

Technischer Bericht

**Magnetische Felder im Bereich eines als Erdkabel-
verbindung geplanten Teilabschnitts der 380-kV-Leitung
„Fedderwarden – Conneforde“ im Bereich östlich der
Ortschaft Neustadtgödens (Stand August 2017)**

Dr.-Ing. Winfried Fricke

Frettchenweg 31A

12623 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
34 / -

Datum: 20.09.2017

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 der magnetischen Flussdichte**
 - 4.1. Magnetische Flussdichten im Bereich der Abschnitte mit Regelprofil**
 - 4.2. Magnetische Flussdichten im Bereich der HDD-Abschnitte**
 - 4.3. Magnetische Flussdichten an ausgewählten Punkten mit Bebauung**
 - 4.3.1. Gebäude auf dem Grundstück Keelköpkenweg 4**
 - 4.3.2. Gebäude auf dem Grundstück Keelköpkenweg 1**
 - 4.3.3. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 31**
 - 4.3.4. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 34b**
- 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 Höchstspannungs-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. 1,7 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 parallelen Erdleitern 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 (V/m). Im Hochspannungsbereich werden elektrische Feldstärken aus praktischen Gründen zumeist in Kilovolt pro Meter (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: μ) unterscheiden. Die magnetische Flussdichte wird in der Maßeinheit Tesla (T) angegeben, aus praktischen Gründen wird zur Beurteilung der von Energieanlagen ausgehenden magnetischen Felder zumeist die abgeleitete Maßeinheit Mikrottesla (μT) 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 Span-

nungen bzw. Ströme. 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° . 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 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
- μ_r - relative Permeabilität (für nicht ferromagnetische Materialien $\mu_r \approx 1$)
- μ_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:

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

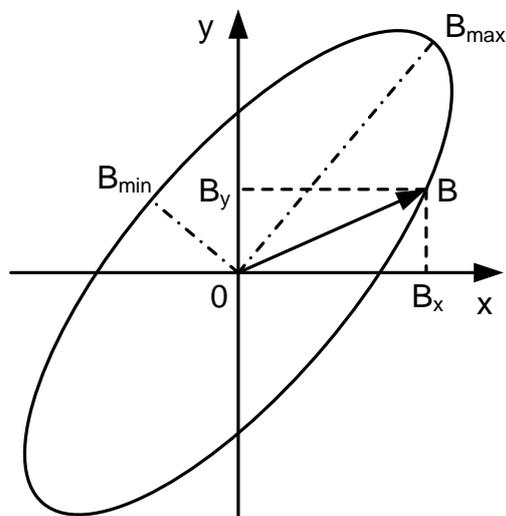


Bild 1: Magnetisches Feld in der Ebene senkrecht zu den felderzeugenden Strömen (nach [2])

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 für eine Anordnung mit langen parallelen Leitern, wie sie für Kabeltrassen typisch ist, bis zum Faktor $\sqrt{2}$ größer sein als die maximale Flussdichte, wird jedoch niemals kleiner als diese. In allen nachfolgend vorgestellten Berechnungsergebnissen wurde einheitlich dieser 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 Kabeln der Spannungsebene 400 kV 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+715). Die gesamte Trassenlänge beträgt also ca. 1,7 km. Auf der Trasse sind verschiedene Trassenprofile gemäß nachfolgender Tabelle vorgesehen:

Stationierung	Länge [m]	Legetiefe [m]	Phasenabstand [m]	Trassenprofil	Bemerkungen
0+000 - 0+260	260	3,0	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung mehrerer Gräben
0+260 - 0+315	55	1,6	0,75	offen	
0+315 - 0+500	185	3,0	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung eines befestigten Weges
0+500 - 1+000	500	1,6	0,75	offen	
1+000 - 1+120	120	3,0	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung der Sanderahmer Straße
1+120 - 1+290	170	1,6	0,75	offen	
1+290 - 1+465	175	3,0	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung mehrerer Gräben und eines Weges
1+465 - 1+600	135	1,6	0,75	offen	
1+600 - 1+725	125	3,0	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung mehrerer Gräben und eines Weges

Tabelle 1: Vorgesehene Trassenprofile entlang der gesamten Trasse

Auf ca. der Hälfte der gesamten Trasse soll die Kabelanlage in offener Bauweise gemäß dem sogenannten Regelprofil nach Bild 2 errichtet werden. Bei insgesamt 5 notwendigen Querungen von Straßen, Wegen oder Gräben kommt das grabenlose HDD-Verfahren zum Einsatz. Dabei werden die Kabelschutzrohre mit Hilfe von Spülbohrungen in den Boden eingebracht. Diese 5 HDD-Abschnitte umfassen zusammen ebenfalls ca. die Hälfte der gesamten Trassenlänge.

Die Kabel werden in allen Trassenprofilen in ebener Anordnung geführt. Diese Anordnung ist notwendig, um die Verlustleistung der Kabel hinreichend gut durch das umgebende Erdreich abführen zu können.

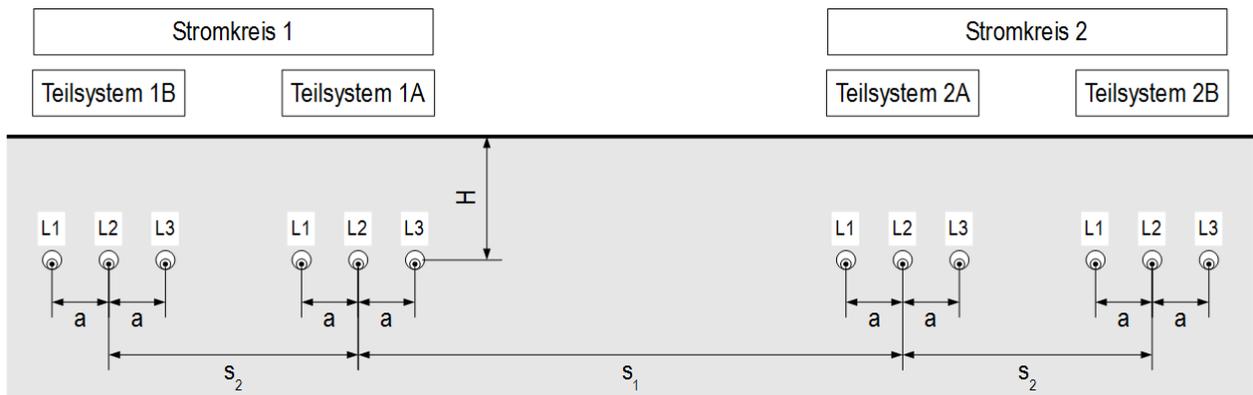


Bild 2: Regelprofil der 380-kV-Kabelverbindung (Kabel einzeln in Schutzrohren 250 x 9,6 mm)

Im Ergebnis von Erwärmungsberechnungen wurde für die in offener Bauweise zu errichtenden Trassenabschnitte ein Profil mit vorgegebenen Kabel- und Systemabständen festgelegt. Für das Regelprofil gelten folgende Parameter:

Legetiefe („H“):	1,60 m (Regeltiefe)
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,75 m
Mittenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („s2“):	3,40 m
Mittenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („s1“):	9,20 m

Auf den im HDD-Verfahren zu errichtenden 5 Trassenabschnitten ist neben den 12 Rohren für die Hochspannungskabel in der Mitte der Trasse ein weiteres Rohr vorgesehen, das die parallel mitgeführten Erdungsleiter, Steuerkabel, LWL usw. aufnimmt. Aus bohrtechnischen Gründen ist ein horizontaler Mindestabstand der Rohre einzuhalten. Bild 3 zeigt das für diese HDD-Ab-schnitte vorgesehene Trassenprofil.

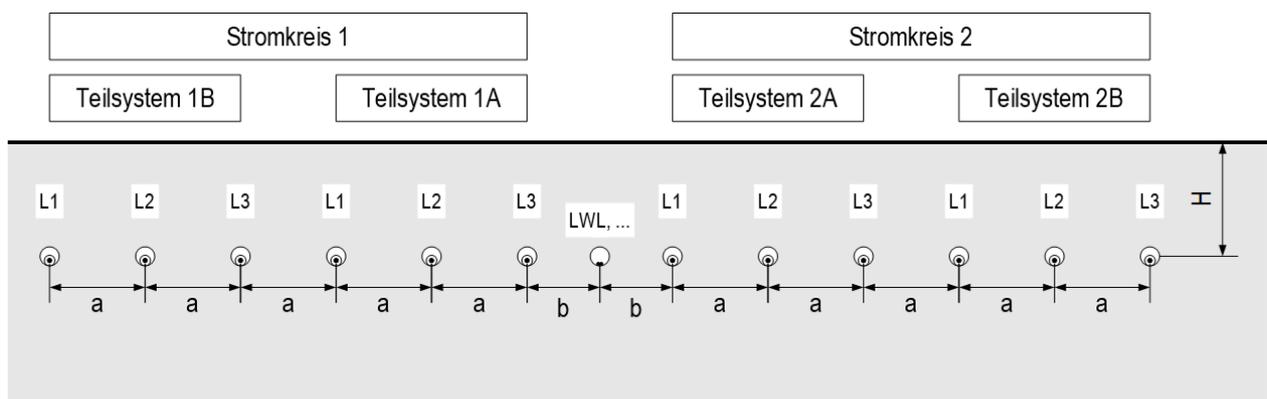


Bild 3: Trassenprofil der 380-kV-Kabelverbindung für Abschnitte in HDD-Bauweise (Kabel einzeln in Schutzrohren 355 x 32,2 mm)

Für das HDD-Profil sind folgende Parameter vorgesehen:

Legetiefe („H“):	$\geq 3,0$ m
Achsenabstand der Schutzrohre für Hochspannungskabel („a“):	2,0 m
Achsenabstand zum Schutzrohr für Begleitkabel („b“):	2,0 m

Bei elektrisch parallelgeschalteten Kabelsystemen wird die Stromaufteilung maßgeblich von den gegenseitigen induktiven Kopplungen der einzelnen Phasen beeinflusst. Die Aufteilung der Lastströme ist daher in der Regel nicht gleichmäßig. Allgemein üblich ist für parallelgeschaltete einadriges Kabel im Drehstromsystem die häufig 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 unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse 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 nur einseitig geerdet. Jedes der 12 parallelen Kabel soll aus jeweils zwei Teillängen zusammengesetzt sein. Wenn die Kabelschirme an den Verbindungsmuffen, aber nicht an den Freiluftendverschlüssen geerdet werden, ergeben sich auf der Trasse zwei Teilabschnitte mit jeweils einseitiger Schirmerdung. Bild 4 zeigt das elektrische Schema dieser Kabelverbindung.

Durch die einseitige Erdung der Kabelschirme stehen diese im Falle eines einpoligen Erdkurzschlusses nicht mehr als Strompfad für den rückfließenden Fehlerstrom zur Verfügung. Aus diesem Grunde sind parallele Erdleiter für jedes Teilsystem vorzusehen. Diese Erdleiter müssen an definierten Positionen relativ zu den Hochspannungskabeln im Trassenprofil angeordnet werden. Zudem ist es in der Regel notwendig, bei ca. der Hälfte der Länge eines Teilabschnitts mit einseitiger Erdung einen Wechsel der Position dieser Erdleiter vorzunehmen, um im Normalbetrieb die in den Erdleitern induzierten Restströme möglichst klein zu halten (siehe Bild 4).

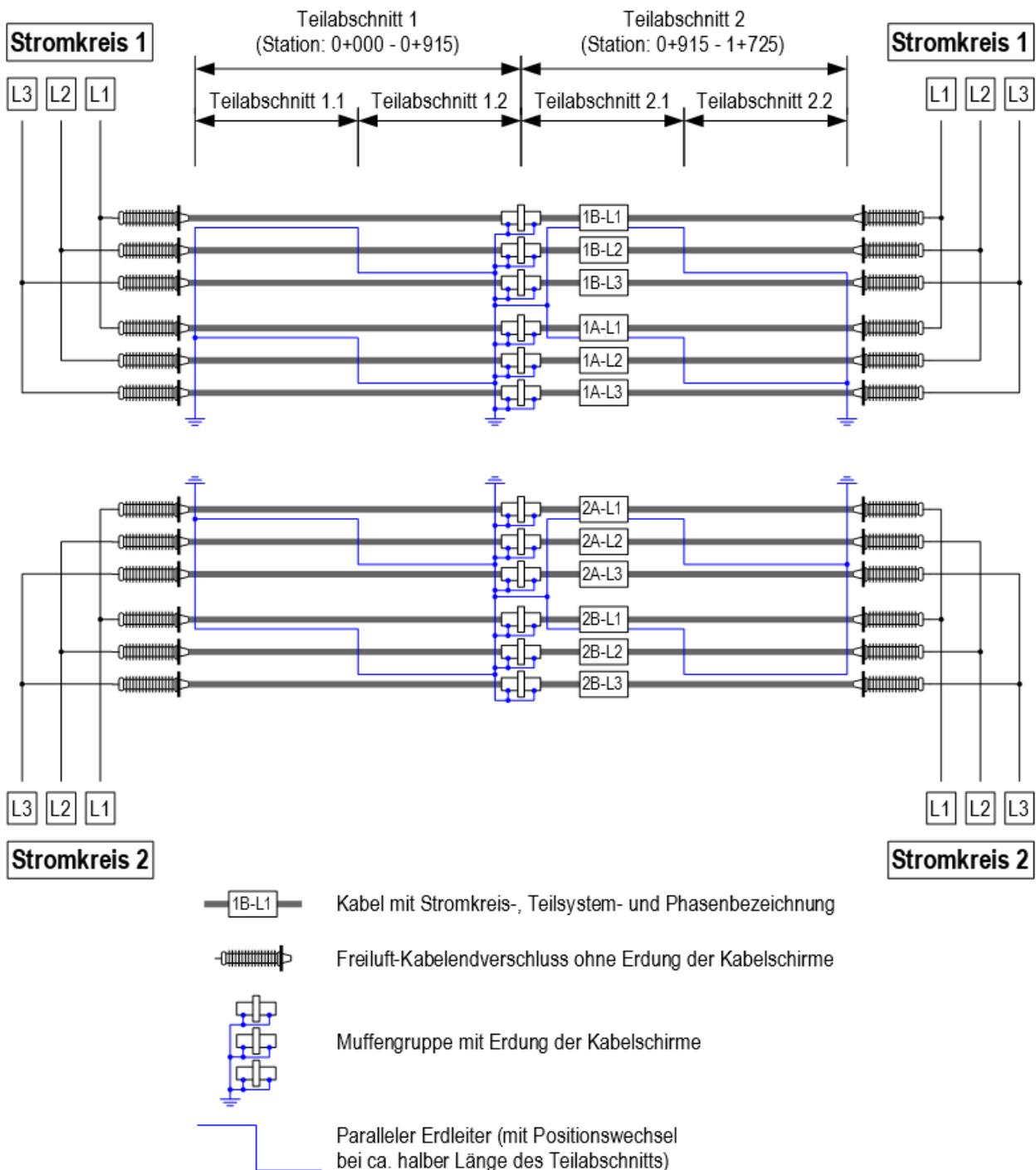


Bild 4: Elektrisches Schema der 380-kV-Kabelverbindung (aufgebaut aus zwei Teilabschnitten mit einseitiger Erdung der Kabelschirme)

Auf Grund der induktiven Kopplung der parallelen Erdleiter untereinander sowie zu den einzelnen Phasenleitern ergeben sich auch in den Erdleitern unterschiedlich große Restströme. Da diese neben den Strömen in den Leitern der Kabel ebenfalls einen gewissen Einfluss auf das resultierende magnetische Feld haben, werden die magnetischen Flussdichten auf den einzelnen Teilabschnitten wegen der Positionswechsel der parallelen Erdleiter nicht völlig identisch sein. Wie im nachfolgenden Abschnitt dargelegt wird, sind die Unterschiede jedoch relativ gering.

3.2. Kabelströme bei maximaler Anlagenauslastung

Die Kabelanlage ist so ausgelegt, dass ein stationärer Laststrom von 3150 A pro Stromkreis beim vorgegebenen Belastungsgrad aus thermischer Sicht zulässig wäre. Bei dieser Last würde das wärmste der 12 einzelnen Kabel gerade die zulässige Grenztemperatur für Dauerbetrieb von 90 °C am Leiter erreichen. Bei verringerter Vorlast ist die Kabelverbindung für einen begrenzten Zeitraum von maximal 48 h in der Lage, einen erhöhten Laststrom von 3600 A pro Stromkreis zu übertragen. Obwohl diese Strombelastung nicht dauerhaft zulässig ist und im späteren Betrieb mit hoher Wahrscheinlichkeit auch nicht ausgenutzt werden wird, wurde der Laststrom von 3600 A pro Stromkreis im Sinne der Vorgaben der 26. BImSchV [1] als technisch bedingte Obergrenze für die Ermittlung der magnetischen Flussdichte angesetzt.

Die Berechnung der Stromaufteilung auf die Leiter der parallelgeschalteten Kabel sowie die Ermittlung der Ströme in den parallelen Erdleitern 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 Schirme der Hochspannungskabel sowie parallele Erdleiter) 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:

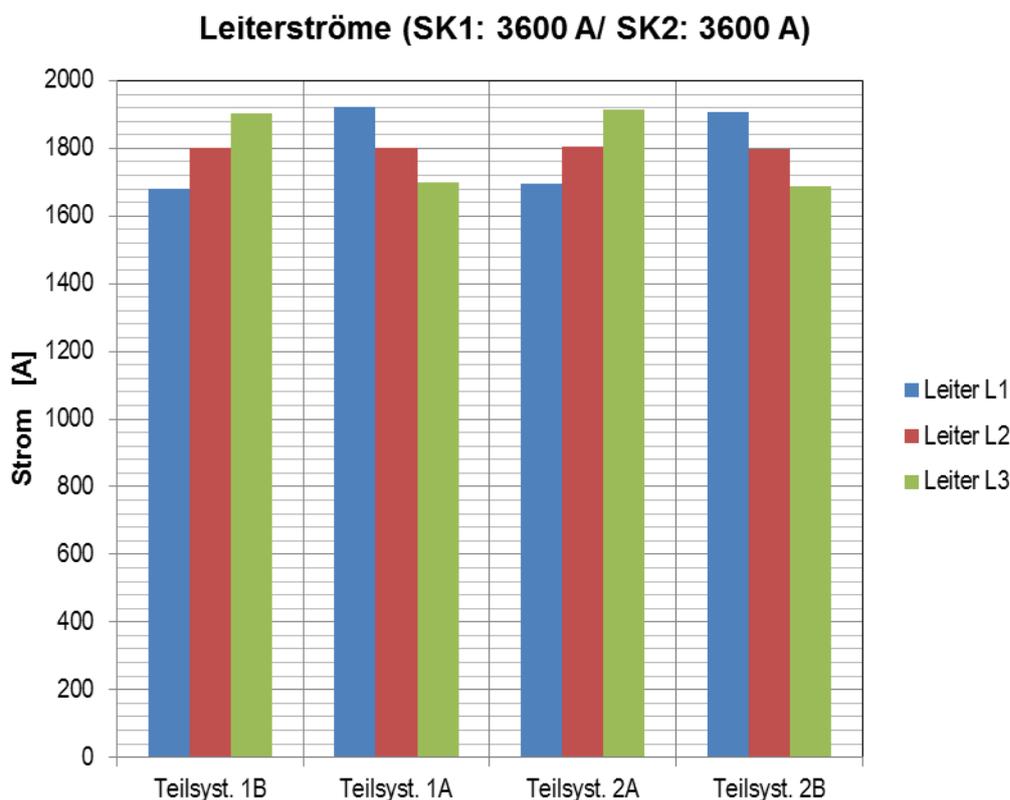


Bild 5: Berechnete Stromaufteilung in den Phasenleitern für eine Strombelastung von 3600 A pro Stromkreis

Mit dem gleichen Rechenmodell wurden auch die induzierten Ströme in den parallelen Erdleitern berechnet, die sich auf den einzelnen Teilabschnitten ergeben (Bilder 6 und 7). Sie sind im Vergleich zu den Leiterströmen relativ gering, da sich die in den Erdleitern induzierten Längsspannungen durch die vorgegebenen Positionen in den Trassenprofilen sowie den Positionswechsel ungefähr in der Mitte der Teilabschnitte über die Abschnittslänge hinweg betrachtet weitgehend kompensieren. In den Kabelschirmen können wegen der einseitigen Erdung keine induzierten Ströme fließen.

Ströme in parallelen Erdleitern, Teilabschnitt 1 (Stromkreis 1: 3600 A/ Stromkreis 2: 3600 A)

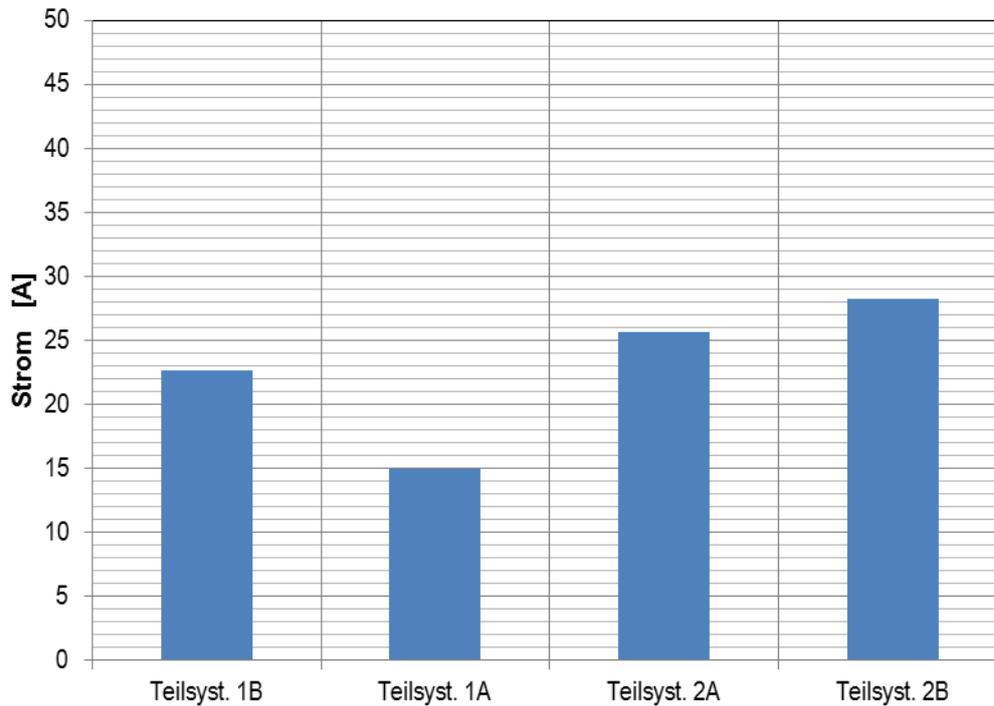


Bild 6: Berechnete Ströme in den parallelen Erdleitern im Teilabschnitt 1 für eine Strombelastung von 3600 A pro Stromkreis

Ströme in parallelen Erdleitern, Teilabschnitt 2 (Stromkreis 1: 3600 A/ Stromkreis 2: 3600 A)

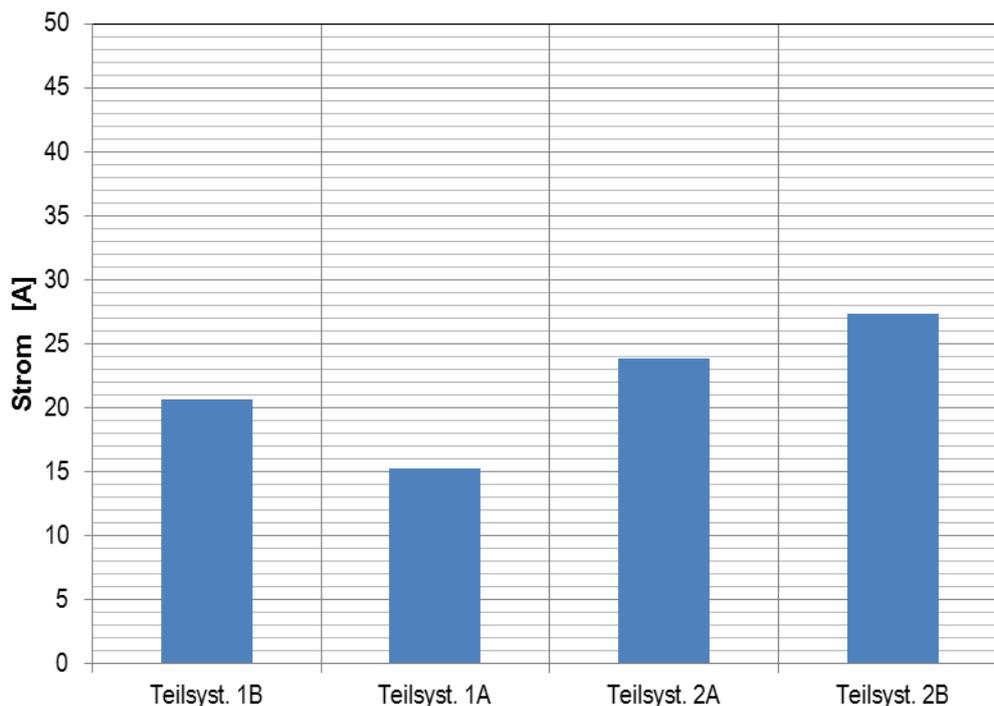


Bild 7: Berechnete Ströme in den parallelen Erdleitern im Teilabschnitt 2 für eine Strombelastung von 3600 A pro Stromkreis

4. Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte

4.1. Magnetische Flussdichten im Bereich der Abschnitte mit Regelprofil

Auf ungefähr der Hälfte der gesamten Trassenlänge soll das Regelprofil nach Bild 2 zum Einsatz kommen. Dies ist gleichzeitig auch das Profil mit der geringsten Legetiefe (Regeltiefe 1,6 m bezogen auf die Achse der Kabelschutzrohre). Bei allen anderen Profilen, die bedarfsweise im Bereich von Querungen zum Einsatz kommen, ist die Legetiefe deutlich 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 der Erdoberfläche unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse als auf den Abschnitten mit Regelprofil (siehe Kapitel 4.2). Auf Grund der unterschiedlich großen Ströme in den Erdleitern sowie durch den Positionswechsel in der Mitte der Teilschnitte ergeben sich für die Teilschnitte geringfügig unterschiedliche Werte der magnetischen Flussdichten.

Weder auf der Trasse selbst noch in deren unmittelbarer Umgebung (weniger als 20 m Abstand von der Trasse) 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 ± 120 m beidseits der Trassenmittellachse in einer Höhe von 0,2 m, 0,5 m bzw. 1,0 m über der Geländeoberkante (GOK) berechnet.

Zusätzlich zu den grafischen Darstellungen dieser Verläufe wurden die maximalen Werte der magnetischen Flussdichte auch für vier ausgewählte unterschiedlich weit von der Trassenmittellachse entfernte Punkte berechnet und in tabellarischer Form zusammengestellt.

Für die Trassenabschnitte mit Regelprofil im Teilschnitt 1.1 zwischen der KÜA Sanderahm und dem Ort des Positionswechsels der Erdleiter wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet:

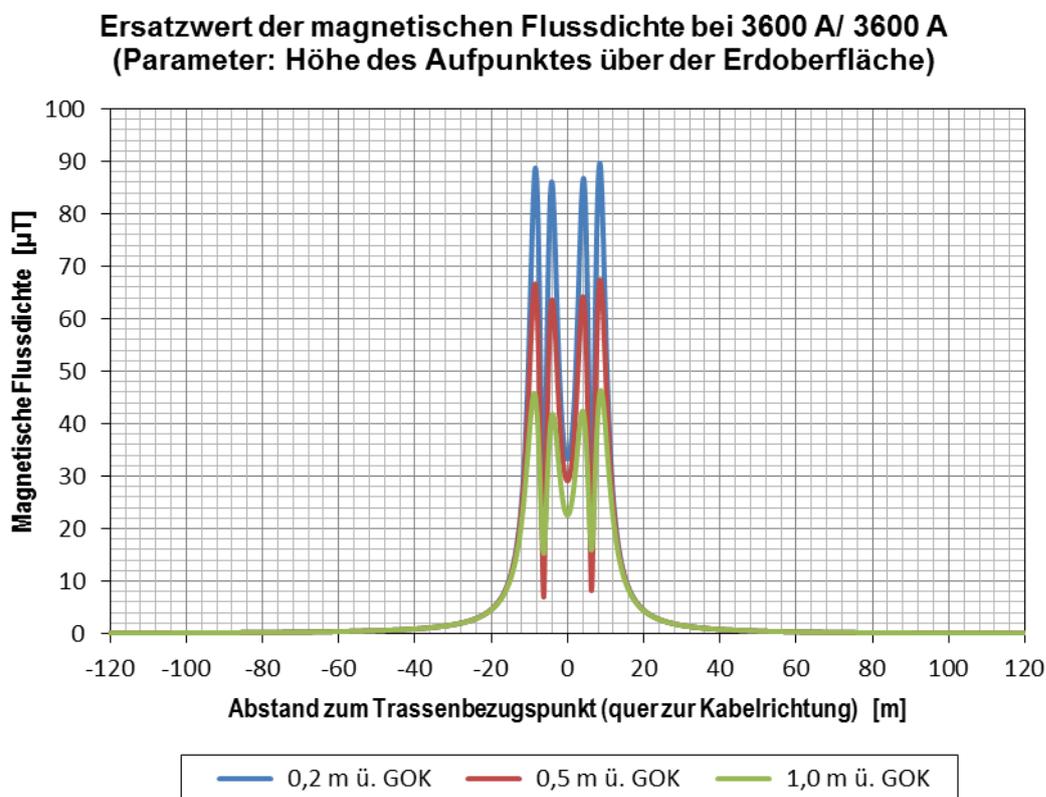


Bild 8: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilschnitt 1.1, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

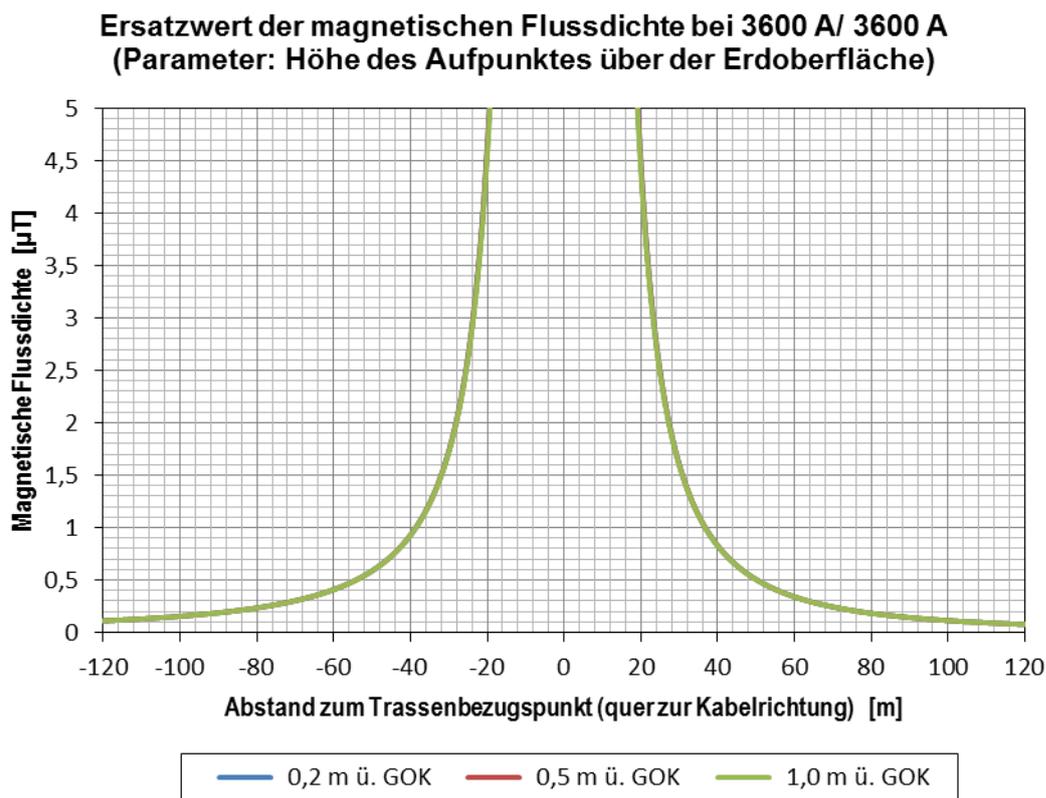


Bild 9: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilschnitt 1.1, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

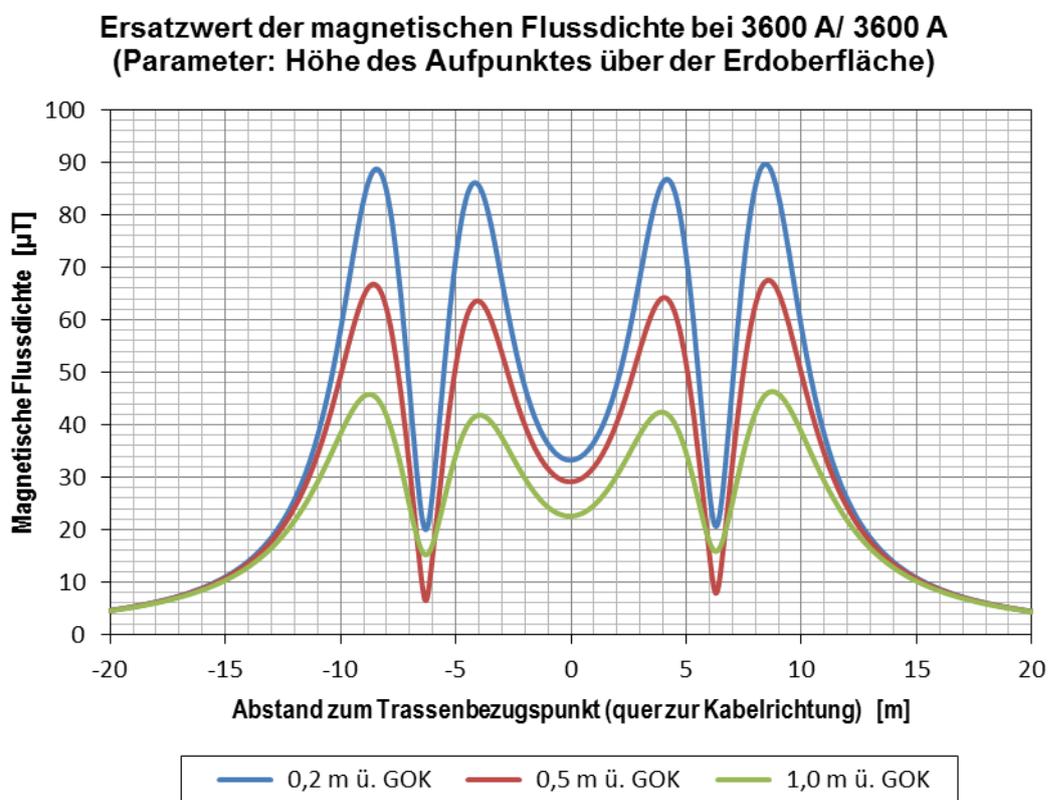


Bild 10: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilschnitt 1.1, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -20 m ... + 20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Teilabschnitt 1.1 (Position der parallelen Erdleiter zwischen den Phasen L1 und L2):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,7 μT	2,65 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT
0,5 m	67,4 μT	2,64 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT
1,0 m	46,4 μT	2,62 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird selbst unmittelbar über der Kabeltrasse und unter ungünstigsten Bedingungen (Regelprofil mit 1,60 m Legetiefe, höchste Anlagenbelastung) noch nicht erreicht. In 1 m Höhe über der Geländeoberkante beträgt die magnetische Flussdichte dort bereits weniger als die Hälfte des Grenzwertes. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 15,3 m zur Trassenmitte werden weniger als 10 % des Grenzwertes erreicht. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Geländeoberkante besteht ab dort praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Flussdichte noch weiter ab.

Für die Trassenabschnitte mit Regelprofil im Teilabschnitt 1.2 zwischen dem Ort des Positionswechsels der Erdleiter und den Verbindungsmuffen ergeben sich folgende Werte der magnetischen Flussdichte:

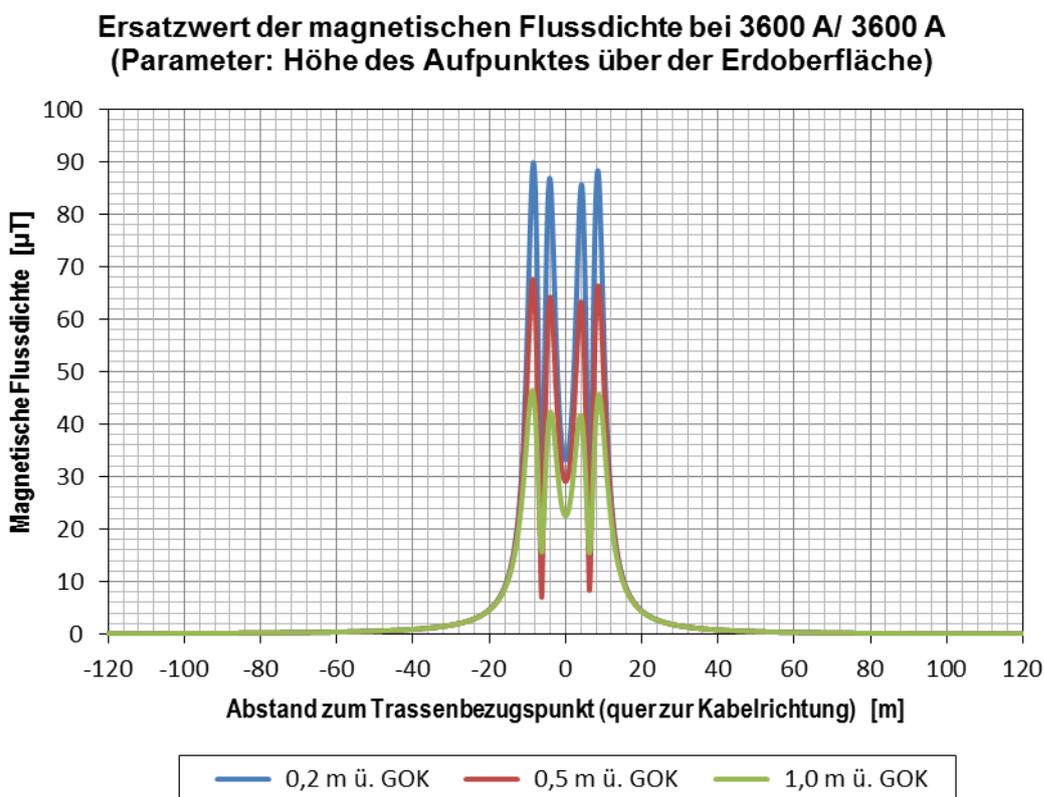


Bild 11: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilabschnitt 1.2, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

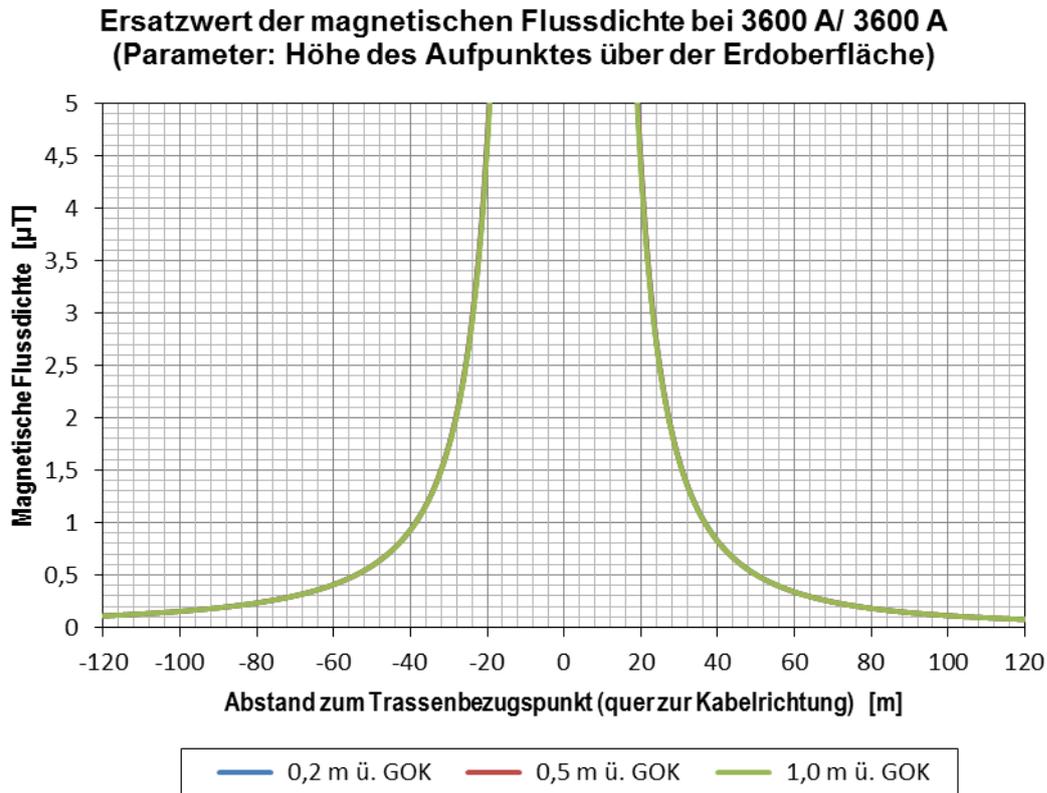


Bild 12: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilschnitt 1.2, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

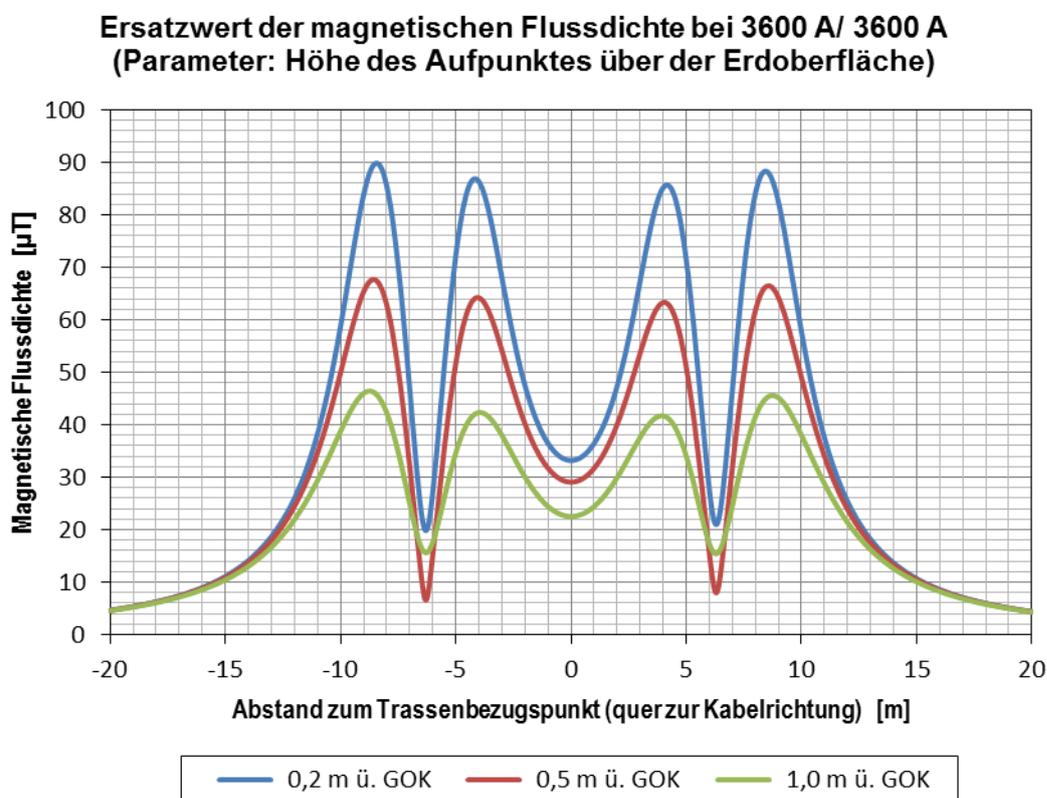


Bild 13: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilschnitt 1.2, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -20 m ... + 20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Teilabschnitt 1.2 (Position der parallelen Erdleiter zwischen den Phasen L2 und L3):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,9 μT	2,66 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT
0,5 m	67,7 μT	2,65 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT
1,0 m	46,5 μT	2,64 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird selbst unmittelbar über der Kabeltrasse und unter ungünstigsten Bedingungen (Regelprofil mit 1,60 m Legetiefe, höchste Anlagenbelastung) noch nicht erreicht. In 1 m Höhe über der Geländeoberkante beträgt die magnetische Flussdichte dort bereits weniger als die Hälfte des Grenzwertes. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 15,3 m zur Trassenmitte werden weniger als 10 % des Grenzwertes erreicht. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Geländeoberkante besteht ab dort praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Flussdichte noch weiter ab. Die berechneten Werte unterscheiden sich praktisch nicht von denen, die für den Teilabschnitt 1.1 ermittelt wurden.

Für die Trassenabschnitte mit Regelprofil im Teilabschnitt 2.1 zwischen den Verbindungsmuffen und dem Ort des Positionswechsels der Erdleiter wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet:

**Ersatzwert der magnetischen Flussdichte bei 3600 A/ 3600 A
(Parameter: Höhe des Aufpunktes über der Erdoberfläche)**

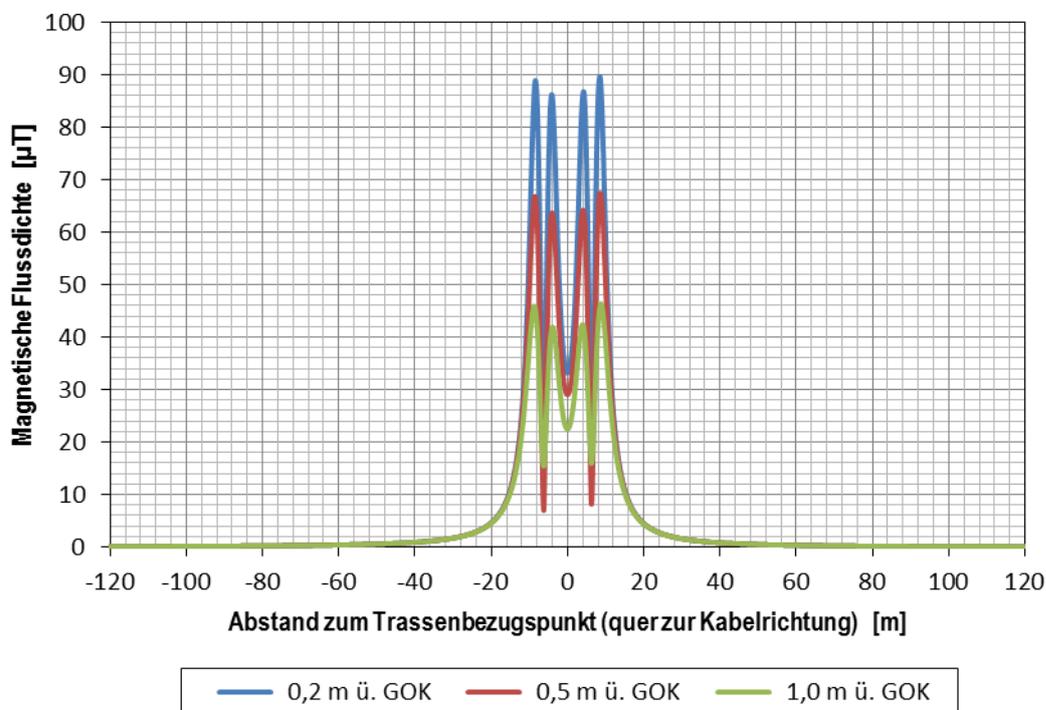


Bild 14: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilabschnitt 2.1, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

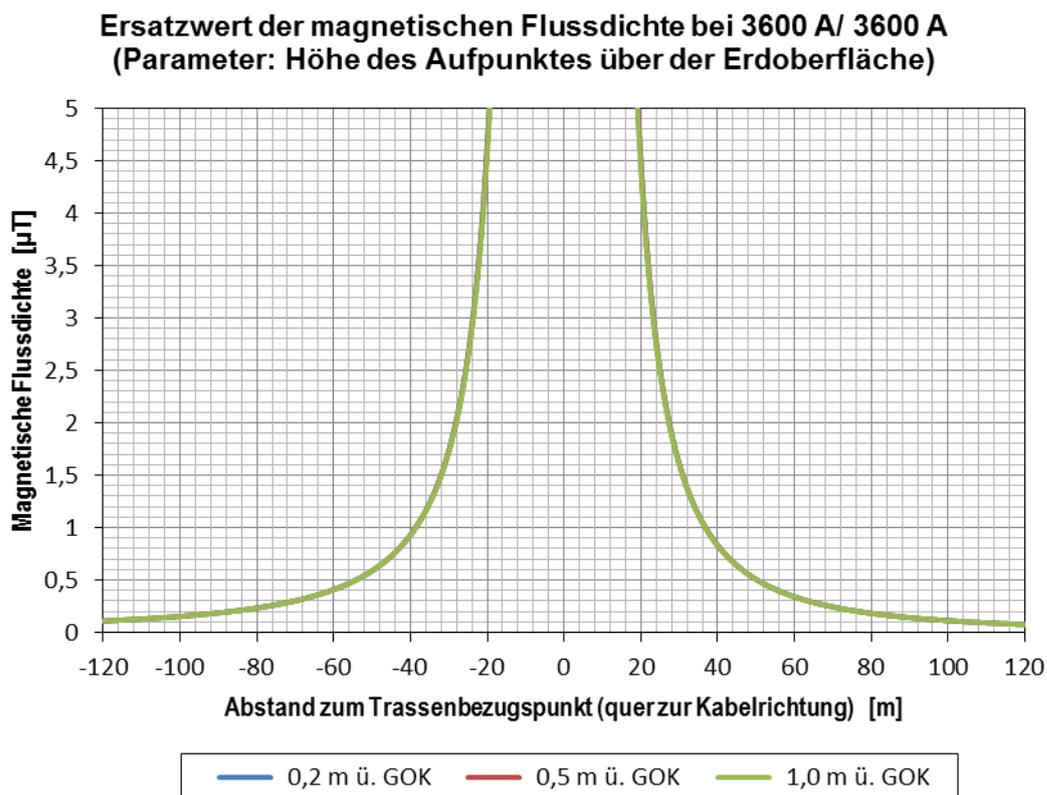


Bild 15: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilschnitt 2.1, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

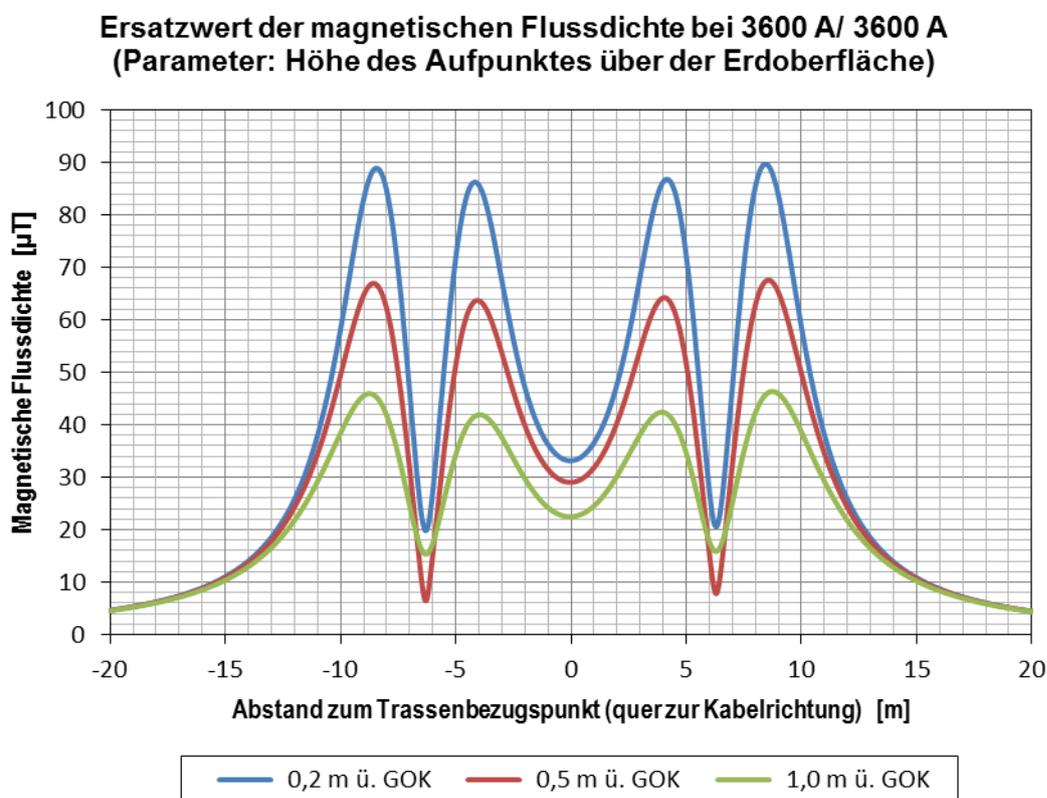


Bild 16: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilschnitt 2.1, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -20 m ... + 20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Teilabschnitt 2.1 (Position der parallelen Erdleiter zwischen den Phasen L1 und L2):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,7 μT	2,66 μT	0,59 μT	0,15 μT	0,05 μT
0,5 m	67,6 μT	2,65 μT	0,59 μT	0,15 μT	0,05 μT
1,0 m	46,4 μT	2,63 μT	0,59 μT	0,15 μT	0,05 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird selbst unmittelbar über der Kabeltrasse und unter ungünstigsten Bedingungen (Regelprofil mit 1,60 m Legetiefe, höchste Anlagenbelastung) noch nicht erreicht. In 1 m Höhe über der Geländeoberkante beträgt die magnetische Flussdichte dort bereits weniger als die Hälfte des Grenzwertes. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 15,3 m zur Trassenmitte werden weniger als 10 % des Grenzwertes erreicht. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Geländeoberkante besteht ab dort praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Flussdichte noch weiter ab.

Für die Trassenabschnitte mit Regelprofil im Teilabschnitt 2.2 zwischen dem Ort des Positionswechsels der Erdleiter und der KÜA Vorwerk ergeben sich folgende Werte der magnetischen Flussdichte:

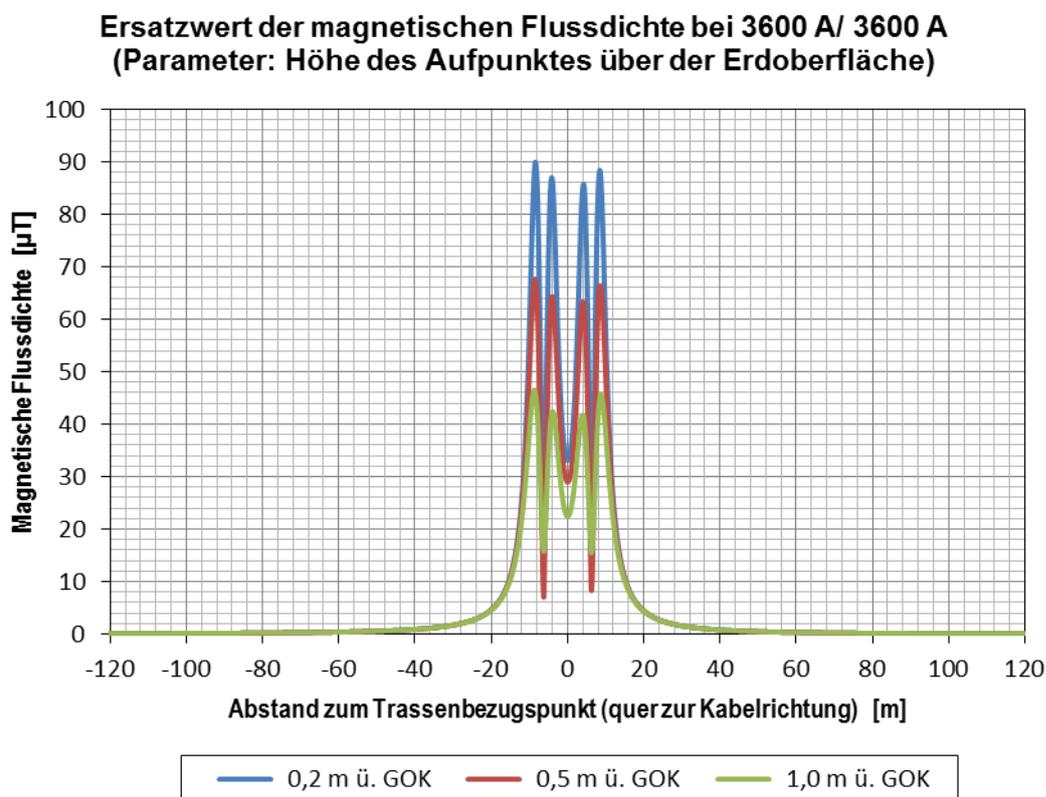


Bild 17: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilabschnitt 2.2, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

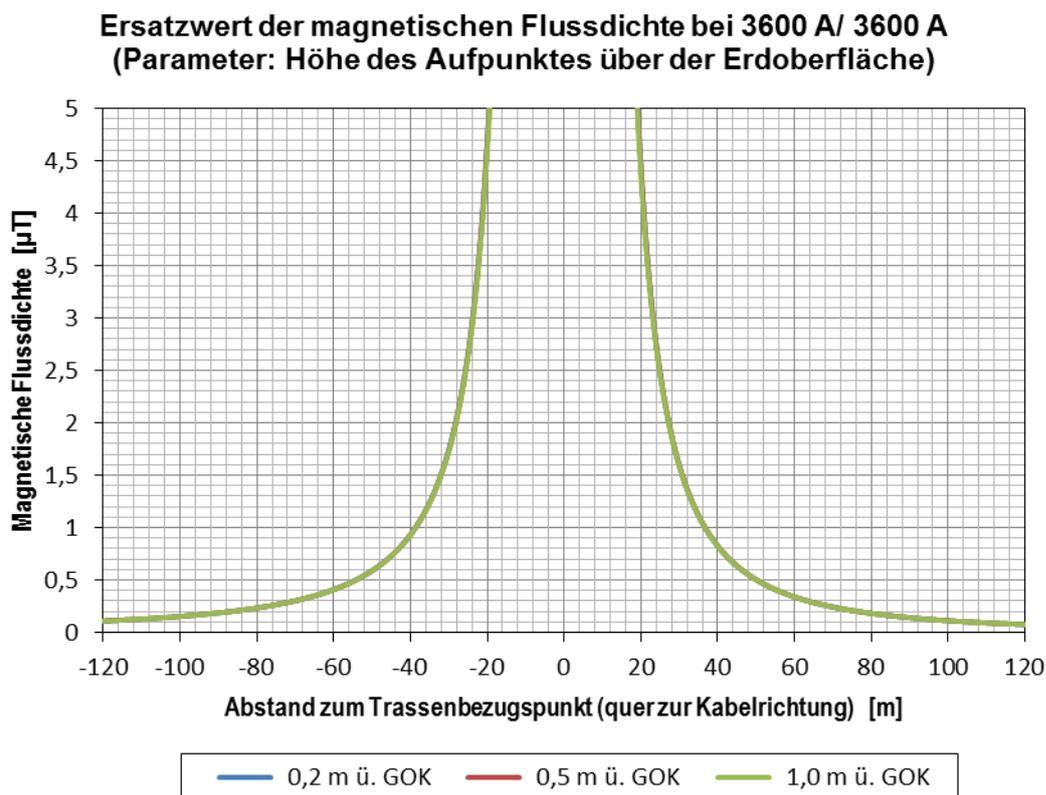


Bild 18: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilschnitt 2.2, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

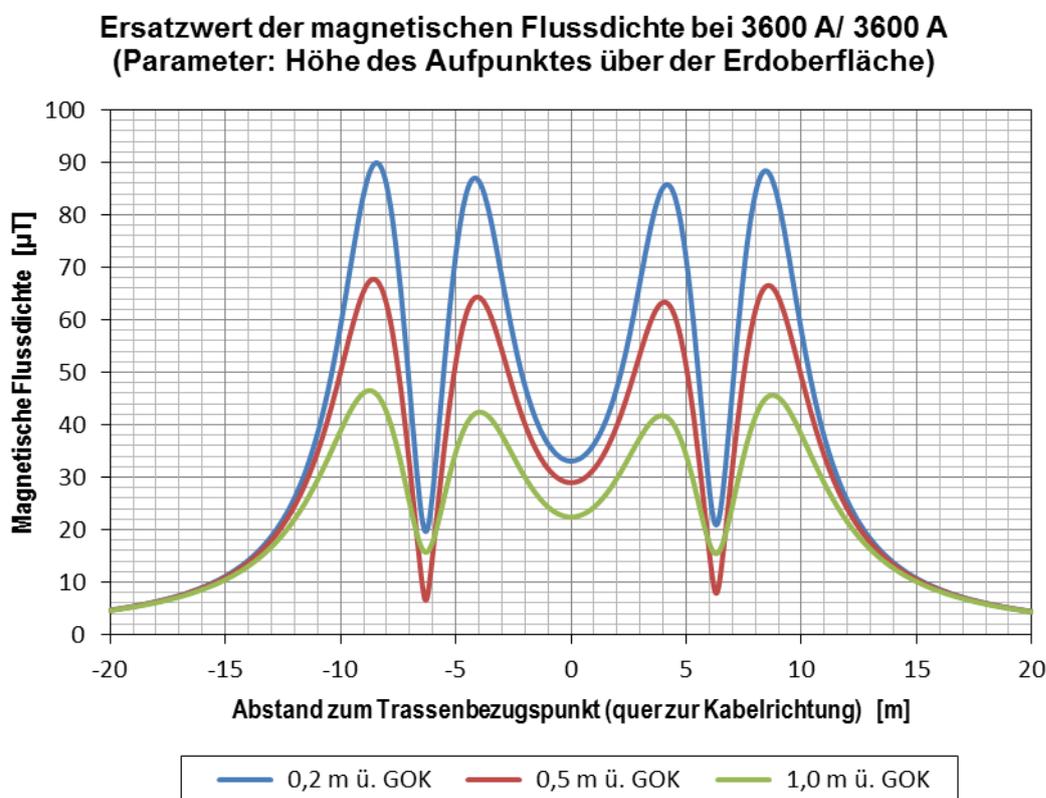


Bild 19: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilschnitt 2.2, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -20 m ... + 20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Teilabschnitt 2.2 (Position der parallelen Erdleiter zwischen den Phasen L2 und L3):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,9 μT	2,67 μT	0,59 μT	0,15 μT	0,05 μT
0,5 m	67,8 μT	2,66 μT	0,59 μT	0,15 μT	0,05 μT
1,0 m	46,5 μT	2,64 μT	0,59 μT	0,15 μT	0,05 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird selbst unmittelbar über der Kabeltrasse und unter ungünstigsten Bedingungen (Regelprofil mit 1,60 m Legetiefe, höchste Anlagenbelastung) noch nicht erreicht. In 1 m Höhe über der Geländeoberkante beträgt die magnetische Flussdichte dort bereits weniger als die Hälfte des Grenzwertes. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 15,3 m zur Trassenmitte werden weniger als 10 % des Grenzwertes erreicht. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Geländeoberkante besteht ab dort praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Flussdichte noch weiter ab. Die berechneten Werte unterscheiden sich praktisch nicht von denen, die für den gesamten Teilabschnitt 1 und den Teilabschnitt 2.1 ermittelt wurden.

Auf allen Trassenabschnitten wird somit der zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte auch unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse selbst unter den ungünstigsten Bedingungen eingehalten. Dies gilt unabhängig davon, in welchem Teilabschnitt mit einseitiger Erdung der Kabelschirme der jeweilige Trassenbereich liegt. Bereits ab 20 m seitlichem Abstand zur Trassenachse liegt die magnetische Flussdichte auf Abschnitten mit Regelprofil bei weniger als 5 μT .

4.2. Magnetische Flussdichten im Bereich der HDD-Abschnitte

Auf 5 Trassenbereichen mit einer Länge zwischen ca. 120 m und ca. 260 m, auf denen verschiedene Straßen, Wege oder Gräben zu queren sind, soll die Trasse grabenlos im HDD-Verfahren errichtet werden. Diese Bereiche stellen insgesamt ca. die Hälfte der gesamten Trassenlänge dar. Auf diesen Abschnitten soll das sogenannte HDD-Profil nach Bild 3 zum Einsatz kommen. In diesem Profil ist der gegenseitige Abstand der Kabel zwar deutlich größer als im Regelprofil nach Bild 2, gleichzeitig ist aber auch die Legetiefe wesentlich größer. Durch die bohrtechnisch vorgegebenen Mindestabstände der Kabelschutzrohre ist es hier im Gegensatz zum Regelprofil nicht möglich, die parallelen Erdleiter in der elektrisch optimalen Position relativ zu den Hochspannungskabeln anzuordnen. Es ist daher vorgesehen, die parallelen Erdleiter auf den HDD-Abschnitten in dem für Begleitkabel vorgesehenen Schutzrohr in der Mitte der Kabeltrasse mitzuführen.

Auch im Bereich der HDD-Abschnitte befinden sich weder auf der Trasse selbst noch in deren unmittelbarer Umgebung (weniger als 20 m Abstand von der Trasse) Bereiche, die nach der 26. BImSchV [1] „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“. Unabhängig davon wurden die erzeugten magnetischen Felder jedoch in gleicher Weise wie für die Abschnitte mit Regelprofil auch für die HDD-Abschnitte durchgehend für einen Bereich von ± 120 m beidseits der Trassenmittelachse in einer Höhe von 0,2 m, 0,5 m bzw. 1,0 m über der Geländeoberkante berechnet.

Zusätzlich zu den grafischen Darstellungen dieser Verläufe wurden die maximalen Werte der magnetischen Flussdichte ebenfalls wieder für vier ausgewählte unterschiedlich weit von der Trassenmittelachse entfernte Punkte berechnet und in tabellarischer Form zusammengestellt.

Für die HDD-Abschnitte im Teilabschnitt 1 zwischen der KÜA Sanderahm und den Verbindungsmuffen wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet:

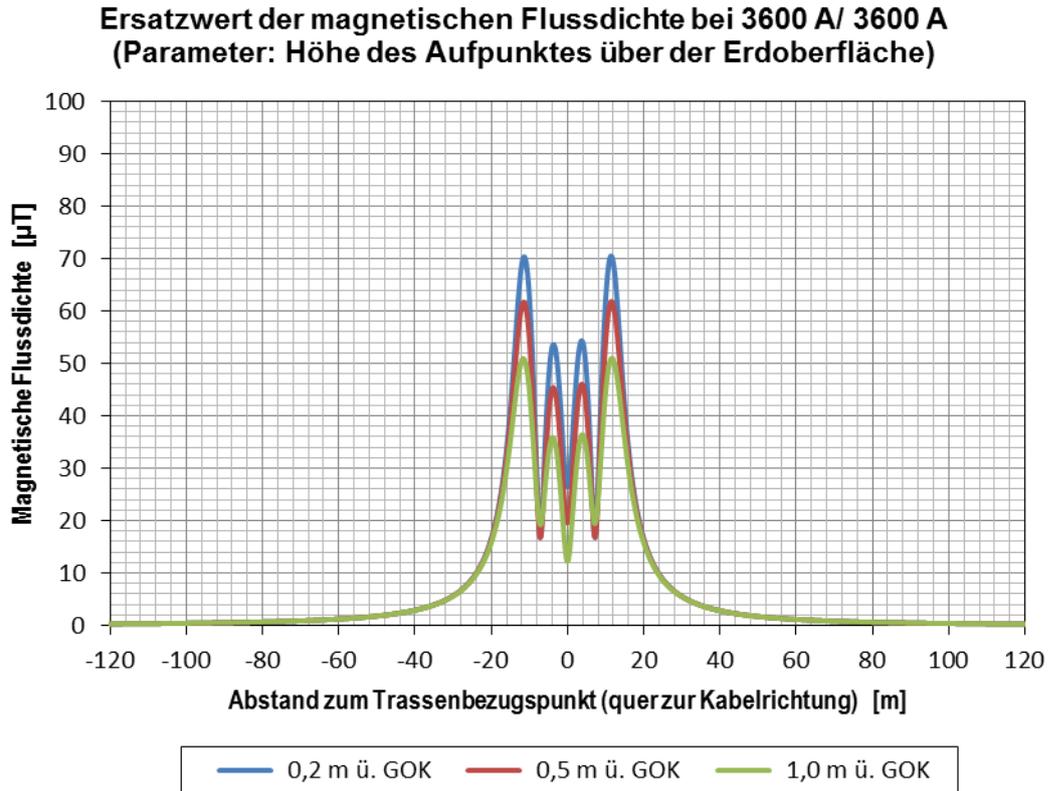


Bild 20: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilabschnitt 1, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

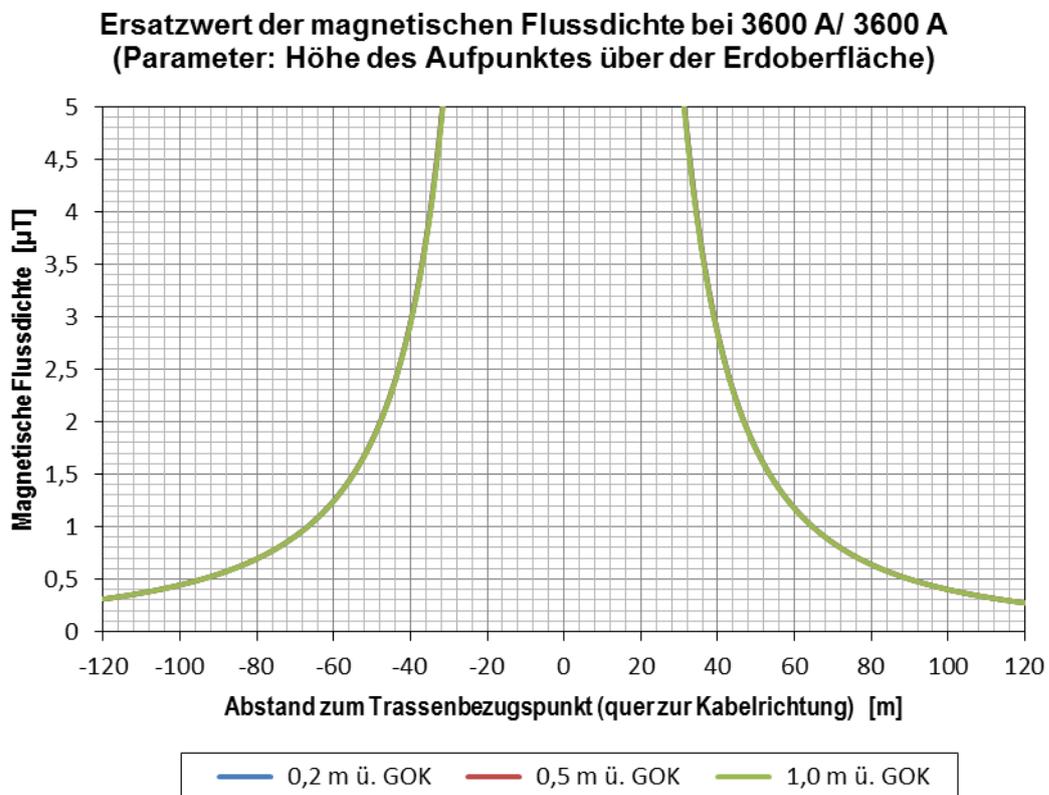


Bild 21: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilabschnitt 1, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

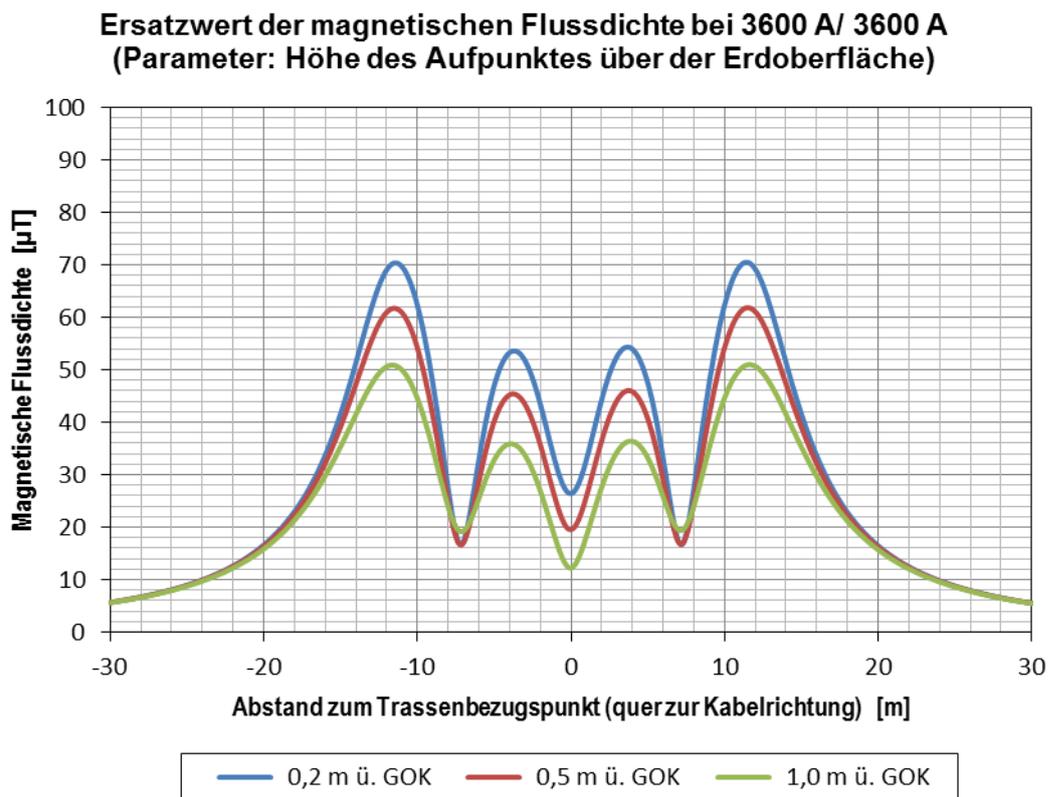


Bild 22: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilabschnitt 1, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -30 m ... + 30 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Teilabschnitt 1:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	70,5 µT	8,97 µT	1,83 µT	0,45 µT	0,12 µT
0,5 m	61,9 µT	8,91 µT	1,82 µT	0,45 µT	0,12 µT
1,0 m	51,0 µT	8,79 µT	1,82 µT	0,45 µT	0,12 µT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 µT wird selbst unmittelbar über der Kabeltrasse und unter ungünstigsten Bedingungen (geringste Legetiefe, höchste Anlagenbelastung) bereits deutlich unterschritten. In 1 m Höhe wird dort nur noch ca. die Hälfte des Grenzwertes erreicht. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 24 m zur Trassenmitte beträgt die maximale magnetische Flussdichte weniger als 1/10 des Grenzwertes. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Geländeoberkante besteht ab dort praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Flussdichte noch weiter ab.

Für die HDD-Abschnitte im Teilabschnitt 2 zwischen der Verbindungsmuffe und der KÜA Vorwerk wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet:

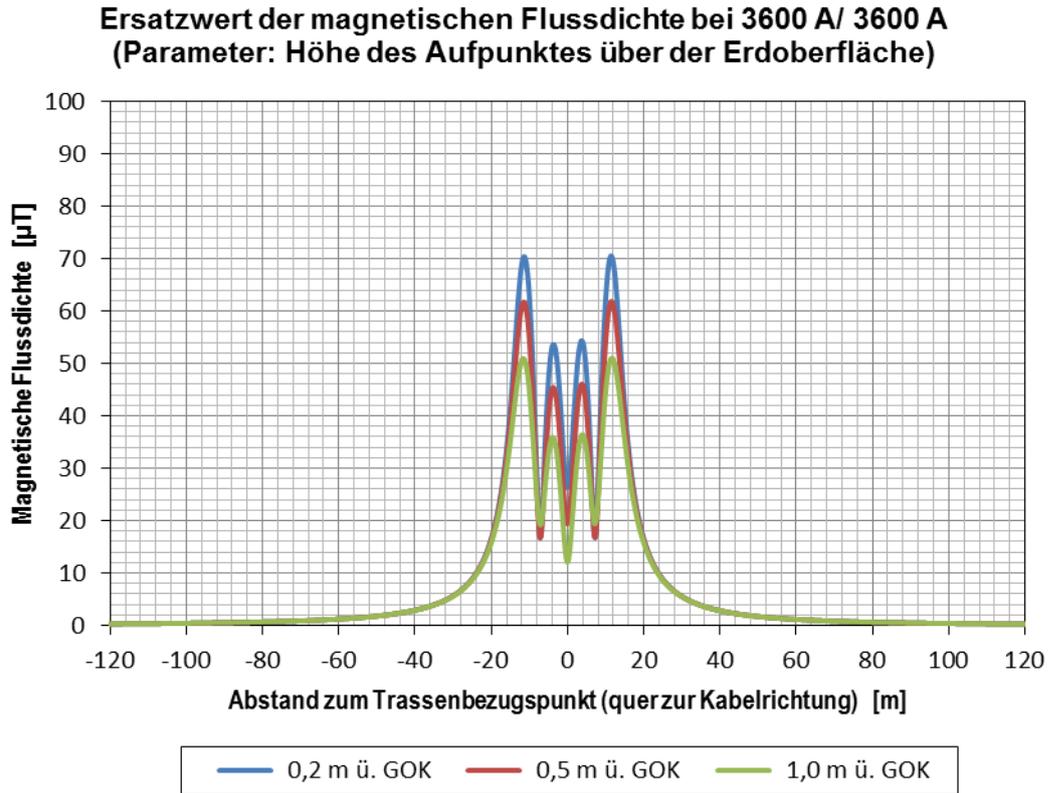


Bild 23: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilabschnitt 2, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

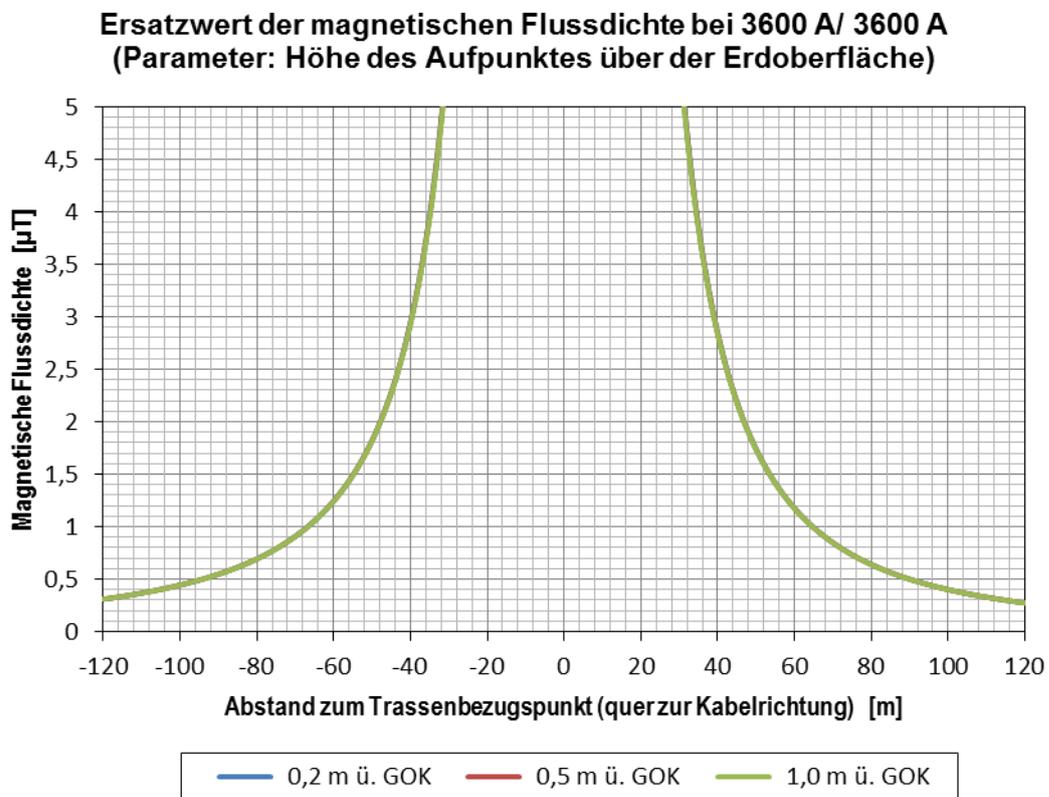


Bild 24: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilabschnitt 2, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

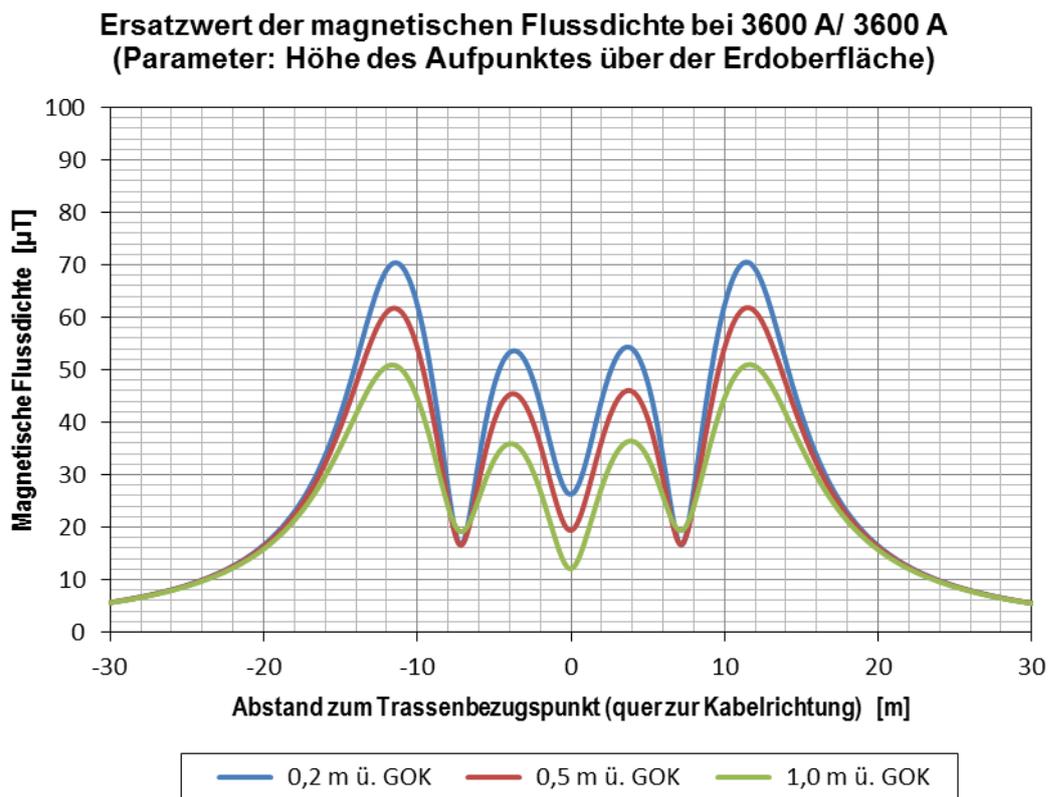


Bild 25: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Teilabschnitt 2, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -30 m ... + 30 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Teilabschnitt 2:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	70,6 μT	8,97 μT	1,82 μT	0,45 μT	0,12 μT
0,5 m	61,9 μT	8,90 μT	1,82 μT	0,45 μT	0,12 μT
1,0 m	51,0 μT	8,79 μT	1,82 μT	0,44 μT	0,12 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird selbst unmittelbar über der Kabeltrasse und unter ungünstigsten Bedingungen (geringste Legetiefe, höchste Anlagenbelastung) bereits deutlich unterschritten. In 1 m Höhe wird dort nur noch ca. die Hälfte des Grenzwertes erreicht. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 24 m zur Trassenmitte beträgt die maximale magnetische Flussdichte weniger als 1/10 des Grenzwertes. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Geländeoberkante besteht ab dort praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Flussdichte noch weiter ab. Die Ergebnisse unterscheiden sich praktisch nicht von denen, die für die HDD-Abschnitte im einseitig geerdeten Teilabschnitt 1 der Trasse berechnet wurden.

Im Vergleich zu den Abschnitten mit Regelprofil ist die maximale magnetische Flussdichte unmittelbar oberhalb der Trasse deutlich geringer. In größerer Entfernung von der Trasse ist die magnetische Flussdichte für das HDD-Profil zwar größer als für das Regelprofil, jedoch liegen die absoluten Werte in allen Fällen bereits weit unterhalb des nach der 26. BImSchV [1] zulässigen Grenzwertes von 100 μT . Ab ca. 31 m seitlichem Abstand zur Trassenachse liegt die magnetische Flussdichte auch im Bereich der HDD-Profile bei weniger als 5 μT .

4.3. Magnetische Flussdichten an ausgewählten Punkten mit Bebauung

Die magnetischen Flussdichten wurden zusätzlich zu den in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten allgemeinen Betrachtungen auch für vier ausgewählte Punkte in der Umgebung der Kabeltrasse untersucht. Es handelt sich dabei um Bereiche, auf denen sich die Kabeltrasse bis auf weniger als 100 m an vorhandene Gebäude annähert. Diese Gebäude gelten im Sinne der 26. BImSchV als Bereiche, die „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“ [1]. Für solche Bereiche 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 Keelköpkenweg 1, Keelköpkenweg 4, Sanderahmer Straße 31 und Sanderahmer Straße 34b.

4.3.1. Gebäude auf dem Grundstück Keelköpkenweg 4

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 305 m ab der KÜA Sanderahm nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 99 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Keelköpkenweg 4 befindet (Bild 26). In diesem Bereich gilt für die Trasse zwar das Regelprofil gemäß Bild 2, der betreffende Abschnitt ist jedoch nur vergleichsweise kurz, da sich auf beiden Seiten unmittelbar Abschnitte in HDD-Bauweise anschließen. Das magnetische Feld im interessierenden Bereich in 99 m Entfernung von der Trassenmitte wird deshalb vorwiegend von den benachbarten HDD-Abschnitten bestimmt. Für die Berechnung wurde deshalb auch das HDD-Profil nach Bild 3 angesetzt. Der betreffende Bereich befindet sich im einseitig geerdeten Teilabschnitt 1 der Trasse.

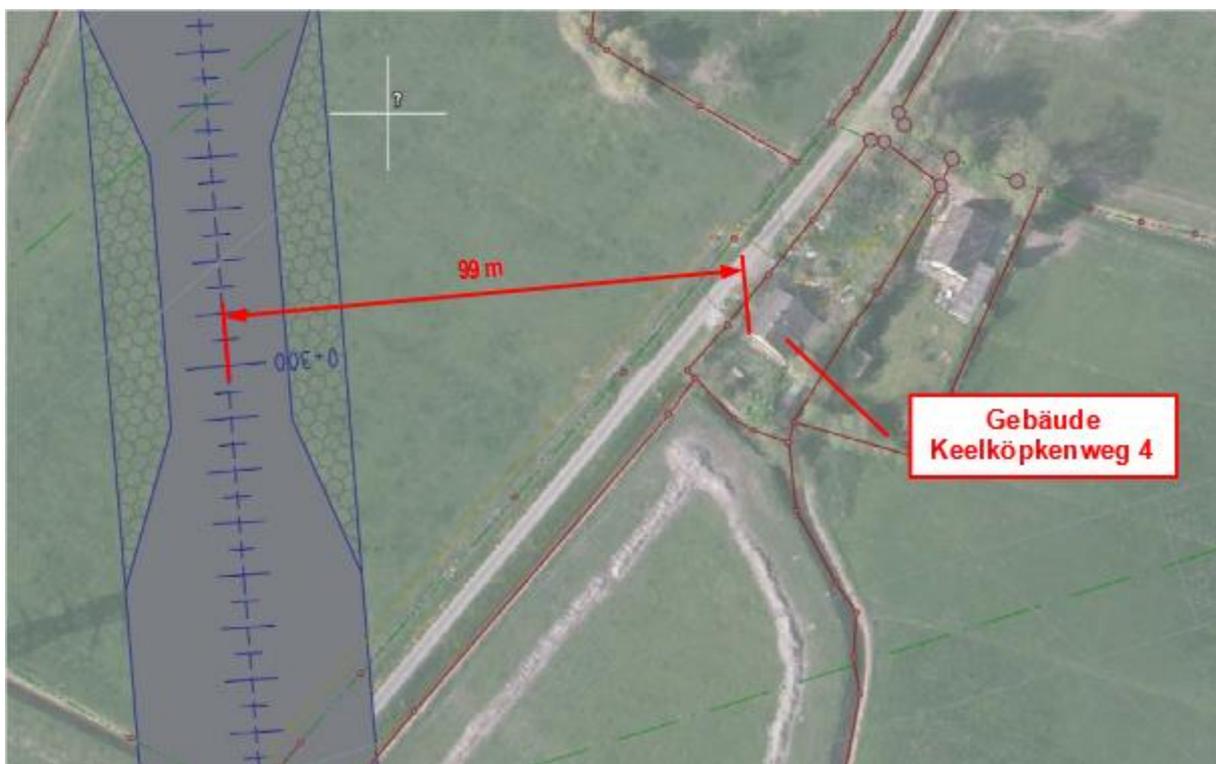


Bild 26: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Keelköpkenweg 4 nahe Trassen-km 0+305

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 27 gezeigten Verlauf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in diesem Diagramm nur die Seite berücksichtigt, auf der sich das Gebäude von der Kabeltrasse aus gesehen befindet. Die Position dieses Gebäudes ist im Diagramm markiert.

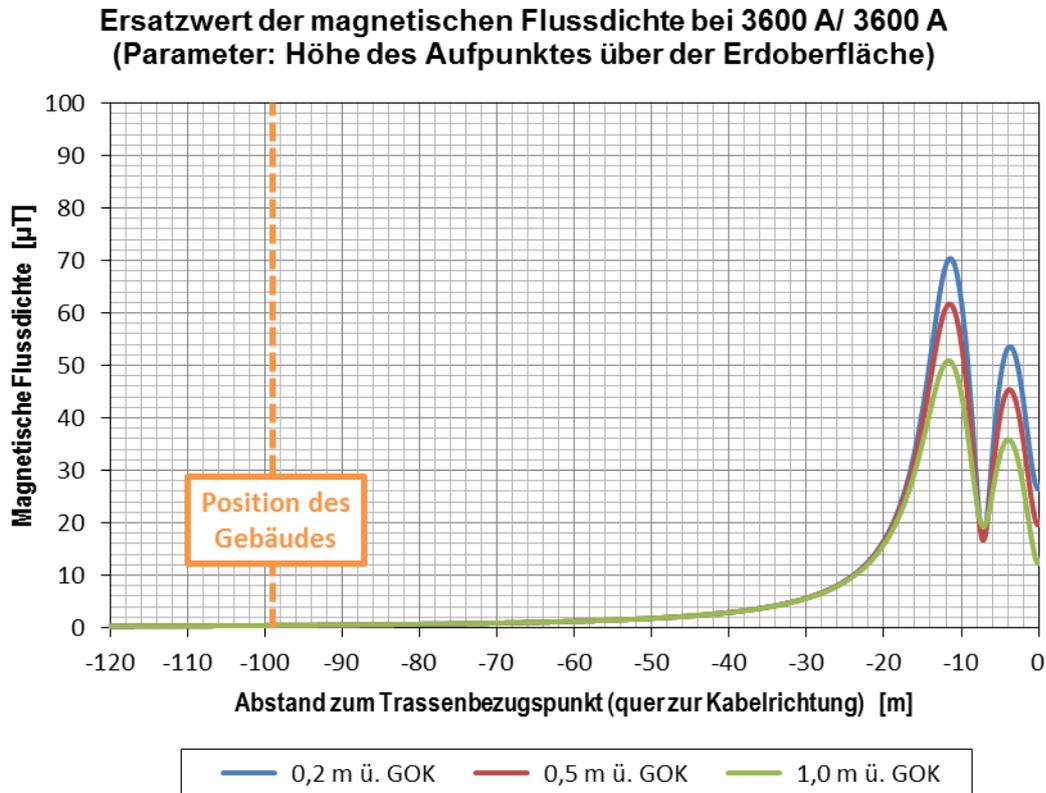


Bild 27: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Keelköpkenweg 4 für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes) 99 m
0,2 m	0,46 μT
0,5 m	0,46 μT
1,0 m	0,45 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 220) unterschritten.

4.3.2. Gebäude auf dem Grundstück Keelköpkenweg 1

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 845 m ab der KÜA Sanderahm nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 61 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Keelköpkenweg 1 befindet (Bild 28). In diesem Bereich gilt für die Trasse das Regelprofil gemäß Bild 2. Der betreffende Bereich befindet sich im einseitig geerdeten Teilabschnitt 1.2 der Trasse, in dem die Positionen der parallelen Erdleiter bereits auf eine Lage zwischen den Phasen L2 und L3 der einzelnen Teilkabelsysteme gewechselt wurden (siehe auch Bild 4).

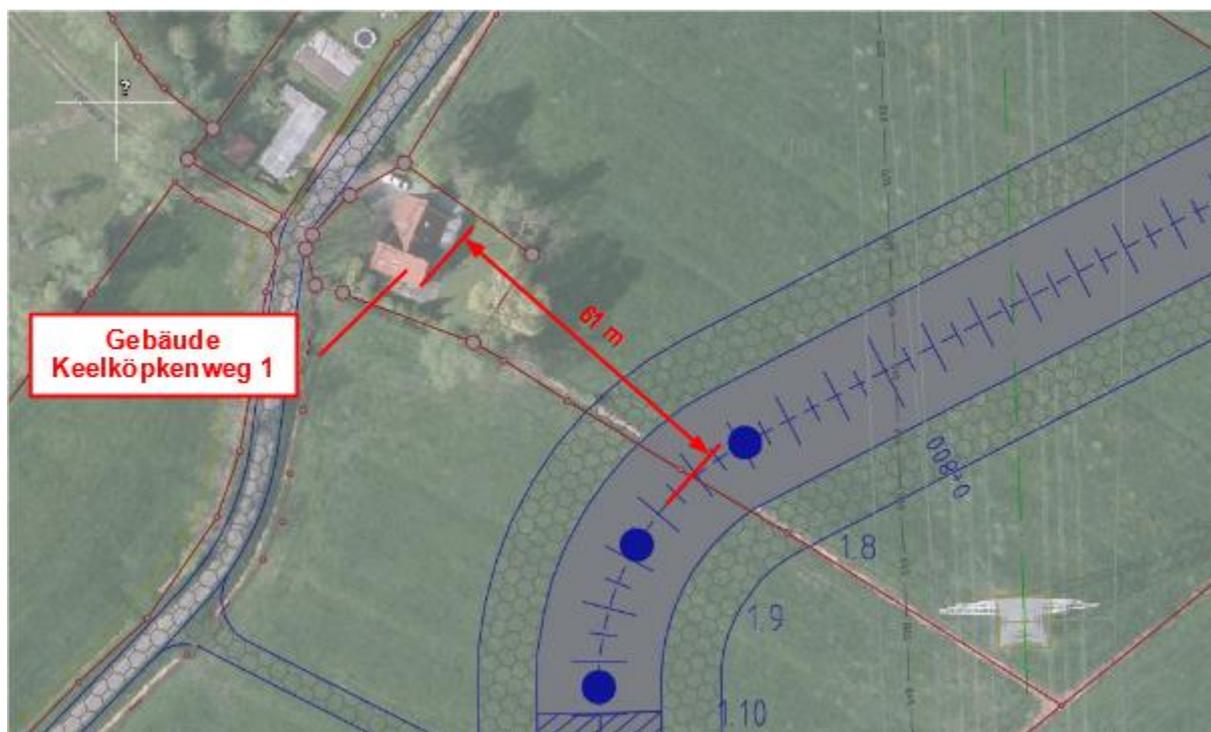


Bild 28: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Keelköpkenweg 1 nahe Trassen-km 0+845

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 29 gezeigten Verlauf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in diesem Diagramm nur die Seite berücksichtigt, auf der sich das Gebäude von der Kabeltrasse aus gesehen befindet. Die Position dieses Gebäudes ist im Diagramm markiert.

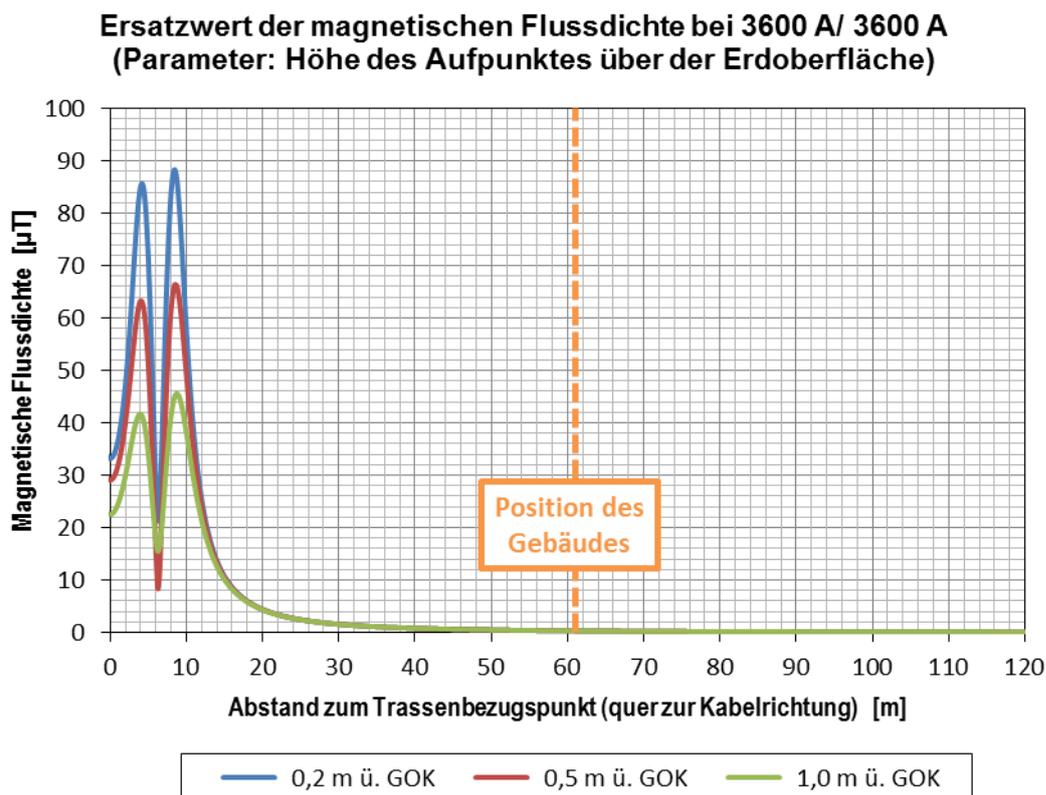


Bild 29: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Keelköpkenweg 1 für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes) 61 m
0,2 m	0,33 µT
0,5 m	0,33 µT
1,0 m	0,33 µT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 µT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 300) unterschritten.

4.3.3. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 31

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 1045 m ab der KÜA Sanderahm nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 60 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 31 befindet (Bild 30). In diesem Bereich unterquert die Trasse die Sanderahmer Straße, deshalb gilt in diesem Bereich das HDD-Profil gemäß Bild 3. Der betreffende Bereich befindet sich im einseitig geerdeten Teilabschnitt 2 der Trasse.

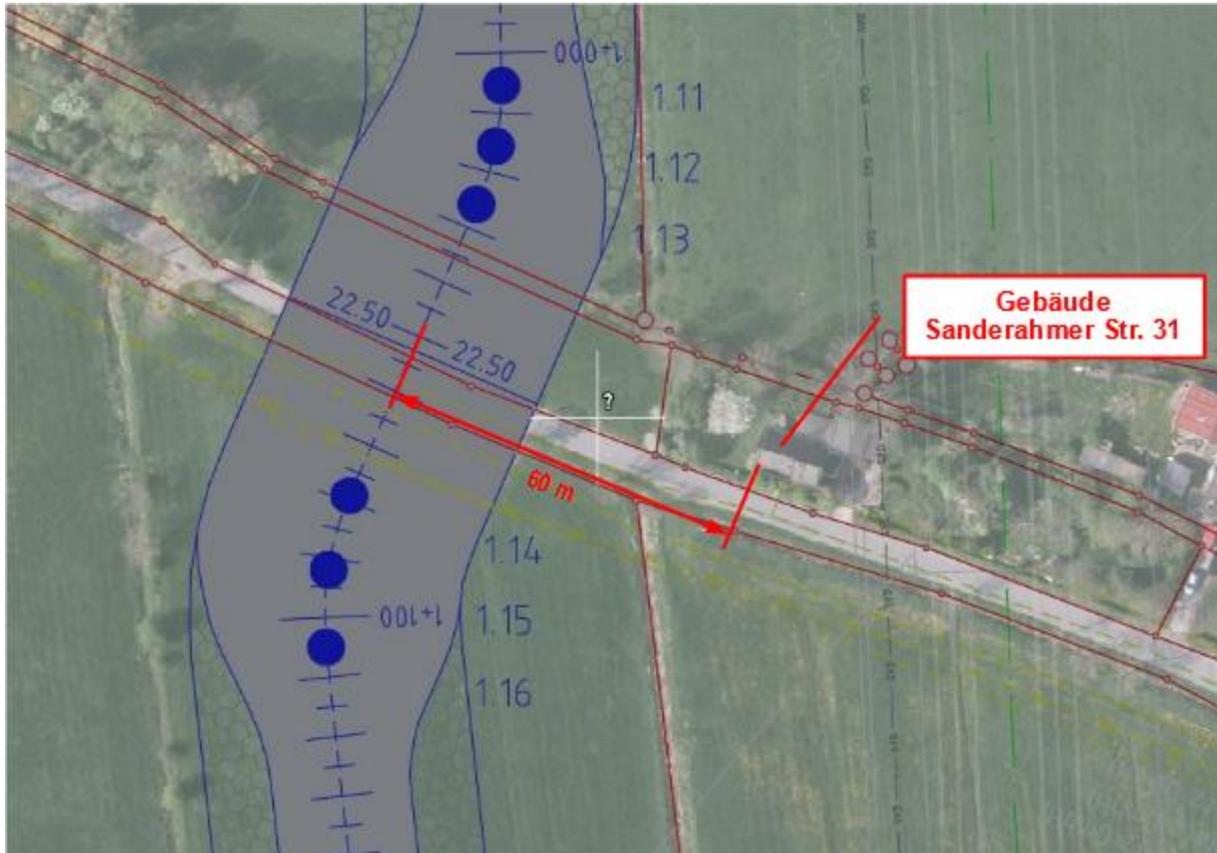


Bild 30: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 31 nahe Trassen-km 1+045

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 31 gezeigten Verlauf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in diesem Diagramm nur die Seite berücksichtigt, auf der sich das Gebäude von der Kabeltrasse aus gesehen befindet. Die Position dieses Gebäudes ist im Diagramm markiert.

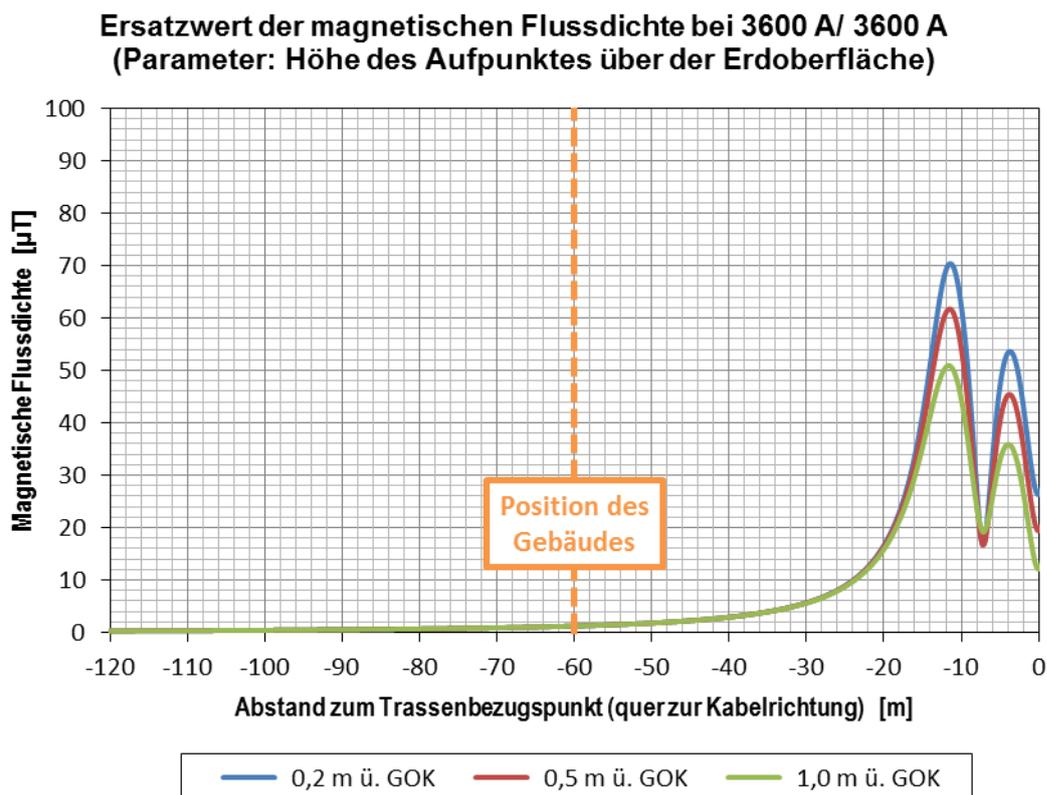


Bild 31: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 31 für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes)
	60 m
0,2 m	1,25 μT
0,5 m	1,25 μT
1,0 m	1,24 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als eine Größenordnung (Faktor ca. 80) unterschritten.

4.3.4. Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 34b

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 1070 m ab der KÜA Sanderahm nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 97 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 34b befindet (Bild 32). In diesem Bereich unterquert die Trasse die Sanderahmer Straße, deshalb gilt in diesem Bereich das HDD-Profil gemäß Bild 3. Der betreffende Bereich befindet sich im einseitig geerdeten Teilabschnitt 2 der Trasse.

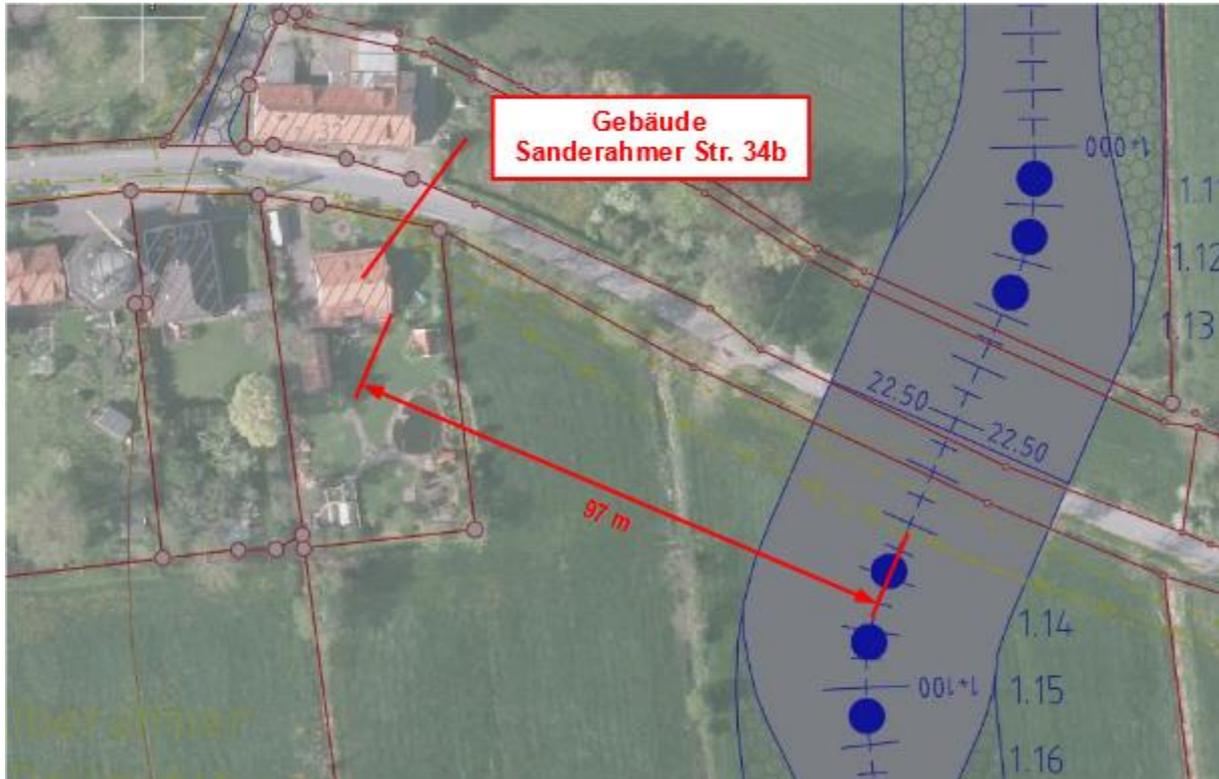


Bild 32: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 34b nahe Trassen-km 1+070

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 33 gezeigten Verlauf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in diesem Diagramm nur die Seite berücksichtigt, auf der sich das Gebäude von der Kabeltrasse aus gesehen befindet. Die Position dieses Gebäudes ist im Diagramm markiert.

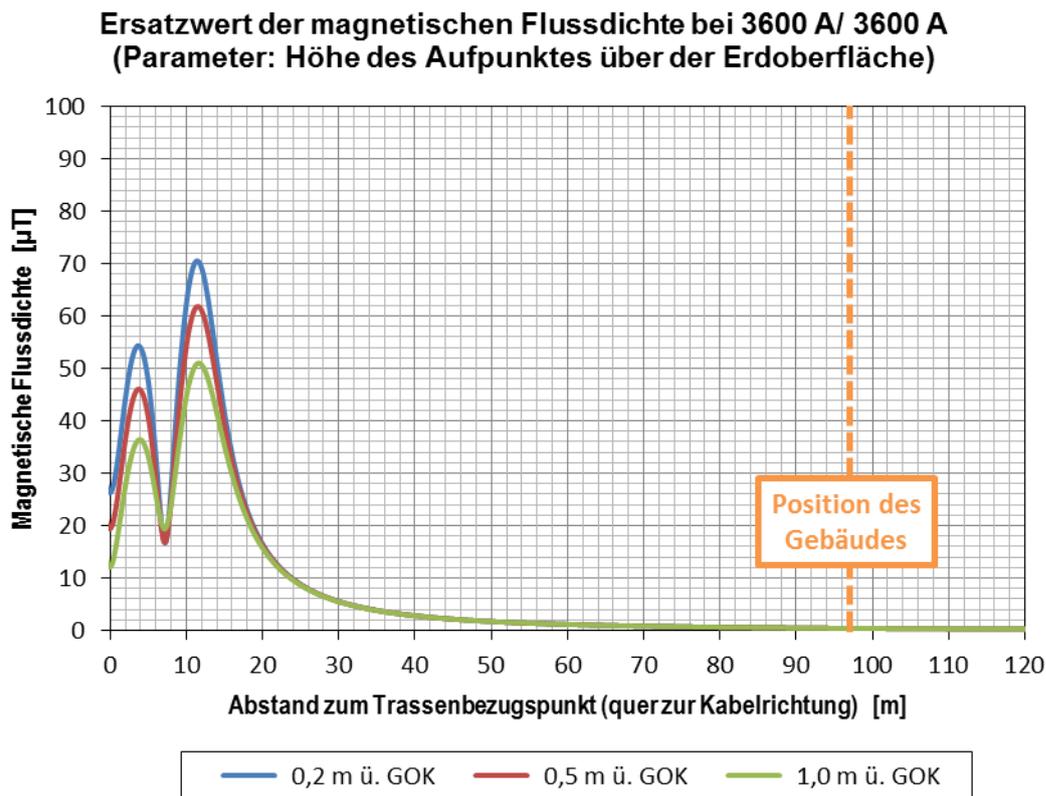


Bild 33: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Sanderahmer Straße 34b für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes)
	97 m
0,2 m	0,43 μT
0,5 m	0,43 μT
1,0 m	0,43 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 230) 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 μT , 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 eine maximale Belastung von 3600 A pro Stromkreis angesetzt, obwohl diese Last aus thermischen Gründen nur für einen begrenzten Zeitraum von maximal 48 h zulässig ist. Bei allen Berechnungen wurden die ungleichmäßige Stromaufteilung auf die parallelgeschalteten Kabel sowie die induzierten (Rest-) Ströme in den parallelen Erdleitern der vier Kabelteilsysteme berücksichtigt. Auf Grund der für diese Kabelverbindung vorgesehenen einseitigen Erdung der Kabelschirme fließen in diesen im Gegensatz zum sonst häufig eingesetzten Cross-Bonding-Verfahren keine induzierten (Rest-) Ströme.

Auf ca. der Hälfte der Trasse soll ein vorgegebenes Regelprofil zum Einsatz kommen. Einzelne Teilabschnitte der Kabeltrasse werden mit Hilfe des Horizontalspülbohrverfahrens (HDD-Verfahren) erstellt. Auf diesen Trassenabschnitten ist die Legetiefe der Kabel durchweg größer als im Bereich des Regelprofils, die Kabelabstände müssen aus bohrtechnischen und thermischen Gründen jedoch ebenfalls größer gewählt werden. Diese HDD-Abschnitte umfassen zusammen ebenfalls ca. die Hälfte der gesamten Trassenlänge.

Für das Regelprofil wurde die auf den beiden einseitig geerdeten Teilabschnitten erzeugte magnetische Flussdichte für einen symmetrisch zur Mittelachse der Kabeltrasse liegenden 240 m breiten Korridor berechnet. Dabei wurde auch der vorgesehene Positionswechsel der parallelen Erdleiter jeweils ca. in der Mitte des betreffenden einseitig geerdeten Teilabschnitts berücksichtigt. Diese Untersuchungen erfolgten in analoger Weise auch für die Abschnitte mit HDD-Profil. Zusätzlich wurde die magnetische Flussdichte noch einmal explizit für 4 ausgewählte Punkte in 25 m, 50 m, 100 m und 200 m Abstand von der Trassenmittelachse berechnet.

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Teilabschnitt 1.1 (Position der parallelen Erdleiter zwischen den Phasen L1 und L2):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,7 μT	2,65 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT
0,5 m	67,4 μT	2,64 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT
1,0 m	46,4 μT	2,62 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Teilabschnitt 1.2 (Position der parallelen Erdleiter zwischen den Phasen L2 und L3):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,9 μ T	2,66 μ T	0,59 μ T	0,16 μ T	0,05 μ T
0,5 m	67,7 μ T	2,65 μ T	0,59 μ T	0,16 μ T	0,05 μ T
1,0 m	46,5 μ T	2,64 μ T	0,59 μ T	0,16 μ T	0,05 μ T

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Teilabschnitt 2.1 (Position der parallelen Erdleiter zwischen den Phasen L1 und L2):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,7 μ T	2,66 μ T	0,59 μ T	0,15 μ T	0,05 μ T
0,5 m	67,6 μ T	2,65 μ T	0,59 μ T	0,15 μ T	0,05 μ T
1,0 m	46,4 μ T	2,63 μ T	0,59 μ T	0,15 μ T	0,05 μ T

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Teilabschnitt 2.2 (Position der parallelen Erdleiter zwischen den Phasen L2 und L3):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,9 μ T	2,67 μ T	0,59 μ T	0,15 μ T	0,05 μ T
0,5 m	67,8 μ T	2,66 μ T	0,59 μ T	0,15 μ T	0,05 μ T
1,0 m	46,5 μ T	2,64 μ T	0,59 μ T	0,15 μ T	0,05 μ T

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Teilabschnitt 1:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	70,5 μ T	8,97 μ T	1,83 μ T	0,45 μ T	0,12 μ T
0,5 m	61,9 μ T	8,91 μ T	1,82 μ T	0,45 μ T	0,12 μ T
1,0 m	51,0 μ T	8,79 μ T	1,82 μ T	0,45 μ T	0,12 μ T

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Teilabschnitt 2:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	70,6 μ T	8,97 μ T	1,82 μ T	0,45 μ T	0,12 μ T
0,5 m	61,9 μ T	8,90 μ T	1,82 μ T	0,45 μ T	0,12 μ T
1,0 m	51,0 μ T	8,79 μ T	1,82 μ T	0,44 μ T	0,12 μ T

Die größten magnetischen Flussdichten treten immer unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse auf. Die berechneten Ersatzwerte liegen für das Regelprofil zwischen 46,4 μ T in 1,0 m Höhe und 89,9 μ T in 0,2 m Höhe über der Geländeoberkante. Für das HDD-Profil erreicht die maximale magnetische Flussdichte unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse Werte zwischen 51,0 μ T in 1,0 m

Höhe und 70,6 μT in 0,2 m Höhe über der Geländeoberkante. Die Werte sind nahezu unabhängig davon, in welchem Teilabschnitt der einseitigen Erdung sich der betreffende Trassenbereich befindet.

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 μT auch dort eingehalten, obwohl dies formal nicht erforderlich wäre. Für größere horizontale Abstände von der Kabeltrasse sind die erzeugten magnetischen Flussdichten erheblich geringer.

Zusätzlich wurden die zu erwartenden maximalen magnetischen Flussdichten auch für vier ausgewählte Orte berechnet, an denen sich die Kabeltrasse auf weniger als 100 m an Wohn- bzw. Nebengebäude annähert. Dabei wurden die jeweiligen Trassenprofile (Regelprofil bzw. HDD-Profil) im Bereich der größten Annäherung der Kabeltrasse an die Gebäude sowie in den jeweils unmittelbar anschließenden Bereichen berücksichtigt. Für alle diese Orte wurden maximale Werte der magnetischen Flussdichte ermittelt, die um mehr als eine Größenordnung unter dem zulässigen Grenzwert liegen (0,46 μT , 0,33 μT , 1,25 μT , 0,43 μT).

Bei Ausführung der Kabelanlage in der vorgestellten Form und unter Zugrundelegung der beschriebenen maximalen thermisch zulässigen Strombelastung von 3600 A pro Stromkreis kann somit davon ausgegangen werden, dass der in der 26. BImSchV vorgegebene Grenzwert von 100 μT für ein magnetisches 50-Hz-Wechselfeld im gesamten Bereich der Kabeltrasse eingehalten wird. In den gesondert untersuchten Bereichen der maximalen Annäherung an Gebäude, bei denen es sich im Sinne der 26. BImSchV um Bereiche handelt, die „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“ wird dieser Grenzwert sogar erheblich unterschritten.

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