

Trennungsabstandsberechnung unter Berücksichtigung der transienten Vorgänge im Erdsystem mit GSA-FD Version 6.4.1

Prof.Dr.-Ing.Jan Meppelink
Soest

Version 01/12/2015

Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Trennungsabstand wird durch den negativen Erstblitz 1/200 bestimmt und nicht durch den in IEC 62305-3 zugrunde gelegten negativen Folgestoßstrom 0,25/100.

Die Trennungsabstandsberechnung in IEC 62305-3 basiert auf einer künstlich festgelegten magnetischen Kopplung in Luft mit einer Gegeninduktivität von $1,2\mu\text{H/m}$, die einer Näherungsleitung in einem Abstand von 2 m zur Ableitung entspricht. Die Vorgänge einer innerhalb der Erde angeschlossenen Näherungsleitung ist nicht berücksichtigt.

Das Programm GSA_FD berechnet eine IEC-Anordnung (Reine Luftnäherung) korrekt. Dabei werden die Heidler'schen Stoßstromfunktionen durch Sinusförmige Ströme nachgebildet. Bei der Sinus-Nachbildung ($314\text{kA}/\mu\text{s}$) ergeben sich etwa 10 % größere Trennungsabstände gegenüber der Heidlerfunktion ($280\text{kA}/\mu\text{s}$).

Bei komplexeren Trennungsanordnungen ist die Spannung an der Näherungsstelle bestimmt durch:

- Magnetisch eingekoppelte Spannung aller Ströme oberhalb Erde und innerhalb des Erdreichs. Innerhalb des Erdreichs sind die Ströme durch Abfluss in das Erdreich stark ortsabhängig.
- Kapazitive Kopplung zwischen allen Leitungen, auch innerhalb des Erdreichs
- Galvanische Kopplung bei größeren Abständen der Einführungspunkte der Ströme von der Ableitung und Näherung.
- Strahlungskopplung (Wird in GSA_FD nicht berücksichtigt)

Für ein Modellgebäude $45\text{m} \times 15\text{m} \times 10\text{m}$ mit einem $1,5\text{m} \times 1,5\text{m}$ Maschegitter in 0,25 m Tiefe ergeben sich folgende Trennungsabstände:

- a) Näherung entsprechend IEC62305-3 in 2 m Abstand von der Ableitung bis zur Tiefe von 0,25 m im Erdreich:
 - a. 0,25/100: Trennungsabstände 1,5-fach größer als nach IEC 62305-3 berechnet
 - b. 1/200: Trennungsabstände etwa doppelt so groß gegenüber IEC 62305-3
- b) Näherung in ca. 45 m Abstand in 0,25m Tiefe geerdet:
 - a. 0,25/100: Trennungsabstand im Erdreich 1,8-fach größer als nach IEC 62305-3 berechnet
 - b. 1/200: Trennungsabstand im Erdreich 2,4-fach größer als nach IEC 62305-3 berechnet

Die größeren Trennungsabstände bei 1/200 resultieren aus der Stoßkennlinie für Luftfunkenstrecken. Beispielsweise gilt für 0,25/100 Klasse 1 mit 50 kA und 1/200 für Klasse 1 ein Verhältnis der Stromsteilheiten von 200/100 kA/μs von 2. Die Festigkeit aus der Stoßkennlinie fällt aber nicht von 3MV/m auf 1,5 MV/m sondern auf nur 1,2 MV/m. Daher ist der negative Erstblitz der für den Trennungsabstand maßgebliche Stoßstrom. In IEC 62305-3 ist das aber nicht realisiert worden.

Für die Klärung von Schadensfällen und Gutachten ist das Ergebnis dieser Studie von Bedeutung. Gerade die Schadensfälle an Gebäuden mit Reetdächern erscheinen unter Berücksichtigung der Ergebnisse dieser Studie in einem neuen Licht.

Die Ergebnisse decken sich vom Trend her mit der Veröffentlichung von Heidler/Zischank für den kritischen Eckschlag.

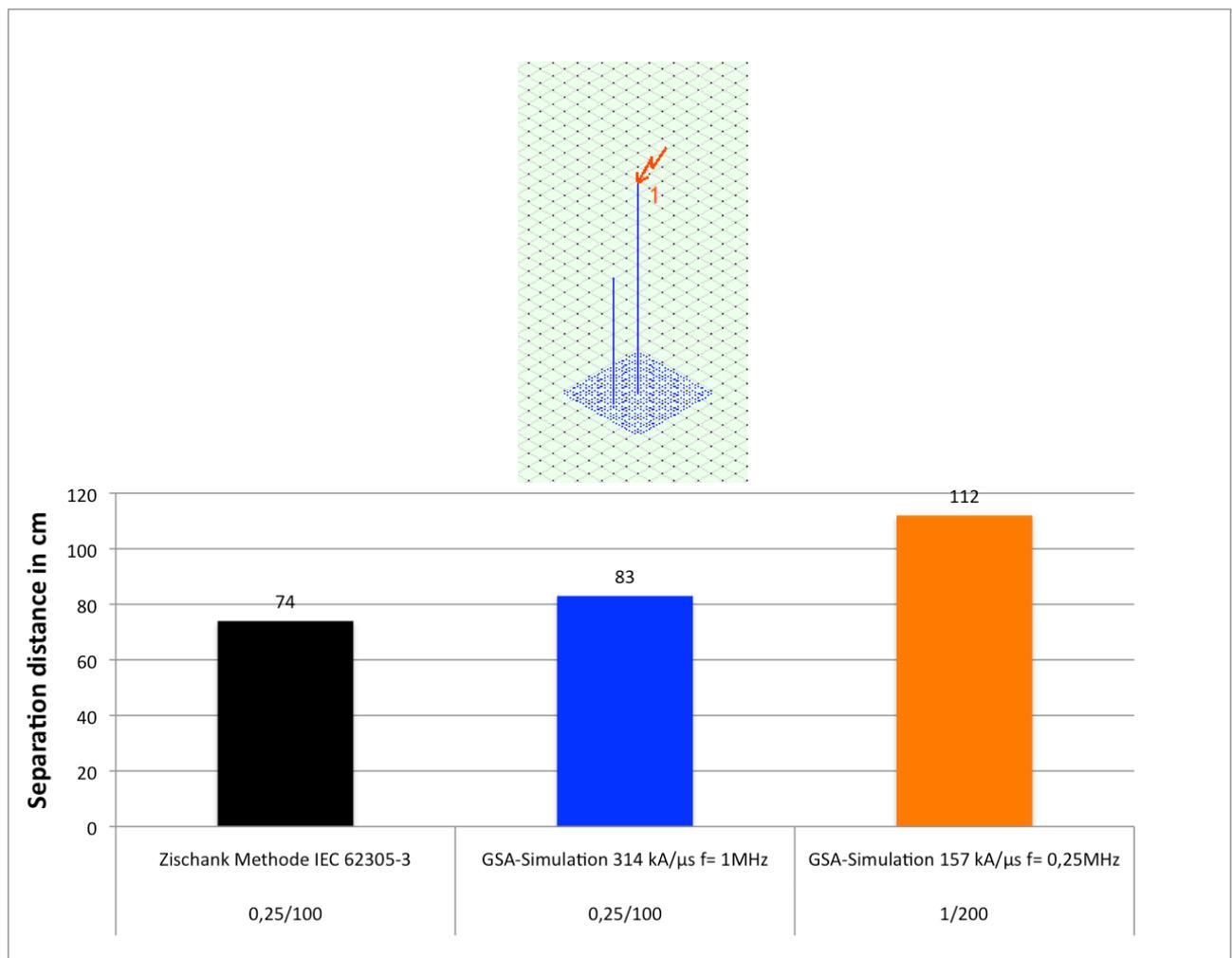


Bild 1-1 Trennungsabstände berechnet mit GSA_FD Version 6.4.1. Gebäude nach Bild 1-2. Ergebnis einer grundsätzlichen Untersuchung der Vergleichbarkeit mit der Methode nach IEC 62305-3.

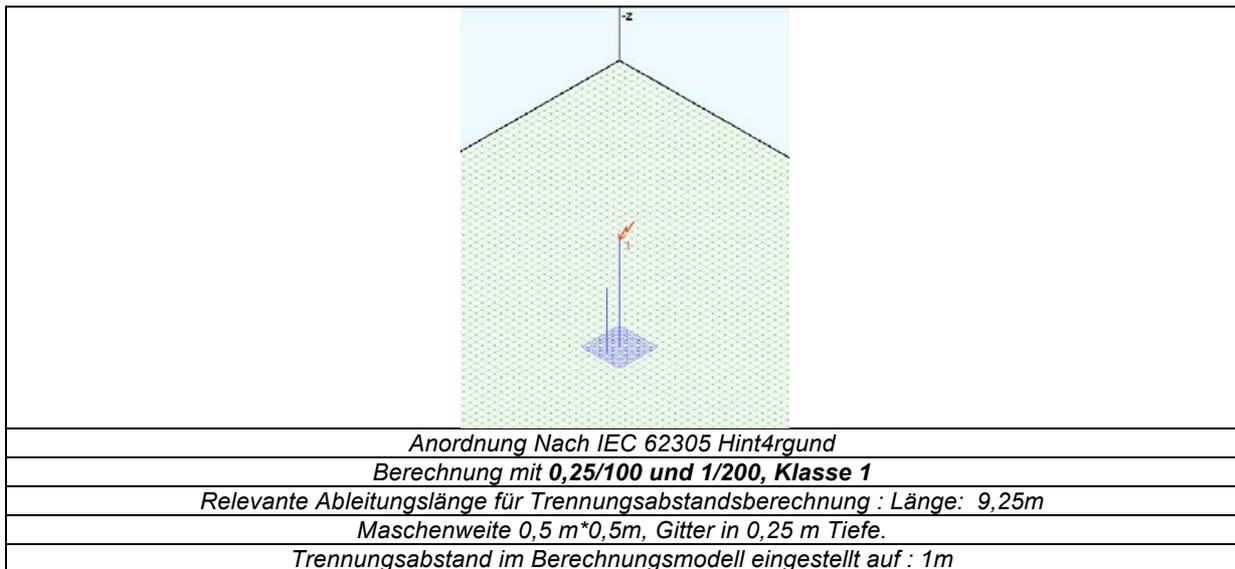


Bild 1-2 Anordnung mit Näherung nach IEC 62305-3

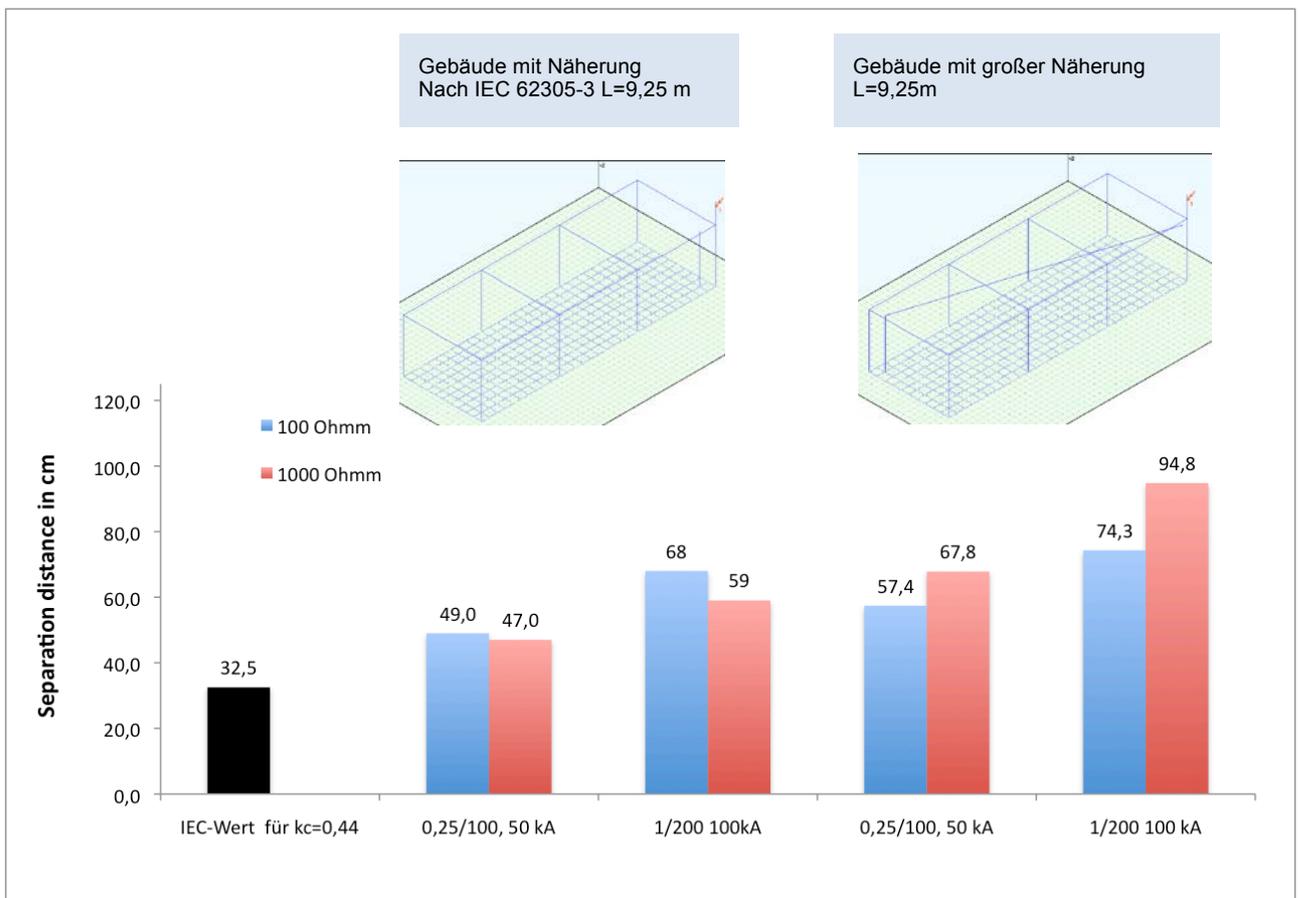


Bild 1-3 Trennungsabstände berechnet mit GSA_FD Version 6.4.1 mit 314 kA/μs bzw. 1 MHz für 0,25/100, 50 kA und 157 kA/μs bzw. 0,25 MHz für 1/200, 100 kA Gebäude nach Bild 1-5. Diese Berechnung erfolgte mit der Annäherung des Heidlerimpulses durch eine Sinusfunktion.

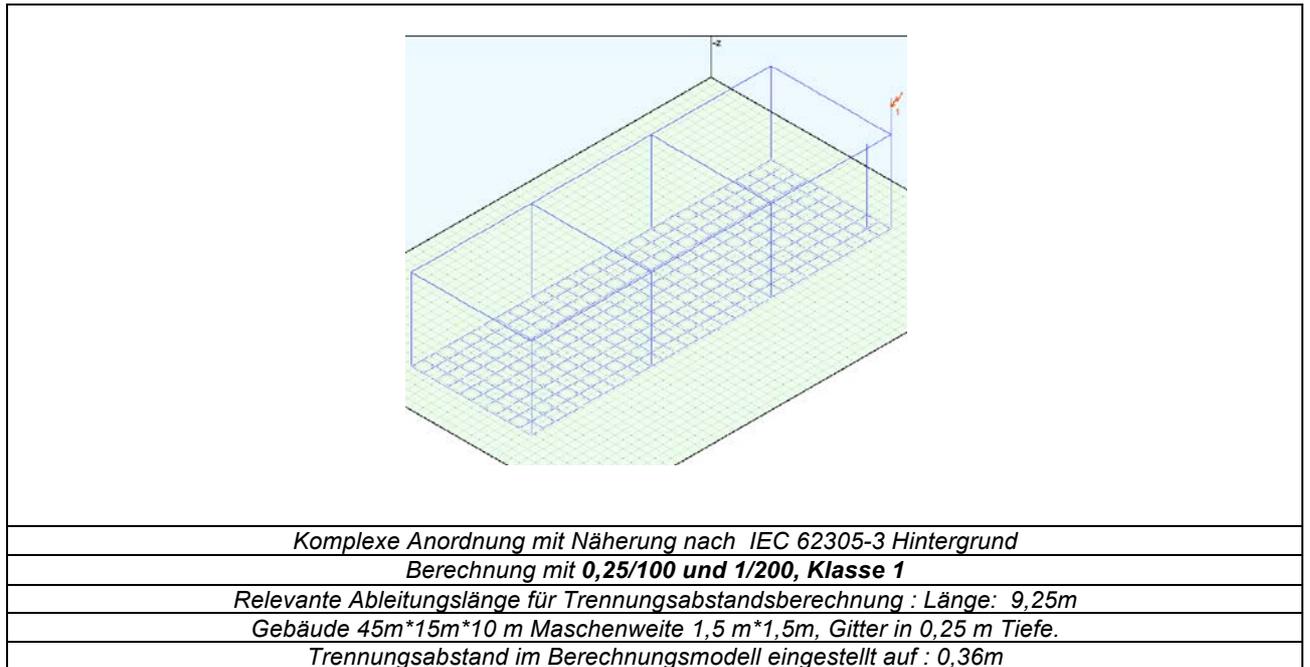


Bild 1-4 Anordnung mit Näherung nach IEC 62305-3

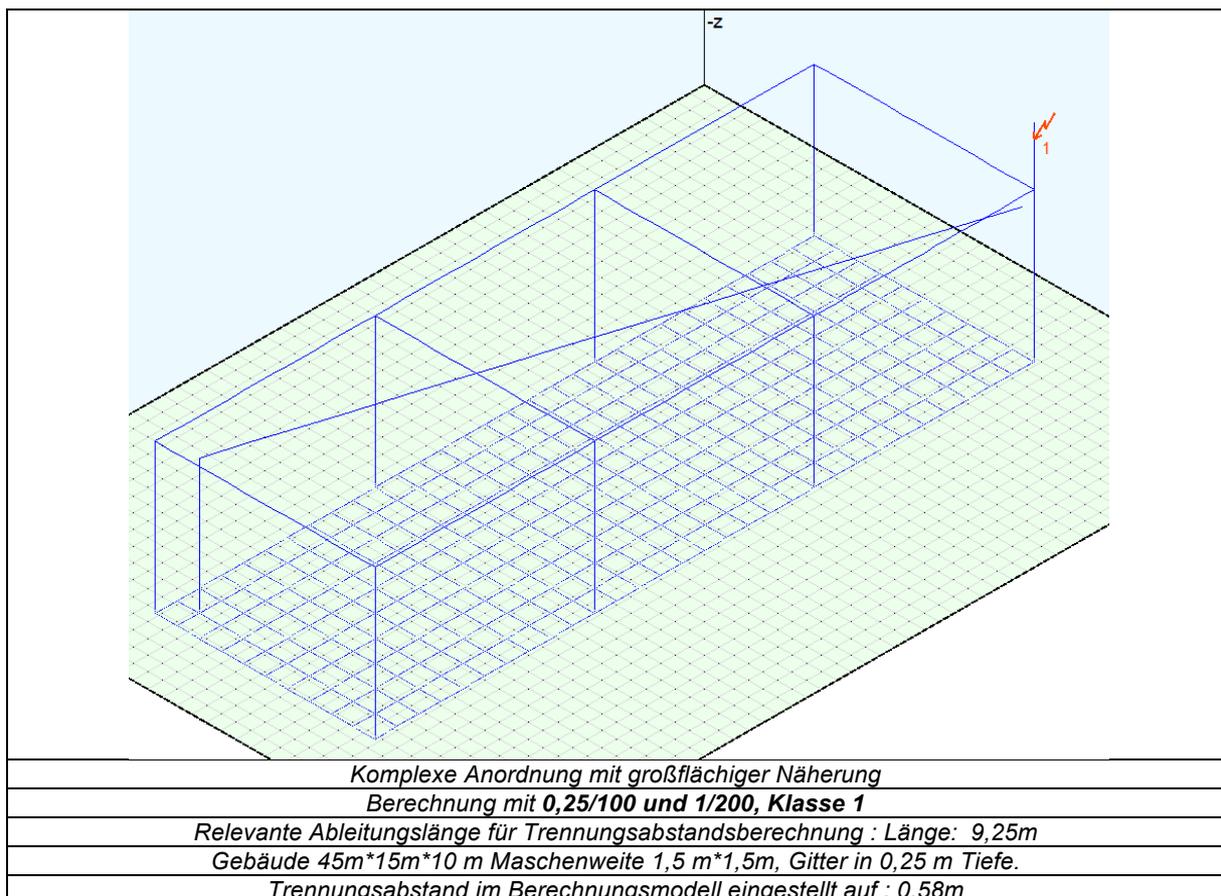


Bild 1-5 Anordnung mit großer Näherung.

Inhalt

1	ZIEL DIESER UNTERSUCHUNG	7
2	STAND DER WISSENSCHAFT	7
3	NORMATIVER BEZUG	7
4	BERECHNUNGSMETHODE GSA	7
5	UNTERSUCHTE GEOMETRIEN	10
5.1	ÜBERPRÜFUNG DER IEC-62305-3- METHODE ZUR TRENNUNGSABSTANDSBERECHNUNG AN EINER EINZELNEN ABLEITUNG	11
5.1.1	GRUNDLAGE DER IEC-62305-3- BERECHNUNG	11
5.1.2	BERECHNUNG MIT GSA_FD VERSION 6.4.1	12
5.1.3	KONTROLLE DES GSA_FD-PROGRAMMS	12
5.1.3.1	Eine Ableitung mit einem Tiefenerder und Potentialanschluss der Näherung oberhalb der Erde	12
5.1.3.2	Eine Ableitung mit einem Tiefenerder und Potentialanschluss der Näherung 0,25 m unterhalb der Erde	17
5.1.3.3	Ergebnisvergleich	21
5.1.4	EINE ABLEITUNG MIT EINEM ERDUNGSGITTER UND POTENTIALANSCHLUSS DER NÄHERUNG UNTERHALB DER ERDE	21
5.1.4.1	Berechnung für Klasse 1, 50 kA 0,25/100, Sinusstrom, 1 MHz bzw. 314 kA/μs	23
5.1.4.2	Berechnung für Klasse 1, 100 kA 1/200, Sinusstrom, 0,25 MHz bzw. 157 kA/μs	26
5.1.5	VERGLEICH DER ERGEBNISSE	30
5.2	TRENNUNGSABSTANDSBERECHNUNG AN EINEM KOMPLEXEN GEBÄUDE	31
5.2.1	BERECHNUNG MIT GEOMETRIE NACH HINTERGRUND DER IEC 62305-3	31
5.2.1.1	Modellgeometrie	31
5.2.1.2	Berechnung für Klasse 1, 50 kA 0,25/100	34
5.2.1.2.1	Simulationsergebnisse für 100 Ohmm, Sinusstrom, 1 MHz bzw. 314kA/μs	34
5.2.1.2.2	Simulationsergebnisse für 1000 Ohmm, Sinusstrom, 1 MHz bzw. 314kA/μs	38
5.2.1.3	Berechnung für Klasse 1, 100 kA, 1/200	40
5.2.1.3.1	Simulationsergebnisse für 100 Ohmm, Sinusstrom, 0,25 MHz bzw. 157kA/μs	40
5.2.1.3.2	Simulationsergebnisse für 1000 Ohmm, Sinusstrom, 0,25 MHz bzw. 157kA/μs	42
5.2.1.4	Vergleich der Ergebnisse	45
5.2.2	TRENNUNGSABSTANDSBERECHNUNG AN EINEM KOMPLEXEN GEBÄUDE MIT NÄHERUNG IN GROßEM ABSTAND VON DER ABLEITUNG	48
5.2.2.1	Modellgeometrie	48
5.2.2.2	Berechnung für Klasse 1 50 kA 0,25/100	50
5.2.2.2.1	Simulationsergebnisse für 100 Ohmm, Sinusstrom 1 MHz bzw. 314 kA/μs	50
5.2.2.2.2	Simulationsergebnisse für 1000 Ohmm, Sinusstrom, 1 MHz bzw 314 kA/μs	54
5.2.2.3	Berechnungen für Klasse 1, 100 kA, 1/200	56
5.2.2.3.1	Simulationsergebnisse für 100 Ohmm, Sinusstrom 0,25 MHz bzw. 157 kA/μs	56
5.2.2.3.2	Simulationsergebnisse für 1000 Ohmm, Sinusstrom 0,25 MHz bzw. 157 kA/μs	60
5.2.2.4	Vergleich der Ergebnisse	63
6	LITERATUR	65
7	ANHANG	65
7.1	KOPPLUNG ZWISCHEN ABLEITUNG UND DER NÄHERUNGSLEITUNG	65
7.2	STOßKENNLINIE FÜR TRENNUNGSANORDNUNG NACH ZISCHANK	66
7.3	ANALYTISCHE BERECHNUNG DES TRENNUNGSABSTANDS AUS DER STOßKENNLINIE.	70

7.4 BERECHNUNG DES TRENNUNGSABSTANDS AUS DEN ERGEBNISSEN DER INDUZIERTEN SPANNUNG UT MIT GSA_FD UND DER STOßKENNLINIE. 71

1 Ziel dieser Untersuchung

Nach der Veröffentlichung über die Berechnung der Schrittspannung mit GSA kam die Frage auf, wie die galvanische Kopplung im Erdsystem den notwendigen Trennungsabstand beeinflusst.

Mit der neuen Version GSA_FD 6.4.1 mit angepassten Impedanzwerten für Ableitungen und einer komfortablen Auswertemöglichkeit aller Spannungen und Ströme in einem komplexen äußeren Blitzschutzsystem lässt sich die Antwort auf die Frage finden.

2 Stand der Wissenschaft

Die neueren Veröffentlichungen von Zischank, Heidler zeigen deutliche Abweichungen der nach den IEC 62305-3 berechneten und den mit dem Programm „Concept“ berechneten Trennungsabständen an Gebäuden **ohne Berücksichtigung des Erdsystems**. Die Berechnungen mit Concept sind nur für den negativen Folgestoßstrom durchgeführt worden.

Details in der Veröffentlichung:

NECESSARY SEPARATION DISTANCES FOR LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS - IEC 62305-3 REVISITED

Fridolin H. Heidler, Wolfgang J. Zischank

Die folgende Grafik zeigt die Ergebnisse.

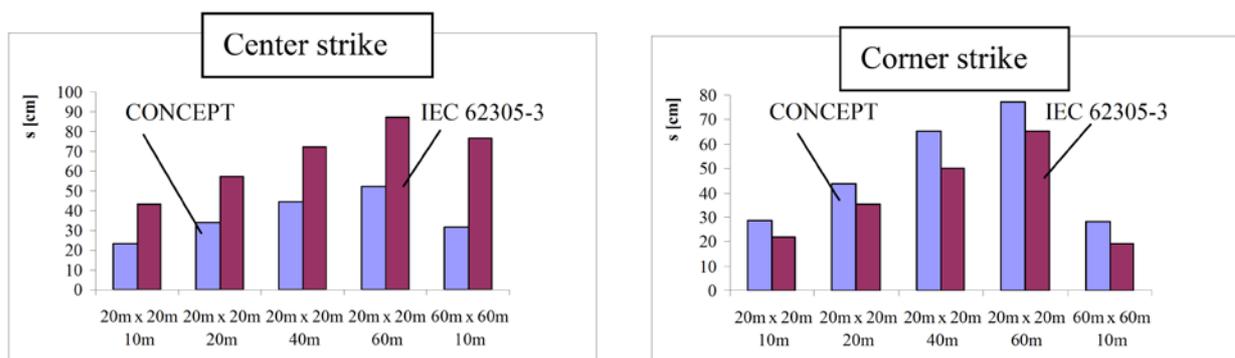


Fig. 13 – Comparison of the separation distances resulting from the CONCEPT computer code and from IEC 62305-3 (eq. (3)) for the cases of corner strike and center strike to LPS type “a”

Eine Berechnung unter Berücksichtigung der Einflüsse des Erdsystems auf den Trennungsabstand ist bisher nicht veröffentlicht.

3 Normativer Bezug

IEC 62305-1, Protection against lightning – Part 1: General principles

IEC 62305-3, Protection against lightning – Part 3: Physical damages to structures and life hazard

4 Berechnungsmethode GSA

GSA_FD ist ein Programm zur Berechnung von Erdsystemen einschließlich des äußeren Blitzschutzsystems, also Fangeinrichtung und Ableitungen. Das Programm arbeitet im Frequenzbereich. Einzelheiten zur richtigen Nachbildung von Stoßströmen nach IEC 62305-1 (Heidlerimpulse) sind im Vortrag von Meppelink in Neu Ulm 2015 zusammengestellt, siehe Literatur.

Die Stromsteilheit ist beim Heidlerimpuls immer 40 % größer als bei dem für die Klasse hinterlegten Wert in der Trennungsabstandsberechnung.

Beispiel: Klasse 1: $di/dt=200\text{kA}/\mu\text{s}$ für Trennungsabstandsberechnung nach IEC 62305-3. In IEC 62305-1 wird aber für Berechnungen der Heidlerimpuls für Klasse mit einem di/dt von $280\text{ kA}/\mu\text{s}$ angegeben. Das bleibt einer der Widersprüche in der Normenreihe IEC 62305.

Das Programm GSA arbeitet mit sinusförmigen Strömen. Dabei kann der Scheitelwert richtig nachgebildet werde, die Stromsteilheit ist dabei jedoch 11 % größer gegenüber dem Heidlerimpuls, siehe Tabelle 4-1.

Eine Berücksichtigung des km-Koeffizienten ist in dieser Berechnung nicht vorgesehen. Alle Berechnungen werden für Luftisolierte Anordnungen durchgeführt. Die Berücksichtigung von Baustoffen führt dann zu einer Vergrößerung des Trennungsabstands

Die Bestimmung des erforderlichen Trennungsabstands erfolgt nach der Stoßkennlinie in Bild 7-3.

Der Ablauf einer Berechnung mit GSA_FD ist in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-1 Vergleich der Stromsteilheiten, Heidlerimpuls 0,25/100 nach IEC 62305-1 und Sinusschwingung 1 MHz

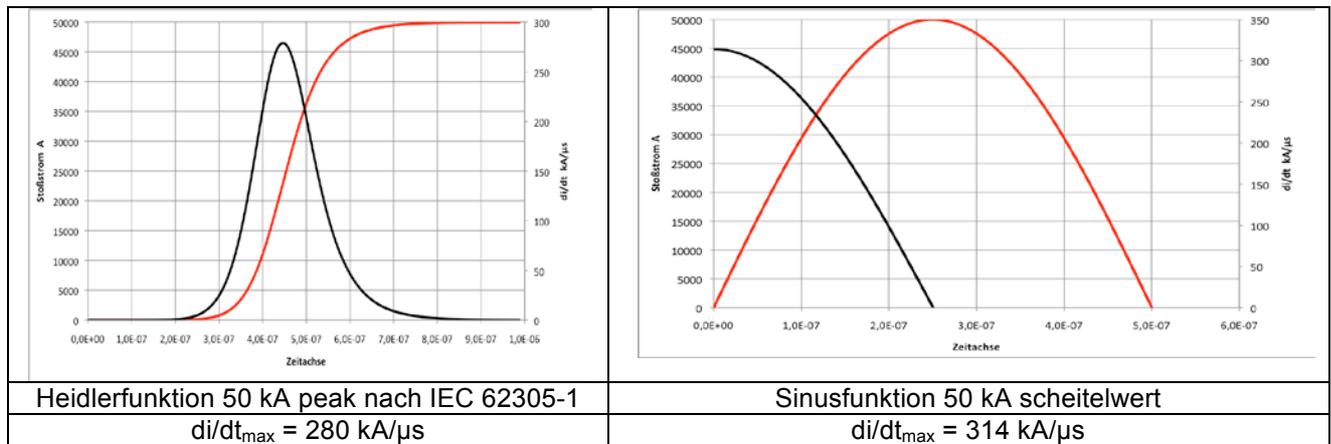


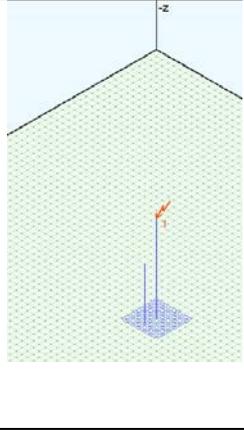
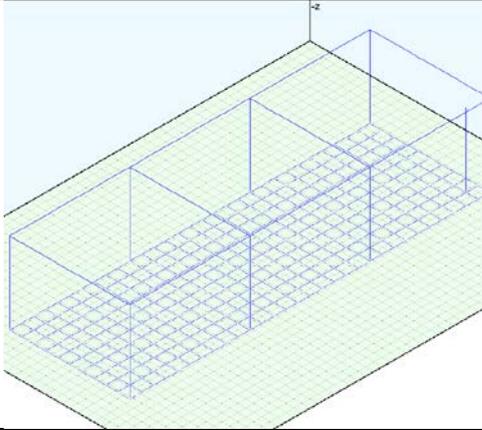
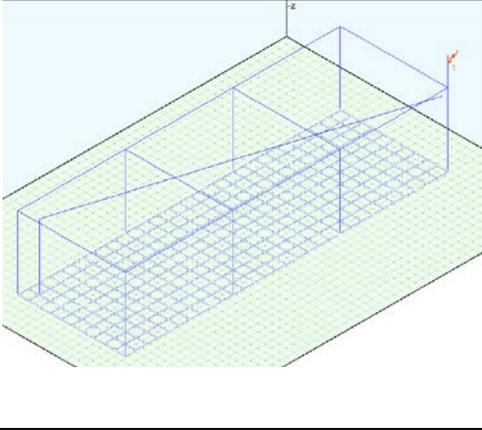
Tabelle 4-2 Vergleich der möglichen Nachbildung der genormten Stoßstromparameter durch eine Sinusschwingung.

Stoßstromform	Impulsnachbildung-		Sinus-Nachbildung		
	di/dt nach IEC 62305-1 kA/μs	di/dt Heidlerimpuls kA/μs	Frequenz MHz	di/dt _{t=0} kA/μs	Güte der Nachbildung
0,25/100 50 kA	200	280	1	314	Korrekte Frequenz di/dt 11 % zu groß gegenüber Heidlerimpuls
1/200 100 kA	100	140	0,25	157	

5 Untersuchte Geometrien

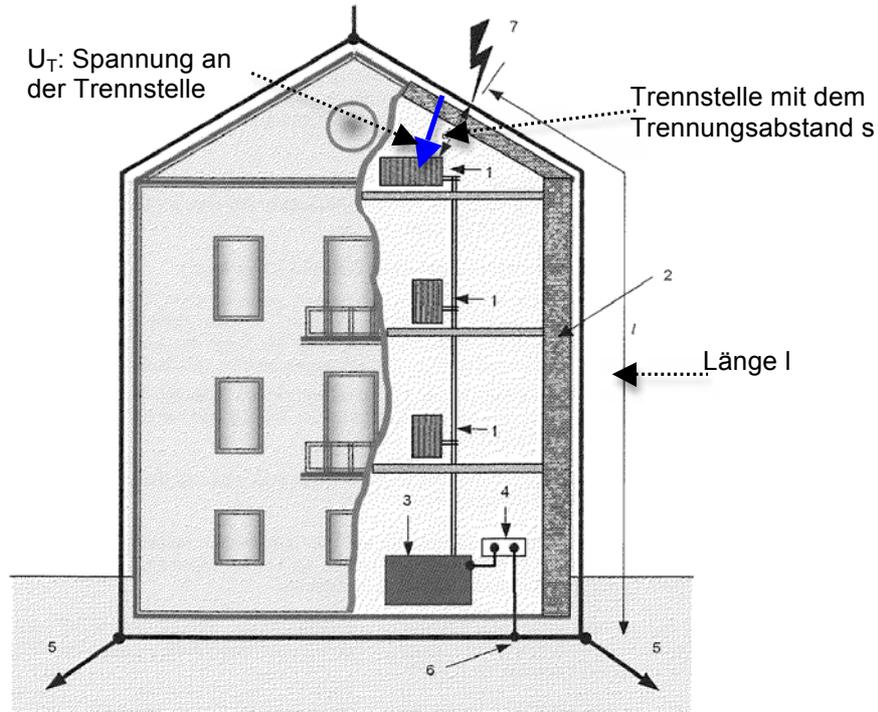
Die untersuchten Anordnungen zeigt Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1 Übersicht der untersuchten Anordnungen

		
Einfache Anordnung nach IEC 62305-3 Hintergrund	Komplexe Anordnung nach IEC 62305-3 Hintergrund	Komplexe Anordnung mit großflächiger Näherung
Berechnung mit 0,25/100 Klasse 1	Berechnung mit 0,25/100, Klasse 1	Berechnung mit 0,25/100 und 1/200, Klasse 1
Relevante Ableitungslänge für Trennungsabstands-berechnung :9,25m	Relevante Ableitungslänge für Trennungsabstands-berechnung : 9,25m	Relevante Ableitungslänge für Trennungsabstands-berechnung : 9,25m
Erdungsgitter 6m*6m mit Maschenweite 0,5m. Tiefe : 1 m.	Gebäude: 45m*15m*10m Erdungsgitter 1,5m*1,5m in 0,25 m Tiefe	
Trennungsabstand im Berechnungsmodell eingestellt auf : 1m	Trennungsabstand im Berechnungsmodell eingestellt auf : 2,11m	Trennungsabstand im Berechnungsmodell eingestellt auf : 2,11m

5.1 Überprüfung der IEC-62305-3- Methode zur Trennungsabstandsberechnung an einer einzelnen Ableitung

5.1.1 Grundlage der IEC-62305-3- Berechnung



Legende

- 1 metallener Heizkörper
- 2 Wand aus Ziegeln oder Holz
- 3 Heizkessel
- 4 Potentialausgleichsschiene
- 5 Erdungsanlage
- 6 Verbindung mit der Erdungsanlage oder der Ableitung
- 7 ungünstigster Blitzeingangspunkt
- d* tatsächlicher Abstand
- l* Länge für die Berechnung des Trennungsabstandes *s*

ANMERKUNG Die bauliche Anlage besteht aus isolierenden Ziegeln.

Bild E.47 – Hinweise zur Berechnung des Trennungsabstandes *s* für den ungünstigsten Einschlagspunkt im Abstand *l* vom Potentialausgleichspunkt nach 6.3

Bild 5-1 Erklärung zur Berechnung des Trennungsabstands. Hinweis: In IEC 62305-3 wird in der Berechnung der Trennungsabstand mit *s* angegeben.

Die Berechnung der Gegeninduktivität einer Ableitung für die Annahmen, die in der IEC 62305-3 gemacht wurden, ergibt folgendes Ergebnis:

Nach Aussagen von Kransteiner wurde der Wert willkürlich auf $M' = 1,2 \mu\text{H/m}$ festgelegt. Es ist nun festzustellen, für welches Verhältnis r_a/r_i dieser Wert gilt.

$$M' = \frac{1,256 \mu\text{H}}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_a}{r_i} \quad \text{Gleichung 5-1}$$

Mit $r_a = 2\text{m}$ und $r_i = 5\text{mm}$ ergibt sich ein Wert für M' von $1,2 \mu\text{H/m}$ wie in der IEC 62305-3 in der Formel für den Trennungsabstand *s* hinterlegt ist.

Das bedeutet:

Nach der IEC 62305-3 wird bei der Berechnung des Trennungsabstands immer eine Fläche im Abstand von 2 m von der Ableitung bis zur Höhe (Länge l in Bild 5-1) der betrachteten Trennstelle zugrunde gelegt.

In der Realität trifft dies aber nicht zu. Die Potentialausgleichsschiene bzw. Verbindung mit der Erdungsanlage oder der Ableitung kann weit entfernt vom Ort des Einschlags sein.

Der Hintergrund der Trennungsabstandsrechnung ist in einer separaten Datei wiedergegeben, siehe Literaturangabe (Meppelink).

5.1.2 Berechnung mit GSA_FD Version 6.4.1

Das Programm arbeitet im Frequenzbereich. Details sind im Vortrag Meppelink VDE-ABB Neu Ulm 2015 beschrieben, Meppelink VDE-ABB 2015 .

Für den negativen Folgeblitz wird der in IEC 62305-1 definierte Heidlerimpuls mit einer äquivalenten Frequenz von 1 MHz nachgebildet. Der Scheitelwert wird durch die Sinusfunktion richtig wiedergegeben. Die maximale Steilheit der Sinusfunktion $di/dt_{(max,Sinus)}$ ist jedoch gegenüber der maximalen Steilheit der Heidlerfunktion $di/dt_{(max,Heidler)}$ um etwa 11 % größer.

Hinweis: Die Trennungsabstandsrechnung nach IEC 62305-3 rechnet nicht mit dem Heidler-Impuls, sondern mit der Rampenfunktion nach Zischank.

Der Berechnungsablauf ist in Tabelle 4-3 dargestellt.

Die Bestimmung des erforderlichen Trennungsabstands erfolgt nach der Stoßkennlinie in Bild 7-3.

5.1.3 Kontrolle des GSA_FD-Programms

5.1.3.1 Eine Ableitung mit einem Tiefererder und Potentialanschluss der Näherung oberhalb der Erde

Ein einfaches Modell ist in Bild 5-2 bis Bild 5-8 gezeigt. Eine Fangstange ist symmetrisch in der Mitte angeordnet. Eine Näherung ist in einem Abstand von 2 m von der Ableitung angeordnet und weist eine Länge von 9,25 m auf, ausgehend vom Anschluss an das Erdungsgitter bis zum Ort , an dem der Trennungsabstand berechnet werden soll. .

Der Trennungsabstand nach IEC 62305-3 errechnet sich für Klasse 1 zu

$$s = \frac{k_i \cdot k_c}{k_m} \cdot l = \frac{0,08 \cdot 1}{1} \cdot 9,25\text{m} = 0,74\text{m} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

Dabei ist im Hintergrund der IEC 62305-3 eine Steilheit $di/dt_{(max)}$ von 200 kA/μs für Klasse 1 berücksichtigt.

Mit dem Ziel, die in IEC 62305-3 angegebene Methode richtig wiederzugeben, wird bewusst eine Näherung erzeugt, deren Leitung in einem Abstand von 2 m von der Ableitung verläuft.

Damit kann also das Verfahren in IEC 62305-3 überprüft werden, die Ergebnisse zeigt Tabelle 5-2.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der analytisch berechneten induzierten Spannung und der vom Programm GSA_FD berechneten induzierten Spannung.

Nach der IEC Berechnung nach Gleichung 4-1 ergibt sich ein Trennungsabstand von 0,78 m, der auch normativ gültig ist. Nach der In IEC 62305-1 angegebenen analytischen Stoßstromform (Heidlerfunktion) für Berechnungen ergibt sich der Trennungsabstand zu 0,81 m.

Tabelle 5-2 Ergebnisse der Simulation für 0,25/100 entsprechend 1 MHz, 50 kA, Klasse 1.

	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
Ableitung	1.008.875	4.575.807	4.685.706	6.626.589	V
Näherung	993.380	2.073.167	2.298.875	3.251.100	V
UT	15.495	2.502.640	2.502.688	3.539.335	V
Analytische Berechnung $M_{di}/dt \cdot l = 1,2 \cdot 1 \cdot 314 \cdot 9,25 \cdot 1000$ für Sinusform				3.480.442	V
Trennungsabstand aus analytischer Berechnung für Sinusform mit 314 kA/μs und Stoßkennlinie				0,80	m
Analytische Berechnung $M_{di}/dt \cdot l = 1,2 \cdot 1 \cdot 280 \cdot 9,25 \cdot 1000$ für die Steilheit des Heidlerimpulses				3.103.578	V
Trennungsabstand aus analytischer Berechnung für die Steilheit des Heidlerimpulses mit 280 kA/μs und Stoßkennlinie				0,78	m
Analytische Berechnung $M_{di}/dt \cdot l = 1,2 \cdot 1 \cdot 200 \cdot 9,25 \cdot 1000$				2.220.000	V
Trennungsabstand aus analytischer Berechnung mit 200 kA/μs und Stoßkennlinie				0,74	m
Trennungsabstand aus IEC 62305-3 mit $k_c=1, l=9,25m$				0,74	m
Trennungsabstand aus GSA Berechnung				0,81	m
Spannungsdifferenz $U_T - M_{di}/dt$				58.894	V

Der relative Fehler gegenüber der analytischen Berechnung beträgt 1,7 %.

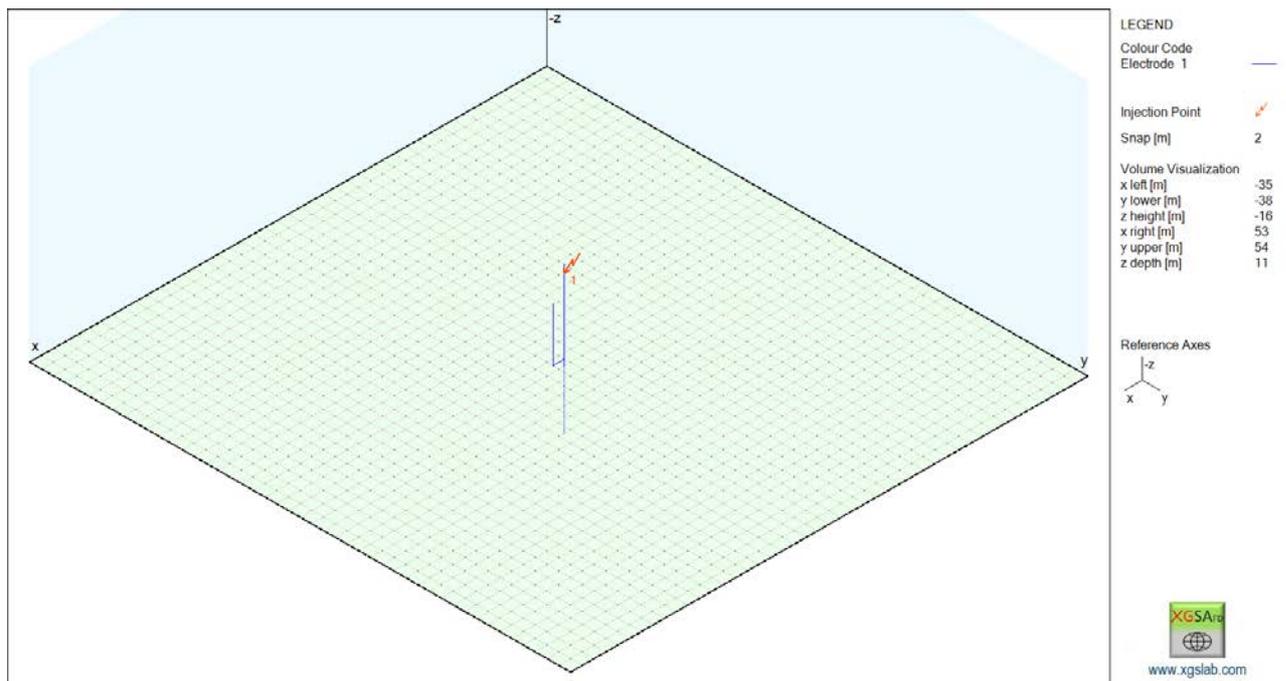


Bild 5-2 3-D-Ansicht der Anordnung entsprechend dem Hintergrund der Berechnung nach IEC 62305-3 mit $M' = 1,2 \mu H/m$ bei einem Abstand von 2 m zwischen Ableitung und Näherung. Durchmesser der Ableitung und der Näherung: 10mm Kupfer. Länge der Näherung : 9,25m in Luft.



Bild 5-3 Detailansicht der Anordnung entsprechend dem Hintergrund der Berechnung nach IEC 62305-3 mit $M' = 1,2 \mu\text{H/m}$ bei einem Abstand von 2 m zwischen Ableitung und Näherung. Durchmesser der Ableitung und der Näherung: 10mm Kupfer. Länge der Näherung : 9,25m in Luft.



Bild 5-4 2-D-Ansicht der Anordnung entsprechend dem Hintergrund der Berechnung nach IEC 62305-3 mit $M' = 1,2 \mu\text{H/m}$ bei einem Abstand von 2 m zwischen Ableitung und Näherung. Durchmesser der Ableitung und der Näherung: 10mm Kupfer. Länge der Näherung : 9,25m. Die Näherung endet in einer Höhe von 10,25m.

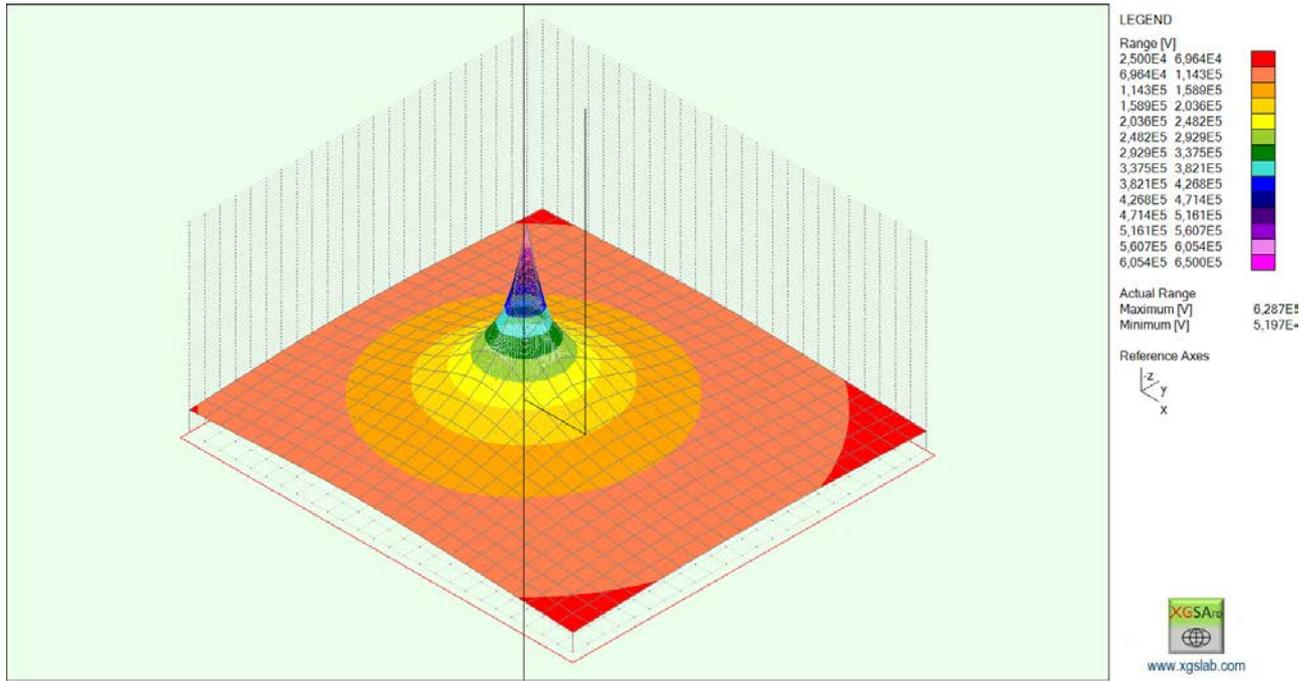


Bild 5-5 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

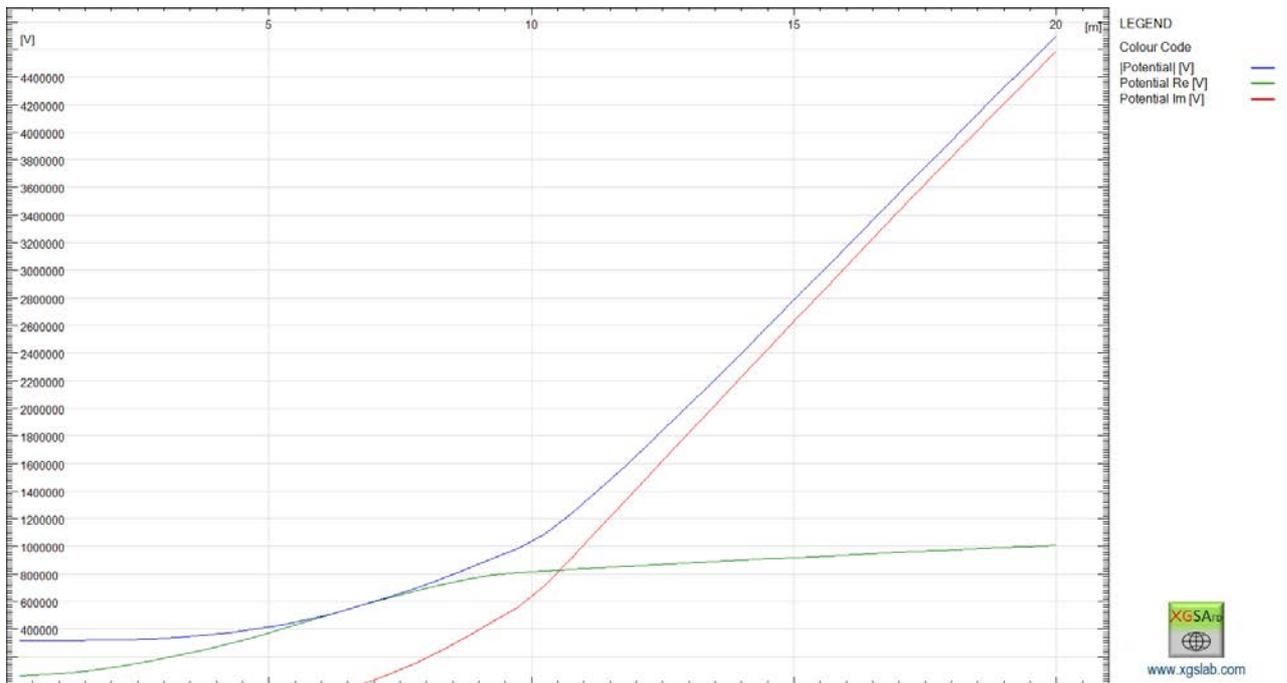


Bild 5-6 Potentialverlauf entlang der Ableitung bis zu einer Höhe von 10,25 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 10,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

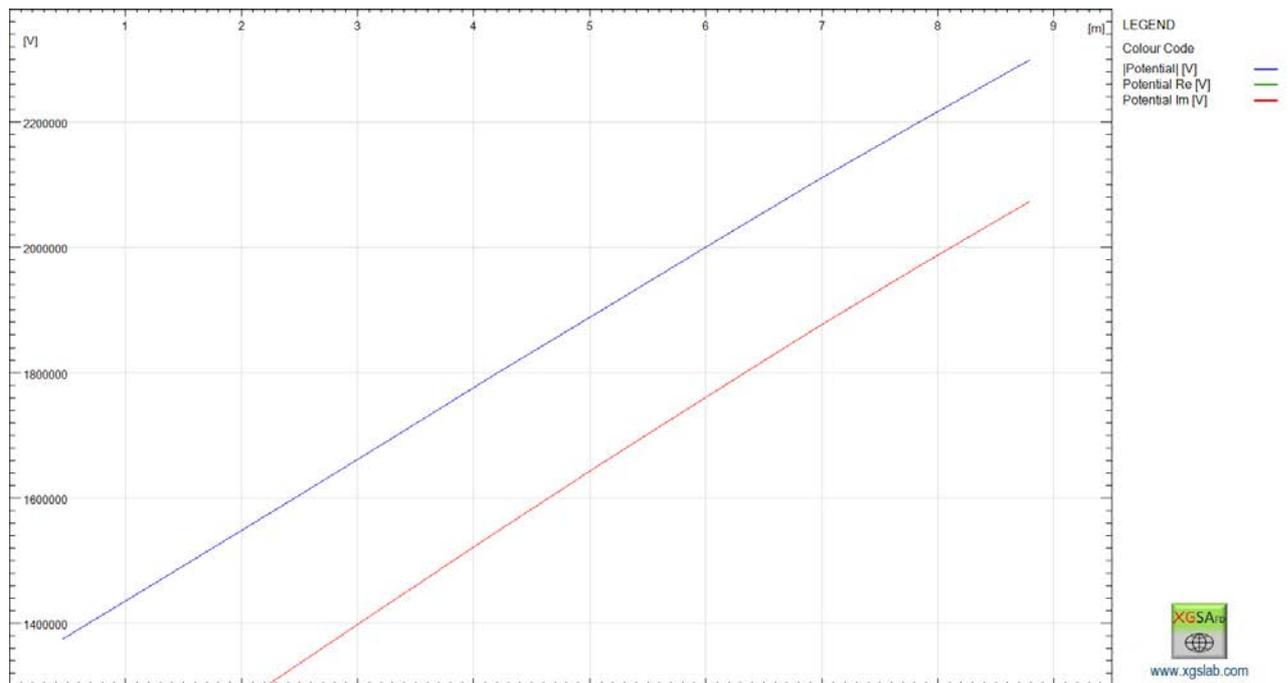


Bild 5-7 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von einer Höhe von 1 m bis zu einer Höhe von 10,25 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

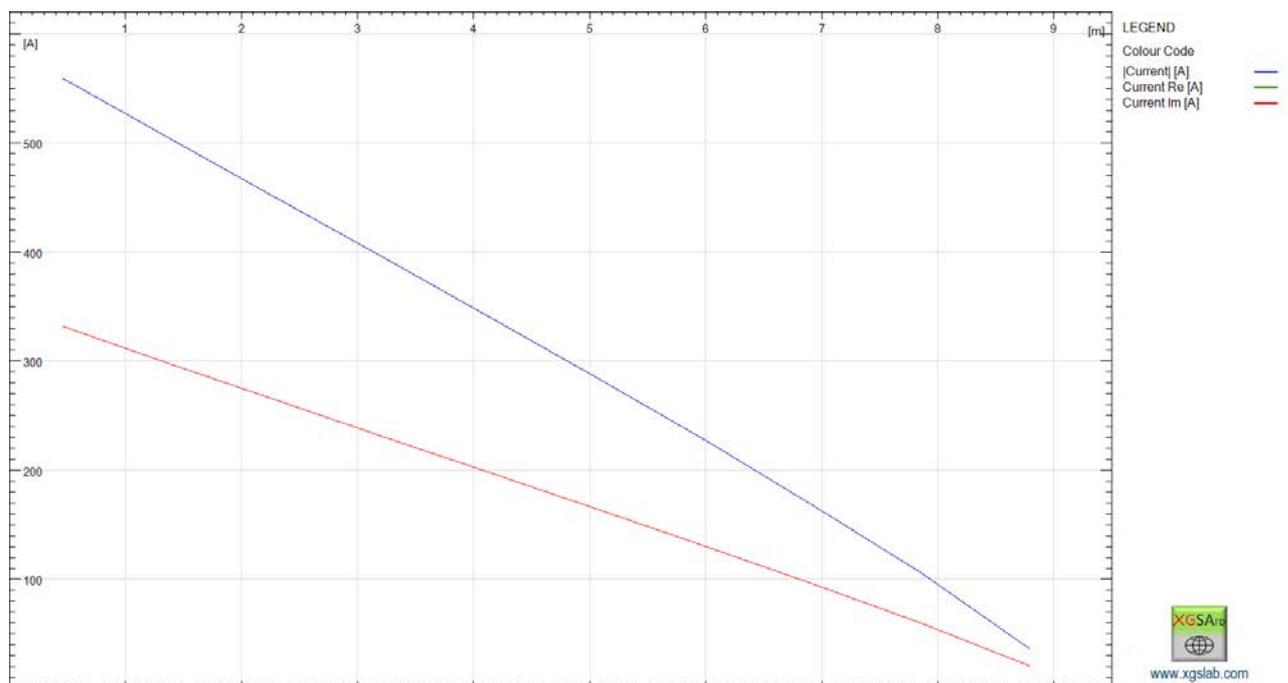


Bild 5-8 Stromverlauf entlang der Näherung ausgehend von einer Höhe von 10,25 m bis zu einer Höhe von 1 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

5.1.3.2 Eine Ableitung mit einem Tiefenerder und Potentialanschluss der Näherung 0,25 m unterhalb der Erde

Die Anordnung entspricht der im vorigen Abschnitt. Nur der Anschluss der Näherung befindet sich gemäß Bild 5-9 0,25 m im Erdreich. Dadurch kommt es zum Stromabfluss über den im Erdreich liegenden Teil der Näherung und damit zu einer magnetischen Einkopplung dieses Erdstroms in die Näherungsschleife.

Das Erdoberflächenpotential in Bild 5-10 und Bild 5-11 zeigt erwartungsgemäß einen anderen Verlauf gegenüber dem Fall mit einer Näherung oberhalb der Erdoberfläche. Die Potentialverläufe zeigen Bild 5-12 und Bild 5-13. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 5-3. Der Strom auf dem horizontal in der Erde verlaufenden Teil der Näherung ist in Bild 5-14 dargestellt. Ein nennenswerter Anteil fließt über diesen Teil der Näherung ab und erzeugt in der Näherungsschleife ein zusätzliches Magnetfeld. Dies führt zu einer Erhöhung der Spannung gegenüber analytisch berechneten Spannung für eine stromlose Näherung. Auf dem vertikalen Teil der Näherung kommt es zu einem kapazitiv eingekoppelten Stromanteil, siehe Bild 5-15.

Bedingt durch die magnetische Einkopplung ist die berechnete Spannung U_T etwas größer als die analytische Berechnung. Die Änderung liegt im 5 % Bereich.

Tabelle 5-3 Ergebnisse der Simulation für 0,25/100 entsprechend 1 MHz, 50 kA, Klasse 1.

	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
Ableitung	855.217	3902253	3.994.869	5.649.597	V
Näherung	877.724	1.312.019	1.578.542	2.232.395	V
UT	-22.507	2.590.234	2.590.332	3.663.282	V
Analytische Berechnung $M_{di}/dt \cdot l = 1,2 \cdot 1 \cdot 314 \cdot 9,25 \cdot 1000$ für Sinusform				3.480.442	V
Trennungsabstand aus analytischer Berechnung für Sinusform mit 314 kA/μs und Stoßkennlinie				0,80	m
Analytische Berechnung $M_{di}/dt \cdot l = 1,2 \cdot 1 \cdot 280 \cdot 9,25 \cdot 1000$ für die Steilheit des Heidlerimpulses				3.103.578	V
Trennungsabstand aus analytischer Berechnung für die Steilheit des Heidlerimpulses mit 280 kA/μs und Stoßkennlinie				0,78	m
Analytische Berechnung $M_{di}/dt \cdot l = 1,2 \cdot 1 \cdot 200 \cdot 9,25 \cdot 1000$				2.220.000	V
Trennungsabstand aus analytischer Berechnung mit 200 kA/μs und Stoßkennlinie				0,74	m
Trennungsabstand aus IEC 62305-3 mit $k_c=1$, $l=9,25m$				0,74	m
Trennungsabstand aus GSA Berechnung				0,84	m
Spannungsdifferenz $U_T - M_{di}/dt$				182.841	V

Die relative Änderung gegenüber der analytischen Berechnung beträgt 5,2 %.



Bild 5-9 Darstellung der Näherung, die 0,25 m im Erdreich verläuft.

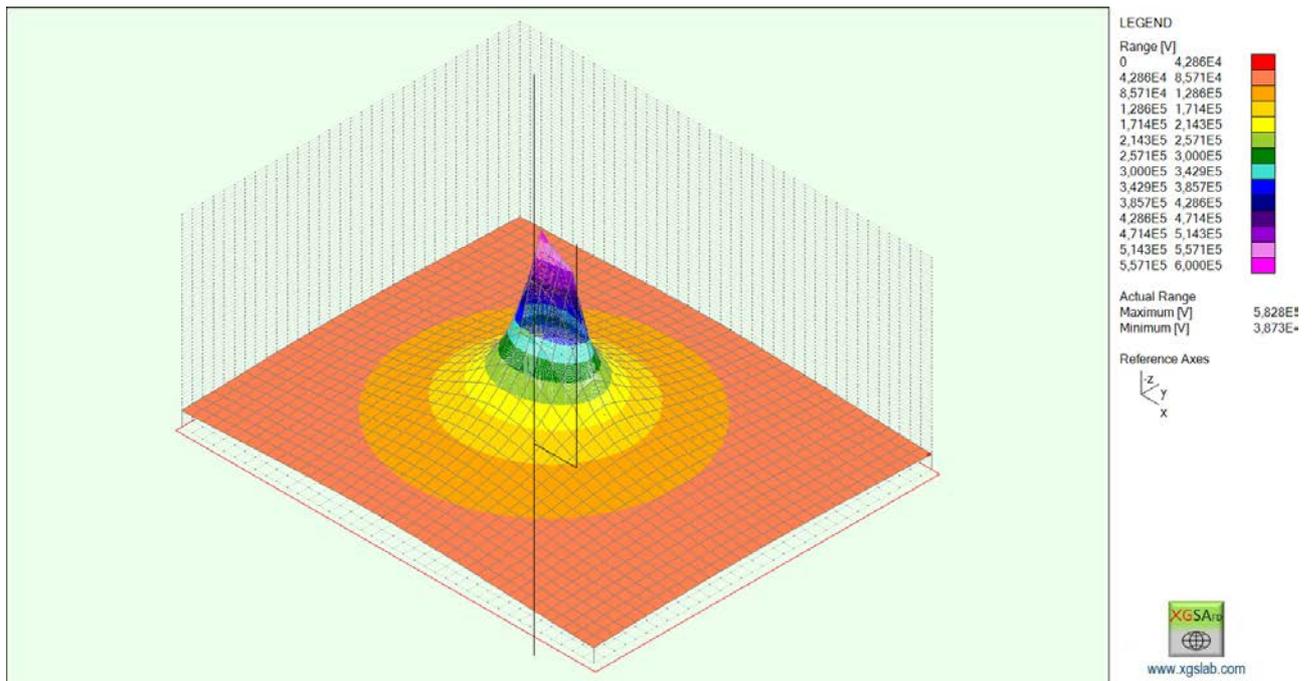


Bild 5-10 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

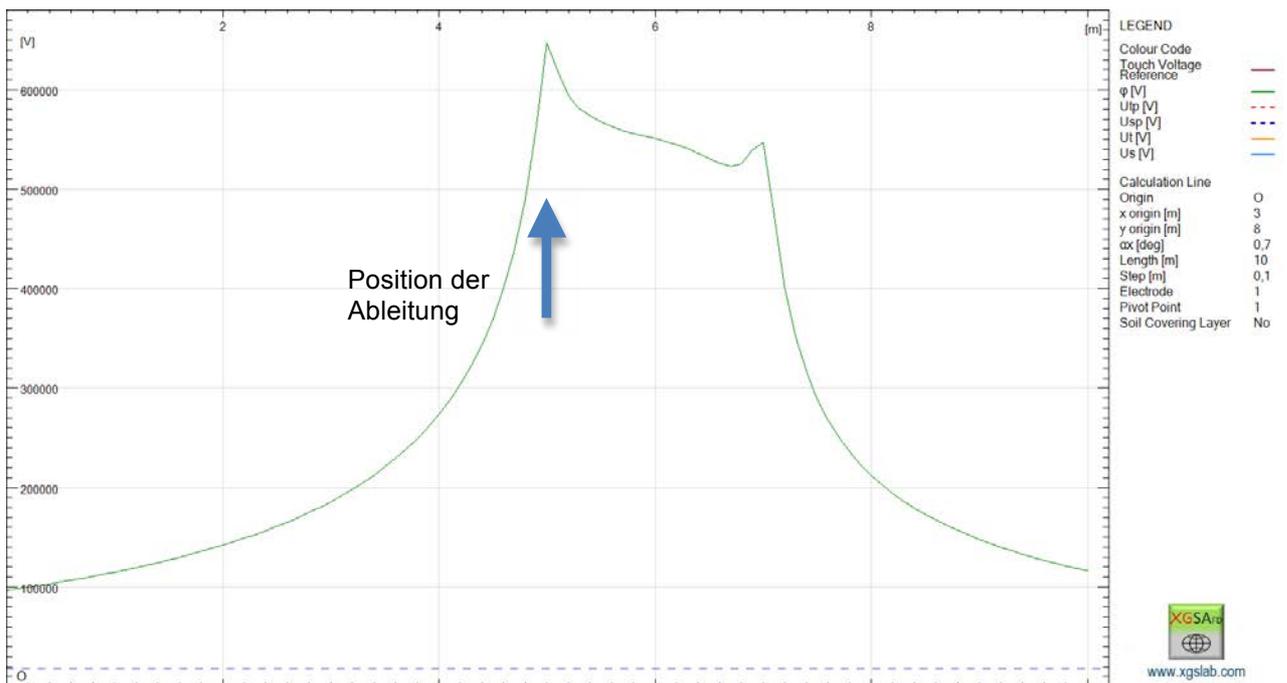


Bild 5-11 Erdoberflächenpotential entlang der Näherung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

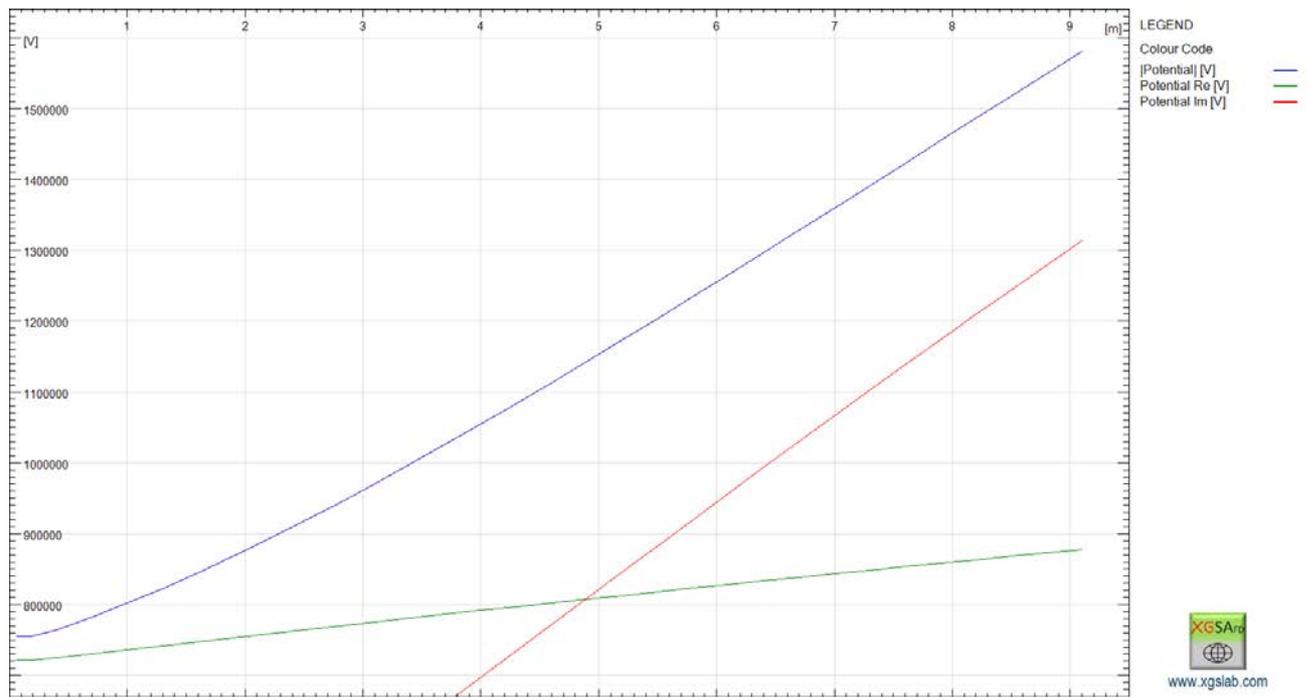


Bild 5-12 Potentialverlauf entlang der Ableitung bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

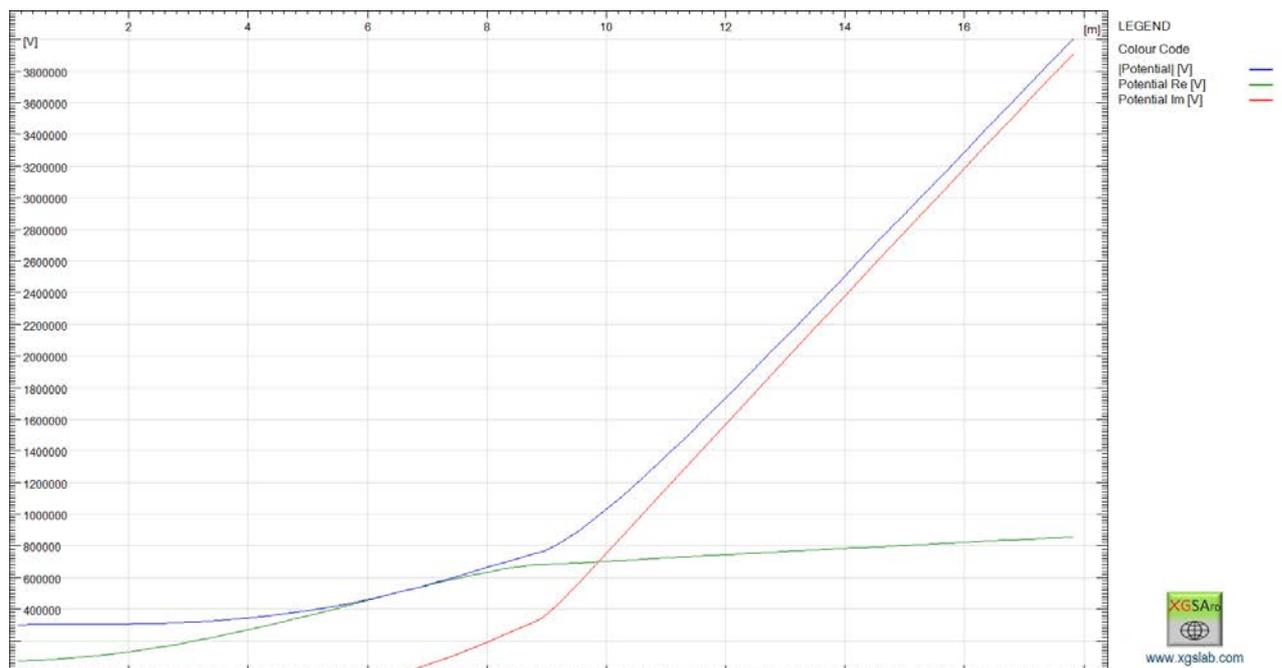


Bild 5-13 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von einer Höhe von 0,25 m in der Erde bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

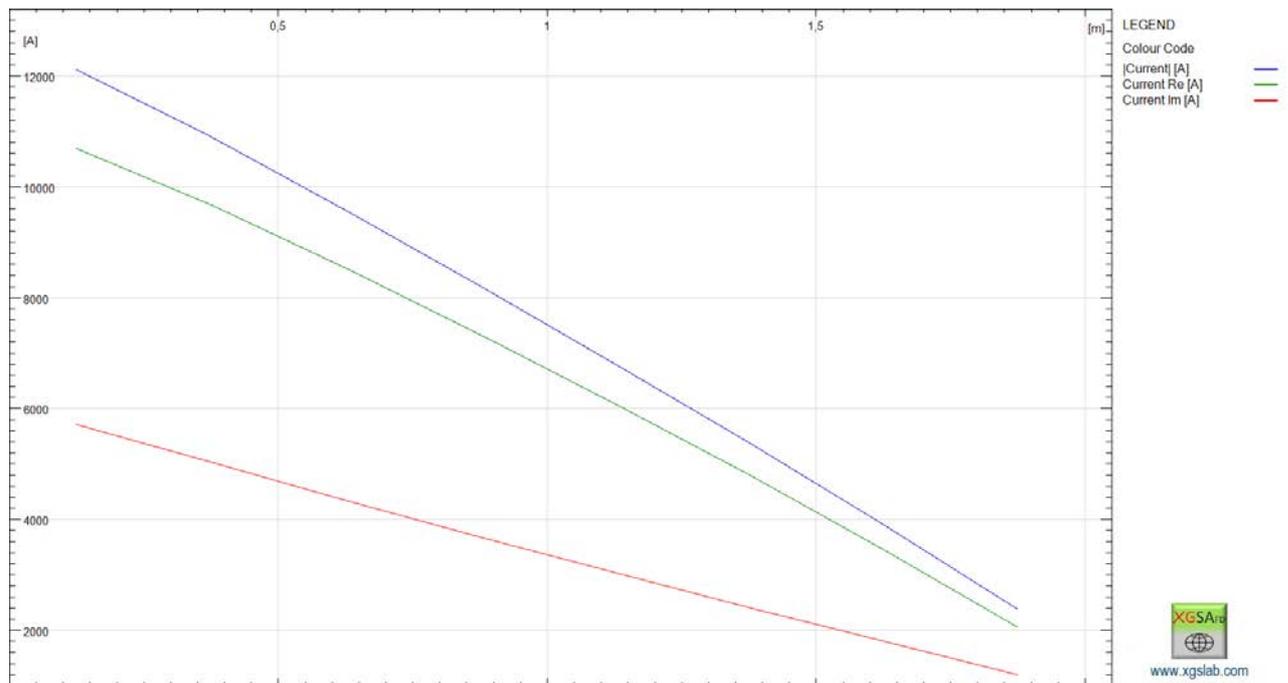


Bild 5-14 Stromverlauf auf dem horizontalen Teil der Näherung in 0,25 m Tiefe. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

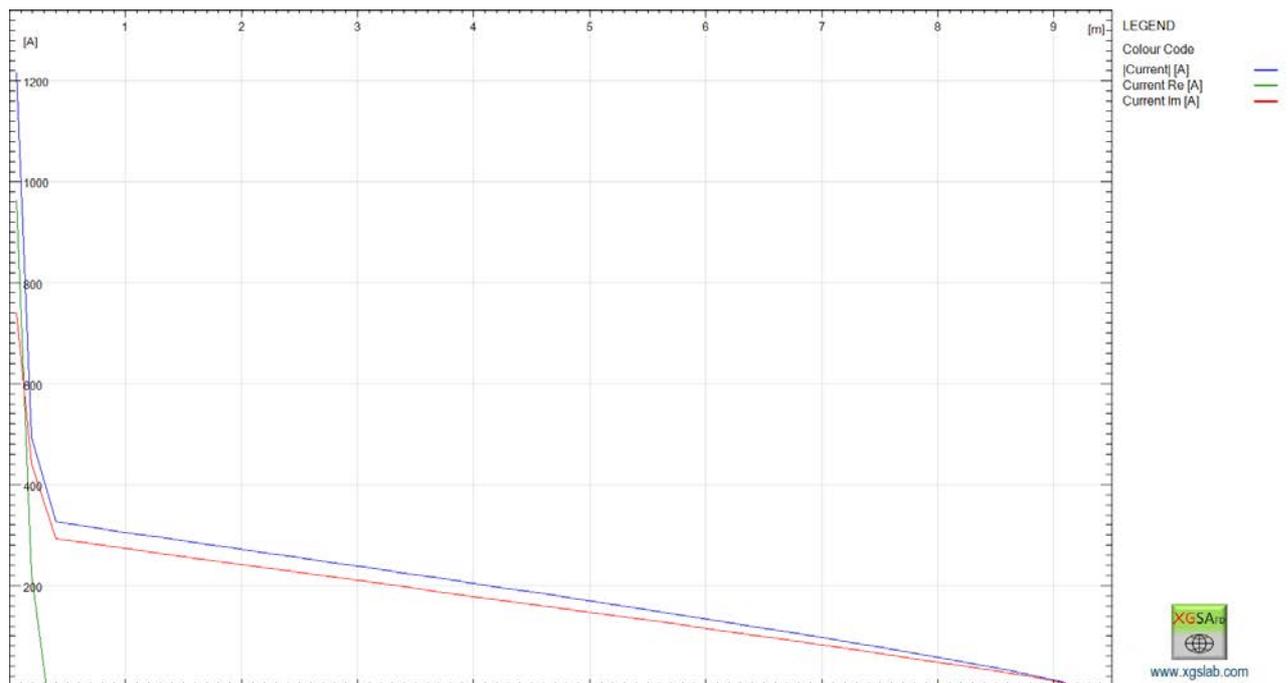
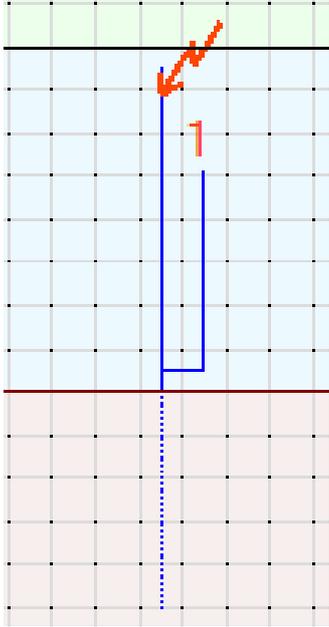
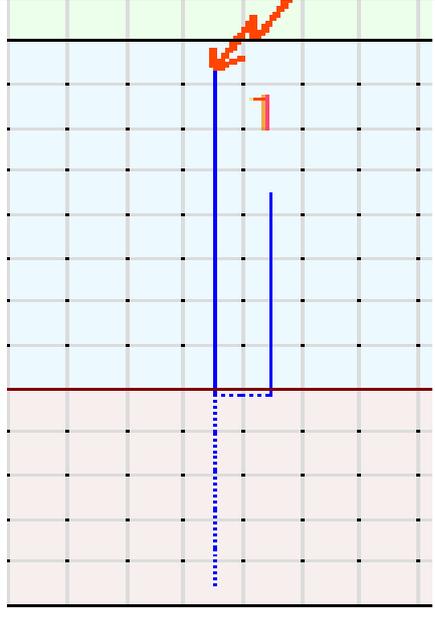


Bild 5-15 Stromverlauf auf dem vertikalen Teil der Näherung ausgehend von 0,25 m Tiefe bis zu einer Höhe von 9m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

5.1.3.3 Ergebnisvergleich

Das einfache Beispiel hat die Richtigkeit der Berechnung mit GSA_FD gezeigt.

Tabelle 5-4 Ergebnisvergleich

		
	Näherung 1m oberhalb Erde	Näherung 0,25m in der Erde
Ableitung	6.626.589	5.649.597
Näherung	3.251.100	2.232.395
Aus GSA_FD: U _T	3.539.335	3.663.282
Berechneter Trennungsabstand mit GSA_FD	0,81m	0,84m
Analytisch U _a	3.480.442	

5.1.4 Eine Ableitung mit einem Erdungsgitter und Potentialanschluss der Näherung unterhalb der Erde

Ein einfaches Modell ist in Bild 5-16 , Bild 5-17 und Bild 5-18 gezeigt. Eine Fangstange ist symmetrisch in der Mitte über einem Erdungsgitter angeordnet. Eine Leitung ist in einem Abstand von 2 m von der Ableitung angeordnet und weist eine Länge von 12,5 m auf, ausgehend vom Anschluss an das Erdungsgitter bis zum Ort , an dem der Trennungsabstand berechnet werden soll.

Der Trennungsabstand nach IEC 62305-3 errechnet sich für Klasse 1 zu:

$$s = \frac{k_i \cdot k_c}{k_m} \cdot l = \frac{0,08 \cdot 1}{1} \cdot 9,25\text{m} = 0,74\text{m} \quad \text{Gleichung 5-3}$$

Dabei ist im Hintergrund der IEC 62305-3 eine Steilheit $di/dt_{(max)}$ von 200 kA/μs für Klasse 1 berücksichtigt.

Mit dem Ziel, die in IEC 62305-3 angegebene Methode richtig wiederzugeben, wird bewusst eine Näherung erzeugt, deren Leitung in einem Abstand von 2 m von der Ableitung verläuft und an der betrachteten Stelle einen Abstand von 1 m entsprechend des berechneten Trennungsabstands aufweist.

Damit kann also das Verfahren in IEC 62305-3 überprüft werden.

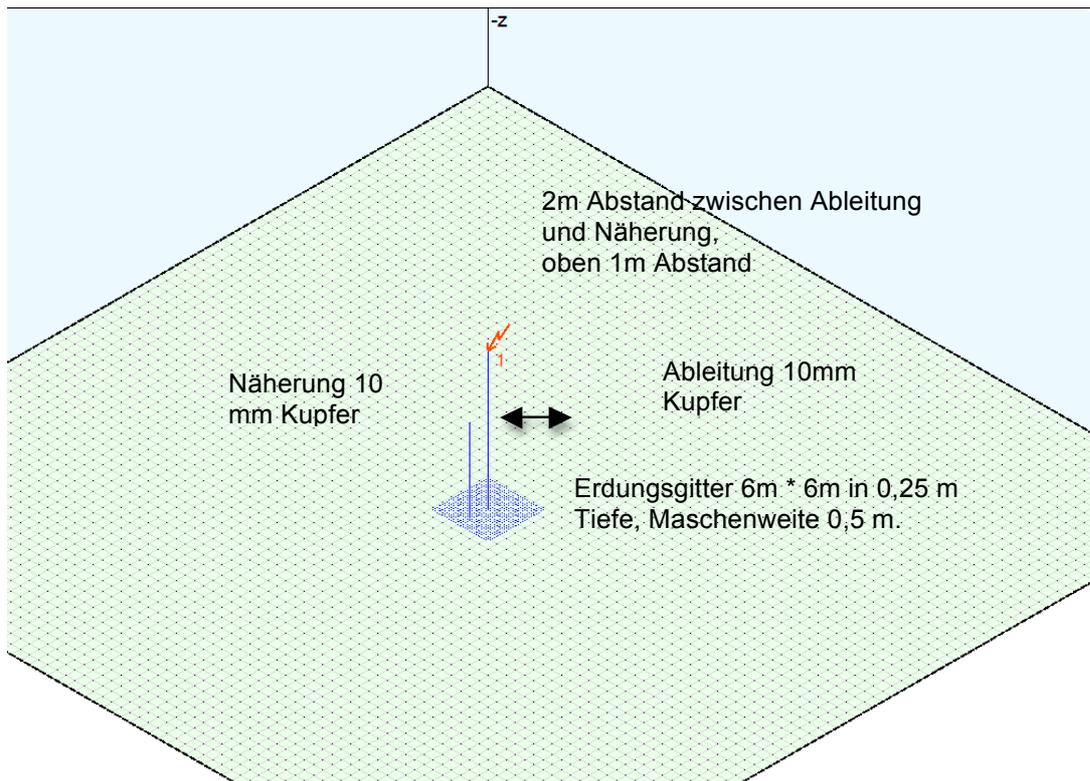


Bild 5-16 Anordnung entsprechend dem Hintergrund der Berechnung nach IEC 62305-3 mit $M'=1,2\mu\text{H/m}$ bei einem Abstand von 2 m zwischen Ableitung und Näherung. Durchmesser der Ableitung und der Näherung: 10mm Kupfer. Länge der Näherung : 9m in Luft und 0,25 m in der Erde.

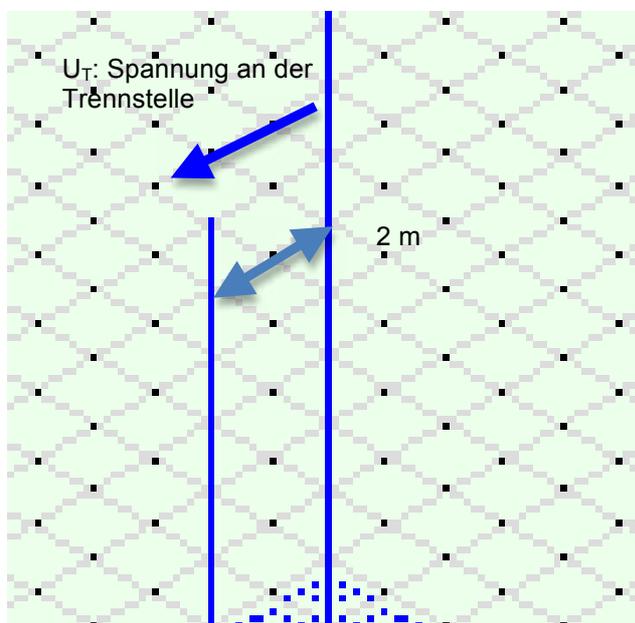


Bild 5-17 Detailansicht der Anordnung in Bild 5-16 entsprechend dem Hintergrund der Berechnung nach IEC 62305-3 mit $M'=1,2\mu\text{H/m}$ bei einem Abstand von 2 m zwischen Ableitung und Näherung. Durchmesser der Ableitung und der Näherung: 10mm Kupfer.

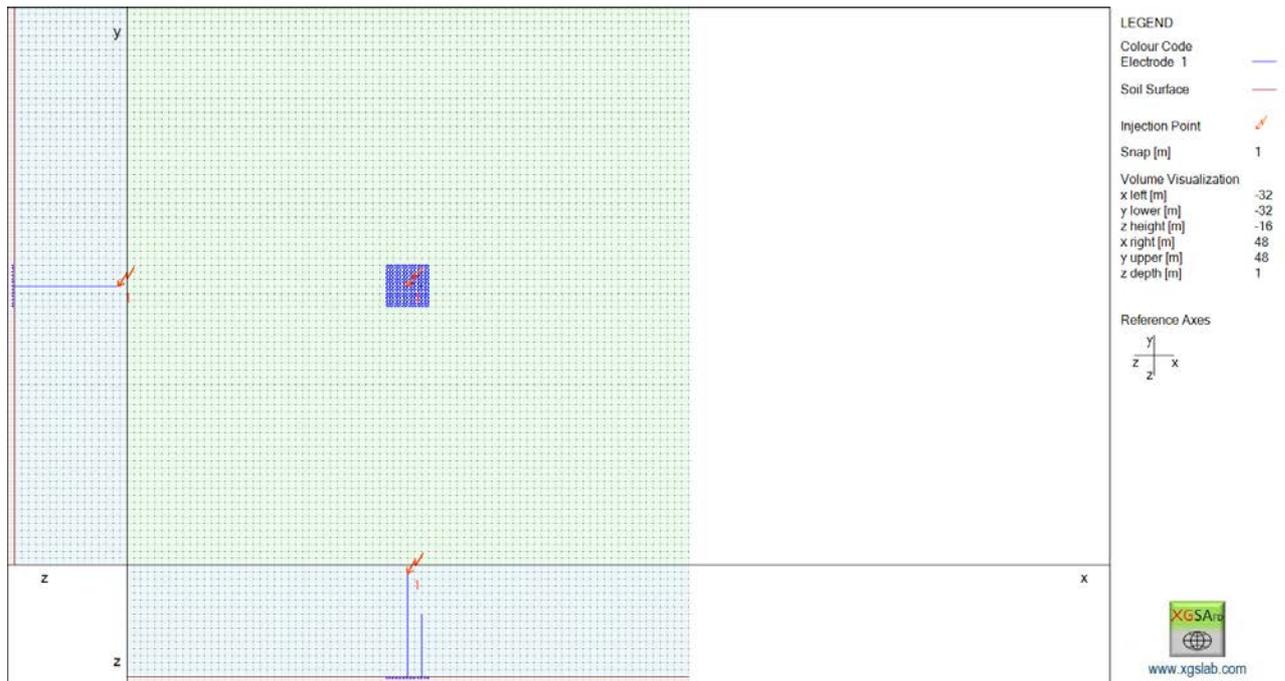


Bild 5-18 Wie Bild 5-16 jedoch isometrische Darstellung.

5.1.4.1 Berechnung für Klasse 1, 50 kA 0,25/100, Sinusstrom, 1 MHz bzw. 314 kA/μs

Das Erdoberflächenpotential in Bild 5-19 zeigt im Bereich der Näherung einen gleichmäßigen Verlauf. Der Abfall ist nicht so steil wie bei anderen Anordnungen, die in Neu Ulm vorgestellt wurden. Das liegt an dem kleinen Erdungsgitter und der mittigen Stromspeisung.

Zum weiteren Verständnis ist in Bild 5-20 der Verlauf des Erdoberflächenpotentials entlang der Mittellinie der Anordnung dargestellt. Hier zeigt sich, wie bereits in der 3 D Darstellung in Bild 5-19 der moderate Verlauf des Erdoberflächenpotentials.

Mit dem Programm GSA_FD lassen sich jetzt die Potentialverläufe einzelner Leiter darstellen. Dabei sind Betrag, Realteil und Imaginärteil einzeln abzulesen. Die Verläufe sind in Bild 5-21 und Bild 5-22 dargestellt. Die Spannung U_T an der Näherung, vergl. Bild 5-17 ergibt sich dann unter Berücksichtigung von Real- und Imaginärteil aus der Differenz der Potentiale an den entsprechenden Stellen.

Die Näherung ist nicht stromlos. Durch kapazitive Kopplung zwischen der Ableitung und der Näherung entsteht auf der Näherung ein Strom gemäß Bild 5-23.

Die Ergebnisse der Simulation im Vergleich zu analytischen Berechnungen zeigt Tabelle 5-5

Der Trennungsabstand aus der GSA_FD Berechnung stimmt exakt mit der analytischen Trennungsabstandsberechnung überein. Aus der analytischen Berechnung der induzierten Spannung und der berechneten Spannung U_T an der Trennstelle ergibt sich eine Differenz von 244 kV, die auf die Kopplung zwischen Ableitung und Näherung zurückzuführen ist.

Tabelle 5-5 Ergebnisse der Simulation mit 1 MHz

	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
Ableitung	386.429	3.630.194	3.650.703	5.162.874	V
Näherung	369.556	1.060.114	1.122.681	1.587.711	V
U_T	16.873	2.570.080	2.570.135	3.634.720	V
Analytische Berechnung $Mdi/dt \cdot l = 1,2 \cdot 1 \cdot 314 \cdot 9,25 \cdot 1000$				3.480.442	V
Trennungsabstand aus analytischer Berechnung mit $di/dt = 314 \text{ kA}/\mu\text{s}$ und Stoßkennlinie für 314 kA/ μs $U_d = 4.368.000 \text{ V}/\text{m}$, siehe Abschnitt 7.2				0,80	m
Analytische Berechnung $Mdi/dt \cdot l = 1,2 \cdot 1 \cdot 200 \cdot 9,25 \cdot 1000$				2.220.000	V
Trennungsabstand aus analytischer Berechnung mit $di/dt = 200 \text{ kA}/\mu\text{s}$ und Stoßkennlinie für 200kA/ μs $U_d = 3.000.000 \text{ V}/\text{m}$, siehe Abschnitt 7.2				0,74	m
Trennungsabstand aus IEC 62305-3 mit $k_c = 1, l = 9,25 \text{ m}$				0,74	m
Trennungsabstand aus GSA Berechnung				0,83	m
Spannungsdifferenz $U_T - Mdi/dt \cdot l$				154.279	V
Abweichung U_T gegen analytische Berechnung :				4,4	%

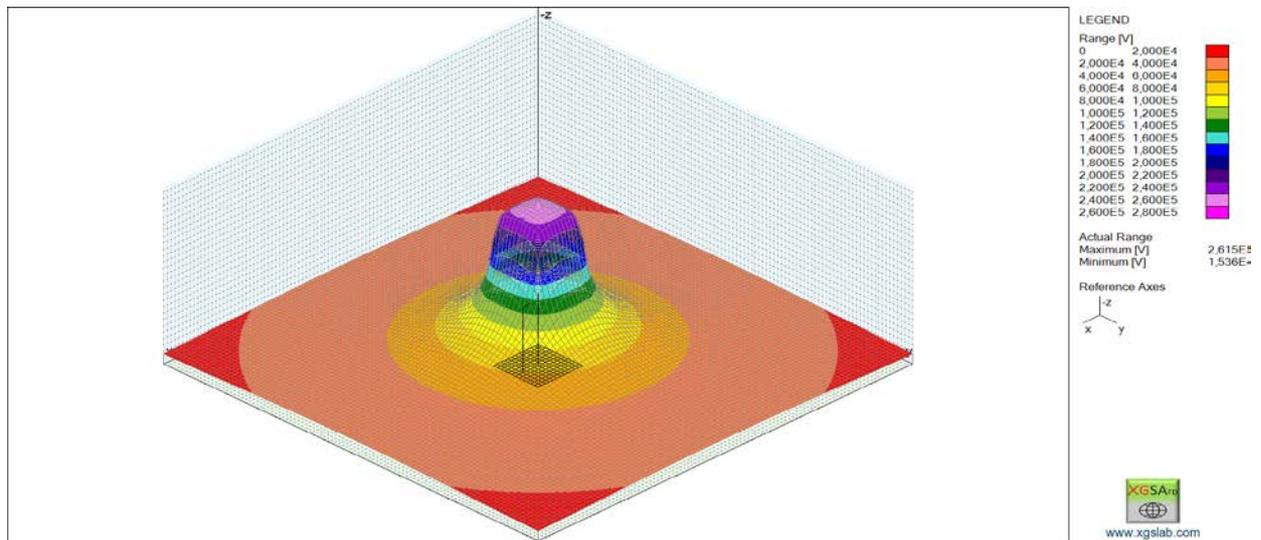


Bild 5-19 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$ und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

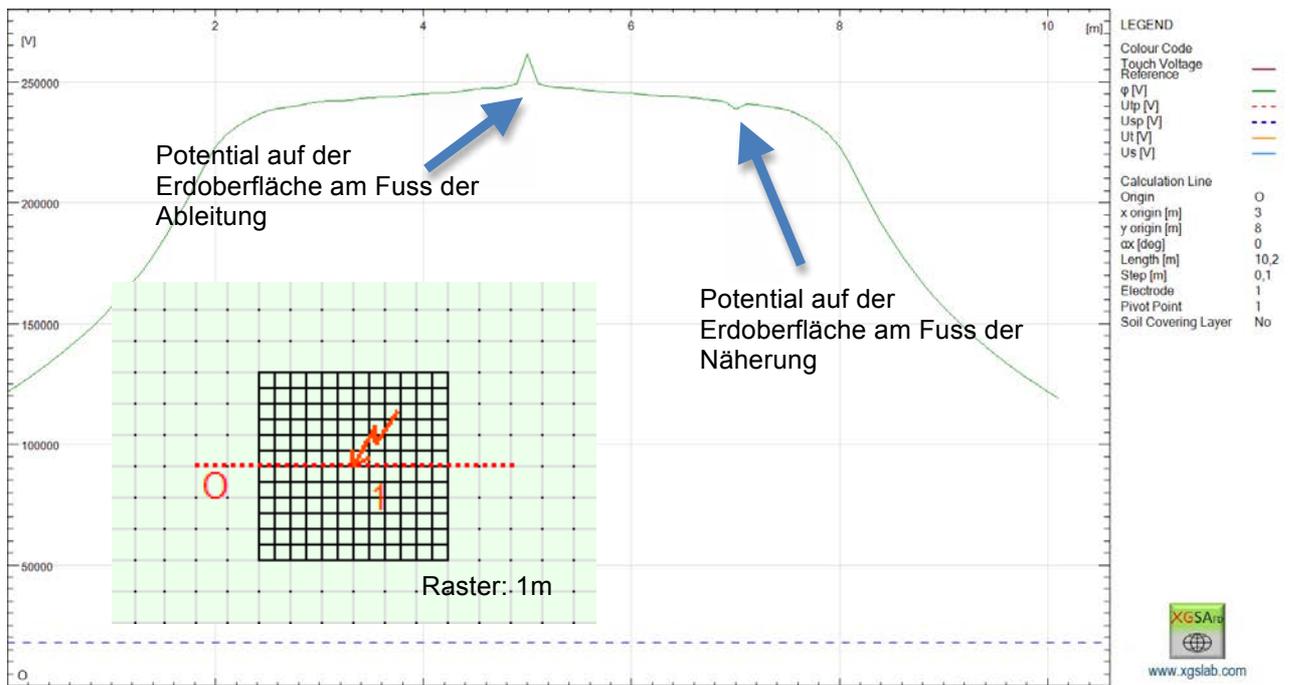


Bild 5-20 Verlauf des Erdoberflächenpotentials auf der im Bild dargestellten gestrichelten Linie. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

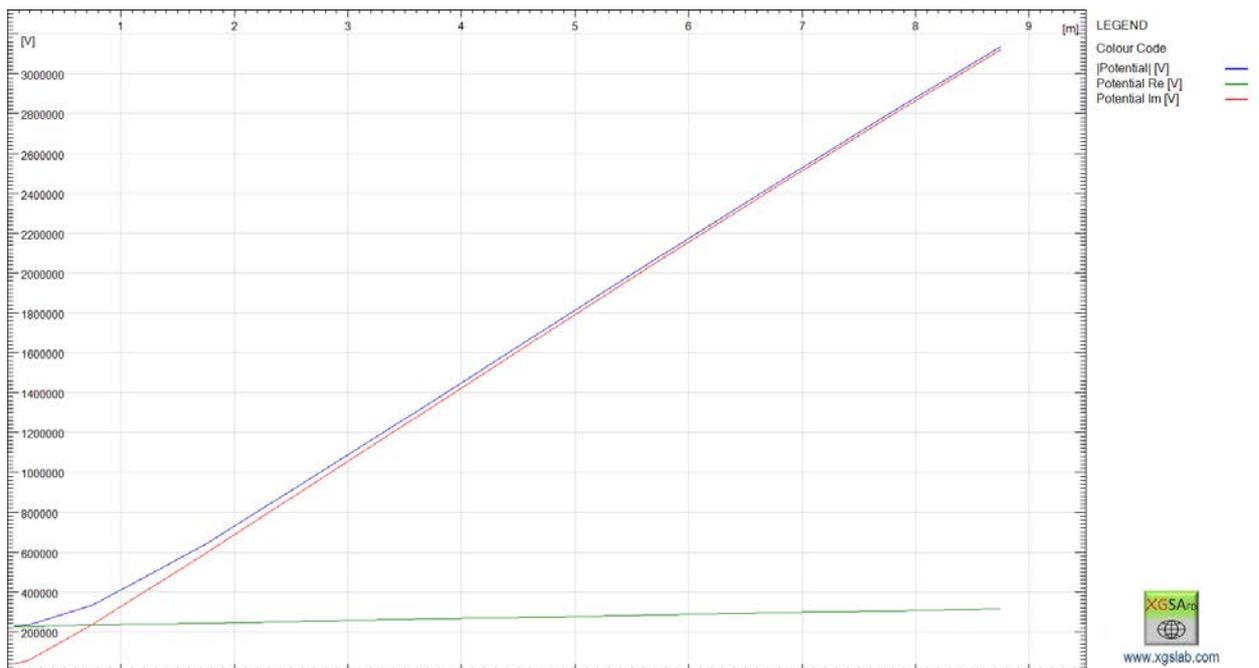


Bild 5-21 Potentialverlauf entlang der Ableitung ausgehend vom Erdungsgitter in 0,25 m Tiefe bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

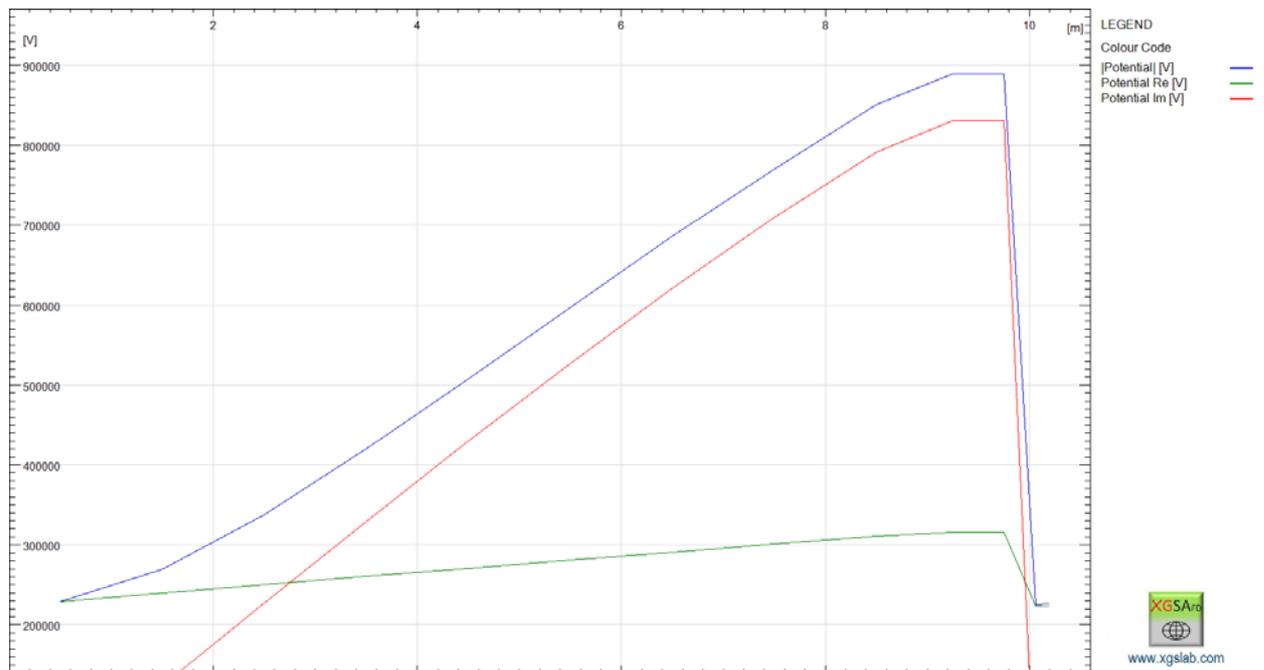


Bild 5-22 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend vom Erdungsgitter in 0,25 m Tiefe bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche und dem 1 m langen Knick, vergl. Bild 5-17. Gesamtlänge der Näherung nach den Definitionen in IEC 62305-3: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

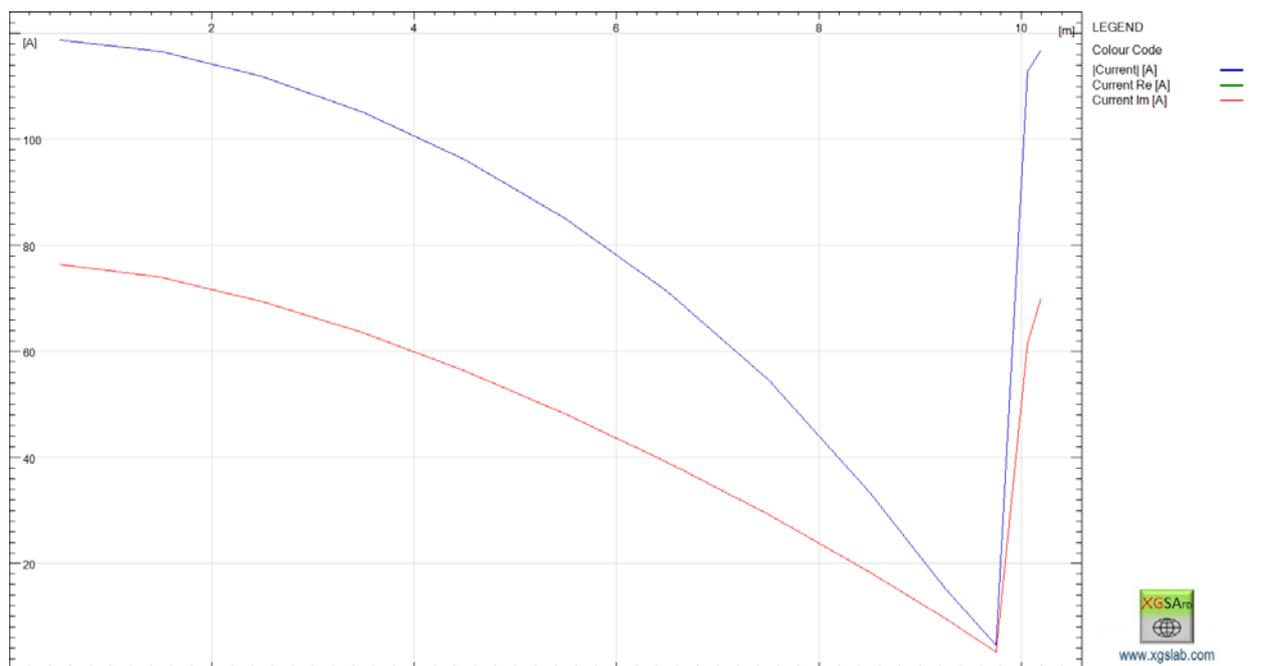


Bild 5-23 Stromverlauf entlang der Näherung ausgehend vom Erdungsgitter in 0,25 m Tiefe bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche und dem 1 m langen Knick, vergl. Bild 5-17. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 mit einer Frequenz von 1 MHz.

5.1.4.2 Berechnung für Klasse 1, 100 kA 1/200, Sinusstrom, 0,25 MHz bzw. 157 kA/ μ s

Das Erdoberflächenpotential in Bild 5-24 zeigt einen gleichmäßigen Verlauf. Der Abfall ist nicht so steil wie bei anderen Anordnungen, die in Neu Ulm vorgestellt wurden. Das liegt an dem kleinen Erdungsgitter und der mittigen Stromspeisung.

Zum weiteren Verständnis ist in Bild 5-25 der Verlauf des Erdoberflächenpotentials entlang der Mittellinie der Anordnung dargestellt. Hier zeigt sich, wie bereits in der 3 D Darstellung in Bild 5-24 der moderate Verlauf des Erdoberflächenpotentials.

Mit dem Programm GSA_FD lassen sich jetzt die Potentialverläufe einzelner Leiter darstellen. Dabei sind Betrag, Realteil und Imaginärteil einzeln abzulesen. Die Verläufe sind in Bild 5-26 und Bild 5-27 dargestellt. Die Spannung U_T an der Näherung, vergl. Bild 5-17 ergibt sich dann unter Berücksichtigung von Real- und Imaginärteil aus der Differenz der Potentiale an den entsprechenden Stellen.

Die Näherung ist nicht stromlos. Durch kapazitive Kopplung zwischen der Ableitung und der Näherung entsteht auf der Näherung ein Strom gemäß Bild 5-28.

Die Ergebnisse der Simulation im Vergleich zu analytischen Berechnungen zeigt Tabelle 5-6

Der Trennungsabstand aus der GSA_FD Berechnung stimmt bis auf 1 % mit der analytischen Trennungsabstandsberechnung überein.

Der Trennungsabstand ist aber bei dem 1/200-Impuls (Simuliert mit 0,25 MHz) mit 1,12 m deutlich größer als bei der nach IEC 62305-3 zugrunde gelegten Stoßstromform 0,25/100.

Tabelle 5-6 Ergebnisse der Simulation mit 0,25 MHz

	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
Ableitung	474.617	1.711.916	1.776.490	2.504.851	V
Näherung	478.186	487.178	682.645	962.530	V
UT	-3.569	1.224.738	1.224.743	1.726.888	V
Analytische Berechnung $M_{di}/dt^*I=1,2*1*157*9,25*1000$				1.742.700	V
Trennungsabstand aus analytischer Berechnung				1,13	m
Trennungsabstand aus GSA Berechnung				1,12	m
Spannungsdifferenz $U_T - M*di/dt^*I$				-15.812	V
Abweichung U_T gegen analytische Berechnung :				-0,9	%

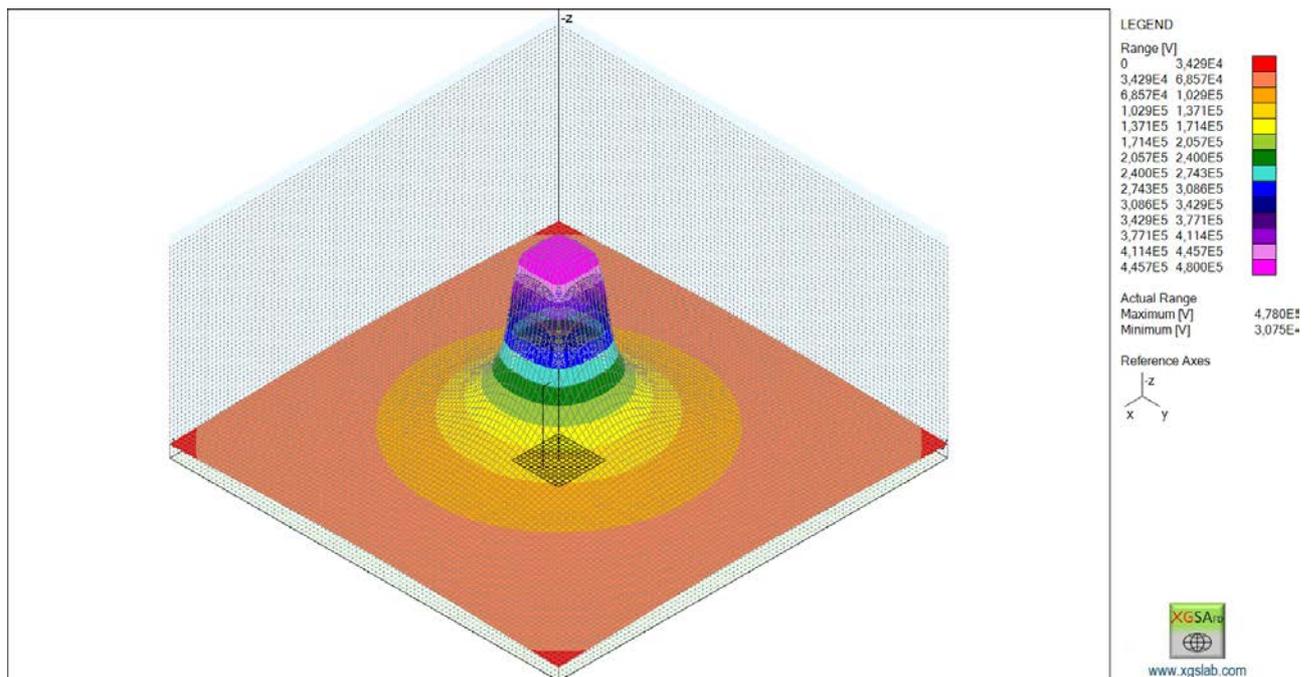


Bild 5-24 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 mit einer Frequenz von 0,25 MHz.

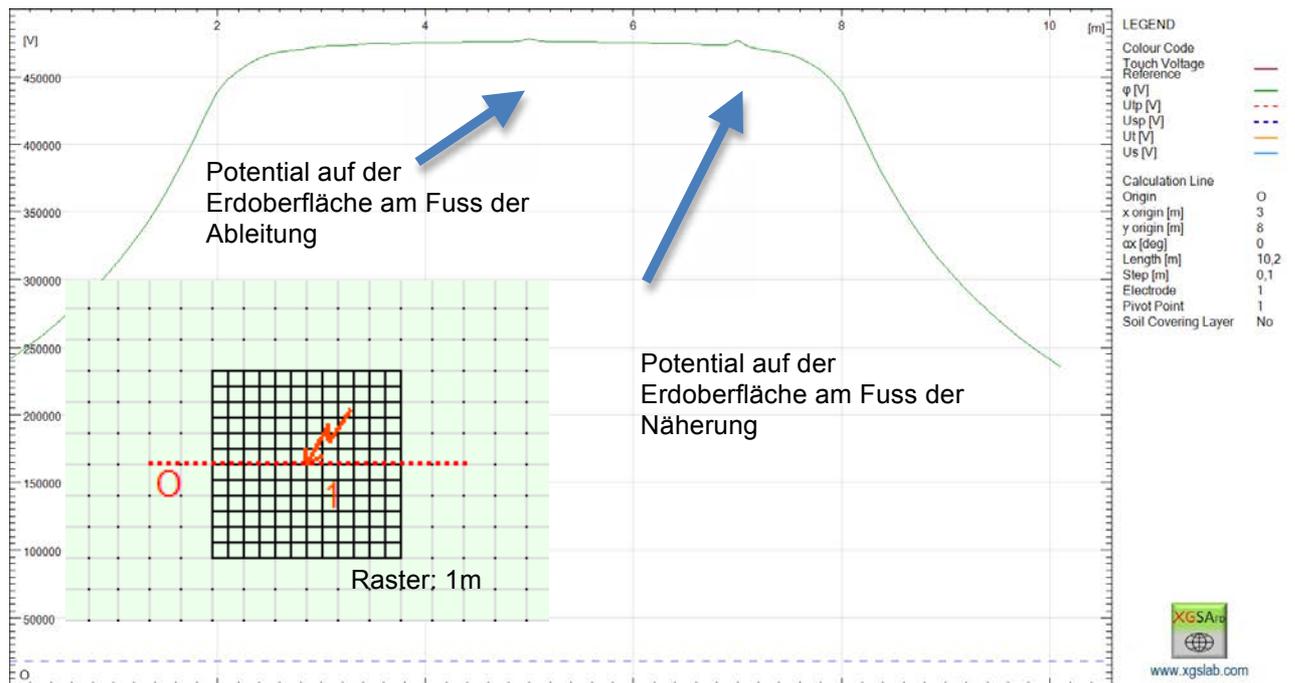


Bild 5-25 Verlauf des Erdoberflächenpotentials auf der im Bild dargestellten gestrichelten Linie. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 mit einer Frequenz von 0,25 MHz.

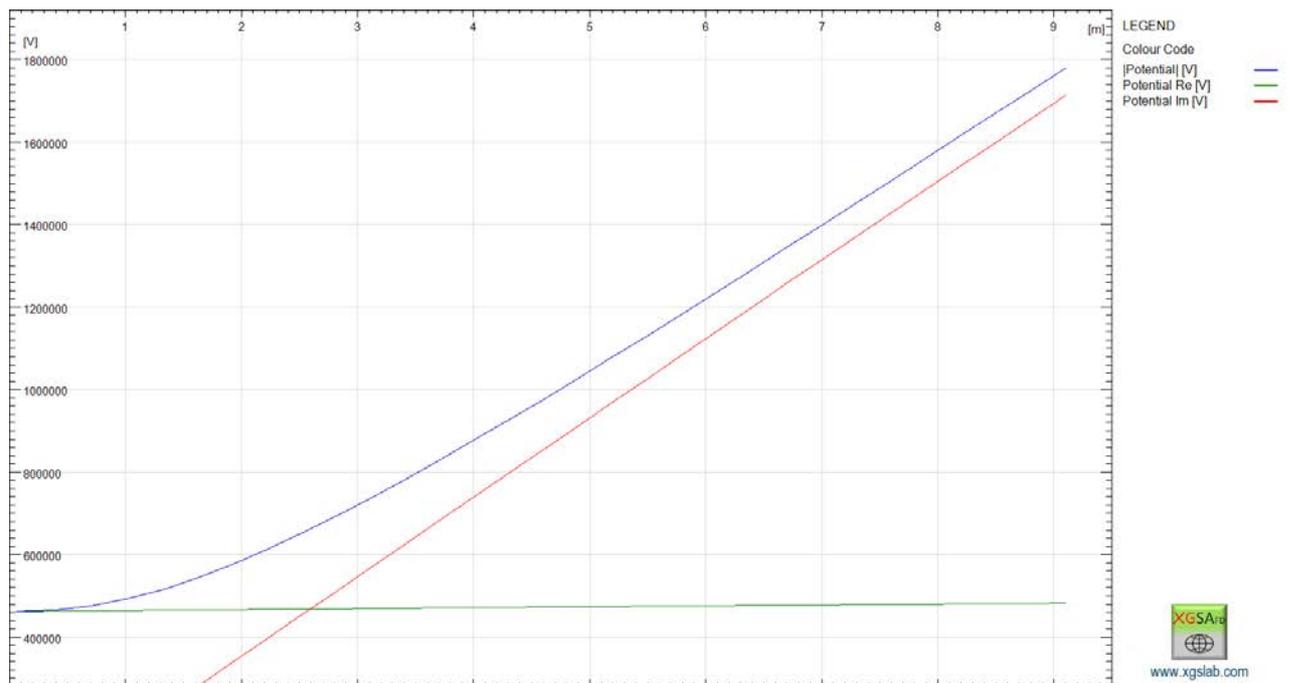


Bild 5-26 Potentialverlauf entlang der Ableitung ausgehend vom Erdungsgitter in 0,25 m Tiefe bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 mit einer Frequenz von 0,25 MHz.

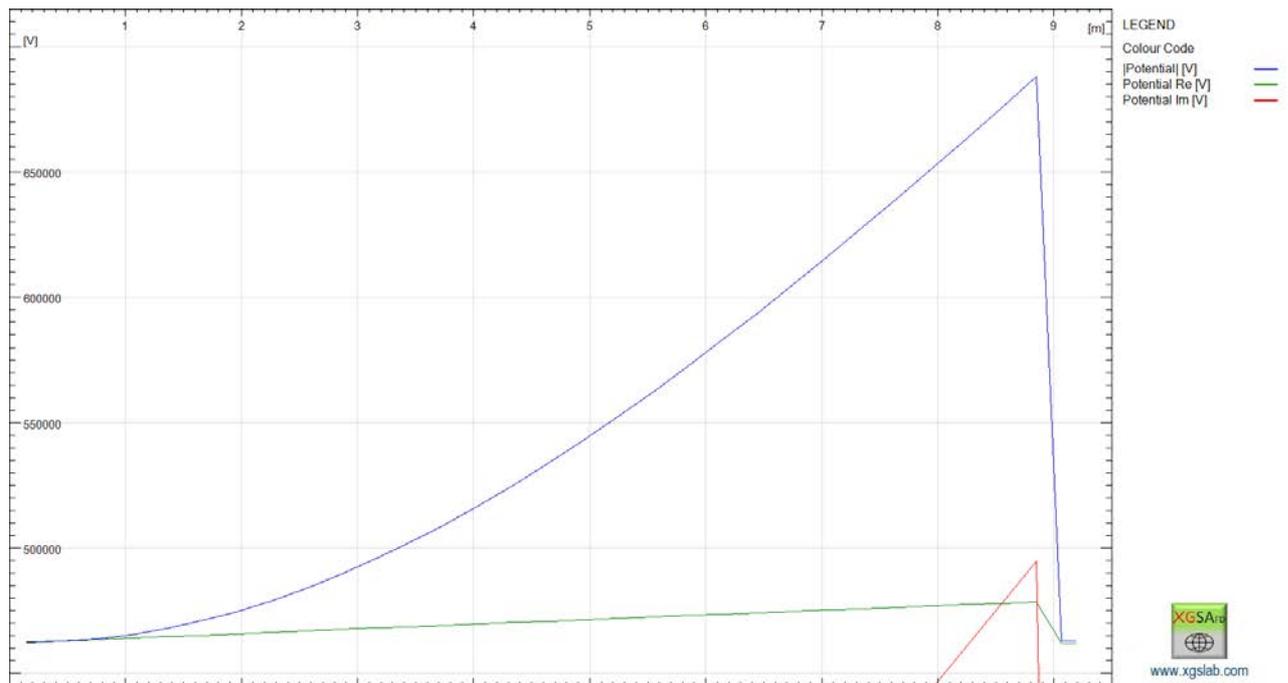


Bild 5-27 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend vom Erdungsgitter in 0,25 m Tiefe bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche und dem 1 m langen Knick, vergl. Bild 5-17. Gesamtlänge der Näherung nach den Definitionen in IEC 62305-3: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$ und 100 kA 1/200 mit einer Frequenz von 0,25 MHz.

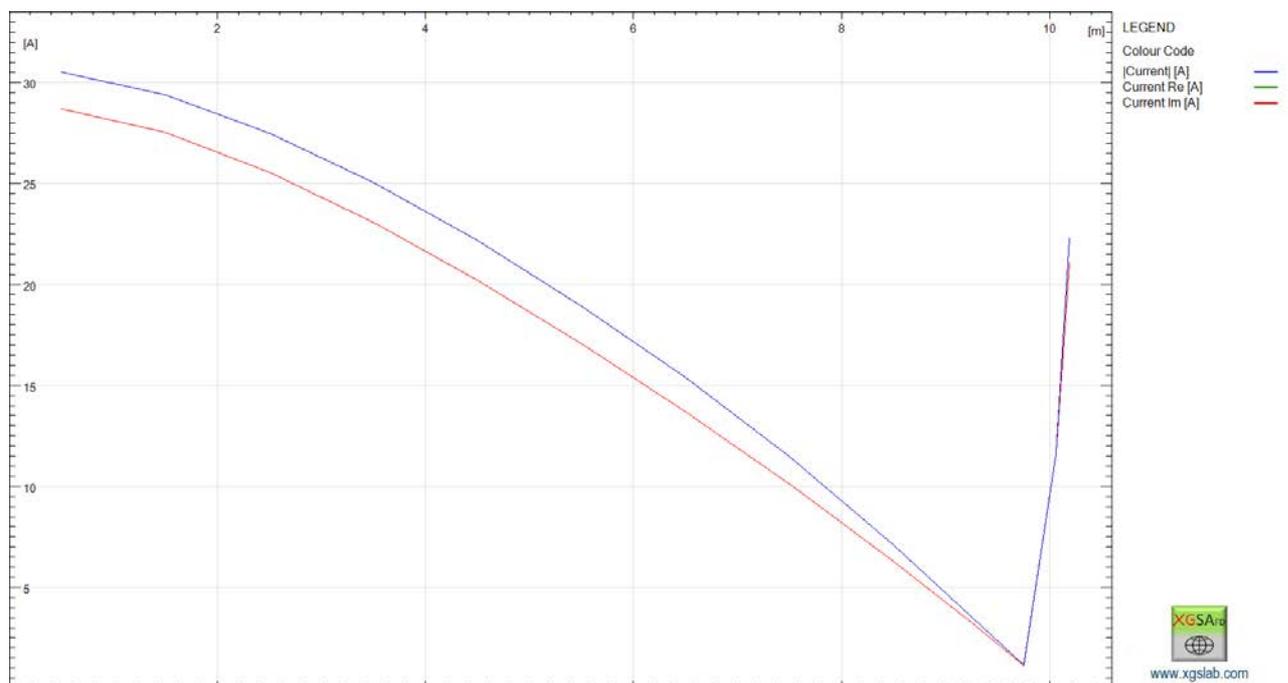


Bild 5-28 Stromverlauf entlang der Näherung ausgehend vom Erdungsgitter in 0,25 m Tiefe bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche und dem 1 m langen Knick, vergl. Bild 5-17. Berechnung für $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$ und 100 kA 1/200 mit einer Frequenz von 0,25 MHz.

5.1.5 Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-7 zusammengestellt und zeigen, dass die Simulation mit der Frequenz von 1 MHz bzw. 0,25 MHz die richtigen Ergebnisse zeigen.

Die Abweichung gegenüber den Frequenzen 0,637 MHz und 0,159 MHz ist im Bereich von 10-20 %

Die Ergebnisse sind in der Grafik in Bild 5-29 dargestellt.

Tabelle 5-7 Vergleich der Ergebnisse aller Simulationen und analytischer Berechnung. Alle Werte gelten für spezifischen Bodenwiderstand von 100 OHmm.

	di/dt	M*	Spannung an Trennstelle U_T	Trennungs- abstand S¹⁾
	kA/μs	μH/m	kV	m
0,25/100				
IEC Methode (Zischank) Rampenmethode 200kA/μs	200	1,2	2m*9,25m= 18,5m ²	2217 0,74
GSA-Simulation mit 314kA/μs f=1 MHz	314		3634	0,83
Analytische Berechnung	314	Mdi/dt	3480	0,8
Analytische Berechnung	200	Mdi/dt	2220	0,74
Spannungsdifferenz (U _T - Mdi/dt) durch galvanische kapazitive und magnetische Kopplung			154 F= 4,4 %	
1/200				
GSA-Simulation mit 157kA/μs f= 0,25 MHz	157		1726	1,12
Analytische Berechnung	157	Mdi/dt	1742	1,13
Analytische Berechnung	100	Mdi/dt	1108	0,84
Spannungsdifferenz (U _T - Mdi/dt) durch galvanische kapazitive und magnetische Kopplung			-15,8 F=-0,9%	

1) Für die Spannungsfestigkeit siehe Stoßkennlinie Abschnitt 7.2.

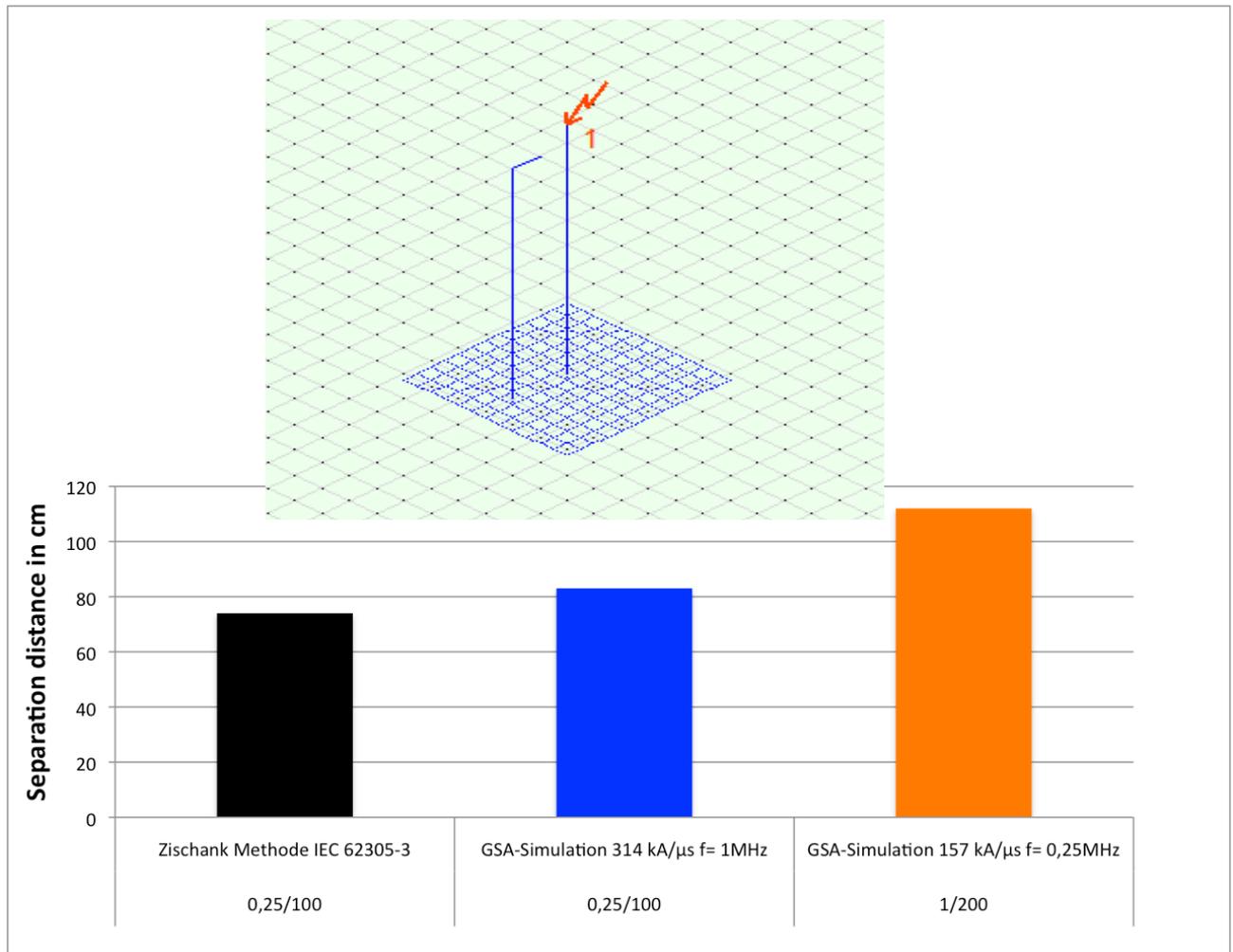


Bild 5-29 Darstellung der ermittelten Trennungsabstände

5.2 Trennungsabstandsrechnung an einem komplexen Gebäude

Ausgehend von dem im Vortrag in Neu ULM 2015 vorgestellten Gebäude (Meppelink VDE-ABB 2015 Vortrag Neu Ulm) werden die Trennungsabstände für verschiedene Näherungssituationen untersucht. Dabei werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Anschlussstelle einer Näherung, nah oder fern des Einschlagspunktes
- Spezifischer Bodenwiderstand
- Impulsform 0,25/100 und 1/200 jeweils Klasse 1

5.2.1 Berechnung mit Geometrie nach Hintergrund der IEC 62305-3

5.2.1.1 Modellgeometrie

Das untersuchte Gebäude mit den Abmessungen 45m*15m*10m zeigt Bild 5-30 und Bild 5-32. Es steht auf einem Maschengitter mit der Maschenweite 1,5m x 1,5m. Das Maschengitter ist in 0,25m Tiefe angeordnet. Eine Näherung ist gemäß Bild 5-31 in einem Abstand von 2,12 m angeordnet. Dieser Abstand ergibt sich praktisch durch das vorhandene Erdungsgitter. Der Abstand oben an der Trennstelle ist auf 0,36 m eingestellt.

Der nach IEC 62305-3 berechnete Trennungsabstand für Klasse 1 beträgt 0,36m.

$$s = \frac{0,08 \cdot 0,44}{1} \cdot 9,25 \text{m} = 0,36 \text{m} \quad \text{Gleichung 5-4}$$

Zur Kontrolle: Die Gegeninduktivität beträgt:

$$M' = \frac{1,256 \mu\text{H} / \text{m}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2,115}{0,005} = 1,2 \mu\text{H} / \text{m} \quad \text{Gleichung 5-5}$$

Damit entspricht diese Anordnung der Grundlage der IEC -Trennungsabstandsberechnung nach 62305-3.

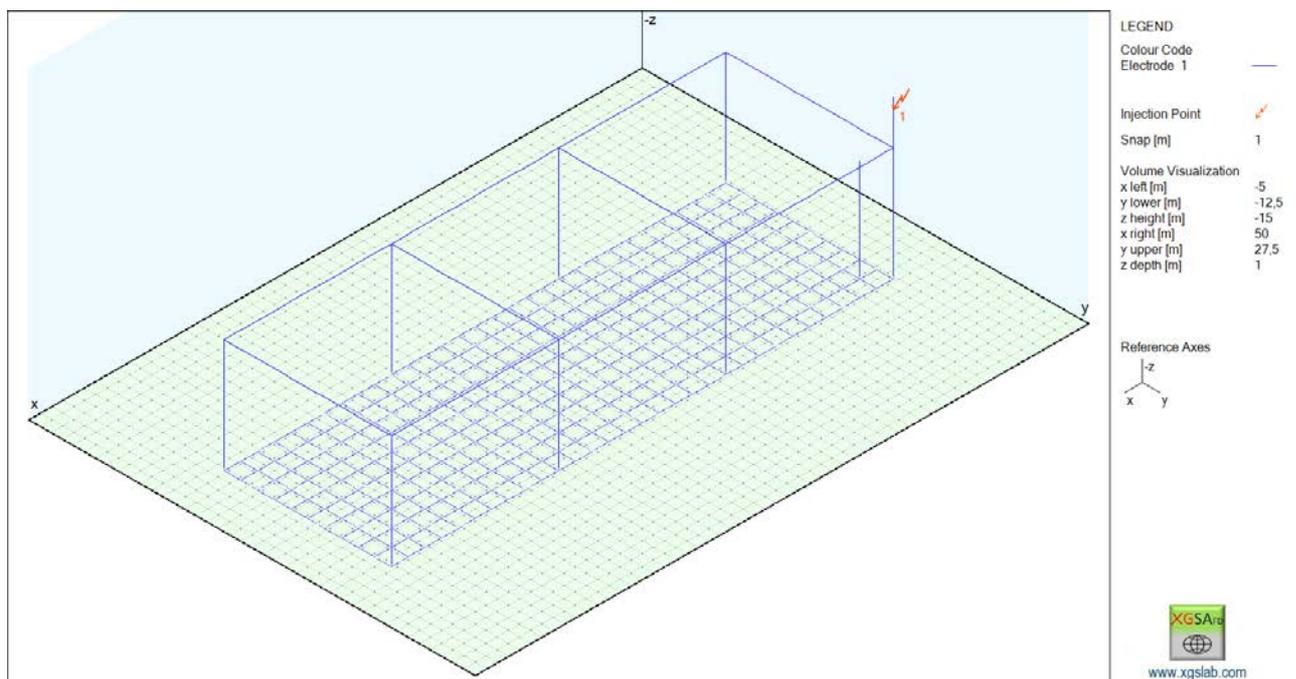
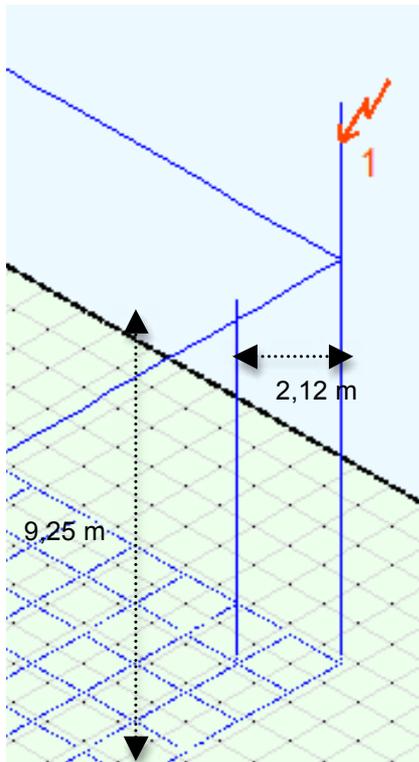


Bild 5-30 Anordnung entsprechend dem Hintergrund der Berechnung nach IEC 62305-3 mit $M' = 1,2 \mu\text{H}/\text{m}$ bei einem Abstand von 2,12 m zwischen Ableitung und Näherung. Durchmesser der Ableitung und der Näherung: 10mm Kupfer. Gebäude: 45m*15m*10m.



9,25 m= Länge vom 0,25 m tiefen Erdungsgitter bis zum Ende der Näherung in 9 m Höhe = der Länge l zur Berechnung des Trennungsabstands.

Bild 5-31 Detailansicht der Anordnung in Bild 5-30 nach dem Hintergrund der Berechnung nach IEC 62305-3 mit $M' = 1,2 \mu\text{H/m}$ bei einem Abstand von 2,12 m zwischen Ableitung und Näherung. Durchmesser der Ableitung und der Näherung: 10mm Kupfer. Länge l :9,25 m Trennungsabstand nach IEC 62305-3: 36 cm.



Bild 5-32 Wie Bild 5-30, jedoch isometrische Darstellung.

5.2.1.2 Berechnung für Klasse 1, 50 kA 0,25/100

5.2.1.2.1 Simulationsergebnisse für 100 Ohm, Sinusstrom, 1 MHz bzw. 314kA/μs

Das Erdoberflächenpotential in Bild 5-33 und Bild 5-34 zeigt einen **stark asymmetrischen Verlauf**. Das liegt an dem räumlich mehr ausgedehnten Erdungsgitter und der Stromspeisung an dessen Kante.

Zum weiteren Verständnis ist in Bild 5-36 der Verlauf des Erdoberflächenpotentials entlang der gestrichelten Linie dargestellt. Hier zeigt sich, wie bereits in der 3 D Darstellung in Bild 5-34, der Abfall des Erdoberflächenpotentials im Bereich der Näherung. Es fällt auf, dass der Abfall hier relativ gering ist. Erst bei größeren Abständen von der Ableitung fällt das Erdoberflächenpotential steiler ab.

Die Stromaufteilung auf einzelne Ableitungen lässt sich anhand des Magnetfeldes gut visualisieren, siehe Bild 5-35.

Mit dem Programm GSA_FD lassen sich jetzt die Potentialverläufe einzelner Leiter darstellen. Dabei sind Betrag, Realteil und Imaginärteil einzeln abzulesen. Die Verläufe sind in Bild 5-37 und Bild 5-38 dargestellt. Die Spannung U_T an der Näherung ergibt sich dann unter Berücksichtigung von Real- und Imaginärteil aus der Differenz der Potentiale an den entsprechenden Stellen.

Die Näherung ist nicht stromlos. Durch kapazitive Kopplung zwischen der Ableitung und der Näherung entsteht auf der Näherung ein Strom gemäß Bild 5-39.

Die Ergebnisse der Simulation im Vergleich zu analytischen Berechnungen zeigt Tabelle 5-8

Der Trennungsabstand aus der GSA_FD Berechnung stimmt exakt bis auf 10 % mit der analytischen Trennungsabstandsberechnung überein.

Der Trennungsabstand ist aber bei dem 0,25/100-Impuls (Simuliert mit 1 MHz) mit 49 cm etwa 20 % größer als bei der nach IEC 62305-3 zugrunde gelegten Stoßstromform 0,25/100. Hierbei ist zu beachten, dass auch von den beiden horizontalen Ableitungen an der Einschlagstelle ein gewisses Magnetfeld in die Näherung einkoppelt und ebenfalls eine Kopplung zur Näherung besteht.

Aus der analytischen Berechnung der induzierten Spannung und der berechneten Spannung U_T an der Trennstelle ergibt sich eine Differenz von 312 kV, die auf die Kopplung zwischen Ableitung und Näherung zurückzuführen ist.

Tabelle 5-8 Ergebnisse der Simulation mit 1 MHz und 100 Ohm

	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
Ableitung	433.029	2.210.337	2.252.355	3.185.311	V
Näherung	314.806	700.546	768.028	1.086.156	V
UT	118.223	1.509.791	1.514.413	2.141.703	V
Strom auf der Ableitung	-18.615	-247	18.617	26.328	A
kc-Koeffizient aus GSA	0,53				
Analytische Berechnung GSA sinus $kc \cdot M \cdot di/dt \cdot I = 1,19 \cdot 314 \cdot 0,53 \cdot 9,25m$				1.828.994	V
Trennungsabstand aus IEC 62305-3 mit $kc=0,44$, $l=9,25m$				0,3256	cm
Trennungsabstand aus IEC 62305-3 mit $kc=0,53$, $l=9,25m$				0,3922	cm
Trennungsabstand mit Wert aus GSA Berechnung mit $s=1.1397716/3.000.000 \cdot 100$				49	cm
Potentialunterschied $U_T - M \cdot di/dt \cdot I$				312.709	V

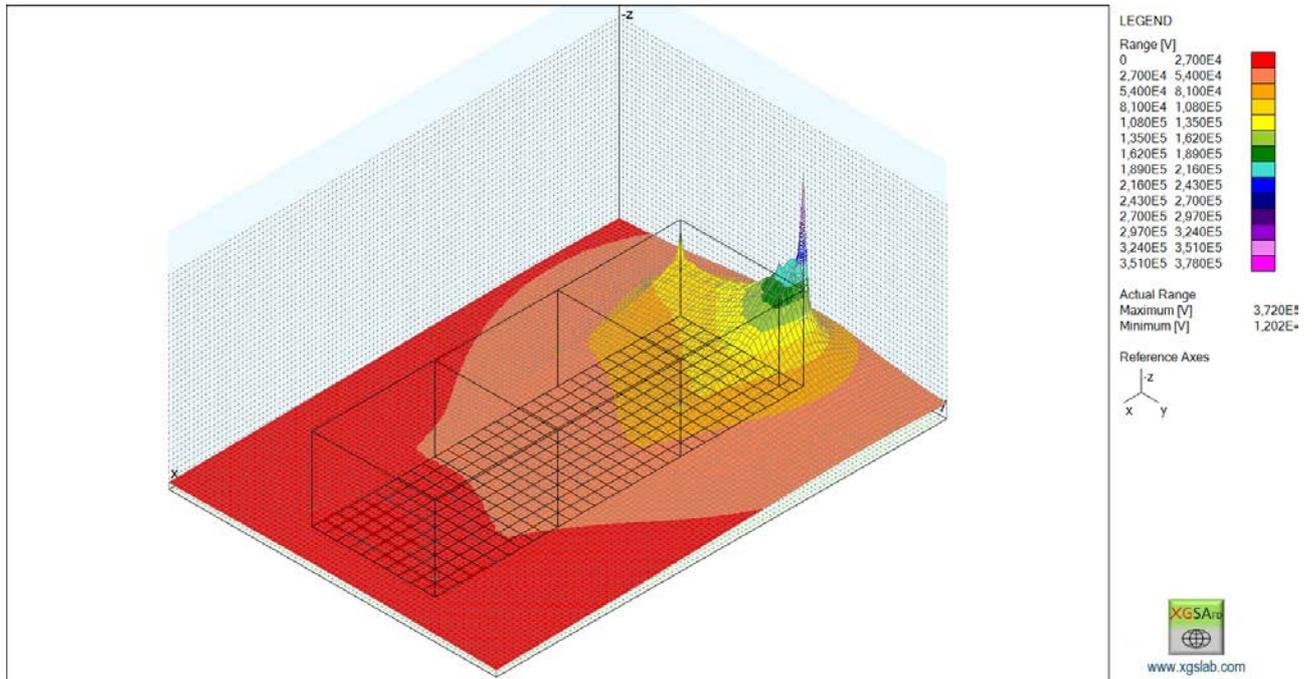


Bild 5-33 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

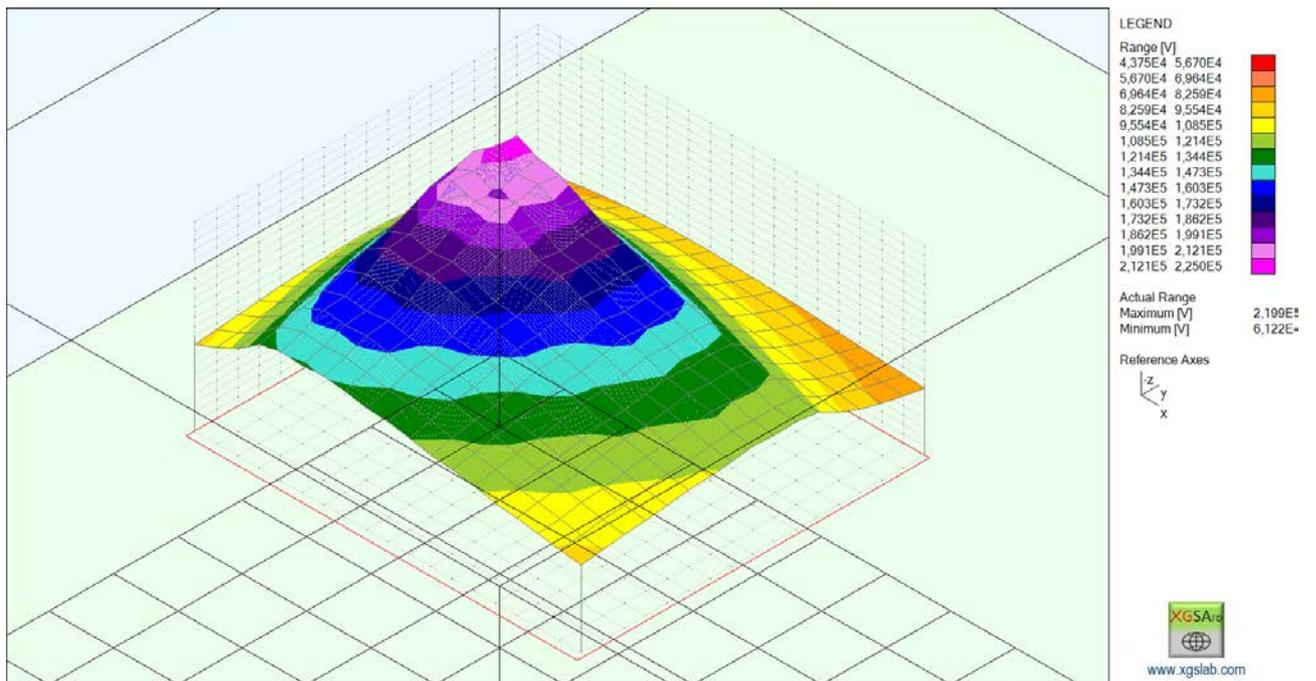


Bild 5-34 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung mit größerer Auflösung Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

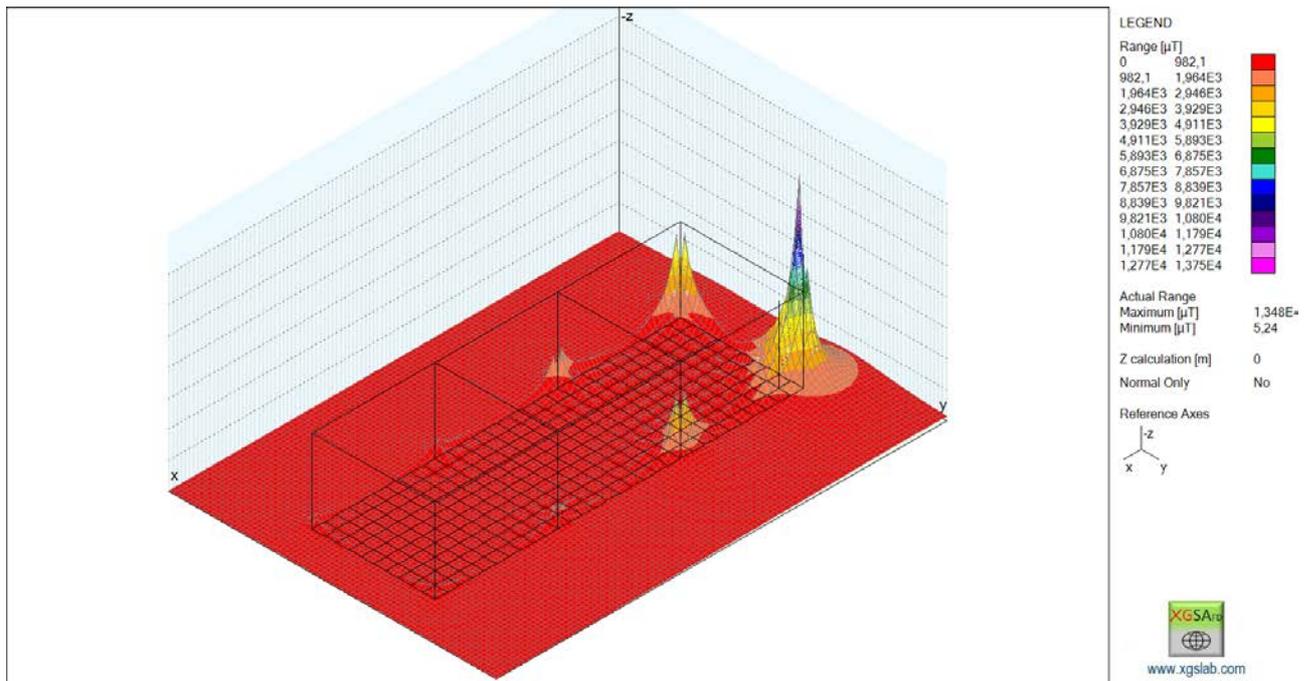


Bild 5-35 Magnetische Feldstärke in 3 D Darstellung Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

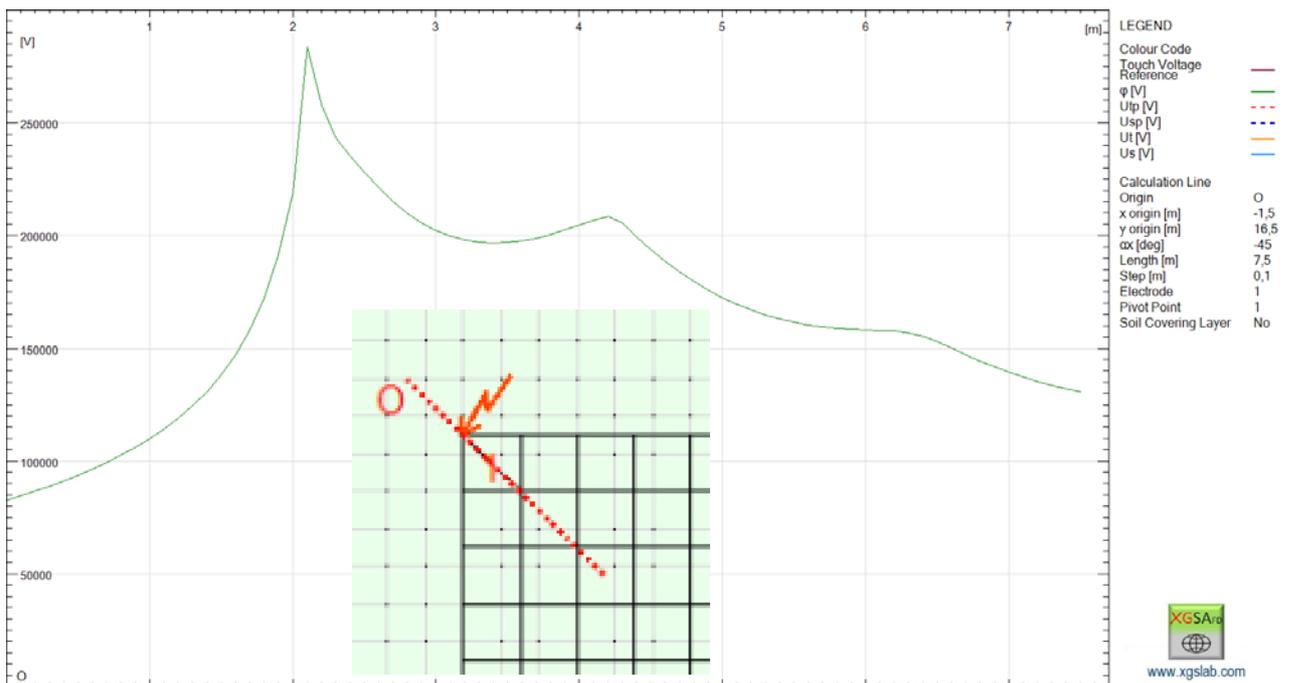


Bild 5-36 Verlauf des Erdoberflächenpotentials auf der im Bild dargestellten gestrichelten Linie. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

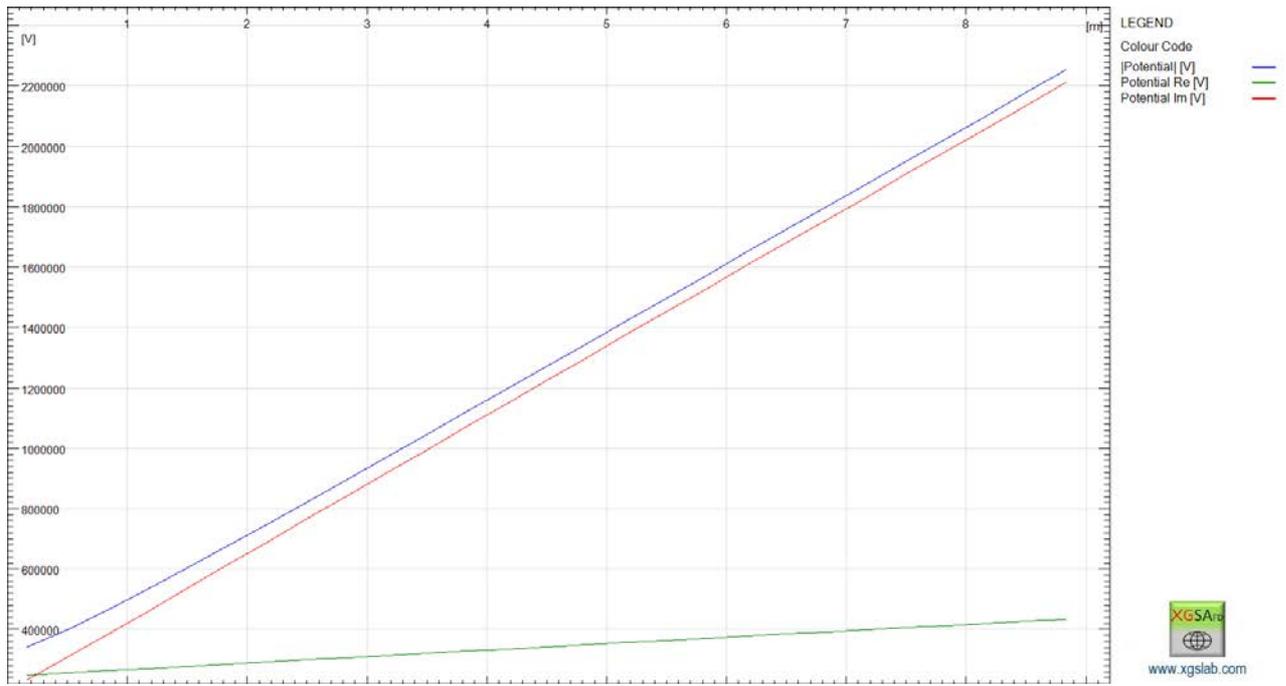


Bild 5-37 Potentialverlauf entlang der Ableitung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$ und $50 \text{ kA } 0,25/100$ entsprechend 1 MHz.

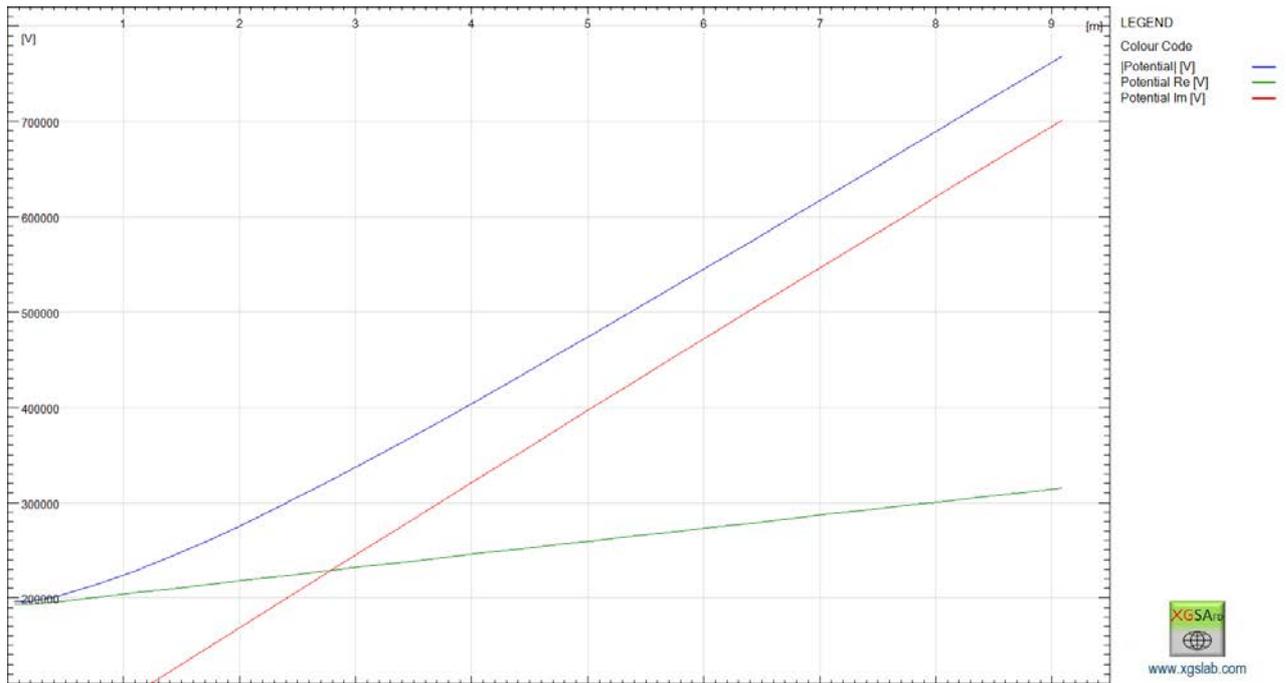


Bild 5-38 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9,25 m oberhalb Erdoberfläche. Berechnung für $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$ und $50 \text{ kA } 0,25/100$ entsprechend 1 MHz. Hinweis: Für die Trennungsabstandsberechnung ist die Länge der Ableitung von 0,25 m +9m maßgebend.

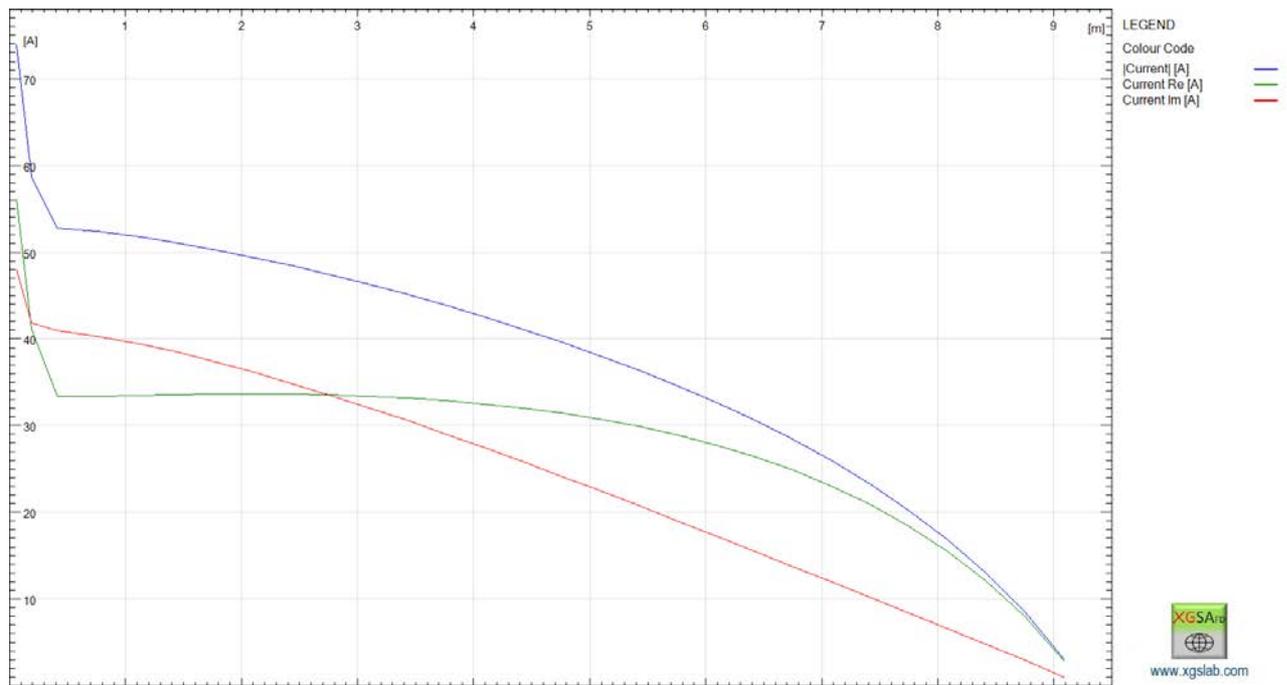


Bild 5-39 Strom entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9,25 m oberhalb Erdoberfläche. Berechnung für $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$ und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz. Hinweis:

5.2.1.2.2 Simulationsergebnisse für 1000 Ohmm, Sinusstrom, 1 MHz bzw. 314kA/ μs

Die Ergebnisse sind ähnlich denen für 100 Ohmm. Daher werden die Verläufe hier nicht wiederholt, sondern nur die deutlich unterschiedlichen Effekte. Das Erdoberflächenpotential in Bild 5-40 ist deutlich unterschiedlich. Bedingt durch den hohen spezifischen Bodenwiderstand erfolgt eine schnellere Wanderwellenausbreitung im Erdreich. Dies ist auch am Magnetfeld in Bild 5-41 zu erkennen, das ein direkter Indikator für die Stromaufteilung auf die einzelnen Ableitungen darstellt.

Hier stellt sich ein neues kc von 0,49 gegenüber 0,53 für 100 Ohmm ein. Es fließt daher weniger Strom in die Ableitung, andererseits ist das absolute Potential der Ableitung natürlich höher.

Die Ergebnisse der Simulation im Vergleich zu analytischen Berechnungen zeigt Tabelle 5-9

Tabelle 5-9 Ergebnisse der Simulation mit 1 MHz und 1000 Ohmm.

	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
Ableitung	1.172.950	2.040.901	2.353.952	3.328.990	V
Näherung	1.082.070	581.072	1.228.218	1.736.963	V
UT	90.880	1.459.829	1.462.655	2.068.507	V
Strom auf der Ableitung	-17.449	-348	17.452	24.682	A
kc-Koeffizient aus GSA	0,49				
Analytische Berechnung GSA sinus $kc \cdot M \cdot di/dt \cdot I = 1,19 \cdot 314 \cdot 0,49 \cdot 9,25\text{m}$				1.714.620	V
Trennungsabstand aus IEC 62305-3 mit $kc=0,44, l=9,25\text{m}$				0,3256	cm
Trennungsabstand aus IEC 62305-3 mit $kc=0,49, l=9,25\text{m}$				0,3626	cm
Trennungsabstand mit Wert aus GSA Berechnung				47,4	cm
Potentialunterschied $U_T - M \cdot di/dt \cdot I$				353.886	V

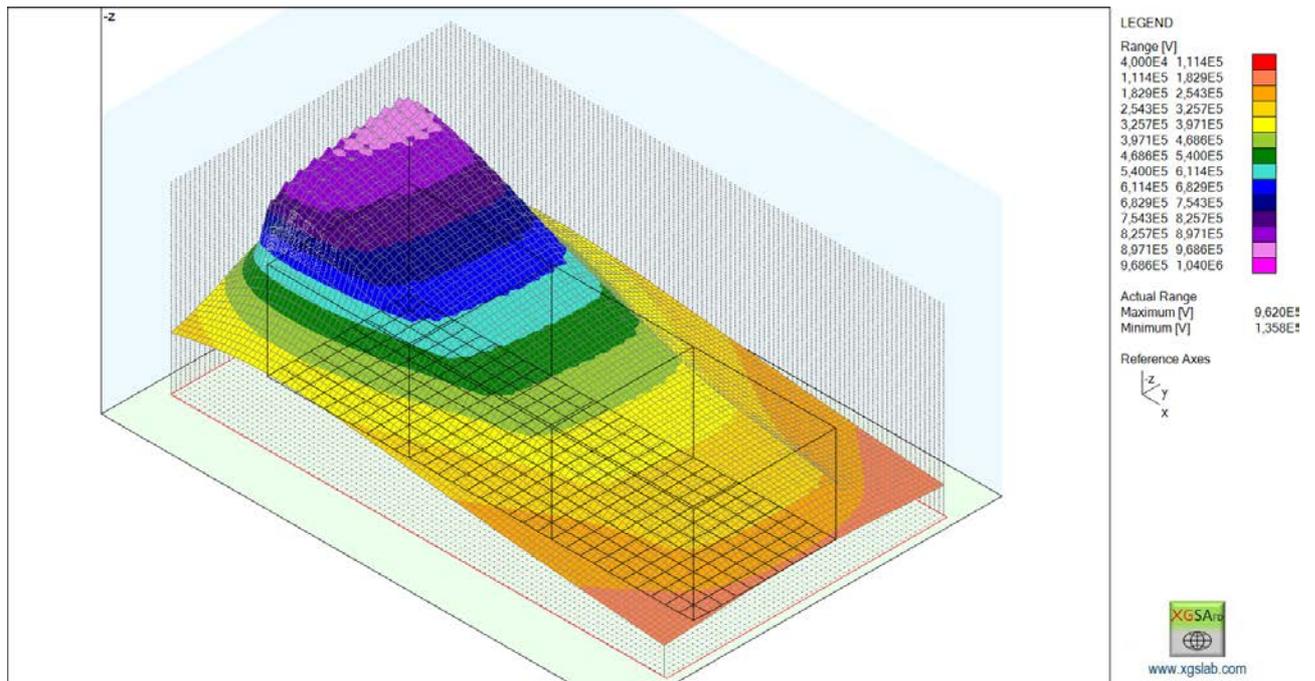


Bild 5-40 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

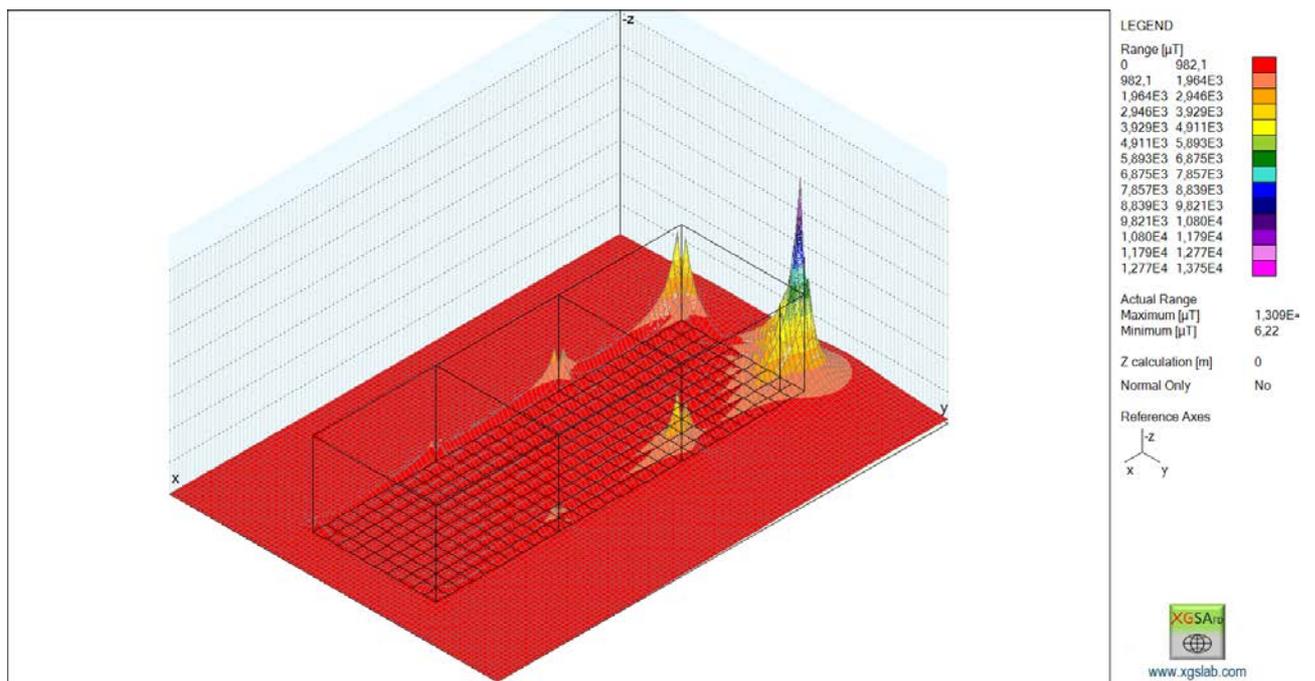


Bild 5-41 Magnetische Feldstärke in 3 D Darstellung Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

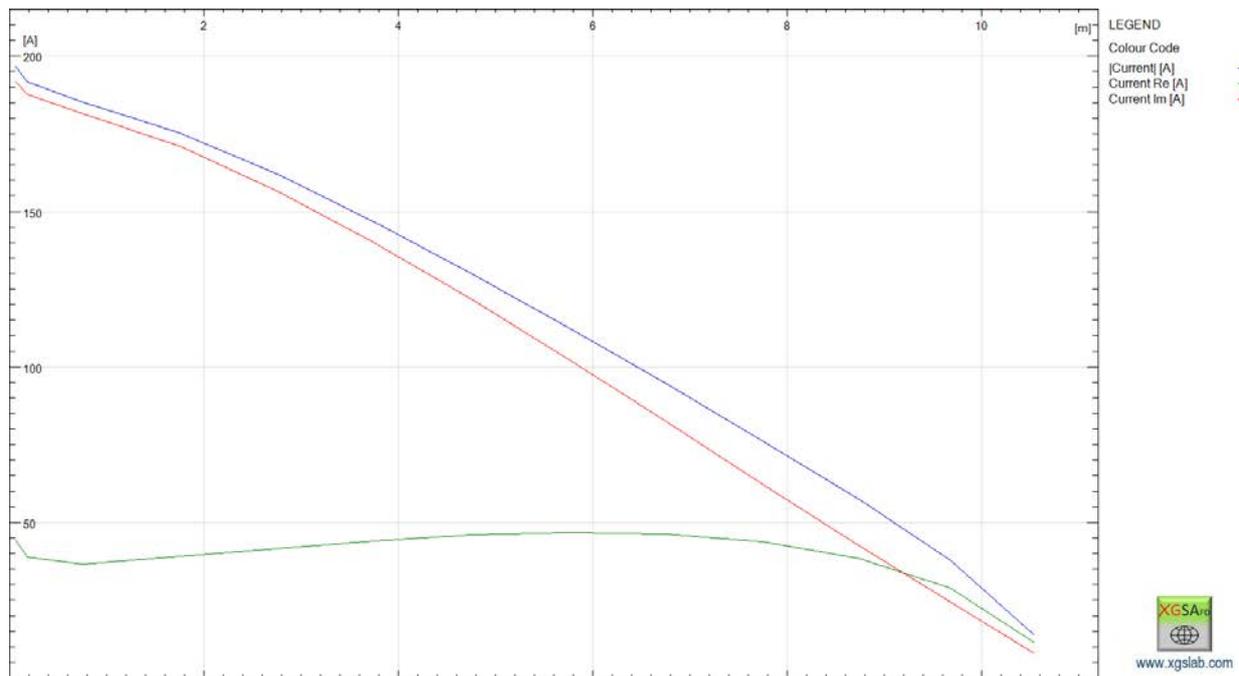


Bild 5-42 Strom entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9,25 m oberhalb Erdoberfläche. Berechnung für $\rho_E = 1000 \text{ Ohmm}$ und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

5.2.1.3 Berechnung für Klasse 1, 100 kA, 1/200

Die Berechnung für den Stoßstrom 1/200 erfolgt mit Hinblick auf die Tatsache, dass die Steilheit zwar nur noch die Hälfte des 0,25/100 Impulses beträgt, andererseits aber die Spannungsfestigkeit um mehr als die Hälfte absinkt, siehe Bild 7-3.

Es soll daher festgestellt werden, ob der 1/200 Impuls der kritische Fall ist.

5.2.1.3.1 Simulationsergebnisse für 100 Ohmm, Sinusstrom, 0,25 MHz bzw. 157kA/μs

Das Erdoberflächenpotential in Bild 5-43 zeigt einen **asymmetrischen Verlauf**.

Die Stromaufteilung auf einzelne Ableitungen lässt sich anhand des Magnetfeldes gut visualisieren, siehe Bild 5-44.

Mit dem Programm GSA_FD lassen sich jetzt die Potentialverläufe einzelner Leiter darstellen. Dabei sind Betrag, Realteil und Imaginärteil einzeln abzulesen. Die Verläufe sind in Bild 5-45 und Bild 5-46 dargestellt. Die Spannung U_T an der Näherung ergibt sich dann unter Berücksichtigung von Real- und Imaginärteil aus der Differenz der Potentiale an den entsprechenden Stellen.

Für die Ermittlung der Trennungsabstände ist hier aber **die Stoßkennlinie für 1/200** zu verwenden, vergl. Abschnitt 7.2. Die Durchschlagsspannung für eine Stab-Stab-Funkenstrecke von 1 m Schlagweite reduziert sich bei 1/200 auf 1200 kV/m.

Die Ergebnisse der Simulation im Vergleich zu analytischen Berechnungen zeigt Tabelle 5-10

Tabelle 5-10 Ergebnisse der Simulation mit 0,25 MHz und 100 Ohmm

	Re	Im	Betrag,rms	Peak
Ableitung	334.121	1.143.785	1.191.588	1.685.159 V
Näherung	252.771	402.866	475.599	672.598 V
UT	81.350	740.919	745.372	1.054.115 V
Strom auf der Ableitung	-33.226	-1.206	33.248	47.020 A
kc-Koeffizient aus GSA	0,47			
Analytische Berechnung GSA sinus $kc \cdot M \cdot di/dt \cdot I = 1,19 \cdot 314 \cdot 0,47 \cdot 9,25m$				816.611 V
Trennungsabstand mit Wert aus GSA				68,4 cm
Potentialunterschied $U_T - M \cdot di/dt \cdot I$				237.504 V

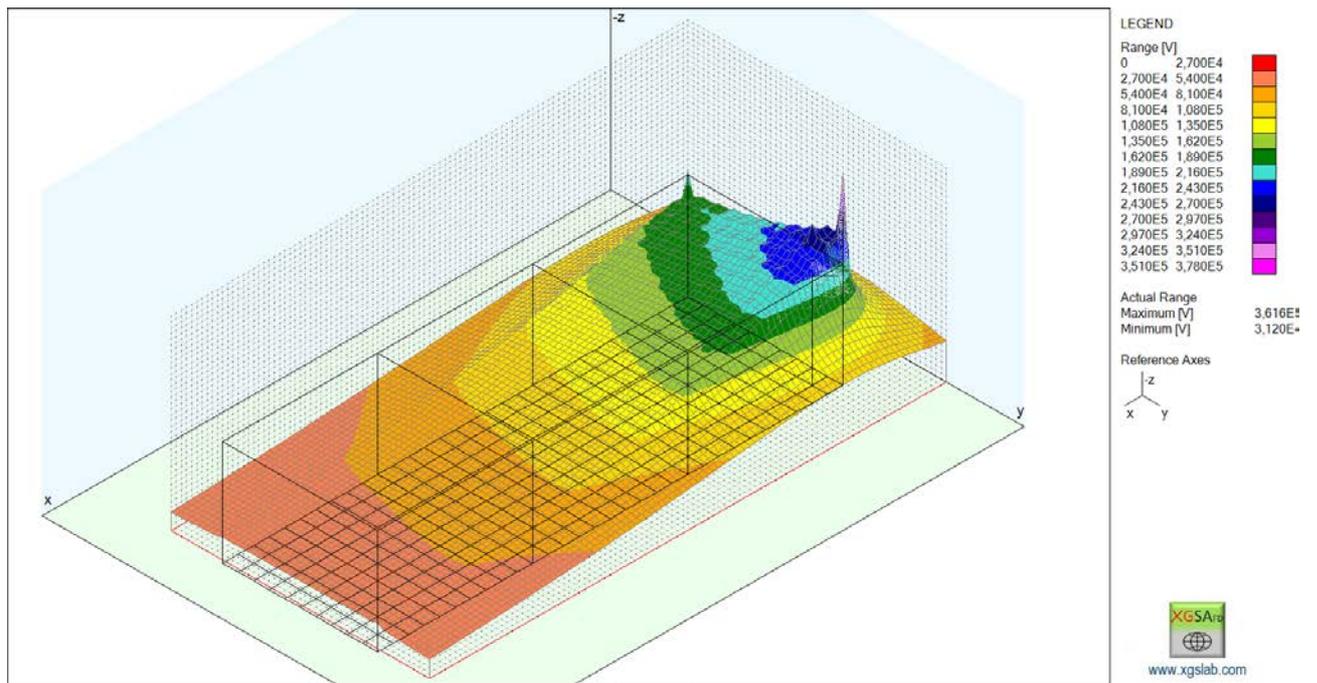


Bild 5-43 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

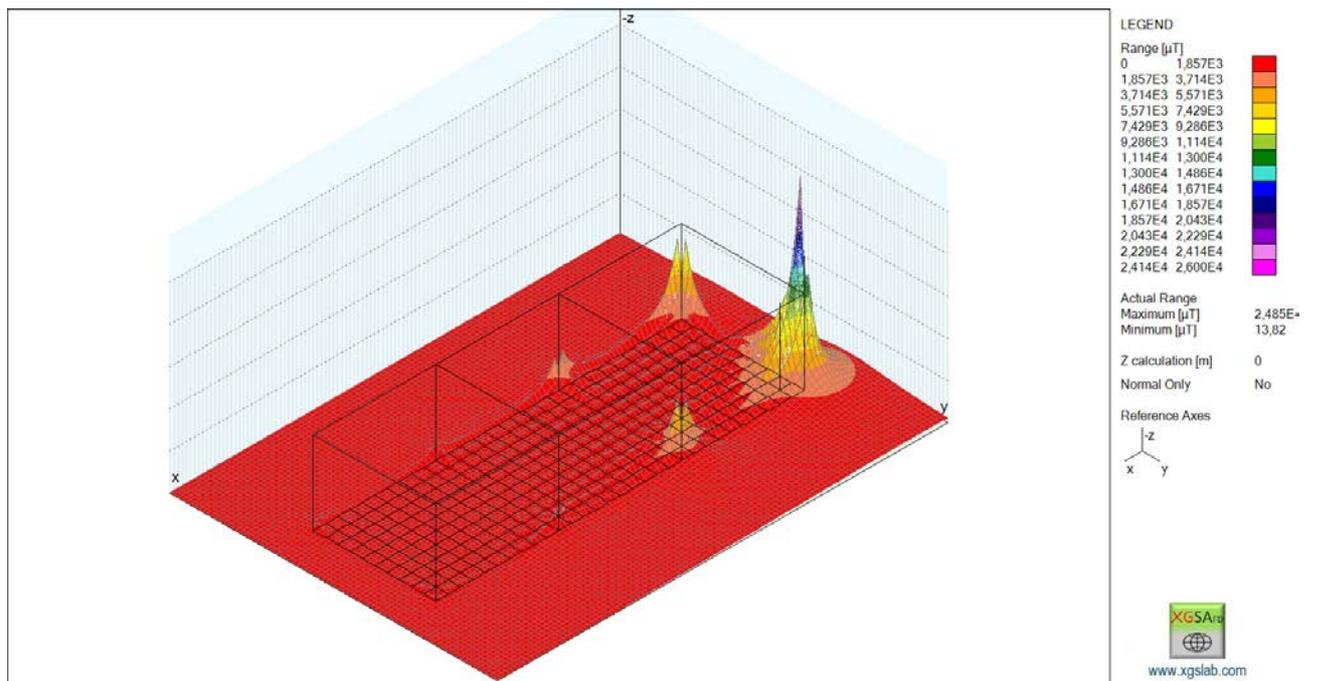


Bild 5-44 Magnetfeld in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

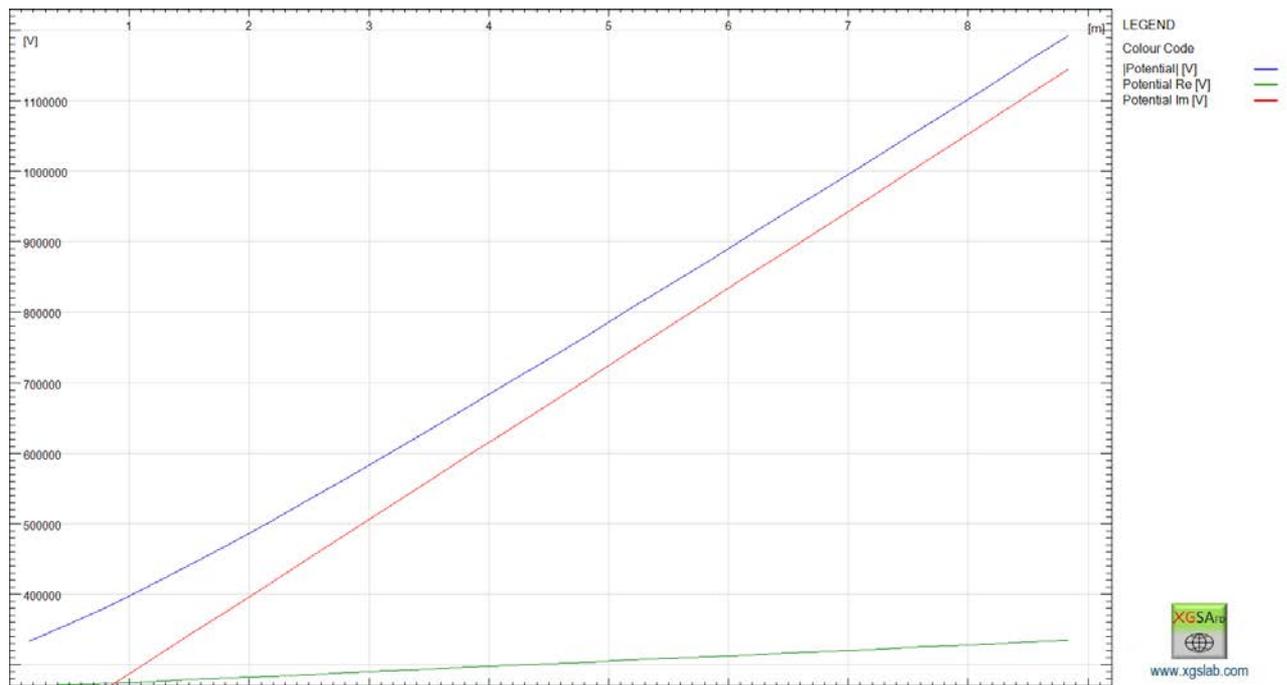


Bild 5-45 Potentialverlauf entlang der Ableitung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

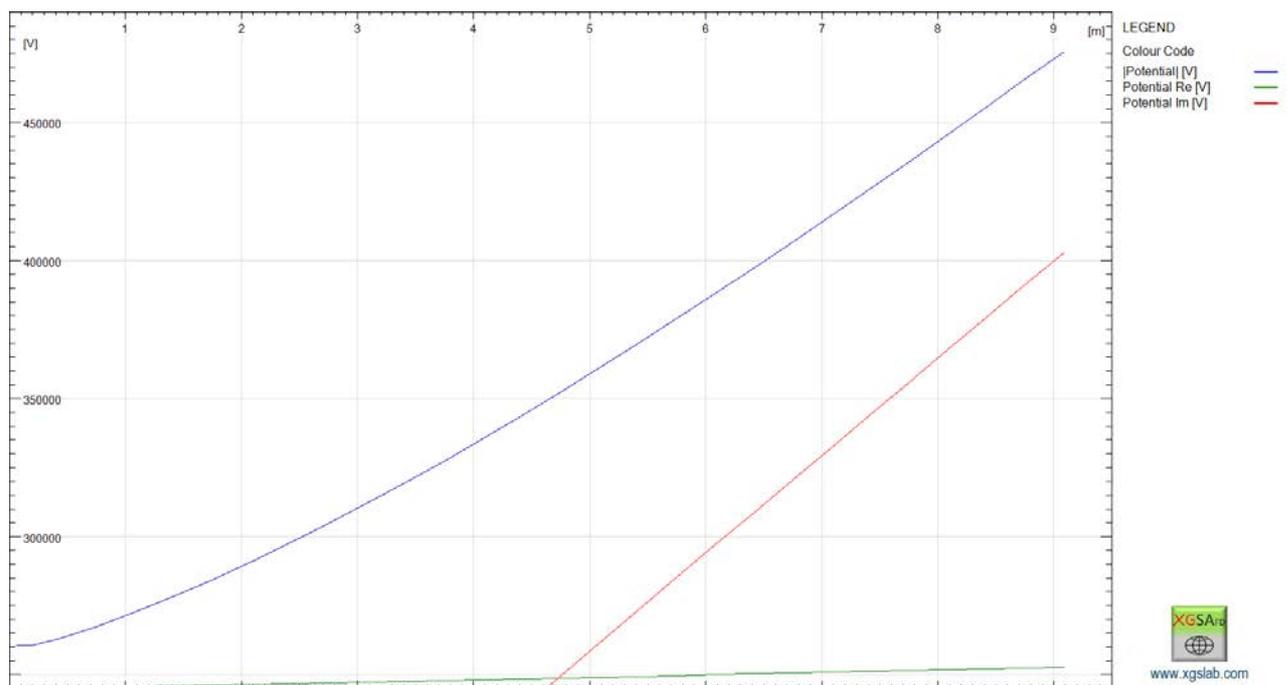


Bild 5-46 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9,25 m oberhalb Erdoberfläche. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz. Hinweis: Für die Trennungsabstandsberechnung ist die Länge der Ableitung von 0,25 m +9m maßgebend.

5.2.1.3.2 Simulationsergebnisse für 1000 Ohmm, Sinusstrom, 0,25 MHz bzw. 157kA/μs

Das Erdoberflächenpotential in Bild 5-47 zeigt einen **ausgeglichener Verlauf**.

Die Stromaufteilung auf einzelne Ableitungen lässt sich anhand des Magnetfeldes gut visualisieren, siehe Bild 5-48.

Mit dem Programm GSA_FD lassen sich jetzt die Potentialverläufe einzelner Leiter darstellen. Dabei sind Betrag, Realteil und Imaginärteil einzeln abzulesen. Die Verläufe sind in Bild 5-49 und Bild 5-50 dargestellt.

Die Spannung U_T an der Näherung ergibt sich dann unter Berücksichtigung von Real- und Imaginärteil aus der Differenz der Potentiale an den entsprechenden Stellen.

Für die Ermittlung der Trennungsabstände ist hier aber **die Stoßkennlinie für 1/200** zu verwenden, vergl. Abschnitt 7.2. Die Durchschlagsspannung für eine Stab-Stab-Funkenstrecke von 1 m Schlagweite reduziert sich bei 1/200 auf 1200 kV/m.

Es ergibt sich ein Trennungsabstand von 75,5 cm. Wegen des größeren spezifischen Bodenwiderstands ergibt sich ein kc-Koeffizient von 0,44, d.h in der Ableitung fließt etwas weniger Strom.

Die Ergebnisse der Simulation im Vergleich zu analytischen Berechnungen zeigt Tabelle 5-11

Tabelle 5-11 Ergebnisse der Simulation mit 0,25 MHz und 1000 Ohmm

	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
Ableitung	1.385.716	1.202.253	1.834.563	2.594.464	V
Näherung	1.310.324	566.160	1.427.405	2.018.656	V
UT	75.392	636.093	640.545	905.868	V
Strom auf der Ableitung	-30.885	-613	30.891	43.687	A
kc-Koeffizient aus GSA	0,44				

Analytische Berechnung GSA sinus $kc \cdot M \cdot di / dt \cdot I = 1,19 \cdot 157 \cdot 0,47 \cdot 9,25m$ 758.725 V

Trennungsabstand mit Wert aus GSA **58,75** cm
Potentialunterschied $U_T - M \cdot di / dt \cdot I$ 147.143 V

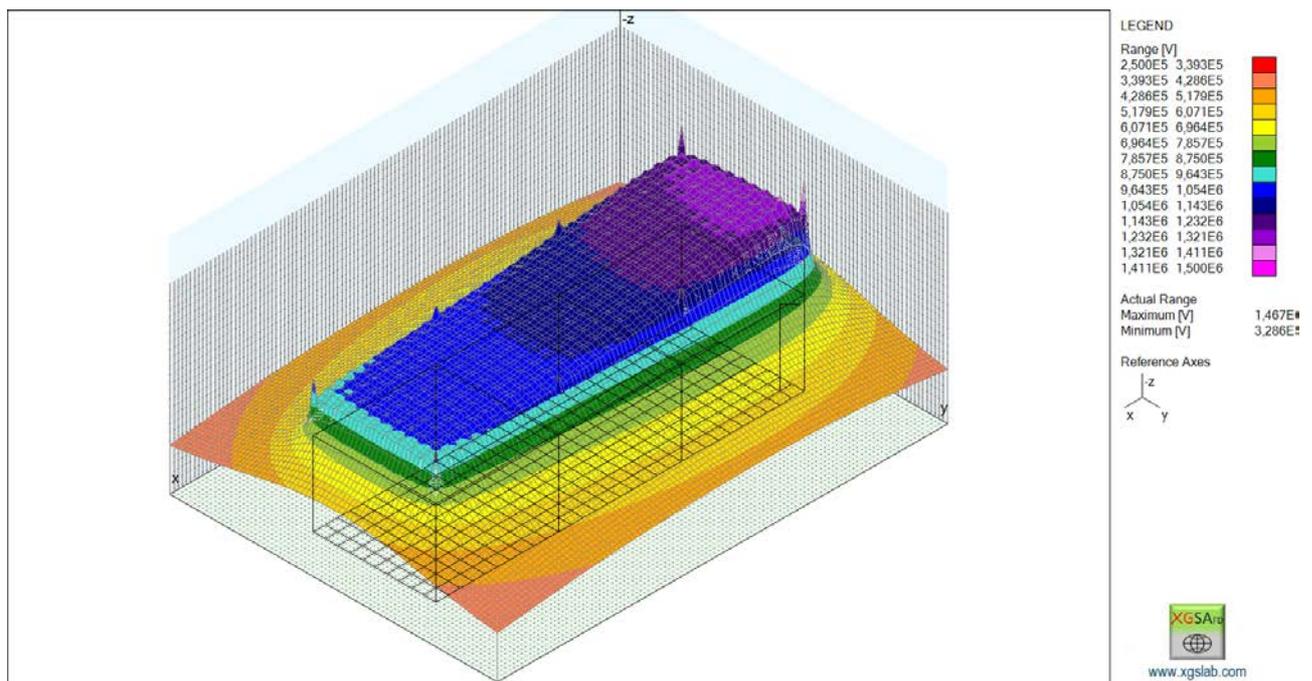


Bild 5-47 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

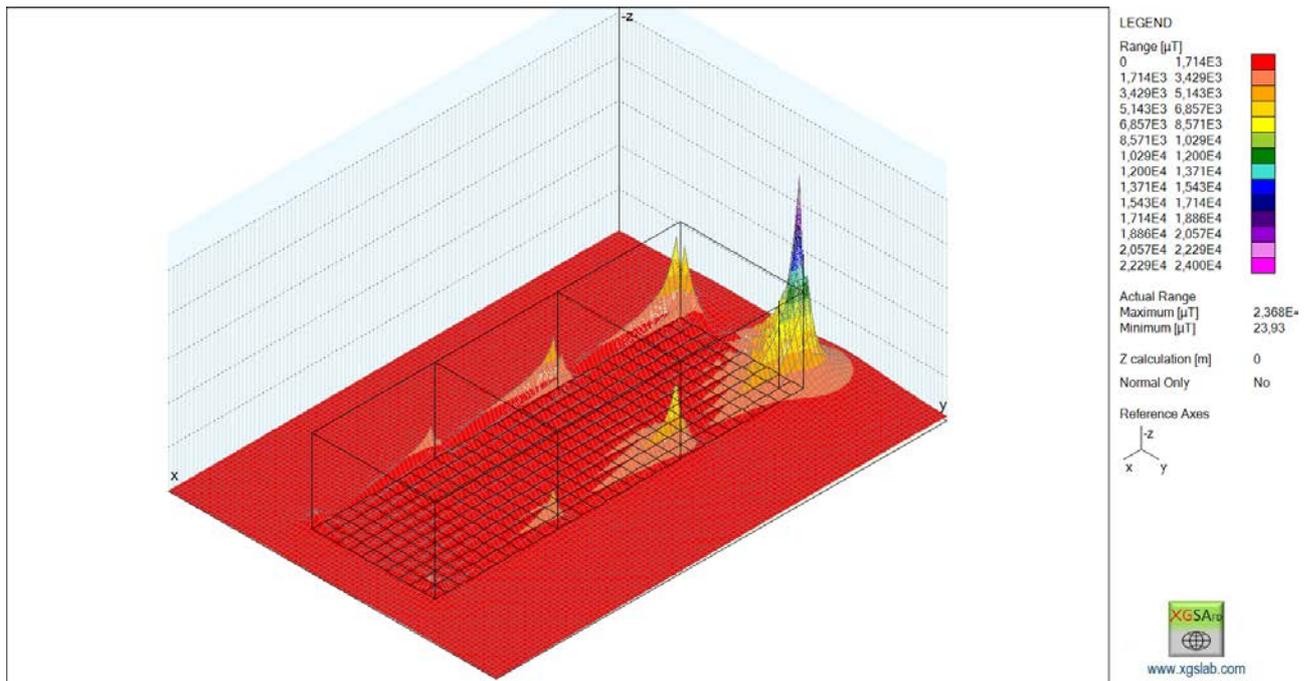


Bild 5-48 Magnetfeld in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

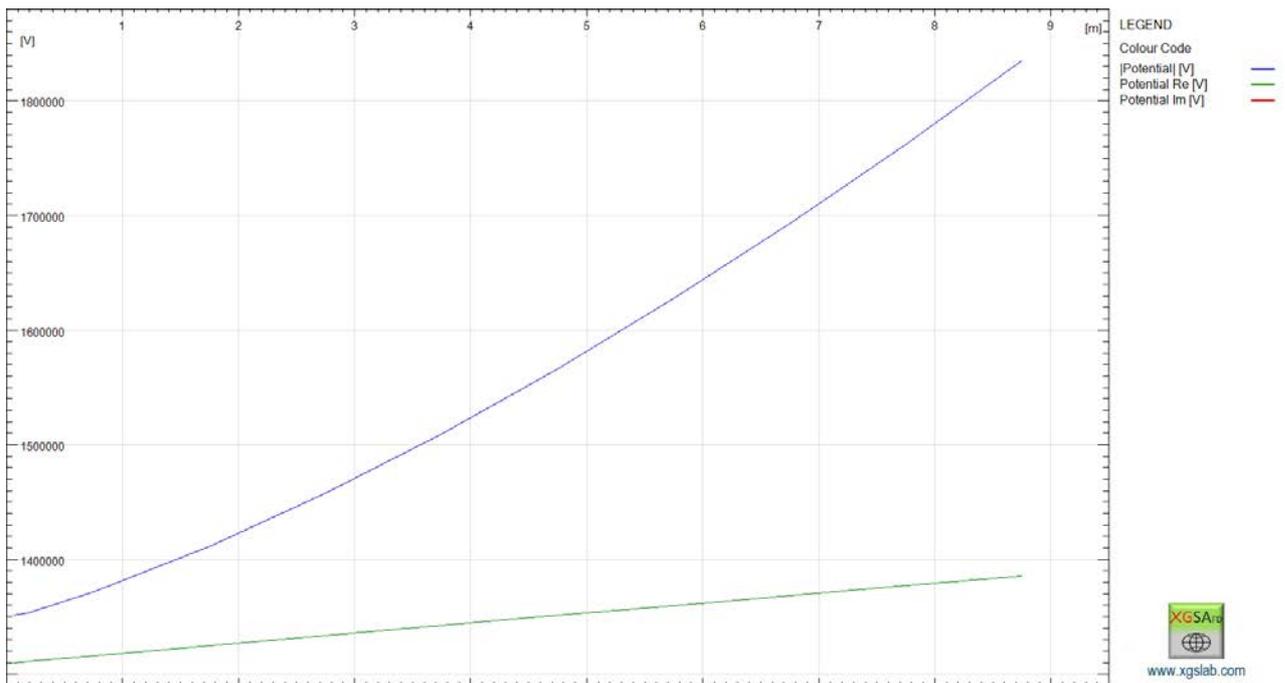


Bild 5-49 Potentialverlauf entlang der Ableitung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

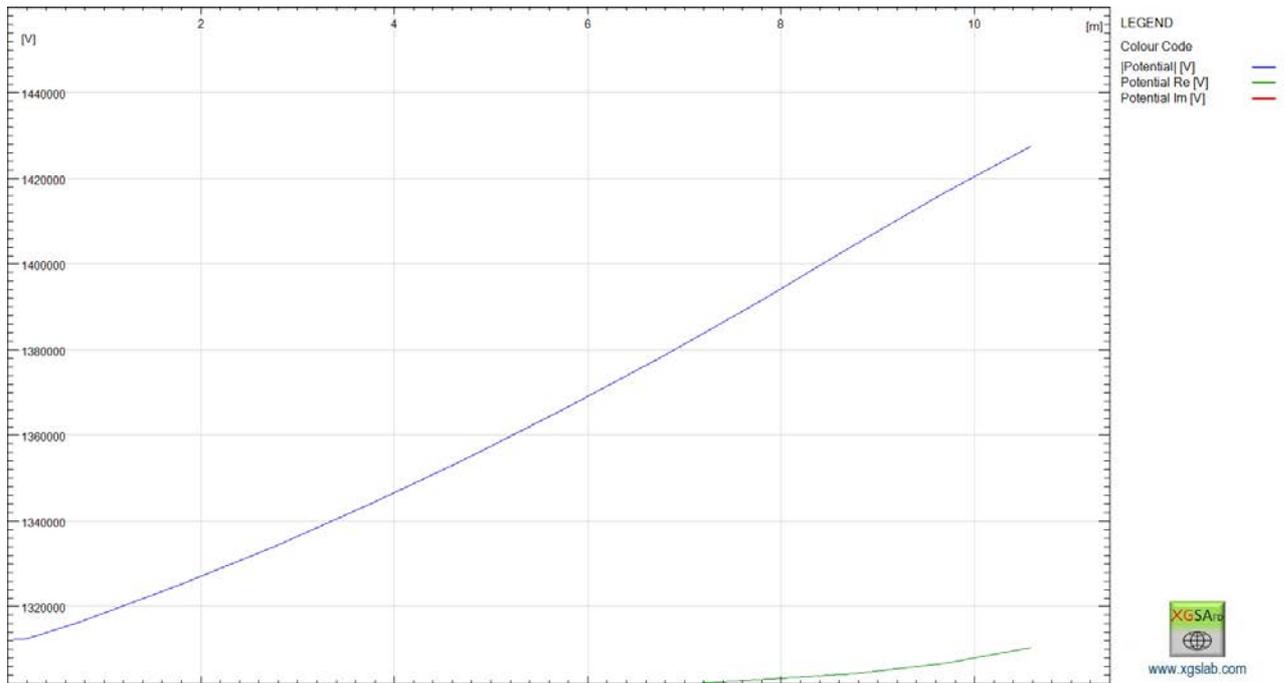


Bild 5-50 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9,25 m oberhalb Erdoberfläche. Berechnung für $\rho_E = 1000 \text{ Ohmm}$ und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz. Hinweis: Für die Trennungsabstandsberechnung ist aber die Länge der Ableitung von 0,25 m +9m maßgebend.

5.2.1.4 Vergleich der Ergebnisse

Tabelle 5-12 Vergleich der Ergebnisse.

	di/dt	M*	Spannung an Trennstelle		Trennungs-Abstand	
			U _T kV		S ¹⁾ m	
	kA/μs	μH/m	100 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	1000 Ohmm
		0,25/100				
IEC Methode (Zischank) Rampenmethode Mit kc=0,44	200	1,2	975¹⁾		0,325	
Simulation mit GSA_FD mit 1 MHz	314	1,2	2141	2068	0,49	0,47
		1/200 100 kA				
Simulation mit GSA_FD mit 0,25 MHz	157	1,2	1054	906	0,68	0,59

1) Der geringere Wert bei 0,25 MHz gegenüber 1 MHz resultiert aus der Stoßkennlinie, siehe Abschnitt 7.3.

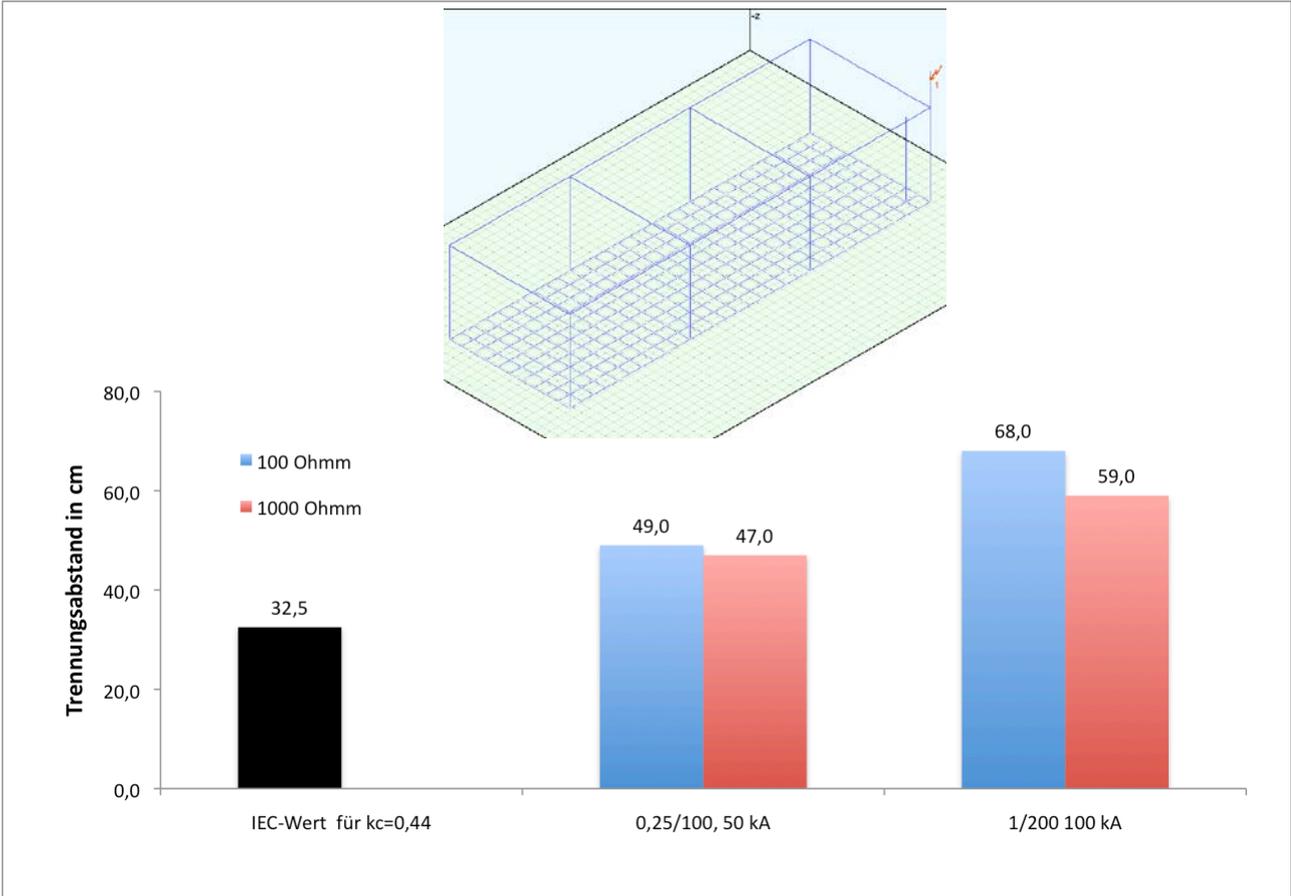
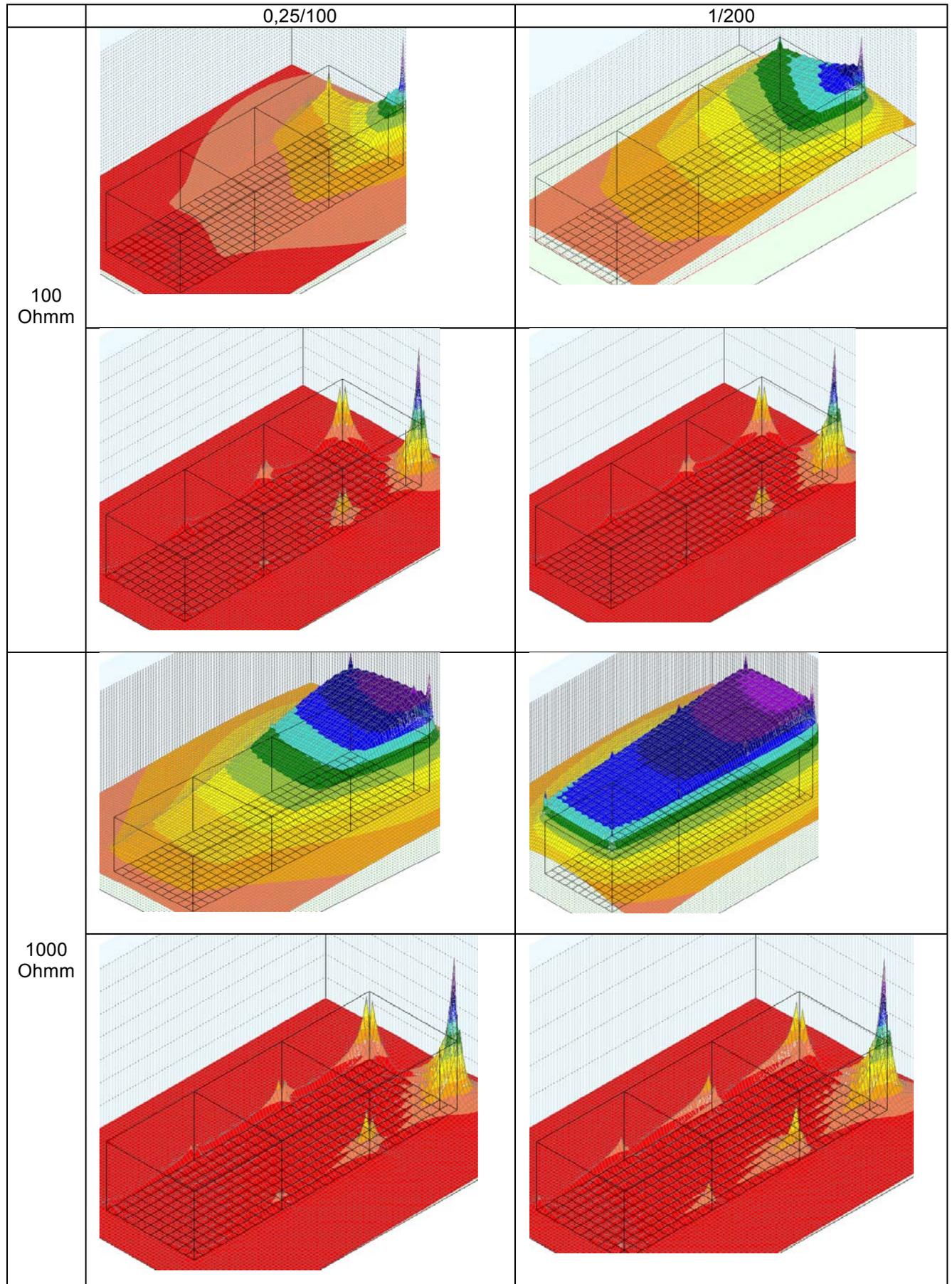


Bild 5-51 Berechnete Trennungsabstände für das Gebäude mit Näherung nach IEC 62305-3

Tabelle 5-13 Vergleichende Darstellung der Erdoberflächenpotentiale und der Magnetfelder auf der Erdoberfläche für das Gebäude mit Näherung nach IEC 62305-3



5.2.2 Trennungsabstandsberechnung an einem komplexen Gebäude mit Näherung in großem Abstand von der Ableitung

5.2.2.1 Modellgeometrie

Das untersuchte Gebäude mit den Abmessungen 45m*15m*10m zeigt Bild 5-52. Es steht auf einem Maschengitter mit der Maschenweite 1,5m x 1,5m. Das Maschengitter ist in 0,25m Tiefe angeordnet. Eine Näherung ist gemäß Bild 5-53 in einem Abstand von 0,58 m angeordnet und etwa 45 m entfernt an das Erdungsgitter angeschlossen. Der Abstand von 0,58 cm ergibt sich iterativ durch Berechnung des notwendigen Trennungsabstands mit GSA_FD.

Nur zum Vergleich: Die Gegeninduktivität beträgt:

$$M' = \frac{1,256\mu\text{H} / \text{m}}{2\pi} \cdot \ln \frac{44,5}{0,005} = 1,82\mu\text{H} / \text{m} \quad \text{Gleichung 5-6}$$

Eine einfache analytische Berechnung der induzierten Spannung ist hier nicht mehr möglich, da von den anderen Ableitungen Magnetfelder wirken, die mit einem anderen Strom verkoppelt sind.

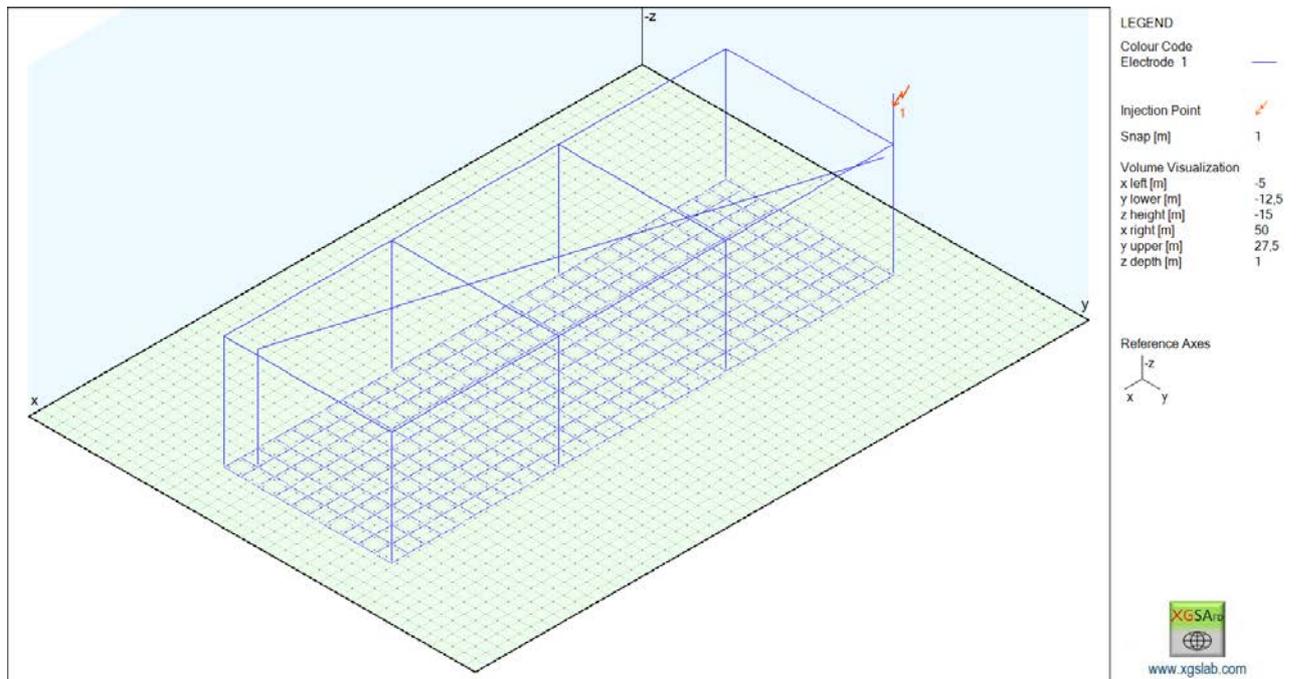


Bild 5-52 Anordnung entsprechend dem Hintergrund der Berechnung nach IEC 62305-3 mit $M' = 1,81\mu\text{H}/\text{m}$ bei einem Abstand von 0,58 m zwischen Ableitung und Näherung. Durchmesser der Ableitung und der Näherung: 10mm Kupfer.

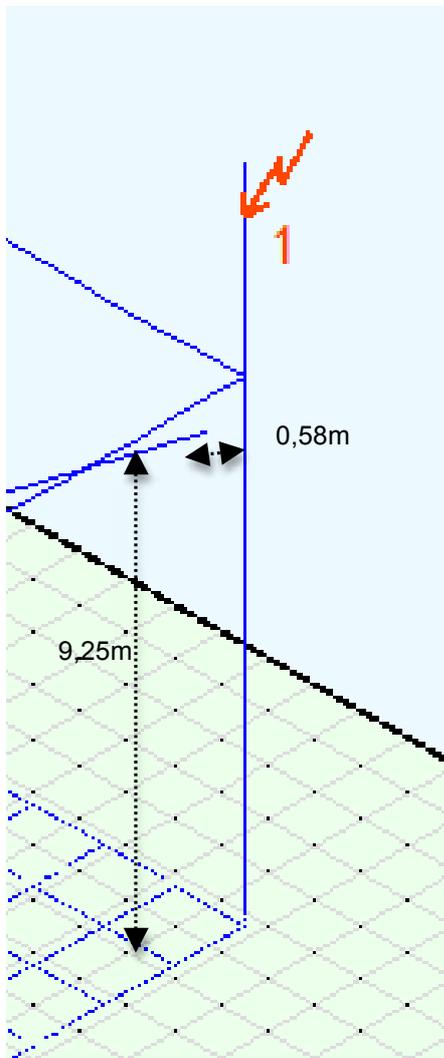


Bild 5-53 Detailansicht der Anordnung in Bild 5-38 nach dem Hintergrund der Berechnung nach IEC 62305-3 mit $M' = 1,8 \mu\text{H/m}$ bei einem Abstand von 0,58 m zwischen Ableitung und Näherung. Durchmesser der Ableitung und der Näherung: 10mm Kupfer. Länge l :9,25 m, von der Näherung bis zum Anschluss an das Erdungsgitter.

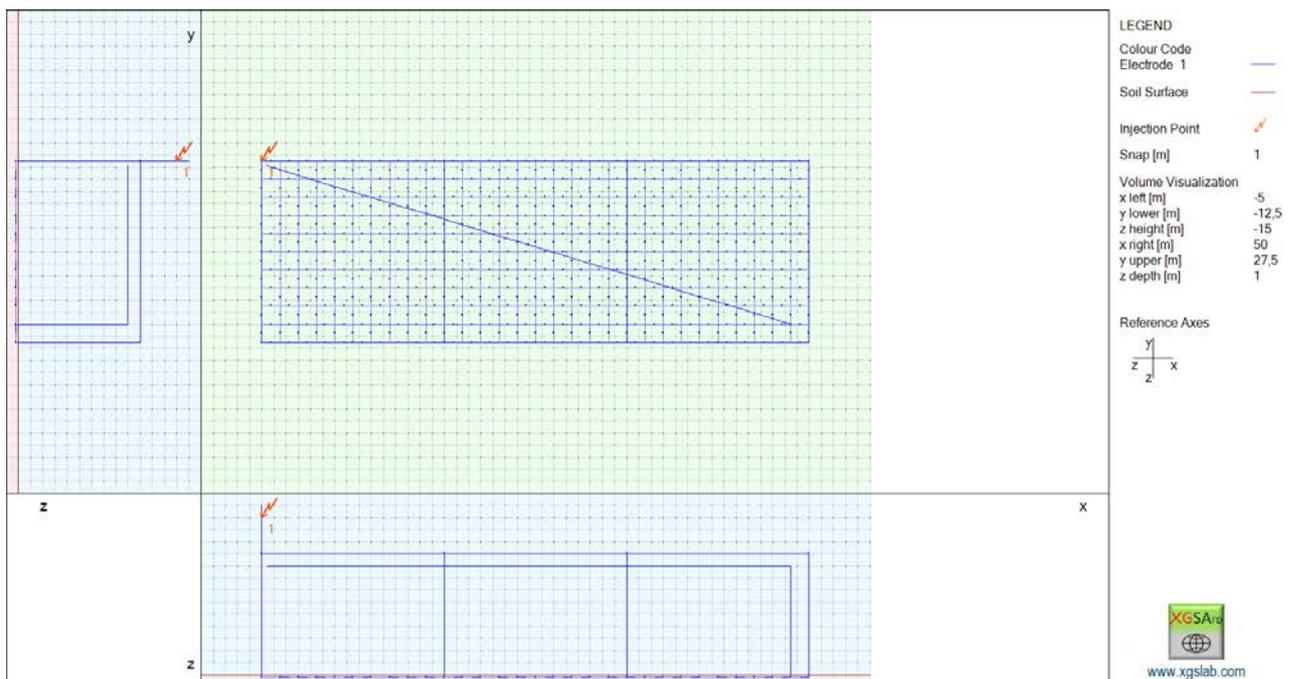


Bild 5-54 Wie Bild 5-52, jedoch isometrische Darstellung.

5.2.2.2 Berechnung für Klasse 1 50 kA 0,25/100

5.2.2.2.1 Simulationsergebnisse für 100 Ohm, Sinusstrom 1 MHz bzw. 314 kA/μs

Das Erdoberflächenpotential ist in diesem Falle identisch mit dem in Bild 5-33 und Bild 5-34 dargestellten **stark asymmetrischen Verlauf**.

Mit dem Programm GSA_FD lassen sich jetzt die Potential- und Stromverläufe sowie das Magnetfeld auf der Erdoberfläche einzelner Leiter darstellen. Dabei sind Betrag, Realteil und Imaginärteil einzeln abzulesen. Die Verläufe sind in Bild 5-55 und Bild 5-60 dargestellt. Die Spannung U_T an der Näherung ergibt sich dann unter Berücksichtigung von Real- und Imaginärteil aus der Differenz der Potentiale an den entsprechenden Stellen.

Die Stromverläufe auf den beiden Ableitungen, vergl. Bild 5-56 bis Bild 5-58 zeigen eine Asymmetrie. Dies macht deutlich, dass eine analytische Berechnung allein mit der Gegeninduktivität nicht zielführend ist. Die Auswertung zeigt Tabelle 5-14

Tabelle 5-14 Ergebnisse der Simulation mit 1 MHz und 100 Ohm.

Potential	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
2.167.710	433.021	2.203.681	2.245.822	3.176.072	V
496.197	281.751	436.161	519.250	734.330	V
U_T	151.270	1.767.520	1.773.981	2.508.788	V
Strom auf der Ableitung	-18.615	-247	18.617	26.328	A
kc-Koeffizient aus GSA	0,527				

Trennungsabstand aus GSA Berechnung

57,4 cm

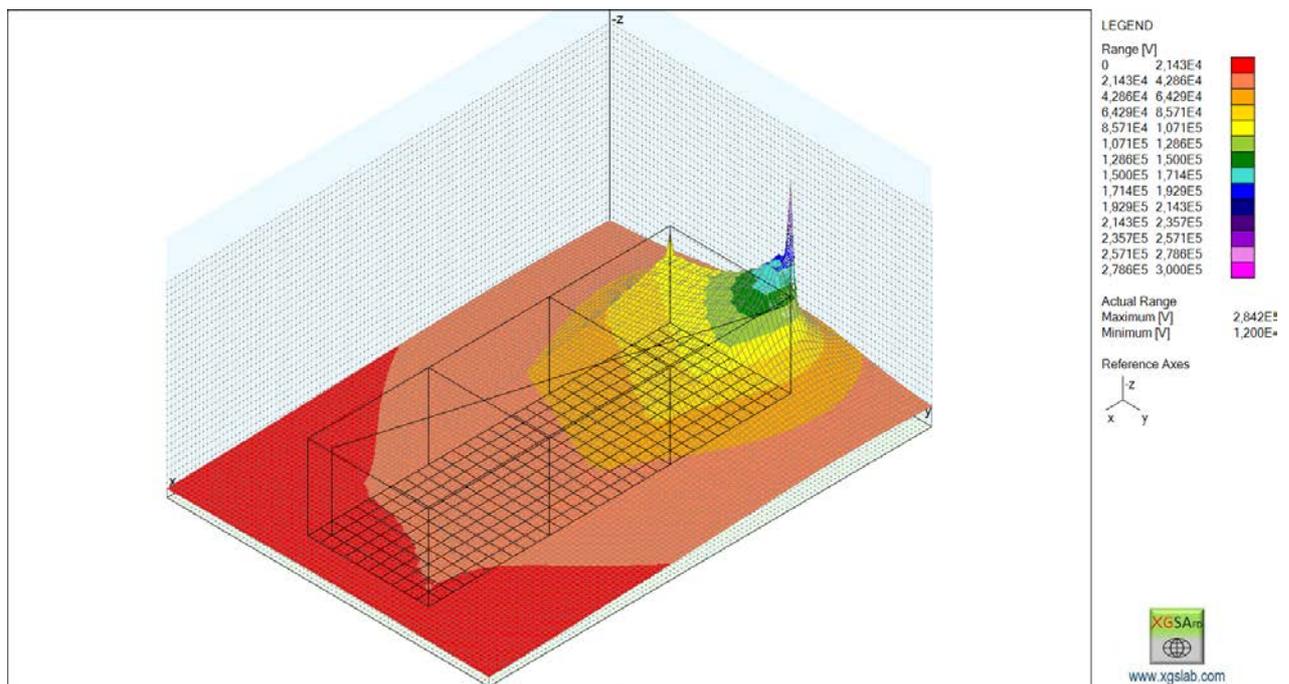


Bild 5-55 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

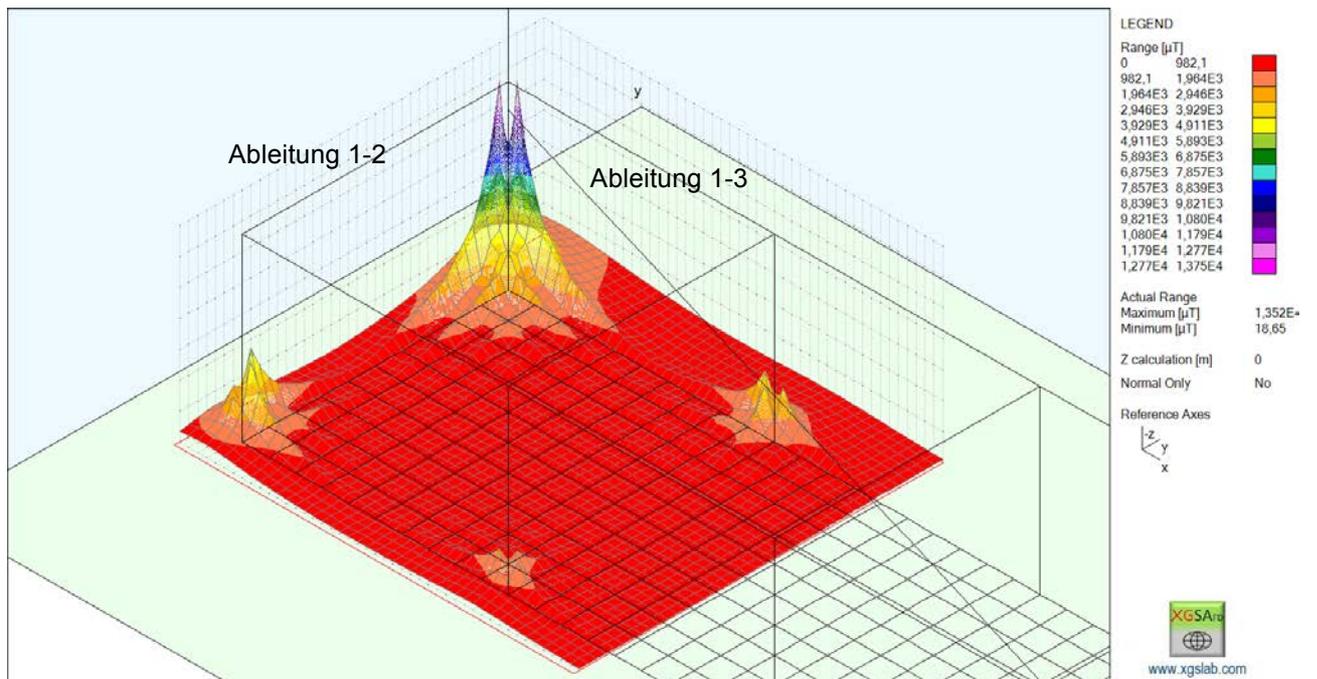
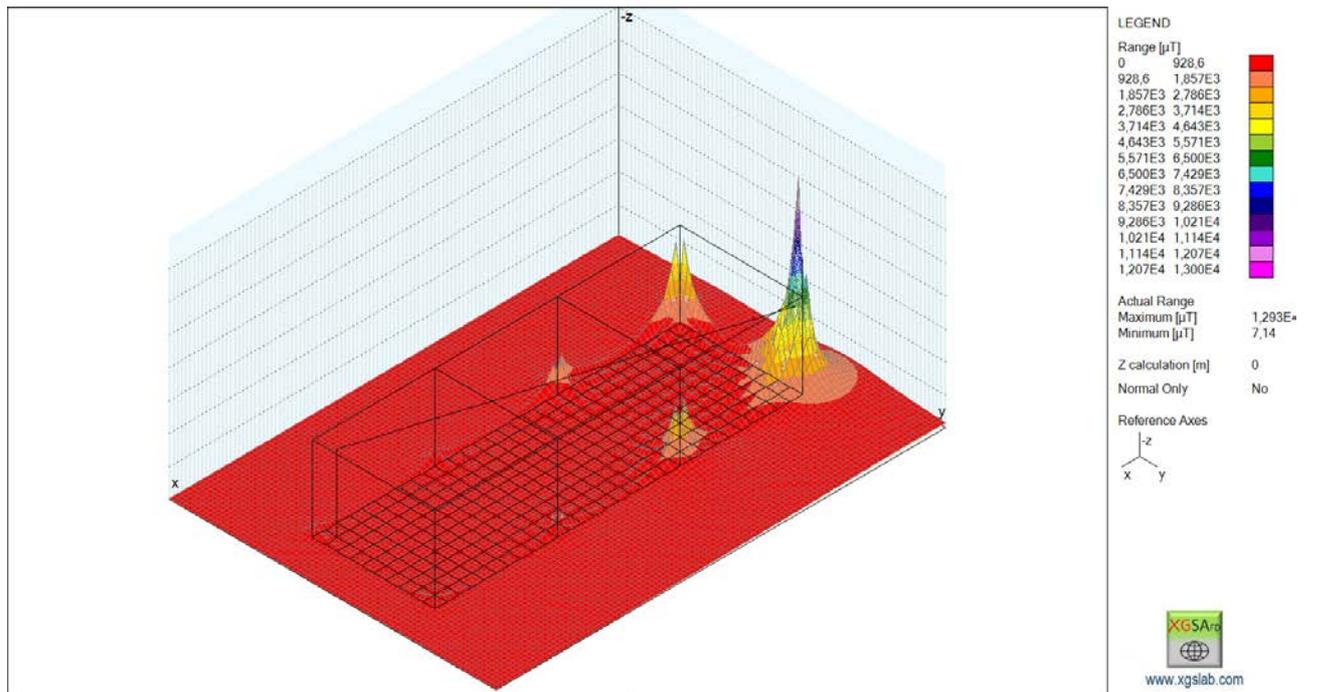


Bild 5-56 Magnetfeld in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

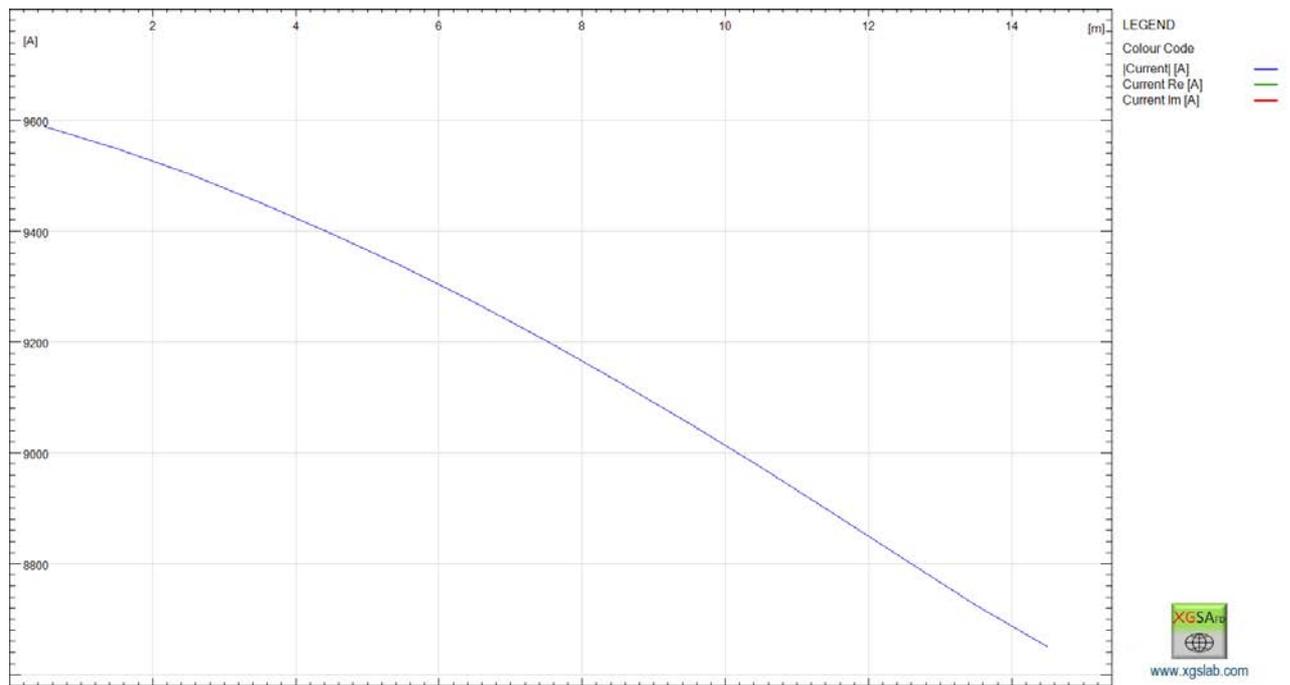


Bild 5-57 Darstellung der Stromverteilung auf der Ableitung 1-2 gemäß Bild 5-56

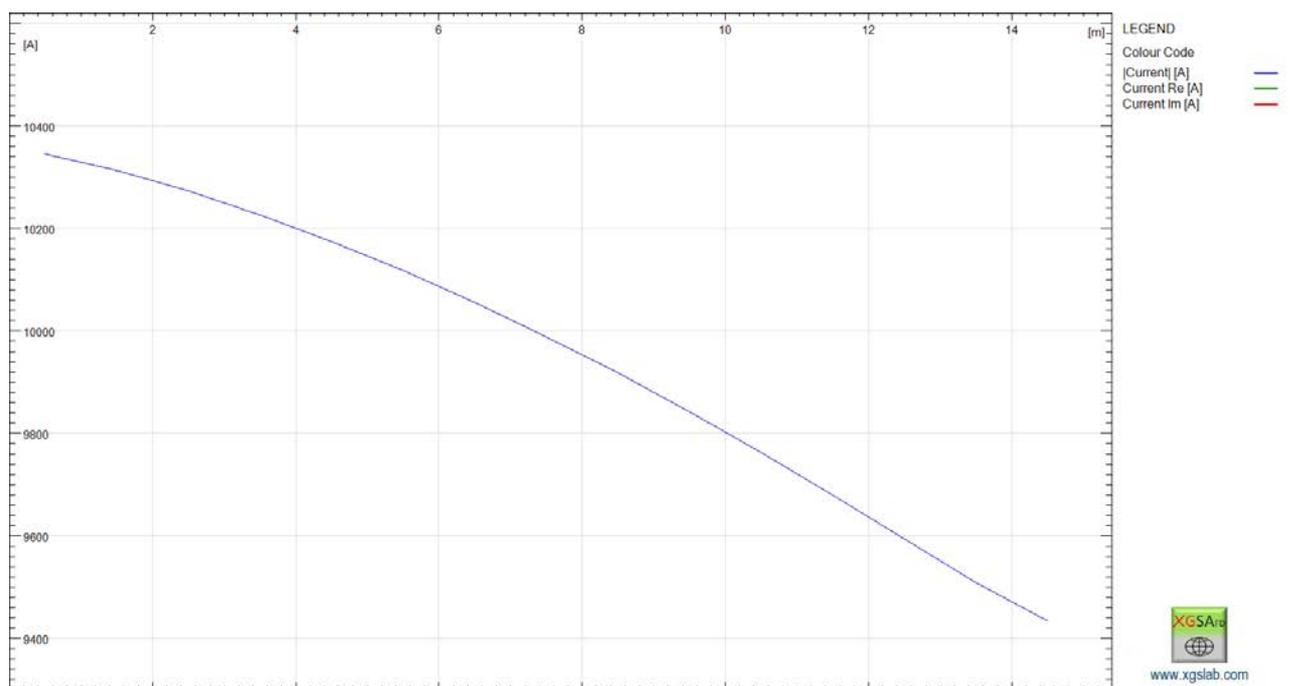


Bild 5-58 Darstellung der Stromverteilung auf der Ableitung 1-3 gemäß Bild 5-56

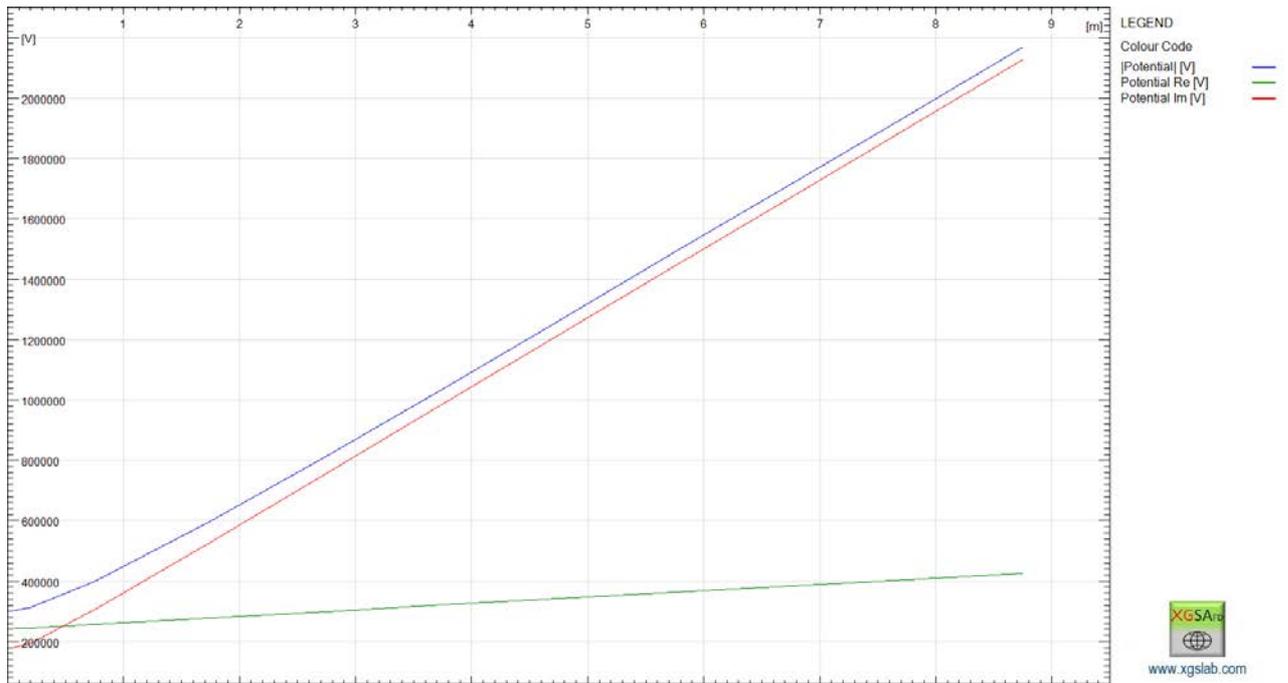


Bild 5-59 Potentialverlauf entlang der Ableitung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz. (Hinweis: Im Programm ist die Ableitung gezählt von 25 cm unterhalb Erde bis 9 m oberhalb Erde. Daher wird hier 8,75m angezeigt)

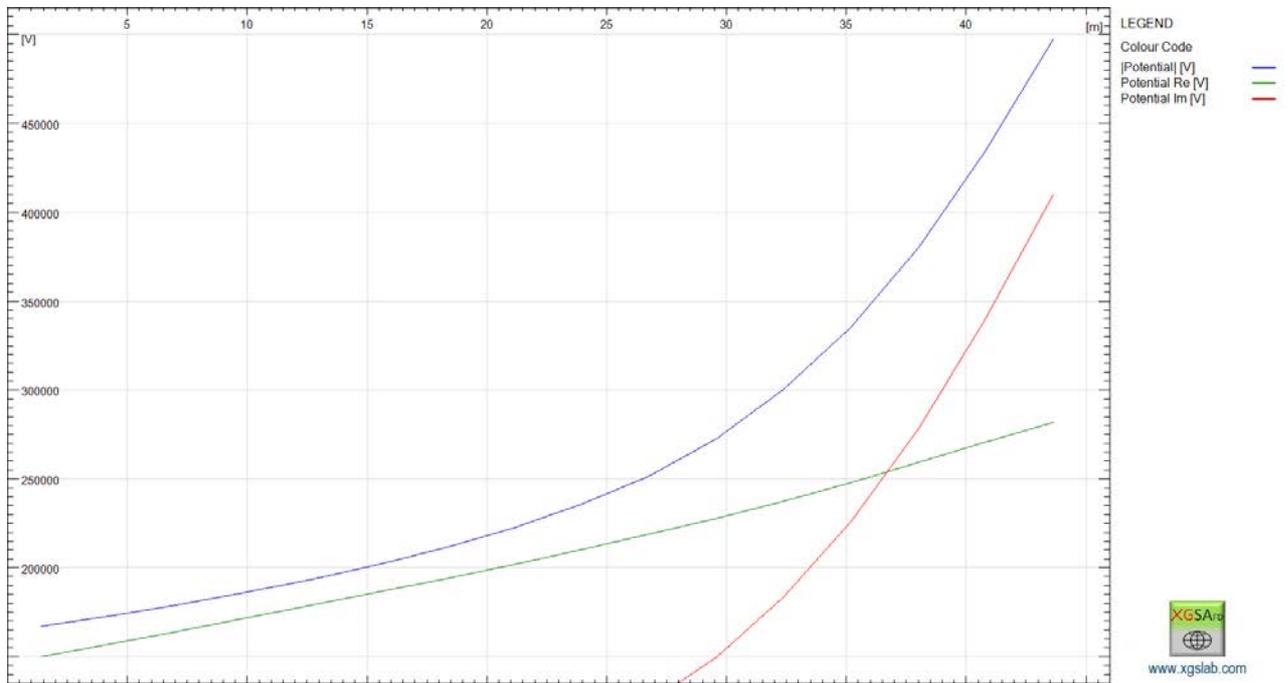


Bild 5-60 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche folgend etwa 45 m bis zur Näherung an der Ableitung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.:

5.2.2.2.2 Simulationsergebnisse für 1000 Ohmm, Sinusstrom , 1 MHz bzw 314 kA/μs

Das Erdoberflächenpotential verläuft bei 1000 Ohmm schon etwas gleichförmiger, wie in Bild 5-61 dargestellt.

Mit dem Programm GSA_FD lassen sich jetzt die Potential- und Stromverläufe sowie das Magnetfeld auf der Erdoberfläche einzelner Leiter darstellen. Dabei sind Betrag, Realteil und Imaginärteil einzeln abzulesen. Die zunehmend gleichmäßige Stromaufteilung auf die einzelnen Ableitungen zeigt das Magnetfeld an der Erdoberfläche in Bild 5-62. Die Auswertung zeigt Tabelle 5-15.

Es ergibt sich ein größerer Trennungsabstand von 67,8 cm.

Tabelle 5-15 Ergebnisse der Simulation mit 1 MHz und 1000 Ohmm.

	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
Ableitung	1.258.466	2.304.103	2.625.381	3.712.850	V
Näherung	914.490	236.269	944.518	1.335.751	V
UT	343.976	2.067.834	2.096.248	2.964.543	V
Strom auf der Ableitung	-17449	-348	17452	24682	
kc-Koeffizient aus GSA	0,49				

Trennungsabstand aus GSA Berechnung

67,8 cm

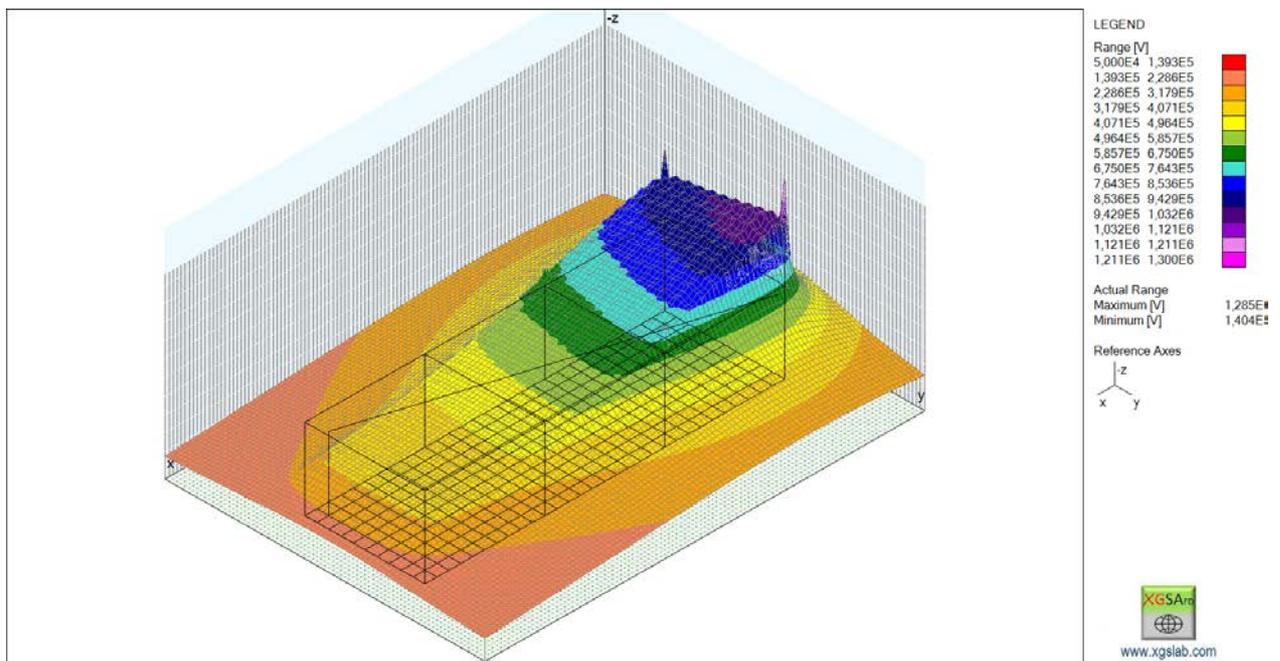


Bild 5-61 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

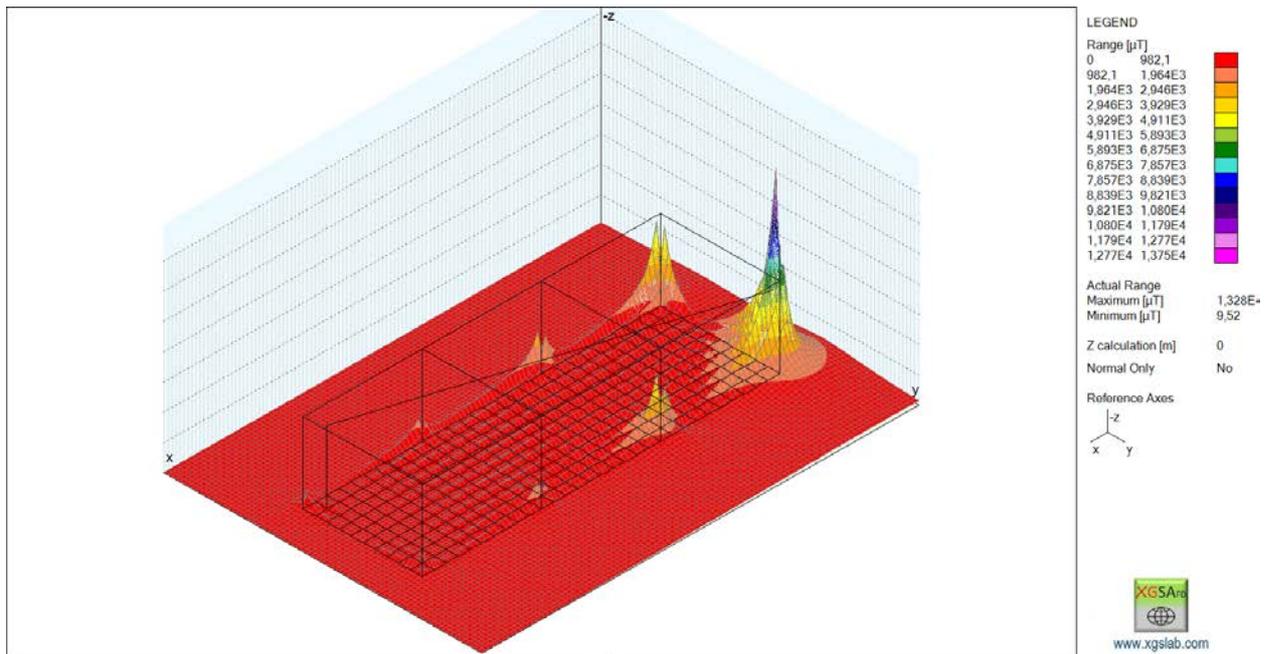


Bild 5-62 Magnetfeld in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.

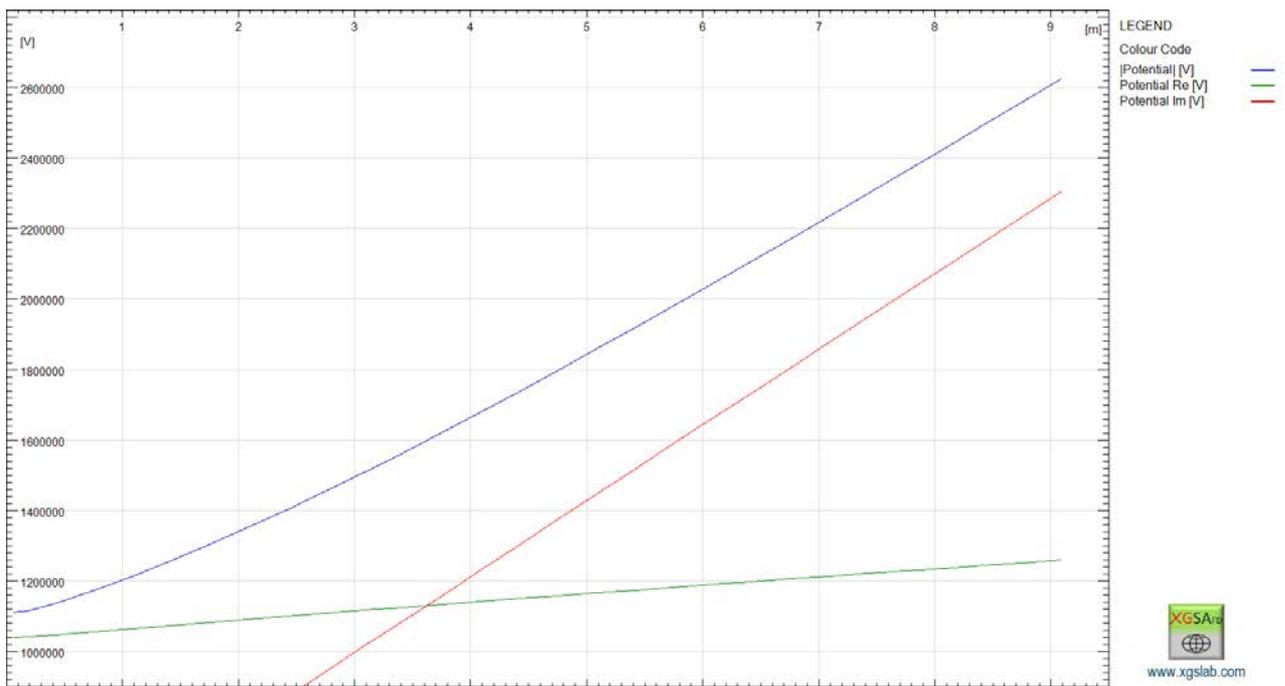


Bild 5-63 Potentialverlauf entlang der Ableitung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz. (Hinweis: Im Programm ist die Ableitung gezählt von 25 cm unterhalb Erde bis 9 m oberhalb Erde. Daher wird hier 8,75m angezeigt)

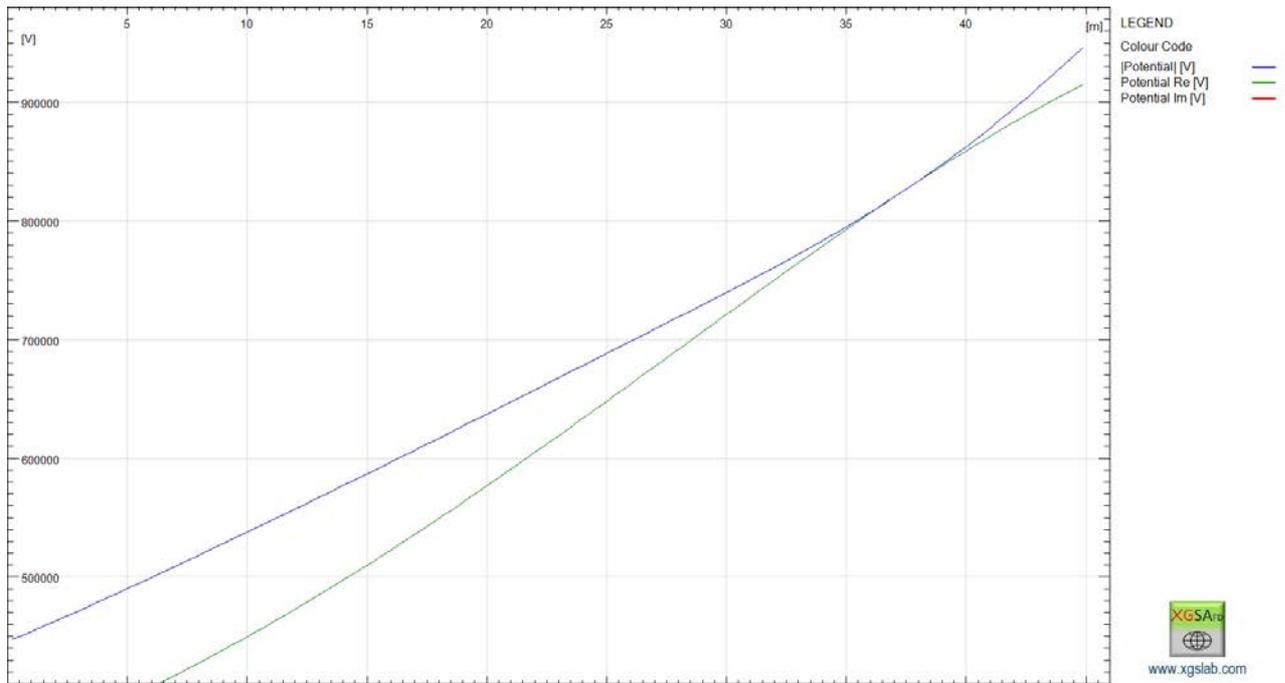


Bild 5-64 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche folgend etwa 45 m bis zur Näherung an der Ableitung. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.:

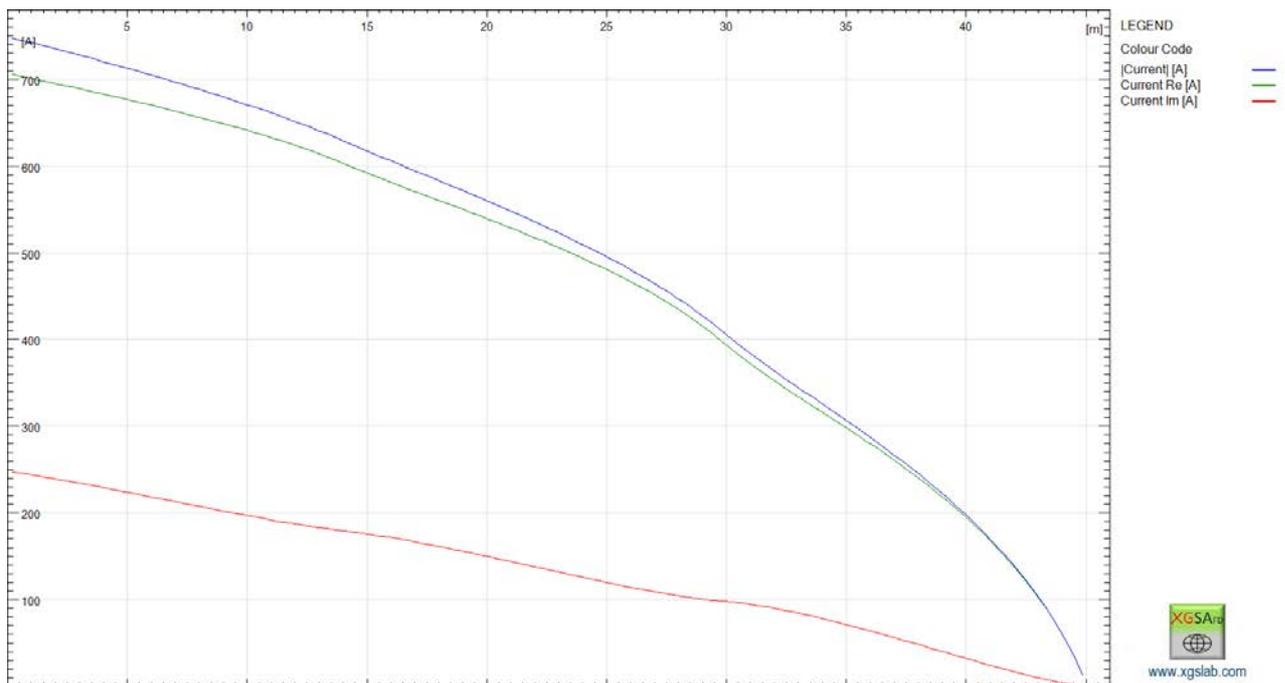


Bild 5-65 Stromverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche folgend etwa 45 m bis zur Näherung an der Ableitung. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 50 kA 0,25/100 entsprechend 1 MHz.:

5.2.2.3 Berechnungen für Klasse 1, 100 kA, 1/200

5.2.2.3.1 Simulationsergebnisse für 100 Ohmm, Sinusstrom 0,25 MHz bzw. 157 kA/ μ s

Das Erdoberflächenpotential zeigt in Bild 5-66 einen asymmetrischen Verlauf.

Mit dem Programm GSA_FD lassen sich jetzt die Potential- und Stromverläufe sowie das Magnetfeld auf der Erdoberfläche einzelner Leiter darstellen. Dabei sind Betrag, Realteil und Imaginärteil einzeln abzulesen. Die

Verläufe sind in Bild 5-59 und Bild 5-60 dargestellt. Die Spannung U_T an der Näherung ergibt sich dann unter Berücksichtigung von Real- und Imaginärteil aus der Differenz der Potentiale an den entsprechenden Stellen.

Für die Ermittlung der Trennungsabstände ist hier aber **die Stoßkennlinie für 1/200** zu verwenden, vergl. Abschnitt 7.2. Die Durchschlagspannung für eine Stab-Stab-Funkenstrecke von 1 m Schlagweite reduziert sich bei 1/200 auf 1200 kV. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 5-16.

Tabelle 5-16 Ergebnisse der Simulation mit 0,25 MHz und 100 Ohmm.

	Re	Im	Betrag,rms	Peak	
Ableitung	331.837	1.103.323	1.152.145	1.629.379	V
Näherung	157.619	312.286	349.809	494.705	V
UT	174.218	791.037	809.995	1.145.506	V
Strom auf der Ableitung	-33.227	-1.169	33.248	47.019	A
kc-Koeffizient aus GSA	0,47				

Trennungsabstand mit GSA Berechnung

74,3 cm

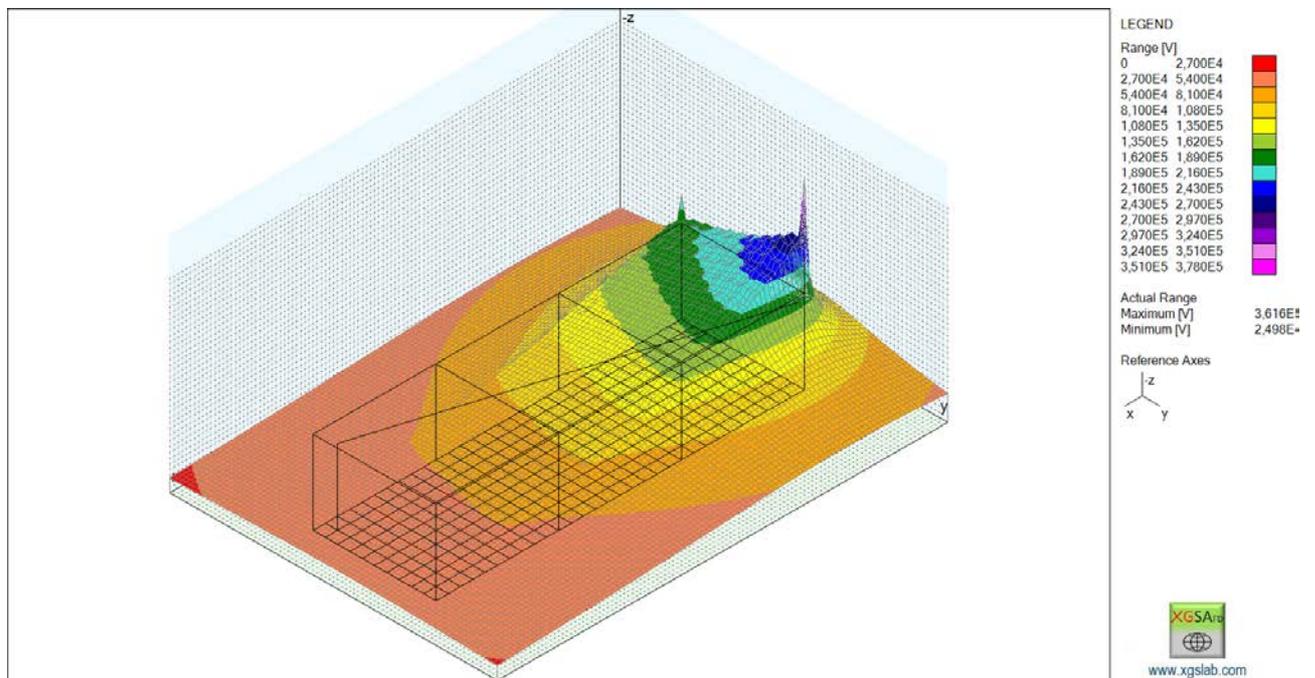


Bild 5-66 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

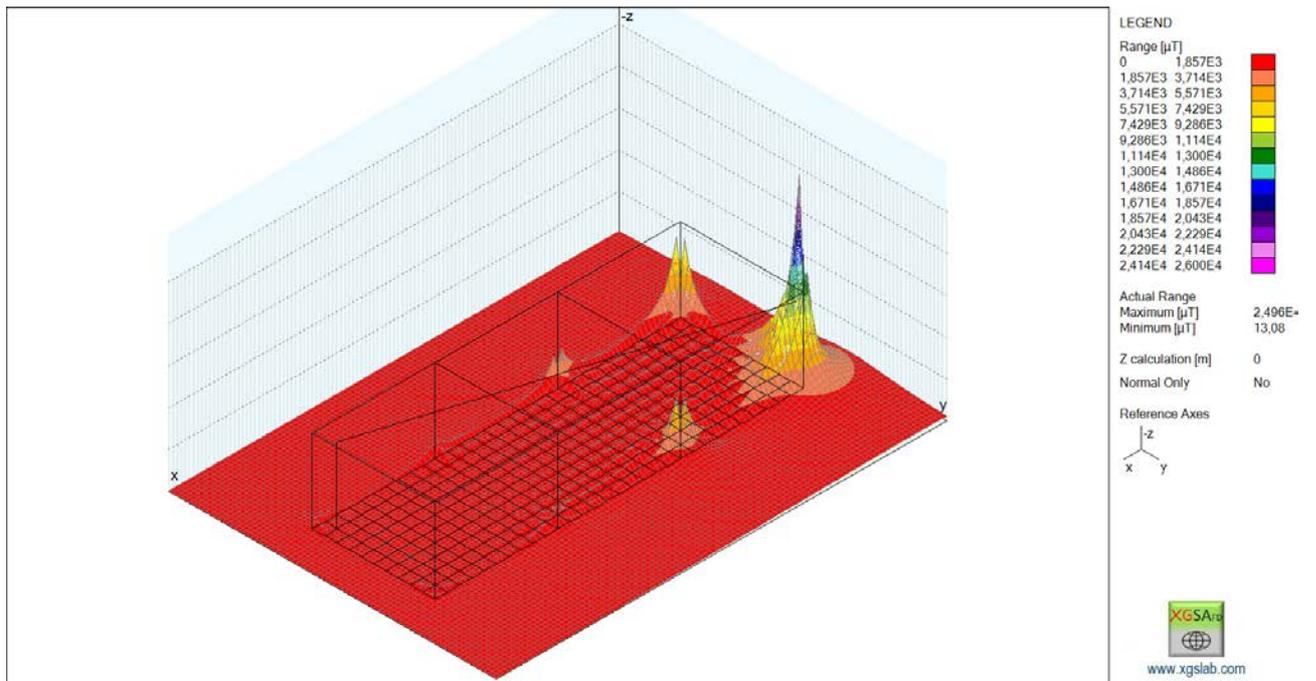


Bild 5-67 Magnetfeld in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

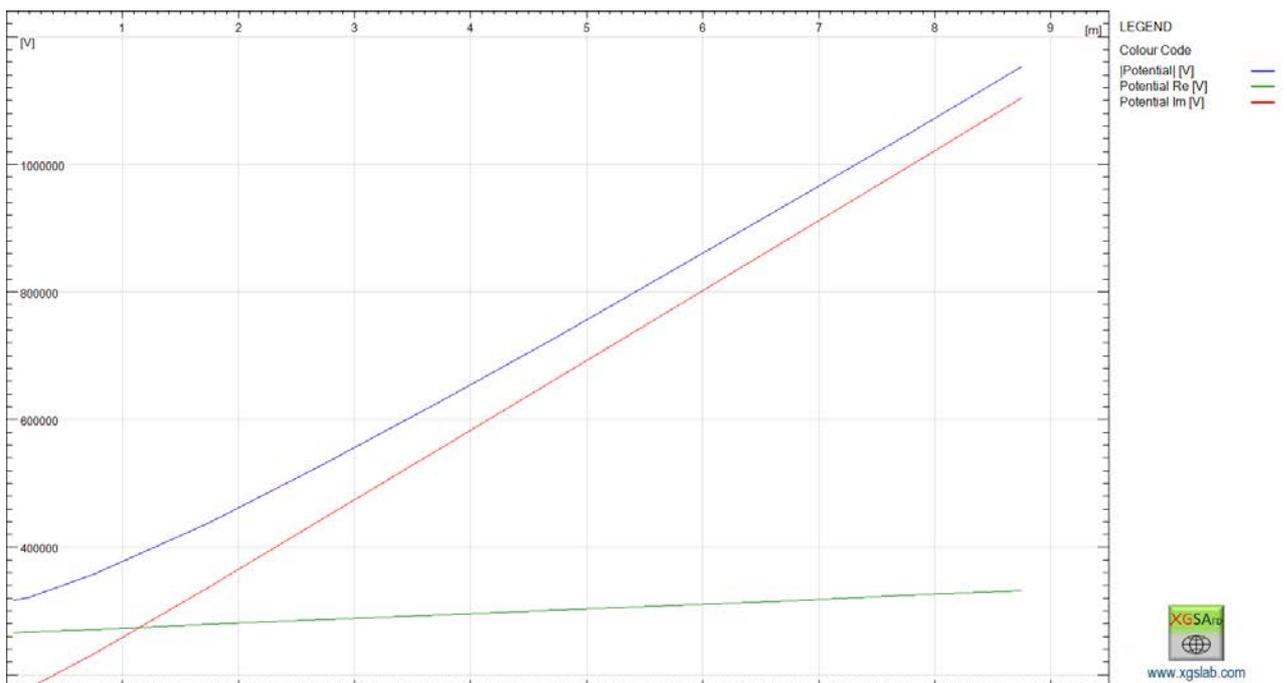


Bild 5-68 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche folgend etwa 45 m bis zur Näherung an der Ableitung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

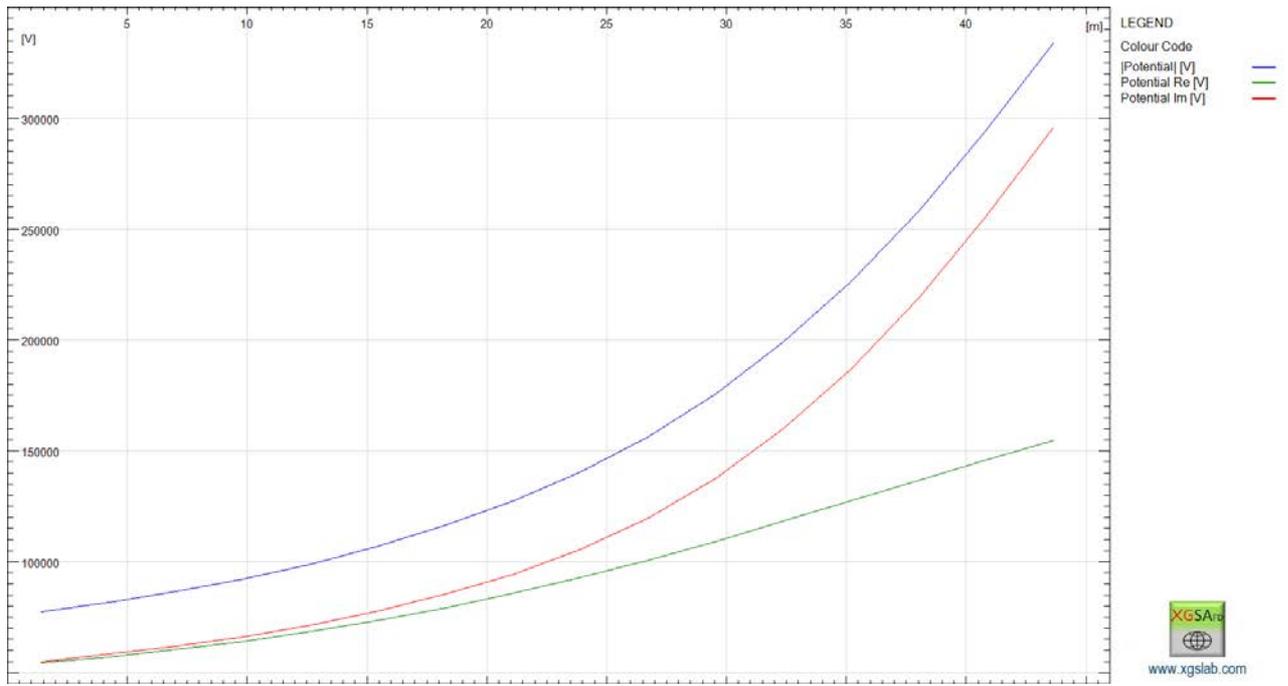


Bild 5-69 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche folgend etwa 45 m bis zur Näherung an der Ableitung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

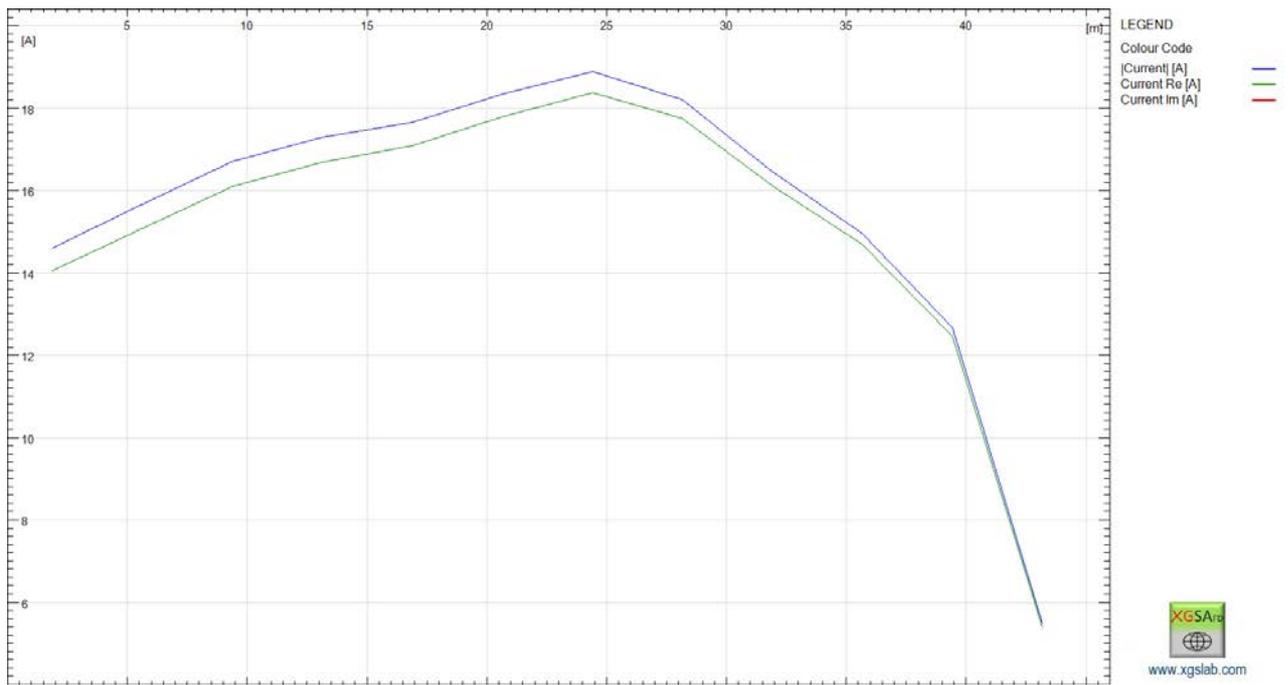


Bild 5-70 Stromverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche folgend etwa 45 m bis zur Näherung an der Ableitung. Berechnung für $\rho_E = 100$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

5.2.2.3.2 Simulationsergebnisse für 1000 Ohmm, Sinusstrom 0,25 MHz bzw. 157 kA/μs

Das Erdoberflächenpotential verläuft bei 1000 Ohmm schon etwas gleichförmiger, wie in Bild 5-70 dargestellt.

Mit dem Programm GSA_FD lassen sich jetzt die Potential- und Stromverläufe sowie das Magnetfeld auf der Erdoberfläche einzelner Leiter darstellen. Dabei sind Betrag, Realteil und Imaginärteil einzeln abzulesen. Die zunehmend gleichmäßige Stromaufteilung auf die einzelnen Ableitungen zeigt das Magnetfeld an der Erdoberfläche in Bild 5-72. Die Auswertung zeigt Tabelle 5-17.

Es ergibt sich ein größerer Trennungsabstand von 94,8 cm.

Tabelle 5-17 Ergebnisse der Simulation mit 0,25 MHz und 1000 Ohmm.

Strom auf der Ableitung	-30.890	-603	30.896	43.693 A
kc-Koeffizient aus GSA	0,44			
Trennungsabstand aus GSA Berechnung mit				94,8 cm

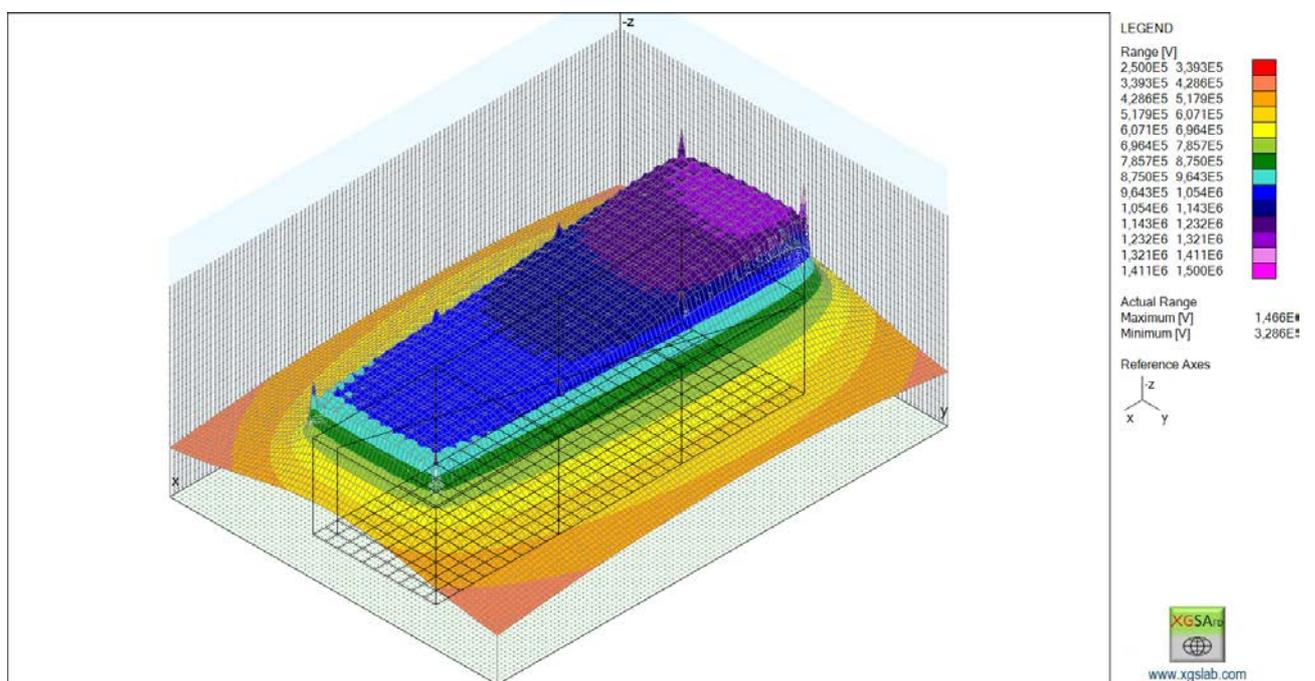


Bild 5-71 Erdoberflächenpotential in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

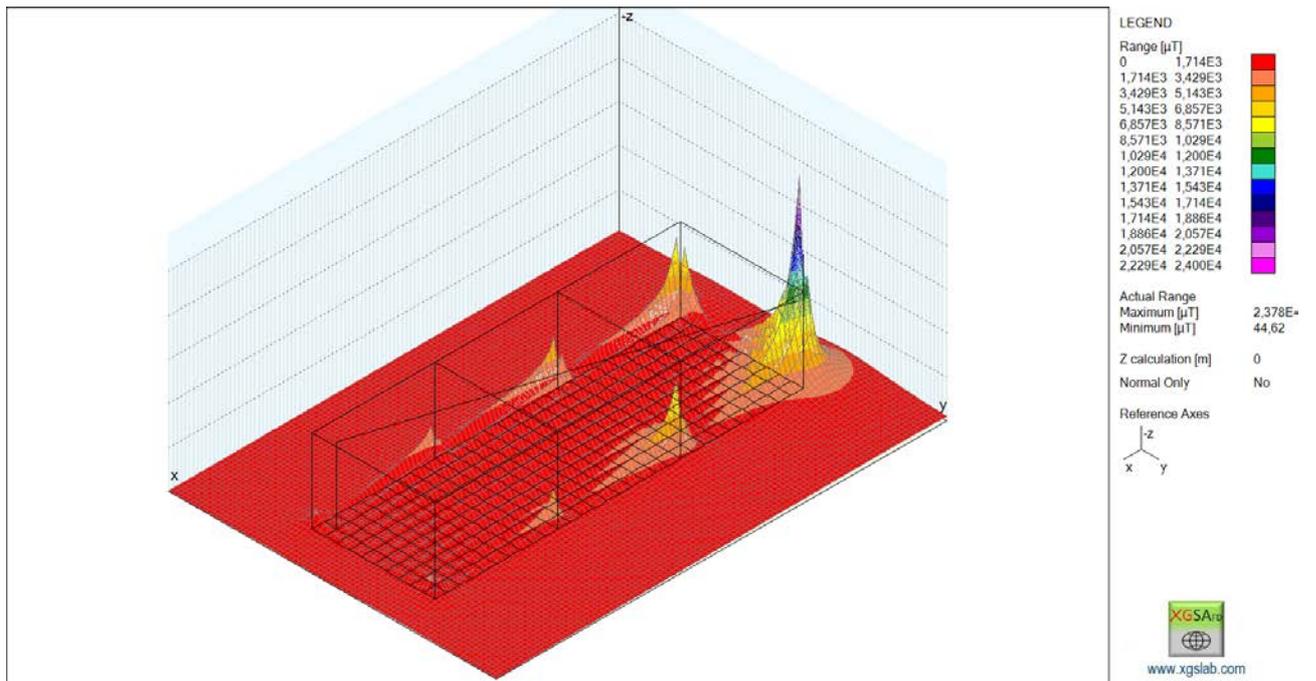


Bild 5-72 Magnetfeld in 3 D Darstellung. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

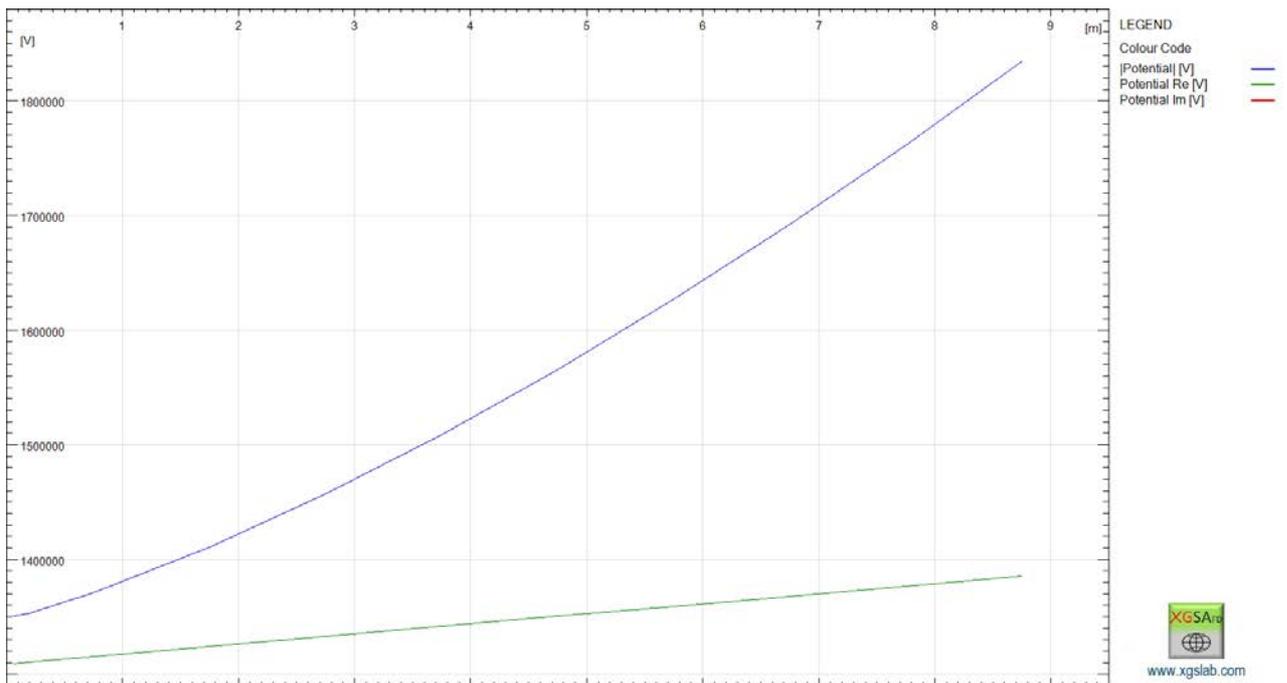


Bild 5-73 Potentialverlauf entlang der Ableitung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 1000$ Ohmm und 100 kA 1/200 entsprechend 0,25 MHz.

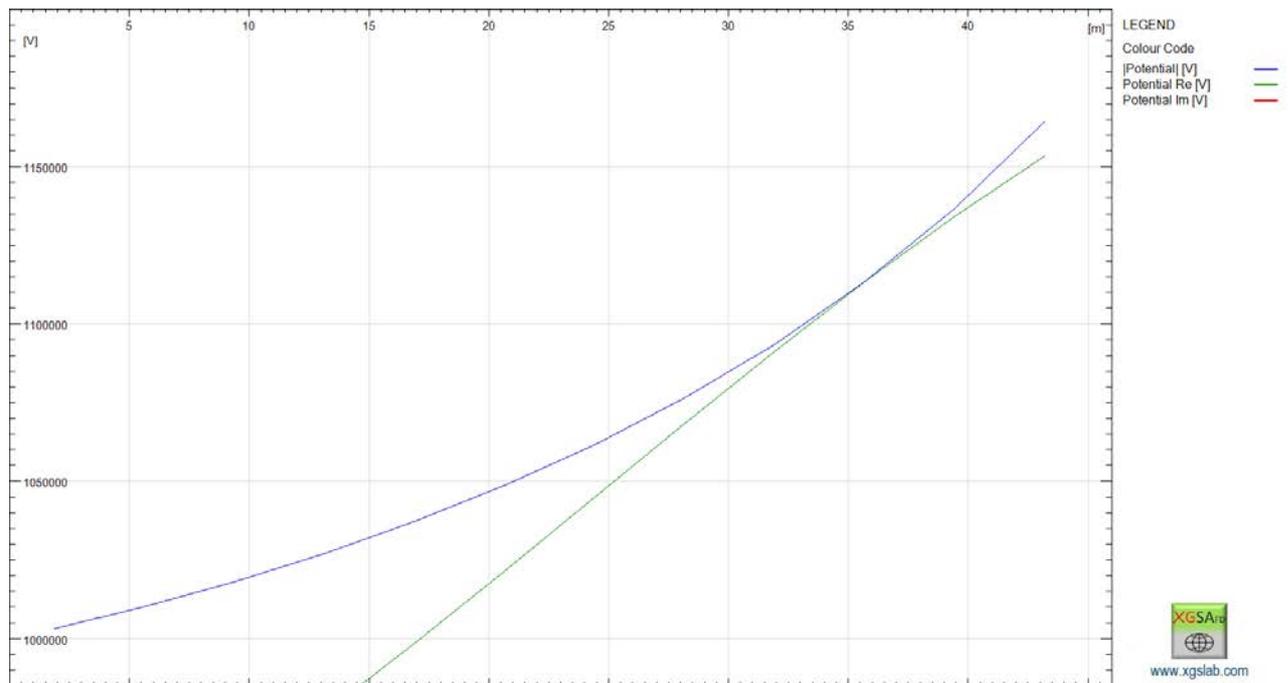


Bild 5-74 Potentialverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche folgend etwa 45 m bis zur Näherung an der Ableitung. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 1000 \text{ Ohmm}$ und $100 \text{ kA } 1/200$ entsprechend $0,25 \text{ MHz}$.

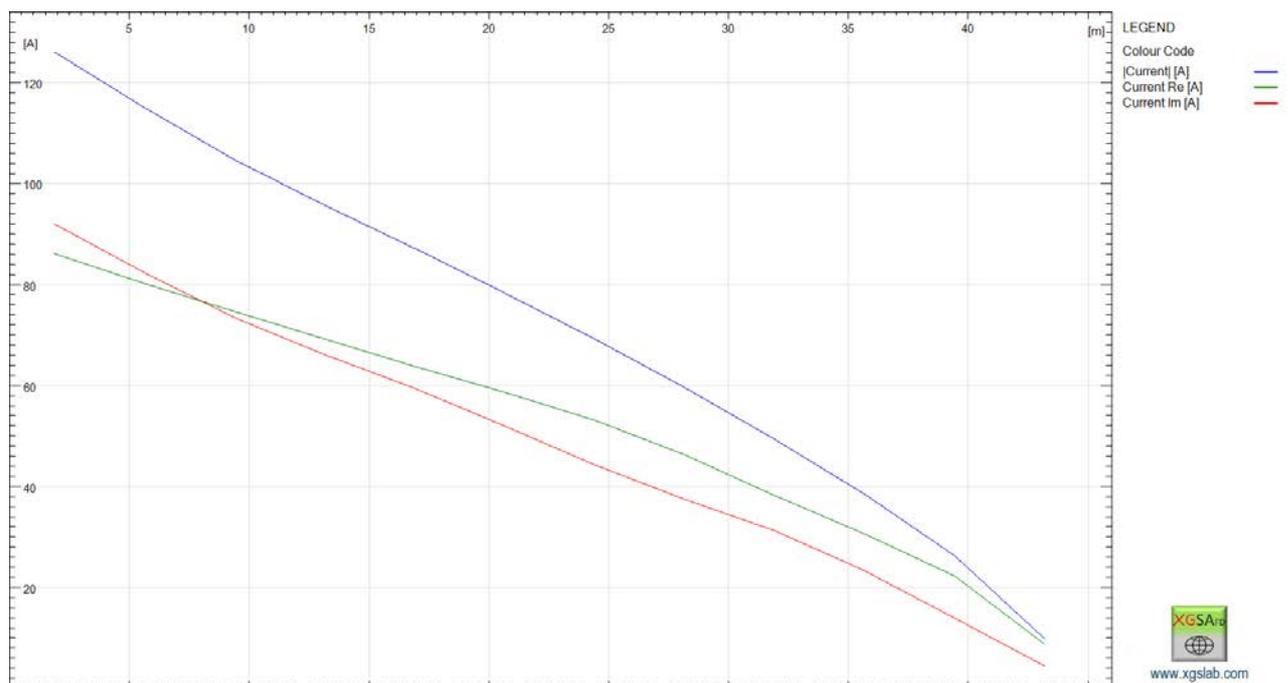


Bild 5-75 Stromverlauf entlang der Näherung ausgehend von der Erdoberfläche bis zu einer Höhe von 9 m oberhalb Erdoberfläche folgend etwa 45 m bis zur Näherung an der Ableitung. Gesamtlänge der Ableitung: 9,25 m. Berechnung für $\rho_E = 1000 \text{ Ohmm}$ und $100 \text{ kA } 1/200$ entsprechend $0,25 \text{ MHz}$.

5.2.2.4 Vergleich der Ergebnisse

Tabelle 5-18 Vergleich der Ergebnisse.

	di/dt	M*	Spannung an Trennstelle		Trennungs-Abstand	
			U _T kV		S m	
	kA/μs	μH/m	100 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	1000 Ohmm
		0,25/100				
IEC Methode (Zischank) Rampenmethode Mit kc=0,44	200	1,2	925¹⁾		0,325	
Simulation mit GSA_FD mit 1 MHz	314	1,82²⁾	2508	2964	0,57	0,68
		1/200 100 kA				
Simulation mit GSA_FD mit 0,25 MHz	157	1,82²⁾	1145	1461	0,74	0,95

- 1) Der geringere Wert gegenüber 1 MHz resultiert aus der Stoßkennlinie. Die Durchschlagspannung ist bei 1 MHz mit 314kA/μs deutlich größer gegenüber 200kA/μs.
- 2) Wert dient nur zur Orientierung, nicht zur Berechnung.

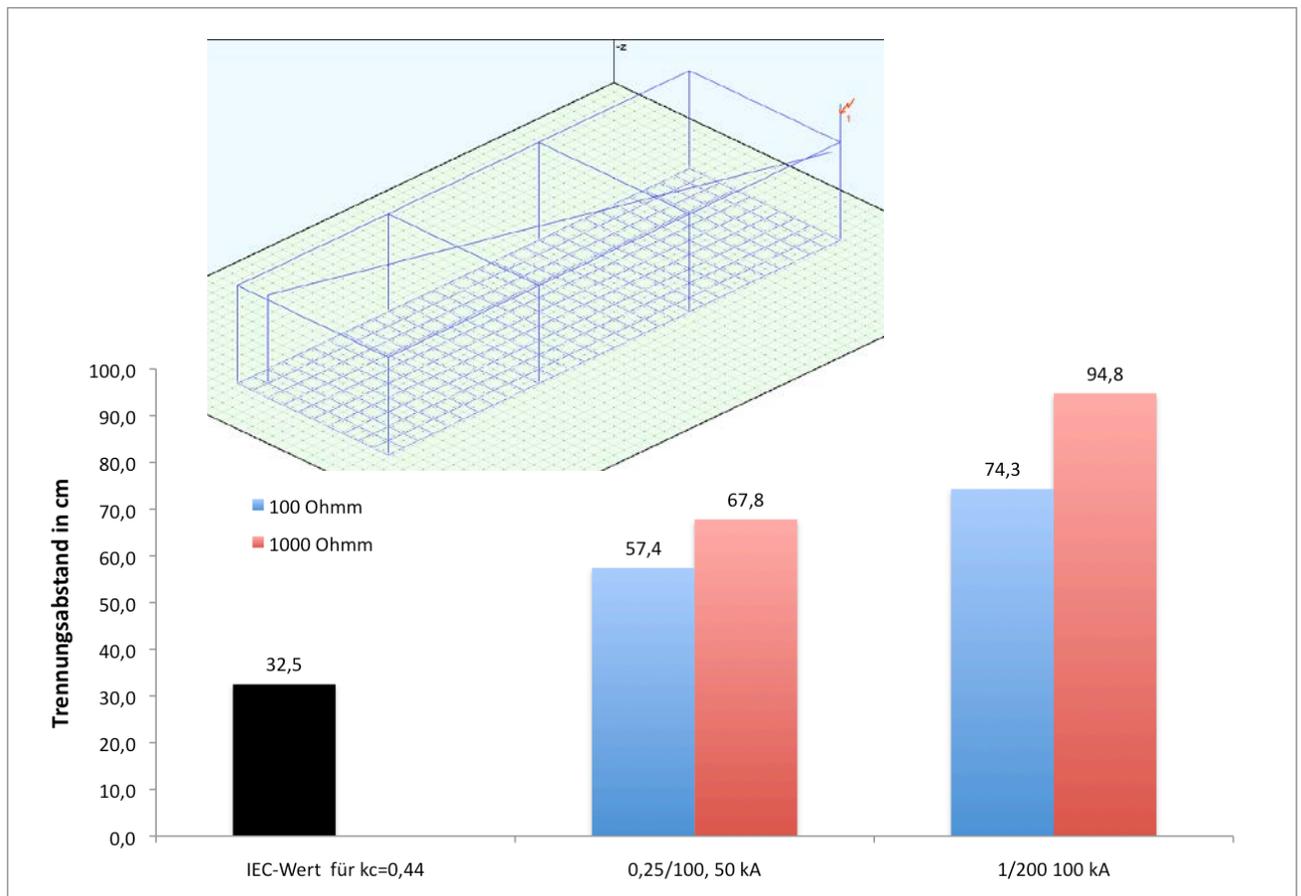
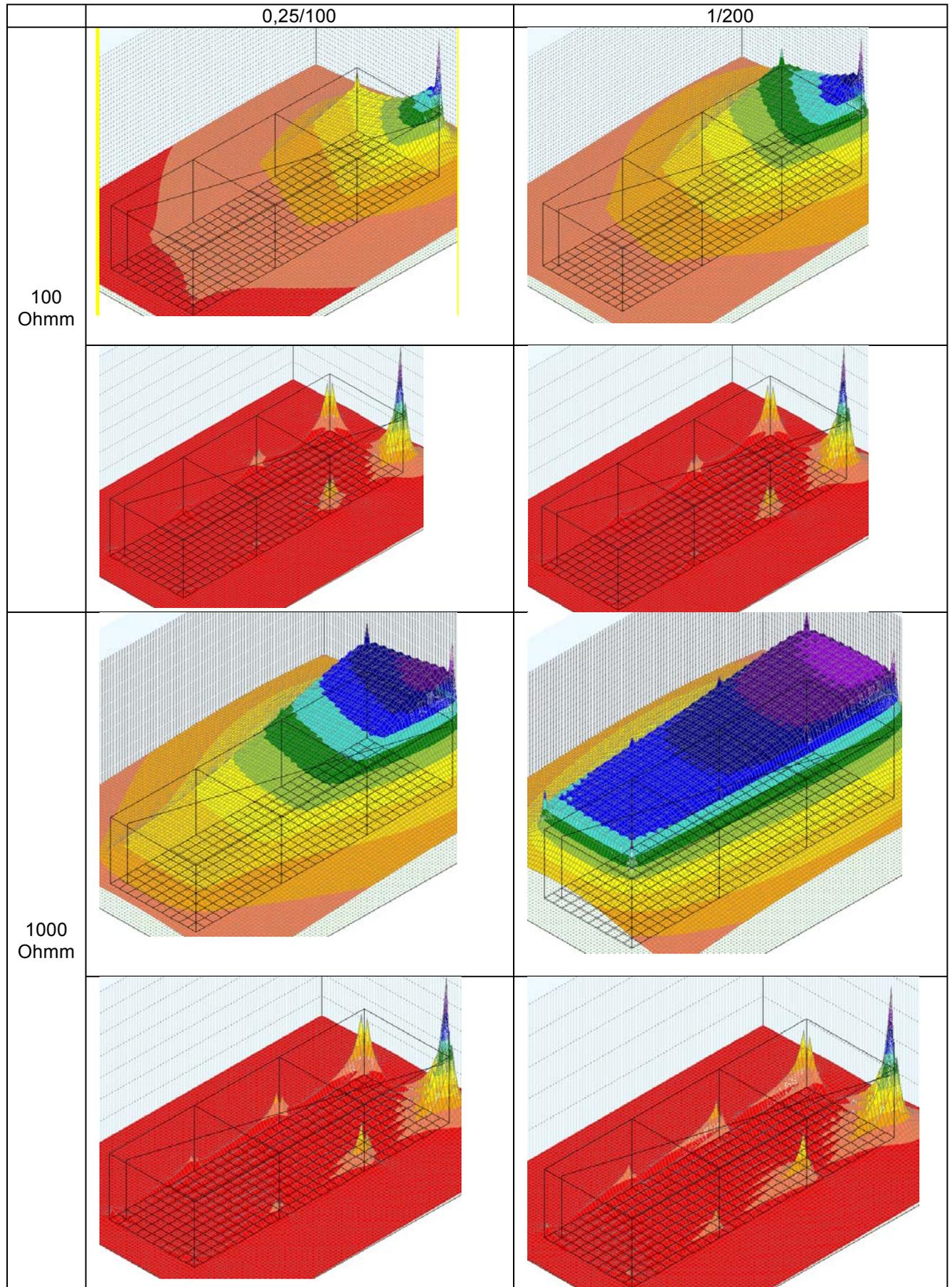


Bild 5-76 Berechnete Trennungsabstände für das Gebäude mit großer Näherung.

Tabelle 5-19 Vergleichende Darstellung der Erdoberflächenpotentiale und der Magnetfelder für das Gebäude mit großer Näherung



6 Literatur

Meppelink Review Trennungsabstandsberechnung

Meppelink VDEA-BB 2015 Vortrag Neu Ulm.

Heidler, Zischank: NECESSARY SEPARATION DISTANCES FOR LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS - IEC 62305-3 REVISITED X International Symposium on Lightning Protection- Curitiba, Brazil, 2009.

Thione in: Ragaller : Surges in High voltage Networks, Seite 200; Plenum Press 1980,

7 Anhang

7.1 Kopplung zwischen Ableitung und der Näherungsleitung

Die elektromagnetische Kopplung zwischen einer stromführenden Ableitung und einer Näherungsleitung ist durch galvanische Kopplung im Erdreich, kapazitive Kopplung und induktive Kopplung gegeben. Dabei ist auch zu beachten, dass die Ableitung als auch die Näherung (im Erdreich und oberhalb Erde) einen ortsabhängigen Strom führt.

Eine einfache Berechnung allein durch die magnetische Kopplung ist daher bei komplexen Trennungsanordnungen nicht zielführend.

Bild 7-1 zeigt ein Modell der Kopplung ohne Berücksichtigung der Strahlungskopplung durch elektromagnetische Wellen.

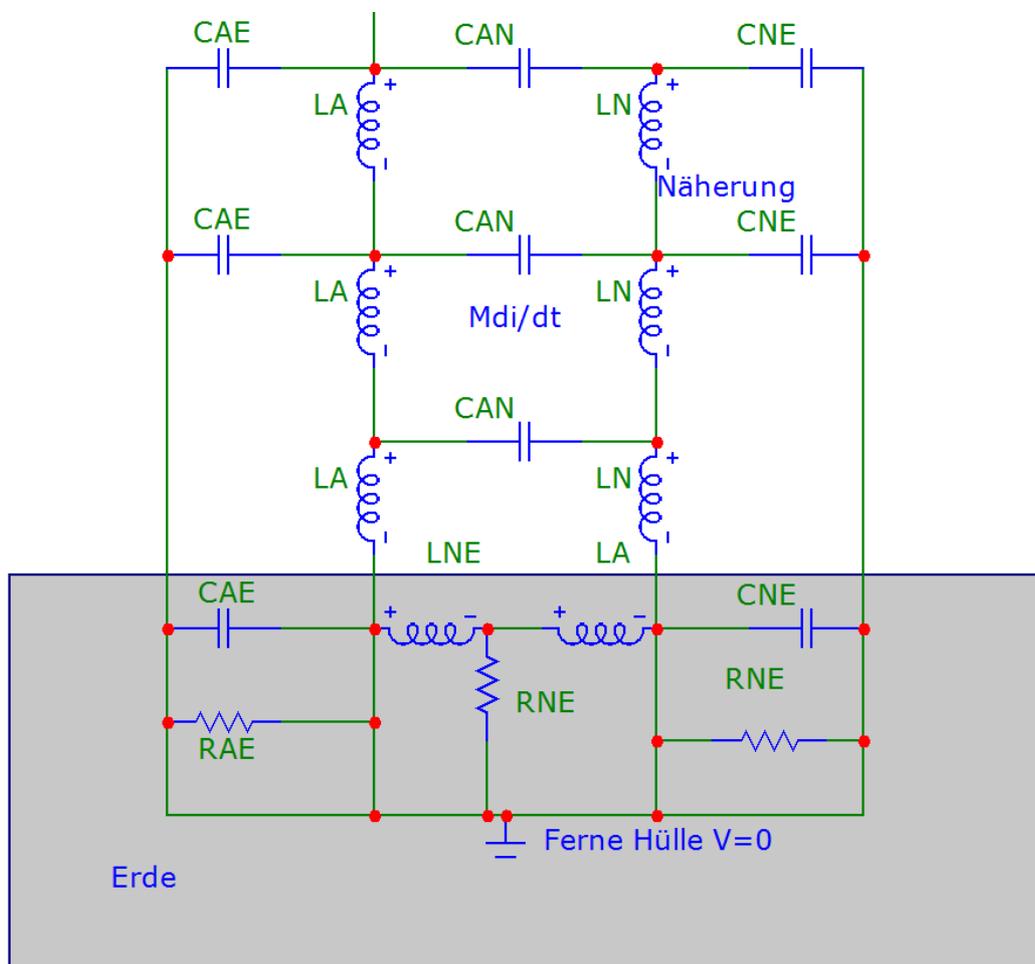


Bild 7-1 Einfaches Modell der Kopplung zwischen der Ableitung und der Näherung. Darstellung ohne Einfluss der Strahlungskopplung.

7.2 Stoßkennlinie für Trennungsanordnung nach Zischank

Nach einer Veröffentlichung von Thione in: Ragaller : Surges in High voltage Networks, Seite 200; Plenum Press 1980, kann die Durchschlagspannung V_d einer Stab-Stab-Funkenstrecke wie folgt berechnet werden.

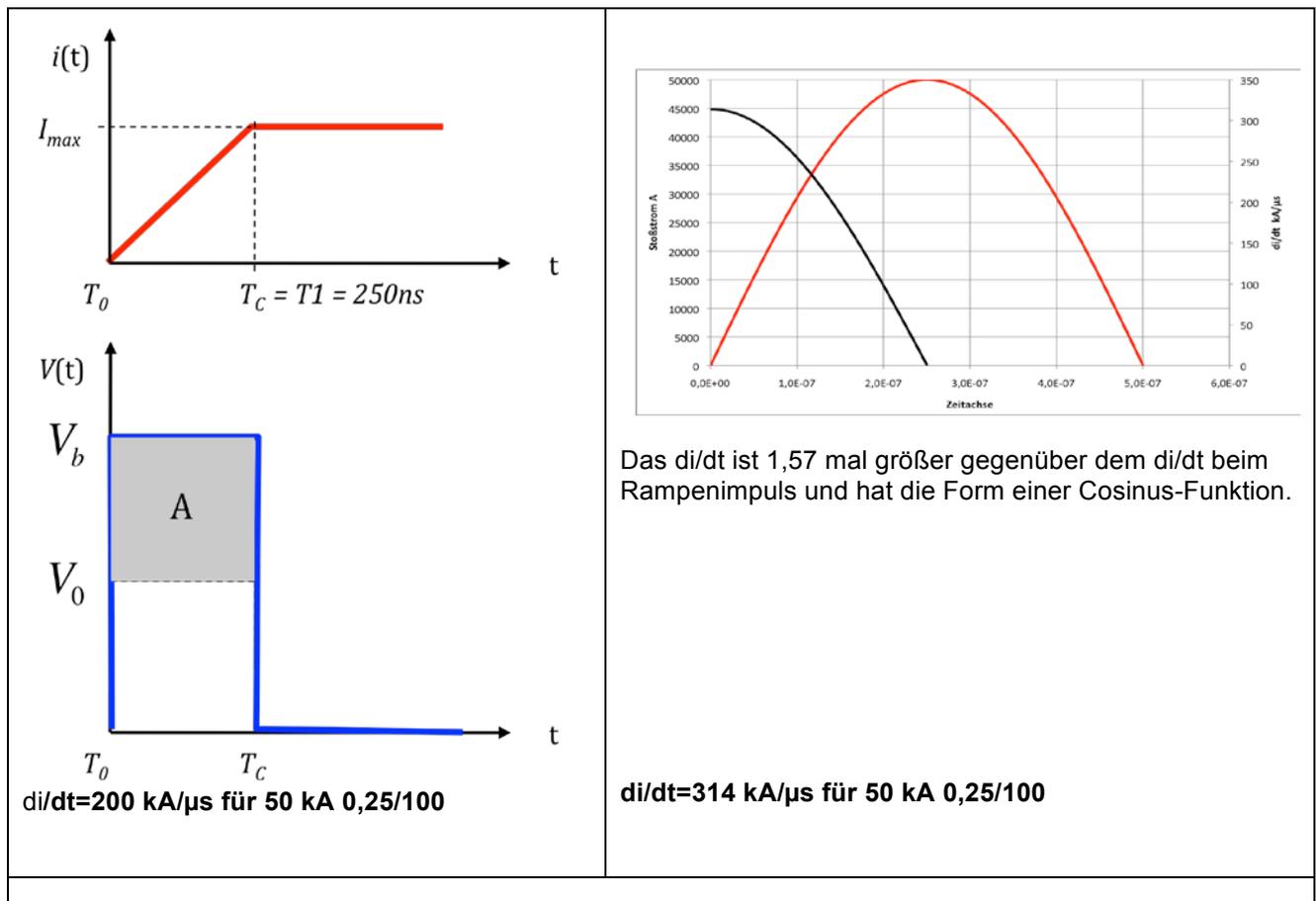
Die Gültigkeit dieser Berechnungsmethode wurde durch Messungen im Labor an einer Funkenstrecke mit 0,25 cm bestätigt, siehe Bild 7-2 .

Diese Methode ist in der IEC 62305-3- Trennungsabstandsberechnung hinterlegt. Diese Stoßkennlinie gilt auch für einen Sinusstrom mit einer äquivalenten Frequenz des in IEC 62305-1 angegebenen Stoßstroms (Heidlerfunktion).

$$V_d(T_C) = V_d(T_1) = \frac{d}{[m]} \cdot 600\text{kV} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_1 / [\mu\text{s}]} \right) \quad \text{Gleichung 7-1}$$

Bild 7-3 zeigt die Stoßkennlinie einer Anordnung und die korrespondierenden Durchschlagspannungen für 0,25/100 und 1/200 Stoßströme. Dabei wird nach Zischank ein linearer Anstieg des Stoßstroms angenommen, so dass sich für die induzierte Spannung ein Rechteckimpuls ergibt.

Tabelle 7-1 Vergleichende Berechnung der Stoßkennlinie für Rampenförmigen Strom (Grundlage der Trennungsabstandsberechnung in IEC 62305-3) und für Sinusförmigen Strom.



$$\int_{T_0}^{T_C} (V(t) - V_0) dt = A$$

$$A = (V_b - V_0) \cdot T_C \text{ für } T_0 = 0$$

$$V_0 = 6 \cdot 10^5 \cdot d [m] V; \quad A = 0,6 \cdot d [m] Vs$$

Gleichung 7-2

Data published by Thione 1979
 V_0, A : are independent from the shape of the voltage

$$\int_{T_0}^{T_C} (V(t) - V_0) dt = A$$

$$\int_{T_0}^{T_C} (V_b(t) - V_0) dt = A$$

$$V_b(t) \cdot T_C - V_0 \cdot T_C = A \text{ für } T_0 = 0$$

mit $A = 0,6 \cdot s$ und $s = 1m$

Gleichung 7-3

$$V_b(t) = \frac{A + V_0 \cdot T_C}{T_C}$$

Für $s = 1m$:

$$= \frac{0,6Vs + 6 \cdot 10^5 \cdot T_C [\mu s] \cdot 10^{-6} sV}{T_C [\mu s] \cdot 10^{-6} s}$$

$$= 10^6 V \cdot \frac{0,6 + 0,6 \cdot T_C [\mu s]}{T_C [\mu s]}$$

$$= 600kV \cdot \left(1 + \frac{1}{T_C [\mu s]} \right)$$

Gleichung 7-4

$$\int_{T_0}^{T_C} (V(t) - V_0) dt = A$$

$$\int_{T_0}^{T_C} (1,57 \cdot V_b(t) \cdot \cos(\omega t) - V_0) dt = A$$

$$\frac{1,57}{\omega} \cdot V_b(t) \cdot \sin(\omega T_C) - V_0 \cdot T_C = A$$

Gleichung 7-5

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{4 \cdot T_C} = 1,57 \cdot \frac{1}{T_C}$$

Gleichung 7-6

$$V_b(t) = \frac{A + V_0 \cdot T_C}{T_C \cdot \underbrace{\sin(\omega T_C)}_{=1}}$$

Für $s = 1m$:

$$= \frac{0,6Vs + 6 \cdot 10^5 \cdot T_C [\mu s] \cdot 10^{-6} sV}{T_C [\mu s] \cdot 10^{-6} s}$$

$$= 10^6 V \cdot \frac{0,6 + 0,6 \cdot T_C [\mu s]}{T_C [\mu s]}$$

$$= 600kV \cdot \left(1 + \frac{1}{T_C [\mu s]} \right)$$

Gleichung 7-7

Die berechnete Stoßkennlinie ist für beide Impulsformen gleich.
 T_C entspricht der Stirnzeit T_1 des Stoßstroms in IEC 62305-1

$$V_b(T_C) = 600 \text{ kV} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_C [\mu\text{s}]} \right)$$

Gleichung 7-8

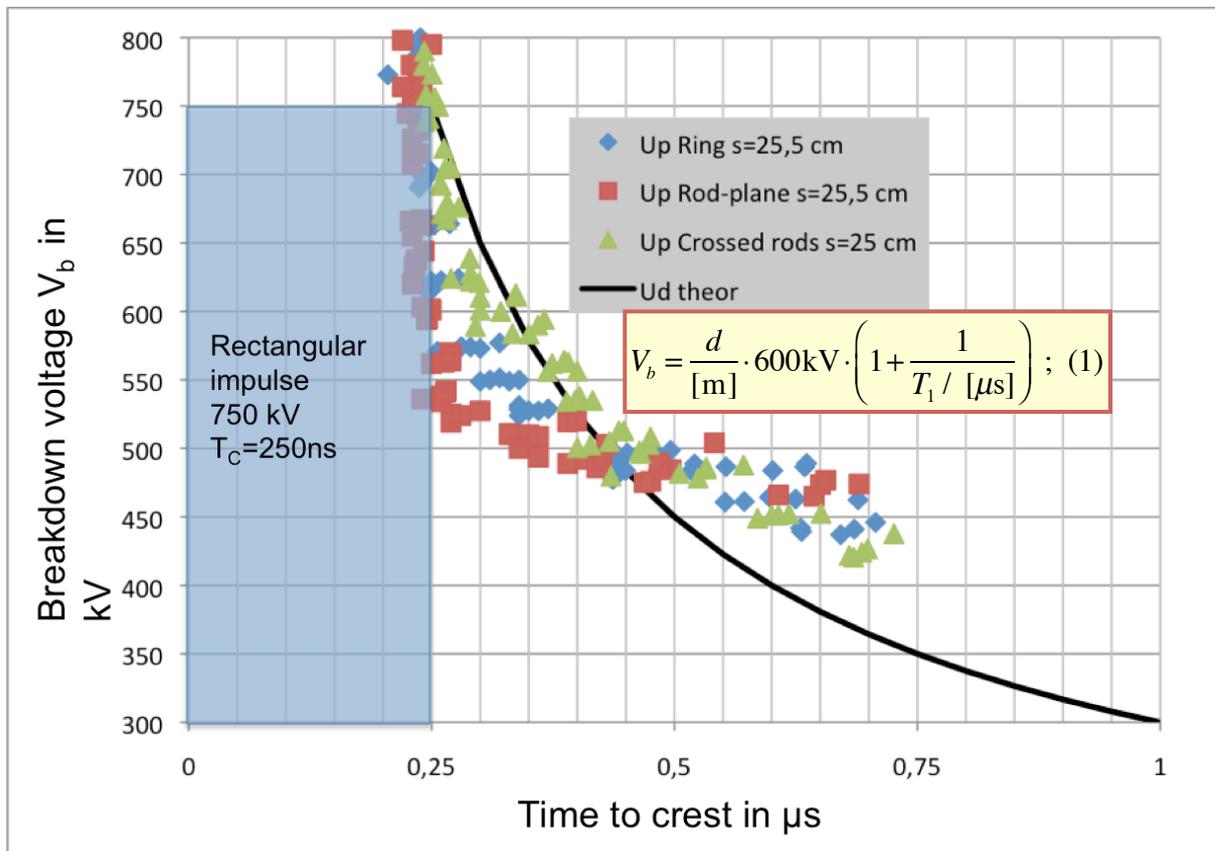


Bild 7-2 Gemessene Stoßkennlinie für eine Schlagweite von 0,25 m.

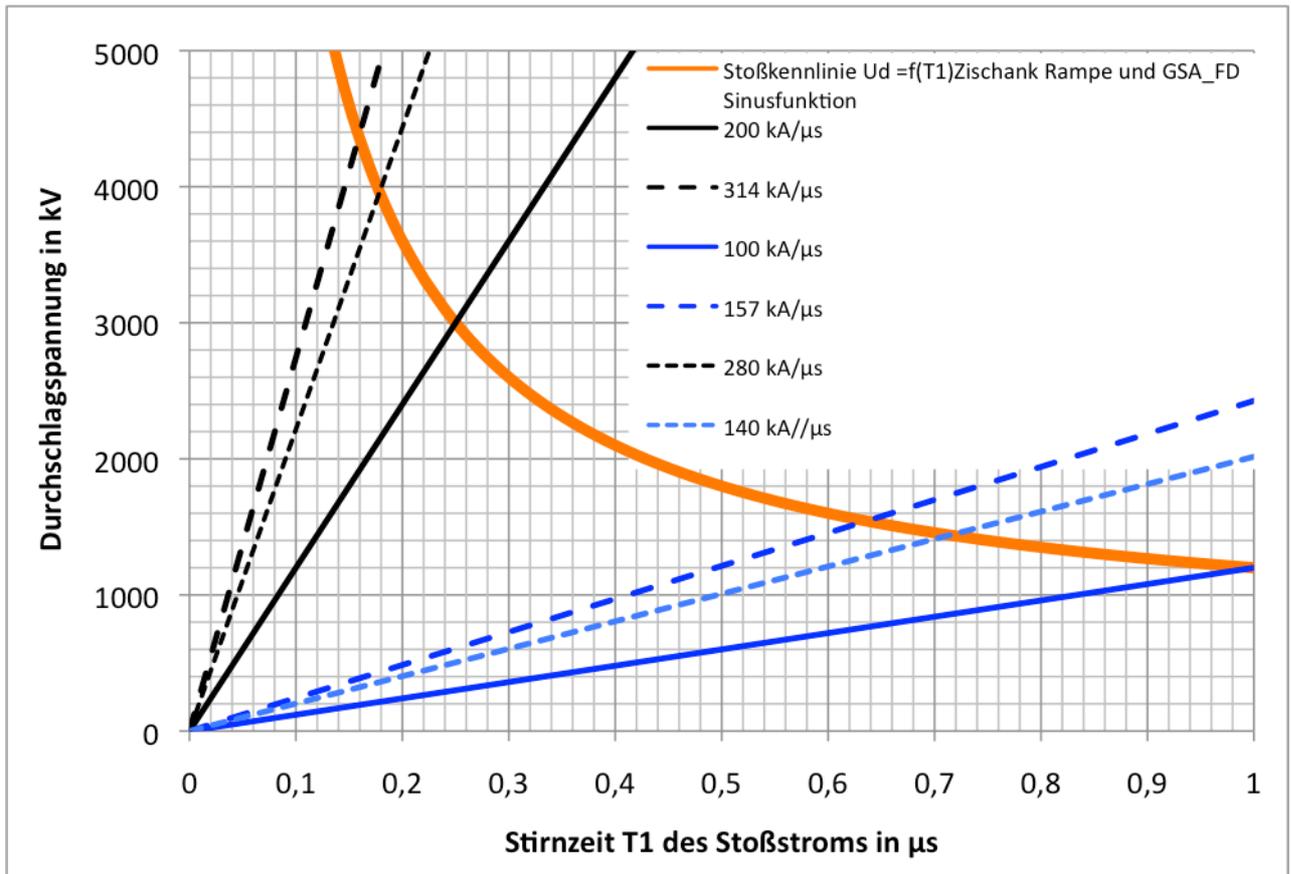


Bild 7-3 Stoßspannungskennlinie für eine Stab-Stab-Funkenstrecke mit 1 m Schlagweite. Die Durchschlagspannung ergibt sich für die jeweiligen Steilheiten des Stoßstroms.

Tabelle 7-2 Tabellarische Übersicht der verwendeten Stoßstromimpulse bzw. deren Nachbildung durch eine sinus-Funktion.

	Frequenz	$di/dt_{t=0}$	\hat{i}	T_1 bzw. $T_c = \hat{i}/di/dt_{t=0}$
	MHz	kA/μs	kA	μs
Rampenimpuls				
	0,25/100	200	50	0,25
	1/200	100	100	1
Sinusnachbildung				
	0,25/100	314	50	0,15923
	1/200	157	100	0,63694
Heidlerimpuls ¹⁾				
	0,25/100	280 ¹⁾	50	0,17857
	1/200	140 ¹⁾	100	0,71428

1) Beim Heidlerimpuls tritt die maximale Steilheit nicht zum Zeitpunkt t=0 auf.

7.3 Analytische Berechnung des Trennungsabstands aus der Stoßkennlinie.

Im Folgenden wird anhand der Stoßkennlinie und der analytisch berechneten induzierten Spannung der notwendige Trennungsabstand berechnet: Durch Gleichsetzen der analytisch berechneten induzierten Spannung mit der Spannung aus Stoßkennlinie folgt:

$$U_{ind}(M', l) = V_b(T_c)$$

$$M' [\mu H / m] \cdot l [m] \cdot \frac{di}{dt} [kA / \mu s] = 600 kV \cdot s [m] \cdot \left(1 + \frac{1}{T_c [\mu s]} \right)$$

M' : Induktivität pro m Länge

l : Länge der Ableitung nach IEC62305-3

di/dt : maximale Stromsteilheit

s : Schlagweite bzw. Trennungsabstand

T_c : Stirnzeit des Stoßstroms

Gleichung 7-9

Nach Umstellung ergibt sich der auf die Länge der Ableitung l bezogene Trennungsabstand s wie folgt

$$\frac{s}{l} = \frac{M' [\mu H / m] \cdot \frac{di}{dt} [kA / \mu s]}{600 kV \cdot \left(1 + \frac{1}{T_c [\mu s]} \right)}$$

Gleichung 7-10

Ersetzt man T_c durch di/dt , folgt durch Einsetzen für den Trennungsabstand

$$s = l [m] \cdot \frac{M' [\mu H / m] \cdot \left(\frac{1}{\frac{di}{dt} [kA / \mu s]} + \frac{1}{\hat{I} [kA]} \right)}{600 kV}$$

Gleichung 7-11

di/dt kA/μs	l kA	s/l	s für l= 9,25 m m
100	100	0,10	0,93
140	100	0,12	1,08
157	100	0,12	1,13
200	50	0,08	0,74
280	50	0,08	0,78
314	50	0,09	0,80

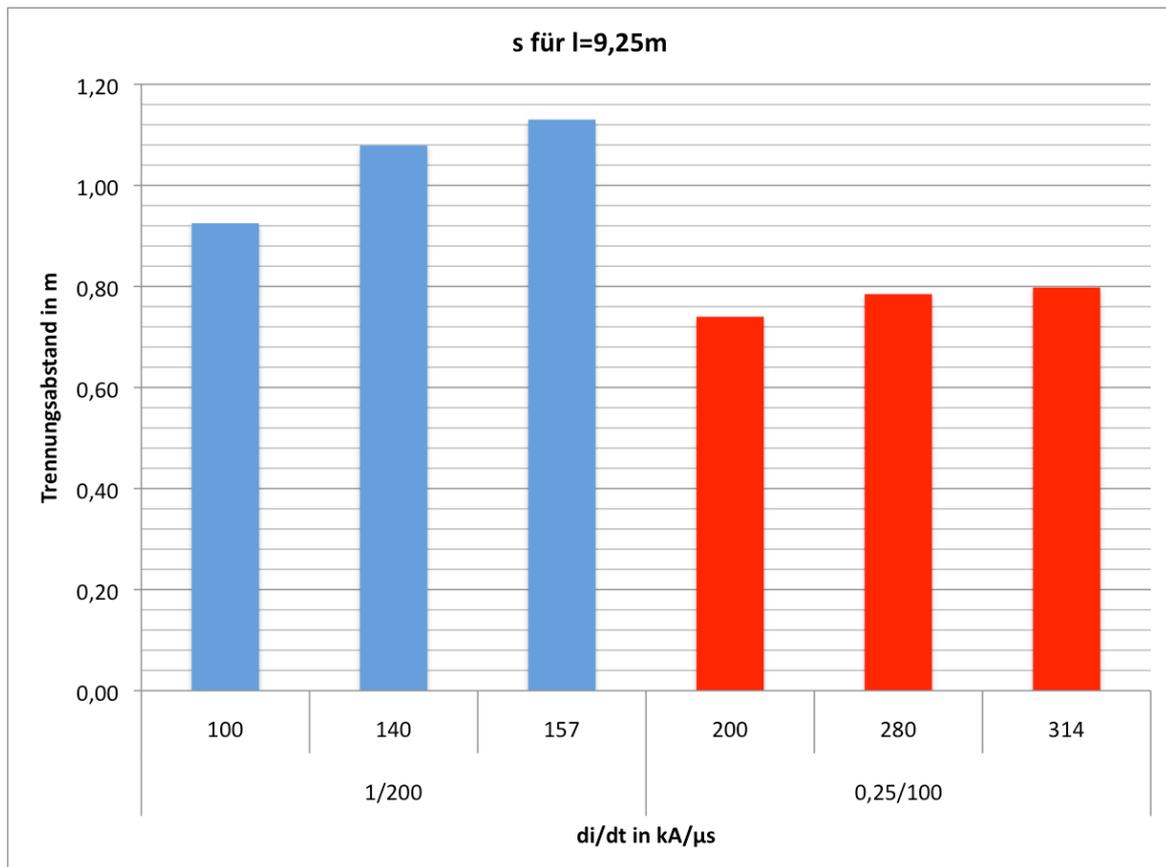


Bild 7-4 Berechneter Trennungsabstand für $M'=1,2\mu\text{H/m}$ und eine Länge von 9,25 m für die Stoßströme 0,25/100, 50 kA und 1/200, 100 kA entsprechend Klasse 1 für verschiedene Stromsteilheiten.

7.4 Berechnung des Trennungsabstands aus den Ergebnissen der induzierten Spannung U_T mit GSA_FD und der Stoßkennlinie.

Der notwendige Trennungsabstand ergibt sich aus der mit GSA_FD berechneten Spannung U_T und der Festigkeit einer Trennstrecke aus der Stoßkennlinie in Bild 7-3 .

$$s[m] = \frac{U_T [kV]}{600kV \cdot \left(1 + \frac{1}{T_C [\mu s]}\right)}$$

Mit der folgenden Skizze gilt :

$$\hat{I} = \left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} \cdot T_C$$

und für den Trennungsabstand

$$s[m] = \frac{U_T [kV]}{600kV \cdot \left(1 + \frac{\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} [kA/\mu s]}{\hat{I} [kA]}\right)}$$

U_T : Mit GSA für die Stromsteilheit $(di/dt)_{t=0}$ ermittelte Spannung
Gleichung 7-12

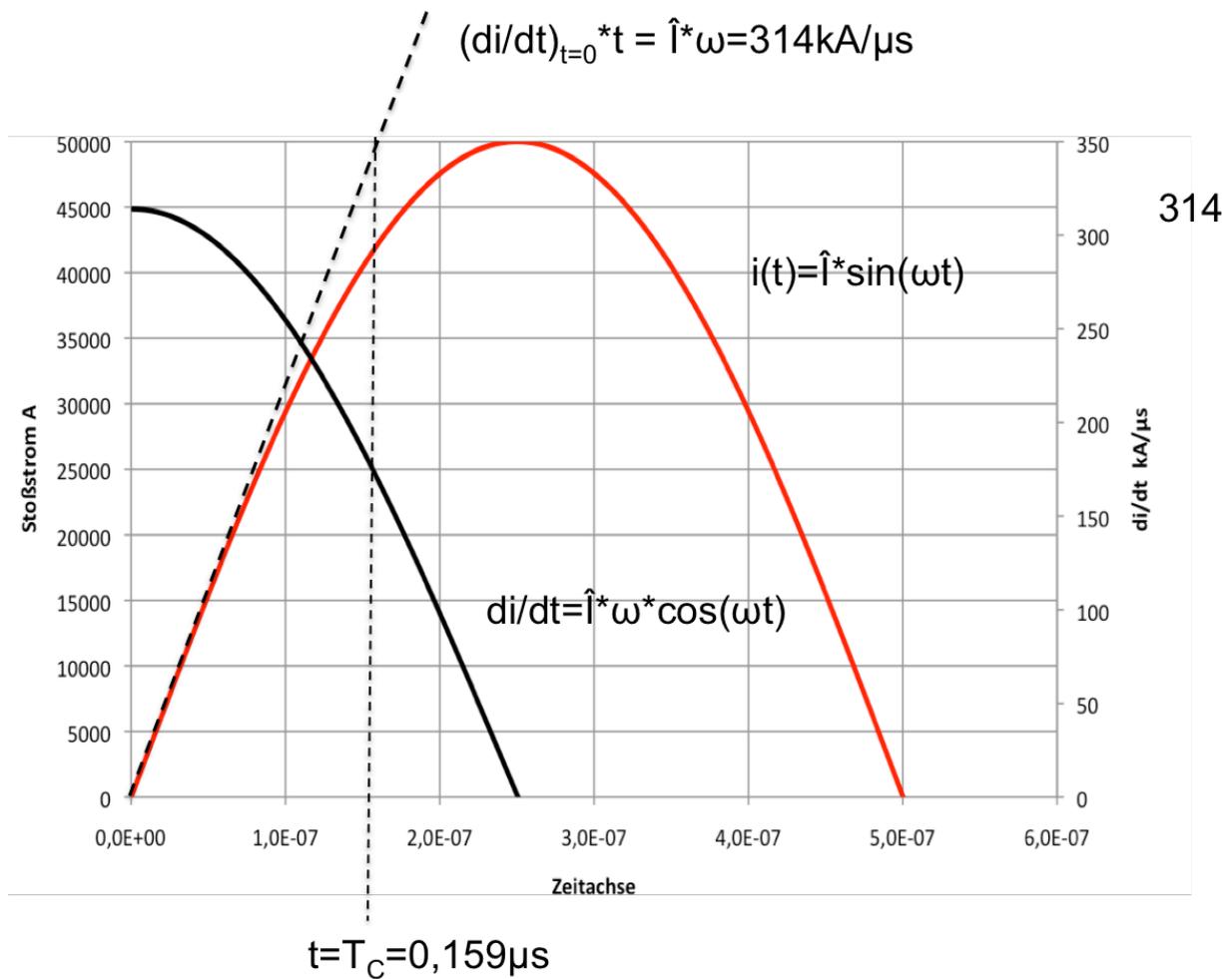


Bild 7-5 Skizze zur Darstellung des negativen Stoßstroms, der durch eine Sinus-Funktion nachgebildet ist. Die erste Ableitung ergibt die cosinus-Funktion. Die Tangente im Nullpunkt wird mit der Geradengleichung beschrieben. Dieses Beispiel gilt für den negativen Folgestoßstrom 0,25/100 mit 50kA Scheitelwert.

Für eine Berechnung nach der angewandten Frequenz gilt:

$$\frac{di}{dt} = \hat{I} \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

für $t = 0$ folgt :

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{t=0} = \hat{I} \cdot \omega \cdot 1$$

Einsetzen in Gleichung 7-9 ergibt

$$s[m] = \frac{U_T [kV]}{600 kV \cdot (1 + 2 \cdot \pi \cdot f [MHz])}$$

U_T : Mit GSA für die Frequenz f ermittelte Spannung

Gleichung 7-13