

Technischer Bericht

**Magnetische Felder im Bereich eines als Erdkabel-
verbindung geplanten Teilabschnitts der 380-kV-Leitung
„Fedderwarden – Conneforde“ im Bereich westlich der
Ortschaft Bockhorn (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
43 / -

Datum: 26.09.2017

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 Urwaldstraße 35**
 - 4.3.2. Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 47**
 - 4.3.3. Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 45**
 - 4.3.4. Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 43a**
 - 4.3.5. Gebäude auf dem Grundstück Hauptstraße 1**
 - 4.3.6. Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 54**
 - 4.3.7. Gebäude auf dem Grundstück Hauptstraße 2**
 - 4.3.8. Gebäude auf dem Grundstück Grafenweg 2a**
- 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 westlich der Ortschaft Bockhorn ist jedoch vorgesehen, einen ca. 3,6 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 (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:

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

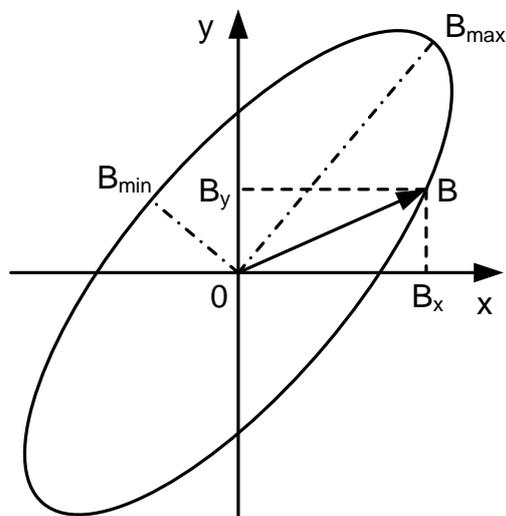


Bild 1: Magnetisches Feld in der Ebene senkrecht zu den felderzeugenden Strömen (nach [2])

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 westlich der Ortschaft Bockhorn 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) Bockhorn (Trassen-km 0+000) und endet an der Kabelübergangsanlage Osterforde (Trassen-km 3+565). Die gesamte Trassenlänge beträgt also ca. 3,6 km. Auf der Trasse sind verschiedene Trassenprofile gemäß nachfolgender Tabelle vorgesehen:

Stationierung	Länge [m]	Legetiefe [m]	Phasenabstand [m]	Trassenprofil	Bemerkungen
0+000 - 0+374	374	1,60	0,75	offen	
0+374 - 0+680	306	3,50	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung der Kreisstraße K102 Und einer Ferngasleitung
0+680 - 1+157	477	1,60	0,75	offen	
1+157 - 1+217	60	3,50	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung der Bundesstraße B437
1+217 - 1+350	133	1,60	0,75	offen	
1+350 - 1+470	120	3,50	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung eines Grabens
1+470 - 1+545	75	1,60	0,75	offen	
1+545 - 1+660	115	3,00	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung eines Grabens
1+660 - 1+715	55	1,60	0,75	offen	
1+715 - 1+910	195	3,00	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung eines befestigten Weges
1+910 - 2+650	740	1,60	0,75	offen	
2+650 - 2+850	200	3,00	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung der Grabsteder Straße, FFH-Gebiet Neuenburger Holz
2+850 - 2+950	100	1,60	0,75	offen	
2+950 - 3+080	130	3,00	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung der Landstraße L816
3+080 - 3+125	45	1,60	0,75	offen	
3+125 - 3+265	140	3,00	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung einer Wallhecke
3+265 - 3+460	195	1,60	0,75	offen	
3+460 - 3+565	105	3,00	2,00	geschlossen (HDD)	Kreuzung einer Wallhecke

Tabelle 1: Vorgesehene Trassenprofile entlang der gesamten Trasse

Auf ca. 2/3 der gesamten Trasse soll die Kabelanlage in offener Bauweise gemäß dem sogenannten Regelprofil nach Bild 2 errichtet werden. Bei insgesamt 9 notwendigen Querungen von Straßen, Wegen, Gräben oder ökologisch sensiblen Bereichen kommt das grabenlose HDD-Verfahren zum Einsatz. Dabei werden die Kabelschutzrohre mit Hilfe von Spülbohrungen in den Boden eingebracht. Diese 9 HDD-Abschnitte umfassen zusammen ca. 1/3 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.

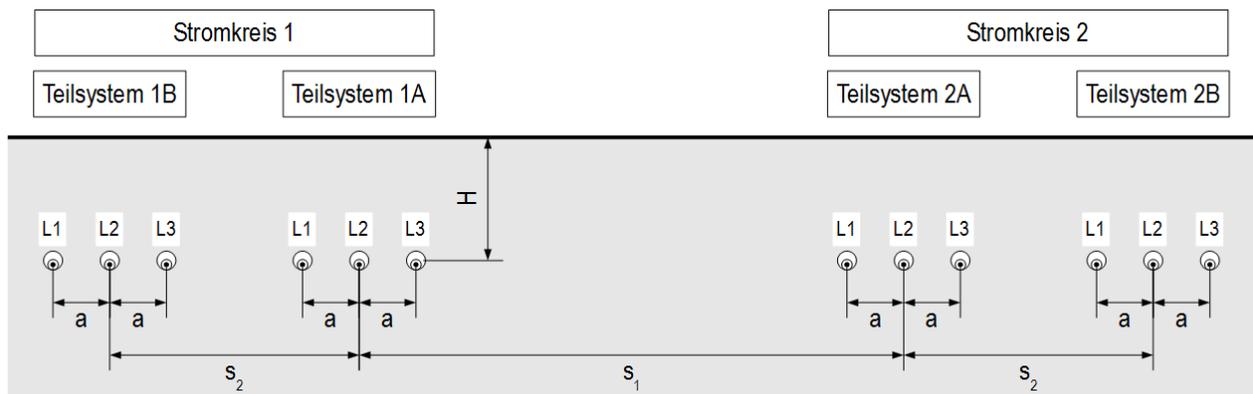


Bild 2: Regelprofil der 380-kV-Kabelverbindung (Kabel einzeln in Schutzrohren 250 x 9,6 mm)

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 9 Trassenabschnitten ist neben den 12 Rohren für die Hochspannungskabel 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. Bild 3 zeigt das für diese HDD-Abschnitte vorgesehene Trassenprofil.

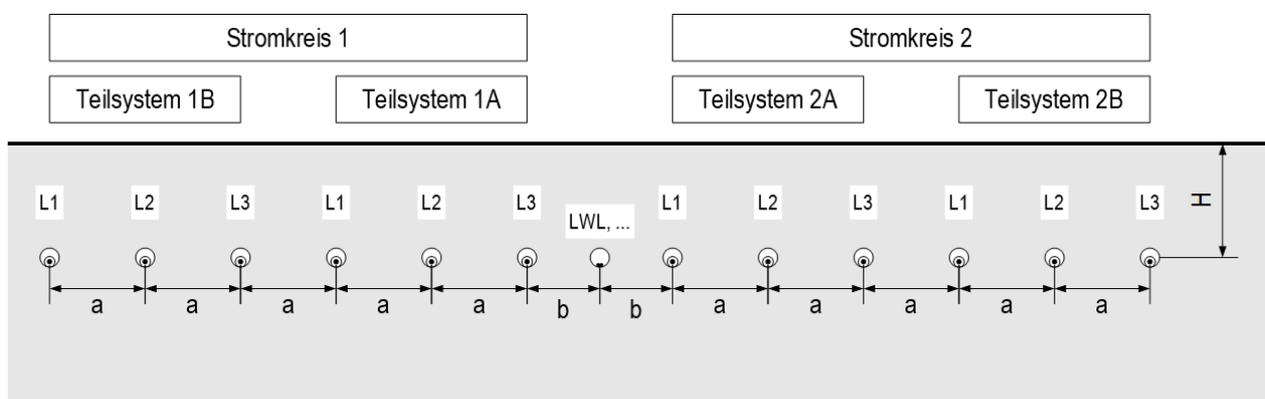


Bild 3: Trassenprofil der 380-kV-Kabelverbindung für Abschnitte in HDD-Bauweise (Kabel einzeln in Schutzrohren 355 x 32,2 mm)

Für das HDD-Profil sind folgende Parameter vorgesehen:

Legetiefe („H“):	≥ 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 einadrige 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 an geeigneten Verbindungsmuffen zyklisch ausgetauscht (sogenanntes „Cross-Bonding“). Damit ergibt sich ein elektrisches Schema der Kabelverbindung gemäß Bild 4.

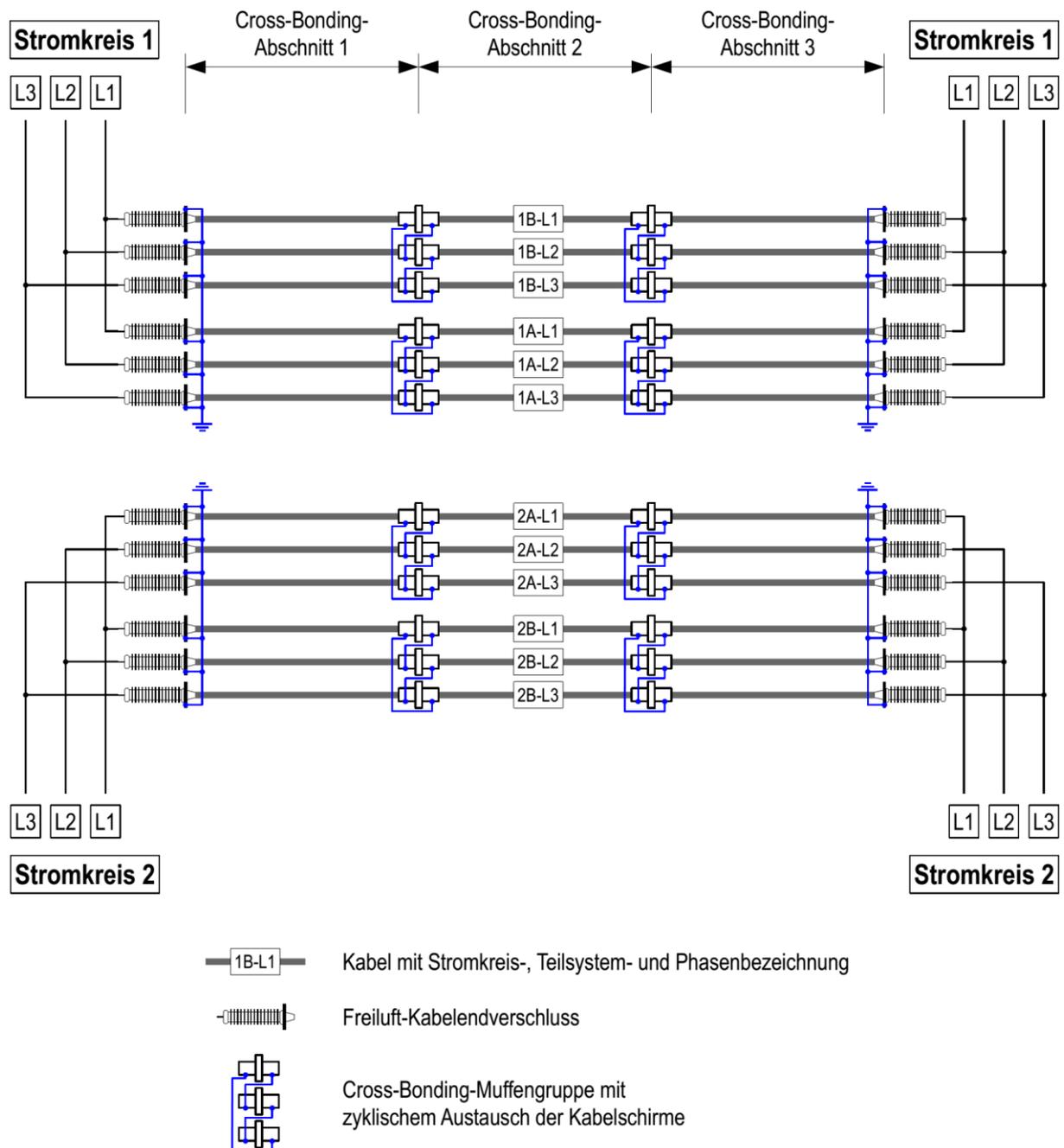


Bild 4: Elektrisches Schema der 380-kV-Kabelverbindung (aufgebaut aus drei Teilabschnitten mit zyklischer Auskreuzung der Kabelschirme nach dem Cross-Bonding-Verfahren)

Die Positionen der Schirmauskreuzungen liegen bei ca. 1/3 bzw. 2/3 der Trassenlänge. Die Auskreuzung erfolgt an konstruktiv speziell dafür ausgelegten Verbindungsmuffen. Die drei sich ergebenden Auskreuzungsabschnitte können wiederum aus mehreren physischen Kabellängen zusammengesetzt sein, die mit Hilfe von Verbindungsmuffen ohne Schirmauskreuzung miteinander verbunden werden (in Bild 4 nicht dargestellt).

Auf Grund der induktiven Kopplung der Schirme untereinander sowie zu den einzelnen Phaseleitern 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 exakt identisch sein. Wie im nachfolgenden Abschnitt dargelegt wird, sind die Unterschiede jedoch vergleichsweise 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 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:

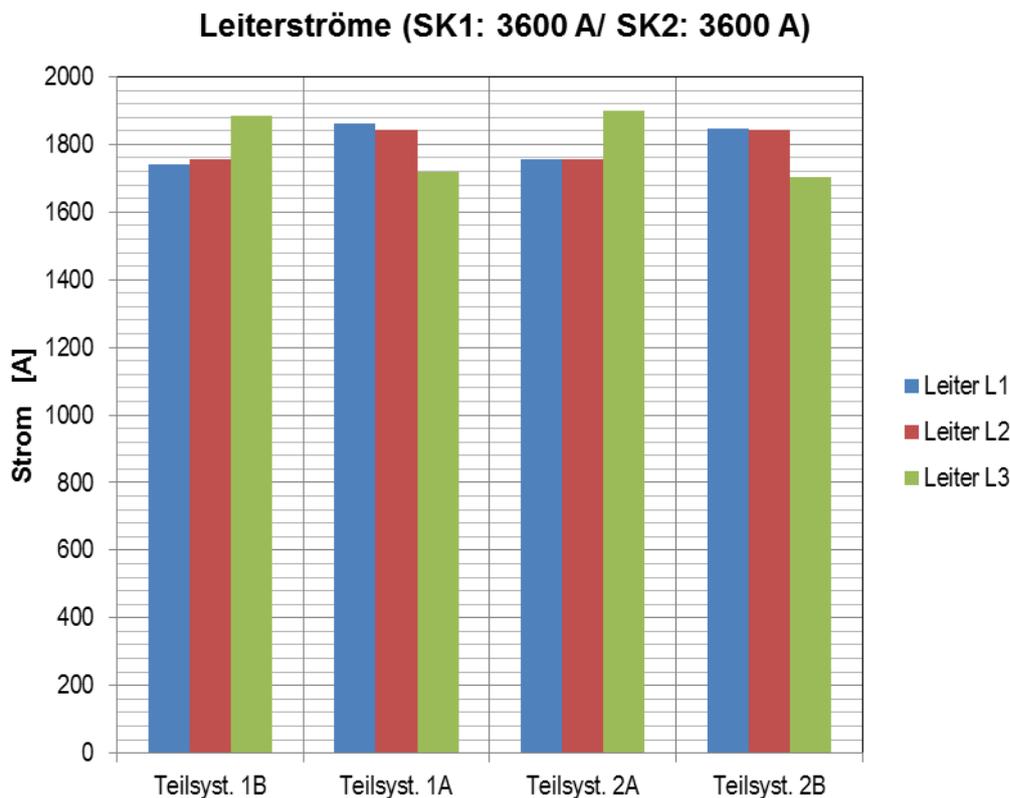


Bild 5: Berechnete Stromaufteilung in den Phasenleitern für eine Strombelastung von 3600 A pro Stromkreis

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-Teilabschnitt 1 (Stromkreis 1: 3600 A/ Stromkreis 2: 3600 A)

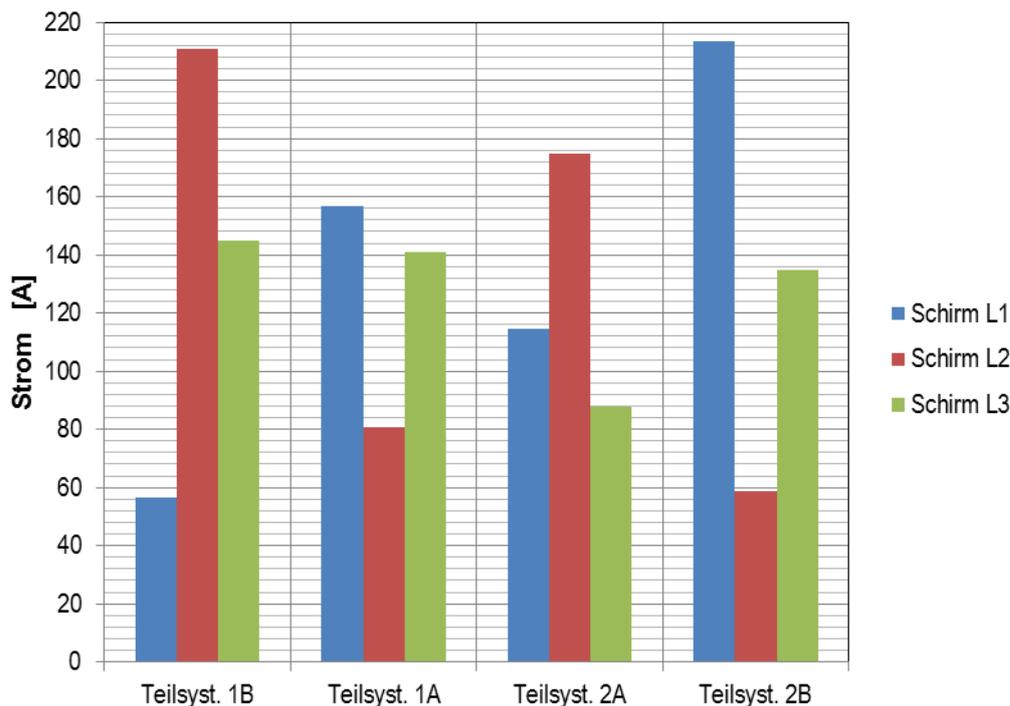


Bild 6: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Abschnitt 1 für eine Strombelastung von 3150 A pro Stromkreis

Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 (Stromkreis 1: 3600 A/ Stromkreis 2: 3600 A)

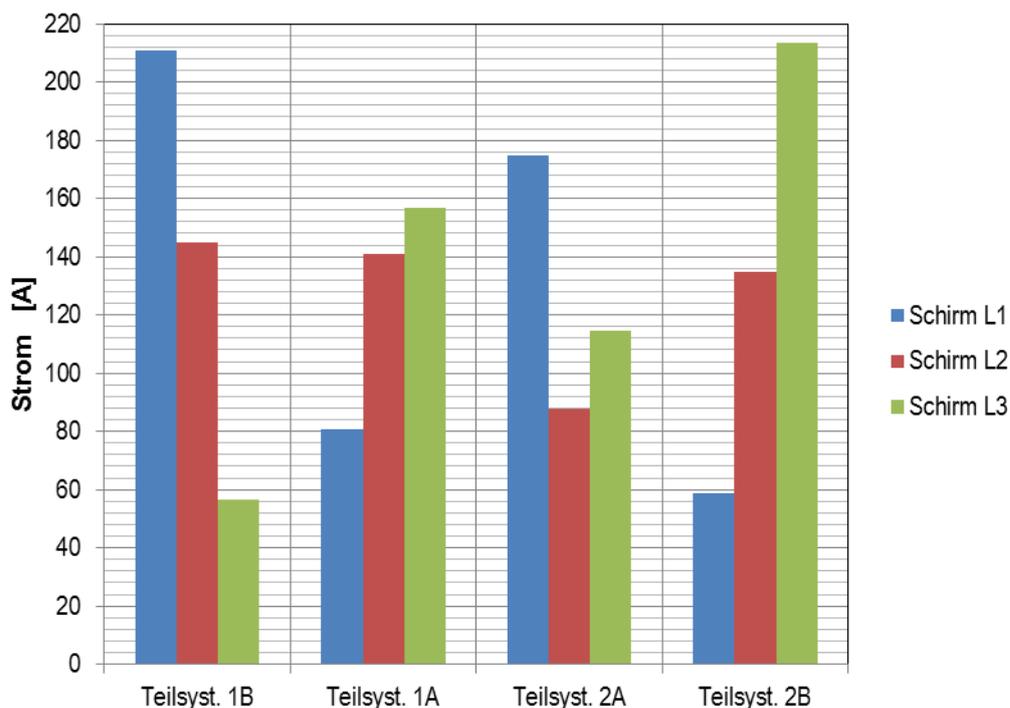


Bild 7: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Abschnitt 2 für eine Strombelastung von 3150 A pro Stromkreis

Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 (Stromkreis 1: 3600 A/ Stromkreis 2: 3600 A)

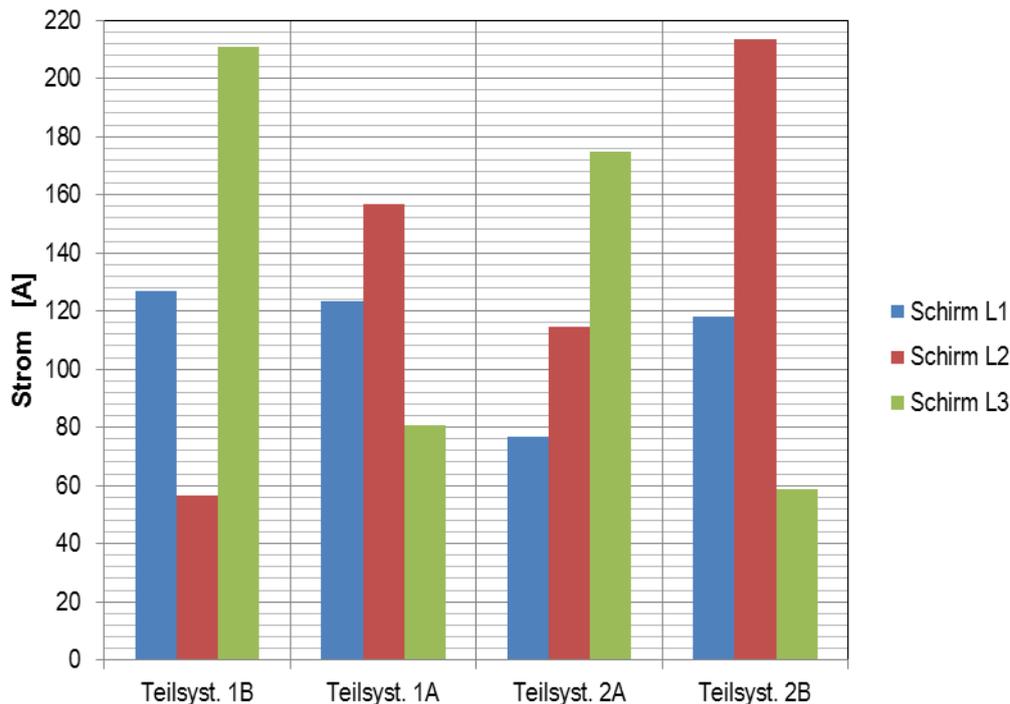


Bild 8: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Abschnitt 3 für eine Strombelastung von 3150 A pro Stromkreis

4. Berechnungsergebnisse der magnetischen Flussdichte

4.1. Magnetische Flussdichten im Bereich der Abschnitte mit Regelprofil

Auf ungefähr 2/3 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 Restströme in den Kabelschirmen ergeben sich für die Teilabschnitte etwas 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 Cross-Bonding-Teilabschnitt 1 zwischen der KÜA Bockhorn und der Verbindungsmuffe CBVM1 wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet:

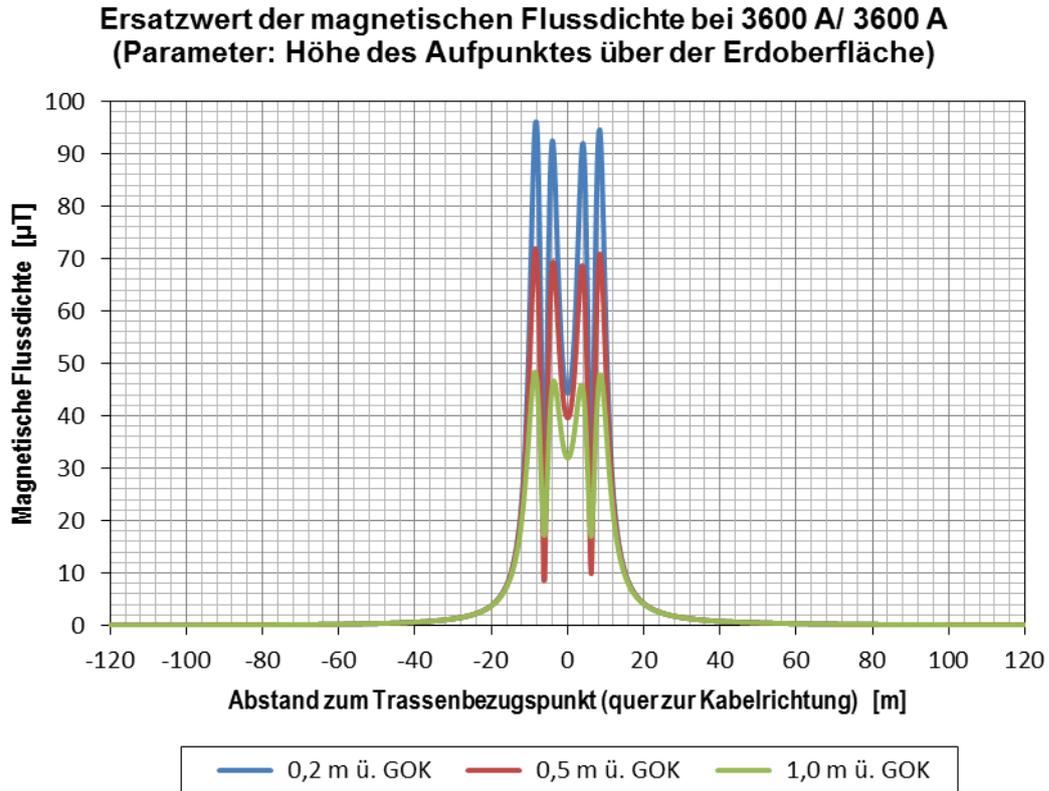


Bild 9: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

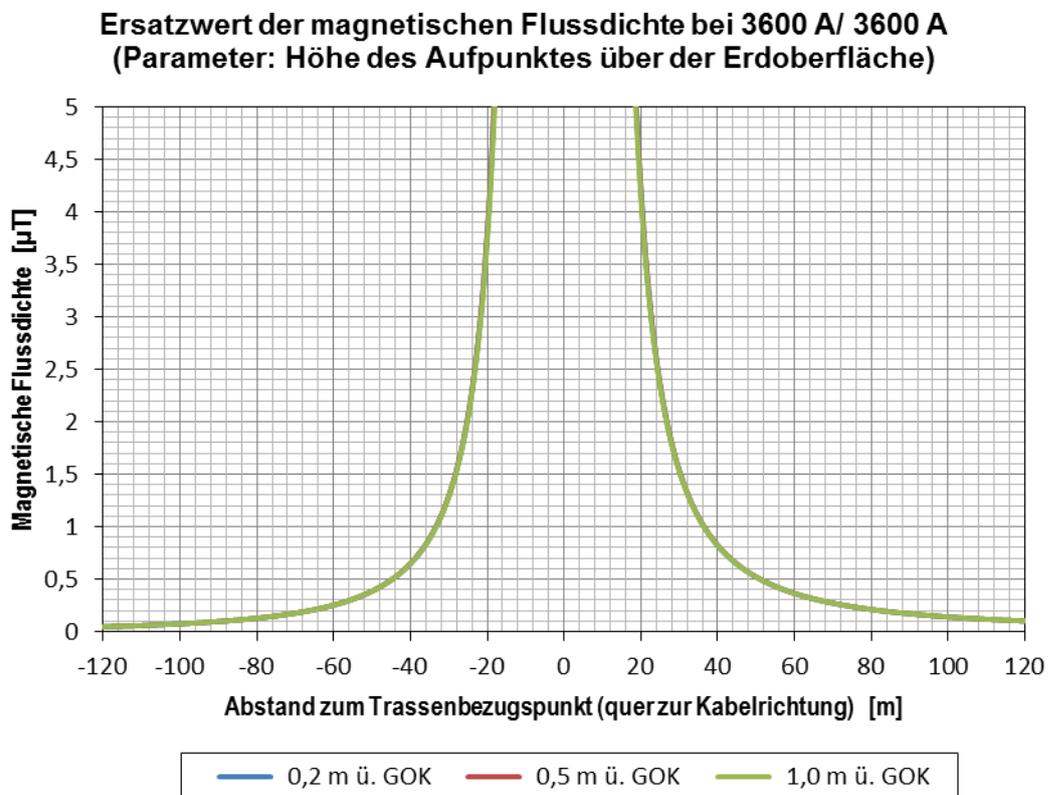


Bild 10: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

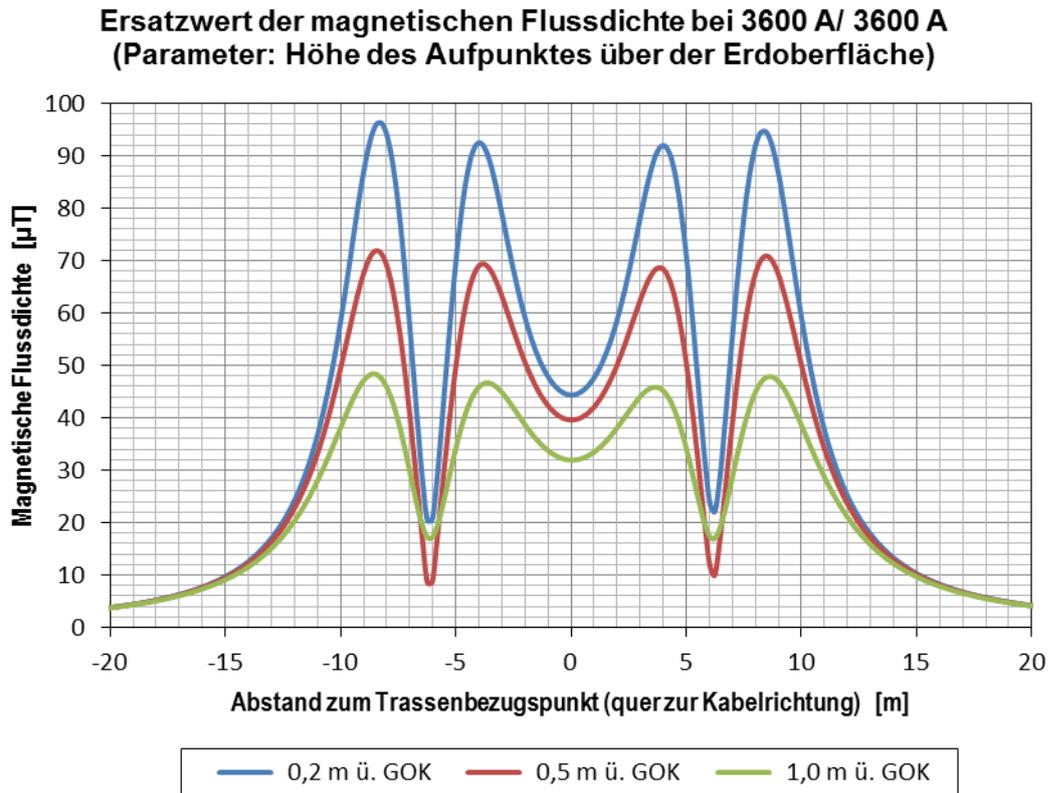


Bild 11: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -20 m ... + 20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Cross-Bonding-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	96,4 µT	2,36 µT	0,52 µT	0,14 µT	0,04 µT
0,5 m	71,9 µT	2,35 µT	0,52 µT	0,14 µT	0,04 µT
1,0 m	48,4 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. 15,2 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 Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 zwischen den Verbindungsmuffen CBVM1 und CBVM3 ergeben sich folgende Werte der magnetischen Flussdichte (Hinweis: an der zwischen CBVM1 und CBVM3 vorgesehenen zusätzlichen Verbindungsmuffe VM2 erfolgt keine elektrische Auskreuzung der Kabelschirme):

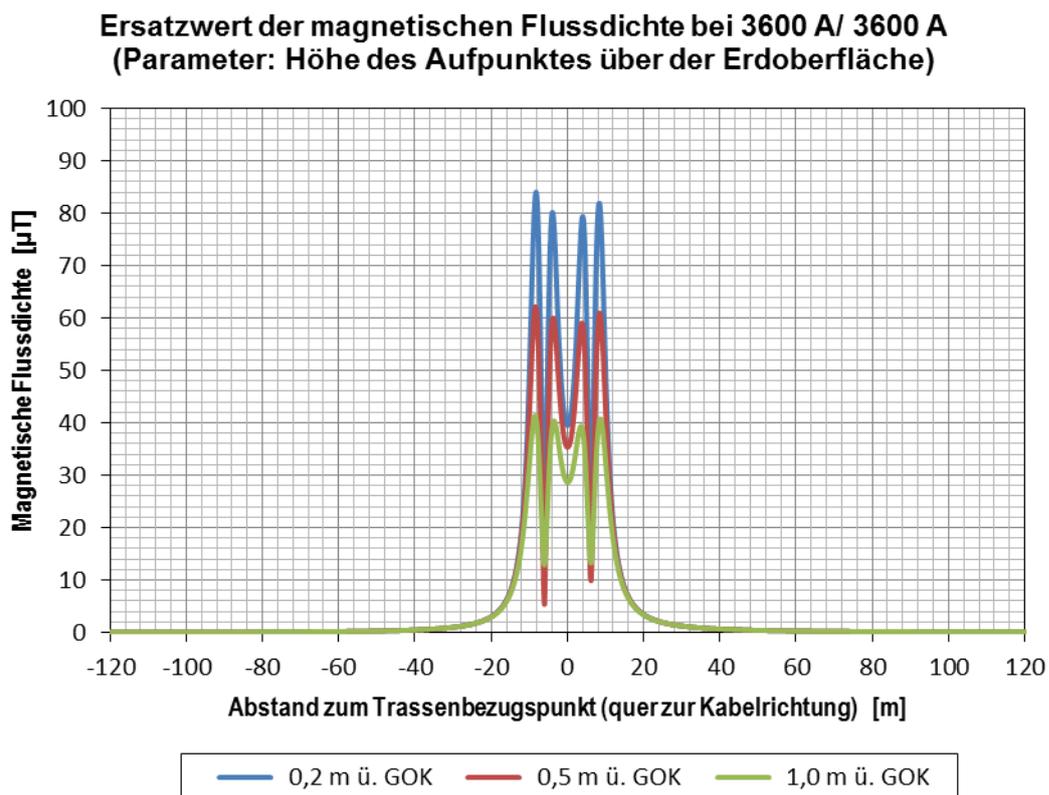


Bild 12: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

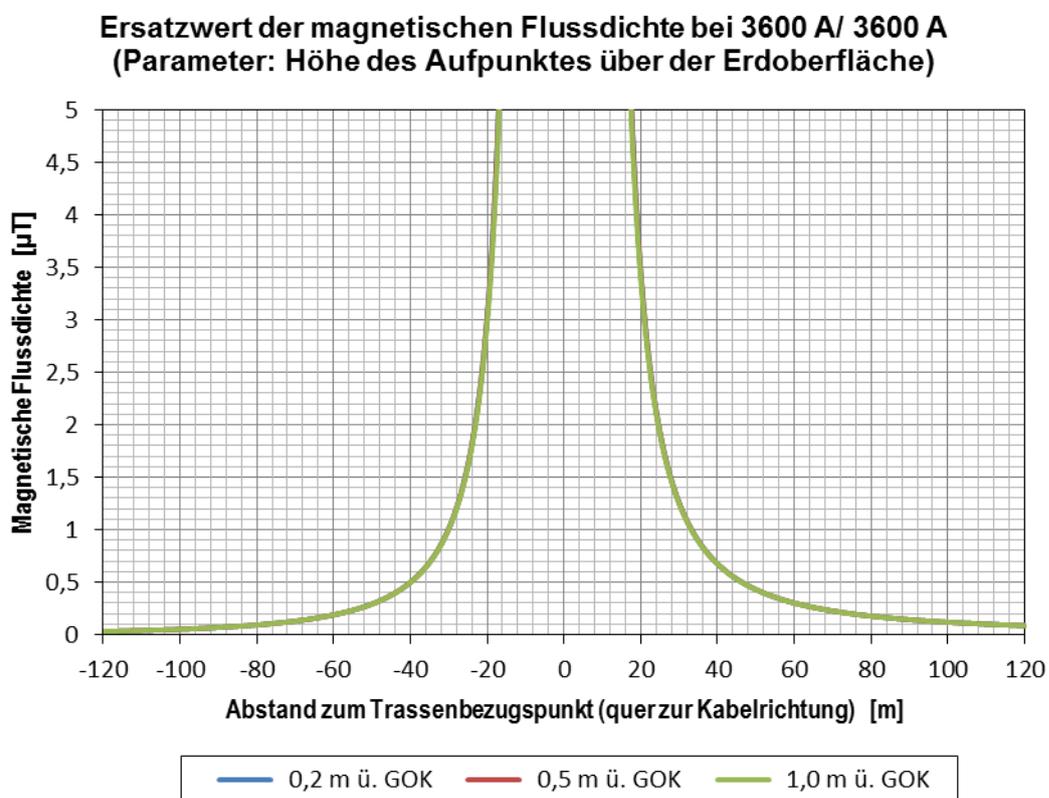


Bild 13: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

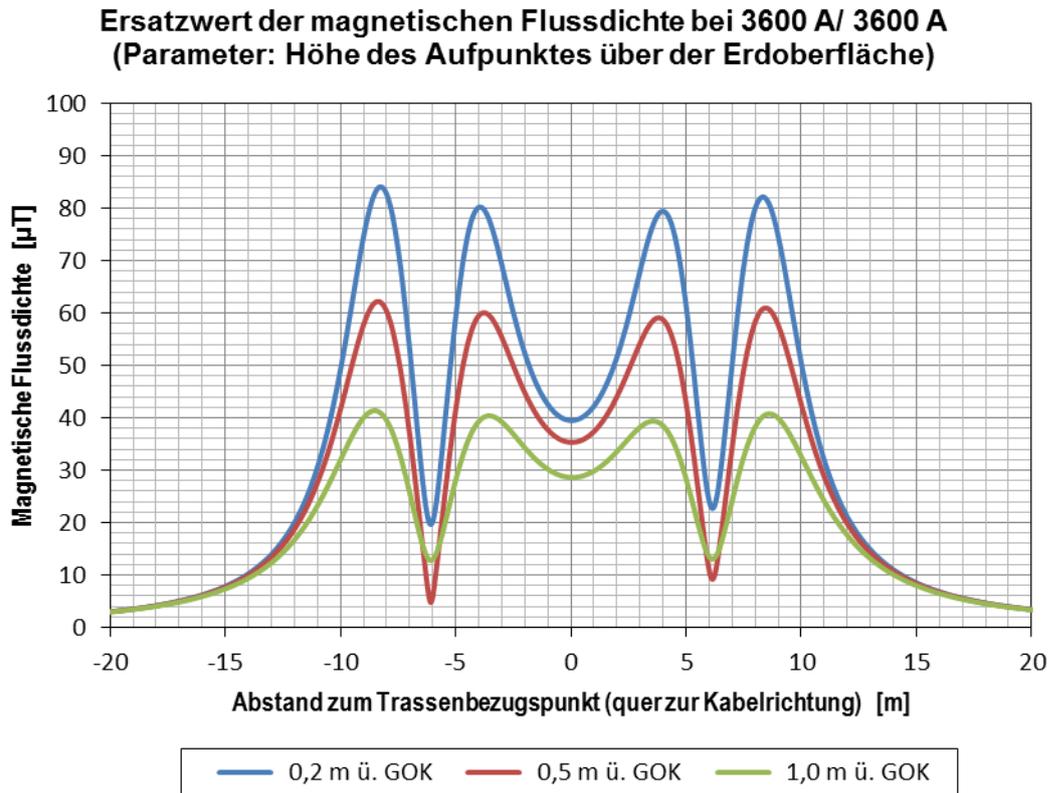


Bild 14: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -20 m ... + 20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Cross-Bonding-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	84,1 µT	1,93 µT	0,43 µT	0,12 µT	0,04 µT
0,5 m	62,2 µT	1,92 µT	0,43 µT	0,12 µT	0,04 µT
1,0 m	41,4 µT	1,91 µT	0,43 µT	0,12 µT	0,04 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) deutlich unterschritten. 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. 14,4 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 Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 zwischen der Verbindungsmuffe CBVM3 und der KÜA Osterforde wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet:

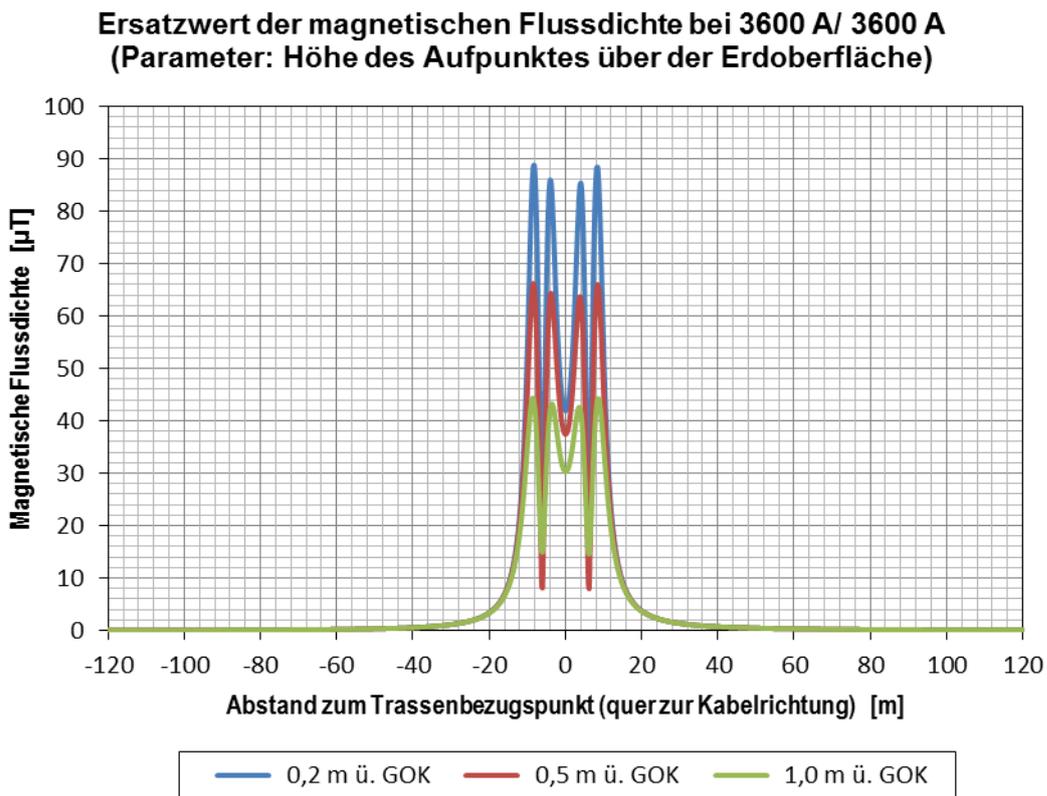


Bild 15: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

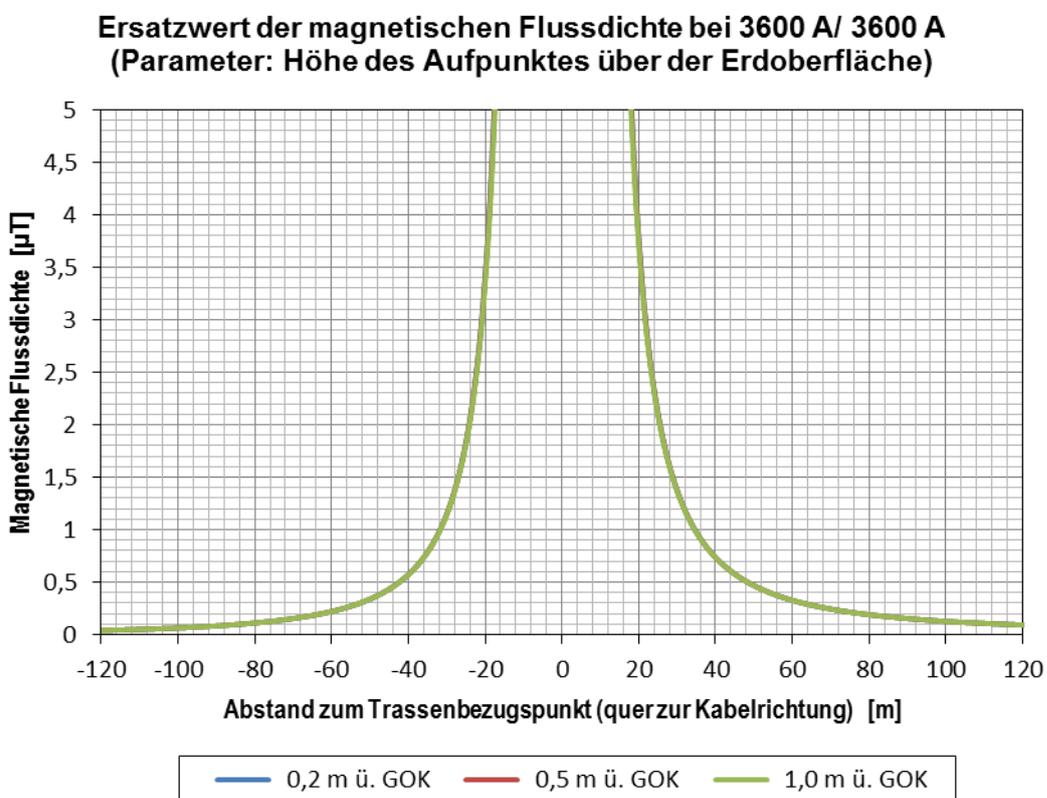


Bild 16: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

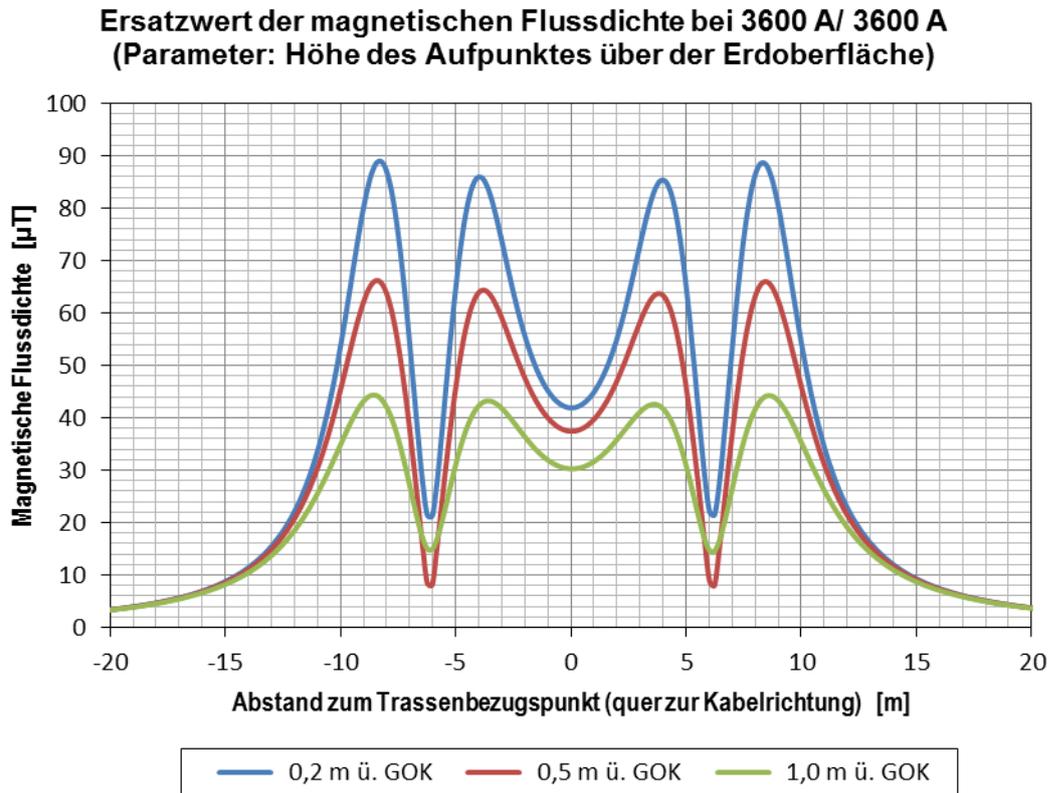


Bild 17: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3, Regelprofil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -20 m ... + 20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 3:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,1 μT	2,11 μT	0,47 μT	0,13 μT	0,04 μT
0,5 m	66,3 μT	2,10 μT	0,47 μT	0,13 μT	0,04 μT
1,0 m	44,4 μT	2,09 μT	0,47 μT	0,13 μT	0,04 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. 14,7 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.

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 Cross-Bonding-Teilabschnitt der jeweilige Trassenbereich liegt. Bereits ab ca. 19 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 9 Trassenbereichen mit einer Länge zwischen ca. 60 m und ca. 310 m, auf denen verschiedene Straßen, Wege, Gräben oder ökologische sensible Bereiche zu queren sind, soll die Trasse grabenlos im HDD-Verfahren errichtet werden. Diese Bereiche stellen insgesamt ca. 1/3 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.

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 Trassenmittellachse 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 Trassenmittellachse entfernte Punkte berechnet und in tabellarischer Form zusammengestellt.

Für den HDD-Abschnitt im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1 zwischen der KÜA Bockhorn und der Verbindungsmuffe CBVM1 (Legetiefe 3,5 m) wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet:

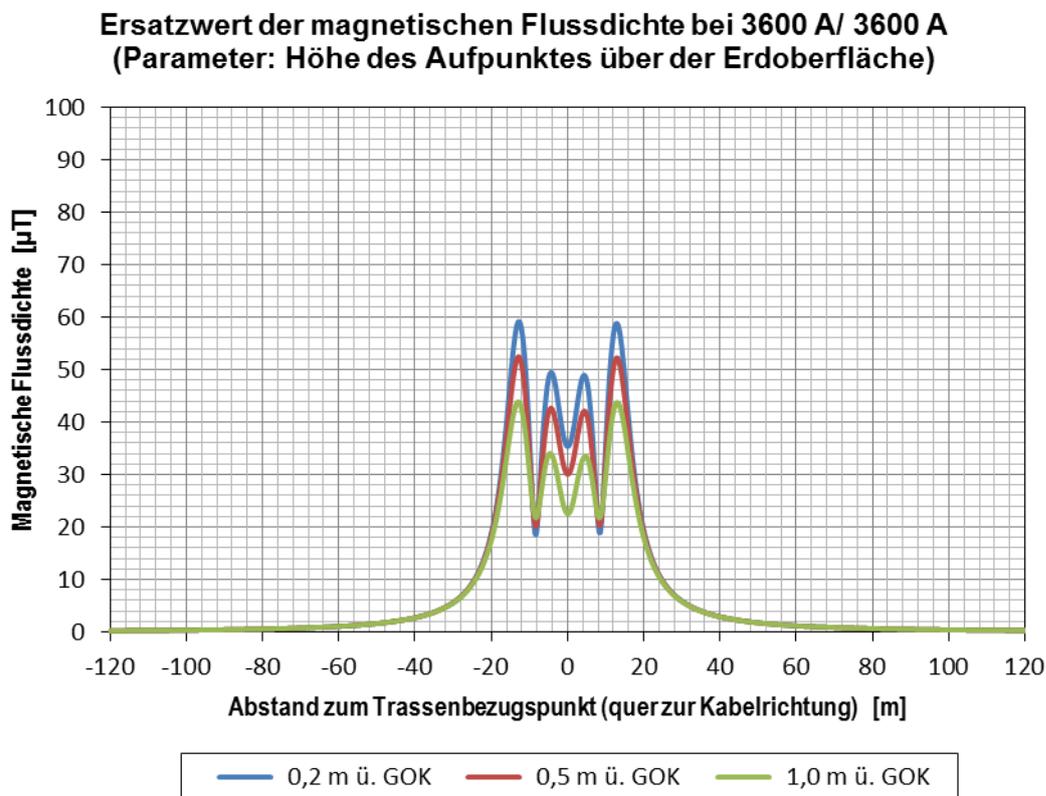


Bild 18: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μ T)

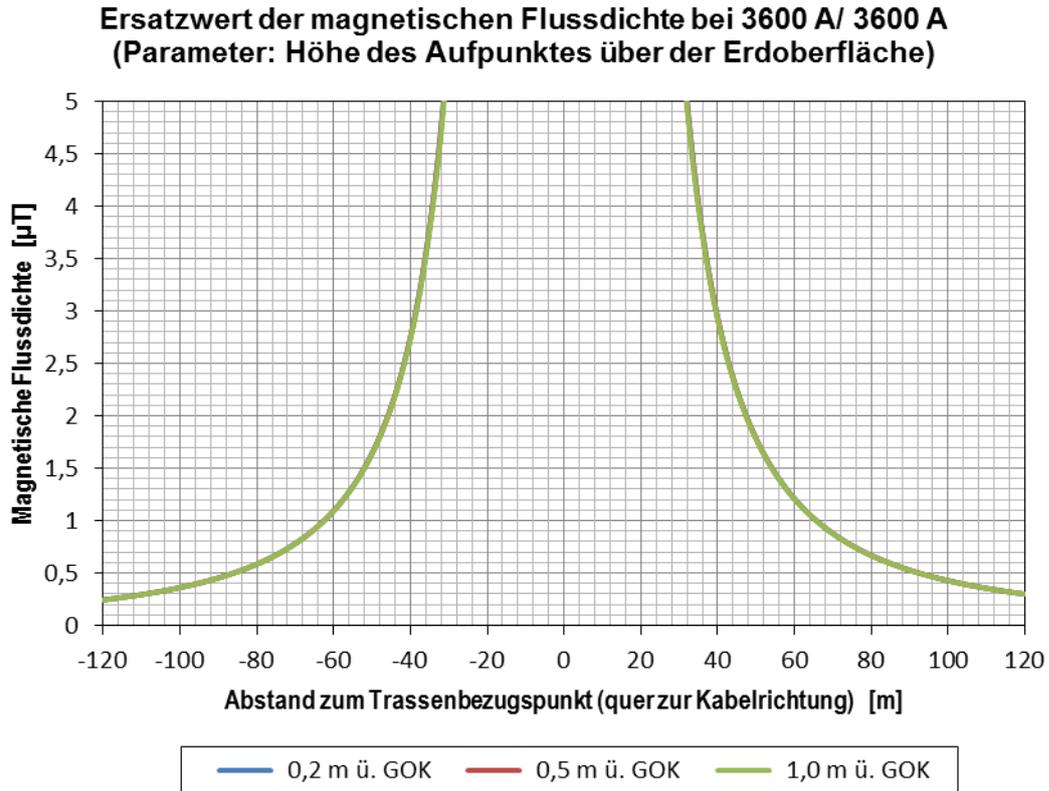


Bild 19: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

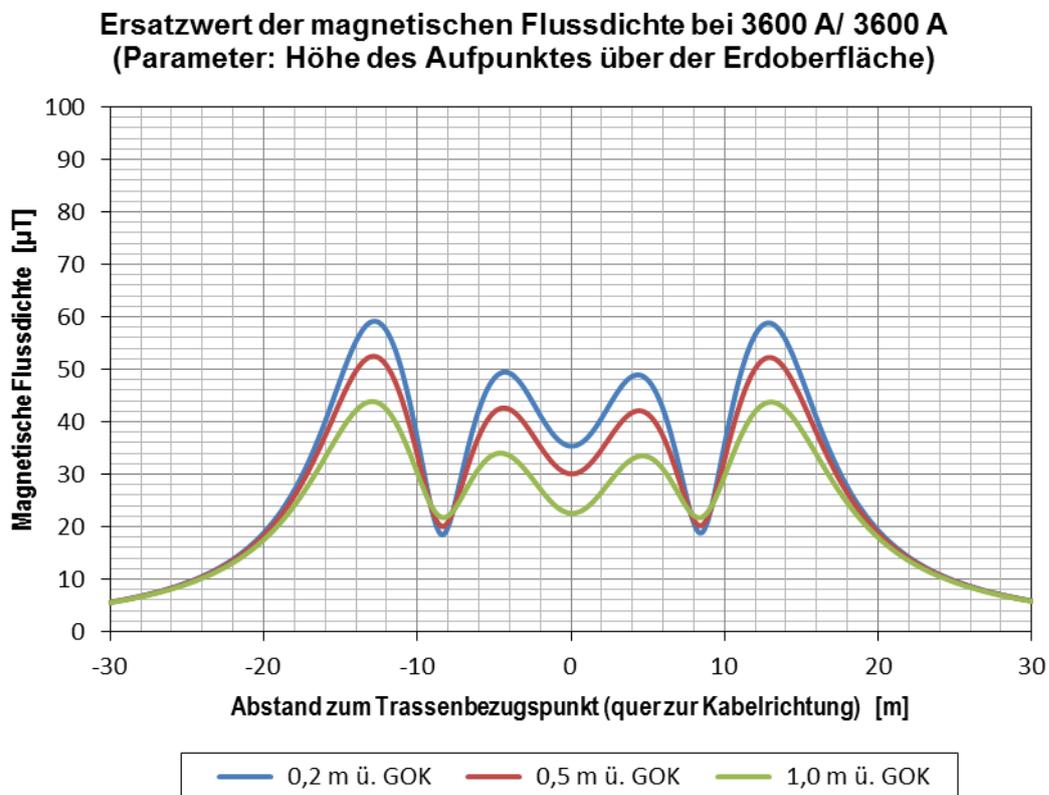


Bild 20: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -30 m ... + 30 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 1 (Legetiefe 3,5 m):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	59,2 μT	9,69 μT	1,78 μT	0,43 μT	0,11 μT
0,5 m	52,5 μT	9,58 μT	1,78 μT	0,43 μT	0,11 μT
1,0 m	43,9 μT	9,40 μT	1,78 μT	0,43 μT	0,11 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) deutlich unterschritten. In 1 m Höhe wird dort bereits weniger als die Hälfte des Grenzwertes erreicht. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 24,7 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 Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 zwischen den Verbindungsmuffen CBVM1 und CBVM3 (Legetiefe mindestens 3,0 m) wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet (Hinweis: an der zwischen CBVM1 und CBVM3 vorgesehenen zusätzlichen Verbindungsmuffe VM2 erfolgt keine elektrische Auskreuzung der Kabelschirme):

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

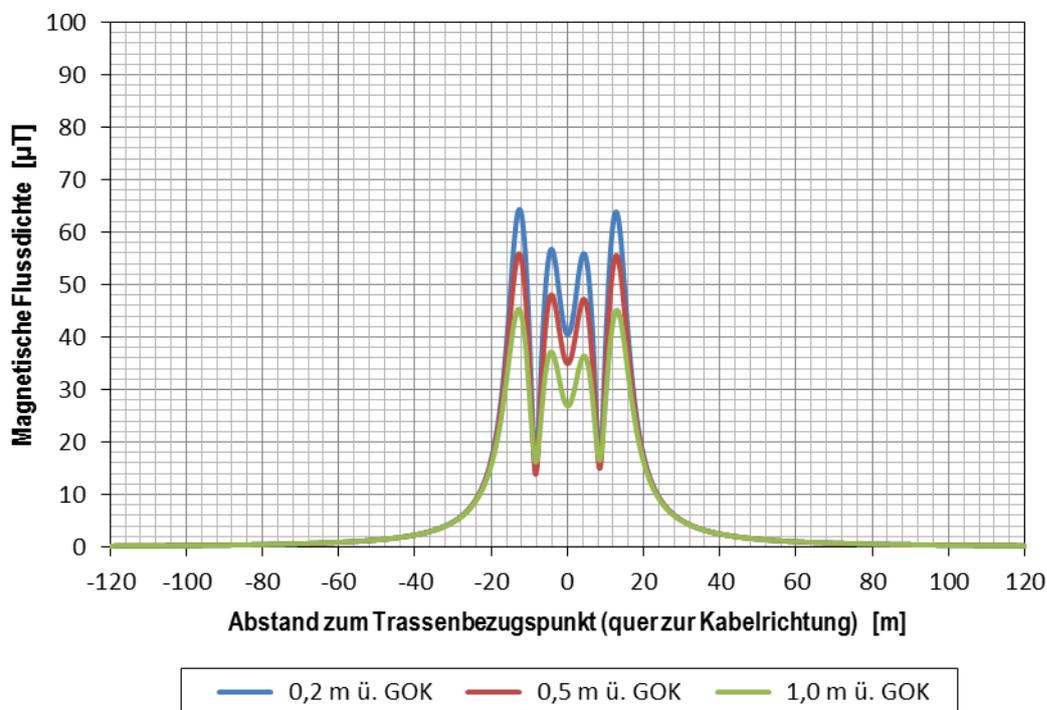


Bild 21: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

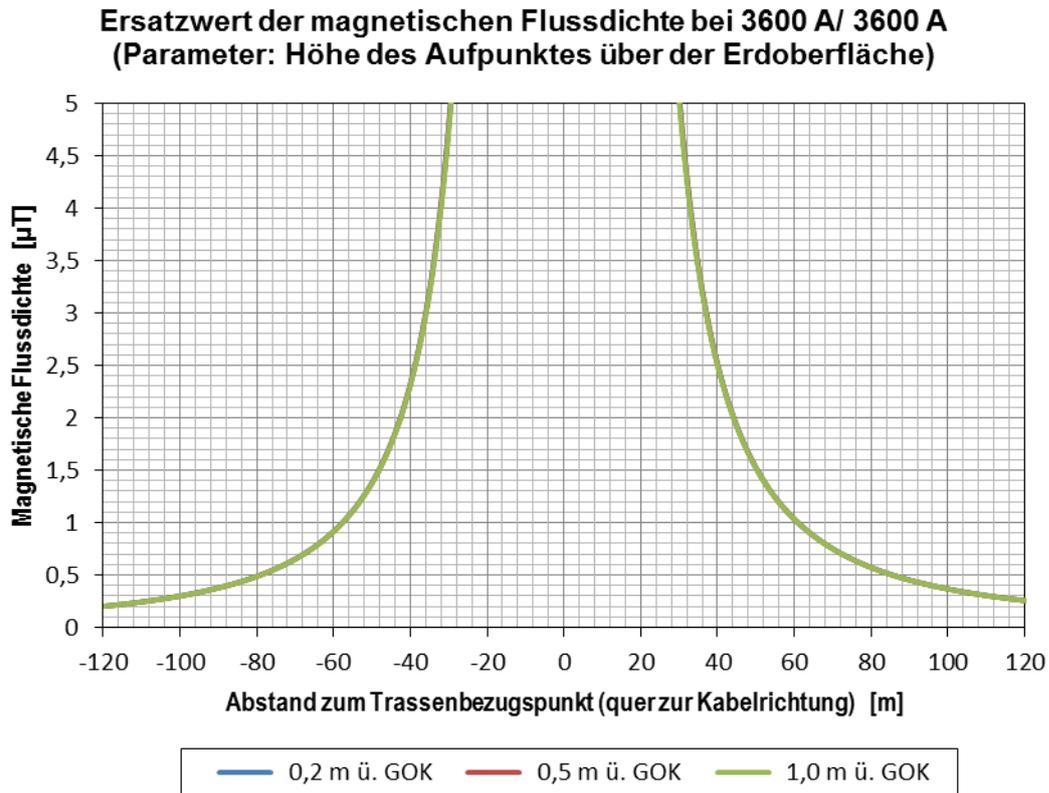


Bild 22: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

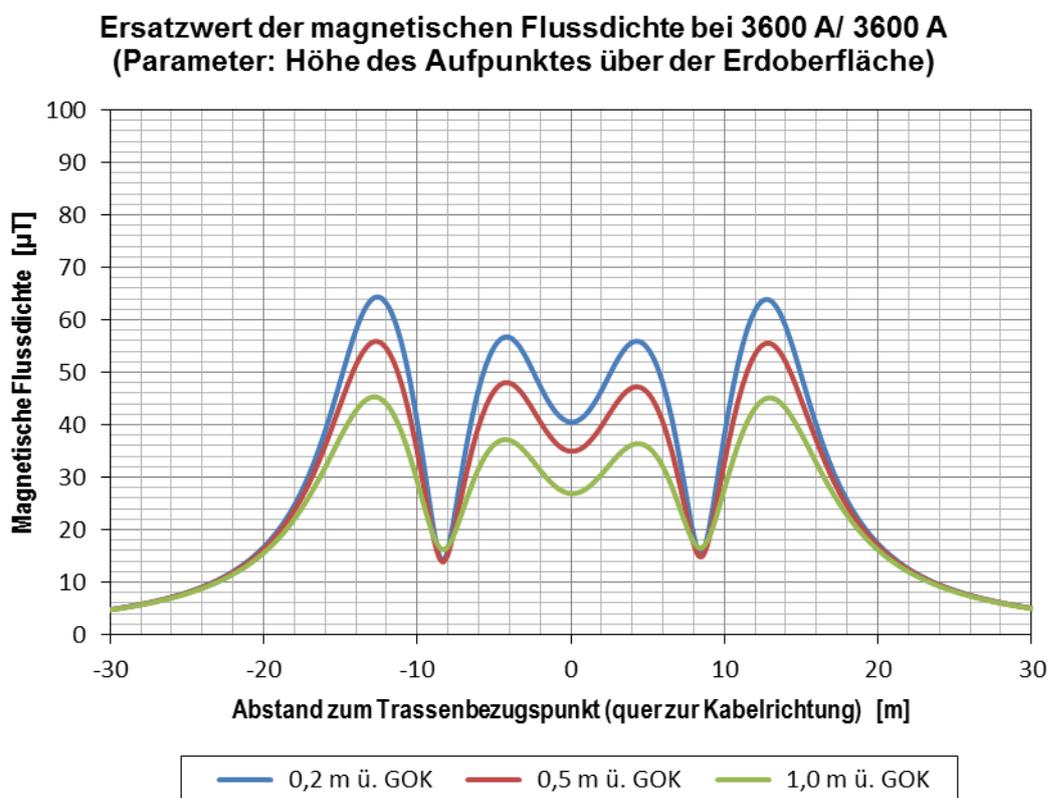


Bild 23: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -30 m ... + 30 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 (Legetiefe mindestens 3,0 m):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	64,4 μT	8,44 μT	1,53 μT	0,37 μT	0,10 μT
0,5 m	55,9 μT	8,36 μT	1,52 μT	0,37 μT	0,10 μT
1,0 m	45,4 μT	8,21 μT	1,52 μT	0,37 μT	0,10 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) deutlich unterschritten. In 1 m Höhe wird dort bereits weniger als die Hälfte des Grenzwertes erreicht. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 23,4 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 Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 zwischen der Verbindungsmuffe CBVM3 und der KÜA Osterforde (Legetiefe mindestens 3,0 m) wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet:

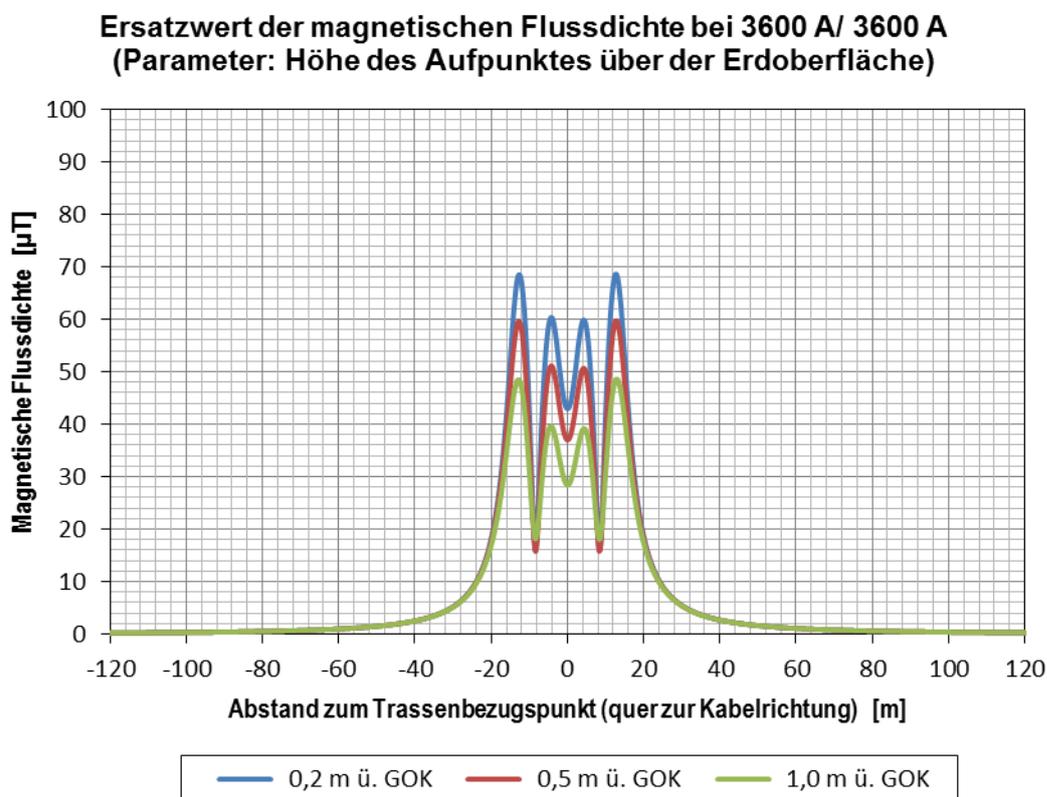


Bild 24: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

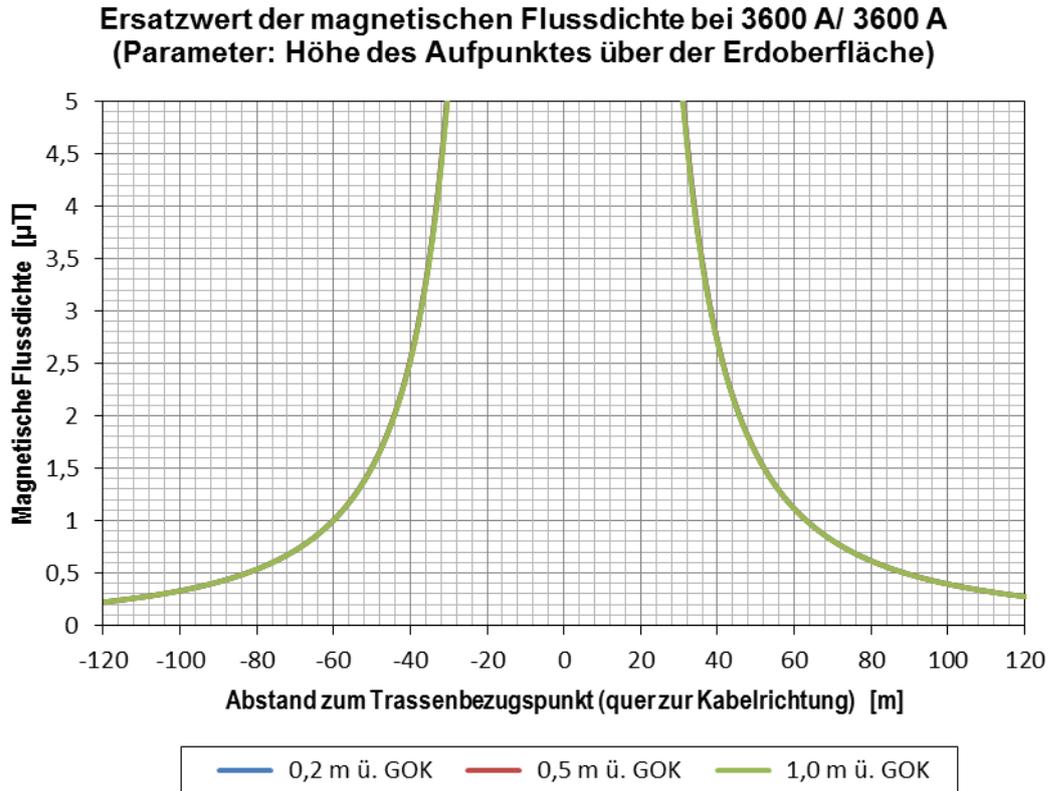


Bild 25: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

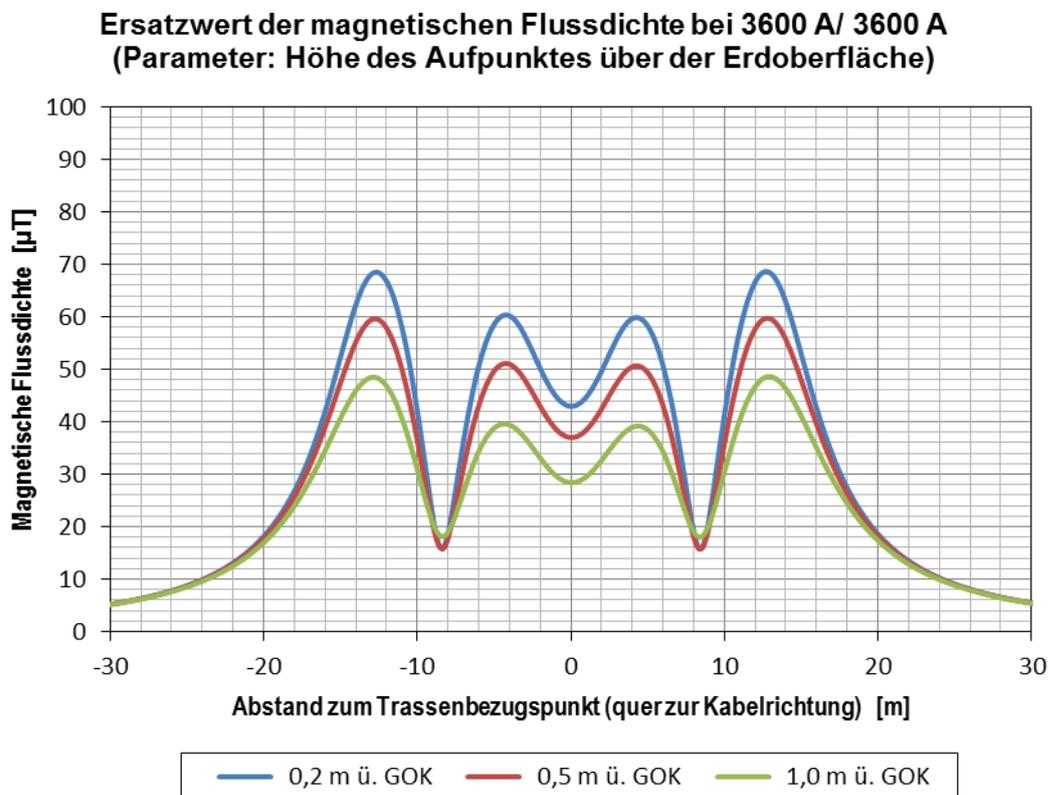


Bild 26: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3, HDD-Profil, 3600 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -30 m ... + 30 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 (Legetiefe mindestens 3,0 m):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	68,7 μ T	9,08 μ T	1,65 μ T	0,40 μ T	0,11 μ T
0,5 m	59,8 μ T	9,00 μ T	1,64 μ T	0,40 μ T	0,11 μ T
1,0 m	48,6 μ T	8,84 μ T	1,64 μ T	0,40 μ T	0,11 μ T

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μ T wird selbst unmittelbar über der Kabeltrasse und unter ungünstigsten Bedingungen (geringste Legetiefe, höchste Anlagenbelastung) deutlich unterschritten. In 1 m Höhe wird dort bereits weniger als die Hälfte des Grenzwertes erreicht. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 24,1 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.

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 μ T. Ab ca. 32 m seitlichem Abstand zur Trassenachse liegt die magnetische Flussdichte auch im Bereich der HDD-Profile bei weniger als 5 μ T.

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 8 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 Urwaldstraße 35, Grabstedter Straße 47, Grabstedter Straße 45, Grabstedter Straße 43a, Grabstedter Straße 54, Hauptstraße 1, Hauptstraße 2 und Grafenweg 2a der Gemeinde Bockhorn.

4.3.1. Gebäude auf dem Grundstück Urwaldstraße 35

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 345 m ab der KÜA Bockhorn nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 56 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Urwaldstraße 35 befindet (Bild 27). Dieser Bereich befindet sich am Anfang eines Trassenabschnitts in HDD-Bauweise. In größeren Abständen von der Trasse sind die magnetischen Flussdichten für das HDD-Profil höher als für das Regelprofil (siehe Kapitel 4.1 und 4.2). Das magnetische Feld am interessierenden Ort in 56 m Entfernung von der Trassenmitte wird deshalb vorwiegend von diesem HDD-Abschnitt bestimmt. Für die Berechnung wurde deshalb auch das HDD-Profil nach Bild 3 angesetzt. Der betreffende Bereich befindet sich im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1 (siehe Bild 4).

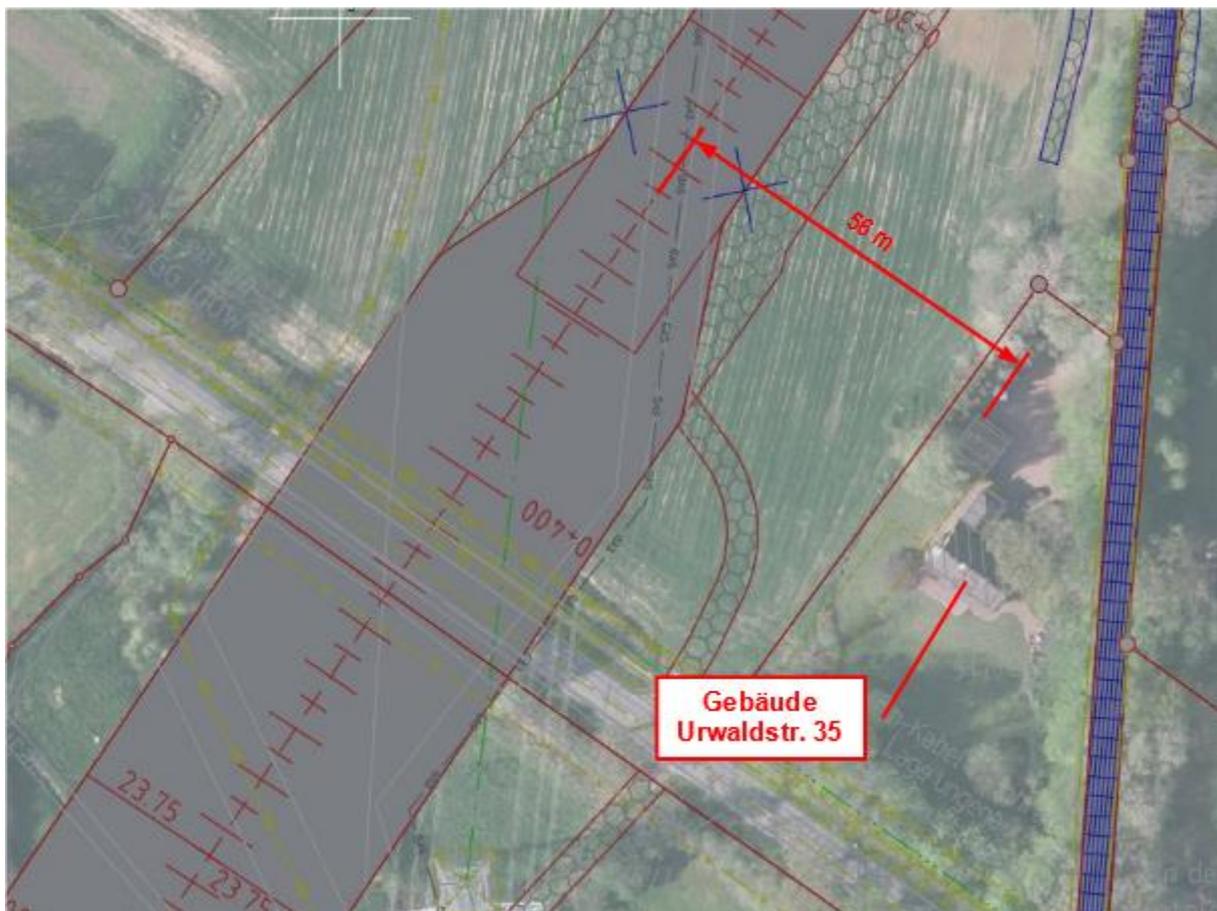


Bild 27: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Urwaldstraße 35 nahe Trassen-km 0+345

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 28 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.

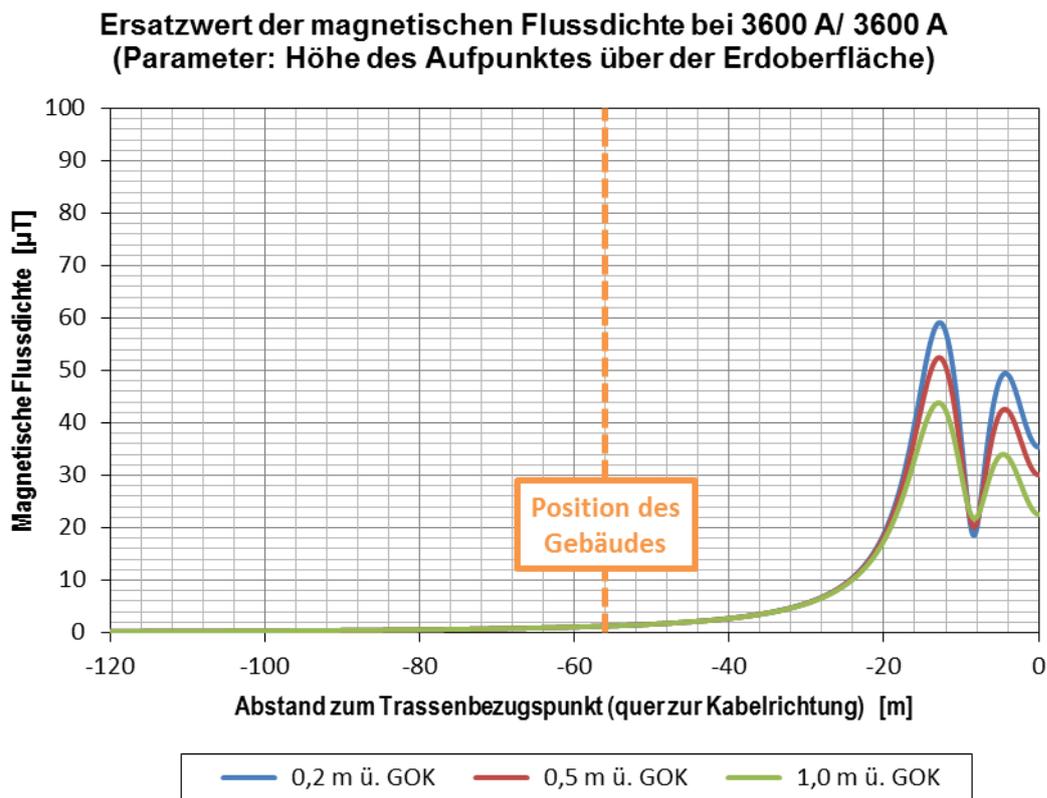


Bild 28: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Urwaldstraße 35 für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes)
	56 m
0,2 m	1,28 μT
0,5 m	1,28 μT
1,0 m	1,27 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als eine Größenordnung (Faktor ca. 78) unterschritten.

4.3.2. Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 47

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 2680 m ab der KÜA Bockhorn nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 36 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Grabstedter Straße 47 befindet (Bild 29). In diesem Abschnitt befindet sich ein Übergangsbereich zwischen Regelprofil und HDD-Profil der Kabeltrasse. Im Sinne einer „Worst-Case“-Betrachtung wurde für die Berechnungen das HDD-Profil (Bild 3) angesetzt, da sich bei diesem Profil für Orte neben der Kabeltrasse tendenziell etwas höhere magnetische Flussdichten ergeben als beim Regelprofil (Bild 2). Der betreffende Abschnitt der Kabeltrasse gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 3 (siehe Bild 4).

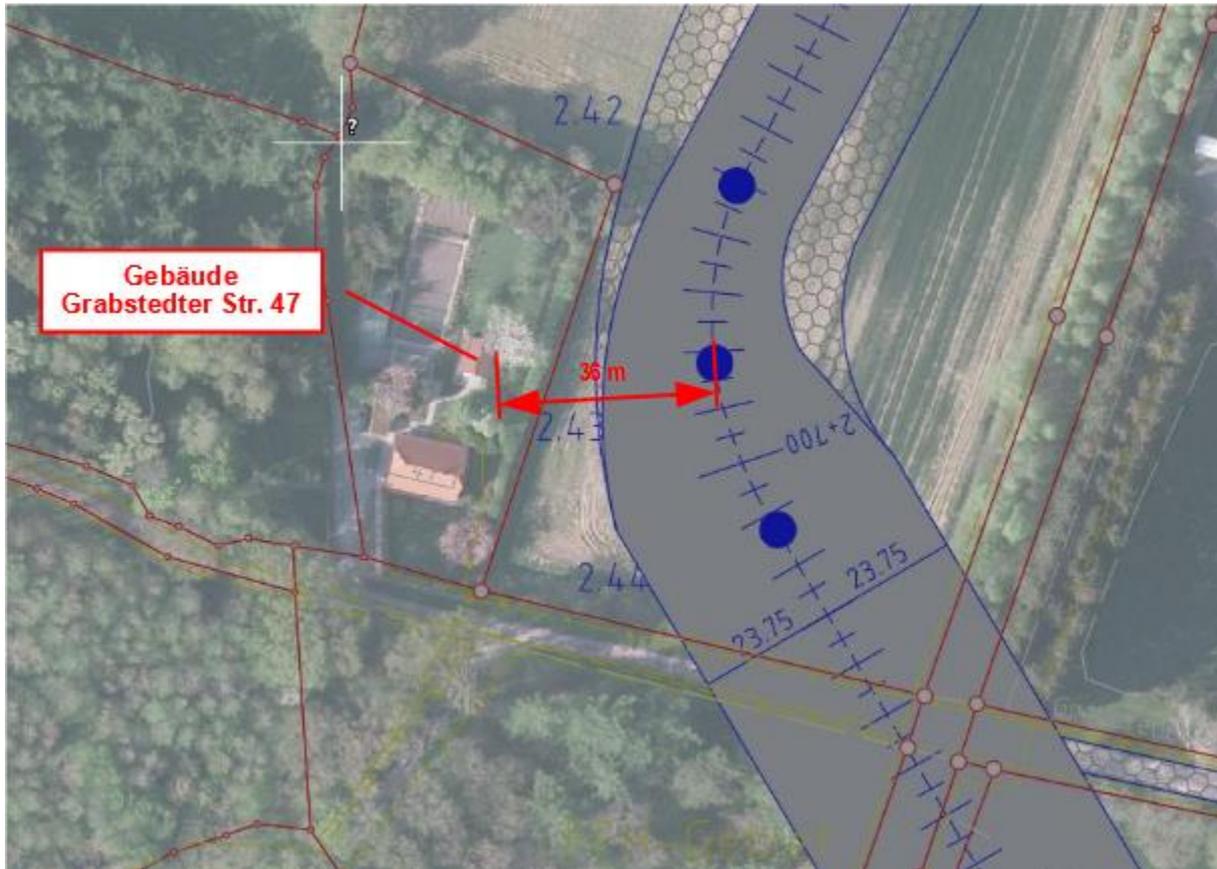


Bild 29: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 47 nahe Trassen-km 2+680

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 30 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.

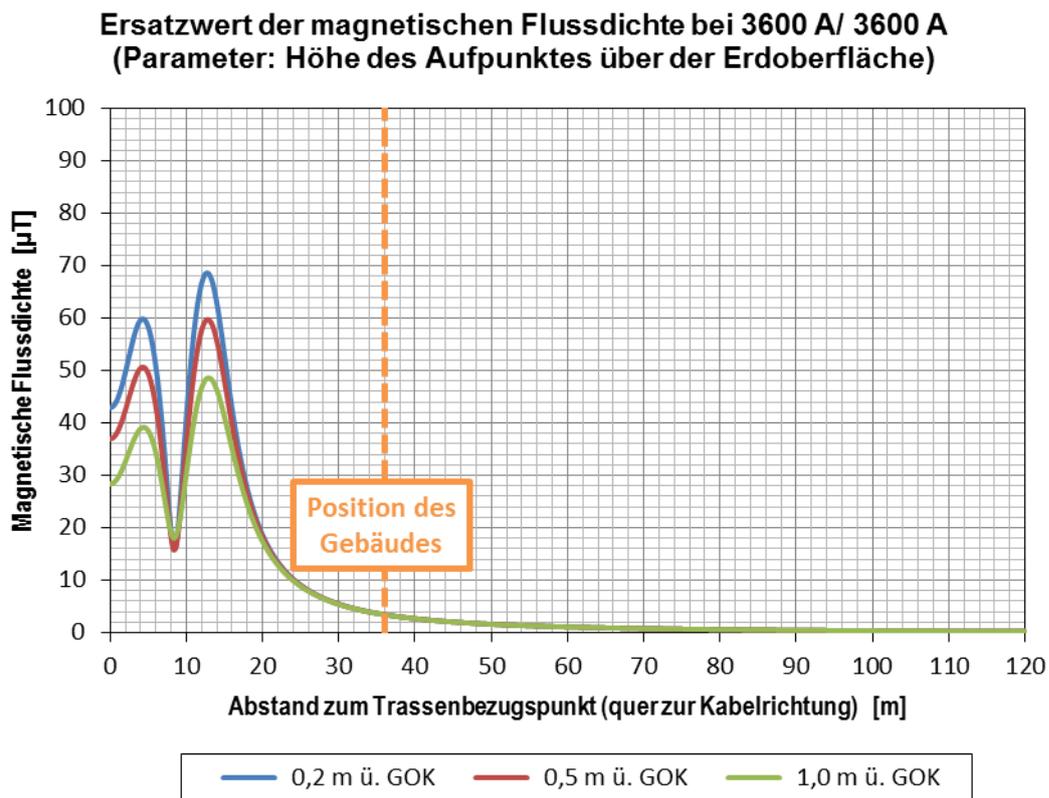


Bild 30: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Grabstedter Straße 47 für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes)
	36 m
0,2 m	3,47 μT
0,5 m	3,46 μT
1,0 m	3,45 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als eine Größenordnung (Faktor ca. 29) unterschritten.

4.3.3. Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 45

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 2720 m ab der KÜA Bockhorn nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 84 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Grabstedter Straße 45 befindet (Bild 31). In diesem Bereich unterquert die Trasse die Grabstedter Straße und das FFH-Gebiet „Neuenburger Holz“, deshalb gilt in diesem Bereich das HDD-Profil gemäß Bild 3. Unmittelbar vor diesem Abschnitt befindet sich ein Richtungswechsel im Trassenverlauf, dort verläuft die Trasse zwar nur in ca. 72 m Entfernung vom Gebäude, jedoch gilt dort das Regelprofil nach Bild 2. Das von diesem Abschnitt erzeugte magnetische Feld am Ort des Gebäudes ist deshalb trotz des etwas geringeren Abstandes deutlich kleiner als das vom nachfolgenden HDD-Abschnitt erzeugte Feld (siehe Kapitel 4.1 und 4.2). Der HDD-Abschnitt wird also maßgeblich das magnetische Feld am Ort des Gebäudes bestimmen, deshalb wurde für die Berechnung das HDD-Profil nach Bild 3 angesetzt. Der betreffende Bereich befindet sich im Cross-Bonding-Abschnitt 3 der Trasse (siehe Bild 4).

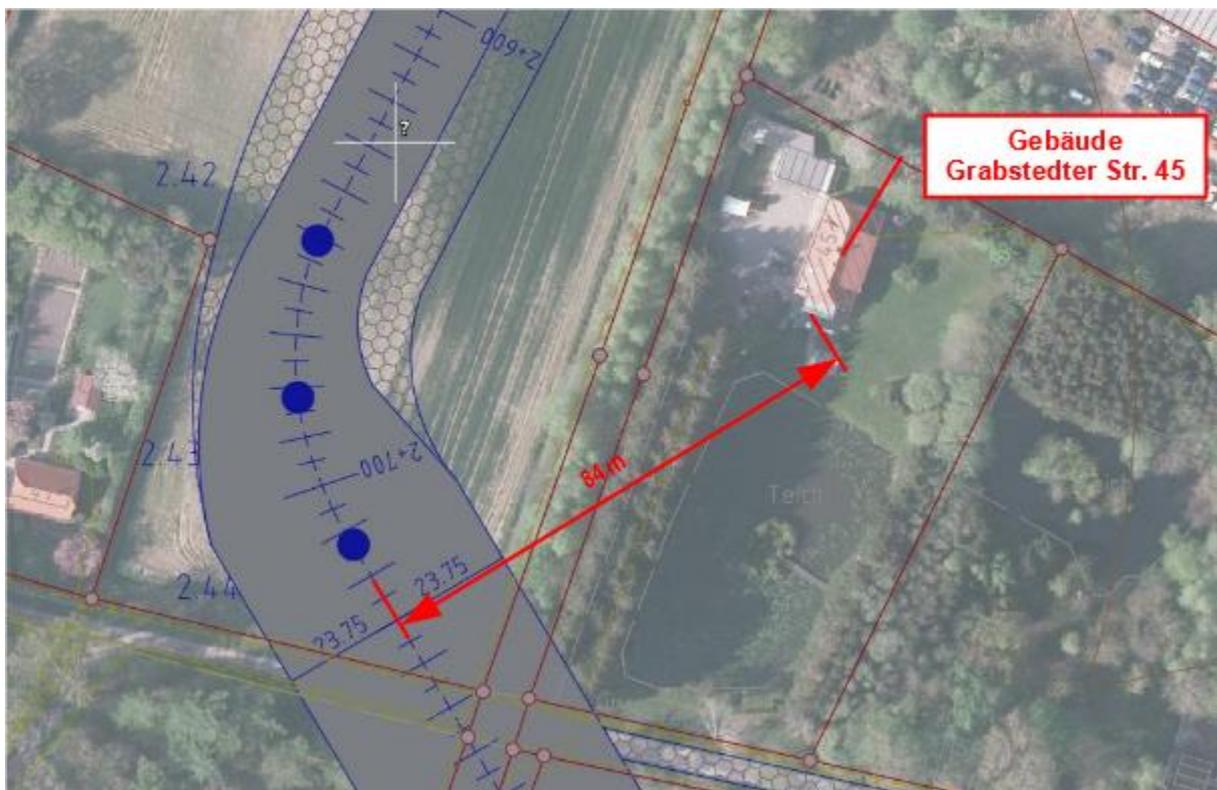


Bild 31: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 45 nahe Trassen-km 2+720

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 32 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.

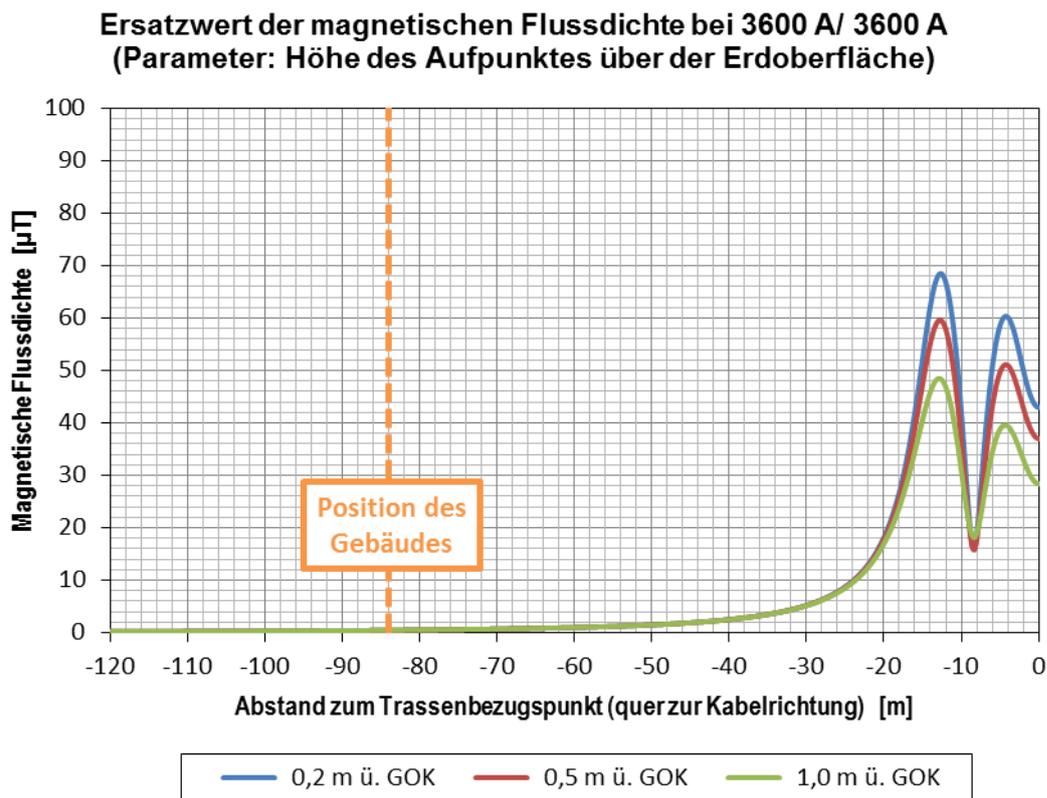


Bild 32: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Grabstedter Straße 45 für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes)
	84 m
0,2 m	0,48 μT
0,5 m	0,48 μT
1,0 m	0,48 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 200) unterschritten.

4.3.4. Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 43a

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 2975 m ab der KÜA Bockhorn nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 65 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Grabstedter Straße 43a befindet (Bild 33). In diesem Abschnitt befindet sich ein Übergangsbereich zwischen Regelprofil und HDD-Profil der Kabeltrasse. Im Sinne einer „Worst-Case“-Betrachtung wurde für die Berechnungen das HDD-Profil (Bild 3) angesetzt, da sich bei diesem Profil für Orte neben der Kabeltrasse tendenziell etwas höhere magnetische Flussdichten ergeben als beim Regelprofil (Bild 2). Der betreffende Abschnitt der Kabeltrasse gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 3 (siehe Bild 4).

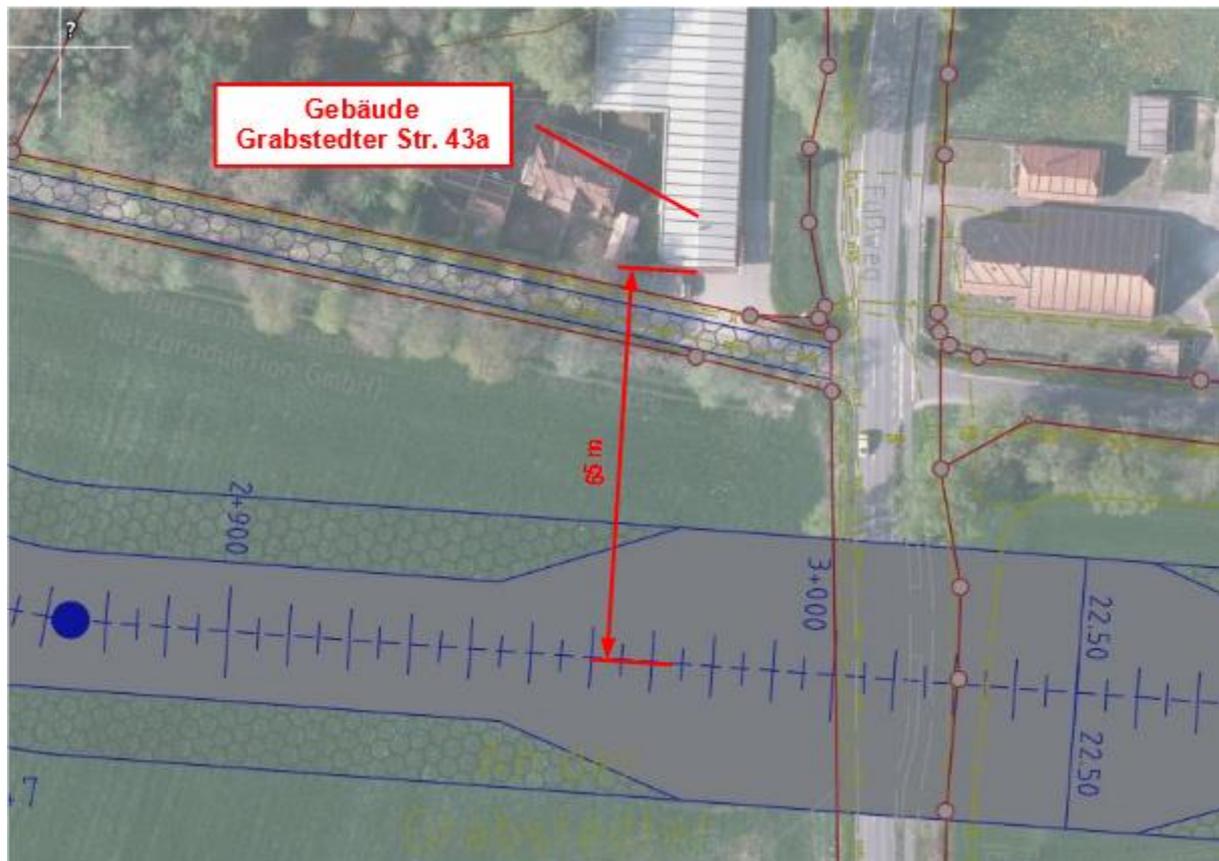


Bild 33: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 43a nahe Trassen-km 2+975

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 34 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.

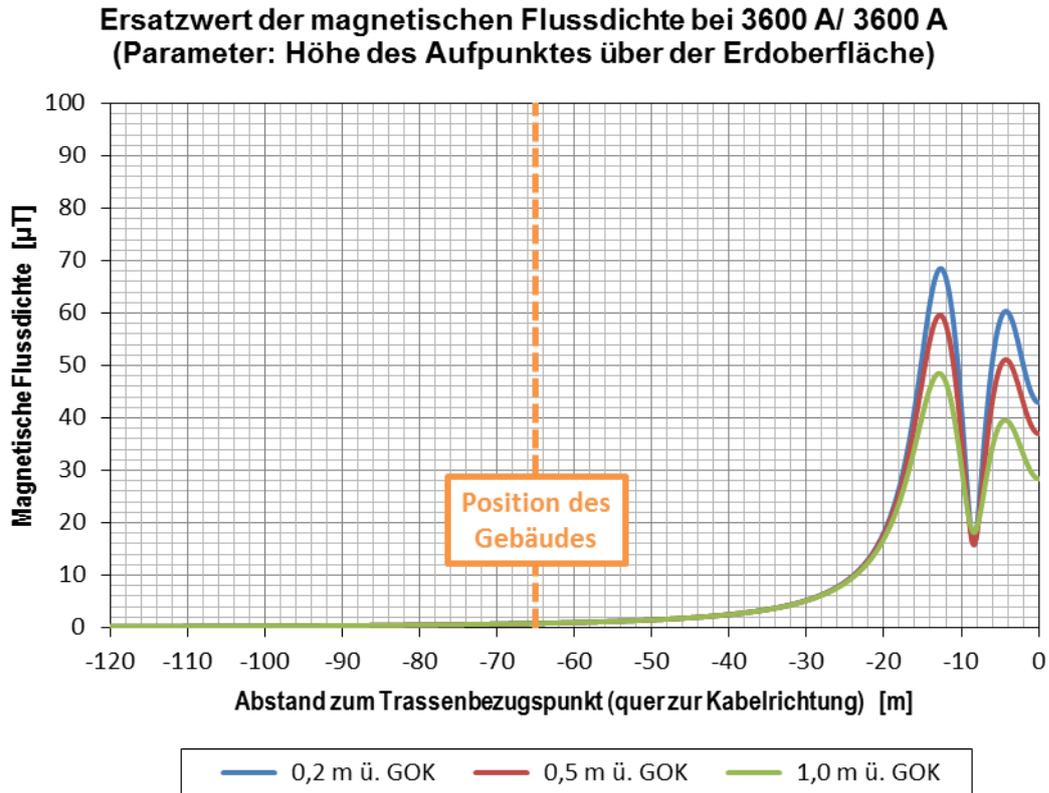


Bild 34: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Grabstedter Straße 43a für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes) 65 m
0,2 m	0,84 μT
0,5 m	0,84 μT
1,0 m	0,84 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 118) unterschritten.

4.3.5. Gebäude auf dem Grundstück Hauptstraße 1

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 3005 m ab der KÜA Bockhorn nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 89 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Hauptstraße 1 befindet (Bild 35). In diesem Bereich gilt das HDD-Profil nach Bild 3. Der betreffende Abschnitt der Kabeltrasse gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 3 (siehe Bild 4).

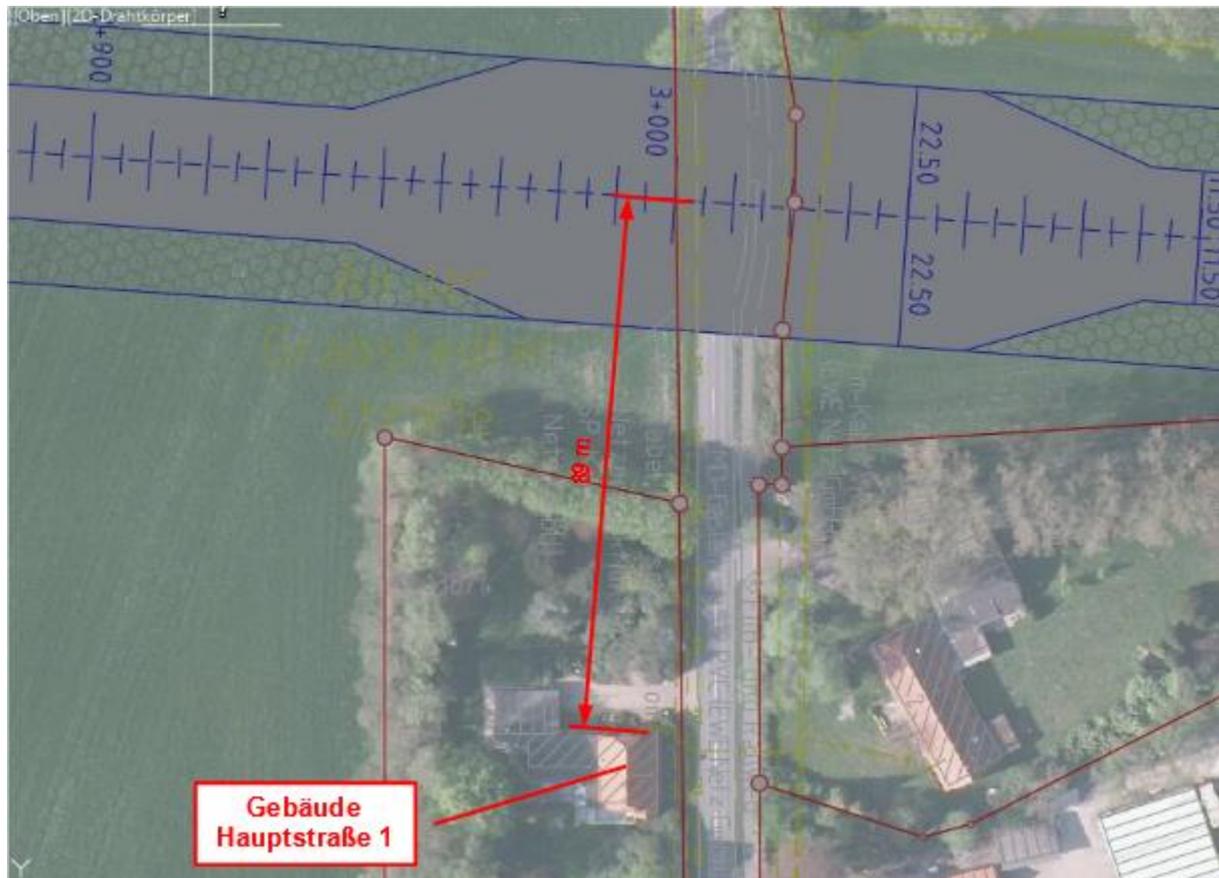


Bild 35: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Hauptstraße 1 nahe Trassen-km 3+005

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 36 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.

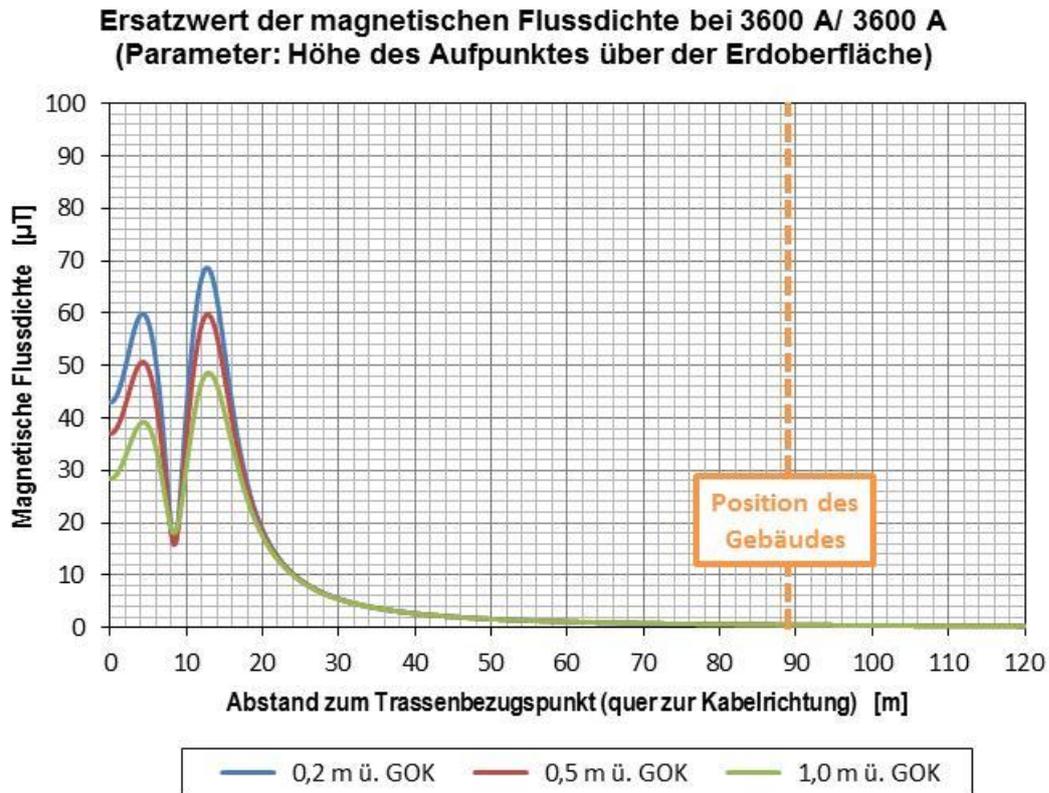


Bild 36: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Hauptstraße 1 für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes)
	89 m
0,2 m	0,50 μT
0,5 m	0,50 μT
1,0 m	0,50 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 200) unterschritten.

4.3.6. Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 54

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 3045 m ab der KÜA Bockhorn nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 65 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Grabstedter Straße 54 befindet (Bild 37). Dieser Abschnitt befindet sich nahe an einem Übergangsbereich zwischen Regelprofil und HDD-Profil der Kabeltrasse. Im Sinne einer „Worst-Case“-Betrachtung wurde für die Berechnungen das HDD-Profil (Bild 3) angesetzt, da sich bei diesem Profil für Orte neben der Kabeltrasse tendenziell etwas höhere magnetische Flussdichten ergeben als beim Regelprofil (Bild 2). Der betreffende Abschnitt der Kabeltrasse gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 3 (siehe Bild 4).

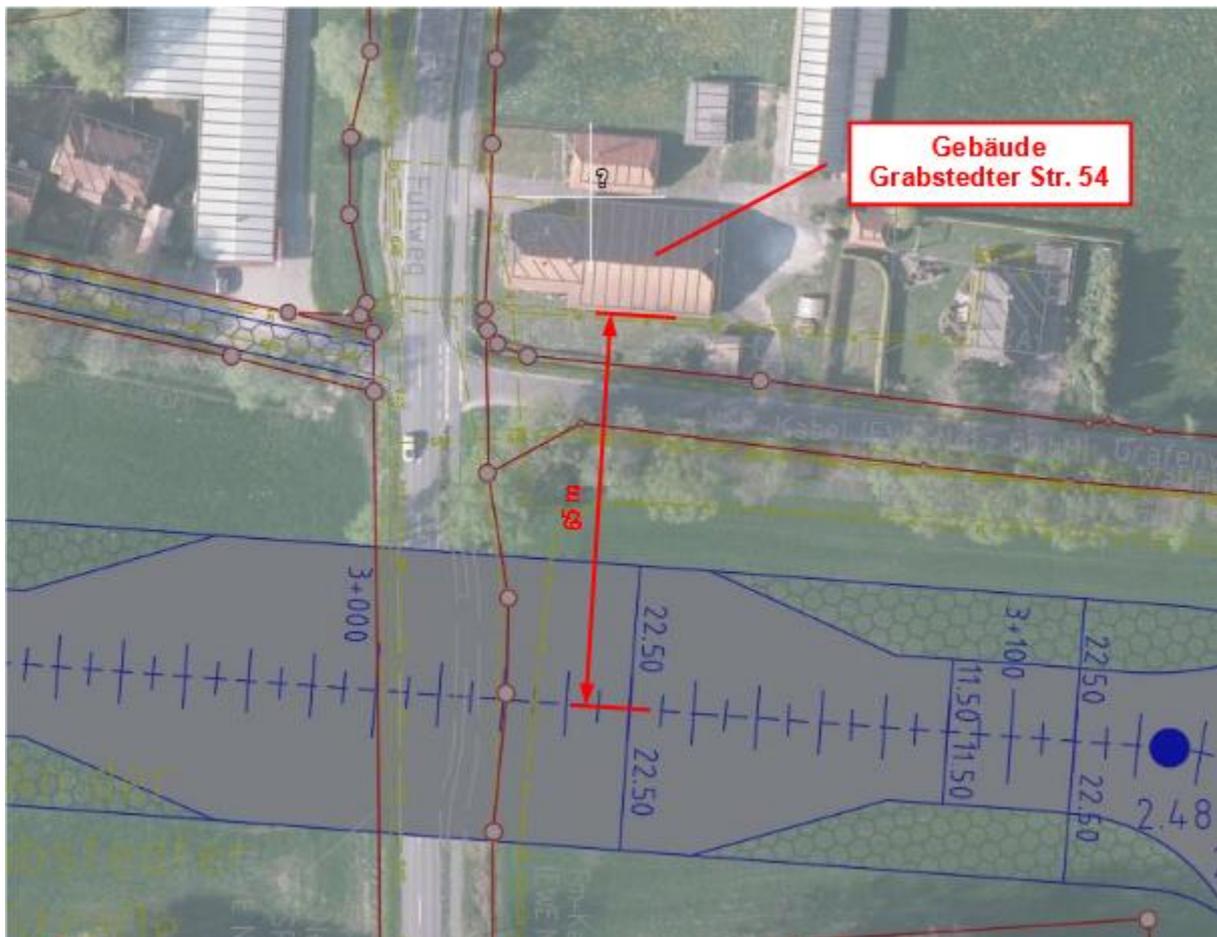


Bild 37: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Grabstedter Straße 54 nahe Trassen-km 3+045

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 38 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.

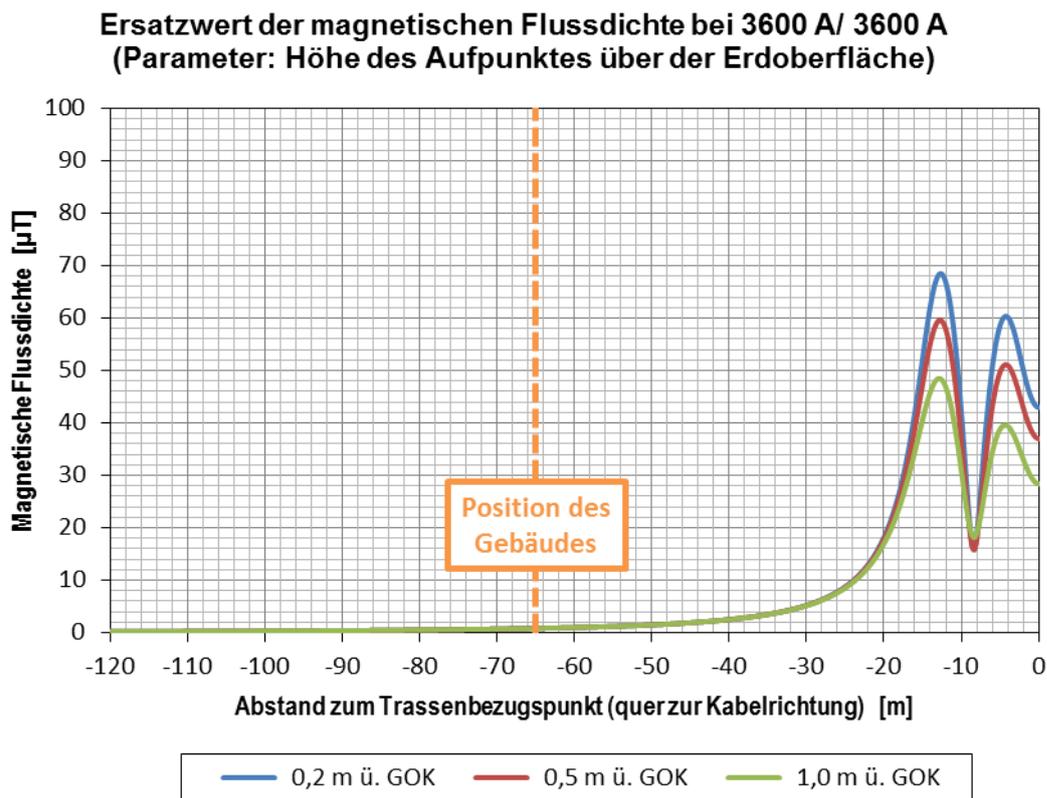


Bild 38: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Grabstedter Straße 54 für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes)
	65 m
0,2 m	0,84 μT
0,5 m	0,84 μT
1,0 m	0,84 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 118) unterschritten.

4.3.7. Gebäude auf dem Grundstück Hauptstraße 2

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 3060 m ab der KÜA Bockhorn nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 57 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Hauptstraße 2 befindet (Bild 39). In diesem Abschnitt befindet sich ein Übergangsbereich zwischen Regelprofil und HDD-Profil der Kabeltrasse. Im Sinne einer „Worst-Case“-Betrachtung wurde für die Berechnungen das HDD-Profil (Bild 3) angesetzt, da sich bei diesem Profil für Orte neben der Kabeltrasse tendenziell etwas höhere magnetische Flussdichten ergeben als beim Regelprofil (Bild 2). Der betreffende Abschnitt der Kabeltrasse gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 3 (siehe Bild 4).

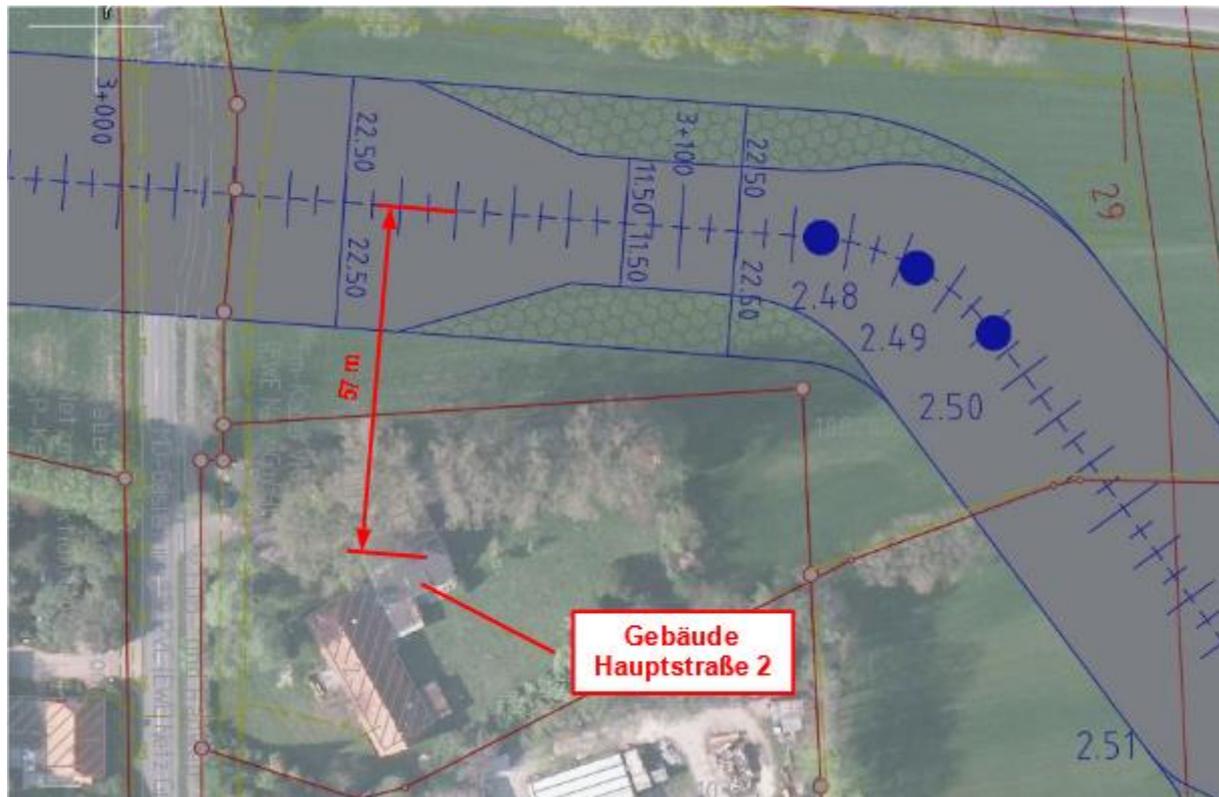


Bild 39: Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Hauptstraße 2 nahe Trassen-km 3+060

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 40 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.

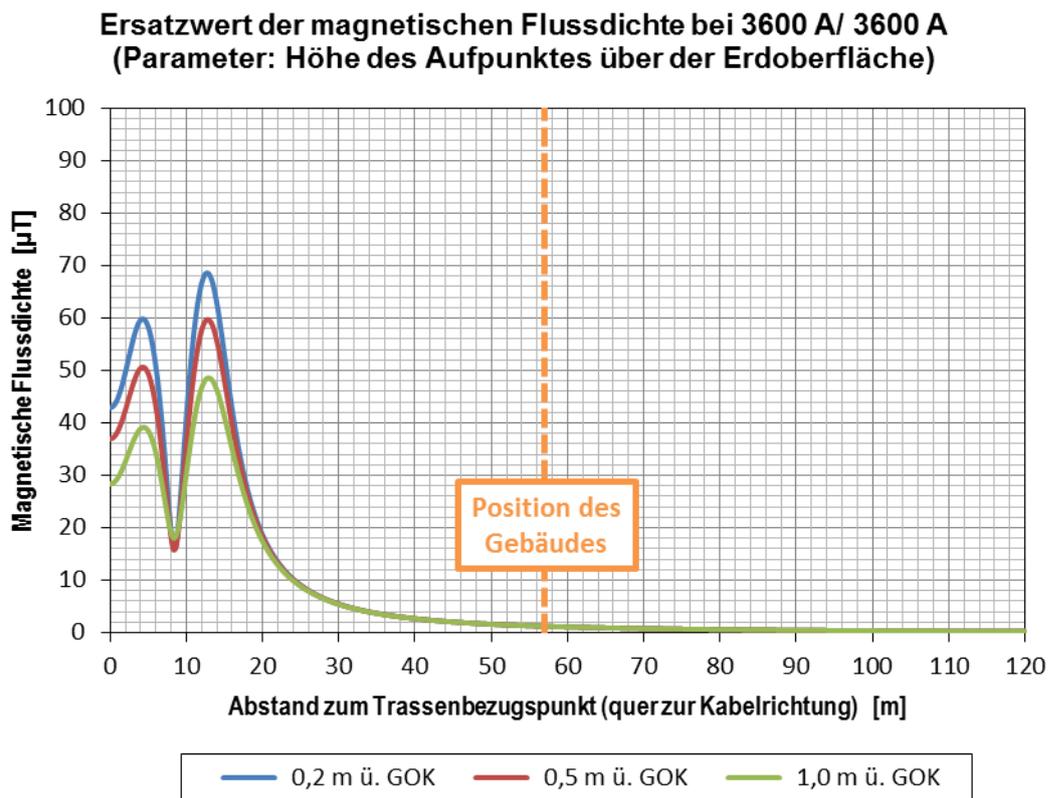


Bild 40: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Hauptstraße 2 für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

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

4.3.8. Gebäude auf dem Grundstück Grafenweg 2a

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 3095 m ab der KÜA Bockhorn nähert sich die Kabeltrasse bis auf ca. 67 m an ein Gebäude an, das sich auf dem Grundstück Grafenweg 2a befindet (Bild 41). 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 67 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 Abschnitt der Kabeltrasse gehört zum Cross-Bonding-Abschnitt 3 (siehe Bild 4).

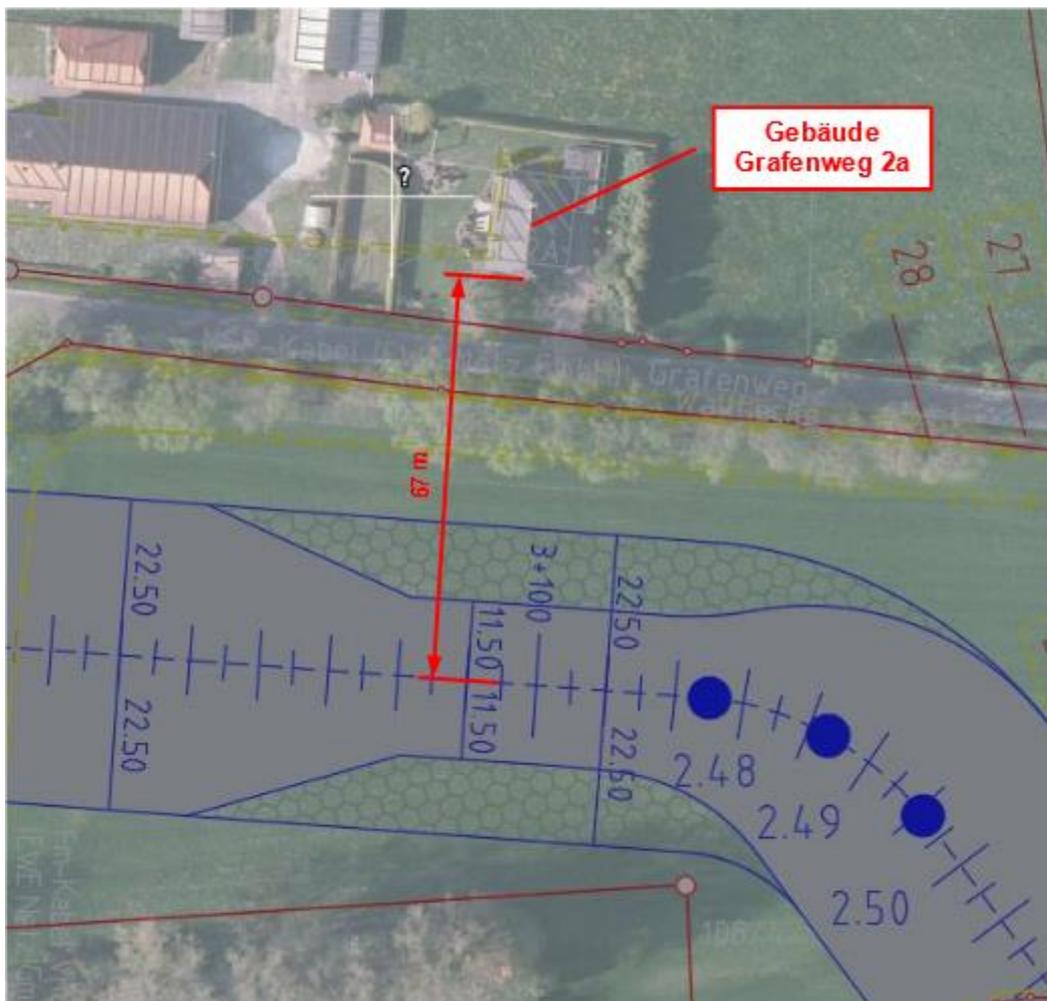


Bild 41 Annäherung der Kabeltrasse an ein Gebäude auf dem Grundstück Grafenweg 2a nahe Trassen-km 3+095

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 42 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.

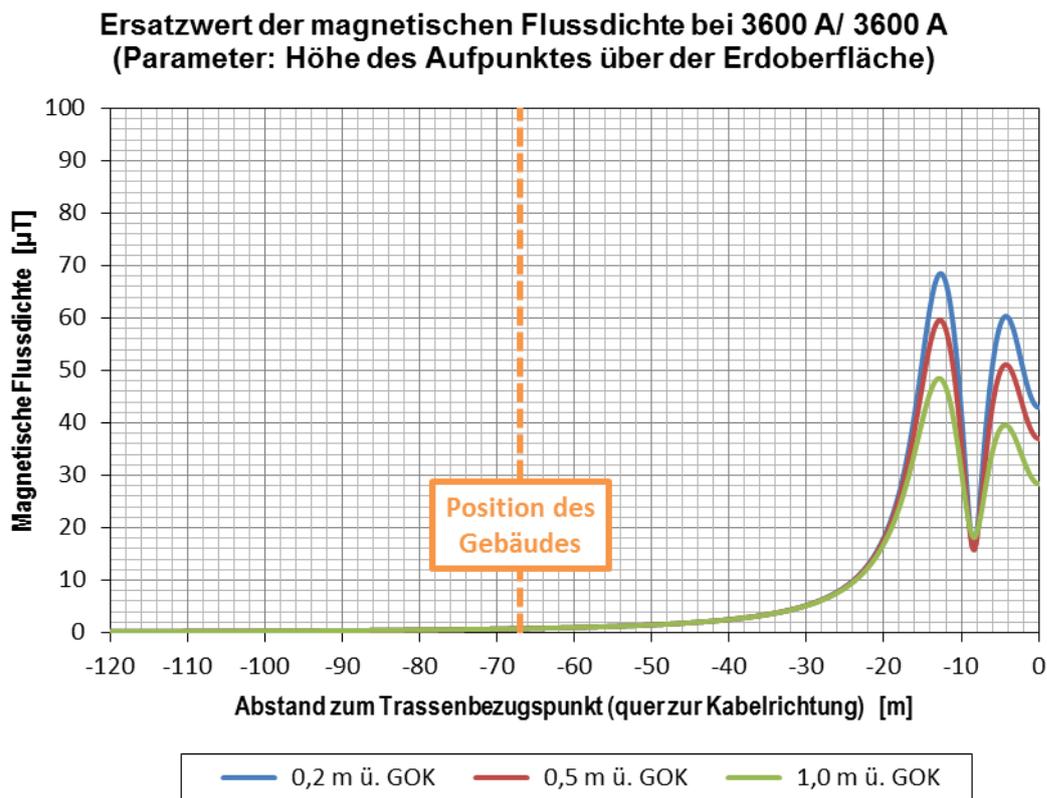


Bild 42: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Gebäudes auf dem Grundstück Grafenweg 2a für 3600 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Gebäudes) 67 m
0,2 m	0,79 μT
0,5 m	0,79 μT
1,0 m	0,79 μT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 μT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 126) unterschritten.

5. Zusammenfassung

Für einen als Erdkabeltrasse geplanten Teilabschnitt der 380-kV-Leitung „Fedderwarden – Conneforde“ im Bereich westlich der Ortschaft Bockhorn 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 Kabelschirmen berücksichtigt, die sich trotz zyklischer Auskreuzung der Kabelschirme (Cross-Bonding) einstellen.

Auf ca. 2/3 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 ca. 1/3 der gesamten Trassenlänge.

Für das Regelprofil wurde die auf den drei Cross-Bonding-Teilabschnitten erzeugte magnetische Flussdichte für einen symmetrisch zur Mittelachse der Kabeltrasse liegenden 240 m breiten Korridor berechnet. 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, Cross-Bonding-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	96,4 μT	2,36 μT	0,52 μT	0,14 μT	0,04 μT
0,5 m	71,9 μT	2,35 μT	0,52 μT	0,14 μT	0,04 μT
1,0 m	48,4 μT	2,62 μT	0,59 μT	0,16 μT	0,05 μT

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Cross-Bonding-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	84,1 μT	1,93 μT	0,43 μT	0,12 μT	0,04 μT
0,5 m	62,2 μT	1,92 μT	0,43 μT	0,12 μT	0,04 μT
1,0 m	41,4 μT	1,91 μT	0,43 μT	0,12 μT	0,04 μT

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 3:

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	89,1 μT	2,11 μT	0,47 μT	0,13 μT	0,04 μT
0,5 m	66,3 μT	2,10 μT	0,47 μT	0,13 μT	0,04 μT
1,0 m	44,4 μT	2,09 μT	0,47 μT	0,13 μT	0,04 μT

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 1 (Legetiefe 3,5 m):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	59,2 μT	9,69 μT	1,78 μT	0,43 μT	0,11 μT
0,5 m	52,5 μT	9,58 μT	1,78 μT	0,43 μT	0,11 μT
1,0 m	43,9 μT	9,40 μT	1,78 μT	0,43 μT	0,11 μT

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 (Legetiefe mindestens 3,0 m):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	64,4 μT	8,44 μT	1,53 μT	0,37 μT	0,10 μT
0,5 m	55,9 μT	8,36 μT	1,52 μT	0,37 μT	0,10 μT
1,0 m	45,4 μT	8,21 μT	1,52 μT	0,37 μT	0,10 μT

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für HDD-Profil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 (Legetiefe mindestens 3,0 m):

Höhe über der Geländeoberkante	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	68,7 μT	9,08 μT	1,65 μT	0,40 μT	0,11 μT
0,5 m	59,8 μT	9,00 μT	1,64 μT	0,40 μT	0,11 μT
1,0 m	48,6 μT	8,84 μT	1,64 μT	0,40 μT	0,11 μT

Die größten magnetischen Flussdichten treten immer unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse auf. Die berechneten Ersatzwerte liegen für das Regelprofil zwischen 41,4 μT in 1,0 m Höhe und 96,4 μT in 0,2 m Höhe über der Geländeoberkante. Für das HDD-Profil erreicht die maximale

magnetische Flussdichte unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse Werte zwischen 43,9 μT in 1,0 m Höhe und 68,7 μT in 0,2 m Höhe über der Geländeoberkante.

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 zu den allgemeinen Untersuchungen wurden die zu erwartenden maximalen magnetischen Flussdichten auch für acht 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 (1,28 μT , 3,47 μT , 0,48 μT , 0,84 μT , 0,50 μT , 0,84 μT , 1,24 μT , 0,79 μT).

Bei Ausführung der Kabelanlage in der vorgestellten Form und unter Zugrundelegung der beschriebenen maximalen 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