

**Technischer Bericht**

**Magnetische Felder im Bereich eines als Erdkabel-  
verbindung geplanten Teilabschnitts der 380-kV-Leitung  
„Fedderwarden - Conneforde“ im Bereich östlich der  
Ortschaft Neustadtgödens**

**Dr.-Ing. Winfried Fricke**

**Vulkanstraße 28**

**10367 Berlin**

**Germany**

fon: +49 (0)30 9831 8213

fax: +49 (0)30 9831 8234

mobile: +49 (0)1577 8925 229

eMail: wfricke@fricke-engineering.de

www.fricke-engineering.de

---

Textseiten / Anlagen  
17 / -

Datum: 11.12.2014

---

**Inhalt**

- 1. Einführung**
- 2. Theoretische Grundlagen**
  - 2.1. Allgemeine Erläuterungen zu elektrischen und magnetischen Feldern**
  - 2.2. Berechnungsverfahren für die magnetische Flussdichte**
- 3. Technische Parameter der Kabelverbindung**
  - 3.1. Aufbau der Kabelanlage**
  - 3.2. Kabelströme bei maximaler Anlagenauslastung**
- 4. Berechnungsergebnisse**
  - 4.1. Magnetische Flussdichten im Bereich der Abschnitte mit Regelprofil**
  - 4.2. Magnetische Flussdichten im Bereich des HDD-Abschnitts „Sanderahmer Straße“**
  - 4.3. Magnetische Flussdichten an ausgewählten Punkten mit Bebauung**
    - 4.3.1. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 25A**
    - 4.3.2. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 26**
    - 4.3.3. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 27**
    - 4.3.4. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 29**
- 5. Zusammenfassung**
- 6. Quellenverzeichnis**

## 1. Einführung

Die erwartete zunehmende Einspeisung von elektrischer Energie aus regenerativen Quellen (u.a. On- und Offshore-Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen, Biogasanlagen) sowie neuen Kraftwerken erfordert den Ausbau des deutschen Hochspannungs-Übertragungsnetzes. Die sich daraus ergebenden konkreten Anforderungen sind im sogenannten „Netzentwicklungsplan Strom“ zusammengefasst, der nach den Vorgaben des Energiewirtschaftsgesetzes von den vier deutschen Übertragungsnetzbetreibern federführend erstellt und jährlich aktualisiert wird.

Im Rahmen dieses Netzausbaus ist unter anderem die Errichtung der 380-kV-Leitung „Fedderwarden – Conneforde“ vorgesehen. Für den Bau und Betrieb dieser ca. 34 km langen 380-kV-Leitung ist die TenneT TSO GmbH mit Sitz in Bayreuth als der für diesen Bereich zuständige Übertragungsnetzbetreiber verantwortlich. Diese Leitung ist im überwiegenden Teil der Trasse als Freileitung geplant. Unmittelbar östlich der Ortschaft Neustadtgödens ist jedoch vorgesehen, einen ca. 1,5 km langen Teilabschnitt als Erdkabelverbindung auszuführen.

Stromdurchflossene Kabel erzeugen in ihrer Umgebung magnetische Felder. Elektrische Felder außerhalb der Kabelanlagen treten wegen der geerdeten metallischen Mäntel bzw. Schirme im vorliegenden Fall nicht auf. Für magnetische 50-Hz-Wechselfelder gilt in Deutschland ein verbindlich einzuhaltender Grenzwert von  $100 \mu\text{T}$  für Bereiche, die „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“. Dieser Grenzwert ist in der 26. Bundesimmissionschutzverordnung (26. BImSchV, [1]) festgelegt.

Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse von Magnetfeldberechnungen für die geplante Kabelverbindung zusammengefasst. Berechnet wurde jeweils die magnetische Flussdichte oberhalb des Erdbodens nach der in der 26. BImSchV vorgeschriebenen Methode für die maximale Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung der Wechselwirkung aller beteiligten Kabel für den jeweils ungünstigsten Fall. Die ungleichmäßige Stromaufteilung auf parallelgeschaltete Kabel sowie die Wirkung induzierter Ströme in den Kabelschirmen wurden ebenfalls einbezogen.

## 2. Theoretische Grundlagen

### 2.1. Allgemeine Erläuterungen zu elektrischen und magnetischen Feldern

Die elektrische Energieübertragung ist aus physikalischen Gründen zwangsläufig immer mit dem Auftreten elektrischer und magnetischer Felder verbunden. Elektrische Felder entstehen in der Umgebung elektrischer Ladungen, die sich bei Anlagen der elektrischen Energietechnik auf allen spannungsführenden leitfähigen Teilen befinden. Magnetische Felder werden dagegen von den in den Anlagenteilen fließenden Strömen erzeugt, also von Strömen in Phasenleitern, Schirmen, Erdungsleitern und gegebenenfalls auch leitfähigen Kapselungen.

Die Intensität elektrischer Felder wird durch die elektrische Feldstärke (Formelzeichen:  $E$ ) charakterisiert, die Maßeinheit ist Volt pro Meter ( $\text{V/m}$ ). Im Hochspannungsbereich werden elektrische Feldstärken aus praktischen Gründen zumeist in Kilovolt pro Meter ( $\text{kV/m}$ ) angegeben. Zur Beschreibung magnetischer Felder dient die magnetische Feldstärke (Formelzeichen:  $H$ ) bzw. die magnetische Flussdichte (Formelzeichen:  $B$ ), die sich nur durch einen materialabhängigen Proportionalitätsfaktor, die sogenannte Permeabilität (Formelzeichen:  $\mu$ ) unterscheiden. Die magnetische Flussdichte wird in der Maßeinheit Tesla ( $\text{T}$ ) angegeben, aus praktischen Gründen wird zur Beurteilung der von Energieanlagen ausgehenden magnetischen Felder zumeist die abgeleitete Maßeinheit Mikrottesla ( $\mu\text{T}$ ) verwendet. Elektrische und magnetische Feldstärken sind grundsätzlich vektorielle Größen, d.h. sie werden neben ihrem Betrag auch durch ihre Richtung gekennzeichnet.

Da der Betrag der elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke proportional zur jeweiligen felderzeugenden Größe (Spannung bzw. Strom) ist, folgt der Zeitverlauf der Feldstärken im für die Energieübertragung relevanten Bereich niedriger Frequenzen genau dem Zeitverlauf der Ströme

bzw. Spannungen. Weitere wesentliche Einflussgrößen sind Anzahl und geometrische Anordnung der spannungs- bzw. stromführenden Anlagenteile sowie der Abstand des betrachteten Raumpunktes zu diesen Teilen. Im Niederfrequenzbereich, der für die Beurteilung der von elektrotechnischen Anlagen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder relevant ist, sind elektrische und magnetische Felder entkoppelt, sie können daher unabhängig voneinander getrennt berechnet bzw. gemessen und bewertet werden.

Hochspannungskabel sind grundsätzlich als koaxiale Anordnungen aufgebaut, bei denen sich im Innern ein strom- und spannungsführender Phasenleiter befindet, der von einem geerdeten metallischen Schirm umgeben ist. Ein geerdeter Schirm weist gegenüber seiner Umgebung keine nennenswerte Spannungsdifferenz auf, nach außen hin erzeugt ein Hochspannungskabel daher kein elektrisches Feld. Dieses bleibt vielmehr bauartbedingt auf das Innere des Kabels beschränkt. Auch andere leitfähige Teile einer Hochspannungskabelverbindung wie z.B. gegebenenfalls installierte parallele Erdungsleiter führen gegenüber der Umgebung keine nennenswerte Spannung und erzeugen daher praktisch kein elektrisches Feld. Dagegen reichen die magnetischen Felder, die durch die in den Leitern und Schirmen der Hochspannungskabel fließenden Ströme erzeugt werden, in die Umgebung der Anlage hinein. Hinsichtlich der von einer Hochspannungskabelanlage ausgehenden Feldwirkungen ist es daher in der Praxis ausreichend, nur das magnetische Feld zu betrachten.

Charakteristisch für dreiphasige Wechselstromsysteme (Drehstromsysteme) ist, dass Ströme und Spannungen der drei Phasen jeweils den gleichen sinusförmigen Zeitverlauf aufweisen, der jedoch von Phase zu Phase jeweils um ein Drittel einer Periodendauer zeitlich verschoben ist. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Phasenverschiebung von jeweils  $120^\circ$ . Auf Grund dieser Phasenverschiebung ist die Summe der Ströme in den drei Phasenleitern eines Drehstromsystems im (symmetrischen) Normalbetrieb zu jedem Zeitpunkt gleich Null. Daher kommt es auch zu einer teilweisen Kompensation der von den Phasenleitern erzeugten magnetischen Felder, die jedoch auf Grund der im Allgemeinen unterschiedlichen geometrischen Abstände der einzelnen Phasenleiter zu dem jeweils betrachteten Raumpunkt nicht vollständig ist.

## 2.2. Berechnungsverfahren für die magnetische Flussdichte

Die magnetische Flussdichte  $B$  ist mit der magnetischen Feldstärke  $H$  für magnetisch homogene und isotrope Materialien über folgende Beziehung verknüpft:

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$$

- $\vec{B}$  - komplexer Vektor der magnetischen Flussdichte
- $\vec{H}$  - komplexer Vektor der magnetischen Feldstärke
- $\mu_r$  - relative Permeabilität (für nicht ferromagnetische Materialien  $\mu_r \approx 1$ )
- $\mu_0$  - absolute Permeabilität ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am)

Wenn keine ferromagnetischen Materialien vorhanden sind, kann die magnetische Feldstärke eines theoretisch unendlich langen geraden stromdurchflossenen Leiters in einem vorgegebenen Aufpunkt nach dem Gesetz von Biot-Savart berechnet werden [2]. Dieses lautet in vektorieller Form:

$$\vec{H} = \frac{\vec{I} \times \vec{R}}{2\pi |\vec{R}|^2}$$

- $\vec{H}$  - komplexer Vektor der magnetischen Feldstärke
- $\vec{I}$  - komplexer Stromvektor (in Richtung der Leiterachse)
- $\vec{R}$  - Radiusvektor (Vektor senkrecht von der Achse des Leiters zum Aufpunkt)

Bei Drehstromkabelverbindungen wird die Zeitabhängigkeit des magnetischen Feldes, wie in der Wechselstromtechnik üblich, durch komplexe Größen mit Betrag und Phasenlage beschrieben. Die magnetischen Felder mehrerer Quellen (Ströme in den Leitern und Kabelschirmen) werden nach dem Superpositionsprinzip überlagert.

Im allgemeinen Fall wird das magnetische Feld in einem bestimmten Punkt bei mehrphasiger Erregung ein sogenanntes elliptisches Drehfeld sein, bei dem die Spitze des magnetischen Flussdichtevektors in der Darstellung nach Bild 1 während einer Periode der felderzeugenden Ströme eine Ellipse beschreibt [2]. Der Augenblickswert der magnetischen Flussdichte variiert dabei zwischen den Werten  $B_{\min}$  und  $B_{\max}$ , während sich die Feldrichtung ständig ändert.

Die Berechnung des echten Maximalwertes der magnetischen Flussdichte  $B_{\max}$  erfordert die Berücksichtigung der Phasenverschiebung zwischen den räumlichen Komponenten  $B_x$  und  $B_y$  und führt auf eine sehr komplexe Berechnungsvorschrift. Für die Grenzwertvorgaben gemäß 26. BImSchV wird deshalb auf einen Ersatzwert der magnetischen Flussdichte Bezug genommen, der sich ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung aus den beiden Extremwerten  $B_{\min}$  und  $B_{\max}$  wie folgt berechnet:

$$B_{ers} = \sqrt{B_{\max}^2 + B_{\min}^2}$$

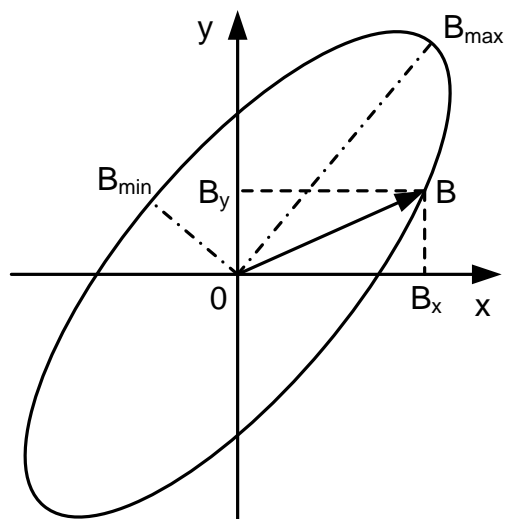


Bild 1: Magnetisches Feld in der Ebene senkrecht zu den felderzeugenden Strömen (nach [2])

Es lässt sich mathematisch zeigen, dass es letztendlich unerheblich ist, in welcher Lage die beiden Raumrichtungen x und y zur Lage des maximalen Flussdichtevektors ( $B_{\max}$  nach Bild 1) stehen. Wichtig ist nur, dass die Achsen x und y orthogonal zueinander und zur Richtung der Kabel stehen und dass zur Ermittlung des Ersatzwertes jeweils die maximalen Werte der Flussdichtekomponenten in den Raumrichtungen x und y verwendet werden. Der Ersatzwert der Flussdichte kann bis zum Faktor  $\sqrt{2}$  größer sein als die maximale Flussdichte, wird jedoch niemals kleiner als diese. In allen nachfolgend vorgestellten Berechnungsergebnissen wurde einheitlich der Ersatzwert der magnetischen Flussdichte verwendet.

### 3. Technische Parameter der Kabelverbindung

#### 3.1. Aufbau der Kabelanlage

Für den als Kabelverbindung geplanten Abschnitt der 380-kV-Leitung Fedderwarden - Conneforde im Bereich unmittelbar östlich der Ortschaft Neustadtgödens sollen pro Stromkreis der ankommenden bzw. weiterführenden Freileitung jeweils zwei parallele Kabelsysteme aus VPE-isolierten 400-kV-Kabeln zum Einsatz kommen. Diese Aufteilung auf jeweils zwei elektrisch parallelgeschaltete Teilsysteme ist aus Gründen der Stromtragfähigkeit erforderlich. Im Trassenquerschnitt existieren somit 12 Einzelkabel, die in ebener Anordnung geführt werden sollen. Die Kabel werden einzeln in vorab installierte Kabelschutzrohre aus Kunststoff eingezogen. Nach dem zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts gültigen Planungsstand beginnt die Kabeltrasse an der Kabelübergangsanlage (KÜA) Sanderahm (Trassen-km 0.000) und endet an der Kabelübergangsanlage Vorwerk (Trassen-km 1.461). Die gesamte Trassenlänge beträgt also ca. 1,5 km.

Auf dem weitaus überwiegenden Teil der Trasse (nach gegenwärtiger Planung ca. 80 % der Gesamtlänge) soll die Kabelanlage in offener Bauweise gemäß dem sogenannten Regelprofil nach Bild 2 errichtet werden. Nur bei Bedarf kann auf kurzen Teilstücken von diesem Regelprofil abgewichen werden, z.B. bei notwendigen Querungen von Straßen, Gewässern oder anderen im Boden bereits existierenden Installationen.

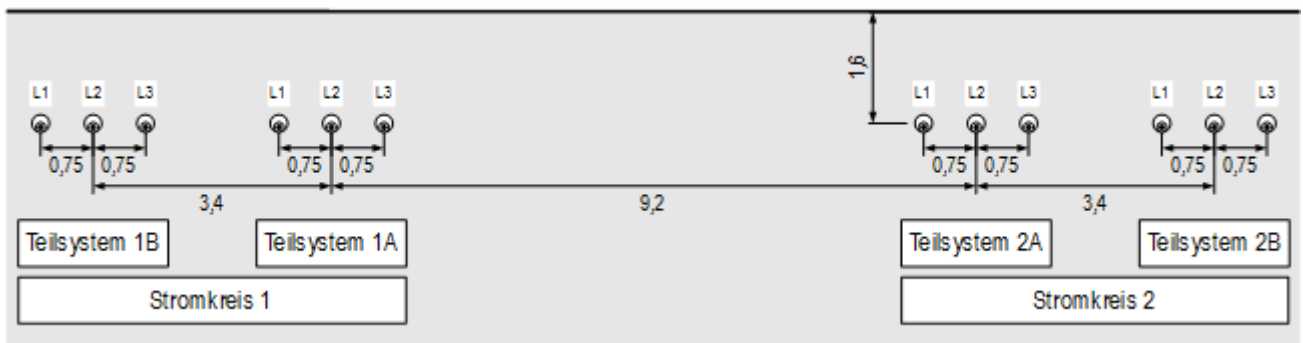


Bild 2: Regelprofil der 380-kV-Kabelverbindung (Abmessungen in m)

Der gegenseitige horizontale Abstand der einzelnen Kabel innerhalb eines Teilsystems beträgt im Regelprofil 0,75 m. Die beiden zu einem Stromkreis gehörenden parallelgeschalteten Teilsysteme befinden sich in einem horizontalen Abstand von 3,4 m zueinander, der Abstand zwischen den jeweils innen liegenden Teilsystemen beider Stromkreise beträgt 9,2 m (jeweils gemessen vom Schwerpunkt der Teilsysteme). Die Legetiefe (Achse der Kabelschutzrohre) beträgt 1,6 m.

Für die Unterquerung der Sanderahmer Straße und der parallel zu dieser verlaufenden existierenden Kabel und Rohrleitungen soll nach gegenwärtigem Planungsstand das grabenlose HDD-Verfahren zum Einsatz kommen. Dabei werden die Kabelschutzrohre vorab mit Hilfe von Spülbohrungen in den Boden eingebracht. Neben den 12 Rohren für die Hochspannungskabel ist in der Mitte der Trasse ein weiteres Rohr vorgesehen, das die parallel mitgeführten Steuerkabel, LWL usw. aufnimmt. Aus bohrtechnischen Gründen ist ein horizontaler Mindestabstand der Rohre einzuhalten, der mit 3,5 m angenommen wird. Im Bereich der Bohrung werden die Kabelschutzrohre in 3 m bis 3,5 m Tiefe (bezogen auf die Geländeoberkante) liegen. Bild 3 zeigt das Trassenprofil für diesen HDD-Abschnitt.

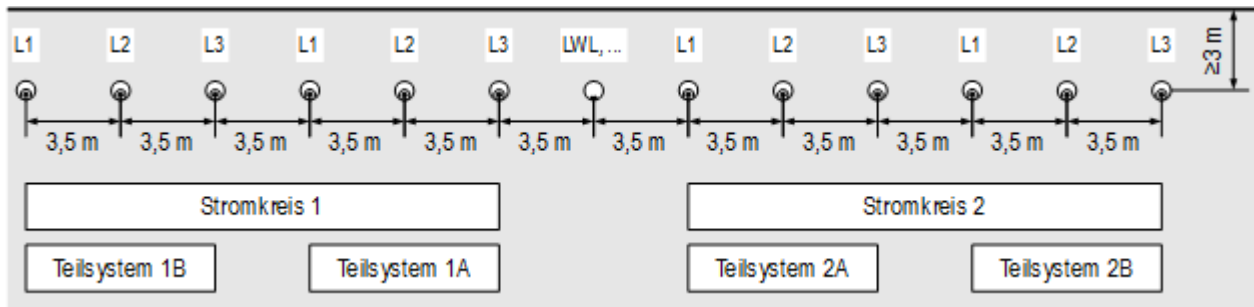


Bild 3: Trassenprofil für die Kreuzung der Sanderahmer Straße im HDD-Verfahren (Abmessungen in m)

Bei elektrisch parallelgeschalteten Kabelsystemen wird die Stromaufteilung von den gegenseitigen induktiven Kopplungen der einzelnen Phasen bestimmt. Die Aufteilung ist daher in der Regel nicht gleichmäßig. Allgemein üblich ist dabei die auch in der Literatur empfohlene alternierende Phasenfolge (L1 – L2 – L3, L3 – L2 – L1, L1 – L2 – L3, L3 – L2 – L1), die zu den geringsten Abweichungen von der idealen gleichmäßigen Stromaufteilung führt. Für die insgesamt vier Teilsysteme der hier beschriebenen Kabelverbindung wurde abweichend davon jedoch eine gleichbleibende Phasenfolge gewählt (L1 – L2 – L3, L1 – L2 – L3, L1 – L2 – L3, L1 – L2 – L3). Dies führt zwar zu einer deutlich ungleichmäßigeren Stromaufteilung (und damit zu einer geringeren Strombelastbarkeit), jedoch haben Voruntersuchungen gezeigt, dass die von der Kabelanlage im Betrieb erzeugten magnetischen Felder in diesem Fall deutlich kleiner sind als bei einer alternierenden Phasenfolge.

Die metallischen Schirme der einzelnen Kabel werden zur Verringerung der Zusatzverluste infolge induzierter Zirkulationsströme an geeigneten Verbindungsmuffen zyklisch ausgetauscht (sogenanntes „Cross-Bonding“). Damit ergibt sich ein elektrisches Schema der Kabelverbindung gemäß Bild 4.

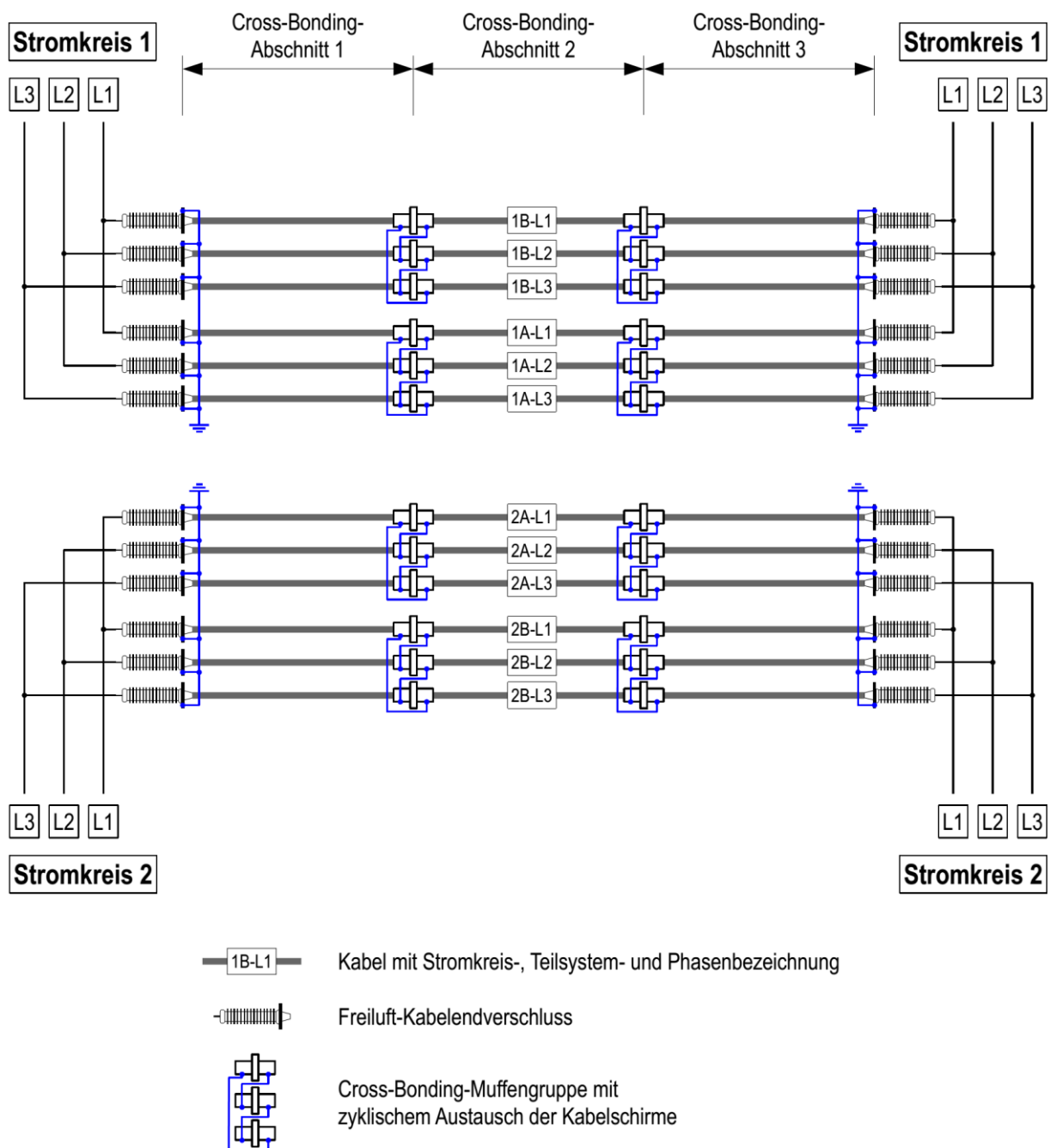


Bild 4: Elektrisches Schema der 380-kV-Kabelverbindung (vereinfacht)

Die Positionen der Schirmauskreuzungen liegen bei ca. 1/3 bzw. 2/3 der Trassenlänge. Die Auskreuzung erfolgt an den konstruktiv speziell dafür ausgelegten Verbindungsmuffen. Auf Grund der induktiven Kopplung der Schirme untereinander sowie zu den einzelnen Phasenleitern ergeben sich auch in den Schirmen unterschiedlich große Restströme. Da diese neben den Strömen in den Leitern der Kabel ebenfalls einen Einfluss auf das resultierende magnetische Feld haben, werden die magnetischen Flussdichten auf den einzelnen Cross-Bonding-Abschnitten nicht identisch sein. Wie im nachfolgenden Abschnitt dargelegt wird, sind die Unterschiede jedoch nicht erheblich. Für alle nachfolgend dargestellten Übersichten und Ergebnisdigramme wurden deshalb immer die ungünstigsten (größten) Werte der magnetischen Flussdichten angegeben, so dass alle Abweichungen auf der sicheren Seite liegen.

### 3.2. Kabelströme bei maximaler Anlagenauslastung

Die Kabelanlage ist so ausgelegt, dass sich ein thermisch zulässiger Dauerstrom von 3150 A pro Stromkreis ergibt. Bei diesem Strom würde das wärmste der 12 einzelnen Kabel gerade die zulässige Grenztemperatur für Dauerbetrieb von 90 °C am Leiter erreichen. Diese Strombelastung stellt daher gemäß 26. BImSchV [1] die Basis für die Ermittlung der magnetischen Flussdichte dar.

Die Berechnung der Stromaufteilung auf die Leiter der parallelgeschalteten Kabel sowie die Ermittlung der Schirmströme erfolgten anhand eines Berechnungsmodells nach dem Knotenspannungsverfahren, das die Selbst- und gegenseitigen Impedanzen (ohmsch und induktiv) aller beteiligten stromführenden Aufbauelemente der Kabel (d.h. Leiter und Kabelschirme) berücksichtigt (Details u.a. in [3], [4]). Dafür wurden die konkreten Trassenprofile und Abschnittslängen gemäß dem zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts gültigen Planungsstand angesetzt. Es ergaben sich folgende Ströme in den Leitern der Kabel:

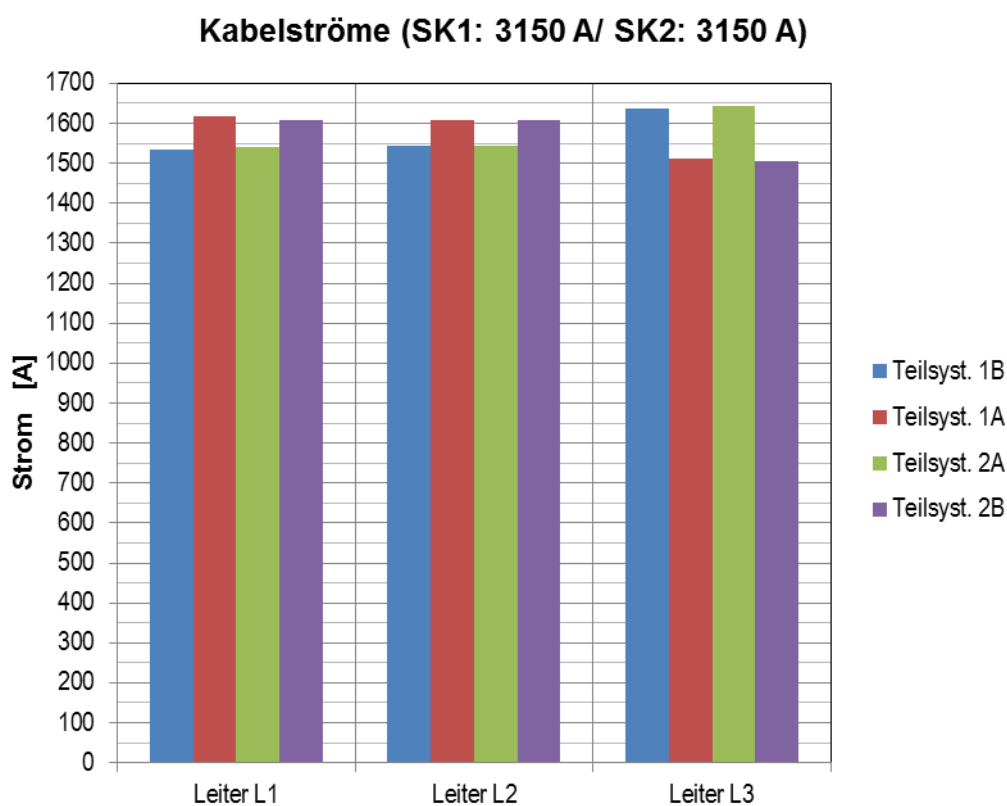


Bild 5: Berechnete Stromaufteilung in den Phasenleitern für eine Strombelastung von 3150 A pro Stromkreis

Mit dem gleichen Rechenmodell wurden auch die induzierten Schirmströme berechnet, die sich auf den einzelnen Cross-Bonding-Abschnitten ergeben (Bilder 6, 7 und 8). Sie sind im Vergleich zu den Leiterströmen relativ gering, da sich die in den Schirmen induzierten Längsspannungen durch die Auskreuzungen über die drei Abschnitte hinweg betrachtet weitgehend kompensieren. Dies entspricht dem bekannten Grundprinzip des Cross-Bonding-Verfahrens, mit dessen Hilfe die Zusatzverluste in den Kabelschirmen minimiert werden können.



### Schirmströme im Cross-Bonding-Abschnitt 1, Dauerlast (SK1: 3150 A/ SK2: 3150 A)

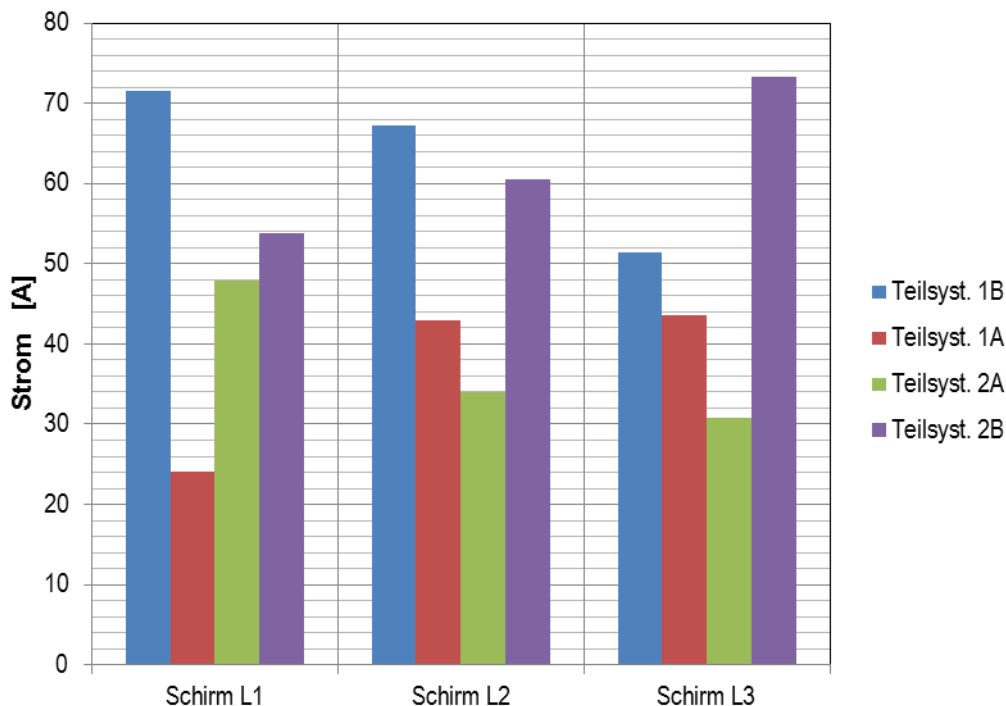


Bild 6: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Abschnitt 1 für eine Strombelastung von 3150 A pro Stromkreis

### Schirmströme im Cross-Bonding-Abschnitt 2, Dauerlast (SK1: 3150 A/ SK2: 3150 A)

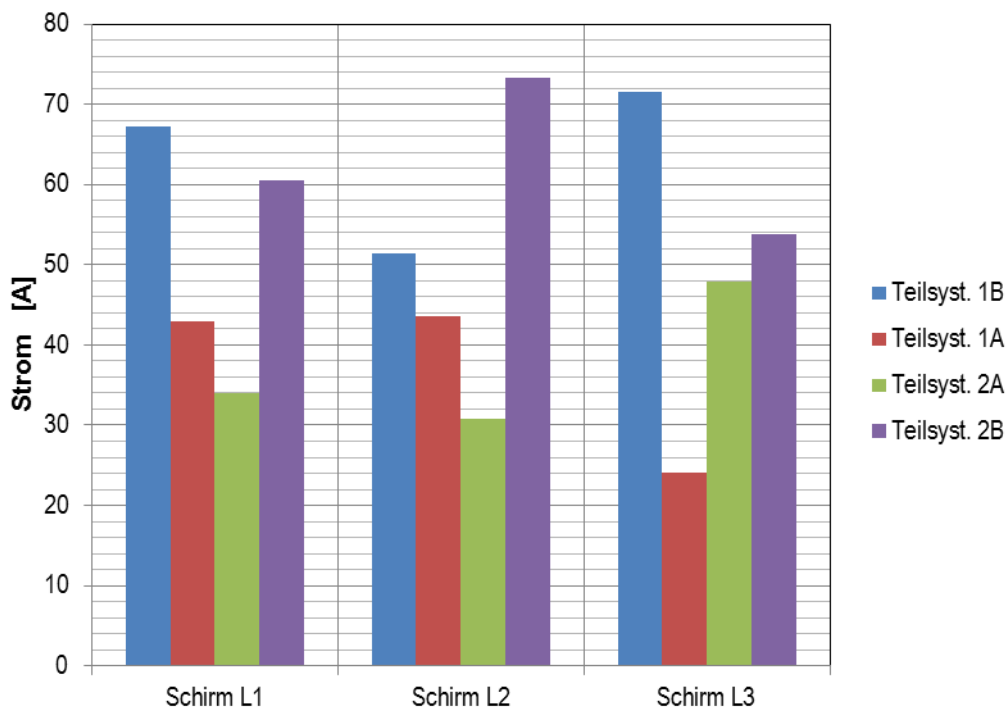


Bild 7: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Abschnitt 2 für eine Strombelastung von 3150 A pro Stromkreis

### Schirmströme im Cross-Bonding-Abschnitt 3, Dauerlast (SK1: 3150 A/ SK2: 3150 A)

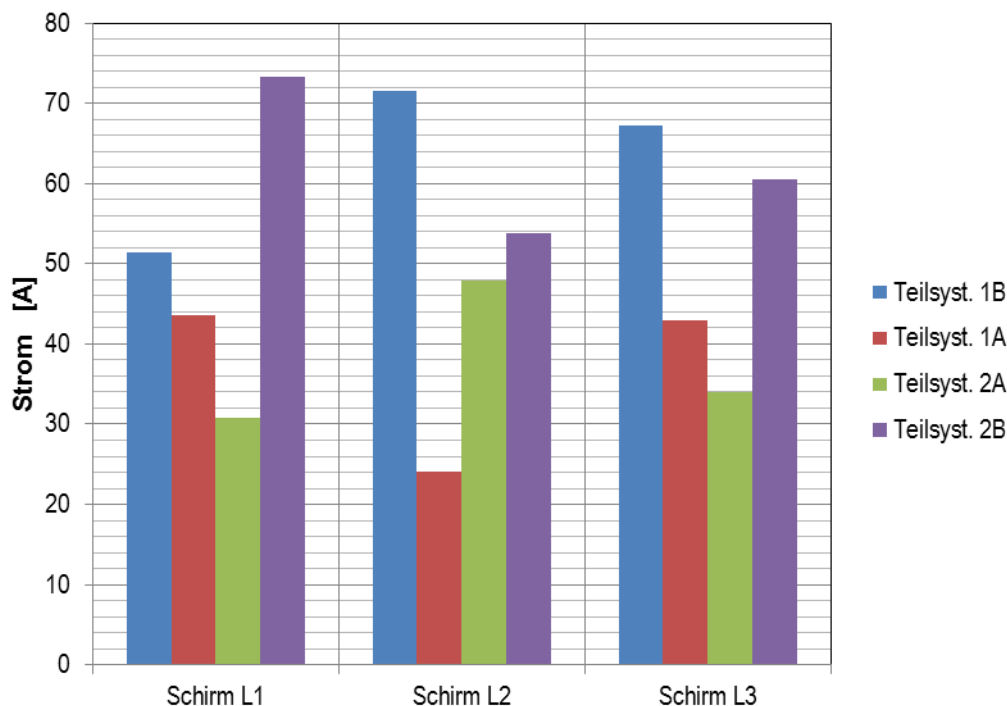


Bild 8: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Abschnitt 3 für eine Strombelastung von 3150 A pro Stromkreis

## 4. Berechnungsergebnisse

### 4.1. Magnetische Flussdichten im Bereich der Abschnitte mit Regelprofil

Auf ca. 80 % der gesamten Trassenlänge soll das Regelprofil nach Bild 2 zum Einsatz kommen. Dies ist gleichzeitig auch das Profil mit der geringsten Legetiefe (1,6 m bezogen auf die Achse des Kabelschutzrohres). Bei den Profilen für alle anderen in offener Bauweise zu errichtenden kürzeren Trassenabschnitte ist die Legetiefe erheblich größer. Da die magnetische Flussdichte maßgeblich vom Abstand zu den stromdurchflossenen Leitern abhängt (kleinere Abstände führen zu größeren magnetischen Flussdichten), ergibt sich für diese Profile trotz größerer Kabelabstände ein geringerer Maximalwert der magnetischen Flussdichte über dem Erdboden unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse als auf den Abschnitten mit Regelprofil.

Weder auf der Trasse selbst noch in deren unmittelbarer Umgebung befinden sich Bereiche, die nach 26. BImSchV [1] „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“. Unabhängig davon wurden die erzeugten magnetischen Felder jedoch durchgehend für einen Bereich von  $\pm 20$  m beidseits der Trassenmittelachse in einer Höhe von 0,2 m, 0,5 m bzw. 1,0 m über der Erdoberfläche berechnet (Diagramm in Bild 9).

Zusätzlich wurden die maximalen Werte der magnetischen Flussdichte auch für vier weitere ausgewählte wesentlich weiter von der Trassenmittelachse entfernte Punkte berechnet.

**Ersatzwert der magnetischen Flussdichte bei 3150 A/ 3150 A  
(Parameter: Höhe des Aufpunktes über der Erdoberfläche)**

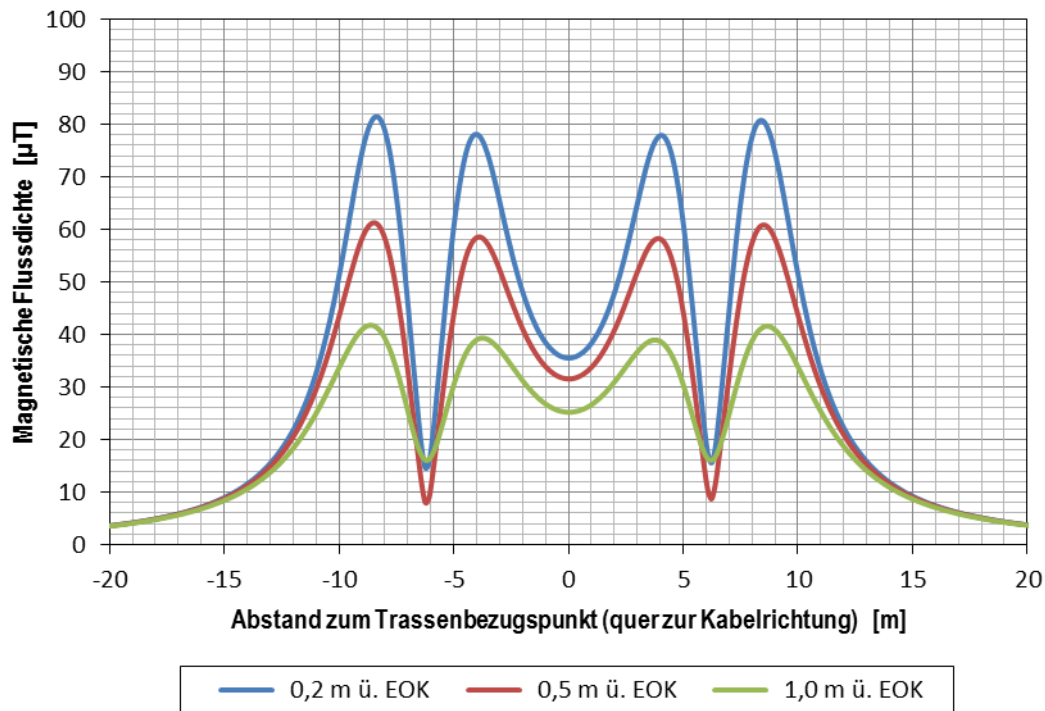


Bild 9: Berechnete magnetische Flussdichte oberhalb der Kabeltrasse im Bereich des Regelprofils nach Bild 2 für eine Strombelastung von 3150 A pro Stromkreis

Maximale magnetische Flussdichte:

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittellachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	81,5 µT	2,13 µT	0,46 µT	0,12 µT	0,03 µT
0,5 m	61,3 µT	2,12 µT	0,46 µT	0,12 µT	0,03 µT
1,0 m	41,8 µT	2,11 µT	0,46 µT	0,12 µT	0,03 µT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 µT wird selbst unmittelbar über der Kabeltrasse bereits deutlich unterschritten. In 1 m Höhe über dem Erdboden beträgt die magnetische Flussdichte dort bereits weniger als die Hälfte des Grenzwertes. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 15 m zur Trassenmitte wird weniger als 10 % des Grenzwertes erreicht. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Erdoberfläche besteht praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Feldstärke noch weiter ab.

**4.2. Magnetische Flussdichten im Bereich des HDD-Abschnitts „Sanderahmer Straße“**

Im Bereich der Kreuzung mit der Sanderahmer Straße soll das HDD-Profil nach Bild 3 zum Einsatz kommen. Dieses Profil ist für Legetiefen von 3,0 bis 3,5 m vorgesehen (bezogen auf die Achse des Kabelschutzrohres). Beiderseits der Bohrungen schließen sich Übergangsbereiche an, auf denen das Trassenprofil allmählich in das Regelprofil nach Bild 2 übergeht.

Auch hier befinden sich auf der Trasse selbst keine Bereiche, die nach 26. BImSchV [1] „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“. Unabhängig davon wurden die erzeugten magnetischen Felder jedoch ähnlich wie beim Regelprofil wieder durchgehend für einen Bereich von  $\pm 40$  m beidseits der Trassenmittellachse in einer Höhe von 0,2 m, 0,5 m bzw. 1,0 m über der Erdoberfläche berechnet (Diagramm in Bild 10).

Zusätzlich wurden die maximalen Werte der magnetischen Flussdichte auch wieder für drei weitere ausgewählte wesentlich weiter von der Trassenmittellachse entfernte Punkte berechnet.

**Ersatzwert der magnetischen Flussdichte bei 3150 A/ 3150 A  
(Parameter: Höhe des Aufpunktes über der Erdoberfläche)**

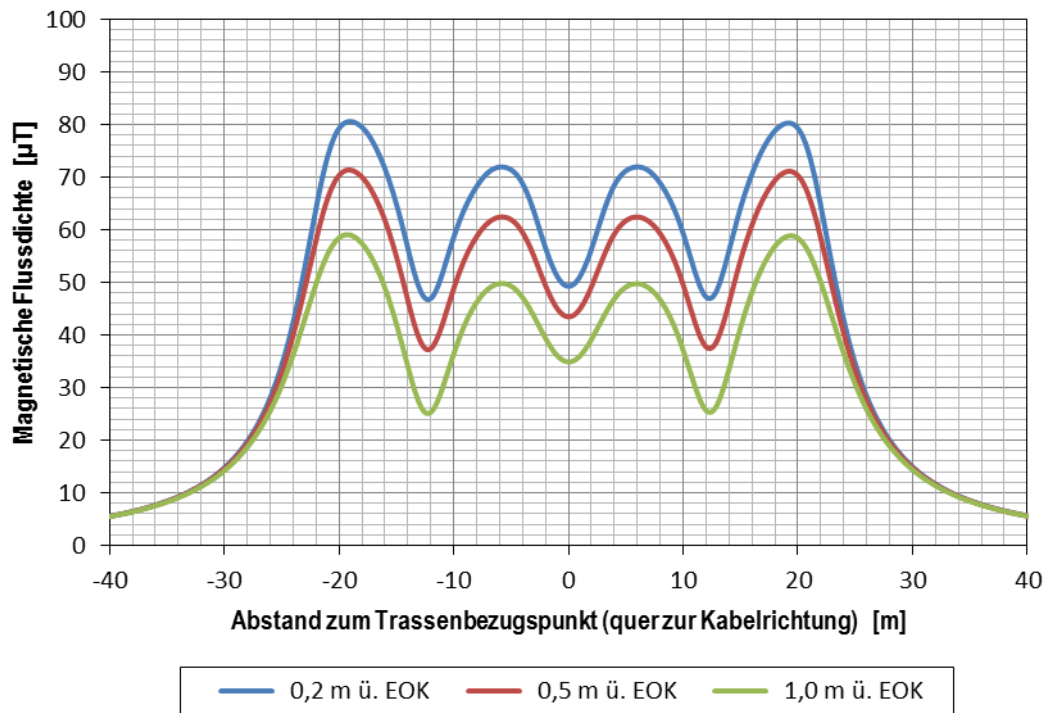


Bild 10: Berechnete magnetische Flussdichte oberhalb der Kabeltrasse im Bereich des HDD-Profiles nach Bild 3 für eine Strombelastung von 3150 A pro Stromkreis

Maximale magnetische Flussdichte für das HDD-Profil:

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittellachse			
	-40 m ... +40 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	80,6 µT	3,11 µT	0,65 µT	0,16 µT
0,5 m	71,4 µT	3,10 µT	0,65 µT	0,16 µT
1,0 m	59,1 µT	3,09 µT	0,65 µT	0,16 µT

Auf Grund der notwendigerweise größeren Kabelabstände im HDD-Bereich sind die magnetischen Flussdichten in der Regel höher als beim Regelprofil, jedoch wird auch hier der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 µT selbst unmittelbar über der Kabeltrasse bereits deutlich unterschritten. In 1 m Höhe über dem Erdboden beträgt die magnetische Flussdichte dort nur noch ca. 60 % des Grenzwertes. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 33 m zur Trassenmitte wird weniger als 10 % des Grenzwertes erreicht. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Erdoberfläche besteht praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Feldstärke noch weiter ab.

### 4.3. Magnetische Flussdichten an ausgewählten Punkten mit Bebauung

Die magnetischen Flussdichten wurden zusätzlich für vier ausgewählte Punkte in der Umgebung der Kabeltrasse untersucht. Es handelt sich dabei um Bereiche, auf denen sich die Kabeltrasse an vorhandene Gebäude annähert. Diese gelten im Sinne der 26. BImSchV als Bereiche, die „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“ [1]. Für solche Gebiete muss die Einhaltung des Grenzwertes der magnetischen Flussdichte nachgewiesen werden.

Die untersuchten Punkte sind jeweils die der Kabeltrasse am nächsten liegenden Teile der Gebäude auf den Grundstücken Sanderahmer Straße 25A, 26, 27 und 29 (Bild 11).

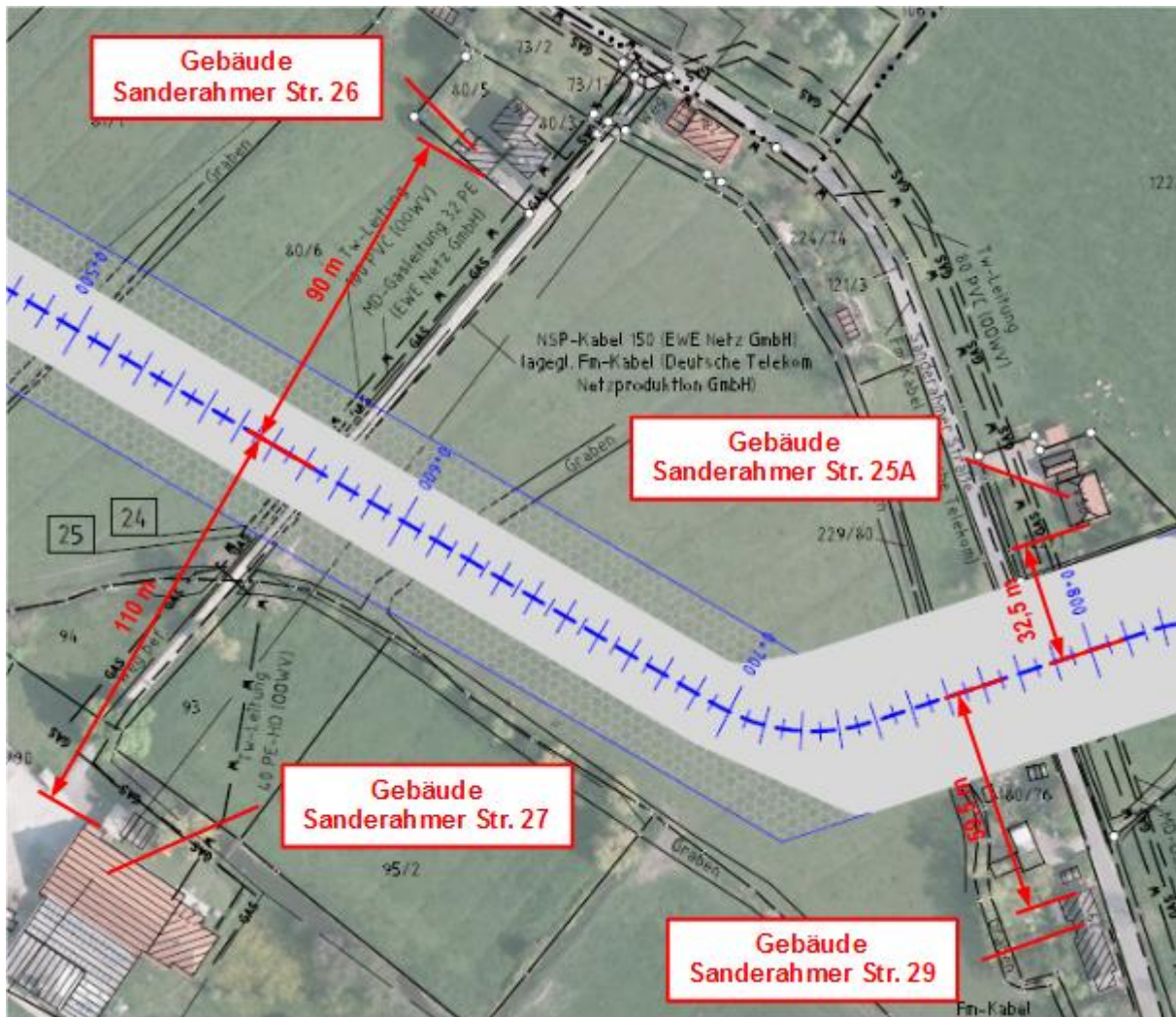


Bild 11: Lage der untersuchten Punkte in der Nähe der Kabeltrasse mit eingetragenen Abständen zur Trassenmittellachse

#### 4.3.1. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 25A

Im Bereich der Unterquerung der Sanderahmer Straße verläuft die Trasse in der Nähe eines Gebäudes, das sich auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 25A befindet. Der der Kabeltrasse am nächsten liegende Punkt dieses Gebäudes befindet sich ca. bei Trassen-km 0+810 und ist 32,5 m von der Trassenmittellachse entfernt. Auf diesem Abschnitt der Kabeltrasse gilt das HDD-Profil nach Bild 3, er gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 2 (vgl. Bild 4).

Die für diesen Punkt berechneten Werte der maximalen magnetischen Flussdichte sind:

Höhe über der Erdoberfläche	Maximale magnetische Flussdichte
0,2 m	11,1 $\mu\text{T}$
0,5 m	11,0 $\mu\text{T}$
1,0 m	10,8 $\mu\text{T}$

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100  $\mu\text{T}$  wird um fast eine Größenordnung (Faktor ca. 9) unterschritten.

#### 4.3.2. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 26

In der Umgebung der Sanderahmer Straße verläuft die Trasse in der Nähe eines Gebäudes, das sich auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 26 befindet. Der der Kabeltrasse am nächsten liegende Punkt dieses Gebäudes befindet sich ca. bei Trassen-km 0+572 und ist 90 m von der Trassenmittelachse entfernt. Auf diesem Abschnitt der Kabeltrasse gilt das Regelprofil nach Bild 2, er gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 2 (vgl. Bild 4).

Die für diesen Punkt berechneten Werte der maximalen magnetischen Flussdichte sind:

Höhe über der Erdoberfläche	Maximale magnetische Flussdichte
0,2 m	0,14 $\mu\text{T}$
0,5 m	0,14 $\mu\text{T}$
1,0 m	0,14 $\mu\text{T}$

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100  $\mu\text{T}$  wird um weit mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 700) unterschritten.

#### 4.3.3. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 27

In der Umgebung der Sanderahmer Straße verläuft die Trasse in der Nähe eines Gebäudes, das sich auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 27 befindet. Der der Kabeltrasse am nächsten liegende Punkt dieses Gebäudes befindet sich ca. bei Trassen-km 0+570 und ist 110 m von der Trassenmittelachse entfernt. Auf diesem Abschnitt der Kabeltrasse gilt das Regelprofil nach Bild 2, er gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 2 (vgl. Bild 4).

Die für diesen Punkt berechneten Werte der maximalen magnetischen Flussdichte sind:

Höhe über der Erdoberfläche	Maximale magnetische Flussdichte
0,2 m	0,10 $\mu\text{T}$
0,5 m	0,10 $\mu\text{T}$
1,0 m	0,10 $\mu\text{T}$

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100  $\mu\text{T}$  wird um drei Größenordnungen (Faktor 1000) unterschritten.

#### 4.3.4. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 29

Im Bereich der Unterquerung der Sanderahmer Straße verläuft die Trasse in der Nähe eines Gebäudes, das sich auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 29 befindet. Der der Kabeltrasse am nächsten liegende Punkt dieses Gebäudes befindet sich ca. bei Trassen-km 0+776 und ist 59,5 m von der Trassenmittelachse entfernt. Auf diesem Abschnitt der Kabeltrasse gilt das HDD-Profil nach Bild 3, er gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 2 (vgl. Bild 4).

Die für diesen Punkt berechneten Werte der maximalen magnetischen Flussdichte sind:

Höhe über der Erdoberfläche	Maximale magnetische Flussdichte
0,2 m	2,04 $\mu\text{T}$
0,5 m	2,04 $\mu\text{T}$
1,0 m	2,03 $\mu\text{T}$

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100  $\mu\text{T}$  wird um mehr als eine Größenordnung (Faktor ca. 50) unterschritten.

## 5. Zusammenfassung

Für einen als Erdkabeltrasse geplanten Teilabschnitt der 380-kV-Leitung „Fedderwarden – Conneforde“ im Bereich östlich der Ortschaft Neustadtgödens wurden Untersuchungen zur Größe der von der Kabelanlage im Betrieb erzeugten magnetischen Felder durchgeführt. Die Kabelverbindung soll aus insgesamt vier Teilsystemen bestehen, wobei pro Stromkreis der angeschlossenen Freileitung zwei Kabelteilsysteme elektrisch parallelgeschaltet werden sollen. Auf Grund der induktiven Kopplung ist mit einer ungleichmäßigen Stromaufteilung auf die parallelgeschalteten Kabel der beiden Stromkreise zu rechnen.

Für magnetische Wechselfelder mit einer Frequenz von 50 Hz existiert in Deutschland ein verbindlicher Grenzwert von 100  $\mu\text{T}$ , der laut 26. BImSchV [1] einzuhalten ist in Bereichen, die „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“.

Im Interesse einer Minimierung der erzeugten Magnetfelder wurde für die Kabelanlage eine gleichbleibende Phasenfolge gewählt, obwohl die in der Literatur üblicherweise vorgeschlagene alternierende Phasenfolge zu einer gleichmäßigeren Stromaufteilung und damit zu einer etwas höheren Strombelastbarkeit führen würde. Diese Maßnahme dient somit auch der von der 26. BImSchV [1] in § 4 vorgeschriebenen vorsorglichen Minimierung der erzeugten elektromagnetischen Felder.

Für die Magnetfeldberechnungen wurde jeweils die höchste zu erwartende Anlagenauslastung (3150 A Dauerlast pro Stromkreis) angesetzt. Dieser Wert stellt gleichzeitig die technisch gegebene Obergrenze der zulässigen Dauerlast dar, bei der die Leitertemperatur des wärmsten Kabels die zulässige Grenztemperatur erreicht. Bei allen Berechnungen wurden die ungleichmäßige Stromaufteilung auf die parallelgeschalteten Kabel sowie die induzierten (Rest-) Ströme in den Kabelschirmen berücksichtigt, die sich trotz zyklischer Auskreuzung der Kabelschirme (Cross-Bonding) einstellen.

Auf dem überwiegenden Teil der Trasse soll ein vorgegebenes Regelprofil zum Einsatz kommen. Die Unterquerung der Sanderahmer Straße wird nach dem gegenwärtigen Stand der Planung in grabenloser Bauweise mit Hilfe des HDD-Verfahrens realisiert werden. Aus technischen Gründen ist hierfür ein vom Regelprofil abweichendes Trassenprofil (HDD-Profil) erforderlich. Sowohl für das Regelprofil als auch für das HDD-Profil wurden die erzeugten magnetischen Flussdichten für

einen symmetrisch zur Mittelachse der Kabeltrasse liegenden 40 m bzw. 80 m breiten Korridor sowie zusätzlich für vier bzw. drei weiter entfernte Punkte berechnet.

Folgende magnetische Flussdichten wurden für das Regelprofil berechnet:

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	81,5 $\mu$ T	2,13 $\mu$ T	0,46 $\mu$ T	0,12 $\mu$ T	0,03 $\mu$ T
0,5 m	61,3 $\mu$ T	2,12 $\mu$ T	0,46 $\mu$ T	0,12 $\mu$ T	0,03 $\mu$ T
1,0 m	41,8 $\mu$ T	2,11 $\mu$ T	0,46 $\mu$ T	0,12 $\mu$ T	0,03 $\mu$ T

Im Bereich des HDD-Profiles werden folgende magnetische Flussdichten erreicht:

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse			
	-40 m ... +40 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	80,6 $\mu$ T	3,11 $\mu$ T	0,65 $\mu$ T	0,16 $\mu$ T
0,5 m	71,4 $\mu$ T	3,10 $\mu$ T	0,65 $\mu$ T	0,16 $\mu$ T
1,0 m	59,1 $\mu$ T	3,09 $\mu$ T	0,65 $\mu$ T	0,16 $\mu$ T

Die größten magnetischen Flussdichten treten jeweils unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse auf. Die berechneten Ersatzwerte liegen zwischen 41,8  $\mu$ T in 1,0 m Höhe und 81,5  $\mu$ T in 0,2 m Höhe über der Erdoberfläche für das Regelprofil bzw. zwischen 59,1  $\mu$ T in 1,0 m Höhe und 80,6  $\mu$ T in 0,2 m Höhe über der Erdoberfläche für das HDD-Profil. Unabhängig davon, dass die Flächen unmittelbar über der Kabeltrasse nicht zu den Bereichen gehören, die nach 26. BImSchV „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“ [1], wird der Grenzwert von 100  $\mu$ T auch dort bereits deutlich unterschritten. Für größere horizontale Abstände von der Kabeltrasse sind die erzeugten magnetischen Flussdichten noch erheblich geringer.

Zusätzlich wurden die zu erwartenden maximalen magnetischen Flussdichten auch für vier ausgewählte Orte berechnet, an denen die Kabeltrasse in der Nähe vorhandener Gebäude verläuft. Es handelt sich dabei um Gebäude auf den Grundstücken Sanderahmer Straße 25A, 26, 27 und 29. Für alle vier Orte wurden maximale Werte der magnetischen Flussdichte ermittelt, die deutlich unter dem zulässigen Grenzwert von 100  $\mu$ T liegen (11,1  $\mu$ T, 0,14  $\mu$ T, 0,10  $\mu$ T, 2,04  $\mu$ T).

Bei Ausführung der Kabelanlage in der vorgestellten Form und unter Zugrundelegung der beschriebenen maximalen Anlagenauslastung kann somit davon ausgegangen werden, dass der in der 26. BImSchV vorgegebene Grenzwert von 100  $\mu$ T für ein magnetisches 50-Hz-Wechselfeld im gesamten Bereich der Kabeltrasse sicher eingehalten wird.



## 6. Quellenverzeichnis

- [1] - 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder, 26. BImSchV) 21. August 2013, BGBl. Jahrgang 2013 Teil I Nr. 50, S. 3267
  
- [2] - Magnetic field in HV cable systems  
1/ systems without ferromagnetic component  
CIGRE Technical Brochure No. 104, June 1996  
Joint task force 36.01/21
  
- [3] - Special Bonding of High Voltage Power Cables  
Technical Brochure No. 283, CIGRE Working Group B1.18,  
October 2005
  
- [4] - Earth Potential Rises in Specially Bonded Screen Systems  
Technical Brochure No. 347, CIGRE Working Group B1.26,  
June 2008