

Karsten Fuchs, Alexander Novitskiy, Frank Berger und  
Dirk Westermann

**Hochspannungsgleichstromübertragung  
– Eigenschaften des Übertragungsmediums Freileitung**

## **Ilmenauer Beiträge zur elektrischen Energiesystem-, Geräte- und Anlagentechnik (IBEGA)**

Herausgegeben von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann  
(Fachgebiet Elektrische Energieversorgung) und  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger  
(Fachgebiet Elektrische Geräte und Anlagen)  
an der TU Ilmenau.

**Band 7**

Karsten Fuchs

Alexander Novitskiy

Frank Berger

Dirk Westermann

**Hochspannungsgleichstromübertragung  
– Eigenschaften des Übertragungsmediums  
Freileitung**



Universitätsverlag Ilmenau  
2014

# Impressum

## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek  
**Universitätsverlag Ilmenau**  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau  
[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

## **Herstellung und Auslieferung**

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG  
Am Hawerkamp 31  
48155 Münster  
[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

**ISSN** 2194-2838 (Druckausgabe)  
**ISBN** 978-3-86360-075-4 (Druckausgabe)  
**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014100019

---

### Titelfotos:

©iStockphoto.com : JLGutierre ; timmy ; 3alexnd ; Elxeneize ; tap10  
yuyang/Bigstock.com

M. Streck, FG EGA | F. Nothnagel, FG EGA | D. Westermann, FG EEV

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Hochspannungsgleichstromübertragung</b> .....	<b>2</b>
2.1	Einleitung .....	2
2.2	Netzgeführte HGÜ (LCC-HGÜ) .....	5
2.2.1	Grundlegende Funktionsweise .....	5
2.2.2	Ausführungsformen .....	6
2.3	Selbstgeführte HGÜ (VSC-HGÜ) .....	11
2.3.1	PWM-VSC und Grundprinzip des Vierquadrantenbetriebs .....	13
2.4	Ausführung der DC-Leitung .....	13
2.4.1	Leiter- und Erdseile .....	18
2.4.2	Anordnung der Leiterpolaritäten .....	19
2.4.3	Art des Erdbodens .....	21
<b>3</b>	<b>Elektrische und magnetische Felder von DC-Freileitungen</b> .....	<b>23</b>
3.1	Physikalische Grundlagen .....	23
3.2	Methode und Werkzeug für die Feldberechnung .....	25
3.3	Grenzwerte für elektrische und magnetische Gleichfelder .....	26
<b>4</b>	<b>Berechnungsergebnisse</b> .....	<b>27</b>
4.1	Klassifizierung der Betriebs- und Fehlerzustände .....	27
4.2	Nennbetrieb monopolarer Systeme .....	28
4.3	Nennbetrieb bipolarer Systeme .....	28
4.4	Einfluss der Raumladung auf die elektrische Feldstärke von mono- und bipolaren Systemen im Nennbetrieb .....	31
4.5	Betrieb eines Systems von einem bipolaren Doppelsystem mit voller und doppelter Nennleistung .....	33
4.6	Nennbetrieb bipolarer Systeme mit Neutralleiter .....	34
4.7	Fehlerzustand Überspannung bipolarer Systeme .....	35

---

4.8	Fehlerzustand Kurzschluss bipolarer Systeme .....	36
4.8.1	Fehlerzustand Erdkurzschluss.....	36
4.8.2	Fehlerzustand Leiter-Leiter-Kurzschluss .....	38
4.9	Einfluss der Raumladung auf die elektrische Feldstärke von bipolaren Systemen in Fehlerfällen.....	41
<b>5</b>	<b>Isolationsabstände und Schutzstreifen.....</b>	<b>44</b>
5.1	Isolationsabstände .....	44
5.2	Schutzstreifen .....	46
<b>6</b>	<b>Bewertung der elektromagnetischen Beeinflussungen.....</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>50</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>53</b>
<b>Anhang A1:</b>	<b>Nennbetrieb monopolarer Systeme</b>	
<b>Anhang A2:</b>	<b>Nennbetrieb bipolarer Systeme</b>	
<b>Anhang A3:</b>	<b>Nennbetrieb eines Systems vom bipolaren Doppelsystem</b>	
<b>Anhang A4:</b>	<b>Betrieb eines Systems vom bipolaren Doppelsystem mit doppelter Leistung</b>	
<b>Anhang A5:</b>	<b>Nennbetrieb bipolarer Systeme mit Neutralleiter</b>	
<b>Anhang A6:</b>	<b>Fehlerzustand Überspannung bipolarer Systeme</b>	
<b>Anhang A7:</b>	<b>Fehlerzustand Kurzschluss bipolarer Systeme</b>	

## 1 Einführung

Im Zuge der sogenannten Energiewende sehen politische Zielstellungen bis 2050 vor, rund 80 % des Energiebedarfs mit erneuerbaren Energien zu decken. Dafür müssen beispielsweise große in der Nord- und Ostsee erzeugte Energiemengen über geeignete Kabel- oder Freileitungen mit hinreichend großen Transportkapazitäten in den Süden Deutschlands übertragen werden. Da die bisherigen Drehstromsysteme den geänderten Anforderungen nicht mehr genügen, liegt der Fokus nun auf der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ). Um mit dieser Technologie eine Vermaschung der Netze realisieren zu können, ist der Einsatz von selbstgeführten HGÜ-Anlagen (Voltage Source Converter – VSC) erforderlich.

Aus der Betriebserfahrung der Hochspannungsgleichstromübertragung ist bekannt, dass die elektrischen Felder von DC-Freileitungen größer sind als die von AC-Freileitungen. Magnetische Felder der AC- und DC-Freileitungen werden durch vergleichbare Zahlenwerte der magnetischen Flussdichte charakterisiert.

Im Mittelpunkt dieser Studie stehen rechengestützte Untersuchungen zu den elektrischen und magnetischen Feldern von verschiedenen monopolen und bipolaren Ausführungsformen von DC-Freileitungssystemen. Dabei wird auf bereits realisierte Anlagen in Asien bzw. Nord- oder Südamerika zurückgegriffen. Diese Untersuchungen werden für den Normal- und für unterschiedliche Fehlerarten durchgeführt.

Das Ziel der Studie besteht in der Analyse und Beurteilung der stationären elektrischen und magnetischen Felder der DC-Freileitungen. Ausgehend von bereits existierenden Richtwerten kann eine Beurteilung der elektromagnetischen Felder im Normalbetrieb vorgenommen werden.

## 2 Hochspannungsgleichstromübertragung [47]

### 2.1 Einleitung

In den Anfängen der elektrischen Energieversorgung wurde zunächst Gleichstrom verwendet und erst später vom Wechselstrom verdrängt [1]. Bereits 1881 experimentierte Marcel Deprez mit Lichtbogenlampen, die mittels Gleichstromgeneratoren betrieben wurden und veröffentlichte daraufhin die erste theoretische Arbeit über HGÜ. Die Anfänge der Transformation mehrphasiger Systeme und Asynchronmotoren in den 1880er und 1890er Jahren hingegen stellten den Wendepunkt zur Wechsel- bzw. Drehstromstrom her. Der Transformator machte es auf einfache, zuverlässige und effiziente Art und Weise möglich, verschiedene Spannungsebenen für die Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Nutzung von Elektroenergie zu verwenden. Insbesondere ermöglichte er die Energieübertragung über weite Strecken und auf hohen Spannungsebenen. Die Erschließung der Wasserkraft, die sich meist weit entfernt von großen Ballungszentren befindet, gab zusätzliche Anreize für diese Art der elektrischen Energieübertragung. Somit wurden Gleichstromsysteme nahezu vollständig durch Wechselstromsysteme verdrängt. Die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) bietet dagegen volle Regelbarkeit der Strecken und benötigt naturgemäß für die Übertragung elektrischer Energie keine Blindleistung, sondern lediglich bei Ausführung als fremdgeführte HGÜ Kommutierungsblindleistung an den Umrichterstandorten. Obwohl die Vorteile der Gleichstromübertragung von Beginn an erkannt wurden, musste deren praktische Anwendung auf die Entwicklung von passend dimensionierten elektrischen Ventilen warten. 1939 machte Dr. Uno Lamm die bedeutende Entwicklung von Quecksilberventilen für Hochspannungsanwendungen. Damit leistete er Pionierarbeit bei der Entwicklung der modernen HGÜ-Technologie.

Eine frühe kommerzielle HGÜ-Übertragungsstrecke wurde 1951 in der damaligen UdSSR zwischen Kashira und Moskau errichtet. Es war ein Kabelprojekt mit einer Gesamtlänge von 100 km, einer Nennleistung von 30 MW und einer Nennspannung von 100 kV. Kurz darauf (1954) wurde die Insel Gotland und das schwedische Festland mittels einer monopolaren HGÜ-Strecke durch ein Unterseekabel verbunden. Über diese wurde eine Nennleistung von 20 MW bei einer Nennspannung von 100 kV über eine Strecke von 96 km übertragen. Beide Projekte basierten auf der Technologie von Quecksilberdampfventilen [2]. Die Leistung wurde über ein einadriges Kabel übertragen, dessen Rückleitung über die Erde bzw. das Meer erfolgte. In der Zeit zwischen 1951 und 1972 herrschten Quecksilberdampfventile vor. Das Projekt "Nelson River Bipole 1" (Kanada, 1,854 MW,  $\pm$  463 kV, 897 km) beendete 1977 die Übergangsphase zu den Thyristorventilen [2]. 1972 wurde mit der ersten asynchronen Back-to-Back-Verbindung (BtB-Verbindungen) am Eel River (Kanada) zwischen

Quebec und New Brunswick ein bedeutender Meilenstein gesetzt. Dieses Projekt hatte eine Nennleistung von 320 MW und eine Nennspannung von  $\pm 80$  kV. Es war das erste kommerzielle Projekt mit Thyristorventilen, die von dort an Quecksilberdampfventile ablösten [3]. Der Wechsel zu den Thyristorventilen brachte den Vorteil, dass störende Eigenschaften wie Rückzündungen und die damit verbundenen transienten Effekte nicht existieren. Anfänglich war der Thyristor sehr empfindlich gegen Überströme und Überspannungen, deshalb waren die Anwendungen auf BtB-HGÜs begrenzt. Folglich wurden entsprechende Schutzschaltkreise entwickelt. Ohne zusätzliche Entwicklungen wie Glasfaser und Überspannungsschutz, im Speziellen die neueren Zinkoxid-Überspannungsableiter, wären Thyristorventile für die Anwendung in der HGÜ unmöglich gewesen. Diese Entwicklungen lieferten den nötigen Strom- und Spannungsschutz für die Ventile und ermöglichten die Übertragung von Regelungs- und Sicherungssignalen für verschiedene Spannungsebenen [4]-[6].

Seit 1976 werden Thyristorventile großflächig in HGÜ-Systemen verwendet. Mit der raschen Weiterentwicklung von leistungselektronischen Komponenten wurde die Thyristortechnologie um aktiv abschaltbare Bauelemente wie Insulated Gate Bipolar Transistoren (IGBT) und Gate Turn-Off Thyristoren (GTO) erweitert. Damit war es möglich, selbstgeführte Umrichter auch im großen Leistungsmaßstab zu konstruieren. [7]

Heute sind mehrere unterschiedliche Technologievarianten für HGÜ kommerziell verfügbar. Grundsätzlich unterscheidet man die Varianten anhand ihrer Betriebsweise in selbstgeführte Umrichter (als Spannungsumrichter, also VSC ausgeführt) und fremd- bzw. netzgeführte Umrichter (Line Commutated Converter, LCC) mit Gleichstromzwischenkreis (auch Current Source Converter, CSC). Eine LCC-HGÜ erfordert ein stabiles Drehstromnetz an den Umrichteranschlussorten, damit eine Gleich- bzw. Wechselrichtung erfolgen kann. Während LCC-HGÜ für die Übertragung großer Leistungen über weite Entfernungen heute immer noch alternativlos eingesetzt wird, ist nach heutigem Stand der Technik die VSC-HGÜ auf einige wenige Gigawatt pro Umrichterstation limitiert. Die Hochleistungsenergieübertragung mittels LCC wird in naher Zukunft bis knapp 10 GW pro Umrichterstation und Stromkreis übertragen können. Im angelsächsischen Sprachgebrauch spricht man bei der Hochleistungsenergieübertragung auch von „bulk power transmission“. Damit diese Übertragungsleistungen erreicht werden können, ist eine Gleichspannung von heute bis  $\pm 800$  kV erforderlich (Ultra High Voltage, UHV). In Tabelle 2.1 ist eine Einordnung der unterschiedlichen Leistungsklassen angegeben. Hier wird verdeutlicht, wie die Nennleistungsbandbreite in elektrischen Energieübertragungssystemen bemessen werden. Die VSC-HGÜ-Technologie wird mit fortschreitender Entwicklung im Bereich von Anwendungen für große elektrische Leistungen mit hohen Spannungen und Nennleistungen in Zukunft an Bedeutung gewinnen.

Mit der LCC-HGÜ sind wesentlich höhere Übertragungsleistungen möglich und die zugehörigen Verluste einer Umrichterstation sind im Vergleich zur heute installierten VSC-HGÜ geringer. VSC-Technologien, die sich einer Multilevelschaltung bedienen, sind wesentlich verlustärmer und liegen bezüglich der Umrichterverluste mit bis zu 1% im Bereich der LCC-Technologie.

Auch bei Freileitungsprojekten wird überwiegend die LCC-HGÜ verwendet. Im Jahr 2010 wurde die erste VSC-HGÜ mit Freileitung in Betrieb gesetzt: Der sog. „Caprivi Link“; eine 950 km lange Verbindung zwischen Gerus in Namibia und Zambezi in der Caprivi-Region. Bei einer Gleichspannung von 350 kV wird eine Nennleistung von 300 MW übertragen [8]).

Kabel- und Seekabelverbindungen lassen sich mit beiden Technologien sinnvoll realisieren, wobei die LCC-Technologie nicht geeignet ist, um mit XLPE-Kabeln betrieben zu werden.

**Tabelle 2.1:** Einordnung von Leistungsklassen für Hochleistungsenergieübertragung

Leistungsbereich	LCC HVDC	VSC HVDC
5.000 MW... > 7.000 MW	UHV-HGÜ „Bulk“ (> 800 kV)	-
2.500 MW... 5.000 MW	UHV-HGÜ „Bulk“ (800 kV)	-
1.800 MW... 3.500 MW	Klassische HGÜ (500 kV)	Hochleistungs-VSC-HGÜ “Bulk” Freileitungsausführung
700 MW .. 2.000 MW	Klassische HGÜ (400kV .. 500kV) Bipolare Ausführung	VSC-HGÜ
300 MW .. 800 MW	Klassische HGÜ (300kV .. 500kV) Monopolare Ausführung	Standard VSC-HGÜ
< 300 MW	Klassische HGÜ ( < 300kV) Monopolare Ausführung	VSC-HGÜ für kleine Leistungen

## 2.2 Netzgeführte HGÜ (LCC-HGÜ)

### 2.2.1 Grundlegende Funktionsweise

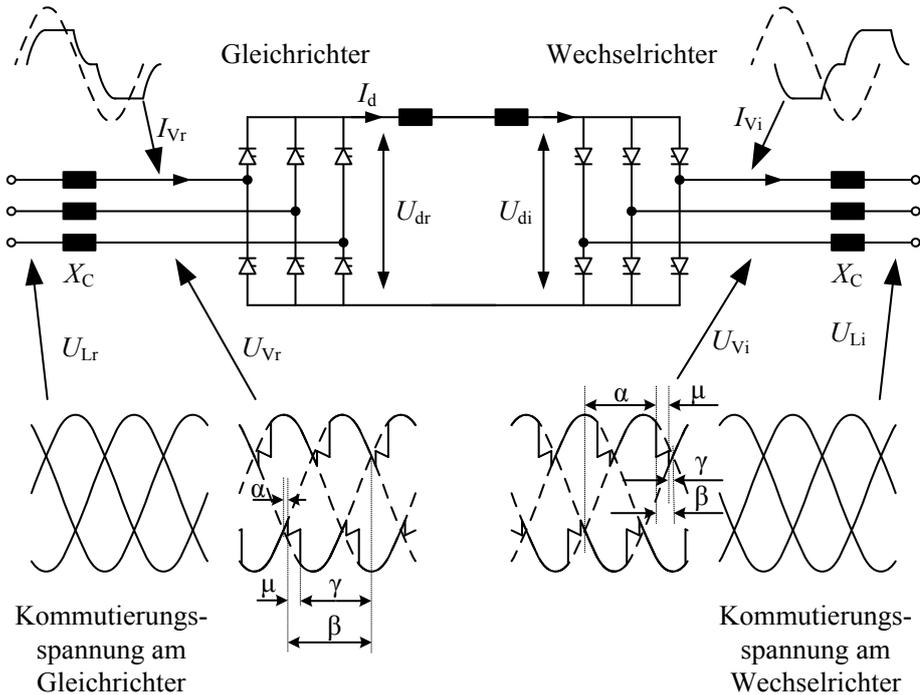
Seit LCC-HGÜ-basierte Energieübertragungssysteme mit Thyristortechnologie existieren, finden LCC-HGÜ in den folgenden Kategorien Anwendung:

- Untersee- und Erdkabelübertragung
- Asynchrone Kopplung von Drehstromsystemen
- Transport großer Energiemengen über weite Entfernungen mittels Freileitungen.

Das zentrale Bauelement bei der Gleichrichtung ist der Thyristor, wovon mehrere (z.B. 100) in Serie geschaltet werden. Diese Serienschaltung wird als Thyristorventil bezeichnet. Eine beispielsweise zwölpulsige Brückenschaltung wird über spezielle Stromrichtertransformatoren an das Drehstromsystem angeschlossen. Der Gleich- bzw. Wechselrichtvorgang erfolgt über die Ansteuerung der Thyristorventile derart, dass jeweils ausschnittsweise aus den Netzspannungen die Amplituden gleicher Polarität zyklisch von einer Phase zur nächsten „herausgeschnitten“ und auf den Gleichstromkreis geschaltet werden. Die Grundanordnung einer LCC-HGÜ besteht aus einem Gleichrichter und einem Wechselrichter mit Gleichstromzwischenkreis. Die Stromflussrichtung im Gleichstromkreis ist, wie bereits oben erwähnt, durch die Anordnung der Ventile vorgegeben. Eine Regelung der Gleichspannung bzw. des Gleichstroms erfolgt durch die Variation der Zünd- bzw. Löschwinkel (siehe Bild 2.1).

Netzgeführte Umrichter können nur mit einem Wechselstrom betrieben werden, der der Spannung nacheilt. Deshalb benötigt dieser Umrichter Blindleistung. Um die Wechselspannung in zulässigen Grenzen zu halten, muss die Blindleistung direkt am Umrichter von schaltbaren Kondensatorbänken, Filtereinrichtungen oder anderen Blindleistungskompensationsquellen bereitgestellt werden. Die entstehenden Harmonischen bedingen weiterhin die Installation von Filteranlagen, die so ausgelegt werden können, dass für die Grundwelle Blindleistung bereitgestellt wird. Wegen der großen Beanspruchung durch Oberwellen und einer zusätzlichen Gleichspannungskomponente in der Sekundärwicklung müssen für eine LCC-HGÜ-Umrichterstation spezielle Stromrichtertransformatoren verwendet werden. Auf der Gleichspannungsseite kommen Glättungsdrosseln zum Einsatz, um bei minimaler Leistung eine Stromunterbrechung zu vermeiden und DC-Fehlerströme zu begrenzen. [10]

Eine Leistungsflussumkehr ist nur durch die Änderung der Polarität der Gleichspannung möglich. Aus diesem Grund eignen sich LCC-HGÜ-Systeme nicht für den Einsatz mit heute verfügbaren Kunststoffkabeln, da bei einer Polaritätsänderung eine unzulässig hohe Belastung des Dielektrikums auftreten kann. Technologien für die Ausführung der Gleichstromstrecke sind Freileitungen oder Massekabel.



**Bild 2.1:** Einfacher Aufbau einer Gleichstromübertragung mit Gleichrichter und Wechselrichter in LCC-HGÜ-Technologie

## 2.2.2 Ausführungsformen

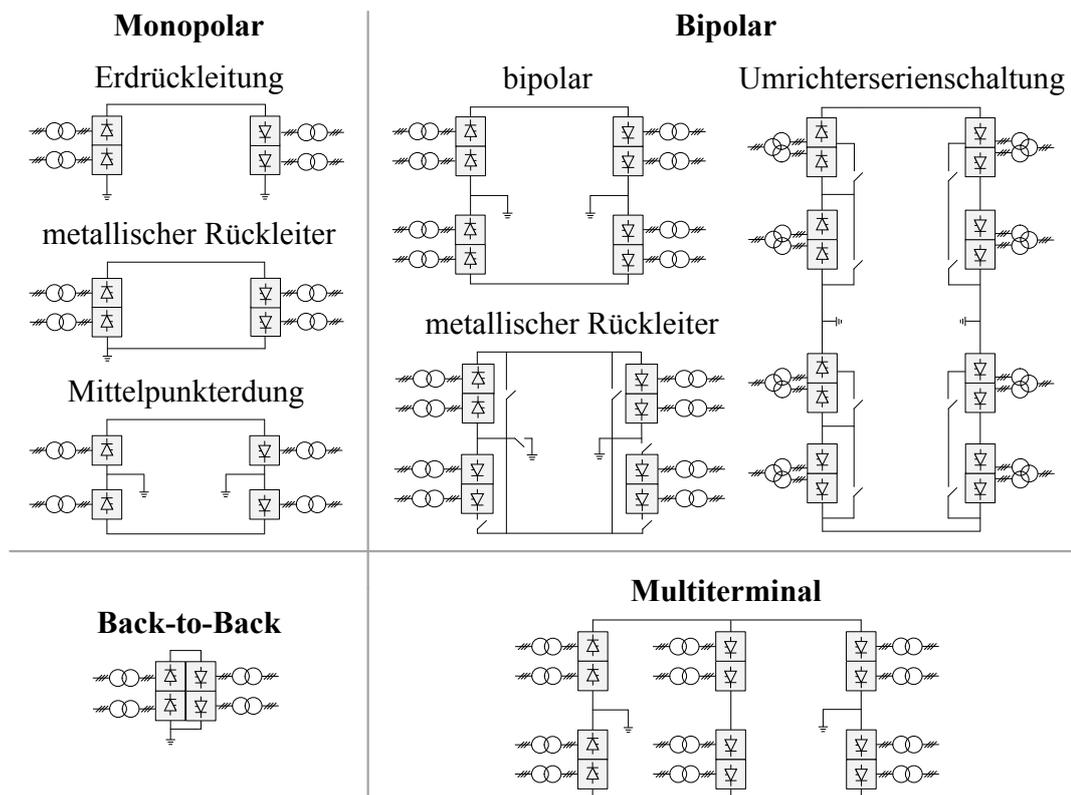
Heute realisierte HGÜ-Verbindungen umfassen unterschiedlichste Ausführungsformen und reichen von Kurzkupplungen (Back-to-Back, BtB) über monopolare bis bipolare Ausführungen. Theoretisch sind auch nicht vermaschte Mehrpunktsysteme denkbar. Es existiert weltweit bislang erst ein nicht vermaschtes Dreipunktsystem. Bild 2.2 zeigt eine Übersicht über die denkbaren HGÜ-Systemausführungen.

### *BtB-Systeme*

BtB-Systeme werden vorwiegend für die Kopplung von zwei asynchronen Netzen verwendet. Bei BtB-Umrichterstationen existiert keine Übertragungsleitung, so sind beide Umrichter in einem Umrichtergebäude untergebracht. Der Aufbau einer BtB-Anlage besteht typischerweise aus zwei Ventilblöcken und einer Glättungsdrossel auf der Gleichspannungsseite. Es werden nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimale Gleichspannungs- und -stromnennwerte gewählt. Da keine Rücksicht auf etwaige Leitungen im Gleichstromkreis genommen werden muss, erfolgt die Dimensionierung häufig mit einer niedrigen Gleichspannung und einem hohen Gleichstrom, um den Thyristornennstrom voll auszunutzen.

### Monopolare Systeme

Die einfachste Ausführungsart mit Gleichstromleitung ist eine monopolare Anordnung, die aus einer Hochspannungs-DC-Leitung und einer geerdeten Elektrode als Rückleitung besteht. Der monopolare Betrieb ist für einige Systeme die übliche Betriebsart, besonders für ältere Systeme mit Seekabeln, bei denen die Kosten für eine Rückleitung nicht gerechtfertigt wären. Der Erdrückstrom ist bei diesen Systemen durch die Anwendung von Seeelektroden nicht so sehr von Bedeutung, da nur geringe Stromdichten erreicht werden (Bild 2.3). Es besteht allerdings die Gefahr einer Verfälschung der magnetischen Kompasseneigenschaften in der Nähe der Gleichstromleitung. An den Seeelektroden kann durch elektrolytische Prozesse Chlorgas freigesetzt werden. Monopolare Ausführungen mit Erdelektroden zur Rückleitung des Gleichstroms über die Erde sind heute nicht mehr genehmigungsfähig.



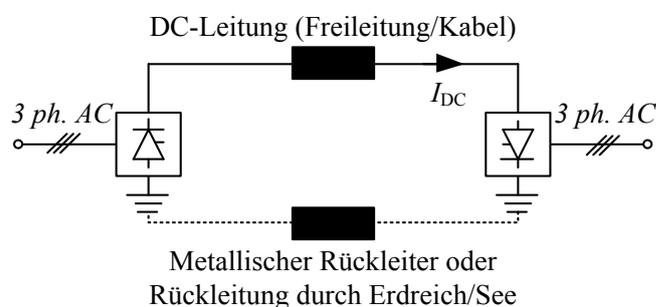
**Bild 2.2:** Mögliche Ausführungen von HGÜ-Stationen [12] – Dreiwicklungs-  
transformatoren sind typisch bei der Übertragung großer Leistungen

Ausführungen mit geerdeten Elektroden und damit ein Langzeitbetrieb mit Erdrückstrom können unerwünscht sein, weil es zu Korrosion und anderen Erscheinungen an den Übergangsstellen kommen kann. Monopolarer Betrieb einer bipolaren Anordnung

kann erforderlich werden, wenn ein Pol ausfällt. In diesem Fall steht mindestens ein metallischer Rückleiter zur Verfügung, sodass die oben genannten Nebeneffekte bei einer Erdstromrückleitung nicht auftreten.

Um bei einer Umschaltung von bipolarem auf monopolaren Betrieb die Übertragungsleitung als metallischen Rückleiter nutzbar zu machen, werden die Anlagenteile der Umrichterpole isoliert, indem mit Schaltgeräten der Neutralleiter auf den Rückleiter geschaltet wird. Daraus resultiert, dass der metallische Rückleiter zum geerdeten Anlagenteil parallel geschaltet ist. Der Erdstrom und damit der Strom durch die Elektrode wird dann ebenfalls wieder durch einen Schalter unterbrochen. Erst dann fließt der gesamte Polstrom durch den metallischen Rückleiter. Da es sich hier um mechanische Schaltgeräte handelt, ist eine unterbrechungsfreie Umschaltung nicht möglich. Der Rückleiter hat den vollen Leitungsquerschnitt, aber nur Mittelspannungsisolationsniveau.

Die einfachste Verbindungskonfiguration ist ein sog. monopolarer Link, der aus einem Hochspannungs-DC-Leiter und einer Erdelektrode als Rückleiter besteht. Monopolarer Betrieb ist heutzutage ein Betriebsmodus für Bestandsanlagen mit Seekabel. Neue Anlagen werden grundsätzlich mit einem metallischen Rückleiter ausgestattet.



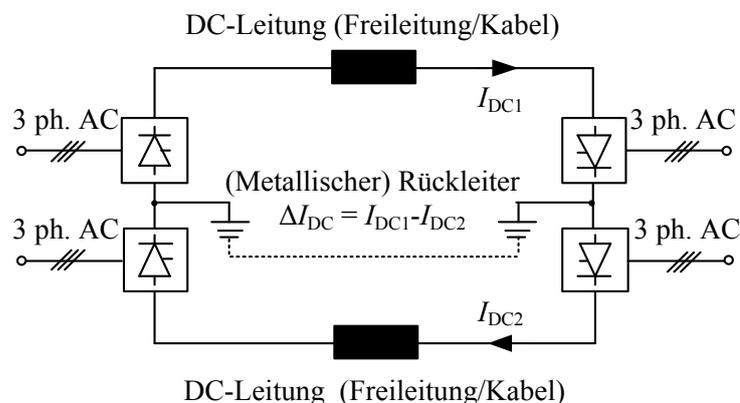
**Bild 2.3:** Systemstruktur eines monopolaren LCC-HGÜ-Systems

### Bipolare Systeme

Anstatt nur einen Umrichter in einer Station unterzubringen, kann der Umrichter selbst aus einer Reihenschaltung mehrerer (monopolarer) Umrichter bestehen (Bild 2.4). Der Gleichstromfluss in jedem Pol wird so geregelt, dass er in jedem Umrichter der Reihenschaltung identisch ist. Im Normalbetrieb fließt dann kein Strom über die Erde ab.

Bipolare LCC-HGÜ sind häufig so ausgelegt, dass die Pole voneinander unabhängig betrieben werden können. So ist sichergestellt, dass eine erzwungene Abschaltung eines Pols oder einer Station keinen Einfluss auf die anderen unbeschädigten Anlagenteile hat. Wenn ein Pol außer Betrieb ist, sollte der verbleibende Pol in der Lage sein, den

Betrieb monopolar mittels der Erdung bzw. metallischem Rückleiter aufrecht zu erhalten. 50% der bipolaren Nennleistung wird durch monopolaren Betrieb abgedeckt. Aus den oben genannten Gründen wird daher ein auf Mittelspannungsniveau isolierter metallischer Rückleiter mit verbaut. Ein bipolares System verfügt also über eine eingebaute Redundanz, sodass bei Ausfall eines Pols die Hälfte der Leistung noch übertragen werden kann. Durch eine in der Auslegung der Anlagen berücksichtigte Überlastfähigkeit der Umrichter kann die übertragbare Leistung im Redundanzfall, also bei Ausfall eines Pols, auch deutlich über die Hälfte der installierten Leistung gesteigert werden. Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist die thermische Kapazität der Stromrichtertransformatoren. Eine bipolare Ausführung wird üblicherweise für Langstreckenübertragung mit Freileitung verwendet. Für unidirektionalen Lastfluss hat einer der Pole positive und der jeweils andere negative Polarität. Für eine Lastflussumkehr wird die Polarität umgekehrt. Für gewöhnlich sind beide Endstationen geerdet. Der Stromfluss in jedem Pol ist notwendigerweise symmetrisch, die unsymmetrischen Stromanteile, die zur Erde hin abfließen, sind in der Regel kleiner als 1-2% des Nennstromes.



**Bild 2.4:** Schematischer Aufbau einer bipolaren Zweipunktverbindung mit der Serienschaltung von zwei Monopolen auf beiden Umrichterseiten

### *Mehrpunkt-Systeme*

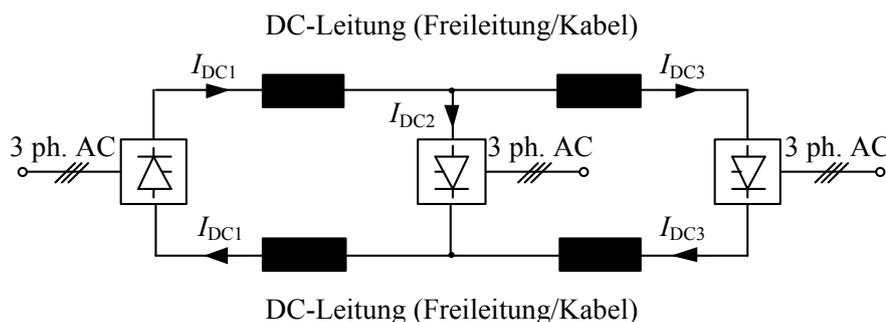
Weltweit ist derzeit ein LCC-HGÜ-Mehrpunktssystem mit drei Umrichterstationen in Betrieb; zahlreiche Studien haben unterschiedlichste Ausführungs-, Anwendungs- und Betriebsszenarien untersucht (siehe dazu z.B. folgende Referenzen: [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]). Die bislang einzige Multiterminal-LCC-HGÜ-Einrichtung weltweit ist die „Quebec-New-England-Verbindung“, eine HGÜ von Radisson, Québec, nach Sandy-Pond in Ayer, Massachusetts. Dies ist eine Dreipunktverbindung

ohne Masche. In der aktuellen Ausbaustufe wird hier mit einer Gleichspannung von  $\pm 450$  kV über eine Entfernung von 1.100 km eine Leistung von 2.000 MW übertragen.

Allgemein dient ein Mehrpunkt-HGÜ-System dem Leistungsaustausch zwischen mindestens drei Umrichterstationen. Die zusätzlichen Umrichterstationen können sowohl in Reihe als auch parallel zu einem bestehenden Zweiterminal-HGÜ-System geschaltet werden. Bild 2.5 und Bild 2.6 zeigen vereinfacht den Aufbau von Multiterminal-Systemen, welche einmal in Reihen- und einmal in Parallelschaltung dargestellt sind. Aufgrund der Eigenschaft von LCC-HGÜ, dass der Gleichstrom immer in dieselbe Richtung fließen muss, ist der Aufbau eines vermaschten Gleichstromnetzes schwierig.

Während eine einfache Masche über die Regelung des Gleichstroms beherrschbar ist, wird der Betrieb von mehreren Maschen sehr aufwändig. Eine weitere Problemstellung des Mehrpunktbetriebs stellt die Leistungsflussrichtungsänderung dar. Mit einer Änderung der Leistungsflussrichtungen ist auch immer technologiebedingt eine Umkehr der Polarität der Gleichspannung erforderlich.

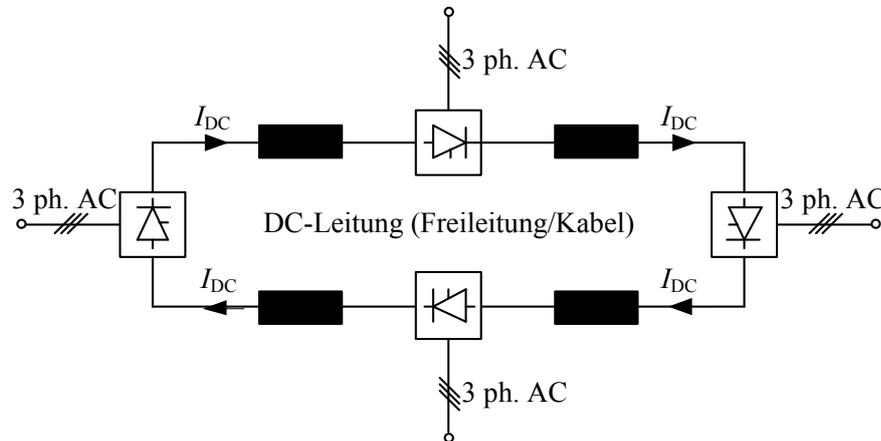
Eine einfache Änderung der Leistungsflussrichtung an einer der Umrichterstationen ist daher nicht so einfach möglich. Änderungen in der Leistungsflussrichtung bedeutet immer eine Abschaltung des gesamten Gleichstromnetzes, eine Änderung der Ausrichtung der Bipole mit Polwendeschaltern und ein erneutes Wiederhochfahren. Die LCC-Technologie ist aus diesem Grund nicht inhärent netzwerkfähig und kann bestenfalls in einem Gleichstromnetz mit vorgegebenen Leistungsflussrichtungen eingesetzt werden.



**Bild 2.5:** Systemstruktur eines Mehrpunkt-HGÜ-Systems mit Parallelschaltung von Umrichtern

Für den Aufbau eines vermaschten Gleichstromnetzes, indem durch parallele Leitungen eine gewisse Netzredundanz eingebaut werden kann, muss auf eine andere Technologie zurückgegriffen werden. Hier wird heute der Einsatz von selbstgeführten Spannungsumrichtern favorisiert, da diese Umrichtertechnologie eine konstante Gleichspannungspolarität ermöglicht und sich die Gleichstromflussrichtungen in ei-

nem vermaschten Gleichstromnetz beliebig ändern können, ohne einen Polarisationswechsel der Gleichspannung herbeizuführen.



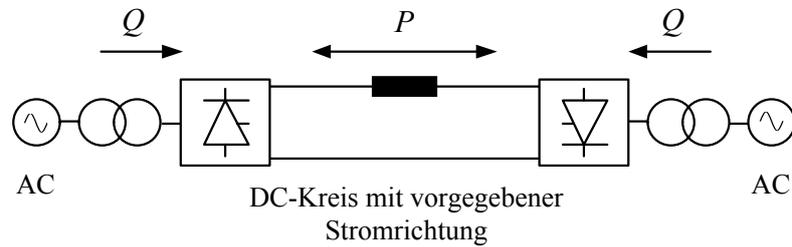
**Bild 2.6:** Systemstruktur eines Mehrpunkt-HGÜ-Systems mit einer Reihenschaltung von Umrichtern

### 2.3 Selbstgeführte HGÜ (VSC-HGÜ)

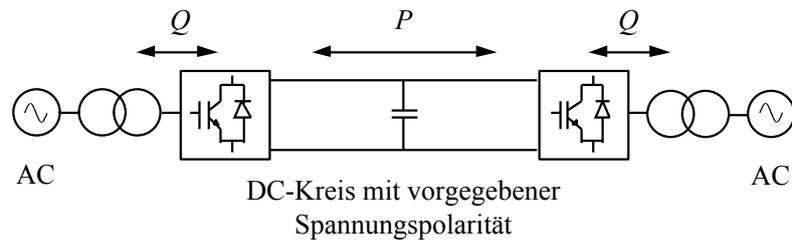
Die fortschreitende Entwicklung in der Leistungselektronik führte zur Einführung von abschaltbaren Halbleiterelementen. Basierend auf IGBT-Ventilen, die zunächst in einer Zweipunktumrichterschaltung eingesetzt wurden, wurde die erste selbstgeführte HGÜ in den späten 1990er Jahren entworfen [12]. Weitere Technologien für selbstgeführte Umrichter mit Gleichspannungskreis (Voltage Source Converter, VSC) folgten etwa 10 Jahre später mit der Markteinführung.

Der grundlegende Unterschied zwischen der selbstgeführten und der netzgeführten Technologie ist, dass VSC-HGÜs abschaltbare Leistungshalbleiter verwenden. Deshalb ist es nicht mehr erforderlich, die AC-Spannungen am Anschlussort für den Kommutierungsprozess bereit zu stellen. Ein weiterer Vorteil der VSC-HGÜ-Technologie ist die Fähigkeit, die Blindleistung an beiden Umrichterstationen, unabhängig vom Wirkleistungsfluss, sondern nur noch abhängig von der maximalen Nennscheinleistung zu steuern (siehe auch Bild 2.7).

a) Fremdgeführte LCC-HGÜ



b) Selbstgeführte VSC-HGÜ

**Bild 2.7:** LCC-HGÜ im Vergleich mit selbstgeführter VSC-HGÜ

Deshalb können VSC-HGÜs überall im Drehstromnetz unabhängig von dem zur Verfügung stehenden Kurzschlussleistungsverhältnis platziert werden. Dies ermöglicht die Versorgung von passiven Netzwerken bei gleichzeitiger Schwarzstartfähigkeit oder die Inselversorgung. Die Betriebseigenschaften und Charakteristika von selbstgeführten Umrichtern hängen stark von der Anordnung der Umrichterventile und der Schaltgeräte ab. Heute lassen sich folgende Technologieprinzipien unterscheiden:

- Pulsweitenmodulierte (PWM) Zweilevel- oder Dreilevel-VSC-Umrichter, die erstmals von ABB in den 1990er Jahren eingeführt wurden. (PWM-VSC-HGÜ, kurz: PWM-VSC oder PWM-HGÜ). Diese Technologie ist unter dem Markennamen “Light-Technology” auf den Markt eingeführt worden.
- Multilevel-Umrichter-Technologie, die sich voraussichtlich als Stand der Technik in den nächsten Jahren für hohe Leistungen in HGÜ-Anwendungen durchsetzen wird. Es gibt drei verschiedene Konzepte:
  - Modulare Multilevel-Umrichter-Technologie (MMC-VSC-HGÜ, kurz: MMC-VSC oder auch MMC-HGÜ), die etwa 2006 durch Siemens auf den Markt gebracht wurden und unter dem Markennamen “Plus-Technology” bekannt ist.
  - Hybrid-Multilevel-Ansatz (HML-VSC-HGÜ, kurz: HML-VSC), dessen Entwicklung 2010 durch Alstom Grid bekannt gemacht wurde. Technologisch ist dieser Ansatz eine Kombination der beiden zuvor genannten Technologien.
  - Kaskadierte Zweilevel-Umrichter wurden ebenfalls 2010 durch ABB eingeführt (CTL-VSC-HGÜ, kurz: CTL-VSC). Dieser Ansatz ist eine Weiterent-

wicklung der Zweilevel- bzw. Dreilevel-PWM-VSC-Technologie und soll unter demselben Markennamen vermarktet werden: "Light-Technology".

### 2.3.1 PWM-VSC und Grundprinzip des Vierquadrantenbetriebs

Grundsätzlich erfordern VSC-HGÜ-Stationen weniger bis gar keine Blindleistungskompensationsanlagen und AC-Filter-Ausrüstungen als LCC-HGÜ-Stationen. Unter anderem auch deswegen weisen VSC-HGÜ-Umrichterstationen einen geringeren Platzbedarf auf. Je nach Technologie variieren der Kühlaufwand und die externe Beschaltung mit Filtereinrichtungen. VSC-HGÜ-Stationen erfordern im Gegensatz zu LCC-HGÜ-Stationen keinen großen Aufwand an Blindleistungskompensation und Filtereinrichtungen. Deshalb haben VSC-HGÜ-Umrichter einen verminderten Grundflächenbedarf. Die benötigten VSC-HGÜ-Betriebsmittel sind Transformatoren, AC-Filter und Glättungskapazitäten sowie Betriebsmittel zur Regelung und Kühlung.

Für das weltweit erste HGÜ-Übertragungssystem mit MMC-VSC [28] wurden extrudierte 200-kV-Untersee Gleichstromkabel entwickelt und damit eine neue Spannungsebene für diese Kabeltechnologie eingeführt. Die Schnittstellen auf der Wechselstromseite des HGÜ-Anschlusspunktes sind die Netzanschlusstransformatoren, die die AC-Systemspannungen an die Umrichtersystemspannungen auf der AC- und DC-Seite des Umrichters anpassen. Die geeigneten Spannungswerte ergeben sich aus grundlegenden Berechnungen während der Systemauslegung. Umrichter werden so entworfen und ausgelegt, dass die Leistungsanforderungen an das HGÜ-Übertragungssystem erfüllt werden und dass sie Überstrom- und Überspannungsbeanspruchungen, die durch Fehler in verschiedenen Teilen der Station auftreten können, standhalten.

## 2.4 Ausführung der DC-Leitung

Als Übertragungsmedium im DC-Kreis kommen grundsätzlich drei verschiedene Technologien in Frage, die aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften die Leistungsübertragung begrenzen und die betrieblichen Möglichkeiten vorgeben:

- Freileitung
- Masseimprägnierte Kabel (MI-Kabel)
- Kunststoffkabel (XLPE-Kabel)

### *Gleichstromkabel*

Masseimprägnierte Kabel sind bis dato bis zu einer Nenngleichspannung von 500 kV verfügbar. Typischerweise wird diese Kabeltechnologie für Seekabelverbindungen eingesetzt. Präqualifikationstests gemäß den CIGRE-Empfehlungen sind mit polypropylen-papier-laminiertem masseimprägnierten Kabeln (MI-PPL-Kabel) bis 600 kV erfolgreich durchgeführt worden [29]. Eine technologische Grenze für MI-Kabel be-

steht in der Abfuhr der Verlustenergie und maximalen (durch das Isolationsmedium gegebenen) Betriebstemperatur. MI-Kabel werden heute praktisch nur in Verbindung mit Seekabelprojekten verlegt. Für die Anlandung erfolgt allerdings auch eine Erdverlegung. Diesbezüglich liegen Betriebserfahrungen vor. Eine weitere Begrenzung besteht in dem maximalen Außendurchmesser eines Kabels, der durch den Leiterquerschnitt und der Dicke des Isolationsmaterials gegeben ist. Bei Seekabeln stellt der Außendurchmesser keine großartige Begrenzung bzgl. der maximalen Kabelsegmentlänge dar, weil das produzierte Kabel direkt in einem Trommelspeicher auf einer entsprechenden Verlegebarkasse aufgespult werden kann. Auf diese Weise können Kabelsegmente großer Länge produziert werden. Anders stellt sich der Transport bei Landkabeln dar. Hier werden die Kabel auf für den Schwertransport auf der Straße / Schiene geeigneten Kabeltrommeln aufgewickelt und mittels Tieflader zum Installationsort transportiert. Die Größe dieser Kabeltrommeln ist durch das Transportprofil (Straße / Schiene) vom Produktionsort zum Installationsort bestimmt. Unter Berücksichtigung des Biegeradius' und der typischen Isolationsdicke kann man von einer Kabelsegmentlänge von kleiner gleich 1 km pro Kabeltrommel für 500-kV-MI-Kabel ausgehen.

Als Beispiel sei das reine MI-Kabel im Neptune-Projekt mit einem Außendurchmesser von etwa 130 mm angeführt [30]. Bei einer Kabeltrommel mit Außenabmaßen von 3 m x 4,2 m und einem Innendurchmesser von 3,2 m ergibt sich eine Kabelsegmentlänge von rund 700 m pro Trommel. Bei einem Kabeldurchmesser von 120 mm bei 2.000 mm<sup>2</sup> [31] kann eine Kabelsegmentlänge von rund 1 km erzielt werden. Mit einem spezifischen Gewicht von rund 40 kg/m [31] hat dieses Kabel pro Trommel ohne Trommeleigengewicht ein Transportgewicht von 40 t, was wiederum eine Randbedingung bzgl. der Belastbarkeit der Zufahrtswege mit sich bringt. Die Kabelsegmente werden mittels Kabelmuffen miteinander verbunden. Stand der Technik bei MI-Kabeln sind handgewickelte Muffen, die in einem speziellen „Muffenfertigungszelt“ unter kontrollierten klimatischen Bedingungen angefertigt werden müssen. Der Arbeitsaufwand für die Anbringung einer MI-Kabel-Muffe muss nach Aussagen verschiedener Hersteller mit 2 - 4 Tagen angesetzt werden.

Kunststoffkabel mit Isolation aus quervernetztem Polyäthylen haben bezüglich der erforderlichen Isolationsdicke und des Transportgewichtes einige Vorteile gegenüber MI-Kabeln. Auch das thermische Verhalten ist für die Verlegung als Landkabel deutlich vorteilhafter, da mit höheren Betriebstemperaturen gearbeitet und die Wärmeabfuhr durch das Isolationsmedium besser gewährleistet werden kann. Der Außendurchmesser ist bei gleichem Leiterquerschnitt vergleichbar (leicht geringer) mit dem eines MI-Kabels. Das spezifische Gewicht ist ebenfalls vergleichbar. Bezüglich der logistischen Anforderungen an eine Landverlegung zwischen den MI- und XLPE-Kabeln ergeben sich nur geringe Unterschiede. Die XLPE-Kabelsegmente werden ebenfalls mit Kabelmuffen miteinander verbunden. Diese Kabelmuffen können in Teilen vorge-

fertigt werden, was eine deutliche Reduktion des Zeitaufwands zur Installation der Kabelmuffen bedeutet. Der Arbeitsaufwand für die Anbringung einer XLPE-Kabelmuffe muss nach Aussagen verschiedener Hersteller mit 1-2 Tagen angesetzt werden.

### *DC-Freileitungsmastkonstruktionen*

Freileitungen stellen in der Regel die geringste Begrenzung dar. Hier sind lediglich die Abmaße des „Right of Way“, die bautechnische Konstruktion der Masten sowie isolationstechnische Randbedingungen begrenzende Faktoren. Freileitungen für HGÜ-Anwendungen sind heute bis 800 kV Gleichspannung und 4,5 kA Gleichstrom dimensioniert worden. Die Ausführungen und geometrischen Abmessungen von DC-Freileitungsmasten werden unterschieden in die:

- zu übertragende Nennspannung  $U_n = \pm 400 \text{ kV}; \pm 500 \text{ kV}; \pm 600 \text{ kV}; \pm 800 \text{ kV}$
- Art der HGÜ-Ausführung: monopolar oder bipolar
- Anzahl der Systeme pro Mast:  $n = 1$  oder  $n = 2$ .

An den Freileitungsmasten sind die Leiterseile über Langstabisolatoren mit den Traversen verbunden. In Abhängigkeit von der Nennspannung werden unterschiedlich lange Isolatoren verwendet (Tabelle 2.2, Länge  $\ell_{Iso}$ ).

Wird ein Leiterseil zwischen zwei Freileitungsmasten mit der Spannweite  $a$  aufgehängt, stellt sich ein Leiterdurchhang ein. Der größte Durchhang tritt in der Mitte des Spannungsfeldes auf und ist von der Temperatur  $\vartheta$  des Leiterseils sowie von zusätzlichen Eislasten abhängig. Ausgehend von diesen Einflussgrößen kann ein maximaler Durchhang angegeben werden, der in keinem Fall überschritten werden sollte. Anstatt des maximalen Leiterdurchhangs kann auch der minimale Abstand  $s_{min}$  zwischen Leiterseil und Erdboden in der Spannungsfeldmitte berechnet werden. Die Bestimmung des minimalen Abstands  $s_{min}$  erfolgt für Drehstromsysteme nach [1] durch:

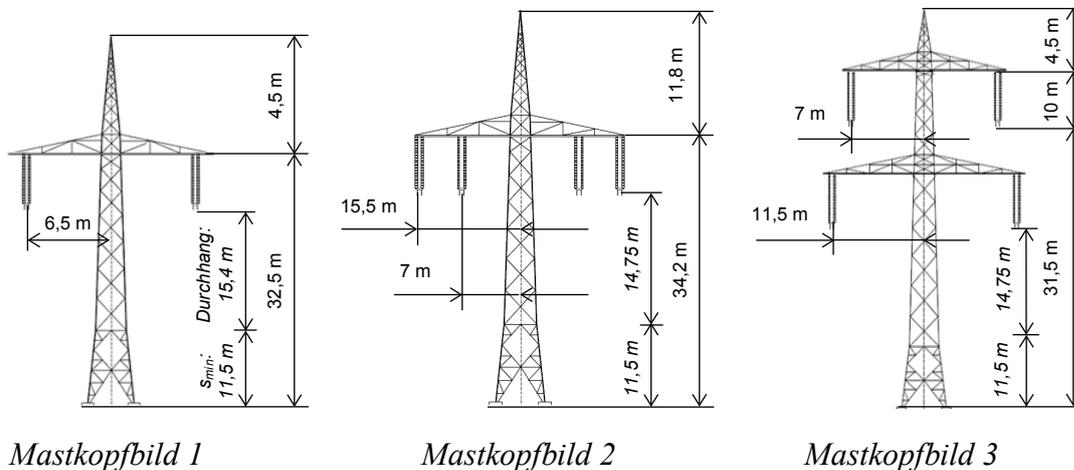
$$s_{min} = 7,5\text{m} + 0,01 \frac{\text{m}}{\text{kV}} U_n [\text{kV}] \quad (2.1)$$

Da es für DC-Systeme keinen Berechnungsstandard für  $s_{min}$  gibt, wird die Formel 2.1 verwendet. Die resultierenden Abstände  $s_{min}$  sind in Tabelle 2.2 in Abhängigkeit von der Nennspannung aufgelistet. Durch die Verwendung des minimalen Bodenabstands müssen in den weiteren Berechnungen keine zusätzlichen Betrachtungen zum Einfluss von Temperatur und Eislast auf die Zugkraft und den Durchhang der Leiterseile vorgenommen werden.

**Tabelle 2.2:** Länge der Langstabisolatoren (aus [43], [44], [45], [46], [47]) und minimaler Bodenabstand für unterschiedliche DC-Spannungsebenen [42]

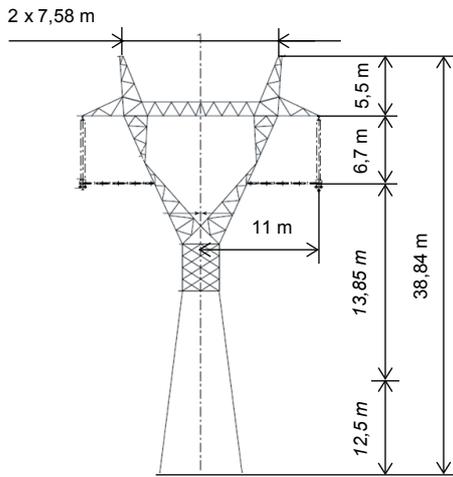
DC-Spannung $U_n$ [kV]	Isolatorlänge $\ell_{Iso}$ [m]	minimaler Bodenabstand $s_{min}$ [m]
$\pm 400$	5,25 – 7,95	11,5
$\pm 500$	6,7	12,5
$\pm 600$	7,2	13,5
$\pm 800$	9	15,5

Ausgehend von den bisherigen Betrachtungen für geometrische Abmessungen können Mastkopfbilder für DC-Freileitungen angegeben werden. Dabei ist eine grundsätzliche Unterscheidung in monopolare oder bipolare HGÜ-Systeme vorzunehmen. Die hier untersuchten Mastkopfbilder sind repräsentativ für bipolare HGÜ-Systeme (Bilder 2.8 - 2.10).

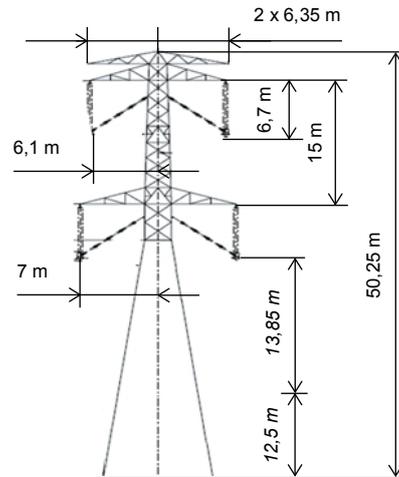


**Bild 2.8:** Mastkopfbilder für bipolare  $\pm 400$ -kV-Einfachleitung (links) [43] und bipolare  $\pm 400$ -kV-Doppelleitung (Mitte und rechts) [43], [44]

In Bild 2.9 sind die verwendeten Mastkopfbilder mit den vollständig eingetragenen geometrischen Abmessungen für bipolare  $\pm 500$ -kV-Freileitungen dargestellt.



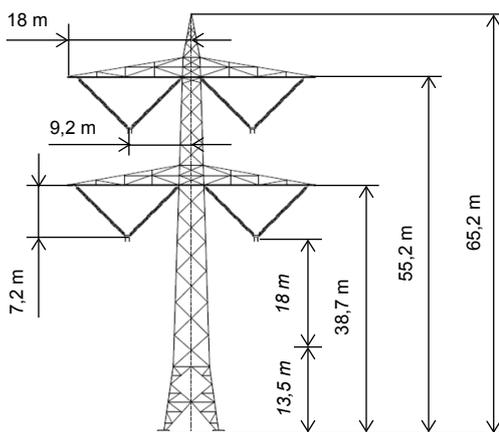
Mastkopfbild 4



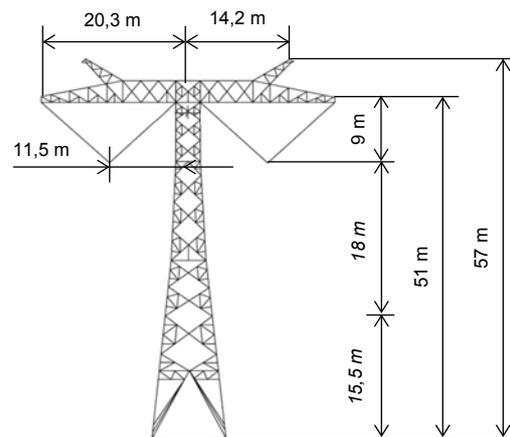
Mastkopfbild 5

**Bild 2.9:** Mastkopfbilder für bipolare  $\pm 500$ -kV-Einfachleitung (links) und bipolare  $\pm 500$ -kV-Doppelleitung (rechts) [45]

Für monopolare Systeme mit Neutralleiter können die Freileitungsmasten der bipolaren Einfachsysteme verwendet werden. Für monopolare Systeme ohne Neutralleiter werden die Mastkopfbilder der bipolaren Einfachsysteme modifiziert. Da pro Leitung ein einziges Leiterseil geführt wird, befindet sich an jedem Mast nur ein Querträger. Die übrigen geometrischen Abmessungen unterscheiden sich nicht zu den Mastkopfbildern der bipolaren HGÜ-Systeme. Bild 2.11 zeigt die modifizierten Mastkopfbilder für den monopolen HGÜ-Betrieb ohne Neutralleiter.

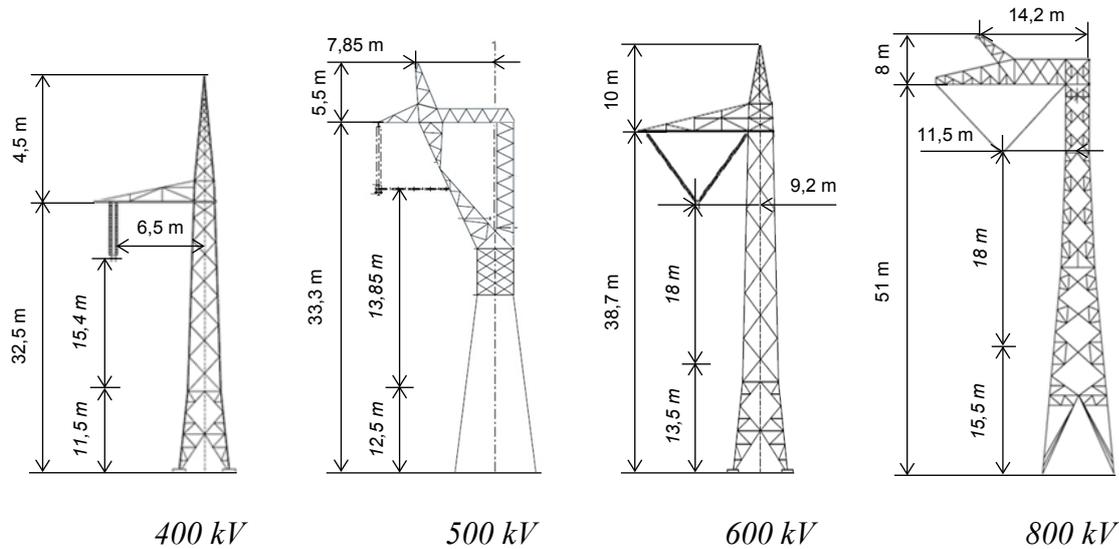


Mastkopfbild 6



Mastkopfbild 7

**Bild 2.10:** Mastkopfbilder für bipolare  $\pm 600$ -kV-Doppelleitung (links) [44], [46] und bipolare  $\pm 800$ -kV-Einfachleitung (rechts) [47]



**Bild 2.11:** Mastkopfbilder für monopolare DC-Freileitungen (in Anlehnung an [43], [44], [45], [46], [47])

#### 2.4.1 Leiter- und Erdseile

Die Auswahl und Bemessung der Leiterseile erfolgt auf Grundlage des höchsten betrieblichen Nennstroms  $I_n$  pro System. Da der Fokus in dieser Studie auf selbstgeführten HGÜ-Anlagen (VSC-HGÜ) liegt, beträgt der maximale Nennstrom  $I_n = 2$  kA. Nach (2.2) reicht bei 2 kA Nennstrom die Übertragungsleistung für unterschiedliche Nennspannungen von 1,6 GW bis 3,2 GW (Tabelle 2.3).

$$P_n = 2 \times U_n \times I_n \quad (2.2)$$

**Tabelle 2.3:** Nennleistungen und Bezeichnungen der verwendeten Leiterseile in Abhängigkeit von der Nennspannung

Nennspannung $U_n$ [kV]	Nennleistung $P_n$ [GW]	Bezeichnung des Leiters
± 400	1,6	564-AL3/72-ST1A
± 500	2	
± 600	2,4	
± 800	3,2	

Während bei Drehstromfreileitungen für Betriebsspannungen bis 220 kV ein einzelnes Leiterseil pro Phase verwendet wird, müssen auch bei DC-Freileitungen zu Verringerung der Randfeldstärke bei höheren Spannungen Bündelleiter eingesetzt werden. Für alle hier betrachteten Anordnungen werden Vierer-Bündelleiter mit einem Teilleiterabstand von 40 cm angesetzt.

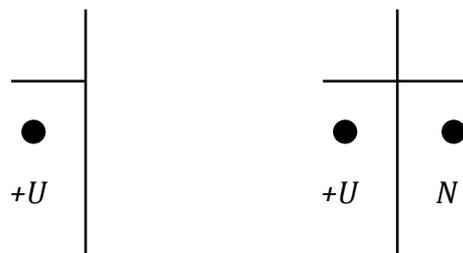
Die Spannweite der Leiterseile zwischen zwei Freileitungsmasten ist von der Nennspannung und der Masthöhe abhängig. In Tabelle 2.4 sind die für die Berechnungen angenommenen Spannweiten in Abhängigkeit von der Nennspannung aufgelistet. Es kommen für alle betrachteten Varianten Erdseile als Einzelleiter des Typs 44-AL3/32-ST1A zum Einsatz.

**Tabelle 2.4:** Spannweite der DC-Freileitungen in Abhängigkeit von der Nennspannung

Nennspannung $U_n$ [kV]	$\pm 400$	$\pm 500$	$\pm 600$	$\pm 800$
Spannweite $s$ [m]	400	450	500	600

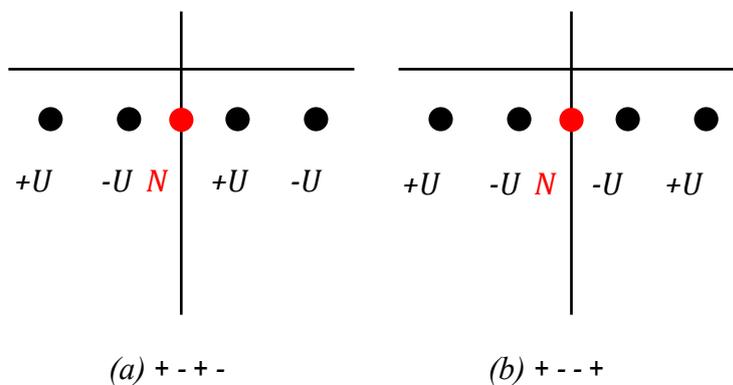
### 2.4.2 Anordnung der Leiterpolaritäten

Monopolare HGÜ-Systeme können mit und ohne Neutralleiter  $N$  ausgeführt sein. Der Neutralleiter beeinflusst die elektrische Feldstärke- und magnetische Flussdichteverteilung. Der Neutralleiter dient zur Stromrückleitung und führt bei Nennleistung den vollen Nennstrom  $I_n$ . Die über der Länge des Neutralleiters  $N$  anliegende Spannung ist eine Niederspannung und kann für die Berechnungen als  $U = 0$  angesetzt werden. Bild 2.12 enthält beide Ausführungsformen für monopolare Systeme.



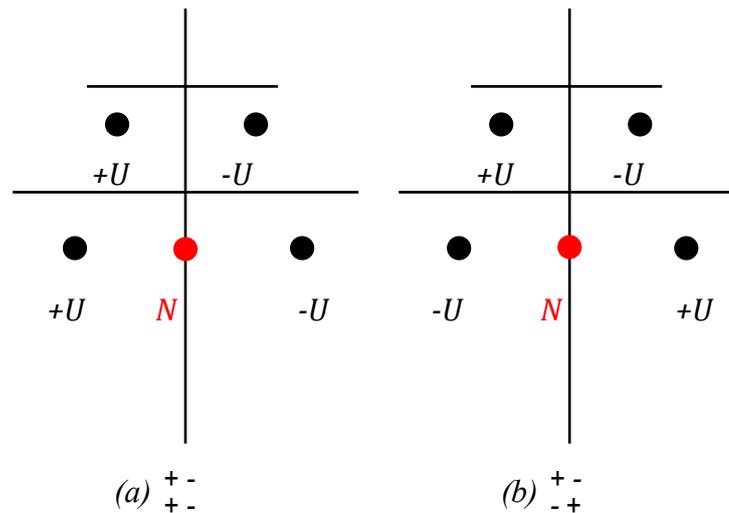
**Bild 2.12:** Ausführung von monopolaren HGÜ-Systemen ohne Neutralleiter (links) und mit Neutralleiter (rechts)

Bei bipolaren DC-Freileitungen mit zwei Systemen pro Mast können die Leiterpolaritäten  $+U$  und  $-U$  unterschiedlich angeordnet sein und die Verteilung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte beeinflussen. Zudem werden, ausgehend von Bild 2.2, Systeme mit und ohne zusätzlichem Neutralleiter  $N$  (rot dargestellt) für die nachfolgenden Berechnungen unterschieden. Dieser Neutralleiter verbindet die Erdungspunkte beider Umrichterstationen (vgl. Bild 2.2) und ermöglicht einen Weiterbetrieb der Leitung bei Ausfall eines (Teil-) Umrichters oder eines Leiterseils im monopolen Betrieb. Es gibt zwei elektrisch unterschiedliche Anordnungsmöglichkeiten bei mittigem Neutralleiter und Einebenenordnung (Bild 2.13).



**Bild 2.13:** Anordnung der Leiterpolaritäten für zwei bipolare Systeme in horizontaler Anordnung an einem DC-Freileitungsmast [51]

Bild 2.14 zeigt die zwei möglichen Leiteranordnungen, wenn an einem Freileitungsmast zwei bipolare Systeme vertikal in zwei Ebenen angeordnet sind.



**Bild 2.14:** Anordnung der Leiterpolaritäten für zwei bipolare Systeme in vertikaler Anordnung an einem DC-Freileitungsmast

### 2.4.3 Art des Erdbodens

Die Beschaffenheit des Erdbodens hat einen großen Einfluss auf den Erdbodenwiderstand  $R_E$ . Die Zahlenwerte reichen von 30  $\Omega\text{m}$  bei Moorboden bis 3 k $\Omega$  bei steinigem Untergrund (Tabelle 2.5).

**Tabelle 2.5:** Spezifische Erdbodenwiderstände für verschiedene Arten des Erdreichs

Art des Erdreichs (nach DIN VDE 0141)	spezifischer Erdbodenwiderstand $R_E$ [ $\Omega\text{m}$ ]
Moorboden	30
Lehm-, Ton- oder Ackerboden	100
feuchter Sand	200
feuchter Kies	500
trockener Sand	1000
steiniger Boden	3000

In den Berechnungen wurde kein Einfluss des Erdbodenwiderstands auf die Verteilung und die Größe der elektrischen Feldstärke oder der magnetischen Flussdichte festge-

stellt, da auch im Fehlerfall aufgrund des mitgeführten Neutralleiters kein dauerhafter Strom durch das Erdreich fließt. Deshalb wird für alle weiteren Betrachtungen in der Modellparametrierung ein Erdbodenwiderstand von  $R_E = 30 \Omega\text{m}$  angenommen.

## 3 Elektrische und magnetische Felder von DC-Freileitungen

### 3.1 Physikalische Grundlagen

Das elektrische Gleichfeld  $E_G$  von DC-Freileitungen setzt sich aus einem elektrostatischen (raumladungsfreien) Feldanteil  $E_0$  (Leiterfeldstärke) und einem raumladungsbehafteten Feldanteil  $E_{RL}$  zusammen. Der elektrostatische Feldanteil  $E_0$  ist von der Mastgeometrie, den verwendeten Leitern und deren Durchhang sowie von der Entfernung von der Leitung abhängig. Der raumladungsbehaftete Feldanteil  $E_{RL}$  entsteht während des Betriebs von DC-Freileitungen sowohl zwischen zwei Leitern als auch zwischen jedem Leiter und der Erde aufgrund von Ionisationsprozessen.

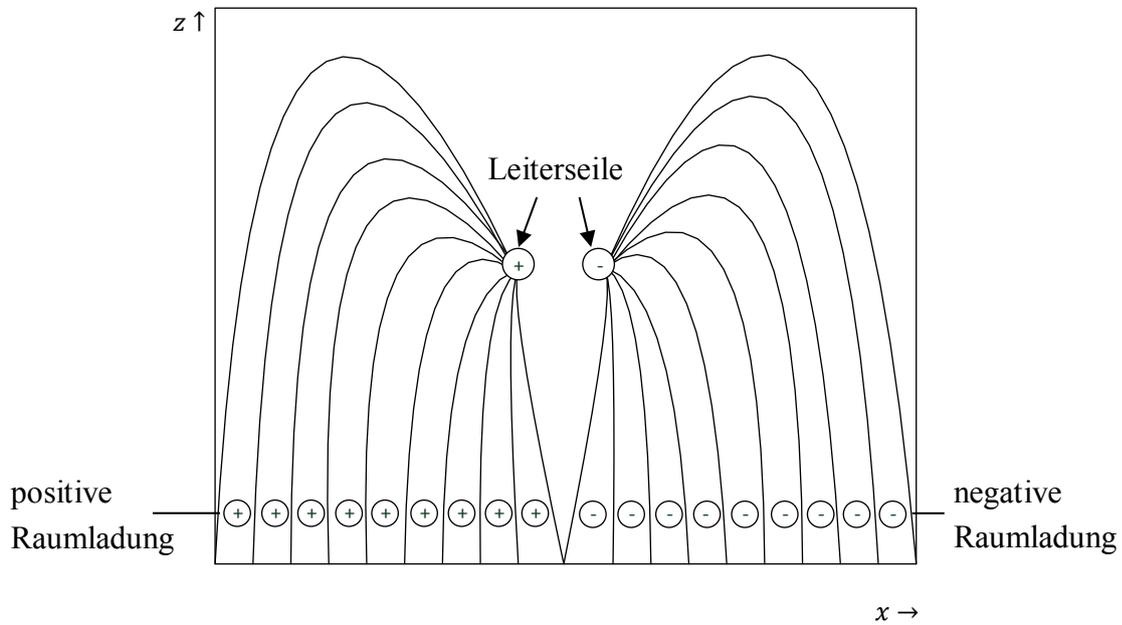
Ionisationsvorgänge entstehen, wenn die kritische Feldstärke an einer ideal glatten Leiteroberfläche größer ist als 29,8 ... 30 kV/cm [59]. Da in der Praxis die Leiteroberfläche, bspw. durch Unregelmäßigkeiten, nicht exakt glatt ist, können die Ionisationsvorgänge auch bei einer mittleren kritischen Feldstärke zwischen 15 und 29,8 kV/cm [59] auftreten. Die kritische Feldstärke beträgt dabei lokal mehr als 29,8 kV/cm.

Das raumladungsbehaftete Feld setzt sich aus einer Ionisationszone und Raumladungszone zusammen. Die Ionisationszone ist eine dünne Schicht um einen einzelnen Leiter. Durch die erhöhte Feldstärke an der Leiteroberfläche werden in der Ionisationszone frei bewegliche (Start-) Elektronen aus der Luft beschleunigt und durch Stoßionisationsprozesse neue Ladungsträger (Luftionen und Elektronen) erzeugt. Das elektrische Feld beschleunigt die so erzeugten Elektronen in Richtung der positiv geladenen Leiter. Auf dem Weg dorthin ionisieren sie weitere Luftmoleküle. Da die bereits vorhandenen und neu erzeugten Elektronen eine geringere Masse haben und damit schneller beschleunigt werden können als die Ionen, werden die Stoßionisationsprozesse überwiegend durch Elektronen hervorgerufen. Ladungsträgerlawinen sind die Folge.

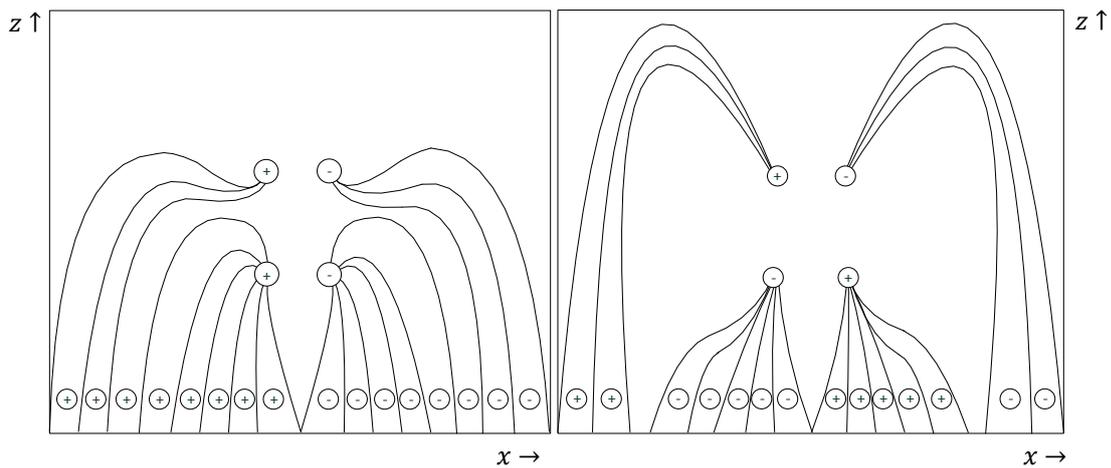
Die Beschleunigung der Luftionen ist aufgrund ihrer größeren Masse geringer. Sie bilden, je nach Entstehungsort, eine Raumladung entweder zwischen den Leitern oder zwischen jedem Leiter und der Erde aus. Dieser Bereich wird als Raumladungszone bezeichnet.

Die Bilder 3.1 und 3.2 zeigen für drei typische bipolare Leiterkonfigurationen die Raumladungszonen und den Verlauf der elektrischen Feldlinien (aus [60]). In [60, 61] wird angenommen, dass die Raumladung zwar die Höhe der elektrischen Feldstärke, aber nicht den Verlauf der elektrischen Feldlinien beeinflusst. Während die elektrische Feldstärke an der Leiteroberfläche abgeschwächt wird, verstärkt die Raumladung das elektrische Feld in der Nähe der Erdoberfläche um den Faktor 1,5 - 2,5 [64]. Die Amplitude der Raumladung und damit die Höhe des raumladungsbehafteten Feldanteils sind abhängig von der Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und

vom Luftdruck. Grundsätzlich ist die elektrische Feldstärke am Erdboden infolge der Raumladungen bei schönem Wetter höher als bei regnerischen Wetter.



**Bild 3.1:** Raumladungszonen und elektrische Feldlinien für bipolare Einfachfreileitung [60]



**Bild 3.2:** Raumladungszonen und elektrische Feldlinien für bipolare Doppelfreileitungssysteme mit der Leiteranordnung  $\begin{matrix} + - \\ + - \end{matrix}$  und  $\begin{matrix} + - \\ - + \end{matrix}$  [60]

### 3.2 Methode und Werkzeug für die Feldberechnung

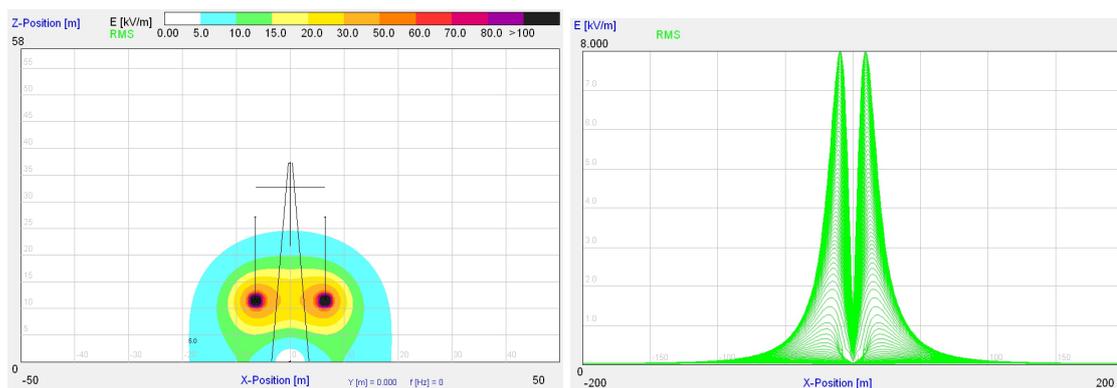
Zur Berechnung der elektrostatischen und magnetischen Felder von DC-Freileitungen wird das Programm „WinField 2012 / EFC 400“ [68] von der Forschungsgemeinschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH (FGEU) eingesetzt. Die Berechnung der raumladungsfreien elektrostatischen Feldstärke erfolgt bei WinField2012 / EFC 400 über ein lineares Gleichungssystem mit der Potentialkoeffizientenmatrix ( $P \cdot K_{ij}$ ) und der Ladungsmatrix  $Q_j$ :

$$U_i = P \cdot K_{ij} \cdot Q_j \quad (3.1)$$

Der Feldanteil  $E_{RL}$ , verursacht durch die Korona und Raumladungszonen, berechnet sich im Rahmen der Worst-Case-Abschätzung durch die Korrekturfaktoren 1,5 – 2,5 [64]. Die Bestimmung der magnetischen Flussdichte  $B$  erfolgt durch das Gesetz von Biot-Savart [68]:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{I} \times \vec{r}}{r^3} \cdot I \quad (3.2)$$

Im Rahmen der Studie werden die Verläufe der elektrostatischen Feldstärke  $E_0(z)$  und der magnetischen Flussdichte  $B(z)$  in der Spannfeldmitte 1 m über der Erdbodenoberkante (EOK) erstellt (siehe Bild 3.3 links). Zudem wird in der Spannfeldmitte der Freileitung die Verteilung der elektrostatischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte in der xz-Ebene dargestellt (siehe Bild 3.3 rechts). Bild 3.3 enthält beispielhaft für das elektrische Feld beide Darstellungsformen.



**Bild 3.3:** Verlauf der elektrostatischen Feldstärke 1 m über der EOK (links) und elektrostatische Feldstärkeverteilung in der xz-Ebene (rechts)

### 3.3 Grenzwerte für elektrische und magnetische Gleichfelder

Zur Gewährleistung der Sicherheit und der Gesundheit der Bevölkerung in elektrischen Feldern werden von nationalen oder internationalen Gremien Grenzwerte für die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte bei unterschiedlichen Frequenzen ermittelt.

Für 50-Hz-Wechselfelder hat die deutsche Bundesregierung solche Grenzwerte in einer Verordnung [41] im Jahr 1996 festgelegt. Für elektrische Gleichfelder gibt es keine gesetzlichen Grenzwerte. Zum Arbeitnehmerschutz existieren jedoch in der BGR 11 (Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit) [49] Grenzwerte (Richtwerte) für die elektrostatische Feldstärke in den Expositionsbereichen 1 und 2. Durch die Raumladungen, die durch den Betrieb von DC-Freileitungen zwischen den Leitern sowie zwischen den Leitern und der Erde entstehen, ist die resultierende elektrische Feldstärke  $E_G$  auf der EOK um den Faktor 1,5 - 2,5 größer als die Feldstärke  $E_\theta$ . Unter Berücksichtigung des Einflusses der Raumladung wird in [64] für die maximale resultierende elektrische Feldstärke ein Wert von 40 kV/m angegeben (siehe Tabelle 3.1).

Für magnetische Gleichfelder wird in der Entwurfsfassung zur Novellierung der 26. BImSchV [25], die voraussichtlich im Juni 2013 verabschiedet wird, ein Grenzwert von 500  $\mu\text{T}$  angegeben (siehe auch Tabelle 3.1).

**Tabelle 3.1:** Grenzwerte für elektrostatische und resultierende elektrische Feldstärke sowie magnetische Flussdichte in Gleichfeldern [49, 66]

elektrische Feldstärke $E_{max}$ [kV/m]	magnetische Flussdichte $B_{max}$ [ $\mu\text{T}$ ]
elektrostatische Feldstärke $E_{\theta max}$ : 20	500
resultierende Feldstärke $E_{G max}$ : 40	

Mit den angegebenen Grenzwerten aus Tabelle 3.1 wird eine Beurteilung der Berechnungsergebnisse in Kapitel 4 für die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte 1 Meter über der EOK vorgenommen.

## 4 Berechnungsergebnisse

### 4.1 Klassifizierung der Betriebs- und Fehlerzustände

Die vorliegende Studie wurde für den Normalbetrieb und Fehlerbetrieb von Freileitungen angefertigt. Die normalen Betriebszustände werden unterschieden in:

- Nennbetrieb mit  $U = U_n$  (volle Betriebsspannung) und  $I = I_n$  (voller Betriebsstrom)
- Teillast mit  $U = U_n$  und  $0 < I < I_n$  (nicht voller Betriebsstrom)
- Leerlauf mit  $U = U_n$  und  $I = 0$  (kein Betriebsstrom).

Bei Nennbetrieb wird die höchste betriebliche Anlagenausnutzung und -belastung erreicht, sodass die Berechnungen stationär und für den schlimmsten Fall (worst-case) erfolgen. Die Ergebnisse werden für monopolare Systeme in Kapitel 4.2 und für bipolare Systeme in Kapitel 4.3 vorgestellt. Für die beiden Betriebszustände *Teillast* und *Leerlauf* bleibt die elektrische Feldstärke aufgrund der unveränderten Betriebsspannung im Vergleich zum Betriebszustand *Nennbetrieb* gleich. Die magnetische Flussdichte ist gemäß Formel 2.1 (Gesetz von Biot-Savart) direkt vom Betriebsstrom abhängig und ist bei Teillast stets kleiner als bei Nennbetrieb. Bei Leerlauf bildet sich kein magnetisches Feld aus. Die Betriebszustände *Teillast* und *Leerlauf* haben bei einer worst-case-Betrachtung keine Signifikanz und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

An Freileitungen können durch Umwelteinwirkungen Teilleiter unterbrochen oder im Rahmen der Betriebsführung Stromkreise planmäßig abgeschaltet werden. Bei monopolaren Systemen und bipolaren Einfachsystemen wird bei Ausfall des einen Stromkreises keine Leistung übertragen. Folglich bilden sich keine elektrischen und magnetischen Felder aus. Bei bipolaren Doppelsystemen kann bei Unterbrechung eines Systems das zweite System mit der vollen oder der doppelten Übertragungsleistung betrieben werden. Dabei bleibt die Nennspannung unverändert und der Strom wird zwischen  $I_1 = I_n$  oder  $I_2 = 2 \cdot I_n$  variiert. Die zugehörigen Berechnungsergebnisse werden im Kapitel 4.5 vorgestellt.

Wenn an bipolaren DC-Freileitungen ein zusätzlicher Neutralleiter für einen monopolaren Weiterbetrieb gespannt ist, können die elektrischen Felder dieser DC-Systeme beeinflusst werden. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.6 dargestellt.

Die Fehlerzustände von DC-Freileitungen werden unterschieden in:

- Auftreten einer Überspannung  $U_{\text{ÜS}} = 1,8 \cdot U_n$  [50]
- Kurzschlussfall mit  $U = 0$  und  $I_{\text{KS}} \approx 1,3 \cdot I_n$

Trotz kleiner Auftrittsdauer und -wahrscheinlichkeit beider Fehler soll durch die Berechnungen ein Überblick über die tatsächlich auftretenden Felder im Fehlerfall gege-

ben werden (beispielsweise für den Mindestabstand benachbarter Objekte zur Leitung). Die Berechnungsergebnisse für beide Fehlerarten werden in den Kapiteln 4.7 und 4.8 dargestellt.

Kurzschlüsse können bei Freileitungen entweder zwischen Leiter und Erde (Erdkurzschluss) oder zwischen zwei Leitern (Leiter-Leiter-Kurzschluss) auftreten. Dabei ergibt der Nennstrom unter Ausnutzung einer 30%-igen Überlastreserve ein Fehlerstrom von  $1,3 \cdot I_n$ . Die Höhe des tatsächlich auftretenden Kurzschlussstroms ist abhängig von der Stromtragfähigkeit des Stromrichters in der Konverterstation und der Entfernung von der Fehlerstelle.

## 4.2 Nennbetrieb monopolarer Systeme

Monopolare Systeme können mit und ohne Neutralleiter zur Stromrückleitung ausgeführt sein (vgl. Bild 2.1). In Tabelle 4.1 sind die maximalen Werte der elektrostatischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte 1 Meter über der EOK aufgelistet.

**Tabelle 4.1:** Maximale elektrostatische Feldstärke und maximale magnetische Flussdichte für monopolare Systeme mit und ohne Neutralleiter 1 m über EOK

$U_n$ [kV]	<i>ohne Neutralleiter</i>		<i>mit Neutralleiter</i>	
	$E_{0max}$ [kV/m]	$B_{max}$ [ $\mu$ T]	$E_{0max}$ [kV/m]	$B_{max}$ [ $\mu$ T]
+ 400	13,3	38	12,8	34
+ 500	15,1	34,7	15	34,6
+ 600	16,2	31,9	15,8	30,4
+ 800	17,6	27,4	17,2	26,7

Die Werte für  $E_{0max}$  und  $B_{max}$  überschreiten die zulässigen Grenzparameter nicht. Ein Neutralleiter schwächt die elektrostatische Feldstärke und die magnetische Flussdichte etwas ab. Die ausführlichen Berechnungsergebnisse befinden sich im Anhang A1.

## 4.3 Nennbetrieb bipolarer Systeme

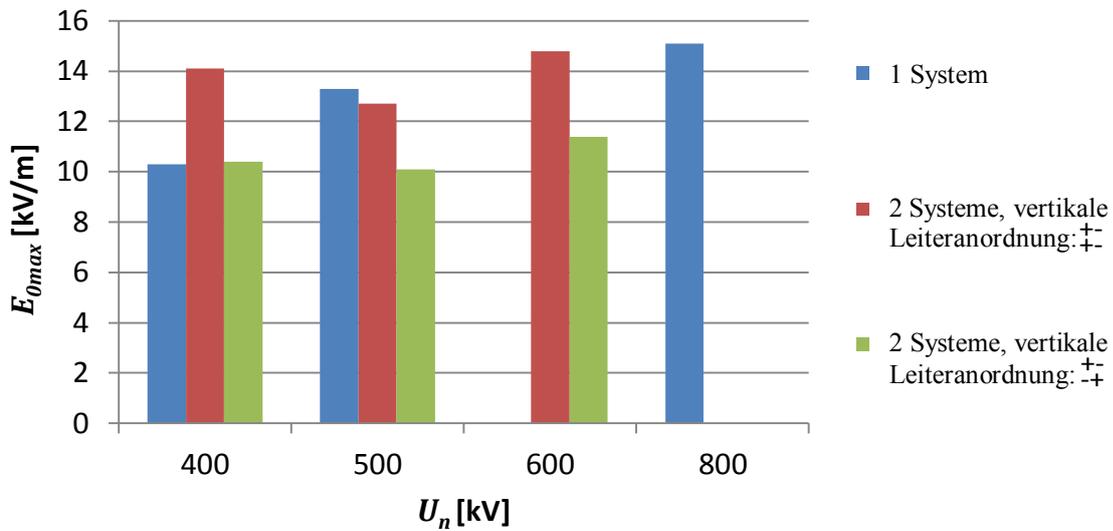
Für die  $\pm 400$ -kV-Spannungsebene existieren Freileitungsmastkonstruktionen, bei denen zwei Systeme entweder horizontal oder vertikal (vgl. Bild 2.3) angeordnet sein können. Aus Tabelle 4.2 geht hervor, dass die Werte für die elektrostatische Feldstärke

und die magnetische Flussdichte 1 Meter über der EOK innerhalb des zulässigen Bereichs sind und die Grenzparameter (Richtwerte) nicht überschreiten. Die geringsten elektrischen und magnetischen Felder bilden sich aus, wenn zwei Systeme auf einer Ebene horizontal angeordnet sind. Sind zwei bipolare Systeme vertikal angeordnet, sind bei der Leiteranordnung + - + - die elektrostatische Feldstärke und die magnetische Flussdichte am kleinsten. Für die übrigen Spannungsebenen  $\pm 500$  kV und  $\pm 600$  kV wurden die Feldberechnungen für Mastkonstruktionen mit einem System oder zwei Systemen in vertikaler Leiteranordnung durchgeführt.

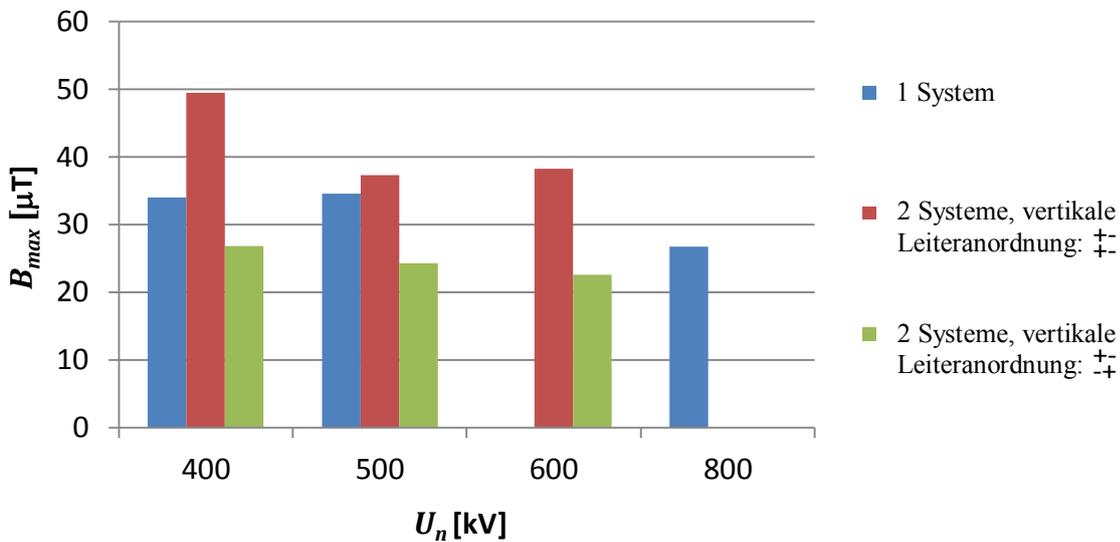
**Tabelle 4.2:** Maximale elektrostatische Feldstärke und maximale magnetische Flussdichte für unterschiedliche bipolare Mastkonstruktionen für  $\pm 400$  kV

	$E_{0max}$ [kV/m]	$B_{max}$ [ $\mu$ T]
1 System: + -	10,3	34
2 Systeme, horizontale Leiteranordnung: + - + -	7,2	19,6
2 Systeme, horizontale Leiteranordnung: + - - +	9,6	24,7
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: + - + -	14,1	49,5
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: - + + -	10,4	26,8

Ausgehend von den im Anhang A2 gezeigten Ergebnissen sind in Bild 4.1 und 4.2 die Maximalwerte der elektrostatischen Feldstärke  $E_{0max}$  bzw. der magnetischen Flussdichte  $B_{max}$  1 Meter über der EOK für die bipolaren Freileitungssysteme dargestellt. Beide Bilder zeigen, dass die Werte für die elektrostatische Feldstärke und die magnetische Flussdichte 1 Meter über den Erdboden im Betriebszustand Nennbetrieb innerhalb des zulässigen Bereichs sind und die Grenzwerte (Richtwerte) nicht überschreiten. Die berechneten Werte für  $B_{max}$  sind zudem geringer als die magnetische Flussdichte des Erdmagnetfelds mit  $B \approx 50 \mu\text{T}$  [54].



**Bild 4.1:** Maximale elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  1 m über EOK für bipolare Freileitungen für Nennbetrieb



**Bild 4.2:** Maximale magnetische Flussdichte ( $B_{max}$ ) 1 m über EOK für bipolare Freileitungen für Nennbetrieb

Die ausführlichen Berechnungsergebnisse für die elektrischen und magnetischen Felder befinden sich im Anhang A2.

#### 4.4 Einfluss der Raumladung auf die elektrische Feldstärke von mono- und bipolaren Systemen im Nennbetrieb

In Tabelle 4.3 sind die Maximalwerte der elektrostatischen Feldstärke  $E_{0max}$  (aus Kapitel 4.2) und der resultierenden elektrischen Feldstärke  $E_G$  ein Meter über der EOK für monopolare Freileitungen mit und ohne Neutralleiter aufgelistet. Die resultierende elektrische Feldstärke  $E_{Gmin}$  ergibt sich durch Multiplikation des Faktors 1,5 zu  $E_{0max}$  und  $E_{Gmax}$  durch Multiplikation des Faktors 2,5 zu  $E_{0max}$ . Durch die Faktoren 1,5 und 2,5 wird der Einfluss der Raumladung auf die resultierende elektrische Feldstärke  $E_G$  berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.1 und Quelle [64]).

**Tabelle 4.3:** Maximalwerte von  $E_{0max}$  und  $E_G$  für monopolare Freileitungen 1 m über EOK für Nennbetrieb

$U_n$ [kV]	ohne Neutralleiter			mit Neutralleiter		
	$E_{0max}$ [kV/m]	$E_{Gmin}$ [kV/m]	$E_{Gmax}$ [kV/m]	$E_{0max}$ [kV/m]	$E_{Gmin}$ [kV/m]	$E_{Gmax}$ [kV/m]
400	13,3	19	33	12,8	19	32
500	15,1	22	37,5	15	22	37
600	16,2	23	40	15,8	23	39
800	17,6	25,6	43,8	17,2	26	42

Der Tabelle 4.3 ist zu entnehmen, dass durch die Berücksichtigung der Raumladung auf die resultierende elektrische Feldstärke  $E_G$  ein Meter über der EOK der Grenzwert (Richtwert) von 40 kV/m bei den Nennspannungen von 400 kV und 500 kV nicht sowie bei 600 kV gerade noch nicht überschritten wird. Bei 800 kV wird der Richtwert von 40 kV/m im schlimmsten Fall überschritten. Durch die Vergrößerung des minimalen Bodenabstands  $s_{min}$  (Abstand Leiterseil in der Spannfeldmitte und Erdboden) kann der zulässige Grenzwert jedoch eingehalten werden. Für bipolare Einfachleitungen enthält Tabelle 4.4 die Werte für  $E_{0max}$  (aus Kapitel 4.3) sowie  $E_{Gmin}$  und  $E_{Gmax}$  ein Meter über der EOK.

**Tabelle 4.4:** Maximalwerte von  $E_{0max}$  und  $E_G$  für bipolare Einfachleitungen 1 m über EOK für Nennbetrieb

$U_n$ [kV]	$E_{0max}$ [kV/m]	$E_{Gmin}$ [kV/m]	$E_{Gmax}$ [kV/m]
± 400	10,3	15,5	25,7
± 500	13,3	19,5	32,5
± 800	15,1	22,6	37,7

In Tabelle 4.4 ist zu sehen, dass für bipolare Einfachleitungen der Grenzwert für die resultierende elektrische Feldstärke von 40 kV/m in allen Spannungsebenen nicht überschritten wird. Zudem zeigt eine Auswertung der Quellen [62] und [63], dass die in Tabelle 4.4 berechneten Werte für  $E_{Gmin}$  und  $E_{Gmax}$  mit den Messwerten in [62] und [63] nahezu übereinstimmen. Damit kann die Richtigkeit der Faktoren 1,5 - 2,5 (aus Quelle [64]) gezeigt werden. Abschließend sind für bipolare Doppelsysteme in Tabelle 4.5 die Werte für  $E_{0max}$  (aus Kapitel 4.3) sowie  $E_{Gmin}$  und  $E_{Gmax}$  ein Meter über der EOK aufgelistet.

Der Grenzwert (Richtwert) für die resultierende elektrische Feldstärke von 40 kV/m bei allen Anordnungen und Spannungsebenen wird nicht überschritten (siehe Tabelle 4.5).

**Tabelle 4.5:** Maximalwerte von  $E_{0max}$  und  $E_G$  für bipolare Doppelleitungen 1 m über EOK für Nennbetrieb

$U_n$ [kV]	Leiteranordnung	$E_{0max}$ [kV/m]	$E_{Gmin}$ [kV/m]	$E_{Gmax}$ [kV/m]
$\pm 400$	+ - + -	7,2	10,8	18
$\pm 400$	+ - - +	9,6	14,4	24
$\pm 400$	+ - + -	14,1	21,1	35,2
$\pm 400$	+ - - +	10,4	15,6	26
$\pm 500$	+ - + -	12,7	19	31,8
$\pm 500$	+ - - +	9,1	13,7	22,8
$\pm 600$	+ - + -	14,8	22,2	37
$\pm 600$	+ - - +	11,4	17,1	28,5

#### 4.5 Betrieb eines Systems von einem bipolaren Doppelsystem mit voller und doppelter Nennleistung

Bei bipolaren Doppelsystemen kann ein System (Stromkreis) durch die Betriebsführung planmäßig abgeschaltet werden oder durch äußere Umweltauswirkungen ausfallen, sodass sich nur noch ein bipolares System im Betrieb befindet. Dadurch verändern sich die Maximalwerte der elektrostatischen Feldstärke  $E_{max}$  und der magnetischen Flussdichte  $B_{max}$  im Vergleich zum Nennbetrieb, wie in Tabelle 4.6 aufgelistet ist.

**Tabelle 4.6:** Maximale elektrostatische Feldstärke und maximale magnetische Flussdichte beim Betrieb eines Systems von einem bipolaren Doppelsystem

$U_n$ [kV]	Leiteranordnung	$E_{0max}$ [kV/m]	$B_{max,1}$ [ $\mu$ T]	$B_{max,2}$ [ $\mu$ T]
$\pm 400$		7,1	21,5	42,9
$\pm 400$		12,2	37,9	75,8
$\pm 400$		2	11,8	23,6
$\pm 500$		10,3	30,8	61,5
$\pm 500$		1,9	6,5	13
$\pm 600$		13,1	30,4	60,8
$\pm 600$		2,6	7,8	15,6

Aus Tabelle 4.6 ist zu entnehmen, dass bei dieser veränderten Betriebsweise von bipolaren Doppelsystemen die elektrostatische Feldstärke und die magnetische Flussdichte 1 Meter über der EOK die zulässigen Grenzwerte (Richtwerte) nicht überschreiten. Zudem zeigt ein Vergleich in der  $\pm 400$ -kV-Spannungsebene für die ersten beiden Leiteranordnungen aus Tabelle 4.6 und der bipolaren Einfachleitung in Tabelle 4.3, dass sich die Maximalwerte für  $E_{0max}$  und  $B_{max}$  untereinander unterscheiden. Diese Feststellung ist auf die beiden spannungs- und stromlosen Leiter des bipolaren Doppelsystems zurückzuführen, welche die elektrischen und magnetischen Felder beeinflussen.

Die ausführlichen Berechnungsergebnisse für die elektrischen und magnetischen Felder befinden sich für den Betrieb des Systems mit der vollen Nennleistung im Anhang A3 und für den Betrieb des Systems mit doppelter Nennleistung im Anhang A4.

#### 4.6 Nennbetrieb bipolarer Systeme mit Neutralleiter

Bipolare Freileitungssysteme können mit zusätzlichen Neutralleitern oder Erdseilen ausgestattet sein, welche die Verteilung der elektrostatischen Feldstärke  $E_0$  und der resultierenden elektrischen Feldstärke  $E_G$  beeinflussen.

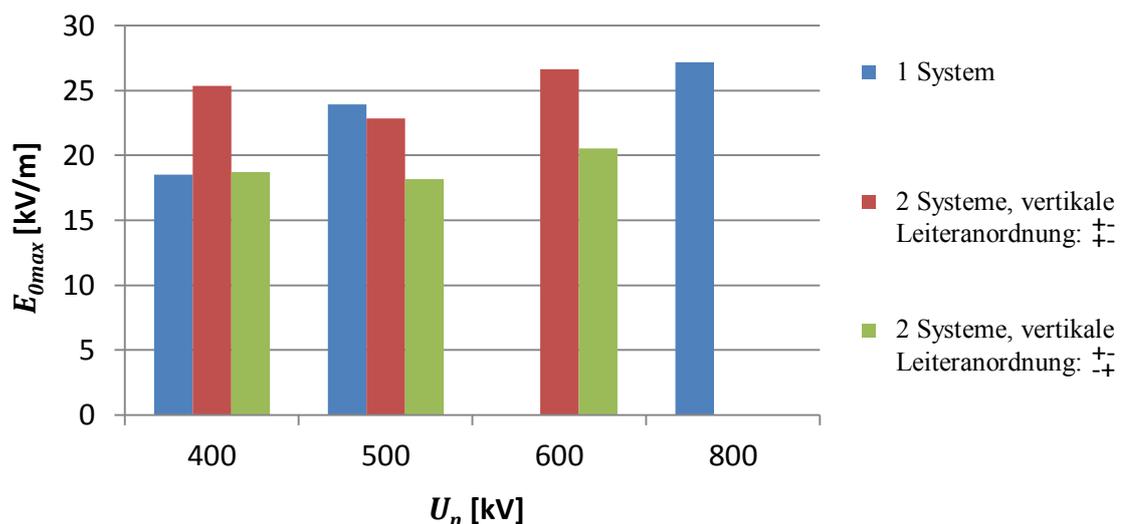
In diesem Abschnitt wird der Nennbetrieb eines bipolaren Systems mit einem Neutralleiter (spannungs- und stromlos) betrachtet. Einzig für das  $\pm 400$ -kV-Mastkopfbild mit horizontaler Leiteranordnung + - - + (aus Bild 2.8 Mitte) bewirkt dieser Neutralleiter eine Verminderung der maximalen elektrostatischen Feldstärke  $E_{0max}$  um etwa 1,4 kV/m. Eine Veränderung der magnetischen Flussdichte kann für dieses und alle

anderen Mastkopfbilder durch die Berechnungen ausgeschlossen werden. Im Anhang A5 sind die elektrostatische Feldstärkeverteilung und der Verlauf der elektrostatischen Feldstärke 1 Meter über der EOK dargestellt.

Weiterhin wurde der Einfluss von zusätzlichen Erdseilen auf die Verteilung der elektrischen und magnetischen Felder untersucht. Ausgehend von Bild 2.8 und 2.9 wurde zunächst ein zusätzliches Erdseil in der Lage des Neutralleiters positioniert. Durch die Berechnungen wurde nur für das  $\pm 400$ -kV-Mastkopfbild mit horizontaler Leiteranordnung + - - + (aus Bild 2.8 Mitte) ein kleinerer Wert von  $E_{0max}$  um 1,4 kV/m bestimmt (vgl. voriger Abschnitt). Anschließend wurde an allen Mastkopfbildern die Position des Erdseils horizontal oder vertikal verändert. In diesen Fällen bleibt die elektrische Feldstärke- und magnetische Flussdichtevertelung im Vergleich zu den Mastkopfbildern ohne zusätzliches Erdseil unverändert.

#### 4.7 Fehlerzustand Überspannung bipolarer Systeme

In diesem Kapitel werden die elektrostatischen Felder unterschiedlicher bipolarer Freileitungen beim Auftreten von Überspannungen betrachtet. Bei solchen Freileitungssystemen ist im ungünstigsten Fall nur mit Überspannungen gegen Erde zu rechnen, die etwa das 1,8-fache der Nennspannung betragen. Bild 4.3 zeigt die maximale elektrische Feldstärke  $E_{0max}$  1 Meter über der EOK beim Auftreten von Überspannungen für unterschiedliche DC-Freileitungen bei verschiedenen Nennspannungen.



**Bild 4.3:** Maximale elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  1 m über EOK für bipolare Freileitungen für Fehlerzustand Überspannung

Bild 4.3 ist zu entnehmen, dass die maximale elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  direkt von der Höhe der Spannung abhängig ist und daher genau um den Faktor 1,8 größer als im normalen Betriebszustand ist. Die ausführlichen Berechnungsergebnisse für die elektrischen Felder beim Auftreten von Überspannungen befinden sich im Anhang A6.

## 4.8 Fehlerzustand Kurzschluss bipolarer Systeme

### 4.8.1 Fehlerzustand Erdkurzschluss

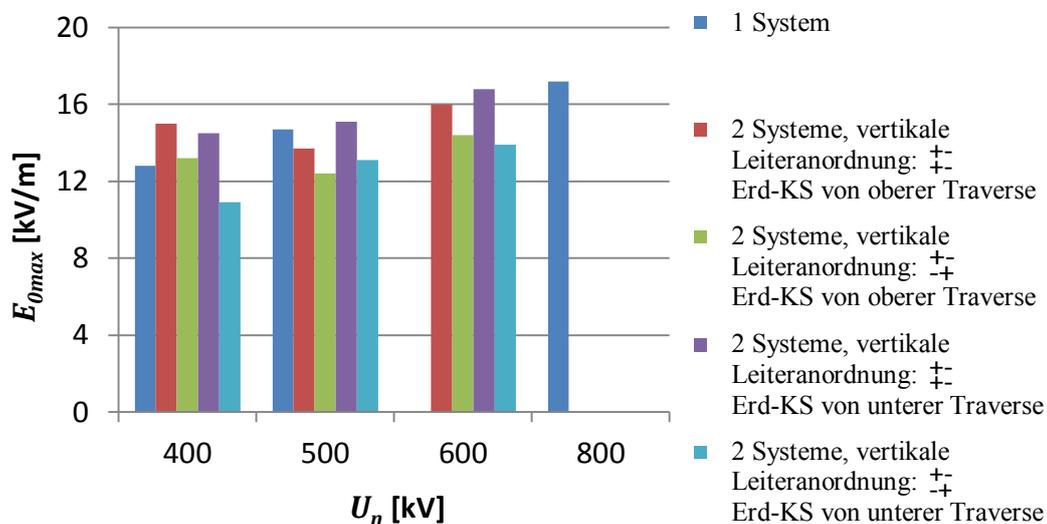
Die Berechnungen der elektrischen und magnetischen Felder beim Auftreten eines Kurzschlusses zwischen Leiter und Erde wurden in diesem Kapitel nur für bipolare Systeme durchgeführt. In Tabelle 4.7 sind die Werte für die maximale elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  und die magnetische Flussdichte  $B_{max}$  für unterschiedliche Leiteranordnungen (1 System, vertikal oder horizontal) in der  $\pm 400$ -kV-Spannungsebene aufgelistet.

**Tabelle 4.7:** Maximale elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  und magnetische Flussdichte  $B_{max}$  1 m über EOK für bipolare  $\pm 400$ -kV-Systeme für Erdkurzschluss

Ausführungsart	$E_{0max}$ [kV/m]	$B_{max}$ [ $\mu$ T]
1 System: + -	12,8	41,1
2 Systeme, horizontale Leiteranordnung: + - + -	10,3	28,1
2 Systeme, horizontale Leiteranordnung: + - - +	13,3	28,5
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: $\begin{matrix} + - \\ + - \end{matrix}$ , Erdkurzschluss zwischen Leiter in oberer Traverse und Erde	15	52,5
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: $\begin{matrix} + - \\ - + \end{matrix}$ , Erdkurzschluss zwischen Leiter in oberer Traverse und Erde	13,2	28
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: $\begin{matrix} + - \\ + - \end{matrix}$ , Erdkurzschluss zwischen Leiter in unterer Traverse und Erde	14,5	57,9
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: $\begin{matrix} + - \\ + - \end{matrix}$ , Erdkurzschluss zwischen Leiter in unterer Traverse und Erde	10,9	36,9

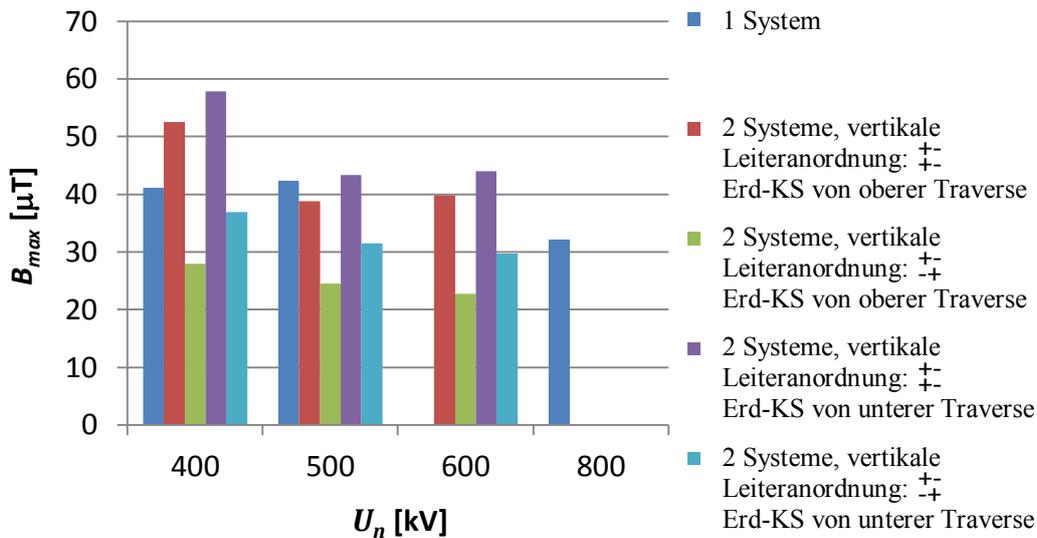
Der Tabelle 4.7 ist zu entnehmen, dass die geringste elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  bzw. magnetische Flussdichte  $B_{max}$  auftritt, wenn sich zwei Systeme horizontal auf einer Ebene befinden. Für diese Anordnung sind die berechneten Werte für  $E_{0max}$  und  $B_{max}$  kleiner als die zulässigen Grenzwerte, die eigentlich nur für den Normalbetrieb gelten.

Im Folgenden werden bipolare DC-Freileitungen für unterschiedliche Nennspannungen mit einem oder zwei Systemen in vertikaler Leiteranordnung betrachtet. Bild 4.4 zeigt die maximale elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  für diese Konfigurationen.



**Bild 4.4:** Maximale elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  1 m über EOK für bipolare Freileitungen im Fehlerzustand Erdkurzschluss

Analog zu Bild 4.4 zeigt Bild 4.5 die maximale magnetische Flussdichte  $B_{max}$  für bipolare DC-Freileitungen mit einem System oder zwei Systemen in vertikaler Leiteranordnung.



**Bild 4.5:** Maximale magnetische Flussdichte  $B_{max}$  1 m über EOK für bipolare Freileitungen für Fehlerzustand Erdkurzschluss

Dem Bild 4.5 ist zu entnehmen, dass die erhöhten magnetischen Flussdichten der unterschiedlichen Freileitungssysteme der Größenordnung der magnetischen Flussdichte des Erdmagnetfeldes von etwa  $50 \mu\text{T}$  [54] entsprechen.

Die ausführlichen Berechnungsergebnisse für die elektrischen und magnetischen Felder aller betrachteten Freileitungssysteme sind im Anhang A7 enthalten.

#### 4.8.2 Fehlerzustand Leiter-Leiter-Kurzschluss

An Freileitungen können neben Erdkurzschlüssen auch Kurzschlüsse zwischen den zwei Leitern eines bipolaren Systems auftreten. In Tabelle 4.8 sind die Werte der maximalen elektrischen Feldstärke  $E_{0max}$  und der maximalen magnetischen Flussdichte  $B_{max}$  für unterschiedliche Leiteranordnungen (1 System, vertikal oder horizontal) in der  $\pm 400\text{-kV}$ -Spannungsebene aufgelistet.

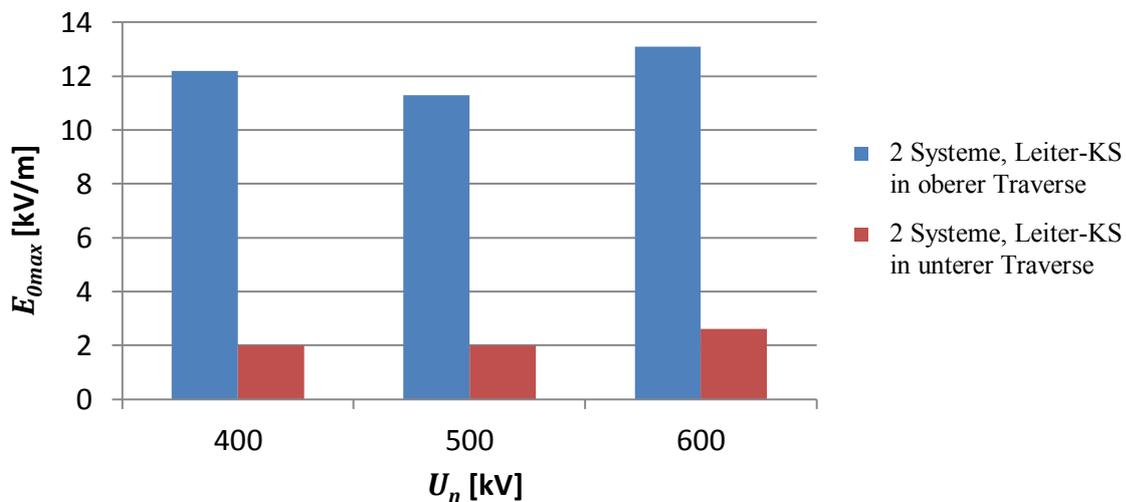
**Tabelle 4.8:** Maximale elektrische Feldstärke  $E_{0max}$  und magnetische Flussdichte  $B_{max}$  1 m über EOK für  $\pm$  400-kV-Systeme für Fehlerzustand Leiterkurzschluss

Ausführungsart	$E_{0max}$ [kV/m]	$B_{max}$ [ $\mu$ T]
1 System: + -	0	44,2
2 Systeme, horizontale Leiteranordnung: + - + -	7,2	25,9
2 Systeme, horizontale Leiteranordnung: + - - +	7,2	31
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: $\begin{matrix} + - \\ + - \end{matrix}$ , Leiter-Leiter-Kurzschluss zwischen den zwei Leitern in oberer Traverse	12,2	53,1
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: $\begin{matrix} + - \\ - + \end{matrix}$ , Leiter-Leiter-Kurzschluss zwischen den zwei Leitern in oberer Traverse	12,2	23,6
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: $\begin{matrix} + - \\ + - \end{matrix}$ , Leiter-Leiter-Kurzschluss zwischen den zwei Leitern in unterer Traverse	2	60,9
2 Systeme, vertikale Leiteranordnung: $\begin{matrix} + - \\ - + \end{matrix}$ , Leiter-Leiter-Kurzschluss zwischen den zwei Leitern in unterer Traverse	2	38,1

Da bei einem einzelnen bipolaren System die Übertragungsspannung im Kurzschlussfall etwa null beträgt, bildet sich in diesem Fall kein elektrisches Feld aus. Der Tabelle 4.8 ist auch zu entnehmen, dass sich erwartungsgemäß die elektrische Feldstärke  $E_{0max}$  nur zwischen den unterschiedlichen Kurzschlussorten (Leiter-Leiter-Kurzschluss bei horizontaler Leiteranordnung, Leiterkurzschluss in oberer Ebene und unterer Ebene bei vertikaler Leiteranordnung) unterscheidet. Die kleinste elektrische Feldstärke  $E_{0max}$  (größer null) tritt auf, wenn ein Kurzschluss zwischen zwei Leitern der unteren Traverse (vertikale Leiteranordnung) entsteht.

Hingegen ist die maximale magnetische Flussdichte  $B_{max}$  nicht nur vom Kurzschlussort, sondern auch von der Anordnung der Leiterpolaritäten abhängig. Große magnetische Flussdichten  $B_{max}$  treten auf, wenn ein Leiter-Leiter-Kurzschluss in der unteren Traverse entsteht. Der Wert von  $B_{max}$  wird zudem durch die ungleichmäßige Leiteranordnung  $\begin{matrix} + - \\ - + \end{matrix}$  verstärkt und ist für diese Konfiguration am größten.

In den folgenden Bildern werden die maximalen Werte von  $E_{0max}$  und  $B_{max}$  von bipolaren DC-Freileitungen mit zwei Systemen in vertikaler Leiteranordnung betrachtet. Bild 4.6 zeigt die maximale elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  für diese Anordnungen.

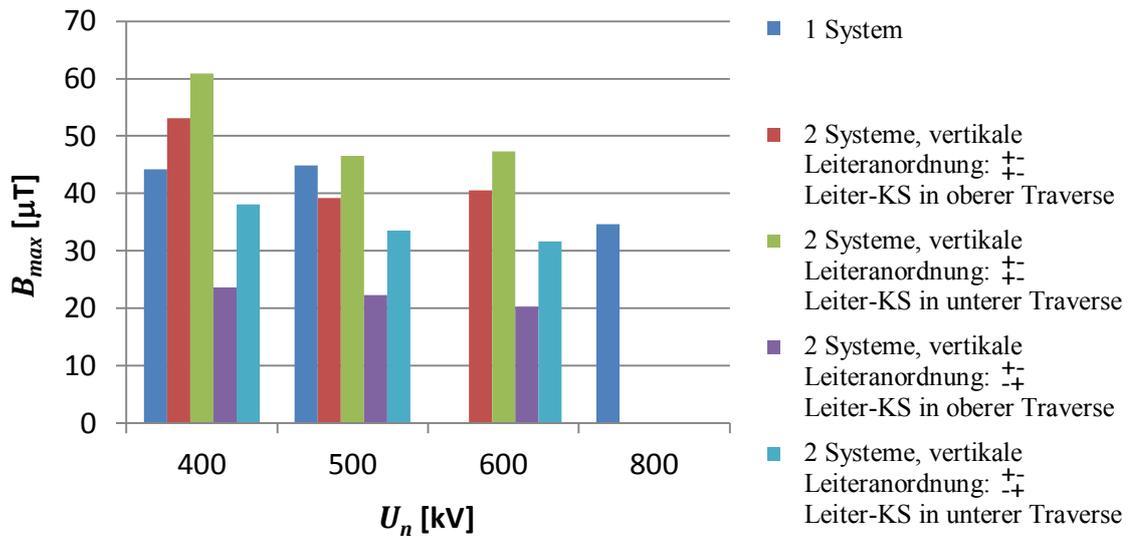


**Bild 4.6:** Maximale elektrostatische Feldstärke  $E_{0max}$  1 m über EOK für bipolare Freileitungen für Fehlerzustand Leiter-Leiter-Kurzschluss

Da bei einem einzelnen bipolaren System die Übertragungsspannung im Kurzschlussfall etwa null beträgt, bildet sich in diesem Fall kein elektrisches Feld aus. Wie bereits auch in Tabelle 4.8 festgestellt wurde, ist bei bipolaren Doppelsystemen die Höhe der elektrischen Feldstärke  $E_{0max}$  nur vom Kurzschlussort abhängig. Tritt der Leiter-Leiter-Kurzschluss zwischen den zwei Leitern in der unteren Traverse auf, nimmt die elektrische Feldstärke  $E_{0max}$  1 m über der EOK den kleinsten Wert größer null an.

Analog zu Bild 4.6 zeigt Bild 4.7 die maximale magnetische Flussdichte  $B_{max}$  für bipolare DC-Freileitungen mit einem System oder zwei Systemen in vertikaler Leiteranordnung.

In Bild 4.7 ist zu sehen, dass die magnetische Flussdichte  $B_{max}$  beim Auftreten von Leiterkurzschlüssen in der unteren Traverse bei bipolaren Doppelsystemen mit der Leiteranordnung  $+ -$  am größten ist. Da mit steigender Nennspannung auch der minimale Abstand  $s_{min}$  zwischen Leiter und Erdboden ansteigt, sinken die Werte für  $B_{max}$ . Die ausführlichen Berechnungsergebnisse sind im Anhang A7 enthalten.



**Bild 4.7:** Maximale magnetische Flussdichte  $B_{max}$  1 m über EOK für bipolare Freileitungen für Fehlerzustand Leiter-Leiter-Kurzschluss

#### 4.9 Einfluss der Raumladung auf die elektrische Feldstärke von bipolaren Systemen in Fehlerfällen

##### *Fehlerzustand Überspannung*

In Bild 4.8 sind die Minimal- und die Maximalwerte der resultierenden elektrischen Feldstärke ( $E_{Gmin}$  und  $E_{Gmax}$ ) ein Meter über der EOK für bipolare Freileitungssysteme aufgelistet. Wie in Kapitel 4.4 ergibt sich die elektrische Feldstärke  $E_{Gmin}$  (helle Säulen) durch Multiplikation des Faktors 1,5 zu  $E_{0max}$  und  $E_{Gmax}$  (dunkle Säulen) durch Multiplikation des Faktors 2,5 zu  $E_{0max}$ .

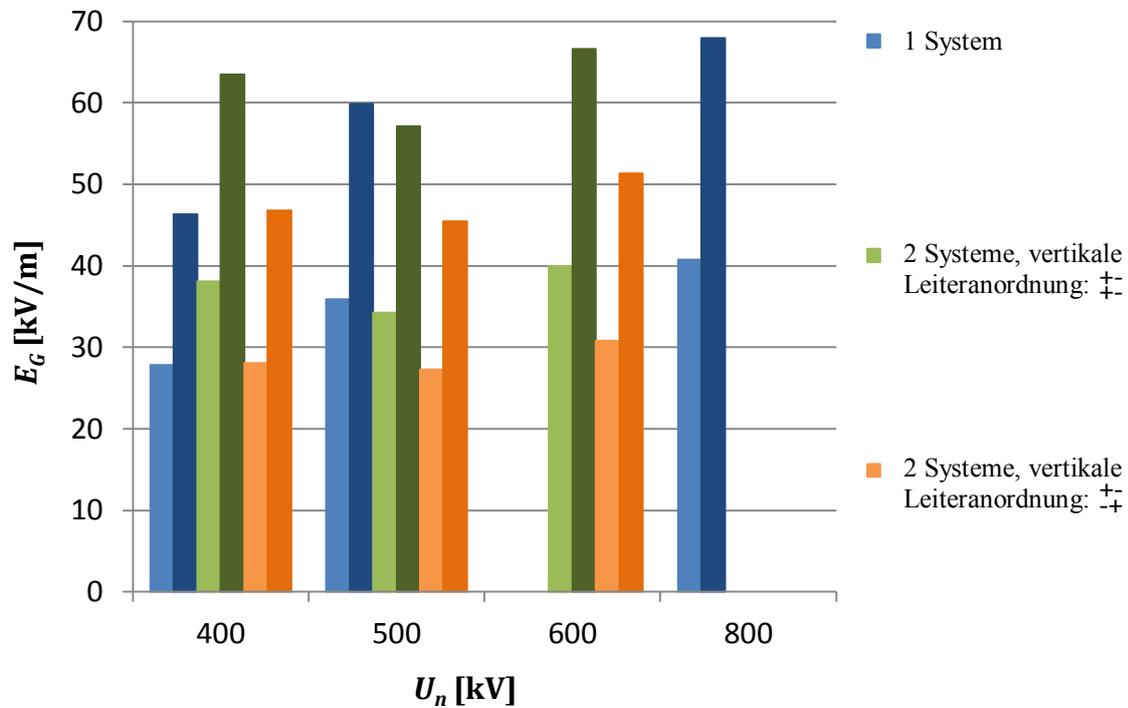
##### *Fehlerzustand Erdkurzschluss*

Analog zu Kapitel 4.9.1 sind in Bild 4.9 die Minimal- und die Maximalwerte der resultierenden elektrischen Feldstärke ( $E_{Gmin}$  und  $E_{Gmax}$ ) ein Meter über der EOK für bipolare Freileitungssysteme für den Fehlerzustand Erdkurzschluss dargestellt. Die elektrische Feldstärke  $E_{Gmin}$  (helle Säulen) berechnet sich durch Multiplikation des Faktors 1,5 zu  $E_{0max}$  und  $E_{Gmax}$  (dunkle Säulen) durch Multiplikation des Faktors 2,5 zu  $E_{0max}$ .

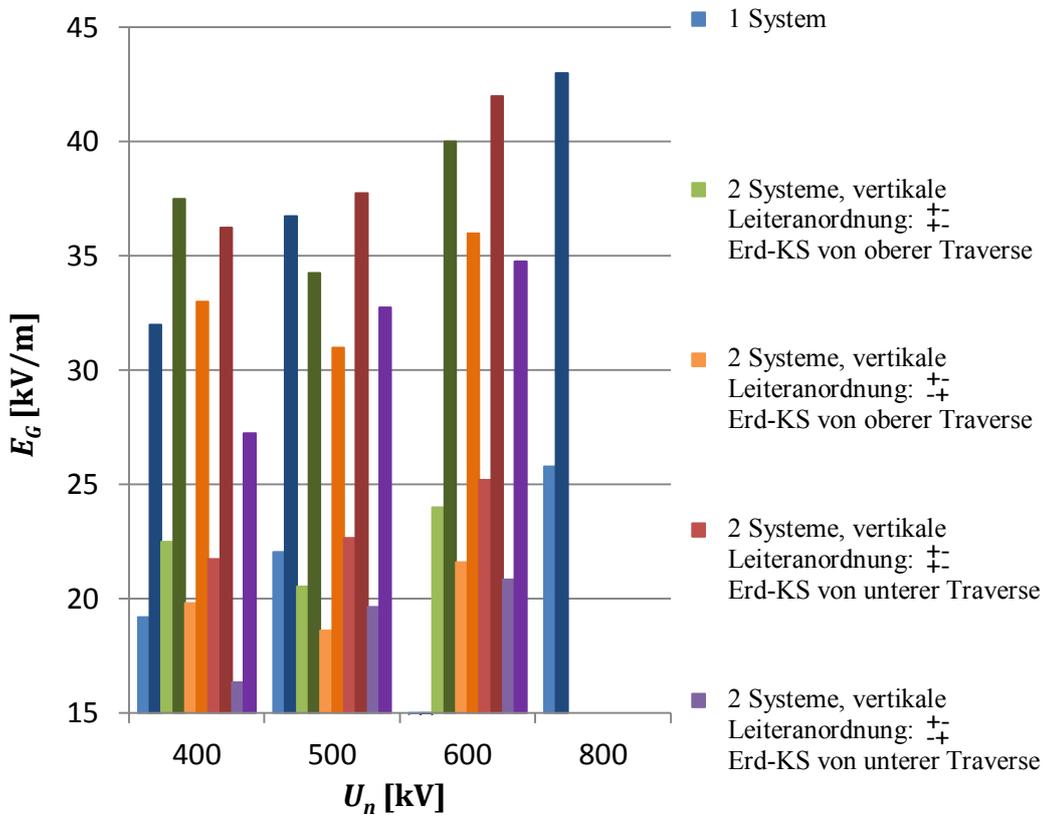
##### *Fehlerzustand Leiter-Leiter-Kurzschluss*

In Bild 4.10 sind analog zu den beiden vorigen Absätzen die Minimal- und die Maximalwerte der resultierenden elektrischen Feldstärke ( $E_{Gmin}$  und  $E_{Gmax}$ ) ein Meter über der Erdbodenoberkante für bipolare Freileitungssysteme für den Fehlerzustand Leiter-Leiter-Kurzschluss dargestellt. Die elektrische Feldstärke  $E_{Gmin}$  (helle Säulen) berech-

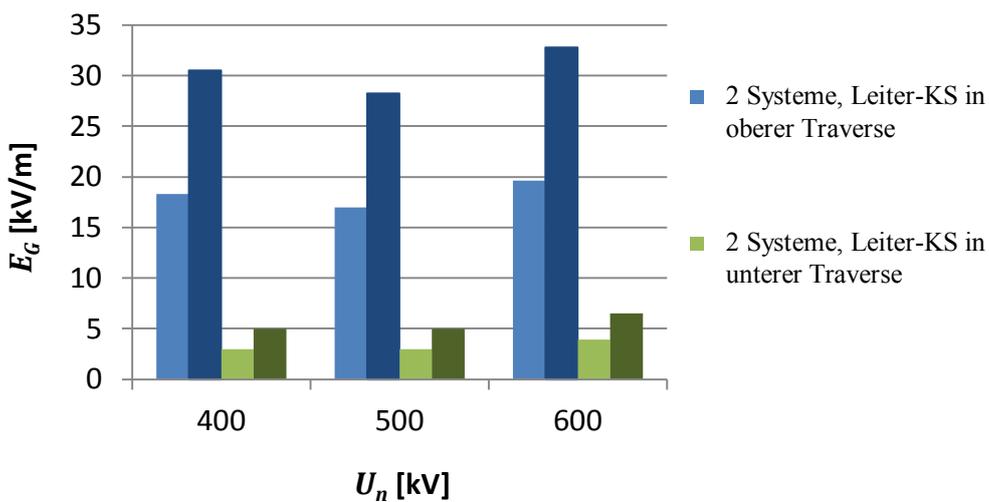
net sich durch Multiplikation des Faktors 1,5 zu  $E_{0max}$  und  $E_{Gmax}$  (dunkle Säulen) durch Multiplikation des Faktors 2,5 zu  $E_{0max}$ .



**Bild 4.8:**  $E_{Gmin}$  (helle Säulen) und  $E_{Gmax}$  (dunkle Säulen) für bipolare Freileitungen 1 m über EOK für Fehlerzustand Überspannung



**Bild 4.9:**  $E_{Gmin}$  (helle Säulen) und  $E_{Gmax}$  (dunkle Säulen) für bipolare Freileitungen 1 m über EOK für Fehlerzustand Erdkurzschluss



**Bild 4.10:**  $E_{Gmin}$  (helle Säulen) und  $E_{Gmax}$  (dunkle Säulen) für bipolare Freileitungen 1 m über EOK für Fehlerzustand Leiter-Leiter-Kurzschluss

## 5 Isolationsabstände und Schutzstreifen

### 5.1 Isolationsabstände

Zur sicheren Übertragung der Nennspannung und zur Vermeidung von Überspannungen müssen an Freileitungssystemen notwendige Isolationsabstände eingehalten werden. Dabei wird zwischen fünf verschiedenen Abständen unterschieden, die in innere oder äußere Abstände eingeteilt werden können. Durch äußere Abstände sollen Gefahren von Durchschlägen für Personen oder Objekte auf der Erdoberfläche sowie für in der Nähe von Freileitungen arbeitende Personen vermieden werden. Innere Abstände dienen zur Auslegung der elektrischen Festigkeit des Freileitungssystems. Im Folgenden sind die verschiedenen Mindestluftstrecken in Luft aus der Norm EN 50341-1 für Drehstromfreileitungen aufgelistet:

- **Mindestluftstrecke  $D_{el}$ :** zur Vermeidung von Durchschlägen zwischen Außenleitern und Objekten auf Erdpotential beim Auftreten von schnell oder langsam ansteigenden Überspannungen:
  - innerer Abstand: Abstand zwischen Außenleiter und Teil des Freileitungsmasten
  - äußerer Abstand: Abstand zwischen Außenleiter und Objekt auf Erdoberfläche
- **Mindestluftstrecke  $D_{pp}$**  (innerer Abstand): zur Vermeidung von Durchschlägen zwischen Außenleitern beim Auftreten von schnell oder langsam auftretenden Überspannungen
- **Mindestluftstrecke  $D_{50Hz,p,e}$**  (innerer Abstand): zur Vermeidung von Durchschlägen zwischen Außenleitern und Objekten auf Erdpotential bei betriebsfrequenter Spannung
- **Mindestluftstrecke  $D_{50Hz,p,p}$**  (innerer Abstand): zur Vermeidung von Durchschlägen zwischen Außenleitern bei betriebsfrequenter Spannung

Für HGÜ-Freileitungen können diese Mindestabstände nicht direkt übernommen werden. Zudem existiert bisher keine Norm zur Bestimmung dieser Abstände. Unter der Annahme, dass die Nennspannung (Leiter-Erde-Spannung) einer HGÜ-Freileitung kleiner oder gleich der höchsten Betriebsspannung  $U_S$  einer Drehstromfreileitung ist, können zur Abschätzung die jeweiligen Werte der Drehstromfreileitung übernommen werden.

Zur Einhaltung der in Tabelle 5.1 aufgelisteten Werte muss der Einfluss von zusätzlichen Wind- und Eislasten sowie der Leiterseiltemperatur auf den Durchhang berücksichtigt werden. Aufgrund dieser Faktoren ändern sich die Mindestluftstrecken, die in Tabelle 5.2 aufgelistet sind.

Unter Berücksichtigung von örtlichen Begebenheiten gibt die Norm EN 50341-1 unterschiedliche Abstandsfälle an, von denen einige in Tabelle 5.3 beispielhaft aufgelistet sind.

**Tabelle 5.1:** Empirische Werte für Mindestluftstrecken  $D_{el}$ ,  $D_{pp}$ ,  $D_{50\text{Hz}_p_e}$  und  $D_{50\text{Hz}_p_p}$

höchste Betriebsspannung $U_S$ [kV]	$U_n$ [kV]	$D_{el}$ [m]	$D_{pp}$ [m]	$D_{50\text{Hz}_p_e}$ [m]; $K_g = 1,45$	$D_{50\text{Hz}_p_p}$ [m]; $K_g = 1,6$
420	$\pm 400$	2,8	3,2	0,7	1,17
525	$\pm 500$	3,5	4	0,86	1,47
765	$\pm 600$	4,9	5,6	1,28	2,3

**Tabelle 5.2:** Innere Mindestabstände im Feld und am Mast

Lastfall	Mindestluftstrecken im Feld und am Mast			
	Im Feld		Am Mast	
	Außenleiter - Außenleiter	Außenleiter - Erdseil	zwischen zwei Leitern	Leiter - geerde- te Teile
Höchste Leiter- temperatur	$D_{pp}$	$D_{el}$	$D_{pp}$	$D_{el}$
Eislast	$D_{pp}$	$D_{el}$	$D_{pp}$	$D_{el}$
Windlast	$0,75 D_{pp}$	$0,75 D_{el}$	$0,75 D_{pp}$	$0,75 D_{el}$
extreme Wind- last	$D_{50\text{Hz}_p_p}$	$D_{50\text{Hz}_p_e}$	$D_{50\text{Hz}_p_p}$	$D_{50\text{Hz}_p_e}$

**Tabelle 5.3:** Äußere Mindestabstände unterschiedlicher Abstandsfälle (Beispiele)

Abstandsfall	für höchste Leitertemperatur / Eislast / Windlast
Abstand zu nicht besteigbaren Bäumen	$D_{el}$
Abstand zu besteigbaren Bäumen	$1,5 \text{ m} + D_{el}$
Abstand zum Boden im üblichen Gelände	$5 \text{ m} + D_{el}$
seitlicher Abstand zu Gebäuden	$2 \text{ m} + D_{el}$ (mindestens 3 m)
Abstand zur Straßenoberfläche	$6 \text{ m} + D_{el}$
Abstand zu Sportflächen	$7 \text{ m} + D_{el}$

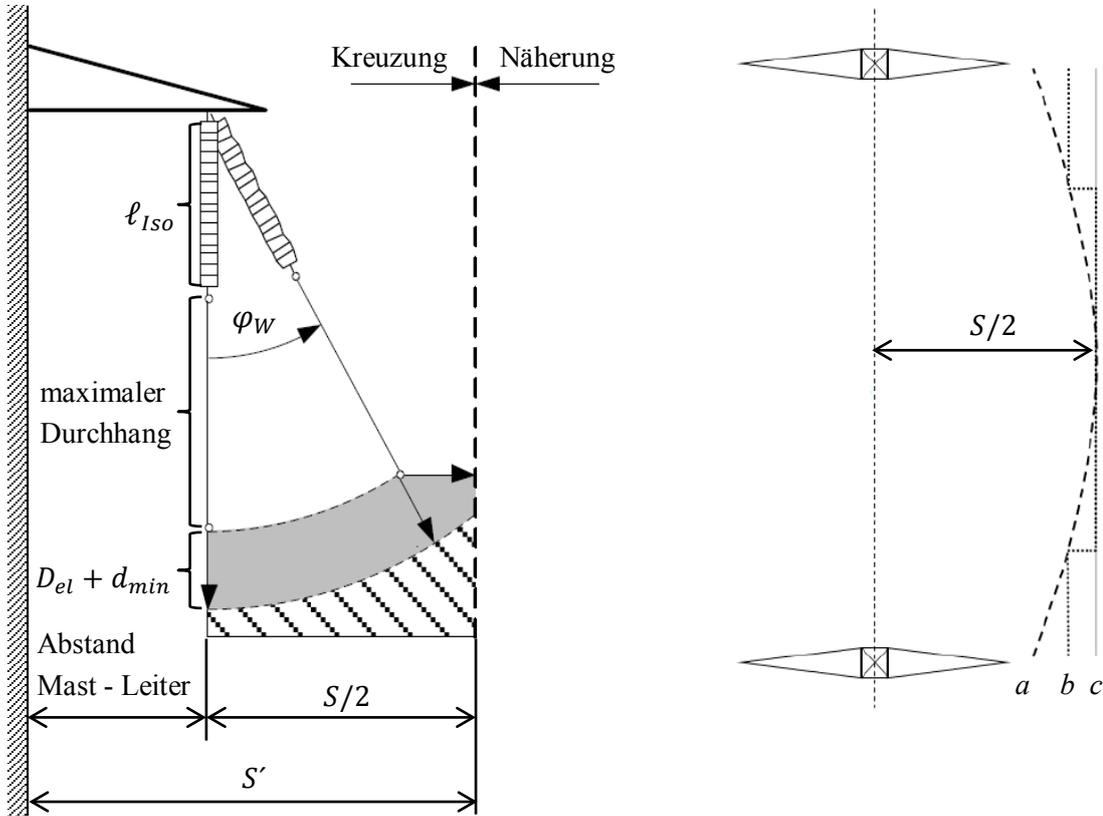
## 5.2 Schutzstreifen

Ein Schutzstreifen entlang von Freileitungen ist erforderlich, um die notwendigen Isolationsabstände (Mindestluftstrecken aus Kapitel 5.1) einzuhalten. Diese Abstände sind von der Leitertemperatur und zusätzlichen Eis- oder Windlasten abhängig.

Um die Einhaltung der Mindestabstände direkt unterhalb der Freileitung zu gewährleisten, wird der Leiterdurchhang bei einer maximalen Leitertemperatur von 80 °C zugrunde gelegt. Zusätzlich wird der Leiterdurchhang von weiteren Faktoren, wie Mastabstand und Seilzugspannung, beeinflusst. Aufgrund dieser Faktoren müssen die Mindestabstände aus Tabelle 5.1 und 5.3 eingehalten werden.

Durch Windeinwirkung können die Leiterseile von Freileitungen seitlich ausschlagen. Für die Berechnung des seitlichen Abstands zur Freileitung wird der Ausschwingwinkel  $\varphi_W = 20 \dots 50^\circ$  der Leiterseile benötigt, der von dem Eigengewicht, Durchhang und den Abmessungen der Leiterseile sowie von der Isolatorreihe, Auslegungsgeschwindigkeit und der Umgebung der Freileitung abhängig ist.

Ausgehend von den bisherigen Betrachtungen kann der Schutzstreifen von Freileitungen nach Bild 5.1 bestimmt werden.



**Bild 5.1:** Bestimmung des Schutzstreifens einer Freileitung [44], [Verweis auf DB Energie in [44]]

Die maximal mit dem Winkel  $\varphi_W$  ausgeschwungenen Leiterseile werden unter Berücksichtigung der zusätzlichen Sicherheitsabstände (aus Tabelle 5.1 und 5.3) lotrecht auf den Erdboden projiziert. Diese Projektion nimmt in der Spannfeldmitte eine parabolische Form an (siehe Kurve *a* in Bild 5.1 rechts). In der Praxis wird der parabolische Schutzstreifen häufig durch eine stufenförmige Form *b* oder einen parallel zur Leitungsachse verlaufenden Schutzstreifen *c* vereinfacht.

Im Folgenden wird für die verschiedenen, in der Studie betrachteten DC-Freileitungen ein parallel zur Leitungsachse verlaufender Schutzstreifen berechnet. Für den Leiterdurchhang wird wie in den Berechnungen in Kapitel 4 der maximale Leiterdurchhang eingesetzt, sodass weitere Betrachtungen zur Zugspannung und zu zusätzlichen Eislasten vernachlässigt werden können. Da bei den Berechnungen auch die örtlichen Begebenheiten berücksichtigt werden müssen, ist der berechnete Schutzstreifen *S* als Mindestbreite anzusehen. In Tabelle 5.4 sind der minimale und der maximale Schutzstrei-

fen für die unterschiedlichen Konfigurationen angegeben. Die Berechnung des Schutzstreifens für die  $\pm 800$ -kV-Freileitungen wird näherungsweise durchgeführt, da diese Spannungsebene in Tabelle 5.4 (bzw. Norm EN 50341-1) nicht aufgeführt ist.

**Tabelle 5.4:** minimaler und maximaler Schutzstreifen von DC-Freileitungen

Mast-kopfbild	$U_n$ [kV]	$\ell_{Iso}$ [m]	Durchhang [m]	$(D_{el} + d_{min})$ [m]	$S_{min}$ [m]	$S_{max}$ [m]
1	$\pm 400$	5,6	15,4	8,8	44,9	62,8
2	$\pm 400$	5,6	14,75	8,8	64,1	83,3
3	$\pm 400$	5,6	14,75	8,8	54,3	71,2
4	$\pm 500$	6,7	13,85	9,5	55	72,5
5	$\pm 500$	6,7	13,85	9,5	47,1	64,5
6	$\pm 600$	7,2	18	10,5	56,6	78
7	$\pm 800$	9	18	$\approx 12,5$	$\approx 66,5$	$\approx 89,4$

## 6 Bewertung der elektromagnetischen Beeinflussungen

Die Auswirkungen der elektrischen und magnetischen Felder von DC-Freileitungen auf die Umgebung wurden auf Grundlage der Studie [52] und den darin angegebenen Quellen [53-57] zusammengefasst.

Gleichspannungsfreileitungen erzeugen nicht wie Drehstromfreileitungen elektrische und magnetische Wechselfelder, sondern statische Gleichfelder. Solche statischen Gleichfelder existieren auch unter natürlichen Bedingungen in der Erdatmosphäre. So beträgt beispielsweise die elektrostatische Feldstärke in der unteren Atmosphäre etwa 0,12 - 0,15 kV/m und kann sich durch Stürme auf einige kV/m erhöhen [53]. Ein statisches magnetisches Feld wird durch das Erdmagnetfeld hervorgerufen und nimmt einen Wert von etwa 50  $\mu\text{T}$  an [54].

Das elektrische Feld entsteht bei Gleichspannungsfreileitungen aufgrund der Übertragungsspannung und ist von den Wetterbedingungen, wie Regen und Sturm abhängig. Durch die Berechnungen im Rahmen dieser Studie wurde festgestellt, dass im Normalbetrieb der Grenzwert (Richtwert) für die elektrostatische Feldstärke von  $E_{0max} = 20 \text{ kV/m}$  1 m über der EOK nicht überschritten wird. Erst ab 25-30 kV/m kann dieses elektrische Feld durch die elektrostatische Aufladung der Haare oder der Kleidung wahrgenommen werden [54]. Jedoch dringt das elektrische Feld nicht in den menschlichen Organismus ein, da im Körper durch das Gleichfeld keine Ströme oder Spannungen induziert werden können. Deshalb sind keine biologischen Auswirkungen auf den menschlichen Organismus in Folge des elektrischen Feldes zu erwarten [55].

Die fließenden Nennströme erzeugen bei Gleichspannungsfreileitungen statische magnetische Gleichfelder. Direkte biologische Auswirkungen auf einen gesunden menschlichen Organismus sind ab etwa 400 mT zu erwarten [55]. Negative indirekte Auswirkungen auf Herzschrittmacher oder andere implantierte elektromedizinische Geräte im menschlichen Körper sind bereits ab etwa 0,5 mT wahrzunehmen [55]. Da die magnetische Flussdichte im Nennbetrieb etwa um den Faktor 2 - 5 kleiner ist als das magnetische Gleichfeld der Erde, sind die Auswirkungen auf den menschlichen Organismus als unbedenklich einzustufen [13].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass nach derzeitigem Wissensstand keine gesundheitsschädlichen Auswirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern von DC-Freileitungen zu erwarten sind [54]. Jedoch warnt die Weltgesundheitsorganisation WHO davor, dass in der Erforschung von negativen Auswirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern noch Nachholbedarf besteht. Bisherige Studien wurden nicht systematisch und ohne geeignete Methoden bzw. ohne Expositionsangaben durchgeführt [57].

## 7 Zusammenfassung

Im Mittelpunkt dieser Studie standen Untersuchungen zu den elektrischen und magnetischen Feldern von monopolen und bipolaren DC-Freileitungen. Auf Grundlage der Geometrie bereits verwendeter Mastkopfbilder (im Ausland) und typischer Leiterkonfigurationen wurden mit der Software WinField2012 / EFC 400 die Berechnungen durchgeführt. Mit Hilfe der Grenzwerte aus der Entwurfsfassung zur Novellierung der 26. BImSchV [66] und den Richtwerten aus den Berufsgenossenschaftlichen Regeln für Sicherheit und Gesundheit von Arbeitnehmern (BGR 11) wurde eine Beurteilung der maximalen elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte ein Meter über der Erdbodenoberkante vorgenommen.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass im Nennbetrieb die Grenzwerte bei monopolen und bipolaren DC-Freileitungen nicht überschritten wurden. Unter Berücksichtigung der Raumladung lässt sich jedoch feststellen, dass bei monopolen DC-Freileitungen in der 800-kV-Spannungsebene eine Vergrößerung des Abstands zwischen Leiterseil und Erdboden notwendig ist, um den zulässigen Grenzwert einzuhalten.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde weiterhin festgestellt, dass sich die Verteilung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte bei bipolaren Systemen mit und ohne spannungs-/stromlosen Neutralleiter weitgehend nicht unterscheiden. Einzig für ein Mastkopfbild in der  $\pm 400$ -kV-Spannungsebene, bei dem zwei Systeme horizontal auf einer Traversenebene angeordnet sind, wird durch den Neutralleiter eine Verminderung der elektrischen Feldstärke um 1,4 kV/m ein Meter über der Erdbodenoberkante festgestellt.

Die Untersuchungen wurden nicht nur für den Nennbetrieb, sondern auch für die Fehlerzustände Überspannung und Kurzschluss (Erdkurzschluss oder Leiter-Leiter-Kurzschluss) durchgeführt. Bei Fehlerzuständen ist ein Vergleich der maximalen elektrischen Feldstärke bzw. der magnetischen Flussdichte mit Grenzwerten nicht üblich, sodass eine Beurteilung der Felder im Fehlerzustand nicht vorgenommen wurde. Auch die Angaben über die zulässigen Kurzzeitauswirkungen von elektromagnetischen Gleichfeldern fehlen komplett in den bestehenden Normen und Richtlinien. Die ermittelten Berechnungswerte, welche die elektromagnetischen Gleichfelder bei Fehlerzuständen der DC-Freileitungen charakterisieren, ermöglichen grundsätzlich eine derartige Abschätzung.

Ein weiterer Schwerpunkt der Studie lag in den Betrachtungen zu den Isolationsabständen und Schutzstreifen von DC-Freileitungen. In der  $\pm 800$ -kV-Spannungsebene ist der Schutzstreifen mit etwa 90 m (bzw. einem Abstand von 45 m zur Leitungsachse) erwartungsgemäß am größten.

Abschließend wurde eine Beurteilung zu den Auswirkungen der elektrischen und magnetischen Gleichfelder auf die Umgebung vorgenommen. Da die zulässigen Grenzwerte für die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte im Nennbetrieb ein Meter über der Erdbodenoberkante nicht überschritten wurden, sind keine negativen Auswirkungen zu erwarten.

Es sei angemerkt, dass alle Berechnungen auf die minimalen zulässigen Abstände der Leiterseile zur Erdoberkante ausgerichtet wurden. Praktisch beziehen sich die unter diesen Annahmen ermittelten Werte auf die relativ kleinen Flächen lotgerecht zu den Punkten der maximalen Seildurchhänge. Somit stellen die ermittelten Werte die Worst-Case-Charakteristiken der Auswirkungen von stationären elektromagnetischen Gleichfeldern der DC-Freileitungen dar. Das bedeutet, dass die meisten der zu erwartenden Feldkennwerte noch niedrigere Zahlenwerte innerhalb der Spannfeldweite annehmen.

Zusammenfassend ist zu schlussfolgern, dass ein Betrieb von monopolarer oder bipolarer VSC-HGÜ-Freileitungen mit den verwendeten Mastkopfgeometrien und den getroffenen Annahmen praktisch und ohne negative Auswirkungen realisiert werden kann.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Kimbark E.D.: Direct Current Transmission, Volume 1, Wiley-Interscience, 1971
- [2] Wilhelm D., Piwko R. J.: *High Voltage Direct Current Handbook*, First Edition, EPRI 1994
- [3] Sood V.K.: HVDC and FACTS Controllers, Application of Static Converter in Power Systems, Kluwer Academic Publishers, 2004
- [4] Breuer G.D., et.al.: HVDC Surge Diverters and their Application for Overvoltage Protection on HVDC Schemes, CIGRE Report 33-14, Paris 1972
- [5] Käuferle J., Povh D.: Concepts of Overvoltage and Overcurrent Protection of HVDC Converters, CIGRE Report 14-08, Paris 1978
- [6] Beringer J., et.al.: Design of Water cooled Thyristor Valve Group for Extension of Manitoba Hydro HVDC System, CIGRE Report 14-05, Paris 1976
- [7] Schettler F., Huang H., Christl N.: *HVDC Transmission Systems using Voltage Sourced Converters – Design and Applications*, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 2000
- [8] Magg T.G., Mutschler H.D., Nyberg S.; Wasborg J., Thunehed H., Sandberg B.: Caprivi Link HVDC Interconnector: Site selection, geophysical investigations, interference impacts and design of the earth electrodes, CIGRE Session Paper B4-302, Paris, 2010
- [9] Bahrmann M.P.: *Overview of HVDC Transmission*, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Oct 29<sup>th</sup> – Nov 1<sup>st</sup>, 2006
- [10] Lazaridis L.P.: Economic Comparison of HVAC and HVDC Solutions for Large Offshore Wind Farms under Special Consideration of Reliability, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2005
- [11] CIGRE WG B4.46 Report, VSC based HVDC for bulk power transmission – economic aspects and comparison with other AC and DC technologies, 2011
- [12] Bahrman M., Johnson B.K.: *The ABCs of HVDC Transmission Technologies*, IEEE Power & Energy magazine, pp.32-44, March/April 2007
- [13] LeDu A., Taisne J.P., Birret D., Couraud X.: *The Sardinia-Corsica-Italy Multiterminal dc Scheme*, CIGRE SV 14, Paper 13-8, 1982
- [14] Reeve J.: *Multiterminal HVDC Power Systems*, IEEE T-PAS, Vol. 99, No. 2, March/April 1980
- [15] Guide for Planning DC Links Terminating at AC Systems Location Having Low Short-Circuit Capacity – Part 1: AC/DC Interaction Phenomena, CIGRE Brochure No. 68, Paris, June 1992

- [16] Reeve J., Chen S.P.: *Digital Simulation of a Multiterminal HVDC Transmission System*, IEEE T-PAS, Vol. 103, No. 12, December 1984
- [17] Ishikawa M., Horiuchi S., Irokawa S., Imai K., Hirose S., Sekiya K.: *Simulator Study of Multiterminal HVDC Transmission System without fast Commutation*, IEEE T-PWRD, Vol. , No. 3, July 1986
- [18] Sakurai T., Goto K.: A new Control Method for Multiterminal HVDC Transmission without fast Commutation Systems, IEEE T-PAS, Vol. 102, No. 5, May 1983
- [19] Long W.F., Reeve J.: *Application Aspects of Multiterminal DC Power Transmission*, IEEE T-PWRD, Vol. 5, No. 4, pp. 2084-2098, November 1990
- [20] Guide for Planning DC Links Terminating at AC Systems Location Having Low Short-Circuit Capacity – Part 2: Planning Guidelines, CIGRE Brochure No. 115, Paris, September 1997
- [21] Arrilaga J.: *High Voltage Direct Current Transmission*, 2nd Edition, The Institution of Electrical Engineers, 1998
- [22] Karlecik-Maier F.: *A New Closed Loop Control Method for HVDC Transmission*, IEEE T-PWRD, Vol. 11, No. 4, pp. 1955-1960, October 1996
- [23] Thepparat P.: Analysis of the Combined and Coordinated Control Method for HVDC Transmission, Shaker Verlag, Aachen, 2010
- [24] Ainsworth J.D.: *Developments in the Phase-Locked Oscillator Control System for HVDC and other large Convertors*, IEE Conference Publication 255 on AC and DC Power Transmission, pp. 98-103, September 1985
- [25] Sucena-Paiva J.P., Freris L.L.: *Stability of a DC Transmission Link between strong AC Systems*, IEE Proc.120 (1973), pp. 1233-1243
- [26] Ainsworth J.D.: The Phase-Locked Oscillators – A New Control System for Controlled Static Convertors, IEEE PAS, Vol.120, no.10, pp.1233-1242, October 1973
- [27] It's time to connect – a technical description of HVDC light, ABB Grid Systems - HVDC, Ludvika, Sweden, March 2008.
- [28] Westerweller T., Friedrich K., Armonies U., Orini A., Parquet D., When, S.: Transbay cable – world's first HVDC system using multilevel voltage-sourced converter, CIGRE Session Paris, Paper B4-101-2010, August 2010
- [29] CIGRE SC B4 Colloquium, Northern European experiences and future needs of HVDC & FACTS applications, Bergen, Norwegen, 10.06. – 12.06.2009
- [30] Stern E., Nach J., Schoeniger C., Bartzsch C., Acquotta G., Bacchini, M., Orini A.: *The Neptune Regional Transmission System 500 kV Project*, Paper B4-118, CIGRE Session Paris, 2008

- [31] Stark G.: Energieübertragung mit HGÜ-Technologie und Projektbeispiele, Beitrag zur ETG-Fachtagung „Transport von elektrischer Energie mit Freileitungen und Kabeln“, ETH Zürich, 2. April 2009
- [32] Barberis N.; Todorovic J.; Ackermann T.: *Loss evaluation of HVAC and HVDC transmission solutions for large offshore wind farms*, Electronic Power Systems Research 76 (2006) 916-927, 2006
- [33] HVDC PLUS – Basic and Principle of Operation, Siemens Energy Sector, PTD H 1 M7Re, V1, March 7<sup>th</sup>, 2008.
- [34] Adapa, R. (ed.): *Advanced HVDC Systems at ±800 kV and Above*, Electric Power Research Institute (EPRI) Report 1013857, November 2007
- [35] Vancers, I.; Christofersen, D.J.; Leirbukt, A.; Benett, M.G.: *A survey of the reliability of HVDC systems throughout the world during 2005-2006*, CIGRE Paper B4-119, Paris Session, 2008
- [36] Plotzke, O.: Untersuchung des ungestörten magnetischen und elektrischen Felds unter maximaler Last bei einer Nenngleichspannung von ±800 kV unter einer Freileitung, Abschlussbericht A-00468 / 2009, Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie FGEU mbH, November 2009
- [37] Ferrero, G.M.: *The Transmission System*, Presentation at the World Energy Council – International Forum on the Grand Inga Project, 6-17 March, 2007
- [38] Zhenjian Shengda Group Co., Ltd. – Produktinformation über Angle Steel Towers, 2009
- [39] Aström, U.; Lescale, V.: *Converter Stations for 800 kV HVDC*, Proceedings of the International Power System Technology Conference, PowerCon, Chongqing, China, 22-26 October 2006
- [40] Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm) vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503)
- [41] 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV); Bundesgesetzblatt Jahrgang 1996, Teil 1, Nr. 66, 16.12.1996
- [42] Lundkvist, Gutmann, Weimers: Feasibility Study for converting 380 kV AC lines to hybrid AC/ DC lines, EPRI's High-Voltage Direct Current & Flexible AC Transmission Systems Conference; Westminster, November 2011
- [43] Oeding, Oswald: *Elektrische Kraftwerke und Netze*; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 6. Auflage, 2004
- [44] Machbarkeitsstudie zur Verknüpfung von Bahn- und Energieleitungsinfrastrukturen, Leibniz Universität Hannover; TU Dresden, TU Clausthal, Juni 2006

- [45] Erhöhte Übertragungsfähigkeit von Freileitungen durch Umbau von Drehstrom auf Gleichstrom; ABB Technik 3/1997, 1997
- [46] Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik e.V.: *Elektrische Hochleistungsübertragung und -verteilung in Verdichtungsräumen*; Mannheim, Studie 1977
- [47] Crastan V., Westermann D., *Elektrische Energieversorgung III, Dynamik, Regelung und Stabilität, Versorgungsqualität, Netzplanung, Betriebsplanung und -führung, Leit- und Informationstechnik, FACTS, HGÜ*, ISBN-10: 3642200990, Springer, Berlin, 2011
- [48] Benz, Görner: Freileitungen und Erdkabel – Möglichkeiten der Stromübertragung mit Gleichstrom; Technikdialog der BNetzA in Hannover, 2012
- [49] BGR 11 – Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit; Oktober 2001, aktualisierte Fassung 2006
- [50] EPRI: Transmission Line Reference Book HVDC to  $\pm 600$  kV. Based on HVDC Transmission Research Project RP 104; Palo Alto, USA (1976)
- [51] Zehong, Jiayu, Jun, Yong, Yong: Study on the Total Electric Field at the Ground Level Under Two-circuit  $\pm 800$  kV DC Transmission Lines in the Same Corridor; China 2011
- [52] Oecos GmbH: *Umweltauswirkungen unterschiedlicher Netzkomponenten*, im Auftrag der Bundesnetzagentur, September 2012
- [53] ORNL (Oak Ridge National Laboratory, Hrsg.) (1997): *HVDC Power Transmission Environmental Issues Review*. ORNL/Sub/95-SR893/2; Bearbeiter: Bailey, W.H., Weil, D.E., Stewart, J.R.
- [54] NRL (National Radiation Laboratory, Ministry of Health, New Zealand) (2008): Electric and magnetic fields and your health. Information on electric and magnetic fields associated with transmission lines, distribution lines and electrical equipment
- [55] Health Science Group (2011): Western Alberta Transmission Line: Health and Environmental Assessment of the Electrical Environment
- [56] ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) 2009: *Guide - Lines on limits of exposure to static magnetic fields*. Health Physics 96(4): 504-514
- [57] WHO – World Health Organisation (2006): *Research Agenda for Static Fields*. [http://www.who.int/peh-emf/research/smf\\_research\\_agenda\\_2006.pdf](http://www.who.int/peh-emf/research/smf_research_agenda_2006.pdf) (Zugriff: 13.06.2012)
- [58] Siemens Energy: High Voltage Direct Current Transmission; Erlangen, 2012

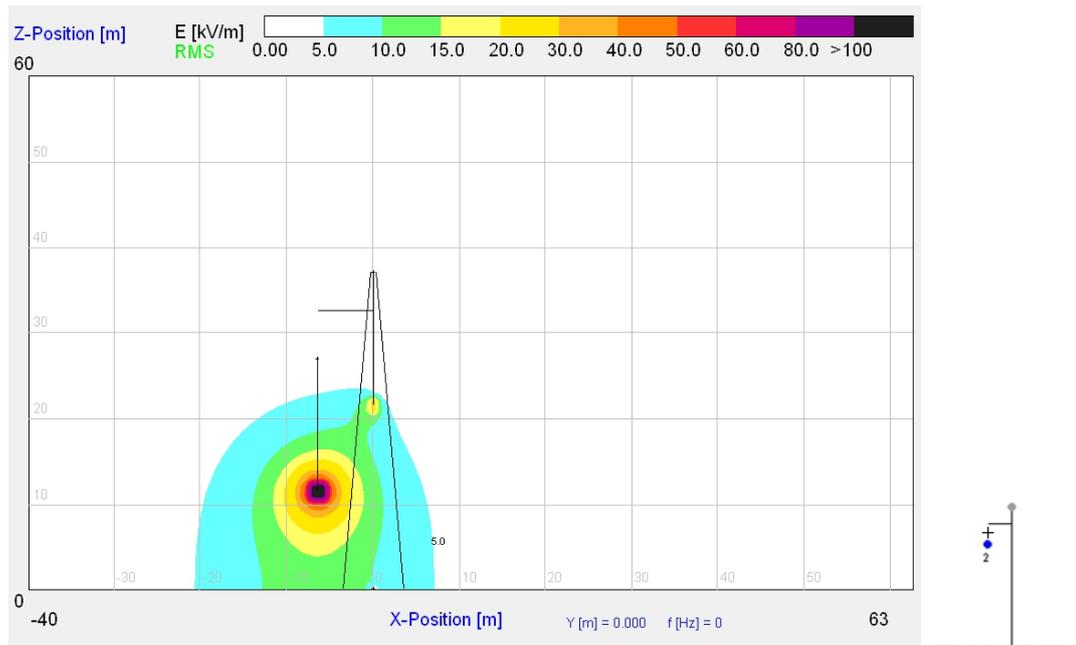
- [59] Salah F. A. Sharif, Ahmed Kasikci: The Environmental Impacts of UHVDC Power Transmission Proposed Line from Iraq to Europe through Turkey, November 2012
- [60] Ju Yong, Lu Jiayu etc.: Study on Simulating Test of Total Electric Field of Double-Circuit DC Transmission Line; Beijing, April 2010
- [61] Maruvada P. Sarma, Wasyl Janischewskyj: Analysis of Corona Losses on DC Transmission Lines Part II – Bipolar Lines; October 1969
- [62] Zheng Zhang, Rong Zeng, Zhanqing Yu: Measurement of Corona Characteristics and Electromagnetic Environment of  $\pm 800$  kV HVDC Transmission Lines under High Altitude Condition; Beijing, August 2009
- [63] P. Sarma Maruvada: Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Transmission Lines – Comparison of Calculations and Measurements; Januar 2012
- [64] В. Чудный. Оптимизация параметров воздушных линий постоянного тока сверх- и ультравысокого напряжения с учетом требования надежности и экологии. Автореф. дисс. канд. тех. наук, Санкт-Петербургский государственный технический университет, Санкт-Петербург 2002
- V. Chudny: Optimierung der Parameter von DC-Höchstspannungsfreileitungen unter Berücksichtigung der Anforderungen von Versorgungssicherheit und Ökologie; Kurzreferat der Dr.-Ing.-Dissertation, St. Petersburger Staatliche Technische Universität, St. Petersburg 2002 (auf Russisch)
- [65] ГОСТ 29176-91. Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока. Short-circuits in electrical installations. Calculation methods in d. c. electrical equipment. 2004 (auf Russisch)
- [66] Verordnung zur Änderung der Vorschriften über elektromagnetische Felder und das telekommunikationsrechtliche Nachweisverfahren; Entwurfsfassung zur Novellierung der 26. BImSchV (2013)
- [67] ABB: Der Beitrag von HVDC Light zum zukünftigem Stromsystem; E. Spahic; Berlin, 6.05.2010
- [68] Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH: *WinField 2012 / EFC 400*; Berlin, 1997-2013

## Anhang A1 – Nennbetrieb monopolarer Systeme

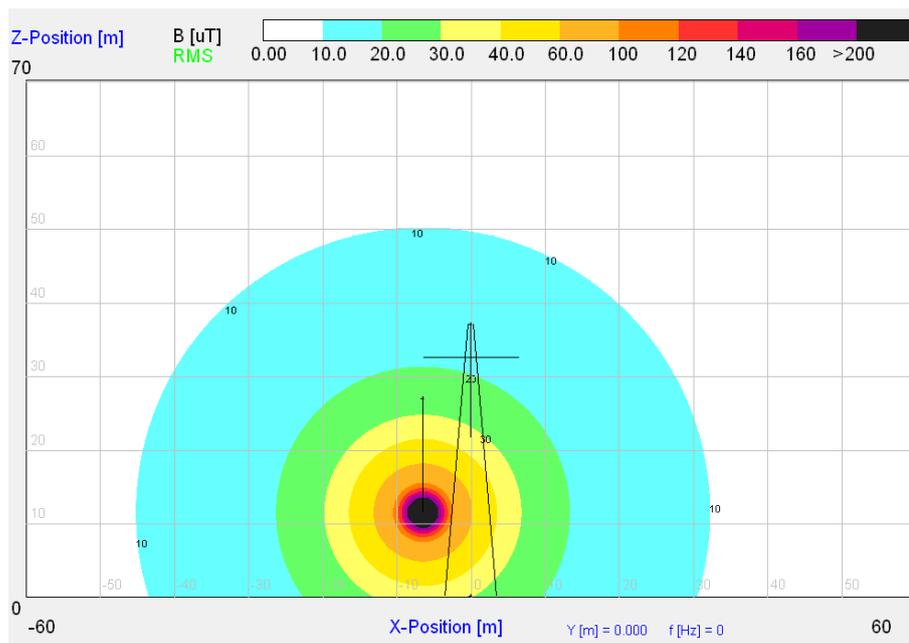
### Elektrische Feldstärkeverteilung und magnetische Flussdichteverteilung im Querschnitt (xz-Ebene)

+ 400-kV-Spannungsebene

Bodenabstand 11,5 m, ohne Neutralleiter

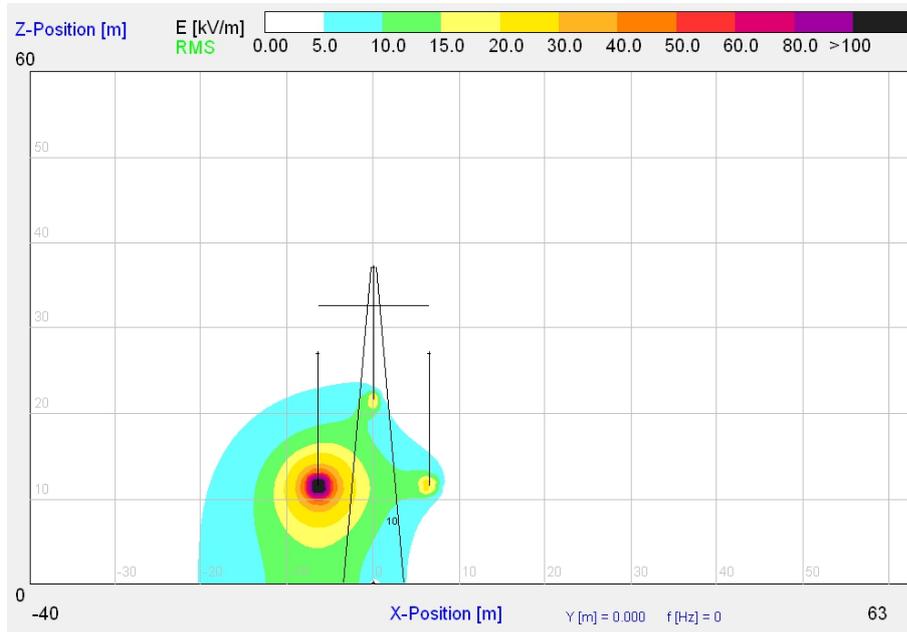


Elektrische Feldstärkeverteilung

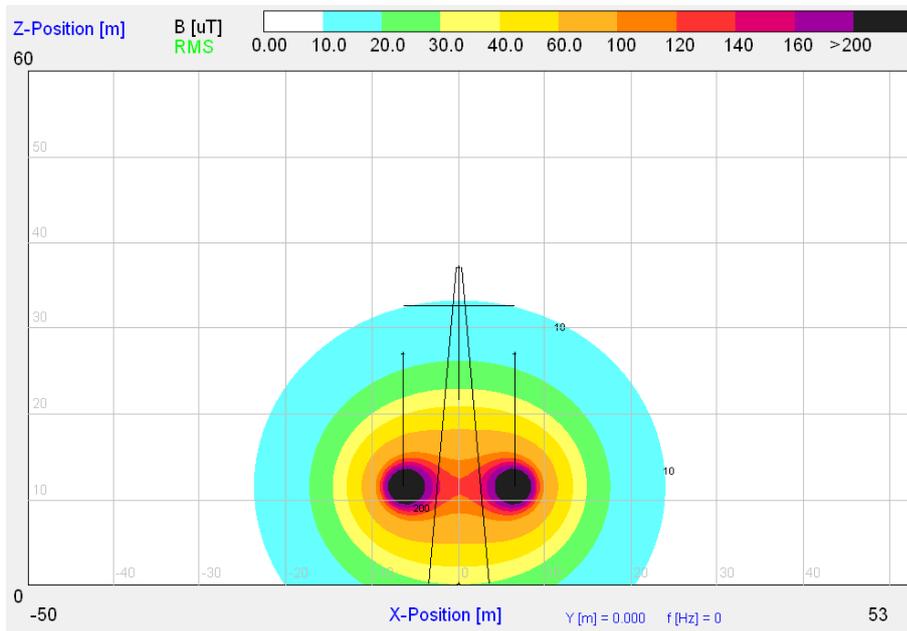


Magnetische Flussdichteverteilung

Bodenabstand 11,5 m, mit Neutralleiter



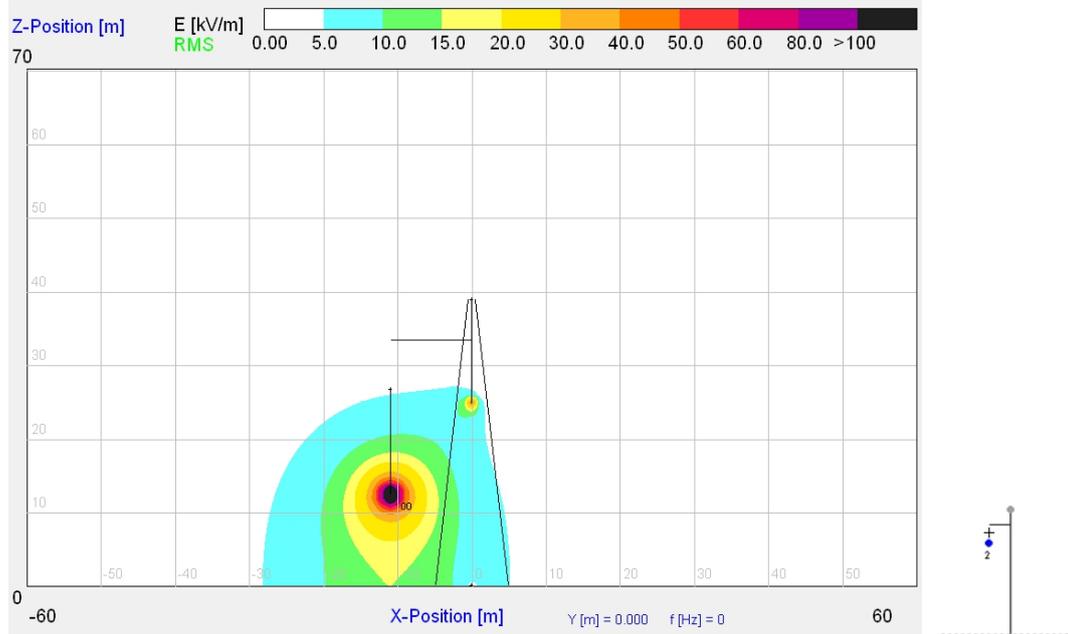
Elektrische Feldstärkeverteilung



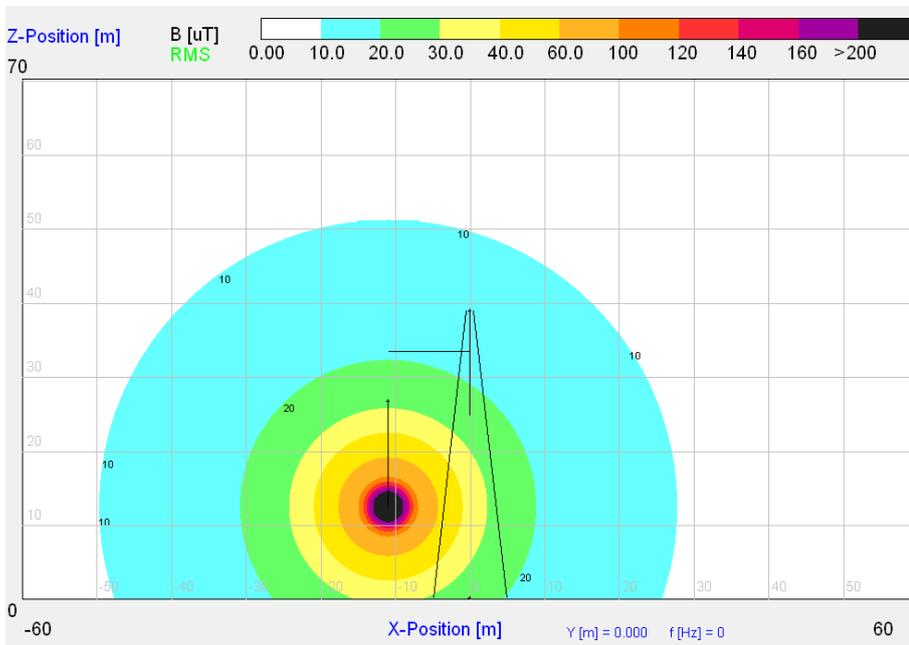
Magnetische Flussdichteverteilung

**+ 500-kV-Spannungsebene**

*Bodenabstand 12,5 m, ohne Neutralleiter*

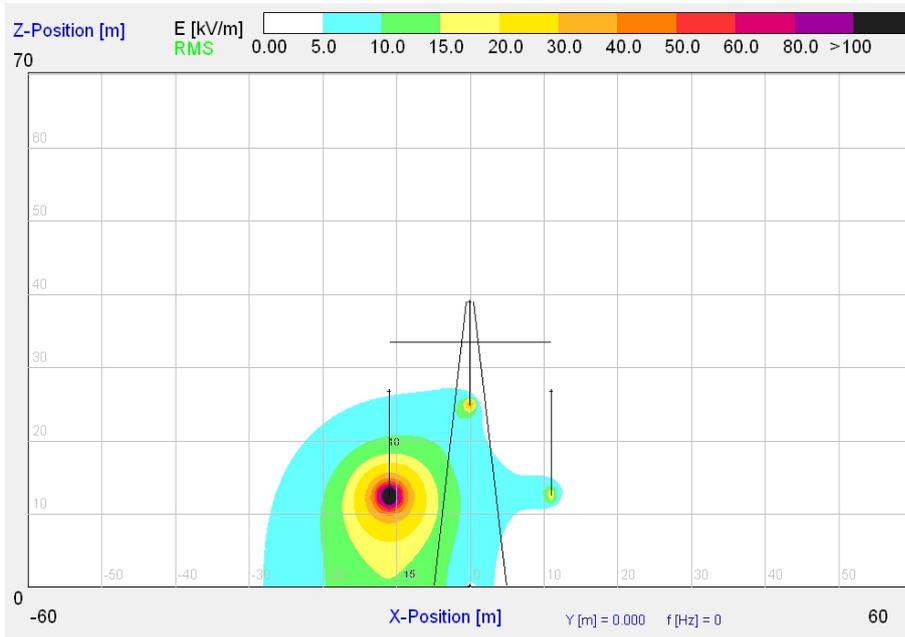


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

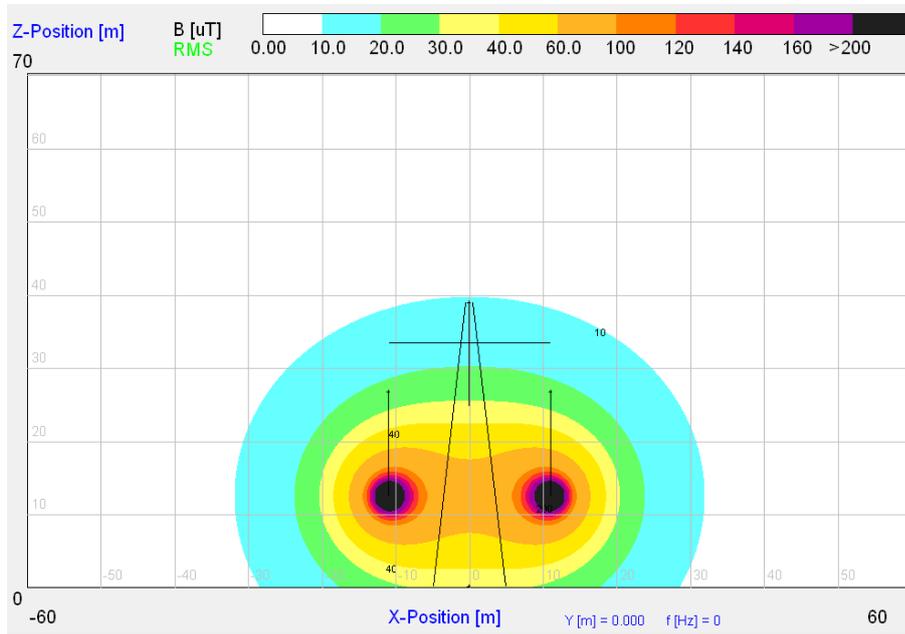


*Magnetische Flussdichteverteilung*

*Bodenabstand 12,5 m, mit Neutralleiter*



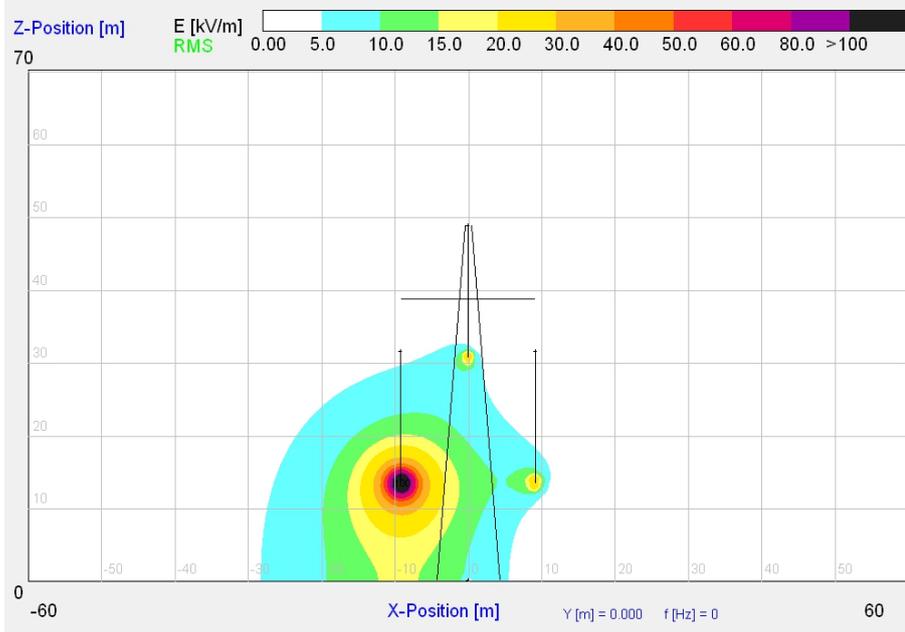
*Elektrische Feldstärkeverteilung*



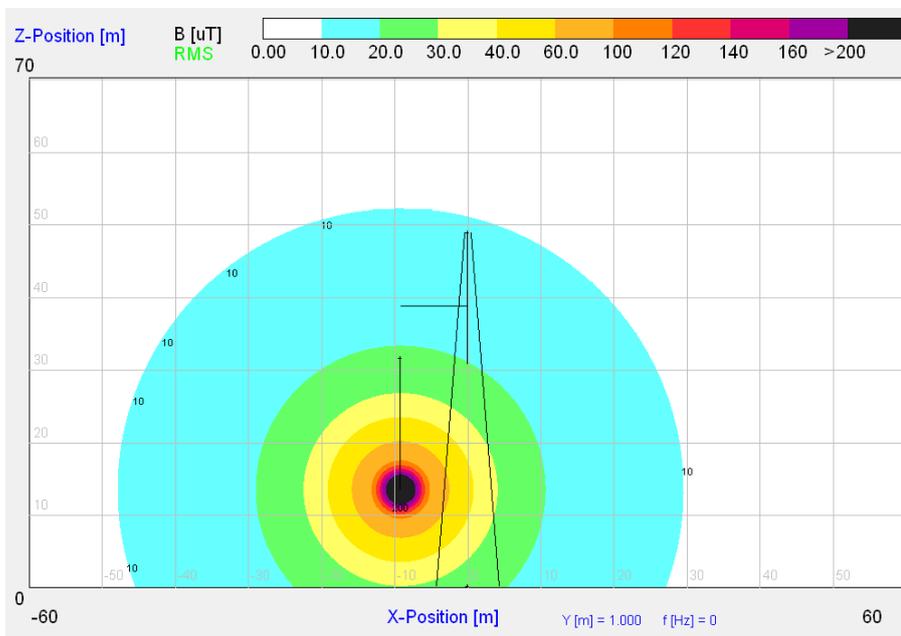
*Magnetische Flussdichteverteilung*

**+ 600-kV-Spannungsebene**

*Bodenabstand 13,5 m, ohne Neutralleiter*

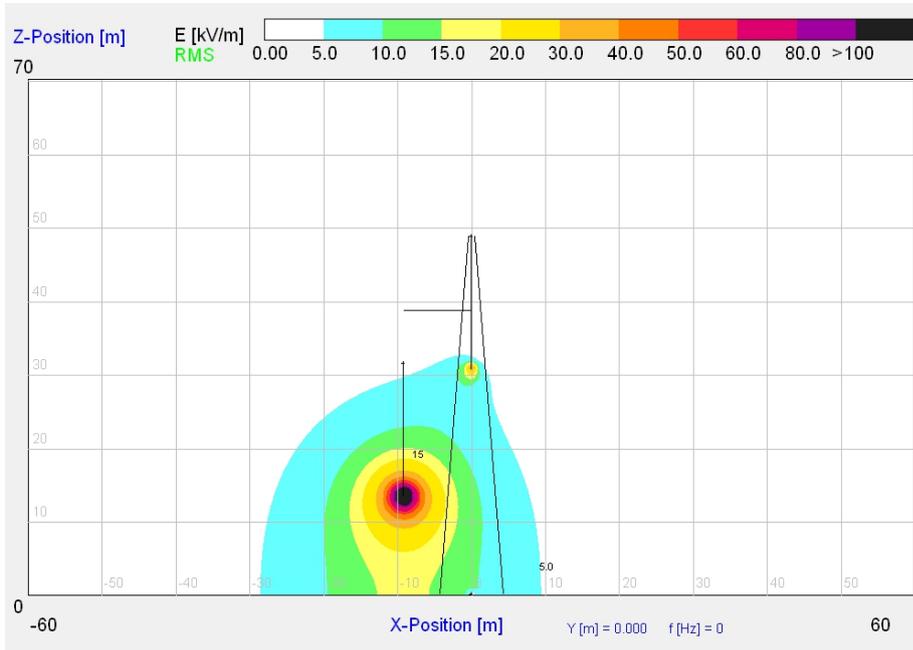


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

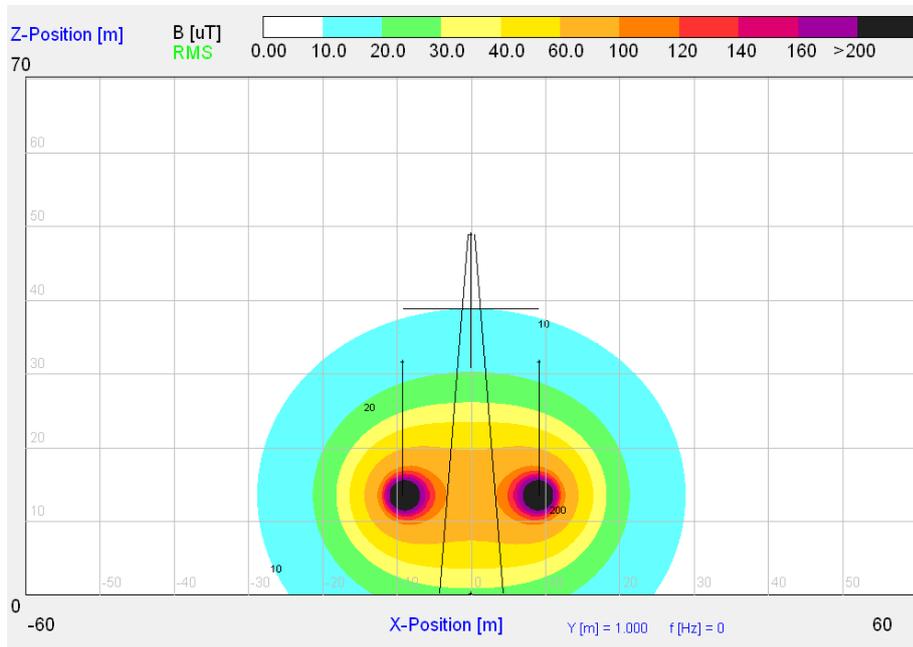


*Magnetische Flussdichteverteilung*

*Bodenabstand 13,5 m, mit Neutralleiter*



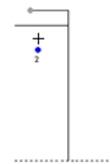
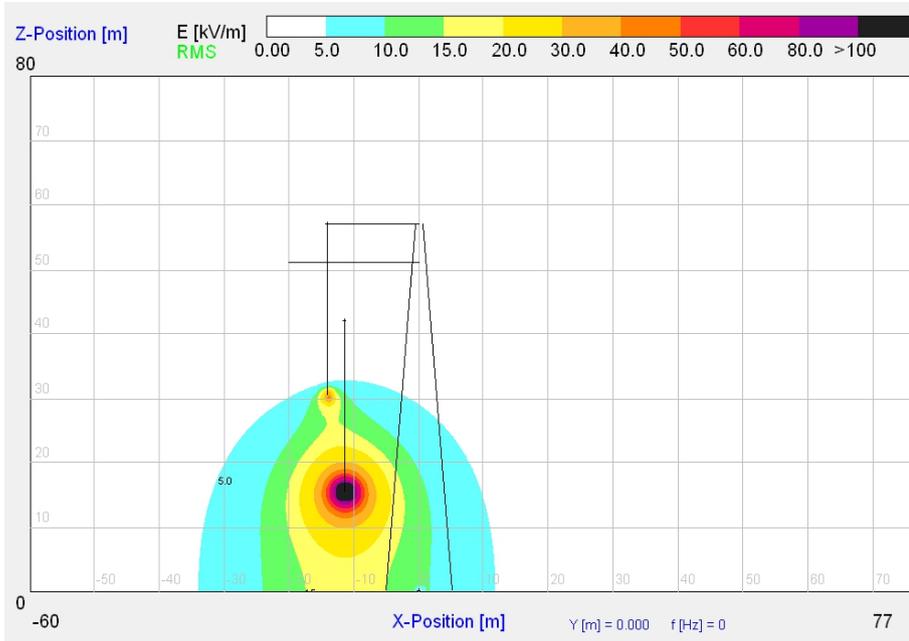
*Elektrische Feldstärkeverteilung*



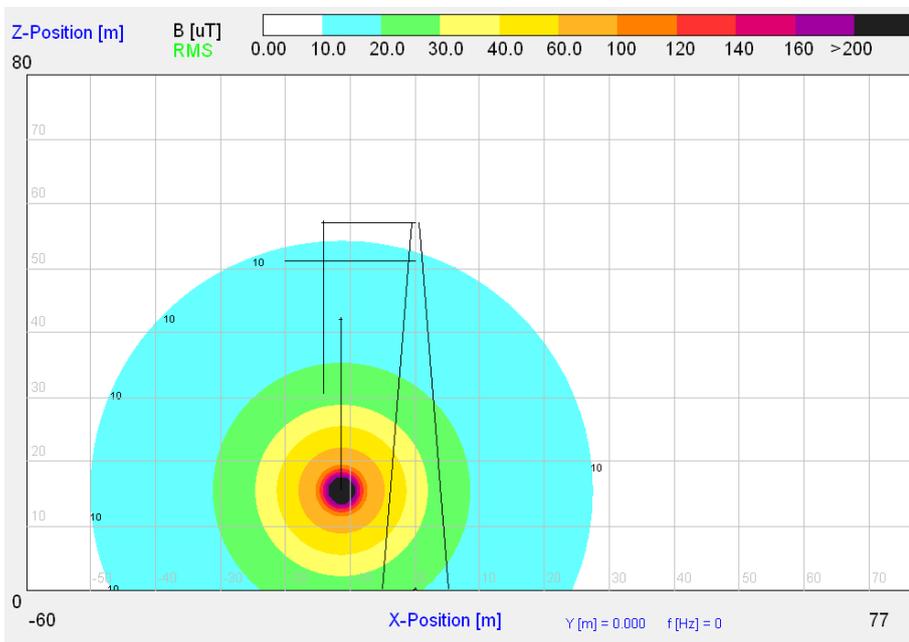
*Magnetische Flussdichteverteilung*

**+ 800-kV-Spannungsebene**

*Bodenabstand 15,5 m, ohne Neutralleiter*

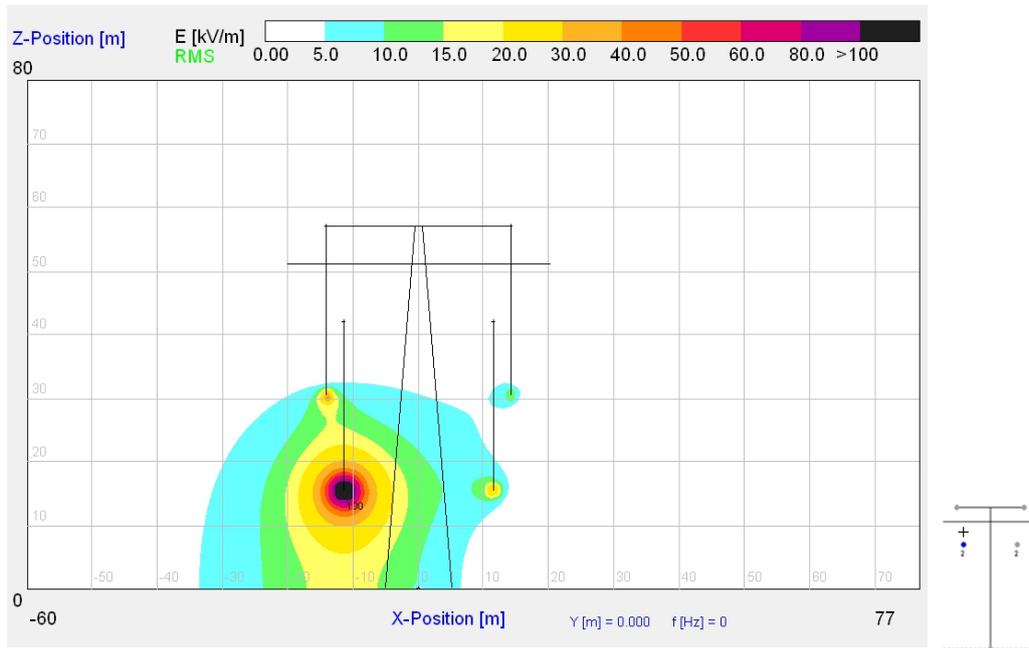


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

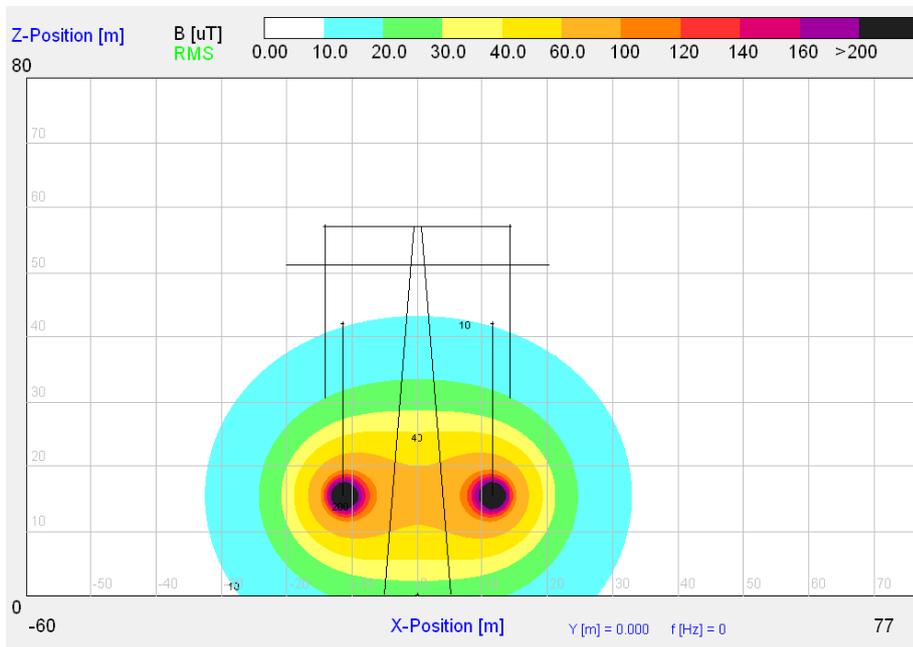


*Magnetische Flussdichteverteilung*

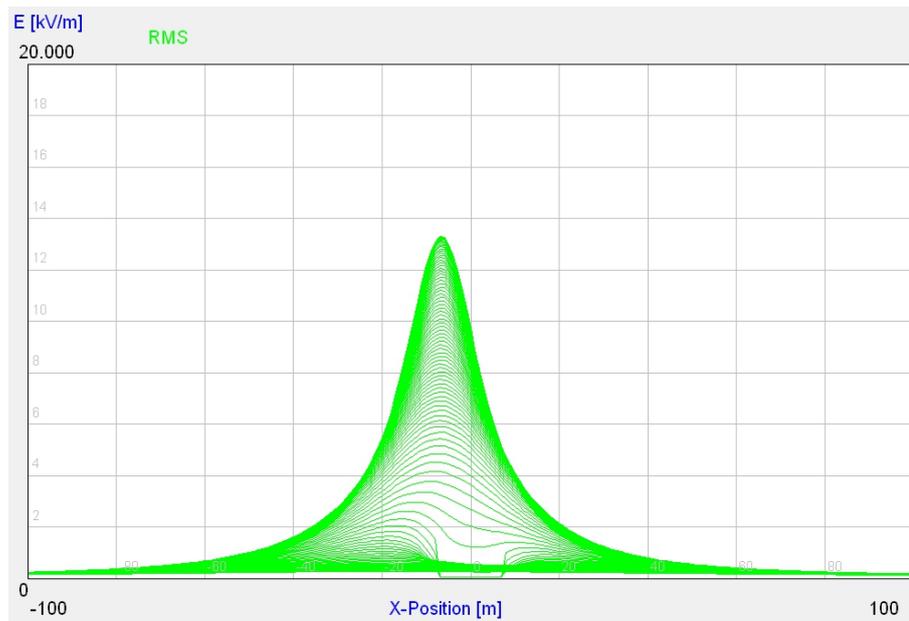
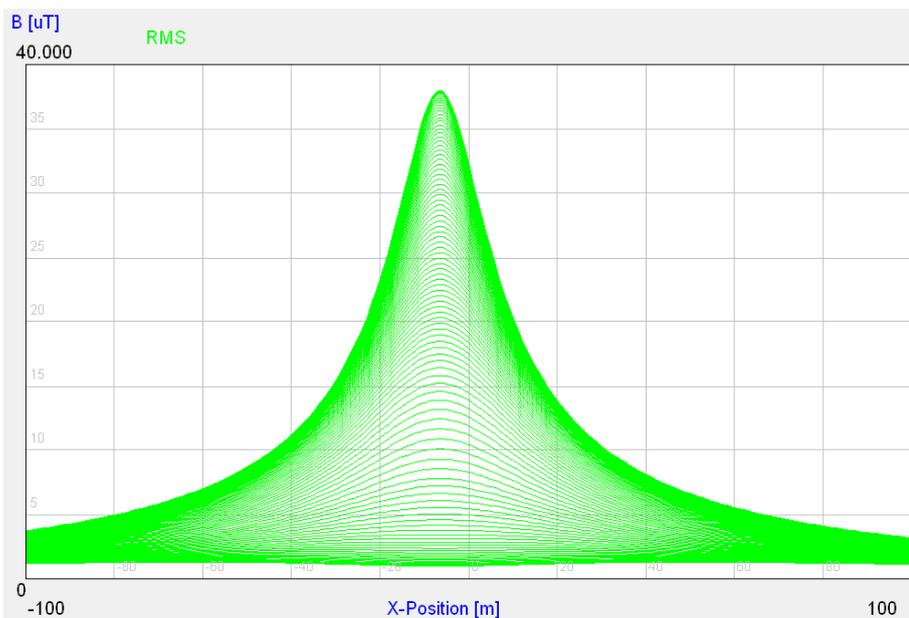
Bodenabstand 15,5 m, mit Neutralleiter



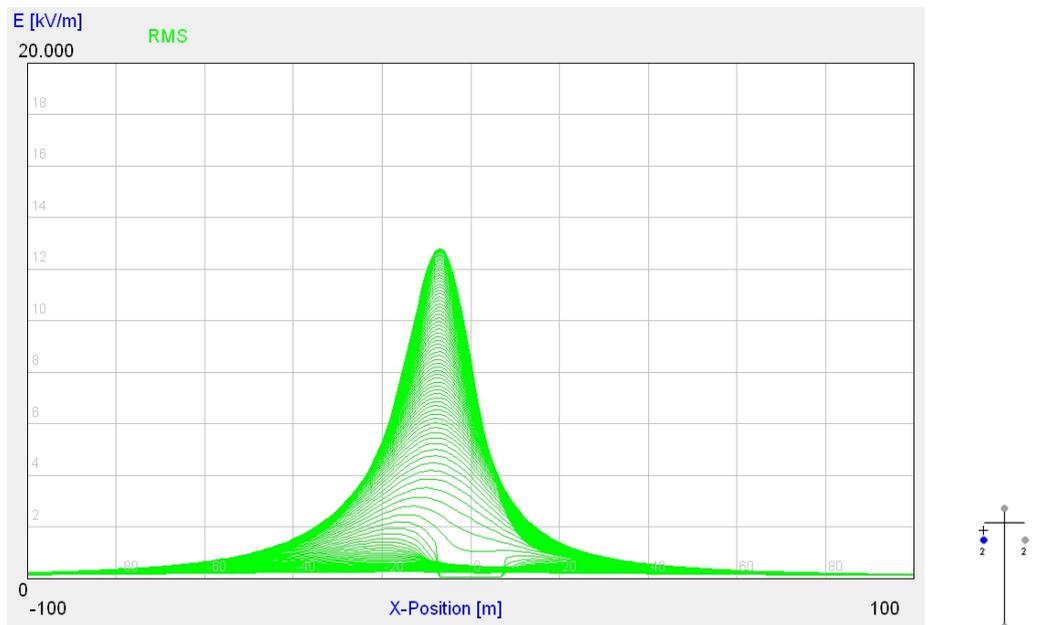
Elektrische Feldstärkeverteilung



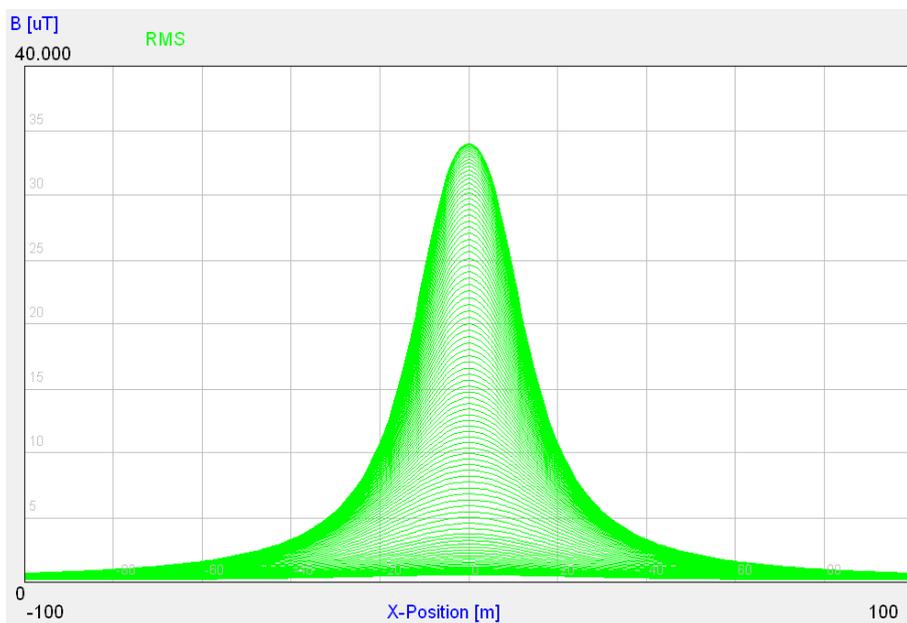
Magnetische Flussdichteverteilung

**Elektrischer Feldstärkeverlauf und magnetischer Flussdichteverlauf 1 m über der Erdoberkante****+ 400-kV-Spannungsebene***Bodenabstand 11,5 m, ohne Neutralleiter**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,3 \text{ kV/m}$ )**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 38 \text{ µT}$ )*

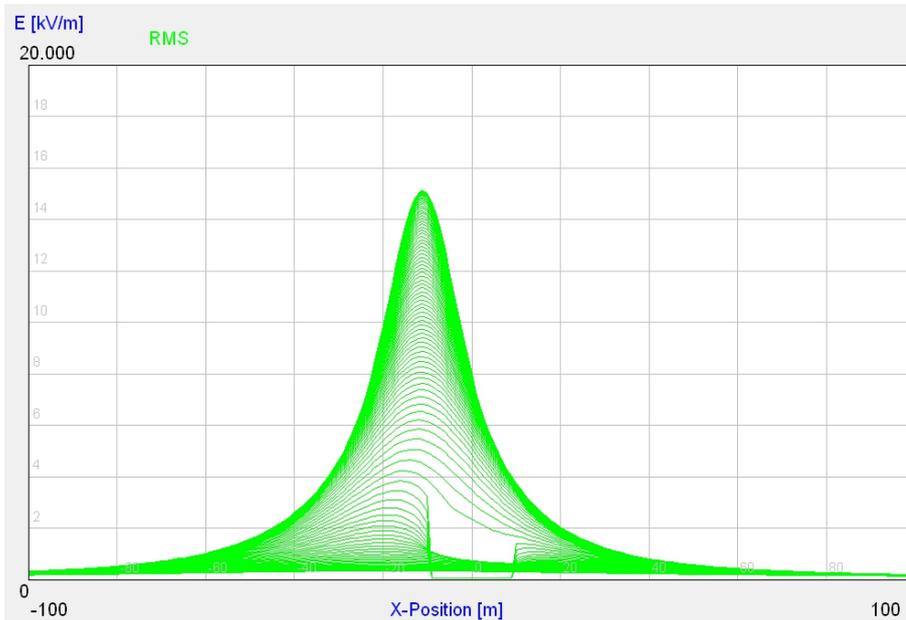
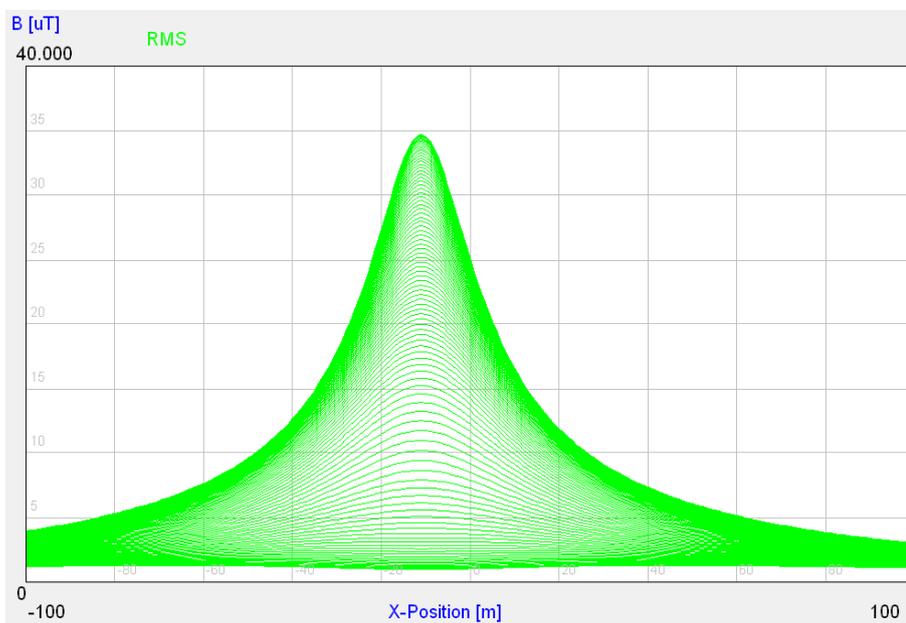
Bodenabstand 11,5 m, mit Neutralleiter



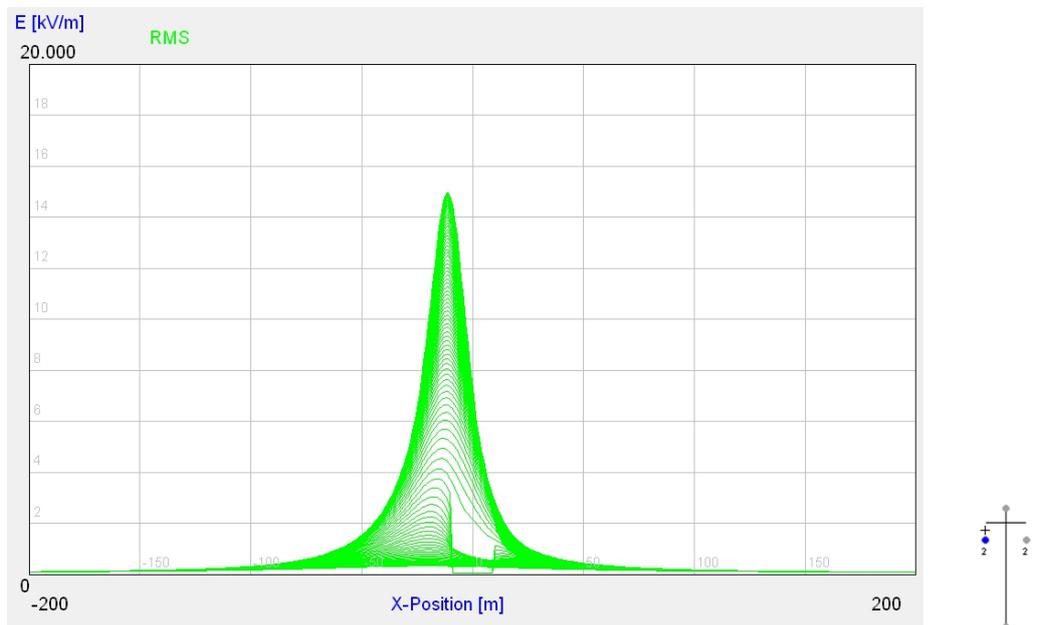
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 12,8 \text{ kV/m}$ )



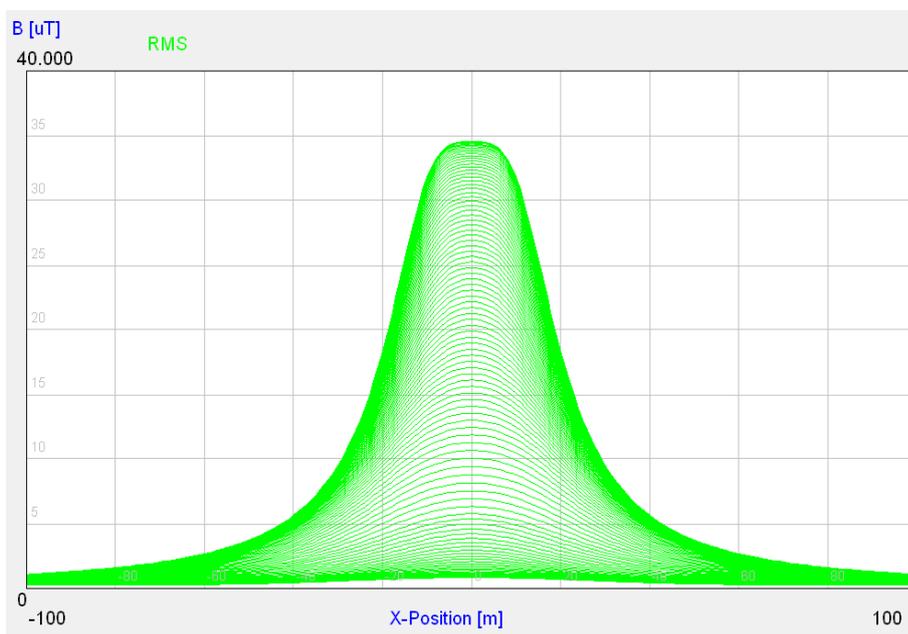
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 34 \text{ µT}$ )

**+ 500-kV-Spannungsebene***Bodenabstand 12,5 m, ohne Neutralleiter**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 15,1$  kV/m)**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 34,7$   $\mu\text{T}$ )*

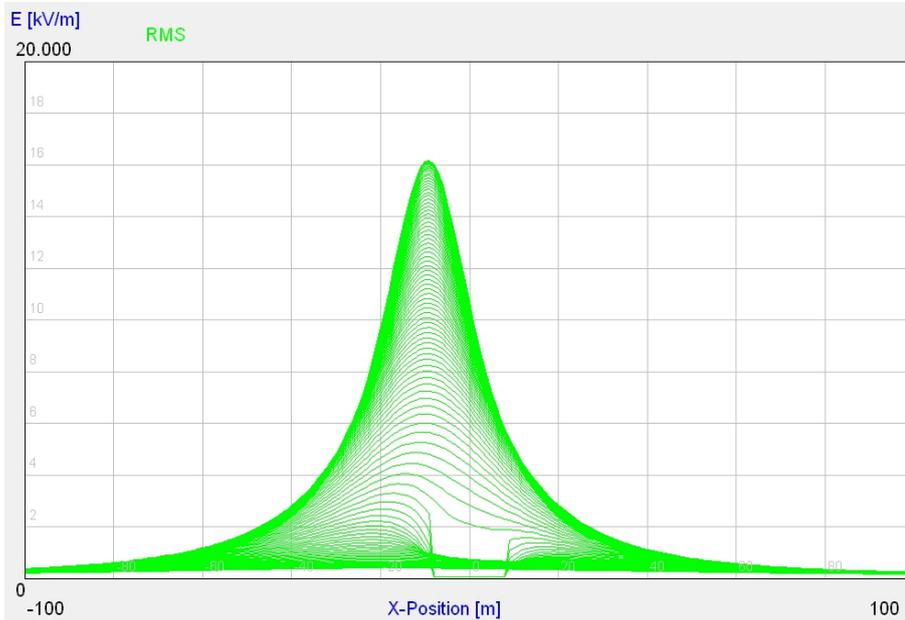
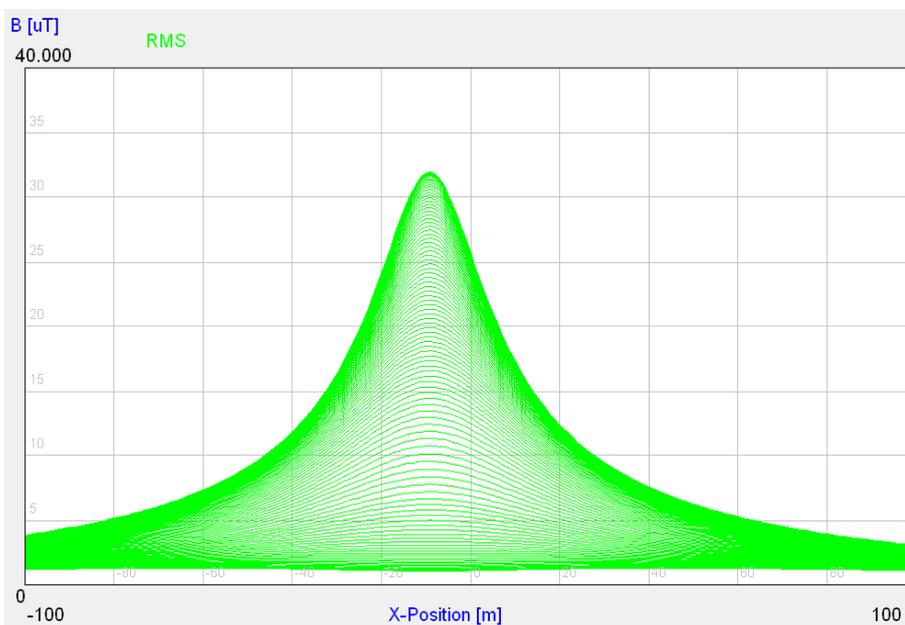
Bodenabstand 12,5 m, mit Neutralleiter



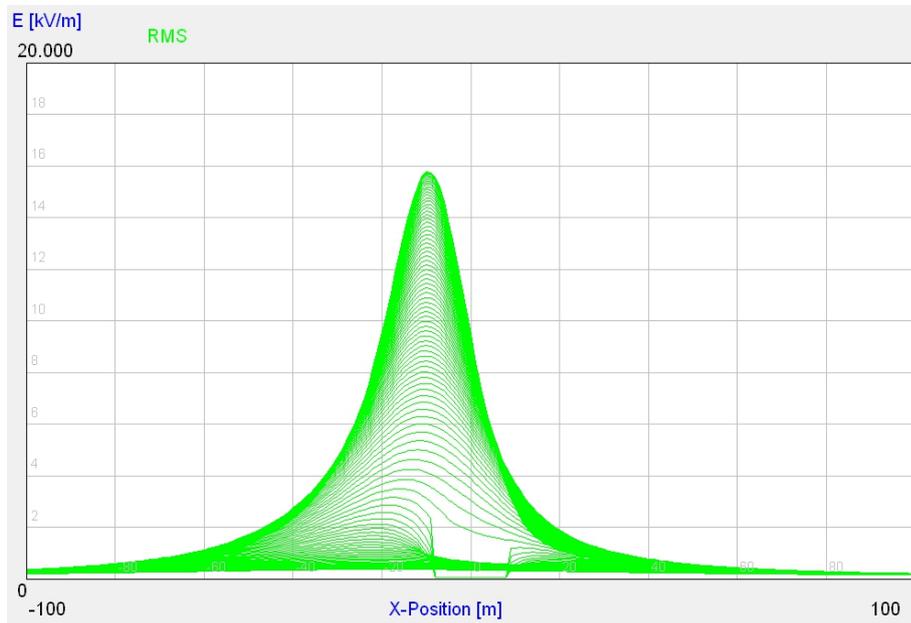
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{max} = 15$  kV/m)



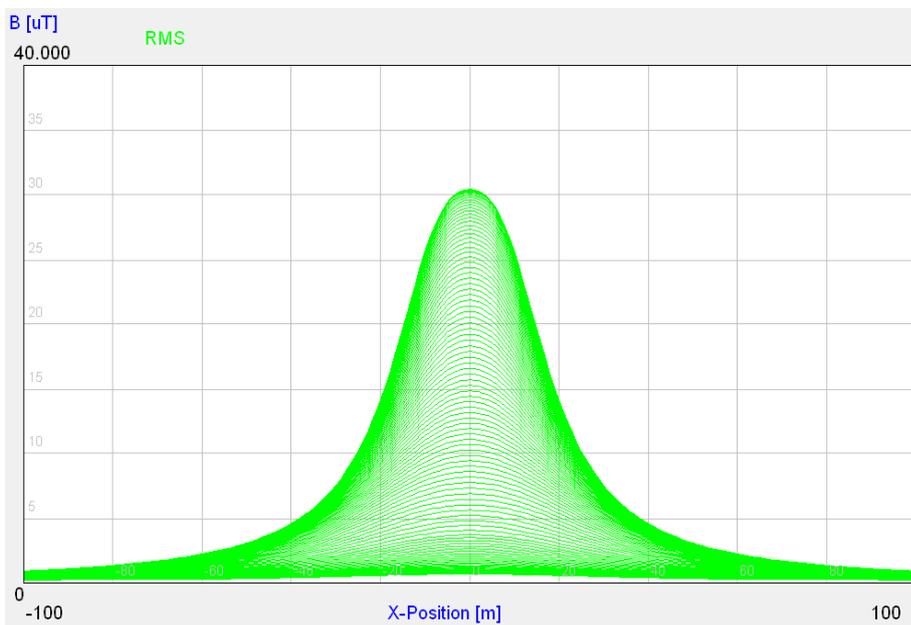
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 34,6$   $\mu T$ )

**+ 600-kV-Spannungsebene***Bodenabstand 13,5 m, ohne Neutralleiter**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 16,2$  kV/m)**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 31,9$   $\mu\text{T}$ )*

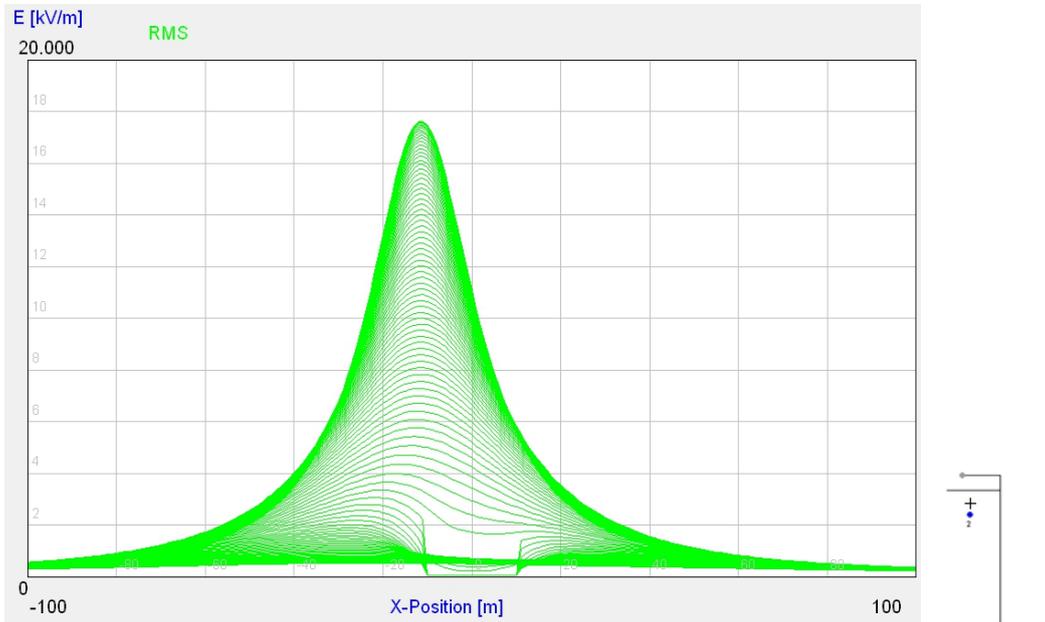
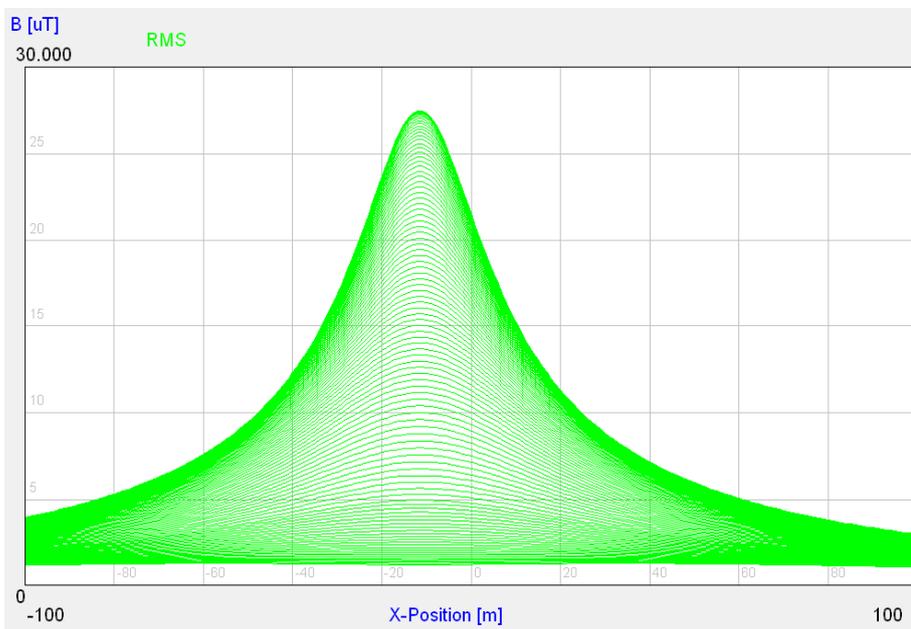
Bodenabstand 13,5 m, mit Neutralleiter



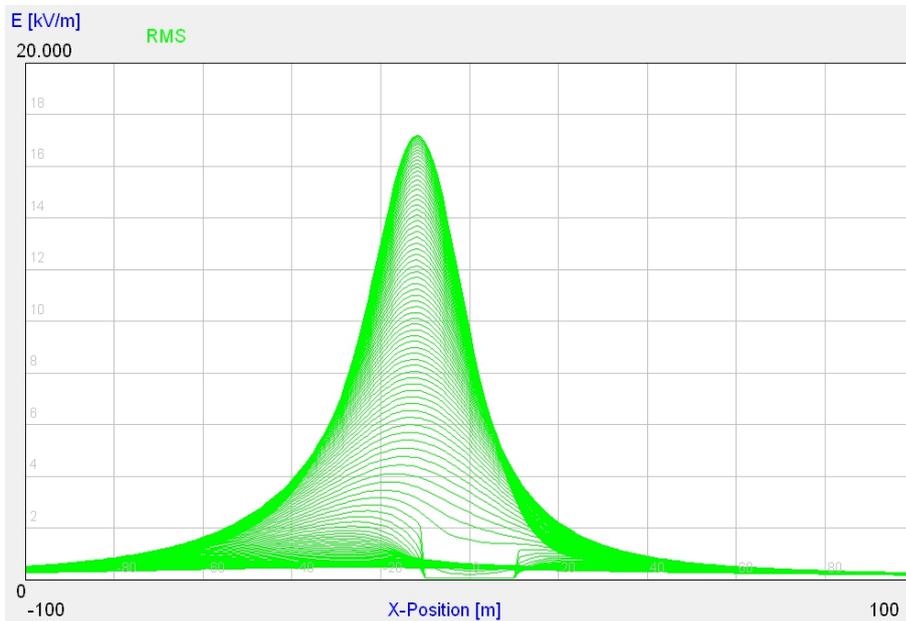
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 15,8 \text{ kV/m}$ )



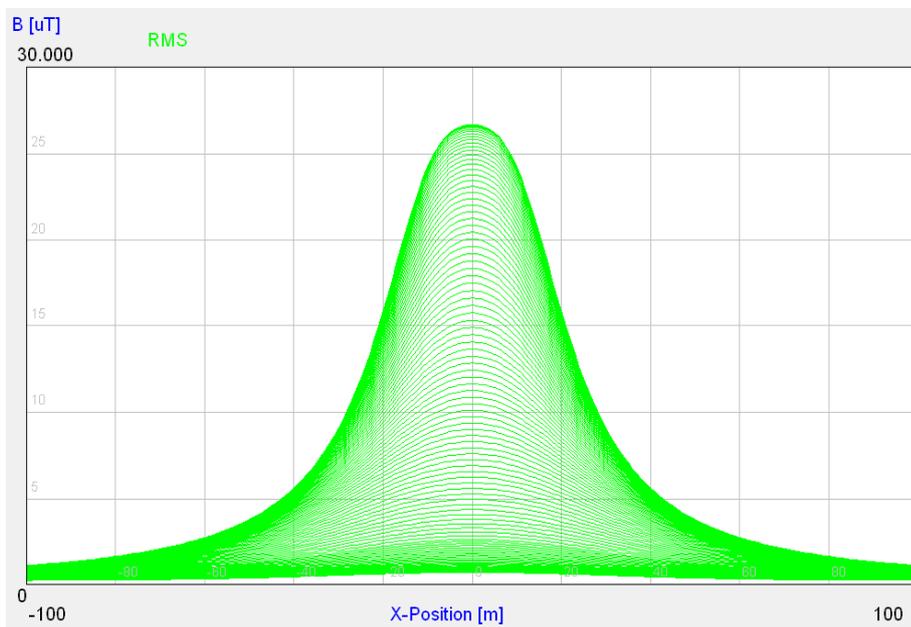
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 30,4 \mu\text{T}$ )

**+ 800-kV-Spannungsebene***Bodenabstand 15,5 m, ohne Neutralleiter**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 17,6$  kV/m)**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 27,4$   $\mu\text{T}$ )*

Bodenabstand 15,5 m, mit Neutralleiter



Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 17,2 \text{ kV/m}$ )



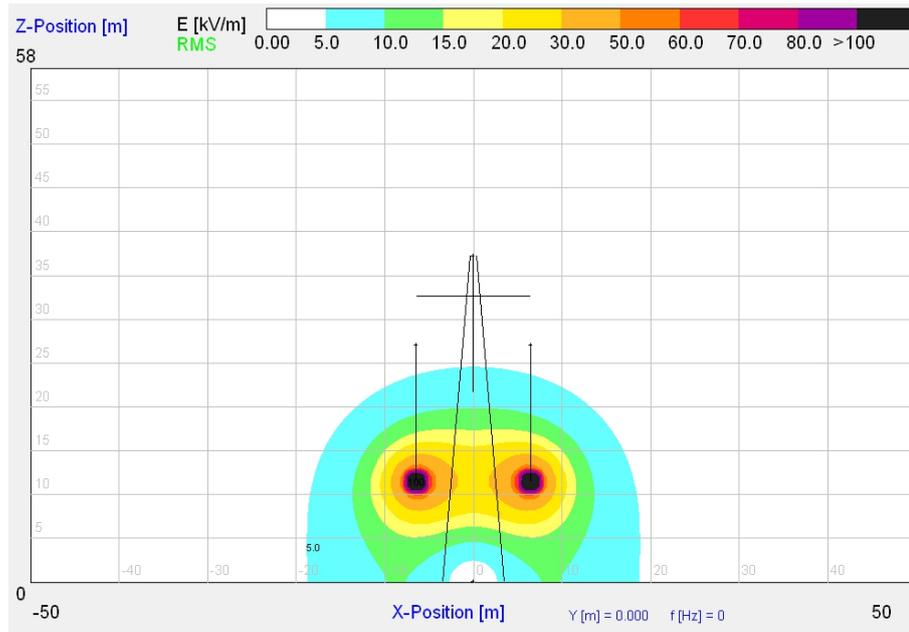
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 26,7 \text{ µT}$ )

## Anhang A2 – Nennbetrieb bipolarer Systeme

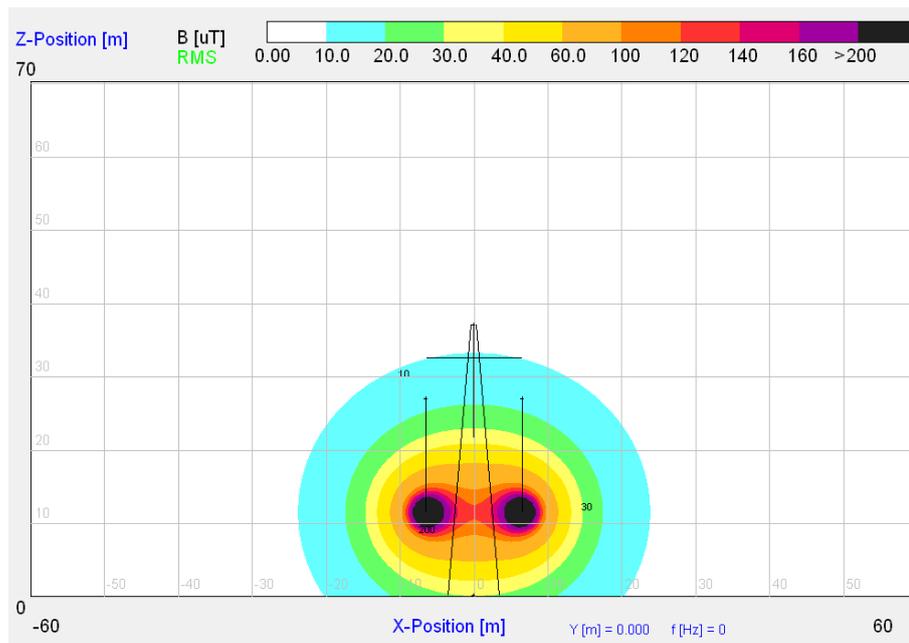
### Elektrische Feldstärkeverteilung und magnetische Flussdichteverteilung im Querschnitt (xz-Ebene)

$\pm 400\text{-kV}$ -Spannungsebene

1 System, Bodenabstand 11,5 m

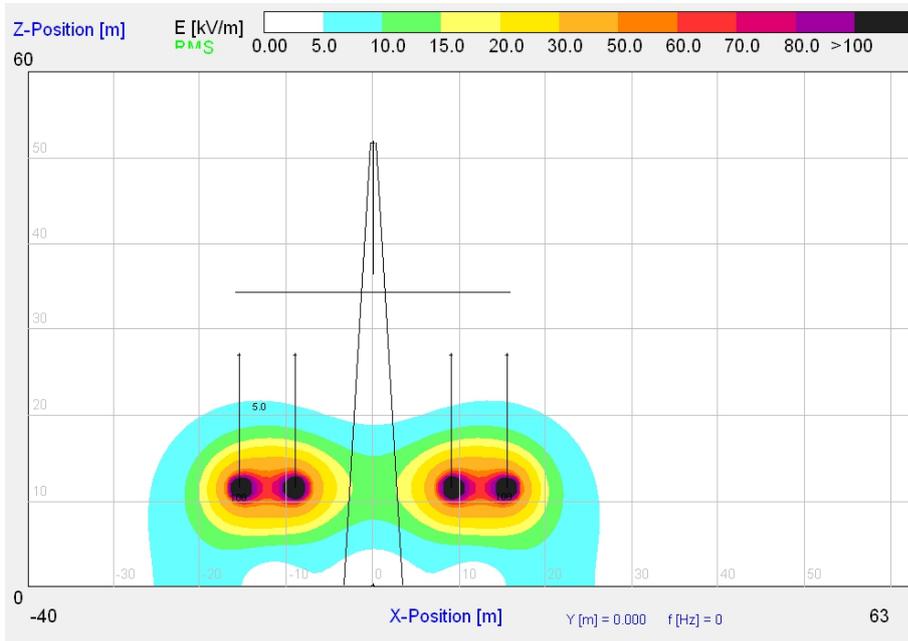


Elektrische Feldstärkeverteilung

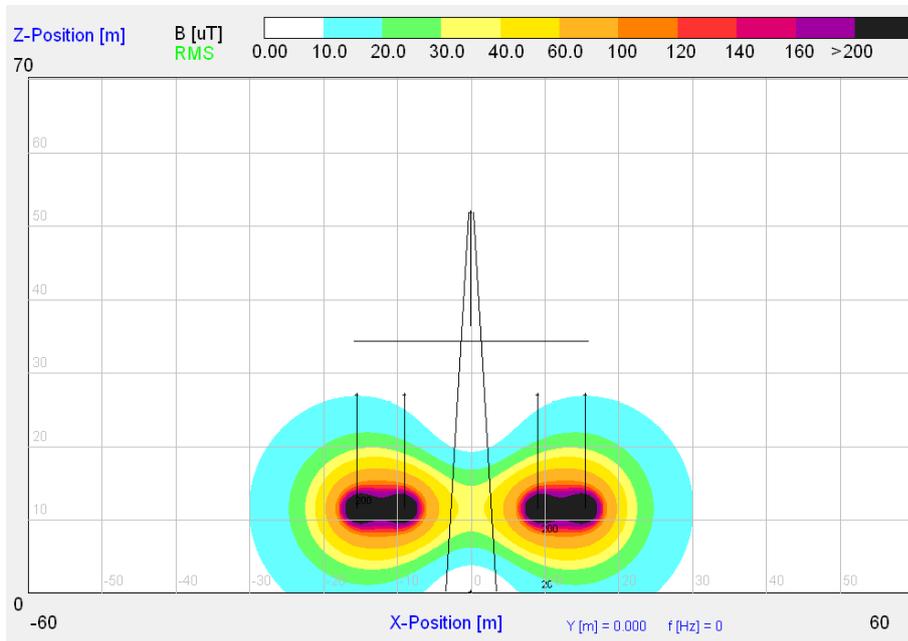


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - + -

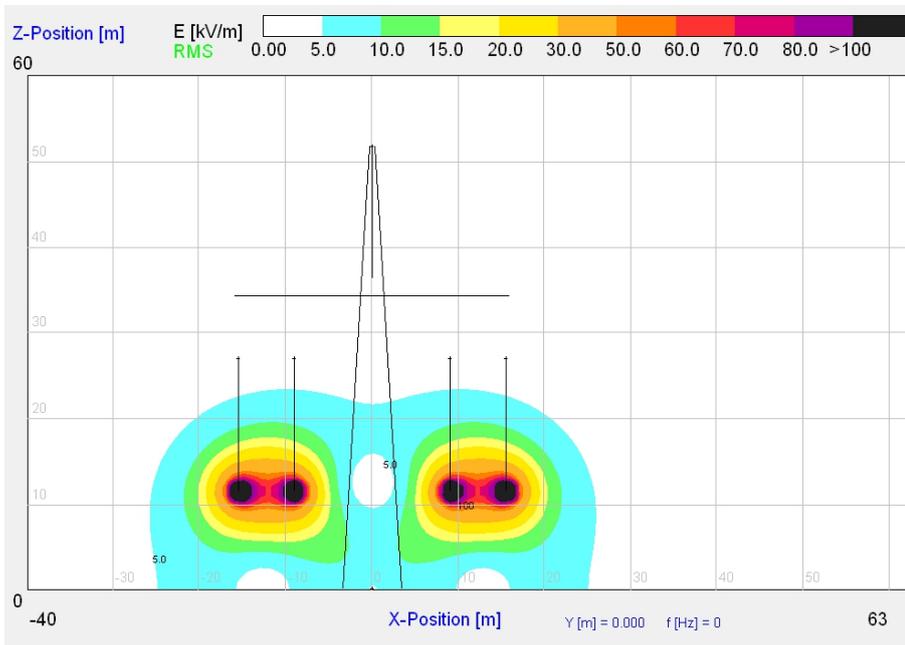


Elektrische Feldstärkeverteilung

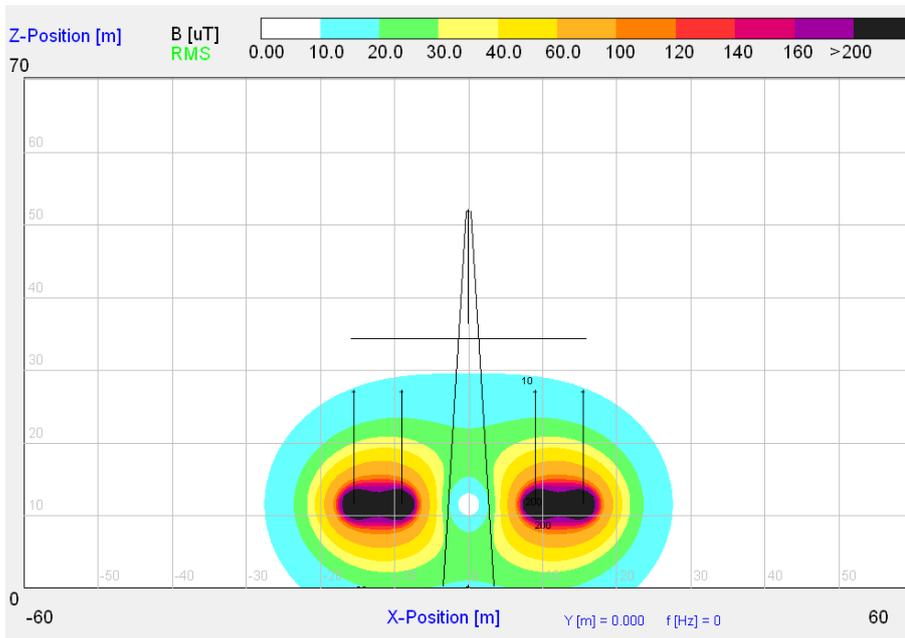


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - - +

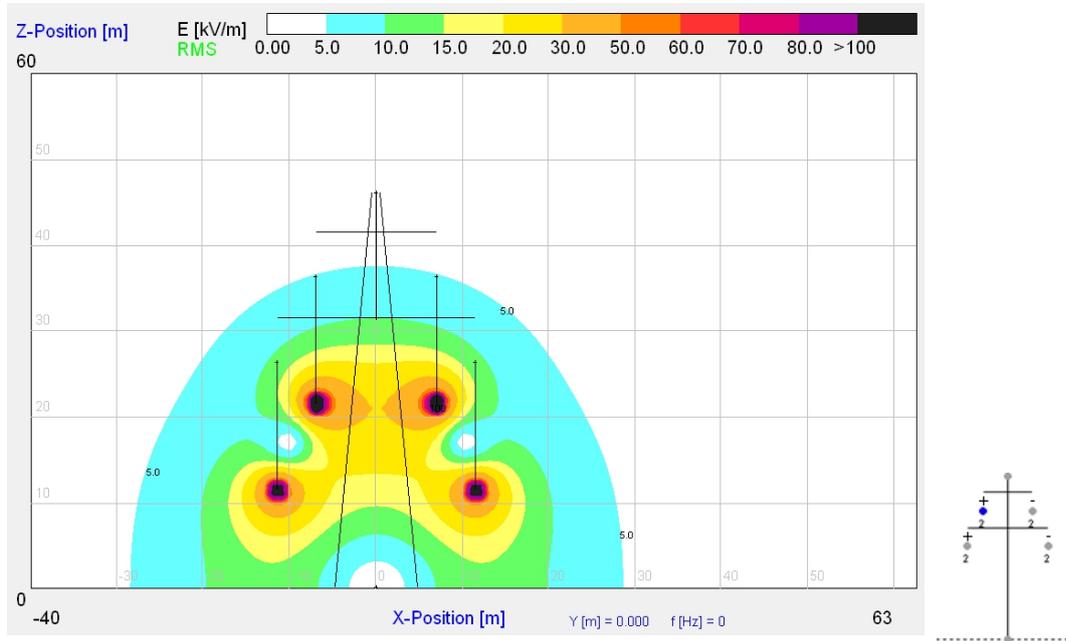


Elektrische Feldstärkeverteilung

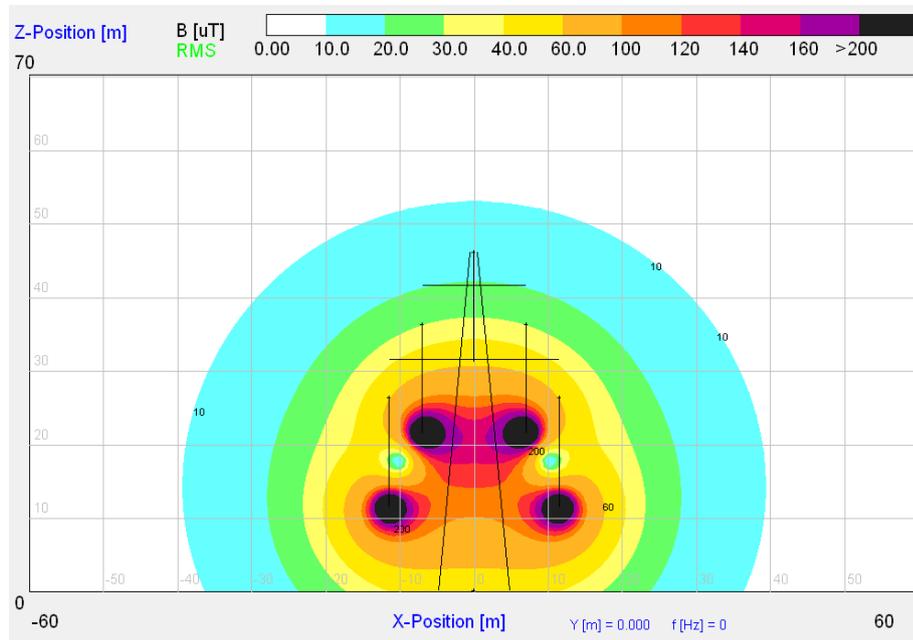


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten)

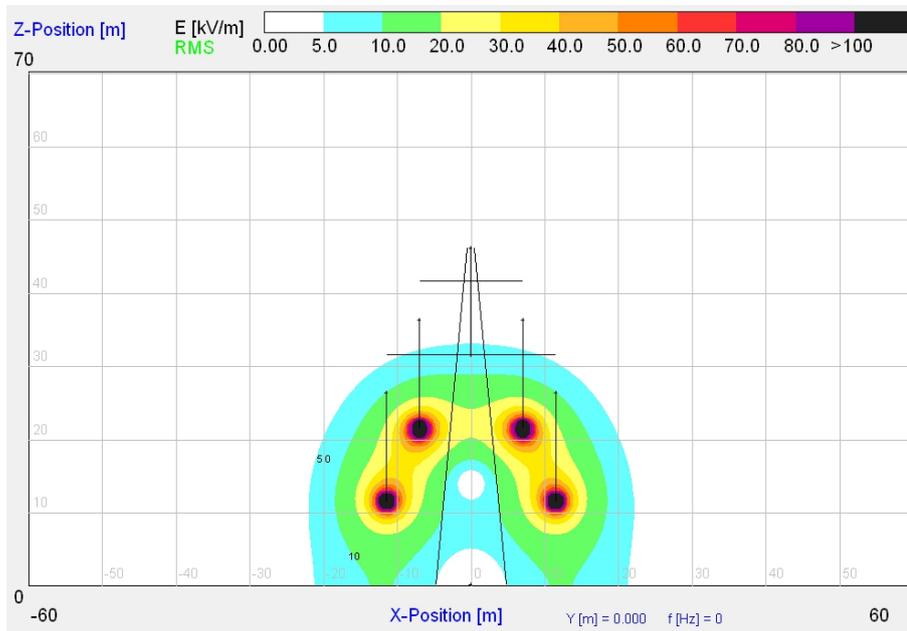


Elektrische Feldstärkeverteilung

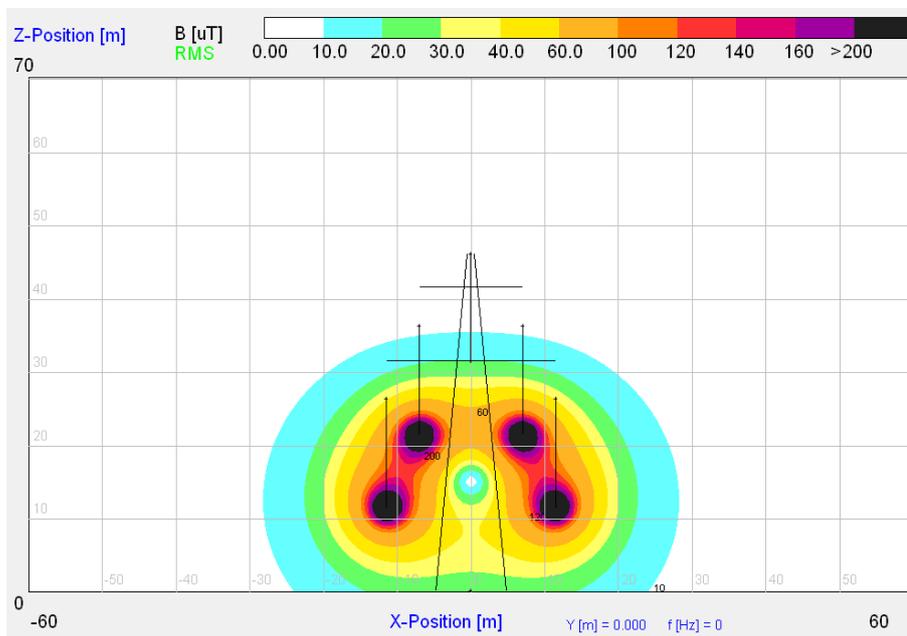


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten)



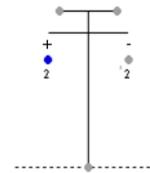
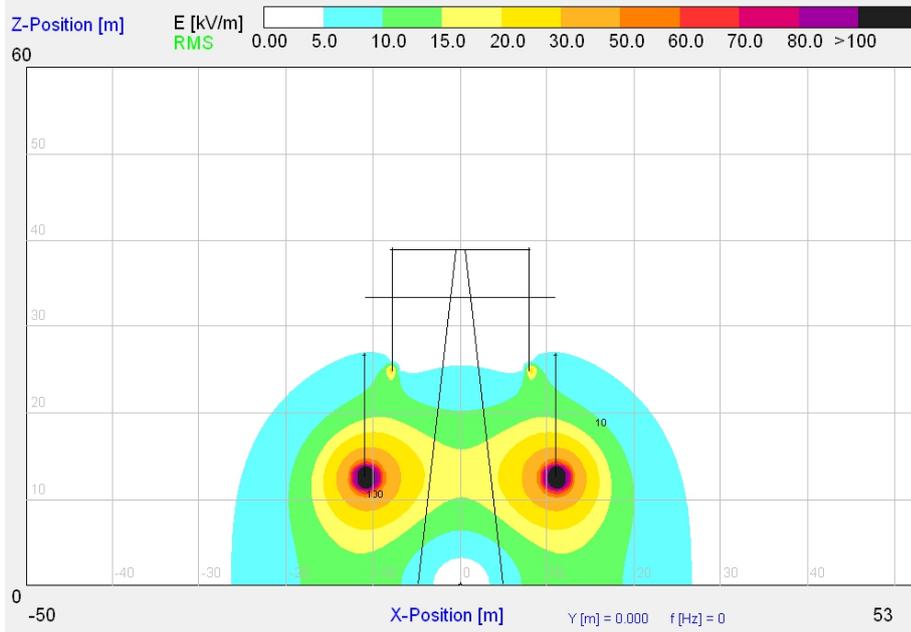
Elektrische Feldstärkeverteilung



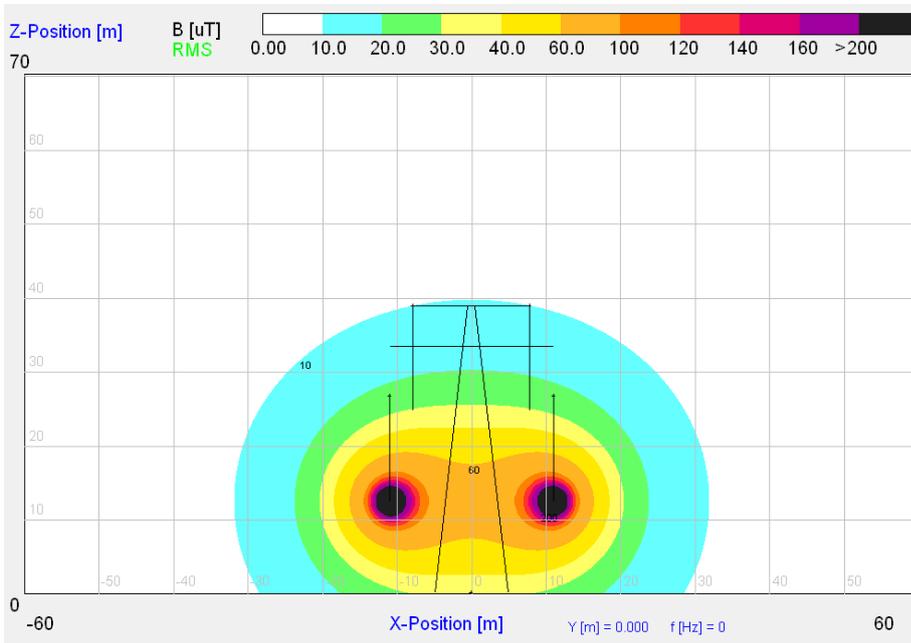
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 500-kV-Spannungsebene**

*1 System, Bodenabstand 12,5 m*

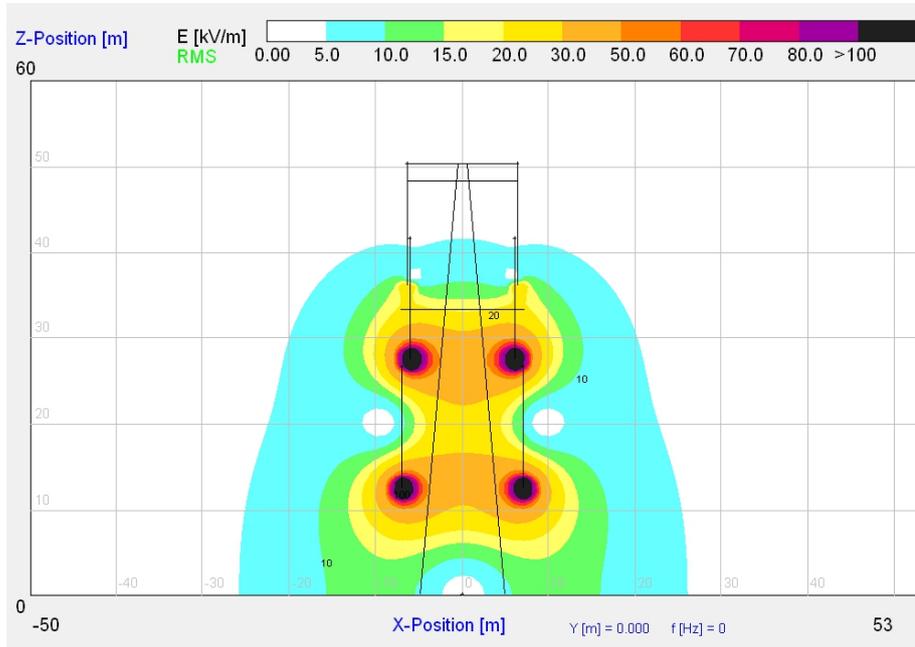


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

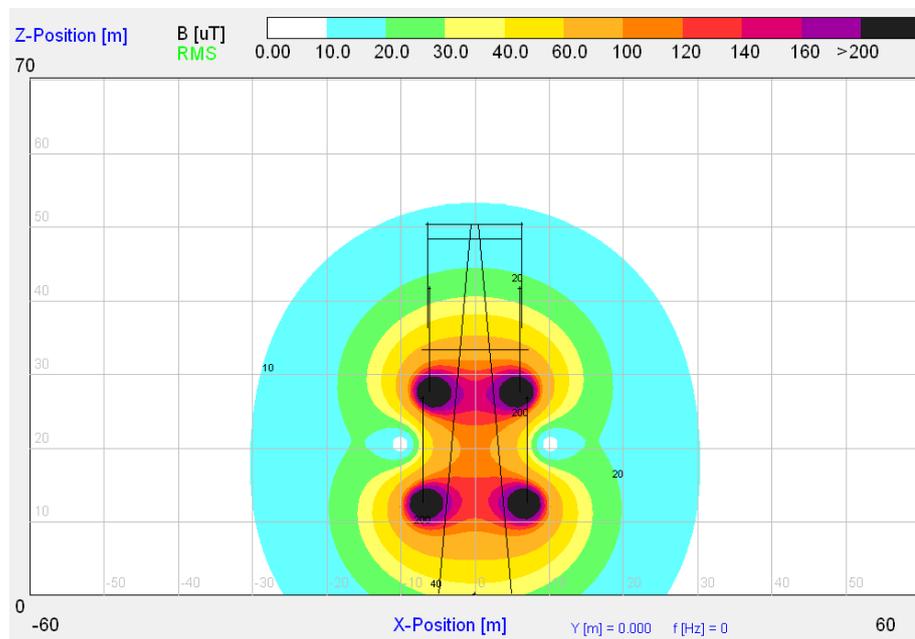


*Magnetische Flussdichteverteilung*

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten)

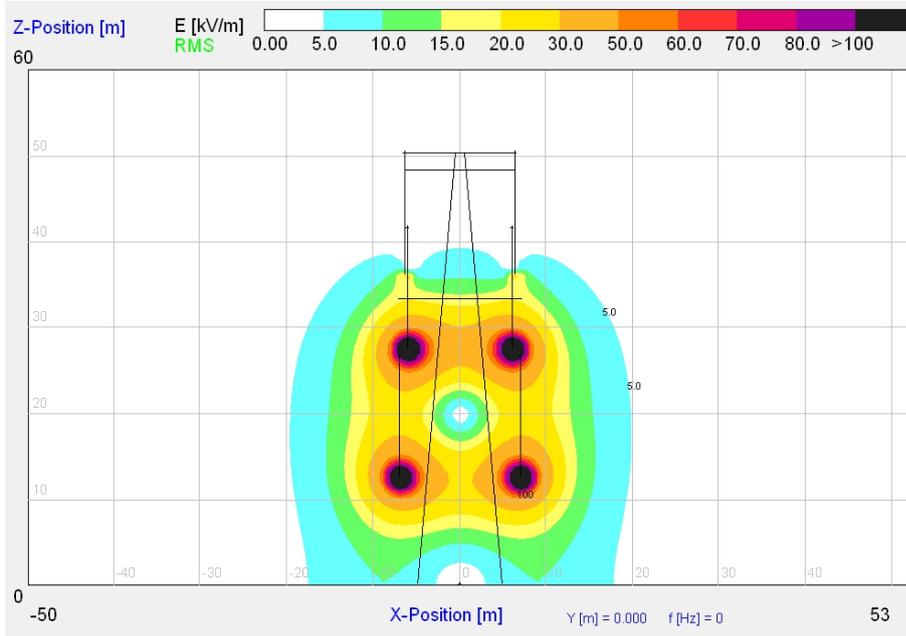


Elektrische Feldstärkeverteilung

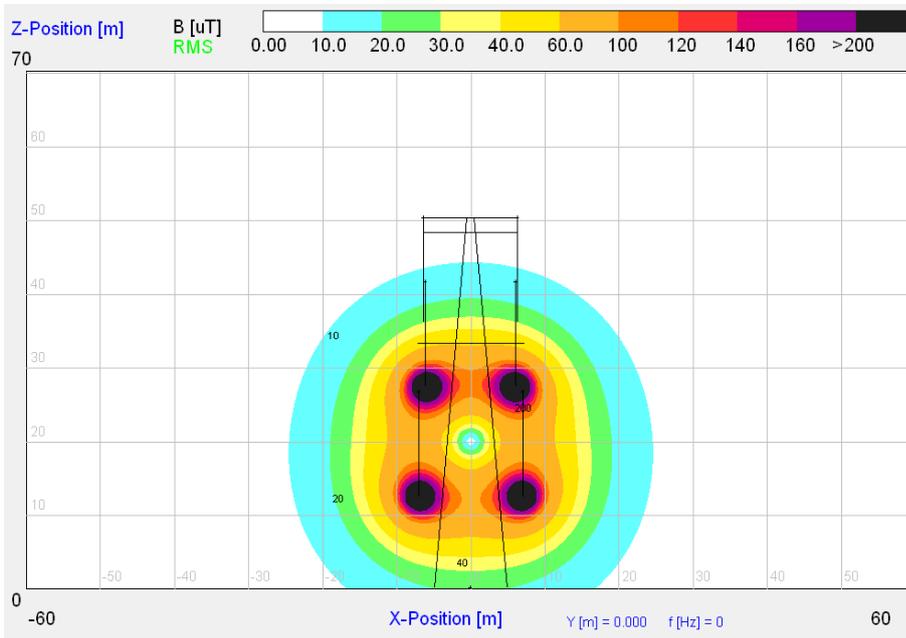


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten)



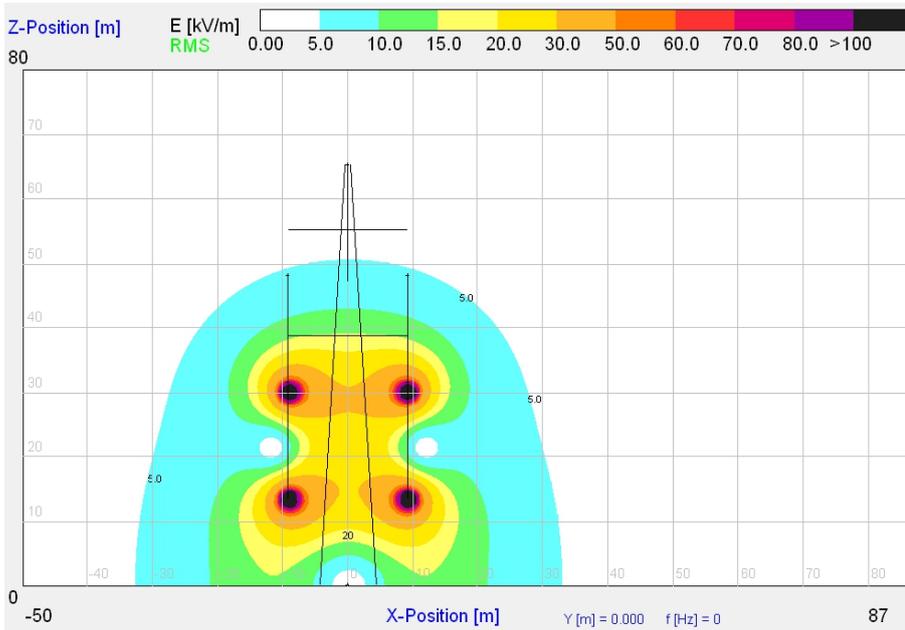
Elektrische Feldstärkeverteilung



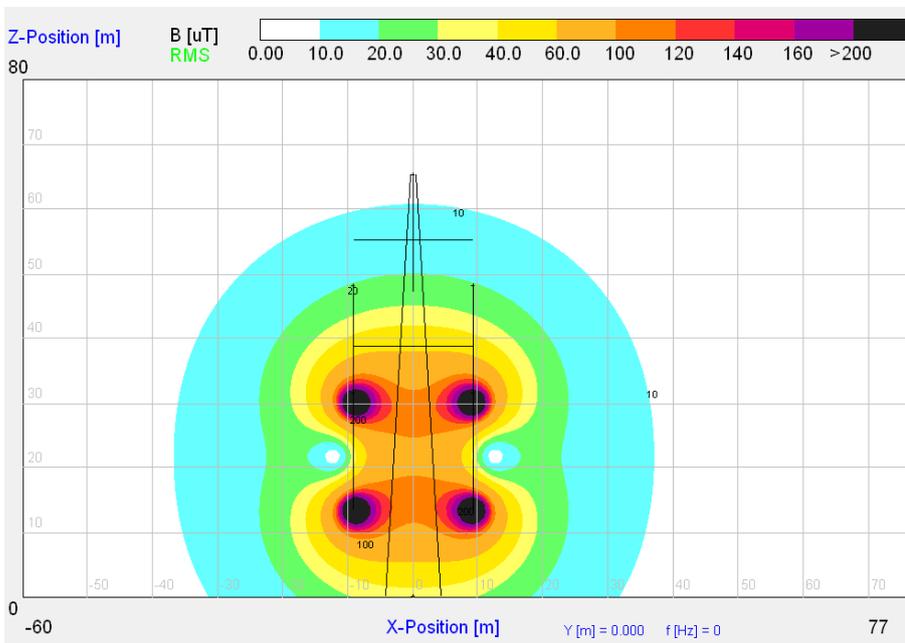
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 600-kV-Spannungsebene**

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten)

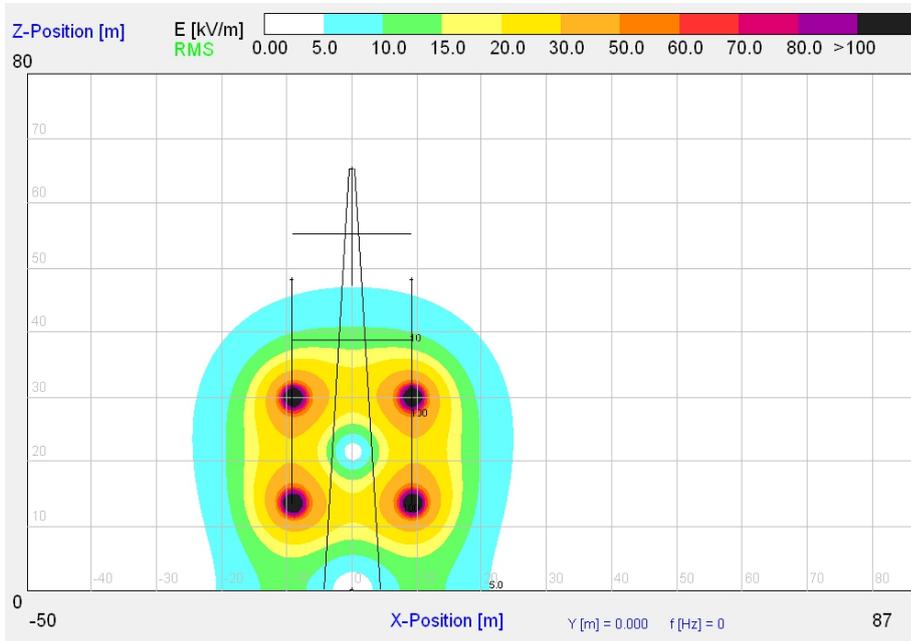


Elektrische Feldstärkeverteilung

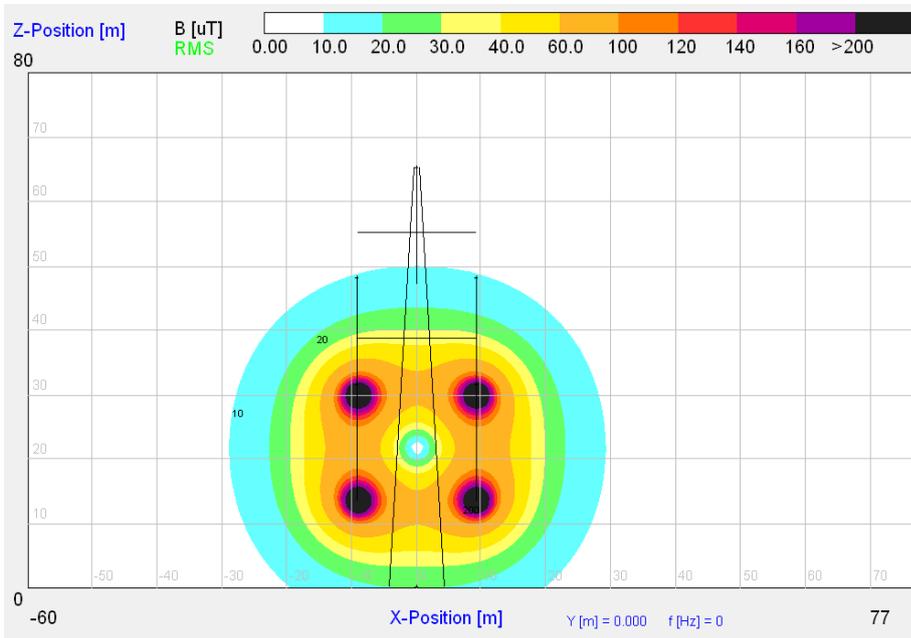


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten)



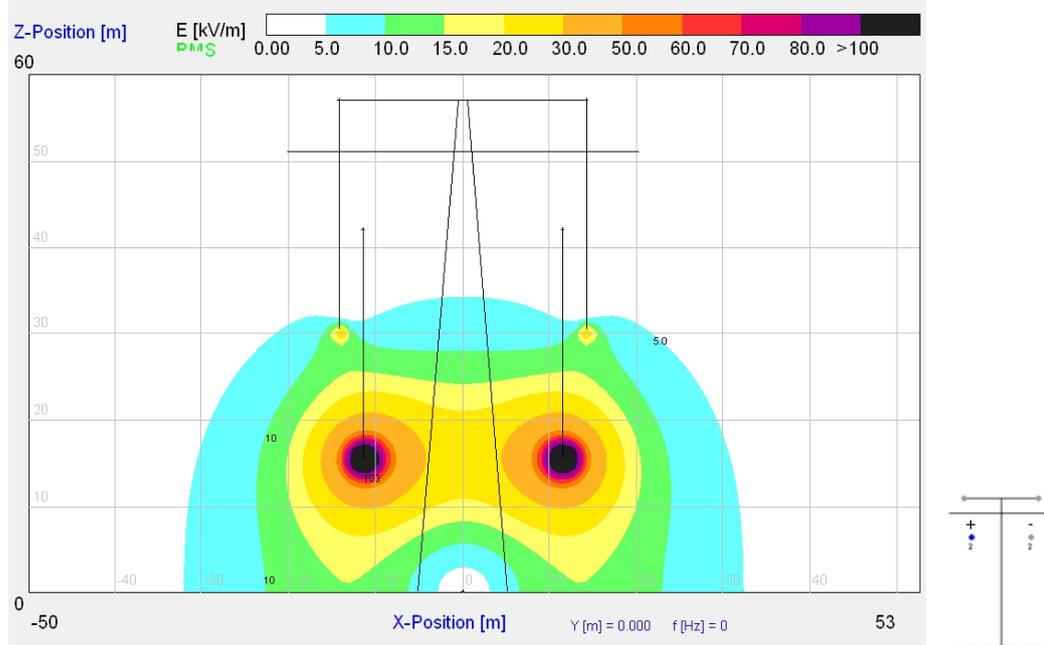
Elektrische Feldstärkeverteilung



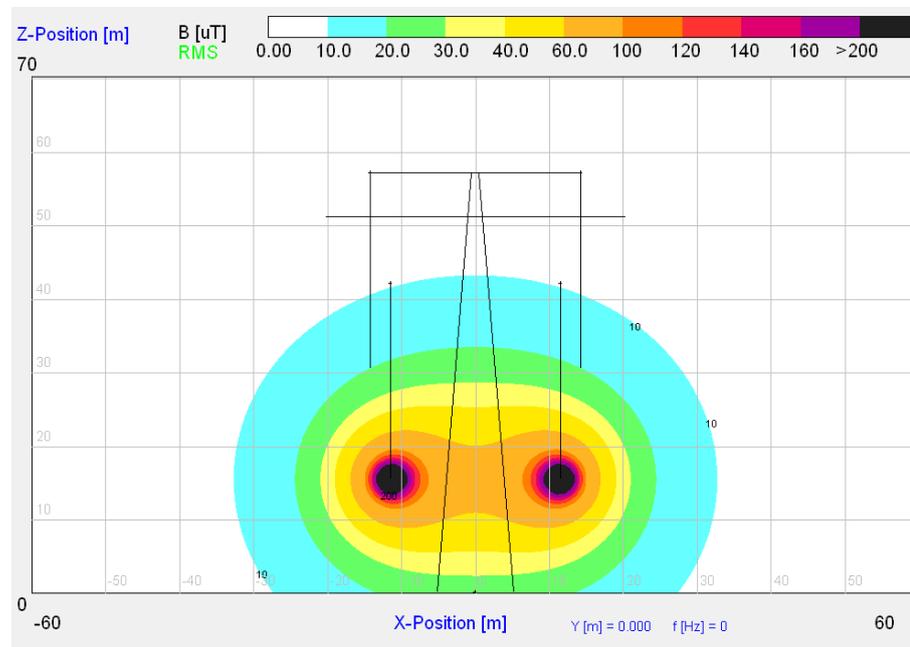
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 800-kV-Spannungsebene**

*1 System, Bodenabstand 15,5 m*



*Elektrische Feldstärkeverteilung*

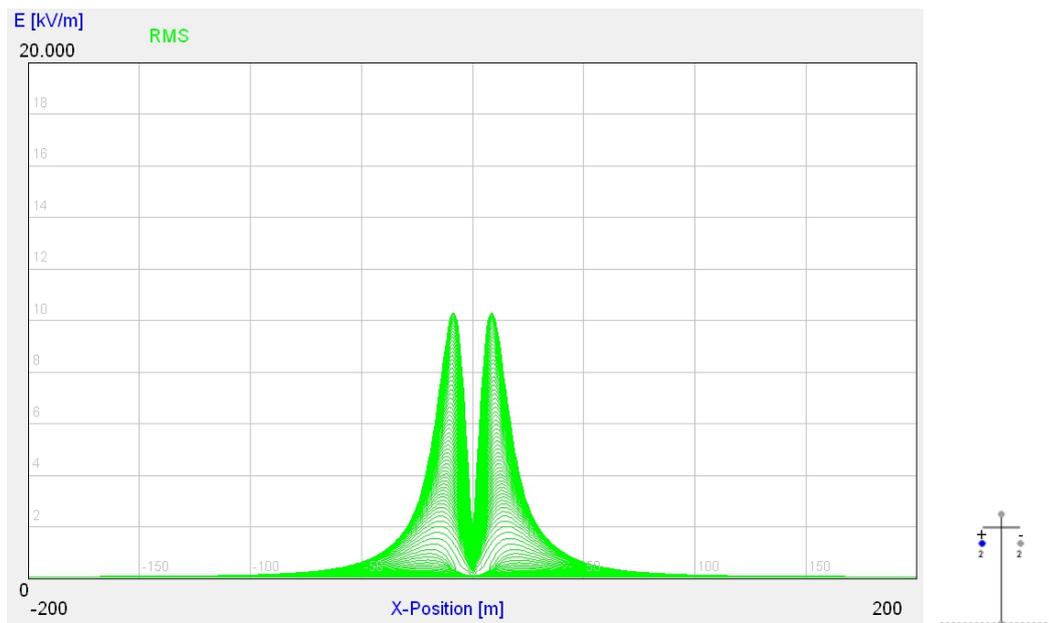


*Magnetische Flussdichteverteilung*

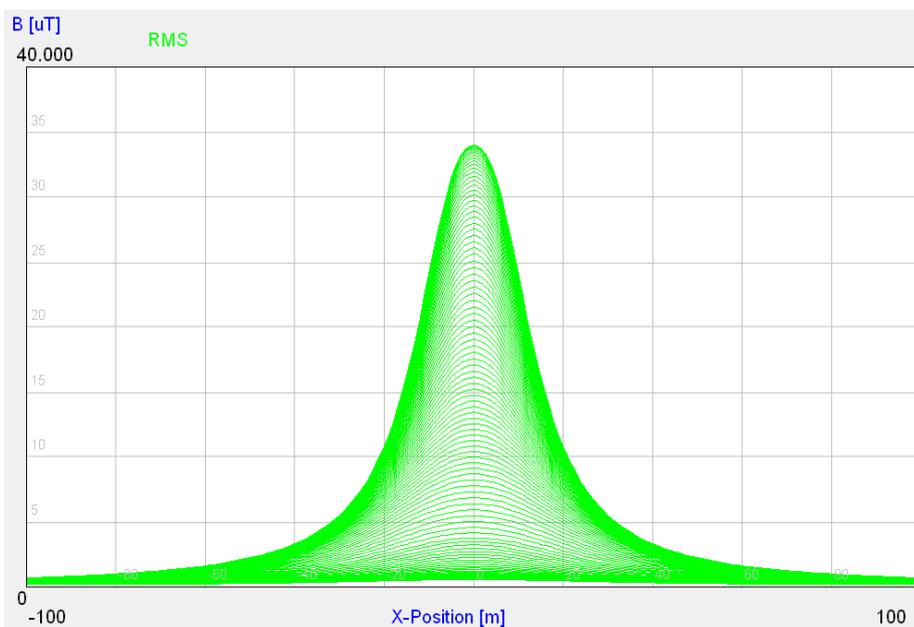
## Elektrischer Feldstärkeverlauf und magnetischer Flussdichteverlauf 1 m über der Erdoberkante

± 400-kV-Spannungsebene

1 System, Bodenabstand 11,5 m

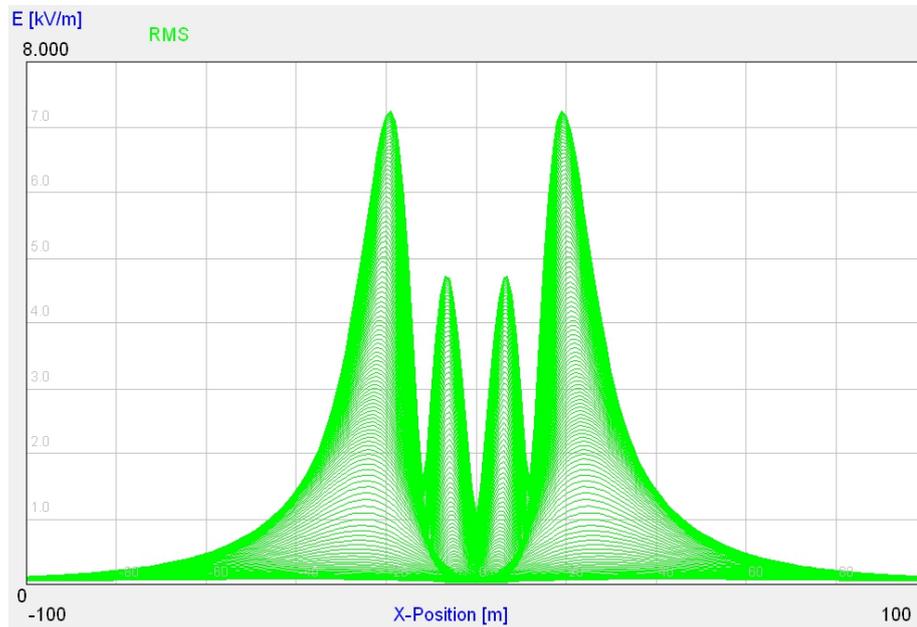


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 10,3$  kV/m)

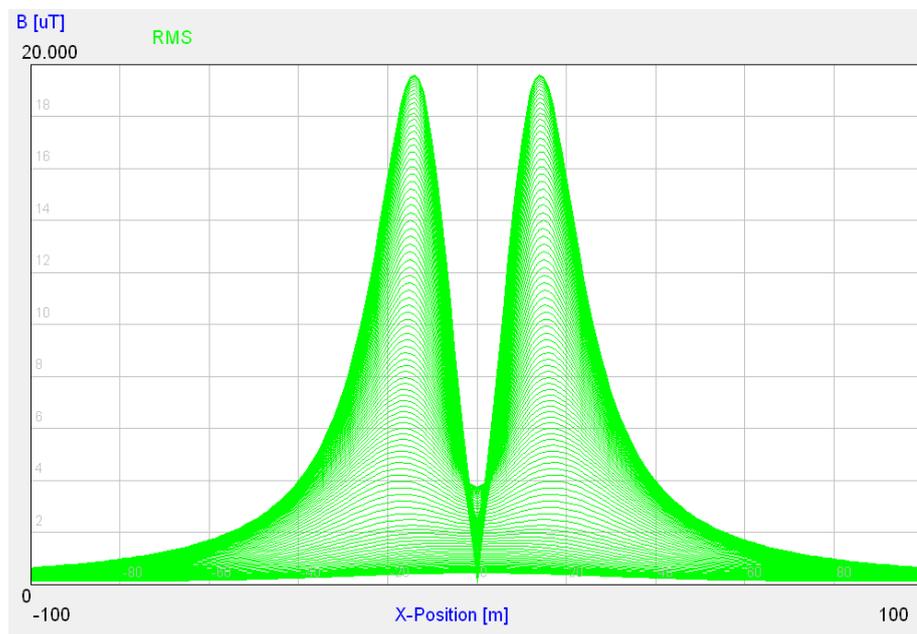


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 34$   $\mu T$ )

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - + -

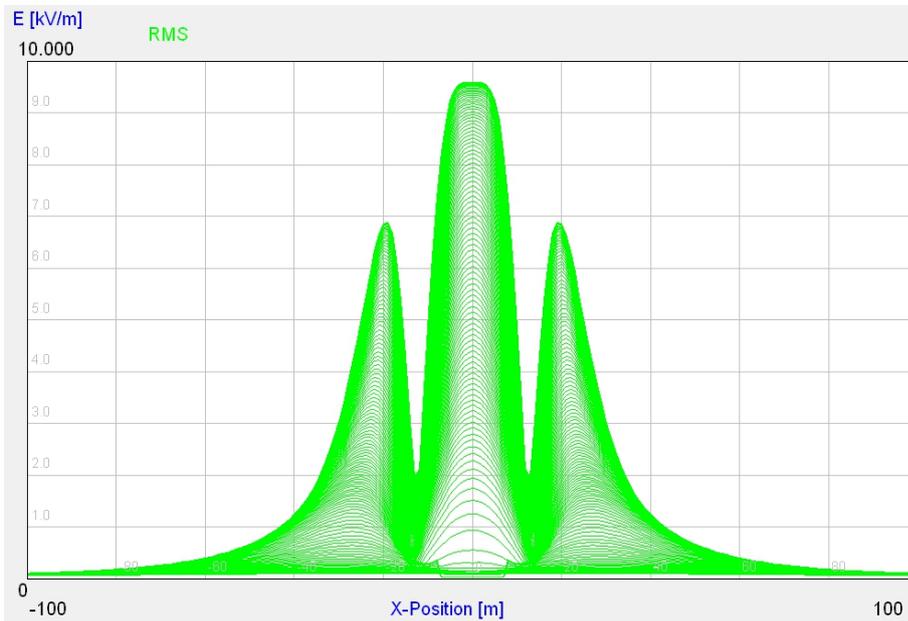


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 7,2 \text{ kV/m}$ )

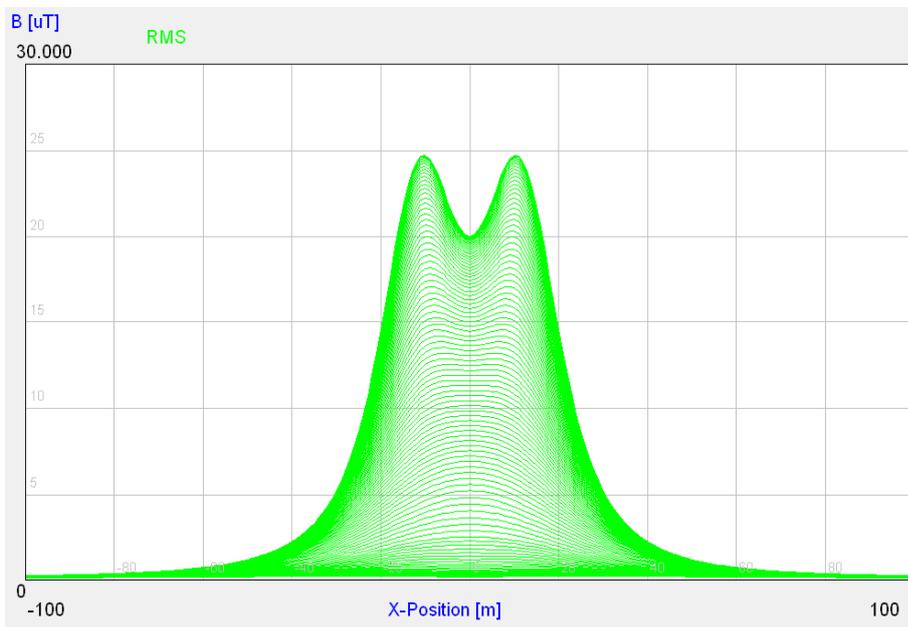


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 19,6 \text{ } \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - - +

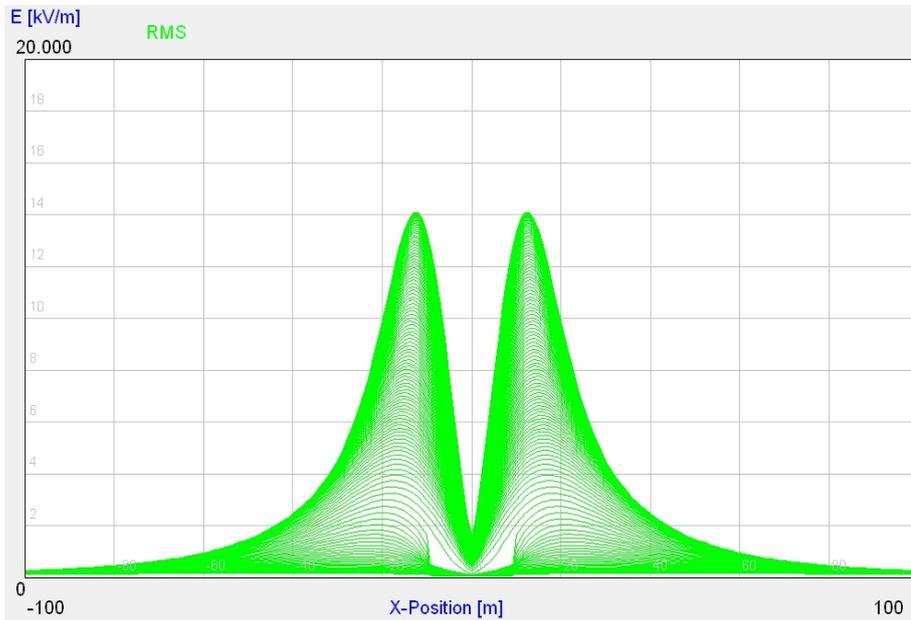


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 9,6 \text{ kV/m}$ )

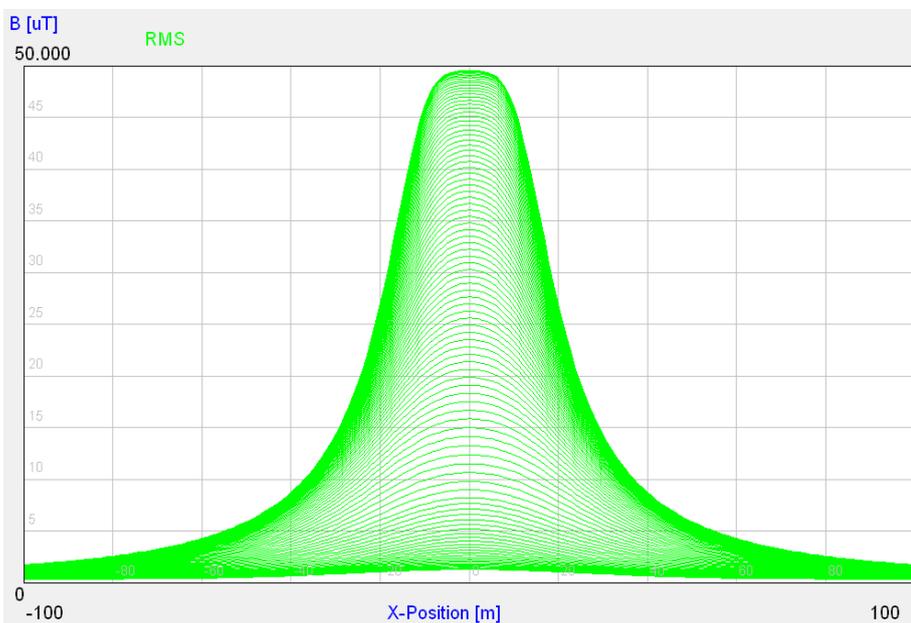


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 24,7 \text{ } \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten)

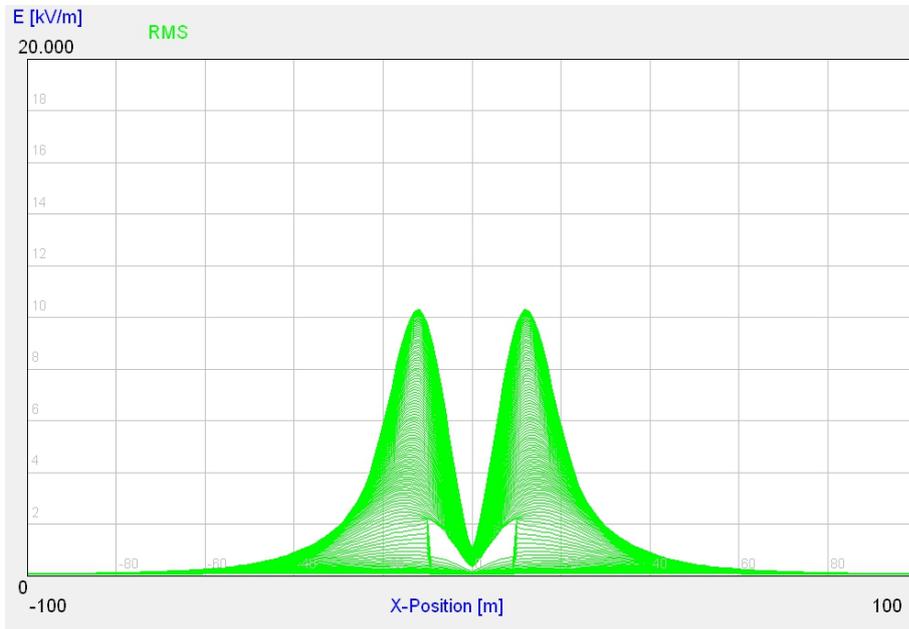


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 14,1$  kV/m)

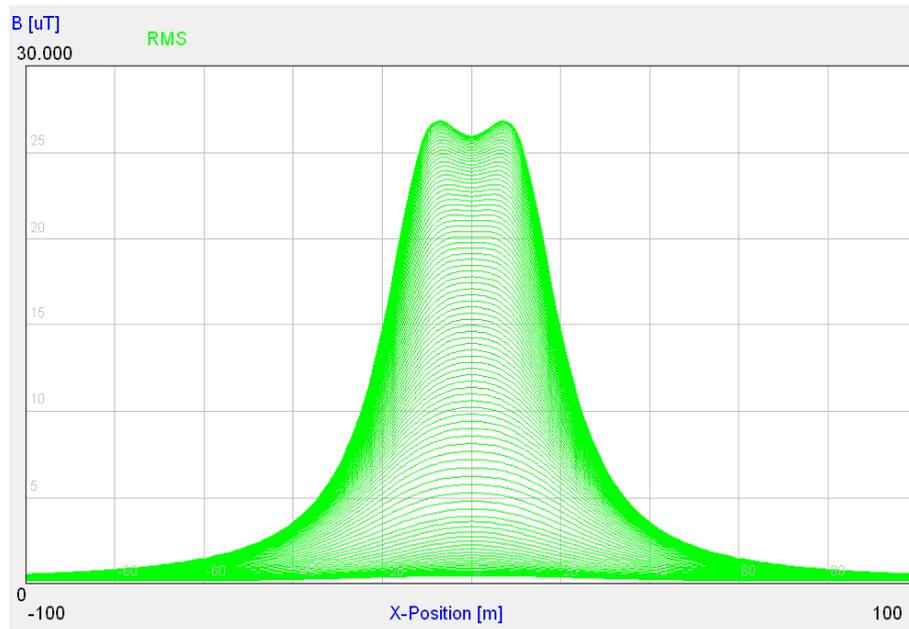


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 49,5$   $\mu T$ )

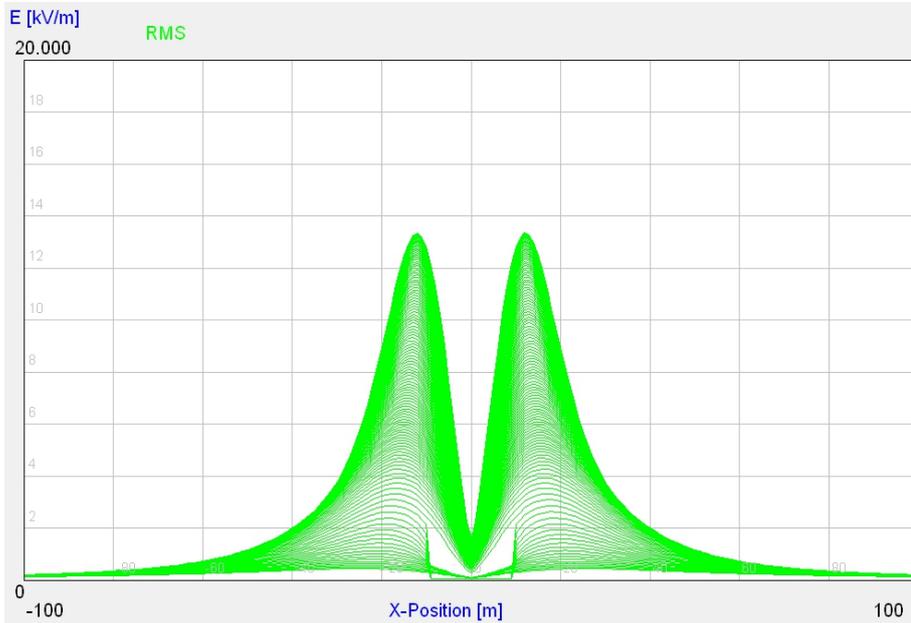
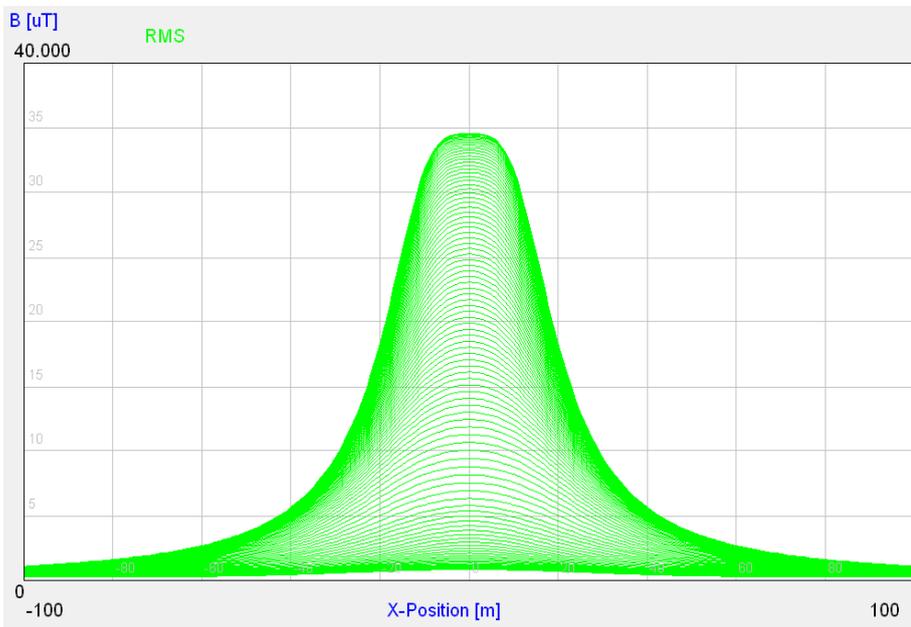
2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten)



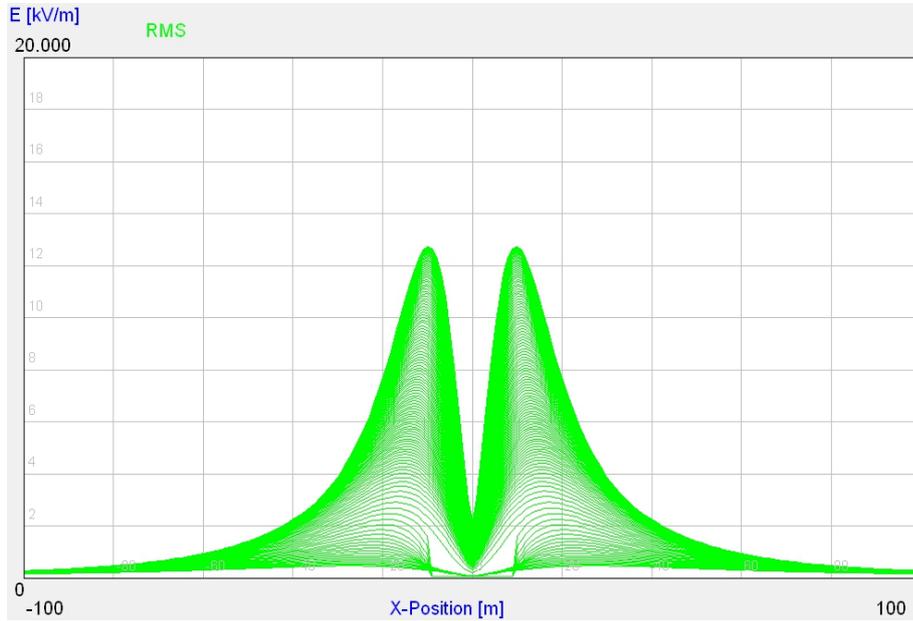
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 10,4 \text{ kV/m}$ )



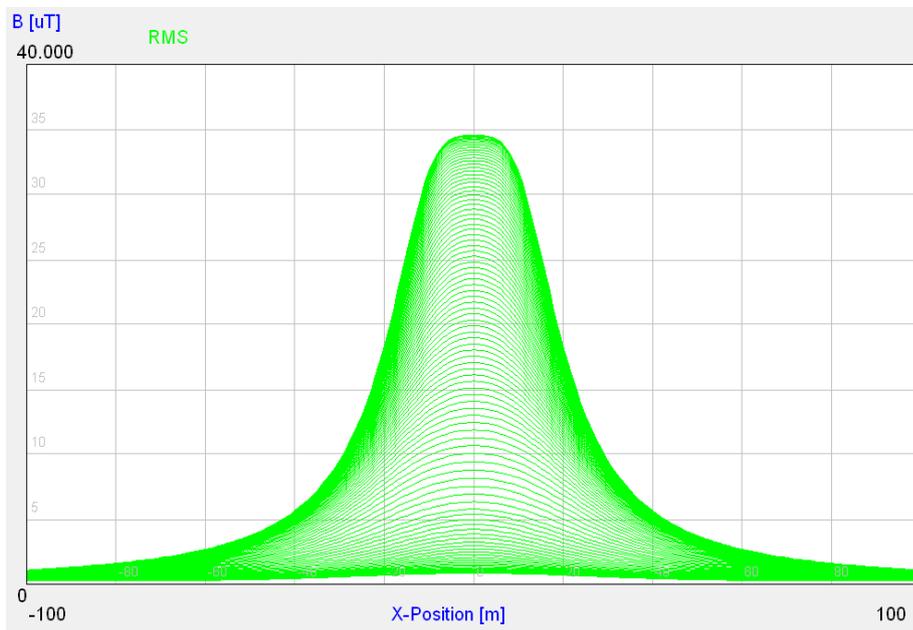
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 26,8 \mu\text{T}$ )

**± 500-kV-Spannungsebene***I System, Bodenabstand 12,5 m**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,3$  kV/m)**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 34,6$   $\mu\text{T}$ )*

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten)

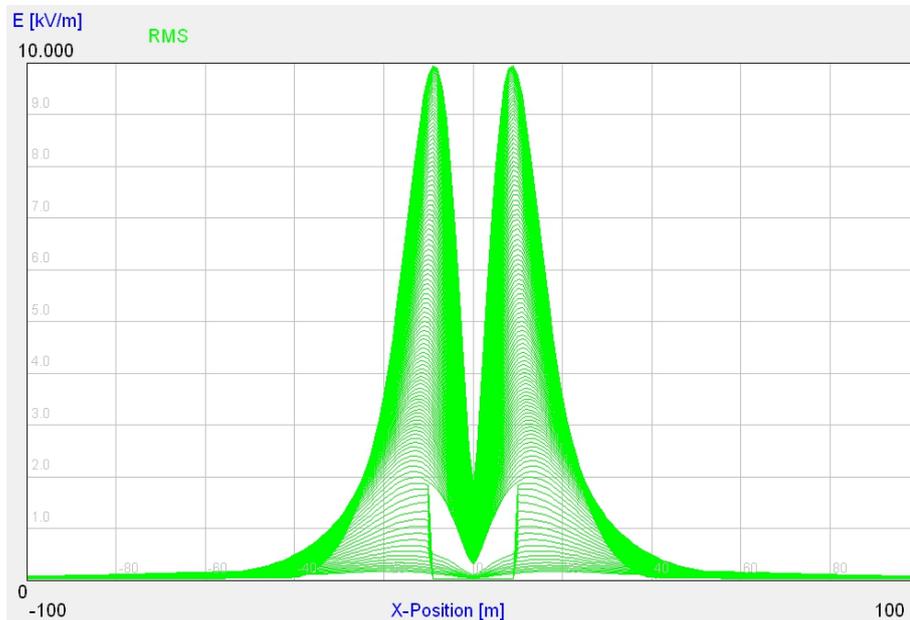


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 12,7 \text{ kV/m}$ )

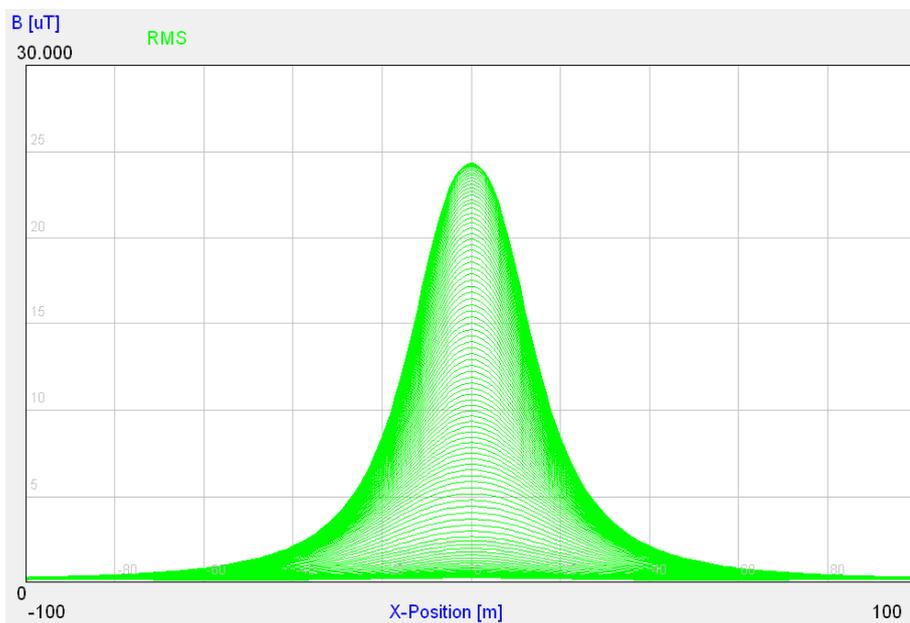
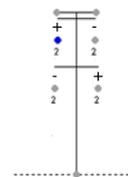


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 37,3 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten)



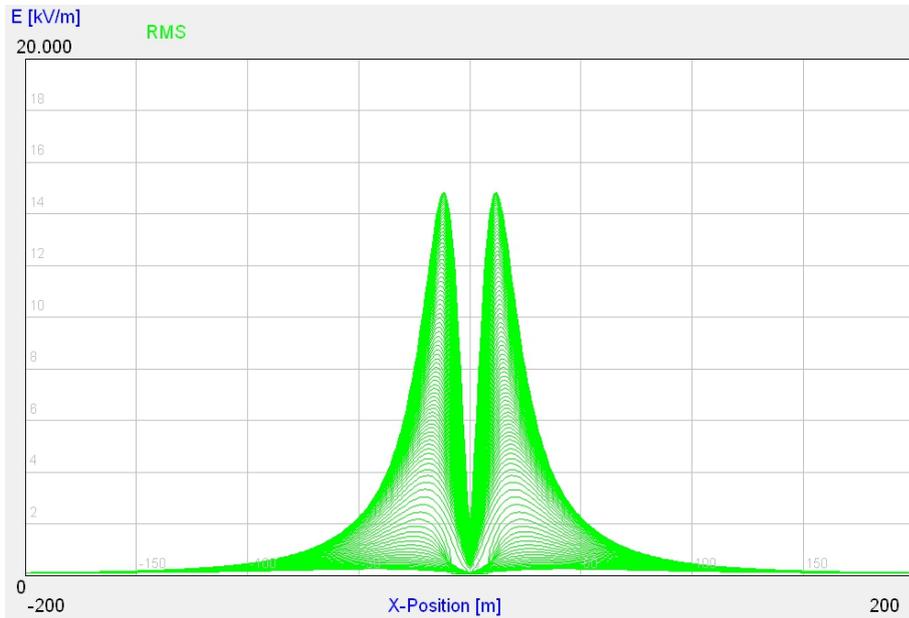
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 9,1$  kV/m)



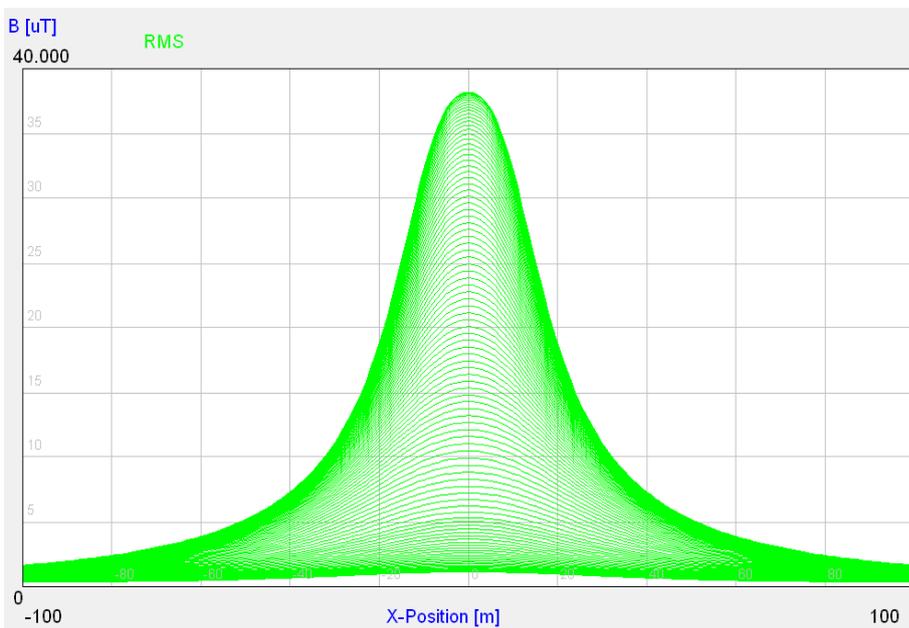
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 24,3$   $\mu T$ )

**± 600-kV-Spannungsebene**

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten)

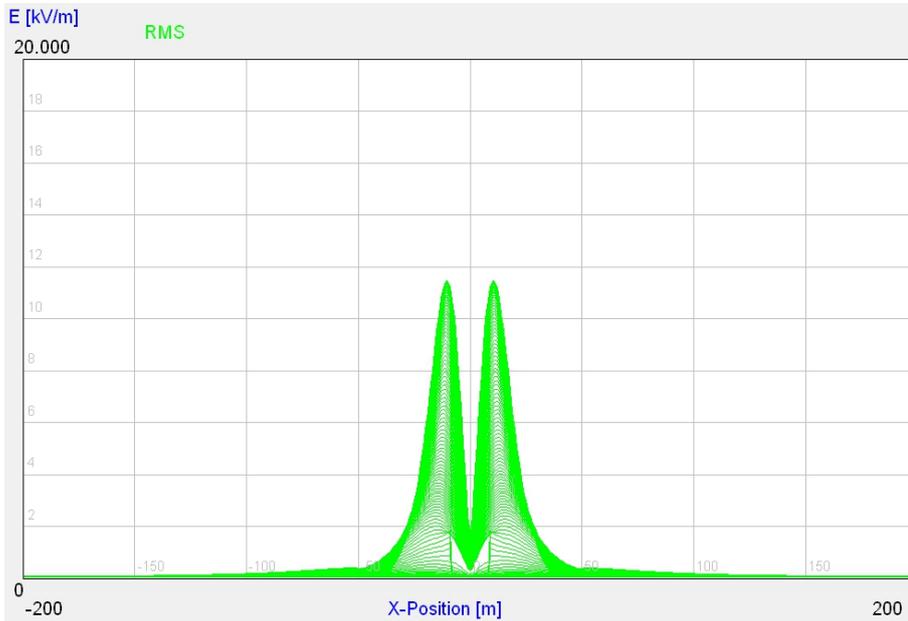


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 14,8 \text{ kV/m}$ )

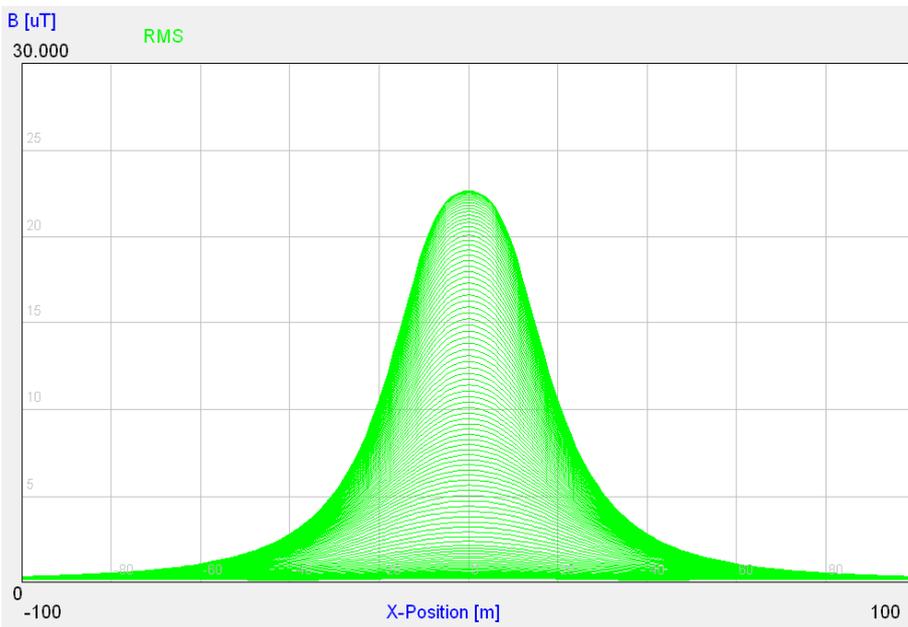


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 38,2 \text{ µT}$ )

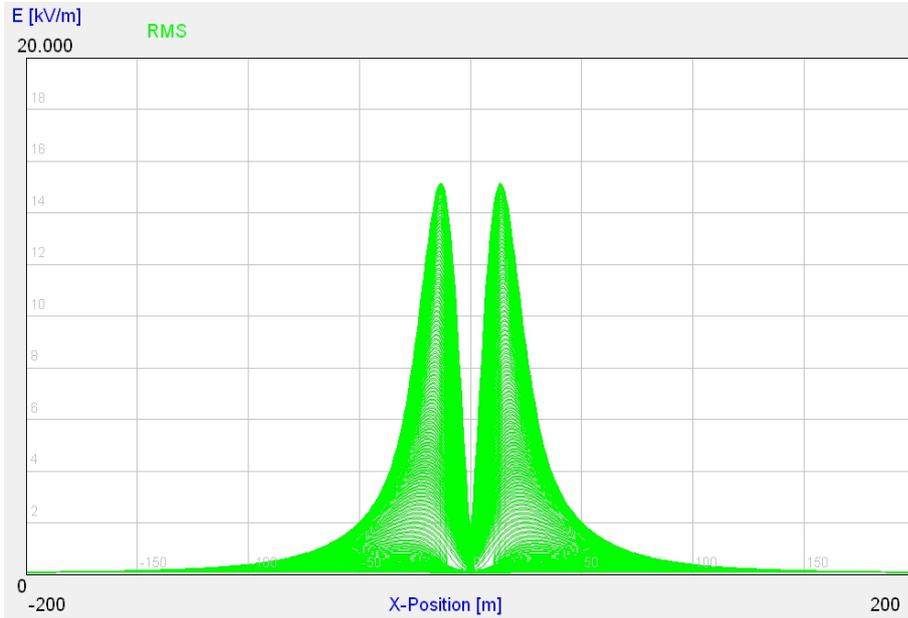
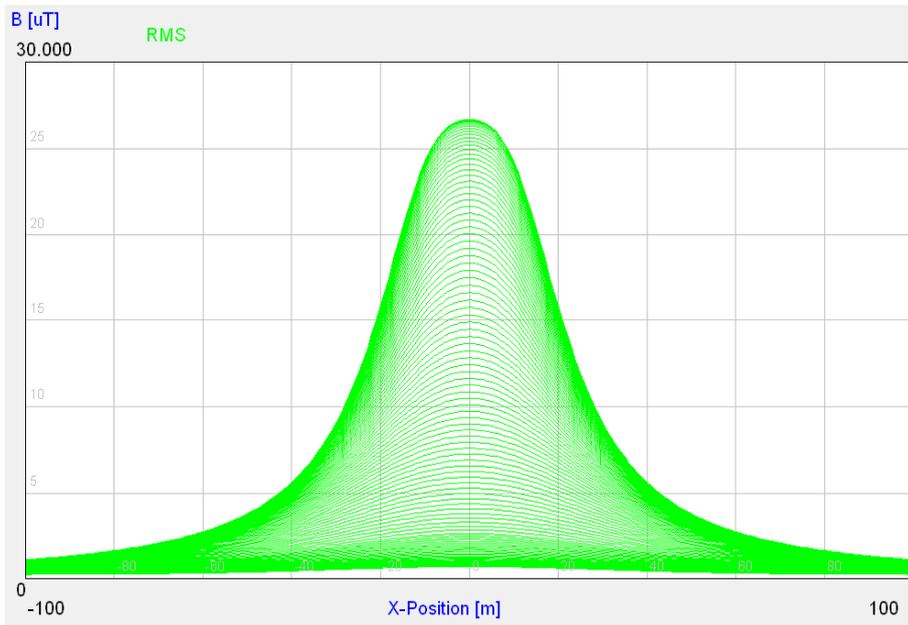
2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten)



Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 11,4$  kV/m)



Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 22,6$   $\mu$ T)

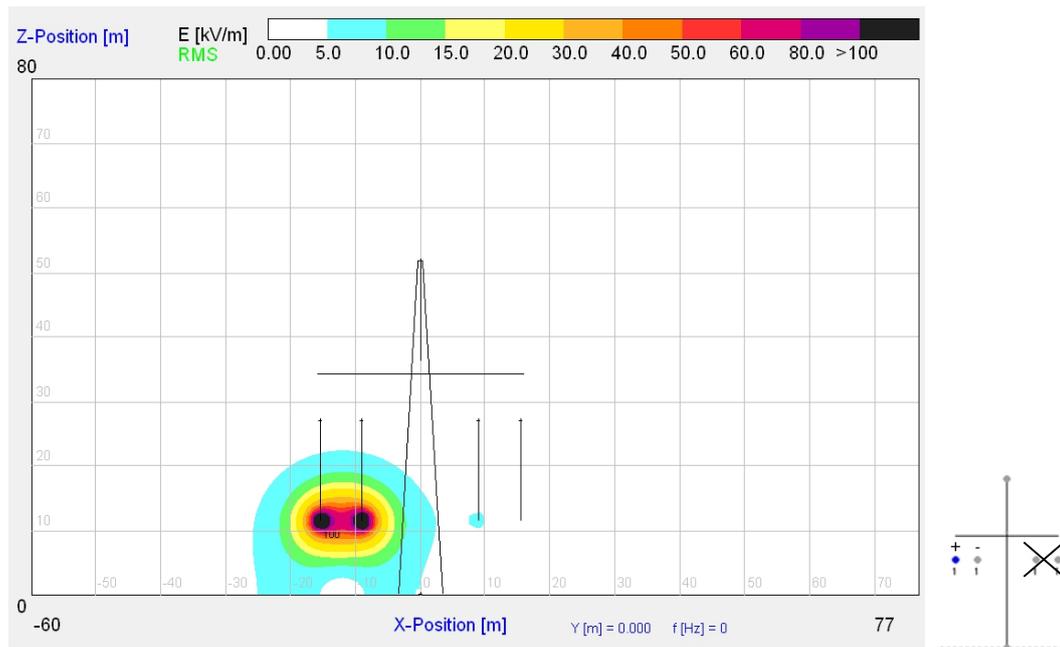
**± 800-kV-Spannungsebene***1 System, Bodenabstand 15,5 m**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 15,1 \text{ kV/m}$ )**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 26,7 \mu\text{T}$ )*

## Anhang A3 – Nennbetrieb eines Systems vom bipolaren Doppelsystem

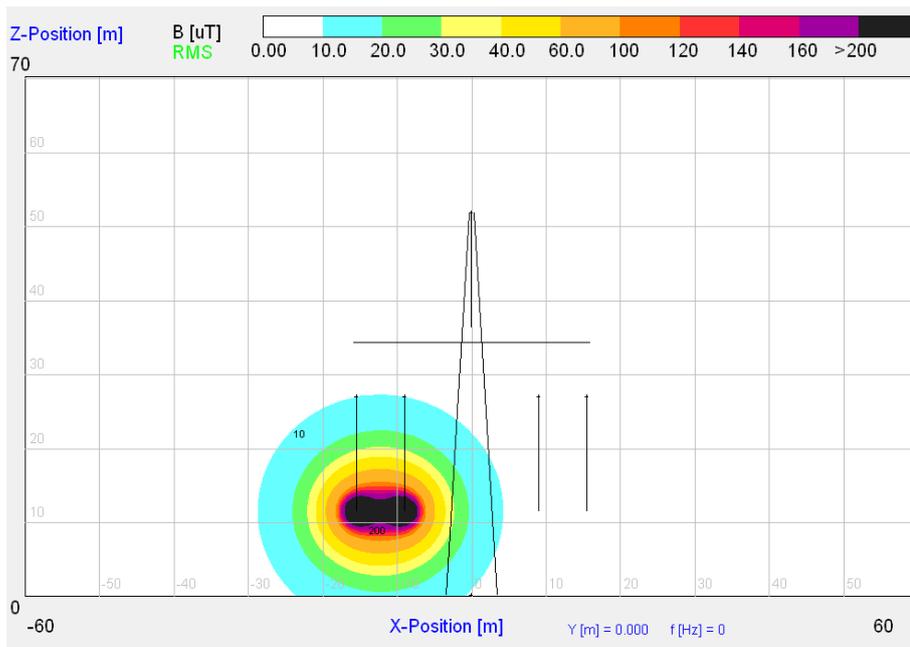
### Elektrische Feldstärkeverteilung und magnetische Flussdichteverteilung im Querschnitt (xz-Ebene)

**± 400-kV-Spannungsebene**

*Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, linkes System im Betrieb*

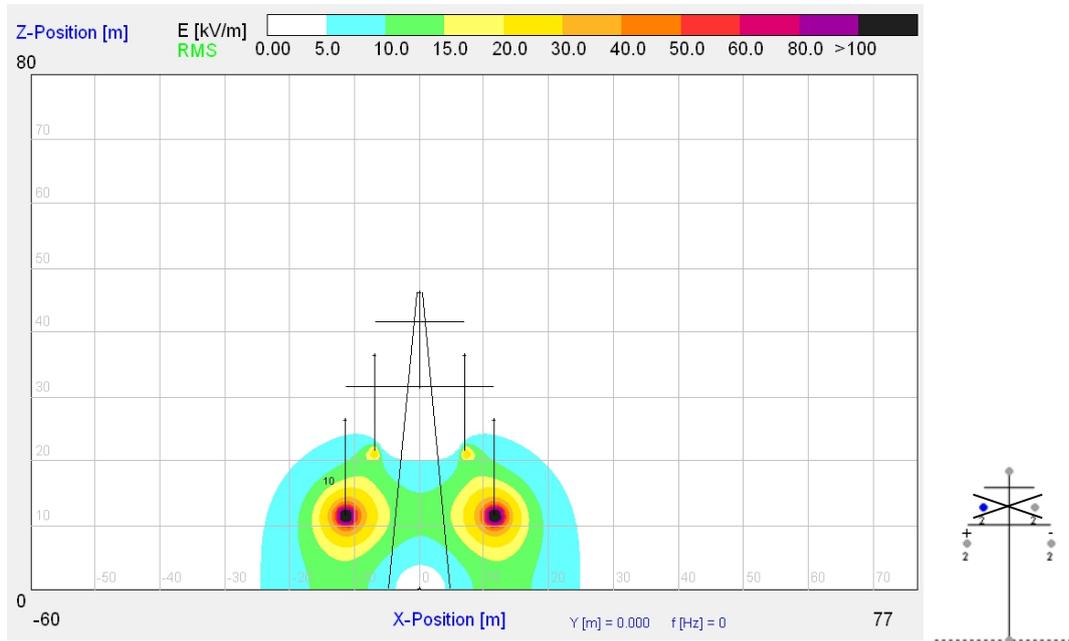


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

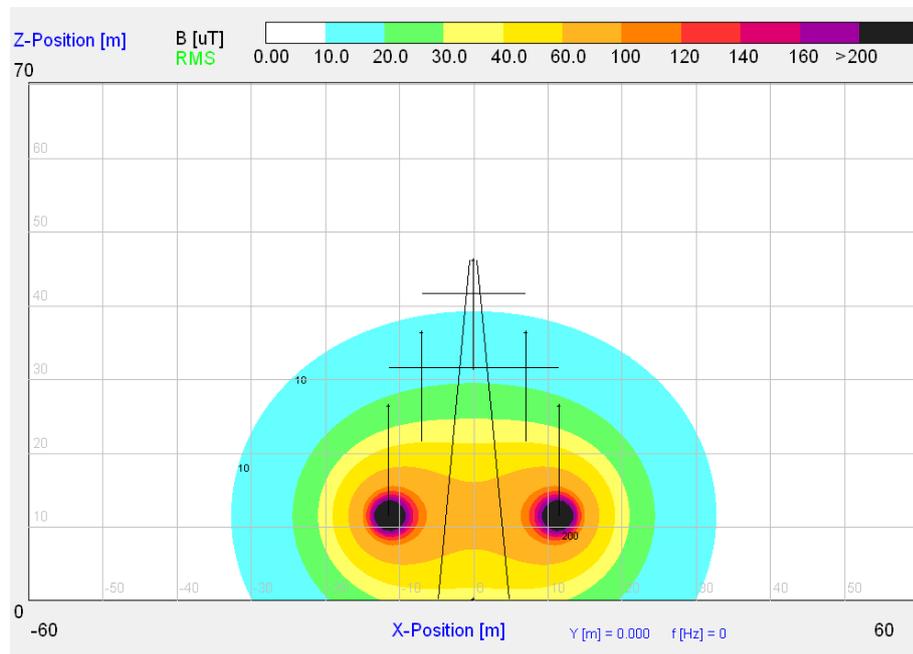


*Magnetische Flussdichteverteilung*

*Einebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m, unteres System im Betrieb*

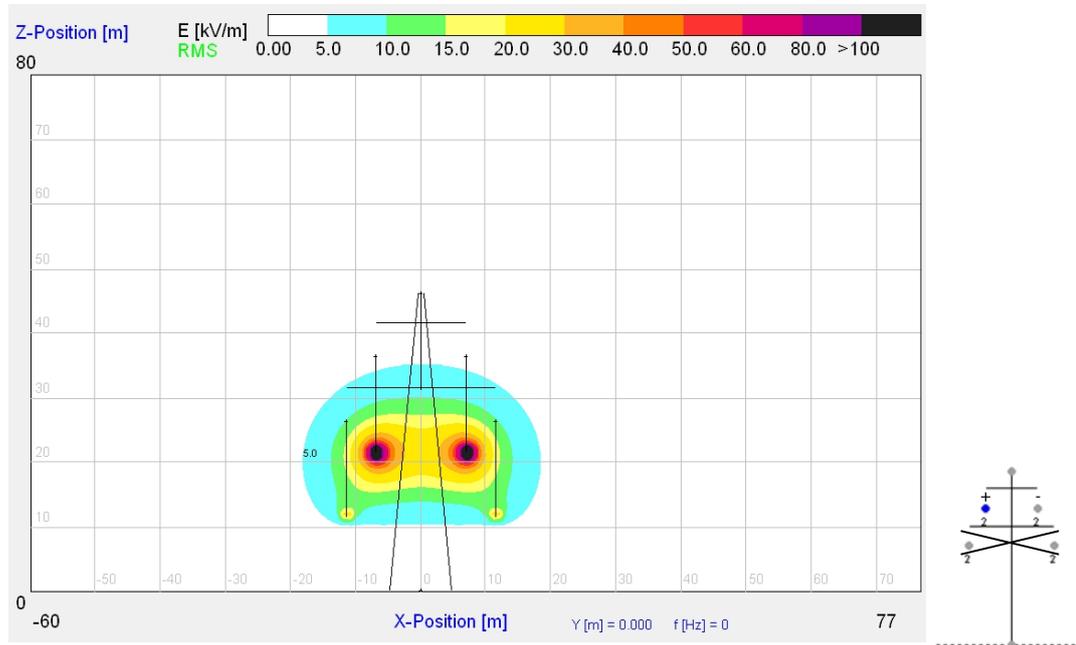


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

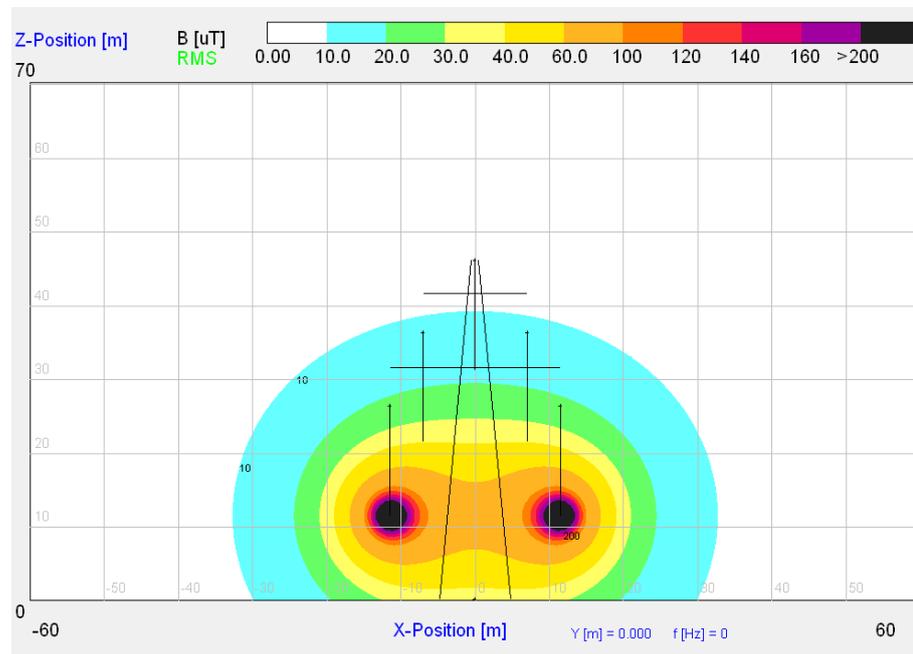


*Magnetische Flussdichteverteilung*

*Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, oberes System im Betrieb*



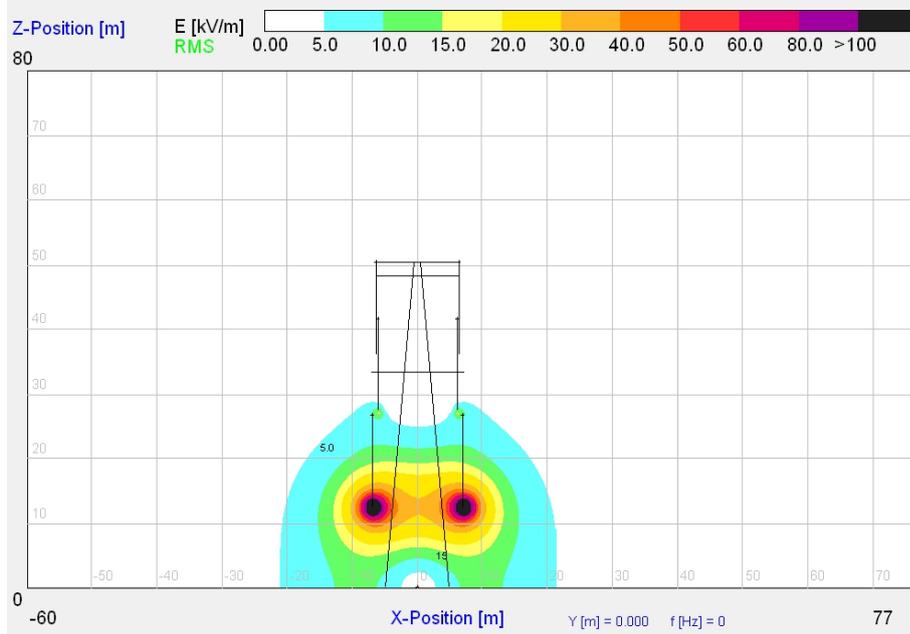
*Elektrische Feldstärkeverteilung*



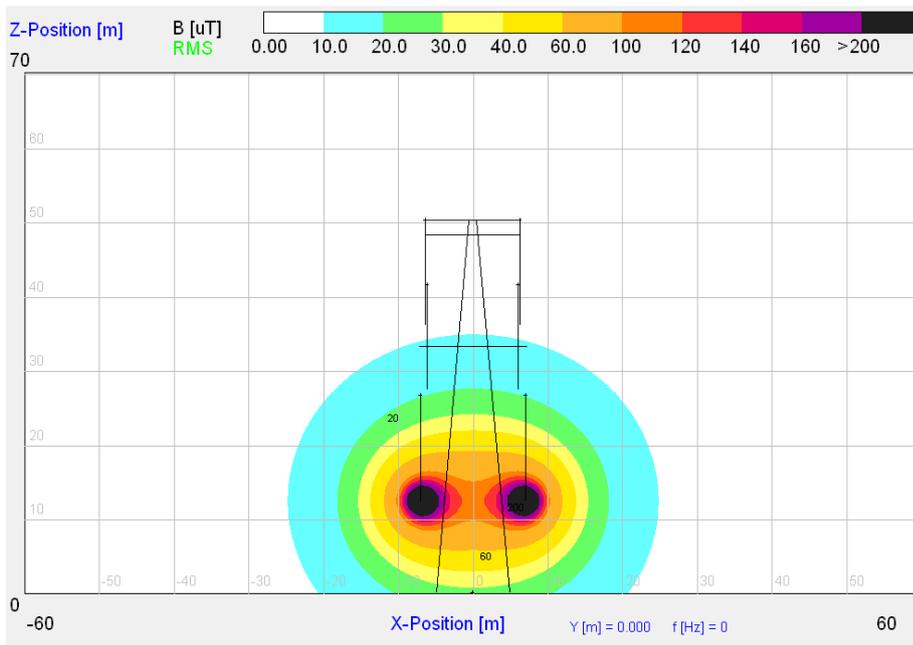
*Magnetische Flussdichteverteilung*

**± 500-kV-Spannungsebene**

*Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m, unteres System im Betrieb*

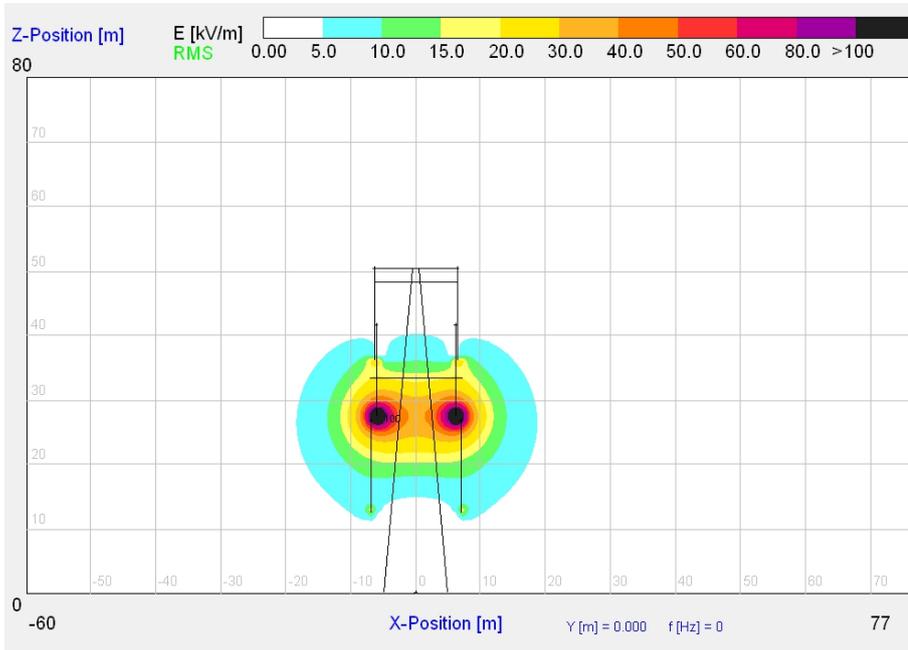


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

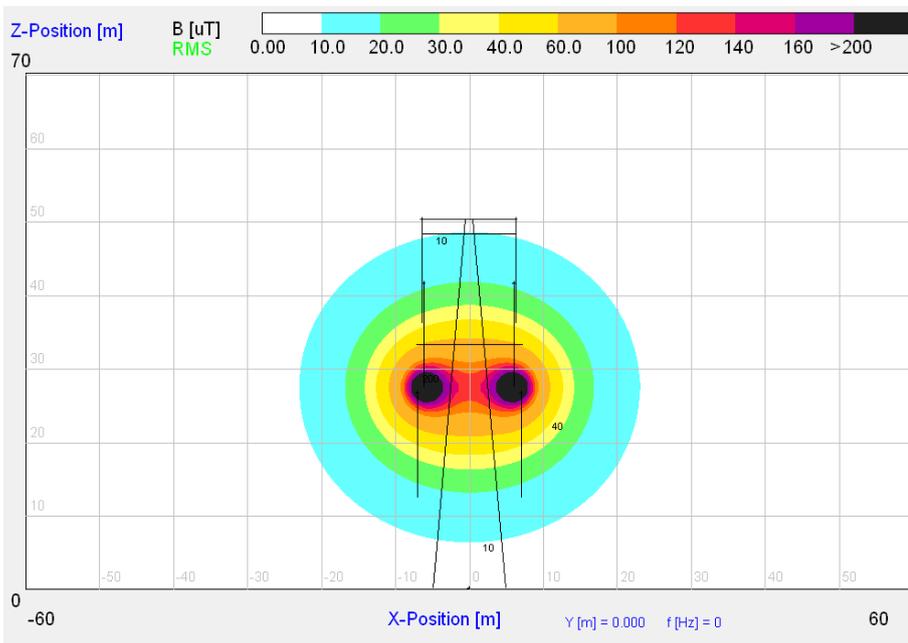


*Magnetische Flussdichteverteilung*

Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m, oberes System im Betrieb



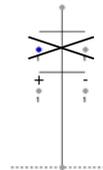
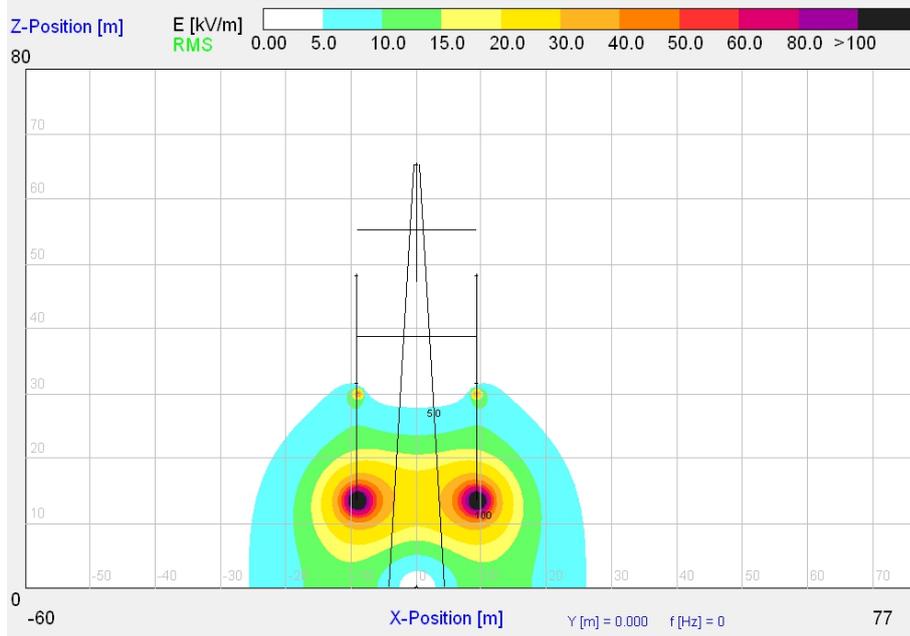
Elektrische Feldstärkeverteilung



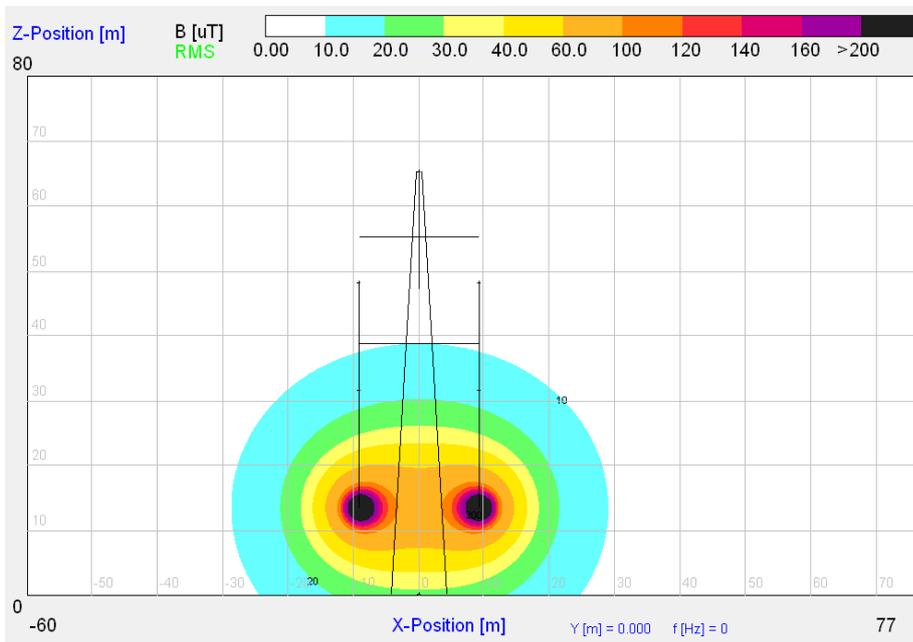
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 600-kV-Spannungsebene**

*Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m, unteres System im Betrieb*

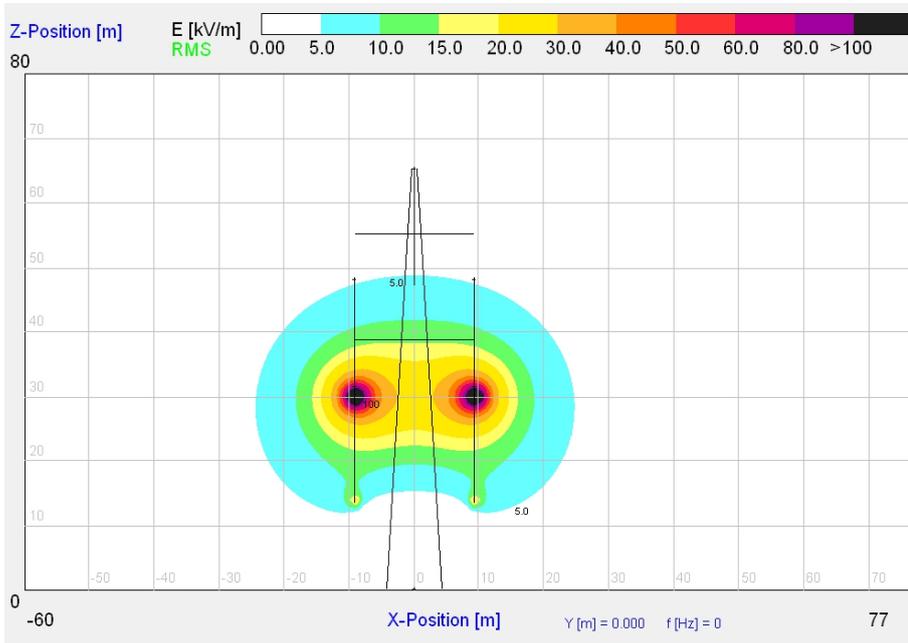


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

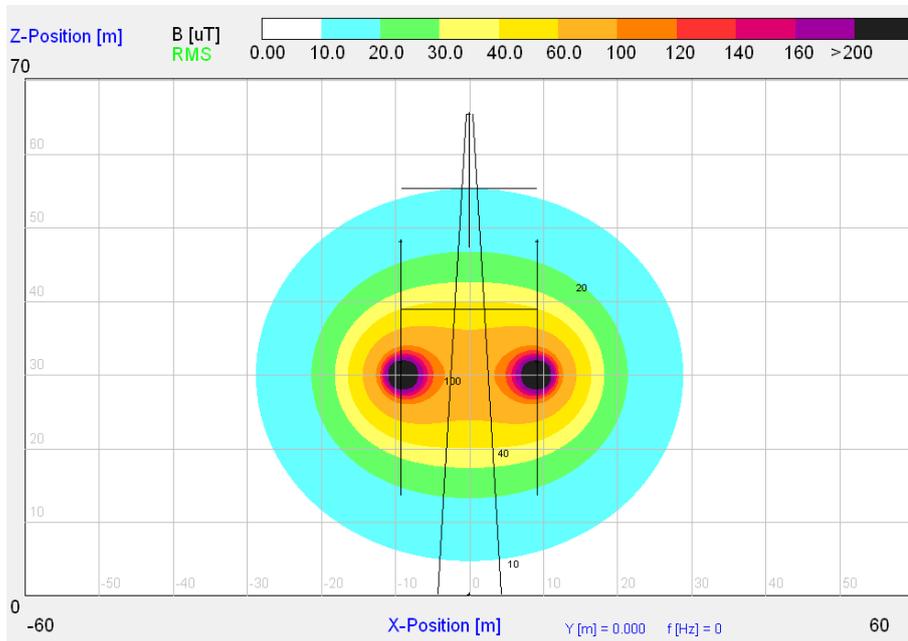


*Magnetische Flussdichteverteilung*

Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m, oberes System im Betrieb



Elektrische Feldstärkeverteilung

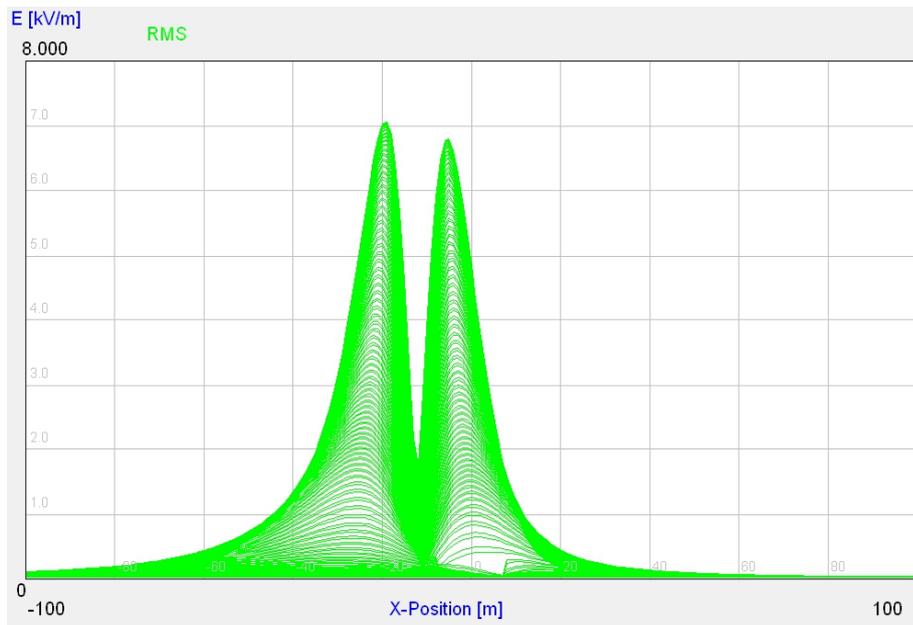


Magnetische Flussdichteverteilung

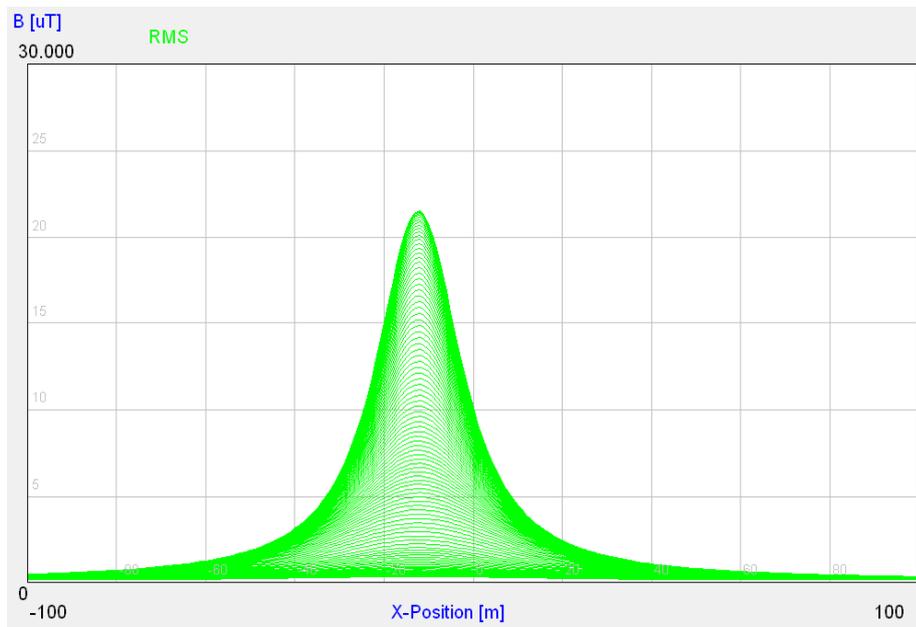
## Elektrischer Feldstärkeverlauf und magnetischer Flussdichteverlauf 1 m über der Erdbodenoberkante

± 400-kV-Spannungsebene

Einebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m, linkes System im Betrieb

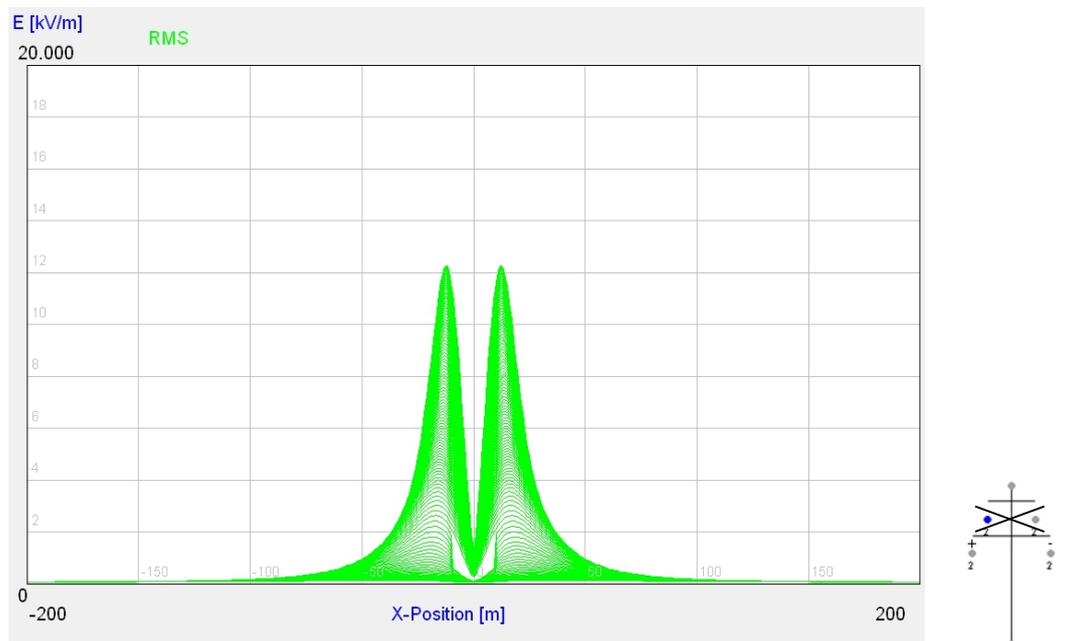


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 7,1 \text{ kV/m}$ )

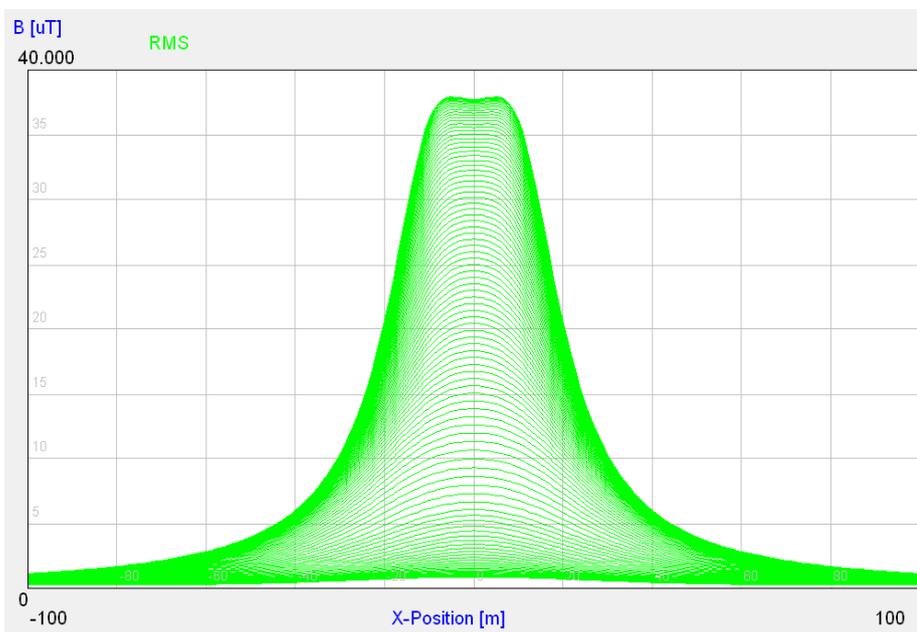


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 21,5 \text{ µT}$ )

Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m, unteres System im Betrieb

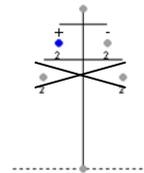
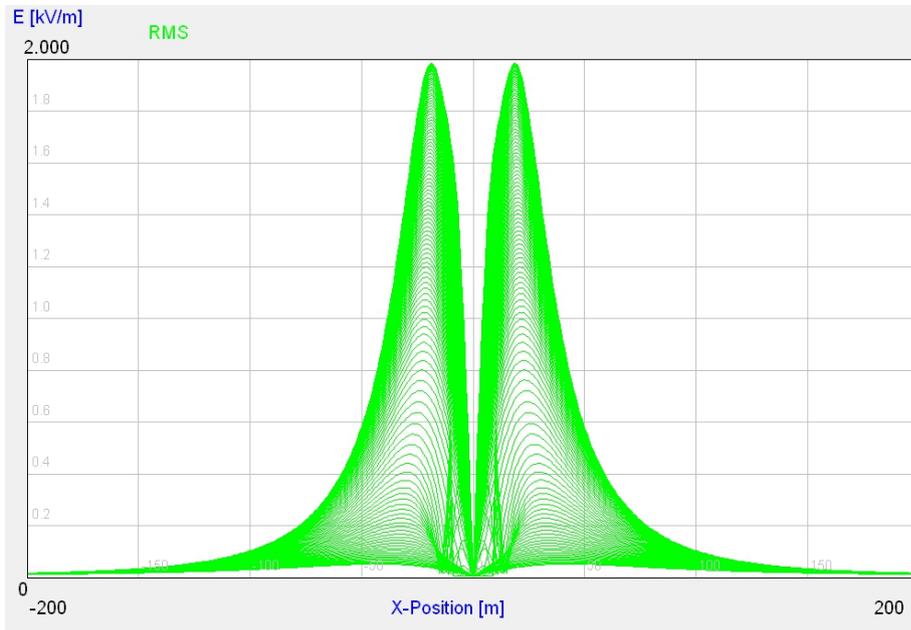


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 12,2$  kV/m)

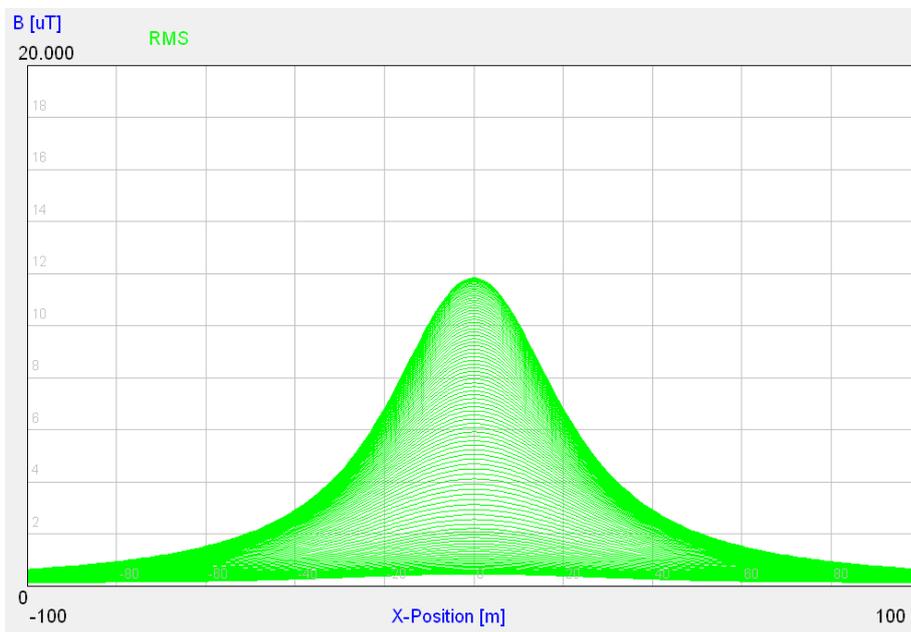


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 37,9$   $\mu T$ )

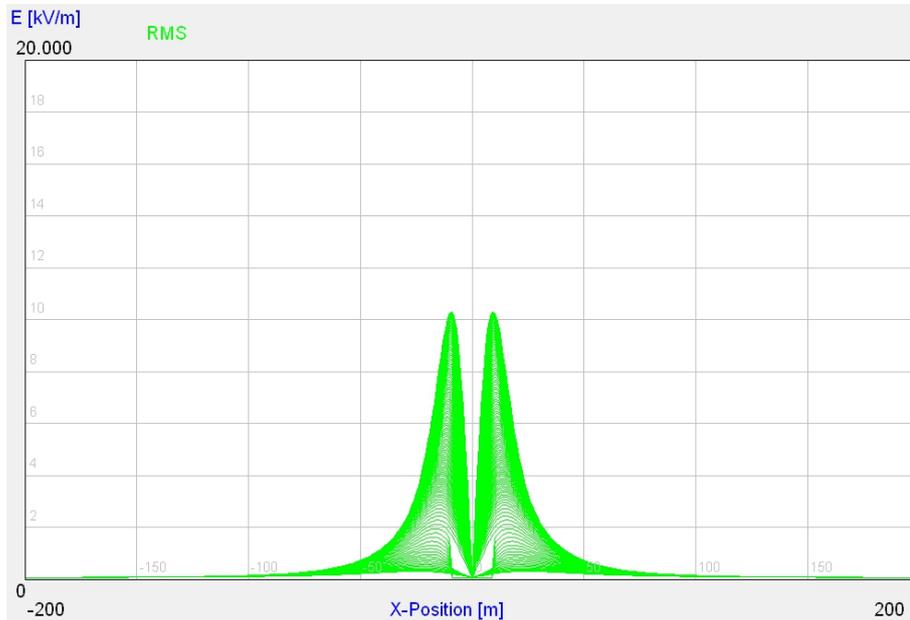
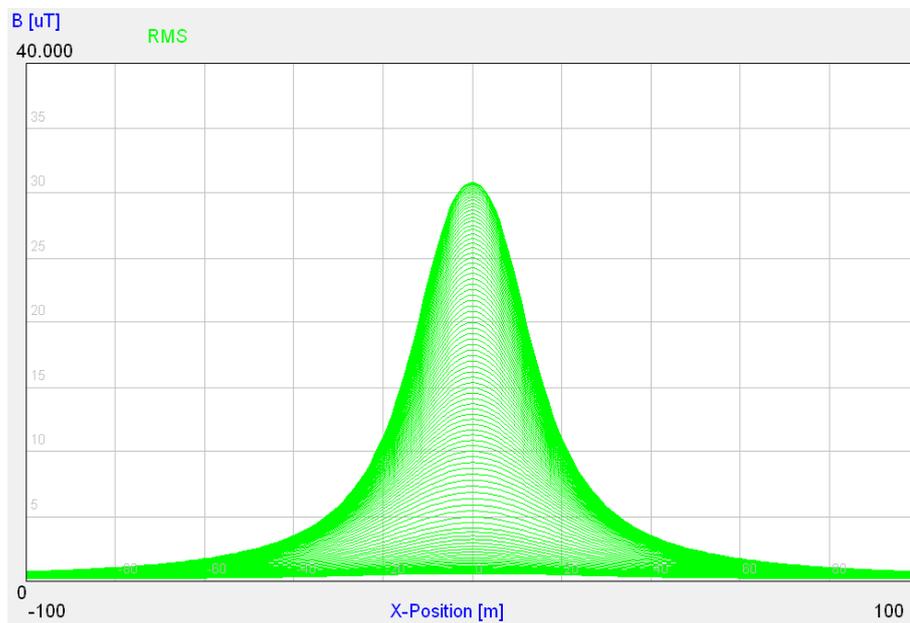
Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m, oberes System im Betrieb



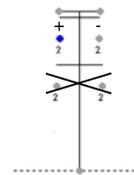
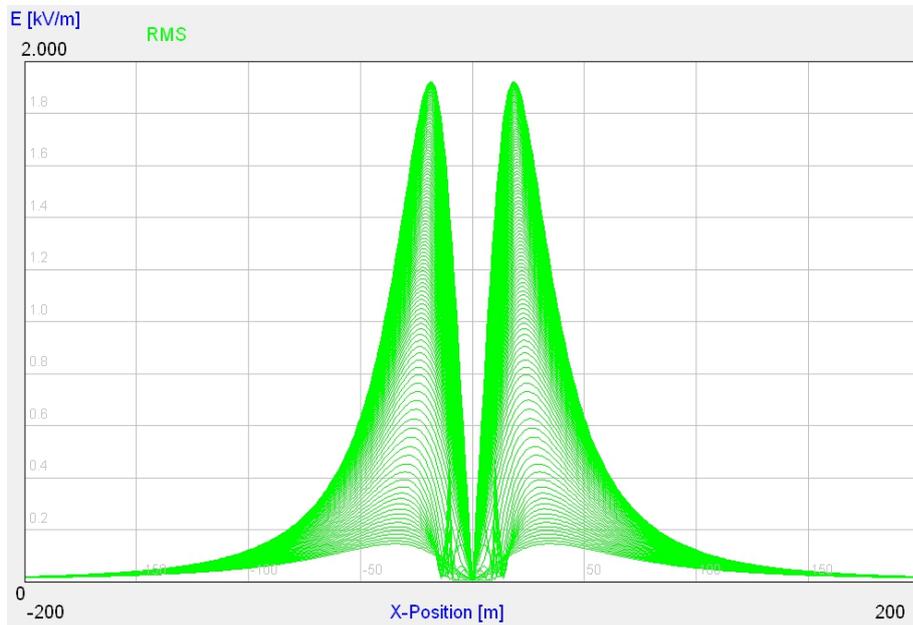
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0\max} = 2 \text{ kV/m}$ )



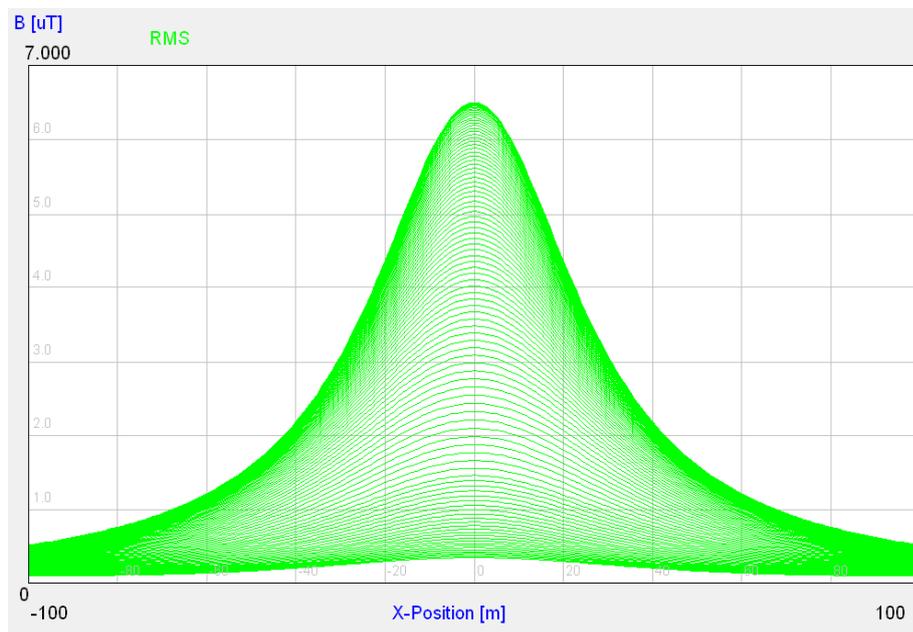
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{\max} = 11,8 \mu\text{T}$ )

**$\pm 500$ -kV-Spannungsebene***Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m, unteres System im Betrieb**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 10,3$  kV/m)**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 30,8$   $\mu T$ )*

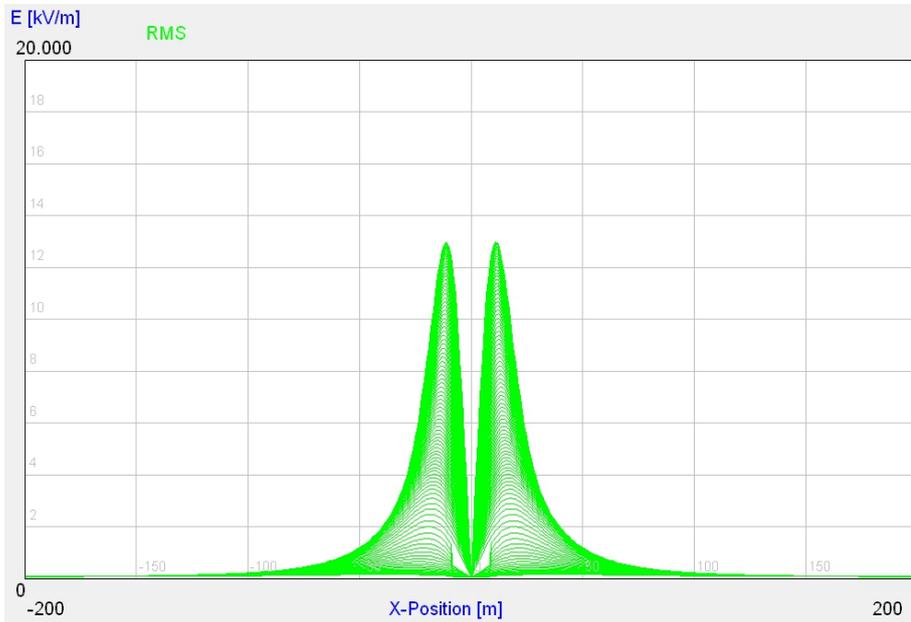
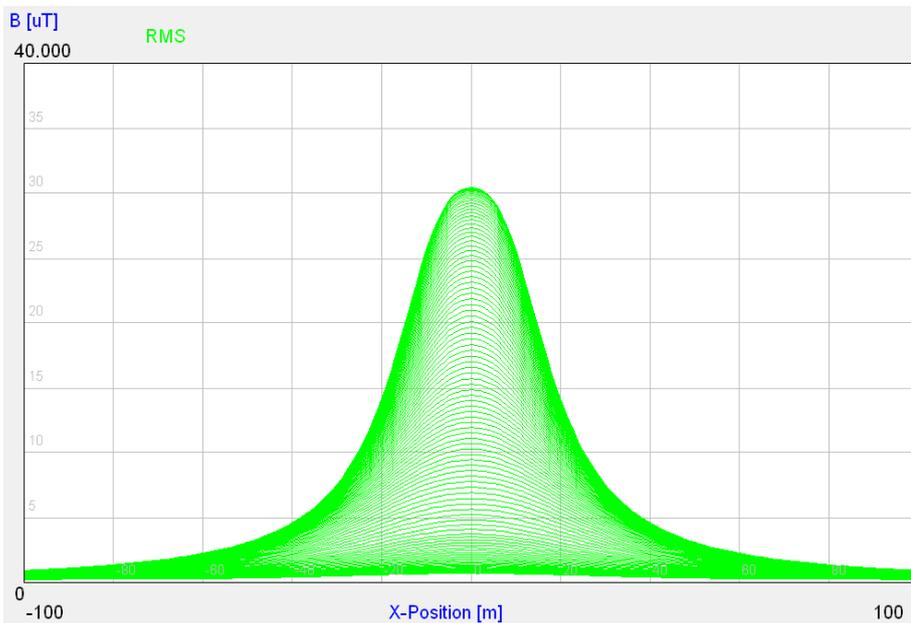
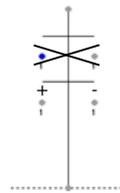
Zweiebeneanordnung, Bodenabstand 12,5 m, oberes System im Betrieb



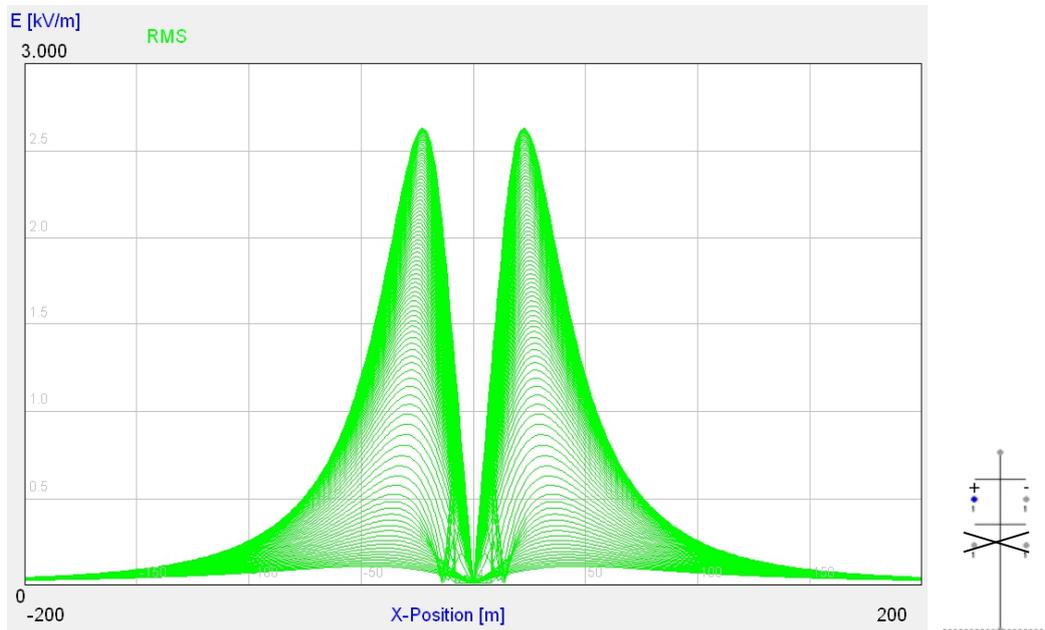
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 1,9$  kV/m)



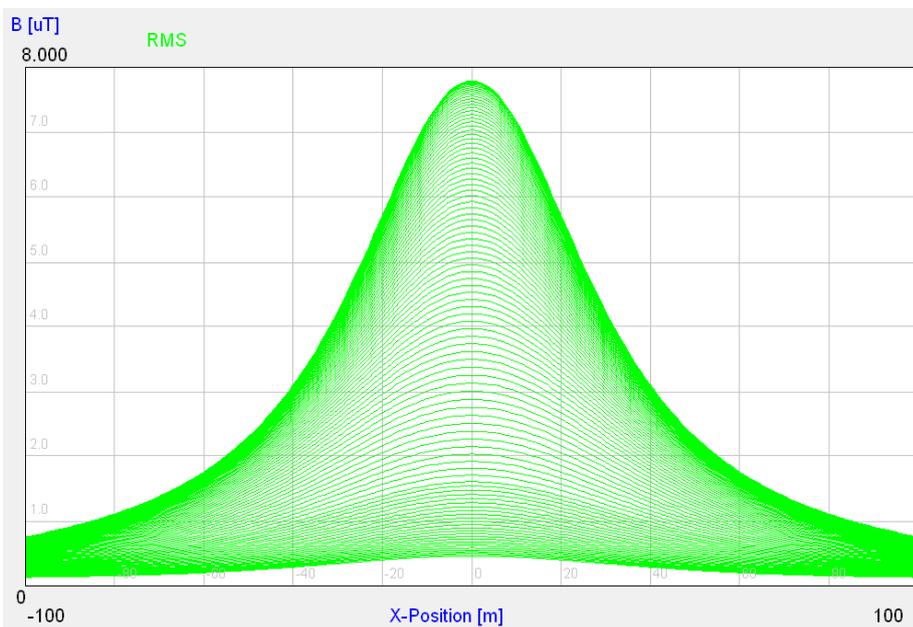
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 6,5$   $\mu T$ )

**± 600-kV-Spannungsebene***Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m, unteres System im Betrieb**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,1$  kV/m)**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 30,4$   $\mu\text{T}$ )*

Zweiebeneanordnung, Bodenabstand 13,5 m, oberes System im Betrieb



Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 2,6$  kV/m)



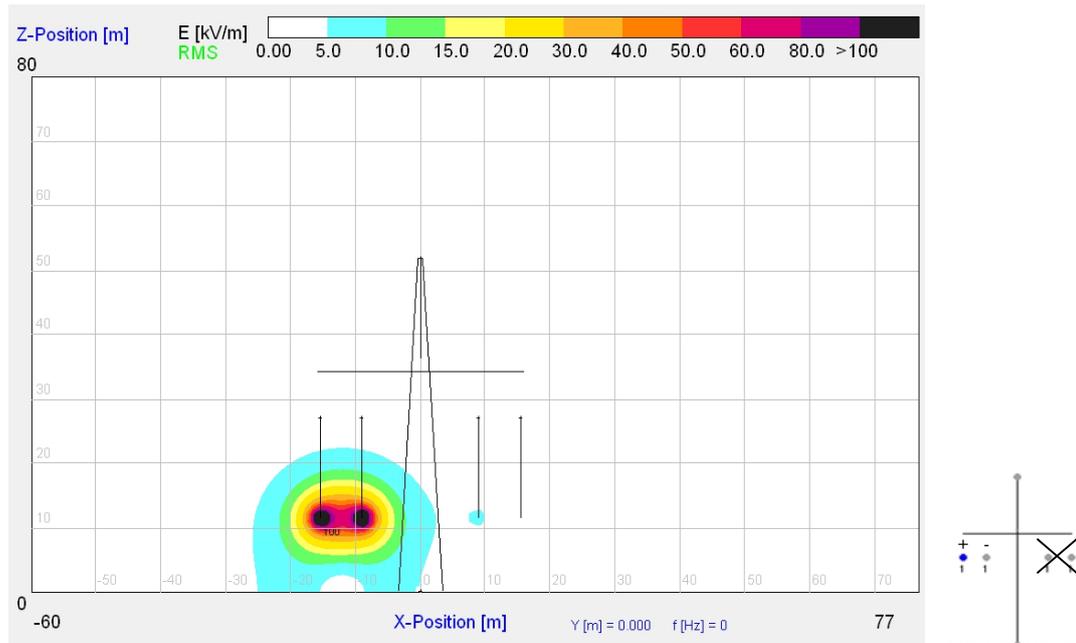
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 7,8$   $\mu\text{T}$ )

## Anhang A4 – Betrieb eines Systems mit doppelter Leistung

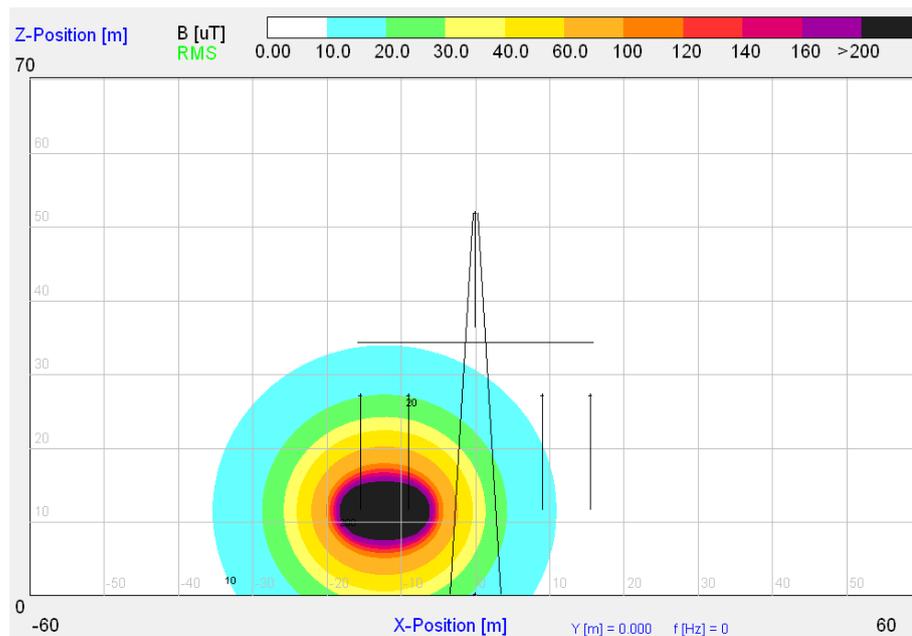
### Elektrische Feldstärkeverteilung und magnetische Flussdichteverteilung im Querschnitt (xz-Ebene)

$\pm 400$ -kV-Spannungsebene

Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, linkes System im Betrieb

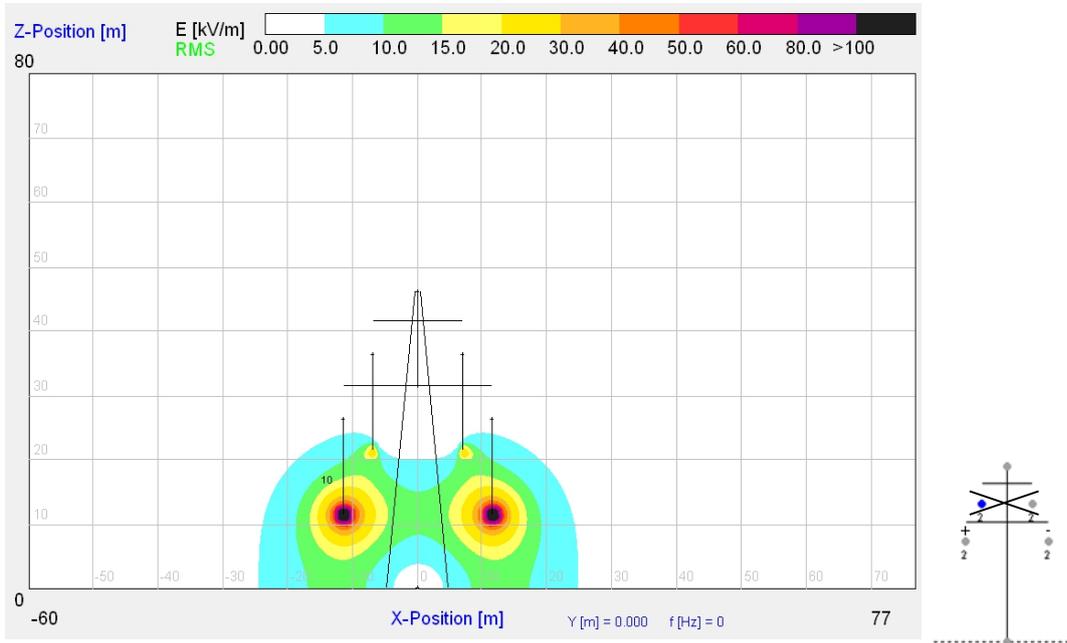


Elektrische Feldstärkeverteilung

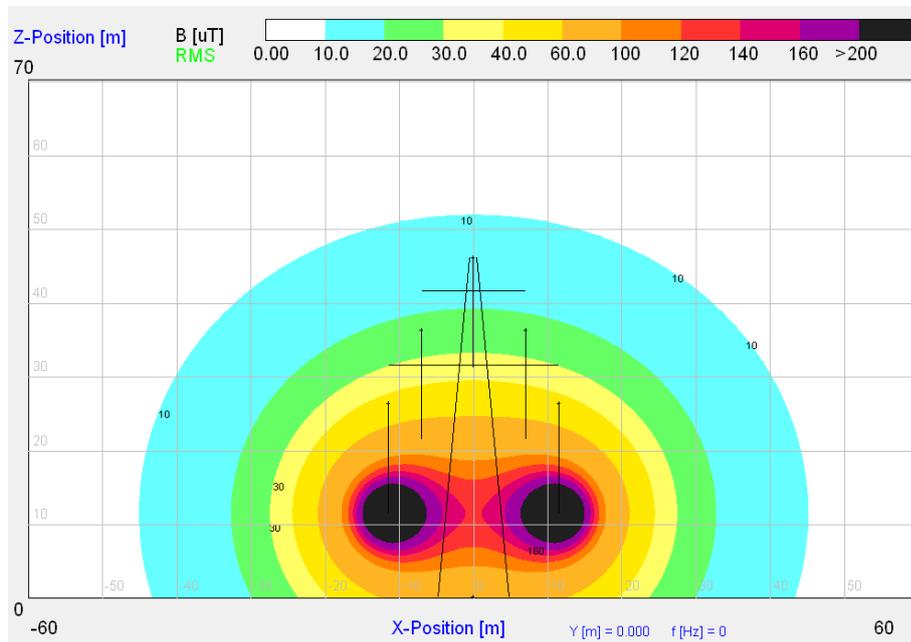


Magnetische Flussdichteverteilung

Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m, unteres System im Betrieb

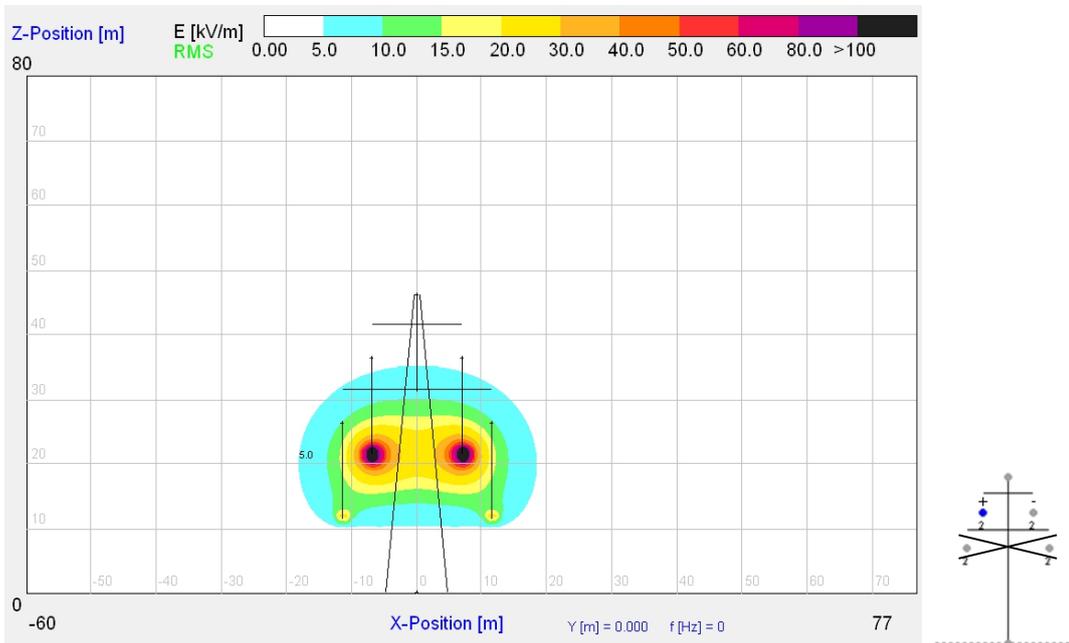


Elektrische Feldstärkeverteilung

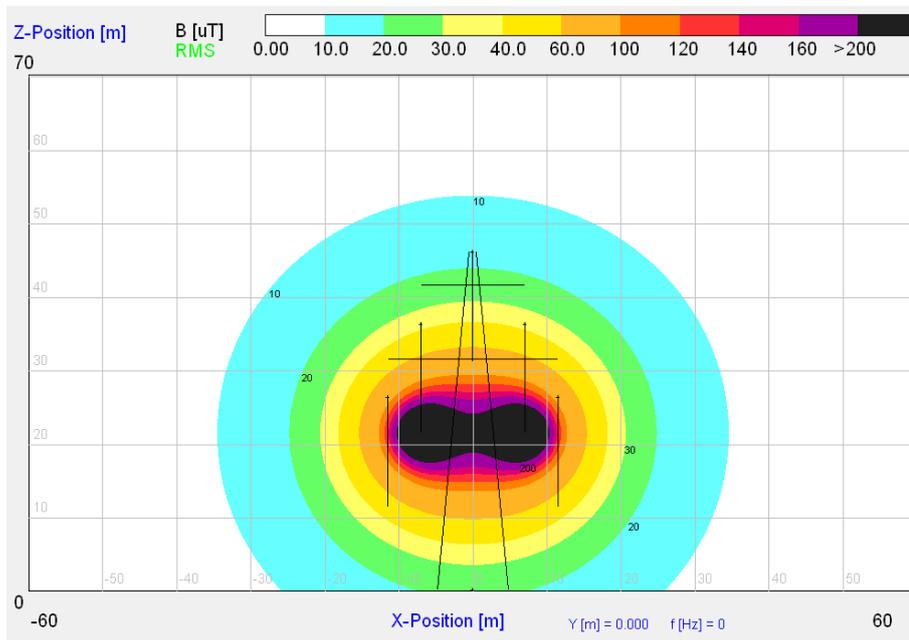


Magnetische Flussdichteverteilung

Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m, oberes System im Betrieb



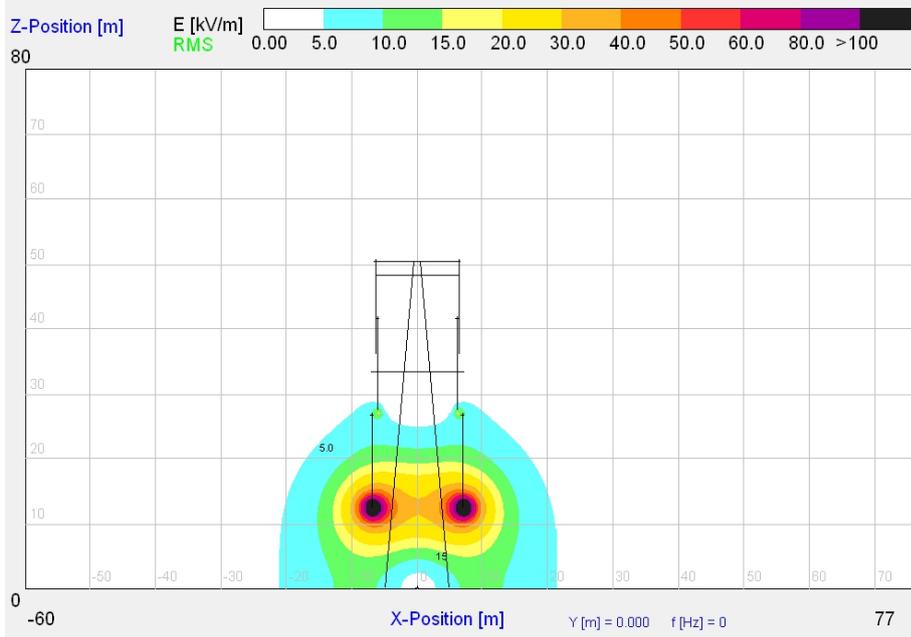
Elektrische Feldstärkeverteilung



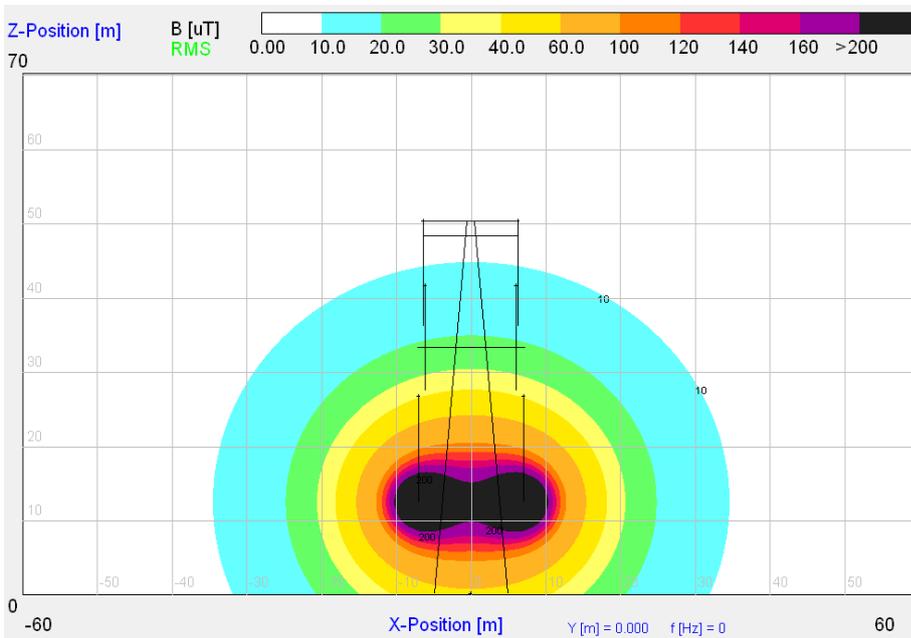
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 500-kV-Spannungsebene**

*Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m, unteres System im Betrieb*

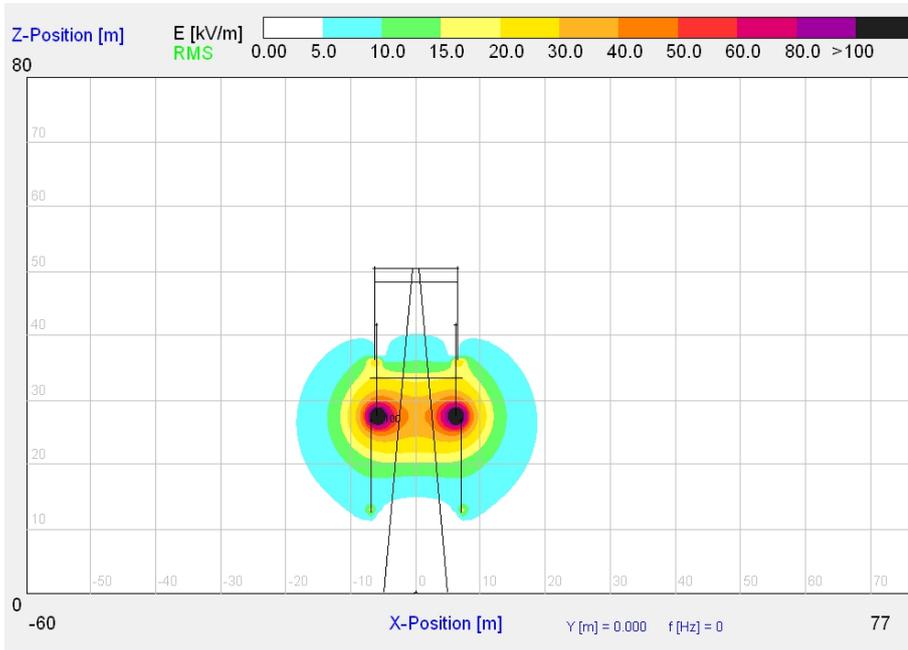


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

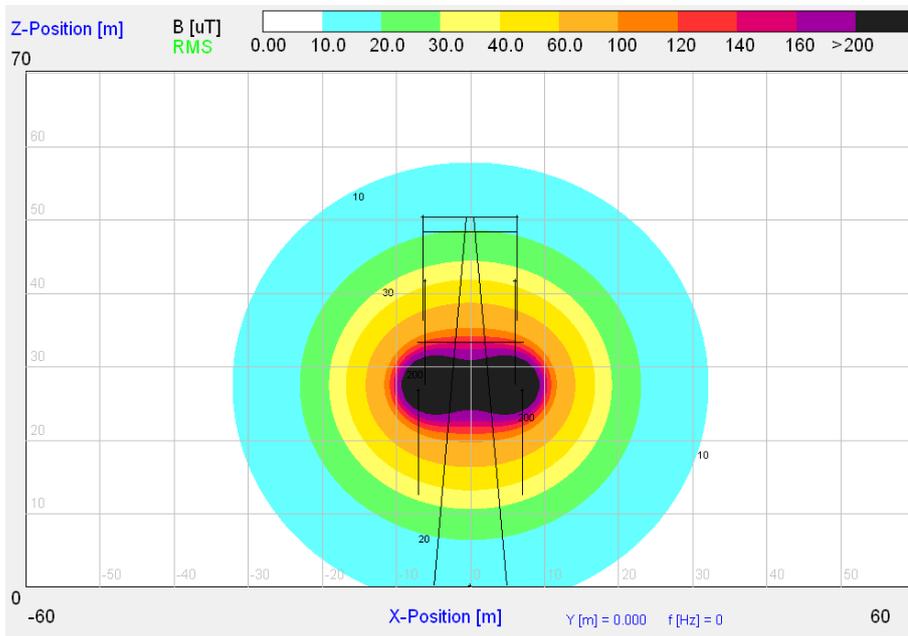


*Magnetische Flussdichteverteilung*

Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m, oberes System im Betrieb



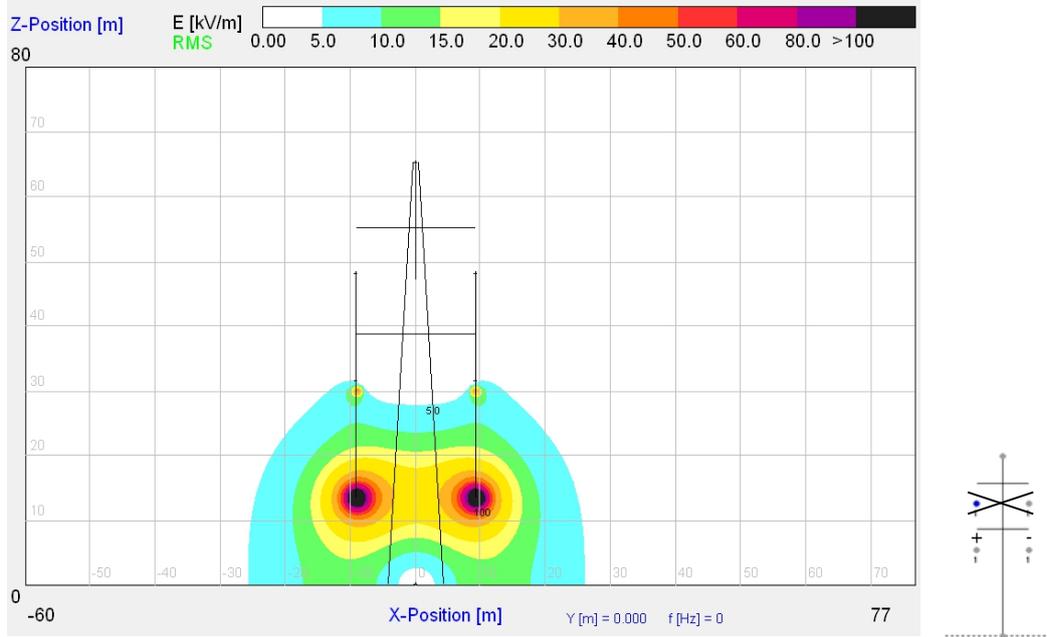
Elektrische Feldstärkeverteilung



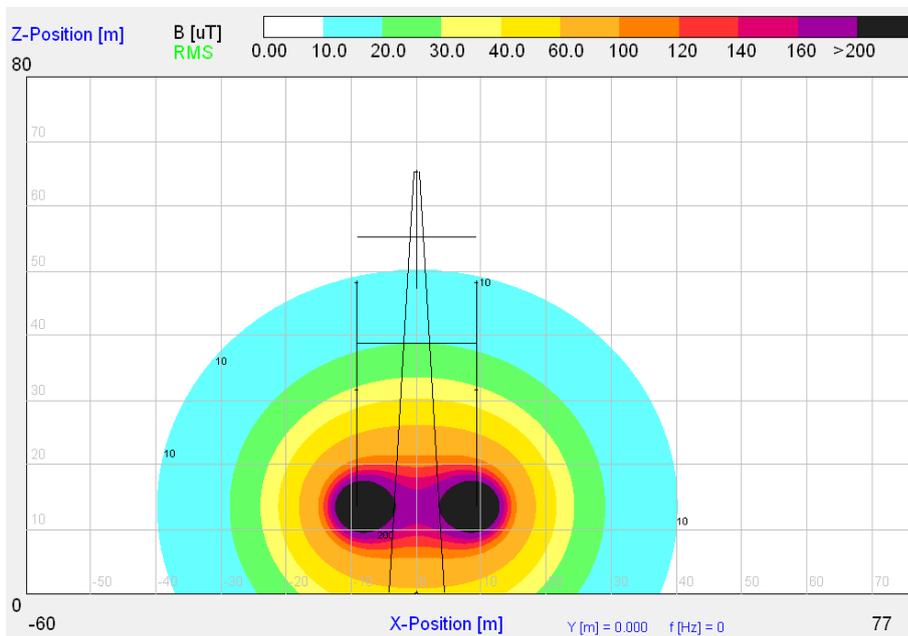
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 600-kV-Spannungsebene**

*Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m, unteres System im Betrieb*

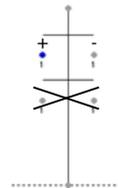
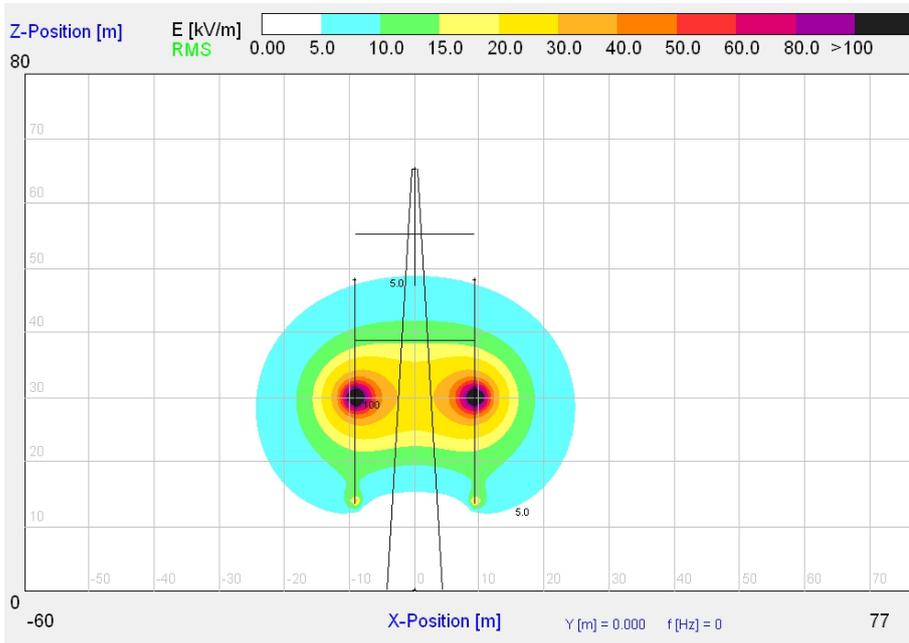


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

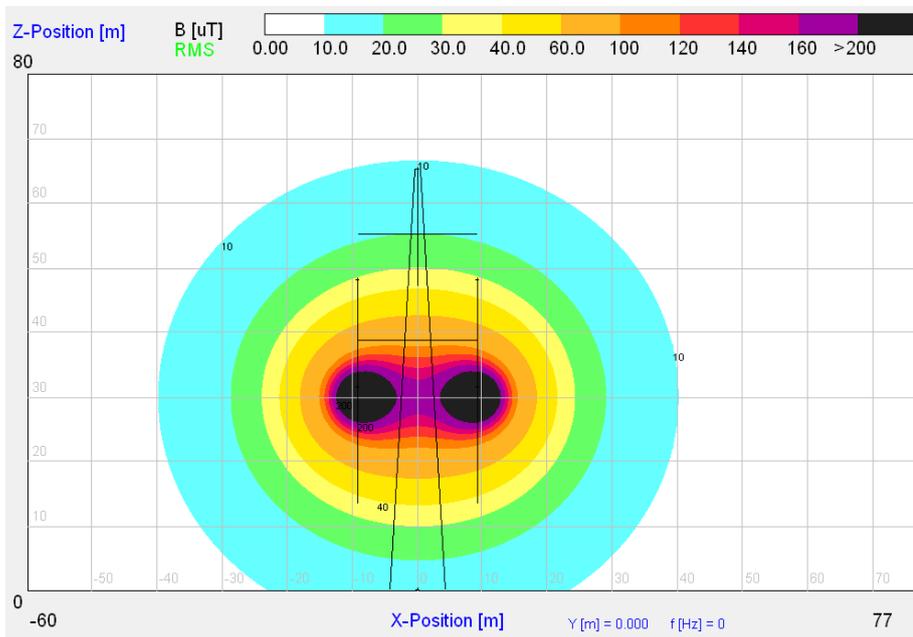


*Magnetische Flussdichteverteilung*

Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m, oberes System im Betrieb



Elektrische Feldstärkeverteilung

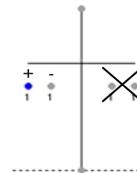
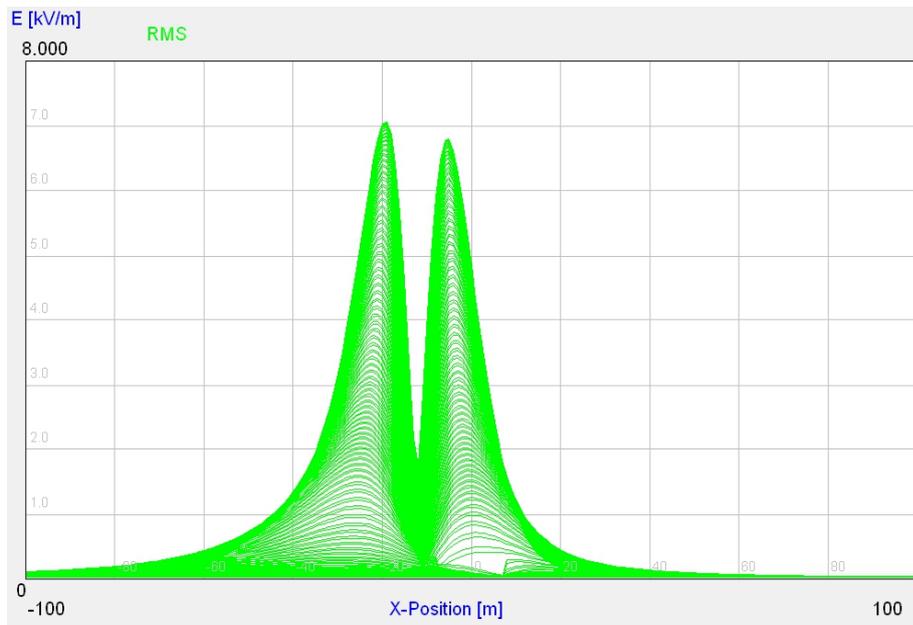


Magnetische Flussdichteverteilung

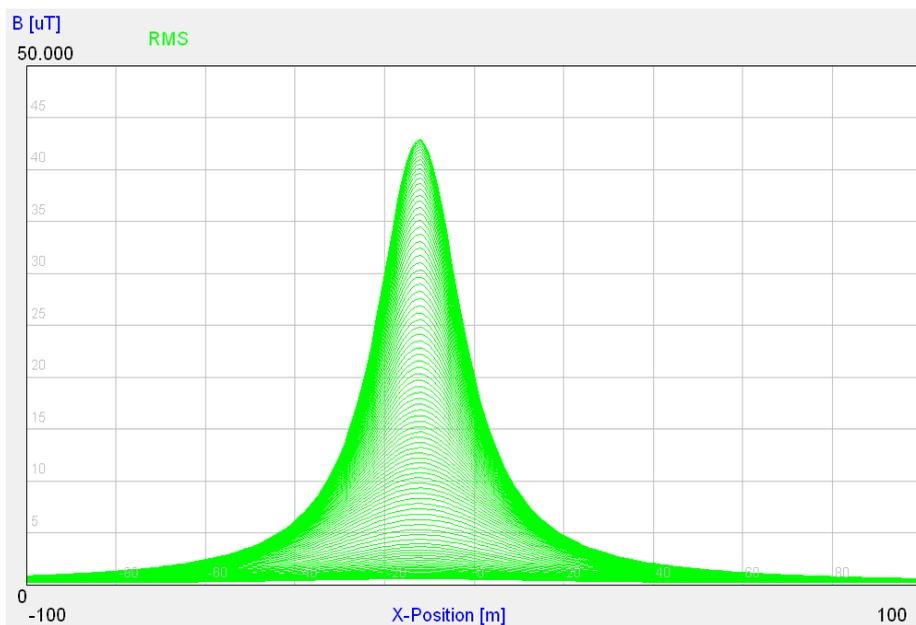
## Elektrischer Feldstärkeverlauf und magnetischer Flussdichteverlauf 1 m über der Erdoberkante

± 400-kV-Spannungsebene

Einebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m, linkes System im Betrieb

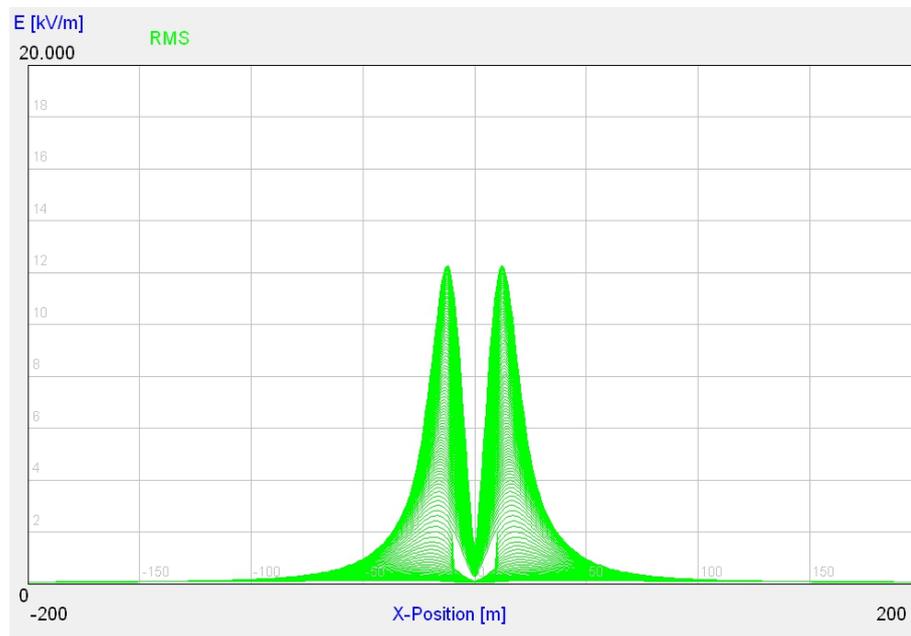


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 7,1$  kV/m)

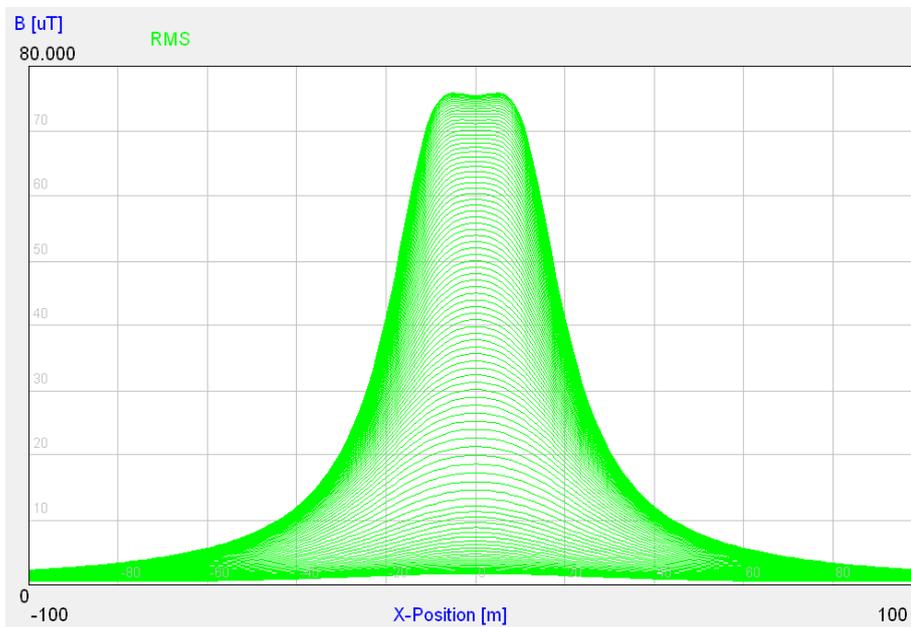


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 42,9$   $\mu$ T)

Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m, unteres System im Betrieb

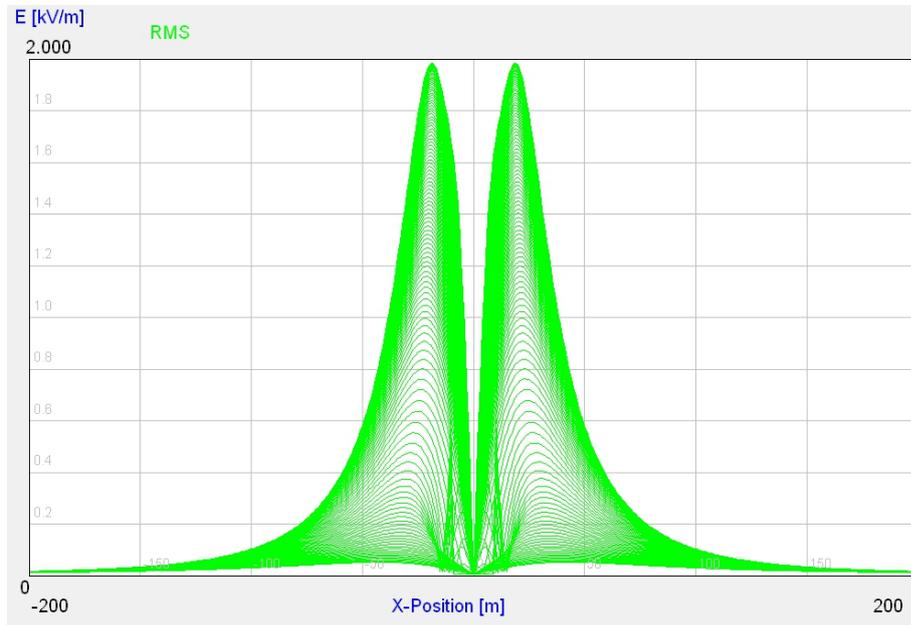


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 12,2$  kV/m)

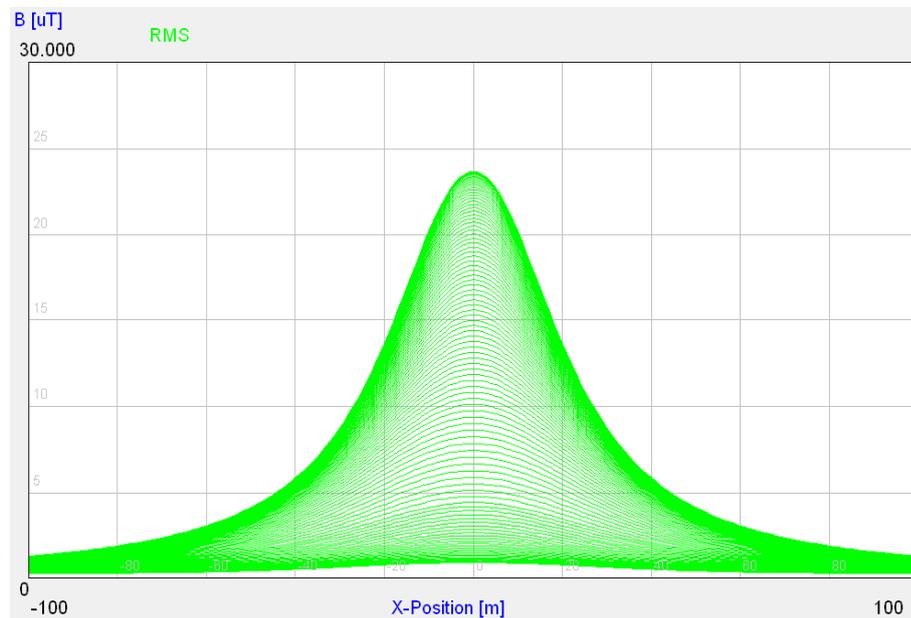


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 75,8$   $\mu T$ )

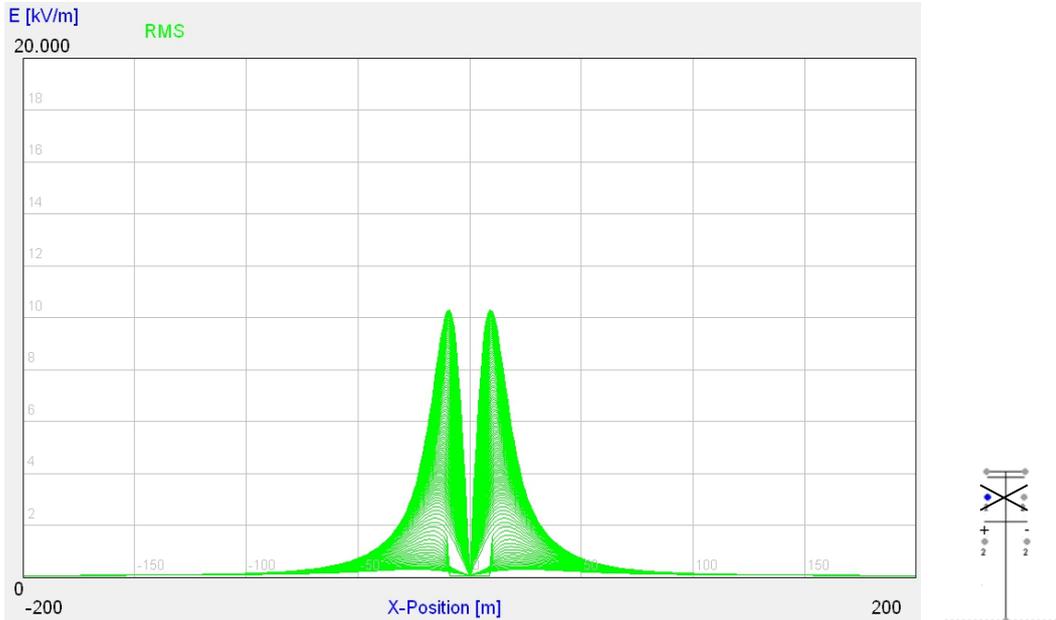
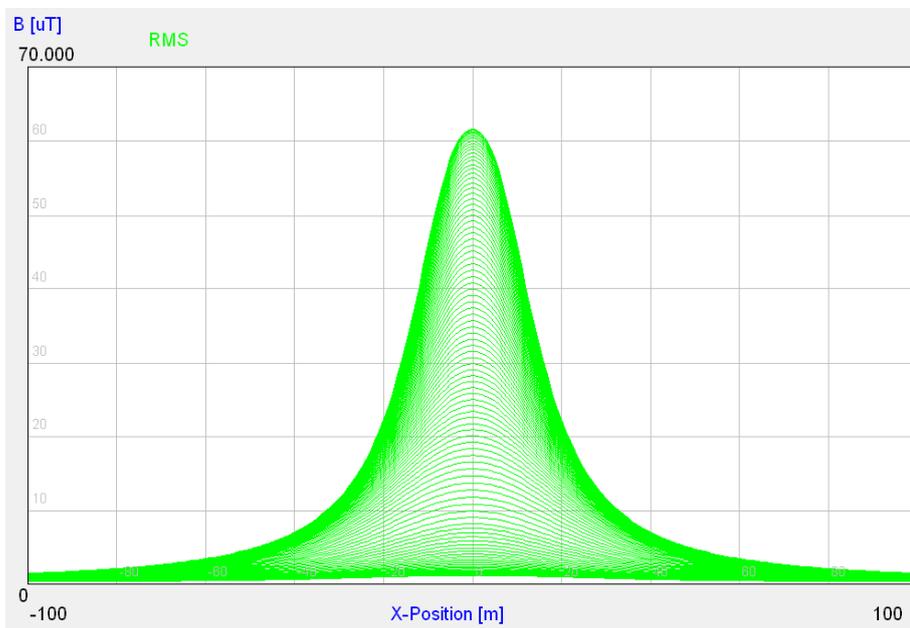
Zweiebeneanordnung, Bodenabstand 11,5 m, oberes System im Betrieb



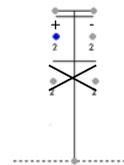
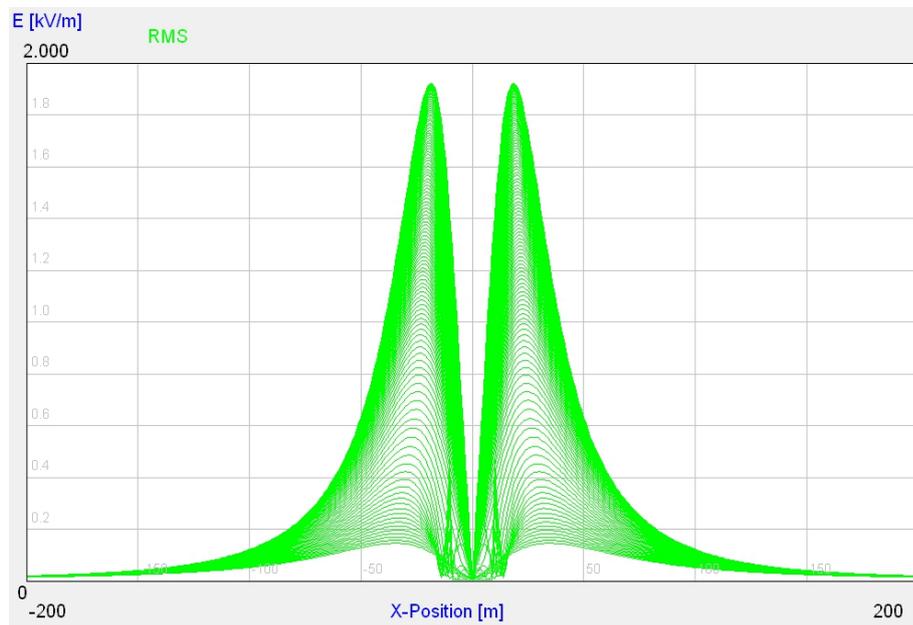
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 2$  kV/m)



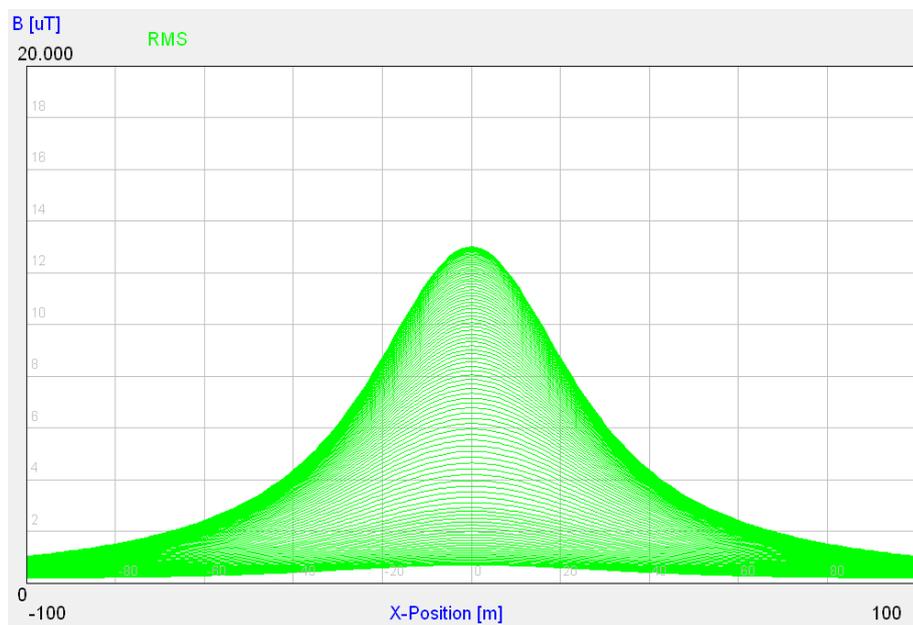
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 23,6$   $\mu$ T)

**± 500-kV-Spannungsebene***Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m, unteres System im Betrieb**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 10,3$  kV/m)**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 61,5$   $\mu T$ )*

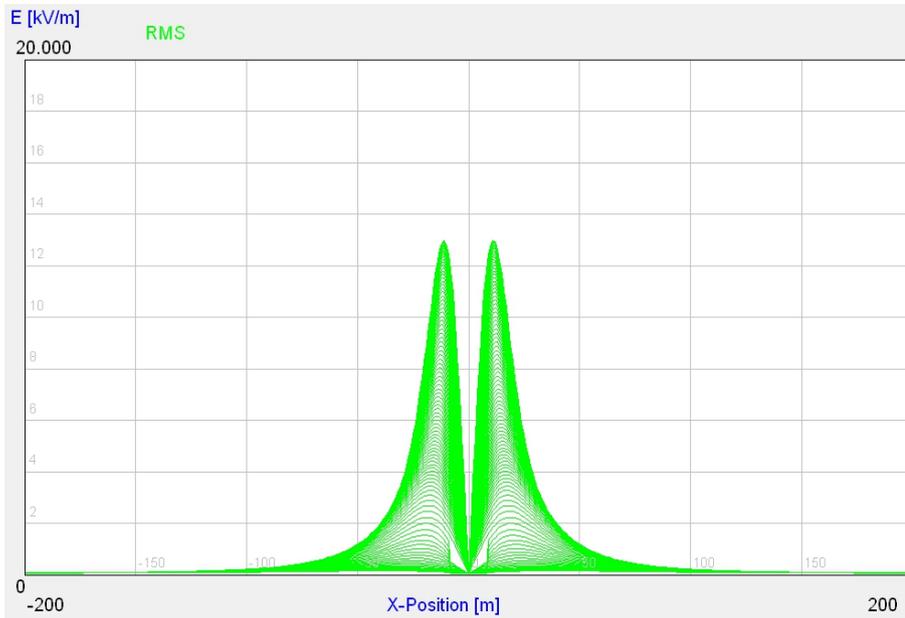
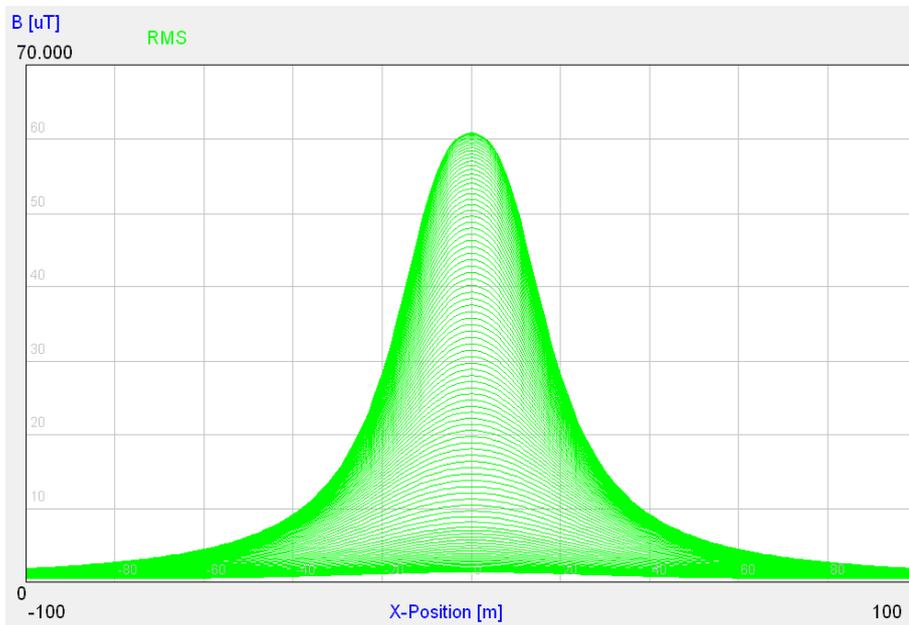
Zweiebeneanordnung, Bodenabstand 12,5 m, oberes System im Betrieb



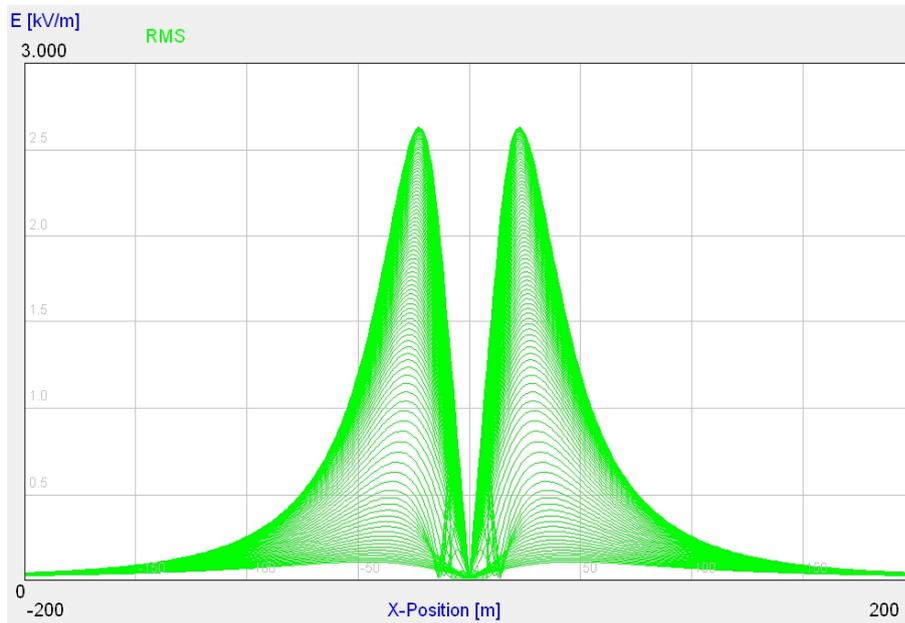
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 1,9$  kV/m)



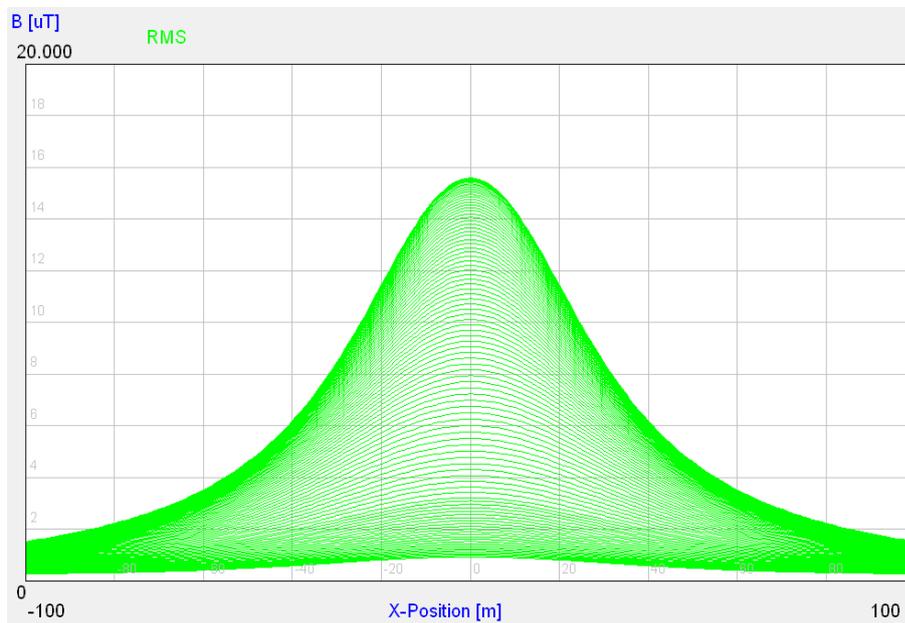
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 13$   $\mu T$ )

**± 600-kV-Spannungsebene***Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m, unteres System im Betrieb**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,1 \text{ kV/m}$ )**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 60,8 \mu\text{T}$ )*

Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m, oberes System im Betrieb



Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 2,6 \text{ kV/m}$ )



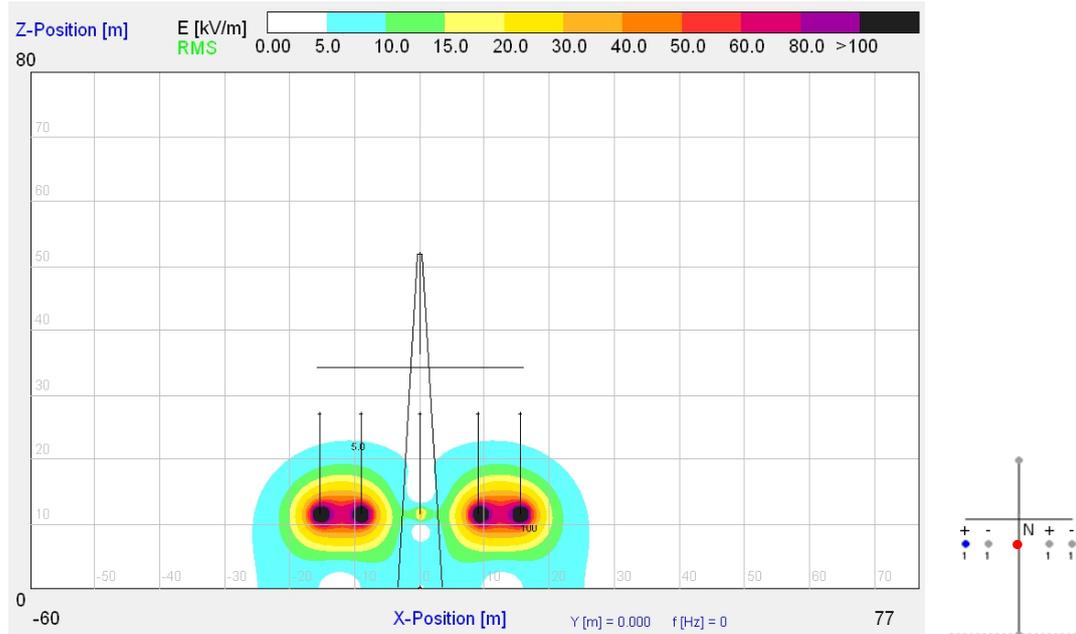
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 15,6 \mu\text{T}$ )

## Anhang A5 – Nennbetrieb bipolarer Systeme mit Neutralleiter

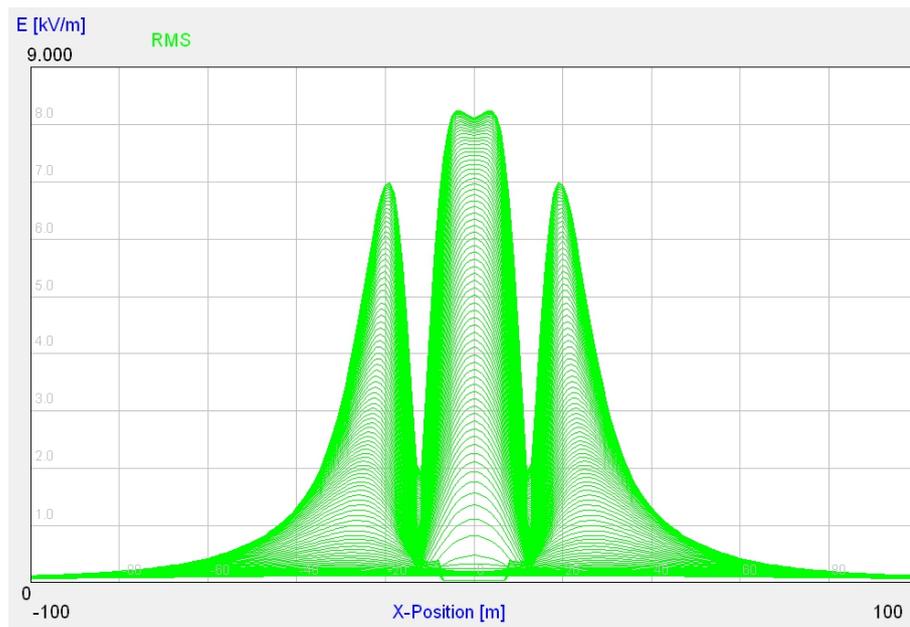
Elektrische Feldstärkeverteilung im Querschnitt (xz-Ebene) und elektrischer Feldstärkeverlauf 1 m über der Erdbodenoberkante

± 400-kV-Spannungsebene

Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m



Elektrische Feldstärkeverteilung



Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 8,2 \text{ kV/m}$ )

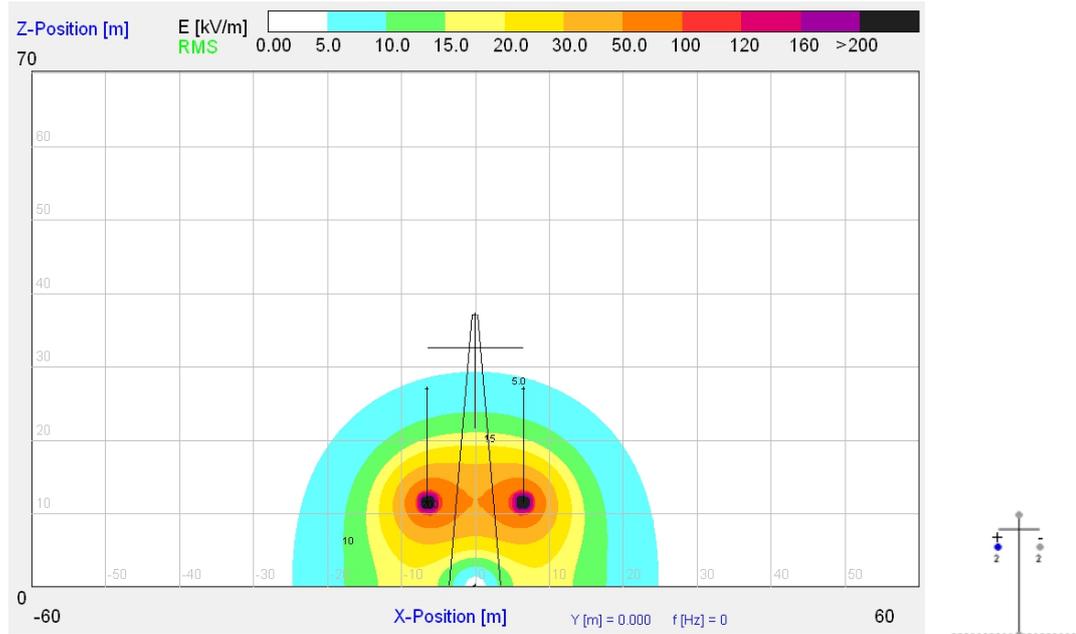


## Anhang A6 – Fehlerzustand Überspannung bipolarer Systeme

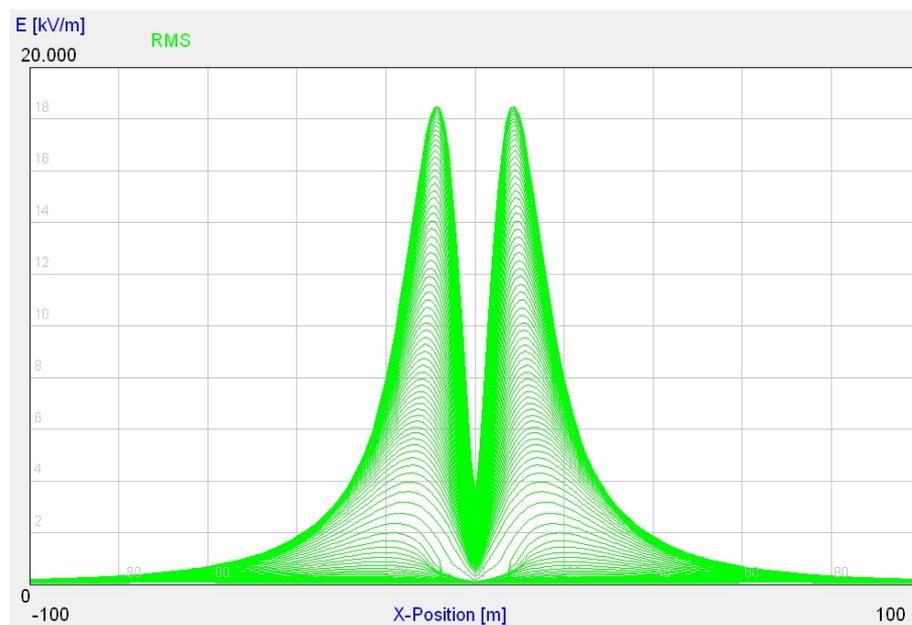
Elektrische Feldstärkeverteilung im Querschnitt (xz-Ebene) und elektrischer Feldstärkeverlauf 1 m über der Erdbodenoberkante

$\pm 400$ -kV-Spannungsebene

1 System, Bodenabstand 11,5 m

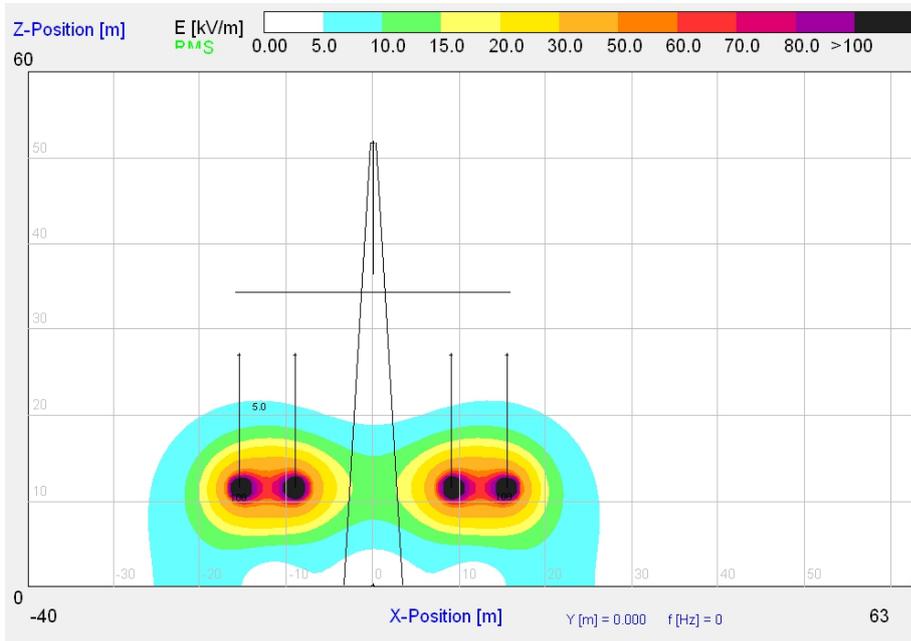


Elektrische Feldstärkeverteilung

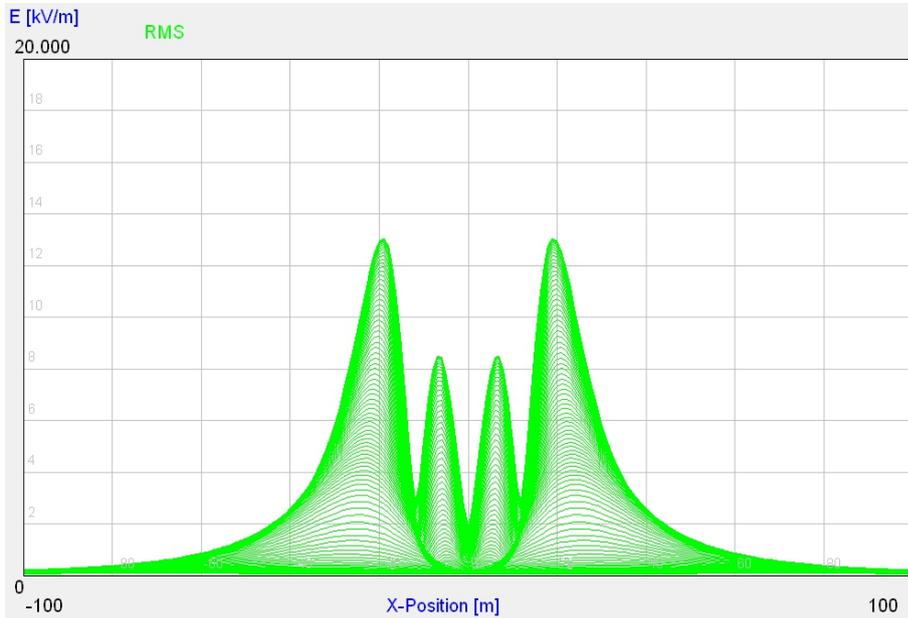


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 18,5$  kV/m)

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - + -

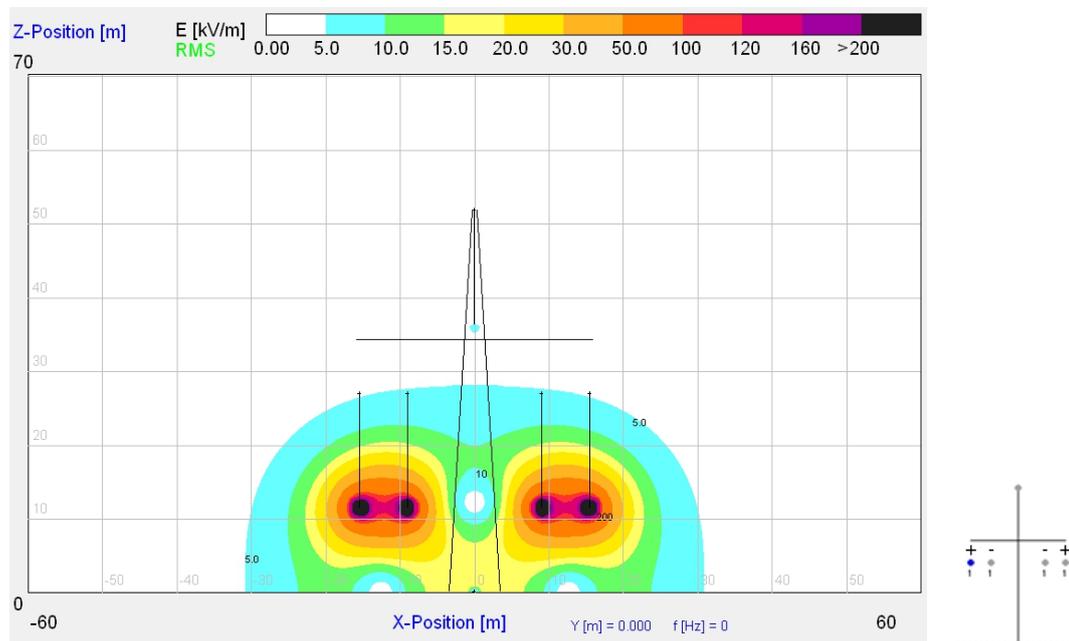


Elektrische Feldstärkeverteilung

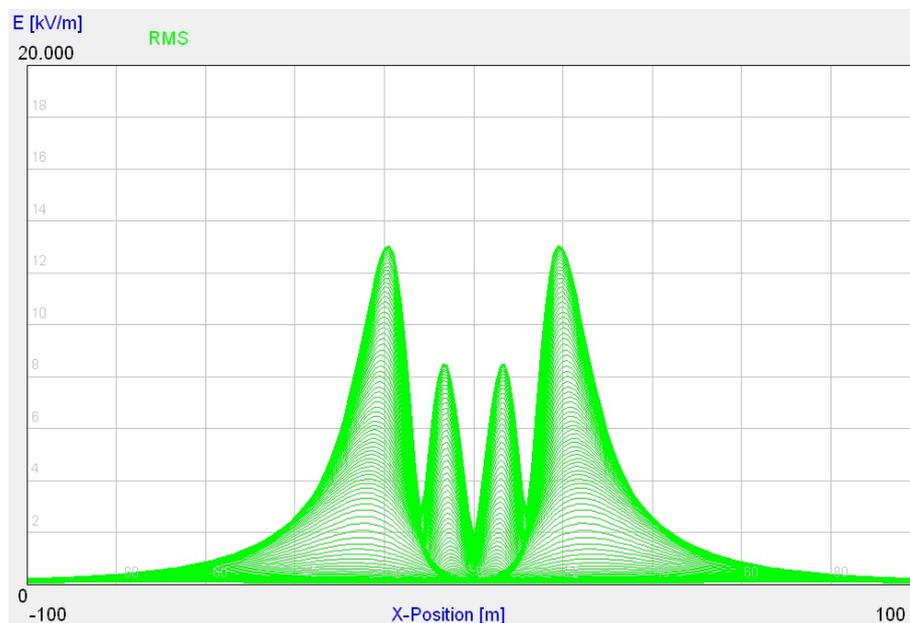


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13 \text{ kV/m}$ )

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - - +

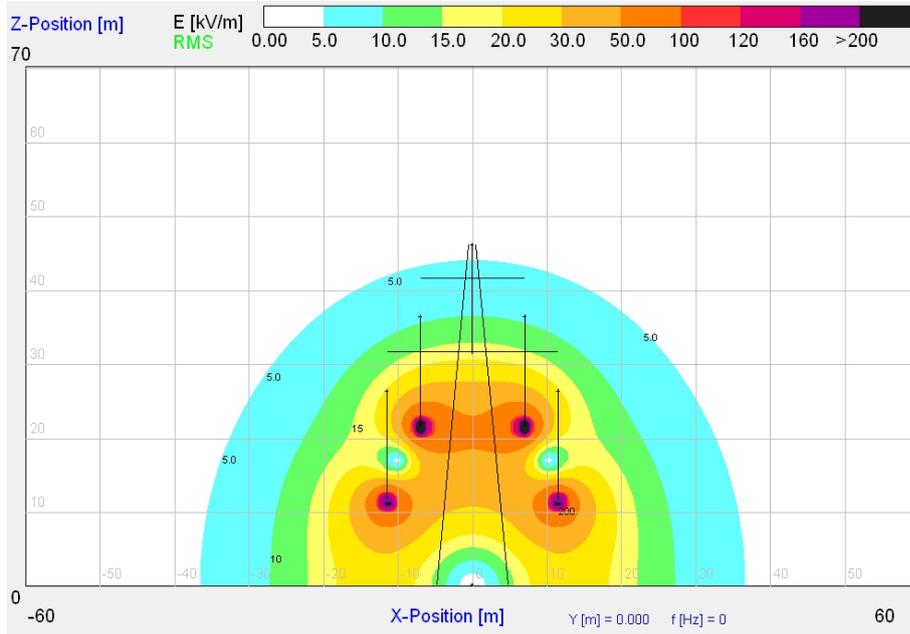


Elektrische Feldstärkeverteilung

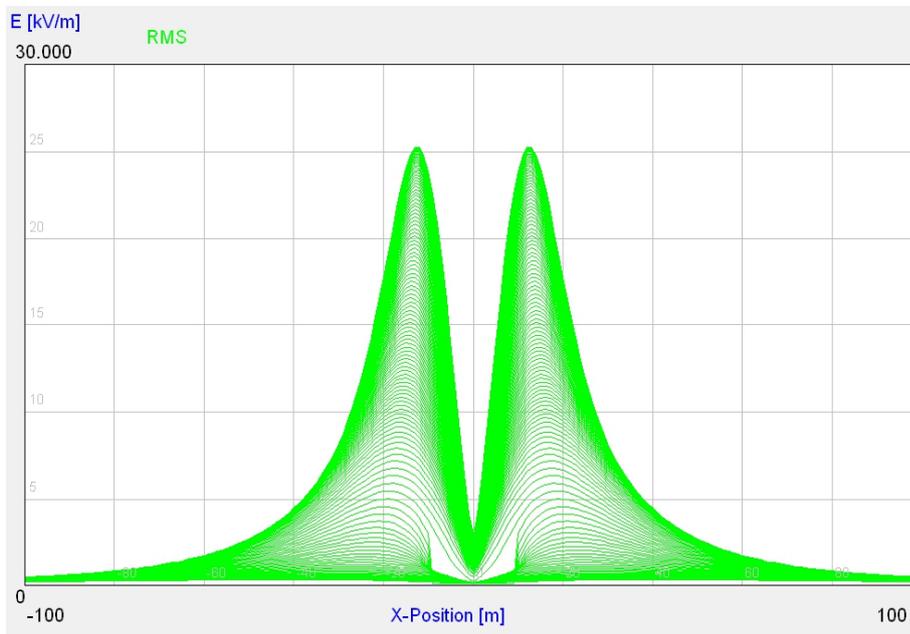


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 17,3 \text{ kV/m}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten)

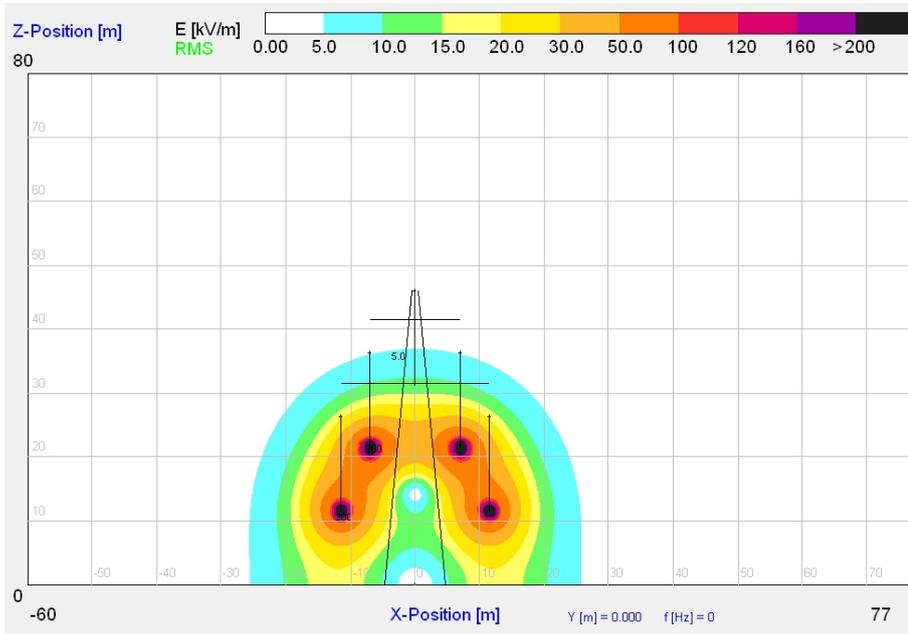


Elektrische Feldstärkeverteilung

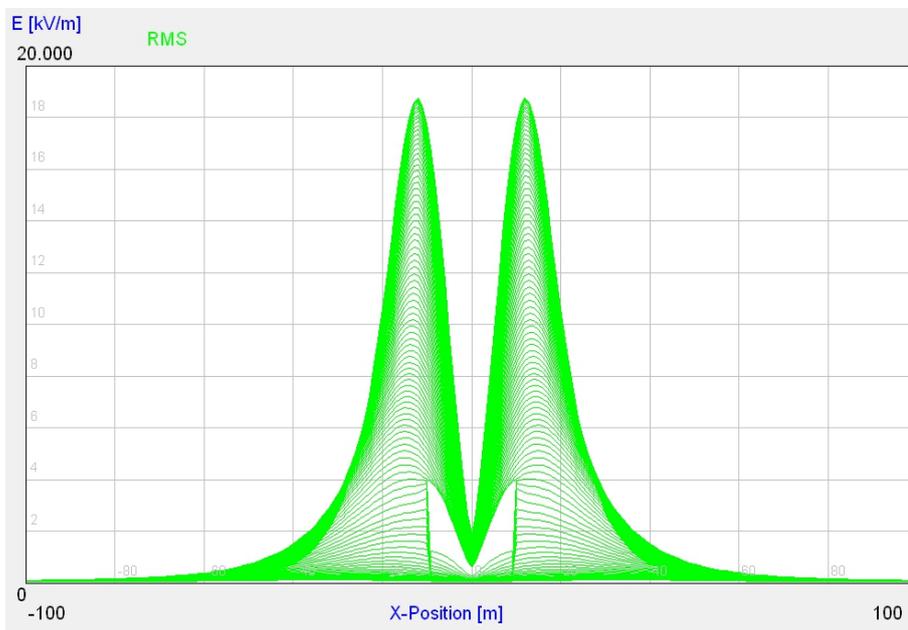


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 25,2 \text{ kV/m}$ )

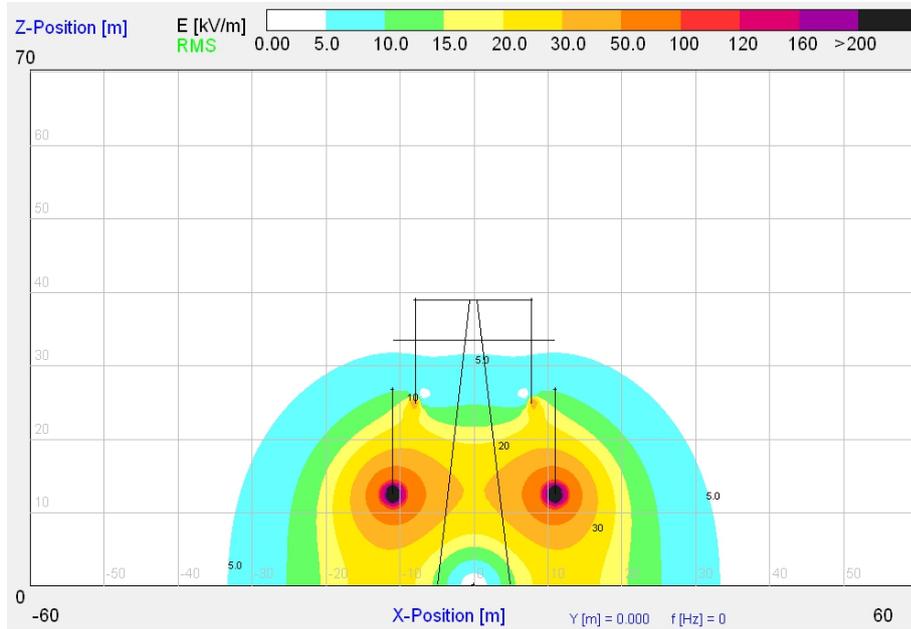
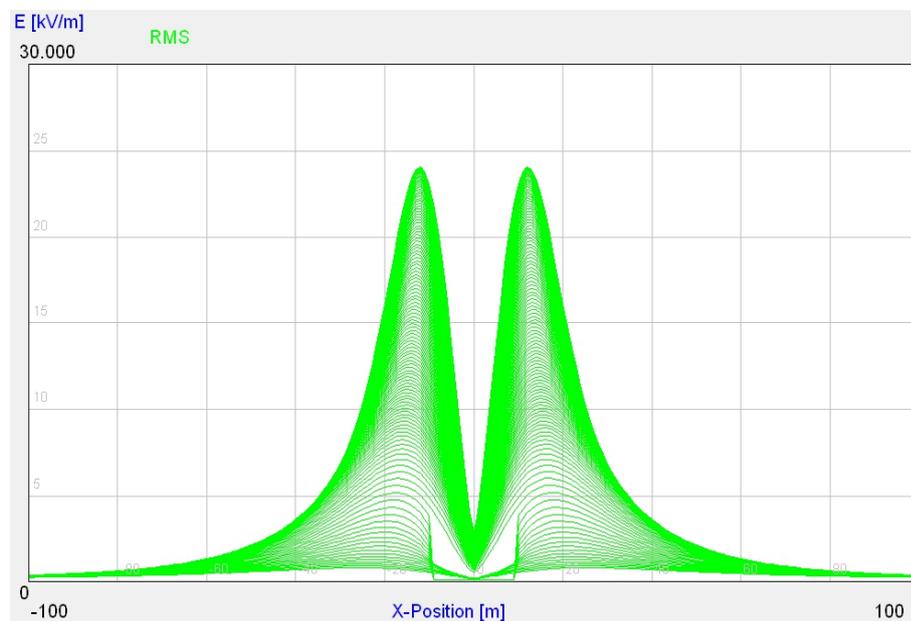
2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten)



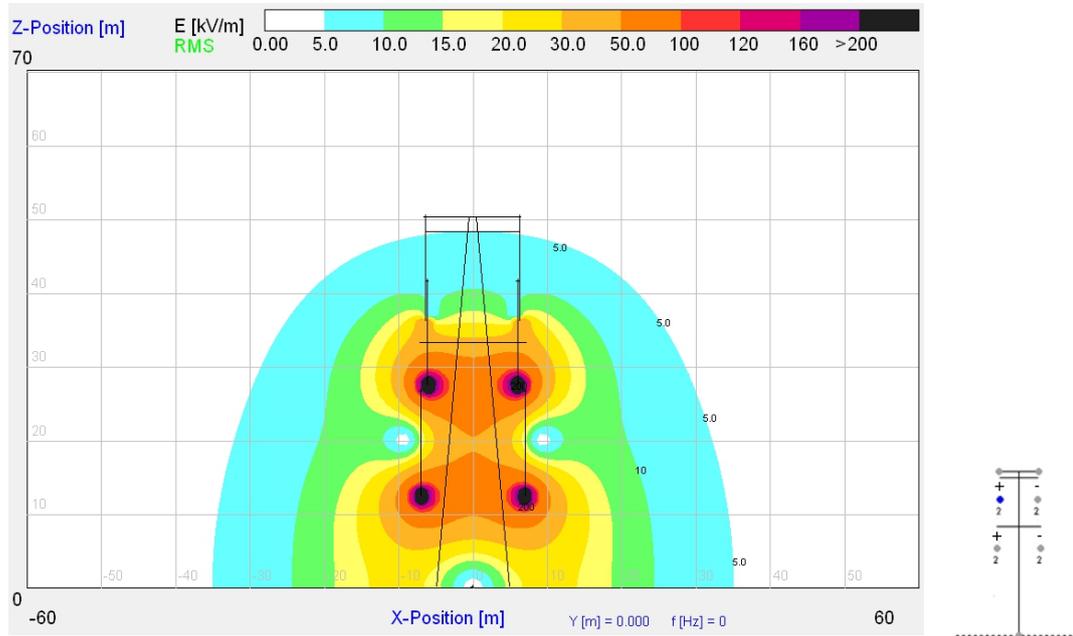
Elektrische Feldstärkeverteilung



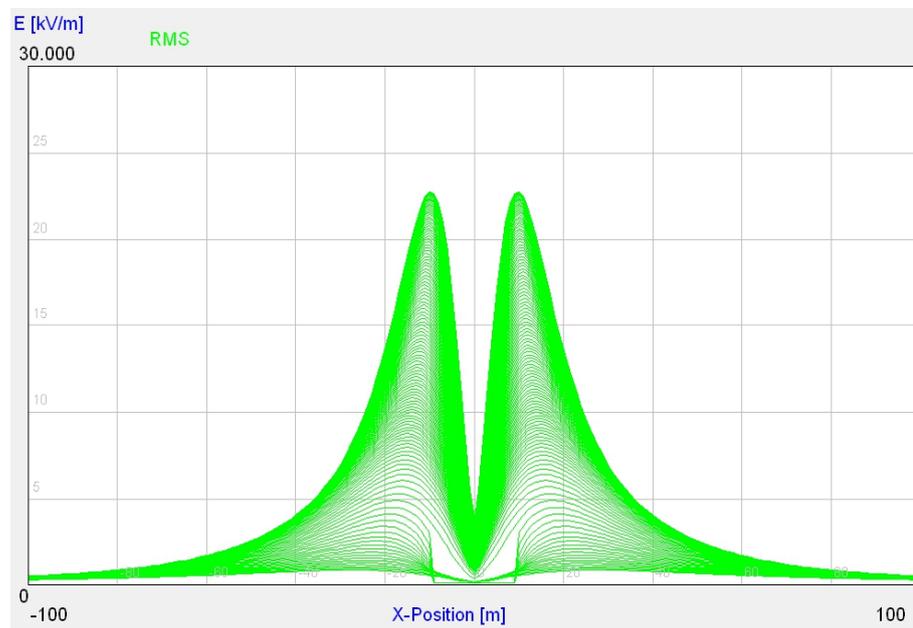
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 18,8 \text{ kV/m}$ )

**± 500-kV-Spannungsebene***I System, Bodenabstand 12,5 m**Elektrische Feldstärkeverteilung**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 24$  kV/m)*

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten)

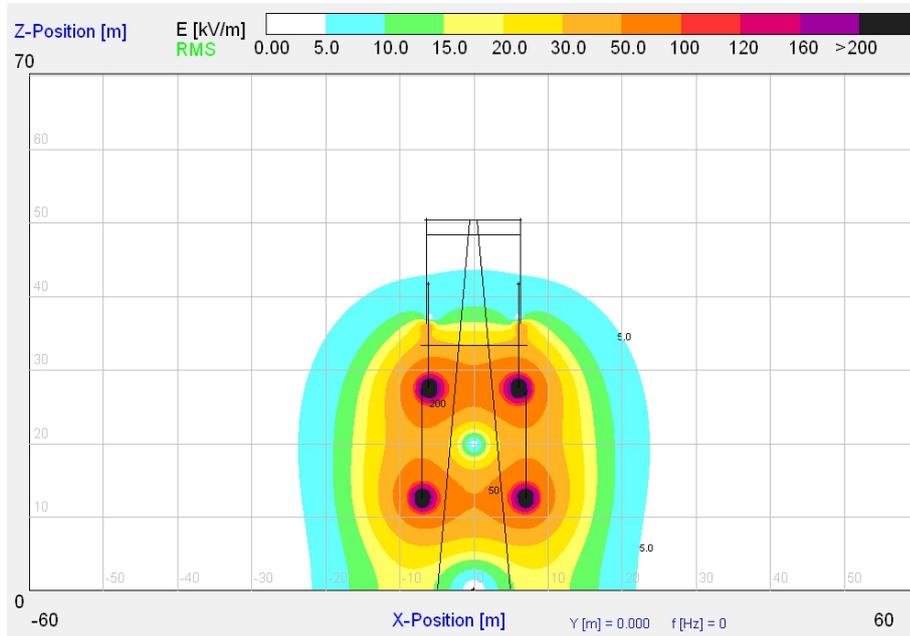


Elektrische Feldstärkeverteilung

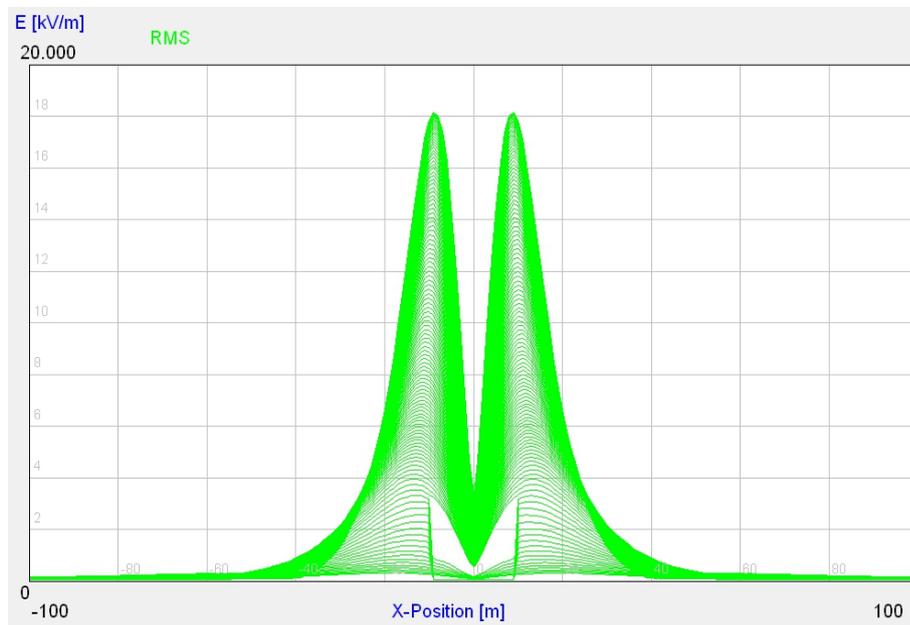


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 22,7 \text{ kV/m}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten)



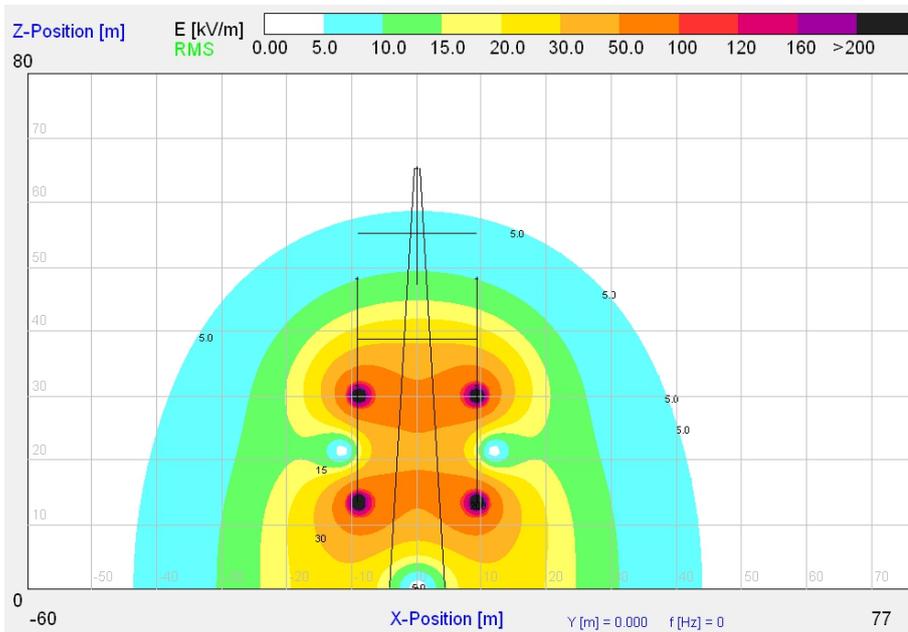
Elektrische Feldstärkeverteilung



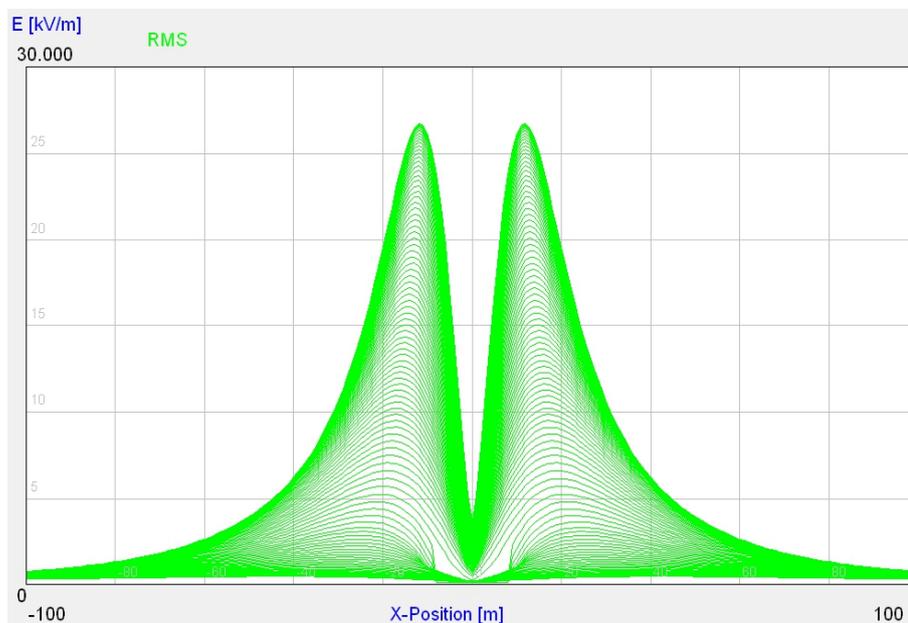
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 18,2 \text{ kV/m}$ )

**± 600-kV-Spannungsebene**

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten)

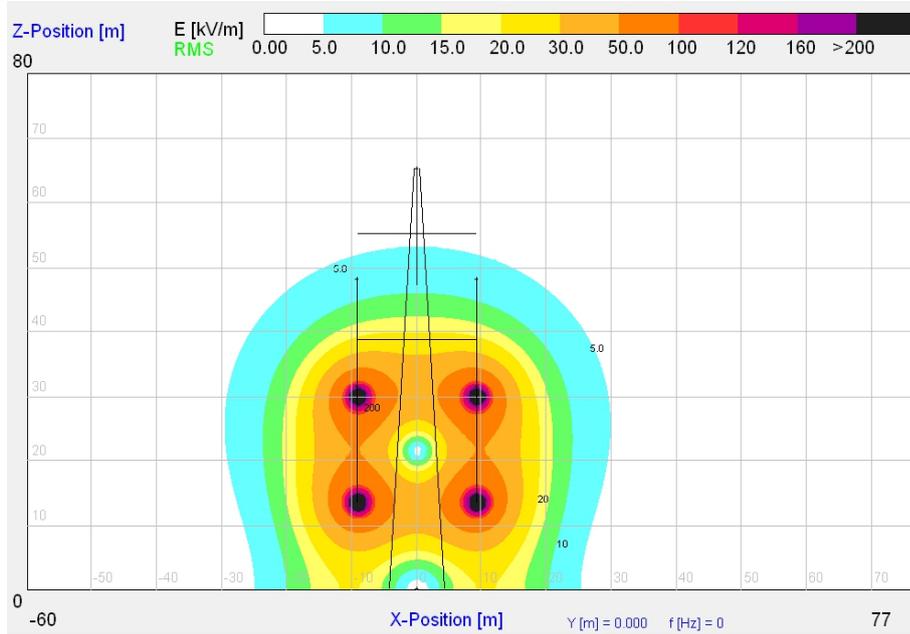


Elektrische Feldstärkeverteilung

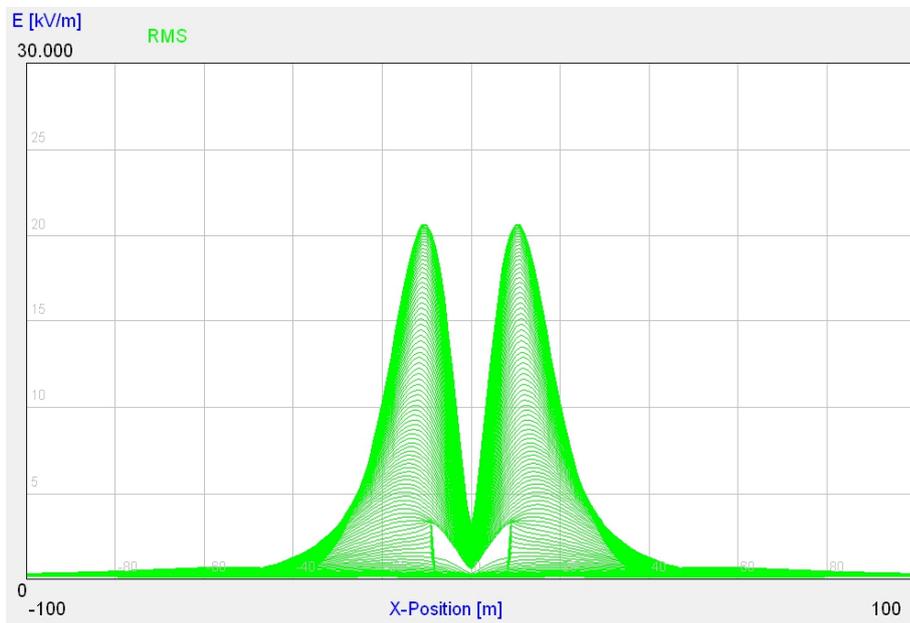


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 26,7 \text{ kV/m}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten)



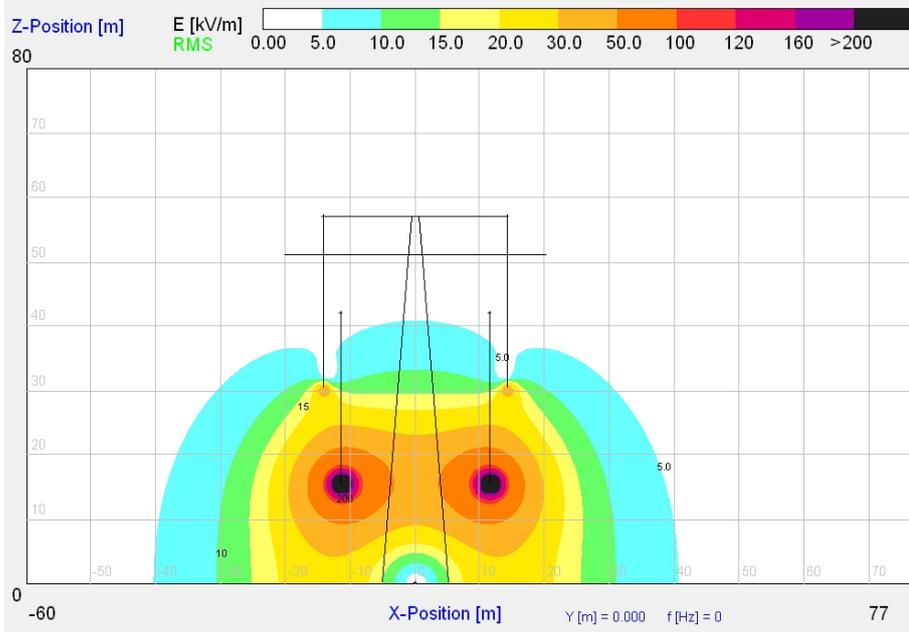
Elektrische Feldstärkeverteilung



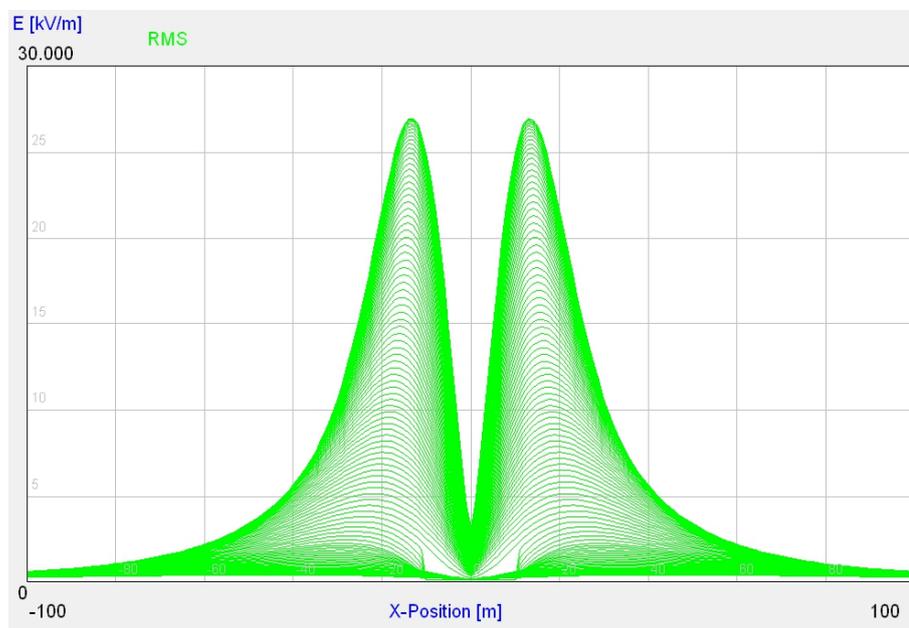
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 20,6 \text{ kV/m}$ )

**± 800-kV-Spannungsebene**

*1 System, Bodenabstand 15,5 m*



*Elektrische Feldstärkeverteilung*



*Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 26,9 \text{ kV/m}$ )*

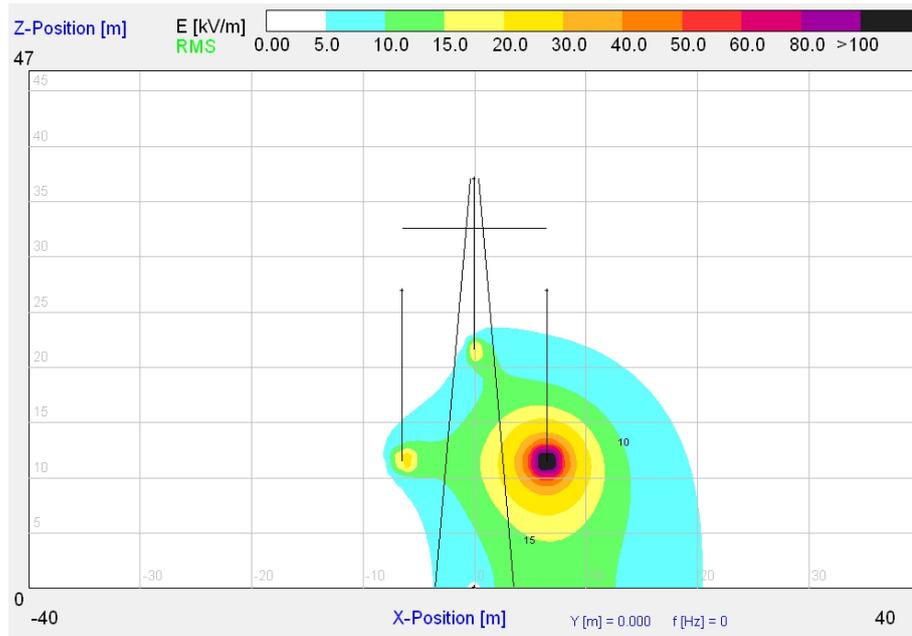


## Anhang A7 – Fehlerzustand Kurzschluss bipolarer Systeme

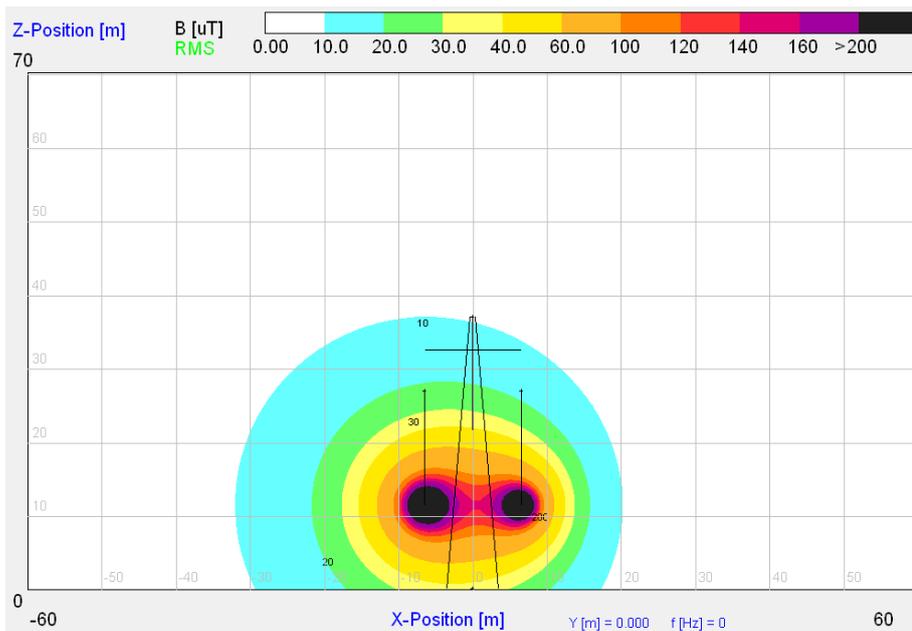
### Elektrische Feldstärkeverteilung und magnetische Flussdichteverteilung im Querschnitt (xz-Ebene) für Erdkurzschluss

$\pm 400\text{-kV}$ -Spannungsebene

1 System, Bodenabstand 11,5 m

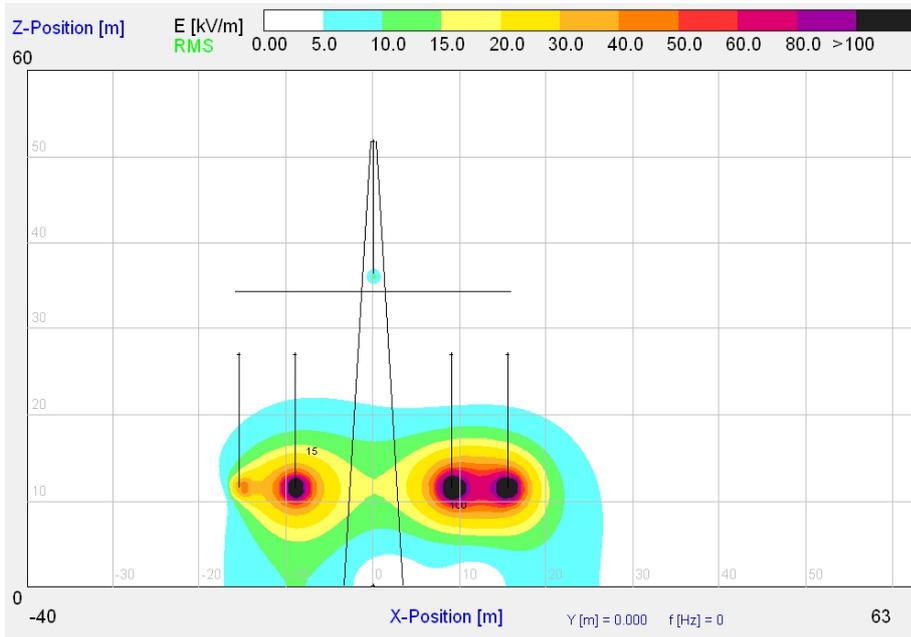


Elektrische Feldstärkeverteilung

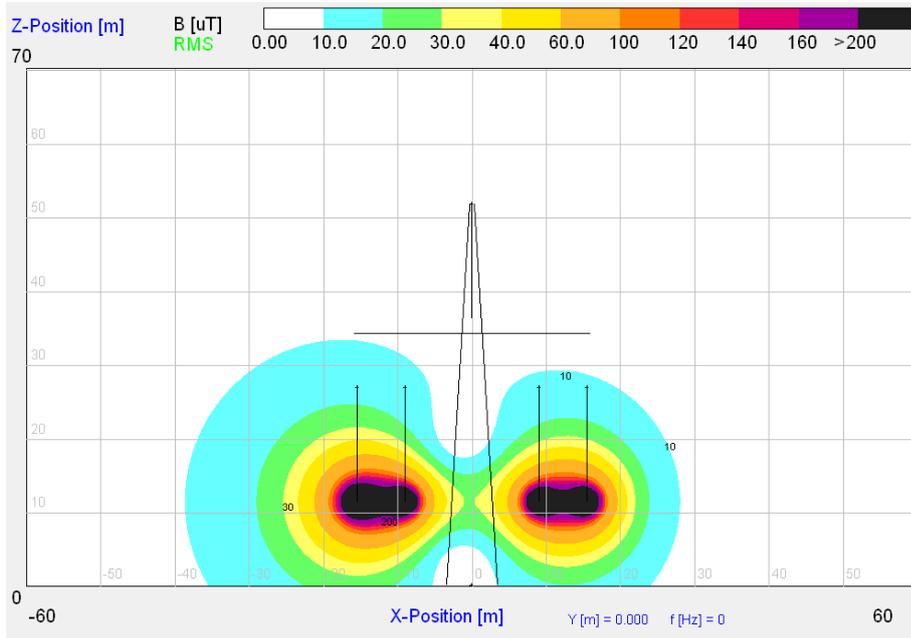


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - + - ,

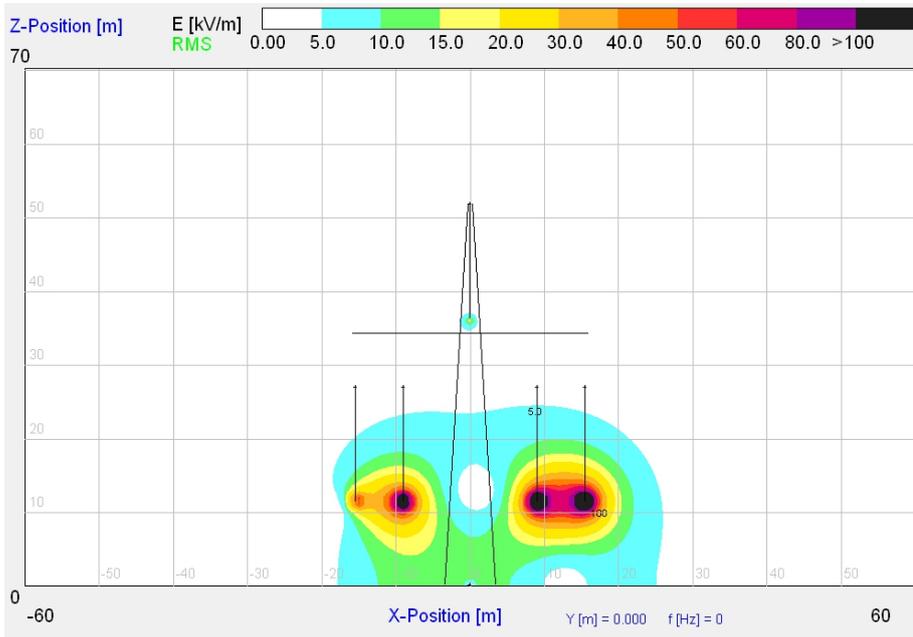


Elektrische Feldstärkeverteilung

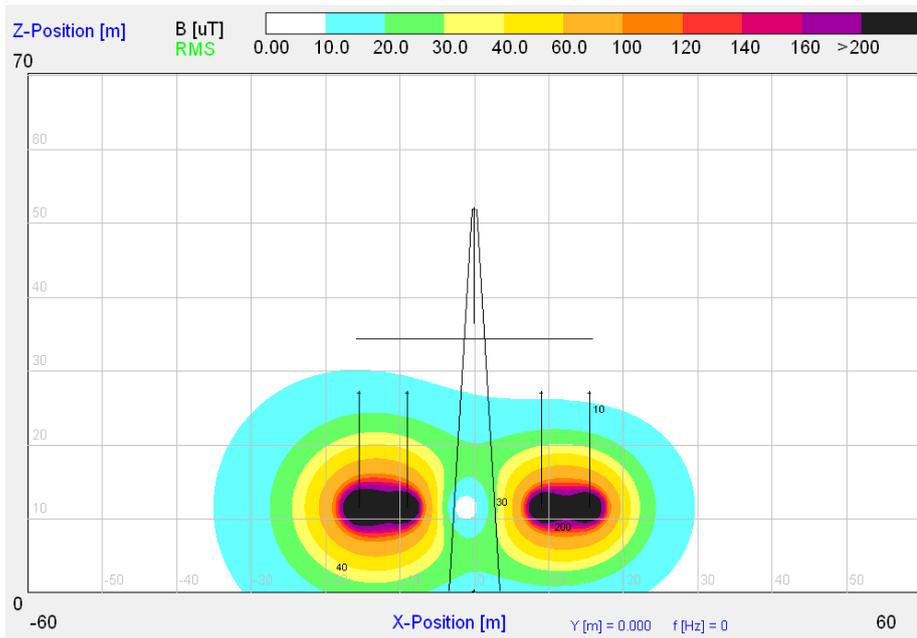


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - - +,

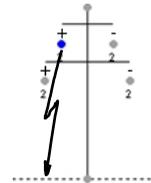
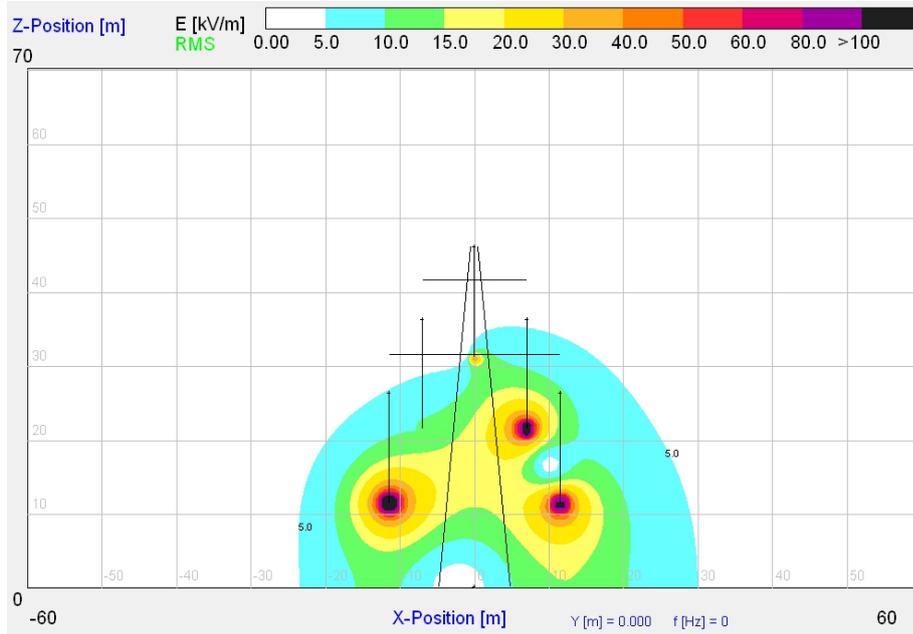


Elektrische Feldstärkeverteilung

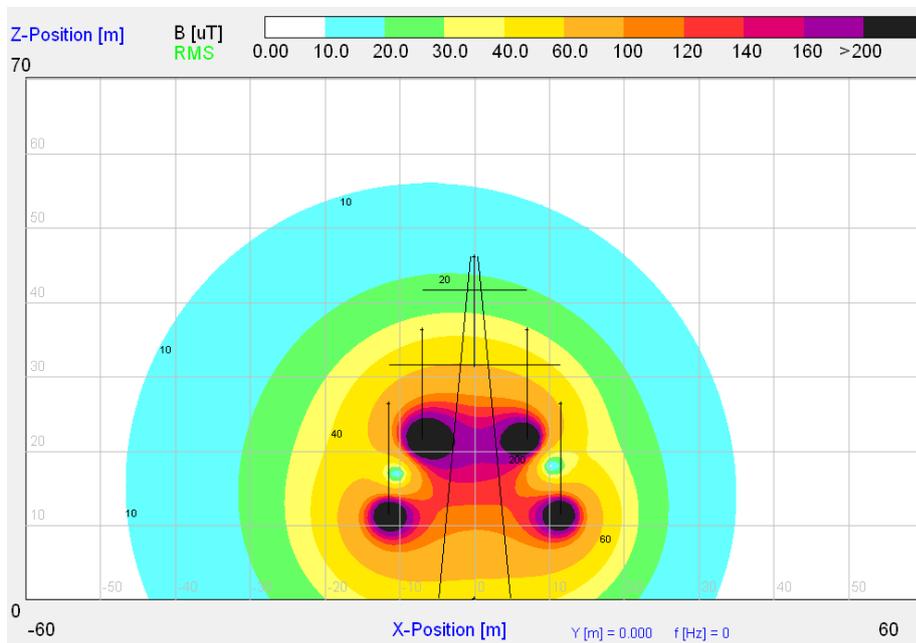


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

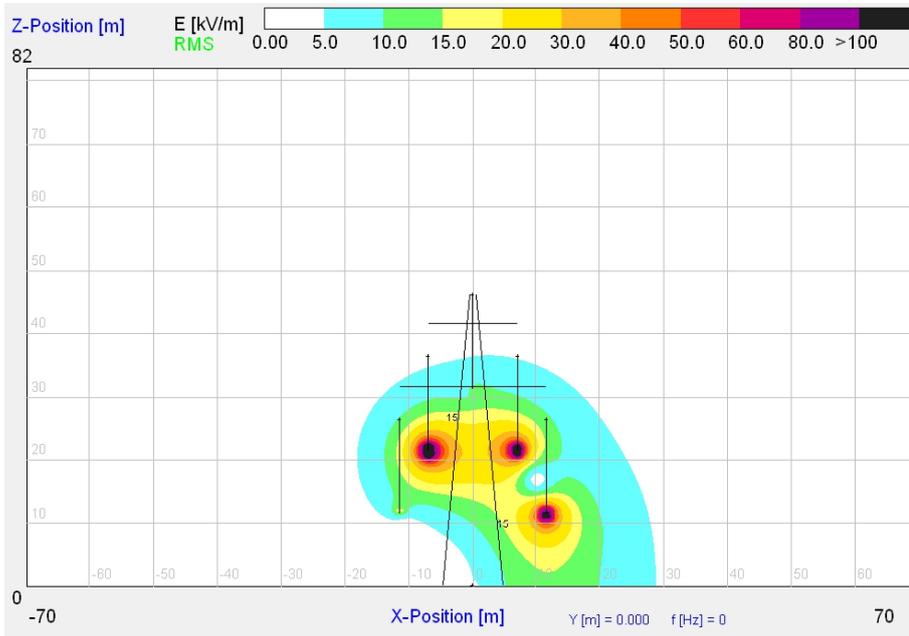


Elektrische Feldstärkeverteilung

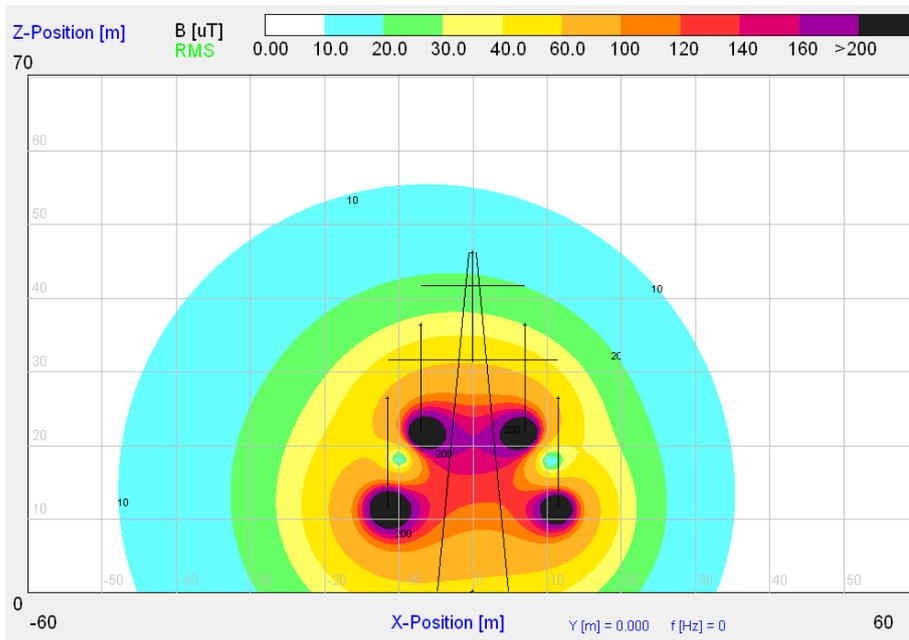


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene

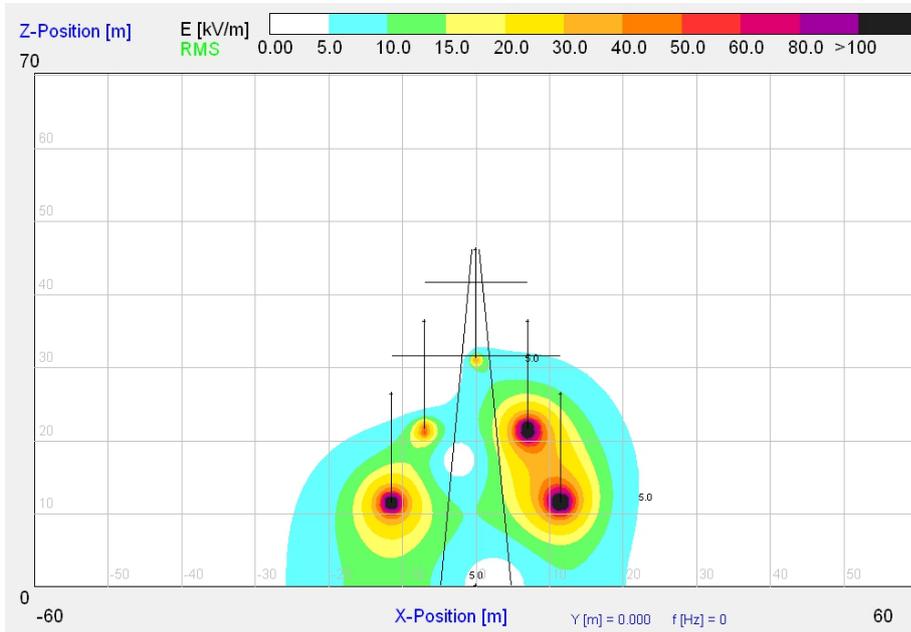


Elektrische Feldstärkeverteilung

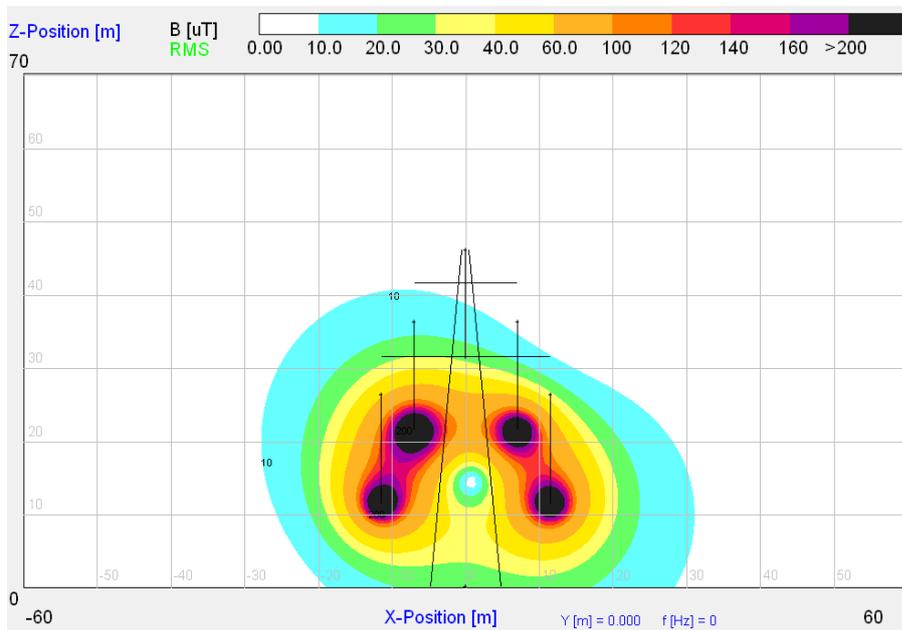


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

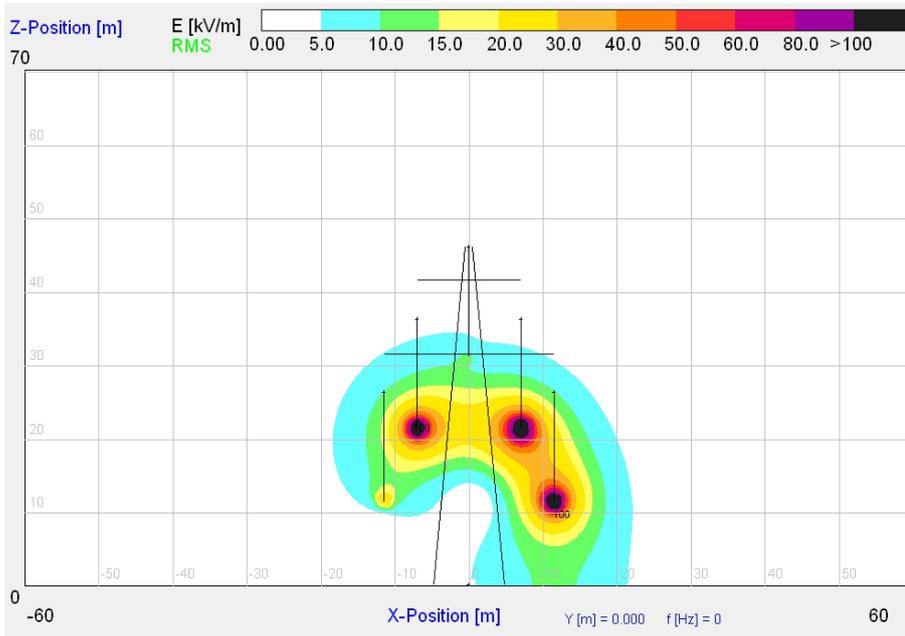


Elektrische Feldstärkeverteilung

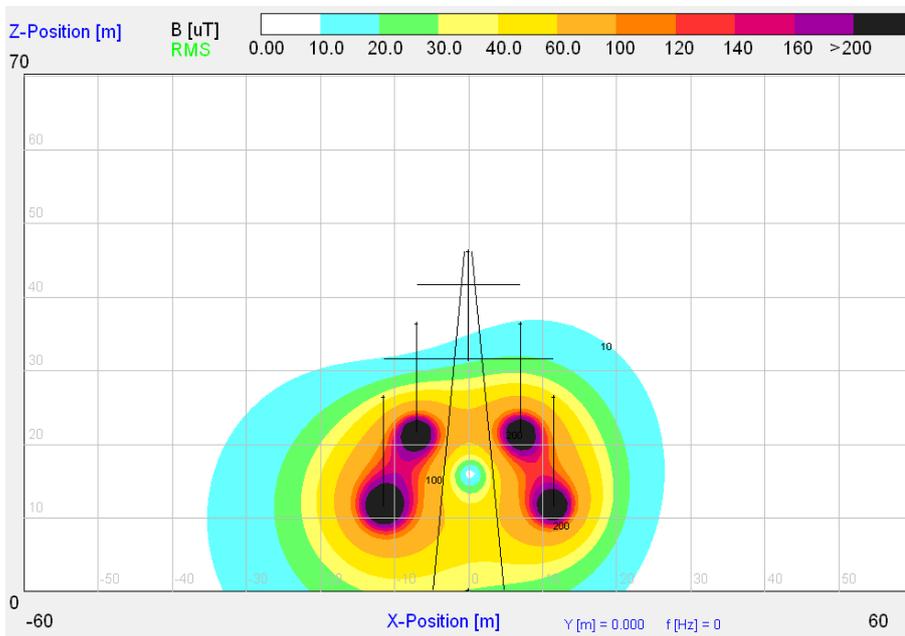


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene



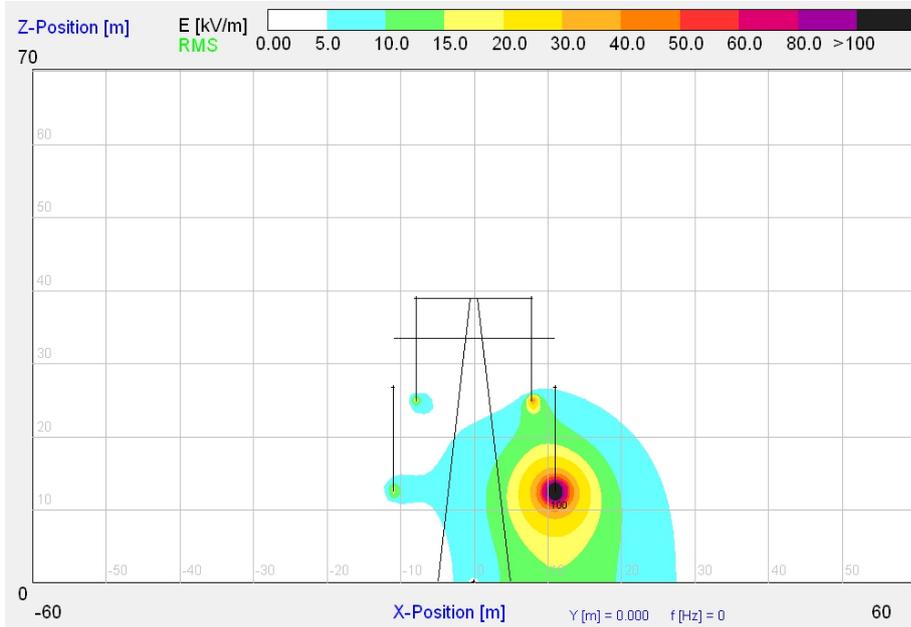
Elektrische Feldstärkeverteilung



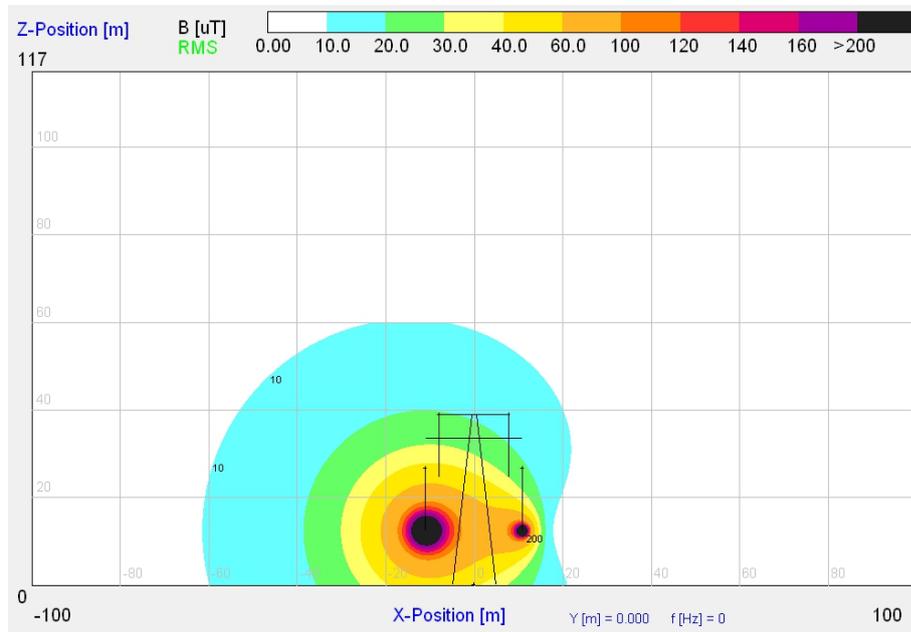
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 500-kV-Spannungsebene**

*1 System, Bodenabstand 12,5 m*

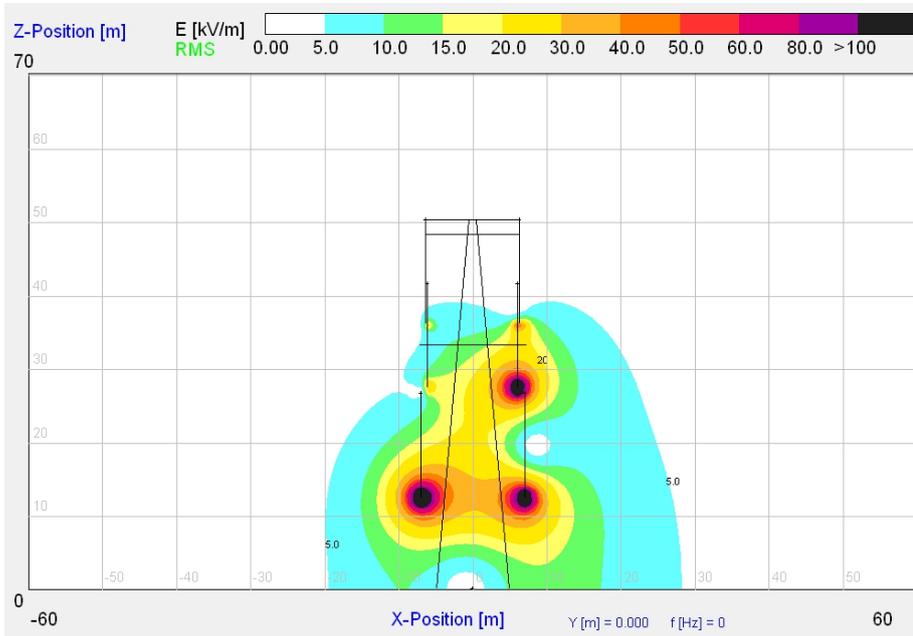


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

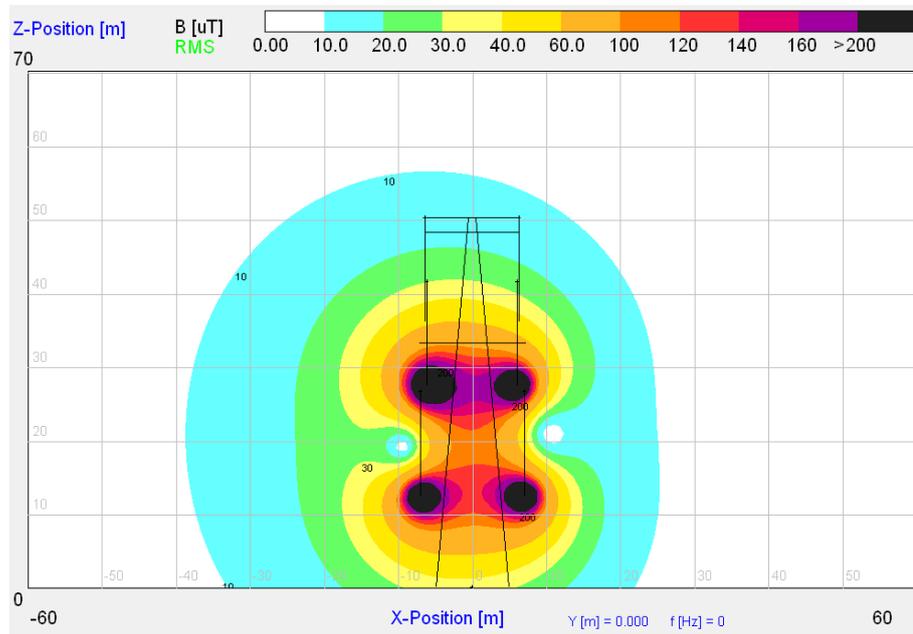


*Magnetische Flussdichteverteilung*

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

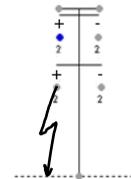
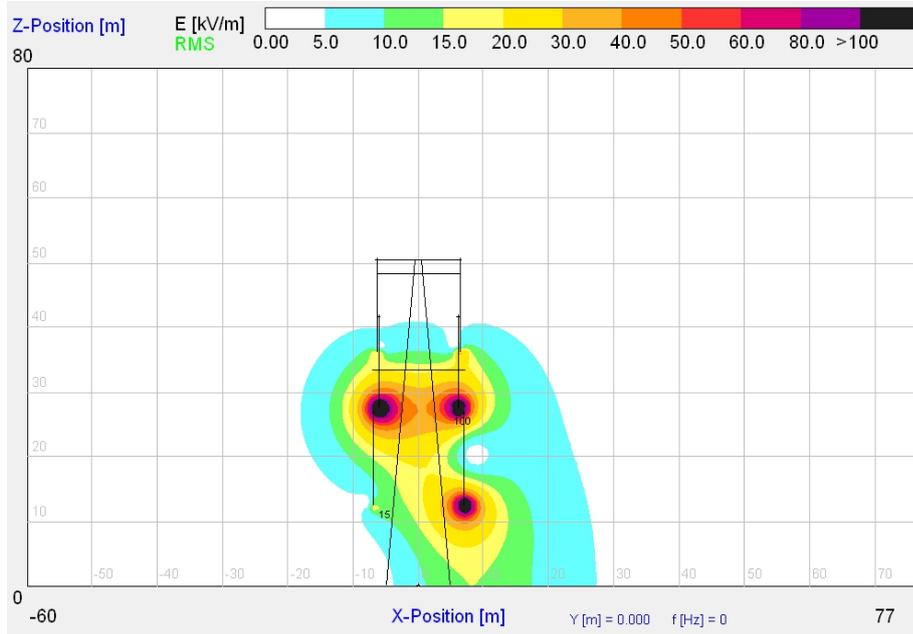


Elektrische Feldstärkeverteilung

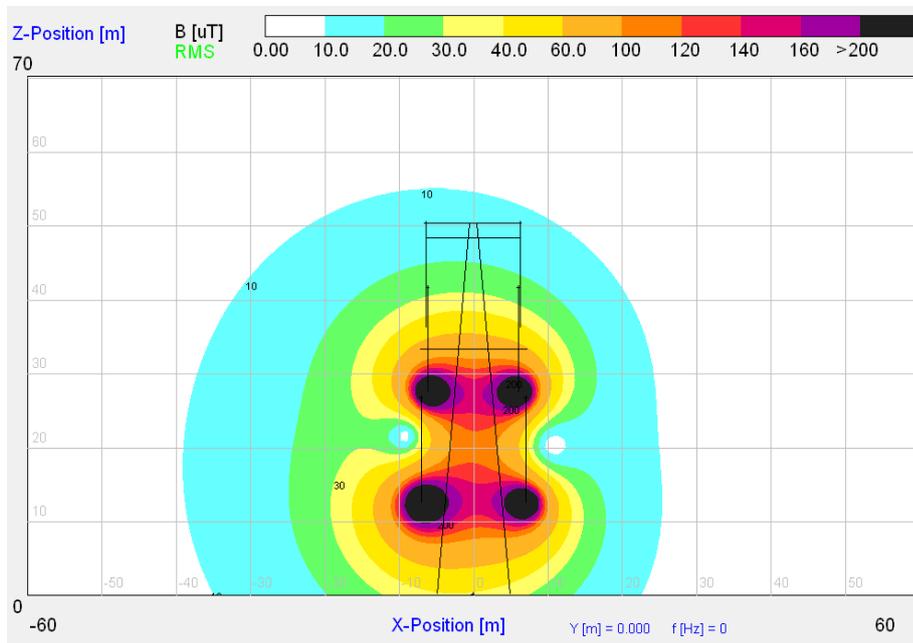


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene

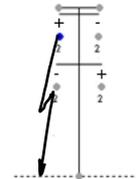
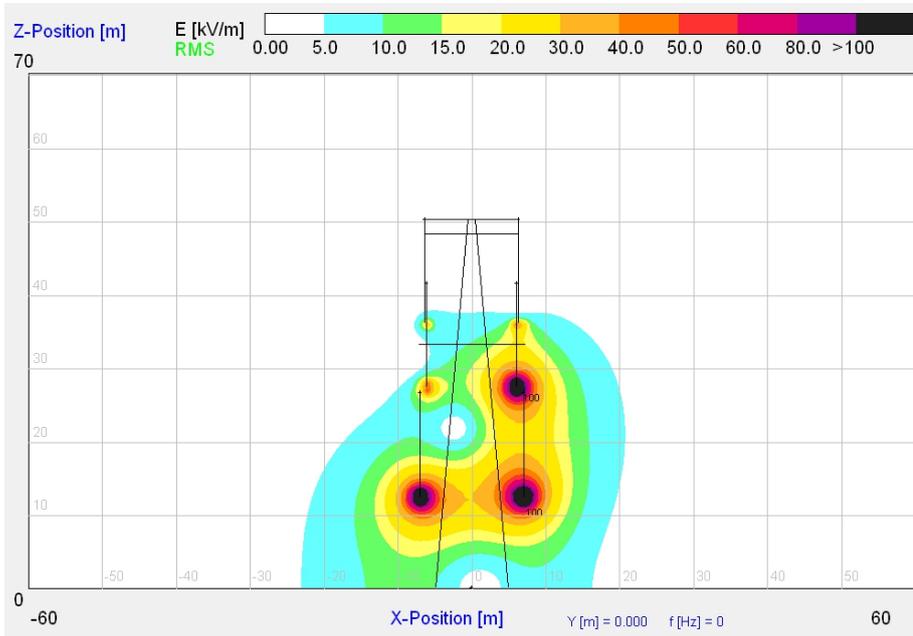


Elektrische Feldstärkeverteilung

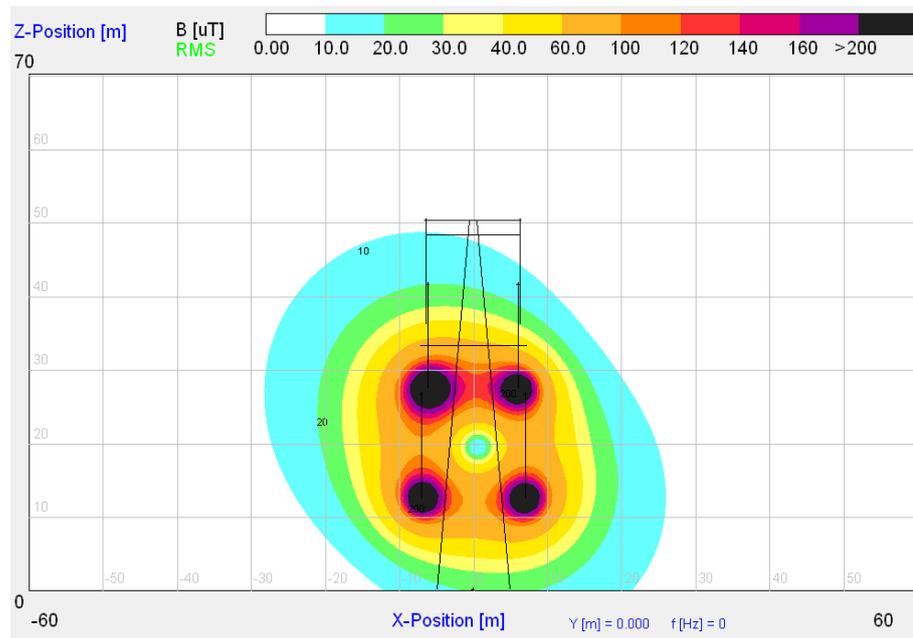


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

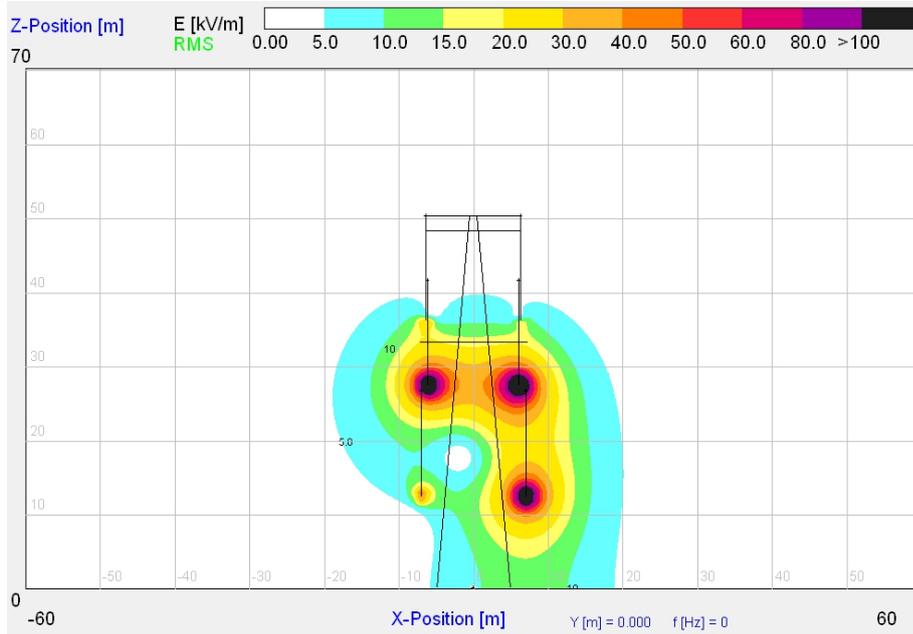


Elektrische Feldstärkeverteilung

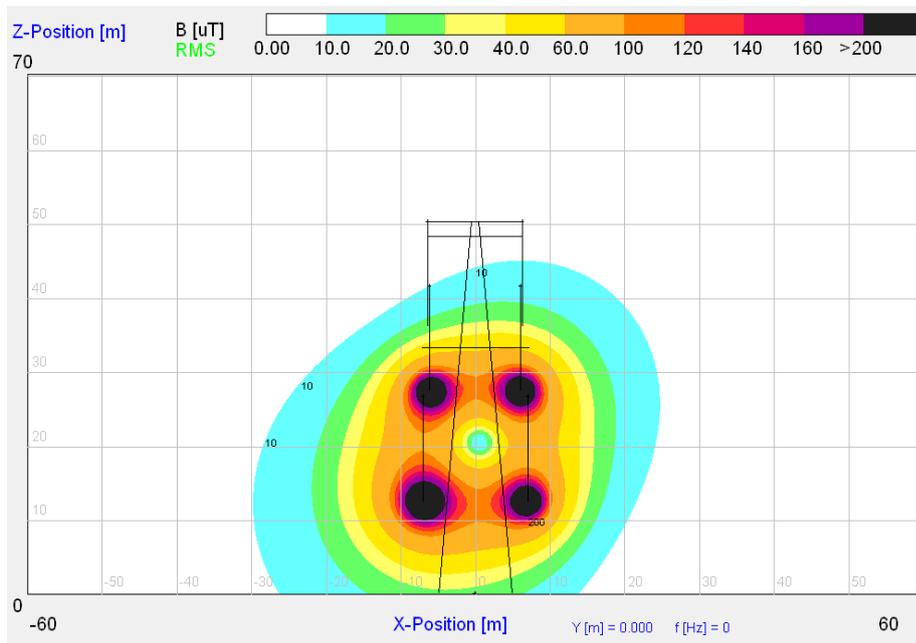


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene



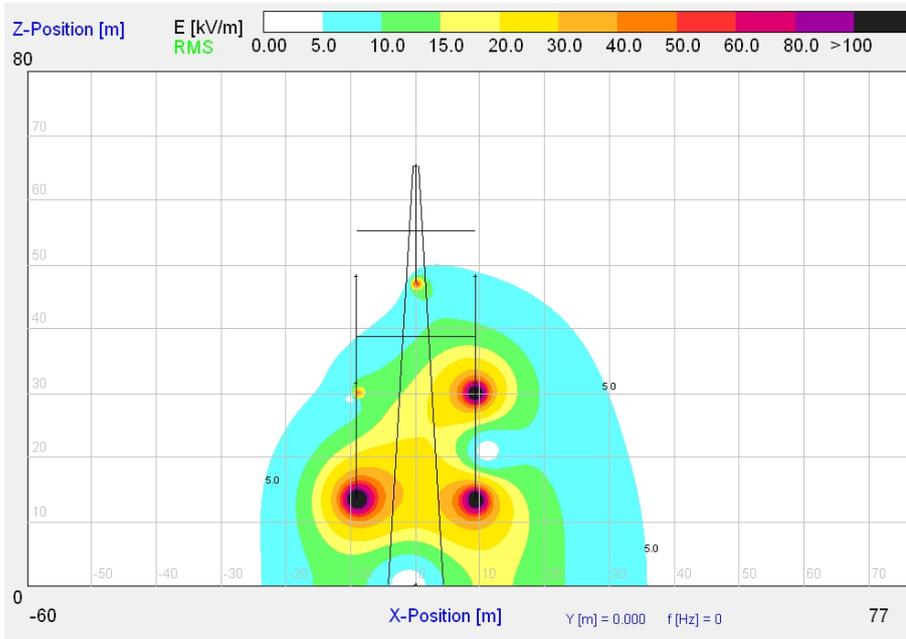
Elektrische Feldstärkeverteilung



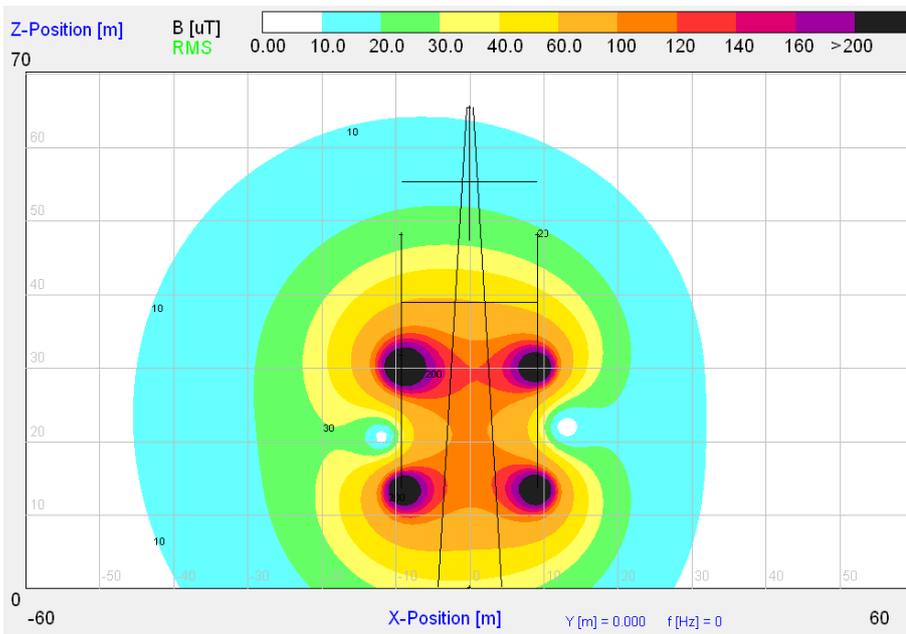
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 600-kV-Spannungsebene**

*2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene*

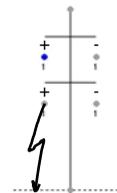
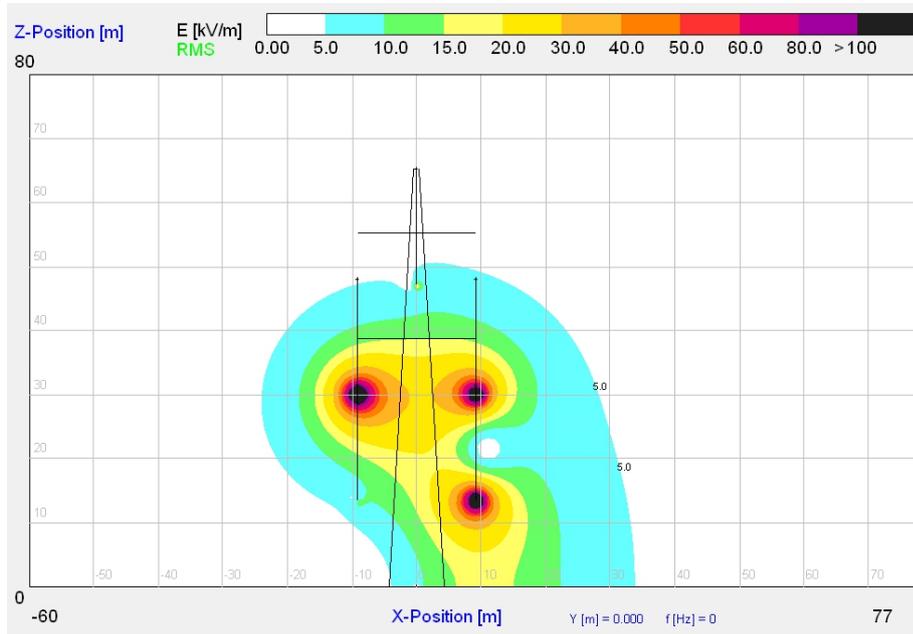


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

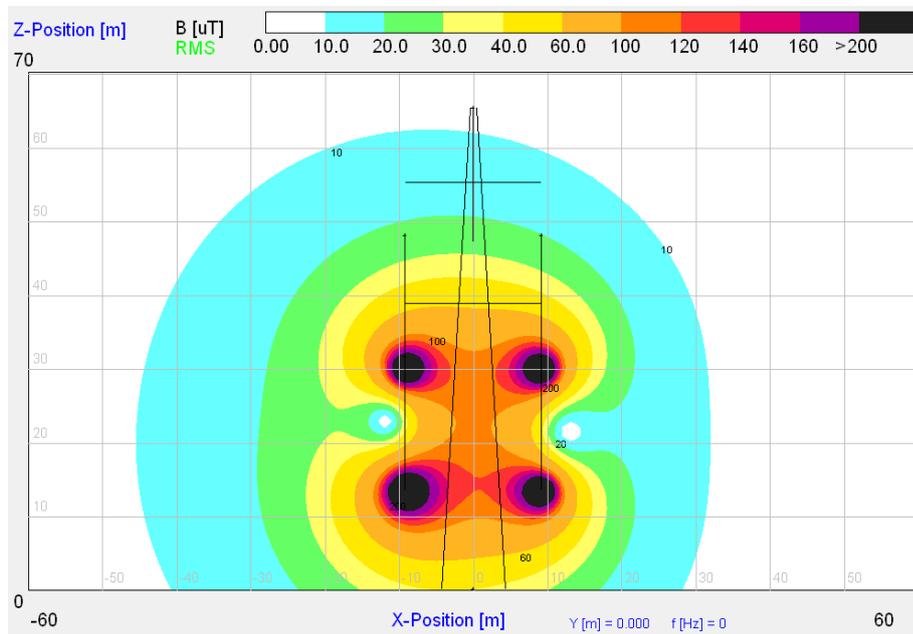


*Magnetische Flussdichteverteilung*

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene

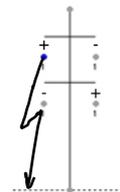
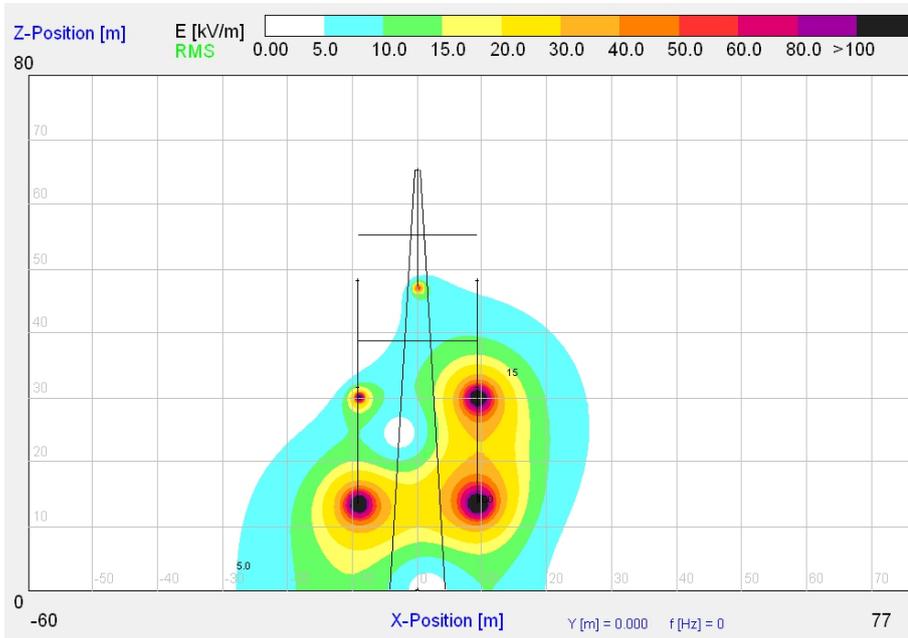


Elektrische Feldstärkeverteilung

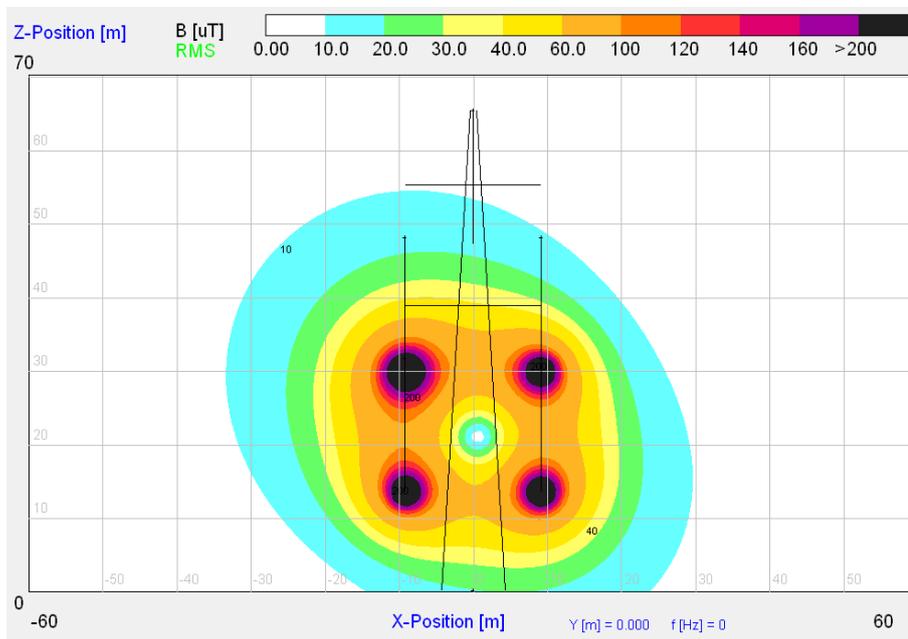


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

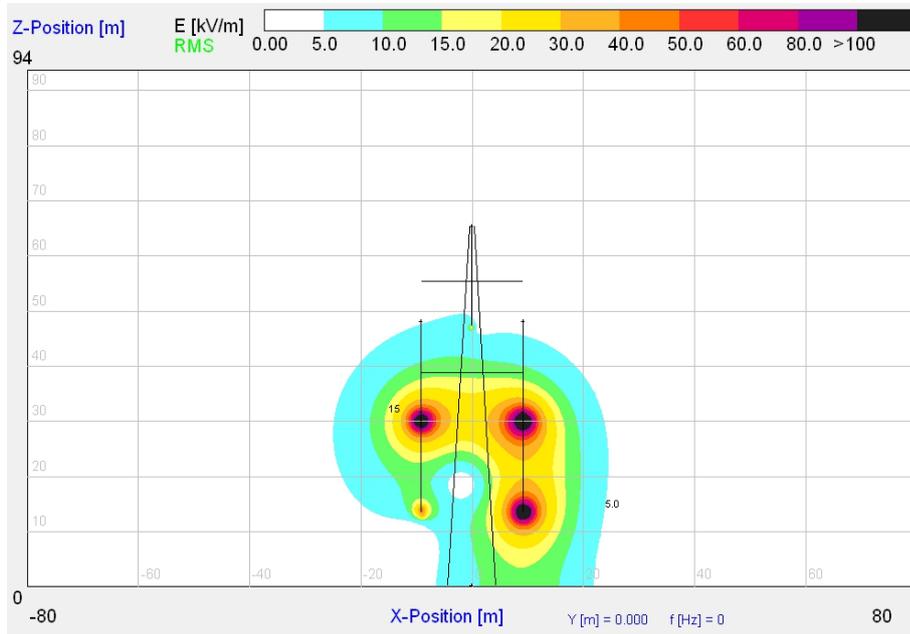


Elektrische Feldstärkeverteilung

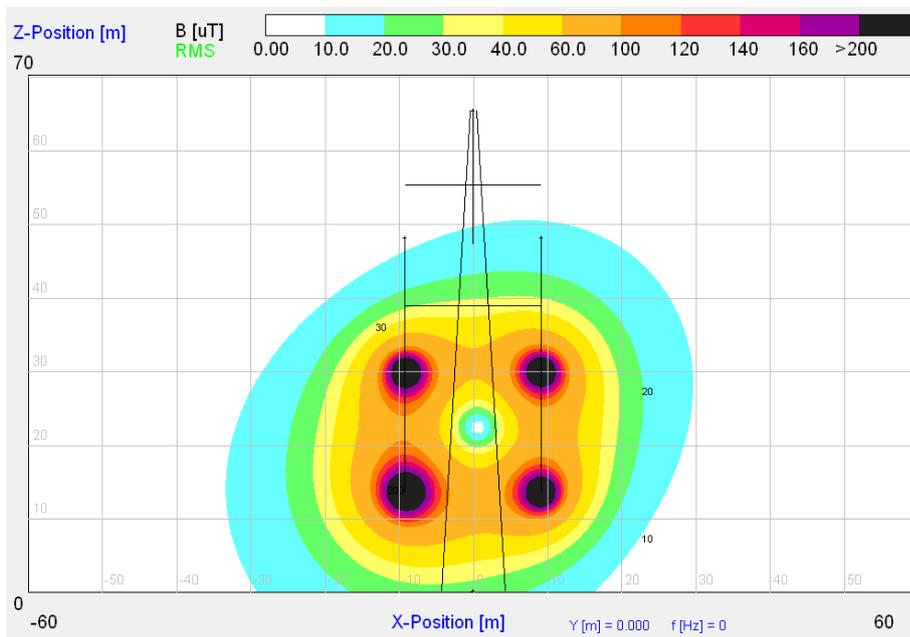


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene



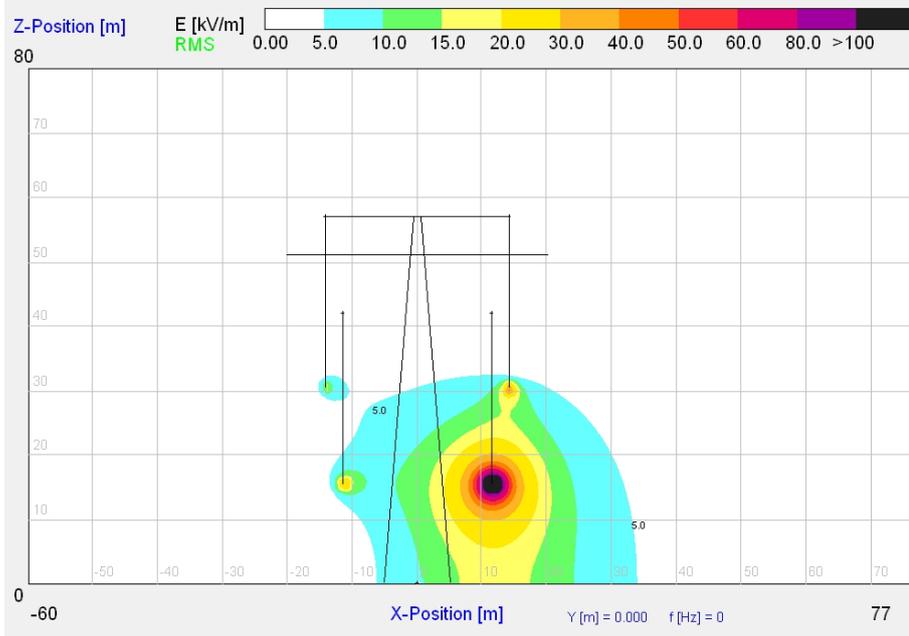
Elektrische Feldstärkeverteilung



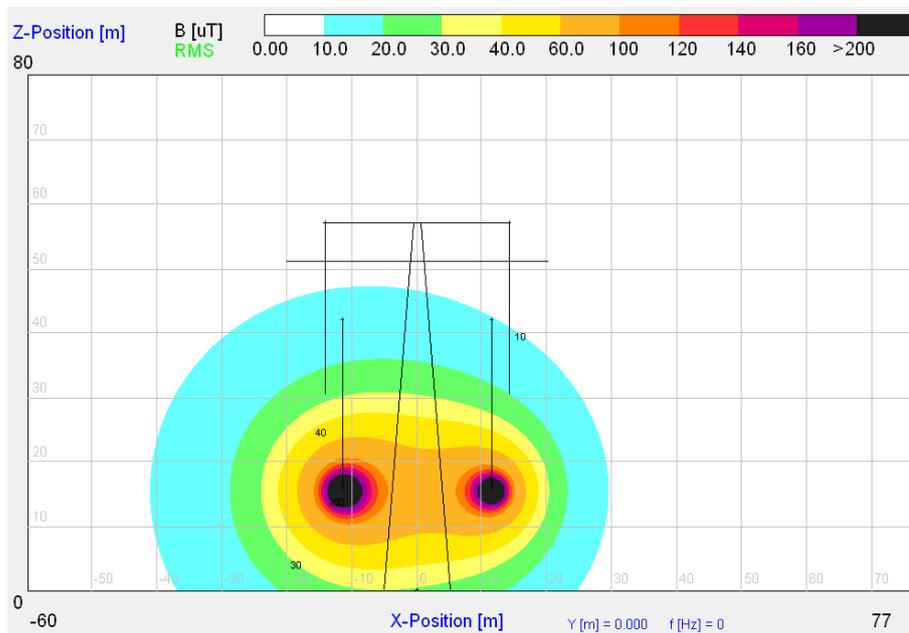
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 800-kV-Spannungsebene**

*I System, Bodenabstand 15,5 m*



*Elektrische Feldstärkeverteilung*

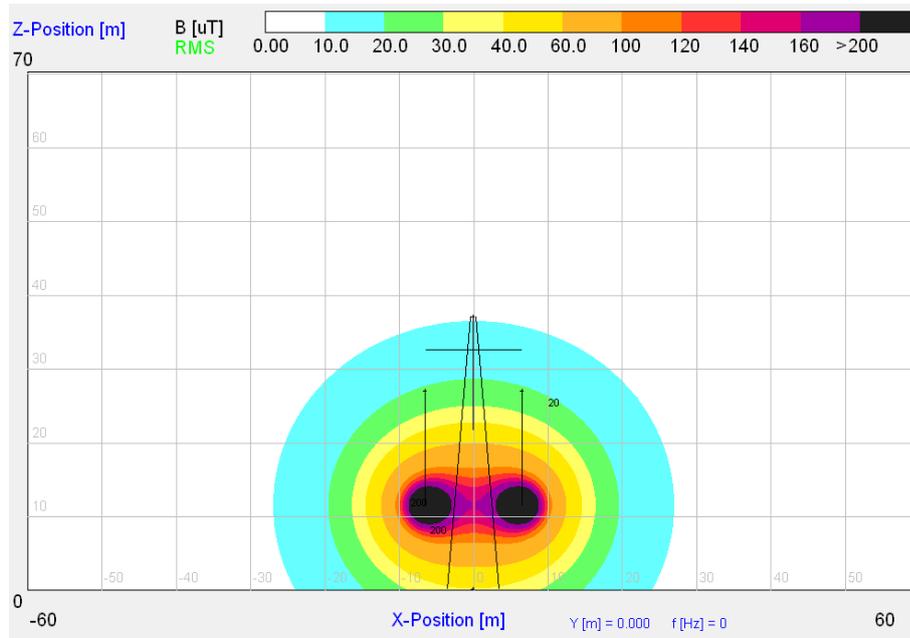


*Magnetische Flussdichteverteilung*

## Elektrische Feldstärkeverteilung und magnetische Flussdichteverteilung im Querschnitt (xz-Ebene) für Leiter-Leiter-Kurzschluss

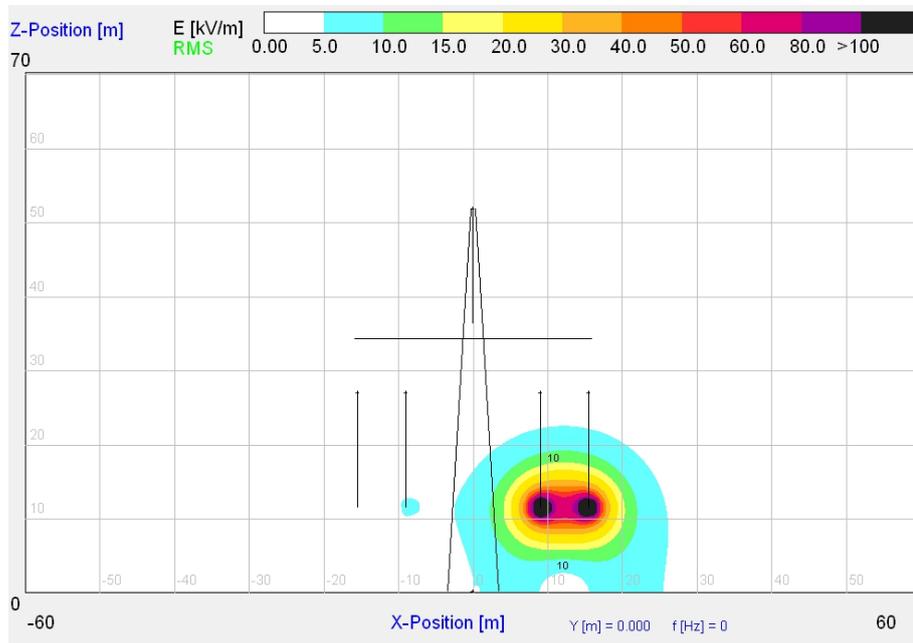
$\pm 400$ -kV-Spannungsebene

1 System, Bodenabstand 11,5 m

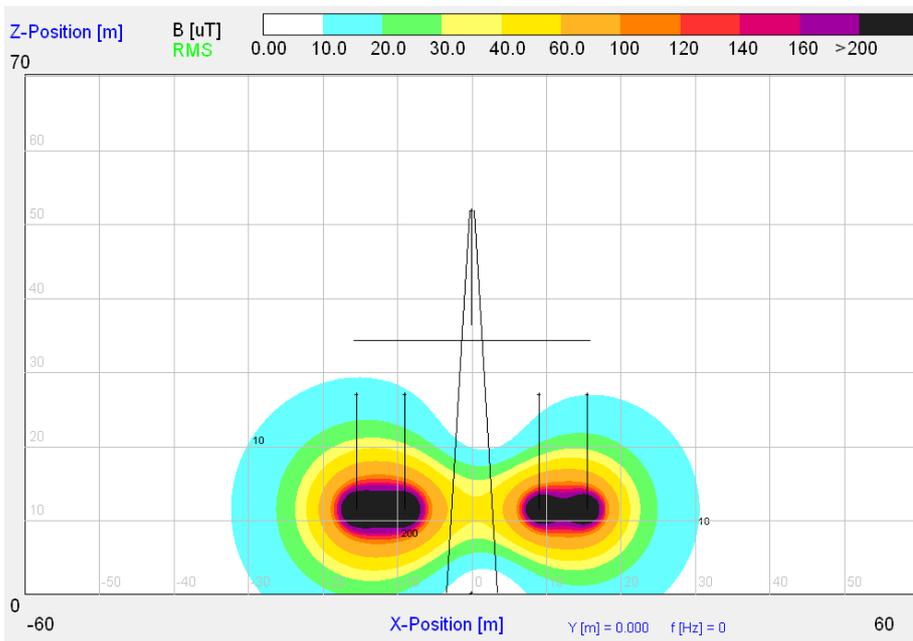


*Magnetische Flussdichteverteilung*

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - + -,

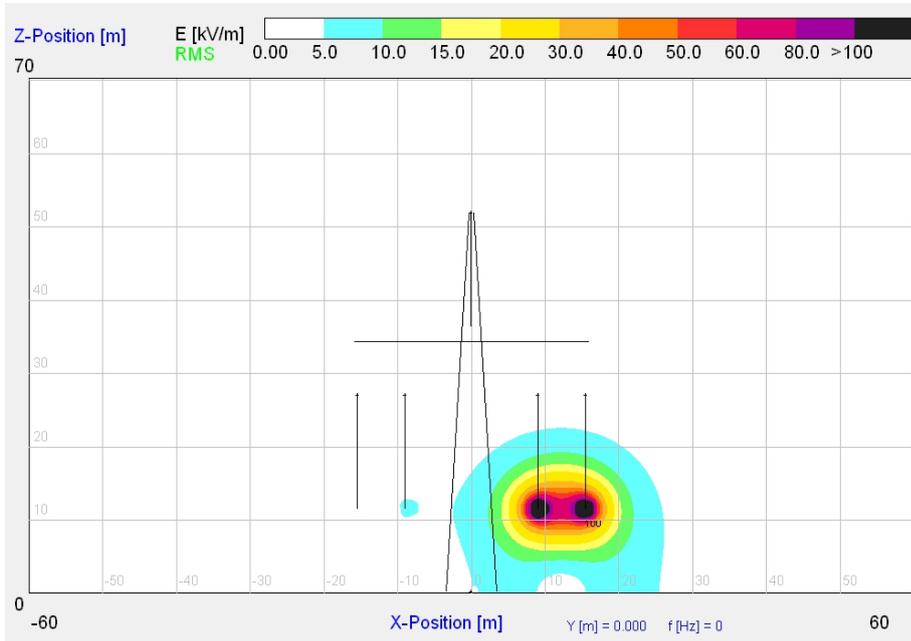


Elektrische Feldstärkeverteilung

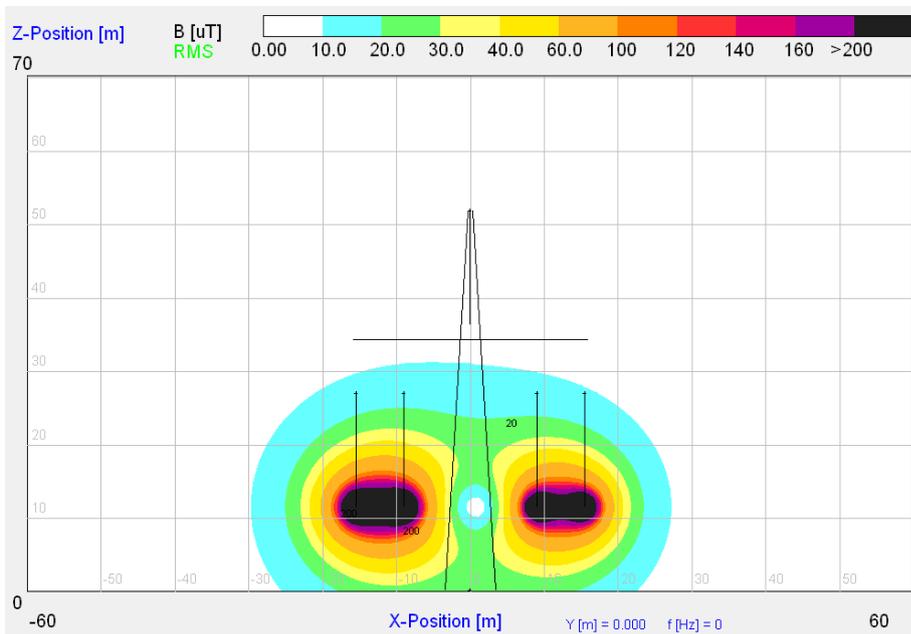


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - +,

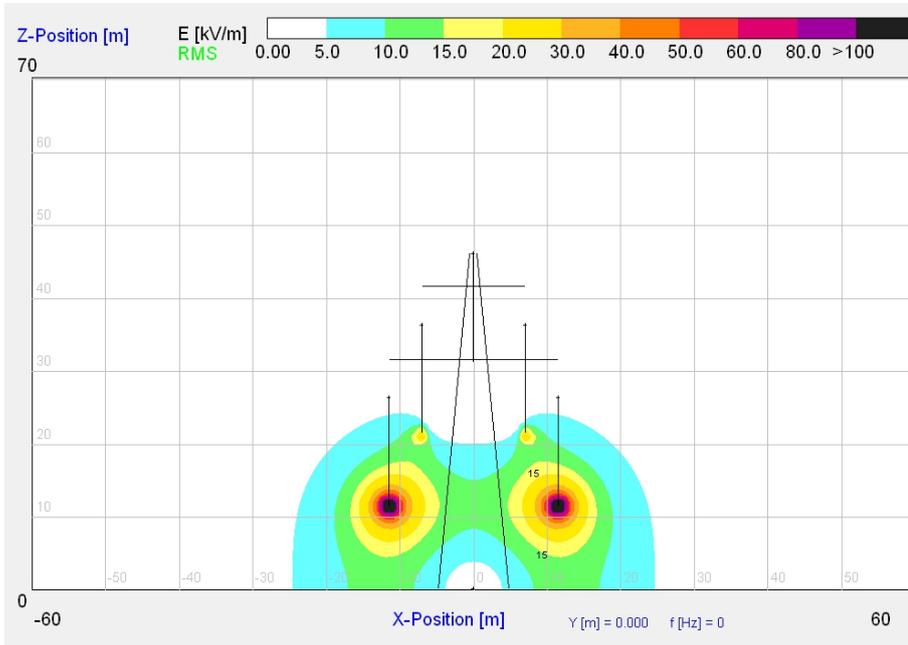


Elektrische Feldstärkeverteilung

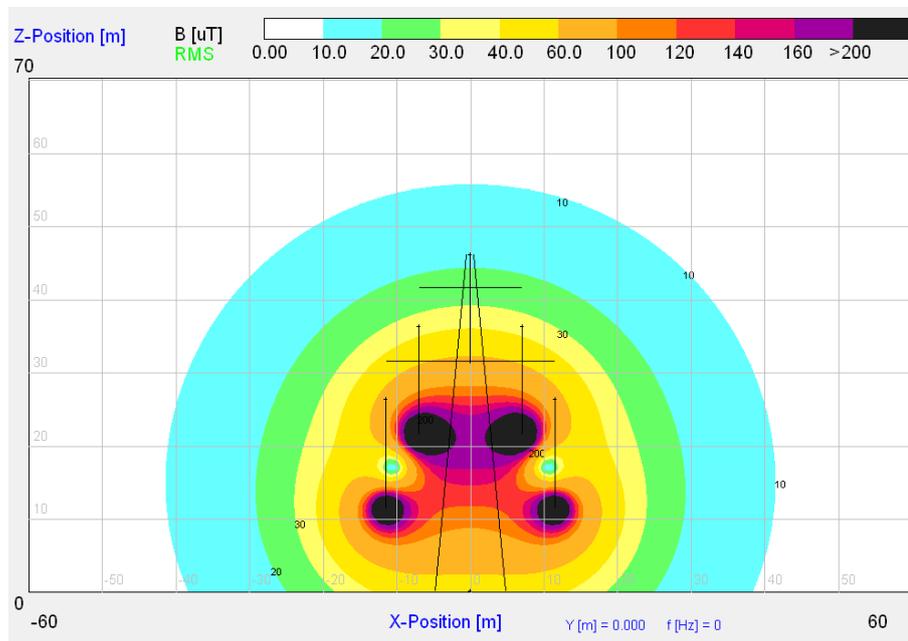


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

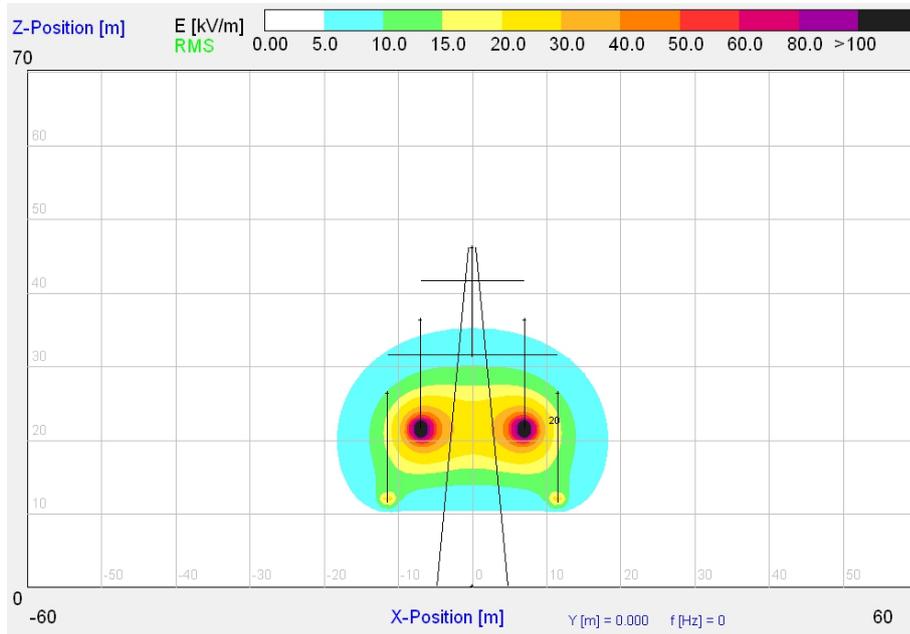


Elektrische Feldstärkeverteilung

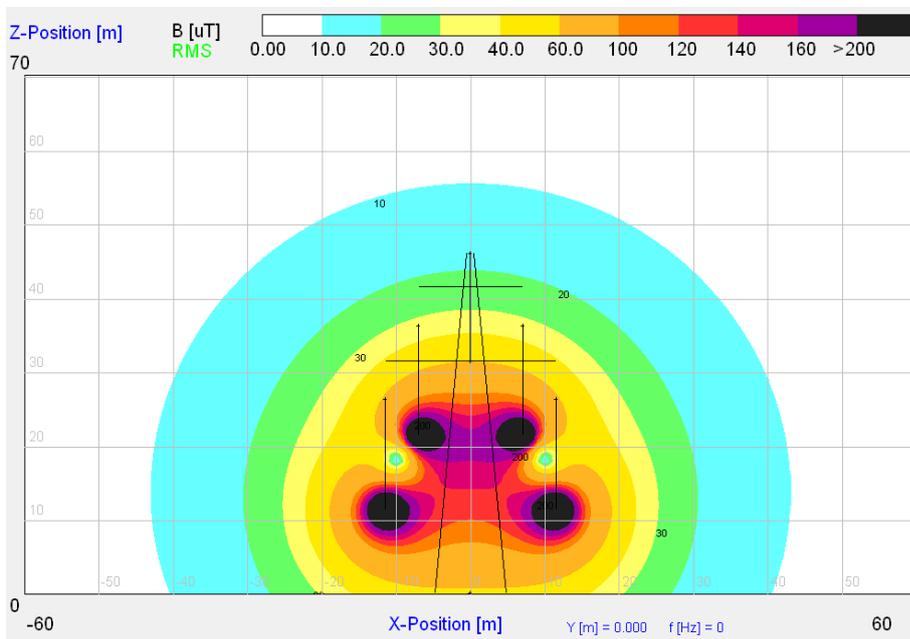


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene

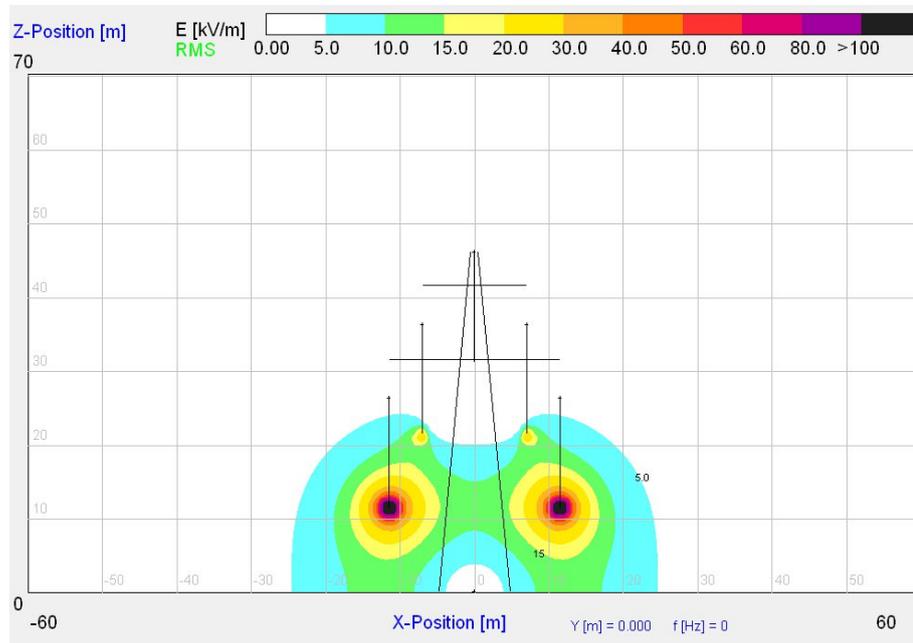


Elektrische Feldstärkeverteilung

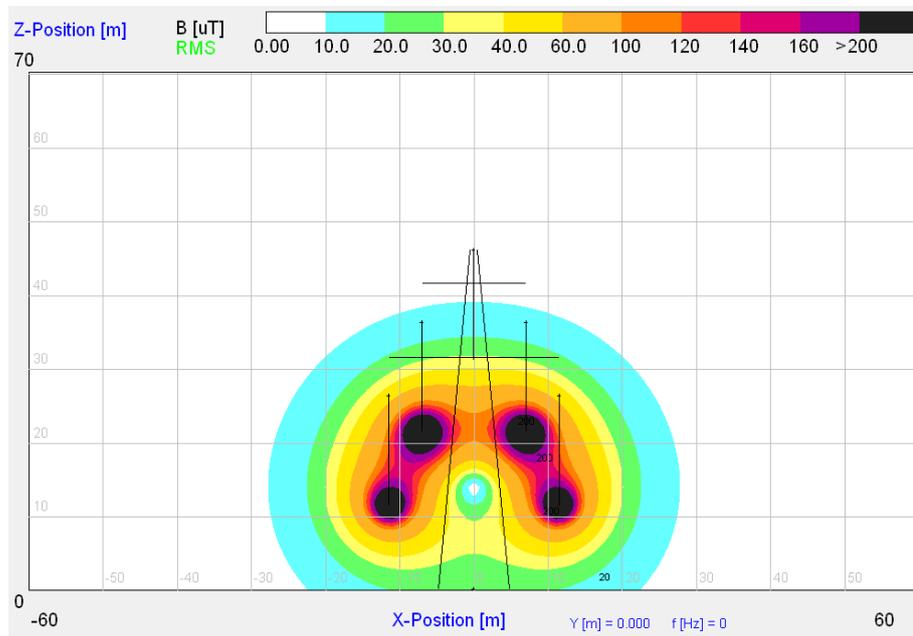


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

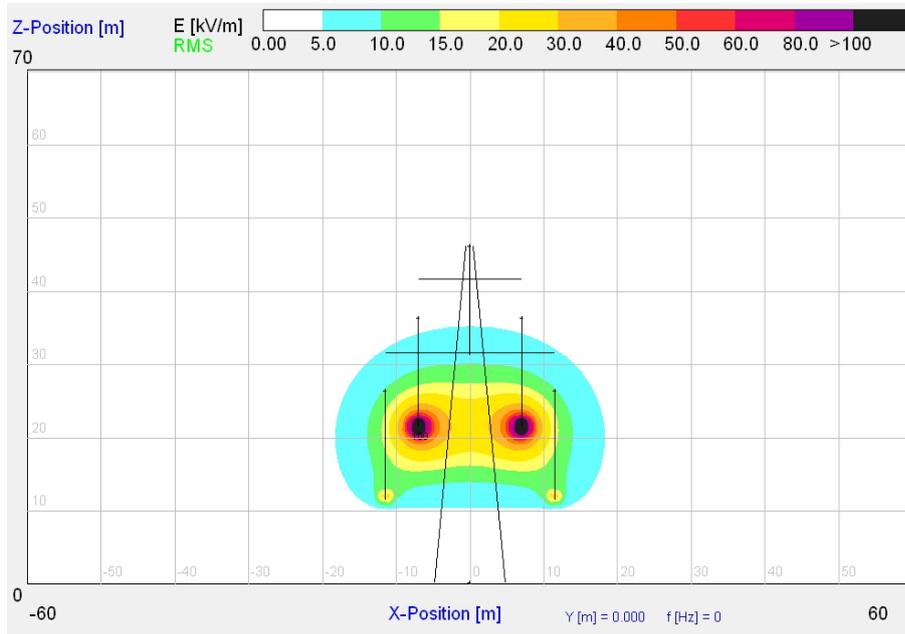


Elektrische Feldstärkeverteilung

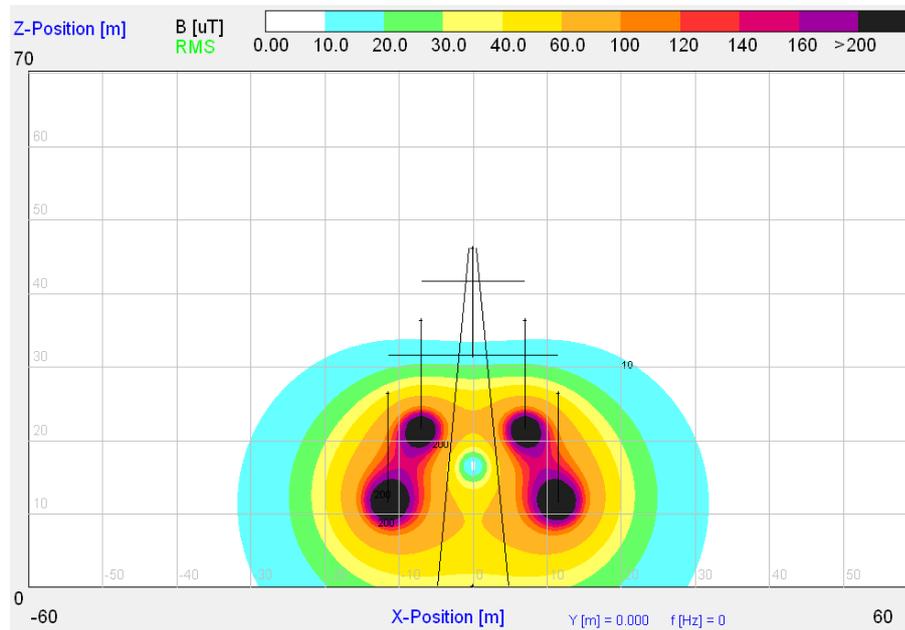


Magnetische Flussdichteverteilung

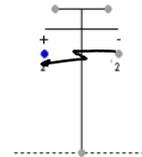
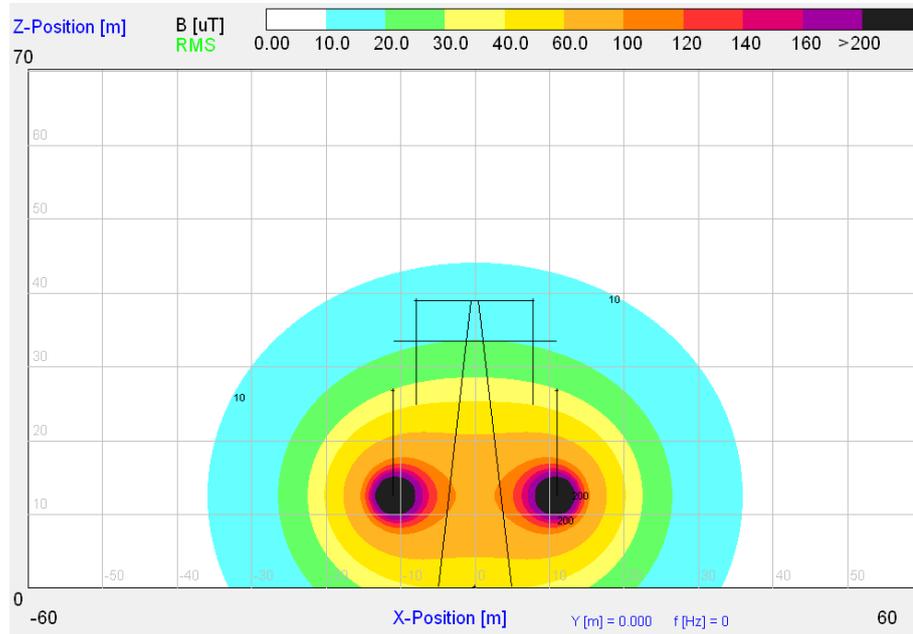
2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene



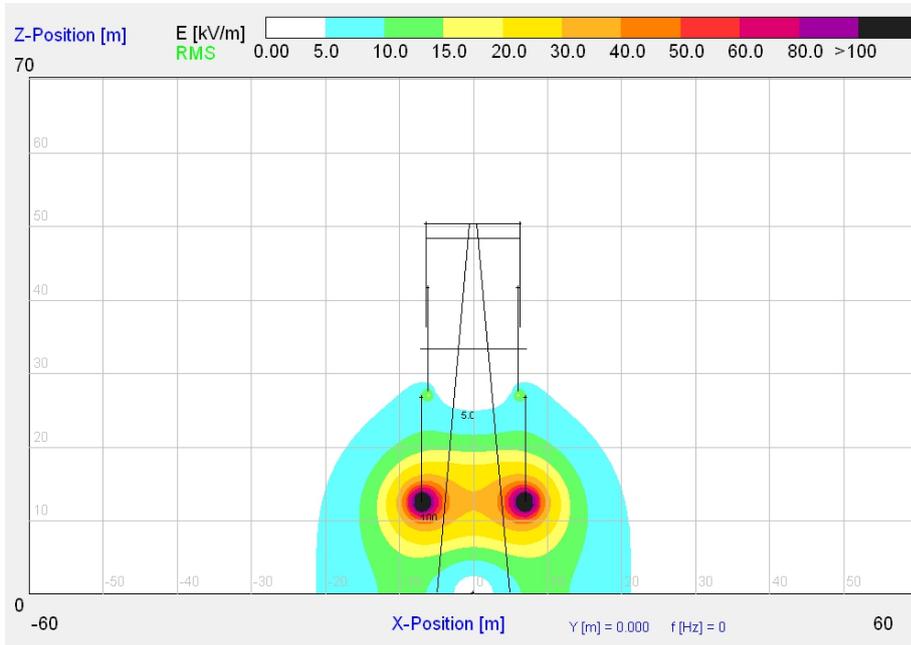
Elektrische Feldstärkeverteilung



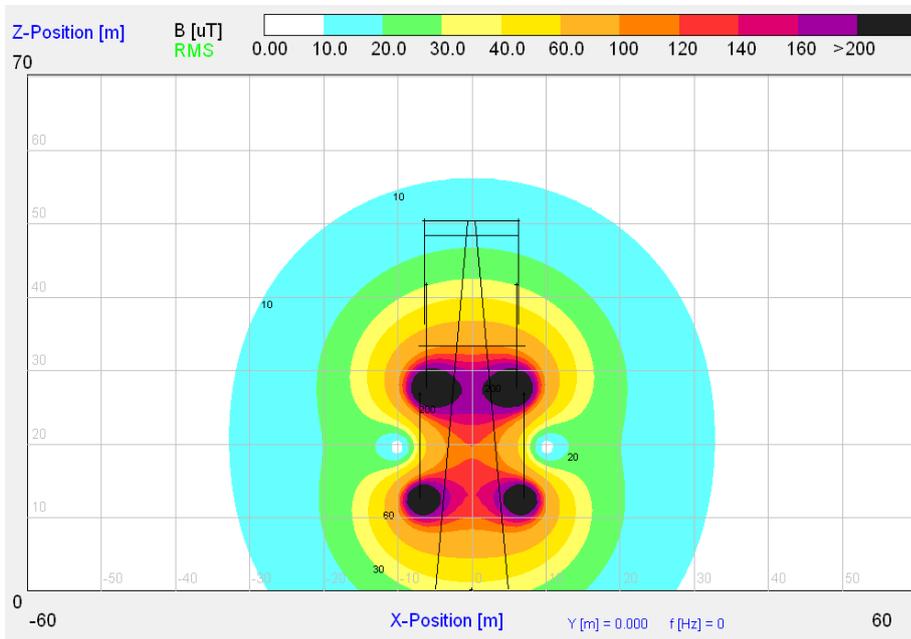
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 500-kV-Spannungsebene***I System, Bodenabstand 12,5 m**Magnetische Flussdichteverteilung*

2 Systeme, Zweiebenenordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

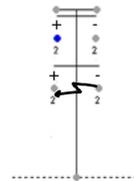
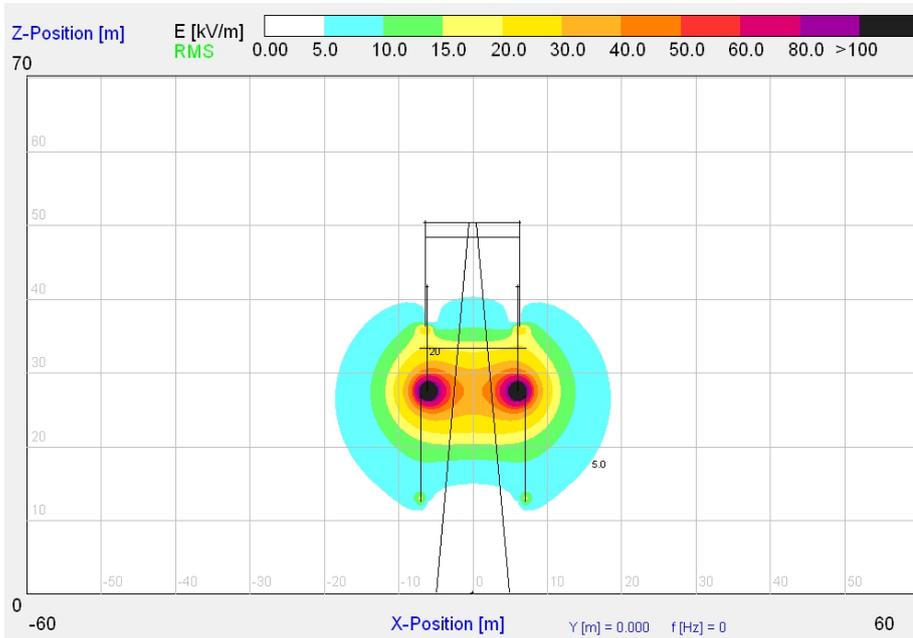


Elektrische Feldstärkeverteilung

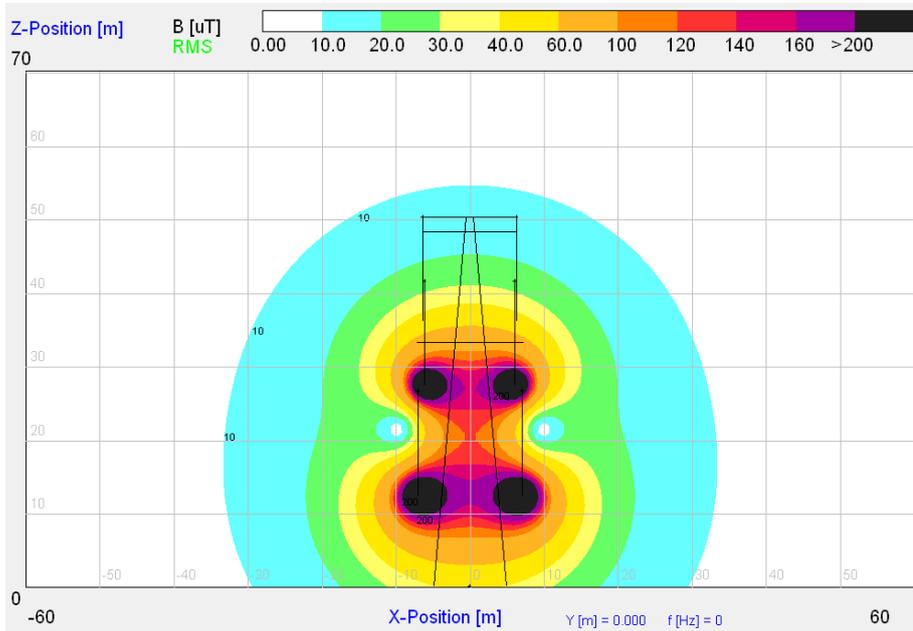


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene

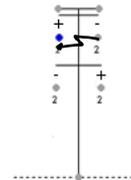
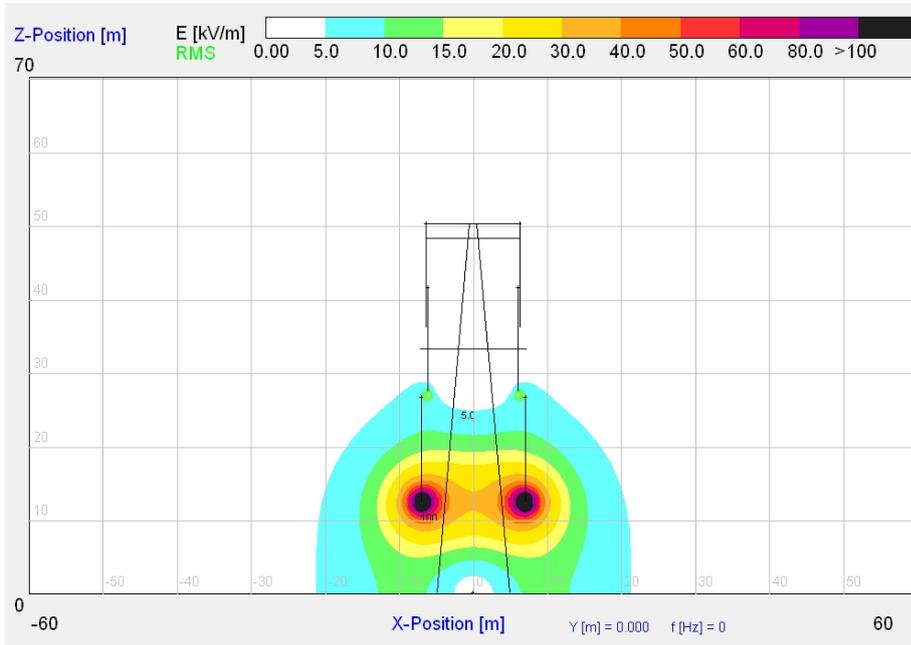


Elektrische Feldstärkeverteilung

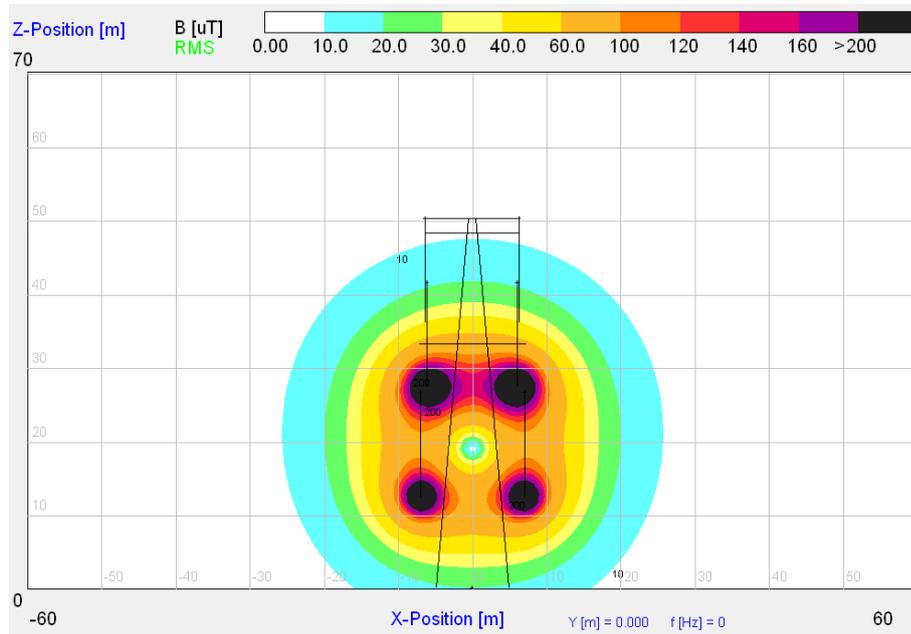


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

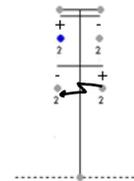
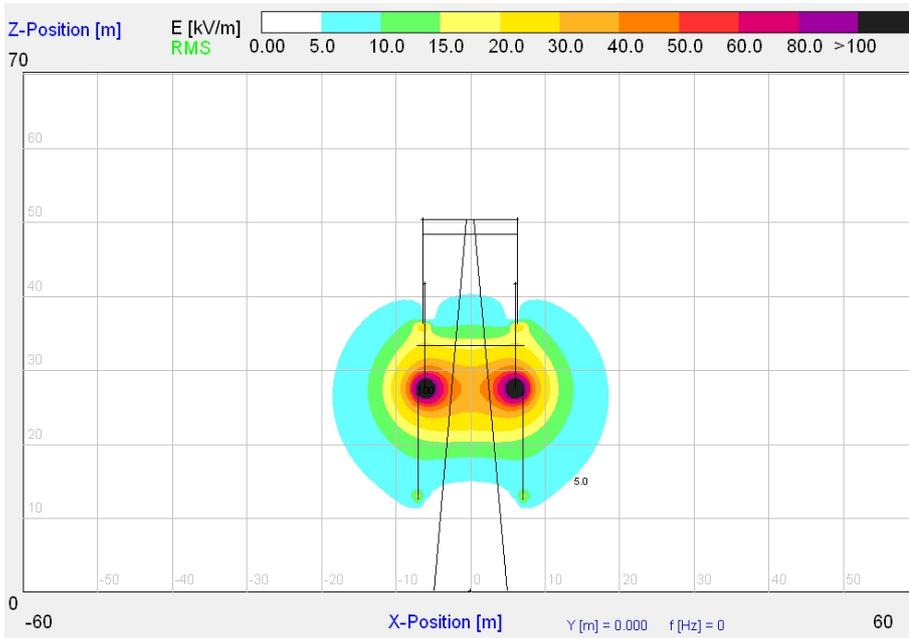


Elektrische Feldstärkeverteilung

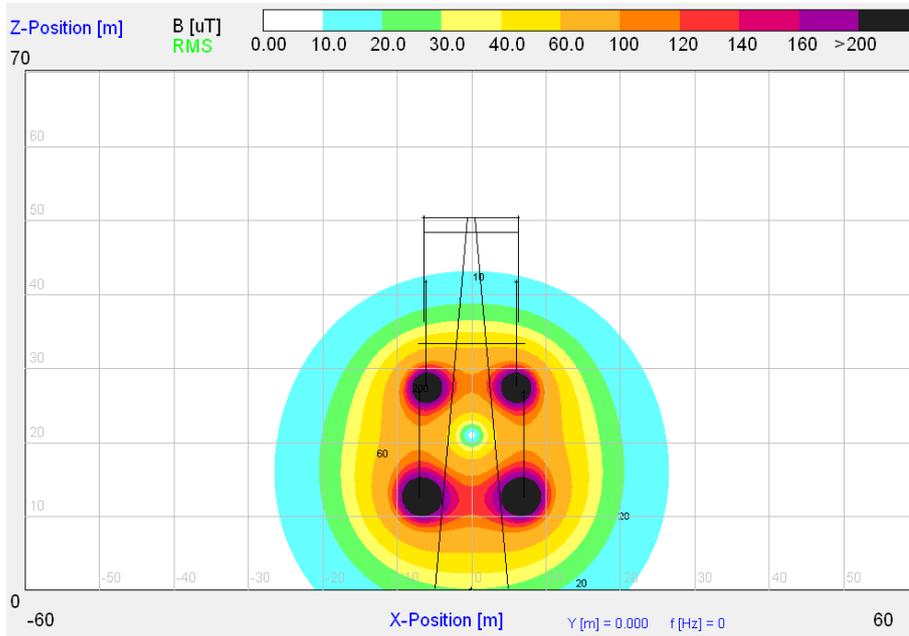


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene



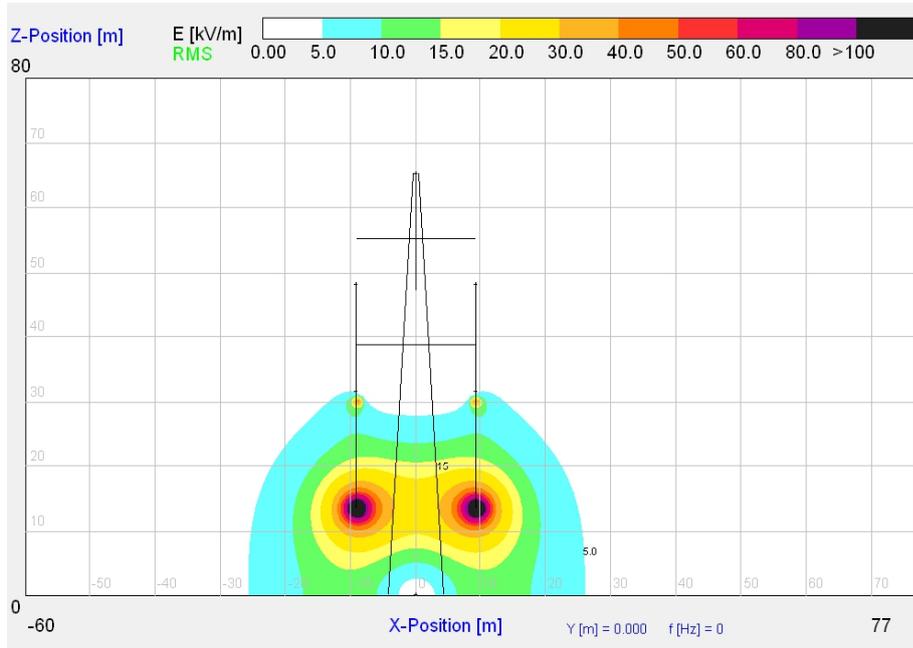
Elektrische Feldstärkeverteilung



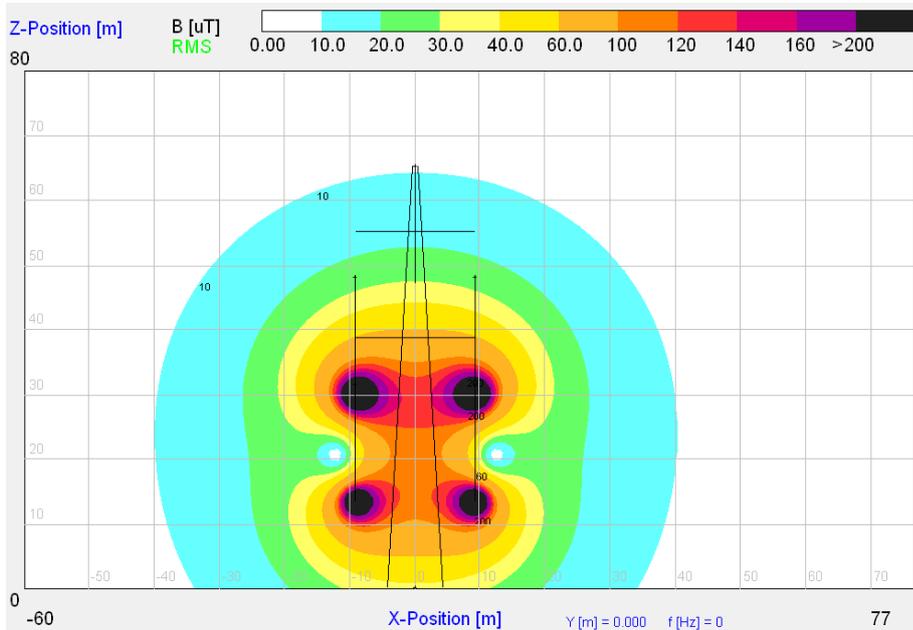
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 600-kV-Spannungsebene**

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

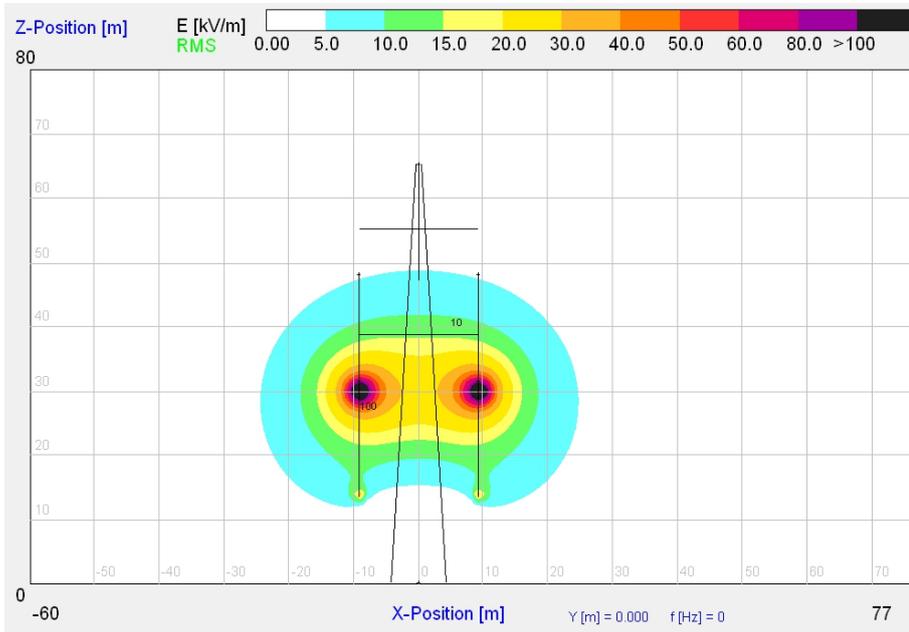


*Elektrische Feldstärkeverteilung*

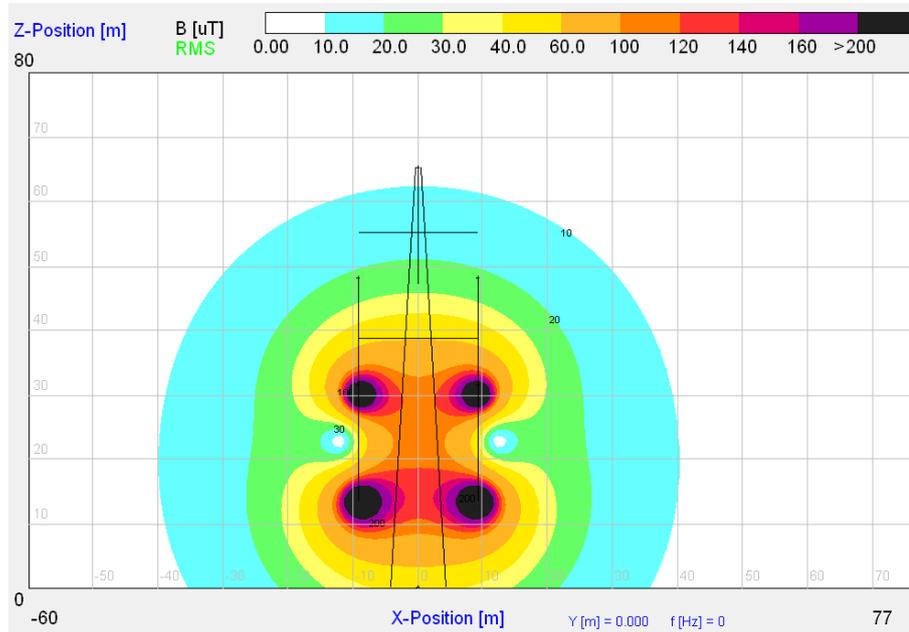


*Magnetische Flussdichteverteilung*

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene

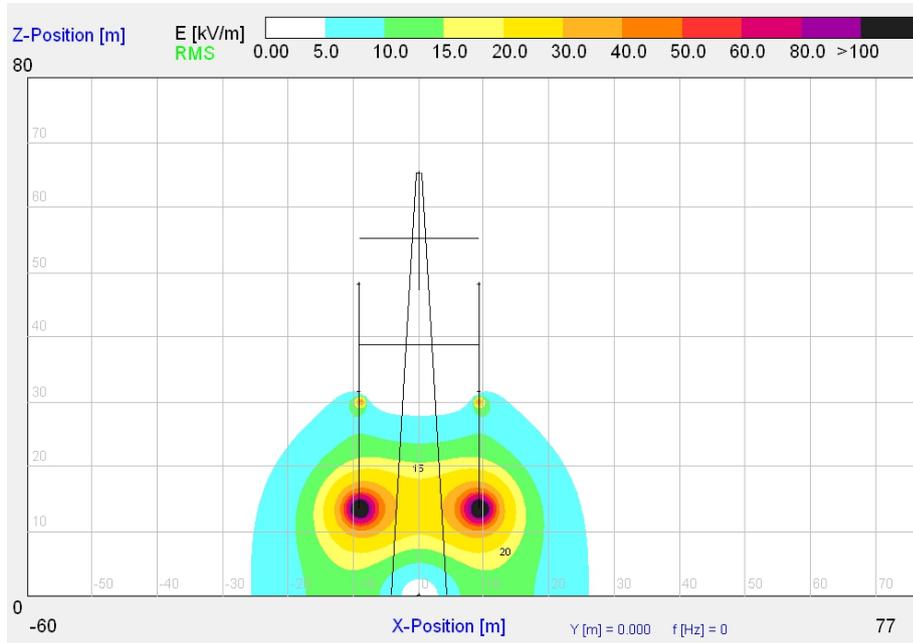


Elektrische Feldstärkeverteilung

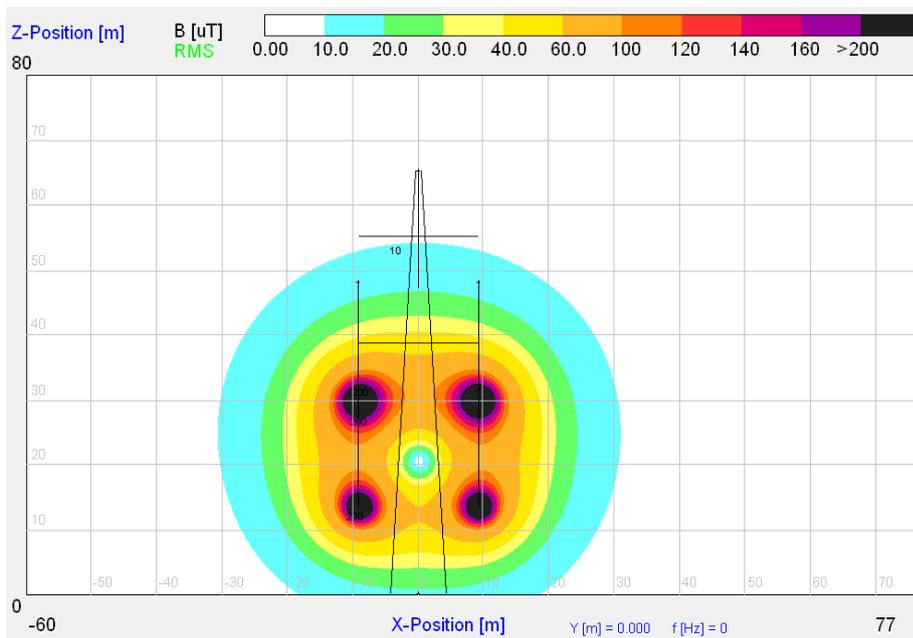


Magnetische Flussdichteverteilung

2 Systeme, Zweiebenenordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

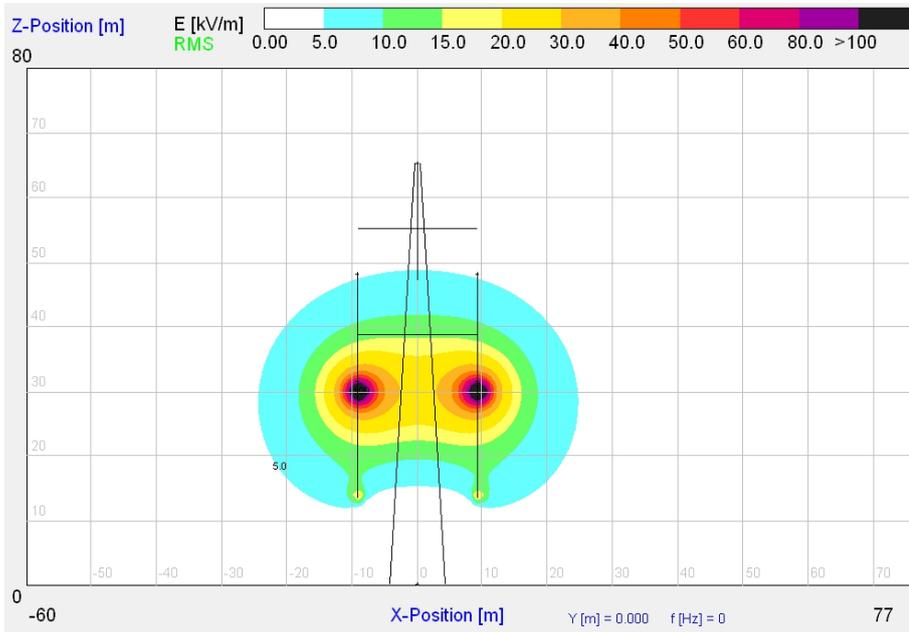


Elektrische Feldstärkeverteilung

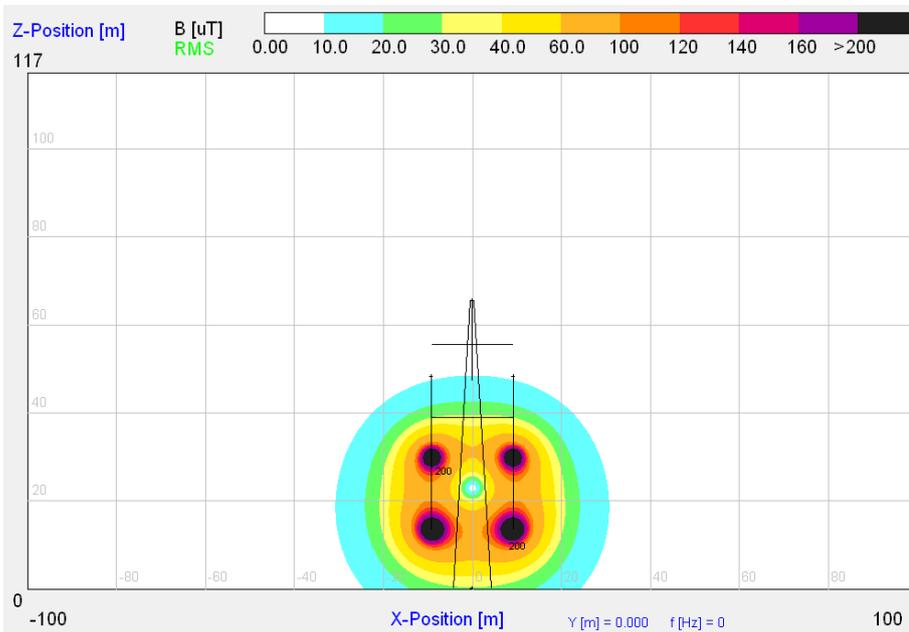


Magnetische Flussdichteverteilung

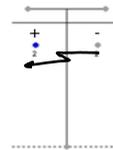
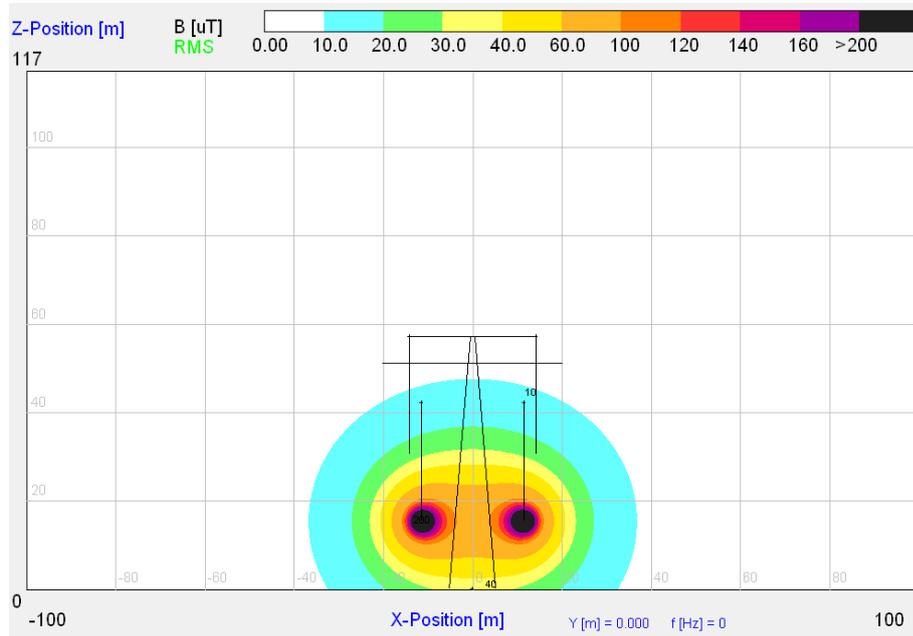
2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
 Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene



Elektrische Feldstärkeverteilung



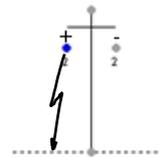
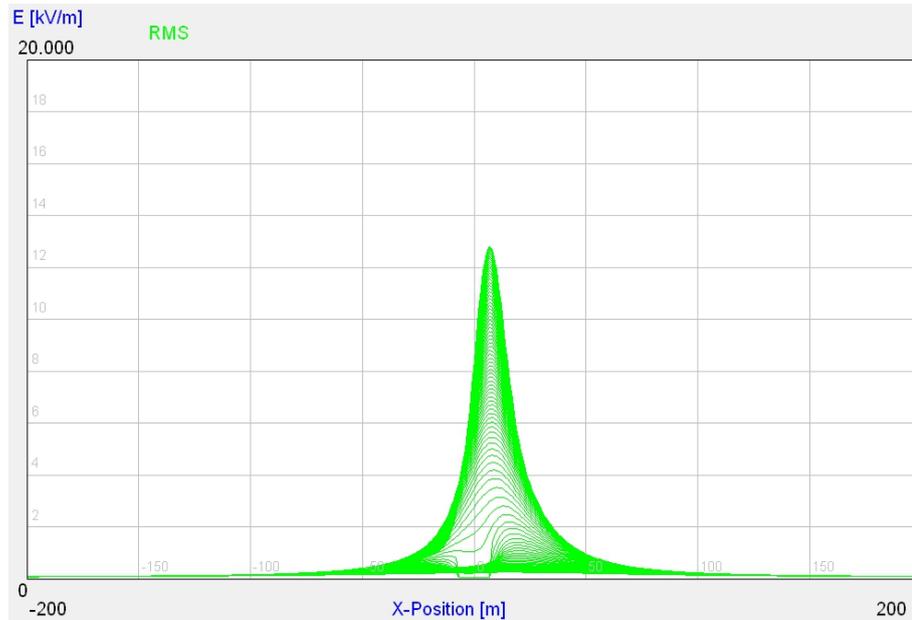
Magnetische Flussdichteverteilung

**± 800-kV-Spannungsebene***I System, Bodenabstand 15,5 m**Magnetische Flussdichteverteilung*

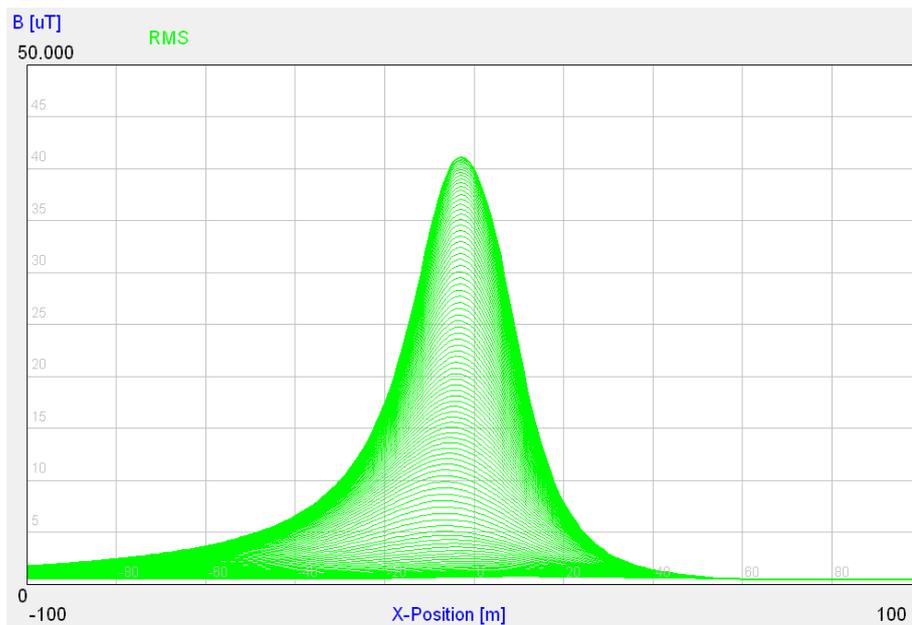
## Elektrischer Feldstärkeverlauf und magnetischer Flussdichteverlauf 1 m über der Erdbodenoberkante für Erdkurzschluss

**± 400-kV-Spannungsebene**

*1 System, Bodenabstand 11,5 m*

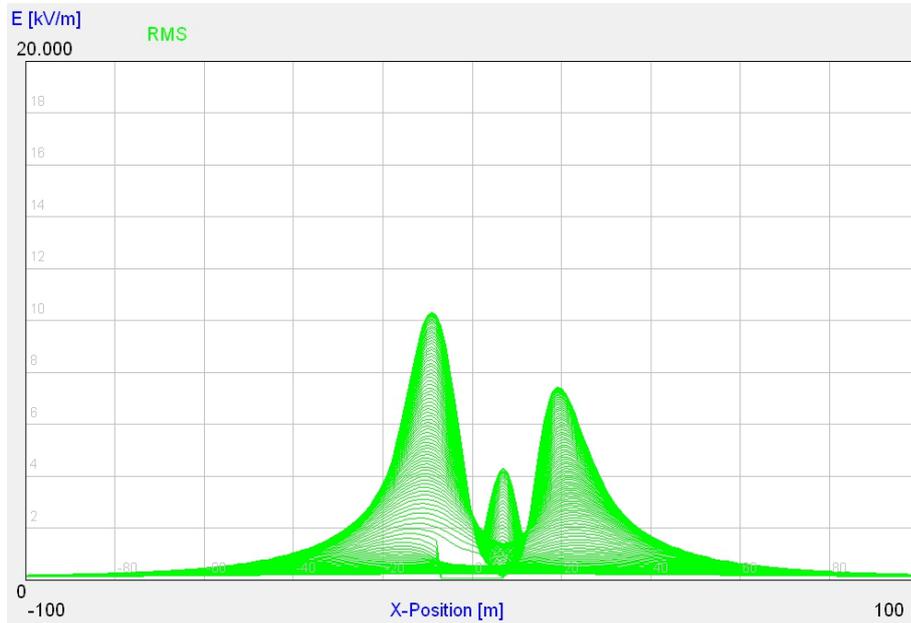


*Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 12,8 \text{ kV/m}$ )*

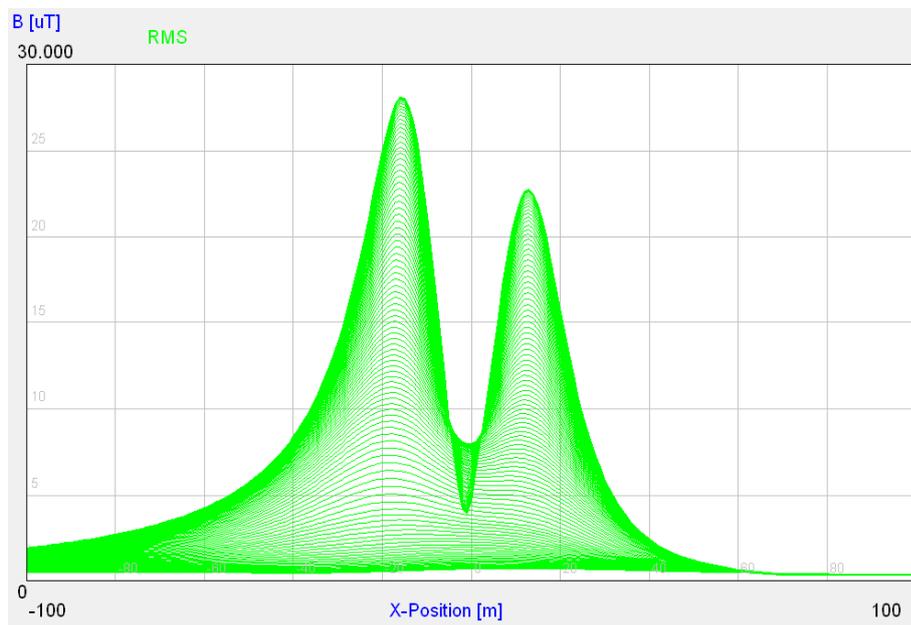


*Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 41,1 \mu\text{T}$ )*

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - + -,

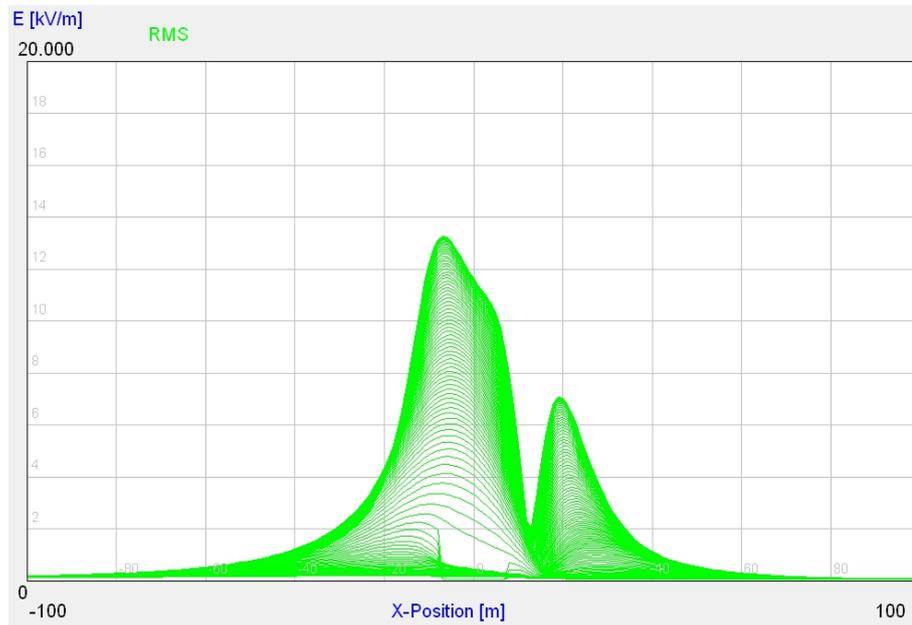


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 10,3 \text{ kV/m}$ )

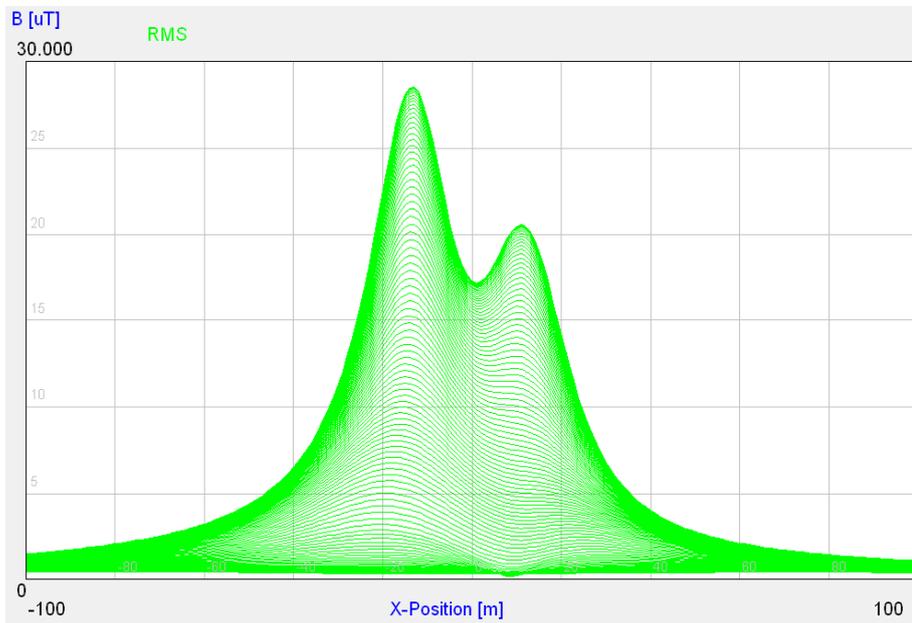


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 28,1 \text{ µT}$ )

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - - +,

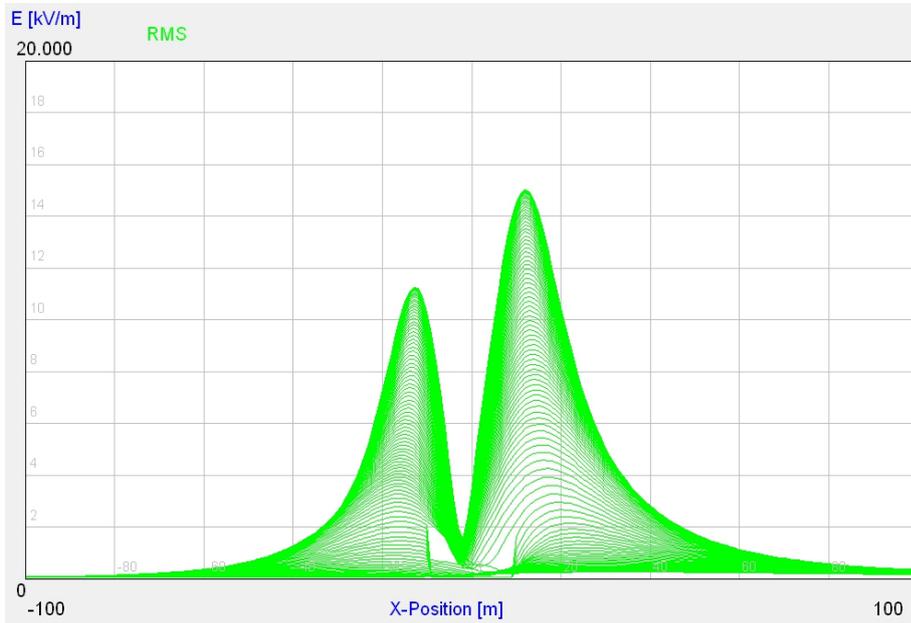


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,3 \text{ kV/m}$ )

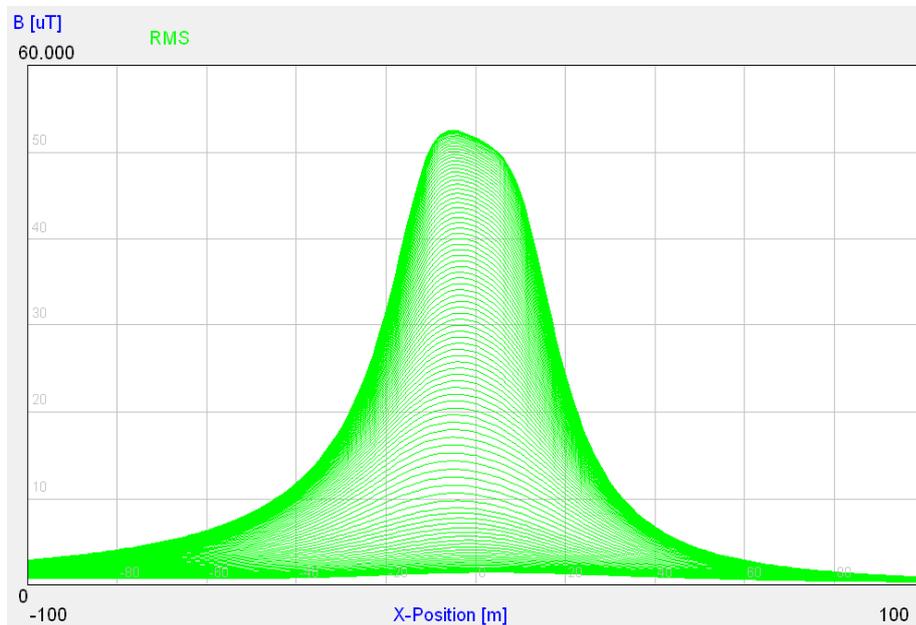


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 28,5 \text{ µT}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

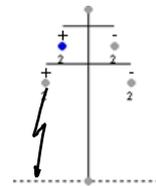
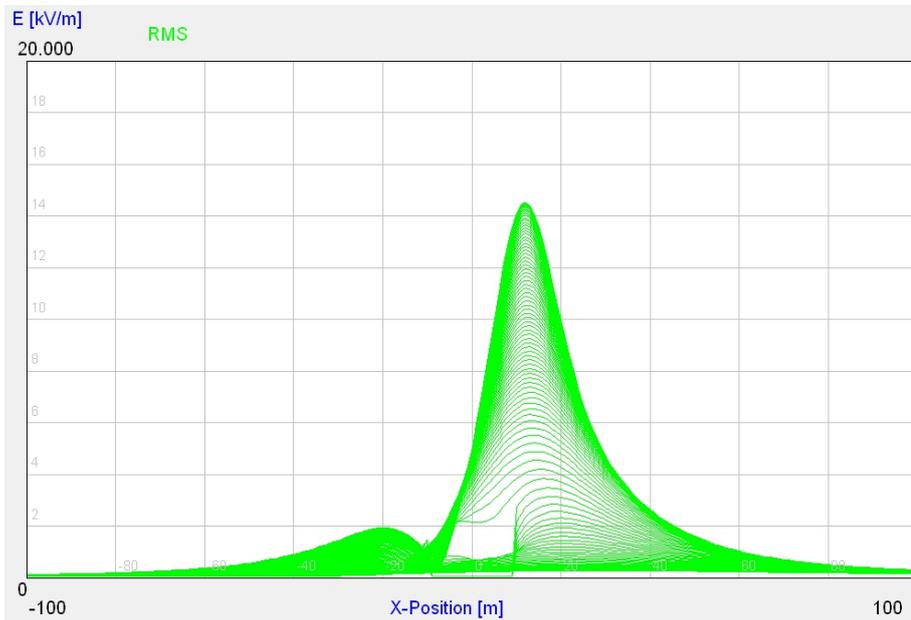


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 15 \text{ kV/m}$ )

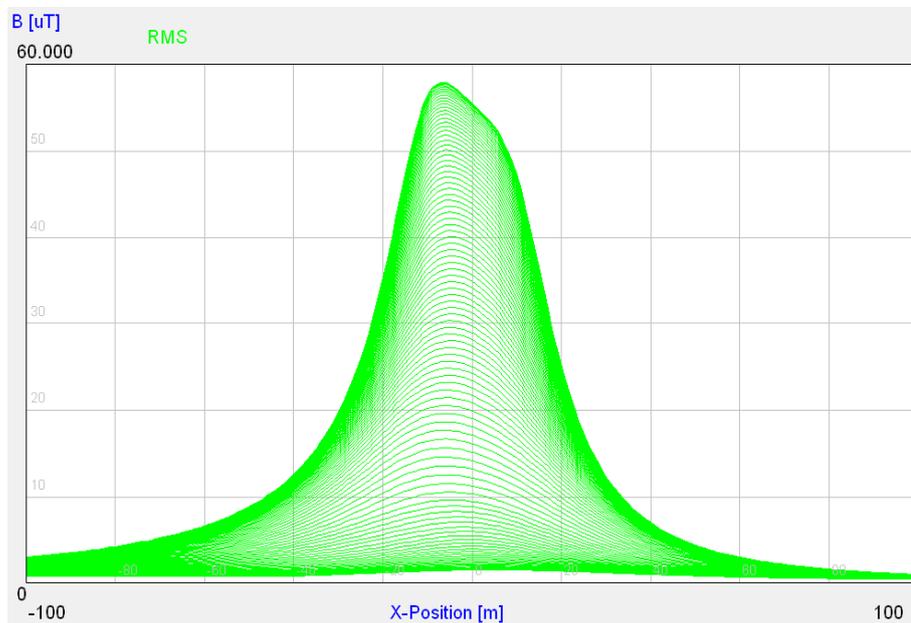


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 52,5 \text{ µT}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene

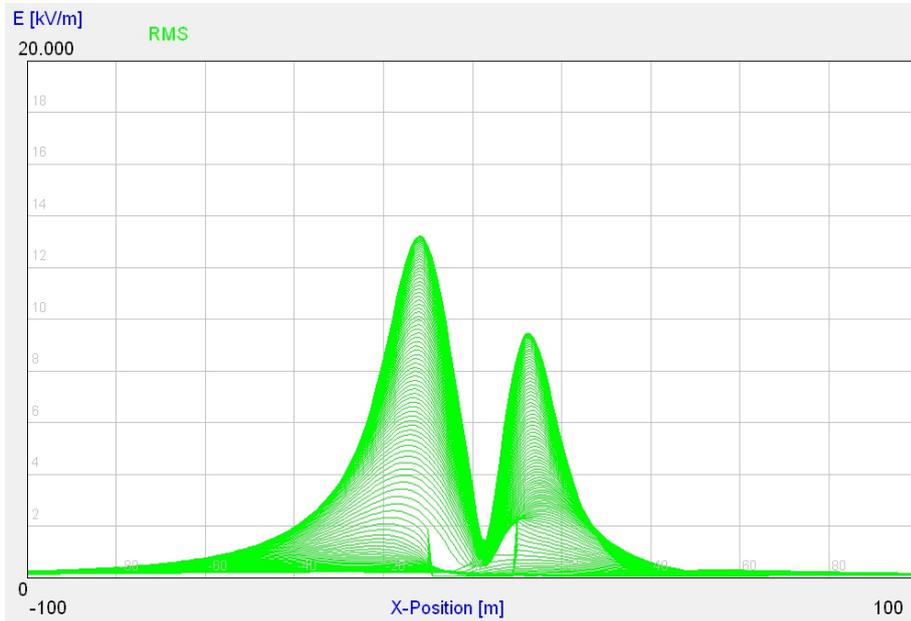


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 14,5 \text{ kV/m}$ )

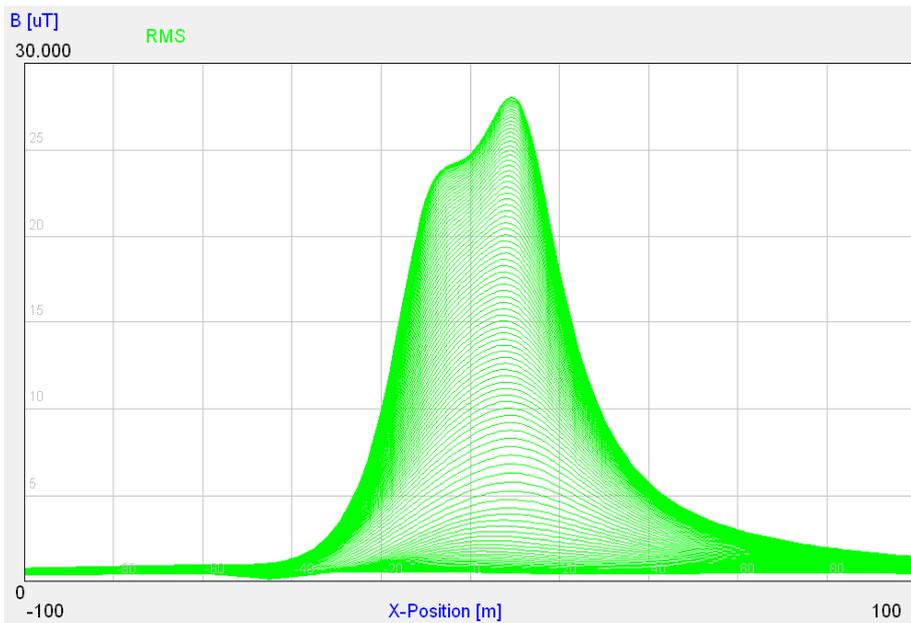


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 57,9 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

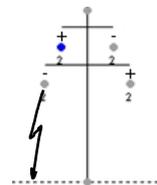
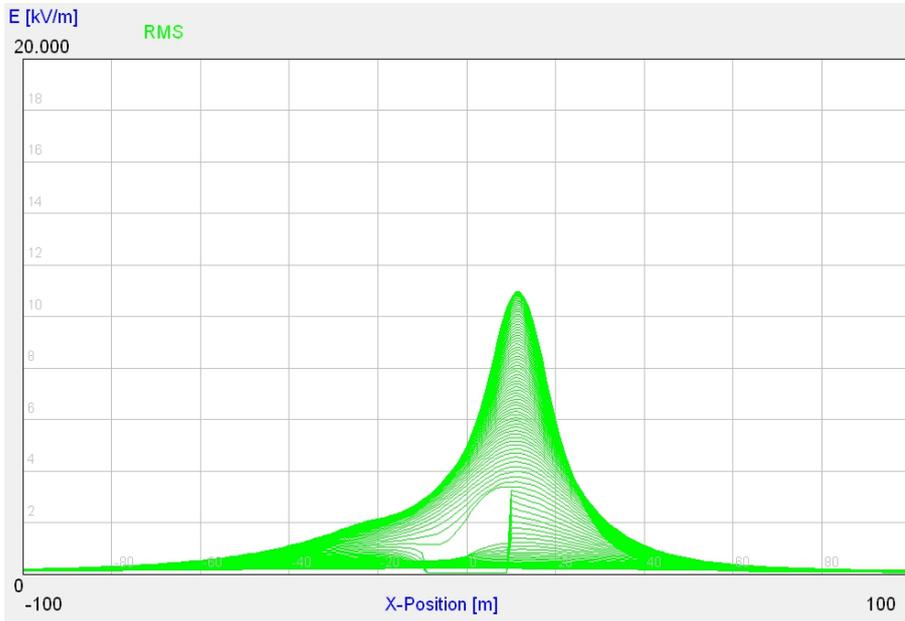


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,2$  kV/m)

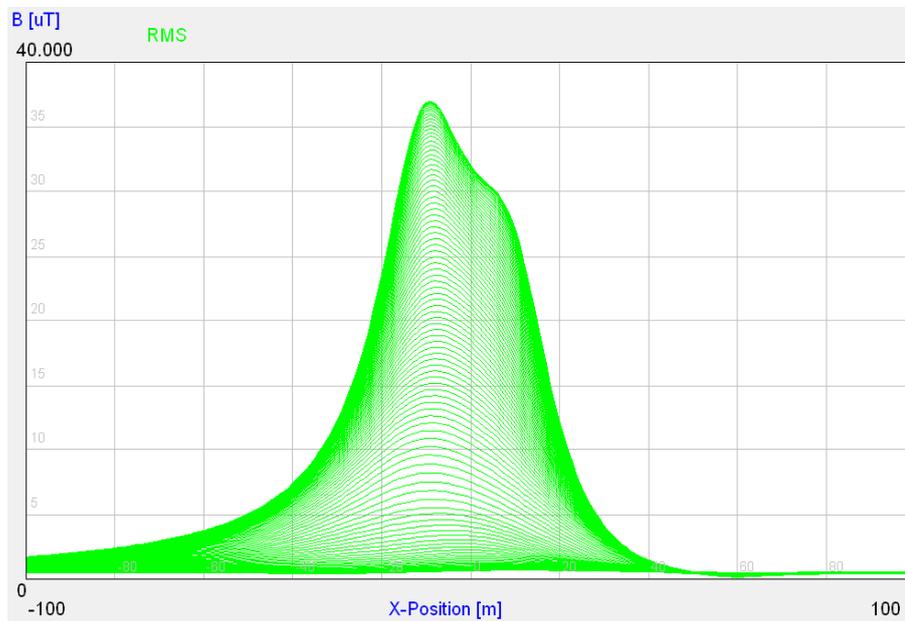


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 28$   $\mu T$ )

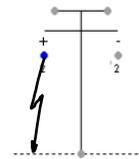
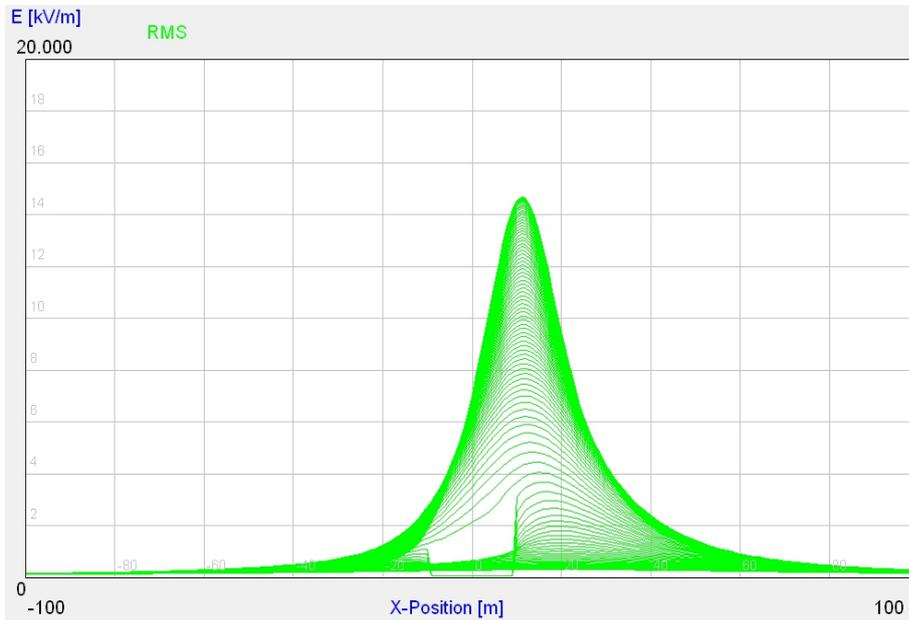
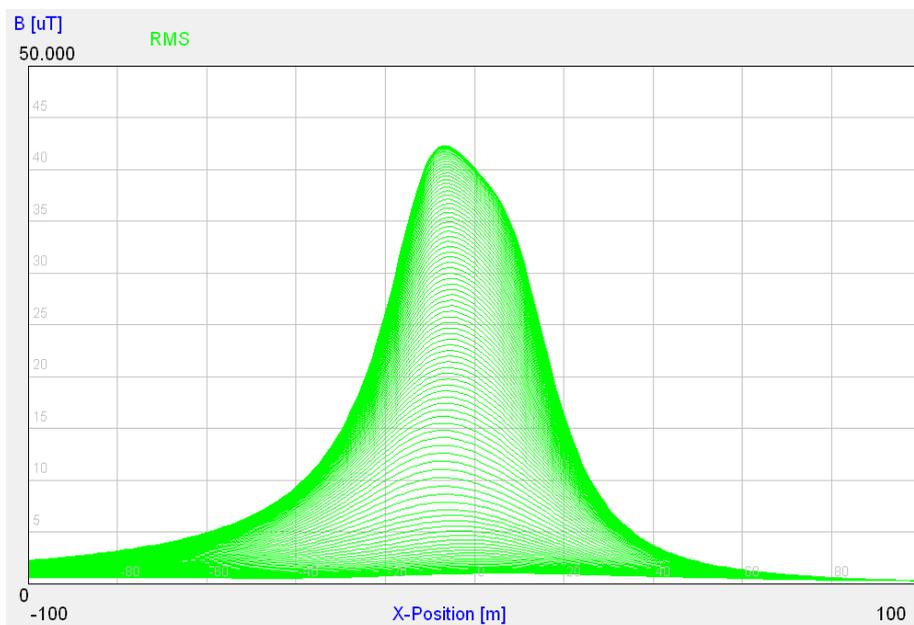
2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene



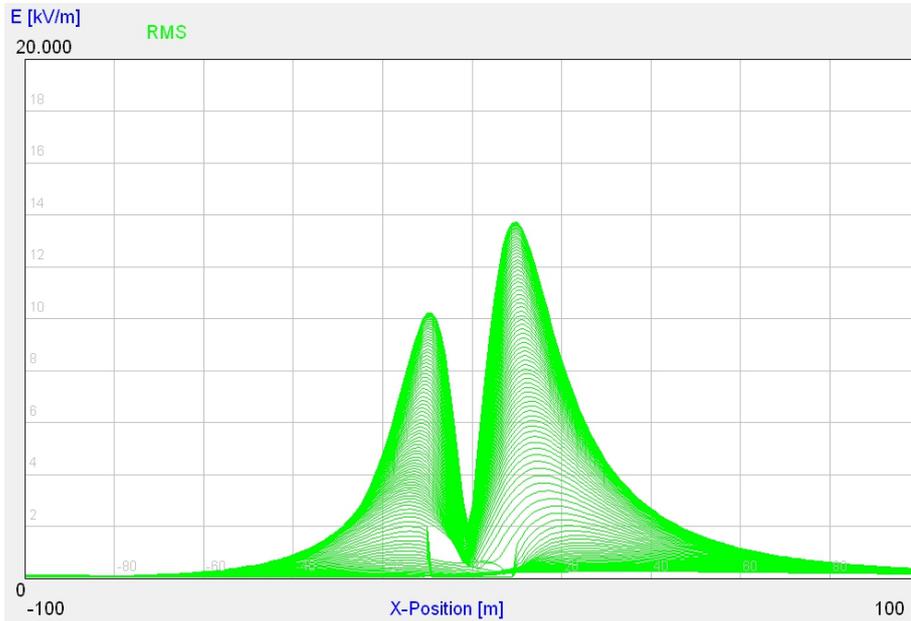
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 10,9 \text{ kV/m}$ )



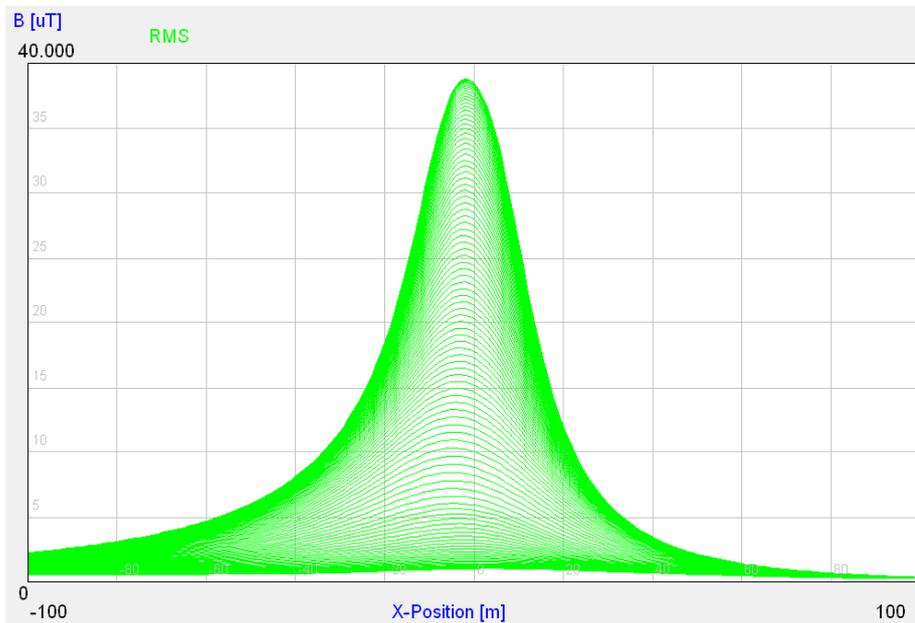
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 36,9 \mu\text{T}$ )

**± 500-kV-Spannungsebene***1 System, Bodenabstand 12,5 m**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 14,7 \text{ kV/m}$ )**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 42,3 \text{ μT}$ )*

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

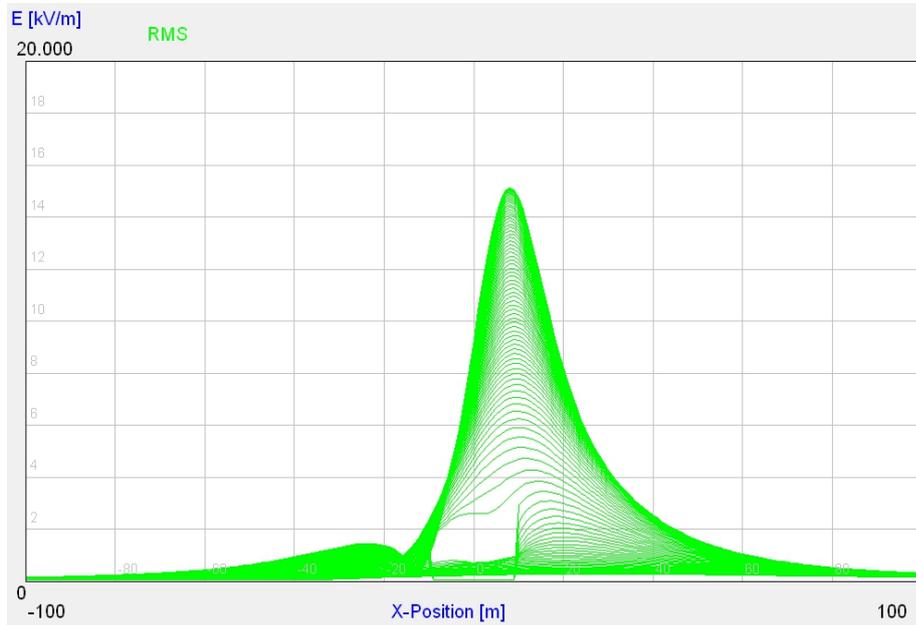


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,7 \text{ kV/m}$ )

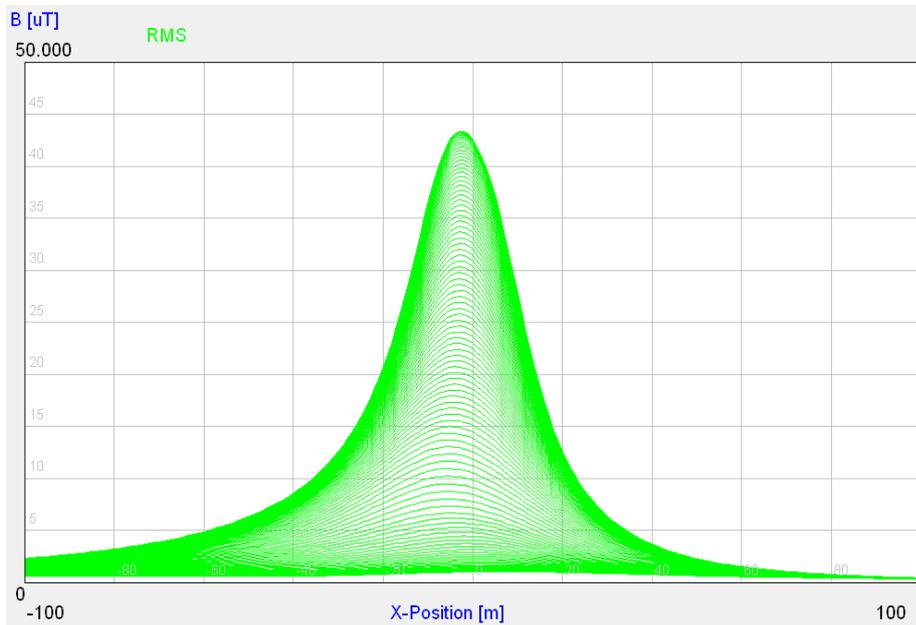


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 38,8 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene

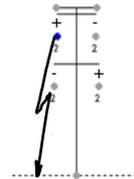
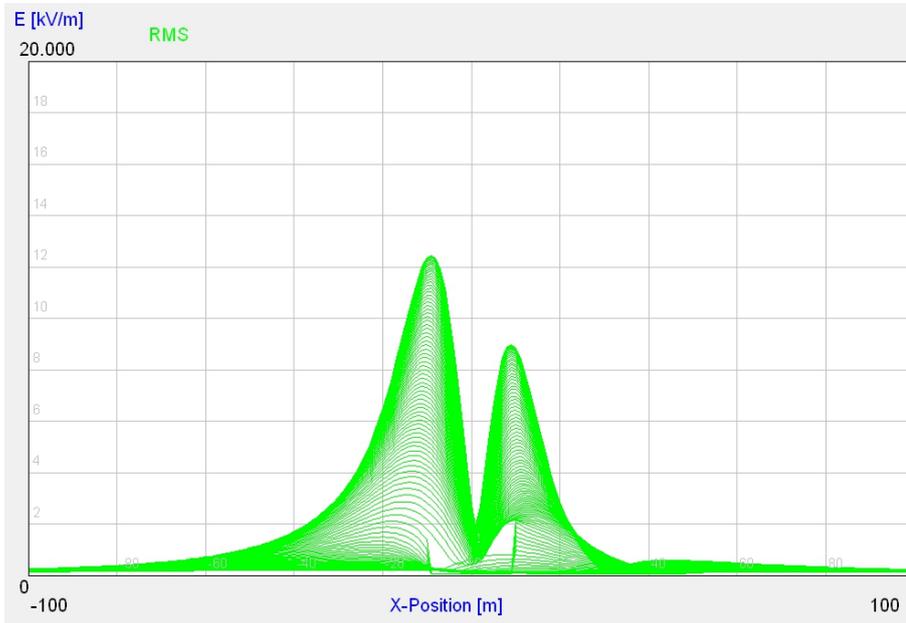


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 15,1 \text{ kV/m}$ )

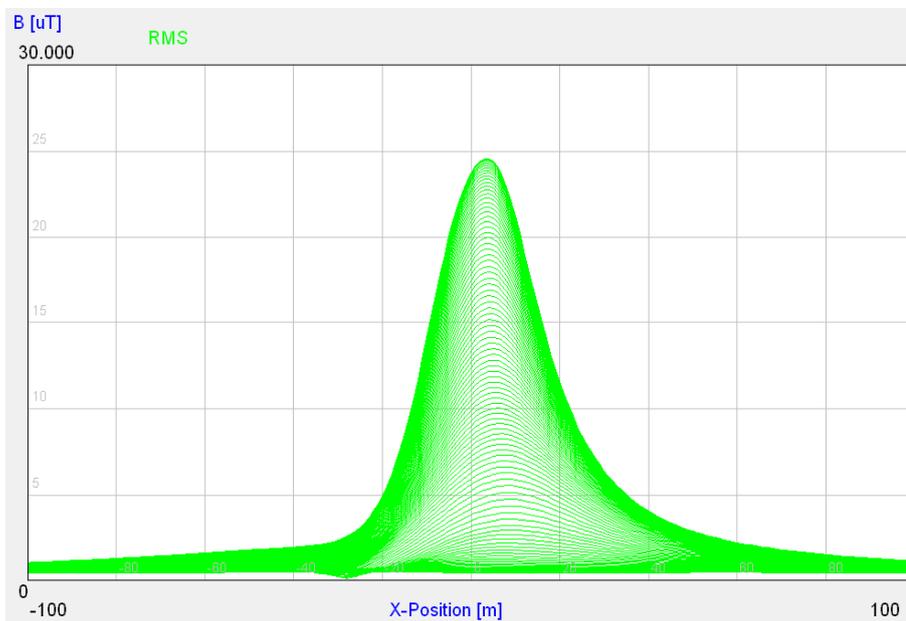


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 43,3 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

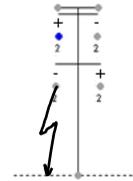
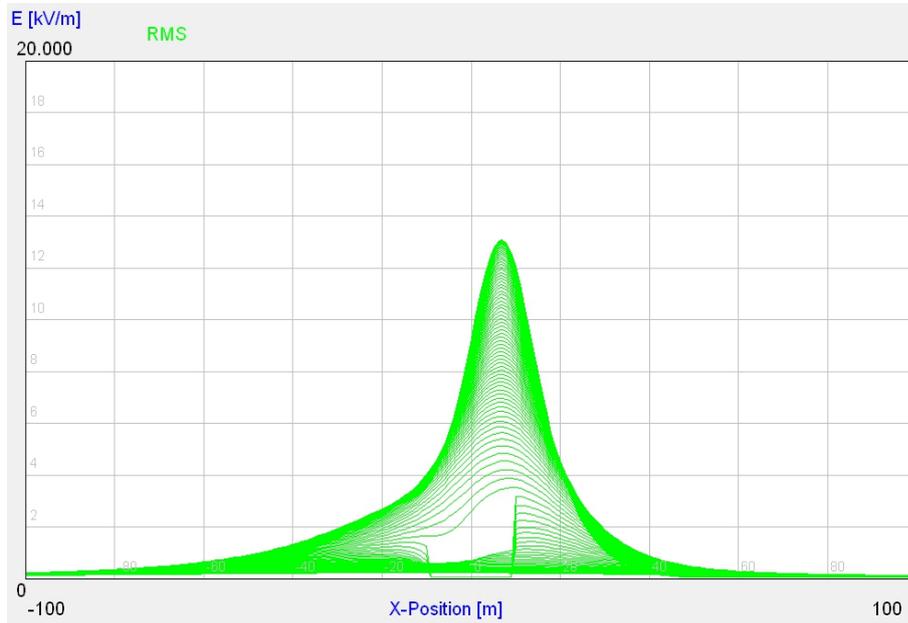


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 12,4 \text{ kV/m}$ )

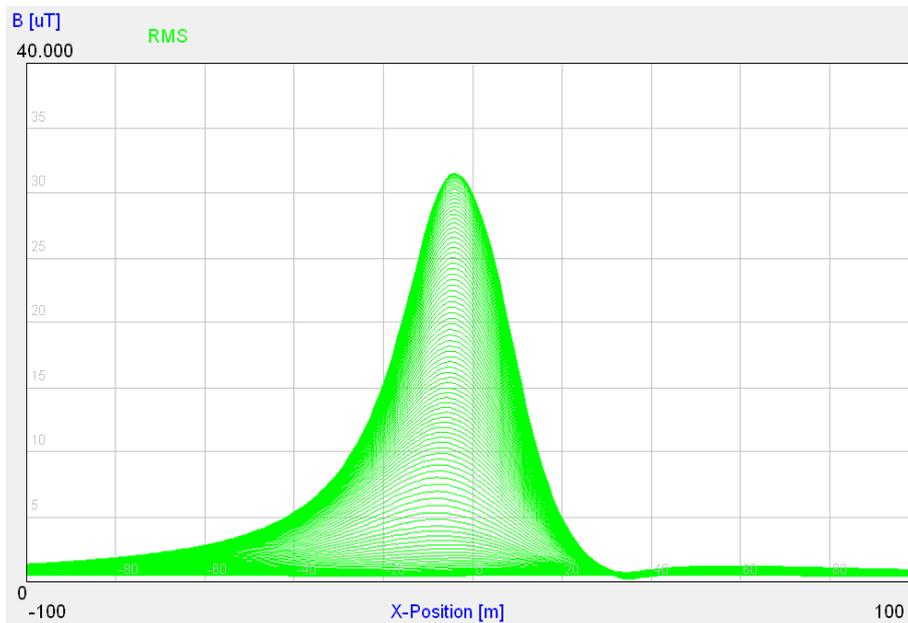


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 24,5 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene



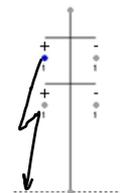
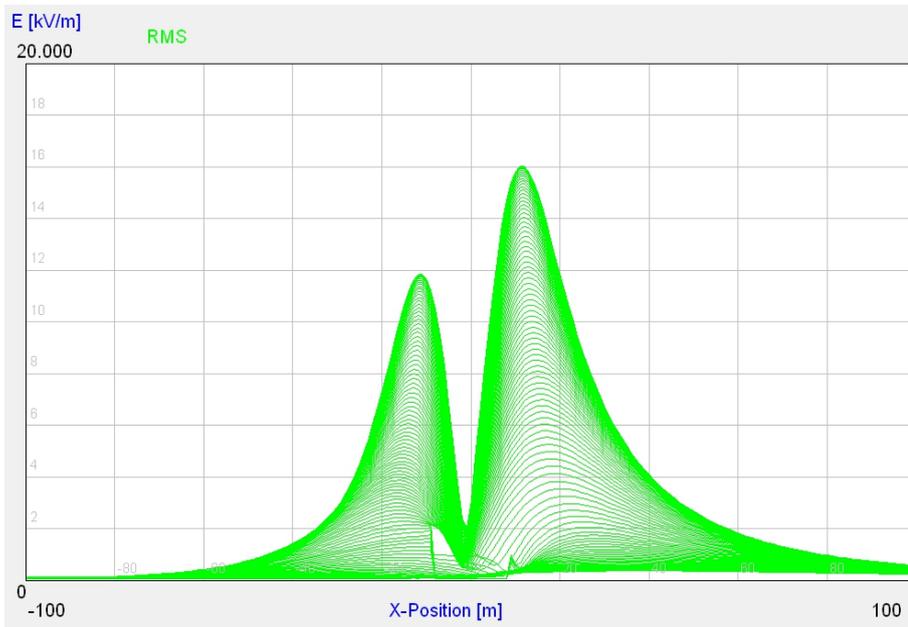
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,1 \text{ kV/m}$ )



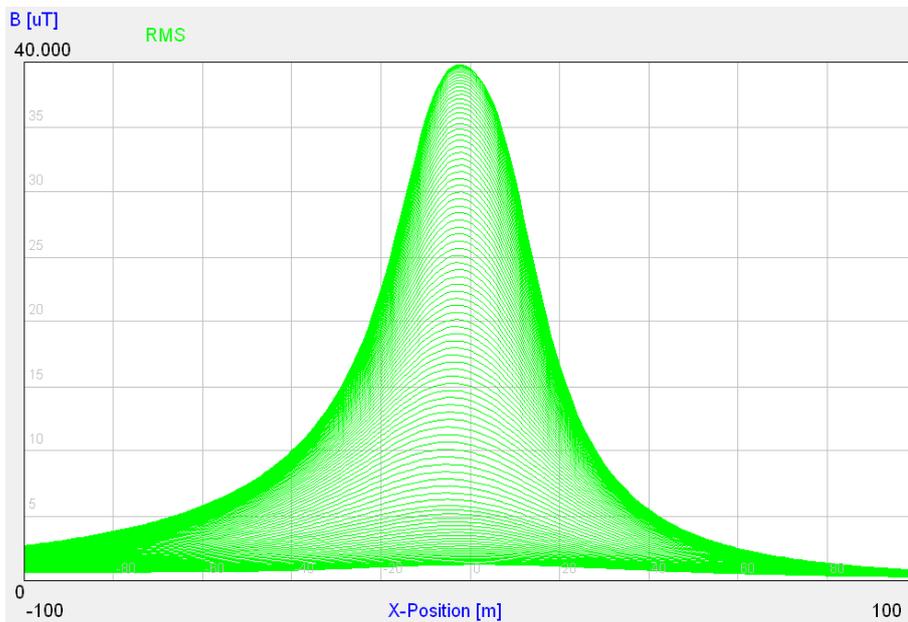
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 31,5 \mu\text{T}$ )

**± 600-kV-Spannungsebene**

2 Systeme, Zweiebenenordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

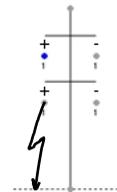
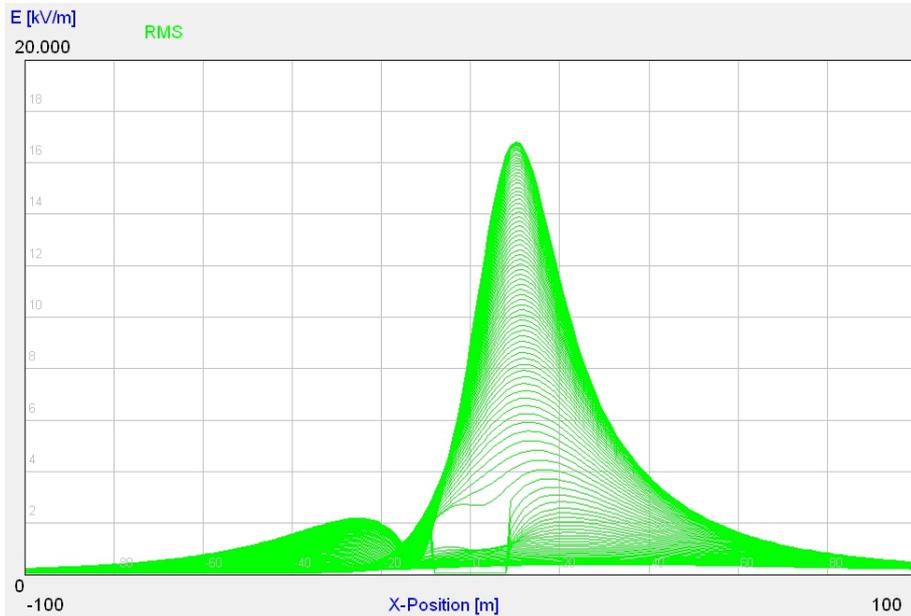


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 16 \text{ kV/m}$ )

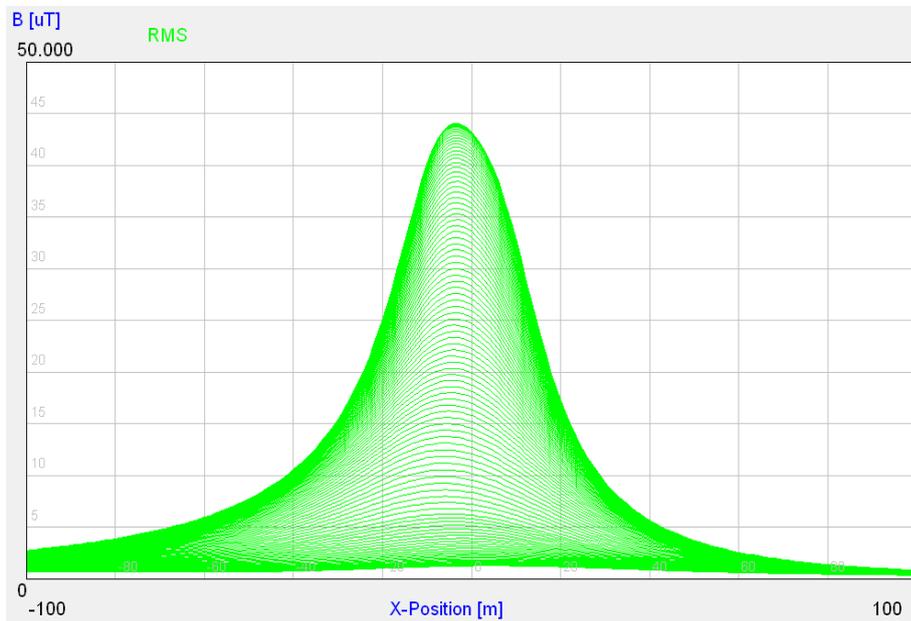


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 39,8 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene

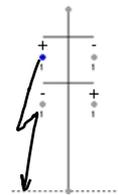
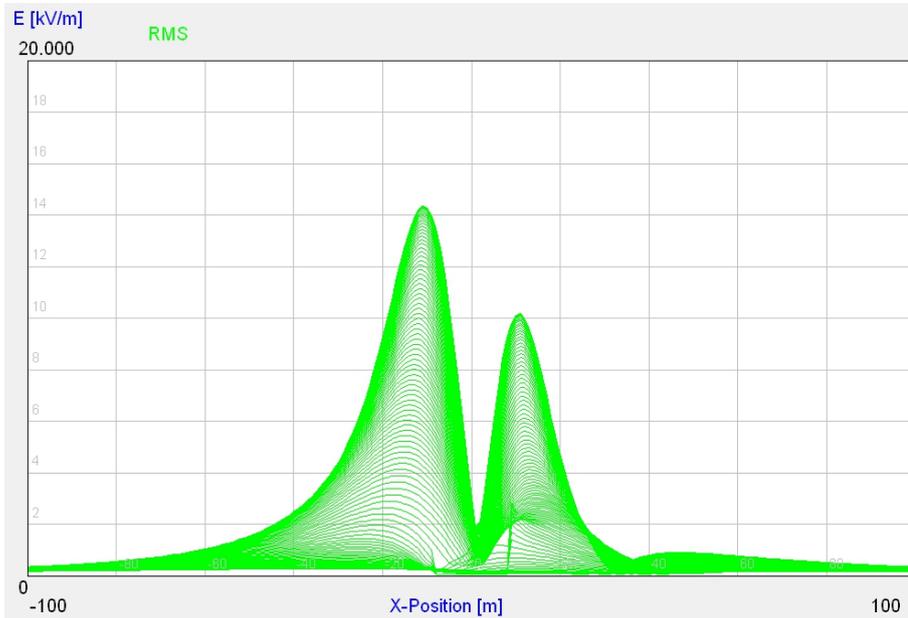


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 16,8 \text{ kV/m}$ )

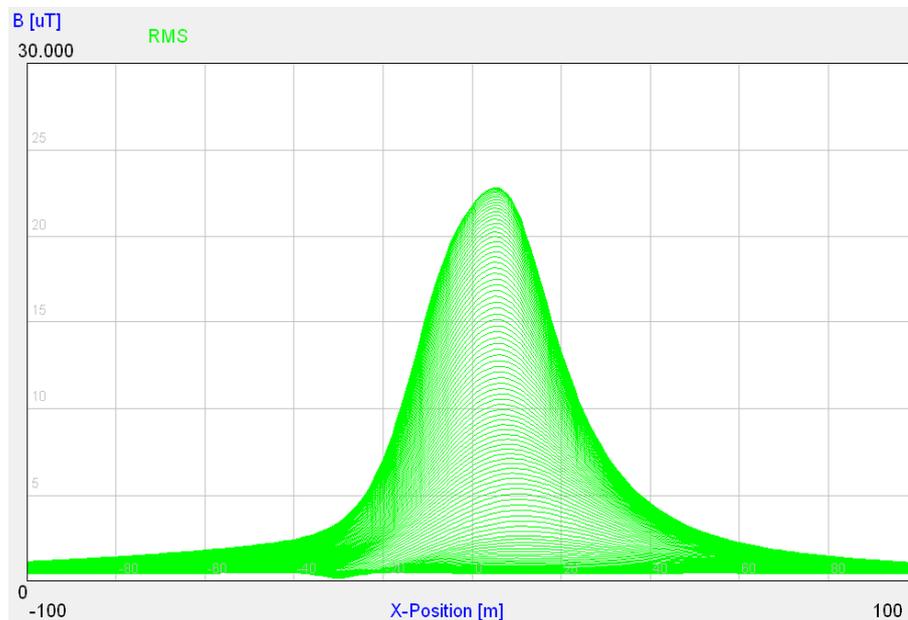


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 44 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von oberen Ebene

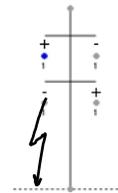
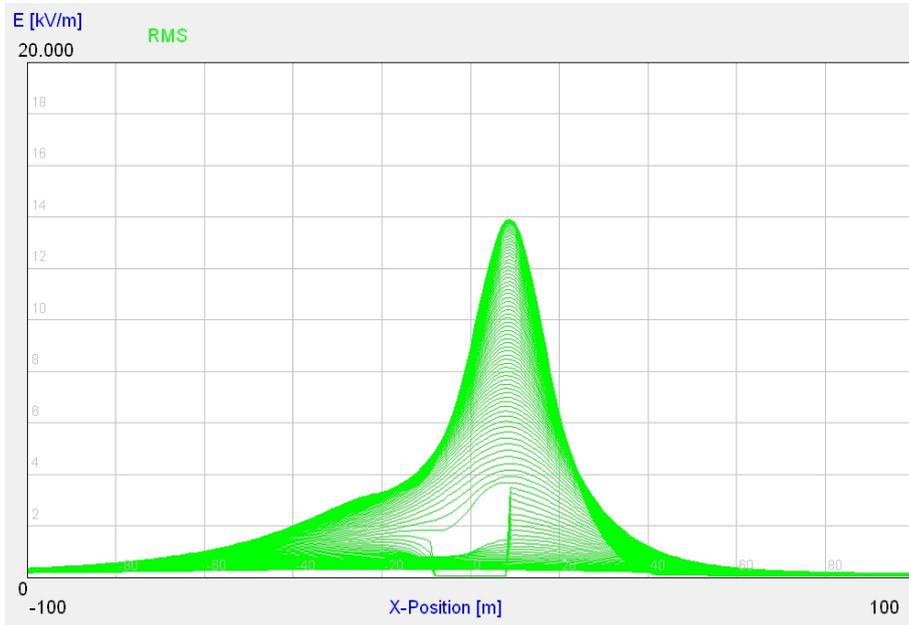


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 14,4$  kV/m)

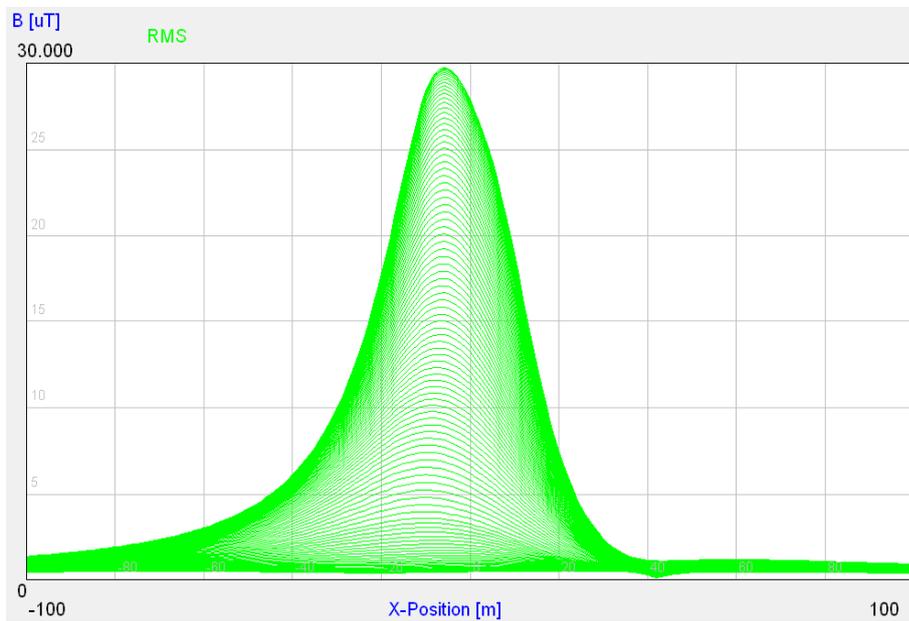


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 22,8$   $\mu T$ )

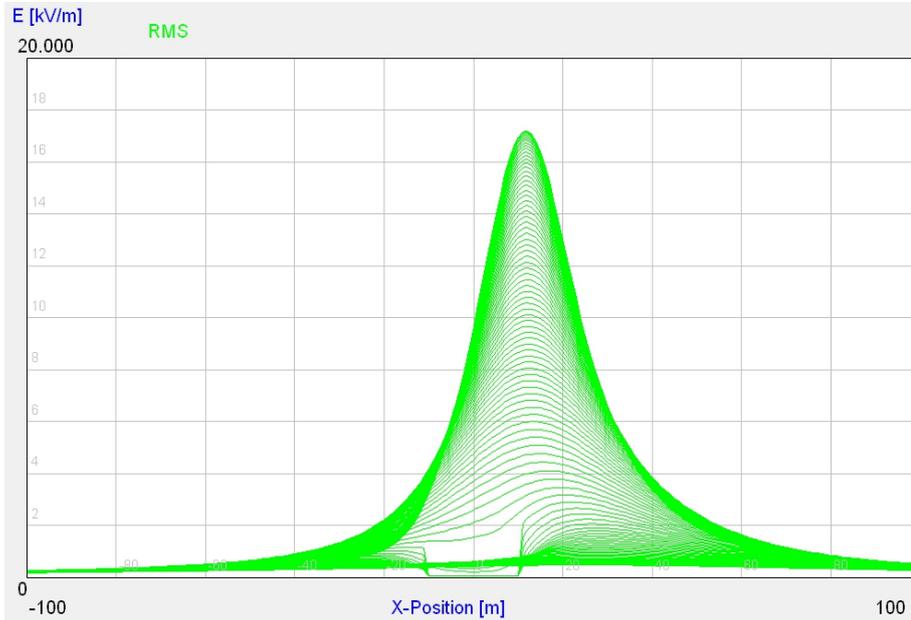
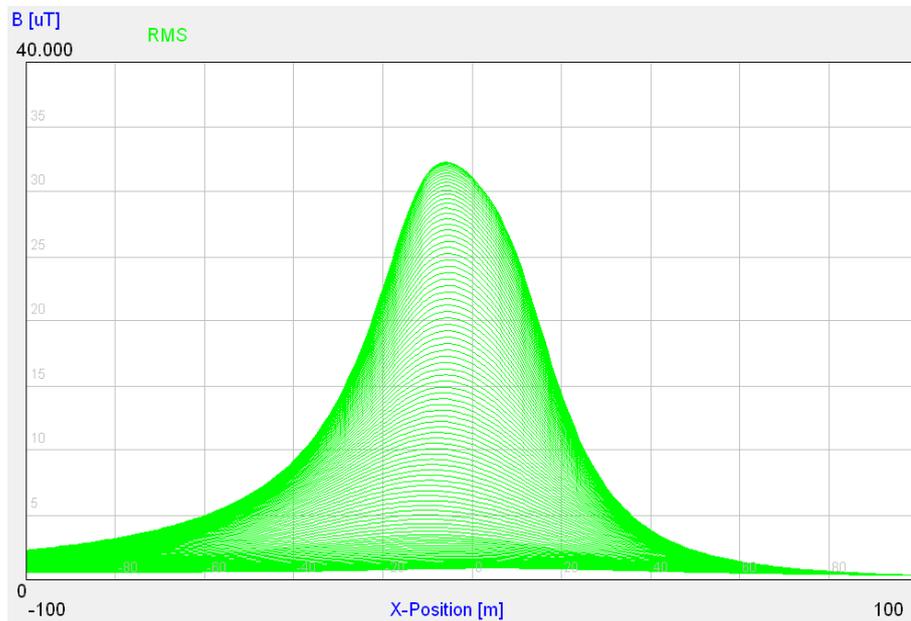
2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Erdkurzschluss ausgehend von unteren Ebene



Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,9 \text{ kV/m}$ )



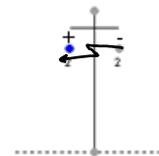
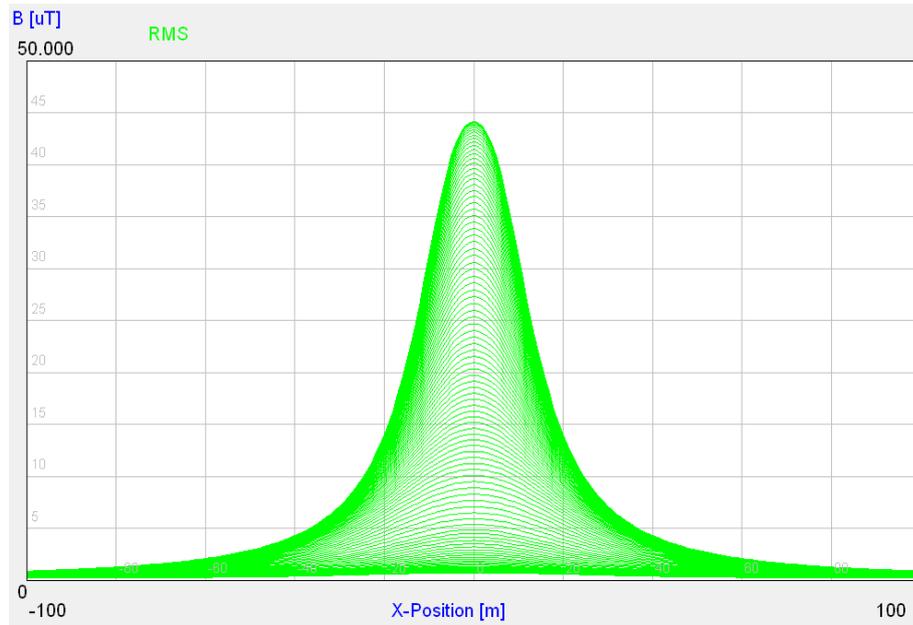
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 29,7 \mu\text{T}$ )

**± 800-kV-Spannungsebene***I System, Bodenabstand 15,5 m**Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 17,2$  kV/m)**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 32,2$   $\mu T$ )*

## Elektrischer Feldstärkeverlauf und magnetischer Flussdichteverlauf 1 m über der Erdbodenoberkante für Leiter-Leiter-Kurzschluss

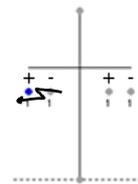
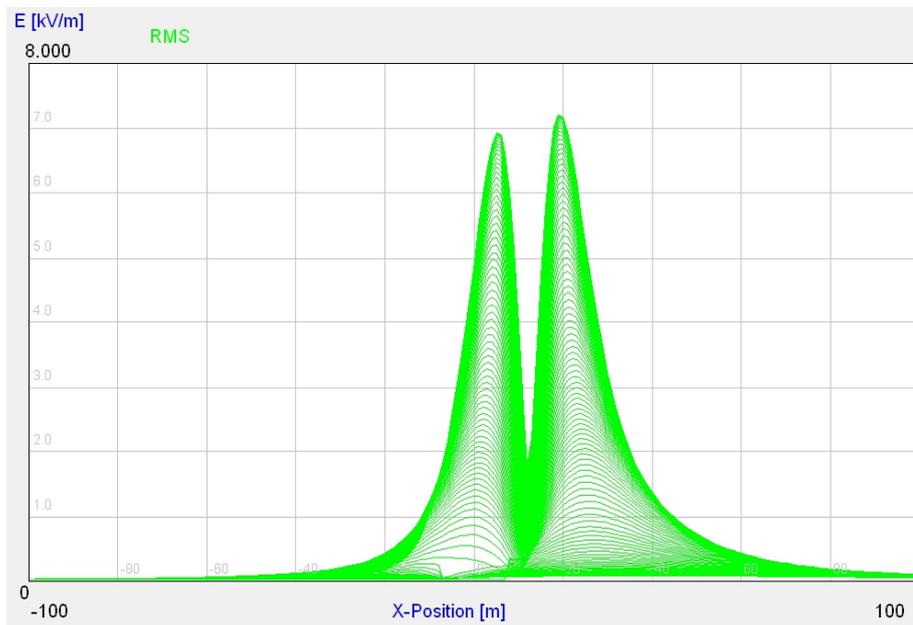
± 400-kV-Spannungsebene

1 System, Bodenabstand 11,5 m

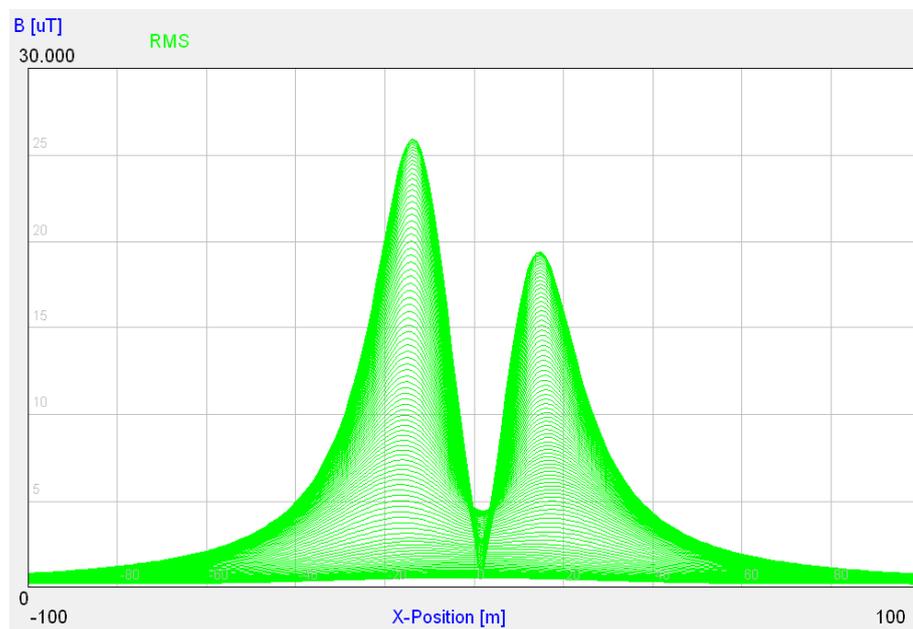


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 44,2 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - + -,

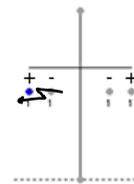
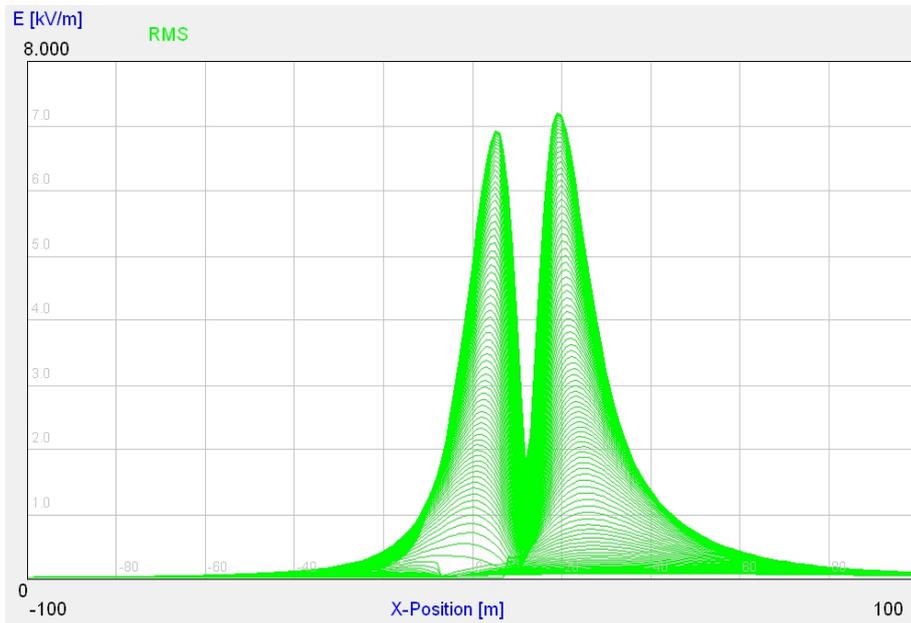


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 7,2$  kV/m)

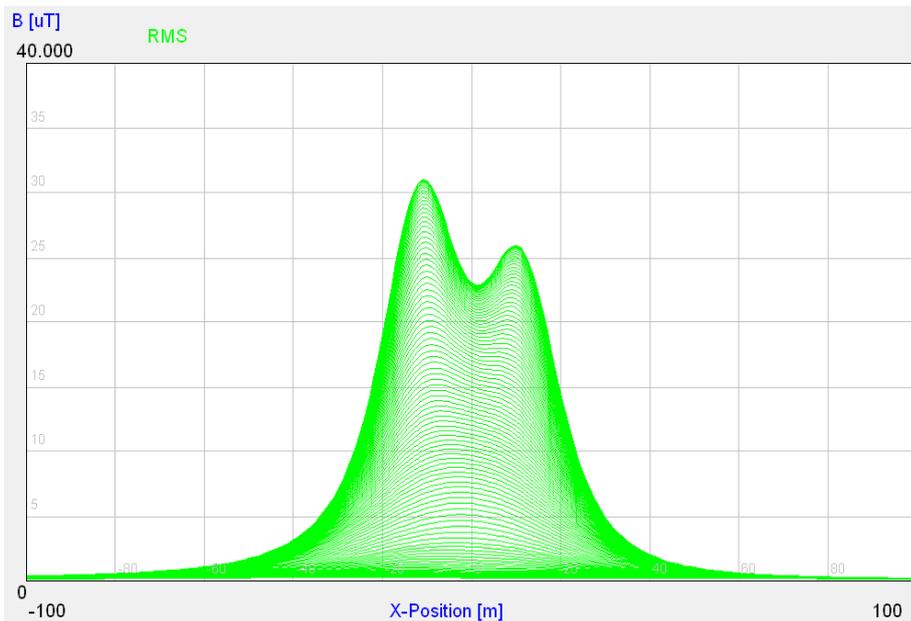


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 25,9$   $\mu T$ )

2 Systeme, Einebenenordnung, Bodenabstand 11,5 m, Leiteranordnung + - - +,

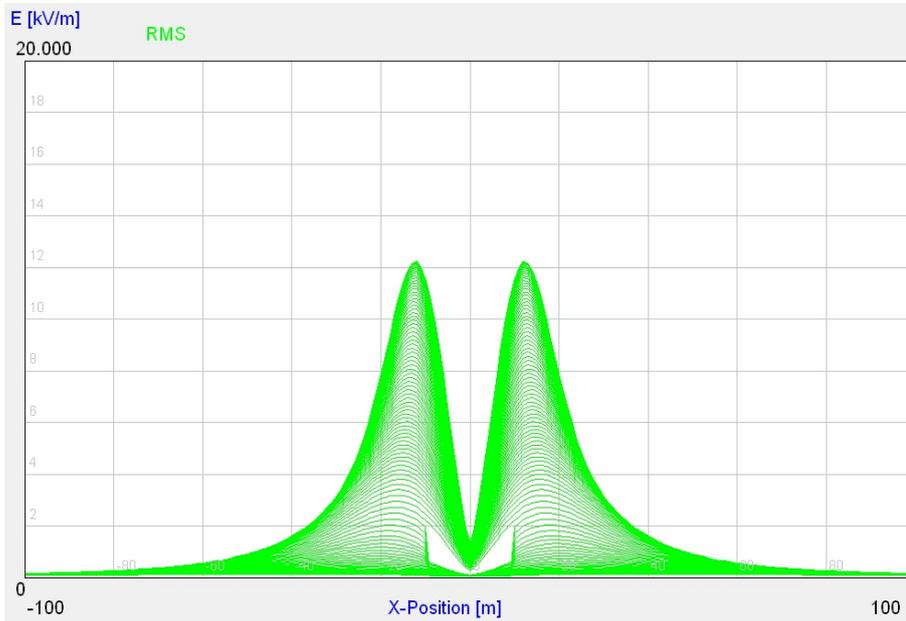


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 7,2$  kV/m)

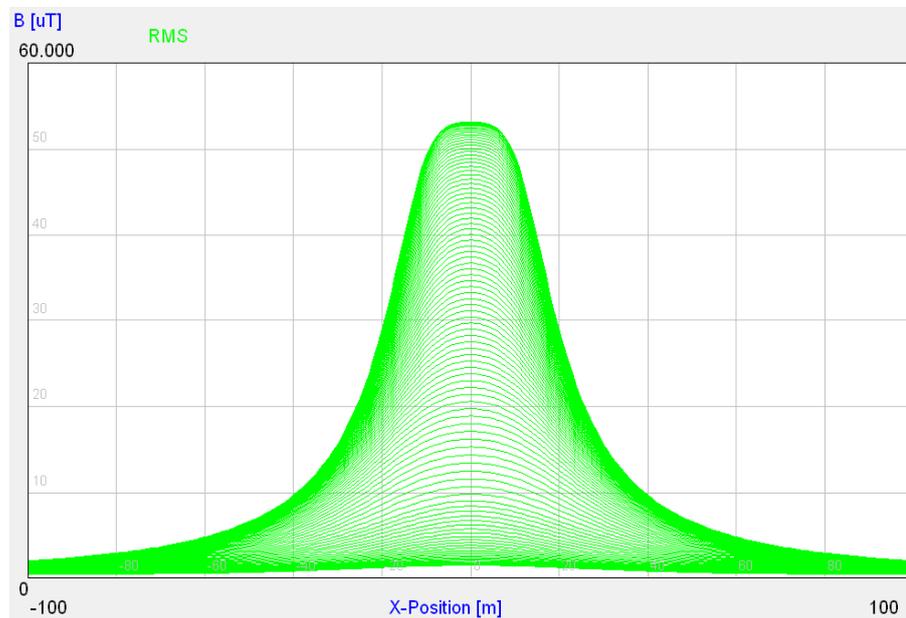


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 31$   $\mu T$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

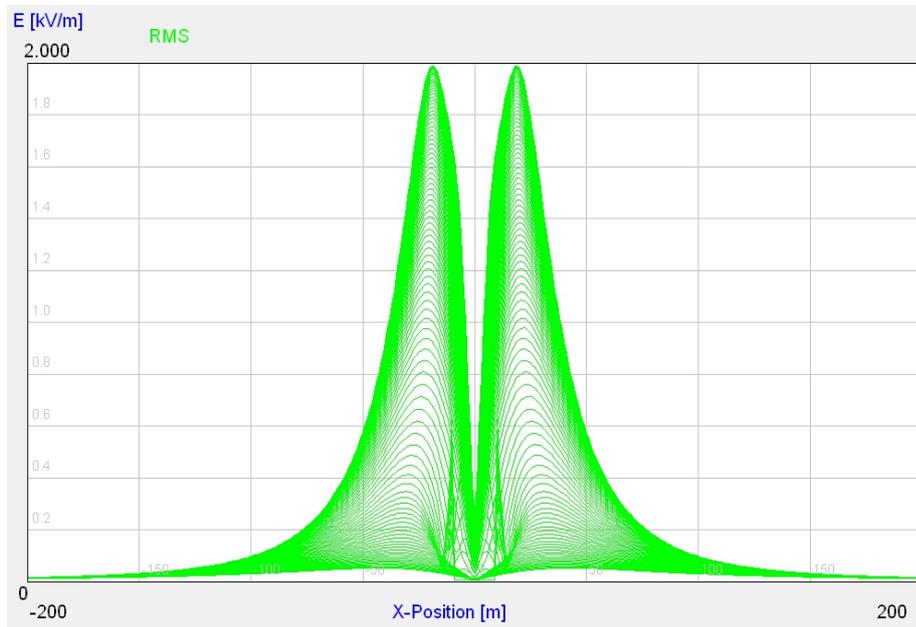


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 12,2$  kV/m)

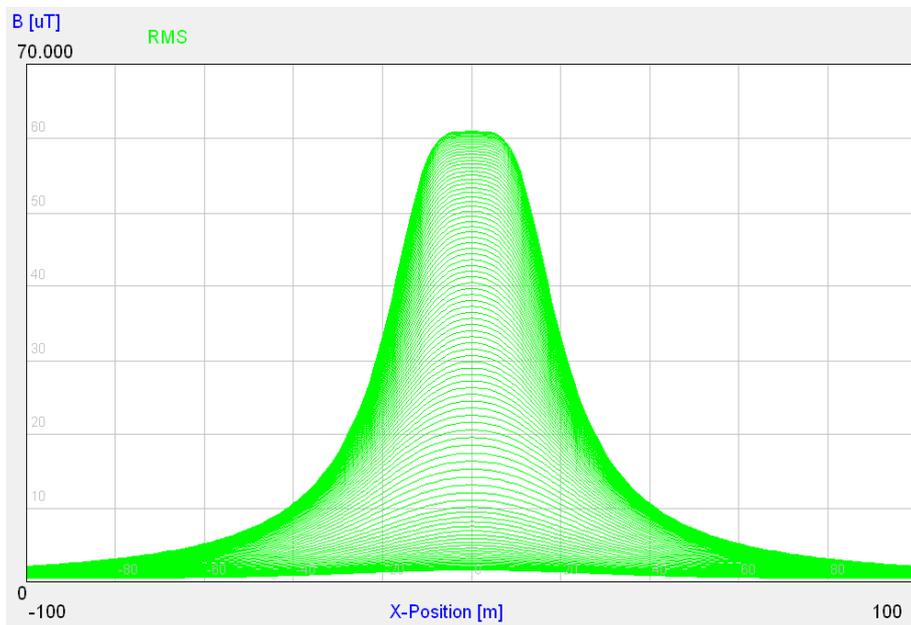


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 53,1$   $\mu T$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene

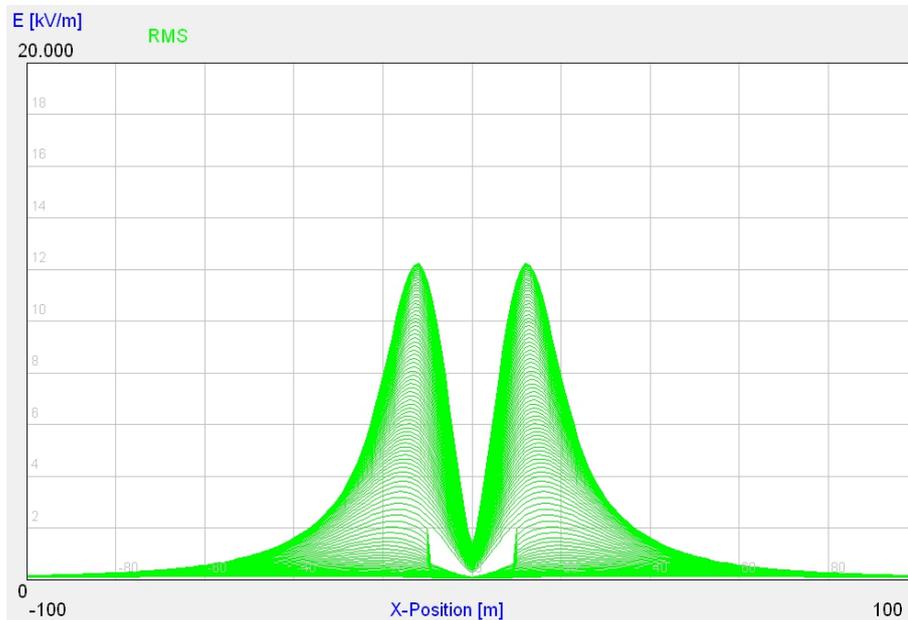


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 2 \text{ kV/m}$ )

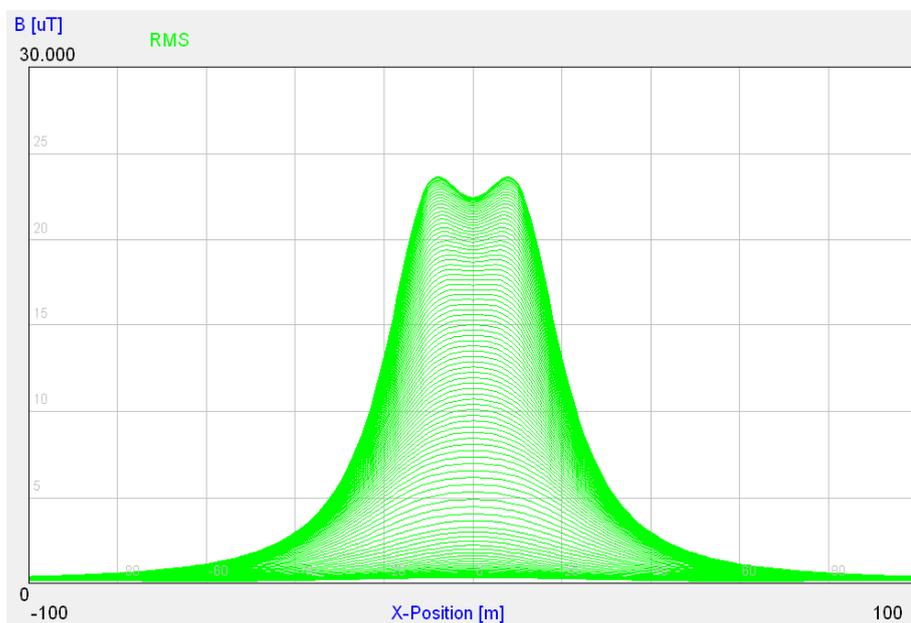


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 60,9 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

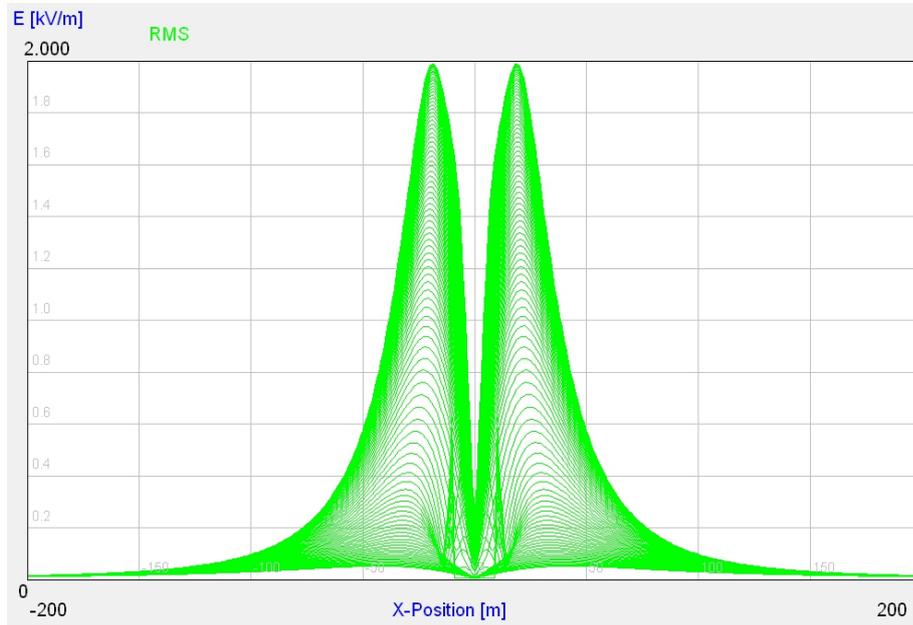


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 12,2$  kV/m)

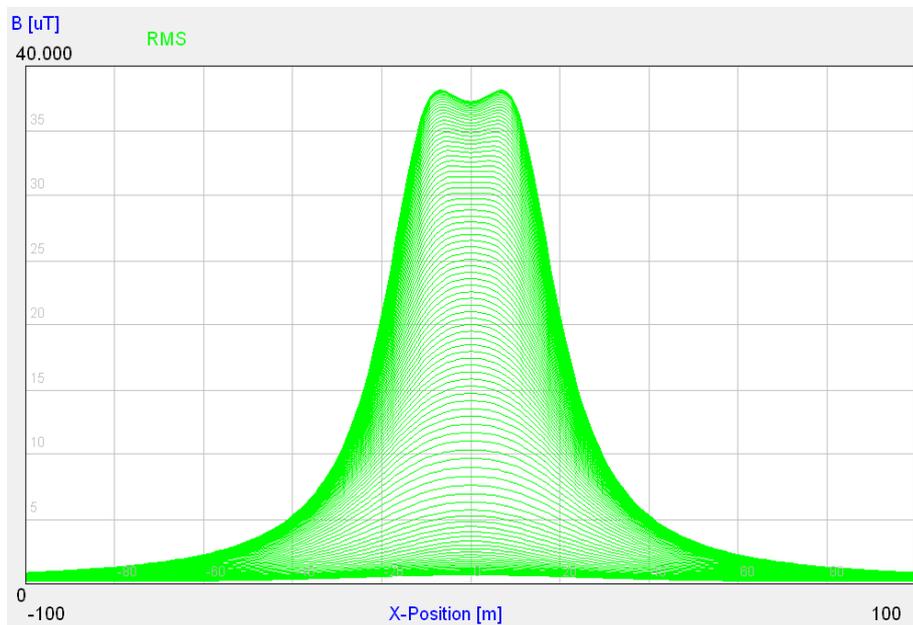


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 23,6$   $\mu T$ )

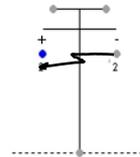
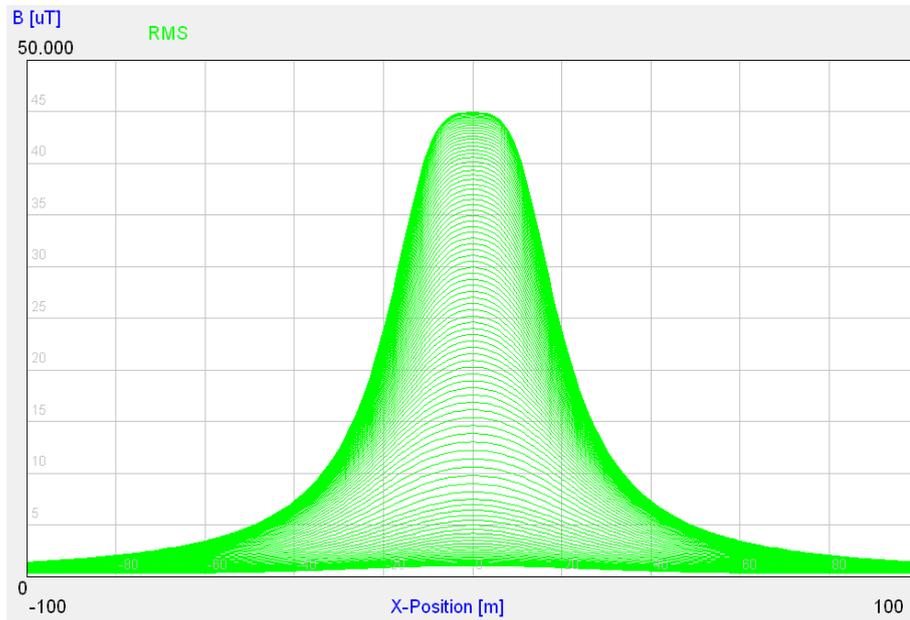
2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 11,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene



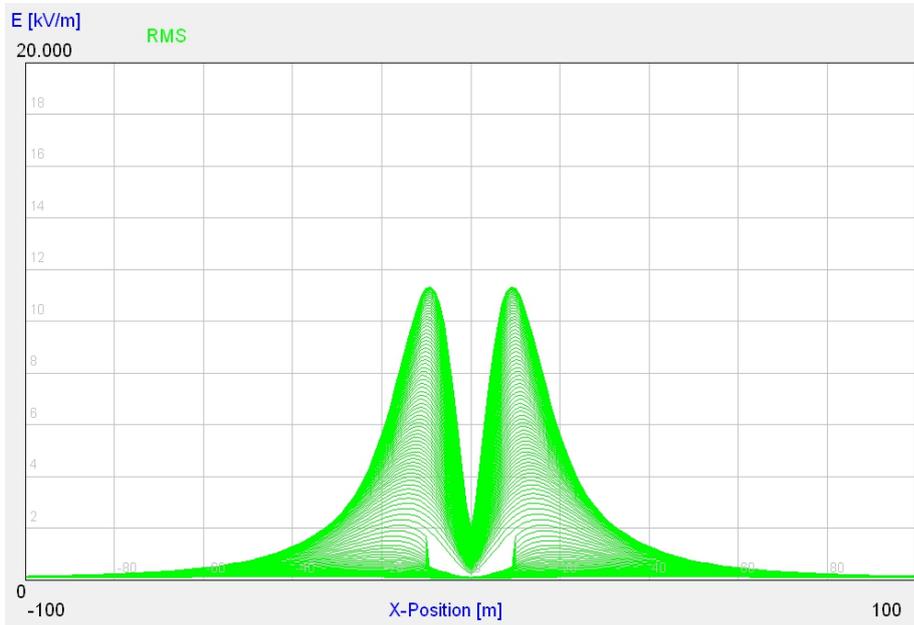
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 2$  kV/m)



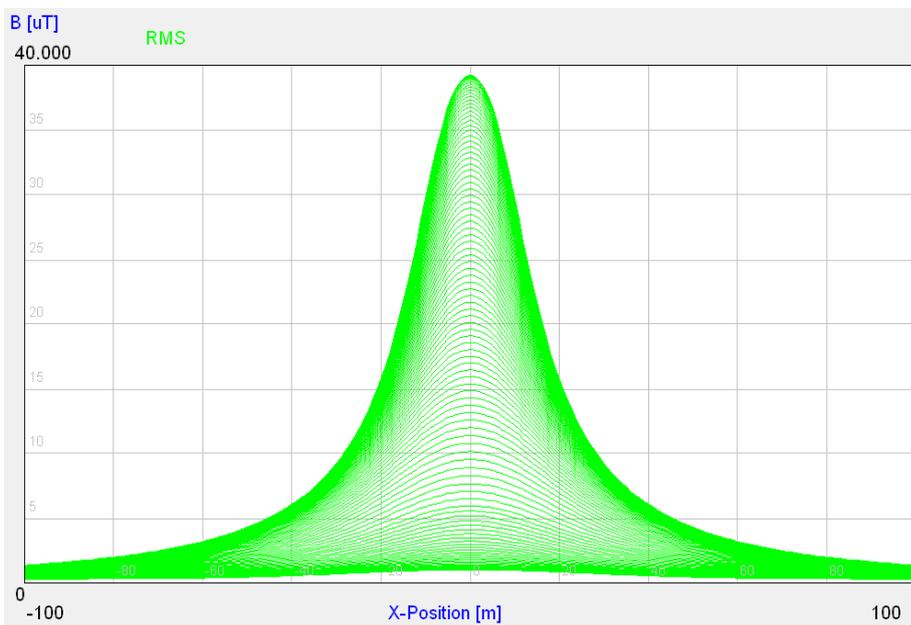
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 38,1$   $\mu T$ )

**± 500-kV-Spannungsebene***I System, Bodenabstand 12,5 m**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 44,9 \mu\text{T}$ )*

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

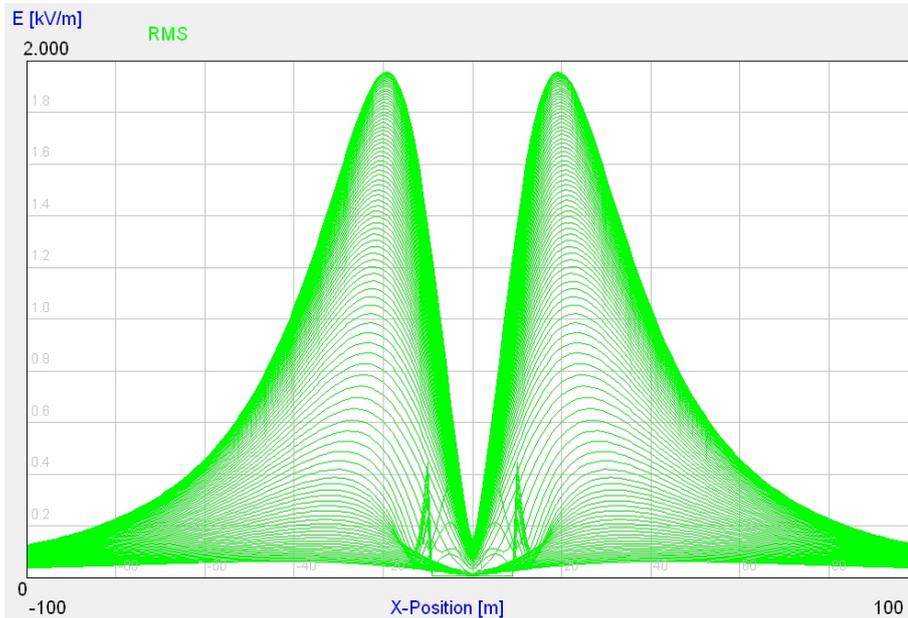


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 11,3$  kV/m)

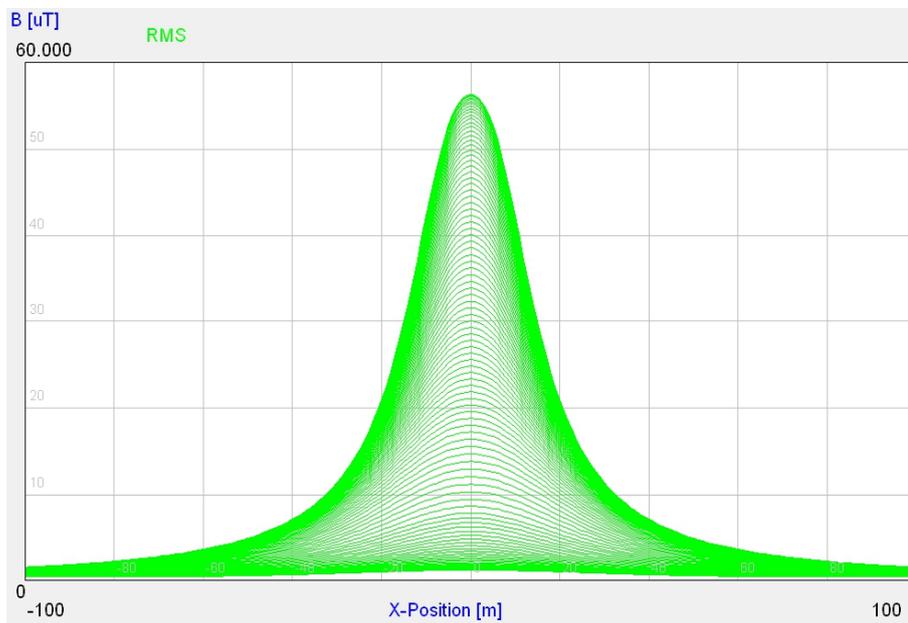


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 39,2$   $\mu T$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

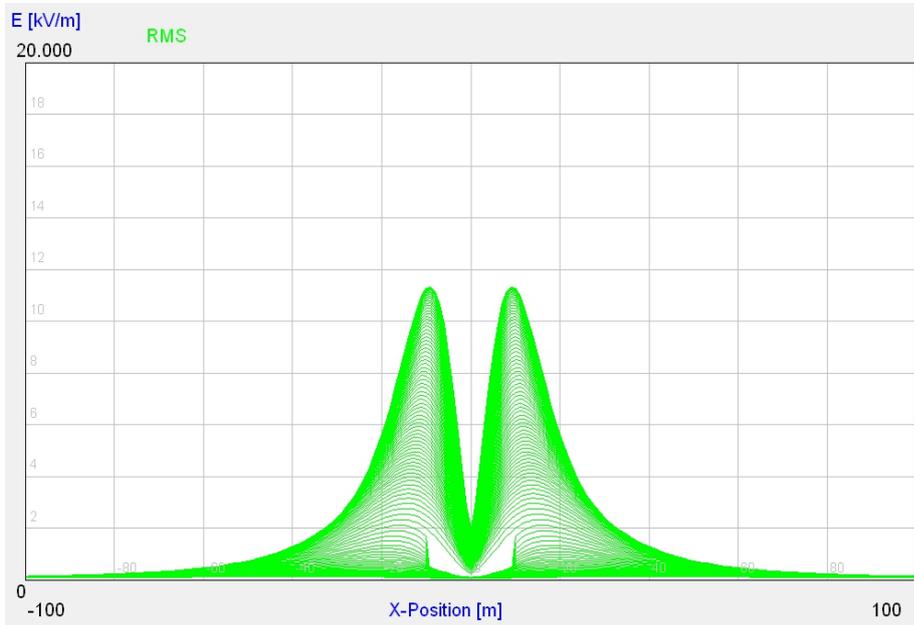


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 2 \text{ kV/m}$ )

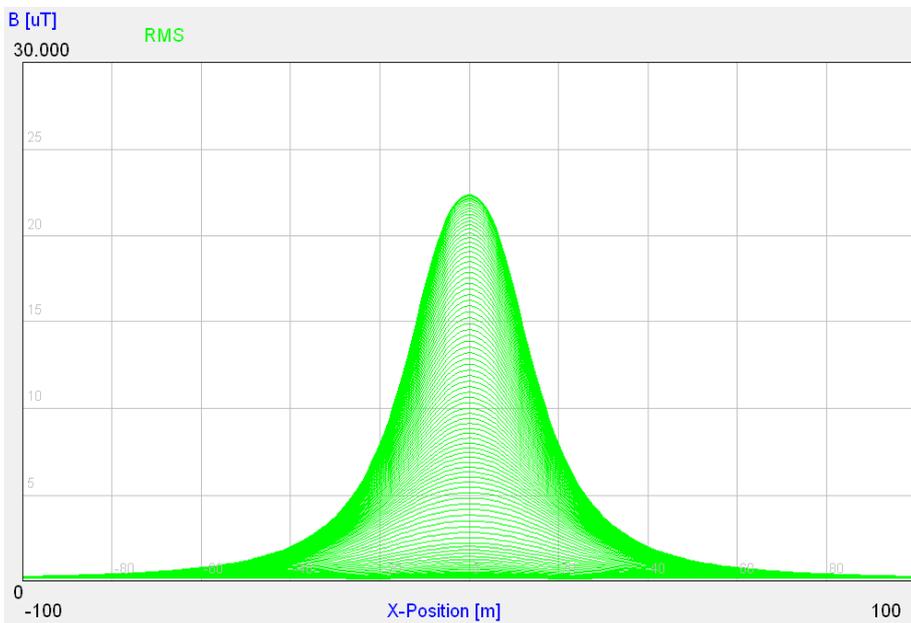


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 56,3 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

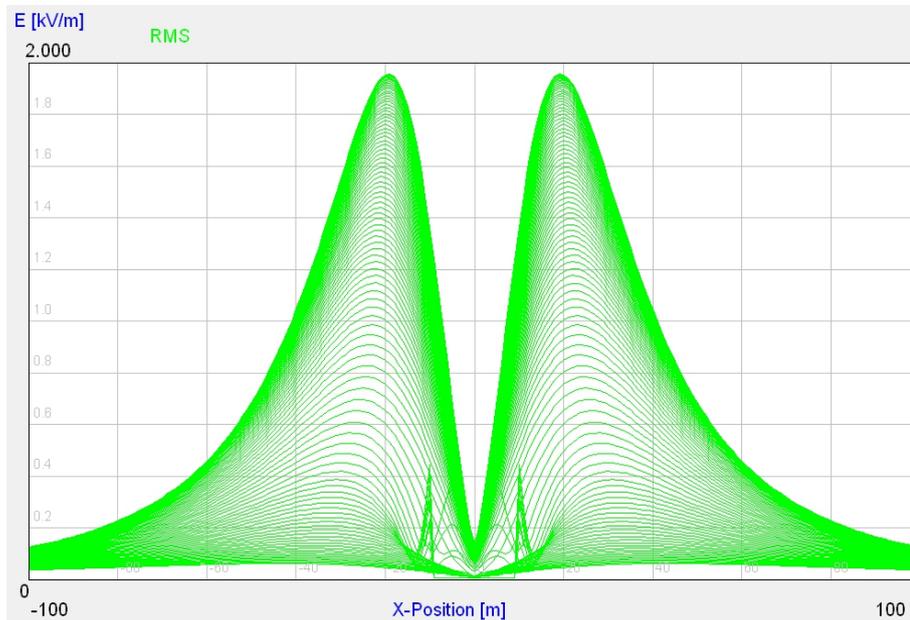


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 11,3 \text{ kV/m}$ )

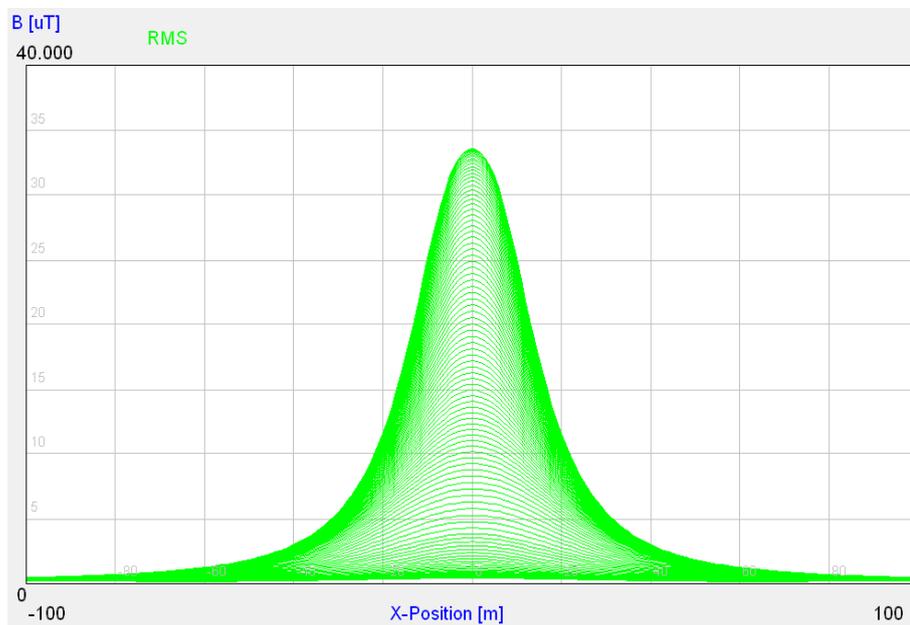


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 22,3 \text{ } \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 12,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene



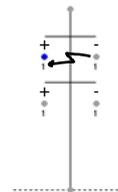
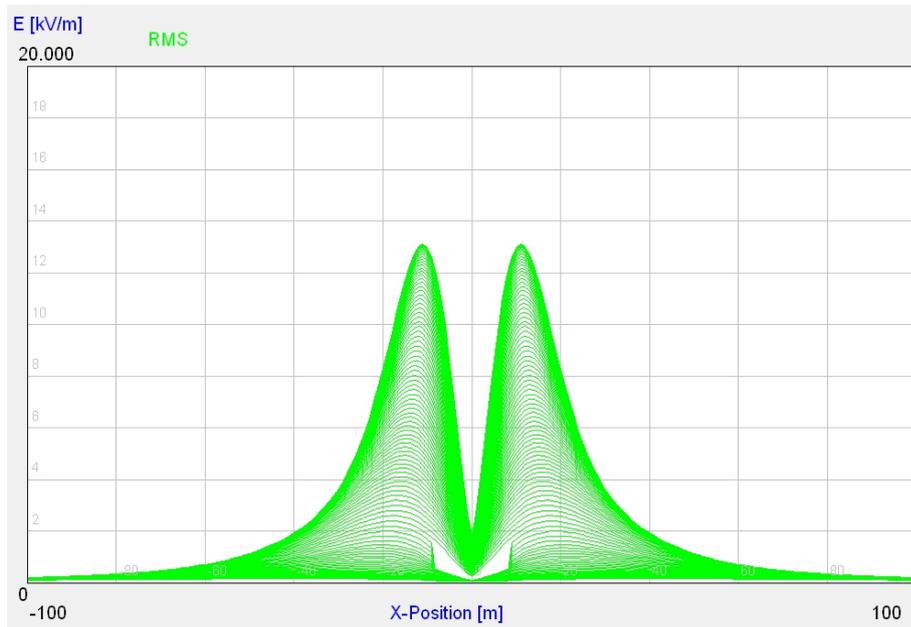
Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 2 \text{ kV/m}$ )



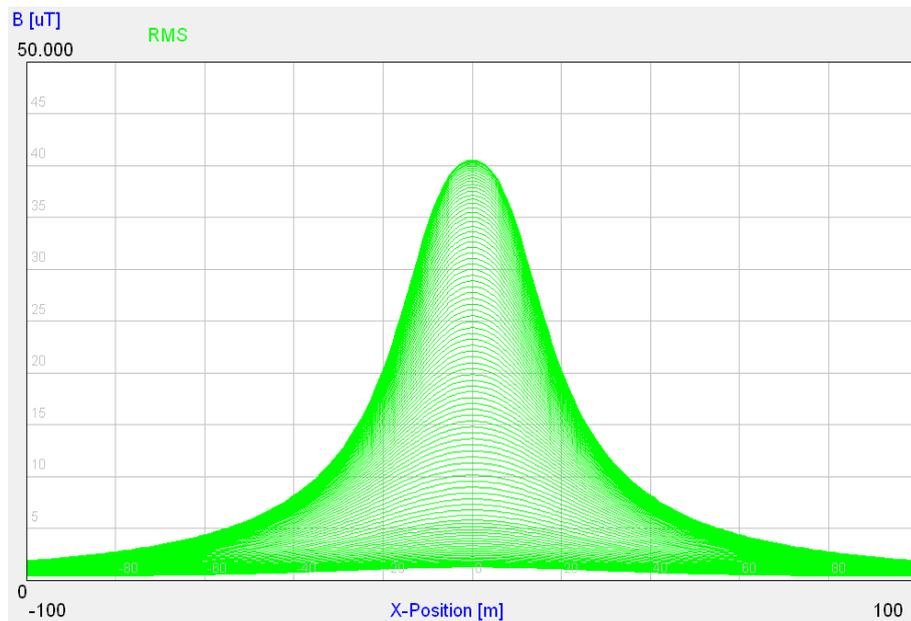
Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 33,5 \mu\text{T}$ )

**± 600-kV-Spannungsebene**

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

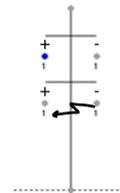
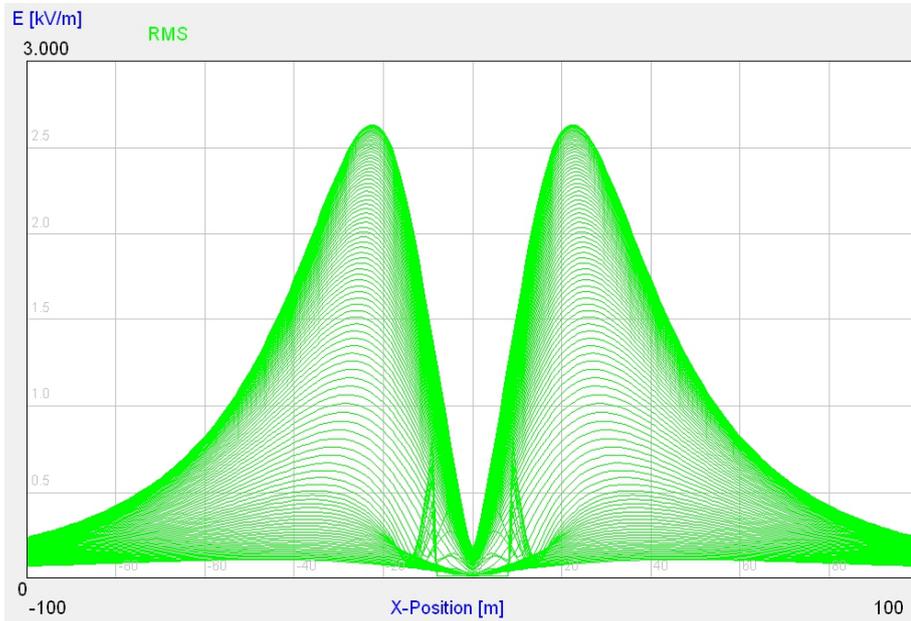


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0\max} = 13,1 \text{ kV/m}$ )

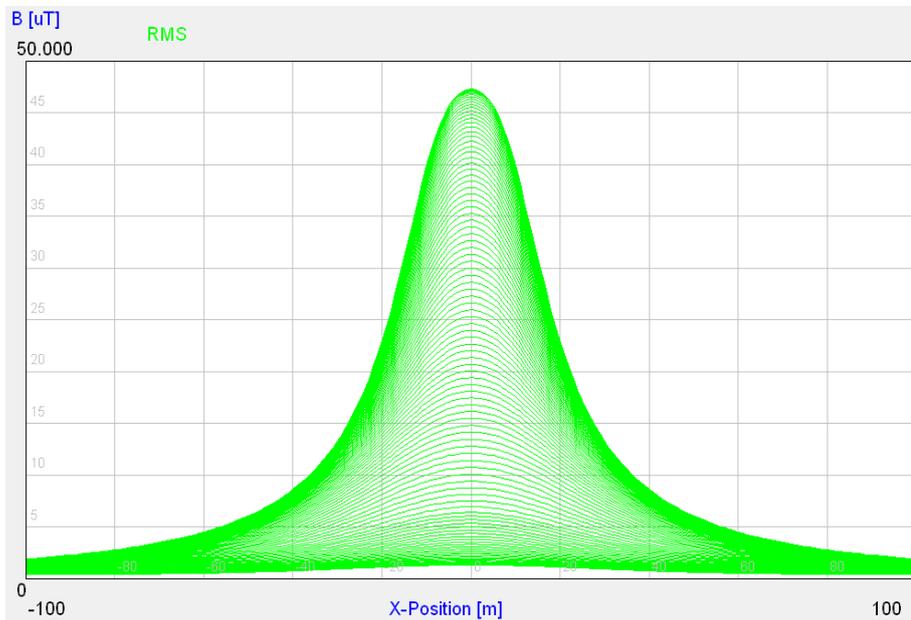


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{\max} = 40,5 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) + - (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene

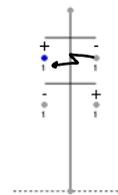
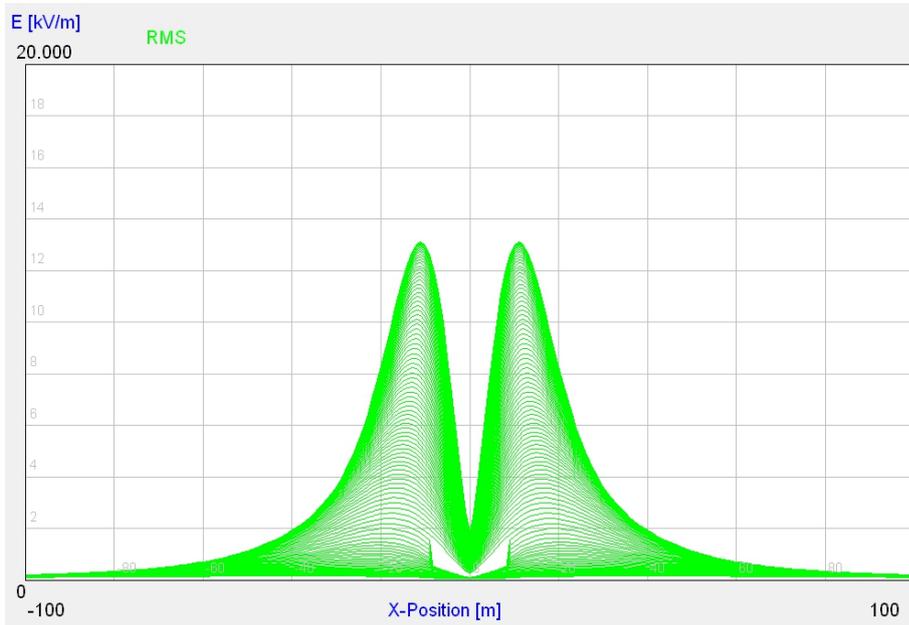


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 2,6 \text{ kV/m}$ )

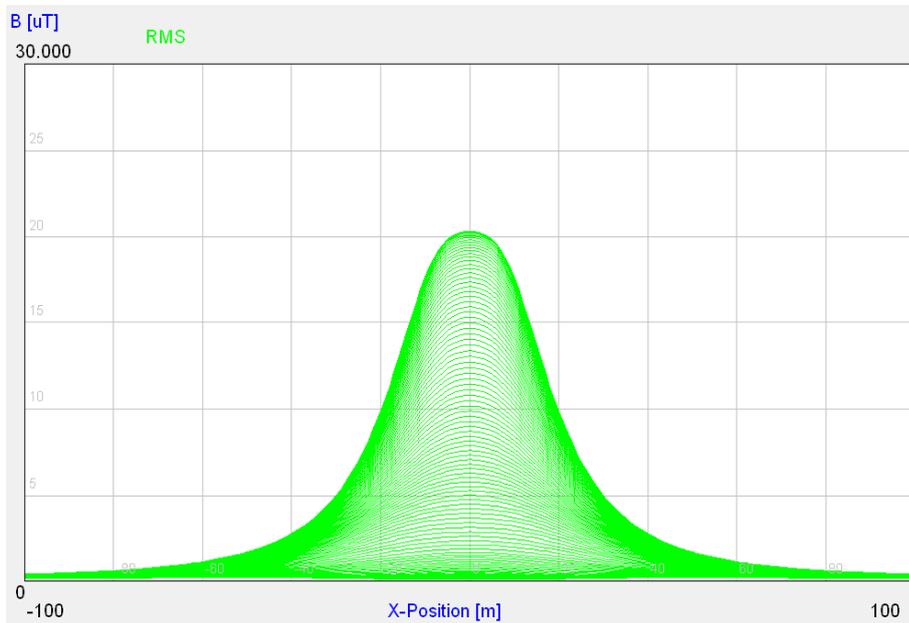


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 47,3 \mu\text{T}$ )

2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in oberer Ebene

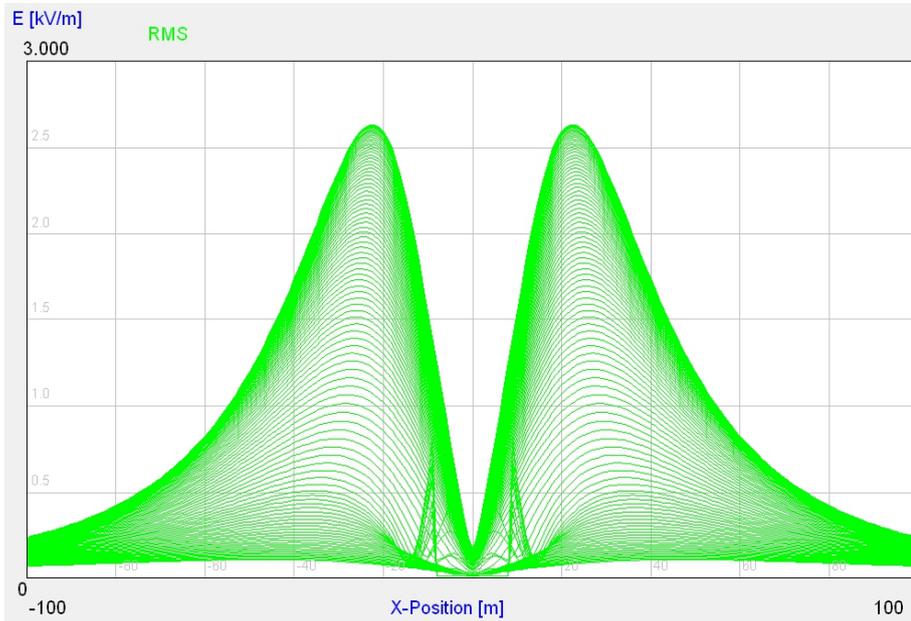


Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 13,1 \text{ kV/m}$ )

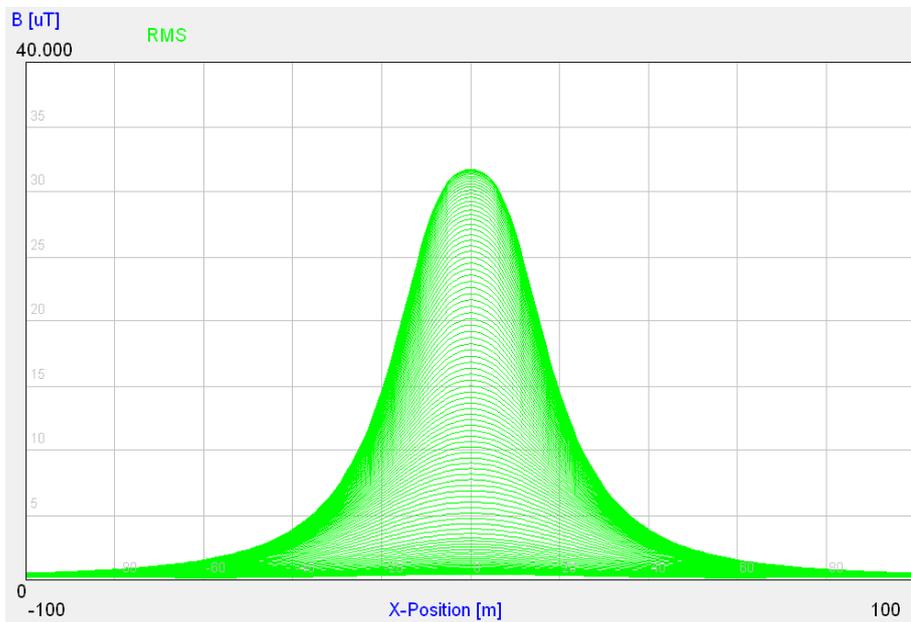


Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 20,3 \mu\text{T}$ )

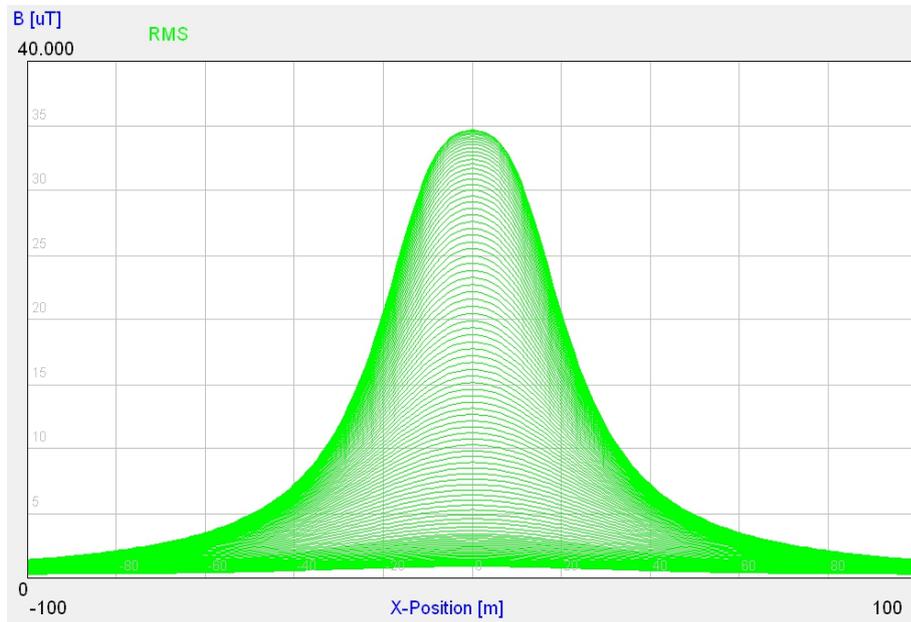
2 Systeme, Zweiebenenanordnung, Bodenabstand 13,5 m,  
Leiteranordnung + - (oben) - + (unten), Leiter-Leiter-Kurzschluss in unterer Ebene



Elektrischer Feldstärkeverlauf ( $E_{0max} = 2,6 \text{ kV/m}$ )



Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 31,7 \text{ µT}$ )

**± 800-kV-Spannungsebene***I System, Bodenabstand 15,5 m**Magnetischer Flussdichteverlauf ( $B_{max} = 34,7 \mu\text{T}$ )*

