Gutachten

Messungen und Simulationsberechnungen zu Immissionen durch elektrische und magnetische Felder aufgrund einer benachbarten Hochspannungstrasse im Bereich des Plangebietes "Auf dem Grend" in Troisdorf-Sieglar

STADT TROISDORF **Der Bürgermeister**	**Anlage 5** **zur Begründung**
Bebauungsplan S 195	

Auftraggeber: **TroPark Troisdorf GmbH**
Poststraße 105
53840 Troisdorf

Autor: Dr. Klaus Trost
Wissenschaftsladen Bonn e.V.
Mess- und Beratungsstelle Elektrosmog
Reuterstraße 157
53113 Bonn
Tel.: 0228/20161-0
eMail: Klaus.Trost@Wilabonn.de

Bonn, den 29. März 2018

Inhaltsverzeichnis:

Seite

1. Ausgangssituation und örtliche Gegebenheiten 2
2. Durchführung der Messungen 6
3. Messergebnisse 8
4. Simulationsberechnungen der magnetischen Induktion 11
5. Physikalische Wirkungen elektrischer und magnetischer Wechselfelder im Körper 17
6. Biologische und gesundheitliche Wirkungen elektrischer und magnetischer Wechselfelder 19
7. Grenzwerte und Vorsorgeempfehlungen für elektrische und magnetische Wechselfelder 21
8. Zusammenfassung und Empfehlungen 24
9. Anhang: Fotos der Messpunkte sowie Diagramme und Ergebnistabellen 26

1. Ausgangssituation und örtliche Gegebenheiten

Zwischen der Straße *Auf dem Grend* in Troisdorf-Sieglar und einer Hochspannungstrasse befindet sich eine landwirtschaftlich genutzte Fläche (Abb. 1), die mit Wohnungen bebaut werden soll. Geplant ist eine teilweise Bebauung des Geländes nach Abb. 2, so dass sich zwischen der Hochspannungstrasse und den Geplanten Häusern ein relativ großer Mindestabstand von mehr als 100 m ergibt.

Die Trasse besteht aus drei Hochspannungsleitungen mit unterschiedlichen Geometrien, Spannungsebenen und Frequenzen. Den geringsten Abstand zum Plangebiet hat die 110 kV-Bahnstromleitung. Sie dient zur Stromversorgung der elektrischen Züge der Deutschen Bahn. Abweichend von der sonst üblichen Wechselstromfrequenz 50 Hz beträgt die Frequenz von Bahnstrom in Deutschland nur 16,7 Hz. Die Bahnstromleitung besitzt zwei zweiphasige Systeme, die Masten haben eine Einebenengeometrie (Abb. 3) mit vier

Abb. 1: *Landwirtschaftlich genutzte Fläche zwischen der Straße "Auf dem Grend" und der aus drei Leitungen bestehenden Hochspannungstrasse*

Strompfaden und einem Erdseil. Die von der üblichen Netzfrequenz 50 Hz abweichende Stromfrequenz 16,7 Hz ist durch die technischen Notwendigkeiten zu Beginn der Motorenentwicklung bei elektrifizierten Hauptbahnen bedingt. Wechselstrom mit der Frequenz 16,7 Hz wird außer in Deutschland nur noch in den Ländern Österreich, Norwegen, Schweden und der Schweiz zum Antrieb elektrischer Bahnen eingesetzt.

Im Abstand von ca. 30 m östlich der Bahnstromleitung und annähernd parallel zu dieser verläuft eine ältere 220 kV-Hochspannungsleitung des öffentlichen Stromnetzes mit zwei dreiphasigen Systemen und der Stromfrequenz 50 Hz. Die Masten dieser Leitung haben eine Tannengeometrie (Abb. 4) mit sechs Leiterseilpaaren und einem Erdseil.

Die dritte Leitung der Trasse ist eine Kombileitung mit je zwei dreiphasigen Systemen der Spannungsebenen 110 kV, 220 kV und 380 kV. Die große Kombileitung verläuft ca. 50 m östlich und annähernd parallel zur 220

Abb. 2: *Plangebiet "Auf dem Grend" (grün) mit der benachbarten Hochspannungstrasse, bestehend aus 110 kV-Bahnstromleitung, 220 kV-Hochspannungsleitung und 110/220/380 kV-Höchstspannungsleitung*

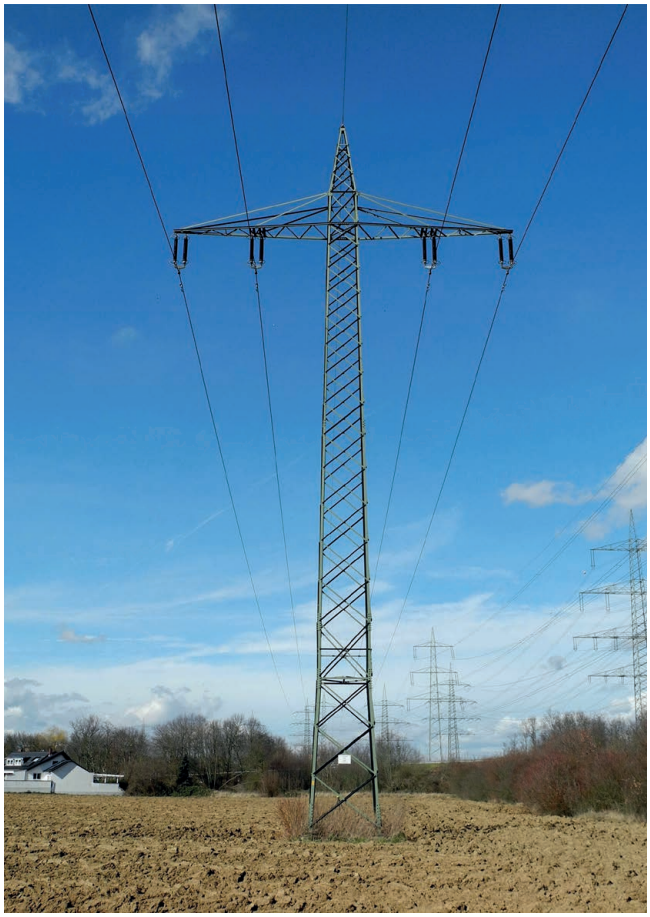


Abb. 3: *Tragmast der 110 kV-Bahnstromleitung mit Einebenengeometrie (Mast Nr. 3 in Abb. 9)*

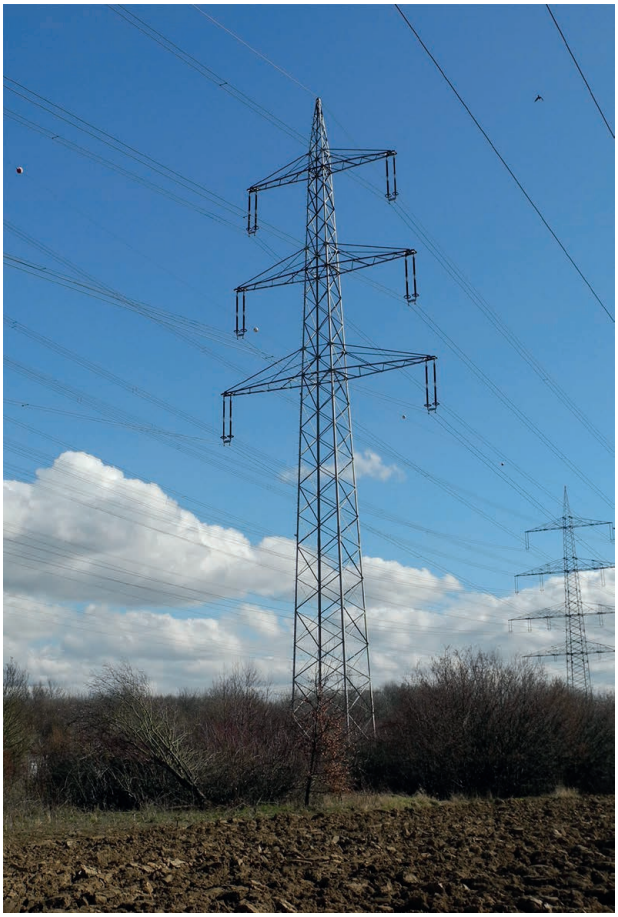


Abb. 4: *Tragmast der 220 kV-Netzstromleitung mit Tannengeometrie (Mast Nr. 8 in Abb. 9)*

kV-Leitung. Die Masten der Kombileitung haben insgesamt eine Tonnengeometrie. Die Untergeometrieen sind für die beiden 110 kV- und die beiden 220 kV-Systeme jeweils die Einebenengeometrie und für die beiden 380 kV-Systeme die Donaugeometrie (Abb. 5). Die Leiterseile der Kombileitung bilden zusammen 18 Strompfade, außerdem hat die Leitung ein Erdseil.

Durch den Stromfluss in den Leiterseilen von Hochspannungsleitungen kommt es im Bereich der Trassen zu Immissionen durch magnetische Wechselfelder, wobei die Stärke der Magnetfelder (Magnetische Induktion) proportional zur fließenden Stromstärke ist. Die Immissionen durch magnetische Wechselfelder sind daher nicht konstant und schwanken in Abhängigkeit von den Leistungsanforderungen im Stromnetz. Magnetfelder durchdringen ungeschwächt fast jede Materie. Insbesondere die Baumaterialien von Wohnhäusern haben gegenüber Magnetfeldern keine spürbar abschirmende Wirkung. Wohnhäuser können gegen von außen eindringende Magnetfelder nicht abgeschirmt werden. Schutz vor zu hohen Immissionen durch Magnetfelder bietet nur ein ausreichend großer Abstand zur Feldquelle.

Von den Leiterseilen einer Hochspannungsleitung gehen zusätzlich zu den Magnetfeldern und unabhängig von diesen auch elektrische Felder aus. Die im Bereich einer Hochspannungstrasse wirksame elektrische Feldstärke ist abhängig von der elektrischen Potentialdifferenz zwischen den Leiterseilen und der Erde und ist daher um so größer, je höher die Betriebsspannung der Leitung ist. Elektrische Felder werden von jeglicher Materie in ihrem Ausbreitungsverhalten beeinflusst und können leicht abgeschirmt werden. Schon blattlose Kronen von Bäumen werden von elektrischen Feldern kaum noch durchdrungen, und alle für Gebäudehüllen verwendeten Baumaterialien haben eine annähernd zu 100 % abschirmende Wirkung. Wegen ihrer Abhängigkeit von der elektrischen Spannung sind elektrische Felder konstant, da die Betriebsspannung

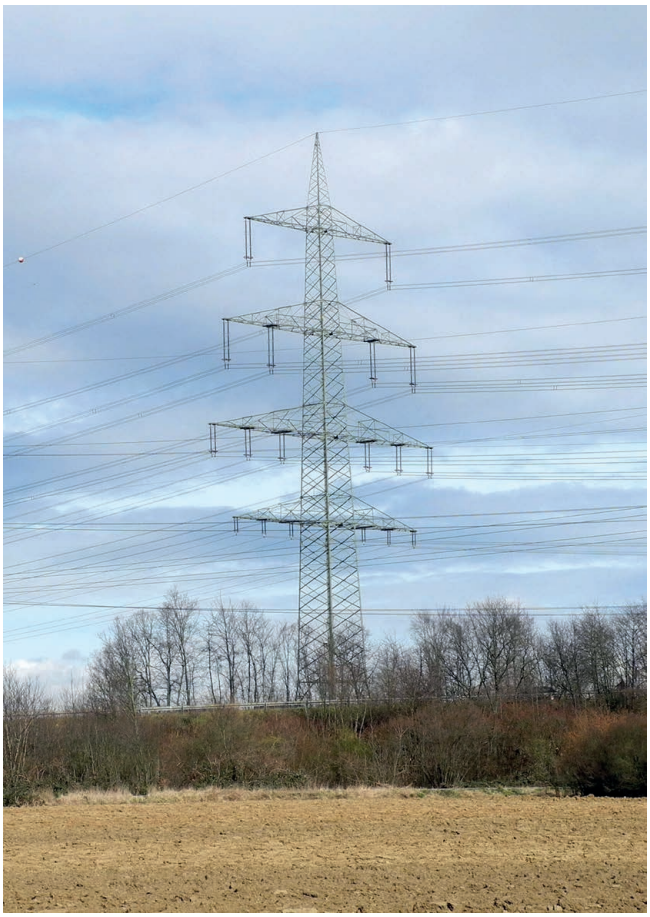


Abb. 5: *Tragmast der 110/220/380 kV-Kombileitung mit Tonnengeometrie (Mast Nr. 14 in Abb. 9)*

von Hochspannungsleitungen auch bei wechselnden Stromlasten praktisch konstant ist. Wegen ihrer leichten Abschirmbarkeit können Immissionen durch elektrische Felder mit entsprechenden Maßnahmen leicht verhindert werden.

Aufgrund der von der Stromfrequenz des öffentlichen Stromnetzes (50 Hz) abweichenden Frequenz des Bahnstromes können Bahnstromfelder bei Messungen von Netzstromfeldern unterschieden und getrennt von diesen gemessen werden.

Die Betreiber von Hochspannungsleitungen sind zur Vermeidung akuter Gesundheitsgefährdung verpflichtet, in öffentlich zugänglichen Bereichen ihrer Trassen die gesetzlichen Grenzwerte der 26. Bundesimmissionsschutzverordnung (26. BImSchV) einzuhalten. Die Überwachung der Feldimmissionen durch die Bundesnetzagentur gewährleistet, dass die Grenzwerte der 26. BImSchV im Bereich von GHochspannungstrassen immer eingehalten werden. Allerdings sind die Grenzwerte der 26. BImSchV aufgrund ihrer konzeptionellen Grundlage nur zur Vermeidung akuter Gesundheitsschäden durch die Feldexposition ausgelegt. Die Existenz von Gesundheitsrisiken durch Langzeitexposition, die möglicherweise auch unterhalb der Grenzwerte auftreten können, wird in der Verordnung nicht berücksichtigt. Dies ist ein offensichtlicher Mangel in der Grenzwertgesetzgebung der 26. BImSchV, denn in anderen Bereichen der Toxikologie wird stets zwischen akuten und chronischen Wirkungen einer Noxe unterschieden. Zahlreiche europäische Länder haben für Immissionen durch elektromagnetische Felder in Wohnungen und anderen Daueraufenthaltsbereichen vorsorgende Empfehlungen und zum Teil auch strengere gesetzliche Grenzwerte eingeführt.

In diesem Gutachten werden die Immissionen durch magnetische und elektrische Wechselfelder im Planungsbereich nach Abb. 2 untersucht und nach gesetzlichen deutschen Grenzwerten sowie etablierten internationalen Richtwerten für sensible Bereiche und Vorsorgeempfehlungen für Daueraufenthaltsbereiche von Personen beurteilt. Des weiteren werden die im Planungsbereich zu erwartenden Immissionen durch niederfrequente Magnetfelder mittels Simulationsberechnungen für verschiedene Auslastungsgrade der benachbarten Hochspannungsleitungen ermittelt, um zu fundierteren Abstandsempfehlungen zu kommen, die nicht nur auf Messergebnissen beruhen.

2. Durchführung der Messungen

Die Intensität (Induktion) magnetischer Wechselfelder von Hochspannungsleitungen schwankt wegen ihrer Abhängigkeit von der in den Leiterseilen fließenden Stromstärke. Es verbessert daher die Genauigkeit der Messergebnisse, wenn mindestens zwei Messgeräte eingesetzt werden. Ein Gerät verbleibt während der gesamten Messzeit möglichst nahe bei der Hochspannungsleitung an derselben Stelle und "beobachtet" den Lastgang der Leitung, indem es den Intensitätsverlauf der magnetischen Induktion über den gesamten Messzeitraum aufzeichnet. Mit dem zweiten Gerät werden an mehreren Messpunkten mit unterschiedlichem Abstand zur Trasse die magnetischen Feldimmissionen über einen Zeitraum von 6 Minuten je Messpunkt bestimmt. Mittels eines Normierungsverfahrens (Beschreibung des Verfahrens in Kap. 4) werden aus den Messergebnissen die während des Messzeitraumes auftretenden Lastschwankungen der Leitungen herausgerechnet, wodurch eine genauere Darstellung der Feldintensitäten in Abhängigkeit vom Abstand der Immissionsorte zur Trasse ergibt. Bei Hochspannungsleitungen des öffentlichen Stromnetzes (Stromfrequenz 50 Hz) ist der Aufwand mit dem zweiten Messgerät meist nicht erforderlich, weil bei diesen die zeitlichen Schwankungen der magnetischen Feldimmissionen in der Regel nur gering sind. Die Intensitäts-

Abb. 6: *Lage der Messpunkte auf dem Plangebiet und die Trassenmitten der drei Hochspannungsleitungen. Die in Tab. 1 angegebenen Abstände beziehen sich auf den Abstand der Messpunkte zur Trassenmitte der 110 kV-Bahnstromleitung.*

schwankungen der magnetischen Feldimmissionen im Bereich von Bahnstromleitungen (Stromfrequenz 16,7 Hz) sind dagegen sehr groß, so dass bei Bahnstromleitungen durch den Einsatz eines zusätzlichen fest positionierten Magnetometers eine wesentliche Verbesserung der Messgenauigkeit erreicht werden kann. Da die Messungen zur Validierung der Simulationsberechnungen (Kap. 4) verwendet werden, ist eine möglichst hohe Genauigkeit der Messergebnisse wünschenswert.

Da die elektrischen Felder von Hochspannungsleitungen konstant sind, genügen für diese Feldart kurze Messungen über einen Zeitraum von wenigen Sekunden.

Die Immissionen durch magnetische Felder auf dem Plangebiet wurden am 8. März 2018 an 11 Messpunkten (Lageplan Abb. 6) in der Zeit von 11 Uhr bis 14 Uhr bestimmt (Messpunkte 1 bis 11). An einem weiteren Messpunkt (MP 0) wurde die magnetische Induktion während des gesamten Messzeitraumes aufgezeichnet. Die Abstände der Messpunkte beziehen sich auf die Trassenmitte der 110 kV-Bahnstromleitung. Sie wurden mit einem Bandmaß ermittelt und sind in Spalte 2 von Tabelle 1 (Seite 9) zusammengefasst.

Die Standorte der Messgeräte an den einzelnen Messpunkten sind im Anhang ab Seite 27 abgebildet. Die Höhe der Messgeräte über Grund betrug an allen Messpunkten bei beiden Feldarten 1,5 m. MP0 lag in der Trassenmitte der Bahnstromleitung hatte von Mast Nr. 3 (Abb. 9) einen Abstand von 20 m in nördlicher Richtung. Der Messpunkt 1 lag ebenfalls in der Trassenmitte der Bahnstromleitung und hatte zu Mast Nr. 3 einen nördlichen Abstand von 30 m. Von MP1 aus wurden auf eine rechtwinklig zur Trasse der Bahnstromleitung verlaufende Linie die übrigen 10 Messpunkte gelegt.

An MP0 wurde der 3D-Feldanalysator NFA30M der Firma Gigahertz-Solutions GmbH eingesetzt. Für die Messungen an den Punkten 1 - 11 wurde der 3D-Feldanalysator NFA1000 der Firma Gigahertz-Solutions GmbH verwendet. Die Messzeit der magnetischen Induktion an den variablen Messpunkten betrug entsprechend den Vorgaben der 26. BImSchV 6 Minuten. Zur Messung der elektrischen Feldstärke genügte an jedem Messpunkt eine Aufzeichnungszeit von etwa 10 Sekunden.

Beide Messgeräte können magnetische und das NFA1000 auch elektrische Wechselfelder frequenzselektiv und dreidimensional (3D) erfassen und mit einer Rate von 10 Messwertsätzen pro Sekunde aufzeichnen. Die Uhren der beiden Geräte wurden vor den Messungen synchronisiert, um die für die Normierung der Messwerte an den 11 wechselnden Messpunkten erforderlichen zu den 11 Einzelmessungen passenden Zeitabschnitte in der Langzeitmessung identifizieren zu können.

Die Frequenzselektivität der Messungen ermöglicht eine von den Netzstromfeldern (50 Hz) getrennte Erfassung der Bahnstromfelder (16,7 Hz).

Die magnetische Induktion wurde gemessen in der Einheit Nanotesla (nT). Gebräuchlich ist auch die Einheit Mikrotesla (µT). Umrechnung: 1000 nT = 1 µT

Die elektrische Feldstärke wurde gemessen in der Einheit Volt pro Meter (V/m). Gebräuchlich ist bei Hochspannungsleitungen auch die Einheit Kilovolt pro Meter (kV/m). Umrechnung: 1 kV/m = 1000 V/m

3. Messergebnisse

Im Anhang sind in Diagrammen die an den variablen Messpunkten MP1 bis MP11 sowie dem festen Messpunkt MP0 (ab Seite 31) bestimmten zeitlichen Verläufe der Intensität der magnetischen Induktion in den Frequenzbereichen des Bahnstromes (blaue Kurve, 16,7 Hz) und des Netzstromes (grüne Kurve, 50 Hz) dargestellt. Die Diagramme mit den Ergebnissen der 11 variablen Punkte sind zur besseren optischen Unterscheidbarkeit farbig hinterlegt, die Diagramme mit den Ergebnissen von MP 0 im selben Zeitabschnitt haben einen weißen Hintergrund. Die Mittelwerte aus den letzteren Diagrammen werden zur Normierung der Messwerte der magnetischen Induktion an den variablen Messpunkten in Kap. 4 benötigt, um das dort erstellte Simulationsmodell der gesamten benachbarten Hochspannungstrasse zu validieren.

In den Diagrammen ist aufgezeichnet der Induktionsverlauf im Bahnstrombereich 16,7 Hz und Netzstrombereich 50 Hz, außerdem sind tabellarisch angegeben die am jeweiligen Messpunkt im Messzeitraum bestimmten Minimal- und Maximalwerte sowie die aus allen aufgezeichneten Messwerten berechneten Mittelwerte und weitere statistische Parameter, die hier nicht von Bedeutung sind. Beim Lesen der Diagramme ist zu beachten, dass die senkrechten Achsen für eine möglichst optimale Darstellung der Kurven unterschiedlich skaliert sind. Durch ein Versehen wurden bei den Messungen an den variablen Messpunkten statt der gebräuchlichen Effektivwerte die Spitzenwerte der magnetischen Induktion aufgezeichnet. Aus den Spitzenwerten erhält man die Effektivwerte durch Division der Spitzenwerte durch die Wurzel aus 2 ($\sqrt{2} = 1{,}414$).

In Tabelle 1 sind die an allen mobilen Messpunkten bestimmten mittleren magnetischen Induktionen **B** bzw. mittleren elektrischen Feldstärken E in den Frequenzbereichen 16,7 Hz und 50 Hz zusamengefasst. Im einzelnen enthält die Tabelle folgende Parameter:

1. Spalte: Nummer des Messpunktes
2. Spalte: Abstand des Messpunktes von der Trassenmitte der 110 kV-Bahnstromleitung
3. Spalte: Anfang und Ende der Messzeit
4. Spalte: Im Messzeitraum nach Spalte 3 gemessene mittlere Induktion **B** im Frequenzbereich 16,7 Hz
5. Spalte: Im Messzeitraum nach Spalte 3 gemessene mittlere Induktion **B** im Frequenzbereich 50 Hz
6. Spalte: Vektorielle Summe der in den Frequenzbereichen 16,7 Hz und 50 Hz gemessenen mittleren Induktion
7. Spalte: Gemessene mittlere elektrische Feldstärke **E** im Frequezbereich 16,7 Hz
8. Spalte: Gemessene mittlere elektrische Feldstärke **E** im Frequezbereich 50 Hz

Zur Veranschaulichung sind die inTabelle 1 aufgelisteten Messwerte in Abb. 7 (Magnetfelder) und Abb. 8 (elektrische Felder) als Kurvendiagramme dargestellt. In jedem der beiden Diagramme zeigen die Kurvenverläufe eine auffällige Besonderheit. Im Diagramm Abb. 7 steigt am Messpunkt 11, der den größten Abstand zu den Hochspannungsleitungen hat, in beiden Frequenzbereichen die magnetische Induktion wieder an, im Frequenzbereich 50 Hz sogar besonders stark. Die den Induktionsanstieg verursachenden Feldquellen sind die Erdkabel des Niederspannungsnetzes, welche meist unter den Bürgersteigen bzw. neben der Straße verlegt sind. MP11 hat von der Straße *Auf dem Grend* einen Abstand von weniger als 10 m. Vermutlich liegen neben der Straße unter dem dort wachsenden Buschwerk ein oder mehrere Erdkabel des Niederspannungsnetzes, die hier stärkere Immissionen verursachen als die benachbarten Hochspannungsleitungen.

An Bahnstromleitungen mit Einebenengeometrie erreicht die elektrische Feldstärke nicht in der Trassenmitte unter den Leiterseilen ihr Maximum, sondern auf beiden Seiten der Trasse in etwa 10 - 15 m Abstand zur Trassenmitte. Es gibt also zwei Maxima. Im Diagramm Abb. 8 liegt das Maximum der von der Bahnstromleitung ausgehenden elektrischen Felder auf der Westseite der Trasse bei etwa 12 m Abstand zur Trasenmitte.

Der Kurvenverlauf der elektrischen Feldstärke im 50 Hz-Bereich zeigt ab 30 m trotz zunehmendem Abstand bis 50 m einen leichten Anstieg der Intensität. Dieser Befund ist kein Messfehler, sondern erklärt sich aus

1	2	3	4	5	6	7	8
MP-Nr.	**Abstand zur Trassenmitte Bahnstrom**	**Messzeit am 08.03.2018**	**B 16,7 Hz [nT]**	**B 50 Hz [nT]**	**Vektorielle Summe B16,7+B50**	**E 16,7 Hz [V/m]**	**E 50 Hz [V/m]**
MP0	0 m	11:16:30 - 14:05:45	769,3 nT	360,4 nT	**849,5 nT**	-	-
MP1	0 m	11:52:00 - 11:58:00	797,7 nT	369,6 nT	**879,2 nT**	132 V/m	96 V/m
MP2	15 m	12:07:45 - 12:13:45	587,2 nT	109,9 nT	**597,4 nT**	139 V/m	34 V/m
MP3	30 m	11:45:45 - 11:52:15	295,9 nT	50,7 nT	**300,2 nT**	44 V/m	24 V/m
MP4	50 m	11:54:53 - 12:00:42	141,2 nT	31,3 nT	**144,6 nT**	18 V/m	25 V/m
MP5	80 m	12:08:05 - 12:14:35	58,6 nT	21,9 nT	**62,6 nT**	8 V/m	19,5 V/m
MP6	110 m	12:15:25 - 12:21:55	34,5 nT	14,9 nT	**37,6 nT**	5 V/m	15 V/m
MP7	140 m	12:26:05 - 12:32:35	22,8 nT	11,4 nT	**25,5 nT**	4 V/m	11 V/m
MP8	170 m	12:34:58 - 12:41:28	17,5 nT	9,1 nT	**19,7 nT**	3 V/m	8,5 V/m
MP9	200 m	12:44:40 - 12:51:10	12,7 nT	7,4 nT	**14,7 nT**	2 V/m	6,7 V/m
MP10	230 m	12:57:00 - 13:03:30	11,5 nT	6,0 nT	**13,0 nT**	*	5,6 V/m
MP11	283 m	13:05:59 - 13:12:29	11,1 nT	23,6 nT	**30,8 nT**	*	3,4 V/m

Tabelle 1: *An allen Messpunkten gemessene mittlere magnetische Induktion **B** [nT] und mittlere elektrische Feldstärke **E** [V/m] in den Frequenzbereichen 16,7 Hz (Bahnstrom) und 50 Hz (Netzstrom) mit Messzeitraum und Abstand der Messpunkte von der Trassenmitte der Bahnstromleitung.*

** : Sehr schwache stark verrauschte Signale, die nicht ausgewertet wurden*

der abschirmenden Wirkung der Leiterseile der Bahnstromleitung gegenüber den von den weiter entfernten Netzstromleitungender ausgehenden elektrischen Feldern. Besonders die Messpunkte 2 und 3 werden durch die Leiterseile der Bahnstromleitung gegen die weit reichenden starken elektrischen Felder der hoch hängenden 380 kV-Leiterseile der Kombileitung abgeschirmt. Bei größerem Abstand nimmt die Schirmwirkung ab, und die elektrische Feldstärke steigt daher zunächst wieder an.

Der in Deutschland gültige gesetzliche und damit auch rechtlich verbindliche Grenzwert für die Immissionen durch Magnetfelder von Bahnstromanlagen (Bahntrassen und Hochspannungsleitungen für Bahnstrom), beträgt gemäß 26. Bundesimmissionsschutzverordnung (26. BImSchV) 300.000 nT (Nanotesla), für magnetische Netzstromfelder (50 Hz) beträgt der Grenzwert 100.000 nT. Die entsprechenden Grenzwerte für die elektrische Feldstärke sind 10.000 V/m (16,7 Hz) bzw. 5.000 V/m (50 Hz). Die gesetzlichen

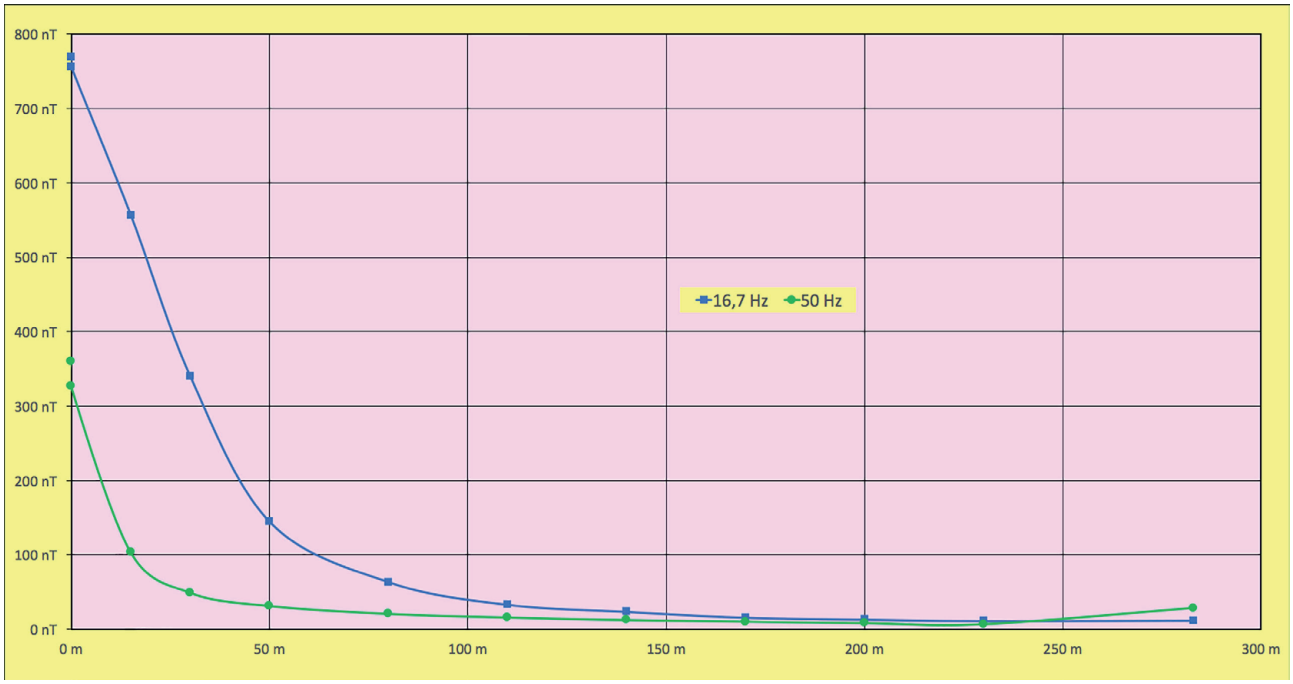


Abb. 7: *Messwerte der mittleren* ***magnetischen Induktion*** *aus Tabelle 1 für alle 11 Messpunkte über dem Abstand der Messpunkte zur Trassenmitte in den Frequenzbereichen 16,7 Hz (blau) und 50 Hz (grün).*

Grenzwerte werden mit sehr großem Abstand eingehalten. In den Kapiteln 5, 6 und 7 wird jedoch gezeigt, dass es sinnvoll ist, die elektromagnetischen Immissionen in Wohnungen nach wesentlich strengeren Vorsorgerichtwerten zu beurteilen.

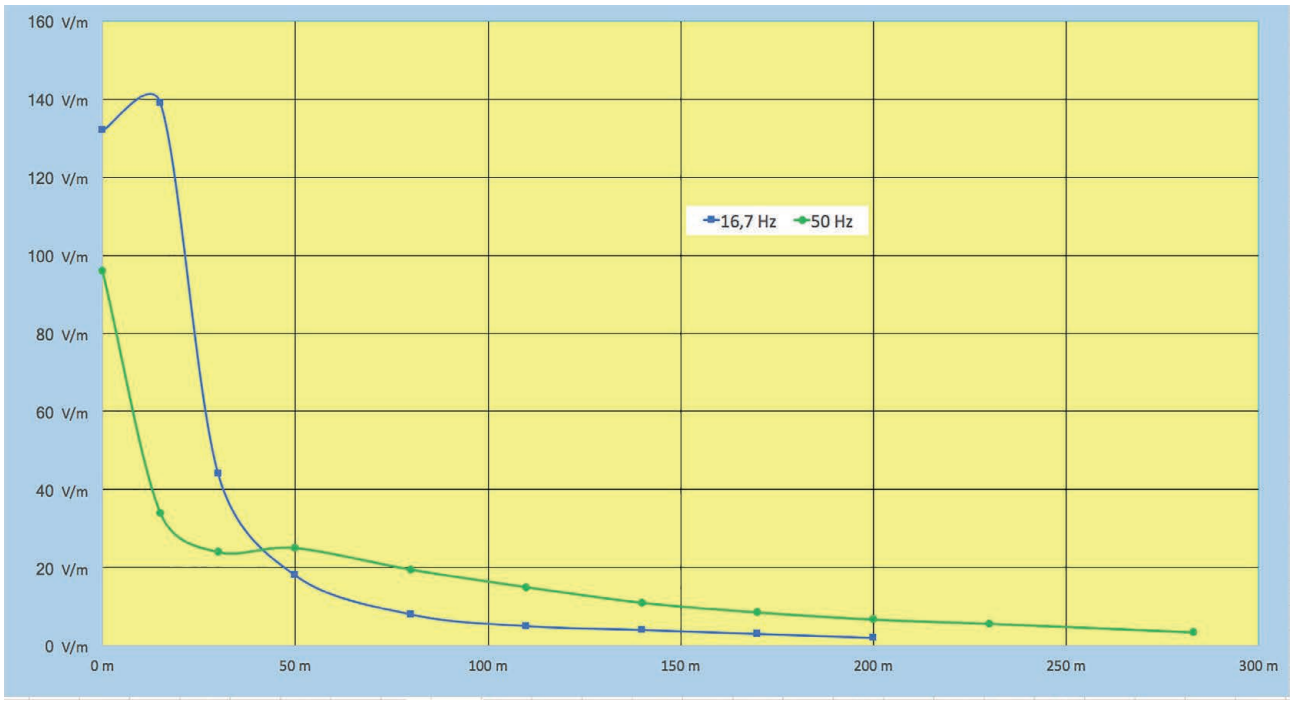


Abb. 8: *Messwerte der mittleren* ***elektrischen Felstärke*** *aus Tabelle 1 für alle Messpunkte 11 über dem Abstand der Messpunkte zur Trassenmitte in den Frequenzbereichen 16,7 Hz (blau, nur 9 MP) und 50 Hz (grün).*

4. Simulationsberechnungen der magnetischen Induktion

Die Immissionen durch Magnetfelder im Bereich von Hochspannungsleitungen sind abhängig von der in den Leiterseilen fließenden elektrischen Stromstärke (Ampère). Die Stromstärke und somit auch die Immissionen durch Magnetfelder schwanken mit dem entsprechend den ständig wechselnden Anforderungen elektrischer Leistung. Eine Messung der magnetischen Induktion an einer Hochspannungstrasse liefert daher nur eine Momentaufnahme, deren Ergebnisse unter Umständen deutlich von den für die Beurteilung der Immissionen maßgeblichen Jahresmittelwerten abweichen können.

Die Voraussage der in Durchschnitt zu erwartenden Immissionen im Bereich einer Hochspannungstrasse kann durch Simulationsberechnungen erheblich verbessert werden. Für diese Berechnungen wurden Computerprogramme entwickelt, welche bei Kenntnis der Trassengeometrie (räumliche Anordnug der Leiterseile und Phasenanordnung) in Abhängigkeit von der Stromstärke eine genaue Berechnung der Immissionen durch Magnetfelder ermöglichen.

Wegen der Intensitätsschwankungen der Magnetfelder im Bereich von Hochspannungstrassen ist es manchmal nicht möglich, aus den Messwerte eine ausreichend korrekte Intensitäts-Abstandskurve (Abb. 7) zu erstellen, weil sich je nach momentanem Stromfluss bei kleineren Abständen schwächere Immissionen ergeben können als bei größeren Abständen. Dieses Problem tritt wegen der in der Regel größeren Intensitätsschwankungen besoders bei 110 KV-Bahnstromleitungen auf. Um die einzelnen Messwerte miteinander vergleichbar zu machen, müssen sie daher auf einen Bezugswert normiert werden. Als Bezugswert wurde der an MP 0 während des gesamten Messzeitraumes der mobilen Messpunkte ermitelte Durchschnittswert verwendet (769,3 nT bei 16,7 Hz und 360,4 nT bei 50 Hz). Der Normierungsfaktor, mit dem multipliziert die Mittelwerte der variablen Messpunkte die normierten Mittelwerte ergeben, ist der Quotient aus dem Durchschnittswert 769,3 nT (16,7 Hz) bzw. 360,4 nT (50 Hz) und dem an MP 0 im jeweiligen Messzeitraum eines mobilen Messpunktes bestimmten Mittelwert der magnetischen Induktion im selben Frequenzbereich. Auf diese Weise wird die jeweilige momentane Auslastung der Trasse berücksichtigt und man erhält Werte, die einem konstanten Stromfluss in den Leiterseilen der Hochspannungseitungen entsprechen.

Zur Berechnung der Immissionen durch magnetische Felder im Bereich des Plangebietes wurde das Programm WinField V4.03 der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie (FGEU) verwendet. Die Geometrie der benachbarten Hochspannungstrasse wurde in ihrem Verlauf über ca. 1250 m Länge nachgebildet und in das Programm WinField eingegeben. Abb. 9 zeigt den simulierten Trassenverlauf mit den 15 nummerierten Masten. Der Standort des Masten 1 der Bahnstromleitung wurde für die Simulation als Koordinate Y = 0 m gesetzt, die Trassenmitte der Bahnstromleitung als Koordinate X = 0 m gesetzt. Die Höhe über Grund entspricht der Koordinate Z. Die geometrischen Koordinaten der Leiterseile wurden nach Standard-Mastgeometrien für die Berechnungen erforderliche Parameter wurden für das Programm WinField in eine Tabelle eingetragen, die im Anhang auf den Seiten 43 bis 45 abgebildet ist.

Zur Valdierung der Simulationsberechnungen wurden die normierten Ergebnisse der Messungen der magnetischen Induktion nach Tabelle 1 verwendet. Die Höhe der von einer Hochspannungsleitung verursachten magnetischen Feldimmissionen hängt außer von der in den Leiterseilen fließenden Stromstärke auch davon ab, welche Phasenanordnung die einzelnen Leiterseile haben. Die drei Phasen des Drehstromsystems einer normalen Hochspannungsleitung haben die Phasenwinkel 0°, 120° und 240°. Bahnstromleitung sind nur zweiphasig mit den Phasenwinkeln 0° und 180°. Durch Vergleiche der Messdaten mit den simulierten Daten und Variation der Phasenanordnung kann die aktuelle Phasenanordnung experimentell bestimmt werden. Abb. 10 zeigt die so ermittelte Phasenanordnung aller Leiterseile der Trasse.

Die Bestimmung der Phasenanordnung ergab bei der großen 110/220/380 kV-Kombileitung Abweichungen von der üblichen Standardanordnung. Die Phasenanordnungen der Bahnstromleitung und der 220 kV-Leitung dagegen entsprechen dem Standard. Eine Abweichung von der Standardanordnung ist stets mit einem zusätzlichen Konstruktionsaufwand verbunden. Die vorliegende Phasenan-

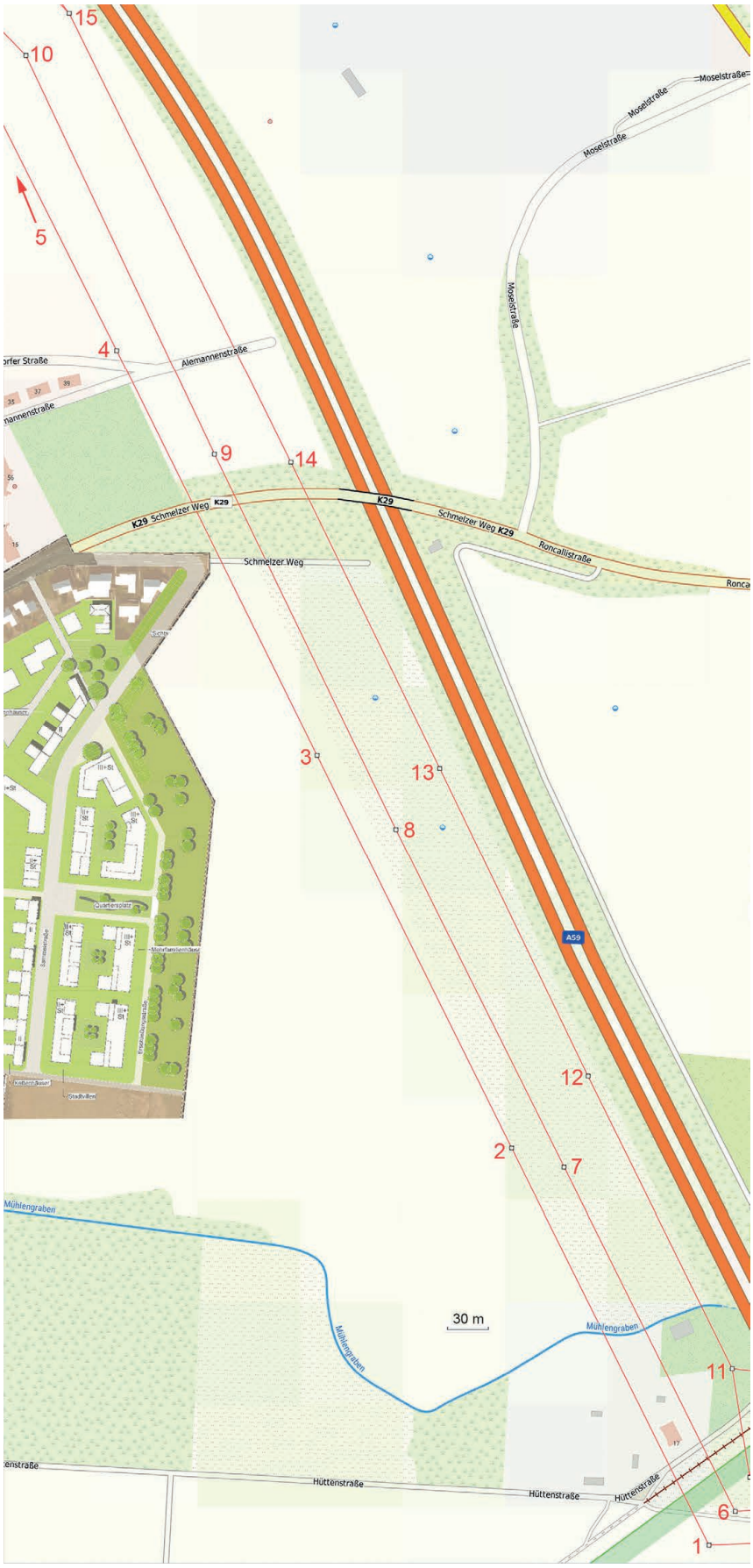


Abb. 9: *Der für die Simulations-berechnungen verwendete Teil der Hochspannungstrasse mit nummerierten Masten. Mast 5 der Bahnstromleitung liegt außerhalb des dargestellten Abschnitts.*

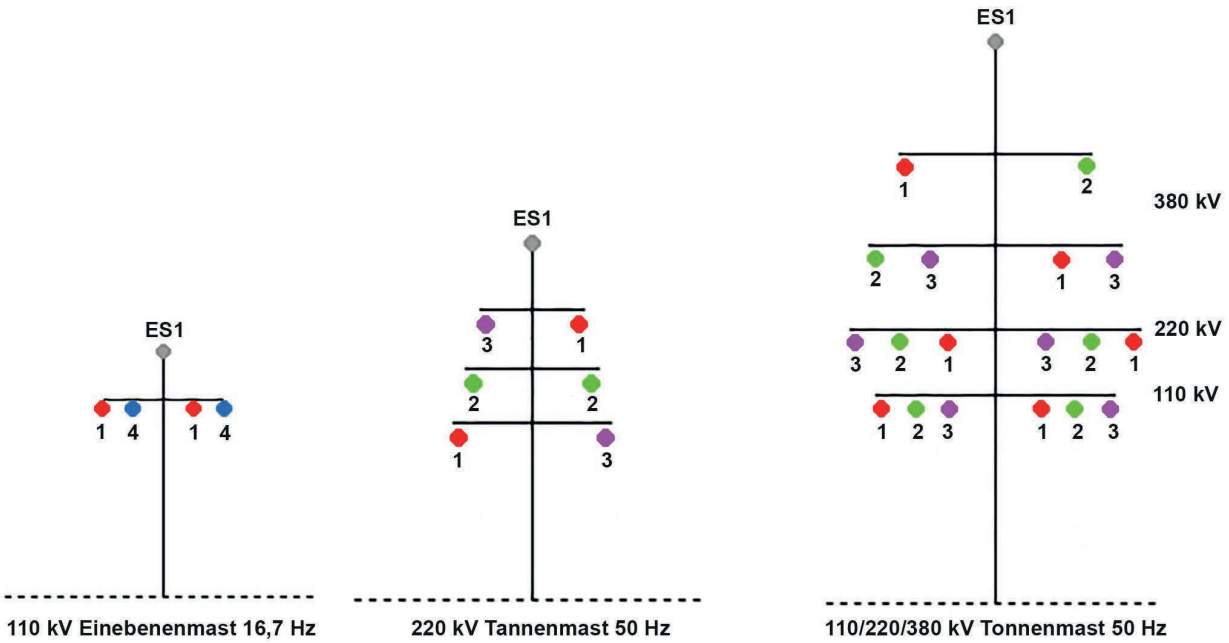


Abb. 10: *Phasenanordnung der Hochspannungstrasse im Bereich des Plangebietes. ES: Erdseil*
Die Phasenwinkel sind: 1 (rot): 0°, 2 (grün): 120 °, 3 (violett): 240°, 4 (blau): 180°

ordnung führt im Vergleich zur Standardanordnung niedrigeren Immissionen durch Magnetfelder auf dem Plangebiet.

Die Güte des für die Simulationsberechnungen erstellten Modells der Hochspannungstrasse wurde durch Vergleich der für 16,7 Hz und 50 Hz berechneten Verläufe der magnetischen Induktion mit den gemessenen Werten überprüft. In den Diagrammen Abb. 11 und 12 sind die berechneten Verläufe als

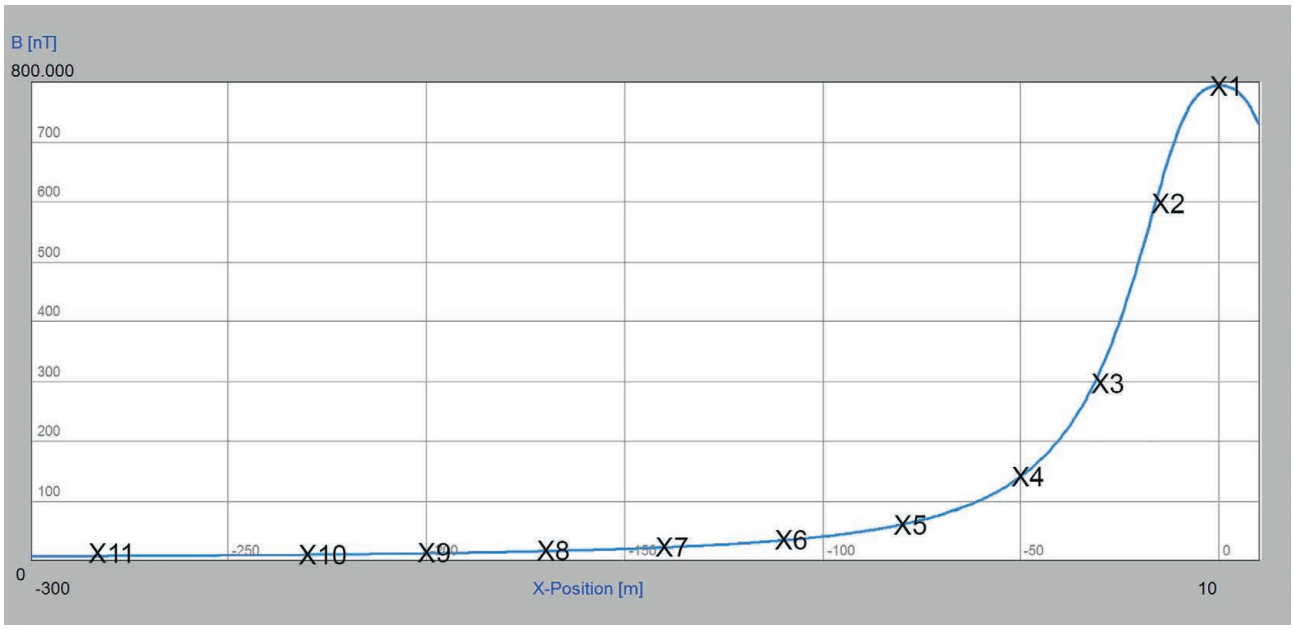


Abb. 11: *Simulierter Verlauf der magnetischen Induktion **B** im Frequenzbereich **16,7 Hz** von der Mitte der Bahnstromtrasse (X = 0 m) bis zu einem Abstand von 300 m in Z = 1,5 m Höhe mit den an MP1 - MP11 im Frequenzbereich des Bahnstroms gemessenen normierten Werten*

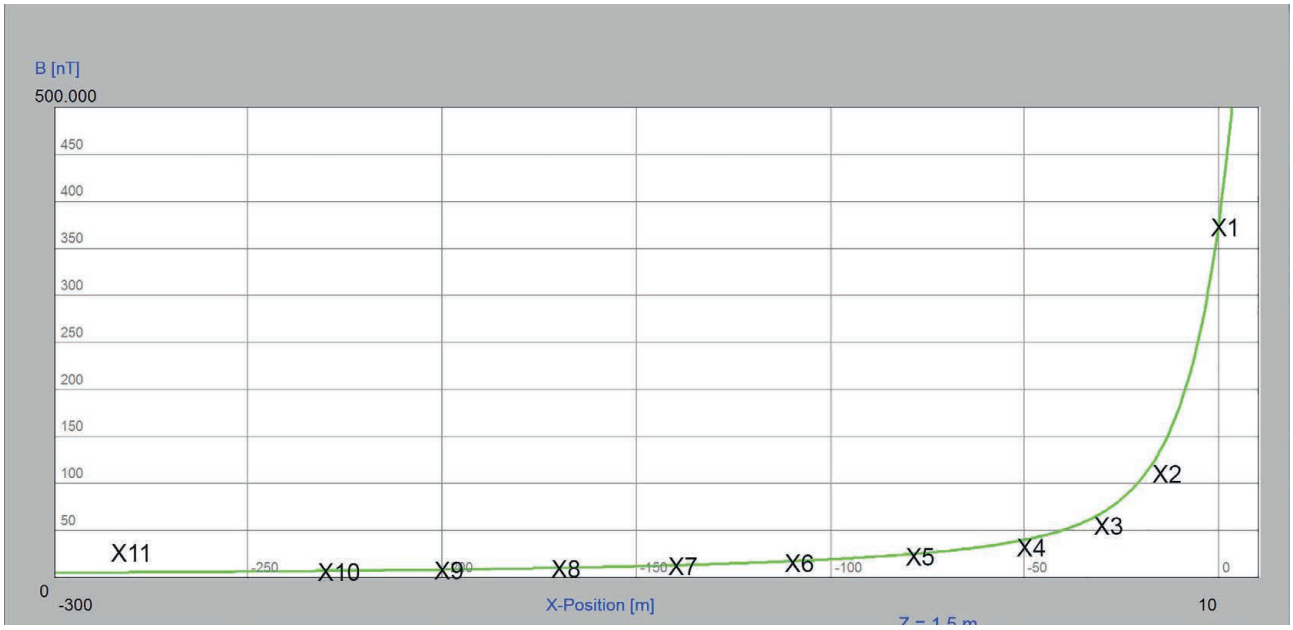


Abb. 12: *Simulierter Verlauf der magnetischen Induktion* ***B*** *im Frequenzbereich* ***50 Hz*** *von der Mitte der Bahnstromtrasse (X = 0 m) bis zu einem Abstand von 300 m in Z = 1,5 m Höhe mit den an MP1 - MP11 im Frequenzbereich des Netzstroms gemessenen normierten Werten*

durchgehende Kurven dargestellt und die Daten der Messergebnisse an den 11 Messpunkten als Kreuze eingetragen. Für beide Frequenzbereiche ergibt sich mit einer Ausnahme (MP11/50 Hz) eine gute Überseinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Werten. An MP11 war trotz des größten Abstandes dieses Punktes zur Hochspannungstrasse die gemessene magnetische Induktion im Frequenzbereich 50 Hz stärker als an den wesentlich näher zur Trasse gelegenen Messpunkten 5 - 10. Wie schon auf Seite 8 bemerkt, hatte MP11 nur wenige Meter Abstand zur Straße *Auf dem Grend*, so dass sich hier

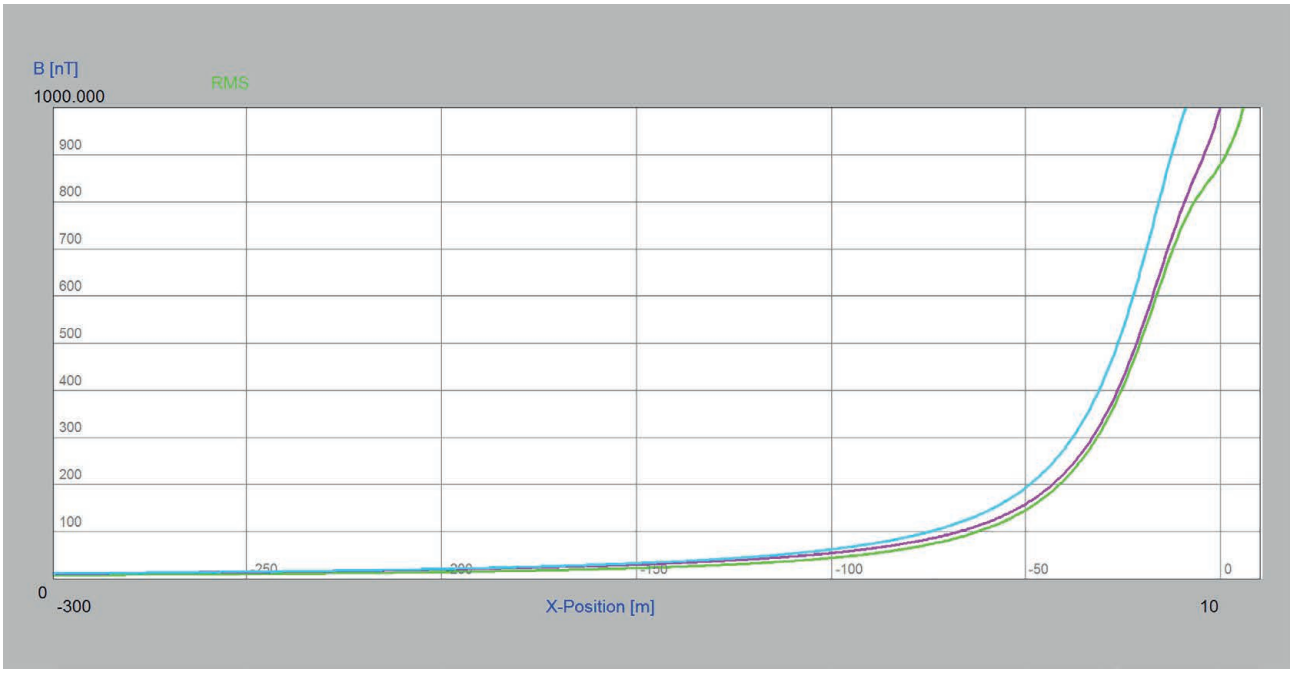


Abb. 13: *X-Diagramm des Verlaufs der magnetischen Induktion von der Trassenmitte der Bahnstromleitung (X = 0) bis 300 m Abstand. Grüne Kurve: Bahnstromleitung 75 %, Netzstromleitungen 25 - 30 % Auslastung. Violett: Bahnstrom 75 %, Netzstrom 50 %; Blau: Bahnstrom 100 %, Netzstrom 50 %*

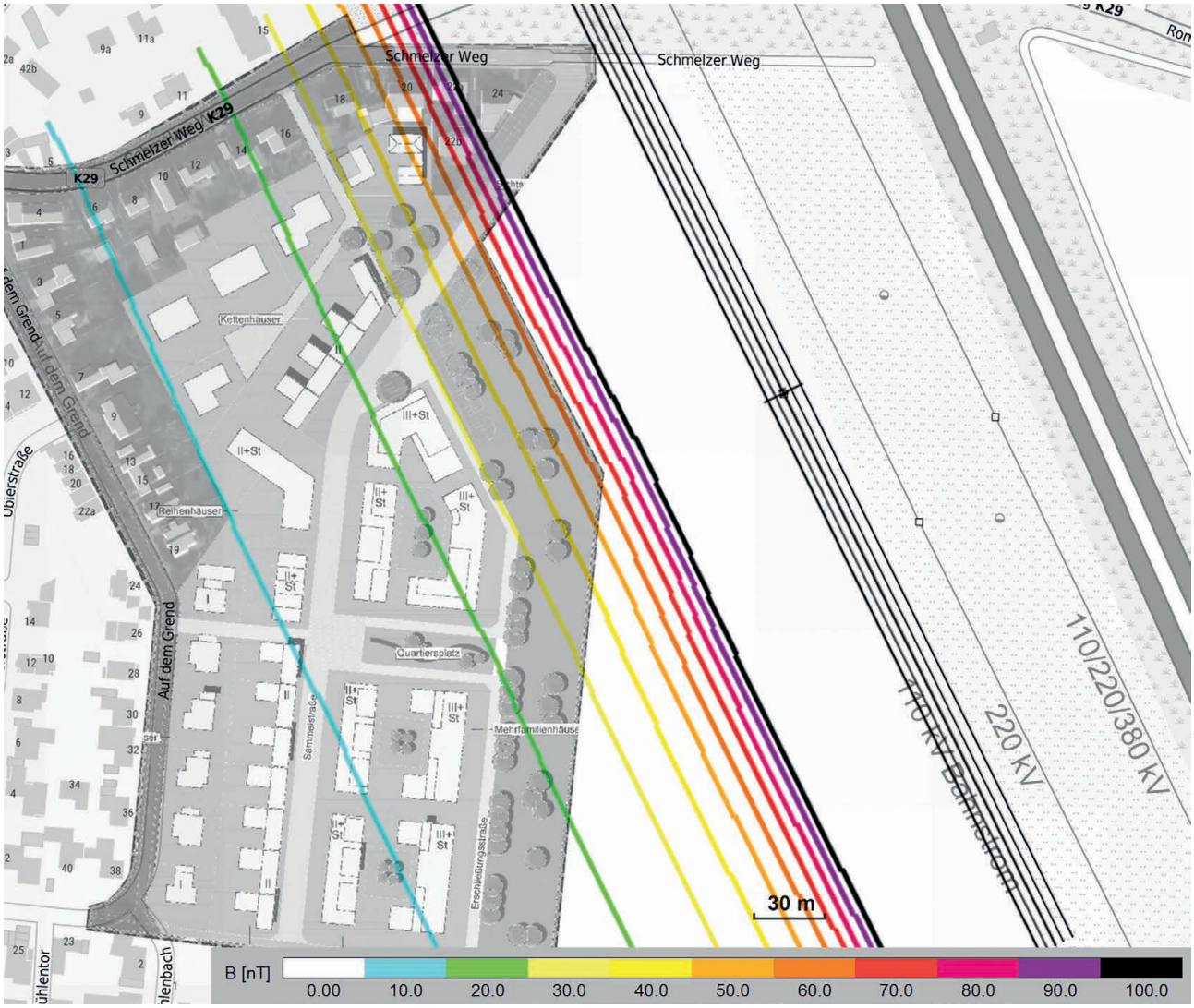


Abb. 14: *Iso-Linien der durchschnittlich zu erwartenden magnetischen Induktion 1,5 m über dem Plangebiet*

bereits die Immissionen durch Magnetfelder bemerkbar machten, die von den entlang der Straße verlegten Niederspannungserdkabeln ausgingen.

Aufgrund der Simulationsberechnungen kann abgeschätzt werden, dass die beiden Netzstromleitungen zum Zeitpunkt der Messungen zu 25 - 30 % ausgelastet waren. Dies entspricht im Jahresmittel einem üblichen Durchschnittswert. Die Bahnstromleitung hatte zum Zeitpunkt der Messung einen überraschend hohen mittleren Auslastungsgrad von etwa 75 %.

Die Ergebnisse der Simulationsberechnungen werden in Diagrammen dargestellt, in denen die Intensitätsverteilung der magnetischen Induktion auf dem Plangebiet durch farbige Iso-Linien (Iso-Diagramme, Abb. 14) und Farbverläufe (2D-Diagramme, Abb. 15) sowie durch X-Diagramme (Abb. 13) dargestellt ist. In der Iso-Darstellung sind Grenzen auf dem Plangebiet, an denen bestimmte Immissionswerte über- oder unterschritten werden, besonders gut erkennbar. Das X-Diagramm erlaubt innerhalb des dargestellten Bereichs an beliebiger Stelle das genauere Ablesen von Werten.

Abb. 13 zeigt den Verlauf der mittleren magnetischen Induktion auf dem Plangebiet quer zur Trassenrichtung bei verschiedenen Auslastungen der benachbarten Hochspannungsleitungen. Der Abstand des Plangebietes zur Trassenmitte der Bahnstromleitung beträgt 100 m und mehr. Der für Wohnungen von Kindern empfohlene Vorsorgerichtwert 100 nT wird selbst bei erheblich höherer Last der Hochspannungsleitungen noch weit

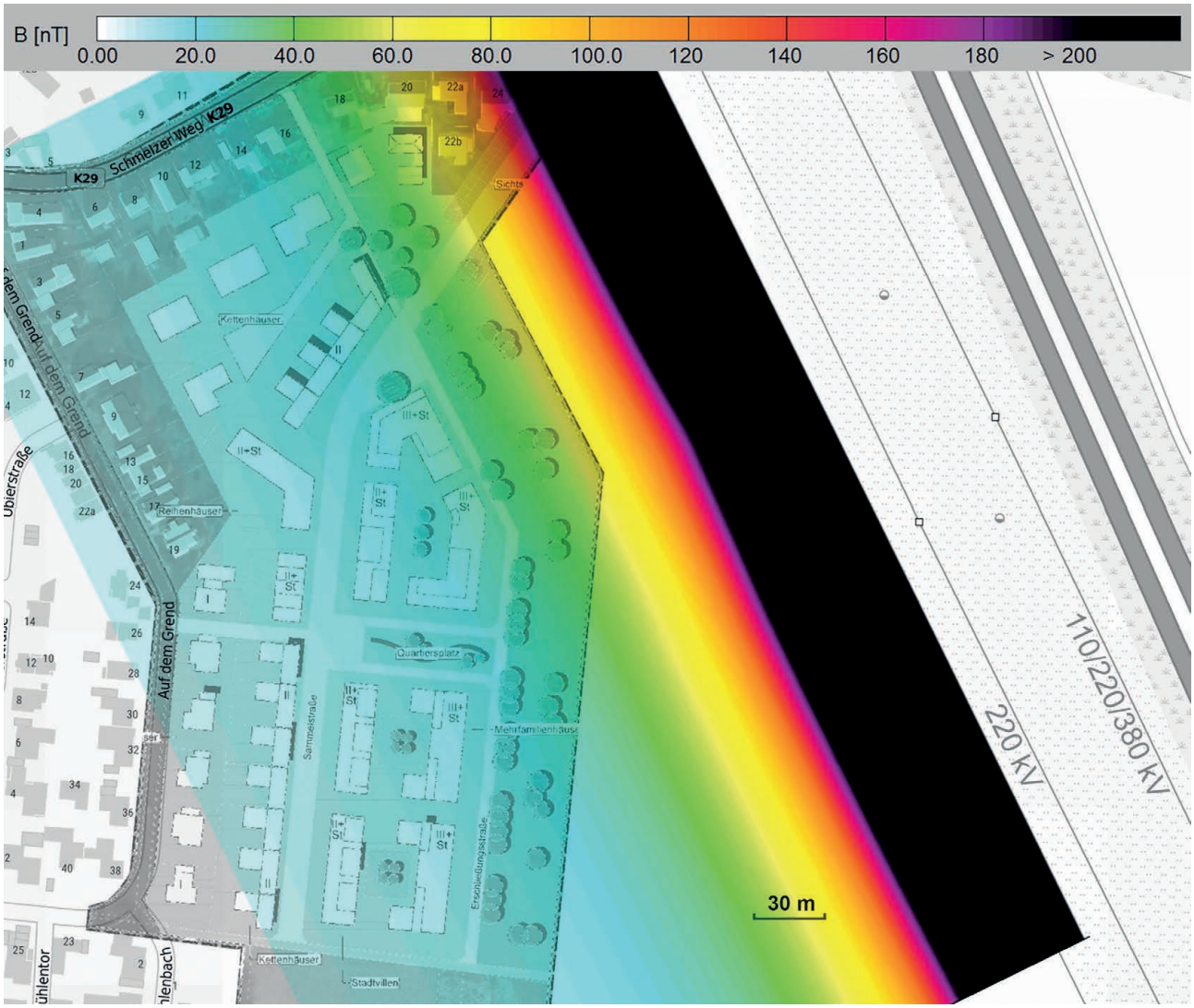


Abb. 15: *2D-Verlaufsdiagramm der magnetischen Induktion auf dem Plangebiet bei mittlerer Stromlast der Netzstromleitungen (Auslastung 25 - 30 %) und 75 % Auslastung der Bahnstromleitung*

unterschritten. Man erkennt, dass es auf dem Plangebiet selbst bei erheblichem Anstieg der Stromlast nur zu einem geringen Anstieg der Immissionen durch Magnetfelder kommt.

Das Iso-Diagramm (Abb. 14) und das 2D-Diagramm oben stellen die Ausbreitung des Magnetfeldes auf dem Plangebiet bei durchschnittlicher Stromlast der Netzstromleitungen und bei 75 %iger Stromlast der Bahnstromleitung dar. Alle Diagramme wurden für eine Höhe von 1,5 m über Grund berechnet. Wegen des relativ großen Abstandes des Plangebietes von den Leitungen sind die Immissionen dort annähernd unabhängig von der Höhe des Immissionsortes. Daher sind Berechnungen für andere Höhen nicht notwendig. Nur bei geringem Abstand von kritischen Immissionsorten zu den Leitungen ist es erforderlich, Simulationsberechnungen auch für größere Höhen bis zur Maximalhöhe von Immissionsorten zu erstellen.

5. Physikalische Wirkungen elektrischer und magnetischer Wechselfelder im Körper

Elektrische Bahntrassen erzeugen durch ihren Betrieb elektrische und magnetische Wechselfelder. Elektrische Felder werden durch jede Materie in ihrer Ausbreitung beeinflusst und werden von Gebäudehüllen weitestgehend zurückgehalten. Magnetfelder dagegen durchdringen ungehindert fast jede Materie und können nur mit sehr teuren Speziallegierungen (Mu-Metall) teilweise abgeschirmt werden. Trafostationen und andere kleinräumige magnetische Feldquellen können mit Mu-Metallfolien abgeschirmt werden. Bei Bahntrassen ist dies nicht nur wegen der exorbitanten Kosten, sondern auch aus praktischen Gründen völlig unmöglich.

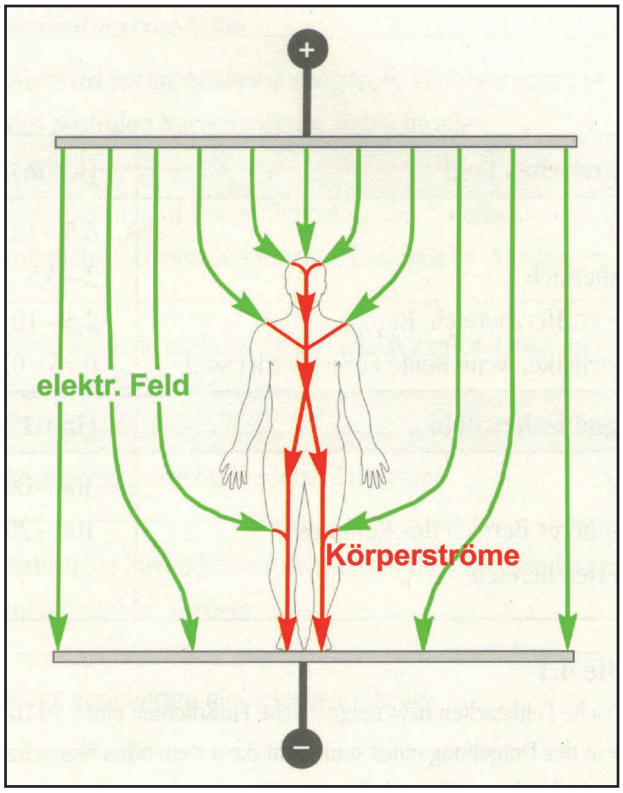


Abb. 16: *Der* ***Influenzeffekt*** *eines elektrischen Wechselfeldes erzeugt im Körper elektrische* ***Verschiebeströme****.*

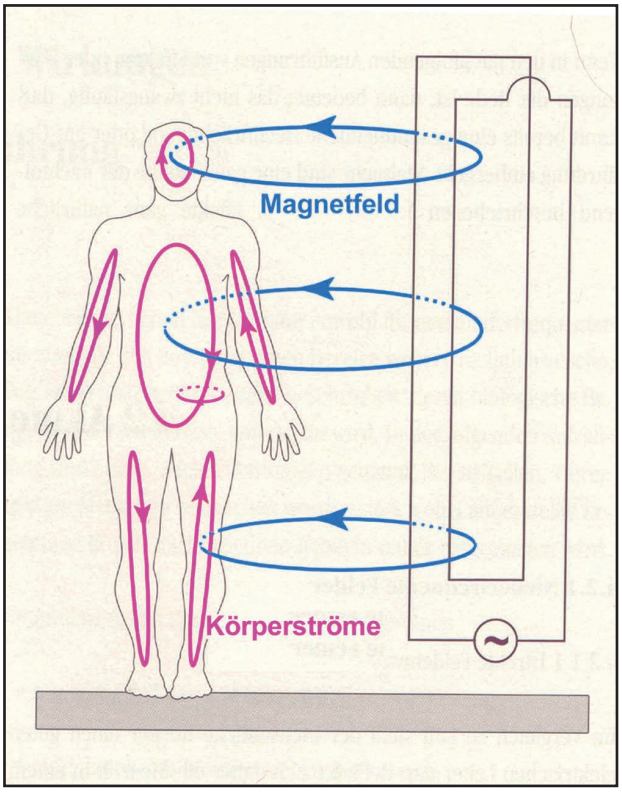


Abb. 17: *Der* ***Induktionseffekt*** *eines magnetischen Wechselfeldes erzeugt im Körper elektrische* ***Wirbelströme****.*

Elektrische Wechselfelder dringen in den menschlichen Körper nicht ein, erzeugen aber an seiner Oberfläche durch den Influenzeffekt elektrische Potentialdifferenzen, die sich im Inneren des Körpers über Körperströme ausgleichen (Abb. 16). Das Maß für die Belastung durch Körperströme ist die Körperstromdichte, meist angegeben in mA/m^2 (Milliampère pro Quadratmeter). Außer den Körperströmen sind weitere physikalische Effekte im Körper durch elektrische Felder nicht bekannt.

Da magnetische Felder in den Körper eindringen, ist die Zahl der möglichen physikalischen Effekte größer als bei den elektrischen Feldern. Vier physikalische Effekte von Magnetfeldern im Körper sind denkbar:

1. Körperströme durch den Induktionseffekt (in ruhenden Körpern nur bei Wechselfeldern, Abb. 17)
2. Ablenkung bewegter Ladungsträger (z.B. Ablenkung von Ionen im strömenden Blut)
3. magnetische Polarisation
4. Kraftwirkungen auf magnetisierbare Materie

Die Effekte 1 und 2 sind miteinander verwandt, beide beruhen auf der Lorentz-Kraft. Effekt 2 führt im Bereich strömender Flüssigkeiten im Körper ebenfalls zu Körperströmen. Die Effekte 2 - 4 sind auch bei statischen Magnetfeldern (z.B. Erdmagnetfeld) zu beobachten.

Im Körper treten vor allem die ersten beiden Effekte auf. Der Induktionseffekt führt ähnlich wie der Influenzeffekt bei elektrischen Wechselfeldern zu Körperströmen (Abb. 17), die induzierten Ströme fließen aber im Gegensatz zu den Strömen der elektrischen Felder im Inneren des Körpers im Kreis (Wirbelströme), daher sind bei Exposition durch magnetische Wechselfelder außerhalb des Körpers keine elektrischen Potentiale messbar. Das Maß für die Belastung durch die induzierten Körperströme ist wie bei den elektrischen Feldern die Körperstromdichte. Die magnetische Polarisation (Ausrichtung von Atomkernen und Molekülen) dürfte bei Magnetfeldern von Hochspannungsleitungen keine Rolle spielen, da dieser Effekt nur bei wesentlich stärkeren Feldern zu beobachten ist und erst bei millionenfach stärkeren Feldern technisch nutzbar wird (z.B. bei der Kernspintomografie). Extrem schwache Kraftwirkungen von Magnetfeldern auf paramagne-tische Substanzen im Körper sind möglich, erscheinen aber wegen ihrer außerordentlich geringen Größe vernachlässigbar. Ob der menschliche Körper auch ferromagnetische Substanzen enthält, bei denen mit stärkeren Kraftwirkungen zu rechnen wäre (Effekt 4), ist nicht bekannt. Tauben und andere Tiere nutzen ferromagnetische Magnetitkristalle in ihrem Gehirn zur Orientierung im Erdmagnetfeld.

Fazit: Von den vier bekannten physikalischen Effekten magnetischer Felder kann wahrscheinlich nur der Induktionseffekt (Effekt 1) bei Feldintensitäten unterhalb der Grenzwerte zu biologisch relevanten Wirkungen führen. Damit wird die Wirkung magnetischer Felder auf den menschlichen Organismus im Intensitätsbereich unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte vergleichbar mit der Wirkung elektrischer Felder. Im Sinne einer worst-case Betrachtung sollte davon ausgegangen werden, dass sich die von beiden Feldarten erzeugten Körperströme addieren, womit sie sich in ihrer Wirkung also gegenseitig verstärken.

Die durch ein Magnetfeld von 100.000 nT (Grenzwert 26. BImSchV) bei einer Frequenz von 50 - 60 Hz induzierte maximale Körperstromdichte beträgt etwa 1 - 2 mA/m^2. Magnetfelder mit der Bahnstromfrequenz 16,7 Hz erreichen diese Körperstromdichte erst bei 300.000 nT. Die gleiche maximale Stromdichte wird bei 50 - 60 Hz durch eine elektrische Feldstärke von 5.000 V/m (Bahnstrom 15.000 V/m) erwartet. Es besteht also bezüglich der erzeugten Körperstromdichten zwischen elektrischen und magnetischen Wechselfeldern unabhängig von der Frequenz die folgende Äquivalenz:

1000 nT entsprechen 50 V/m oder: **1 V/m entspricht 20 nT**

Bei den elektrischen Feldern treten neben der oben beschriebenen direkten Feldwirkung durch Körperströme aufgrund des Influenzeffektes auch indirekte Wirkungen auf, die ebenfalls zu Körperströmen führen können: Elektrisch isolierte Gebilde werden durch den Influenzeffekt im elektrischen Feld aufgeladen. Wenn das Gebilde aus Metall, genügend groß und gegen die Erde elektrisch isoliert ist (z.B. ein großes Fahrzeug auf Gummireifen) sowie das Feld genügend stark ist, fließen bei Berührung des blanken Metalls spürbare Ströme (besonders unter 380 kV-Höchstspannungsleitungen), die im Extremfall sogar lebensgefährlich sein können (Abb. 18).

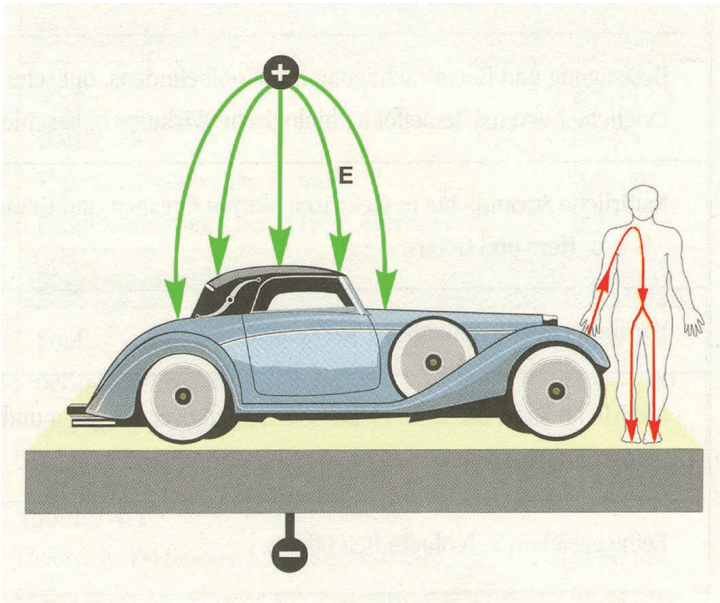


Abb. 18: *Indirekte Wirkung eines elektrischen Feldes*

6. Biologische und gesundheitliche Wirkungen elektrischer und magnetischer Wechselfelder

Wegen der weltweiten Seltenheit von elektrischen und magnetischen Wechselfeldern mit der Bahnstromfrequenz 16,7 Hz gibt es kaum Untersuchungen zu gesundheitlichen Auswirkungen durch die Exposition mit diesen Feldern. Die folgenden Ausführungen basieren daher auf Studien zu Wechselfeldern mit den international üblichen Stromfrequenzen 50 Hz und 60 Hz.

Als wissenschaftlich bewiesen gelten lediglich die akuten Wirkungen elektrischer und magnetischer Wechselfelder auf Grund der induzierten Körperstromdichten. Sie treten erst auf, wenn die gesetzlichen Grenzwerte (siehe Kap. 7.) erheblich überschritten werden. Diese Wirkungen bestehen vor allem in Nervenreizungen, die sich z.B. als Magnetophosphene (optische Sinneseindrücke, ab ca. 1.000 µT) und Muskelzuckungen (ab ca. 10.000 µT / 10.000.000 nT bzw. 500.000 V/m) äußern können. Bei sehr großen Feldstärken besteht durch die Wirkung auf den Herzmuskel akute Lebensgefahr (ab ca. 100.000 µT / 100.000.000 nT bzw. 5.000.000 V/m).

Unterhalb der Grenzwerte sind beim gesunden Menschen akute Feldwirkungen ausgeschlossen. Träger medizinischer Implantate können dagegen auch unterhalb der Grenzwerte beeinträchtigt werden. Experimenell bestätigt wurden Störungen von älteren Herzschrittmachern ab 1.000 V/m (elektrisches Feld) bzw. 20 µT / 20.000 nT (Magnetfeld). Bis heute wurde aber nur ein einziger Fall dokumentiert, bei dem ein Patient durch eine Störung seines Schrittmachers ums Leben gekommen ist, wobei allerdings die Dunkelziffer hoch sein kann. Magnetische Feldintensitäten über den Grenzwerten können bei Diebstahlsicherungssystemen in Kaufhäusern auftreten, hier wurden maximale Induktionen von 100 bis 1.000 µT festgestellt. Solche Sicherungssysteme sollten von Implantatträgern möglichst schnell durchschritten werden. Für Herzschrittmacher gefährliche Felder können auch von elektrischen Rasierapparaten (bis 1.500 µT / 1.500.000 nT auf der Haut), Bohrmaschinen (30 - 2.000 µT) und elektrischen Heizdecken (bis 7.000 V/m unmittelbar am Körper) ausgehen.

Als Belege für ein erhöhtes Leukämierisiko von Kindern bei magnetischen Dauerbelastungen über 0,2 µT - 0,4 µT/200 nT - 400 nT existieren zahlreiche epidemiologische Hinweise. Der Verdacht besteht schon seit mehr

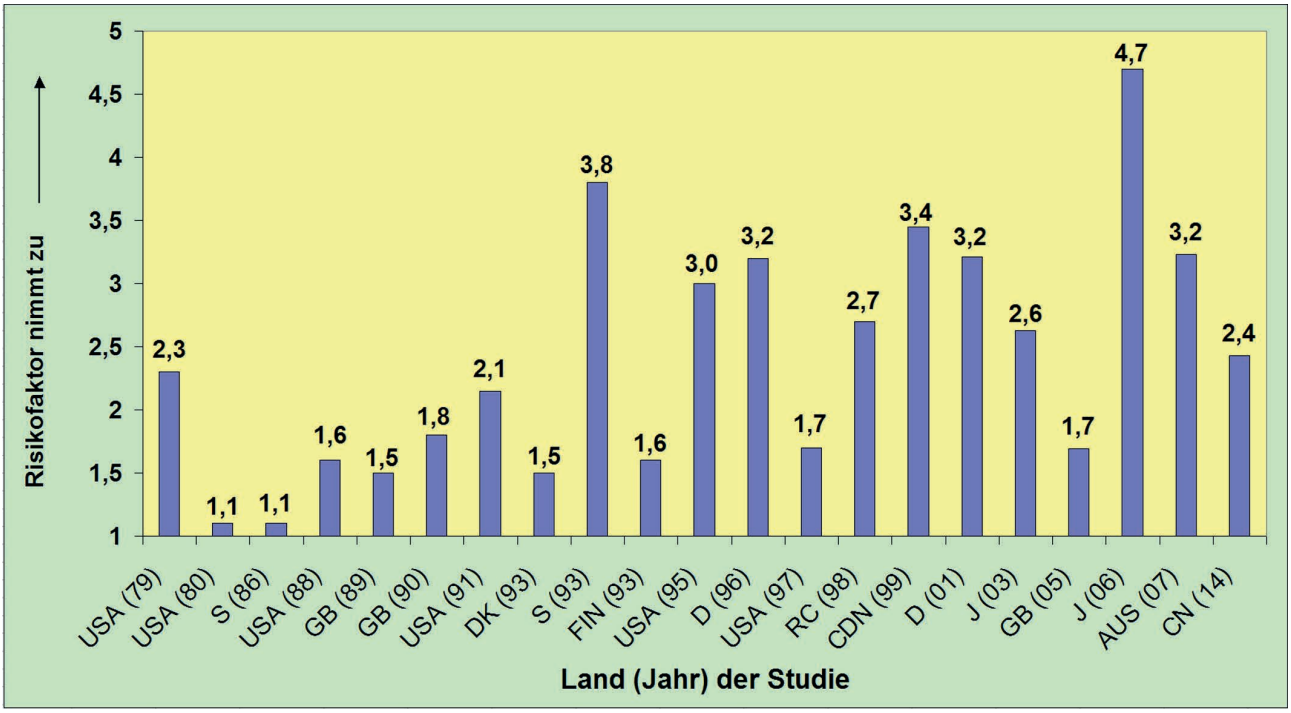


Abb. 19: *Leukämierisiken für Kinder durch 50 Hz/60 Hz-Magnetfelder oberhalb 200 - 400 nT im Wohnbereich.*

als 30 Jahren und wird durch zahlreiche internationale epidemiologische Studien gestützt, konnte aber nicht mit Gewissheit bestätigt werden, weil bisher ein möglicher Wirkungsmechanismus unbekannt ist. Die gefundenen Risikofaktoren für Kinderleukämie liegen je nach Studie (Abb. 19) zwischen 1,1 und mehr als 4. Das Erkrankungsrisiko war für magnetisch exponiert lebende Kinder also annähernd nicht erhöht (Risikofaktor = 1,1) oder bis mehr als vierfach (höchster Risikofaktor 4,7) erhöht. Bei den neueren Studien mit besserer Expositionsbestimmung wurden zunehmend höhere Risiken gefunden als in den älteren Studien vor 1990.

Einige weitere aktuelle epidemiologische Studien zum Leukämierisiko von Kindern aus den letzten Jahren mit zum Teil höheren gefundenen Risikofaktoren finden sich auf dem EMF-Portal der TH-Aachen unter den folgenden Links. Meist findet man eine Zusammenfassung der Studienergebnisse auf Deutsch.

http://www.emf-portal.de/viewer.php?aid=13427&l=g (Japan 2006. Um den Faktor 4,7 erhöhtes Risiko für akute lymphatische Leukämie bei Expositionen von Kindern über 0,4 µT / 400 nT im Wohnbereich)

http://www.emf-portal.de/viewer.php?aid=14787&l=g (Australien 2007. Längeres Wohnen in der Nähe von Hochspannungsfreileitungen führt bei Kindern zu einem erhöhten Erkrankungsrisiko für einige Arten von Leukämien und Lymphomen)

http://www.emf-portal.de/viewer.php?aid=19148&l=g (Iran 2010. Um den Faktor 10,78 erhöhtes Leukämierisiko für Kinder bei Wohnen mit geringem Abstand zu 230 kV-Hochspannungsleitungen)

http://www.emf-portal.de/viewer.php?aid=18655&l=g (Großbritannien 2010. Bei Kindern, die nahe an Hochspannungsleitungen leben, Anstieg der Leukämierisikos)

http://www.emf-portal.de/viewer.php?aid=22049&l=g (Frankreich 2013. Erhöhtes Leukämierisiko für Kinder, die näher als 50 m zu einer 250 – 400 kV-Hochspannungsleitung wohnen)

http://www.emf-portal.de/viewer.php?aid=24082&l=g (VR China 2014. Erhöhtes Leukämierisiko, wenn Kinder im Wohnbereich Magnetfeldern über 0,3 µT / 300 nT ausgesetzt waren)

Für das Leukämierisiko durch Magnetfeldexposition von Erwachsenen liegen widersprüchliche Ergebnisse vor, die auf eine geringere Empfindlichkeit im Vergleich zu Kindern hindeuten. Die Inkonsistenz der Forschungsergebnisse bei Erwachsenen kann aber auch damit zusammenhängen, dass sich die Expositionsbedingungen von Erwachsenen wegen deren vergleichsweise größerer Mobilität weniger genau bestimmen lassen als bei kleineren Kindern.

Für langzeitige Magnetfeldbelastungen ab 1 µT / 1.000 nT gibt es Hinweise auf einen Zusammenhang mit Alzheimer Erkrankungen, amyotrophischer Lateralsklerose (ALS) und der Häufigkeit von Herzinfarkten. Oberhalb von 10 µT / 10.000 nT wurden Wirkungen auf das Hormonsystem (Melatonin) festgestellt. Für langzeitige Magnetfeldexpositionen über 1 µT / 1.000 nT liegen Hinweise auf ein erhöhtes Hirntumorrisiko vor.

Vermutlich ist die Kombination von elektrischen und magnetischen Feldern biologisch wirksamer als reine Magnetfelder. Diese Annahme wird durch eine große kanadische Studie gestützt, bei der die kombinierte elektrische und magnetische Belastung von mehr als 31.000 Beschäftigten eines Stromversorgungsunternehmens (Ontario Hydro) bei der Auswertung von Erkrankungsdaten berücksichtigt wurde. Dabei ergab sich für die nur magnetisch exponierte Gruppe (Exposition >7 µT) ein 1,6-fach erhöhtes Leukämierisiko, für die nur elektrisch exponierte Gruppe (Exposition >345 V/m) ein 4,4-faches und für die kombiniert belastete Gruppe (magnetisch über 7 µT und elektrisch über 345 V/m) ein 11-faches Leukämierisiko. Das Risiko bei reinen Magnetfeldern erreichte keine statistische Signifikanz. Diese Untersuchung ist auch ein Hinweis darauf, dass elektrische Felder bei gleicher erzeugter Körperstromdichte biologisch wirksamer sind als Magnetfelder, denn 345 V/m entsprechen dabei ungefähr 7 µT.

Leider werden die biologischen Wirkungen elektrischer Felder kaum untersucht. Die Ursache ist vielleicht das Bestreben der Wissenschaftler, die Parameter eines untersuchten Systems möglichst exakt beherrschen und reproduzieren zu können. Die Stärke elektrischer Felder ist im Gegensatz zu Magnetfeldern nur sehr ungenau

bestimmbar, da elektrische Felder bereits durch den Messvorgang selbst oder durch exponierte Körper und sogar durch deren variierende Form erheblich verändert werden. Die Expositionsbedingungen durch elektrische Felder sind also nur sehr unvollkommen zu beherrschen und zu reproduzieren, andererseits können elektrische Felder bei Experimenten durch Erdung und Abschirmung leicht vollkommen ausgeschlossen werden. Untersuchungen mit reinen Magnetfeldern unter Ausschluss von elektrischen Feldern werden von der Wissenschaft daher bevorzugt. Elektrische Felder werden bei epidemiologischen Studien nur selten gemessen, obwohl sie praktisch immer vorhanden sind und häufig auch die größeren Körperstromdichten hervorrufen. Dieser Anteil an der elektromagnetischen Belastung von Personen bleibt in Studien meist unbekannt.

Nach einer Studie der Universität Mainz aus dem Jahr 2001 (www.emf-portal.de/viewer.php?aid=6207&l=g) liegen in nur 1,4 % der deutschen Wohnungen die Immissionen durch magnetische Wechselfelder über 200 nT, mit Immissionen über 400 nT sind weniger als 0,2 % der Wohnungen exponiert. Der höchste in der Mainzer Studie gemessene Immissionswert betrug bei mehr als 1.800 untersuchten Wohnungen 700 nT. Dies bedeutet, dass die Erkrankungsrisiken durch Langzeitexposition mit stärkeren Feldern oberhalb 400 nT durch epidemiologische Studien kaum ermittelt werden können, weil die für ein statistisch sicheres Studienergebnis erforderliche ausreichend große Teilnehmerzahl nur mit sehr hohem Aufwand zu erreichen wäre.

7. Grenzwerte und Vorsorgeempfehlungen für elektrische und magnetische Wechselfelder

In den meisten Ländern der EU gelten zum Schutz der Bevölkerung vor elektrischen und magnetischen Feldern von Stromversorgungsanlagen die von der Internationalen Kommission zum Schutz vor Nichtionisierender Strahlung (ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ausgearbeiteten Grenzwerte. Die ICNIRP hat keine demokratische Legitimation und ist ein privater in München eingetragener Verein, dessen Mitglieder sich gegenseitig ernennen. In Deutschland wurden die Empfehlungen der ICNIRP ohne Änderung in die Regelungen der am 1. Januar 1997 in Kraft getretenen 26. Bundesimmissionsschutzverordnung (26. BImSchV) übernommen. Vor dem 1. Januar 1997 fehlten in Deutschland gesetzliche Regelungen auf diesem Gebiet, es gab lediglich die Normen der DIN/VDE 0848. Im August 2013 trat eine novellierte Fassung der 26. BImSchV in Kraft, die aber der Bevölkerung keinen besseren Schutz vor elektromagnetischen Feldexpositionen bietet, sondern die Grenzwerte der alten Verordnung bestätigt und für kurzfristige Spitzenexpositionen den Grenzwert für Magnetfelder sogar verdoppelt. Als Vorsorgeregelung enthält die Neufassung der 26. BImSchV die Vorschrift, dass in sensiblen Bereichen (z.B. Wohnungen, Schulen, Kindergärten) die Grenzwerte immer eingehalten werden müssen. Ansonsten sind kurzfristige Überschreitungen bis zum Doppelten des Grenzwertes erlaubt. Außerdem dürfen Wohngebäude nicht mehr mit Höchstspannungsleitungen der Spannungsebenen 220 kV und höher überspannt werden.

Das Konzept der deutschen Grenzwerte für elektrische und magnetische Felder von Stromversorgungsanlagen beruht auf dem Körperstromdichte-Modell. Danach soll die mittlere Körperstromdichte infolge Feldexposition bei Dauerbelastung den Wert 2 mA/m^2 nicht überschreiten. Körperstromdichten von 1 - 2 mA/m^2 werden bei einer Frequenz von 50 Hz durch ein 100 µT / 100.000 nT starkes Magnetfeld oder durch ein 5.000 V/m starkes elektrisches Feld erzeugt. Bei 16,7 Hz (Bahnstrom) sind die Werte dreimal so hoch. Das Körperstromdichtemodell ist zur biologischen Bewertung der elektromagnetischen Exposition durch Felder von Stromversorgungsanlagen sicherlich unzureichend, da es wichtige Parameter wie die Kurvenform (z.B. Sinus- oder Pulsform), die unterschiedliche Wirkung verschiedener Frequenzen oder den Gehalt von kurzen Feldspitzen (Transienten) und Oberwellen nicht berücksichtigt. Obwohl das einfache Körperstromdichte-Modell wissenschaftlich eigentlich nicht mehr haltbar ist, dient es in Ermangelung einer besseren Alternative weiterhin als Grundlage der internationalen Grenzwertgesetzgebung.

	Elektrische Feldstärke [V/m]	Magnetische Induktion [nT]	Bemerkungen
Deutschland 2013 (26. BImSchV)	5.000 (Netzstrom) 10.000 (Bahnstrom)	100.000 (Netz) 300.000 (Bahn)	Gesetzliche Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung
Nordrhein-Westfalen 1998	1.300	10.000	Abstandserlass NRW, Handlungsanleitungen für die Bauleitplanung
Schweiz 2000 (NISV)	-	1.000	Gesetzlicher Anlagegrenzwert für Orte mit empfindlicher Nutzung (OMEN)*
Niederlande	-	400	Bei neuen Leitungen für sensible Bereiche, Berechnung für 30 % Auslastung der Leitung
Litauen	500	10.000	Gesetzliche Grenzwerte für Wohnungen
Slowenien	500	10.000	Gesetzliche Grenzwerte für Wohnungen, Schulen, Kindergärten, Krankenhäuser, Spielplätze, Parks, öffentliche Gebäude, Ausflugsziele
Schwedische Angestelltengewerkschaft TCO 1991	10	200	Computerbildschirme, Immissionen am Büroarbeitsplatz
NCRP (USA) 1995	10 - 50	200 - 1.000	Vorschlag des National Council on Radiation Protection für den US-Kongress
BioInitiative 2012	-	100** - 200	Für Wohnungen, Schulen und andere bewohnbare Bereiche
Ecolog-Institut 1995	20	100 - 200	Empfehlung für Wohnungen

Tabelle 2: *Gesetzliche Grenzwerte, Referenzwerte und Vorsorgeempfehlungen für Felder von Hochspannungsleitungen.*
** OMEN im Sinne der schweizer NISV sind z.B. Wohnräume, Schulen, Kindergärten, ständige Arbeitsplätze, Kinderspielplätze, Krankenhäuser und Pflegeheime.*
*** Bei Neuplanungen von Stromversorgungsleitungen und für Altanlagen, wenn Kinder oder Schwangere betroffen sind.*

Etwa ein Dutzend der EU-Staaten haben der unsicheren wissenschaftlichen Basis der ICNIRP-Grenzwerte Rechnung getragen und vorsorgeorientierte Regelungen eingeführt. Einige Länder haben die gesetzlichen Grenzwerte allgemein verschärft, andere haben die Grenzwerte nur für sensible Bereiche (z.B. Wohnungen) gesenkt. Im Detail unterscheiden sich die Vorsorgeregelungen von Land zu Land. In Tabelle 2 sind die Regelungen einiger Länder sowie Vorsorgeempfehlungen verschiedener Organisationen zusammengestellt.

Die Schweiz führte als erstes europäisches Land Vorsorgegrenzwerte ein: Seit dem 1. Februar 2000 begrenzt in der Schweiz die Verordnung zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN: Wohnräume, Schulen, Krankenhäuser, Büroräume, Altersheime) die durchschnittliche magnetische Dauerbelastung durch Felder von Stromversorgungsanlagen auf 1 µT (= 1.000 nT). Dieser als Anlagegrenzwert bezeichnete Immissionsrichtwert muss z.B. von allen Hochspannungsleitungen, die nach dem 1. Februar 2000 neu gebaut oder umgerüstet wurden, an Orten mit empfindlicher Nutzung eingehalten werden.

Im Jahre 1991 empfahl die schwedische TCO-Gewerkschaft, die elektromagnetischen Immissionen an Bildschirmarbeitsplätzen auf das mit vertretbarem Aufwand erreichbare Maß zu beschränken. Die empfohlenen Richtwerte - 0,2 µT / 200 nT für das Magnetfeld und 10 V/m für das elektrische Feld - basieren weniger auf gesundheitlich begründeten Zahlen, sondern orientieren sich vielmehr am mit wirtschaftlich vertretbaren Mitteln technisch Machbaren. Vorausgegangen waren häufige Klagen von Arbeiterinnen an Computerbildschirmen, die an erheblichen Hautproblemen im Gesicht und hoher Infektanfälligkeit gegenüber Erkältungskrankheiten litten. Die Hautprobleme verschwanden nach der Einführung von Monitoren, die der TCO-Norm entsprachen.

Der nationale Strahlenschutzrat in den USA (NCRP), ein beratendes Gremium des Amerikanischen Kongresses, empfahl 1995 nach Abschluss einer großen Studie, die Immissionen durch Netzstromfelder im Bereich von Schulen, Krankenhäusern und Büros auf 200 - 1.000 nT (Magnetfeld) bzw. 10 - 50 V/m (elektrisches Feld) zu begrenzen. Bis heute gibt es in den USA keine bundeseinheitlichen gesetzlichen Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinheit vor niederfrequenten Feldexpositionen. Die Regelungen auf diesem Gebiet sind Angelegenheit der einzelnen Bundesstaaten, wobei die meisten Bundesstaaten noch keine Regelungen für elektromagnetische Feldimmissionen eingeführt haben.

Die BioInitiative Working Group (www.bioinitiative.org) ist ein Zusammenschluss von 29 (Stand 2012) international renommierten Wissenschaftlern, die sich mit der Erforschung von Gesundheitsrisiken durch Exposition mit elektromagnetischen Feldern beschäftigen. Bei einigen konkreten oben zum Teil noch nicht erwähnten Erkrankungsrisiken kommen sie zu folgenden Ergebnissen:

- Bei Frauen mit Langzeitexposition am Arbeitsplatz von 1.000 nT und mehr sind niederfrequente magnetische Felder ein Risikofaktor für Brustkrebs.
- Es gibt starke wissenschaftliche Hinweise, dass Langzeitexpositionen durch niederfrequente Magnetfelder ein Risikofaktor für die Alzheimer-Krankheit und Amyotrophische Lateralsklerose sind.
- Es gibt wissenschaftliche Hinweise dafür, dass dauerhafte Expositionen durch niederfrequente Magnetfelder das Erkrankungsrisiko für Hirntumore und maligne Melanome erhöhen.

Das Ecolog-Institut in Hannover (www.ecologinstitut.de) ist eine unabhängige Institution, die bis Ende 2013 regelmäßige Veröffentlichungen zur gesundheitlichen Problematik von elektromagnetischen Immissionen und zum Stand der einschlägigen Forschung herausgegeben hat (EMF-Monitor). Das von Wissenschaftlern geführte Institut empfiehlt auf wissenschaftlicher Basis begründete Vorsorgerichtwerte für Immissionen durch elektrische und magnetische Felder von Stromversorgungsanlagen, die in der Größenordnung der TCO-Norm liegen (100 - 200 nT magnetische Induktion bzw. 10 - 20 V/m elektrische Feldstärke). Das Ecolog-Institut argumentiert mit Vorsorgeüberlegungen, da sehr zahlreiche Studien existieren, die schon wenig oberhalb der empfohlenen Richtwerte biologische Effekte und erhöhte Erkrankungsrisiken gefunden haben.

Baubiologen fordern für elektromagnetische Felder extrem niedrige Immissionswerte, die auch für elektrosensible Personen akzeptabel sein sollen. Ob es Elektrosensibilität wirklich gibt, konnte wissenschaftlich noch nicht geklärt werden.

Der in der obigen Tabelle aufgeführte und von mehreren Organisationen empfohlene wissenschaftlich begründete Vorsorgerichtwert 200 nT ist für magnetische Wechselfelder mit der Frequenz 50 Hz und in erster Linie für Wohnungen und andere Daueraufenthaltsbereiche von Personen gedacht. Es liegen einige Studienergebnisse vor, die auf eine größere Empfindlichkeit bei nächtlicher magnetischer Feldexposition im Schlaf hinweisen, so dass die Anwendung von Vorsorgerichtwerten auf Wohnungen strikter gehandhabt werden sollte als für andere Daueraufenthaltsbereiche wie z.B. Bürogebäude oder Schulen. Wegen der niedrigeren Frequenzdie nur ein Drittel von 50 Hz beträgt, haben deutsche Bahnstromfelder eine schwächere Induktionswirkung. Daher kann man den Vorsorgerichtwert für diese Felder auf 600 nT erhöhen.

8. Zusammenfassung und Empfehlungen

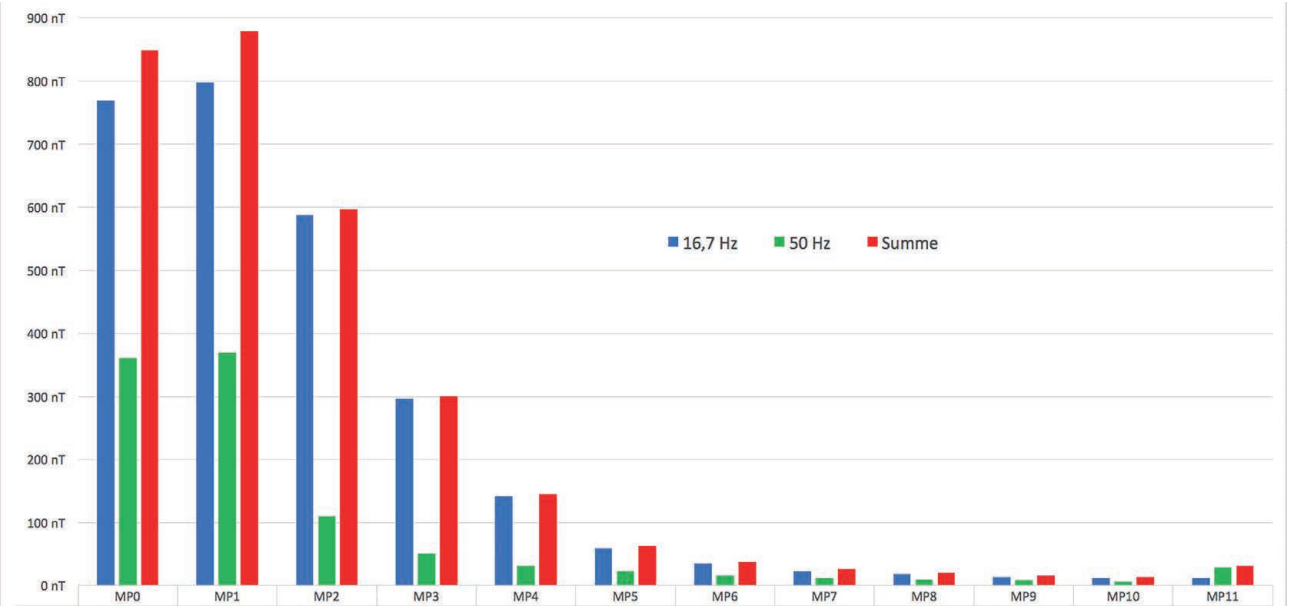
Auf dem freien Gelände zwischen der Straße *Auf dem Grend* und einer Hochspannungstrasse mit drei parallel nebeneinander verlaufenden Leitungen ist der Bau einer Wohnsiedlung geplant. Die drei Hochspannungsleitungen sind eine 110 kV-Bahnstromleitung (Stromfrequenz 16,7 Hz) mit zwei zweiphasigen Systemen, eine 220 kV-Hochspannungsleitung (Frequenz 50 Hz) mit Tannengeometrie und zwei dreiphasigen Systemen sowie einer Kombileitung (Frequenz 50 Hz) mit je zwei dreiphasigen Systemen der Spannungsebenen 110 kV, 220 kV und 380 kV. Die Bahnstromleitung liegt dem Plangebiet am nächsten. Der Abstand des Plangebietes zur Bahnstromleitung beträgt 100 m und mehr.

Die Hochspannungstrasse verursacht in ihrer Umgebung Immissionen durch elektrische und magnetische Wechselfelder.

Elektrische Felder werden von jeglicher Materie in ihrer Ausbreitung beeinflusst und mehr oder weniger gut abgeschirmt. In Gebäude dringen sie praktisch nicht ein. Bereits Baumkronen ohne Laub schirmen elektrische Felder weitgehend ab. Elektrische Felder treten nur bei weiträumig freier Sicht auf die Hochspannungsleitungen in voller Stärke auf. Die Stärke von Immissionen durch elektrischer Felder hängt von der Betriebsspannung einer Hochspannungsleitung und vom Abstand ab. Sie ist daher bei Leitungen der Spannungsebene 380 kV und kleinen Abständen besonders groß. Hoch hängende Leiterseile vergrößern die Reichweite elektrischer Felder.

Die im Bereich des Plangebietes gemessenen elektrischen Feldstärken (Diagramm Abb. 21, etwa ab MP6) sind sehr niedrig und liegen auch bei freier Sicht auf die Hochspannungsleitungen unter dem Vorsorgerichtwert für Wohnungen (20 V/m).

Magnetfelder durchdringen ungeschwächt fast jede Materie und durchdringen auch Gebäudehüllen ohne nennenswerte Abschwächung. Wirksame Abschirmungen von Gebäuden gegen Magnetfelder sind nicht praktikabel. Ein Schutz vor erhöhten Immissionen durch Magnetfelder kann im allgemeinen nur durch einen ausreichend großen Abstand zur Feldquelle erreicht werden. Durch eine Optimierung der Phasenanordnung besteht von Seiten des Leitungsbetreibers die Möglichkeit, die Immissionen durch Magnetfelder im Umfeld



	MP0	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	MP8	MP9	MP10	MP11
16,7 Hz	769,3 nT	797,7 nT	587,2 nT	295,9 nT	141,2 nT	58,6 nT	34,5 nT	22,8 nT	17,5 nT	12,7 nT	11,5 nT	11,8 nT
50 Hz	360,4 nT	369,6 nT	109,9 nT	50,7 nT	31,3 nT	21,9 nT	14,9 nT	11,4 nT	9,1 nT	7,4 nT	6,0 nT	28,5 nT
Summe	849,5 nT	879,2 nT	597,4 nT	300,2 nT	144,6 nT	62,6 nT	37,6 nT	25,5 nT	19,7 nT	14,7 nT	13,0 nT	30,8 nT

Abb. 20: *Auf eine mittlere Stromstärke normierte magnetische Induktion an allen Messpunkten für beide Frequenzen sowie die vektorielle Summe der Messwerte*

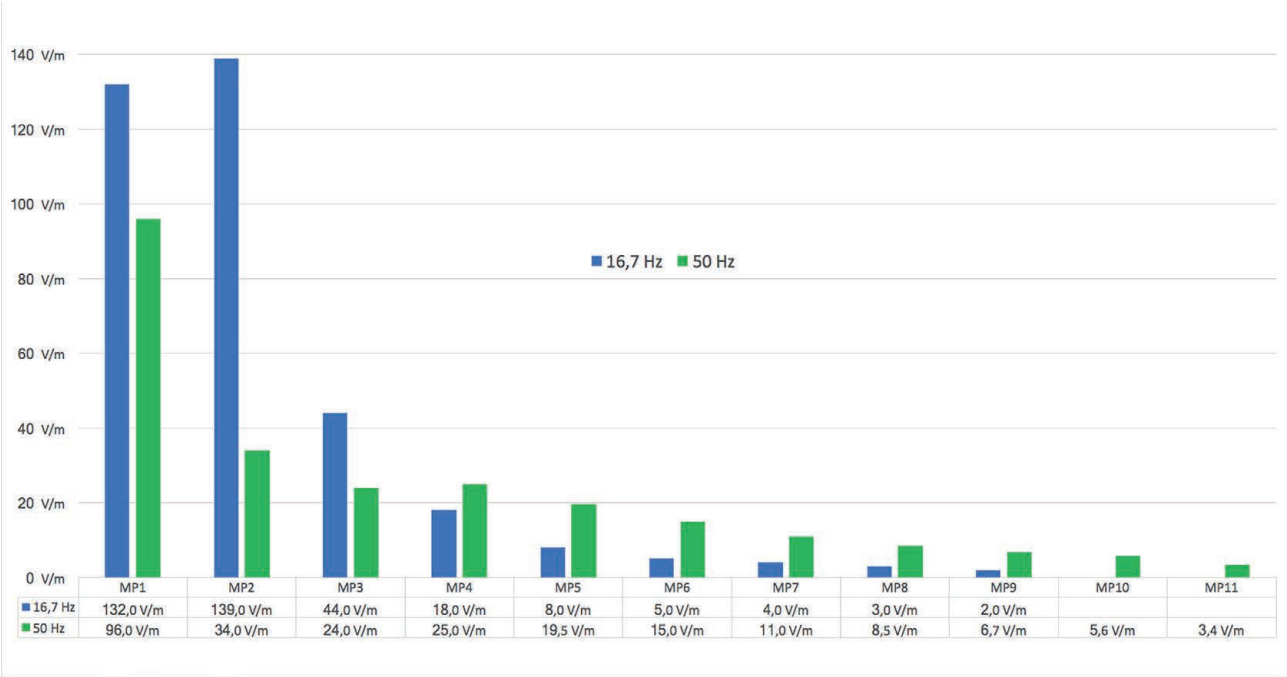


Abb. 21: *An allen Messpunkten in beiden Frequenzbereichen gemessene elektrische Feldstärke*

einer Hochspannungsleitung zu senken. Magnetische Wechselfelder sind bei sehr großer Intensität akut gesundheitsschädlich und können durch ihre Wirkung auf den Herzschlag auch lebensgefährlich sein. Durch die Anwendung der gesetzlichen Grenzwerte (26. BImSchV) auf die Feldimmissionen in öffentlich zugängigen Bereichen von Stromversorgungsanlagen ist gewährleistet, dass akute Gesundheitsschäden durch die Feldexposition ausgeschlosen sind. Wegen schwerwiegender konzeptioneller Schwächen der in der 26. BImSchV definierten Grenzwerte sind erhöhte gesundheitiche Risiken bei Expositionen mit magnetischen Wechselfeldern auch unterhalb der Grenzwerte möglich.

Die in der Nähe der Hochspannungstrasse an 11 Messpunkten bestimmten Werte der magnetischen Induktion sind im Diagramm Abb. 20 zusammengefasst. Auf dem Plangebiet (etwa ab MP6) lagen die Immissionen weit unter dem für die Wohnungen von Kindern empfohlenen Richtwert 100 nT. Sie lagen sogar unter dem in einer Studie der Universität Mainz ermittelten Durchschnittswert in deutschen Wohnungen (40 nT). Durch Simulationsberechnungen konnte nachgewiesen werden, dass auch bei erheblicher Zunahme der Strombelastung der Leitungen die Immissionen durch Magnetfelder auf dem Plangebiet im Bereich der vorgesehenen Bebauung 50 nT nicht überschreiten.

Aufgrund der auf dem Plangebiet gemesenen Immissionen durch elektrische und magnetische Wechselfelder sind aus Sicht des vorsorgenden Gesundheitsschutzes für die zukünftigen Bewohner erhöhte Gesundheitsrisiken nicht zu erwarten. Dies gilt auch bei erheblichem Anstieg der Stromlast der benachbarten Hochspannungsleitungen. Es sind für den Bereich des Plangebietes keinerlei Schutzmaßnahmen gegen Immissionen durch niederfrequente elektromagnetische Felder erforderlich, jedoch könnten durch das Anpflanzen von Bäumen oder höherem Buschwerk zwischen der Hochspannungstrasse und der neuen Siedlung die Immissionen durch elektrische Felder auf dem Plangebiet auf praktisch null gesenkt werden.

Bonn, den 29. März 2018

Dr. Klaus Trost
Wissenschaftsladen Bonn e.V.

9. Anhang

Fotos der einzelnen Messpunkte..... Seite 27 - 30

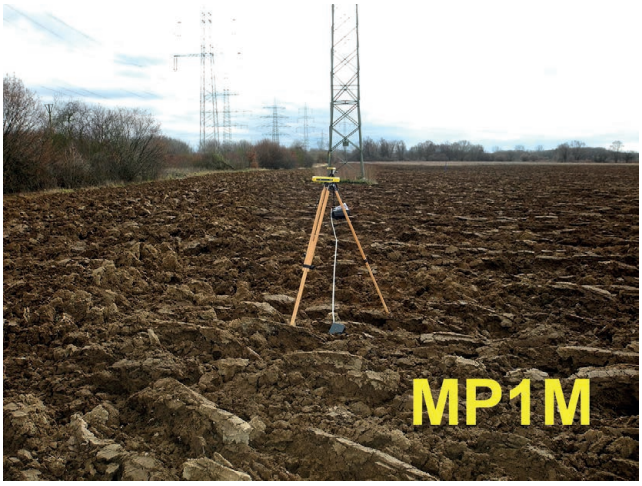
Gemessene Diagramme der magnetischen Induktion mit tabellarischer Angabe von Messwerten..... Seite 31 - 42

Berechnungsparameter für das Simulationsprogramm WinField V4.0..... Seite 43 - 45

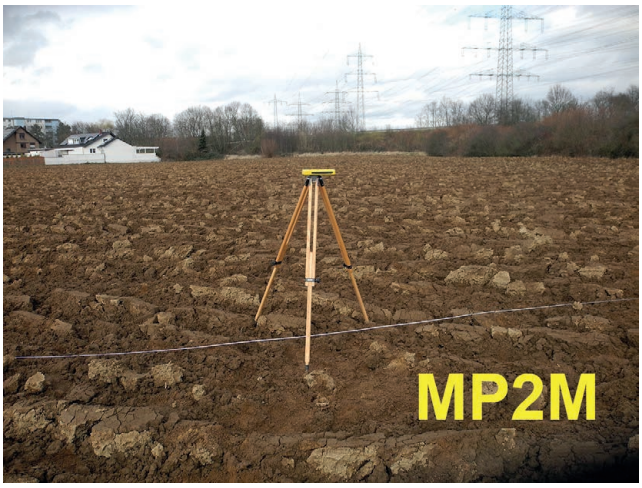
MP0M

MP0+1M

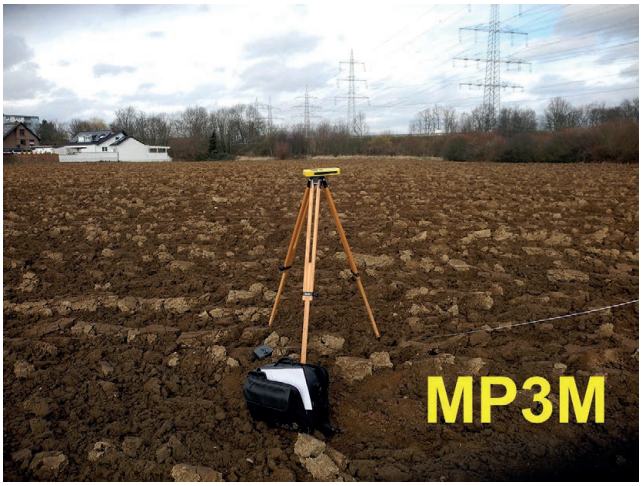
MP1E


MP1M

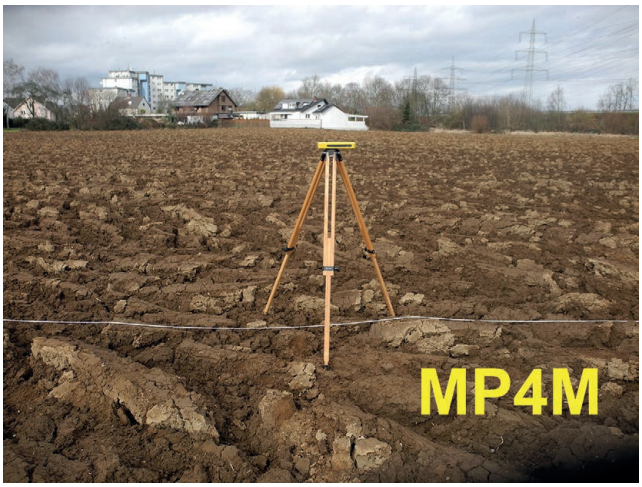
MP2E


MP2M

MP3E


MP3M

MP4E


MP4M

MP5E

MP5M

MP6E

MP6M

MP7E

MP7M

MP8E

MP8M

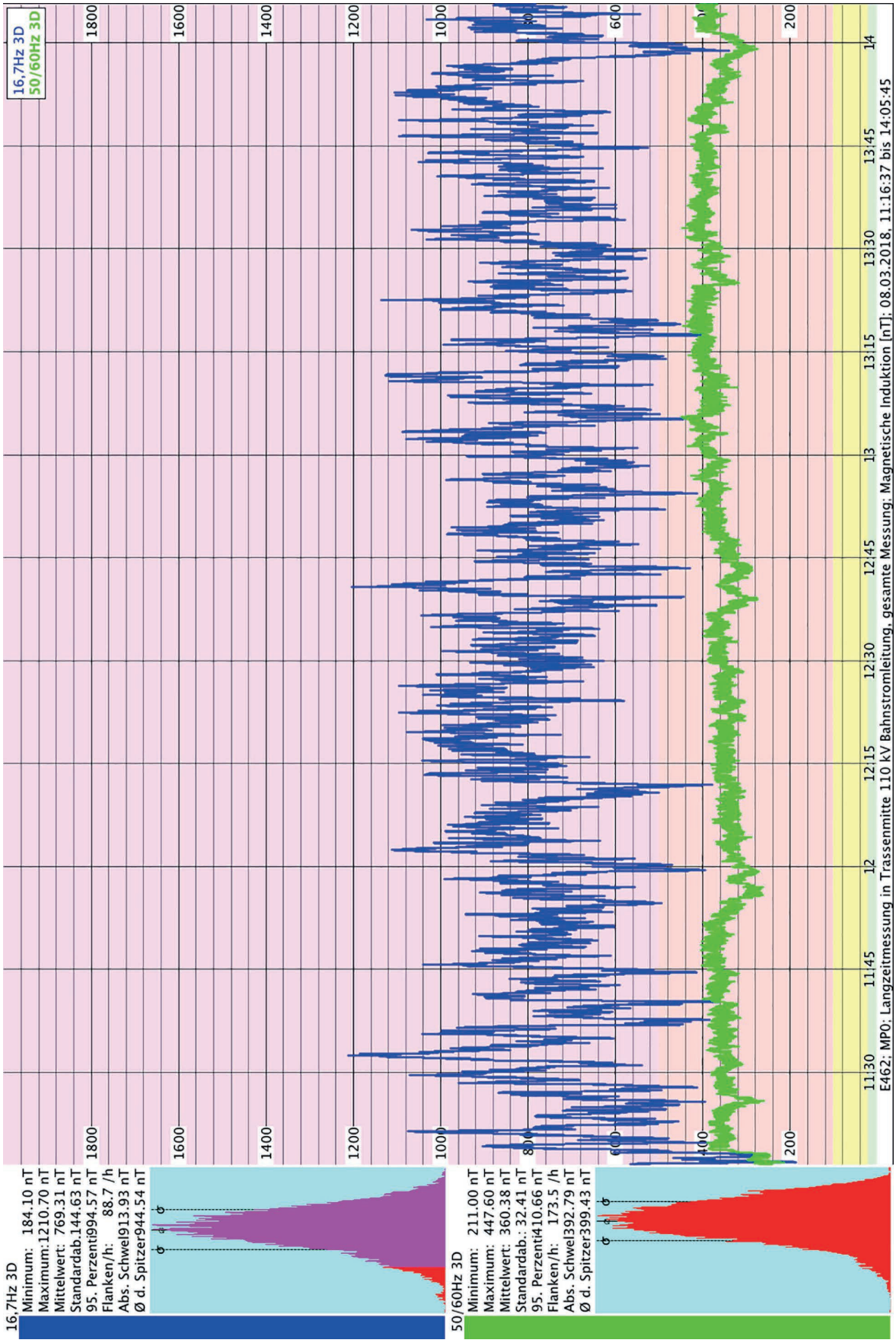
MP9E

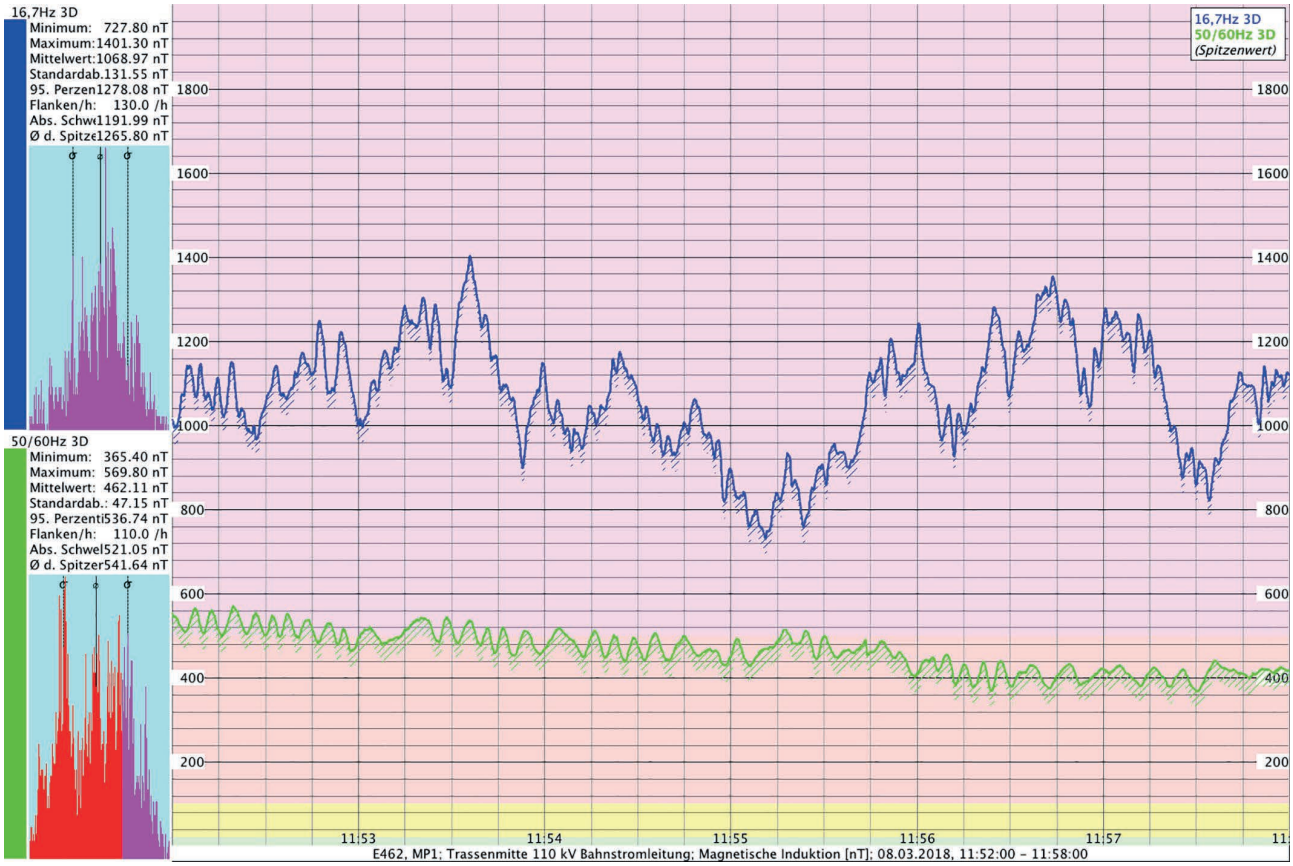
MP9M

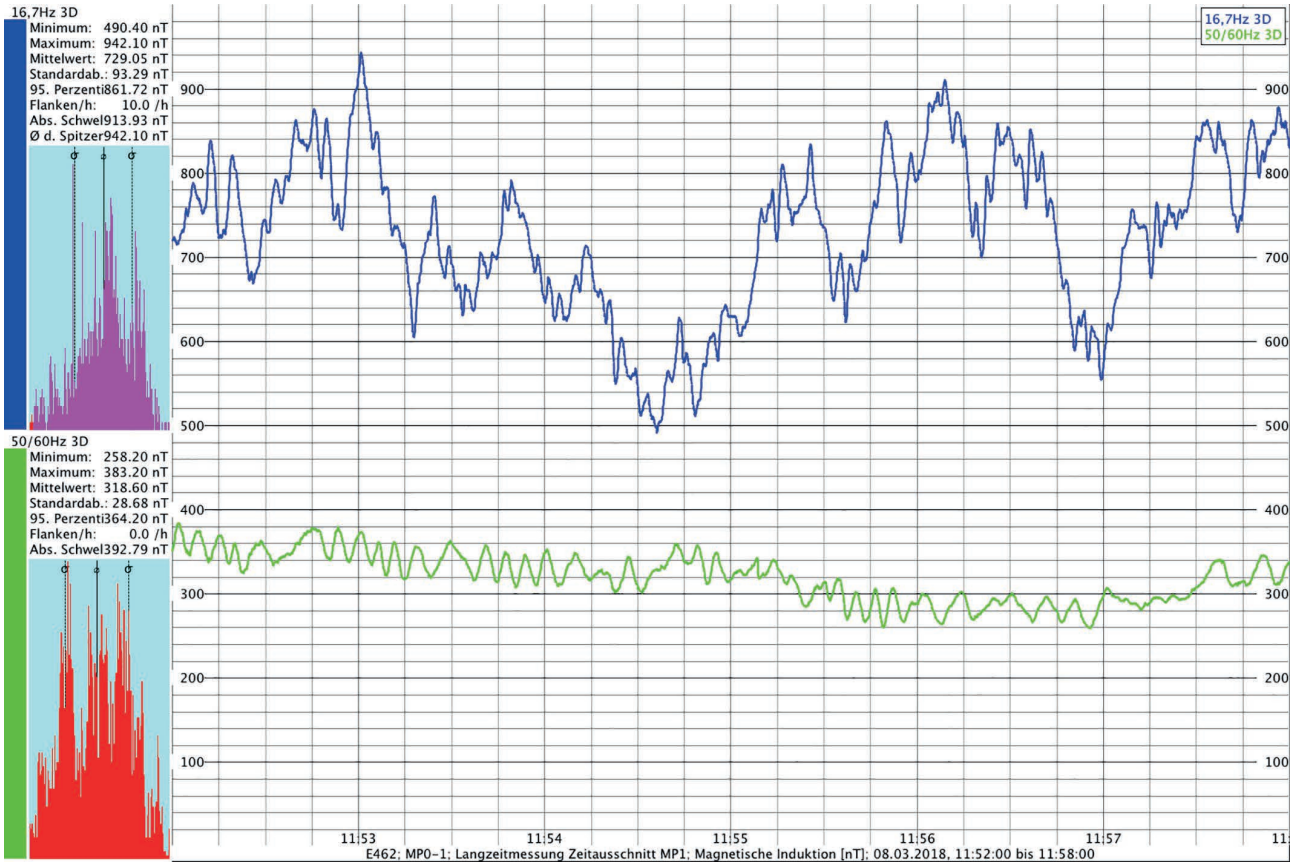
MP10E

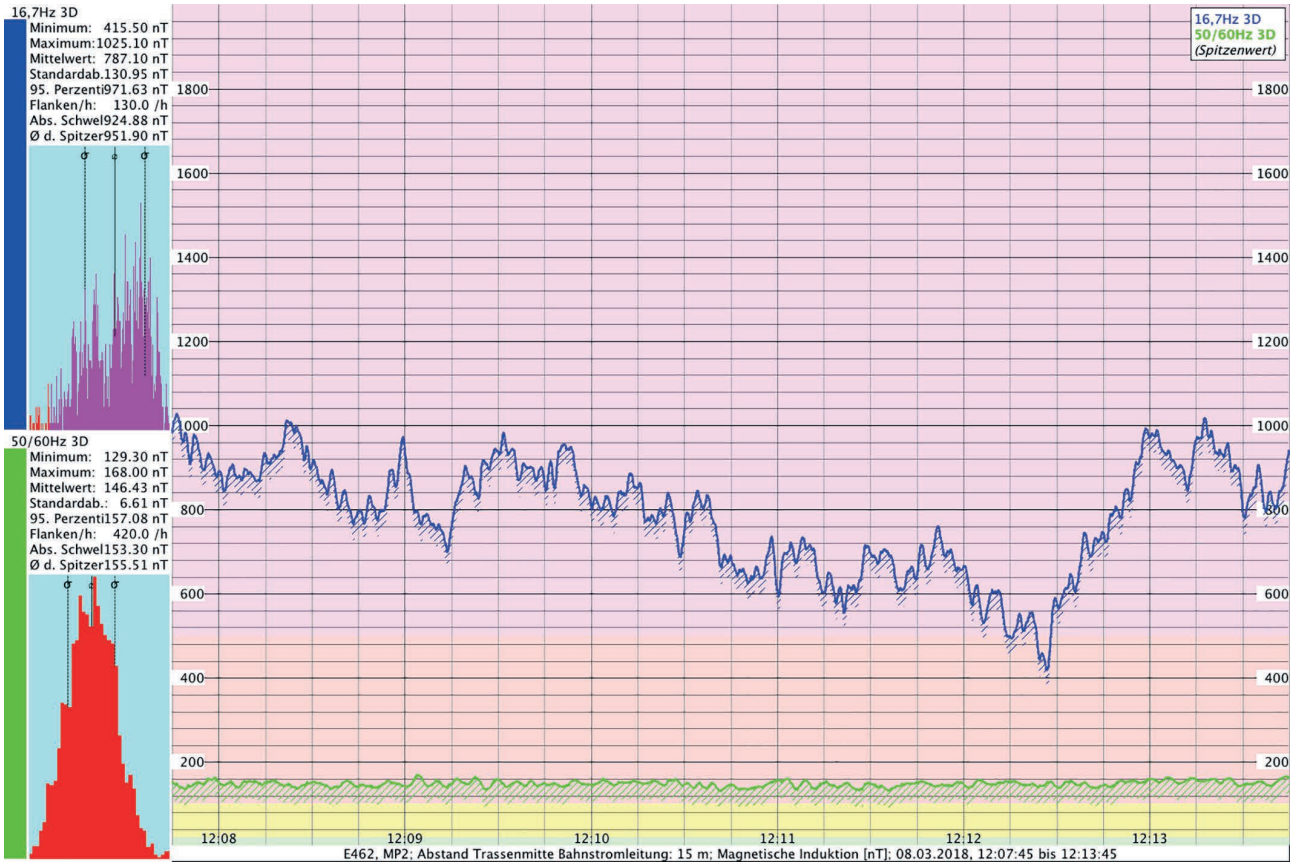
MP11E

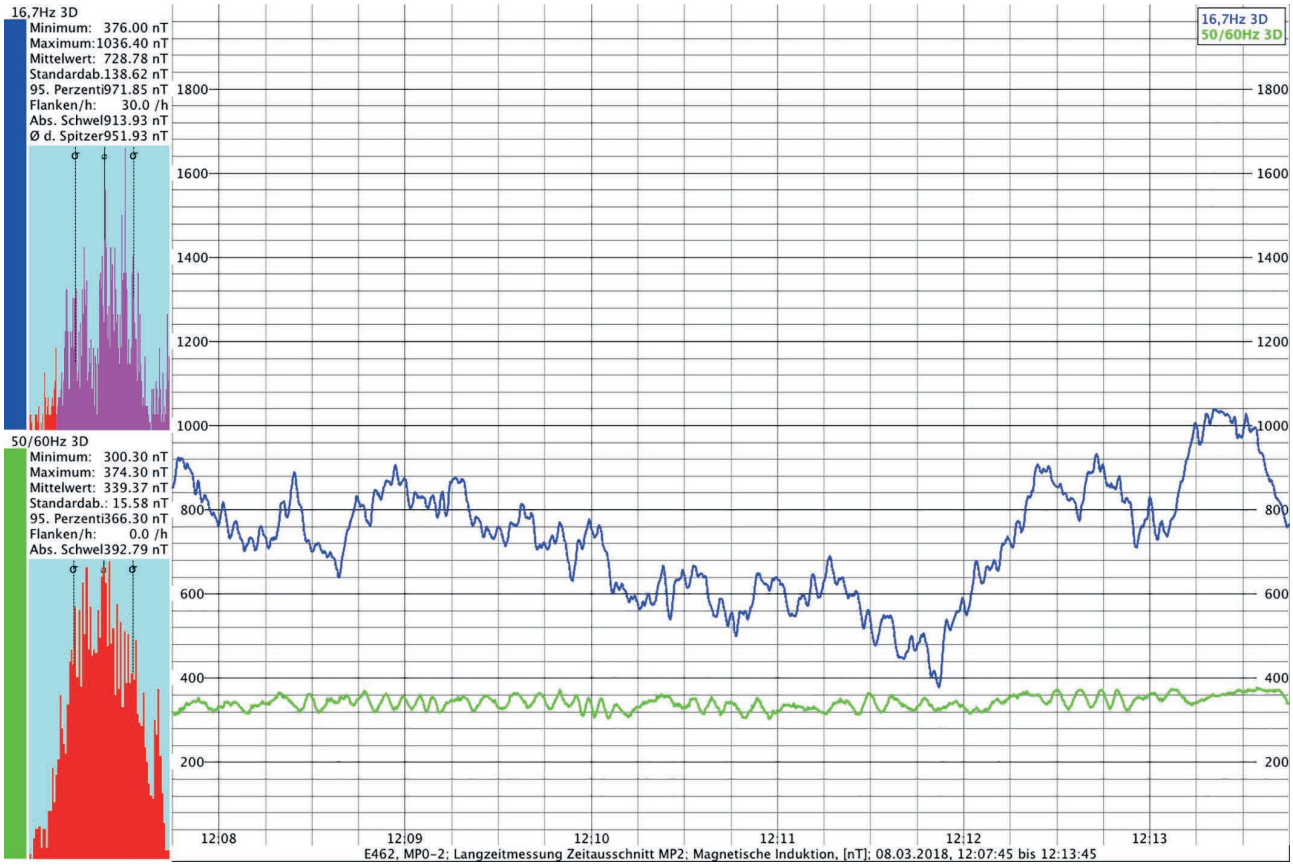
MP11M

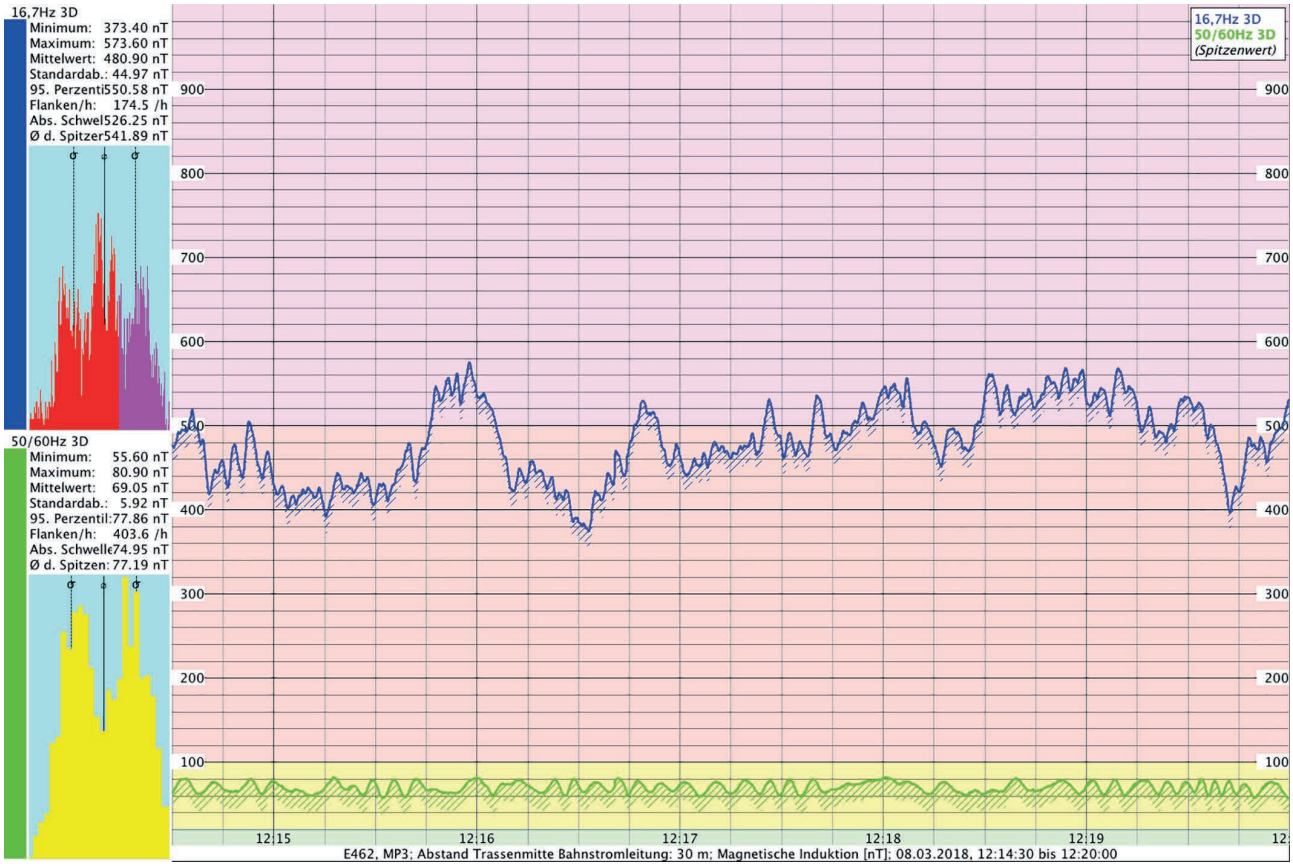

16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
16,7Hz 3D
Minimum: 184.10 nT
Maximum:1210.70 nT
Mittelwert: 769.31 nT
Standardab.144.63 nT
95. Perzenti994.57 nT
Flanken/h: 88.7 /h
Abs. Schwel913.93 nT
Ø d. Spitzer944.54 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 211.00 nT
Maximum: 447.60 nT
Mittelwert: 360.38 nT
Standardab.: 32.41 nT
95. Perzenti410.66 nT
Flanken/h: 173.5 /h
Abs. Schwel392.79 nT
Ø d. Spitzer399.43 nT
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
11:30
11:45
12
12:15
12:30
12:45
13
13:15
13:30
13:45
14
E462; MP0; Langzeitmessung in Trassenmitte 110 kV Bahnstromleitung, gesamte Messung; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 11:16:37 bis 14:05:45

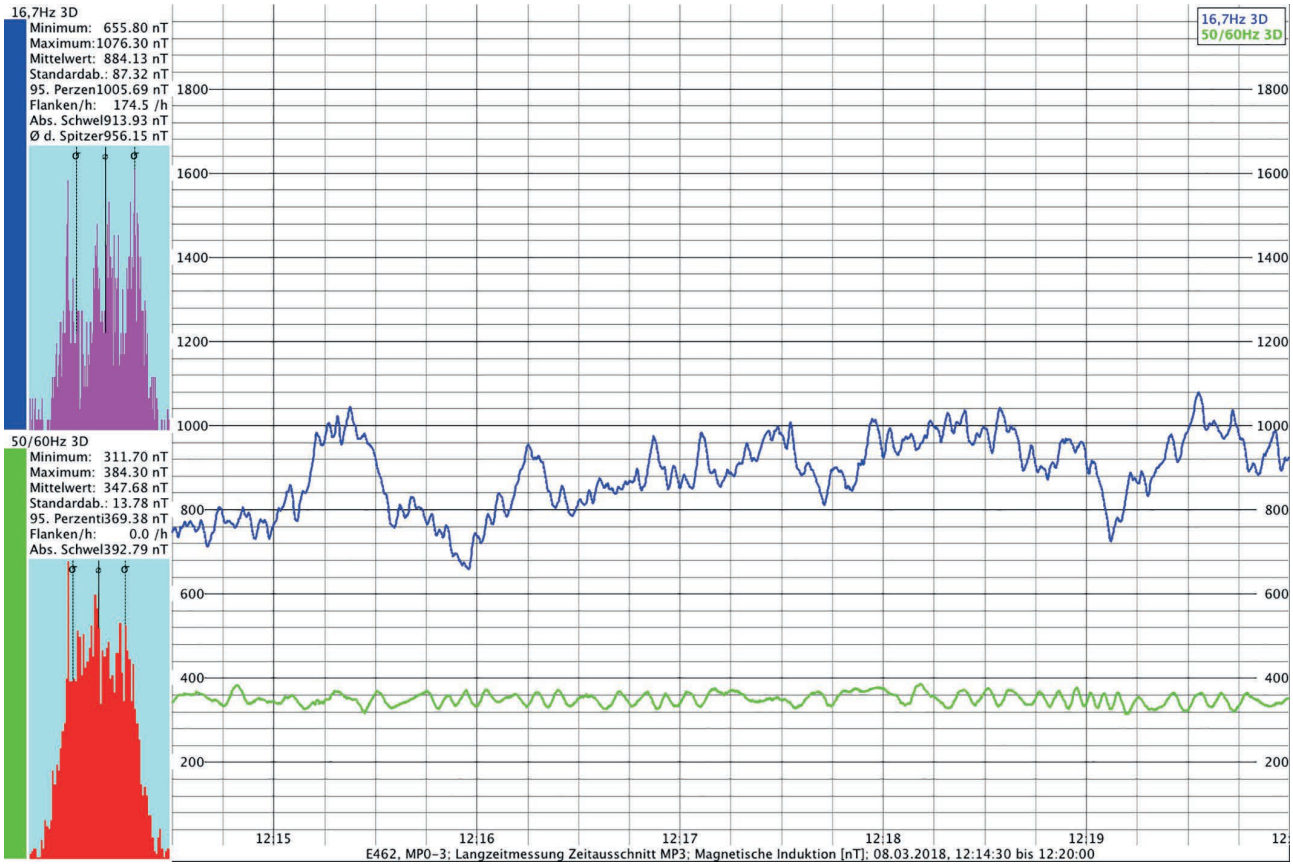

16,7Hz 3D
Minimum: 727.80 nT
Maximum:1401.30 nT
Mittelwert:1068.97 nT
Standardab.131.55 nT
95. Perzen1278.08 nT
Flanken/h: 130.0 /h
Abs. Schw1191.99 nT
Ø d. Spitze1265.80 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 365.40 nT
Maximum: 569.80 nT
Mittelwert: 462.11 nT
Standardab.: 47.15 nT
95. Perzenti536.74 nT
Flanken/h: 110.0 /h
Abs. Schwel521.05 nT
Ø d. Spitzer541.64 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
11:53
11:54
11:55
11:56
11:57
E462, MP1; Trassenmitte 110 kV Bahnstromleitung; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 11:52:00 - 11:58:00

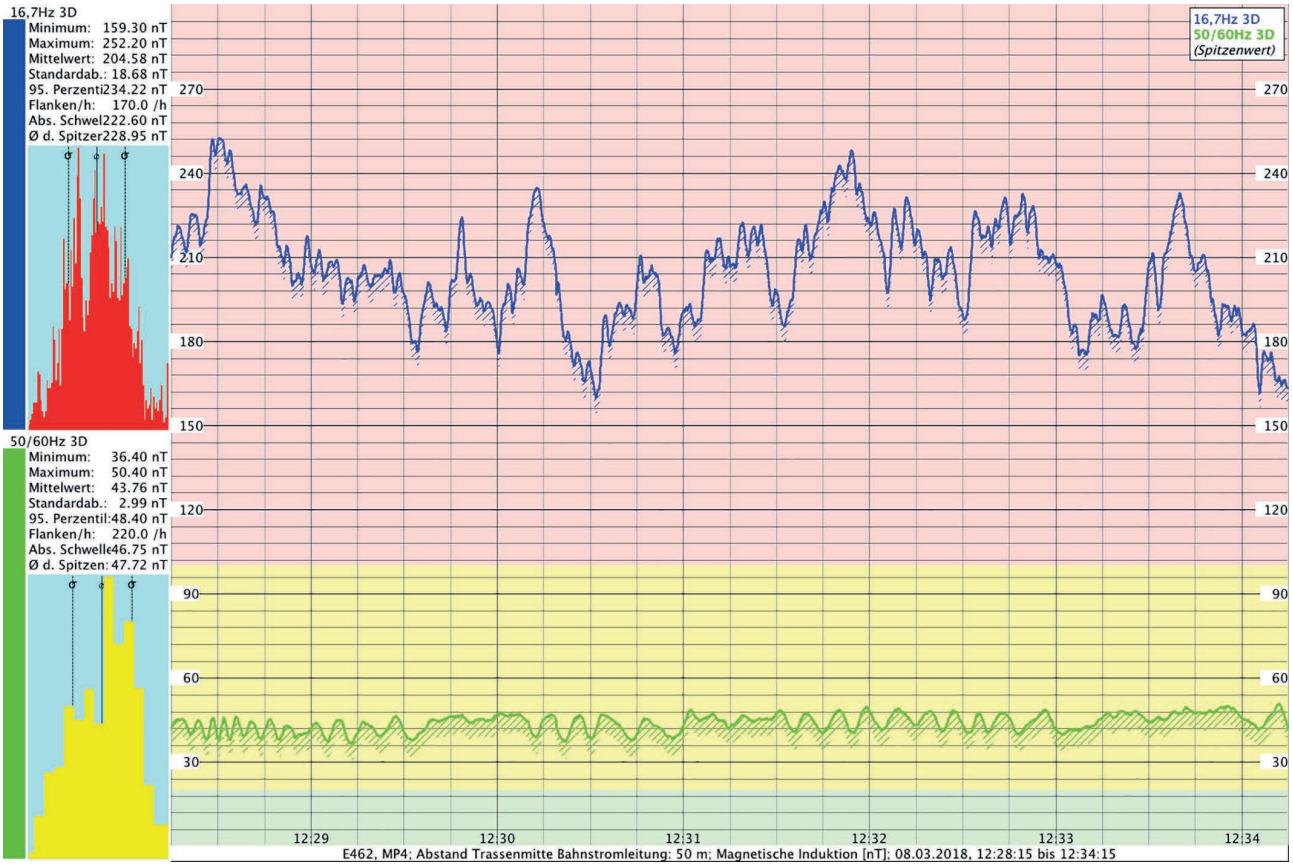

16,7Hz 3D
Minimum: 490.40 nT
Maximum: 942.10 nT
Mittelwert: 729.05 nT
Standardab.: 93.29 nT
95. Perzenti861.72 nT
Flanken/h: 10.0 /h
Abs. Schwel913.93 nT
Ø d. Spitzer942.10 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 258.20 nT
Maximum: 383.20 nT
Mittelwert: 318.60 nT
Standardab.: 28.68 nT
95. Perzenti364.20 nT
Flanken/h: 0.0 /h
Abs. Schwel392.79 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
900
800
700
600
500
400
300
200
100
11:53
11:54
11:55
11:56
11:57
E462; MP0-1; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP1; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 11:52:00 bis 11:58:00

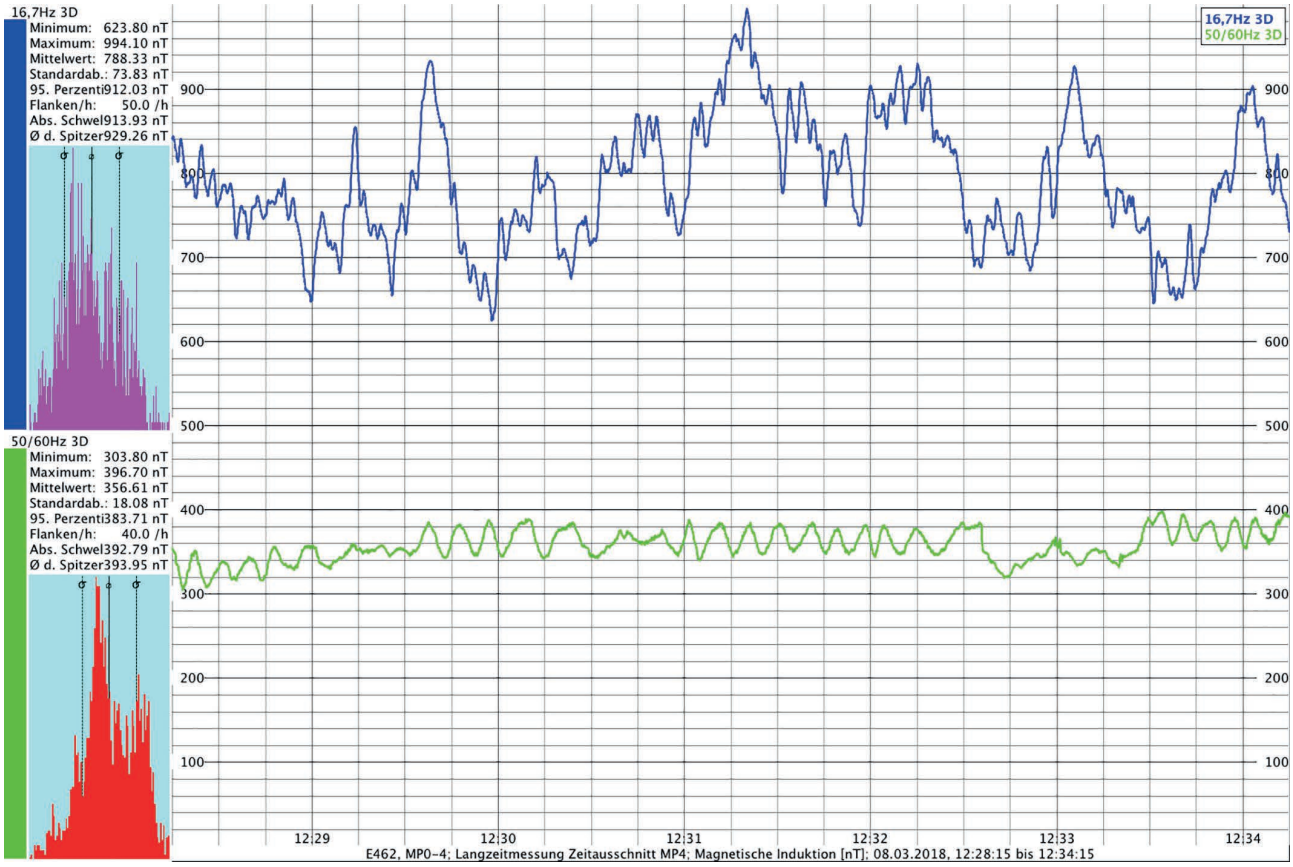

16,7Hz 3D
Minimum: 415.50 nT
Maximum:1025.10 nT
Mittelwert: 787.10 nT
Standardab.130.95 nT
95. Perzenti971.63 nT
Flanken/h: 130.0 /h
Abs. Schwel924.88 nT
Ø d. Spitzer951.90 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 129.30 nT
Maximum: 168.00 nT
Mittelwert: 146.43 nT
Standardab.: 6.61 nT
95. Perzenti157.08 nT
Flanken/h: 420.0 /h
Abs. Schwel153.30 nT
Ø d. Spitzer155.51 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
12:08
12:09
12:10
12:11
12:12
12:13
E462, MP2; Abstand Trassenmitte Bahnstromleitung: 15 m; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 12:07:45 bis 12:13:45

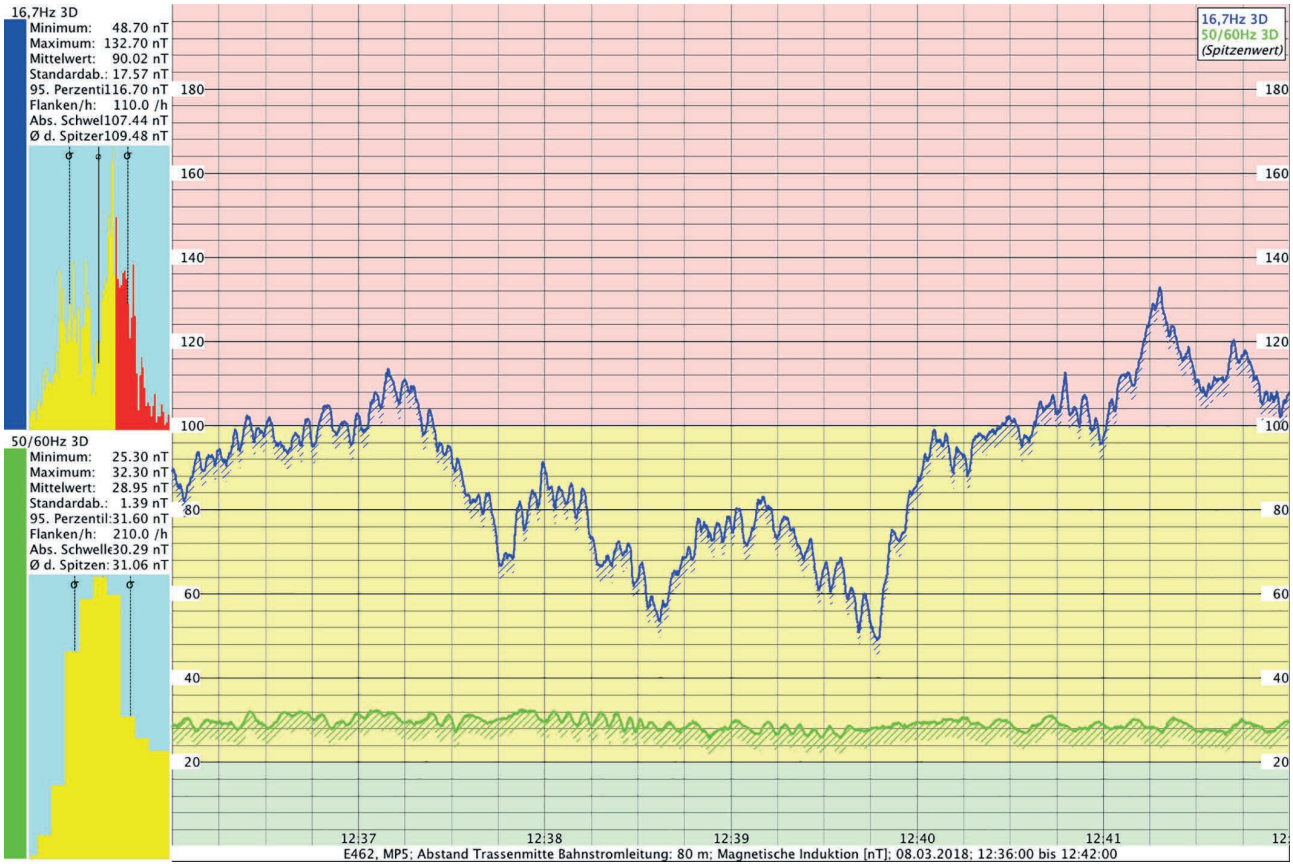

16,7Hz 3D
Minimum: 376.00 nT
Maximum:1036.40 nT
Mittelwert: 728.78 nT
Standardab.138.62 nT
95. Perzenti971.85 nT
Flanken/h: 30.0 /h
Abs. Schwel913.93 nT
Ø d. Spitzer951.93 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 300.30 nT
Maximum: 374.30 nT
Mittelwert: 339.37 nT
Standardab.: 15.58 nT
95. Perzenti366.30 nT
Flanken/h: 0.0 /h
Abs. Schwel392.79 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
12:08
12:09
12:10
12:11
12:12
12:13
E462, MP0-2; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP2; Magnetische Induktion, [nT]; 08.03.2018, 12:07:45 bis 12:13:45

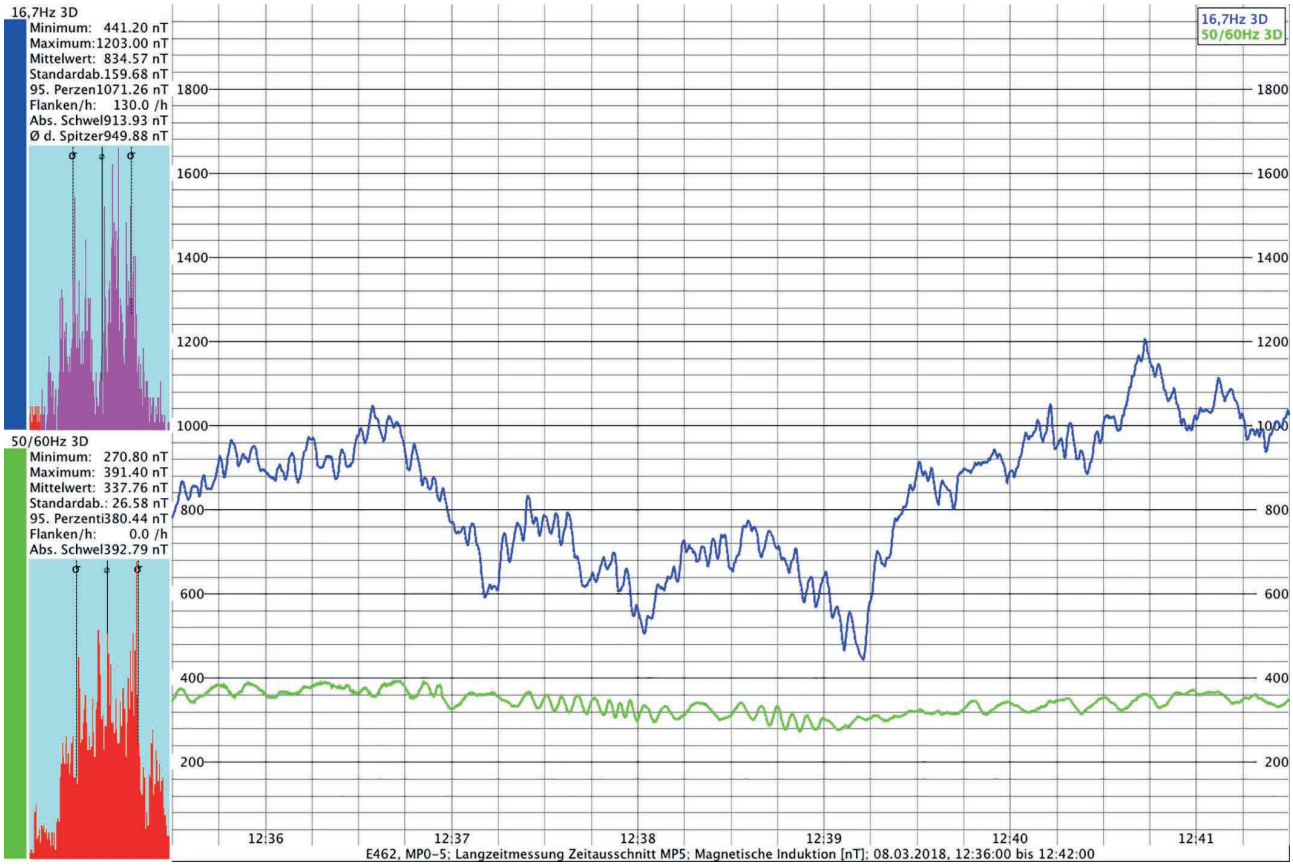

16,7Hz 3D
Minimum: 373.40 nT
Maximum: 573.60 nT
Mittelwert: 480.90 nT
Standardab.: 44.97 nT
95. Perzenti550.58 nT
Flanken/h: 174.5 /h
Abs. Schwel526.25 nT
Ø d. Spitzer541.89 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 55.60 nT
Maximum: 80.90 nT
Mittelwert: 69.05 nT
Standardab.: 5.92 nT
95. Perzentil:77.86 nT
Flanken/h: 403.6 /h
Abs. Schwelle74.95 nT
Ø d. Spitzen: 77.19 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
900
800
700
600
500
400
300
200
100
12:15
12:16
12:17
12:18
12:19
E462, MP3; Abstand Trassenmitte Bahnstromleitung: 30 m; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 12:14:30 bis 12:20:00

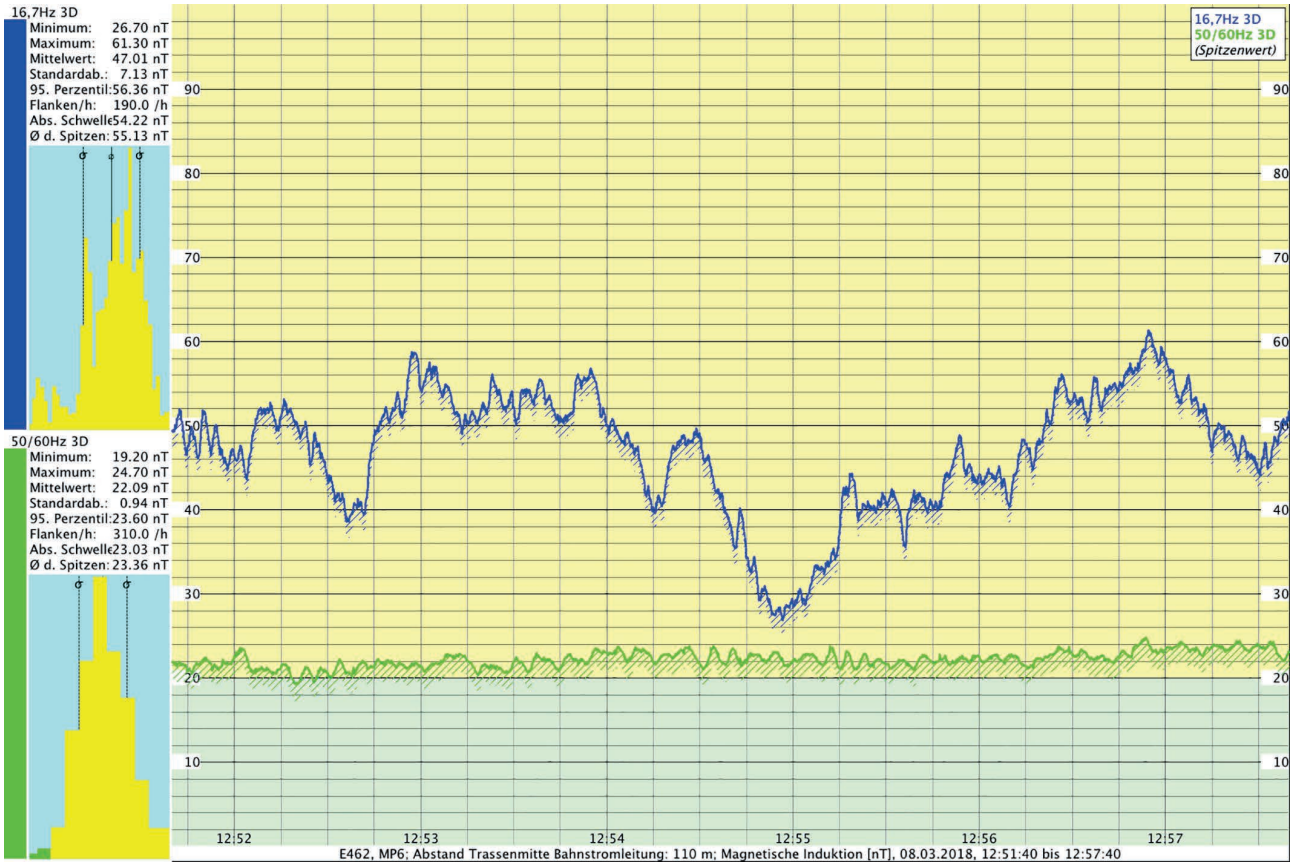

16,7Hz 3D
Minimum: 655.80 nT
Maximum:1076.30 nT
Mittelwert: 884.13 nT
Standardab.: 87.32 nT
95. Perzen1005.69 nT
Flanken/h: 174.5 /h
Abs. Schwel913.93 nT
Ø d. Spitzer956.15 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 311.70 nT
Maximum: 384.30 nT
Mittelwert: 347.68 nT
Standardab.: 13.78 nT
95. Perzenti369.38 nT
Flanken/h: 0.0 /h
Abs. Schwel392.79 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
12:15
12:16
12:17
12:18
12:19
E462, MP0-3; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP3; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 12:14:30 bis 12:20:00

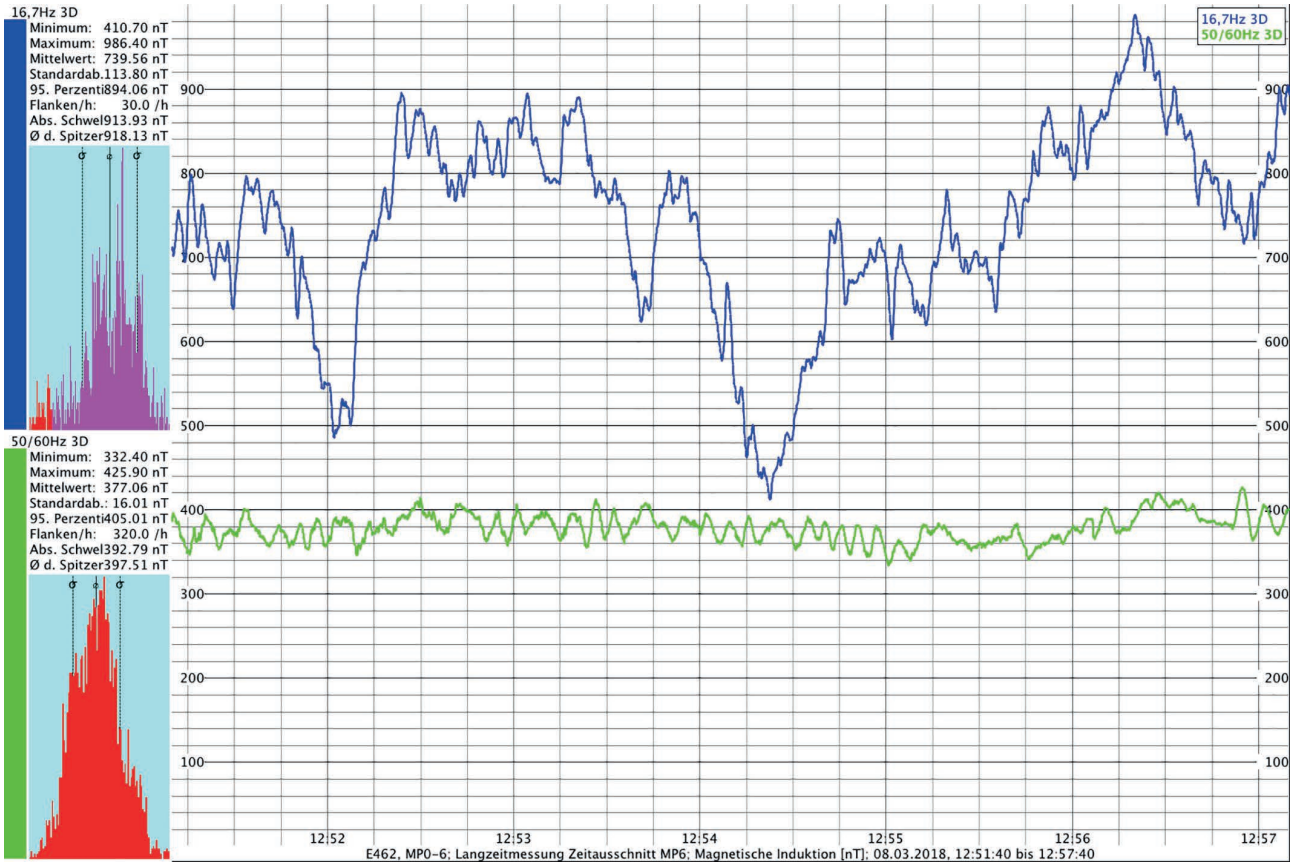

16,7Hz 3D
Minimum: 159.30 nT
Maximum: 252.20 nT
Mittelwert: 204.58 nT
Standardab.: 18.68 nT
95. Perzenti234.22 nT
Flanken/h: 170.0 /h
Abs. Schwel222.60 nT
Ø d. Spitzer228.95 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 36.40 nT
Maximum: 50.40 nT
Mittelwert: 43.76 nT
Standardab.: 2.99 nT
95. Perzentil:48.40 nT
Flanken/h: 220.0 /h
Abs. Schwelle46.75 nT
Ø d. Spitzen: 47.72 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
270
240
210
180
150
120
90
60
30
12:29
12:30
12:31
12:32
12:33
12:34
E462, MP4; Abstand Trassenmitte Bahnstromleitung: 50 m; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 12:28:15 bis 12:34:15

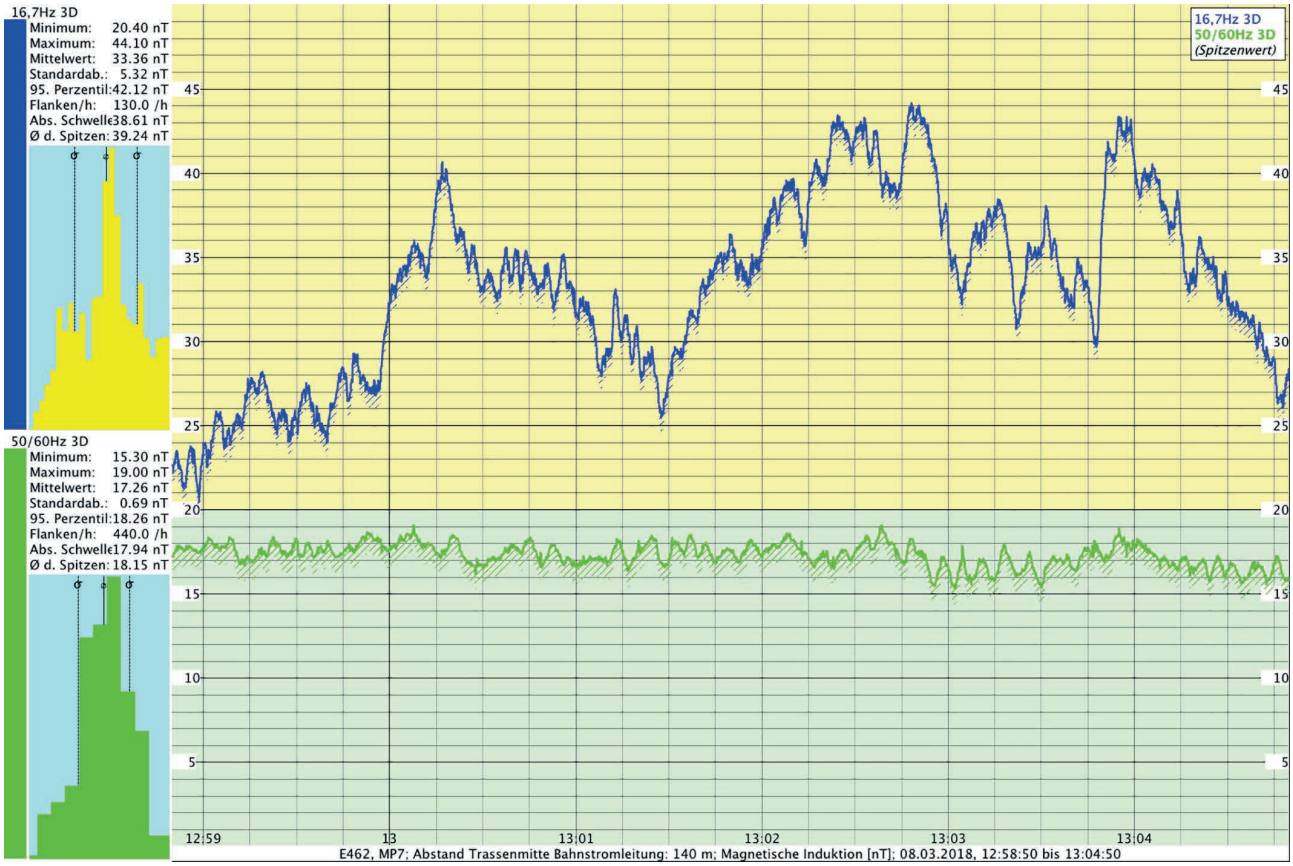

16,7Hz 3D
Minimum: 623.80 nT
Maximum: 994.10 nT
Mittelwert: 788.33 nT
Standardab.: 73.83 nT
95. Perzenti912.03 nT
Flanken/h: 50.0 /h
Abs. Schwel913.93 nT
Ø d. Spitzer929.26 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 303.80 nT
Maximum: 396.70 nT
Mittelwert: 356.61 nT
Standardab.: 18.08 nT
95. Perzenti383.71 nT
Flanken/h: 40.0 /h
Abs. Schwel392.79 nT
Ø d. Spitzer393.95 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
900
800
700
600
500
400
300
200
100
12:29
12:30
12:31
12:32
12:33
12:34
E462, MP0-4; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP4; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 12:28:15 bis 12:34:15

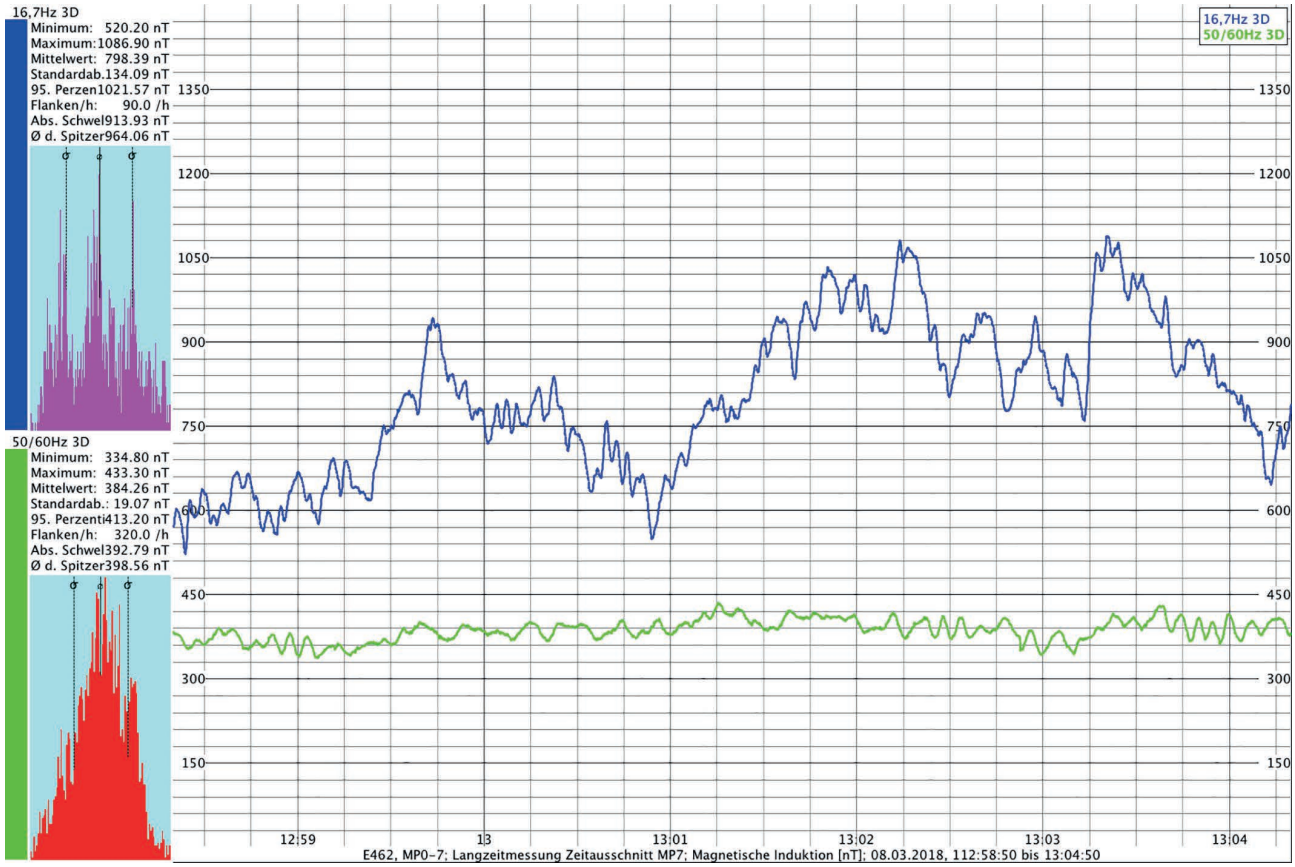

16,7Hz 3D
Minimum: 48.70 nT
Maximum: 132.70 nT
Mittelwert: 90.02 nT
Standardab.: 17.57 nT
95. Perzentil 116.70 nT
Flanken/h: 110.0 /h
Abs. Schwel 107.44 nT
Ø d. Spitzen 109.48 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 25.30 nT
Maximum: 32.30 nT
Mittelwert: 28.95 nT
Standardab.: 1.39 nT
95. Perzentil: 31.60 nT
Flanken/h: 210.0 /h
Abs. Schwelle 30.29 nT
Ø d. Spitzen: 31.06 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
180
160
140
120
100
80
60
40
20
12:37
12:38
12:39
12:40
12:41
E462, MP5; Abstand Trassenmitte Bahnstromleitung: 80 m; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018; 12:36:00 bis 12:42:00

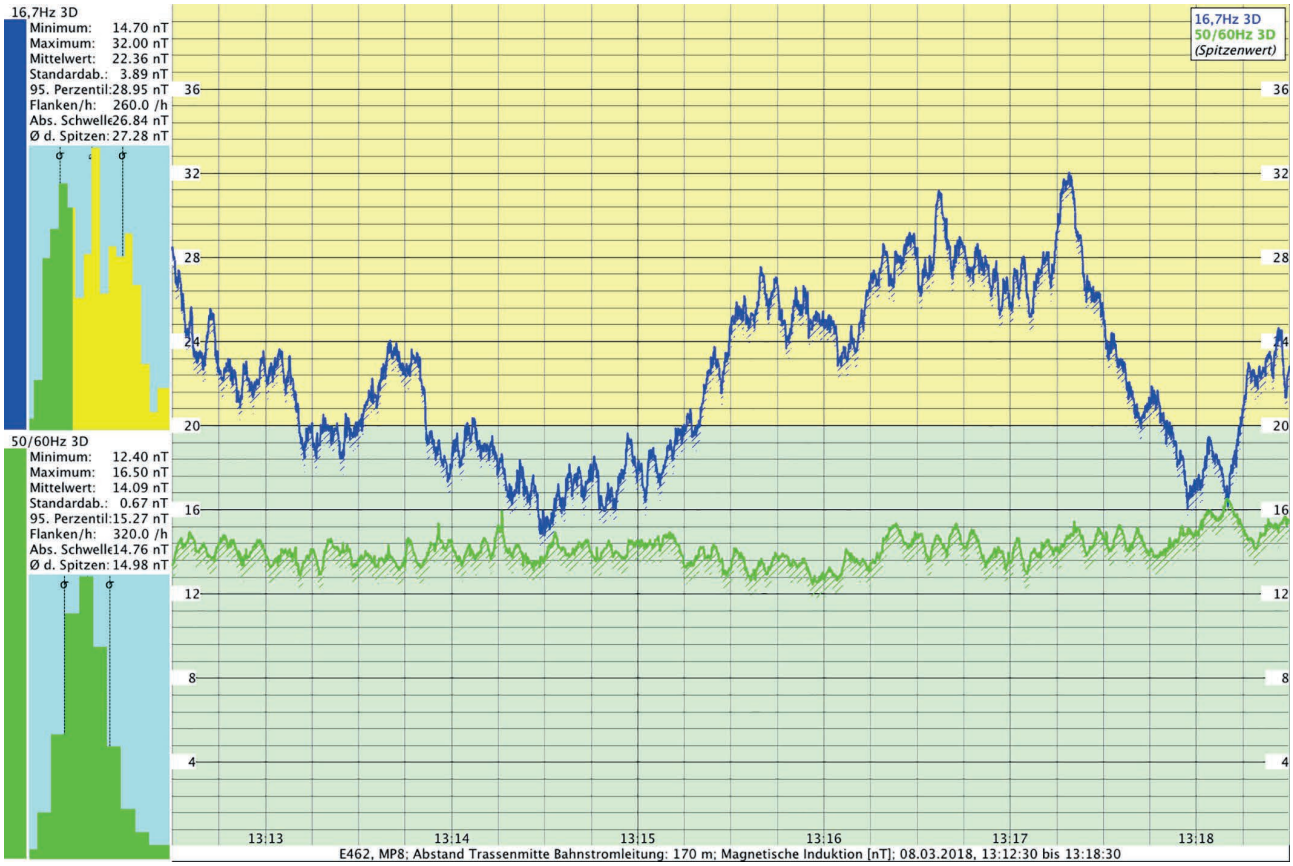

16,7Hz 3D
Minimum: 441.20 nT
Maximum: 1203.00 nT
Mittelwert: 834.57 nT
Standardab. 159.68 nT
95. Perzen 1071.26 nT
Flanken/h: 130.0 /h
Abs. Schwel 913.93 nT
Ø d. Spitzen 949.88 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 270.80 nT
Maximum: 391.40 nT
Mittelwert: 337.76 nT
Standardab.: 26.58 nT
95. Perzenti 380.44 nT
Flanken/h: 0.0 /h
Abs. Schwel 392.79 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
12:36
12:37
12:38
12:39
12:40
12:41
E462, MP0-5; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP5; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 12:36:00 bis 12:42:00


16,7Hz 3D
Minimum: 26.70 nT
Maximum: 61.30 nT
Mittelwert: 47.01 nT
Standardab.: 7.13 nT
95. Perzentil: 56.36 nT
Flanken/h: 190.0 /h
Abs. Schwelle 54.22 nT
Ø d. Spitzen: 55.13 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 19.20 nT
Maximum: 24.70 nT
Mittelwert: 22.09 nT
Standardab.: 0.94 nT
95. Perzentil: 23.60 nT
Flanken/h: 310.0 /h
Abs. Schwelle 23.03 nT
Ø d. Spitzen: 23.36 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
12:52
12:53
12:54
12:55
12:56
12:57
E462, MP6; Abstand Trassenmitte Bahnstromleitung: 110 m; Magnetische Induktion [nT], 08.03.2018, 12:51:40 bis 12:57:40

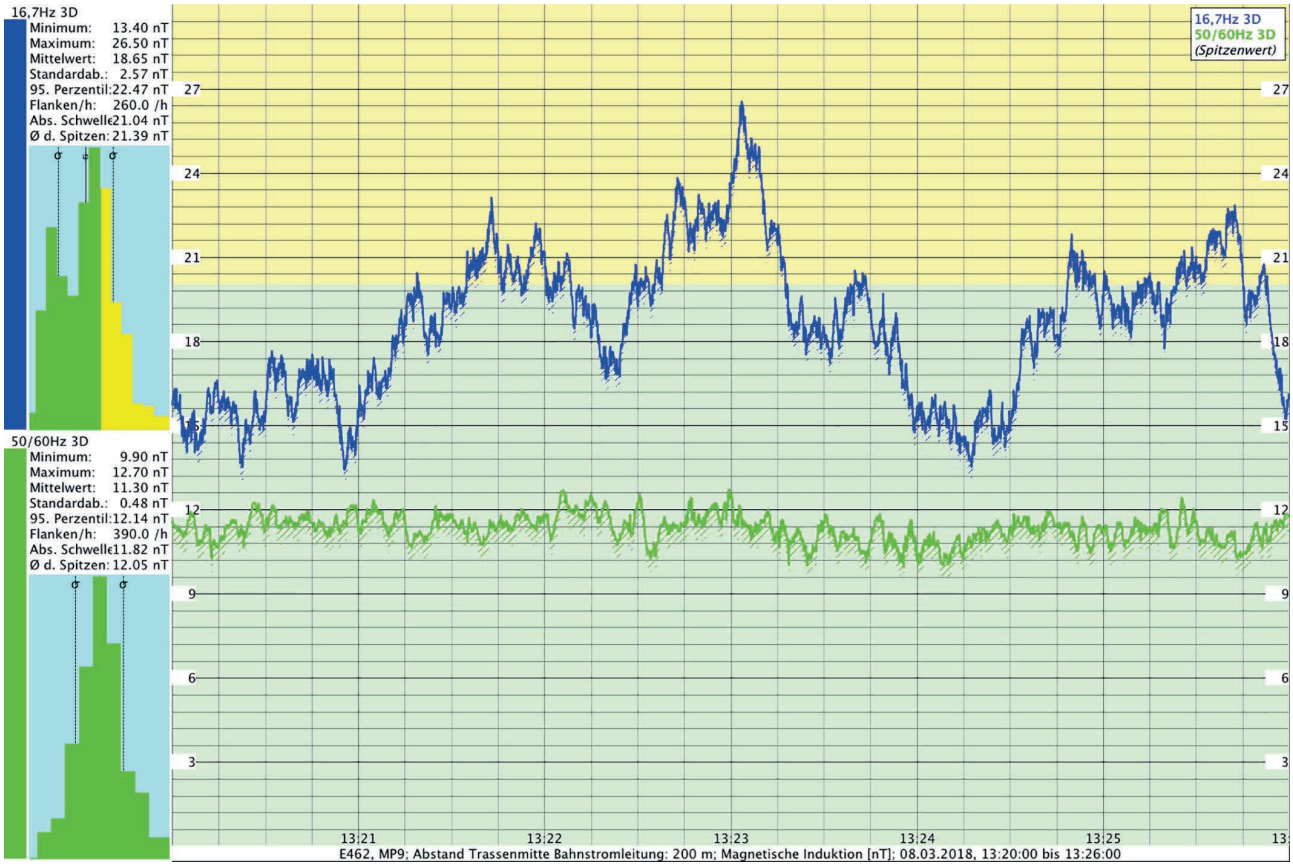

16,7Hz 3D
Minimum: 410.70 nT
Maximum: 986.40 nT
Mittelwert: 739.56 nT
Standardab. 113.80 nT
95. Perzenti 894.06 nT
Flanken/h: 30.0 /h
Abs. Schwel 913.93 nT
Ø d. Spitzer 918.13 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 332.40 nT
Maximum: 425.90 nT
Mittelwert: 377.06 nT
Standardab.: 16.01 nT
95. Perzenti 405.01 nT
Flanken/h: 320.0 /h
Abs. Schwel 392.79 nT
Ø d. Spitzer 397.51 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
12:52
12:53
12:54
12:55
12:56
12:57
E462, MP0-6; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP6; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 12:51:40 bis 12:57:40


16,7Hz 3D
Minimum: 20.40 nT
Maximum: 44.10 nT
Mittelwert: 33.36 nT
Standardab.: 5.32 nT
95. Perzentil: 42.12 nT
Flanken/h: 130.0 /h
Abs. Schwelle 38.61 nT
Ø d. Spitzen: 39.24 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 15.30 nT
Maximum: 19.00 nT
Mittelwert: 17.26 nT
Standardab.: 0.69 nT
95. Perzentil: 18.26 nT
Flanken/h: 440.0 /h
Abs. Schwelle 17.94 nT
Ø d. Spitzen: 18.15 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
12:59
13
13:01
13:02
13:03
13:04
E462, MP7; Abstand Trassenmitte Bahnstromleitung: 140 m; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 12:58:50 bis 13:04:50

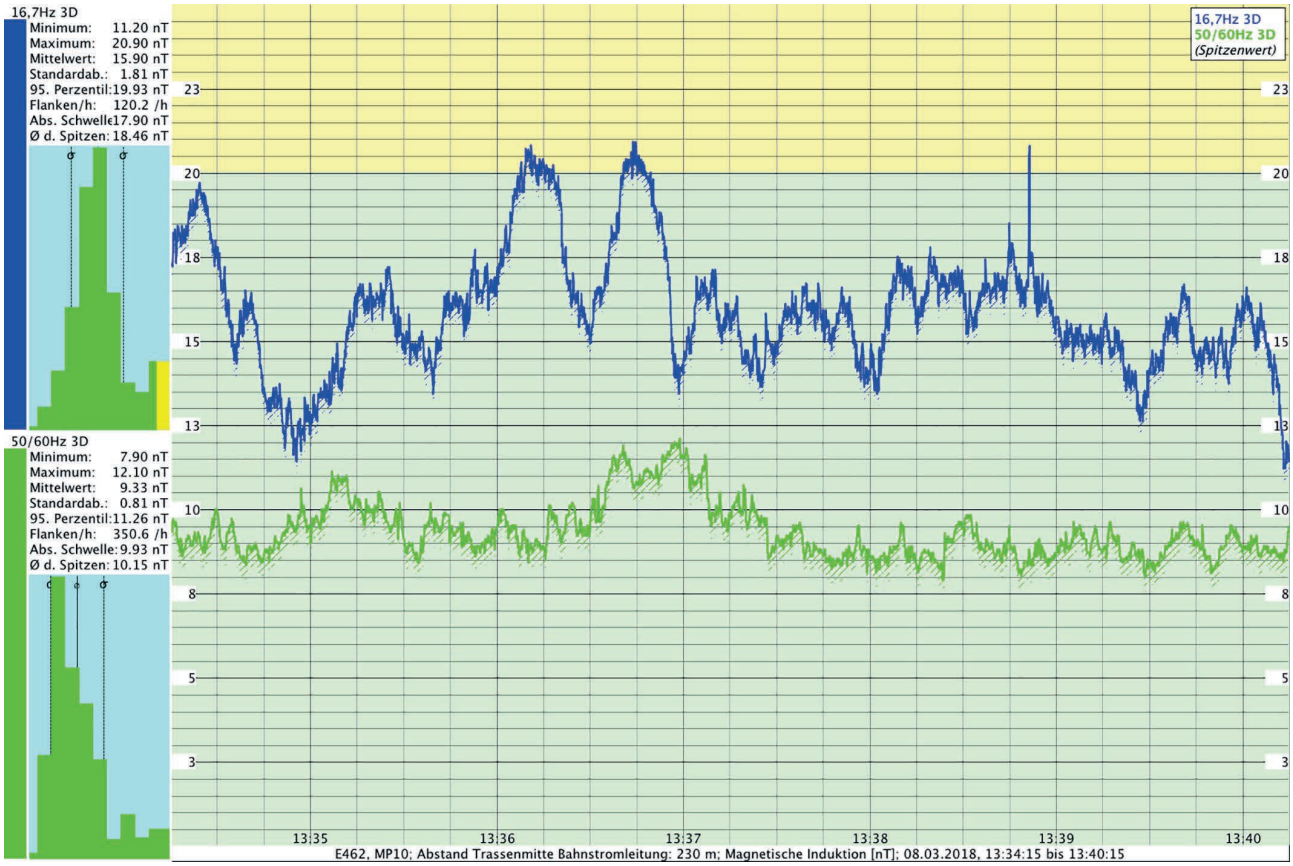

16,7Hz 3D
Minimum: 520.20 nT
Maximum: 1086.90 nT
Mittelwert: 798.39 nT
Standardab. 134.09 nT
95. Perzen 1021.57 nT
Flanken/h: 90.0 /h
Abs. Schwel 913.93 nT
Ø d. Spitzer 964.06 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 334.80 nT
Maximum: 433.30 nT
Mittelwert: 384.26 nT
Standardab.: 19.07 nT
95. Perzenti 413.20 nT
Flanken/h: 320.0 /h
Abs. Schwel 392.79 nT
Ø d. Spitzer 398.56 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
12:59
13
13:01
13:02
13:03
13:04
E462, MP0-7; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP7; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 112:58:50 bis 13:04:50

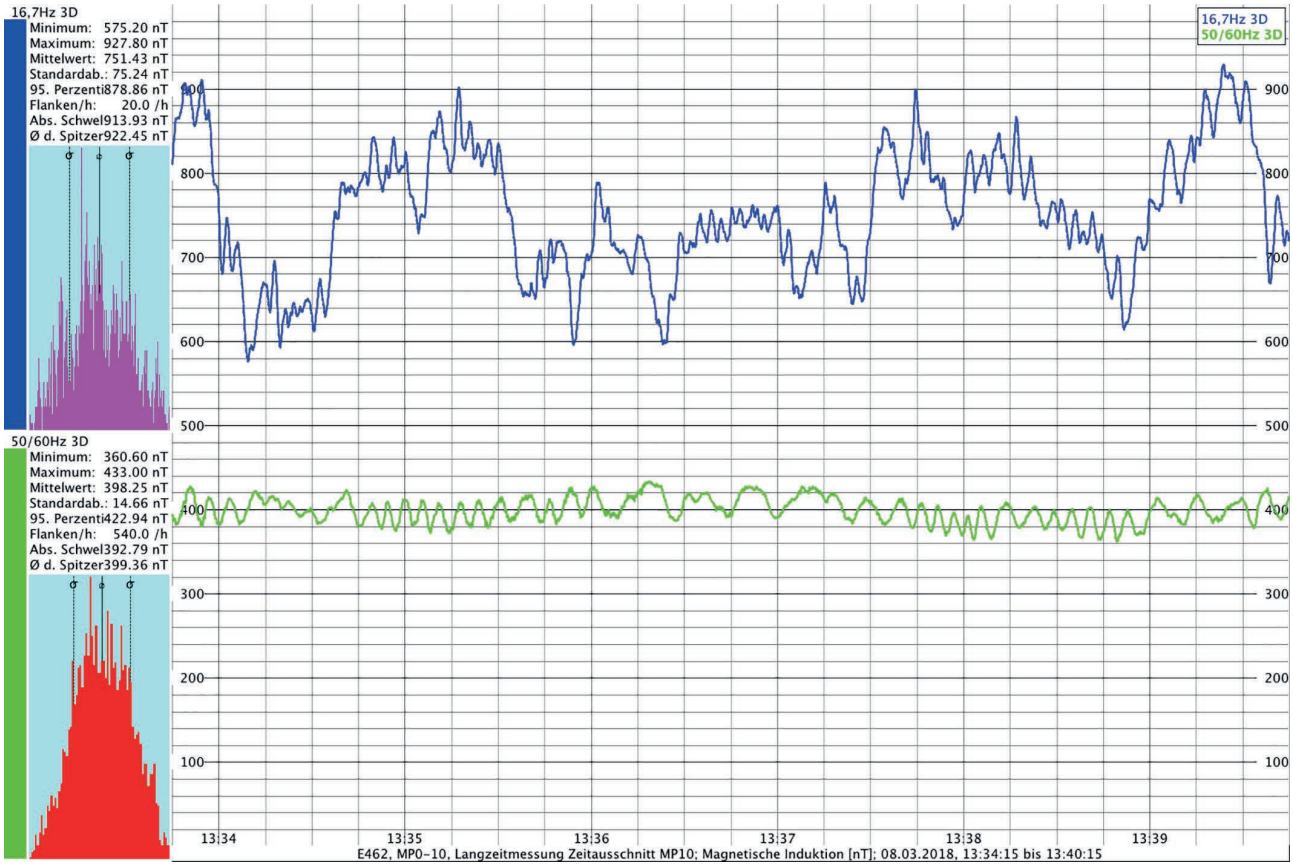

16,7Hz 3D
Minimum: 14.70 nT
Maximum: 32.00 nT
Mittelwert: 22.36 nT
Standardab.: 3.89 nT
95. Perzentil: 28.95 nT
Flanken/h: 260.0 /h
Abs. Schwelle 26.84 nT
Ø d. Spitzen: 27.28 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 12.40 nT
Maximum: 16.50 nT
Mittelwert: 14.09 nT
Standardab.: 0.67 nT
95. Perzentil: 15.27 nT
Flanken/h: 320.0 /h
Abs. Schwelle 14.76 nT
Ø d. Spitzen: 14.98 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
36
32
28
24
20
16
12
8
4
13:13
13:14
13:15
13:16
13:17
13:18
E462, MP8; Abstand Trassenmitte Bahnstromleitung: 170 m; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 13:12:30 bis 13:18:30

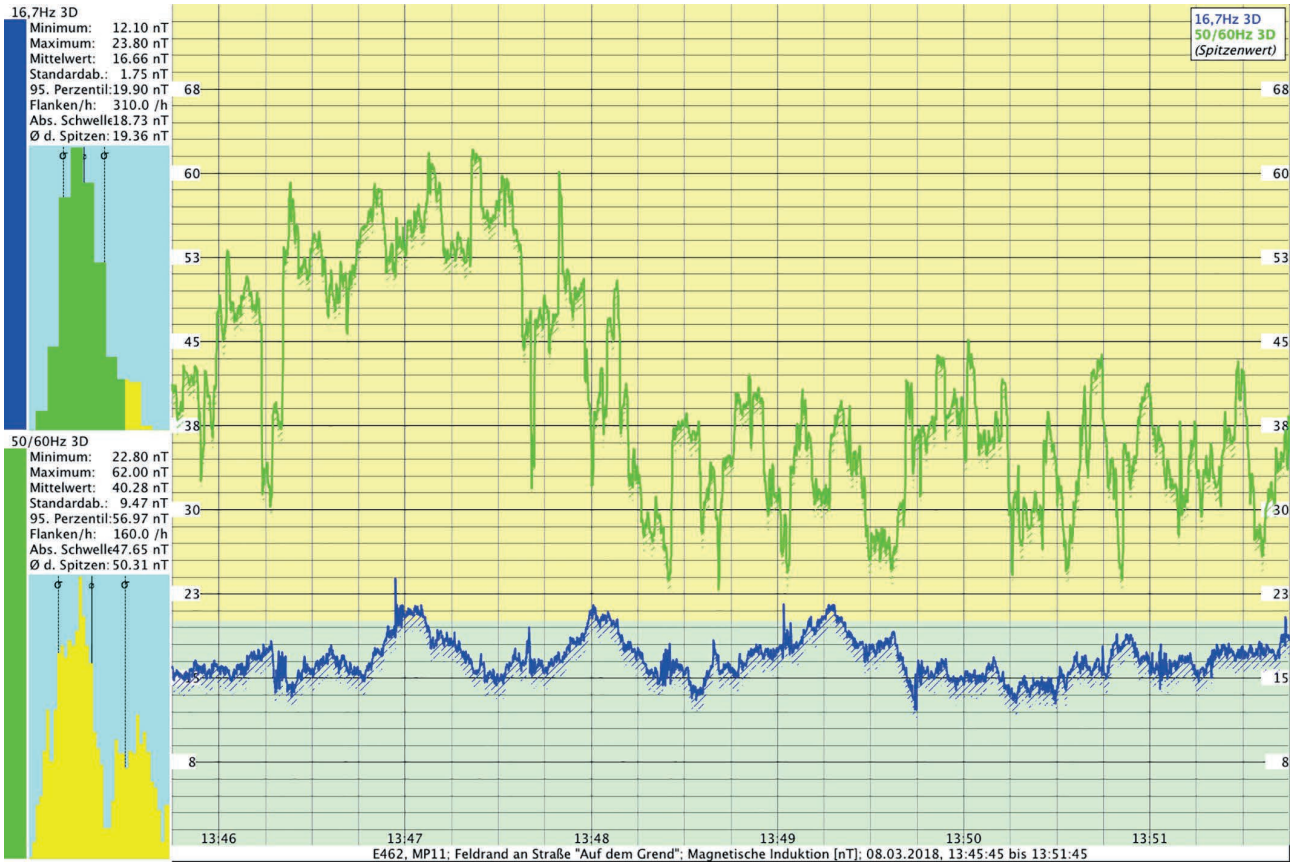
16,7Hz 3D
Minimum: 399.10 nT
Maximum: 991.90 nT
Mittelwert: 694.98 nT
Standardab. 125.69 nT
95. Perzenti 890.87 nT
Flanken/h: 20.0 /h
Abs. Schwel 913.93 nT
Ø d. Spitzer 975.55 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 354.80 nT
Maximum: 433.00 nT
Mittelwert: 395.00 nT
Standardab.: 13.88 nT
95. Perzenti 417.96 nT
Flanken/h: 620.0 /h
Abs. Schwel 392.79 nT
Ø d. Spitzer 400.50 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
900
800
700
600
500
400
300
200
100
13:13
13:14
13:15
13:16
13:17
E462, MP0-8; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP8; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 13:12:30 bis 13:18:30

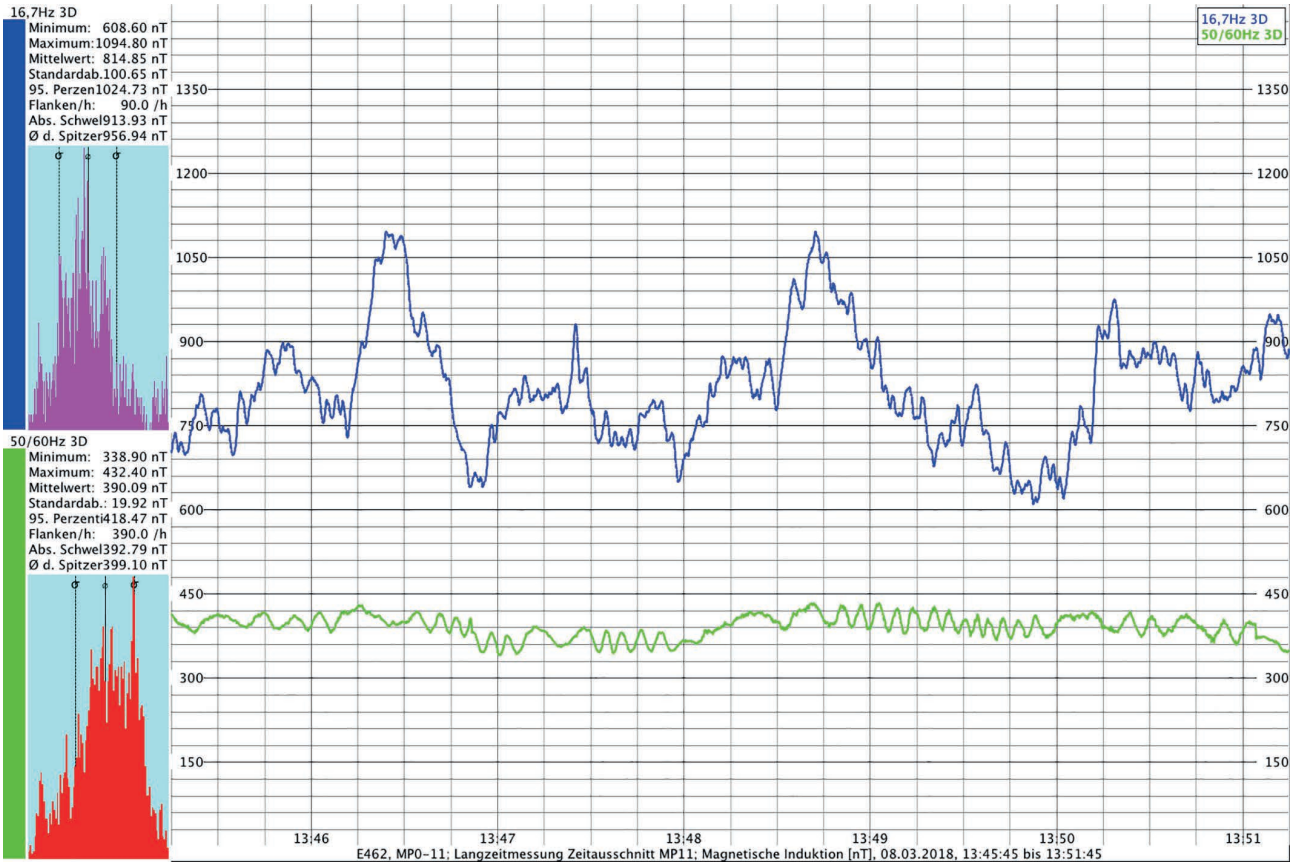

16,7Hz 3D
Minimum: 13.40 nT
Maximum: 26.50 nT
Mittelwert: 18.65 nT
Standardab.: 2.57 nT
95. Perzentil: 22.47 nT
Flanken/h: 260.0 /h
Abs. Schwelle 21.04 nT
Ø d. Spitzen: 21.39 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 9.90 nT
Maximum: 12.70 nT
Mittelwert: 11.30 nT
Standardab.: 0.48 nT
95. Perzentil: 12.14 nT
Flanken/h: 390.0 /h
Abs. Schwelle 11.82 nT
Ø d. Spitzen: 12.05 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
27
24
21
18
15
12
9
6
3
13:21
13:22
13:23
13:24
13:25
E462, MP9; Abstand Trassenmitte Bahnstromleitung: 200 m; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 13:20:00 bis 13:26:00

16,7Hz 3D
Minimum: 500.30 nT
Maximum: 1134.70 nT
Mittelwert: 799.90 nT
Standardab. 111.78 nT
95. Perzenti 951.85 nT
Flanken/h: 170.0 /h
Abs. Schwel 913.93 nT
Ø d. Spitzer 940.31 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 313.70 nT
Maximum: 434.40 nT
Mittelwert: 391.77 nT
Standardab.: 24.13 nT
95. Perzenti 420.43 nT
Flanken/h: 390.0 /h
Abs. Schwel 392.79 nT
Ø d. Spitzer 401.78 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
1350
1200
1050
900
750
600
450
300
150
13:20
13:21
13:22
13:23
13:24
13:25
E462, MP0-9; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP9; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 13:20:00 bis13:26:00


16,7Hz 3D
Minimum: 11.20 nT
Maximum: 20.90 nT
Mittelwert: 15.90 nT
Standardab.: 1.81 nT
95. Perzentil:19.93 nT
Flanken/h: 120.2 /h
Abs. Schwelle17.90 nT
Ø d. Spitzen: 18.46 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 7.90 nT
Maximum: 12.10 nT
Mittelwert: 9.33 nT
Standardab.: 0.81 nT
95. Perzentil:11.26 nT
Flanken/h: 350.6 /h
Abs. Schwelle: 9.93 nT
Ø d. Spitzen: 10.15 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
23
20
18
15
13
10
8
5
3
13:35
13:36
13:37
13:38
13:39
13:40
E462, MP10; Abstand Trassenmitte Bahnstromleitung: 230 m; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 13:34:15 bis 13:40:15


16,7Hz 3D
Minimum: 575.20 nT
Maximum: 927.80 nT
Mittelwert: 751.43 nT
Standardab.: 75.24 nT
95. Perzenti878.86 nT
Flanken/h: 20.0 /h
Abs. Schwel913.93 nT
Ø d. Spitzer922.45 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 360.60 nT
Maximum: 433.00 nT
Mittelwert: 398.25 nT
Standardab.: 14.66 nT
95. Perzenti422.94 nT
Flanken/h: 540.0 /h
Abs. Schwel392.79 nT
Ø d. Spitzer399.36 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
900
800
700
600
500
400
300
200
100
13:34
13:35
13:36
13:37
13:38
13:39
E462, MP0-10, Langzeitmessung Zeitausschnitt MP10; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 13:34:15 bis 13:40:15


16,7Hz 3D
Minimum: 12.10 nT
Maximum: 23.80 nT
Mittelwert: 16.66 nT
Standardab.: 1.75 nT
95. Perzentil:19.90 nT
Flanken/h: 310.0 /h
Abs. Schwelle18.73 nT
Ø d. Spitzen: 19.36 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 22.80 nT
Maximum: 62.00 nT
Mittelwert: 40.28 nT
Standardab.: 9.47 nT
95. Perzentil:56.97 nT
Flanken/h: 160.0 /h
Abs. Schwelle47.65 nT
Ø d. Spitzen: 50.31 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
(Spitzenwert)
68
60
53
45
38
30
23
15
8
13:46
13:47
13:48
13:49
13:50
13:51
E462, MP11; Feldrand an Straße "Auf dem Grend"; Magnetische Induktion [nT]; 08.03.2018, 13:45:45 bis 13:51:45


16,7Hz 3D
Minimum: 608.60 nT
Maximum:1094.80 nT
Mittelwert: 814.85 nT
Standardab.100.65 nT
95. Perzen1024.73 nT
Flanken/h: 90.0 /h
Abs. Schwel913.93 nT
Ø d. Spitzer956.94 nT
50/60Hz 3D
Minimum: 338.90 nT
Maximum: 432.40 nT
Mittelwert: 390.09 nT
Standardab.: 19.92 nT
95. Perzenti418.47 nT
Flanken/h: 390.0 /h
Abs. Schwel392.79 nT
Ø d. Spitzer399.10 nT
16,7Hz 3D
50/60Hz 3D
1350
1200
1050
900
750
600
450
300
150
13:46
13:47
13:48
13:49
13:50
13:51
E462, MP0-11; Langzeitmessung Zeitausschnitt MP11; Magnetische Induktion [nT], 08.03.2018, 13:45:45 bis 13:51:45

Geometry: new.geo

Para. No.	Number Ropes	Segments p.Ropes	Startpoint X[m]	Y[m]	Z[m]	Endpoint X[m]	Y[m]	Z[m]	Number Points	dx-Size [m]	dy_Size [m]	Number of Rows
0	124	1	-300.0	690.0	1.5	10.0	690.1	1.5	1241	0.3	0.1	2

No. Rope		Startcoordinates X[m]	Y[m]	Z[m]	Endcoordinates X[m]	Y[m]	Z[m]	Height [m]	Voltage [kV]	Current [A]	Phase [°]	Rope Radius [mm]	No. Subr.	Dist. Subr. [m]	Freq-uency [Hz]
1	X	3.8	-0.0	23.9	3.8	330.0	23.9	14.0	110.0	325.0	0.0	10.9	1	0.0	17
2	X	7.7	-0.0	23.9	7.7	330.0	23.9	14.0	110.0	325.0	180.0	10.9	1	0.0	17
3	X	-7.7	0.0	23.9	-7.7	330.0	23.9	14.0	110.0	325.0	0.0	10.9	1	0.0	17
4	X	-3.8	0.0	23.9	-3.8	330.0	23.9	14.0	110.0	325.0	180.0	10.9	1	0.0	17
5	GX	0.0	0.0	31.0	0.0	330.0	31.0	21.0	0.0	0.0	0.0	5.7	1	0.0	17
6	X	3.8	330.0	23.9	3.8	660.0	23.9	14.0	110.0	325.0	0.0	10.9	1	0.0	17
7	X	7.7	330.0	23.9	7.7	660.0	23.9	14.0	110.0	325.0	180.0	10.9	1	0.0	17
8	X	-7.7	330.0	23.9	-7.7	660.0	23.9	14.0	110.0	325.0	0.0	10.9	1	0.0	17
9	X	-3.8	330.0	23.9	-3.8	660.0	23.9	14.0	110.0	325.0	180.0	10.9	1	0.0	17
10	GX	0.0	330.0	31.0	0.0	660.0	31.0	21.0	0.0	0.0	0.0	5.7	1	0.0	17
11	X	3.8	660.0	23.9	3.8	995.0	23.9	14.0	110.0	325.0	0.0	10.9	1	0.0	17
12	X	7.7	660.0	23.9	7.7	995.0	23.9	14.0	110.0	325.0	180.0	10.9	1	0.0	17
13	X	-7.7	660.0	23.9	-7.7	995.0	23.9	14.0	110.0	325.0	0.0	10.9	1	0.0	17
14	X	-3.8	660.0	23.9	-3.8	995.0	23.9	14.0	110.0	325.0	180.0	10.9	1	0.0	17
15	GX	0.0	660.0	31.0	0.0	995.0	31.0	21.0	0.0	0.0	0.0	5.7	1	0.0	17
16	X	3.8	995.0	23.9	3.8	1325.0	23.9	14.0	110.0	325.0	0.0	10.9	1	0.0	17
17	X	7.7	995.0	23.9	7.7	1325.0	23.9	14.0	110.0	325.0	180.0	10.9	1	0.0	17
18	X	-7.7	995.0	23.9	-7.7	1325.0	23.9	14.0	110.0	325.0	0.0	10.9	1	0.0	17
19	X	-3.8	995.0	23.9	-3.8	1325.0	23.9	14.0	110.0	325.0	180.0	10.9	1	0.0	17
20	GX	0.0	995.0	31.0	0.0	1325.0	31.0	21.0	0.0	0.0	0.0	5.7	1	0.0	17
21	X	19.8	12.0	18.3	20.8	300.0	18.3	10.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
22	X	21.2	12.0	24.4	22.2	300.0	24.4	16.1	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
23	X	22.8	12.0	31.1	23.8	300.0	31.1	22.6	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
24	X	33.3	12.0	31.1	34.3	300.0	31.1	22.6	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
25	X	34.8	12.0	24.4	35.8	300.0	24.4	16.1	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
26	X	36.3	12.0	18.3	37.3	300.0	18.3	10.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
27	GX	28.0	12.0	40.3	29.0	300.0	40.3	31.1	0.0	3.1	150.9	5.7	1	0.0	50
28	X	20.8	300.0	18.3	21.8	582.0	18.3	10.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
29	X	22.2	300.0	24.4	23.2	582.0	24.4	16.1	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
30	X	23.8	300.0	31.1	24.8	582.0	31.1	22.6	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
31	X	34.3	300.0	31.1	35.3	582.0	31.1	22.6	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
32	X	35.8	300.0	24.4	36.8	582.0	24.4	16.1	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
33	X	37.3	300.0	18.3	38.3	582.0	18.3	10.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
34	GX	29.0	300.0	40.3	30.0	582.0	40.3	31.1	0.0	3.1	150.9	5.7	1	0.0	50
35	X	21.8	582.0	18.3	22.8	892.0	18.3	10.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
36	X	23.2	582.0	24.4	24.2	892.0	24.4	16.1	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
37	X	24.8	582.0	31.1	25.8	892.0	31.1	22.6	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
38	X	35.3	582.0	31.1	36.3	892.0	31.1	22.6	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
39	X	36.8	582.0	24.4	37.8	892.0	24.4	16.1	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
40	X	38.3	582.0	18.3	39.3	892.0	18.3	10.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
41	GX	30.0	582.0	40.3	31.0	892.0	40.3	31.1	0.0	3.1	150.9	5.7	1	0.0	50

Matrix mit Parametern für die Simulationsberechnungen mit dem Programm WinField, 1. Teil

Para. No.	Number Ropes	Segments p.Ropes	Startpoint X[m]	Y[m]	Z[m]	Endpoint X[m]	Y[m]	Z[m]	Number Points	dx-Size [m]	dy_Size [m]	Number of Rows
0	124	1	-300.0	690.0	1.5	10.0	690.1	1.5	1241	0.3	0.1	2

No. Rope		Startcoordinates X[m]	Y[m]	Z[m]	Endcoordinates X[m]	Y[m]	Z[m]	Height [m]	Voltage [kV]	Current [A]	Phase [°]	Rope Radius [mm]	No. Subr.	Dist. Subr. [m]	Freq-uency [Hz]
42	X	22.8	892.0	18.3	28.8	1222.0	18.3	10.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
43	X	24.2	892.0	24.4	30.2	1222.0	24.4	16.1	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
44	X	25.8	892.0	31.1	31.8	1222.0	31.1	22.6	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
45	X	36.3	892.0	31.1	42.3	1222.0	31.1	22.6	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
46	X	37.8	892.0	24.4	43.8	1222.0	24.4	16.1	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
47	X	39.3	892.0	18.3	45.3	1222.0	18.3	10.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
48	GX	31.0	892.0	40.3	37.0	1222.0	40.3	31.1	0.0	3.1	150.9	5.7	1	0.0	50
49	X	64.3	110.0	51.8	64.3	354.0	51.8	36.8	380.0	650.0	0.0	10.9	4	0.4	50
50	X	60.8	110.0	40.8	60.8	354.0	40.8	25.9	380.0	650.0	120.0	10.9	4	0.4	50
51	X	67.3	110.0	40.8	67.3	354.0	40.8	25.9	380.0	650.0	240.0	10.9	4	0.4	50
52	X	82.8	110.0	40.8	82.8	354.0	40.8	25.9	380.0	650.0	0.0	10.9	4	0.4	50
53	X	85.8	110.0	51.8	85.8	354.0	51.8	36.8	380.0	650.0	120.0	10.9	4	0.4	50
54	X	89.3	110.0	40.8	89.3	354.0	40.8	25.9	380.0	650.0	240.0	10.9	4	0.4	50
55	X	68.5	110.0	31.0	68.5	354.0	31.0	16.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
56	X	63.5	110.0	31.0	63.5	354.0	31.0	16.0	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
57	X	58.5	110.0	31.0	58.5	354.0	31.0	16.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
58	X	91.5	110.0	31.0	91.5	354.0	31.0	16.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
59	X	86.5	110.0	31.0	86.5	354.0	31.0	16.0	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
60	X	81.5	110.0	31.0	81.5	354.0	31.0	16.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
61	X	61.5	110.0	23.0	61.5	354.0	23.0	8.0	110.0	162.0	0.0	10.9	1	0.0	50
62	X	65.5	110.0	23.0	65.5	354.0	23.0	8.0	110.0	162.0	120.0	10.9	1	0.0	50
63	X	69.5	110.0	23.0	69.5	354.0	23.0	8.0	110.0	162.0	240.0	10.9	1	0.0	50
64	X	80.5	110.0	23.0	80.5	354.0	23.0	8.0	110.0	162.0	0.0	10.9	1	0.0	50
65	X	84.5	110.0	23.0	84.5	354.0	23.0	8.0	110.0	162.0	120.0	10.9	1	0.0	50
66	X	88.5	110.0	23.0	88.5	354.0	23.0	8.0	110.0	162.0	240.0	10.9	1	0.0	50
67	GX	75.0	110.0	66.8	75.0	354.0	66.8	51.8	0.0	21.1	273.0	5.7	1	0.0	50
68	X	64.3	354.0	51.8	65.3	610.0	51.8	36.8	380.0	650.0	0.0	10.9	4	0.4	50
69	X	60.8	354.0	40.8	61.8	610.0	40.8	25.9	380.0	650.0	120.0	10.9	4	0.4	50
70	X	67.3	354.0	40.8	68.3	610.0	40.8	25.9	380.0	650.0	240.0	10.9	4	0.4	50
71	X	82.8	354.0	40.8	83.8	610.0	40.8	25.9	380.0	650.0	0.0	10.9	4	0.4	50
72	X	85.8	354.0	51.8	86.8	610.0	51.8	36.8	380.0	650.0	120.0	10.9	4	0.4	50
73	X	89.3	354.0	40.8	90.3	610.0	40.8	25.9	380.0	650.0	240.0	10.9	4	0.4	50
74	X	68.5	354.0	31.0	69.5	610.0	31.0	16.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
75	X	63.5	354.0	31.0	64.5	610.0	31.0	16.0	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
76	X	58.5	354.0	31.0	59.5	610.0	31.0	16.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
77	X	91.5	354.0	31.0	92.5	610.0	31.0	16.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
78	X	86.5	354.0	31.0	87.5	610.0	31.0	16.0	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
79	X	81.5	354.0	31.0	82.5	610.0	31.0	16.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
80	X	61.5	354.0	23.0	62.5	610.0	23.0	8.0	110.0	162.0	0.0	10.9	1	0.0	50
81	X	65.5	354.0	23.0	66.5	610.0	23.0	8.0	110.0	162.0	120.0	10.9	1	0.0	50
82	X	69.5	354.0	23.0	70.5	610.0	23.0	8.0	110.0	162.0	240.0	10.9	1	0.0	50
83	X	80.5	354.0	23.0	81.5	610.0	23.0	8.0	110.0	162.0	0.0	10.9	1	0.0	50

Matrix mit Parametern für die Simulationsberechnungen mit dem Programm WinField, 2. Teil

Para. No.	Number Ropes	Segments p.Ropes	Startpoint X[m]	Startpoint Y[m]	Startpoint Z[m]	Endpoint X[m]	Endpoint Y[m]	Endpoint Z[m]	Number Points	dx-Size [m]	dy_Size [m]	Number of Rows
0	124	1	-300.0	690.0	1.5	10.0	690.1	1.5	1241	0.3	0.1	2

No. Rope	Startcoordinates X[m]	Startcoordinates Y[m]	Startcoordinates Z[m]	Endcoordinates X[m]	Endcoordinates Y[m]	Endcoordinates Z[m]	Height [m]	Voltage [kV]	Current [A]	Phase [°]	Rope Radius [mm]	No. Subr.	Dist. Subr. [m]	Freq-uency [Hz]
84 X	84.5	354.0	23.0	85.5	610.0	23.0	8.0	110.0	162.0	120.0	10.9	1	0.0	50
85 X	88.5	354.0	23.0	89.5	610.0	23.0	8.0	110.0	162.0	240.0	10.9	1	0.0	50
86GX	75.0	354.0	66.8	76.0	610.0	66.8	51.8	0.0	21.1	273.0	5.7	1	0.0	50
87 X	65.3	610.0	51.8	68.3	865.0	51.8	36.8	380.0	650.0	0.0	10.9	4	0.4	50
88 X	61.8	610.0	40.8	64.8	865.0	40.8	25.9	380.0	650.0	120.0	10.9	4	0.4	50
89 X	68.3	610.0	40.8	71.3	865.0	40.8	25.9	380.0	650.0	240.0	10.9	4	0.4	50
90 X	83.8	610.0	40.8	86.8	865.0	40.8	25.9	380.0	650.0	0.0	10.9	4	0.4	50
91 X	86.8	610.0	51.8	89.8	865.0	51.8	36.8	380.0	650.0	120.0	10.9	4	0.4	50
92 X	90.3	610.0	40.8	93.3	865.0	40.8	25.9	380.0	650.0	240.0	10.9	4	0.4	50
93 X	69.5	610.0	31.0	72.5	865.0	31.0	16.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
94 X	64.5	610.0	31.0	67.5	865.0	31.0	16.0	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
95 X	59.5	610.0	31.0	62.5	865.0	31.0	16.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
96 X	92.5	610.0	31.0	95.5	865.0	31.0	16.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
97 X	87.5	610.0	31.0	90.5	865.0	31.0	16.0	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
98 X	82.5	610.0	31.0	85.5	865.0	31.0	16.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
99 X	62.5	610.0	23.0	65.5	865.0	23.0	8.0	110.0	162.0	0.0	10.9	1	0.0	50
100 X	66.5	610.0	23.0	69.5	865.0	23.0	8.0	110.0	162.0	120.0	10.9	1	0.0	50
101 X	70.5	610.0	23.0	73.5	865.0	23.0	8.0	110.0	162.0	240.0	10.9	1	0.0	50
102 X	81.5	610.0	23.0	84.5	865.0	23.0	8.0	110.0	162.0	0.0	10.9	1	0.0	50
103 X	85.5	610.0	23.0	88.5	865.0	23.0	8.0	110.0	162.0	120.0	10.9	1	0.0	50
104 X	89.5	610.0	23.0	92.5	865.0	23.0	8.0	110.0	162.0	240.0	10.9	1	0.0	50
105GX	76.0	610.0	66.8	79.0	865.0	66.8	51.8	0.0	21.1	273.0	5.7	1	0.0	50
106 X	68.3	865.0	51.8	70.3	1265.0	51.8	36.8	380.0	650.0	0.0	10.9	4	0.4	50
107 X	64.8	865.0	40.8	66.8	1265.0	40.8	25.9	380.0	650.0	120.0	10.9	4	0.4	50
108 X	71.3	865.0	40.8	73.3	1265.0	40.8	25.9	380.0	650.0	240.0	10.9	4	0.4	50
109 X	86.8	865.0	40.8	88.8	1265.0	40.8	25.9	380.0	650.0	0.0	10.9	4	0.4	50
110 X	89.8	865.0	51.8	91.8	1265.0	51.8	36.8	380.0	650.0	120.0	10.9	4	0.4	50
111 X	93.3	865.0	40.8	95.3	1265.0	40.8	25.9	380.0	650.0	240.0	10.9	4	0.4	50
112 X	72.5	865.0	31.0	74.5	1265.0	31.0	16.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
113 X	67.5	865.0	31.0	69.5	1265.0	31.0	16.0	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
114 X	62.5	865.0	31.0	64.5	1265.0	31.0	16.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
115 X	95.5	865.0	31.0	97.5	1265.0	31.0	16.0	220.0	325.0	0.0	10.9	2	0.4	50
116 X	90.5	865.0	31.0	92.5	1265.0	31.0	16.0	220.0	325.0	120.0	10.9	2	0.4	50
117 X	85.5	865.0	31.0	87.5	1265.0	31.0	16.0	220.0	325.0	240.0	10.9	2	0.4	50
118 X	65.5	865.0	23.0	67.5	1265.0	23.0	8.0	110.0	162.0	0.0	10.9	1	0.0	50
119 X	69.5	865.0	23.0	71.5	1265.0	23.0	8.0	110.0	162.0	120.0	10.9	1	0.0	50
120 X	73.5	865.0	23.0	75.5	1265.0	23.0	8.0	110.0	162.0	240.0	10.9	1	0.0	50
121 X	84.5	865.0	23.0	86.5	1265.0	23.0	8.0	110.0	162.0	0.0	10.9	1	0.0	50
122 X	88.5	865.0	23.0	90.5	1265.0	23.0	8.0	110.0	162.0	120.0	10.9	1	0.0	50
123 X	92.5	865.0	23.0	94.5	1265.0	23.0	8.0	110.0	162.0	240.0	10.9	1	0.0	50
124GX	79.0	865.0	66.8	81.0	1265.0	66.8	51.8	0.0	21.1	273.0	5.7	1	0.0	50

Matrix mit Parametern für die Simulationsberechnungen mit dem Programm WinField, 3. Teil