

Modellhafte Feldstärkenbetrachtung von Stromleitungen am Beispiel Niedernhausen

Dr.-Ing. Sebastian Strunck, sebastian@strunck.at

©27. August 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlegende Annahmen	2
3	Die Höchstspannungsleitung	4
3.1	Baulich realisierter Zustand (380kV AC, 220kV AC)	6
3.1.1	Magnetfelder	6
3.2	Geplanter Stand (380kV AC, 380kV DC)	7
3.2.1	Elektrisches Feld	8
3.2.2	Magnetfeld	8
3.3	Geplanter Stand (Backup) (380kV AC, 380kV AC)	8
4	Kombinierte Szenarien	11
5	Vergleich mit Grenzwerten anderer Länder	13

1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende werden mehrere Höchstspannungsgleichstromübertragungsleitungen (HGÜ) in Deutschland aufgebaut. Eine besondere Stellung nimmt da das Vorhaben Ultranet ein (Osterath - Phillipsburg), welches, anders als die anderen HGÜ-Leitungen, keinen Erdverkabelungsvorrang hat und im Zuge der Bestandsnutzung auch keine Mindestabstände. Daher gilt ausschließlich die 26. BImSchV [5]. Bei Ultranet sollen neben der HGÜ-Leitung auf den gleichen Masten eine 380 kV-Wechselstromübertragung stattfinden. Parallel zu der Höchstspannungstrasse verläuft eine weitere Stromtrasse mit Bahnstrom und einer 110kV Übertragungsstrecke der Firma Syna.

2 Grundlegende Annahmen

In der aktuellen Betrachtung haben wir es mit Stromübertragung bei unterschiedlichen Frequenzen zu tun. Die betrachteten Frequenzen sind 0 Hz (HGÜ), 16,7 Hz und 50 Hz. Diese sind in Abbildung 1 zusammen mit den Grenzwerten der magnetischen Flussdichte dargestellt. Dabei ist bereits ersichtlich, dass der Gleichstrom eine Sonderbehandlung erhält. Die 500 μT sind deutlich niedriger als 40 000 μT , die für magnetische Felder bei 1 Hz gelten. Des Weiteren wird regelmäßig von 100 μT als Grenzwert für magnetische Felder bei 50 Hz gesprochen. Dies wird nochmal gesondert im §3 aufgeführt, dass für 50 Hz Anlagen nur die Hälfte des besagten Grenzwertes gilt für die magnetische Flussdichte gilt.

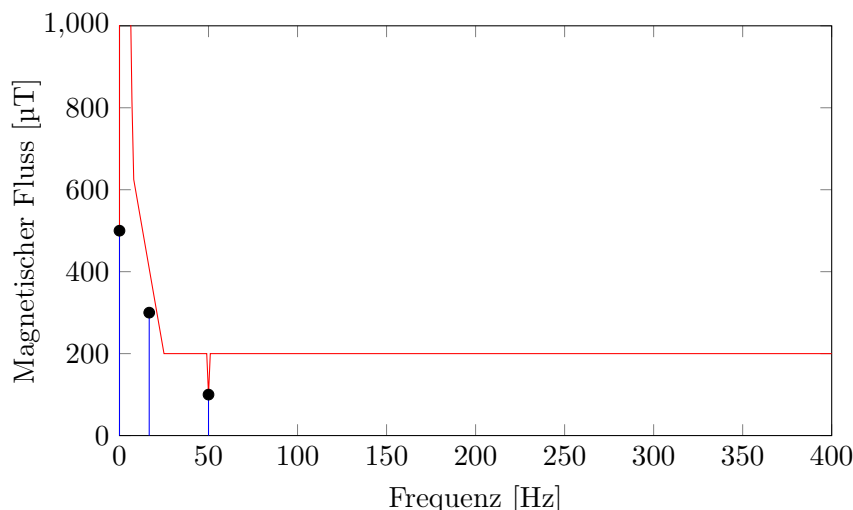


Abbildung 1: Grenzwerte (Effektivwerte) des magnetischen Flusses (B) in μT und die drei Frequenzpunkte, die in diesem Bericht relevant sind.

Die angegebenen Werte sind Effektivwerte. Dies ist ein Maß, um Wechselspannungen mit Gleichspannungen vergleichbarer zu machen. Dieser wird mit Hilfe des Spannungsverlaufs über der Zeit $u(t)$ wie folgt ermittelt.

$$U_{\text{eff}} = \int_0^T |\sqrt{u(t)}| dt \quad (1)$$

Für einfache Sinus-förmige Spannungsverläufe, wie dies bei der Wechselstromübertragung der Fall ist, vereinfacht sich die Formel zu $U_{\text{eff}} = \sqrt{2}^{-1} U_s = 0.707 U_s$, wobei U_s den Spitzenwert einer Sinusschwingung darstellt.

Im Folgenden wird jeweils die duale Betrachtung durchgeführt. Erst werden die Ergebnisse der elektrischen Felder dargestellt, anschließend die magnetischen Felder. Die elektrischen Felder leiten sich im Gleichstromfall alleinig aus der angelegten Spannung ab, die magnetischen Felder aus dem

Stromfluss. Im Wechselstromfall ergeben sich Kombinationen, bei der die Änderung des einen, das jeweils andere erzeugt. Bedeutet konkret, dass die Änderung eines Magnetfeldes erzeugt ein elektrisches Feld und die Änderung des elektrischen Feldes erzeugt ein Magnetfeld. Daher wird im Folgenden auf die einfache Betrachtung verzichtet und direkt die Berechnung mit Hilfe eines Vollwellensimulators¹ durchgeführt.

Die Modellbildung im Simulator erfolgt unter vereinfachten Bedingungen. Auf eine Modellierung eines Masts wurde verzichtet, da der größte Teil der Leitungen als durchhängende Leitung ausgeführt ist. Für die elektrischen Felder wurde auf Leiterseilen ein statisches Potential von 380 kV, bzw. -380 kV aufgebracht. Der Boden ist, bezogen auf die Übertragungsleitung, auf 0 V gesetzt.

¹<http://www.cst.com>

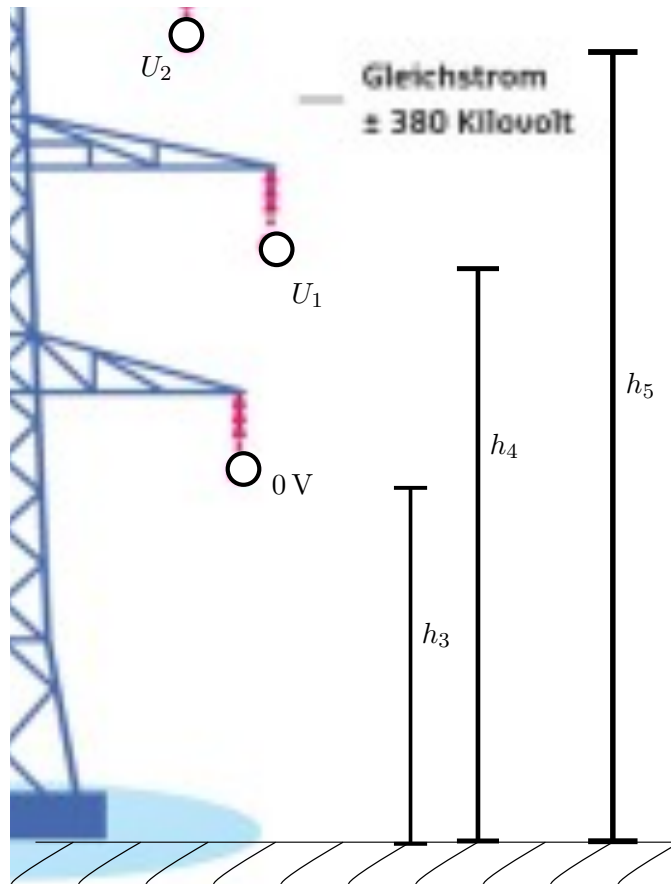


Abbildung 2: Szenario für die Berechnung einer bipolaren Feldanordnung einer HGÜ-Leitung. Hintergrundbild entstammt [3]. Die Masten weisen in etwa eine Höhe von 60 m auf.

3 Die Höchstspannungsleitung

Die Höchstspannungstrasse besteht aus bis zu 6 stromführenden Leiterbündeln. Diese sind beidseitig angebracht und sind für eine Drehstromübertragung (jeweils 3 Phasen) gedacht. Die einseitige Anordnung ist in Abbildung 2 dargestellt. Die dazugehörigen Abstände und Größen sind in Tabelle 1 aufgezeigt.

Die Modellbildung umfasst erstmal nur die Leitungen (also die Feldherauffordernden Elemente). Zur Darstellung der seitlichen Abstände wurde einseitig ein Block eingebracht, welcher die Position eines Hauses darstellen soll, welches 30 m von der Mast-Mitte entfernt steht.

Tabelle 1: Tabelle der angenommenen geometrischen Anordnung an einem Mast, basierend auf der Illustration aus [3].

Leitung	Höhe	Armlänge	Spannung	Strom
Mast	60 m	0 m	0 V	
Oberer Arm	$h_5 = 44,35$ m	10,18 m	380 kV	5500 A
Mittlerer Arm	$h_4 = 32,87$ m	15,65 m	-380 kV	-5500 A
Unterer Arm	$h_3 = 20,35$ m	13,83 m	0 kV	0 A

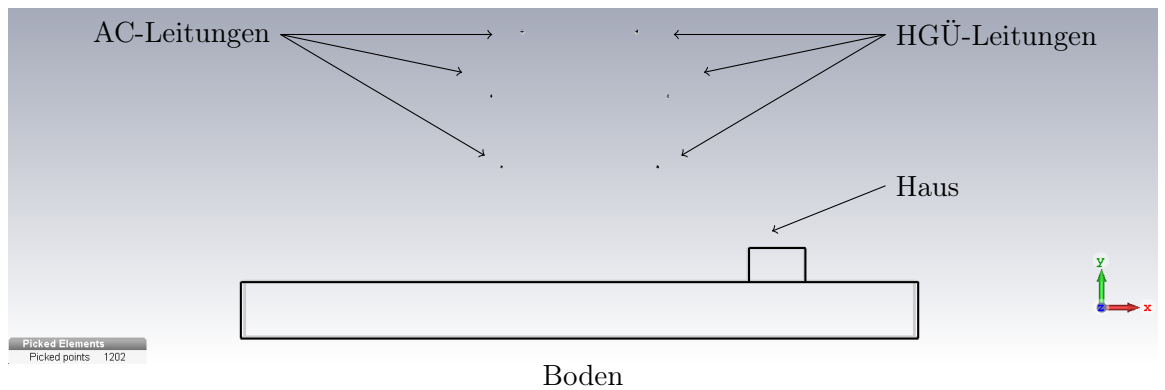


Abbildung 3: Dies ist das verwendete Modell mit den drei, in der Luft hängenden Leitern und einem Haus mit einem Abstand von 30 m zur Mitte des Strommasts. Dieses Haus besteht in dem Modell aus elektrisch leitfähigem Material.

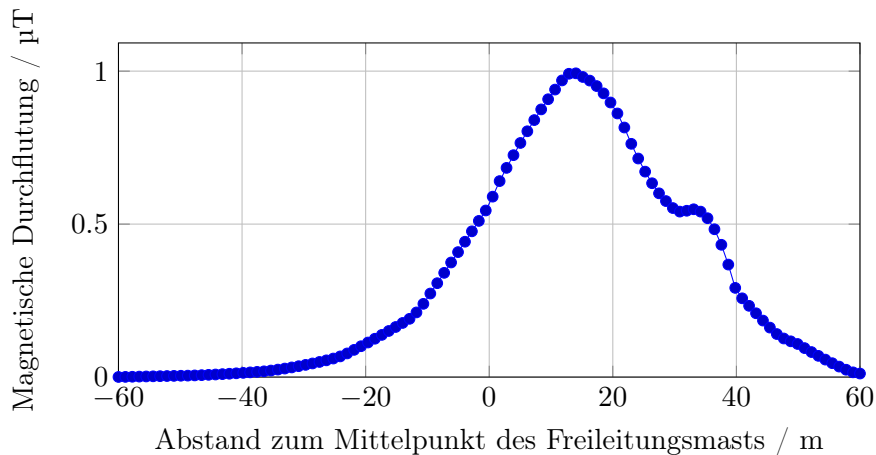


Abbildung 4: Magnetischer Fluss 1 m über dem Erdboden mit eingeschalteter 220 kV-Leitung mit jeweils 84 A. Die 380 kV-Leitung war zum Zeitpunkt der Messung abgeschaltet.

3.1 Baulich realisierter Zustand (380kV AC, 220kV AC)

Dieser Abschnitt dient der Referenzdarstellung um den bisherigen Stand zu dokumentieren. Dies wird dadurch ermöglicht, dass ein Messprotokoll der Firma Amprion GmbH existiert, welches eine Messreihe im Bereich des Spielplatz Dachsbau dokumentiert. [2]

3.1.1 Magnetfelder

Die Simulation zum Vergleich basiert auf einer aktiven 220 kV-Leitung mit 84 A pro Leitung. Die Messwerte von Amprion liegen zwischen $0,04 \mu\text{T}$ und $0,23 \mu\text{T}$. Die nachsimulierten Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

Es gibt mehrere Unsicherheiten, welche zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

- Es wurde angenommen, dass pro Leitung 84 A fließen. Es kann sein, dass dieser Wert auf die drei Phasen aufgeteilt ist. Des Weiteren ist dieser Wert lediglich ein Maximalwert für den Zeitpunkt dieser Messreihe.
- Die Höhe der Leitung kann unterschiedliche sein. Selbst die Geometrie der Leiteranordnung basiert auf Annahmen.

In dem Messprotokoll ist eine Simulation dargestellt, bei der die volle Kapazität der Leitungen als aktuelle Last angenommen wird. Diese ist für die 380 kV Leitung laut Messprotokoll jeweils 2720 A pro Leitung. Auch hier ergibt sich eine weitere Annahme.

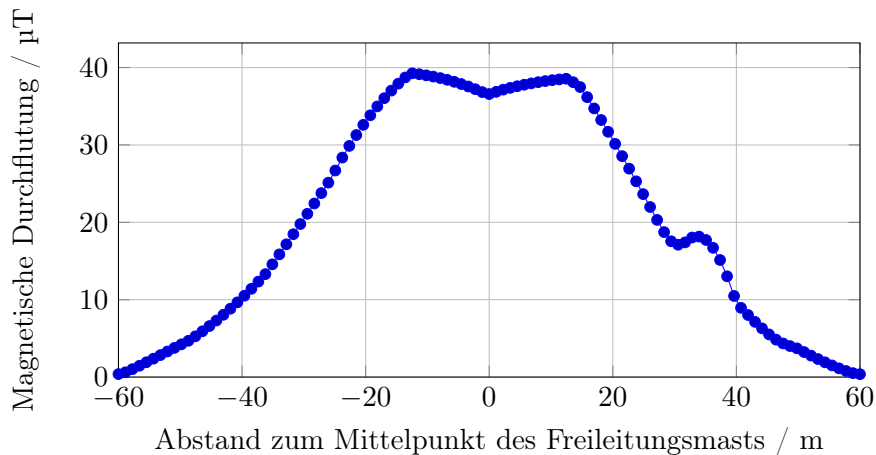


Abbildung 5: Magnetischer Fluss 1 m über dem Erdboden mit eingeschalteter 220 kV- und 380 kV-Leitung mit jeweils 2720 A.

- Da für die 220 kV-Leitung kein Maximalstrom angegeben ist, wurde ebenfalls 2720 A angenommen.

Die simulierten Ergebnisse der Firma Amprion GmbH [3] beinhalten neben den hier angenommenen Trassen die benachbarte Westnetz und DB 110 kV-Trasse. Die dadurch ermittelten Werte liegen zwischen $8,7 \mu\text{T}$ und $22,5 \mu\text{T}$. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Simulation dargestellt. Hier sind Maximalwerte bis $40 \mu\text{T}$ ermittelt worden.

In Anbetracht der Unsicherheiten bei der Modellierung sind die gemessenen und später simulierten Werte durch die Firma Amprion in einem ähnlichen Bereich.

3.2 Geplanter Stand (380kV AC, 380kV DC)

Die beiden Technologien werden getrennt von einander betrachtet, daher gibt es im Folgenden die AC-Ergebnisse und dem gegenüber die DC-Ergebnisse. Die AC-Betrachtung stellt daher auch den aktuellen Stand mit der im Betrieb befindlichen 380 kV-Leitungen und der außer Betrieb befindlichen 220 kV-Leitungen dar.

Die AC-Ergebnisse beziehen sich auf die Leitungen auf der linken Seite der dargestellten Abbildungen. Diese bilden ein 3-Phasen System mit jeweils um 120° -phasen verschobenen Anregungen. Die Stromstärke ist die jeweilige Maximalstromstärke von 2720 A.

Die DC-Ergebnisse bilden die Felder der HGÜ-Anordnung ab. Die oberste Leitung führt eine Spannung von 380 kV und die mittlere eine Spannung von -380 kV. Die unterste liegt auf Masse-Niveau. Die Stromführung für die Magnetfeldberechnung liegt bei jeweils 5500 A.

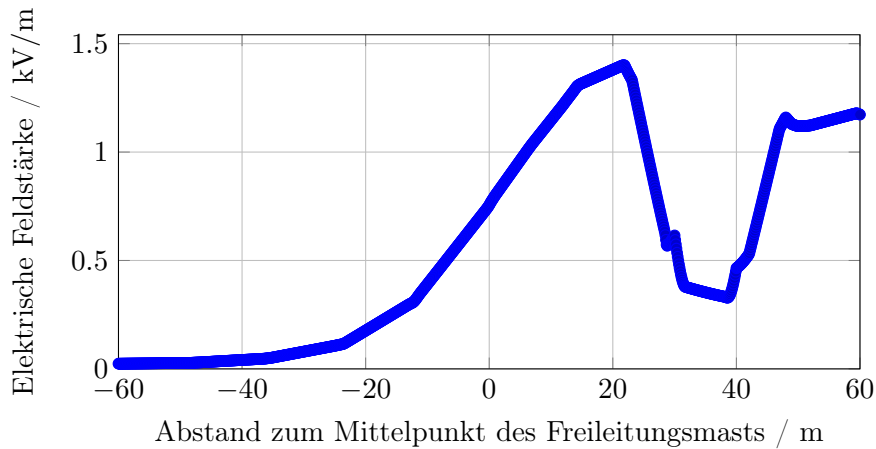


Abbildung 6: Elektrische Feldstärke 1 m über dem Erdboden, hervorgerufen durch 380 kV an der HGÜ-Leitungskombination.

3.2.1 Elektrisches Feld

Die elektrische Feldstärke wird getrennt nach Frequenzen voneinander betrachtet. Das elektrische Feld der HGÜ-Leitung ist in Abbildung 6 dargestellt. Da ist ersichtlich, dass sich die elektrische Feldstärke unterhalb von 1,5 kV ausbildet. Das metallische Haus führt gerade beim elektrischen Feld zu einer Erhöhung der Feldstärke, da die Abstände zur Leitung angehoben werden.

3.2.2 Magnetfeld

Die Ergebnisse der magnetischen Untersuchung beinhalten basieren auf einem modellierten Stromfluss. Die Ergebnisse für die magnetische Feldstärke wurde 1 m oberhalb des Bodens bestimmt und in Abbildung 7 dargestellt. Die Magnetfeldstärken der AC-Leitung überschreiten den Wert von $30 \mu\text{T}$ nur in einem engen Bereich, die HGÜ-Leitung bleibt sogar deutlich unter diesem Wert.

3.3 Geplanter Stand (Backup) (380kV AC, 380kV AC)

Die Alternativnutzung als beidseitig genutzte AC Strecke mit 380 kV unterscheidet sich nur im magnetischen Fluss kaum von der bestehenden Wechselstromanordnung mit 220 kV/380 kV, da die angenommenen maximalen Stromstärken gleich sind (vgl. Abbildung 5).

Es wurde weiterhin eine kombinierte Simulation durchgeführt. In dieser Simulation wurde das Haus, angelehnt an die Situation der Hochhäuser (7 Stockwerke) in Trassennähe angelehnt. In dieser Betrachtung wird überwiegend auf die magnetische Feldstärke eingegangen. In Abbildung 9 ist eine 3D

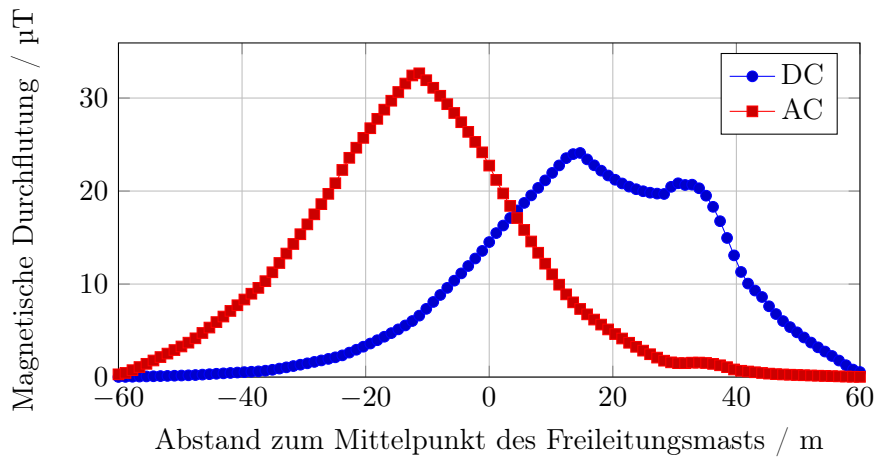


Abbildung 7: Magnetischer Fluss 1 m über dem Erdboden der kombinierten AC-Leitung auf der linken Seite und der HGÜ-Leitung auf der rechten Seite.

Darstellung des Szenarios mit einem überlagerten Schnittbild des magnetischen Flusses abgebildet. Die Leitungen sind untereinander 120° phasenversetzt, die untersten Leitungen haben jedoch den höchsten Wert, was nach derzeitiger Betrachtungsweise den *worst case* darstellt.

In Abbildung 8 ist das simulierte Ergebnis einer beidseitigen 380 kV Wechselstromanordnung unter Vollast zu sehen. Dabei wird im Bereich bis zu 20 m links und rechts der Leitung der Grenzwert für die elektrische Feldstärke überschritten. Das ist in sofern bemerkenswert, da der Vollastfall einen erheblich zusätzlichen Einfluss hat als lediglich der lastfreie Fall.

In Abbildung 9 sind die dazugehörigen Magnetfelder für den Wechselstrombetrieb aufgezeichnet. Um die Farben in eine gewisse Perspektive zu rücken. Der Grenzwert der 26. BImSchV mit $100 \mu\text{T}$ ist in dem gelben Bereich zu finden. Diese magnetischen Flussstärken befinden sich um die Leiterseile herum, erreichen jedoch nicht den Erdboden. Den Abschnitt 5 vorgehend ist der Wert $1 \mu\text{T}$ jedoch bei Übergang in das Dunkelblaue zu finden und in diesem Bild nur an den äußeren Rändern. An der Grenze zum Wohnhaus findet man nach dieser Berechnung etwa einen Pegel von $10 \mu\text{T}$. Das Haus in diesem Szenario ist 40 m von der Mastmitte entfernt und somit bei weitem nicht das nächstgelegene Haus.

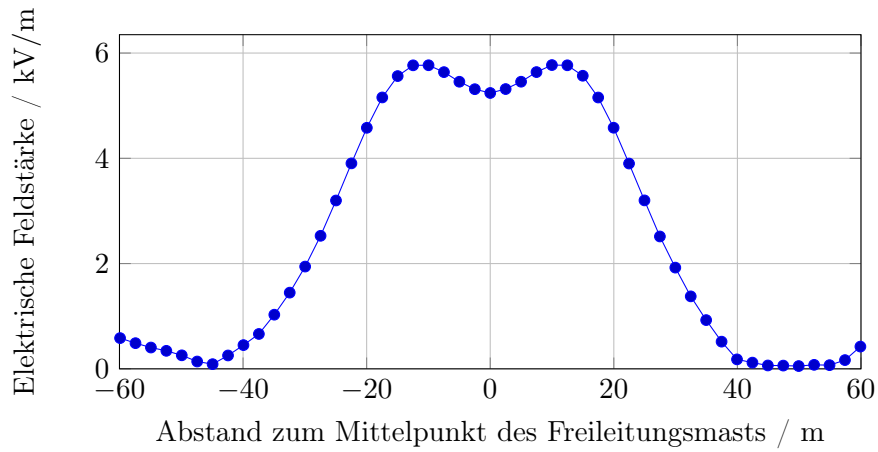


Abbildung 8: Elektrische Feldstärke 1 m über dem Erdboden, hervorgerufen durch 380 kV mit 50 Hz in der 3-Phasen-Anordnung.

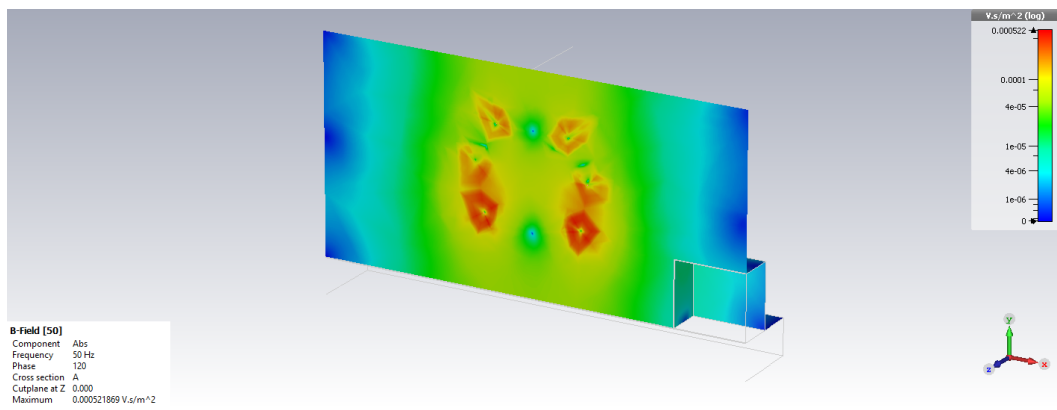


Abbildung 9: Hochhauszenario mit beidseitigen AC Leitungen unter Voll- last. Abgebildet ist das Schnittbild des magnetischen Flusses.

4 Kombinierte Szenarien

In [5] ist in Anhang II eine Regel für Kombinationen von mehreren Anlagen festgelegt. Diese geht von den auf den jeweiligen Grenzwert normierten Immisionsbeitrag aus und addiert diese Werte, in unserem Fall vom 1 Hz - 10 MHz. Der kombinierte Wert darf den Wert 1 nicht überschreiten. Das bedeutet, dass für jeden Immisionsteilnehmer der prozentuale Wert bezogen auf den Grenzwert mit den jeweils anderen addiert wird. Die Kombination aus allen darf nicht größer als 100% sein.

In Tabelle 2 werden alle betrachteten Anlagen aufgelistet. Für die nähere Betrachtung sind mehrere Parameter der Benachbarten Leitung unbekannt und können daher nicht in die Betrachtung einfließen. Aus diesem Grund wird nur die HGÜ Leitung und die Wechselstromleitung auf den "großen" Masten berücksichtigt.

In Abbildung 10 sind die Beträge im Verhältnis zum normierten Grenzwert aufgetragen. Es ist gut ersichtlich, dass die Wechselstromleitung etwa 33% erreicht, da ihr Grenzwert bei 100 μ T liegt. Die HGÜ-Leitung hingegen erreicht etwa 5% von ihrem Grenzwert, auch wenn die magnetische Feldstärke in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie bei der Wechselstromleitung. Das liegt an dem sehr hohen Grenzwert von 500 μ T. Selbst wenn die Gleichstromleitung in Zukunft Berücksichtigung finden sollte, spielt die bei einer Gesamtbetrachtung kaum eine Rolle, wenn weiterhin derartige Grenzwerte angesetzt werden.

Tabelle 2: Auflistungen der bekannten Anlagen zwischen 1 Hz - 10 MHz

Nr.	Leitung	Frequenz	Spannung (eff.) / V	Stromstärke / A
1	HGÜ Leitung	DC	380.000	5.500
2	Bahnstromleitung	16,7 Hz		
3	Syna-Leitung	50 Hz	110.000	
4	Wechselstrom	50 Hz	380.000	2720

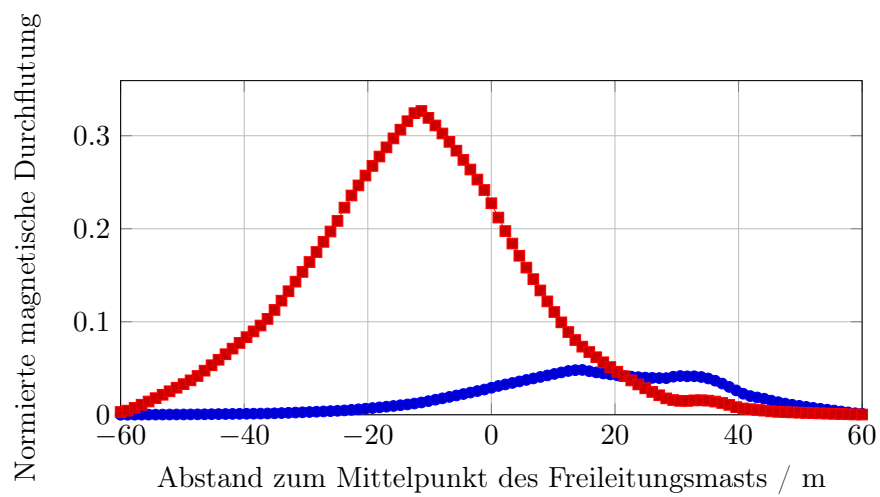


Abbildung 10: Auf den jeweiligen Grenzwert normierter magnetischer Fluss 1 m über dem Erdboden der kombinierten AC-Leitung auf der linken Seite und der HGÜ-Leitung auf der rechten Seite.

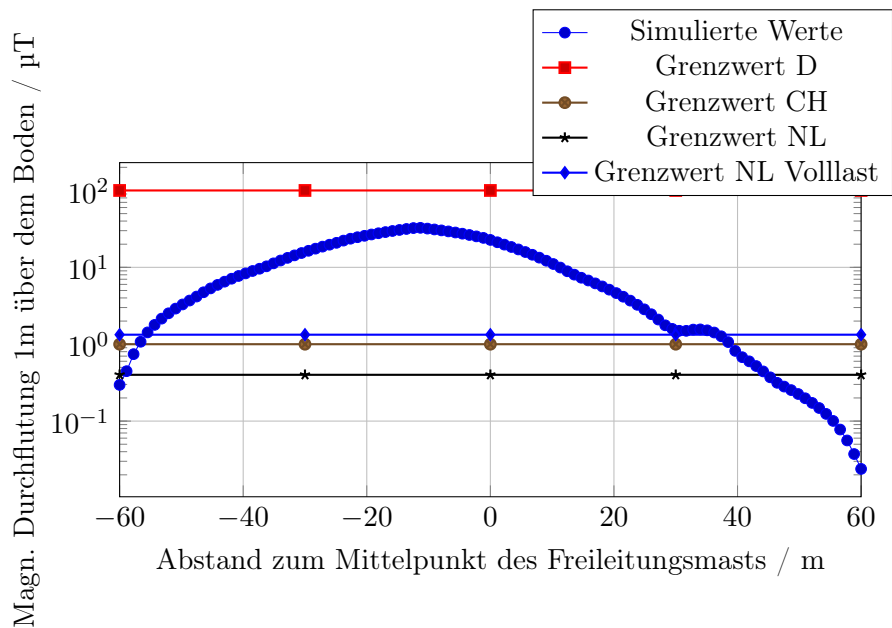


Abbildung 11: Vergleich der simulierten Werte der magnetischen Durchflutung der Wechselstromleitung mit den Grenzwerten der unterschiedlichen Ländern.

5 Vergleich mit Grenzwerten anderer Länder

Für die unterschiedlichen Länder bestehen auch unterschiedliche Grenzwerte. Hierzu hat das Bundesamt für Strahlenschutz eine Seite aufgestellt, wo die Grenzwerte verglichen werden [4]. Besonders auffällig ist der Unterschied zu unseren Nachbarländern Schweiz (CH) mit $1 \mu\text{T}$ in Orten mit ständigen Aufenthalt und den Niederlanden (NL), bei denen deutlich niedrigere Grenzwerte bestehen. Im Falle der Niederländischen Grenzwerte ist dieser jedoch bei einer über das Jahr gemittelten 30% Auslastung zu verstehen [1], wohingegen die Grenzwerte in Deutschland sogenannte Volllastgrenzwerte darstellen. In Abbildung 11 sind die simulierten Werte mit den jeweiligen Grenzwerten aufgetragen. Selbst bei den reinen Wechselstromanordnung nach dem Status Quo werden bis etwa ± 40 m von der Mastmitte die Grenzwerte deutlich überschritten. Das gilt allerdings nicht für den deutschen Grenzwert.

Literatur

- [1] AACHEN, E.-P. : *Grenzwerte im internationalen Vergleich*. 2020. – <https://www.emf-portal.org/de/cms/page/home/more/limits/limit-values-compared-internationally>
- [2] AMPRION: *220-/380-kV-Höchstspannungsfreileitung Pkt. Koblenz - Pkt. Marxheim Bl. 4127 (Bereich mast 174 - Mast 175) Messung elektrischer und magnetischer Felder im Bereich zwischen Quellenweg und Am Dachsbau der Gemeinde Niedernhausen*. 6 2016
- [3] AMPRION: *Projektbeschreibung Ultranet*. 2017. – <https://www.amprion.net/Netzausbau/Aktuelle-Projekte/Ultranet/> [Online; Stand 16. Juli 2017]
- [4] STRAHLENSCHUTZ, B. für: *Rechtliche Regelungen und Grenzwerte für den Bereich der niederfrequenten Felder im europäischen Vergleich*. 2020. – <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/kompetenzzentrum/netzausbau/schutz/grenzwerte-europa.html>
- [5] VERBRAUSCHERSCHUTZ, B. für Justiz u.: *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)*. 2013. – https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/