eindeutigen Bestimmung des Vektorfeldes müssen auch die Quellen definiert sein. So wird im allgemeinen  $\text{div}\vec{A}_m = 0$  gesetzt.<sup>20</sup>

## 2.2 Berechnungsverfahren

### 2.2.1 Das Gesetz von Biot-Savart

Aus der magnetischen Feldgleichung im stationären Fall läßt sich die Potentialgleichung des magnetischen Vektorpotentials herleiten:<sup>21</sup>

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} \quad \Rightarrow \quad \Delta\vec{A}_m = -\mu \cdot \vec{J} \quad \text{wenn} \quad \text{div}\vec{A}_m = 0. \quad [11]$$

Die Lösung dieser Poissongleichung lautet:

$$\vec{A}_m(x_1, y_1, z_1) = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{\vec{J}(x_1, y_1, z_1) dV_2}{r_{12}}. \quad [12]$$

Wird das Volumenstück eines Leiters  $dV_2$ , für das die Lösung gilt, auf einen fadenförmigen Leiter reduziert, kann der Integralausdruck verändert werden. Die

<sup>18</sup> Vgl. Schwab S. 101 ff.

<sup>19</sup> Vgl. Schwab S. 107 ff. und von Weiss S. 152 f.

<sup>20</sup> Ein überlagertes Quellenfeld wird im statischen Fall nicht berücksichtigt (Coulomb-Eichung). Wird dagegen  $\text{div}\vec{A}_m = -\varepsilon\mu \cdot \frac{\partial\varphi_e}{\partial t}$  gesetzt, eignet sich das Vektorpotential zur Berechnung nichtstationärer

Felder.

<sup>21</sup> Vgl. Schwab S.113 f.

Stromdichte in einer Volumeneinheit wird auf den Gesamtstrom im Leiter eines Wegstücks  $d\vec{l}$  reduziert:<sup>22</sup>

$$\vec{J} dV_2 = I d\vec{l} . \quad [13]$$

Jedes Leiterstück liefert für den jeweiligen Berechnungspunkt einen Beitrag  $d\vec{A}_m$  zum gesamten Vektorpotential. Mit der Berechnung der Wirbelstärke dieser Teilbeiträge kann für die gesamte magnetische Flußdichte bzw. die magnetische Feldstärke, lineare Medien vorausgesetzt, in jedem Punkt unabhängig vom Koordinatensystem formuliert werden:

$$\vec{H} = \mu \cdot \vec{B} = \frac{I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}_{Leiter})}{|\vec{r} - \vec{r}_{Leiter}|^3} . \quad [14]$$

Mit dem nach Biot und Savart benannten Gesetz kann das magnetische Feld einer Leiterschleife in einem Punkt  $\vec{r}$  durch Superposition der Feldanteile, der in den Punkten  $\vec{r}_{Leiter}$  befindlichen Leiterstücke, berechnet werden.

## 2.2.2 Numerische Berechnungsverfahren

In diesem Abschnitt sollen kurz die wichtigsten numerischen Rechenverfahren und die grundsätzlichen Vorgehensweisen bei ihrer Anwendung vorgestellt werden. Da nur Aspekte der einzelnen Verfahren erwähnt werden, sei auf weitergehende Literatur, i.e. Kost, Schwab und Binns, verwiesen.

### 2.2.2.1 Methode der Finiten Differenzen (FDM)

Bei Anwendung der FDM<sup>23</sup> wird ein Gitternetz in den Berechnungsraum gelegt. Für die benachbarten Gitterpunkte des Gitternetzes lassen sich Funktionswerte mit Hilfe der Taylorreihenentwicklung bilden. Durch geeignetes Umformen ergeben sich Differenzenquotienten für die Differentialquotienten erster oder zweiter Ordnung. Abschließend ersetzen die Differenzenquotienten die Differentialquotienten der feldbeschreibenden Differentialgleichung. Mit der zwingenden Berücksichtigung der Randbedingungen entsteht ein zu lösendes Gleichungssystem für alle Gitterpunkte mit einer dünn besetzten Matrix. Das Ergebnis der FDM sind approximierte Werte der Feldgröße für jeden diskreten Gitterpunkt. Zwischenwerte können aber durch Interpolation errechnet werden.

<sup>22</sup> Zur Herleitung des Gesetzes von Biot-Savart vgl. Purcell S. 146 ff.

<sup>23</sup> Vgl. Kost S. 371 ff. und Lehner S. 552 ff.

---

Der Diskretisierungsfehler ist bei einem äquidistanten Knotenpunktabstand am geringsten. Eine Verfeinerung des Gitternetzes in Gebieten größerer Fehler, die adaptive Netzgenerierung, ist daher kaum möglich.

### 2.2.2.2 Methode der Finiten Elemente (FEM)

Der Berechnungsraum bei der FEM<sup>24</sup> wird in Teilbereiche, finite Elemente, zerlegt. Für jedes Element werden Formfunktionen gebildet, deren Parameter durch gemeinsame Randpunkte der Elemente, sogenannte Knotenpunkte, mittels eines Gleichungssystems noch bestimmt werden. Die Formfunktionen gelten für den gesamten Raum des finiten Elements, außerhalb nehmen sie den Wert Null an.

Die Formfunktionen mit ihren Parametern stellen aber nur eine approximative Lösung der feldbeschreibenden Differentialgleichung dar. Es existieren verschiedene Methoden die verbleibende Abweichung zu minimieren. Mit der häufig verwendeten „Methode der gewichteten Residuen“ z.B. sollen die Residuen im Mittel über den Berechnungsraum verschwinden. Die Residuen werden mit einer Gewichtsfunktion multipliziert und über den gesamten Raum integriert, so daß das Integral den Wert Null annimmt. Bei der Bestimmung der Gewichtsfunktion hat sich das Galerkin-Verfahren in weiten Bereichen durchgesetzt. Üblich ist die Wahl linearer Formfunktionen, die eine ausreichende Approximation gewährleisten. Enthält die Differentialgleichung Ableitungen zweiter Ordnung, müssen bei der Integration über die Elementgrenzen hinweg zur Vermeidung von Singularitäten auch höhere Anforderungen an die Stetigkeit, wie die Stetigkeit der ersten Ableitung der angrenzenden Formfunktionen, gestellt werden.

Das Ergebnis der FEM sind schließlich Funktionen, die auf den Raum der einzelnen finiten Elemente begrenzt sind. Sie lassen sich zu einer Lösung des Gesamttraumes überlagern.

Im Gegensatz zur FDM eignet sich die FEM gut zur adaptiven Netzgenerierung und damit zur Darstellung komplizierter Formen. Dafür ist der zu veranschlagende Programmieraufwand, insbesondere für die Gittergenerierung, höher einzuschätzen. Problematisch ist auch bei Anwendung der FEM die Begrenzung des Berechnungsraumes und die Wahl der Randbedingungen bei künstlich gewählten Randgebieten.

### 2.2.2.3 Boundary Element Methode (BEM)

Bei der BEM<sup>25</sup> findet zur Minimierung des Fehlers der approximativen Lösung ebenfalls die „Methode der gewichteten Residuen“ durch Einführen einer Gewichtsfunktion

---

<sup>24</sup> Vgl. Kost S. 45 ff.

<sup>25</sup> Vgl. Kost S. 194 ff.

---

Anwendung. Die Lösung der feldbeschreibenden Differentialgleichung soll aber nur durch Lösungswerte auf dem Rand des Berechnungsraumes ausgedrückt werden. Die Reduzierung auf die Randwerte erfolgt mit Hilfe des 2. Green'schen Satzes. Wird der Rand in Elemente unterteilt, für die Formfunktionen als Approximation für die Lösung bzw. deren Normalableitung auf dem Rand gewählt werden, entsteht aus dem Randintegral ein lösbares Gleichungssystem. Als Ergebnis sind stückweise konstante Lösungen oder Funktionen höherer Ordnung möglich. Aus dem Integral über den gesamten Rand können schließlich alle Werte innerhalb des Berechnungsraumes berechnet werden.

Die BEM eignet sich gut für offene Feldgebiete. Sie wird daher häufig in Verbindung mit der FEM angewandt. Die Lösungsmatrix ist aber stark besetzt, wodurch lange Rechenzeiten entstehen und großer Speicherplatzbedarf notwendig ist.

#### 2.2.2.4 Finite Integrations Theorie (FIT)

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Verfahren geht die FIT<sup>26</sup> nicht von feldbeschreibenden Differentialgleichungen, sondern von den Maxwell'schen Gleichungen in Integralform aus. Die erste Maxwell'sche Gleichung wird dabei z.B. auf ein äquidistantes orthogonales Gitter angewandt. Die elektrische Feldstärke nimmt an jeder Kante eines Gitterelementes nur diskrete und für die gesamte Kante konstante Werte an. Die Komponenten der Feldstärke sind ausschließlich tangential zur Kante ausgerichtet. Auch für die magnetische Induktion werden konstante Werte pro Gitterelement angenommen. Die Normalkomponente der Induktion steht senkrecht in der Mitte des ursprünglichen Gitterelements. Dadurch kann ein duales orthogonales und um eine halbe Gitterweite verschobenes Gitter für die magnetische Induktion gebildet werden. Die Komponenten der Induktion sind dabei tangential zu den Gitterkanten ausgerichtet und errechnen sich aus dem Wegintegral der elektrischen Feldstärke des ursprünglichen Gitters. Dieser Vorgang muß auch für die anderen Maxwell'schen Gleichungen erfolgen, wobei die Materialkonstanten für jede räumliche Gitterzelle einzeln gewählt werden können.

Die Zeitabhängigkeit kann in der FIT mit Differenzenquotienten dargestellt werden. Auch dreieckige Gitterformen sind möglich, solange die Orthogonalität der beiden Gitter gewährleistet ist.

Die FIT stellt die Maxwell'schen Gleichungen in diskreter Form dar. Sogar die Quellenfreiheit von Wirbelfeldern und die Wirbelfreiheit von Gradientenfeldern sind gegeben. Durch die Vorgabe der Materialkonstanten in einzelnen Elementarzellen sind

---

<sup>26</sup> Vgl. Kost S. 379 ff.

beliebige Materialverteilungen berechenbar. Die konstanten Gitterweiten erschweren aber die adaptive Netzgenerierung.

### 2.2.2.5 Allgemeiner Vergleich der beschriebenen Verfahren

In diesem Abschnitt erfolgt ein abschließender Vergleich zwischen dem Berechnungsverfahren nach Biot-Savart und den numerischen Rechenverfahren.<sup>27</sup> Es soll auf die zur Aufgabenstellung der Berechnung der magnetischen Flußdichte an Kabeln notwendigen Eigenschaften explizit eingegangen werden. Die Eigenschaften der Verfahren sind in *Tab. 2.1* zusammengefaßt. Die numerischen Rechenverfahren werden dabei zusammenfassend behandelt. Auf die individuellen Eigenschaften wurde bereits in den vorangegangenen Abschnitten verwiesen.

Eigenschaften	Berechnungsverfahren nach Biot-Savart	Numerische Berechnungsverfahren
Berücksichtigung nichtlinearer Medien	nein	ja, bei der BEM eingeschränkt möglich
Berücksichtigung der Induktion (Skin- und Proximityeffekt)	nein	ja
Berechnung komplizierter Leiterstrukturen	im Prinzip nein, Nachbildung durch Einzelleiter möglich	ja, bei der FDM von der Gitterweite eingeschränkt
Begrenzung des Frequenzbereiches	nur für stationäre und quasistationäre Felder anwendbar	immer anwendbar
benötigte Berechnungszeit	gering	hoch
Aufwand der Modellimplementierung	niedrig	hoch

*Tabelle 2.1: Zusammenfassung der Eigenschaften der Berechnungsverfahren*

Obwohl beim Verfahren nach Biot-Savart nichtlineare Materialien keine Berücksichtigung finden, kann für Untersuchungen an Kabeln von der Freiheit des gewachsenen Erdbodens von ferromagnetischen und auch diamagnetischen Stoffen ausgegangen werden. Die Berechnung nichtlinearer Medien kann in Einzelfällen unabdingbar sein; zur Bestimmung allgemeiner Aussagen über die magnetische Flußdichte an Kabelanordnungen kann darauf verzichtet werden.

Das Verfahren nach Biot-Savart berücksichtigt auch nicht die Induktionswirkung magnetischer Felder auf leitende Körper. Damit können der Skineffekt und der Proximityeffekt in den Leitern nicht berücksichtigt werden. Vor allem in Leiternähe kann es dadurch zu Berechnungsfehlern kommen. Zwar soll in dieser Ausarbeitung die magnetische Flußdichte oberhalb des Erdbodens, also im größeren Abstand bestimmt werden, trotzdem soll diese Effekte noch untersucht werden. Auf die Schirmwirkung

<sup>27</sup> Vgl. Kost S. 20 f., 41 f., 195 f., 372 f. und 379 ff., sowie Kegel, Muchaier, Basche S. 184 und 187 ff.

metallischer Körper in der Nähe der Kabelanordnungen kann prinzipiell nicht eingegangen werden.

Nach Biot-Savart werden die Teilleiter auf fadenförmige Leiter reduziert. Das Verfahren ist damit nur für kreissymmetrische Leiter mit hoher Genauigkeit einsetzbar. Fehler, die aus anderen Leiterformen erwachsen, verringern sich aber mit zunehmendem Abstand. Andererseits ist eine Nachbildung der Leiterform durch Teilleiter möglich.

Weiterhin ist das Verfahren nach Biot-Savart nur auf stationäre und quasistationäre Felder anwendbar. Da in dieser Arbeit aber keine transienten und subtransienten Vorgänge, sondern nur die betriebsfrequenten Vorgänge untersucht werden, ist die Anwendung numerischer Verfahren unnötig.

Numerische Verfahren verursachen einen hohen Rechenaufwand, benötigen viel Speicherbedarf und erfordern eine komplexe Implementierung der Geometrien und des zu diskretisierenden Feldbereichs. Obwohl diese Einschränkungen vom gewählten numerischen Verfahren abhängen, als auch von der zukünftigen Entwicklung der Hardware und Software, müssen sie berücksichtigt werden. Insbesondere für die Untersuchung vieler verschiedener Anordnungen ist das Verfahren nach Biot-Savart unumgänglich, da hier die Ergebnisse schnell und mit hinreichender Genauigkeit zu ermitteln sind.

Einige numerische Verfahren weisen Berechnungsprobleme bei offenen Feldgebieten auf. Diese werden z.B. durch Kombination der FEM mit der BEM beseitigt. Die Berechnung nach Biot-Savart geht von offenen Feldräumen aus, wie sie bei üblichen Kabelanordnungen im Erdreich gegeben sind.

Der Einsatz des Verfahrens nach Biot-Savart für die Berechnung der magnetischen Flußdichte ist mit der vorhandenen Software WinField unter der Berücksichtigung obengenannter Einschränkungen wesentlich sinnvoller. Die Berechnungsgenauigkeit ist ausreichend, aber vor allem ermöglicht erst die schnelle Berechenbarkeit verschiedener Anordnungen umfangreiche Untersuchungen zum Magnetfeld an Kabeltrassen.

## **2.3 Feldberechnung mit WinField**

### **2.3.1 Programmbeschreibung**

Die Berechnungssoftware WinField erlaubt die Berechnung quasistationärer elektrischer und magnetischer Felder. Die Berechnung der magnetischen Felder erfolgt nach dem Gesetz von Biot-Savart. Die Software gestattet die Anordnung der Leiter und die Feldberechnung im dreidimensionalen Raum. Voraussetzung einer korrekten Berechnung ist die Abwesenheit ferro- und diamagnetischer Stoffe und die Vernachlässigung der

---

Induktion von Wirbelströmen.<sup>28</sup> WinField ermöglicht somit die Berechnung quasistationärer Magnetfelder verschiedener Anlagen der elektrischen Energieversorgung, wenn die felderzeugenden Leiter durch fadenförmige Teilleiter approximierbar sind. WinField wird daher für die Feldberechnung von Freileitungen, Kabeln, Netzstationen und Schaltanlagen eingesetzt.

WinField erlaubt darüber hinaus das Einlesen von Geländeinformationen. Mit diesen Informationen können Anlagen im dreidimensionalen Raum konstruiert werden. Die Ergebnisausgabe ist sowohl graphisch, als auch in Form von Berechnungswerten möglich.

### **2.3.2 Berechnungsmethoden**

Die Berechnung der magnetischen Flußdichte basiert, wie bereits erwähnt, auf dem Gesetz von Biot-Savart. Die Leiter werden dafür in eine vom Benutzer vorzugebende Anzahl fadenförmiger Teilleiter segmentiert, deren Flußdichteanteile für diskrete Aufpunkte einer Ebene aufsummiert, die Flußdichtevektoren in kartesischen Koordinaten für diese Aufpunkte ergeben.

Bei der Berechnung wird vom globalen Koordinatensystem ausgegangen. In ihm sind die Leiterstücke im Raum angeordnet. Für die Berechnung erfolgt die Drehung und Verschiebung der Aufpunkte in ein lokales Koordinatensystem des Leiterstücks, in dem das Segment in einer festgelegten Hauptachse liegt. Nach der Berechnung der Flußdichtevektoren der Aufpunkte transformiert das Programm die Vektoren zurück in das globale Koordinatensystem.<sup>29</sup> Die Flußdichtevektoren und ihre Beträge können somit für jeden Raumpunkt bestimmt werden.

WinField ermittelt die Flußdichtevektoren der Aufpunkte zu jedem festgelegten Zeitpunkt und ermöglicht deren Ausgabe. Bei unterschiedlichen Frequenzen werden die Vektoren aufsummiert. Weiterhin bestimmt WinField den Spitzenwert. Unter der Annahme sinusförmiger Ströme wird auch der Effektivwert berechnet.

### **2.3.3 Beschreibung der Optimierungs- und Randomalgorithmen**

#### **2.3.3.1 Phasenoptimierung in Winfield**

WinField bietet die Möglichkeit, Anordnungen von Kabeln und Freileitungen durch Variation der Phasenbelegung hinsichtlich der maximalen und minimalen magnetische Flußdichte zu optimieren.

---

<sup>28</sup> Die Berechnung der Erdseilströme von Hochspannungsfreileitungen ist allerdings möglich.

<sup>29</sup> Vgl. auch Schwetz S. 827 ff.

---

Dazu generiert das Programm eine temporäre Anordnung z.B. von parallelen Kabeln, deren gerade Leiterstücke in Richtung einer Koordinatenachse gelegt werden.<sup>30</sup> Die magnetische Flußdichte eines Leiters wird dann mit der Berechnungsformel für den unendlich langen geraden stromdurchflossenen Leiter berechnet:

$$\vec{B} = \frac{2 \cdot I}{\vec{r}}. \quad [15]$$

Maximal 30 Leiter sind möglich, wodurch zehn Drehstromsysteme gleichzeitig optimiert werden können. Vom Programm wird eine Reihe von 101 Berechnungspunkten über die doppelte Trassenbreite gebildet. Sie liegt senkrecht zur Ausrichtung der Kabel über dem Fußpunkt der Anordnung. Die Höhe und Anzahl der Berechnungspunkte kann variabel verändert werden.

Beim Start der Berechnungsroutine berechnet das Programm die gesamte Flußdichte aller Leiter in den Berechnungspunkten. Danach werden die Phasen eines Systems vertauscht und die Flußdichte erneut berechnet. Für jede Anordnung wird der Maximalwert der Flußdichte der 101 Berechnungspunkte abgespeichert. Die Phasen der Anfangskonfiguration erhalten eine Numerierung. Neben dem Maximalwert wird die veränderte Anordnung der Phasen abgespeichert. Damit kann die berechnete Phasenanzahl mit Hilfe der bekannten Startanzahl im nachhinein bestimmt werden.

Die Phasenoptimierung durchläuft alle möglichen Permutationen. Am Ende erfolgt zusätzlich die Ausgabe des Maximalwertes, des Minimalwertes und des Mittelwertes dieser Ergebnisse.

Bei der Nutzung der Phasenoptimierung zeigte sich schnell, daß eine Erweiterung der Leiteranzahl weitere Erkenntnisse und die Überprüfung der Schlußfolgerungen ermöglichen würde. Der Optimierungsalgorithmus konnte durch weitere Annahmen beschleunigt werden. Mit der erweiterten Optimierungsroutine sind bis zu 60 Leiter in 20 Systemen erfaßbar.

### 2.3.3.2 Ermittlung zufälliger Phasenanzahlungen in WinField

WinField verfügt über einen Algorithmus zur Erzeugung zufälliger Phasenanzahlungen. Bei einer vorgegebenen Anordnung wird jeder Phasenbelegung eine natürliche Zahl bis zur Anzahl der möglichen Permutationen zugeordnet. Unter Zuhilfenahme eines Generators für Pseudozufallszahlen wird eine Zahl des möglichen Wertebereiches ermittelt, deren zugehörige Phasenbelegung dann gewählt wird.

---

<sup>30</sup> Diese Festlegung reduziert die Rechenzeit bei der Koordinatentransformation.

### 2.3.4 Berechnungsgenauigkeit und Fehlerbetrachtung

Die Berechnungsgenauigkeit bei der Ermittlung der magnetischen Flußdichte ist durch das Zahlenformat Single gegeben. Sie beläuft sich auf 7-8 Stellen. Das Zahlenformat Double wird in der Phasenoptimierung angewendet. Die Genauigkeit erhöht sich hier auf 15-16 Stellen. Fehler, die aus diesen Restriktionen entstehen, hängen von den angewandten Rechenoperationen ab.

Die Nachbildung realer Elemente durch geradlinige Leiterstücke ist mit Fehlern verbunden. Diese sind vom Abstand der Teilleiter zum Berechnungspunkt, als auch von der Segmentierung abhängig.

Beispielhaft soll die Abweichung der Flußdichte im Inneren eines Kreisringes mit einem Radius von 1 m und einer Stromstärke von 1 A hervorgerufen durch die Segmentierung bestimmt werden. Während die Abweichung von der analytischen Berechnung für 8 Segmente noch 5,23 % beträgt, sinkt sie für 16 Segmente auf 1,36 %. Bei 128 Segmenten beträgt der Fehler nur 0,05 %. Soll dagegen ein geradliniger Leiter von 1 km Länge durch 1 bzw. 1000 Segmente nachgebildet werden, wird die Abweichung durch die Berechnungsgenauigkeit begrenzt.

In der Phasenoptimierung wird die Berechnung der magnetischen Flußdichte für unendlich lange gerade Leiter verwendet. Reale Anordnungen weisen diese Eigenschaften nicht auf. Ist die Leiterlänge begrenzt oder ändert der Leiter die Richtung entstehen Berechnungsfehler, z.B. bei der Bestimmung des Mittelwertes für alle Phasenkombinationen. Die Flußdichte im Abstand von 1 m in der Mitte eines 20 m langen Leiters weicht um weniger als 0,5 % von der Lösung des unendlich langen Leiters ab.

Die Nachbildung kreissymmetrischer Leiter durch fadenförmige Leiter ist ohne Berechnungsfehler außerhalb des Leiters möglich. Abweichende Leiterformen sind dagegen durch Linienleiter nur mit Berechnungsfehlern im Nahbereich reproduzierbar. Durch Teilleiter kann aber die Leiterform nachgebildet werden. Beispielhaft wird eine Sammelschiene mit den Abmaßen 60 x 20 mm durch 1200 Teilleiter im Abstand von 1 mm nachgebildet. Im Abstand von 0,9 m erhöht sich die maximale magnetische Flußdichte lediglich um 0,089 %, wenn statt dessen nur ein Leiter im Zentrum der Sammelschiene den Gesamtstrom der Teilleiter führt.

## 3 Auslegung und technische Besonderheiten von Kabelanordnungen

### 3.1 Arten der Energieversorgungskabel

Zur Energieübertragung eignen sich eine Vielzahl verschiedener Starkstromkabel mit unterschiedlichen Eigenschaften. Pro Spannungsebene wird in dieser Ausarbeitung nur ein Kabeltyp gewählt. Dies reicht zur Darstellung grundsätzlicher Zusammenhänge aus. Um eine Praxisorientierung zu wahren, werden von der Berliner Kraft- und Licht (Bewag)-Aktiengesellschaft eingesetzte Kabel als Referenzkabel gewählt.

Die Grundsatzplanung der Bewag sieht im Bereich der Energieverteilung für Berlin die Spannungsebenen 110 kV/ 10 kV und 0,4 kV vor.<sup>31</sup> Da bei der Übertragung elektrischer Energie im Höchstspannungsbereich nur Einleiterkabel in konkreten Anordnungen mit geringen Häufungen verlegt werden und die Emission magnetischer Felder explizit betrachtet wird, ist die ausschließliche Betrachtung des Verteilungsbereichs gerechtfertigt. Die folgenden Starkstromkabel werden von der Bewag zukünftig für neu zu errichtende Kabelanlagen verwendet.<sup>32</sup>

Kabeltyp	Spannungsebene	Aufbau	Schirmquerschnitt	Außendurchmesser	Bemessungsstrom in Erde
NA2XY 4x150 0,6/1 kV	0,4 kV	Vierleiter-VPE-Kabel; eindrätige Sektorleiter	-	45 mm	300 A
N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV	10 kV	Einleiter-VPE-Kabel; mehrdrätiger Rundleiter	25 mm <sup>2</sup>	ca. 40 mm	526 A
N2XS(FL)2Y 1x630 64/110 kV	110 kV	Einleiter-VPE-Kabel; mehrdrätiger Rundleiter	35 mm <sup>2</sup>	ca. 84 mm	735 A

Tab. 3.1: Aufstellung der verwendeten Kabeltypen

Die Leiterpositionen der Dreiecksverlegung können durch den Kabeldurchmesser, entsprechend den Werten der Tab. 3.1 übernommen, und mit der Kenntnis, daß die linienförmigen Leiternachbildungen ein gleichseitiges Dreieck aufspannen, errechnet werden. Zu beachten ist, daß der Kabeltyp NA2XY 4x150 0,6/1 kV eine Verseilung, also eine Verdrillung der Teilleiter, besitzt.

<sup>31</sup> Vgl. Bohge, Hardtke, Raskop S. 9.

<sup>32</sup> Vgl. Biewald, Henschel, Ringler S. 42 f.

---

## 3.2 Technische Besonderheiten

### 3.2.1 Der Skineffekt und der Proximityeffekt

Im betrachteten Frequenzbereich ist die Stromdichte nicht gleichmäßig über den Leiterquerschnitt verteilt, da das zeitlich veränderliche magnetische Feld im Inneren des Leiters ein elektrisches Feld erzeugt. Das elektrische Feld bewirkt Wirbelströme, welche z.T. die Leiterströme kompensieren und zur Verschiebung der Stromdichte in Teilbereichen des Leiterquerschnitts führen.

Dieser als Stromverdrängung bezeichnete Effekt läßt sich in den Skin- und den Proximityeffekt unterteilen. Der Skineffekt führt durch das Magnetfeld des Leiterstromes selbst zu einer Stromverdrängung in die äußeren Bereiche des Leiters. Er wird im energietechnischen Frequenzbereich bei größeren Leiterquerschnitten evident. Der Proximityeffekt wird durch die Nähe zu anderen stromführenden Leitern bedingt. Die Stromverdrängung erfolgt nicht radial zum Leitermittelpunkt, sondern in Richtung der anderen Leiter. Die Stromverdrängung hat eine Verringerung des wirksamen Leiterquerschnitts zur Folge, wodurch der Widerstand und somit die Verlustleistung des Leiters erhöht werden.

Die Berechnung des Skineffekts und des Proximityeffekts ist für einfache Anordnungen analytisch möglich. Einige analytische Berechnungsverfahren gehen von kreisförmigen Leitern aus, für die Lösungen in Form von radiusabhängigen Besselfunktionen für die Stromdichtebeläge angebar sind.<sup>33</sup> Beim Teilleiterverfahren dagegen werden die Leiter in Gebiete homogener Stromdichte unterteilt und die Gegen- und Eigenimpedanzbeläge aller Teilleiter zueinander bestimmt. Durch Inversion der Teilleiterimpedanzmatrix sind die Strombeläge bestimmbar. Im Rückwirkungsverfahren werden die oben beschriebenen Verfahren kombiniert.<sup>34</sup> Auf eine Implementierung dieser Verfahren muß in dieser Ausarbeitung verzichtet werden.

Neben den analytischen Berechnungen können Wirbelstromprobleme auch mit numerischen Methoden berechnet werden.<sup>35</sup> Von der Lösung von Kasper und Kost ausgehend sollen die Auswirkungen des Skin- und Proximityeffekts am Beispiel des Kabels NA2XY 4x150 0,6/1 kV auf die Stromverteilung und das sich daraus ergebene Magnetfeld betrachtet werden. Das Vierleiterkabel besteht aus Kreissegmenten. Der Neutralleiter soll vereinfachend stromfrei bleiben. Kasper und Kost beziehen sich auf zweiphasige Systeme des segmentierten Querschnitts. Sie liefern Anhaltspunkte für die Stromverteilung eines Dreiphasensystems.

---

<sup>33</sup> Vgl. z.B. Hannakam, Boulahia S. 337 ff.

<sup>34</sup> Vgl. Brakelmann [4] S. 127 ff.

<sup>35</sup> Vgl. Kasper, Kost S. 333 ff.

Die Autoren definieren für die Berechnungen als Parameter eine bezogene Frequenz  $\lambda$  und einen normierten Leiterabstand  $\delta$ .<sup>36</sup>

$$\lambda = \sqrt{F \omega \kappa \mu} ; \quad \delta = \frac{d}{F}. \quad [16]$$

Die bezogene Frequenz für das Niederspannungskabel liegt bei  $\lambda = 1,48$  der normierte Leiterabstand bei  $\delta = 0,114$ . Im Vergleich dazu basieren die Stromverteilungen der numerischen Berechnung auf den Werten  $\lambda = 3,5$  und  $\delta = 0$ . Der Skineffekt wirkt wegen der niedrigeren Frequenz im realen Kabel also in geringem Maße. Auch der Proximityeffekt hat wegen des größeren Abstandes der Leiter geringere Auswirkungen.<sup>37</sup> Die von Kasper und Kost angegebene Stromverteilung bildet die Stromverdrängung daher stärker ab. Vor diesem Hintergrund dient diese Stromverteilung als Simulationsgrundlage. Ein Sektorleiter (eine Phase) wurde mit WinField durch 75 Teilleiter individueller Stromdichte approximiert, deren Summe dem Gesamtstrom einer Phase entspricht. Bei gleichmäßiger Stromdichte wird der gewichtete Schwerpunkt aller Teilleiter einer Phase entsprechend dem analytischen Schwerpunkt des Kreissegmentes  $P(\bar{x}; \bar{y})$  gewählt. Wegen der Symmetrie gilt in kartesischen Koordinaten mit dem Ursprung im Mittelpunkt des Kreises:

$$\bar{x} = \bar{y} \quad \text{mit} \quad \bar{x} = \frac{1}{A} \int_0^r \left( \int_0^{\sqrt{r^2-x^2}} x \, dy \right) dx = \frac{4}{3\pi} \cdot r. \quad [17]$$

Liegt das Koordinatensystem im Mittelpunkt des Vierleiterkabels und wird die Isolation zwischen den Leitern berücksichtigt, liegt der analytische Schwerpunkt etwa auf den Koordinaten  $P(7,3 \text{ mm}; 7,3 \text{ mm})$ . Die 75 Teilleiter werden verschoben, so daß sich ihr Schwerpunkt auf diesen Koordinaten befindet. Das Beispiel von Kasper und Kost mit  $\lambda = 3,5$  dient zur Festlegung der Teilleiterströme.<sup>38</sup> *Abb. 3.1* veranschaulicht die gewählten Ströme jedes Teilleiters von 3,8 A bis 4,4 A durch zunehmende Leiterradien.

<sup>36</sup>  $F$  entspricht der Querschnittsfläche des Leiters und  $d$  dem halben Abstand zwischen den Leitern.

<sup>37</sup> Vgl. Kasper, Kost Bild 6d und Bild 8 S. 337 f.

<sup>38</sup> Vgl. Kasper, Kost Bild 4d und 6d.

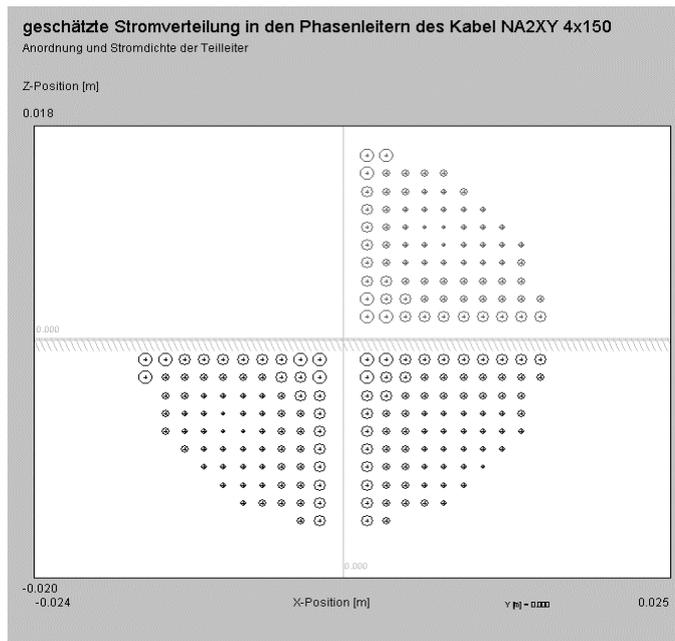


Abbildung 3.1:

Geschätzte Stromverteilung aufgrund des Skin- und Proximityeffekts eines Vierleiterkabels NA2XY 4x150 bei 50 Hz. Die Stromdichte ist durch Einzelleiter mit unterschiedlicher Stromstärke nachgebildet.

Die Stromstärke pro Teilleiter liegt im Bereich von 3,8 bis 4,4 A. Eine größere Stromdichte ist durch größere Leiterradien, die größere Stromstärken aber überzeichnen, dargestellt.

Die Stromdichte zwischen den Phaseleitern ist stark vom Proximityeffekt abhängig. Die Ströme am Rand zum nicht gezeichneten Neutralleiter dagegen unterliegen deutlicher dem Einfluß des Skineffekts. Der Vergleich zwischen der gleichmäßig durchflossenen Anordnung und der Anordnung mit Stromverdrängung ist in Tab. 3.2 dargestellt. Zusätzlich werden die Teilleiter jeder Phase mit einem Einzelleiter im Schwerpunkt der Anordnung verglichen.<sup>39</sup> Die Werte der Flußdichte entsprechen den Maximalwerten 20 cm über dem Erdboden, während die Kabelunterseite in 70 cm unter der Erdoberfläche aufliegt.

Verteilung der Teilströme	berechneter Schwerpunkt P(x;y) der Phasenleiter zur Kabelmitte in mm	Teilleiter	Einzelleiter	relative Abweichung Teilleiter- und Einzelleiterapproximation
		magn. Flußdichte	magn. Flußdichte	
keine Verdrängung; $\lambda = 0$	$P_R (-7,26 \text{ mm}; -7,26 \text{ mm});$ $P_S (7,26 \text{ mm}; 7,26 \text{ mm}); P_T$ $(7,26 \text{ mm}; -7,26 \text{ mm});$	1,585 $\mu\text{T}$	1,593 $\mu\text{T}$	0,505 %
Verdrängung; $\lambda = 3,5$	$P_R (-7,19 \text{ mm}; -7,21 \text{ mm});$ $P_S (7,21 \text{ mm}; 7,19 \text{ mm}); P_T$ $(7,19 \text{ mm}; -7,19 \text{ mm});$	1,572 $\mu\text{T}$	1,571 $\mu\text{T}$	0,064 %
relative Abweichung ohne und mit Stromverdrängung		0,82 %	1,38 %	

Tabelle 3.2: Vergleich der Flußdichte mit und ohne Stromverdrängung, sowie der Nachbildung durch Einzelleiter

<sup>39</sup> Die Einzelleiterposition kann nur mit 0,1 mm Genauigkeit festgelegt werden. Die Tabellenwerte sind daher in der Berechnung mit Winfield gerundet berücksichtigt worden.

Die Nachbildung mit Teilleitern zeigt, daß die Stromverdrängung für das Niederspannungskabel vernachlässigt werden kann. Die relative Abweichung im Abstand von etwa 90 cm vom Kabel beträgt nur 0,82 %, wobei die Stromverdrängung real kleiner sein dürfte, als durch  $\lambda = 3,5$  ausgedrückt wird.

Die Teilleiter können auch durch Einzelleiter im Schwerpunkt nachgebildet werden. Die Flußdichte im Abstand von 0,9 m weicht dadurch um weniger als ein Prozent ab. Selbst wenn die Einzelleiterposition mit einer Genauigkeit von einem mm festgelegt wird, steigt die Flußdichte auf nur 1,528  $\mu\text{T}$ . Das entspricht einer Abweichung von 3,6 %, die bereits durch Fertigungstoleranzen der Kabel entstehen kann.

Auf die Stromverdrängung der 10 und 110 kV-Kabel wird in dieser Ausarbeitung nicht weiter eingegangen. Die Stromverdrängung durch den Proximityeffekt führt zu einer Annäherung der Stromlinien und damit zur Verringerung der magnetischen Flußdichte.<sup>40</sup>

### 3.2.2 Mantelströme

Leiterströme erzeugen in den Schirmen und Metallmänteln von Starkstromkabeln Induktionsspannungen und Wirbelströme.<sup>41</sup> Ursache der Induktionsspannungen sind Magnetfelder, erzeugt von den Stromflüssen in benachbarten Leitern. Bei beidseitiger Erdung der Mäntel rufen die Induktionsspannungen Längsströme in den Kabelmänteln hervor, gegenüber denen die Wirbelströme zu vernachlässigen sind. Diese Mantelströme reduzieren die magnetische Feldstärke<sup>42</sup>, sind aber wegen der entstehenden Verluste und Erwärmungen unerwünscht. Eine wirksame Gegenmaßnahme stellt das Auskreuzen der Kabelmäntel dar.<sup>43</sup> Im Falle von unsymmetrischen Belastungen werden in den Mäntel allerdings Ströme eingeprägt, die durch Auskreuzen nicht kompensiert werden.<sup>44</sup>

In dieser Ausarbeitung soll auf die Berücksichtigung von Mantelströmen verzichtet werden. Von den betrachteten Kabeln verfügen nur das N2XS(F)2Y 1x240 6/10kV und das N2XS(FL)2Y 1x630 64/110 kV über leitfähige Schirme. Deren kleine Querschnitte erlauben nur geringe Mantelströme. Zusätzlich wird davon ausgegangen, daß Mantelströme durch Auskreuzen nahezu beseitigt werden können.

---

<sup>40</sup> Vgl. das Berechnungsbeispiel für ein Drehstromsystem in Brakelmann [4] S. 131.

<sup>41</sup> Zu den folgenden Ausführungen vgl. Peschke, v. Olshausen S. 62 f.

<sup>42</sup> Die Mantelströme können z.T. durch angepaßte Kompensationsdrosseln und nichtlineare Widerstände an den Mantelaukreuzstellen für eine optimale Feldreduktion eingestellt werden, vgl. Brakelmann [1] S. 929 f.

<sup>43</sup> Vgl. Peschke, v. Olshausen S. 62.

<sup>44</sup> Vgl. Pannicke, Demmig.

### 3.2.3 Induktive Kopplung und Nullströme

Die Induktion der niederfrequenten Magnetfelder ist nicht auf die Kabelmäntel und Kabelschirme beschränkt. Ströme können sich in anderen leitfähigen Anlagen ausbilden, z.B. in Metallrohren der Wasser- oder Gasversorgung, aber auch in Schutz- und Neutralleitern, sofern diese mehrfach geerdet sind. Dabei sind Neutralleiter in Kabeltrassen zumeist auf die Spannungsebene von 0,4 kV beschränkt. Bei der Betrachtung der Kabeltrassen spielt die induktive Kopplung der in den Niederspannungskabeln mitgeführten Neutralleiter die herausragende Rolle.

Auf dem Neutralleiter fließen in Abhängigkeit von den Erdungsverhältnissen Teile des Nullstromes, der aus unsymmetrischen Belastungen im Drehstromsystem entsteht.

Wird der unsymmetrische Nullstrom im Neutralleiter zum Sternpunkt des Verteilungstransformators zurückgeführt, kompensieren sich der Hin- und der Rückstrom weitgehend. Eine resultierende Feldkomponente entsteht durch die Entfernung des Hin- und Rückleiters. Der geringe Abstand des Neutralleiters zu den Phasenleitern im Vierleiterkabel NA2XY 4x150 bedeutet nur geringe Mehrbelastungen. Eine Simulation mit WinField und einem unsymmetrischen Strom von 3 A, der über den Neutralleiter zurückfließt, ergab gegenüber dem symmetrischen Fall eine maximale Felderhöhung von 1,52 % im Abstand von 90 cm über der Unterkante des Kabels. Der symmetrische Phasenstrom betrug in beiden Fällen 100 A. Werden jedoch Teile des Rückstroms aufgrund der Mehrfacherdung über andere Stromwege entfernt vom Leiter geführt, wird der entsprechende Anteil des unsymmetrischen Stromes nicht kompensiert. Im ungünstigsten Fall fließt der gesamte unsymmetrische Strom nicht über den Neutralleiter zurück. Das größtmögliche Feld kann durch Überlagerung des Magnetfeldes des symmetrischen Stromes mit dem Magnetfeld des unsymmetrischen Stromes maximal abgeschätzt werden. Eine Stromsumme von 3 A bei einem Phasenstrom von 100 A kann die magnetische Flußdichte in diesem Fall um 119,1 % erhöhen.

Die Neutralleiter bilden durch die beidseitige Erdung am Niederspannungstransformator und den Verteilerkästen Massenschleifen. Somit wird dem Nullstrom ein zusätzlicher Induktionsstrom überlagert. Er bewirkt wegen seiner Phasenlage und Stromrichtung ein Magnetfeld, das ebenfalls das erzeugende Magnetfeld kompensiert. In wie weit das Magnetfeld durch den Rückstrom in den Massenschleifen ansteigt, ist sehr stark von den Widerstandsverhältnissen des Erdrückleiters und der Verteilung des Rückstromes abhängig.

Ist der Nulleiter z.B. konzentrisch zum Kabel angeordnet, bewirkt die Verdrillung einen ständigen Wechsel des magnetischen Feldvektors. Damit heben sich die induzierten Spannungen größtenteils wieder auf. Häufig ist der Neutralleiter im betrachteten

Niederspannungskabel mitverseilt. Der Neutralleiter folgt der Drehung des magnetischen Feldvektors, wodurch die induzierte Spannung anwächst.<sup>45</sup>

Auf die Berechnung von Induktionsströmen wird in dieser Ausarbeitung verzichtet.

### 3.3 Berücksichtigung der Verdrillung

#### 3.3.1 Analytische Lösung für ein im Dreieck verlegtes Drehstromsystem

Das Niederspannungskabel NA2XY 4x150 0,6/1 kV weist eine Verdrillung der Phasenleiter auf. Durch die Verdrillung werden die Stabilität und die Biegeeigenschaften der Kabel verbessert. Der Einfluß der Verdrillung auf das magnetische Feld ist nicht der Grund, die Kabel mit einer Verdrillung auszuführen. Er soll aber Gegenstand der nächsten Betrachtungen sein.

Für die Feldberechnung an Kabeltrassen ist der Abfall der magnetischen Feldintensität mit zunehmendem Abstand von den Kabeln besonders interessant. In unmittelbarer Nähe der Leiter, im Nahbereich<sup>46</sup>, hängt das Magnetfeld noch stark von der Geometrie der Anordnung ab. Im Fernbereich dagegen verringert sich der Geometrieinfluß. Für diesen Fernbereich lassen sich vereinfachte Formeln zur Berechnung der magnetischen Flußdichte für gerade Leiteranordnungen in der Entfernung  $r$  vom Leiter angeben.<sup>47</sup>

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad \text{für eine Einleiteranordnung} \quad [18]$$

$$B = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\mu_0 I a}{2\pi r^2} \quad \text{für ein im Dreieck verlegtes Dreiphasensystem, wobei } a \text{ der Abstand der Leiter vom geometrischen Schwerpunkt des Kabelbündels ist} \quad [19]$$

Es stellt sich die Frage, wie sich die Verdrillung der Leiter auf die Feldintensität auswirkt. Bereits 1937 wurde von Buchholz<sup>48</sup> eine analytische Lösung für verdrillte Leiter gefunden. In Anlehnung an das Gesetz von Biot-Savart läßt sich das Vektorpotential oder die magnetische Flußdichte<sup>49</sup> für einen schraubenförmigen Leiter angeben. Die Berechnung der Flußdichte in Zylinderkoordinaten führt für die radialen, azimuthalen und axialen Flußdichtevektoren zu Summenfolgen modifizierter Besselfunktionen der ersten und zweiten Art, sowie deren Ableitungen.<sup>50</sup>

<sup>45</sup> Vgl. Jäkel, Messer S. 75 ff.

<sup>46</sup> Die Begriffe Nahbereich bzw. Fernbereich stehen nicht im Zusammenhang mit den Begriffen Nahfeld und Fernfeld der Wellenausbreitung. Der Nahbereich umfaßt die unmittelbare Nähe weit unterhalb 1 m von einem Kabelbündels oder einer Grundanordnung aus wenigen Kabelbündeln.

<sup>47</sup> Vgl. Hadrian S.453 ff.

<sup>48</sup> Vgl. Buchholz S. 264 ff.

<sup>49</sup> Vgl. Pettersson, Schönberg S. 1679 bzw. Haper S. 79.

<sup>50</sup> Vgl. zu den folgenden Aussagen Pettersson, Schönberg S. 1679 ff.

In der elektrischen Energieversorgung werden häufig dreiphasige Leitersysteme im Niederspannungsbereich von 0,4 kV und z.T. im Mittelspannungsbereich von 6/10 kV verdreht ausgeführt. Für dreiphasige Systeme, deren schraubenförmige Leiter jeweils um  $120^\circ$  versetzt auf einem festen Radius  $a$  um den Koordinatenursprung angeordnet sind, ergeben sich folgende Effektivwerte für die radialen, azimuthalen und axialen Feldkomponenten in einem Punkt mit dem Abstand  $r$  zum Koordinatenursprung und mit dem Winkel  $\theta$ :<sup>51</sup>

$$B_r = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \cdot \gamma^2 \sqrt{\sum_n \sum_m (\mp n)(\mp m) I'_n(n\eta) I'_m(m\eta) \cdot K'_n(n\gamma) K'_m(m\gamma) \cdot \cos((\pm n \mp m)\Theta)} \quad [20]$$

$$B_\theta = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \cdot \gamma \sqrt{\sum_n \sum_m n m \cdot I'_n(n\eta) I'_m(m\eta) \cdot K_n(n\gamma) K_m(m\gamma) \cdot \cos((\pm n \mp m)\Theta)}$$

$$B_z = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \cdot \gamma^2 \sqrt{\sum_n \sum_m n m \cdot I'_n(n\eta) I'_m(m\eta) \cdot K_n(n\gamma) K_m(m\gamma) \cdot \cos((\pm n \mp m)\Theta)}$$

$$\text{mit} \quad \gamma = \frac{2\pi r}{p}, \quad \eta = \frac{2\pi a}{p} \quad \Theta = \theta - kz = \theta - \frac{2\pi}{p} \cdot z$$

Hierbei entsprechen  $I_n(x)$  und  $K_n(x)$  den modifizierten Besselfunktionen der ersten bzw. zweiten Art  $n$ -ter Ordnung. Die Ströme werden als sinusförmig angenommen. Die Helix verläuft dabei in  $z$ -Richtung. Als Verseilschlaglänge  $p$  ist die Strecke definiert, innerhalb derer der Leiter die Helix einmal umrundet. Für gerade Leiter geht  $p$  somit gegen unendlich.

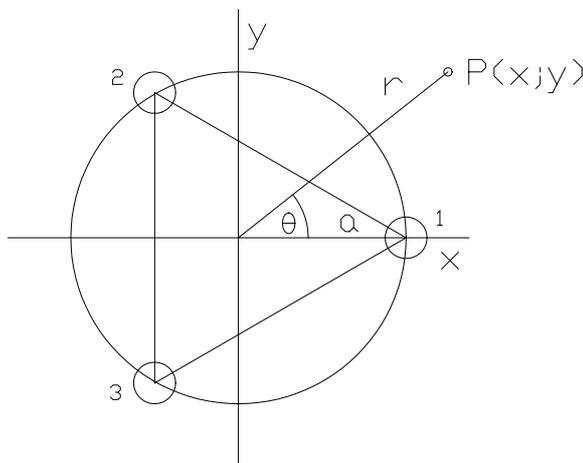


Abbildung 3.2:

Leiteranordnung und Parameter zur Berechnung der magnetischen Flußdichte bei Verdrehung

$a$  ist der Abstand der Teilleiter und  $r$  der Abstand des Berechnungspunktes zum geometrischen Schwerpunkt der Anordnung.

Unter der Annahme  $r \gg a$ ,  $r \gg p$ , aber auch  $a \ll p$  wird  $\eta$  kleine und  $\gamma$  große Werte annehmen. Die Ableitungen der modifizierten Besselfunktionen erster Art z.B.  $I'_n(n\eta)$

<sup>51</sup> Vgl. Abb. 3.2.

gehen dann gegen Null. Eine Ausnahme bildet  $I_1(\eta) = 0,5$ . Die Besselfunktionen zweiter Art z.B.  $K_n(n\gamma)$  und deren Ableitungen  $K'_n(n\gamma)$ <sup>52</sup> nähern sich für große Argumente exponentiell Null an.<sup>53</sup>

Die Summenausdrücke der Komponentengleichungen vereinfachen sich somit auf die dominanten Terme mit  $n = m = 1$ :<sup>54</sup>

$$B_r = -\frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \cdot \gamma^2 \cdot I_1'(\eta) \cdot K_1'(\gamma) = -\frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cdot e^{-\gamma} = -\frac{3\mu_0 I a}{4\sqrt{2\pi} \cdot r^2} \gamma^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\gamma} \quad [21]$$

$$B_\theta = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \cdot \gamma \cdot I_1'(\eta) \cdot K_1(\gamma) = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \cdot \gamma \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cdot e^{-\gamma} = \frac{3\mu_0 I a}{4\sqrt{2\pi} \cdot r^2} \sqrt{\gamma} \cdot e^{-\gamma}$$

$$B_z = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \cdot \gamma^2 \cdot I_1(\eta) \cdot K_1(\gamma) = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{\sqrt{2\pi\gamma}} \cdot e^{-\gamma} = \frac{3\mu_0 I a}{4\sqrt{2\pi} \cdot r^2} \gamma^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\gamma}.$$

Mit  $B_\theta \approx 0$  kann der Effektivwert der magnetischen Flußdichte durch folgende Gleichung in Abhängigkeit von der Verseilschlaglänge  $p$  beschrieben werden:

$$B = \frac{3\mu_0 I a}{4\sqrt{\pi} \cdot r^2} \left( \frac{2\pi r}{p} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\left(\frac{2\pi}{p}\right)}. \quad [22]$$

Für den Fall, daß die Verseilschlaglänge verhältnismäßig klein gegenüber der Entfernung des Aufpunktes von der Bündelmitte ist, ist das Feld also nicht von der azimuthalen und axialen Lage des Aufpunktes abhängig. Insbesondere wird ein exponentieller Abfall der magnetischen Flußdichte mit zunehmender Entfernung von dem verdrehten Kabelbündel deutlich.

### 3.3.2 Vergleich der analytischen Berechnung mit der Simulation durch WinField

Pettersson und Schönberg geben für die oben stehende Approximation einen Fehler von 10 % gegenüber der exakten Lösung an, unter den Bedingungen  $\eta < 0,5$  und  $\gamma > 10$ . Während die erste Bedingung für das Niederspannungskabel NA2XY 4x150 erfüllt wird, erreicht  $\gamma \approx 4,71$  die Vorgabe bei einer Verseilschlaglänge von  $p = 1,2$  m und einem Abstand des Aufpunktes  $r \approx 0,9$  m nicht. Weiterhin weist das Niederspannungskabel

<sup>52</sup> Der erste Term der Ableitung ist für große  $n\gamma$  vernachlässigbar.

<sup>53</sup> Zu den Näherungen vgl. Press, Flannery, Teukolsky, Vetterling S. 197 ff.

<sup>54</sup> Die Berücksichtigung der Terme höherer Ordnung führt schnell zur Annäherung an die exakte Lösung. Vgl. Pettersson, Schönberg S. 1681 f.

durch den mitverdrellten Nulleiter einen anderen geometrischen Aufbau auf. Aus diesen Gründen soll auf die Angabe einer analytischen Lösung verzichtet werden. Statt dessen wird der verdrehte Aufbau mit WinField simuliert. Zur Referenz erfolgt im voraus die Simulation ebenfalls für eine von Pettersson und Schönberg ausgewertete Beispielanordnung.

Diese Beispielanordnung<sup>55</sup> weist folgende Parameter auf:

$$a = 0,1 \text{ m}, p = 1 \text{ m}, r = 0,3 - 0,8 \text{ m}, I = 200 \text{ A}, f = 50 \text{ Hz}.$$

Die Verdrellung wird mit WinField durch 16 geradlinige Leiter pro Verseilschlaglänge und Phase nachgebildet. Die Leiter der anderen Phasen sind jeweils um  $120^\circ$  räumlich gedreht angeordnet. Die geraden Leiterstücke bilden somit drei ineinander versetzte langgezogene Spulen, wie in *Abb. 3.3* dargestellt ist.

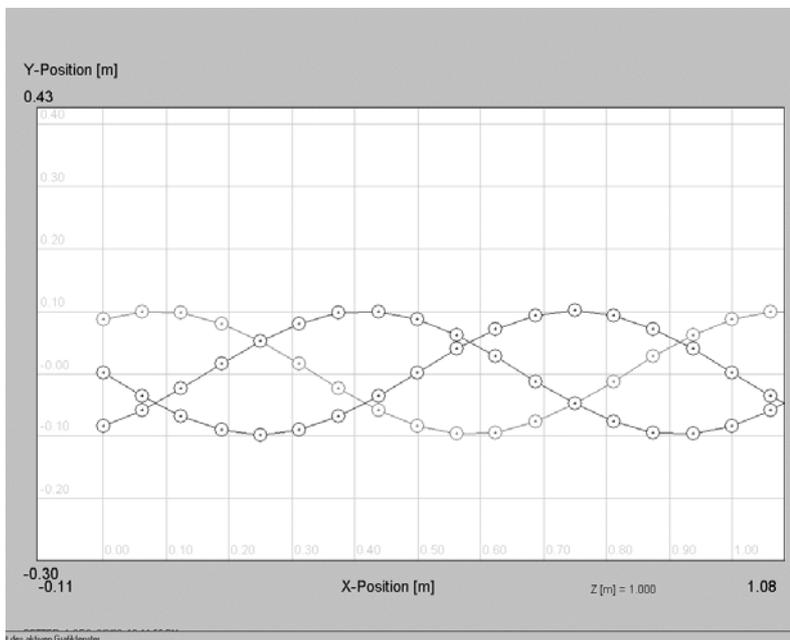


Abbildung 3.3:

*Nachbildung der Verdrellung eines Dreileiterkabels mit WinField durch 16 geradlinige Leiterstücke innerhalb einer Verseilschlaglänge*

Bei der Berechnung verdrellter Leiter endlicher Länge tritt das Problem auf, daß an den Enden der Anordnung das Feld erhöhte Feldstärken aufweist. Die Kompensation durch die Verdrellung beruht auf der Superposition der magnetischen Feldvektoren auch der benachbarten Kabelabschnitte. Ist die Anordnung begrenzt oder ändert sich die Richtung der Kabelachse, fehlen einseitig die Feldvektoren, die von den nicht vorhandenen Leiterabschnitten erzeugt werden. Der Einfluß der fehlenden Leiterabschnitte sinkt mit zunehmender Entfernung, so daß die Feldreduktion in der Mitte der Anordnung geringer gestört wird. Der exponentielle Feldabfall kann nur bis zu einem begrenzten Abstand vom

<sup>55</sup> Vgl. Pettersson, Schönberg S. 1682.

Kabelbündel aufrecht erhalten werden.<sup>56</sup> Leider ist WinField nur in der Lage eine begrenzte Zahl von 16000 Teilleitern zu berechnen. Daher kann die Anordnung nicht beliebig erweitert werden. Der mit WinField berechnete Feldverlauf beruht auf einer 320 m langen Leiternachbildung aus 15360 Leiterstücken. Die Berechnung erfolgt in der Mitte der Anordnung.

Abb. 3.4 vergleicht die Ergebnisse der Berechnung mit dem Feldverlauf der approximativen Lösung und Werten des exakten Feldverlaufs.<sup>57</sup> Pettersson und Schönberg ermittelten den exakten Feldverlauf vermutlich ebenfalls durch eine Simulation.

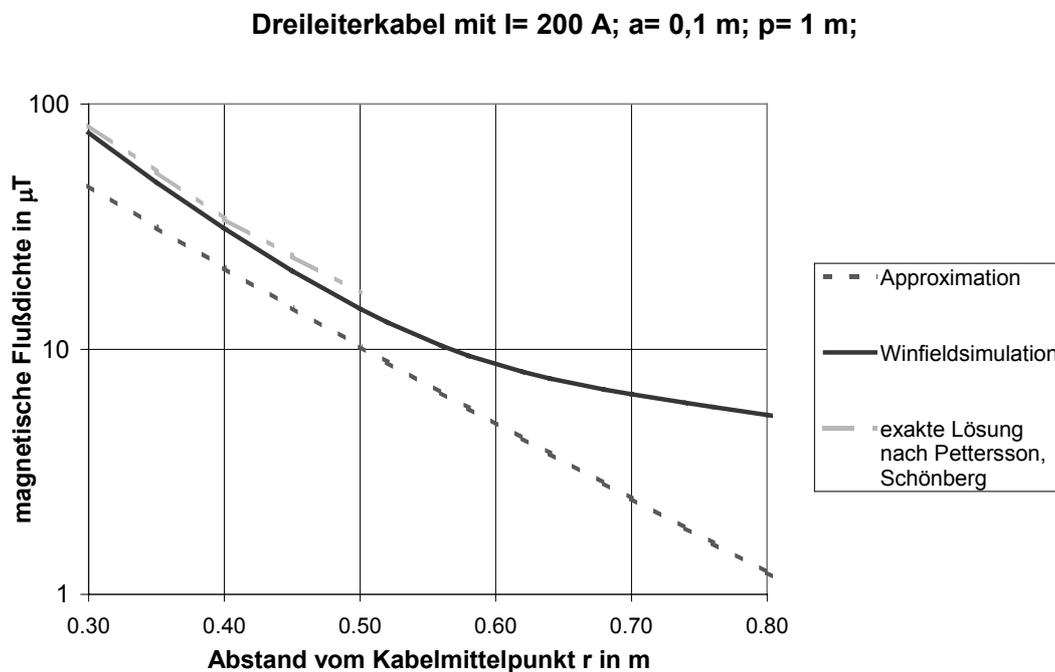


Abbildung 3.4: Vergleich des Verlaufs der magnetischen Flußdichte der approximativen Lösung, der Simulation durch WinField mit dem exakten Verlauf der Beispielanordnung

Die WinField-Simulation zeigt eine bessere Übereinstimmung mit der exakten Lösung als die analytische Berechnung. Durch die Überlagerung der Randfelder ändert sich der Feldabfall in der Simulation ab  $10 \mu\text{T}$  und damit endet die Übereinstimmung. Das Beispiel zeigt, daß mit WinField die magnetische Flußdichte an verdrehten Leiteranordnungen berechnet werden kann.

<sup>56</sup> Zur Wirkung des Randfeldes vgl. Abschnitt 3.3.3.

<sup>57</sup> Die Werte wurden aus dem von Pettersson und Schönberg angegebenen Diagramm abgelesen.

### 3.3.3 Nachbildung der Verdrillung des NS-Kabel NA2XY 4x150 0,6/1kV

Das Kabel NA2XY 4x150 0,6/1 kV besitzt neben den Phasenleitern einen mitverdrillten Neutralleiter. Der Phasenleiterstrom beträgt 100 A. Es fließt annahmegemäß kein Neutralleiterstrom. Die Anordnung der Leiter entspricht im Querschnitt einem Rechteck mit 14 mm Kantenlänge. Nach Herstellerangaben besitzt das Kabel eine Verseilschlaglänge von 1,2 m. Die Nachbildung erfolgt wiederum mit 16 geraden Teilleitern pro Verseilschlaglänge und System. Die Gesamtlänge der Anordnung erreicht 33,6 m, wobei der Flußdichteverlauf in der Mitte der Anordnung bestimmt wird.

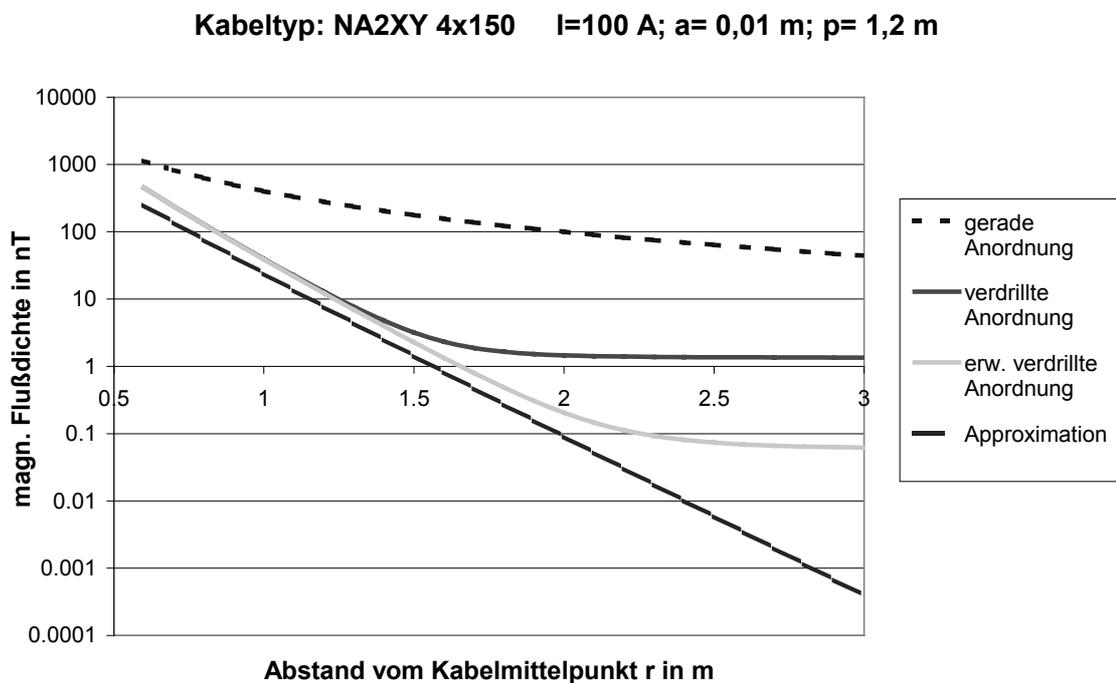


Abbildung 3.5: Vergleich des Verlaufs der magnetischen Flußdichte der approximativen Lösung, mit verdrillten Anordnungen und der geradlinigen Anordnung.

Abb. 3.5 zeigt den Verlauf der magnetischen Flußdichte der verdrillten Anordnung. Oberhalb eines Abstandes von 1,5 m wird die Wirkung des Randfeldes dominant. Der Einfluß verschiebt sich zu größeren Abständen, wenn die Leiteranordnung verlängert wird. Der Graph der erweiterten verdrillten Anordnung zeigt den Flußdichteverlauf einer 100,8 m langen Anordnung. Zum Vergleich sind die approximative Lösung<sup>58</sup> und die Lösung der geradlinigen Leiteranordnung angegeben. Bereits in einem Abstand von

<sup>58</sup> Beachte: Die Approximation gilt für Dreileitersysteme. Sie ist nur aus vergleichenden Gründen angegeben.

90 cm über der Unterkante des Kabels erreicht das verdrehte Kabel eine etwa 7fach niedrigere Flußdichte als bei geradem Leiteraufbau.

Entgegen der approximativen Lösung hängt die Flußdichte bei realen Anordnungen von der azimuthalen Lage ab. Dies gilt insbesondere durch den mitverdrehnten Neutralleiter. Mit zunehmenden Abstand vom Kabelmittelpunkt verringert sich dieser Effekt. Schon im Abstand von 0,9 m über der Kabelunterkante ist ein gleichmäßiger Feldverlauf erkennbar.<sup>59</sup>

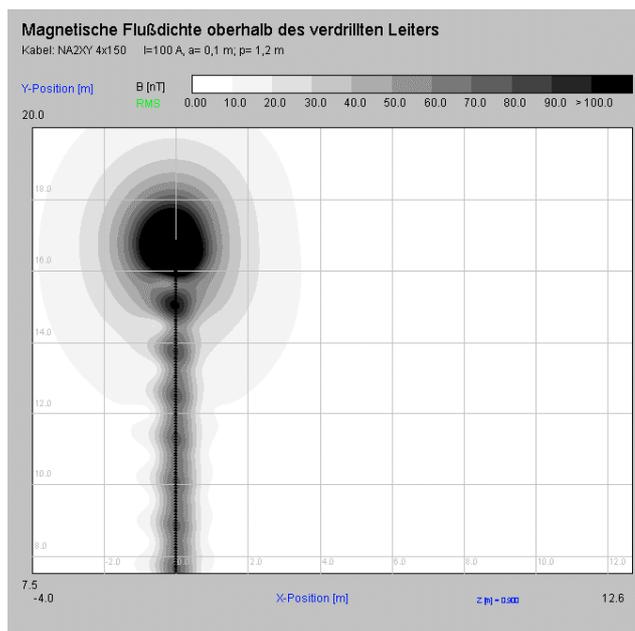


Abb. 3.6:

Magnetische Flußdichte bei Abbruch der Anordnung im Abstand von 0,9 m über der Unterkante eines verdrehten Kabels NA2XY 4x150 0,6/1 kV.

Üblicherweise bieten die Hersteller die Kabel mit einer Gleichschlagverseilung an. Die Richtung der Verdrehung bleibt über die Kabellänge erhalten. Seltener ist die Wechselschlagverseilung zu finden. Diese Art der Verseilung bedeutet einen Wechsel der Richtung der Verdrehung in regelmäßigen Abständen. Sie erlaubt einen kontinuierlichen Herstellungsprozeß von Kabeln großer Länge.<sup>60</sup>

Der Richtungswechsel bewirkt aber auch eine Richtungsänderung der Längskomponente des magnetischen Feldes. Die Feldstärken erhöhen sich am Schlagwechsel, wie am Ende der Anordnung, da die Drehung der Feldvektoren nun eine andere Richtung aufweist. Dieser Effekt kann mit WinField simuliert werden. Die Strecke, in der die Richtung der Verdrehung wechselt, wirkt sich dabei nur geringfügig aus. In Abb. 3.7 sind verschiedene Ansichten auf ein Kabel mit Schlagwechsel dargestellt. Hierbei umfaßt die Länge des Schlagwechsels 1/16 der Länge des Verseilschlages.

<sup>59</sup> Vgl. Abb. 3.6. Dort ist auch die fehlende Kompensation bei Abbruch der Anordnung gut erkennbar.

<sup>60</sup> Vgl. Alcatel Kabel.

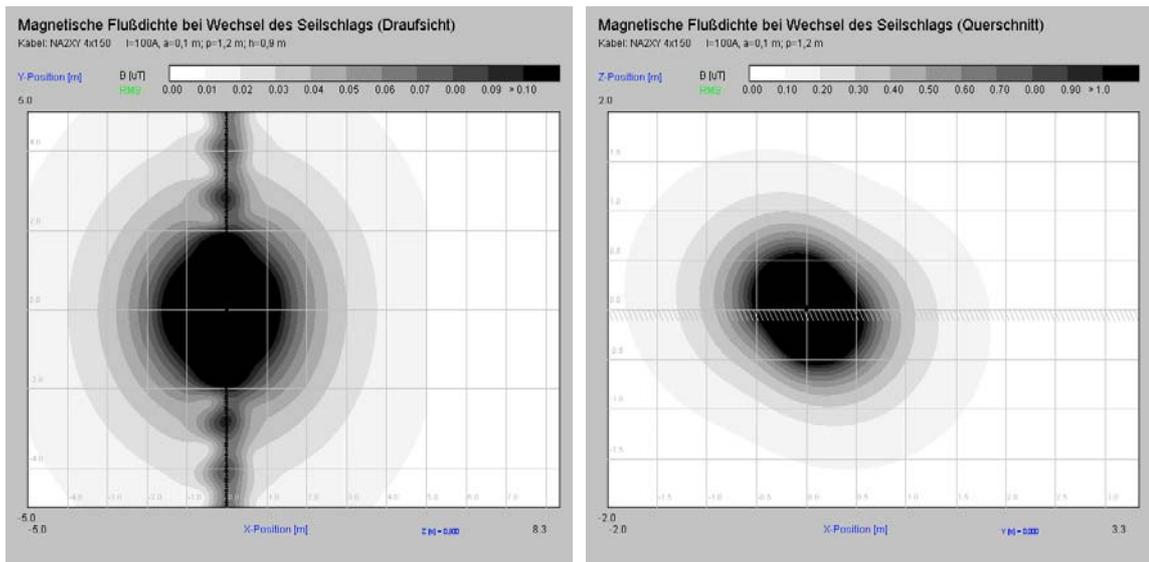


Abbildung 3.7 Magnetische Flußdichte im Bereich des Schlagwechsels eines Niederspannungskabels NA2XY 4x150 0,6/1kV.

Im Querschnitt entsteht wegen der Vierleitergeometrie ein ovales Magnetfeld. Der Abfall der magnetischen Flußdichte in Richtung der geringsten Reduktion wird in Abb. 3.8 mit dem Abfall der Feldstärke einer geradlinigen Leiteranordnung verglichen.

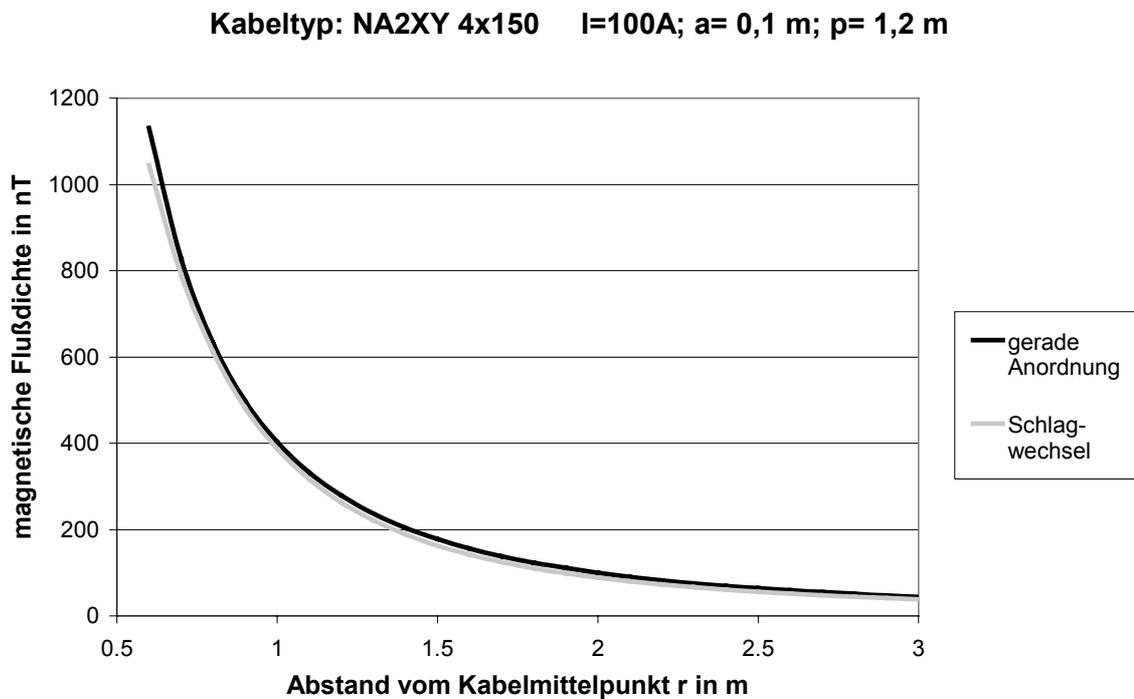


Abbildung 3.8: Verlauf der magnetischen Flußdichte am Schlagwechsel und an einer geradlinigen Leiteranordnung.

Die Abweichung der maximalen Flußdichte ist gering. Da die magnetische Flußdichte einer geradlinigen Anordnung etwa quadratisch abfällt, kann in der Nähe des Schlagwechsels eine ebenfalls quadratische Reduktion des Magnetfeldes angenommen werden.

Der Wechsel der Richtung des Verseilschlages tritt beim Kabel NA2XY 4x150 im Abstand von ca. 20 m auf.<sup>61</sup> Die Felderhöhung durch den Richtungswechsel ist lokal begrenzt, wie auch *Abb. 3.7* zeigt.

Da bei der Verlegung die Position des Richtungswechsels nicht bekannt ist, kann sich ein verdrehtes Kabel im schlechtesten Fall wie ein unverdrehtes Kabel verhalten. Weder die Richtung der minimalen Feldreduktion, noch die Richtung der Magnetfeldvektoren läßt sich somit sicher bestimmen. Ist eine konservative Abschätzung erwünscht, sollten Kabelanordnungen mit verdrehten Leitern deshalb wie magnetisch ungünstigste Anordnungen mit geradlinigen Leitern behandelt werden. Dann liegen die Ergebnisse auf der sicheren Seite.

## 3.4 Kabelanordnungen

### 3.4.1 Berücksichtigung der Erwärmung

Die Ströme in den Kabeln erzeugen an ohmschen Widerständen Verluste, die in Form von Wärme abgegeben werden. Dabei sind nicht nur die Leiterströme, sondern auch Mantelströme und Wirbelströme zu berücksichtigen. Eine weitere Erwärmungsquelle stellen die spannungsabhängigen dielektrischen Verluste dar. Sie sind bei gegebenen Anlagen aufgrund der festgelegten Betriebsspannung aber kaum beeinflussbar.

Für die Erwärmungsberechnung von Kabelanordnungen existieren ein Vielzahl Berechnungsverfahren, auf die in dieser Ausarbeitung nicht eingegangen werden soll.<sup>62</sup>

Grundlage der Ermittlung der magnetischen Flußdichte an Kabeltrassen sind die zulässigen Übertragungsfähigkeiten von neu verlegten Kabeln im Netzgebiet der Bewag.<sup>63</sup>

Die Belastungen für die Niederspannungskabel ergeben sich aus der Verteilung der Transformatorenlast. Sie unterliegen starken Schwankungen. Unter der Annahme der Maximalbelastung eines 630-kVA-Transformators bei 8 Niederspannungssystemen nehmen die Leiterströme die Werte in *Tab. 3.3* an. Für die Kabel der höheren Spannungsebenen setzt die Bewag die dargestellten Übertragungsfähigkeiten an.

---

<sup>61</sup> Nach telefonischer Auskunft von Frau Schneider (Abteilung Konstruktion/ Alcatel Kabel).

<sup>62</sup> Vgl. dazu u.a. Brakelmann [2].

<sup>63</sup> Vgl. Abbildung 3.3 (erstellt nach Biewald, Henschel, Ringler S. 44 ff.) Die Berechnungen basieren auf dem Programm Katras. Zu den Leistungsmerkmalen vgl. Brakelmann [3] S. 384 ff.

Kabeltyp	Betriebsart	übertragbare Leistung in MVA	zul. Strombelastung in A
NA2XY 4x150	Aufteilung der Transformatorleistung/ (gleichmäßig; extrem ungleich)	ca. 0.08 - 0.15	ca. 120 - 230
N2XS(F)2Y 1x240	Ringkabel: 24 Kabel in 3 Lagen	5	290
	Ringkabel: 15 Kabel in 3 Lagen	5.5	320
	Ringkabel: 8 Kabel in 2 Lagen	6	350
N2XS(FL)2Y 1x630	Einfach-Verbundkabel	130	680
	Ringkabel	120	630

Tabelle 3.3: Übertragungsfähigkeit neu verlegter Kabel im Netzgebiet der Bewag

### 3.4.2 Die Standardverlegearten der Bewag

Die Untersuchung der magnetischen Flußdichte orientiert sich zur Wahrung der Praxisrelevanz an realen Kabeltrassen. Als Vorlage der geometrischen Anordnung dienen die Standardtrassen der Bewag in Netzen von 0,4 kV bis 110 kV.<sup>64</sup> Sie stellen auch die Grundlage der Berechnung der Übertragungsfähigkeiten dar.

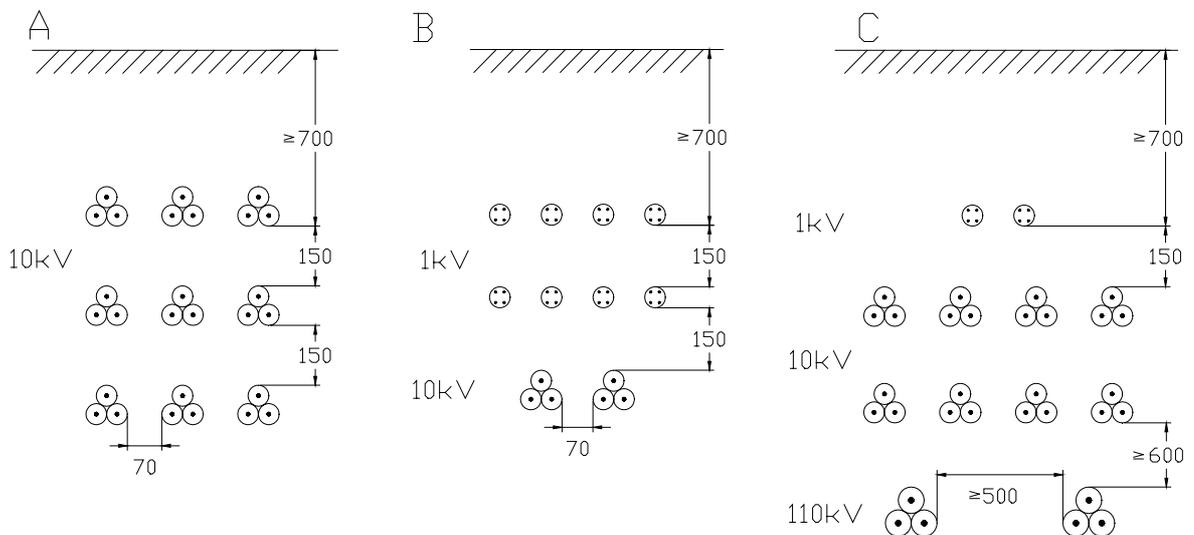


Abbildung 3.9: Standardtrassen der Bewag: A) 10 kV-Ringkabeltrasse; B) Kabeleinführung einer Netzstation; C) 110 kV-Trasse. Die Abstände sind in mm angegeben.

In den Untersuchungen zur magnetischen Flußdichte wird von diesen angegebenen Leiterabständen und Verlegearten ausgegangen. Energieversorgungskabel werden häufig in der sogenannten 2d-Verlegeart in den Erdboden eingebracht, welche besagt, daß der Abstand zwischen den Kabelbündeln im Kabelgraben angenähert der Breite der

<sup>64</sup> Vgl. Biewald, Henschel, Ringler S. 42, sowie Abb. 3.9.

---

Kabelbündel entspricht. Im Bereich von 10 kV findet sich diese Verlegeart in den Standardtrassen der Bewag wieder.

Weiterhin sollen Stromsummen bis 3 A im Niederspannungsbereich und die Richtungsabhängigkeit der Ströme in Ringnetzen einbezogen werden. In gemischten Kabeltrassen dürfen die Phasendrehungen der Ströme durch die Schaltung der Transformatorenwicklungen nicht unberücksichtigt bleiben.

Die Verlegung der Kabelbündel ist in bis zu drei Ebenen üblich. Nur in seltenen Fällen sollte eine weitere Verlegeebene hinzugefügt werden. Da bei Fehlern auf den Systemen die unteren Ebenen schwer erreichbar sind, wird häufig darauf verzichtet.

### 3.4.3 Möglichkeiten der Feldreduktion

Bevor die Optimierung der Phasenordnung zur Reduktion der magnetischen Flußdichte betrachtet wird, sollen weitere Möglichkeiten der Reduktion des magnetischen Feldes behandelt werden.

Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 gezeigt nimmt das Feld bei Drehstromsystemen im größeren Abstand quadratisch mit der Entfernung ab. Die Dreiecksverlegung von Einleiterkabeln führt dabei zu einer größeren Feldreduktion als die Flachverlegung.<sup>65</sup> Eine exponentielle Reduktion durch Verdrillen der Leiter konnte bereits im Abschnitt 3.3 gezeigt werden.

Bei Sammelschienen wird häufig das „phase splitting“ zur Feldreduktion verwendet. Bei diesem Verfahren werden die einzelnen Phasen eines Systems auf zwei Systeme verteilt und die Phasen der neuen Systeme symmetrisch zueinander angeordnet. Für das „phase splitting“ gelang der Nachweis einer asymptotischen Feldabnahme umgekehrt proportional zur dritten Potenz des Abstandes von den Leitern.<sup>66</sup>

Insgesamt kann für Drehstromsysteme eine Verringerung der Feldbelastung der Umwelt durch eine kompakte Verlegeweise erreicht werden. Der Abstand der Leiter in Kabelanordnungen wird von den Querschnitten der Leiter selbst und der zulässigen Erwärmung der Kabel begrenzt. Dabei ist die Feldabnahme näherungsweise proportional zum Abstand der Leiter von der Mitte des Kabelbündels.<sup>67</sup>

Negativ auf die Feldreduktion wirken Stromsummen in den Drehstromsystemen. Sie entstehen durch unsymmetrische Belastungen einzelner Phasenleiter und Phasenverschiebungen der Ströme zueinander. Die Folge sind nichtkompensierte Ströme, deren Magnetfeldabfall mit zunehmenden Abstand reziprok approximiert werden kann.

---

<sup>65</sup> Vgl. Hadrian S. 454.

<sup>66</sup> Vgl. Hadrian S. 455.

<sup>67</sup> Vgl. die Näherungen in Hadrian S. 454 ff.

---

Die Vektoren der Feldes des symmetrischen Systems und des Stromsummenstromes überlagern sich. Auch wenn die Stromsumme niedrig ist, spielt das von ihr erzeugte Feld im weiteren Abstand von den Leitern die dominierende Rolle.

Abschirmungen aus leitenden oder hochpermeablen Stoffen dienen auch der Feldreduktion. Sie wirken aber in unterschiedlicher Weise.<sup>68</sup> Wirbelströme in leitenden Abschirmungen entstehen im Einfluß des veränderlichen magnetischen Feldes. Die Wirbelströme erzeugen wiederum ein Magnetfeld, das dem ursprünglichen Magnetfeld entgegenwirkt. Die Abschwächung des Magnetfeldes findet im gesamten Raum statt. Diese Abschirmungen können als Platte an magnetisch hochbelasteten Orten eingefügt werden oder direkt als Kabelschirm ausgeführt sein. Die Wirkung ist stark von der Frequenz, der Dicke der Abschirmung und der Eindringtiefe ins Material abhängig.<sup>69</sup> Auf ähnliche Weise reduzieren induzierte Längsströme in Kabelmänteln und Neutralleiterströme bei unsymmetrischen Belastungen die Feldstärke im Außenraum durch Feldüberlagerung.

Platten oder Schirme aus hochpermeablen Materialien reduzieren das magnetische Feld, indem durch ihre höhere magnetische Leitfähigkeit die magnetischen Feldlinien in ihrem Inneren konzentriert werden. Im Außenraum wird das Feld somit in der Umgebung des hochpermeablen Körpers reduziert. Um den gewünschten Abschirmeffekt zu erreichen, muß der Körper sich allerdings in Richtung der Feldlinien ausdehnen. Eine Sättigung des Abschirmkörpers bei hohen Feldstärken reduziert schließlich seine Wirkung.

---

<sup>68</sup> Vgl. zu den folgenden Ausführungen Schmitt S. 458 f.

<sup>69</sup> Vgl. auch die Schirmwirkung dicker Kabelschirmungen in Brakelmann [4], S. 131 f.

---

## 4 Magnetische Flußdichte an idealisierten Kabeltrassen

### 4.1 Vorbetrachtungen

#### 4.1.1 Annahmen

Im Abschnitt 4 werden die Ergebnisse der allgemeinen Untersuchungen zur optimalen Verlegung von Kabeln dargestellt. Ausgangspunkt der Untersuchungen sind 10 kV-Kabeltrassen, entsprechend der Verlegungsweise der Bewag.<sup>70</sup>

Demnach wird das Kabel N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV in im Dreieck verlegten Anordnungen verwendet. Es wird von symmetrischen Belastungen ausgegangen. Die Abstände der Kabelbündel entsprechen denen der 10 kV-Ringkabeltrasse der Bewag und berücksichtigen die thermische Belastbarkeit der Anordnung bei gegebenen Leiterströmen. Die Leiterströme in den allgemeinen Untersuchungen stimmen mit dem Bemessungsstrom bei Erdverlegung von 526 A überein. Die Strombelastung liegt über der zulässigen Belastung der gewählten Verlegungsweise. Dieser Annahme liegt die Tatsache zugrunde, daß die Maximalbelastung bei anderen Bodengegebenheiten unterschiedliche Ströme zulassen könnte. Für diesen Kabeltyp stellen die berechneten Werte aus diesem Grund Maximalangaben dar. Die Stromstärke verhält sich linear zur magnetischen Flußdichte, wodurch Feldgrößen niedrigerer Strombelastungen leicht zu ermitteln sind. Die Kabel werden in einer Querschnittsanordnung betrachtet, in der die positive Stromrichtung in die Zeichenebene hineinzeigt.

Die Berechnungen und Optimierungen der Phasenordnung erfolgen in einer Höhe von 20 cm über dem Erdboden. Diese Berechnungshöhe entstammt den Durchführungshinweisen zur 26. BImSchV. Die Kabelbündel liegen in einer Tiefe von 70 cm auf, oder sind bei der Verlegung in zwei oder drei Ebenen entsprechend der 10 kV-Ringkabeltrasse angeordnet.

#### 4.1.2 Das Magnetfeld einer Dreiecksanordnung

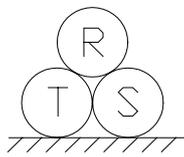
In vielen Fällen werden Starkstromkabel in einer Dreiecksanordnung im Erdboden verlegt. Gründe hierfür sind die annähernd gleichen Impedanz- und Kapazitätsbeläge der Kabel zueinander, die kompakte Verlegeart, aber auch die Verringerung der magnetischen Feldbelastung in der Kabelumgebung.

Die Nennung der Phasen in dieser Arbeit entspricht der in der Starkstromtechnik üblichen Bezeichnung. Die Phase R steht für einen Phasenwinkel des Stromes von 0°, T für 120°

---

<sup>70</sup> Vgl. Abschnitte 3.4.1 und 3.4.2.

und S für  $240^\circ$ . *Abb. 4.1* zeigt die Phasenordnung im Dreieck verlegter Einleiterkabel, wie sie in dieser Ausarbeitung angewendet werden.



Bezeichnung der  
Phasenordnung: RST  
Notation: R

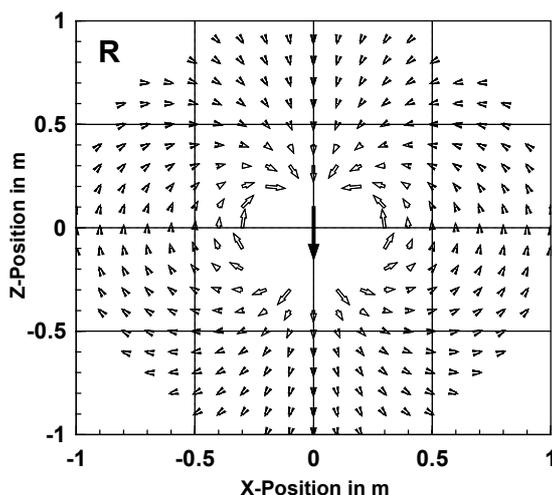
*Abbildung 4.1:*

*Phasenordnung eines Drehstromsystems  
bei Dreiecksverlegung*

Die Bezeichnung von Anordnungen mit vielen Kabelbündeln kann schnell unübersichtlich werden. Daher soll folgende eindeutige Notation verwendet werden.

Die Phase des oben aufliegenden Kabels wird übernommen. Entspricht die Phasenabfolge der Reihenfolge RST<sup>71</sup> in der Uhrzeigerrichtung, also der mathematisch negativen Richtung, genügt diese Bezeichnung, z.B. **R**. Bei entgegengesetzter Phasenabfolge, im mathematisch positiven Rotationssinn, wird die Notation in **R'** geändert.<sup>72</sup>

Das Magnetfeld eines symmetrischen Drehstromsystems in Dreiecksverlegung kann mit dem eines rotierenden Magneten verglichen werden. Diese Vorstellung kann mit der Stromerzeugung in Synchronmaschinen erläutert werden. Eine rotierende Erregerspule induziert nach Gleichung [1] in drei  $120^\circ$  versetzte Statorwicklungen Spannungen, die ihrerseits Stromflüsse bedingen, die nach Gl. [5] in jedem Strang ein Magnetfeld erzeugen. Die Magnetfelder der Einzelleiter überlagern sich zu einem Drehfeld, das mit Netzfrequenz rotiert.<sup>73</sup>



*Abbildung 4.2:*

*Flußdichtevektoren des Drehstromsystems  
entsprechend Abb. 4.1 zum Zeitpunkt des  
Nulldurchganges des Stromes in Phase R*

<sup>71</sup> Der Begriff Phasenabfolge kennzeichnet die Reihenfolge der Phasen innerhalb des Systems, der Begriff Phasenfolge die Reihenfolge der aufliegenden Phasen der Kabelbündel im Kabelgraben.

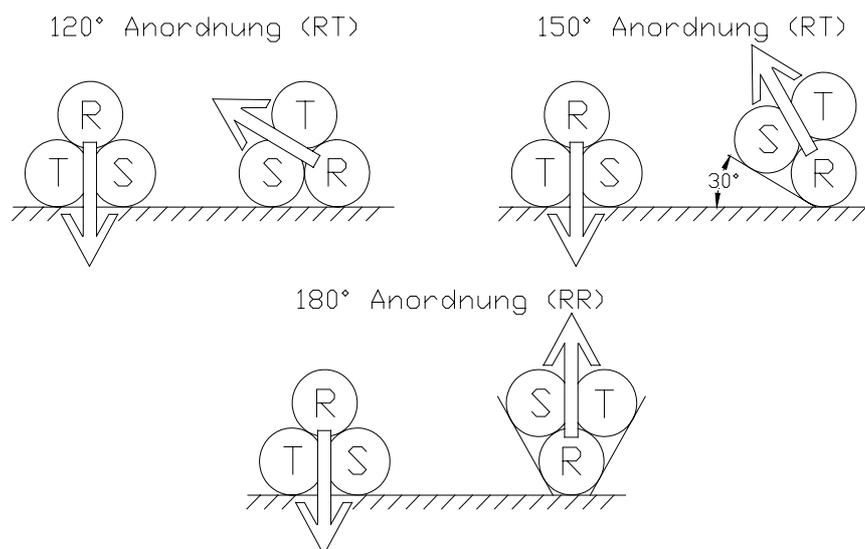
<sup>72</sup> Die Notation in Fettdruck beschreibt die Phasenordnung des Drehstromsystems.

<sup>73</sup> Detaillierter vgl. Heuck S. 133.

### 4.1.3 Möglichkeiten der geometrischen Anordnung

Ausgangspunkt der Betrachtung sind zwei Kabelbündel in Dreiecksanordnung. Sie erlauben bereits prinzipielle Aussagen zum Magnetfeld von Mehrsystemanordnungen zu treffen. Durch Rotation der Kabelbündel um  $30^\circ$  um den geometrischen Schwerpunkt des Bündels können verschiedene Anordnungen erzeugt werden. Ein Vergleich in *Abb. 4.3* im Anhang zeigt, daß alle möglichen Anordnungen auf sieben Grundanordnungen zurückführbar sind. An ihnen wurde eine Phasenoptimierung durchgeführt und die magnetische Flußdichte bestimmt.

Das Ergebnis der Optimierung zeigt, daß die sieben Grundanordnungen in drei Fälle mit guter Feldreduktion eingeteilt werden können. Das sind die Anordnungen entsprechend *Abb. 4.4*. Die Anordnungen mit guter Feldreduktion weisen Phasenabfolgen in Richtung des Uhrzeigersinns auf.



*Abbildung 4.4:*

*Anordnungen von Kabelbündeln mit Darstellung der Zeiger des magnetischen Feldes bei einem Phasenwinkel von  $0^\circ$  des Stromes der Phase R.*

*Die Notation der 180° Anordnung wird wieder auf den horizontal einzeln liegenden Leiter bezogen. Die Notation der Phasenabfolge erfolgt wie in 4.1.2 beschrieben.*

Die Vorstellung der rotierenden Magnetfelder erweist sich zum Verständnis der Feldbilder als hilfreich. Eine gute Feldreduktion oberhalb der Anordnung wird erreicht, wenn der in mathematisch positiver Richtung rotierende Zeiger des Magnetfeldes des linken Kabelbündels dem Zeiger des rechten Kabelbündels um  $120^\circ$  bzw.  $150^\circ$  vorherläuft.

Die Feldreduktion ist in beiden Fällen allerdings richtungsabhängig. Dieser Umstand wird im Abschnitt 4.1.4 eingehend behandelt. Neben diesen richtungsabhängigen Anordnungen reduziert eine Anordnung mit einer Drehung der Zeiger um  $180^\circ$  die Flußdichte in alle Richtungen. Die Verlegung der Kabelbündel ist aber nur bei der eben verlegten Anordnung unproblematisch. Durch Drehung des rechten Kabelbündels gegenüber dem linken Kabelbündel um  $120^\circ$  in mathematisch positiver Richtung oder

einfach durch einen entsprechenden Anschluß der Phasen kann daher ausschließlich eine Zeigerkonstellation mit einer Drehung von  $120^\circ$  erfolgen.

In den beiden anderen Fällen müßten die Kabel durch Stützkörper oder Anhäufung von Erddreich in Position gehalten werden.<sup>74</sup> In der weiteren Betrachtung sollen aufgrund dieser Problematik nur noch die Anordnungen mit Drehungen der Zeiger von  $120^\circ$  und  $180^\circ$  behandelt werden.

Die gerade aufliegende Anordnung, weiterhin als *gerade* Anordnung bezeichnet, stellt die typische Verlegepraxis für Kabel dar. Die Anordnung mit einer Zeigerdifferenz von  $180^\circ$  wird im folgenden *gestützte* Anordnung genannt.

Für die Feldreduktion oberhalb der Anordnung durch die Phasenverschiebung der benachbarten Systeme ist die Stromrichtung irrelevant, wenn alle Systemströme die gleiche Richtung aufweisen. Eine Änderung der Phasenabfolge aller Systeme von RST (**R**) in RTS (**R'**) dagegen, würde die Phasenverschiebung der rechtsseitigen Systeme um  $120^\circ$  eine Erhöhung des magnetischen Feldes oberhalb und eine Reduktion des Feldes unterhalb bedeuten.

#### 4.1.4 Das zeitpunktbezogene Magnetfeld von zwei Systemen

Nach der Wahl der geometrischen Anordnung sollen die Phasenordnungen untersucht werden.

Wird das Magnetfeld der *geraden* Anordnung aus *Abb. 4.4* zu verschiedenen Zeitpunkten während einer Periodendauer betrachtet, ist eine Reduktion der Flußdichte oberhalb der Anordnungen und eine Erhöhung der Flußdichte unterhalb, wie in *Abb. 4.5* links, erkennbar. Sie besteht zu jedem Zeitpunkt, so daß auch die Effektivwerte der Flußdichte diese Feldausbreitung aufweisen. Eine Anordnung mit einer Zeigerdifferenz von  $240^\circ$  bedeutet eine Feldreduktion unter und eine Felderhöhung über den Kabeln. Aufgrund des Feldbildes wird diese richtungsabhängige Form der Feldreduktion als *Erdbußeffekt* bezeichnet.

Entspricht die Zeigerdifferenz  $0^\circ$ , womit die Zeiger die gleiche Ausrichtung besitzen, entsteht ein symmetrisches Feld zur Ebene der verlegten Kabel mit schwach abfallender Flußdichte. Die entstehenden Flußdichtevektoren zeigt *Abb. 4.5* rechts.

---

<sup>74</sup> Siehe *Abb. 4.4*.

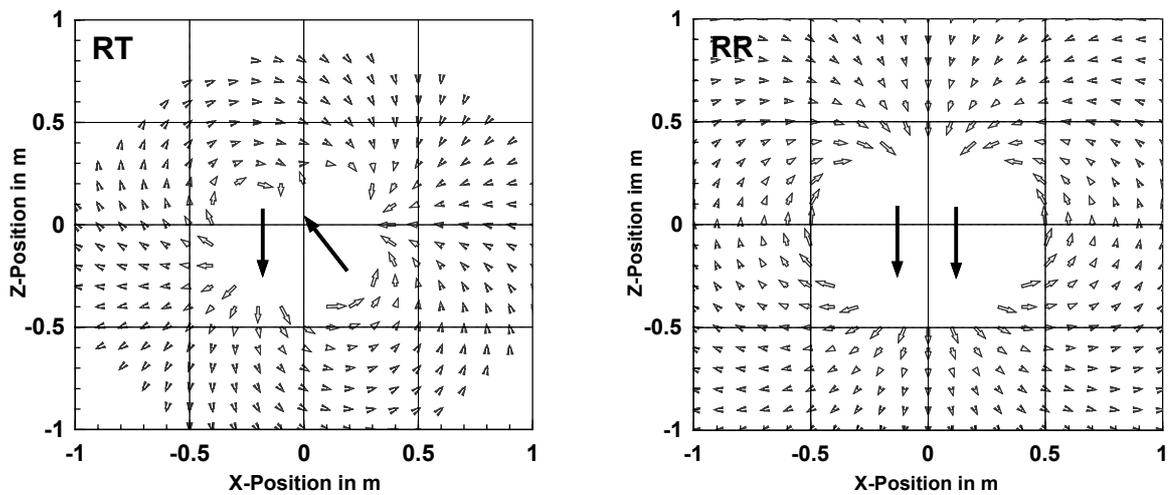


Abbildung 4.5: Vektoren der magnetischen Flußdichte an Anordnungen mit unterschiedlicher Phasenfolge in gerader Anordnung zum Zeitpunkt des Nulldurchgangs des Stromes der Phase R. Die Beträge der Vektoren sind von  $5 \mu\text{T}$  bis  $50 \mu\text{T}$  durch die Vektorlänge gegeben. Die Magnetfeldzeiger sind eingetragen. Kabeltyp N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV, Parameter  $I = 526 \text{ A}$

In diesen ersten Anordnungen sind die Phasenabfolgen der Kabel in den zwei Bündeln gleich. Zwei Kabelbündel mit entgegengesetzter Phasenabfolge erzeugen zu verschiedenen Zeitpunkten eine Feldreduktion oberhalb, aber auch unterhalb der Verlegeebene. Der Effektivwert der Flußdichte zeigt daher eine gleichmäßige Feldausbreitung nach oben und unten mit durchschnittlicher Feldreduktion. Die Zeiger der Magnetfelder der Kabelbündel rotieren in entgegengesetzter Richtung, wodurch die Zeigerdifferenzen zeitabhängig verändert werden und diese unterschiedliche Feldausbreitung bewirkt wird.

Abb. 4.6 verdeutlicht die beschriebenen Effekte. Sie zeigt die Feldeffektivwerte bei gleicher und entgegengesetzter Phasenabfolge, also bereits das Ergebnis der zeitabhängigen Feldreduktion.

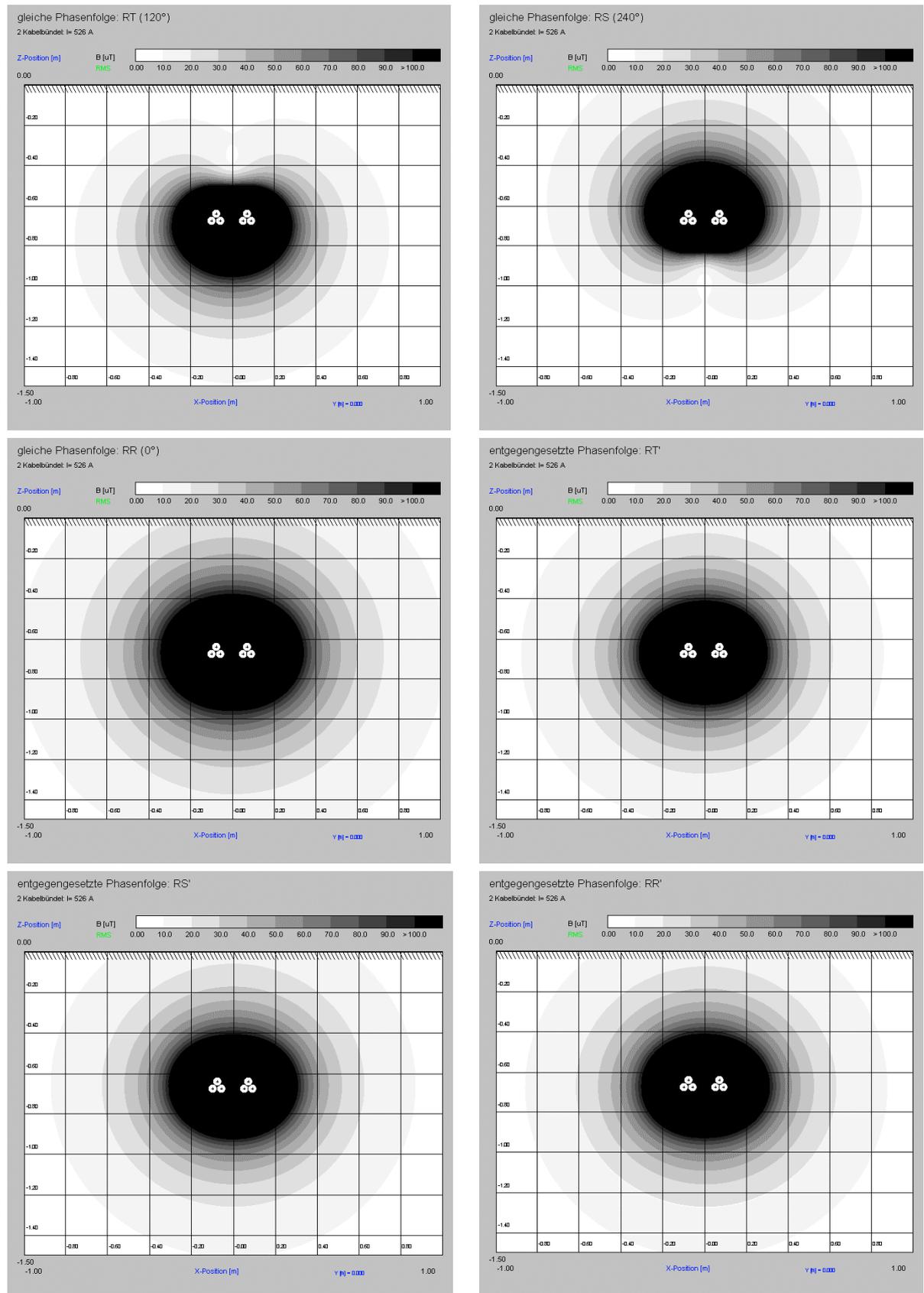
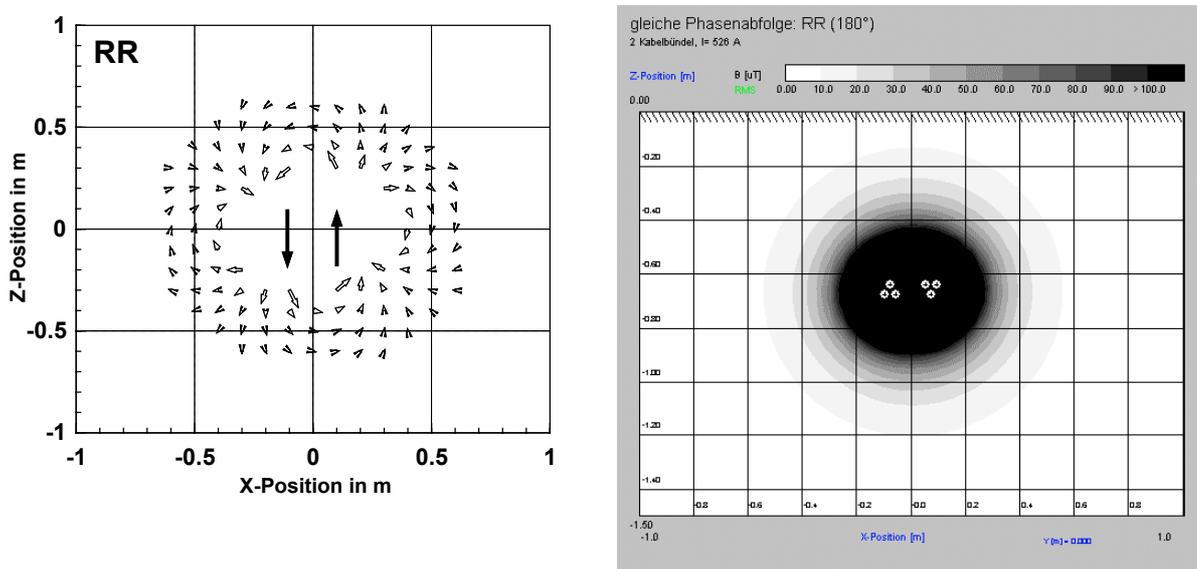


Abbildung 4.6: Magnetische Flußdichte an zwei Kabelbündeln in gerader Anordnung mit gleicher bzw. entgegengesetzter Phasenabfolge. Die Kabelbündel sind durch Notation der Phasenbelegung eindeutig definiert. Kabeltyp N2XS(F)2Y Ix240 6/10 kV, Parameter:  $I = 526$  A

Die Magnetfelder der Einzelleiter in der *gestützten* Anordnung reduzieren sich aufgrund der entgegengesetzten Zeigerausrichtung zu jedem Zeitpunkt. Der Effektivwert der Flußdichte, dargestellt in *Abb. 4.7* rechts, zeigt daher eine gute Feldreduktion in allen Richtungen.<sup>75</sup> Trotz der insgesamt guten Feldreduktion der *gestützten* Anordnung ist das Magnetfeld in der relevanten Berechnungshöhe bei *gerader* Verlegung mit der Nutzung des *Erdbußeffektes* nach unten geringer.



*Abbildung 4.7:* Vektoren der magnetischen Flußdichte an zwei Kabelbündeln in gestützter Anordnung zum Zeitpunkt des Nulldurchgangs des Stromes der Phase R. (links)  
Magnetische Flußdichte an zwei Kabelbündeln in gestützter Anordnung. (rechts)  
Kabeltyp N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV, Parameter:  $I = 526 \text{ A}$

Die Effekte durch die Richtung der *Magnetfeldzeiger* bei  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  und  $180^\circ$  erklären die Vektorbilder der *Abb. 4.5* und *4.7*. Bei gleicher Ausrichtung addieren sich die gleichgerichteten Vektoren der magnetischen Flußdichte nahezu. Die resultierenden Vektoren nehmen hohe Werte an. Das Magnetfeld entspricht annähernd dem Feld eines einzigen magnetischen Dipols. Ist die Ausrichtung der Magnetfelder entgegengesetzt, wie in der *gestützten* Anordnung, kompensieren sich die entgegengesetzten Vektoren deutlich besser. Im Ergebnis verringert sich die Flußdichte in der Berechnungshöhe erheblich. Der Reduktionseffekt durch unterschiedliche Richtung der Vektoren besteht auch bei Zeigerdifferenzen von  $120^\circ$ . Er ist oberhalb der Kabelbündel jedoch wesentlich stärker ausgeprägt als unterhalb.

<sup>75</sup> Die Phasenanzordnung ist in *Abb. 4.4* unten dargestellt.

## 4.2 Phasenoptimierung der Einebenenordnung

### 4.2.1 Phasenoptimierung auf die geringste Flußdichte

#### 4.2.1.1 Phasenoptimierung der *geraden* Anordnung

Die Phasenoptimierung kann mit WinField für maximal 20 Systeme erfolgen.<sup>76</sup> Die Anordnung der Kabel entspricht den Annahmen des Abschnitts 4.1.1, d.h. es liegt eine *gerade* Verlegeweise zugrunde. Da bei der festen geometrischen Anordnung ausschließlich andere Phasenbelegungen gewählt werden können, sind nur Phasenverschiebungen von jeweils  $120^\circ$ , durch veränderten Anschluß der Phasen möglich. Daneben sollen symmetrische Systeme mit identischer Stromstärke vorausgesetzt werden.

Optimiert wird die magnetische Flußdichte in einer Höhe von 20 cm über dem Erdboden mit 101 Berechnungspunkten für bis zu acht Drehstromsysteme, mit 51 Berechnungspunkten für bis zu 16 Systeme und mit 15 Berechnungspunkten ab 16 Systeme. Die Reduzierung der Berechnungspunkte wurde zur Verringerung der Berechnungszeit notwendig.

Das erste System, links in der Anordnung, wird festgelegt, mit der Phasenabfolge entsprechend der Notation **R**. Sollte das Startsystem eine andere Phasenabfolge besitzen, ist es möglich, durch Umstellen aller anderen Systeme die optimale Anordnung zu bestimmen. An dieser Stelle sei noch erwähnt, daß die Vertauschung zweier Phasen in allen Systemen zwar unterschiedliche Feldstärken zu gleichen Zeitpunkten zur Folge hat, über die gesamte Periodendauer der Stromschwingung aber ein identisches Feld entsteht. D.h. die Effektivwerte der magnetischen Flußdichte unterscheiden sich in diesen Fällen nicht voneinander.

Bei mehr als neun Systemen wurde die Vertauschung der Phasen nur noch für Phasenabfolgen im Uhrzeigersinn zugelassen, um den Berechnungsaufwand zu verringern. Schon der Abschnitt 4.1.4 zeigt, daß die Feldreduktion bei entgegengesetzter Phasenabfolge keine ausreichende Reduktion des Magnetfeldes erreicht, um die beste Phasenordnung zu stellen. Das gilt im allgemeinen auch für Anordnungen mit mehr Systemen.

Die Ergebnisse der Optimierung für die geringste magnetische Flußdichte zeigen die *Abb. 4.8 bis 4.10* im Anhang. Die ermittelten optimalen Anordnungen sind für eine Berechnungshöhe von 20 cm über dem Erdboden gegeben. Dies muß keinesfalls für

---

<sup>76</sup> Zur Phasenoptimierung mit WinField vgl. Abschnitt 2.3.3.1

---

andere Berechnungshöhen zutreffen. Die angegebenen Phasenfolgen der Systeme und die Feldbilder lassen folgende Rückschlüsse zu:

- Eine gute Feldreduktion, aufgrund des *Erdnußeffektes*, ermöglichen Anordnungen von drei Systemen. Die Phasenfolge der rechtsseitigen Systeme muß dabei um jeweils  $120^\circ$  phasenverschoben sein. In der Notation bedeutet dies z.B. **RTS**. Die benachbarten Magnetfelder kompensieren sich in der nahen Umgebung bei dieser Phasenfolge am besten.
- Auch Anordnungen mit vier Systemen erreichen eine gute Feldreduktion. Die Phasenlagen in der Mitte sind dann identisch, z.B. **RTTS**.
- Optimale Anordnungen lassen sich im allgemeinen aus Vielfachen dieser beiden Grundanordnungen bilden. Eine hohe Reduktion wird erreicht, wenn benachbarte Grundanordnungen wiederum eine Phasenverschiebung um  $120^\circ$  erfahren, z.B. **RTS TSR**.
- Die Regeln der Verschiebung um  $120^\circ$  oder der doppelten Grundanordnungen<sup>77</sup> in der Mitte finden sich auch bei Konstellationen, die aus Gruppen von Grundanordnungen zusammengesetzt sind, wieder.
- Die Phasenabfolgen in gleicher Richtung in allen Systemen, z.B. in Richtung des Uhrzeigersinns, erzeugen eine bessere Feldreduktion. Nur bei der Anordnung mit sieben Systemen besteht eine Ausnahme. Das Ergebnis der Richtungsumkehr ist aber eine Felderhöhung oberhalb der Systeme mit umgekehrter Phasenabfolge.
- Allgemein sind Anordnungen mit einer hohen Systemanzahl für eine Feldreduktion durch die Optimierung der Phasen besser geeignet als Anordnungen mit wenigen Systemen.

Die Verschiebung der Phasen um  $120^\circ$  reduziert nicht nur die Flußdichte an einzelnen Kabelbündeln, sondern auch an Grundanordnungen und Gruppen aus Grundanordnungen. Dieser Umstand wird am Beispiel von Anordnungen aus Grundanordnungen mit drei Systemen erläutert.

Eine Fortschreibung der Phasenfolge der Dreiersysteme ohne die Phasenverschiebung der Grundanordnungen um  $120^\circ$ , auch als *gute* Anordnung bezeichnet (**RTS RTS RTS...**), führt zu einer schlechten Feldreduktion am Rand der Anordnung.<sup>78</sup>

---

<sup>77</sup> Vgl. Phasenfolge der Anordnung mit 16 Systemen in *Abb. 4.10* im Anhang.

<sup>78</sup> Vgl. *Abb. 4.11*.

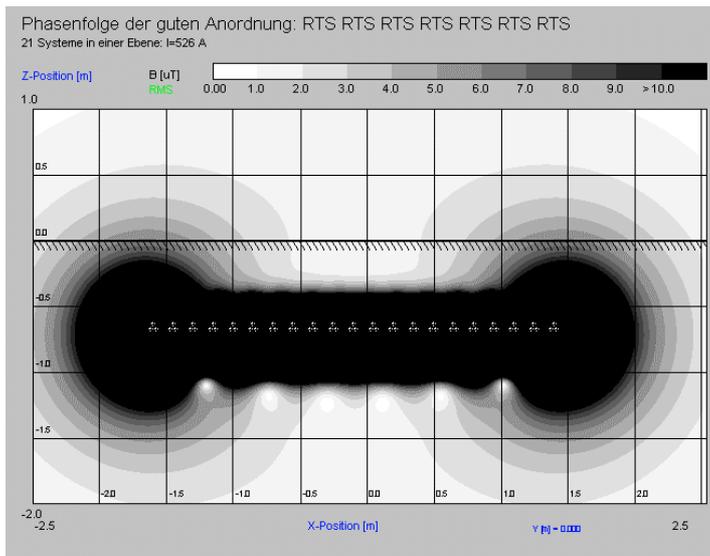


Abbildung 4.11:

Magnetische Flußdichte einer „guten“ Anordnung mit 21 Systemen.

Parameter:  $I = 526 \text{ A}$ .

Die identisch gerichteten Feldvektoren in Fernbereich aller Dreieranordnungen bewirken infolge der Superpositionierung am Rand der Gesamtanordnung hohe Flußdichtewerte. Während sich in Raumpunkten im Bereich der Mitte der Anordnung sowohl von rechts- als auch linksseitigen Kabelbündeln erzeugte unterschiedlich gerichtete Feldanteile kompensieren, fehlen an den Rändern der Anordnungen einseitig diese Anteile.

Werden die Phasen der Grundanordnungen um  $120^\circ$  verschoben und die Phasen von Gruppen aus drei Grundanordnungen wiederum um  $120^\circ$  gedreht, sind die Vektoren des Magnetfeldes im Fernbereich der jeweiligen Grundanordnungen nicht mehr identisch gerichtet und reduzieren sich somit.<sup>79</sup> Die Verschiebung um  $120^\circ$  sorgt wegen des *Erdnußeffektes* für eine Verringerung der resultierenden Flußdichte oberhalb der Anordnung.

Die Randfelder entstehen nicht nur bei *gerader* Verlegung. Regelmäßige Phasenfolgen führen stets zu den beschriebenen Effekten. Mit steigender Gruppengröße fällt die Randfeldverringerng durch eine Verdrehung der gesamten Gruppe kleiner aus, da die Feldanteile in größeren Entfernungen geringer sind und ihre additive Wirkung sinkt.

Aus den vorhergehenden Überlegungen können Anordnungen erstellt werden. Die Kombination von Grundanordnungen aus drei und vier Systemen erweist sich aber nur dann als sinnvoll, wenn sie aus drei Dreieranordnungen und mindestens zwei Viereranordnungen bestehen.<sup>80</sup> Anderenfalls ist der Unterschied zur *guten* Anordnung gering. Die erstellten Phasenarrangements werden mit den z.T. schwer nachvollziehbaren optimalen Phasenarrangements in *Tab. 4.1* verglichen. Hierbei entsprechen die optimalen Anordnungen mit weniger als 7 Systemen den vorher beschriebenen Regeln.

<sup>79</sup> Vgl. die Anordnung mit 18 und 16 Systemen in *Abb. 4.10* im Anhang.

System- anzahl	optimale Anordnung		erstellte Anordnung		relative Erhöhung
	Phasenfolge	$B_{\max}$ in $\mu\text{T}$	Phasenfolge	$B_{\max}$ in $\mu\text{T}$	
9	RTS TRS TSR	1,43	RTS TSR SRT	2,25	57,3 %
12	RTS TSR SRT RTS	1,79	RTS TSR SRT RTS	1,79	0%
15	RTTS SRT S RTS SRRT	1,55	RTS TSR SRT RTS TSR	1,9	22,6 %
18	RTS TRS TSR/ TSR STR SRT	1,31	RTS TSR SRT/ TSR SRT RTS	3,72	183,9 %
8	RTTS TSSR	1,26	RTTS TSSR	1,26	0%
16	RTTS TSSR/ TSSR SRRT	0,83	RTTS TSSR/ TSSR SRRT	0,83	0%
20	RTTS TSSR SRRT TRS TTSSR	1,07	RTTS TSSR SRRT/ RTTS TSSR	1,25	16,8 %
17	RTTS TSSR/ SRT RST RTS	1,63	RTTS TSSR/ SRT RTS TSR	3,04	86,5 %

Tabelle 4.1: Vergleich der optimalen Anordnungen mit Anordnungen, die aufgrund der Überlegungen zur Phasenoptimierung erstellt wurden.

Insgesamt besitzen alle regelmäßigen Anordnungen Probleme mit der Feldreduktion am Rand der Anordnung.<sup>81</sup> Einige optimale Anordnungen bestehen aus Vielfachen der Grundanordnungen aus drei oder vier Systemen mit differenzierten Phasenfolgen in der Mitte, die eine bessere Reduktion des Feldes an den Rändern bewirken. Bemerkenswert ist insbesondere die Anordnung mit neun Systemen. Durch die Dreieranordnung des 4., 5. und 6. Systems mit einer Phasenverschiebung um jeweils  $240^\circ$  ist eine hohe Flußdichtereduktion am Rand erreichbar, wogegen die Flußdichte in der Mitte steigt. Wird dieser Umstand bei der Erstellung von Anordnungen berücksichtigt, entsprechen die Anordnungen mit 9, 17 und 18 Systemen den optimalen Phasenarrangements.

Für Anordnungen mit 7, 10, 11, 13, 14 und 19 Systemen lassen sich in dieser Weise keine begründeten Vorschläge angeben. Kombinationen von Dreier- und Viererarrangements sind möglich. Sie bestehen aber nicht aus mindestens drei Dreier- oder zwei Viererarrangements und erreichen keine sehr gute Feldreduktion. Die Werte liegen lediglich im Bereich der *guten* Anordnungen.

#### 4.2.1.2 Phasenoptimierung der *gestützten* Anordnungen

Im Abschnitt 4.1.3 wurde bereits eine Anordnung aus zwei Kabelbündeln beschrieben, deren Magnetfeldzeiger einander entgegengesetzt sind. Für die gute Feldreduktion muß aber ein erhöhter Aufwand bei der Kabelverlegung in Kauf genommen werden. Eine gute Kompensation erreichen dabei nur Bündelpaare. Daher können nur Anordnungen mit einer geradzahlig Systemanzahl sinnvoll angeordnet werden.

Zudem tritt bei einer vielfachen Verlegung dieser Anordnungen (**RR RR RR...**) ein ähnliches Randfeldproblem, wie bei der *guten* Anordnung (**RTS RTS RTS...**), auf. Auch

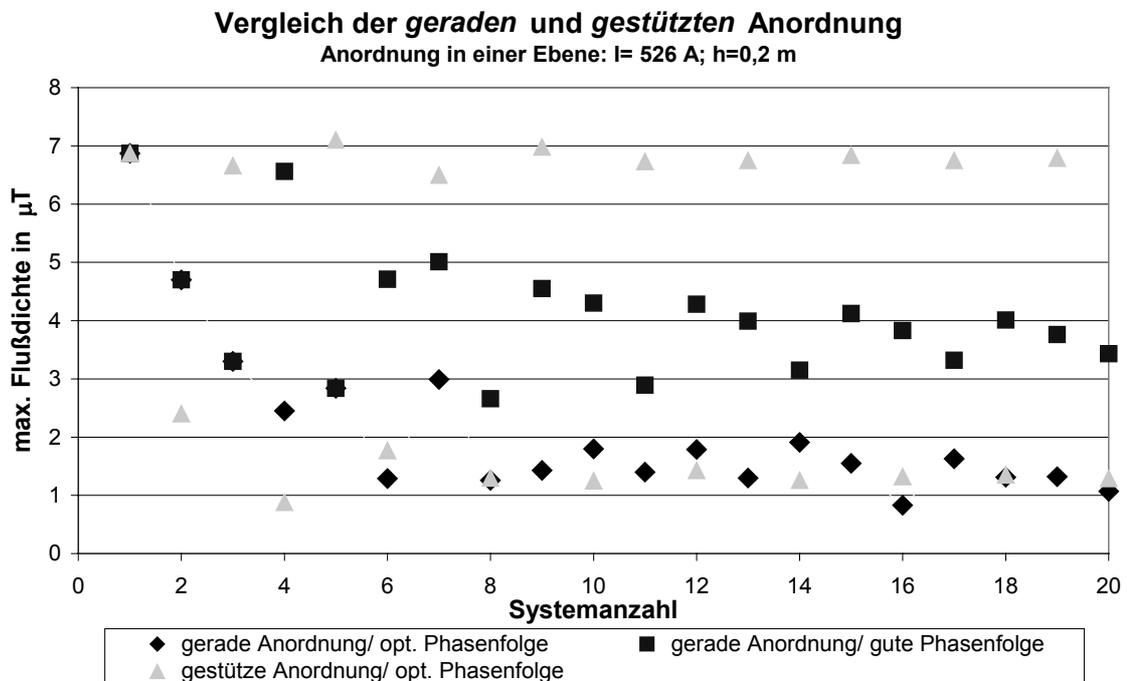
<sup>80</sup> Eine Anordnung mit 7 Systemen kann nur schlecht nachgebildet werden.

<sup>81</sup> Vgl. die beste Anordnung mit 12 Systemen in *Abb. 4.9*.

hier führt die Verschiebung der Phasen benachbarter Grundanordnungen aus zwei Systemen um jeweils  $120^\circ$  zum *Erdbußeffekt* und zur guten Reduktion dieser Randfelder (z.B. **RR TT SS...**).

#### 4.2.1.3 Vergleich der Anordnungen mit *guter* Feldreduktion

In den vorherigen Abschnitten wurden Phasenoptimierungen von *geraden* und *gestützten* Anordnungen untersucht. *Abb. 4.12* stellt die Ergebnisse zusammen und vergleicht diese optimierten Phasenanordnungen mit der *guten* Phasenanordnung bei *gerader* Verlegung.



*Abbildung 4.12:* Vergleich der *geraden* und *gestützten* Anordnung mit optimaler Phasenfolge und der *geraden* Anordnung mit *guter* Phasenfolge.

Die maximale magnetische Flußdichte der optimalen und *guten* Phasenanordnungen bei *gerader* Verlegung weichen je nach Anzahl der Systeme voneinander ab. Eine Reduktion von mehr als 50 % ermöglicht die optimale Phasenfolge. Die maximale magnetische Flußdichte der *gestützten* Anordnungen erreicht nur bei paarweiser Verlegung der Systeme niedrige Werte. Allerdings sind Verbesserungen bei höherer Systemanzahl gegenüber den *geraden* Anordnungen gering. Nur für Anordnungen mit zwei und vier Systemen dürfte der hohe Verlegungsaufwand eine *gestützte* Verlegung gerechtfertigt sein. Aber auch die hohe Feldreduktion unterhalb der Anordnung könnte in besonderen Anwendungsfällen, z.B. in Schaltanlagen, für diese Verlegeart sprechen.

---

Vor allem bei *gestützter* Verlegung muß die Auswirkung von Rotationsabweichungen der Kabelbündel betrachtet werden. Die Rotationsabweichung von  $15^\circ$  eines Kabelbündels am Rand der Anordnung bewirkt eine stärkere Erhöhung der magnetischen Flußdichte als dies in der Mitte der Anordnung der Fall ist. In Beispielrechnungen reichten die Flußdichteerhöhungen von 50 % bis 100 %. An *geraden* Anordnungen erreichen diese Flußdichteerhöhungen etwas niedrigere Werte. Es ist aber anzunehmen, daß die Rotationsabweichungen bei *gerader* Verlegung schon allein deshalb geringer sein werden, weil die Anordnung in sich stabil ist.

Die Kombination von Trassen mit *geraden* und *gestützten* Anordnungen sollte nach folgenden Gesichtspunkten erfolgen:

- Die Kabelbündel in *geraden* Kabelanordnungen werden zu Dreier- und Viereranordnungen zusammengefaßt. Die Systeme in *gestützter* Anordnung sollten dagegen paarweise angeordnet werden.
- Eine gute Feldreduktion wird durch Verschiebung der Phasen der rechtsseitigen Systeme um  $120^\circ$  innerhalb der Grundanordnungen und zwischen den Grundanordnungen erreicht.
- *Gestützte* und *gerade* Anordnungen werden schließlich zusammen in der Kabeltrasse verlegt. Die Verschiebung der Phasen der beiden Gesamtanordnungen zueinander hängt vor allem von der Anzahl der Systeme je Gesamtanordnung ab. Eine allgemeingültige Regel zur Phasenfolge kann nicht angegeben werden.

Die Nachbildung von Kabeltrassen mit unterschiedlicher Systemanzahl in der Verlegung in einer Ebene durch gemischte *gestützte* und *gerade* Systemanordnungen erreicht nicht die Feldreduktion reiner *gestützter* oder *gerader* Anordnungen. Der erhöhte Aufwand der Verlegung ist nicht gerechtfertigt.

#### 4.2.2 Phasenoptimierung auf die größte Flußdichte

Geringe Kompensationseffekte erzielen Phasenordnungen mit gleichbleibender Phasenfolge und somit identisch gerichteten *Magnetfeldzeigern*. Folglich besitzen die Anordnungen mit identischer Phasenfolge die größten Flußdichtewerte.

In näheren Bereich oberhalb des Kabelgrabens kann die Felderhöhung noch verstärkt werden. Dazu müssen die Phasen der Gruppen von Kabelbündeln mit identischer Phasenfolge gegeneinander um  $-120^\circ$  bzw.  $240^\circ$  phasenverschoben werden, wodurch der *Erdnußeffekt* das Feld nach oben noch verstärkt. Die magnetische Flußdichte nimmt bei dieser Anordnung jedoch mit zunehmendem Abstand wieder stärker ab. Im Fernbereich oberhalb des Kabelgrabens erzeugt eine Anordnung mit gleicher Phasenfolge das größte

Magnetfeld. *Abb. 4.13* und *4.14* stellen die Felder bei Anwendung dieser Prinzipien für Anordnungen mit 16 Systemen beispielhaft gegenüber.

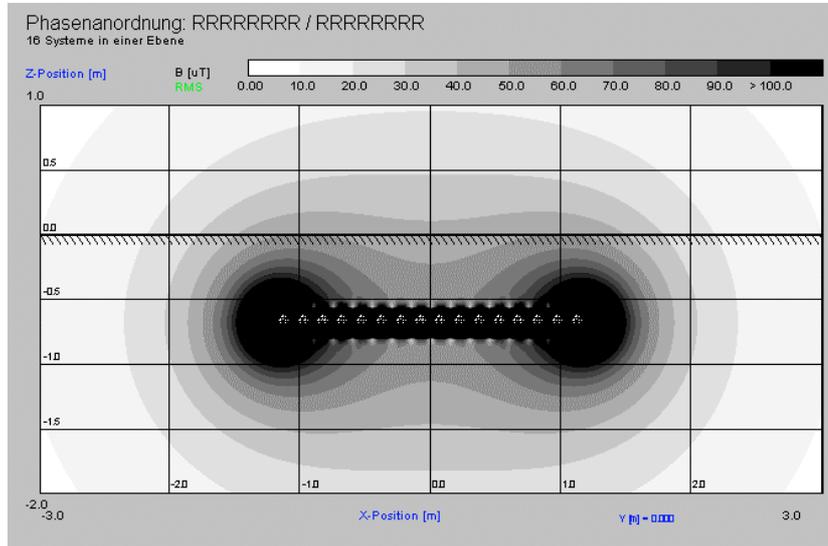


Abbildung 4.13:

Magnetische Flußdichte an einer geraden Anordnung von 16 Systemen mit gleicher Phasenfolge (auch als schlechte Anordnung bezeichnet).

Parameter:  $I = 526 \text{ A}$

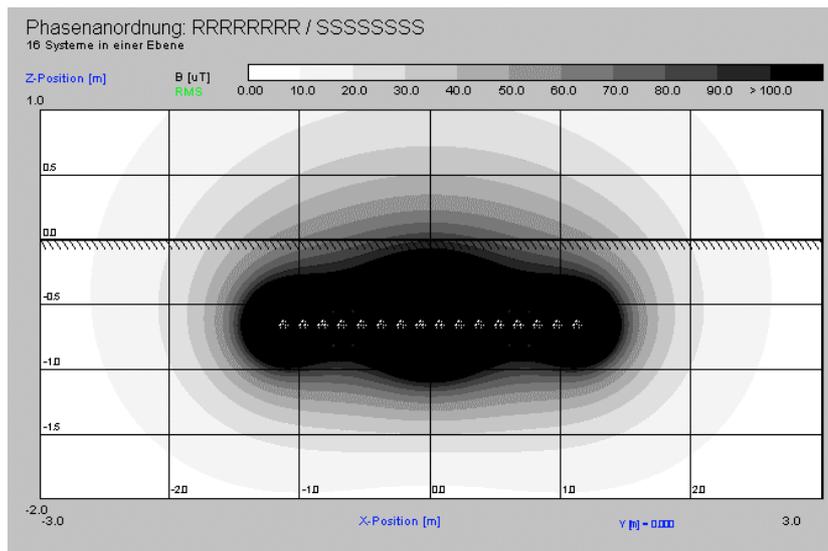


Abbildung 4.14:

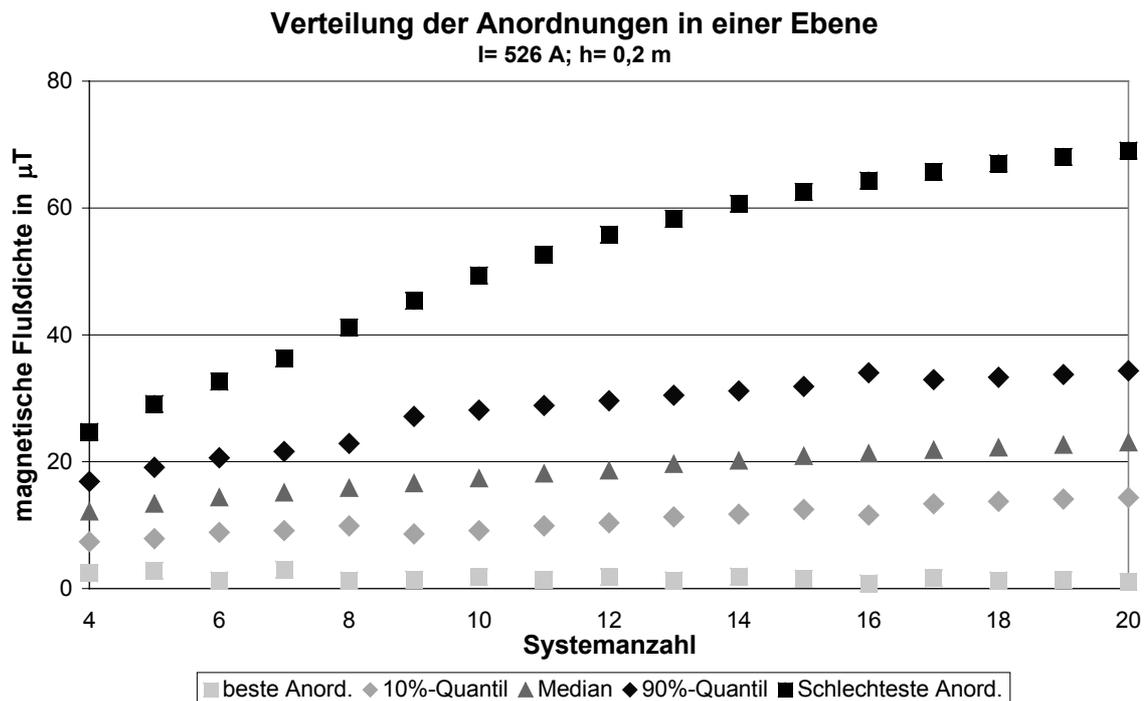
Magnetische Flußdichte an einer geraden Anordnung von 16 Systemen mit stückweise gleicher Phasenfolge (auch als schlechteste Anordnung bezeichnet).

Parameter:  $I = 526 \text{ A}$

Bei Anordnungen mit bis zu sechs Systemen garantiert die gleichbleibende Phasenfolge die größten Feldstärken. Diese Anordnungen mit gleichbleibender Phasenfolge werden als *schlechte* Phasen-anordnungen bezeichnet. Die Verschiebung der Phasen der rechts von der Mitte liegenden Systeme um  $240^\circ$  erhöht die Flußdichte jedoch im stärkeren Maße. Bis zur Verlegung von 24 Systemen in einer Ebene erzeugen diese *schlechtesten* Phasen-anordnungen die höchsten Feldstärken. Dann führt eine weitere Aufteilung in drei Gruppen mit neun, sieben und neun Systemen und einer Verschiebung um jeweils  $240^\circ$  zu höheren Feldstärken.

### 4.2.3 Reduktionseffekte durch Beachtung der Phasenfolge

Die Berücksichtigung der Phasenfolgen ermöglicht eine große Reduktion der magnetischen Flußdichte an Kabeltrassen. *Abb. 4.15* faßt die Ergebnisse der Berechnung für Einebenenarrangements zusammen.



*Abbildung 4.15: Vergleich der Anordnung in einer Ebene mit optimaler Feldreduktion und schlechter Feldreduktion. Zusätzlich sind Verteilungsparameter angegeben*

Die *Abb. 4.15* stellt die maximale magnetische Flußdichte verschiedener *gerader* Anordnungstypen bei steigender Systemanzahl dar. Die besten Anordnungen besitzen die Phasenfolgen entsprechend den *Abb. 4.8* bis *4.10* im Anhang.

Die *Abb. 4.15* bildet weiterhin die Anordnungen mit geringer Feldreduktion ab. Die *schlechteste* Anordnung bis sechs Systeme beruht auf Phasenfolgen mit identischer Ausrichtung. Darüber hinaus erreicht die Verschiebung der Phasen mehrerer Gruppen von Systemen höhere Werte der magnetischen Flußdichte. Daher steigt die maximale Flußdichte zwischen einer Anzahl von sechs und sieben Systeme stärker an.

Die dem Diagramm zugrundeliegenden Berechnungsdaten in *Tab. 4.2* des Anhangs zeigen zusätzlich die relative Felderhöhung der *guten*, *schlechten* und *schlechtesten* Anordnung gegenüber Werten bei optimaler Feldreduktion. Während die Flußdichte guten Anordnung um 200 % ansteigt, erhöht sich die Flußdichte der schlechten Anordnung um bis zu 6000 %.

---

## 4.3 Optimierung der Zwei- und Dreiebenenanordnung

### 4.3.1 Phasenoptimierung auf die geringste Flußdichte

#### 4.3.1.1 Phasenoptimierung der *geraden* Anordnung

Die Phasenoptimierung in zwei bzw. drei Ebenen erfolgt ausschließlich für symmetrische Anordnungen. Die geometrische Ausrichtung entspricht wiederum der Anordnung A der Standardtrassen der Bewag. Die Berechnungsparameter und Annahmen aus Abschnitt 4.1.1 und 4.2.1.1 finden Anwendung.

Die Feldbilder der Zweiebenenanordnungen der Phasenoptimierung zeigen die *Abb. 4.16* und *4.17* im Anhang. Generell lassen sich nur geringere Aussagen zu optimalen Phasenordnungen gegenüber der Verlegung in einer Ebene angeben. Auffallend ist die gute allseitige Feldreduktion der Anordnung mit sechs Systemen<sup>82</sup> mit der Phasenfolge:

**R T S**  
**S T R.**

Diese symmetrische Anordnung nutzt die entgegengesetzte Ausrichtung der Feldvektoren ähnlich der *gestützten* Anordnung. *Abb. 4.18* zeigt die entgegengesetzte Feldausbreitung und das Ergebnis der Zusammenführung der beiden Dreieranordnungen. Diese gute Feldausbreitung entsteht aber erst bei dieser Grundanordnung mit sechs Systemen.

---

<sup>82</sup> Vgl. Die Anordnung mit sechs Systemen in *Abb. 4.16* im Anhang.

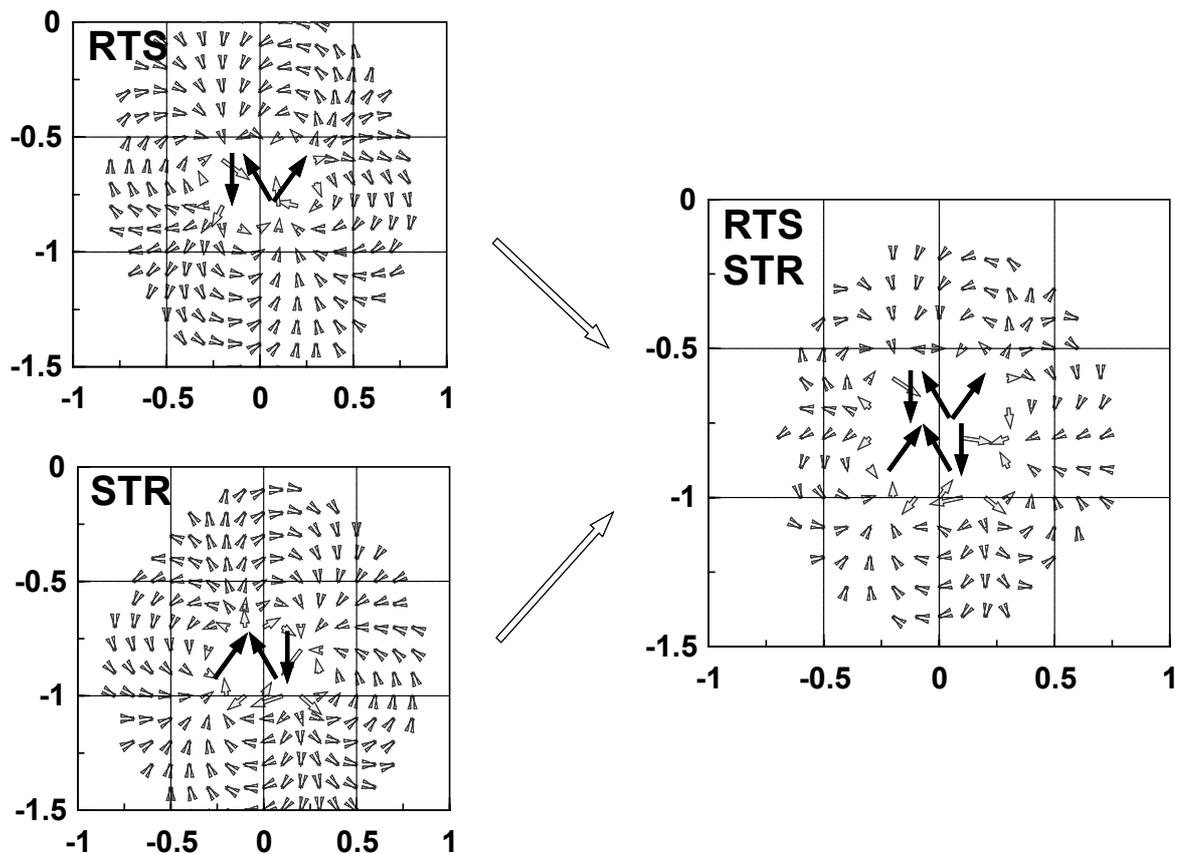


Abbildung 4.18: Vektoren der magnetischen Flußdichte der optimierten Anordnung für sechs Systeme in zwei Ebenen zum Zeitpunkt des Nulldurchgangs des Stromes der Phase R. Die Beträge der Vektoren sind von  $5 \mu\text{T}$  bis  $50 \mu\text{T}$  durch die Vektorlänge gegeben. Die Magnetfeldzeiger der Systeme sind eingetragen. Parameter Kabeltyp N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV,  $I = 526 \text{ A}$

Aus der Grundanordnung sind Anordnungen mit Vielfachen von sechs Systemen erstellbar. Mit der Verschiebung der Phasen der rechtsseitigen Grundanordnung kann eine Randfelderhöhung vermieden werden. Zwar ergibt die Phasenoptimierung für 12 bzw. 18 Systeme nicht diese vorgeschlagenen Anordnungen, die Flußdichte ist aber auch nur unwesentlich erhöht. Die optimalen Ergebnisse der anderen Anordnungen können nicht hinreichend gedeutet werden.

In Abb. 4.19 im Anhang sind die Feldbilder der Phasenoptimierung für Dreiebenenanordnungen dargestellt. Wiederum ergibt eine Anordnung aus sechs Systemen eine gute Feldreduktion. Ihre Phasenanzordnung entspricht der Phasenfolge der gedrehten guten Grundanordnung der Zweiebenenverlegung mit der Phasenfolge:

R S  
T T  
S R.

---

Somit lassen sich aus dieser Grundanordnung bei Phasenverschiebung um  $120^\circ$  der rechtsseitigen Grundanordnungen optimale Anordnungen erstellen. Die phasenoptimierte Anordnung mit 12 Systemen entspricht dieser Phasenfolge. Aber auch bei den Dreiebenenanordnungen sind die Phasenfolgen der Systeme anderer Anordnungen nicht interpretierbar. Anordnungen, die nicht aus vollständigen Grundanordnungen bestehen, wie die Anordnungen aus 9 oder 15 Systemen, können mit guter Feldreduktion aus diesen Grundanordnungen aufgebaut werden, indem ergänzend nur eine Halbseite der Grundanordnung verlegt wird.

Eine gute Feldreduktion versprechen daneben Anordnungen, die aus identischen feldreduzierenden Einebenen anordnungen aufgebaut sind. Das können sowohl Grundanordnungen aus drei bzw. vier Systemen, als auch deren abgeleitete Anordnungen sein. Wichtig ist die Phasenverschiebung der Anordnungen jeder Ebene zueinander.

#### 4.3.1.2 Phasenoptimierung der *gestützten* Anordnung

Die Verlegung *gestützter* Anordnungen erweist sich nur bei Anordnungen mit geradzahligem Systemanzahl als sinnvoll. Prädestiniert ist diese Verlegeweise daher für die Zweiebenenanordnung. Bei einer geradzahligem Systemanzahl in der Dreiebenenanordnung können durch die Grundanordnungen mit sechs Systemen bereits optimale Anordnungen gebildet werden. Durch eine *gestützte* Verlegung ist keine Feldreduktion erreichbar. Bei ungeradzahligem Systemanzahl fehlt einem System ein kompensierendes Partnersystem. Sie erscheint daher für die Feldreduktion ungeeignet.

Die erreichbare Feldreduktion der *gestützten* Anordnungen ist analog den Ergebnissen der Einebenen anordnungen nur eine Systemanzahl unterhalb von sechs Systemen der Feldreduktion der *geraden* Anordnungen überlegen.

#### 4.3.2 Phasenoptimierung auf die größte Flußdichte

Die Erkenntnisse der Einebenen anordnungen können auch auf die Mehrebenen anordnungen angewandt werden. Eine geringe Feldreduktion entsteht, wenn die *Magnetfeldzeiger* eine identische Ausrichtung besitzen. Die Flußdichte kann durch Phasenverschiebung der rechtsseitigen Systeme um  $240^\circ$  nach dem *Erdnußeffekt* erhöht werden. Entscheidend für die Systemanzahl mit identischer Ausrichtung ist die Anzahl der Kabelbündel in einer Ebene. Das bedeutet, daß eine weitere Erhöhung der Flußdichte, ebenso wie bei der Einebenen anordnung, ab sieben Systeme in jeder Ebene, somit ab 14

bzw. 21 Systeme in einer Anordnung, erreicht werden kann.<sup>83</sup> Die Systeme der anderen Ebenen müssen die gleiche Ausrichtung wie die darüberliegenden Systeme besitzen. Eine Phasenverschiebung zwischen den Ebenen würde die Flußdichte reduzieren.

Die Werte der maximalen magnetischen Flußdichte sind im Gegensatz zu den Einebenenanordnungen größer. Die Ursache ist die räumlich kompaktere Verlegung der Mehrebenenanordnungen.

### 4.3.3 Reduktionseffekte durch Beachtung der Phasenfolge

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Optimierung der Mehrebenenanordnungen bieten die *Abb. 4.20* und *4.21*. *Tab. 4.3* im Anhang zeigt die zugehörigen Werte. Der Vergleich zwischen den optimalen Anordnungen und den Anordnungen mit der schlechtesten Feldreduktion zeigt die erhebliche Spanne möglicher Flußdichten.

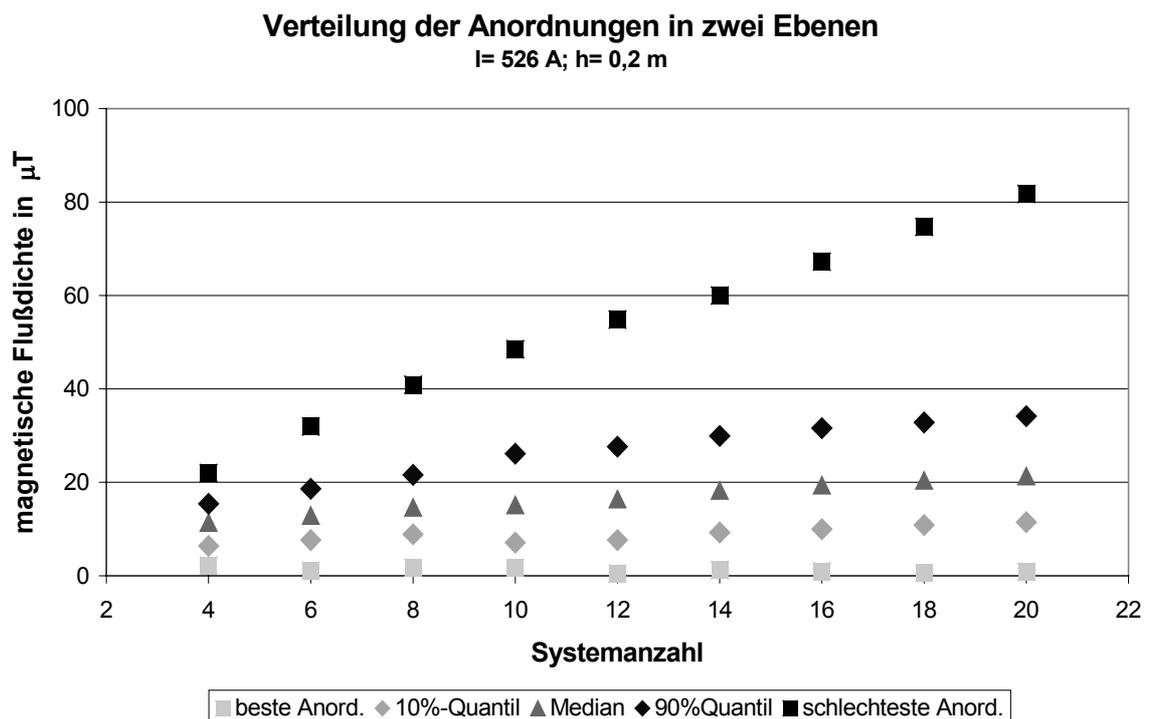


Abbildung 4.20: Vergleich der Anordnung in zwei Ebenen mit optimaler Feldreduktion und schlechter Feldreduktion. Zusätzlich sind Verteilungsparameter angegeben

<sup>83</sup> Der *Erdnußeffekt* wirkt erst ab 16 Systemen bzw. 21 Systemen in der Zwei- bzw. Dreiebenenanordnung. Dies ist am erhöhten Anstieg der Werte der Zweiebenenanordnung ab 16 Systeme in *Abb. 4.18* erkennbar.

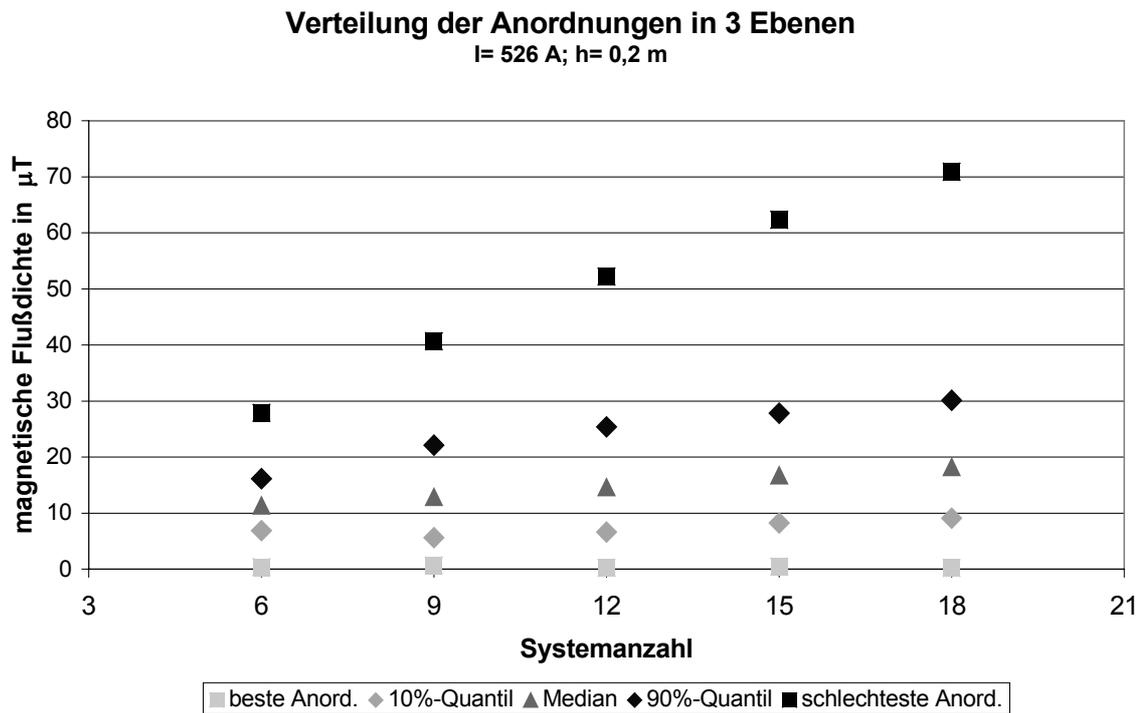


Abbildung 4.21: Vergleich der Anordnung in drei Ebenen mit optimaler Feldreduktion und schlechter Feldreduktion. Zusätzlich sind Verteilungsparameter angegeben

## 4.4 Statistische Betrachtungen

### 4.4.1 Vorbetrachtungen

Die Phasenoptimierung in WinField bietet die Möglichkeit die maximalen magnetischen Flußdichten aller Phasenkombinationen einer bestehenden Anordnung ausgeben zu lassen.<sup>84</sup> Mit Hilfe dieser Daten wird eine statistische Auswertung durchgeführt. Mit der Untersuchung soll festgestellt werden, ob die Flußdichten der Phasenkombinationen normalverteilt sind und damit Aussagen über mögliche Konfidenzintervalle möglich sind. Die Untersuchungen beschränken sich auf die *geraden* Anordnungen, denn sie stellen die meist verbreitetste Verlegeart dar. Weiterhin werden die Anordnungen ab vier Systeme betrachtet. Die wenigen möglichen Phasenarrangements bei Anordnungen mit weniger Systemen rechtfertigen keine Auswertung.

Der Umfang der möglichen Phasenkombinationen nimmt rasch extrem hohe Werte an. Daher müssen einige Einschränkungen getroffen werden.

Wenn das erste System festgelegt bleibt, können durch Vertauschung der Phasen eines weiteren Systems sechs verschiedene Kombinationen gebildet werden. Die Anzahl der

permutierbaren Anordnungen  $N$  steigt mit der Anzahl der Systeme  $n$  in einer Anordnung entsprechend:  $N = 6^{n-1}$ .

Ab ca. 300000 Berechnungswerten ist eine Bearbeitung der Daten mit Standardsoftware mit vertretbarem Aufwand nicht mehr möglich. Daher ist die Grundgesamtheit nur für maximal acht Systeme bestimmbar. Mit der Einschränkung nur Phasenabfolgen in mathematisch negativer Richtung zuzulassen,<sup>85</sup> kann die Anzahl der permutierbaren Anordnungen weiter eingeschränkt werden:  $N = 3^{n-1}$ .

Mit dieser Einschränkung kann die Grundgesamtheit für neun bis zwölf Systeme angegeben werden. Ab Anordnungen mit 13 Systemen können nur noch Stichproben Anhaltspunkte über mögliche Verteilungen geben. Für sie werden 10000 Werte ermittelt. Die ausgegebenen Werte für die maximale Flußdichte werden aus 101 Aufpunkten in einer Höhe von 20 cm über der Oberfläche des Erdbodens bestimmt.

#### 4.4.2 Test auf Normalverteilung

Jede ermittelte Grundgesamtheit der Phasenkombinationen von 4 bis 12 Systemen wird mit einem selbsterstellten Programm auf die mögliche Approximation durch die Normalverteilung getestet. Als Testverfahren dient der  $\chi^2$ -Anpassungstest.<sup>86</sup> Die zusammenfassende Aufstellung bietet *Tab. 4.4*.

Anordnung Systeme / Ebenen	Mittelwert $\mu$	Standard- abweichung $\sigma$	Anzahl der berechneten Werte	Klassen- anzahl N	Klassifikation im normierten Bereich	$\chi^2$ errechnet	$\chi^2$ zulässig
	in $\mu\text{T}$	in $\mu\text{T}$					$\alpha = 1\%;$ FG = N-1
4 / 1 Ebene	12.185	3.888	216	30	-2,2 bis 2,2	78	49.6
5 / 1 Ebene	13.442	4.295	1296	30	-2,2 bis 2,2	91	49.6
6 / 1 Ebene	14.518	4.621	7776	30	-2,2 bis 2,2	314	49.6
7 / 1 Ebene	15.457	4.851	46656	30	-2,2 bis 2,2	1258	49.6
8 / 1 Ebene	16.299	5.048	279936	30	-2,2 bis 2,2	6398	49.6
9 / 1 Ebene	17.486	7.223	6561	42	-2,6 bis 2,6	500	70.9
10 / 1 Ebene	18.238	7.396	19683	42	-2,6 bis 2,6	1529	70.9
11 / 1 Ebene	18.946	7.515	59049	42	-2,6 bis 2,6	3634	70.9
12 / 1 Ebene	19.584	7.621	177147	42	-2,6 bis 2,6	10498	70.9
4 / 2 Ebenen	10.931	3.412	216	30	-2,2 bis 2,2	65	49.6
6 / 2 Ebenen	13.234	4.308	7776	42	-2,6 bis 2,6	217	70.9
8 / 2 Ebenen	15.099	4.985	279936	42	-2,6 bis 2,6	5269	70.9
10 / 2 Ebenen	16.163	7.411	19683	42	-2,6 bis 2,6	1525	70.9
12 / 2 Ebenen	17.221	7.788	177147	42	-2,6 bis 2,6	13732	70.9
6 / 3 Ebenen	11.653	3.723	7776	42	-2,6 bis 2,6	222	70.9
9 / 3 Ebenen	13.583	6.348	6561	42	-2,6 bis 2,6	463	70.9
12 / 3 Ebenen	15.579	7.259	177147	42	-2,6 bis 2,6	12938	70.9

Tabelle 4.4:  $\chi^2$ -Anpassungstest für die vollständig permutierbaren Anordnungen

<sup>84</sup> Vgl. Abschnitt 2.3.3.

<sup>85</sup> Vgl. die Überlegungen des Abschnitt 4.2.1.1.

<sup>86</sup> Vgl. Hartung S. 186 f.

Das Ergebnis des Tests ist, daß die Verteilungen aller überprüften Anordnungen nicht durch die Normalverteilung approximiert werden können. Die Ablehnung erfolgte zu einem Signifikanzniveau  $\alpha$  von 1 % bei einer Einteilung der Berechnungsergebnisse in 42 Klassen und somit 41 Freiheitsgraden. Einfache Aussagen über die Abweichungen der berechneten Werte vom Erwartungswert sind somit nicht möglich.

Mögliche Aussagen über diese Abweichungen könnte die Tschebyscheff-Ungleichung ergeben.<sup>87</sup> Sie geht von der Verteilungsfreiheit der Daten aus. Allerdings erreicht sie nur sehr grobe Aussagen. Nach ihr liegen maximal 11,1 % der berechneten Werte außerhalb eines Abstandes von der dreifachen Standardabweichung.<sup>88</sup> Die Tschebyscheff-Ungleichung ist daher zur Abschätzung von Konfidenzintervallen ungeeignet.

#### 4.4.3 Der Kolmogoroff-Smirnov-Anpassungstest

Die Verteilungsdichten zeigen eine rechtsschiefe Verteilung der Berechnungsdaten für alle Anordnungen mit mehr als drei Systemen. Sie ist unabhängig davon, in wie vielen Ebenen die Systeme verlegt sind. Beispielhaft sind in *Abb. 4.22* einige Verteilungen aufgeführt.

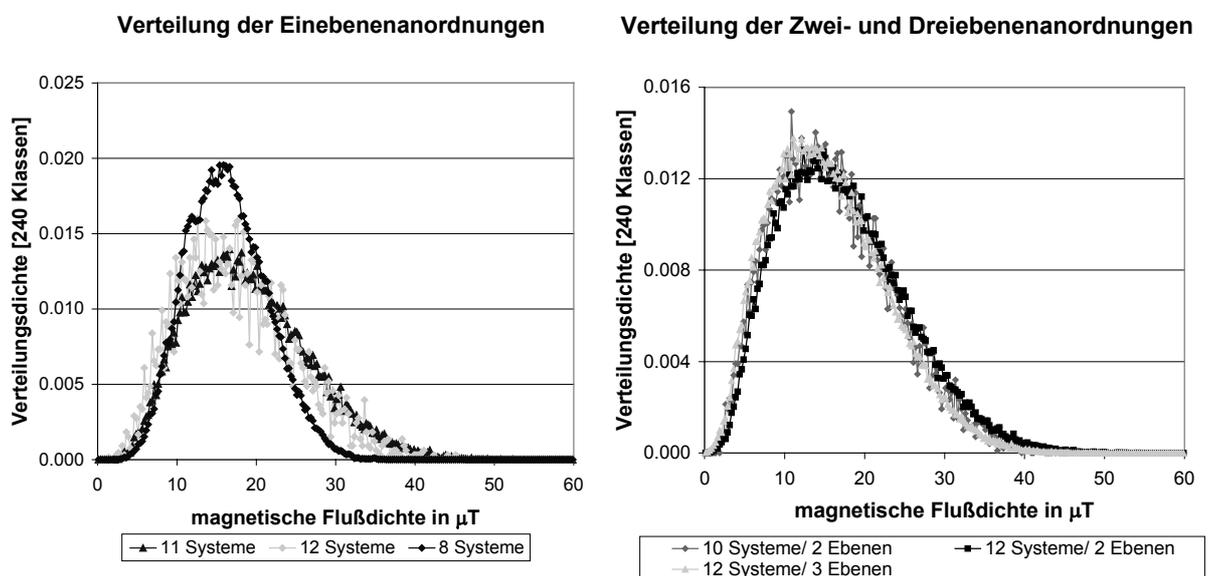


Abbildung 4.22: Verteilungsdichten ausgewählter Anordnungen

<sup>87</sup> Vgl. Hartung S. 116.

<sup>88</sup> Für die Einebenenanordnung mit sieben Systemen bedeutet dies z.B. einen Bereich unter  $0,9 \mu\text{T}$  und über  $30 \mu\text{T}$ . Der Maximalwert dieser Anordnung liegt bei  $36,29 \mu\text{T}$  und der Minimalwert bei  $2,99 \mu\text{T}$ .

Ab einer Verteilung von neun Systemen sind nur noch Vertauschungen der Phasen bei gleicher Phasenabfolge dargestellt. Die normierten Berechnungswerte<sup>89</sup> für neun bis zwölf Systeme weisen dabei eine starke Ähnlichkeit auf, wie *Abb. 4.23* zeigt.

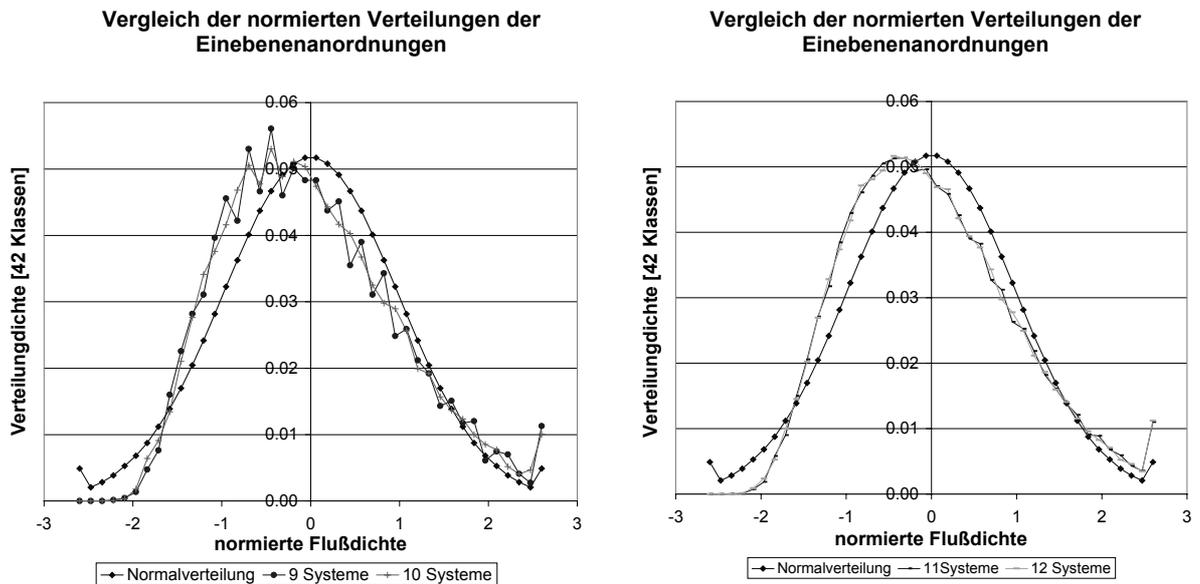


Abbildung 4.23: Normierte Verteilungsdichten der Anordnungen mit neun bis zwölf Systemen

Mit Stichproben von 10000 Berechnungswerten sollen die Verteilungen der Anordnungen mit 13 bis 20 Systemen auf die Zugehörigkeit zu einer empirischen Verteilung getestet werden. Dazu wird der Kolmogoroff-Smirnov-Test angewandt.<sup>90</sup> Der Vorteil dieses Tests ist, daß keine Verteilungsannahmen für die Vergleichsverteilungsfunktion getroffen werden müssen. In dem Test werden die Verteilungsfunktionen der Anordnungen mit 13 bis 20 Systemen mit der gesamten Verteilung der Anordnungen mit elf Systemen verglichen. Der maximale Abstand der Verteilungsfunktionen bestimmt die Prüfgröße. Ist die Referenzverteilung nicht stetig, gilt der Test durch die Mittelung der Werte als konservativ. Indem alle Werte in 42 Klassen unterteilt werden, soll der Einfluß dieser Einschränkung verringert werden.

Die Ergebnisse des Tests sind in *Tab. 4.5* aufgeführt. Die Nullhypothese, daß die Verteilungsfunktionen der Anordnungen mit 13 bis 20 Systemen mit der Verteilungsfunktion der Anordnung mit elf Systemen übereinstimmen, wird in keinem Fall zu einem

<sup>89</sup> Normiert mit dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$  durch  $X_{\text{normiert}} = \frac{X - \mu}{\sigma}$ .

<sup>90</sup> Vgl. Bronstein S. 692 und Hartung S. 183 ff.

Signifikanzniveau  $\alpha = 10\%$  verworfen. Die Verteilungen der getesteten Anordnungen können durch die Verteilung mit elf Systemen dargestellt werden.

Anordnung Systeme / Ebenen	Stichprobenumfang	Klassenanzahl N	Prüfgröße	kritischer Wert $\alpha=0,1$
13 / 1 Ebene	10000	42	0.500	1.23
14 / 1 Ebene	10000	42	0.719	1.23
15 / 1 Ebene	10000	42	0.610	1.23
16 / 1 Ebene	10000	42	0.610	1.23
17 / 1 Ebene	10000	42	1.095	1.23
18 / 1 Ebene	10000	42	0.961	1.23
19 / 1 Ebene	10000	42	1.221	1.23
20 / 1 Ebene	10000	42	0.853	1.23
14 / 2 Ebenen	10000	42	0.757	1.23
16 / 2 Ebenen	10000	42	0.955	1.23
18 / 2 Ebenen	10000	42	0.477	1.23
20 / 2 Ebenen	10000	42	0.491	1.23
15 / 3 Ebenen	10000	42	0.835	1.23
18 / 3 Ebenen	10000	42	0.774	1.23

*Tabelle 4.5:  
Ergebnisse des  
Kolmogoroff-Smirnov-  
Anpassungstests*

#### 4.4.4 Empirische Verteilung der magnetischen Flußdichte

Die Erkenntnisse des vorhergehenden Abschnitts erlauben eine detaillierte Beschreibung aller möglichen Phasenarrordnungen der idealisierten Trassen. Insbesondere können die 10 und 90 %-Quantile und der Median, das 50 %-Quantil, für die Anordnungen mit bis zu zwölf Systemen genau und für Anordnungen mit über zwölf Systemen approximativ angegeben werden, da die Verteilung nur bis zu zwölf Systemen vollständig ermittelt werden kann.

Der Mittelwert der Anordnungen mit 13 und mehr Systemen ist für alle Phasenabfolgen bekannt. Er wird bei der Berechnung der Quantile verwendet, nicht der Schätzwert aus den 10000 Werten. Die empirische Standardabweichung muß deshalb mit dem bekannten Mittelwert und den 10000 berechneten Werten erneut geschätzt werden. Die Quantile der Referenzverteilung werden unter Verwendung dieser Werte auf die Verteilungen der Anordnungen mit mehr als 12 Systemen umgerechnet.

Die berechneten Quantile lassen Aussagen über die Flußdichte von verlegten Systemen zu, bei denen der Phasenabfolge keine Beachtung geschenkt wurde. Sie stellen das 80 %-Konfidenzintervall für die magnetische Flußdichte dar. Die wichtigen Quantile, sowie die besten und schlechtesten Werte zeigt *Tab. 4.6* im Anhang. In den *Abb. 4.15, 4.20* und *4.21* sind die Lageparameter bereits graphisch dargestellt.

---

Der Median wird als Lageparameter verwendet. Er ist besser geeignet als der Mittelwert, da er wesentlich robuster gegenüber Ausreißern ist. Die oberen und unteren 10 %-Quantile begrenzen den Bereich in dem bei zufälliger Phasenordnung mit 80 %iger Wahrscheinlichkeit die maximale magnetische Flußdichte der Anordnung liegt. Sie zeigen aber, daß die magnetische Flußdichte bei Nichtbeachtung der Phasenfolge mit hoher Wahrscheinlichkeit etwa 3 bis 10 fach höhere Werte annehmen kann als bei optimaler Verlegung. Je mehr Systeme verlegt werden, um so wahrscheinlicher sind größere Belastungen durch magnetische Felder. Gleichzeitig relativieren die Lageparameter die maximalen Flußdichtewerte der Anordnungen mit schlechter Feldreduktion. Insbesondere bei vielen Systemen sind Faktoren von mehr als dem 30fachen der Flußdichtewerte der optimalen Anordnungen wenig wahrscheinlich.

Weitere Aussagen sind mit den Ergebnissen der statistischen Betrachtung möglich. Starke Differenzen zwischen dem oberen und unteren 10 %-Quantil, wie in der Anordnung von 16 Systemen in einer Ebene, können durch eine große Standardabweichung der Stichprobe bedingt sein.

Die Einschränkung der Phasenabfolgen in mathematisch positiver Richtung für Anordnungen ab neun Systemen führt zur Erweiterung des Konfidenzintervalls. Die Erweiterung läßt die Schlußfolgerung zu, daß reale zufällig verlegte Phasenordnungen in einem schmalen Bereich um den Median zu finden sind, wenn die Phasenabfolge auch in der anderen Richtung möglich ist.

Der Einfluß der Systemanzahl auf die maximal auftretende Flußdichte ist geringer ausgeprägt als der Einfluß der Phasenordnung. *Abb. 4.15* zeigt, daß die *schlechteste* Phasenordnung bei sechs Systemen ähnlich hohe Feldbelastungen ergibt, wie etwa 90 % der Phasenordnungen bei 20 Systemen. Daneben nehmen die wahrscheinlich auftretenden magnetischen Belastungen nicht im gleichem Maße mit der Systemanzahl zu, wie eine alleinige Betrachtung der *schlechtesten* Phasenordnungen dies vermuten lassen würde. Die Annahme, daß mit mehr Systemen in einer Trasse die maximale Flußdichte zunimmt, kann bei zufälliger Phasenordnung nicht aufrechterhalten werden. Die Auswirkungen der Verlegung einer erhöhten Systemanzahl wird im nachfolgenden Kapitel 5 noch einmal aufgegriffen werden.

## 5 Grenzbetrachtungen bei erweiterten Anordnungen

### 5.1 Theoretische Überlegungen zur maximalen Flußdichte

Bereits die Phasenoptimierung von 20 Systemen in einem Kabelgraben wird in der Realität den Großteil aller üblichen Anordnungen umschließen. Trotzdem sollen durch logische Schlußweise erstellte Anordnungen mit mehr Systemen untersucht werden. Das Ziel ist eine Grenzwertbetrachtung für die magnetische Flußdichte an Kabeltrassen mit unbegrenzter Systemanzahl.

Der Effektivwert der magnetischen Flußdichte eines symmetrischen Drehstromsystems, das im Dreieck verlegt ist, kann mit der Näherungsformel [19] beschrieben werden. Der in dieser Ausarbeitung verwendete Abstand der Berechnungspunkte vom geometrischen Schwerpunkt der Systeme erlaubt diese Annahme. Bei konstantem Strom  $I$  und gleichbleibendem Abstand  $a$  der Leiter vom geometrischen Schwerpunkt des Systems hängt der Effektivwert der Flußdichte  $B$  nur noch vom Abstand  $r$  des Berechnungspunktes zum Systemmittelpunkt ab.

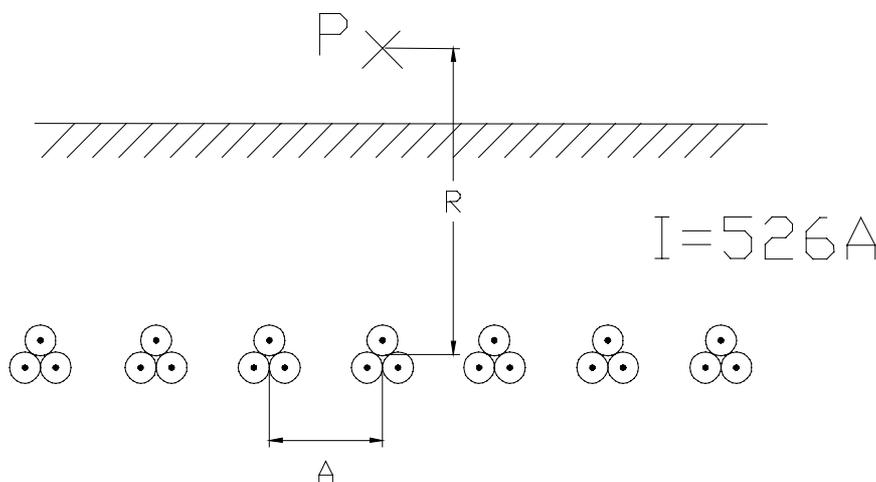


Abbildung 5.1:

Berechnungsparameter bei Abschätzung des Grenzwertes der magn. Flußdichte

Befinden sich entsprechend *Abb. 5.1* weitere Systeme im Kabelgraben, wird die Gesamtflußdichte im ungünstigsten Fall durch Superposition der Flußdichtebeträge  $B_i$  der Einzelsysteme gebildet. Bei Konstanz aller anderen Parameter beeinflusst allein der Abstand  $r$  die Gesamtflußdichte. Der Abstand zum Berechnungspunkt kann für jedes links bzw. rechtsseitige System  $n$  anhand der geometrischen Anordnungen bestimmt werden:

$$r_i = \sqrt{R^2 + (nA)^2} .$$

[23]

Die Gesamtflußdichte  $B$  wird bei konstanten geometrischen Abmaßen von der Anzahl  $i = 2n + 1$  der Systeme bestimmt:

$$B = \sum_{i=0}^{\infty} B_i = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\mu}{2\pi} I a \left( \frac{1}{R^2} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{R^2 + n^2 A^2} \right) = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\mu}{2\pi} I a \left( \frac{1}{R^2} + \frac{2}{A^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\frac{R^2}{A^2} + n^2} \right) \quad [24]$$

Der erste Term der Summe berechnet den Anteil des Systems, senkrecht unter dem Berechnungspunkt. Die Summenfolge bestimmt die Anteile der paarweisen Systeme links und rechts des Mittelsystems. Zur Prüfung der Konvergenz der Flußdichte für eine unbegrenzte Anzahl von Systemen genügt es, die Summenfolge allein zu betrachten. Nach dem Majorantenkriterium kann die Summenfolge vereinfacht werden<sup>91</sup>:

$$C_n = \frac{1}{\frac{R^2}{A^2} + n^2} \leq D_n = \frac{1}{n^2} \text{ für alle } n \geq 1 \text{ und } n \in N. \quad [25]$$

Die verbleibende Summenfolge konvergiert gegen einen Grenzwert:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}. \quad [26]$$

Hieraus kann der Grenzwert für die Gesamtanordnung berechnet werden, wenn der erste Summenterm mit in die Berechnung eingeht:

$$\lim_{i \rightarrow \infty} B = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{\mu}{2\pi} I a \left( \frac{1}{R^2} + \frac{2}{A^2} \frac{\pi^2}{6} \right) = 760,4 \mu T \quad [27]$$

$$\text{Parameter: } \quad A = 0,15 \text{ m}, \quad I = 526 \text{ A}, \quad R = 0,9 \text{ m} - 0,02 \text{ m} - \tan 30^\circ \cdot 0,02 \text{ m}, \\ a = 0,02 \text{ m} / \cos 30^\circ, \quad \mu_r = 1.$$

Diese Werte beruhen auf der üblichen Verlegung in einer Ebene bei Verwendung des Referenzkabels.

Der Grenzwert bildet für diese Anordnungsweise einen Maximalwert der magnetischen Flußdichte im festgelegten Berechnungspunkt in der Berechnungsebene. Dabei ist der Grenzwert der Summe der vereinfachten Terme  $D_n$  zu hoch abgeschätzt. Der entfallene Quotient  $R^2/A^2$  reduziert vor allem die ersten Terme der Summenfolge erheblich.<sup>92</sup> Aus diesem Grund wird der Grenzwert durch Berechnung der maximalen magnetischen

<sup>91</sup> Der erste Summenterm stellt für die Gesamtsumme lediglich einen zusätzlichen konstanten Anteil dar.

<sup>92</sup> Mit der Bestimmung des Grenzwertes soll die Konvergenz der maximalen magnetischen Flußdichte an Anordnungen mit einer unbegrenzten Systemanzahl gezeigt werden.

Flußdichte (Gl. [24]) für eine endliche Systemanzahl bestimmt. Die Ergebnisse, auch für die Mehrebenenarrangements, sind in *Tab. 5.1* dargestellt.

Ebenenanzahl	Systemanzahl	theoretischer Maximalwert der Flußdichte	ermittelter Maximalwert der Flußdichte	Systemanzahl	theoretischer Grenzwert der Flußdichte
1	19	81,0 $\mu\text{T}$	68,06 $\mu\text{T}$	120001	124,3 $\mu\text{T}$
2	38	138,6 $\mu\text{T}$	117,8 $\mu\text{T}$	240002	223,0 $\mu\text{T}$
3	57	181,6 $\mu\text{T}$	155,3 $\mu\text{T}$	360001	304,8 $\mu\text{T}$

*Tabelle 5.1:*

*Vergleich der theoretischen und ermittelten maximalen Flußdichten*

Beispielhaft werden die Ergebnisse der Einebenenarrangements erläutert. In Arrangements mit 19 Systemen kann die Flußdichte aufgrund der theoretischen Berechnungen 81,0  $\mu\text{T}$  nicht überschreiten. Zum Vergleich ergibt die Phasenoptimierung auf die geringste Feldreduktion bei *gerader* Verlegeweise einen Maximalwert der Flußdichte von 68,08  $\mu\text{T}$ . Werden 120001 Systeme in einer Ebene verlegt, beträgt der errechnete Maximalwert der magnetischen Flußdichte nach Gl. [24] 124,3  $\mu\text{T}$ . Ein weiteres Systempaar an den Außenseiten der Arrangements erhöht die Flußdichte um 127 fT. Aufgrund der mit Gl. [26] und [27] nachgewiesenen Konvergenz kann der berechnete Maximalwert als Grenzwert für die magnetische Flußdichte einer unbegrenzten Systemanzahl in einer Ebene angesehen werden. An realen Arrangements wird die Voraussetzung der identisch gerichteten Flußdichtevektoren nicht erfüllt sein, wodurch dieser Wert weiter unterschritten wird.

## 5.2 Berechnungsbeispiele

### 5.2.1 Arrangements mit großer Feldreduktion

Untersuchungen der optimalen Feldreduktion, aber auch der schlechten Feldreduktion, sind durch die Permutation der möglichen Phasenfolgen mit WinField bei Arrangements mit mehr als 20 Systemen nicht mehr möglich. Vielmehr können, aufbauend auf den Erfahrungen des Abschnitt 4, Phasenfolgen konstruiert werden, die zu einer großen bzw. geringen Reduktion der magnetischen Flußdichte führt. Absolut beste oder schlechteste Phasenfolgen können somit nicht eindeutig bestimmt werden. Die dargestellten Arrangements kommen den optimalen Arrangements aber sehr nahe.

Auf eine statistische Auswertung muß ebenfalls verzichtet werden. Stichproben bei dieser Systemanzahl können mit WinField nur noch durch manuelle Eingabe berechnet werden. Dadurch ist eine ausreichend große Stichprobe für eine unterschiedliche Anzahl von Systemen mit vertretbarem Zeitaufwand nicht zu simulieren.

Mit Hinblick auf eine gute Feldreduktion können nicht für alle Anordnungen mit beliebiger Systemanzahl Phasenfolgen angegeben werden. Probleme, Phasenfolgen mit guter Feldreduktion nach den ermittelten Verlegeregeln aufzustellen, traten schon bei Anordnungen mit weniger als 20 Systemen auf. Die Aufstellung der Phasenfolgen mit optimaler Feldreduktion bei bis zu 20 Systemen läßt die Schlußfolgerung zu, daß auch für diese Anordnungen die Werte der Flußdichte innerhalb des Toleranzbandes von 1 bis 2  $\mu\text{T}$  bei gleichbleibender Strombelastung zu finden sind.

Eine sehr gute Feldreduktion entsteht in der Anordnung in einer Ebene, insbesondere bei vielen Systemen, wenn Anordnungen aus Grundanordnungen mit vier Systemen gebildet werden. Eine große Feldreduktion bei Anordnungen in zwei und drei Ebenen besteht bei Grundanordnungen, die aus sechs Systemen aufgebaut sind. Die ermittelten Phasenfolgen entstammen keiner Phasenoptimierung, sondern lediglich logischen Schlußfolgerungen und können daher nicht als optimale Phasenfolgen bezeichnet werden.

In *Tab. 5.2* im Anhang sind die Phasenfolgen der untersuchten Anordnungen mit der zugehörigen magnetischen Flußdichte aufgeführt. Die graphische Auswertung ermöglicht *Abb. 5.2*. In dieser Graphik sind auch die optimalen Phasenfolgen mit bis zu 20 Systemen dargestellt. Die Betrachtung der Anordnungen mit mehr als 20 Systemen unterstreicht, daß mit erhöhter Systemanzahl weiterhin Phasenfolgen mit sehr großer Feldreduktion erstellt werden können.

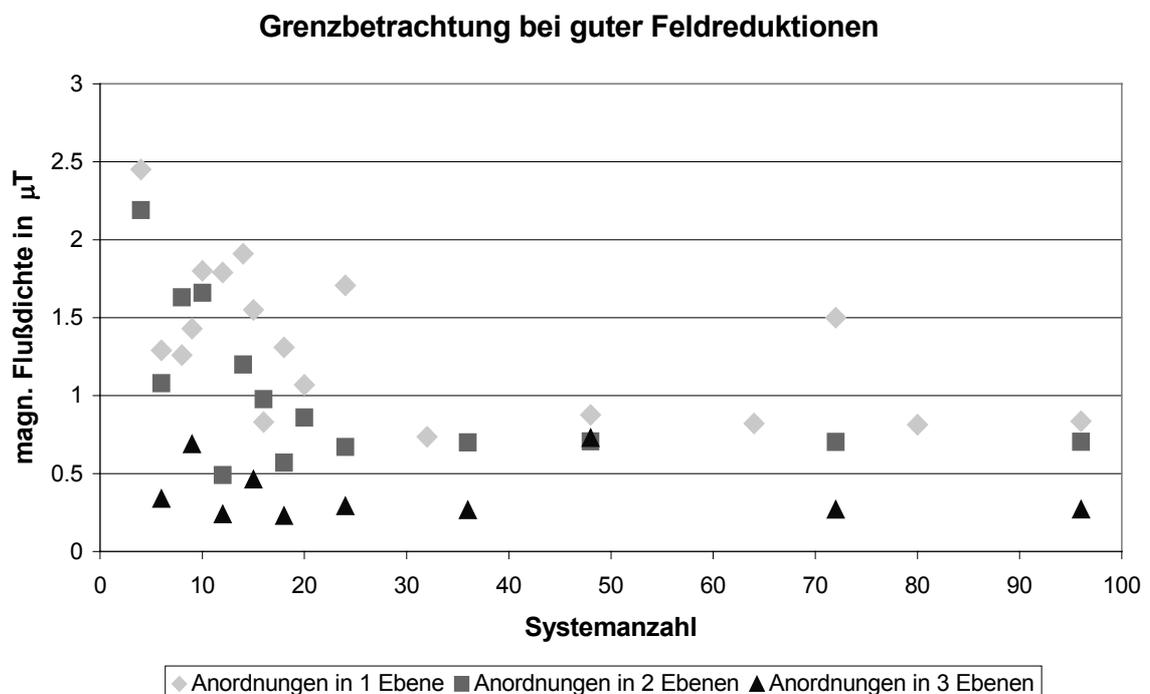


Abbildung 5.2: Flußdichte an erweiterten Anordnungen mit optimaler und guter Phasenfolge (ab 21 Systeme)

### 5.2.2 Anordnungen mit geringer Feldreduktion

Auch die Phasenfolgen mit schlechter Feldreduktion können bei über 20 Systemen in einer Anordnung nur aufgrund von Schlußfolgerungen gebildet werden. Die Werte der Flußdichte dieser Phasenfolgen enthält *Tab. 5.3* im Anhang, die graphische Auswertung erfolgt mit *Abb. 5.3*.

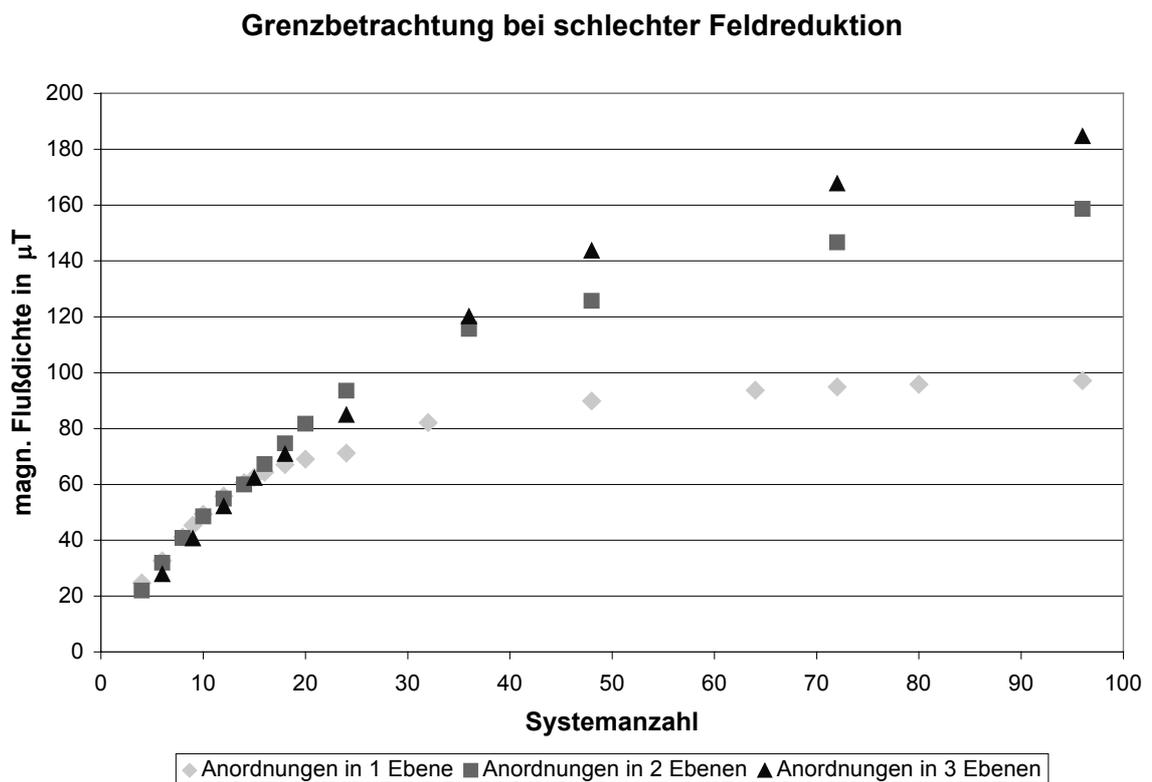


Abbildung 5.3: Flußdichte an erweiterten Anordnungen mit schlechtester und schlechter Phasenfolge (ab 21 Systeme)

Bereits ab sieben Systeme, in einer Ebene verlegt, bedeutet die Phasenverschiebung der rechts liegenden Systeme um  $240^\circ$  eine Felderhöhung im Abstand von etwa 1 m oberhalb der Kabel. Die Erhöhung beruht auf dem *Erdnußeffekt* und führt im weiteren Abstand von den Systemen jedoch zu einer besseren Feldreduktion als bei einer Anordnung mit gleichbleibender Phasenfolge. Bei bis zu 24 Systemen erreicht diese zweigeteilte Phasenfolge eine niedrige Reduktion in der Berechnungsebene. Werden mehr Systeme betrachtet, kann durch eine dreigeteilte Phasenfolge eine weitere Erhöhung der Flußdichte erzielt werden. Diese Art der Phasenordnung erreicht für bis zu 96 Systeme in einer Ebene die geringste Feldreduktion der getesteten Phasenfolgen.

Die Aussagen der Phasenfolge der Einebenenordnung sind auch auf Anordnungen in mehreren Verlegeebenen anwendbar. Die größten Flußdichten werden nur erreicht, wenn

---

die Phasenfolgen der Einebenenordnung in gleicher Weise für die darunter liegenden Ebenen angewandt werden. Dementsprechend ist eine Erstellung der Phasenfolgen mit geringer Feldreduktion analog der Einebenenordnungen möglich, wobei die Anzahl der Systeme durch die Anzahl der Ebenen verdoppelt oder verdreifacht wird.

Die Darstellung der maximalen magnetischen Flußdichte in *Abb. 5.3* zeigt einen degressiv steigenden Verlauf der Flußdichte mit erhöhter Systemanzahl. Sprünge in diesen Verläufen beruhen auf dem Wechsel der Art der Phasenordnung. Ausgeprägt sind die Sprünge in den Anordnungen in einer Ebene zwischen 24 und 32 Systemen, den Anordnungen in zwei Ebenen zwischen 48 und 72 Systemen und den Anordnungen in drei Ebenen zwischen 72 und 96 Systemen, aber auch zwischen 24 und 36 Systemen. Innerhalb der gleichartigen Phasenordnungen verlaufen die maximalen Werte der magnetischen Flußdichte in der Berechnungsebene asymptotisch gegen einen Grenzwert. Das erklärt sich auch, da der Einfluß der entfernteren Systeme im weiten Abstand von der Position der maximalen Flußdichte abnimmt. Bereits bei 96 Systemen in einer Ebene konnte auch durch Veränderung der Bereiche mit gleicher Phasenfolge oder durch eine erhöhte Zahl von Wechseln in der Phasenfolge keine signifikant höheren Flußdichtewerte in der Berechnungsebene erzeugt werden. Wie im Abschnitt 5.1 gezeigt, existieren Grenzwerte für die magnetische Flußdichte bei zunehmender Systemanzahl allein aus geometrischen Gründen. Auf eine Angabe der realen Grenzwerte aus den Beispielerrechnungen muß verzichtet werden, da die Möglichkeit anderer Phasenfolgen mit geringerer Feldreduktion oberhalb der Anordnung nicht ausgeschlossen werden kann. Die *Abb. 5.3* zeigt höhere Flußdichtewerte für Anordnungen mit mehreren Ebenen. Das Magnetfeld der unteren Ebenen überlagert bei gleicher Phasenfolge in jeder Ebene das Magnetfeld der oberen Ebenen und führt bei gleicher Breitenausdehnung daher zu einer erhöhten Flußdichte gegenüber den Anordnungen in einer Ebene.

---

## 6 Untersuchung der magnetischen Flußdichte an realen Kabeltrassen

### 6.1 Besonderheiten in realen Anordnungen

#### 6.1.1 Hin und Rückströme

An Umspannstationen und Netzstationen mit Ringkabeltrassen treten in den überspannungsseitigen Versorgungsleitungen Ströme in entgegengesetzten Richtungen auf. Typischerweise besitzen die Einführungstrassen solcher Stationen nur ein Systempaar unterschiedlicher Stromrichtung, die allerdings bedingt durch die Ausspeisung geringfügig verschiedene Systemstromstärken besitzen. Bei starker innerstädtischer Vernetzung können Kabeltrassen durch Trassenmangel mehrere Systeme entgegengesetzter Stromrichtung aufweisen.

Die *Magnetfeldzeiger* der Systeme sind bei gleicher Phasenfolge entsprechend entgegengesetzt, rotieren aber in identischer Richtung. Sie weisen eine große Ähnlichkeit mit den *Zeigern* der *gestützten* Anordnung auf. Die Unterschiede in der berechneten Flußdichte zu den *gestützten* Anordnungen basieren allein auf der unterschiedlichen geometrischen Anordnung der Einzelleiter zueinander, denn die Verlegung entspricht der Art der *geraden* Anordnungen. Eine paarweise Anordnung zweier Systeme mit unterschiedlicher Stromrichtung erreicht die größte Feldreduktion, wenn die Phasenabfolgen beider Kabelbündel identisch sind. Eine mehrfache Verlegung mit gleichen Phasenfolgen führt zum erwähnten Randfeldproblem, welches durch Rotation der Bündelpaare um jeweils  $120^\circ$  beseitigt werden kann.

Bei der Kombination von Systemen unterschiedlicher Stromrichtung mit Systemen gleicher Stromrichtung kann entsprechend der Überlegungen zu den *gestützten* Anordnungen vorgegangen werden.

#### 6.1.2 Unterschiedliche Belastungen der Kabel

Die Systeme in den Kabeltrassen sind im allgemeinen unterschiedlich ausgelastet, wie in *Abb. 6.1* dargestellt. Die Reduktionswirkung der ermittelten Phasenordnungen kann dadurch stark eingeschränkt werden. Genaue Aussagen scheitern an den zufälligen zeitlichen Belastungen der Systeme und an der schlechten Nachvollziehbarkeit des Einflusses einzelner Systeme auf das Feld komplexer Anordnungen.

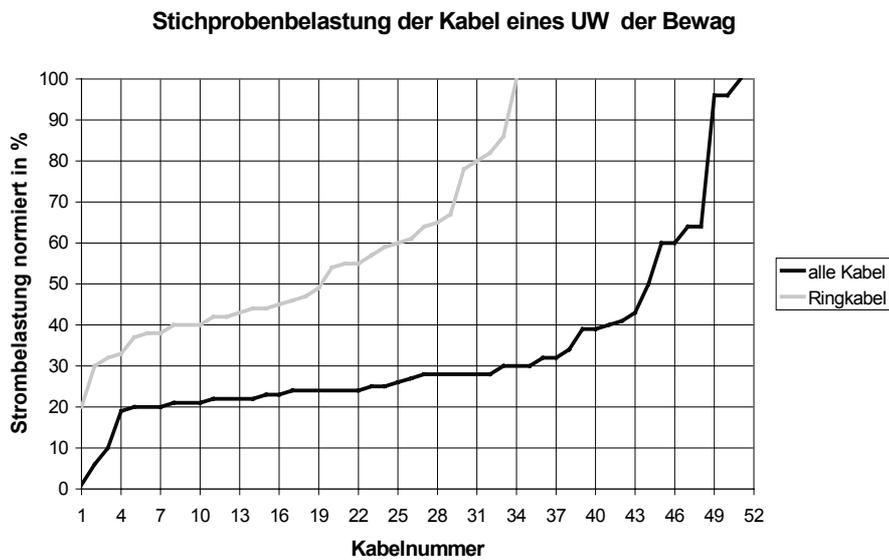


Abbildung 6.1:

Unterschiedliche Auslastung der Kabel einer Kabeltrasse vor einem UW der Bewag.

Zur Wahrung des Reduktionseffektes empfiehlt es sich aber, die Verlegung der Kabel so zu wählen, daß die Stromstärken in den Systemen der Grundanordnungen vorrangig ähnliche Werte annehmen. Einige Feldbilder optimierter Anordnungen besitzen Erhöhungen der magnetischen Flußdichte an den Rändern der Anordnung, wie z.B. optimierte Anordnung für zwölf Systeme in *Abb. 6.1*. Werden die geringer belasteten Kabel in den Grundanordnungen an den Seiten und die hoch belasteten Kabel in der Mitte der Anordnung verlegt, kann eine Reduktion dieser Randfelder die Verringerung der maximal auftretenden Flußdichte bewirken. Eine solche Verlegung wirkt aber negativ auf die thermische Belastbarkeit der Kabeltrasse.

### 6.1.3 Abschätzung der Stromsummen

Unsymmetrische Belastungen entstehen nicht nur im Niederspannungsbereich durch die fehlende Gleichzeitigkeit der Lastentnahme durch die Verbraucher. Sie können in Abhängigkeit von der Schaltung der Transformatoren und ihrer Erdung in das übergelagerte Netz übertragen werden. Wird das übergelagerte Netz aber beispielsweise mit freiem Sternpunkt betrieben, ist die Übertragung der Nullströme und somit der Unsymmetrie ausgeschlossen. Eine überspannungsseitige Dreieckswicklung schließt ebenfalls mögliche Nullströme kurz.<sup>93</sup> Daneben erzeugen Lichtbogenöfen vornehmlich in Industrienetzen erhebliche unsymmetrische Zustände.

<sup>93</sup> Vgl. Heuck S. 440 ff.

Im Niederspannungsbereich geht die Bewag von unsymmetrische Zustände mit Stromsummen bis zu 3 A aus. Für eine Simulation der Auswirkungen von Stromsummen wird diese Stromsumme in Anordnungen der 0,4 kV Spannungsebene nachgebildet. Hierbei muß der Einfluß des Neutralleiters entsprechend Abschnitt 3.2.3 beachtet werden.

Die Stromsumme kann im 0,4 kV-Netz bei entferntem Rückfluß über das Erdreich als zusätzlicher Einleiterstrom interpretiert werden. Das magnetische Feld eines Einleiterstromes wird nicht kompensiert und sinkt mit zunehmenden Abstand umgekehrt proportional. Es überlagert das Feld der symmetrisch belasteten Anordnung, deren kompensierte Magnetfelder der einzelnen Systeme allein betrachtet annähernd umgekehrt quadratisch abfallen. Die Stromsumme kann durch unterschiedliche Belastung aller Phasen beliebige Phasenlagen aufweisen.

Die geringste Entfernung der Kabelbündel von der Berechnungsebene ist für die Kabelbündel der obersten Ebene gegeben. In der idealen Anordnung beträgt der Abstand senkrecht zur Berechnungslinie 0,85 m. Nach Gl. [18] ergibt sich bei einer Stromsumme von 3 A ein Betrag der magnetischen Flußdichte von 0,705  $\mu\text{T}$ .

Folgende Überlegungen sollen einer Abschätzung der Stromsummen dienen. Die Flußdichtevektoren besitzen eine radiale Ausrichtung zum Leiter. Die Stromstärke im Leiter zu einem Zeitpunkt bestimmt die Vektorlänge und die Zeigerrichtung im oder entgegen des Uhrzeigersinns. Die momentane Stromstärke ergibt sich aus der Amplitude und der Phasenlage der Stromschwingung. Würden sich mehrere Leiter in der gleichen Position befinden, würde ihr Gesamtfeld durch den Gesamtstrom aller Leiter gebildet werden. Dieser Gesamtstrom ergibt sich aus der Superposition der Teilströme. Der Effektivwert der Flußdichte hängt allein von der Amplitude des Gesamtstromes ab, da alle Teilströme eine identische Frequenz besitzen. Die Amplitude des Gesamtstromes  $\vec{A}$  kann durch Addition der Amplituden der Teilströme berechnet werden. Sie ist von den Teilstromamplituden  $A_i$  und deren Phasenlagen  $\varphi_i$  abhängig:

$$\vec{A} = \sum_n \vec{A}_i = \sum_n A_i \cdot e^{j\varphi_i} . \quad [28]$$

Den schlechtesten Fall ergibt die arithmetische Addition aller Stromsummenbeträge. Dann steigt die maximale magnetische Flußdichte linear mit der Anzahl der Systeme mit einer Stromsumme. Im besten Fall kompensieren sich die durch die Ströme hervorgerufenen Flußdichtevektoren zu jedem Zeitpunkt und der Effektivwert der Flußdichte wird Null.

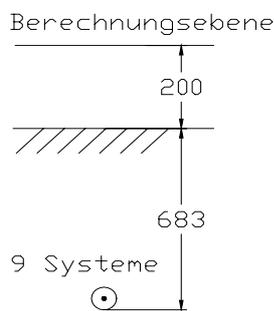
Realistischer als im schlechtesten Fall ist der Erwartungswert der magnetischen Flußdichte, denn die Magnetfelder kompensieren sich z.T. gegenseitig. Hier kann bei

zufälligen Beträgen der Amplituden und zufälliger Phasenlage der Teilströme im Berechnungspunkt der Erwartungswert der Flußdichte aus den maximalen Beträgen der Teilflußdichten  $B_i$  bestimmt werden:

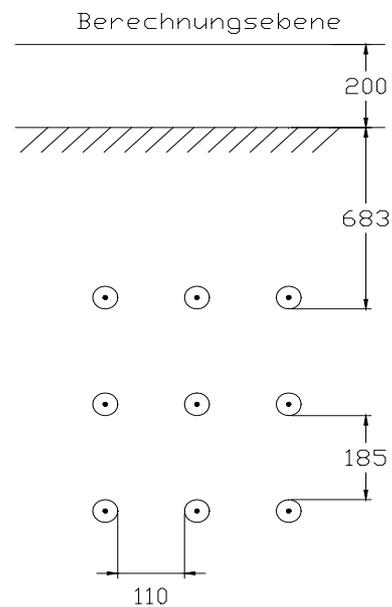
$$|B_{\text{erwartet}}| = \sqrt[n]{\sum_n |B_i|^2}. \quad [29]$$

Als Beispiel soll die Anordnung aus neun Systemen in drei Ebenen verwendet werden.<sup>94</sup>

konzentrierte Anordnung



3 Ebenen Anordnung



konzentrierte Anordnung  
in mehreren Ebenen

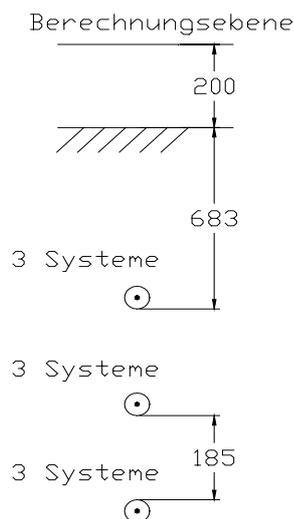


Abbildung 6.2: Anordnungen zur Bestimmung der durch Nullströme hervorgerufenen Flußdichte

<sup>94</sup> Die Leiterpositionen zu den Berechnungen können Abb. 6.2 entnommen werden. Die Stromsummen von jeweils neun bzw. drei Systemen befinden sich in den konzentrierten Anordnungen auf identischen Positionen!

Die Mitten der Systeme werden als Position der Stromsummen führenden Leiter gewählt. Die Stromsumme beträgt jeweils 3 A. Wenn alle Leiter auf der identischen Position in der obersten Verlegeebene und somit im gleichen mittleren Abstand von der Berechnungsebene liegen (konzentrierte Anordnung), ergibt der Betrag der zu erwartenden maximalen Flußdichte  $2,1 \mu\text{T}$  im Vergleich zu  $6,3 \mu\text{T}$  ohne Annahme einer gegenseitigen Reduktion der Magnetfelder der Summenströme.

Diese Werte für die Flußdichte verringern sich, wenn für jede Verlegeebene alle Stromsummenleiter nur dieser Ebene in einem Punkt vereinigt im senkrechten Abstand zur Berechnungsebene liegen, wie in der konzentrierten Anordnung in drei Ebenen. Damit sinken die erreichbaren Amplituden im Berechnungspunkt, da die Abstände der Verlegeebenen zum Berechnungspunkt größer werden. Die zu erwartende Flußdichte unterschreitet mit  $1,75 \mu\text{T}$  deutlich die maximal Flußdichte von  $5,2 \mu\text{T}$  ohne gegenseitige Reduktion der Magnetfelder der Stromsummen. Werden die Einzelpositionen der Leiter gewählt (3 Ebenen Anordnung), besitzen die Flußdichtevektoren in einem Berechnungspunkt nicht mehr nur zwei mögliche Ausrichtungen. Zwar kann somit keine vollständige Reduktion, aber auch keine absolute Betragsaddition erreicht werden. Zusätzlich erhöht sich der Abstand der Teilleiter vom Berechnungspunkt, wodurch die Beiträge der Stromsumme zur gesamten Flußdichte sinken. Für reale Anordnungen mit einigen Systemen sollte Gl. [29] eine konservative Abschätzung darstellen.

Die theoretischen Werte werden mit einer Simulation von WinField verglichen. Bei Stromsummen von 3 A pro Einzelleiter und aus Zufallszahlen bestimmten Phasenlagen konnte die durchschnittliche Flußdichte aus je zwölf Berechnungen den Erwartungswert der Flußdichte noch unterschreiten, wie Tab. 6.1 des Anhangs zeigt.

Eine weitere Reduktion ist in realen Anordnungen zu erwarten. Die Stromsumme wird zum einen in allen Systemen nicht gleichzeitig 3 A erreichen. Weiterhin kompensieren sich die Magnetfelder der symmetrischen Systeme und der Stromsummen teilweise, so daß die Addition der Beträge das real auftretende Gesamtfeld überschätzt.

Allgemein kann eine Abschätzung des Einflusses der Stromsummen nach diesen Überlegungen vorgenommen werden. Die Hinweise zur 26. BImSchV sehen keine Berücksichtigung unsymmetrischer Zustände vor. Der Einfluß der Stromsumme sollte aber nicht unbetrachtet bleiben. Das Beispiel der Anordnung aus neun Systemen in drei Ebenen zeigt, wie groß die Erhöhung durch eine Stromsumme sein kann. Der Erwartungswert der Flußdichte von  $1,75 \mu\text{T}$  der Stromsummen übersteigt die maximalen Flußdichte ohne Stromsumme bei optimaler Phasenordnung von  $0,7 \mu\text{T}$ , wenn der maximale betriebliche Dauerstrom der Einzelkabel von 526 A als symmetrischer Strom angenommen wird.

#### 6.1.4 Phasendrehungen durch die Umspannung

Die Umspannung von der höheren zur niedrigeren Spannungsebene kann aufgrund der Schaltungen der Transformatoren zu Drehungen der Phasenwinkel führen. Bevorzugte Schaltungen für die Umspannung 110/ 10 kV sind YNd 5 bzw. für 10/ 0,4 kV Yzn 5 und Dyn 5.<sup>95</sup> Diese Schaltungen sollen in dieser Ausarbeitung verwendet werden, wenn Kabeltrassen mit Systemen unterschiedlicher Spannungsebene vorkommen. Die Phasenwinkel der oberen zu den unteren Spannungsebenen verschieben sich daher um jeweils 150°.

Bereits im Abschnitt 4.1.3. konnte gezeigt werden, daß die Drehung des rechtsseitigen Systems um 150° den *Erdnußeffekt* nach unten bewirkt. Bleibt nun die geometrische Anordnung konstant, ergibt eine Phasenverschiebung des Stromes um 150° das gleiche Ergebnis wie die Drehung der Geometrie. Da aber Kabelbündel unterschiedlicher Spannungsebenen selten in der gleichen Verlegeebene liegen, ist der mögliche *Erdnußeffekt* nicht nutzbar.

#### 6.1.5 Das Magnetfeld von Anordnungen mit mehreren verdrehten NS-Kabeln

Die Verdrehung kann in unterschiedlicher Art und Weise berücksichtigt werden. Im folgenden Abschnitt werden hierzu einige Vorschläge gemacht.

In Kabeltrassen mit verdrehten Kabeln muß die Richtung des Verseilschlages betrachtet werden. Besitzen die verwendeten Kabel eine Gleichschlagverseilung, kann ihr Beitrag unter der Annahme symmetrischer Ströme vernachlässigt werden, da bereits die Anteile der Kabel der obersten Verlegeebene in der gegebenen Berechnungshöhe nur noch 1/7 der Flußdichte der geradlinigen Anordnung verursachen.<sup>96</sup>

Andere Verhältnisse existieren, wenn die Kabel eine Wechselschlagverseilung aufweisen. Abschnitt 3.3.3 zeigte, daß in der Nähe des Schlagwechsels ähnliche Feldverhältnisse wie an geraden Kabeln herrschen. Mit der konservativen Abschätzung der Kabel durch geradlinige Leiteranordnungen in magnetisch ungünstigster Anordnung wird die Flußdichte aber stark überschätzt.

Realistischer ist eine Berücksichtigung der Niederspannungssysteme als Kabel ohne Verdrehung bei zufälliger Kabellage bzw. Phasenlage. Folgende Gründe sprechen für diese Vorgehensweise:

---

<sup>95</sup> Vgl. ABB S. 525.

<sup>96</sup> Vgl. Abschnitt 3.3.3.

- 
- Der Ort des Richtungswechsels des Verseilschlages ist bei Kabeln mit Verseilschlagwechsel nicht bekannt. Mit dem Modell, alle Leiter als geradlinige Leiter mit zufälliger Phasenlage zu betrachten, wird auch der unwahrscheinliche Zustand, daß alle Verseilschlagwechsel im gleichen Bereich auftreten, berücksichtigt.
  - Stromsummen, deren Rückströme nicht über den Neutralleiter zurückfließen, erzeugen hohe Feldanteile, die das Feld der symmetrischen Stromverteilung überlagern. Durch die Verdrillung der Leiter wird dieser Anteil nur im geringen Maße reduziert.
  - Richtungsänderungen der Kabel im Kabelgraben bewirken, daß Feldanteile der Leiterabschnitte hinter dem Richtungswechsel nicht mehr die Feldanteile der Leiterabschnitte vor dem Richtungswechsel kompensieren können. Der Effekt ist vergleichbar mit der Felderhöhung beim Abbruch der Anordnung.

Eine weitere Möglichkeit ist die Vernachlässigung der Feldanteile der Kabel, deren Verseilschlagwechsel nicht im Bereich der Berechnungsebene liegt. Wie in der Draufsicht der *Abb. 3.7* erkennbar, ist die Felderhöhung in der Berechnungsebene auf einen Bereich von etwa  $1/5$  der Verseilschlaglänge begrenzt. Außerhalb dieses Bereiches beträgt der Betrag der Flußdichte nur noch  $1/7$  des Maximalwertes. Unter der Annahme, daß die Position des Schlagwechsels zufällig ist, ist das Auftreten der Schlagwechsel weiterer Kabel im Bereich des Schlagwechsels eines Kabels über der Strecke der Kabeltrassen binomialverteilt ( $B(n;0,1)$ ) mit einer Einzelwahrscheinlichkeit von 20 % bei  $n$  zusätzlichen Kabeln. Die Wahrscheinlichkeit z.B., daß der Schlagwechsel weiterer zwei Kabel innerhalb des Bereiches eines Kabels liegt, beträgt nur 17,3 %, wenn im Kabelgraben acht verdrillte Systeme verlegt sind. In diesem Fall sollten nur drei der acht Systeme in der Berechnung berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist die Ausrichtung des magnetischen Feldes der Schlagwechsel zufällig. Mit der Abschätzung der wahrscheinlich auftretenden Flußdichte, wie in *Gl. [29]*, kann eine realistische Beurteilung der magnetischen Belastung durch die Niederspannungskabel erfolgen. Die Einzelflußdichte  $B_i$  am Schlagwechsel kann durch eine geradlinige Leiteranordnung geschätzt werden.

Schließlich kann eine Anordnung mit Kabeln mit Verseilschlagwechsel direkt durch WinField simuliert werden. Der Ort des Richtungswechsels und die Drehung der Kabel sollten dabei zufällig gewählt werden. Nachteilig bei dieser Untersuchung sind die langen Berechnungszeiten. Dabei lassen die zufälligen Anordnungen nur begrenzte Aussagen über die maximale Flußdichte in der Berechnungsebene zu.

---

## 6.2 Untersuchungen der Standardtrassen

### 6.2.1 Erläuterungen

Die Erkenntnisse des Abschnitts 6.1 sollen in die Berechnung realer Kabeltrassen einfließen.

Betrachtet werden Anordnungen, die von den Standardtrassen der Bewag, wie sie in *Abb. 3.9* dargestellt sind, abgeleitet werden. Die Erwärmungsberechnung<sup>97</sup> für diese Trassen gibt die Belastungen der Systeme vor.

### 6.2.2 10 kV-Ringkabeltrassen

#### 6.2.2.1 Randbedingungen

Die Übertragungsfähigkeit der neu verlegten Ringkabel ist insbesondere von der Häufung der Kabel in der Trasse abhängig.<sup>98</sup> Die Summenlasten der Trassen bestimmen die thermische Belastbarkeit. Sie werden in dieser Ausarbeitung vernachlässigt, wodurch Magnetfelder entstehen können, die real nicht dauerhaft vorkommen können. Die Last der Systeme ergibt sich aus der Übertragungsfähigkeit des Ringes. Die Last wird auf beide Systeme eines Ringes aufgeteilt und mit dem Auslastungsgrad  $a_t = 0,7$  gewichtet.<sup>99</sup>

#### 6.2.2.2 Anordnung mit acht Systemen in zwei Ebenen

Für die Anordnung mit acht Systemen ist eine Anwendung der Phasenoptimierung möglich. Die Ergebnisse der Optimierung für die folgenden beschriebenen Anordnungen gibt *Tab. 6.2* wieder.

Die Übertragungsfähigkeit des Ringes dieser Anordnung beträgt 6 MVA. Bei gleichmäßiger Auslastung der Halbringe und unter Berücksichtigung des Auslastungsgrades führt jedes System einen Phasenstrom von 121,2 A. Die Phasenoptimierung auf die geringste Flußdichte bei dieser Belastung ergibt die gleiche Phasenfolge, wie die der optimalen Phasenordnung in *Abb. 4.16*.

Bei einer ungleichmäßigen Verteilung der Ringlast auf die Ringhälften<sup>100</sup> von 35 % und 65 % ändert sich die optimale Phasenfolge. Die unterschiedlichen Ströme bedingen veränderte Magnetfeldanteile, die durch die optimale Phasenordnung bei gleicher

---

<sup>97</sup> Vgl. die Annahme in Biewald, Henschel, Ringler S. 42 ff.

<sup>98</sup> Vgl. *Tab. 3.3*

<sup>99</sup> Vgl. Biewald, Henschel, Ringler S. 44.

<sup>100</sup> Die maximale ungleichmäßige Aufteilung der Ringströme im Netzbereich der Bewag liegt bei 35 zu 65 %. Die Steuerung dieser Lastaufteilung erfolgt durch die Trenner.

Systembelastung nicht ausreichend kompensiert werden. Bei Beibehaltung dieser Phasenordnung würde die maximale Flußdichte in der Berechnungshöhe auf  $0,957 \mu\text{T}$  steigen. Das entspricht einer Erhöhung der Flußdichte gegenüber der optimalen Phasenordnung bei ungleichmäßiger Belastung von 925 %.

Im Kurzschlußfall kann es zur Abschaltung eines Halbrings über einen Zeitraum von fünf Tagen kommen. Das zweite Ringsystem übernimmt dann die gesamte Ringlast. Auch in diesem Fall ergibt die Phasenoptimierung eine veränderte Phasenfolge mit nur gering erhöhter magnetischer Flußdichte. Unter Beibehaltung der optimalen Phasenordnung der gleich belasteten Systeme hingegen, würde die Flußdichte gegenüber der veränderten Phasenfolge um 971 % auf  $4,287 \mu\text{T}$  erhöht. Die Felderhöhung ist nahezu ausschließlich auf das hoch belastete System zurückzuführen, das bei alleiniger Verlegung eine maximale Flußdichte von  $4,527 \mu\text{T}$  erzeugen würde.

Reduktion in der Berechnungshöhe	Phasenfolge	Belastung der Systeme	max. magn. Flußdichte	Anmerkungen
beste	<b>RTSR TSTS</b>	121,2 A	0,337 $\mu\text{T}$	gleiche Belastung aller Systeme
beste	<b>RTS`T` SSR`R`</b>	157,6 A / 84,9 A	0,085 $\mu\text{T}$	ungleiche Belastung mit 65% (obere Systeme) und 35%
beste	<b>RRTT SSTS</b>	346,4 A / 121,2 A	0,366 $\mu\text{T}$	1. System stromlos, 2. System mit gesamter Ringlast, andere Systeme mit gleicher Belastung
schlechteste	<b>RRRR RRRR</b>	121,2 A	9,423 $\mu\text{T}$	gleiche Belastung aller Systeme
schlechteste	<b>RRRR RRRR</b>	157,6 A / 84,9 A	10,015 $\mu\text{T}$	ungleiche Belastung mit 65% (obere Systeme) und 35%
schlechteste	<b>RRRR RRRR</b>	346,4 A / 121,2 A	11,066 $\mu\text{T}$	1. System stromlos, 2. System mit gesamter Ringlast, andere Systeme mit gleicher Belastung

Tabelle 6.2:

*Untersuchung der Phasenfolgen der Anordnung von acht Systemen in zwei Ebenen*

Die Beispielkonfigurationen der Anordnung mit acht Systemen zeigen, daß die Reduktion der magnetischen Flußdichte in der Berechnungshöhe stark von den Belastungen der einzelnen Systeme abhängt. Die Lastflüsse der Systeme unterliegen großen Schwankungen, wobei die geänderten Lastzustände extreme, aber realistische Belastungen darstellen. Die optimale Phasenfolge wird bereits bei der Verlegung festgelegt. Wie gezeigt, können jedoch Lastzustände entstehen, bei der Teile der Ströme nicht der Reduktionswirkung durch diese optimale Phasenfolge unterliegen. Anders verhält es sich bei parallelen Verbindungen z.B. in Schaltanlagen. Da Einzelkabel dort die Last nicht übertragen können, werden mehrere Kabel zur Leistungsübertragung verwendet. Die Ströme sind dann bei gleichen Widerstandsverhältnissen auf den Systemen gleich groß und die Kompensation bleibt erhalten.

### 6.2.2.3 Anordnung mit 15 Systemen in drei Ebenen

Am Beispiel dieser Anordnung wird weiter die Auswirkung ungleichmäßiger Lastflüsse auf die maximale magnetische Flußdichte betrachtet. Ausgangspunkt ist die Anordnung mit optimaler Phasenfolge bei gleichen Systembelastungen.<sup>101</sup>

Die Anordnung besteht aus 14 Ringleitungen und einer Stichleitung. Die Übertragungsfähigkeit der Ringe sinkt für Anordnungen mit 15 Systemen in drei Ebenen auf 5,5 MVA. Die Belastungen der Ringhälften und die Belastung der Stichleitung sind zufällig verteilt.<sup>102</sup>

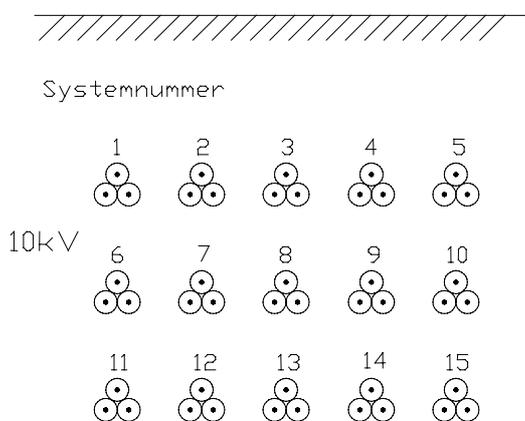


Abbildung 6.3:

Bezeichnung und Anordnung der 15 Systeme in drei Ebenen

Wie *Abb. 6.4* beispielhaft zeigt, steigt bei der ungleichmäßigen Belastung der Systeme von 35 zu 65 % die Flußdichte in der Berechnungshöhe. Gegenüber der gleichmäßigen Belastung nimmt die maximale Flußdichte von 98 nT auf 0,920  $\mu\text{T}$  zu.<sup>103</sup>

Belastung der Systeme	max. magnetische Flußdichte
77,8 A (35%): System 1, 3, 4, 6, 9, 12, 13 144,5 A (65%): System 2, 5, 7, 8, 10, 11, 14 111,1 A (Stichleitung): System 15	1,11 $\mu\text{T}$
77,8 A (35%): System 3, 5, 6, 8, 10, 11, 13 144,5 A (65%): System 1, 4, 7, 9, 12, 14, 15 111,1 A (Stichleitung): System 2	1,08 $\mu\text{T}$
77,8 A (35%): System 1, 3, 5, 6, 8, 12, 13 144,5 A (65%): System 2, 4, 7, 10, 11, 14, 15 111,1 A (Stichleitung): System 9	1,19 $\mu\text{T}$
77,8 A (35%): System 3, 4, 5, 7, 9, 11, 14 144,5 A (65%): System 1, 2, 8, 10, 12, 13, 15 111,1 A (Stichleitung): System 6	0,94 $\mu\text{T}$
77,8 A (35%): System 2, 3, 6, 8, 11, 14, 15 144,5 A (65%): System 1, 5, 7, 9, 10, 12, 13 111,1 A (Stichleitung): System 4	0,49 $\mu\text{T}$
77,8 A (35%): System 2, 5, 8, 11, 13, 14, 15 144,5 A (65%): System 1, 3, 4, 6, 9, 10, 12 111,1 A (Stichleitung): System 7	0,72 $\mu\text{T}$
Mittelwert	0,92 $\mu\text{T}$

Tabelle 6.3:

Zufällige Stromverteilung der Systeme bei ungleichmäßiger Belastung

<sup>101</sup> Die Phasenfolge entspricht Phasenfolge der Anordnung mit 15 Systemen in *Abb. 4.19*.

<sup>102</sup> Vgl. *Abb. 6.4* im Anhang. Die Systeme werden von links oben bis rechts unten durchnummeriert.

<sup>103</sup> Vgl. *Tab. 6.3*. Die Flußdichte wurde als Mittelwert aus sechs Beispielen bestimmt.

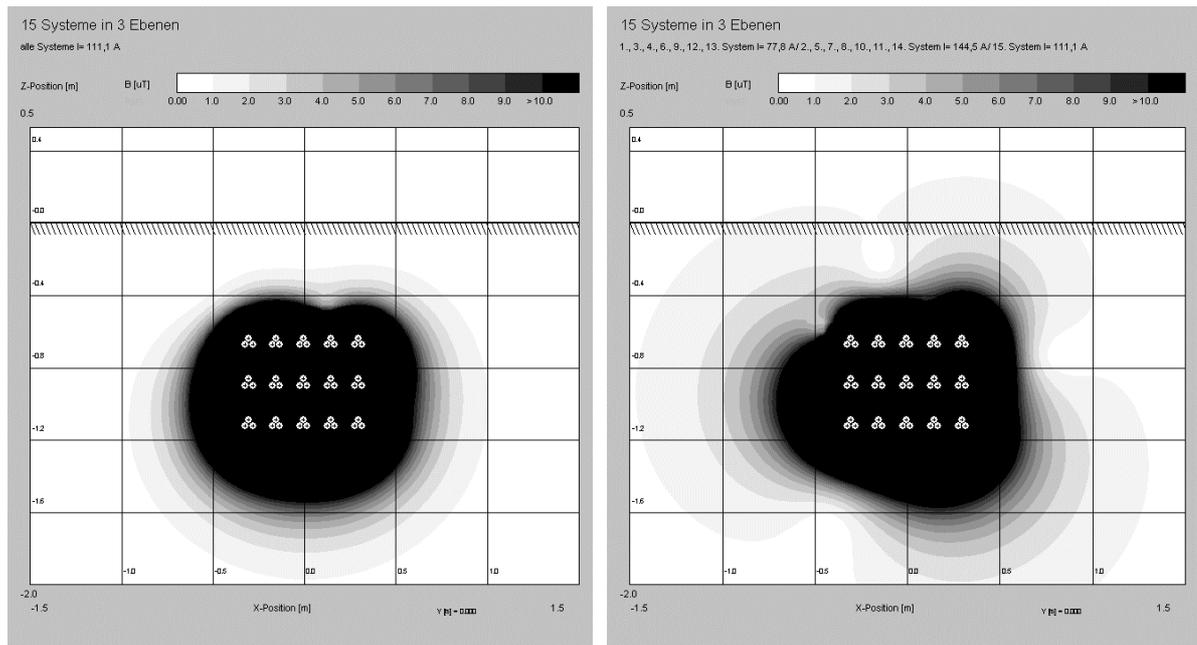


Abbildung 6.4: Magnetische Flußdichte der Anordnung mit optimaler Phasenfolge bei gleicher Belastung und ungleicher Belastung der Ringhälften

Die ungleichmäßige Belastung führt zu einer geringeren Reduktion des magnetischen Feldes in der Berechnungshöhe. Die absolute Erhöhung der Flußdichte ist durch die Ungleichverteilung der Systemströme verhältnismäßig niedrig, wenn die Ergebnisse der Phasenoptimierung bei gleichen Systemströmen in Betracht gezogen werden. Hierbei erreicht die Phasenordnung mit der geringsten Feldreduktion  $13,0 \mu\text{T}$  und der Mittelwert der Flußdichten aller möglichen Phasenfolgen  $3,6 \mu\text{T}$ . Deshalb sollte bei der Verlegung von der gleichmäßigen Stromverteilung ausgegangen werden.

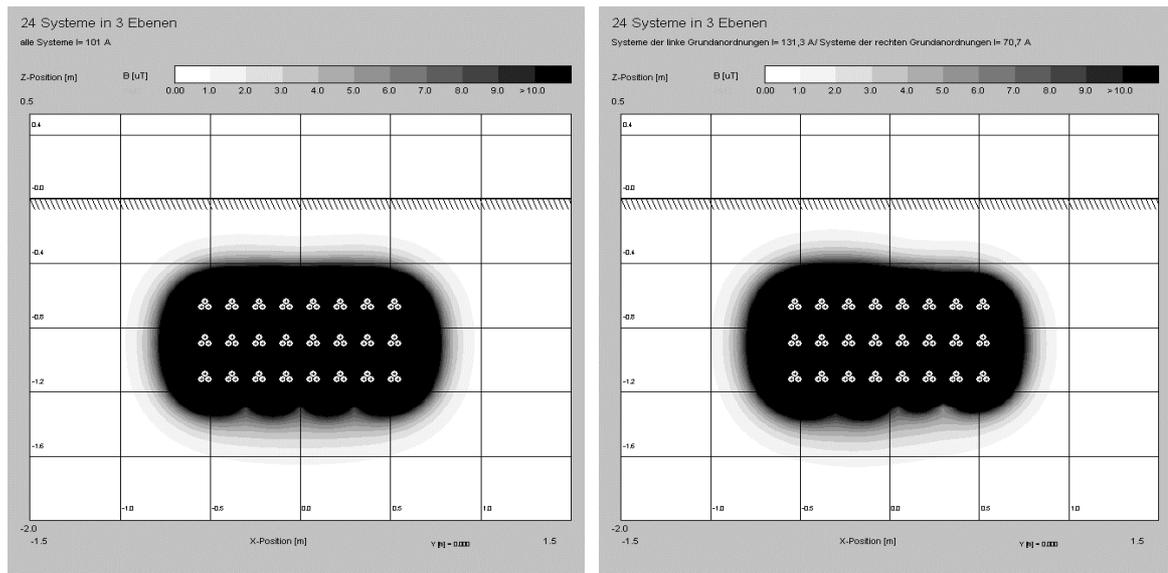
#### 6.2.2.4 Anordnung mit 24 Systemen in drei Ebenen

Die Anordnung der Ringkabeltrasse mit 24 Systemen in drei Ebenen kann wegen des Trassenmangels vor allem in Großstädten notwendig werden. Durch die Häufung der Systeme sinkt die Übertragungsfähigkeit des Ringes auf 5 MVA.

Die optimale Phasenfolge bei gleichmäßiger Systembelastung kann für diese Trasse nicht mehr durch die Phasenoptimierung bestimmt werden. Die Anzahl der Phasenordnungen entspricht in diesem Fall  $3^{23}$  Permutationen. Wird die Anordnung durch vier Grundanordnungen aus je sechs Systemen erstellt, entsteht jedoch eine Anordnung mit sehr guter allseitiger Feldreduktion.<sup>104</sup> Sind die Lastflüsse der Systeme gut abschätzbar und liegen in ähnlichen Größenordnungen wie die Lastflüsse anderer Systeme, bietet es

<sup>104</sup> Vgl. die Phasenfolge in Tab. 5.2.

sich an, diese zu einer Grundanordnung zusammenzufassen. D.h. Systeme mit ähnlichen Belastungen sollten Grundanordnungen bilden. Diese Vorgehensweise wirkt sich allerdings nachteilig auf die thermische Stabilität der Anordnung aus. *Abb. 6.5* vergleicht eine Anordnung mit identischen Strömen pro System mit einer Anordnung, in der die Systeme der linksseitigen Grundanordnungen 65 % der Ringlast und die rechtsseitigen Systeme nur 35 % der Ringlast führen.



*Abbildung 6.5: Magnetische Flußdichte der Anordnung mit optimaler Phasenfolge bei gleicher Belastung und ungleicher Belastung der Ringhälften zwischen den Grundanordnungen*

Die ungleiche Stromverteilung erhöht die maximale magnetische Flußdichte in der Berechnungshöhe nur unwesentlich von 56 nT auf 63 nT. Der Reduktionseffekt der gesamten Anordnung wird durch die gute Kompensation innerhalb der Grundanordnungen erreicht.

Die beschriebene Verlegestrategie setzt die Kenntnis der Grundanordnungen voraus. Bei vielen Anordnungen mit optimaler Phasenfolge kann diese Struktur aber nicht erkannt werden. Werden dagegen Anordnungen mit guter Feldreduktion aus Grundanordnungen erstellt, wie die Abschnitte 4.2.1.1, 4.2.1.3 und 4.3.1.1 zeigen, ist die Gruppierung der Systeme mit ähnlichen Belastungen möglich.

### 6.2.3 Kabeleinführungen in eine Netzstation

#### 6.2.3.1 Randbedingungen

Drei weitere Besonderheiten realer Kabelanordnungen treten an Stationseinführungstrassen auf. Die Phasenverschiebung zwischen der 10 kV- und 0,4 kV-Spannungsebene hängt von der Wahl der Transformatoren ab. In dieser Ausarbeitung wird von einem überspannungsseitigen Phasenwinkel von  $-150^\circ$  ausgegangen. Darüber hinaus ist die Verdrillung der NS-Kabel zu berücksichtigen. Unterschieden wird zwischen Kabeln mit Gleich- und Wechselschlagverseilung. Schließlich treten durch die Speisung der Netzstation Anordnungen mit Hin- und Rückströmen auf.

Die Beispielanordnung entspricht der Kabeleinführung in *Abb. 3.9 Bild B*. Neben den speisenden 10 kV-Kabeln sind acht verdrillte NS-Kabel in der Trasse verlegt. Die Belastungen der Systeme sind *Abb. 6.6* zu entnehmen.<sup>105</sup>

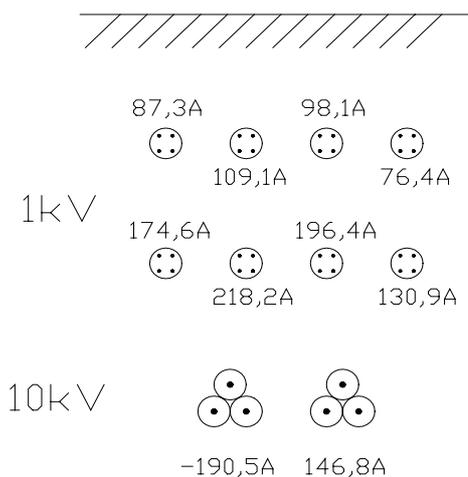


Abbildung 6.6:

*Belastungen der Systeme der Beispielanordnung der Stationseinführungstrasse. Die geometrischen Abstände sind nicht maßstabsgetreu.*

#### 6.2.3.2 Stationseinführungstrassen mit NS-Kabeln mit Gleichschlagverseilung

Die verdrillten Niederspannungskabel werden durch Anordnungen mit einer Länge von 33,6 m nachgebildet. Der Einfluß der Felderhöhung am Ende der Anordnung kann damit bis in die Berechnungshöhe gering gehalten werden. Die Kabel sind untereinander identisch. Sie sind nicht entlang der Ausbreitungsachse verschoben oder verdreht.

Die Phasenfolge der 10 kV-Systeme **RR** entspricht einer feldreduzierenden Anordnung mit Hin- und Rückströmen. Die Phasen sind zusätzlich um  $-150^\circ$  phasenverschoben, um die Phasendrehung durch den Transformator nachzubilden. In *Abb. 6.7* wird eine

Anordnung mit vollständiger Belastung mit einer Anordnung, in der die Belastungen der NS-Kabel nicht berücksichtigt sind, verglichen.

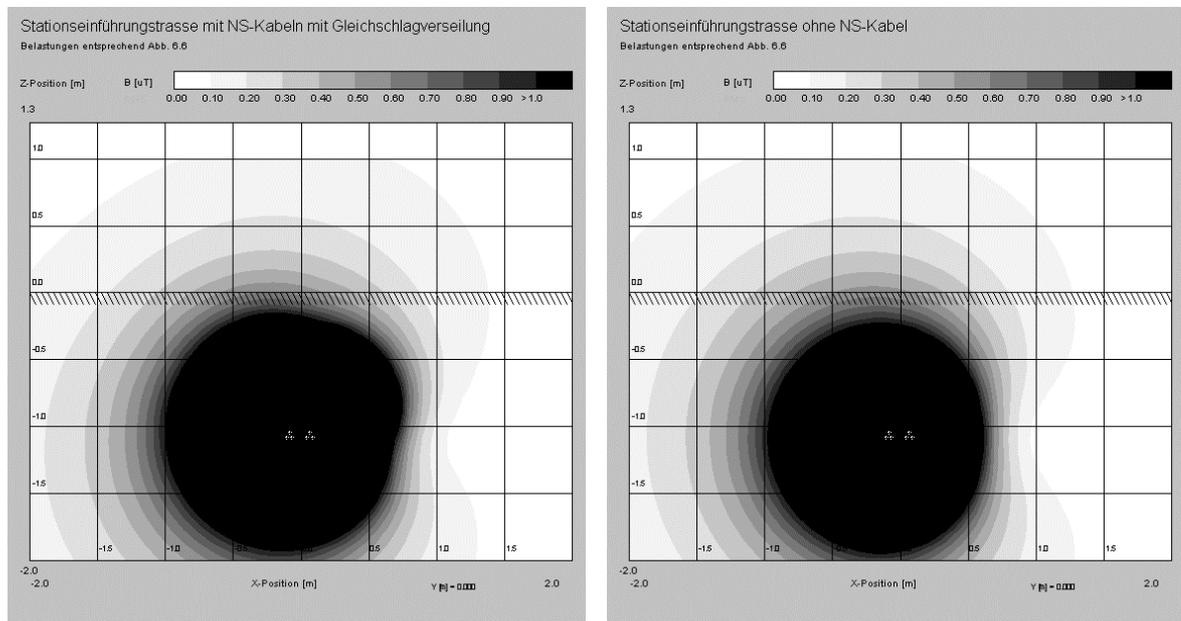


Abbildung 6.7: Magnetische Flußdichte der Stationseinführungstrasse mit und ohne NS-Kabel

Das Beispiel zeigt, daß der Einfluß der NS-Kabel mit Gleichschlagverseilung in der Berechnungshöhe vernachlässigt werden kann. Die maximale Flußdichte sinkt sogar von 0,378  $\mu\text{T}$  auf 0,367  $\mu\text{T}$ , wenn die NS-Kabel berücksichtigt werden.<sup>106</sup>

### 6.2.3.3 Stationseinführungstrassen mit NS-Kabeln mit Wechselschlagverseilung

Die Belastungen der Systeme wurden in diesem Beispiel beibehalten. Die verdrehten Niederspannungskabel werden wieder durch Anordnungen mit einer Länge von 33,6 m nachgebildet. In der Mitte der Anordnungen befindet sich der Wechsel des Verseilschlages. Wegen der fehlenden Kompensation erhöht sich die Flußdichte in einem Bereich von etwa 2 m Abstand um den Verseilschlagwechsel in der Ausbreitungsrichtung erheblich. Da der Ort des Verseilschlagwechsels nicht bekannt ist, werden die NS-Kabel des Beispiels in einem Bereich von  $-10\text{ m}$  bis  $10\text{ m}$  entlang der Ausbreitungsrichtung verschoben. Dabei ist die Strecke der Verschiebung zufällig. In gleicher Weise werden

<sup>105</sup> Die übertragenen Leistungen entsprechen einer Erwärmungsberechnung der Bewag. Durch eine Fehler wird dabei der Transformator überlastet. Dies kann einem real auftretendem Betriebszustand entsprechen. Vgl. Biewald, Henschel, Ringler S. 45 Beispiel B.

<sup>106</sup> Der maximale Effektivwert der Flußdichte in der Berechnungshöhe, der allein von den NS-Kabeln hervorgerufen wird, beträgt 49 nT.

die Kabel um die Ausbreitungsachse in Uhrzeigersinn zufällig gedreht. Die Verschiebungen und Drehwinkel sind in *Abb. 6.8* aufgeführt.

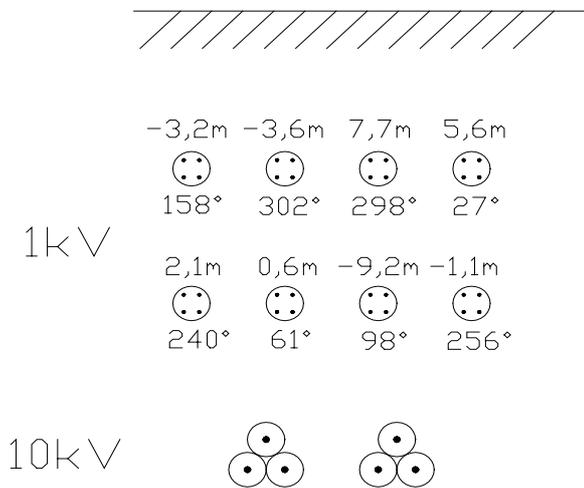


Abbildung 6.8:

Zufällige Verschiebung und Drehung der NS-Kabel im Berechnungsbeispiel. Die geometrischen Abstände sind nicht maßstabsgetreu.

Das Feldbild der Anordnung ist in *Abb. 6.9* dargestellt. Die maximale Flußdichte in der Berechnungshöhe beträgt  $0,734 \mu\text{T}$  und liegt damit über dem Wert der Anordnung mit NS-Kabeln mit Gleichschlagverseilung.

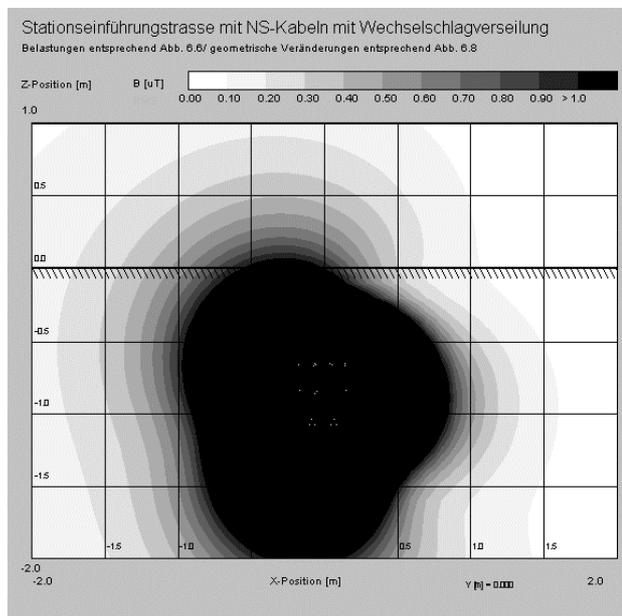


Abbildung 6.9:

Magnetische Flußdichte der Stationseinführungstrasse mit NS-Kabeln mit Wechselschlagverseilung

In *Abb. 6.10* sind die Effektivwerte der Flußdichte der 0,4 kV und 10 kV-Systeme separat aufgeführt. Es ist erkennbar, daß die Feldanteile der NS-Kabel nicht mehr zu vernachlässigen sind. Die maximale Flußdichte in der Berechnungshöhe allein der NS-Kabel liegt bei  $0,525 \mu\text{T}$  gegenüber  $0,367 \mu\text{T}$  der 10 kV-Systeme.

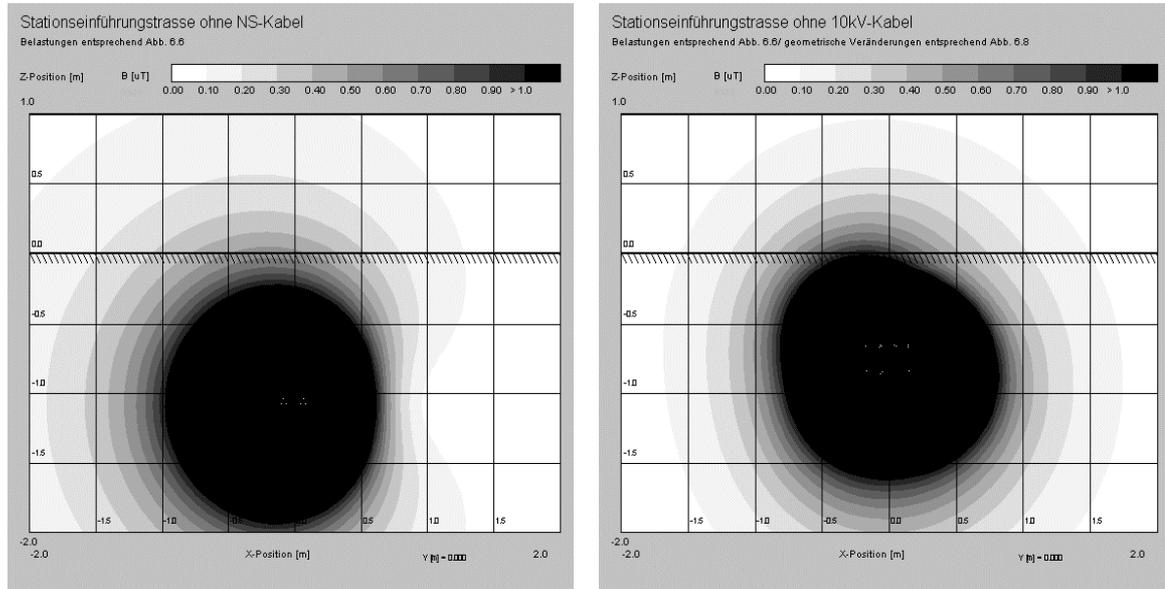


Abbildung 6.10: Magnetische Flußdichte der 10 kV- und 0,4 kV-Systeme der Stationseinführungstrasse

Der Vergleich der Maximalwerte der Flußdichte zeigt eine geringe gegenseitige Reduktion durch die beiden Anteile in der Trasse.

Der Ansatz des Abschnitts 6.1.5, die Kabel mit einem Schlagwechsel im Bereich der Berechnungsaufpunkte durch geradlinige Leiter nachzubilden, wird im folgenden betrachtet.

Das 6. und 8. Niederspannungssystem liegen im relevanten Bereich von  $-2\text{ m}$  bis  $2\text{ m}$  um die Berechnungsebene. Das Magnetfeld ausschließlich dieser beiden Systeme ist in *Abb. 6.11 links* dargestellt. Der Vergleich mit dem Feldbild, hervorgerufen durch alle NS-Kabel, verdeutlicht den großen Anteil der beiden Kabel am gesamten Magnetfeld.

Ihr Abstand zu den Berechnungsaufpunkten beträgt im Mittel  $1,07\text{ m}$ . Bei den gegebenen Leiterströmen und der Annahme geradliniger Leiter erzeugt das 6. System eine Flußdichtebetrag von  $0,754\text{ }\mu\text{T}$ , das 8. System von  $0,333\text{ }\mu\text{T}$ . Nach *Gl. [29]* beträgt der Erwartungswert der magnetischen Flußdichte der NS-Kabel  $0,824\text{ }\mu\text{T}$ . Dieser Anteil überschätzt bereits den simulierten Beitrag der NS-Kabel von  $0,525\text{ }\mu\text{T}$  deutlich. Ein Grund dafür liegt in der Annahme der konstanten Flußdichte im Bereich von  $-2\text{ m}$  bis  $2\text{ m}$ . Ein weiterer Grund ist die wechselnde Ausbreitungsrichtung der Magnetfelder, wie es am Beispiel des Feldes des 8. Systems in *Abb. 6.11 rechts* deutlich wird. Durch sie beträgt die maximale magnetische Flußdichte in der Berechnungshöhe des 6. NS-Kabels nur  $0,571\text{ }\mu\text{T}$  und des 8. NS-Kabels nur  $0,176\text{ }\mu\text{T}$ , wenn die Nachbildung der verdrehten Leiter mit WinField erfolgt.

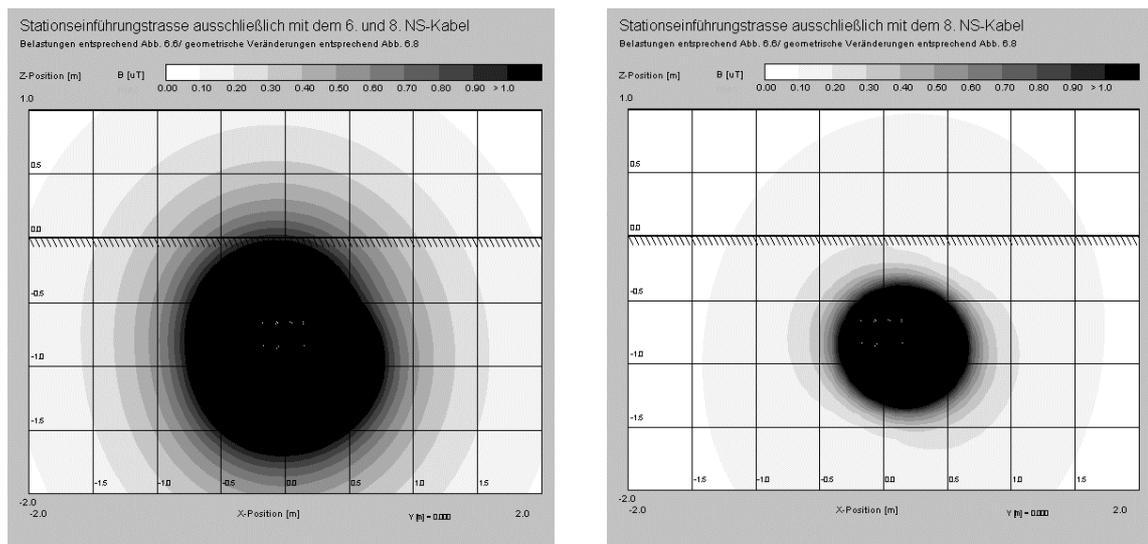


Abbildung 6.11: Magnetische Flußdichte des 6. und 8. Niederspannungskabels (links) bzw. ausschließlich des 8. Niederspannungskabels (rechts)

Der Ansatz der Nachbildung der Kabel mit Wechselschlagverseilung durch geradlinige Leiter im Bereich der Berechnungsebene kann somit als konservativ betrachtet werden.

## 6.2.4 110 kV-Trassen

### 6.2.4.1 Randbedingungen

Die 110 kV-Standardtrasse, wie sie der *Abb. 3.9* entnommen werden kann, wird im folgenden Beispiel modifiziert. Die zwei Niederspannungskabel finden keine Berücksichtigung, da der Einfluß dieser Kabel bereits im Abschnitt 6.2.3 ausführlich gewürdigt wurde. Der zusätzliche Feldanteil ist bei Kabeln mit Gleichschlagverseilung sehr gering und muß bei der Betrachtung nicht einfließen. Außerdem sind in 110 kV-Trassen nicht zwangsläufig NS-Kabel verlegt. Die Anordnung kann ohne die NS-Kabel weiter in Richtung der Erdoberfläche verschoben werden, wodurch die Flußdichte in der Berechnungshöhe erhöht wird.

Die Übertragungsleistungen der Trassen sind wieder aus den Erwärmungsberechnungen der Bewag abgeleitet.<sup>107</sup> Auch in diesem Beispiel soll von einer überspannungsseitigen Phasenverschiebung von  $-150^\circ$  ausgegangen werden.

Neben der optimalen Phasenordnung soll eine Anordnung mit einer Phasenfolge entsprechend den Empfehlungen zur Verlegung der Abschnitte 4.2 und 4.3 gebildet werden. Beide Anordnungen werden mit einer gleichmäßigen und ungleichmäßigen Belastung der Systeme betrachtet.

<sup>107</sup> Vgl. Biewald, Henschel, Ringler S. 45 ff.

## 6.2.4.2 110 kV-Trasse mit gleichmäßiger Belastung der Systeme

Wird eine Übertragungsleistung der 10 kV-Ringkabel von 3 MVA und eine Übertragungsleistung für das 110 kV-Doppelverbundkabel von 110 MVA angenommen, können die Belastungen der Systeme bei einem Auslastungsgrad  $a_t = 0,7$  bestimmt werden. *Abb. 6.12* gibt die zugehörigen Stromstärken an.

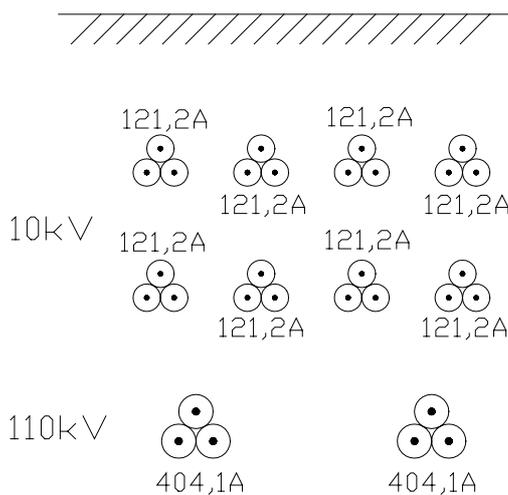


Abbildung 6.12:

*Belastungen der Systeme der Beispielanordnung 110 kV-Trasse bei gleichmäßiger Aufteilung der Ströme. Die geometrischen Abstände sind nicht maßstabsgetreu.*

Eine mögliche Anordnung der 10 kV-Systeme nach den Verlegeempfehlungen besteht aus zwei Grundanordnungen mit vier Systemen mit der Phasenfolge **RTTS**. Die Phasen der zweiten Ebene sind um  $120^\circ$  phasenverschoben (**TSSR**) mit einer einhergehenden Feldreduktion.

Durch nachstehende Überlegungen erfolgt die Anbindung der Phasenfolge der 110 kV-Systeme. Wegen der Phasenordnung der 10 kV-Systeme bietet sich die Phasenfolge **R** für das linke System an. Zur Ausnutzung des *Erdnußeffektes* muß das rechtsseitige System die Phasenfolge **T** aufweisen. Wegen der überspannungsseitigen Phasenverschiebung um  $-150^\circ$  wird die Phasenfolge der 110 kV-Systeme um  $120^\circ$  phasenverschoben und in **TS** geändert. Diese Maßnahme erreicht die größte Annäherung an die gewünschte Phasenfolge **RT**. Das Feldbild der erstellten Anordnung wird in *Abb. 6.13* mit der phasenoptimierten Anordnung verglichen.

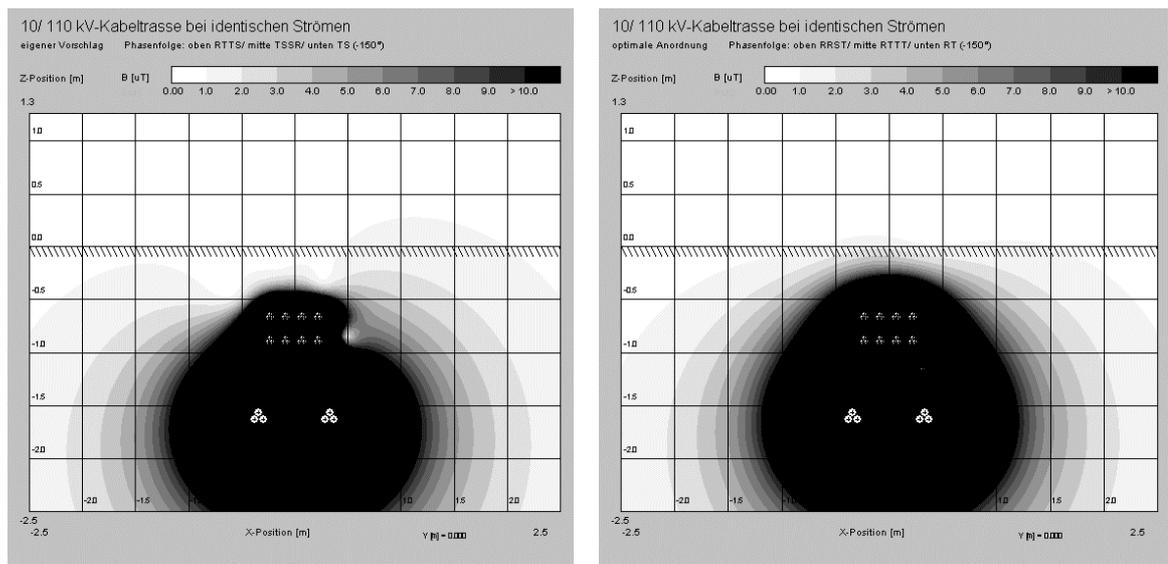


Abbildung 6.13: Magnetische Flußdichte der erstellten und phasenoptimalen Anordnung bei gleichmäßiger Belastung der Systeme

Die magnetische Flußdichte in der Berechnungshöhe erreicht in der erstellten Anordnung maximal  $1,09 \mu\text{T}$  gegenüber  $0,779 \mu\text{T}$  der optimalen Anordnung. Mit dieser maximalen Flußdichte liegt die Anordnung noch innerhalb des unteren 10%-Quantils aller Phasenarrangements, wie Abb. 6.14 dokumentiert.

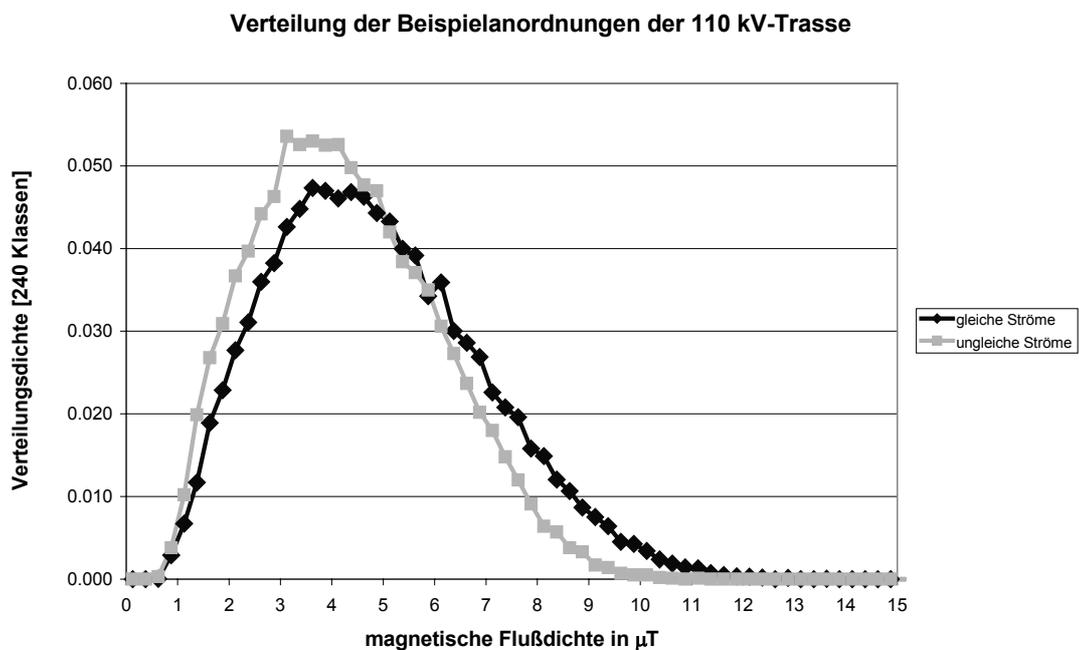


Abbildung: 6.14: Verteilungsdichte der Anordnungen der 110 kV-Trasse

### 6.2.4.3 110 kV-Trasse mit ungleichmäßiger Belastung der Systeme

Im Regelfall führen die Systeme keine identischen Ströme. Entsprechend dem Berechnungsbeispiel der Bewag<sup>108</sup> sind die Übertragungsleistungen der 10 kV-Systeme von 1 x 3,3 MVA, 3 x 2,3 MVA und 4 x 1.9 MVA zufällig auf die Systeme verteilt. Für das linke 110 kV-System wird von einer Übertragungsleistung von 120 MVA bzw. von 90 MVA für das rechte System ausgegangen. Diese Annahmen ergeben die Belastung der Systeme in *Abb. 6.15*.

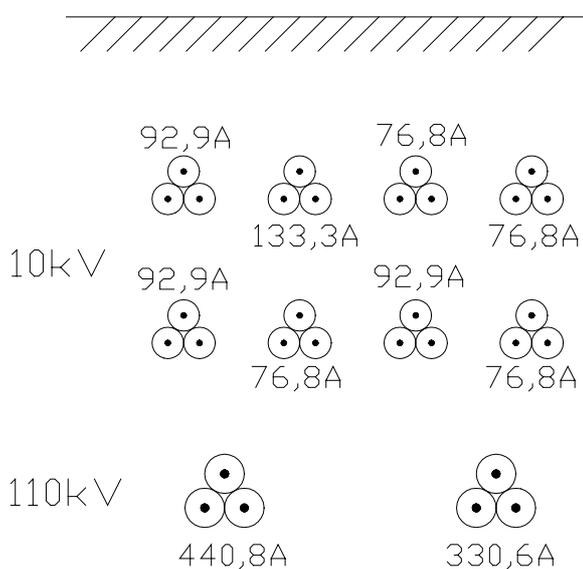


Abbildung 6.15:

*Belastungen der Systeme der Beispielanordnung 110 kV-Trasse bei ungleichmäßiger Aufteilung der Ströme. Die geometrischen Abstände sind nicht maßstabsgetreu.*

Mit diesen Belastungen sinkt die maximale Flußdichte der erstellten Anordnung auf  $0,968 \mu\text{T}$ . Die maximale Flußdichte der optimalen Phasenordnung bei gleichmäßiger Belastung steigt geringfügig auf  $0,869 \mu\text{T}$ , ist aber immer noch geringer als bei der erstellten Anordnung. Die Feldbilder in *Abb. 6.16* dienen dem Vergleich.

Beide Anordnungen erreichen sehr geringe Flußdichten innerhalb des unteren 10%-Quantils aller Phasenordnungen. Die für diese Belastungen optimierte Anordnung erreicht lediglich  $0,772 \mu\text{T}$ . Die Verteilungsdichte bei ungleichmäßiger Belastung veranschaulicht *Abb. 6.14*.

<sup>108</sup> Vgl. Biewald, Henschel, Ringler S. 46.

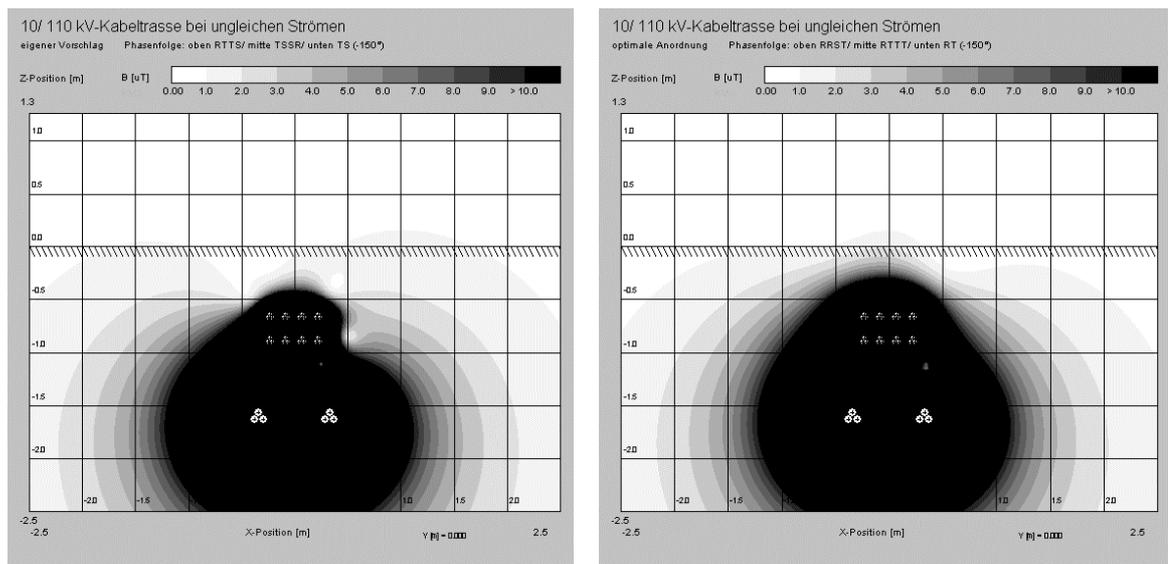


Abbildung: 6.16:            *Magnetische Flußdichte der erstellten und phasenoptimierten Anordnung bei ungleichmäßiger Belastung der Systeme*

Dieses Beispiel zeigt, daß mit den Empfehlungen zur Verlegung Phasenanordnungen erstellt werden können, die nicht die beste, aber doch eine gute Feldreduktion in der Berechnungshöhe oberhalb der Anordnung erreichen. Die gute Feldreduktion sollte auch bei unsymmetrischer Belastung erreicht werden.

---

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Ausarbeitung wurde die Reduktion des Magnetfeldes an Kabeltrassen durch die Optimierung der Phasenordnungen untersucht. Es konnten Phasenoptimierungen für bis zu 20 Drehstromsysteme durchgeführt werden. Aus den Berechnungen wurde ein Modell entwickelt, das die Effekte der Magnetfeldentstehung erklärt und mit dem Phasenordnungen mit richtungsabhängiger Feldreduktion erstellt werden können.

Die Untersuchung beschränkt sich auf Vierleiterkabel und Einleiterkabel, wobei letztere im Dreieck angeordnet sind. Diese Verlegung erreicht aufgrund ihrer kompakten Anordnung bereits eine erhebliche Feldreduktion. Die Phasenoptimierung führt zu optimalen Anordnungen. Es ist jedoch zu beachten, daß in der Praxis mit zunehmender Optimierung der relative Einfluß auftretender Stromsummen zunimmt. Bei quantitativen Aussagen an Kabelanlagen entsprechend dieser Arbeit ist Vorsicht geboten, da in der Realität immer Stromsummen auf den unteren Spannungsebenen vorhanden sind.

Das entwickelte Modell zur Phasenoptimierung stellt das Magnetfeld einer Dreiecksanordnung durch einen rotierenden *Magnetfeldzeiger* dar. Die Rotationsrichtung des Zeigers ist von der Stromrichtung und der Phasenabfolge im Kabelbündel abhängig. Sind sie identisch, kann durch die Verschiebung der Phasen der benachbarten Systeme eine richtungs- und ortsabhängige Reduktion erreicht werden. Dieser in der vorliegenden Arbeit gefundene Effekt wird als *Erdnußeffekt* bezeichnet. Daneben entsteht bei entgegengerichteten *Magnetfeldzeigern* eine isotrope Magnetfeldreduktion (*gestützte* Anordnung). Die beschriebene Reduktion wird jedoch nur dann erreicht, wenn die Richtungen der Drehfelder aller Systeme übereinstimmen. Durch die herkömmliche Methode, das „Auskreuzen der Phasen“ ist dies nicht gewährleistet.

Die Verschiebung der Phasen der Nachbarsysteme um konstante Phasenwinkel führt zu einer großen Feldreduktion. Durch die regelmäßige Anordnung entsteht allerdings eine Felderhöhung am Rand der Anordnung. Mit Hilfe des Modells kann eine Anleitung zum systematischen und nachvollziehbaren Aufbau feldreduzierender Phasenordnungen gegeben werden, die die Randfeldprobleme minimiert.<sup>109</sup> Diese Anordnungen optimieren nur die vorhandenen Systeme. Anlagen, deren endgültiger Ausbauzustand nicht feststeht, sollten deshalb durch regelmäßige Anordnungen (*gute* Anordnung) erstellt werden. Die optimierten Anordnungen eignen sich wegen der notwendigen Protokollierung und der notwendigen Neuberechnung eher für spezielle nicht veränderliche Anordnungen, z.B. auch innerhalb von Schaltanlagen.

---

<sup>109</sup> Vgl. die Abschnitte 4.2 und 4.3.

---

Mit der Beachtung der Phasenordnung ist eine sehr große Reduktion der Magnetfelder nicht nur gegenüber ausgewählten ungünstigen Phasenordnungen, sondern auch gegenüber zufälligen Phasenordnungen möglich. Die Flußdichte in der Berechnungshöhe steigt z.B. bei Anordnungen mit vier bzw. zwölf Systemen in zwei Verlegeebenen gegenüber der besten und der schlechtesten Phasenordnung um den Faktor 10 bzw. 110, sowie gegenüber der besten Anordnung und der zufälligen Anordnung (Median) um den Faktor 5 bzw. 33. Diese Art der Reduktion magnetischer Felder ist mit verhältnismäßig geringem Aufwand bei der Verlegung der Systeme erreichbar. Sie erzielt auch bei ungleichmäßigen Belastungen der Drehstromsysteme eine geringe magnetische Flußdichte im Bereich oberhalb der Kabeltrasse.

Unter der Voraussetzung konstanter Belastungen und gleichbleibender geometrischer Abstände hängt die magnetische Flußdichte von der Anordnung der Phasen und der Anzahl der verlegten Systeme ab. Mit dieser Ausarbeitung konnte gezeigt werden, daß die maximale Flußdichte in erster Linie von der Phasenordnung beeinflusst wird. Zwar steigt die magnetische Flußdichte mit zunehmender Systemanzahl an, jedoch erreichen z.B. 90 % aller Phasenordnungen von 20 Systemen in einer Ebene niedrigere maximale Flußdichtewerte als die schlechteste Anordnung von sechs Systemen!

Neben der Bestimmung der optimalen Phasenordnung konnten in dieser Arbeit die folgenden Ergebnisse ermittelt werden:

- Simulation des feldreduzierenden Einflusses der Verdrillung,
- Existenz einer maximalen magnetischen Flußdichte für Anordnungen mit unbegrenzter Systemanzahl,
- Abschätzung des Magnetfeldes durch Stromsummen,
- Beispielhafte Simulation der Auswirkungen ungleichmäßiger Systembelastung bei optimierten Anordnungen.

Im Rahmen dieser Arbeit traten weitere Themen auf, die nicht eingehend behandelt werden konnten. U.a. erfordert die Phasenoptimierung von mehr als 20 Systemen die Beschleunigung des Berechnungsalgorithmus durch die weitere Einschränkung der Freiheitsgrade. Weiterhin sollte der Einfluß der Stromverdrängung auf die Ausbildung des Magnetfeldes untersucht werden.

# Anhang

## Einebenenordnung

System- anzahl	beste Anordnung	gute Anordnung		schlechte Anordnung		schlechteste Anordnung	
	B <sub>max</sub> in $\mu\text{T}$	B <sub>max</sub> in $\mu\text{T}$	rel. Erhöhung in %	B <sub>max</sub> in $\mu\text{T}$	rel. Erhöhung in %	B <sub>max</sub> in $\mu\text{T}$	rel. Erhöhung in %
1	6.87	6.87	0	6.87	0	6.87	0
2	4.7	4.7	0	13.44	186	13.44	186
3	3.3	3.3	0	19.45	489	19.45	489
4	2.45	6.56	168	24.71	909	24.71	909
5	2.84	2.84	0	29.11	925	29.11	925
6	1.29	4.71	265	32.65	2431	32.65	2431
7	2.99	5.01	68	35.65	1092	36.27	1113
8	1.26	2.66	111	37.32	2862	41.12	3163
9	1.43	4.55	218	38.65	2603	45.36	3072
10	1.8	4.3	139	39.43	2091	49.36	2642
11	1.4	2.89	106	39.79	2742	52.65	3661
12	1.79	4.28	139	39.83	2125	55.79	3017
13	1.3	3.99	207	39.84	2965	58.28	4383
14	1.91	3.15	65	39.85	1986	60.68	3077
15	1.55	4.12	166	39.85	2471	62.53	3934
16	0.83	3.83	361	39.85	4701	64.32	7649
17	1.63	3.32	104	39.86	2345	65.7	3931
18	1.31	4.01	206	39.86	2943	67.04	5018
19	1.32	3.76	185	39.86	2920	68.06	5056
20	1.07	3.43	221	39.86	3625	69.05	6353

Tabelle 4.2: Relative Felderhöhung der schlechten Anordnung in einer Ebene

## Zwei- und Dreiebenenordnung

System- anzahl	Zweiebenen			Dreiebenen		
	beste Anordnung	schlechteste Anordnung		beste Anordnung	schlechteste Anordnung	
	B <sub>max</sub> in $\mu\text{T}$	B <sub>max</sub> in $\mu\text{T}$	rel. Erhöhung in %	B <sub>max</sub> in $\mu\text{T}$	B <sub>max</sub> in $\mu\text{T}$	rel. Erhöhung in %
4	2.19	21.99	904			
6	1.08	31.96	2859	0.34	27.89	8103
8	1.63	40.86	2407			
9				0.69	40.68	5796
10	1.66	48.51	2822			
12	0.49	54.87	11098	0.24	52.22	21658
14	1.2	59.98	4898			
15				0.464	62.33	13333
16	0.977	67.22	6780			
18	0.57	74.68	13002	0.23	70.91	30730
20	0.86	81.73	9403			

Tabelle 4.3: Relative Felderhöhung der schlechten Anordnung in zwei und drei Ebenen

Anordnung: Systeme / Ebenen	bester Wert in $\mu\text{T}$	10%-Quantil in $\mu\text{T}$	50%-Quantil (Median) in $\mu\text{T}$	90%-Quantil in $\mu\text{T}$	schlechtester Wert in $\mu\text{T}$	Anmerkungen zu den Quantilen
4 / 1 Ebene	2.45	7.38	12.13	16.88	24.71	
5 / 1 Ebene	2.84	7.88	13.38	19.13	29.11	
6 / 1 Ebene	1.29	8.88	14.38	20.63	32.65	
7 / 1 Ebene	2.99	9.13	15.13	21.63	36.27	
8 / 1 Ebene	1.26	9.88	15.88	22.88	41.12	
9 / 1 Ebene	1.43	8.63	16.63	27.13	45.36	
10 / 1 Ebene	1.8	9.13	17.38	28.13	49.36	
11 / 1 Ebene	1.4	9.88	18.13	28.88	52.65	Referenz
12 / 1 Ebene	1.79	10.38	18.63	29.63	55.79	
13 / 1 Ebene	1.3	11.29	19.62	30.49	58.28	geschätzt
14 / 1 Ebene	1.91	11.75	20.17	31.14	60.68	geschätzt
15 / 1 Ebene	1.55	12.48	20.89	31.85	62.53	geschätzt
16 / 1 Ebene	0.83	11.56	21.31	34.01	64.32	geschätzt
17 / 1 Ebene	1.63	13.37	21.87	32.95	65.70	geschätzt
18 / 1 Ebene	1.31	13.74	22.24	33.31	67.04	geschätzt
19 / 1 Ebene	1.32	14.12	22.65	33.76	68.06	geschätzt
20 / 1 Ebene	1.07	14.36	23.03	34.32	69.05	geschätzt
4 / 2 Ebenen	2.19	6.38	11.38	15.38	21.99	
6 / 2 Ebenen	1.08	7.63	12.88	18.63	31.96	
8 / 2 Ebenen	1.63	8.88	14.63	21.63	40.86	
10 / 2 Ebenen	1.66	7.13	15.13	26.13	48.51	
12 / 2 Ebenen	0.49	7.63	16.38	27.63	54.87	
14 / 2 Ebenen	1.2	9.28	18.24	29.92	59.98	geschätzt
16 / 2 Ebenen	0.977	9.94	19.36	31.62	67.22	geschätzt
18 / 2 Ebenen	0.57	10.86	20.39	32.81	74.68	geschätzt
20 / 2 Ebenen	0.86	11.48	21.32	34.15	81.73	geschätzt
6 / 3 Ebenen	0.34	6.88	11.38	16.13	27.89	
9 / 3 Ebenen	0.69	5.63	12.88	22.13	40.68	
12 / 3 Ebenen	0.24	6.63	14.63	25.38	52.22	
15 / 3 Ebenen	0.464	8.24	16.75	27.83	62.33	geschätzt
18 / 3 Ebenen	0.23	9.10	18.23	30.13	70.91	geschätzt

Tabelle 4.6: Berechnung der Quantile der Verteilungen der Anordnungen in einer, zwei und drei Ebenen

Systemanzahl	Anzahl der Ebenen	max. magn. Flußdichte in $\mu\text{T}$	Erläuterungen zur Phasenfolge
24	1	1.707	bestehend aus 6 Grundanordnungen (Phasenfolge: RSST), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
32	1	0.736	bestehend aus 2 Grundanordnungen (Phasenfolge: RSST TSSR TSSR STTR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
48	1	0.876	bestehend aus 3 Grundanordnungen (Phasenfolge: RSST TSSR TSSR STTR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
64	1	0.821	bestehend aus 4 Grundanordnungen (Phasenfolge: RSST TSSR TSSR STTR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
72	1	1.5	bestehend aus 18 Grundanordnungen (Phasenfolge RSST), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
80	1	0.814	bestehend aus 5 Grundanordnungen (Phasenfolge: RSST TSSR TSSR STTR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
96	1	0.836	bestehend aus 6 Grundanordnungen (Phasenfolge: RSST TSSR TSSR STTR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
24	2	0.671	bestehend aus 4 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RTS, unten STR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
36	2	0.7	bestehend aus 6 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RTS, unten STR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
48	2	0.707	bestehend aus 8 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RTS, unten STR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
72	2	0.703	bestehend aus 12 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RTS, unten STR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
96	2	0.704	bestehend aus 16 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RTS, unten STR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
24	3	0.292	bestehend aus 4 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RT, mitte SS, unten TR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
36	3	0.267	bestehend aus 6 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RT, mitte SS, unten TR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
48	3	0.73	bestehend aus 8 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RT, mitte SS, unten TR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
72	3	0.27	bestehend aus 12 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RT, mitte SS, unten TR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist
96	3	0.271	bestehend aus 16 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben RT, mitte SS, unten TR), wobei die jeweils rechtsliegende Grundanordnung eine Phasenverschiebung von $120^\circ$ aufweist

Tabelle 5.2: Erstellte Phasenfolgen mit guter Feldreduktion von Anordnungen mit mehr als 20 Systemen

System-anzahl	Anzahl der Ebenen	max. magn. Flußdichte in $\mu\text{T}$	Erläuterungen zur Phasenfolge
24	1	71.216	bestehend aus 24 Systemen; 12x R, rechts folgend 12x S
32	1	82.091	bestehend aus 32 Systemen; 13x R, rechts folgend 6x S, wiederum rechts folgend 13x T
48	1	89.886	bestehend aus 48 Systemen; 21x R, rechts folgend 6x S, wiederum rechts folgend 21x T
64	1	93.749	bestehend aus 64 Systemen; 29x R, rechts folgend 7x S, wiederum rechts folgend 28x T
72	1	94.922	bestehend aus 72 Systemen; 33x R, rechts folgend 7x S, wiederum rechts folgend 32x T
80	1	95.837	bestehend aus 80 Systemen; 37x R, rechts folgend 7x S, wiederum rechts folgend 36x T
96	1	97.165	bestehend aus 96 Systemen; 45x R, rechts folgend 7x S, wiederum rechts folgend 44x T
24	2	93.521	bestehend aus 12 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, unten jeweils gleiche Phase); 6x R, rechts folgend 6x S
36	2	115.641	bestehend aus 18 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, unten jeweils gleiche Phase); 9x R, rechts folgend 9x S
48	2	125.73	bestehend aus 24 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, unten jeweils gleiche Phase); 12x R, rechts folgend 12x S
72	2	146.686	bestehend aus 36 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, unten jeweils gleiche Phase); 15x R, rechts folgend 6x S, wiederum rechts folgend 15x T
96	2	158.64	bestehend aus 48 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, mitte, unten jeweils gleiche Phase); 21x R, rechts folgend 7x S, wiederum rechts folgend 20x T
24	3	84.941	bestehend aus 8 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, mitte, unten jeweils gleiche Phase); 4x R, rechts folgend 4x S
36	3	120.216	bestehend aus 12 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, mitte, unten jeweils gleiche Phase); 6x R, rechts folgend 6x S
48	3	143.737	bestehend aus 16 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, mitte, unten jeweils gleiche Phase); 8x R, rechts folgend 8x S
72	3	167.813	bestehend aus 24 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, mitte, unten jeweils gleiche Phase); 12x R, rechts folgend 12x S
96	3	184.7	bestehend aus 32 Grundanordnungen (Phasenfolge: oben, mitte, unten jeweils gleiche Phase); 13x R, rechts folgend 6x S, wiederum rechts folgend 13x T

Tabelle 5.3: *Erstellte Phasenfolgen mit schlechter Feldreduktion von Anordnungen mit mehr als 20 Systemen*

Winkel der Phasen der Summenströme in °	1.Beispiel	2.Beispiel	3.Beispiel	4.Beispiel	5.Beispiel	6.Beispiel
1.System	201	240	353	218	67	52
2.System	227	55	133	312	15	189
3.System	140	296	285	217	213	347
4.System	242	195	277	40	213	340
5.System	213	12	126	126	45	137
6.System	126	106	99	283	295	188
7.System	241	189	72	311	2	290
8.System	333	28	62	135	79	28
9.System	270	261	229	56	114	48
konzentrierte Anordnung/ magn. Flußdichte in $\mu\text{T}$	3.264	0.504	1.085	0.498	1.706	1.368
3 Ebenen Anordnung/ magn. Flußdichte in $\mu\text{T}$	3.072	0.503	0.749	0.756	1.331	0.992

Winkel der Phasen der Summenströme in °	7.Beispiel	8.Beispiel	9.Beispiel	10.Beispiel	11.Beispiel	12.Beispiel
1.System	53	239	75	122	64	93
2.System	99	196	258	64	80	331
3.System	116	44	1	176	95	126
4.System	308	266	324	78	46	165
5.System	336	264	349	33	28	264
6.System	172	66	216	283	305	355
7.System	187	143	265	17	89	105
8.System	251	167	183	278	130	21
9.System	302	144	72	338	20	60
konzentrierte Anordnung/ magn. Flußdichte in $\mu\text{T}$	0.266	2.207	1.367	1.815	4.356	2.133
3 Ebenen Anordnung/ magn. Flußdichte in $\mu\text{T}$	0.445	1.687	1.223	1.446	3.610	1.599

	Mittelwert der Beispiele	Erwartungswert
konzentrierte Anordnung/ magn. Flußdichte in $\mu\text{T}$	1.714	2.13
3 Ebenen Anordnung/ magn. Flußdichte in $\mu\text{T}$	1.451	1.75

Tabelle 6.1: Stichproben und deren Auswertung zur Bestimmung des Einflusses von Nullströmen auf die magnetische Flußdichte

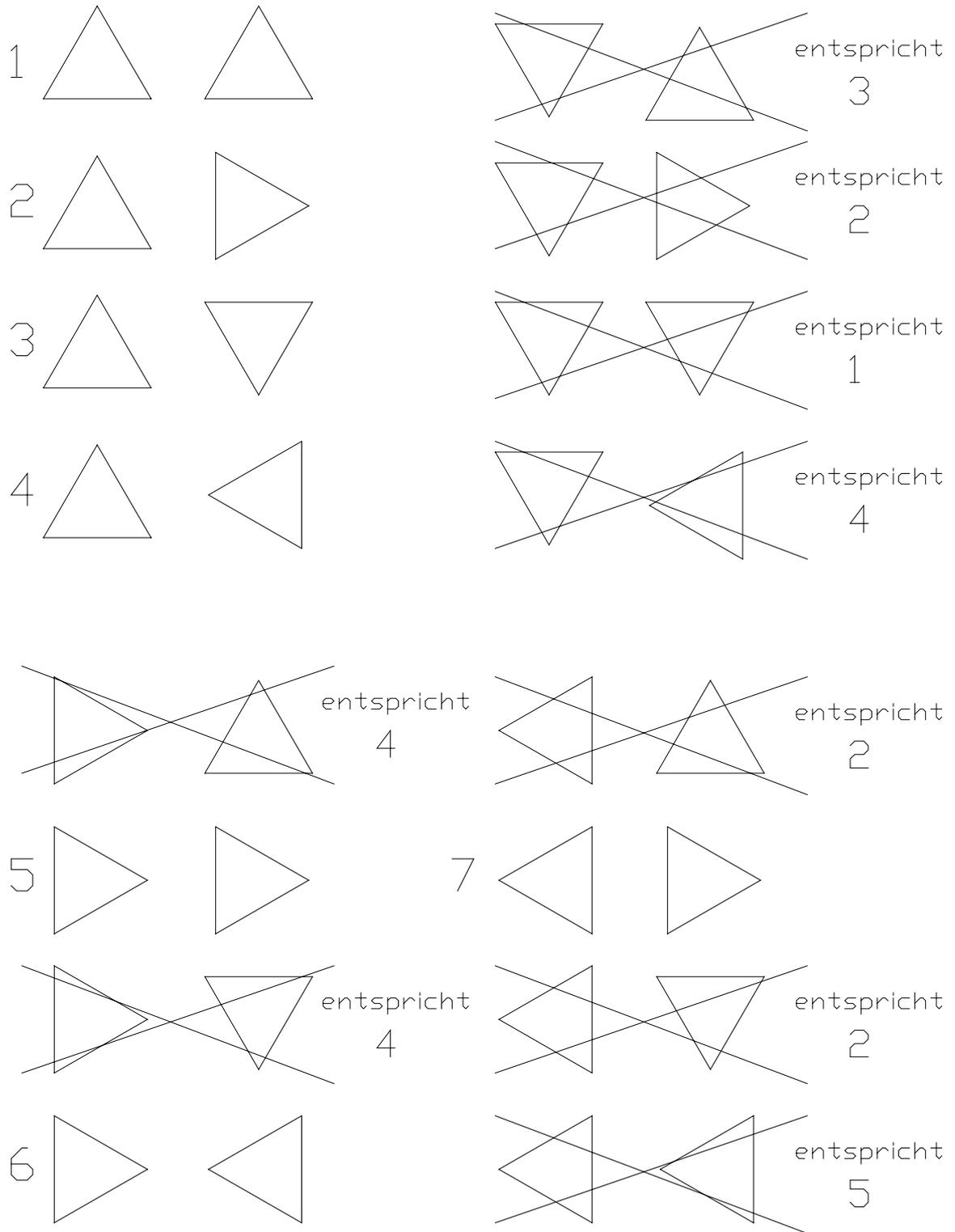


Abbildung 4.3: Möglichkeiten der geometrischen Anordnung der Kabelbündel in Dreiecksverlegung bei einem minimalen Rotationswinkel von  $30^\circ$ . Die Feldberechnung der sieben verbleibenden Anordnungen erfolgte oberhalb und unterhalb der Anordnung.

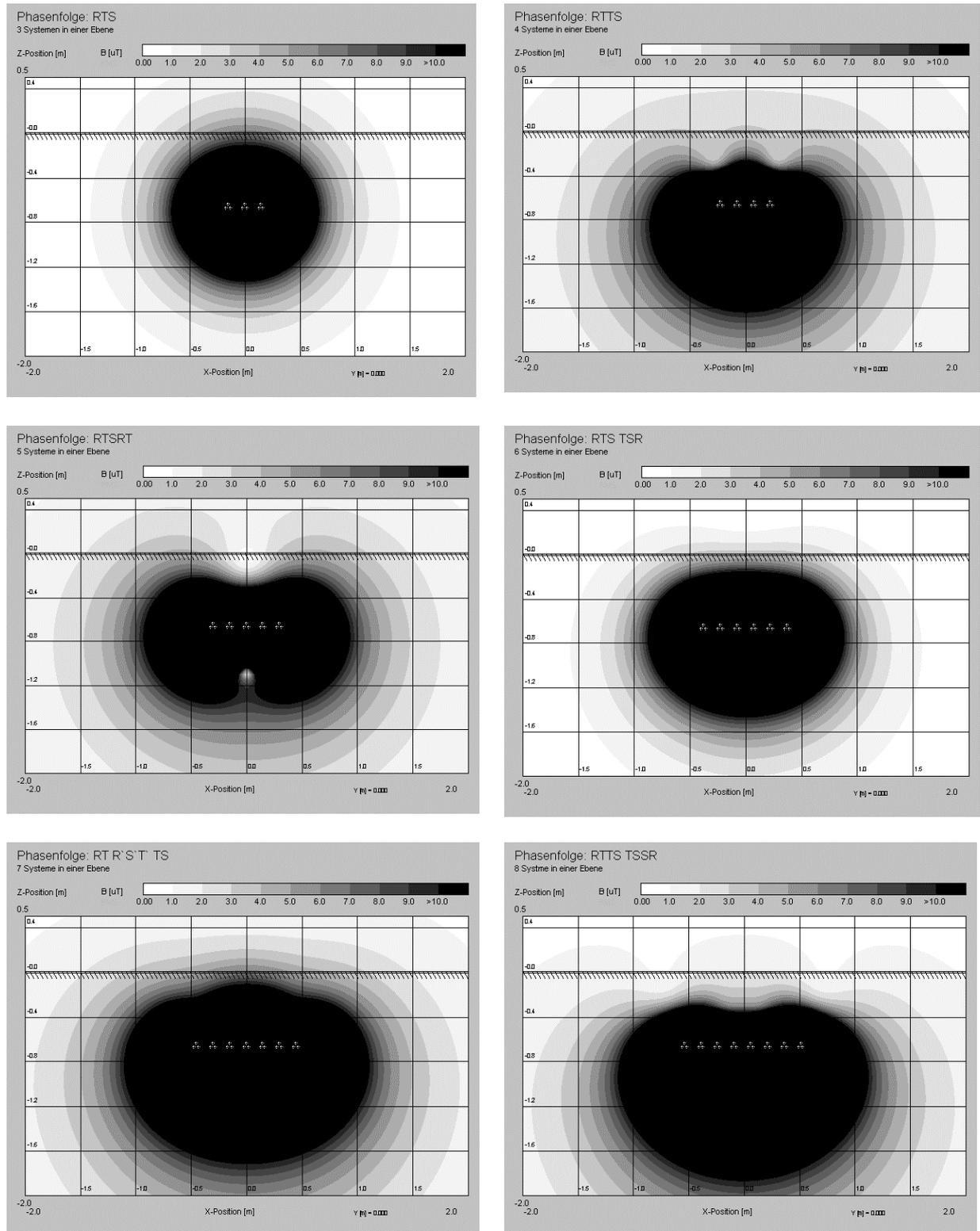


Abbildung 4.8: Magnetische Flußdichte an Kabeltrassen des Kabeltyps N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV in einer 2d-Verlegung mit Angabe der optimalen Phasenfolge. Die Phasenfolge wurde für die geringste Flußdichte in einer Höhe von 0,2 m über dem Erdboden ermittelt. Variation der Systemanzahl von 3 bis 8. Parameter: Leiterstrom= 526 A; Verlegetiefe= 0,7 m; Systemabstand= 0,07 m

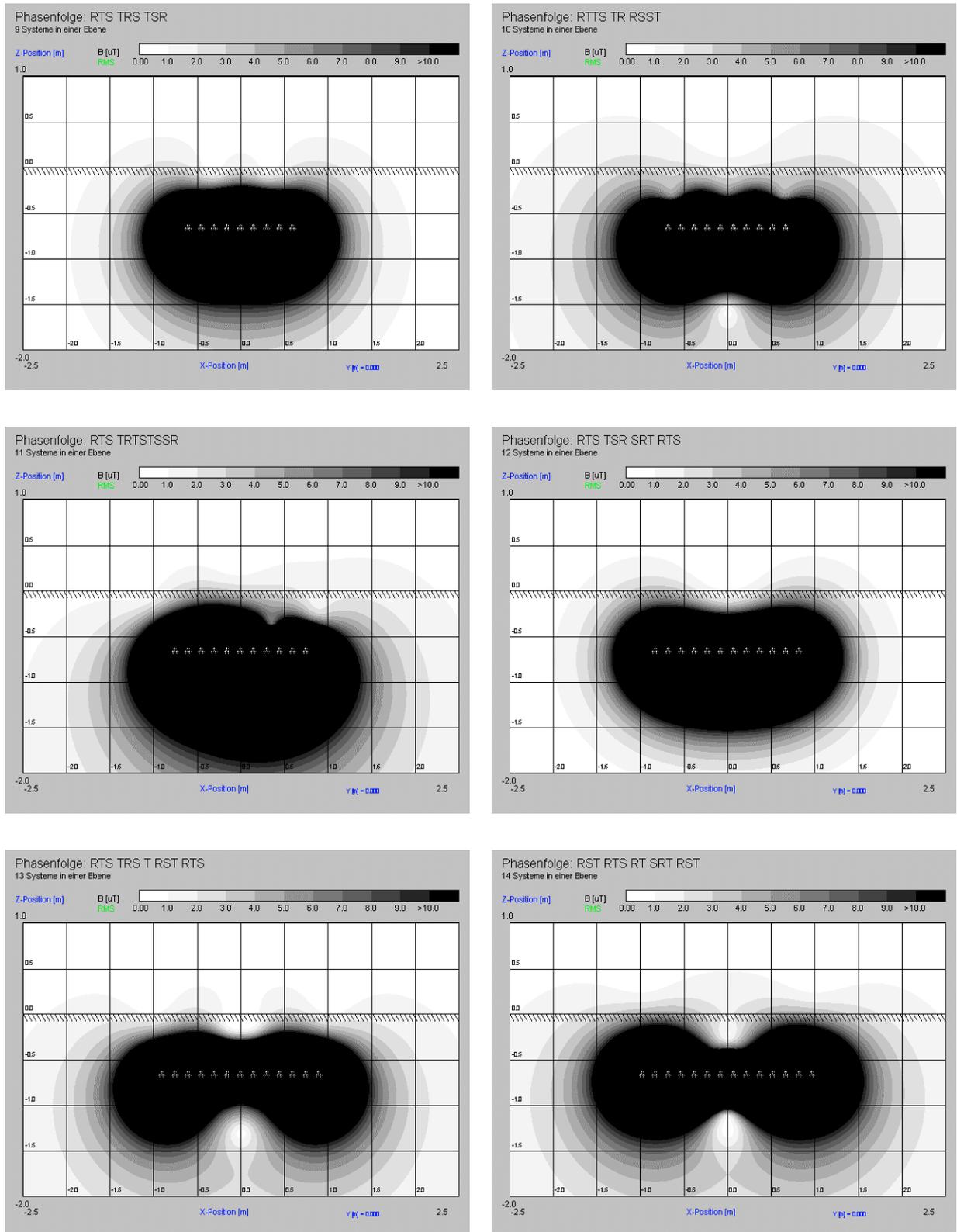


Abbildung 4.9: Magnetische Flußdichte an Kabeltrassen des Kabeltyps N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV in einer 2d-Verlegung mit Angabe der optimalen Phasenfolge. Die Phasenfolge wurde für die geringste Flußdichte in einer Höhe von 0,2 m über dem Erdboden ermittelt. Variation der Systemanzahl von 9 bis 14. Parameter: Leiterstrom= 526 A; Verlegetiefe= 0,7 m; Systemabstand= 0,07 m

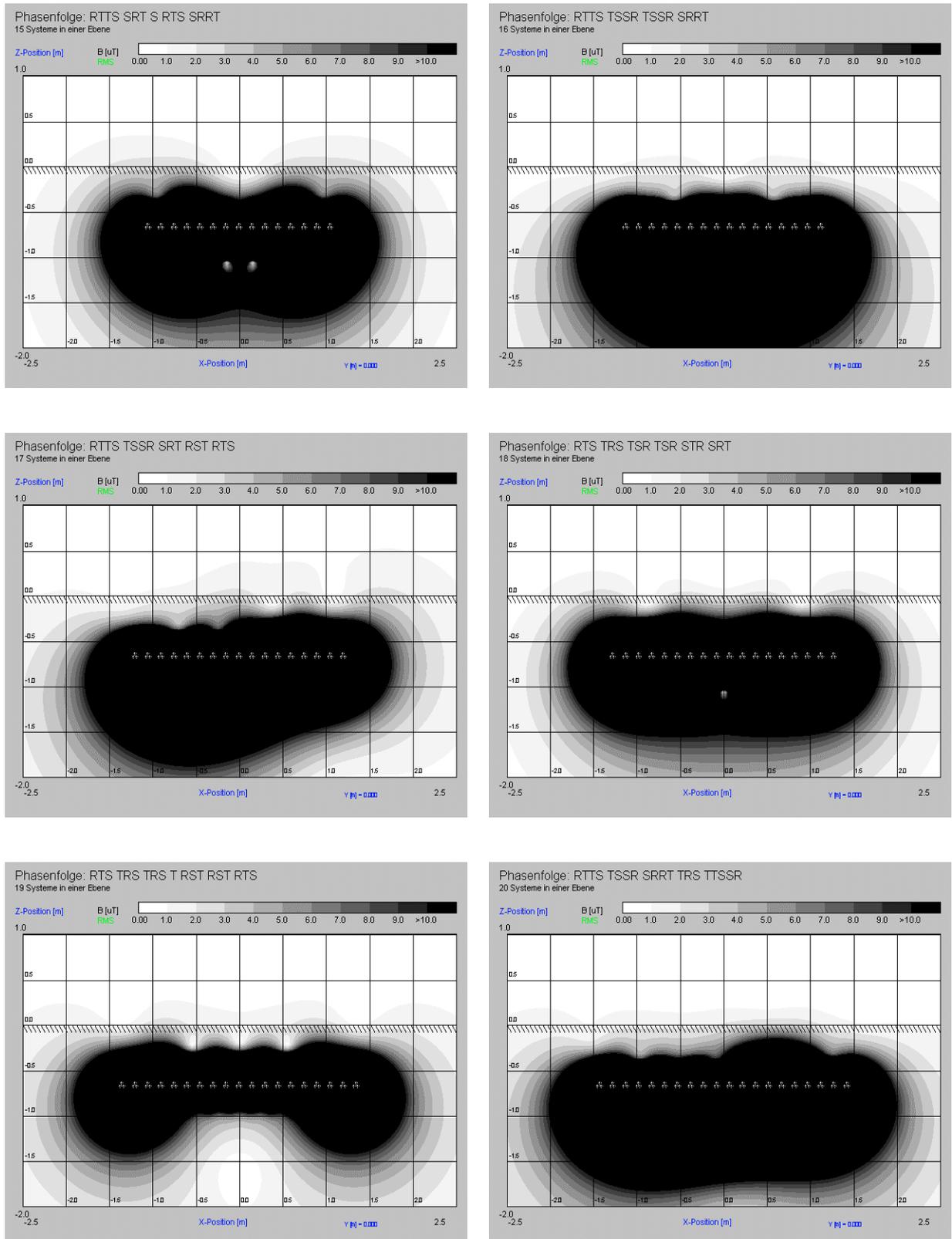


Abbildung 4.10: Magnetische Flußdichte an Kabeltrassen des Kabeltyps N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV in einer 2d-Verlegung mit Angabe der optimalen Phasenfolge. Die Phasenfolge wurde für die geringste Flußdichte in einer Höhe von 0,2 m über dem Erdboden ermittelt. Variation der Systemanzahl von 15 bis 20. Parameter: Leiterstrom= 526 A; Verlegetiefe = 0,7 m; Systemabstand= 0,07 m

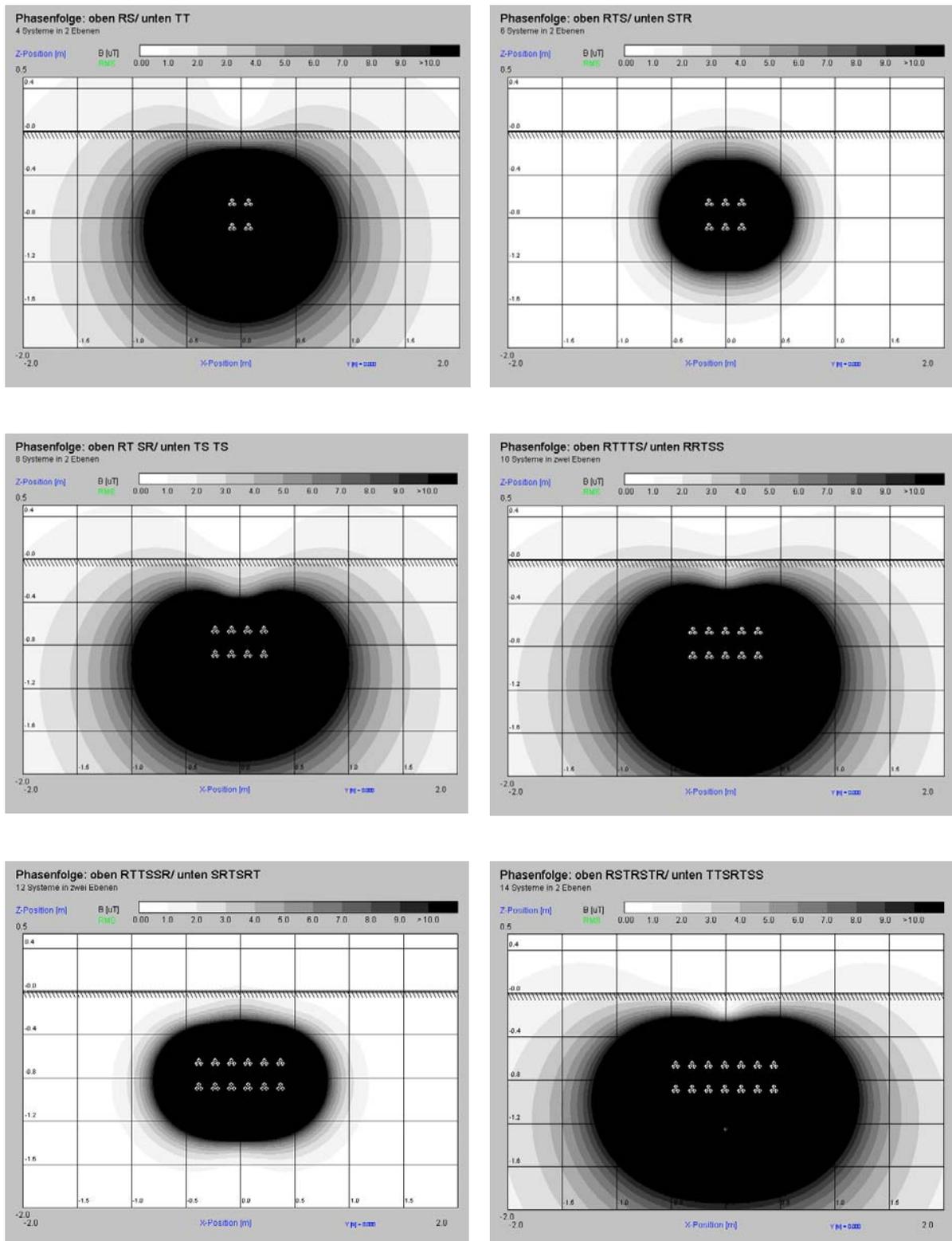


Abbildung 4.16: Magnetische Flußdichte an Kabeltrassen des Kabeltyps N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV in einer 2d-Verlegung mit Angabe der optimalen Phasenfolge. Die Phasenfolge wurde für die geringste Flußdichte in einer Höhe von 0,2 m über dem Erdboden ermittelt. Variation der Systemanzahl von 4 bis 14.  
Parameter: Leiterstrom= 526 A; Verlegetiefe= 0,7/ 0,925 m; Systemabstand= 0,07 m

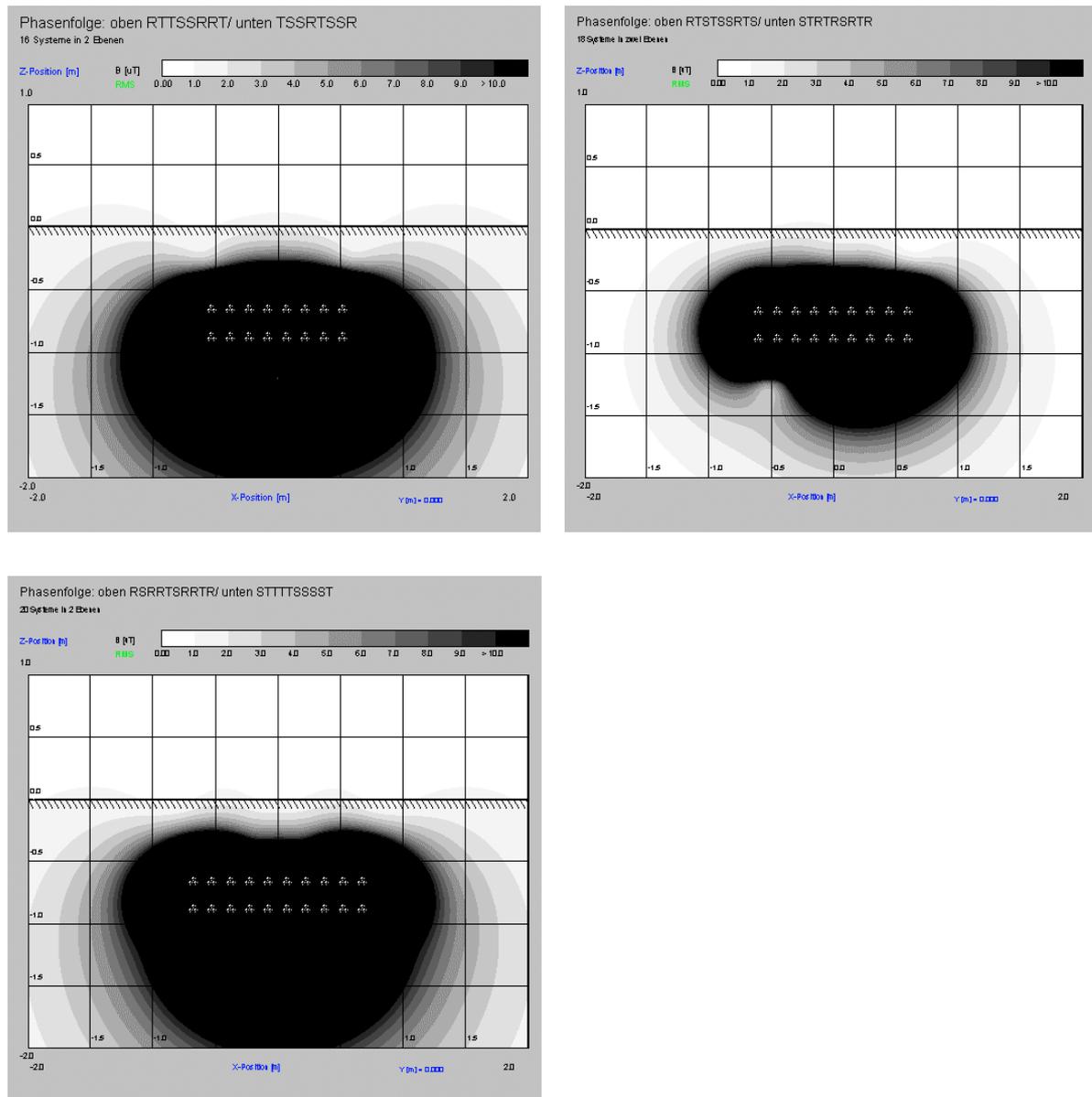


Abbildung 4.17: Magnetische Flußdichte an Kabeltrassen des Kabeltyps N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV in einer 2d-Verlegung mit Angabe der optimalen Phasenfolge. Die Phasenfolge wurde für die geringste Flußdichte in einer Höhe von 0,2 m über dem Erdboden ermittelt. Variation der Systemanzahl von 16 bis 20. Parameter: Leiterstrom= 526 A; Verlegetiefe= 0,7/ 0,925 m; Systemabstand= 0,07 m

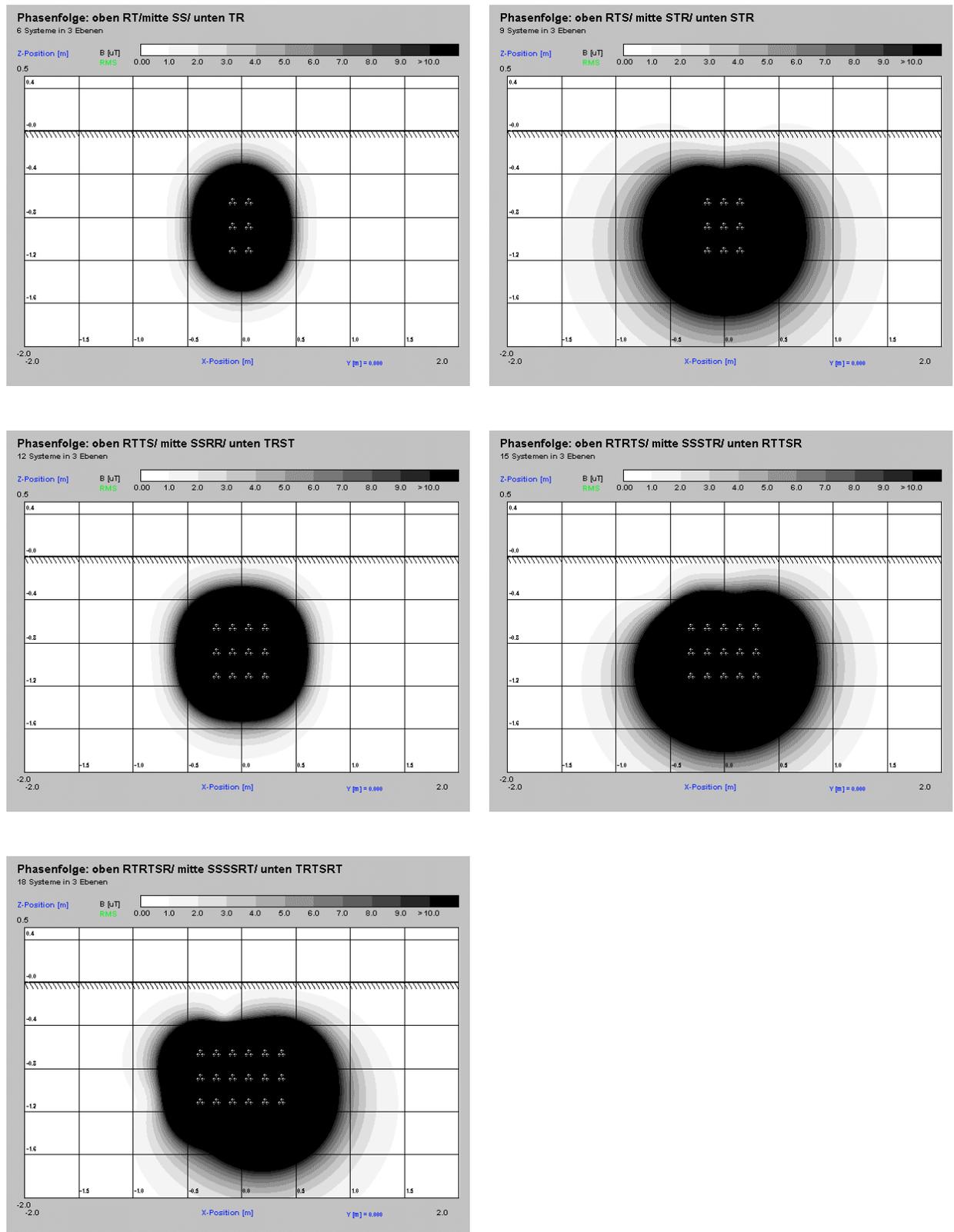


Abbildung 4.19: Magnetische Flußdichte an Kabeltrassen des Kabeltyps N2XS(F)2Y 1x240 6/10 kV in einer 2d-Verlegung mit Angabe der optimalen Phasenfolge. Die Phasenfolge wurde für die geringste Flußdichte in einer Höhe von 0,2 m über dem Erdboden ermittelt. Variation der Systemanzahl von 6 bis 18.  
Parameter: Leiterstrom= 526 A; Verlegetiefe= 0,7/0,925/1,115 m; Systemabstand= 0,07 m

---

## Literaturverzeichnis

26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. (Verordnung über elektromagnetische Felder 26. BImSchV). In: Bundesgesetzblatt, 1996, Teil 1, Nr. 66, (Dez. 1996).

ABB: Asea Brown Boveri-Taschenbuch Schaltungen. 9. Auflage, Düsseldorf: Cornelsen-Verlag, 1992. –ISBN 3-464-48233-2

Alcatel Kabel: Interne Mitteilung zu den technologischen Prinzipien der Wechschlagverseilung. Fax vom 23.Oktober 1999.

Biewald, H., Henschel, M., Ringler, J.: Übertragungsfähigkeit von Kabeln in Standardtrassen der Bewag. In: Sonderdruck (Nr. 4612) aus Elektrizitätswirtschaft „Die elektrische Energieversorgung Berlins“. VDEW, Jg. 94 (1995), H. 8, S. 403-487.

Binns, K. J., Lawrenson, P. J., Trowbridge, C. W.: The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1992. –ISBN 0-471-92460-1

Bohge, M., Hardtke, R., Raskop, M.: Gesichtspunkte zur Planung des elektrischen Versorgungsnetzes von Berlin. In: Sonderdruck (Nr. 4612) aus Elektrizitätswirtschaft „Die elektrische Energieversorgung Berlins“. VDEW, Jg. 94 (1995), H. 8, S. 4-14.

Brakelmann, H. [1]: EMV-Maßnahmen für Drehstrom-Einleiterkabel. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 94 (1995), Heft 15, S. 926-930.

Brakelmann, H. [2]: Beschreibung des Prinzips der Belastbarkeitsberechnung. Auszug aus der Vorlesung: Berechnungsverfahren der Energiekabeltechnik. Universität Duisburg, 1992.

Brakelmann, H. [3]: CAE bei der Planung von Energiekabeltrassen. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 90 (1991), Heft 8, S. 384-393.

Brakelmann, H. [4]: Verfahren zur Bestimmung von Stromdichteverteilungen paralleler Leitersysteme. In: etz-Archiv, Band 4 (1982), Heft 5, S. 127-133.

Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. 25.Auflage, Moskau: Verlag Nauka; Stuttgart: B.G.Teubner Verlagsgesellschaft, 1991.

–ISBN 3-8154-2000-8

Buchholz, H.: Elektrische Strömungsfelder mit Schraubenstruktur. In: Elektrische Nachrichtentechnik, Band 14 (1937), Heft 8, S. 264-284.

DIN VDE 0228 Teil 2. Maßnahmen bei Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Starkstromanlagen. Beeinflussung durch Drehstromanlagen. Berlin: VDE-Verlag GmbH, Dez. 1987.

DIN EN 50 082 Teil 1. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Fachgrundnorm Störfestigkeit. Teil 1: Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe. Berlin: VDE-Verlag GmbH, März 1993.

DIN EN 50 082 Teil 2. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Fachgrundnorm Störfestigkeit. Teil 2: Industriebereich. Berlin: VDE-Verlag GmbH, Feb. 1996.

Hadrian, W.: Entfernungsgesetze in der Energietechnik. In: Elektrotechnik und Informations-technik, Jg. 115 (1998), Heft 9, S. 452-456.

Hannakam, L., Boulahia, K.: Bestimmung der Stromverteilung in einem Mehrleitersystem aus zylindrischen Massivleitern und Hohlzylindern endlicher Wandstärke. In: Archiv für Elektrotechnik. Jg. 61 (1979), S. 337-346.

Haper, F.: The Magnetic Field in the Vicinity of Parallel and Twisted Three-Wire Cable Carrying Balanced Three-Phased Current. In: IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC 16 (May 1974), No. 2, p. 76-82.

Hartung, J.: Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 7. Auflage, München: R. Oldenbourg-Verlag, 1989. –ISBN 3-486-21448-9

Heuck, K.: Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Transport und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis. 4. Auflage, Braunschweig: Vieweg-Verlag, 1999.

–ISBN 3-528-38547-2

Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. Bundes-Immissionsschutzverordnung). Entwurf des LAI-AK „EMS“, (15. Dez. 1997).

ICNIRP: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Elektromagnetic Fields (up to 300 GHz). In: Health Physics, Vol. 74 (April 1998), No. 4, p. 494-522.

Jäkel, B., Messer, R.: Niederfrequente magnetische Streufelder von Energiekabeln und deren Kopplung. In: Schmeer, H. (Hrsg.): Elektromagnetische Verträglichkeit/ EMV '96. 5. Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, 20.- 22. Februar 1996, Stuttgart. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag, 1996.  
–ISBN 3-8007-2164-3

Kegel, R., Muchaier, M., Basche, S.: Rechnergestützte, EMV-gerechte Planung und Projektierung von Freileitungs-, Sammelschienen- und Kabeltrassen. In: Elektrie, Jg. 52 (1998), Heft 4/5/6/7/8, S. 183-195.

Kirschvink, J. L., Kobayashi-Kirschvink, A., Woodford, B. J., Kirschvink, S. J.: Magnetite in human tissues: a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields. In: Bioelectromagnetics, No. 1 (1998), p. 101-113.

Kost, A.: Numerische Methoden in der Berechnung elektromagnetischer Felder. Berlin: Springer-Verlag, 1994. –ISBN 3-540-55005-4

Lehner, G.: Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker. 3.Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 1996. –ISBN 3-540-60373-5

Pannicke, J., Demmig, S.: Überspannungsverhältnisse und Dimensionierung von Mantelspannungsableitern an Höchstspannungskabeln. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 97 (1998), Heft 6, S. 52-56

Peschke, E. F., von Olshausen, R.: Kabelanlagen für Hoch –und Höchstspannung: Entwicklung, Herstellung, Prüfung, Montage und Betrieb von Kabeln und deren Garnituren. Erlangen, München: Publicis MCD-Verlag, 1998. –ISBN 3-89578-057-X

Pettersson, P., Schönberg, N.: Reduction of Power System Magnetic Field by Configuration Twist. In: IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12 (Oct. 1997), No. 4 p. 1678-1683.

---

Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T.: Numerical Recipes in Pascal. The Art of Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. –ISBN 0-521-37516-9

Purcell, E. M.: Elektrizität und Magnetismus. Aus dem Amerikanischen übersetzte und bearbeitete 4. Auflage, Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1989. –ISBN 3-528-38352-6

Schmitt, W.: Numerische Berechnung der Abschirmwirkung leitfähiger Bleche auf magnetische Wechselfelder. In: Elektrie, Jg. 51 (1997), Heft 11/12, S. 457- 459.

Schwab, A. J.: Begriffswelt der Feldtheorie. 5.Auflage, Berlin: Springer-Verlag, 1998. –ISBN 3-540-63487-8

Schwetz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung von dreidimensionalen Magnetfeldern im Nahbereich von Leitungen der elektrischen Energieversorgung. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 85 (1986), Heft 21, S. 827-831.

Suess, M. J., Benwell-Morison, D. A. (Editors): Nonionizing radiation protection. 2<sup>th</sup> edition. Copenhagen: World Health Organisation. Regional Office for Europe, 1989 –ISBN 92-890-1116-5

Tenforde, T.S.: Interaction of extremely-low frequency electromagnetic fields with living systems. In: Matthes R. (Editor): Proceedings of the Third International Non-Ionizing Radiation Workshop, Baden, Austria, April 22-26, 1996. München: Märkl-Druck, 1996. –ISBN 3-9804789-1-2

Thiem, B.: Umweltfragen bei Mittel- und Hochspannungskabeln. In: Elektrizitätswirtschaft, Jg. 96 (1997), Heft 20, S. 1141-1144.

von Weiss, A.: Die elektromagnetischen Felder. Einführung in die Feldtheorie und ihre Anwendung. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1993. –ISBN 3-528-04225