

Magnetfelder der 110-kV-Drehstromkabel bei der Eiderquerung östlich von Tönning

Auftraggeber

TenneT TSO GmbH

Mit der Durchführung beauftragt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. B. R. Oswald

Hannover, 8.07.2014

Inhalt

1	Anlass und Zielsetzung	3
2	Berechnung.....	4
2.1	Grundsätzliches	4
2.2	Kabellegung in Rohren.....	5
2.3	Kabellegung im Graben	8
3	Zusammenfassung.....	11
4	Literatur	11
	Anhang A1: Berechnung der magnetischen Flussdichte	12
	A1.1 Exakte Berechnung.....	12
	A1.2 Vereinfachte Berechnung.....	12
	Anhang A2: Bemerkungen zur Variantenvielfalt	13

1 Vorgaben und Zielsetzung

Für die Teilverkabelung der 110-kV-Doppelfreileitung bei Tönning mit 110-kV-Kabeln sind die von den Kabelströmen ausgehenden Magnetfelder zu berechnen. Der Begriff Magnetfelder ist umgangssprachlich. Es ist üblich, anstelle der magnetischen Feldstärke die magnetische Flussdichte zu berechnen und zu bewerten. Die magnetische Flussdichte ist der magnetischen Feldstärke proportional. Sie wird in μT (Mikrotesla) angegeben. Der Proportionalitätsfaktor ist die Permeabilität $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Der vorgesehene Verlauf der Kabeltrasse im Korridor 3.1 ist in Bild 1.1 als durchgezogene violette Linie ersichtlich. Der Querschnitt der Teilverkabelungsstrecke ist aus Bild 1.2 ersichtlich.

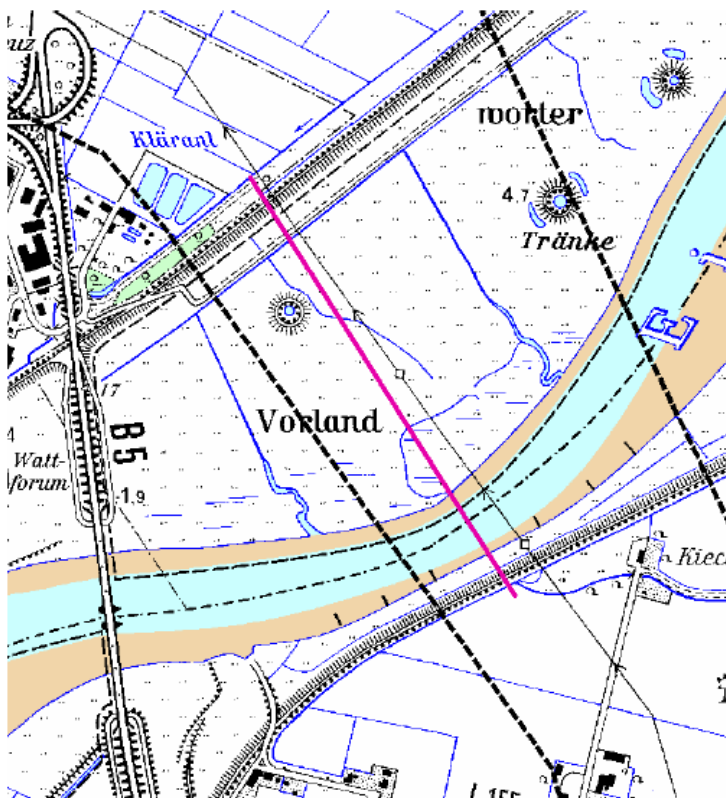


Bild 1.1. Verlauf der Kabeltrasse entlang der 110-kV-Bestandsleitung

Die maximalen Kabelströme pro System betragen 870 A. Die Schirme der Kabel sind einseitig geerdet, so dass keine nennenswerten Schirmströme auftreten. Die Kabelströme verursachen aufgrund ihrer zeitlichen Abhängigkeit und unterschiedlicher Phasenlage ein elliptisches Drehfeld in der senkrecht zur Kabelrichtung stehenden x-y-Ebene, das sich dem natürlichen magnetischen Gleichfeld der Erde (etwa $40 \mu\text{T}$ in unseren Breiten) geometrisch überlagert.

Für die Berechnung der magnetischen Flussdichte wird gewöhnlich ein vereinfachtes Berechnungsverfahren nach der Norm /2/ angewendet. Dabei wird der Maximalwert aus den Beträgen der x- und y-Komponente ohne Berücksichtigung deren verschiedener Phasenlage gebildet wird (s. Anhang A1). Man erhält dann etwas größere, bestenfalls gleiche Maximalwerte der magnetischen Flussdichte wie nach dem exakten Berechnungsverfahren.

Die vorliegenden Berechnungen wurden mit beiden Berechnungsverfahren durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Dabei wurden die beiden aus Bild 1.2 ersichtlichen Anordnungen:

1. Kabellegung in PE-HD-Rohren mit maximaler Überdeckung von 24 m unter der Geländeoberkannte und
2. Kabellegung im Graben im Übergangsbereich zwischen den Rohrenden und den Kabelendmasten mit einer Legetiefe von 1,6 m untersucht.

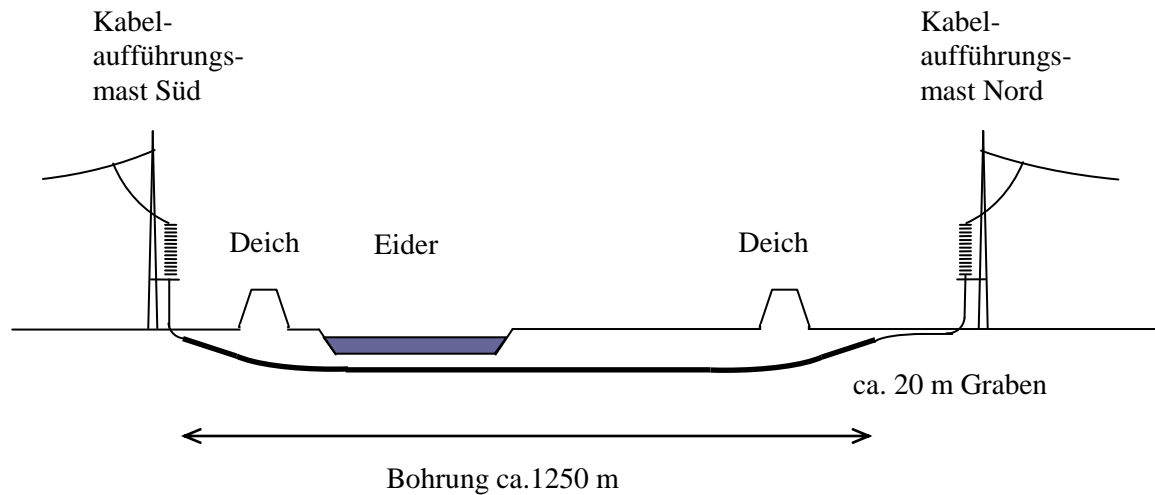


Bild 1.2. Querschnitt durch die Teilverkabelungsstrecke (nicht maßstäblich)

2 Berechnung

2.1 Grundsätzliches

Der Effektivwert der magnetischen Flussdichte B hängt von den Strömen (Effektivwerte), der Lage der Kabel in Bezug auf den Messpunkt (hier entlang der Geländeoberfläche) und der einzelnen Kabelleiter eines Drehstromsystems zu den Leitern weiterer in der Nähe befindlicher Drehstromsysteme sowie der Zuordnung der Ströme

$$\underline{I}_a, \underline{I}_b = \underline{a}^2 \underline{I}_a, \underline{I}_c = \underline{a} \underline{I}_a \quad (\underline{a} = e^{j2\pi/3})$$

der beiden Drehstromsysteme zu den Kabeladern M1, M2, M3 und L1, L2, L3 (s. Bilder 2.1 und 2.4) ab. Für diese Zuordnung gibt es pro System jeweils die sechs Möglichkeiten nach Tabelle 2.1, so dass sich bei zwei Drehstromsystemen insgesamt $6^2 = 36$ verschiedene Möglichkeiten der Zuordnung ergeben.

Tabelle 2.1. Zuordnung der Ströme des Drehstromsystems zu den Kabeladern (es sind nur die Indizes a, b, c der Ströme angegeben)

m	M1-M2-M3	l	L3-L2-L1
1	a-b-c	1	c-b-a
2	b-c-a	2	a-c-b
3	c-a-b	3	b-a-c
4	c-b-a	4	a-b-c
5	a-c-b	5	b-c-a
6	b-a-c	6	c-a-b

Jedes der beiden Drehstromsysteme erzeugt im Messpunkt mit den Koordinaten x und y ein elliptisches Drehfeld. Der Umlaufsinn hängt von der Stromzuordnung innerhalb der Drehstromsysteme ab. Für die Zuordnungen $m = 1..3$ und $l = 4..6$ in Tabelle 2.1 werden die zugehörigen Ellipsen im Uhrzeigersinn und für die Zuordnungen $m = 4..6$ und $l = 1..3$ im Gegen- uhrzeigersinn durchlaufen. Beide Drehfelder überlagern sich zum resultierenden Drehfeld, das im Allgemeinen wieder eine elliptische Form hat. Je weiter der Messpunkt von den Kabeln entfernt ist und je geringer der Abstand der Kabel innerhalb der Drehstromsysteme ist, desto mehr nähert sich der von ihnen ausgehende Anteil des Magnetfeldes und das resultierende Magnetfeld einem kreisförmigen Verlauf an.

Die (an sich beliebige) Sortierung in Tabelle 2.1 zeigt, dass bei spiegelsymmetrischer Anordnung der Kabel und gleichen Strömen (Effektivwerten) beider Drehstromsysteme die Kombinationen $l_i - m_k$ ($i, k = 1..6$) die gleiche magnetische Flussdichte wie die Kombinationen $l_k - m_i$ verursachen. Damit beschränkt sich die Vielfalt der Stromzuordnungsmöglichkeiten hinsichtlich der magnetischen Flussdichte zunächst auf die 21 Zuordnungsmöglichkeiten in Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2. Relevante Stromzuordnungsmöglichkeiten

	$l = 1$	2	3	4	5	6
$m = 1$	×	×	×	×	×	×
2		×	×	×	×	×
3			×	×	×	×
4				×	×	×
5					×	×
6						×

Für die 21 Möglichkeiten der Stromzuordnung nach Tabelle 2.2 wurden die Verläufe der magnetischen Flussdichte an der Geländeoberfläche ($y = 0$) für die beiden Kabelanordnungen in Abhängigkeit von der Koordinate x nach der exakten und vereinfachten Methode berechnet und der jeweilige Maximalwert ermittelt.

Dabei hat sich gezeigt, dass sich bei allen 21 bzw. 36 Varianten der Stromzuordnungen zu den Kabeladern nur 5 unterschiedliche Maximalwerte ergeben. Die Begründung dafür ist im Anhang A2 dargelegt.

2.2 Kabellegung im Rohr

Das Bild 2.1 zeigt die Anordnung mit den Abmessungen und der Bezeichnung der Kabeladern. Der seitliche Abstand der beiden Kabelsysteme von 10 m und die maximale Überdeckung von 24 m sind aus bohrtechnischen Gründen und zur Gewährleistung einer genügenden Überdeckung unterhalb der Flusssohle der Eider erforderlich.

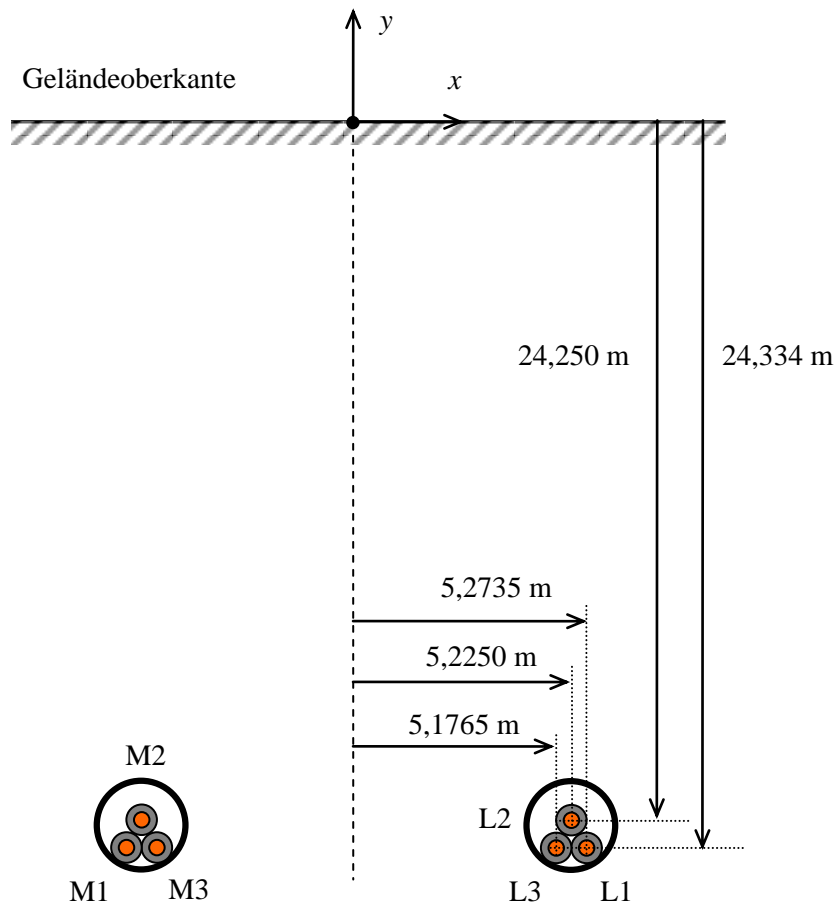


Bild 2.1. Bohrprofil für 2 Kabelsysteme in PE-HD-Rohren mit 450 mm Außendurchmesser. Kabelaußendurchmesser 97 mm.

Die sich bei exakter Rechnung ergebenden Maximalwerte sind in Tabelle 2.3 zusammengestellt. Die Maxima aus der vereinfachten Berechnung enthält die Tabelle 2.4.

Tabelle 2.3. Maximalwerte der magnetischen Flussdichte in μT für die 36 Möglichkeiten der Stromzuordnung zu den Kabeladern nach exakter Berechnung

	$l = 1$	2	3	4	5	6
$m = 1$	0,0473	0,0473	0,0473	0,0432	0,0384	0,0101
2	0,0473	0,0473	0,0473	0,0101	0,0432	0,0384
3	0,0473	0,0473	0,0473	0,0384	0,0101	0,0432
4	0,0432	0,0101	0,0384	0,0473	0,0473	0,0473
5	0,0384	0,0432	0,0101	0,0473	0,0473	0,0473
6	0,0101	0,0384	0,0432	0,0473	0,0473	0,0473

Tabelle 2.4. Maximalwerte der magnetischen Flussdichte in μT für die 36 Möglichkeiten der Stromzuordnung zu den Kabeladern nach genäherter Berechnung

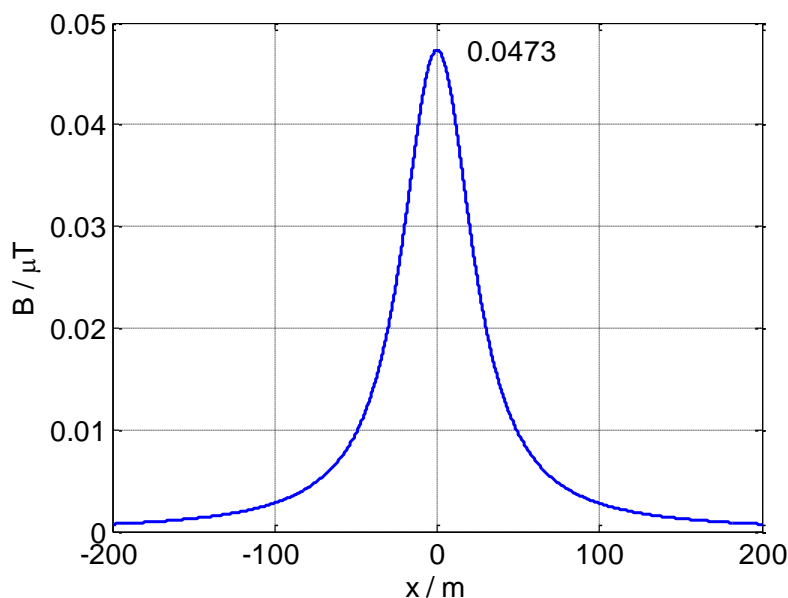
	$l = 1$	2	3	4	5	6
$m = 1$	0,0473	0,0473	0,0473	0,0610	0,0543	0,0142
2	0,0473	0,0473	0,0473	0,0142	0,0610	0,0543
3	0,0473	0,0473	0,0473	0,0543	0,0142	0,0610
4	0,0610	0,0142	0,0543	0,0473	0,0473	0,0473
5	0,0543	0,0610	0,0142	0,0473	0,0473	0,0473
6	0,0142	0,0543	0,0610	0,0473	0,0473	0,0473

Die Variablen m und l bezeichnen die Variantenummer für die Systeme M und L in Tabelle 2.1. So bedeutet beispielsweise $m = 1$ und $l = 3$ die folgende Stromzuordnung.

m	M1-M2-M3	l	L3-L2-L1
1	a-b-c	3	b-a-c

Der absolute Maximalwert (Höchstwert) der magnetischen Flussdichte beträgt nach der exakten Berechnung **0,0473 μT** und nach der genäheren Berechnung **0,0610 μT** .

Den Verlauf der magnetischen Flussdichte an der Geländeoberfläche entlang der Ortskoordinate x für die Stromzuordnungen, die zum Höchstwert von 0,0473 μT nach exakter Berechnung führen, zeigt das Bild 2.2.

**Bild 2.2.** Verlauf des Betrages der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von der Ortskoordinate x für die Varianten der Stromzuordnung zu den Kabeladern nach Tabelle 2.3, die zum Höchstwert führen (nach exakter Berechnung).

Die zum Verlauf Bild 2.2 gehörende Ortskurve der magnetischen Flussdichte zeigt Bild 2.3. Die Ellipse ist in diesem Fall zu einer Geraden auf der x -Achse entartet, weil sich die von den beiden Stromsystemen verursachten Y -Komponenten der magnetischen Flussdichte gegenseitig aufheben.

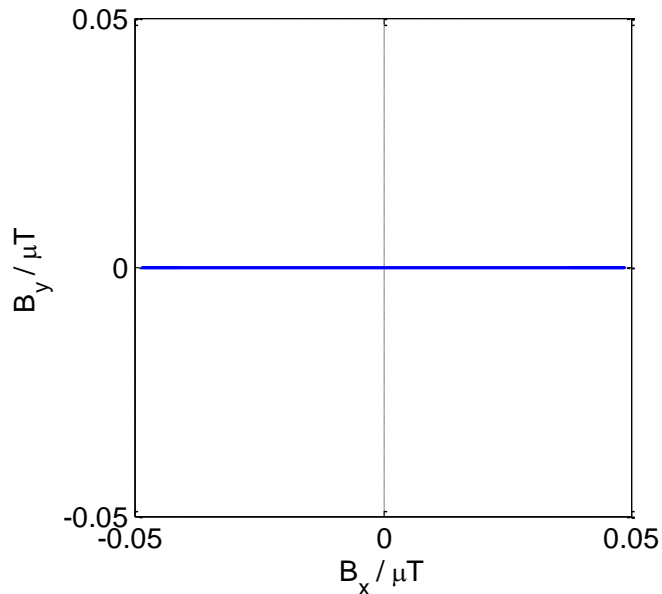


Bild 2.3. Ortskurve der magnetischen Flussdichte an der Stelle $x = y = 0$ für die Varianten der Stromzuordnung zu den Kabeladern nach Tabelle 2.3, die zum Höchstwert führen (exakte Berechnung).

2.3 Kabellegung im Graben

Das Grabenprofil ist in Bild 2.4 dargestellt. Es wurden wieder alle 36 Varianten der Stromzuordnung zu den Kabeladern entsprechend Tabelle 2.1, sowohl mit dem exakten als auch nach dem genäherten Berechnungsverfahren untersucht. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 2.5 und 2.6 zusammengestellt und für die zu den Höchstwerten der magnetischen Flussdichte führenden Stromzuordnungen in den Bildern 2.5 und 2.6 illustriert.

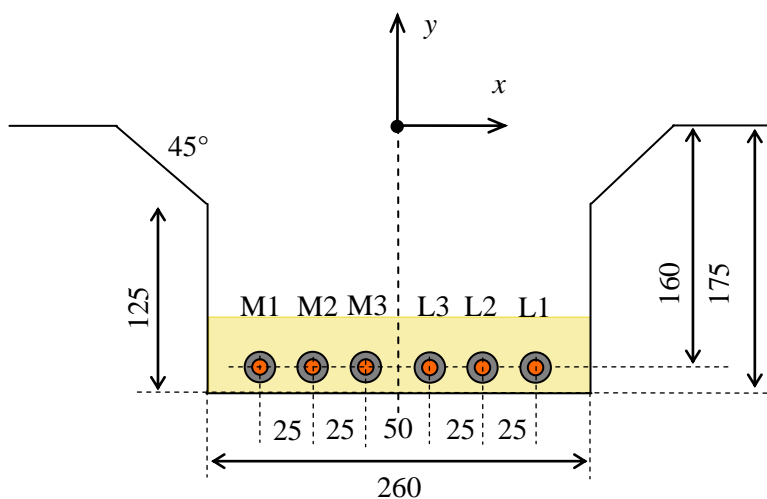


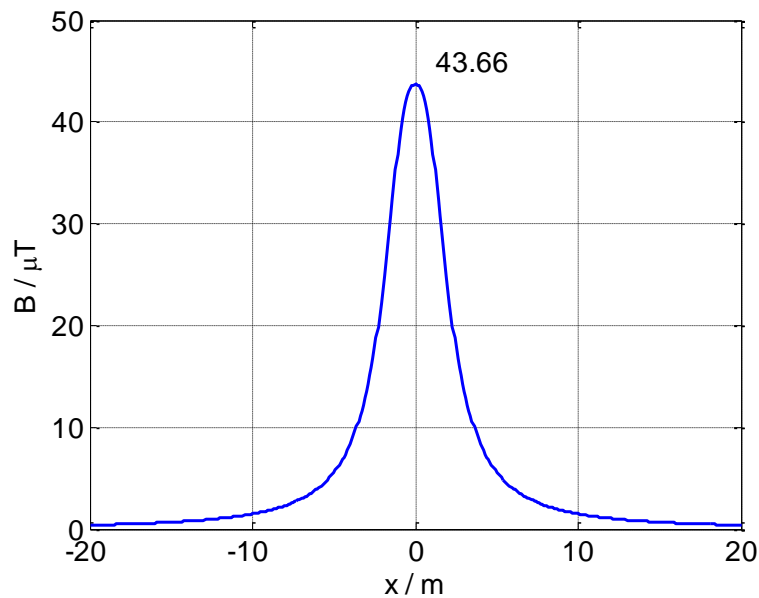
Bild 2.4. Grabenprofil für 2 Kabelsysteme (Maße in cm).

Tabelle 2.5. Maximalwerte der magnetischen Flussdichte in μT für die 36 Möglichkeiten der Stromzuordnung zu den Kabeladern nach exakter Berechnung

	$l = 1$	2	3	4	5	6
$m = 1$	29,58	38,22	38,22	43,66	27,38	24,60
2	38,22	29,58	38,22	24,60	43,66	27,38
3	38,22	38,22	29,58	27,38	24,60	43,66
4	43,66	24,60	27,38	29,58	38,22	38,22
5	27,38	43,66	24,60	38,22	29,58	38,22
6	24,60	27,38	43,66	38,22	38,22	29,58

Tabelle 2.6. Maximalwerte der magnetischen Flussdichte in μT für die 36 Möglichkeiten der Stromzuordnung zu den Kabeladern nach genäherter Berechnung

	$l = 1$	2	3	4	5	6
$m = 1$	29,58	40,71	40,71	43,75	36,66	30,53
2	40,71	29,58	40,71	30,53	43,75	36,66
3	40,71	40,71	29,58	36,66	30,53	43,75
4	43,75	30,53	36,66	29,58	40,71	40,71
5	36,66	43,75	30,53	40,71	29,58	40,71
6	30,53	36,66	43,75	40,71	40,71	29,58

**Bild 2.5.** Verlauf des Betrages der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von der Ortskoordinate x für die Varianten der Stromzuordnung zu den Kabeladern nach Tabelle 2.5, die zum Höchstwert führen (nach exakter Berechnung).

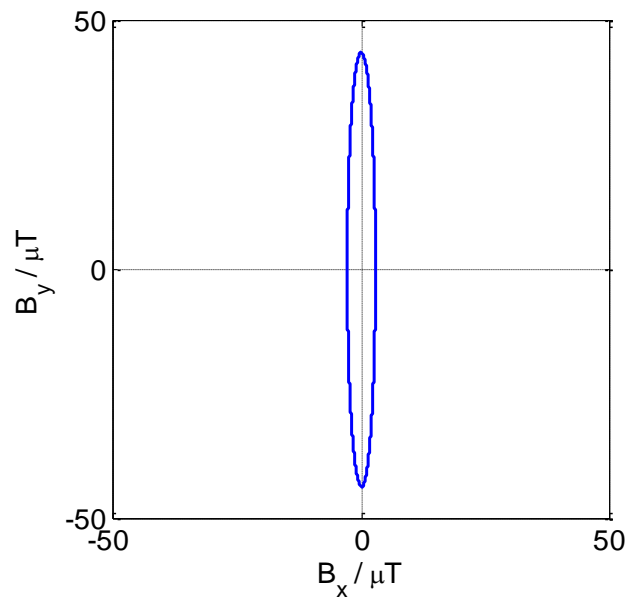


Bild 2.6. Ortskurve der magnetischen Flussdichte an der Stelle $x = y = 0$ für die Varianten der Stromzuordnung zu den Kabeladern nach Tabelle 2.5, die zum Höchstwert führen (nach exakter Berechnung).

3 Zusammenfassung

Für die Teilverkabelung der 110-kV-Doppelfreileitung bei Tönning mit 110-kV-Kabeln wurden für zwei Kabelanordnungen (Kabel im Rohr und Kabel im Graben) für alle 36 möglichen Zuordnungen der um jeweils 120° phasenverschobenen Ströme der beiden Drehstromsysteme zu den einzelnen Kabeladern der Verlauf der magnetischen Flussdichte an der Geländeoberfläche in Abhängigkeit vom seitlichen Abstand x berechnet und der jeweilige Maximalwert ermittelt. Für den Betrag (Effektivwert) der Ströme wurde der zu erwartende Höchstwert von 870 A/System angenommen. Bei geringeren Strömen gehen die Maximalwerte der magnetischen Flussdichte etwa in gleichem Maß wie der Strom zurück.

Neben der sonst üblichen vereinfachten Berechnung der magnetischen Flussdichte auf der Grundlage einer Näherung wurde auch ein exaktes Berechnungsverfahren verwendet und der Unterschied zu den Ergebnissen der vereinfachten Rechnung dargestellt und begründet.

Bei der Kabellegung im Rohr mit einer Überdeckung von 24 m unter der Geländeoberfläche beträgt der Höchstwert (größtes Maximum) der magnetischen Flussdichte nach der exakten Berechnung lediglich $0,0473 \mu\text{T}$. Nach dem Näherungsverfahren wird ein größerer Höchstwert von $0,0610 \mu\text{T}$ berechnet. Die Ursache des Fehlers wird im Anhang A2 erklärt. Die relativ kleinen Werte sind auf die enge Anordnung der Kabel im Dreieck sowie die tiefe Lage der Kabel unter der Geländeoberfläche zurückzuführen.

Das von den Kabeln ausgehende Drehfeld in Form einer Ellipse steht senkrecht auf der Kabelachse und überlagert sich geometrisch dem natürlichen magnetischen Gleichfeld der Erde, das in unseren Breiten etwa $40 \mu\text{T}$ beträgt. Aufgrund der gegenüber $40 \mu\text{T}$ äußerst geringen Maximalwerte von $0,0473 \mu\text{T}$ und der geometrischen Überlagerung kann eine Beeinträchtigung der Schiffselektronik durch die von den Kabeln in den Rohren unter der Eider ausgehenden Magnetfelder ausgeschlossen werden.

Bei der Kabellegung im Graben in 1,6 Tiefe ergibt sich nach dem exakten Berechnungsverfahren ein Höchstwert der magnetischen Flussdichte von $43,66 \mu\text{T}$ und nach dem genäherten Berechnungsverfahren ein geringfügig größerer Höchstwert von $43,75 \mu\text{T}$, der noch deutlich unterhalb des nach der 26. BImSchV einzuhaltenden Grenzwerts von $100 \mu\text{T}$ liegt.

4 Literatur

- /1/ Oeding, D.; Oswald, B. R.: Elektrische Kraftwerke und Netze. Springer Verlag. 7. Auflage 2011.
- /2/ DIN VDE 0848-1: 2000. Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern. Teil 1: Definitionen, Mess- und Berechnungsgrundlagen.

Anhang A1: Berechnung der magnetischen Flussdichte

A1.1 Exakte Berechnung

Die x- und y-Komponente berechnet sich nach /1/:

$$\underline{B}_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n I_i \frac{y + h_i}{(x - a_i)^2 + (y + h_i)^2} \quad (\text{A1.1})$$

$$\underline{B}_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{i=1}^n I_i \frac{x - a_i}{(x - a_i)^2 + (y + h_i)^2} \quad (\text{A1.2})$$

Der zeitliche Verlauf ergibt sich aus:

$$\underline{B}(t) = \text{Re}(\underline{B}_x e^{j\omega t}) + j \text{Re}(\underline{B}_y e^{j\omega t}) \quad (\text{A1.4})$$

Der umlaufende Zeiger $\underline{B}(t)$ beschreibt eine Ellipse.

Aus Gl. (A1.4) folgt weiter:

$$\underline{B}(t) = \frac{1}{2} (\underline{B}_x e^{j\omega t} + \underline{B}_x^* e^{-j\omega t}) + j \frac{1}{2} (\underline{B}_y e^{j\omega t} + \underline{B}_y^* e^{-j\omega t}) \quad (\text{A1.5})$$

$$\underline{B}(t) = \frac{1}{2} (\underline{B}_x + j \underline{B}_y) e^{j\omega t} + \frac{1}{2} (\underline{B}_x^* + j \underline{B}_y^*) e^{-j\omega t} = \underline{B}_1(t) + \underline{B}_2(t) \quad (\text{A1.6})$$

Die beiden Zeiger $\underline{B}_1(t)$ und $\underline{B}_2(t)$ laufen entgegengesetzt mit der Winkelgeschwindigkeit ω um. Die maximale Länge des Zeigers $\underline{B}(t)$ ergibt sich zu:

$$B_{\max} = \frac{1}{2} |\underline{B}_x + j \underline{B}_y| + \frac{1}{2} |\underline{B}_x^* + j \underline{B}_y^*| \quad (\text{A1.7})$$

A1.2 Vereinfachte Berechnung

Nach /2/ wird der Maximalwert (Effektivwert) wie folgt bestimmt.

$$B_{\max, n} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (\text{A1.8})$$

Dabei ist nicht berücksichtigt, dass \underline{B}_x und \underline{B}_y unterschiedliche Phasenlagen haben, so dass, abgesehen von Ausnahmen, stets zu große Werte erhalten werden.

Anhang A2: Bemerkungen zur Variantenvielfalt

Aus den Tabellen 2.3 bis 2.6 ist ersichtlich, dass sich die Maximalwerte zu den 12 Dreiergruppen in Tabelle A2.1 zusammenfassen lassen. Die Dreiergruppen zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Zuordnungen durch zyklisches Tauschen ineinander übergehen (s. die Tabelle 2.1). Da sich dadurch das Magnetfeld nicht ändert, weisen die Dreiergruppen jeweils die gleichen Maxima der magnetischen Flussdichte auf.

Tabelle A2.1. Zusammenfassung von Stromzuordnungsmöglichkeiten mit gleichen Maxima der magnetischen Flussdichte zu Dreiergruppen.

	$l = 1$	2	3	4	5	6
$m = 1$	1	3	4	5	7	9
2	4	1	3	9	5	7
3	3	4	1	7	9	5
4	6	10	8	2	11	12
5	8	6	10	12	2	11
6	10	8	6	11	12	2

Die Stromzuordnungen zu den Kabeladern nach Tabelle 2.1 für die 12 Dreiergruppen sind in der Tabelle A2.2 angegeben.

Tabelle A2.2. Gruppen von Stromzuordnungen, die jeweils die gleiche magnetische Flussdichte hervorrufen. Nummerierung der Gruppen entsprechend Tabelle A2.1.

1	3	5	7	9	11
$m_1 - l_1$	$m_1 - l_2$	$m_1 - l_4$	$m_1 - l_5$	$m_1 - l_6$	$m_4 - l_5$
$m_2 - l_2$	$m_2 - l_3$	$m_2 - l_5$	$m_2 - l_6$	$m_2 - l_4$	$m_5 - l_6$
$m_3 - l_3$	$m_3 - l_1$	$m_3 - l_6$	$m_3 - l_4$	$m_3 - l_5$	$m_6 - l_4$
2	4	6	8	10	12
$m_4 - l_4$	$m_2 - l_1$	$m_4 - l_1$	$m_5 - l_1$	$m_6 - l_1$	$m_5 - l_4$
$m_5 - l_5$	$m_3 - l_2$	$m_5 - l_2$	$m_6 - l_2$	$m_4 - l_2$	$m_6 - l_5$
$m_6 - l_6$	$m_1 - l_3$	$m_6 - l_3$	$m_4 - l_3$	$m_5 - l_3$	$m_4 - l_6$

Aufgrund der spiegelsymmetrischen Kabelanordnung liefern die Gruppenpaare 3-4, 5-6, 7-8, 9-10 und 11-12 jeweils das gleiche Maximum der magnetischen Flussdichte. Da auch noch das Paar 1-2 sowie die Paare 3-4 und 11-12 gleiche Maximalwerte aufweisen, kommen bei allen 36 Möglichkeiten der Stromzuordnungen nur fünf verschiedenen Maximalwerte für die magnetische Flussdichte vor.

Für die Varianten $m_i = l_i$ ($i = 1 \dots 6$) in Tabelle 2.1 sind die Stromzuordnungen zu den Kabeln der beiden Systemen M und L spiegelsymmetrisch gleich. Dadurch wird die y-Komponente der magnetischen Flussdichte Null und die elliptische Ortskurve entartet zu einer Geraden auf der x-Achse. In diesem speziellen Fall erhält man auch mit dem vereinfachten Berechnungsverfahren den richtigen Maximalwert.

Der Fehler, den man mit der vereinfachten Berechnung begeht, ist umso größer, je mehr sich die elliptische Ortskurve einem Kreis nähert. Der größtmögliche Fehler bei kreisförmiger Ortskurve beträgt 41 %.