

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

**Bestimmung und Vergleich der von Erdkabeln und
Hochspannungsfreileitungen verursachten Expositionen
gegenüber niederfrequenten elektrischen und magnetischen
Feldern – Vorhaben 3608S03011**

2. korrigierte Auflage

Auftragnehmer:

ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH, Hannover

H.-P. Neitzke

J. Osterhoff

H. Voigt

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

BfS-RESFOR-29/10-REV-1

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-201011153619

Salzgitter, November 2010



Vorhaben **3608S03011**

Bestimmung und Vergleich der von Erdkabeln und Hochspannungsfreileitungen verursachten Expositionen gegenüber niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern

Abschlussbericht

ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH

im Auftrag des

Bundesamtes für Strahlenschutz

Bestimmung und Vergleich der von Erdkabeln und Hochspannungsfreileitungen verursachten Expositionen gegenüber niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern

Abschlussbericht

ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH

Dr. H.-Peter Neitzke
Dr. Julia Osterhoff
Dr. Hartmut Voigt

im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz

Hannover, November 2009

Der vorliegende Bericht gibt den Kenntnisstand und die Auffassung des Auftragsnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftragsgebers (Bundesamt für Strahlenschutz) übereinstimmen.

Inhalt

		Seite
	Kurzzusammenfassung / Abstract	0-1
	Zusammenfassung	0-3
	Summary	0-5
1	Aufgabenstellung	1
2	Bestandsaufnahme	3
2.1	Grundlagen	3
2.1.1	Elektrische Versorgungsnetze	3
2.1.2	Technische Ausführung von Freileitungen	6
2.1.3	Technische Ausführung von Erdkabeln	7
2.1.4	Einflussfaktoren elektrischer und magnetischer Immissionen in der Umgebung von Freileitungen und Erdkabeln	11
2.1.4.1	Einflüsse auf das elektrische Feld	13
2.1.4.2	Einflüsse auf das magnetische Feld	14
2.1.5	Immissionsschutzrechtliche Bestimmungen und Normen	16
2.2	Verfahren zur Bestimmung elektrischer und magnetischer Immissionen	22
2.2.1	Messtechnische Verfahren	22
2.2.1.1	Verfahren zur Messung des elektrischen Feldes	24
2.2.1.2	Verfahren zur Messung des magnetischen Feldes	26
2.2.1.3	Technische Daten von Messgeräten	28
2.2.2	Rechentechnische Verfahren	33
2.2.2.1	Theoretische Grundlagen für die Berechnung elektrischer und magnetischer Felder	33
2.2.2.2	Numerische Verfahren	34
2.2.2.3	Mögliche Fehler bei der Feldberechnung	35
2.2.2.4	Rechenprogramme zur Bestimmung der Feldverteilungen an Stromübertragungstrassen	36
2.3	Netzfrequente elektrische und magnetische Immissionen	37
2.3.1	Ergebnisse von Messungen	38
2.3.1.1	Netzfrequente elektrische und magnetische Felder in der Umgebung von Stromversorgungsanlagen	38
2.3.1.2	Netzfrequente elektrische und magnetische Felder in Wohngebieten	46
2.3.1.3	Netzfrequente elektrische und magnetische Felder in Wohnungen	47
2.3.1.4	Netzfrequente Magnetfeldexpositionen der Bevölkerung	56
2.3.2	Ergebnisse von Berechnungen der netzfrequenten elektrischen und magnetischen Felder in der Umgebung von Stromversorgungsanlagen	60
2.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse von Messungen und Berechnungen	64
3	Bestimmung der von Hochspannungsfreileitungen und -erdkabeln verursachten elektrischen und magnetischen Immissionen	65
3.1	Messtechnische Erfassung der niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder an Hochspannungsübertragungstrassen	68
3.1.1	Vorgehen bei der Immissionsbestimmung	68
3.1.1.1	Messungen an Freileitungstrassen	68
3.1.1.2	Messungen an Erdkabeltrassen	69
3.1.1.3	Verwendetes Messgerät	70
3.1.2	Ergebnisse der Messungen	71
3.1.2.1	Übersicht über die Messorte und Beschreibung der Messergebnisse anhand von Beispielen	71
3.1.2.2	Ergebnisse der Messungen an 380 kV-Freileitungen	77
3.1.2.2.1	FL380_1a	77
3.1.2.2.2	FL380_1b	81
3.1.2.2.3	FL380_2	89
3.1.2.2.4	FL380_3a	98
3.1.2.2.5	FL380_3b	102

3.1.2.2.6	FL380_3c	106
3.1.2.2.7	FL380_4a	110
3.1.2.2.8	FL380_4b	114
3.1.2.2.9	FL380_5	118
3.1.2.3	Ergebnisse der Messungen an einer 220 kV-Freileitung	122
3.1.2.4	Ergebnisse der Messungen an 110 kV-Freileitungen	126
3.1.2.4.1	FL110_1	126
3.1.2.4.2	FL110_2	130
3.1.2.4.3	FL110_3	134
3.1.2.4.4	FL110_4a	138
3.1.2.4.5	FL110_4b	145
3.1.2.4.6	FL110_5	150
3.1.2.4.7	FL110_6	154
3.1.2.4.8	FL110_7	158
3.1.2.4.9	FL110_8	162
3.1.2.5	Ergebnisse der Messungen an 380 kV-Erdkabeltrassen	166
3.1.2.5.1	EK380_1	166
3.1.2.5.2	EK380_2	169
3.1.2.5.3	EK380_3	172
3.1.2.6	Ergebnisse der Messungen an einer 220 kV-Erdkabeltrasse	175
3.1.2.7	Ergebnisse der Messungen an 110 kV-Erdkabeltrassen	178
3.1.2.7.1	EK110_1	178
3.1.2.7.2	EK110_2	181
3.1.2.7.3	EK110_3	185
3.1.2.7.4	EK110_4	188
3.1.2.7.5	EK110_5	191
3.1.3	Zusammenfassung der Messergebnisse und Vergleich der gemessenen Immissionen von Hochspannungsfreileitungen und Erdkabeltrassen	194
3.2	Rechnerische Bestimmung der niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder an Hochspannungsübertragungstrassen	198
3.2.1	Vorgehen bei den Feldberechnungen	198
3.2.1.1	Berechnungen für Freileitungstrassen	198
3.2.1.2	Berechnungen für Erdkabeltrassen	200
3.2.1.3	Verwendetes Feldberechnungsprogramm	202
3.2.2	Ergebnisse der Berechnungen	202
3.2.2.1	Übersicht über die Immissionsorte und Beschreibung der Ergebnisse anhand von Beispielen	202
3.2.2.2	Ergebnisse für 380 kV-Freileitungen	206
3.2.2.2.1	FL380_1a	206
3.2.2.2.2	FL380_1b	210
3.2.2.2.3	FL380_2	217
3.2.2.2.4	FL380_3a	224
3.2.2.2.5	FL380_3b	228
3.2.2.2.6	FL380_3c	232
3.2.2.2.7	FL380_4a	236
3.2.2.2.8	FL380_4b	240
3.2.2.2.9	FL380_5	244
3.2.2.2.10	FL380_6	248
3.2.2.3	Ergebnisse für eine 220 kV-Freileitung	252
3.2.2.4	Ergebnisse für 110 kV-Freileitungen	256
3.2.2.4.1	FL110_1	256
3.2.2.4.2	FL110_2	260
3.2.2.4.3	FL110_3	264
3.2.2.4.4	FL110_4a	268
3.2.2.4.5	FL110_4b	274
3.2.2.4.6	FL110_5	278
3.2.2.4.7	FL110_6	282
3.2.2.4.8	FL110_7	286
3.2.2.4.9	FL110_8	290

3.2.2.5	Ergebnisse für 380 kV-Erdkabeltrassen	294
3.2.2.5.1	EK380_1	294
3.2.2.5.2	EK380_2	296
3.2.2.5.3	EK380_3	298
3.2.2.5.4	EK380_4	300
3.2.2.6	Ergebnisse für eine 220 kV-Erdkabeltrasse	302
3.2.2.7	Ergebnisse für 110 kV-Erdkabeltrassen	305
3.2.2.7.1	EK110_1	305
3.2.2.7.2	EK110_2	307
3.2.2.7.3	EK110_3	311
3.2.2.7.4	EK110_4	314
3.2.2.7.5	EK110_5	316
3.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich der Immissionen von Hochspannungsfreileitungen und -erdkabeln	318
3.3	Vergleich der Ergebnisse dieses Vorhabens mit denen anderer Untersuchungen	326
3.3.1	Messungen	326
3.3.2	Berechnungen	327
4	Messungen der magnetischen Immissionen in Wohnungen	328
4.1	Vorgehen bei der Immissionsbestimmung	328
4.1.1	Punktmessungen und Spektren	329
4.1.2	Dauermessungen	330
4.1.3	Verwendetes Messgerät	330
4.1.4	Umrechnung auf andere Lastzustände	330
4.2	Ergebnisse der Messungen in Wohnungen fernab von Hochspannungstrassen (nicht-exponierte Wohnungen)	331
4.2.1	Beschreibung der Wohnungen	331
4.2.2	Punktmessungen	331
4.2.3	Frequenzspektren	338
4.2.4	Dauermessungen	340
4.3	Ergebnisse der Messungen in Wohnungen in der Nähe von Hochspannungstrassen (exponierte Wohnungen)	343
4.3.1	Beschreibung der Wohnungen	343
4.3.2	Messungen in Wohnungen an 380 kV-Freileitungen	344
4.3.2.1	Punktmessungen	344
4.3.2.2	Frequenzspektren	351
4.3.2.3	Dauermessungen	353
4.3.3	Messungen in Wohnungen an 110 kV-Freileitungen	356
4.3.3.1	Punktmessungen	356
4.3.3.2	Frequenzspektren	363
4.3.3.3	Dauermessung	364
4.3.4	Messungen in Wohnungen an 110 kV-Erdkabeltrassen	365
4.3.4.1	Punktmessungen	365
4.3.4.2	Frequenzspektren	369
4.3.4.3	Dauermessung	370
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen im Rahmen dieses Vorhabens und Vergleich mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen	372
4.4.1	Nicht-exponierte Wohnungen	372
4.4.2	Exponierte Wohnungen	373
5	Diskussion	376
	Literatur	378

Kurzzusammenfassung

Mittels Messungen vor Ort wurden die tatsächlich vorkommenden und mittels Berechnungen die maximal möglichen elektrischen und magnetischen Immissionen in der Umgebung von Freileitungen und Erdkabeln für die Stromversorgung bestimmt. Die Auswirkungen unterschiedlicher technischer Realisierungen auf die Immissionen sowie der Beitrag der Stromversorgungstrassen zu den Magnetfeldimmissionen in Wohnungen wurden untersucht. Die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Immissionen erreichten im Bereich von Freileitungstrassen fast 52 μT bzw. 9 kV/m. Im Trassenbereich von 380 kV-Freileitungen wurden in mehreren Fällen kleinräumige Überschreitungen des Grenzwerts der 26. BImSchV für das elektrische Feld festgestellt. Über Erdkabeln mit einer Verlegetiefe von 1,5 m und mehr können Werte der magnetischen Flussdichte bis 168 μT auftreten, d.h. dort sind kleinräumige Überschreitungen des Grenzwertes der 26. BImSchV für das Magnetfeld möglich. Erdkabel, die auf bestimmten Abschnitten ausnahmsweise in geringerer Tiefe verlegt wurden, können im Trassenbereich zu höheren Magnetfeldwerten führen. Außerhalb des Trassenbereichs sind die von Erdkabeln verursachten Immissionen deutlich niedriger als die von Freileitungen der gleichen Spannungsebene verursachten. Benachbarte Hochspannungsfreileitungen können in Wohnungen zu Expositionen führen, die deutlich über denen in Wohnungen fernab solcher Trassen liegen.

Abstract

Actual and worst case electric and magnetic immissions in the neighbourhood of overhead and underground high voltage power lines have been determined by measurements resp. calculations. The effects of different technical realisations on the immissions and the contribution of power lines to the magnetic field exposure in dwellings have been investigated. For overhead power lines extrapolation to maximum power load resulted in immissions up to 52 μT resp. 9 kV/m. Within the hauling corridor of 380 kV overhead power lines small scale violations of the legal limits defined by the 26th Ordinance Implementing the Federal Immission Control Act (26. BImSchV) were found in some cases. Above underground cables laid in a depth of 1.5 m or more magnetic fields of up to 168 μT are possible, i.e. small scale violations of the legal limits defined by the 26. BImSchV can occur within the hauling corridor. Above underground cables laid as an exception in minor depth higher values are possible. The immissions caused by underground cables outside the hauling corridor are substantially lower than those caused by overhead power lines of the same voltage level. High voltage overhead power lines in the neighbourhood can lead to exposures in dwellings substantially higher than those in dwellings far from power lines.

Zusammenfassung

Aufgabenstellung

In dem Projekt waren mittels Messungen vor Ort tatsächlich vorkommende und mittels Berechnungen maximal mögliche elektrische und magnetische Immissionen in der Umgebung von Freileitungen und Erdkabeln für die Stromversorgung zu bestimmen. Die Immissionen für unterschiedliche technische Realisierungen der Stromversorgungstrassen waren zu vergleichen und es waren die Auswirkungen der Stromversorgungstrassen auf die Expositionen gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern in Wohnungen zu untersuchen.

Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen des Projekts wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Bestandsaufnahme zu bereits durchgeführten Untersuchungen zu den Immissionen in der Umgebung von Hochspannungstrassen und in Wohnungen sowie zu derzeit verfügbaren rechen- und messtechnischen Verfahren zur Bestimmung der von Stromversorgungsanlagen verursachten elektrischen und magnetischen Immissionen
- Entwicklung eines einfachen Computerprogramms zur Berechnung der magnetischen Felder in der Umgebung von Stromversorgungsleitungen
- Messtechnische Bestimmung der elektrischen und magnetischen Immissionen in der Umgebung von Hochspannungsfreileitungen und Erdkabeln
- Rechnerische Extrapolation der Immissionen für maximale Anlagenauslastung
- Messung der niederfrequenten Magnetfelder in Wohnungen in der Nähe und fernab von Stromversorgungstrassen
- Bestimmung der Expositionen gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern in Wohnungen für den Fall maximaler Auslastung benachbarter Stromversorgungsleitungen

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen und der Berechnungen der Felder an Hochspannungstrassen sowie der Messungen in Wohnungen stimmen weitgehend mit den Befunden aus früheren Untersuchungen überein:

- Die Höhe der von Freileitungen und Erdkabeln verursachten Immissionen hängt sehr stark von den konstruktiven und betrieblichen Parametern ab. Kritische Parameter sind
 - die Stärke des übertragenen Stroms, die sich direkt auf die Stärke des Magnetfeldes auswirkt und bei Freileitungen zudem den Durchhang der Leiterseile beeinflusst, was wiederum Folgen sowohl für das magnetische als auch für das elektrische Feld hat
 - die Zahl der aufgelegten Systeme und deren Anordnung
 - die Aufhängehöhe bzw. der Durchhang von Freileitungsleiterseilen bzw. die Verlegetiefe von Erdkabel
 - die relative Anordnung der Phasenleitungen der Systeme und deren Strombelegung
- Die von Erdkabeln der gleichen Spannungsebene außerhalb des Trassenbereichs verursachten Immissionen sind deutlich niedriger als die von Freileitungen verursachten (s.u.).
- Die Expositionen gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern nehmen mit der Wohnungsdichte zu, sie sind in Mehrfamilienhäusern höher als in Einfamilienhäusern.

- Hochspannungsfreileitungen können in benachbarten Wohnungen zu mittleren Expositionen führen, die deutlich über denen in Wohnungen fernab solcher Trassen liegen (s.u.). In der Nähe häuslicher Stromversorgungsanlagen oder von in Betrieb befindlichen Elektrogeräten können die Expositionen deutlich über dem allgemeinen Haushintergrund liegen und auch deutlich höher sein, als die Beiträge von Hochspannungsfreileitungen.

Die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Immissionen erreichten im Bereich von Freileitungstrassen fast $52 \mu\text{T}$ bzw. 9 kV/m (1,0 m Höhe). Im Trassenbereich von 380 kV-Freileitungen wurden in mehreren Fällen kleinräumige Überschreitungen des Grenzwerts der 26. BImSchV für das elektrische Feld festgestellt. Im Bereich des Normalverlaufes von Erdkabeltrassen (Verlegetiefe 1,5 m oder mehr) erreichte die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte magnetische Immission einen Wert von maximal $168 \mu\text{T}$ (0,2 m Höhe) bzw. $86 \mu\text{T}$ (1,0 m Höhe). Bei geringeren Verlegetiefen, wie sie bei einer untersuchten Erdkabeltrasse im Bereich einer Brücke gegeben war, sind natürlich höhere Immissionen möglich. Der für Erdkabel ermittelte Maximalwert war höher als die entsprechenden Werte an Freileitungstrassen, die Immissionen nehmen bei Erdkabeln jedoch, anders als bei der Freileitung, sehr schnell mit dem Abstand zur Trassenmitte ab. Der maximale Abstand, ab dem ein Wert von $0,1 \mu\text{T}$ unterschritten wird, lag für 380 kV-Freileitungen bei 466 m. Bei den hier untersuchten 380 kV-Erdkabeltrassen, wurde dieser Wert spätestens ab einem Abstand von 74 m unterschritten. In dem Tunnelabschnitt mit einer Verlegetiefe von mehr als 30 m Tiefe wurde dieser Wert selbst direkt über der Trasse nicht erreicht.

Für Wohnungen fernab von Hochspannungsversorgungstrassen wurde ein Mittelwert der Wohnungsmittelwerte (Mindestabstand zu eingeschalteten Geräten mindestens 1,0 m) von $0,05 \mu\text{T}$ ermittelt. Der in diesen Wohnungen ermittelte maximale Einzelwert der magnetischen Flussdichte betrug $0,19 \mu\text{T}$. In Wohnungen mit benachbarten 380 kV- (110 kV-) Freileitungstrassen ergab sich für die aktuelle Stromlast ein Mittelwert der Wohnungsmittelwerte von $0,81 \mu\text{T}$ ($0,35 \mu\text{T}$) und ein maximaler Einzelwert von $3,39 \mu\text{T}$ ($1,17 \mu\text{T}$). Die Berechnungen für Maximallast ergaben einen mittleren Wohnungsmittelwert von $8,9 \mu\text{T}$ ($1,4 \mu\text{T}$) und Maximalwerte bis $16,3 \mu\text{T}$ ($4,4 \mu\text{T}$). Der Einfluss von Erdkabeltrassen auf die Expositionen in Wohnungen lag innerhalb der Variationsbreite der Expositionen in Wohnungen fernab solcher Trassen.

Summary

Task

Actual and worst case electric and magnetic immissions in the neighbourhood of overhead and underground high voltage power lines had to be determined by measurements resp. calculations and the effect of different technical realisations of the power lines on the immissions had to be compared. The effect of power lines on the low frequency magnetic field exposure in dwellings had to be investigated.

Work packages

The following works have been carried out:

- Survey of previous investigations of the immissions in the neighbourhood of power lines and in dwellings as well as of available procedures to measure or calculate the electric and magnetic immissions caused by power supply facilities
- Development of a simple computer program for the calculation of the magnetic fields in the neighbourhood of power lines
- Measurement of the electric and magnetic immissions in the neighbourhood of overhead and underground power lines
- Extrapolation of immissions for maximum workload
- Measurements of the magnetic fields in dwellings near to as well as far from power lines
- Extrapolation of exposure to magnetic fields in dwellings near power lines for maximum workload

Results

The results of measurements and calculations of the fields caused by high voltage power lines and of the measurements in dwellings agree with the results of earlier studies to a large extent:

- The level of the immissions caused by overhead and underground power lines strongly depends on the constructive and operational parameters. Critical parameters are
 - the strength of the current on the line because this has a direct effect on the strength of the magnetic field and it influences the sagging of overhead power lines which in turn affects the magnetic as well as the electric field
 - the number of the wires and their spatial arrangement
 - the mounting height and the constructive sagging of overhead power lines and the hauling depth of underground power lines
 - the relative arrangement of the phase wires and the current asymmetry
- The immissions caused by underground cables outside the hauling corridor are substantially lower than those caused by overhead power lines of the same voltage level.
- The low frequency magnetic field exposure increase with the density of flats, it is higher in apartment buildings than in single-family houses.
- High voltage overhead power lines in the neighbourhood can lead to exposures substantially higher than those in dwellings faraway from power lines (see below). Near electrical

installations and electrical devices magnetic field exposure can be substantially higher than the general background and the contributions from overhead power lines.

Extrapolation to maximum power load resulted for overhead power lines in immissions up to 52 μT resp. 9 V/m (at a height of 1.0 m). Within the hauling corridor of 380 kV overhead power lines small scale violations of the legal limits defined by the 26th Ordinance Implementing the Federal Immission Control Act (26. BImSchV) were found in several cases. For the normal traces of underground cables (hauling depth 1.5 m or more) extrapolation to maximum power load yields immissions up to 168 μT (at a height of 0.2 m) resp. 86 μT (at a height of 1.0 m). For minor hauling depths, as found for one of the investigated underground power lines near a bridge, higher immissions are possible. This maximum value determined for underground power lines was higher than the corresponding value for overhead power lines, but the immissions decrease very fast with the distance to the middle of the hauling corridor. For 380 kV overhead power lines the maximum distance from which magnetic immissions were below 0.1 μT was 466 m, for 380 kV underground cables it was 74 m. For a tunnel section with a hauling depth of more than 30 m the magnetic field was everywhere lower than 0.1 μT even directly above the cable.

In dwellings far from high voltage power lines the average of the dwelling mean values (minimum to electrical devices 1.0 m) was 0.05 μT . In these dwellings the maximum single measured value for the magnetic field was 0.19 μT . In dwellings near 380 kV (110 kV) overhead power lines the average of the dwelling mean values was 0.81 μT (0.35 μT) for the actual currents on the lines, the maximum single measured value for the magnetic field was 3.39 μT (1.17 μT). The calculations for maximum work load resulted in a mean magnetic field in the dwellings of 8.9 μT (1.4 μT) and maximum values up to 16.3 μT (4.4 μT). The effect of high voltage underground power lines on the magnetic field exposure in dwellings was within the range of variation of exposure in dwellings far from any high voltage power lines.

1 Aufgabenstellung

In dem Projekt waren mittels Berechnungen und Messungen vor Ort maximal mögliche und tatsächlich vorkommende Immissionen elektromagnetischer Felder in der Umgebung von Freileitungen und Erdkabeln für die Stromversorgung quantitativ zu erfassen, die unterschiedlichen Realisierungen auf verschiedenen Spannungsebenen waren in dieser Hinsicht miteinander zu vergleichen und es waren Schlussfolgerungen für die tatsächliche Exposition der allgemeinen Bevölkerung abzuleiten.

Dazu waren die folgenden Arbeiten durchzuführen:

Bestandsaufnahme

- Erstellen einer Übersicht über die derzeit verfügbaren rechen- und messtechnischen Verfahren zur Bestimmung der von Stromversorgungsanlagen verursachten elektrischen und magnetischen Felder und Diskussion ihrer Brauchbarkeit für die Bestimmung bzw. Prognose der maximal möglichen sowie der tatsächlich, unter realen Bedingungen vorkommenden Immissionen im Einwirkungsbereich von Freileitungen bzw. von Erdkabeln
- Durchführung einer Literaturstudie zu bereits durchgeführten Untersuchungen zu den Immissionen in der Umgebung von sowie in Wohnungen in der Nähe und fernab von Hochspannungstrassen

Untersuchung der Immissionen in der Umgebung von Hochspannungsfreileitungen und Erdkabeln

- Entwicklung eines Konzepts für die messtechnische Bestimmung und für die rechentechnische Prognose der Immissionen in der Umgebung von Freileitungen und Erdkabeln
- Erstellung eines handhabbaren Computerprogramms für die rechentechnische Prognose magnetischer Felder
- Auswahl der Anlagen (Kabel, Freileitungen, Trassen), in deren Einwirkungsbereich die zeitlichen und räumlichen Verteilungen der Immissionen ermittelt werden sollen, sowie der Messorte jeweils in Abstimmung mit dem Auftraggeber
- Beschaffung der Anlagen- und Betriebsdaten
- Messtechnische Bestimmung der Immissionsverteilungen an Freileitungs- und Erdkabeltrassen
- Bewertung der Immissionen gem. 26. BImSchV nach Extrapolation der Messwerte auf die höchstmögliche betriebliche Anlagenauslastung
- Rechentechnische Bestimmung der Immissionsverteilungen
- Vergleichende Diskussion der mess- und rechentechnisch bestimmten Immissionsverteilungen

Untersuchung des Einflusses von Hochspannungstrassen auf die Expositionen in Wohnungen

- Entwicklung eines Konzepts für die messtechnische Bestimmung der Immissionen in Wohnungen
- Messungen der Felder in Wohnungen in Häusern an Freileitungs- oder Erdkabeltrassen der Höchstspannungsebene
- Vergleich der Immissionen, die durch die beiden Typen von Stromversorgungsleitungen in den Wohnungen verursacht werden und Bestimmung des externen Anteils an den Gesamtmissionen

2 Bestandsaufnahme

2.1 Grundlagen

2.1.1 Elektrische Versorgungsnetze

Das elektrische Versorgungsnetz ist neben elektrischen Maschinen und Geräten der Hauptverursacher von elektrischen und magnetischen Immissionen im Frequenzbereich von 50 Hz ($\pm 0,5$ Hz, E.ON-Netz GmbH 2003), der Grundfrequenz des Netzes, bis zu einigen hundert Hz, den Frequenzen der Oberwellen, die Vielfache der Grundfrequenz sind und durch Schaltvorgänge und nichtlineare Verbraucher erzeugt werden. Bezogen auf die Fläche sind dabei vor allem die Leitungen zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie von Bedeutung. Lokal eng begrenzt können auch Anlagen zur Erzeugung elektrischer Energie sowie Umspannanlagen relevante Beiträge liefern.

Für den Transport der elektrischen Energie zwischen den Kraftwerksstandorten und den Bedarfsschwerpunkten sind elektrische Leitungen notwendig. Von den Standorten großer Kraftwerke wird die elektrische Energie überwiegend durch 380 kV- und 220 kV-Leitungen der Höchstspannungsebene transportiert (s. Abb. 2/1; zu den Nennspannungen von 380 bzw. 220 kV gehören Betriebsspannungen von 350 bis 420 kV bzw. 193 bis 245 kV, E.ON-Netz GmbH 2003). Das Höchstspannungsnetz in Deutschland hat eine Gesamtlänge von 36.000 km (vdn 2007). Die Zusammenschaltung der Übertragungsleitungen zu einem Verbundsystem dient dem Ausgleich von Angebot und Nachfrage und ist Voraussetzung einer gesicherten Versorgung mit elektrischer Energie auch im Falle erhöhten regionalen Bedarfs oder von Störungen an Kraftwerken oder Übertragungsleitungen.

Mittlere Kraftwerke werden über 110 kV-Hochspannungsleitungen (Betriebsspannung 96 bis 123 kV) an das Verbundnetz angeschlossen, seltener durch 60 kV-Leitungen. Leitungen dieser Spannungsebene dienen auf der Verbrauchsseite außerdem dem Anschluss von großen Ortschaften und Industriebetrieben. In Deutschland waren im Jahr 2007 rund 75.200 km Hochspannungsleitungen installiert (vdn 2007).

Die Leitungen der Mittelspannungsnetze mit Nennspannungen von zumeist 10 oder 20 kV, gelegentlich auch 30 oder 6 kV, können Energie aus mittleren Anlagen zur Erzeugung elektrischer Energie aufnehmen (Betriebsspannungen: 12, 24, 36 bzw. 7,2 kV). Die Mittelspannungsnetze übernehmen auch Energie aus dem Übertragungsnetz und dienen der Regionalverteilung. Aus ihnen werden Siedlungen, Ortsteile von größeren Gemeinden und größere Abnehmer in Industrie, Handel und Gewerbe sowie in der Landwirtschaft versorgt. Die Gesamtlänge aller Mittelspannungsleitungen in Deutschland beträgt 493.000 km (vdn 2007).

Die örtliche Verteilung elektrischer Energie erfolgt durch die Niederspannungsnetze mit einer Gesamtlänge von 1.067.100 km (vdn 2007). Über die Niederspannungsleitungen werden die Verbrauchergruppen Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft versorgt. Die übliche Spannung ist 220 bzw. 380 V. Die Niederspannungsnetze können nur in begrenztem Umfang Energie aus Erzeugungsanlagen (kleine Wasserkraftwerke, kleine Windkraftanlagen) aufnehmen.

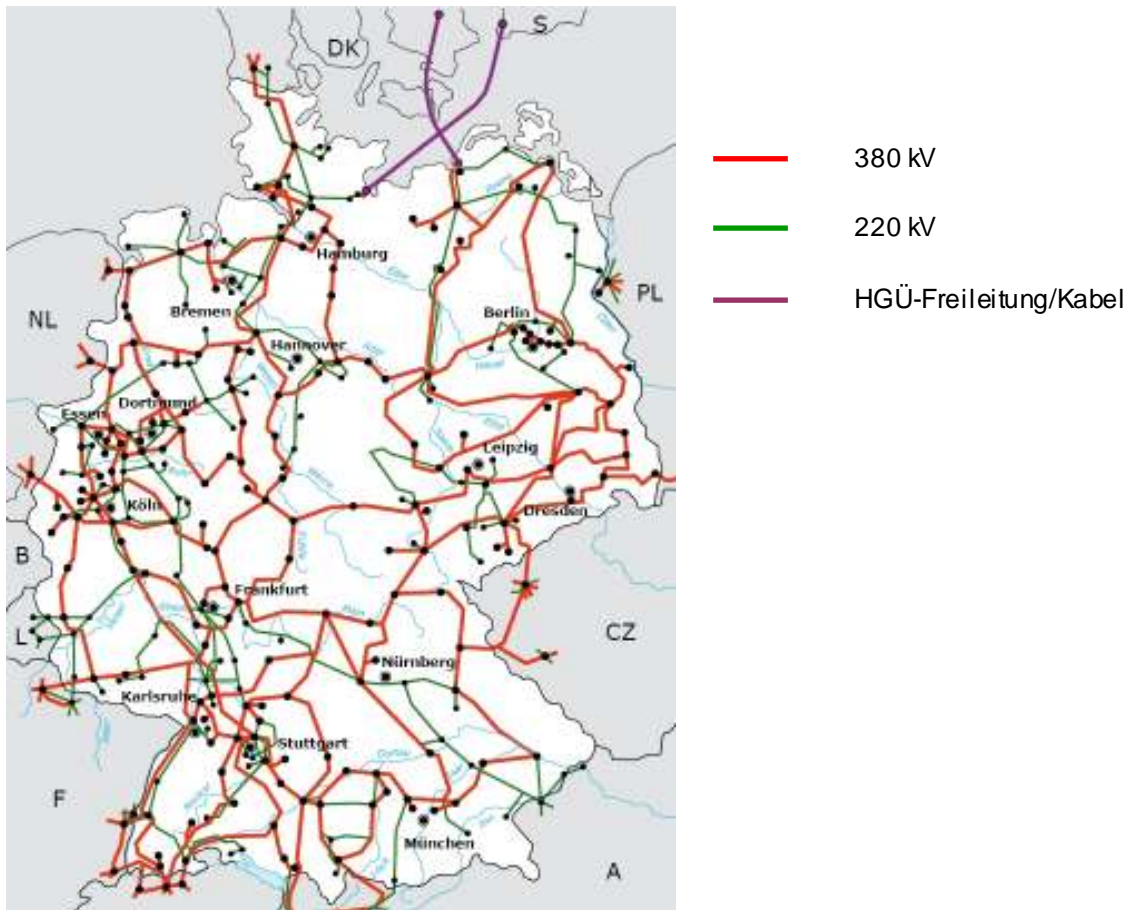


Abbildung 2/1
 Höchstspannungsverbundnetz in Deutschland und Hochspannungsgleichstrom-Übertragungsstrecken (HGÜ) durch die Ostsee (v.dn 2007)

Die Leitungen der öffentlichen Stromversorgung bestehen auf den Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsebenen generell und auf der Niederspannungsebene bei den Hausanschlussleitungen überwiegend aus drei Leitungen (Phasen). Die Spannungen auf diesen Leitungen sind im Idealfall jeweils 120 Grad gegeneinander phasenverschoben. Wäre es möglich, die drei Phasenleitungen ohne Abstand in einer Leitung zusammenzufassen, und wären Ströme und Spannungen auf den drei Phasenleitungen exakt gleich groß (Phasenbalance, symmetrische Last), so würden sich die von den einzelnen Phasenleitungen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder im Fall exakter Phasenverschiebungen um 120 Grad gegenseitig kompensieren (s. 2.1.4). Unter realen Bedingungen ist dies allenfalls näherungsweise zu erreichen, da eine elektrische Isolation zwischen den Phasenleitern notwendig ist und diese gewisse Mindestabstände erfordert. Diese können im Falle von Erdkabeln mit geeigneten Isolationsmaterialien sehr gering gehalten werden. Im Falle elektrischer Freileitungen, wo Luft das isolierende Medium darstellt, sind dagegen große Abstände erforderlich, die durch die Durchschlagsfestigkeit der Luft bei den jeweiligen Spannungen vorgegeben sind.

Die Leitungen der Spannungsebenen 380, 220 und 110 kV sind in Deutschland überwiegend als Freileitungen auf Stahlgittermasten ausgeführt. Lediglich auf der 110 kV-Ebene gibt es einen nennenswerten Anteil Erdkabel vor allem in Belastungsschwerpunkten, z.B. Stadtgebieten mit enger Bebauung und hoher Lastdichte. Die Gründe für den geringen Anteil an Erdkabeln liegen zum einen in den – zumindest in den Spannungsgruppen 380 und 220 kV –

deutlich höheren Kosten für Kabel im Vergleich zu denen für Freileitungen. Zum anderen gibt es physikalische und betriebliche Gründe. Erdkabel haben eine viel größere Kapazität als Freileitungen. Deshalb sind die Anforderungen an die Blindleistungskompensation (mit Anpassung der Impedanz) in reinen Kabelnetzen und gemischten Netzen höher als bei reinen Freileitungsnetzen. Große leistungsstarke Netze mit Kabeln sind u. U. alle 30 bis 40 km des Kabelsystems zu kompensieren. Auf der betrieblichen Seite steht der geringeren Empfindlichkeit von Erdkabeln gegenüber äußeren Einflüssen der im Vergleich mit Freileitungen höhere Aufwand bei der Reparatur im Falle einer Störung gegenüber.

Auf der Mittelspannungsebene sind die meisten Leitungen als Erdkabel ausgeführt. Als Abspannstützpunkte für Freileitungen kommen Stahlgitter-, Beton- oder Holz maste zum Einsatz. Auf den Leitungen der Mittelspannungsebene sind die Amplitudenasymmetrien durch unterschiedliche Lasten auf den einzelnen Phasen zwar oft größer als auf den Leitungen der höheren Spannungsebenen, doch sind sie in der Regel immer noch relativ gering.

Die Anschlussleitungen der Niederspannungsebene sind überwiegend als Erdkabel ausgeführt. Der Hausanschluss (Sicherungskasten), von dem die Leitungen innerhalb des Gebäudes abgehen, liegt bei Erdkabelanschlüssen in der Regel im Keller oder im Erdgeschoß. In Gebäuden für Wohn- und Gewerbe Zwecke treten, abgesehen von den Bereichen in unmittelbarer Nähe zu einzelnen Geräten und Maschinen, in der Umgebung des Hausanschlusses und der zu- bzw. abführenden Leitungen die stärksten magnetischen Felder auf. Auf den Anschlussleitungen der Niederspannungsebene gibt es oft große Amplitudenasymmetrien.

Eine Alternative zur Übertragung elektrischer Energie als Hochspannungs-Drehstrom ist die Hochspannungsgleichstrom-Übertragung. Diese kann sowohl über Freileitungen als auch über Erdkabel erfolgen. Die Leitungen werden für die Übertragung hoher Leistungen (über 800 MW) bipolar mit zwei Kabelleitungen ausgeführt (Kramer 2000). Bei geringeren Übertragungsleistungen ist auch eine monopolare Ausführung mit einer Rückleitung durch die Erde möglich. Die Hochspannungsgleichstrom-Übertragung innerhalb eines Drehstromübertragungsnetzes erfordert an beiden Enden der Hochspannungsgleichstrom-Übertragungsstrecke eine Stromrichterstation, in denen die Wechselspannung in Gleichspannung und diese am Ende der Gleichstrom-Übertragungsstrecke wieder in Wechselspannung umgewandelt wird. Die Stromrichter können in beide Richtungen sowohl als Gleich- oder Wechselrichter arbeiten, daher ist der Aufbau der Gleichrichter- und der Wechselrichterstation identisch. Die Stromrichterstationen enthalten neben den eigentlichen Stromrichtern und den Steuerungsanlagen auch noch Stromrichtertransformatoren, Glättungsdrosseln und Oberschwingungsfiler. Mit den Transformatoren wird die elektrische Wechselspannung auf den erforderlichen Wert transformiert.

Bei der Übertragung elektrischer Energie über sehr große Entfernungen über Land (mehr als 500 km) oder unter Wasser (mehr als 30 km) hat die Hochspannungsgleichstrom-Übertragung einige Vorteile gegenüber der Übertragung von Drehstrom:

- die bei Wechselspannungsübertragung auftretenden kapazitiven Blindströme entfallen und damit die Notwendigkeit des Einbaus von Kompensationsspulen;
- die Isolierung von Gleichstromkabeln ist weniger aufwändig als die von Drehstromkabeln da im Gleichstromnetz der Spitzenwert der Spannung dem Effektivwert entspricht und zum anderen bei Gleichspannung in der Kabelisolation keine dielektrischen Verluste auf-

treten;

- an Freileitungen sind die Verluste durch Koronaentladungen bei Gleichspannung wesentlich geringer als bei einer gleich hohen Wechselspannung;
- Leitungsquerschnitte können bei Gleichstromübertragung besser ausgenutzt werden als bei einer vergleichbaren Wechselstromübertragung, da bei Wechselstrom der Skin-Effekt zur Stromverdrängung an die Ränder des Leitungsquerschnitts führt, dieser Effekt bei Gleichstrom aber nicht in Erscheinung tritt;
- die bei Wechselstrom-Übertragung erforderliche Synchronisierung der zu verbindenden Netze entfällt bei der Gleichstromübertragung.

Nachteile der Hochspannungsgleichstrom-Übertragung gegenüber der Drehstromübertragung sind:

- die, im Vergleich mit Drehstromtransformatoren, hohen Kosten und die geringen Überlastungstoleranzen der erforderlichen Stromrichterstationen;
- die Probleme die bei Freiluftanlagen für Gleichspannungen von mehr als 500 kV aufgrund von Verschmutzungen und Feuchtigkeit auf den Isolatoren auftreten können.

Zudem ist die Hochspannungsgleichstrom-Übertragung vor allem für die Übertragung elektrischer Energie zwischen zwei Punkten geeignet. Der nachträgliche Einbau eines Abzweigs in eine bestehende Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung ist sehr schwierig.

2.1.2 Technische Ausführung von Freileitungen

Freileitungen werden in Deutschland überwiegend auf Stahlgittermasten geführt.

Der **Donaumast** (s. Abb. 2/2) ist in den Ländern der alten Bundesrepublik Deutschland die häufigste Bauform von Masten für die Drehstromübertragung auf der Hoch- und Höchstspannungsebene. Wenn, was die Regel ist, zwei Drehstromkreise installiert sind, befinden sich auf der unteren Traverse vier und auf der oberen Traverse zwei Leiterseile. Vereinzelt gibt es Donaumasten, mit der breiteren Traverse mit vier Leiterseilen über der schmaleren mit zwei Leiterseilen.

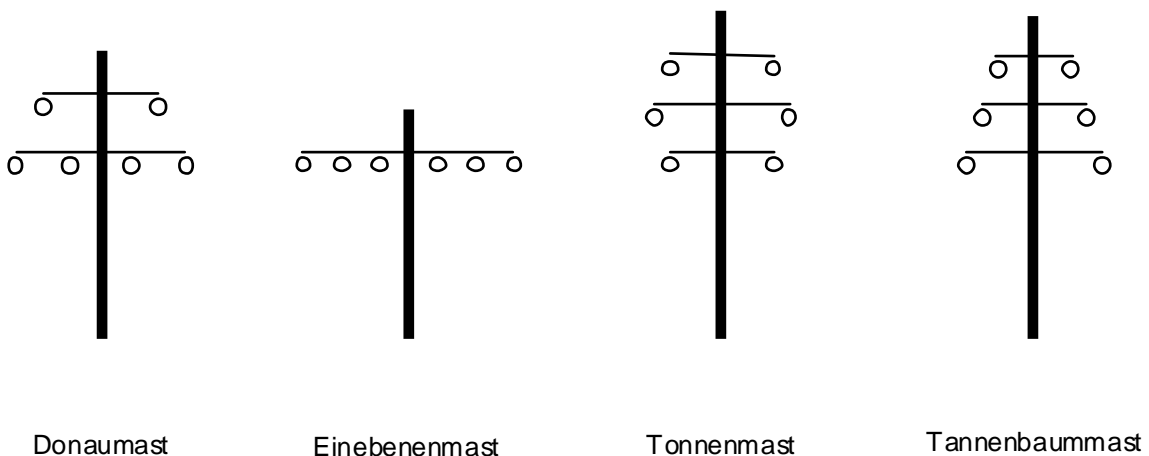


Abbildung 2/2
Häufigste Mastformen bei Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen in Deutschland

Beim **Einebenenmast** sind alle Leiterseile auf eine Ebene angeordnet. Die Masten können niedriger sein als Donaumasten, die Trassenbreite ist jedoch größer. Die Schutzwirkung durch ein einzelnes Erdseil ist wegen der größeren Trassenbreite schlechter als beim Donaumast. Der Masttyp ist in den ostdeutschen Bundesländern am meisten verbreitet.

Der **Tonnenmast** hat drei Traversen, von denen die mittlere die größte Spannweite besitzt. Die Spannweiten der oberen und der unteren Traverse sind im Regelfall gleich. Gegenüber Freileitungen auf Donaumasten haben Freileitungen auf Tonnenmasten den Vorteil einer geringeren Trassenbreite, dafür sind aber Tonnenmasten höher als vergleichbare Donaumasten.

Der **Tannenbaummast** ist ein Mast für die Anordnung von zwei Drehstromkreisen in drei Ebenen, bei dem die unterste Traverse die größte und die oberste Traverse die geringste Spannweite hat.

In Abbildung 2/3 sind einige Beispiele für die Ausführung von Freileitungen zusammengestellt.

2.1.3 Technische Ausführung von Erdkabeln

Ausführungsformen

Als Ersatz für herkömmliche Öl- bzw. Ölpapierkabel, die seit rund 80 Jahren für die Starkstromübertragung eingesetzt werden, verwendet man heute VPE- bzw. VPE/XLPE-Kabel mit vernetzter Polyethylen-Isolierung. Abbildung 2/4 zeigt beispielhaft den Aufbau eines solchen Kabels (zur Ausführung von Kabeln s.a. Dellby et al. 2000, Fischer & Roth 2007, Tele-Fonica 2007). Zur Reduzierung der durch den Skineffekt verursachten Verluste wird der Leiter oft in Segmente unterteilt. Bei großen Querschnitten ($> 1000 \text{ mm}^2$) werden sogenannte 'Milliken-Leiter' verwendet, die aus Einzelleitern bestehen.

Die Übertragungskapazität einer Erdkabeltrasse kann durch die Anzahl der Kabel beliebig erhöht werden. Für 3000 MW werden 3 Systeme aus je 3 Einleiterkabeln (Querschnitt: 2500 mm^2) benötigt (NDS 2007).

Bei gasisolierten Rohrleitern (s. Abb. 2/5) ist der spannungsführende Leiter durch Stützisolatoren und ein isolierendes Gas oder Gasgemisch (100 % Schwefelhexafluorid, SF_6 , oder Stickstoff mit 20% bis 60% SF_6 , 7 bar Druck) von dem umgebenden, geerdeten Leitungsmantel isoliert angebracht. Je System kommen 3 parallel angeordnete Rohre mit einem Durchmesser von ca. 50 cm zum Einsatz. Zur Übertragung einer Leistung von 3000 MVA wird, wie bei einer Freileitung, ein Doppelsystem benötigt, das aus 2 x 3 Rohrsträngen besteht.

Abbildung 2/6 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Seekabels für die Hochspannungsgleichstromübertragung.



220 kV Höchstspannungsfreileitung
 Donaumast
 2 Systeme
 1 Erdseil an der Mastspitze



110 kV Hochspannungsfreileitung
 Eiebenenmast
 2 Systeme
 2 Erdseile an den Spitzen der Traverse



110 kV / 110 kV Hochspannungsfreileitung
 Kombinierte Donau-/Eiebenenanordnung
 4 Systeme
 2 Erdseile an der Mastspitzetraverse

Abbildung 2/3
 Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen

Verlegearten

Die drei Phasen einer Drehstromübertragungsleitung werden bei Ausführung als Erdkabeltrasse in Dreiecks- oder Eiebenenanordnung verlegt. Bei der kompakten Dreiecksanordnung sind die Magnetfeldimmissionen in der Regel geringer als bei der Anordnung in einer horizontalen Ebene. Erdkabel werden entweder direkt im Boden bzw. in Aufgrabungsschächten (typische Verlegetiefen bei Hochspannungskabeln 0,6 bis 2,0 m) oder in (glasfaserverstärkten Kunststoff-) Rohren bzw. Tunneln verlegt. Abbildung 2/7 zeigt den Tunnel einer 400 kV-Leitung mit einer Übertragungsleistung von 1100 MW im Zentrum Berlins. Auch eine Freiluftverlegung ist möglich und wurde bereits für kurze Strecken realisiert (Kindersberger 2005).

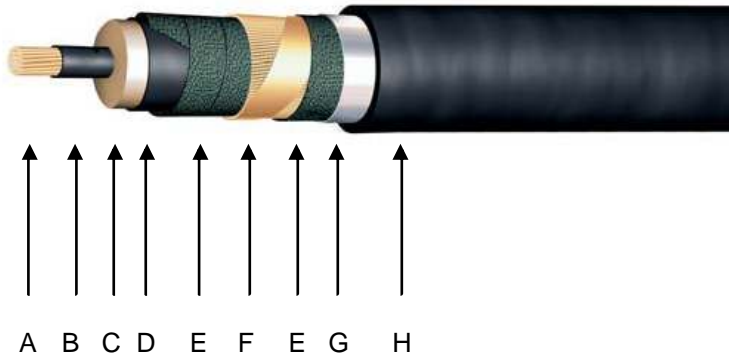


Abbildung 2/4
 Aufbau eines VPE-Hochspannungskabels (Foto: Tele-Fonika 2007)

- A Aluminium- oder Kupferleiter
- B innere Leitschicht
- C VPE-Isolierung
- D äußere Leitschicht
- E leitfähiges Quellfließ
- F Kupferschirm
- G Aluminiumband
- H flammwidriger Mantel



Abbildung 2/5
 Koaxialer Aluminiumrohrleiter (Foto: Kindersberger 2005)

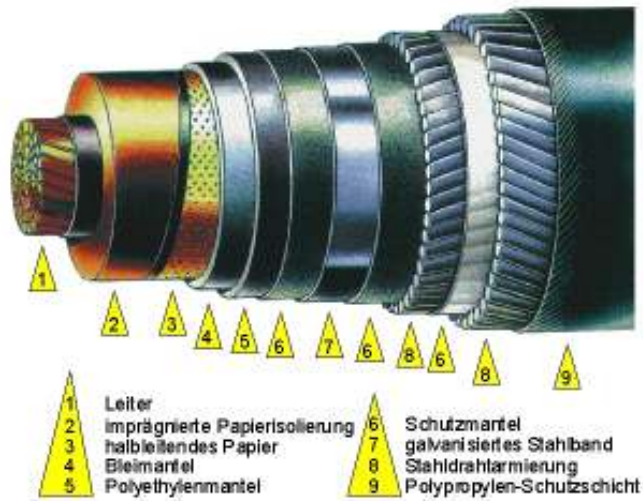


Abbildung 2/6
Prinzipieller Aufbau eines Seekabels für die Hochspannungsgleichstrom-Übertragung (Kramer 2000)



Abbildung 2/7
400 kV-Kabelsystem in einem 6,3 km langen Tunnel im Zentrum von Berlin (Foto: Dellby et al. 2000)

Bezeichnung von Starkstromkabeln

Die Bauartkurzzeichen für Starkstromkabel sind in der DIN VDE 0276 festgelegt:

Ader	N	Normtyp
	A	Aluminiumleiter
		Kupferleiter werden nicht gekennzeichnet
	2X	Isolierung aus vernetztem Polyethylen (VPE)
Schirm	S	Schirm aus Kupfer
	(FL)	längs- und querwasserdichter Schirmbereich (Schichtenmantel)
Mantel	2Y	PE-Mantel

Zur kompletten Typangabe gehören neben den Bauartkurzzeichen Angaben

- zu Aderzahl und Nennquerschnitt je Leiter in mm²
- zu Leiterform (rund: R) und -art (eindrätig: E, mehrdrätig: M)
- zum Schirmquerschnitt

- zur Nennspannung (U_0/U).

Das folgende Beispiel verdeutlicht die Anwendung der Kurzzeichen (Fischer & Roth 2007):

NA 2X S 2Y 1 x 150 RM /25 12/20 kV

N	Normkabel
A	Leitematerial (Aluminium)
2X	Isolierstoff (VPE)
S	Schirmmaterial (Kupfer)
2Y	Mantel (PE)
1	Aderzahl (einadrig)
150	Nennquerschnitt Leiter (150 mm ²)
R	Leiterform (rund)
M	Leiterart (mehrdrätig)
25	Schirmquerschnitt (25 mm ²)
12/20 kV	Nennspannung

2.1.4 Einflussfaktoren elektrischer und magnetischer Immissionen in der Umgebung von Freileitungen und Erdkabeln

Die Stärke und die räumliche Verteilung der Felder in der Umgebung einer Stromversorgungsleitung hängen zum einen vom technischen Aufbau der Leitung und dem Betriebszustand zum anderen von den Umgebungsbedingungen ab. Tabelle 2/1 gibt einen Überblick welche Faktoren, zum einen bei Freileitungen und zum anderen bei Erdkabeln, welche Auswirkungen auf elektrisches und magnetisches Feld haben.

Tabelle 2/1

Faktoren, die die Stärke und die räumliche Verteilung elektrischer und magnetischer Felder in der Umgebung von Trassen zur Übertragung elektrischer Energie beeinflussen

Freileitung	Wirkung	Erdkabel
Faktoren technischer Aufbau		
Masthöhe	Die Stärke des magnetischen Felds nimmt mit dem Abstand und damit mit zunehmender Masthöhe bzw. zunehmender Verlegetiefe ab nur Freileitung: gleiches gilt für das elektrische Feld	Verlegetiefe
Mastabstand	Mastabstand und Masthöhe bestimmen (neben dem Material der Leiterseile, der Strombelastung und den Umwelteinflüssen) den Durchhang der Leiterseile; die Erdung der Masten führt in ihrer Umgebung zu Störungen des elektrischen Feldes	entfällt
Mastkonstruktion	Die Mastkonstruktion (s. 2.1.2) bestimmt die Anordnung der aufgelegten Systeme und der Leiterseile	Anordnung der Einzelkabel
Anzahl der aufgelegten Systeme	Bei mehreren Systemen überlagern sich deren Beiträge zum magnetischen Feld, je nach relativer Phasenlage und -anordnung kommt es dabei zu einer Verstärkung oder einer teilweisen Kompensation; nur Freileitungen: gleiches gilt für das elektrische Feld; Systeme mit niedriger Betriebsspannung, die unterhalb von Systemen mit höherer Spannung angebracht sind, können das von letzteren erzeugte elektrische Feld teilweise abschirmen	dto., Auswirkungen aber nur auf das magnetische Feld

Freileitung	Wirkung	Erdkabel
Anordnung der aufgelegten Systeme	Die Überlagerung der Beiträge der Einzelsysteme zum Magnetfeld hängt von deren relativer Anordnung und den Abständen zwischen ihnen (sowie von den Phasenbeziehungen) ab nur Freileitung: gleiches gilt für das elektrische Feld	dto.
Anordnung der Phasenleitungen eines Systems	Die Überlagerung der Beiträge der einzelnen Phasenleitungen zum Magnetfeld hängt von deren relativer Anordnung und den Abständen zwischen ihnen (sowie von den Phasenbeziehungen) ab nur Freileitung: gleiches gilt für das elektrische Feld	dto.
Durchhang der Leiterseile	Mit wachsendem Durchhang nimmt der Abstand zum Erdboden ab und sowohl die Stärke des elektrischen wie des magnetischen Feldes nehmen zu; der Abstand der Leiterseile zum Erdboden hängt von den Masthöhen, den Mastabständen, dem Material der Leiterseile, der Strombelastung und den Umwelteinflüssen ab	entfällt
Erdseilanordnung	Die Erdseile wirken sich über die Induktion elektrischer Ströme auf das Magnetfeld aus, falls zusätzliche Erdseile unterhalb der spannungsführenden Leiterseile angebracht sind, führt dies zu einer teilweisen Abschirmung des elektrischen Feldes	entfällt
Faktoren Betrieb		
Betriebsspannung	Die Stärke des elektrischen Feldes ist bei einem Einzelleiter direkt proportional zur Betriebsspannung; die Betriebsspannung gibt außerdem die notwendigen Abstände zwischen den Leiterseilen sowie die Länge der Isolatoren vor	entfällt; durch die Verlegung im Erdboden wird das elektrische Feld abgeschirmt
Betriebsstrom	Die Stärke des magnetischen Feldes ist bei einem Einzelleiter direkt proportional zum Betriebsstrom; nur Freileitung: mit steigendem Betriebsstrom steigt die Temperatur der Leiterseile und damit ihr Durchhang	dto.
Phasenbeziehung innerhalb eines Systems	Die von den verschiedenen Phasenleitungen erzeugten Magnetfelder überlagern sich; bei idealen Phasenbeziehungen sowie gleichen Strömen auf den Phasenleitungen und keinem Abstand (nicht realisierbar) zwischen den Phasenleitungen kompensieren sich die Felder vollständig; nur Freileitung: gleiches gilt für das elektrische Feld	dto.
Strombelegung der einzelnen Phasenleitungen	Die von den verschiedenen Phasenleitungen erzeugten Magnetfelder überlagern sich; bei gleichen Strömen auf den Phasenleitungen sowie idealen Phasenbeziehungen und keinem Abstand (nicht realisierbar) zwischen den Phasenleitungen kompensieren sich die Felder vollständig; nur Freileitung: gleiches gilt für das elektrische Feld	dto.
Phasenbeziehung zwi-	Die Stärke und räumliche Verteilung des aus	dto.

Freileitung	Wirkung	Erdkabel
schen den Systemen	der Überlagerung der Beiträge der verschiedenen Systeme resultierenden Magnetfeld hängt von der relativen Phasenlage ab	
Faktoren Umgebung		
Bodenprofil	Das Bodenprofil wirkt sich in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens auf die räumliche Verteilung des elektrischen Feldes aus;	entfällt
Bodenbeschaffenheit	Die räumliche Verteilung des elektrischen Feldes hängt von der Leitfähigkeit des Bodens ab	entfällt
Fremdobjekte	Objekte aus ferromagnetischen Materialien beeinflussen die räumliche Verteilung des magnetischen Feldes; nur Freileitung: elektrisch leitfähige Objekte (z.B. Personen, Gebäude, Vegetation, Masten) beeinflussen die räumliche Verteilung des elektrischen Feldes;	dto.
Lufttemperatur	Die Lufttemperatur hat Auswirkungen auf den temperaturbedingten Durchhang der Leiterseile und damit auf die räumliche Verteilung sowohl des elektrischen wie des magnetischen Feldes	entfällt
Wind	Wind führt abhängig von Richtung und Stärke zu einem Ausschlagen der Leiterseile und beeinflusst dadurch die räumliche Verteilung sowohl des elektrischen wie des magnetischen Feldes	entfällt
Niederschlag	Niederschlag verändert die Leitfähigkeit des Bodens und wirkt sich damit vor allem auf das elektrische Feld aus; bei niedrigen Temperaturen kann Eisbehang zu einem stärkeren Durchhang der Leiterseile führen, was sich auf die räumliche Verteilung sowohl des elektrischen wie des magnetischen Feldes auswirkt	entfällt

2.1.4.1 Einflüsse auf das elektrische Feld

Elektrische Felder treten lediglich in der Umgebung von Freileitungen auf. Bei Erdkabeln führen die Hülle und das Erdreich zu einer vollständigen Abschirmung. Die Stärke und räumliche Verteilung der elektrischen Felder an Freileitungen wird im Wesentlichen durch die Höhe der Spannungen der Übertragungssysteme und die geometrischen Bedingungen bestimmt (Höhe und Anordnung der spannungsführenden Leiter sowie der Abstand des Messpunktes zu ihnen). Die elektrischen Eigenschaften der Umgebung, insbesondere die Leitfähigkeit des Erdbodens, das Vorhandensein von leitfähigen Körpern (z.B. Pflanzen, Menschen, Autos,...) beeinflussen die elektrische Feldstärke.

Ein weiterer nicht unwichtiger Einflussfaktor auf die Feldstärke ist die Anordnung der verschiedenen Phasen auf den Leitern. Da die Höhe und die Phasenlage der Spannung auf den einzelnen Leitern des dreiphasigen Drehstromnetzes durch die Generatoren in den Kraftwerken festgelegt werden, ändern sich diese Größen mit der Zeit praktisch nicht und es bestehen praktisch auch keine Spannungs- oder Phasendifferenzen zwischen verschiedenen Systemen der selben Spannungsebene. Eine geringe Spannungs-Asymmetrie (typischerweise

< 5 %) kann durch die unterschiedliche kapazitive Kopplung der einzelnen Phasenleiter an die Erde hervorgerufen werden. Diesem wird durch möglichst gleichmäßige 'Verdrillung' der Phasen entgegengewirkt. Dazu wird in regelmäßigen Abständen an Auskreuzungen die Anordnung der Phasenleiter komplett gedreht.

Natürlich gibt es auch einen Einfluss des Lastzustandes auf die Höhe der elektrischen Felder. Er kommt dadurch zustande, dass bei höheren Strömen aufgrund der steigenden Leitungsverluste die Temperatur in den Leiterseilen steigt, diese sich ausdehnen und sich so deren Höhe über Grund ein wenig verringert. Dieser Effekt kann für sehr große Lastunterschiede direkt unter der Trasse Änderungen in der elektrischen Feldstärke (in 1 m Höhe) bis zu etwa 50 % bewirken [eigene Rechnungen]. Mit wachsendem Abstand von der Trasse wird dieser Einfluss schnell kleiner: ab einem Abstand von der Trassenmitte, der der Trassenbreite entspricht, liegen die Änderungen bei unter ca. 10 %. Ebenso haben die Lufttemperatur und die kühlende Wirkung des Windes einen Einfluss auf die Leitertemperatur und damit auf die Größe des Durchhanges.

2.1.4.2 Einflüsse auf das magnetische Feld

Die Stärke der Magnetfelder wird primär von der Stärke der Stromflüsse auf den Leitungen bestimmt. Da die Stärke der Ströme auf den Übertragungsleitungen von der Höhe des momentanen Energieverbrauchs abhängt, ändert sich die Stärke der Magnetfelder, anders als die Stärke der elektrischen Felder, u.U. sehr stark mit der Zeit.

Aus der Formel für das magnetische Feld, das von einem (unendlichen langen, geraden) Einzelleiter erzeugt wird

$$B = \mu_0 / (2\pi) \times (I/r)$$

I Strom I
r Abstand zum Leiter

(s.a. Abschnitt 2.2.2.1), kann durch Taylorreihenentwicklung eine Näherungsformel für ein Dreiphasensystem abgeleitet werden (hier ohne Erdseile, da die Beiträge von auf den Erdseilen induzierten Strömen zu der Gesamtfeldstärke in den meisten Fällen kleiner sind als die Fehler, die durch die Näherung gemacht werden). Diese Näherung enthält zwei Terme: ein Term entspricht der eben angegebenen Formel, wobei I jetzt die phasengerechte Stromsumme auf den drei Phasenleitern ist. Diese ist in vielen Fällen (symmetrische Last) gleich oder zumindest fast gleich null. Der zweite Term beschreibt einen Zusatzbeitrag, der davon herrührt, dass die drei Einzelströme nicht am gleichen Ort (in demselben Leitungsstrang) fließen. Er ist proportional zu dem Abstand d zwischen den Einzelleitern (s. Abb. 2/8). Außerdem ist er proportional zu dem Strom I_m , dem Mittelwert aus den Effektivströmen auf den drei Phasenleitern, und umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes r vom Aufpunkt zum Schwerpunkt des Leitungssystems. Für eine Dreiecksanordnung gilt:

$$B_D \approx \sqrt{3/2} \times \mu_0 / (2\pi) \times (I_m \times d / r^2).$$

Für eine Einebenenordnung erhöht sich das Feld in dieser Näherung um den Faktor $\sqrt{2}$. Der Fehler wird bei dieser Näherung für Abstände r, die größer sind als der dreifache Abstand zwischen den Leitern ($r > 3d$), kleiner als 2,5 %. Somit kann für die Ermittlung des Magnetfeldes im (äußeren) Einflussbereich einer Übertragungsstrecke mit einem System, die gemessene Flussdichte mithilfe des gleichzeitig gemessenen Stroms auf einem der Phasenleiter, auf andere (symmetrische) Lastzustände umgerechnet werden: mit dem Ände-

rungsfaktor f folgt aus $I' = f \times I$ für das Magnetfeld $B'(I') = f \times B(I)$. Für unsymmetrische Lastzustände tritt zusätzlich noch der Beitrag für die Stromsumme auf. Dieser nimmt mit w wachsendem Abstand nur mit $1/r$ ab und ist deshalb deutlich w eitreichender.

Bei zwei Dreiphasensystemen kann diese Umrechnung nur dann durchgeführt werden, wenn die Änderungen auf beiden Systemen mit demselben Faktor erfolgen, d.h. nur, wenn für beide Systeme $I_1' = f \times I_1$ und $I_2' = f \times I_2$ mit demselben Faktor f gilt, ist $B'(I_1', I_2') = f \times B(I_1, I_2)$, und auch dies nur, solange die relative Phasenlage der beiden Systeme gleich bleibt. In allen anderen Fällen korreliert das Gesamtfeld nicht eindeutig mit den Einzelströmen oder der Stromsumme auf den beiden Systemen (s. z.B. Benes et al. 2006).



Abbildung 2/8
Überlagerung der Feldbeiträge von drei Phasenleitern

Bei unbekannter Phasenlage kann eine Reihenentwicklung wie oben für ein Dreiecks-Doppelsystem mit einem Abstand s zwischen dem jeweiligen Schwerpunkt der beiden Dreieckssysteme und der Trassenmitte, auch wenn auf beiden Systemen Ströme in der gleichen Stärke fließen, nur eine Ober- und eine Untergrenze liefern, je nachdem, wie groß die Phasendifferenz zwischen den beiden Systemen ist. Im Fall, dass die beiden Systeme völlig in Phase liegen (Anordnung der Einzelphasen: $(0^\circ \ 120^\circ \ 240^\circ \mid 0^\circ \ 120^\circ \ 240^\circ)$), ergibt sich das größte Gesamtfeld. Wenn R der Abstand zum gemeinsamen Schwerpunkt beider Systeme in Trassenmitte ist, ist das Gesamtfeld $B_{DD}(R)$ etwa so größer als das Doppelte eines Dreieckssystems $B_D(r)$, da die quadratische Abstandsabhängigkeit dazu führt, dass der geringere Abstand zum einen System sich stärker auswirkt als der größere Abstand zum anderen. Der Zusatzbeitrag ist proportional zum Quadrat des Verhältnisses $(2s/R)$. Die Näherung

$$B_{DDmax}(R) \approx 2 \times B_D(R) \times \{1 + 1,5 \times (2s/R)^2\}$$

gilt erst ab Abständen R, die größer sind als die Trassenbreite D (mit $D = 2s+d$), ab Werten von $R > 2D$ ist der Fehler kleiner als 3 %.

Im anderen Grenzfall, dass die Ströme auf den beiden Systeme genau gegenphasig fließen (Anordnung der Einzelphasen: $(0^\circ \quad 120^\circ \quad 240^\circ \mid 180^\circ \quad 300^\circ \quad 60^\circ)$), ergibt die Näherung für das Gesamtfeld des Doppelsystems $B_{DD}(R)$ das Doppelte des Feldes für ein Dreieckssystem $B_D(R)$, skaliert mit dem Verhältnis $(2s/R)$

$$B_{DDmin}(R) \approx 2 \times B_D(R) \times (2s/R).$$

Diese Näherung wird erst für Abstände R ab etwa der doppelten Trassenbreite brauchbar ($R > 2 \times D$), ab Abstände von $R > 3D$ liegt der Fehler unter 5 %.

Die Phasenlage der Ströme auf den einzelnen Leitern eines Doppelsystems ist zunächst durch die Anordnung der Spannungsphasen der beiden Drehstromsysteme vorgegeben. Da die Phasenlage des Stromes bei kapazitiven Lasten derjenigen der Spannung vorausgeht und bei induktiven Lasten derjenigen der Spannung folgt, ist die Phasenlage der Ströme auf den Leitungen abhängig von der Art und Anzahl der Verbraucher, die durch sie versorgt werden; d.h. bei zwei parallelen Übertragungssystemen ist weder sichergestellt, dass die Phasenlage der Ströme derjenigen der Spannungen gleicht, noch dass sie zeitlich konstant bleibt. In einer umfangreichen Untersuchung (Mazzanti 2006a) wurde gezeigt, dass das Gesamtfeld im 'ungünstigsten' Fall der genau parallelen Ströme (s.o.) unter der Trasse etwa dreimal so hoch liegt wie im 'günstigsten' Fall der jeweils genau gegenphasigen Ströme, außerhalb der Trasse steigt das Verhältnis mit dem Abstand an. In der obigen Näherung, die den Einfluss der Ströme auf den Erdseilen nicht berücksichtigt, steigt das Verhältnis zwischen dem maximalen und dem minimalen Gesamtfeld für größere Abstände linear mit dem Abstand an

$$B_{DDmax}/B_{DDmin} = R/(2s)+1,5 \times 2s/R \approx R/2s$$

für $R \gg 2s$.

2.1.5 Immissionsschutzrechtliche Bestimmungen und Normen

Die Grenzwerte und Vorsorgeregelungen zum Schutz von niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern sind in der 26. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (26. BImSchV) festgeschrieben. Um einen bundesweit einheitlichen Vollzug der Verordnung zu gewährleisten hat der Länderausschuss für Immissionsschutz 'Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder' verabschiedet (LAI 2004). Von den dort vorgenommenen Begriffsbestimmungen sind im Zusammenhang mit dem vorliegenden Berichtsinhalt die folgenden von Bedeutung (LAI 2004):

*Der **Einwirkungsbereich einer Niederfrequenzanlage** beschreibt den Bereich, in dem die Anlage einen sich signifikant von der Hintergrundbelastung abhebenden Immissionsbeitrag verursacht, unabhängig davon, ob die Immissionen tatsächlich schädliche Umwelteinwirkungen auslösen. Für die Bestimmung der im Sinne des § 3 Satz 1 und § 4 maßgebenden Immissionsorte reicht es zur Umsetzung der Verordnung aus, folgende Bereiche um die Anlagen zu betrachten:*

- *Freileitungen*

Breite des jeweils an den ruhenden äußeren Leiter angrenzenden Streifens:

380 kV: 20 m

220 kV: 15 m

- | | |
|--------------|------|
| 110 kV: | 10 m |
| unter 110 kV | 5 m |
- Erdkabel

Bereich im Radius um das Kabel:	1 m
---------------------------------	-----
 - Umspannanlagen/Unterwerke

Breite des jeweils an die Anlage angrenzenden Streifens:	5 m
--	-----

Maßgebende Immissionsorte sind schutzbedürftige Gebäude oder Grundstücke gemäß § 3 Satz 1 und § 4, die sich im o.g. Bereich einer Anlage befinden (siehe auch Abschnitt II Nr. 2.2). Dem nicht nur vorübergehenden Aufenthalt dienen Gebäude und Grundstücke, in oder auf denen nach der bestimmungsgemäßen Nutzung Personen regelmäßig länger - mehrere Stunden - verweilen. Als Anhaltspunkt ist dabei die üblicherweise anzunehmende durchschnittliche Aufenthaltsdauer einer einzelnen Person heranzuziehen. Das schutzwürdige Gebäude oder Grundstück muss nicht notwendigerweise einem dauernden Aufenthalt, z.B. zum Wohnen, dienen. Voraussetzung ist weiterhin nicht, dass man sich täglich dort aufhält. Ausreichend ist beispielsweise auch ein Aufenthalt, der in regelmäßigen Abständen nur tagsüber oder nur in bestimmten Jahreszeiten stattfindet. Zur Feststellung, ob ein Gebäude oder Grundstück im Einzelfall zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt "bestimmt" ist, ist insbesondere die bauplanungsrechtliche Einordnung von Belang. Bei Grundstücken im Bereich eines Bebauungsplans oder innerhalb eines im Zusammenhang bebauten Ortsteils oder bei einem mit Wohngebäuden bebauten Grundstück im Außenbereich ist in der Regel von einer Bestimmung zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt auszugehen.

Entsprechend der vorgenannten Abgrenzung dienen dem nicht nur vorübergehenden Aufenthalt insbesondere Wohngebäude, Krankenhäuser, Schulen, Schulhöfe, Kindergärten, Kinderhorte, Spielplätze und Kleingärten. Bei diesen Nutzungen sind in der Regel sowohl die Gebäude als auch die Grundstücke zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt. Auch Gaststätten, Versammlungsräume, Kirchen, Marktplätze mit regelmäßigem Marktbetrieb, Turnhallen und vergleichbare Sportstätten, sowie Arbeitsstätten, z.B. Büro-, Geschäfts-, Verkaufsräume oder Werkstätten können dem nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen.

Nur zum vorübergehenden Aufenthalt von Menschen dienen dagegen Orte, an denen die Verweilzeit des Einzelnen in der Regel gering ist. Hierzu zählen beispielsweise Gänge, Flure, Treppenträume, Toiletten, Vorratsräume - soweit sie außerhalb von Wohnungen liegen - sowie Abstellräume, Heiz-, Kessel- oder Maschinenräume, Räume, die nur zur Lagerung von Waren oder Aufbewahrung von Gegenständen dienen, und Garagen. Auch Orte, an denen sich zwar ständig Menschen aufhalten, die Verweilzeit des Einzelnen aber in der Regel gering ist, wie beispielsweise Bahnsteige und Bushaltestellen, dienen im Sinne der Verordnung nur dem vorübergehenden Aufenthalt.

Die **höchste betriebliche Anlagenauslastung** ist durch eine technische Grenze charakterisiert. Bei Freileitungen und Erdkabeln sind dies der maximale betriebliche Dauerstrom sowie die Nennspannung und bei Elektromspspannanlagen die Nennleistung des Transformators. Der maximale betriebliche Dauerstrom wird festgelegt z.B. durch den thermisch maximal zulässigen Dauerstrom, die maximal zulässige Übertragungsleistung oder die maximale Erzeugerleistung (Generatorleistung).

Für die maßgebenden Immissionsorte ist eine **Summenbetrachtung** unter Berücksichtigung relevanter Immissionen durch andere Niederfrequenzanlagen durchzuführen. Bei der Ermittlung der Vor- wie der Zusatzbelastung ist von der höchsten betrieblichen Auslastung der zu betrachtenden Anlagen auszugehen.

Bei der Festlegung der Anlagen, die bei der Ermittlung der Vorbelastung zu berücksichtigen sind, sind die Einschränkungen des Anwendungsbereichs der Verordnung nach § 1 Abs. 1 ("die gewerblichen Zwecken dienen oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen Verwendung finden und nicht einer Genehmigung nach § 4 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes bedürfen") nicht maßgeblich. So sind beispielsweise auch genehmigungsbedürftige Anlagen sowie nicht gewerblich genutzte Niederfrequenzanlagen zu berücksichtigen.

Bei Ermittlung der Vorbelastung ist der Immissionsbeitrag anderer Niederfrequenzanlagen zu berücksichtigen, unabhängig davon, ob diese von der Begriffsdefinition in § 1 Abs. 2 Nr. 2 der 26. BImSchV erfasst sind.

Immissionen durch andere Niederfrequenzanlagen im Sinne des § 1 Abs. 2 Nr. 2 der 26. BImSchV tragen in der Regel nur an den maßgebenden Immissionsorten, die zugleich in einem der in Abschnitt II Nr. 3.1 definierten Bereiche um diese anderen Niederfrequenzanlagen liegen, relevant zur Vorbelastung bei.

Niederfrequenzanlagen, die nicht die Voraussetzungen des § 1 Abs. 2 Nr. 2 der 26. BImSchV erfüllen - insbesondere Niederspannungsanlagen unter 1000 V -, tragen nicht relevant zur Vorbelastung bei (weniger als 10% des Grenzwertes) und machen daher eine gezielte Vorbelastungsermittlung entbehrlich, sofern keine gegenteiligen Anhaltspunkte bestehen. ... Gegenteilige Anhaltspunkte sind nur dann gegeben, wenn Hinweise auf Anlagen, die von § 1 Abs. 2 Nr. 2 der 26. BImSchV nicht erfasst sind, als relevante Feldquellen (z.B. Steigleitungen mit hohen Strömen, große Verbraucher) in unmittelbarer Nähe (ca. 0,5 m) zu maßgeblichen Immissionsorten bestehen. Nur in der Nähe (ca. 1 m) von in Gebäuden eingebauten Elektromotormanlagen (z.B. Netzstationen) ist zu erwarten, dass es zusammen mit der Vorbelastung zu einer Grenzwertüberschreitung an maßgebenden Immissionsorten kommen könnte.

Die vom Nutzer am Immissionsort durch Gebrauch elektrischer Geräte (Heizdecke, Fön) selbst hervorgerufenen elektrischen und magnetischen Felder sind dabei nicht zu berücksichtigen, da insoweit die Merkmale des § 3 Abs. 1 Bundes-Immissionsschutzgesetz ("für die Nachbarschaft oder die Allgemeinheit") nicht erfüllt werden.

Die Immissionen dieser anderen Anlagen sind unabhängig von der Frequenz (50 Hz oder 16 2/3 Hz) zu berücksichtigen. Da der hinsichtlich der Grenzwertfestlegung relevante Wirkmechanismus für diese Frequenzen gleich ist, können für eine Beurteilung die Feldanteile addiert werden. Für eine Gesamtbeurteilung ist zunächst die Feldstärke und Flussdichte für die jeweilige Frequenz zu bestimmen und wie folgt in Bezug zu dem entsprechenden Grenzwert zu setzen:

$$E_{\text{ges}} (16 \frac{2}{3} \text{ Hz}) / 10 \text{ kV/m} + E_{\text{ges}} (50 \text{ Hz}) / 5 \text{ kV/m} \leq 1$$

$$B_{\text{ges}} (16 \frac{2}{3} \text{ Hz}) / 300 \mu\text{T} + B_{\text{ges}} (50 \text{ Hz}) / 100 \text{ mT} \leq 1$$

Dabei ist

E_{ges} : Gesamtwert der elektrischen Feldstärke für die jeweilige Frequenz in kV/m;

B_{ges} : Gesamtwert der magnetischen Flussdichte für die jeweilige Frequenz in μT .

Ergibt die Summe der so bestimmten relativen Feldgrößen einen Wert gleich oder kleiner als 1, ist von der Zulässigkeit der Immissionsbelastung auszugehen. Durch diese Addition der Beträge bleiben unterschiedliche Richtungen der Feldvektoren und Phasendifferenzen unberücksichtigt, so dass der ungünstigste Fall angenommen wird.

Kurzzeitige Überschreitungen der in § 3 Satz 1 in Bezug genommenen Werte für die elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte, wie sie z.B. bei Schaltvorgängen oder bei bestimmten Betriebssituationen des Bahnverkehrs auftreten können, bleiben außer Betracht, soweit nicht im Rahmen einer Einzelfallprüfung festgestellt wird, dass Anhaltspunkte für erhebliche Belästigungen, insbesondere durch Berührungsspannungen, vorliegen.

Kleinräumige Überschreitungen der elektrischen Feldstärke außerhalb von Gebäuden können insbesondere in Hitzeperioden im Bereich des größten Durchhangs im Spannungsfeld von 380 kV- und in seltenen Fällen bei 220 kV-Hochspannungsfreileitungen auftreten.

Auch bei Außerbetrachtlassung von kleinräumigen Überschreitungen der in § 3 Satz 1 in Bezug genommenen Werte der elektrischen Feldstärke außerhalb von Gebäuden ist sichergestellt, dass sich aus der erhöhten Exposition nicht für sich gesundheitliche Bedenken ergeben. Dem liegt zugrunde, dass die Verteilung der Feldstärkewerte des elektrischen Feldes im Bereich einer Freileitung wegen des beim elektrischen Feld bestehenden Abschirmeffekts von Gebäuden und Bepflanzungen sehr inhomogen ist, so dass eine kleinräumige Überschreitung außerhalb von Gebäuden in aller Regel weder zu einer Dauerexposition mit den erhöhten Feldstärkewerten führt, noch den Schluss auf ein insgesamt erhöhtes Feldstärkeniveau erlaubt. Im Hinblick auf die Induktion gesundheitlich relevanter Körperstromdichten kann daher eine schädliche Umwelteinwirkung ausgeschlossen werden.

Überschreitungen sind dann als kleinräumig anzusehen, wenn nur Teile eines Grundstücks betroffen sind, so dass insgesamt kein erhöhtes Feldstärkeniveau daraus resultiert und bei der Nutzung des Grundstücks ein Ausweichen auf ein weniger belastetes Grundstücksteil möglich ist, wobei die Nutzung des Grundstücks nicht wesentlich eingeschränkt werden darf. Der dauerhafte Abschirmeffekt des vorhandenen Bewuchses ist in seiner tatsächlichen Wirkung zu berücksichtigen. Wird Bewuchs entfernt und ist deshalb infolge Wegfalls des Abschirmeffekts eine Überschreitung nicht mehr kleinräumig, kann dies einen Verstoß gegen § 3 der 26. BImSchV bis hin zur Verwirklichung einer Ordnungswidrigkeit (§ 9 Nr. 1 der 26. BImSchV) beinhalten.

In den LAI-Hinweisen werden auch Hinweise zu einem praktischen und einheitlichen Vorgehen bei der Ermittlung von Feldstärke- und Flussdichte-Werten auf der Grundlage der Norm DIN VDE 0848-1 gegeben. Die DIN VDE 0848-1 gilt für Mess- und Berechnungsverfahren zur Beurteilung der Sicherheit in elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz.

Die Einhaltung der Anforderungen nach der 26. BImSchV kann durch Berechnung, Messung, Herstellerangaben oder Vergleich erfolgen. Eine Übertragung von Ergebnissen bei vergleichbaren Anlagen ist dann möglich, wenn dies aufgrund von Anlagentyp und Randbedingungen begründbar ist (z.B. bei Standardanlagen).

Rechnungen

Eine Reihe von Feldern, besonders im Rundfunkbereich und bei Hochspannungsfreileitungen, lassen sich in der Regel mit guter Genauigkeit berechnen. Dies gilt auch für komplexere

Strukturen wie Umspannwerke und Ortsnetzstationen, wenn die komplexen Randbedingungen hinreichend bekannt sind.

Bei Berechnungsprogrammen ist die Genauigkeit der Ergebnisse davon abhängig, wie gut Feldquellen und Randbedingungen in diesen Programmen beschrieben sind. Für jedes verwendete Programm und jeden Typ von Feldquelle muss mindestens einmal eine Vergleichsmessung vorgenommen worden sein.

Die Beschreibbarkeit der Anlage durch die Rechnung für den Einzelfall muss bei komplexen Randbedingungen durch stichprobenhafte messtechnische Überprüfung sichergestellt werden. Rechnungen mit ausreichender Genauigkeit sind nur mit den jeweiligen spezifischen Daten des Betreibers der einzelnen Feldquelle durchführbar.

Bei der Überlagerung von Feldern verschiedener Quellen (z.B. mehrere Erdkabel in einer Trasse) ist zu beachten, dass eine betragsmäßige Addition der Feldgrößen unrealistisch hohe Werte ergeben kann.

Meßverfahren

Messgeräte

Die Messgeräte müssen den Anforderungen nach DIN VDE 0848-1 'Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern' genügen. Die Messgeräte zur Beurteilung dieser Felder müssen je nach Frequenzbereich so eingerichtet sein, dass sie die elektrische Feldstärke E , die magnetische Feldstärke H , die magnetische Flussdichte B oder die Leistungsflussdichte S messen. Die Messunsicherheit der Messgeräte sollte insgesamt $\pm 25\%$ (± 2 dB) nicht überschreiten; Messgeräte für niederfrequente Magnetfelder sollten $\pm 10\%$ Messunsicherheit insgesamt nicht überschreiten.

Vorbereitung und Durchführung von Messungen

Zur Messvorbereitung empfiehlt sich folgende Vorgehensweise:

- Einholen von technischen Angaben über die Feldquellen beim Betreiber (Frequenzen, Generatorleistung, Strahlungseigenschaften, ggf. Modulation, Leiterströme und -spannungen),
- Ermittlung von Expositionsbedingungen und Angaben zu den maßgebenden Immissionsorten
- Festlegung eines bewertbaren Betriebszustandes bei Anlagen mit wechselnden Betriebsparametern,
- Auswahl von Messverfahren und -geräten entsprechend den technischen Bedingungen,
- Abschätzung der zu erwartenden maximalen Feldstärke oder Leistungsflussdichte vor Beginn der Messungen bzw. vor Inbetriebnahme einer Anlage,
- Messung, Protokollierung und Auswertung.

Die Messungen sind bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchzuführen; anderenfalls sind die Werte entsprechend hochzurechnen.

Gemessen wird grundsätzlich ohne eine mögliche Beeinflussung durch die Anwesenheit von Personen. Die Beurteilung der Messergebnisse erfolgt auf der Basis der maximalen gemessenen Werte der Feldstärke oder Leistungsflussdichte am Messort.

Die das Messgerät bedienende Person hat darauf zu achten, dass sie sich während der Messung nicht zwischen Feldquelle und Feldsonde bzw. Messantenne befindet und sich alle nicht mit der Messung beauftragten Personen aus dem Bereich des Messortes entfernen.

Feldsonden mit isotroper Empfangscharakteristik, die durch eine orthogonale Anordnung von drei Messwertaufnehmern/Detektorkombinationen im Sondenkopf erzielt wird, liefern einen

von Einfallrichtung und Polarisierung des zu messenden Feldes weitgehend unabhängigen Messwert und sind Feldsonden mit Richtcharakteristik vorzuziehen.

Feldsonden mit nur einem Messwertempfänger/einer Detektorkombination oder Messantennen weisen eine Richtcharakteristik auf und erfordern eine Orientierung der Sonde bzw. Antenne im Feld auf Maximumanzeige am Messgerät. Dieser Maximalwert entspricht in vielen Fällen praktisch der Ersatzfeldstärke nach DIN VDE 0848-1 (Wenn der Quotient zwischen dem maximalen und minimalen Messwert größer 3 ist, ist ein Fehler in der Größenordnung von 0,5 dB zu erwarten.). Bei bestimmten Feldkonfigurationen, z.B. 50 Hz-Drehstromfelder, ist zur exakten Bestimmung der Ersatzfeldstärke die Sonde nacheinander in x-, y- und z-Richtung auszurichten und aus den Einzelmesswerten die Ersatzfeldstärke zu berechnen. Treten am Messort gleichzeitig Felder von mehr als einer Feldquelle auf, ist folgendes zu berücksichtigen:

- Sind die Grenzwerte im zu untersuchenden Frequenzbereich gleich, so können die resultierenden Feldstärken mit breitbandigen Messeinrichtungen direkt gemessen werden.
- Arbeiten die Feldquellen in Frequenzbereichen mit unterschiedlichen Grenzwerten, so darf mit breitbandigen Geräten nur bei Einzelbetrieb der Feldquellen gemessen werden, anderenfalls sind frequenzselektive Messsysteme einzusetzen, oder es ist der niedrigste im Frequenzbereich vorkommende Grenzwert zur Bewertung heranzuziehen.
- Bei Verwendung von Feldsonden oder Messantennen mit ausgeprägter Richtcharakteristik sollte die Messung durch Abtastung des Raumes in Schritten mit dem Öffnungswinkel der Antenne und Berücksichtigung der Polarisierung mit nachfolgender Berechnung der Feldstärke (Raumintegral) durchgeführt werden.

Besonderheiten im Niederfrequenzbereich

Bei zeitabhängiger Richtung der Feldvektoren, z.B. Drehfelder von dreiphasigen Leiteranordnungen, ist die mit eindimensionalen Messwertempfängern (Feldsonden mit Richtcharakteristik) gemessene maximale Feldstärke immer kleiner als die Ersatzfeldstärke. In diesem Fall muss in drei orthogonalen Achsen gemessen und aus den Einzelmesswerten die Ersatzfeldstärke berechnet werden.

Es ist bei der Messung der elektrischen Feldstärke besonders darauf zu achten, dass die Messergebnisse nicht durch die feldverzerrende Wirkung von Personen oder Gegenständen, z.B. Messleitungen, leicht veränderliche Bodenstrukturen und leichtveränderlicher Bewuchs, unzulässig hoch beeinflusst werden. Objekte, die bei Messungen eine unveränderliche Abschirmung hervorrufen (Bäume, Büsche), müssen berücksichtigt und im Messprotokoll dargestellt werden. Deshalb werden die Geräte zur Messung der elektrischen Feldstärke entweder an einer Isolierstange ins Feld gehalten oder das Messgerät befindet sich auf einem Stativ, und die Messwertübertragung erfolgt über einen Lichtwellenleiter zu einem abgesetzten Anzeigeteil. Auf diesbezügliche Angaben des Geräteherstellers ist zu achten.

Bei inhomogenen elektrischen Feldern sind Verfahren zur Bestimmung der elektrischen Ersatzfeldstärke (DIN VDE 0848-1) über die Messung des Gesamtkörperableitstroms zugelassen, wenn der dabei entstehende Fehler bekannt ist.

Bei inhomogenen magnetischen Feldern dürfen die maximalen Feldstärken, gemittelt über eine kreisförmige Fläche von 100 cm, den zulässigen Wert nicht überschreiten.

Nennenswerte Verzerrungen des magnetischen Feldes sind nur durch Gegenstände aus ferromagnetischen Metallen (Stahlträger, Armierungen, Blechtüren und -bedachungen, Fahrzeuge) zu erwarten. Personen beeinflussen das magnetische Feld nicht, so dass die Messgeräte vom Messenden direkt ins Feld gebracht werden dürfen.

Für die höchste betriebliche Anlagenauslastung sind die Angaben aus der Anzeige nach § 7 zu verwenden. Dabei muss nur von einer symmetrischen Strombelastung durch die Verbraucher und einer gleichmäßigen Verteilung der Last ausgegangen werden. (In der Praxis ist dies nicht immer gegeben, besonders bei Ortsnetzstationen kann die Unsymmetrie groß sein. Dies wird aber weitgehend durch die Verwendung der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung berücksichtigt.). Wird die Anlage mit verschiedenen Schaltzuständen betrieben, müssen alle Schaltzustände berücksichtigt werden, die im Betrieb eine Wahrscheinlichkeit von über 5 pro Jahr haben.

Können die Messungen nicht bei der höchsten betrieblichen Anlagenauslastung durchgeführt werden, muss bei Freileitungen mit einem Feldberechnungsprogramm auf diese Werte hochgerechnet werden, da z.B. die Leiterseilhöhe nichtlinear vom Leiterstrom abhängt. Eine lineare Hochrechnung mit dem Leiterstrom ist nur möglich, wenn sichergestellt ist, dass es keine nichtlinearen Einflussgrößen gibt.

Werden für Standardanlagen (z.B. Kompaktstationen) 'Hersteller-Zertifikate' ausgestellt, so sind diese immer für die höchsten betrieblichen Anlagenauslastungen zu berechnen oder bei diesen zu messen. Die Bezugsebene für die Rechen- oder Messwerte bei Elektromessanlagen liegt in 20 cm Abstand von der berührbaren und zugänglichen Oberfläche.

Werden Messungen unter anderen als den höchsten betrieblichen Anlagenauslastungen durchgeführt, ist zu berücksichtigen, dass die Messgröße nicht immer eine reine Sinusschwingung ist. Im Hinblick auf die Hochrechnung der Messergebnisse auf die höchste betriebliche Anlagenauslastung müssen daher mögliche Oberwellen durch eine Spektralanalyse oder Breitbandmessung berücksichtigt werden.

Bei der Bestimmung der Gesamtexposition durch verschiedene Anlagen einer Frequenz ist eine phasenrichtige Addition der Feldgrößen einer betragsmäßigen vorzuziehen. Eine Addition der Beträge führt immer zu einer konservativen Abschätzung der Gesamtexposition. Liegen Felder von Anlagen der öffentlichen Stromversorgung und Bahnstromanlagen gleichzeitig vor, so sind neben der Gesamtexposition auch die Feldanteile für die jeweilige Frequenz anzugeben.

2.2 Verfahren zur Bestimmung elektrischer und magnetischer Immissionen

2.2.1 Messtechnische Verfahren

Die Feldvektoren der elektrischen und der magnetischen Feldstärke beschreiben im Zeitverlauf einer Schwingungsperiode im Raum ein Ellipsoid, wobei in vielen realen Fällen eine Raumkomponente verschwindend gering ist, z.B. bei Hochspannungsleitungen die leitungsparallele Komponente. Für die Frage nach biologischen Wirkungen interessiert in erster Linie der (zeitabhängige) Betrag des Feldvektors. Für dessen Bestimmung werden die Anteile in drei (senkrecht aufeinander stehenden) Raumrichtungen gemessen und phasengerecht 'addiert' (physikalisch korrekt wird die Wurzel aus der Summe der Quadrate gezogen: $F_{\text{phy}}(t) = \sqrt{[F_1(t)^2 + F_2(t)^2 + F_3(t)^2]}$). Hieraus können der **Spitzenwert** F_{max} (das Maximum dieser Größe), das Minimum und als Mittelwert der **Effektivwert** F_{rms} (auch rms-Wert, 'root mean square', die Wurzel aus dem zeitlichen Mittel des Quadrates der Feldstärke), bestimmt werden. Für reine Sinusschwingungen ergibt sich der Effektivwert zu: $F_e = F_{\text{max}}/\sqrt{2}$.

Da die Phasenbeziehung bei Messungen der Einzelkomponenten nicht immer bekannt ist, trotzdem aber vergleichbare Ergebnisse erzielt werden sollen, wird für eine normgerechte Messung nicht die Bestimmung dieses phasengerecht bestimmten Werts, sondern der so genannten **Ersatzfeldstärke** gefordert. Diese wird ohne Berücksichtigung der Phasenbeziehung aus den Werten (Spitzenwert oder Effektivwert) für die drei Raumrichtungen ermittelt ($F_e = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}$). Diese ist fast immer größer als der phasengerecht ermittelte physikalische Wert, nur in Ausnahmefällen sind sie gleich groß. Bei der Wahl eines Messgerätes muss darauf geachtet werden, dass dieses die Bestimmung der Ersatzfeldstärke ermöglicht und dass immer klar ist, welcher Wert - Effektivwert oder Spitzenwert, physikalische Feldstärke oder Ersatzfeldstärke - vom Messgerät gerade angezeigt und/oder gespeichert wird. Bei dem in diesem Vorhaben verwendeten Messgerät (s. Abschnitt 3.1.1.3) kann zwischen zwei Arten der Messwertaufnahme gewählt werden, zum einen 'RMS', dabei wird die Ersatzfeldstärke aus den drei RMS-Effektivwerten der einzelnen Messachsen ermittelt und gespeichert, und zum anderen 'VECT-PEAK', wobei der Spitzenwert des phasengerecht gebildeten Feldvektors ermittelt wird. Für die Darstellungen und Auswertungen wurde der RMS-Wert verwendet.

Bei Messgeräten ist grundsätzlich zu unterscheiden, zum einen zwischen ein- und dreidimensional messenden Geräten und zum anderen zwischen frequenzselektiven und Breitband-Messgeräten.

Die meisten hochwertigen Geräte haben heutzutage vielfältige Funktionen, die die Messung und die Auswertung erleichtern: Einstellung verschiedener Messbereiche, Ausgabe in unterschiedlichen Einheiten, große Messwertspeicher, automatische Dauermessung, 'max hold'-Modus zum Auffinden des Maximalwertes, 'ave'-Modus mit der sofortigen Mittelwertbildung, eine Schnittstelle zum PC zur nachträglichen Auswertung u.s.w.

Eindimensional messende Geräte: Diese Geräte messen jeweils nur eine Raumkomponente des (elektrischen oder magnetischen) Feldes. Durch Drehen der Messsonde im Feld kann im 'max hold'-Modus die Amplitude und bei Beobachtung der Feldstärkeänderungen im 'live'-Modus die Richtung des maximalen Feldvektors, ermittelt werden. Für die normgerechte Bestimmung der Ersatzfeldstärke müssen jeweils drei unabhängige Raumrichtungen (meist senkrecht zueinander stehend) gemessen und hinterher zur Ersatzfeldstärke zusammengefasst werden.

Dreidimensional messende Geräte erfassen die drei Raumkomponenten gleichzeitig, bzw. sehr kurz hintereinander, und bilden dann den gewünschten Gesamtwert (Ersatzfeldstärke oder physikalischer Betrag des Feldvektors). Da in vielen Fällen nur die Größe der Felder und nicht die exakte Richtung des Feldvektors interessiert, ist es nicht unbedingt notwendig, dass ein dreidimensionales Messgerät zur Bestimmung der Feldrichtung auf eindimensionale Messung umgestellt werden kann. Auch ist die Speicherung aller drei Einzelkomponenten selten erforderlich. Diese sind auch nur für spezielle Auswertungen nötig, nicht aber für die meisten Fragestellungen im Zusammenhang mit Übertragungsleitungen der Stromversorgung.

Frequenzselektive Messgeräte haben entweder eingebaute Frequenzfilter (Bandpass – und/oder Kantenfilter), die die selektive Messung einzelner Frequenzbereiche ermöglichen,

und/oder besitzen die Möglichkeit zur Analyse des Frequenzspektrums, meist durch eine eingebaute FFT-Recheneinheit, die eine Fast-Fourier-Transformation durchführt und die unterschiedlichen Frequenzbeiträge des Gesamtsignals ausgibt. In Situationen, in denen mehrere Quellen mit unterschiedlichen Frequenzanteilen vorkommen, ist nur mit solchen frequenzselektiven Geräten eine Zuordnung der Feldbeiträge zu den einzelnen Quellen möglich: z.B. wenn parallel zu einer Hochspannungstrasse der Stromversorgung (mit 50 Hz als Grundfrequenz) noch eine Übertragungsleitung der Bahn (mit der Grundfrequenz von $16 \frac{2}{3}$ Hz) verläuft oder wenn neben der Gesamtfeldstärke auch der Oberwellenanteil von Interesse ist.

Frequenzintegrale Messgeräte erfassen breitbandig den gesamten Messbereich, für den das Gerät ausgelegt ist, ohne die Möglichkeit die Beiträge einzelner Frequenzabschnitte gesondert zu messen. Mit diesen Breitbandgeräten kann schnell und ohne großen Aufwand die Gesamtfeldstärke bestimmt werden. Sie eignen sich deshalb insbesondere für Überwachungsaufgaben, bei denen die Einhaltung bestimmter Obergrenzen überprüft werden soll. Aber auch bei Messprojekten, bei denen eine größere Anzahl vergleichbarer Messungen durchzuführen ist, können sie als Zwittergerät eingesetzt werden. Beispielsweise bei der flächenmäßigen Ausmessung eines kompletten Spannungsfeldes unter einer Hochspannungsfreileitung kann es ausreichen, die frequenzselektive Messung an einem Punkt (oder einigen wenigen Punkten) vorzunehmen und die vielen Einzelmessungen auf dem Punktraster mit einem Breitbandmessgerät durchzuführen.

2.2.1.1 Verfahren zur Messung des elektrischen Feldes

Zur Erfassung der elektrischen Feldstärke werden in der Praxis im Wesentlichen drei Verfahren eingesetzt: die potentialfreie Messung, die Messung mit einer (genormten) Sonde gegen ein festes (meist das Erd-) Potential und die Messung der durch das elektrische Feld im Menschen verursachten Körperspannung bzw. der Ableitströme.

Bei den meisten Messgeräten wird zur Messung elektrischer Felder der physikalische Effekt der Influenz ausgenutzt. Durch das zu messende Feld werden auf zwei verbundenen Elektroden (z.B. zwei Metallplatten) Ladungen induziert. Sind die beiden Elektroden niederohmig verbunden, kann der Verschiebestrom gemessen und ausgewertet werden. Vom Grundprinzip her besteht bei den meisten technischen Ausführungen eine hochohmige Verbindung zwischen den Elektroden und es wird die Kondensatorspannung gemessen und in ihrem Zeitverhalten ausgewertet. Die geometrische Form der Elektroden ist dabei von Gerätetyp zu Gerätetyp unterschiedlich. Teilweise wird der leitfähige Erdboden als eine der Elektroden verwendet, z.B. bei Messung der Ableitströme.

Zur Messung hoher elektrischer Feldstärken bzw. Spannungen kann auch der elektrooptische Effekt zur Messung ausgenutzt werden. Die optischen Eigenschaften spezieller Kristalle oder Flüssigkeiten werden durch das elektrische Feld verändert, sie werden doppelbrechend bzw. verändern die Stärke ihrer Doppelbrechung. Dabei ist die zwischen den unterschiedlichen Polarisationskomponenten entstehende Phasenverschiebung abhängig von der Stärke des äußeren Feldes (lineare Feldabhängigkeit → Pockelseffekt, quadratische Feldabhängigkeit → Kerreffekt).

Die **potentialfreie Messung** wird in den einschlägigen Normen (DIN 0848) für die Messung im Freien, z.B. an Hochspannungsleitungen, vorgeschrieben. Dabei werden je nach Dimensionalität des Gerätes ein bis drei metallische Elektrodenpaare in der Messsonde untergebracht. Die Sonde wird entweder an einer langen Isolierstange oder auf einem gegen den Erdboden isolierten Stativ befestigt. Die Messsignale werden meist über einen Lichtwellenleiter zu einer Anzeige- und Auswerteeinheit geleitet, z.T. werden sie auch in der Sonde gespeichert und später ausgelesen.

Auch eine Messung unter Ausnutzung des elektrooptischen Effekts ist eine potentialfreie Messung, diese Methode ist aber für die im Umfeld von Hochspannungsleitungen auftretenden Feldstärken nicht empfindlich genug. (Küchler 2005)

Häufig eingesetzte Geräte zur potentialfreien Messung des elektrischen Feldes sind:

- EFA-300 mit E-Feld-Würfel (Narda Safety Test Solutions, Pfullingen, D)
- C.A42 mit E-Feld-Sonde EF400 (Chauvin Arnoux GmbH, Kehl/Rhein, D)
- UMS4 mit EF13+3D-EFM (Fauser Elektronik, München, D)
- EMDEX II mit E-Sonde (EnerTech Consultants, Campbell, CA, USA)

Die technischen Daten dieser Geräte sind im Abschnitt 2.2.1.3 aufgeführt, zusammen mit denen für aktuelle Magnetfeld-Messgeräte und -geräten, die in im Abschnitt 2.3 aufgeführten Studien eingesetzt wurden.

Messung gegen Erdpotential: Bei Fragestellungen, bei denen nicht die Stärke des ungestörten elektrischen Feldes im Vordergrund steht, sondern das Augenmerk auf der Exposition der Menschen in der Nähe von elektrischen Geräten liegt, können in bestimmten - geometrisch überschaubaren - Situationen Messgeräte sinnvoll eingesetzt werden, die die Feldstärke gegenüber Erdpotential messen. Dabei wird als 'Worst case' angenommen, dass die exponierte Person durch Kontakt mit leitenden Materialien 'geerdet' ist und sich auf Erdpotential befindet. So werden z.B. die Messungen von Bildschirmgeräten nach der schwedischen TCO-Norm mit einer erdgebundenen Sonde durchgeführt. Solche Sonden werden z.B. für die Geräte der Firma Fauser Elektronik angeboten.

Messung der Körperspannung bzw. der Ableitströme: Bei Untersuchungen in inhomogenen Feldern sind zur Bestimmung der elektrischen Ersatzfeldstärke auch Verfahren über die Messung der Gesamtkörperableitströme (bei niederohmiger Ankopplung an das Erdpotential, bzw. der Körperspannung bei hochohmiger Ankopplung) zulässig, soweit die dabei entstehenden Fehler bekannt sind (Brüggemeyer 1999, Länderausschuss für Immissionsschutz 2004).

Bei Messungen der elektrischen Feldstärke ist darauf zu achten, dass die Messergebnisse nicht durch die das elektrische Feld verzerrende Wirkung von Personen oder Gegenständen, wie Messleitungen oder ein metallisches Stativ, unzulässig verfälscht werden (s. dazu auch Abschnitt 2.1.5). Auch müssen sowohl die Bodenbeschaffenheit und möglicherweise vorhandener Bewuchs dokumentiert werden. So unterscheiden sich z.B. die Messwerte der elektrischen Feldstärke in einem Meter Höhe über einer Wasserpflanze von denen über trockenem Sand und die über einer ebenen Rasenfläche von denen über einer einzelnen stehenden, etwa höheren Pflanze. Dauermessungen im Freien sind nur bei stabiler Wetterlage möglich, da einsetzender Regen die Ergebnisse verfälscht bzw. zum Ausfall des Gerätes

führen kann. Eine an den meisten Messorten notwendige Überwachung der Messausrüstung erschwert die Durchführung von E-Feld-Dauermessungen bzw. macht sie an vielen Orten praktisch unmöglich. Aufgrund der Konstanz der elektrischen Spannungsamplituden und -phasen (s.o.) sind Dauermessungen des E-Feldes allerdings deutlich weniger interessant als Dauermessungen des magnetischen Feldes. Änderungen in der Stärke des elektrischen Feldes durch den Einfluss der Stromstärke auf den Durchhang lassen sich bei Messungen zu unterschiedlichen Zeiten meist kaum von den anderen Einflüssen auf das elektrische Feld trennen, zumal die in den meisten Fällen vorkommenden Stromschwankungen nur einen kleinen Teil der maximal möglichen Schwankung (Maximalstrom/kein Strom auf der unter Spannung stehenden Trasse) betragen. Die bei eigenen Messungen festgestellten zeitlichen Schwankungen in der elektrischen Feldstärke ließen sich praktisch alle im Wesentlichen auf äußere, vom Stromübertragungssystem unabhängige Einflüsse, meist Witterungseinflüsse auf die Bodenfeuchte und die Messgeräte, zurückführen.

2.2.1.2 Verfahren zur Messung des magnetischen Feldes

Zur Erfassung magnetischer Felder im Alltag stehen im Wesentlichen zwei Verfahren zur Verfügung: zum einen die Messung mit einer Hall-Sonde, bei der die im magnetischen Feld durch die auf bewegte Ladungsträger wirkende Lorentzkraft - entstehende Querspannung, die Hallspannung, gemessen wird; zum anderen die Bestimmung der magnetischen Flussdichte durch die Messung der in einer Spule induzierten Spannung.

Hall-Sonden werden aufgrund ihrer geringen Größe, die meisten Sonden sind nur wenige Zentimeter lang, weniger als einen Zentimeter breit und nur einige Millimeter dick, bei Messungen in sehr kleinräumigen Umgebungen und/oder bei sehr inhomogenen Feldern eingesetzt. Für Messungen im Umfeld von Stromübertragungssystemen eignen sie sich weniger, da sie auch aufgrund ihrer geringen Größe keine ausreichende Empfindlichkeit haben. Hall-Sonden sind sowohl zur Messung zeitabhängiger wie statischer Felder geeignet.

Die Messgeräte für eine normgerechte Erfassung der magnetischen Feldstärke im Umfeld von Übertragungseinrichtungen der Stromversorgung arbeiten mit einer **Induktionsspule** mit einer Fläche von 100 cm² zur Messung der magnetischen Flussdichte. Zu den meisten kommerziellen Messgeräten, die zu einer normgerechten Messung geeignet sind, gehört eine externe Messsonde mit drei orthogonalen Messspulen (jeweils mit 100 cm² Querschnittsfläche) zur gleichzeitigen Erfassung der drei Raumkomponenten der magnetischen Flussdichte. Meist werden diese gleich zu der Ersatzfeldstärke zusammengefasst, die in der Steuereinheit als Messwert angezeigt wird. Für die Ermittlung der maximalen Flussdichte in stark inhomogenen Feldern, die an Stromübertragungstrassen allerdings nicht auftreten, können Messsonden mit kleineren Spulenquerschnitten angeschlossen werden.

Die Messung der magnetischen Flussdichte wird durch die Anwesenheit des Messpersonals nicht und durch normale metallische Gegenstände in der Nähe der Messsonde nur unwesentlich gestört, was die Durchführung der Magnetfeldmessungen gegenüber Messungen der elektrischen Feldstärke wesentlich vereinfacht. Dauermessungen der magnetischen Flussdichte an Stromübertragungstrassen sind selbst in einem Fahrzeug möglich. Die Abschirmwirkung der Metallkarosserie ist nur gering und kann durch Messung am gleichen Ort ohne und im Fahrzeug bestimmt und hinterher berücksichtigt werden. Starke Störungen des

Magnetfelds können jedoch durch ausgedehnte, massive Strukturen aus ferromagnetischen Materialien verursacht werden.

Die Überlegungen im Abschnitt 2.1.4.2 zeigen, dass für die Bestimmung der maximalen und der mittleren magnetischen Flussdichte im Umfeld von Stromübertragungssystemen einmalige Messungen nicht ausreichen, weder Punktmessungen noch Querprofile oder ganze Spannungsfelder. Vielmehr müssten über sehr lange Zeit die Messungen mit möglichst kurzen Zeitabständen wiederholt werden. Auch die gleichzeitige Erfassung der Stromdaten auf den Leitungen ermöglicht – wie oben gezeigt – nur in Sonderfällen eine einfache Umrechnung auf die gewünschten Maximal- oder Mittelwerte. Die andere Möglichkeit besteht darin, parallel zu den Messungen neben der Anordnung der Phasenleiter der Spannungen und den Stromwerten auf den einzelnen Leitern auch die Phasendifferenz zwischen den beiden Systemen zu erfassen. Alternativ zu der Phasendifferenz können auch die jeweiligen Leistungen und Blindleistungen auf den Systemen bei den Stromversorgern ermittelt werden. Mit diesen Daten kann dann die magnetische Flussdichte im Umfeld der Übertragungstrasse berechnet (s. Abschnitt 2.2.2) und mit den Messungen verglichen werden. Anschließend können die Rechnungen für die gewünschten Lastzustände wiederholt werden. Das können neben typischen Situationen, wie arithmetische Mittel, Median, Sommer- und/oder Wintermittel usw., auch Sonderfälle sein, wie Maximum und Minimum oder extrem unsymmetrische Zustände.

Trotz der im Abschnitt 2.1.4.2 beschriebenen Probleme bei der Umrechnung auf andere Lastzustände und damit auf die Exposition zu anderen Zeiten hat eine taiwanesishe Untersuchung über vier Monate eine sehr gute Korrelation von Kurzzeit-Spotmessungen in 80 Wohnungen, die weniger als 70 m von zwei Hochspannungsfreileitungen entfernt lagen, mit 72 h-Dauermessungen gefunden (Ger 2007).

Für die Bestimmung der mittleren Expositionen von Anwohnern in der Umgebung von Stromübertragungstrassen kann die mittlere Feldverteilung im Umfeld eines Doppelsystems aus den gemittelten Strom- und Phasenwerten für die einzelnen Leiter berechnet werden, statt sie aus einer Vielzahl von Messungen zu ermitteln (Mazzanti 2006b).

Häufig eingesetzte Geräte zur normgerechten Messung (100 cm²) niederfrequenter Magnetfelder sind

- EFA-300 mit externer Magnetfeldsonde (narda Safety Test Solutions, Pfullingen)
- C.A42 mit B-Feld-Sonde EM400 (Chauvin Arnoux GmbH, Kehl/Rhein)
- UMS4 mit MAG3 oder ENB (Fauser Elektronik, München)

Das in epidemiologischen Studien oft eingesetzte EMDEX-Messgerät hat keine normgerechte sondern eine dreidimensionale Magnetfeld-Sonde mit deutlich kleinerer Querschnittsfläche

- EMDEX II (Enertech Consultants, Campbell, CA, USA)

Nähere Informationen zu diesen Messgeräten werden im Abschnitt 2.2.1.3 gegeben.

2.2.1.3 Technische Daten von Messgeräten

Bezeichnung	Field Analyser EFA-300	Narda Safety Test Solutions GmbH, Pfullingen, D	früher: Wandel & Goltermann
Art des Geräts	Spektrumanalysator für wechselbare Sonden		
Bemerkungen / eigene Erfahrungen	hochwertiges Gerät, mit sehr guter Frequenzanalyse, feste und frei wählbare Filter, einfach in der Handhabung, geeignet für Dauermessungen, robust		

Field Analyser EFA-300		E-Feld (potentialfrei)	B-Feld	
Messsonde(n)		Isotrop: 3 Plattenkondensatoren	isotrop: 3 Luftspulen, 100 cm ² (auch kleinere isotrope Sonde)	
Frequenzbereich(e)		Breitband (BB1): Breitband (BB2): Bandfilter (BF): Spektrum (FFT1, Auflösung 0,01 Hz): Spektrum (FFT2, Auflösung 0,1 Hz):	30 Hz - 2 kHz 5 Hz - 32 kHz 50 Hz - 400 Hz 5 Hz - 2 kHz 40 Hz - 32 kHz	
Messbereiche		< 10 V/m bis < 100 kV/m	< 100 nT bis < 32 mT	
Auflösung		0,1 V/m	0,1 nT	
Rauschen	BB1	0,7 V/m	4 nT	
	BB2	< 4,5 V/m	< 10 nT	
	BF	0,14 V/m	0,8 nT	
	FFT1	< 48 Hz	0,3 V/m	< 45 nT
		> 48 Hz	0,1 V/m	4 nT
		noise floor	0,02 V/m	0,05 nT
	FFT2	< 200 Hz	0,1 V/m	2 nT
		0,2 - 20 kHz		0,3 nT
> 20 kHz		einzelne Peaks bis 3 V/m	0,6 nT	
	noise floor	0,05 V/m	0,07 nT	
Messfehler	BB1	± 3 % ab 5 V/m	± 3 % ab 40 nT	
	BB2	± 3 % ab 40 V/m	± 3 % ab 80 nT	
	BF	± 3 % ab 1 V/m	± 3 % ab 10 nT	
	FFT1	± 3 % ab 5 V/m	± 3 % ab 40 nT	
	FFT2	± 3 % ab 40 V/m	± 3 % ab 80 nT	
Frequenzauflösung		0,1 Hz		

Bezeichnung	Feldstärkenmesser C.A 42	Chauvin Arnoux GmbH. Kehl/Rhein, D	früher: Symann & Trebbau
Art des Geräts	Spektrumanalysator für wechselbare Sonden		
Bemerkungen	vielseitiges Gerät, mit Frequenzanalyse und Oszilloskop-Funktion, feste und frei wählbare Filter, geeignet für Dauermessungen		

Feldstärkenmesser C.A 42		E-Feld (potentialfrei)	B-Feld
Messsonde(n)		EF400: Isotrop: 3 Plattenkondensatoren	MF400: isotrop: Luftspulen, 100 cm ²
Frequenzbereich(e)	Breitband	5 Hz - 400 kHz	10 Hz - 400 kHz
	Bandfilter	zwischen 16 ² / ₃ Hz und 2.000 Hz frei wählbar	
	Spektrum FFT	aus 10 Hz - 91 kHz (Auflösung ab 1 Hz, Frequenzbereich/2048)	
Messbereiche		< 300 V/m bis < 30 kV/m	< 200 nT bis < 20 mT
Auflösung		1 V/m	1 nT
Rauschen	BB	1 V/m	< 10 nT
Messfehler	bei 50 Hz	± 0,5 % ± 1 D. (300 V/m)	± 0,5 % ± 1 D. (20 µT u. 200 µT)
Frequenzauflösung		1 Hz	

Bezeichnung	Messsystem UMS4	Fauser Elektrotechnik, München, D
Art des Geräts	Spektrumanalysator für wechselbare Sonden	
Bemerkungen	vielseitiges Gerät, mit Frequenzanalyse, anpassbare Filterfunktionen, geeignet für Dauermessungen, für dieses Gerät ist eine Magnetfeldsonde (ENB) zur Messung nach EN50366 und eine TCO-Sonde (zur Messung des E-Feldes gegen Erde nach TCO-Norm für Bildschirmgeräte) lieferbar	

Messsystem UMS4	E-Feld (potentialfrei)	B-Feld
Messsonde(n)	EF13+3D-EFM: isotrop: 3 Plattenkondensatoren	MAG3: isotrop: Luftspulen, 100 cm ²
Frequenzbereich(e)	Breitband	10 Hz – 100 kHz
Messbereiche	< 10 V/m bis < 1 kV/m	5 Hz – 400 kHz, vier Filterfunktionen
Auflösung	0,1 V/m	< 200 nT bis < 20 µT
Rauschen	?	0,1 nT
Messfehler	bei 50 Hz	?
Frequenzauflösung	< ± 5 %	± 2,5 %
		?

Bezeichnung	SignalAnalysator SAR40	PhysicalSystemsLabs PSL, Hildesheim	existiert nicht mehr, keine Nachfolgefirma
Art des Geräts	Spektrumanalysator für wechselbare Sonden		
Bemerkungen / eigene Erfahrungen	sehr hochwertiges Gerät, mit ausgezeichneter Frequenzanalyse, Darstellung des original Timings, Auswertung für frei wählbare Filter, schwer und umständlich in der Handhabung, da auch zur Steuerung der Messwertaufnahme ein Laptop angeschlossen sein muss		

SignalAnalysator SAR40	E-Feld (potentialfrei)	B-Feld
Messsonde(n)	eindim.: 1 Plattenkondensator	isotrop: 3 Luftspulen, 100 cm ²
Frequenzbereich(e)	(0 -) 15 – 45.000 Hz	
Messbereiche	1 V/m bis 30 kV/m	10 nT bis 300 µT
Auflösung	0,1 V/m	0,1 nT
Grundrauschen im Spektrum (ab 50 Hz)	0,01 V/m	0,03 nT
Messfehler	± 5 %	± 3 %
Frequenzauflösung	0,1 Hz	

Bezeichnung	Handfeldrekorder HFR1200	PhysicalSystemsLabs PSL, Hildesheim	existiert nicht mehr, keine Nachfolgefirma
Art des Geräts	frequenzintegrales Messgerät mit selektiven Bandfiltern, feste Sonden		
Bemerkungen / eigene Erfahrungen	handliches Gerät, feste Filter, am PC nachträgliche Spektrumanalyse möglich, für Dauermessungen geeignet		

Handfeldrekorder HFR1200	E-Feld (potentialfrei)	B-Feld
Messsonde(n)	eindim.: 1 Plattenkondensator	isotrop: 3 Luftspulen, 100 cm ²
Frequenzbereich(e)	15 – 500 Hz feste Filter: 16 ² / ₃ Hz, 50 Hz, 150 Hz	
Messbereiche	bis < 50 kV/m	bis < 50 µT
Auflösung	0,1 V/m	0,1 nT
Grundrauschen im Spektrum	bis 150 Hz	?
	ab 150 Hz	0,5 nT
Messfehler	± 2 %	± 1 %
Frequenzauflösung (in der FFT)	5 Hz	

Bezeichnung	Handfeldmeter HFM30	Physical Systems Labs PSL, Hildesheim	existiert nicht mehr, keine Nachfolgefirma
Art des Geräts	frequenzintegrales Messgerät mit festen Sonden		
Bemerkungen / eigene Erfahrungen	handliches Gerät, gut geeignet zum Aufspüren von Feldquellen für die ungestörte, potentialfreie Messung des E-Feldes wird das Gerät an eine ca. 3 m lange Isolierstange montiert und so gehalten, dass sich das Messgerät zwischen Quelle und Messperson befindet		

Handfeldmeter HFM30		E-Feld (potentialfrei)	B-Feld
Messsonde(n)		eindim.: 1 Plattenkondensator	eindim.: 1 Luftspule, 100 cm ²
Frequenzbereich(e)		16 Hz – 30 kHz	
Messbereiche		< 1 kV bis < 50 kV/m	< 10 µT bis < 100 µT
Auflösung		0,1 % vom Messbereich	0,1 % vom Messbereich
Rauschen	kleinste MB	< 0,5 % vom Messbereich	< 0,5 % vom Messbereich
	sonst	< 0,1 % vom Messbereich	< 0,1 % vom Messbereich
Messfehler		± 3 % ± 5 Digits	± 3 % ± 5 Digits

Bezeichnung	FieldWatcher FW1 (a,b,c)	Physical Systems Labs PSL, Hildesheim	existiert nicht mehr, keine Nachfolgefirma
Art des Geräts	frequenzintegrales Personendosimeter mit fester Sonde		
Bemerkungen / eigene Erfahrungen	kleines Gerät, mit Gürteltasche zum kontinuierlichen, personennahen Tragen geeignet, besonders in der Breitbandversion empfindlich gegen Bewegungsartefakte, Dauermessung: für max. 27,3 h ein Messwert alle 3 sec		

FieldWatcher FW1 (a,b,c)		B-Feld	
Messsonde(n)		dreidim.: 3 (kleine) orthog. Spulen	
Frequenzbereich(e)	(a)	16 Hz – 300 Hz	
	(b)	50 Hz Bandfilter	
	(c)	16 ² / ₃ Hz Bandfilter	
Messbereiche		bis 10 µT	
Auflösung		10 nT	
Rauschen		10 nT	
Messfehler		± 2 %	

Bezeichnung	FieldWatcher FW2	Physical Systems Labs PSL, Hildesheim	existiert nicht mehr, keine Nachfolgefirma
Art des Geräts	frequenzintegraler Personendosimeter mit fester Sonde		
Bemerkungen	kleines Gerät, mit Gürteltasche zum kontinuierlichen, personennahen Tragen geeignet, Dauermessung: für max. 24 h je ein Messwert für beide Filter jede Sekunde		

FieldWatcher FW2		B-Feld	
Messsonde(n)		dreidim.: 3 (kleine) orthog. Spulen	
Frequenzbereich(e)		16 ² / ₃ Hz- und 50 Hz-Bandfilter	
Messbereiche		bis 100 µT	
Auflösung		1 nT	
Rauschen	16 ² / ₃ Hz	2 nT	
	50 Hz	1 nT	
Messfehler		± 3 %	

Bezeichnung	μT-Vector	Physical Systems Labs PSL, Hildesheim	existiert nicht mehr, keine Nachfolgefirma
Art des Geräts	frequenzintegraler Handmessgerät mit fester Sonde		
Bemerkungen	kleines Gerät für die Jackentasche'		

μT-Vector		B-Feld	
Messsonde(n)		dreidim.: 3 (kleine) orthog. Spulen	
Frequenzbereich(e)		16 ² / ₃ Hz - 400 Hz	
Messbereiche		bis 40 μT	
Auflösung		10 nT	
Rauschen		30 nT	
Messfehler		?	

MAG-03MC 3-Achsen-Magnetfeldsensor (Bartington)

- - Bandbreite: 0 Hz – 2 kHz
- Messfehler: 1%

FM 210, FM GEO (Projekt-Elektronik, FGEU)

- - Bandbreite: 0 Hz – 2 kHz
- Messfehler: 1% ± 2 Digits

Bezeichnung	Feldstärkenmesser EM400	damals: Symann & Treb- bau	2008: Chauvin Amoux GmbH. Kehl/Rhein, D
Art des Geräts	frequenzintegrales Messgerät mit selektiven Bandfiltern, wechselbare Sonden		
Bemerkungen	handliches Gerät, feste Filter, geeignet für Dauermessungen		

Feldstärkenmesser EM400		E-Feld (potentialfrei)	B-Feld
Messsonde(n)		EF400: Isotrop: 3 Plattenkondensatoren	MF400: isotrop: Luftspulen, 100 cm ²
Frequenz- bereich(e)	BB1	5 Hz - 3,2 kHz	10 Hz - 3,2 kHz
	BB2	2 kHz - 400 kHz	2 kHz - 30 kHz
	BB3	5 Hz - 400 kHz	10 Hz - 30 kHz
	BF	16 ² / ₃ Hz, 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz	
Messbereiche		< 200 V/m bis < 20 kV/m	< 100 nT bis < 10 mT
Auflösung		0,1 % vom Messbereich	
Rauschen	BB	1 V/m	5 nT
Mess- fehler	in BB1: 16 Hz - 2,5 kHz	± 3 % ± 4 Digits	± 3 % ± 2 Digits
	in BB2 (für E ab 2 V/m)	± 5 % ± 4 Digits (ab 10 kHz)	± 3 % ± 2 Digits (8 kHz - 10 kHz)
	in BB3 (für E ab 2 V/m)	± 5 % ± 4 Digits (ab 16 Hz)	± 3 % ± 2 Digits (16 Hz- 2,5 kHz)
Frequenzauflösung		ab 1 Hz	

EMDEXC Vers. 1.22 (Electric Field Measurements, USA)

- - Sensoren: 3 Spulen mit Ferritkern, orthogonal
- Messbereiche: 0,0 bis 2550 μT
- Auflösung: ?
- Frequenzmessbereich: 40 bis 400 Hz, 100 bis 800 Hz

Bezeichnung	EMDEX II	damals: Enertech, USA	2008: Enertech Consultants, Campbell CA, USA
Art des Geräts	frequenzintegrales Messgerät mit selektiven Bandfiltern, wechselbare Sonden		
Bemerkungen	handliches Gerät, feste Filter für die Oberwellen zu 50/60 Hz, für Dauermessungen geeignet, das Messrad 'LINDA Wheel' ermöglicht eine automatische Messung alle 30 cm entlang eines Messweges		

EMDEX II	E-Feld (potentialfrei)	B-Feld
Messsonde(n)	eindim.: 1 Plattenkondensator an ca. 1m langer Isolierstange,	isotrop: 3 kleine, orthog. Spulen mit Ferritkern
Frequenzbereich(e)	40 Hz - 1 kHz	BB: 40 Hz - 800 Hz Oberwellen: 100 - 800 Hz
Messbereiche	bis < 200 kV/m	bis < 300 μ T
Auflösung	1 V/m	10 nT
Rauschen	< 1 V/m	10 nT
Messfehler	± 2 %	± 1 %
Frequenzauflösung (in der FFT)	5 Hz	

Weitere Angaben zum EMDEX II

Toleranzen:	50/60 Hz	Broadband:	± 10 %	Harmonic:	-
	100 Hz		± 30 %		+10% bis -45%
	120 Hz		± 30 %		+25% bis -30%
	150 Hz		± 30 %		+25% bis 0%
	180 – 800 Hz		± 30 %		+25% bis -25%

Bezeichnung	Field Analyser EFA-3	heute: Narda Safety Test Solutions GmbH, Pfullingen, D	damals: Wandel & Goltermann
Art des Geräts	frequenzintegrales Messgerät mit selektiven Bandfiltern, wechselbare Sonden		
Bemerkungen	hochwertiges Gerät, feste und frei wählbare Filter, einfach in der Handhabung, geeignet für Dauermessungen, durch EFA-300 (s.u.) und ELT-400 ersetzt		

Field Analyser EFA-3	E-Feld (potentialfrei)	B-Feld
Messsonde(n)	Isotrop: 3 Plattenkondensatoren	isotrop: 3 Luftspulen, 100 cm ²
Frequenzbereich(e)	5 Hz – 30 kHz	Breitband (BB1): 5 Hz - 2 kHz Breitband (BB2): 5 Hz - 30 kHz selektive Bandfilter (BF) aus BB1
Messbereiche	bis < 100 kV/m	bis < 10 mT
Auflösung	0,1 V/m	1 nT
Rauschen	0,5 V/m	5 nT
Messfehler	BB1, BB2	± 3 % ± 1 nT ab 40 nT
	BF aus BB1	± 5 % ± 1 nT ab 40 nT
Frequenzauflösung	0,1 Hz	

2.2.2 Rechentechnische Verfahren

2.2.2.1 Theoretische Grundlagen für die Berechnung elektrischer und magnetischer Felder

Jeder stromdurchflossene Leiter ist von einem Magnetfeld umgeben. Die magnetische Flussdichte einer Leiterkonfiguration berechnet sich nach dem Gesetz von Biot-Savart durch die Superposition von Teilfeldern einzelner kleiner, linearer Leitersegmente. Jedes infinitesimale Leiterstück $d\mathbf{l}$ (als Vektor mit Länge und Richtung) trägt zum Gesamtfeld am Ort \mathbf{r} zum Zeitpunkt t den Anteil

$$d\mathbf{B}(\mathbf{r},t) = (\mu_0/(4\pi)) \times I(t) \times (d\mathbf{l} \times \mathbf{r})/r^3$$

bei. Die Integration über einen unendlich langen, geraden Leiter führt zu der oben angegebenen exakten Formel

$$B(t) = (\mu_0/(2\pi)) \times I(t)/r.$$

Das elektrische Feld kann durch den negativen Gradienten des skalaren Potentials beschrieben werden. Das elektrische Potential, das von einer vorgegebenen Ladungsverteilung an einem bestimmten Ort erzeugt wird, entspricht der Arbeit, die notwendig ist, um eine Testladung vom Bezugspunkt (meist im Unendlichen), an dem das Potential mit Null angesetzt wird, zu diesem Ort zu verschieben. Auch hier gilt das Superpositionsprinzip. Das Gesamtpotential ist die Überlagerung der Einzelpotentiale aller einzelnen Ladungen der Verteilung. Gleiches gilt für das elektrische Feld. Der Beitrag zum elektrischen Feld einer infinitesimalen Ladung dQ am Aufpunkt ist proportional zur Ladung geteilt durch den Abstand

$$d\mathbf{E} = (dQ / (2\pi\epsilon_0)) \times \mathbf{R}/R^2 \quad \mathbf{R} \quad \text{Vektor von der Ladung zum Aufpunkt}$$

Für das magnetische Feld sind die Ströme auf den Leiterstücken gegeben und der Einfluss des Erdbodens ist verschwindend gering. Für das elektrische Feld müssen die Linienladungen auf den Leitersegmenten erst aus der Spannung, d.h. dem Potential auf dem sich die Linienladungen befinden, berechnet werden. Außerdem ist der Erdboden in den meisten Fällen sehr gut leitend, so dass die Feldlinien senkrecht auf ihm stehen. Dies wird in den Berechnungen dadurch sichergestellt, dass die realen Ladungen auf den Stromleitern am Erdboden räumlich gespiegelt werden. Diese Spiegelladungen gehen mit dem entgegengesetzten Vorzeichen in die Berechnungen ein und erhöhen den Rechenaufwand.

Das Superpositionsprinzip gilt natürlich auch bei mehreren Leitern. Für den Fall eines Drehstromsystems mit drei unendlich langen, geraden Leitern parallel zum Erdboden können noch analytische Lösungen angegeben werden, mit denen im ganzen Raum und zu jedem Zeitpunkt der exakte Wert der Feldstärke angegeben werden kann. Mithilfe von Multipolentwicklungen und in doppelt komplexer Darstellung (für den räumlichen Vektor und die zeitliche Sinusschwingung der Größen) gelingt dies sowohl für das magnetische Feld (Filippopoulos et al. 2005) wie auch das elektrische Feld (Tzinevrakis et al. 2008).

Für komplexere Situationen, z.B. für mehrere Drehstromsysteme und/oder nicht geradlinige Leiterstränge, kann im Allgemeinen keine analytische Lösung mehr angegeben werden. In diesen Fällen müssen die Felder mithilfe von Computerprogrammen berechnet werden. Berechnungsprogramme, die auf den gerade beschriebenen Gleichungen fußen, können nur für stationäre und quasistationäre Felder (keine, bzw. vernachlässigbare Kopplung zwischen dem elektrischen und magnetischen Feld) angewandt werden, außerdem können keine

nichtlinearen Medien eingeschlossen werden. Auch kann die Induktion nur eingeschränkt berücksichtigt werden, z.B. bei der Berechnung der in den Erdseilen induzierten Ströme. Dafür sind die benötigte Rechenzeit und der Aufwand bei der Modellimplementierung vergleichsweise gering. Für die Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder im Umfeld von Übertragungstrassen der Stromversorgung sind Programme dieser Art jedoch völlig ausreichend. Die Fehler, die hierdurch entstehen, können äußerst gering gehalten werden. (vgl. Abschnitt 2.2.2.3).

2.2.2.2 Numerische Verfahren

Für die Berechnungen in sehr komplexen Situationen und für die Bestimmung der Feldverteilungen in der Nähe der Quellen, in stark inhomogenen Situationen und bei Anwesenheit von feldbeeinflussenden Materialien, z.B. auch im Inneren von biologischem Gewebe, kommen verschiedene numerische Verfahren zum Einsatz, die über die eben beschriebenen Ansätze hinausgehen. Bei diesen Methoden wird der Berechnungsraum in Elemente unterteilt und die feldbeschreibenden Gleichungen werden zunächst nur für die Einzelemente gelöst, bzw. es werden approximative Lösungen berechnet.

Bei der Methode der Finiten Differenzen (FDM) wird der Berechnungsraum mit einem Gitternetz überzogen. Für benachbarte Gitterpunkte werden die Funktionswerte mit Hilfe einer Taylorreihenentwicklung gebildet. Nach geeignetem Umformen ergeben sich Differenzenquotienten, die die Differentialquotienten der feldbeschreibenden Differentialgleichungen ersetzen. Das so entstandene Gleichungssystem wird dann unter Berücksichtigung der Randbedingungen für alle Gitterpunkte gelöst. Das Ergebnis sind approximative Werte der Feldgrößen für jeden diskreten Gitterpunkt. Durch Interpolation können aber auch Zwischenwerte gewonnen werden. Die Fehler bei dieser Methode sind bei einem äquidistanten Gitternetz am geringsten. Eine Verbesserung durch Verfeinerung des Gitternetzes in Teilgebieten mit größeren Fehlern, die adaptive Netzgenerierung, ist von daher kaum möglich. Andere Methoden, z.B. die Methode der Finiten Elemente (FEM) oder die Boundary Element Methode (BEM), bei der nur der Rand des Berechnungsgebietes in Elemente aufgeteilt wird, sind an diesem Punkt (Möglichkeit der adaptiven Netz- bzw. Elementgenerierung) wesentlich günstiger und eignen sich daher auch zur Darstellung komplizierter Formen. Allerdings ist der für diese Methoden aufzuwendende Programmier- und Rechenaufwand höher.

Im Gegensatz zu den eben beschriebenen Verfahren geht die Finite Integrations Theorie (FIT) nicht von den feldbeschreibenden Differentialgleichungen aus, sondern von den Maxwell Gleichungen in Integralform. Dabei werden die Maxwell Gleichungen in diskreter Form dargestellt. Für jeden einzelnen Gitterpunkt können die Materialkonstanten gesondert gewählt werden. Die äquidistanten Gitterabstände erschweren aber auch hier die adaptive Netzgenerierung.

Weitergehende Beschreibungen der numerischen Verfahren und die Hintergrundliteratur finden sich z.B. in einer Diplomarbeit der Technischen Universität Berlin (Genz 1999).

2.2.2.3 Mögliche Fehler bei der Feldberechnung

Für die Berechnung der Felder von Stromversorgungseinrichtungen werden überwiegend - für Stromübertragungstrassen praktisch ausschließlich - Programme eingesetzt, die nach dem in Abschnitt 2.2.2.1 beschriebenen Verfahren arbeiten. Aus der Praxis liegen viele Vergleiche zwischen Messungen und Rechnungen in veröffentlichter Form vor (für das Programm WinField® z.B. Frohn et al. 1995, Stenzel et al. 1996, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg 1999, Voigt & Neitzke 1997). Außerdem führt die Mehrzahl der Anwender der Rechenprogramme immer wieder ebenfalls solche Vergleiche durch. Dabei wurde und wird in den meisten Fällen eine ausreichend gute Übereinstimmung erzielt. Wichtigste Voraussetzung hierfür ist die möglichst vollständige Kenntnis der Parameter zur Beschreibung des Betriebszustandes während der Messung. Große Abweichungen zwischen Messungen und Berechnungen sind in der Regel auf eine unvollständige und/oder ungenaue Simulation der zu untersuchenden Anlage und der Umgebungsbedingungen zurückzuführen (vgl. Tab. 2/1).

In den Berechnungsprogrammen entstehen Fehler zunächst einmal durch Rundungen bei den einzelnen Rechenschritten. Diese sind durch das numerische Zahlenformat gegeben. Sie führen für das magnetische Feld zu Fehlern in der Größe von 10^{-n} (mit n = Zahl der signifikanten Stellen - 1, Plotzke 1999). Für das elektrische Feld ist der Fehler etwa eine Größenordnung höher, da bei der Matrixinversion zur Bestimmung der Ersatzladungen sehr viele Rechenoperationen durchgeführt werden müssen. Ein weiterer Fehler entsteht durch die Nachbildung komplexer Leitungsteile aus linearen Grundelementen. Für Kreisringe und Spulen kann dieser Effekt durch Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den für diese Elemente bekannten analytischen Lösungen abgeschätzt werden. Bei Nachbildung einer Spule mit WinField® (1 m Länge, 10 Windungen) durch nur 16 Segmente betrug der Fehler der berechneten Feldstärke in der Spulenmitte schon unter 0,534 %, bei Nachbildung der Spule durch 64 (bzw. 1024) Segmente lag der Fehler nur noch bei 0,026 % (0,0021 %). Es kann davon ausgegangen werden, dass auch für beliebige Bauteile der Fehler bei genügend feiner Segmentierung in ähnlicher Größe liegt.

Die Grundelemente der Berechnung sind bei den meisten Programmen Leiter ohne räumliche Ausdehnung (Linienleiter). Die Vernachlässigung der räumlichen Ausdehnung führt bei der Berechnung des magnetischen Feldes eines runden Leiters (mit kreisförmigen Querschnitt) zu keinem Fehler, denn das Magnetfeld eines runden Leiters entspricht demjenigen eines Linienleiters in dessen Zentrum. Im Nahbereich von Bauteilen mit rechteckigem Leiterquerschnitt kann dieser durch mehrere kreisförmige Leiter nachgebildet werden. Der Vergleich für das Magnetfeld einer so mit WinField® nachgebildeten Stromschiene (Querschnitt 2×6 cm) mit demjenigen eines runden Leiters zeigt, dass bereits in einer Entfernung von 10 cm von der Anordnung kein nennenswerter Unterschied mehr vorhanden ist. Für die in den meisten Anwendungen relevanten Abstände spielt somit die Form des Leiterquerschnittes keine Rolle. Dies gilt auch für Bündelleiter, die zur Berechnung des elektrischen Feldes in WinField® ohnehin durch einen Ersatzradius dargestellt werden.

2.2.2.4 Rechenprogramme zur Bestimmung der Feldverteilungen an Stromübertragungstrassen

Für ihre Untersuchungen im Zusammenhang mit den Feldverteilungen im Umfeld von Stromübertragungstrassen haben viel Forschergruppen eigene Berechnungsprogramme entwickelt, die ihren besonderen Anforderungen genügen. Die meisten dieser Programme fußen letztendlich auf den im Abschnitt 2.2.2.1 beschriebenen Gleichungen. Nur wenige dieser Programme sind für unabhängige Anwender auf dem freien Markt verfügbar. Die einzelnen Programme unterscheiden sich weniger in der Berechnungsgrundlage als in den Anwendungsdetails und -möglichkeiten. Viele dieser Detailinformationen sind erst auf direkte Nachfrage und beim Austesten von Demo-Versionen, die dann oft nicht alle Möglichkeiten bereithalten, zu erfahren.

Das amerikanische Electric Power Research Institute hat das Berechnungsprogramm EMF Workstation entwickelt, um seinen Mitgliedern (Firmen und Einrichtungen aus der Elektrizitätsindustrie) ein fortgeschrittenes Programm zur Berechnung der Feldverteilungen bei Stromversorgungseinrichtungen Freileitungen, Kabel, Umspannwerke und Transformatorstationen anbieten zu können (Takemoto-Hambleton 1996). Eine deutlich abgespeckte Demonstrationsversion 'B-fast', die nur von linearen Leitern ausgeht, steht Interessierten frei zugänglich im Internet (Enertech Consultants) zur Verfügung.

Das Institut der Elektromagnetischen Verträglichkeit – IEV GmbH, Lübeck, vertreibt das Feldberechnungsprogramm Copperfield® (IEV GmbH 2000-2006), das eine Weiterentwicklung des Programms EMFP des Laboratoriums für Hochspannungstechnik (Prof. Kegel) der Fachhochschule Lübeck ist. Dieses Programm kann z.B. automatisch die exakte Durchgangsberechnung unter Berücksichtigung von Temperatur und Wetter durchführen.

Die Firma narda Safety Test Solutions bietet neben seinen Messinstrumenten das Programm EFC-400LF zur Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder von Stromversorgungsleitungen und Trafostationen an (narda). Dieses Programm ist im Wesentlichen identisch mit dem Programm WinField® der Firma FGEU mbH, Berlin.

Die beiden (bzw. drei, wenn WinField® und EFC-400LF getrennt gezählt werden) aufgeführten Programme, die in Deutschland vertrieben werden, bieten im Wesentlichen die gleichen Möglichkeiten, mit unterschiedlichen Nuancen und sicher jeweils Vor- und Nachteilen in der Bedienungsfreundlichkeit und im Umfang der angebotenen Bibliotheken mit vorgefertigten Objekten. Tabelle 2/2 gibt einen Überblick über die Leistungsfähigkeit von drei häufig eingesetzten Rechenprogrammen.

Tabelle 2/2

Merkmale von Programmen zur Berechnung elektrischer und magnetischer Felder

- + Option gegeben
? keine Informationen verfügbar

	Copper-field®	WinField® EFC-400LF	EMF Workstation
Berechnung der Feldstärken als max/rms	+/+	+/+	?
freie Eingabe pro Leiter von			
Strom (Betrag und Phase)	+	+	+
Spannung (Betrag und Phase)	+	+	+
Frequenz	+	+	?
Höhe und Abstand	+	+	+
Durchhang	+	+	+
Seilart, -stärke	?	+	?
Berechnung von Erdleiterströmen	+	+	?
Berechnung des Einflusses von Masten, Gebäuden und dem Erdboden auf das elektrische Feld	+	+	?
Möglichkeit der Phasenoptimierung, bzw. die Wahl zufällig verteilter Phasen	+	+	?
Berücksichtigung von Temperatur und Wind sowie der Stromstärke auf den Durchhang	+	+	?
Berechnung der Windlast und deren Auswirkung auf Lage und die internen Abstände der Leiterseile	?	+	?
Bibliothek von Objekten (Mastbilder, Kabeltypen, ...)	+	+	?

2.3 Netzfrequente elektrische und magnetische Immissionen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse einer Bestandsaufnahme zu bereits durchgeführten Messungen der niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder

- in der Umgebung von Freileitungen (s. 2.3.1.1)
- in Wohngebieten (s. 2.3.1.2)
- in Wohnungen (s. 2.3.1.3)
- und personenbezogen (s. 2.3.1.4)

sowie

- der Berechnung der Felder in der Umgebung von Stromversorgungsanlagen (s. 2.3.2) im Überblick dargestellt. Berücksichtigt wurden grundlegende Untersuchungen an Stromversorgungstrassen sowie solche, die aus Gründen des Immissionsschutzes oder zur Expositionsbestimmung in epidemiologischen Studien durchgeführt wurden. Im Rahmen der Recherche wurden Untersuchungen weitestgehend erfasst. Hier werden jedoch nur die Ergebnisse von Untersuchungen, die in Deutschland und der Schweiz durchgeführt wurden, dargestellt, da sich die Verhältnisse in anderen Ländern sowohl in Bezug auf die technische Ausführung der Übertragungsleitungen und die Kopplung der verschiedenen Spannungsebenen als auch auf Schutzleiter und Erdung in Wohnung erheblich von denen in Deutschland unterscheiden. Letzteres gilt insbesondere für die USA und die asiatischen Länder (Japan, Korea). In den USA wurden vor allem in den 1990er Jahren zahlreiche, auch systematische, Untersuchungen zu den Magnetfeldimmissionen in Wohnungen und deren Ursachen durchgeführt. Aus Japan und Korea gibt es einzelne Untersuchungen zur Magnetfeldexposition der Bevölkerung, u.a. im Rahmen epidemiologischer Studien.

2.3.1 Ergebnisse von Messungen

2.3.1.1 Netzfrequente elektrische und magnetische Felder in der Umgebung von Stromversorgungsanlagen

2.3.1.1 (A)

Publikationen

A) Dahms C., Hanisch T. & Neitzke H.-P. 1994: Messung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umgebung von Hochspannungsleitungen. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung Baden-Württemberg

B) Hanisch T., Münchenhagen R., Neitzke H.-P. & Voigt H. 1994: Elektrische und magnetische Felder von Stromversorgungsanlagen. Gutachten im Auftrag des Niedersächsischen Umweltministeriums

C) Voigt H. & Neitzke H.-P. 1997: Untersuchungen zur Wirksamkeit der Vorsorgeregulierung des § 4 der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV). Berechnung und Messung der elektrischen und magnetischen Felder von Stromversorgungsanlagen. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Raumordnung, Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt

Gegenstand der Untersuchungen

Elektrische und magnetische Felder in der Umgebung von

- Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen
- Hochspannungserdkabeln
- Umspannwerken

Untersuchungszeitraum

A: 1993/1994

B: 1993/1994

C: 1996

Messausrüstung

SAR40 (Physical Systems, Hildesheim)

HFR1200 (Physical Systems, Hildesheim)

HFM30 (Physical Systems, Hildesheim)

FW1 (Physical Systems, Hildesheim) frequenzintegral

Untersuchte Anlagen

Arbeit	Freileitung 380 kV	Freileitung 220 kV	Freileitung 110 kV	Erdkabel 110 kV	Umspannwerk
A			1		
B	5	3	10	2	6
C			1	1	

Vorgehensweise

Freileitungen

- Vermessung von Querprofilen am größten Durchhang der Leiterseile in 1 m Höhe über Grund (E-Feld, B-Feld)
- Vermessung kompletter Spannungsfelder in 1 m Höhe über Grund (E-Feld, B-Feld)
- Dauermessungen während der Vermessung von Querprofilen und Spannungsfeldern (B-Feld)
- 22 Stunden-Langzeitmessungen (B-Feld)
- Aufnahme von Frequenzspektren

Erdkabel

- Vermessung von Querprofilen in 1 m Höhe über Grund (B-Feld)
- Dauermessungen während der Vermessung von Querprofilen (B-Feld)

Umspannwerke

- Vermessung von Ringprofilen in 1 m Höhe über Grund (E-Feld, B-Feld)
- 22 Stunden-Langzeitmessungen (B-Feld)
- Aufnahme von Frequenzspektren

Messungen frequenzselektiv bzw. in Frequenzfenstern

Auswertung:

A) Breitband $10 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$ und Filter $f = 50 \text{ Hz}$

B) Breitband $10 \text{ Hz} \leq f \leq 500 \text{ Hz}$ und Filter $f = 50 \text{ Hz}$

C) $f = 50 \text{ Hz}$

Oberwellenanteil s. Bemerkungen

Ergebnisse

Einige Ergebnisse der Messungen an Freileitungs- und Erdkabeltrassen sind in Tabelle A/1 zusammengestellt.

Tabelle A/1

Elektrische und magnetische Felder an Freileitungen und Erdkabeln, Messwerte (rms)

Anlage	Syst.	Mast-typ	h [m]	I _a [A]	B _M [μT]	B ₅₀ [μT]	B ₁₀₀ [μT]	E _M [kV/m]	E ₅₀ [kV/m]	E ₁₀₀ [kV/m]
B380-FL1	2	Donau	20,0	181-320 43-163	1,0	0,2	0,05	2,5	0,4	0,2
B380-FL2	2	Donau	14,4	228-289 285-333	2,4	0,6	0,15	8,1	1,2	0,2
B380-FL3	2	Donau	13,2	320 430	4,2	0,8	0,15	4,2	0,5	0,1
B380-FL4	2	Donau	18,6	240 255	1,5	0,4	0,1	4,1	0,5	0,1
B380-FL5	2	Donau	15,0	136 134	0,9	0,2	0,1	3,6	0,5	0,1
B220-FL1	2	Donau	7,6	168-194 199-236	5,3	0,4	0,1	3,5	0,2	0,1
B220-FL2	2	Donau	13,1	150 117	2,0	0,24	0,07	1,9	0,17	0,04
B220-FL3	2	Donau	11,8	378 63	4,2	0,5	0,1	1,5	0,1	0,03
A110-FL	1	Sonder		108-180	1,0	0,1				
B110-FL1	2	Donau	14,2	?	1,3	0,1	0,04	0,76	0,05	0,02
B110-FL2	2	Donau	11,8	60 140	1,2	0,1		0,8	0,04	
B110-FL3	2	Donau	11,1	129-135 129-135	1,45	0,15	0,05	0,9	0,1	0,03

Anlage	Syst.	Mast- typ	h [m]	I _a [A]	B _M [μT]	B ₅₀ [μT]	B ₁₀₀ [μT]	E _M [kV/m]	E ₅₀ [kV/m]	E ₁₀₀ [kV/m]
B110-FL4	2	Donau	9,9	100 125	1,7	0,15	0,05	1,1	0,05	0,01
B110-FL5	2	Donau	14,8	21 18	0,2	0,02		0,67	0,05	
B110-FL6	4	Donau / Eineb.	14,6 / 12,7	294 293 254 165	1,5	0,3	0,08	0,35	0,05	0,02
B110-FL7	2	Donau	8,2	<65 0	1,07	0,04		0,9	0,04	
B110-FL8	2	Donau	11,1	60 0	0,55	0,06		0,73	0,04	
B110-FL9	2	Eineb.	12,3	56 0	0,78	0,05		0,7	0,04	
B110-FL10		Donau	10,9	151 104	1,5	0,15	0,05	0,92	0,05	0,01
C110-FL	2	Eineb.	14,8	80 37	0,49					
D110-FL	2	Donau	14,8	77-107 159-197	0,68	0,08				
Anlage	Syst.	Leiter- anord.	Mess- höhe [m]	Strom [A]	B _M [μT]	B ₁ [μT]	B ₅ [μT]	B ₁₀ [μT]		
B110-EK1	1	Dreieck	1,0	236	0,06					
			0,1		0,1	0,04				
B110-EK2	1	Einleit.		69	0,37		0,1	0,05		
C110-EK			0,7	116	0,94					

Legende

Anlage Art und Bezeichnung der Anlage

FL Freileitung

EK Erdkabel

Syst. Zahl der auf der Trasse geführten Drehstromsysteme

h Höhe der Leiterseile am Ort des größten Durchhangs

I_a Mittelwert der Ströme auf den Leitern bzw. Bandbreite der Mittelwerte der Ströme auf den Leitern der Systeme im Messzeitraum

B_M, E_M Maximalwert des magnetischen bzw. elektrischen Feldes

B_x, E_x Wert des magnetischen bzw. elektrischen Feldes im Abstand x

Die Abbildungen A/1 und A/2 zeigen die Verteilung der Messwerte für das magnetische und das elektrische Feld entlang einer Linie senkrecht zu einer 220 kV-Trasse (B220/2) am Ort des größten Durchhangs der Leiterseile.

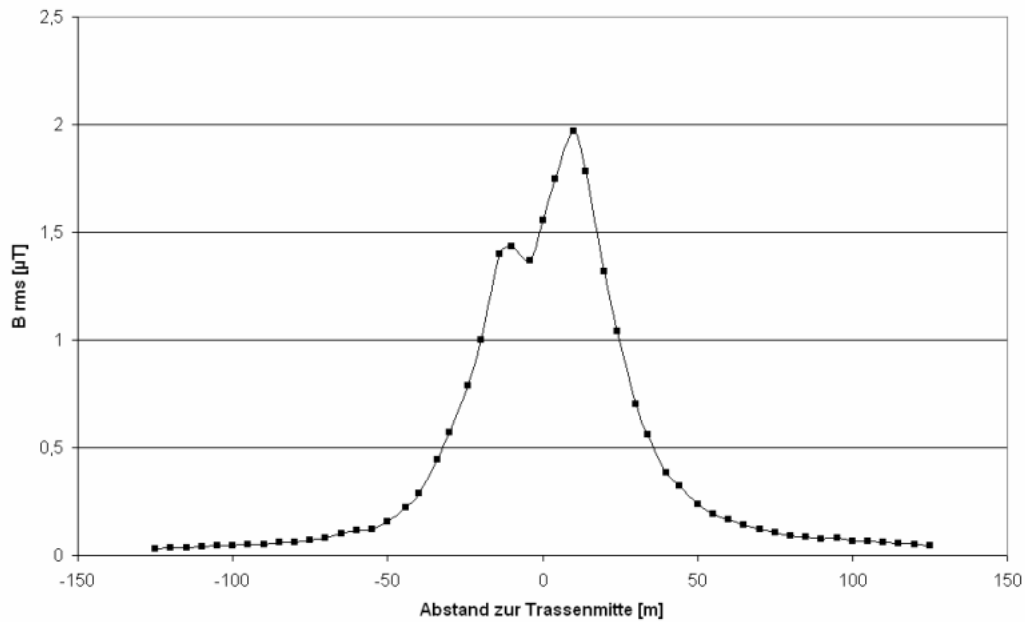


Abbildung A/1
Verteilung der Messwerte für das magnetische Feld entlang einer Linie senkrecht zu einer 220 kV-Trasse am Ort des größten Durchhangs der Leiterseile

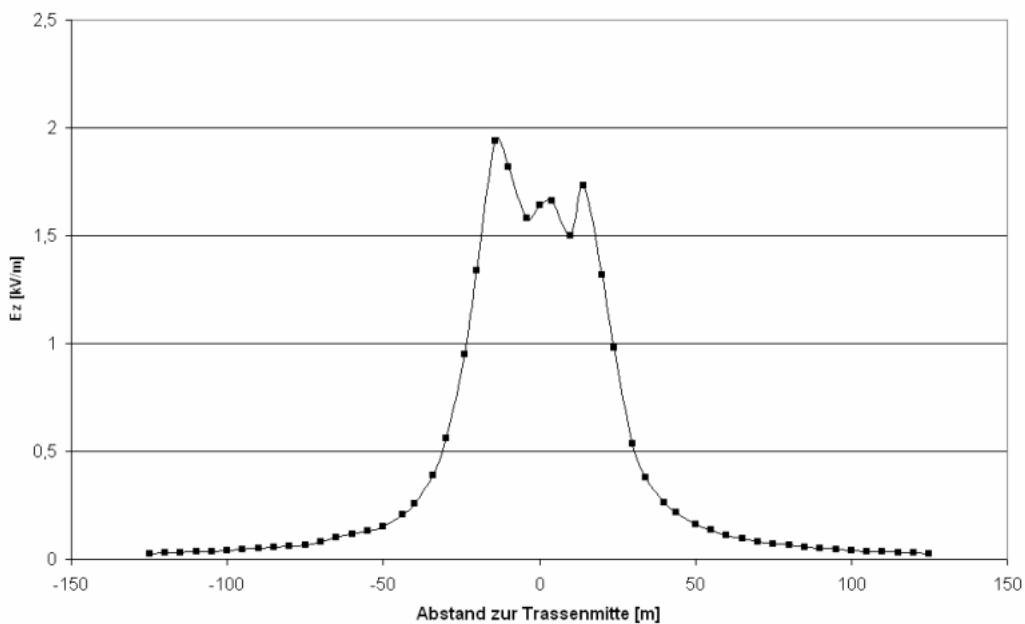


Abbildung A/2
Verteilung der Messwerte für die vertikale Komponente des elektrischen Feldes (rms) entlang einer Linie senkrecht zu einer 220 kV-Trasse am Ort des größten Durchhangs der Leiterseile

Bemerkungen

Alle erforderlichen technischen Daten der Anlagen (Mastkonstruktion, Leiterseile und Aufhängung) und die Betriebsdaten (Strombelegung im Tagesverlauf, Phasenbelegung) wurden von den Betreibern zur Verfügung gestellt). Alle sonstigen Daten (Temperatur, Niederschlag, Bodenprofil und -beschaffenheit) wurden erfasst. Im Projekt C wurden Vergleiche zwischen Messungen und Rechnungen durchgeführt.

Der Oberwellenanteil betrug

380 kV-Leitungen: bis 2 %

110 und 220 kV-Leitungen: bis 5 %

2.3.1.1 (B)

Publikation

Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie FGEU mbH (Hrsg.) 1995: Emissionskataster der elektrischen und magnetischen Feldexposition im Stadtgebiet Berlin. Verlag: Oberhofer, Berlin

Gegenstand der Untersuchung

Elektrische und magnetische Immissionen durch Stromversorgungs- und Bahnanlagen

Untersuchungszeitraum

1994 – 1998

Messausrüstung

SAR40 Fourier-Analyser (Physical Systems, Hildesheim)
HFR1200 Handfeldrekorder (Physical Systems, Hildesheim)
HFM30 E- und B-Handfeldmeter (Physical Systems, Hildesheim)
MAG-03MC 3-Achsen-Magnetfeldsensor (Bartington)
FM 210, FM GEO (Projekt-Elektronik)

Untersuchte Anlagen

- 110 kV Hochspannungsfreileitung: 1
- 220 kV Höchstspannungsfreileitung: 2
- 380 kV Höchstspannungsfreileitung: 1
- 110 kV Erdkabeltrasse: 11
- Umspannwerk: 1
- Mittelspannungs-Erdkabeltrassen
- Mittel-/Niederspannungs-Netzstationen
- Fern- und S-Bahn-Anlagen

Vorgehensweise

Erfassung der elektrischen und magnetischen Felder von Freileitungs- und Kabeltrassen als Querprofile (1 m Höhe über Grund)

Ergebnisse

Die durch Messungen ermittelten maximalen Immissionen an den Hoch- und Höchstspannungsleitungen bei angenommener mittlerer Last zum Zeitpunkt der Messung sind in Tabelle B/1 aufgeführt.

Tabelle B/1

Maximalwerte der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte bei mittlerer Last in 1 m Höhe über Grund

Anlage	Syst.	Masttyp	B _M [μT]	E _M [kV/m]
380 kV-FL	2	Donau	2,6	7,6
220 kV-FL	2	Eineb.	4,2	4,8
220 kV/110 kV-FI	2	?	2,0	0,9
220 kV/110 kV-FI	2	?	2,3	1,1
220 kV/110 kV-FI	2	?	0,9	0,4

Anlage	Syst.	Mast- typ	B _M [μT]	E _M [kV/m]
220 kV/110 kV-Fl	2	?	4,8	3,0
220 kV/110 kV-Fl	2	?	3,1	2,7
110 kV-Fl	2	Eineb.	2,0	2,0
110 kV-Fl	2	?	0,8	0,4
110 kV-Fl	2	?	0,7	0,1
110 kV-Fl	2	?	0,8	0,2
110 kV-Fl	2	?	0,8	0,3
110 kV-Fl	2	?	0,9	
110 kV-Fl	2	?	1,2	0,7
110 kV-Fl	1	?	0,3	0,2
110 kV-Fl	1	?	0,6	
110 kV-Fl	1	?	0,3	
110 kV-Fl	1	?	0,5	0,1
110 kV-Fl	1	?	0,8	
110 kV-Fl	1	?	0,2	
110 kV-Fl	1	?	0,5	
110 kV-Fl	1	?	0,5	0,6
110 kV-Fl	1	?	0,2	
110 kV-Fl	2	?	1,0	0,5

Legende

Anlage	Art und Bezeichnung der Anlage
Fl	Freileitung
Syst.	Zahl der auf der Trasse geführten Drehstromsysteme
B _M , E _M	Maximalwert des magnetischen bzw. elektrischen Feldes

Bemerkung

Für einige Anlagen wurden Vergleiche zwischen den messtechnisch und rechnerisch ermittelten Feldverteilungen durchgeführt (s. 2.3.2).

Informationen ob und ggf. wie Oberwellen berücksichtigt wurden, liegen nicht vor.

2.3.1.1 (C)

Publikation

Karmann R. & Kracke T. 1994: Elektrische und magnetische Felder. Messungen in und um Magdeburg. Modellhafte Vermessung der Emissionen und Immissionen von technischen Quellen elektrischer und magnetischer Felder im Großraum Magdeburg im Frequenzbereich 0 bis 30 kHz. Bericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Sachsen-Anhalt

Gegenstand der Untersuchung

Elektrische und magnetische Felder von Stromversorgungs- und Bahnanlagen

Untersuchungszeitraum

1993/1994

Messausrüstung

SAR40 Feldanalysator (Physical Systems, Hildesheim)

Untersuchten Anlagen

- Höchstspannungsfreileitung 220 kV: 1 (Einebenenmast)
- Hochspannungsfreileitung 110 kV: 1
- Erdkabel 110 kV: 2
- Mittelspannung Freileitungen, Umspannwerke, Transformatorstationen, Anlagen DB, Straßenbahn

Vorgehensweise

- Frequenzselektive Messung der Felder (ausgewertet wurden die Werte in einem schmalen Frequenzband um 50 Hz)
- Messhöhe Freileitungen: 1 m über Erdboden
- Messhöhe Erdkabel: 0,5 m über Erdboden

Ergebnisse

Die an den Trassen ermittelten Maximalwerte für die elektrischen und magnetischen Felder im zur Zeit der Messungen jeweils aktuellen Betriebszustand sind in Tabelle C/1 angegeben.

Tabelle C/1
Gemessene Felder an Freileitungs- und Erdkabeltrassen

Anlage	Syst.	Mast- typ		I_a [A]	B_{mx} [μ T]	E_{mx} [kV/m]
220 kV-FL	2	Eieb.		130-140 140-150	0,75	0,65
110 kV-FL	2	Eieb.		60-80 60-80	0,26	0,56
		Leiter- anord.	Verlege- tiefe [m]			
110 kV-EK1	1	Dreieck	0,8	35	1,85	
110 kV-EK2	1	Eieb.	1,2	25	0,77	

Legende

Anlage	Art und Bezeichnung der Anlage
FL	Freileitung
EK	Erdkabel
Syst.	Zahl der auf der Trasse geführten Drehstromsysteme
h	Höhe der Leiterseile am Ort des größten Durchhangs
I_a	Mittelwert der Ströme auf den Leitern bzw. Bandbreite der Mittelwerte der Ströme auf den Leitern der Systeme
B_M, E_M	Maximalwert des magnetischen bzw. elektrischen Feldes

Ergänzende Informationen

220 kV-Freileitung	thermische Grenzlast: 1100 A Oberwellen 1,7% der Amplitude des 50 Hz-Grundfeldes
110 kV-Freileitung	thermische Grenzlast: 600 A
110 kV-Erdkabel 1	Nennstrom: 560 A Normaler Betriebsstrom: 200 A Aktueller Betriebsstrom: 35 A
110 kV-Erdkabel 2	Nennstrom: 720 A Normaler Betriebsstrom: 200 A Aktueller Betriebsstrom: 25 A

Bemerkungen

Die Betriebsdaten wurden von den Betreibern zur Verfügung gestellt.

2.3.1.1 (D)

Publikation

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) 1999: Immissionen durch Hochspannungsfreileitungen: Einwirkungen durch elektrische und magnetische Felder sowie Geräusche in der Umgebung einer 380 kV-Trasse. Bericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (in Zusammenarbeit EnBW Badenwerk AG, Karlsruhe), Stuttgart

Gegenstand der Untersuchung

Elektrische und magnetische Felder in der Umgebung einer 380 kV-Höchstspannungsfreileitung

Untersuchungszeitraum

1998

Messausrüstung

Feldmesssystem EM 400 (Syman & Trebbau)

Magnetfeldmessgerät μ T-Vektor (Physical Systems Lab, Hildesheim)

Dosimeter FW2A (Physical Systems Lab, Hildesheim)

Feldanalysator EFA-2 (Wandel & Goltermann)

(Anmerkung: In der Publikation wurden auch Messergebnisse für das elektrische Feld veröffentlicht. Laut Herstellerangaben kann dieses nur mit dem Messgerät EFA-3 und nicht mit dem in der Publikation aufgeführten Gerät EFA-2 gemessen werden.)

Untersuchte Anlagen

1 380 kV-Trasse mit 3 Systemen

Vorgehensweise

- Messung der Feldstärken des elektrischen und magnetischen Feldes durch zwei unabhängige Gruppen mit unterschiedlichen Messgeräten (50 Hz-Filter)
 - Kurzzeitmessungen zur Vermessung der Verteilungen des elektrischen und magnetischen Feldes entlang von Wegen, die die Trasse kreuzen
 - Messung 1 in Mastnähe (Mastprofil s. Abb. D/1)
 - Messung 2 am größten Durchhang
 - Dauermessungen: Kontinuierliche Messung der drei Komponenten des Magnetfelds in Zeiträumen von 9 bis 24 Stunden mit sekundlicher Aufnahme der Messwerte
- Messung mit 50 Hz-Filter

Ergebnisse

Die Maximalwerte für das gemessene elektrische und das magnetische Feld wurden in Tabelle D/1 übernommen.

Tabelle D/1

Maximalwerte der elektrischen Feldstärke und magnetischen Flussdichte (mittlere Last)

Anlage	Syst.	Mast- typ	h [m]	I _a [A]	B _M [μT]	E _M [kV/m]
380 kV-FL	3	Tonne	?	243-258 429-444 60-84	3,76	4,62

Legende

- Anlage Art der Anlage
- FL Freileitung
- Syst. Zahl der auf der Trasse geführten Drehstromsysteme, Anordnung s. Abb. D/1
- h Höhe der Leiterseile am Ort des größten Durchhangs
- I_a Mittelwert der Ströme auf den Leitern bzw. Bandbreite der Mittelwerte der Ströme auf den Leitern der Systeme im Messzeitraum
- B_M, E_M Maximalwert des magnetischen bzw. elektrischen Feldes

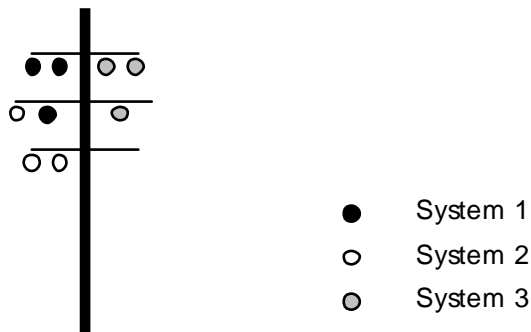


Abbildung D/1

Mastbild und Anordnung der drei 380 kV-Systeme

Die Mittelwerte der Dauermessungen im Zeitraum 11.11.1998 und 05.12.1998 lagen zwischen 0,73 und 1,20 μT (Abstand zur Trasse: 54,50 m, Messhöhe: 3 m).

Bemerkungen

Informationen zur technischen Ausführung der Leitung und den Betriebsbedingungen lagen vor (Masttyp, Anordnung der Systeme, Stromstärken, Phasenwinkel aller Leiter). Die unabhängig voneinander mit verschiedenen Messgeräten an den einzelnen Messpunkten ermittelten Messwerte unterscheiden sich um weniger als 5%. Die Unterschiede liegen im Bereich der Messungenauigkeit der verwendeten Messgeräte. Laut Aussage der Autoren ergaben Testmessungen mit und ohne 50 Hz-Filter keinen Unterschied. Die Ergebnisse der Messungen wurden mit den Ergebnissen von Berechnungen verglichen (s. 2.3.2).

2.3.1.2 Netzfrequente elektrische und magnetische Felder in Wohngebieten

2.3.1.2 (E)

Publikation

Bayrisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) 2008: EMF-Monitoring in Bayern 2006/2007: Messungen von elektromagnetischen Feldern (EMF) in Wohngebieten. LfU Bericht, Augsburg

Gegenstand der Untersuchung

Niederfrequente (5 Hz bis 32 kHz) elektrische und magnetische Felder in Wohngebieten

Untersuchungszeitraum

2002/2003, 2006/2007

Ergebnisse

Es liegen nur Informationen zur Summenausschöpfung der Grenzwerte für die Frequenzbereiche bis 2,0 kHz (2002/2003) bzw. 32 kHz (2006/2007), aus denen die netzfrequenten Anteile nicht abgeleitet werden können.

2.3.1.3 Netzfrequente elektrische und magnetische Felder in Wohnungen

2.3.1.3 (F)

Publikation

Brinkmann K., Grigat J.P. & Störmer B. 2000: Niederfrequenz-Exposition und Leukämie – Systematische Bestandsaufnahme über die Höhe der Exposition durch niederfrequente Magnetfelder und die Anzahl der betroffenen Personen im täglichen Bereich; stationäre Messungen in Wohnungen. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz

Gegenstand der Untersuchung

Niederfrequente Magnetfelder in Wohnungen

Untersuchungszeitraum

1997-1999

Messausrüstung

FW2a (Physical Systems, Hildesheim)

EMDEX II (Enertech, USA)

Zahl der untersuchten Wohnungen

1841 (verwertbare Messungen)

Vorgehensweise

- Bestimmung der Feldverteilung in der Wohnung (Kurzzeitmessung, $40 \text{ Hz} \leq f \leq 800 \text{ Hz}$)
- Identifizierung von Quellen (intern, extern)
- 24 Stunden Dauermessung mit zwei Messgeräten (Schlafzimmer des Kindes, Referenzraum, $f = 50 \text{ Hz}$)

Ergebnisse

Dauerexpositionen von mehr als $0,02 \mu\text{T}$ wurden in weniger als 2% der Wohnungen festgestellt (s. Tab. F/1)

Tabelle F/1
Verteilung der Mediane der Messwerte (50 Hz) nach Art der Messung

	B < 0,05 µT	0,05 ≤ B < 0,1 µT	0,1 ≤ B < 0,2 µT	B ≥ 0,2 µT
Kurzzeitmessung	64,6%	22,4%	9,8%	3,2%
24 h-Dauermess. Kind	75,5%	17,0%	5,8%	1,5%
24 h-Dauermess., Nacht (22:00 – 06:00)	79,9%	13,0%	5,8%	1,3%

Der Anteil der Wohnungen mit Expositionen von mehr als 0,2 µT ist im Innenbereich großer Städte größer als in Randbereichen und in kleineren Kommunen (s. Tab. F/2).

Tabelle F/2
Verteilung der Mediane der Messwerte (50 Hz, Dauermessung Kind) nach Wohnungslage

	Anzahl	Anteil	Anzahl B ≥ 0,2 µT	Anteil B ≥ 0,2 µT*
Dorf	786	42,7%	9	1,1%
Kleinstadt	459	24,9%	6	1,3%
Innenstadt	217	11,8%	5	2,3%
Vorort	312	16,9%	6	1,9%
Neubausiedlung	51	2,8%	1	2,0%
Konglomerat	16	0,9%	0	0,0%

Legende

*	die irreführenden Werte in der Originaltabelle wurden korrigiert
Dorf	Ort mit maximal ca. 5.000 Einw.
Kleinstadt	Stadt mit maximal ca. 50.000 Einw.
Innenstadt	belebte Kernzone einer größeren Stadt
Vorort	periphere Lage einer größeren Stadt
Neubausiedlung	Ansiedlung jüngeren Datums
Konglomerat	Einöde (irreführende Bezeichnungen durch die Autoren)

In Mehrfamilienhäusern sind die Expositionen deutlich höher als in Ein- und Zweifamilienhäusern (s. Tab. F/3).

Tabelle F/3
Verteilung der Mediane der Messwerte (50 Hz, Dauermessung Kind) nach Haustyp

	Anzahl	Anteil	Anzahl B ≥ 0,2 µT	Anteil B ≥ 0,2 µT*
Einfamilienhaus	732	39,8%	8	1,1%
Zweifamilienhaus	419	22,7%	4	1,0%
Mehrfamilienhaus (3–5 Wohn.)	217	11,8%	4	1,8%
Mehrfamilienhaus (6–10 Wohn.)	213	11,5%	6	2,8%
Wohnblock mit mehr als 8 Wohn.	78	4,2%	4	5,1%
Reihenhaus	119	6,6%	1	0,8%
Bauernhof	63	3,4%	0	0,0

Legende

*	die irreführenden Werte in der Originaltabelle wurden korrigiert
---	--

Bei den stärker exponierten Wohnungen liegen 60 bis 75% aller dominierenden Feldquellen außerhalb der Wohnung. In 20 bis 25% der Fälle sind es Hochspannungsfreileitungen.

2.3.1.3 (G)

Publikation

Dahms C., Hanisch T. & Neitzke H.-P. 1994: Messung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umgebung von Hochspannungsleitungen. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung Baden-Württemberg

Gegenstand der Untersuchung

Niederfrequente Magnetfelder in Wohnungen an einer 110 kV-Leitung (Abstand zur Trassenmitte: 0 bis 5 m) und fernab dieser Leitung

Untersuchungszeitraum

1993/1994

Messausrüstung

HFR1200 (Physical Systems, Hildesheim)

Zahl der untersuchten Wohnungen

- 5 exponiert (110 kV-Leitung)
- 5 nicht exponiert
- Häuser mit maximal 3 Wohnungen

Vorgehensweise

- Vermessung der Wohnungen, alle Geräte ausgeschaltet ($5 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ kHz}$)
- Vermessung der Wohnungen, alle Geräte eingeschaltet ($5 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ kHz}$)
- Vermessung der Umgebung relevanter interner Quellen ($5 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ kHz}$)
- Langzeitmessung (22 Stunden) an einem festen Ort (Wohn- oder Schlafzimmer) ($5 \text{ Hz} \leq f \leq 1 \text{ kHz}$)

Ergebnisse

Eine unmittelbar benachbarte Hochspannungsfreileitung (Häuser teilweise überspannt) führt zu Immissionen, die deutlich höher sind als die durch interne Quellen verursachten (s. Tab. G/1 s. a. Tab. G/2).

Tabelle G/1

Ergebnisse der Langzeitmessungen in Wohnungen

	Minimum [μT]	Arith. Mittel [μT]	Standardabw. [μT]	Maximum [μT]
nicht exponierte Wohnungen	0,015	0,057	0,055	0,153
nicht exponierte Wohnungen, ohne Wohnung nahe 20 kV-Transform.station	0,015	0,033	0,014	0,049
exponierte Wohnungen	0,328	0,831	0,579	1,833

Felder aus der Umgebung (Elektrogeräte aus) sind in Wohnungen ohne starke äußere Quelle für rund ein Drittel der Immissionen verantwortlich (s. Tab. G/2).

Tabelle G/2

Ergebnisse der Vermessungen in Wohnungen (alle Räume, alle Messpunkte) mit aus- und eingeschalteten Elektrogeräten

	Minimum [μ T]	Arith. Mittel [μ T]	Standardabw. [μ T]	Maximum [μ T]
nicht exponierte Wohnungen Elektrogeräte aus	0,008	0,045	0,040	0,113
nicht exponierte Wohnungen Elektrogeräte an	0,029	0,068	0,042	0,132
nicht exponierte Wohnungen Elektrogeräte aus ohne Wohnung nahe 20 kV- Transform.station	0,008	0,016	0,016	0,047
nicht exponierte Wohnungen Elektrogeräte an, ohne Wohnung nahe 20 kV- Transform.station	0,029	0,052	0,025	0,086
exponierte Wohnungen Elektrogeräte aus	0,284	0,646	0,457	1,43
exponierte Wohnungen Elektrogeräte an	0,318	0,687	0,485	1,51

Bemerkungen

Umfassende Dokumentation der Messbedingungen und Quellen magnetischer Felder (intern, extern).

2.3.1.3 (H)

Publikationen

Schüz J. & Michaelis J. 2000: Epidemiologische Studie zur Assoziation von Leukämieerkrankungen bei Kindern und häuslicher Magnetfeldexposition. Technischer Bericht Institut für Medizinische Statistik und Dokumentation der Universität Mainz, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

Schüz J., Grigat J.P., Störmer B., Rippin G., Brinkmann K. & Michaelis J. 2000: Extremely low frequency magnetic fields in residences in Germany. Distribution of measurements, comparison of two methods for assessing exposure, and predictors for the occurrence of magnetic fields above background level. *Radiat Environ Biophys* 39: 233-240

Gegenstand der Untersuchung

- Systematische Bestandsaufnahme über die Höhe der Exposition durch niederfrequente Magnetfelder und die Anzahl der betroffenen Personen im täglichen Bereich
- Medizinisch-statistische Auswertung des Auftretens von Leukämieerkrankungen

Untersuchungszeitraum

1993 – 1998

Messausrüstung

FW2a (Physical Systems, Hildesheim)

EMDEX II (Enertech, USA)

Zahl der untersuchten Wohnungen

1.815 (ausgewertet)

Vorgehensweise

- 24h-Dauermessungen in Kopfhöhe unter der Matratze der Probanden, sekundliche Aufnahme der Magnetfeldintensität bei $f=50$ Hz und $f=16\frac{2}{3}$ Hz (FW2a)
- 24h-Dauermessungen an einem festen Ort in der Wohnung $40\text{ Hz} \leq f \leq 800\text{ Hz}$ (EMDEX II)
- Kurzzeitmessungen der räumlichen Feldverteilung (EMDEX II)

Ergebnisse

In mehr als drei Viertel der untersuchten Wohnungen lag der Medianwert der über 24 Stunden aufgenommenen Messwerte unter $0,05\ \mu\text{T}$ (s. Abb. H/1). Die Prävalenz medianer Magnetfelder von $0,2\ \mu\text{T}$ und mehr lag bei 1,4 %.

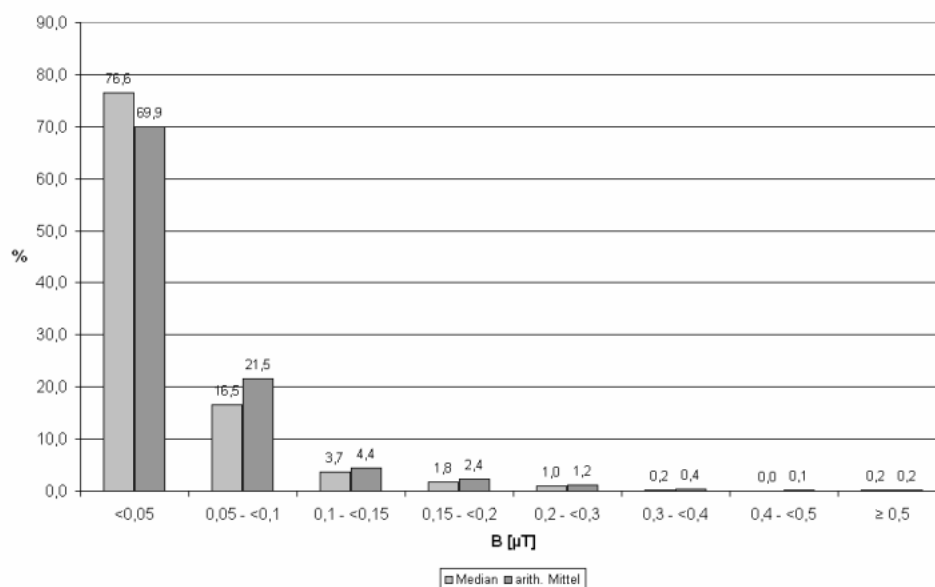


Abbildung H/1

Verteilung der magnetischen Immissionen (1.314 Wohnungen, 24h-Dauermessung)

Während der Nacht sind die magnetischen Immissionen geringer als am Tag (s. Tab. H/1).

Tabelle H/1

Univariate Statistiken ausgewählter Magnetfeldcharakteristika (1.314 Wohnungen, 24h-Dauermessung)

	Median [µT]	Arithm. Mittel [µT]	Median Tag [µT]	Median Nacht [µT]
Mittelwert	0,040	0,046	0,044	0,035
Standardabweichung	0,047	0,051	0,050	0,051
25%-Quantil	0,014	0,016	0,016	0,011
Median (50%-Quantil)	0,027	0,031	0,030	0,022
75%-Quantil	0,048	0,055	0,054	0,042
95%-Quantil	0,117	0,136	0,125	0,110
Maximum	0,682	0,624	0,708	1,061

Die Höhe der magnetischen Immissionen hängt vom Haustyp ab: In Mehrfamilienhäusern treten häufiger höhere Magnetfelder auf (s. Tab. H/2).

Tabelle H/2
Magnetische Immissionen in Abhängigkeit vom Haustyp

Haustyp	n		OR	95%-KI
	B < 0,2 µT	B ≥ 0,2 µT		
Einfamilienhaus, Bauernhof	565	3	1,0	-
Zweifamilienhaus, Reihenhaus	400	4	1,9	0,4 – 8,3
Mehrfamilienhaus (3-10 Parteien)	284	8	4,8	1,3 – 18,4
Mehrfamilienhaus (> 10 Parteien)	47	3	11,3	2,2 – 58,0

n Zahl der untersuchten Wohnungen, mit dem angegebenen Mittelwert der Immissionen
OR Odds Ratio
95%-KI 95%-Vertrauensintervall

2.3.1.3 (I)

Publikation

Schuschke G. & Rudloff F. 1995: Messung und präventivmedizinische Bewertung niederfrequenter elektromagnetischer Felder in Wohnungen. Forum Städte-Hygiene 46: 358-365

Gegenstand der Untersuchung

Niederfrequente Magnetfelder möglichst in Wohnungen, in denen aufgrund der Nähe externer Quellen mit einer erhöhten Exposition zu rechnen ist

Untersuchungszeitraum

?

Messausrüstung

SAR40 (Physical Systems, Hildesheim), Kurzzeitmessungen
Field Watcher (Physical Systems, Hildesheim), Langzeitmessungen

Zahl der untersuchten Wohnungen

Kurzzeitmessung: 57
Langzeitmessung: 24 Stunden: 34
Langzeitmessung 7 Tage: 10

Vorgehensweise

Kurzzeitmessungen an drei Orten in der Wohnung (50 Hz)
Langzeitmessungen, bei denen das Messgerät immer in der Nähe der Probanden lag (50 Hz)

Ergebnisse

Durchschnittliche Magnetfeldimmissionen: 0,05 bis 1,1 µT stark abhängig vom Vorhandensein externer Quellen
Maximalwert für Wohnungen in der Nähe einer Hochspannungsfreileitung: 2,0 µT

Bemerkung

Die Angaben zur Methodik sind unzureichend. Es ist unklar, auf welche Frequenzbereiche sich die Messwerte beziehen. Eine statistische Analyse wurde nicht durchgeführt.

2.3.1.3 (J)

Publikation

Stamm A. 1993: Untersuchungen zur Magnetfeldexposition der Bevölkerung im Niederfrequenzbereich. Dissertation, erschienen als Band 3 in der Reihe 'Elektromagnetische Verträglichkeit biologischer Systeme' (Hrsg.: Brinkmann K. & Schaefer H.), vde-verlag, Berlin, Offenbach

Gegenstand der Untersuchung

Niederfrequente Magnetfelder in Wohnungen (Braunschweig, Berlin)

Untersuchungszeitraum

1991/1992

Messausrüstung

EMDEXC Vers. 1.22 (Electric Field Measurements, USA)

EMDEX II Vers. 1.0 (Enertech, USA)

Zahl der untersuchten Wohnungen

Braunschweig	12 Einfamilienhäuser in einem vorstädtischen Wohngebiet
	12 Mehrfamilienhäuser in einem städtischen Wohngebiet
	19 Läden oder Wohnungen im Stadtzentrum
Berlin	42 Häuser (entlang des Gehsteiges vor dem Haus parallel zum nächstgelegenen Niederspannungskabel)
	47 Häuser (entlang des Weges vom Gehsteig in das Haus)
	47 Häuser (in allen Fluren und Zwischenebenen von Treppenhäusern)
	36 Häuser (in je einer Wohnung)

Vorgehensweise

- Kurzzeitmessungen der räumlichen Feldverteilung ($40 \text{ Hz} \leq f \leq 400/800 \text{ Hz}$)
- 24h-Dauermessungen an einem festen Ort in der Wohnung ($40 \text{ Hz} \leq f \leq 400/800 \text{ Hz}$)

Ergebnisse

In der überwiegenden Zahl der Wohnungen lagen die 24 Stunden Dauerimmissionen unter 200 nT (s. Abb. J/1).

In Wohnungen in mehrgeschossigen Wohngebäuden sind die Immissionen im Schnitt höher als in Einfamilienhäusern.

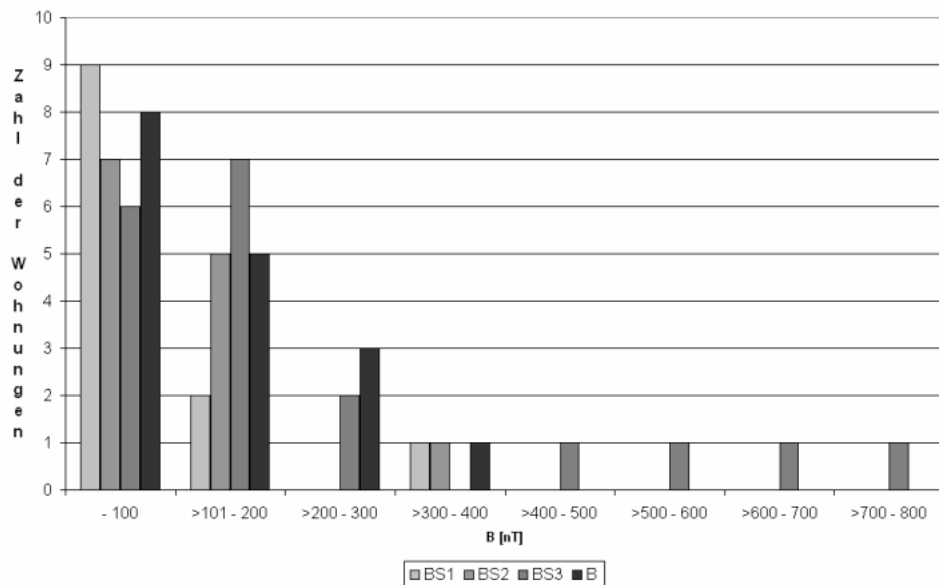


Abbildung J/1

Verteilung der in 24h-Dauermessung ermittelten magnetischen Immissionen in Wohnungen (95%-Quantil der in einem Zeitraum von 24 Stunden ermittelten Messwerte)

- BS1 Messungen in Braunschweig, Einfamilienhäuser in einem vorstädtischen Wohngebiet
- BS2 Messungen in Braunschweig, Mehrfamilienhäuser in einem städtischen Wohngebiet
- BS3 Messungen in Braunschweig, Läden oder Wohnungen im Stadtzentrum
- B Messungen in West-Berlin, überwiegend mehrgeschossige Mietshäuser verteilt über alle Stadtbezirke

Bemerkungen

Ausführliche Diskussion der Ursachen niederfrequenter Magnetfeldimmissionen im Lebensbereich der Menschen:

- Hochspannungs-Drehstrom-Übertragungssysteme (Freileitungen, Kabel)
- Mittelspannungs-Drehstrom-Übertragungssysteme
- Stromsummen in Niederspannungs-Verteilungsnetzen
- Transformatorstationen
- Hausinterne Ursachen (Installationen, Haushaltsgeräte)

2.3.1.3 (K)

Publikation

Udke-Dost K. 2003: 50-Hz-Magnetfeldmessungen in Privathaushalten durch geschulte Interviewerinnen – im Kontext der Norddeutschen Leukämie – Lymphomstudie. Dissertation, Universität Bremen

Gegenstand der Untersuchung

- 50 Hz-Magnetfelder in Wohnungen und ihre Einflussfaktoren
- Machbarkeit der Messungen durch geschulte Interviewerinnen

Untersuchungszeitraum

1986 – 1998

Messausrüstung

EMDEX II (Enertech, USA), frequenzintegrale Messung

Zahl der untersuchten Wohnungen

1935 (verwertbare Messungen)

Vorgehensweise

- 30 Sekunden-Spotmessung
 - in der Mitte des Fernsehzimmers
 - am Lieblingsplatz des Probanden im Fernsehzimmer (beim Fernsehen, wenn nicht ferngesehen wird)
 - in der Mitte des Raumes, in dem sich der Proband nach Fernsehzimmer und Schlafzimmer am häufigsten aufhält
 - in der Mitte eines Raumes mit besonderen Belastungsmöglichkeiten, wenn vorhanden (z.B. Arbeitszimmer mit PC, Hobbykeller)
 - in der Mitte des Schlafzimmers
 - im Kopfkissen/Brustbereich des Bettes
- 2 Stdn.-Dauermessung im Kopfkissenbereich des Bettes
- Berechnung des 50 Hz-Magnetfeldes aus der Differenz der Broadband- und der Harmonic-Messung

Ergebnisse

Die Immissionen sind in allen Räumen einer Wohnung vergleichbar (s. Tab. K/1). Die höheren Werte für das Arbeitszimmer sind darauf zurückzuführen, dass dort eine Quelle (PC) bewusst eingeschaltet wurde.

Tabelle K/1

Geometrische Mittelwerte der magnetischen Flussdichte nach Messorten

Messort/ Messbedingungen	Anzahl Messungen	Geometrisches Mittel [μT]	Geometr. Standard- abweichung
Arbeitszimmer, PC an	301	0,049	2,11
Küche, Geräte aus	1357	0,028	2,78
Kopfkissenbereich (Spot)	1892	0,027	2,86
Dauermessung	1912	0,026	3,67
Lieblingsplatz, TV an	1883	0,024	2,74
Normverbraucher messung	1906	0,022	2,59
Lieblingsplatz, TV aus	1783	0,022	2,82
Schlafzimmer, Mitte	1861	0,021	2,88

Die magnetischen Immissionen sind in Mehrfamilienhäusern höher als in Einfamilienhäusern (s. Tab. K/2).

Tabelle K/2

Geometrische Mittelwerte der magnetischen Flussdichte (Dauermessung) nach Art der Wohnung

Art der Wohnung	Anzahl	Geometrisches Mittel [μT]
Wohnung / Apartment	454 (25,8 %)	0,040
Komplette Hausetage	141 (8,0 %)	0,026
Ganzes Haus	1168 (66,2 %)	0,021

Es ist keine Abhängigkeit der Höhe der Messwerte von der Etage, in der gemessen wurde, erkennbar (s. Tab. K/3).

Tabelle K/3

Geometrische Mittelwerte der magnetischen Flussdichte (Dauermessung) nach Etage (nur für Haus-etagen / Apartments)

Etage / Stockwerk	Anzahl Messungen	Geometrisches Mittel [μT]	Geometr. Standardabweichung
Erdgeschoss	211 (39,1 %)	0,035	3,47
1. Stock	239 (44,3 %)	0,039	3,02
2. Stock	82 (15,2 %)	0,041	2,05
\geq 3. Stock	8 (1,4 %)	0,019	2,30

Die magnetischen Immissionen steigen mit der Bevölkerungsdichte (s. Tab. K/4).

Tabelle K/4

Geometrische Mittelwerte der magnetischen Flussdichte (Dauermessung) nach Bevölkerungsdichte, geschichtet nach Quintilen

Quintil	Bevölkerungsdichte [Einw./km ²]	Anzahl	Geometrisches Mittel [μT]
1	< 153	349	0,015
2	\geq 153 und < 335	312	0,021
3	\geq 335 und < 712	392	0,028
4	\geq 712 und < 936	292	0,033
5	\geq 936	429	0,038

Bemerkungen

- umfangreiche Dokumentation der Vorgehensweise
- ausführliche Diskussion der Fehlermöglichkeiten
- bei technischen Ausführungen wird deutlich, dass der Text nicht von einer Fachperson verfasst wurde

2.3.1.4 Netzfrequente Magnetfeldexpositionen der Bevölkerung

2.3.1.4 (L)

Publikation

Brix J., Wettemann H., Scheel O. & Matthes R. 1999: "Wie hoch sind die niederfrequenten Magnetfelder im Alltag?" – Erfassung der Exposition der Bevölkerung in Bayern mit Magnetfeldern der Stromversorgung. Seminarband 'Strahlen, Felder und Wellen: Nichtionisierende Strahlung im täglichen Umfeld, Zentrale Informationsstelle Umweltberatung in Bayern, Bd. 15, GSF-Bericht 12/99, Neuherberg

Gegenstand der Untersuchung

Niederfrequente Magnetfeldexposition der Bevölkerung

Untersuchungszeitraum

1996/1997

Messausrüstung

Personendosimeter FieldWatcher FW2A (Physical Systems, Hildesheim)

Zahl der untersuchten Personen

1952, Verteilung auf die Stadt- und Gemeindegrößen s. Tab. L/1

Vorgehensweise

- Erfassung der Exposition während für die Probanden typischer Tagesabläufe ($f = 50 \text{ Hz}$)
- Führen von Tagesablaufsprotokollen durch die Probanden

Ergebnisse

In ländlichen Siedlungen sind die Expositionen deutlich geringer als in Siedlungen mit einer höheren Einwohnerzahl (s. Tab. L/1)

Tabelle L/1
Exposition in Abhängigkeit vom Siedlungstyp

Siedlungstyp	N	MW [μT]	SD [μT]	P25 [μT]	P50 [μT]	P75 [μT]	P90 [μT]	P95 [μT]	P99 [μT]
Großstadt	370	0,115	0,258	0,033	0,061	0,136	0,225	0,314	0,919
Mittelstadt	235	0,102	0,231	0,030	0,052	0,114	0,215	0,338	0,678
Kleinstadt	354	0,105	0,232	0,032	0,055	0,135	0,207	0,282	0,723
Ländliche Siedlung	433	0,077	0,198	0,018	0,035	0,087	0,145	0,261	0,656
nicht berücksichtigt	560								
Alle	1952	0,101	0,241	0,026	0,047	0,123	0,203	0,308	0,785

Legende

N	Zahl der Personen
MW	arithm. Mittelwert
SD	Standardabweichung
Pxx	xx%-Perzentil (P50: 50%-Perzentil / Median)

Die Magnetfeldexposition wächst mit der Größe des Gebäudes (s. P50 Tab. L/2).

Tabelle L/2
Exposition in Abhängigkeit vom Haustyp

Haustyp	N	MW [μT]	SD [μT]	P25 [μT]	P50 [μT]	P75 [μT]	P90 [μT]	P95 [μT]	P99 [μT]
Einfamilienhaus	1227	0,092	0,190	0,029	0,059	0,120	0,170	0,218	0,510
Mehrfamilienhaus	661	0,087	0,149	0,032	0,068	0,106	0,151	0,212	0,430
Hochhaus	51	0,097	0,239	0,030	0,076	0,136	0,159	0,188	0,477
Alle	1939	0,090	0,177	0,0320	0,063	0,116	0,163	0,251	0,482

Legende

s. Tabelle L/1

Mehrfamilienhaus:	Zahl der Stockwerke: bis 4
Hochhaus:	Zahl der Stockwerke: mehr als 4

Die höchsten Expositionen werden während der Arbeitszeit erreicht (s. Tab. L/3).

Tabelle L/3
Exposition während verschiedener Tagesphasen

Zeitraum	N	MW [μ T]	SD [μ T]	P25 [μ T]	P50 [μ T]	P75 [μ T]	P90 [μ T]	P95 [μ T]	P99 [μ T]
Haus mit Nacht	1941	0,090	0,177	0,0320	0,063	0,116	0,163	0,251	0,482
Haus ohne Nacht	1941	0,085	0,206	0,034	0,050	0,085	0,149	0,229	0,668
Nacht	1926	0,095	0,033	0,078	0,092	0,109	0,130	0,144	0,175
Arbeit	1048	0,154	0,253	0,056	0,086	0,164	0,341	0,499	1,058
Gesamt	1952	0,101	0,241	0,026	0,047	0,123	0,203	0,308	0,785

Legende
s. Tabelle L/1

Befinden sich Stromversorgungsanlagen in der Umgebung, so führt dies zu einer leichten Erhöhung der Exposition (vgl. Tab. L/3 Zeile 'Gesamt' und Tab. L/4). Die Informationen zum Vorhandensein einer Anlage in der Umgebung beruhen auf Angaben der Probanden. 'Umgebung' wird von den Autoren nicht definiert.

Tabelle L/4
Exposition beim Vorhandensein von Stromversorgungsanlagen in der Umgebung

Anlage	N	MW [μ T]	SD [μ T]	P25 [μ T]	P50 [μ T]	P75 [μ T]	P90 [μ T]	P95 [μ T]	P99 [μ T]
Freileitung	41	0,112	0,223	0,037	0,061	0,146	0,221	0,299	0,808
Umspannwerk	31	0,182	0,412	0,031	0,059	0,284	0,346	0,689	1,343
Transformator	20	0,120	0,306	0,025	0,049	0,160	0,248	0,370	0,948

Legende
s. Tabelle L/1

2.3.1.4 (M)

Publikationen

Dahms C., Hanisch T. & Neitzke H.-P. 1994: Messung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umgebung von Hochspannungsleitungen. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Arbeit, Gesundheit und Sozialordnung Baden-Württemberg

Gegenstand der Untersuchung

Niederfrequente Magnetfeldexposition von Personen, die in Wohnungen an einer 110 kV-Leitung (Abstand zur Trassenmitte: 0 bis 5 m) und fernab dieser Leitung wohnen

Untersuchungszeitraum

1993/1994

Messausrüstung

FW1 (Physical Systems, Hildesheim)

Zahl der untersuchten Personen

10 exponiert (110 kV-Leitung)

10 nicht exponiert

Vorgehensweise

- Erfassung der Exposition während für die Probanden typischer Tagesabläufe (16 Hz \leq f \leq 300 Hz)
- Führen von Tagesablaufsprotokollen durch die Probanden

Ergebnisse

Die Exposition von Personen, die in unmittelbarer Nähe einer 110 kV-Hochspannungsfreileitung lebten, lag im Mittel einen Faktor 6 über der von Personen ohne eine solche externe Quelle (s. Tab. M/1).

Tabelle M/1
Ergebnisse der Messungen mit Personendosimetern

	Minimum [μ T]	Arith. Mittel [μ T]	Standardabw. [μ T]	Maximum [μ T]
Personen mit nicht exponierter Wohnung	0,112	0,193	0,128	0,536
Personen mit nicht exponierter Wohnung, ohne Person mit starker Exposition am Arbeitsplatz	0,112	0,155	0,045	0,208
Personen mit exponierten Wohnungen	0,324	0,906	0,681	2,257

2.3.1.4 (N)

Publikation

Stratmann M., Wernli Ch., Kreuter U. & Joss S. 1995: Messung der Belastung der Schweizer Bevölkerung durch 50 Hz Magnetfelder. PSI Bericht Nr. 95-09, Paul Scherrer Institut, Villigen, Schweiz

Gegenstand der Untersuchung

NF-Magnetfeldexposition der Bevölkerung

Untersuchungszeitraum

1993/1994

Messausrüstung

EMDEX II (Enertech, USA)

Zahl der untersuchten Personen

552

Vorgehensweise

- Erfassung der Exposition während für die Probanden typischer Tagesabläufe mit Personendosimeter (40 Hz \leq f \leq 800 Hz)
- Führen von Tagesablaufsprotokollen durch die Probanden

Ergebnisse

Die Messwerte sind annähernd log-normal verteilt. Der Median aller Messwerte liegt bei 0,05 μ T und der arithmetische Mittelwert bei 0,21 μ T (s. Tab. N/1). Der typische Untergrund

des 50 Hz-Magnetfeldes in Wohngebäuden mit Anschluss an das Elektrizitätsnetz, außerhalb des unmittelbaren Einflussbereiches von Quellen liegt im Bereich von etw a 0,02 bis 0,04 μT .

Tabelle N/1

Statistische Maßzahlen der Messwerte bezüglich der fünf verschiedenen Tagesabschnitte

Tagesabschnitt	N	MX [μT]	MW [μT]	SD [μT]	GM [μT]	GSD [μT]	P25 [μT]	P50 [μT]	P75 [μT]	P90 [μT]	P95 [μT]	P99 [μT]
Arbeitsplatz	1483377	209,2	0,282	1,74	0,108	3,34	0,045	0,100	0,232	0,51	0,85	2,35
Arbeitsweg	180336	13,8	0,136	0,31	0,067	3,16	0,032	0,067	0,140	0,28	0,43	1,10
zu Hause	1075396	31,8	0,087	0,51	0,034	2,87	0,023	0,031	0,061	0,12	0,20	0,82
Schlafzim.	1456641	73,5	0,252	1,50	0,048	4,41	0,023	0,038	0,097	0,42	1,02	3,55
Sonst.	414317	59,6	0,128	2,21	0,054	3,30	0,025	0,052	0,120	0,26	0,41	1,02
Alle	4610067	209,2	0,208	1,48	0,059	3,83	0,025	0,051	0,130	0,35	0,65	2,50

Legende

N	Zahl der Messwerte
MX	Maximalwert
MW	arithm. Mittelwert
SD	arithm. Standardabweichung
GM	Geometrischer Mittelwert
GSD	geometr. Standardabweichung
Pxx	xx%-Perzentil (P50: 50%-Perzentil / Median)

2.3.2 Ergebnisse von Berechnungen der netzfrequenten elektrischen und magnetischen Felder in der Umgebung von Stromversorgungsanlagen

2.3.2 (O)

Publikation

Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie FGEU mbH (Hrsg.) 1995: Emissionskataster der elektrischen und magnetischen Feldexposition im Stadtgebiet Berlin. Verlag: Oberhofer, Berlin

Gegenstand der Untersuchung

Elektrische und magnetische Immissionen durch Stromversorgungs- und Bahnanlagen

Rechenprogramm

WinField (Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie – FGEU mbH, Berlin)

Untersuchte Anlagen

380 kV-Freileitung:	1
220 kV-Freileitung:	1
110 kV-Freileitung:	1
110 kV-Erdkabel:	1

Ergebnisse

Bei Maximallast liegen die Magnetfelder

- an 380 kV-Leitungen 42%
- an 220 kV-Leitungen 14%
- an 110 kV-Leitungen 53%

über den Magnetfeldern bei mittlerer Last (s. Tab. O/1)

Tabelle O/1

Elektrische und magnetische Felder an Stromtrassen bei mittlerer Last in 1 m Höhe über Grund

Anlage	Syst.	Mast-typ	Höhe [m]	Strom [A]	B _{100%} [µT]	B _M [µT]	E _M [kV/m]
380 kV-FL	2	Donau	?	140	3,6	2,6	7,6
220 kV-FL	2	Eineb.	?	140	4,8	4,2	4,8
110 kV-FL	2	Eineb.	?	68	3,1	2,0	2,0
		Verlege-art	Verlege-tiefe				
110 kV-EK im Rohr	2	2xDreieck Abstand: 0,5 m	2,0 m			0,35	
110 kV-EK frei						0,24	

Legende

XX kV-FL	XX kV-Freileitung
XX kV-EK	Xx kV-Erdkabel
Syst.	Zahl der Drehstromsysteme
Höhe	minimale Höhe der Leiterseile über Grund bei maximaler Stromlast
Strom	Strom pro Phase
B _{100%}	Maximalwert des Magnetfeldes bei maximaler Stromlast
B _M	Maximalwert des Magnetfeldes bei mittlerer Stromlast
E _M	Maximalwert des elektrischen Feldes

Bemerkung

Die Berechnungen beruhen auf Annahmen bzgl. der mittleren Ströme.

2.3.2 (P)

Publikation

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) 1999: Immissionen durch Hochspannungsfreileitungen: Einwirkungen durch elektrische und magnetische Felder sowie Geräusche in der Umgebung einer 380-kV-Trasse. Bericht im Auftrag des Ministeriums für Umw elt und Verkehr Baden-Württemberg (in Zusammenarbeit EnBW Badenw erk AG, Karlsruhe), Stuttgart

Gegenstand der Untersuchung

Elektrische und magnetische Felder in der Umgebung einer 380 kV-Höchstspannungsfreileitung

Rechenprogramme

EMFP FOK Vers. 5.01 (IEV – Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit GmbH, Lübeck)
WinField Release V4.0 (Forschungsgesellschaft für Energie und Umw eltechnologie – FGEU mbH, Berlin)

Untersuchte Anlagen

380 kV-Freileitung: 1

Ergebnisse

Die Berechnungen für Ist-Bedingungen ergaben die folgenden Maximalwerte:

magnetisches Feld 3,69 μ T

elektrisches Feld: 3,94 kV/m

Die Rechenergebnisse weichen

- für das magnetische Feld weniger als 4%
- für das elektrische Feld weniger als 20%

von den Messwerten (s. 3.1.1.4) ab.

Bemerkung

Fazit der Autoren:

"Bei sorgfältiger Erfassung der Betriebsbedingungen sind Rechenverfahren prinzipiell geeignet, die Einhaltung der in der 26. BImSchV aufgeführten Grenzwerte zu überprüfen."

2.3.2 (Q)

Publikation

Voigt H. & Neitzke H.-P. 1997: Untersuchungen zur Wirksamkeit der Vorsorgeregelung des § 4 der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV). Berechnung und Messung der elektrischen und magnetischen Felder von Stromversorgungsanlagen. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Raumordnung, Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt

Gegenstand der Untersuchung

Elektrische und magnetische Felder in der Umgebung von Stromversorgungsanlagen

Rechenprogramm

WinField (Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie – FGEU mbH, Berlin)

Untersuchte Anlagen

380 kV-Freileitung: 1

220 kV-Freileitung: 1

110 kV-Freileitungen: 2

110 kV-Erdkabel: 2

Umspannwerke: 2

Ergebnisse

Ein Beispiel für die Berechnung der B-Feldverteilung entlang einer 380 kV-Freileitungstrasse ist in Abbildung Q/1 dargestellt.

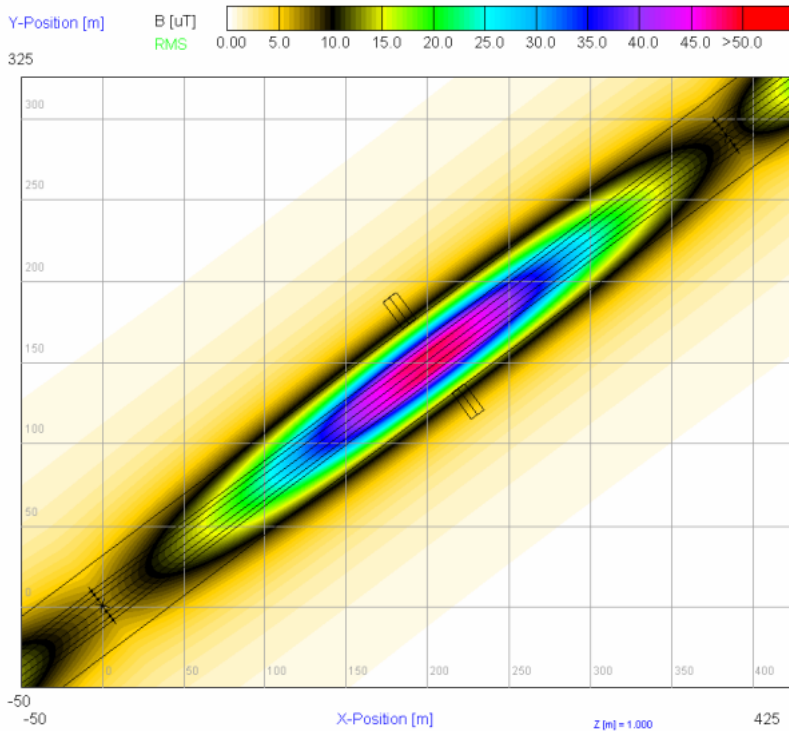


Abbildung Q/1
Magnetfeld entlang einer 380 kV-Freileitungstrasse in 1 m Höhe über Grund

Bei der Normallast (ca. 30% der Maximallast) erreicht das Magnetfeld an Freileitungen je nach Anlagentyp 24 bis 28% des Maximalwerts bei maximaler Stromlast (s. Tab. Q/1).

Tabelle Q1
Elektrische und magnetische Felder an Stromtrassen bei maximaler und 30%-iger Stromlast in 1 m Höhe über Grund

Anlage	Syst.	Mast- typ	Höhe [m]	Strom [A]	B _{100%} [µT]	B _{30%} [µT]	B _R [µT]	E _M [kV/m]
380 kV-FL	2	Donau	9,7	2520	48,7	11,7		8,4
220 kV-FL	2	Eineb.	8,1	1070	15,5	4,2		4,8
110 kV-FL	4	Doppel- Eineb.	12 13,4	680	7,5	2,1		0,6
110 kV-FL	2	Eineb.	12,2	680	5,5		0,38	
		Verlege- art	Verlege- tiefe					
110 kV/10 kV- EK	3	1xDreieck, 2xEineb.	1,0 m	435 300	10,0	3		
110 kV-EK		Dreieck	1,2 m	435	2,7		0,21 – 0,98	

Legende

- XX kV-FL XX kV-Freileitung
- XX kV-EK Xx kV-Erdkabel
- Syst. Zahl der Drehstromsysteme
- Höhe minimale Höhe der Leiterseile über Grund bei maximaler Stromlast
- Strom maximaler Strom pro Phase
- B_{100%} Maximalwert des Magnetfeldes bei maximaler Stromlast
- B_{30%} Maximalwert des Magnetfeldes bei 30% der maximalen Stromlast
- B_R Maximalwert des Magnetfeldes bei realer Stromlast
- E_M Maximalwert des elektrischen Feldes

Bemerkung

Die Berechnungen wurden für verschiedene Lastzustände und Leitungsabschnitte durchgeführt. Den Berechnungen liegen Angaben der Betreiber zu den technischen Daten der Anlage und den möglichen Betriebszuständen zugrunde.

2.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse von Messungen und Berechnungen

Die Ergebnisse der messtechnischen Erfassung

- der elektrischen und magnetischen Felder an Stromversorgungsanlagen (s. 2.3.1.1)
- der magnetischen Immissionen in Wohnungen (s. 2.3.1.3)
- der personenbezogenen magnetischen Expositionen (s. 2.3.1.4)

sowie

- der Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder an Stromversorgungsanlagen (s. 2.3.2)

lassen sich wie folgt zusammenfassen:

An **380 kV-Freileitungen** wurden in der Trasse in 1,0 m Höhe magnetische Felder bis 4,2 μT gemessen. In 50 m Abstand wurden Werte bis 0,8 μT festgestellt. Die Berechnungen für Maximallast ergaben nahe der Trassenmitte Werte bis 48,7 μT . Die elektrischen Felder betragen den Messungen zufolge bis 8,1 kV/m. Die Berechnungen ergaben einen Wert in etwa der gleichen Höhe (8,4 kV/m).

An **220 kV-Freileitungstrassen** wurden Werte für die magnetische Flussdichte bis 4,8 μT gemessen. Im Abstand von 50 m lagen die Werte bei maximal 0,4 μT . Berechnungen für Maximallast ergaben bis zu 7,5 μT im Bereich der Trasse. Die Werte für das elektrische Feld betragen 3,5 (Messung) bzw. 4,8 kV/m (Berechnung).

Die Magnetfelder an **110 kV-Freileitungstrassen** erreichten den Messungen zufolge maximal 1,7 μT und in 50 m Abstand bis zu 0,3 μT . Die Berechnungen für Maximallast ergaben bis zu 5,5 μT . Für die elektrische Feldstärke wurden messtechnisch bis zu 1,1 kV/m ermittelt. Die Berechnungen ergaben Werte bis 2,0 kV/m.

Über **110 kV-Erdkabeltrassen** wurden bis zu 1,85 μT gemessen. Den vorliegenden Berechnungen zufolge ist mit maximal 10,0 μT zu rechnen. Das Magnetfeld nimmt in der Umgebung von Erdkabeltrassen viel schneller mit dem Abstand zur Trassenmitte ab als es bei Freileitungstrassen der Fall ist. In 10 m Abstand wurden nur noch 0,05 μT gemessen.

Dauermessungen der Magnetfelder in **Wohnungen** ohne besondere äußere Feldquellen, wie Freileitungen oder Transformatorstationen, und in größerem Abstand von Anlagen und Geräten in der Wohnung ergaben Medianwerte in der Größenordnung von 0,03 μT . Lediglich in rund 1,5 % der Wohnungen wurden Dauerimmissionen von mehr als 0,2 μT ermittelt.

Magnetische Immissionen von mehr als 1,0 μT sind nur in sehr seltenen Fällen festzustellen und in der Regel auf äußere Feldquellen zurückzuführen. In Wohnungen, die in verdichtet bebauten städtischen Wohngebieten liegen und/oder die sich in mehrstöckigen Häusern befinden, sind deutlich höhere Immissionen festzustellen als in Wohnungen in Einfamilienhauswohngebieten.

Die Erfassung der Magnetfeld-Exposition von **Personen** mit Hilfe von Personendosimetern ergaben sowohl in Deutschland als auch in der Schweiz Medianwerte in der Größe von 0,05 μT . Auch bei diesen Messungen ist eine Abhängigkeit der häuslichen Expositionen von der Dichte der Bebauung der Wohngebiete und der Geschosshöhe der Häuser festzustellen, in denen sich die Wohnungen der Probanden befanden.

3 Bestimmung der von Hochspannungsfreileitungen und -erdkabeln verursachten elektrischen und magnetischen Immissionen

Zur Bestimmung der von Erdkabeln und Hochspannungsfreileitungen verursachten aktuellen und maximalen Immissionen waren zum einen die magnetischen Flussdichten in der Umgebung von Hochspannungsfreileitungen und Erdkabeln sowie zum anderen die elektrischen Feldstärken an Freileitungen messtechnisch zu erfassen, sowie sowohl für die aktuelle, während der entsprechenden Messung gegebene, als auch für die maximale Betriebsauslastung zu berechnen.

In diesem Vorhaben sollten 25 Anlagen der Stromübertragung auf der Hoch- und Höchstspannungsebene untersucht werden. Um auch Trassenplanungen der nahen Zukunft zu berücksichtigen, war vorgesehen, dass zwei der 25 zu untersuchenden Anlagen den z.Z. vorgesehenen Ausführungen für in Planung befindliche Höchstspannungstrassen entsprechen. Die vorgesehene Verteilung der Messungen und Berechnungen an den verschiedenen Spannungsebenen ist zusammen mit den durchgeführten in Tabelle 3/1 zusammengestellt.

Tabelle 3/1

Verteilung der Messungen (M) und Berechnungen (B) auf die verschiedenen Spannungsebenen und Trassenarten

	vorgesehen	durchgeführt
380 kV-Freileitungen	9 M + 9 B (bestehende Trassen) 1 B (geplante Trasse)	9 M + 10 B
220 kV-Freileitungen		1 M + 1 B
380 kV-Erdkabel	1 M + 1 B (bestehende Trasse) 1 B (geplante Trasse)	3 M + 4 B
220 kV-Erdkabel		1 M + 1 B
110 kV-Freileitungen	10 M + 10 B	9 M* + 9 B
110 kV- Erdkabeln	3 M + 3 B	5 M + 5 B

* Bei einer durchgeführten zehnten Messung an einer 110 kV-Freileitung stellte sich nachträglich heraus, dass an diesem Tag die untersuchte Trasse zwar unter Spannung stand, aber nicht für eine Stromübertragung geschaltet war. In Trassenmitte wurde ein Maximum für die magnetische Flussdichte von nur 0,030 µT, ein Mittelwert um 0,020 µT und ein Minimum von 0,014 µT gemessen. Mit dem Querprofil ließen sich diese Werte der Stromtrasse zuordnen, denn die Messwerte fielen mit wachsendem Abstand von der Trassenmitte langsam ab, allerdings nicht gleichmäßig, da die Schwankungen in Trassenmitte größer waren als der (mittlere) Abfall der Werte für größere Abstände. In 50 m Abstand wurden Werte zwischen 0,005 und 0,022 µT gemessen. Als Quelle kommen nach Aussage der Betreibers minimale Ströme infrage, die zum Ausgleich zwischen anderen Trassen, z.T. auf dem Erdleiter, flossen. Diese Messung wurde nicht für die weiteren Auswertungen berücksichtigt.

Bei der Auswahl der Untersuchungsobjekte wurde versucht, möglichst unterschiedliche Situationen zu erfassen (s. Tab. 3.2a, b):

- verschiedene Spannfeldlängen mit entsprechend unterschiedlicher Leiterseilhöhe
- verschiedene Mastbilder, bzw. bei Erdkabeltrassen verschiedene Verlegearten
- unterschiedliche Betreiber.

Insbesondere wurden auch Trassen ausgewählt, die abschnittsweise mal als Freileitung mal als Erdkabel ausgeführt sind, um die Stärke und Verteilung der Magnetfelder für möglichst

ähnliche Lastzustände bei beiden Ausführungsformen direkt vergleichen zu können. Dies sind die Trassenpaare FL380_5 / EK380_1 (s. Abb. 3/95), FL110_7 / EK110_1 (s. Abb. 3/105) und FL110_8 / EK110_2 (s. Abb. 3/108).

Die Angaben in den Tabellen 3/2a, b für die minimale Leiterseilhöhe in Spannfeldmitte und die Verlegetiefe des Erdkabels wurden bei den Betreibern erfragt. Aus der Leiterseilhöhe für die Maximalbedingungen (maximale Stromlast, Lufttemperatur 40°C, kein Wind) sowie den Angaben für die aktuellen Parameter (aktuelle Temperatur, Wind und Stromwert) berechnet das Simulationsprogramm die aktuelle Leiterseilhöhe in Spannfeldmitte, die in der Tabelle ebenfalls angegeben und für die Berechnung der aktuellen Situation verwendet wurde (s. Abschnitt 3.2).

Tabelle 3/2a

Hochspannungsfreileitungen, an denen Messungen und Feldberechnungen durchgeführt wurden:

Spannungsebene	Trassenbezeichnung	Art	Typ	Leiterseilhöhe [#]	
				min.	akt.
380 kV	FL380_1a	FL	Donau	25,5 m	27,0 m
	FL380_1b	FL	Donau	9,5 m	11,1 m
	FL380_2	FL	Donau	10,0 m	13,5 m
	FL380_3a	FL	Donau	10,6 m	12,8 m
	FL380_3b	FL	Donau	14,5 m	16,5 m
	FL380_3c	FL	Donau	9,1 m	12,5 m
	FL380_4a	FL	Einebene/Donau	20,5 m	23,5 m
	FL380_4b	FL	Donau	9,3 m	11,3 m
	FL380_5	FL	Einebene/Donau	25,0 m	27,0 m
	FL380_6*	FL	Donau	10,7 m	13,4 m
220 kV	FL220_1	FL	Einebene	8,3 m	9,5 m
110 kV	FL110_1	FL	Donau	14,8 m	15,3 m
	FL110_2	FL	Donau	15,9 m	17,1 m
	FL110_3	FL	Donau	10,0 m	11,5 m
	FL110_4a	FL	Donau	8,8 m	10,1 m
	FL110_4b	FL	Einebene	7,5 m	8,5 m
	FL110_5	FL	Einebene	7,0 m	8,2 m
	FL110_6	FL	Einebene	11,3 m	13,0 m
	FL110_7	FL	Donau	9,7 m	10,8 m
	FL110_8	FL	Donau	9,2 m	10,4 m

[#] – minimale (aktuelle) Leiterseilhöhe in Spannfeldmitte für den maximalen (aktuellen) Betriebszustand

* – geplante Trasse, für die nur Berechnungen durchgeführt wurden

Tabelle 3/2b

Hochspannungserdkabeltrassen, an denen Messungen und Feldberechnungen durchgeführt wurden:

Spannungsebene	Trassenbezeichnung	Art	Typ		Verlegetiefe
380 kV	EK380_1	EK	Graben	2 mal 3 untereinander	7,5 m
	EK380_2	EK	Graben		1,9 m
	EK380_3	EK	Tunnel		30,9 m
	EK380_4*	EK	2 x 6 - Einebene		1,5 m
220 kV	EK220_1	EK	2 x Dreieck		4,5 m
110 kV	EK110_1	EK	2 x Dreieck		1,3 m
	EK110_2	EK	2 x Dreieck		(a): 4 m, (b): 1,2 m
	EK110_3	EK	2 x Dreieck		1,8 m
	EK110_4	EK	1 x Dreieck		1,2 m
	EK110_5	EK	1 x Dreieck		1,3 m

* – geplante Trasse, für die nur Berechnungen durchgeführt wurden

3.1 Messtechnische Erfassung der niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder an Hochspannungsübertragungstrassen

3.1.1 Vorgehen bei der Immissionsbestimmung

Für jeden Messort wurde ein Protokollblatt ausgefüllt, auf dem die relevanten Angaben zur Identifikation der Anlage, der Messzeitraum und die Witterungsbedingungen festgehalten wurden. Die einzelnen Messwerte wurden zunächst im Messgerät gespeichert und später für die weitere Auswertung mit einem PC ausgelesen.

3.1.1.1 Messungen an Freileitungstrassen

An Freileitungen wurde auf einem Weg möglichst in der Nähe des größten Durchhangs je ein Querprofil der elektrischen und der magnetischen Feldstärke in der für normgerechte Messungen vorgeschriebenen Höhe von einem Meter über dem Erdboden vermessen. Die vorgesehenen Messorte bzw. -abstände waren (einheitlich für alle Spannungsebenen):

- genau in der Trassenmitte (0 m)
- zu beiden Seiten in 5-Meter-Schritten bis zu 20 m Abstand von der Trassenmitte und anschließend in 10-Meter-Schritten (soweit es ging) bis zu 50 m Abstand, mindestens aber im **Einwirkungsbereich einer Niederfrequenzanlage** entsprechend den Hinweisen zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder' (LAI 2004):

Breite des jeweils an den ruhenden äußeren Leiter angrenzenden Streifens:

380 kV / 220 kV / 110 kV: 20 m / 15 m / 10 m

Das bedeutete im Allgemeinen Messungen bei

0 m, ± 5 m, ± 10 m, ± 15 m, ± 20 m, ± 30 m, ± 40 m und ± 50 m.

In einigen Fällen wurde solange in 10 m Schritten gemessen, bis der aktuelle Messwert unter 0,1 µT lag.

Falls der gangbare Messweg nicht genau senkrecht zur Trassenachse verlief, wurde im Vorfeld der Messung berechnet, in welchen Abständen auf dem Messweg, die angestrebten Abstände zur Trassenmitte erreicht werden.

An jedem Messpunkt wurde mit einer normgerechten dreidimensionalen 100 cm²-Sonde im 'act'-Modus sechsmal der Effektivwert (RMS-Wert) der aktuellen magnetischen Flussdichte (mit 50 Hz-Filter) aufgenommen. Wenn relativ starke Schwankungen beobachtet wurden, wurde die Zahl der Einzelmesspunkte erhöht. Zusätzlich wurde in der Trassenmitte ein Spektrum der magnetischen Flussdichte im Bereich von 5 bis 2.000 Hz aufgezeichnet, um Aufschluss über die Stärke der Oberwellenanteile zu erhalten.

Im Messprotokoll wurde neben dem Abstand zur Trassenmitte, der Uhrzeit und den Messdaten-Nummern ein (Mittel-) Wert der Messanzeige dokumentiert. Da dies in erster Linie zur zusätzlichen Sicherheit für die Zuordnung der gespeicherten Messdaten zu dem genauen Messort diente und außerdem eine erste Vorortbewertung des Feldstärkeverlaufes erlaubte, hinsichtlich möglicher Besonderheiten, die dann durch Wiederholung der Messung(en) hätten überprüft werden können, wurde dabei ein Einzelwert oder ein mittlerer Wert von mehreren Einzelmessungen festgehalten.

Um einen Eindruck von den Immissionsschwankungen zu erhalten, wurde an jeder Trasse gleich zum Beginn – in Trassenmitte – eine etwa längere kontinuierliche Messung der magnetischen Flussdichte begonnen. So konnten während der Zeit, in der die Messorte für das Querprofil bestimmt wurden, die Schwankungen der magnetischen Flussdichte aufgezeichnet werden. Die Messung der magnetischen Flussdichte in Trassenmitte wurde nach jedem Halbprofil und ganz zum Schluss, nach allen anderen Messungen wiederholt. Diese längeren Messungen wurden für die Erstellung der Querprofile genau wie die Messungen an den anderen Messpunkten ausgewertet (Maximum, Mittelwert, Standardabweichung). In den Abbildungen sind die unterschiedlichen Messreihen in Trassenmitte getrennt als verschiedene Messergebnisse dargestellt (vgl. z.B. Abb. 3/1 und die Abbildungen der Querprofile im Abschnitt 3.1.2). Zusätzlich wurde für jede der längeren Messungen einzeln und für alle diese Messungen in Trassenmitte zusammen die maximale Schwankungsbreite (hier definiert als Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Einzelmesswert in Prozent des Maximalwerts) bestimmt.

Für die Messung der elektrischen Feldstärke wurde die Messsonde in einem Meter Höhe auf einem Holzstativ befestigt. Die Steuerung erfolgt über ein 5 m langes Glasfaserkabel. Während der Messungen befand sich die Sonde immer zwischen der Quelle und dem Messpersonal, um die störenden Einflüsse so gering wie möglich zu halten. Die Erfassung der Messwerte (Einzelpunkte mit 50 Hz-Filter und Spektrum in Trassenmitte) erfolgte analog zu dem beschriebenen Vorgehen für die magnetische Induktion. Wegen den erwartungsgemäß geringeren Schwankungen in den Spannungen, verglichen mit den möglichen Schwankungen bei den Strömen, wurden pro Messpunkt nur drei Messwerte festgehalten. Wenn nötig, wurden im Messprotokoll zusätzliche Angaben über möglicherweise das elektrische Feld beeinflussende Umstände (z.B. Veränderungen am Erdboden, Pflanzenbewuchs usw.) festgehalten.

Auch bei den Messungen der elektrischen Feldstärke wurde die Messung in Trassenmitte nach jedem Halbprofil wiederholt. Die Auswertung der verschiedenen Messreihen in Trassenmitte erfolgte analog derjenigen für die magnetische Flussdichte.

3.1.1.2 Messungen an Erdkabeltrassen

Bei Erdkabeln schirmt der Erdboden das elektrische Feld praktisch vollständig ab, so dass hier nur die Messung der magnetischen Flussdichte erforderlich war. Die genaue Bestimmung der Trassenmitte war bei Kabeltrassen meist nicht ganz einfach. Durch Vergleich der Betreiberangaben über die Lage der Kabeltrasse mit einer ersten Orientierungsmessung der magnetischen Feldstärke wurde als 'Referenzpunkt' der Ort des aktuellen Maximums gewählt. Dieser wurde als Trassenmitte angenommen. Die Messungen ergaben, dass diese Wahl recht gut mit der Symmetriemitte der Querprofile übereinstimmt (± 1 m).

Für den besseren Vergleich mit den Immissionen bei den Freileitungen wurde auch an den Kabeltrassen das Querprofil in einem Meter Höhe über dem Erdboden gemessen. Zusätzlich wurde in der Normmesshöhe für Kabeltrassen von 20 cm im 'max-hold'-Modus das Maximum der magnetischen Flussdichte für den Bereich der Kabeltrasse erfasst und festgehalten.

Die vorgesehenen Abstände sind hier (einheitlich für alle Spannungsebenen):

- am Referenzpunkt in Trassenmitte (0 m),
- dann zu beiden Seiten in 2-Meter-Schritten bis zu 10 m Abstand von der Trassenmitte (damit war der *Einwirkungsbereich einer Niederfrequenzanlage*, bei Kabeltrassen 1 m neben dem äußersten Kabel, sicher abgedeckt) und
- anschließend in 5-Meter-Schritten - soweit möglich - bis zu 20 m Abstand

Das bedeutete Messungen bei 0 m, ± 2 m, ± 4 m, ± 6 m, ± 8 m, ± 10 m, ± 15 m und ± 20 m.

Auch hier wurden, wie bei den Freileitungen beschrieben, an jedem Messpunkt sechs aktuelle Einzelwerte im 'act'-Modus mit 50 Hz-Filter festgehalten und in Trassenmitte wurde ein Spektrum aufgezeichnet.

Auch bei Kabeltrassen wurden die aktuellen Schwankungen durch etwas längere kontinuierliche Messungen am Anfang während der Festlegung des Messwertes und zum Schluss, sowie durch Wiederholungen der Messung am Referenzpunkt in Trassenmitte erfasst und entsprechend dem Vorgehen bei den Freileitungen ausgewertet.

3.1.1.3 Verwendetes Messgerät

Mit dem verwendeten Messgerät können sowohl Breitbandmessungen als auch Bandfiltermessungen und Messungen von FFT-Spektren durchgeführt werden. Die magnetische Flussdichte wurde mit einer normgerechten, dreidimensionalen 100 cm²-Sonde erfasst. Die elektrische Feldstärke wurde – wie in einschlägigen Normen (DIN 0848) für die Messung im Freien, z.B. an Hochspannungsleitungen, vorgeschrieben – potentialfrei gemessen. Dafür wurde die Messsonde (ein Würfel mit drei orthogonalen Elektrodenpaaren) auf einem gegen den Erdboden isolierten Stativ in 1 m Höhe über Grund befestigt. Die Messsignale wurden über einen Lichtwellenleiter zu einer Anzeige- und Steuereinheit geleitet, zusätzlich in der Sonde gespeichert und später ausgelesen und ausgewertet.

Das Gerät kann für automatische Dauermessungen mit bis zu maximal 4095 Messwerten bzw. bis zu ca. 34 h (maximale Akkulaufzeit bzw. bis zum zweiten Datumswechsel nach dem Start) eingesetzt werden, wobei der Zeitabstand zwischen den Einzelmessungen frei gewählt werden kann. Zur Qualitätssicherung wurde das Gerät vor dem Beginn der Messungen vom Hersteller geprüft und kalibriert.

Tabelle 3/3

Technische Daten und Ergebnis der Kalibrierung des verwendeten Messgeräts / -sonde

Bezeichnung	Field Analyser EFA-300	Narda Safety Test Solutions GmbH, Pfullingen, D	früher: Wandel & Goltermann
Art des Geräts	Spektrumanalysator für wechselbare Sonden		
Field Analyser EFA-300	E-Feld (potentialfrei)		B-Feld
Messsonde(n)	Isotrop: 3 Plattenkondensatoren		isotrop: 3 Luftspulen, 100 cm ²
verwendete Frequenzbereich(e)	Breitband (BB1): 30 Hz - 2 kHz Bandfilter (BF): 50 Hz Spektrum (FFT1, Auflösung 0,01 Hz): 5 Hz - 2 kHz		
Messbereiche	< 10 V/m bis < 100 kV/m		< 100 nT bis < 32 mT
Auflösung	0,1 V/m		0,1 nT
Rauschen im BB1	0,7 V/m		4 nT
Frequenzauflösung	0,1 Hz		
Datum der letzten Kalibrierung	17.09.2008		
Abweichung vom Sollwert für BB1	50 Hz - 600 Hz	< 1 %	< 1 %
	bis 1.000 Hz	< 1 %	< 4 %
	bis 1.600 Hz	< 13 %	< 18 %
	bei 2.000 Hz	< 42 %	< 47 %

Die RMS-Effektivwerte werden vom digitalen Signalprozessor alle 250 ms aus den mit einer Abtastrate von 8,192 kHz aufgenommenen direkten Messwerten gebildet und dann, gemittelt über eine Sekunde, angezeigt bzw. abgespeichert.

Bei den in diesem Vorhaben durchgeführten Messungen waren nur sehr kleine Oberwellenanteile mit Frequenzen über einigen hundert Hertz zu erwarten und wurden auch nur gefunden.

Das Gerät erzeugt eine interne Schwingung, die in den B-Feld-Spektren im Bereich zwischen 1.200 Hz und 1.250 Hz einen kleinen, sichtbaren 'Berg' mit einer Höhe von bis zu 0,33 nT erzeugt (vgl. Abbildungen 3/4 u5 und die Spektren für die einzelnen Messobjekte in den Abschnitten 3.1.2.2 – 3.1.2.7).

3.1.2 Ergebnisse der Messungen

Die Beschreibung der Messorte, die Einzelergebnisse mit den Abbildungen der Querprofile und Spektren befinden sich in den Abschnitten 3.1.2.2 bis 3.1.2.7. In diesem Abschnitt wird eine Übersicht zu den Messorten gegeben und werden die Ergebnisse beispielhaft gezeigt und zusammengefasst.

3.1.2.1 Übersicht über die Messorte und Beschreibung der Messergebnisse anhand von Beispielen

Vor allem bei den Erdkabeln musste darauf geachtet werden, dass die Messergebnisse möglichst nicht (oder nur unwesentlich) von anderen Einrichtungen der Stromversorgung,

wie Mittelspannungs- oder Niederspannungsversorgungskabel, Hausanschlüsse oder Transformatoren, beeinflusst oder sogar dominiert werden können. Eine Überlagerung durch Beiträge anderer Quellen konnte aber nicht immer vermieden werden. In solchen Fällen wurden die Messpunkte, an denen die Ergebnisse von solchen zusätzlichen Feldquellen bestimmt wurden, nicht in die weitere, zusammenfassende oder vergleichende Bewertung einbezogen.

Die Abbildungen 3/1 und 3/2 zeigen beispielhaft je ein Querprofil der aktuell gemessenen Werte der magnetischen Flussdichte und der elektrischen Feldstärke unter einer 380 kV-Freileitung mit Donaumasten. Die unterschiedliche Höhe der magnetischen Flussdichte in Abb. 3/1 auf beiden Seiten der Trasse spiegelt die unterschiedlich starken Ströme auf den beiden Systemen während der Messung wieder. In Abbildung 3/2 sind die das elektrische Feld abschirmenden und verzerrenden Objekte (hier Bäume und eine Transformatorstation von Mittel- auf Niederspannung) in Lage und Größe skizziert (der senkrechte Abstand zum Messweg ist ebenfalls in die Größe eingegangen: weiter entfernte Objekte sind kleiner dargestellt). In diesem Beispiel wird in Trassenmitte der Grenzwert der 26. BImSchV, wie dort als zulässig erklärt, kleinräumig (um weniger als den Faktor zwei) überschritten. Dies tritt gelegentlich bei großen Mastabständen und entsprechend kleinem Bodennabstand der untersten Leiterseile auf. Bei maximaler Anlagenauslastung wird der dann größere Durchhang zu noch etwas größeren Werten für die elektrische Feldstärke führen. Eine Überschreitung um mehr als den Faktor zwei, d.h. eine nach 26. BImSchV unzulässige Überschreitung, ist – aller Erfahrung nach – auch dann ausgeschlossen.

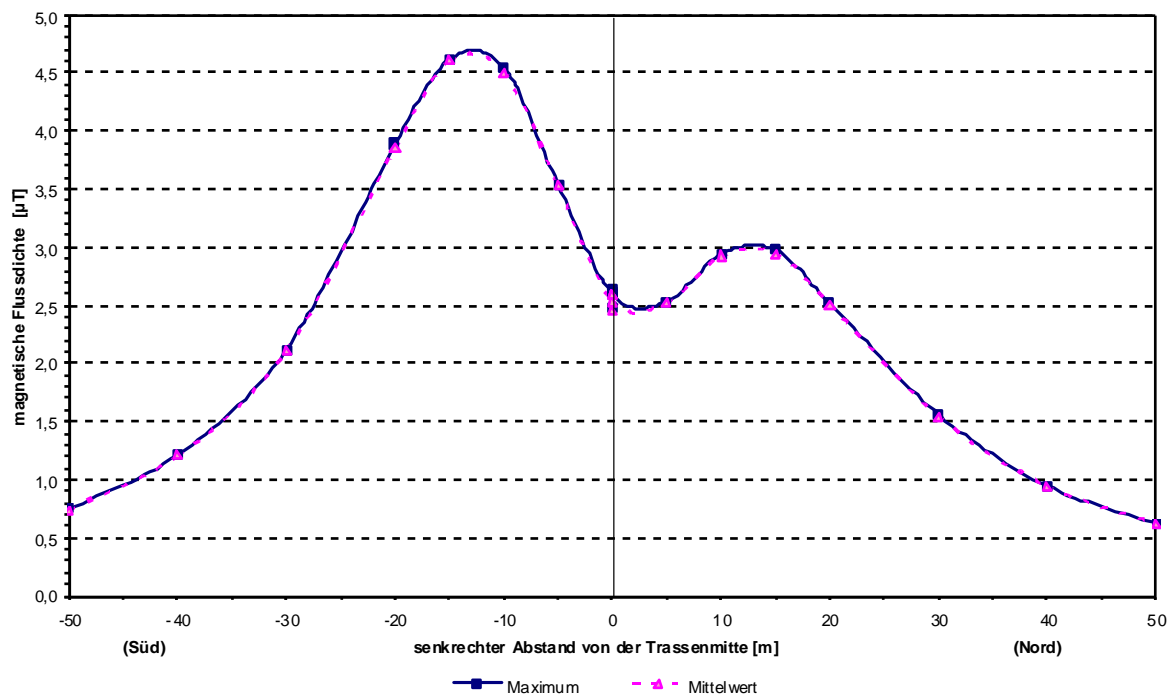


Abbildung 3/1

Querprofil der magnetischen Flussdichte einer 380 kV-Freileitung mit unterschiedlichen Strömen auf den beiden Systemen

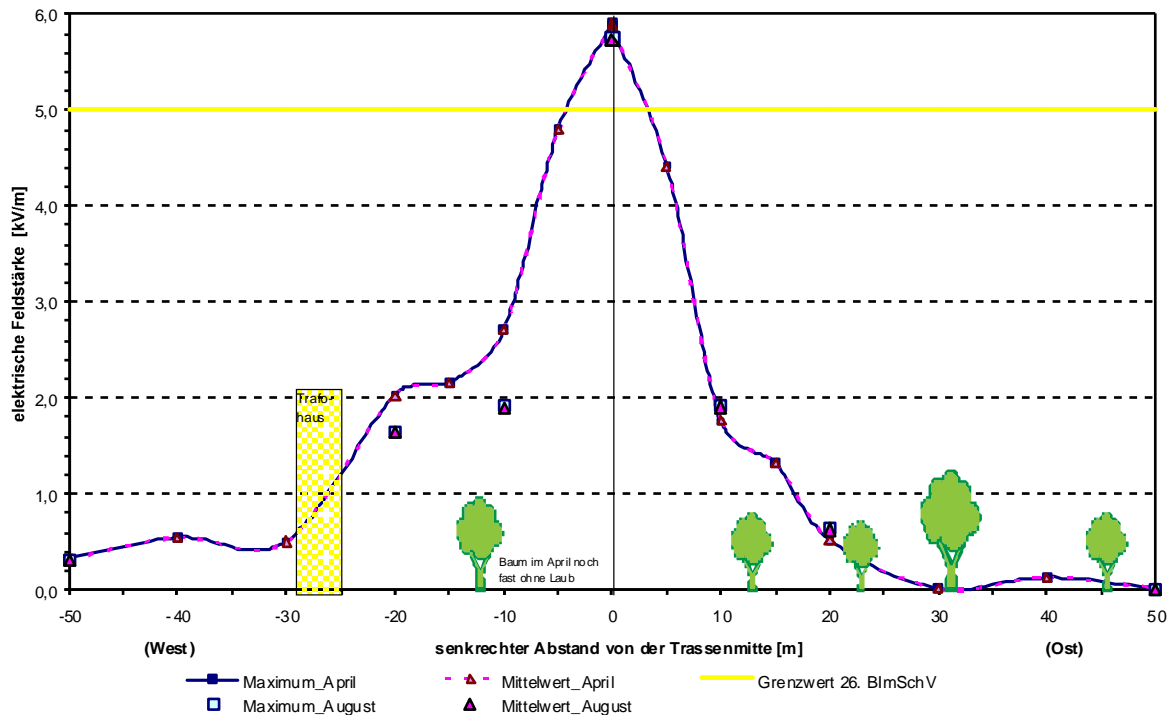


Abbildung 3/2

Querprofile der elektrischen Feldstärke einer 380 kV-Freileitung, gemessen im April und im August, bei der in Trassenmitte der Grenzwert der 26. BImSchV kleinräumig (um deutlich weniger als den Faktor zwei) überschritten wird; die das elektrische Feld abschirmenden und verzerrenden Objekte sind in Lage und Größe skizziert (der senkrechte Abstand zum Messweg ist ebenfalls in die Größe eingegangen: weiter entfernte Objekte sind kleiner dargestellt, der Baum bei 12 m auf der Westseite war im April noch deutlich geringer belaubt als im August)

In den Abbildungen 3/3 bis 3/5 sind die Spektren der elektrischen Feldstärke unter einer 110 kV-Freileitung und der magnetischen Flussdichte sowohl unter dem Freileitungsabschnitt als über einem Erdkabelabschnitt derselben 110 kV-Trasse dargestellt. Die kleinen Oberwellenanteile stammen zum einen von Schaltvorgängen und von Rückwirkungen der elektrischen Verbraucher. Wie in diesen Abbildungen gezeigt, liegen die Beiträge der unteren Oberwellen typischer Weise bei weniger als 10 % und die der höheren bei deutlich unter 1 % des 50 Hz-Beitrages. Bei Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit des Grenzwertes entsprechend der ICNIRP-Empfehlung war der Anteil aller Oberwellen bei einigen Messungen fast genauso groß, wie der 50 Hz-Anteil, der (alleine) bei den hier durchgeführten Messungen im Maximalfall knapp 5 % des Grenzwertes der 26. BImSchV (100 μ T) erreichte.

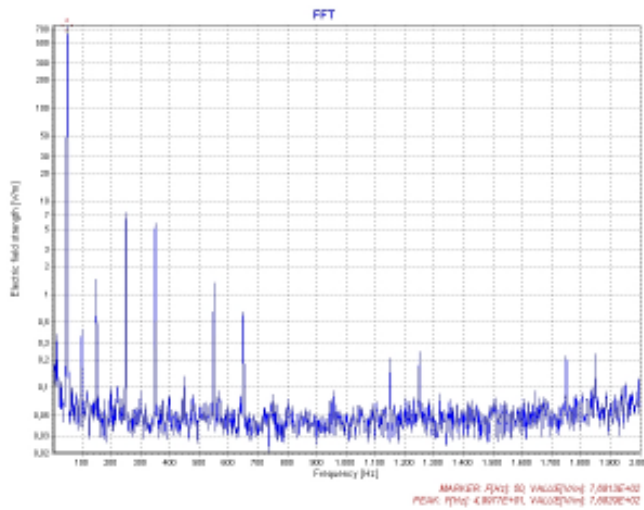


Abbildung 3/3
Spektrum der elektrischen Feldstärke an einer 110 kV-Freileitung

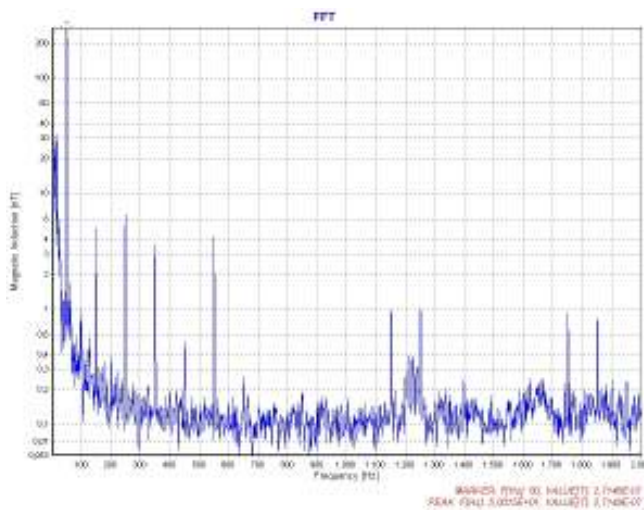


Abbildung 3/4
Spektrum der magnetischen Flussdichte an einer 110 kV-Trasse, Freileitungsabschnitt

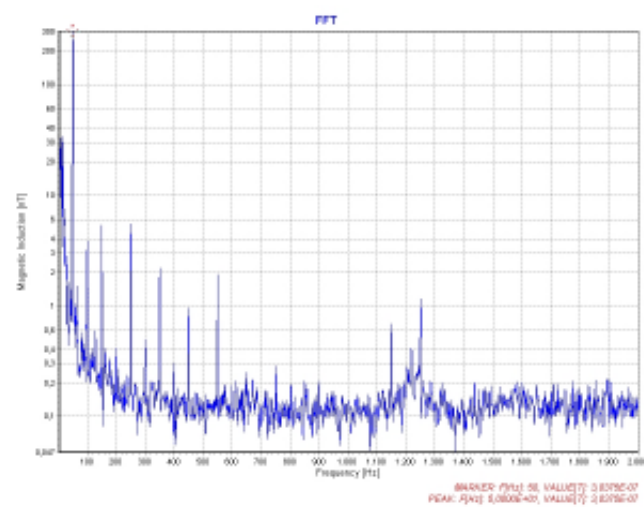


Abbildung 3/5
Spektrum der magnetischen Flussdichte an einer 110 kV-Trasse, Erdkabelabschnitt (Messhöhe 1 m)

Abbildung 3/6 zeigt beispielhaft den Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte während einer Messung, zusammen mit den von dem Betreiber gelieferten Stromwerten (in diesem Fall als Minutenwerte übermittelt). Die maximale Schwankungsbreite (hier definiert als Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Einzelmesswert in Prozent des Maximalwerts) direkt vor, während und direkt nach der Messung des Querprofils der magnetischen Flussdichte (Messwerte 15:45 bis ca. 16:00 Uhr) betrug 11,6 % bei einer Standardabweichung der Einzelmesswerte von $0,012 \mu\text{T}$. In dem Zeitraum, in dem die Messung des Querprofils der elektrischen Feldstärke stattfand, ist der Stromfluss und damit auch die magnetische Flussdichte etwas angestiegen, wie die anschließende Kontrollmessung der magnetischen Flussdichte zeigte. Die maximale Schwankungsbreite für den Gesamtzeitraum beträgt 32,6 % bei einer Standardabweichung von $0,05 \mu\text{T}$.

Typische Standardabweichungen lagen an 380/220 kV-Trassen bei $0,02 \mu\text{T}$ und an 110 kV-Trassen bei $0,01 \mu\text{T}$ mit einer maximalen Schwankungsbreite von 5 – 10 % für beide Spannungsebenen. Selbst im ungünstigsten Fall einer Messung bei kleinen und trotzdem relativ stark schwankenden Strömen, bei dem die maximale Schwankungsbreite einen Wert von 68,5 % erreichte, lag das kleinste Minutenmittel in Trassenmitte um mehr als einen Faktor fünf über den Messwerten bei 40 m und 50 m Abstand, so dass die allgemeine Form des Querprofils noch gut zu erkennen war (vgl. Abb. 3/64 im Abschnitt 3.1.2.4.3).

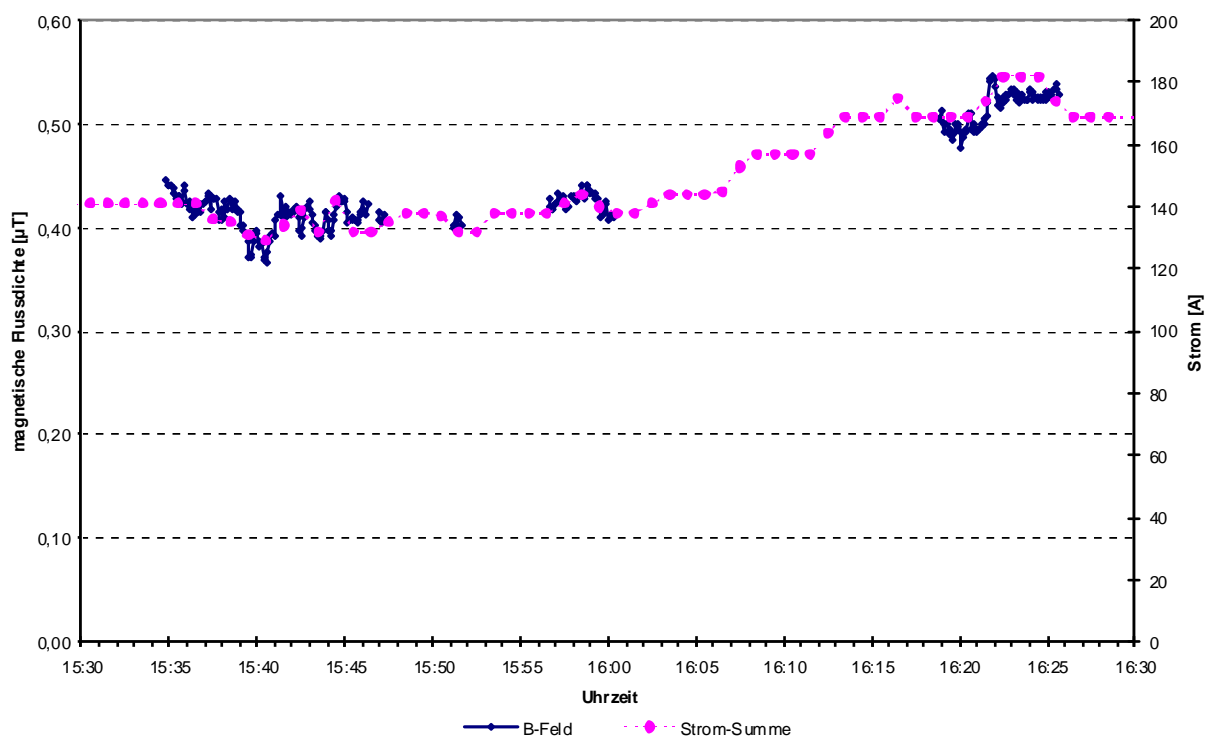


Abbildung 3/6
Zeitverlauf der Messwerte der magnetischen Flussdichte und der vom Betreiber gelieferten Stromwerte

Die Veränderungen in den Messwerten für die elektrische Feldstärke waren deutlich geringer. Die maximale Schwankungsbreite lag bei wenigen Prozent (bis maximal 4,7 %) und die Standardabweichung meist unter $0,001 \text{ kV/m}$ (der Maximalwert betrug $0,062 \text{ kV/m}$). Ursache der Schwankungen sind zum einen Veränderungen des Leitungszustands (Schwankungen der Spannung selbst von typischerweise 1-2 % und - mit meist geringerem Einfluss - Verän-

derung des Durchhanges durch Änderung im Stromfluss) sowie Änderungen in den äußeren Bedingungen, wie Schw ingungen der Leiterseile durch den Wind und Veränderungen in der Bodenfeuchte, aber auch die Unsicherheit in der Positionierung des Messgerätes an exakt der gleichen Stelle (< 20 cm).

In den folgenden Abschnitten (3.1.2.2 – 3.1.2.7) sind die Beschreibungen und die wesentlichen Messergebnisse zu den einzelnen Trassen zusammengestellt. Die Tabellen enthalten die für die Messung wesentlichen Angaben zu der jeweiligen Trasse und dem Messort. Die für die Feldberechnungen wichtigen Angaben stehen in den entsprechenden Tabellen des Abschnitts 3.2 (Unterabschnitte 3.2.2.2 – 3.2.2.7). Auf Wunsch einiger Betreiber sind die Angaben 'anonymisiert', damit kein Rückschluss auf die jeweilige Trasse und den genauen Messort möglich ist. Die zur Orientierung z.T. angegebenen Mastnummern entsprechen nicht den tatsächlichen Mastnummern im Trassenverlauf, sondern sind die 'internen' Nummern des Berechnungsprogramms.

Als Ergebnisse sind immer der Mittelwert und das Maximum der Messergebnisse für bestimmte Abstände oder Abstandsbereiche aufgeführt. Die Werte für den Trassenbereich ('Trasse') geben die Ergebnisse der Messungen direkt über oder unter den Leitungen wieder. Dieser Bereich ist bei 380 kV- und 220 kV-Freileitungen meist 30 m (15 m zu jeder Seite), bei Einebenenmasten auch bis zu 40 m und für 110 kV-Freileitungen 20 m (10 m zu jeder Seite), breit. Bei Erdkabeln beträgt die Trassenbreite zwischen zwei und acht Metern. Bei Freileitungen werden zusätzlich die Werte für 20 m und 50 m, bei Erdkabeln für 10 m und 20 m angegeben, jeweils das Maximum und der Mittelwert für die Messergebnisse beider Seiten der Trasse. Daneben sind für alle Trassen die Querprofile und die Spektren abgebildet. In einigen Fällen sind zusätzlich Vergleiche zwischen verschiedenen, zusammengehörenden Messungen dargestellt, z.B. Wiederholung der Messung an einem anderen Tag oder Vergleich zwischen unterschiedlichen Abschnitten derselben Trasse.

3.1.2.2 Ergebnisse der Messungen an 380 kV-Freileitungen

3.1.2.2.1 FL380_1a

Objekt	380 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	09.04.2009, (10:25 – 11:10 Uhr)				
Winkel des Messweges	14° zur Trassensenkrechten				
(störende) Objekte	nach Süden ab ca. 35 m Buschreihe (bis zu 4 m hoch) in ca. 4 m Abstand vom Messweg				
Bemerkungen	Gelände fällt von Süden (+1 m) nach Norden (-1 m) ab				
Bodenbeschaffenheit	feuchter, mit Gras bewachsenem Randstreifen eines Feldweges				
Wetterbedingungen	klar, fast wolkenlos, kaum Wind, 16 °C, um 80 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	0,414	0,359	1,828	1,741
	20 m	0,321	0,264	1,471	1,422
	50 m	0,129	0,093	0,381	0,340
Bemerkungen	zwei benachbarte Spannungsfelder unterschiedlicher Länge kleines Spannungsfeld zw. Mast 2 / 3 → große Höhe der Stromleiter großes Spannungsfeld zw. Mast 1 / 2 → geringe Höhe der Stromleiter				



Foto: FL380_1a, Blick von Süden



Luftbild: FL380_1a, 380 kV-Freileitung, der Messweg verläuft am linken Rand des Feldweges, der die Trasse kreuzt

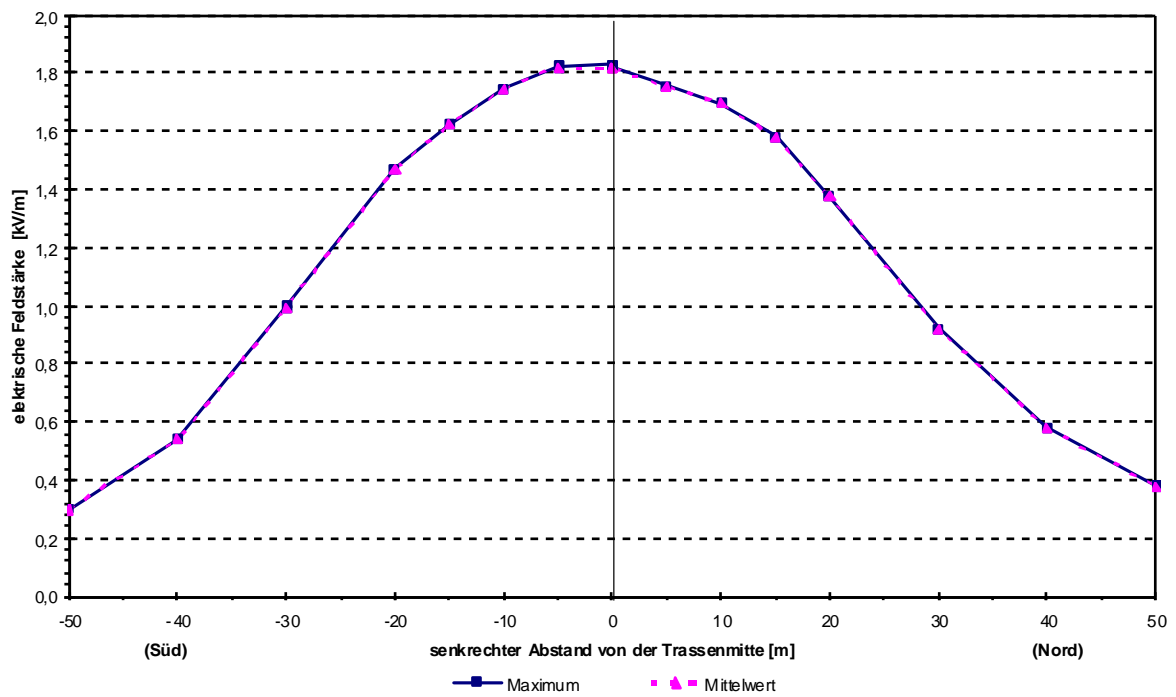


Abbildung 3/7
380 kV-Freileitung, FL380_1a: Querprofil der elektrischen Feldstärke

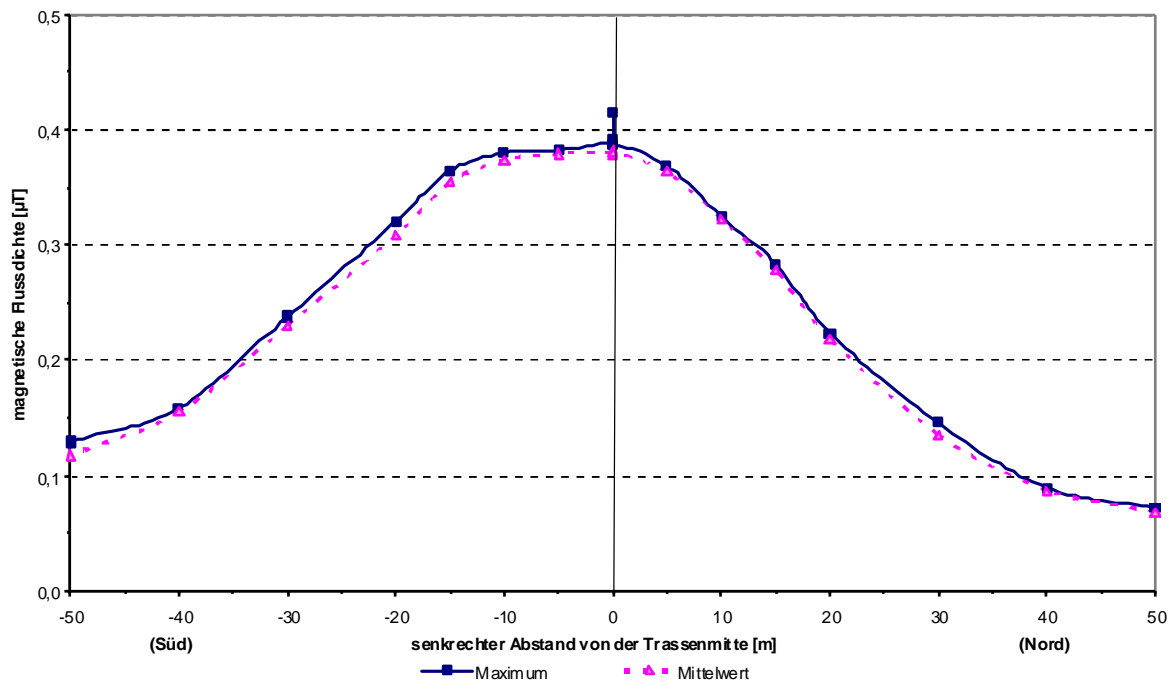


Abbildung 3/8
380 kV-Freileitung, FL380_1a: Querprofil der magnetischen Flussdichte

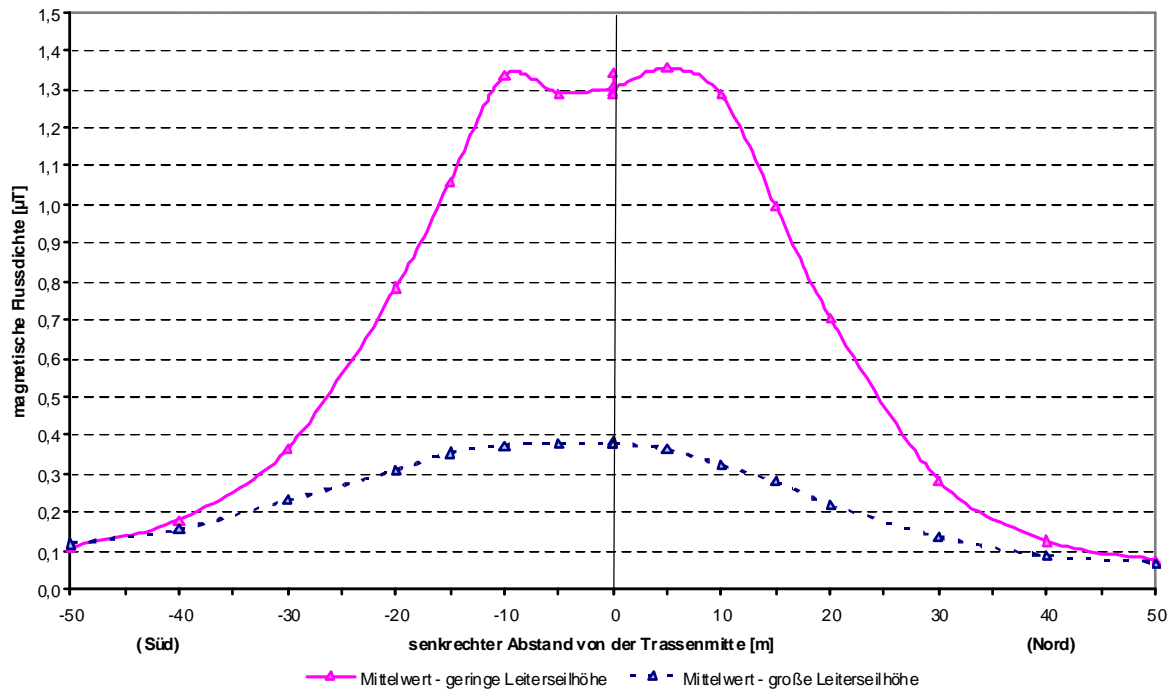


Abbildung 3/9
380 kV-Freileitung, Vergleich der Mittelwert-Profile (Querprofile der magnetischen Flussdichte):
kleines Spannungsfeld (große Leiterseilhöhe) ↔ großes Spannungsfeld (geringe Leiterseilhöhe)

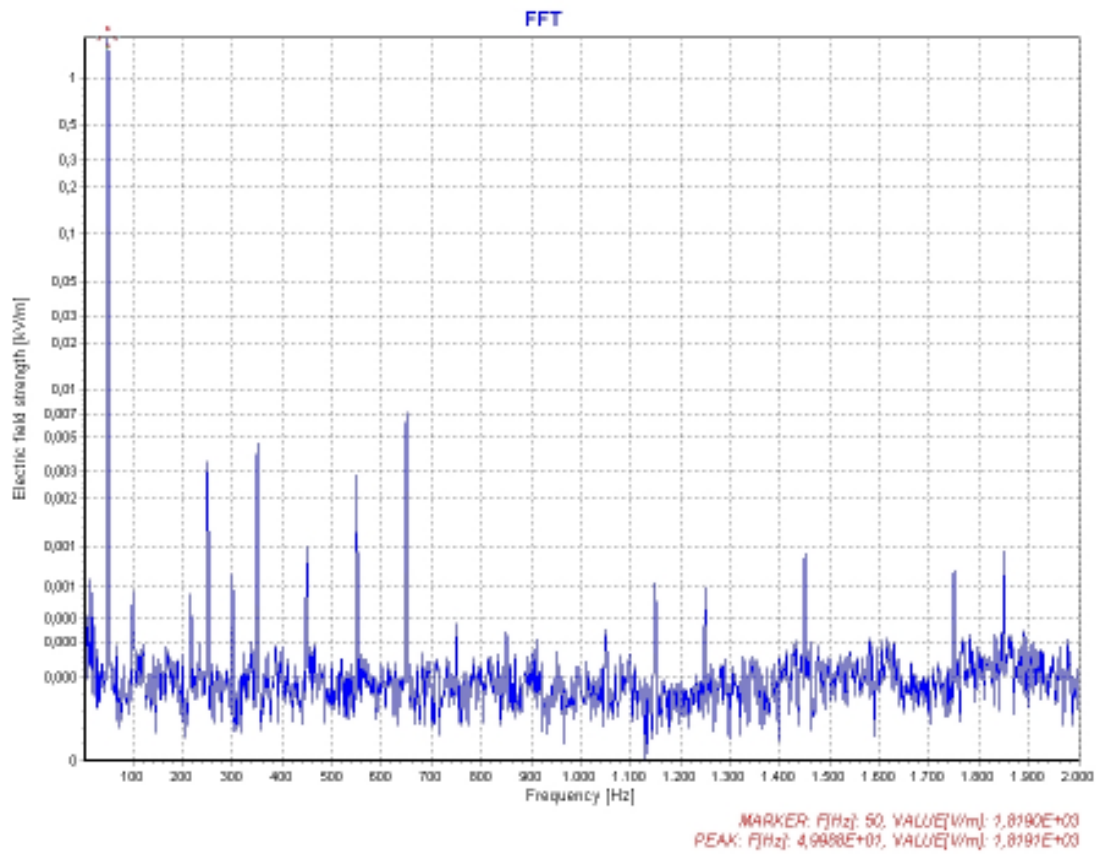


Abbildung 3/10
 380 kV-Freileitung, FL380_1a: Spektrum der elektrischen Feldstärke

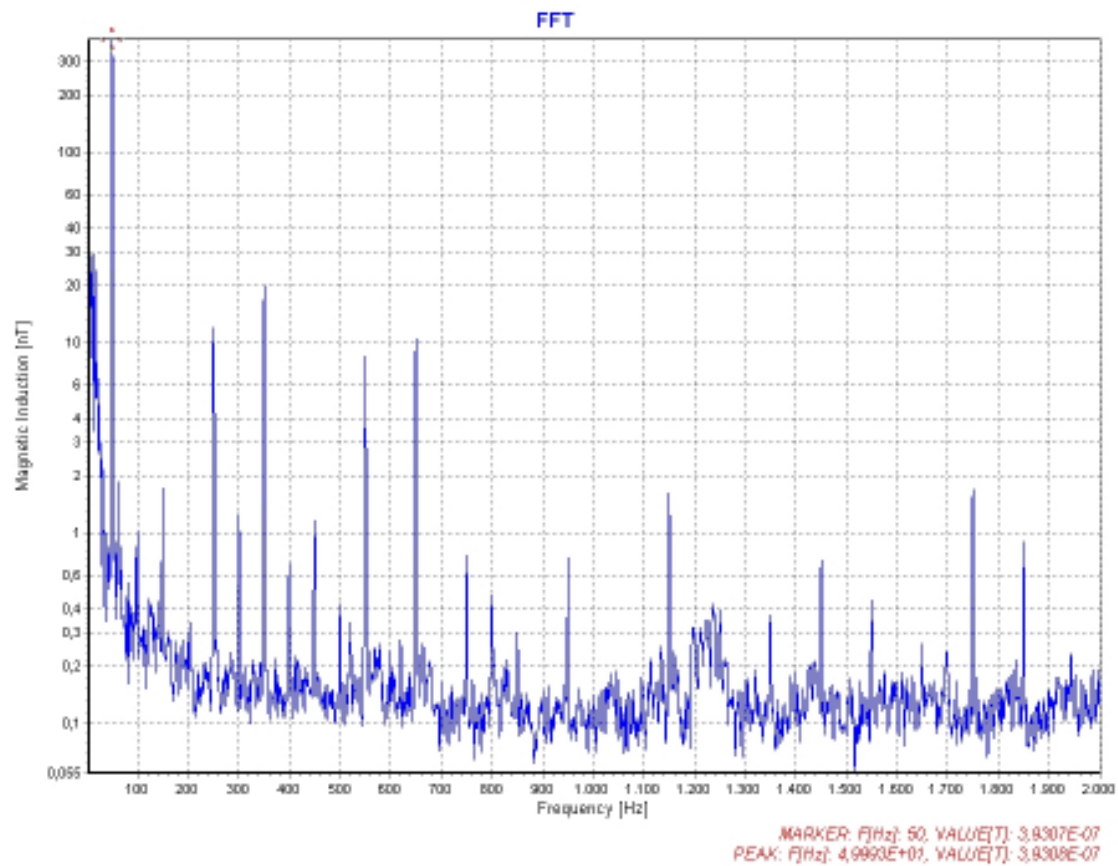


Abbildung 3/11
 380 kV-Freileitung, FL380_1a: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.2.2 FL380_1b

Objekt	380 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	09.04.2009, (11:20 – 12:00 Uhr) 06.08.2009, (16:20 – 17:30 Uhr)				
Winkel des Messweges	6° zur Trassensenkrechten				
(störende) Objekte	nach Süden ab ca. 35 m Büsche (2 m hoch) in ca. 2 m Abstand und Bäume (7 m hoch) in 4 m Abstand vom Messweg 1 Messweg 2: keine				
Bemerkungen	Gelände fällt von Süden (+0,5 m) nach Norden (-0,5 m) ab				
Bodenbeschaffenheit	Asphalt und mit Gras bewachsener Randstreifen (nur April: leicht feucht)				
Wetterbedingungen	April: klar, leicht bewölkt, schwach windig, 17 °C, 78 % rel. Feuchte August: klar, kaum Bewölkt, mäßiger Wind, 30°C, 46 % rel. Feuchte				
Messergebnisse April / August	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
Messweg1 (fast am maximalen Durchhang)	Trasse	1,364 / 3,377	1,250 / 2,065	5,065 / 4,734	4,078 / 3,814
	20 m	0,821 / 2,536	0,744 / 2,340	4,252 / 4,420	3,853 / 4,030
	50 m	0,112 / 0,542	0,093 / 0,488	0,309 / 0,261	0,289 / 0,250
Messweg 2 (60 m zum Mast 2)	Trasse	- / 1,204	- / 1,190	- / 2,013	- / 1,922
	20 m	- / 1,095	- / 1,083	- / 1,720	- / 1,620
	50 m	- / 0,427	- / 0,424	- / 0,424	- / 0,407
Bemerkungen	Vergleich (s. 2.2.2.1): kleines Spannfeld zw. Mast 2 / 3 → große Höhe der Stromleiter großes Spannfeld zw. Mast 1 / 2 → geringe Höhe der Stromleiter				
	Wiederholung der Messung im August bei höheren Strömen ohne Phasendifferenz zwischen den beiden Systemen (s.u. Abschnitt 3.2.2.2 mit den Berechnungen für diese Trasse); bis 50 m Abstand als Vergleich mit reduzierter Anzahl an Messpunkten (→ geringeren Maximalwert beim elektrischen Feld)				
	Messung im August: Überschreitung von 0,1 µT bis 110 m Abstand (Messweg 1) bzw. 90 m (Messweg 2) von der Trassenmitte				
	Das elektrische Feld überschreitet im Trassenbereich – kleinräumig – den Grenzwert der 26. BImSchV				



Foto: FL380_1b, Messweg 1 (auf dem Straßenrandstreifen), Blick von Süden



Foto: FL380_1b, Messweg 2 (in der ersten Treckerspür auf dem linken Feld), Blick von Süden



Luftbild: FL380_1b, 380 kV-Freileitung, der Messweg 1 verläuft auf dem westlichen Straßenrandstreifen, der Messweg 2 in einer Treckerspur am östlichen Rande des großen Feldes, im April wurde an Punkten bis zu 50 m Abstand von der Trassenmitte gemessen (dickere Linie), im August bis zu Abständen (110 m bzw. 130 m), bei denen $0,1 \mu\text{T}$ sicher unterschritten waren

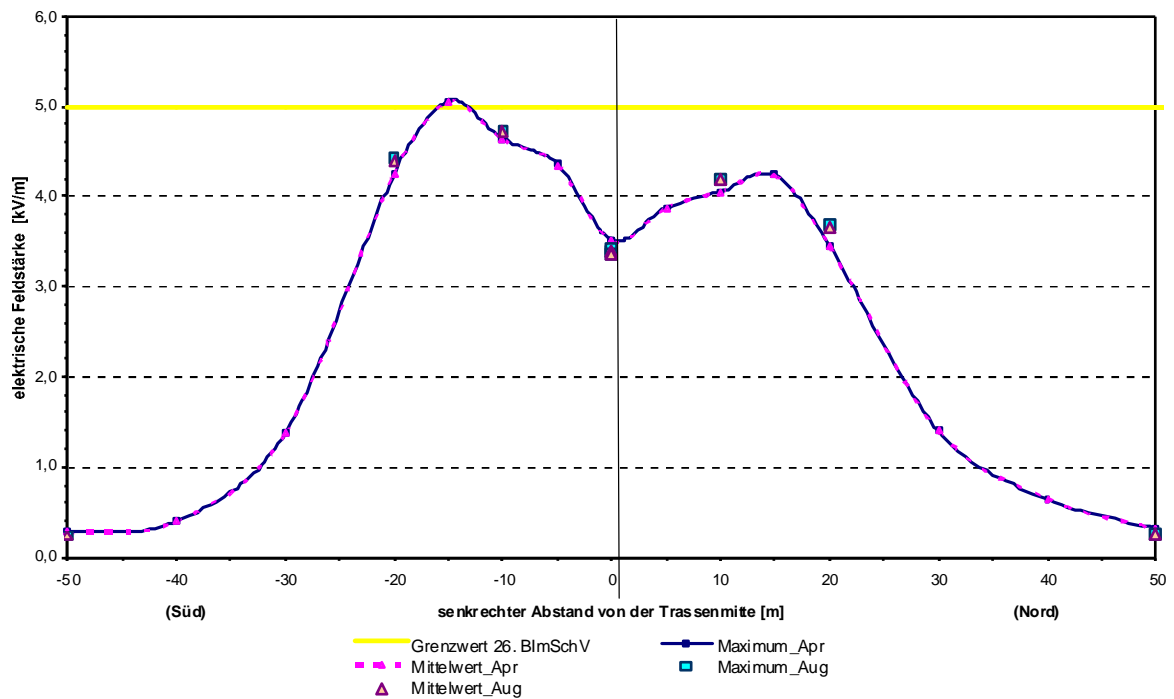


Abbildung 3/12a
380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofil der elektrischen Feldstärke, Messweg 1 April und August

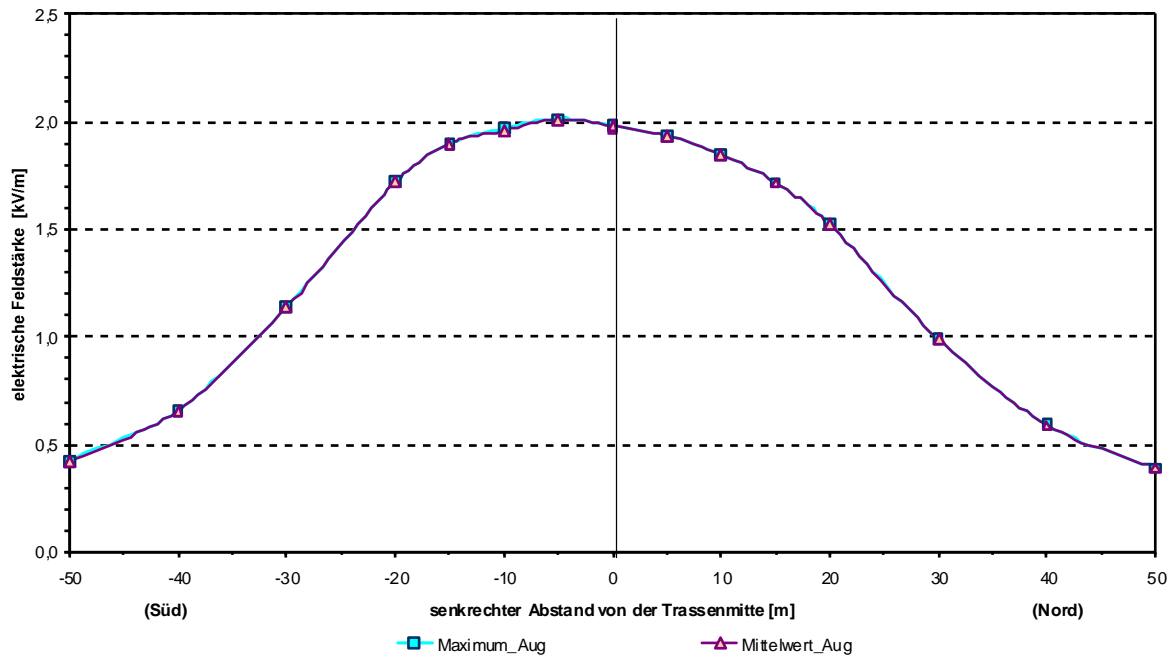


Abbildung 3/12b
380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofil der elektrischen Feldstärke, Messweg 2 August

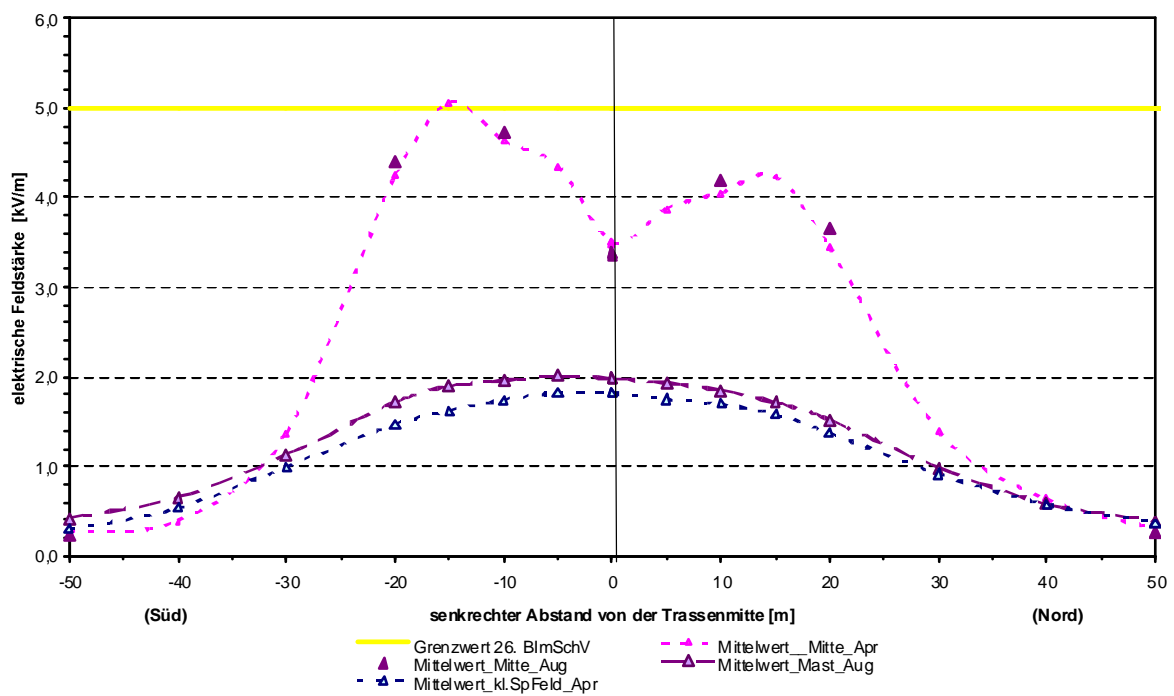


Abbildung 3/13
380 kV-Freileitung, Vergleich der Mittelwert-Profile (Querprofile der elektrischen Feldstärke):
 kleines Spannfeld (Mitte) = große Leiterseilhöhe
 ↔ großes Spannfeld (Mitte) = geringe Leiterseilhöhe
 ↔ großes Spannfeld (Mast) = große Leiterseilhöhe

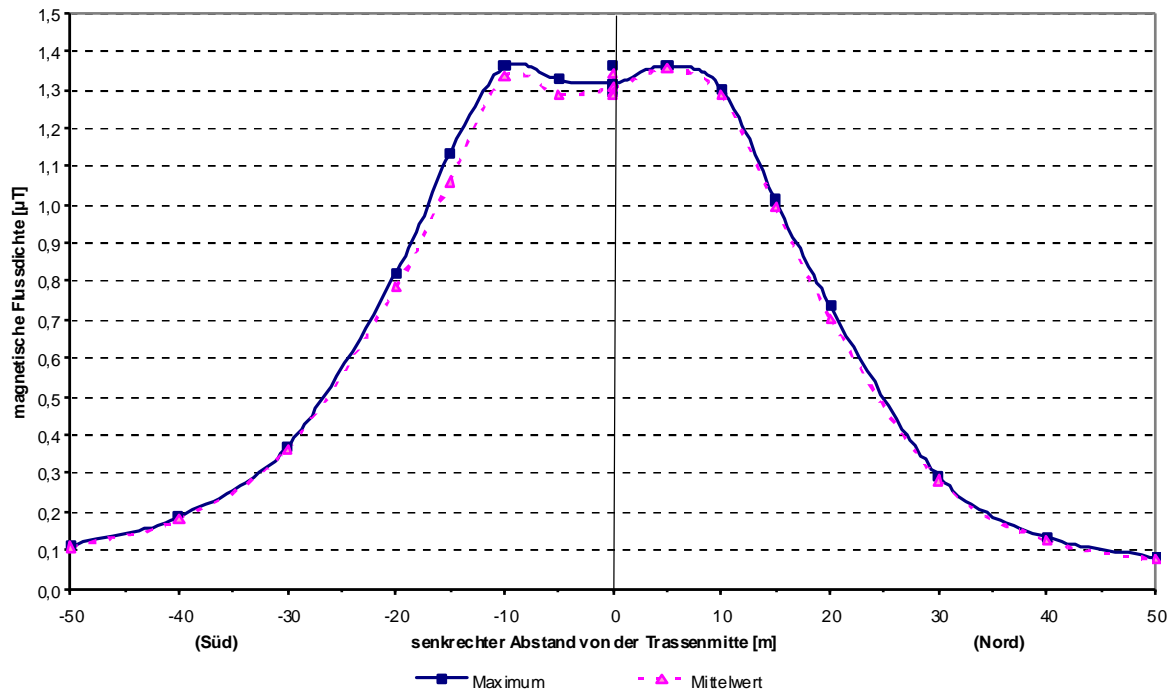


Abbildung 3/14a
380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofil der magnetischen Flussdichte, nur Messung April

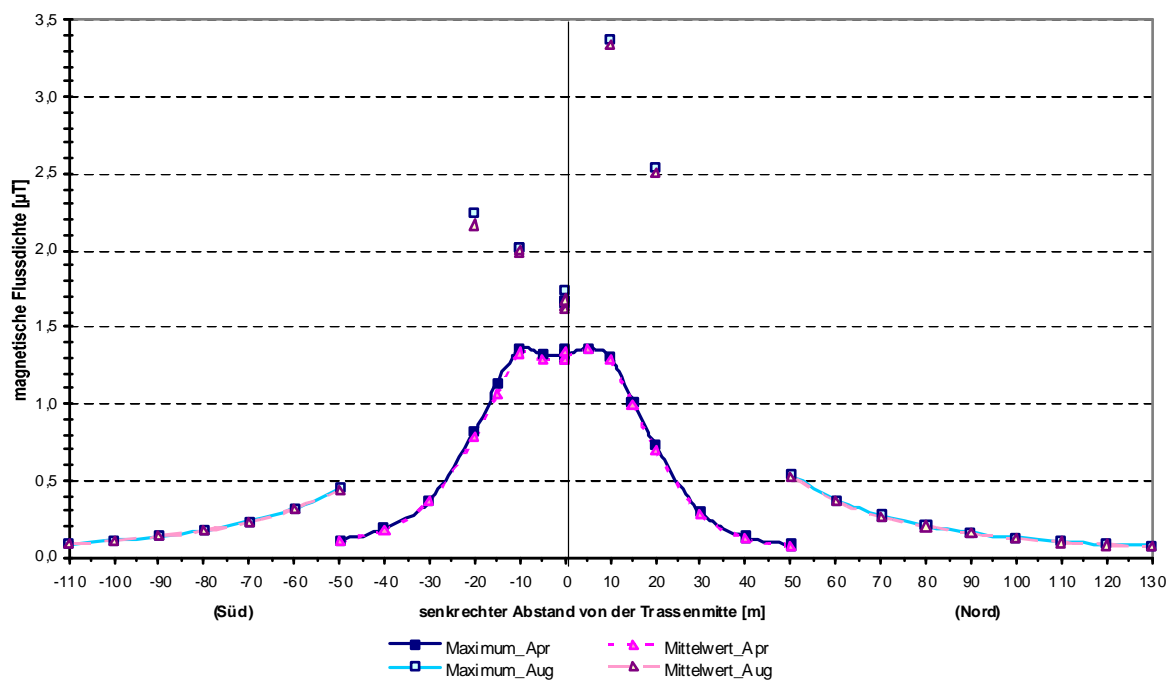


Abbildung 3/14b
380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofil der magnetischen Flussdichte, Messungen April und August (August: Vergleichsmessungen bis 50 m mit geringerer Messpunktdichte, dann in 10 m-Schritten bis zur sichern Unterschreitung von 0,1 µT)

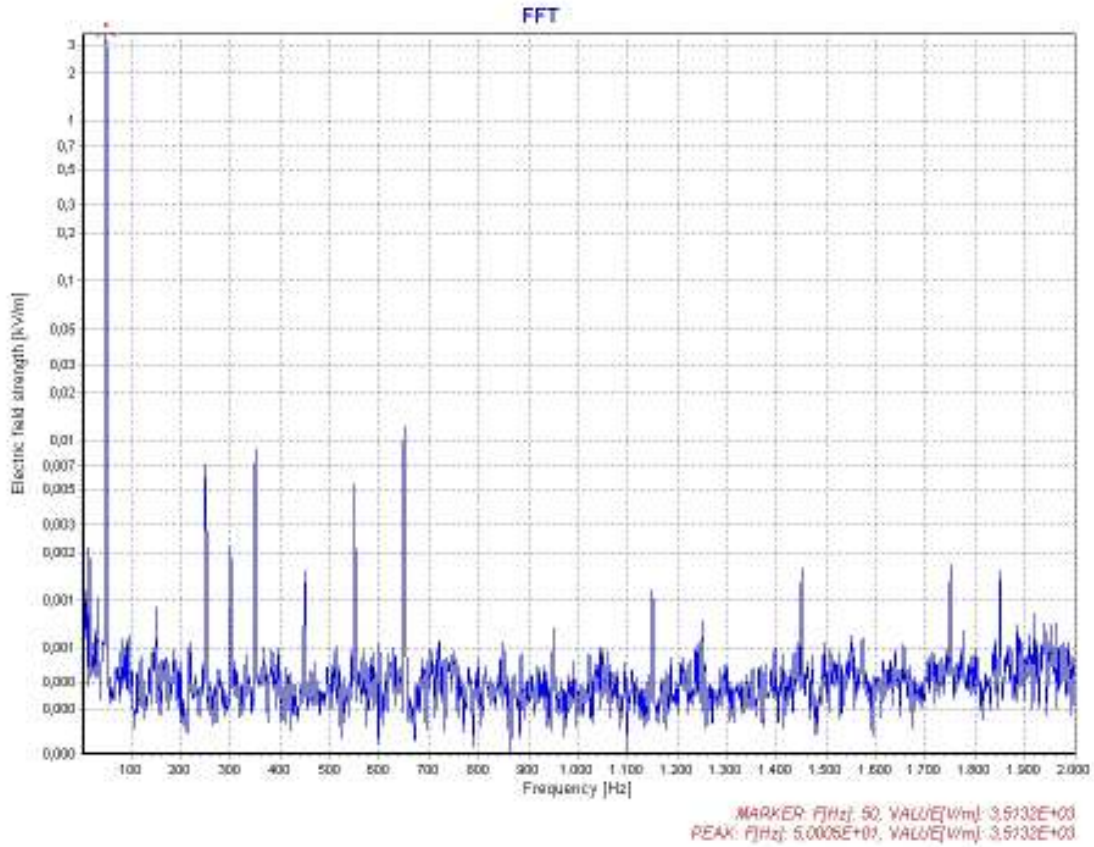


Abbildung 3/15a
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Spektrum der elektrischen Feldstärke, Messung April, Messweg 1

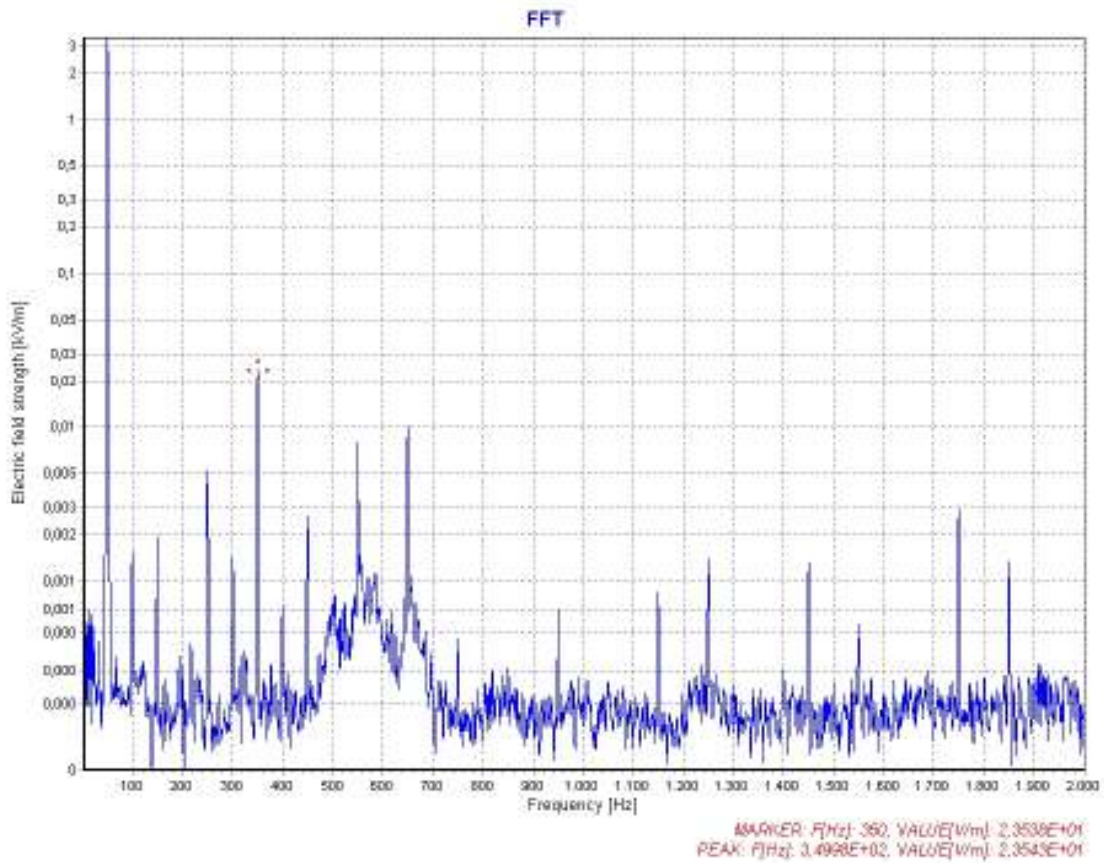


Abbildung 3/15b
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Spektrum der elektrischen Feldstärke, Messung August, Messweg 1

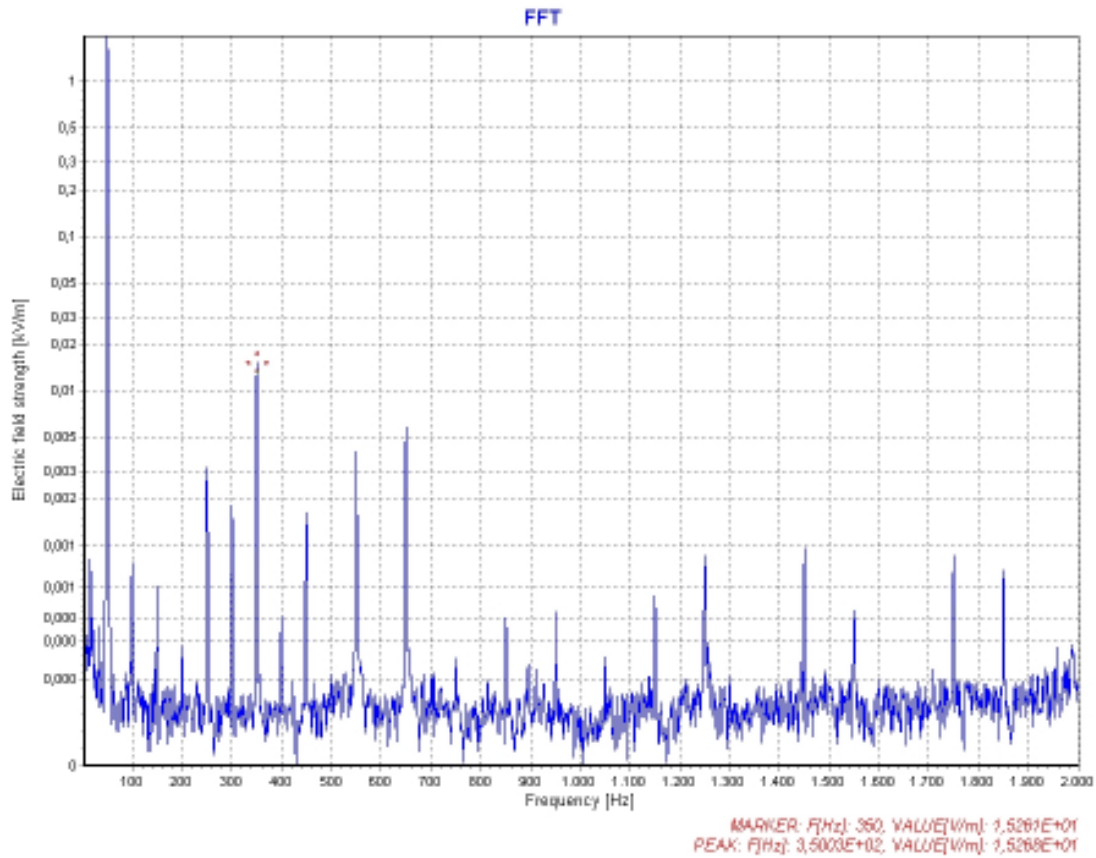


Abbildung 3/15c
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Spektrum der elektrischen Feldstärke, Messung August, Messweg 2

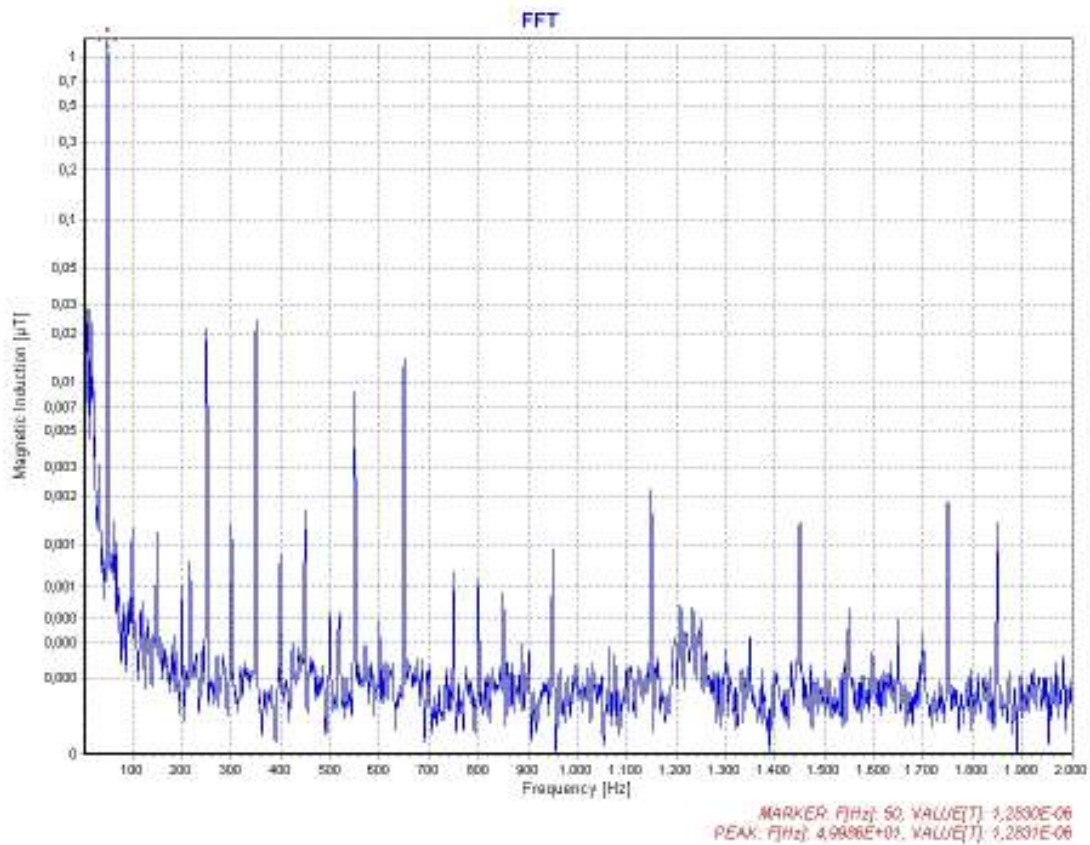


Abbildung 3/16a
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Spektrum der magnetischen Flussdichte, Messung April, Messweg 1

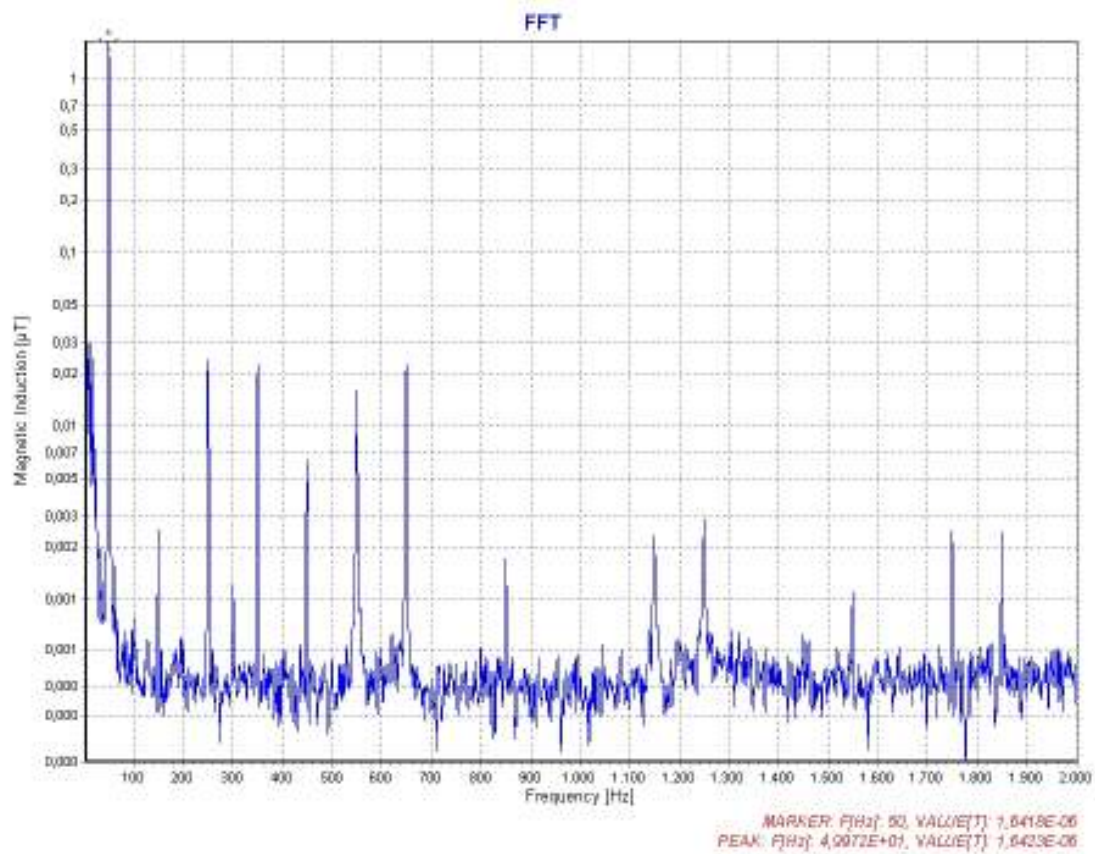


Abbildung 3/16b
 380 kV-Freileitung, FL380_1: Spektrum der magnetischen Flussdichte, Messung August, Messweg 1

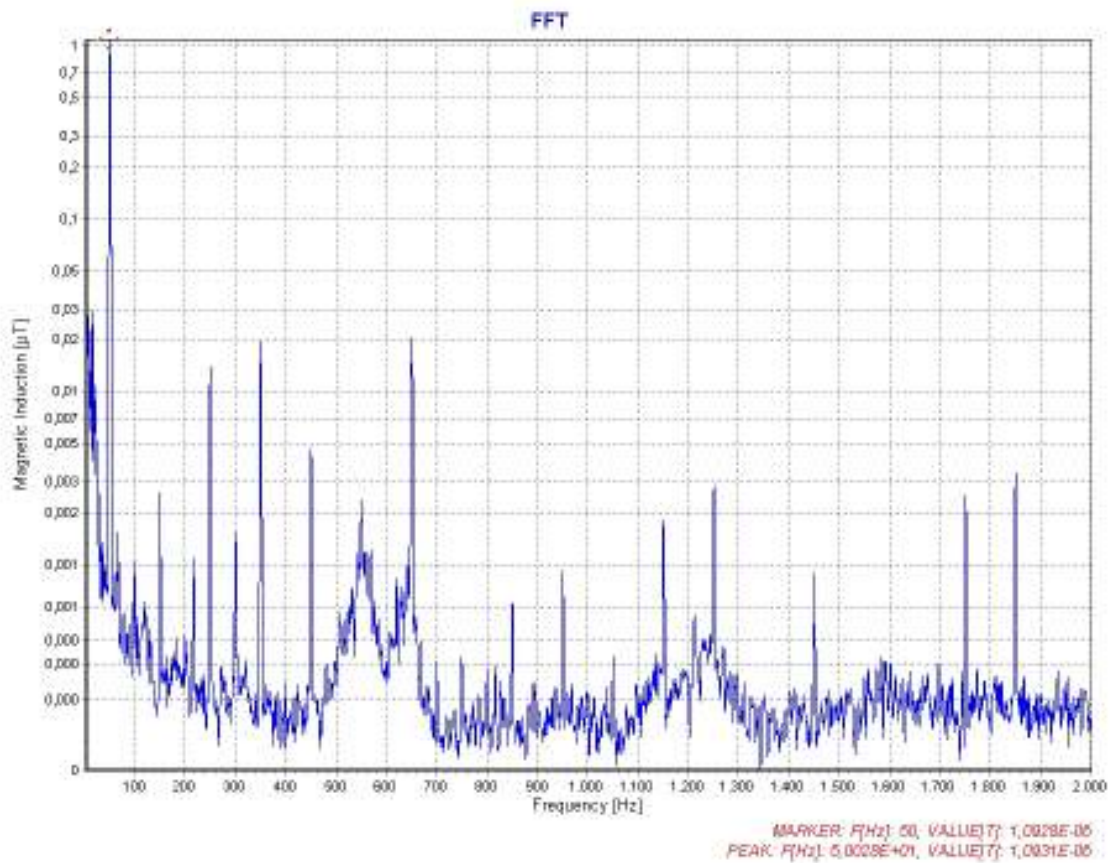


Abbildung 3/16c
 380 kV-Freileitung, FL380_1: Spektrum der magnetischen Flussdichte, Messung August, Messweg 2

3.1.2.2.3 FL380_2

Objekt		380 kV-Freileitung				
Mastbild		Donau				
Datum		Messweg 1 (MW1): 15.04.2009 (14:45 – 16:15 Uhr), 27.04.2009 (14:00 – 14:30) und 07.08.2009 (11:20 – 12:10 Uhr) Messweg 2 (MW2): 07.08.2009 (12:20 – 13:15 Uhr)				
Winkel der Messwege		senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	MW 1	Osten: Bäume bei ca. 13 m (1 m Abstand vom Messweg), 22 m (2 m), 30 m (1 m, Messung direkt unter der Krone) und 48 m (1,5 m) Westen: kleiner Baum bei 8 m (2 m neben dem Messweg), Baum bei 12 m (3 m), Transformatorstation ab 24,5 m bis 28,8 m, Straßenlateme bei 52,5 m und Fußweg (1,8 m zum Messpunkt bei 50 m) mit Niederspannungs- Versorgungskabel, ebenfalls Niederspannungs-Versorgungskabel parallel zur Trasse etwa bei 11 m				
	MW 2	Osten: Bäume bei ca. 18 m (5 m Abstand vom Messweg), 30 m (1 m, Mes- sung direkt unter der Krone) und 47 m (2,5 m) Westen: Baum bei 2 m (1 m neben dem Messweg), Metallumzäunung bei 8-12 m (1 m), Baum bei 15 m (5 m), bei 49 m Fußweg mit Niederspan- nungs-Versorgungskabel, das Niederspannungs-Versorgungskabel parallel zur Trasse etwa bei 11 m war hier nachweisbar: $B(0,1m) \approx 1,05 \mu T$ und $B(1,0m) \approx 0,98 \mu T$, jedenfalls tendenziell kleiner als über dem Erdboden				
Bemerkungen		Gelände fällt von Westen (+0,5 m) nach Osten (-0,5 m) ab (beide MW)				
Bodenbeschaffenheit		Osten: Wiese (neben gepflastertem Fußweg), Westen: Wiese, bzw. bei 8 m bis 25 m (MW1u2) und bei 45 m bis 58 m (nur MW2) gepflasterte Straße				
Wetterbedingungen		15.04.: klar, keine Wolken, so gut wie kein Wind, 22 °C, 45 % rel. Feuchte 17.04.: klar, wenig Wolken, mäßiger Wind, 26 °C, 49 % rel. Feuchte 07.08.: klar, keine Wolken, so gut wie kein Wind, 30 °C, 52 % rel. Feuchte				
Messergebnisse		1 m Höhe	magnetische Flussdichte [μT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
			Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
Messweg 1	jeweils: 15.04. 27.04. 07.08	Trasse	2,686 1,049 1,355	2,062 0,869 1,091	5,912 - 5,766	3,865 - 3,822
		20 m	1,597 0,621 0,626	1,370 0,531 0,499	2,036 - 1,644	1,275 - 1,140
		50 m *	0,166 0,099 0,085	0,163 0,097 0,076	0,324 - 0,314	0,174 - 0,162
Messweg 2		Trasse	1,026	0,771	3,423	2,006
		20 m	0,468	0,406	1,569	1,148
		50 m *	~ 0,125	0,094	0,333	0,171
Bemerkungen		* Da auf der Westseite die Messwerte vom Magnetfeld, das von den Strö- men auf den dort unter den Fußwegen verlegten Niederspannungs- Versorgungskabeln verursacht wird, dominiert wurden, wird für 50 m für den MW1 nur der Wert von der Ostseite aufgeführt und für den MW2 wurde der angegebene Wert aus dem Kurvenverlauf abgeschätzt (s. Abb.19).				
		Das Maximum im Verlauf der Trasse im Bereich des größten Durchhanges lag in Trassenmitte bei ca. 1,5 μT und dort auf der Nordseite in ca. 10 m Abstand von der Trassenmitte bei 1,74 μT .				

Bemerkungen	Vergleich: Wiederholung der Magnetfeldmessung am 27.04.2009 und am 07.08.2009 bei deutlich niedrigeren Strömen.
	Auch wenn die Feldbeiträge des Transformators sowie der Zu- und Ableitungen in den Messwerten ab 10 m auf der Westseite als Erhöhung verglichen mit den korrespondierenden Werten auf der anderen Trassenseite zu erkennen sind, ist im Kurvenverlauf des Querprofils noch deutlich zu sehen, dass die Immissionen bis 30 m im Wesentlichen von der 380 kV-Trasse bestimmt werden. Nur in unmittelbarer Nähe (bis zu wenigen Metern Abstand von der Trafostation) ist der Beitrag des Transformators dominant. Direkt an der Außenwand waren magnetische Flussdichten von 0,6 μ T bis 1,5 μ T messbar. Nur an einzelnen Stellen konnten deutlich höhere Werte gemessen werden: das Maximum lag bei 35,3 μ T.
	Das elektrische Feld überschreitet im Trassenbereich – kleinräumig – den Grenzwert der 26. BImSchV.



Foto:
 FL380_2, Blick von Süden in Trassenrichtung, der Messweg 1 verläuft hinter der nächsten Hecke nach Rechts und Links und der Messweg 2 parallel dazu vor dem Mülltonnenplatz (vorne im Bild)



Foto:
FL380_2, Messweg 1,
Blick von Osten (April,
im August stand auch
der Baum am Ende der
Rasenfläche in vollem
Laub), der Messweg 2
verlief auf dem nächsten
Wohnungszugang



Luftbild: FL380_2, 380 kV-Freileitung, die beiden Messwege verlaufen parallel zueinander und senkrecht zur Trasse, Messweg 1 im April bis 50 m Abstand (dicke Linie) und im August wie Messweg 2 bis zu den Grundstücksgrenzen.

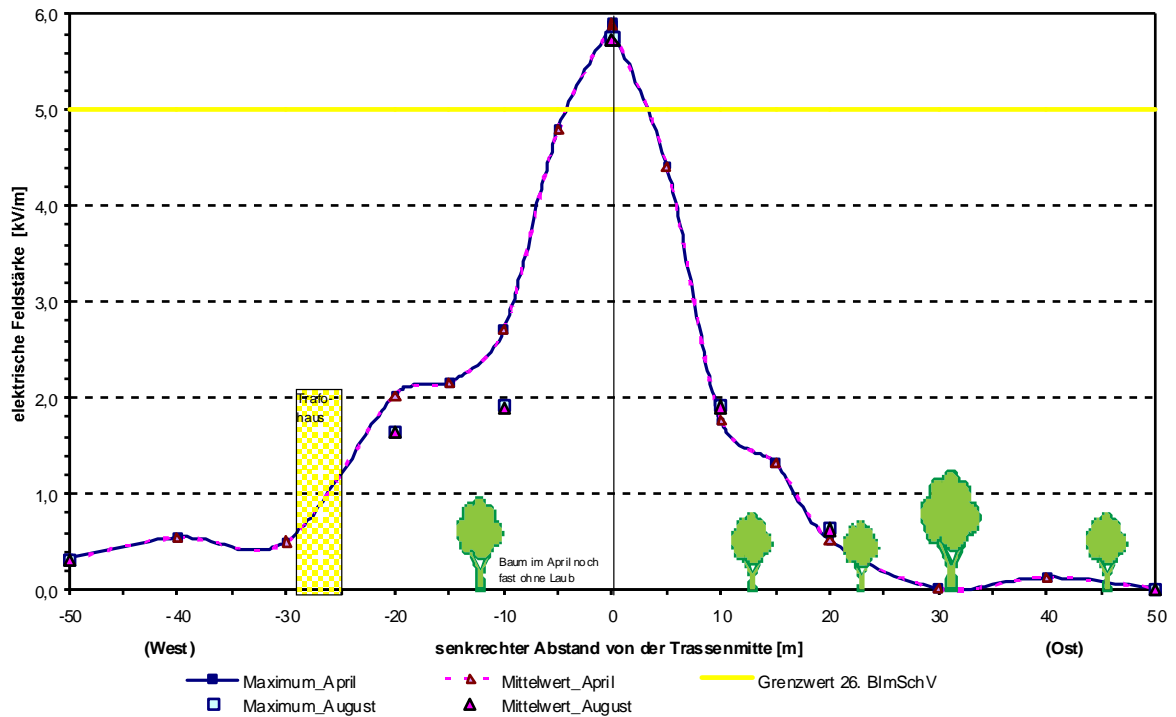


Abbildung 3/17a
380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofil der elektrischen Feldstärke, Messweg 1, April und August

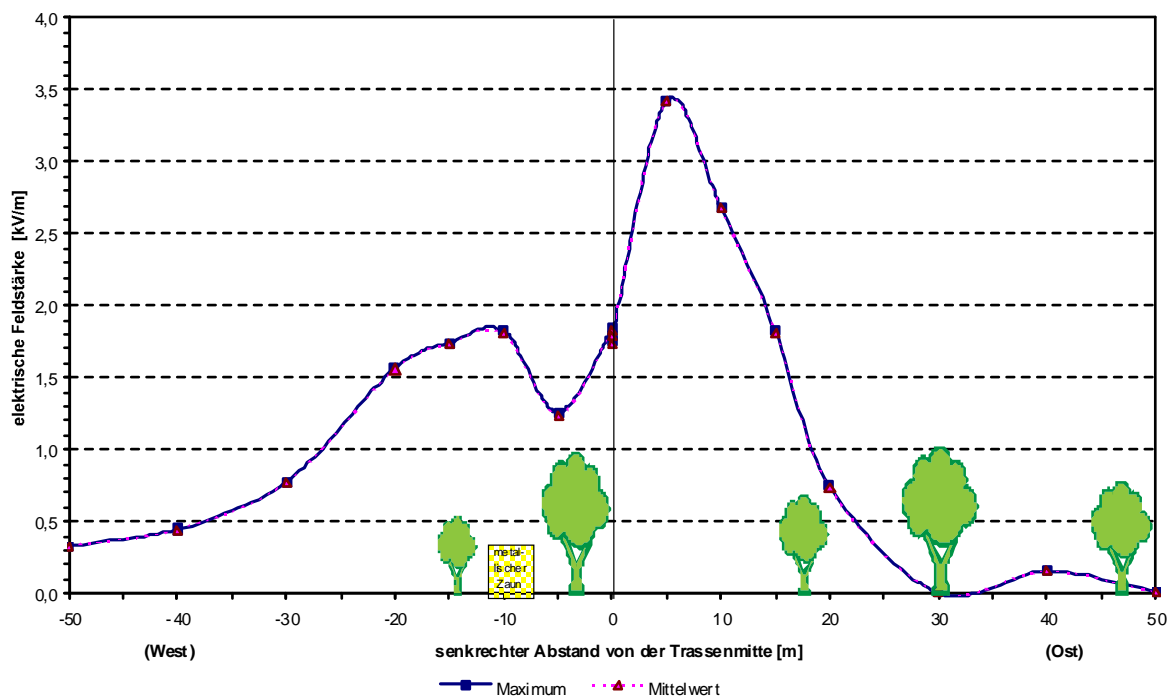


Abbildung 3/17b
380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofil der elektrischen Feldstärke, Messweg 2, August

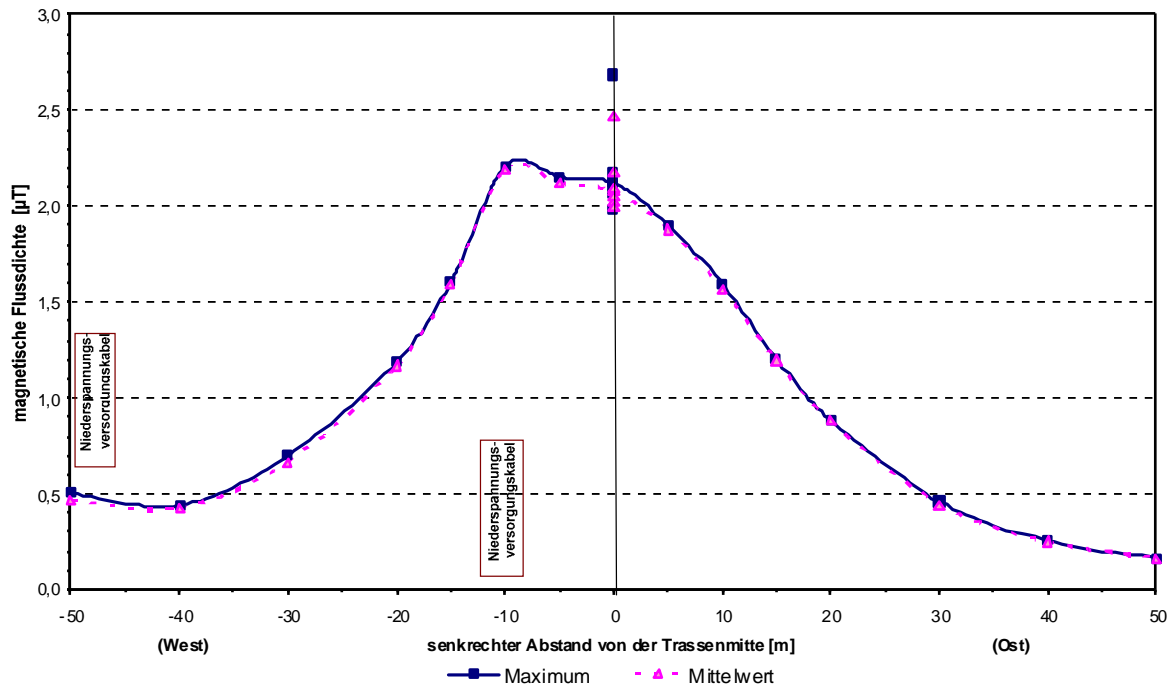


Abbildung 3/18a
380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofil der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April

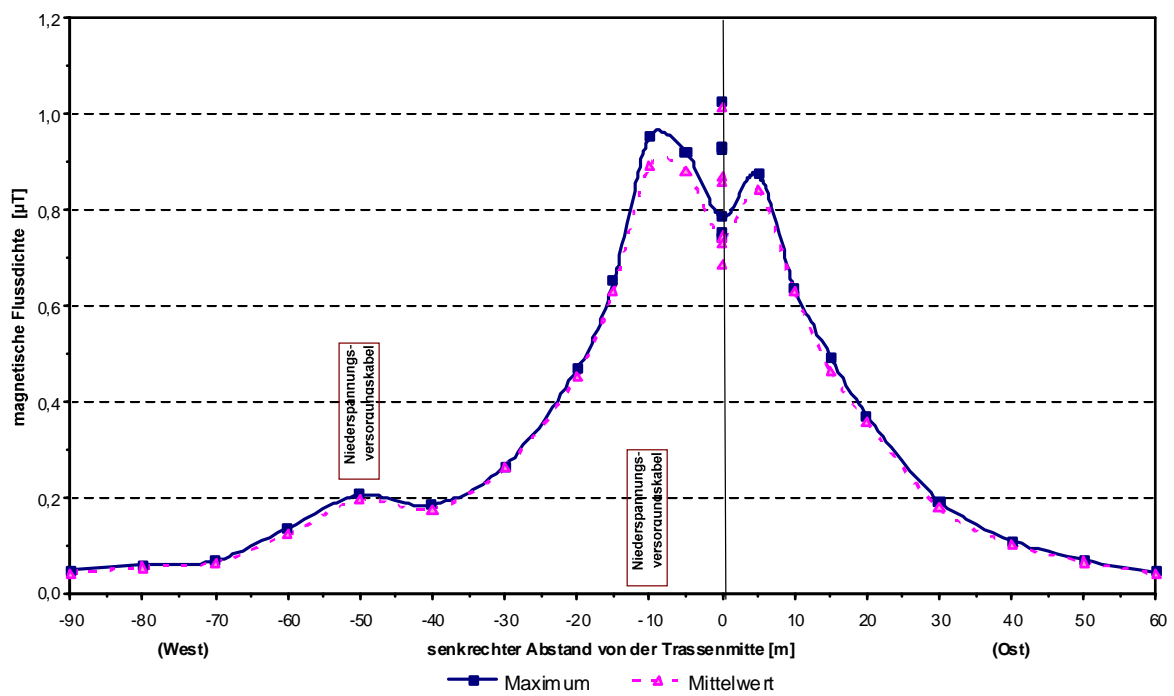


Abbildung 3/18b
380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofil der magnetischen Flussdichte, Messweg 2, August

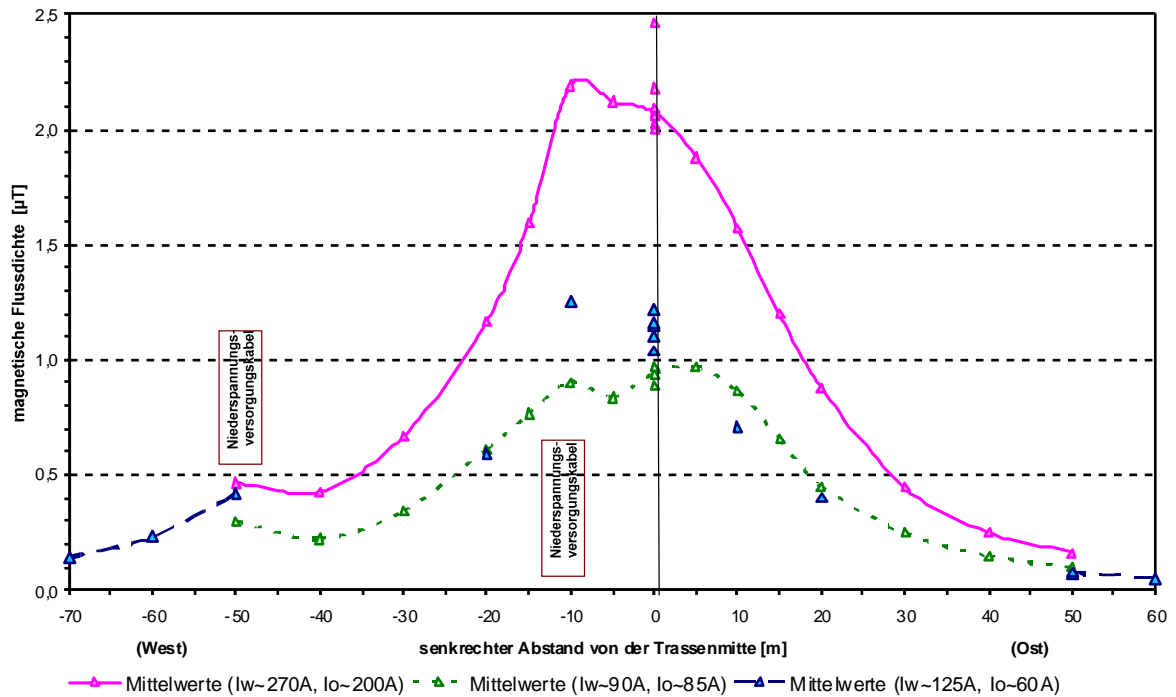


Abbildung 3/19
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Vergleich der Querprofile für die magnetische Flussdichte (Mittelwerte) auf dem Messweg 1, alle drei Messtage bei unterschiedlichen Strömen auf der Trasse

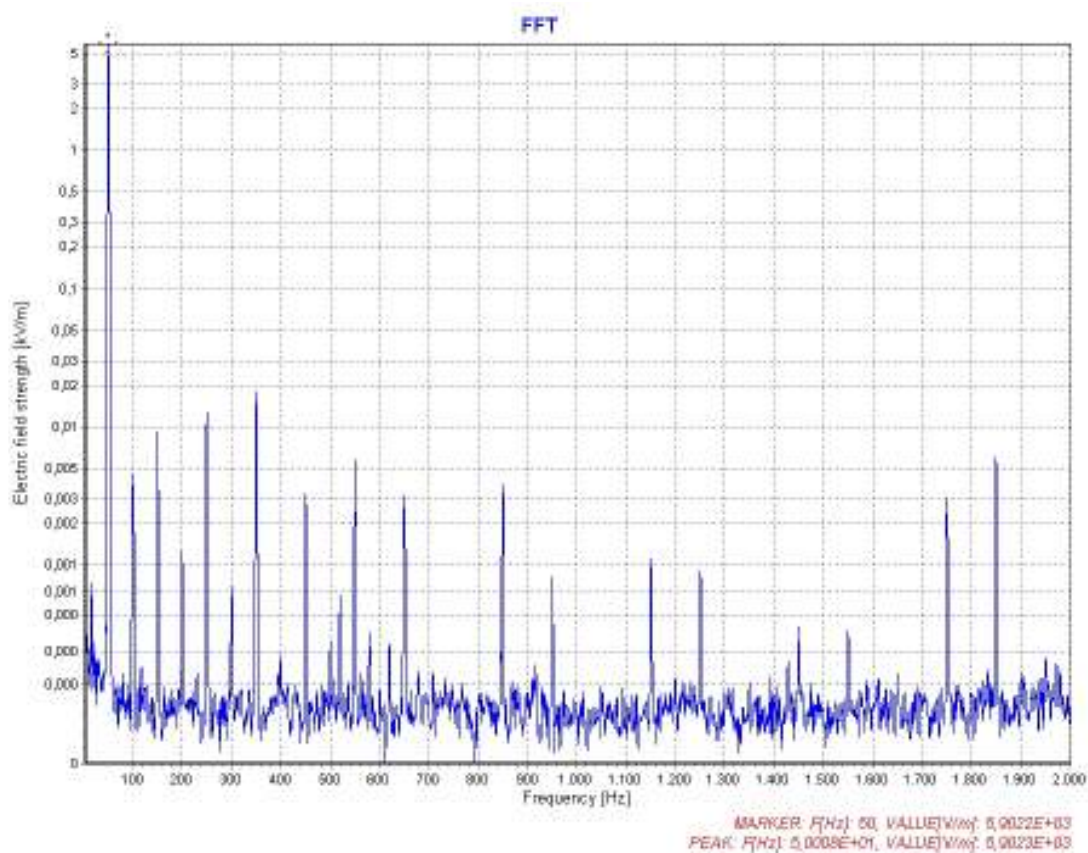


Abbildung 3/20a
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Spektrum der elektrischen Feldstärke, Messweg 1, April

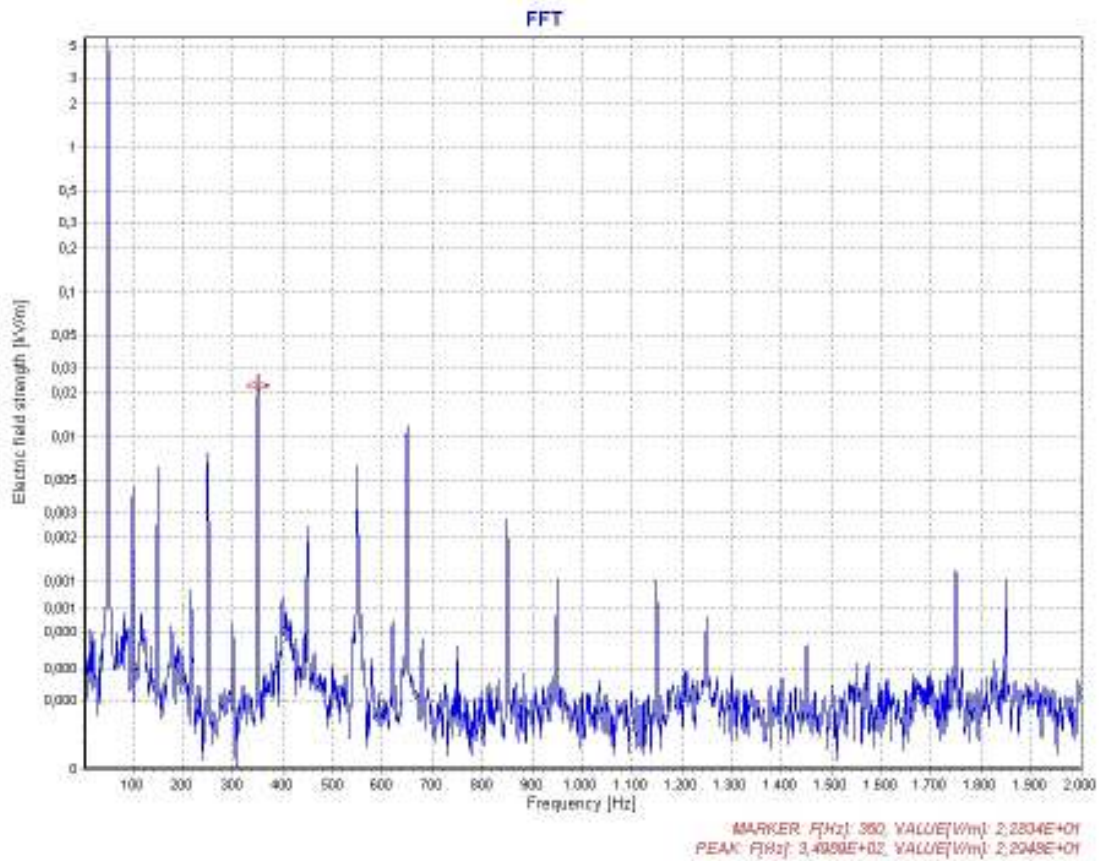


Abbildung 3/20b
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Spektrum der elektrischen Feldstärke, Messweg 1, August

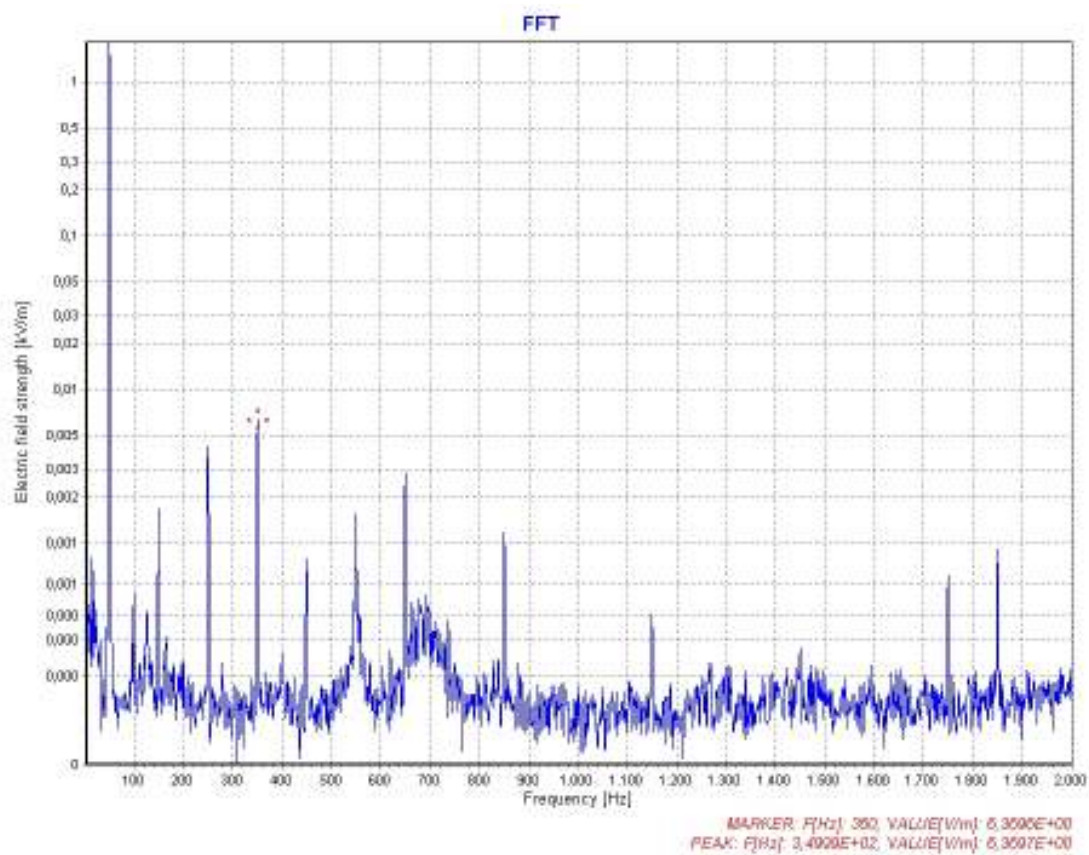


Abbildung 3/20c
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Spektrum der elektrischen Feldstärke, Messweg 2, August

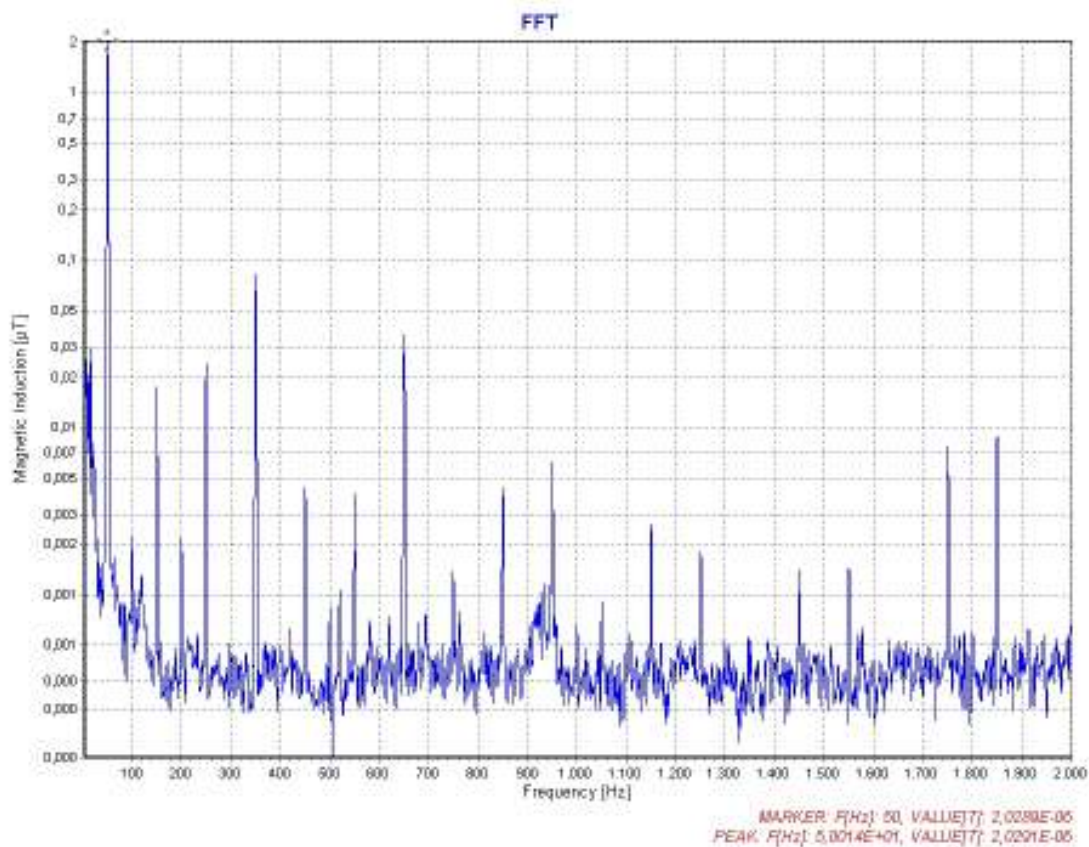


Abbildung 3/21a
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Spektrum der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April

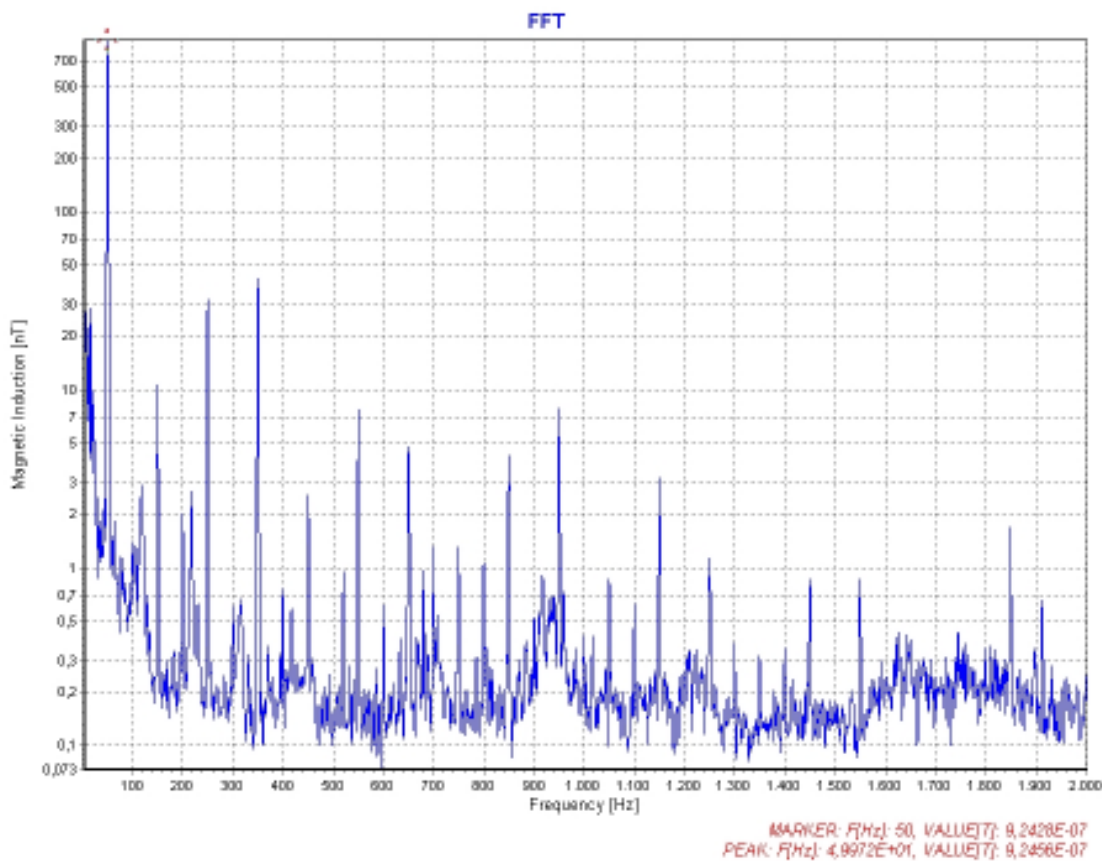


Abbildung 3/21b
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Spektrum der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April

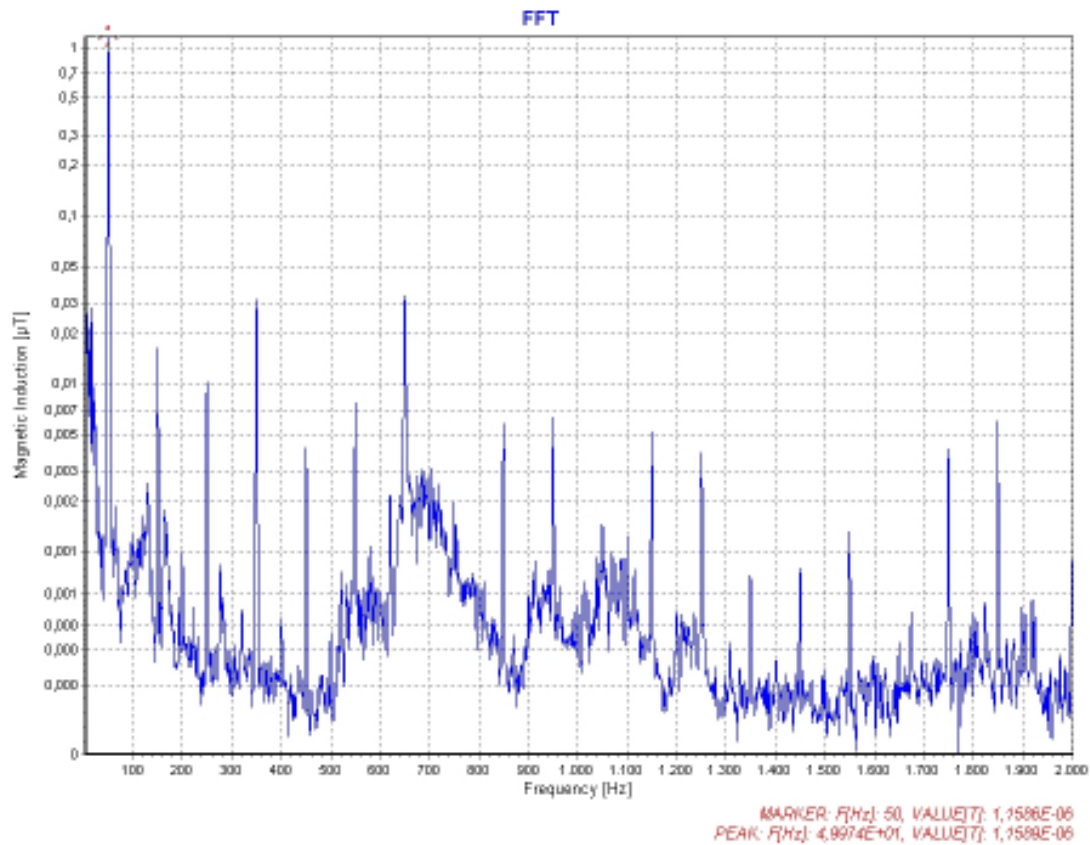


Abbildung 3/22a
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Spektrum der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, August

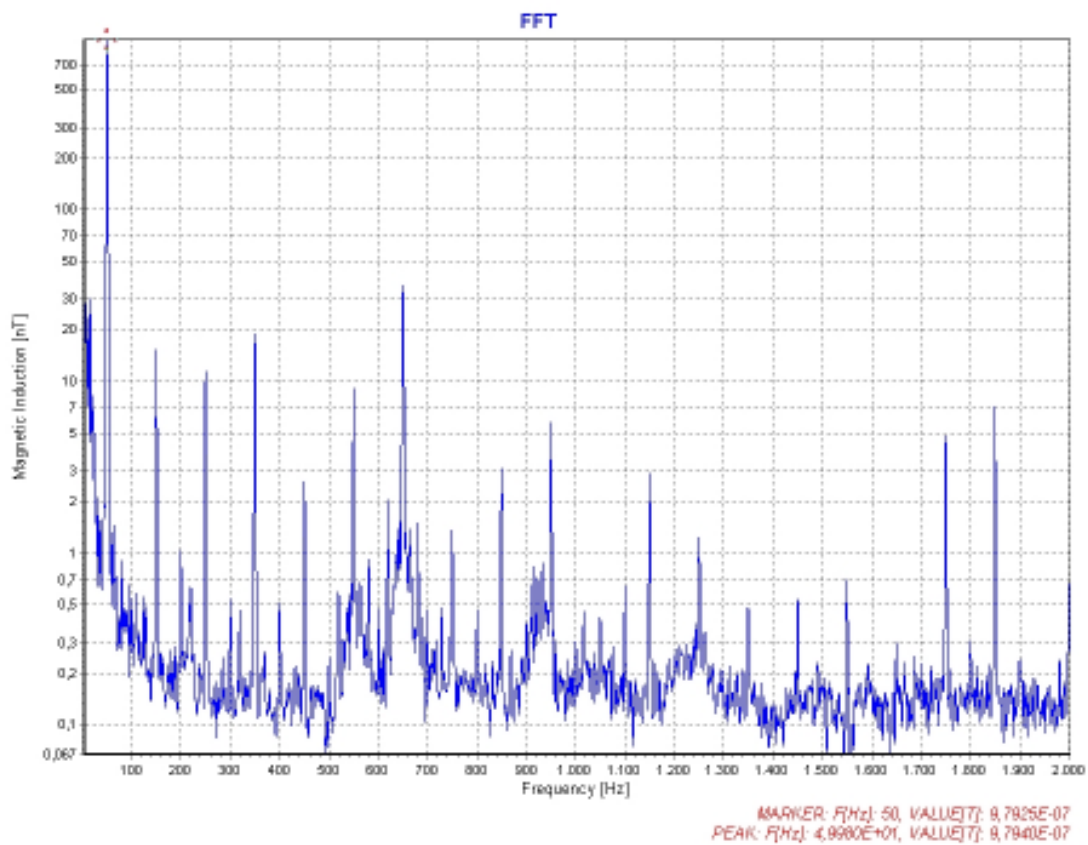


Abbildung 3/22b
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Spektrum der magnetischen Flussdichte, Messweg 2, August

3.1.2.2.4 FL380_3a

Objekt	380 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	01.04.2009, (10:00 – 11:45 Uhr und 13:50 – 14:30 Uhr)				
Winkel des Messweges	16° zur Trassensenkrechten				
(störende) Objekte	nach Süden ab ca. 30 m Gebäude mit Transformator in ca. 5 m Abstand vom Messweg				
Bodenbeschaffenheit	gepflasterter Weg durch ein umgepflühtes Feld, trocken				
Wetterbedingungen	10:30 Uhr: leicht bewölkt, schwach windig, 15 °C, 75 % rel. Feuchte 14:40 Uhr: stärker bewölkt (3/8), mäßiger Wind, 17°C, 69 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [μT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	4,617	3,074	4,059	3,734
	20 m	3,892	3,181	3,139	3,011
50 m	0,748	0,682	0,477	0,374	
Bemerkungen	Kontrollmessung einige Wochen später: Maximalwert im Trassenbereich bei 3,171 μT , verglichen mit 4,617 μT bei der ersten Messung.				



Foto: FL380_3a, Blick von Osten



Luftbild: FL380_3a, 380 kV-Freileitung, der Messweg verläuft am linken Rand des Feldweges, der die Trasse kreuzt

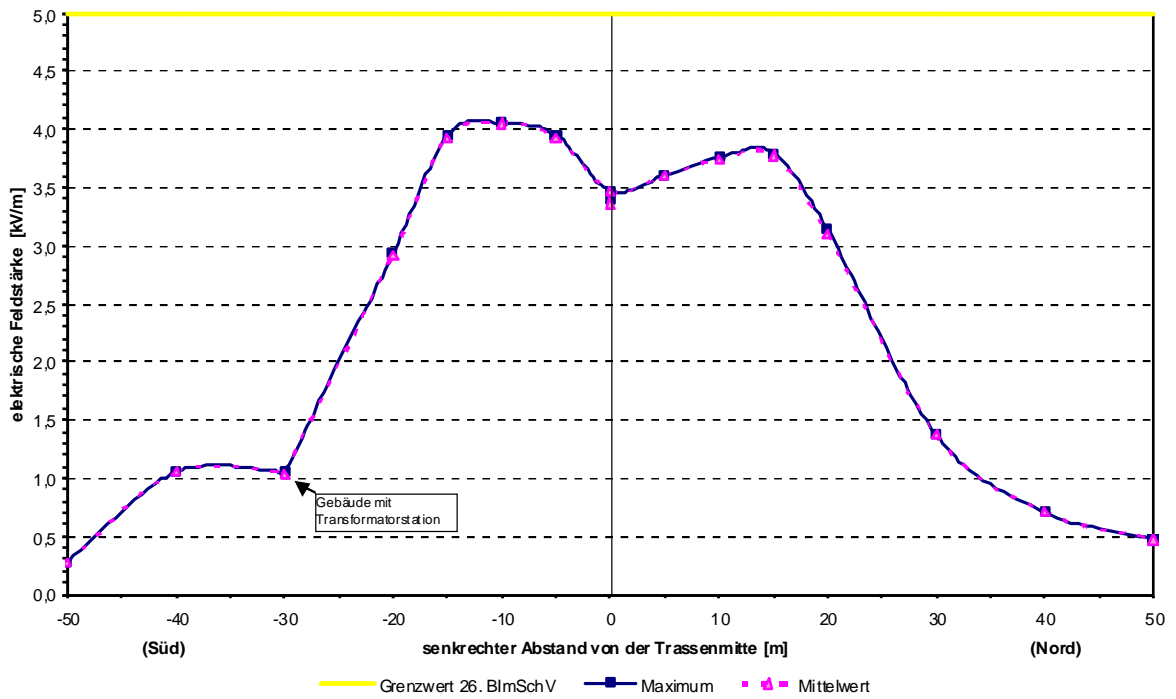


Abbildung 3/23
380 kV-Freileitung, FL380_3a: Querprofil der elektrischen Feldstärke

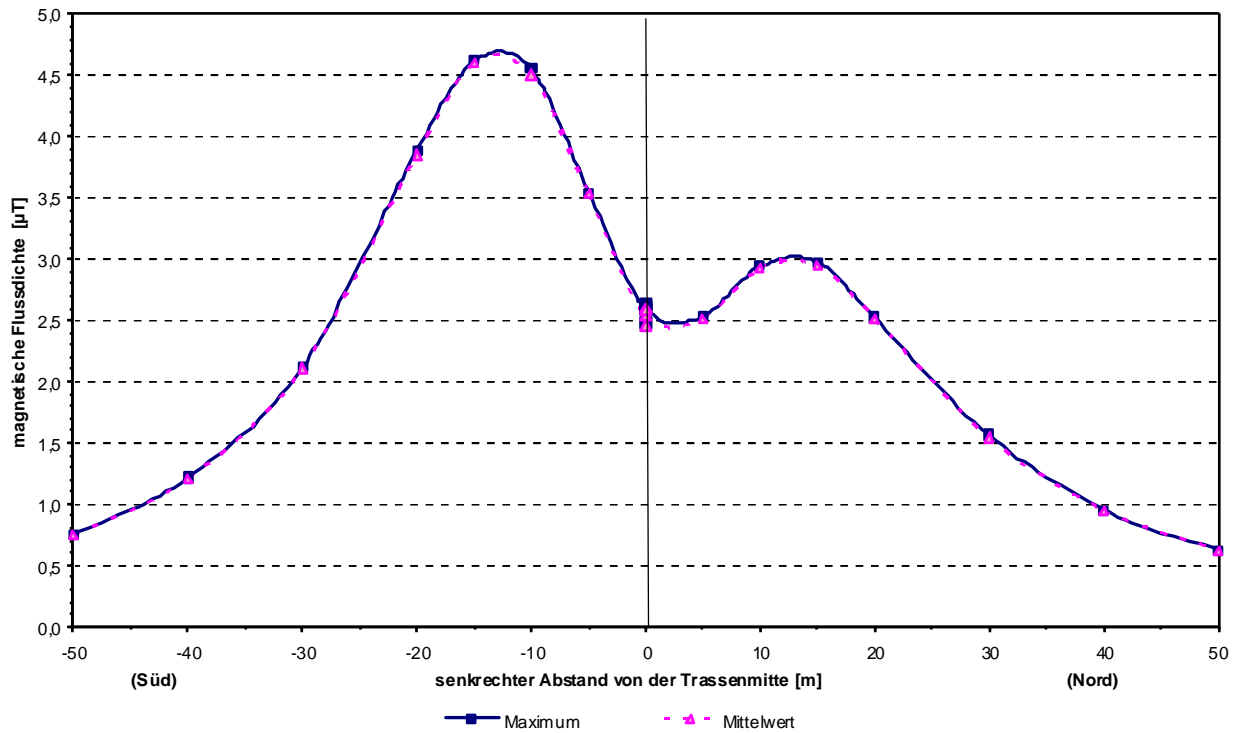


Abbildung 3/24
380 kV-Freileitung, FL380_3a: Querprofil der magnetischen Flussdichte

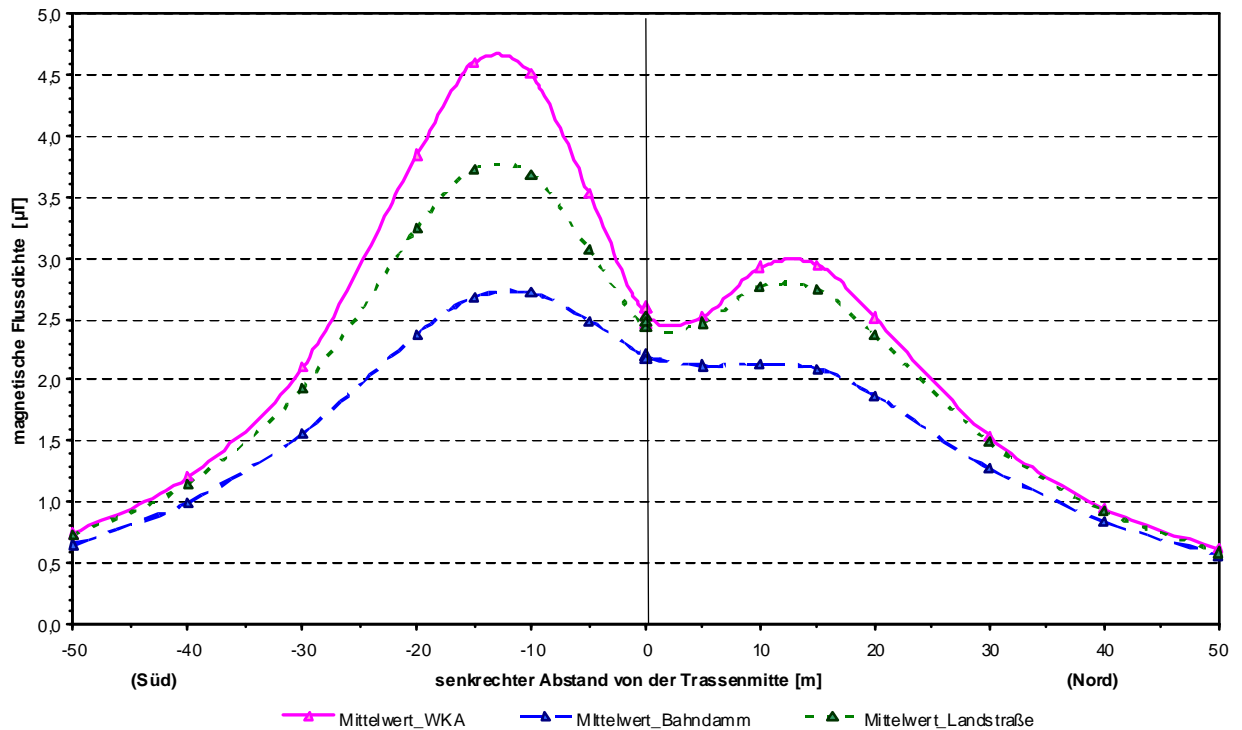


Abbildung 3/25
380 kV-Freileitung, FL380_3a,b,c: Vergleich der Mittelwert-Querprofile der magnetischen Flussdichte von drei verschiedenen Spannungsfeldern derselben Trasse

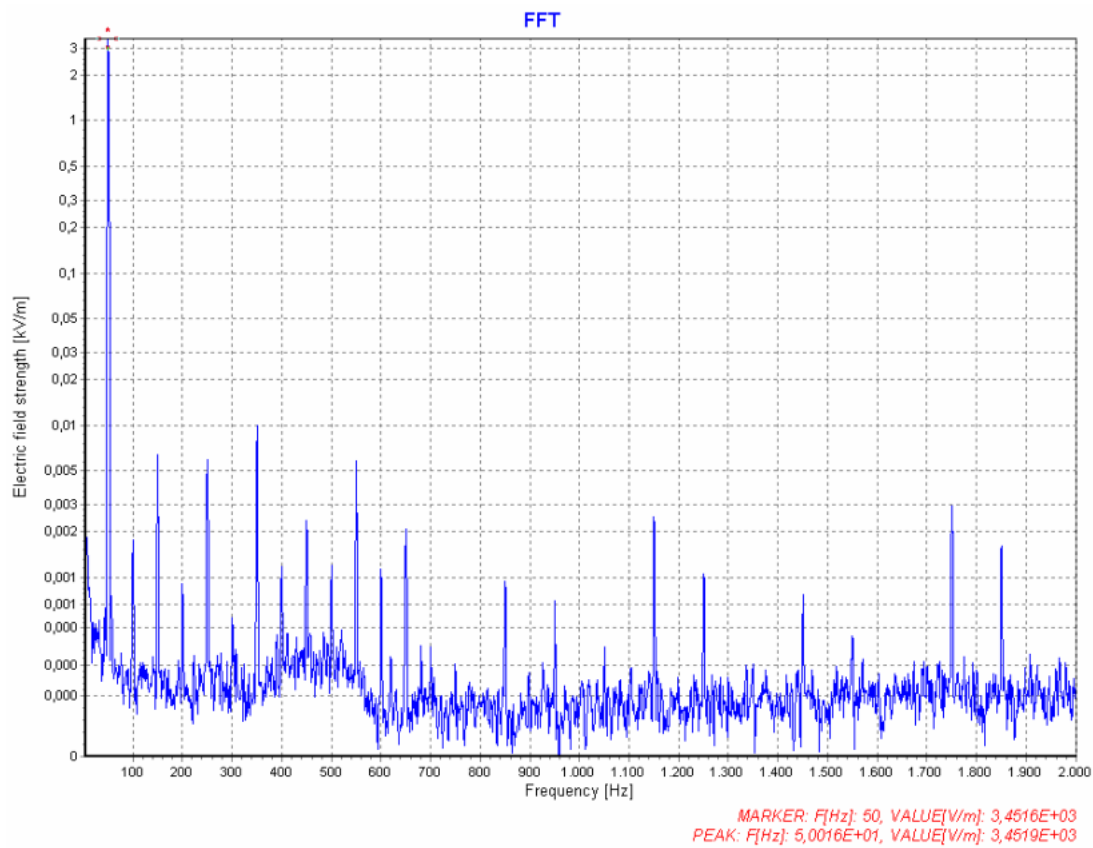


Abbildung 3/26
 380 kV-Freileitung, FL380_3a: Spektrum der elektrischen Feldstärke

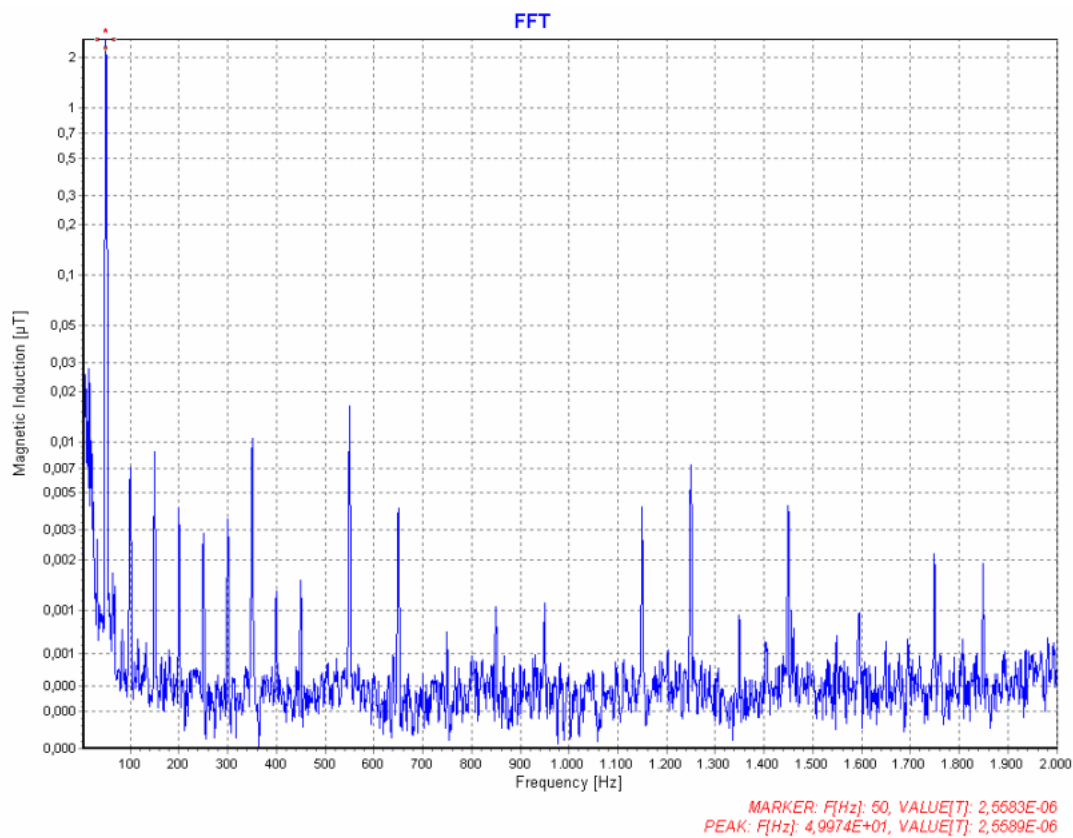


Abbildung 3/27
 380 kV-Freileitung, FL380_3a: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.2.5 FL380_3b

Objekt	380 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	01.04.2009, (12:00 – 12:50 Uhr)				
Winkel des Messweges	Senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	nach Süden ab ca. 40 m Buschreihe ca. 4 m Abstand vom Messweg nach Norden ab ca. 32 m Buschreihe ca. 4 m Abstand vom Messweg				
Bemerkungen	☛				
Bodenbeschaffenheit	Feldweg mit Steinen und Schotter, trocken				
Wetterbedingungen	leicht bewölkt, schwach windig, 15 °C, 71 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	2,730	2,312	2,795	2,713
	20 m	2,387	2,125	2,302	2,248
	50 m	0,657	0,612	0,174	0,150
Bemerkungen	☛				



Foto: FL380_3b, Blick von Süden



Luftbild: FL380_3b, 380 kV-Freileitung, der Messweg verläuft auf einem Feldweg neben dem alten Bahndamm

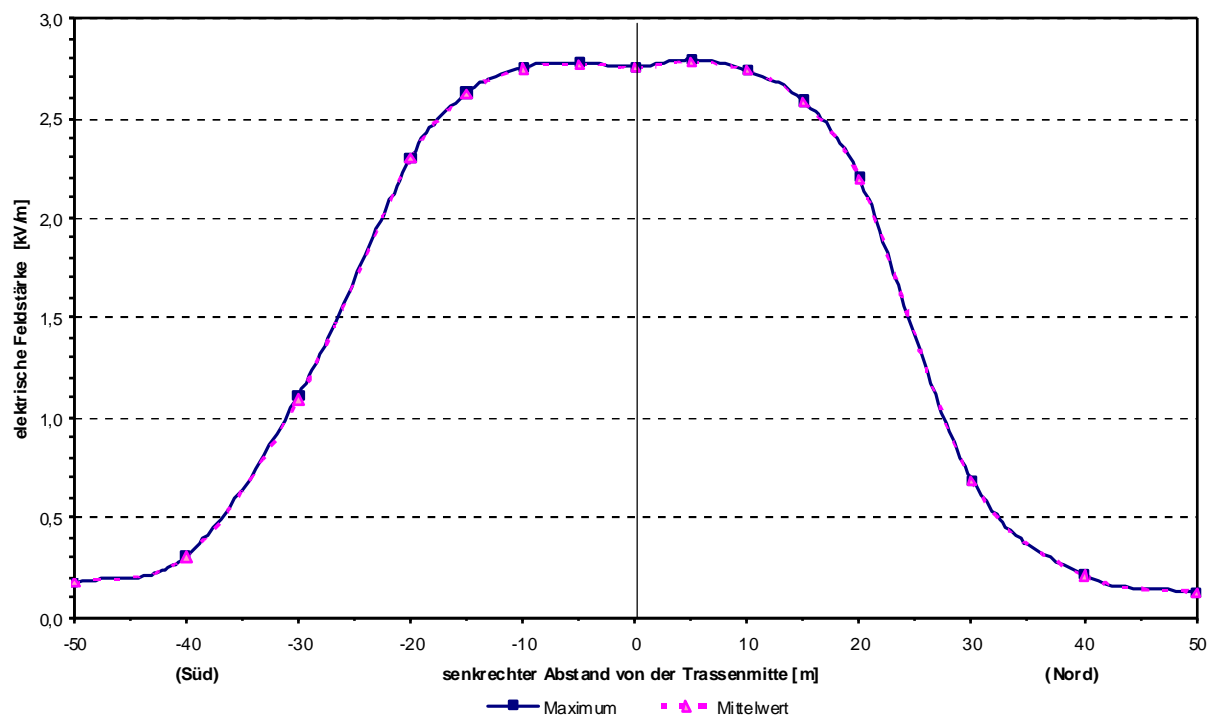


Abbildung 3/28
380 kV-Freileitung, FL380_3b: Querprofil der elektrischen Feldstärke

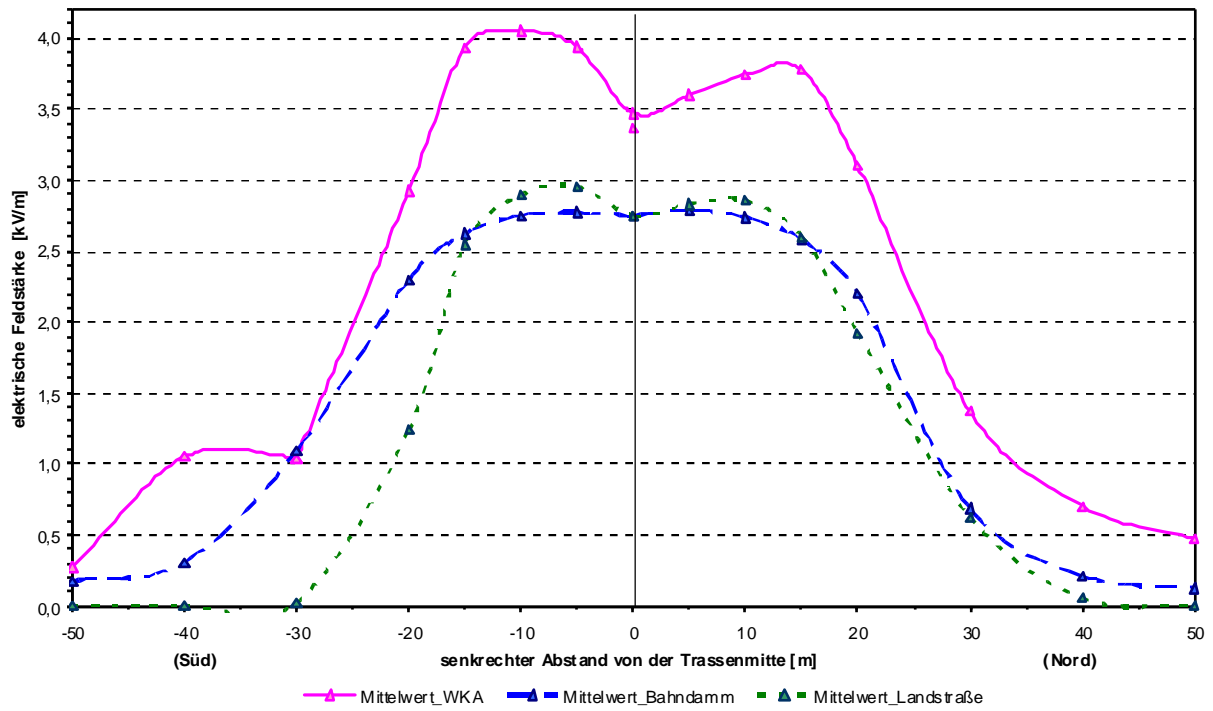


Abbildung 3/29
380 kV-Freileitung, FL380_3a,b,c; Vergleich der Mittelwert-Querprofile der elektrischen Feldstärke von drei verschiedenen Spannungsfeldern derselben Trasse

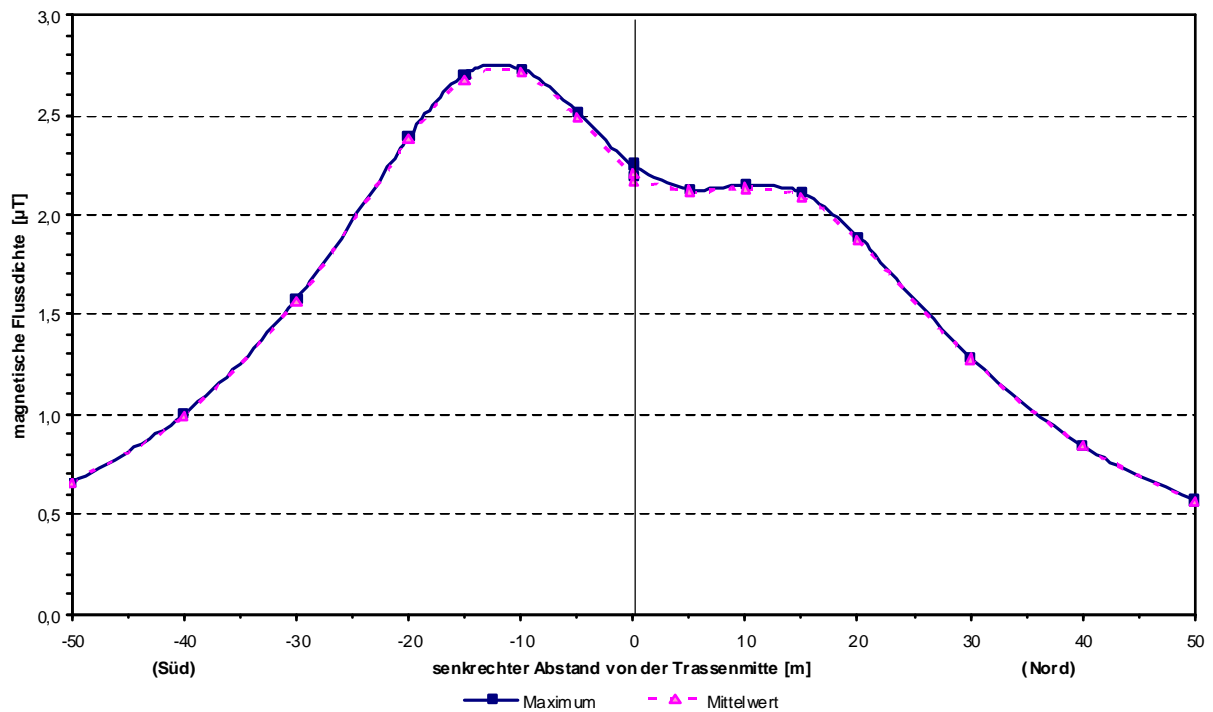


Abbildung 3/30
380 kV-Freileitung, FL380_3b: Querprofil der magnetischen Flussdichte

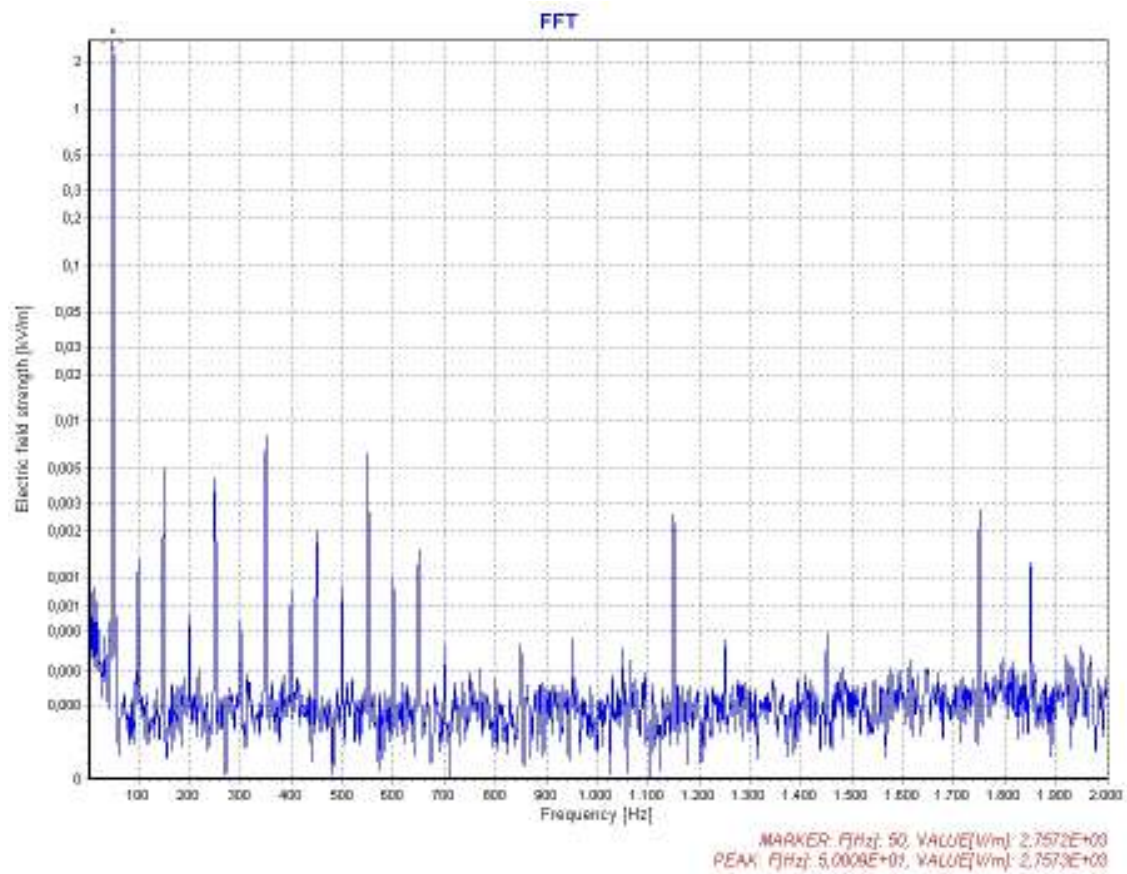


Abbildung 3/31
 380 kV-Freileitung, FL380_3b: Spektrum der elektrischen Feldstärke

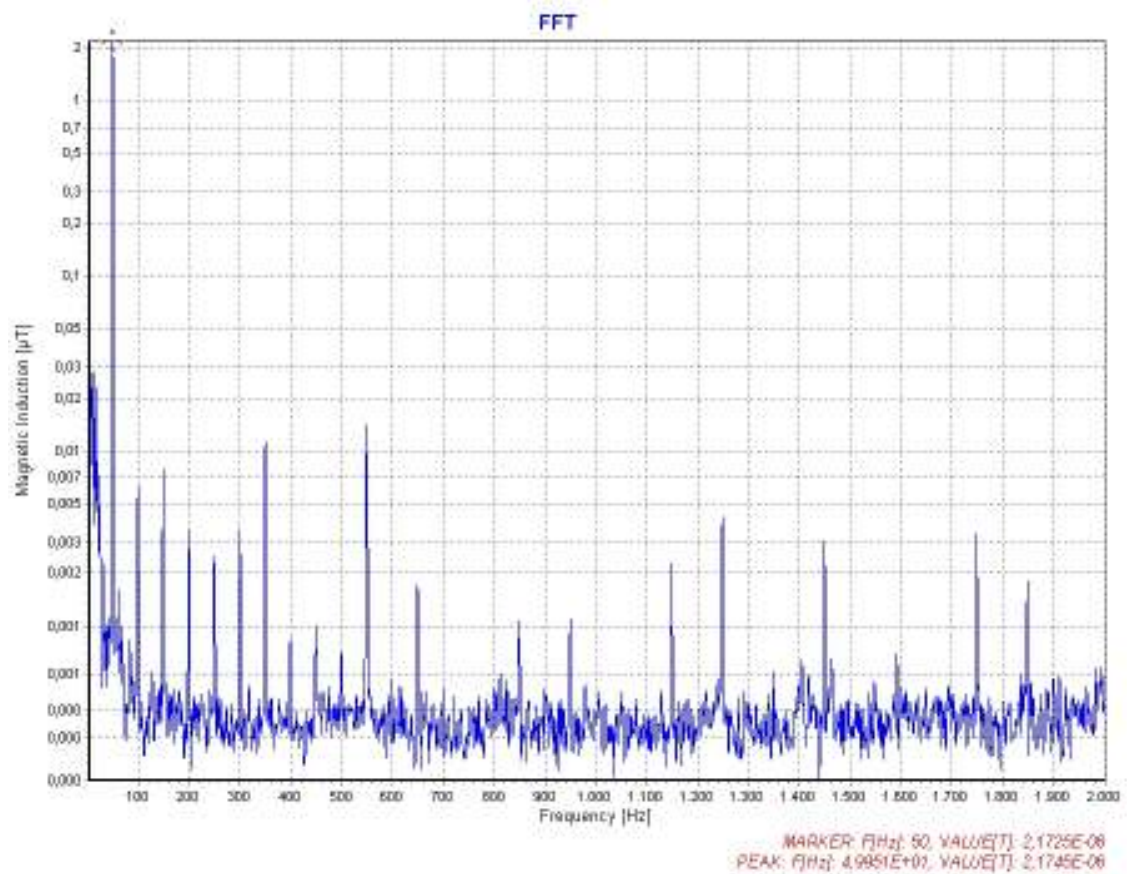


Abbildung 3/32
 380 kV-Freileitung, FL380_3b: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.2.6 FL380_3c

Objekt	380 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	01.04.2009, (15:00 – 16:00 Uhr)				
Winkel des Messweges	6° zur Trassensenkrechten				
(störende) Objekte	Süden: PKW in knapp 2 m Abstand vom 20 m-Messpunkt, ab ca. 25 m Messung in Allee (Bäume ca. 3 m Abstand vom Messweg) Norden: ab ca. 20 m Bäume in ca. 6 m Abstand vom Messweg (andere Straßenseite), ab 45 m Allee (Bäume ca. 3 m Abstand vom Messweg)				
Bemerkungen	☼				
Bodenbeschaffenheit	unbefestigter Straßenrandstreifen, mit Gras, trocken				
Wetterbedingungen	wechselnd bewölkt (4/8), schwach windig, 15 °C, 74 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	3,747	2,880	2,965	2,775
	20 m	3,259	2,804	1,940	1,582
50 m	0,732	0,660	0,007	0,004	
Bemerkungen	☼				



Foto: FL380_3c, Blick von Osten



Luftbild: FL380_3c, 380 kV-Freileitung, der Messweg verläuft am östlichen Straßenrand/Randstreifen

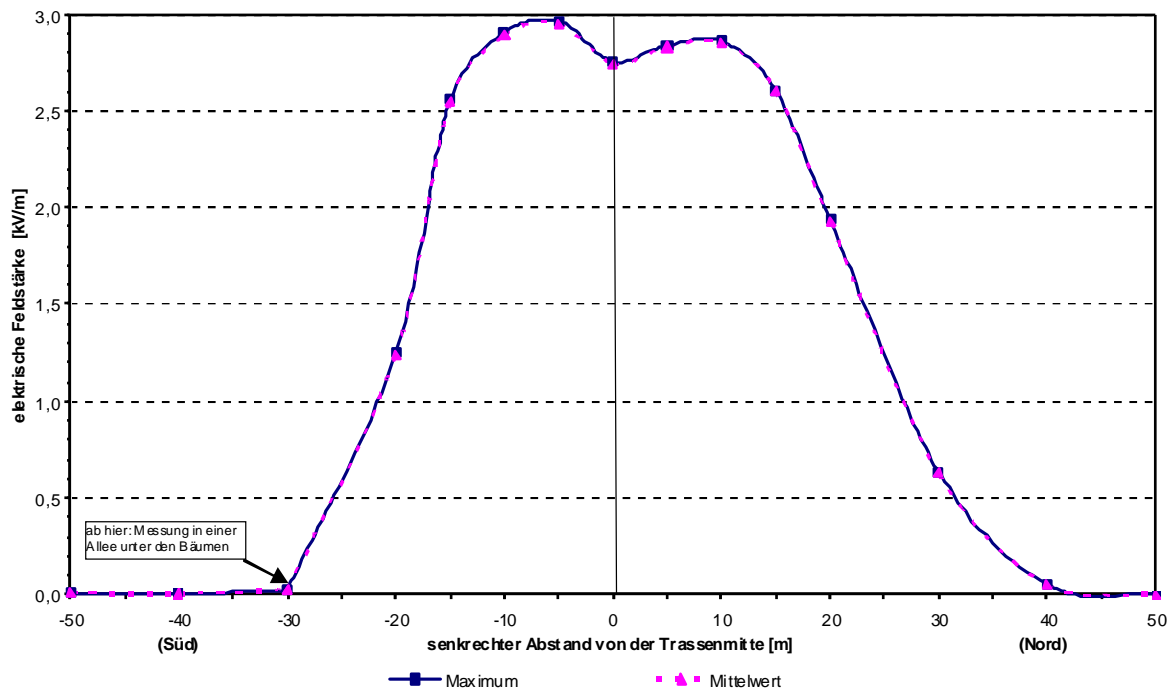


Abbildung 3/33
380 kV-Freileitung, FL380_3c: Querprofil der elektrischen Feldstärke

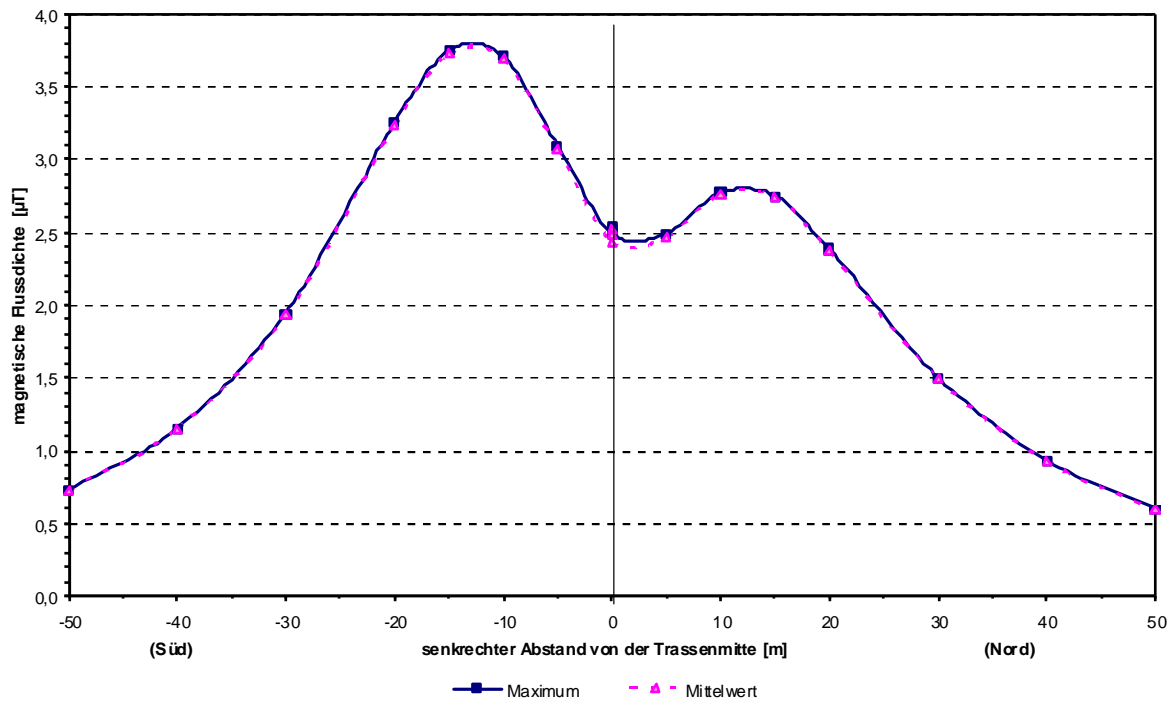


Abbildung 3/34
380 kV-Freileitung, FL380_3c: Querprofil der magnetischen Flussdichte

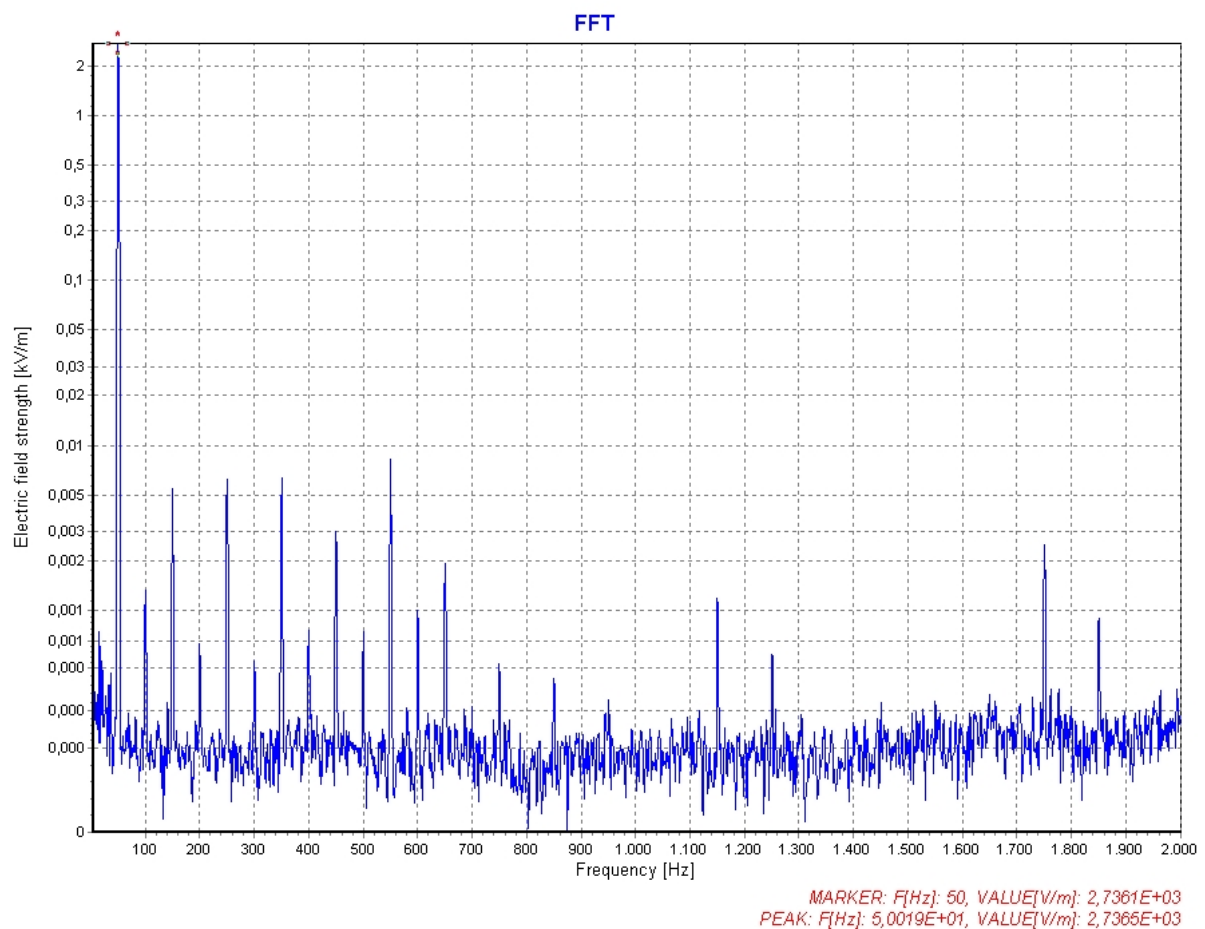


Abbildung 3/35
380 kV-Freileitung, FL380_3c: Spektrum der elektrischen Feldstärke

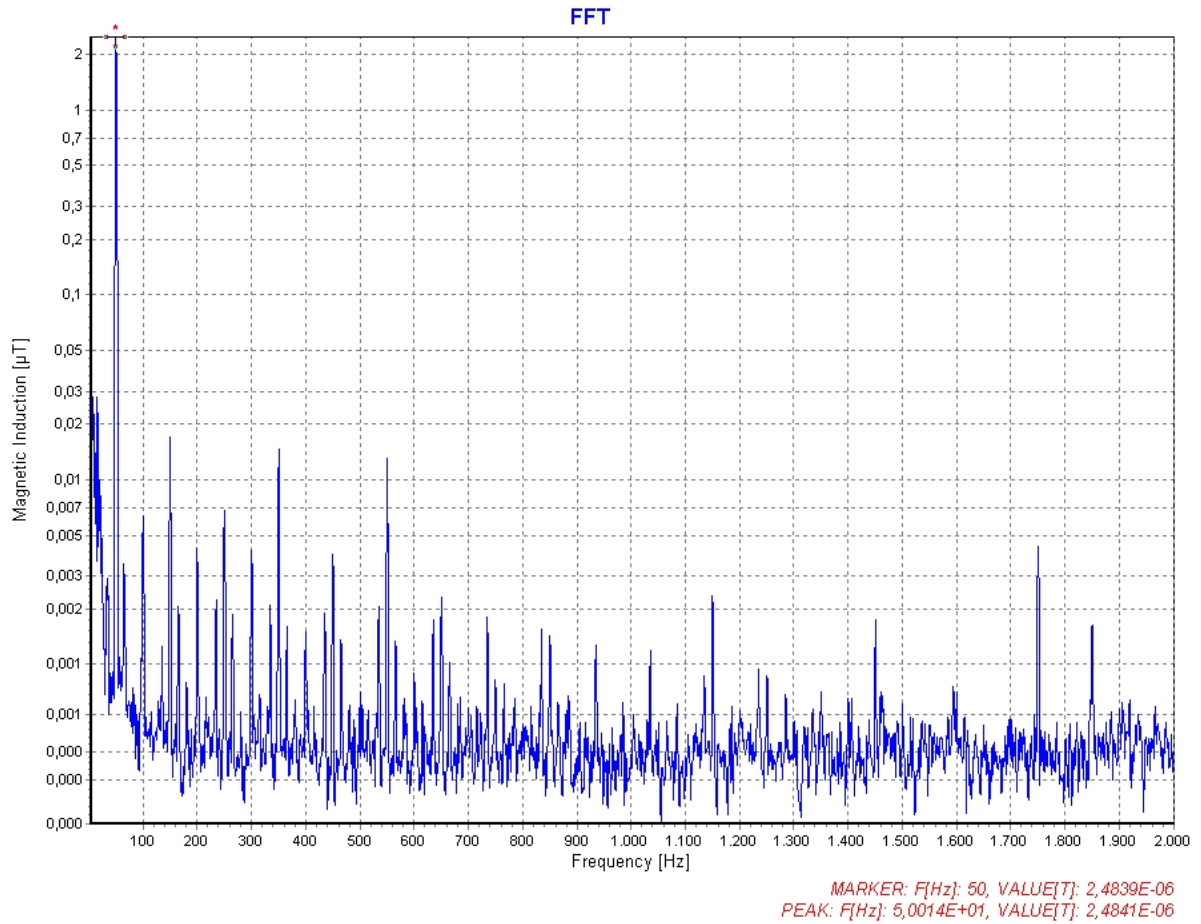


Abbildung 3/36
 380 kV-Freileitung, FL380_3c: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.2.7 FL380_4a

Objekt	380 kV-Freileitung				
Mastbild	Mast 1: Einebene - Mast 2: Donau				
Datum	22.04.2009, (09:45 – 10:45 Uhr)				
Winkel des Messweges	15° zur Trassensenkrechten				
(störende) Objekte	südlich in ca. 180 m Abstand von der Trassenmitte verläuft eine 110 kV-Doppeltrasse				
Bemerkungen	Gelände steigt von Süden (-0,25 m) nach Norden (+0,25 m) etwas an				
Bodenbeschaffenheit	Pfad (0,5 -1,0 m breit) durch ein Getreidefeld (Pflanzen ca. 0,2 m hoch)				
Wetterbedingungen	wenige Federwolken, schwach windig, 20 °C, 63 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	1,725	1,527	1,512	1,350
	20 m	1,673	1,627	1,512	1,470
	50 m	0,693	0,678	0,521	0,498
Bemerkungen	Einebenenmast: Trassenbreite hier 40 m Vergleich: zw. Mast 1 / 2 → Mastbildwechsel zw. Mast 2 / 3 → nur Donaumasten (s. Abs. 3.1.2.2.8)				



Foto: FL380_4a, Blick von Süden



Luftbild: FL380_4a, 380 kV-Freileitung, der Messweg folgt dem Feldweg, der die Trasse kreuzt

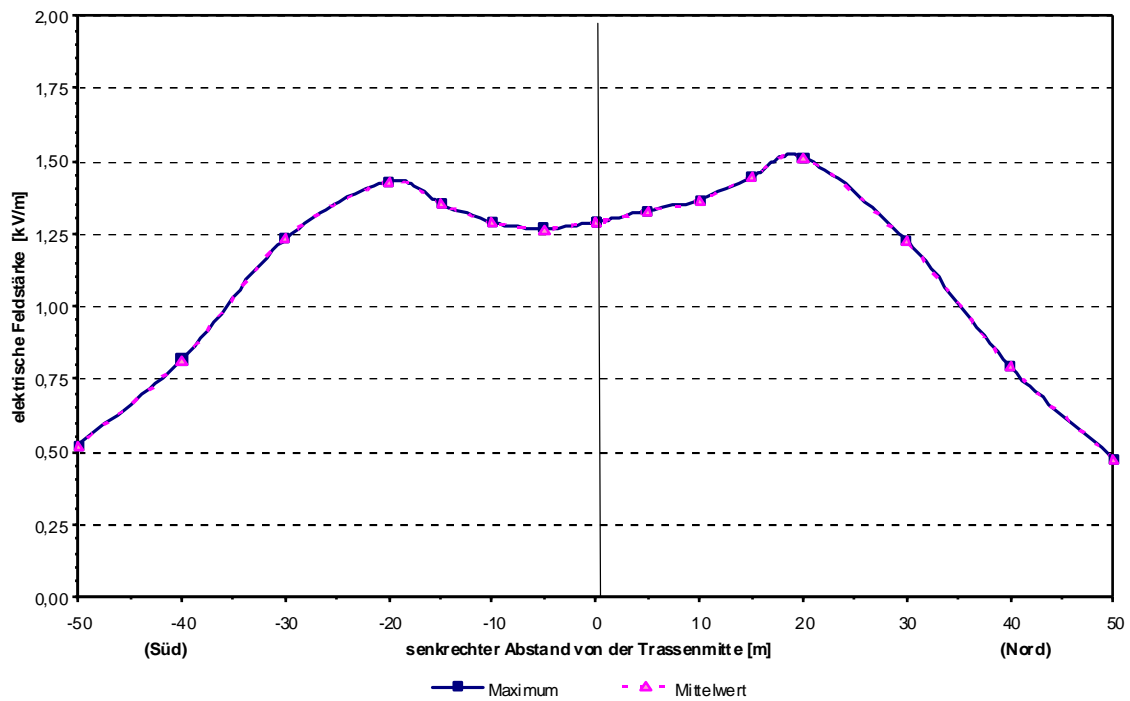


Abbildung 3/37
380 kV-Freileitung, FL380_4a: Querprofil der elektrischen Feldstärke

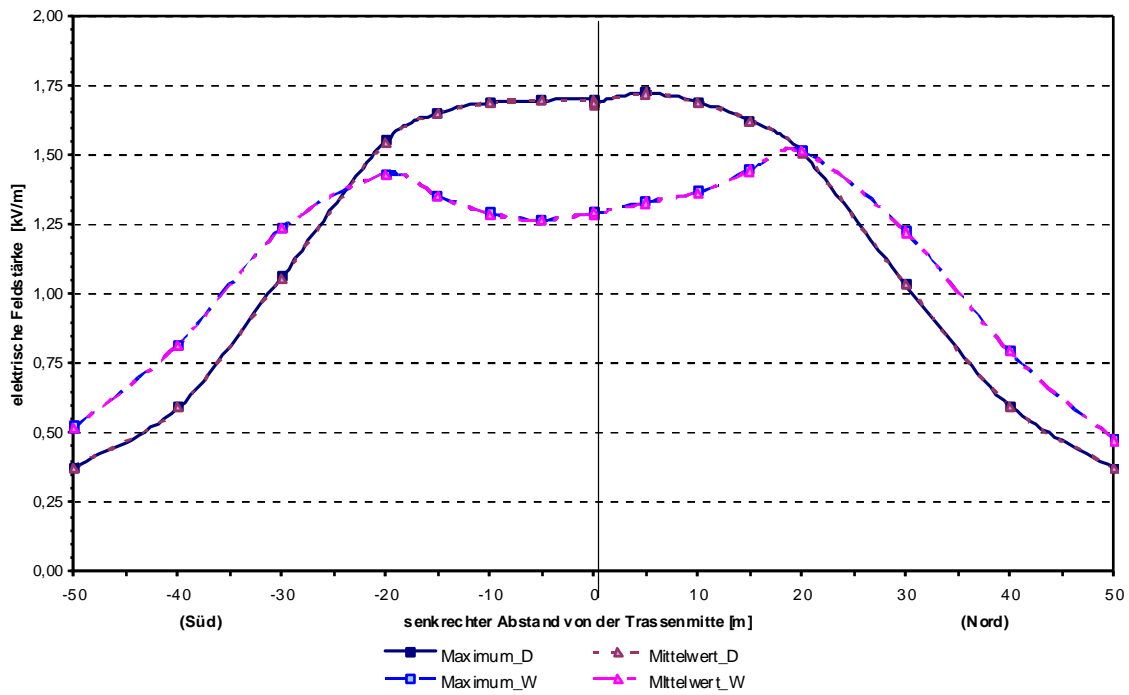


Abbildung 3/38
380 kV-Freileitung, FL380_4a,b: Querprofil der elektrischen Feldstärke,
Vergleich: Donaumast-Abschnitt (D) ↔ Masttypwechsel (W)

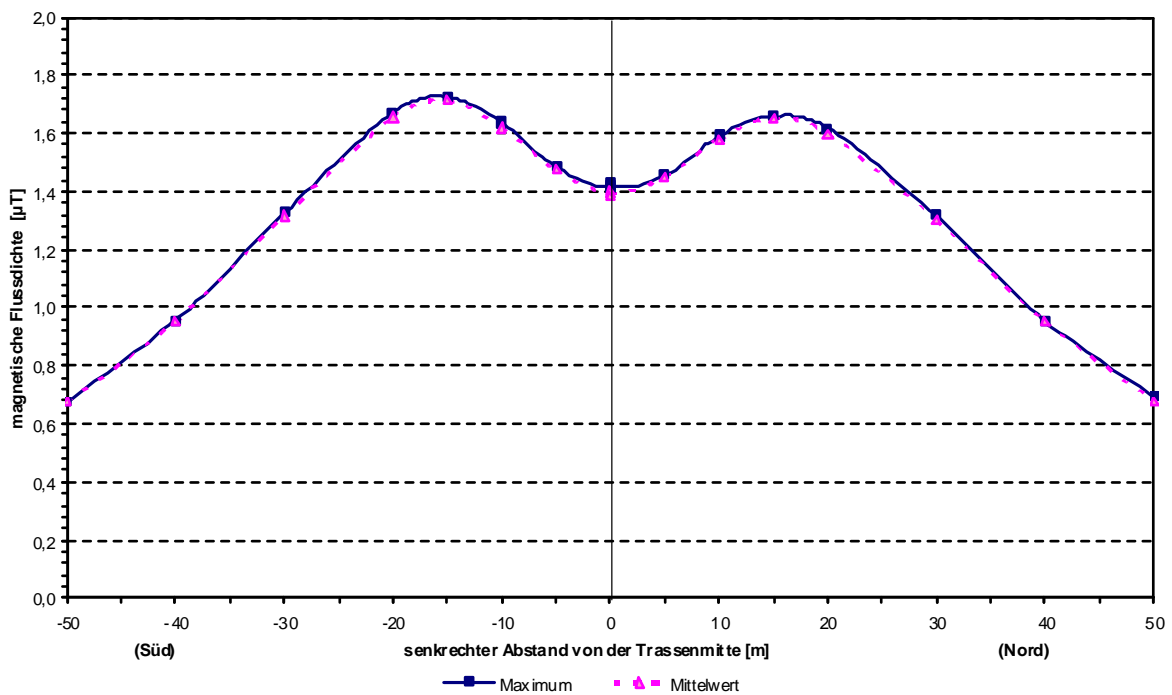


Abbildung 3/39
380 kV-Freileitung, FL380_4a: Querprofil der magnetischen Flussdichte

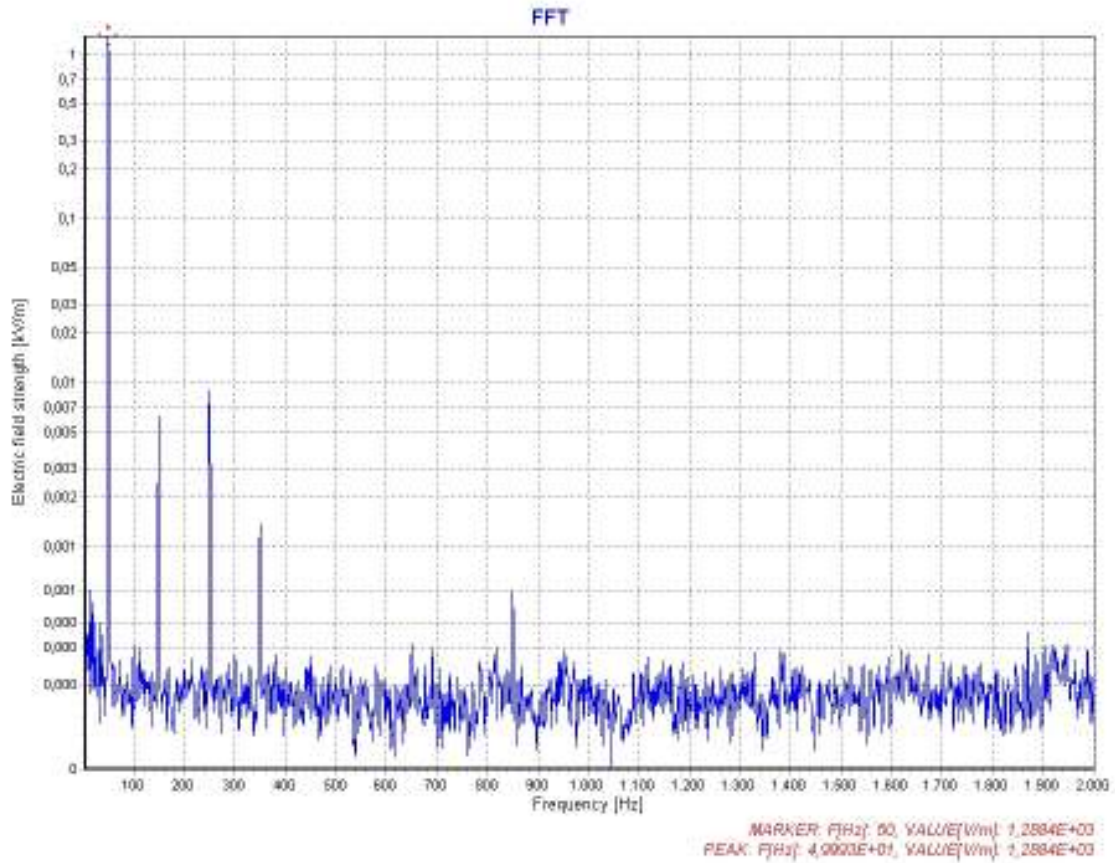


Abbildung 3/40
 380 kV-Freileitung, FL380_4a: Spektrum der elektrischen Feldstärke

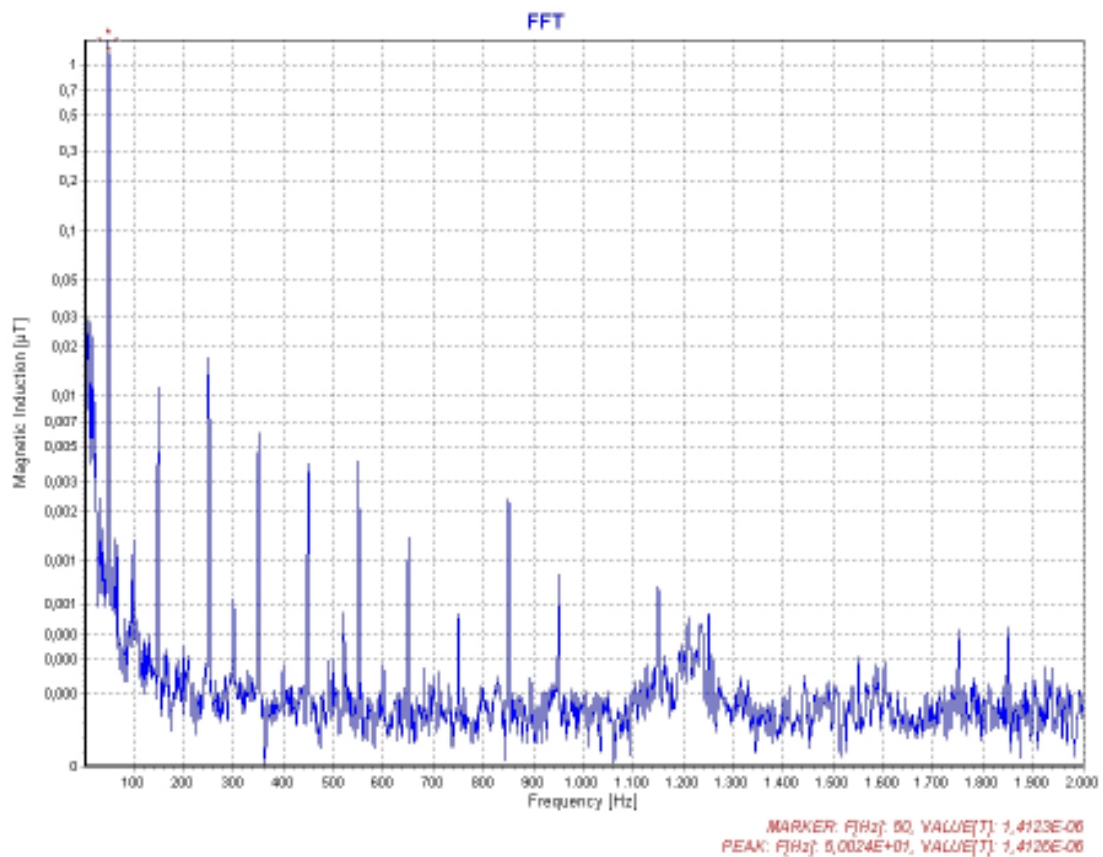


Abbildung 3/41
 380 kV-Freileitung, FL380_4a: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.2.8 FL380_4b

Objekt	380 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	22.04.2009, (09:45 – 10:45 Uhr)				
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	nach Norden und Süden ab ca. 35 m befand sich eine Buschreihe parallel zum Messweg in ca. 4 m Abstand				
Bemerkungen	Gelände steigt nach Süden (+0,5 m) an				
Bodenbeschaffenheit	Feldweg (trocken) mit Grasrandstreifen (dort anfangs etwas Tau)				
Wetterbedingungen	wolkenlos, windstill, 16 °C, 74 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [μT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	1,974	1,790	1,722	1,681
	20 m	1,914	1,877	1,549	1,529
	50 m	0,841	0,824	0,376	0,374
Bemerkungen	Vergleich (s. vorherige Abschnitt 3.1.2.2.7): zw. Mast 1 / 2 → Mastbildwechsel zw. Mast 2 / 3 → nur Donaumasten				
	Der Messweg lag relativ dicht am Mast Nr. 3 (Abstand ca. 45 m). Eine Messung in der Mitte des übernächsten, etwas kürzeren Spannungsfeldes (377 m statt 407 m) ergab dort am Ort des größten Durchhanges ($H_{\min} = 10,1 \text{ m}$, $H_{\text{akt}} \approx 12 \text{ m}$) ein Maximum für die magnetische Flussdichte von 4,791 μT .				



Luftbild: FL380_4b, 380 kV-Freileitung



Foto: FL380_4b, Blick von Süden, der Messweg verläuft auf dem westlichen Rand des Feldweges

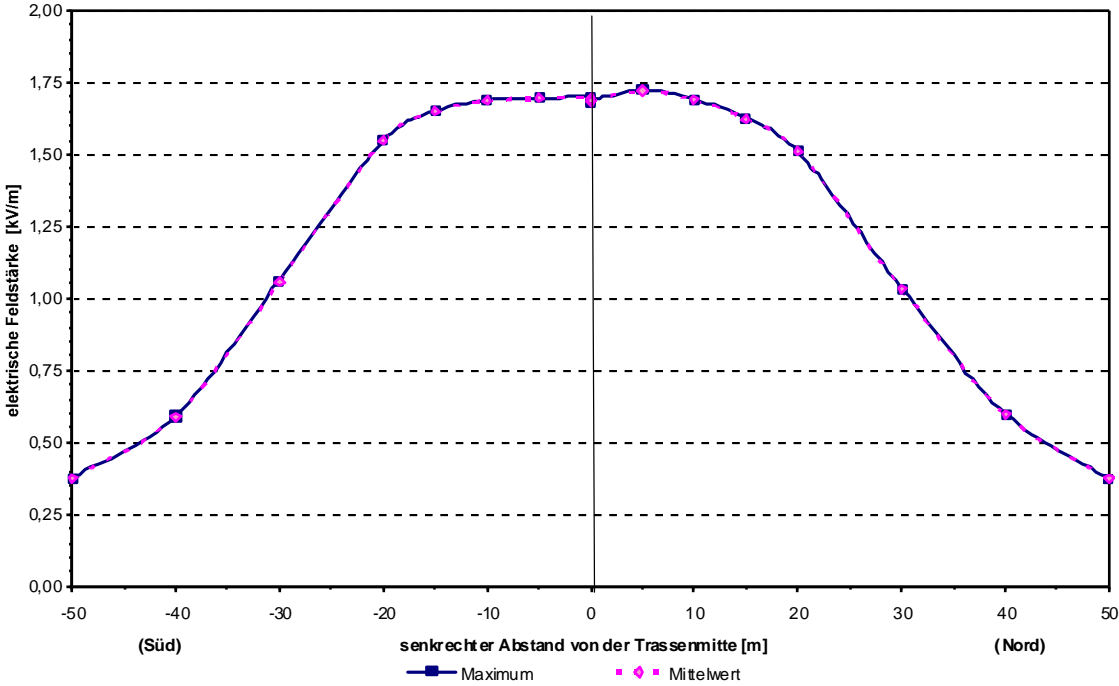


Abbildung 3/42
380 kV-Freileitung, FL380_4b: Querprofil der elektrischen Feldstärke

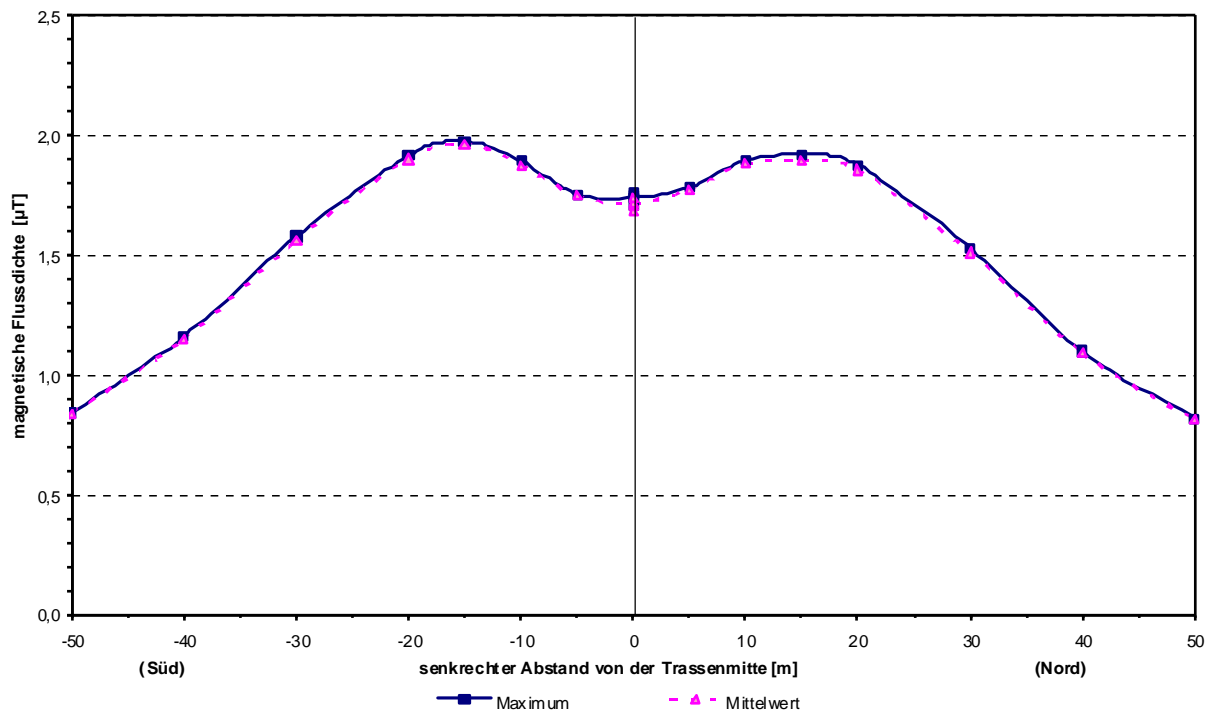


Abbildung 3/43
380 kV-Freileitung, FL380_4b: Querprofil der magnetischen Flussdichte

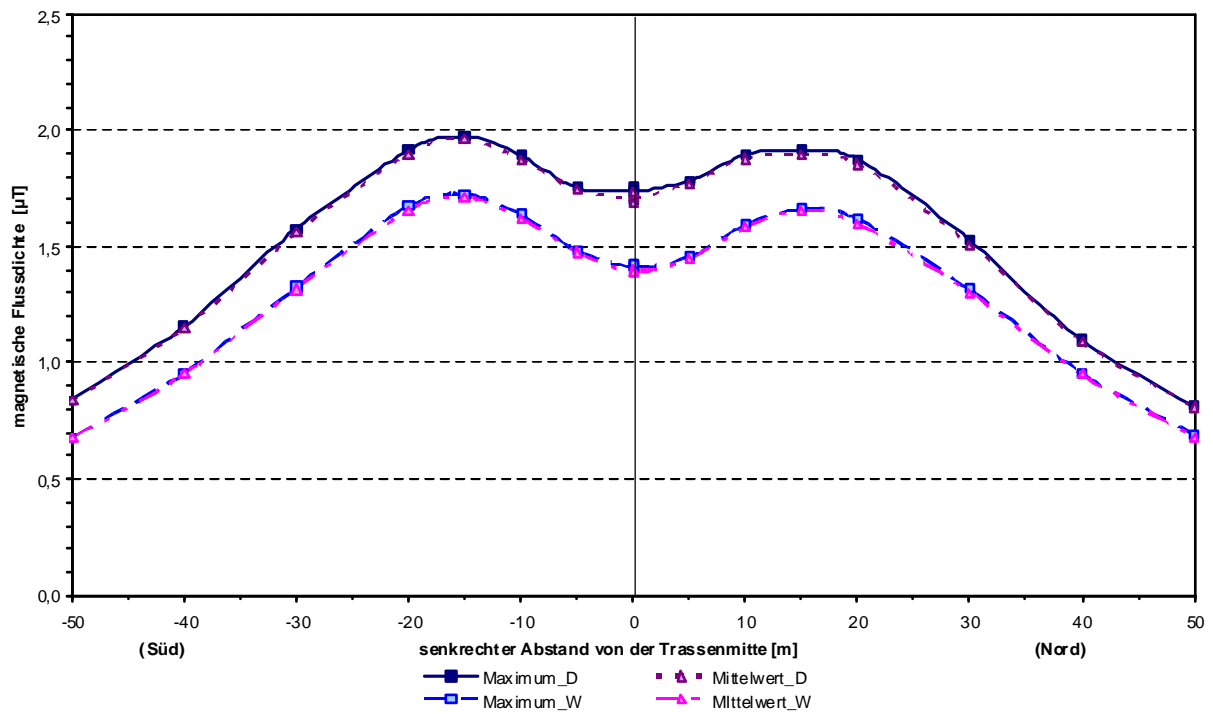


Abbildung 3/44
380 kV-Freileitung, FL380_4a,b: Querprofil der magnetischen Flussdichte,
Vergleich: Donaumast-Abschnitt (D) ↔ Masttypwechsel (W)

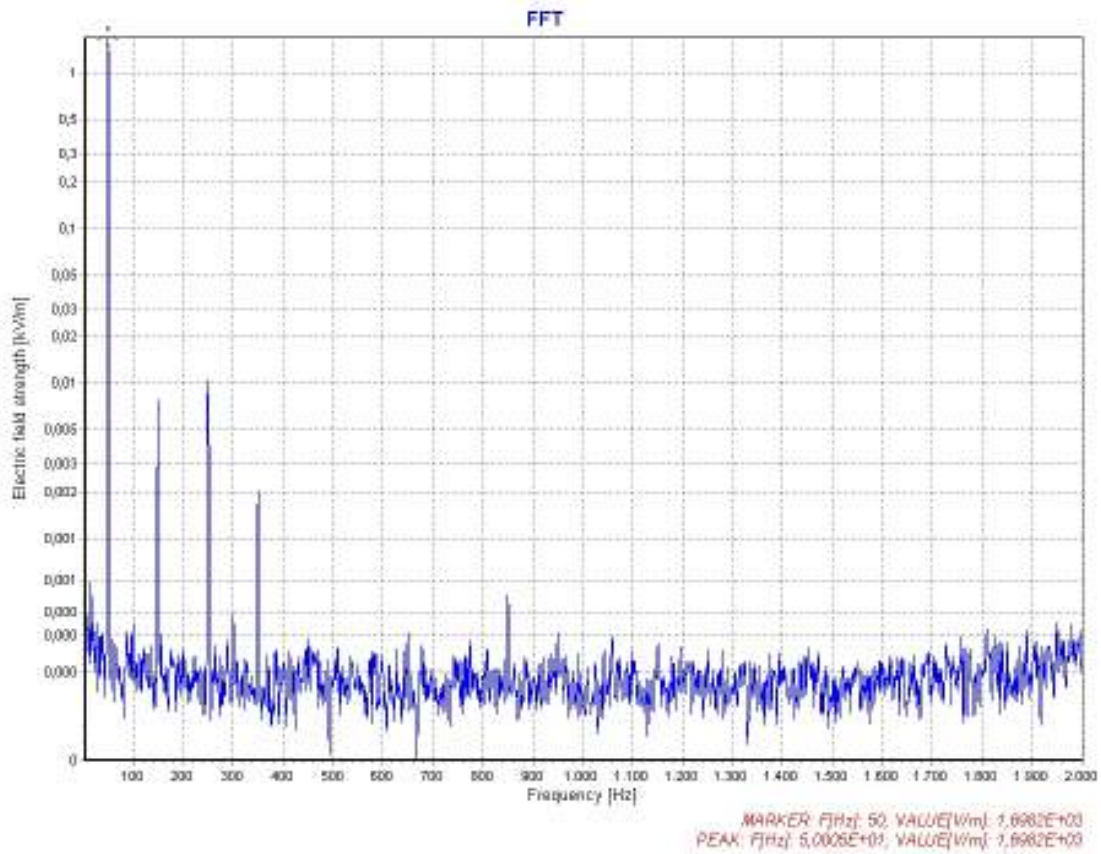


Abbildung 3/45
 380 kV-Freileitung, FL380_4b: Spektrum der elektrischen Feldstärke

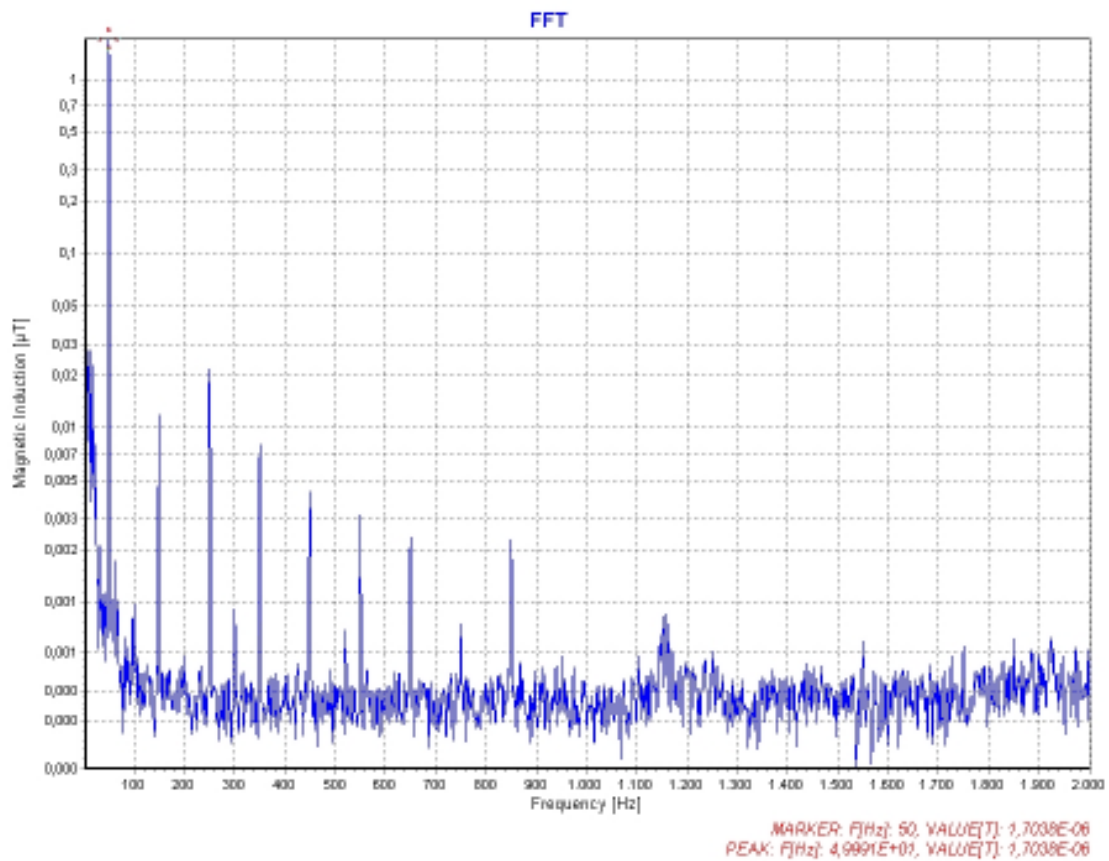


Abbildung 3/46
 380 kV-Freileitung, FL380_4b: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.2.9 FL380_5

Objekt	380 kV-Freileitung				
Mastbild	Mast 1: Donau – Abspannmast (2): Einebene				
Datum	21.04.2009, (12:45 – 13:45 Uhr)				
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	Trassenmitte	größerer Hexelhaufen (2m hoch) neben dem Messpunkt			
	Nord 15 m	Messung 0,4 m höher auf einem Laubhaufen			
	Nord 25 m	Messung ca. 2 m höher auf einem Erdwall			
	Nord 28 m	Normale Höhengniveau, hinter dem Erdwall, vor Büschen			
	Süd 19 m	Feldstein und 4 m hoher, hölzerner Greifvogelsitz			
Bemerkungen	Nord:, ab 15 m nicht mehr begehbar (mehrere Haufen mit Gartenabfällen und Erdwälle), deshalb: ab 10 m zweite parallele Messreihe um 3,5 m versetzt nach Osten (in Richtung zum Abspannmast), größte begehbare Abstand: 28 m (danach: dichte Büsche und Zaun zur Eisenbahnstrecke)				
Bodenbeschaffenheit	Sandboden und Gartenabfälle, z.T. gepflastert (Süd: 50 m), alles trocken				
Wetterbedingungen	wolkenlos, schwach windig, 24 °C, 35 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	0,266	0,182	1,219	1,095
	20 m	0,266	0,227	0,836	0,821
	50 m	0,183	0,163	0,358	0,236
Bemerkungen	Einebenenmast: Trassenbreite hier 40 m Vergleich (s. Abschnitt 3.1.2.5.1): Freileitung ↔ Erdkabel				



Fotos: Messweg, Blick von Südwesten



Abspannmast, südöstlich des Messweges



Luftbild: FL380_5, 380 kV-Freileitung, wegen unbegehrbarer Hindernisse musste der Messweg geteilt werden (Trassenmitte: X)

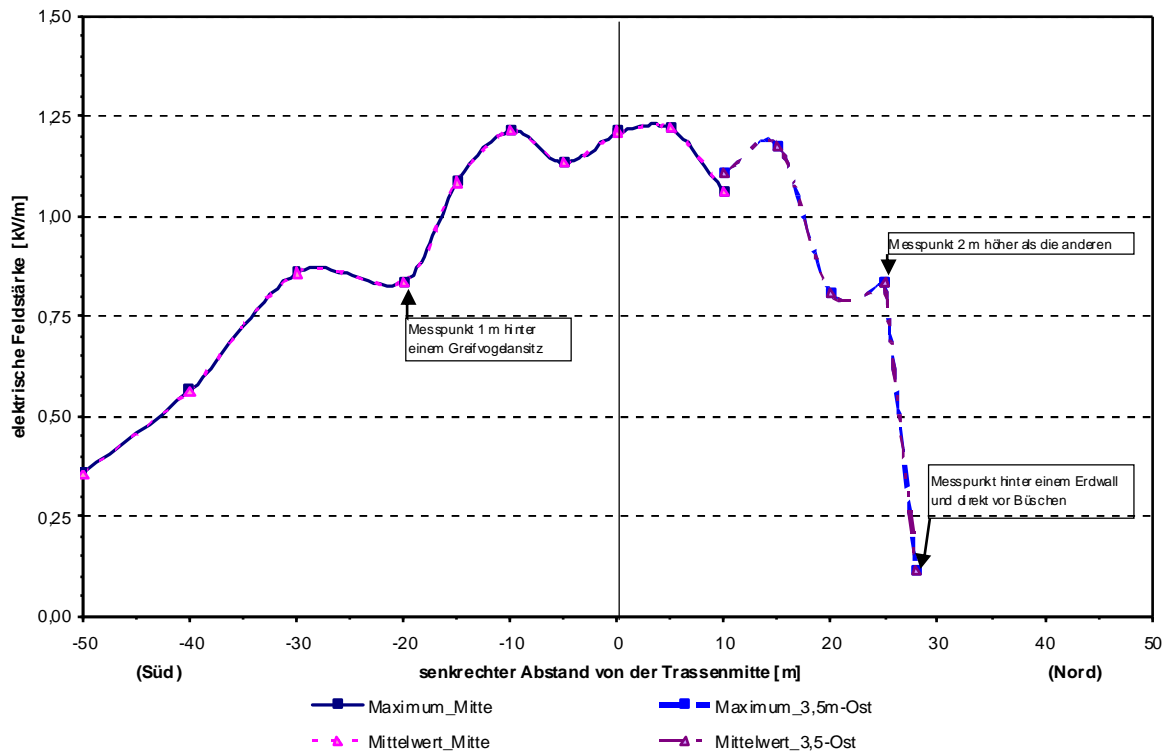


Abbildung 3/47
 380 kV-Freileitung, FL380_5: Querprofil der elektrischen Feldstärke,
 ('_Mitte': Messweg in Trassenmitte, '_3,5m-Ost': 3,5 m nach Osten versetzter Teil des Messweges)

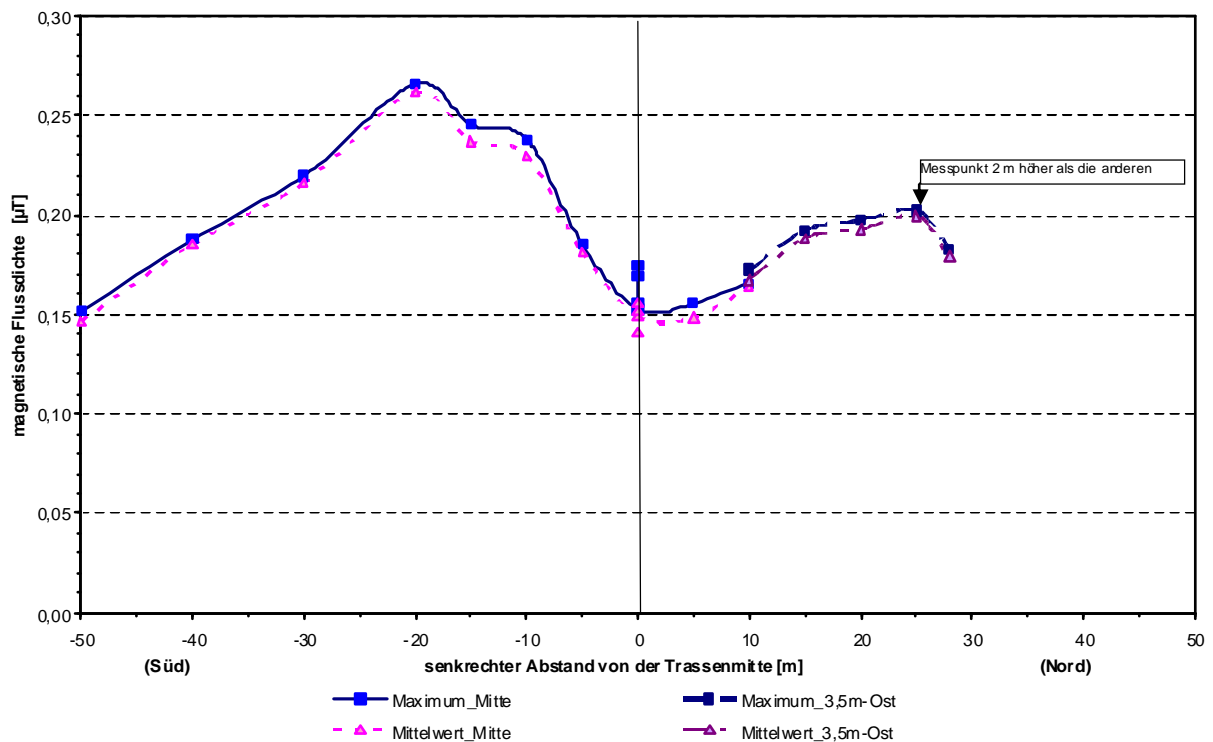


Abbildung 3/48
 380 kV-Freileitung, FL380_5: Querprofil der magnetischen Flussdichte,
 ('_Mitte': Messweg in Trassenmitte, '_3,5m-Ost': 3,5 m nach Osten versetzter Teil des Messweges)

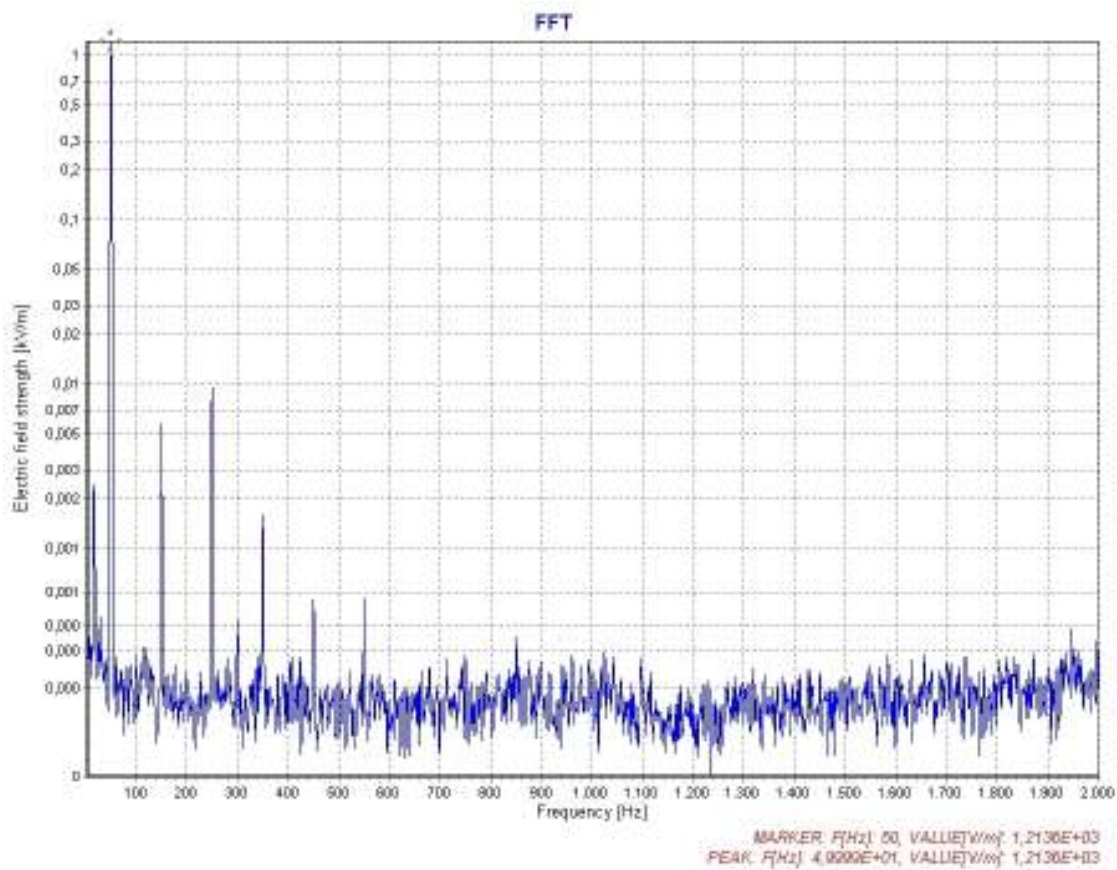


Abbildung 3/49
 380 kV-Freileitung, FL380_5: Spektrum der elektrischen Feldstärke

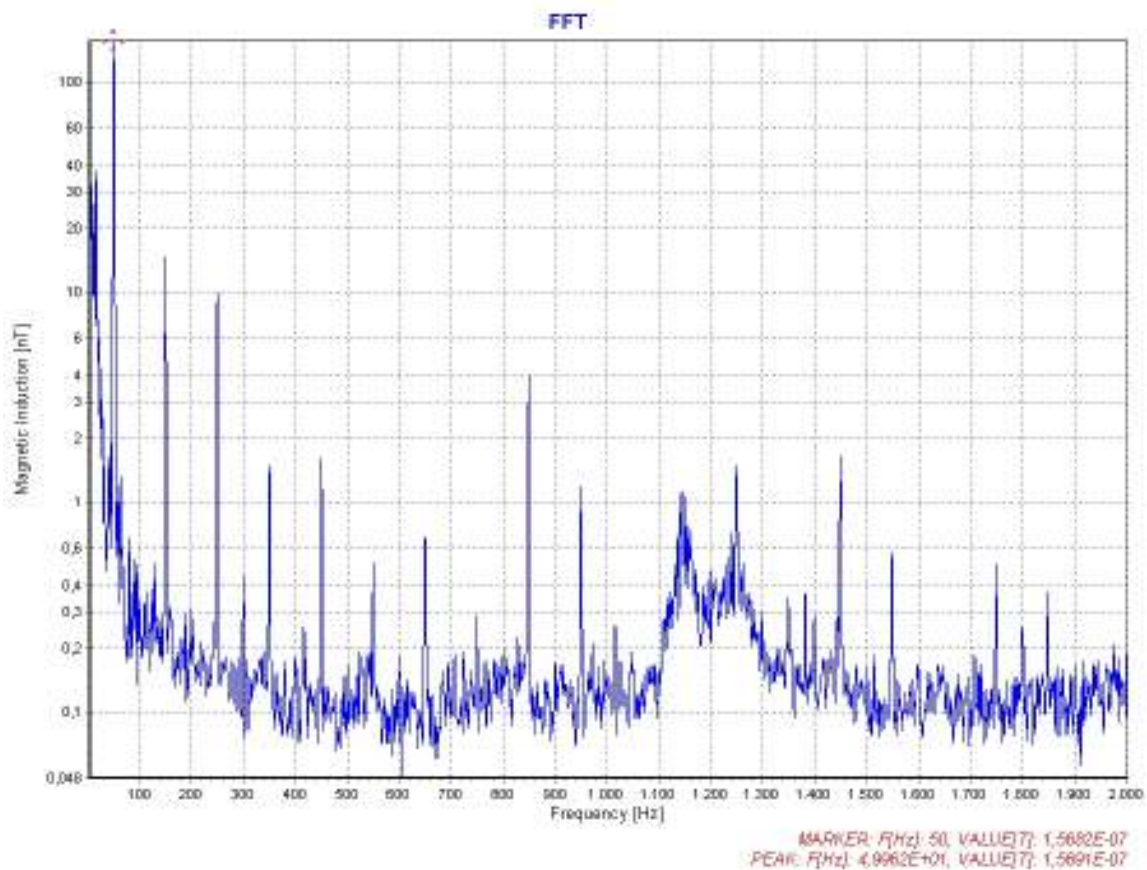


Abbildung 3/50
 380 kV-Freileitung, FL380_5: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.3 Ergebnisse der Messungen an einer 220 kV-Freileitung

FL220_1

Objekt	220 kV-Freileitung				
Mastbild	Einebene				
Datum	22.04.2009, (11:45 – 12:45Uhr)				
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	West: ab 40 m erst hohes Schilfgras, bei 41 m: Baum (~ 30 m hoch)				
Bemerkungen	•/•				
Bodenbeschaffenheit	Wiese, trockenes Gras, leicht feuchter Boden				
Wetterbedingungen	wechselnd bewölkt (6/8), frischer Wind, 15 °C, 78% rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	2,595	1,137	2,594	1,458
	20 m	1,385	0,760	2,527	1,283
	50 m	0,117	0,083	0,133	0,066
Bemerkungen	Einebenenmast: Trassenbreite hier 40 m Zur Zeit der Messung stand nur ein System, das auf der östlichen Seite, unter Spannung und war aktiv.				



Foto: FL220_1, Blick von Norden



Luftbild: FL220_1, 220 kV-Freileitung

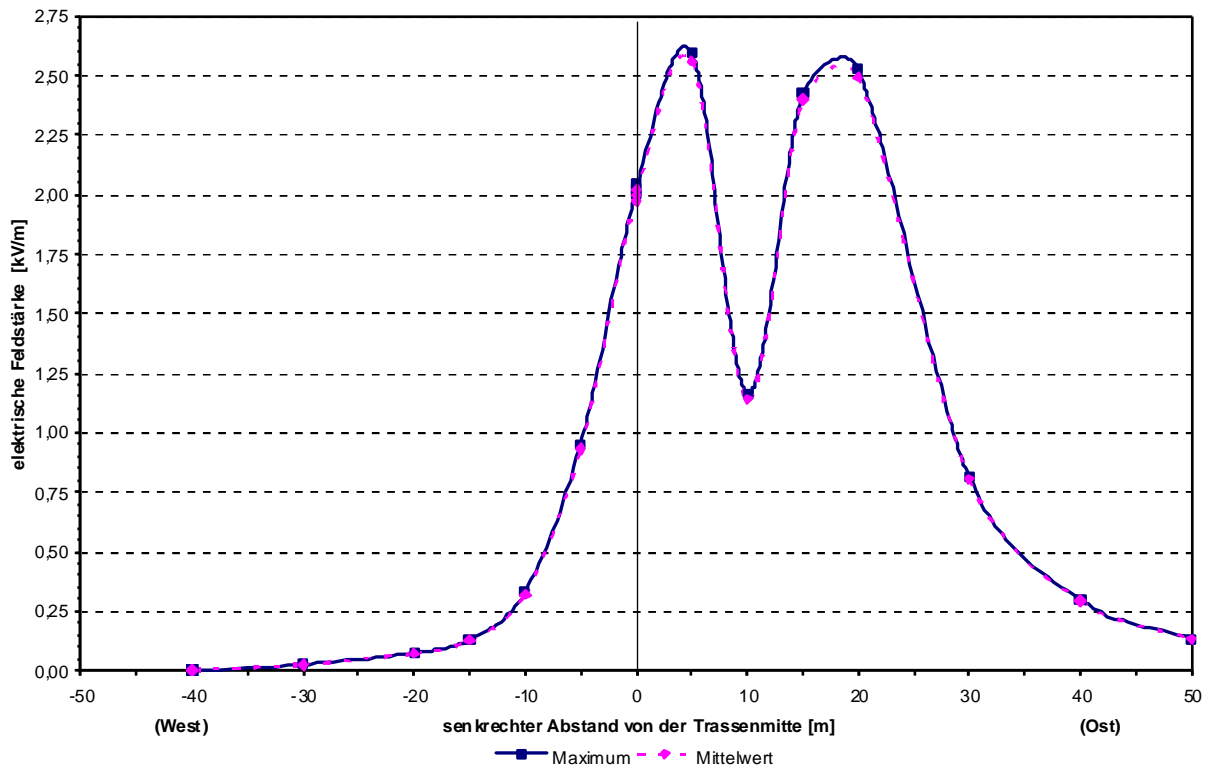


Abbildung 3/51
220 kV-Freileitung, FL220_1: Querprofil der elektrischen Feldstärke

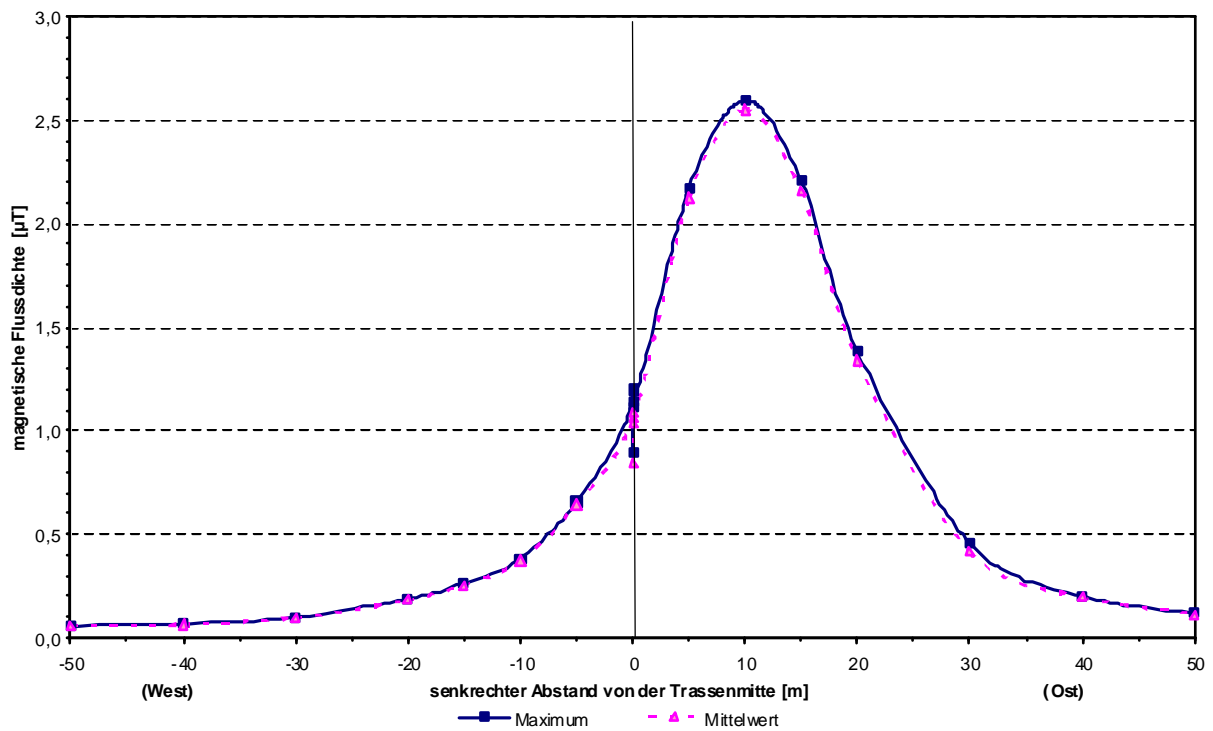


Abbildung 3/52
220 kV-Freileitung, FL220_1: Querprofil der magnetischen Flussdichte

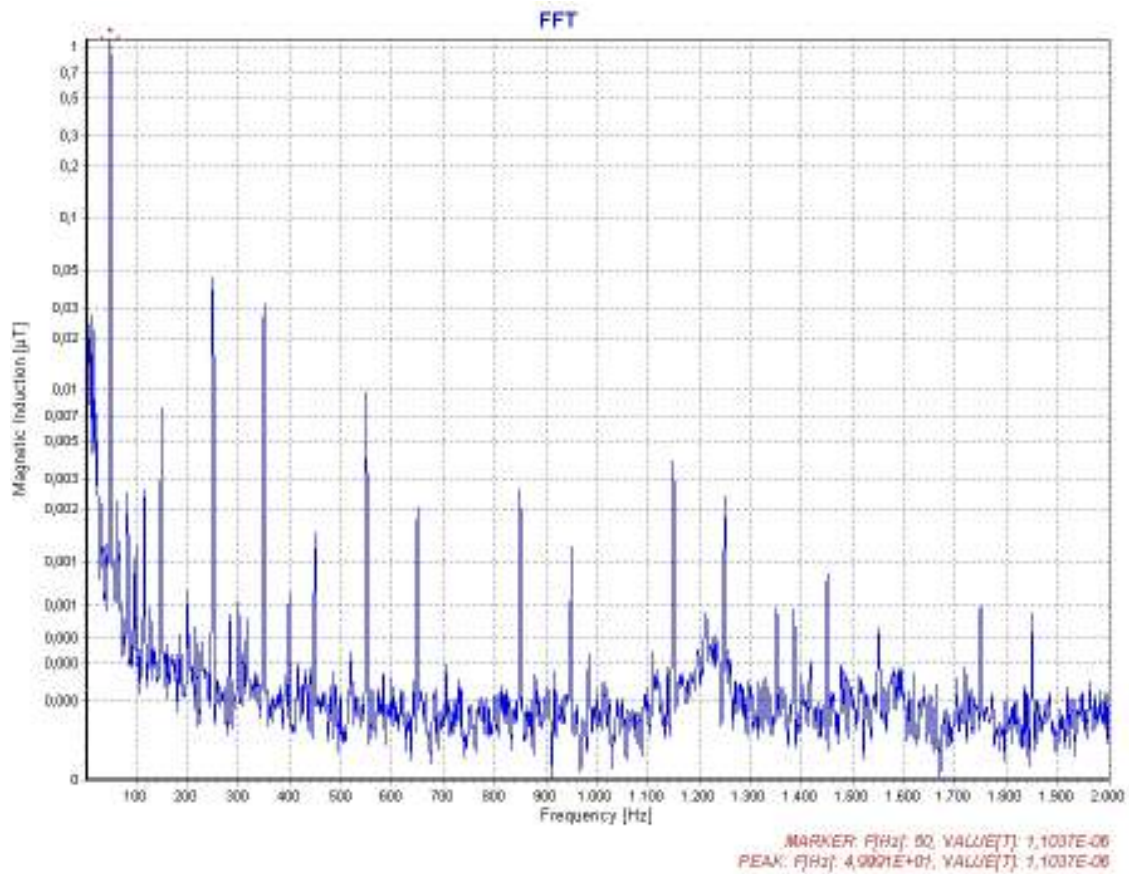


Abbildung 3/53
 220 kV-Freileitung, FL220_1: Spektrum der magnetischen Flussdichte

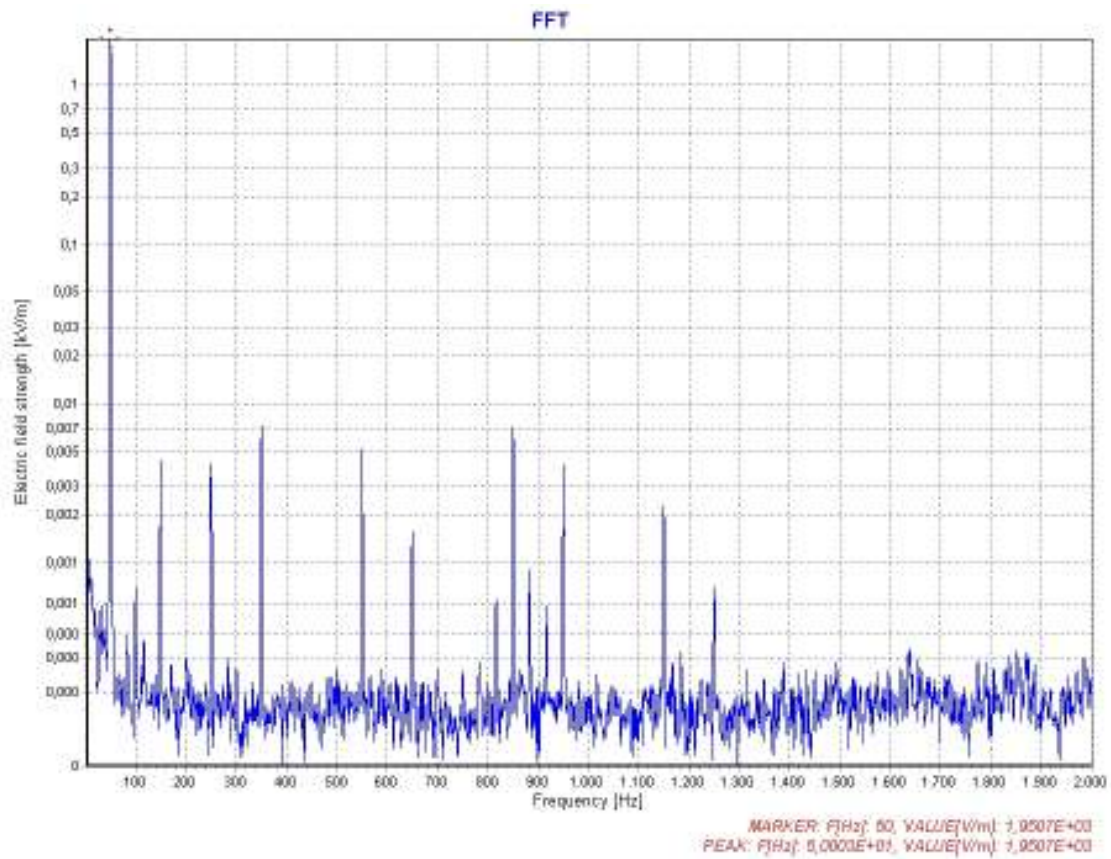


Abbildung 3/54
 220 kV-Freileitung, FL220_1: Spektrum der elektrischen Feldstärke

3.1.2.4 Ergebnisse der Messungen an 110 kV-Freileitungen

3.1.2.4.1 FL110_1

Objekt	110 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	30.04.2009, (13:00 – 14:30 Uhr)				
Winkel der Messwege	Querprofile senkrecht zur Trasse, Längsprofil in Trassenmitte				
(störende) Objekte	Bäume, Büsche und Häuser am Rand der Freifläche: ein kleiner Baum (2 m hoch) in 2 m, ein größerer Busch in 4 m Abstand und beidseitig höhere Bäume in 15 m Abstand vom Messpunkt in der Spannfeldmitte, parallel zum Querprofil-Süd stehen bis ca. 25 m Abstand von der Trassenmitte, weitere höhere Bäume im Abstand von ca. 15 m, am Ende des Querprofil-Nord beginnt ein Wohngrundstück mit einem Schuppen/Anbau				
Bemerkungen	Aufgrund der Begrenzungen der Freifläche konnte kein komplettes Querprofil mit 50 m zu beiden Seiten senkrecht zur Trasse vermessen werden. Stattdessen wurden zwei halbe Querprofile (QP) und als Verbindung zwischen ihnen ein Längsprofil (LP) ausgewählt: QP-S von der Spannfeldmitte 50m nach Süden (negative X-Werte in den Abb. 3/55u56), von dort LP 60 m nach Westen in Richtung zum Mast 1 (X-Werte von 0 – 60 m, auf dieser Strecke steigt das Gelände etwas an, um 0,5 m) und von dort QP-N nach Norden (X-Werte > 60 m)				
Bodenbeschaffenheit	Wiese mit Wildwuchs, kein Tau, Erdboden mit Restfeuchte				
Wetterbedingungen	kaum bewölkt, schwachwindig, 21 °C, 76% rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [μT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	0,727	0,637	0,499	0,387
	20 m	0,373	0,320	0,215	0,201
	50 m	0,109	0,093	0,041	0,040
Bemerkungen	Der gemessene Maximalwert betrug 0,743 μT in 4-5 m südlich der Trassenmitte bei $x \approx 35$ m von der Spannfeldmitte Richtung Mast 1				
	Der nach Norden schwächere Abfall der magnetischen Flussdichte außerhalb der Trasse wird durch die Ströme im Wohnhaus direkt im Anschluss an das Querprofil-Nord verursacht.				



Foto: FL110_1, Blick von Nordwesten



Luftbild: FL110_1, 110 kV-Freileitung, das Querprofil musste geteilt werden, die beiden Teil-Querprofile (QP-S und QP-N) wurden durch ein Längsprofil (LP) in Trassenmitte verbunden (die im Verlauf des Messweges auf dem Luftbild erkennbaren Bäume und Büsche waren während der Messung nicht mehr vorhanden, vgl. Foto)

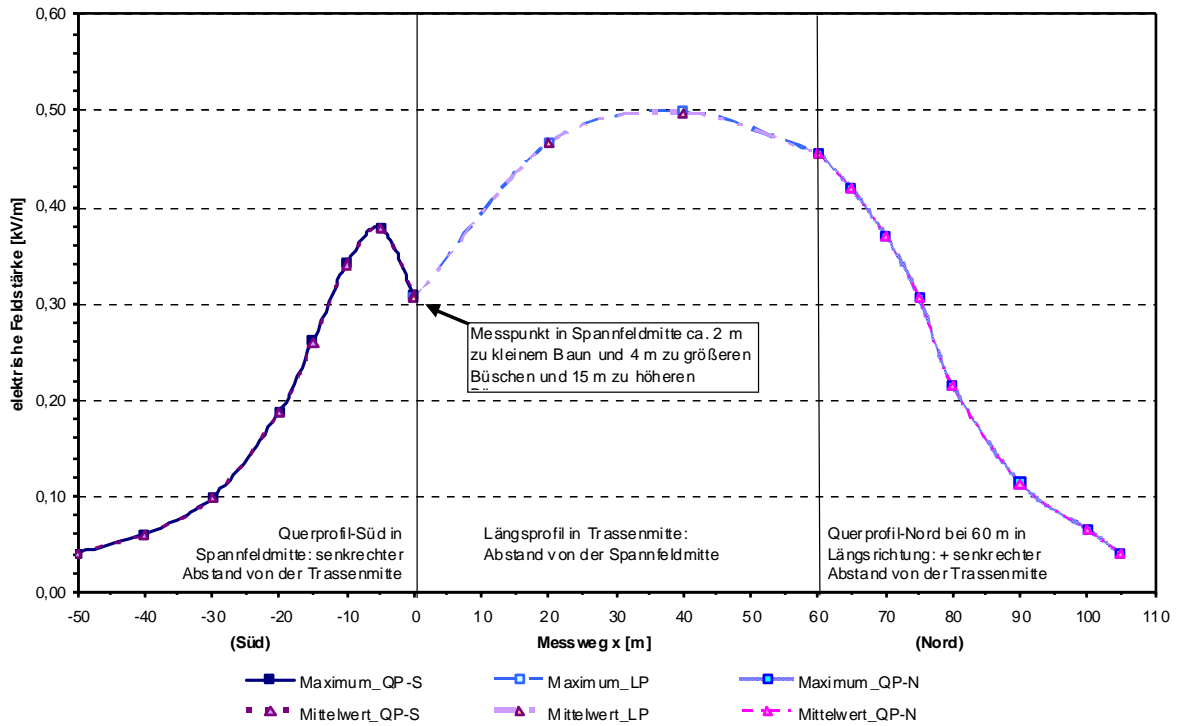


Abbildung 3/55
110 kV-Freileitung, FL110_1: Querprofil der elektrischen Feldstärke

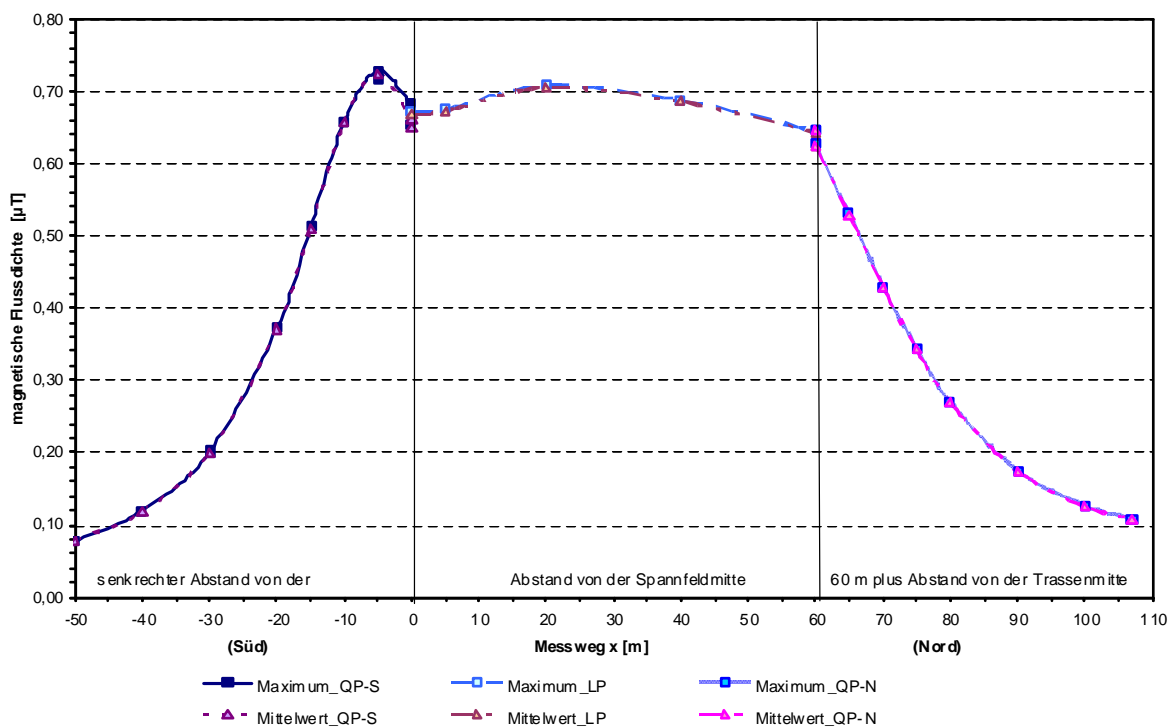


Abbildung 3/56
110 kV-Freileitung, FL110_1: Querprofil der magnetischen Flussdichte

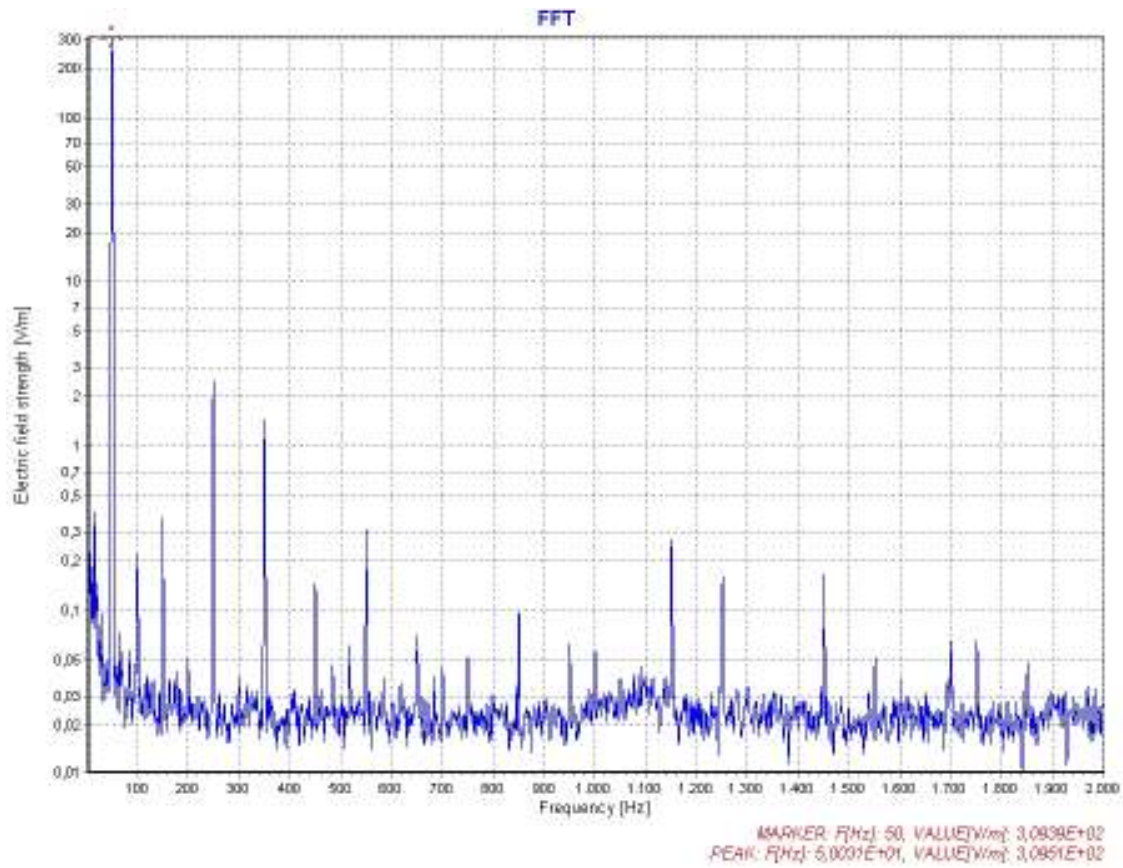


Abbildung 3/57
 110 kV-Freileitung, FL110_1: Spektrum der elektrischen Feldstärke

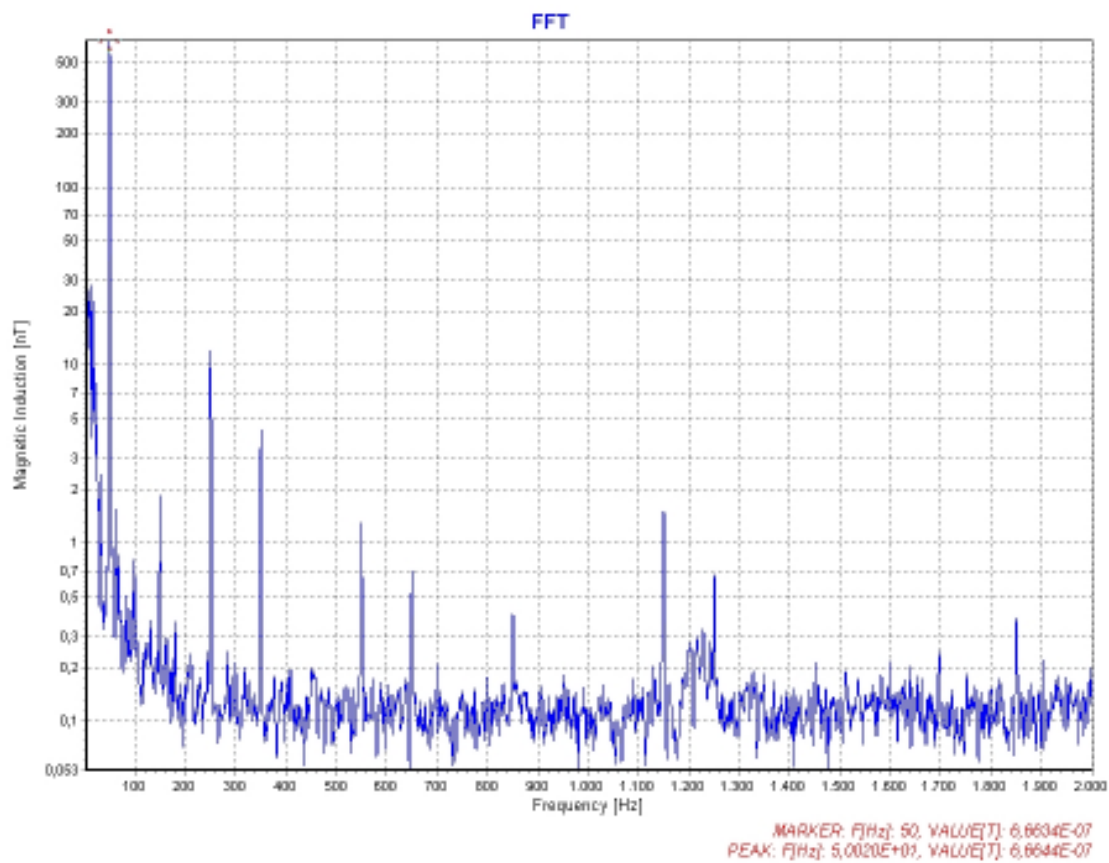


Abbildung 3/58
 110 kV-Freileitung, FL110_1: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.4.2 FL110_2

Objekt	110 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	03.04.2009, (15:15 –16:30Uhr)				
Winkel des Messweges	10° zur Trassensenkrechten				
(störende) Objekte	ab 18 m (Nord), bzw. 17 m (Süd) beginnt eine Buschreihe parallel zur Straße (Höhe bis zu 2 m) in 4 m Abstand vom Messweg				
Bemerkungen	☛				
Bodenbeschaffenheit	asphaltierte Straße				
Wetterbedingungen	wolkenlos, schwachwindig, 23 °C, 50 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	0,732	0,410	0,560	0,513
	20 m	0,251	0,232	0,239	0,198
	50 m	0,084	0,074	0,041	0,030
Bemerkungen	☛				



Foto: FL110_2, Blick von Südosten, der Messweg verläuft auf der alten Landstraße, (X = Trassenmitte, das Foto wurde einige Tage später aufgenommen)



Luftbild: FL110_2, 110 kV-Freileitung, der Messweg verläuft auf der alten, nur noch als Radweg genutzten Landstraße

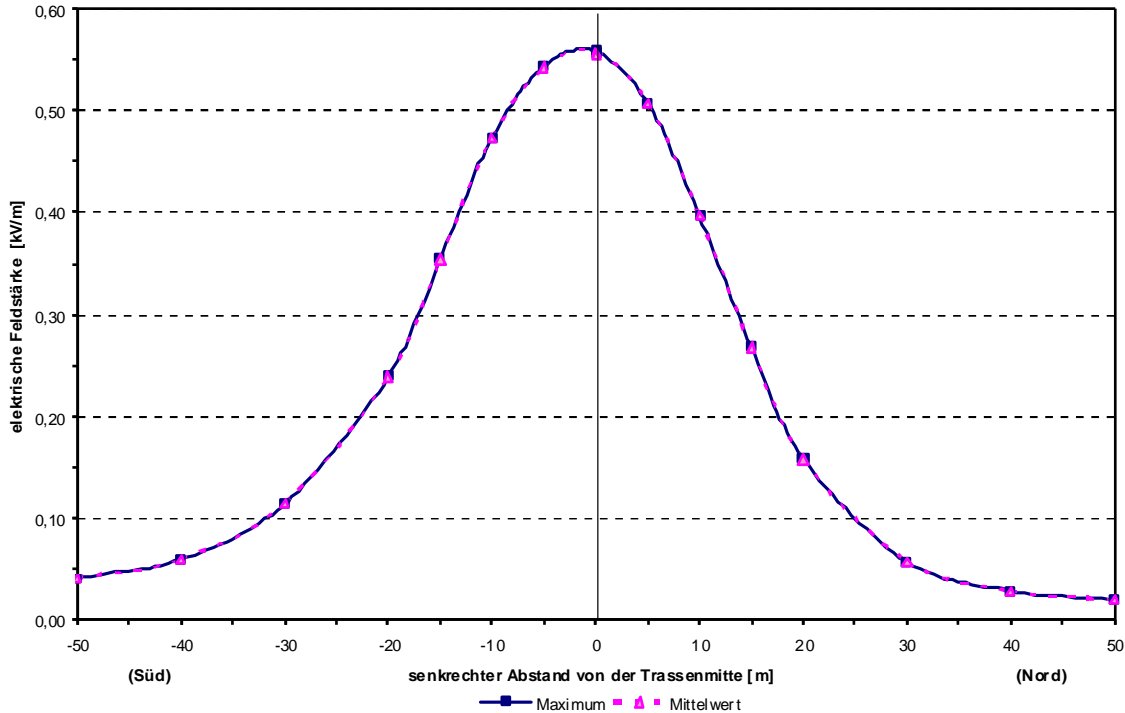


Abbildung 3/59
110 kV-Freileitung, FL110_2: Querprofil der elektrischen Feldstärke

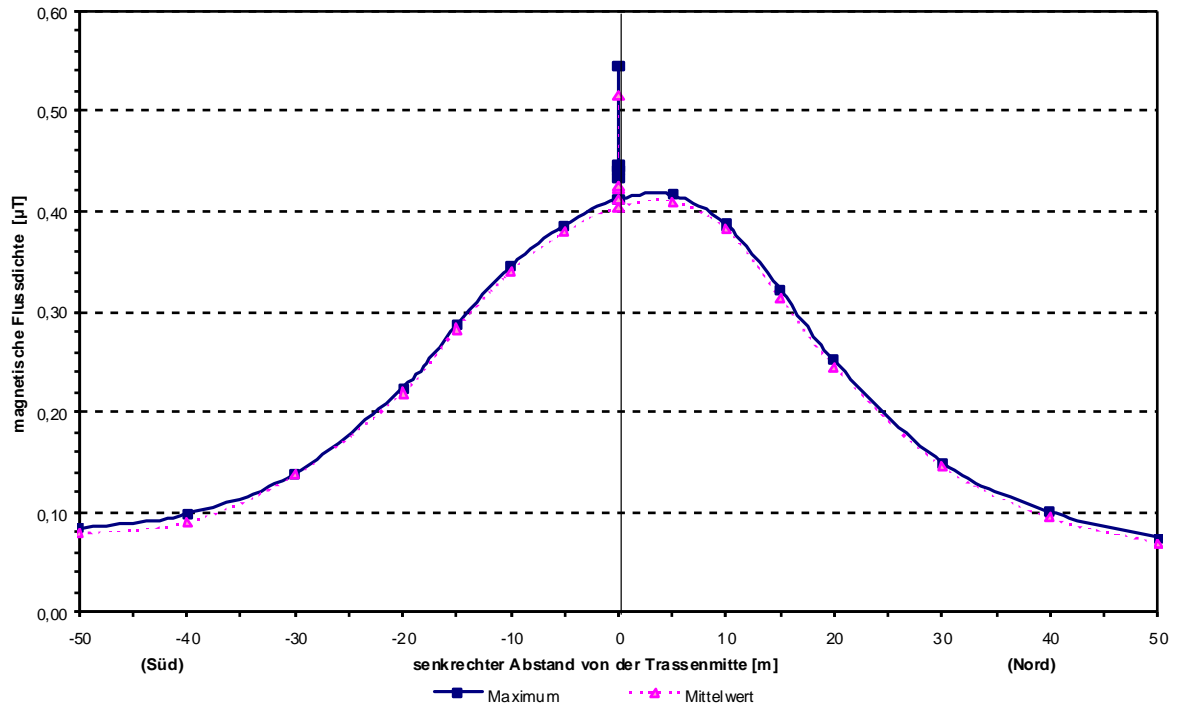


Abbildung 3/60
110 kV-Freileitung, FL110_2: Querprofil der magnetischen Flussdichte

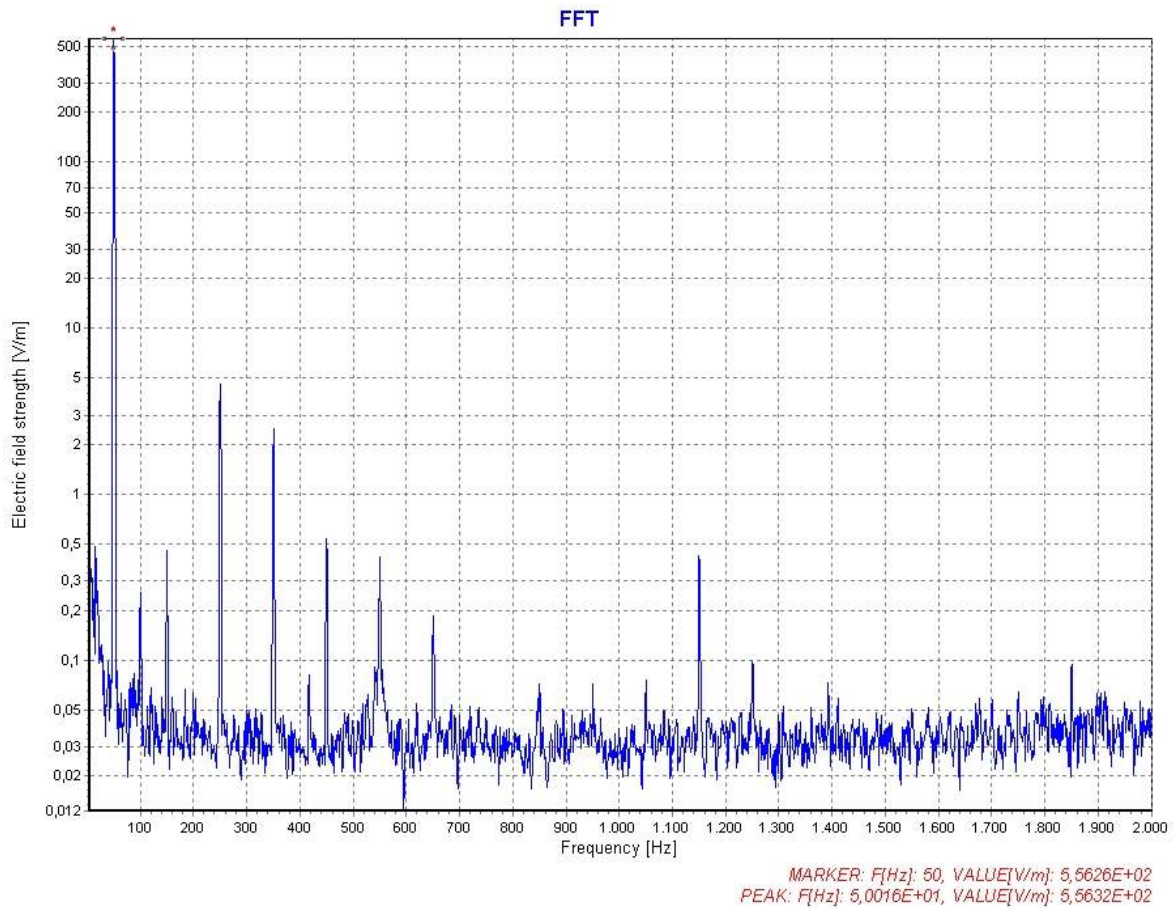


Abbildung 3/61
110 kV-Freileitung, FL110_2: Spektrum der elektrischen Feldstärke

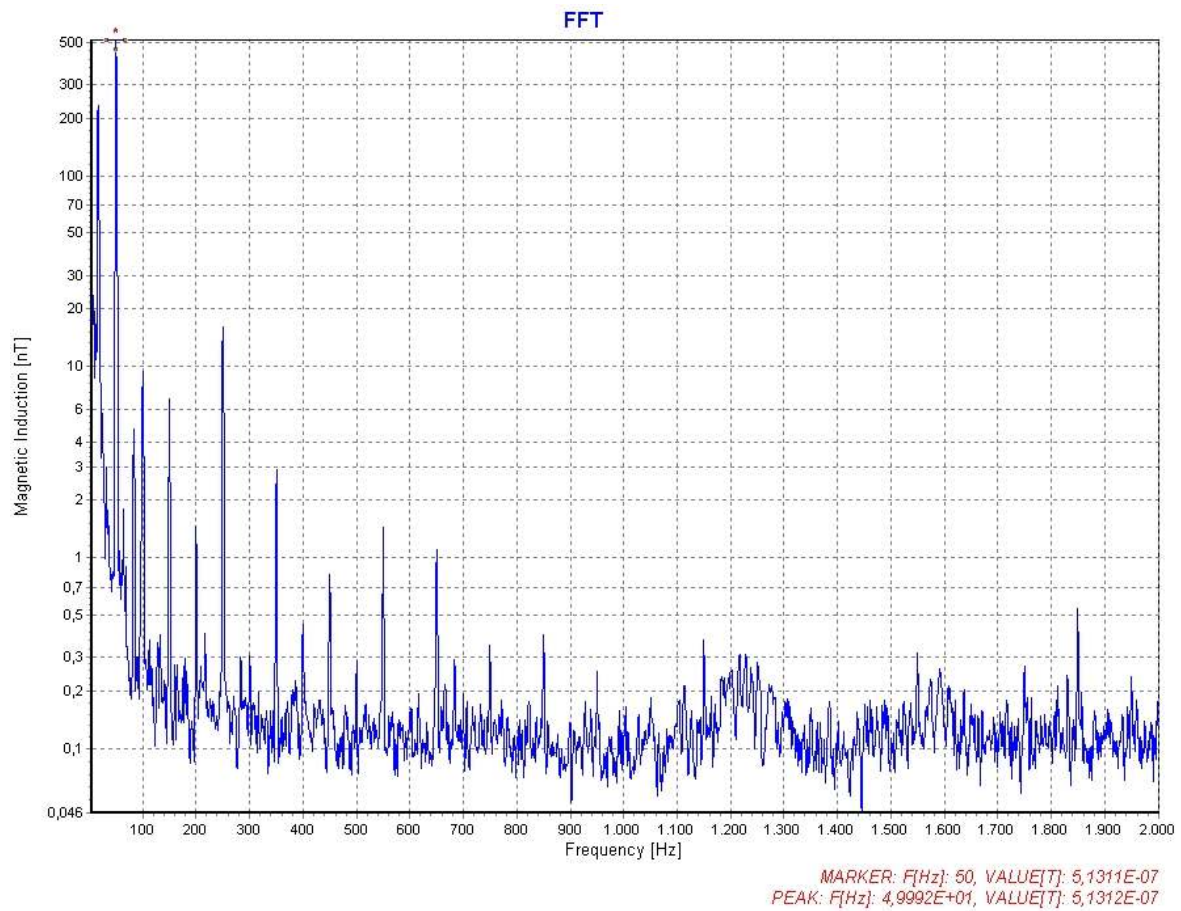


Abbildung 3/62
 110 kV-Freileitung, FL110_2: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.4.3 FL110_3

Objekt	110 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	14.04.2009, (12:15 –13:45 Uhr)				
Winkel des Messweges	6° zur Trassensenkrechten				
(störende) Objekte	Nord: Birke bei 35 m (d = 5 m Abstand vom Messweg, Höhe h = 10 m) Süd: ab 35 m Bäume (d = 2 m / h = 4 m und d = 4 M / h = 15 m)				
Bodenbeschaffenheit	mit Gras bewachsener Ackerrandstreifen (neben einem Graben ohne Wasser), Restfeuchte im Gras				
Wetterbedingungen	Vereinzelte dünne Zirkuswolken, schwach windig, 24 °C, 43 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [μT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	0,106	0,076	0,749	0,689
	20 m	0,053	0,044	0,245	0,230
	50 m	0,009	0,008	0,032	0,019
Bemerkungen	geringer Stromfluss mit hohen relativen Schwankungen				



Foto: FL110_3, Blick von Süden



Luftbild: FL110_3, 110 kV-Freileitung, der Messweg verläuft auf dem Ackerrandstreifen, der die Trasse kreuzt

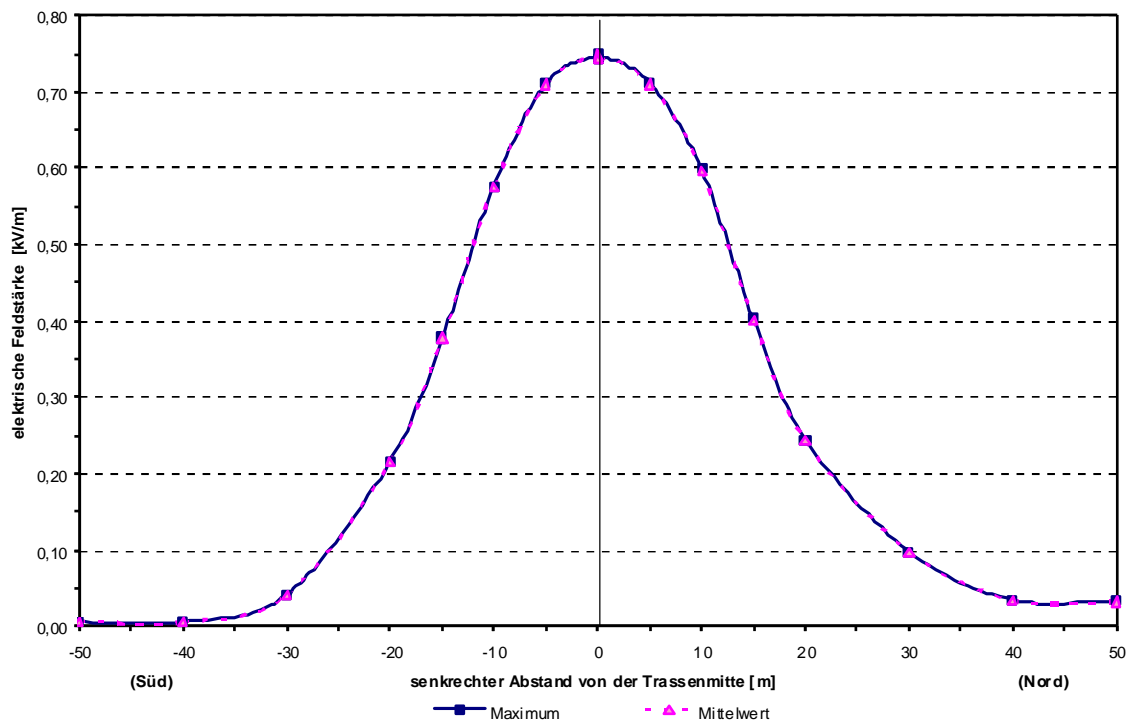


Abbildung 3/63
110 kV-Freileitung, FL110_3: Querprofil der elektrischen Feldstärke

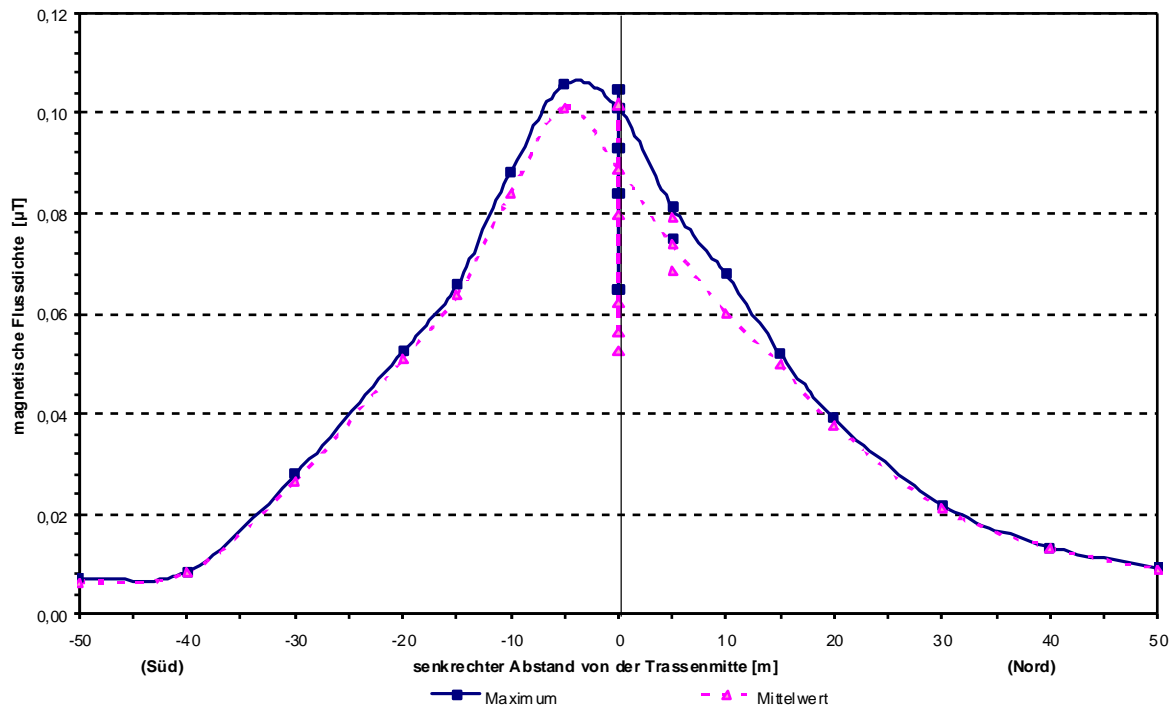


Abbildung 3/64
 110 kV-Freileitung, FL110_3: Querprofil der magnetischen Flussdichte

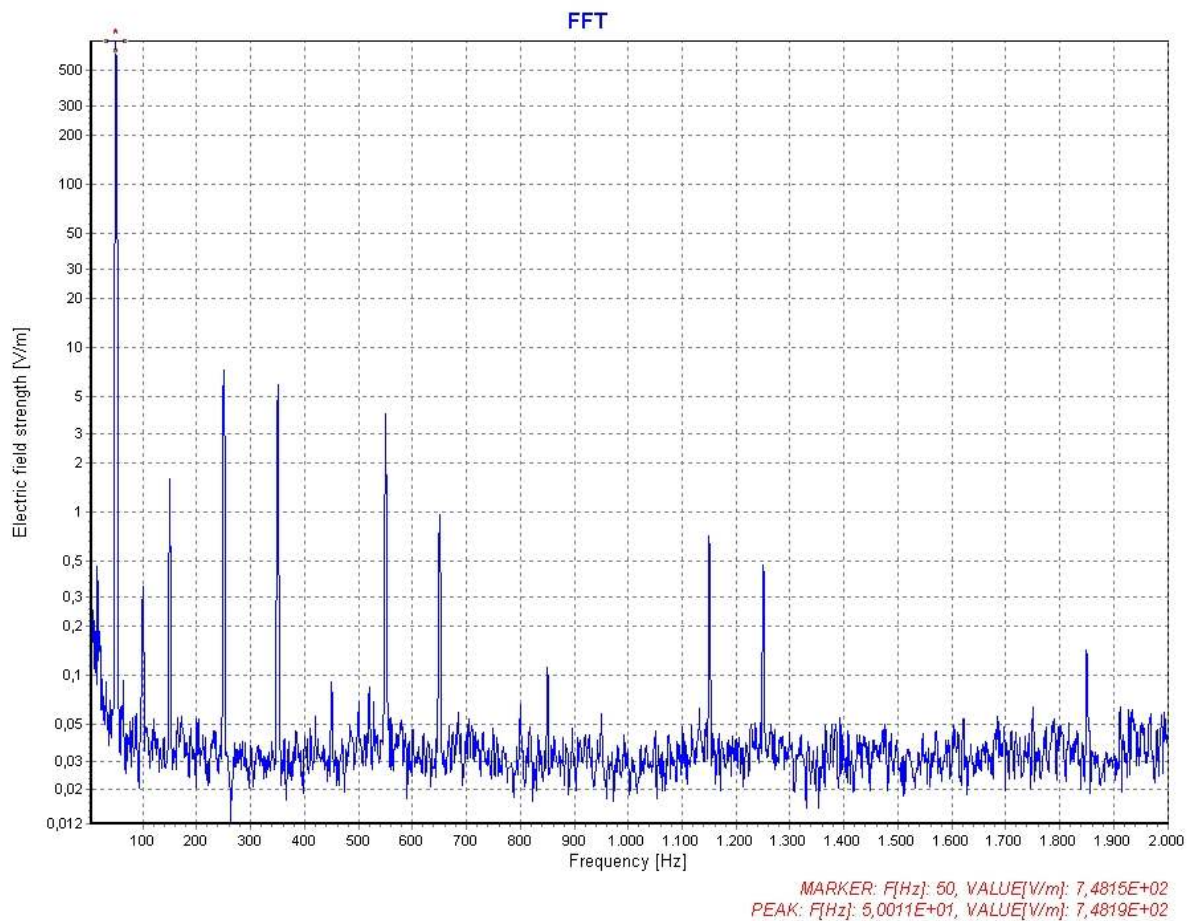


Abbildung 3/65
 110 kV-Freileitung, FL110_3: Spektrum der elektrischen Feldstärke

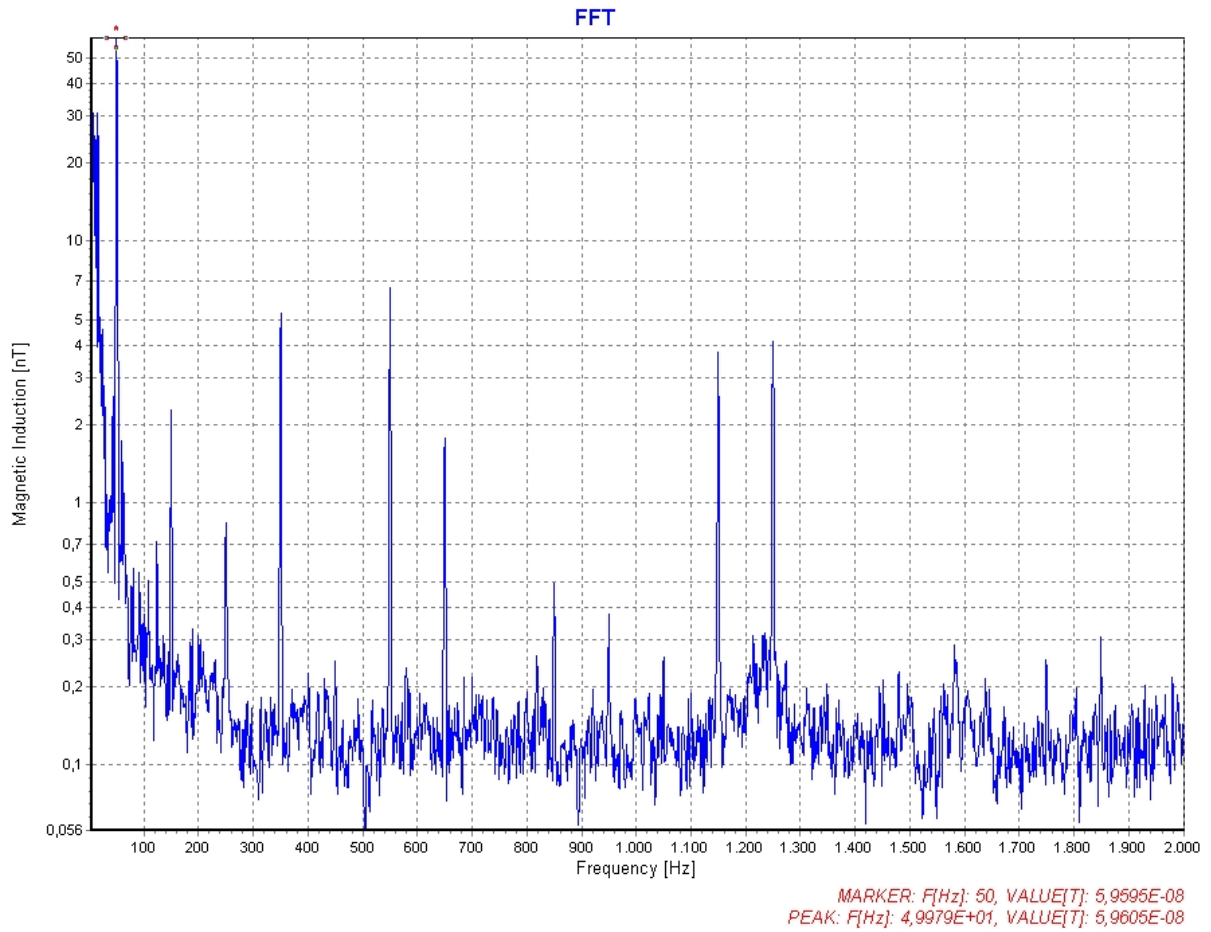


Abbildung 3/66
110 kV-Freileitung, FL110_3: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.4.4 FL110_4a

Objekt	110 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau: $R \begin{matrix} S \\ T \end{matrix} R \begin{matrix} S \\ T \end{matrix}$				
Datum	14.04.2009, (16:00 –17:00 Uhr) 06.08.2009, (11:00 - 11:45 Uhr und 14:20 - 14:45 Uhr)				
Winkel des Messweges	6° zur Trassensenkrechten				
(störende) Objekte	☛				
Bemerkungen	☛				
Bodenbeschaffenheit	Feld, trocken				
Wetterbedingungen	April: kaum bewölkt, schwach windig, 23 °C, 42 % rel. Feuchte August: kaum bewölkt, fast windstill, 26 °C, 63 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
Messweg 1 (April) etwa am Ort des größ- ten Durchhanges (~ Spannfeldmitte)	Trasse	0,475	0,360	0,920	0,860
	20 m	0,162	0,113	0,265	0,261
	50 m	0,025	0,020	0,045	0,045
Messweg 2 (August) in Mastnähe, 55 m vom Mast Nr. 3	Trasse	0,324	0,269	0,627	0,564
	20 m	0,143	0,106	0,203	0,202
	50 m	0,026	0,022	0,037	0,037
Bemerkungen	Während der Messungen standen beide Systeme unter Spannung, aber nur ein System war aktiv.				
	Das Maximum der magnetischen Flussdichte lag bei einem Abstand zur Trassenmitte von ca. 5,5 m in westlicher Richtung auf dem Messweg 1				
	Vergleich (s. Tab. 3.1.2.4.5, FL110_4b) Einebenen-Spannfeld ↔ Donau-Spannfeld				



Foto FL110_4a: Messweg 1 Blick von Westen



Foto FL110_4a: Messweg 2 Blick von Westen



Luftbild: FL110_4a, 110 kV-Freileitung, Messweg 1 verläuft etwa am Ort des größten Durchhanges, aufgrund unterschiedlicher Masthöhen nicht genau in Spannungsfeldmitte, Messweg 2 etwa 55 m vom Mast 1, dem Mast mit den niedrigeren Leiterseilaufhängepunkten

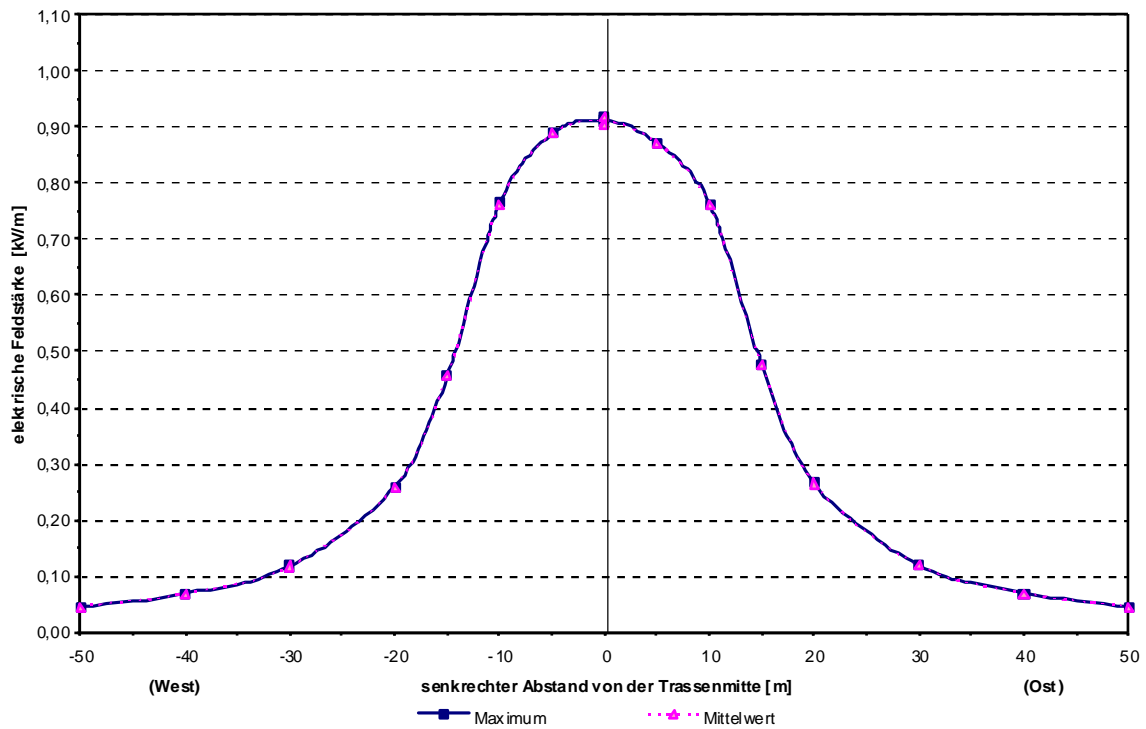


Abbildung 3/67a
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofil der elektrischen Feldstärke,
 Messweg 1 (größter Durchhang)

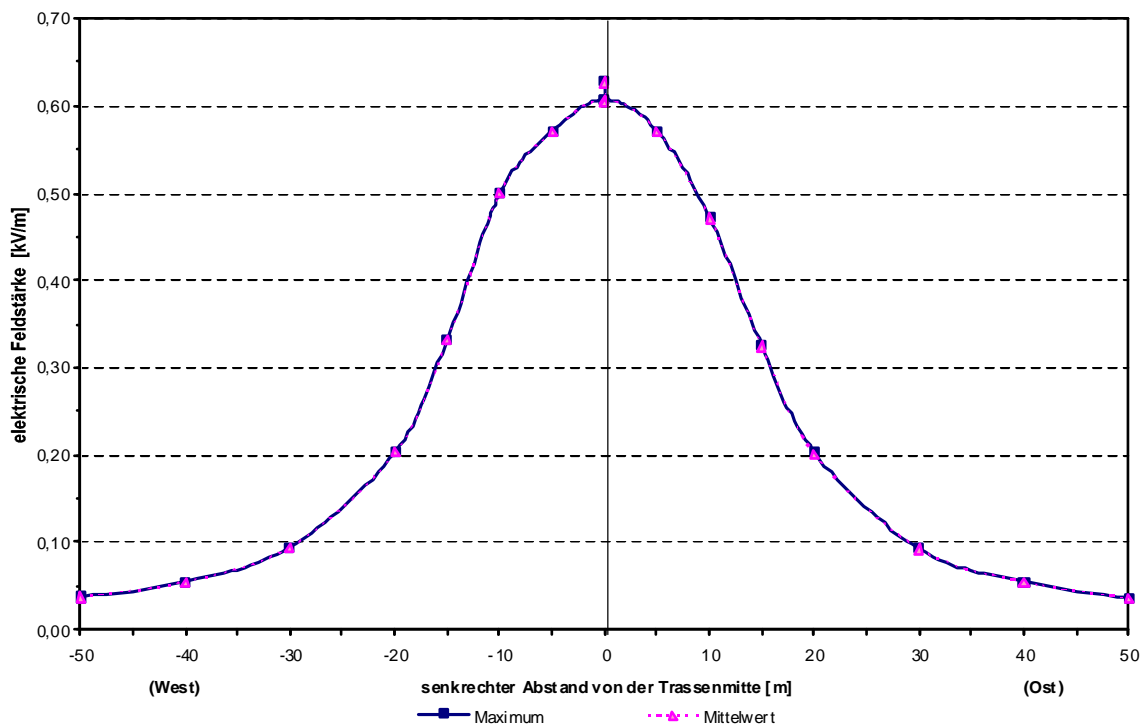


Abbildung 3/67b
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofil der elektrischen Feldstärke,
 Messweg 2 (Mastnähe)

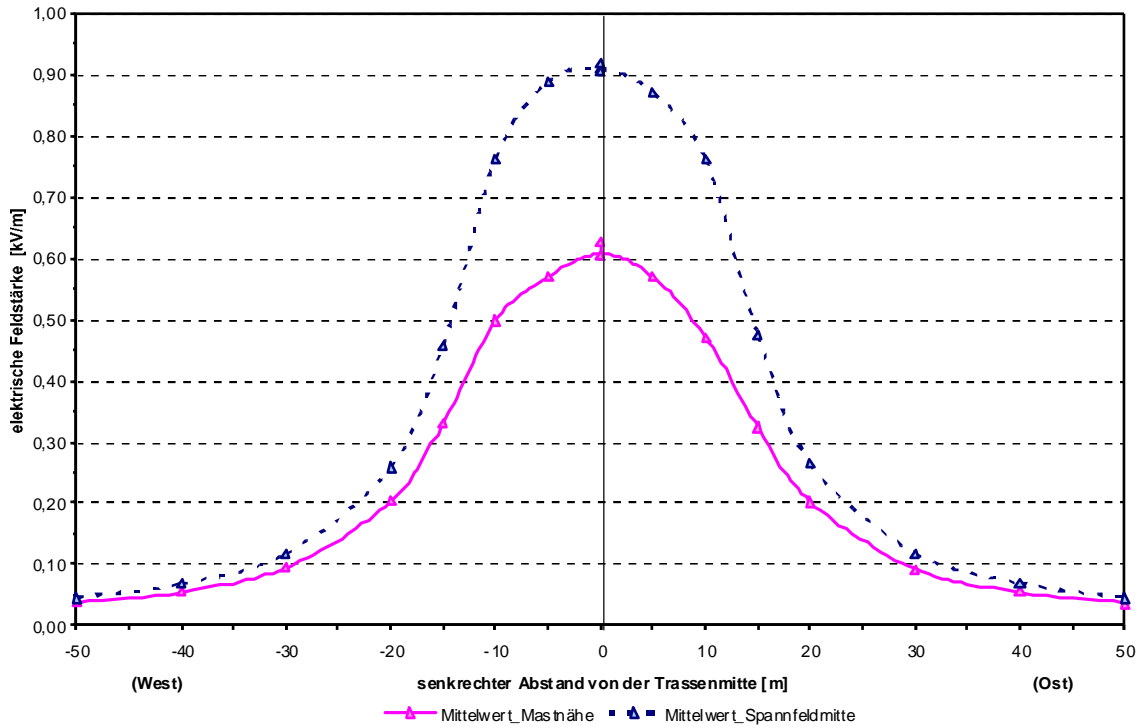


Abbildung 3/67c
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Vergleich der Querprofile für die Mittelwerte der elektrischen Feldstärke, Messweg 1 (größter Durchhang) und Messweg 2 (Mastnähe)

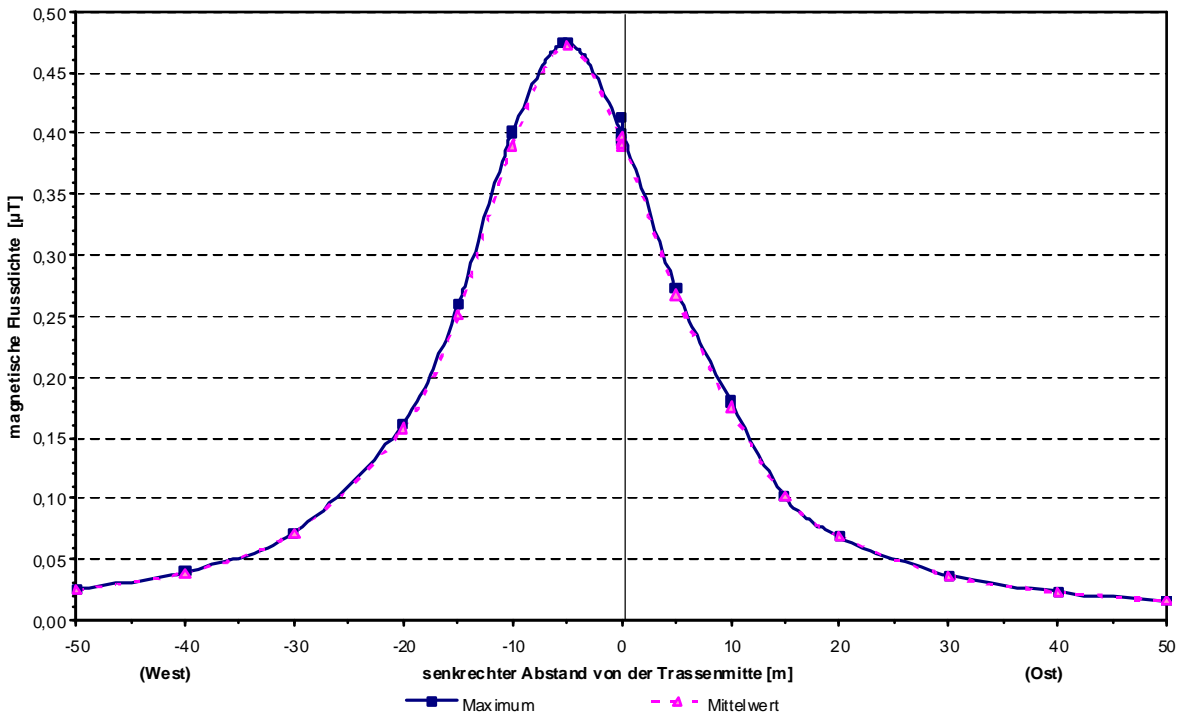


Abbildung 3/68a
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofil der magnetischen Flussdichte, Messweg 1 (größte Durchhang)

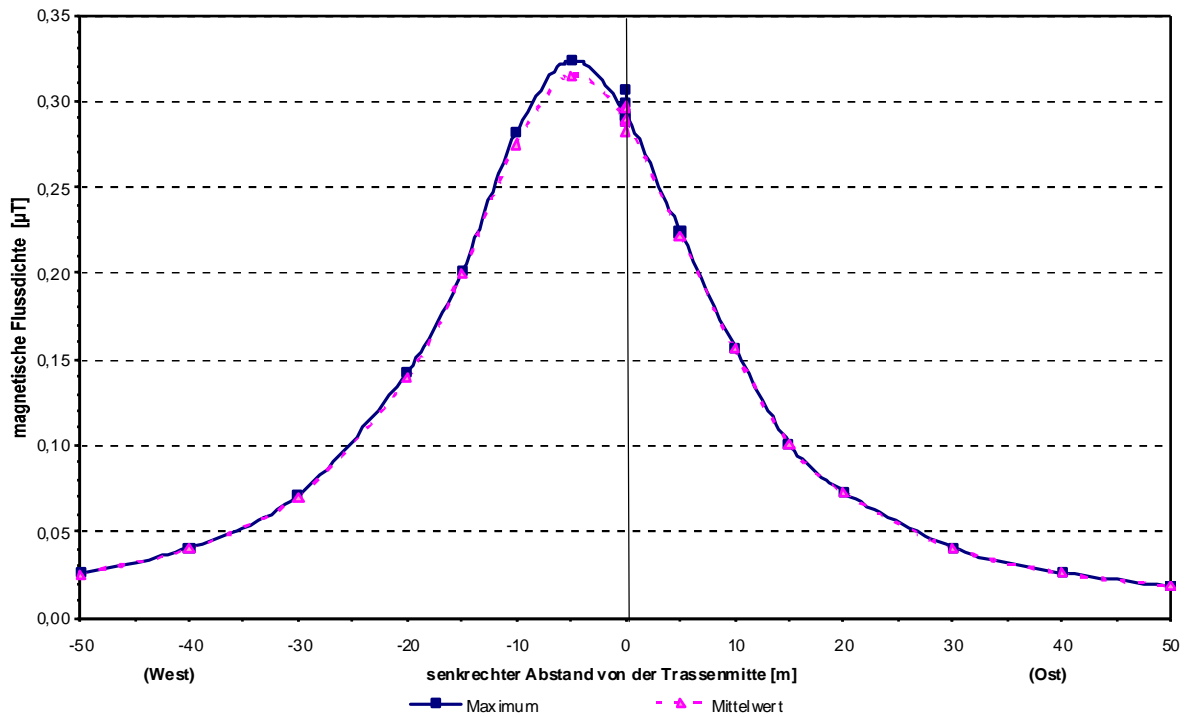


Abbildung 3/68b
110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofil der magnetischen Flussdichte, Messweg 2 (Mastnähe)

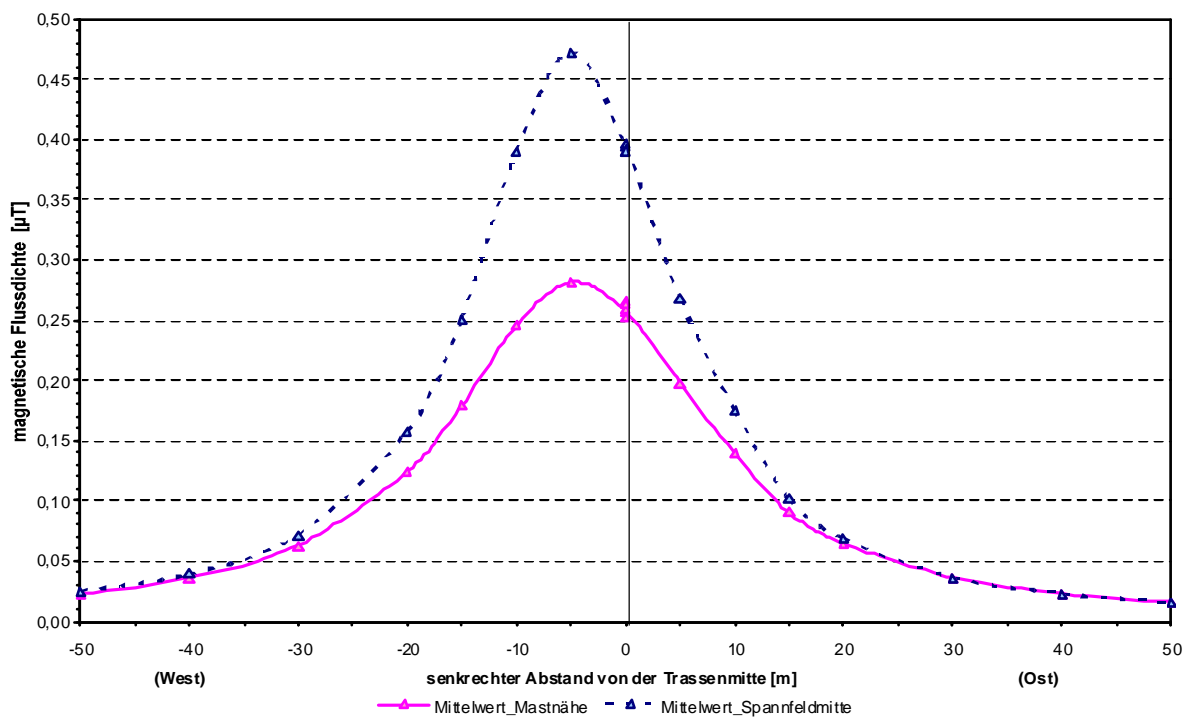


Abbildung 3/68c
110 kV-Freileitung, FL110_4a: Vergleich der Querprofile für die Mittelwerte der magnetischen Flussdichte, Messweg 1 (größter Durchhang) und Messweg 2 (Mastnähe)

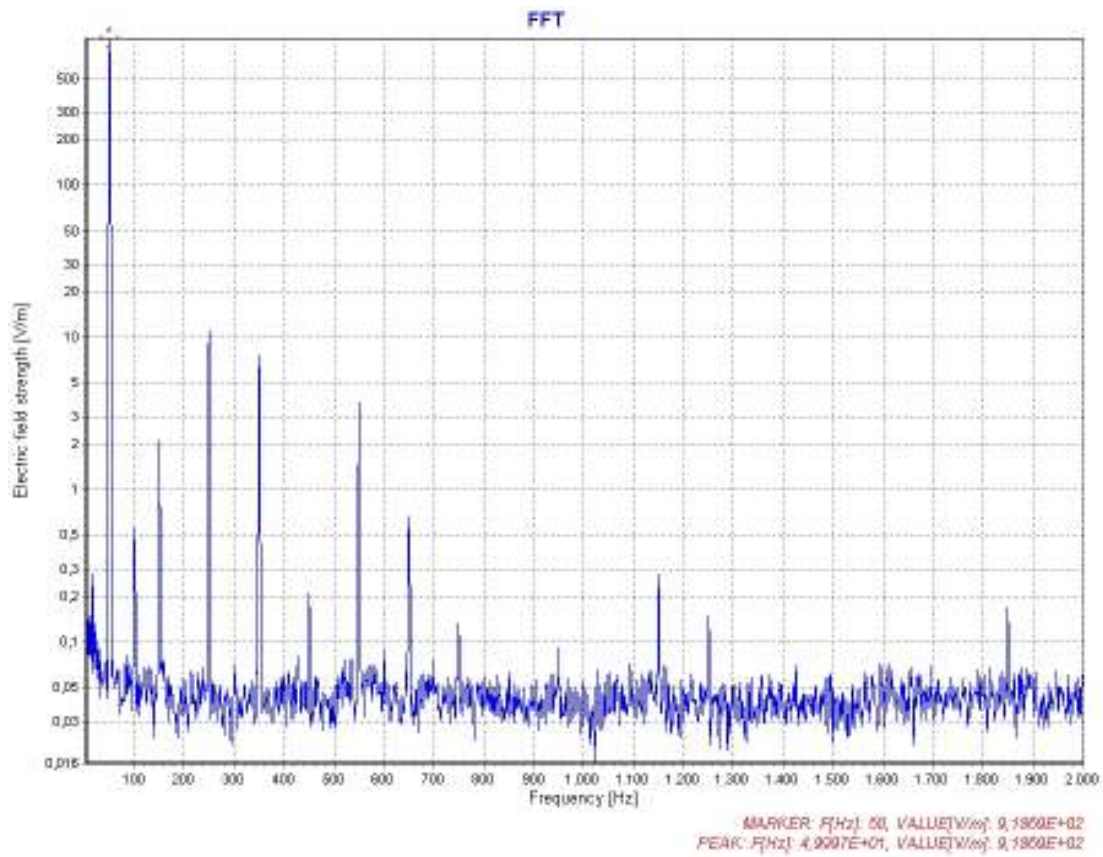


Abbildung 3/69a
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Spektrum der elektrischen Feldstärke, April

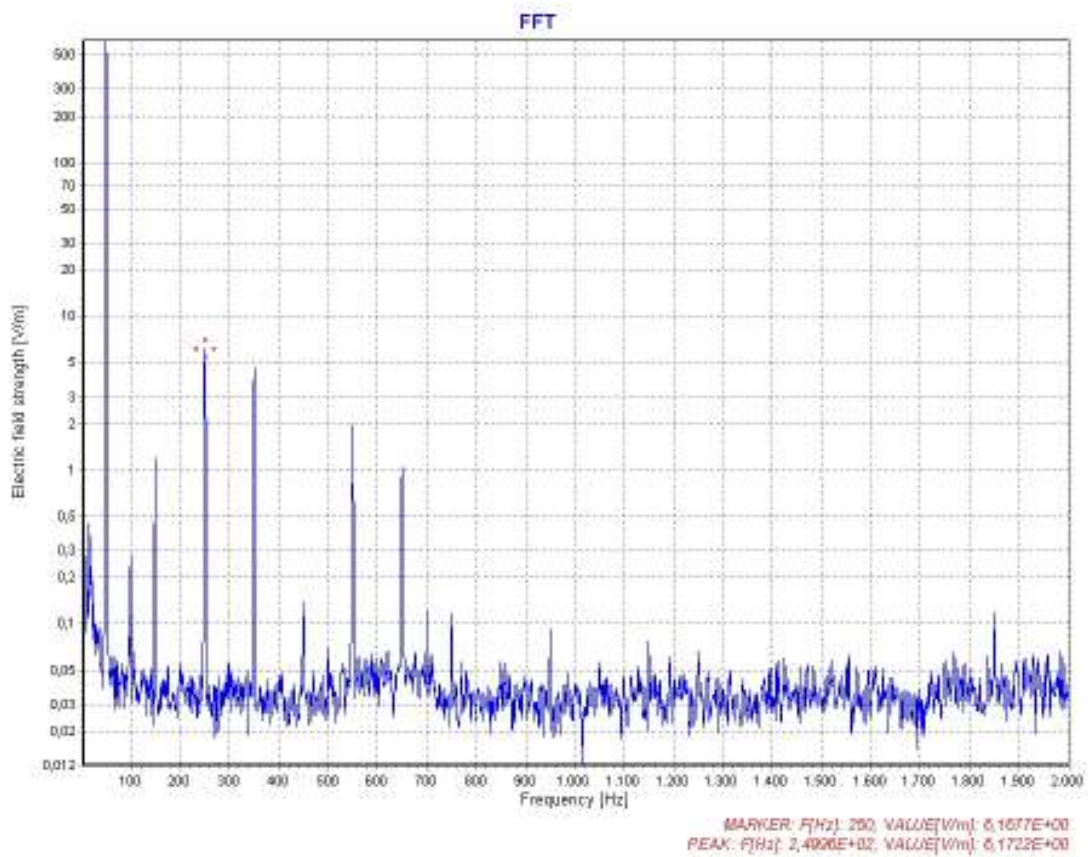


Abbildung 3/69b
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Spektrum der elektrischen Feldstärke, August

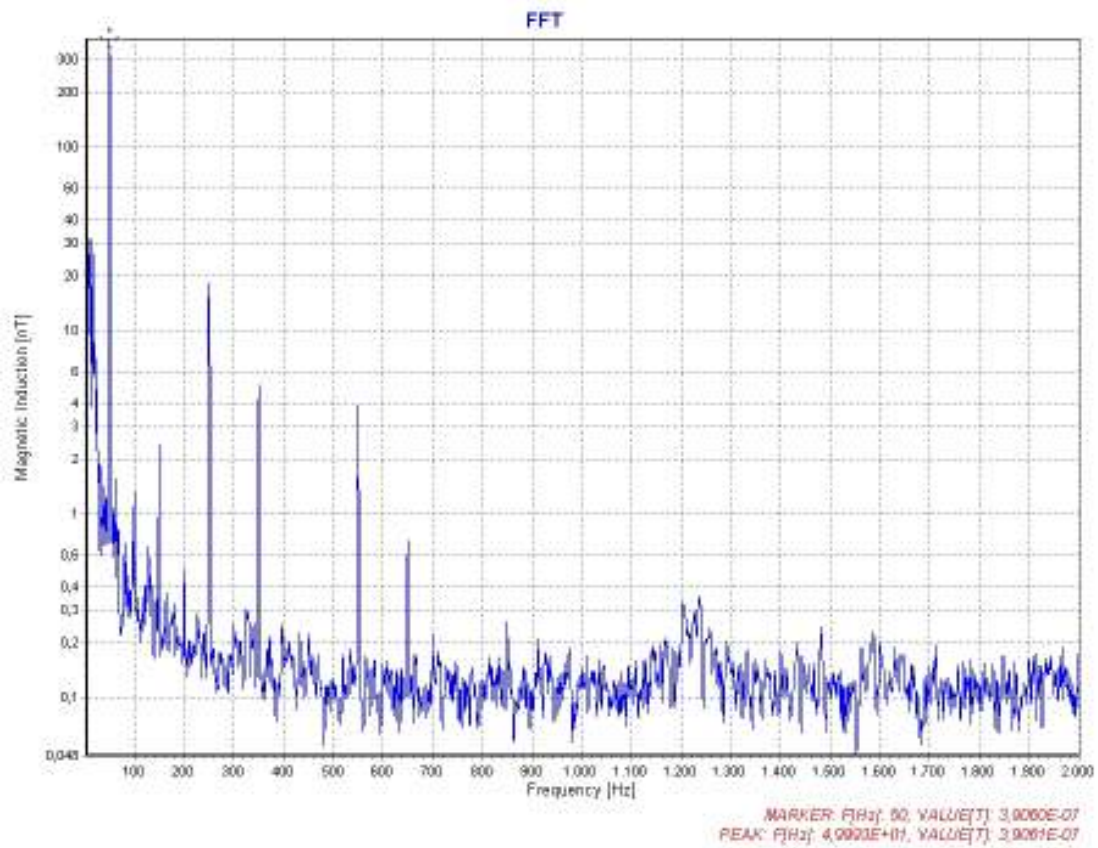


Abbildung 3/70a
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Spektrum der magnetischen Flussdichte, April

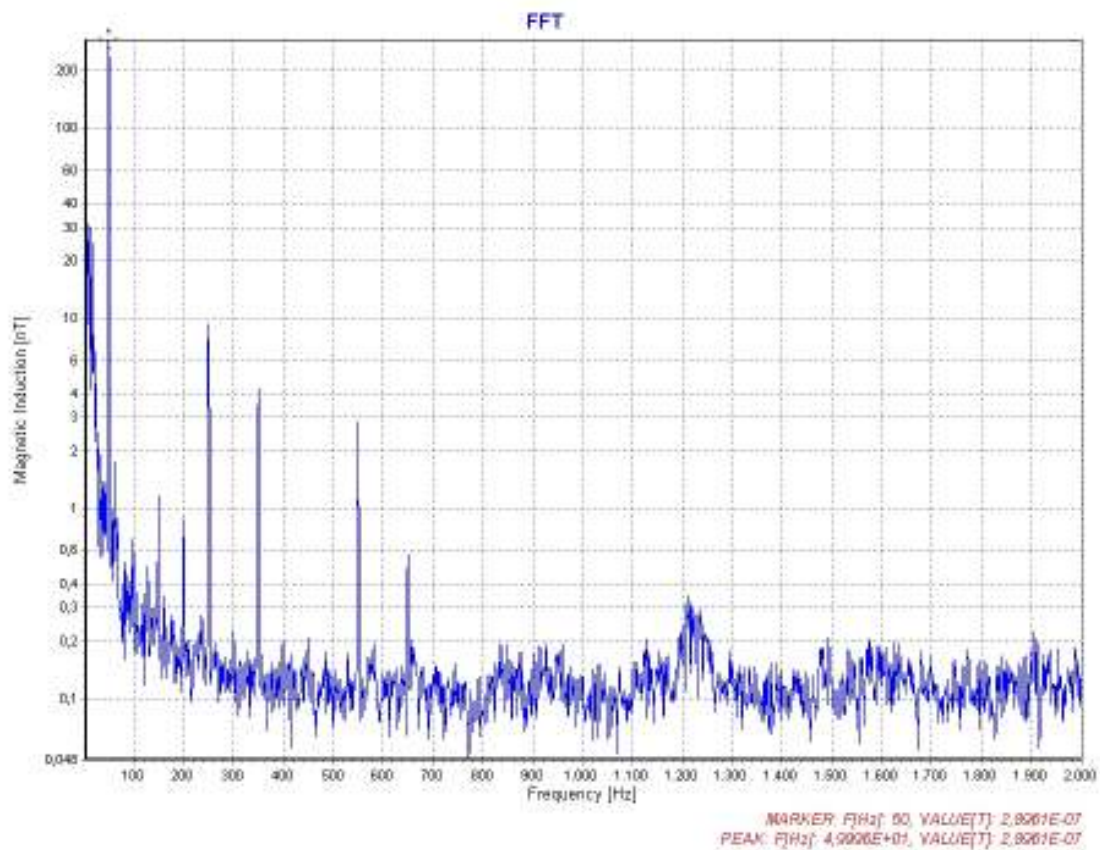


Abbildung 3/70b
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Spektrum der magnetischen Flussdichte, April

3.1.2.4.5 FL110_4b

Objekt	110 kV-Freileitung				
Mastbild	Einebene: R S T R S T				
Datum	14.04.2009, (14:30 –15:45 Uhr)				
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	☛				
Bemerkungen	E-Feld-Messung über dem Getreidefeld				
Bodenbeschaffenheit	Messweg auf der Grenze zwischen zwei Feldern - Norden: Feld mit ca. 30 cm hohen "Dämmen" ohne Bewuchs, Süden: 10cm hohes Getreide				
Wetterbedingungen	kaum bewölkt, leichte Zirren, schwach windig, 25 °C, 33 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	0,934	0,601	1,067	0,495
	20 m	0,276	0,169	0,522	0,511
	50 m	0,039	0,029	0,035	0,034
Bemerkungen	Während der Messung standen beide Systeme unter Spannung, aber nur ein System war aktiv.				
	Das Maximum der magnetischen Flussdichte wurde bei einem Abstand zur Trassenmitte von 6 m bis 6,5 m in westlicher Richtung gemessen.				
	Vergleich (s. Abschnitt 3.1.2.4.4, FL110_4a) Einebenen-Spannfeld ↔ Donau-Spannfeld				



Foto: FL110_4b, Blick von Westen



Luftbild: FL110_4b, 110 kV-Freileitung, der Messweg verläuft zwischen zwei Feldern

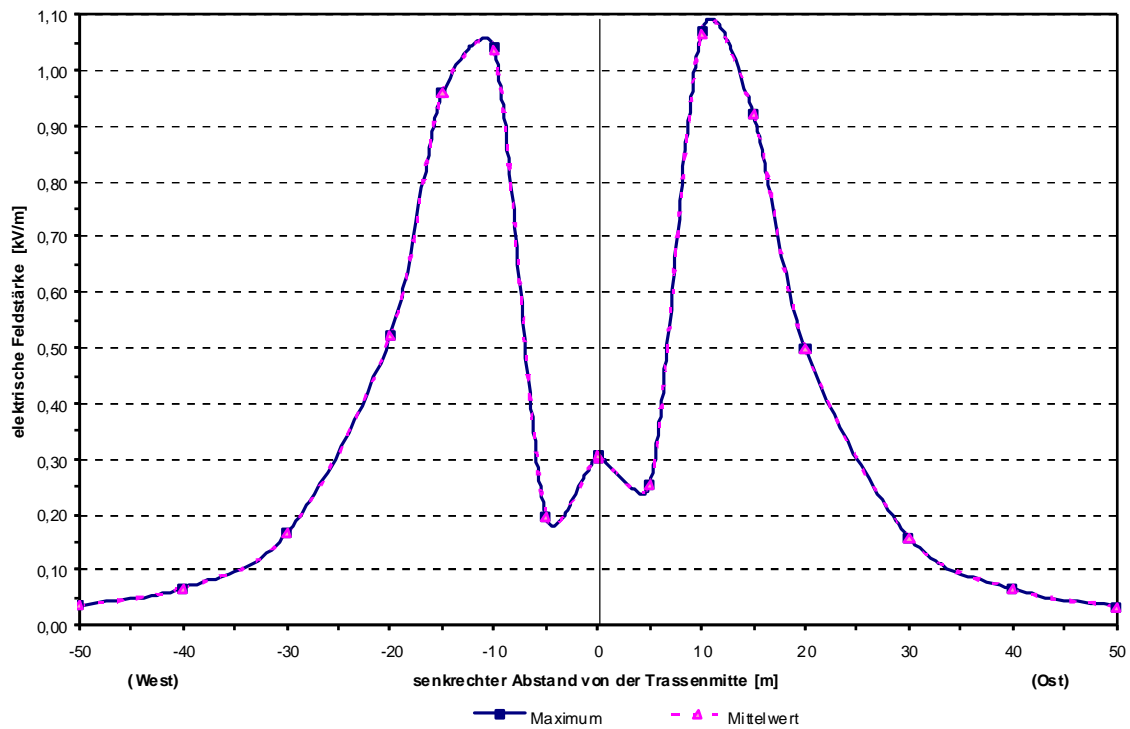


Abbildung 3/71
110 kV-Freileitung, FL110_4b: Querprofil der elektrischen Feldstärke

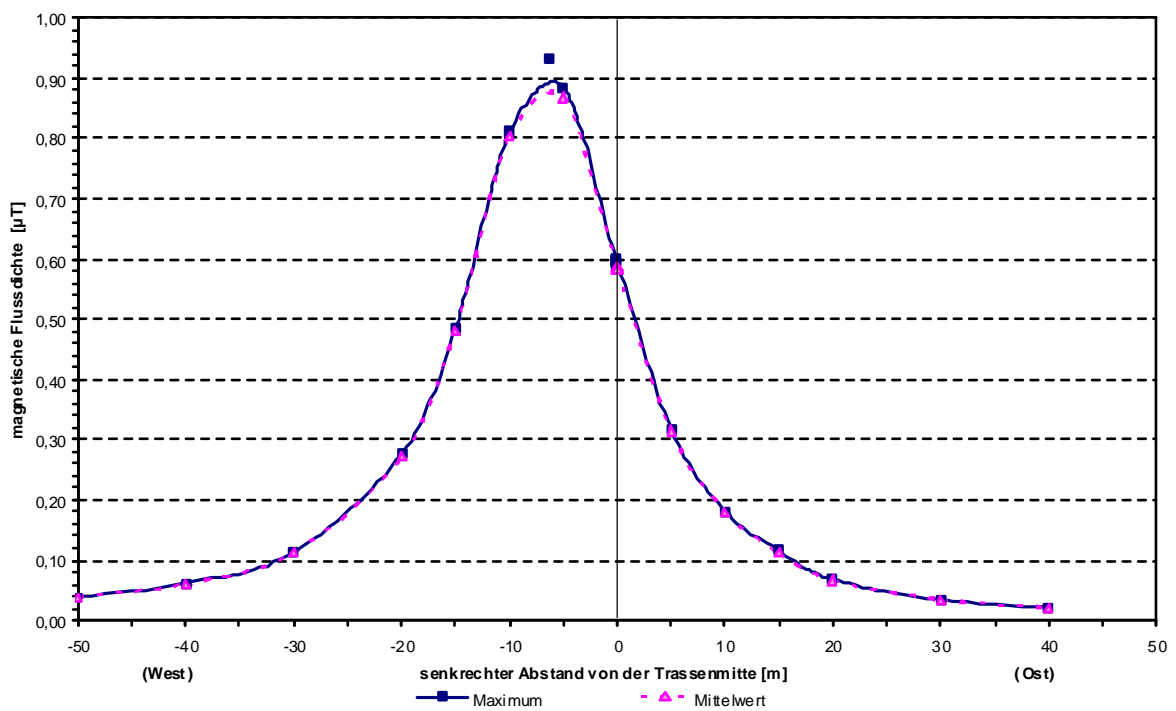


Abbildung 3/72
110 kV-Freileitung, FL110_4b: Querprofil der magnetischen Flussdichte

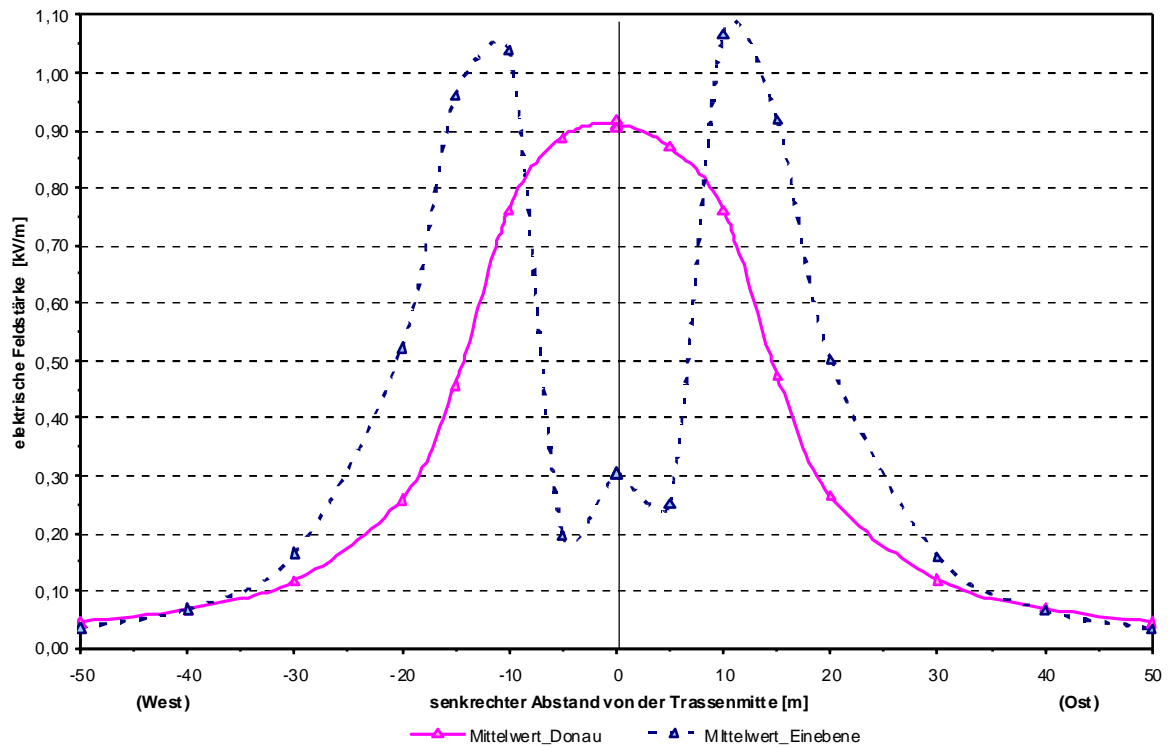


Abbildung 3/73
 110 kV-Freileitung, FL110_4a,b: Querprofile der elektrischen Feldstärke,
 Vergleich: Donaumast-Abschnitt (D) ↔ Einebenenmast-Abschnitt (EE)

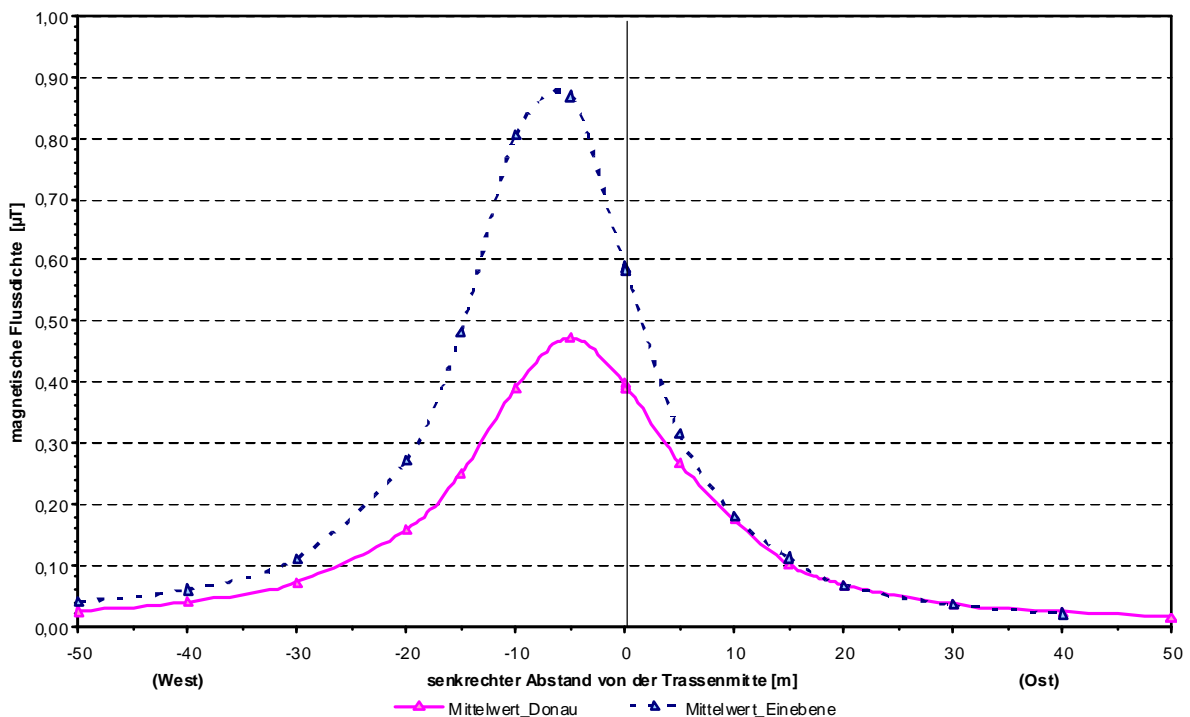


Abbildung 3/74
 110 kV-Freileitung, FL110_4a,b: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 Vergleich: Donaumast-Abschnitt (D) ↔ Einebenenmast-Abschnitt (EE)

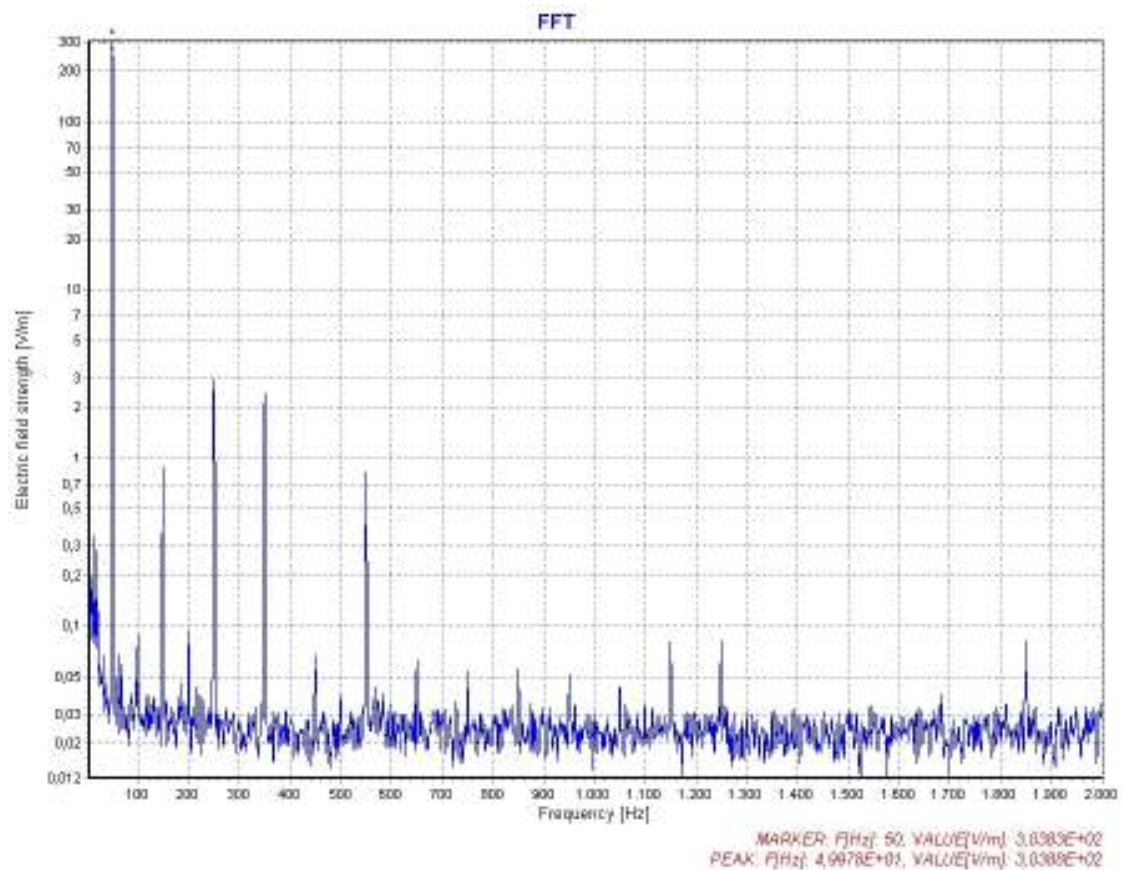


Abbildung 3/75
 110 kV-Freileitung, FL110_4b: Spektrum der elektrischen Feldstärke

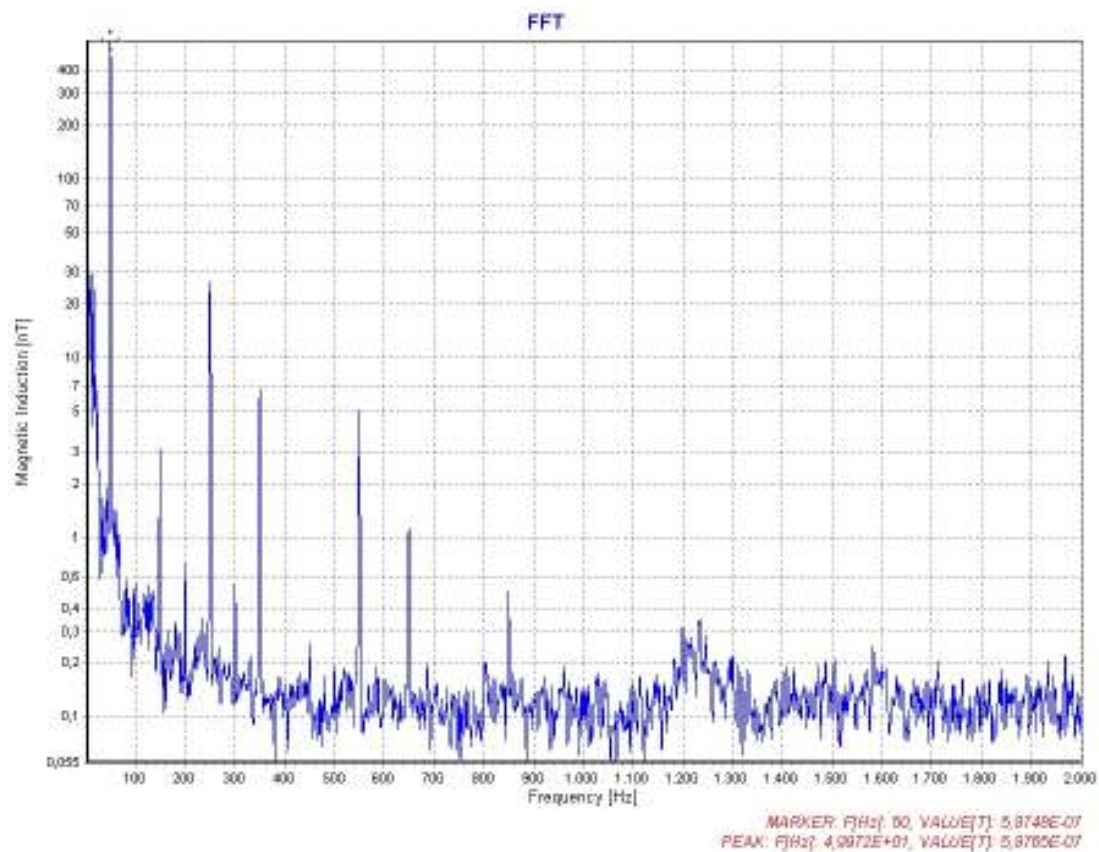


Abbildung 3/76
 110 kV-Freileitung, FL110_4b: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.4.6 FL110_5

Objekt	110 kV-Freileitung				
Mastbild	Einebene: R T S I S R T				
Datum	17.04.2009, (14:00 –15:00 Uhr)				
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	bei 20 m und 40 m in Ostrichtung und bei 15 m und 40 m in Westrichtung je ein Obstbaum (~ 8 m hoch) in 5,5 m Abstand vom Messweg				
Bodenbeschaffenheit	asphaltierte Straße und Randstreifen, Gras bewachsen (trocken)				
Wetterbedingungen	wechselnd bewölkt, mäßiger Wind, 20 °C, 59 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	4,103	2,949	1,560	1,050
	20 m	0,614	0,501	0,241	0,227
	50 m	0,095	0,079	0,017	0,015
Bemerkungen	Als Abstand, bei dem das Maximum der magnetischen Flussdichte auftrat, wurde ein Abstand zur Trassenmitte von 2 m in östlicher Richtung gemessen; der höchste Messwert trat während einer kontinuierlichen Messung in der Trassenmitte auf.				



Foto: FL110_5, Blick von Westen



Luftbild: FL110_5, 110 kV-Freileitung, der Messweg verläuft auf dem nördlichen Randstreifen neben der Straße, die die Trasse kreuzt

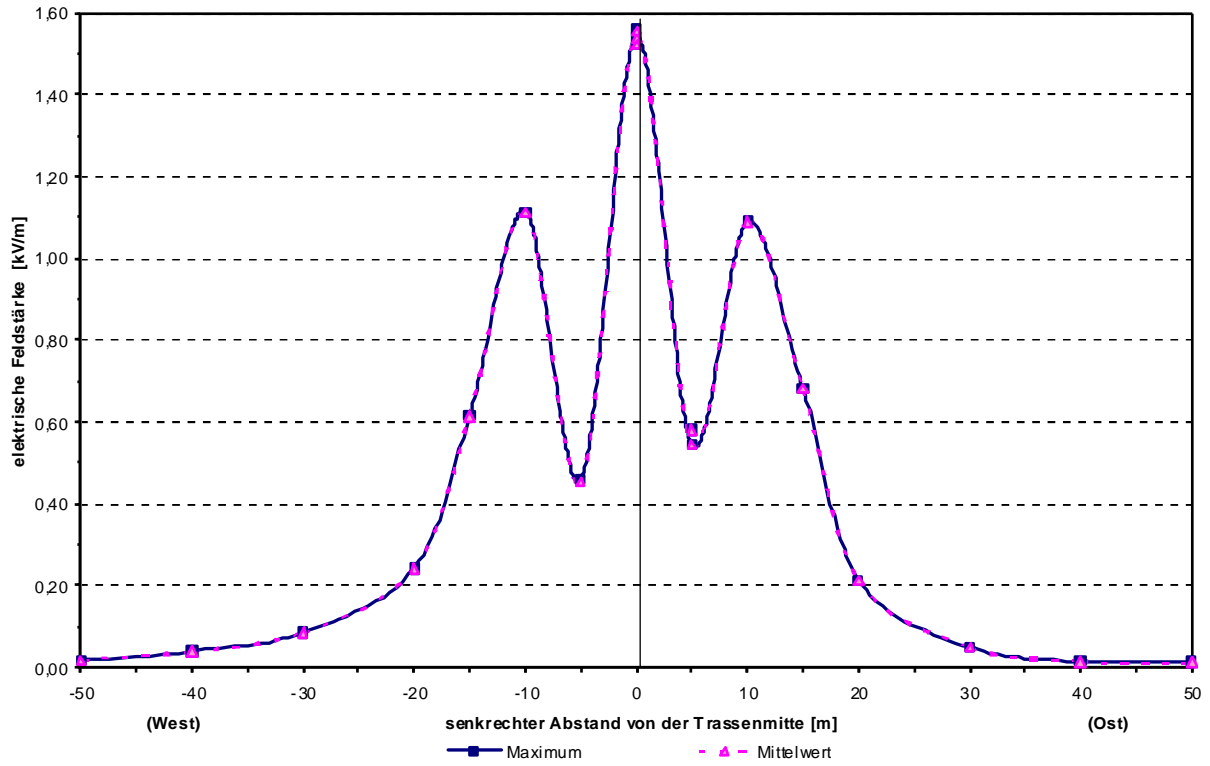


Abbildung 3/77
110 kV-Freileitung, FL110_5: Querprofil der elektrischen Feldstärke

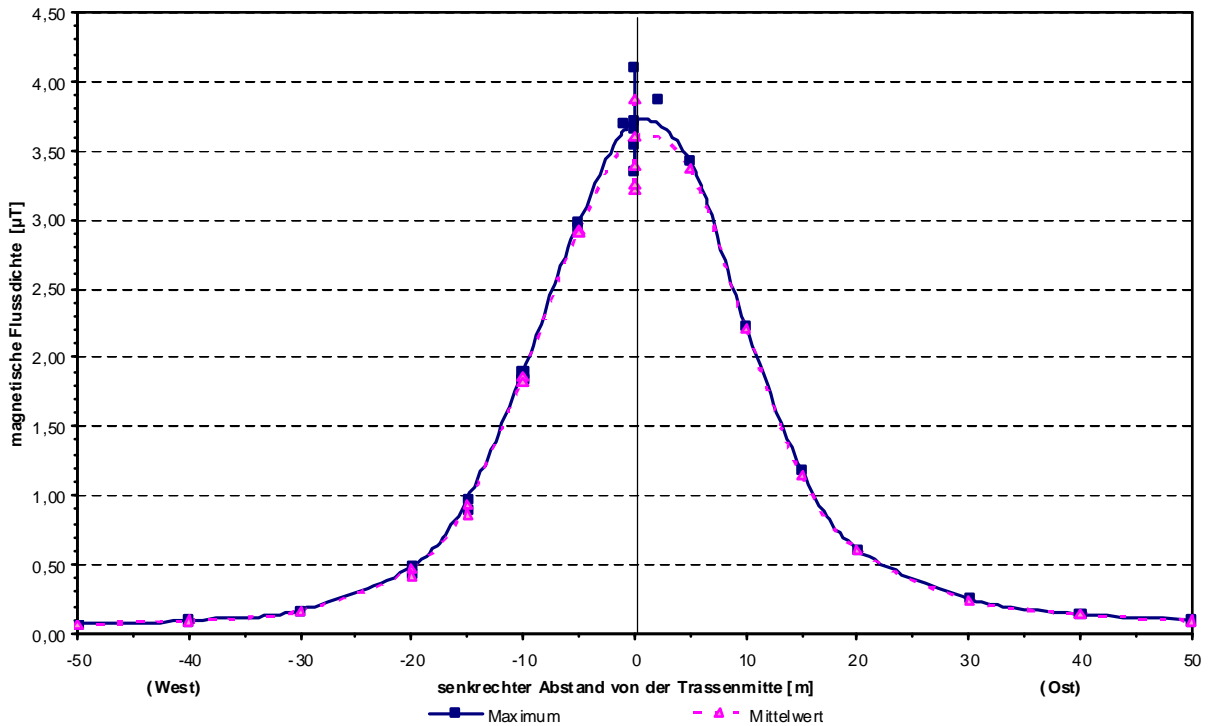


Abbildung 3/78
110 kV-Freileitung, FL110_5: Querprofil der magnetischen Flussdichte

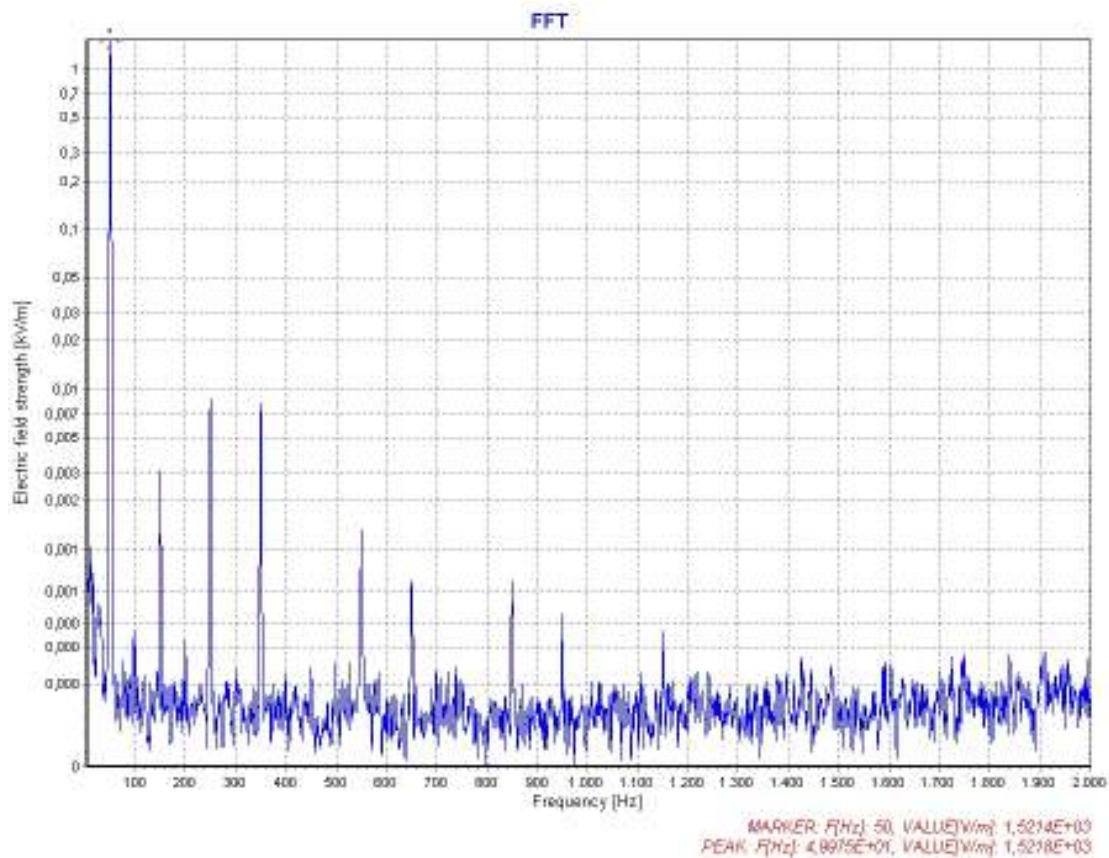


Abbildung 3/79
 110 kV-Freileitung, FL110_5: Spektrum der elektrischen Feldstärke

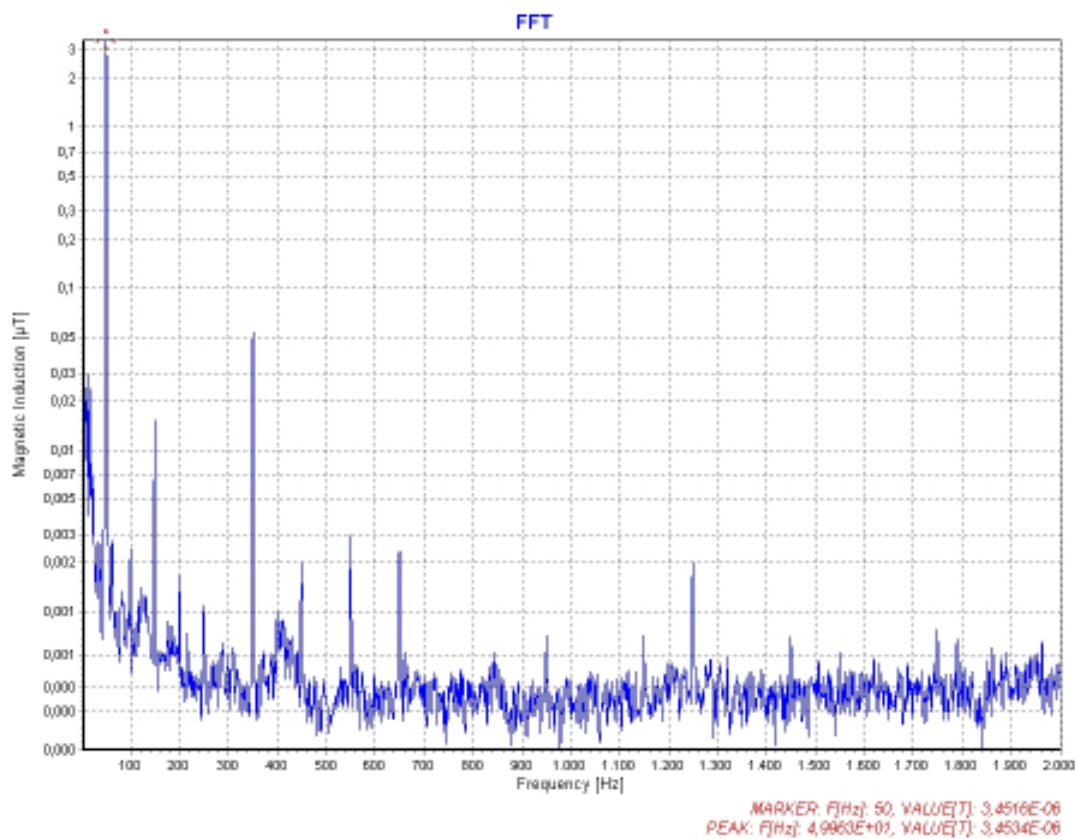


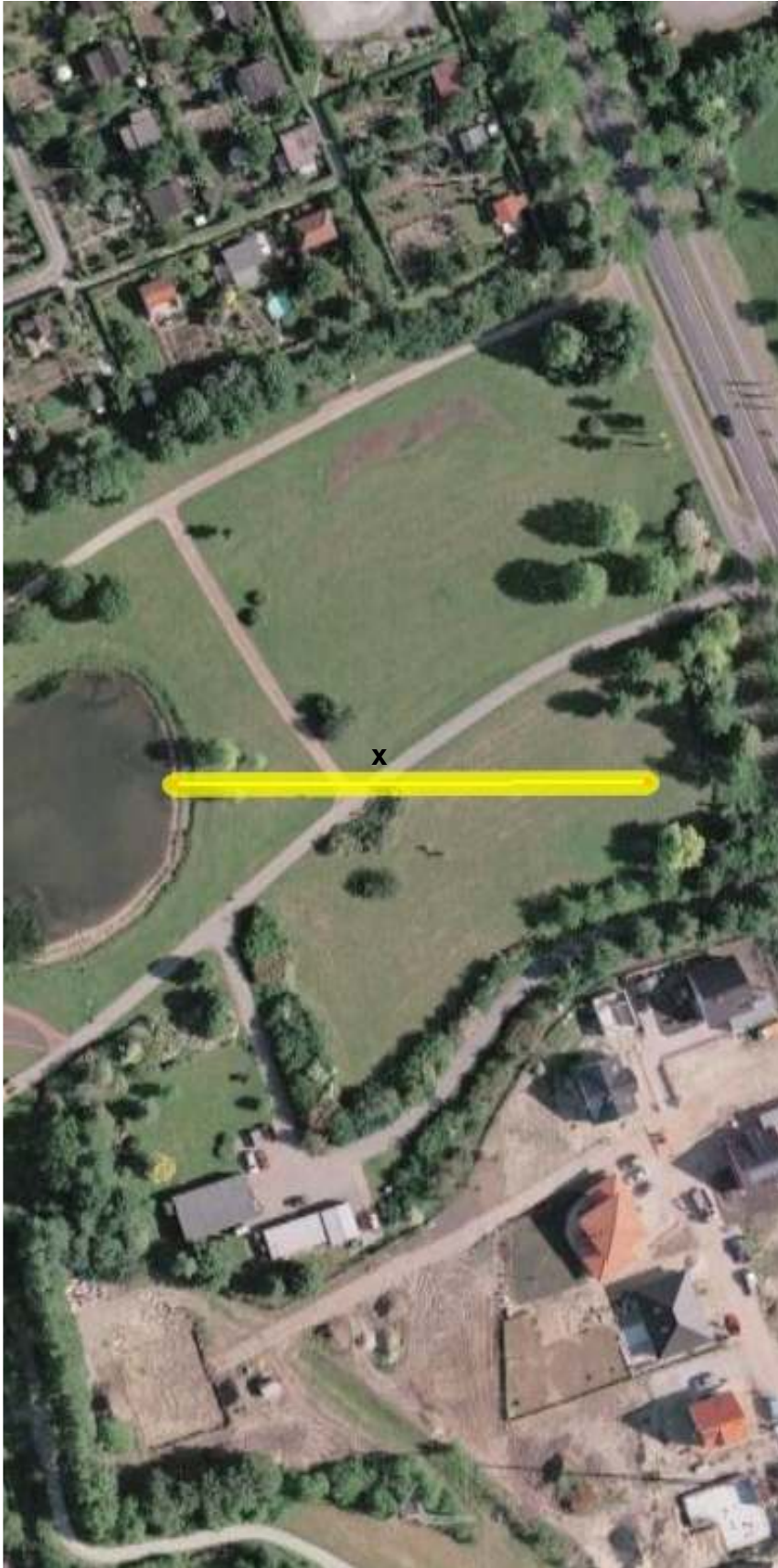
Abbildung 3/80
 110 kV-Freileitung, FL110_5: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.4.7 FL110_6

Objekt	110 kV-Freileitung				
Mastbild	Einebene: R S T I T S R				
Datum	17.04.2009, (15:10 –16:10 Uhr)				
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	Laterne in Spannungsfeldmitte (→ Messung 5 m entfernt in Trassenmitte), Ostseite: kleiner Baum bei 30 m (3 m entfernt), bei 45 m Baum (7 m hoch, 6 m entfernt) Westseite: großer Stein bei 15 m (2 m entfernt), Baum bei 30 m (2 m ent- fernt), Messpunkt bei 40 m am Seeufer 1 m tiefer (1,5 m von See)				
Bodenbeschaffenheit	Wiese und Asphaltweg (E-Feld über dem Weg ca. 3 % niedriger als über der Wiese)				
Wetterbedingungen	wechselnd bewölkt, mäßiger Wind, 20 °C, 59 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [μT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	1,238	1,051	0,652	0,444
	20 m	0,649	0,604	0,345	0,315
50 m	0,194	0,161	0,046	0,034	
Bemerkungen	Das Maximum der magnetischen Flussdichte wurde bei einem Abstand zur Trassenmitte von 7 m in östlicher Richtung gemessen.				



Foto: FL110_6, Blick von Osten



Luftbild: FL110_6, 110 kV-Freileitung, der Messweg verläuft größtenteils über eine Rasenfläche und endet auf der Westseite bei 40 m am Ufer des kleinen Teiches, X – Ort der nicht durch die Laterne gestörten Messung der elektrischen Feldstärke in Trassenmitte

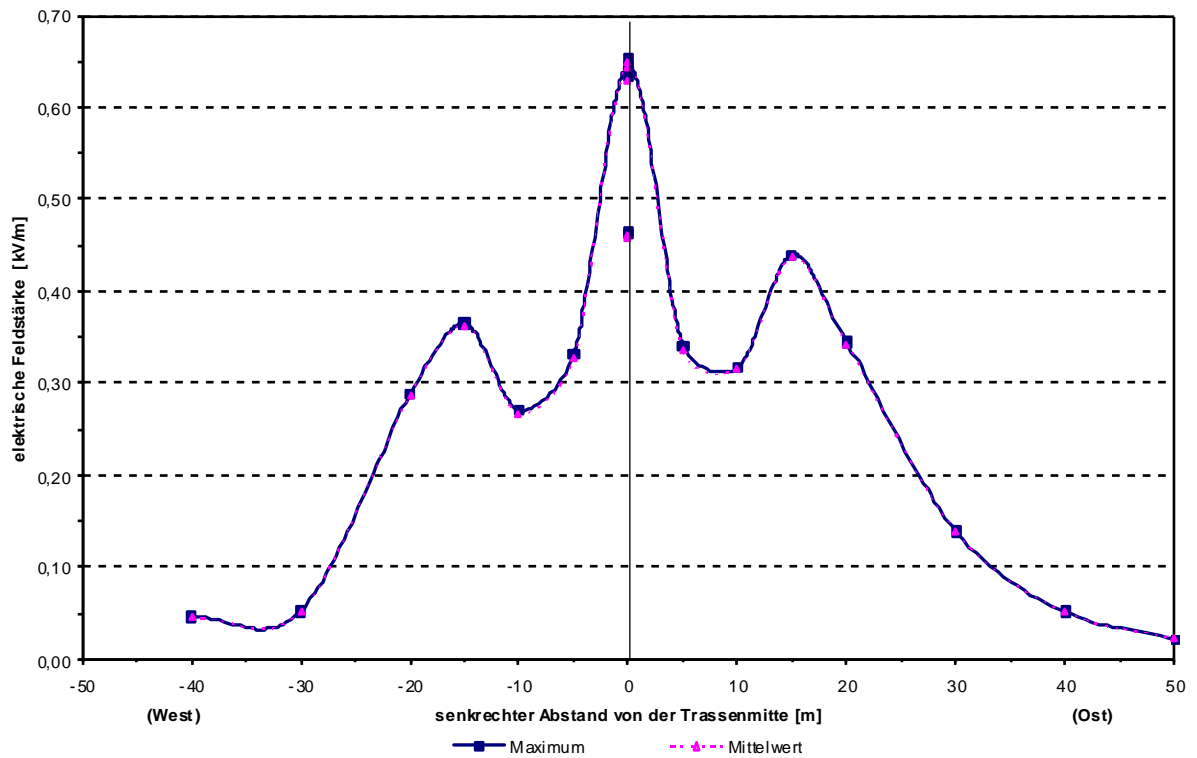


Abbildung 3/81
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Querprofil der elektrischen Feldstärke, Teich (ab 42 m) im Anschluss an das Querprofil; die kleineren Werte in Trassenmitte (um 0,46 kV/m) sind auf dem eigentlichen Messweg neben einer Laterne gemessen worden, die ungestörte Messung erfolgte 5 m trassenparallel versetzt auf dem Rasen (vgl. Foto und Luftbild)

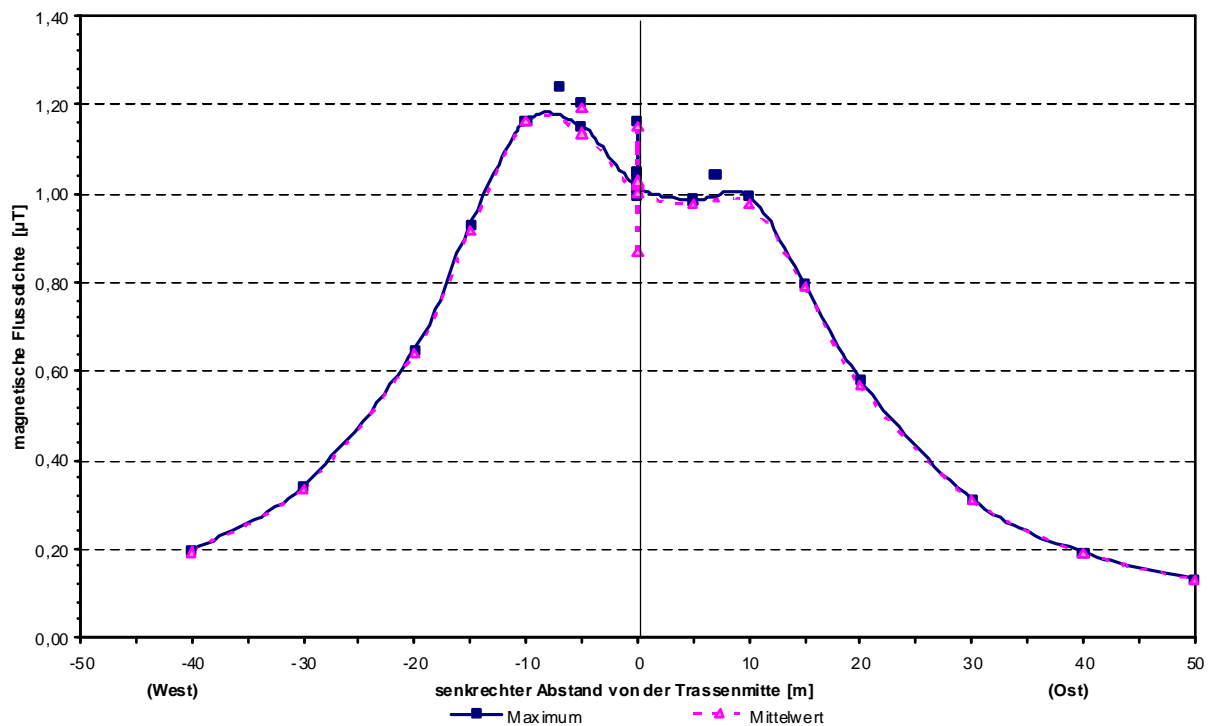


Abbildung 3/82
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Querprofil der magnetischen Flussdichte

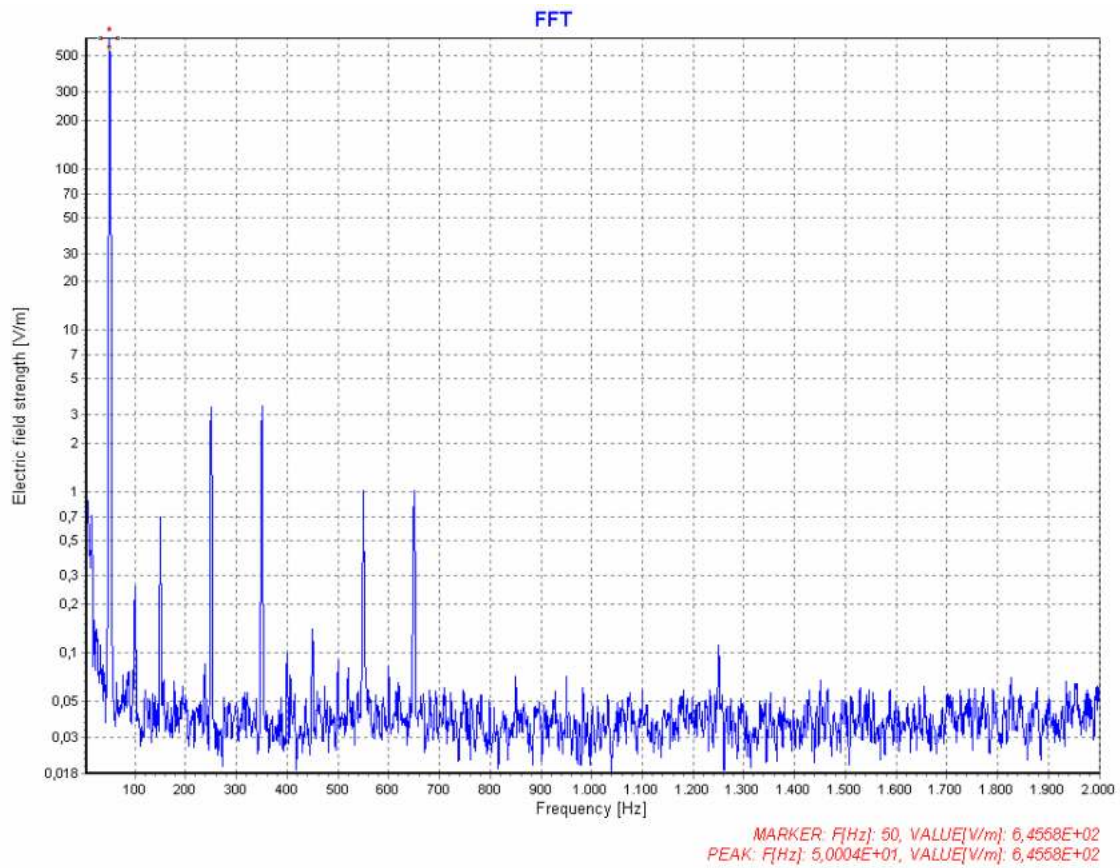


Abbildung 3/83
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Spektrum der elektrischen Feldstärke

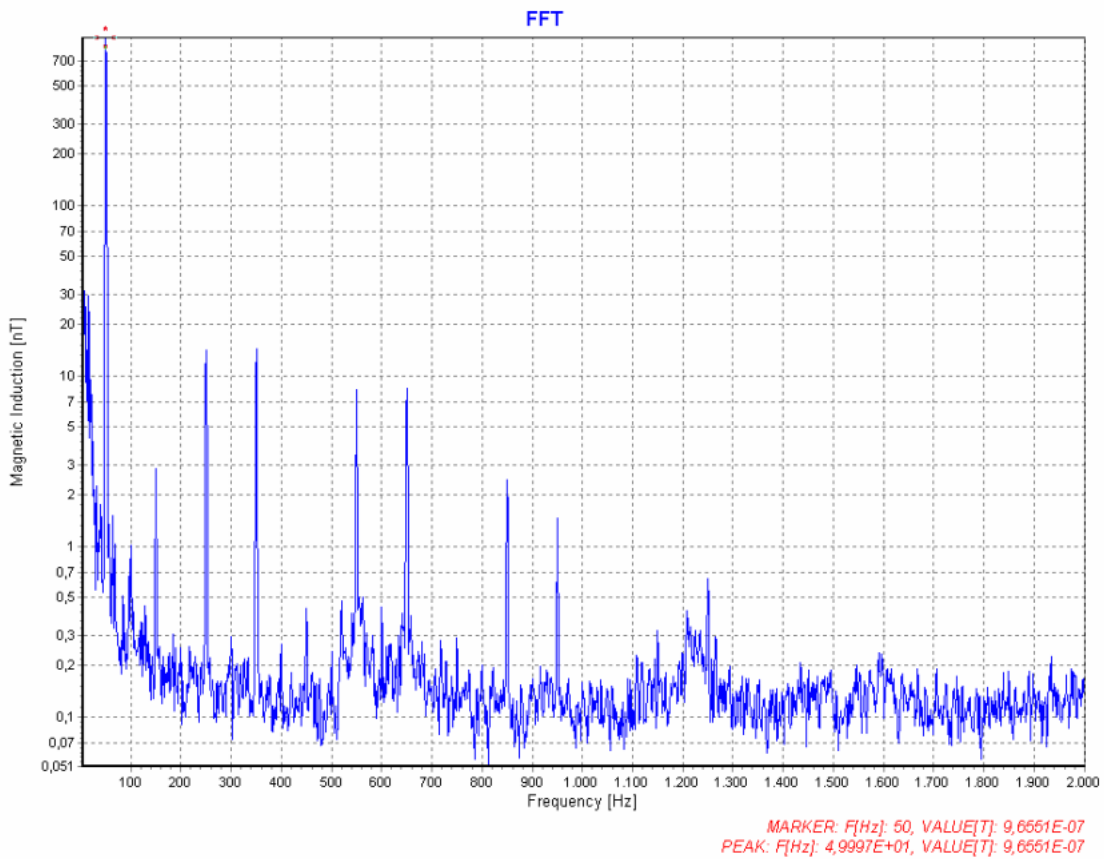


Abbildung 3/84
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.4.8 FL110_7

Objekt	110 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	06.04.2009, (14:00 – 14:35 Uhr)				
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	gut 20 m nach Osten verläuft eine Busch- und Baumreihe parallel zum Messweg (nach Süden erst ab 25 m), in 60 m Abstand nach Süden verläuft eine hohe Baumreihe parallel zur Trasse				
Bemerkungen	Zur Zeit der Messung stand nur das südliche System unter Spannung.				
Bodenbeschaffenheit	Asphaltiert, feucht				
Wetterbedingungen	Leicht bewölkt, windstill, 19 °C, 65 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [μT]		Elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	1,351	0,988	0,585	0,424
	20 m	0,496	0,345	0,206	0,120
50 m	0,092	0,066	0,019	0,015	
Bemerkungen	Vergleich: Freileitung – Erdkabelabschnitte der gleichen Trasse (s. Abschnitt 3.1.2.7.1, EK110_1)				



Foto: FL110_7, Blick von Süden



Luftbild: FL110_7, 110 kV-Freileitung

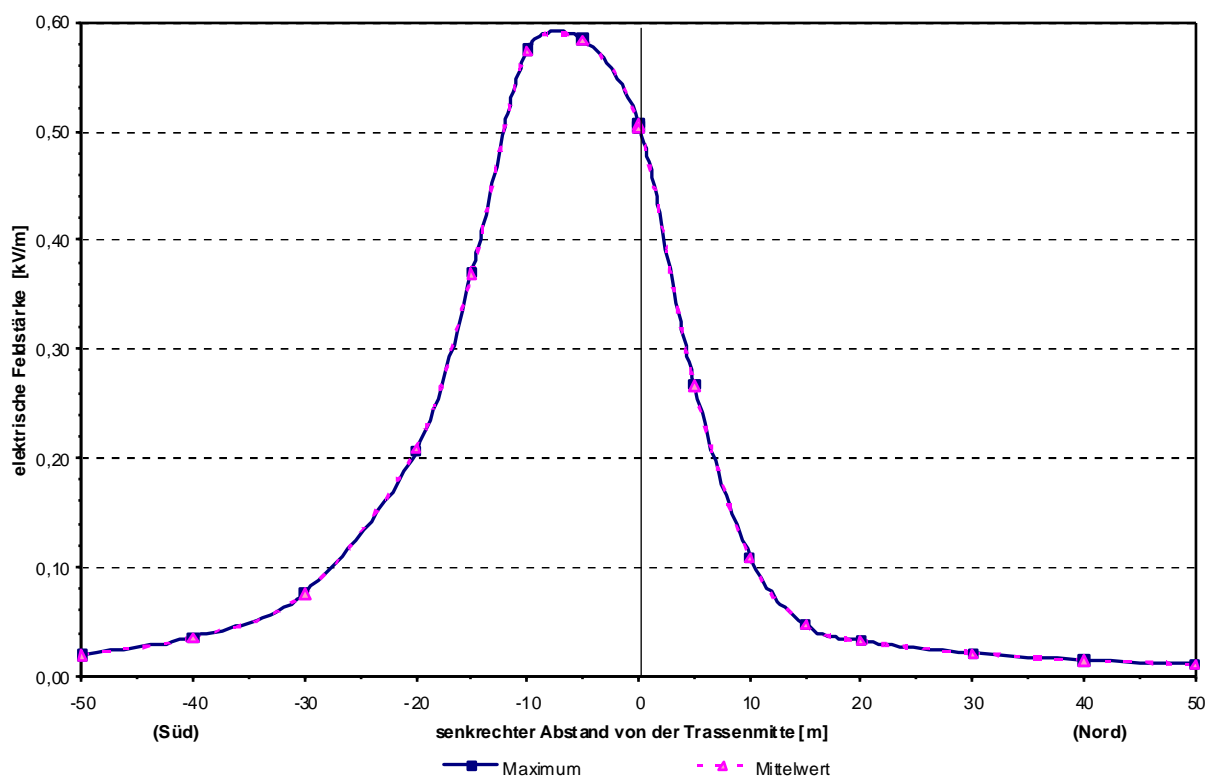


Abbildung 3/85
110 kV-Freileitung, FL110_7: Querprofil der elektrischen Feldstärke

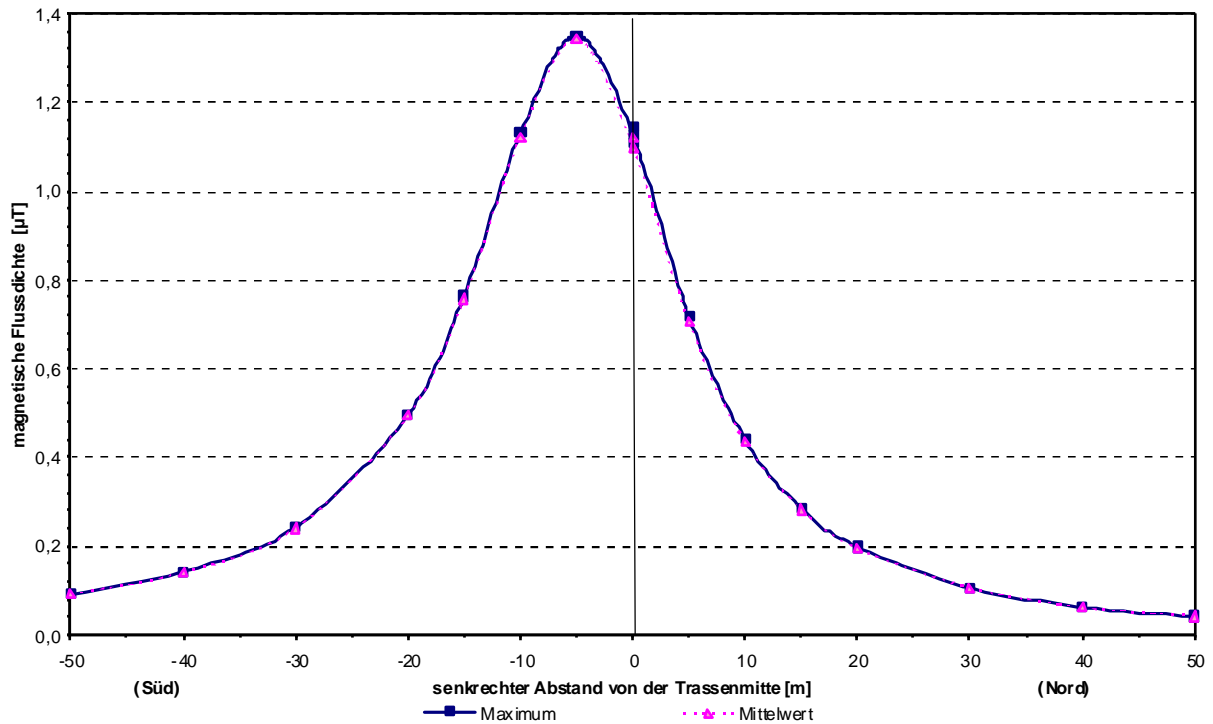


Abbildung 3/86
110 kV-Freileitung, FL110_7: Querprofil der magnetischen Flussdichte

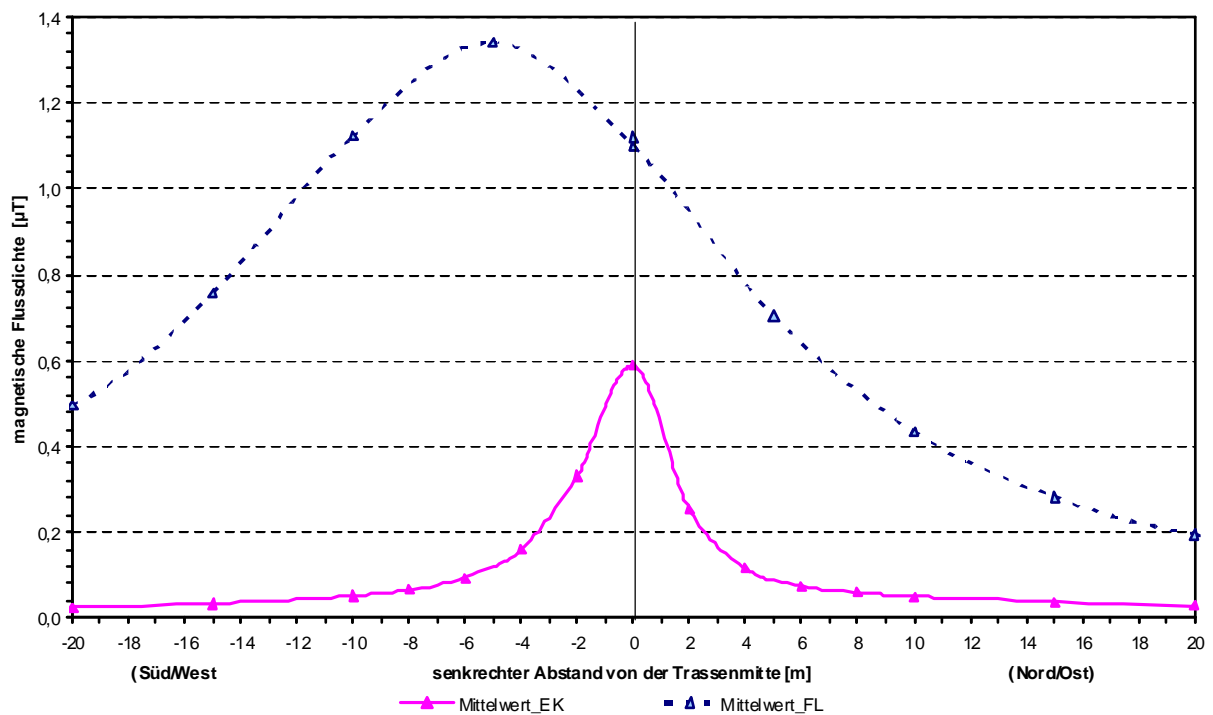


Abbildung 3/87
110 kV-Freileitung, FL110_7/EK110_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
Vergleich: verschiedene Abschnitte der gleichen 110 kV-Trasse :
Freileitung ↔ Erdkabel (vgl. Abschnitt 3.1.2.7.1)

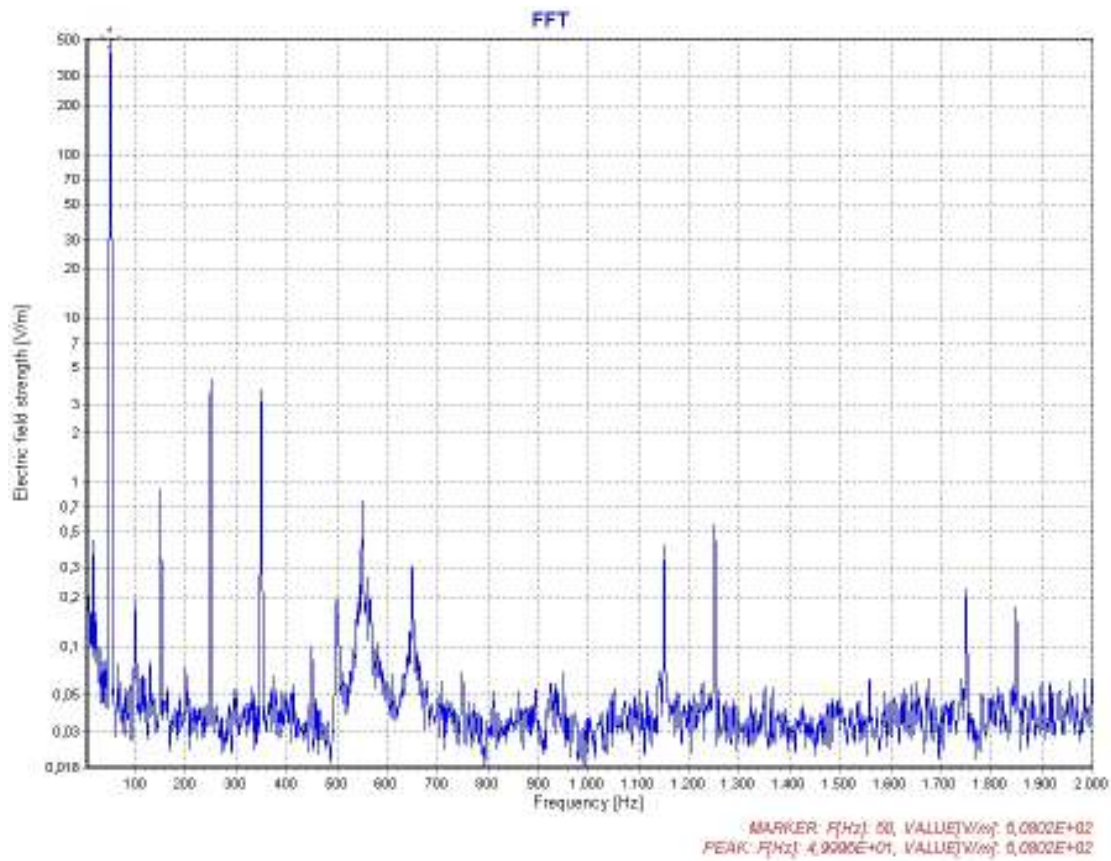


Abbildung 3/88
 110 kV-Freileitung, FL110_7: Spektrum der elektrischen Feldstärke

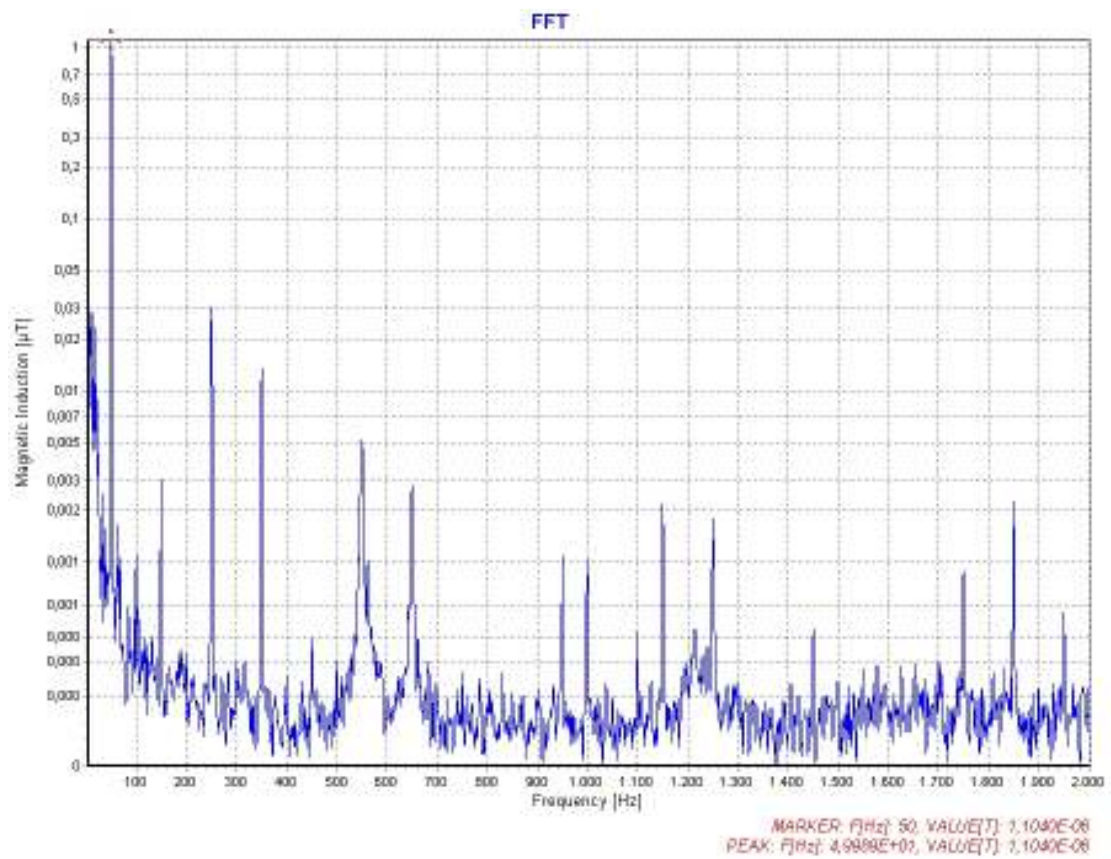


Abbildung 3/89
 110 kV-Freileitung, FL110_7: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.4.9 FL110_8

Objekt	110 kV-Freileitung				
Mastbild	Donau				
Datum	06.04.2009, (14:45 –15:30 Uhr)				
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	☞				
Bemerkungen	☞				
Bodenbeschaffenheit	Ost: leicht feuchter Acker mit beginnendem Pflanzenwuchs West: trockener Acker bis 15m, dann 5 m befestigter Weg, dann trockener, gepflügter Acker				
Wetterbedingungen	wolkenlos, windstill, 21 °C, 66 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
		Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
	Trasse	0,278	0,258	0,795	0,740
	20 m	0,145	0,122	0,272	0,263
50 m	0,024	0,021	0,042	0,041	
Bemerkungen	Vergleich: Freileitung- Kabel-Abschnitt der gleichen Trasse (s. Abschnitt 3.1.2.7.2, EK110_2)				



Foto: FL110_8, Blick von Westen, der Messweg verläuft vom Feld rechts im Bild über die Weggabelung auf das Feld geradeaus (dies Foto wurde einige Wochen nach der Messung aufgenommen, zur Zeit der Messung waren die Felder begehbar)



Luftbild: FL110_8, 110 kV-Freileitung, der Messweg verläuft auf zwei Äckern und quert die Feldweggabelung (X = Trassenmitte), am unteren Bildrand steht der Abspannmast

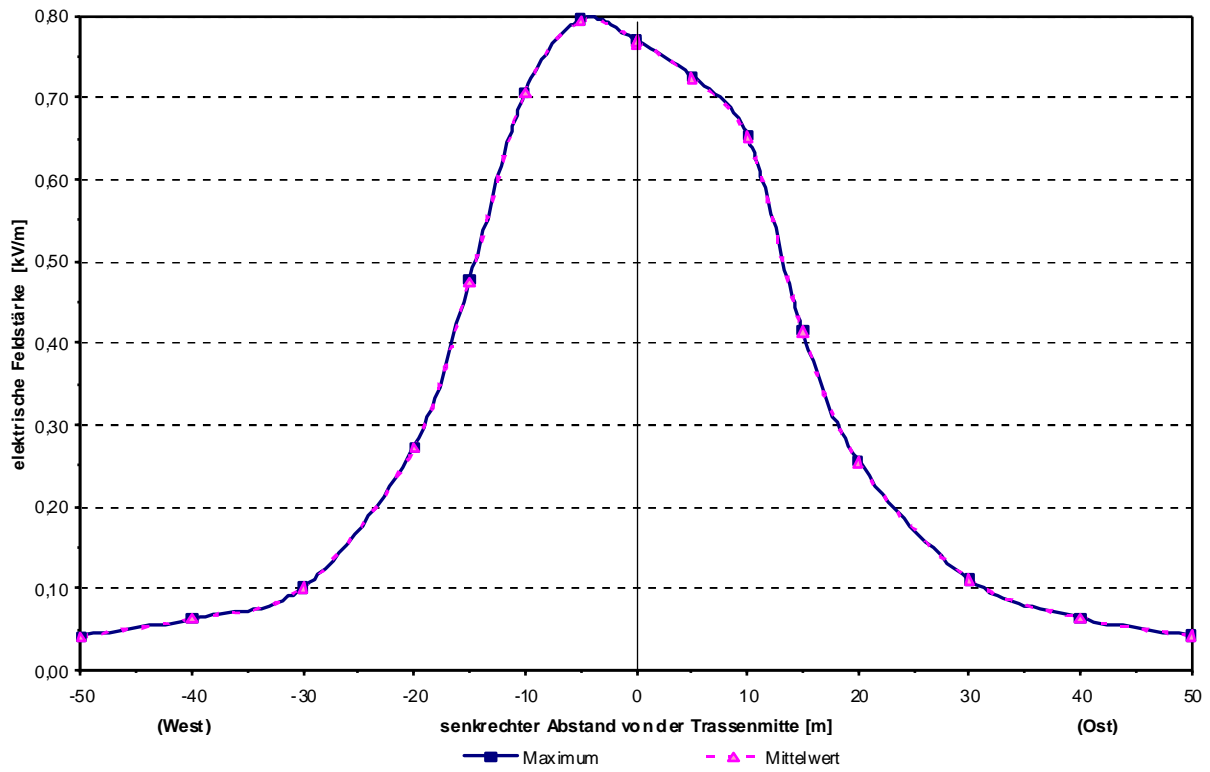


Abbildung 3/90
110 kV-Freileitung, FL110_8: Querprofil der elektrischen Feldstärke

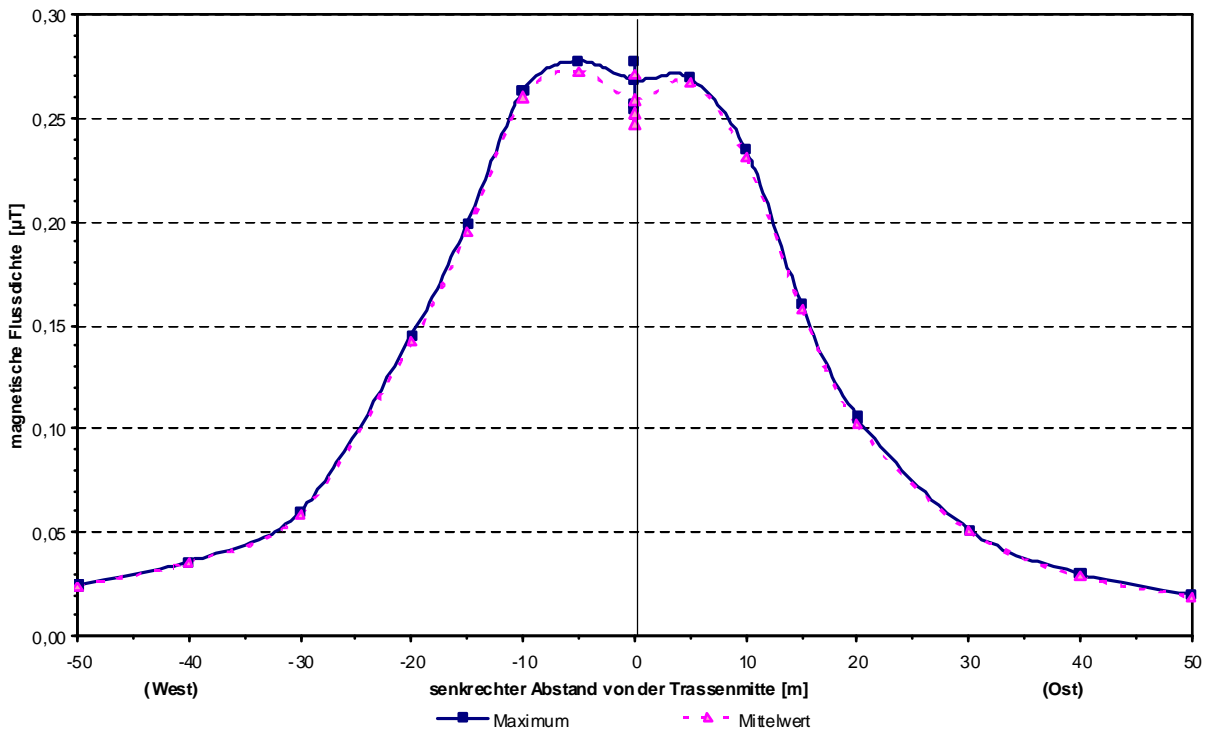


Abbildung 3/91
110 kV-Freileitung, FL110_8: Querprofil der magnetischen Flussdichte

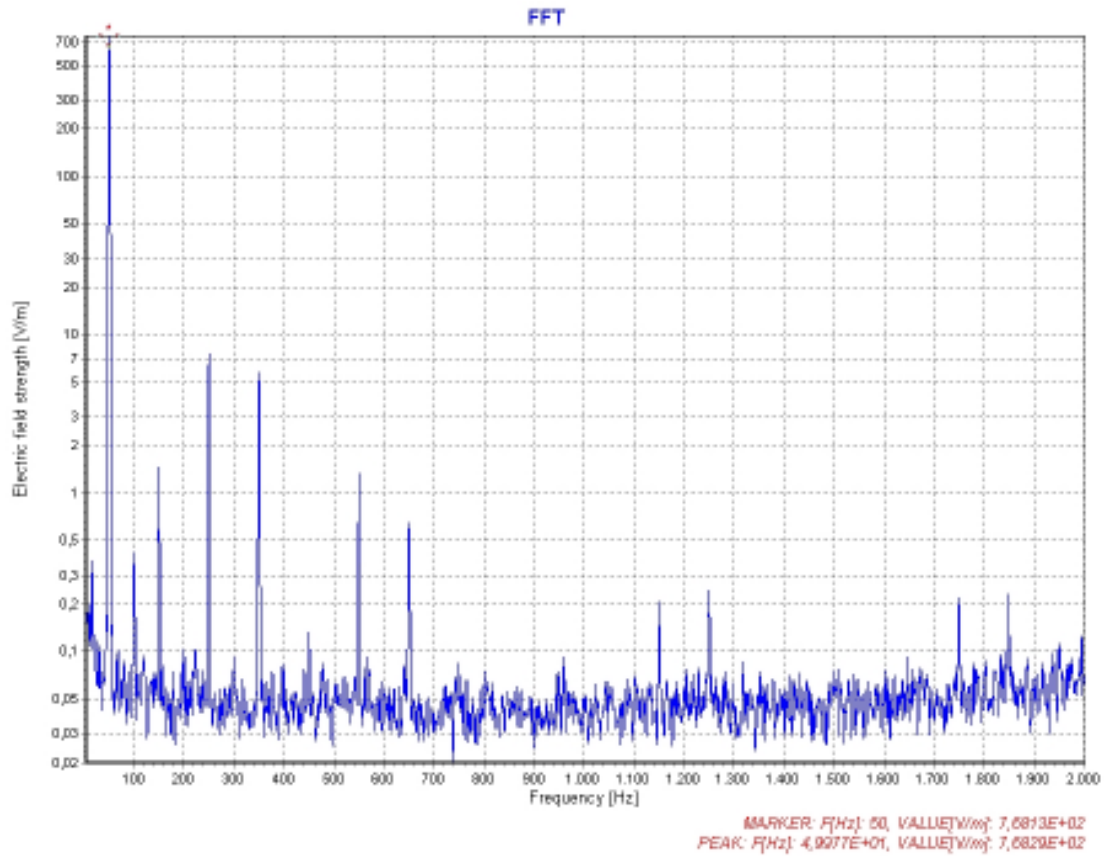


Abbildung 3/92
 110 kV-Freileitung, FL110_8: Spektrum der elektrischen Feldstärke

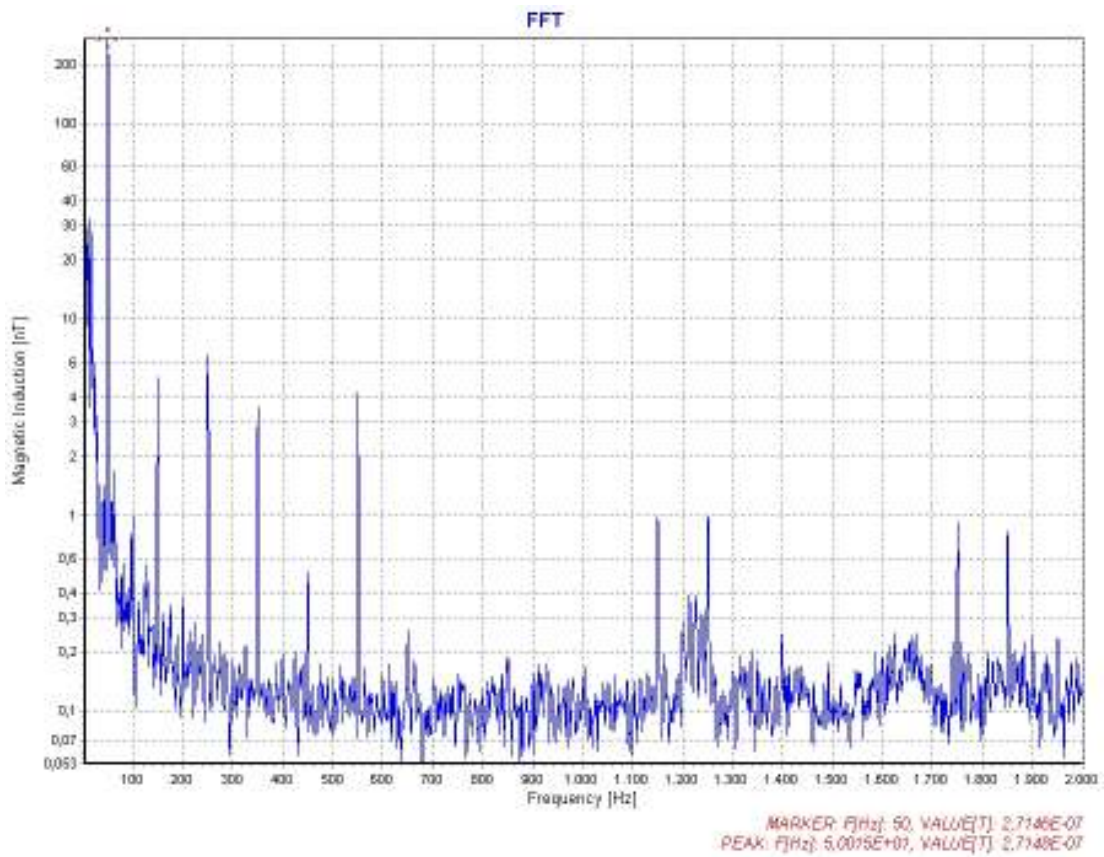


Abbildung 3/93
 110 kV-Freileitung, FL110_8: Spektrum der magnetischen Flussdichte

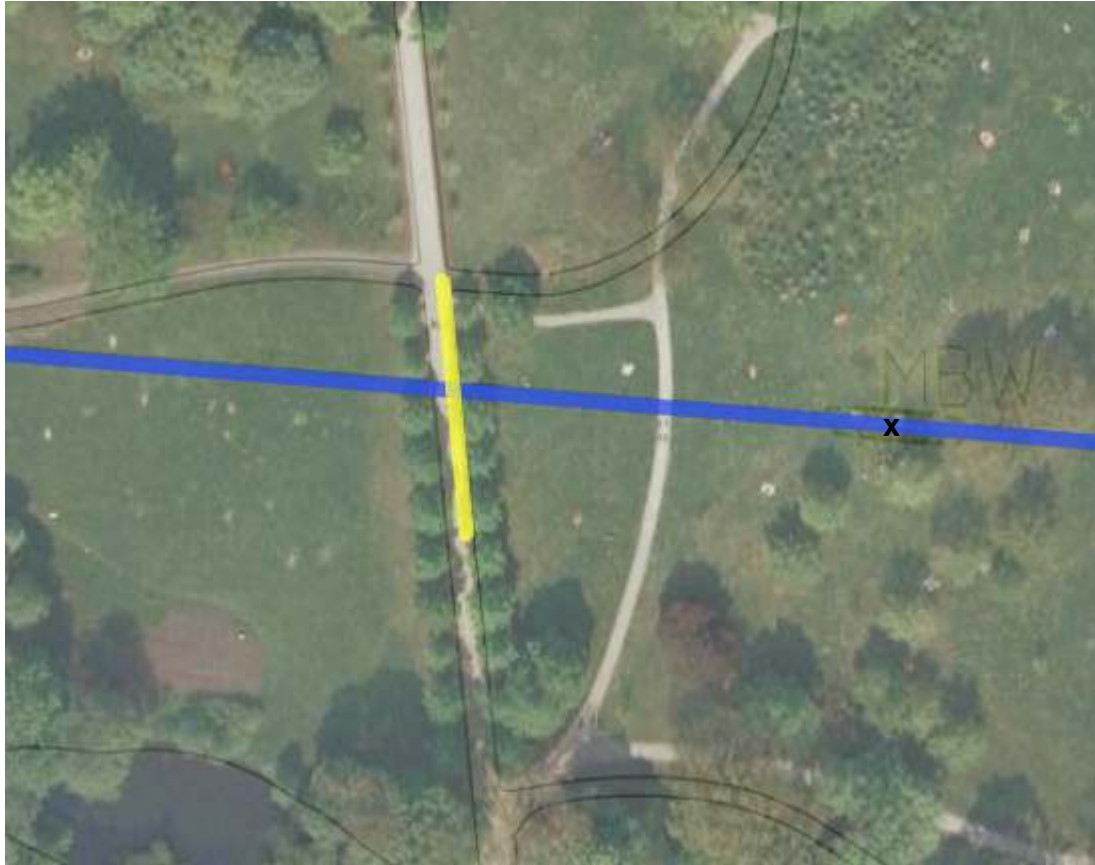
3.1.2.5 Ergebnisse der Messungen an 380 kV-Erdkabeltrassen

3.1.2.5.1 EK380_1

Objekt	380 kV-Erdkabel		
Datum	21.04.2009, (14:15 – 14:45 Uhr)		
Winkel des Messweges	10° zur Trassensenkrechten		
(störende) Objekte	☼		
Bodenbeschaffenheit	halbbefestigter Schotterweg, trocken		
Wetterbedingungen	klar, schwacher bis kein Wind, 21 °C, 39 % rel. Luftfeuchte		
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [μT]	
		Maximum	Mittelwert
	Trasse (-2 / +4 m)	0,326	0,287
	10 m	0,184	0,167
	20 m	0,101	0,088
	Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe: 0,386 μT		
Bemerkungen	Vergleich (s. Abschnitt 3.1.2.2.9, FL380_5): Freileitung (Spannfeld vor dem Abspannmast) ↔ Erdkabel		
	Maximum über einem Muffenbauwerk in der Nähe: 0,260 μT (1 m Höhe)		



Foto: EK380_1, Blick von Osten, das Erdkabel verläuft senkrecht zum Weg auf den Betrachter zu



Luftbild: EK380_1, 380 kV-Erkabeltrasse, der Messweg verläuft am linken Rand des Feldweges, der die Trasse kreuzt (x – Muffenbauwerk)

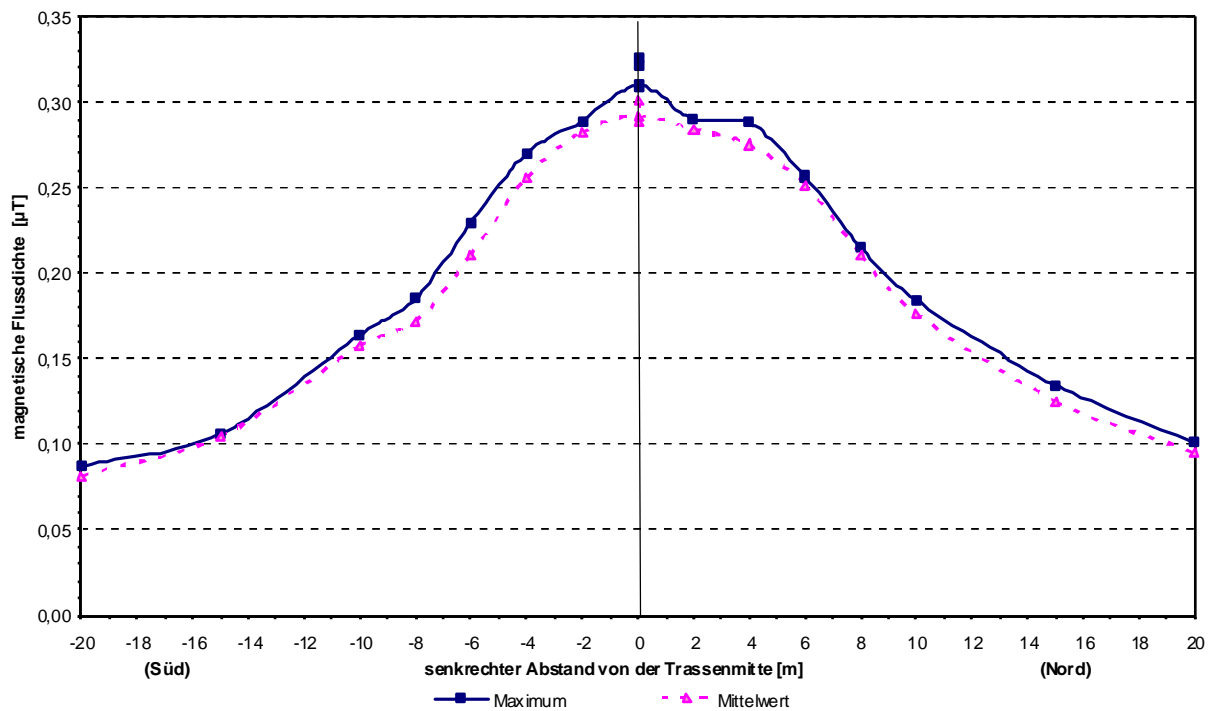


Abbildung 3/94
380 kV-Erkabeltrasse, EK380_1: Querprofil der magnetischen Flussdichte

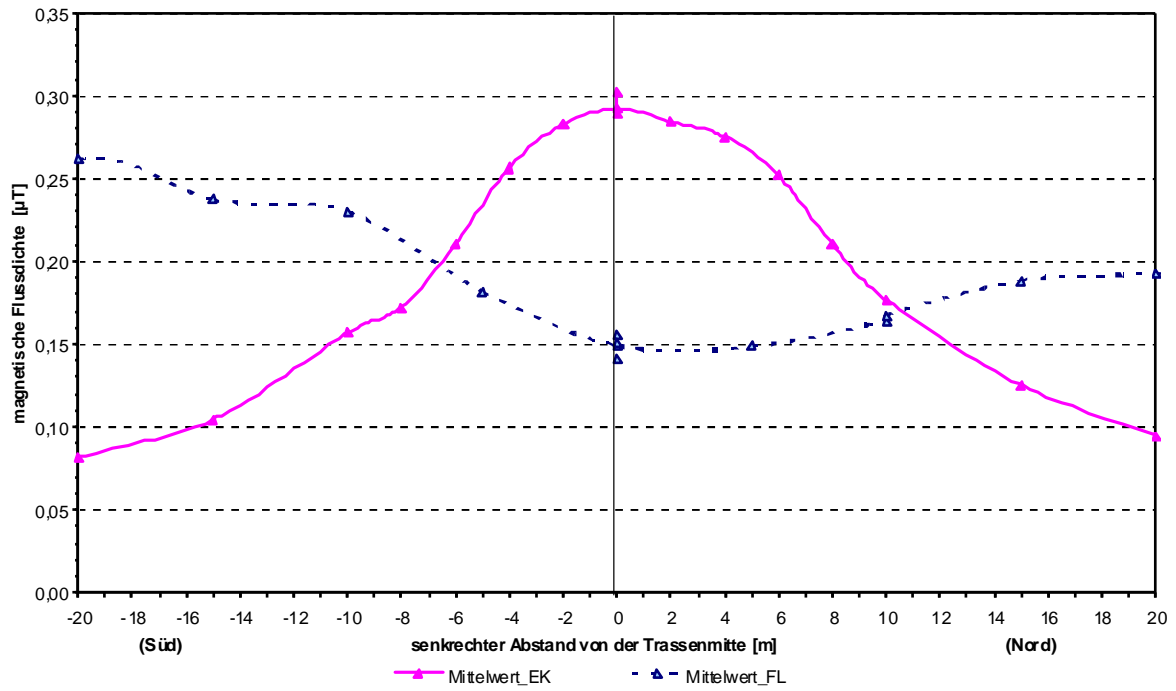


Abbildung 3/95
 380 kV-Trasse, EK380_1/FL380_5: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Vergleich: verschiedene Abschnitte der gleichen 380 kV-Trasse : Freileitung ↔ Erdkabel (vgl. Abschnitt 3.1.2.2.9)

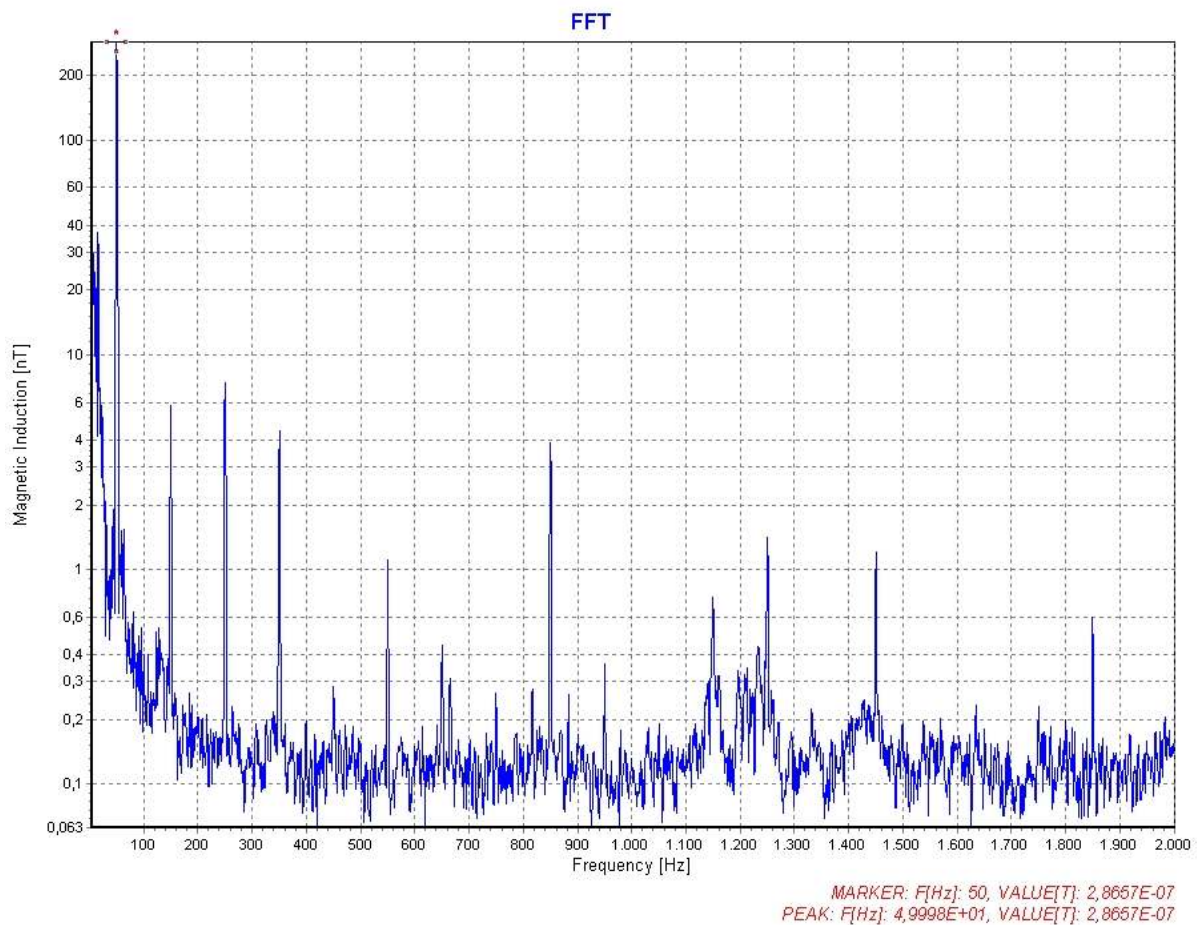


Abbildung 3/96
 380 kV-Erkabeltrasse, EK380_1: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.5.2 EK380_2

Objekt	380 kV-Erdkabel		
Datum	21.04.2009, (15:00 – 15:45 Uhr)		
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse		
(störende) Objekte	☼		
Bodenbeschaffenheit	fester Sandweg, Kies		
Wetterbedingungen	klar, schwacher Wind, 20 °C, 43 % rel. Feuchte		
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]	
		Maximum	Mittelwert
	Trasse (± 2 m)	3,517	3,107
	10 m	0,514	0,494
	20 m	0,170	0,160
Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe: 6,216 µT			
Bemerkungen	Maximum auf der nahe gelegenen Brücke, bei der die Kabel auf der Unterseite der Brücke verlegt sind: 10,446 µT in 1 m Höhe und 36,624 µT in 0,2 m Höhe		



Foto: EK380_2, Blick von Westen den Messweg entlang, das Erdkabel verläuft unter dem Fußweg, der den Messweg kreuzt



Luftbild: EK380_2, 380 kV-Erdkabeltrasse, sie verläuft 1,9 m unter dem Parkweg, nur an der Brücke liegen die Kabel nebeneinander 0,5 m unter dem Asphalt (X)

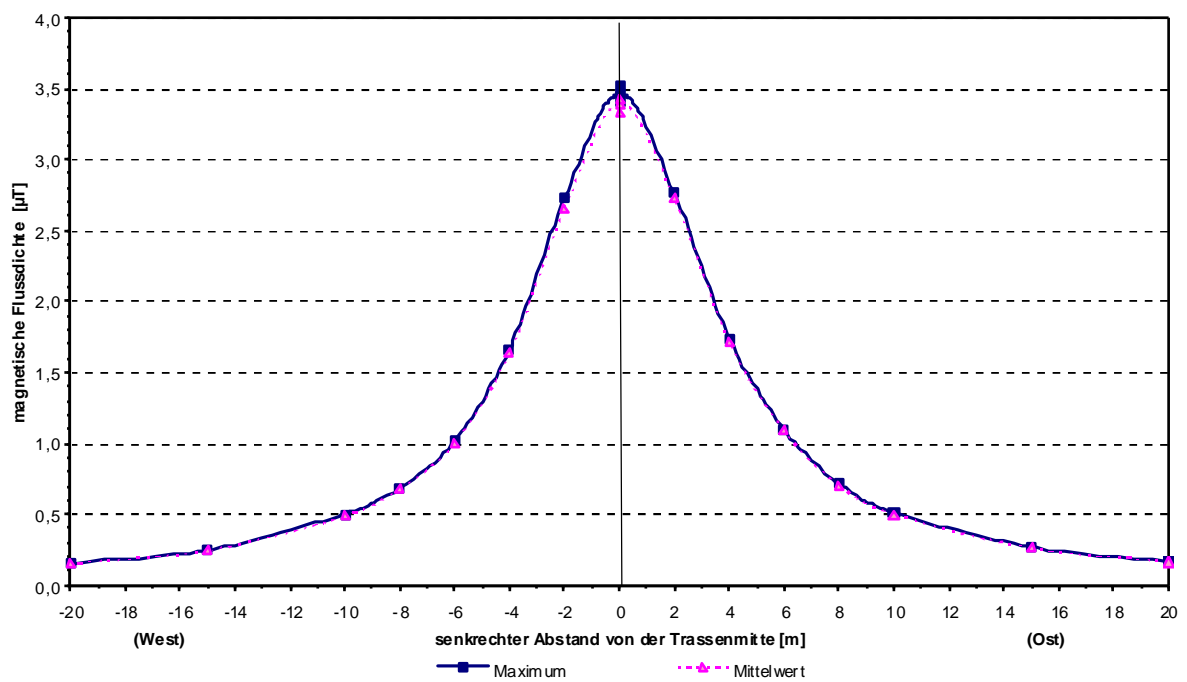


Abbildung 3/97
380 kV-Erdkabeltrasse, EK380_2: Querprofil der magnetischen Flussdichte

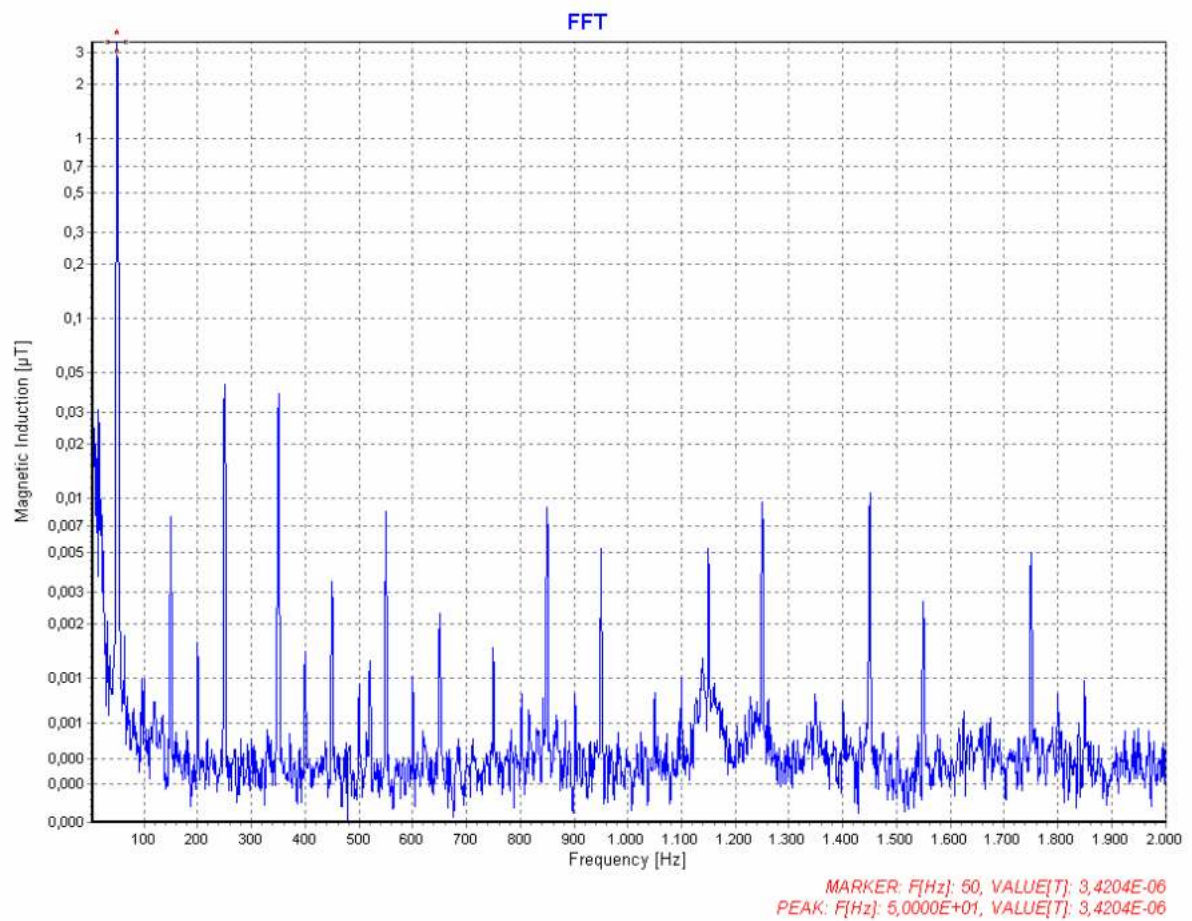


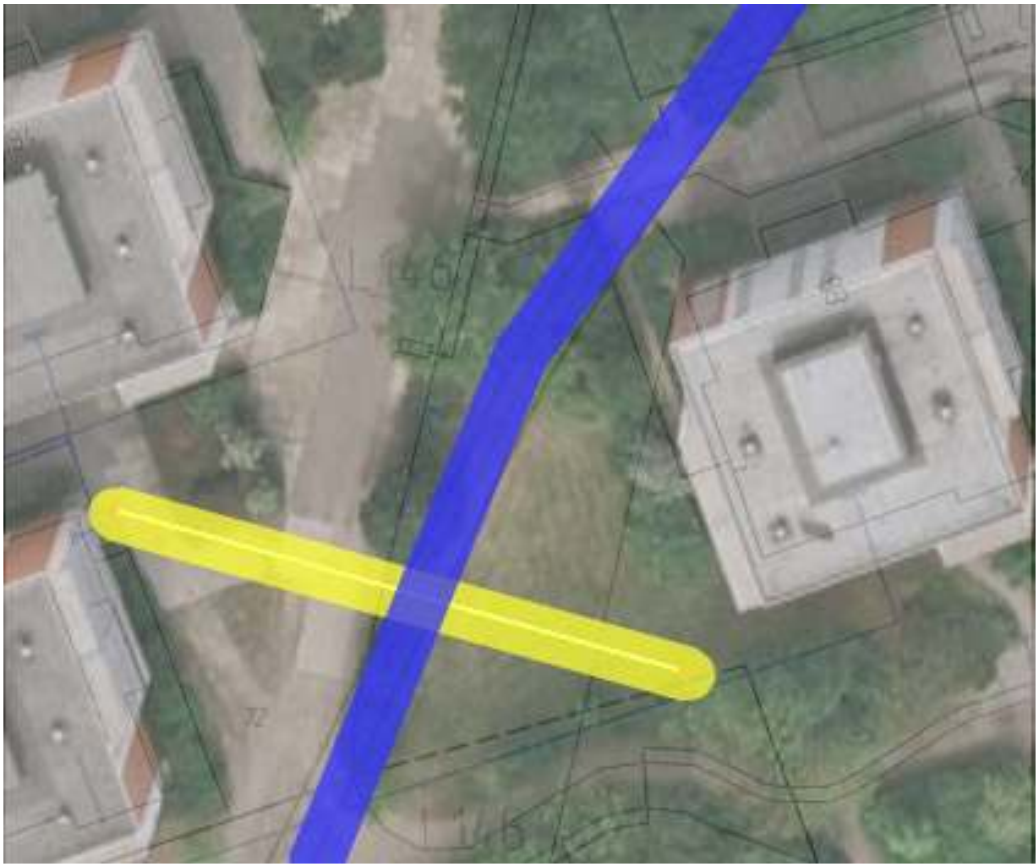
Abbildung 3/98
380 kV-Erdkabeltrasse, EK380_2: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.5.3 EK380_3

Objekt	380 kV-Kabeltunnel		
Datum	21.04.2009, (17:00 – 17:45 Uhr)		
Winkel des Messweges	~15° zur Trassen senkrechten		
(störende) Objekte	Wohngebäude-Versorgungsleitungen, möglicherweise auch ein Mittelspannungserdkabel, wahrscheinlich ein Transformatorraum im EG eines Hochhauses		
Bemerkungen	☛		
Bodenbeschaffenheit	gepflasterter Fußweg, Rasenfläche zwischen zwei Hochhäusern		
Wetterbedingungen	klar, windstill, 19,5 °C, 41 % rel. Feuchte		
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]	
		Maximum	Mittelwert
	Trasse (-2 / +6 m)	0,156	0,154
	10 m	0,151	0,149
	20 m*	0,138	0,137
Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe: 0,162 µT			
Bemerkungen	Maximum auf einem nahe gelegenen Platz, an einer Stelle, an der laut Lageplan der Tunnel verlaufen sollte, aber ohne dort eine Tunnellängsrichtung bestimmen zu können, allerdings auch ohne andere sichtbare Quelle: 0,248 µT in 0,2 m Höhe		
	* Für 20 m wird hier nur der Wert auf der Ostseite aufgeführt, da auf der Westseite der Messwert von dem Feld, das von den Strömen auf einer sehr wahrscheinlich sich dort befindenden Hochhaus-Versorgungsleitung / Transformatorraum verursacht wird, dominiert wurde, dort: $B_{\max} = 0,369 \mu\text{T}$, $B_{\text{ave}} = 0,365 \mu\text{T}$, vgl. Abb. 3/99.		
	Es ist sehr wahrscheinlich, dass die Messergebnisse insgesamt mehr durch die Ströme auf und die Abstände von den Mittelspannungs- und Niederspannungsversorgungseinrichtungen bestimmt wurden, als von den Strömen auf der ca. 30 m tief gelegenen Tunneltrasse. Erste - für diese Trasse durchgeführte Berechnungen - zeigen einen maximalen Beitrag durch die Ströme auf der Trasse von knapp 15 nT und eine Abnahme von ca. 5 nT zum Rand des gemessenen Querprofils.		



Foto: EK380_3, Blick von Osten entlang des Messweges, der Tunnel verläuft in über 30 m Tiefe (von links nach rechts) an der Grenze zwischen der Wiese und dem Fußweg, im Erdgeschoss hinter der Front an der rechten Ecke des Hochhauses, auf das der Messweg zuläuft, befindet sich eine Magnetfeldquelle, sehr wahrscheinlich ein Transformatorraum mit der Hochhaus-Stromverteilung



Luftbild: EK380_3, 380 kV-Erdkabeltrasse

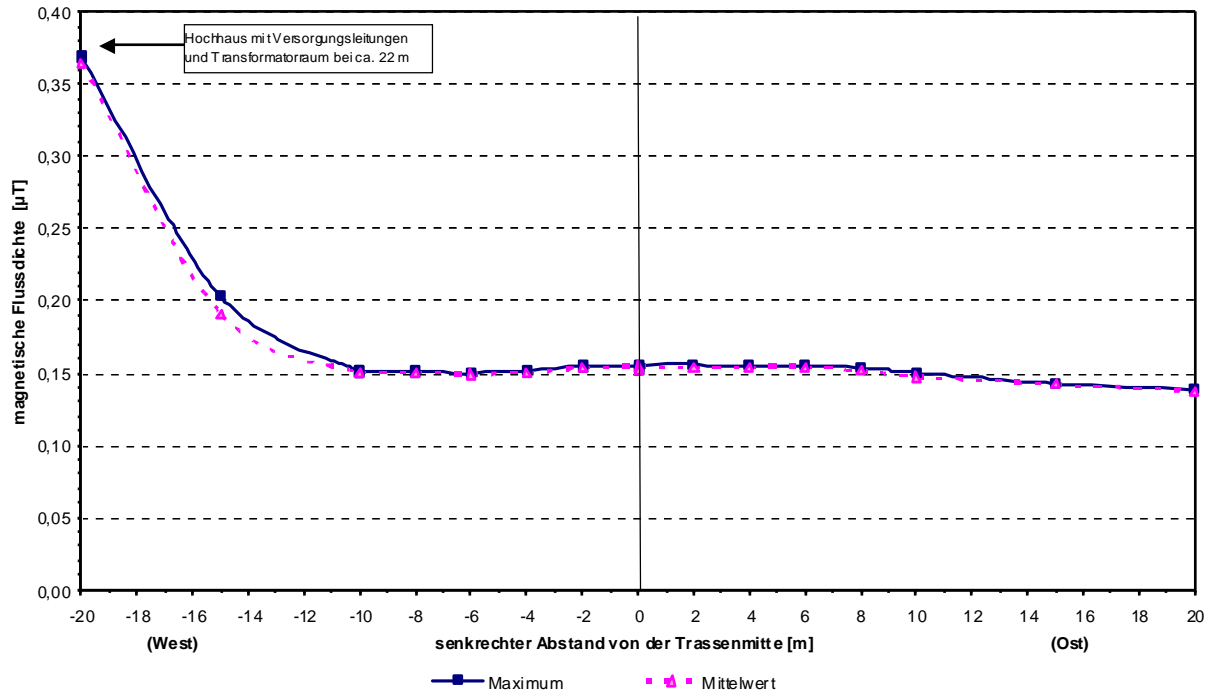


Abbildung 3/99
380 kV-Erdkabeltrasse, EK380_3: Querprofil der magnetischen Flussdichte

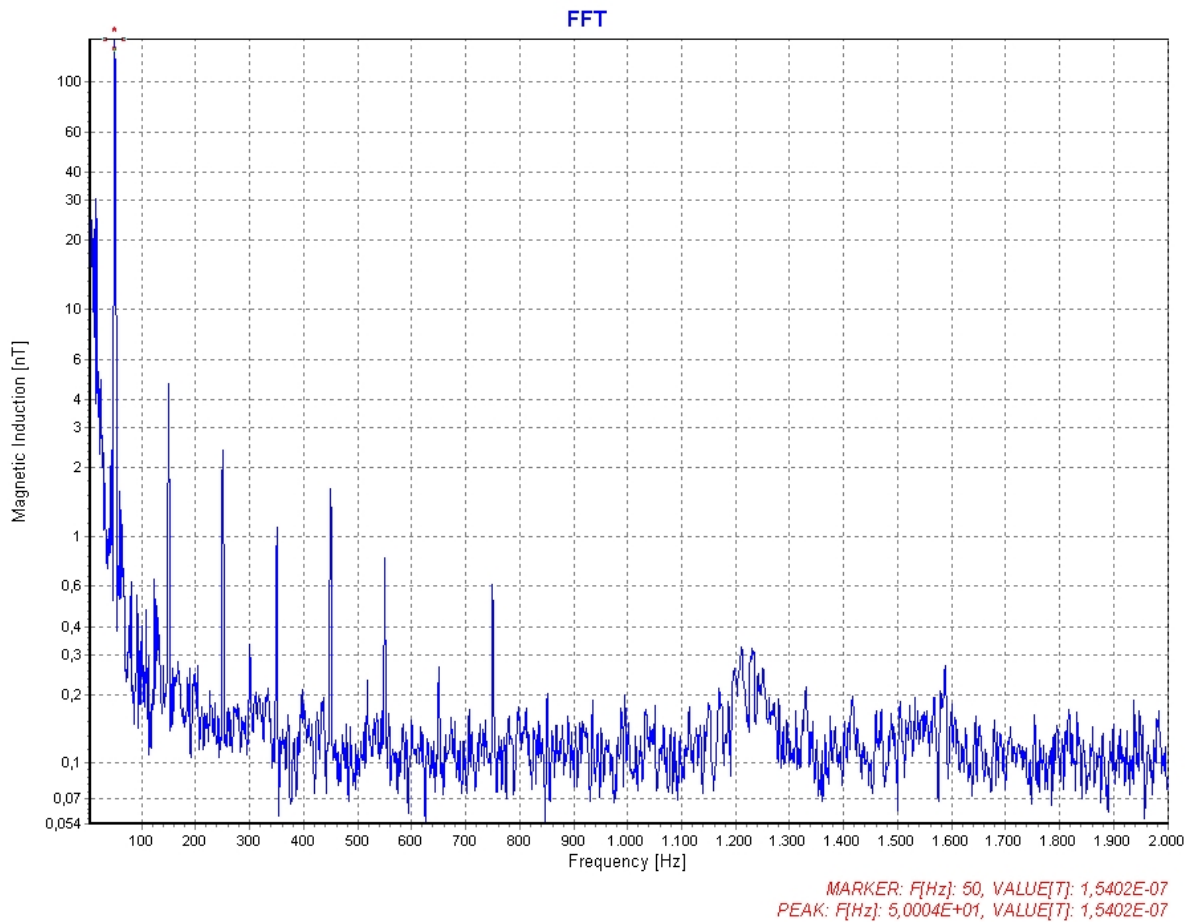


Abbildung 3/100
380 kV-Erdkabeltrasse, EK380_3: Spektrum der magnetischen Flussdichte

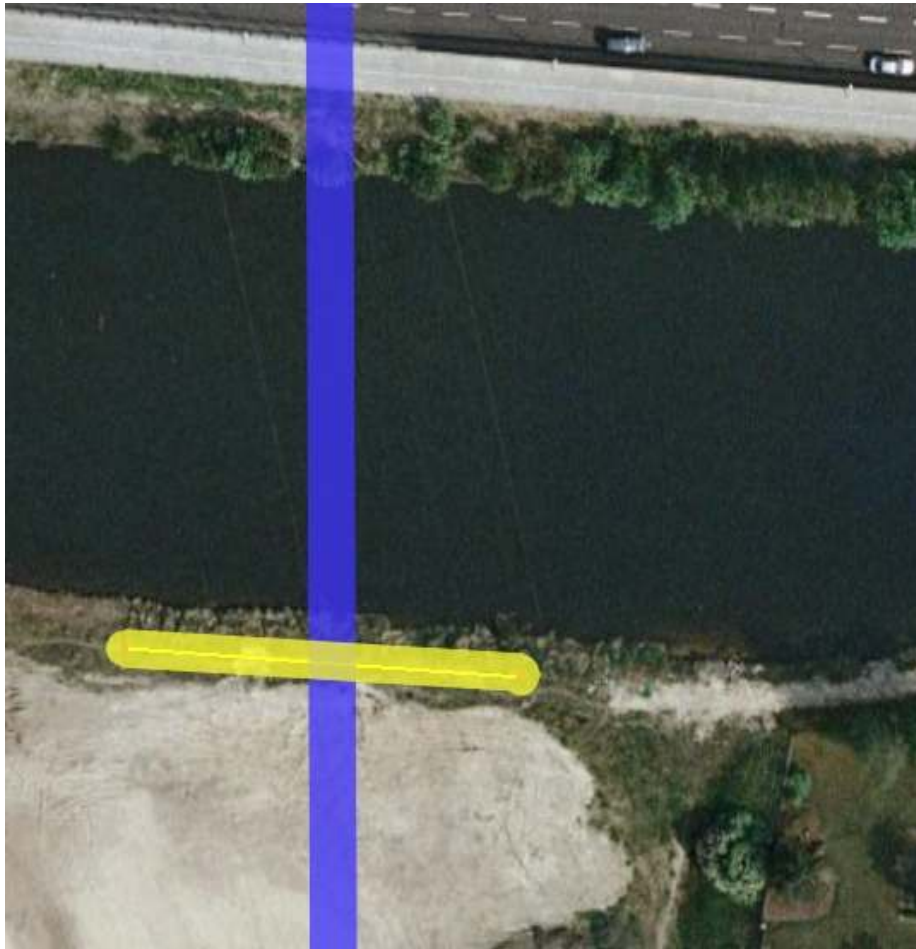
3.1.2.6 Ergebnisse der Messungen an einer 220 kV-Erdkabeltrasse

EK220_1

Objekt	220 kV-Trasse, Erdkabelabschnitt		
Datum	22.04.2009, (13:30 – 14:00Uhr)		
Winkel des Messweges	etwa senkrecht zur Trasse, deren Lage und Richtung auch vom Betreiber nicht genau beschrieben werden konnte		
(störende) Objekte	Abspannmast in ca. 100 m Entfernung nach Süden		
Bodenbeschaffenheit	Wiese, feine Erde, trocken		
Wetterbedingungen	Bewölkt, frischer Wind, 14 °C, 80 % rel. Feuchte		
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]	
		Maximum	Mittelwert
	Trasse (-2 / +6 m)	0,049	0,046
	10 m	0,041	0,039
	20 m	0,030	0,028
	Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe: 0,056 µT		
Bemerkungen	Während der Messung war nur eins von den beiden Systemen aktiv.		



Foto: EK220_1, Blick von Westen, der Messweg verläuft (senkrecht zum Erdkabel) parallel zum Fußweg auf dem Wiese vor den Büschen



Luftbild: EK220_1, 220 kV-Erdkabeltrasse

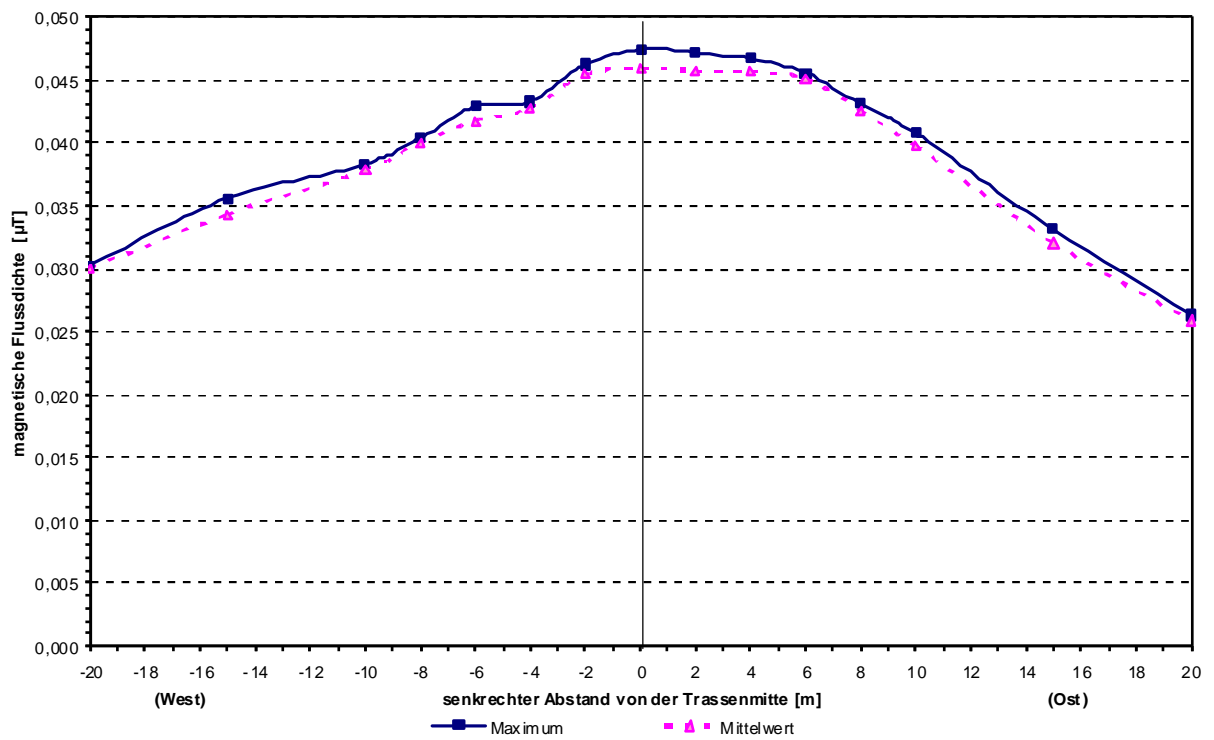


Abbildung 3/101
220 kV-Erdkabeltrasse, EK220_1: Querprofil der magnetischen Flussdichte

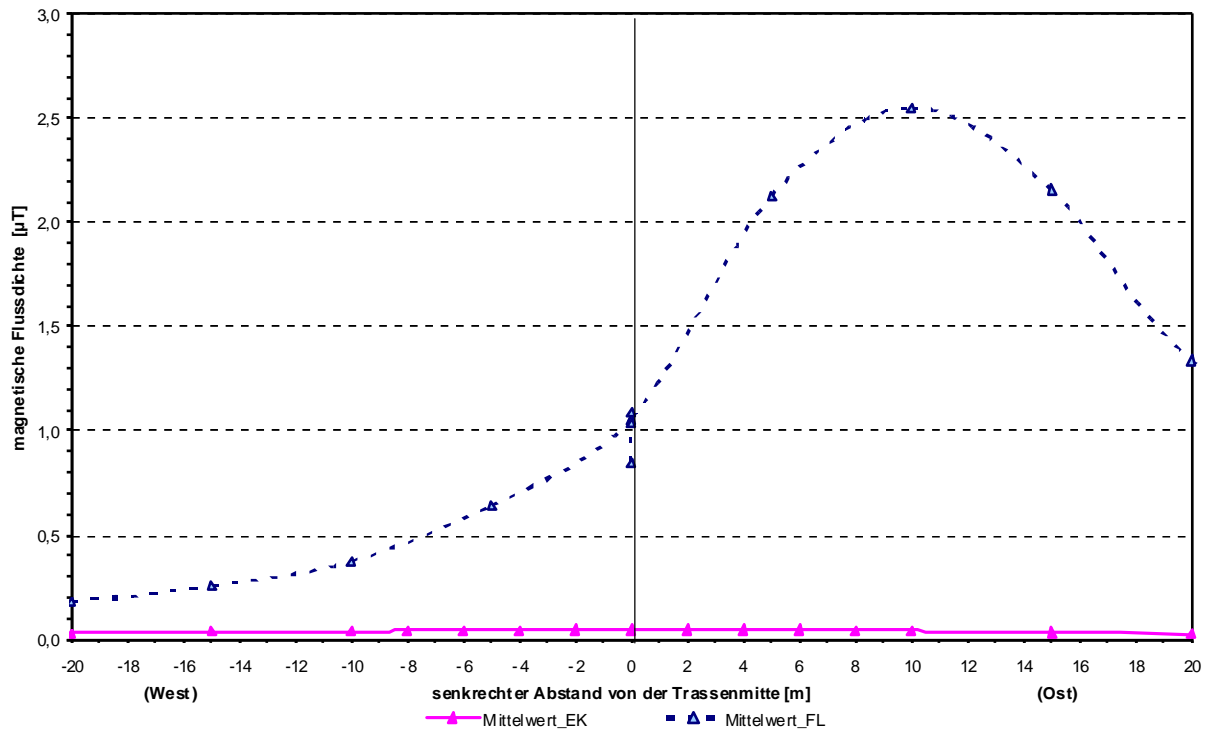


Abbildung 3/102
 220 kV-Trasse, EK220_1/FL220_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Vergleich:
 verschiedene Abschnitte der selben 220 kV-Trasse : Freileitung ↔ Erdkabel (vgl. Abschnitt 3.1.2.3)

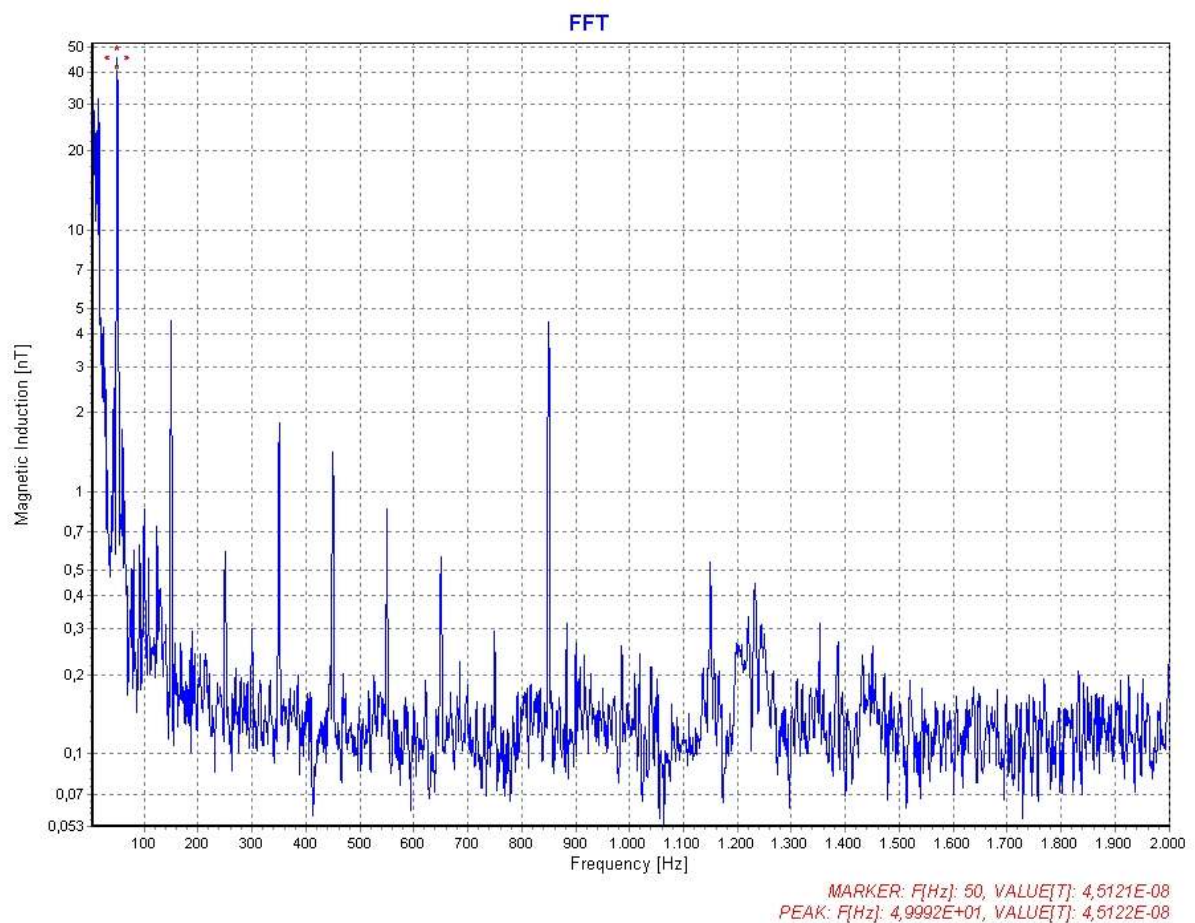


Abbildung 3/103
 220 kV-Erdkabeltrasse, EK220_1: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.7 Ergebnisse der Messungen an 110 kV-Erdkabeltrassen

3.1.2.7.1 EK110_1

Objekt	110 kV-Erdkabel		
Datum	06.04.2009, (10:30 – 11:00 Uhr)		
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse		
(störende) Objekte	☛		
Bemerkungen	☛		
Bodenbeschaffenheit	fast trockener Waldweg, leicht feuchter Waldboden		
Wetterbedingungen	wolkenlos, Windstill, 15 °C, 67% rel. Feuchte		
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]	
		Maximum	Mittelwert
	Trasse (-2 / +1 m)	0,603	0,523
	10 m	0,053	0,051
	20 m	0,030	0,027
Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe: 1,872 µT			
Bemerkungen	Vergleich Freileitung – Erdkabelabschnitt derselben Trasse (s. Abschnitt 3.1.2.4.8)		



Foto: EK110_1, Blick von Norden, die 110 kV-Erdkabeltrasse verläuft auf der östlichen Seite unter dem Waldweg, der Messweg erstreckt sich nach West und Ost in den Wald hinein



Luftbild: EK110_1, 110 kV-Erdkabeltrasse, sie verläuft auf der östlichen Seite unter dem Waldweg, der Messweg erstreckt sich nach West und Ost in den Wald hinein

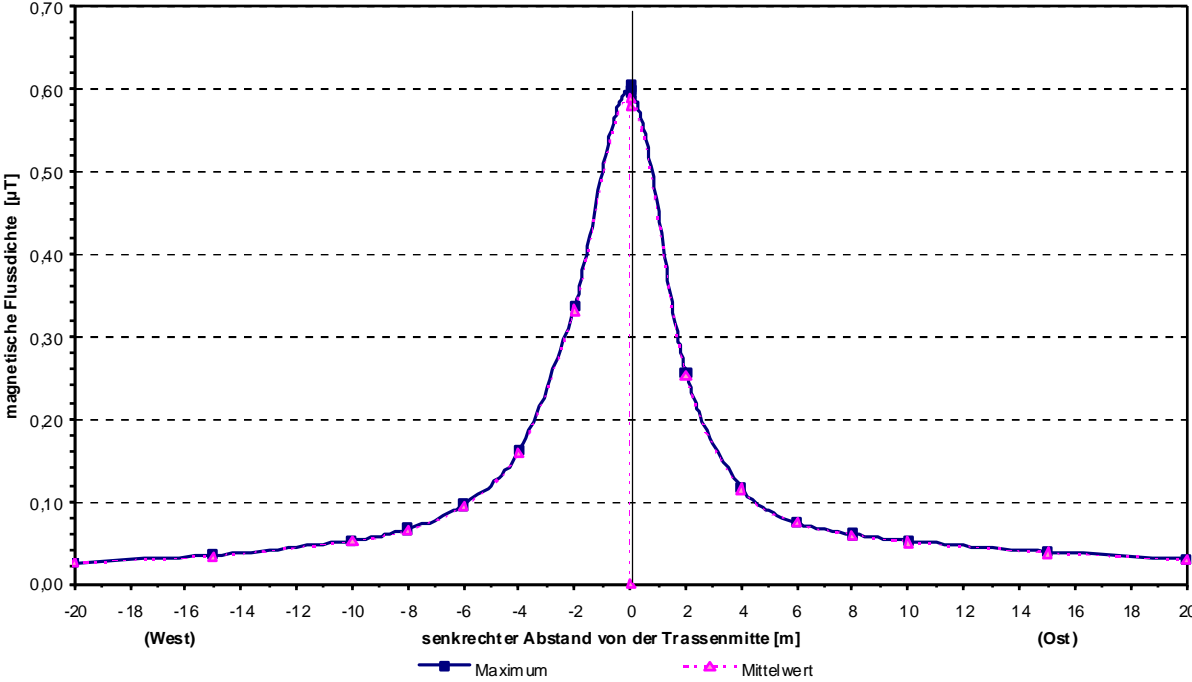


Abbildung 3/104
110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_1: Querprofil der magnetischen Flussdichte

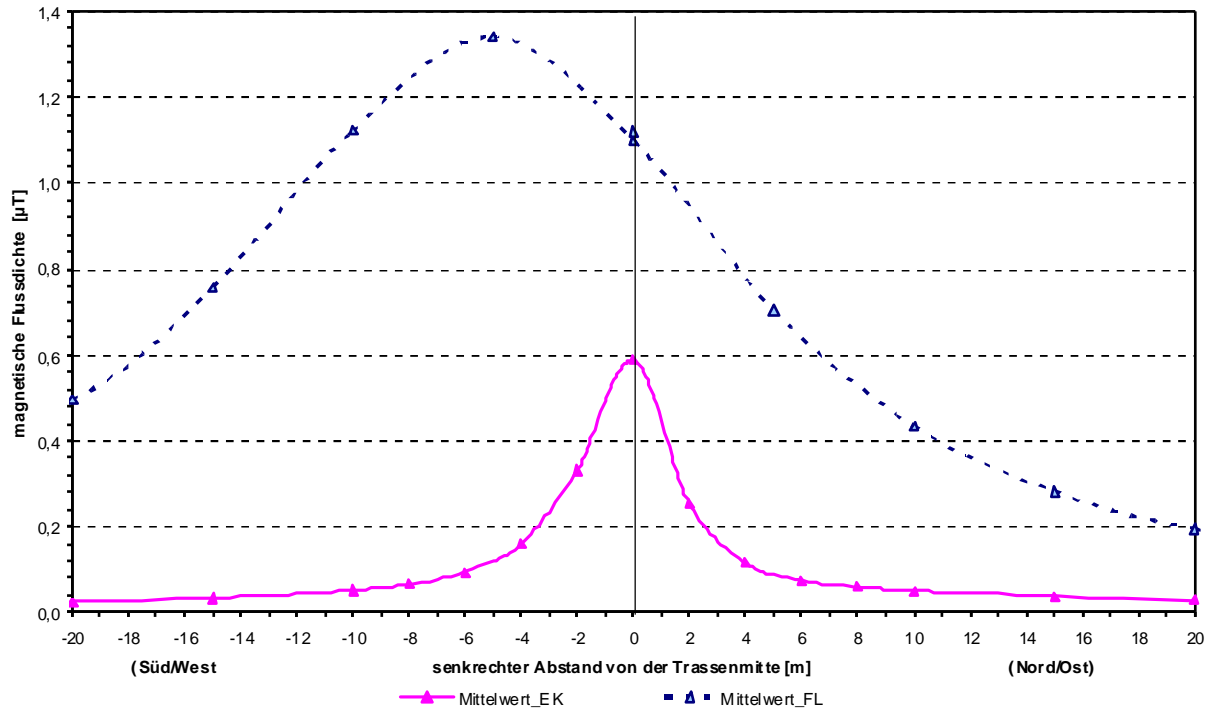


Abbildung 3/105
 110 kV-Trasse, EK110_1/FL110_7: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Vergleich:
 verschiedene Abschnitte derselben 110 kV-Trasse : Freileitung ↔ Erdkabel (vgl. Abschnitt 3.1.2.4.8)
 FFT

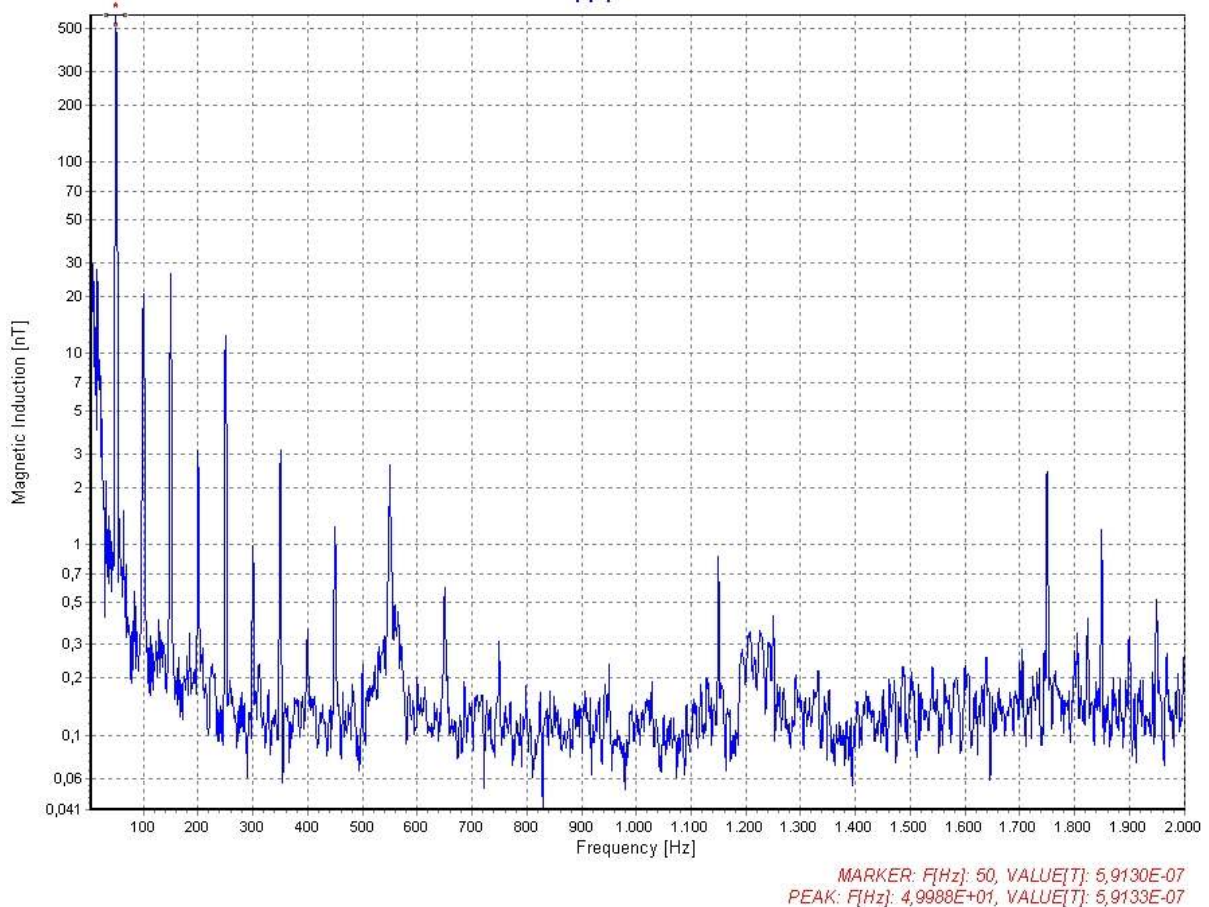


Abbildung 3/106
 110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_1: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.7.2 EK110_2

Objekt	110 kV-Erdkabel				
Datum	06.04.2009, (14:00 – 14:35 Uhr)				
Winkel der Messwege	senkrecht zur Trasse				
(störende) Objekte	Strom-Versorgungsleitungen, die etwa 8 m bis 10 m fast parallel zur Trasse östlich neben dem Radweg verlaufen und die unter dem Albrecht-Schaeffer-Weg nach Osten abknicken				
Bemerkungen	Es wurden zwei Querprofile ausgemessen: (a) direkt auf dem Albrecht-Schaeffer-Weg und (b) 30 m weiter südlich, senkrecht zum Radweg auf einer Brachfläche. Das Erdkabel ist bei (a) am Albrecht-Schaeffer-Weg tiefer verlegt und bei (b) konnte wegen fehlender Begehbarkeit nur wenig mehr als ein halbes Querprofil aufgenommen werden.				
Bodenbeschaffenheit	asphaltiert, leichte Restfeuchte				
Wetterbedingungen	wolkenlos, windstill, 21 °C, 54 % rel. Feuchte				
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [μT]			
		Maximum		Mittelwert	
		(a)	(b)	(a)	(b)
	Trasse (-1 / +2 m)	0,086	0,317	0,081	0,260
	10 m*	0,025	0,072	0,024	0,065
	20 m*	0,017	0,024	0,015	0,017
	Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe			(a): 0,117 μT	
			(b): 0,756 μT		
Bemerkungen	*Beim Querprofil (a) sind hierfür 10 m und 20 m Abstand nur die Werte von der Westseite aufgeführt, da auf der Ostseite der Messwert von dem Feld, das von den Strömen auf einer dort ab 10 Abstand verlaufenden Strom-Versorgungsleitung verursacht wird, beeinflusst wurde, dort bei 10 m / 20 m: $B_{\text{max}} = 0,074 / 0,061 \mu\text{T}$, $B_{\text{ave}} = 0,057 / 0,052 \mu\text{T}$, beim Querprofil (b) konnten nur Messwerte auf der Ostseite aufgenommen werden, vgl. Abb. 3/107				
	Vergleich Freileitung – Erdkabelabschnitt derselben Trasse (s. Abschnitt 3.1.2.4.9)				



Foto: EK110_2, Blick von Süden, das Erdkabel liegt unter der Grasstreifen neben dem Radweg und weiter nach Norden westlich von den Neubauten, unter den Sandhaufen entlang auf den Abspannmast im Hintergrund zu, der Messweg (a) verläuft auf der Querstraße, der Messweg (b) parallel dazu etwa an der Position des Fotografen



Luftbild: EK110_2, 110 kV-Erdkabeltrasse, die Kabeltrasse verläuft von Nord nach Süd, parallel zu dem Radweg

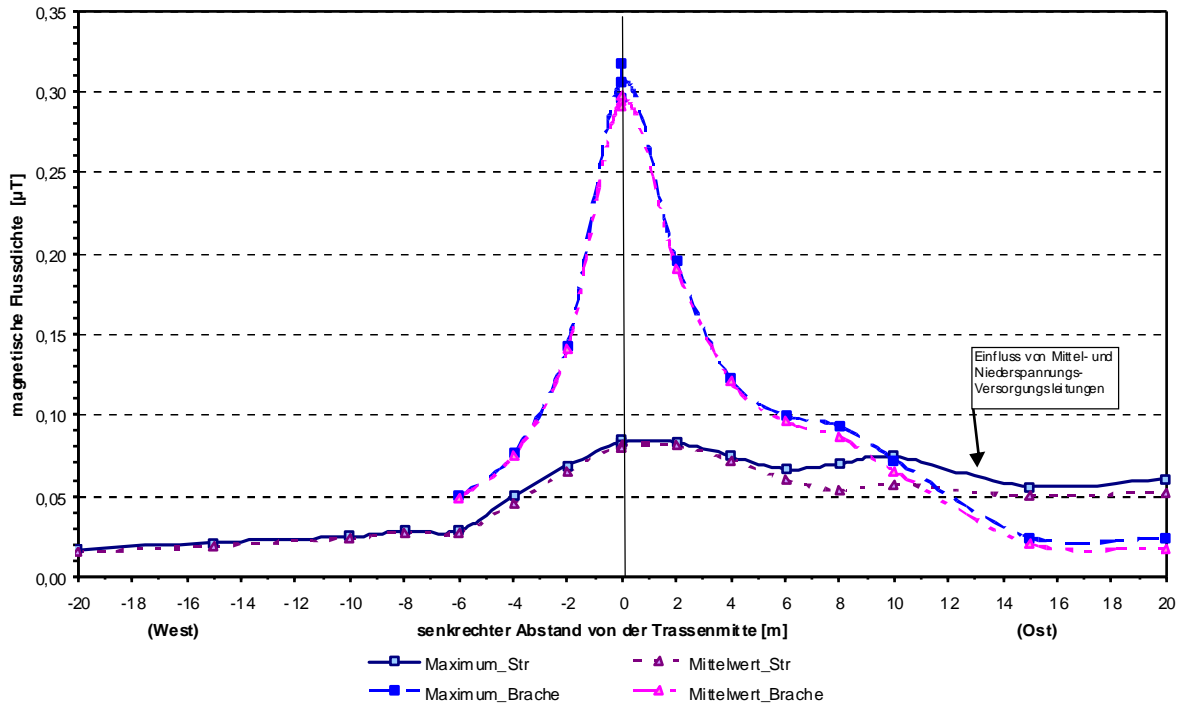


Abbildung 3/107
 110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_2: Querprofil der magnetischen Flussdichte, Vergleich, unterschiedliche Verlegetiefen: groß (am Ort der Straßenquerung, $h_{t-a} \approx 3$ m) \leftrightarrow klein (unter dem Radweg, neben der Brache, $h_{t-b} \approx 1$ m)

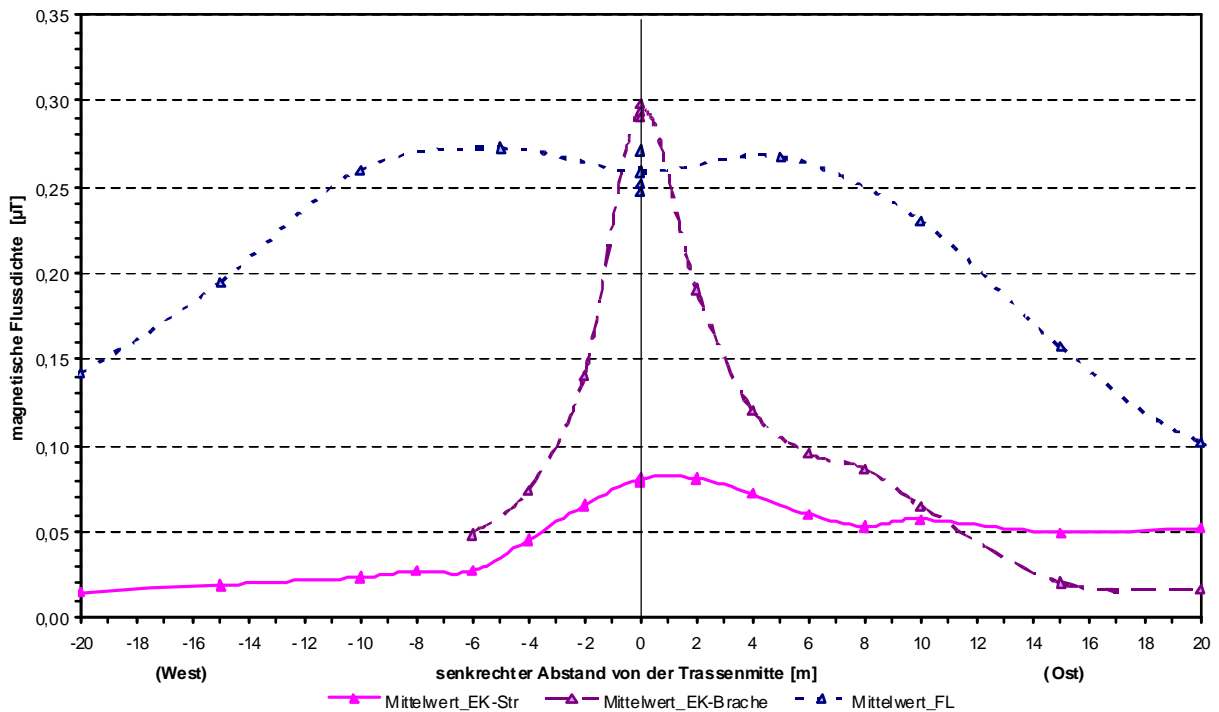


Abbildung 3/108
 110 kV-Trasse, EK110_2/FL110_8: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Vergleich: verschiedene Abschnitte der gleichen 110 kV-Trasse: Freileitung \leftrightarrow Erdkabel (verschiedene Verlegetiefen) (vgl. Abschnitt 3.1.2.4.9)

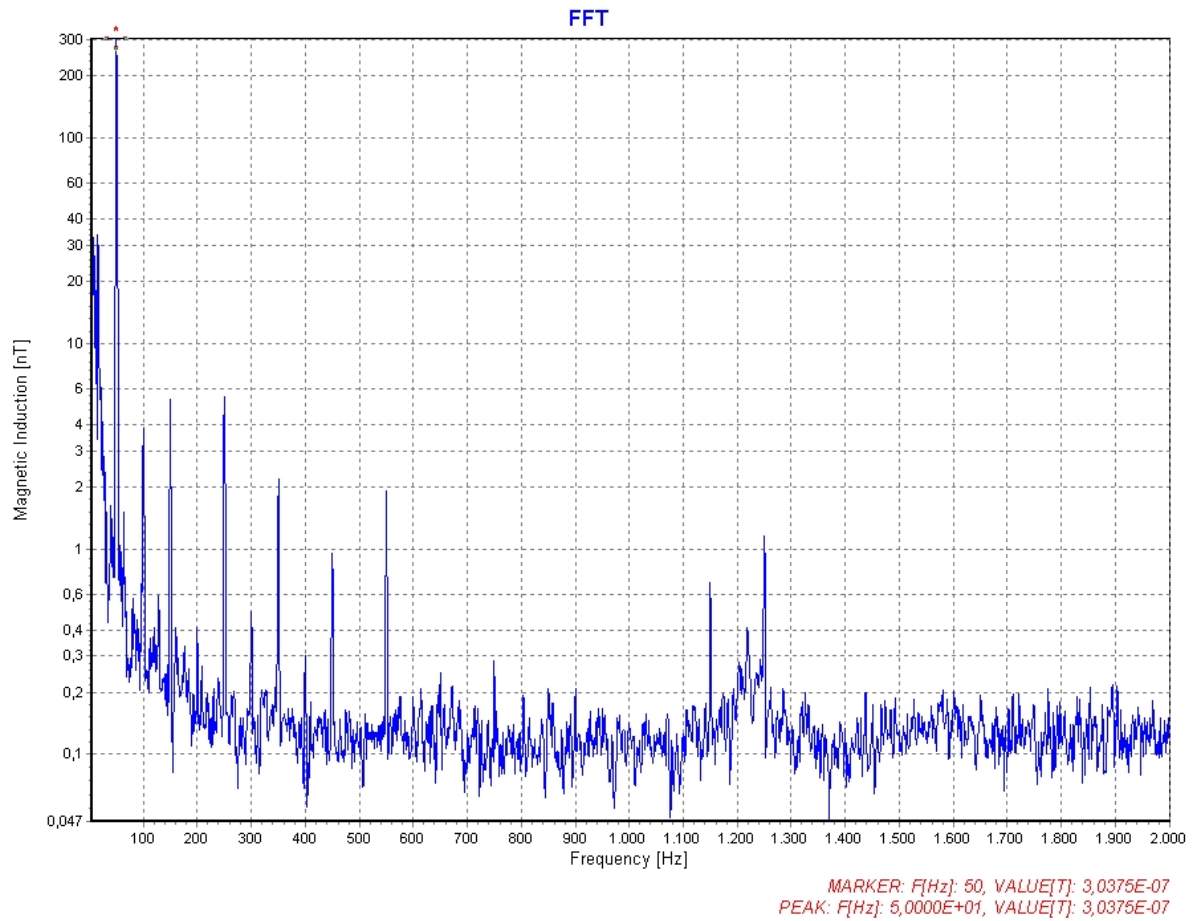


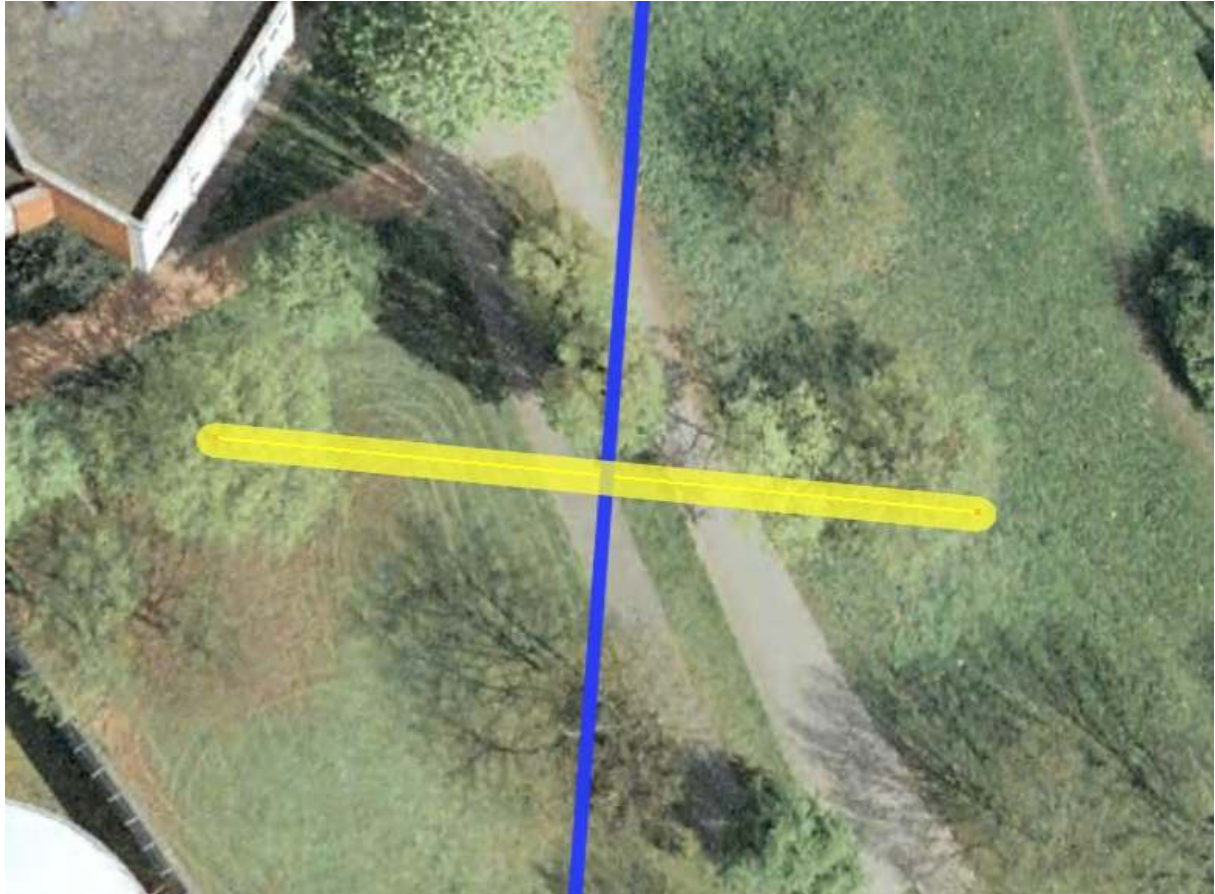
Abbildung 3/109
110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_2: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.7.3 EK110_3

Objekt	110 kV-Erdkabel		
Datum	18.03.2009, (09:00 – 10:00 Uhr)		
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse		
(störende) Objekte	nach Nordwesten nähert sich der Messweg dem Betriebsgelände eines Kraftwerkes (bis auf ca. 12 m) und einem Wohn-Hochhaus (bis auf 15 m)		
Bemerkungen	nach Südosten fällt der Messweg ab etwa 12 m stark ab, der Messpunkt bei 15 m liegt ca. 0,5 m und derjenige bei 20 m gut 1 m tiefer		
Bodenbeschaffenheit	Grünfläche, befestigter Weg		
Wetterbedingungen	bedeckt, windstill, 8 °C, 85 % rel. Feuchte		
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]	
		Maximum	Mittelwert
	Trasse (± 2 m)	0,227	0,163
	10 m	0,057	0,034
	20 m	0,036	0,026
Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe: 0,365 µT			
Bemerkungen	Der leichte Anstieg in den Messwerten wurde sicher durch die allgemeine Stromversorgung auf dem Betriebsgelände und in dem Hochhaus verursacht.		



Foto: EK110_3, Blick von Süden, das Erdkabel quert die Wege unter spitzem Winkel, der Messweg verläuft im Bild von links nach rechts vorbei am Messwagen



Luftbild: EK110_3, 110 kV-Erdkabeltrasse, der Messweg verläuft am linken Rand des Feldweges, der die Trasse kreuzt

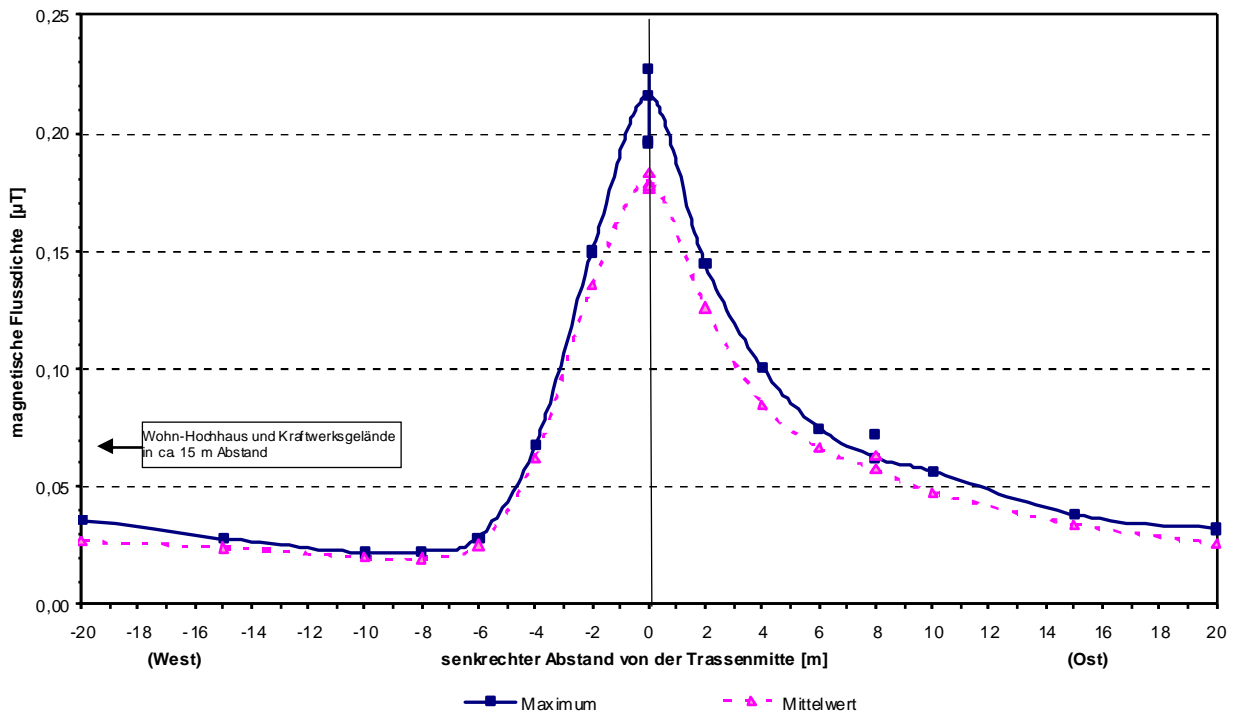


Abbildung 3/110
110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_3: Querprofil der magnetischen Flussdichte

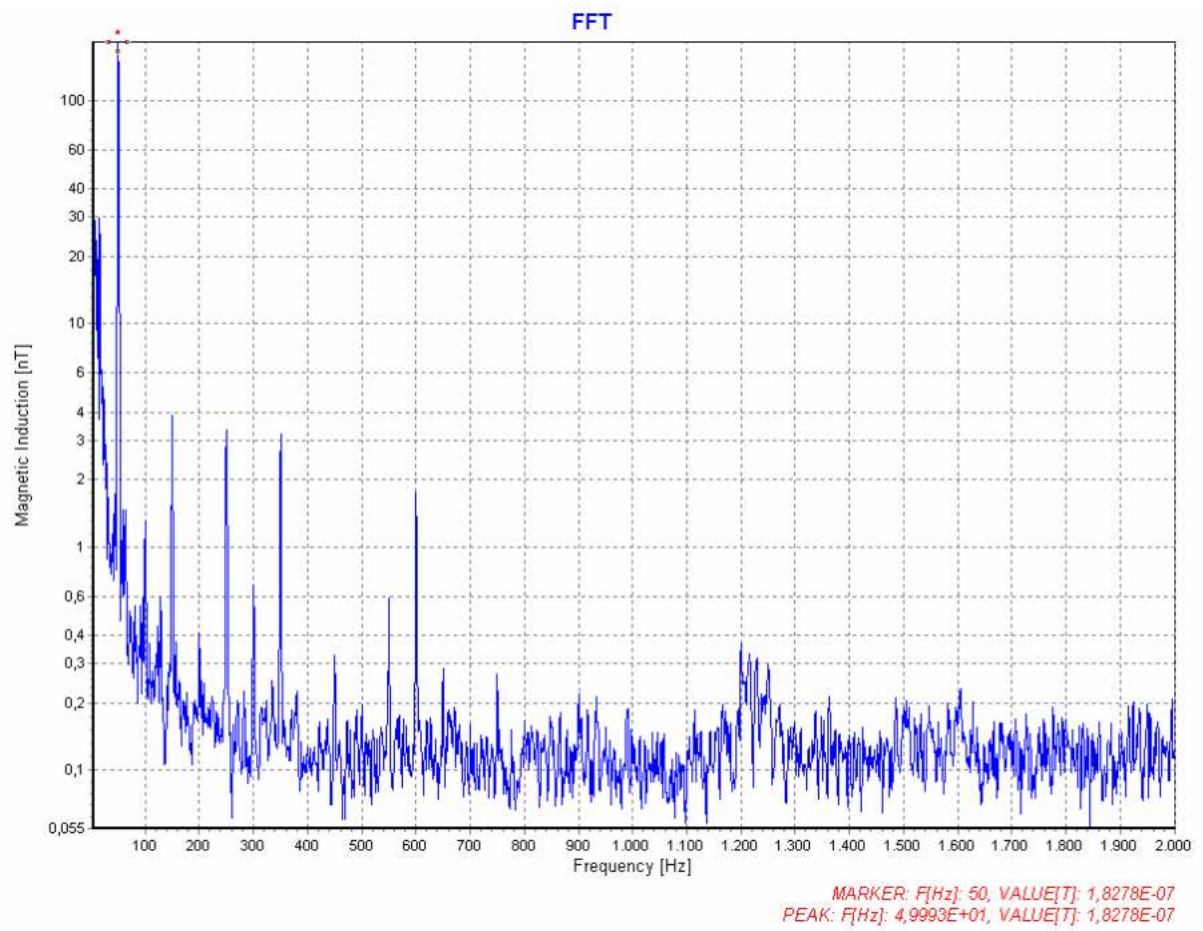


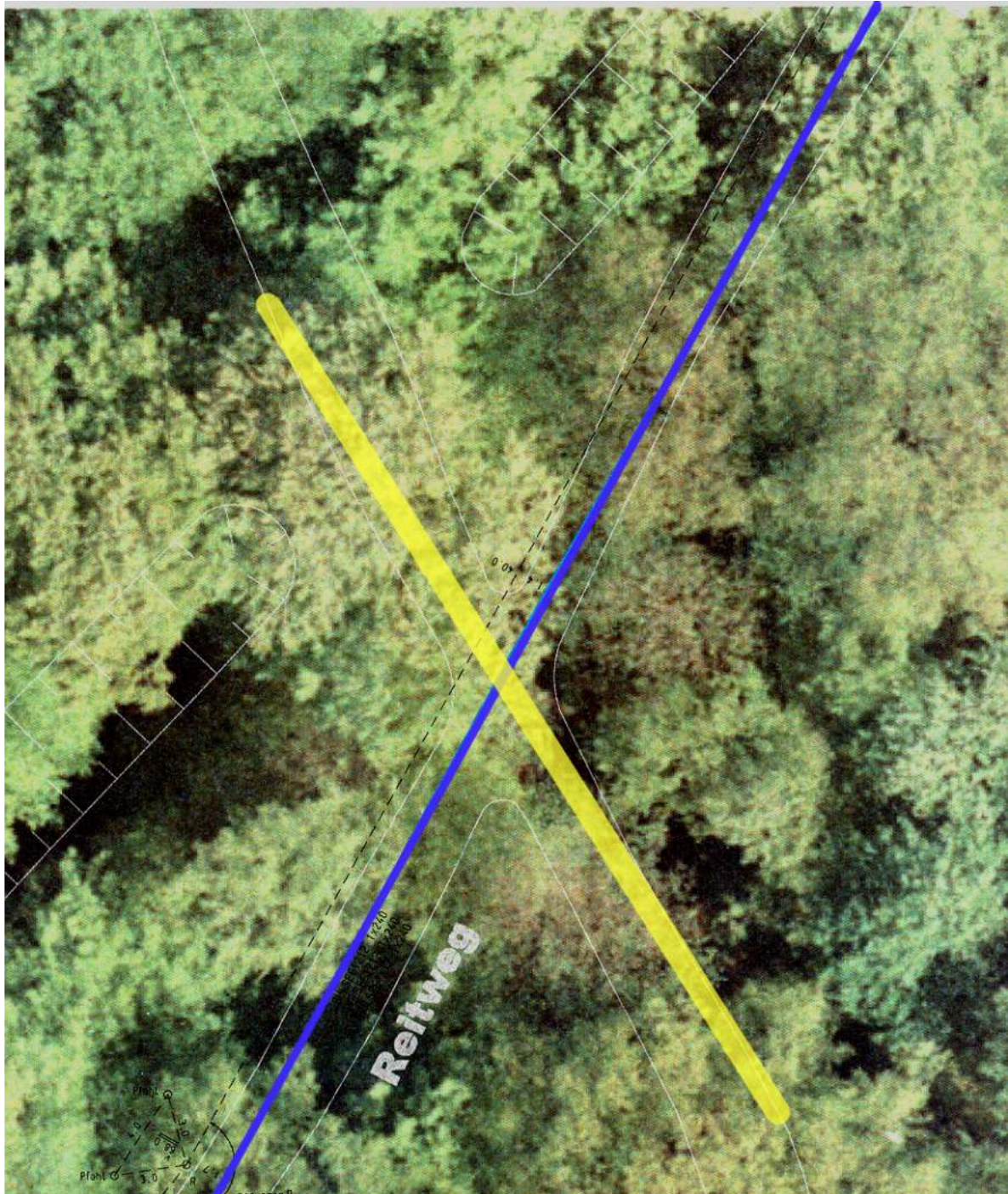
Abbildung 3/111
110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_3: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.7.4 EK110_4

Objekt	110 kV-Erdkabel		
Datum	18.03.2009, (10:45 – 11:30Uhr)		
Winkel des Messweges	30° zur Trassensenkrechten		
(störende) Objekte	☞		
Bemerkungen	☞		
Bodenbeschaffenheit	Waldboden, feucht		
Wetterbedingungen	bedeckt, windstill, 8 °C, 87 % rel. Feuchte		
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]	
		Maximum	Mittelwert
	Trasse (-1 / +2 m)	0,304	0,262
	10 m	0,025	0,021
	20 m	0,010	0,009
Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe: 0,718 µT (am Messweg) Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe: 0,814 µT (± 20 m neben dem Messweg, längst der Trasse)			
Bemerkungen	☞		



Foto: EK110_4, Blick von Norden, das Erdkabel folgt einem quer zum Fußweg verlaufenden Reitweg und kreuzt den Messweg an der Stelle des Messwagens



Luftbild: EK110_4, 110 kV-Erdkabeltrasse, der Messweg verläuft auf einem Waldweg, der den Reitweg, unter dem die 110 kV-Erdkabeltrasse verläuft, kreuzt

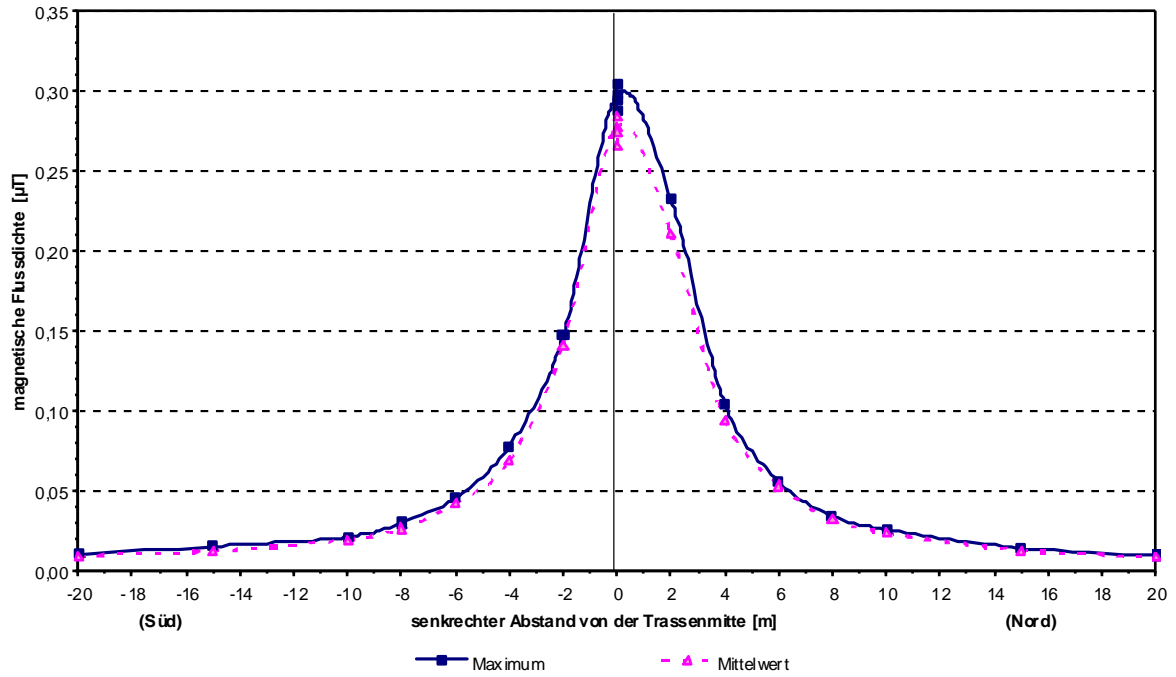


Abbildung 3/112
110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_4: Querprofil der magnetischen Flussdichte

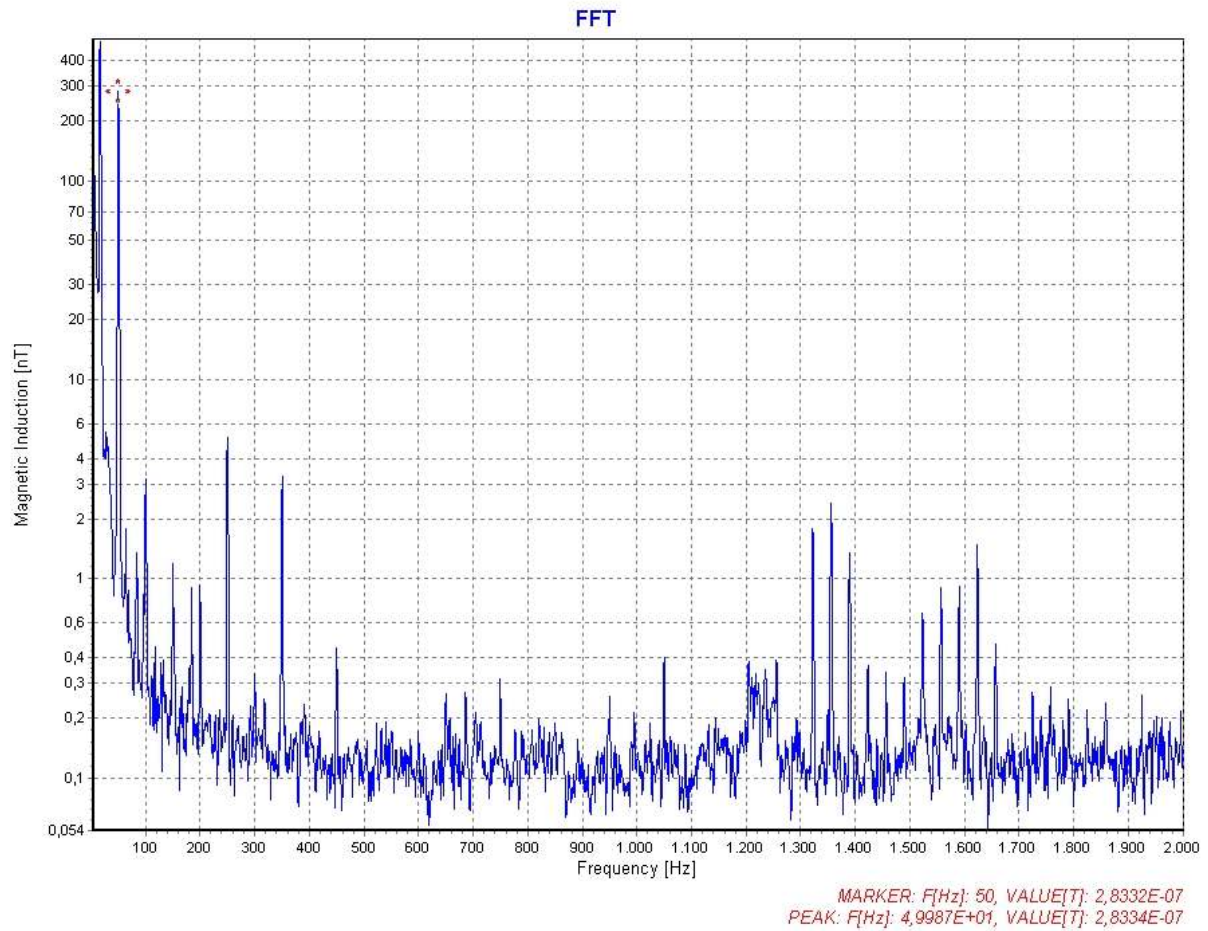


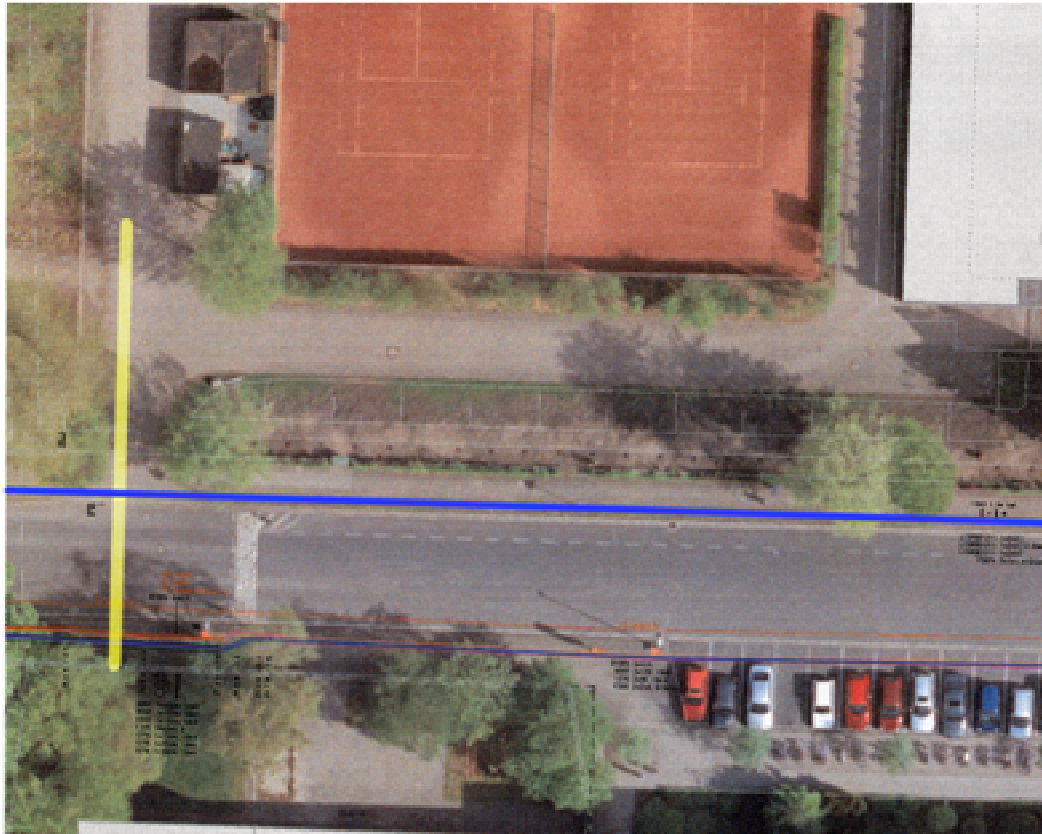
Abbildung 3/113
110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_4: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.2.7.5 EK110_5

Objekt	110 kV-Erdkabel		
Datum	18.03.2009, (13:15 – 13:45Uhr)		
Winkel des Messweges	senkrecht zur Trasse		
(störende) Objekte	in 10 m Abstand, auf der gegenüberliegenden, südlichen Straßenseite verlaufen Mittelspannungskabel (10 kV) unter dem Fußweg		
Bemerkungen	nach Norden fällt der Messweg ab 4 m ab, der Messpunkt bei 20 m liegt ca. 1 m tiefer		
Bodenbeschaffenheit	befestigt		
Wetterbedingungen	größtenteils bedeckt, schwach windig, 10 °C, 75 % rel. Feuchte		
Messergebnisse	1 m Höhe	magnetische Flussdichte [µT]	
		Maximum	Mittelwert
	Trasse (-1 / +2 m)	0,221	0,195
	10 m*	0,019	0,016
	20 m*	0,013	0,011
Maximum über der Trasse in 0,2 m Höhe: 0,581 µT			
Bemerkungen	* Für 10 m und 20 m werden hier nur die Werte von der Nordseite aufgeführt, da auf der Südseite der 10 m-Messwert von dem Feld, das von den Strömen auf den dort verlaufenden Mittelspannungs-Erdkabeln verursacht wird, dominiert wurde (dort: $B_{max} = 0,283 \mu T$, $B_{ave} = 0,257 \mu T$), bei 12 m Abstand endete der begehbare Bereich, vgl. Abb. 3/114		



Foto: EK110_5, Blick von Süden, das Erdkabel verläuft unter dem Fußweg, parallel zur Straße



Luftbild: EK110_5, 110 kV-Erdkabeltrasse, unter dem Fußweg auf der nördlichen Straßenseite, Mittelspannungskabeltrasse unter dem Fußweg auf der anderen Seite, der Messweg verläuft von Nord (Einfahrt zum Tennisplatz) nach Süd, bis Grenze des Schulgeländes (12 m zur 110 kV-Trasse)

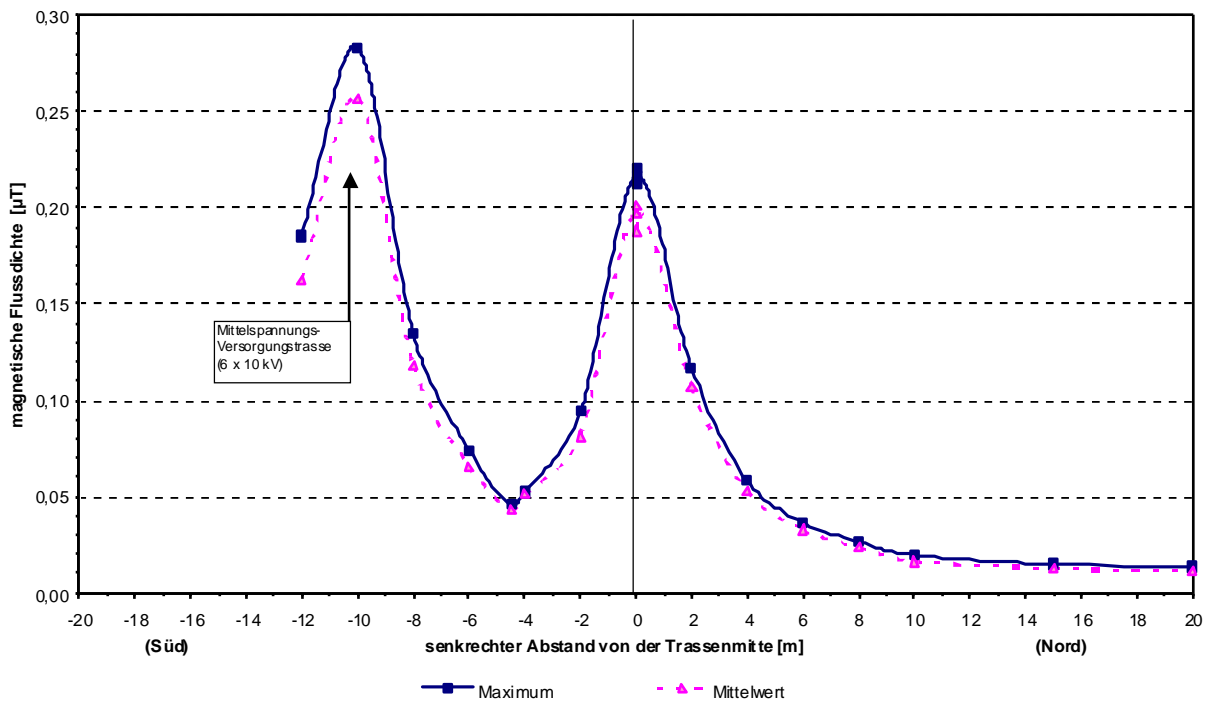


Abbildung 3/114
110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_5: Querprofil der magnetischen Flussdichte

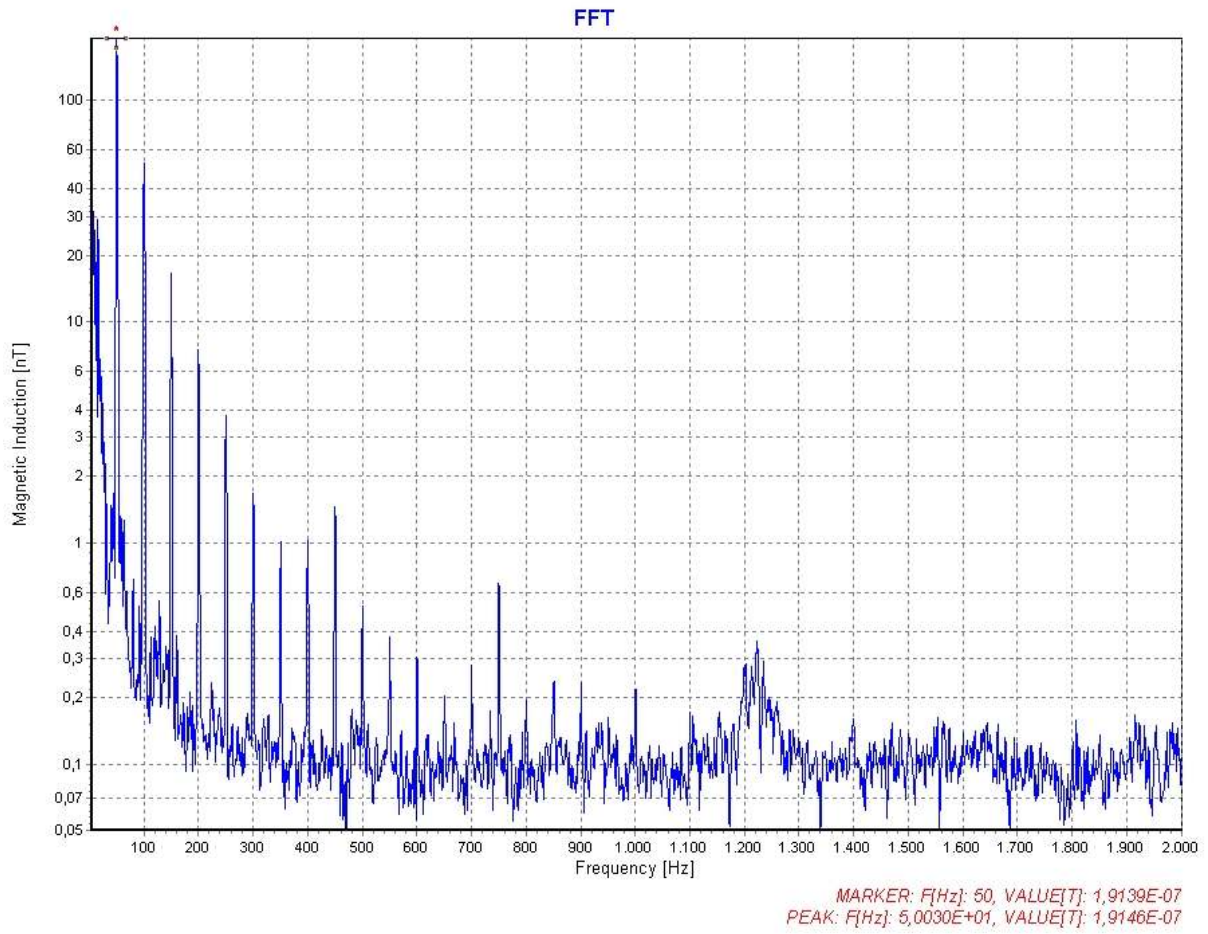


Abbildung 3/115
 110 kV-Erdkabeltrasse, EK110_5: Spektrum der magnetischen Flussdichte

3.1.3 Zusammenfassung der Messergebnisse und Vergleich der gemessenen Immissionen von Hochspannungsfreileitungen und Erdkabeltrassen

Für die folgenden zusammenfassenden Betrachtungen und für die Vergleiche zwischen den Immissionen, wie sie durch die unterschiedlichen Trassenarten typischer Weise verursacht werden, wurden die Messergebnisse in vier Gruppen zusammengefasst:

- 380/220 kV-Freileitungen
- 110 kV-Freileitungen
- 380/220 kV-Erdkabel
- 110 kV-Erdkabel

Für jeden Abstand von der Trassenmitte wurden aus allen entsprechenden Messergebnissen, die nicht von anderen Feldquellen dominiert waren, das Maximum und der Mittelwert bestimmt. Dabei wurden beide Seite als 'getrennte' Messungen betrachtet, d.h. es wurde auch über die u.U. unterschiedlichen Ergebnisse rechts und links von der Trasse gemittelt. Auf diese Weise wurden ein symmetrisches Maximalwert-Querprofil und ein Mittelwert-Querprofil für die jeweilige Trassenart ermittelt. Diese geben den Spielraum der tatsächlich während dieser Messkampagne ermittelten Immissionen wieder. Die Ergebnisse dieses Vorgehens sind in der Tabelle 3/3 zusammengestellt und in den Abbildungen 3/116 bis 3/119 wiedergegeben.

Tabelle 3/4

Zusammenfassung der Ergebnisse für Freileitungen und Erdkabel: Maximum und Mittelwert über alle in einer Gruppe zusammengefassten Trassen

Trassenart			magnetische Flussdichte [μ T]		elektrische Feldstärke [kV/m]	
			Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
380 kV und 220 kV	Freileitungen	Trasse	4,791	1,658	5,912	2,375
		20 m	3,892	1,378	4,252	1,840
		50 m	0,841	0,381	0,521	0,272
	Erdkabel	Trasse	3,517	0,852	-	-
		10 m	0,514	0,222	-	-
		20 m	0,170	0,098	-	-
110 kV	Freileitungen	Trasse	4,103	0,775	1,542	0,601
		20 m	0,649	0,275	0,522	0,259
		50 m	0,131	0,052	0,045	0,030
	Erdkabel	Trasse	0,603	0,182	-	-
		10 m	0,057	0,032	-	-
		20 m	0,032	0,017	-	-

Erwartungsgemäß wurden - für normale Situationen - die höchsten Werte sowohl der magnetischen Flussdichte als auch der elektrischen Feldstärke unter den 380 kV-Freileitungen gemessen. Aber auch über den 380 kV-Erdkabeltrassen und unter 110 kV-Freileitungen traten ähnlich hohe Werte der magnetischen Flussdichte auf. Der insgesamt höchste Messwert der magnetischen Flussdichte (36,6 μT , vgl. S. 168) wurde in dieser Untersuchung für einen Sonderfall aufgezeichnet, bei dem die Kabel einer 380 kV-Erdkabeltrasse direkt an der Unterseite einer Brücke - nur ca. 0,5 m unter dem Asphalt - verlegt sind.

Verursacht durch die kompaktere Verlegung der Erdkabel verglichen mit der Aufhängekonstruktion bei den Freileitungsmasten fällt die magnetische Flussdichte bei Erdkabeltrassen deutlich früher und schneller ab als bei Freileitungstrassen. Insgesamt ergibt sich bei diesen Messungen ungefähr ein Faktor zehn zwischen den Größen der mittleren Einflussbereiche: die Flussdichtewerte, die bei Erdkabeltrassen in 4 bis 5 m Entfernung von der Trassenmitte zu erwarten sind, treten bei Freileitungstrassen erst in etwa 40 bis 50 m auf (s. Abb. 3/116 und 3/117).

Die gemessenen Werte der magnetischen Flussdichte liegen weit unterhalb des Grenzwertes von 100 μT entsprechend der 26. BImSchV. Die Messwerte für die meisten Situationen (Ausnahme: 380 kV-Erdkabel an der Unterseite einer Brücke, s.o.) liegen sogar mehr als einen Faktor zwei unter 10 μT , dem Wert aus den Erläuterungen zur 26. BImSchV vom 09.01.1997, bei dessen Unterschreitung während Zeiten mit normalen Lastsituationen davon ausgegangen werden kann, dass der Grenzwert auch zu Spitzenzeiten unterschritten wird und dass für keine Zeit mit einer kleinräumigen oder kurzzeitigen Überschreitung gerechnet werden muss. D.h. die im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Stromtrassen erfüllen bzgl. der magnetischen Flussdichte die Kriterien des Vorsorgeparagraphen (§4) der 26. BImSchV.

Anders sieht die Situation bei der elektrischen Feldstärke aus. Natürlich treten auch hier innerhalb der Trasse unter den Leiterseilen die höchsten Werte auf. Die Trassenbreite beträgt bei 380/220 kV-Freileitungen mit Donaumasten typischerweise etwa 30 m (15 m zu jeder Seite) und mit Einebenenmasten bis zu etwa 40 m. Im Bereich des größten Durchhanges können dort Überschreitungen des Grenzwertes von 5 kV/m (26. BImSchV) vorkommen (s. Abb.3/118). Diese Überschreitung ist zwar dauerhaft aber nur kleinräumig und erreicht nicht den Faktor zwei. Sie ist somit nach der 26. BImSchV (§3) zulässig, könnte aber durch eine andere Phasenordnung und/oder höhere Masten vermieden werden. Bei 110 kV-Freileitungen beträgt die Trassenbreite für Donaumasten typischerweise knapp 15 m und für Einebenenmasten bis 20 m. Bei dieser Spannungsebene wird der Grenzwert der 26. BImSchV nicht erreicht.

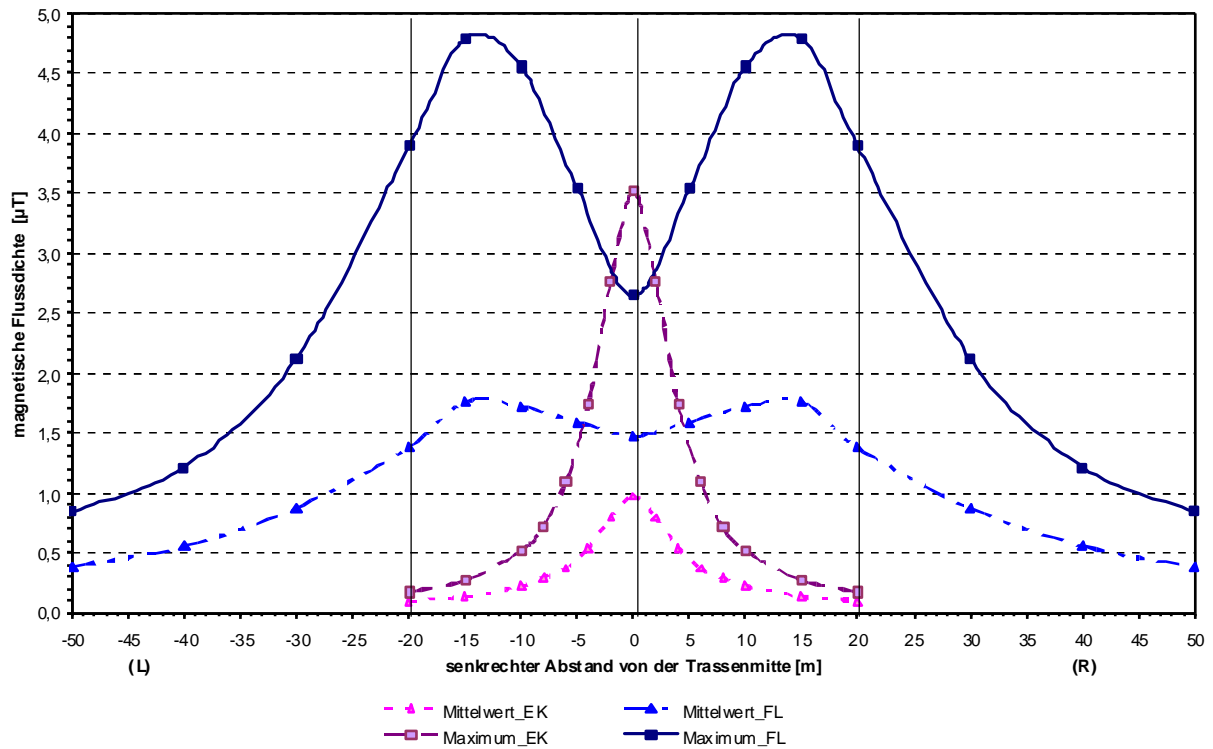


Abbildung 3/116
 380/220 kV Spannungsebene: Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der gemessenen magnetischen Flussdichte, Vergleich Freileitungen (FL, 10 Messorte) und Erdkabel (EK, 5 Messorte)

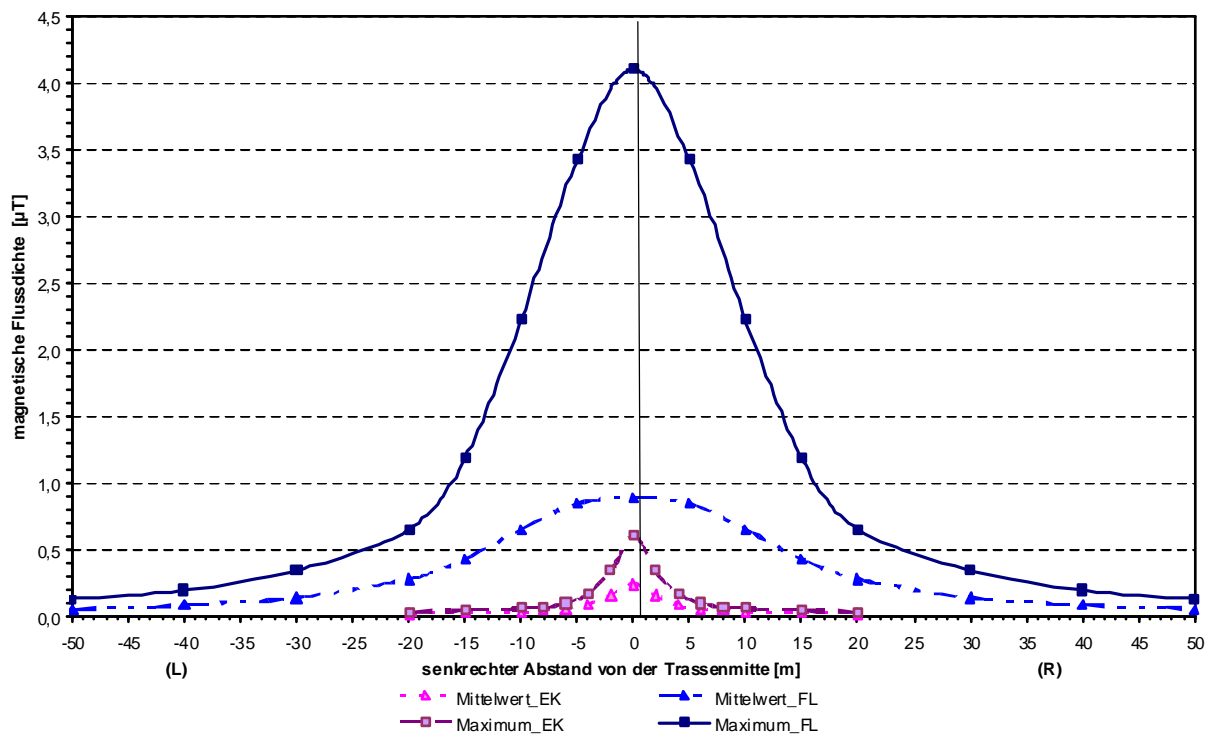


Abbildung 3/117
 110 kV-Spannungsebene: Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der gemessenen magnetischen Flussdichte, Freileitungen (FL, 9 Messorte) und Erdkabel (EK, 5 Messorte)

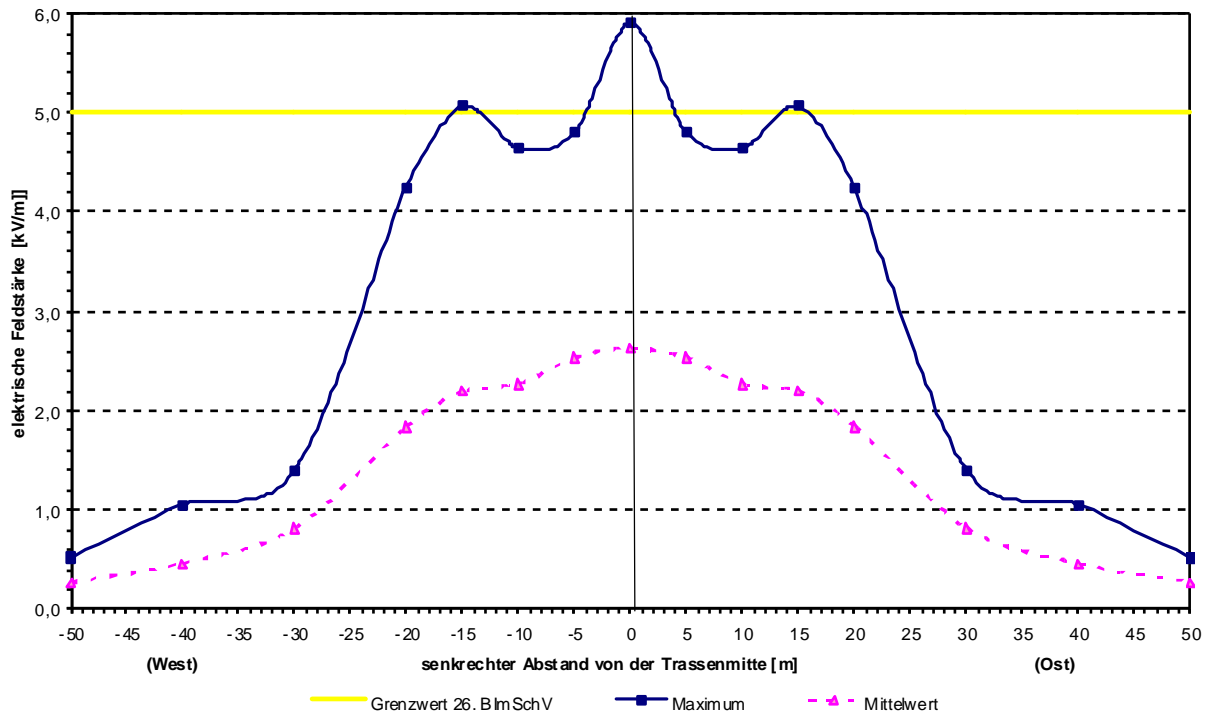


Abbildung 3/118
 380/220 kV-Spannungsebenen: Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der gemessenen elektrischen Feldstärke (Der 'Einbruch' der Feldstärkewert bei 30 m Abstand ist untypisch und hier dadurch bedingt, dass bei der Freileitung mit den höchsten Werten gerade in diesem Abstand ein das Feld abschirmendes Objekt vorhanden war.)

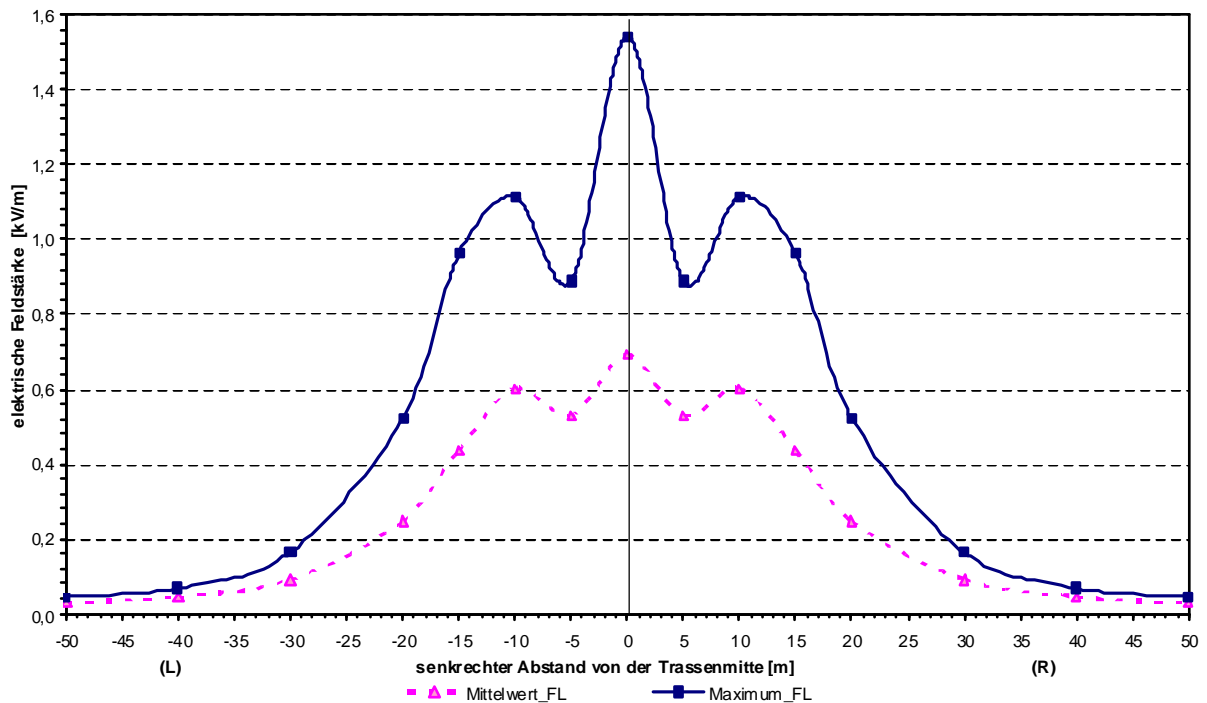


Abbildung 3/119
 110 kV-Spannungsebene: Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der gemessenen elektrischen Feldstärke

3.2 Rechnerische Bestimmung der niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder an Hochspannungsübertragungstrassen

3.2.1 Vorgehen bei den Feldberechnungen

Informationen zu den für die Berechnung relevanten System- und Trassendaten (s. Tab. 3/5 u. 3/6) wurden bei den Netzbetreibern eingeholt. Um einen direkten Vergleich mit den durchgeführten Messungen zu ermöglichen, wurden für die untersuchten Trassen nicht nur die Maximalströme sondern auch die aktuellen Stromwerte, wie sie während der Messzeit vorliegen, erfragt. Als Systemspannung wurden durchgehend nicht die 'Namen' der Spannungsebenen sondern die Bemessungsspannungen, d.h. die Sollspannung, für die die Leitungssysteme ausgelegt sind, angesetzt:

- 380 kV-Ebene: 420 kV
- 220 kV-Ebene: 245 kV
- 110 kV-Ebene: 123 kV

Für jeden Messort wurden Feldsimulationen durchgeführt, für die die relevanten Angaben entsprechend der jeweiligen Messsituation in das Feldberechnungsprogramm eingegeben wurden. Diese Simulationen wurden für die maximalen Stromlasten wiederholt, um so – wie in der 26. BImSchV gefordert – die Immissionen bei den maximalen Betriebszuständen zu berechnen.

3.2.1.1 Berechnungen für Freileitungstrassen

Die für die Berechnungen der an Freileitungstrassen relevanten Größen sind zusammen mit den im Weiteren benutzten Bezeichnungen in der folgenden Tabelle 3/5 zusammengestellt und in den Abbildungen 3/120a, b veranschaulicht.

Tabelle 3/5

Für die Berechnungen relevante Größen und ihre Bezeichnungen

Spannfeldlänge		L
Phasenbelegung (z.B.)		S R T
Ströme	Maximalstrom	I_{\max}
	aktueller Strom	I_{akt}
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen*	$h_{\min, \max}$
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min, \text{akt}}$
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh
Leiterseilhöhen Mast 1		h_1, h_1'
Leiterseilhöhen Mast 2		h_2, h_2'
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1		a_1, b_1, c_1
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2		a_2, b_2, c_2
Abstand des Mess- und/oder Berechnungsprofils vom Mast 1		d_1

*Aus der Leiterseilhöhe in Spannfeldmitte für die Maximalbedingungen (maximale Stromlast, Lufttemperatur = 40°C, kein Wind) sowie den Angaben für die aktuellen Parameter (aktuelle Temperatur, Wind und Stromwert) berechnet das Programm die aktuelle Leiterseilhöhe in Spannfeldmitte, die dann jeweils für die Berechnung der aktuellen Situation verwendet wurde.

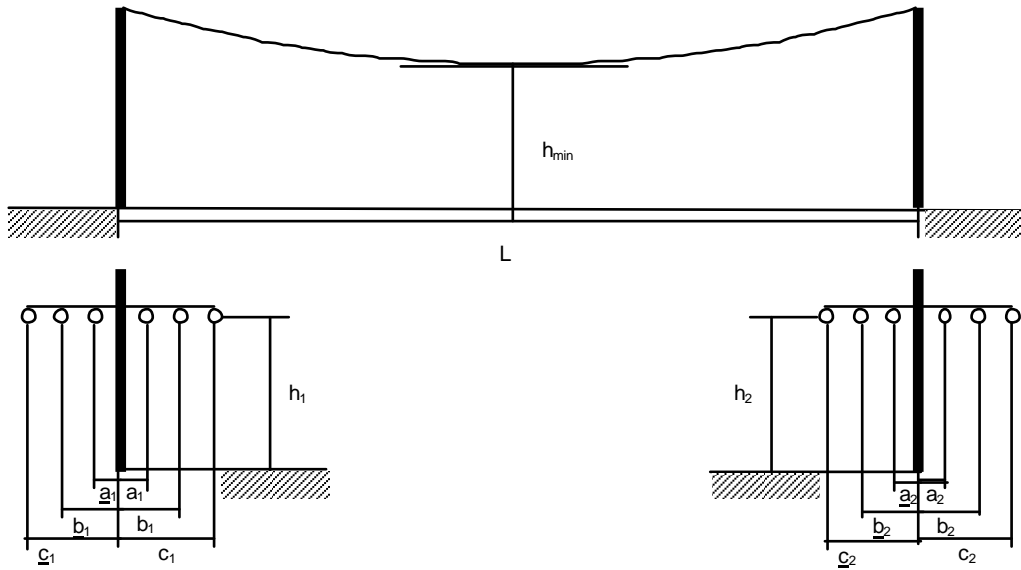


Abbildung 3/120a
 Bezeichnungen der Abstände, Höhen und Längen an Trassen mit Einebenenmasten

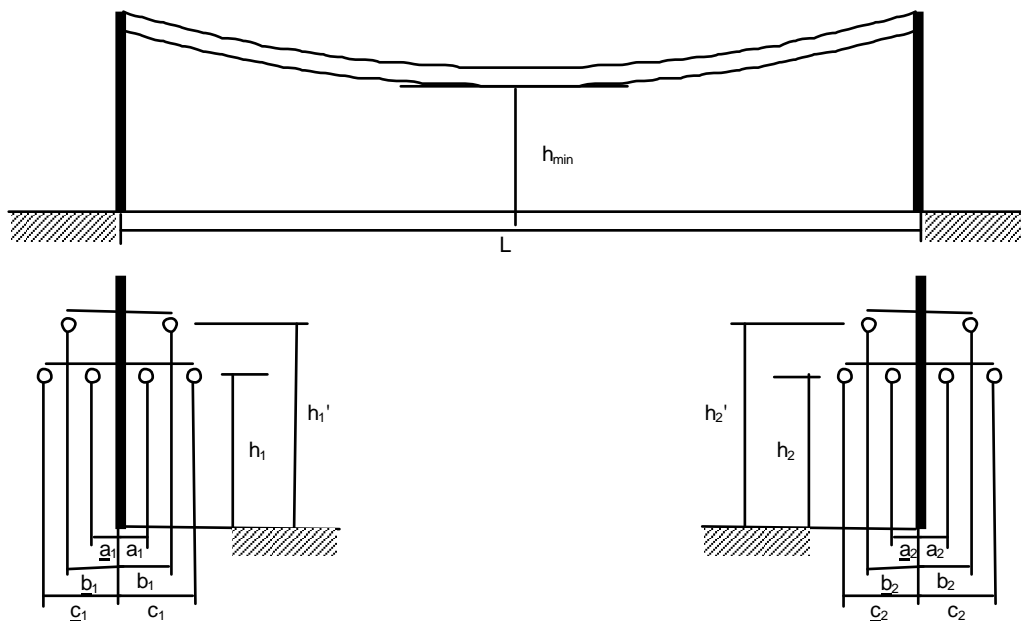


Abbildung 3/120b
 Bezeichnungen der Abstände, Höhen und Längen an Trassen mit Donaumasten

In allen hier behandelten Fällen sind die Entfernungen der Leiterseilaufhängungen auf beiden Seiten der Masten gleich groß, d.h. es gilt immer $a_i = \underline{a}_i$, $b_i = \underline{b}_i$ und $c_i = \underline{c}_i$ (für $i = 1, 2$), so dass immer nur eine Angabe erforderlich ist.

Für alle Freileitungen wurde für beide Feldarten jeweils eine zweidimensionale Feldverteilung in 1 m Höhe über dem Erdboden für den maximalen Betriebszustand berechnet, die etwas mehr als das gesamte Spannfeld, in dem gemessen wurde, umfasst. In Abbildung 3.121 ist eine Farbskala dargestellt, wie sie für die Isolinien-Darstellung dieser Horizontalschnitte verwendet wurde.

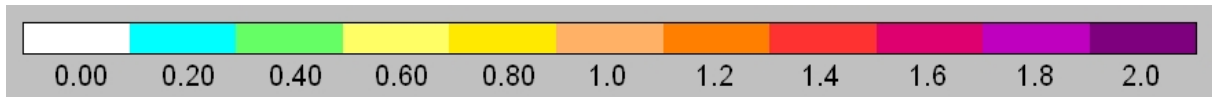


Abbildung 3/121
Beispiel für die Farbskala bei Isolinien-Darstellungen

Die für die Kennzeichnung der Isolinien verwendete Farbskala beginnt immer mit Hellblau für geringe Feldstärkewerte, wechselt mit ansteigenden Werten über Grün, Gelb, Orange, Rot und Violett bis zu Dunkel-Violett für die Isolinie mit dem höchsten Feldstärkewert. In Darstellungen, in denen der gesetzliche Grenzwert entsprechend der 26. BImSchV vorkommt, ist die Isolinie, die diesem Grenzwert entspricht, in Schwarz hervorgehoben.

Für den direkten Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen wurde je ein Querprofil der elektrischen und der magnetischen Feldstärke entlang der Linie, die dem Messweg entspricht für die aktuelle Situation (bzgl. Strom und Leiterseilhöhe) berechnet. Außerdem wurden auch für den Fall der maximalen Betriebsauslastung Querprofile berechnet. Wenn der Messweg die Freileitung nicht am Ort des größten Durchhanges kreuzte, wurde zusätzlich ein Querprofil für diesen Trassenpunkt berechnet. Die Messwerte werden zusammen mit dem berechneten Querprofil für die aktuelle Betriebssituation in einer Abbildung dargestellt.

Wenn nötig, werden in den Abbildungen Angaben über möglicherweise das Feld beeinflussende Umstände (z.B. andere Feldquellen, Pflanzenbewuchs usw.) gemacht.

3.2.1.2 Berechnungen für Erdkabeltrassen

Die für die Berechnungen der bei Erdkabeln relevanten Größen sind zusammen mit den im Weiteren benutzten Bezeichnungen in Tabelle 3/6 zusammengestellt und werden in den Abbildungen 3/122a,b veranschaulicht.

Tabelle 3/6
Für die Berechnungen relevante Größen und ihre Bezeichnungen

Anordnung der Phasen	z.B. Einebene: R S T
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}
maximale Stromlast	I_{1max}
	I_{2max}
aktuelle Stromlast während der Messung	I_{1akt}
	I_{2akt}

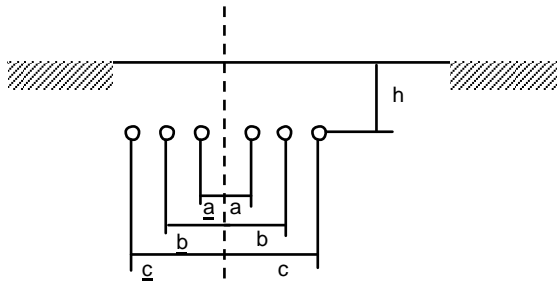


Abbildung 3/122a
Bezeichnungen für die Abstands- und Höhenangaben für Enebenenmasten

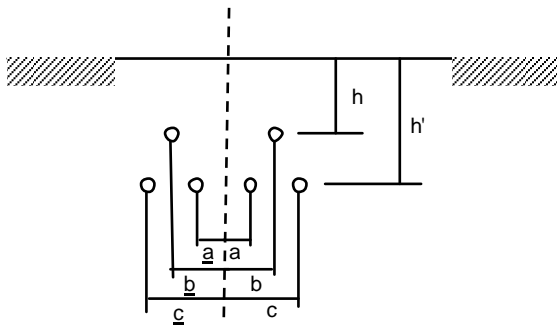


Abbildung 3/122b
Bezeichnungen für die Abstands- und Höhenangaben für Dreiecksanordnungen

Nur in den Ausnahmefällen, wenn $\underline{x} \neq \underline{x}$ (x : a , b oder c) gilt, werden in den entsprechenden Tabellen beide Werte aufgeführt. In den Tabellen für die Erdkabel sind meist die folgenden relativen Angaben aufgeführt:

Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte): $d_{\text{sys}} = b + \underline{b}$

Abstand der Phaseleiter innerhalb eines Systems:

bei Enebenenanordnung: $d_{\text{ph}} = c - b = \underline{c} - \underline{b} = b - a = \underline{b} - \underline{a}$

bzw. bei Dreiecksanordnung: $d_{\text{ph}} = c - a = \underline{c} - \underline{a} = \sqrt{[(c-b)^2 + (h-h')^2]}$

Bei Erdkabeln schirmt der Erdboden das elektrische Feld praktisch vollständig ab, so dass hier nur die Ermittlung der magnetischen Flussdichte erforderlich war. Die genaue Bestimmung der Trassenmitte war bei Kabeltrassen meist nicht ganz einfach. Durch Vergleich der Betreiberangaben über die Lage der Kabeltrasse mit einer ersten Orientierungsmessung der magnetischen Feldstärke wurde als 'Referenzpunkt' der Ort des aktuellen Maximums gewählt. Dieser wurde als Trassenmitte angenommen.

Da die Isolinien der magnetischen Flussdichte bei Erdkabeltrassen diesen parallel folgen, wurden hier keine Horizontalschnitte, sondern nur die Querprofile – für die aktuelle und die maximale Betriebssituation – berechnet. Eine Ausnahme bildet z.B. die 220 kV-Kabeltrasse, bei der relativ dicht zu dem Abspannmast gemessen wurde.

Für den besseren Vergleich mit den Immissionen, wie sie bei Freileitungen auftreten, wurde auch an den Kabeltrassen das Querprofil in einem Meter Höhe über dem Erdboden gemessen und berechnet. Zusätzlich wurde in der Normmesshöhe für Kabeltrassen von 20 cm das Feld gemessen (max-hold-Modus) und berechnet.

3.2.1.3 Verwendetes Feldberechnungsprogramm

Für die Berechnungen der elektrischen und magnetischen Felder von Stromversorgungsleitungen im Rahmen dieses Vorhabens wurde das Programm WinField® der Firma FGEU mbH, Berlin verwendet. Die Merkmale des Programms sind in der Tabelle 3/7 zusammengestellt.

Tabelle 3/7

Merkmale des Programms WinField® zur Berechnung elektrischer und magnetischer Felder

+ Option gegeben

	WinField®
Berechnung der Feldstärken als max/rms	+/+
freie Eingabe pro Leiter von	
Strom (Betrag und Phase)	+
Spannung (Betrag und Phase)	+
Frequenz	+
Höhe und Abstand	+
Durchhang	+
Seilart, -stärke	+
automatische Berechnung von Erdleiterströmen und deren Auswirkungen auf die Feldverteilung	+
Berechnung des Einflusses von Masten, Gebäuden und dem Erdboden auf das elektrische Feld	+
Möglichkeit der Phasenoptimierung, bzw. die Wahl zufällig verteilter Phasen	+
Berücksichtigung der Auswirkungen von Temperatur und Wind sowie der Stromstärke auf den Durchhang	+
Bibliothek von Objekten (Mastbilder, Kabeltypen, ...)	+

3.2.2 Ergebnisse der Berechnungen

Es wurden für alle Trassen, an denen Messungen stattgefunden hatten, Feldberechnungen durchgeführt, ergänzt um Berechnungen für einen Freileitungs- und einen Erdkabelabschnitt einer geplanten 380 kV-Trasse (s. Tab. 3/2, S. 66). Die Beschreibungen der Messorte, Fotos und Luftbilder stehen im Abschnitt 3.1 ('Messtechnische Erfassung ...'). Die Einzelergebnisse der Berechnungen mit den Abbildungen der Querprofile und Horizontalschnitte befinden sich in den Abschnitten 3.2.2.2 bis 3.2.2.7. In folgenden Abschnitt werden einige allgemeine Anmerkungen gemacht und es werden beispielhaft Ergebnisse gezeigt und diskutiert.

3.2.2.1 Übersicht über die Immissionsorte und Beschreibung der Ergebnisse anhand von Beispielen

Auch wenn darauf geachtet wurde, dass die Messergebnisse möglichst nicht (oder nur unwesentlich) von anderen Einrichtungen der Stromversorgung, wie Mittelspannungs- oder Niederspannungsversorgungskabel, Hausanschlüsse oder Transformatoren, beeinflusst oder sogar dominiert wurden, konnte eine Überlagerung durch Beiträge anderer Quellen nicht immer vermieden werden. In den Berechnungen konnten diese Fremdbeiträge nicht simuliert werden. Die dadurch entstandenen Abweichungen sind in den Abbildungen vermerkt (s. z.B. Abb. 3/123).

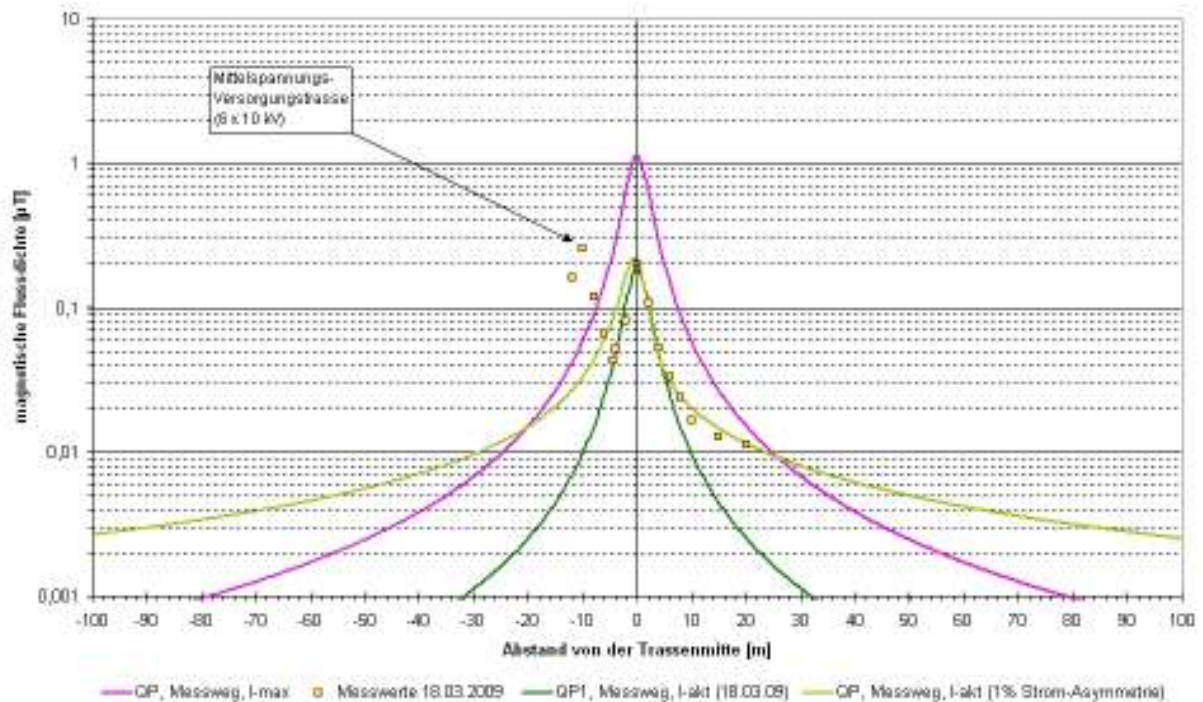


Abbildung 3/123

Querprofile der magnetischen Flussdichte an einem 110 kV-Erdkabel für maximalen und aktuellen Strom auf dem System, die höheren gemessenen Werte auf der linken Trassenseite wurden von einer Mittelspannungsversorgungstrasse (bei -18 m) verursacht, der relativ langsame Abfall der Flussdichte auf der rechten Seite der Trasse kann mit einer (angenommene) Asymmetrie von 1 % in der Stromverteilung auf den Phasen durch die Simulation besser nachgebildet werden (hellgrüne Kurve) als durch eine Feldberechnung mit symmetrischer Stromverteilung (dunkelgrüne Kurve)

In der Mehrzahl der Fälle stimmen die Rechnungen mit den Messungen erw artungsgemäß gut überein. Für eine exakte Übereinstimmung muss eine Vielzahl von Detaildaten in genügender Genauigkeit vorliegen. Als Angabe für die aktuelle Stromlast wurde von den Betreibern im Allgemeinen der Stromwert für eine Phase pro System über mittelt, oft ein Wert alle 15 Minuten, manchmal ein Wert pro Minute, z. T. aber auch nur ein Wert pro Stunde. In solchen Fällen ist es dann nicht verw underlich, wenn die für die übermittelten Daten berechneten magnetischen Flussdichten nicht genau mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

Bei der Angabe eines Stromw erts pro System musste in den Berechnungen von einer symmetrischen Lastverteilung ausgegangen werden, d.h. die Ströme der anderen Phasen wurden als gleich groß angenommen. In der Praxis treten meist nur geringfügig asymmetrische Lastflüsse auf, d.h. die Ströme der anderen Phasen weichen nur wenig von dem der übermittelten Phase ab. Diese Abweichungen können aber auch deutlicher ausfallen. In einem Fall wurden alle drei Phasenströme über mittelt, mit einer Asymmetrie von ca. 20 %, d.h. auf einer Phase war der Strom ca. 20 % größer und auf einer anderen ca. 20 % niedriger als der Mittelwert für alle drei Phasen, dem der Strom auf der dritten Phase in etwa entsprach. Eine solche Asymmetrie führt natürlich zu erkennbar anderen Flussdichten als eine symmetrische Verteilung der Ströme. Insbesondere, wenn nur ein System aktiv ist, bleibt in so einem Fall ein Beitrag zum Magnetfeld der Phase mit dem größten Stromwert übrig, der nicht durch die Felder der Ströme auf den anderen Phasen kompensiert wird. Der Beitrag zur magnetischen Flussdichte dieses 'Überschussstroms' fällt mit dem Abstand von der Trasse nur mit $1/r$ und nicht mit $1/r^2$ ab, was im Außenbereich zu einem deutlich flacheren Verlauf und zu höheren

Werten führt. An einigen Trassen wurde ein solch schwächerer (als $1/r^2$) Abfall gemessen. Dieser kann von einer (nicht übermittelten) asymmetrischen Stromverteilung herrühren, ein 'normaler' $1/r^2$ -Abfall könnte aber auch von einem zusätzlichen Beitrag zur gemessenen Flussdichte, der durch eine unbekanntes zusätzliche Feldquelle verursacht worden war, überlagert worden sein (vgl. Abb. 3/123).

Durch induktive und kapazitive Verbraucher entsteht eine Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung, die auch auf die Übertragungsstrecken zurückwirkt. Dies kann zu kleinen Abweichungen von den erwarteten 120° -Differenzen in den relativen Phasenlagen der Ströme zueinander führen. Wenn auf einer Trasse zwei unabhängige Übertragungssysteme geführt werden, ist die Phasenlage zwischen den Strömen der beiden Systeme – anders als die Spannungen, die im Wesentlichen synchronisiert sind – nicht automatisch festgelegt. Bei einer übermittelten Phasenordnung von RST | RST (d.h. eine relative Phasenlage von 0° – 120° – 240° | 0° – 120° – 240°), kann in der Realität eine Phasendifferenz von z.B. 10° zwischen den Systemen herrschen, dies würde eine Phasenlage von 0° – 120° – 240° | 10° – 130° – 250° bedeuten. Auch diese beiden Situationen führen zu unterschiedlichen Feldverteilungen. In zwei Fällen führte die aktuelle Schaltsituation des Stromnetzes zu Phasendifferenzen von 180° zwischen den Strömen auf den beiden Systemen, bezogen auf die vorgesehene Phasenordnung von RST | RST. Nur durch Berücksichtigung dieser Phasendifferenz konnte eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung erzielt werden (vgl. Abschnitte 3.2.2.2.1u2 sowie 3.2.2.4.7, mit den Abb. 3/133b und 3/202b).

In einigen wenigen Fällen, bei denen die mit den übermittelten Daten berechneten Querprofile nur grob mit den Messungen übereinstimmten, wurden Berechnungen mit geringfügig geänderten Alternativparametern durchgeführt, um aufzuzeigen, welches die Ursachen für die Differenzen sein könnten.

Abbildung 3/124 zeigt beispielhaft die gemessenen und die berechneten Querprofile der elektrischen Feldstärke unter einer 380 kV-Freileitung mit Donaumasten. In der Abbildung sind die das elektrische Feld abschirmenden und verzerrenden Objekte (hier Bäume und eine Transformatorstation von Mittel- auf Niederspannung) in Lage und Größe skizziert (der senkrechte Abstand zum Messweg ist in die Größe eingegangen: weiter entfernte Objekte sind kleiner dargestellt). Der Baum bei $x = -12$ m war im April zur Zeit der ersten Messung noch kaum belaubt, anders als bei der zweiten Messung im August, bei der die abschirmende Wirkung deutlich stärker war (vgl. Messpunkte bei $x = -10$ m und $x = -20$ m). In diesem Beispiel wird in Trassenmitte der Grenzwert der 26. BImSchV, wie dort als zulässig erklärt, kleinräumig (um weniger als den Faktor zwei) überschritten. Dies kommt bei 380 kV-Freileitungen bei großen Mastabständen und entsprechend kleinem Bodenabstand der untersten Leiterseile immer wieder vor.

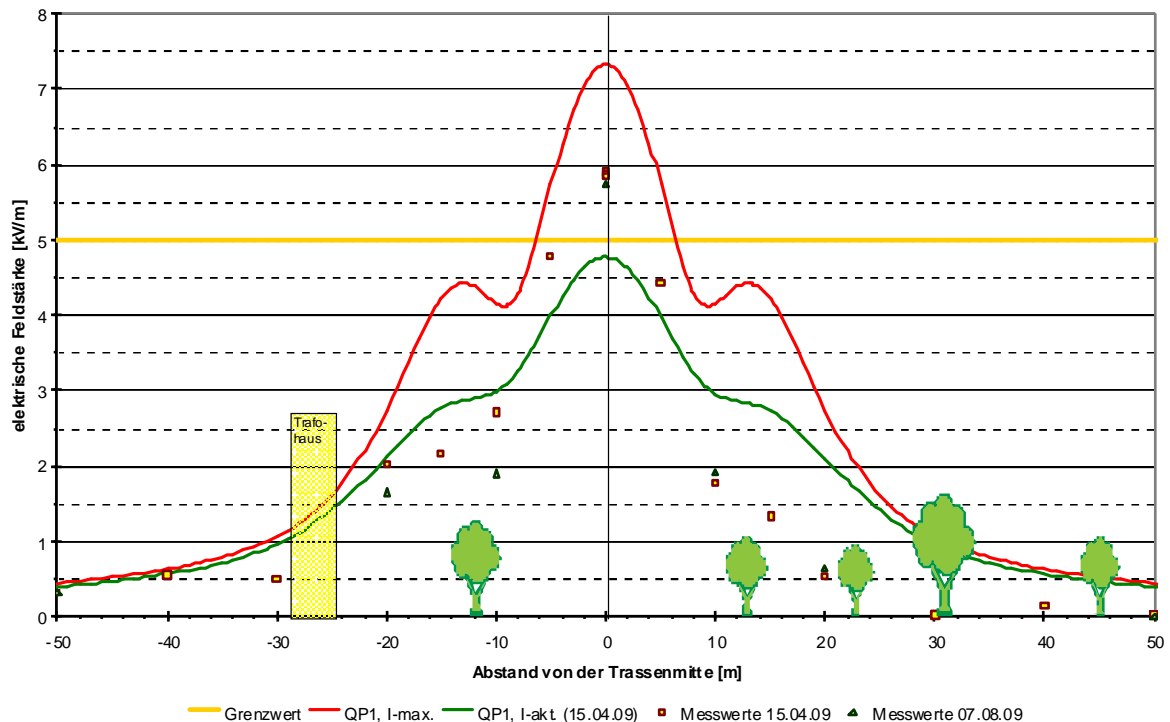


Abbildung 3/124

Querprofile der elektrischen Feldstärke einer 380 kV-Freileitung, gemessen im April und im August und berechnet für die aktuelle und für die maximale Betriebsauslastung

In den folgenden Abschnitten (3.2.2.2 – 3.2.2.7) sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Es beginnt mit einer Tabelle, die die wesentlichen Berechnungsparameter für die einzelnen Trassen und das jeweilige Spannungsfeld enthält, gefolgt von den Abbildungen der Horizontalschnitte (nur Freileitungen) und der Querprofile. Die Querprofile sind jeweils einmal bis 400 m von der Trassenmitte bei Freileitungen bzw. bis 100 m bei Erdkabeln in logarithmischer Darstellung und einmal als Ausschnitt bis 50 m bzw. bis 20 m in linearer Darstellung wiedergegeben. Die Tabellen am Ende jedes Abschnitts enthalten die wesentlichen Ergebnisse. Es sind dort immer das berechnete (bzw. gemessene) Maximum der magnetischen Flussdichte bzw. der elektrischen Feldstärke für das Spannungsfeld, die Werte bei 50 m Abstand von der Trassenmitte bei Freileitungen und für 20 m bei Erdkabeln sowie der maximale Abstand, bis zu dem 0,1 μT bzw. 0,01 kV/m überschritten werden können, aufgeführt, jeweils für den/die Messweg/e (aktuelle Bedingungen) und für das Querprofil am Ort des maximalen Durchhanges (Maximalbedingungen) – u.U. sind verschiedene Parametervarianten angegeben. Bei dem Vergleich zwischen dem gemessenen und dem berechneten Wert muss beachtet werden, dass der berechnete Wert auf dem (mittleren) Stromwert für den Messzeitraum basiert, während der aufgeführte Messwert das jeweilige Maximum im gesamten Messzeitraum darstellt, der durch kurzzeitige Schwankungen, wie Stromspitzen, beeinflusst sein kann. Die Güte der Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den mit den überlieferten Daten berechneten Werten ist besser in den Abbildungen erkennbar, in denen die gemessenen Mittelwerte für jeden Messpunkt dargestellt sind.

3.2.2.2 Ergebnisse der Berechnungen für 380 kV-Freileitungen

3.2.2.2.1 FL380_1a

Spannfeldlänge (kleines Spannfeld – Mast 2 und 3)		L	290,8 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		S R...T	-S -R -T
während der Messung bestand eine Phasendifferenz von $\Delta\varphi=180^\circ$ zwischen den Strömen auf den beiden Systemen (kenntlich gemacht durch das '-'), ohne diese Phasendifferenz ist die magnetische Immission insbesondere im Außenbereich deutlich höher			
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	2724 A	2724 A
	aktueller Strom	123 A	95 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,\max}$	25,5 m
	aktueller Strom	$h_{\min,\text{akt}}$	27,0 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 2 / Standort Mast 3		Δh	0,3 m
Leiterseilhöhen Mast 2	h_1	35,7 m	
	h_1'	46,7 m	
Leiterseilhöhen Mast 3	h_2	33,5 m	
	h_2'	44,5 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_1	7,75 m	
	b_1	10,75 m	
	c_1	14,25 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 3	a_2	7,75 m	
	b_2	10,75 m	
	c_2	14,25 m	
Abstand des Messweges von Mast 2		d_1	145,5 m

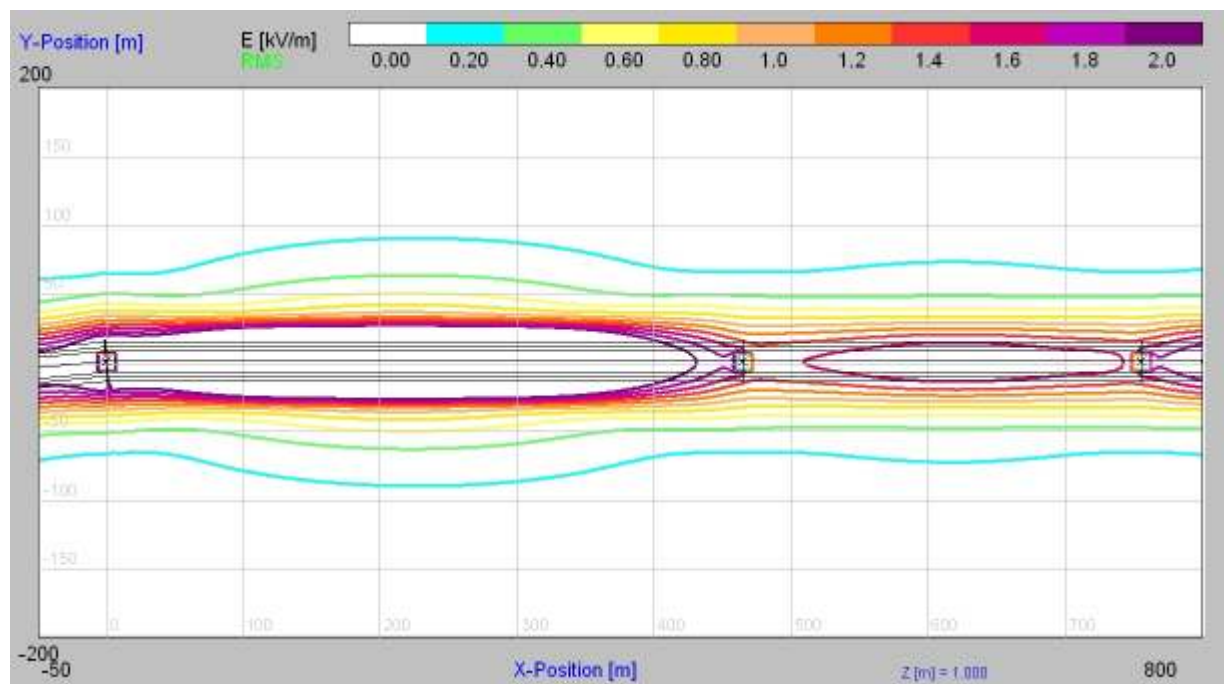


Abbildung 3/125
380 kV-Freileitung, FL380_1a und b: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), der Messweg befindet sich in der Mitte des kleinen Spannfeldes (FL380_1a) zwischen Mast 2 bei $x=465$ m und Mast 3 $x=755$ m

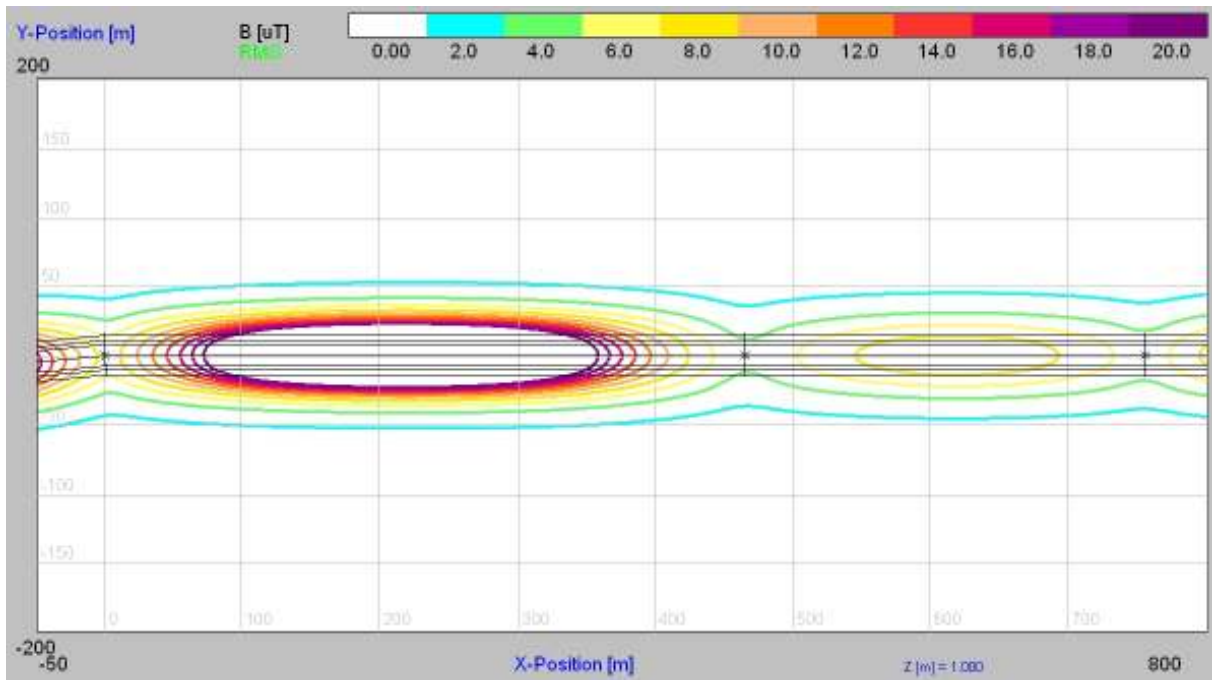


Abbildung 3/126
 380 kV-Freileitung FL380_1a und b: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), der Messweg befindet sich in der Mitte des kleinen Spannungsfeldes (FL380_1a) zwischen den Masten 2 und 3 bei $x=465$ m und $x=755$ m (mit Phasendifferenz von 180° zwischen den Strömen auf beiden Systemen, ohne Phasendifferenz s. Abb. 3/130b)

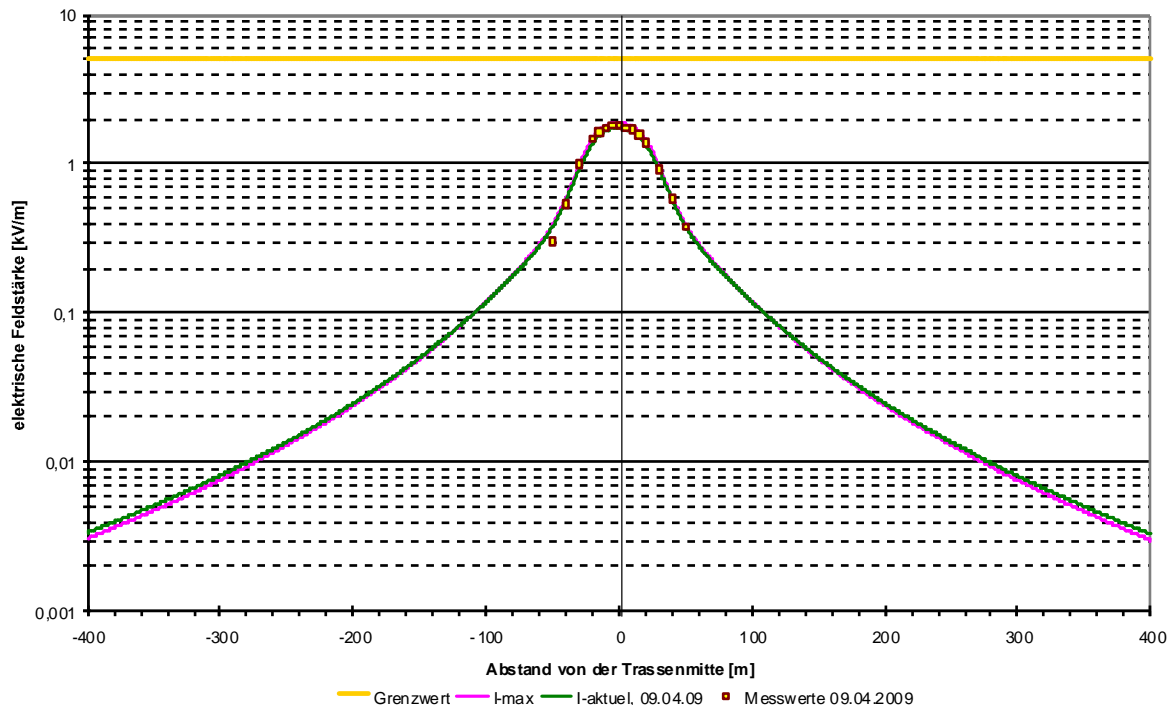


Abbildung 3/127a
 380 kV-Freileitung, FL380_1a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

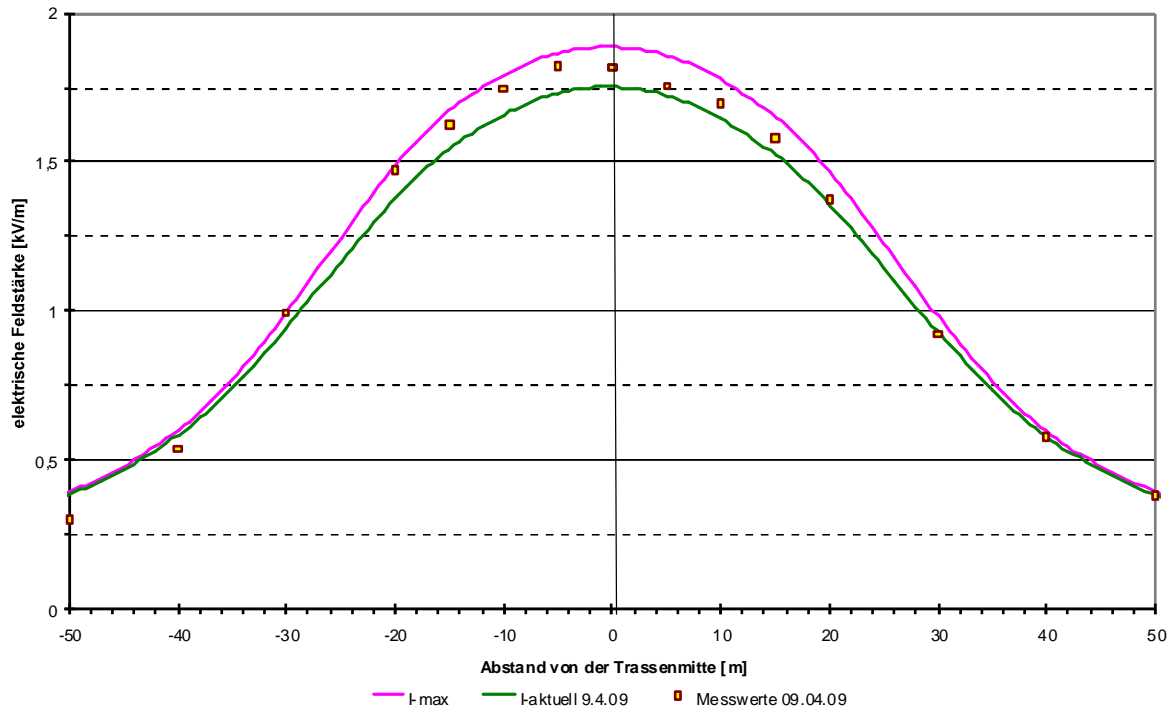


Abbildung 3/127b
 380 kV-Freileitung, FL380_1a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

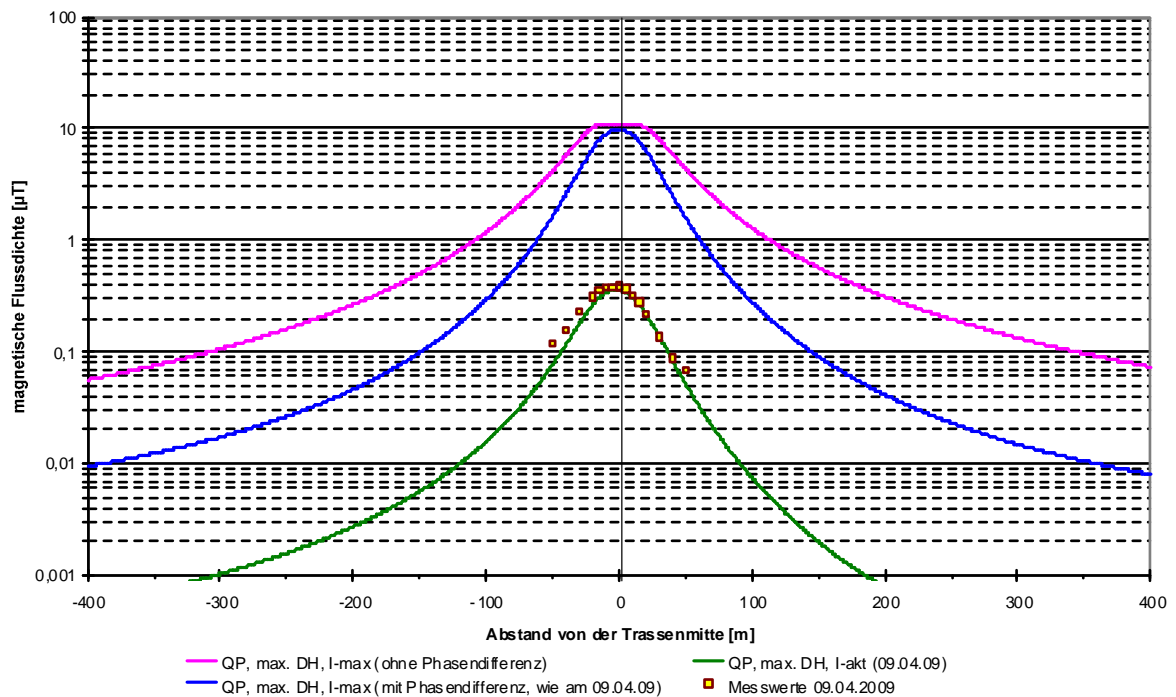


Abbildung 3/128a
 380 kV-Freileitung, FL380_1a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

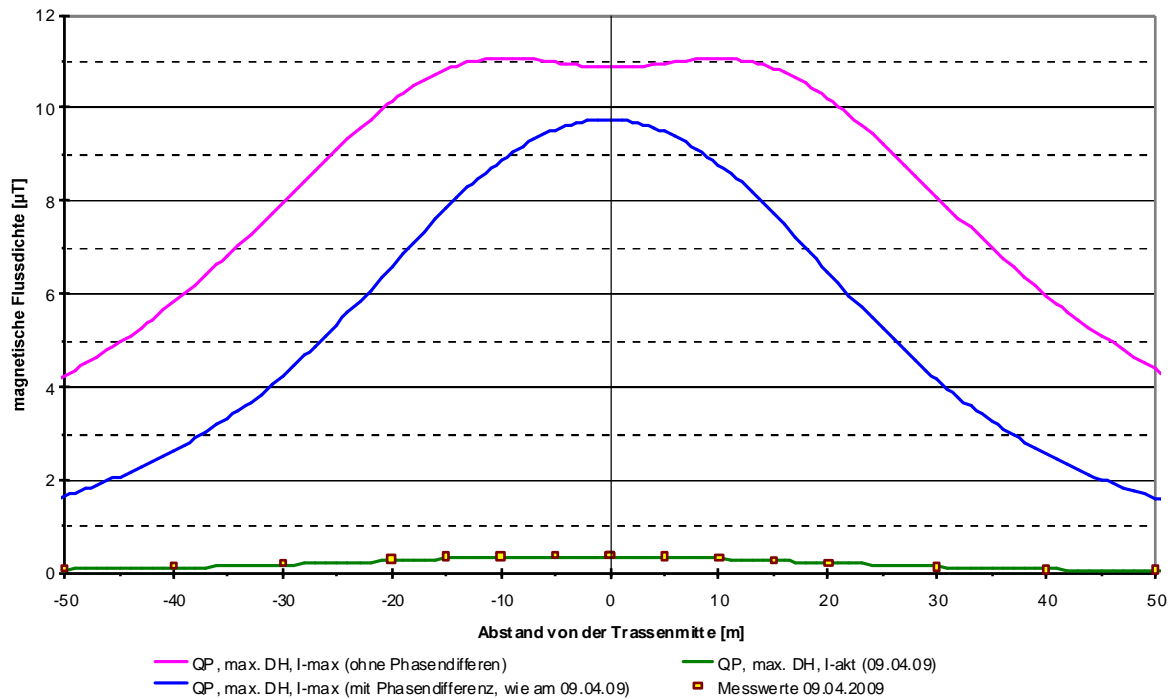


Abbildung 3/128b
380 kV-Freileitung, FL380_1a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/8a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_1a			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung		Querprofil	0,414	0,129	-
Rechnung	akt. Ströme	mit $\Delta\phi$	0,358	0,078	44
	max. Ströme	mit $\Delta\phi$	9,743	1,660	149
		ohne $\Delta\phi$	11,064	4,384	344

Tabelle 3/8b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_1a			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	1,828	0,381	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	1,752	0,386	279
	max. Ströme	max. Durchhang	1,886	0,395	274

3.2.2.2.2 FL380_1b

Spannfeldlänge (großes Spannfeld – Mast 1 bis 2)		L	464,5 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		S R...T	(-)S (-)R (-)T
nur während der Messung am 09.04. (nicht am 06.08.) bestand eine Phasendifferenz von $\Delta\varphi=180^\circ$ zwischen Strömen auf den beiden Systemen (kennlich gemacht durch das '-'), ohne diese Phasendifferenz, sind die magnetischen Immissionen im Außenbereich deutlich höher und im Trassenbereich etwas niedriger			
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	2724 A	2724 A
	aktueller Strom April	123 A	95 A
	August Messweg (1)	200 A	333 A
	August Messweg (2), Anfang	150 A	300 A
	August Messweg (2), Ende	117 A	290 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,max}$	9,5 m
	aktuelle Bedingungen April August	$h_{\min,akt}$	11,1 m 11,0 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	$h_{\min,akt}$
Leiterseilhöhen Mast 1		h_1	28,5 m
		h_1'	38,5 m
Leiterseilhöhen Mast 2		h_2	35,7 m
		h_2'	46,7 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1		a_1	7,75 m
		b_1	10,75 m
		c_1	14,25 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2		a_2	7,75 m
		b_2	10,75 m
		c_2	14,25 m
Abstand des Messweges (1) von Mast 1		d_1	175 m
Abstand des Messweges (2) von Mast 1		d_2	384 m

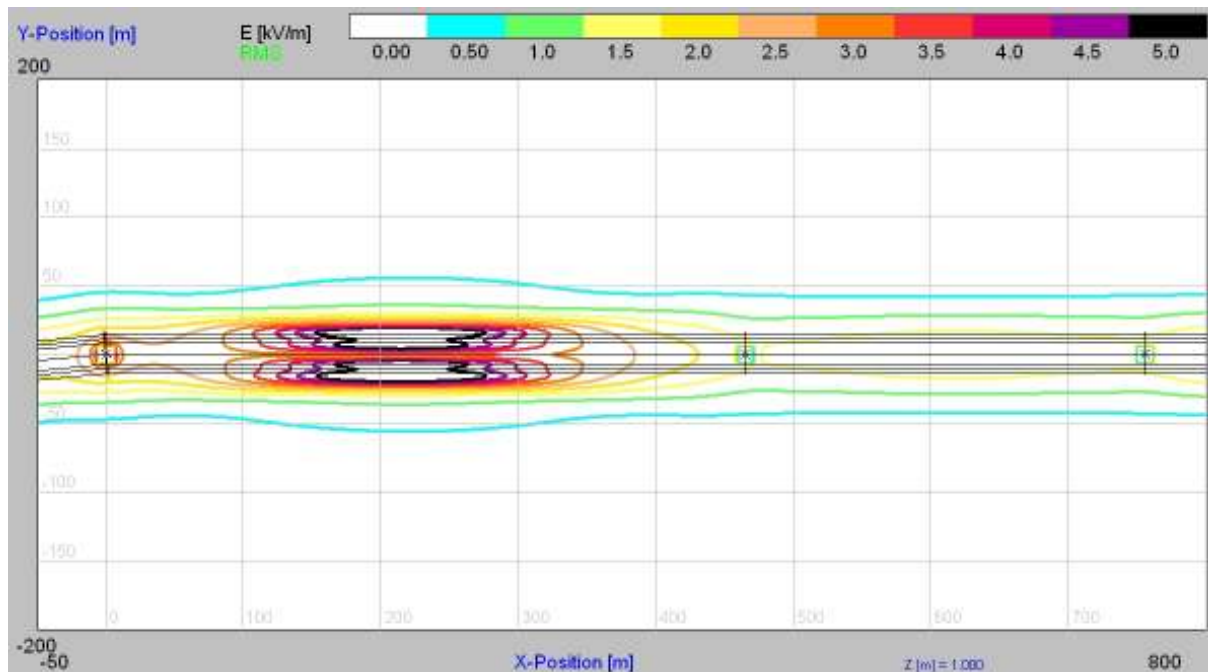


Abbildung 3/129
380 kV-Freileitung, FL380_1a und b: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg 1 bei $x=175$ m, Messweg 2 bei $x=384$ m am Rand des großen Spannfeldes (FL380_1b) zwischen den Masten 1 und 2 bei $x=0$ m und $x=465$ m

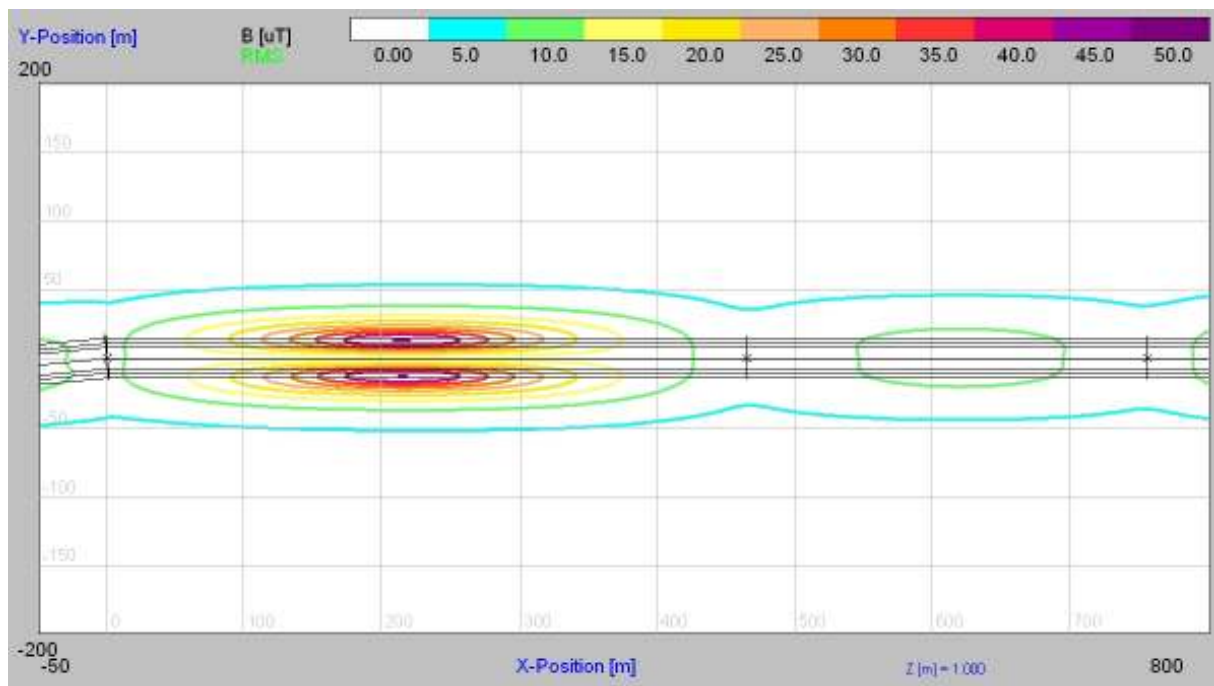
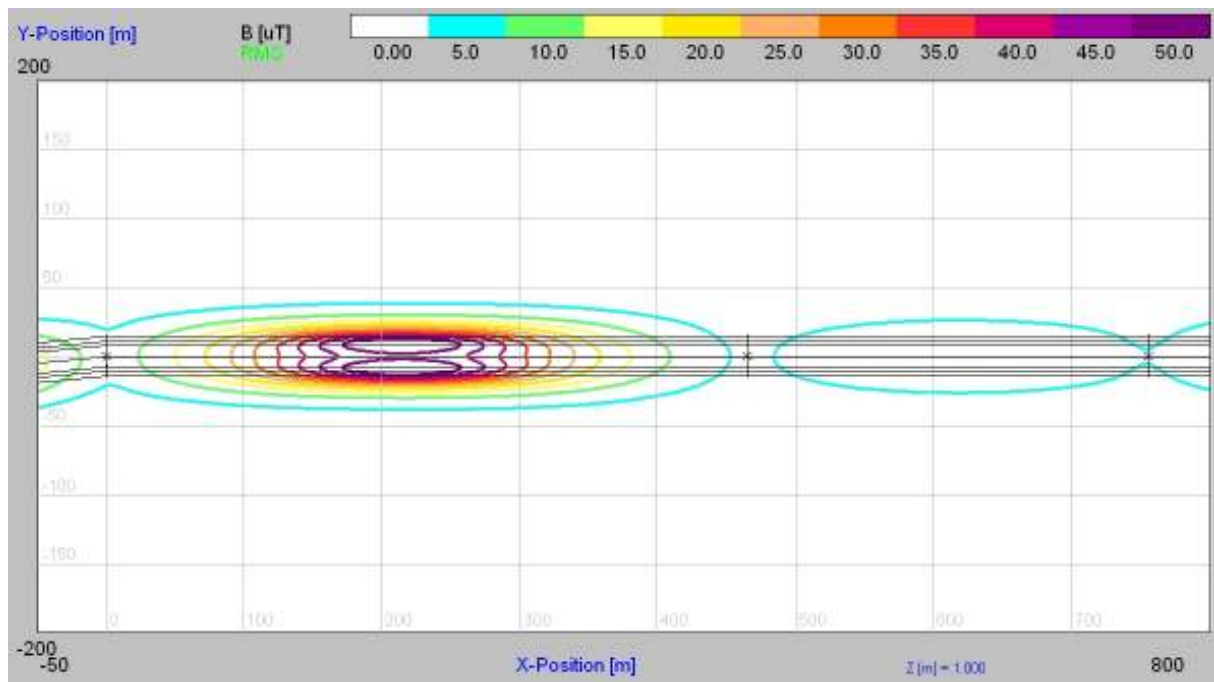


Abbildung 3/130

380 kV-Freileitung, FL380_1a und b: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand) Messweg 1 bei $x=175$ m, Messweg 2 bei $x=384$ m am Rand des großen Spannungsfeldes (FL380_1b) zwischen den Masten bei $x=0$ m und $x=465$ m

a (oben) mit Phasendifferenz von 180° zwischen den Strömen auf beiden Systemen (April)

b (unten) ohne Phasendifferenz (August)

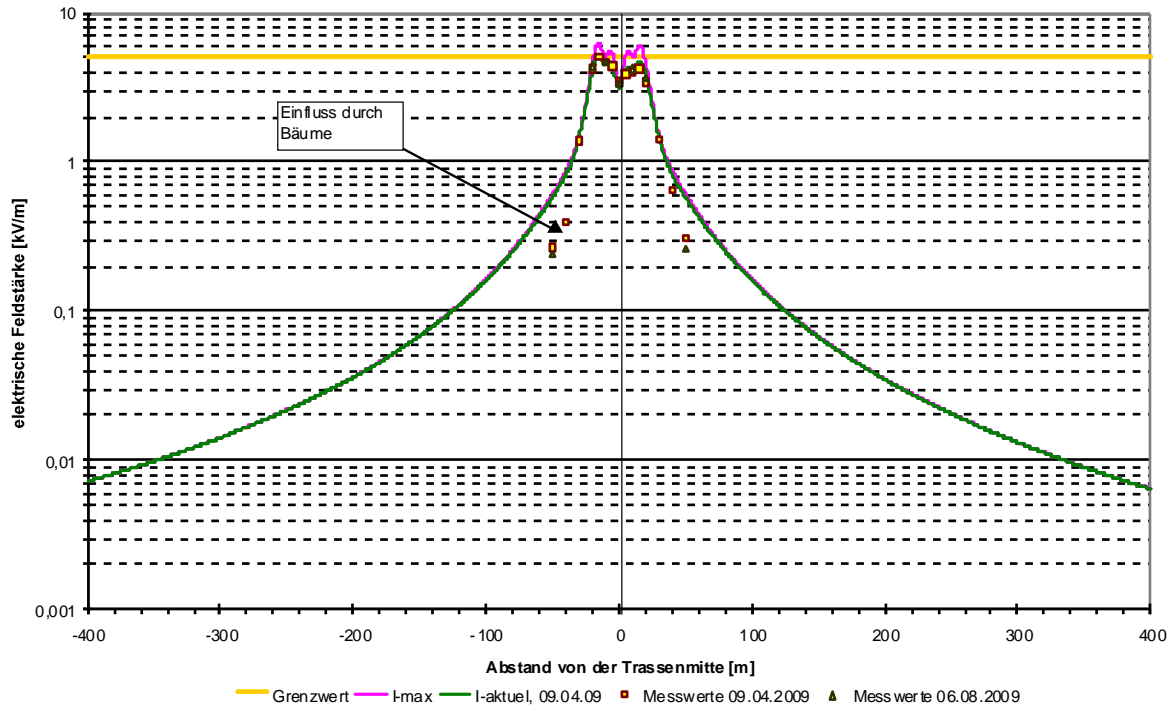


Abbildung 3/131a
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofile der elektrischen Feldstärke, Messweg 1, April und August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

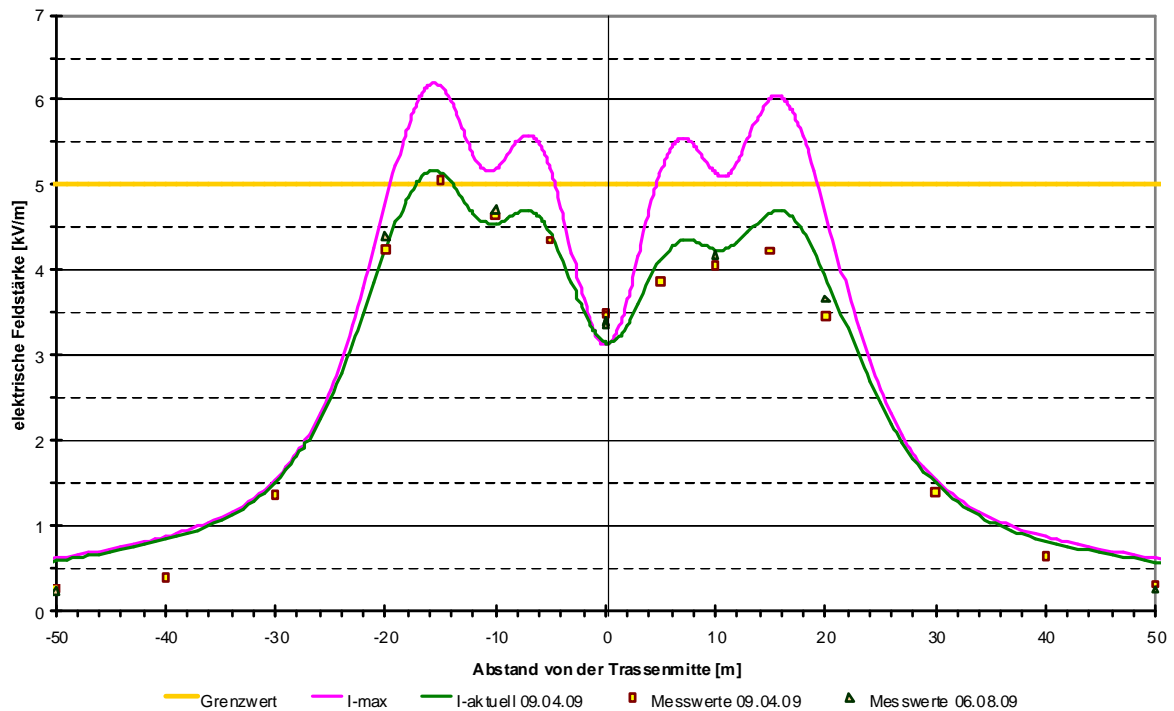


Abbildung 3/131b
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofile der elektrischen Feldstärke, Messweg 1, April und August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

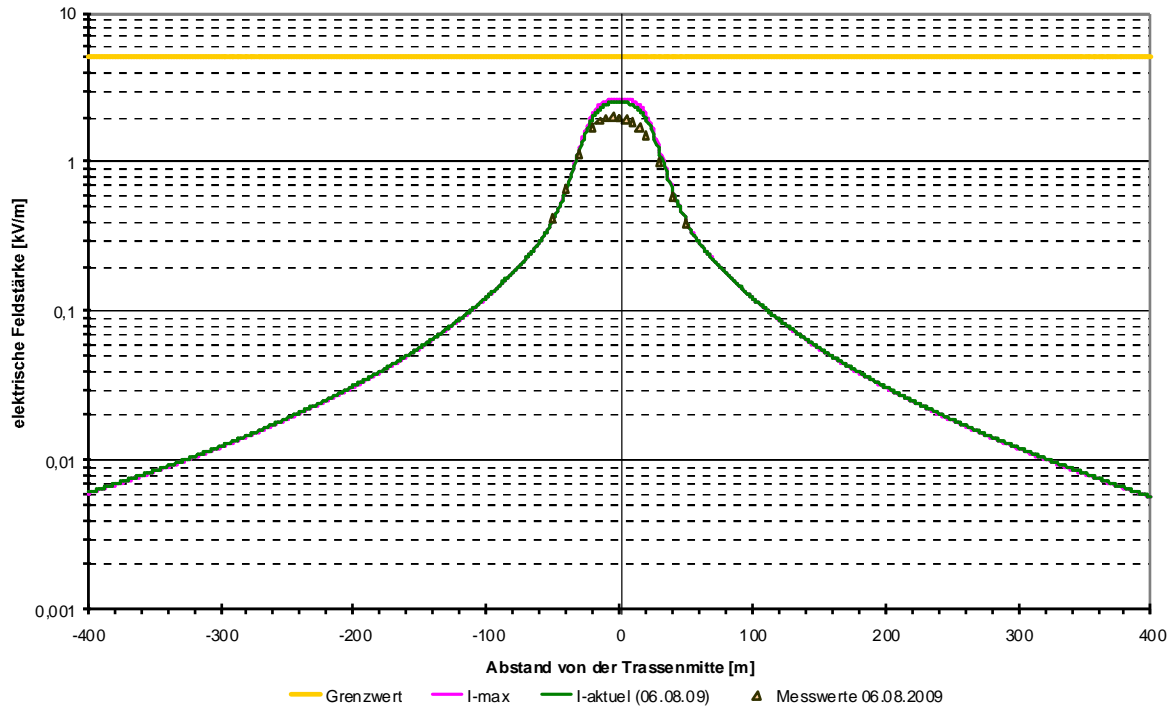


Abbildung 3/132a
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofil der elektrischen Feldstärke, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

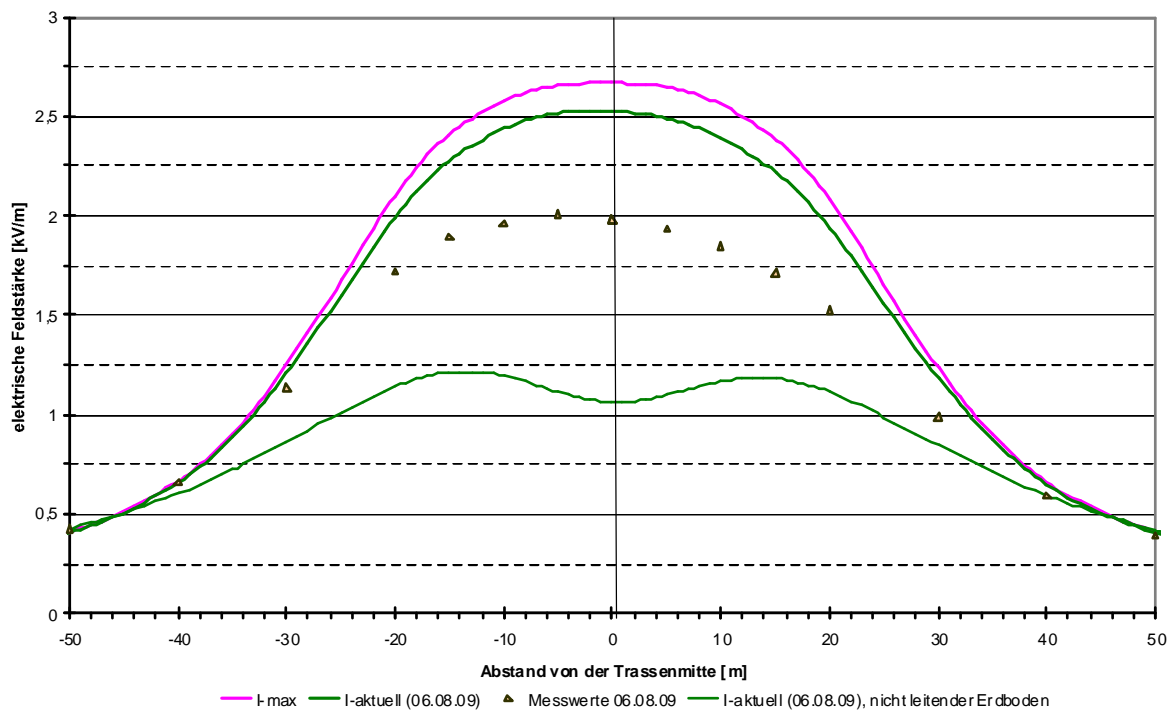


Abbildung 3/132b
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofil der elektrischen Feldstärke, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte
 Vergleich: für leitenden (dicke grüne Linie) und für nicht-leitenden (dünne Linie) Erdboden berechnete elektrische Feldstärke

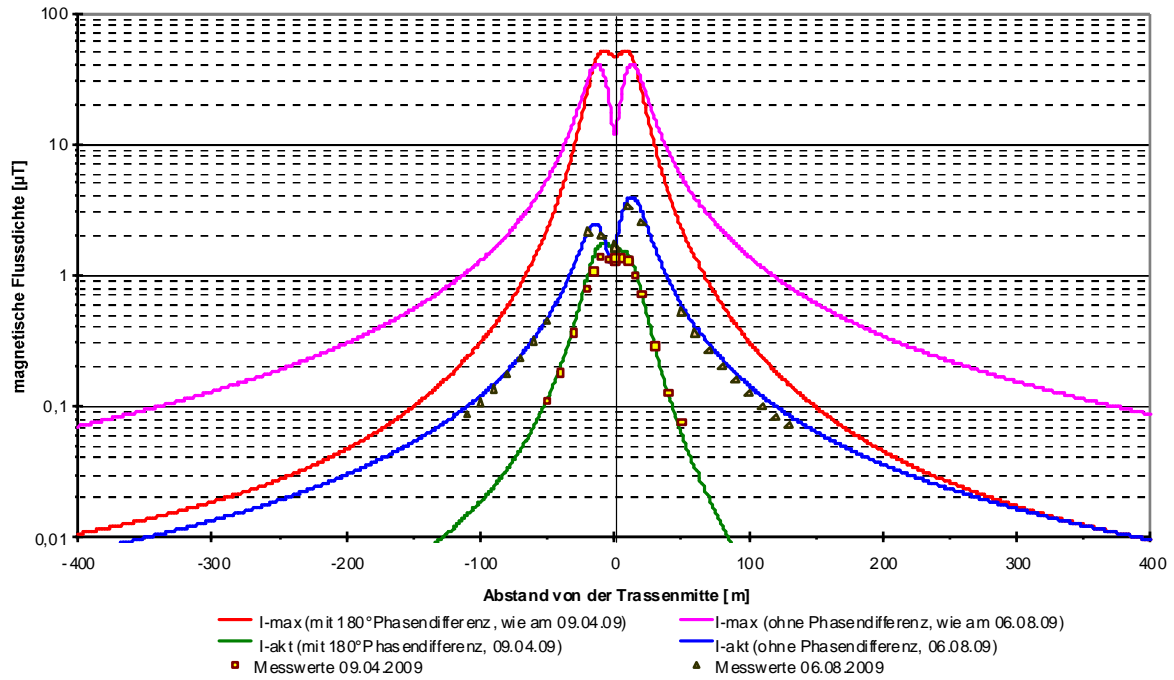


Abbildung 3/133a
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April und August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

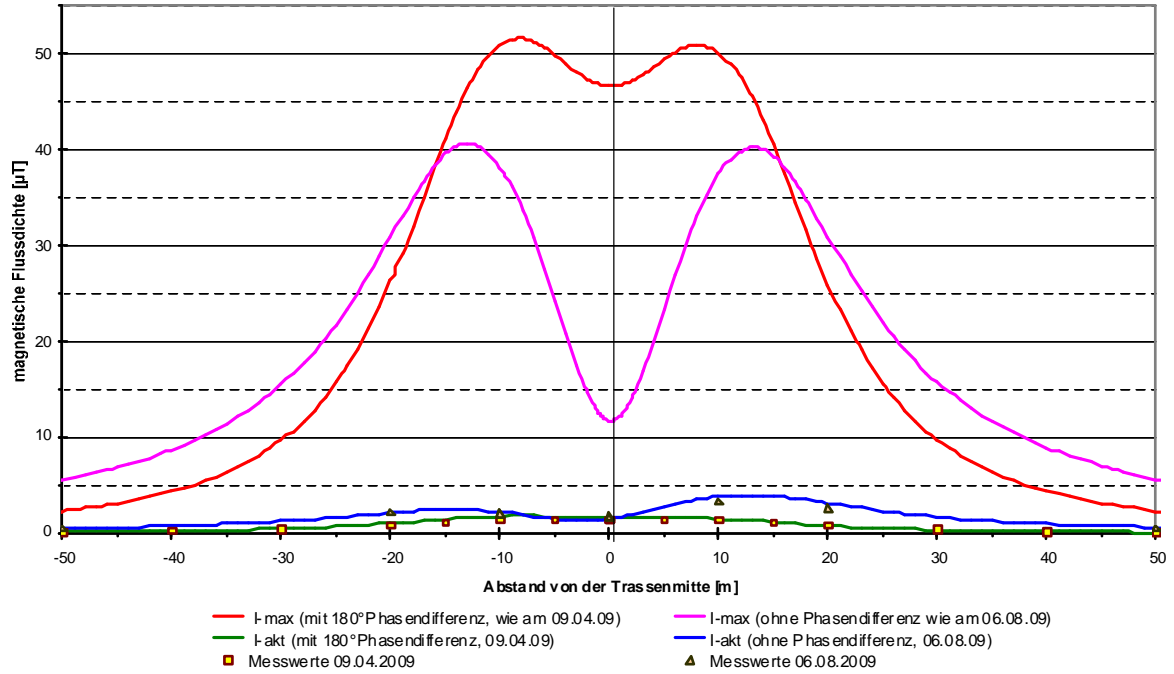


Abbildung 3/133b
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April und August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

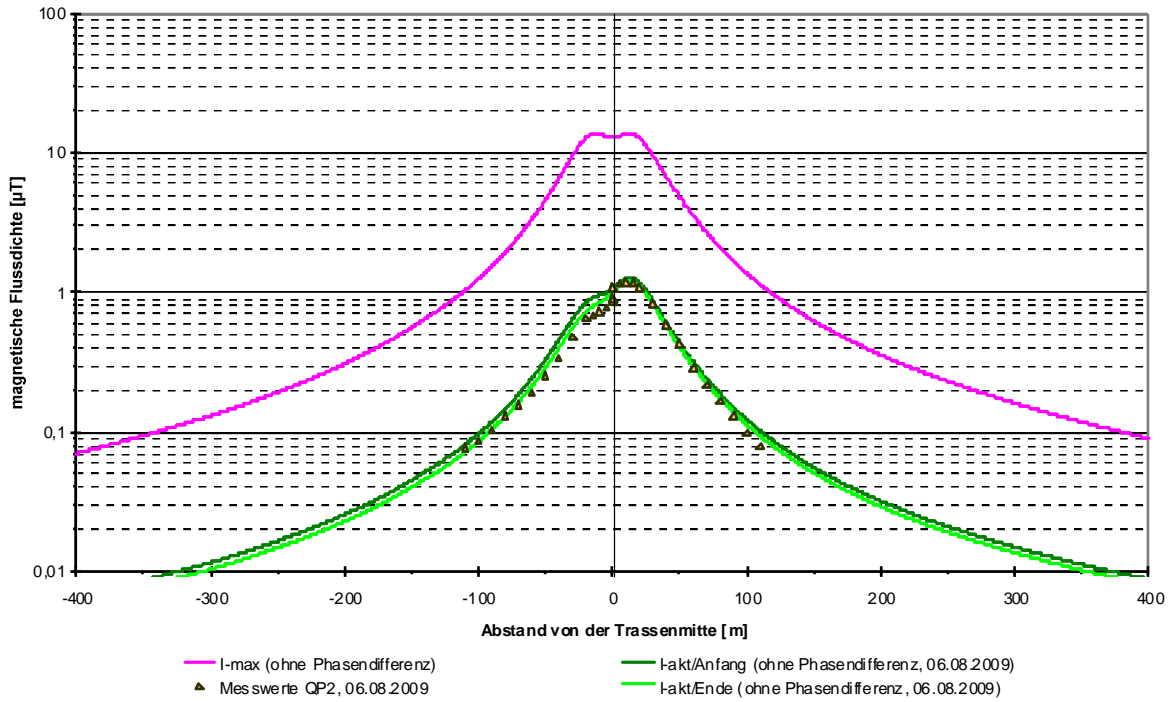


Abbildung 3/134a
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

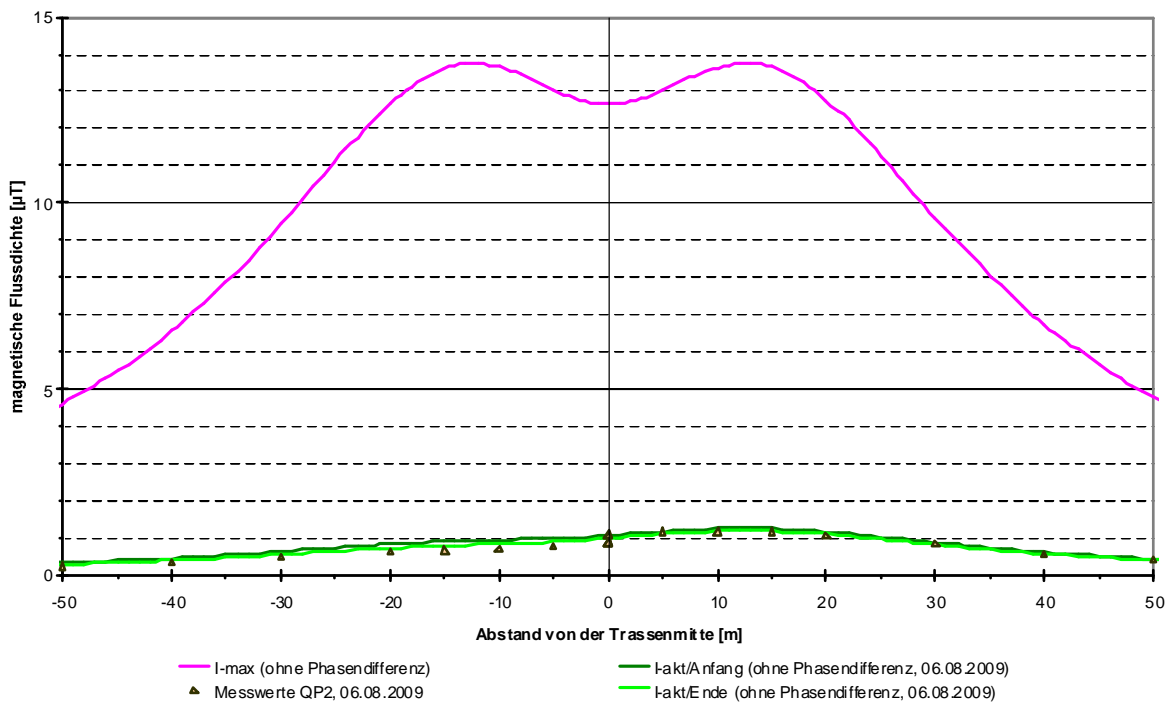


Abbildung 3/134b
 380 kV-Freileitung, FL380_1b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/9a

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_1b			B_{\max} [μT]	B_{\max} (r = 50 m) [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$	
Messung 1 (April)		QP1	1,364	0,112	-	
Messung 2 (August)		QP1	3,377	0,542	110	
		QP2	1,204	0,427	90	
Rechnung	akt. Ströme	mit $\Delta\varphi$	QP1 (Apr)	1,747	0,116	52
		ohne $\Delta\varphi$	QP1 (Aug)	3,938	0,597	119
			QP2 (Aug)	1,263	0,433	105
	max. Ströme	mit $\Delta\varphi$	max. Durchhang	51,619	2,297	149
		ohne $\Delta\varphi$		40,693	5,646	371

Tabelle 3/9b

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_1b			E_{\max} [kV/m]	E_{\max} (r = 50 m) [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$ m
Messung 1 (April)		QP1	5,065	0,309	-
Messung 2 (August)		QP1 (kein Wert bei 15 m)	(4,734)	0,261	-
		QP2	2,013	0,424	-
Rechnung	akt. Ströme	QP1	5,160	0,589	348
		QP2 (Aug)	2,528	0,406	327
		QP2, nicht leitender Erdboden*	1,215	0,424	328
	max. Ströme	max. Durchhang	6,174	0,616	348

*eine geringere Leitfähigkeit des trockenen Bodens als im Berechnungsprogramm angesetzt, ist sehr wahrscheinlich die Erklärung für die durchgängig geringen Messwerte der elektrischen Feldstärke, verglichen mit den für leitenden Erdboden berechneten Werte

3.2.2.2.3 FL380_2

Spannfeldlänge		L	478,8 m
Phasenbelegung (West / Ost)		$\begin{matrix} T \\ R \ S \end{matrix}$	$\begin{matrix} T \\ S \ R \end{matrix}$
Ströme (West / Ost)	Maximalstrom	2520 A	2520 A
	aktueller Strom April(1)	270 A	200 A
	an Messung angepasst	225 A	150 A
	April(2)	90 A	85 A
	August Messweg (1)	125 A	60 A
	August Messweg (2)	90 A	52 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,max}$	10,0 m
	aktuelle Bedingungen	April(1)	13,5 m
		April(2)	13,0 m
	August	$h_{\min,akt}$	12,9 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,2 m
Leiterseilhöhen Mast 1		h_1	31,1 m
		h_1'	39,5 m
Leiterseilhöhen Mast 2		h_2	27,1 m
		h_2'	35,5 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1		a_1	4,3 m
		b_1	8,0 m
		c_1	11,3 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2		a_2	4,3 m
		b_2	8,0 m
		c_2	11,3 m
Abstand des Messweges (1) von Mast 1		d_1	187 m
Abstand des Messweges (2) von Mast 1		d_2	154 m

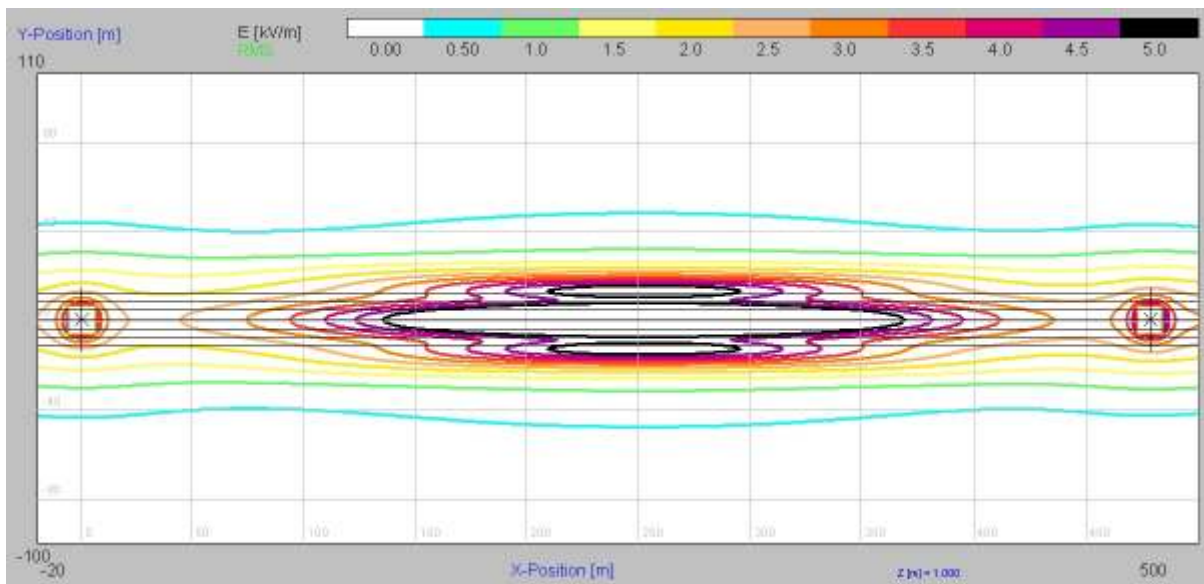


Abbildung 3/135
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg 1 bei $x=187$ m und Messweg 2 bei $x=154$ m

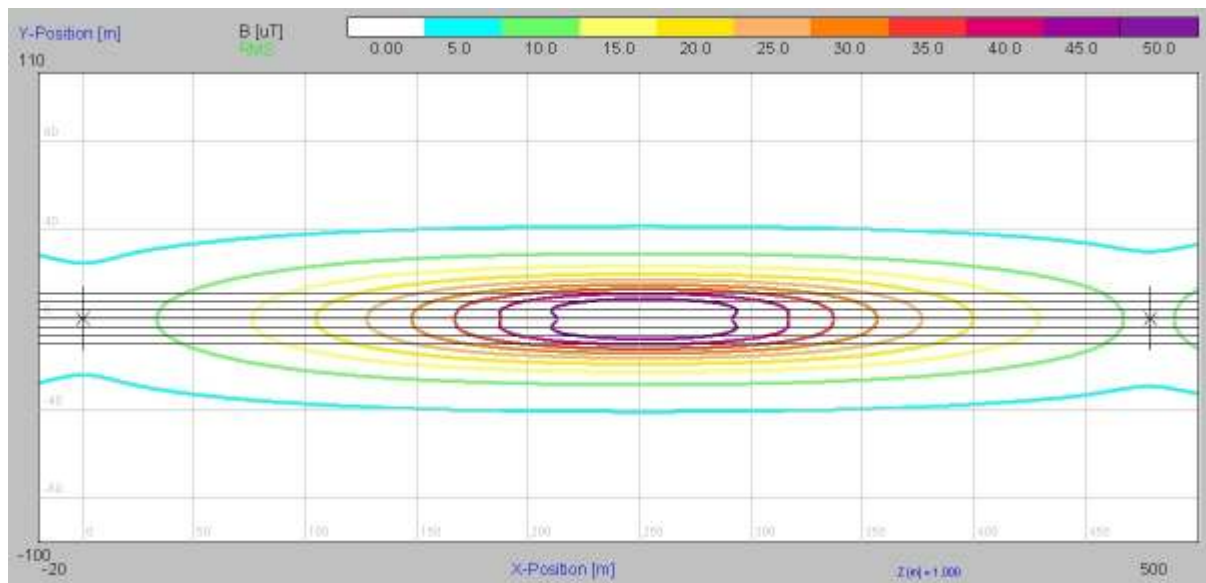


Abbildung 3/136
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg 1 bei x=187 m und Messweg 2 bei x=154 m

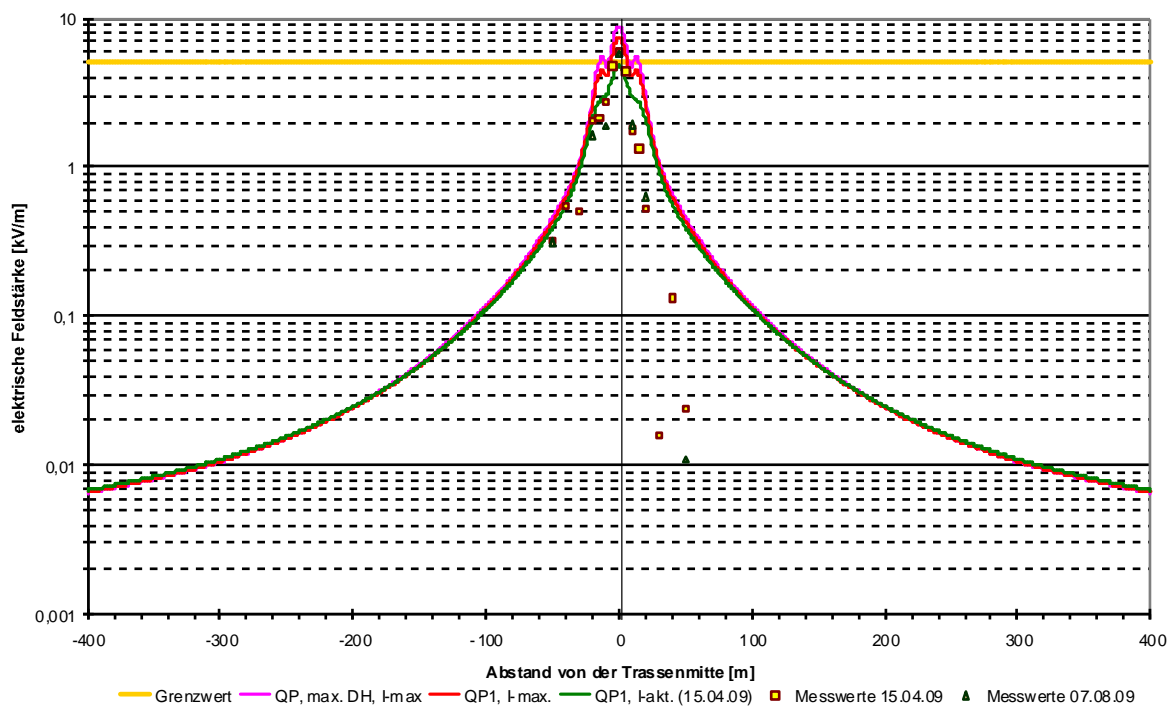


Abbildung 3/137a
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofile der elektrischen Feldstärke, Messweg 1, April und August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte (Einfluss der Bäume s. Abb. 3/137b)

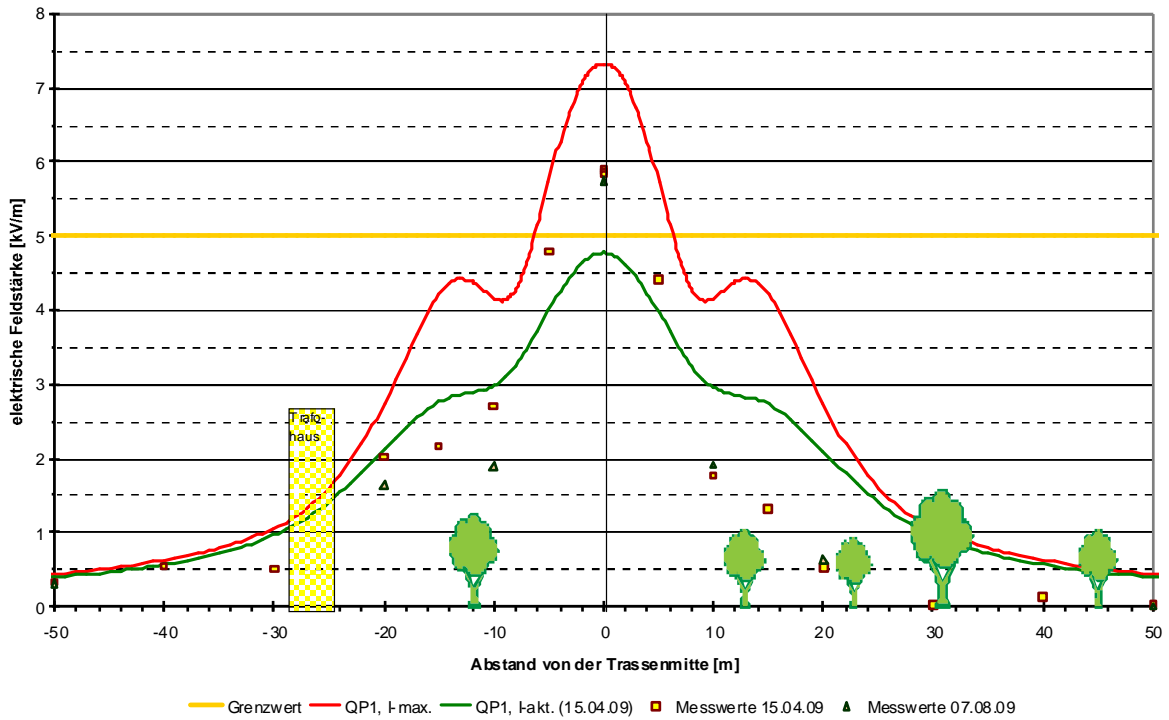


Abbildung 3/137b
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofile der elektrischen Feldstärke, Messweg 1, April und August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

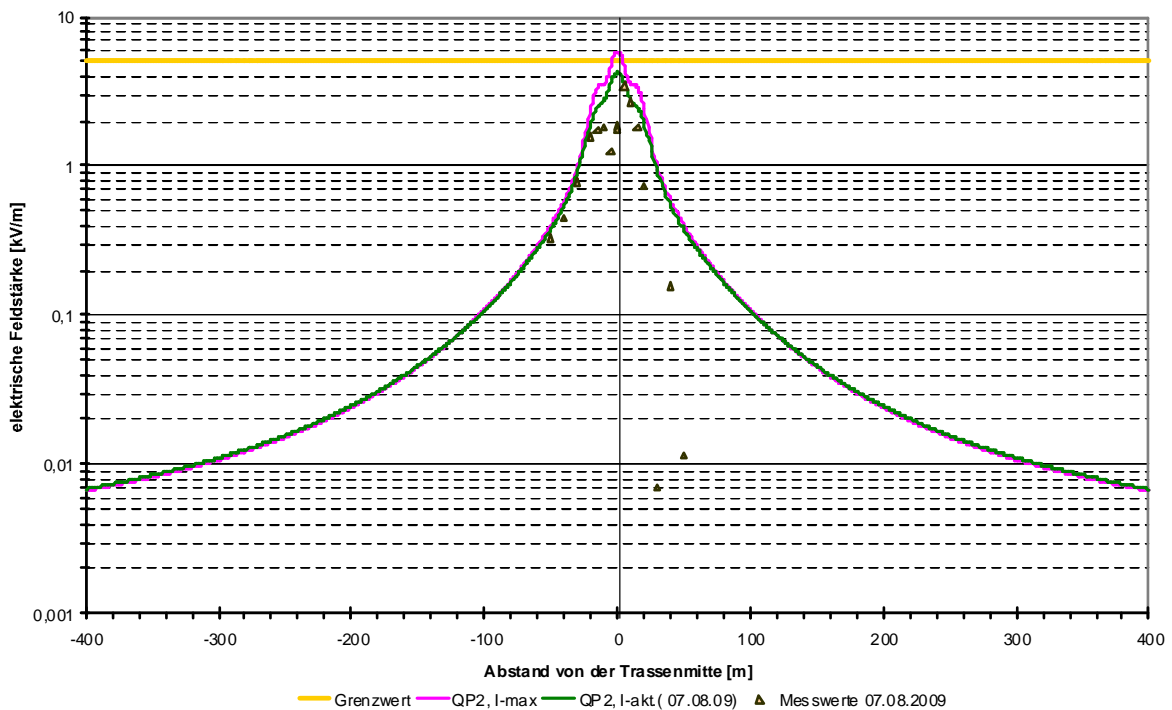


Abbildung 3/138a
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofil der elektrischen Feldstärke, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte (Einfluss der Bäume s. Abb. 3/138b)

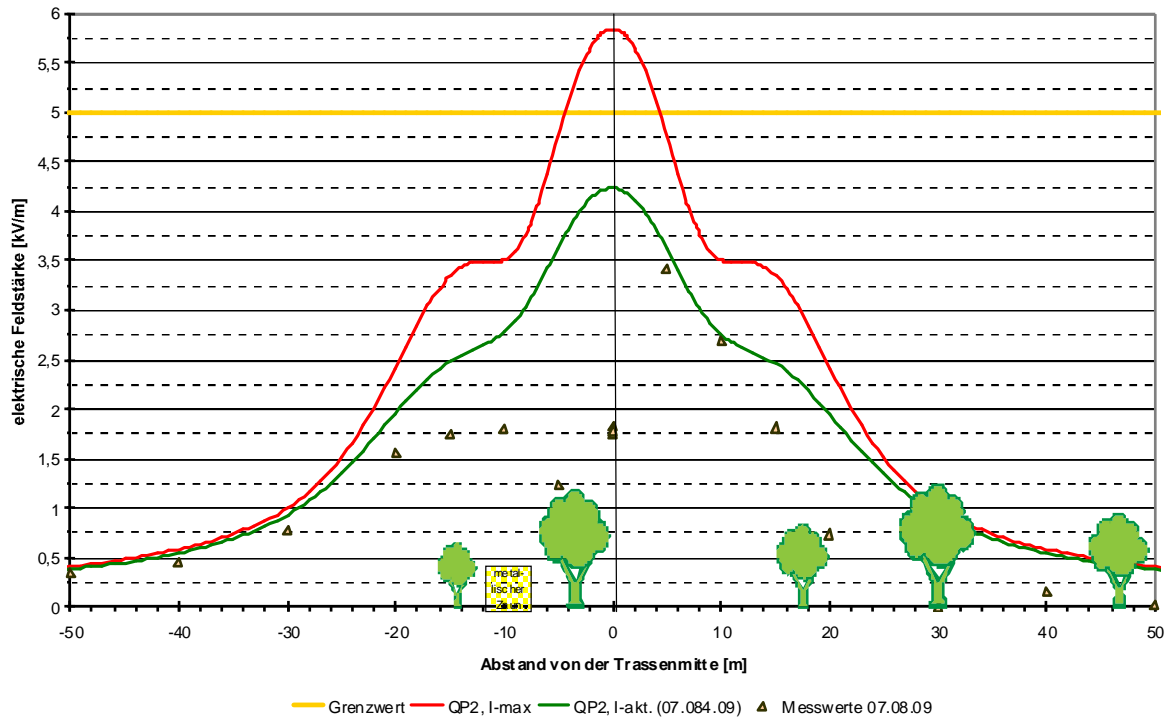


Abbildung 3/138b
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofil der elektrischen Feldstärke, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

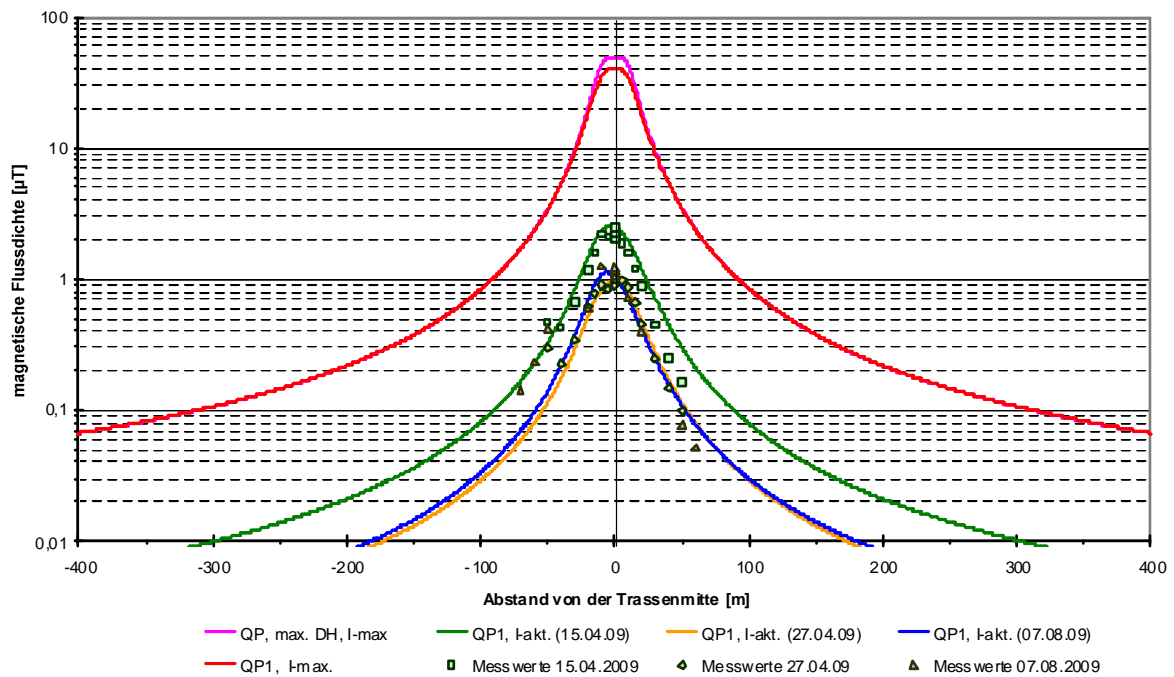


Abbildung 3/139a
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April und August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

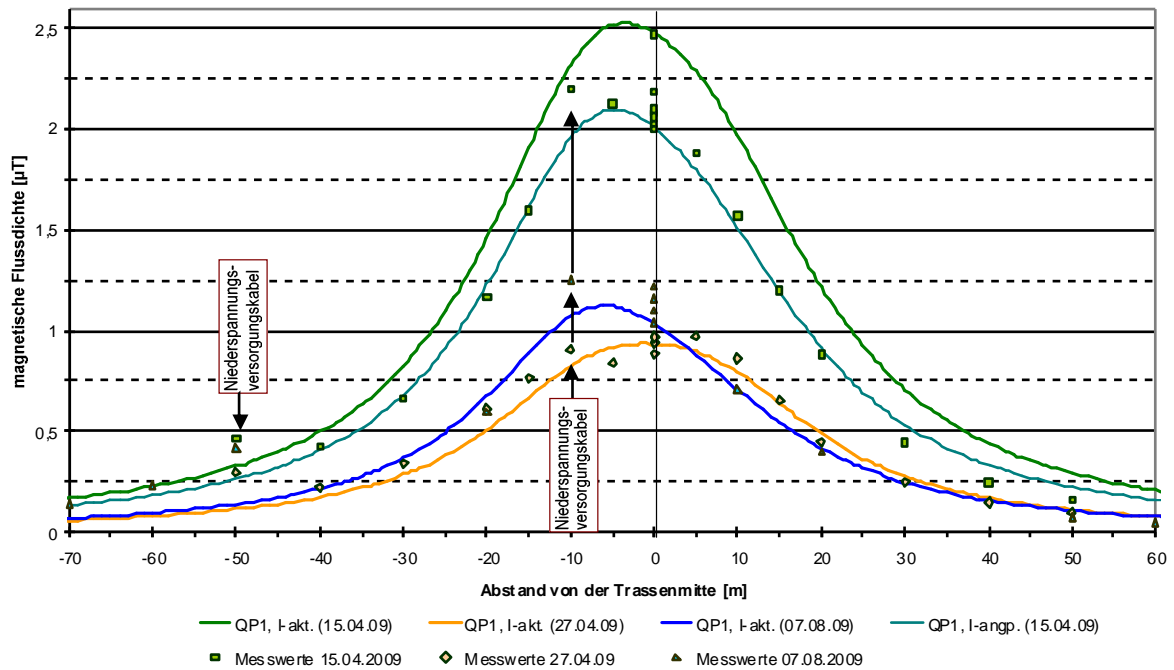


Abbildung 3/139b

380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April und August, gemessene und für verschiedene aktuelle Lastzustände berechnete Werte, für die April-Messung. lagen nur halbstündliche Stromwerte vor, die dünne grüne Kurve gibt eine an die Messwerte angepasste Berechnung mit Strömen in der Größe von 80 % der übermittelten Stromwerte wieder (der größte Mittelwert der zu verschiedenen Zeiten durchgeführten Messungen bei $x=0m$ liegt auf der berechneten Kurve für die überlieferten Stromwerte, die angepasste Kurve liegt zwischen den beiden kleinsten Mittelwerten)

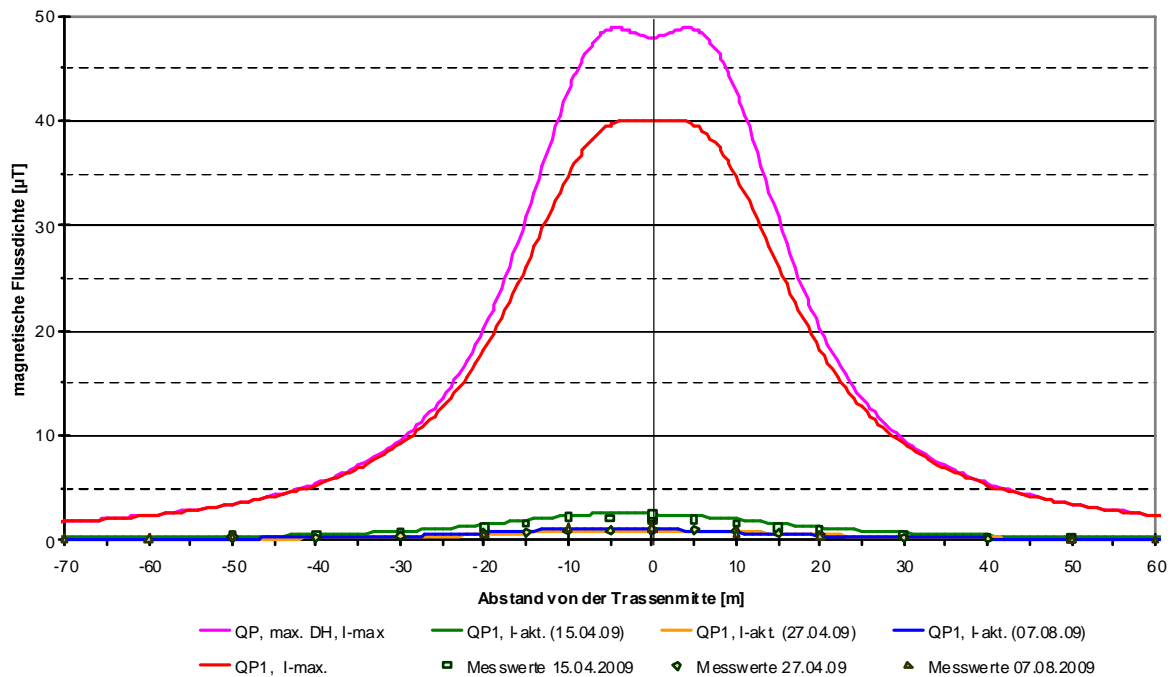


Abbildung 3/139c

380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April und August, gemessene und für verschiedene aktuelle und für den maximalen Lastzustand berechnete Werte

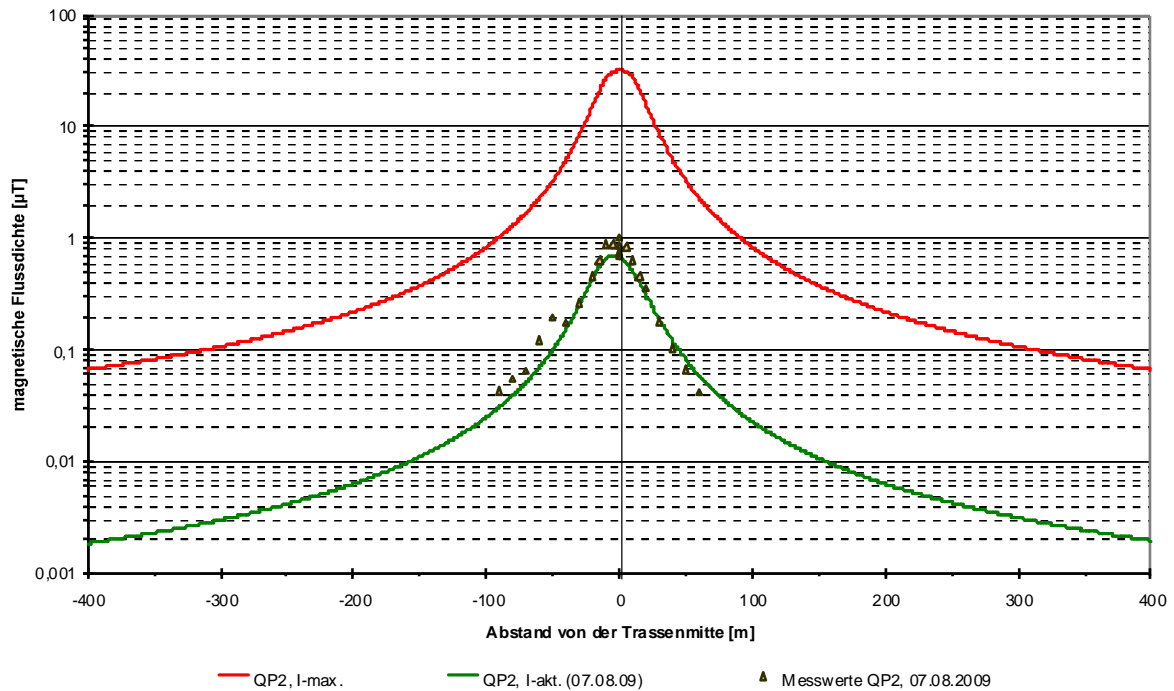


Abbildung 3/140a
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

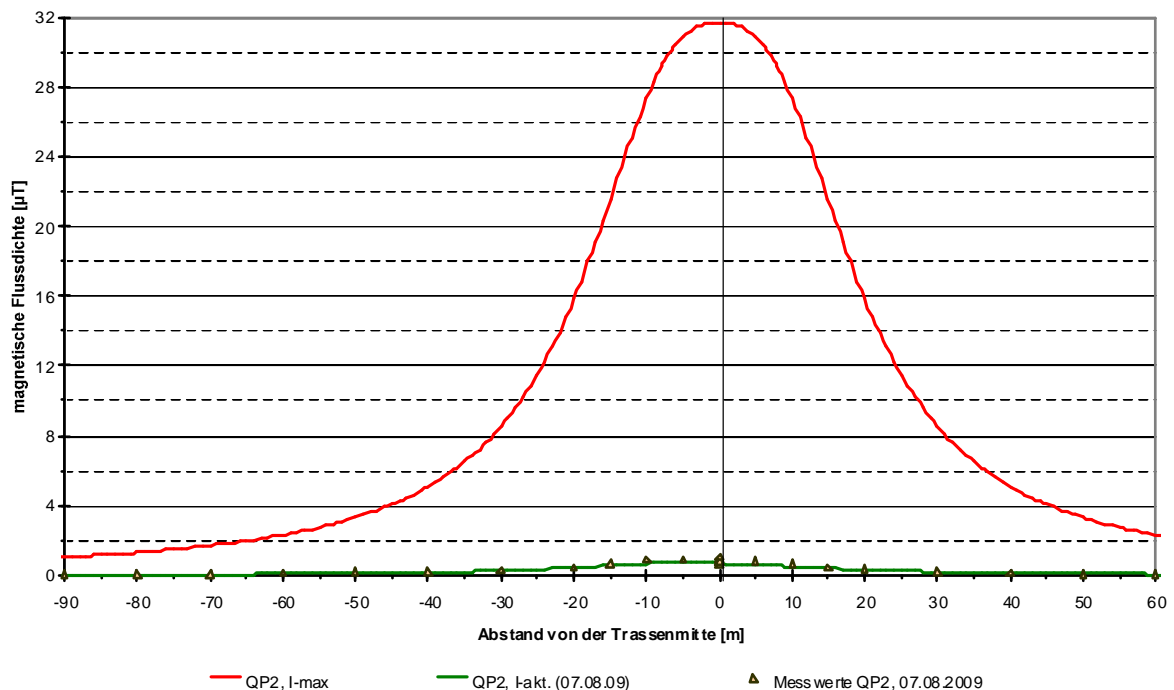


Abbildung 3/140b
 380 kV-Freileitung, FL380_2: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/141

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_2		B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$	
Messung 1 (15. April)	QP1 (anfangs) (Messwert am Schluss)	2,180 2,686	0,166	-	
Messung 2 (27. April)	QP1	1,049	0,099	50	
Messung 2 (August)	QP1	1,355	0,085	50	
	QP2 (Messwert Anfang)	0,741 1,026	0,125	60	
Rechnung	akt. Ströme	QP1 (15. April) (an Messung angepasst)	2,524 2,095	0,326 0,264	90 81
		QP1 (27. April)	0,935	0,114	53
		QP1 (8. August)	1,123	0,140	58
		QP2 (8. August)	0,704	0,101	50
	max. Ströme	max. Durchhang	48,766	3,424	310

Tabelle 3/10b

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_2		E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$	
Messung 1 (15. April)	QP1	5,912	0,324	-	
Messung 2 (August)	QP1	5,766	0,314	-	
	QP2	3,423	0,333	-	
Rechnung	akt. Ströme	QP1 (15. April)	4,776	0,397	317
		QP2 (August)	4,231	0,377	317
	max. Ströme	max. Durchhang	8,808	0,463	309

3.2.2.2.4 FL380_3a

Spannfeldlänge		L	427,9 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		S R...T	S R...T
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	2700 A	2700 A
	aktueller Strom	480 A	230 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,\max}$	10,6 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,\text{akt}}$	12,8 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	3,9 m
Leiterseilhöhen Mast 1	h_1	31,8 m	
	h_1'	42,8 m	
Leiterseilhöhen Mast 2	h_2	29,0 m	
	h_2'	39,0 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	7,8 m	
	b_1	10,8 m	
	c_1	14,3 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	7,8 m	
	b_2	10,8 m	
	c_2	14,3 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	198,0 m

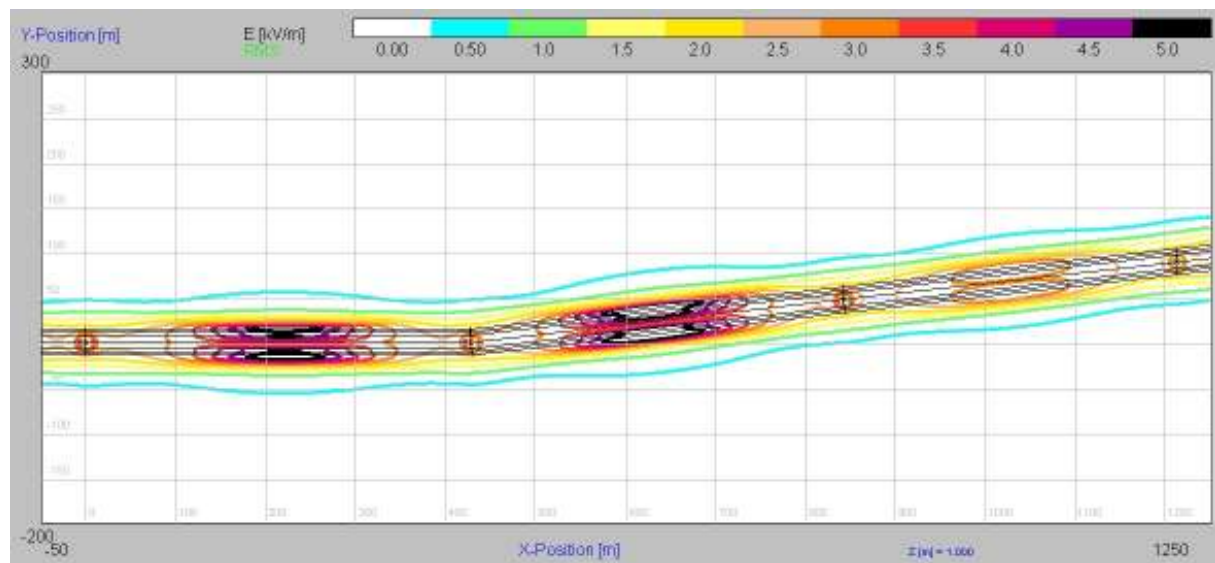


Abbildung 3/141

380 kV-Freileitung, FL380_3a und b: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg etwas links von der Mitte ($x=198$ m) des ersten Spannfeldes (FL380_3a) zwischen den Masten bei $x=0$ m und $x=428$ m

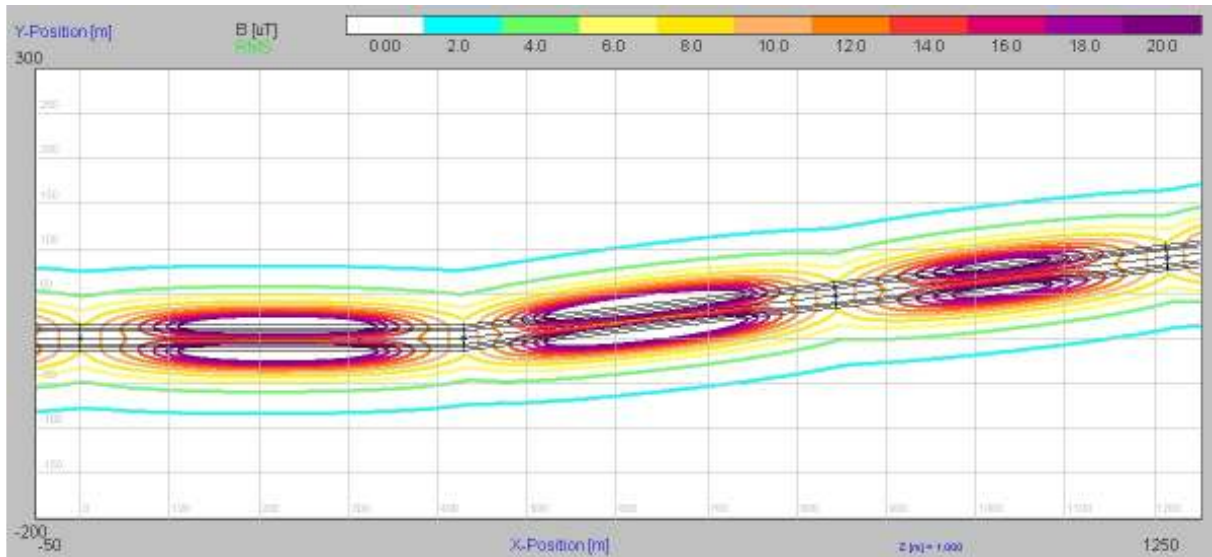


Abbildung 3/142
 380 kV-Freileitung, FL380_3a und b: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg etwas links von der Mitte (x=198 m) des ersten Spannungsfeldes (FL380_3a) zwischen den Masten bei x=0 m und x=428 m

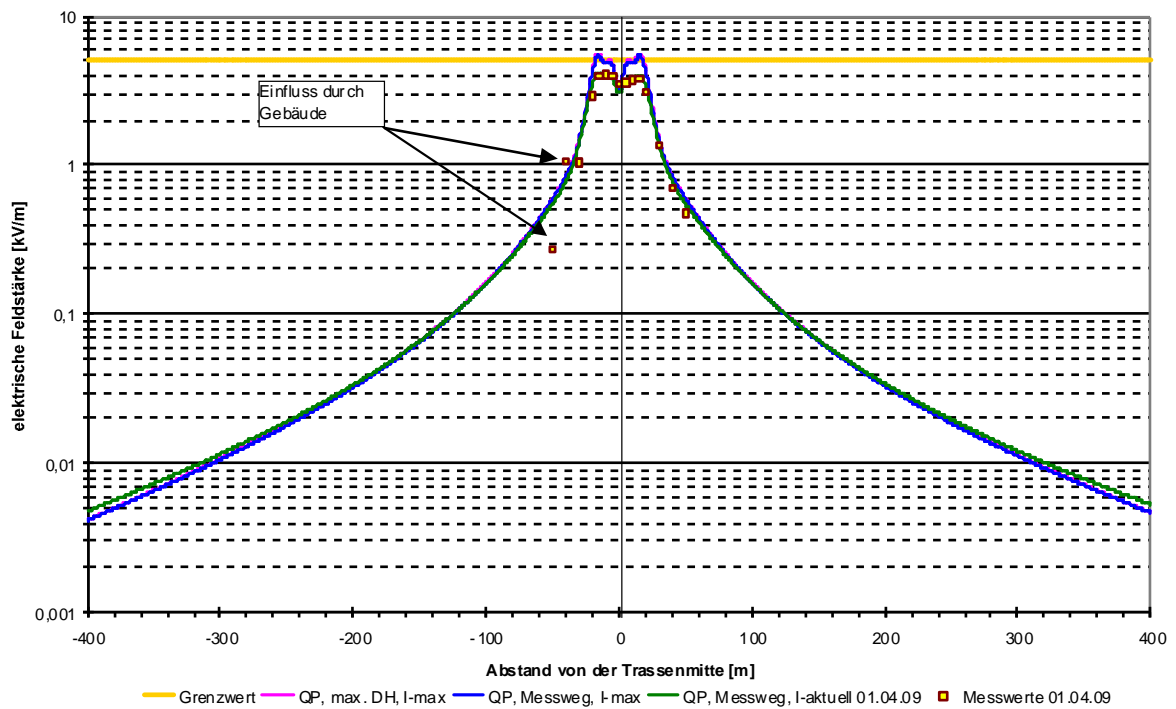


Abbildung 3/143a
 380 kV-Freileitung, FL380_3a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

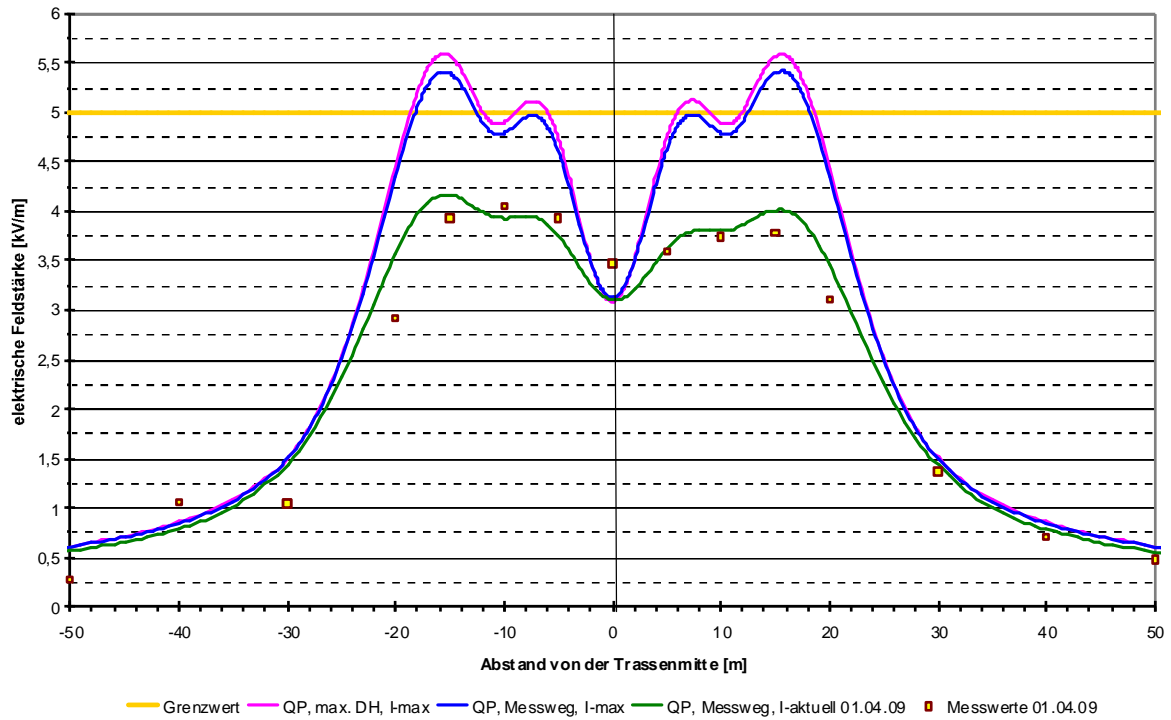


Abbildung 3/143b
 380 kV-Freileitung, FL380_3a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

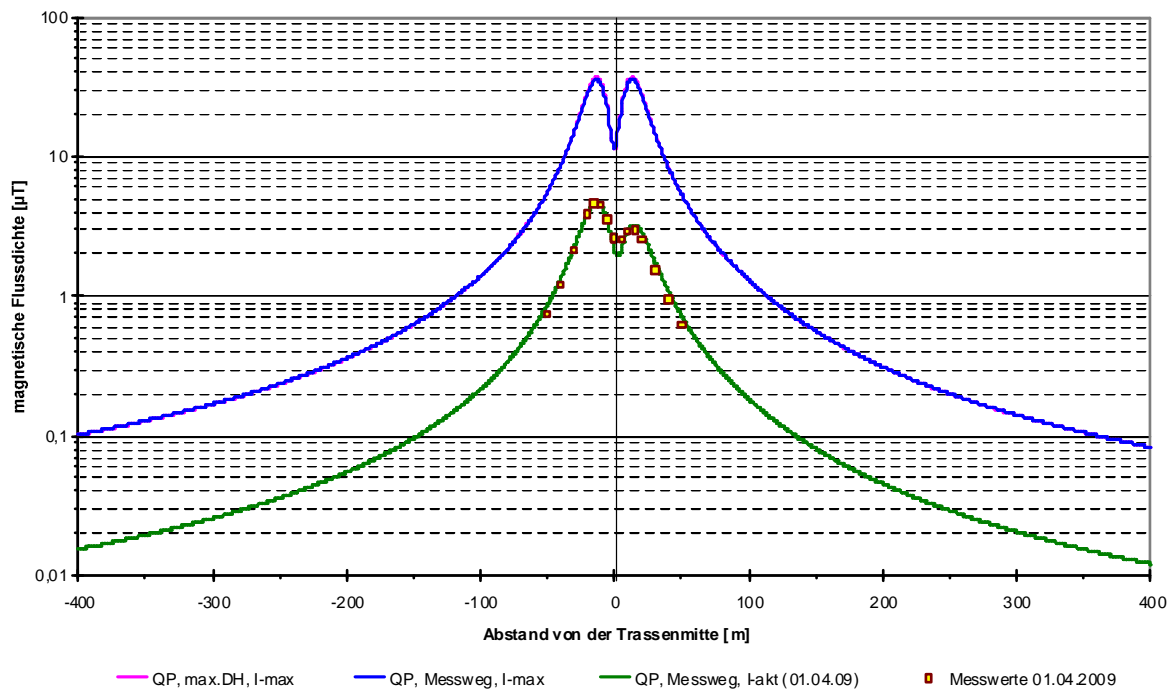


Abbildung 3/144a
 380 kV-Freileitung, FL380_3a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

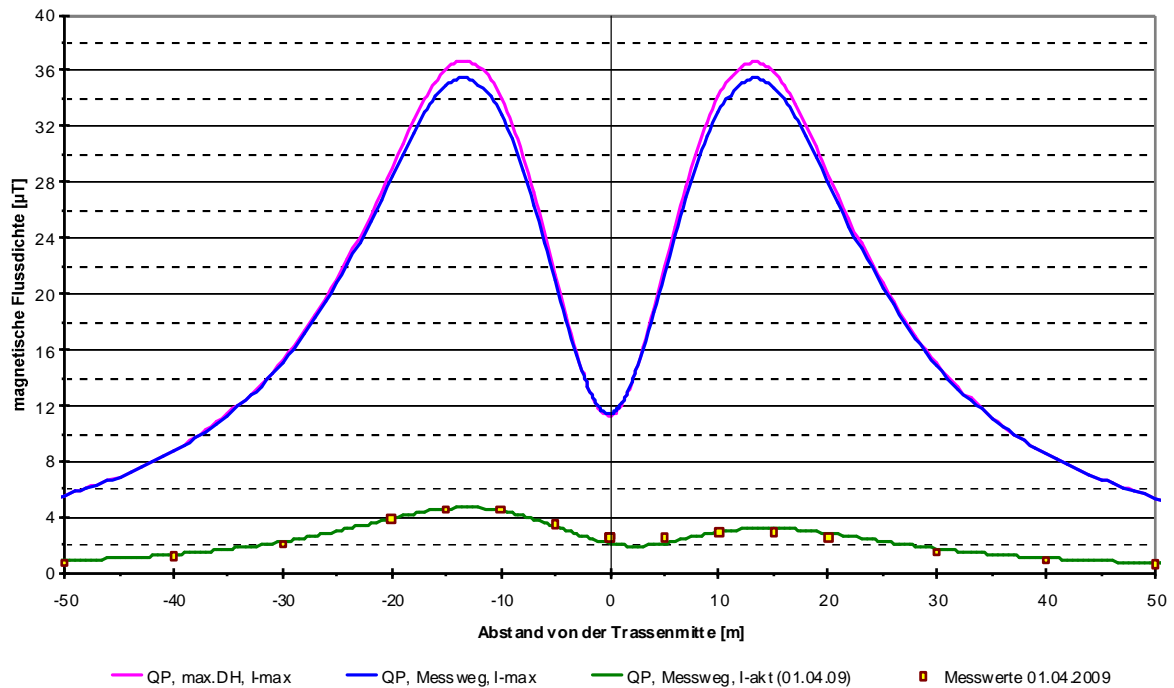


Abbildung 3/144b
380 kV-Freileitung, FL380_3a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/11 a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_3a			B_{\max} [μ T]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μ T]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung		Querprofil	4,617	0,748	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	4,697	0,870	147
	max. Ströme	max. Durchhang	36,673	5,602	402

Tabelle 3/11 b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_3a			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	4,059	0,477	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	4,165	0,559	321
	max. Ströme	max. Durchhang	5,581	0,605	313

3.2.2.2.5 FL380_3b

Spannfeldlänge		L	372,2 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		$\begin{matrix} S \\ R...T \end{matrix}$	$\begin{matrix} S \\ R...T \end{matrix}$
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	2700 A	2700 A
	aktueller Strom	447 A	299 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,max}$	14,5 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,akt}$	16,5 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,0 m
Leiterseilhöhen Mast 1	h_1	31,3 m	
	h_1'	42,3 m	
Leiterseilhöhen Mast 2	h_2	31,0 m	
	h_2'	42,0 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	7,8 m	
	b_1	10,8 m	
	c_1	14,3 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	7,8 m	
	b_2	10,8 m	
	c_2	14,3 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	240 m

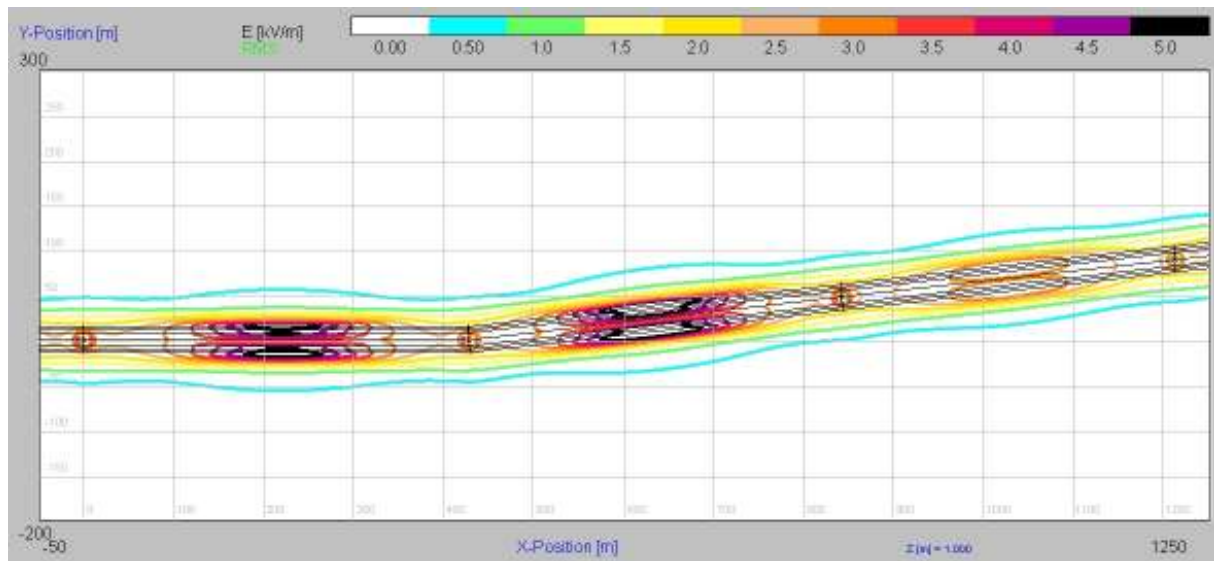


Abbildung 3/145

380 kV-Freileitung, FL380_3a und b: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg rechts von der Mitte ($x=1080$ m, senkrecht zur Trasse) des rechten Spannungsfeldes (FL380_3b) zwischen den Masten bei $x=840$ m und $x=1290$ m

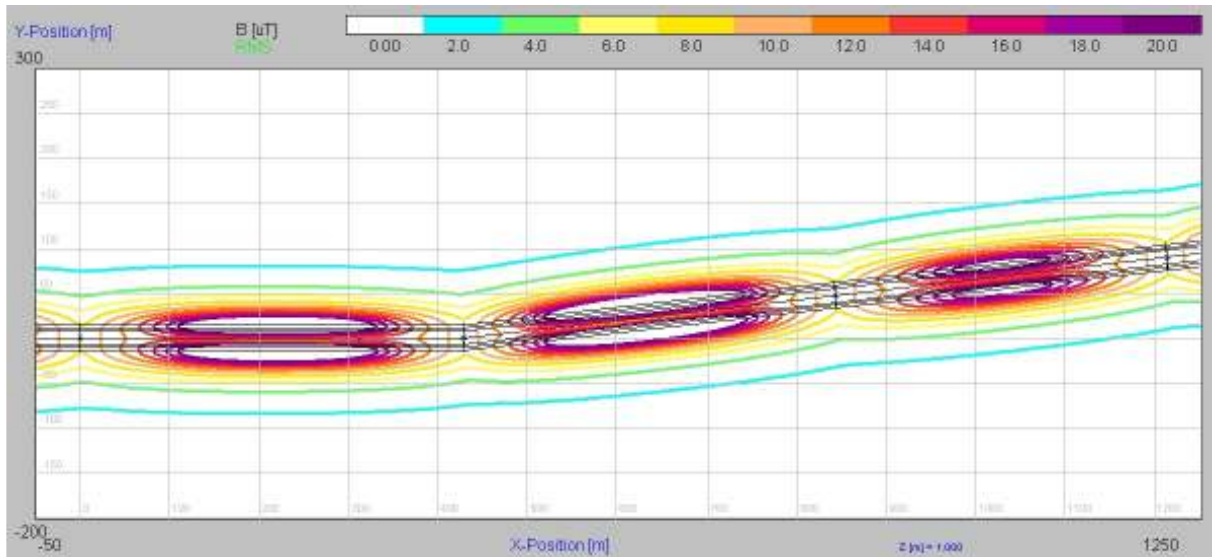


Abbildung 3/146

380 kV-Freileitung, FL380_3a und b: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg rechts von der Mitte (x=1080 m, senkrecht zur Trasse) des rechten Spannungsfeldes (FL380_3b) zwischen den Masten bei x=840 m und x=1290 m

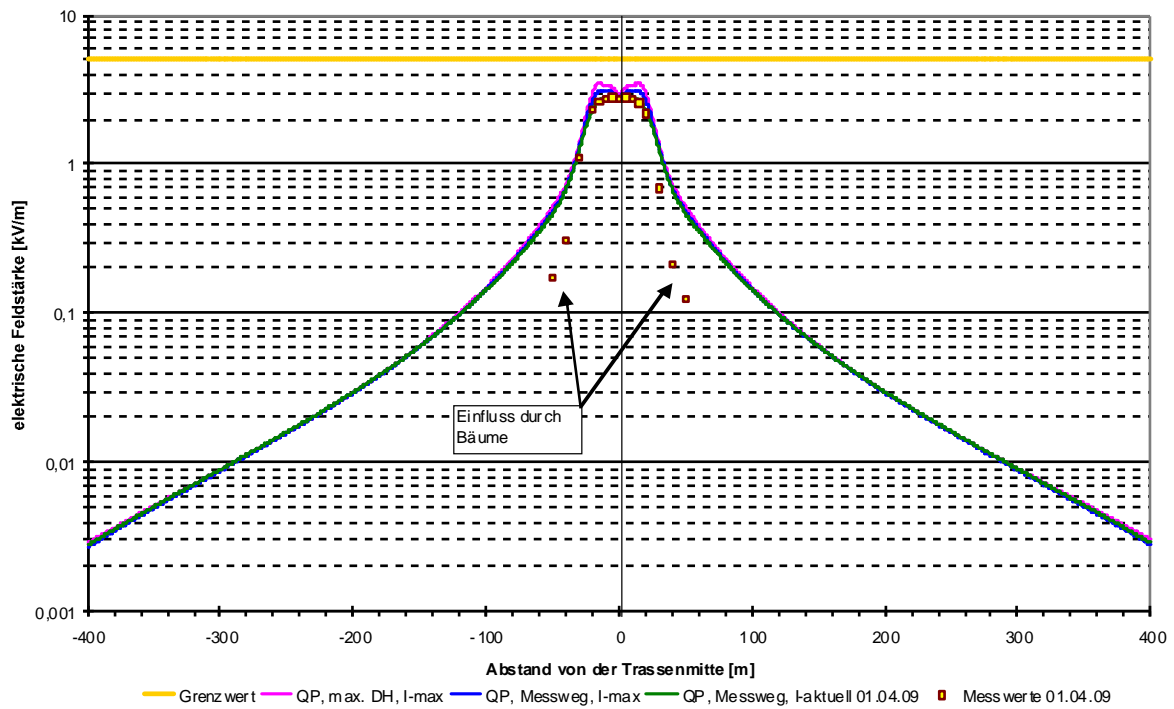


Abbildung 3/147a

380 kV-Freileitung, FL380_3b: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

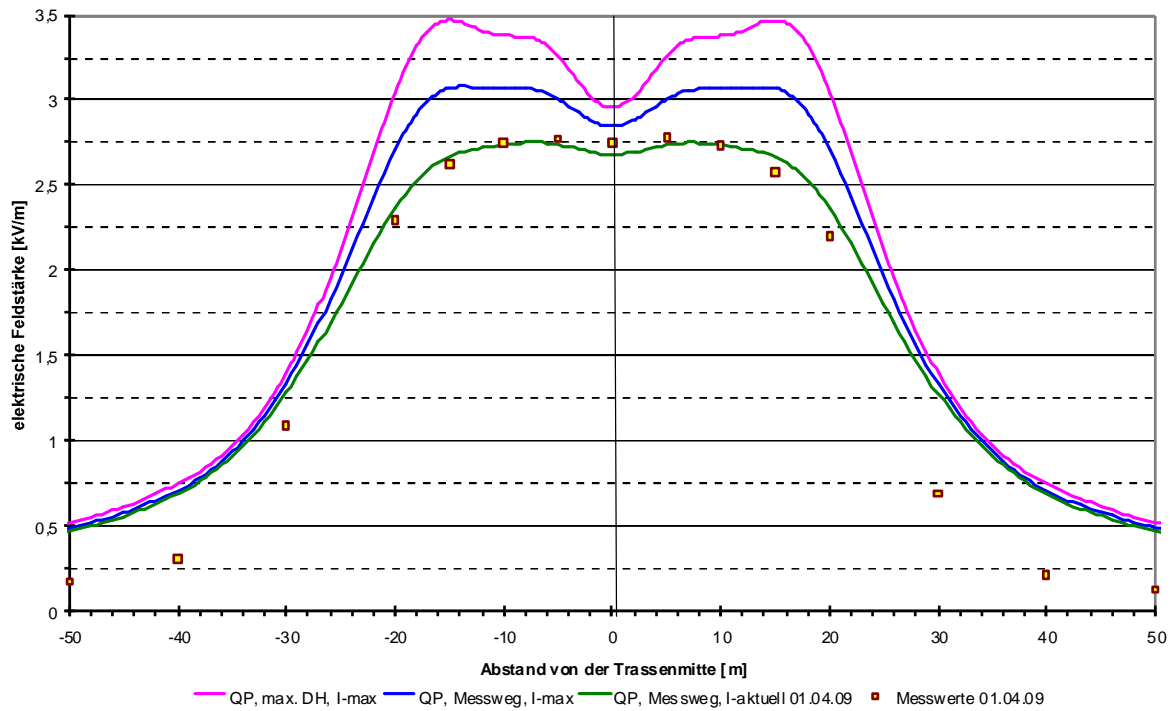


Abbildung 3/147b
 380 kV-Freileitung, FL380_3b: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

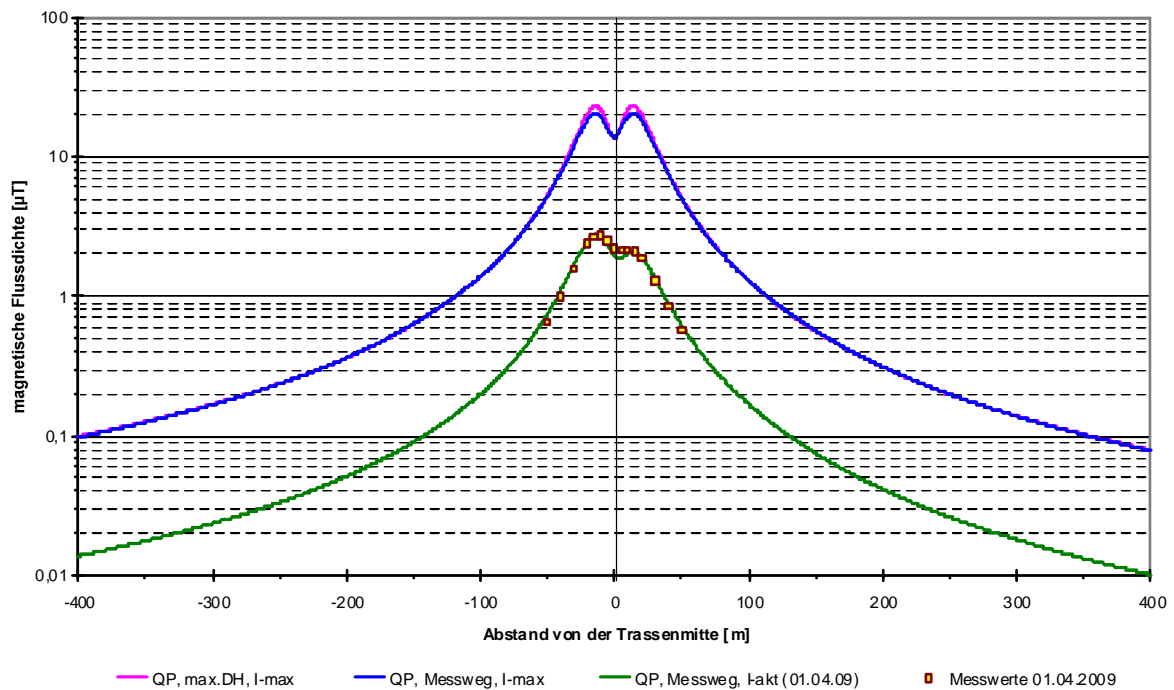


Abbildung 3/148a
 380 kV-Freileitung, FL380_3b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

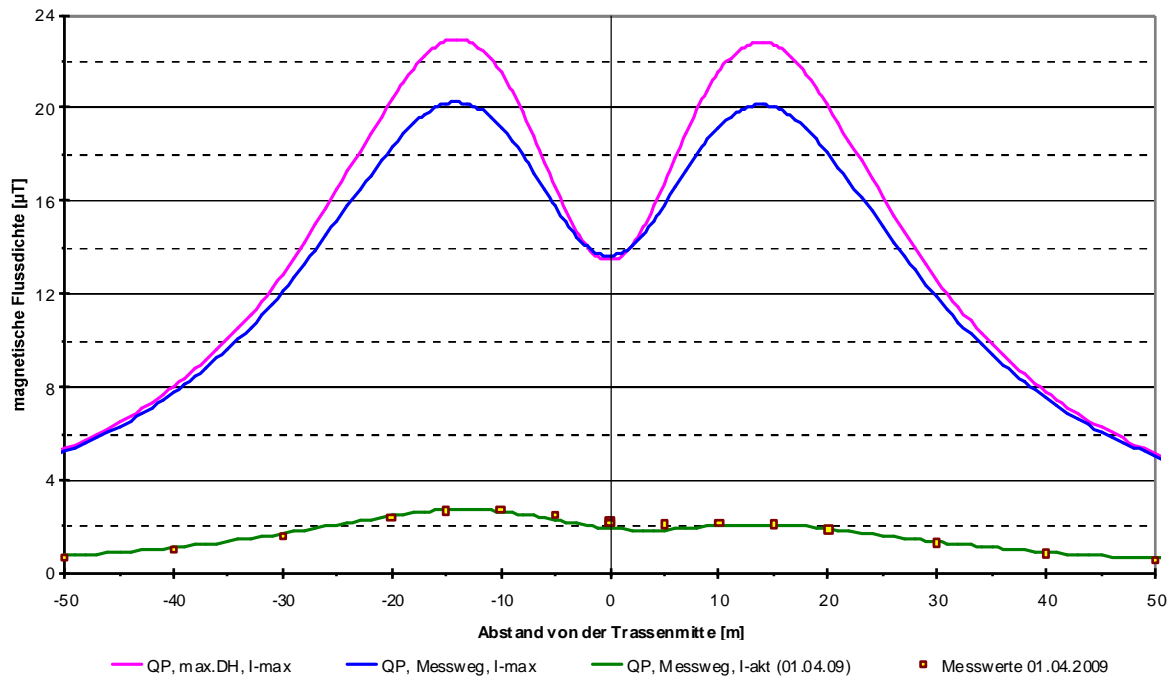


Abbildung 3/148b
380 kV-Freileitung, FL380_3b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/12a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_3b			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung		Querprofil	2,730	0,657	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	2,728	0,749	141
	max. Ströme	max. Durchhang	22,959	5,323	396

Tabelle 3/12b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_3b			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	2,795	0,174	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	2,753	0,470	291
	max. Ströme	max. Durchhang	3,469	0,522	291

3.2.2.2.6 FL380_3c

Spannfeldlänge		L	380,8 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		S R...T	S R...T
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	2700 A	2700 A
	aktueller Strom	476 A	336 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,max}$	9,1 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,akt}$	12,5 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	1,0 m
Leiterseilhöhen Mast 1	h_1	23,5 m	
	h_1'	34,5 m	
Leiterseilhöhen Mast 2	h_2	31,5 m	
	h_2'	41,5 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	7,8 m	
	b_1	10,8 m	
	c_1	14,3 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	7,8 m	
	b_2	10,8 m	
	c_2	14,3 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	235,2 m

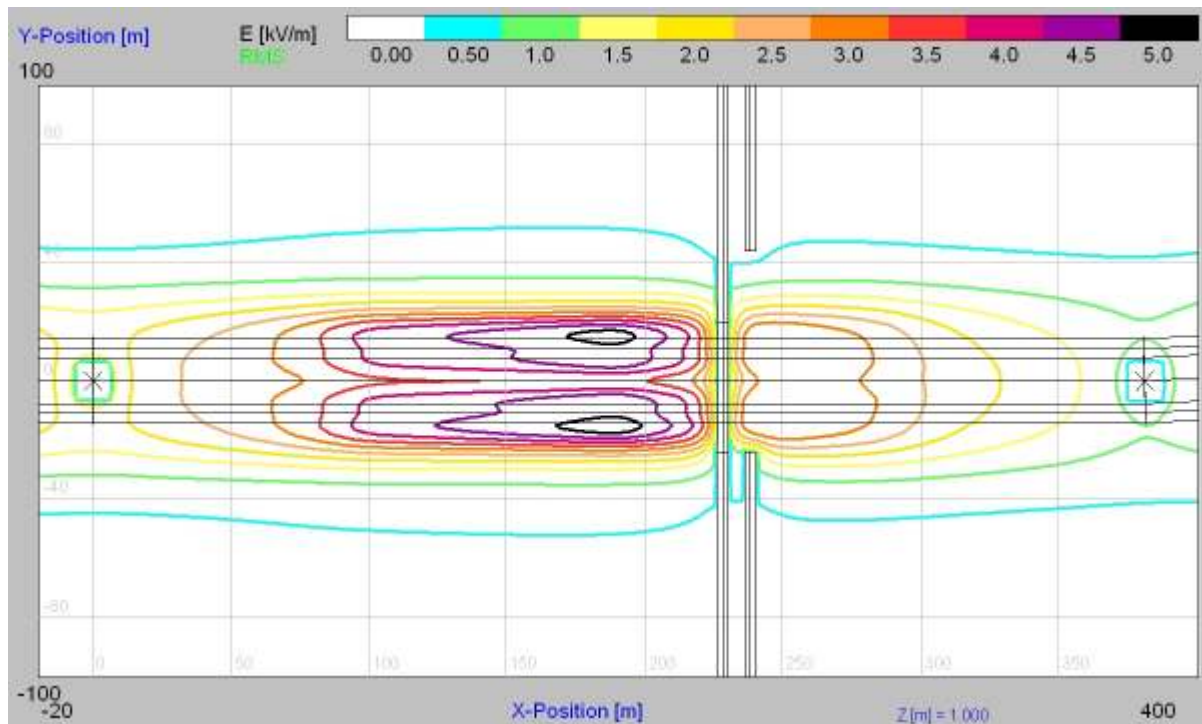


Abbildung 3/149
380 kV-Freileitung, FL380_3c: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg rechts von der Mitte (x=235 m), die Baumreihen an der Straße sind für diese Darstellung simuliert worden

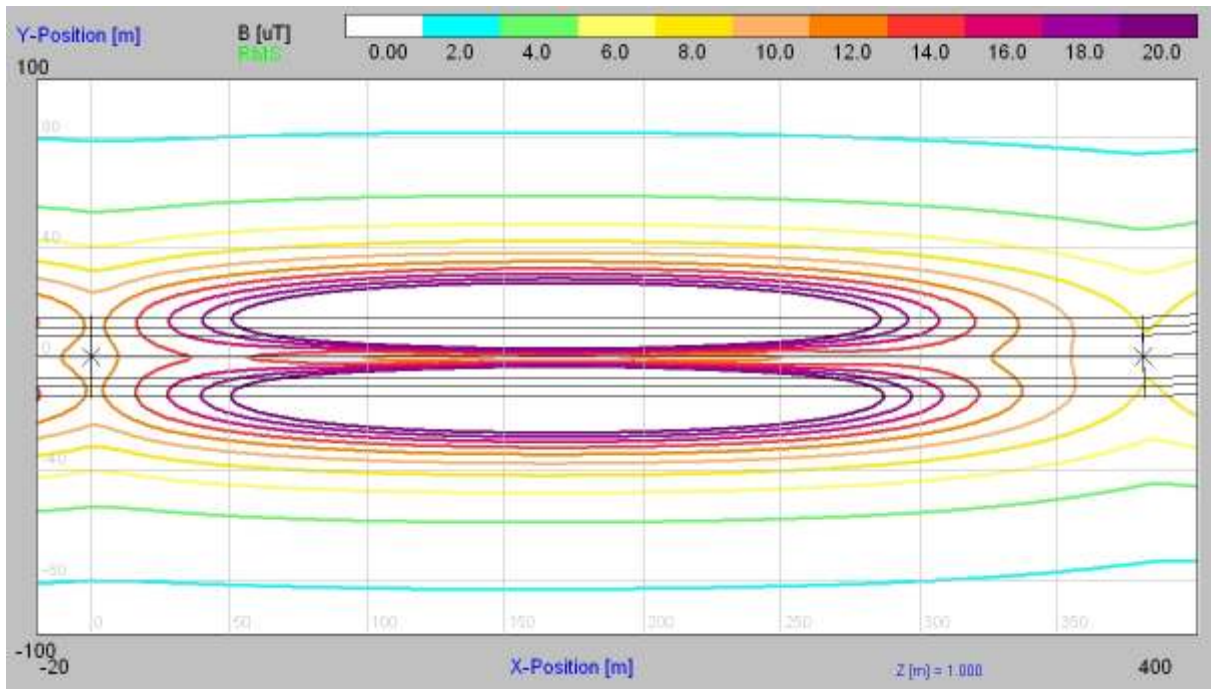


Abbildung 3/150
 380 kV-Freileitung, FL380_3c: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg rechts von der Mitte (x=235 m)

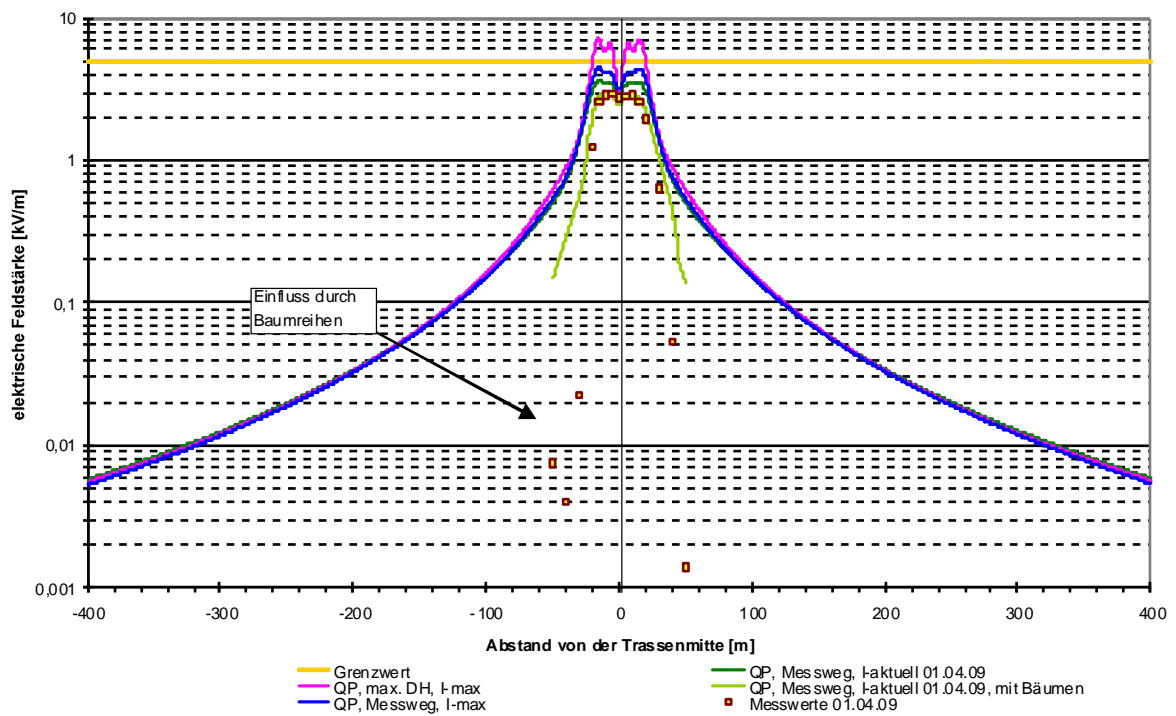


Abbildung 3/151a
 380 kV-Freileitung, FL380_3c: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte, die Baumreihen an der Straße sind für diese Darstellung zusätzlich simuliert worden (hellgrüne Kurve)

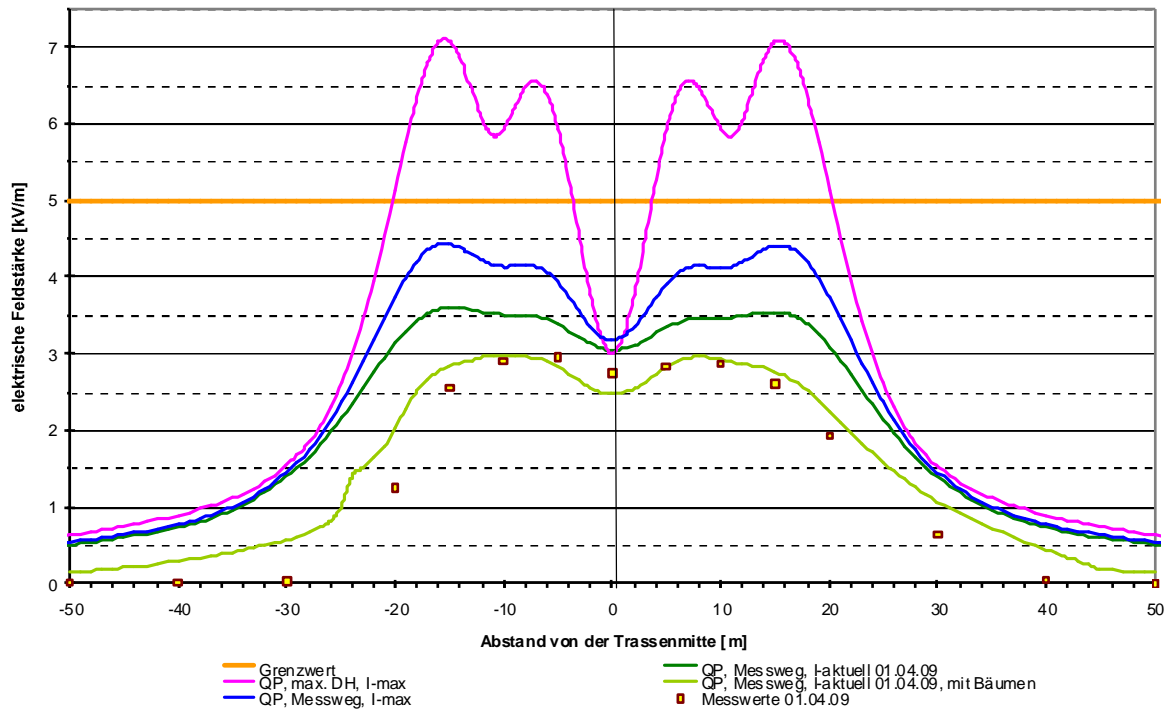


Abbildung 3/151b
 380 kV-Freileitung, FL380_3c: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte, die Baumreihen an der Straße sind für diese Darstellung zusätzlich simuliert worden (hellgrüne Kurve)

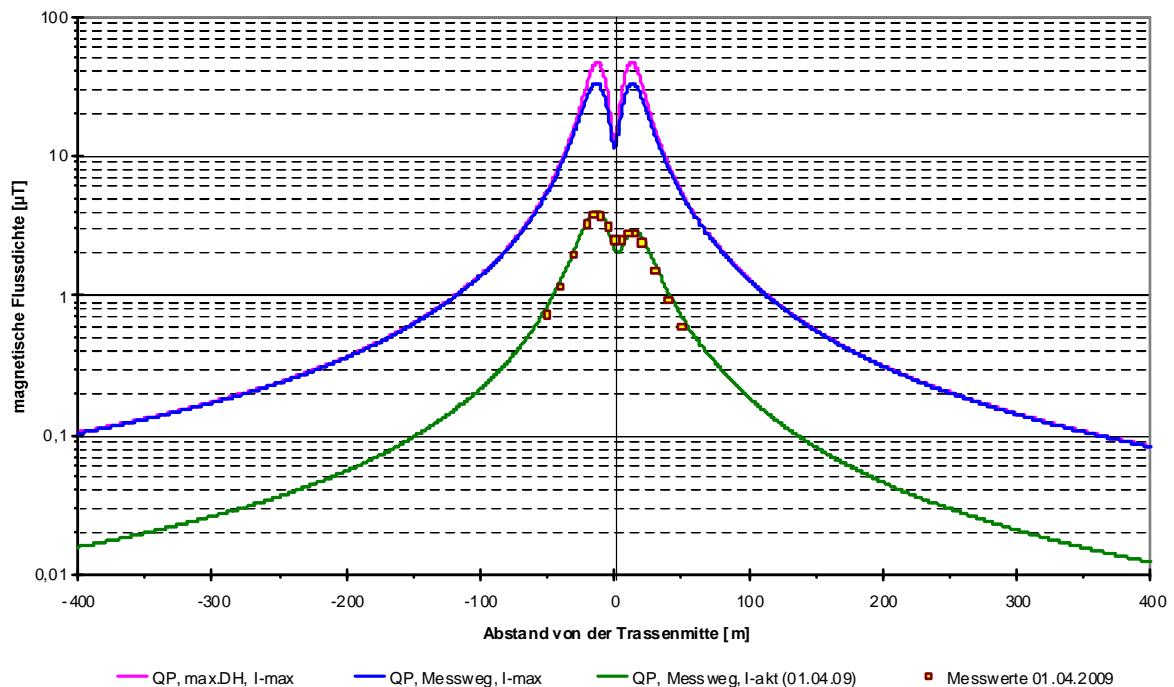


Abbildung 3/152a
 380 kV-Freileitung, FL380_3c: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

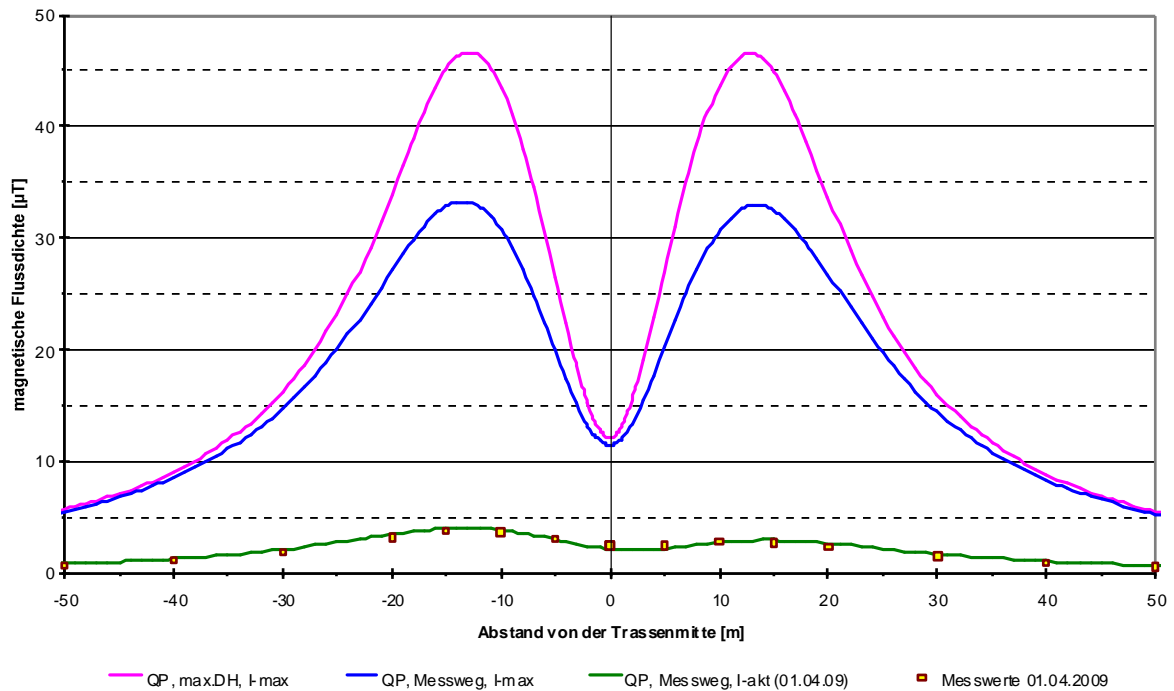


Abbildung 3/152b
380 kV-Freileitung, FL380_3c: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/13a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_3c		B_{\max} [µT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [µT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \text{ µT}$
Messung	Querprofil	3,747	0,732	-
Rechnung	akt. Ströme	4,028	0,849	147
	max. Ströme	max. Durchhang	46,614	5,724

Tabelle 3/13b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_3c		E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$	
Messung	Querprofil	2,965	0,007	40 (wg. Bäumen)	
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	3,598	0,511	328
	max. Ströme	max. Durchhang	7,081	0,627	323

3.2.2.2.7 FL380_4a

Spannfeldlänge (zwischen Mast 1 und 2)		L	398,0 m
Phasenbelegung Mast 1 (Süd / Nord) – Einebenenmast		R ST	R ST
Phasenbelegung Mast 2 (Süd / Nord) – Donaumast		S R...T	S R...T
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	2520 A	2520 A
	aktueller Strom	614 A	568 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min, \max}$	20,5 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min, \text{akt}}$	23,5 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	4,2 m
Leiterseilhöhen Mast 1		h_1	48,2 m
Leiterseilhöhen Mast 2	h_2	26,5 m	
	h_2'	36,5 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	6,8 m	
	b_1	13,1 m	
	c_1	19,4 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	8,3 m	
	b_2	10,8 m	
	c_2	14,8 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	240,0 m

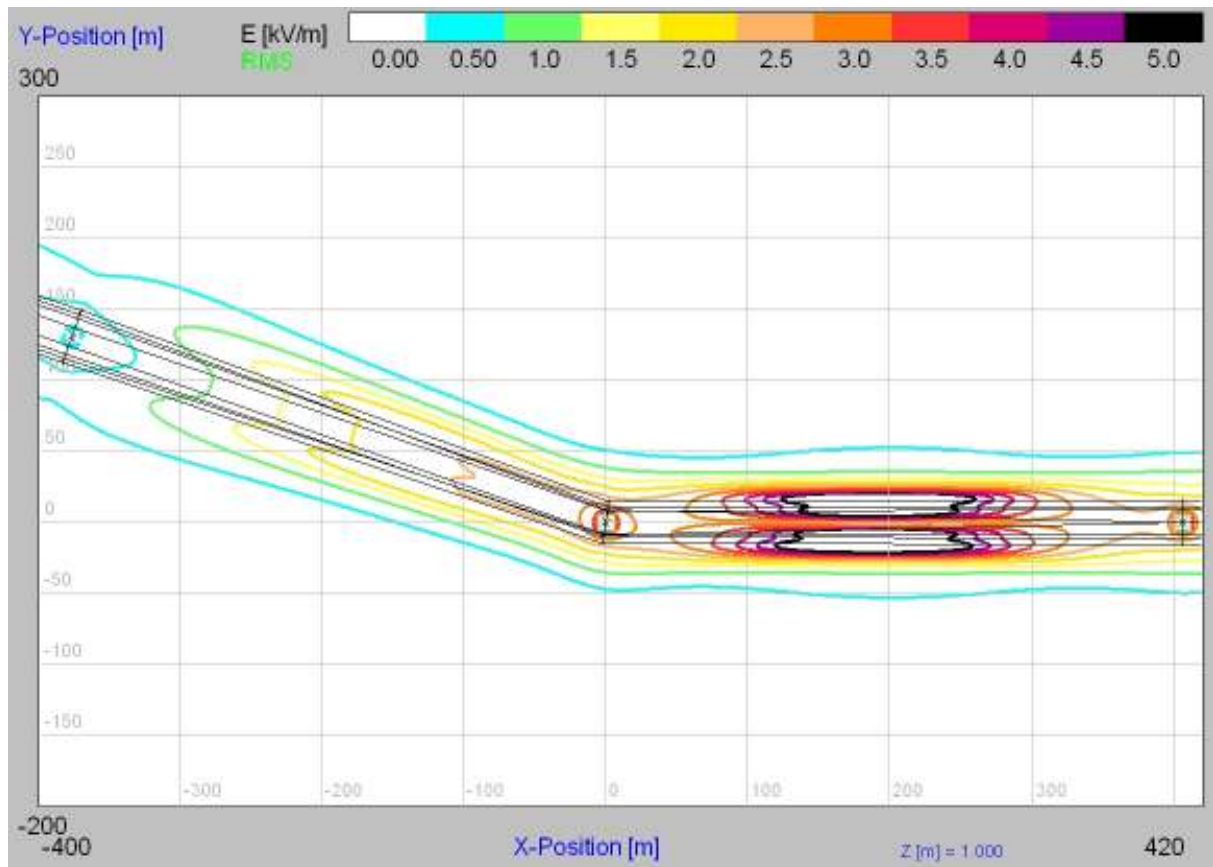


Abbildung 3/153

380 kV-Freileitung, FL380_4a und b: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg rechts von der Mitte ($x = -235$ m, 15° zur Trassen senkrechten) des linken Spannungsfeldes (FL380_4a) zwischen den Masten 1 und 2 bei $x = -380$ m und $x = 0$ m

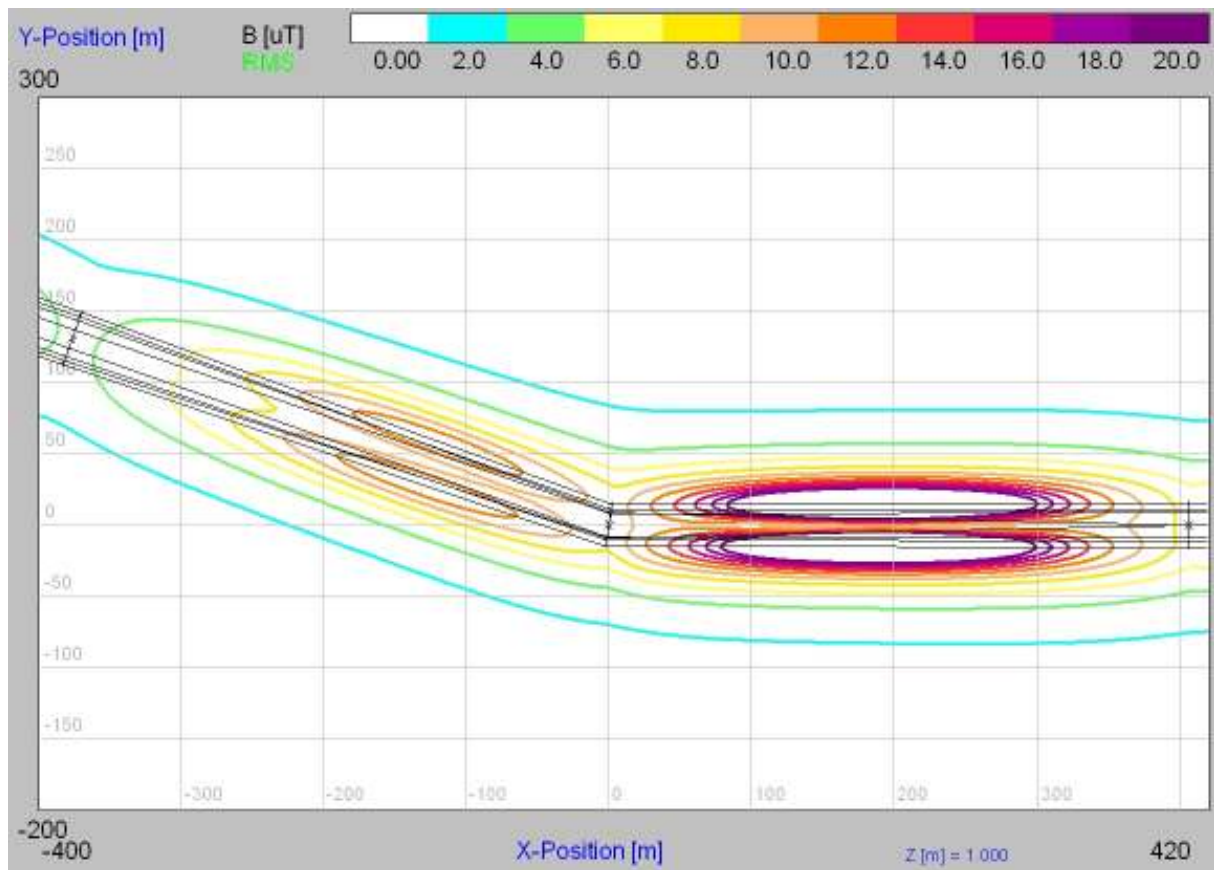


Abbildung 3/154
 380 kV-Freileitung, FL380_4a und b: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg rechts von der Mitte ($x = -235$ m, 15° zur Trassen senkrechten) des linken Spannungsfeldes (FL380_4a) zwischen den Masten 1 und 2 bei $x = -380$ m und $x = 0$ m

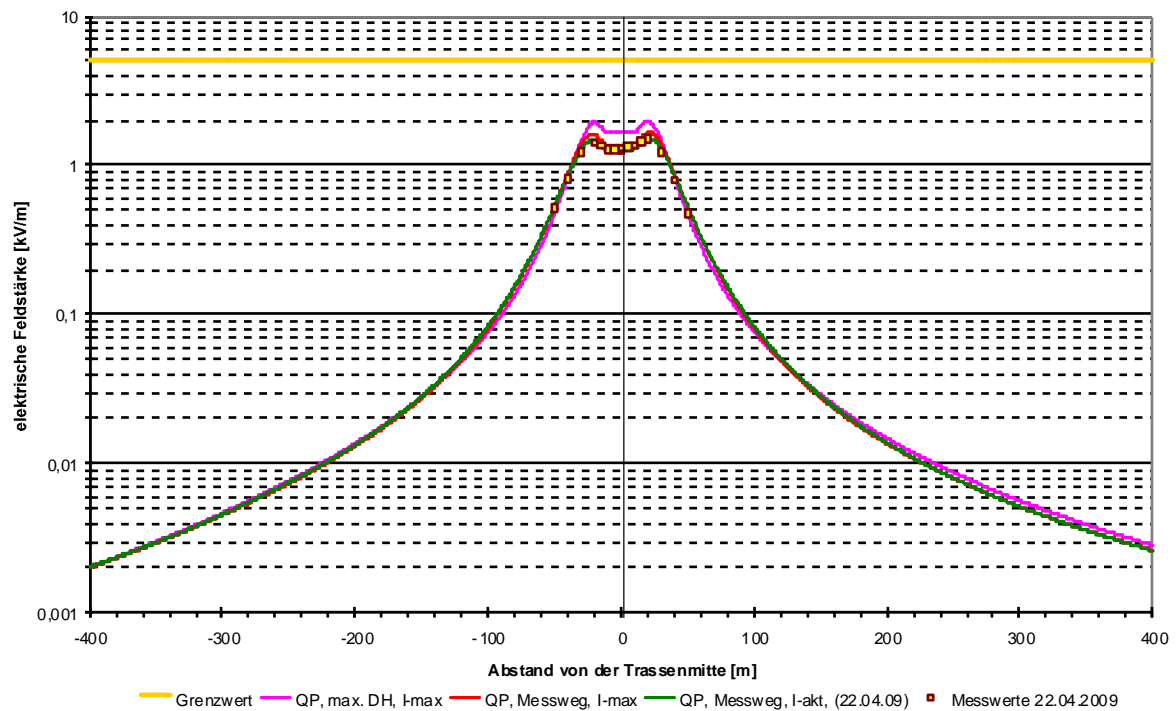


Abbildung 3/155a
 380 kV-Freileitung, FL380_4a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

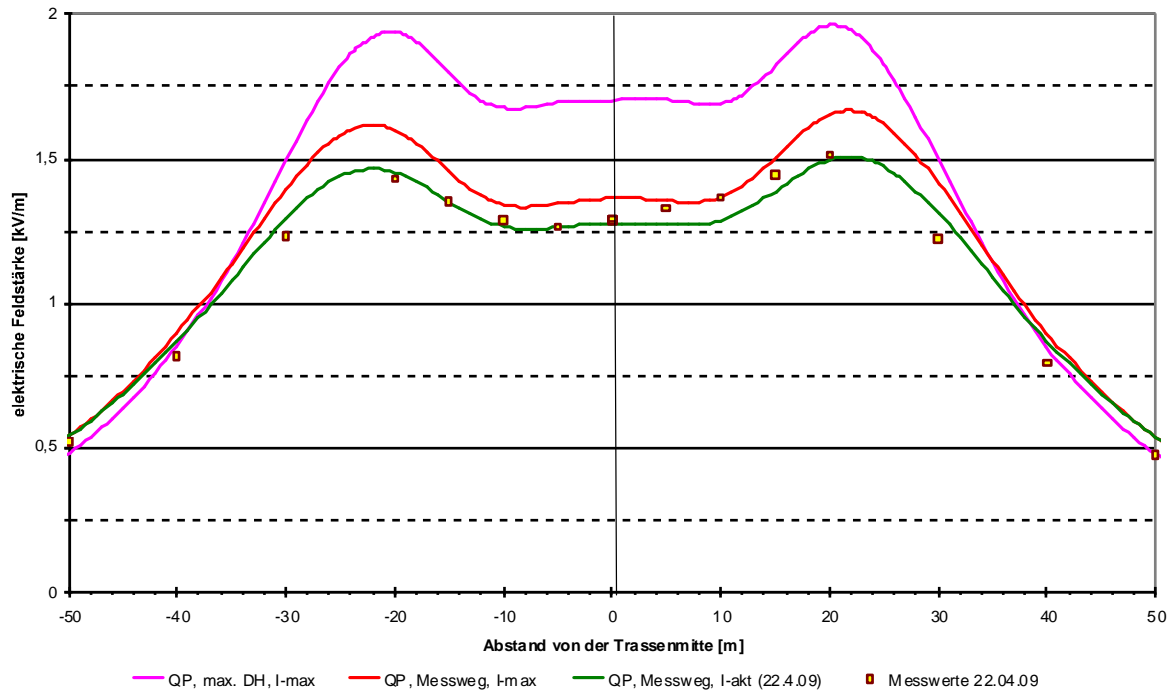


Abbildung 3/155b
 380 kV-Freileitung, FL380_4a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

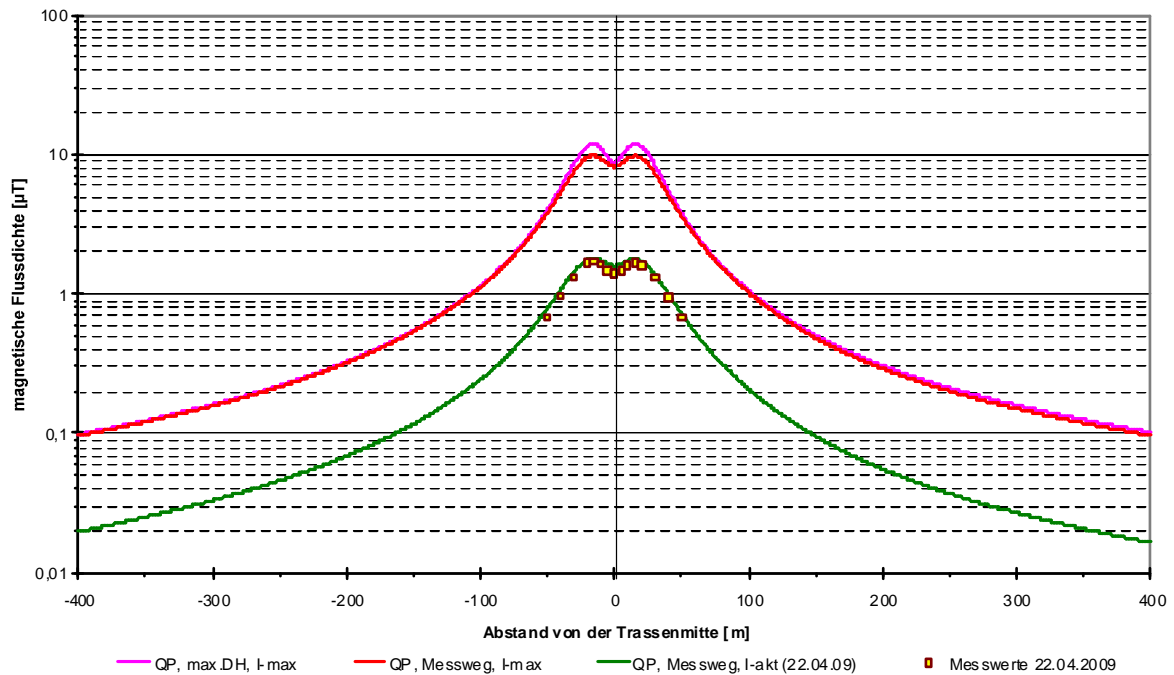


Abbildung 3/166a
 380 kV-Freileitung, FL380_4a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

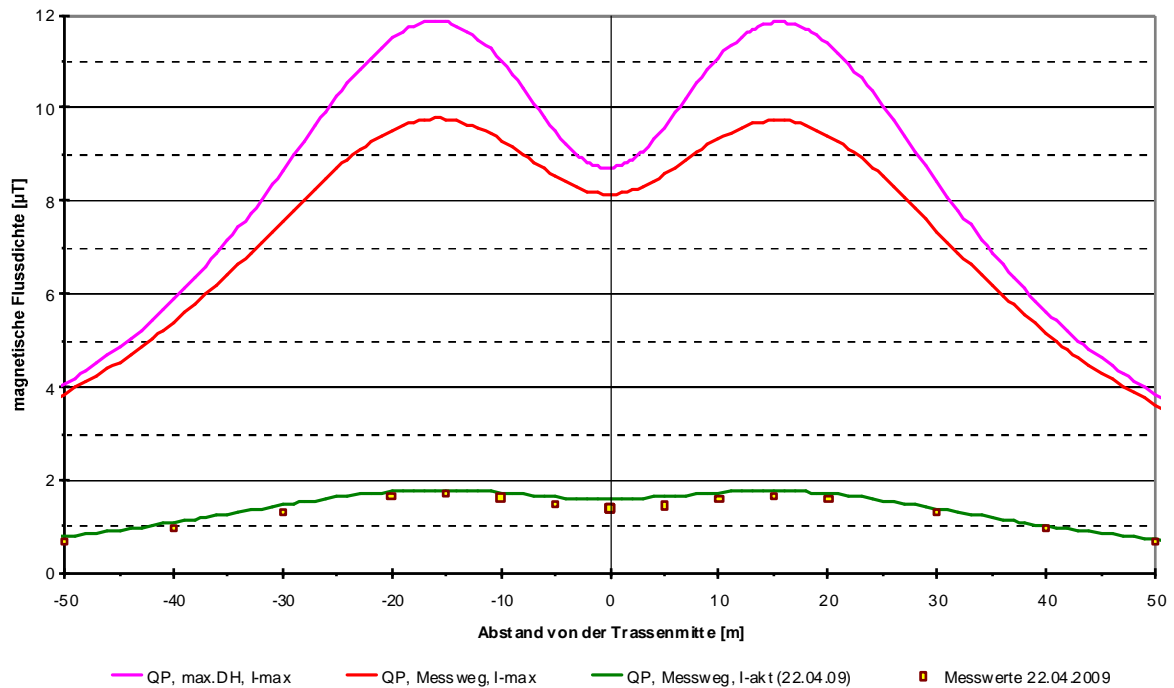


Abbildung 3/166b
380 kV-Freileitung, FL380_4a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/14a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_4a		B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung	Querprofil	1,725	0,693	-
Rechnung	akt. Ströme	1,795	0,797	162
	max. Ströme	max. Durchhang	11,871	4,061

Tabelle 3/14b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_4a		E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung	Querprofil	1,512	0,521	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	1,506	227
	max. Ströme	max. Durchhang	1,962	235

3.2.2.2.8 FL380_4b

Spannfeldlänge (zwischen den Donaumasten 2 und 3)		L	406,6 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		S R...T	S R...T
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	2520 A	2520 A
	aktueller Strom	608 A	560 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,\max}$	9,3 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,\text{akt}}$	11,3 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 2 / Standort Mast 3		Δh	3,7 m
Leiterseilhöhen Mast 2	h_1	26,5 m	
	h_1'	36,5 m	
Leiterseilhöhen Mast 3	h_2	31,8 m	
	h_2'	42,8 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_1	8,3 m	
	b_1	10,8 m	
	c_1	14,8 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 3	a_2	9,0 m	
	b_2	11,0 m	
	c_2	15,5 m	
Abstand des Messweges von Mast 2		d_1	356,0 m

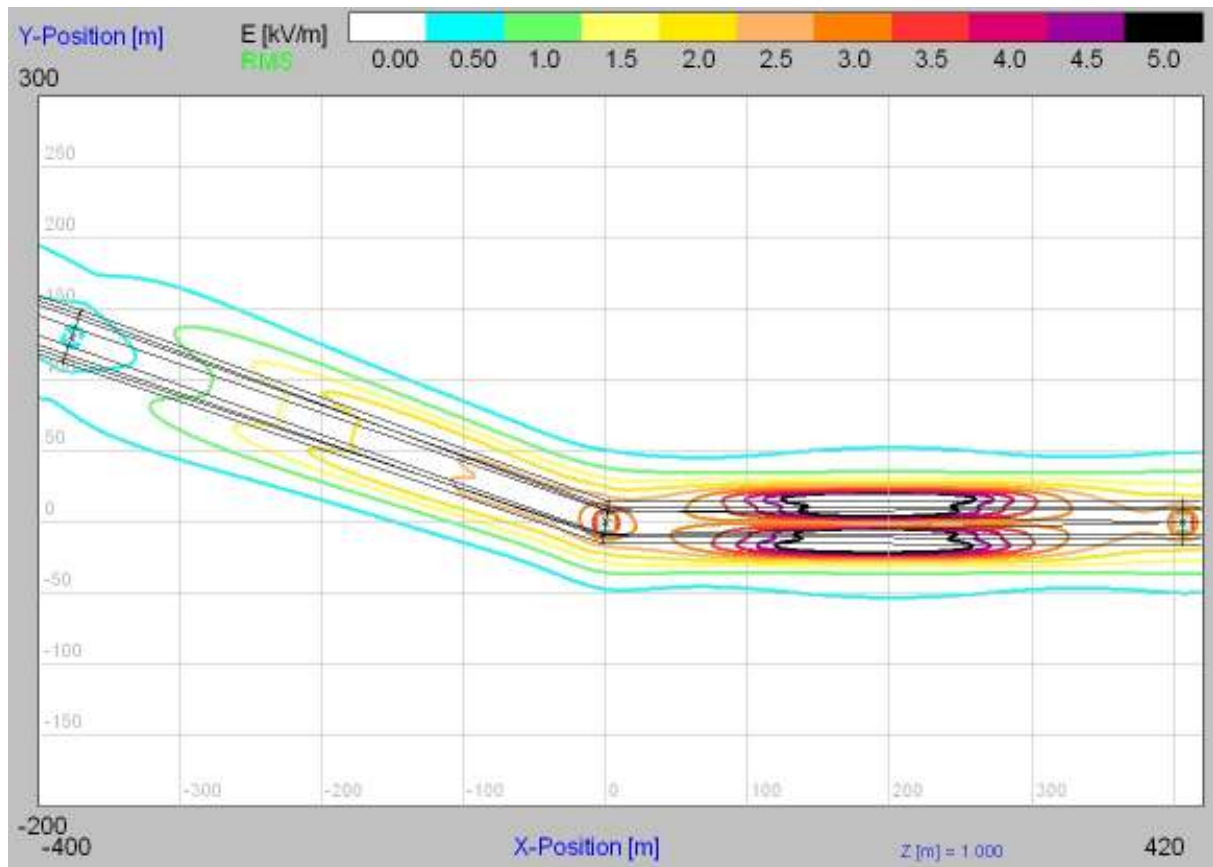


Abbildung 3/157

380 kV-Freileitung, FL380_4a und b: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg am rechten Rand ($x=356$ m) des rechten Spannfeldes (FL380_4b) zwischen den Masten 2 und 3 bei $x=0$ m und $x=407$ m

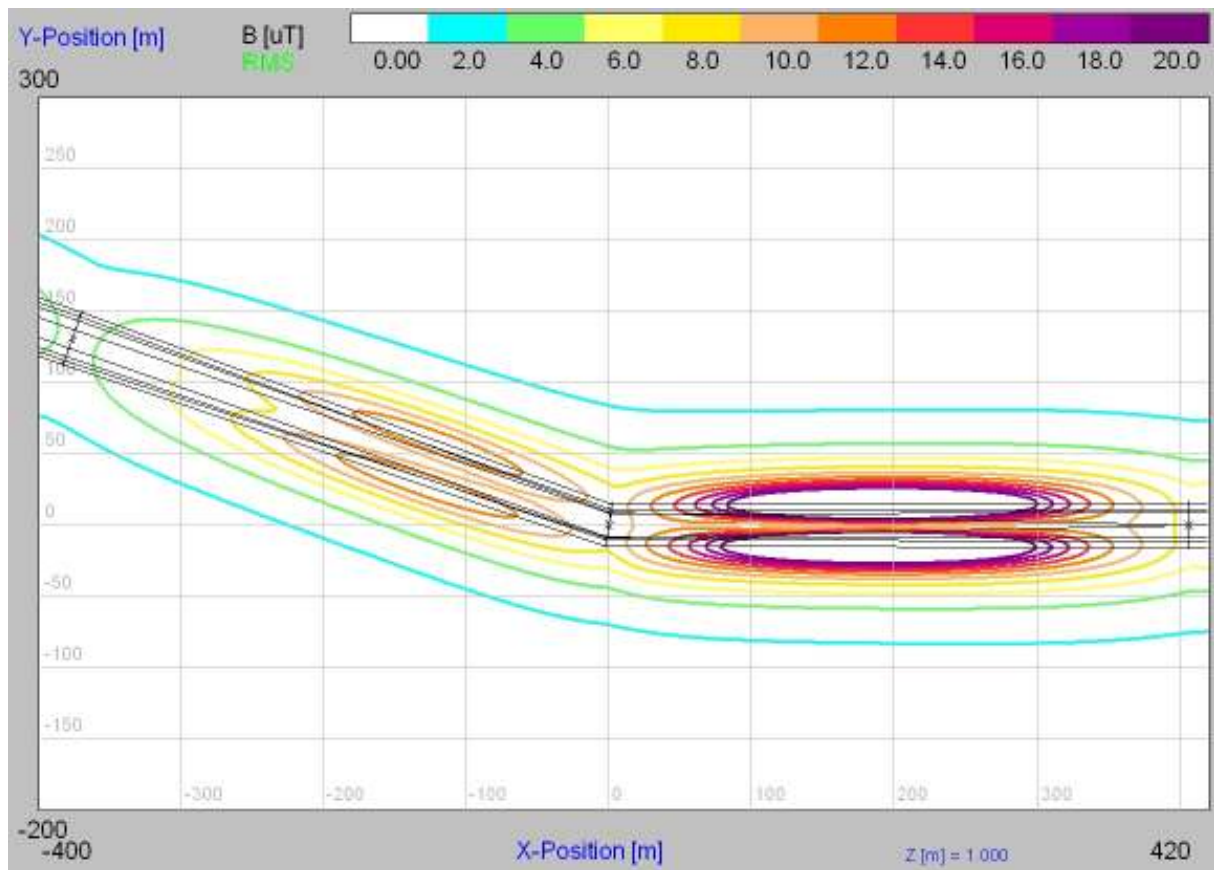


Abbildung 3/158
 380 kV-Freileitung, FL380_4a und b: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg am rechten Rand ($x=356$ m) des rechten Spannungsfeldes (FL380_4b) zwischen den Masten 2 und 3 bei $x=0$ m und $x=407$ m

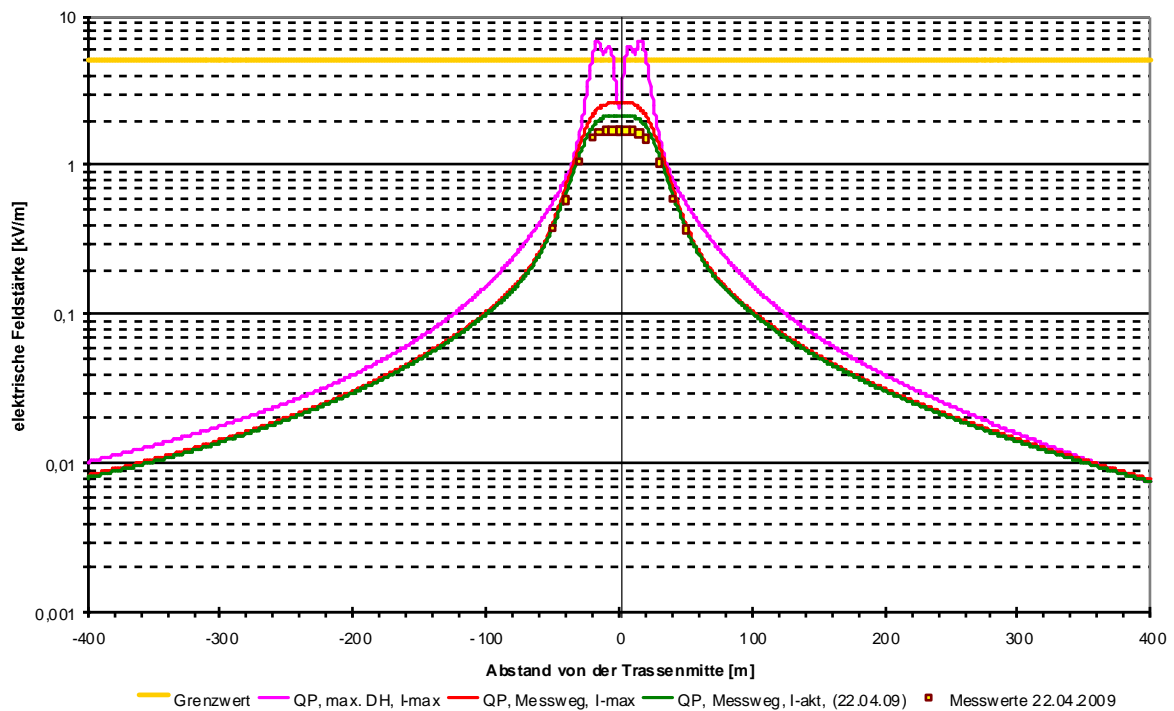


Abbildung 3/159a
 380 kV-Freileitung, FL380_4b: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

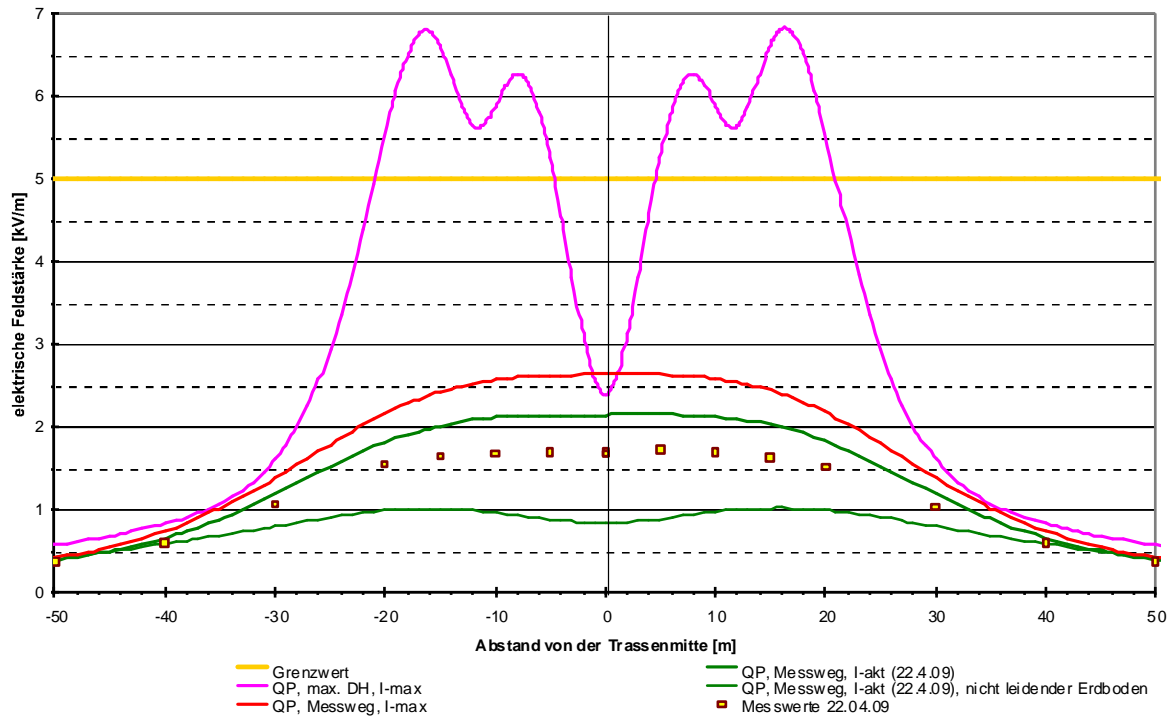


Abbildung 3/159b
 380 kV-Freileitung, FL380_4b: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte, als Vergleich wurde das Feld auch für nicht leitenden Erdboden berechnet (dünne grüne Kurve)

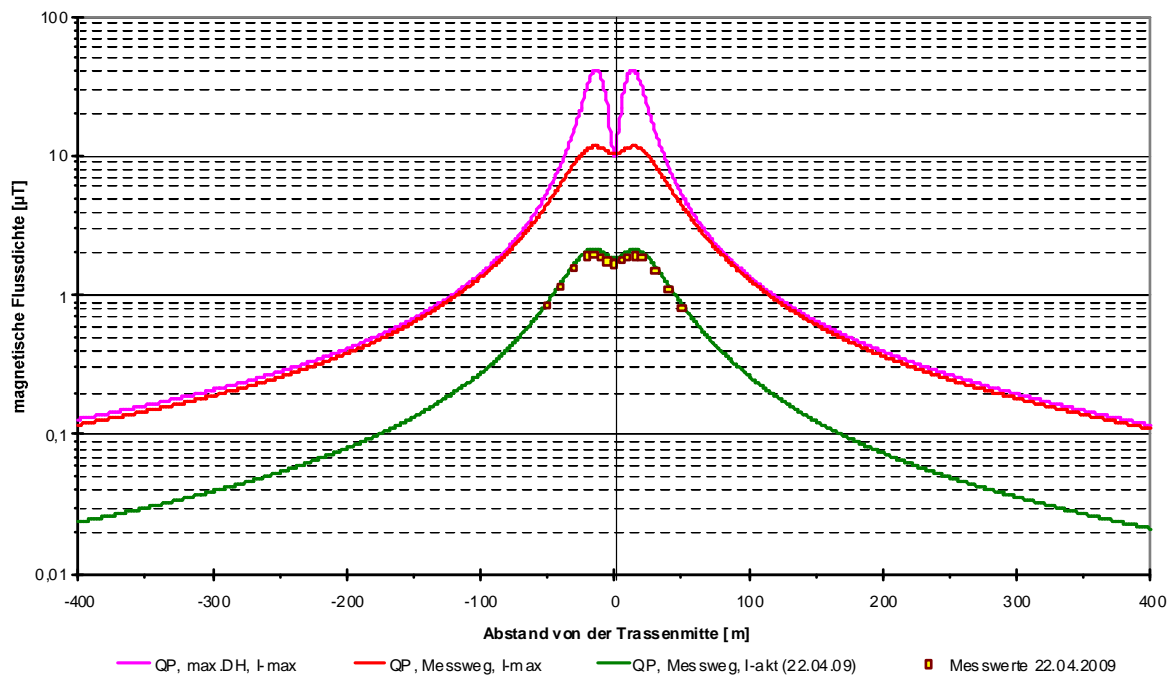


Abbildung 3/160a
 380 kV-Freileitung, FL380_4b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

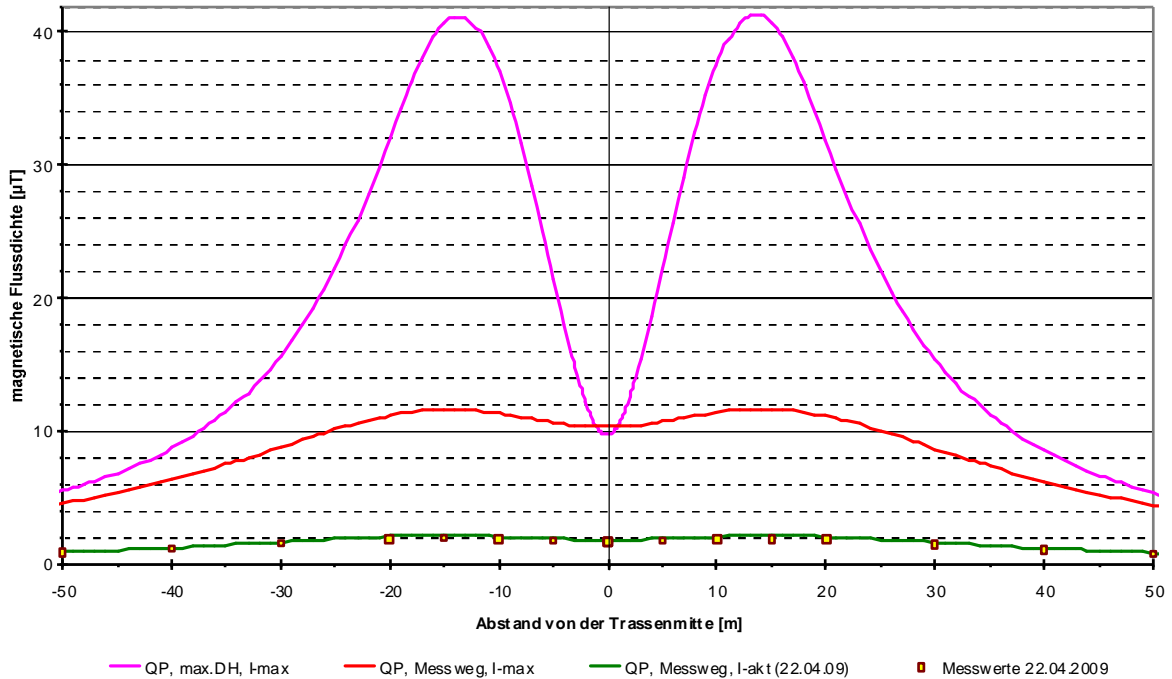


Abbildung 3/160b
380 kV-Freileitung, FL380_4b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/15a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_4b			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung	Querprofil		1,974	0,841	-
	Mitte des nächsten, sehr ähnlichen Spannungsfeldes		4,791	-	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	2,142	0,902	176
	max. Ströme	max. Durchhang	41,323	5,519	466

Tabelle 3/15b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_4b			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	1,722	0,376	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil (nicht leitender Erdboden*)	2,152	0,393	356
			1,018	0,424	391
	max. Ströme	max. Durchhang	6,824	0,570	405

*eine geringere Leitfähigkeit des trockenen Bodens als im Berechnungsprogramm angesetzt, ist sehr wahrscheinlich die Erklärung für die durchgängig geringen Messwerte der elektrischen Feldstärke, verglichen mit den für leitenden Erdboden berechneten Werte

3.2.2.2.9 FL380_5

Spannfeldlänge		L	173,4 m
Phasenbelegung Mast 1 (Süd / Nord) – Donaumast		S R...T	S R...T
Phasenbelegung Mast 2 (Süd / Nord) – Abspannmast (Einebene)		R S T	R S T
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	1620 A	1620 A
	aktueller Strom	137 A	94 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min, \max}$	25,0 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min, \text{akt}}$	27,0 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,1 m
Leiterseilhöhen Mast 1	h_1	34,0 m	
	h_1'	42,5 m	
Leiterseilhöhen Mast 2		h_2	24,7 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	6,8 m	
	b_1	9,4 m	
	c_1	12,3 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	6,5 m	
	b_2	11,1 m	
	c_2	15,7 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	81,7 m

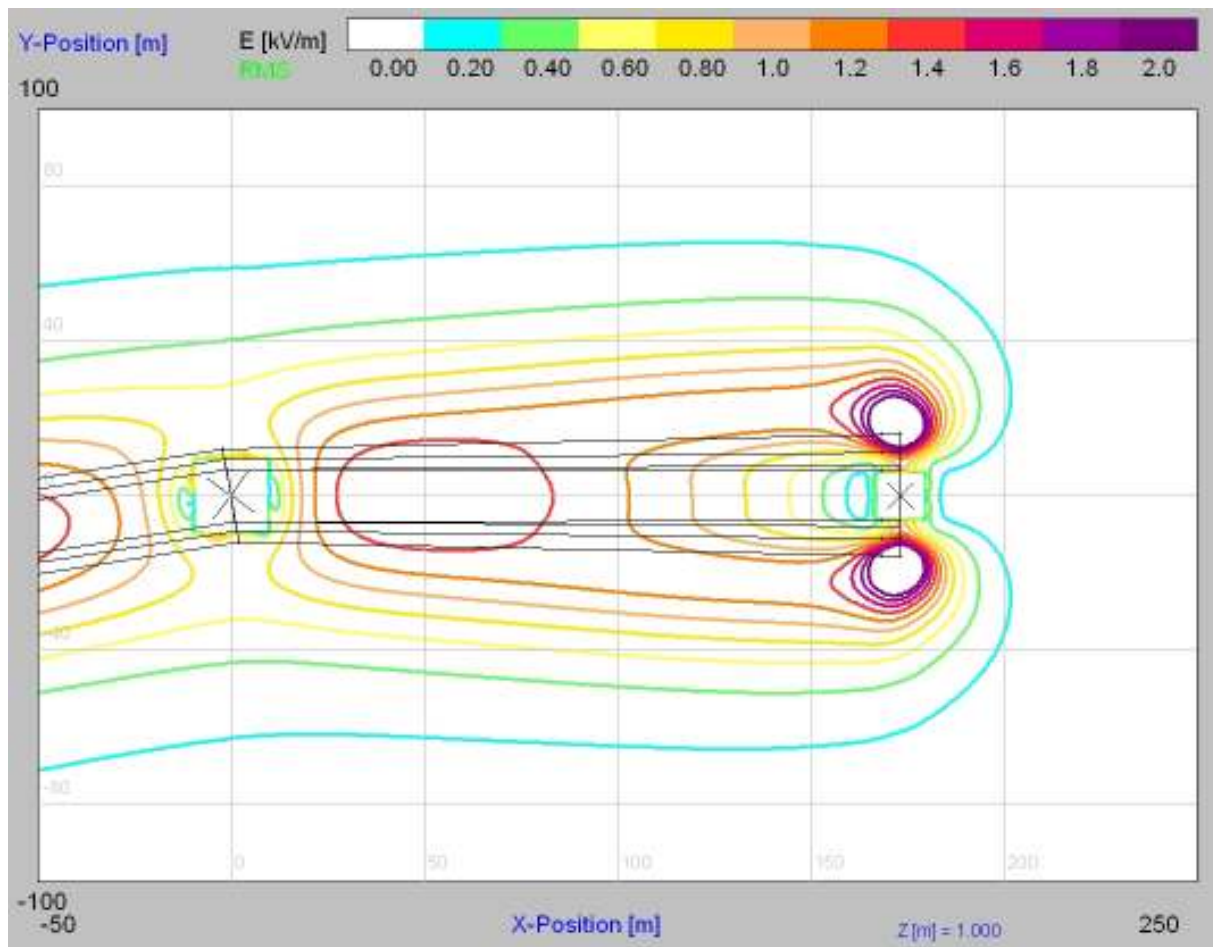


Abbildung 3/161
380 kV-Freileitung, FL380_5: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Abspannmast mit Übergang zum Erdkabel, Messweg in der Mitte (x=82 m) des Spannfeldes

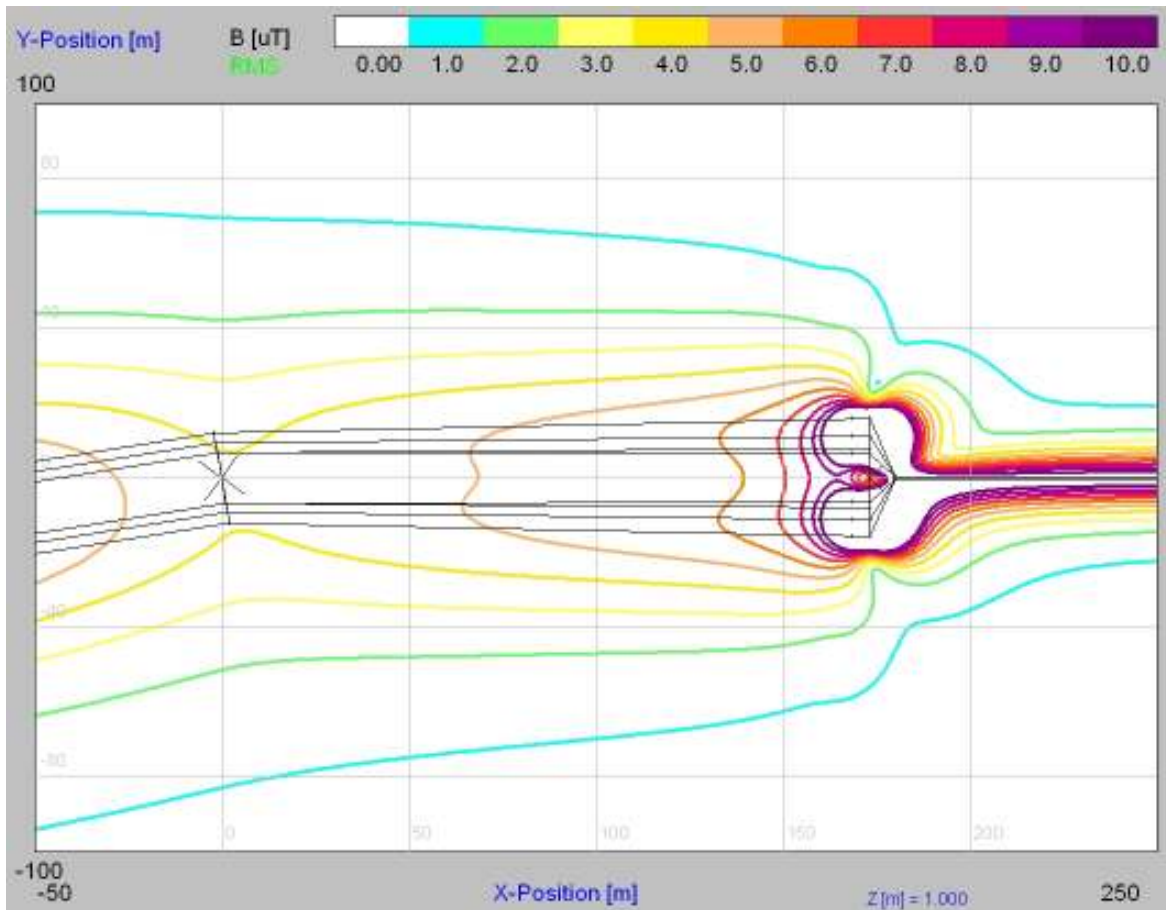


Abbildung 3/162
 380 kV-Freileitung, FL380_5: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Abspannmast mit Übergang zum Erdkabel, Messweg in der Mitte (x=82 m) des Spannungsfeldes

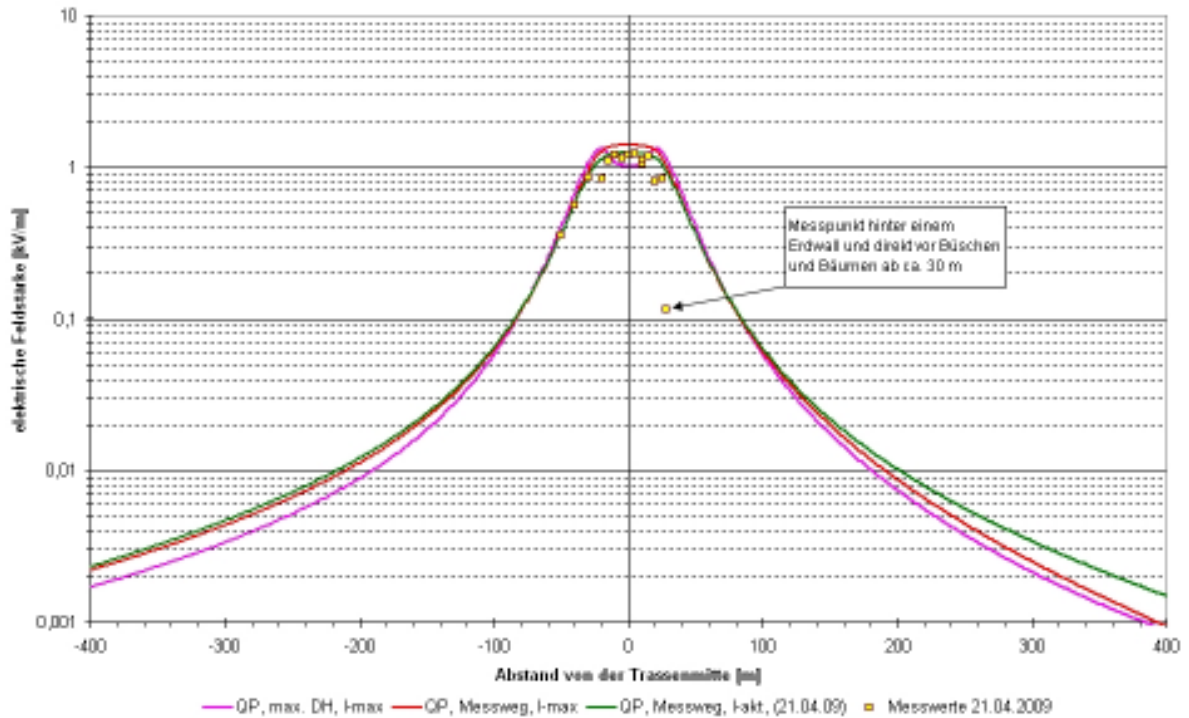


Abbildung 3/163a
 380 kV-Freileitung, FL380_5: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

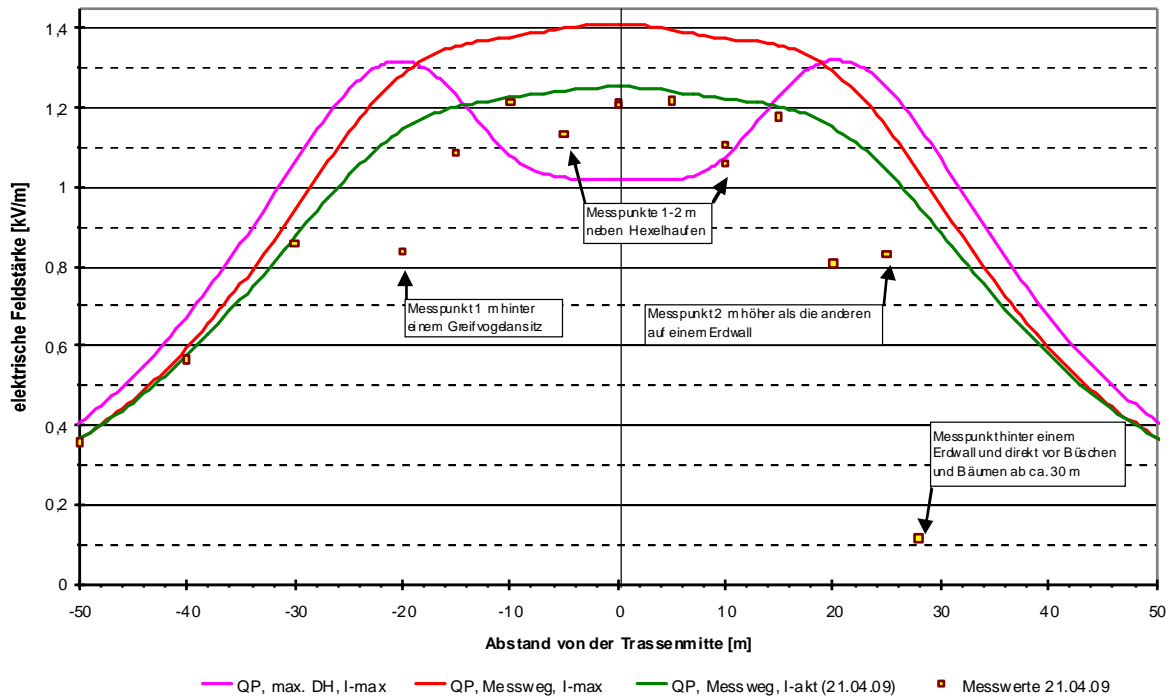


Abbildung 3/163b
 380 kV-Freileitung, FL380_5: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

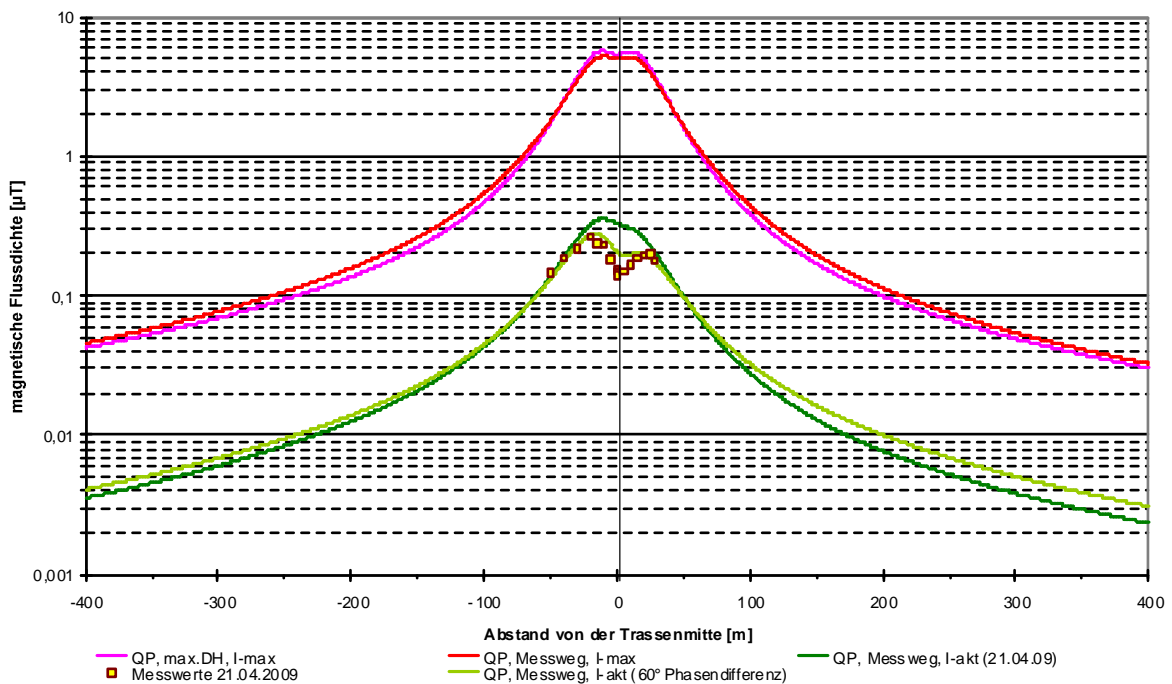


Abbildung 3/164a
 380 kV-Freileitung, FL380_5: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte, die Berechnung mit einer (angenommenen) Phasendifferenz von 60° zwischen den Strömen auf den beiden Systemen ergibt eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Messwerten

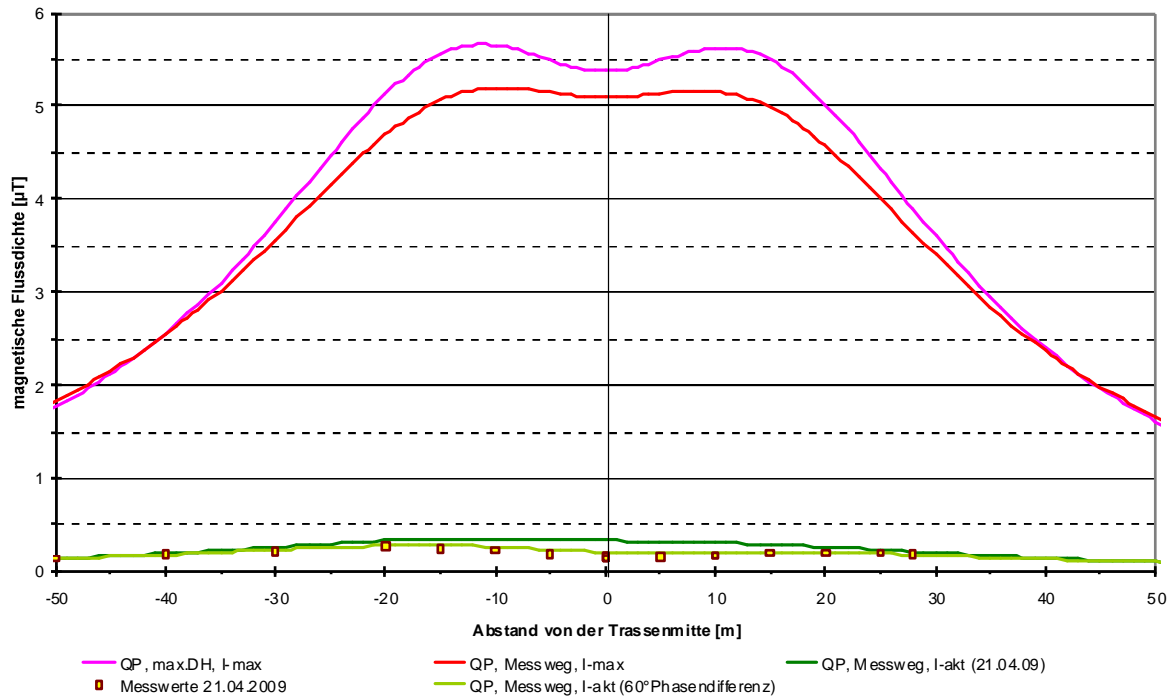


Abbildung 3/164b
 380 kV-Freileitung, FL380_55: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte, die Berechnung mit einer (angenommenen) Phasendifferenz von 60° zwischen den Strömen auf den beiden Systemen ergibt eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Messwerten

Tabelle 3/16a
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_5			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung	Querprofil		0,266	0,183	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil (mit 60° Phasendifferenz)	0,354 0,279	0,139 0,134	61 61
		max. Ströme	5,194	1,828	259
		max. Durchhang	5,660	1,765	241

Tabelle 3/16b
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_5			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung	Querprofil		1,219	0,358	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	1,252	0,367	216
		max. Ströme	1,411	0,368	210
		max. Durchhang	1,319	0,409	190
		bei $x = 48 \text{ m}$ (*)	1,591	-	-

* Durch den Einfluss des Abspannmastes und den Übergang vom höheren Donau- zum niedrigeren Einebenenmast liegt das Maximum der elektrischen Feldstärke nicht im Bereich des größten Durchhangs (vgl. Abb. 3/41).

3.2.2.2.10 FL380_6

Freileitungsabschnitt einer geplanten 380 kV-Höchstspannungstrasse			
Spannfeldlänge	L	400 m	
Phasenbelegung P1 (rechts / links)	S R...T	S R...T	
Phasenbelegung P2 (rechts / links)	S R...T	R T S	
Phasenbelegung P3 (rechts / links)	S R...T	T S R	
Die konkrete Phasenbelegung steht noch nicht fest. Von den sechs unabhängigen Möglichkeiten sind hier beispielhaft drei berechnet: P1 - mit den höchsten Werten der magnetischen Flussdichte in größerer Entfernung und den niedrigsten Werten im Trassenbereich P2 - mit den niedrigsten Werten in größerer Entfernung und den höchsten Werten im Trassenbereich P3 - mit den niedrigsten Werten bei mittleren Abständen und mittleren Werten im Trassenbereich			
Ströme (rechts / links)	Maximalstrom	2760 A	2760 A
	Annahme: $I_{real} = I_{max}/4$	690 A	690 A
als Ersatz für eine aktuelle Messsituation wurde für die Simulation einer Situation mit Normalbedingungen eine Auslastung von 25 % des Maximalstromes gewählt, was einer möglichen realen Situation mit relativ hohen Strömen entspricht (in dieser Untersuchung lagen die aktuellen Ströme immer unter 25 % der Maximalströme)			
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{min,max}$	10,7 m
	Normalbedingungen	$h_{min,real}$	13,4 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2	Δh	0 m	
Leiterseilhöhen Mast 1 und Mast 2	h_1	23,7 m	
	h_1'	34,7 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1 und Mast 2	a_1	8,0 m	
	b_1	11,0 m	
	c_1	14,5 m	

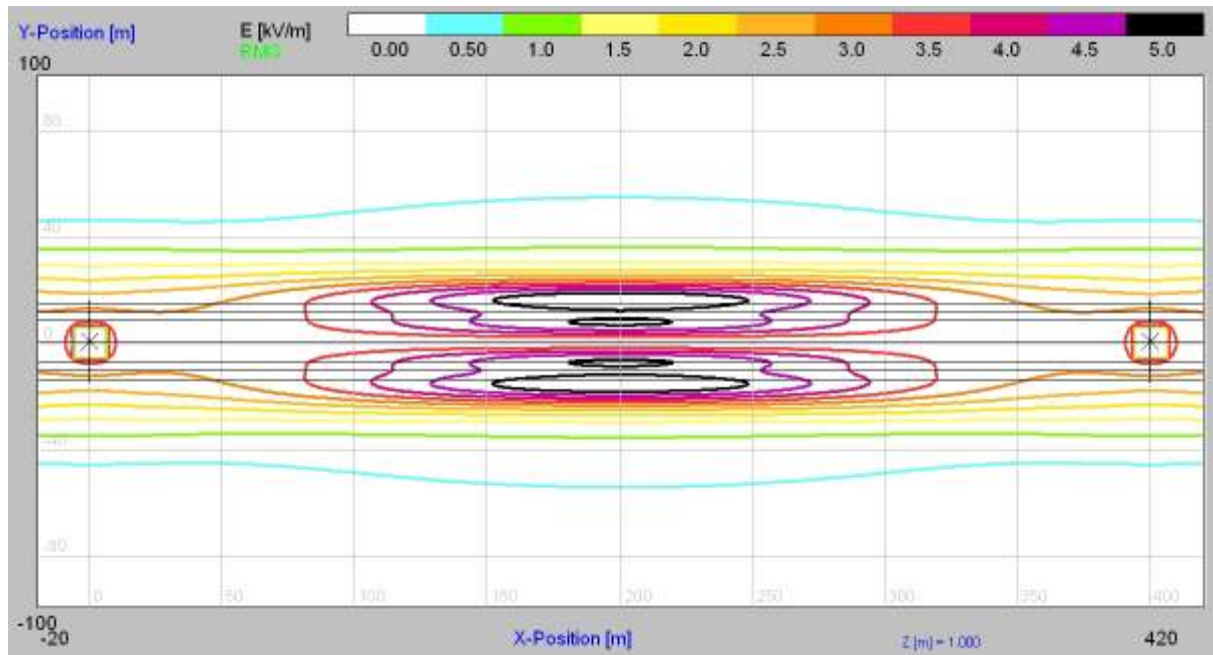


Abbildung 3/165
 (geplante) 380 kV-Freileitung, FL380_6 (P1): Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand)

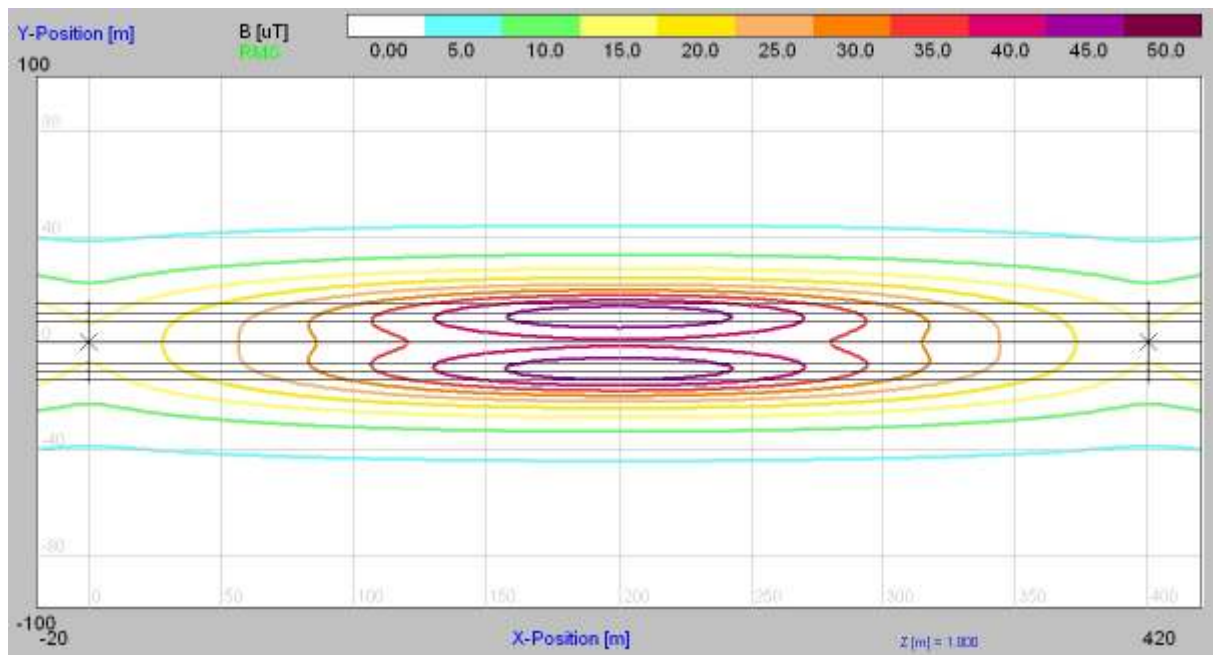


Abbildung 3/166
 (geplante) 380 kV-Freileitung, FL380_6 (P2): Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand)

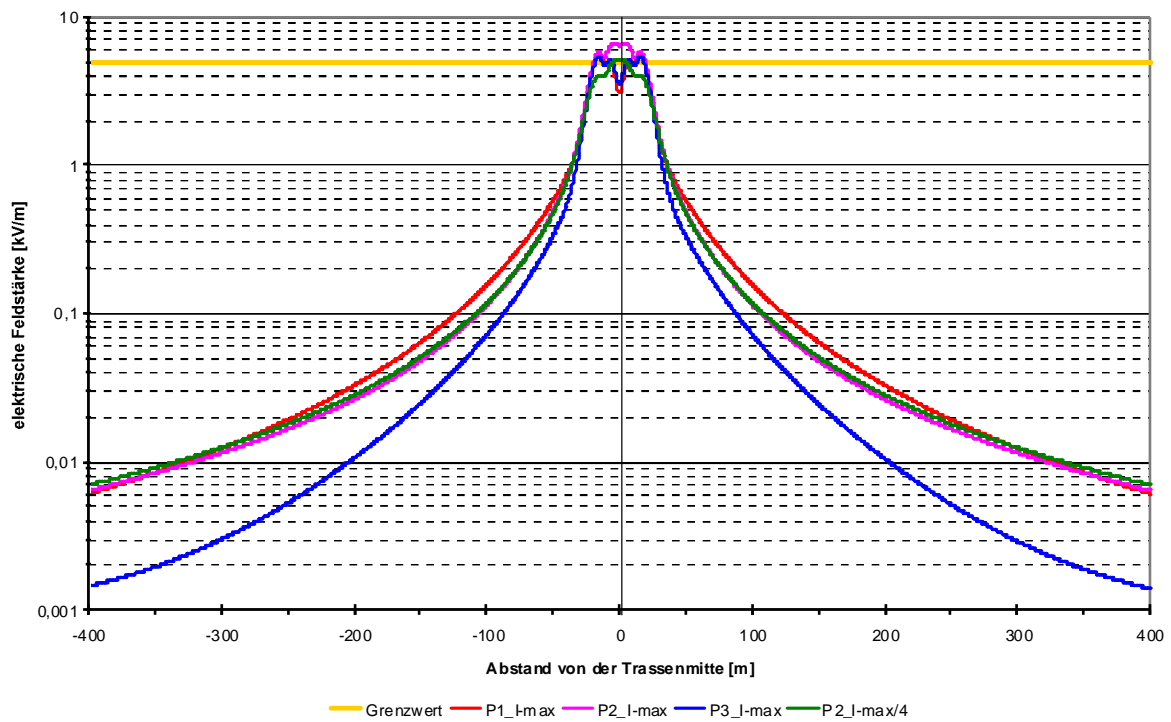


Abbildung 3/167a
 (geplante) 380 kV-Freileitung, FL380_6: Querprofile der elektrischen Feldstärke, für verschiedene Lastzustände und unterschiedliche Phasenarrangierungen berechnete Werte

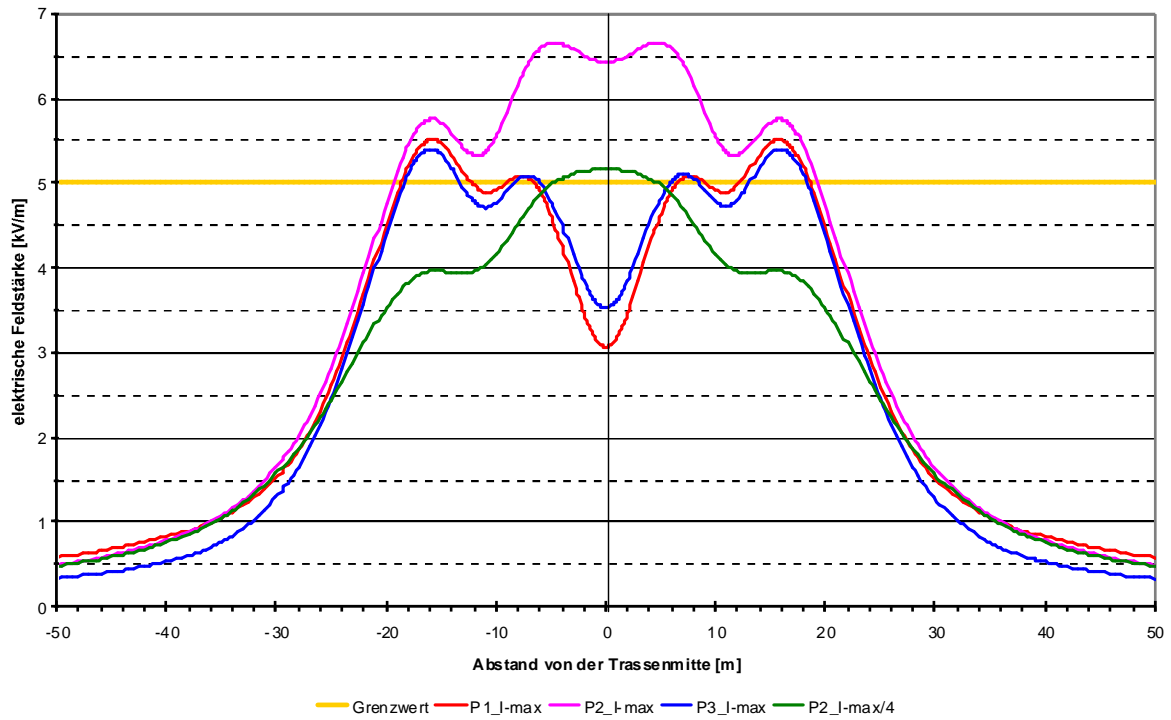


Abbildung 3/167b
 Querprofile der elektrischen Feldstärke, (geplante) 380 kV-Freileitung, FL380_6,
 verschiedene Lastzustände und unterschiedliche Phasenarrangierungen berechnete Werte

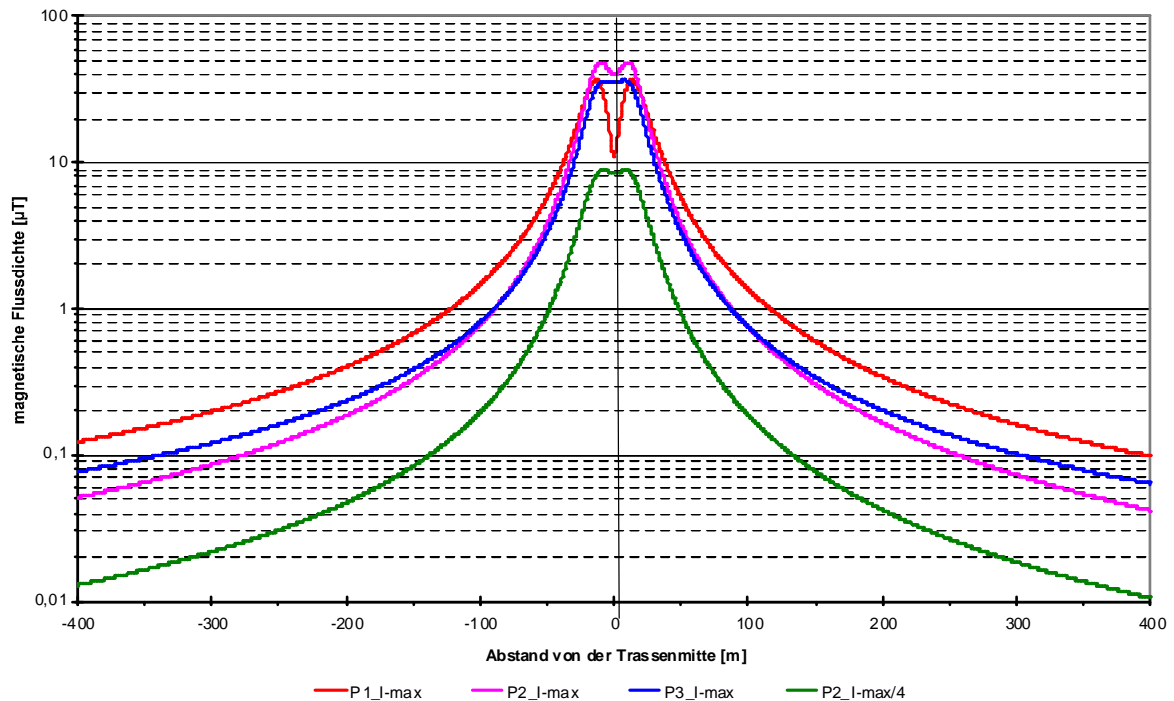


Abbildung 3/168a
 (geplante) 380 kV-Freileitung, FL380_6: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 für verschiedene Lastzustände und unterschiedliche Phasenarrangierungen berechnete Werte

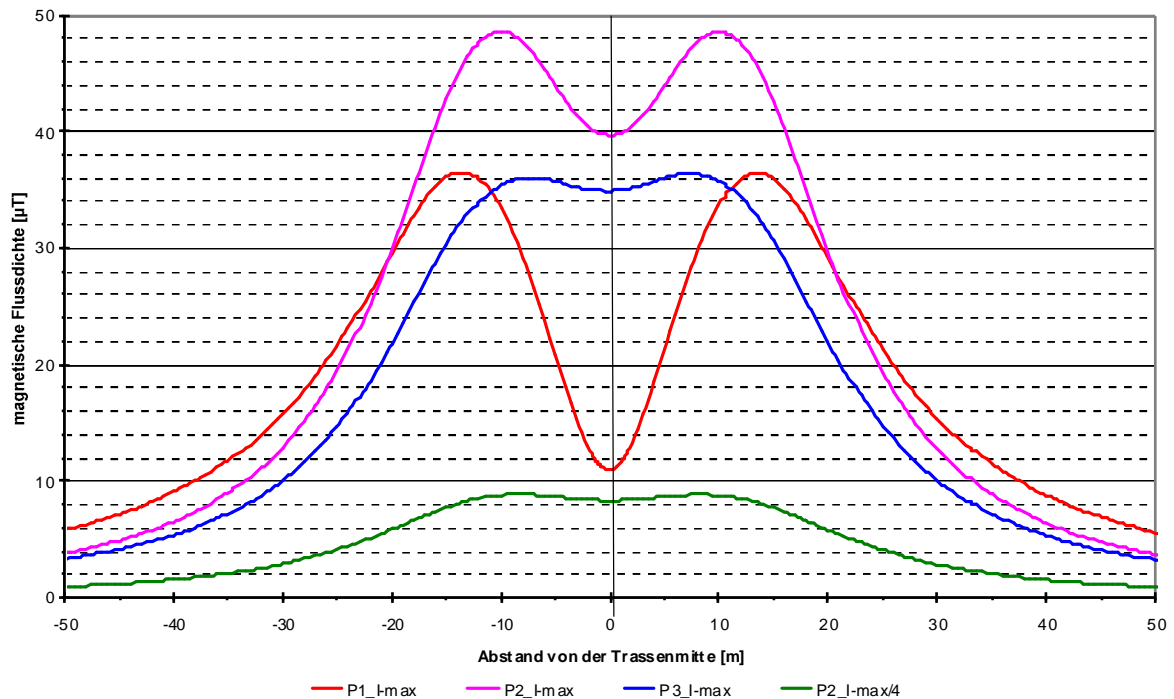


Abbildung 3/168b
 (geplante) 380 kV-Freileitung, FL380_6: Querprofile der magnetischen Flussdichte, für verschiedene Lastzustände und unterschiedliche Phasenarrangierungen berechnete Werte

Tabelle 3/17a
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL380_6			B_{max} [µT]	$B_{max}(r = 50 \text{ m})$ [µT]	r_{max} [m] mit $B(r) > 0,1 \text{ µT}$
Rechnung	reale Ströme $I_{real} = I_{max}/4$	P2 ($\begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} R \\ T \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} T \\ S \end{smallmatrix}$)	8,844	0,927	137
	max. Ströme	P1 ($\begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} S \\ T \end{smallmatrix}$)	36,500	5,793	441
		P2 ($\begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} T \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} R \\ S \end{smallmatrix}$)	48,557	3,801	276
		P3 ($\begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} T \\ S \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} T \\ R \end{smallmatrix}$)	36,373	3,305	336

Tabelle 3/17b
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL380_6			E_{max} [kV/m]	$E_{max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Rechnung	reale Ströme $I_{real} = I_{max}/4$	P2 ($\begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} R \\ T \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} T \\ S \end{smallmatrix}$)	5,162	0,475	334
	max. Ströme	P1 ($\begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} S \\ T \end{smallmatrix}$)	5,512	0,579	327
		P2 ($\begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} T \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} R \\ S \end{smallmatrix}$)	6,651	0,489	321
		P3 ($\begin{smallmatrix} S \\ R \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} T \\ S \end{smallmatrix} / \begin{smallmatrix} T \\ R \end{smallmatrix}$)	5,401	0,334	204

3.2.2.3 Ergebnisse der Berechnungen für eine 220 kV-Freileitung

FL220_1

Spannfeldlänge		L	365,1 m
Phasenbelegung (West / Ost)		STR	TSR
Ströme (West / Ost)	Maximalstrom	1070 A	1070 A
	aktueller Strom	0 A	124 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,max}$	8,3 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,akt}$	9,5 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,0 m
Leiterseilhöhen Mast 1		h_1	21,4 m
Leiterseilhöhen Mast 2		h_2	21,4 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	6,1 m	
	b_1	10,4 m	
	c_1	14,7 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	6,1 m	
	b_2	10,4 m	
	c_2	14,7 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	182,5 m

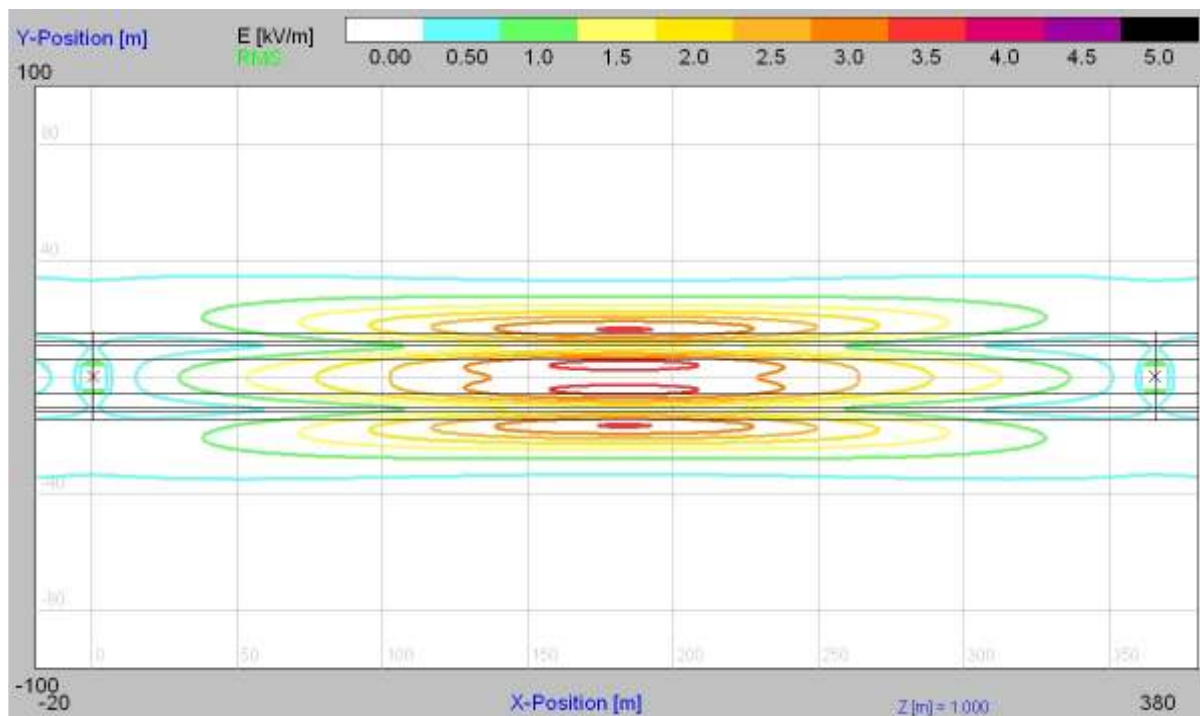


Abbildung 3/169
220 kV-Freileitung, FL220_1: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg in der Mitte ($x=183$ m) des Spannfeldes

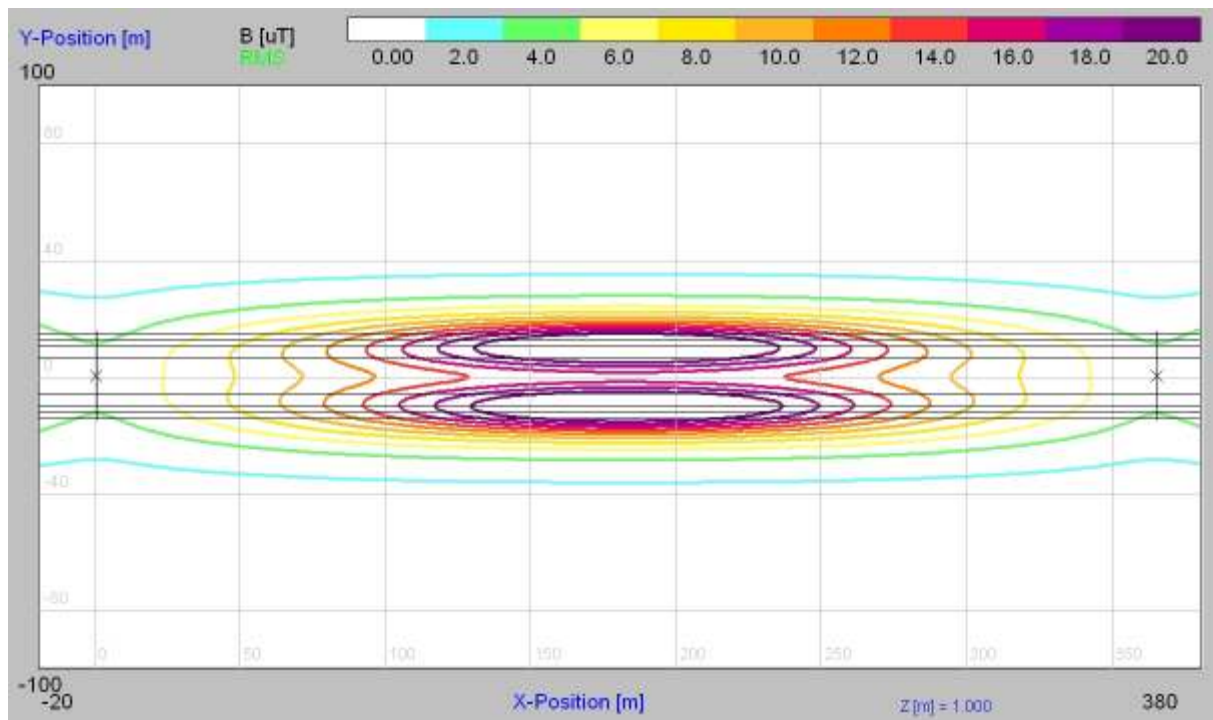


Abbildung 3/170
 220 kV-Freileitung, FL220_1: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg in der Mitte (x=183 m) des Spannungsfeldes

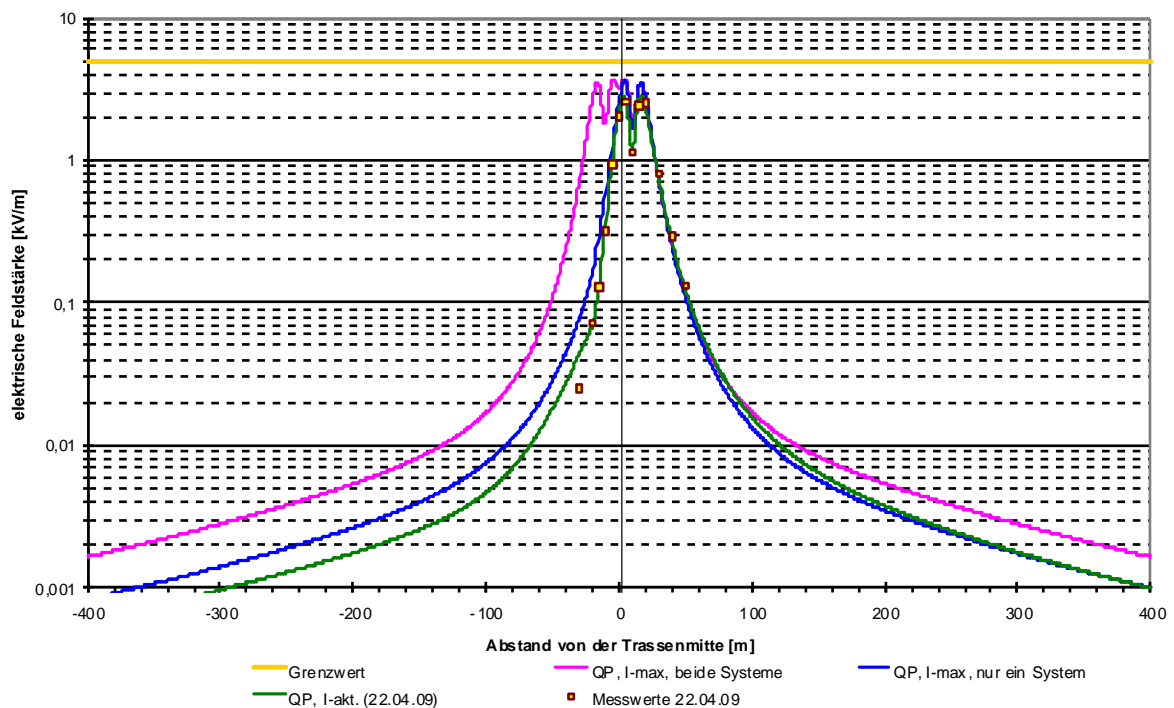


Abbildung 3/171a
 220 kV-Freileitung, FL220_1: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

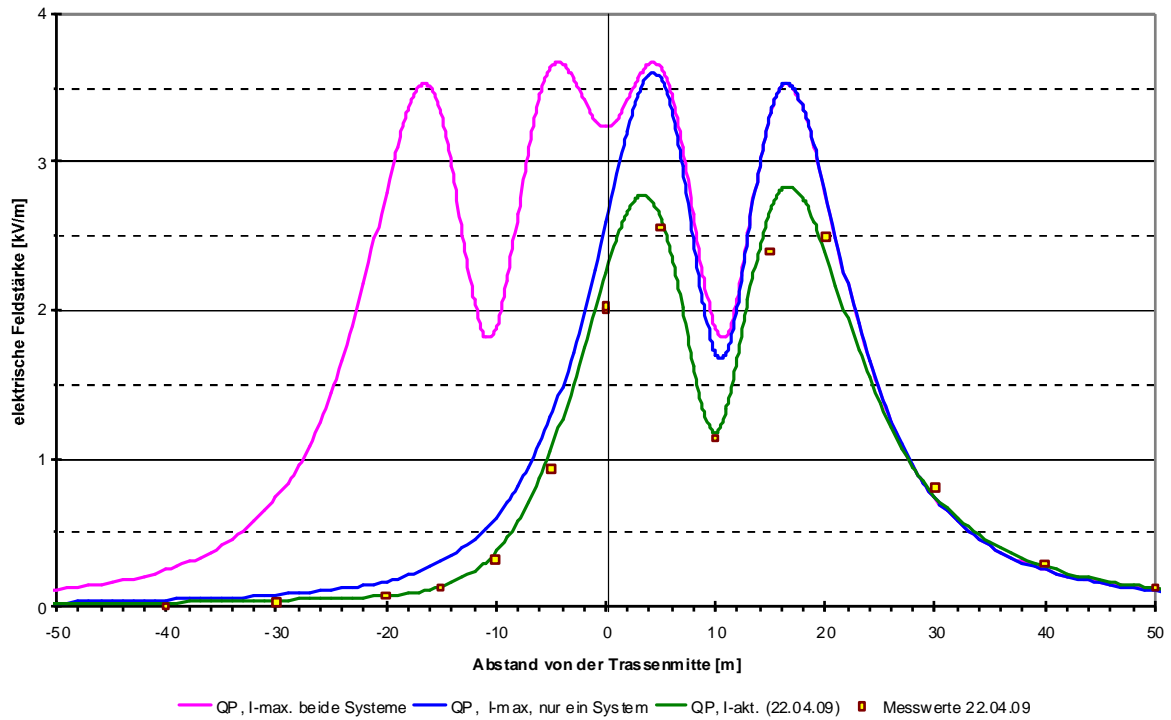


Abbildung 3/171b
 220 kV-Freileitung, FL220_1: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

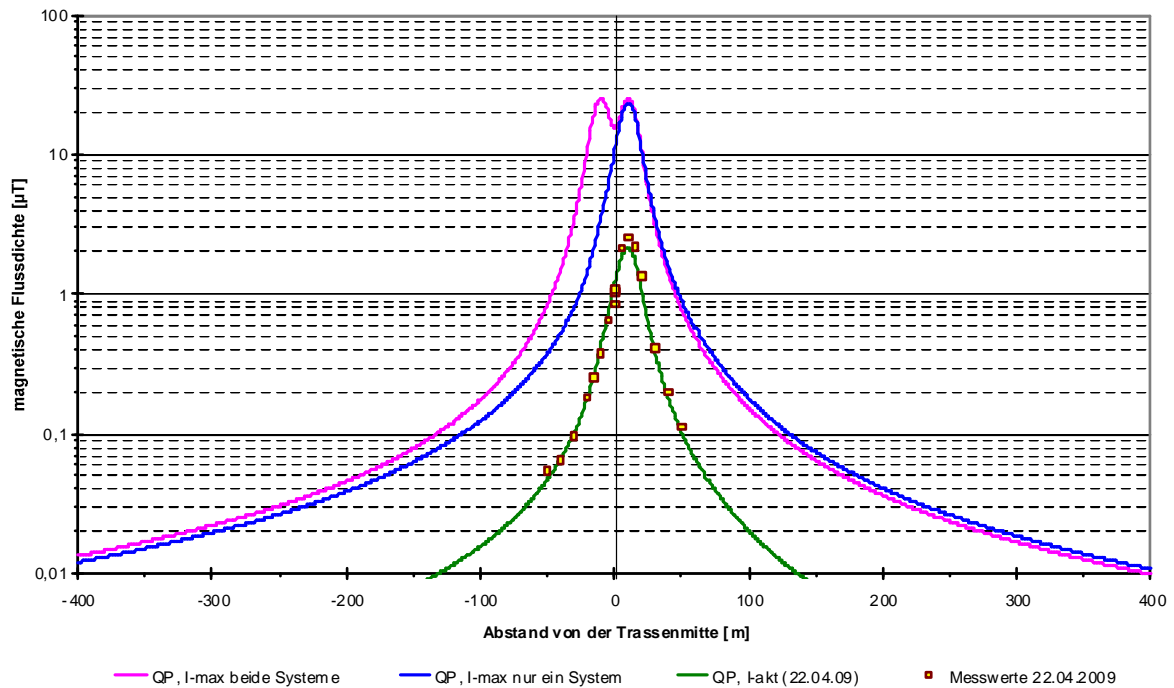


Abbildung 3/172a
 220 kV-Freileitung, FL220_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

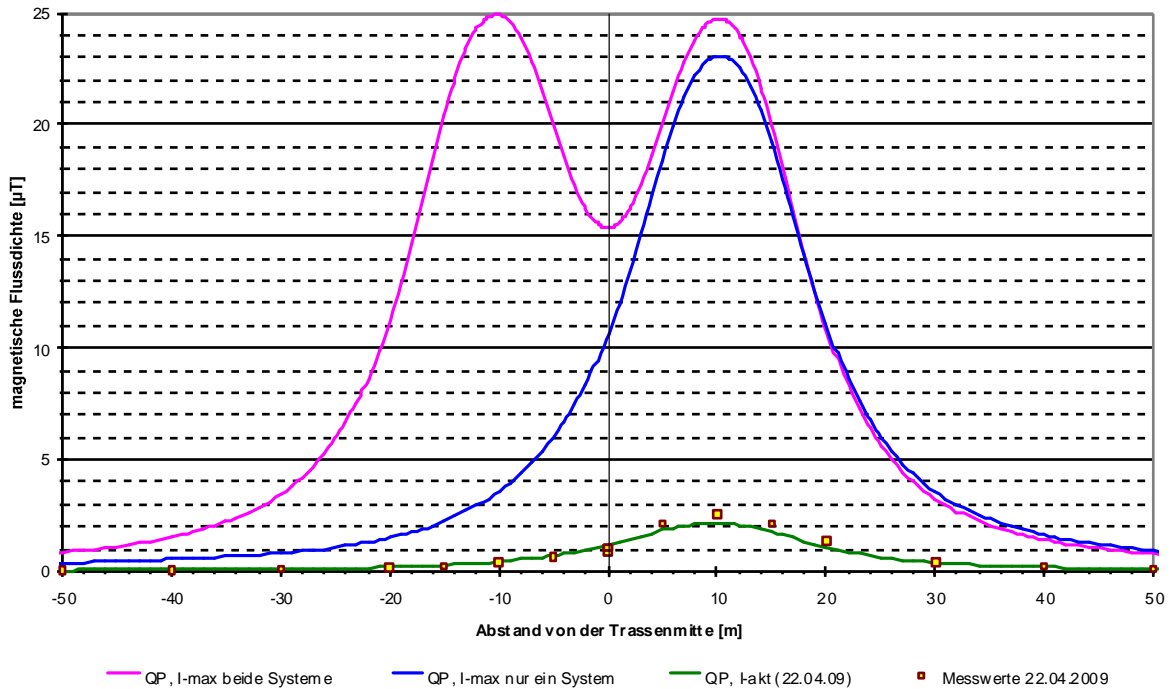


Abbildung 3/172b
220 kV-Freileitung, FL220_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/18a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL220_1			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$	
Messung		Querprofil	2,595	0,117	-	
Rechnung	akt. Ströme (1 System)		Querprofil	2,133	50	
	max. Ströme	1 System	max. Durchhang	23,019	0,912	129
		2 Systeme		24,906	0,855	132

Tabelle 3/18b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL220_1			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$	
Messung		Querprofil	2,594	0,133	-	
Rechnung	akt. Ströme (1 System)		Querprofil	2,830	121	
	2 Systeme	1 System	max. Durchhang	3,590	0,110	113
		2 Systeme		3,662	0,113	133

3.2.2.4 Ergebnisse der Berechnungen für 110 kV-Freileitungen

3.2.2.4.1 FL110_1

Spannfeldlänge		L	169,8 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		$\begin{matrix} S \\ R \dots T \end{matrix}$	$\begin{matrix} S \\ T \ S \end{matrix}$
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	523 A	523 A
	aktueller Strom	157 A	60 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min, \max}$	14,8 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min, \text{akt}}$	15,3 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2 (die Messwege befinden sich beide in etwa auf der Höhe von Mast 2), durch den Höhenunterschied im Gelände und die unterschiedliche Masthöhe befindet sich der Ort des maximalen Durchhangs nicht in Spannfeldmitte, sondern dichter am Mast 1 (etwa bei $x=48\text{m}$)		Δh	2,2 m
Leiterseilhöhen Mast 1	h_1	16,0 m	
	h_1'	20,3 m	
Leiterseilhöhen Mast 2	h_2	20,0 m	
	h_2'	24,3 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	2,8 m	
	b_1	4,5 m	
	c_1	6,4 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	2,8 m	
	b_2	4,5 m	
	c_2	6,4 m	
Abstand des Messweges (1 Halbprofil nach Süden) von Mast 1		d_1	84,9 m
Abstand des Messweges (2 Halbprofil nach Norden) von Mast 1		d_1	24,9 m

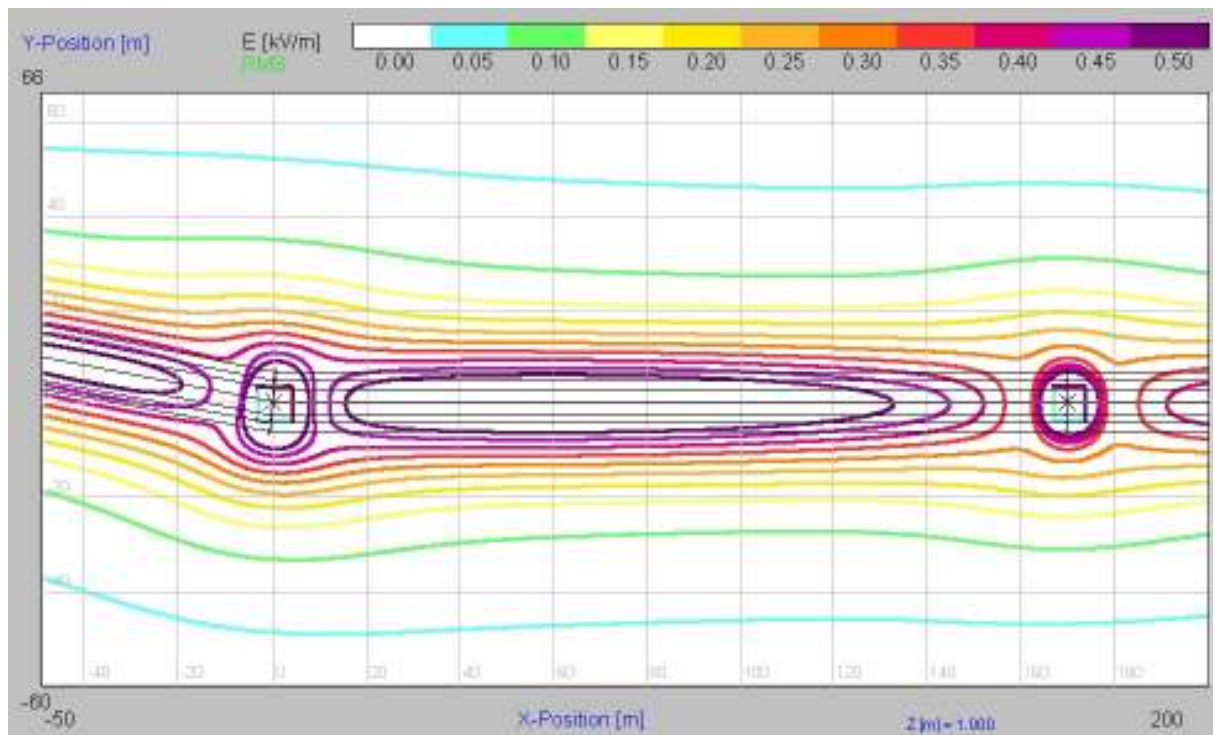


Abbildung 3/173

110 kV-Freileitung, FL110_1: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg 1 in der Mitte ($x=85\text{ m}$) des Spannfeldes und Messweg 2 in der Nähe des ($x=25\text{ m}$) des Mastes bei $x=0\text{ m}$

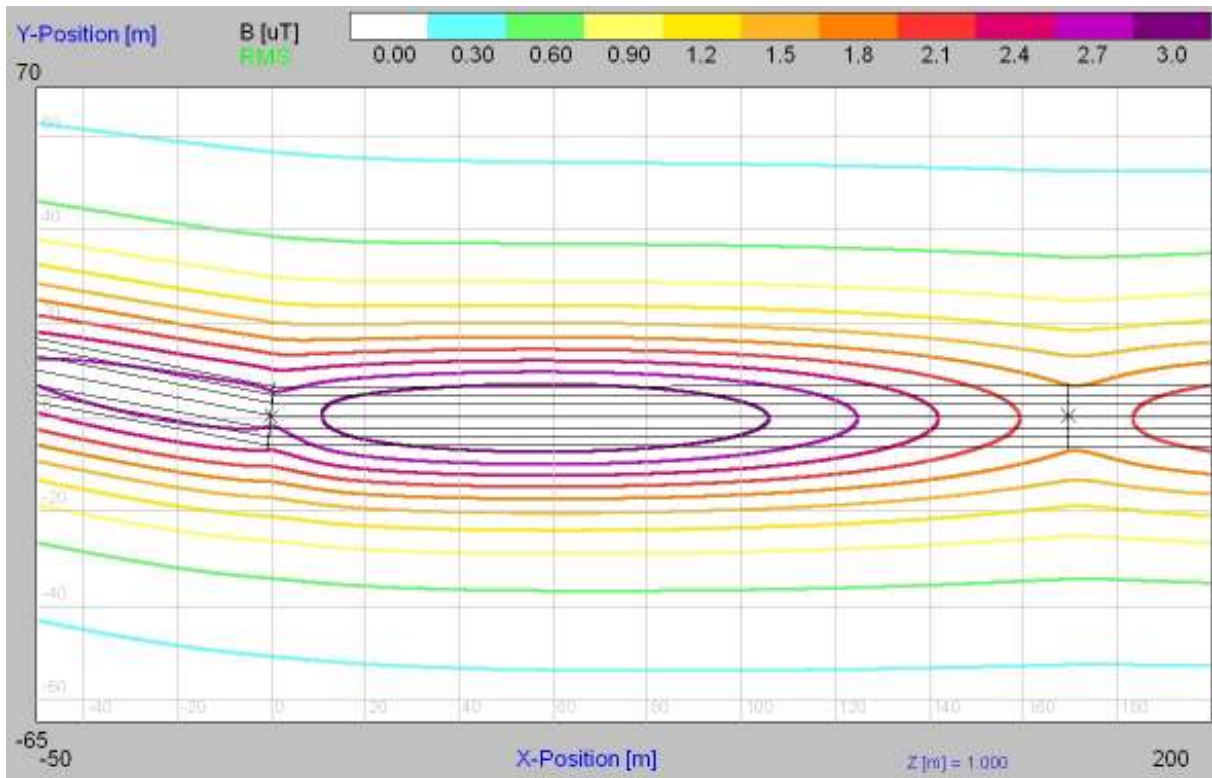


Abbildung 3/174
 110 kV-Freileitung, FL110_1: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg 1 in der Mitte ($x=85$ m) des Spannungsfeldes und Messweg 2 in der Nähe des ($x=25$ m) des Mastes bei $x=0$ m

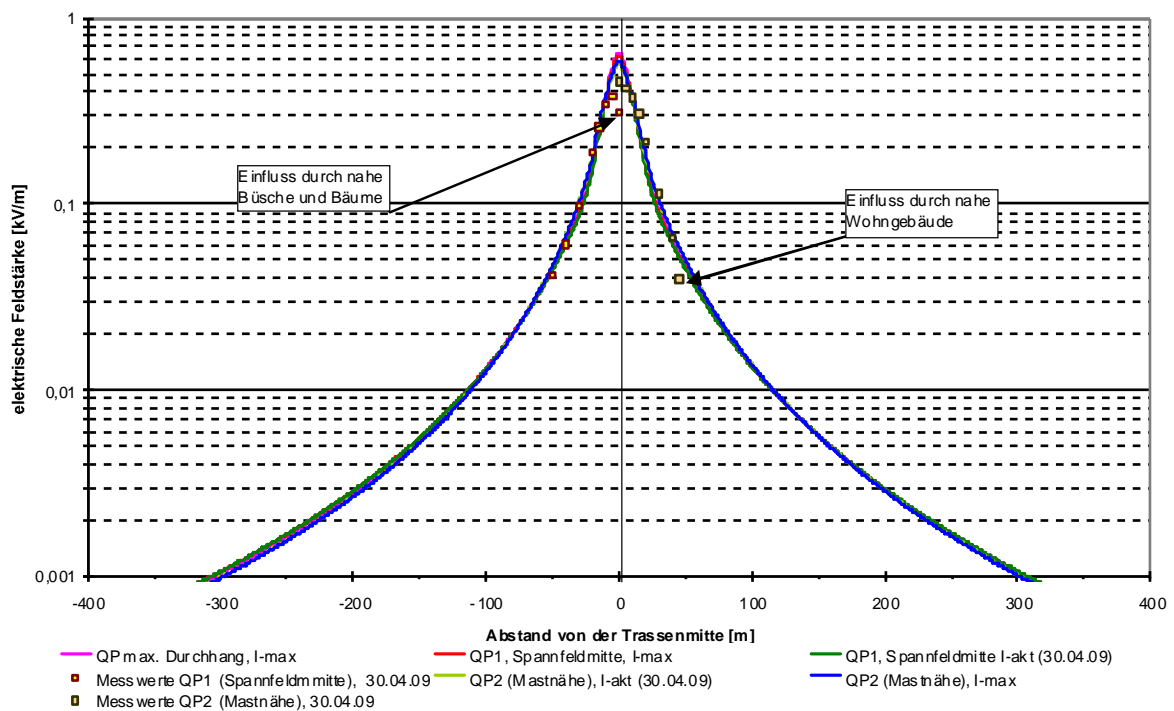


Abbildung 3/175a
 110 kV-Freileitung, FL110_1: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

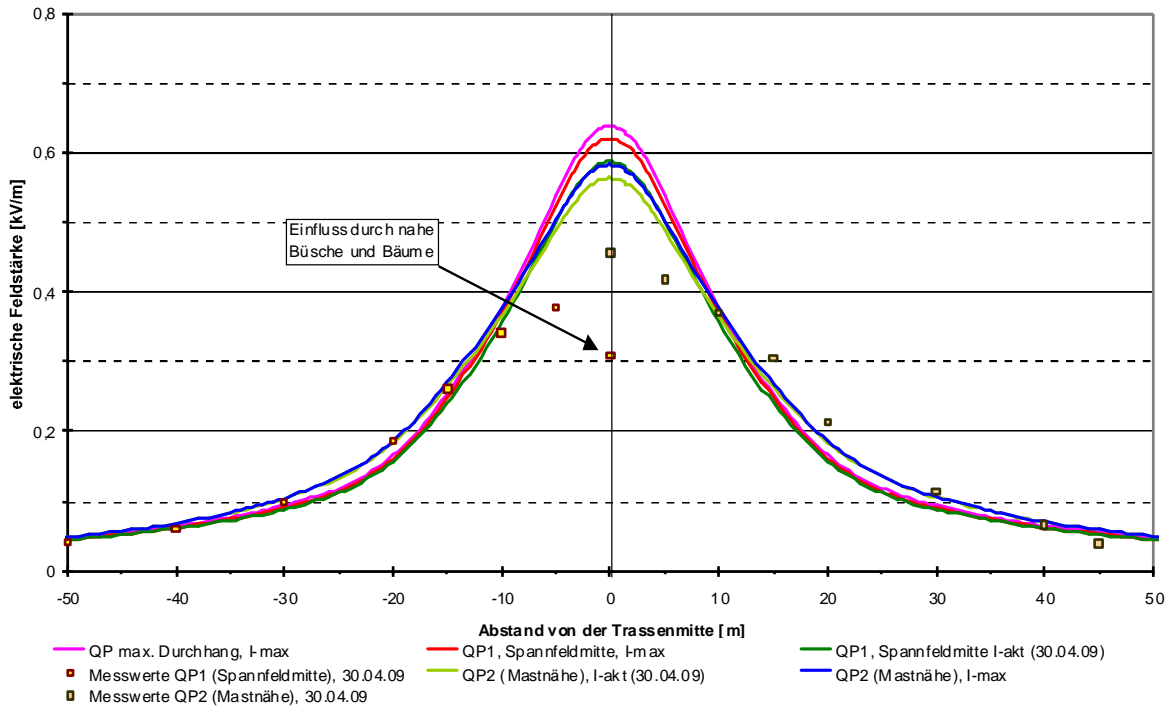


Abbildung 3/175b
 110 kV-Freileitung, FL110_1: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

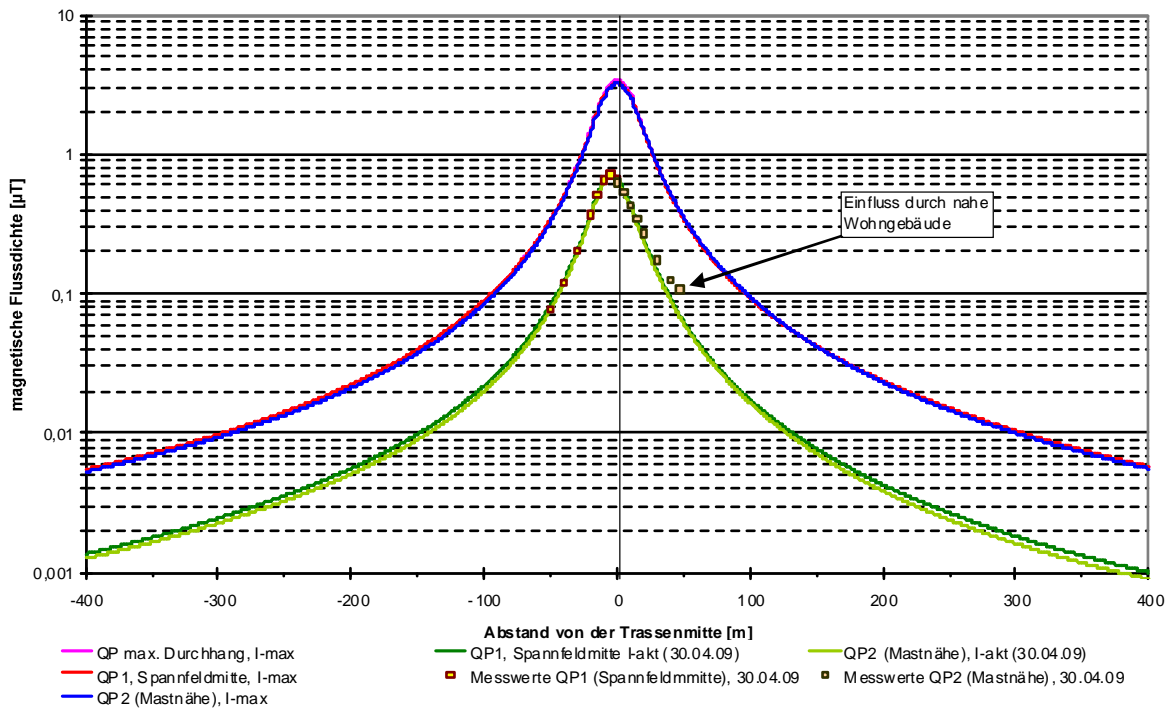


Abbildung 3/176a
 110 kV-Freileitung, FL110_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

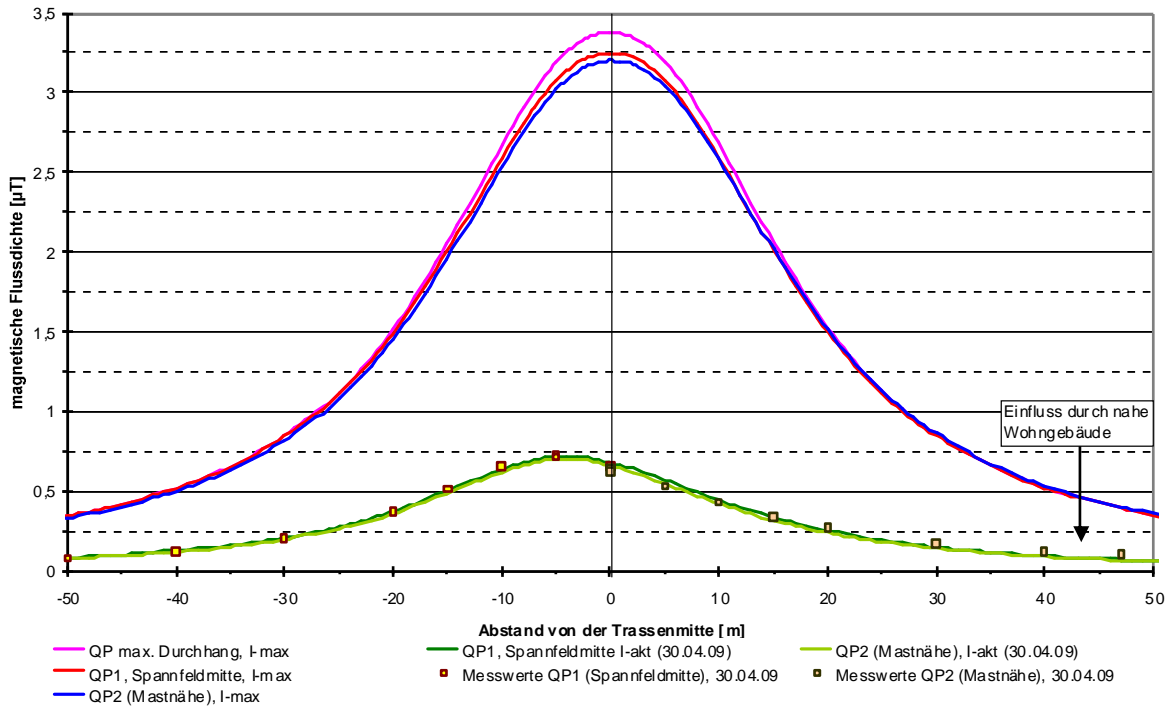


Abbildung 3/176b
110 kV-Freileitung, FL110_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/19a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL110_1		B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung	QP1 (Spannfeldmitte)	0,727	0,078	40
	max. Durchhang	0,743	-	-
	QP2 (Mastnähe)	0,647	0,109 (beeinflusst durch Häuser)	
Rechnung	akt. Ströme	QP1 (Spannfeldmitte)	0,719	45
		QP2 (Mastnähe)	0,702	44
	max. Ströme	max. Durchhang	3,377	0,353

Tabelle 3/19b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL110_1		E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung	QP1 (Spannfeldmitte)	0,379	0,041	-
	max. Durchhang	0,499	-	-
	QP2 (Mastnähe)	0,457	0,040	-
Rechnung	akt. Ströme	QP1 (Spannfeldmitte)	0,587	115
		QP2 (Mastnähe)	0,563	116
	max. Ströme	max. Durchhang	0,639	0,047

3.2.2.4.2 FL110_2

Spannfeldlänge		L	230,3 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		S R...T	S R...T
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	665 A	665 A
	aktueller Strom	66 A	78 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,max}$	15,9 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,akt}$	17,1 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,4 m
Leiterseilhöhen Mast 1	h_1	15,3 m	
	h_1'	19,2 m	
Leiterseilhöhen Mast 2	h_2	31,7 m	
	h_2'	35,7 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	2,8 m	
	b_1	4,8 m	
	c_1	6,8 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	3,1 m	
	b_2	4,9 m	
	c_2	6,7 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	104 m

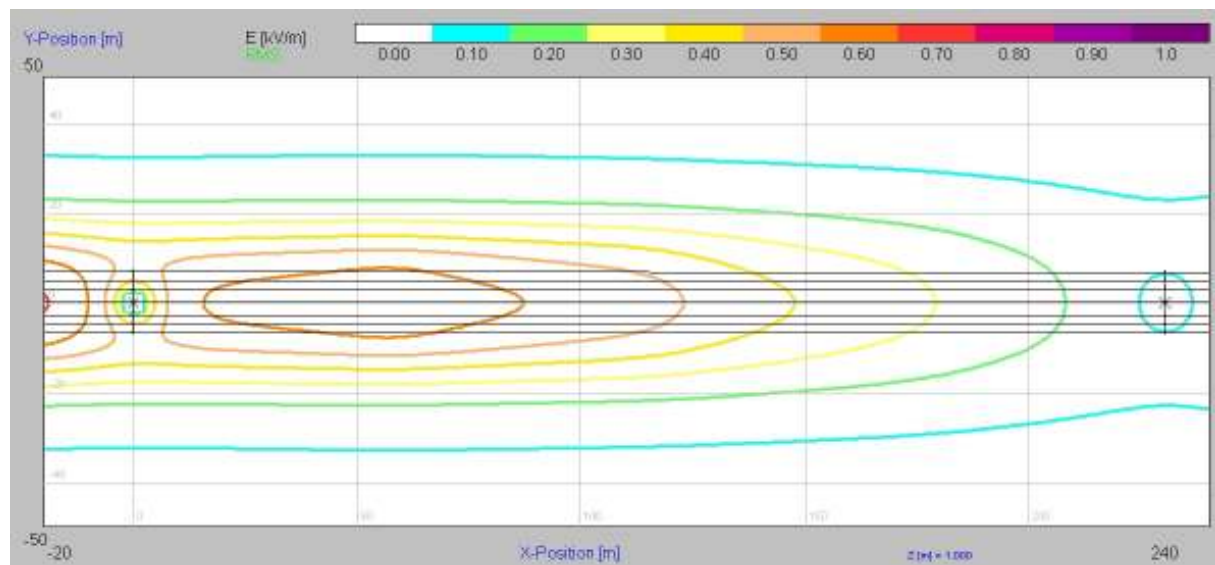


Abbildung 3/177

110 kV-Freileitung, FL110_2: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg etwas links von der Mitte ($x=104$ m) des Spannfeldes

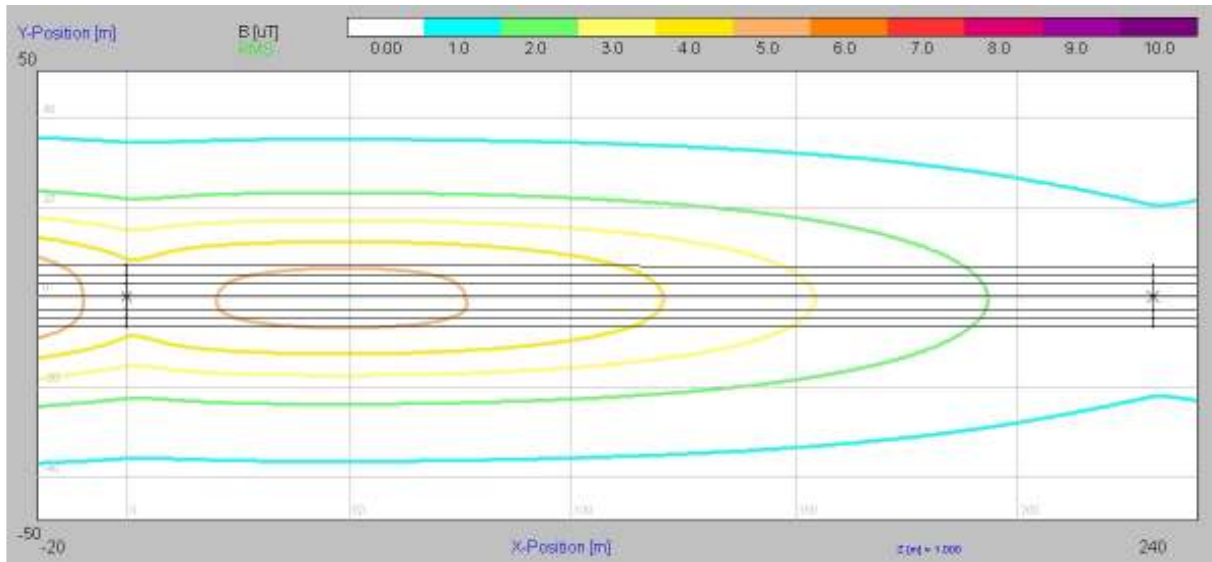


Abbildung 3/178
 110 kV-Freileitung, FL110_2: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg etwas links von der Mitte (x=104 m) des Spannungsfeldes

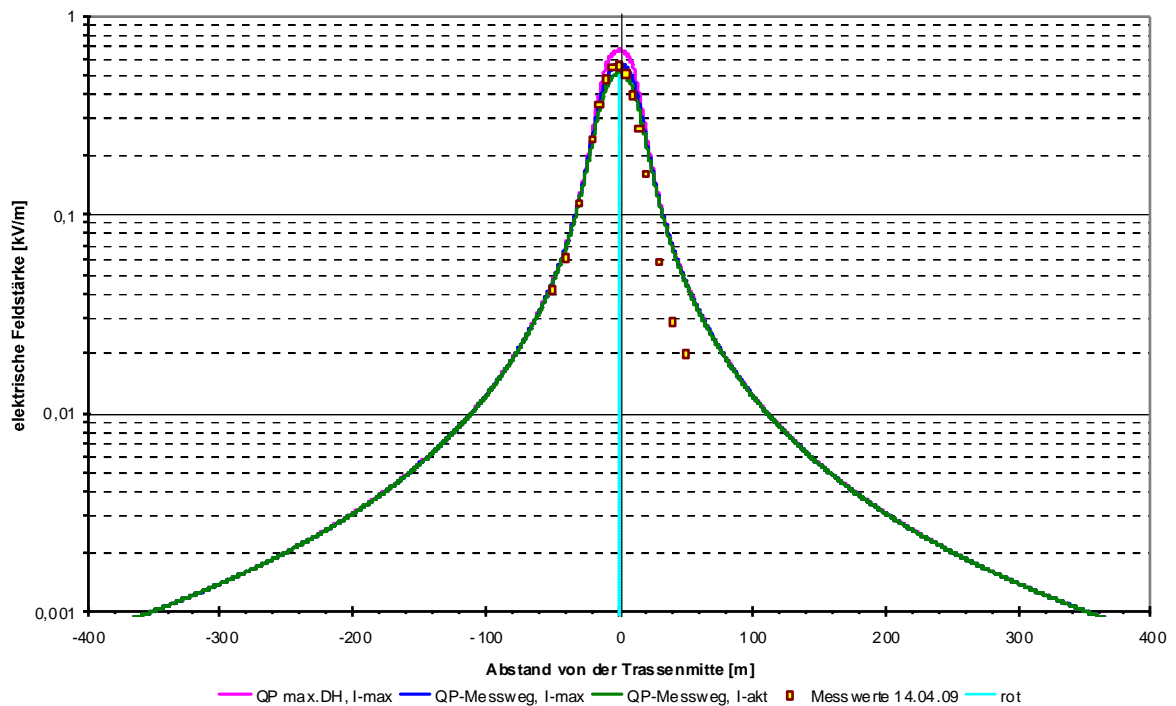


Abbildung 3/179a
 110 kV-Freileitung, FL110_2: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

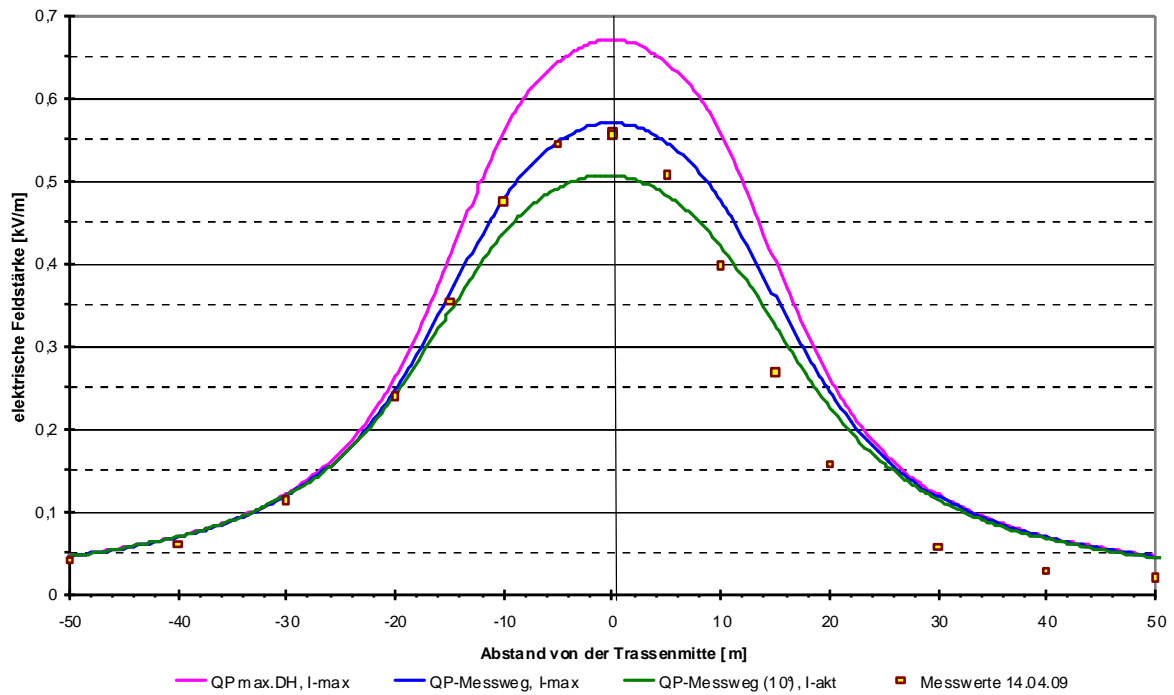


Abbildung 3/179b
 110 kV-Freileitung, FL110_2: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

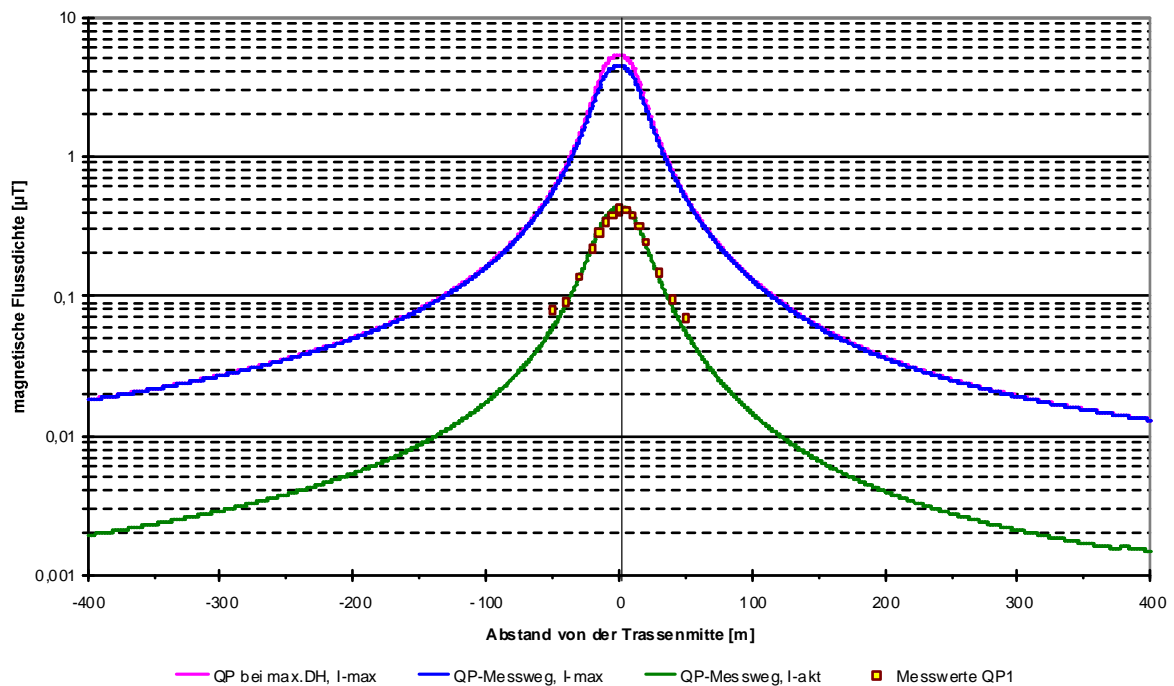


Abbildung 3/180a
 110 kV-Freileitung, FL110_2: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

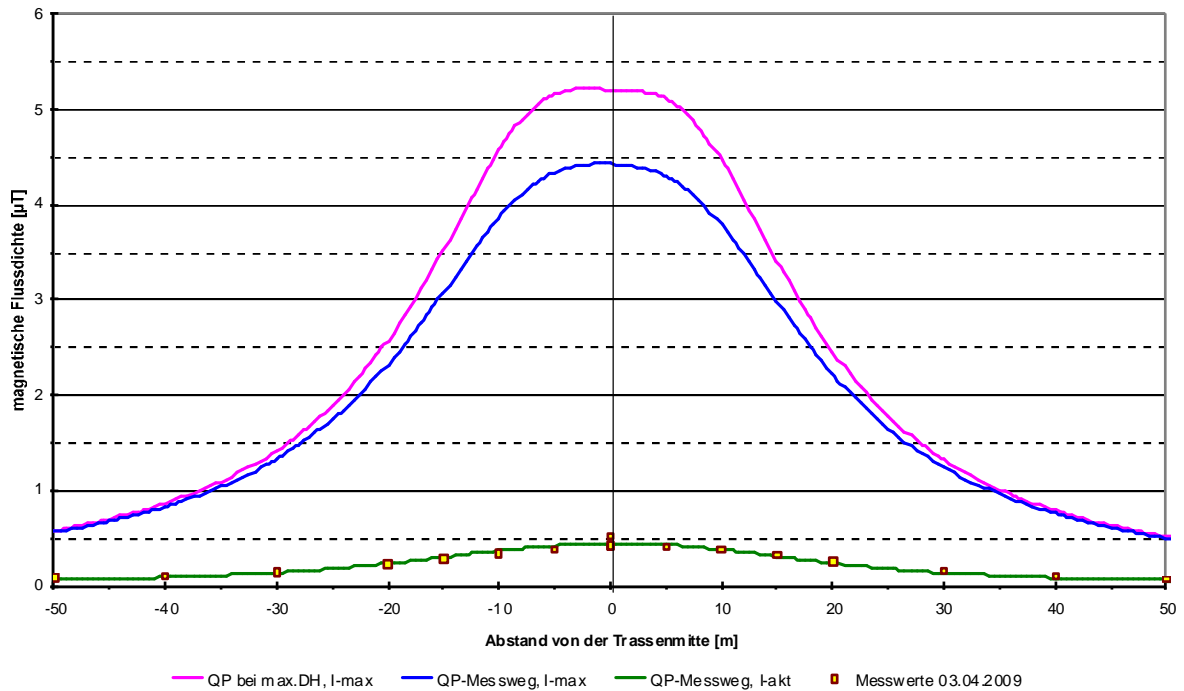


Abbildung 3/180b
110 kV-Freileitung, FL110_2: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/20a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL110_2			B_{\max} [µT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [µT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \text{ µT}$
Messung		Querprofil	0,545	0,084	40
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	0,435	0,060	37
	max. Ströme	max. Durchhang	5,215	0,579	132

Tabelle 3/20b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL110_2			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	0,560	0,041	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	0,512	0,045	111
	max. Ströme	max. Durchhang	0,670	0,046	111

3.2.2.4.3 FL110_3

Spannfeldlänge		L	398,1 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		S R...T	S R...T
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	602 A	602 A
	aktueller Strom	13 A	9 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,max}$	10,0 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,akt}$	11,5 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,5 m
Leiterseilhöhen Mast 1	h_1	25,9 m	
	h_1'	29,9 m	
Leiterseilhöhen Mast 2	h_2	27,8 m	
	h_2'	31,8 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	3,1 m	
	b_1	4,9 m	
	c_1	6,7 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	3,1 m	
	b_2	4,9 m	
	c_2	6,7 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	184,0 m

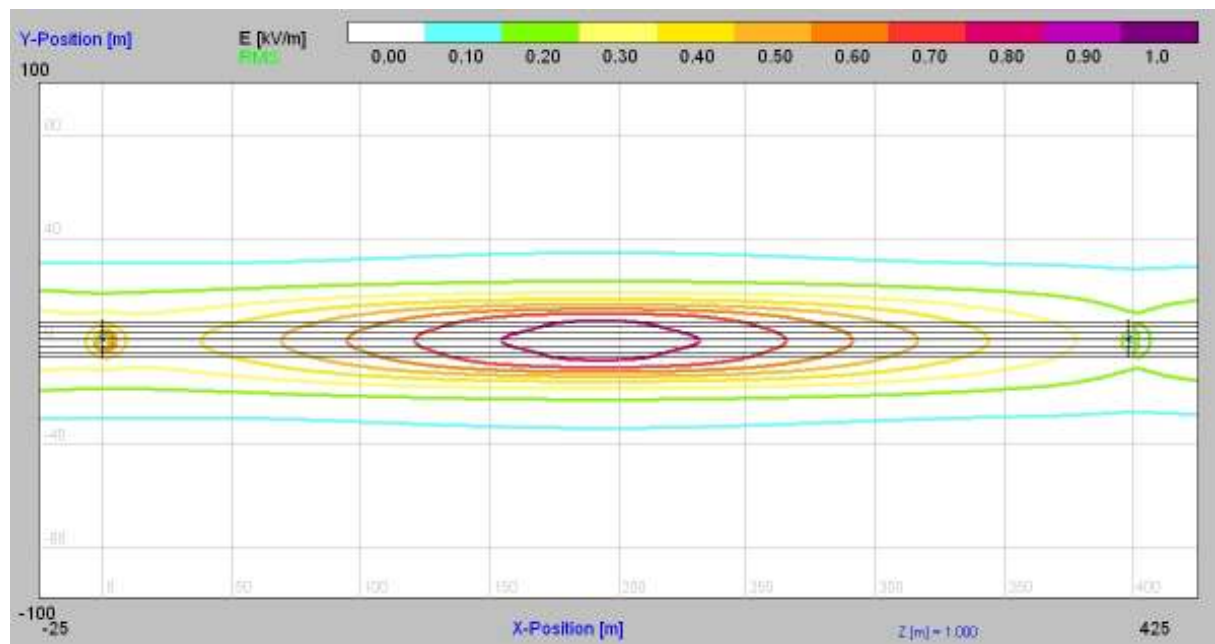


Abbildung 3/181

110 kV-Freileitung, FL110_3: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg etwas rechts von der Mitte (x=184 m) des Spannfeldes

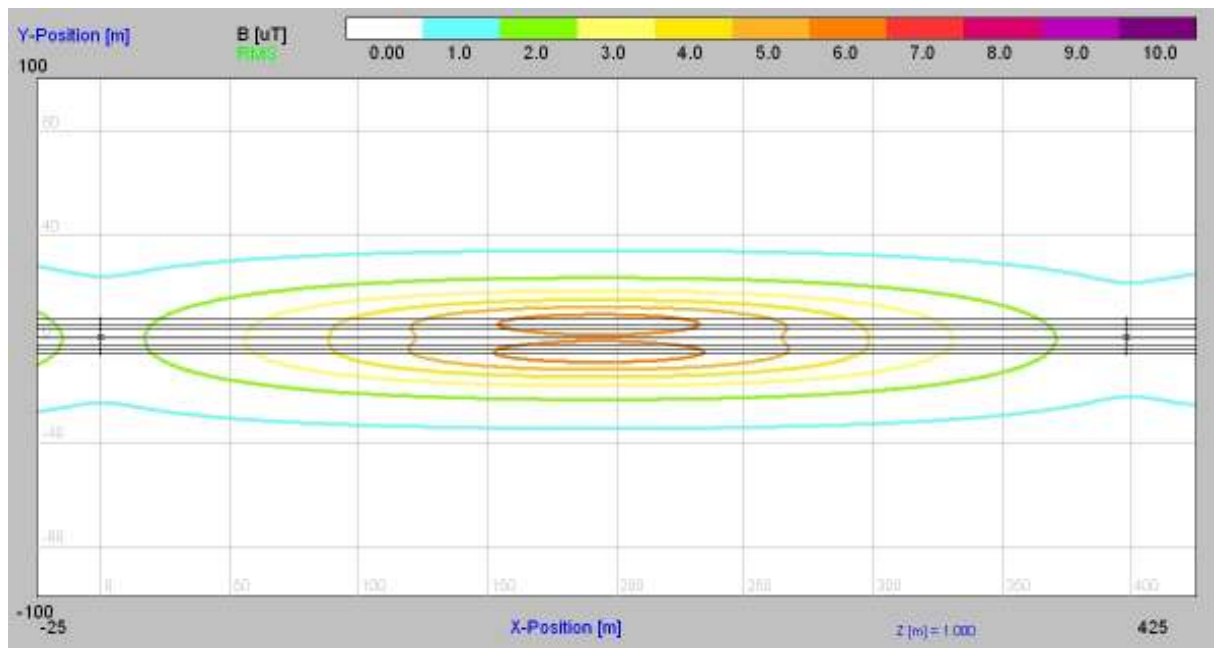


Abbildung 3/182
 110 kV-Freileitung, FL110_3. Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg etwas rechts von der Mitte (bei 184 m) des Spannungsfeldes

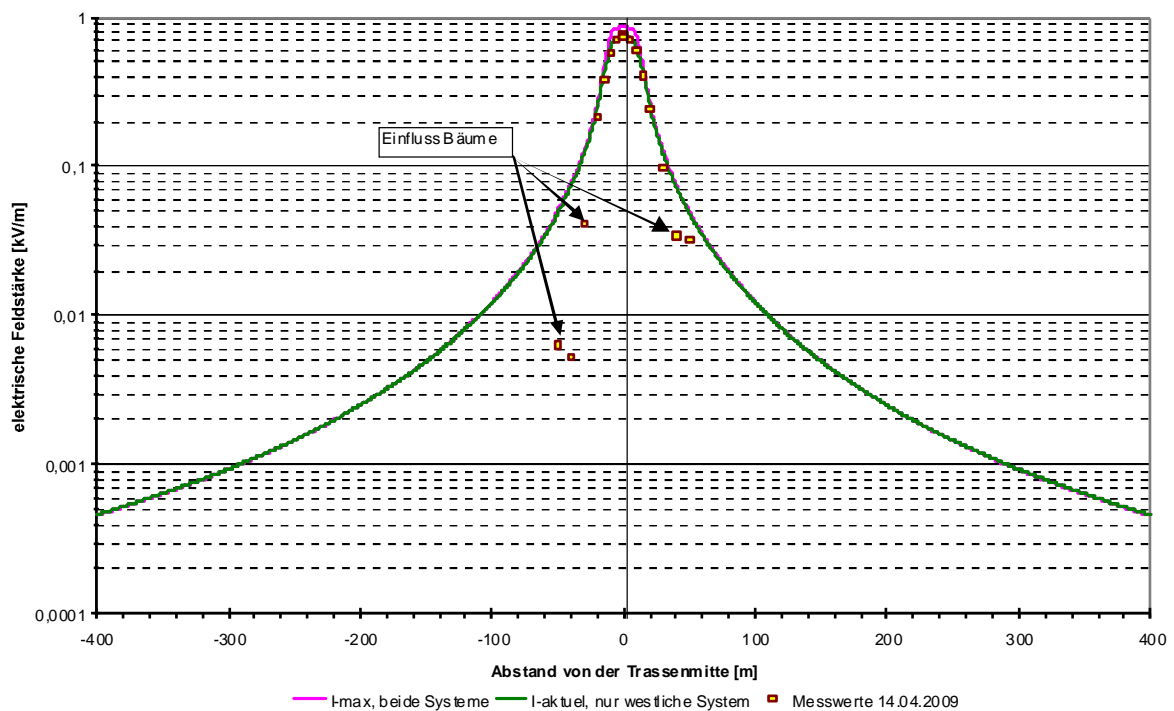


Abbildung 3/183a
 110 kV-Freileitung, FL110_3: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

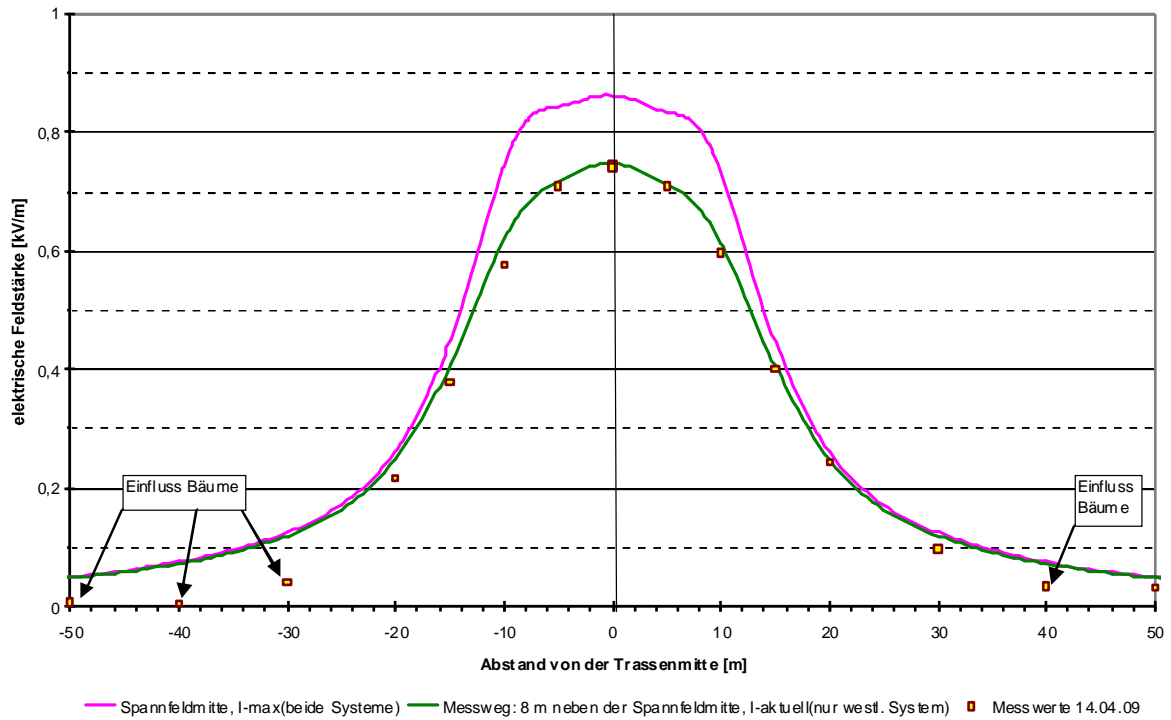


Abbildung 3/183b
 110 kV-Freileitung, FL110_3: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

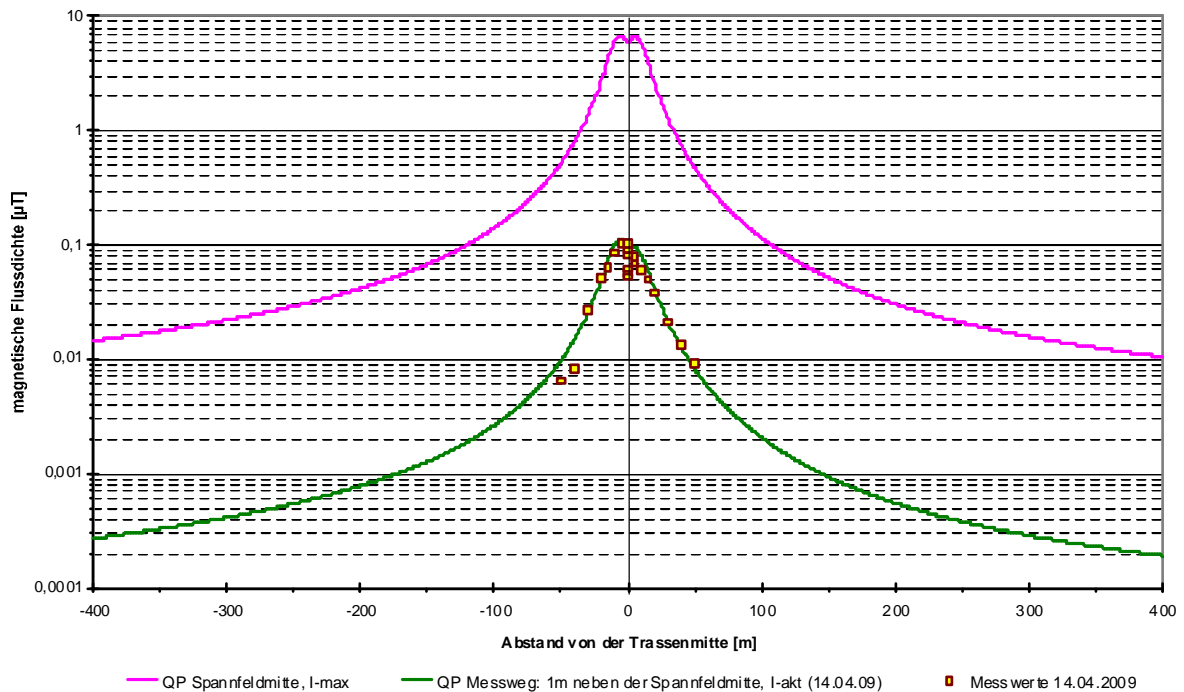


Abbildung 3/184a
 110 kV-Freileitung, FL110_3: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

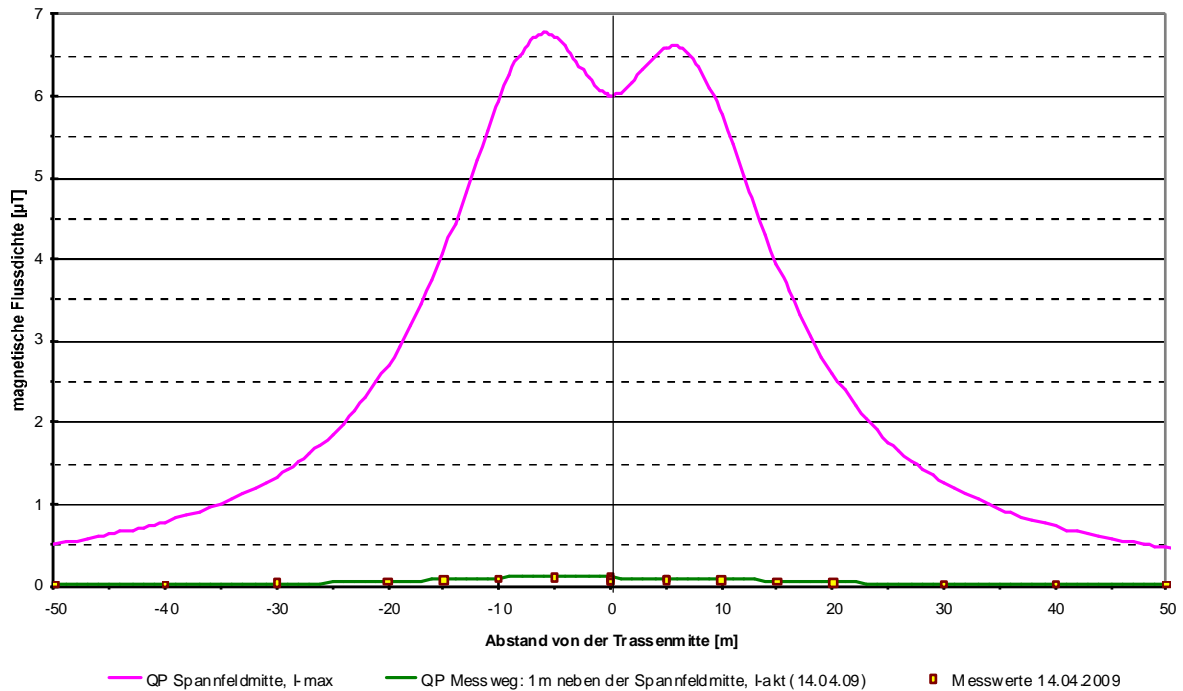


Abbildung 3/184b
110 kV-Freileitung, FL110_3: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/21a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL110_3			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung		Querprofil	0,106	0,009	10
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	0,110	0,010	9
	max. Ströme	max. Durchhang	6,770	0,513	120

Tabelle 3/21b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL110_3			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	0,749	0,032	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	0,747	0,048	109
	max. Ströme	max. Durchhang	0,862	0,050	109

3.2.2.4.4 FL110_4a

110 kV-Freileitung, Donaumastabschnitt			
Spannfeldlänge		L	302,7 m
Phasenbelegung (West / Ost)		S R...T	S R...T
Ströme (West / Ost)	Maximalstrom	481 A	481 A
	aktueller Strom April	50 A	0 A
	August	56 A	0 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min, \max}$	8,8 m
	aktuelle Bedingungen April August	$h_{\min, \text{akt}}$	10,1 m 10,1 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,1 m
Leiterseilhöhen Mast 1		h_1	17,8 m
		h_1'	21,8 m
Leiterseilhöhen Mast 2		h_2	19,8 m
		h_2'	23,8 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1		a_1	3,1 m
		b_1	4,9 m
		c_1	6,7 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2		a_2	3,1 m
		b_2	4,9 m
		c_2	6,7 m
Abstand des Messweges (1) von Mast 1		d_1	143,8 m
Abstand des Messweges (2) von Mast 1		d_2	55,0 m

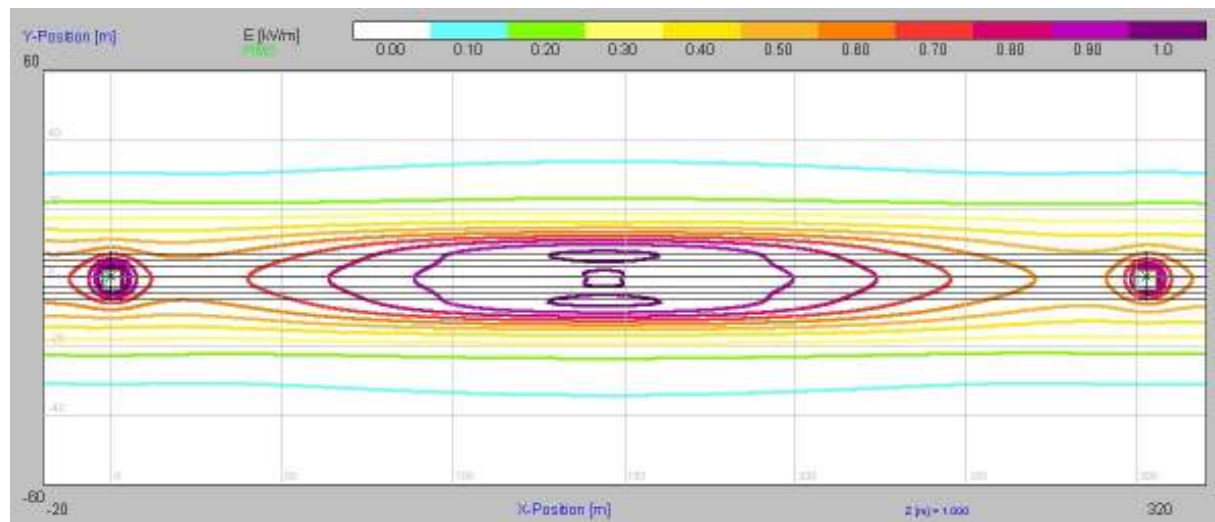


Abbildung 3/185

110 kV-Freileitung, FL110_4a: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg 1 etwa in der Mitte ($x=144$ m) des Spannfeldes, Messweg 2 in der Nähe ($x=55$ m) vom Mast bei $x=0$ m

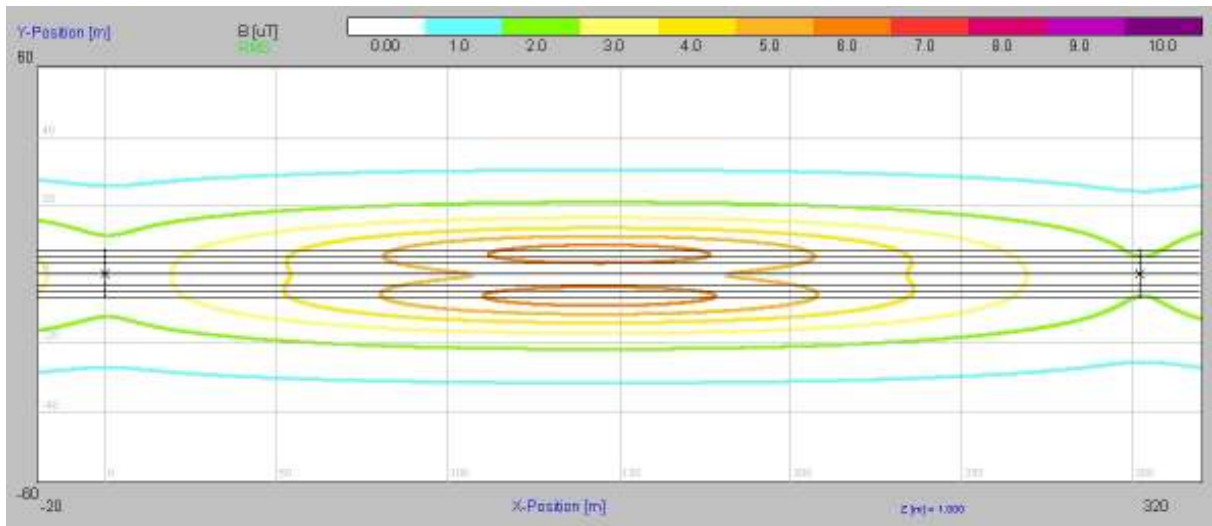


Abbildung 3/186
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg 1 etwa in der Mitte ($x=144$ m) des Spannungsfeldes, Messweg 2 in der Nähe ($x=55$ m) vom Mast bei $x=0$ m

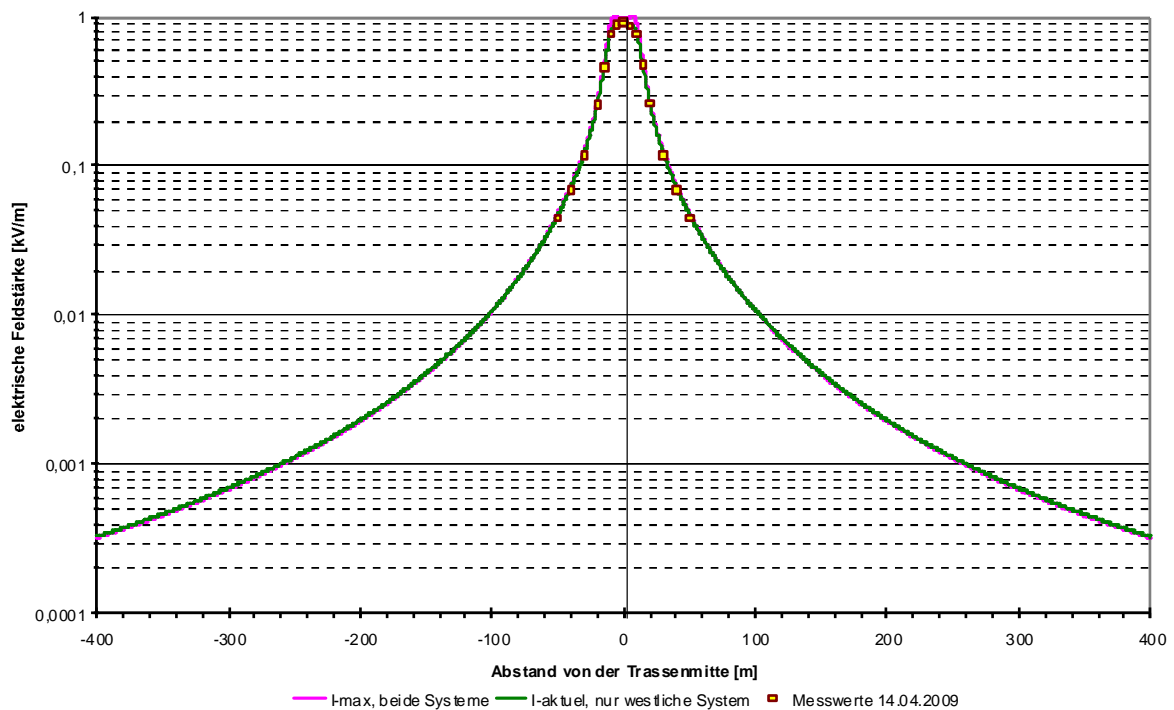


Abbildung 3/187a
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, Messweg 1, April, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

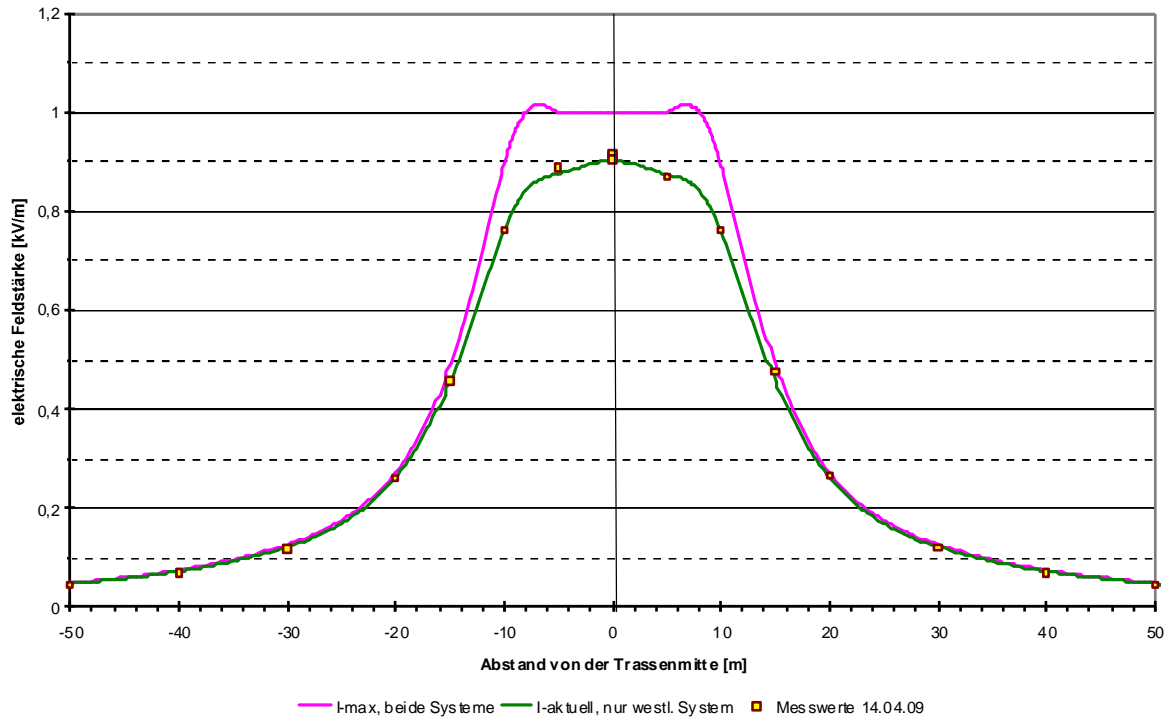


Abbildung 3/187b
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, Messweg 1, April, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

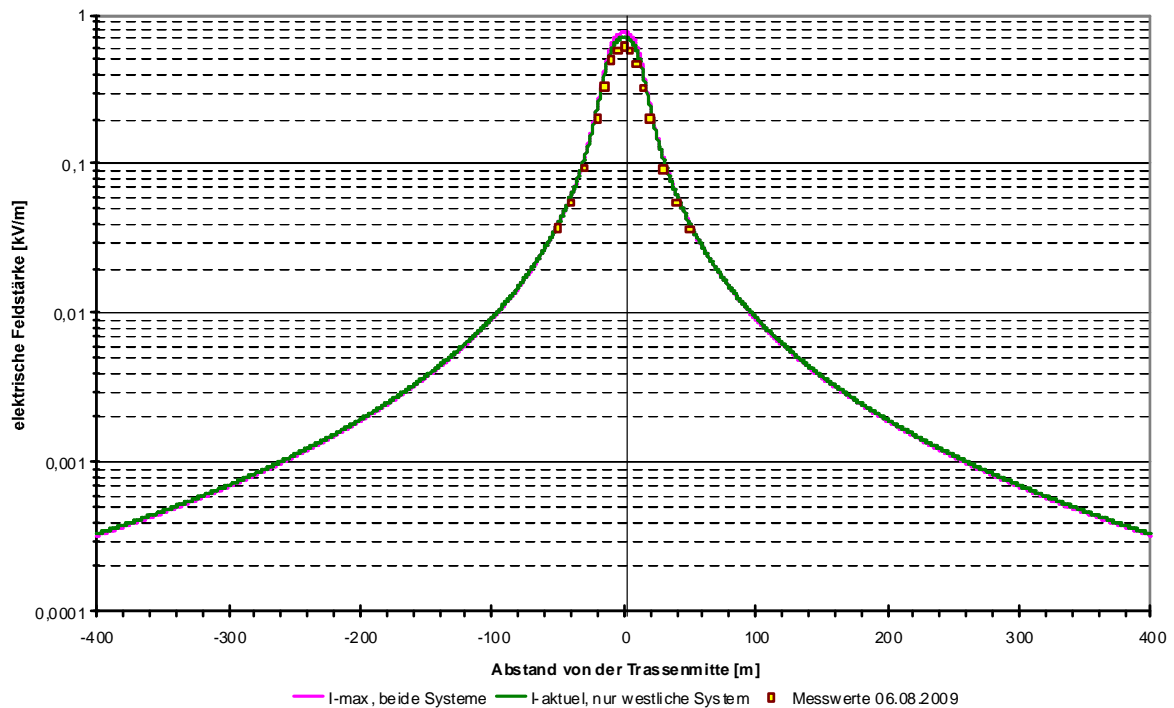


Abbildung 3/188a
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

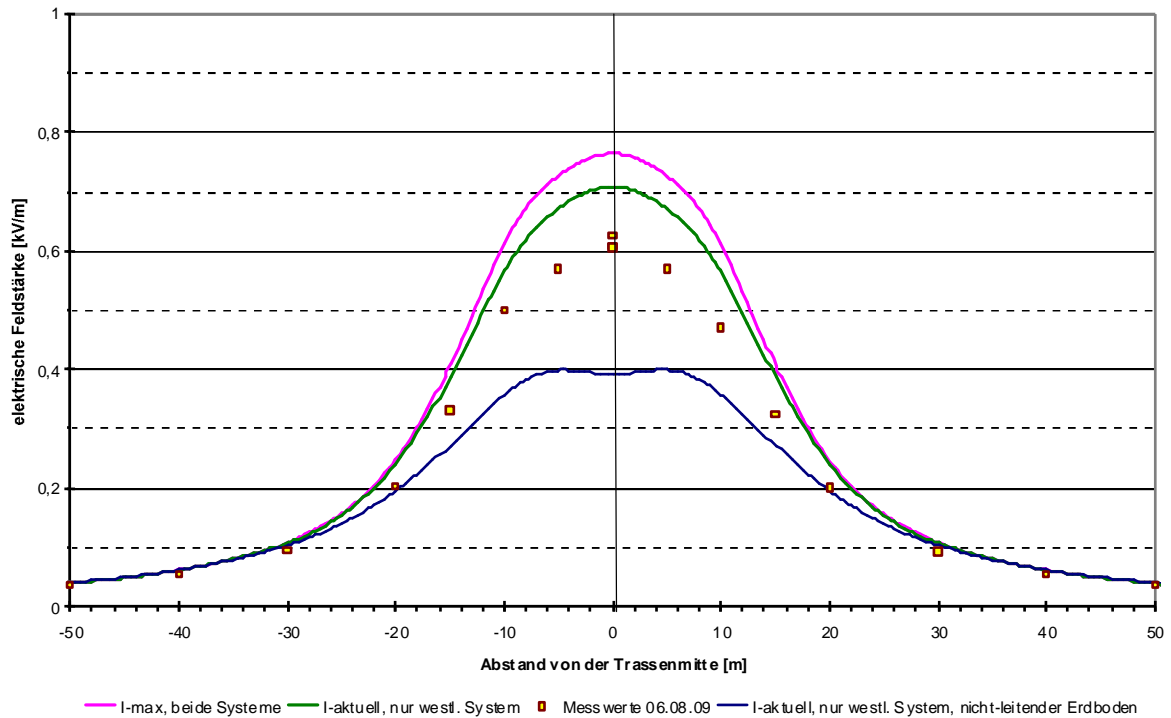


Abbildung 3/188b
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofile der elektrischen Feldstärke, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

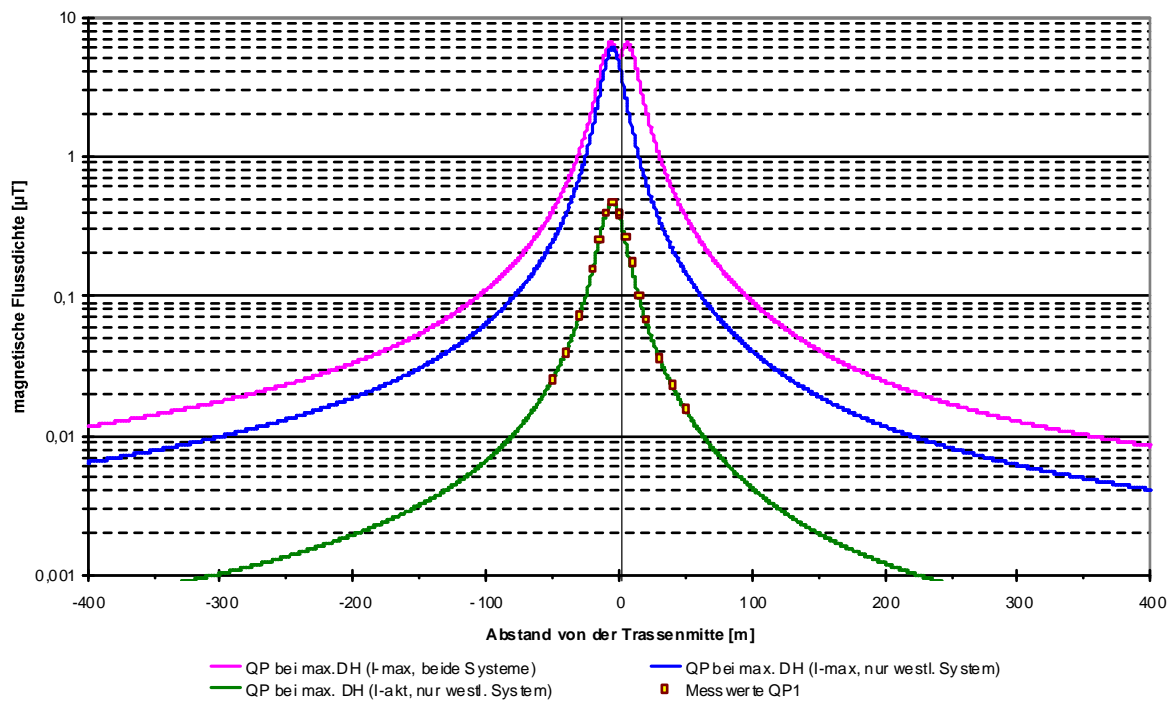


Abbildung 3/189a
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

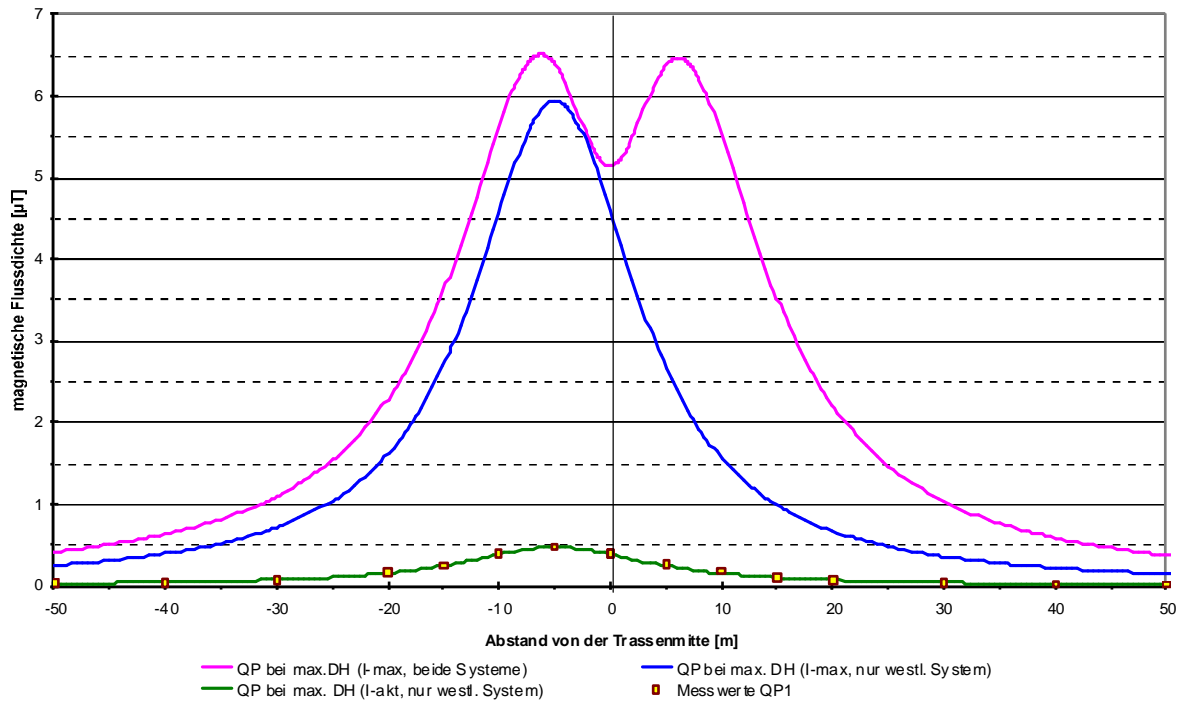


Abbildung 3/189b
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 1, April,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

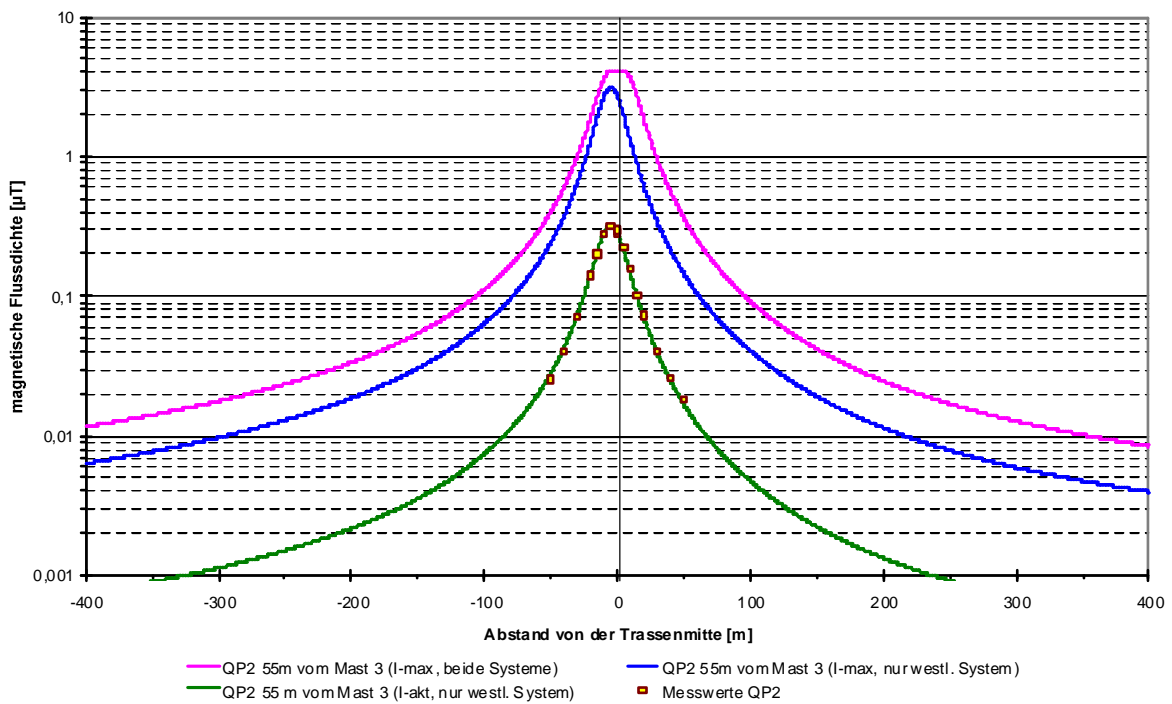


Abbildung 3/190a
 110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 2, August,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

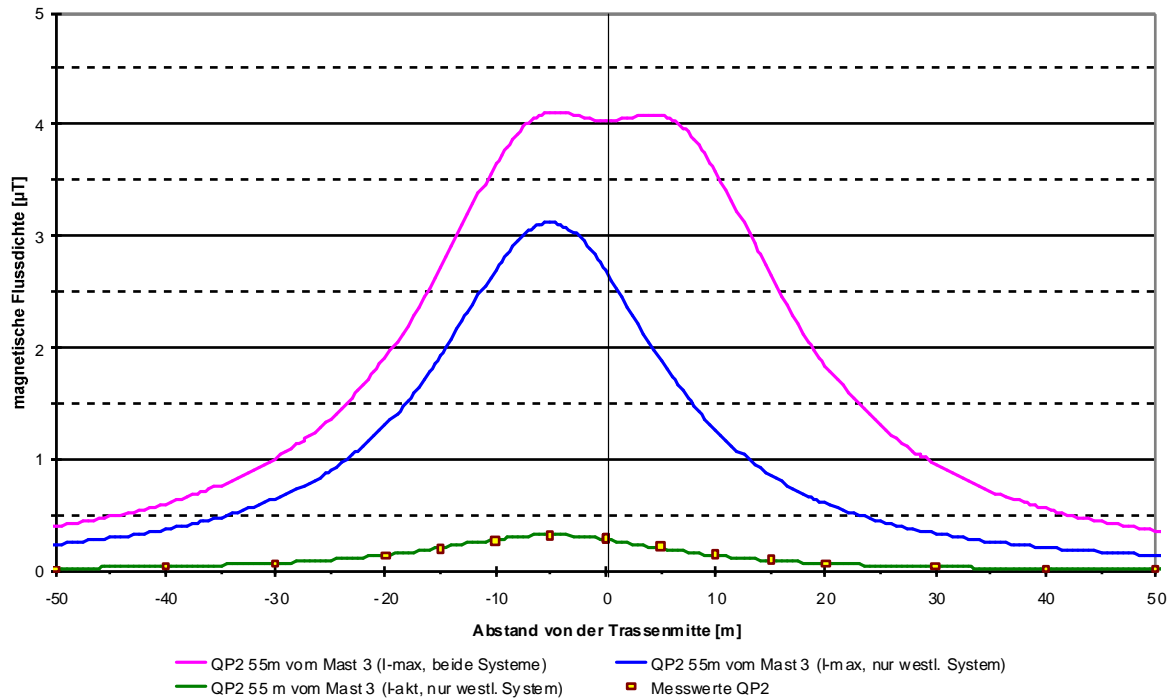


Abbildung 3/190
110 kV-Freileitung, FL110_4a: Querprofile der magnetischen Flussdichte, Messweg 2, August, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/22a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL110_4a			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$	
Messung	Apr.	QP1 (max. Durchhang)	0,475	0,025	20	
	Aug.	QP2 (Mastnähe)	0,324	0,026	20	
Rechnung	akt. Ströme	Apr.	QP1 (max. Durchhang)	0,469	0,026	25
		Aug.	QP2 (Mastnähe)	0,323	0,028	25
	max. Ströme	1 Sys.	max. Durchhang	5,935	0,248	79
		2 Sys.		6,505	0,411	106

Tabelle 3/22b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL110_4a			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$	
Messung	Apr.	QP1 (max. Durchhang)	0,920	0,045	-	
	Aug.	QP2 (Mastnähe)	0,607	0,037	-	
Rechnung	akt. Ströme	Apr.	QP1 (max. Durchhang)	0,901	0,047	103
		Aug.	QP2 (Mastnähe)	0,708	0,040	97
	max. Ströme	max. Durchhang	1,016	0,048	103	

3.2.2.4.5 FL110_4b

110 kV-Freileitung, Einebenenmastabschnitt			
Spannfeldlänge		L	216,4 m
Phasenbelegung (West / Ost)		R ST	R ST
Ströme (West / Ost)	Maximalstrom	481 A	481 A
	aktueller Strom	50 A	0 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min, \max}$	7,5 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min, \text{akt}}$	8,5 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,6 m
Leiterseilhöhen Mast 1		h_1	13,8 m
Leiterseilhöhen Mast 2		h_2	13,8 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	3,1 m	
	b_1	6,4 m	
	c_1	9,7 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	3,1 m	
	b_2	6,4 m	
	c_2	9,7 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	108,0 m

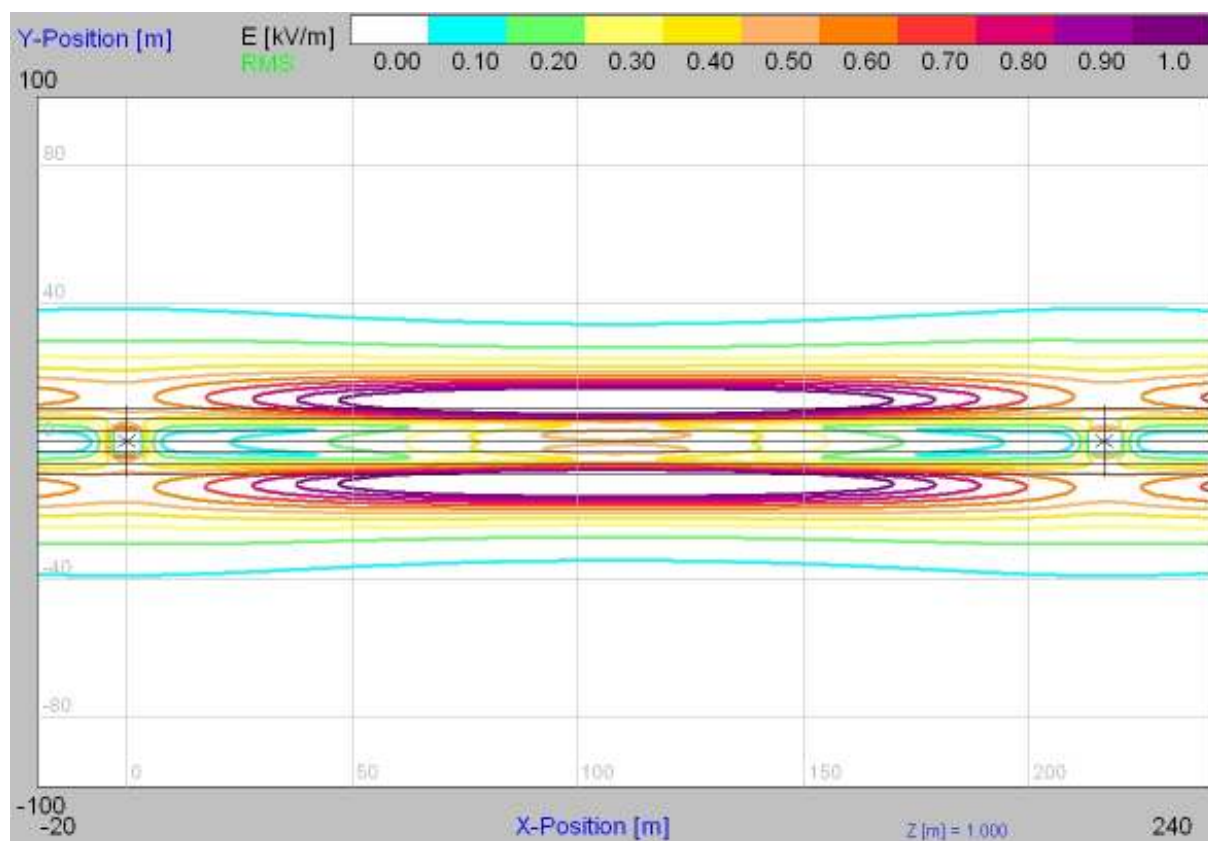


Abbildung 3/191
 110 kV-Freileitung, FL110_4b: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg in der Mitte ($x=108$ m) des Spannfeldes

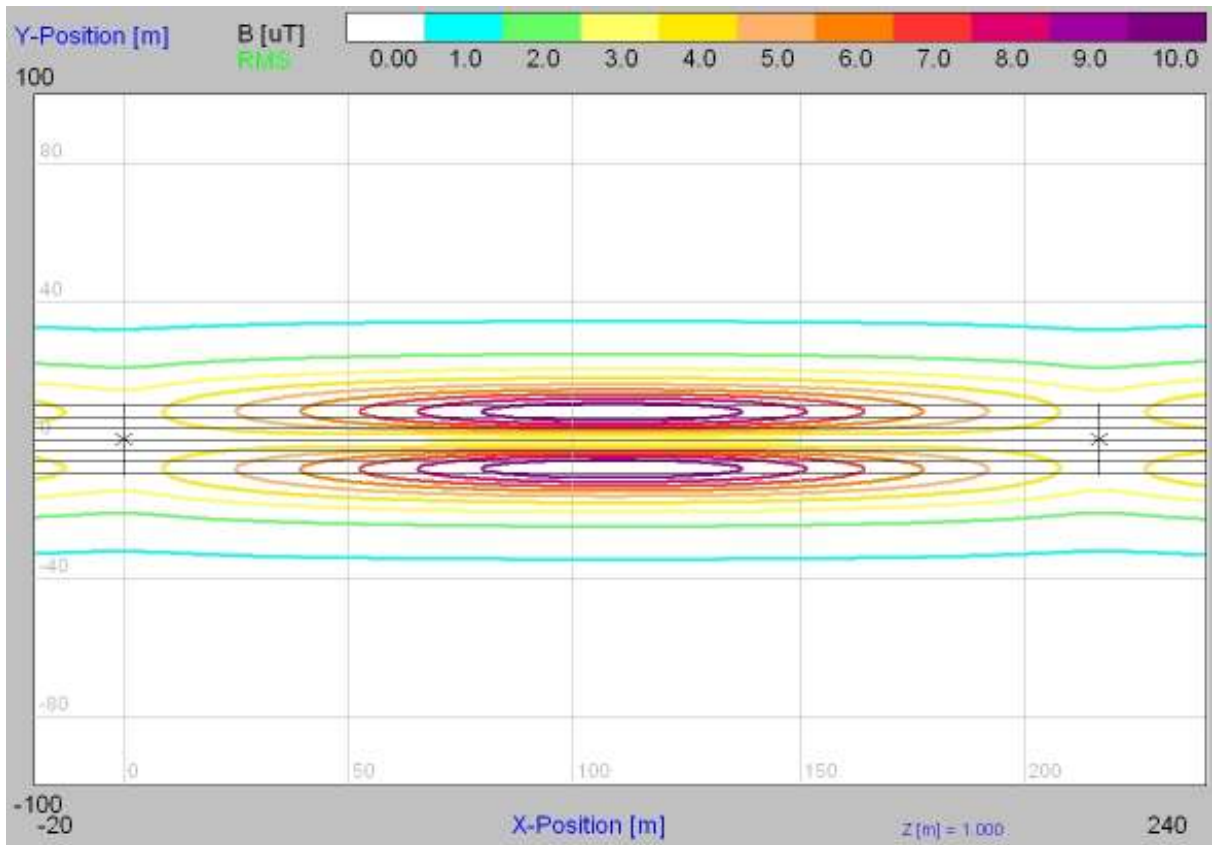


Abbildung 3/192

110 kV-Freileitung, FL110_4b: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg in der Mitte (x=108 m) des Spannungsfeldes

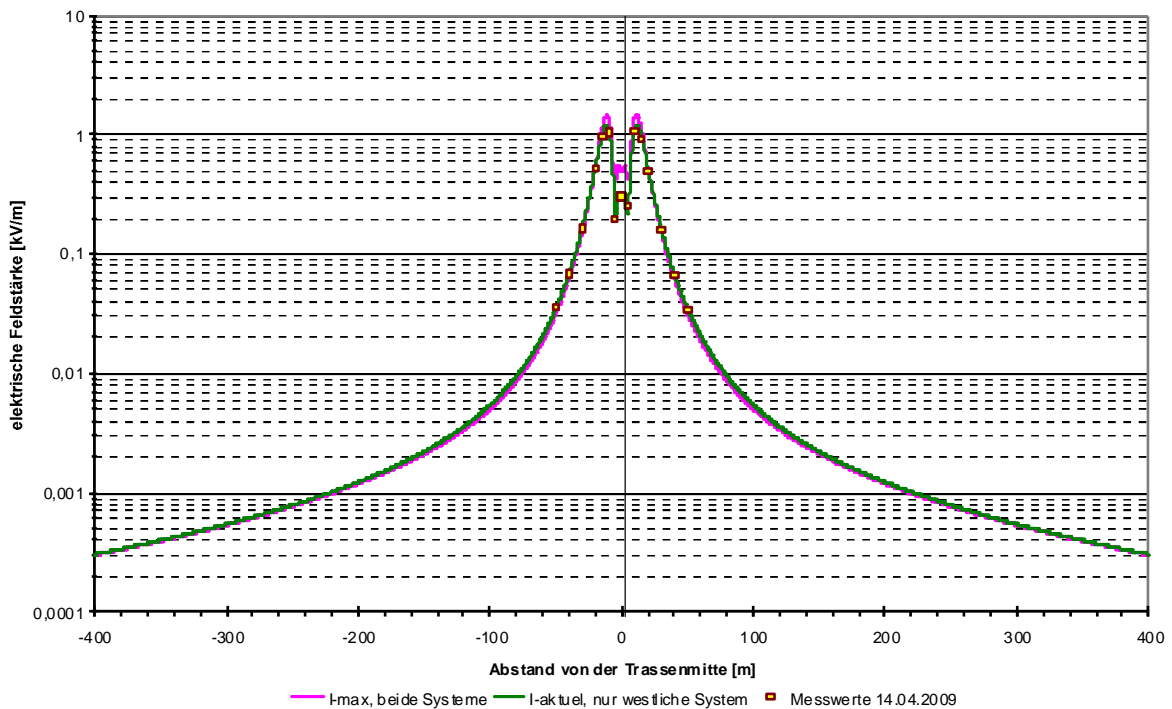


Abbildung 3/193a

110 kV-Freileitung, FL110_4b: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

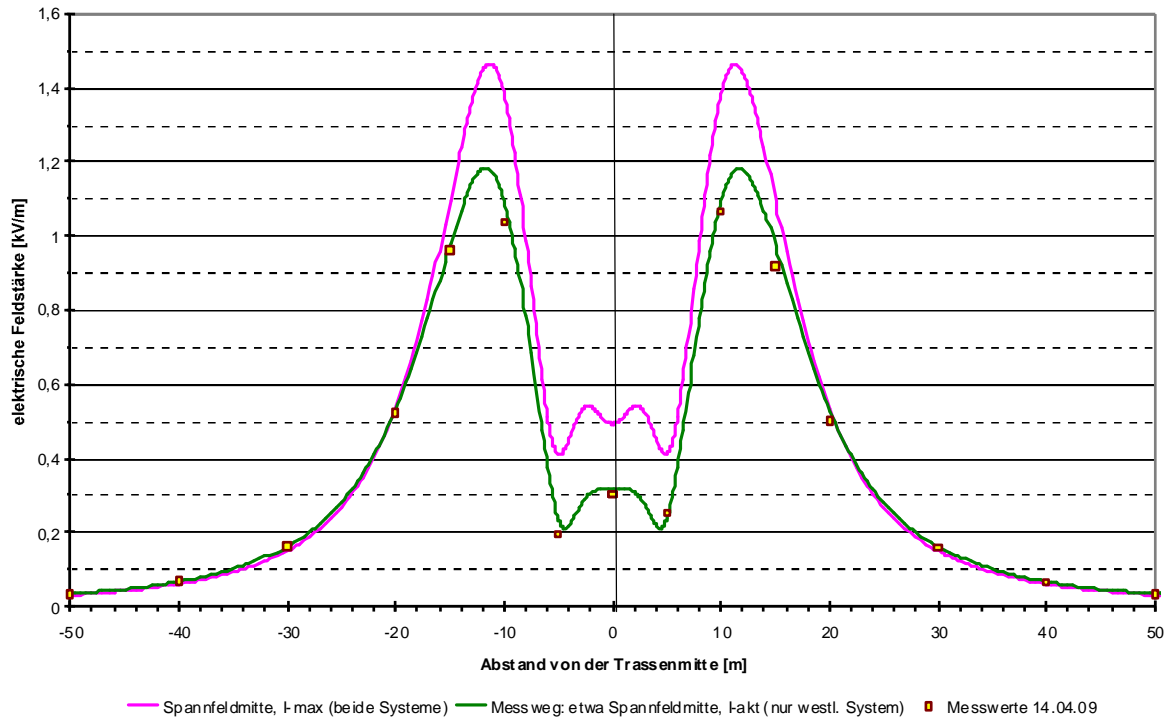


Abbildung 3/193b
 110 kV-Freileitung, FL110_4b: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

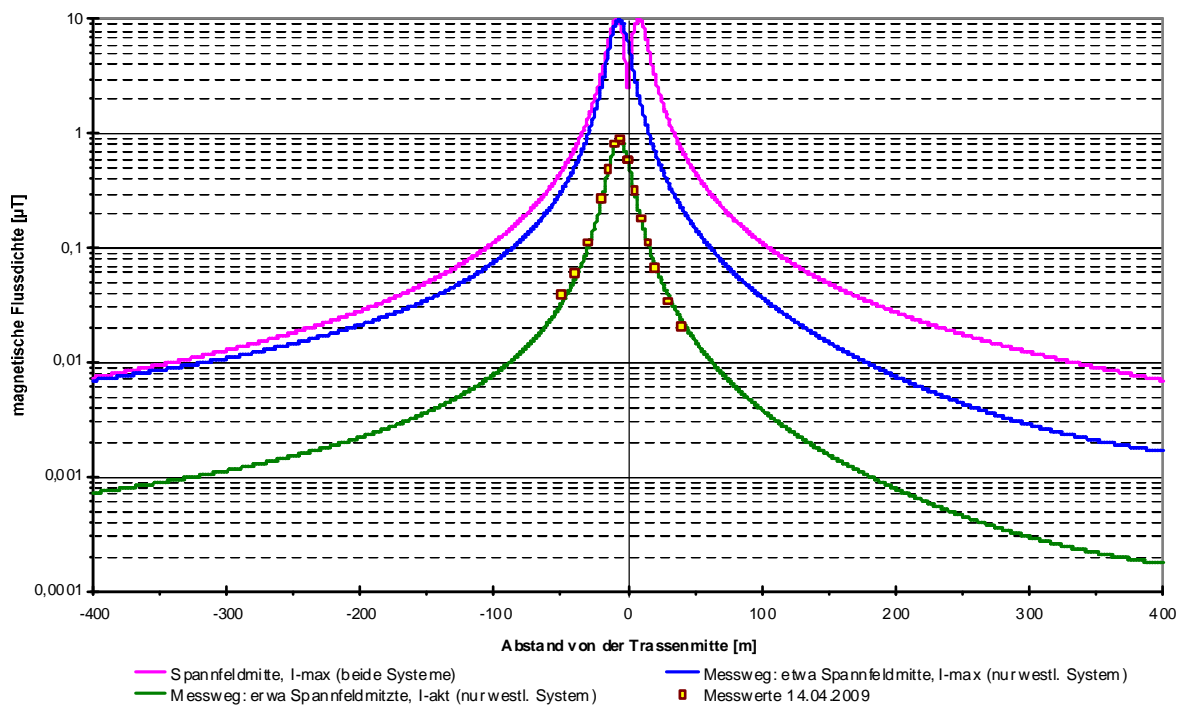


Abbildung 3/194a
 110 kV-Freileitung, FL110_4b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

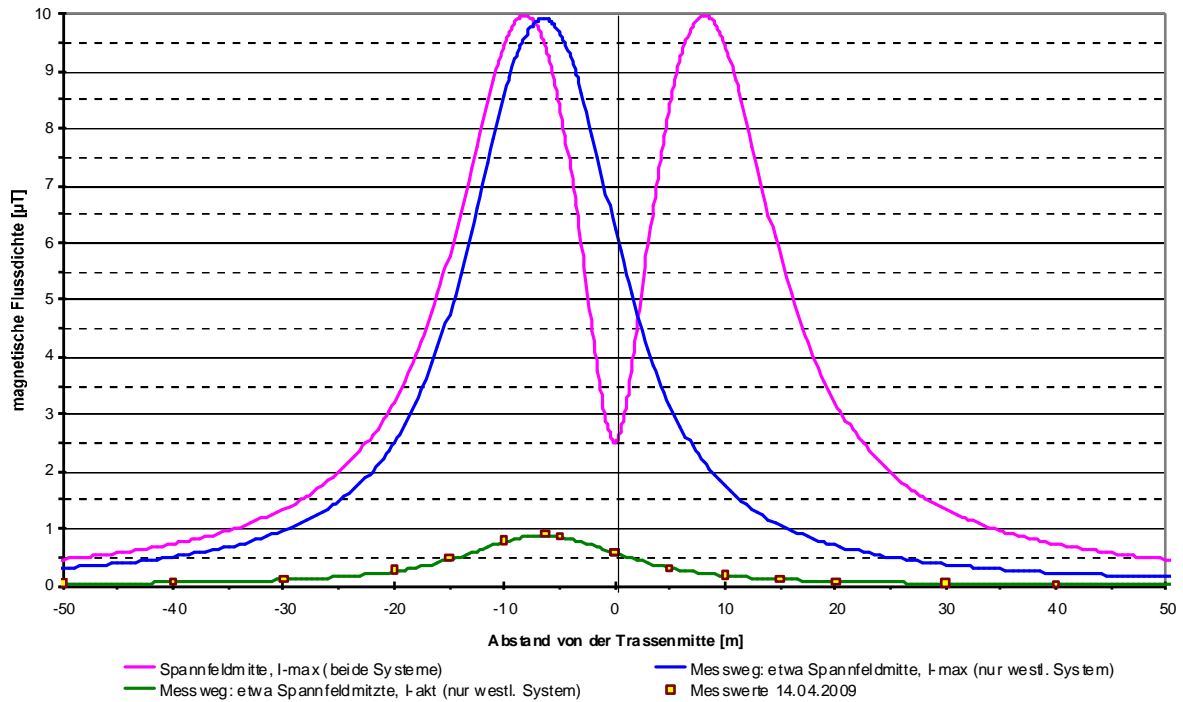


Abbildung 3/194b
110 kV-Freileitung, FL110_4b: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/23a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL110_4b			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung		Querprofil	0,934	0,039	30
Rechnung	akt. Ströme	1 Sys.	0,869	0,032	30
	max. Ströme	1 Sys.	9,925	0,309	86
		2 Sys.	9,977	0,459	106

Tabelle 3/23b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL110_4b			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	1,067	0,035	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	1,183	0,035	78
	max. Ströme	max. Durchhang	1,464	0,032	75

3.2.2.4.6 FL110_5

Spannfeldlänge		L	280,2 m
Phasenbelegung (West / Ost)		R T S	S R T
Ströme (West / Ost)	Maximalstrom	590 A	590 A
	aktueller Strom	155 A	200 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,max}$	7,0 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,akt}$	8,2 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	1,2 m
Leiterseilhöhen Mast 1		h_1	16,0 m
Leiterseilhöhen Mast 2		h_2	16,0 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	2,6 m	
	b_1	5,5 m	
	c_1	8,4 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	2,6 m	
	b_2	5,5 m	
	c_2	8,4 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	133,0 m

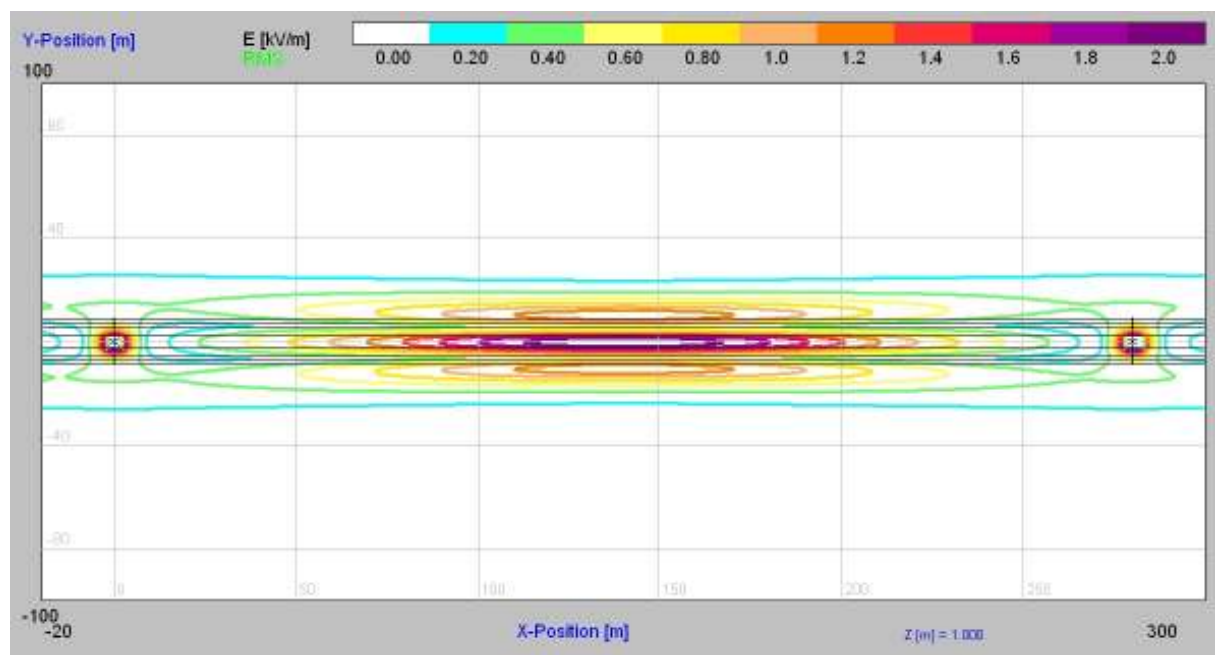


Abbildung 3/195
 110 kV-Freileitung, FL110_5: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg etwas links von der Mitte ($x=133$ m) des Spannfeldes

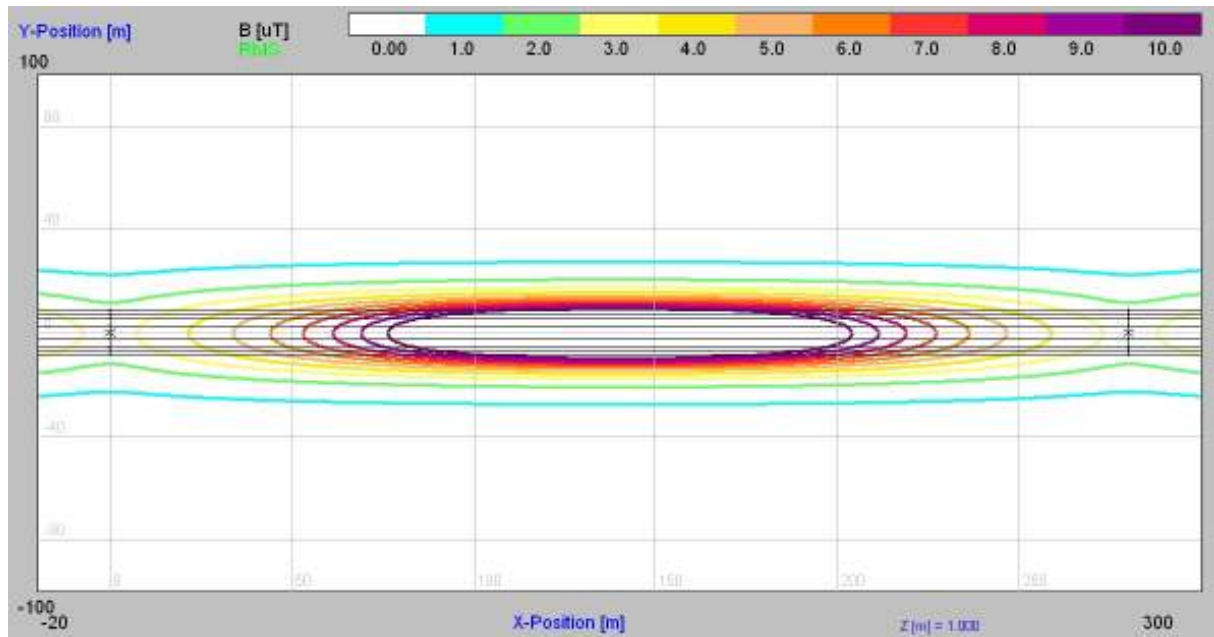


Abbildung 3/196
 110 kV-Freileitung, FL110_5: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg etwas links von der Mitte (x=133 m) des Spannungsfeldes

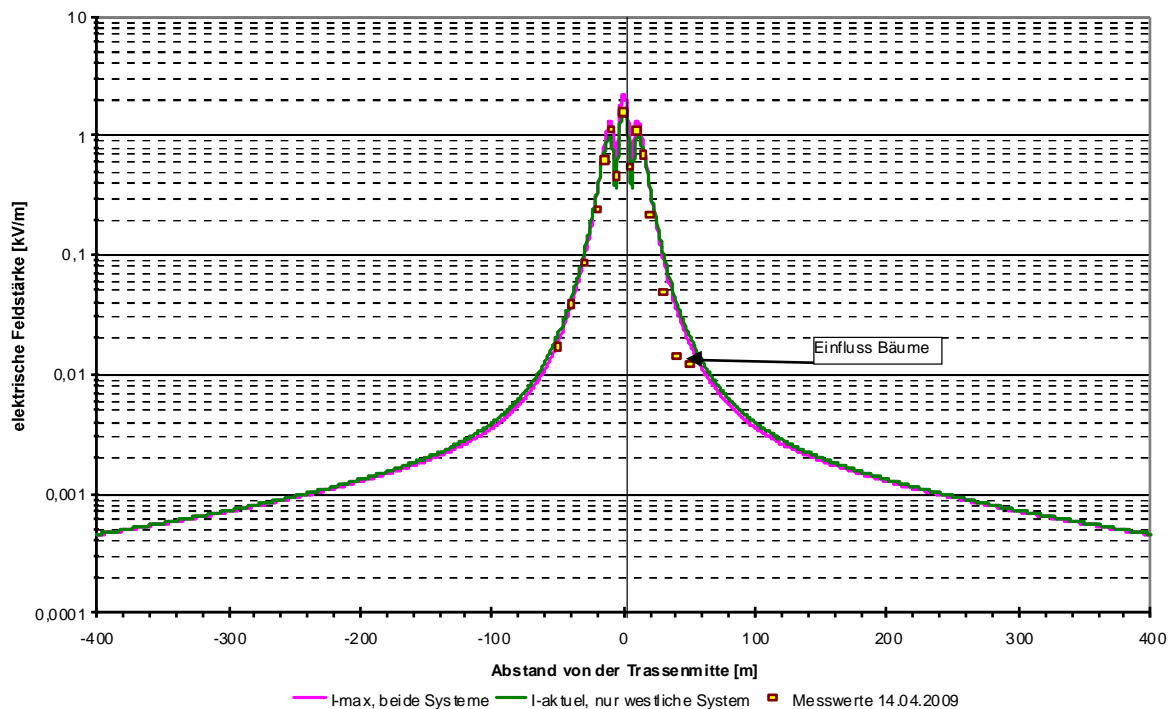


Abbildung 3/197a
 110 kV-Freileitung, FL110_5: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

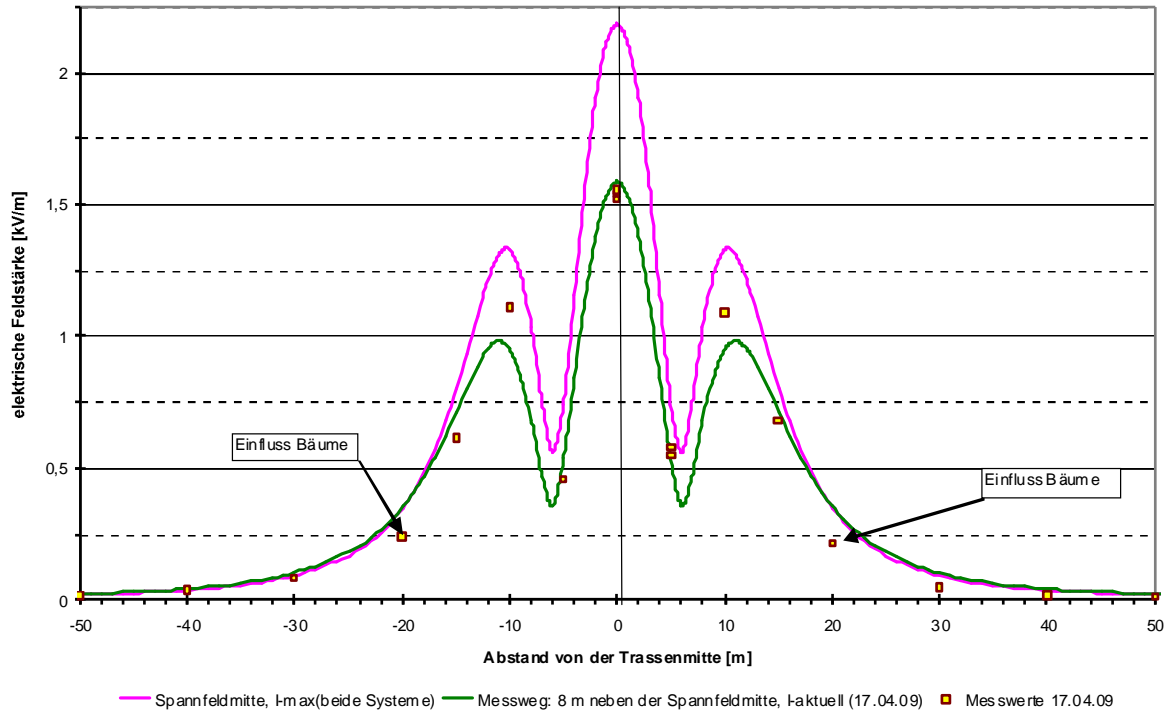


Abbildung 3/197b
 110 kV-Freileitung, FL110_5: Querprofile der elektrischen Feldstärke,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

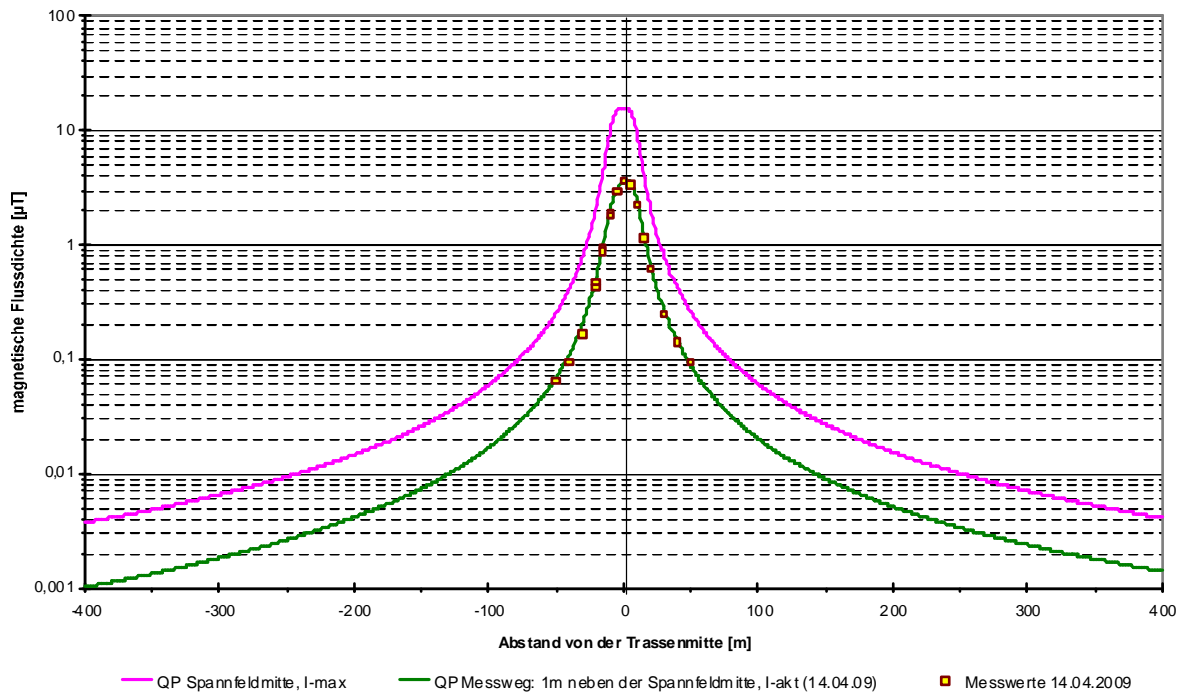


Abbildung 3/198a
 110 kV-Freileitung, FL110_5: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

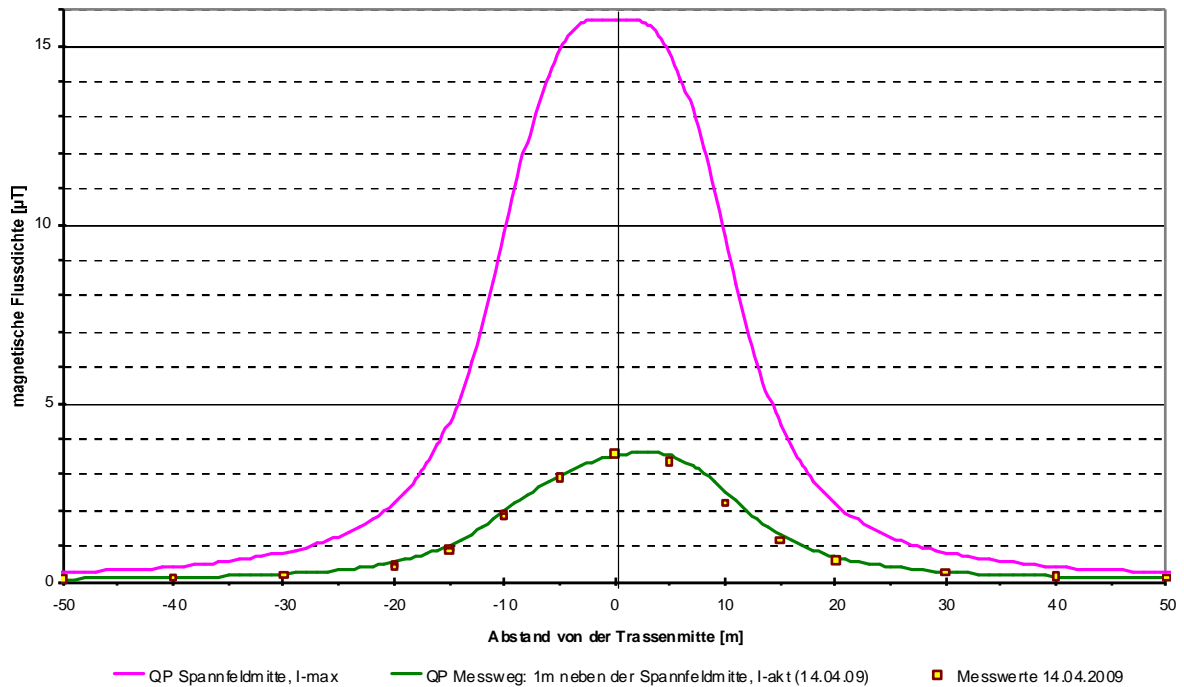


Abbildung 3/198b
 110 kV-Freileitung, FL110_5: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/24a
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL110_5			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung		Querprofil	4,103	0,095	40
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	3,641	0,086	46
	max. Ströme	max. Durchhang	15,754	0,256	78

Tabelle 3/24b
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL110_5			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	1,560	0,017	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	1,586	0,021	65
	max. Ströme	max. Durchhang	2,183	0,018	62

3.2.2.4.7 FL110_6

Spannfeldlänge	L	284,0 m
Phasenbelegung (West / Ost)	R S T	T R S
während der Messung bestand eine Phasendifferenz von 180° zwischen den Strömen auf den beiden Systemen		
Ströme (West / Ost)	Maximalstrom	645 A
	aktueller Strom	162 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min, \max}$ 11,3 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min, \text{akt}}$ 13,0 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2	Δh	2,2 m
Leiterseilhöhen Mast 1	h_1	22,6 m
Leiterseilhöhen Mast 2	h_2	18,7 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	3,3 m
	b_1	6,4 m
	c_1	9,5 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	3,3 m
	b_2	6,4 m
	c_2	9,5 m
Abstand des Messweges von Mast 1	d_1	143,0 m

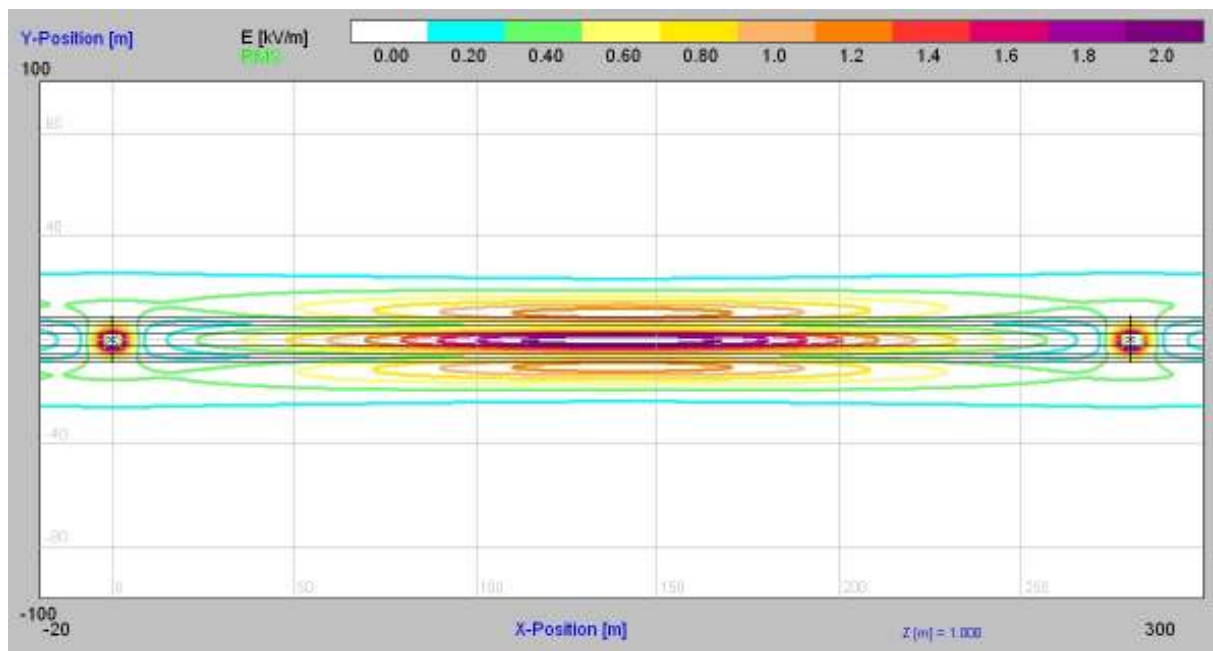


Abbildung 3/199
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg etwa in der Mitte ($x=143$ m) des Spannfeldes

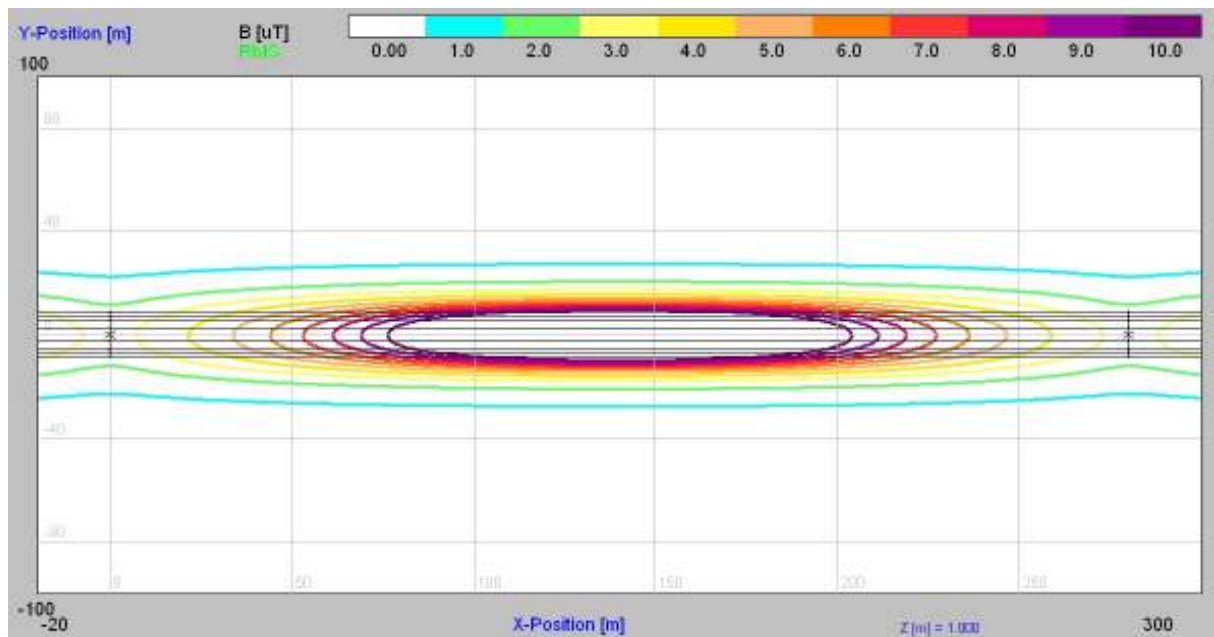


Abbildung 3/200
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg etwa in der Mitte (x=143 m) des Spannfeldes

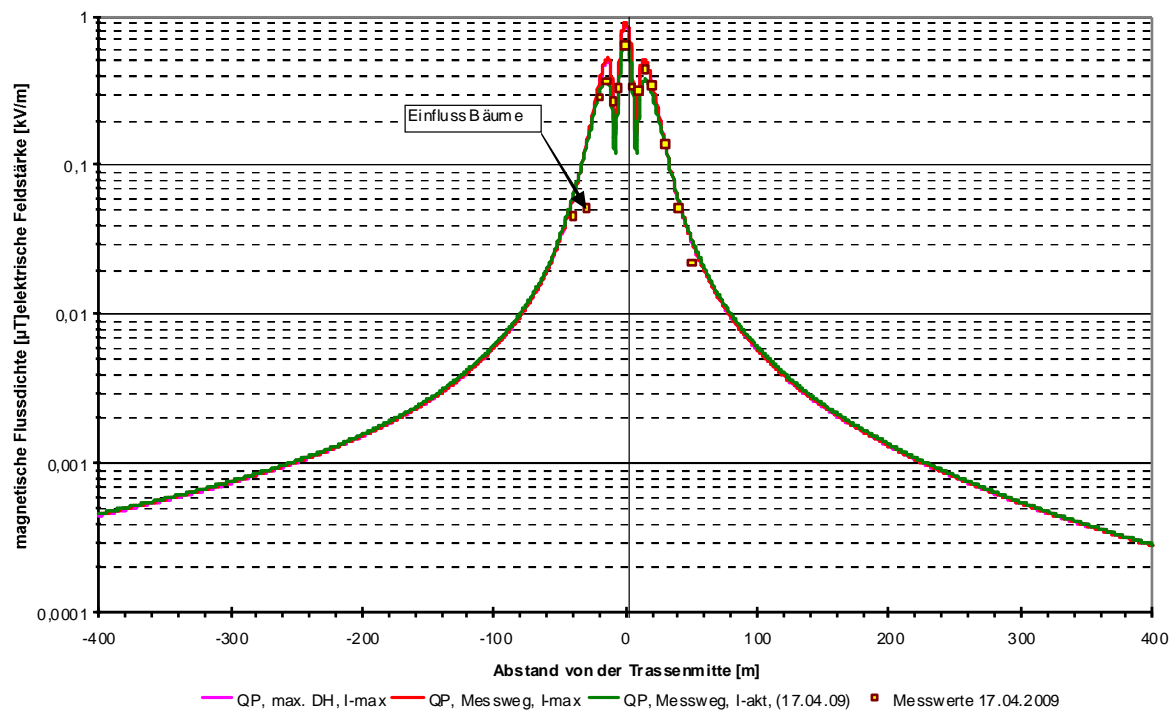


Abbildung 3/201a
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

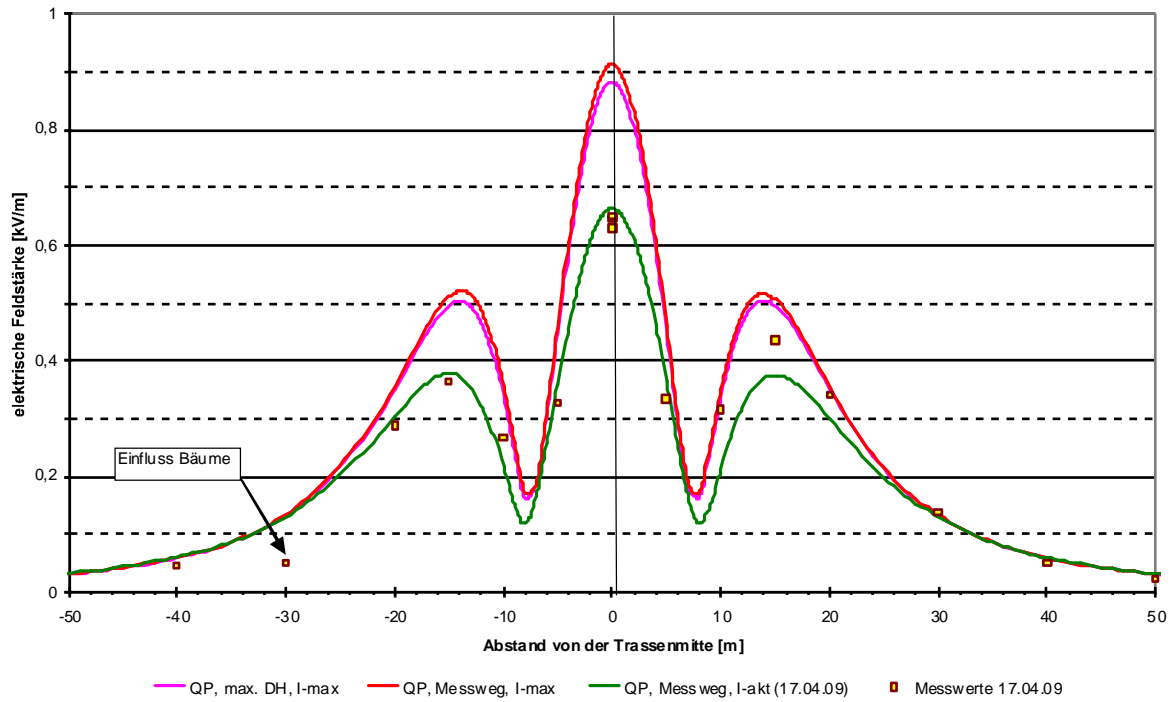


Abbildung 3/201b
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Querprofile der elektrischen Feldstärke,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

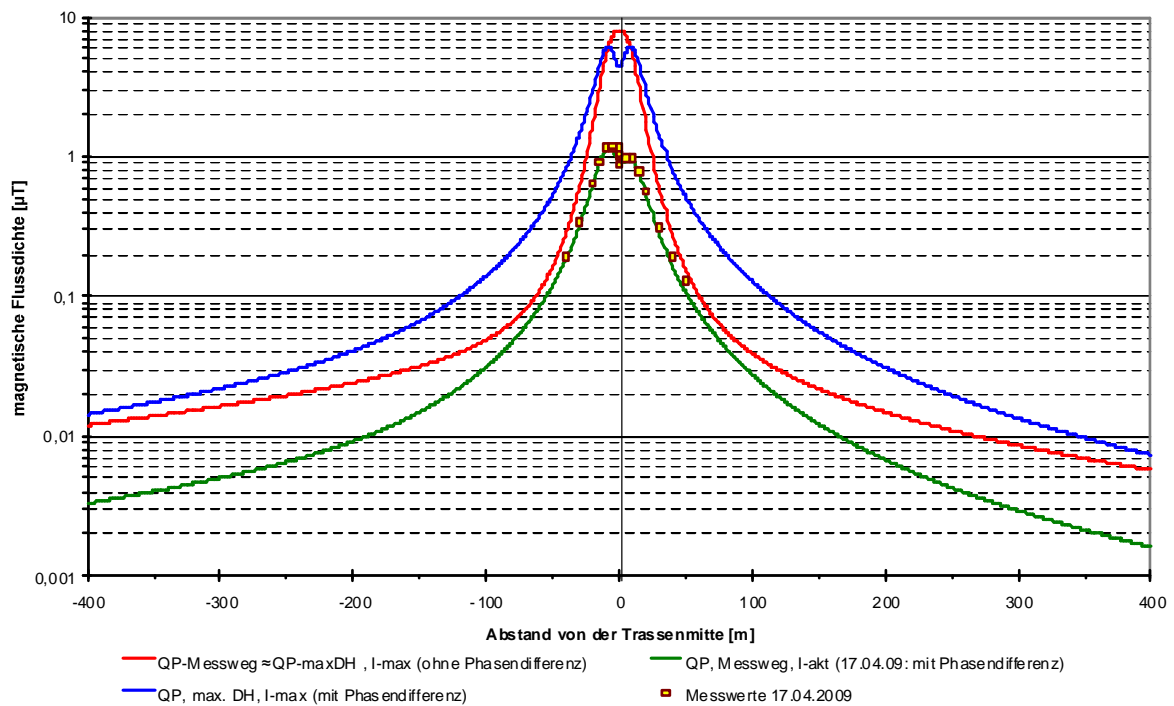


Abbildung 3/202a
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

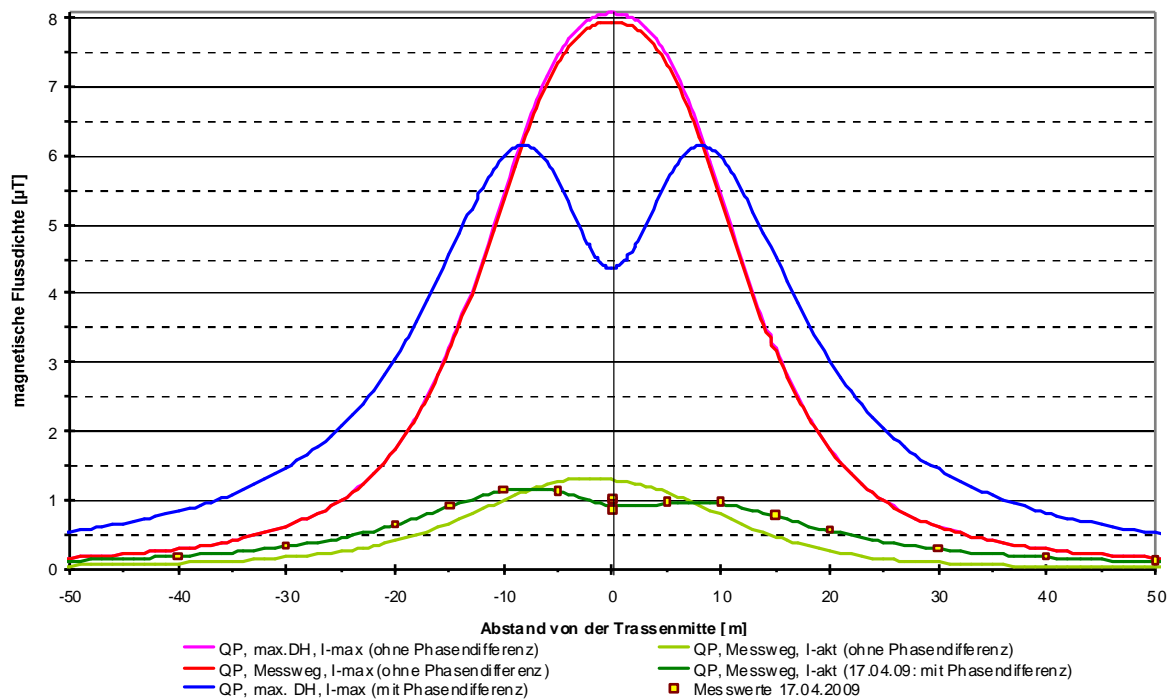


Abbildung 3/202b
 110 kV-Freileitung, FL110_6: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/25a
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL110_6			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung		Querprofil	1,238	0,194	-
Rechnung	akt. Ströme	mit $\Delta\varphi$	1,172	0,121	54
		ohne $\Delta\varphi$	1,309	0,050	37
	max. Ströme	mit $\Delta\varphi$	6,151	0,538	119
		ohne $\Delta\varphi$	8,069	0,165	63

Tabelle 3/25b
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL110_6			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	0,652	0,046	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	0,664	0,033	80
	max. Ströme	max. Durchhang	0,883	0,032	79

3.2.2.4.8 FL110_7

Spannfeldlänge		L	240,2 m
Phasenbelegung (Süd / Nord)		S R...T	S R...T
Ströme (Süd / Nord)	Maximalstrom	547 A	547 A
	aktueller Strom	161 A	0 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,\max}$	9,7 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,\text{akt}}$	10,8 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,1 m
Leiterseilhöhen Mast 1		h_1	17,7 m
		h_1'	21,7 m
Leiterseilhöhen Mast 2		h_2	15,7 m
		h_2'	19,7 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1		a_1	3,1 m
		b_1	4,9 m
		c_1	6,7 m
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2		a_2	3,1 m
		b_2	4,9 m
		c_2	6,7 m
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	120,0 m

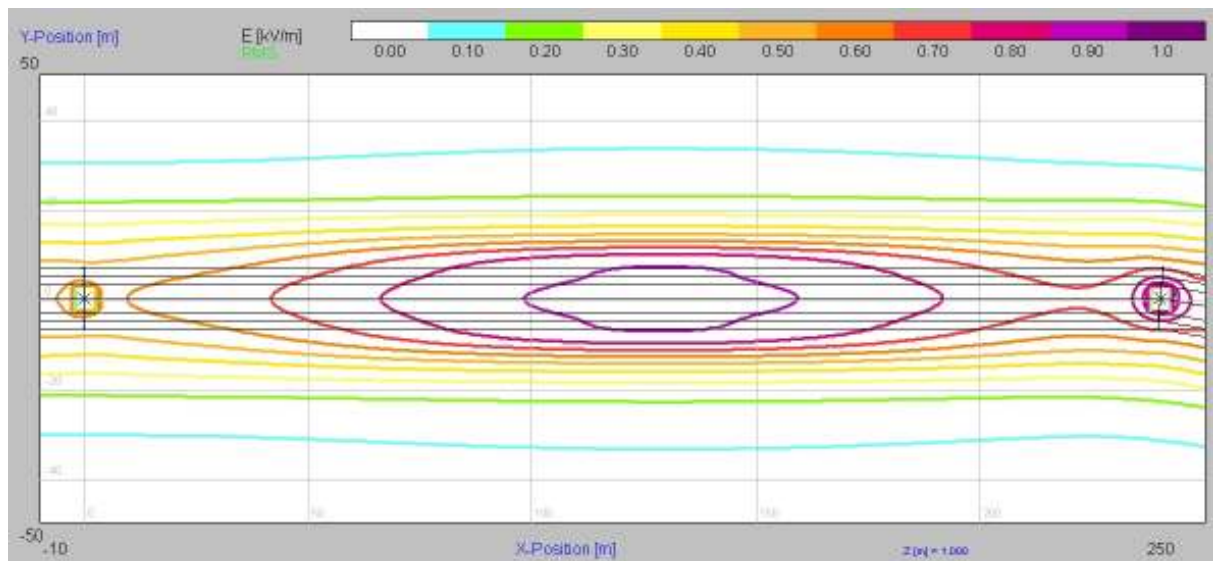


Abbildung 3/203
110 kV-Freileitung, FL110_7: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Messweg in der Mitte ($x=120$ m) des Spannfeldes

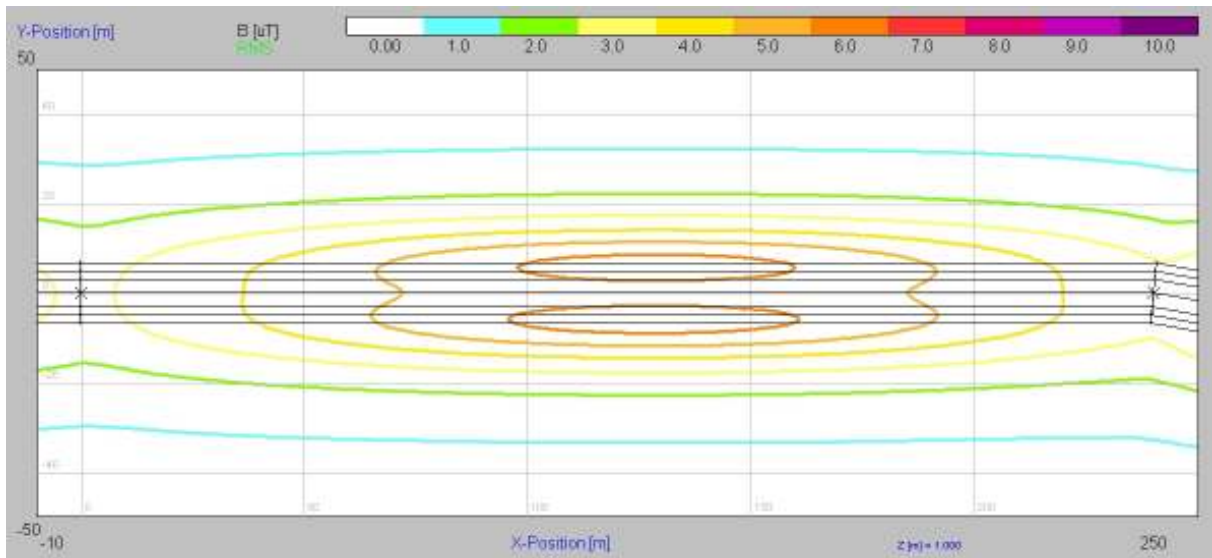


Abbildung 3/204

110 kV-Freileitung, FL110_7: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Messweg in der Mitte ($x=120$ m) des Spannungsfeldes

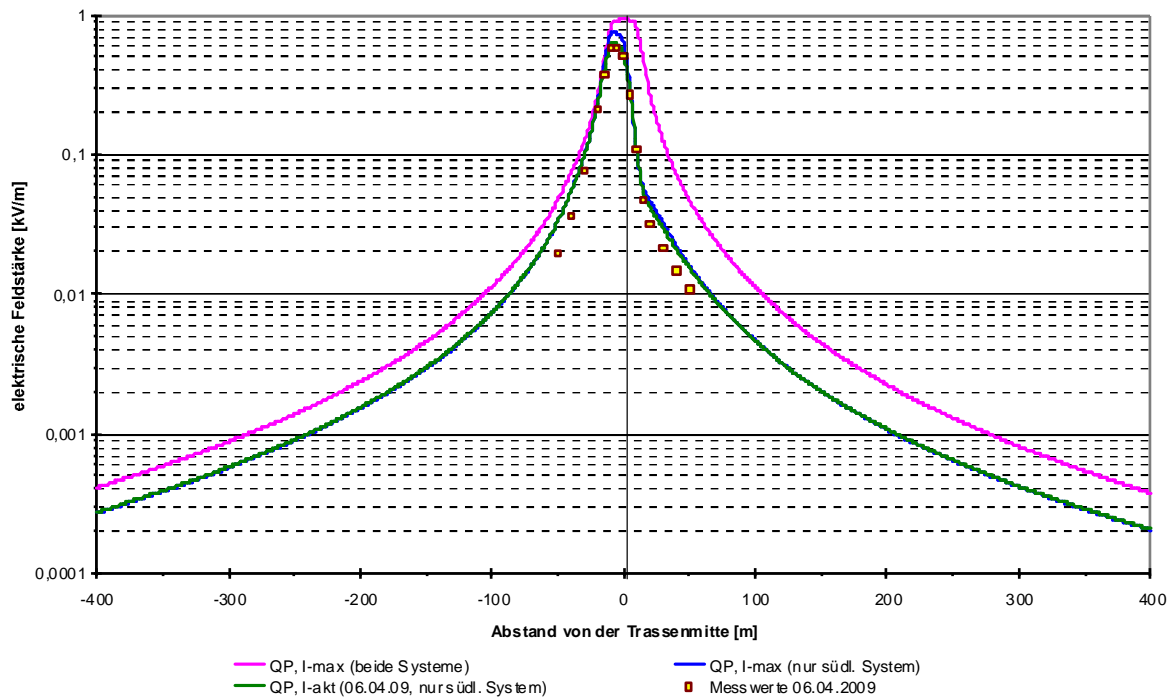


Abbildung 3/205a

110 kV-Freileitung, FL110_7: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

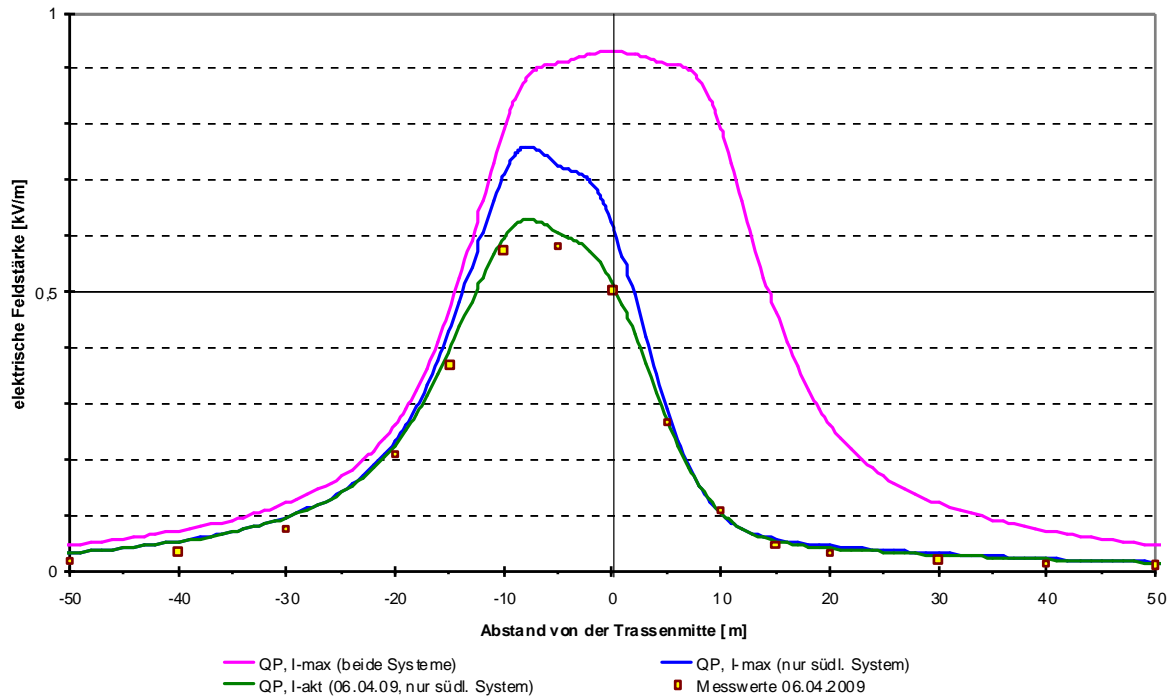


Abbildung 3/205b
 110 kV-Freileitung, FL110_7: Querprofile der elektrischen Feldstärke,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

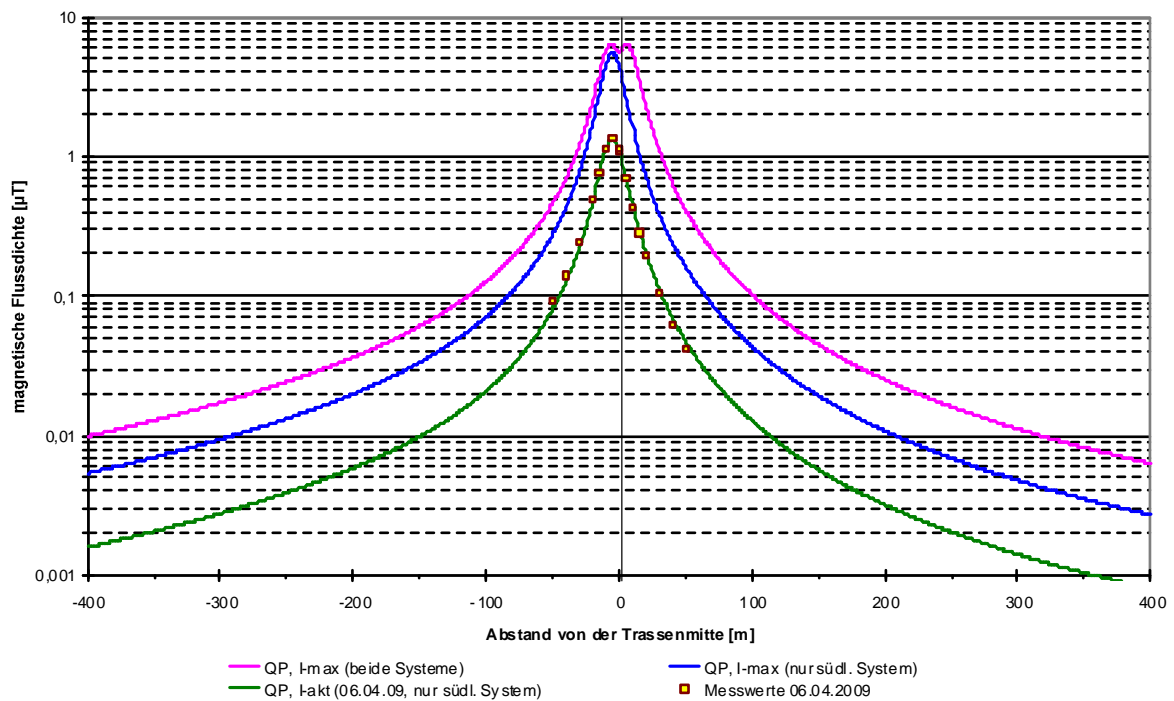


Abbildung 3/206a
 110 kV-Freileitung, FL110_7: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

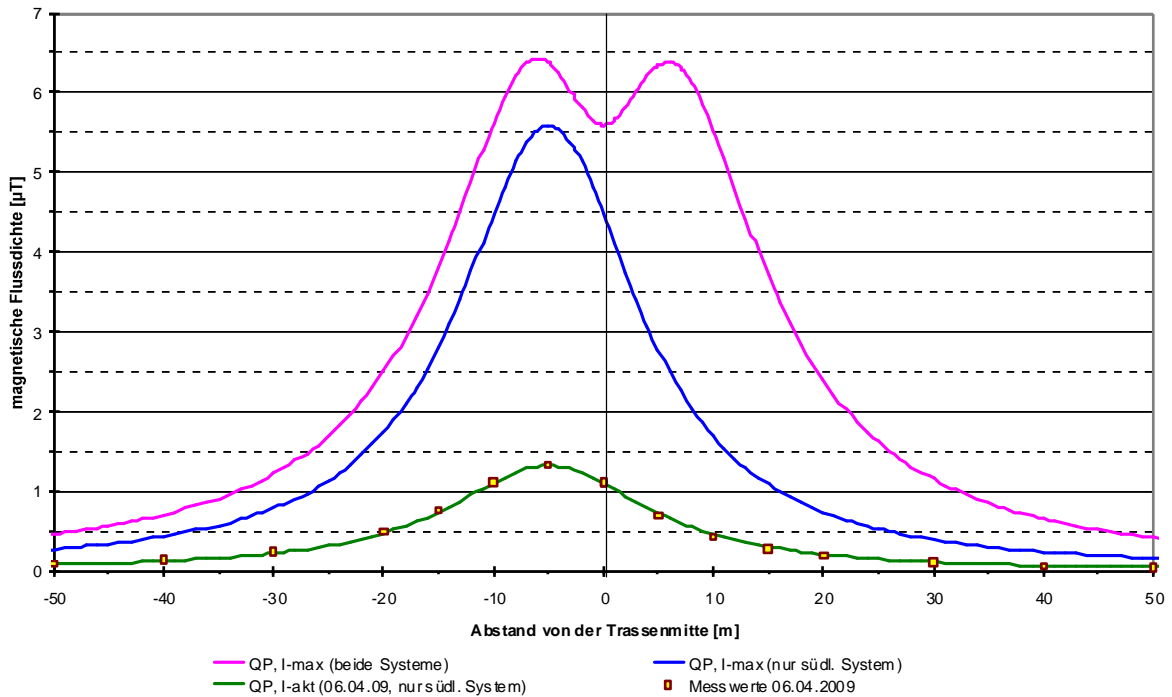


Abbildung 3/206b
110 kV-Freileitung, FL110_7: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/26a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL110_7				B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung			Querprofil	1,351	0,092	40
Rechnung	akt. Ströme	1 Sys.	Querprofil	1,326	0,082	45
		max. Ströme	max. Durchhang	1 Sys.	5,585	0,279
	2 Sys.			6,431	0,466	113

Tabelle 3/26b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL110_7				E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung			Querprofil	0,585	0,,019	-
Rechnung	akt. Ströme	1 Sys.	Querprofil	0,629	0,033	87
		max. Ströme	max. Durchhang	1 Sys.	0,760	0,033
	2 Sys.			0,931	0,047	105

3.2.2.4.9 FL110_8

Spannfeldlänge		L	260,7 m
Phasenbelegung (West / Ost)		$\begin{matrix} S \\ T \\ S \end{matrix}$	$\begin{matrix} S \\ T \\ S \end{matrix}$
Ströme (West / Ost)	Maximalstrom	385 A	385 A
	aktueller Strom	31 A	22 A
Höhe des untersten Leiterseils in Spannfeldmitte über dem Erdboden	Maximalbedingungen	$h_{\min,\max}$	9,2 m
	aktuelle Bedingungen	$h_{\min,\text{akt}}$	10,4 m
Terrainhöhenunterschied Standort Mast 1 / Standort Mast 2		Δh	0,1 m
Leiterseilhöhen Mast 1	h_1	19,0 m	
	h_1'	23,0 m	
Leiterseilhöhen Mast 2	h_2	17,5 m	
	h_2'	21,5 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 1	a_1	3,5 m	
	b_1	5,5 m	
	c_1	7,5 m	
Entfernung der Leiterseilaufhängepunkte von der Mastmitte Mast 2	a_2	3,1 m	
	b_2	4,9 m	
	c_2	6,7 m	
Abstand des Messweges von Mast 1		d_1	123,0 m

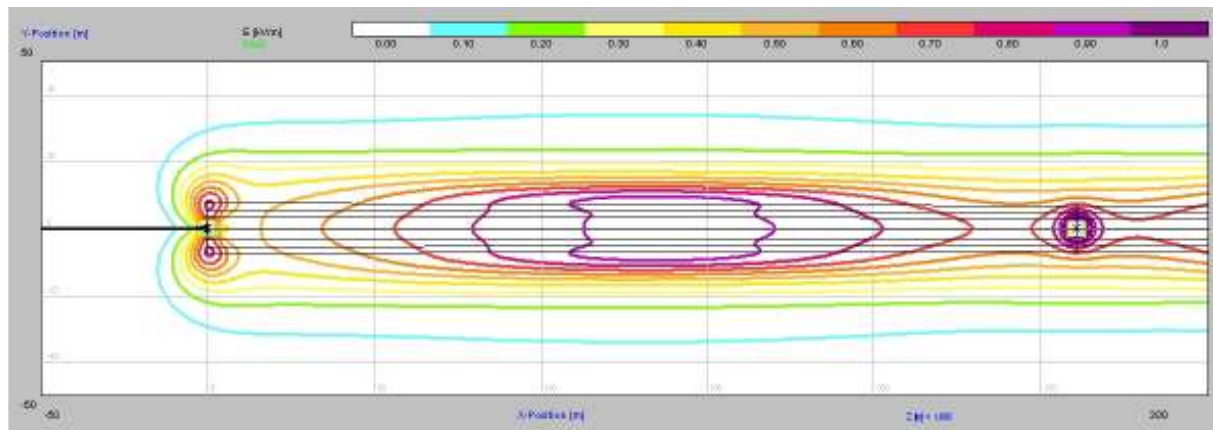


Abbildung 3/207
 110 kV-Freileitung, FL110_8: Horizontalschnitt der elektrischen Feldstärke (maximaler Betriebszustand), Abspannmast, Übergang zum Erdkabel, Messweg etwas links von der Mitte ($x=123$ m) des Spannfeldes

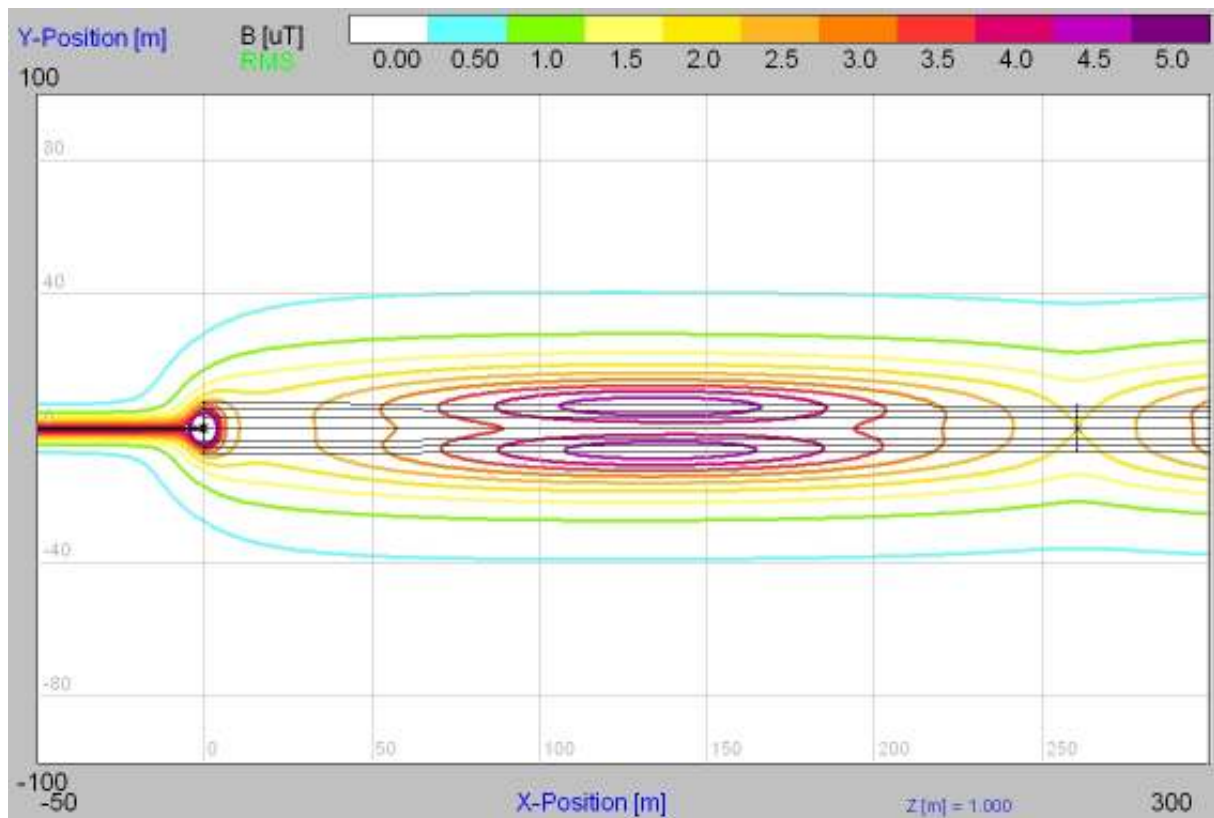


Abbildung 3/208
 110 kV-Freileitung, FL110_8: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), Abspannmast, Übergang zum Erdkabel, Messweg etwas links von der Mitte (x=123 m) des Spannungsfeldes

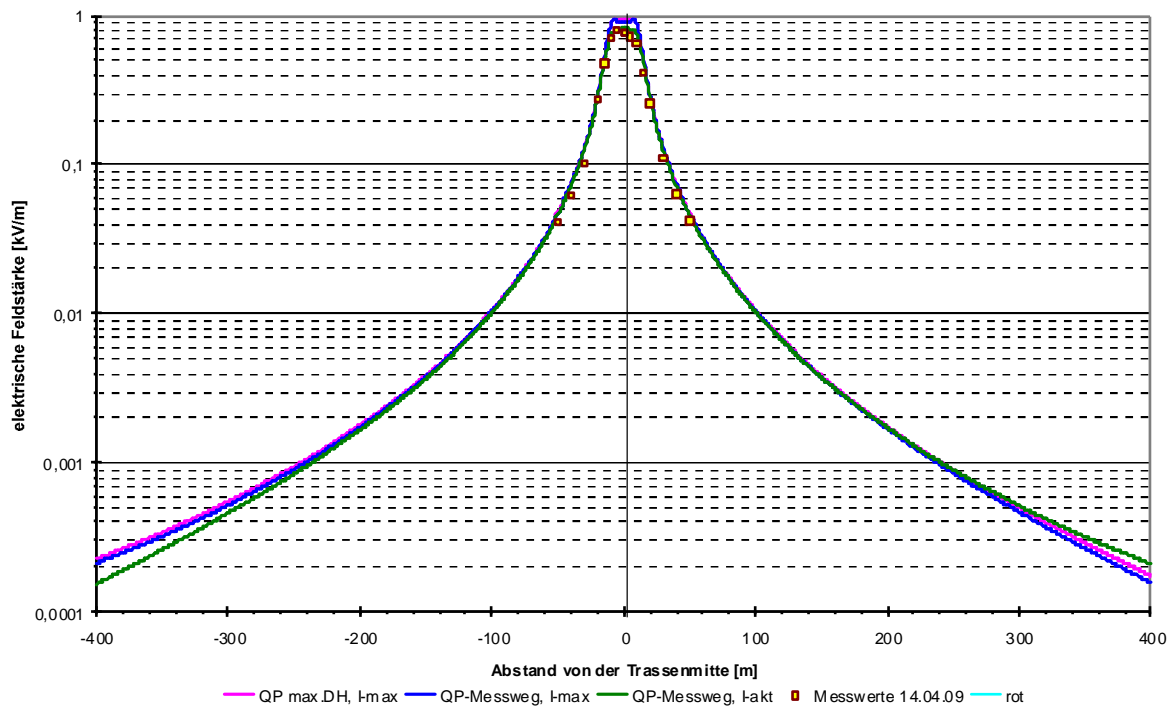


Abbildung 3/209a
 110 kV-Freileitung, FL110_8: Querprofile der elektrischen Feldstärke, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

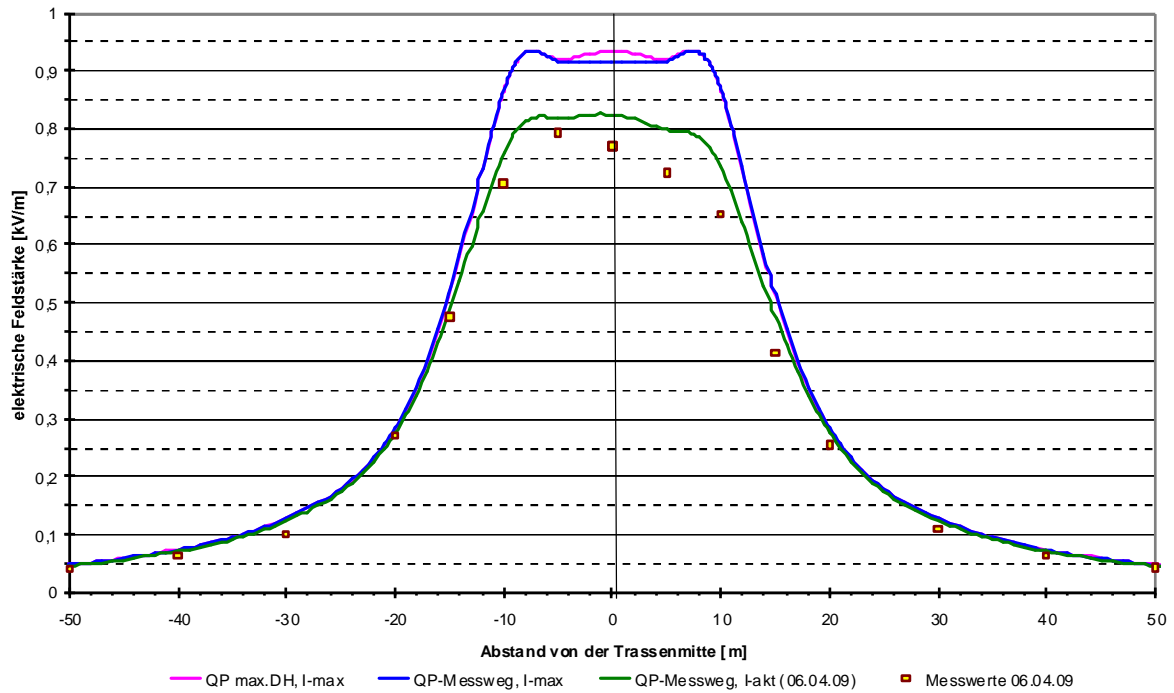


Abbildung 3/209b
 110 kV-Freileitung, FL110_8: Querprofile der elektrischen Feldstärke,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

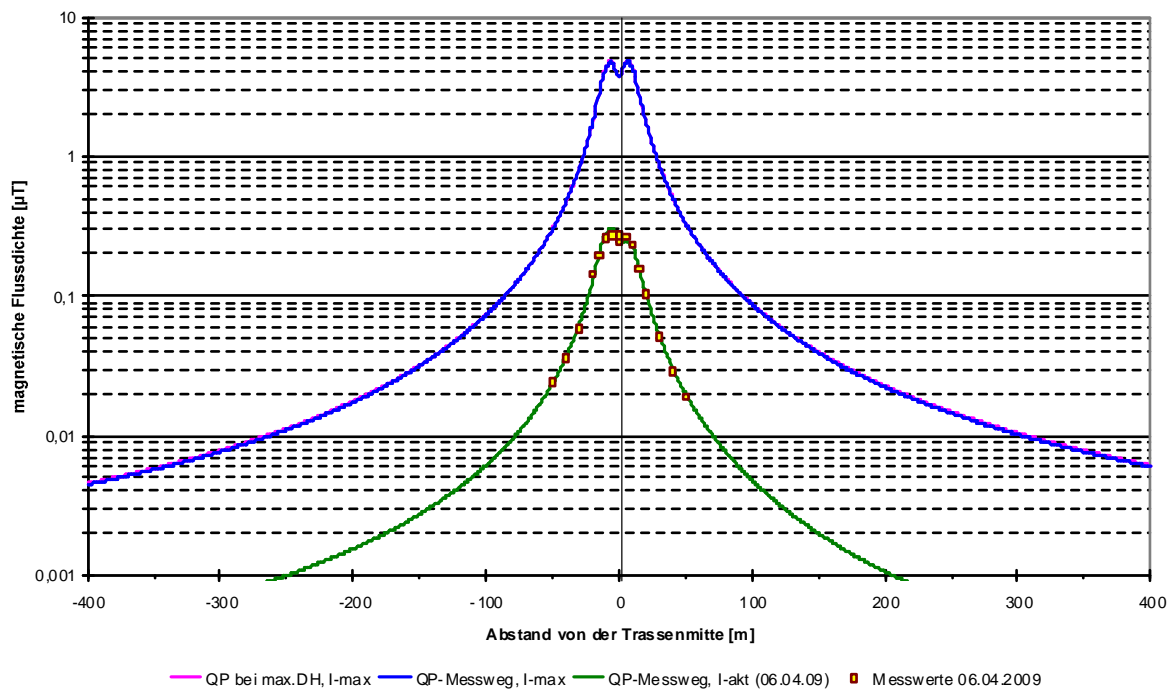


Abbildung 3/210a
 110 kV-Freileitung, FL110_8: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

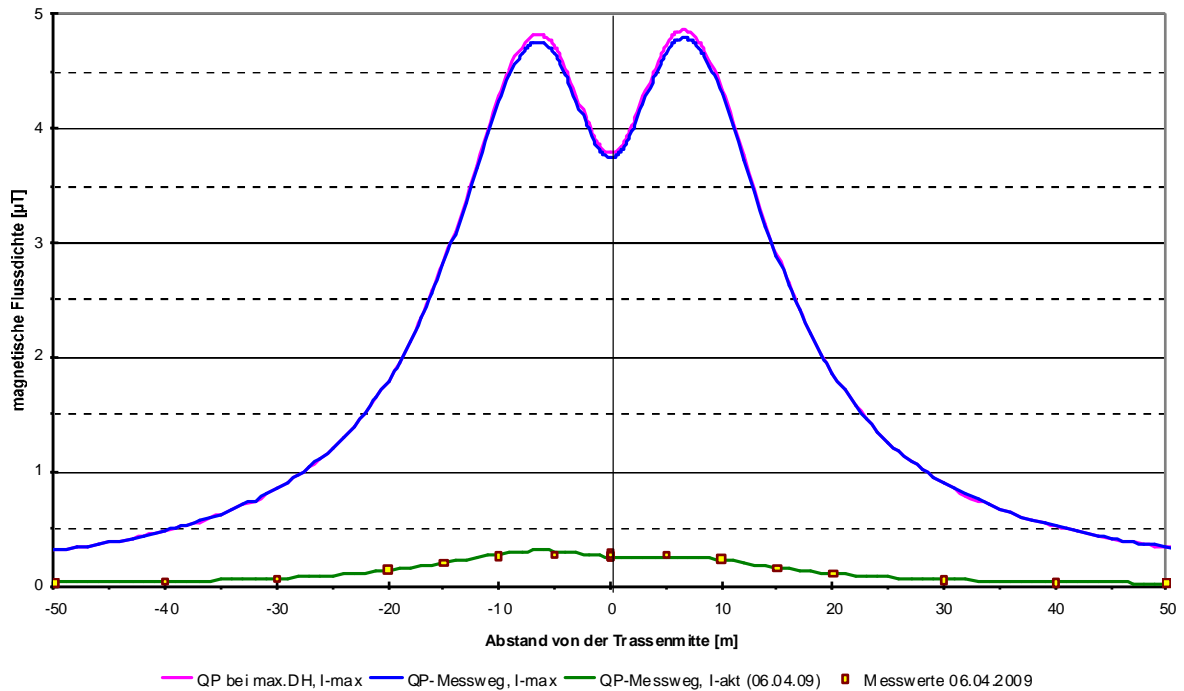


Abbildung 3/210b
110 kV-Freileitung, FL110_8: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/27a
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

FL110_8			B_{\max} [μT]	$B_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung		Querprofil	0,278	0,024	20
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	0,307	0,024	23
	max. Ströme	max. Durchhang	4,852	0,336	93

Tabelle 3/27b
Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der elektrischen Feldstärke

FL110_8			E_{\max} [kV/m]	$E_{\max}(r = 50 \text{ m})$ [kV/m]	r_{\max} [m] mit $E(r) > 0,01 \text{ kV/m}$
Messung		Querprofil	0,795	0,042	-
Rechnung	akt. Ströme	Querprofil	0,826	0,046	100
	max. Ströme	max. Durchhang	0,953	0,048	102

3.2.2.5 Ergebnisse der Berechnungen für 380 kV-Erdkabeltrassen

3.2.2.5.1 EK380_1

Anordnung der Phasen	senkrecht	R R S S T T
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h	7,50 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	0,40 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}	0,70 m
maximale Stromlast	I_{1max}	1.620 A
	I_{2max}	1.620 A
aktuelle Stromlast während der Messung	I_{1akt}	52 A
	I_{2akt}	123 A

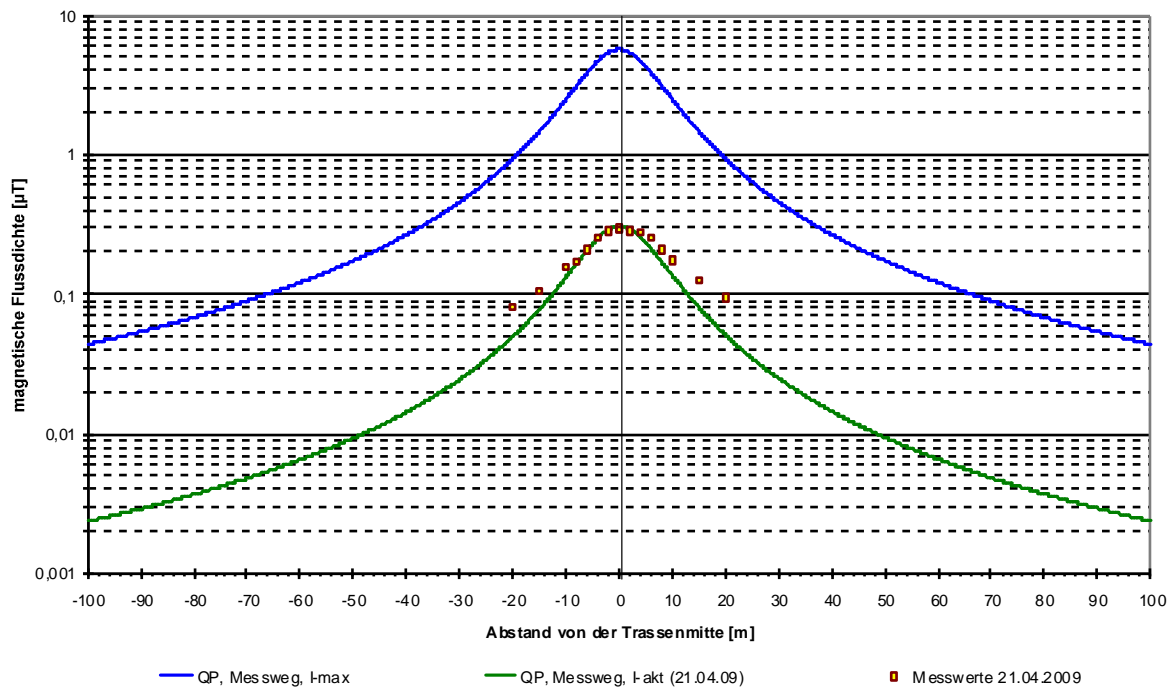


Abbildung 3/211a
 380 kV-Erdkabel, EK380_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

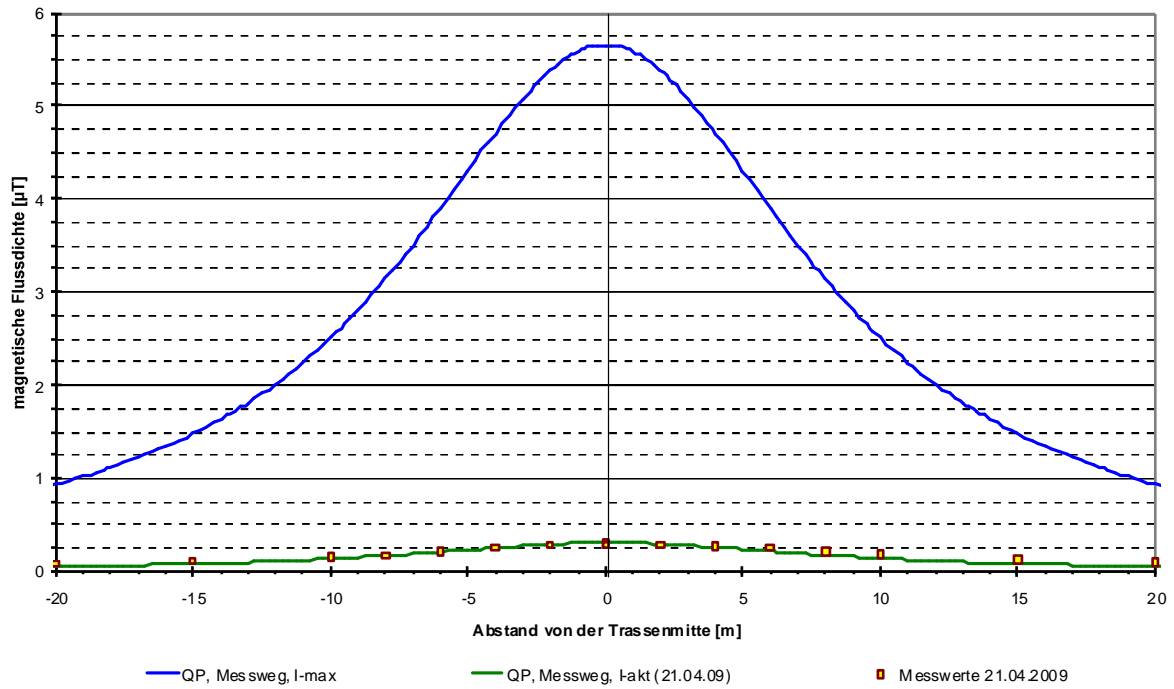


Abbildung 3/211b
 380 kV-Erdkabel, EK380_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/28
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

EK380_1		h = 0,2 m	h = 1,0 m		
		B_{\max} [µT]	B_{\max} [µT]	B_{\max} (r = 20 m) [µT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung		0,386	0,326	0,101	20
Rechnung	akt. Ströme	0,343	0,306	0,051	13
	max. Ströme	6,347	5,656	0,937	66

3.2.2.5.2 EK380_2

Anordnung der Phasen		senkrecht	R R S S T T
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der EOK (Erdbodenoberkante)		h	1,9 m
Abstand der Phasenleiter in einem System		d_{ph}	0,5 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)		d_{sys}	0,7 m
Brücke s.u.(a)	Anordnung der Phasen	Einebene	SRT TRS
	Abstand (Tiefe) der Phasenleiter von EOK	h	0,7 m
	Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	0,6 m
	Abstand zwischen den Systemen	d_{sys}	2,2 m
maximale Stromlast		I_{1max}	1.620 A
		I_{2max}	1.620 A
aktuelle Stromlast während der Messung		I_{1akt}	110 A
		I_{2akt}	54 A
<p>Bemerkungen: (a) in der Nähe des Messweges querte die Kabeltrasse einen Bach, dort waren die Kabel direkt an der Unterseite einer Fußgängerbrücke befestigt, zum Vergleich mit den dort zusätzliche durchgeführten Messungen wurde auch diese Situation berechnet und als 'Brücke' gekennzeichnet</p> <p>(b) deutlich bessere Übereinstimmung mit der Messung ergibt sich, wenn für beide Systeme eine asymmetrische Stromlast (+ 10 %, nur die oberste Phase) angenommen wird.</p>			

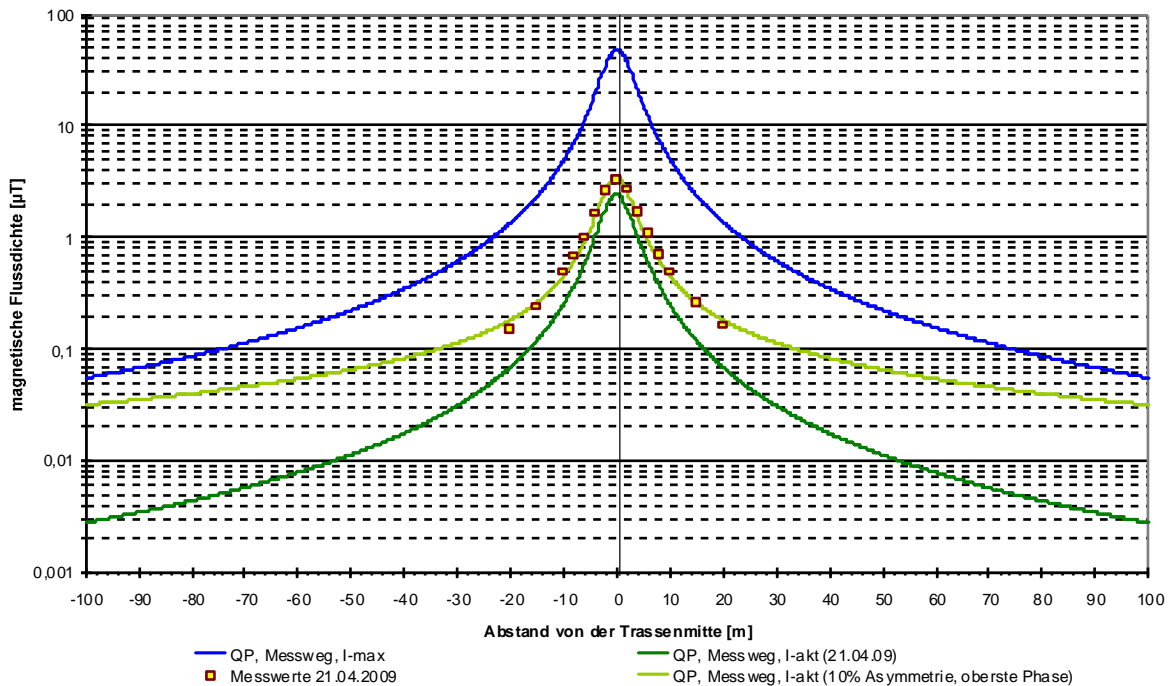


Abbildung 3/212a
 380 kV-Erdkabel, EK380_2: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte, bei Berücksichtigung einer (angenommenen) Abweichung von 10 % im Stromwert für die oberste Phase ergibt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Messwerten

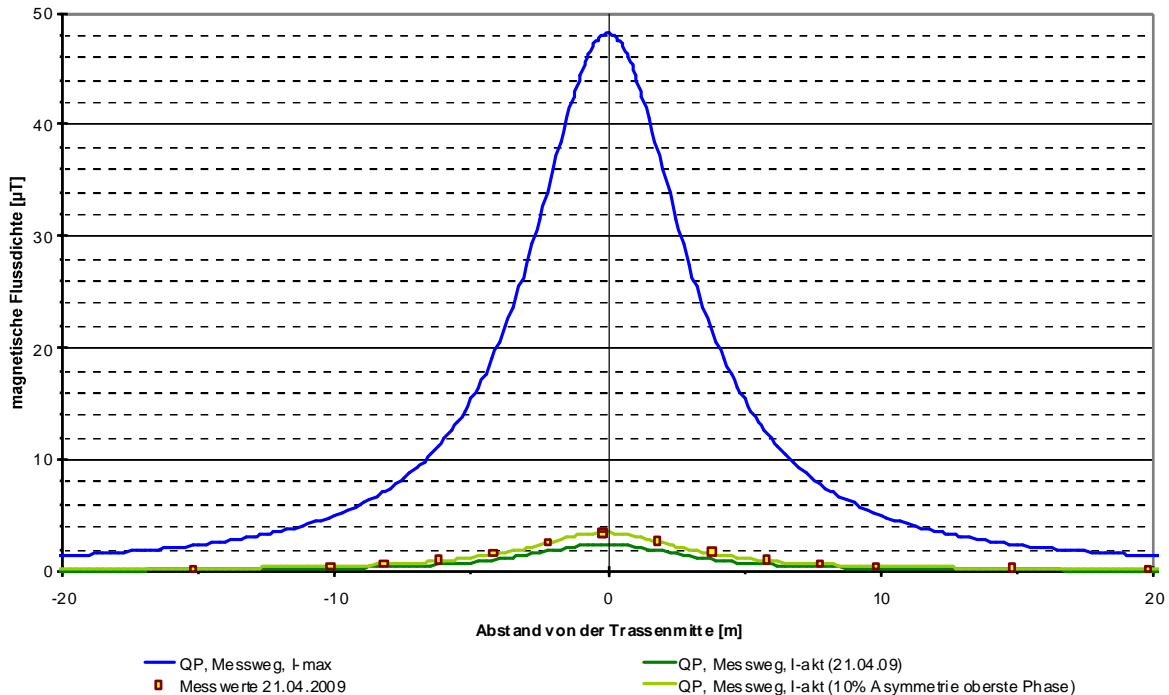


Abbildung 3/212b
 380 kV-Erdkabel, EK380_2: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte, bei Berücksichtigung einer (angenommenen) Abweichung von 10 % im Stromwert für die oberste Phase ergibt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Messwerten

Tabelle 3/29

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte
 Bemerkung 1: eine Berechnung mit Stromwerten, die ca. ein Drittel über den übermittelten Stromwerten liegen, liefert Flussdichten, die den Werten der im Max-Hold-Modus auf der Brücke gemessenen entsprechen

Bemerkung 2: die Simulation liefert für die maximale Auslastung Werte, die zahlenmäßig über den Grenzwerten der 26. BImSchV liegen, in 1 m über Grund gut 30 % über dem Grenzwert, was kurzzeitig gestattet ist, in 0,2 m übersteigt die berechnete Immission das Dreifache des Grenzwertes (allerdings ist die Brücke sicher 'nur für den vorübergehenden Aufenthalt von Menschen vorgesehen')

EK380_2		Messweg	h = 0,2 m	h = 1,0 m		
			B_{max} [µT]	B_{max} [µT]	B_{max} (r = 20 m) [µT]	r_{max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu T$
Messung	Messweg		6,216	3,517	0,170	-
	Brücke		36,624	10,446	-	-
Rechnung	akt. Ströme	MW: sym. Last	3,353	2,445	0,070	17
		MW: asym. Last	4,572	3,459	0,184	34
		Brücke . asym. L.	22,3	7,6	-	-
	max. Ströme	MW: sym. Last.	83,557	48,153	1,363	74
		Brücke . sym. L.	339,8	131,4	-	-

3.2.2.5.3 EK380_3

Anordnung der Phasen	2x3 senkrecht	R...T S S T R
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h	30.9 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	0,6 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}	1,9 m
maximale Stromlast	I_{1max}	1.620 A
	I_{2max}	1.620 A
aktuelle Stromlast	I_{1akt}	574 A
	I_{2akt}	572 A

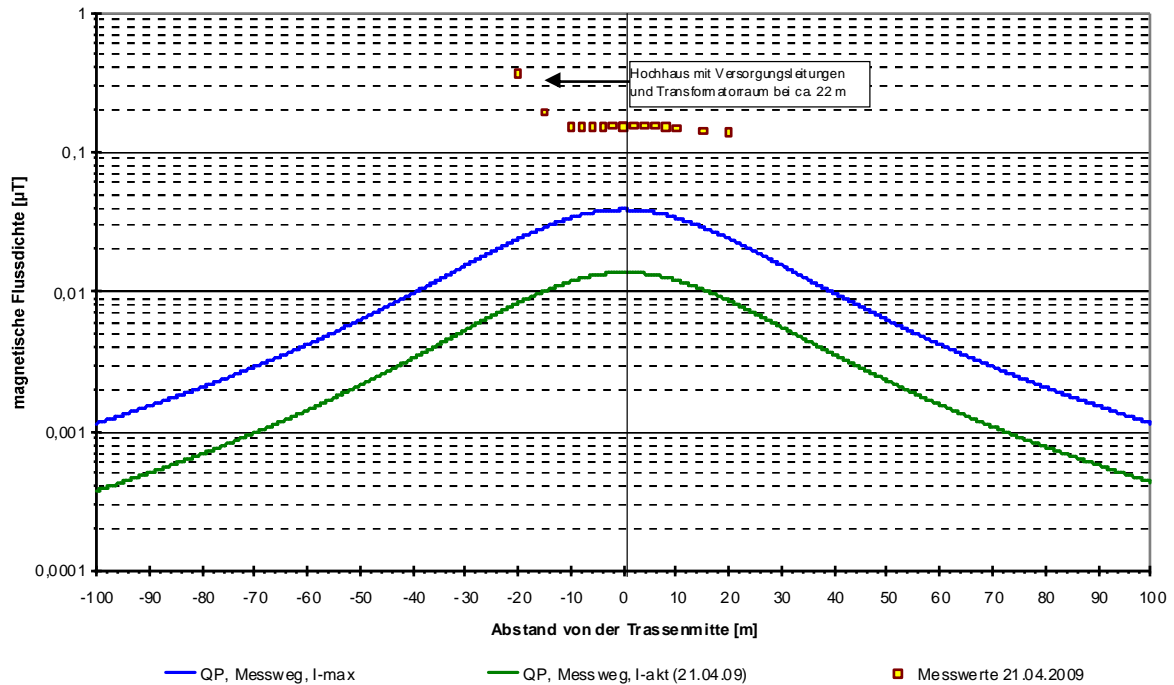


Abbildung 3/213a
380 kV-Erdkabel, EK380_3: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

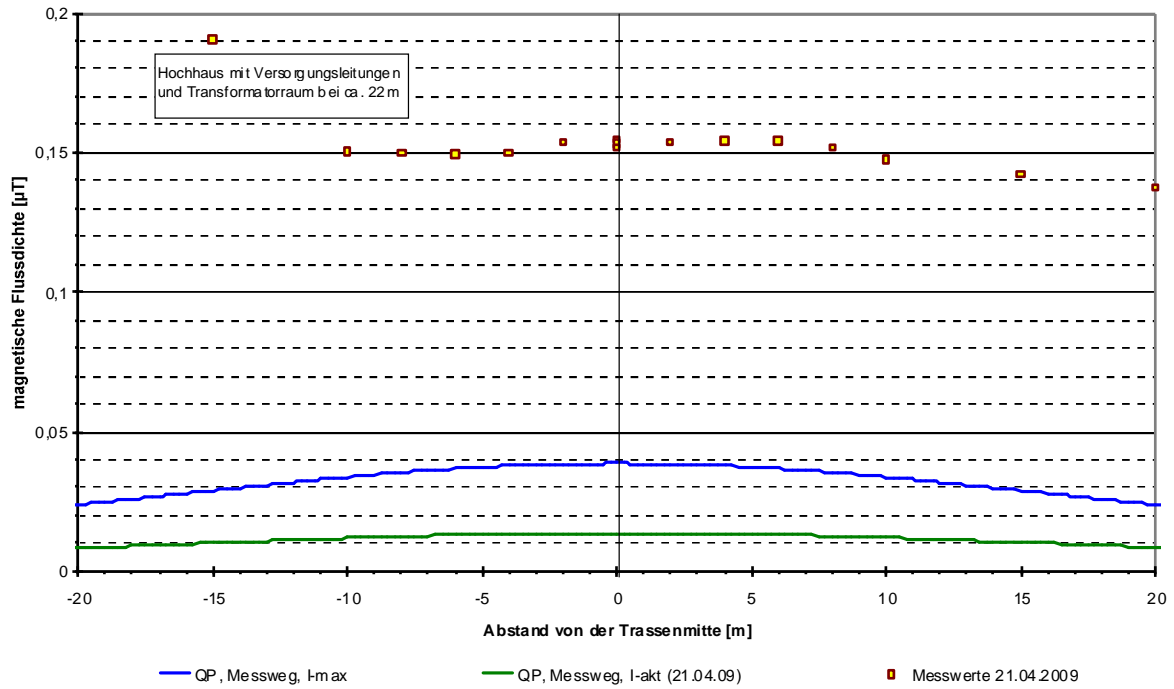


Abbildung 3/213b
 380 kV-Erdkabel, EK380_3: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/30

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte
 Bemerkung: die gemessenen Immissionen wurden sehr wahrscheinlich von den Streufeldern der Stromversorgung für die umliegenden Gebäude dominiert

EK380_3		h = 0,2 m	h = 1,0 m		
		B_{\max} [µT]	B_{\max} [µT]	B_{\max} (r = 20 m) [µT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung MW		0,162	0,156	0,138	-
Rechnung	akt. Ströme	0,015	0,014	0,009	0
	max. Ströme	0,042	0,039	0,024	0

3.2.2.5.4 EK380_4

Erdkabelabschnitt einer geplanten 380 kV-Höchstspannungstrasse			
Anordnung der Phasen	P1:	Einebene	RSTTSR RSTTSR
	P2:		RSTTSR SRTRRS
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h		1,5 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}		1,0 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}		6,0 m
maximale Stromlast	I_{1max}		1.380 A
	I_{2max}		1.380 A
reale (hohe) Stromlast (25 % der Maximallast)	I_{1akt}		345 A
	I_{2akt}		345 A
Bemerkung: für den Erdkabelabschnitt sind je Freileitungssystem zwei Kabelsysteme vorgesehen, die sich die Leistungsübertragung teilen. Alle 12 Kabel sollen in einer Ebene angeordnet werden, wobei die zwei zusammengehörenden Systeme 'phasengespiegelt' nebeneinander liegen werden. Die relative Phasenlage zwischen den beiden Kabelgruppen ist noch nicht festgelegt.			

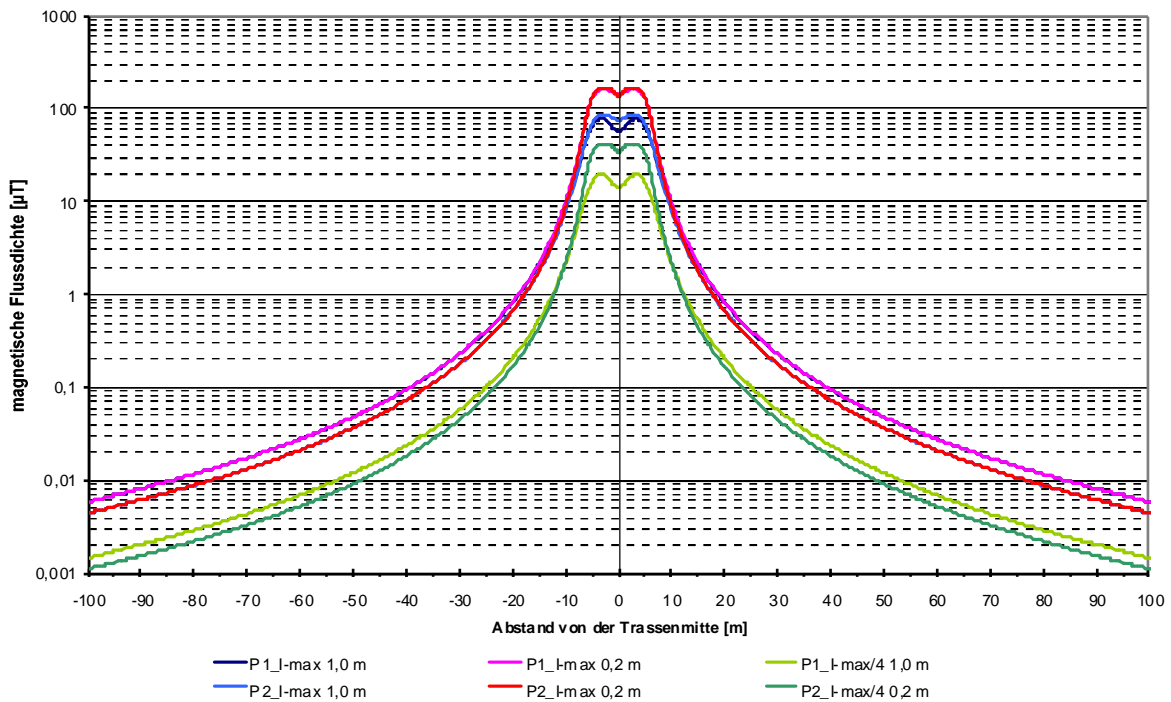


Abbildung 3/214a
 (geplantes) 380 kV-Erdkabel, EK380_4: Querprofile der magnetischen Flussdichte, für verschiedene Lastzustände unterschiedliche Phasenarrangierungen berechnete Werte

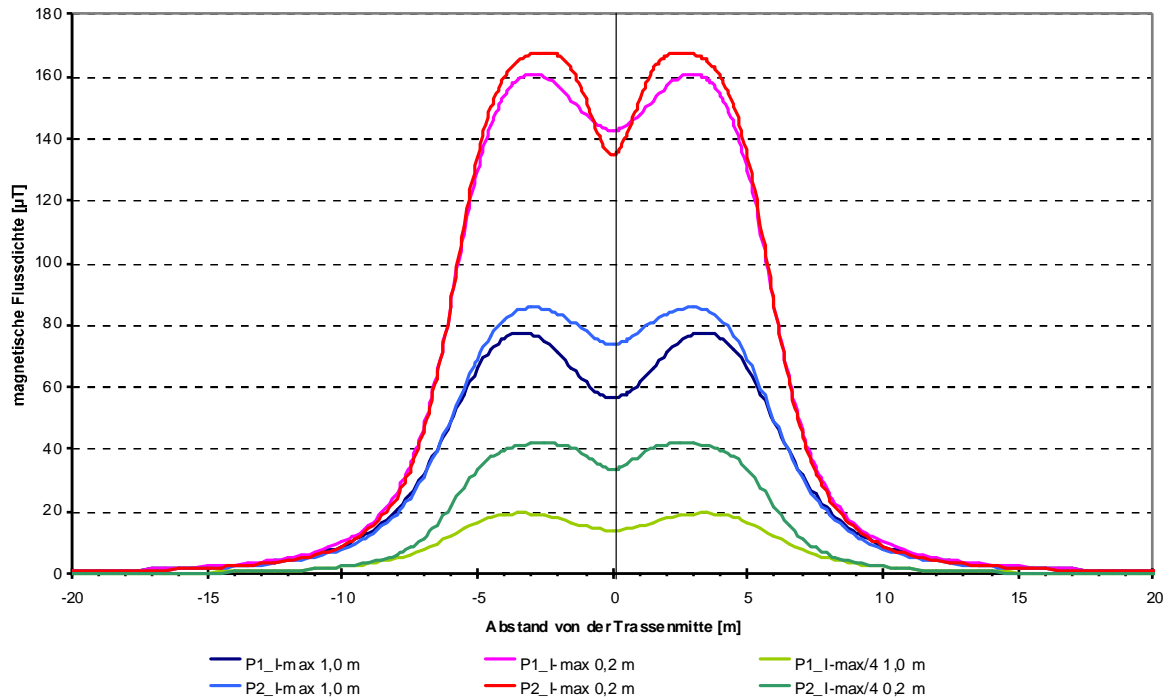


Abbildung 3/214b
 (geplantes) 380 kV-Erdkabel, EK380_4: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 für verschiedene Lastzustände unterschiedliche Phasenordnungen berechnete Werte

Tabelle 3/31
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Berechnung der magnetischen Flussdichte

EK380_4			h = 0,2 m	h = 1,0 m		
			B_{max} [µT]	B_{max} [µT]	B_{max} (r = 20 m) [µT]	r_{max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu T$
Rechnung	reale Ströme $I = I_{max}/4$	P1	40,125	19,406	0,207	25
		P2	41,960	21,433	0,166	23
	maximale Ströme	P1	160,500	77,625	0,840	39
		P2	167,838	85,734	0,664	36

3.2.2.6 Ergebnisse der Berechnungen für eine 220 kV-Erdkabeltrasse

EK220_1

Anordnung der Phasen	Dreieck	$\begin{matrix} S & S \\ R \dots T & R \dots T \end{matrix}$
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h	18,31 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	4,50 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}	0,23 m
maximale Stromlast	I_{1max}	1,070 A
	I_{2max}	1,070 A
aktuelle Stromlast (übermittelte Werte für die einzelnen Phasen für einen Zeitpunkt)	I_{1akt}	88/82/114 A
	I_{2akt}	%
<p>Bemerkung: Die gemessenen Werte der magnetischen Flussdichte liegen deutlich (Faktor sechs) niedriger als die mit den übermittelten Werten berechneten. Mögliche Ursachen: Abschirmung durch das Mantelrohr aus unbekanntem Material, in dem die drei Phasenleiter verlegt sind, oder eine veränderliche, im Mittel während der Messung geringere Asymmetrie in der Lastverteilung. Eine Vergleichsrechnung mit symmetrischer Last ($I = 95$ A für alle drei Phasen) ergibt Flussdichten, die fast einen Faktor drei unter den gemessenen Werten liegen (vgl. Abb. 3/96a,b).</p>		

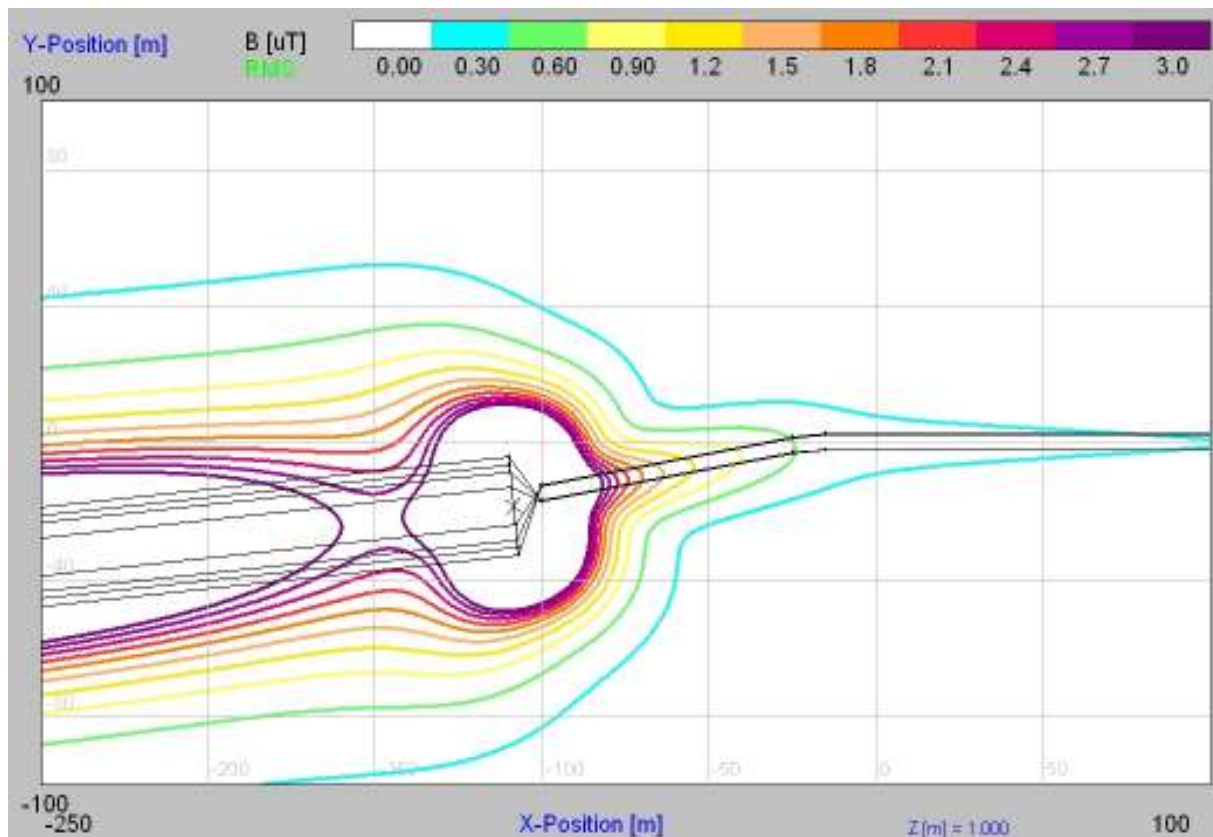


Abbildung 3/215

220 kV-Erdkabel, EK220_1 (Übergang 220kV-Freileitung zum EK): Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), (1m über Grund), Messweg bei $x = 0$ m, etwa 110 m entfernt vom Kabelendmast

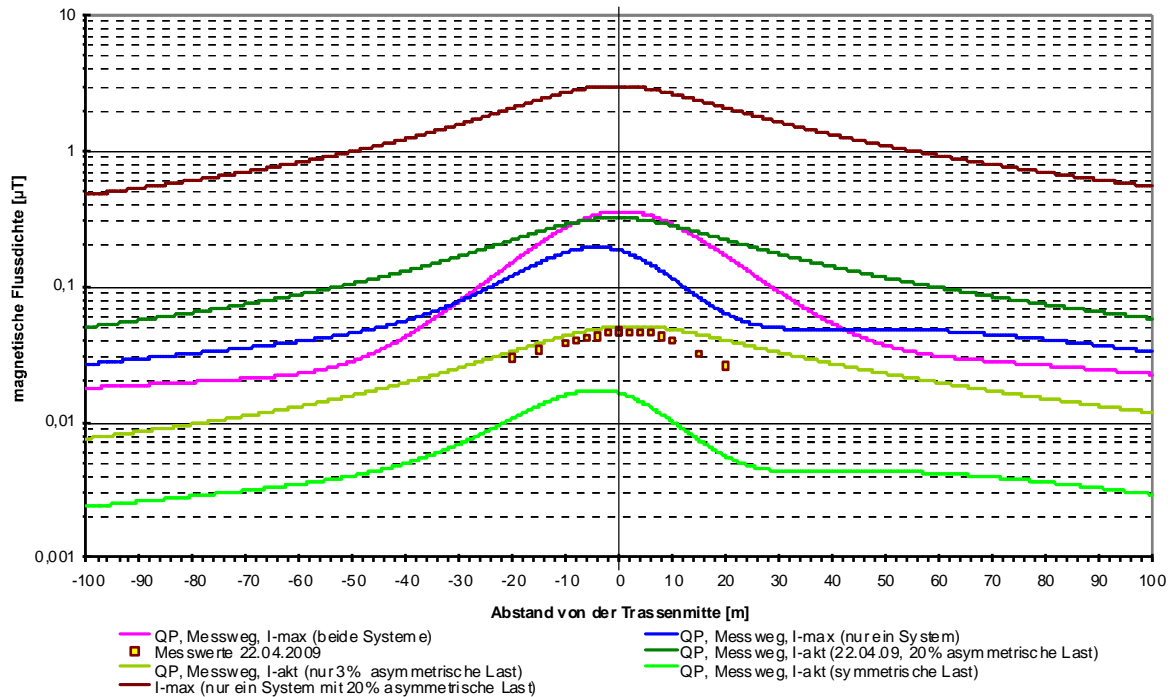


Abbildung 3/216a
 220 kV-Erdkabel, EK220_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte, bei Berücksichtigung einer (angenommenen) geringeren Asymmetrie in den Stromwerten für die drei Phasen ergibt sich eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten, der Fall - ein System mit 20 %-tiger Asymmetrie bei Maximallast ($I_1 = I_{max}, I_2 = I_3 = 0,8 \cdot I_{max}$) ist hier zum Vergleich mit aufgeführt

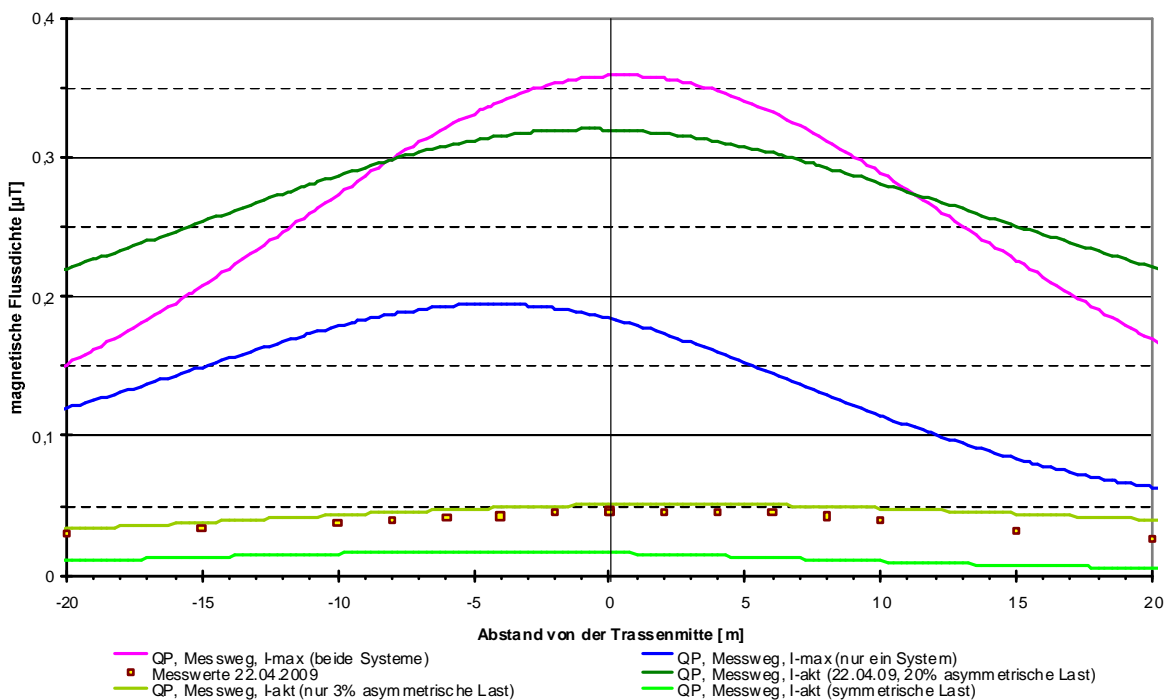


Abbildung 3/216b
 220 kV-Erdkabel, EK220_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/32

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

Bemerkung: die gemessenen Immissionen werden durch die Simulation deutlich besser wiedergegeben, wenn nur 3 % asymmetrische Stromwerte angenommen werden, statt der übermittelten 20 %

EK220_1			h = 0,2 m	h = 1,0 m		
			B_{\max} [μT]	B_{\max} [μT]	B_{\max} (r = 20 m) [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung			0,056	0,049	0,030	0
Rech- nung	akt. Ströme	20% asym.-Last	0,333	0,320	0,221	59
		3% asym.-Last	0,052	0,051	0,040	0
		0% asym.-Last	0,017	0,017	0,011	0
	max. Ströme	1 Sys. sym.-Last.	0,208	0,194	0,120	24
		1 Sys. 20% Asym.*	3,121	3,002	2,076	386
		2 Sys. sym.-Last	0,384	0,358	0,169	29

*Der Fall - ein System mit 20 %-tiger Asymmetrie bei Maximallast ($I_1 = I_{\max}$, $I_2 = I_3 = 0,8 \cdot I_{\max}$) ist hier zum Vergleich mit aufgeführt, er entspricht nicht dem für die 26.BImSchV relevanten maximalen Betriebszustand

3.2.2.7 Ergebnisse der Berechnungen für 110 kV-Erdkabeltrassen

3.2.2.7.1 EK110_1

Anordnung der Phasen	Dreieck	$\begin{matrix} S \\ R \dots T \end{matrix}$ $\begin{matrix} S \\ R T \end{matrix}$
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h	1,26 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	0,10 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}	0,50 m
maximale Stromlast	I_{1max}	280 A
	I_{2max}	280 A
aktuelle Stromlast	I_{1akt}	160 A
	I_{2akt}	∕

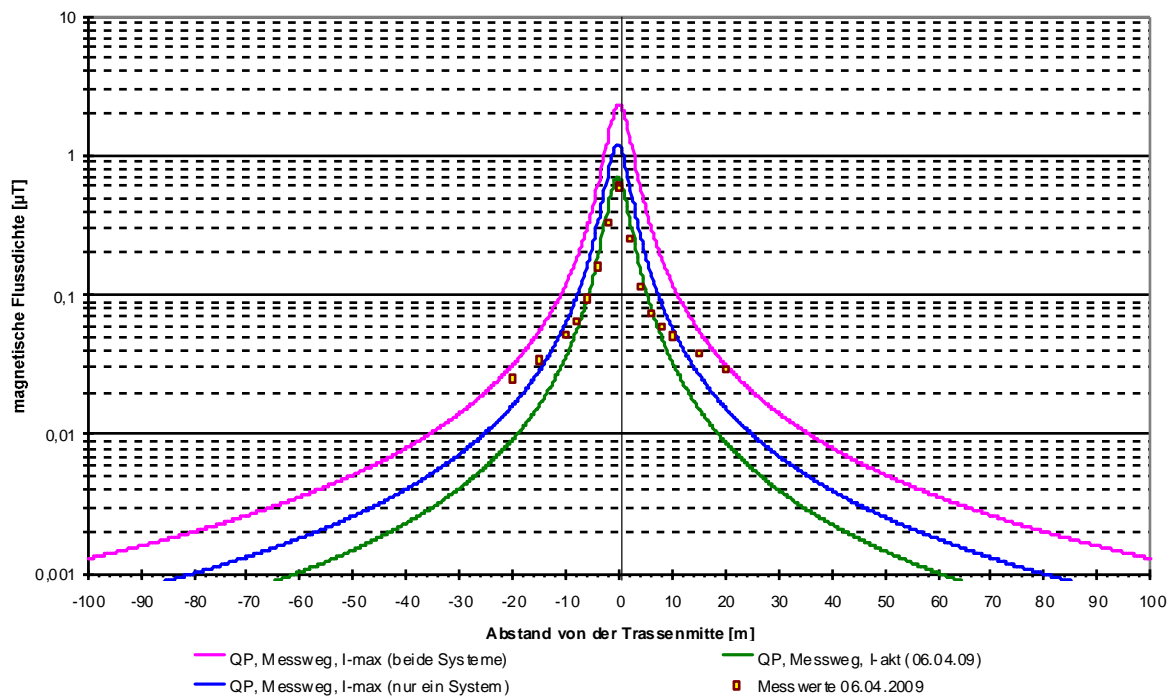


Abbildung 3/217a
 110 kV-Erdkabel, EK110_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

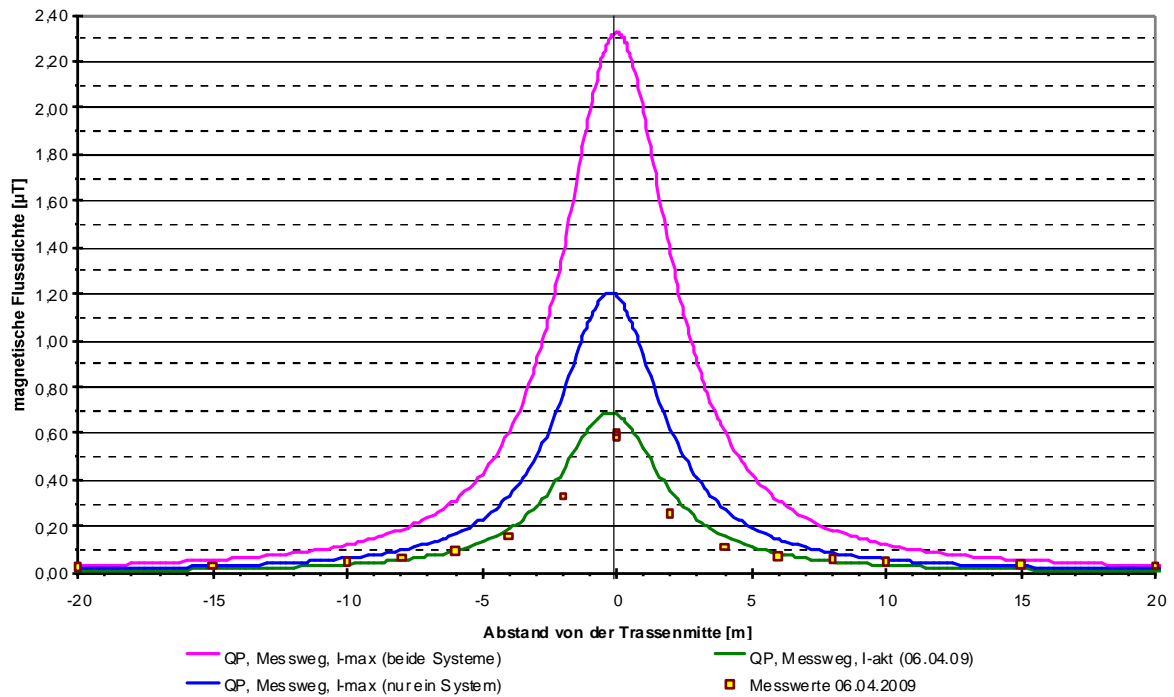


Abbildung 3/217b
 110 kV-Erdkabel, EK110_1: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/33
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte,

EK110_1		h = 0,2 m		h = 1,0 m		
		B_{\max} [µT]	B_{\max} [µT]	B_{\max} (r = 20 m) [µT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$	
Messung		1,872	0,603	0,030	4	
Rechnung	akt. Ströme	1,609	0,689	0,009	6	
	max. Ströme	1 Sys.	2,815	1,205	0,016	8
		2 Sys.	5,179	2,323	0,032	11

3.2.2.7.2 EK110_2

(a) Anordnung bei der Straßenquerung:		
Anordnung der Phasen	Dreieck	$\begin{matrix} T & T \\ S & R & S & R \end{matrix}$
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h	4,0 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	0,15 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}	2,5 m
maximale Stromlast	I_{1max}	385 A
	I_{2max}	385 A
aktuelle Stromlast	I_{1akt}	31 A
	I_{2akt}	22 A
Bemerkung: Die genaue Lage der einzelnen Leiterkabel ist nicht bekannt. An dieser Stelle wurden die Kabel nicht in einem Graben sondern in einer 'Bohrung' unter der Straße hindurch verlegt. Abweichend von den hier genannten Planungswerten, ergibt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Messwerten, wenn für die Verlegetiefe ein um 0,9 m geringerer oder für den Abstand zwischen den Leiterkabeln ein um 0,05 m größerer Wert angenommen wird		
(b) Anordnung unter dem Radweg		
Anordnung der Phasen	Dreieck	$\begin{matrix} T & T \\ S & R & S & R \end{matrix}$
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h	1,2 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	0,15 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}	0,50 m
maximale Stromlast	I_{1max}	385 A
	I_{2max}	385 A
aktuelle Stromlast	I_{1akt}	31 A
	I_{2akt}	22 A

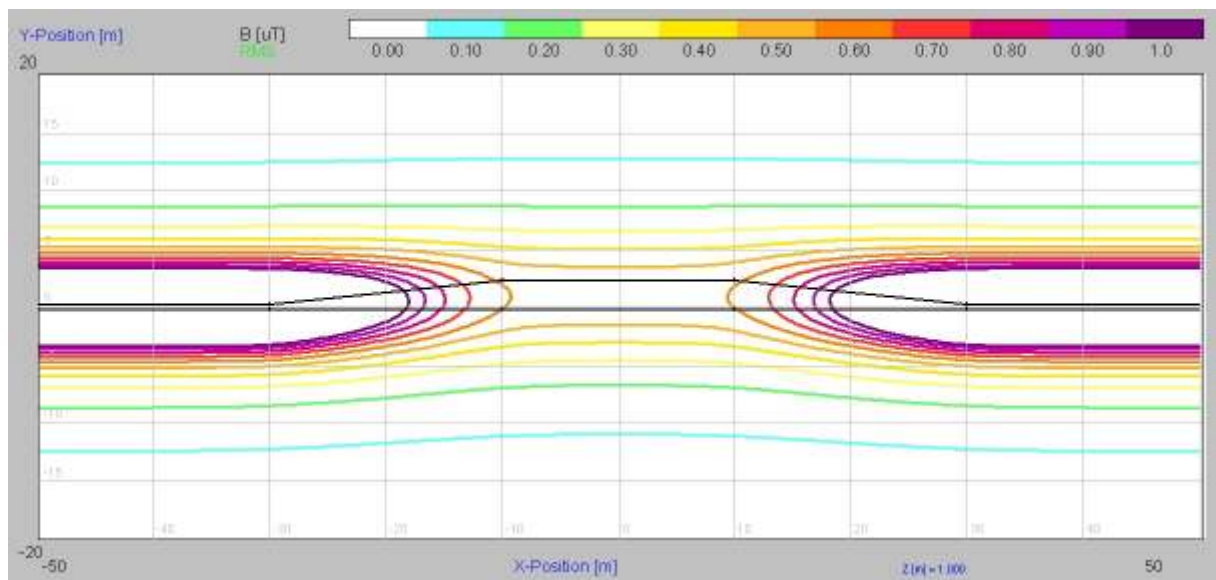


Abbildung 3/218
 110 kV-Erdkabel, EK110_2: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), (1 über Grund), an der Straßenquerung bei $x=0$ m (a) sind die Kabel tiefer und weiter auseinander verlegt als im Normalfall, wie z.B. unter dem Radweg (b) bei $x=50$ m

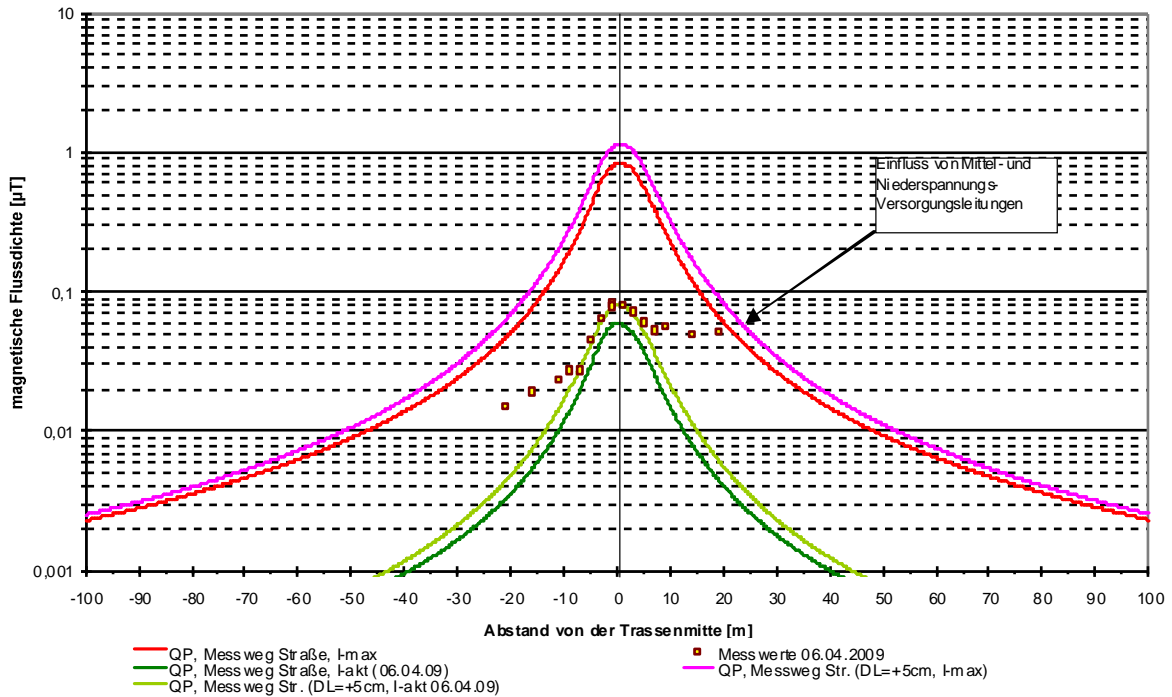


Abbildung 3/219a
 110 kV-Erdkabel, EK110_2 (a), Straßenquerung: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

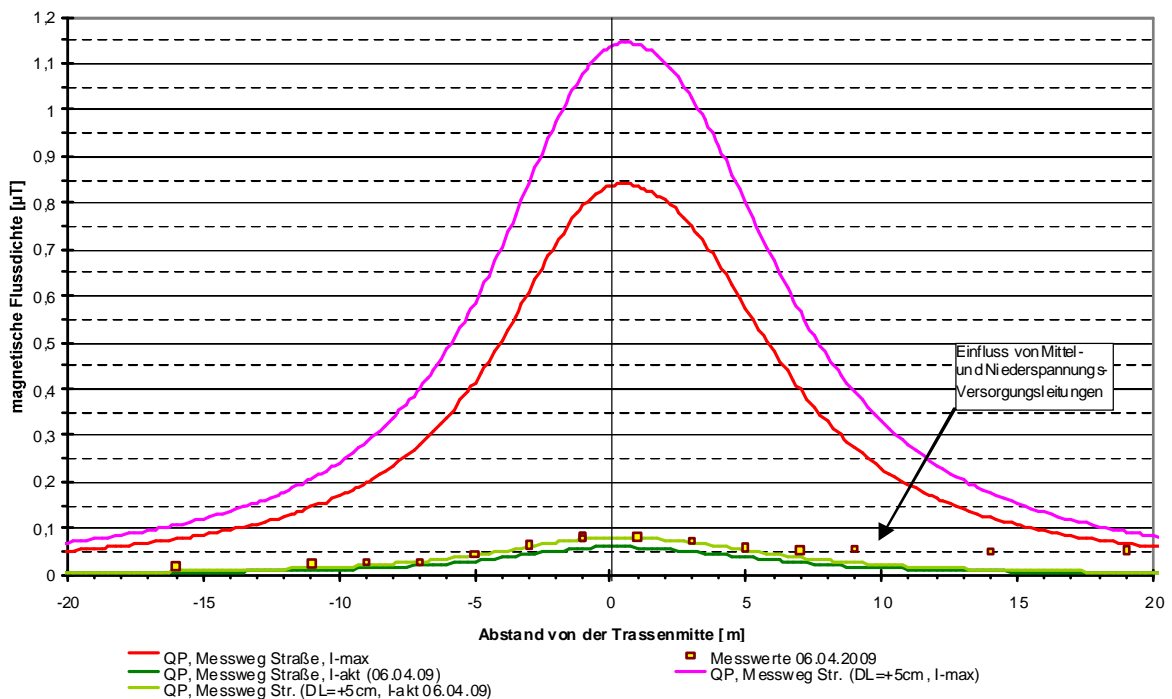


Abbildung 3/219b
 110 kV-Erdkabel, EK110_2 (a), Straßenquerung: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

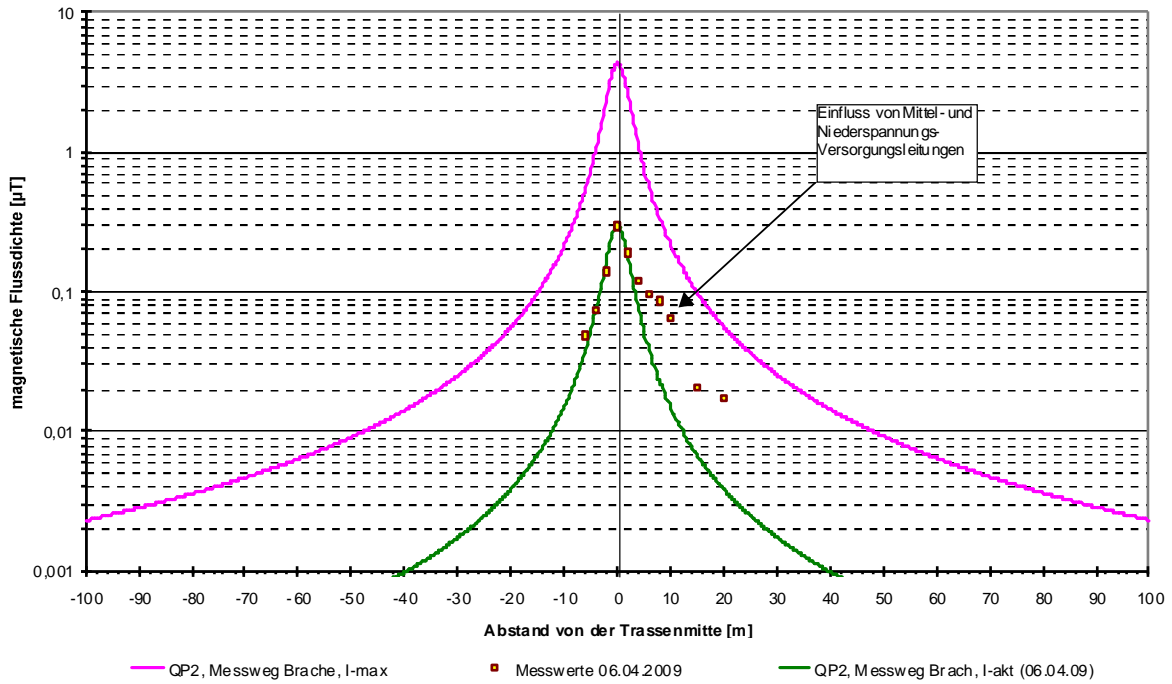


Abbildung 3/220a
 110 kV-Erdkabel, EK110_2 (b), Radweg und Brache: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

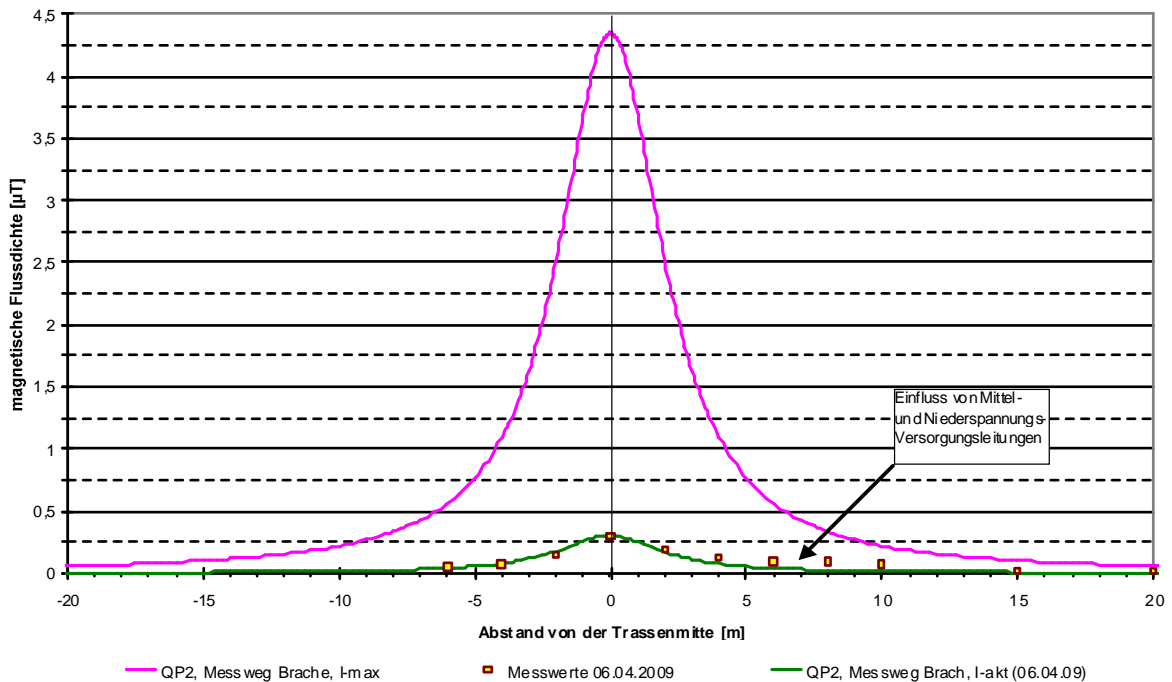


Abbildung 3/220b
 110 kV-Erdkabel, EK110_2 (b), Radweg und Brache: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/34a

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte,

EK110_2 (a: Straßenquerung)			h = 0,2 m	h = 1,0 m		
			B_{\max} [μT]	B_{\max} [μT]	B_{\max} (r = 20 m) [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung			0,117	0,086	0,017	0
Rech- nung	akt. Ströme	Plan	0,082	0,060	0,004	0
		DL=+5cm	0,108	0,081	0,006	0
	max. Strö- me	Plan	1,126	0,840	0,061	16
		DL=+5cm	1,501	1,144	0,084	18

Tabelle 3/34b

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte,

EK110_2 (b: Radweg durch Bra- che)			h = 0,2 m	h = 1,0 m		
			B_{\max} [μT]	B_{\max} [μT]	B_{\max} (r = 20 m) [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$
Messung			0,756	0,317	0,024	4
Rech- nung	akt. Ströme		0,684	0,299	0,004	3
	max. Ströme		9,917	4,347	0,057	15

3.2.2.7.3 EK110_3

Anordnung der Phasen	Dreieck	$\begin{matrix} S & S \\ R & T & R & T \end{matrix}$
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h	1,80 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	0,055 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}	0,260 m
maximale Stromlast	I_{1max}	394 A
	I_{2max}	394 A
aktuelle Stromlast	I_{1akt}	58 A
	I_{2akt}	22 A
Bemerkung: Der Messweg befand sich direkt über einer Reparaturmuffe, an der bei einem System eine Phase um 0,4 m zu Seite heraus geführt ist, was zu einer lokalen Erhöhung der magnetischen Flussdichte führt (vgl. Abb. 3/221)		
Entfernung der Phasenleiter von der Trassenmitte am Ort der Reparaturmuffe	$\underline{a} = -a$	0,158 m
	$\underline{b} = -b$	0,130 m
	c	0,558 m
	\underline{c}	-0,158 m
mit den Alternativparametern (0,5 m größere Verlegetiefe und 10% Asymmetrie auf dem System mit der Muffe) ergibt sich eine bessere Übereinstimmung mit der Messung		

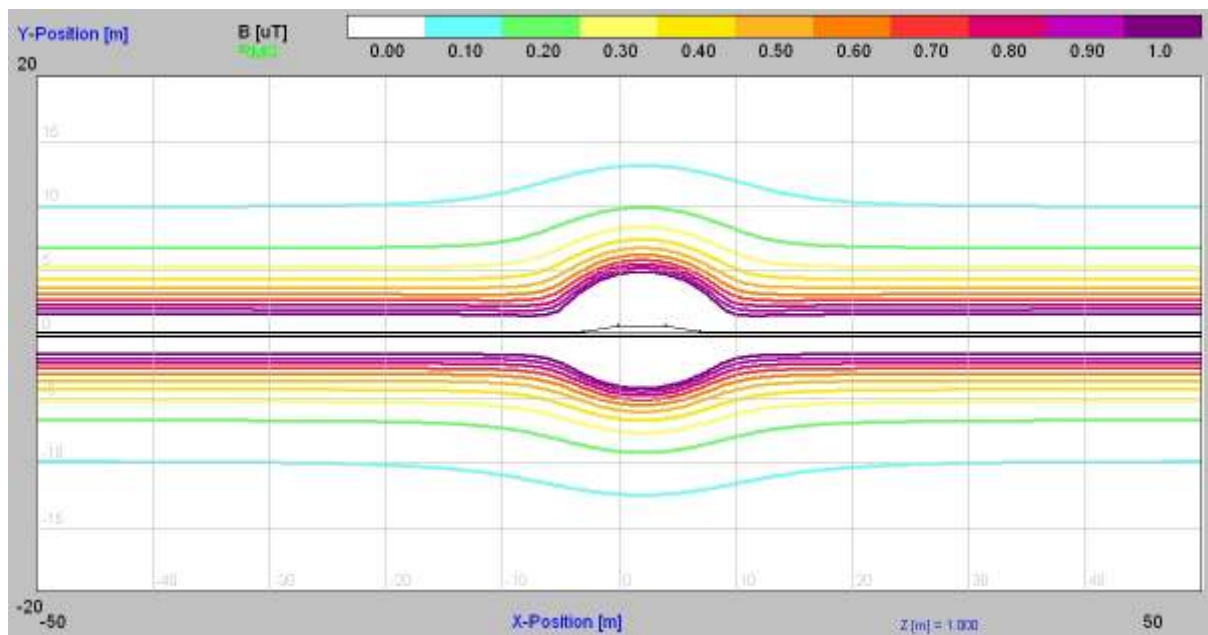


Abbildung 3/221
 110 kV-Erdkabel, EK110_3: Horizontalschnitt der magnetischen Flussdichte (maximaler Betriebszustand), (1 m über Grund), der Messweg befand sich genau über dem Kabelabschnitt mit der Reparaturmuffe

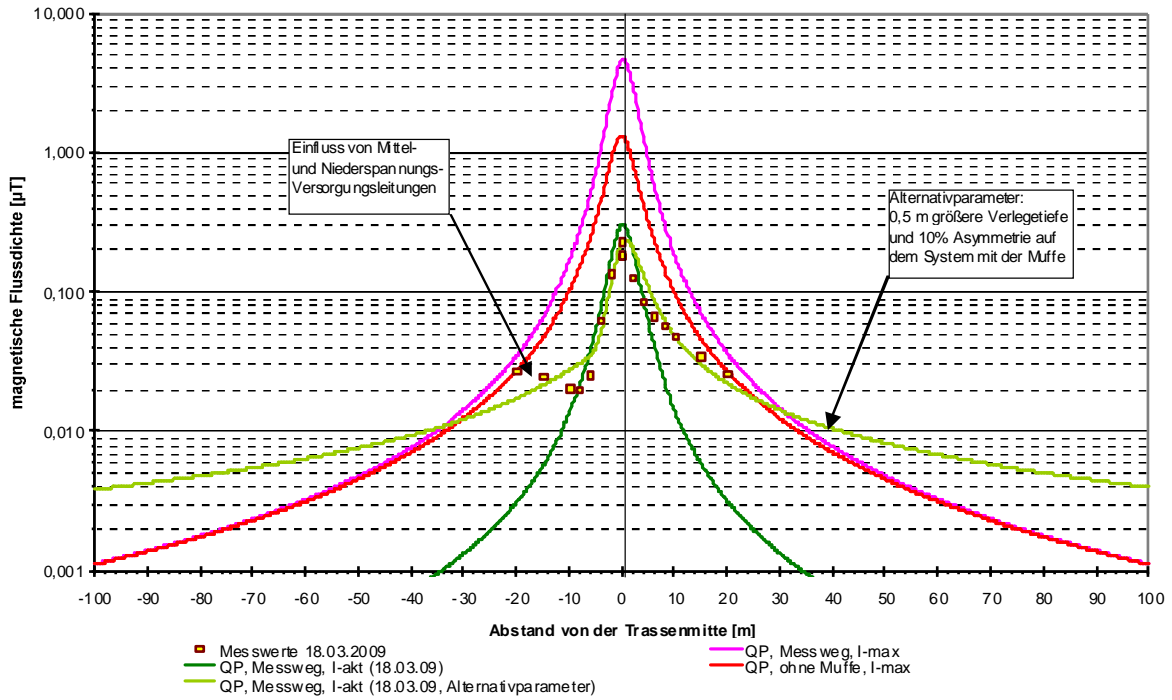


Abbildung 3/222a
 110 kV-Erdkabel, EK110_3: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

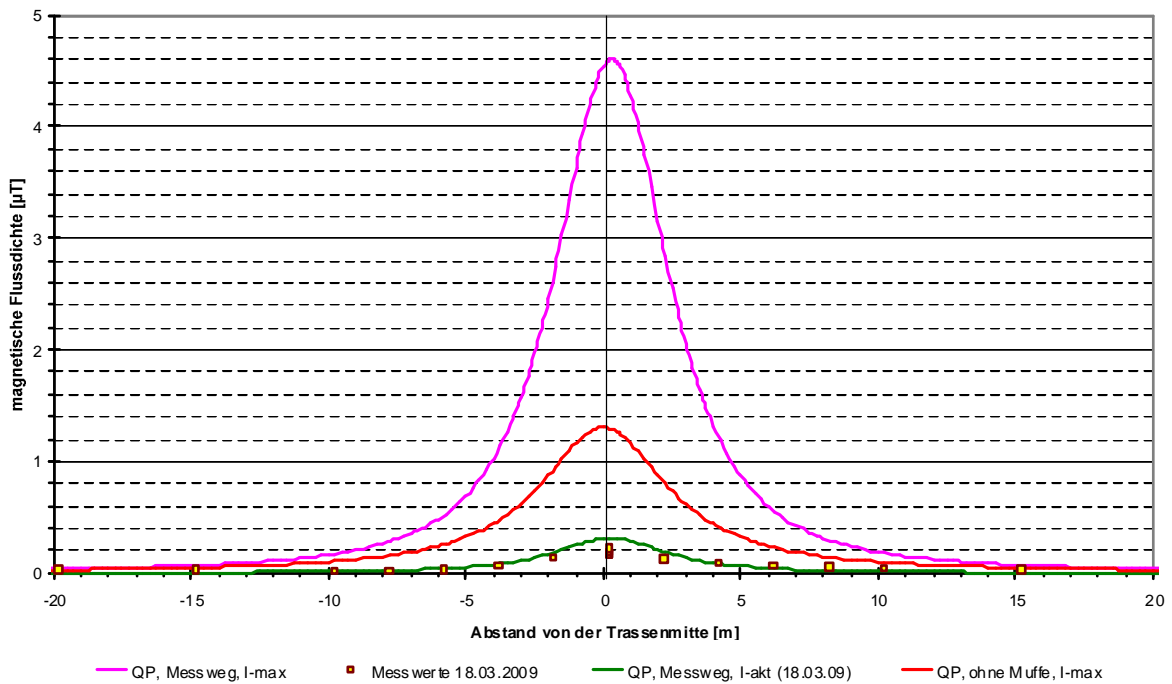


Abbildung 3/222b
 110 kV-Erdkabel, EK110_3: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/35

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte,
 Alternativparameter: 0,5 m größere Verlegetiefe und 10% Asymmetrie auf dem System mit der Muffe

EK110_3		h = 0,2 m	h = 1,0 m			
		B_{\max} [μT]	B_{\max} [μT]	B_{\max} (r = 20 m) [μT]	r_{\max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu\text{T}$	
Messung (MW über einer Muffe)		0,365	0,227	0,036	4	
Rech- nung	akt. Ströme I_{akt} (MW)	0,603	0,306	0,003	4	
	I_{akt} , Alternativparameter	0,397	0,236	0,022	5	
	max. Strö- me	MW	9,098	4,602	0,037	13
		ohne Muffe	2,519	1,304	0,027	10

3.2.2.7.4 EK110_4

Anordnung der Phasen	Dreieck	$S_{R\dots T}$
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h	1,20 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	0,05 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}	%
maximale Stromlast	I_{1max}	483 A
	I_{2max}	%
aktuelle Stromlast	I_{1akt}	113 A
	I_{2akt}	%

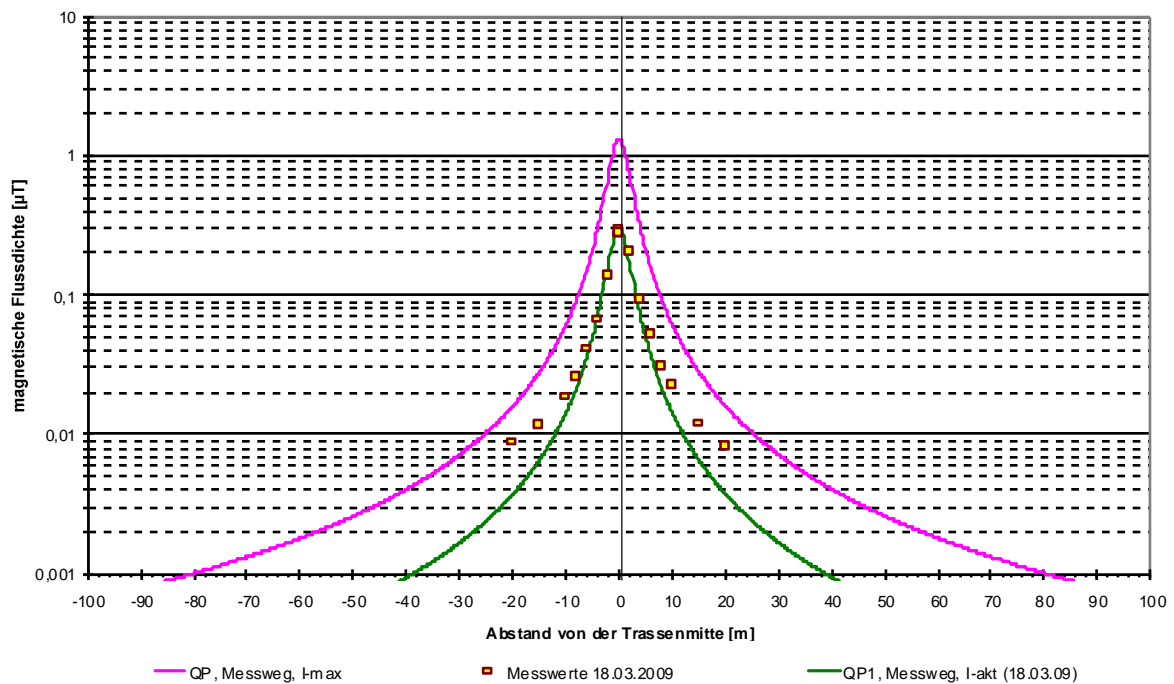


Abbildung 3/223a
 110 kV-Erdkabel, EK110_4: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

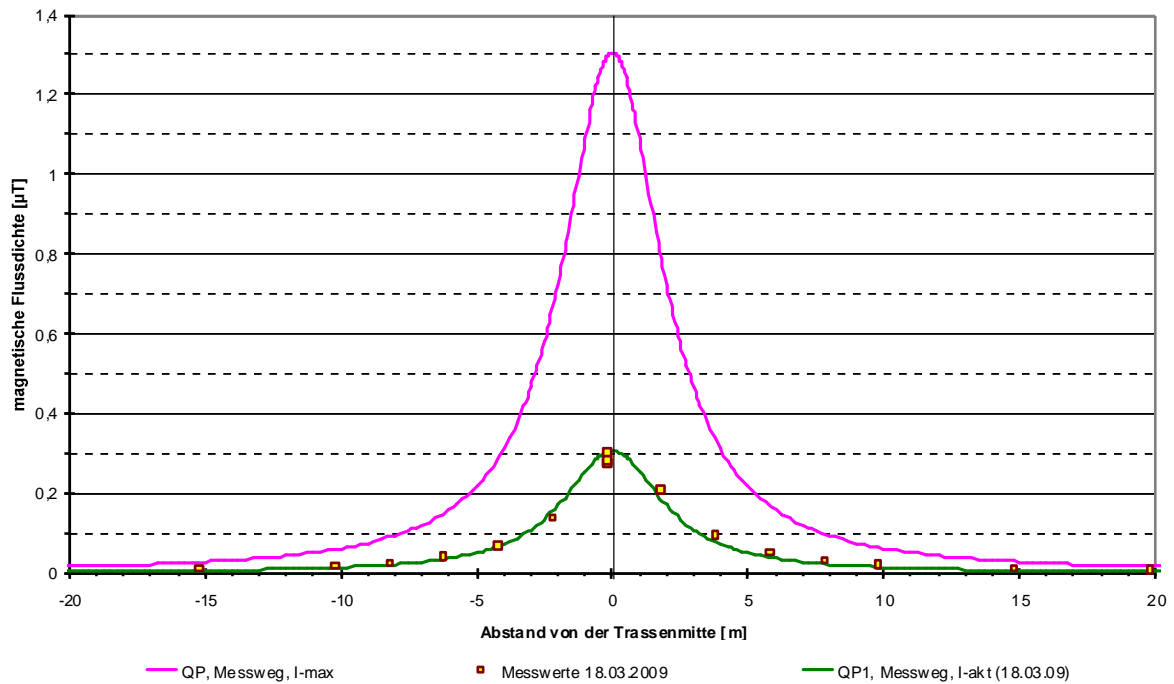


Abbildung 3/223b
 110 kV-Erdkabel, EK110_4: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/36

Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte,
 (ca. 20 m neben dem Messweg über der Erdkabeltrasse wurden geringfügig höhere Immissionen
 gemessen, vermutlich aufgrund geringerer Verlegetiefe als unter dem Messweg auf einem Fußweg,
 der die Trasse kreuzt)

EK110_4		h = 0,2 m	h = 1,0 m		
		B _{max} [µT]	B _{max} [µT]	B _{max} (r = 20 m) [µT]	r _{max} [m] mit B(r) > 0,1 µT
Messung MW (neben dem MW)		0,718 (0,814)	0,304	0,010	4
Rech- nung	akt. Ströme	0,743	0,306	0,004	3
	max. Ströme	3,175	1,306	0,016	8

3.2.2.7.5 EK110_5

Anordnung der Phasen	Dreieck	$S_{R...T}$
Abstand (Tiefe) des obersten Phasenleiters von der Erdbodenoberkante	h	1,30 m
Abstand der Phasenleiter in einem System	d_{ph}	0,05 m
Abstand zwischen den Systemen (Mitte - Mitte)	d_{sys}	%
maximale Stromlast	I_{1max}	457 A
	I_{2max}	%
aktuelle Stromlast	I_{1akt}	76 A
	I_{2akt}	%
Bei einer angenommenen asymmetrischen Stromlast von 1% ergibt sich eine bessere Übereinstimmung mit der Messung.		

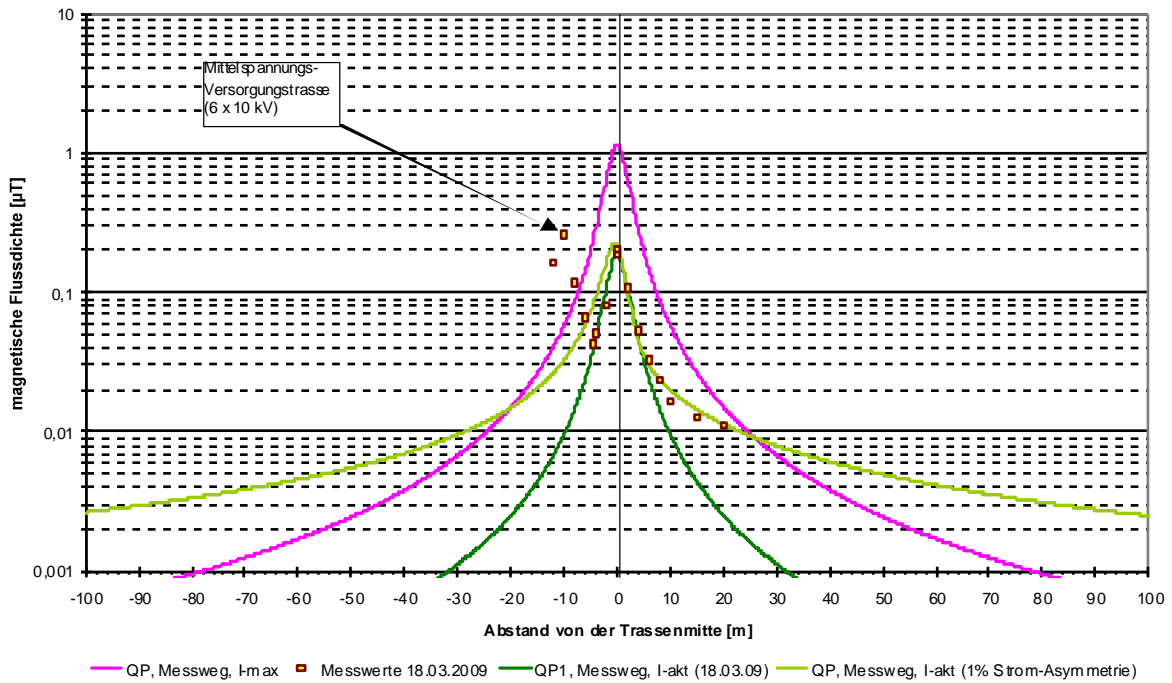


Abbildung 3/224a
 110 kV-Erdkabel, EK110_5: Querprofile der magnetischen Flussdichte, gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

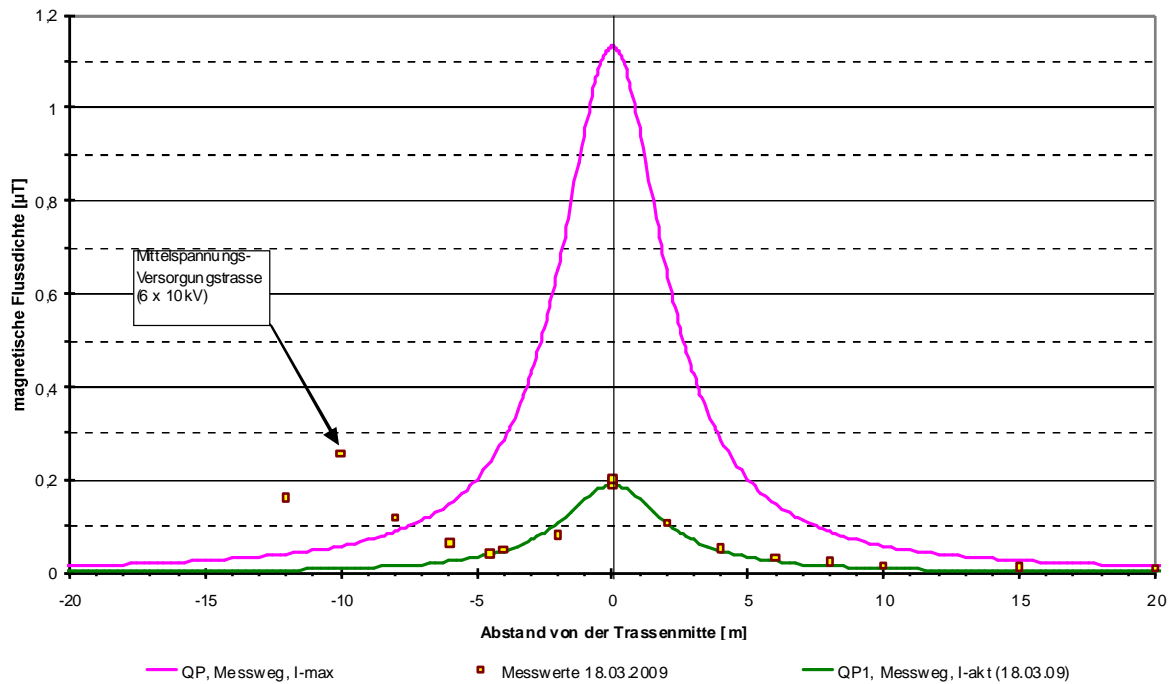


Abbildung 3/224b
 110 kV-Erdkabel, EK110_5: Querprofile der magnetischen Flussdichte,
 gemessene und für verschiedene Lastzustände berechnete Werte

Tabelle 3/37
 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messung und der Berechnung der magnetischen Flussdichte

EK110_5		h = 0,2 m	h = 1,0 m		
		B_{max} [µT]	B_{max} [µT]	B_{max} (r = 20 m) [µT]	r_{max} [m] mit $B(r) > 0,1 \mu T$
Messung		0,581	0,221	0,013	2
Rechnung	akt. Ströme	0,436	0,188	0,003	2
	mit 1% Strom-Asymmetrie	0,474	0,224	0,015	4
	max. Ströme	2,625	1,132	0,015	7

3.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich der Immissionen von Hochspannungsfreileitungen und -erdkabeln

In diesem Abschnitt erfolgt die Zusammenfassung aller Mess- und Berechnungsergebnisse dieser Untersuchung für Stromübertragungstrassen und der Vergleich der Immissionen zwischen den verschiedenen Trassenarten. Wie in den vorangehenden Abschnitten zu sehen war, stimmen Messungen und Berechnungen im Rahmen der Genauigkeit der relevanten Daten gut überein. Bei dem Vergleich zwischen den gemessenen und den berechneten Werten muss beachtet werden, dass die berechneten Werte auf dem jeweiligen (mittleren) Stromwert für den Messzeitraum basieren, während die in den obigen Tabellen am Ende jedes Abschnitts aufgeführten Messwerte das jeweilige Maximum im gesamten Messzeitraum darstellen. Diese können durch kurzzeitige Schwankungen, wie Stromspitzen, beeinflusst sein. Die Güte der Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den mit den von den Betreibern bereitgestellten Daten berechneten Werten ist besser in den obigen Abbildungen erkennbar, in denen die gemessenen Mittelwerte für jeden Messpunkt zusammen mit den berechneten Werten dargestellt sind.

In den Tabellen 38a/b sind die Ergebnisse dieser Untersuchung für das elektrische Feld und in 39a/b für die magnetische Flussdichte zusammengefasst, jeweils in a für jede untersuchte Trasse einzeln und in b als gemeinsamer Wert für jede Trassenart. Dabei sind für jede Trasse bzw. Trassenart die ermittelten Maximalwerte aufgeführt, einmal für den aktuellen Betriebszustand (der höhere Wert aus Messungen oder Berechnungen) und einmal für den maximalen Betriebszustand (nur Berechnungen). Zur Kennzeichnung aus welcher Quelle der jeweilige Wert stammt, sind die in Messungen ermittelten Werte kursiv gesetzt.

Tabelle 3/38a

Maximalwerte der elektrischen Immissionen an den untersuchten Freileitungstrassen, gemessene (kursiv) bzw. berechnete Werte für aktuelle bzw. maximale Lastflüsse, 1 m über dem Erdboden, Immissionen, die – kleinräumig – über dem Grenzwert der 26. BImSchV liegen, sind gelb unterlegt

Trassenbezeichnung	E_{\max} im Trassenbereich [kV/m]		$E(r_{FL}=50m)$ [kV/m]		r_{\max} mit $E(r_{\max}) > 0,01$ kV/m [m]	
	aktuell	maximal	aktuell	maximal	aktuell	maximal
FL380_1a	1,83	1,89	0,39	0,40	279	274
FL380_1b	5,16	6,18	0,59	0,62	348	348
FL380_2	5,92	8,81	0,40	0,46	317	309
FL380_3a	4,17	5,59	0,56	0,61	321	313
FL380_3b	2,80	3,47	0,47	0,53	291	291
FL380_3c	3,60	7,09	0,52	0,63	328	323
FL380_4a	1,52	1,97	0,55	0,49	227	235
FL380_4b	2,16	6,83	0,40	0,57	356	405
FL380_5	1,26	1,42	0,37	0,41	216	210
FL380_6	-	6,65	-	0,58	-	327
FL220_1	2,84	3,67	0,14	0,12	121	133

Tabelle 3/38a(Fortsetzung)

Maximalwerte der elektrischen Immissionen an den untersuchten Freileitungstrassen, gemessene (kursiv) bzw. berechnete Werte für aktuelle bzw. maximale Lastflüsse, 1 m über dem Erdboden, Immissionen, die – kleinräumig – über dem Grenzwert der 26. BImSchV liegen, sind gelb unterlegt

Trassen- bezeichnung	E_{\max} im Trassenbereich		$E(r_{FL}=50m)$		r_{\max} mit $E(r_{\max}) > 0,01$ kV/m	
	aktuell	maximal	aktuell		aktuell	maximal
FL110_1	0,59	0,64	0,05	0,05	116	115
FL110_2	<i>0,56</i>	0,67	0,05	0,05	111	111
FL110_3	<i>0,75</i>	0,87	0,05	0,05	109	109
FL110_4a	<i>0,92</i>	1,02	0,05	0,05	103	103
FL110_4b	1,19	1,47	<i>0,04</i>	0,04	78	75
FL110_5	1,59	2,19	0,03	0,02	65	62
FL110_6	0,67	0,89	<i>0,05</i>	0,04	80	79
FL110_7	0,63	0,94	0,04	0,05	87	105
FL110_8	0,83	0,96	<i>0,05</i>	0,05	100	102

Tabelle 3/38b

Maximalwerte der elektrischen Immissionen an Freileitungstrassen der drei Spannungsebenen 380, 220 und 110 kV, gemessene (kursiv) bzw. berechnete Werte für aktuelle bzw. maximale: Lastflüsse

Trassen- bezeichnung	E_{\max} im Trassenbereich [kV/m]		$E(r_{FL}=50m)$ [kV/m]		r_{\max} mit $E(r_{\max}) > 0,01$ kV/m [m]	
	aktuell	maximal	aktuell	maximal	aktuell	maximal
FL380_ges	5,92	8,81	0,59	0,63	356	405
FL220_1	2,84	3,67	<i>0,14</i>	0,12	121	133
FL110_ges	1,59	2,19	<i>0,05</i>	0,05	116	115

Erwartungsgemäß sind die für Maximalbedingungen berechneten Werte der elektrischen Feldstärke zwar höher als die gemessenen (zwischen 10 % und 40 %), da die Bodenabstände der Leiterseile dann (etwas) geringer sind als in den aktuellen Situationen, liegen aber in der gleichen Größenordnung.

Die höchsten Werte der elektrischen Feldstärke wurden für die 380 kV-Freileitungen ermittelt. Die maximale Feldstärke kann in kleinen Bereichen in der Spannungsfeldmitte bis zu 80 % über dem Grenzwert der 26. BImSchV liegen. Bei den anderen Spannungsebenen wird der Grenzwert von 5 kV/m nicht erreicht.

Für die magnetische Flussdichte ergab die Hochrechnung auf maximale Stromlast bei Freileitungen im Mittel einen Faktor 13 für das Verhältnis (B_{\max}/B_{akt}) und bei Erdkabeltrassen einen mittleren Faktor 8,5.

Tabelle 3/39a

Maximalwerte der magnetischen Immissionen an den untersuchten Freileitungs- und Erdkabeltrassen, gemessene (kursiv) bzw. berechnete Werte für aktuelle bzw. maximale: Lastflüsse, 1 m Höhe über dem Erdboden, für Erdkabeltrassen ist auch der Wert für 0,2 m Höhe im Trassenbereich angegeben

Trassen- bezeichnung	B_{\max} im Trassenbereich [μT]		$B(r_{\text{FL}}=50\text{m}, \text{ bzw. } r_{\text{EK}}=20\text{m})$ [μT]		r_{\max} mit $B(r_{\max}) > 0,1\mu\text{T}$ [m]	
	aktuell	maximal	aktuell	maximal	aktuell	maximal
FL380_1a	<i>0,42</i>	11,07	<i>0,13</i>	4,39	44	344
FL380_1b	3,94	51,62	<i>0,60</i>	5,65	119	371
FL380_2	<i>2,69</i>	48,77	<i>0,33</i>	3,43	90	310
FL380_3a	4,70	36,68	<i>0,87</i>	5,61	147	402
FL380_3b	<i>2,73</i>	22,96	<i>0,75</i>	5,33	141	396
FL380_3c	4,03	46,62	<i>0,85</i>	5,73	147	407
FL380_4a	1,80	11,88	<i>0,80</i>	4,07	162	405
FL380_4b	<i>4,80</i>	41,33	<i>0,91</i>	5,52	176	466
FL380_5	0,36	5,66	<i>0,19</i>	1,83	61	259
FL380_6	-	48,56	-	5,80	-	441
FL220_1	<i>2,60</i>	24,91	<i>0,12</i>	0,92	50	132
FL110_1	<i>0,75</i>	3,38	<i>0,09</i>	0,36	45	96
FL110_2	<i>0,55</i>	5,22	<i>0,09</i>	0,58	40	132
FL110_3	0,11	6,77	<i>0,01</i>	0,52	10	120
FL110_4a	<i>0,48</i>	6,51	<i>0,03</i>	0,42	25	106
FL110_4b	<i>0,94</i>	9,98	<i>0,04</i>	0,46	30	106
FL110_5	<i>4,11</i>	15,76	<i>0,10</i>	0,26	46	78
FL110_6	1,31	8,07	<i>0,20</i>	0,54	54	119
FL110_7	<i>1,36</i>	6,44	<i>0,10</i>	0,47	45	113
FL110_8	0,31	4,86	<i>0,03</i>	0,34	23	93
EK380_1	<i>0,33 / 0,39</i>	5,66 / 6,35	<i>0,11</i>	0,94	20	66
EK380_2, Weg Brücke	<i>3,52 / 6,22</i>	48,16 / 83,56	<i>0,19</i>	1,37	34	74
	<i>10,5 / 36,6</i>	131,4 / 339,8	-	-	-	-
EK380_3	<i>0,02 / 0,02</i>	0,04 / 0,05	<i>0,01</i>	0,02	0	0
EK380_4	-	85,74 / 167,8	-	0,84	-	39
EK220	<i>0,05 / 0,06</i>	0,36 / 0,39	<i>0,03</i>	0,17	0	29
EK110_1	<i>0,69 / 1,88</i>	2,33 / 5,18	<i>0,03</i>	0,04	6	11
EK110_2	<i>0,32 / 0,76</i>	4,35 / 9,92	<i>0,03</i>	0,06	4	15
EK110_3	<i>0,31 / 0,37</i>	4,61 / 9,10	<i>0,04</i>	0,04	4	13
EK110_4	<i>0,31 / 0,82</i>	1,31 / 3,18	<i>0,01</i>	0,02	4	8
EK110_5	<i>0,23 / 0,59</i>	1,14 / 2,63	<i>0,02</i>	0,02	2	7

Tabelle 3/39b

Maximalwerte der magnetischen Immissionen an Freileitungs- und Erdkabeltrassen der drei Spannungsebenen 380, 220 und 110 kV, gemessene (kursiv) bzw. berechnete Werte für aktuelle bzw. maximale (symmetrische) Lastflüsse, 1 m Höhe über dem Erdboden, für Erdkabeltrassen ist auch der Wert für 0,2 m Höhe im Trassenbereich angegeben

Trassen- bezeichnung	B_{\max} im Trassenbereich [μT]		$B(r_{\text{FL}}=50\text{m, bzw.}$ $r_{\text{EK}}=20\text{m})$ [μT]		r_{\max} mit $B(r_{\max}) > 0,1\mu\text{T}$ [m]	
	aktuell	maximal	aktuell	maximal	aktuell	maximal
FL380_ges.	4,80	51,62	0,91	5,73	176	466
FL220_1	2,60	24,91	0,12	0,92	50	132
FL110_ges.	4,11	15,76	0,20	0,58	54	132
EK380 ges mit Brücke	3,52 / 6,22	85,8 / 167,8	0,19	1,37	34	74
	10,5 / 36,6	131,4 / 339,8	-	-	-	-
EK220_1	0,05 / 0,06	0,36 / 0,39	0,03	0,17	0	29
EK110_ges	0,69 / 1,88	4,61 / 9,92	0,04	0,06	6	15

Die höchsten Werte der magnetischen Flussdichte ergaben sich für die in Einebenenanordnung geplante 380 kV-Erdkabeltrasse mit etwa 86 μT in 1 m Höhe über dem Erdboden, gefolgt von den Werten für 380 kV-Freileitungen, in einem Fall bis knapp über 50 μT . Der Vergleich der verschiedenen Trassen gleichen Typs zeigt, dass bei Freileitungen die Vergrößerung des minimalen Bodenabstandes der Leiterseile durch Erhöhung der Masten oder durch Verkürzung der Spannfelder eine Verringerung der magnetischen Immissionen um einen Faktor 2 bis 4 zur Folge hat, während bei Erdkabeltrassen eine größere Verlegetiefe schon um wenige Meter eine Reduktion um den Faktor 10 ermöglicht (vgl. EK380_1 und EK380_2).

Außerhalb der eigentlichen Trasse sind die Immissionen an Erdkabeltrassen deutlich niedriger als an Freileitungstrassen. Der Abstand, ab dem der Wert der magnetischen Flussdichte 0,1 μT unterschreitet, war bei den hier untersuchten Trassen (alle Spannungsebenen) für Freileitungen im Mittel einen Faktor 9 größer als der entsprechende Abstand bei Erdkabeltrassen der gleichen Spannungsebene.

Die Abbildungen 3/225 bis 3/228 zeigen als Zusammenfassung der Berechnungen der Querprofile aus den Maximal- und Mittelwerten für jeden Abstand, die aus allen zu einer Trassenart gehörenden Konfigurationen (Spannungsebenen, Trassenabschnitte und Phasenbeziehungen), die in dieser Untersuchung behandelt wurden, gebildet wurden, wobei die einzelne 220 kV-Trasse mit den 380 kV-Trassen zusammengefasst wurde. Grundlage sind immer die für den maximalen Betriebszustand berechneten Feldstärkewerte. In den Abbildungen a ist jeweils der gesamte Bereich in logarithmischer Darstellung wiedergegeben, und in b sind die Details in Trassennähe in linearem Maßstab dargestellt. Um die Unterschiede in den magnetischen Immissionen von Freileitungs- und Erdkabeltrassen direkt erkennen zu können, sind diese jeweils in einer Abbildung zusammen dargestellt. Da die Feldstärkemaxima verschiedener Konfigurationen in unterschiedlichen Abständen auftreten, ergeben sich durch die Überlagerung z.T. ungewöhnlich aussehende Querprofile (s. z.B. Abb. 3/226b), die so an einer realen Trasse nie auftreten können. Es ist zu beachten, dass die Auswahl der behandelten Konfigurationen nicht mit dem Ziel erfolgte, repräsentativ zu sein.

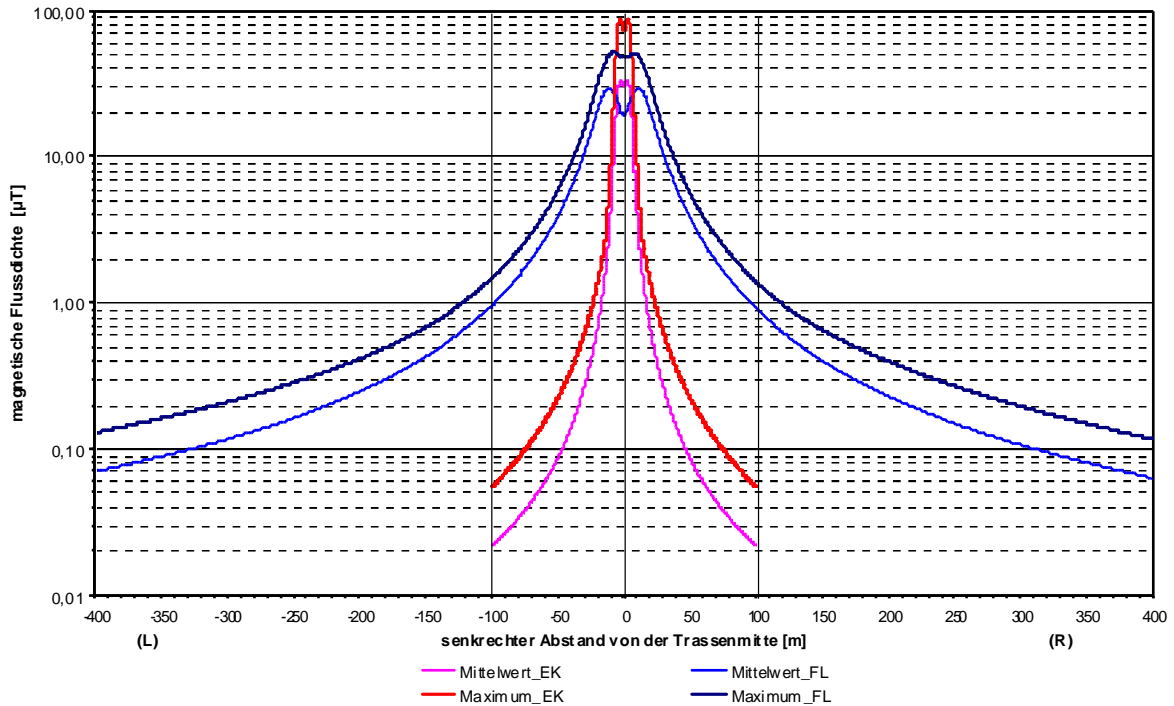


Abbildung 3/225a
 Magnetische Felder an 380/220 kV Freileitungs- (FL) und Erdkabeltrassen (EK): Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der für den maximalen Betriebszustand berechneten magnetischen Flussdichte aus allen hier behandelten Freileitungs- und Erdkabelkonfigurationen (FL: 15 Konfig., EK: 8 Konfig.)

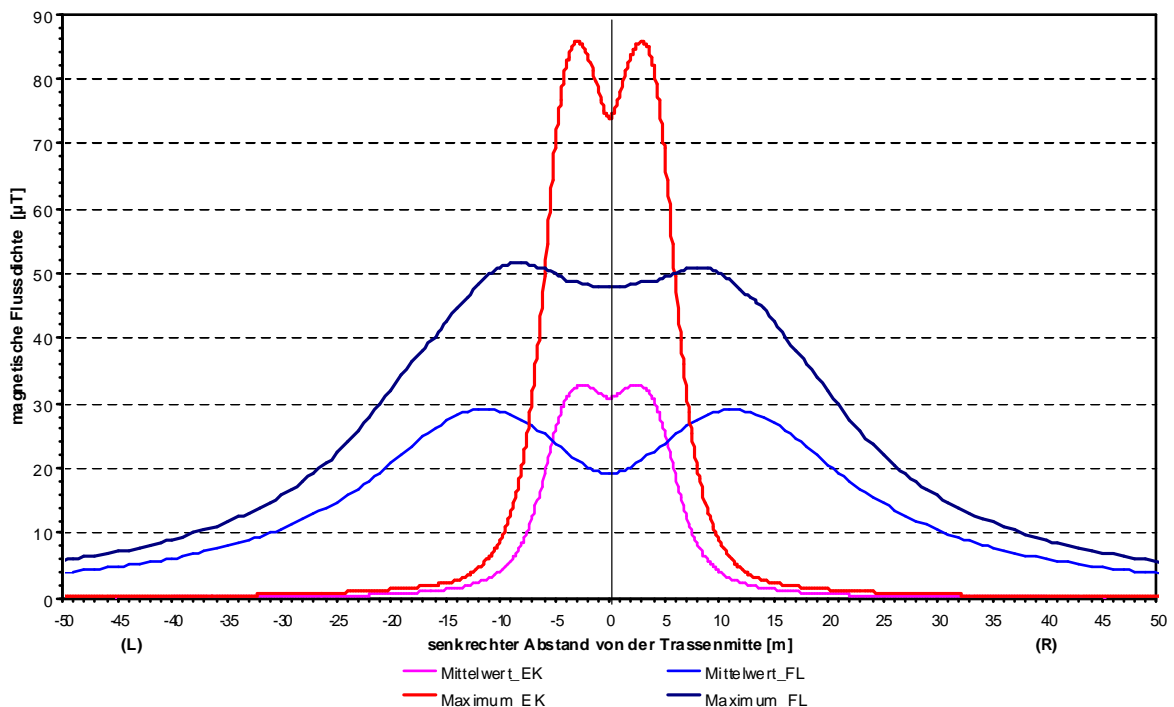


Abbildung 3/225b
 Magnetische Felder an 380/220 kV Freileitungs- (FL) und Erdkabeltrassen (EK): Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der für den maximalen Betriebszustand berechneten magnetischen Flussdichte aus allen hier behandelten Freileitungs- und Erdkabelkonfigurationen (FL: 15 Konfigurationen, EK: 8 Konfigurationen)

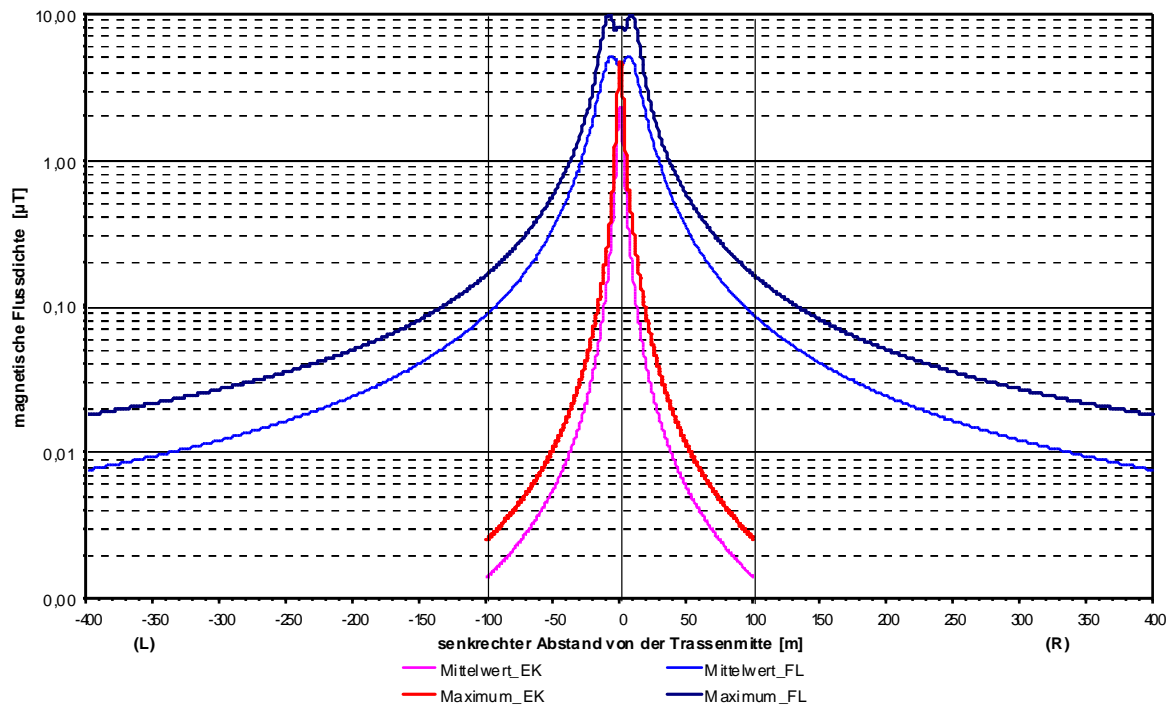


Abbildung 3/226a
 Magnetische Felder an 110 kV Freileitungs- (FL) und Erdkabeltrassen (EK): Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der für den maximalen Betriebszustand berechneten magnetischen Flussdichte aus allen hier behandelten Freileitungs- und Erdkabelkonfigurationen (FL: 10 Konfig., EK: 7 Konfig.)

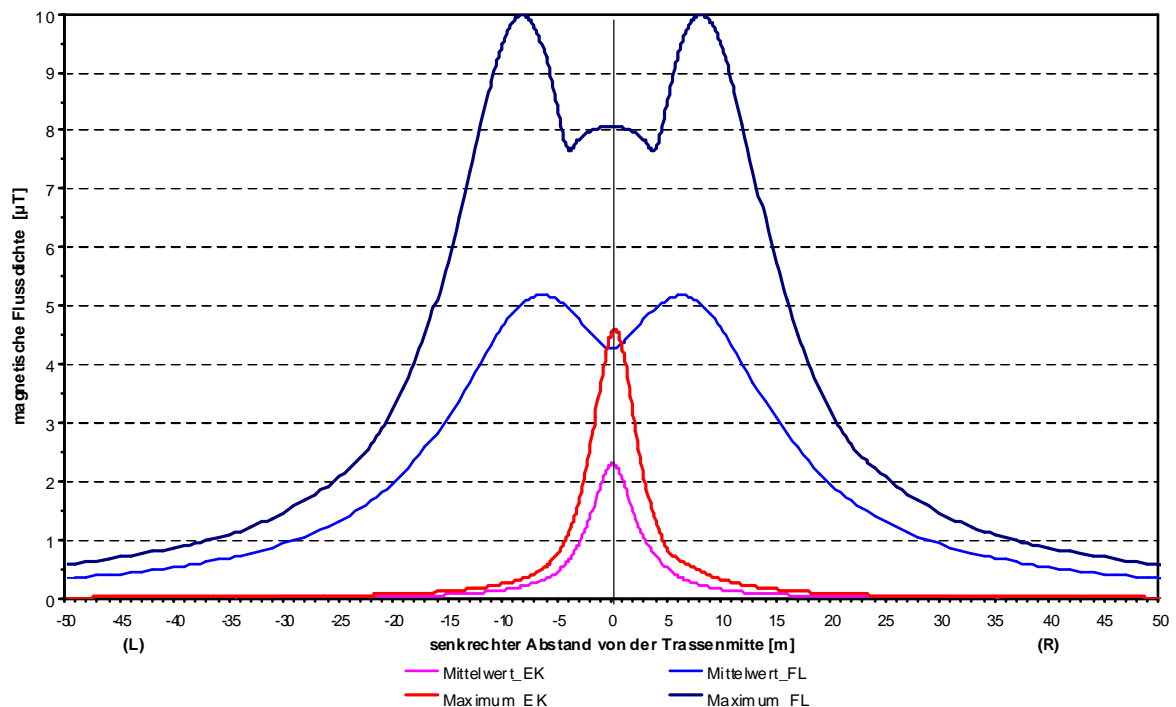


Abbildung 3/226b
 Magnetische Felder an 110 kV Freileitungs- (FL) und Erdkabeltrassen (EK): Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der für den maximalen Betriebszustand berechneten magnetischen Flussdichte aus allen hier behandelten Freileitungs- und Erdkabelkonfigurationen (FL: 10 Konfigurationen, EK: 7 Konfigurationen)

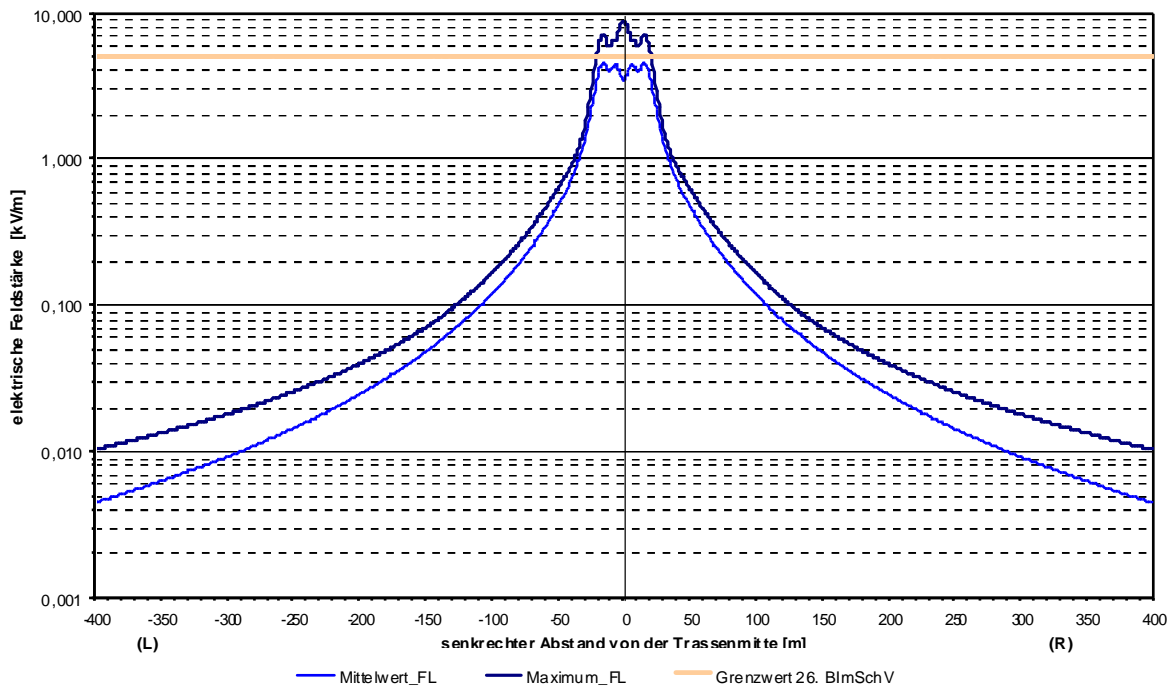


Abbildung 3/227a
 Elektrische Felder an 380/220 kV Freileitungstrassen: Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der für den maximalen Betriebszustand berechneten elektrischen Feldstärke (13 Konfig.)

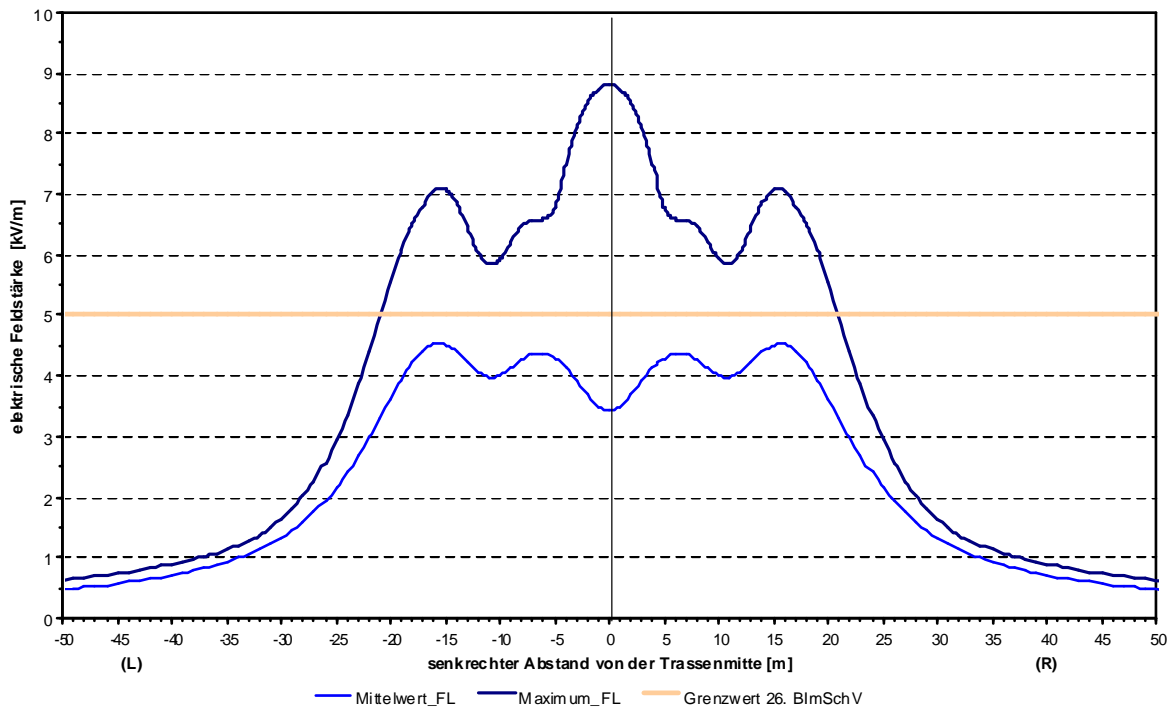


Abbildung 3/227b
 Elektrische Felder an 380/220 kV Freileitungstrassen: Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der für den maximalen Betriebszustand berechneten elektrischen Feldstärke (13 Konfig.)

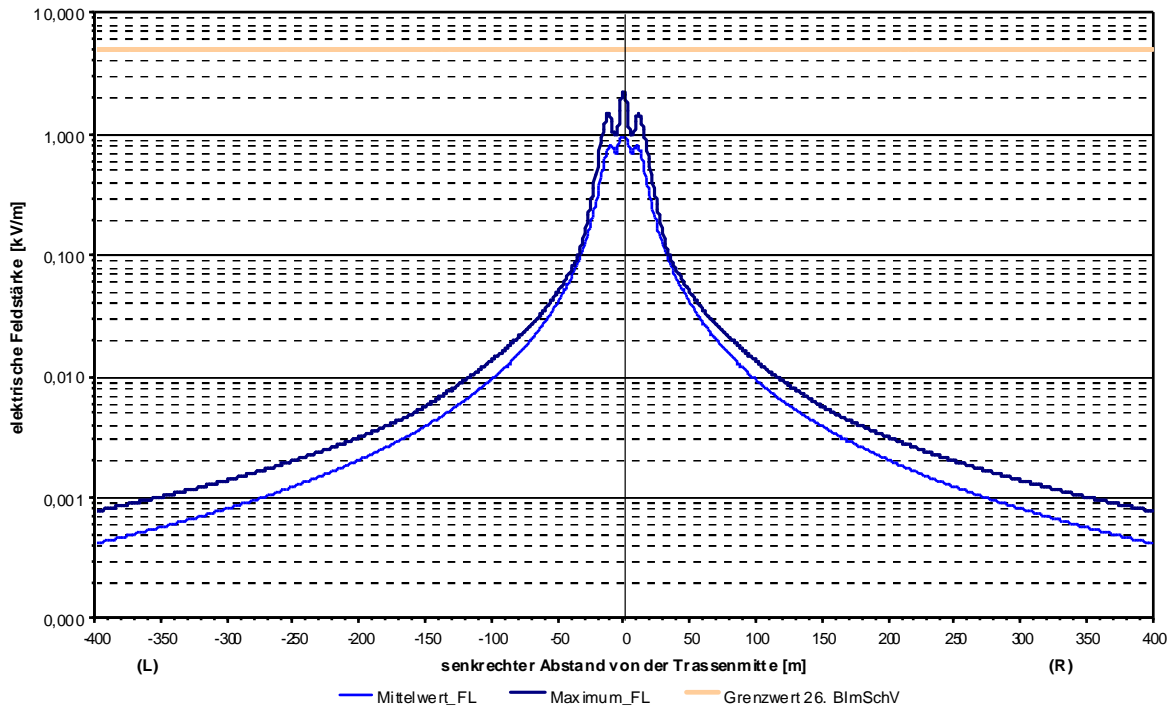


Abbildung 3/228a
 Elektrische Felder an 110 kV Freileitungstrassen: Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der für den maximalen Betriebszustand berechneten elektrischen Feldstärke (9 Konfig.)

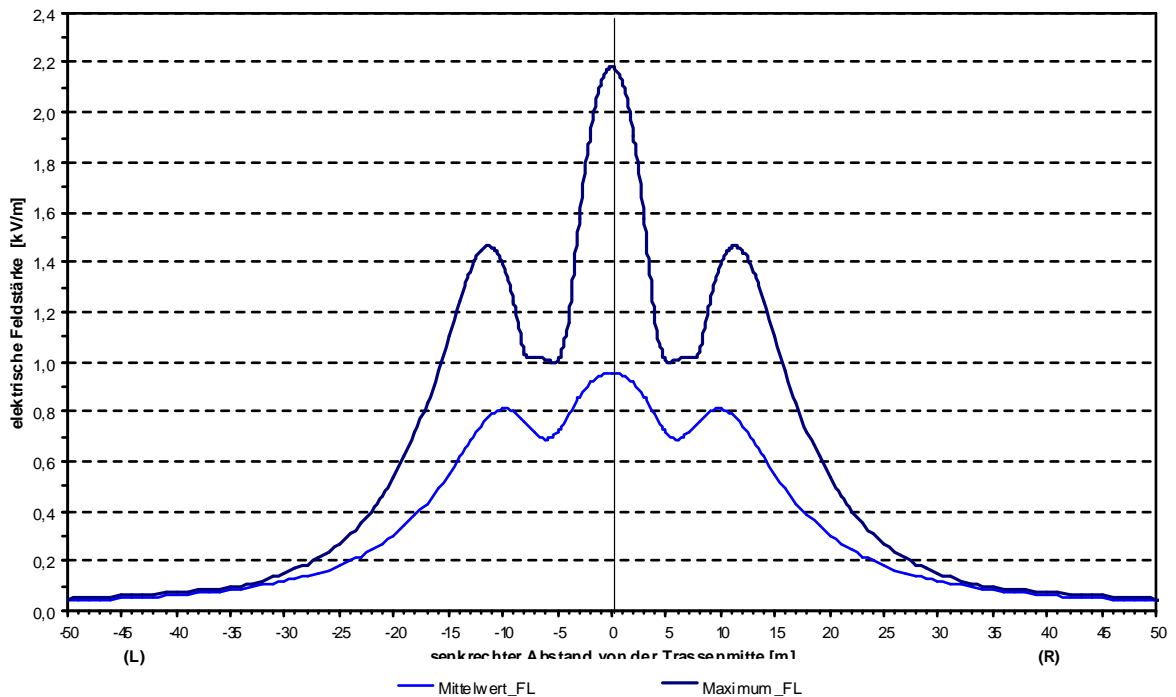


Abbildung 3/228b
 Elektrische Felder an 110 kV Freileitungstrassen: Maximalwert- und Mittelwert-Querprofile der für den maximalen Betriebszustand berechneten elektrischen Feldstärke (9 Konfig.)

3.3 Vergleich der Ergebnisse dieses Vorhabens mit denjenigen anderer Untersuchungen

3.3.1 Messungen

Der Vergleich der im Verlauf dieses Vorhabens gewonnenen Messwerte mit denjenigen aus anderen Untersuchungen ergibt angesichts der großen Spannweite der möglichen Messwerte eine erstaunlich gute Übereinstimmung (s. Tab. 3/40 und 3/41). Da in diesem Vorhaben die Messobjekte nicht speziell danach ausgesucht wurden, Orte mit möglichst hohen Feldstärken zu untersuchen, wie in anderen Untersuchungen, ist es nicht erstaunlich, dass dort z.T. höhere Maximalwerte angegeben wurden. Dies gilt entsprechend auch für die Mittelwerte. Bei diesen ist zusätzlich zu bedenken, dass in einigen der früheren Untersuchungen nur die Maximalwerte angegeben sind, so dass der hier zum Vergleich berechnete 'Mittelwert' z.T. eher einen 'mittleren Maximalwert' der Einzeluntersuchungen wiedergibt, während in diesem Vorhaben der Mittelwert über alle entsprechenden Einzelmesswerte gebildet wurde.

Tabelle 3/40

Vergleich der Messwerte für die magnetische Flussdichte aus diesem Vorhaben mit den Ergebnissen aus anderen Untersuchungen

Trassenart			magnetische Flussdichte [μT]			
			dieses Vorhaben		andere Untersuchungen	
			Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
Freileitung	380 /220 kV	Trasse	4,791	1,658	5,300	2,731
		50 m	0,841	0,381	0,800	0,418
	110 KV	Trasse	4,103	0,775	2,000	0,832
		50 m	0,131	0,052	0,300	0,108
Erdkabel	380/220 kV	Trasse	3,517	0,852	-	-
		10 m	0,514	0,222	-	-
	110 KV	Trasse	0,603	0,182	0,770*	0,220*
		10 m	0,057	0,032	0,050	0,026

*für Messungen in 1 m Höhe über dem Erdboden, Maximum = 1,85 μT und Mittelwert = 0,48 μT bei Einschluss der Messungen in 0,5 m über dem Erdboden

Tabelle 3/41

Vergleich der Messwerte für die elektrische Feldstärke aus diesem Vorhaben mit den Ergebnissen aus anderen Untersuchungen

Trassenart			elektrische Feldstärke [kV/m]			
			dieses Vorhaben		andere Untersuchungen	
			Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
Freileitung	380 /220 kV	Trasse	5,912	2,375	8,100	3,148
		50 m	0,521	0,272	1,200	0,446
	110 KV	Trasse	1,542	0,601	2,000	0,642
		50 m	0,045	0,030	0,100	0,051

3.3.2 Berechnungen

Der Vergleich der im Verlauf dieses Vorhabens gewonnenen Berechnungsergebnisse mit denjenigen aus anderen Untersuchungen ergab für das elektrische Feld eine recht gute Übereinstimmung (s. Tab. 3/42). Für das Magnetfeld wurden in dieser Untersuchung aber an der 220 kV-Freileitung und an zwei 110 kV-Freileitungen deutlich höhere maximale Immissionen ermittelt als in vorangegangenen Untersuchungen. Für die anderen Trassen ergaben sich auch für die magnetische Flussdichte Werte, die den Ergebnissen aus den bisherigen Untersuchungen entsprechen.

Tabelle 3/42

Vergleich der Ergebnisse aus diesem Vorhaben mit denen aus anderen Untersuchungen: Maximalwerte der magnetischen Immissionen an Freileitungs- und Erdkabeltrassen der drei Spannungsebenen 380, 220 und 110 kV, berechnete Werte für maximale Lastflüsse

Trassenart	Spannungsebene	B_{\max} [μ T]		E_{\max} [kV/m]	
		dieses Vorhaben	bisherige Untersuchungen	dieses Vorhaben	bisherige Untersuchungen
FL	380 kV	51,6	48,7	8,8	8,4
	220 kV	24,9	7,5	3,7	4,8
	110 kV	15,8	5,5	2,2	2,0
EK	380 kV	85,7	-	entfällt	
	220 kV	0,4	-		
	110 kV	4,6	< 10,0		

4 Messungen der magnetischen Immissionen in Wohnungen

Zur Erfassung der Exposition gegenüber netzfrequenten Magnetfeldern in Wohnungen waren exemplarische Messungen der häuslichen Immissionen durchzuführen. In Häusern fernab von Hochspannungstrassen und anderen in Bezug auf die von ihnen ausgehenden Magnetfeldemissionen vergleichbaren Installationen der Stromversorgung wurden in fünf Wohnungen exemplarische Punkt-Messungen der häuslichen Immissionen durchgeführt. Dabei wurden möglichst verschiedene Wohnsituationen berücksichtigt. In einer dieser Wohnungen erfolgten zur Bestimmung des Tagesganges an mehrere Langzeitmessungen. Für die Erfassung der Exposition in Wohnungen in der Nähe von Hochspannungstrassen waren Messungen in je fünf Wohnungen an Hochspannungsfreileitungen und an Erdkabeltrassen vorgesehen, sowie vier Dauermessungen in Wohnungen an unterschiedlichen Trassen.

Die Messungen an den Erdkabeltrassen (vgl. Abschnitte 3.1.2.5/6/7) zeigten schnell, dass der Bereich, in dem mit merklichen Beiträgen zu der Gesamtimmission vom Strom auf der Trasse zu rechnen sein konnte, recht schmal war (maximal ± 20 m bei 380 kV und ± 10 m bei 110 kV-Trassen). Da keine entsprechenden Wohnungen gefunden werden konnten, und, um in der vorgesehenen Zeit eine größeren Anzahl an Messungen in Wohnungen an Freileitungstrassen durchführen zu können, wurde die Verteilung der Messungen geändert (s. Tab. 4/1): es wurde in fünf Wohnungen an 380 kV- und in sechs an 110 kV-Freileitungstrassen gemessen, sowie drei Dauermessungen an Freileitungstrassen. Daneben wurde zur Bestätigung des geringen Einflusses der Erdkabeltrassen zusätzlich in zwei Wohnungen, die möglichst dicht an verschiedenen 110 kV-Erdkabeltrassen lagen, gemessen, in einer von ihnen wurde auch eine Dauermessung durchgeführt.

Tabelle 4/1
Verteilung der Messungen an den verschiedenen Spannungsebenen und Trassenarten

	vorgesehen		durchgeführt	
	Einzelpunkte	24 h-Messungen	Einzelpunkte	24 h-Messungen
ohne Trassen	5 Wohnungen	1 Messung	5 Wohnungen	1 Wohnung (mehrfach)
380 kV-Freileitungen	5 Wohnungen	1 Messung	5 Wohnungen	2 Messungen
110 kV-Freileitungen		1 Messung	6 Wohnungen	1 Messung
380 kV-Erdkabel	5 Wohnungen	1 Messung	keine	keine
110 kV- Erdkabeln		1 Messung	2 Wohnungen	1 Messung

4.1 Vorgehen bei der Immissionsbestimmung

Die Messungen in nicht-exponierten Wohnungen (keine Hochspannungstrasse in der Nähe) und in exponierten Wohnungen wurden nach dem gleichen Verfahren durchgeführt (s.u.). Nur bei der Auswahl der Räume, in denen Messungen vorgenommen wurden, und bei der Wahl des 'Referenzraumes' (s.u.) wurde als weiteres Auswahlkriterium die Höhe der erwar-

ten Immission durch die benachbarte Stromtrasse beachtet. Neben den Wünschen der Bewohner (z.B. wollten einige, dass die Privatsphäre des Schlafzimmers gewahrt blieb, während andere gerade dort eine Untersuchung wünschten) und den Kriterien 'möglichst häufige Nutzung' und 'Vorhandensein von elektrischen Geräten', weshalb oft das Wohnzimmer als Referenzraum ausgewählt wurde, wurde in den exponierten Wohnungen darauf geachtet, dass – soweit dies machbar war – einer der wahrscheinlich (relativ) am stärksten exponierten Räume in die Untersuchung eingeschlossen wurde, z.B. ein Raum in der obersten Etage und/oder auf der Hausseite zur Trasse hin.

4.1.1 Punktmessungen und Spektren

Die Immissionen wurden in jeder Wohnung in drei Räumen (Wohnzimmer, Schlafzimmer und Kinderzimmer bzw., wenn es letzteres nicht gab, ein weiteres anderes Zimmer) jeweils in der Raummitte in einem Meter Höhe über dem Fußboden, ermittelt.

Um die Größe der räumlichen Schwankungen abschätzen zu können, wurden in einem Raum, dem 'Referenzraum' (RR, meist im Wohnzimmer), an vier weiteren Punkten die gleichen Messungen durchgeführt, so dass sich ein 5-Punkt-Messraster ergab (s. Abb. 4.1). Wenn sich ein Messpunkt relativ dicht an einem eingeschalteten elektrischen Gerät befand, so wurde dies im Protokoll festgehalten, damit bei der Auswertung neben dem Mittelwert über alle Messpunkte auch der Mittelwert über alle Messpunkte ohne direkte Nachbarschaft zu einer Feldquelle bestimmt werden konnte. Mit den Werten aus den anderen Räumen wurde ein 'Wohnungswert' ermittelt.

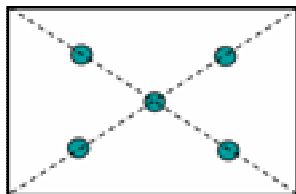


Abbildung 4/1
Verteilung der Messpunkte in einem Raum als 5-Punkt-Raster

Um die kurzzeitigen Schwankungen auszugleichen, wurde an allen Messpunkten mindestens eine Minute lang alle fünf Sekunden ein Einzelmesswert (vgl. Abschnitt 4.1.3) aufgezeichnet und protokolliert, zum einen als Breitbandwert (30 bis 2.000 Hz) und zum anderen als 50 Hz-Filterwert. Da es darum ging, realistische Expositionen der Bewohner zu ermitteln, wurden die Messungen zunächst 'im Normalzustand' durchgeführt, das heißt, dass alle elektrischen Geräte, die üblicherweise in Betrieb sind, auch während der Messung eingeschaltet waren.

In dem 'Referenzraum' wurde in der Raummitte, zusätzlich ein Frequenzspektrum aufgezeichnet, ebenfalls bei eingeschalteten Geräten. Außerdem wurden dort die Messungen (Breitbandmessung, 50 Hz-Filterwert, Spektrum) wiederholt, wenn möglichst alle Geräte ausgeschaltet waren. In einem Fall wurden die Messungen mit dem Gerätezustand AUS an allen Punkten wiederholt.

4.1.2 Dauermessungen

In einer nicht-exponierten Wohnung wurden mehrere Langzeit-Dauermessungen (pro Minute ein RMS-Effektivwert als 1-Sekunden-Mittelwert, Breitbandwert) und in vier exponierten Wohnungen (je einmal an zwei verschiedenen 380 kV-Freileitungen, an einer 110 kV-Freileitung und an einer 110 kV-Erdkabeltrasse) je eine durchgeführt. Für die Langzeitmessungen wurde das Messgerät so platziert dass es möglichst wenig den Tagesablauf der Bewohner stört, die Messwerte möglichst wenig durch einzelne Haushaltsgeräte dominiert werden und – in den Wohnungen in der Nähe von Anlagen der Stromübertragung – in möglichst geringem Abstand zu den äußeren Quellen positioniert wird. Dafür eignete sich oft eine Fensterbank in Richtung zur Stromtrasse. Deshalb wurde das Messgerät auch in der nicht-exponierten Wohnung auf einer Blumenbank vor dem Fenster aufgestellt. In einer weiteren nicht-exponierten Wohnung wurde zusätzlich eine Messreihe über knapp vier Stunden aufgezeichnet, dabei war das Messgerät auf einem Regal im Durchgangsbereich zwischen dem Wohnzimmer und der Küche platziert.

4.1.3 Verwendetes Messgerät

Das Gerät (ausführliche Beschreibung s. Abschnitt 3.1.1.3) kann für automatische Dauermessungen in der Betriebsart 'Feldstärkemessung' mit bis zu 4095 Messwerten bzw. bis zu ca. 34 h (bei einem Messwert pro Minute) eingesetzt werden, wobei der Zeitabstand zwischen den Einzelmessungen frei gewählt werden kann (5 s - 24 h).

4.1.4 Umrechnung auf andere Lastzustände

Ziel dieser Untersuchung war zum einen die Bestimmung der realen Expositionssituation in Wohnungen, die in der Nähe von Anlagen der elektrischen Energieverteilung liegen. Hierfür wurden Messungen der aktuellen Gesamtmissionen durchgeführt. Zum anderen sollten die möglichen Expositionen für Zeiten mit maximaler Auslastung der Stromtrassen ermittelt werden. Die externen Immissionsbeiträge, wie sie von den Stromtrassen bei maximaler Auslastung ausgehen, können mit dem Feldberechnungsprogramm berechnet werden. Allerdings sind die Änderungen in der Stärke der magnetischen Flussdichte mit dem Abstand (horizontal wie vertikal) im Nahbereich der Trassen auch bei kleinen Schritten relativ groß. Ein Fehler in der Abstandbestimmung von 1 m führt so im Nahbereich zu einem Fehler von etwa 10-20 % in der Immission. Bei einer Ungenauigkeit im horizontalen Abstand bis zu 3 m und ca. 1 m im vertikalen Abstand muss bei der Ermittlung der maximalen externen Immissionsbeiträge mit einem möglichen Fehler von typischer Weise bis 50 % gerechnet werden.

Um die aktuellen externen Immissionsbeiträge bestimmen und auf andere Lastzustände umrechnen zu können, wurden für die Zeiten, in denen in den exponierten Wohnungen gemessen wurde, die Stromlasten auf den entsprechenden Trassen abgefragt. Allerdings schwanken die Stromwerte und damit die externen Beiträge zur Immission auch innerhalb weniger Minuten um teilweise bis zu 12 %. Damit sind die von den Stromschwankungen auf den Trassen verursachten Änderungen in den aktuellen externen Beiträgen zur Gesamtmission in der Nähe von Freileitungstrassen ($\Delta B_{\text{ext}} \sim 20\text{-}200\text{nT}$) oft größer als die erwarteten Beiträge durch die hausinternen Quellen, solange Abstände von etwa einem Meter zu elektri-

schen Geräten (bei einigen stromintensiven Geräten von etwa zwei Metern) nicht unterschritten werden.

Anders stellt sich die Situation in Wohnungen dar, die in der Nähe zu Erdkabeltrassen liegen. Hier sind die Schwankungen bei den Werten, die durch Änderungen in den Immissionsbeiträgen durch die hausinternen Quellen (wohnungintern und Nachbarschaft) verursacht werden (vgl. Abschnitt 4.2), größer als die erwarteten externen Immissionsbeiträge durch die aktuellen Ströme auf den Erdkabeltrassen. Hier können die mit dem Feldberechnungsprogramm (für die aktuelle Situation) bestimmten externen Beiträge von den gemessenen Gesamtimmisionen abgezogen werden, um die tatsächlichen hausinternen Beiträge zu ermitteln, die dann zu den auf die maximalen Betriebsströme hochgerechneten externen Beiträgen wieder hinzuaddiert werden können, um die maximal zu erwartende Gesamtbelastung zu ermitteln. Erst die Hochrechnung auf maximale Stromlast auf den Erdkabeltrassen ergibt externe Beiträge, die (etwas) größer sind als die hausinternen Beiträge. Durch die Unsicherheit in der Abstandbestimmung liegt hier die Ungenauigkeit in der Ermittlung der maximalen externen Immissionsbeiträge bei bis zu 50 %, allerdings bezogen auf einen relativ kleinen Wert, so dass die absolute Unsicherheit ($< 0,1 \mu\text{T}$ bei den hier untersuchten Wohnungen) nur einen sehr kleinen Anteil ($< 1 \text{‰}$) vom Grenzwert erreicht.

4.2 Ergebnisse der Messungen in Wohnungen fernab von Hochspannungstrassen (nicht-exponierte Wohnungen)

4.2.1 Beschreibung der Wohnungen

Für die Messungen in Wohnungen fernab von Einrichtungen der Stromversorgung wurden fünf verschiedene Wohnsituationen gewählt:

- EFH: frei stehendes, modernes Einfamilienhaus in Niedrigenergie-Bauweise (BJ 2005), dörfliche Umgebung
- RH: modernes Reihenhaus in Niedrigenergie-Bauweise (BJ 1997), Stadtrandgebiet
- MFH: Wohnung (2. OG von 3), Mehrfamilienhaus (BJ ~ 1970), Stadtgebiet
- GWA: Wohnung (2. OG von 5), moderne Großwohnanlage (BJ 2000), Stadtgebiet
- MFAB: Dachgeschosswohnung (4.+ 5. OG), Mehrfamilien-Altbau (BJ ~ 1930), Innenstadt

4.2.2 Punktmessungen

Bei den Punktmessungen in den Wohnungen (s. Tabellen 4/2-4/6) zeigte sich, dass ein Großteil der zeitlichen Schwankungen in den Messwerten der magnetischen Flussdichte nicht durch Quellen in der vermessenen Wohnung verursacht wurde. Das heißt, es gibt außerhalb der Wohnung bzw. des Raumes, auch ohne große Stromversorgungsanlagen in der Nachbarschaft, Quellen, die deutlich höhere Immissionen verursachen als rauminterne Quellen. Gelegentlich lagen aus diesem Grunde die Messwerte bei ausgeschalteten Elektrogeräten sogar höher als bei eingeschalteten Geräten. Mögliche Quellen außerhalb der Wohnung sind: in Betrieb befindliche Geräte in anderen Wohnungen/Räumen mit hoher Leistungsaufnahme und/oder weitreichenden Streufeldern, stark unterschiedliche Last auf den Phasen, was zu einer schlechteren Kompensation führt, oder vagabundierende (Erd)Ströme. Aus

dem gleichen Grunde ergaben die 50 Hz-Filter-Messungen zum Teil höhere Werte als Messungen am gleichen Ort im Breitbandmodus. Hierfür reicht es, dass die Schwankungen bzw. die zusätzlichen Beiträge der 50 Hz-Feldanteile durch Quellen außerhalb des Raumes, in dem gerade gemessen wurde, größer sind als die Oberwellenanteile der Quellen im Raum, die bei beiden Messungen im gleichen Betriebszustand waren.

In der Großwohnanlage war zunächst eine andere Wohnung für die Messung vorgesehen. Als dort innerhalb kürzester Zeit Sprünge in der Höhe der Messwerte von bis zu $0,350 \mu\text{T}$ auftraten, ohne dass es dafür eine Erklärung innerhalb der Wohnung gab, wurden die Messungen abgebrochen. Die daraufhin erfolgte Suche nach der Quelle für diese Schwankungen ergab, dass sich in etwa 10 m bis 15 m Entfernung schräg unter der Wohnung eine Transformatorstation mit der Niederspannungsverteilung für den gesamten Wohnkomplex, für die Fahrstühle und für einen im gleichen Gebäude befindlichen Internet-Knotenpunkt befand. Die stattdessen ausgesuchte Wohnung in der Großwohnanlage lag gut 30 m weiter entfernt von dem Transformator-Raum. Entsprechend dem Abstands-Quadrat-Gesetz wurden dort - bei ausgeschalteten Geräten - nur noch Schwankungen von ca. $0,050 \mu\text{T}$ festgestellt, ein Wert, wie er auch durch die Geräte in Nachbarwohnungen oder Nebenräumen zustande kommen kann, z.B. führte in einem Fall die Waschmaschine im Bad neben dem Schlafzimmer zu einer Erhöhung der Messwerte um ca. $0,045 \mu\text{T}$.

Erwartungsgemäß lagen die Messwerte im freistehenden Einfamilienhaus am niedrigsten. Dort ergab sich ein Wohnungs-Mittelwert von ca. $0,01 \mu\text{T}$ (s. Tabelle 4/2 bis 4/6). Im Reihenhhaus, verursacht durch die Nachbarn und die größere Anzahl an elektrischen Geräten in dieser Wohnung, lag der Wohnungs-Mittelwert fast beim Vierfachen, aber immer noch unter $0,04 \mu\text{T}$. In der modernen Großwohnanlage lag der Wohnungs-Mittelwert bei etwa $0,06 \mu\text{T}$ (ohne den Messpunkt, neben dem Fernseher). Am höchsten lag der Wohnungs-Mittelwert in dem einfachen Mehrfamilienhaus, einem Wohnblock aus den 1970er Jahren. Der Einfluss durch unterschiedlichen Stromverbrauch in den anderen Wohnungen, sichtbar in den Messwertschwankungen in einer Messreihe, war dort größer als derjenige durch die Geräte in der Wohnung selbst. Im Mittel erreichte die magnetische Flussdichte dort etwa $0,08 \mu\text{T}$. In der Dachwohnung in dem Mehrfamilien-Altbau lag der Wohnungs-Mittelwert bei ausgeschalteten Geräten unter $0,06 \mu\text{T}$ und bei eingeschalteten Geräten zwischen gut $0,07 \mu\text{T}$ und fast $0,085 \mu\text{T}$, je nachdem ob die Messpunkte MP1 und MP4 weniger als einen Meter neben den Geräten mitgerechnet werden oder nicht.

In den folgenden Tabellen sind die Messergebnisse zusammengefasst. Dabei sind für jeden Messpunkt zunächst die Werte für die zeitliche Auswertung der Messergebnisse (Messzeitraum pro Messpunkt mindestens eine Minute, ein Wert alle fünf Sekunden) für eingeschaltete Geräte angegeben. Daneben sind die aus den so gebildeten 'Punkt'-Werten berechneten Wohnungswerte aufgeführt. Diese werden aufgrund der fünf Messungen im Referenzraum verglichen mit jeweils nur einer Messung in den beiden anderen Räumen von der Immissionshöhe im Referenzraum dominiert. Trotz dieser Einschränkung sollte eine Zusammenfassung der Ergebnisse für eine Wohnung in einem Wert erfolgen. Wenn an einem Messpunkt länger als eine Minute gemessen wurde, erfolgte die Wohnungswertbildung aus den zeitlichen Mittelwerten für jeden Messpunkt und nicht aus allen Einzelwerten, da sonst eine zusätzliche Ungleichgewichtung der einzelnen Messorte aufgrund unterschiedlich langer Messzeiten in das Ergebnis eingeflossen wäre. Außerdem ist das Ergebnis der Messung in der

Mitte des Referenzraumes (RR) bei so weit wie möglich ausgeschalteten Geräten dokumentiert.

Die höchsten Einzelwerte der magnetischen Flussdichte für Wohnungen ohne größere Installationseinrichtung der Stromversorgung in der Nähe wurden mit 0,174 μT in dem einfachen Mehrfamilienhaus gemessen, in mehr als zwei Meter Entfernung von dem nächsten eingeschalteten Gerät, d.h. verursacht durch den allgemeinen Stromverbrauch im Haus, und in der Großwohnanlage mit 0,194 μT in 0,8 m Entfernung zu einem kleinen Röhrenfernseher. In der Wohnung in der Nähe zur Transformatorstation mit der Niederspannungsverteilung wurden bis 0,430 μT gemessen, am gleichen Messpunkt wurden wenige Minuten später nur 0,07 bis 0,08 μT festgestellt, nur geringfügig mehr als der Wohnungsmittelwert in der anderen Wohnung der gleichen Großwohnanlage.

Tabelle 4/2

Auswertung der Messungen im freistehenden Einfamilienhaus (EFH)
(RR: Wohnzimmer, R2: Kinderzimmer, R3: Arbeitszimmer)

EFH		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		zeitliche Auswertung für jeden Messpunkt						Geräte AN
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR	Mitte	0,014	0,014	0,012	0,017	0,001		
		0,007	0,008	0,005	0,011	0,002		
	MP1	0,011	0,011	0,005	0,017	0,003		
		0,008	0,008	0,006	0,010	0,001		
	MP2	0,016	0,016	0,015	0,017	0,001		1,5 m zur Stereoanlage
		0,013	0,012	0,008	0,016	0,002		
	MP3	0,013	0,013	0,009	0,015	0,002		1,0 m zur Stehlampe
		0,011	0,011	0,008	0,014	0,002		
MP4	0,008	0,008	0,006	0,009	0,001			
	0,010	0,010	0,008	0,012	0,002			
R2	Mitte	0,009	0,009	0,004	0,014	0,003		
		0,014	0,013	0,008	0,019	0,003		
R3	Mitte	0,005	0,005	0,004	0,006	0,001		
		0,006	0,005	0,003	0,007	0,001		
RR	Mitte	0,018	0,018	0,015	0,021	0,001	Geräte AUS	
		0,015	0,014	0,010	0,019	0,003		
		(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte						
		Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte		
Wohnungswerte		0,011 0,010	0,011 0,010	0,004 0,003	0,021 0,019	0,004 0,003	Geräte AN	

Tabelle 4/3

Auswertung der Messungen im Reihenhaus (RH)

(RR: Wohnzimmer, R2: Kinderzimmer, R3: Schlafzimmer)

RH		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		zeitliche Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte AN	
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR	Mitte	0,048	0,048	0,019	0,077	0,014		
		0,037	0,038	0,015	0,076	0,018		
	MP1	0,045	0,046	0,036	0,059	0,006		1,5 m zu TV, Radio und DVD
		0,022	0,023	0,013	0,033	0,006		
	MP2	0,048	0,045	0,025	0,058	0,011		
		0,028	0,035	0,016	0,083	0,019		
	MP3	0,033	0,032	0,018	0,043	0,007		
		0,048	0,050	0,035	0,071	0,012		
	MP4	0,022	0,021	0,015	0,028	0,004		1,0 m zu einer Halogensteh- lampe
		0,045	0,043	0,034	0,051	0,006		
R2	Mitte	0,031	0,034	0,017	0,067	0,013		
		0,028	0,030	0,010	0,073	0,013		
R3	Mitte	0,028	0,037	0,028	0,037	0,028	Mittelwert = 0,073 μT mit laufender Wasch- maschine i m Bad nebenan	
		0,031	0,040	0,031	0,040	0,031		
RR	Mitte	0,035	0,035	0,017	0,058	0,013	Geräte AUS	
		0,029	0,029	0,021	0,040	0,006		
		(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte						
		Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte		
Wohnungsw erte		0,036	0,037	0,015	0,077	0,010	Geräte AN	
		0,035	0,037	0,010	0,083	0,009		

Tabelle 4/4
 Auswertung der Messungen im Mehrfamilienhaus (MFH)
 (RR: Wohnzimmer, R2: Schlafzimmer, R3: Küche)

MFH		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		zeitliche Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte AN	
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw-		
RR	Mitte	0,079	0,084	0,054	0,160	0,029		
		0,053	0,061	0,039	0,118	0,022		
	MP1	0,065	0,070	0,054	0,098	0,015		0,9 m zum PC
		0,090	0,092	0,062	0,145	0,022		
	MP2	0,098	0,094	0,038	0,134	0,025		
		0,120	0,121	0,080	0,174	0,025		
	MP3	0,060	0,071	0,038	0,119	0,025		0,8 m zum Radio (in Stand-by)
		0,087	0,085	0,050	0,108	0,019		
MP4	0,052	0,058	0,037	0,083	0,017			
	0,068	0,067	0,042	0,090	0,012			
R2	Mitte	0,095	0,095	0,071	0,125	0,016		
		0,092	0,094	0,070	0,125	0,125		
R3	Mitte	0,093	0,092	0,076	0,113	0,010	Küche: E-Herd AN (0,8 m Abstand)	
		0,088	0,089	0,070	0,114	0,013		
RR	Mitte	0,078	0,083	0,065	0,103	0,014	Geräte AUS	
		0,077	0,080	0,058	0,105	0,014		
		räumliche Zusammenfassung aller Messpunkte						
		Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte		
Wohnungswerte		0,077	0,080	0,037	0,160	0,014	Geräte AN	
		0,086	0,087	0,039	0,174	0,020		

Tabelle 4/5
Auswertung der Messungen in der Großwohnanlage (GWA)
(RR: Wohnzimmer, R2: Schlafzimmer, R3: Gästezimmer)

GWA		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen
		zeitliche Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte AN
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.	
RR	Mitte	0,168	0,166	0,139	0,194	0,017	0,8 m zu TV
		0,146	0,151	0,113	0,188	0,020	
	MP1	0,060	0,060	0,057	0,063	0,002	
		0,064	0,064	0,060	0,069	0,003	
	MP2	0,082	0,072	0,044	0,088	0,017	
		0,093	0,078	0,049	0,099	0,021	
	MP3	0,074	0,074	0,064	0,076	0,003	
		0,079	0,079	0,069	0,092	0,007	
MP4	0,056	0,057	0,053	0,062	0,003		
	0,056	0,057	0,053	0,062	0,003		
R2	Mitte	0,026	0,028	0,023	0,033	0,005	
		0,025	0,023	0,014	0,034	0,007	
R3	Mitte	0,027	0,031	0,026	0,042	0,006	
		0,026	0,026	0,024	0,029	0,001	
RR	Mitte	0,070	0,074	0,038	0,112	0,026	Geräte AUS
		0,059	0,066	0,041	0,095	0,017	
		räumliche Zusammenfassung aller Messpunkte					
		Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte	
Wohnungswerte		0,071	0,070	0,023	0,194	0,046	Geräte AN
		0,069	0,068	0,014	0,188	0,043	
		0,054	0,054	0,023	0,088	0,020	Geräte AN ohne RR-Mitte
		0,056	0,054	0,014	0,099	0,024	

Tabelle 4/6

Auswertung der Messungen im Mehrfamilien-Altbau (MFAB)

(RR: Wohnzimmer, R2: Schlafzimmer, R3: Arbeitszimmer, DMP: Dauermesspunkt) im Durchgangsbereich zwischen Wohnzimmer und Küche)

MFAB		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		zeitliche Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte AN	
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR	Mitte	0,085	0,086	0,058	0,110	0,013	5. OG	1,7 m zu Stereo + TV
		0,058	0,059	0,052	0,066	0,004		0,7 m zu Stereo + TV
	MP1	0,139	0,142	0,131	0,165	0,010		0,9 m zum Laptoptrafo
		0,108	0,109	0,098	0,129	0,009		
	MP2	0,071	0,073	0,058	0,086	0,008		
0,072		0,074	0,055	0,091	0,011			
MP3	0,073	0,073	0,063	0,081	0,005			
	0,072	0,069	0,056	0,084	0,008			
MP4	0,086	0,088	0,073	0,098	0,008			
	0,051	0,059	0,039	0,098	0,019			
R2	Mitte	0,080	0,078	0,065	0,085	0,007		
		0,065	0,063	0,052	0,071	0,007		
R3	Mitte	0,054	0,053	0,045	0,065	0,007	4. OG	Geräte AN
		0,063	0,063	0,047	0,084	0,011		
RR	Mitte	0,065	0,065	0,053	0,081	0,007	5. OG	Geräte AUS
		0,053	0,053	0,045	0,063	0,006		
	MP1	0,060	0,062	0,054	0,074	0,006		
		0,073	0,068	0,045	0,084	0,013		
	MP2	0,071	0,068	0,050	0,079	0,008		
		0,057	0,058	0,042	0,072	0,008		
	MP3	0,058	0,056	0,037	0,067	0,010		
		0,050	0,049	0,039	0,056	0,006		
	MP4	0,047	0,046	0,040	0,056	0,005		
		0,054	0,054	0,038	0,069	0,008		
DMP	0,039	0,041	0,015	0,096	0,016	nur BB1		
		(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte						
		Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte		
Wohnungswerte		0,084	0,085	0,045	0,165	0,028	Geräte AN	
		0,070	0,071	0,039	0,129	0,018		
		0,073	0,072	0,045	0,110	0,012	Geräte AN ohne MP1+MP4	
		0,066	0,066	0,047	0,091	0,006		
Wohnungswerte		0,056	0,056	0,015	0,096	0,010	Geräte AUS	
		0,058	0,057	0,038	0,084	0,007		

4.2.3 Frequenzspektren

In allen Wohnungen wurden in der Mitte des Referenzraums zwei Spektren im Frequenzbereich von 5 Hz bis 2.000 Hz aufgenommen, einmal mit eingeschalteten Geräten und einmal mit ausgeschalteten Geräten. Die Abbildungen 4/2 und 4/3 zeigen beispielhaft je ein Spektrum für einen Messpunkt ohne Einfluss von elektrischen Geräten und eines, das im Abstand von nur 0,8 m zu einem kleinen Röhrenfernseher aufgenommen wurde. (Der kleine 'Berg' zwischen 1.200 Hz und 1.250 Hz, der in allen Spektren auftaucht, wird durch eine interne Schwingung des Messgerätes erzeugt.)

In Abbildung 4/2 sind neben dem Anstieg des Rauschens für sehr niedrige Frequenzen der größte Peak bei 50 Hz und – deutlich kleiner – ein weiterer Peak bei 150 Hz, der ersten ungeraden Oberwelle, sowie eine noch kleinere Spitze bei 200 Hz zu erkennen. Weitere Oberwellen waren nicht messbar. Der Peak bei 150 Hz ist bei der Messung, während der die Geräte im Wohnzimmer ausgeschaltet waren, etwas größer als bei eingeschalteten Geräten. Auch diese Messungen zeigen, dass in den Wohnungen oft die Restfelder von stärkeren Quellen in Nachbarräumen oder Nachbarwohnungen größer sind als die Einflüsse der Geräte im gleichen Raum, wenn diese nicht in unmittelbarer Nähe zum Messgerät stehen. Der Einflussbereich reicht typischer Weise bis 2 m, oft ist er auch noch kleiner.

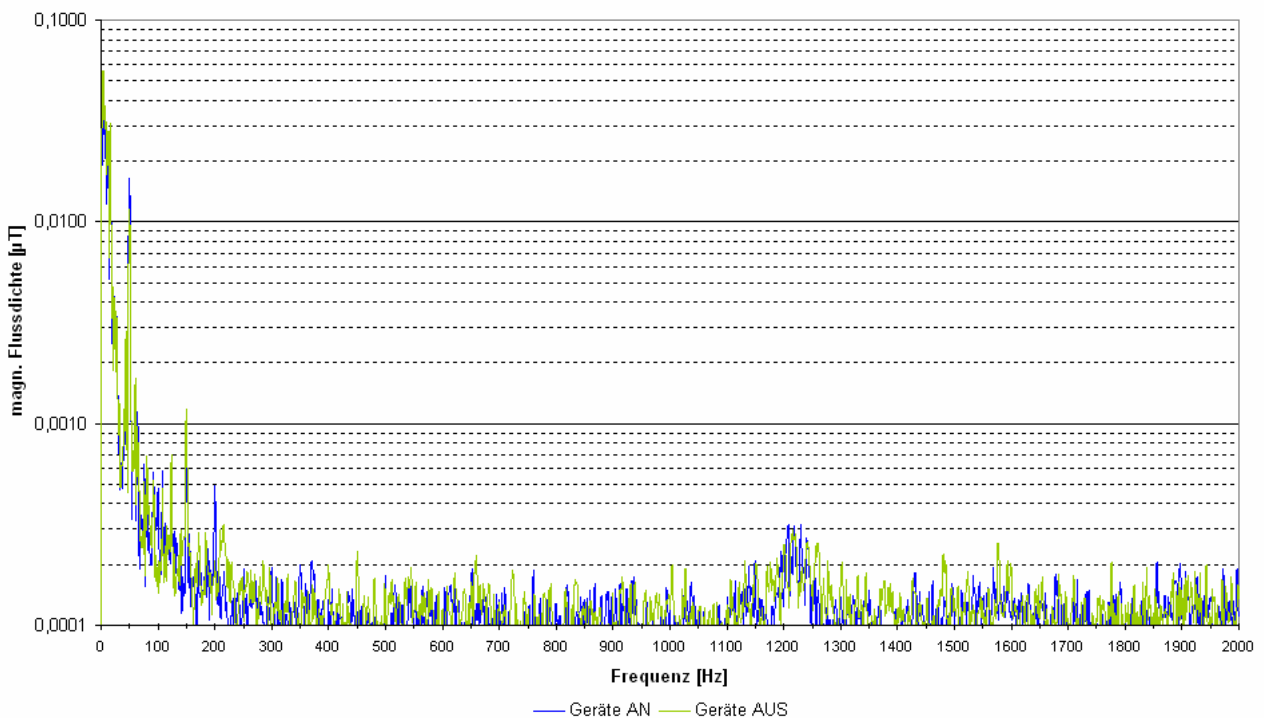


Abbildung 4/2
Spektrum der magnetischen Flussdichte, Wohnzimmer im EG eines modernen Einfamilienhauses in dörflicher Umgebung

Die Abbildungen 4/3 und 4/4 zeigen den Einfluss eines kleinen Röhrenfernsehers, der in geringer Entfernung (hier 0,8 m) vom Messgerät stand. Das Spektrum der Messung mit eingeschalteten Geräten weist eine große Anzahl von Oberwellen auf, die in der Intensität mit wachsender Frequenz langsam abfallen bis zu 1.400 Hz, um danach noch einmal ein wenig anzusteigen (s. Abb. 4/3). Trotz der vielen, deutlich sichtbaren Oberwellen liegt der Median

der Breitbandmessungen nur etwa 15 % höher als die zu den mit dem 50 Hz-Filter gemessenen Werten. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Maxima der Oberwellen zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten, so dass sich die verschiedenen Beiträge zur Gesamtfeldstärke z.T. gegenseitig auslöschen.

In der 26. BImSchV ist bisher keine Regelung für die Oberwellen festgelegt. Mit der angestrebten Einführung der ICNIRP-Werte für den gesamten Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz sollen auch in Deutschland Grenzwerte für die Oberwellenanteile festgelegt werden. Für den Bereich von $f = 8 \text{ Hz}$ bis $f = 800 \text{ Hz}$ fällt der vorgesehene Grenzwert mit $1/f$ von $625 \text{ } \mu\text{T}$ auf $6,25 \text{ } \mu\text{T}$ ab, danach bleibt er bis 3.000 Hz auf dem gleichen Wert. Wenn diese Frequenzabhängigkeit berücksichtigt wird, ergibt sich für die durchgeführte Messung die frequenzabhängige Ausschöpfung des für die Zukunft vorgesehenen Grenzwertes, wie sie in Abbildung 4/4 dargestellt ist. Allerdings fallen elektrische Haushaltsgeräte auch zukünftig nicht unter diese Regelung.

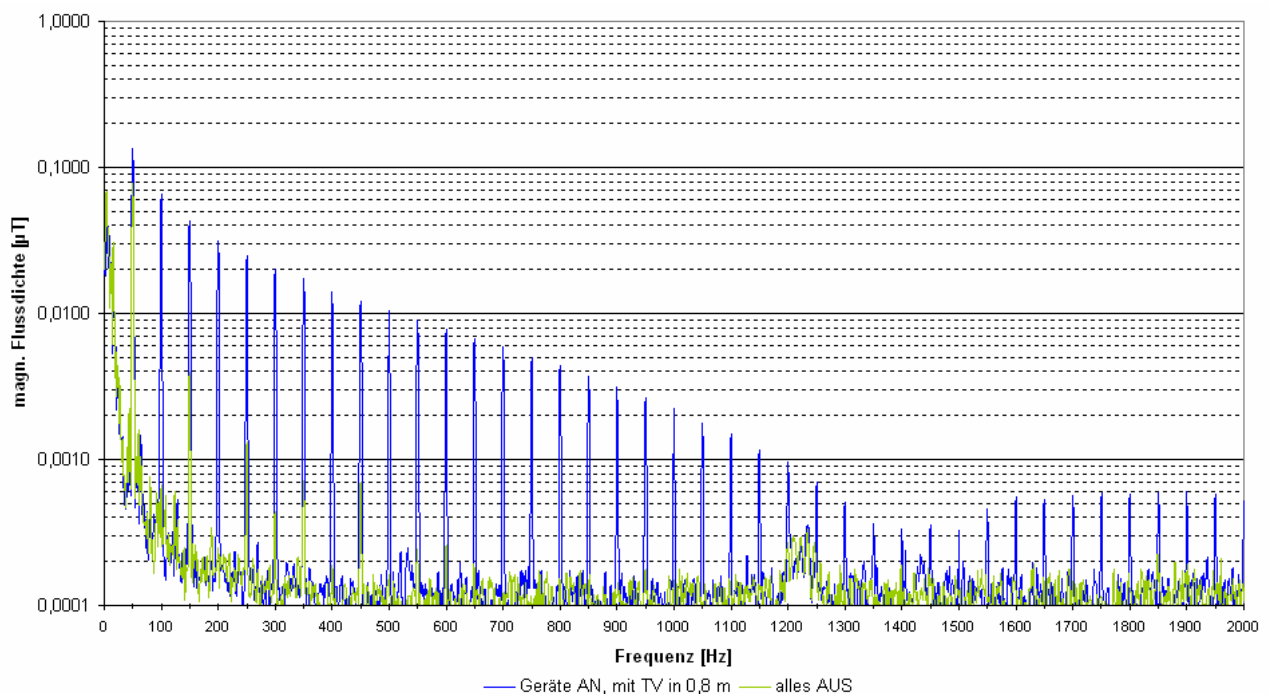


Abbildung 4/3

Spektrum der magnetischen Flussdichte, Wohnzimmer im 2. OG einer modernen Großwohnanlage, der Messpunkt lag in 0,8 m Entfernung zu einem kleinen Röhrenfernseher

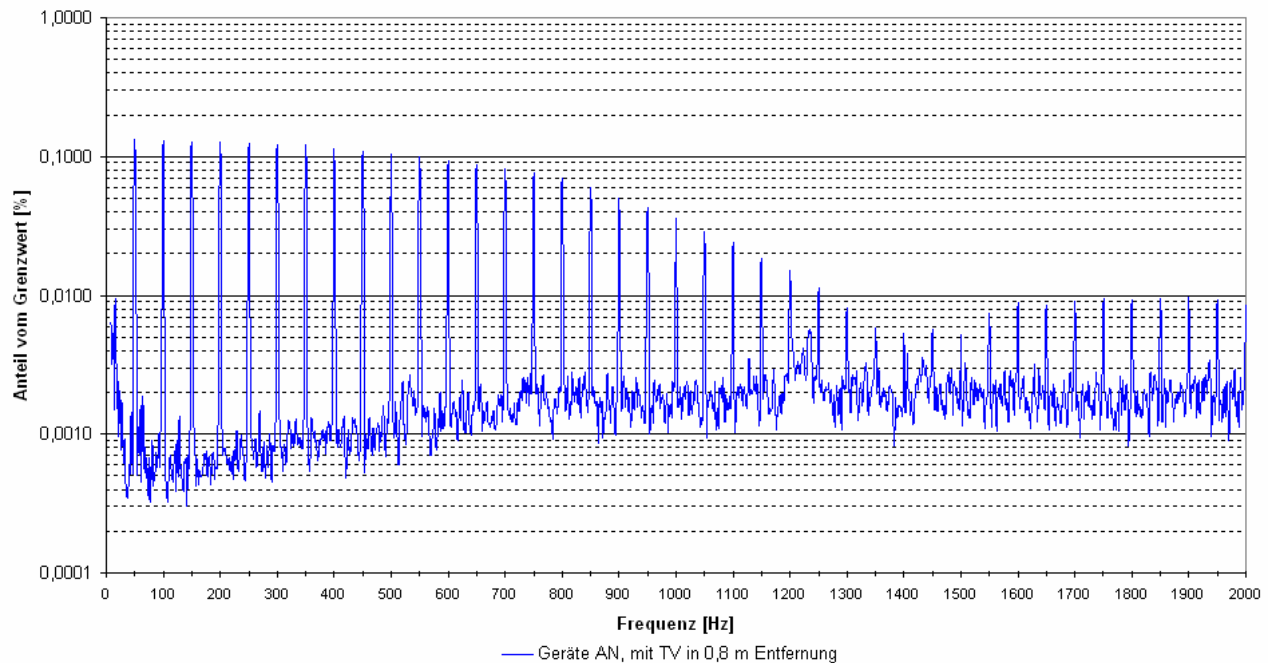


Abbildung 4/4

Spektrum der Anteile am Grenzwert für die magnetische Flussdichte, Wohnzimmer im 2. OG einer modernen Großwohnanlage, der Messpunkt lag in 0,8 m Entfernung zu einem kleinen Röhrenfernseher, die Summe der Grenzwertausschöpfung beträgt ca. 2 %

4.2.4 Dauermessungen

Um die längerfristigen Schwankungen zu erfassen, wurden in dem Reihenhaus mehrere Dauermessungen, verteilt über insgesamt 19 Messstage, durchgeführt. Das Messgerät befand sich bei allen Messungen auf einer Blumenbank vor dem Fenster. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4/7 zusammengetragen und in Abbildung 4/5 dargestellt. In der Abbildung sind neben allen Einzelmesswerten die Medianwerte für jeden Tages-Messzeitpunkt wiedergegeben. Es wurden zunächst alle Messwerte (RMS, Breitband), die zur gleichen Tageszeit aufgenommen wurden, zusammengefasst. Für jede Minute im Tagesverlauf waren mindestens 10 und bis zu 18 Einzelmesswerte vorhanden. Dies ergab den Tagesgang der statistischen Werte (Median, Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung). Diese Tagesgänge wurden dann weiter ausgewertet.

Die getrennte Auswertung für Werktage und Wochenende ergab praktisch keinen Unterschied: die Differenzen zwischen den entsprechenden Werten (Mittelwert, Median, Maximum, Minimum) für den mittleren Tagesgang lag meist bei 0,001 μT , nur das (mittlere) Nachtmaximum lag am Wochenende 3 nT höher und das (mittlere) Tagesminimum 0,003 μT niedriger als die entsprechenden Werte für die Werktage. Wie Abbildung 4/5 zeigt, ergibt sich nur eine zeitliche Verschiebung der Messwerte: vormittags zeigt sich am Wochenende ein um ein bis zwei Stunden verzögerter Anstieg der Messwerte und am Abend treten noch zu späteren Uhrzeiten höhere Messwerte auf, als während der Arbeitswoche.

Der Tages-Mittelwert aus den Dauermessungen von 0,042 μT korreliert recht gut mit den Ergebnissen der Punktmessungen, deren Mittelwert lag bei 0,043 μT . Dieses ist nicht der oben angegebene Wohnungswert (s. Tab. 4/3), sondern hier wurde der Mittelwert aller Punktmessungen gebildet, d.h. es wurden alle Messwerte sowohl für Geräte AN als auch für

Geräte AUS berücksichtigt, da während der Dauermessung auch alle diese Situationen vorkamen. Aufgrund des geringen Unterschiedes zwischen den Breitband- und den 50 Hz-Werten (vgl. Tab. 4/3) wurden beide Arten von Messwerten in diese Mittelung aufgenommen, um möglichst viele Messwerte für diesen Test-Vergleich zusammenfassen zu können.

Aus dem Verlauf der Messwerte wurde für die Auswertung ein Zeitraum von 0:40 Uhr bis 5:30 Uhr als 'Nachtruhe' ausgewählt, in der die Messwerte mehr oder weniger durchgängig im Bereich unter $0,020 \mu\text{T}$ lagen. Abbildung 4/5 verdeutlicht diese Wahl. Der Mittelwert für diesen Zeitraum liegt bei $0,014 \mu\text{T}$, der Median bei $0,013 \mu\text{T}$ (s. Tab. 4/7). Die etwas höheren Werte während dieser Zeit stammen von Nächten in den Schulferien, in der die jugendliche Tochter diese Freizeit für 'Fernsehnächte' ausnutzte. Bei Erweiterung des Nachtzeitraumes auf 22 Uhr abends bis 7 Uhr morgens erhöht sich der Nachtwert sowohl im Mittel wie als Median auf $0,021 \mu\text{T}$.

Der Tagesgang ist typisch für Wohnungen, bei denen die Bewohner (und die Nachbarn) berufstätig sind. In diesem Fall treten die höchsten Werte in den Abendstunden auf, wenn die Bewohner die stromintensiven Geräte benutzen (E-Herd, Waschmaschine, Staubsauger, PC, TV, ...).

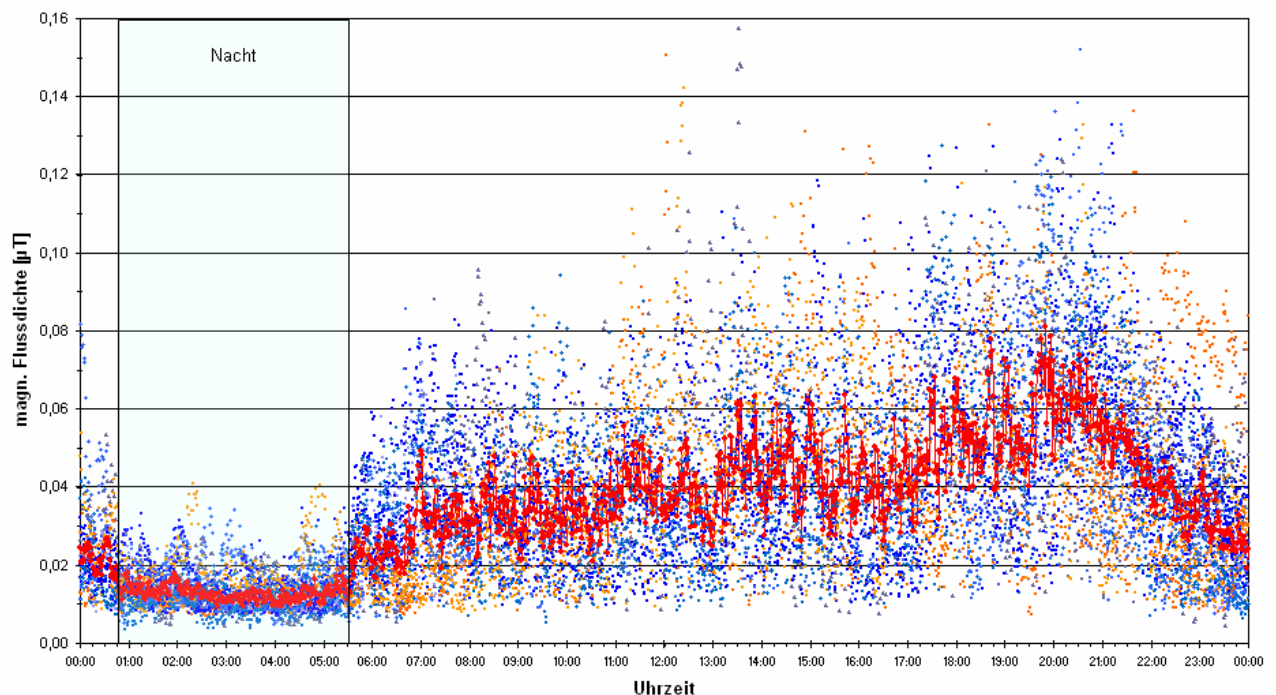


Abbildung 4/5
Dauermessungen im Wohnzimmer eines Reihenhauses: blau - Messwerte an Werktagen, orange - Messwerte am Wochenende, rot - Medianwerte für alle Messungen zur gleichen Minute im Tagesverlauf, unterlegt: als 'Nachtruhe' definierte Zeitraum von 0:40 bis 5:30 Uhr

Tabelle 4/7

Auswertung des Tagesganges der Messungen am Dauermesspunkt im Wohnzimmer eines Reihenhauses, gebildet aus den statistischen Werten der 10-18 Messungen zur gleichen Minute im Tagesverlauf

	Magnetische Flussdichte [μT]		
	24 h - Tageswert	Tag	Nacht (0:40 - 5:30)
Median (vom Median)	0,035	0,039	0,013
Mittelwert	0,036	0,042	0,014
Maximum	0,157	0,157	0,043
Minimum	0,003	0,005	0,003
Standardabweichung (alle Messpunkte)	0,023	0,023	0,005

In der Mehrfamilien-Altbauwohnung wurde eine vierstündige Dauermessung (RMS, Breitband) in der Nähe des Messpunktes MP3 durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 4/8 zusammengestellt und in Abbildung 4/6 wiedergegeben sind. Der Dauermesspunkt war nur knapp 1,5 m vom Messpunkt MP3 und im Mittel etwa gleich weit von den elektrischen Geräten entfernt wie dieser, so dass diese beiden Messpunkte gemeinsam betrachtet werden konnten. Da der Unterschied zwischen den Breitband- und den 50 Hz-Filtermessungen deutlich kleiner war als die kurzzeitigen Schwankungen innerhalb einer Messreihe, wurde neben der Auswertung der Dauermessreihe eine weitere Auswertung vorgenommen, in der alle Messungen vom Messpunkt MP3 eingeschlossen wurden.

Tabelle 4/8

4 h-Dauermessung im Durchgangsbereich zwischen dem Wohnzimmer und der Küche einer Dachgeschosswohnung in einem Mehrfamilienhaus-Altbau

	Magnetische Flussdichte [μT]	
	nur Dauermesspunkt (normaler, wechselnder Gerätestatus)	inkl. MP3 (Geräte AN und AUS)
Median	0,039	0,044
Mittelwert	0,041	0,045
Minimum	0,015	0,015
Maximum	0,096	0,096
Standardabweichung	0,016	0,018

Die Abbildungen 4/5 und 4/6 verdeutlichen, dass auf der einen Seite neben dem Mittelwert auch die Schwankungsbreite einen Tagesgang besitzt, mit einer deutlichen Abnahme während der Nachtruhe, dass auf der anderen Seite schon die einminütigen Messreihen mit einer Messwertaufnahme alle fünf Sekunden in etwa die Schwankungsbreite auch für längere Zeiträume wiedergeben, jedenfalls wenn die Messungen 'Geräte AN' und 'AUS' zusammengefasst werden. Dies zeigt, dass das durchgeführte Vorgehen bei den Einzelmessungen zu vernünftigen Ergebnissen führt.

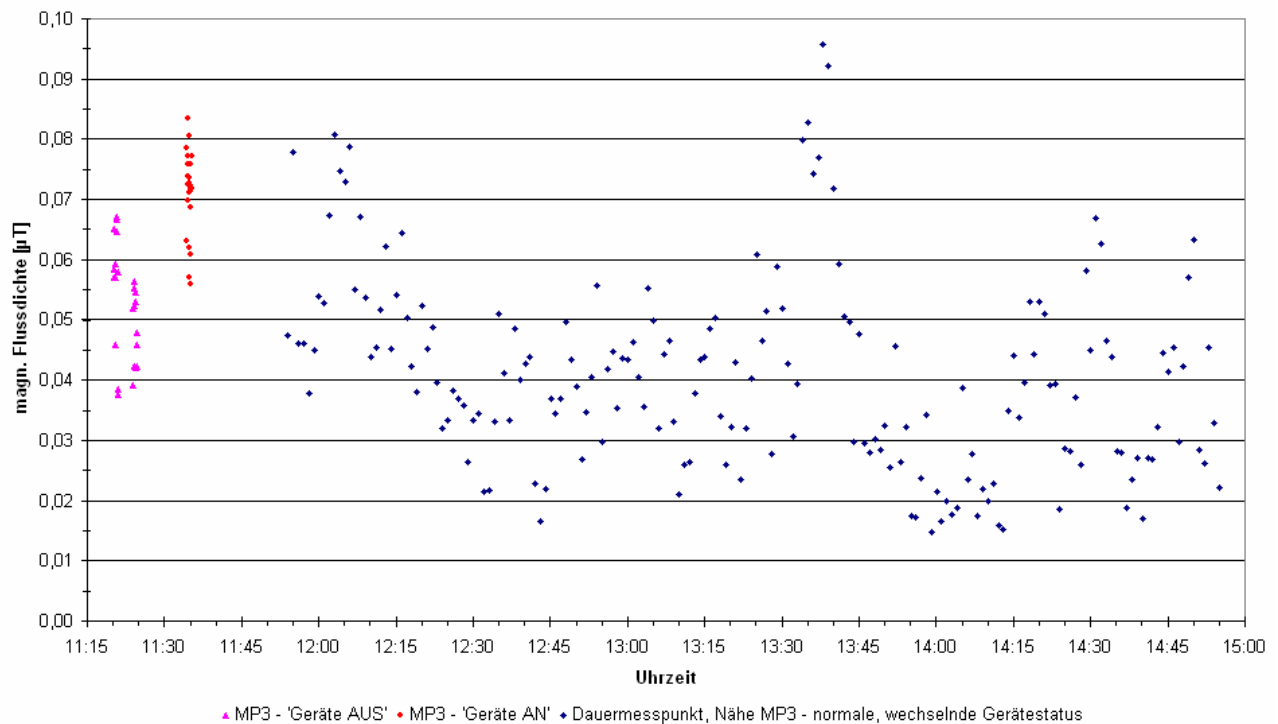


Abbildung 4/6

4 h-Dauermessung im Durchgangsbereich zwischen dem Wohnzimmer und der Küche einer Dachgeschosswohnung in einem Mehrfamilienhaus-Altbau

4.3 Ergebnisse der Messungen in Wohnungen in der Nähe von Hochspannungstrassen (exponierte Wohnungen)

4.3.1 Beschreibung der Wohnungen

In Tabelle 4/9 stehen die Kurzbezeichnungen für die Wohnungen zusammen mit kurzen Charakterisierungen und der Zuordnung zu den Trassenarten. Bei der Auswahl der exponierten Wohnungen wurde weniger auf unterschiedliche Wohnungstypen geachtet, als vielmehr darauf, möglichst mehrere Wohnungen in unterschiedlichem Abstand zur gleichen Trasse zu finden, um neben der unterschiedlichen Ausstattung an elektrischen Geräten nur einen weiteren Parameter – hier den Abstand – zu variieren und möglichst ähnliche Trassenparameter, wie Mastbild, Phasenordnung, Leiterseilhöhe aber auch den Lastzustand, zu erhalten. Die meisten der hier untersuchten exponierten Wohnungen waren freistehende Ein- oder Zweifamilienhäuser bzw. Reihenhäuser. Zum einen sind größere Mehrfamilienhäuser etwas seltener direkt neben Freileitungen zu finden, zum anderen sind die Immissionsbeiträge von Nachbarwohnungen oder der elektrischen Gebäudeinstallation in den hier untersuchten Wohnungstypen geringer (vgl. Abschnitt 4.2), wodurch die Aufteilung der gemessenen Gesamtimmision in wohnungsinterne und in externe, von der Stromtrasse verursachte, Beiträge etwas besser möglich ist. Die hier durch Messungen in den exponierten Wohnungen bzw. direkt an den Stromtrassen und durch die Berechnungen ermittelten aktuellen und maximalen externen Beiträge zur magnetischen Exposition können und müssen natürlich auch in Bezug zu den z.T. höheren, nicht durch Stromtrassen verursachten Expositionen, in anderen Wohnungstypen gesetzt werden.

Tabelle 4/9

Kurzbeschreibungen der Wohnungen und Zuordnung zu den Trassenarten (die Kurzbezeichnungen entsprechen denjenigen der untersuchten Trassen, vgl. Abschnitt 3.1, die mit 'x' gekennzeichneten Wohnungen lagen in Trassenlängsrichtung innerhalb eines Abstandsbereichs von 30 m zu einem Mast)

Kurzbezeichnung	Wohnungsart	mittlerer Abstand zur Trassenmitte (x: Mastnähe)	Wohnungshöhe	Dauer-messung
380 kV-Freileitungen				
FL380_2-MFH-OG	modernes Mehrfamilienhaus	17 m (x)	2.OG	x
FL380_2-MFH-EG	modernes Mehrfamilienhaus	25 m (x)	EG	-
FL380_3-ZFH1	freistehendes Zweifamilienhaus	30 m	EG und 1.OG	x
FL380_3-ZFH2	freistehendes Zweifamilienhaus	20 m (x)	EG und 1.OG	-
FL380_3-ZFH3	freistehendes Zweifamilienhaus	85 m (x)	EG und 1.OG	-
110 kV-Freileitungen				
FL110_1-EFH1	freistehendes Einfamilienhaus	0 m (x)	EG und 1.OG	-
FL110_6-EFH2	freistehendes Einfamilienhaus	40 m (x)	EG und 1.OG	-
FL110_6-RH1	Reihenhaus	25 m (x)	EG bis 2.OG	-
FL110_6-RH2	Reihenhaus	33 m	EG bis 2.OG	x
FL110_6-RH3	Reihenhaus	31 m (x)	EG bis 2.OG	-
FL110_6-RH4	Reihenhaus	38 m	EG bis 2.OG	-
110 kV-Erdkabel				
EK110_5-MFH	Mehrfamilienhaus	14 m	EG	x
EK110_2-EFH	freistehendes Einfamilienhaus	22 m	EG und 1. OG	-

4.3.2 Messungen in Wohnungen an 380 kV-Freileitungen

4.3.2.1 Punktmessungen

Die Messungen in den Wohnungen in der näheren Umgebung von Stromübertragungstrassen zeigten deutlich den oft dominanten Einfluss der Beiträge, die durch die Ströme auf der Trasse verursacht wurden. Erwartungsgemäß wurden die höchsten magnetischen Flussdichten in den Wohnungen dicht an 380 kV-Freileitungen gemessen (höchster Wohnungsmittelwert: 2,16 μT , Mittelwert der Wohnungsmittelwerte: 0,81 μT). Insgesamt bestätigen die durchgeführten Messungen die Erwartung, dass die Magnetfeldimmissionen mit dem Abstand von der Trasse deutlich abnehmen. Auch das Ergebnis, dass die Wohnungen in Mastnähe im Vergleich mit Wohnungen, die in etwa gleichem senkrechten Abstand von der Trassenmitte aber weiter in Richtung Spannfeldmitte liegen, weniger stark exponiert sind, war erwartet worden.

Der höchste Wert für die magnetische Flussdichte wurde mit 3,39 μT in den Abendstunden im ersten Obergeschoss eines freistehenden Zweifamilienhauses ca. 28 m neben einer 380 kV-Freileitung gemessen. Für diese Wohnung ergibt sich eine Immission von bis zu 16,3 μT für den Fall, dass die benachbarte Freileitung mit maximalem Strom betrieben wird. In zwei weiteren Wohnungen muss für Volllast mit Immissionen von über 10 μT gerechnet werden.

In den folgenden Tabellen sind die Messergebnisse zusammengefasst. Dabei werden jeweils in der Tabelle a für jeden Messpunkt (MP) Median, Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung für die im jeweiligen Messzeitraum (mindestens eine Minute, ein Wert alle fünf Sekunden) erfassten Immissionswerte angegeben. Daneben sind die aus den so gebildeten 'Punkt'-Werten berechneten Wohnungswerte aufgeführt, für die die Mittelwerte aus den Medianen, Mittelwerten und der Standardabweichungen gebildet wurden. Diese werden aufgrund der fünf Messungen im Referenzraum verglichen mit jeweils nur einer Messung in den beiden anderen Räumen von der Immissionshöhe im Referenzraum dominiert. Trotz dieser Einschränkung sollte eine Zusammenfassung der Ergebnisse für eine Wohnung in einem Wert erfolgen. Außerdem ist das Ergebnis der Messung in der Mitte des Referenzraumes (RR) bei soweit wie möglich ausgeschalteten Geräten dokumentiert.

In den Tabellen b sind in der Spalte 'bei aktueller Stromlast' die gemessenen 50 Hz-Raummitte-Mittelwerte aufgeführt. Davon wurden die für diesen MP und für die aktuelle Stromlast berechneten externen Beiträge abgezogen und die so gewonnenen hausinternen Beiträge in der Spalte 'ohne Stromlast' eingetragen. Zu diesen wurden dann die für maximale Stromlast berechneten externen Maximalbeiträge hinzuaddiert und die so gewonnenen - bezogen auf die Beiträge durch die Stromtrasse maximalen - Raummittelwerte in der Spalte 'bei maximaler Stromlast' angegeben.

Tabelle 4/10a

Auswertung der Messungen in einem Mehrfamilienhaus (FL380_2-MFH-OG)

(RR: Schlafzimmer, R2: Küche, R3: Wohnzimmer; TM: Trassenmitte, DMP: Dauermesspunkt)

FL380_2-MFH-OG (nur 2. OG)		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Ge- räte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR	Mitte	0,378	0,379	0,371	0,387	0,006	AN	17 m zur TM
		0,370	0,370	0,365	0,379	0,004		
	MP1	0,425	0,425	0,419	0,436	0,005		16 m zur TM
		0,387	0,387	0,384	0,393	0,003		
	MP2	0,415	0,415	0,408	0,423	0,005		16,5 m zur TM 1 m zum TV
		0,363	0,364	0,358	0,370	0,004		
	MP3	0,379	0,379	0,372	0,386	0,004		18 m zur TM 1 m zum TV
		0,341	0,342	0,335	0,347	0,003		
	MP4	0,372	0,374	0,366	0,385	0,006		17,5 m zur TM 0,6 m zum Radio
		0,351	0,352	0,348	0,357	0,003		
R2	0,305	0,306	0,294	0,315	0,008	AUS	21 m zur TM	
	0,304	0,304	0,300	0,309	0,004			
R3	0,312	0,313	0,308	0,320	0,004	AN	23 m zur TM	
	0,312	0,310	0,300	0,321	0,007			
RR Mitte	0,394	0,390	0,368	0,416	0,015	AUS	17 m zur TM	
	0,402	0,401	0,395	0,405	0,003			
RR DMP	0,342	0,342	0,340	0,348	0,003			
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	0,369	0,370	0,294	0,436	0,006	Geräte AN		
	0,347	0,347	0,300	0,405	0,004			
Dauer- messung	0,402	0,429	0,088	1,016	0,194	17 m zur TM		

Tabelle 4/10b

Immissionen (50 Hz) im zweiten Obergeschoss eines Mehrfamilienhauses (FL380_2-MFH-OG) für verschiedene Lastzustände, I_{nah} , I_{fern} : Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System

FL380_2-MFH-OG	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 51 \text{ A}, I_{\text{fern}} = 60 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 2520 \text{ A}$
RR (2.OG)	0,08	0,385	15,1
R2 (2.OG)	0,05	0,304	12,4
R3 (2.OG)	0,07	0,310	10,6

Tabelle 4/11a

Auswertung der Messungen in einem Mehrfamilienhaus (FL380_2-MFH-EG)
(RR: Wohn- und Arbeitszimmer, R2: Küche, R3: Flur, TM: Trassenmitte)

FL380_2-MFH-EG (nur EG)		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR	Mitte	0,198	0,198	0,191	0,205	0,004	AN	26 m zur TM
		0,194	0,195	0,190	0,201	0,003		
	MP1	0,196	0,197	0,192	0,202	0,003		25 m zur TM
		0,206	0,206	0,201	0,211	0,003		
	MP2	0,196	0,198	0,189	0,207	0,006		25,5 m zur T 1 m zum TV
0,218		0,218	0,209	0,226	0,004			
MP3	0,178	0,177	0,174	0,183	0,003	27 m zur TM 1 m zum PC		
	0,200	0,201	0,187	0,209	0,006			
MP4	0,172	0,171	0,165	0,175	0,003	26,5 m zur TM		
	0,182	0,181	0,174	0,184	0,003			
R2	0,211	0,211	0,205	0,215	0,003	AUS	24 m zur TM	
	0,214	0,214	0,209	0,218	0,002			
R3	0,180	0,180	0,176	0,183	0,002	AN	25 m zur TM	
	0,181	0,181	0,177	0,186	0,002			
RR Mitte	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	AUS	26 m zur TM	
	0,193	0,194	0,191	0,200	0,003			
RR MP2	0,198	0,195	0,186	0,202	0,006			
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	0,190	0,190	0,165	0,215	0,003	Geräte AN		
	0,199	0,199	0,174	0,226	0,003			
	0,189	0,189	0,165	0,215	0,003	ohne MP2		
	0,196	0,196	0,174	0,218	0,003			

Tabelle 4/11b

Immissionen (50 Hz) im Erdgeschoss eines Mehrfamilienhauses- (FL380_2-MFH-EG) für verschiedene Lastzustände, I_{nah} , I_{fern} : Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System

FL380_2-MFH-EG	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 51 \text{ A}, I_{\text{fern}} = 60 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 2520 \text{ A}$
RR (EG)	0,08	0,195	7,0
R2 (EG)	0,07	0,214	7,5
R3 (EG)	0,04	0,181	7,2

Tabelle 4/12a

Auswertung der Messungen in einem freistehenden Zweifamilienhaus (FL380_3-ZFH1)

(RR: Wohnzimmer, R2: Kinderzimmer, R3: Schlafzimmer, TM: Trassenmitte, DMP: Dauermesspunkt)

FL380_3-ZFH1		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen			
		Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte	Abstände		
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.				
RR (EG)	Mitte	1,907	1,907	1,892	1,924	0,009	AN	32 m zur TM		
		1,971	1,972	1,943	1,995	0,013				
	MP1	2,134	2,184	2,114	2,459	0,124		29 m zur TM 1 m zum TV		
		2,183	2,185	2,166	2,213	0,013				
	MP2	1,831	1,909	1,792	2,052	0,122		31 m zur TM		
		1,851	1,851	1,841	1,866	0,008				
	MP3	2,016	2,014	1,981	2,039	0,019		31 m zur TM		
		1,819	1,821	1,812	1,830	0,006				
	MP4	2,350	2,353	2,331	2,377	0,016		29 m zur TM		
		2,090	2,089	2,077	2,098	0,006				
	R2 (1.OG)	Mitte	2,326	2,324	2,305	2,343		0,012	AUS	30 m zur TM
			2,295	2,294	2,282	2,315		0,009		
DMP		2,626	2,628	2,610	2,643	0,011	28 m zur TM			
		2,645	2,647	2,621	2,682	0,018				
R3 (1.OG)	2,414	2,413	2,402	2,431	0,009	AN	30 m zur TM			
	2,408	2,415	2,385	2,465	0,024					
RR Mitte (EG)	2,221	2,222	2,206	2,237	0,008	AUS	32 m zur TM			
	2,244	2,242	2,211	2,280	0,016					
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte										
	Mittelwert	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.					
	Mediane				Mittelwerte					
Wohnung gesamt	2,200	2,217	1,792	2,643	0,044	Geräte AN				
	2,158	2,159	1,812	2,682	0,012					
	2,141	2,154	1,792	2,431	0,031	ohne MP1/DMP				
	2,073	2,074	1,812	2,465	0,011					
DMP	2,129	2,076	0,923	3,391	0,616	aus Dauermessungen				

Tabelle 4/12b

Immissionen (50 Hz) in einem freistehenden Zweifamilienhaus (FL380_3-ZFH1) für verschiedene Lastzustände, I_{nah} , I_{fern} : Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System

FL380_3-ZFH1	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 360 \text{ A}, I_{\text{fern}} = 500 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 2700 \text{ A}$
RR (EG)	0,09	2,084	11,8
R2 (1.OG)	0,05	2,294	14,7
R3 (1.OG)	0,07	2,415	16,3

Tabelle 4/13a

Auswertung der Messungen in einem freistehenden Zweifamilienhaus (FL380_3-ZFH2)

(RR: Wohnzimmer1, R2: Schlafzimmer, R3: Wohnzimmer2 – z.Z. leerstehend, TM: Trassenmitte)

FL380_3-ZFH2		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR (1.OG)	Mitte	1,299	1,298	1,287	1,304	0,006	AN	16,5 m zur TM
		1,298	1,299	1,288	1,311	0,007		
	MP1	1,323	1,323	1,316	1,331	0,005		16 m zur TM 1 m zum TV
		1,311	1,311	1,303	1,321	0,006		
	MP2	1,251	1,252	1,245	1,262	0,005		17 m zur TM
		1,247	1,248	1,239	1,260	0,006		
	MP3	1,264	1,263	1,253	1,274	0,007		17 m zur TM
		1,258	1,258	1,252	1,268	0,004		
	MP4	1,345	1,346	1,336	1,359	0,006		16 m zur TM
		1,334	1,335	1,330	1,340	0,003		
R 2 (EG)	0,934	0,932	0,921	0,945	0,008	keine	30 m zur TM	
	0,932	0,933	0,925	0,942	0,006			
R3 (EG)	1,122	1,123	1,117	1,132	0,006	keine	24 m zur TM	
	1,126	1,126	1,119	1,136	0,004			
RR Mitte (1.OG)	1,273	1,273	1,257	1,284	0,009	AUS	26,5 m zur TM	
	1,303	1,302	1,296	1,311	0,004			
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	1,220	1,220	0,921	1,359	0,006	Geräte AN		
	1,215	1,216	0,925	1,340	0,005			

Tabelle 4/13b

Immissionen (50 Hz) in einem freistehenden Zweifamilienhaus (FL380_3-ZFH2) für verschiedene Lastzustände, I_{nah} , I_{fern} : Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System

FL380_3-ZFH2	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 366 \text{ A}, I_{\text{fern}} = 515 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 2700 \text{ A}$
RR (1.OG)	0,069	1,299	11,3
R2 (EG)	0,023	0,933	7,4
R3 (EG)	0,026	1,126	8,5

Tabelle 4/14a

Auswertung der Messungen in einem freistehenden Zweifamilienhaus (FL380_3-ZFH3)

(RR: Arbeitszimmer, R2: Schlafzimmer, R3: Küche, WG: Wintergarten, GZ: Gästezimmer, TM: Tassenmitte)

FL380_3-ZFH3		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR (1.OG)	Mitte	0,216	0,216	0,215	0,217	0,001	AN	90 m zur TM
		0,211	0,211	0,210	0,212	0,001		89 m zur TM
	MP1	0,225	0,225	0,224	0,228	0,001		89 m zur TM
		0,210	0,210	0,208	0,211	0,001		0,6 m zum TV
	MP2	0,295	0,293	0,258	0,313	0,017		91 m zur TM
		0,218	0,218	0,215	0,219	0,001		0,8 m zum PC
	MP3	0,208	0,208	0,205	0,209	0,001		91 m zur TM
		0,211	0,211	0,210	0,213	0,001		0,4 m zum PC
MP4	0,206	0,206	0,204	0,207	0,001			
	0,210	0,210	0,207	0,213	0,002			
R2 (1.OG)		0,212	0,213	0,209	0,216	0,002	keine	86 m zur TM
		0,210	0,210	0,208	0,212	0,001		
R3 (EG)		0,207	0,207	0,204	0,209	0,001	AUS*	90 m zur TM
		0,209	0,209	0,208	0,211	0,001		
RR Mitte (1.OG)		0,210	0,211	0,207	0,214	0,002	AUS	90 m zur TM
		0,203	0,203	0,201	0,206	0,001		
WG (EG)		'live-Wert' der Messgerätanzeige: 0,26 μT					keine	78 m zur TM
GZ (1.OG)		'live-Wert' der Messgerätanzeige: 0,36 μT						74 m zur TM
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
		Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte		
Wohnung gesamt		0,224	0,224	0,204	0,313	0,003	Geräte AN	
		0,211	0,211	0,207	0,219	0,001		
		0,212	0,212	0,204	0,228	0,001	ohne MP2	
		0,210	0,210	0,207	0,213	0,001		

*R3 (Küche): $B_{\text{max}} = 0,225 \mu\text{T}$ bei eingeschaltetem E-Herd in 1,8 m Abstand

Tabelle 4/14b

Immissionen (50 Hz) in einem freistehenden Zweifamilienhaus (FL380_3-ZFH3) für verschiedene Lastzustände, I_{nah} , I_{fer} : Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System

FL380_3-ZFH3	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fer}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 366 \text{ A}, I_{\text{fer}} = 515 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fer}} = 2700 \text{ A}$
RR (1.OG)	0,05	0,211	1,6
R2 (1.OG)	0,03	0,210	1,6
R3 (EG)*	0,07	0,225	1,6
GZ (1.OG)	0,03	0,36	2,3

4.3.2.2 Frequenzspektren

In allen Wohnungen wurden in der Mitte des Referenzraums zwei Spektren im Frequenzbereich von 5 Hz bis 2.000 Hz aufgenommen, einmal mit eingeschalteten Geräten und einmal mit ausgeschalteten Geräten. Letztere unterschieden sich bzgl. der spektralen Verteilung nur unwesentlich von den Spektren an den zugehörigen Stromtrassen. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft für 380 kV-Freileitungstrassen je ein Spektrum aus einer sich relativ dicht an der Trasse befindlichen Wohnung und einer etwas weiter entfernten Wohnung. (Der kleine 'Berg' zwischen 1.200 Hz und 1.250 Hz, der in allen Spektren auftaucht, wird durch eine interne Schwingung des Messgerätes erzeugt.)

In den Abbildungen sind neben dem Anstieg des Rauschens für sehr niedrige Frequenzen der – in den allermeisten Fällen – größte Peak bei 50 Hz und weitere – meist sehr viel kleinere – Oberwellenpeaks erkennbar. Die Oberwellenpeaks waren bei den Messungen, während der die Geräte im Referenzraum ausgeschaltet waren, oft – aber nicht immer – geringfügig kleiner als bei eingeschalteten Geräten (vgl. die meist geringen Unterschiede zwischen den BB- und den 50 Hz-Werten in den Tab. 4/10-14). Bei den Messungen an Freileitungstrassen wurde die gemessene Gesamtimmission ganz deutlich von dem externen Beitrag, der von Strömen auf der Trasse verursacht wurde, dominiert. Das Verhältnis (50 Hz-Peak / größter Oberwellenpeak) lag in meisten Fällen zwischen 20 und 200 und war tendenziell größer bei höheren Feldstärken. Nur im Arbeitszimmer in einer etwas weiter von der Trasse entfernten Wohnung (ca. 90 m Abstand) lag die Spitze des 50 Hz-Beitrags nur gut 12-fach über dem größten Oberwellenpeak bei 100 Hz, der zusammen mit den entsprechenden Vielfachen von dem ca. 2 m entfernten Fernsehgerät (mit 100 Hz-Technik) verursacht wurde (vgl. Abb. 4/7). Bei Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der ICNIRP-Regelung trugen in diesem Fall die Oberwellen zusammen fast doppelt so viel zur Grenzwertausschöpfung bei wie der 50 Hz-Beitrag alleine. Insgesamt erreichte die Grenzwertausschöpfung bei dieser Messung in der Summe 5,6 ‰. Bei ausgeschalteten Geräten war das Verhältnis mehr als zehnmals so groß und die Grenzwertausschöpfung erreichte noch 2,5 ‰, wovon der 50 Hz-Beitrag 80 % ausmacht. Im Wohnzimmer (EG, ca. 30 m zur Trassenmitte) eines näher an der Freileitung gelegenen Zweifamilienhauses betrug die gesamte Grenzwertausschöpfung 22,3 ‰, die zu über 86 % vom 50 Hz-Beitrag herrührten (vgl. Abb. 4/8).

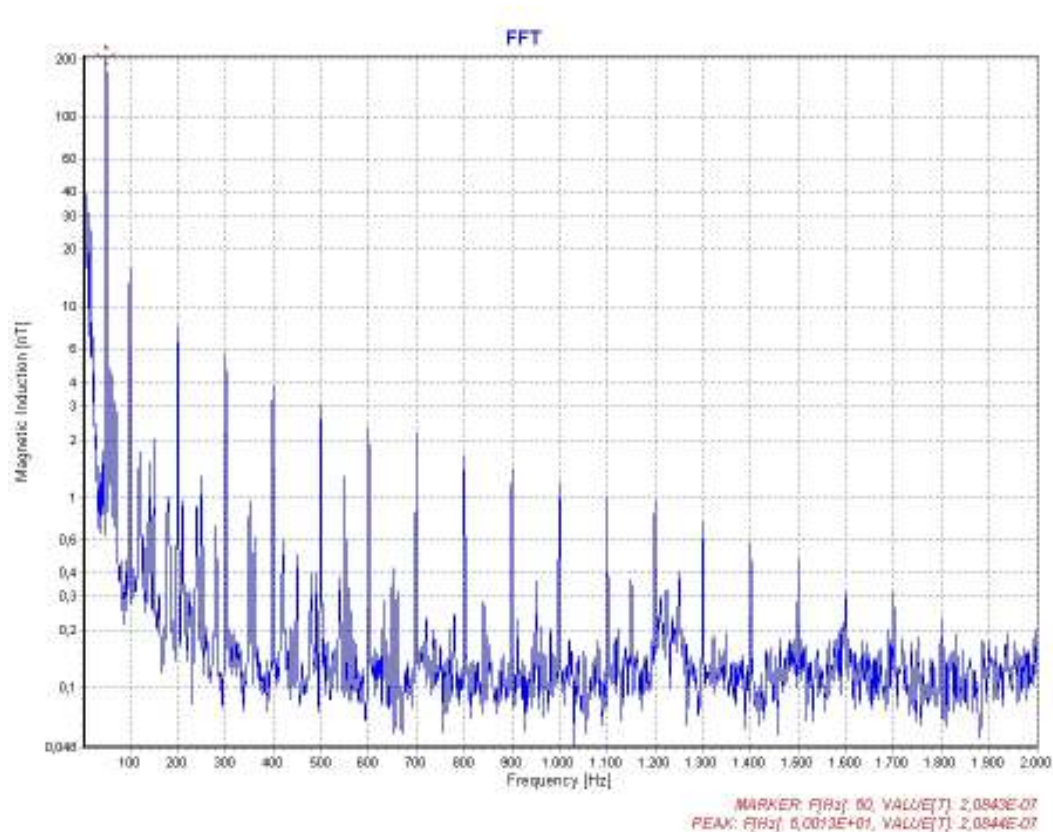


Abbildung 4/7

Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte, Arbeitszimmer im 1.OG eines Zweifamilienhauses (dörfliche Umgebung) ca. 90 m Abstand zu einer 380 kV-Freileitungstrasse, Geräte 'AN' (100 Hz-TV in 2 m Abstand), die Peaks bei n·100 Hz waren nur bei eingeschaltetem TV-Gerät messbar

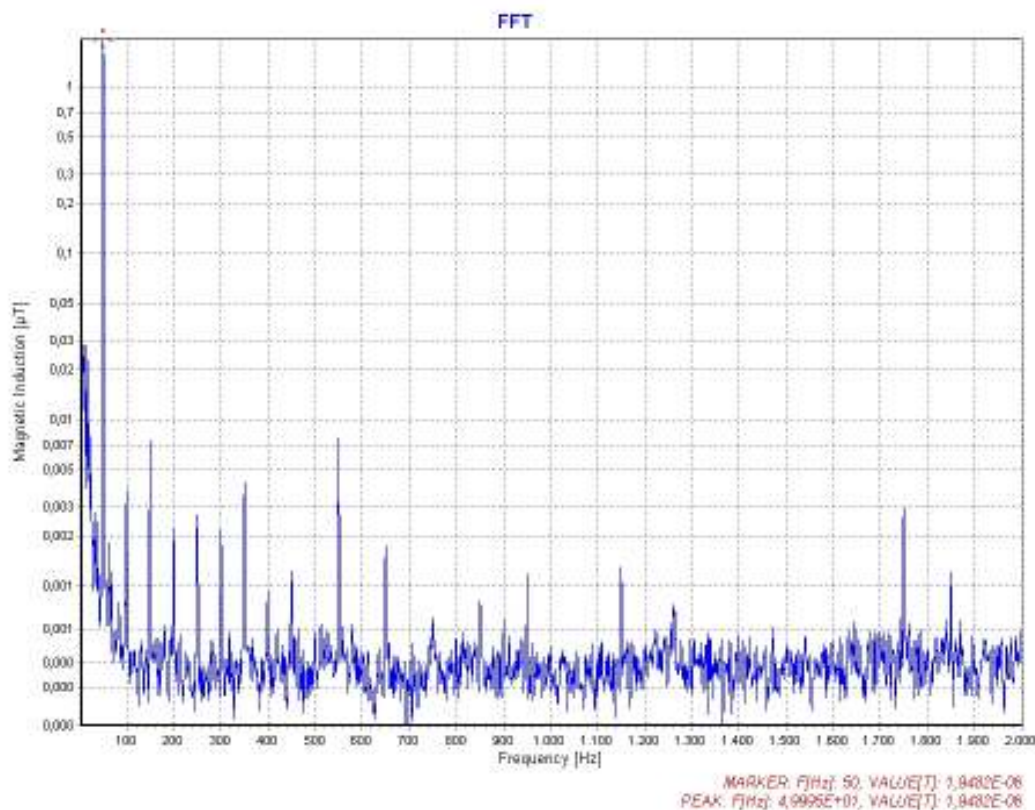


Abbildung 4/8

Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte, Wohnzimmer im EG eines Zweifamilienhauses (dörfliche Umgebung) ca. 30 m Abstand zu einer 380 kV-Freileitungstrasse, Geräte 'AN'

4.3.2.3 Dauermessungen

In zwei Wohnungen in der Nähe zu 380 kV-Freileitungen wurden Dauermessungen über jeweils etwa 32 Stunden durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 4/15+16 zusammengefasst und in den Abbildungen 4/9+10 dargestellt. In beiden Fällen folgt die gemessene magnetische Flussdichte den vom Stromversorger gelieferten Stromdaten. Für die Darstellung wurden die Einzelwerte der beiden Systeme einer Trasse gewichtet zusammengefasst, um den größeren Einfluss des näher am Haus befindlichen Systems zu stärker berücksichtigen, gewichtetes Mittel: $[I_{\text{gew}} = (g \cdot I_{\text{nah}} + 1 \cdot I_{\text{fern}}) / (1 + g)]$. Der jeweilige Gewichtungsfaktor (g) wurde mit dem Feldberechnungsprogramm ermittelt. Die relative Skalierung, d.h. das Verhältnis der in den Abbildungen für beide Werteskalen gewählten Maxima, zwischen den (gewichteten) Stromwerten und der magnetischer Flussdichte ist in den Abbildungen so gewählt, dass die gemessenen Werte für die Flussdichte über den Stromwerten liegen (zusätzliche hausinterne Quellen) und dass nachts, wenn diese Quellen (fast) wegfallen, dieser Abstand klein bleibt (der Vergleich der für die Zeitpunkte der Einzelmessungen durchgeführten Berechnungen der magnetischen Flussdichte aus den für diese Zeitpunkte geltenden aktuellen Stromdaten mit den Messergebnissen bestätigen die Plausibilität dieses Vorgehens).

Für die 24 h-Auswertungen wurden die Werte von doppelt gemessenen Tageszeitpunkten gemittelt, um einen (teilweise gemittelten) Tagesgang zu erhalten. Für diesen mittleren Tagesgang (genauer: 24 h-Zeitraum mit teilweise gemittelten Werten), wurden dann die statistischen Werte gebildet. Daher ist es möglich, dass das Maximum des 24 h-Zeitraumes kleiner ist als das Gesamtmaximum, wenn der Tageszeitpunkt, an dem der gemessene Maximalwert auftrat, zweimal gemessen wurde.

Tabelle 4/15

Auswertung der Dauermessung, Wohnung FL380_2-MFH-OG, 2.Obergeschoss, 17 m Abstand zur Trassenmitte, Mo. 15:54 - Di. 23:59, magnetische Flussdichte mit BB-Filter (30 - 2.000 Hz)

FL380_2-MFH-OG (2. Obergeschoss)	Magnetische Flussdichte [µT]				
	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
ges. Messzeitraum	0,402	0,429	0,088	1,016	0,194
24 h - Zeitraum	0,424	0,447	0,106	0,813	0,172
Tag (6:00-22:15)	0,432	0,465	0,111	1,016	0,196
Nacht (22:15-6:00)	0,336	0,344	0,088	0,738	0,160

Aufgrund der relativ geringen Stromlast auf dieser Trasse während aller Messungen an vier verschiedenen Tagen (im Mittel etwa 5 %, maximal knapp über 11 % der maximalen Stromlast von 2520 A pro Phase) lagen die gemessenen magnetischen Flussdichten trotz des geringen Abstandes von etwa 21 m zum dichtesten Leiterseil (Dauermesspunkt im 2. OG, Abstand zum dichtesten Leitersiel ca. 6 m horizontal und etwa 20 m vertikal) im Mittel unter 0,5 µT und in der Spitze knapp über 1 µT. Hochgerechnet auf maximale Stromlast könnten Werte bis zu knapp über 15 µT erreicht werden (s.o. Tab. 4/10b). Der Tagesgang in beiden Größen weist zwei typische (relative) Maxima auf: gegen Mittag (um 12 Uhr) und am Abend (gegen 21 Uhr). Dabei ist das Abendmaximum in der magnetischen Feldstärke stärker ausgeprägt als dasjenige in den Stromwerten, was sehr wahrscheinlich auf zu der Zeit benutzte elektrische Geräte in der Wohnung zurückzuführen ist (z.B. in der Küche, die sich nur etwa einem Meter vom Dauermesspunkt entfernt befand). Ebenso dürfte das relative Maximum in der Feldstärke am frü-

hern Morgen, das keine Entsprechung in dem Stromwerten findet, durch elektrische Geräte in der Wohnung oder im Haus verursacht worden sein.

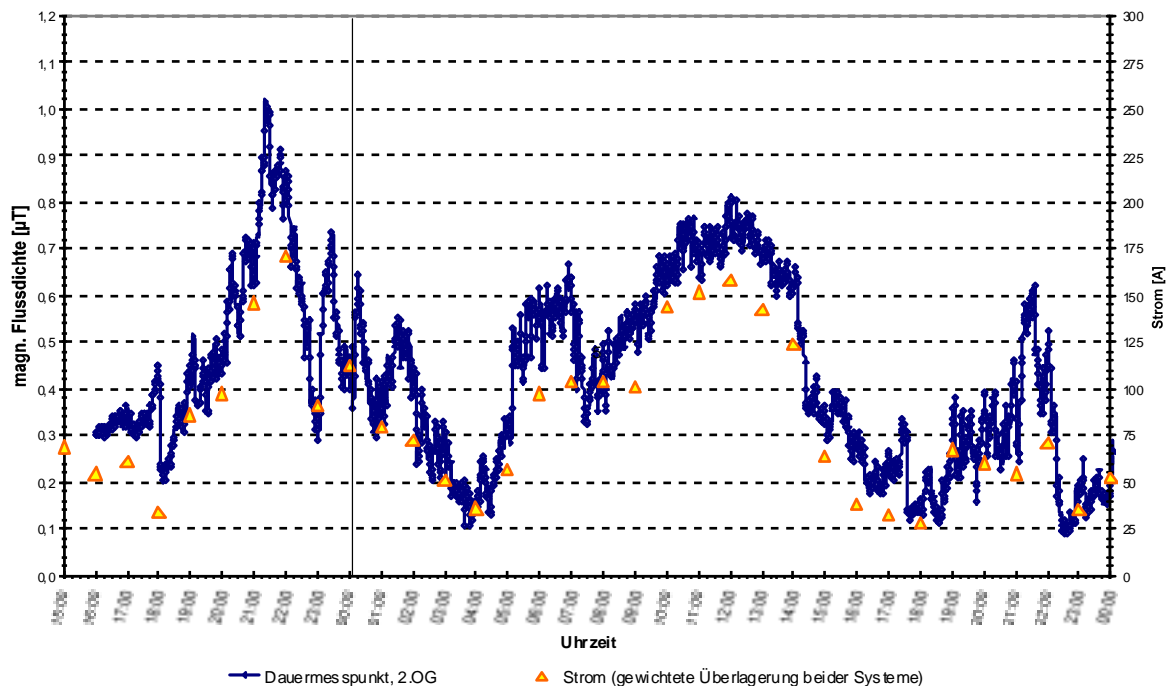


Abbildung4/9

Dauermessung Wohnung FL380_2-MFH-OG, 2.Obergeschoss, 17 m Abstand zur Trassenmitte:
 blaue Kurve: Messreihe für den Zeitraum Mo. 15:54 – Di. 23:59
 gelbe Dreiecke: Stromwerte (gewichtetes Mittel: $[I_{\text{gew}} = (2 \cdot I_{\text{nah}} + 1 \cdot I_{\text{fern}})/3]$),

Die zweite Dauermessung erfolgte in 1. Obergeschoss eines horizontal etwa so weiter von einer anderen Trasse entfernten Zweifamilienhauses. Da diese Wohnung aber nicht so dicht am Mast lag wie die der ersten Dauermessung, betrug der Abstand vom Dauermesspunkt zum nächstgelegenen Leiterseil hier nur etwa 18 m (knapp 14 m horizontal und 12 m vertikal). Da außerdem die Auslastung dieser Trasse deutlich höher lag (bis fast 25 % der maximalen Stromlast von 2700 A pro Phase) ist es nicht erstaunlich, dass hier der höchste in diesem Vorhaben gemessene Einzelwert auftrat (3,39 µT, gemessen in einem knapp zweistündigen Zeitraum am Abend des Tages, an dem auch die Punktmessungen durchgeführt wurden). Auch während der Dauermessung wurden bei einem Mittelwert von über 2 µT und kurzzeitigen Spitzen mit über 3 µT höhere Werte gemessen als sonst in diesem Vorhaben. Hochgerechnet auf maximale Stromlast auf der Trasse können hier Immissionen von über 16 µT auftreten. In die Auswertung (s. Tab. 4/16) wurde auch die knapp zweistündige Messung (01.04.09 18:45-20:29 Uhr) eingeschlossen, um den höchsten gemessenen Einzelwert zu berücksichtigen.

Da sich in dem Kinderzimmer, in dem die Dauermessung durchgeführt wurde, kaum elektrische Geräte befanden, ist die Korrelation zwischen den Stromwerten auf der Trasse und den gemessenen magnetischen Immissionen noch besser, als in der ersten Dauermessung.

Tabelle 4/16

Auswertung der Dauermessung, Wohnung FL380_3-ZFH1-1.OG, 1.Obergeschoss, 28 m Abstand zur Trassenmitte, Mi. 16:06 – Do. 23:59 (13./14.05.09 und ein knapp 2-stündiger Zeitraum am Abend des 01.04.09), magnetische Flussdichte mit BB-Filter (30 - 2.000 Hz)

FL380_3-ZFH1 (1.Obergeschoss)	Magnetische Flussdichte [µT]				
	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
ges. Messzeiträume	2,130	2,077	0,923	3,391	0,616
24 h - Zeitraum	1,970	2,105	1,214	3,087	0,528
Tag (6:00-22:15)	1,865	1,917	1,214	3,391	0,457
Nacht (22:15-6:00)	2,649	2,499	1,564	3,087	0,443

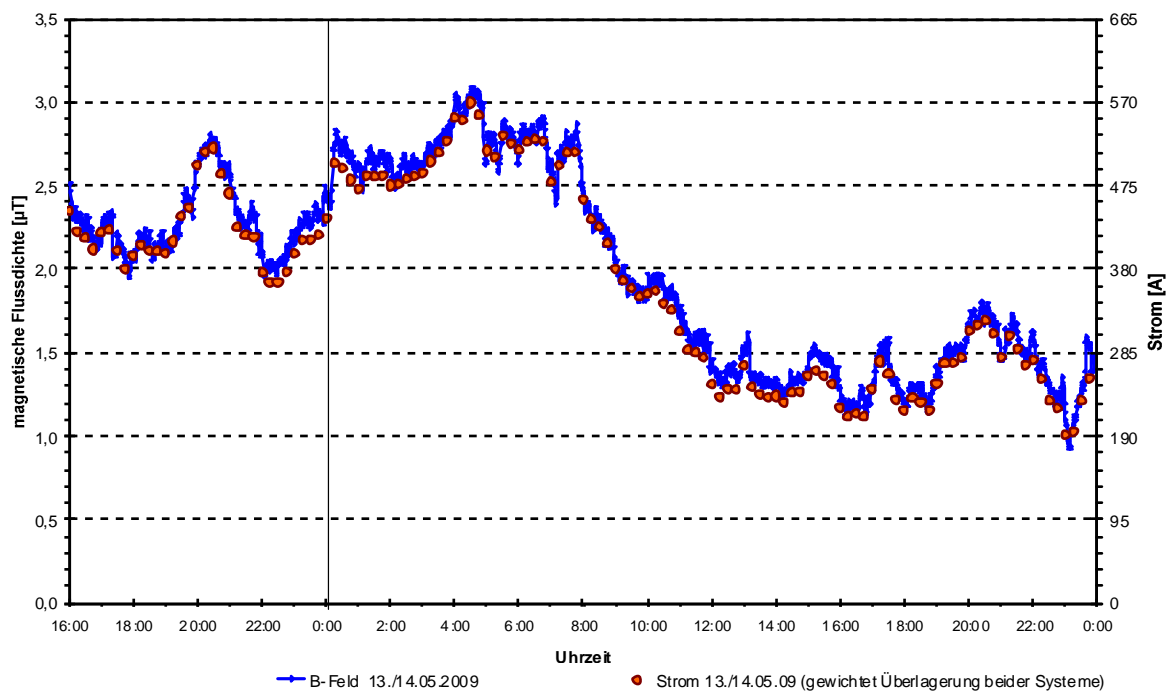


Abbildung 4/10

Dauermessungen im Kinderzimmer im ersten Obergeschoss eines Zweifamilienhauses in 28 m Abstand zur Trassenmitte (FL380_3-ZFH1-1.OG)

blaue Kurve: Messreihe der magnetischen Flussdichte für den Zeitraum 13./14. Mai,
 orangefarbene Punkte: Stromwerte (gewichtetes Mittel: $I_{gew} = [3 \cdot I_{nah} + 1 \cdot I_{ferm}] / 4$)

Etwas überraschend ist hier der Verlauf des Tagesganges mit höheren Werten während der gesamten Nacht. Der Stromverlauf über 39 Stunden ab Mittwoch, 1. April, dem Tag, an dem die Querprofile an der Trasse (vgl. Abschnitt 3.1 zu den Messungen an Freileitungen, FL380_3a-c, S. 97ff) und die Einzelmessungen in den Zweifamilienhäusern (s.o.) durchgeführt wurden, zeigt deutlich niedrigere Stromlasten für den Zeitraum 0 bis 5 Uhr, aber ebenfalls Belastungsspitzen morgens zwischen 5 und 8 Uhr sowie abends zwischen 19 und 21 Uhr. Dabei lagen in beiden Fällen die Stromlasten am Donnerstag nachmittags und abends unter denjenigen für die gleichen Zeiträume am Mittwoch.

4.3.3 Messungen in Wohnungen an 110 kV-Freileitungen

4.3.3.1 Punktmessungen

Auch die Messungen in den Wohnungen in der näheren Umgebung von 110 kV-Übertragungstrassen zeigten deutlich den oft dominanten Einfluss der Beiträge, die durch die Ströme auf der Trasse verursacht wurden. Erwartungsgemäß waren die Immissionen im Umfeld von 110 kV-Freileitungen (höchster Wohnungsmittelwert: 1,04 μT , Mittelwert der Wohnungsmittelwerte: 0,35 μT) nicht so hoch, wie in Wohnungen in der Nähe von 380 kV-Trassen. Insgesamt zeigten auch die Messungen im Umfeld von 110 kV-Freileitungen, dass die Magnetfeldimmissionen mit dem Abstand von der Trasse deutlich abnehmen und dass Wohnungen in Mastnähe im Vergleich mit Wohnungen, die bei etwa gleichem senkrechten Abstand von der Trassenmitte weiter in Richtung Spannungsfeldmitte liegen, weniger stark exponiert sind.

Der höchste Wert für die magnetische Flussdichte wurde im Umfeld der 110 kV-Trassen mit 1,17 μT im ersten Obergeschoss eines direkt unter einer Freileitung stehenden Einfamilienhauses gemessen. Für diese Wohnung ergibt sich eine Immission von bis zu 4,3 μT für den Fall, dass die Freileitung mit maximalem Strom betrieben wird. In drei weiteren Wohnungen muss für Vollauslastung mit Immissionen von über 1 μT gerechnet werden.

In den folgenden Tabellen sind die Messergebnisse zusammengefasst. Dabei werden für jeden Messpunkt (MP) Median, Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung für die im jeweiligen Messzeitraum (mindestens eine Minute, ein Wert alle fünf Sekunden) erfassten Immissionswerte angegeben. Daneben sind die aus den so gebildeten 'Punkt'-Werten berechneten Wohnungswerte aufgeführt. Diese werden aufgrund der fünf Messungen im Referenzraum verglichen mit jeweils nur einer Messung in den beiden anderen Räumen von der Immissionshöhe im Referenzraum dominiert. Trotz dieser Einschränkung sollte eine Zusammenfassung der Ergebnisse für eine Wohnung in einem Wert erfolgen. Wenn an einem Messpunkt länger als eine Minute gemessen wurde, erfolgte die Wohnungswertbildung aus den zeitlichen Mittelwerten für jeden Messpunkt und nicht aus allen Einzelwerten, da sonst eine zusätzliche Ungleichgewichtung der einzelnen Messorte aufgrund unterschiedlich langer Messzeiten in das Ergebnis eingeflossen wäre. Außerdem ist das Ergebnis der Messung in der Mitte des Referenzraumes (RR) bei soweit wie möglich ausgeschalteten Geräten dokumentiert.

Während der Messungen in den Wohnungen FL110_6-EFH2 und FL110_6-RH1-4 waren die Ströme auf den beiden Systemen der benachbarten Trasse um eine Phasendifferenz von $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fern}}) = 180^\circ$ gegeneinander verschoben, dies wurde bei den Berechnungen sowohl für die aktuelle wie auch für die maximale Stromlast berücksichtigt, da dies - bei der auf dieser Trasse vorgesehenen Phasenordnung (RST | TSR) - der ungünstigere Fall ist (vgl. Abschnitt 3.2.2.4.7, S. 281ff). Ohne diese Phasendifferenz ergeben sich deutlich kleinere Immissionen.

Tabelle 4/17a

Auswertung der Messungen in einem Einfamilienhaus direkt unter einer 110 kV-Trasse (FL110_1-EFH1) (RR: Schlafzimmer, R2: Kinderzimmer, R3: Wohnzimmer, TM(S/N): Trassenmitte - Abstände zur Süd-/Nordseite)

FL110_1-EFH1		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR (1. OG Süd)	Mitte	1,110	1,110	1,105	1,117	0,004	normal: AUS	3 m zur TM(S)
		1,111	1,112	1,098	1,130	0,011		3 m zur TM(S)
	MP1	1,105	1,105	1,099	1,111	0,003		1 m zur TM(S)
		1,101	1,102	1,093	1,114	0,007		3 m zur TM(S)
	MP2	1,056	1,056	1,047	1,061	0,004		4 m Zur TM(S)
1,061		1,062	1,058	1,075	0,004	3 m zur TM(S)		
MP3	1,116	1,115	1,099	1,123	0,006	AN	3 m zur TM(S)	
	1,122	1,120	1,111	1,128	0,005		4 m Zur TM(S)	
MP4	1,142	1,142	1,138	1,147	0,003	AN	3 m zur TM(S)	
	1,151	1,154	1,142	1,170	0,009		3 m zur TM(S)	
R2 (1. OG Nord)	0,906	0,908	0,899	0,919	0,005	AN	3 m zur TM(N)	
	0,919	0,919	0,914	0,924	0,003		3 m zur TM(S)	
R3 Mitte (EG Süd)	0,774	0,774	0,771	0,779	0,003	AN	3 m zur TM(S)	
	0,778	0,777	0,771	0,780	0,003		3 m zur TM(S)	
R3 Mitte (EG Süd)	0,780	0,779	0,774	0,786	0,003	AN	3 m zur TM(S)	
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	1,031	1,031	0,774	1,147	0,004	Geräte NORMAL		
	1,035	1,035	0,771	1,170	0,006			

Tabelle 4/17b

Immissionen (50 Hz) in einem freistehenden Einfamilienhaus (FL110_1-EFH1) für verschiedene Lastzustände, I_S , I_N : Stromwerte für das sich über der Nord- / Südseite des Hauses befindliche System

FL110_1-EFH1	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast
	$I_S = I_N = 0 \text{ A}$	$I_S = 157 \text{ A}, I_N = 56 \text{ A}$	$I_S = I_N = 523 \text{ A}$
RR (1. OG-S)	0,03	1,112	4,33
R2 (1. OG-N)	0,02	0,919	4,32
R3 (EG-S)	0,05	0,777	2,95

Tabelle 4/18a

Auswertung der Messungen in einem freistehenden Einfamilienhauses (FL110_6-EFH2)

(RR: Wohnzimmer, R2: Gästezimmer, R3: Schlafzimmer, TM: Trassenmitte)

FL110_6-EFH2		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Ge- räte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR (EG)	Mitte	0,126	0,126	0,124	0,128	0,001	AN	50 m zur TM
		0,120	0,120	0,118	0,123	0,001		
	MP1	0,137	0,137	0,135	0,141	0,002		49 m zur TM 2 m zum TV
		0,135	0,135	0,131	0,137	0,002		
	MP2	0,130	0,130	0,126	0,133	0,002		51 m zur TM 1,6 m zum TV
0,128		0,128	0,126	0,130	0,001			
MP3	0,121	0,121	0,119	0,123	0,001	51 m zur TM		
	0,119	0,120	0,118	0,122	0,001			
MP4	0,129	0,129	0,126	0,133	0,002	49 m zur TM		
	0,124	0,124	0,121	0,128	0,002			
R2 (1.OG)	0,142	0,142	0,139	0,145	0,000	50 m zur TM		
	0,145	0,145	0,142	0,147	0,002			
R3 (1.OG)	0,186	0,186	0,183	0,188	0,002	40 m zur TM		
	0,189	0,188	0,183	0,192	0,003			
RR Mitte	0,127	0,127	0,124	0,130	0,002	AUS	50 m zur TM	
	0,125	0,126	0,124	0,130	0,002			
RR MP2	0,123	0,122	0,117	0,125	0,002	51 m zur TM 1,6 m zum TV		
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	0,139	0,139	0,119	0,188	0,002	Geräte AN		
	0,137	0,137	0,118	0,192	0,002			
	0,140	0,140	0,119	0,188	0,002	ohne MP2		
	0,139	0,139	0,118	0,192	0,002			

Tabelle 4/18b

Immissionen (50 Hz) in einem freistehenden Einfamilienhaus (FL110_6-EFH2) für verschiedene Last-

zustände, I_{nah} , I_{fer} : Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System(in Klammern: Immissionswerte berechnet ohne Phasendifferenz $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fer}}) = 180^\circ$, s. Text)

FL110_6-EFH2	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast mit (ohne) $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fer}})$
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fer}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 164 \text{ A}, I_{\text{fer}} = 122 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fer}} = 645 \text{ A}$
RR (EG)	0,02	0,120	0,51 (0,17)
R2 (1.OG)	0,03	0,145	0,54 (0,19)
R3 (1.OG)	0,02	0,188	0,80 (0,29)

Tabelle 4/19a

Auswertung der Messungen in einem Reihenhaus (FL110_6-RH1)

(RR: Kinderzimmer, R2: Arbeitszimmer, R3: Wohnzimmer, TM: Trassenmitte)

FL110_6-RH1		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR (2. OG)	Mitte	0,292	0,293	0,289	0,296	0,002	AN	24 m zur TM
		0,302	0,303	0,299	0,308	0,003		23 m zur TM
	MP1	0,353	0,353	0,343	0,359	0,004		25 m zur TM
		0,374	0,375	0,370	0,382	0,003		27 m zur TM 1 m zum PC
	MP2	0,291	0,292	0,288	0,296	0,003		23 m zur TM 0,8 m zum TV
0,317		0,317	0,314	0,322	0,003	26 m zur TM 1,2 m zum Drucker		
MP3	0,256	0,257	0,251	0,262	0,004	25 m zur TM		
	0,270	0,270	0,262	0,274	0,004			
MP4	0,316	0,316	0,310	0,321	0,004			
	0,332	0,331	0,325	0,336	0,004			
R2 (1.OG)		0,322	0,321	0,316	0,325	0,003		
		0,320	0,320	0,317	0,324	0,004		
R3 (EG)		0,237	0,237	0,233	0,244	0,004		
		0,241	0,241	0,239	0,244	0,001		
RR Mitte (2.OG)		0,280	0,280	0,275	0,285	0,004	AUS	24 m zur TM
		0,274	0,275	0,271	0,279	0,002		23 m zur TM 0,8 m zum TV
RR MP4 (2.OG)		0,299	0,299	0,293	0,308	0,005		
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	0,295	0,295	0,233	0,359	0,003	Geräte AN		
	0,308	0,308	0,239	0,382	0,003			
	0,292	0,292	0,233	0,359	0,003	ohne MP4		
	0,304	0,304	0,239	0,382	0,003			

Tabelle 4/19b

Immissionen (50 Hz) in einem Reihenhaus (FL110_6-RH1) für verschiedene Lastzustände,

 I_{nah} , I_{fern} : Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System(in Klammern Immissionswerte berechnet ohne Phasendifferenz $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fern}}) = 180^\circ$; s. Text)

FL110_6-RH1	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast mit (ohne) $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fern}})$
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 120 \text{ A}, I_{\text{fern}} = 160 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 645 \text{ A}$
RR (2.OG)	0,01	0,303	1,47 (0,71)
R2 (1.OG)	0,08	0,320	1,23 (0,58)
R3 (EG)	0,02	0,241	1,17 (0,52)

Tabelle 4/20a

Auswertung der Messungen in einem Reihenhaus (FL110_6-RH2)

(RR: Jugendzimmer, R2: Schlafzimmer, R3: Wohnzimmer, TM: Trassenmitte, DMP: Dauermesspunkt)

FL110_6-RH2		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR (2. OG)	Mitte	0,222	0,222	0,217	0,224	0,002	AN	33 m zur TM
		0,225	0,225	0,223	0,228	0,002		
	MP1	0,248	0,248	0,244	0,251	0,002		31 m zur TM
		0,262	0,262	0,257	0,266	0,003		
	MP2	0,253	0,253	0,248	0,256	0,002		31 m zur TM
		0,262	0,263	0,259	0,266	0,002		
MP3	0,192	0,193	0,190	0,199	0,003	36 m zur TM		
	0,201	0,201	0,199	0,203	0,001			
MP4	0,208	0,208	0,204	0,210	0,002	36 m zur TM		
	0,211	0,210	0,207	0,214	0,003			
DMP	0,284	0,285	0,279	0,287	0,004	28 m zur TM		
R2 (1. OG)	0,243	0,243	0,239	0,246	0,003	36 m zur TM		
	0,247	0,248	0,243	0,253	0,001			
R3 (EG)	0,224	0,224	0,221	0,229	0,002	31 m zur TM		
	0,228	0,228	0,224	0,231	0,002			
RR Mitte (2. OG)	0,213	0,214	0,209	0,218	0,003	AUS	31 m zur TM	
	0,211	0,211	0,207	0,215	0,003			
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	0,234	0,234	0,190	0,287	0,003	Geräte AN (BB mit DMP)		
	0,234	0,234	0,199	0,266	0,002			
Dauer- messung	0,123	0,143	0,088	0,326	0,050	AUS	28 m zur TM	

Tabelle 4/20b

Immissionen (50 Hz) in einem Reihenhaus (FL110_6-RH2) für verschiedene Lastzustände,

 I_{nah} , I_{fer} : Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System(in Klammern Immissionswerte berechnet ohne Phasendifferenz $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fer}}) = 180^\circ$; s. Text)

FL110_6-RH2	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast mit (ohne) $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fer}})$
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fer}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 104 \text{ A}, I_{\text{fer}} = 150 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fer}} = 645 \text{ A}$
RR (2. OG)	0,05	0,255	1,01 (0,45)
R2 (1. OG)	0,09	0,248	0,87 (0,38)
R3 (EG)	0,04	0,228	1,01 (0,42)

Tabelle 4/21a

Auswertung der Messungen in einem Reihenhaus (FL110_6-RH3)

(RR: Jugendzimmer, R2: Schlafzimmer, R3: Wohnzimmer, TM: Trassenmitte)

FL110_6-RH3		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Geräte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR (2. OG)	Mitte	0,180	0,180	0,175	0,183	0,002	AN	31 m zur TM
		0,183	0,182	0,177	0,184	0,002		
	MP1	0,215	0,215	0,211	0,218	0,002		30 m zur TM
		0,211	0,211	0,206	0,215	0,003		
	MP2	0,189	0,189	0,186	0,192	0,002		32 m zur TM
0,191		0,190	0,187	0,193	0,002			
MP3	0,176	0,176	0,172	0,179	0,002	32 m zur TM 1,2 m zum PC		
	0,176	0,176	0,174	0,178	0,002			
MP4	0,198	0,198	0,195	0,201	0,002	29 m zur TM 1,5 m zum TV		
	0,189	0,190	0,187	0,196	0,003			
R2 (1.OG)	0,194	0,195	0,192	0,200	0,003	30 m zur TM 1,2 m zum Drucker		
	0,197	0,198	0,194	0,202	0,001			
R3 (EG)	0,164	0,164	0,162	0,166	0,001	31 m zur TM		
	0,165	0,165	0,164	0,169	0,001			
RR Mitte (2.OG)	0,190	0,190	0,186	0,192	0,002	AUS	31 m zur TM	
	0,185	0,186	0,183	0,191	0,003			
RR MP4 (2.OG)	0,200	0,200	0,197	0,202	0,002		29 m zur TM 1,5 m zum TV	
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	0,188	0,188	0,162	0,218	0,002	Geräte AN		
	0,187	0,188	0,164	0,215	0,002			
	0,186	0,187	0,162	0,218	0,002	ohne MP4		
	0,187	0,187	0,164	0,215	0,002			

Tabelle 4/21b

Immissionen (50 Hz) in einem Reihenhaus (FL110_6-RH3) für verschiedene Lastzustände,

 I_{nah} , I_{fern} -Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System(in Klammern Immissionswerte berechnet ohne Phasendifferenz $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fern}}) = 180^\circ$; s.Text)

FL110_6-RH3	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast mit (ohne) $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fern}})$
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 110 \text{ A}, I_{\text{fern}} = 158 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 645 \text{ A}$
RR (2.OG)	0,04	0,182	0,90 (0,38)
R2 (1.OG)	0,05	0,198	0,93 (0,40)
R3 (EG)	0,04	0,165	0,80 (0,34)

Tabelle 4/22a

Auswertung der Messungen in einem Reihenhaus (FL110_6-RH4
(RR: Kinderzimmer, R2: Kinderzimmer, R3: Wohnzimmer)

FL110_6-RH4		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Ge- räte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR (1. OG)	Mitte	0,177	0,176	0,172	0,182	0,003	AN	38 m zur TM
		0,183	0,183	0,179	0,186	0,002		
	MP1	0,178	0,179	0,177	0,182	0,002		37 m zur TM
		0,190	0,190	0,185	0,192	0,002		
	MP2	0,184	0,184	0,180	0,186	0,002		36,5 m zur TM
0,198		0,197	0,191	0,199	0,003			
MP3	0,161	0,161	0,157	0,164	0,002	39,5 m zur TM		
	0,176	0,176	0,173	0,179	0,002			
MP4	0,155	0,156	0,152	0,161	0,003	39 m zur TM		
	0,165	0,165	0,163	0,167	0,001			
R2 (2.OG)	0,195	0,196	0,191	0,200	0,002	38 m zur TM		
	0,197	0,197	0,194	0,199	0,002			
R3 (EG)	0,163	0,163	0,160	0,167	0,002	39 m zur TM		
	0,165	0,165	0,164	0,167	0,001			
RR Mitte (1.OG)	0,169	0,214	0,209	0,218	0,003	AUS	39 m zur TM	
	0,169	0,211	0,207	0,215	0,003			
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	0,173	0,173	0,152	0,200	0,002	Geräte AN		
	0,182	0,182	0,163	0,199	0,002			

Tabelle 4/22b

Immissionen (50 Hz) in einem Reihenhaus (FL110_6-RH4) für verschiedene Lastzustände,
 $I_{\text{nah}}, I_{\text{fer}}$: Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System
(in Klammern Immissionswerte berechnet ohne Phasendifferenz $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fer}}) = 180^\circ$; s.Text)

FL110_6-RH4	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast mit (ohne) $\Delta\varphi(I_{\text{nah}}, I_{\text{fer}})$
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fer}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 115 \text{ A}, I_{\text{fer}} = 160 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fer}} = 645 \text{ A}$
RR (1.OG)	0,02	0,183	1,01 (0,33)
R2 (2.OG)	0,03	0,197	0,87 (0,36)
R3 (EG)	0,04	0,165	0,73 (0,26)

4.3.3.2 Frequenzspektren

In allen Wohnungen wurden in der Mitte des Referenzraums zwei Spektren im Frequenzbereich von 5 Hz bis 2.000 Hz aufgenommen, einmal mit eingeschalteten Geräten und einmal mit ausgeschalteten Geräten. Letztere unterschieden sich bzgl. der spektralen Verteilung nur unwesentlich von den Spektren an den zugehörigen Stromtrassen. Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft für Wohnungen in der Nähe von 110 kV-Freileitungen zwei Spektren einmal ohne merklichen Einfluss der (eingeschalteten) elektrischen Geräte und einmal mit (insbesondere durch den ca. 2,5 m entfernten Fernsehgerät mit 100 Hz-Technik).

Das Verhältnis (50 Hz-Peak / größter Oberwellenpeak) erreichte in den Wohnungen in der Nähe von 110 kV-Freileitungen Werte zwischen 35 und 80. Im Obergeschoss des Einfamilienhauses direkt unter einer 110 kV-Freileitung lag dieses Verhältnis bei 70. Auch bei Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der ICNIRP-Regelung tragen in diesem Fall die Oberwellen zusammen nicht einmal ein Fünftel zur Grenzwertausschöpfung von insgesamt 13,7 μT (vgl. Abb. 4/11) bei. Im Wohnzimmer eines Reihenhauses (ca. 38 m von der Trassenmitte) sorgte das Fernsehgerät (mit 100 Hz-Technik, 2,5 m entfernt vom Messpunkt) dafür, dass die Oberwellen geringfügig mehr (51 %) zur Grenzwertausschöpfung von zusammen 3,3 μT beitrugen als der 50 Hz-Peak (vgl. Abb. 4/12). Bei ausgeschalteten Geräten verringerten sich die Oberwellen deutlich, während der 50 Hz-Beitrag etwa gleich blieb und dann einen Anteil von gut zwei Dritteln an der Grenzwertausschöpfung (jetzt 2,4 μT) ausmachte. Das Verhältnis stieg von 38 bei eingeschalteten auf 74 bei ausgeschalteten Geräten.

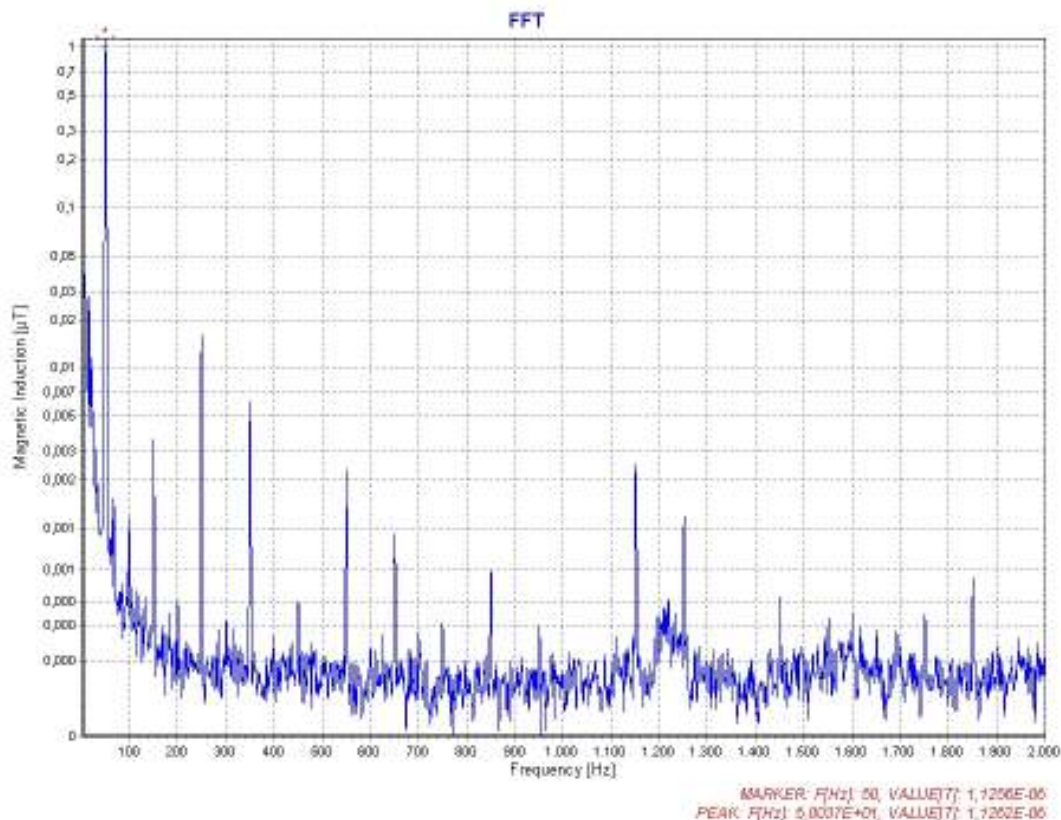


Abbildung 4/11
Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte, Schlafzimmer im 1.OG eines Einfamilienhauses (Stadttrandsiedlung) direkt unter einer 110 kV-Freileitung (Geräte 'AN', aber kaum vorhanden)

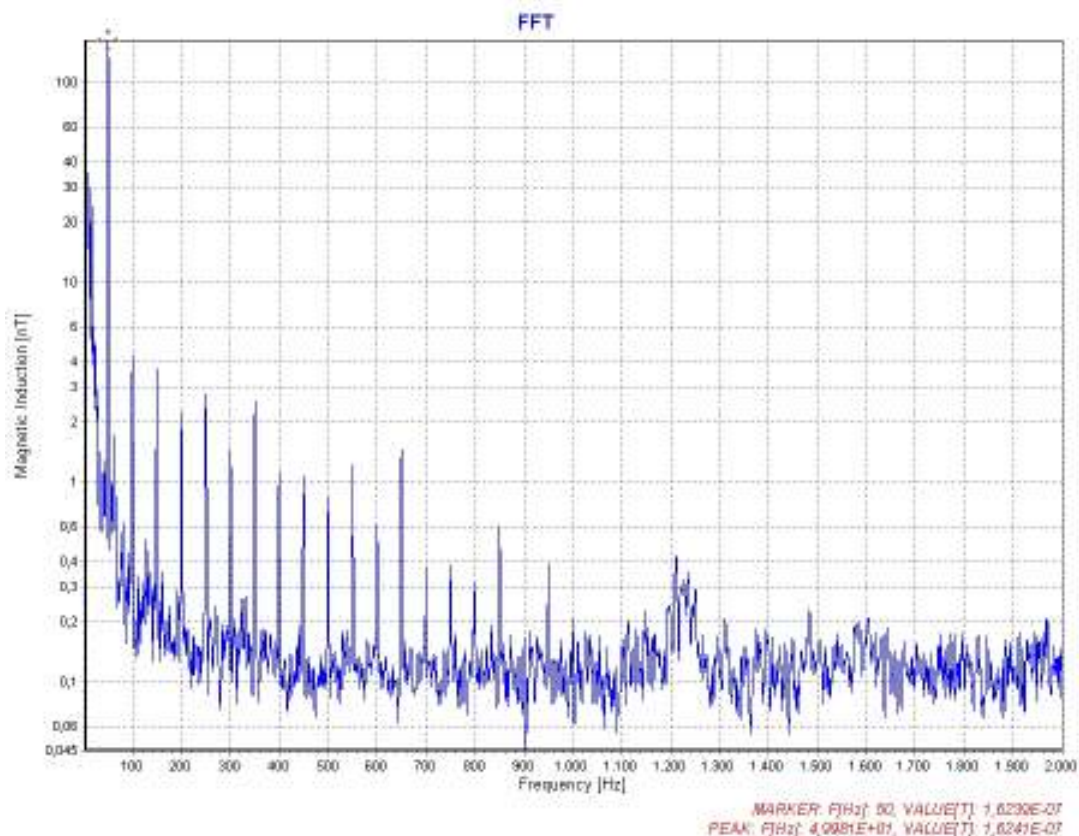


Abbildung 4/12

Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte, Wohnzimmer im EG eines modernen Reihenhauses (Stadtgebiet) ca. 38 m Abstand zu einer 110 kV-Freileitung, Geräte 'AN (100 Hz-TV in 2,5 m Abstand), die Peaks bei n-100 Hz waren nur bei eingeschaltetem TV-Gerät messbar

4.3.3.3 Dauermessung

Im 2. Obergeschoss eines Reihenhauses, etwa 25 m entfernt von der Mitte einer 110 kV-Freileitungstrasse, wurde eine Dauermessung durchgeführt. Der Mittelwert für den Gesamtzeitraum betrug 0,143 μT und lag am Freitag mit knapp über 0,2 μT deutlich über dem Wert für den Samstag von 0,126 μT . Der gemessene Maximalwert betrug in dem Zeitraum 0,326 μT

Tabelle 4/23

Auswertung der Dauermessung, Wohnung FL110_6-RH2, 2.Obergeschoss, 28 m Abstand zur Trassenmitte, Fr. 19:54 - Sa. 23:59, magnetische Flussdichte mit BB-Filter (30 - 2.000 Hz),

FL110_6-RH2 (2. Obergeschoss)	Magnetische Flussdichte [μT]				
	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
ges. Messzeitraum	0,123	0,143	0,088	0,326	0,050
nur Samstag	0,119	0,126	0,088	0,187	0,022
gesamter Freitag	0,199	0,201	0,109	0,326	0,058
Tag (6:00-22:15)	0,211	0,217	0,109	0,326	0,060
Nacht (0:00-6:00 u. 22:15-23:59)	0,188	0,168	0,109	0,231	0,036

Um auch für den Freitag eine Tagesauswertung durchführen zu können, gehen in die Auswertung für den Zeitraum, in dem die magnetische Flussdichte nicht gemessen wurde, die aus den gelieferten Stromwerten ermittelten Flussdichtewerte ein: $B(t) = I(t) \cdot B_{\text{ave}} / I_{\text{ave}}$, Mitte-

lungszeit (19:54 – 20:12), so dass sich der gemessene Wert für den Dauermesspunkt ergibt (vgl. Abb. 4/13).

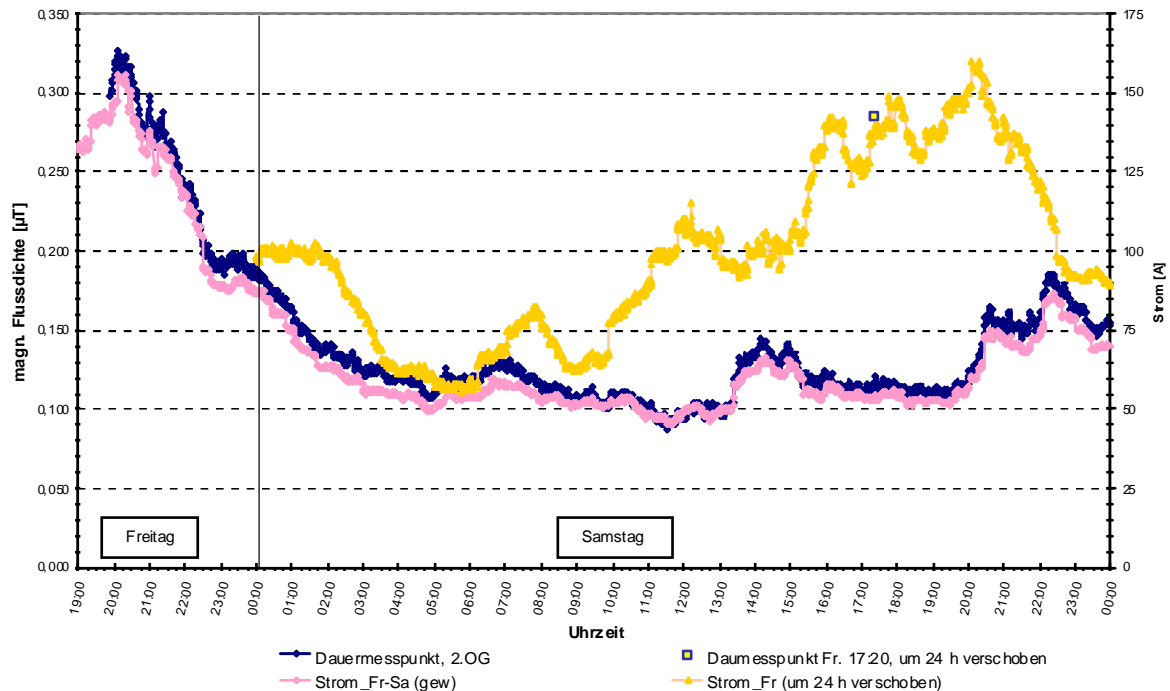


Abbildung 4/13

Dauermessung (Fr. 19:54 - Sa. 23:59) 28 m Abstand zur Trassenmitte (2.OG, Reihenhaus): die magnetische Flussdichte (dunkelblau) folgt den gewichteten Stromwerten (pinkfarben) auf der Trasse (Stromwerte als gewichtetes Mittel ($I_{\text{gew}} = (1,5 \cdot I_{\text{nah}} + 1 \cdot I_{\text{fern}}) / 2,5$), zum Vergleich ist der höhere Stromverlauf vom Freitag (hellgelb) auf den Samstag verschoben wiedergegeben, die magnetische Flussdichte im Verlauf des Freitags lag dementsprechend höher, die Messung am Dauermesspunkt vom Freitag Nachmittag bestätigt dies (einzelnes Quadrat)

4.3.4 Messungen in Wohnungen an 110 kV-Erdkabeltrassen

4.3.4.1 Punktmessungen

In den Wohnungen, die in der näheren Umgebung von 110 kV-Erdkabeltrassen lagen, konnten kaum Beiträge zur Immission gemessen werden, die eindeutig den Stromtrassen zuzuordnen waren. Die gemessenen Gesamtimmissionen (höchster Wohnungsmittelwert: 0,06 µT, Mittelwert der Wohnungsmittelwerte: 0,04 µT) entsprachen den Immissionen, wie sie in nicht-exponierten Wohnungen gleichen Typs gemessen wurden (vgl. Abschnitt 4.2).

In den folgenden Tabellen sind die Messergebnisse zusammengefasst. Dabei werden für jeden Messpunkt (MP) Median, Mittelwert, Minimum, Maximum und Standardabweichung für die im jeweiligen Messzeitraum (mindestens eine Minute, ein Wert alle fünf Sekunden) erfassten Immissionswerte angegeben. Daneben sind die aus den so gebildeten 'Punkt'-Werten berechneten Wohnungswerte aufgeführt. Diese werden aufgrund der fünf Messungen im Referenzraum verglichen mit jeweils nur einer Messung in den beiden anderen Räumen von der Immissionshöhe im Referenzraum dominiert. Trotz dieser Einschränkung sollte eine Zusammenfassung der Ergebnisse für eine Wohnung in einem Wert erfolgen. Wenn an einem Messpunkt länger als eine Minute gemessen wurde, erfolgte die Wohnungswertbildung aus den zeitlichen Mittelwerten für jeden Messpunkt und nicht aus allen Einzelwerten,

da sonst eine zusätzliche Ungleichgewichtung der einzelnen Messorte aufgrund unterschiedlich langer Messzeiten in das Ergebnis eingeflossen wäre. Außerdem ist das Ergebnis der Messung in der Mitte des Referenzraumes (RR) bei so weit wie möglich ausgeschalteten Geräten dokumentiert.

In der Erdgeschosswohnung eines Mehrfamilienhauses in 10 m Abstand (Hauswand) zu einer 110 kV-Erdkabeltrasse mit einem System wurden magnetische Flussdichten um $0,06 \mu\text{T}$ gemessen. Die Berechnungen mit dem Feldberechnungsprogramm zeigen, dass der Feldbeitrag durch den Stromfluss auf dem Kabel in der Wohnung zwischen $0,01 \mu\text{T}$ und $0,02 \mu\text{T}$ lag. Dies bedeutet, dass zwischen etwa 12 % im weiter entfernten Schlafzimmer (R3) und ungefähr 25 % auf dem Balkon in Richtung zur Kabeltrasse von deren Strömen verursacht wurden. Während der Dauermessung auf dem Fensterbrett relativ dicht an der Wand zur Nachbarwohnung wurden Werte fast $0,2 \mu\text{T}$ festgestellt, die wahrscheinlich kaum von den Strömen auf der Kabeltrasse, sondern von elektrischen Geräten in der Nachbarwohnung verursacht wurden. Selbst bei Vollast auf dem Erdkabel beträgt der externe Beitrag nur um $0,06 \mu\text{T}$.

In der zweiten Wohnung, die etwa 20 m von der Erdkabeltrasse mit zwei Systemen entfernt lag, betragen die für die aktuellen Stromwerte berechneten externen Beiträge etwa 50 % der gemessenen Immissionen von ca. $0,02 \mu\text{T}$. allerdings erhöht sich der interne Beitrag zur Gesamtmission bei Annäherung an ein elektrisches Gerät stärker, als der externe Beitrag ausmacht. Selbst bei Vollast auf beiden Systemen liegt der externe Beitrag nur bei $0,07 \mu\text{T}$, verglichen mit einer Immission von über $0,6 \mu\text{T}$ etwa 30 cm vor dem Fernsehgerät.

Tabelle 4/24a

Auswertung der Messungen im Erdgeschoss eines Mehrfamilienhauses (EK110_5-MFH)
(RR: Esszimmer, R2: Fernsehzimmer, R3: Schlafzimmer, EK: Erdkabel)

EK110_5-MFH (nur EG)		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Ge- räte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR	Mitte	0,051	0,055	0,036	0,069	0,011	AN	12 m zum EK
		0,072	0,071	0,054	0,091	0,010		11 m zum EK
	MP1	0,052	0,053	0,035	0,070	0,010		13 m zum EK
		0,055	0,053	0,038	0,068	0,009		13 m zum EK
	MP2	0,059	0,060	0,049	0,068	0,006		11 m zum EK
0,050		0,055	0,042	0,072	0,012	12 m zum EK 2 m zum TV		
MP3	0,053	0,053	0,040	0,081	0,011	16 m zum EK		
	0,044	0,042	0,025	0,055	0,011			
MP4	0,083	0,083	0,066	0,098	0,009	AUS		12 m zum EK
	0,052	0,056	0,027	0,085	0,017			10 m zum EK
R2	Mitte	0,049	0,050	0,045	0,055	0,003	Ohne Balkon	
		0,042	0,042	0,036	0,048	0,003		
R3	Mitte	0,073	0,073	0,064	0,082	0,005	10 m zum EK	
		0,078	0,078	0,064	0,084	0,006		
R2	Mitte	0,051	0,051	0,047	0,057	0,003	10 m zum EK	
		0,061	0,061	0,050	0,071	0,007		
Balkon		0,082	0,083	0,077	0,091	0,004	9 m zum EK	
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
		Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert Stabw.		
Wohnung gesamt		0,059	0,060	0,035	0,098	0,007	Ohne Balkon	
		0,057	0,057	0,025	0,091	0,009		
Dauer- messung		0,081	0,085	0,031	0,198	0,029	10 m zum EK	

Tabelle 4/24b

Immissionen (50 Hz) im Erdgeschoss eines Mehrfamilienhauses (EK110_5-MFH) für verschiedene Lastzustände

EK110_5-MFH	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast
	I = 0 A	I = 150 A	I = 457 A
RR (EG)	0,05	0,071	0,11
R2 (EG)	0,04	0,061	0,10
R3 (EG)	0,07	0,078	0,09

Tabelle 4/25a

Auswertung der Messungen in einem freistehenden Einfamilienhauses (EK110_2-EFH)
(RR: Wohnzimmer, R2: Gästezimmer, R3: Schlafzimmer, EK: Erdkabel)

EK110_2-EFH		Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					Bemerkungen	
		Auswertung für jeden Messpunkt					Ge- räte	Abstände
		Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
RR (EG)	Mitte	0,031	0,032	0,025	0,037	0,003	AN	19 m zum EK
		0,018	0,018	0,014	0,024	0,003		
	MP1	0,059	0,059	0,057	0,062	0,002		18 m zum EK 1,5 m zum TV*
		0,025	0,024	0,017	0,029	0,004		
	MP2	0,034	0,034	0,032	0,036	0,002		20 m zum EK
0,023		0,023	0,019	0,028	0,003			
MP3	0,016	0,016	0,013	0,020	0,002	20 m zum EK		
	0,018	0,017	0,012	0,021	0,003			
MP4	0,029	0,029	0,023	0,034	0,003	18 m zum EK		
	0,016	0,017	0,013	0,023	0,003			
R2 (1.OG)	0,023	0,024	0,020	0,029	0,003	19 m zum EK		
	0,023	0,023	0,018	0,028	0,002			
R3 (1.OG)	0,021	0,021	0,019	0,026	0,002	24 m zum EK		
	0,015	0,015	0,012	0,017	0,001			
RR (EG)	0,019	0,020	0,015	0,026	0,004	AUS	19 m zum EK	
	0,022	0,022	0,019	0,026	0,002			
(räumliche) Zusammenfassung aller Messpunkte								
	Mittelwert Mediane	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw. Mittelwerte			
Wohnung gesamt	0,031	0,031	0,013	0,062	0,002	Geräte AN		
	0,019	0,019	0,012	0,029	0,003			
	0,026	0,026	0,013	0,037	0,002	ohne MP1		
	0,019	0,019	0,012	0,028	0,003			

Messung in 0,3 m Abstand vom Fernsehgerät (TV, 100 Hz-Technik):

$$B_{BB}('AN') = 0,61 \mu\text{T}, B_{50\text{Hz}}('AN') = 0,03 \mu\text{T}, B_{BB}('AUS') = 0,02 \mu\text{T}$$

Tabelle 4/25b

Immissionen (50 Hz) in einem freistehenden Einfamilienhauses (EK110_2-EFH) für verschiedene Lastzustände, I_{nah} , I_{fern} : Stromwerte für das nähere und etwas weiter entfernte System

EK110_2-EFH	mittlere Immissionen (magnetische Flussdichte) [μT]		
	ohne Stromlast	bei aktueller Stromlast	bei maximaler Stromlast
	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 0 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = 56 \text{ A}, I_{\text{fern}} = 68 \text{ A}$	$I_{\text{nah}} = I_{\text{fern}} = 385 \text{ A}$
RR (EG)	0,01	0,022	0,08
R2 (1.OG)	0,01	0,023	0,07
R3 (1.OG)	0,01	0,015	0,05

4.3.4.2 Frequenzspektren

In den Wohnungen in der Nähe zu 110 kV-Erdkabeltrassen waren die Immissionen durch die hausinternen Quellen und die Beiträge der Niederspannungsversorgung bestimmt, letztere befand sich bei beiden Wohnungen in etwa im gleichen Abstand zum Referenzraum wie die 110 kV-Erdkabeltrasse. Die Spektren zeigten ganz ähnliche Ergebnisse wie bei den Messungen in nicht-exponierten Wohnungen. Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils das Spektrum für den Messpunkt im Wohnzimmer bei eingeschalteten Geräten. Bei ausgeschalteten Geräten war in diesen Wohnungen der Anteil an den Immissionen durch die Oberwellen (etwa 5%) geringer. In dem Mehrfamilienhaus betrug der Beitrag der stärksten Oberwelle (150 Hz) etwa ein Drittel des Beitrages bei 50 Hz, sowohl bei eingeschalteten als auch bei ausgeschalteten Geräten (vgl. Abb. 4/14). Bei Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der ICNIRP-Regelung tragen somit beide Anteile etwa gleich viel zur insgesamt minimalen Grenzwertschöpfung bei. Das gleiche gilt für das Einfamilienhaus bei ausgeschalteten Geräten. Bei eingeschalteten Geräten erzeugt insbesondere das Fernsehgerät auch in Zimmermitte höhere und zusätzlich messbare Oberwellenanteile bei 100 Hz und den Vielfachen davon. Dadurch war in diesem Fall der Anteil an der Grenzwertschöpfung durch die Oberwellen fast fünfmal so hoch wie durch den 50 Hz-Beitrag allein, betrug aber in der Summe trotzdem nur 1,2 ‰ (s. Abb.4/15).

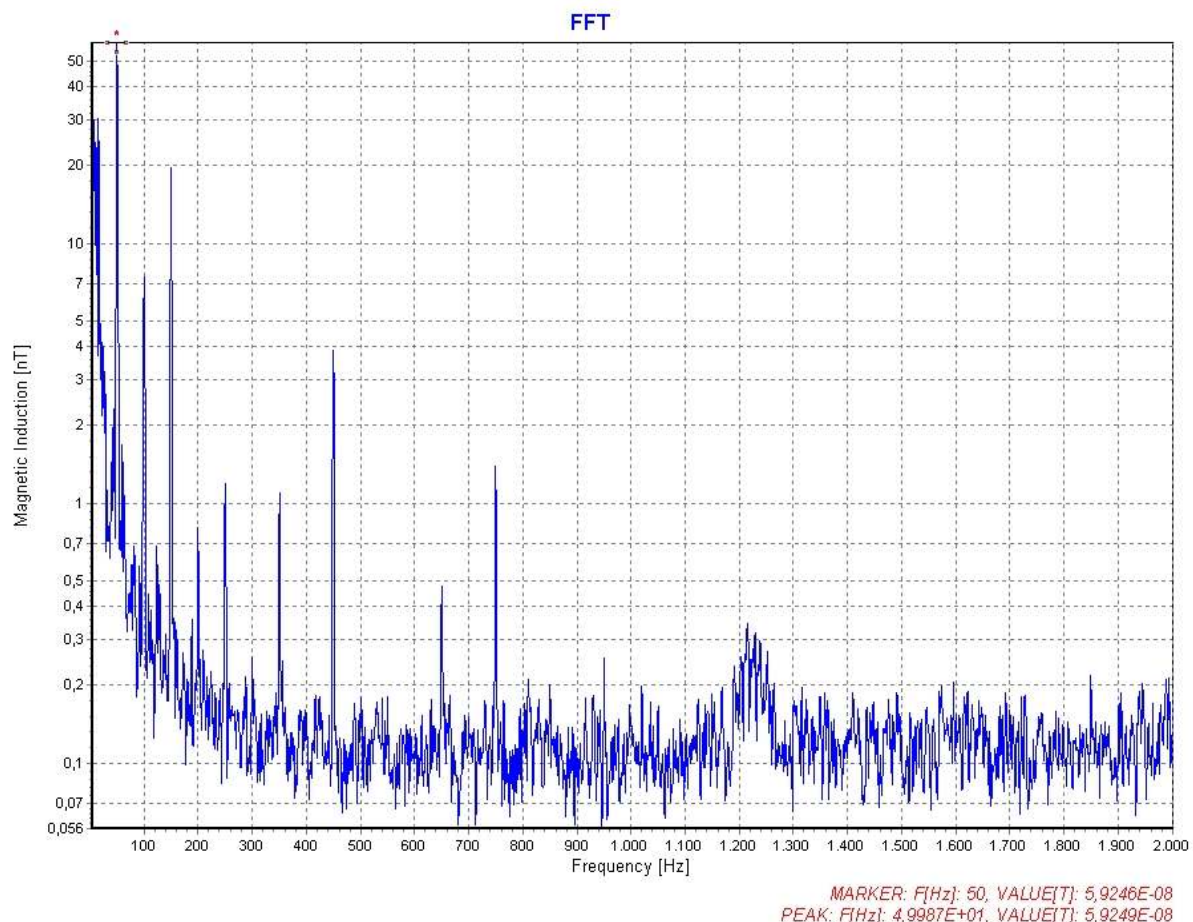


Abbildung 4/14

Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte, Wohnzimmer im EG eines Mehrfamilienhauses (Stadtgebiet) ca. 10 m Abstand zu einer 110 kV-Erdkabeltrasse, Geräte 'AN', im Fall Geräte 'AUS' waren die Oberwellenbeiträge geringfügig kleiner

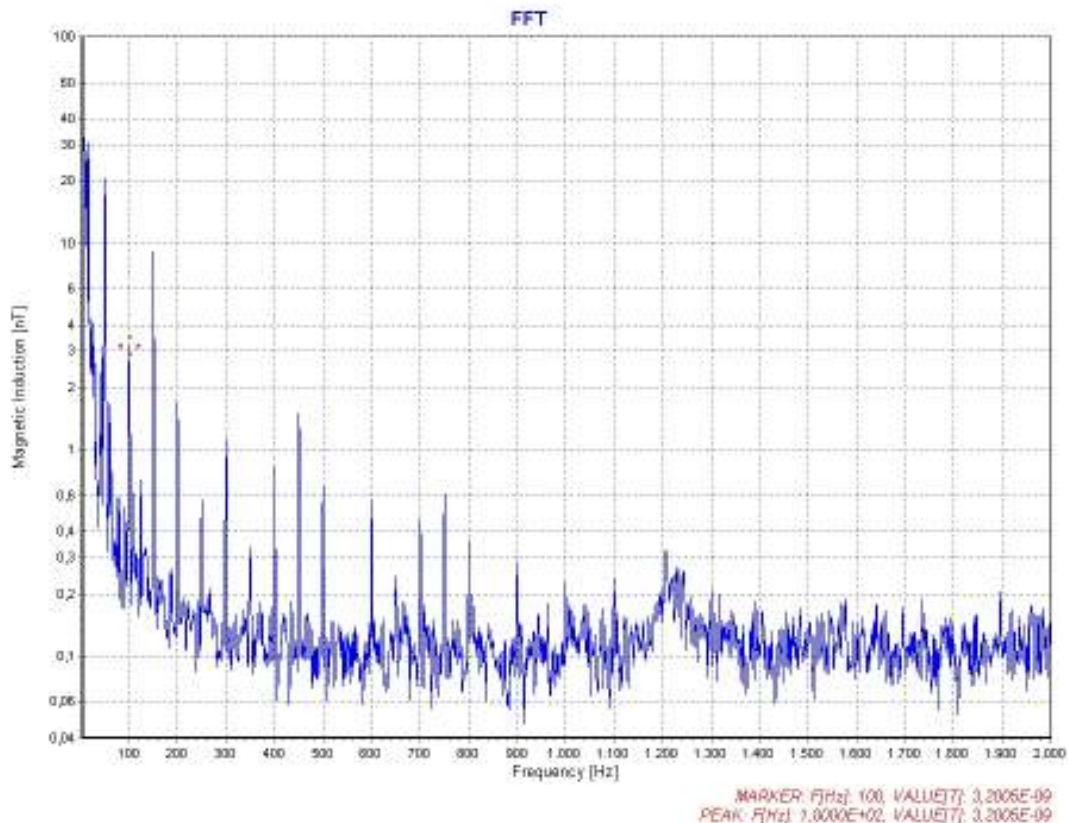


Abbildung 4/15

Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte, Wohnzimmer im EG eines modernen Einfamilienhauses (Stadttrandsiedlung) ca. 20 m Abstand zu einer 110 kV-Erdkabeltrasse, Geräte 'AN' (100 Hz-TV in 4 m Abstand), die Peaks bei $n \cdot 100$ Hz waren nur bei eingeschaltetem TV-Gerät messbar

4.3.4.3 Dauermessung

In der Erdgeschosswohnung eines Mehrfamilienhauses wurde auf der Fensterbank in 10 m Abstand zu einer 110 kV-Erdkabeltrasse eine Dauermessung vorgenommen. Der zeitliche Verlauf der magnetischen Flussdichte ist zusammen mit den während dieser Zeit auf der Kabeltrasse geflossenen Strömen in der Abbildung 4/16 dargestellt. Die relative, vertikale Skalierung der Stromwerte erfolgte für die Abbildung so, dass die Höhe der Stromwerte in etwa den für diesen Punkt berechneten Werten der magnetischen Flussdichte bei diesen Stromwerten entsprechen, d.h. die Kurve der Stromwerte zeigt den Beitrag zum Messwert, der durch den Strom auf dem Erdkabel verursacht sein sollte. Der allgemeine Tagesgang beider Messwerte (Strom auf der Trasse und magnetische Flussdichte in der Wohnung) verläuft in etwa parallel mit niedrigeren Werten während der Nachtzeit und einem breiten Maximum zwischen 8 und 14 Uhr. Daneben zeigen insbesondere die Spitzen in der magnetischen Flussdichte zwischen 20 und 23 Uhr, die in der Stromkurve so nicht zu sehen sind, dass die hausinternen Quellen – nicht unbedingt die wohnungsinternen (der Dauermesspunkt auf der Fensterbank befand sich nur ca. 1 m von der Wand zur Nachbarwohnung) – den dominierenden Beitrag zur Gesamtmission leisteten.

Tabelle 4/26

Auswertung der Dauermessung, Wohnung EK110_5-MFH-EG, Erdgeschoss, 10 m Abstand zur Kabeltrasse, Mi. 19:43 – Do. 20:20, magnetische Flussdichte mit BB-Filter (30 - 2.000 Hz), für die 24 h-Auswertung wurden die Werte von doppelt gemessenen Tageszeitpunkten gemittelt, bevor diese Mittelwerte mit den Werten für die anderen Zeitpunkte zusammengefasst wurden

EK110_5-MFH-EG	Magnetische Flussdichte [μT]				
	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.
ges. Messzeitraum	0,081	0,086	0,031	0,198	0,029
24 h - Zeitraum	0,081	0,085	0,031	0,198	0,029
Tag (6:00-22:15)	0,091	0,092	0,032	0,198	0,029
Nacht (22:15-6:00)	0,064	0,070	0,031	0,154	0,023

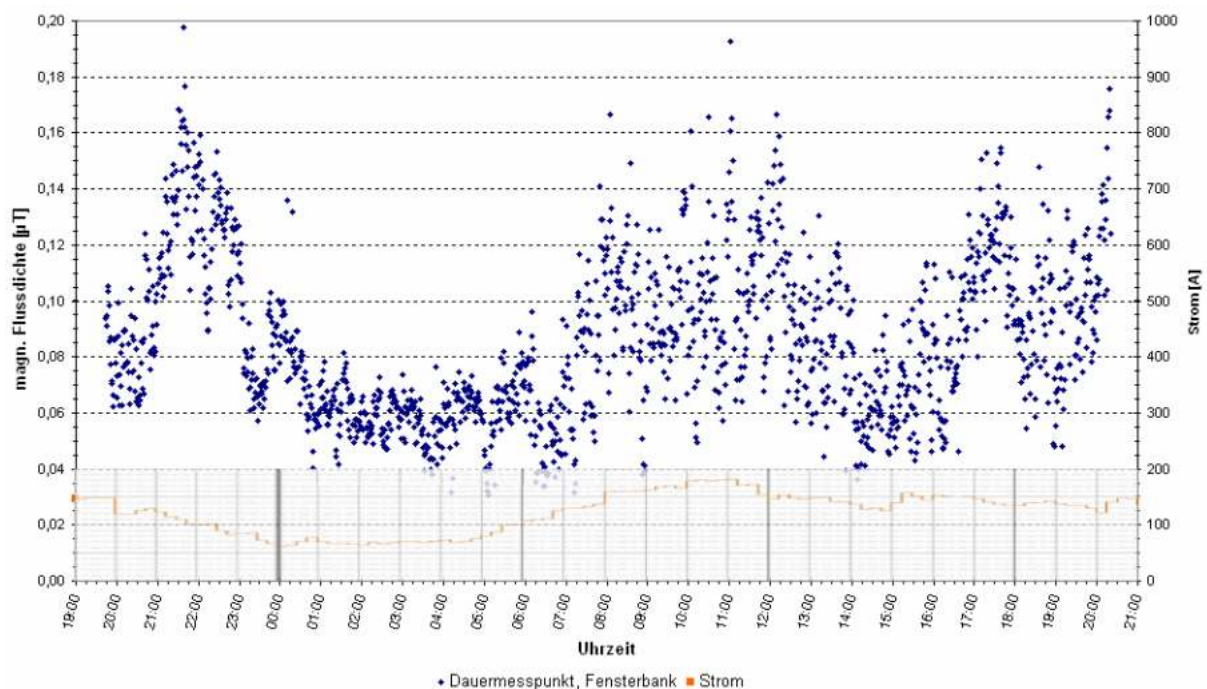


Abbildung 4/16

Dauermessung, Mehrfamilienhaus (EK110_5-MFH, Fensterbank im Erdgeschoss, 10 m Abstand zu einer 110 kV-Erdkabeltrasse, 1 m Abstand zur Nachbarwohnung),
 blaue Vierecke: magnetische Flussdichte , orange Linie: Stromwerte auf der 110 kV-Erdkabeltrasse
 (relative vertikale Skalierung s. Text)

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen im Rahmen dieses Vorhabens und Vergleich mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen

4.4.1 Nicht-exponierte Wohnungen

Die zusammenfassende Auswertung der in diesem Vorhaben durchgeführten stichprobenhaften Messungen in unterschiedlichen Wohnungstypen fernab von Anlagen der Stromversorgung ist in der Tabelle 4/27 aufgeführt. Die Messergebnisse passen sich sehr gut in die bisher veröffentlichten Befunde für solche Wohnungen ein (s. Kap. 2), in denen zumeist keine Werte von Messpunkten in direkter Nähe zu elektrischen Geräten eingeflossen sind. Der Mittelwert der Wohnungs-Mediane für Messpunkte ohne eingeschaltete Geräte in der Nähe liegt bei 0,05 μT , der geringste festgestellte Wohnungs-Medianwert beträgt 0,01 μT und der größte fast 0,08 μT , verglichen mit 0,07 μT als Obergrenze in den bisherigen Untersuchungen. Der in den Wohnungen maximal gemessene Einzelwert der magnetischen Flussdichte erreichte in dieser Untersuchung fast 0,2 μT .

Tabelle 4/27

Wohnungswerte der fünf verschiedenen Wohntypen und zusammengefasste Werte für Wohnungen fernab von Anlagen der Stromversorgung (gemittelt über alle Messpunkte ohne diejenigen, die durch in der Nähe befindliche Geräte dominiert wurden, sowie Maximum aller Messpunkte, Geräte an)

	Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					
	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.	Max (alle MP)
Einfamilienhaus (EFH, dörf. Umfeld)	0,010	0,010	0,004	0,017	0,003	0,017
	0,009	0,009	0,003	0,019	0,003	0,019
Reihenhaus (RH, Standrandgebiet)	0,036	0,037	0,015	0,077	0,010	
	0,035	0,037	0,010	0,083	0,009	0,128
Mehrfamilienhaus (MFH, Stadtgebiet)	0,054	0,054	0,023	0,088	0,020	0,112
	0,056	0,054	0,014	0,099	0,024	0,099
Großwohnanlage (GWA, Stadtgebiet)	0,077	0,080	0,037	0,160	0,014	0,194
	0,086	0,087	0,039	0,174	0,020	0,188
Mehrfamilien-Altbau (MFA, Innenstadt)	0,073	0,072	0,045	0,110	0,012	0,165
	0,066	0,066	0,047	0,091	0,006	0,129
Zusammengefasste Wohnungswerte (Mittelwert der Mediane, Mittelwerte und Stabw, Minimum der Minima sowie Maximum der Maxima)						
kleinere Einheiten (EHF + RH)	0,023	0,023	0,004	0,077	0,007	0,017
	0,022	0,023	0,003	0,083	0,006	0,128
größere Einheiten (MFH + GWA + MFA)	0,068	0,069	0,023	0,160	0,015	0,194
	0,069	0,069	0,014	0,174	0,017	0,188
gesamt	0,050	0,051	0,004	0,160	0,012	0,194
	0,050	0,051	0,003	0,174	0,012	0,188

Die hier gemessenen Werte für die verschiedenen Haustypen bestätigen die in früheren Untersuchungen festgestellten Tendenzen:

höhere Messwerte

- mit steigender Anzahl der Wohnungen pro Haus
- mit wachsender Verdichtung der Bebauung.

Der hier in den Dauermessungen festgestellte Tag-Nachtunterschied ist mit einem Faktor 3 zwischen dem Tages- und dem Nachtwert (s. Abschnitt 4.2.4) deutlich höher als der in den oben aufgeführten Untersuchungen ermittelte Unterschied. Dies liegt zum einen daran, dass hier als 'Nachtzeit' genau der Zeitraum gewählt wurde, in der in der hier untersuchten Wohnung die geringsten magnetischen Flussdichten gemessen wurden, um den Unterschied zwischen Ruhephasen und Aktivitätszeiten gut erkennen zu können. Bei Erweiterung des Nachtzeitraumes auf 22 bis 7 Uhr verringert sich der Unterschied auf einen Faktor zwei. Bei Mittelung über mehrere Wohnungen, mit z.T. unterschiedlichen Tagesrhythmen, wird üblicherweise für alle Wohnungen der gleiche Zeitraum als 'Nacht' definiert, wodurch der mittlere Nachtwert natürlich etwas ansteigt und der Tag-Nacht-Unterschied kleiner wird. Zum anderen wurde hier nur in der Wohnung eines Reihenhauses fernab von Anlagen der Stromversorgung gemessen. In den anderen Untersuchungen wurden auch Wohnungen in Mehrfamilienhäusern und ebenfalls Wohnungen in der Nähe zu solchen Installationen eingeschlossen. Der u.U. andere Tagesrhythmus der Hausbewohner neben, über und unter der untersuchten Wohnung führt in dieser zu einem verringerten Tag-Nacht-Unterschied, verglichen mit dem Unterschied der Immissionen allein durch die elektrischen Einrichtungen der eigenen Wohnung. Bei den Immissionen verursacht durch Anlagen der Stromversorgung ist der Tagesgang meist noch geringer, da sich dort der das magnetische Feld verursachende Stromfluss als Summe von allen Verbrauchern mit ihren unterschiedlichen Tagesrhythmen ergibt. Einige Verbraucher, z.B. Tag und Nacht durchlaufende Maschinen, zeigen praktisch keinen Tagesgang. Zusätzlich gibt es Fälle, z.B. in Wohnungen mit Nachspeicherheizungen, bei denen die Nachtwerte höher liegen als die Tageswerte, was den mittleren Tag-Nacht-Unterschied ebenfalls verringert.

4.4.2 Exponierte Wohnungen

Die Ergebnisse der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Messungen in den Wohnungen in der Nähe von Anlagen der Stromübertragung sind in der Tabelle 4/28 zusammengestellt.

Für den Vergleich mit den nicht-exponierten Wohnungen werden die Messergebnisse für die drei untersuchten Trassenarten zusammengefasst. Dafür wurden von den bei der aktuellen Stromlast gemessenen Immissionen die für diese Situation mit dem Feldberechnungsprogramm ermittelten externen Immissionen abgezogen, um so die hausinternen Immissionen, bzw. die Immissionssituation ohne Stromtrasse zu bestimmen. Durch Addition der für den Fall der maximalen Stromlast berechneten externen Immission konnte eine Abschätzung für die maximal zu erwartende Gesamtimmission (für Aufenthaltsorte, die sich nicht in unmittelbarer Nähe zu elektrischen Geräten befinden) gewonnen werden.

Im Rahmen dieses Vorhabens konnten keine Wohnungen in unmittelbarer Nähe zu 380 kV-Erdkabeln für eine Messung rekrutiert werden. Die relativ gute Übereinstimmung zwischen den Messungen in Wohnungen an anderen Trassenarten und den jeweiligen Berechnungen für diese Wohnungen zeigt, dass durch Kombination der (gemessenen oder berechneten) Ergebnisse für die 380 kV-Erdkabeltrassen mit denjenigen für nicht-exponierte Wohnungen eine vernünftige Prognose der Expositionen auch für Wohnungen in der Nähe von 380 kV-Erdkabeln möglich ist, wenn alle Parameter bekannt sind (Wohnungstyp, Trassenkonfiguration, horizontaler und vertikaler Abstand, typischer und maximaler Lastfluss auf der Trasse).

Tabelle 4/28

Zusammenstellung der Wohnungswerte (gemittelt über alle Messpunkte ohne diejenigen, die durch in der Nähe befindliche Geräte dominiert wurden)

	Magnetische Flussdichte [μT] oben: BB1 (30 - 2.000 Hz), unten: 50 Hz-Filter					(mittlerer) Abstand zur Trassenmitte	Mast- nähe
	Median	Mittelwert	Minimum	Maximum	Stabw.		
Wohnungen an 380 kV-Freileitungen							
FL380_2- MFH-OG	0,369	0,370	0,294	0,436	0,006	17 m zur TM nur 2.OG	x
	0,347	0,347	0,300	0,405	0,004		
FL380_3- ZFH2	1,220	1,220	0,921	1,359	0,006	20 m zur TM EG und 1.OG	x
	1,215	1,216	0,925	1,340	0,005		
FL380_2- MFH-EG	0,189	0,189	0,165	0,215	0,003	25 m zur TM nur EG	x
	0,196	0,196	0,174	0,218	0,003		
FL380_3- ZFH1	2,200	2,217	1,792	2,643	0,044	30 m zur TM EG und 1.OG	
	2,158	2,159	1,812	2,682*	0,012		
FL380_3- ZFH3	0,212	0,212	0,204	0,228	0,001	85 m zur TM EG und 1.OG	x
	0,210	0,210	0,207	0,213	0,001		
Wohnungen an 110 kV-Freileitungen							
FL110_1- EFH1	1,031	1,031	0,774	1,147	0,004	0 m zur TM EG und 1.OG	x
	1,035	1,035	0,771	1,170	0,006		
FL110_6- RH1	0,292	0,292	0,233	0,359	0,003	25 m zur TM EG, 1. u. 2.OG	x
	0,304	0,304	0,239	0,382	0,003		
FL110_6- RH3	0,186	0,187	0,162	0,218	0,002	31 m zur TM EG, 1. u. 2.OG	x
	0,187	0,187	0,164	0,215	0,002		
FL110_6- RH2	0,234	0,234	0,190	0,287	0,003	33 m zur TM EG, 1. u. 2.OG	
	0,234	0,234	0,199	0,266	0,002		
FL110_6- RH4	0,173	0,173	0,152	0,200	0,002	38 m zur TM EG, 1. u. 2.OG	
	0,182	0,182	0,163	0,199	0,002		
FL110_6- EFH2	0,139	0,139	0,119	0,188	0,002	50 m zur TM EG und 1.OG	x
	0,137	0,137	0,118	0,192	0,002		
Wohnungen an 110 kV-Erdkabeln							
EK_5-MFH	0,059	0,060	0,035	0,098	0,007	14 m zum EK nur EG	
	0,057	0,057	0,025	0,091	0,009		
EK_2-EFH	0,026	0,026	0,013	0,037	0,002	22 m zum EK EG und 1.OG	
	0,019	0,019	0,012	0,028	0,003		

* Während der Dauermessung wurde 3,391 μT als Maximalwert aufgezeichnet.

Wie die Werte in Tabelle 4/29 zeigen sind die Wohnungen in der Nähe von Erdkabeltrassen bzgl. der Magnetfeldimmissionen kaum von den nicht-exponierten Wohnungen zu unterscheiden. Für Wohnungen in der näheren Umgebung von 380 kV-Freileitungstrassen liegt die mittlere Immission um den Faktor 16 (für die am stärksten exponierte Wohnung um den Faktor 43) über den Immissionen in nicht-exponierten Wohnungen. Bei Wohnungen in der Nähe von 110 kV-Freileitungstrassen war die Immission in dieser Untersuchung im Mittel sieben (maximal bis zu 23) mal so hoch wie diejenige in den nicht-exponierten Wohnungen. Bei dieser Spannungsebene wurden die höchsten Werte (im Mittel über 1 μT) in einer Wohnung gemessen, die sich direkt unter einer 110 kV-Freileitung befand. In den anderen Wohnungen in der Nähe von 110 kV-Freileitungen lagen die Immissionen um mehr als den Faktor 3 niedriger (vgl. Tab. 4/28).

Sowohl die gemessenen Absolutwerte der Immissionen als auch die ermittelten Verhältnisse (exp./nicht-exp.) fügen sich damit sehr gut in die bekannten Ergebnisse aus früheren Untersuchungen ein.

Tabelle 4/29

Zusammengefasste Werte für Wohnungen in der Nähe unterschiedlicher Stromübertragungsstrassen für verschiedene Lastzustände (ohne Trasse: alle Wohnungen aus Abschnitt 4.2.2)

	Wohnungswerte der magnetischen Flussdichte, 50 Hz [μ T]								
	ohne Stromlast			bei aktueller Stromlast (gemessen)			bei maximaler Stromlast (ohne Geräteinfluss)		
	Wohnungsmittel		Maximum	Wohnungsmittel		Maximum	Wohnungsmittel		Maximum
mittlere	größte	mittlere		größte	mittlere		größte		
FL-380kV	0,06	0,09	-	0,81	2,16	3,39	8,9	14,3	16,3
FL-110kV	0,04	0,09	-	0,35	1,04	1,17	1,4	3,9	4,4
EK-110kV	0,04	0,05	-	0,04	0,06	< 0,2	< 0,1	~ 0,1	0,11
ohne Trasse	0,05	0,09	0,19	-	-	-	-	-	-

5 Diskussion

Detaillierte Zusammenfassungen der Ergebnisse der Messungen und der Berechnungen der Felder an Hochspannungstrassen bzw. in Wohnungen finden sich in den Abschnitten 3.1.3, 3.3 bzw. 4.4. Die dort ebenfalls vorgenommenen Vergleiche mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen zeigen eine weitgehende Übereinstimmung:

- Die Höhe der von Freileitungen und Erdkabeln verursachten Immissionen hängt sehr stark von den konstruktiven und betrieblichen Parametern ab.
- Die von Erdkabeln der gleichen Spannungsebene außerhalb des Trassenbereichs verursachten Immissionen sind deutlich niedriger als die von Freileitungen verursachten.
- Die Expositionen gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern nehmen mit der Wohnungsdichte zu, sie sind in Mehrfamilienhäusern höher als in Einfamilienhäusern.
- Benachbarte Hochspannungsfreileitungen können zu Expositionen führen, die deutlich über denen in Wohnungen fernab solcher Trassen liegen. Die Trassen von Hochspannungserdkabeln sind aus betrieblichen Gründen in der Regel so weit von Gebäuden entfernt, dass sie nur unwesentlich zur Exposition beitragen.

Die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Immissionen erreichten im Bereich von Freileitungstrassen fast $52 \mu\text{T}$ bzw. 9 kV/m . Im Trassenbereich von 380 kV -Freileitungen wurden in mehreren Fällen Überschreitungen des Grenzwerts der 26. BImSchV für das elektrische Feld festgestellt, die aber immer nur kleinräumig innerhalb des eigentlichen Trassenbereichs auftraten. Im Bereich des Normalverlaufes von Erdkabeltrassen erreichte die auf maximale Anlagenauslastung extrapolierte magnetische Immission einen Wert von maximal $168 \mu\text{T}$ ($0,2 \text{ m}$ Höhe). Der maximale Abstand, ab dem ein Wert von $0,1 \mu\text{T}$ unterschritten wird, lag bei 380 kV -Freileitungen mit 466 m mehr als sechsmal über dem entsprechenden Abstand bei 380 kV -Erdkabeln (74 m). Auf der 110 kV -Ebene war der Unterschied noch größer: bei 110 kV -Freileitungen trat die Unterschreitung von $0,1 \mu\text{T}$ in etwa neunmal so großem Abstand auf wie bei 110 kV -Erdkabeln (132 m zu 15 m). Bei der einen untersuchten 220 kV -Trasse war dieses Abstandsverhältnis kleiner: etwa viereinhalb (132 m zu 29 m).

Die Felder in der Umgebung von Hochspannungstrassen weisen neben dem Beitrag bei der 50 Hz -Grundfrequenz auch Beiträge bei höheren Frequenzen auf. Bei den 380 kV -Freileitungen betrug der Anteil des hochgerechneten 50 Hz -Beitrags an der Ausschöpfung des Grenzwerts für die magnetische Flussdichte (26. BImSchV) maximal gut 50% . Bei Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit des Grenzwerts (ICNIRP-Empfehlung) war der Anteil aller Oberwellen bei einigen Messungen fast genauso groß wie der 50 Hz -Anteil, was bei der Annahme eines gleichartigen Spektrums bei Maximallast im Trassenbereich zu einer Ausschöpfung des Summen-Grenzwerts von etwa 100% führen kann. Bei 380 kV -Erdkabeln kann der Grenzwert schon allein durch den 50 Hz -Beitrag knapp überschritten werden, die Berücksichtigung des Oberwellenanteils entsprechend der ICNIRP-Empfehlung könnte dann zu einer Grenzwertausschöpfung von etwa 200% führen. Der Anteil der Oberwellen auf den anderen Spannungsebenen war im Normalfall etwa gleich groß, die Grenzwertausschöpfung des 50 Hz -Anteils, und damit auch die der Oberwellen, allerdings deutlich kleiner: etwa halb so groß bei der 220 kV -Freileitung, etwa ein Drittel bei 110 kV -Freileitungen und etwa ein Fünftel bei 110 kV -Erdkabeln. Die eine untersuchte 220 kV -Kabeltrasse war relativ tief verlegt und damit nicht repräsentativ.

Die in Wohnungen ermittelten Immissionen hängen sehr stark davon ab, in welchem Abstand zu im Betrieb befindlichen Anlagen und Geräte gemessen wird. Der in Wohnungen fernab von Hochspannungstrassen mit einem Mindestabstand von 1 m zu solchen internen Quellen gemessene Maximalwert für das Magnetfeld lag bei 0,174 μT . Typische Werte lagen im Bereich von 0,01 μT bis 0,08 μT . In Wohnungen in der Nähe von Hochspannungsfreileitungstrassen waren die Immissionen durch den externen, von der Freileitung verursachten Beitrag dominiert. Für maximale Anlagenauslastung wurden Magnetfelder bis 16,3 μT (380 kV-Freileitung) bzw. 4,4 μT (110 kV-Freileitung) ermittelt.

Literatur

- Benes M., Comelli M. & Villalta R. 2006: ELF field in the proximity of complex power line configuration measurement procedures. *Radiat. Prot. Dosimetry* 118 (3): 290-295
- Brüggemeyer H. 1999: Messung und Berechnung elektromagnetischer Felder. NLÖ-1999. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hannover (jetzt: NLWKN-AB35, Hildersheim)
- Dellby B., Bergman G., Karlstrand J. & Kaumanns J. 2000: Hochspannungskabeltechnik. *ABB Technik* 4/2000: 35-44
- Enertech Consultants, Campbell, California, USA: B-fast, A Quick Magnetic Field Calculator written in JAVA. http://www.enertech.net/catalog/products/b-fast_desc.html
- E.On Netz GmbH 2003: Netzanschlussregeln für Hoch- und Höchstspannung. 01.08.2003
- Filippopoulos G. & Tsanakas D. 2005: Analytical calculation of the magnetic field produced by electric power lines. *IEEE Trans. Power Del.* 20 (2): 1474-1482
- Fischer M. & Roth H. 2007: Kabelhandbuch. VWEW Verlag, Frankfurt
- Frohn O., Koffke K., Stenzel J. Dunker J. & Plotzke O. 1995: Emissionskataster der elektrischen und magnetischen Feldexposition im Stadtgebiet Berlin – Eine vergleichende Pilotstudie in ausgewählten öffentlichen Bereichen. Teilbericht berlin-Buch/Karow, Berlin
- Genz D. 1999: Magnetische Flussdichte an Kabelstrassen der elektrischen Energieversorgung. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin, FB Elektrotechnik, Inst. F. Elektrische Energieanlagen
- Ger W.-J., Chang W.P., Sung F.-C. & Li C.-Y. 2007: Accuracy of short-term residential measurement in the prediction of 72-h exposure to power frequency magnetic field in households very close to high-tension transmission lines. *J. Exp. Science Envir. Epi.* 17: 69-75
- IEV GmbH 2000-2006: Copperfield® - Rechenprogramm für die Berechnung elektromagnetischer Felder von elektrischen Anlagen. <http://www.iev.de/>
- Kindersberger J. 2005: Gasisolierter Rohrleiter (GIL) für Hochspannungsübertragungen. IEEE Joint IAS/PELS/IES and PES German Chapter Meeting, Goldisthal, 14.10.2005
- Kramer K. 2000: Kabelbauarten sowie Verlegungsmethoden und ihre Auswirkungen auf magnetische und elektrische Felder im Meer. Merck T. & von Nordheim H. (Hrsg.): Technische Eingriffe in marine Lebensräume. Tagungsband. Bundesamt für Naturschutz, Skripten 29
- Küchler, A. 2005: Hochspannungstechnik: Grundlagen- Technologie- und Anwendungen, Springer, Abschnitt 6.3.3.5
- Länderausschuss für Immissionsschutz 2004: Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26.BImSchV), überarbeitete Fassung, 107. Sitzung, 15.-17.03.2004
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) 1999: Immissionen durch Hochspannungsfreileitungen: Einwirkungen durch elektrische und magnetische Felder sowie Geräusche in der Umgebung einer 380-kV-Trasse. Bericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (in Zusammenarbeit EnBW Badenwerk AG, Karlsruhe), Stuttgart
- Mazzanti G. 2006a: The role played by current phase shift on magnetic field established by AC double-circuit overhead transmission lines – part I: Static analysis. *IEEE Transact. Power Delivery* 21 (2): 939-948
- Mazzanti G. 2006b: The role played by current phase shift on magnetic field established by AC double-circuit overhead transmission lines – part II: Dynamic analysis. *IEEE Transact. Power Delivery* 21 (2): 949-958
- Narda: EFC-400LF, Elektrisches und Magnetisches Feld – Berechnung nach VDE 0848. http://www.narda-sts.com/pdf/niederfrequenz/DS_EFC400LF_DE.pdf
- NDS (Niedersächsische Staatskanzlei) 2007: Fakten zum Netzausbau. Hannover, September 2007
- Plotzke O., Schulze F. & Pfister K. 1999: Berechnung der Feldstärken an niederfrequenten Energieanlagen entsprechend 26. BImSchV. 31. Tagung Fachverband Strahlenschutz – Nichtionisierende Strahlung, Köln 1999

- Stenzel E., Frohn O., Kioofke K., Dunker J. & Plotzke O. 1996: Methods of developing an emission catalogue for low frequency electric and magnetic fields. IRPA9 International Congress on Radiation Protection, Vienna, Proceedings 6: 589
- Takemoto-Hambleton R.M., Pappa J.R. & Stewart J.G. 1996: EMFWorkstation2.5: Computer Software for studying magnetic field scenarios. Missouri Valley Electric Association 1996 Engineering Conference, <http://www.enertech.net/emfw/download/documentation/emfw25.pdf>
- Tele-Fonika Kable GmbH 2007: Hochspannungskabel. Firmenschrift
- Tzinevrakis A.E., Tsanakas D.K. & Mimos E.I. 2008: Analytical calculation of the electric field produced by single-circuit power lines. IEEE Trans. Power Del. 23 (3): 1495-1505
- vdn (Verband der Netzbetreiber) 2007: Daten und Fakten: Stromnetze in Deutschland 2007
- Voigt H. & Neitzke H.-P. 1997: Untersuchungen zur Wirksamkeit der Vorsorgeregelung des § 4 der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV). Berechnung und Messung der elektrischen und magnetischen Felder von Stromversorgungsanlagen. Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Raumordnung, Landwirtschaft und Umwelt Sachsen-Anhalt

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz