Fachhochschule Südwestfalen · P.O. box 14 65 · D-59474 Soest · Germany

Fachhochschule Südwestfalen
Hochschule für Technik und Wirtschaft
University of Applied Sciences

Berechnung der Stromverteilung in den Ableitungen eines äußeren Blitzschutzsystems unter Berücksichtigung der Erdungsanlage.

Version 3 22.2.2015

Soest,
22.2.2015

Department of Electrical Engineering

Prof.Dr.-Ing.
Jan Meppelink

Laboratory for
High Voltage Engineering

Phone
+49 29 21 / 378-272
Mobile
+49 1 722312375
Fax
+49 29 21 / 378-271
E-Mail:
janmeppelink@mac.com
web:

Campus Soest
D-Lübecker Ring 2
59494 Soest
Germany

Fachhochschule
Südwestfalen
Head Office: Iserlohn

Hagen
Iserlohn
Meschede
Soest

Executive Summary

Für die Berechnung der Schritt und Berührungsspannung mit dem Programm GSALab bis 1 MHz ist die Kenntnis der Blitzteilströme in den einzelnen Ableitungen erforderlich. Die Berechnung erfolgt mit Microcap unter Berücksichtigung der Wanderwellen im Erdsystem. Diese Berechnung erfolgt im Frequenz- und im Zeitbereich. Damit können diese Blitzteilströme im Programm GSA in die einzelnen Anschlüsse des Erdsystems eingespeist werden.

Für die Modellierung der Horizontl- und Vertkalerder eignet sich ein Kettenleitermodell. Eine Modellierung als Wanderwellenleitung (R,L,G) ist nicht Zielführend.

Der Eckeinschlag in ein Gebäude ist der Worst case. Dabei fließt der größte Blitzteilstrom in die direkt betroffene Ableitung. Daher wird nur dieser Fall untersucht.

Die k_c-Koeffizienten in IEC 62305-3 wurden mit konzentrierten Elementen **ohne Berücksichtigung des Erdsystems** bestimmt. Eine Nachrechnung der Werte aus einer Veröffentlichung von Beierl/Steinbiegler mit dem Simulationsprogramm Microcap hat diese Werte an einem Gebäude mit 10 Ableitungen bestätigt. Weiterhin wurden Gebäude mit 12 und 24 Ableitungen verifiziert. Microcap eignet sich vollumfänglich für die einfache Berechnung der Stromaufteilung.

Eine zentrale Annahme ist die Dualität von Frequenz- und Zeitbereich. Dabei wird der Anstieg eines Blitzstromes durch einen äquivalenten sinusförmigen Strom angenähert.

Eine Berechnung der Stromaufteilung im Frequenzbereich von 1 Hz bis 1 MHz deckt daher in einem Berechnungsgang alle drei Stromimpulse ab. Durch einige vergleichende Untersuchungen im Zeit-und Frequenzbereich, siehe Abschnitt 7, konnte nachgewiesen werden, dass diese Annahmen zutreffen und die Stromaufteilung aus dem Frequenzgang ziemlich genau mit der aus der Berechnung im Zeitbereich übereinstimmt. Daher reicht für die Berechnung der Schritt- und Berührungsspannung mit GSALab aus, die Ergebnisse aus dem Frequenzbereich zu verwenden, da sie in einem Rechengang alle Informationen für die drei Blitzstromformen bereitstellen.

Bei den Simulationen der Vertikal und Horizontalleiter zeigt sich beim 0,25/100 – Impuls in der Zeitbereichssimulation das ausgeprägte Resonanzverhalten durch überlagerte Schwingungen. Im Frequenzbereich treten diese Überschwingungen als Resonanzstelle auf.

Für Vertikal und Horizontalerder wurden die Modelle unter Berücksichtigung der Frequenzabhängigen Kapazität für Microcap entwickelt und verifiziert. Speziell für Gittererder wurden die Impedanzparameter bestimmt und Modelle für die Simulation im Zeit- und Frequenzbereich entwickelt.

Als Nebenaspekt ist die Frage der effektiven Erderlänge untersucht worden. Dabei zeigt die Simulation, daß eine Verlängerung eines Erders über die effektive Länge hinaus keine weitere Reduktion der Erderspannung bringt. Der Effekt ist besonders bei einem kleinen Wert des spezifischen Erdwiderstands sichtbar. So beträgt die effektive Erderlänge bei einem Wert von 100 Ohmm etwa 10 m.

Der spezifische Erdwiderstand hat nur einen untergeordneten Einfluss. Im Wesentlichen ist die Topologie für die Stromverteilung maßgebend.

Für Gittererder ergeben sich folgende Resultate. Der spezifische Erdwiderstand beeinflusst die Stromverteilung nur unmerklich. Das ist durch das stark kapazitive Verhalten eines Gittererders bedingt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt ebenfalls eine vernachlässigbare Abhängigkeit der Stromaufteilung von der Kapazität. Bedingt durch stärkere Schwingungen im Zeitbereich liegen die Werte etwas über denen aus dem Frequenzbereich.

Für ein Gebäude mit 1m Breite und 10 m Höhe bei einem Abstand der Ableitungen von konstant 10m ergeben sich folgende Resultate.
Es zeigt eine fallende Tendenz der Stromaufteilung mit zunehmender Gebäudelänge. Für 0,25/100 und 1/200 ist praktisch nach 20 m keine Änderung mehr feststellbar. Nur bei 10/350 fällen die Werte weiter ab mit zunehmender Gebäudelänge.

Weitere Parameterstudien wie Gebäudehöhe, Gebäudebreite und Abstand der Ableitungen wurden nicht mehr durchgeführt. Dies muss im Einzelfall für eine Berechnung der Schrittspannung in GSA vorbereitet werden. Diese Fallstudie zeigt daher die Tendenzen auf.

Handlungsempfehlung für die Berechnung in GASLab:

Für eine erste Analyse reicht die Frequenzbereichsanalyse aus. Der spezifische Bodenwiderstand kann für die Berechnung der Stromaufteilung in den Ableitungen für erste Analyse vernachlässigt werden. Allgemeine Aussagen können natürlich nicht gemacht werden. Es ist daher immer im Einzelfall zu prüfen, wie die Stromverteilung gelagert ist, insbesondere bei größeren Gebäuden.

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel dieser Arbeit 17

2 Stand der Wissenschaft 17

3 Normativer Hintergrund 17

4 Berechnungsmethoden 17
4.1 Analytische Methoden 17
4.2 Numerische Feldberechnung mit FEM 17
4.3 GSALab 17
4.3.1 GSALab Berechnungsgang 17
4.3.2 Bemerkungen zum Zeit- und Frequenzbereich 18

5 Stromverteilung in Ableitungen 22
5.1 Quasistationäre Berechnung der Stromverteilung in den Ableitungen ohne Berücksichtigung des Erdsystems. 22
5.1.1 Nachrechnung der Steinbieglerwerte für 0,25/100 22
5.1.2 IEC Gebäude kubisch und mit k für 0,25/100 25
5.1.2.1 IEC Gebäude kubisch und mit k Einspeiseort A 26
5.1.2.2 IEC Gebäude kubisch und mit k Einspeiseort B 27
5.1.2.3 IEC Gebäude kubisch und mit k Einspeiseort C 28
5.2 Instationäre Berechnung der Stromverteilung mit Wanderwellenleitungen mit (Z_0,T) für die Ableitungen und Erder 30

6 Wanderwellenausbreitung auf Vertikal- und Horizontalerdern im Erdboden 32
6.1.1 Exakte Berechnung einer unendlich langen Leitung im Erdreich mit 4 Parametern im Frequenzbereich 32
6.1.1.1 Vertikale Leitung 34
6.1.1.2 Horizontale Leitung 37
6.1.1.3 Anwendbarkeit der Leitungstheorie auf Leitungen endlicher Länge 39
6.1.2 Die Verhältnisse bei einer Modellierung als Kettenleiter mit Microcap 42
6.1.2.1 Vertikalerder als Kettenleiter 42
6.1.2.1.1 Frequenzbereichsanalyse für Vertikalerder als Kettenleiter 45
6.1.2.1.2 Zeitbereichsanalyse für Vertikalerder als Kettenleiter 46
6.1.2.1.3 Für 0,25/100 Impuls 50 kA 46
6.1.2.1.4 Für 1/200 Impuls 100 kA 49
6.1.2.1.5 Für 10/350 Impuls 200 kA 52
6.1.2.1.5.1 Vergleich der Ergebnisse 55
6.1.2.2 Horizontalerder als Kettenleiter 56
6.1.2.2.1 Frequenzbereichsanalyse für Horizontalerder als Kettenleiter 59
6.1.2.2.2 Zeitbereichsanalyse für Horizontalerder als Kettenleiter 60
6.1.2.2.2.1 Für 0,25/100 Impuls 50 kA 60
6.1.2.2.2.2 Für 1/200 Impuls 100 kA 61
6.1.2.3 Längenabhängigkeit der Spannungs- und Stromverteilung in einem Horizontalleiter als Kettenleiter 64
6.1.2.3.1 Frequenzgang 64
6.1.2.3.2 Zeitbereichsanalyse 67
6.1.2.3.3 Analyse der effektiven Erderlänge 70
6.1.3 Die Verhältnisse bei einer Modellierung mit Maxwellschen Gleichungen 71

7 Fallstudie der Stromverteilung an einem Gebäude 10m x 10m, 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen und 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen im Frequenz- und Zeitbereich 72
7.1 Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern 72
7.1.1 Frequenzbereichsanalyse 73
7.1.2 Zeitbereichsanalyse 79
7.1.2.1 0,25/100 79
7.1.2.2 1/200 80
7.1.2.3 10/350 81
7.1.3 Erklärung der überlagerten Schwingungen in der Zeitbereichsanalyse 81

7.1.4 Einfluss des Erdungssystems auf die Stromverteilung 83
7.1.4.1 Frequenzbereichsanalyse 83
7.1.4.2 Zeitbereichsanalyse 85
7.1.5 Vergleich der Ergebnisse 87
7.2 Einfluss einer Netzversorgungsleitung nach Ansprechen der Class I Ableiter: Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern 91
7.2.1 Frequenzbereichsanalyse 92
7.2.1.1 Frequenzbereichsanalyse der Ableitungsströme 92
7.2.1.2 Frequnzbereichsanalyse des Ableitungsstroms Nord, Netzkabel und Erder Nord 94
7.2.2 Zeitbereichsanalyse 96
7.2.2.1 Zeitbereichsanalyse der Ableitungsströme 96
7.2.2.1.1 0,25/100 96
7.2.2.1.2 1/200 98
7.2.2.1.3 10/350 99
7.2.2.2 Zeitbereichsanalyse des Ableitungsstromes Nord, Netzkabel und Vertikalerder Nord 101
7.2.2.2.1 0,25/100 101
7.2.2.2.2 1/200 105
7.2.2.2.3 10/350 106
7.2.3 Vergleich der Ergebnisse 108
7.3 Gebäude 10 m x 10 m mit 4 Ableitungen und Gittererder aus 6 mm Edelstahldraht 111
7.3.1 Frequenzbereichsanalyse 111
7.3.1.1 Gitter 10 cm x 10 cm 111
7.3.1.2 Gitter 25 cm x 25 cm 113
7.3.1.3 Gitter 50 cm x 50 cm 114
7.3.2 Zeitbereichsanalyse 115
7.3.2.1 Gitter 10 cm x 10 cm 115
7.3.2.2 Gitter 25 cm x 25 cm 117
7.3.2.3 Gitter 50 cm x 50 cm 118
7.3.3 Vergleich der Ergebnisse 120
7.4 Gebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen 10 m und Gittererder aus 6 mm Edelstahldraht 122
7.4.1 Frequenzbereichsanalyse 122
7.4.1.1 Gitter 10 cm x 10 cm 122
7.4.1.2 Gitter 25 cm x 25 cm 123
7.4.1.3 Gitter 50 cm x 50 cm 124
7.4.2 Zeitbereichsanalyse 125
7.4.2.1 Gitter 10 cm x 10 cm 125
7.4.2.2 Gitter 25 cm x 25 cm 127
7.4.2.3 Gitter 50 cm x 50 cm 128
7.4.3 Vergleich der Ergebnisse 130
7.5 Gebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen 10 m und Gittererder aus 6 mm Edelstahldraht 132
7.5.1 Frequenzbereichsanalyse 132
7.5.1.1 Gitter 10 cm x 10 cm 132
7.5.1.2 Gitter 25 cm x 25 cm 133
7.5.1.3 Gitter 50 cm x 50 cm 133
7.5.2 Zeitbereichsanalyse 135
7.5.2.1 Gitter 10 cm x 10 cm 135
7.5.2.2 Gitter 25 cm x 25 cm 136
7.5.2.3 Gitter 50 cm x 50 cm 137
7.5.3 Vergleich der Ergebnisse 138
7.6 Gebäude 15 m x 45 m mit 8 Ableitungen 10 m und Gittererder aus 6 mm Edelstahldraht mit Maschenweite 150 cm x 150 cm. 141

8 Fallstudie Gebäude mit Kettenleitermodellierung der Horizontalerder 10m, 20 m und 30m und Vertikalerder 9 m und Wanderwellenmodellierung der Ableitungen für Gebäude mit 12 und 24 Ableitungen. 144
8.1 Gebäude mit 12 Ableitungen und Horizontalleitern 10,20 und 30m. 144
8.2 Gebäude mit 12 Ableitungen und Horizontalleitern 10,20 und 30m. 144
8.2.1 Stromaufteilung der Einspeisung und der benachbarten Ableitungen. 145
8.2.2 Stromaufteilung im Frequenz und Zeitbereich für alle Ableitungen. 147
8.2.2.1 Horizontalleiter von 10 m Länge. 147

8.2.2.2 Horizontalleiter von 20 m Länge. 148
8.2.2.3 Horizontalleiter von 30 m Länge. 149
8.3 Gebäude mit 24 Ableitungen. 150
8.3.1 Stromaufteilung der Einspeisung und der benachbarten Ableitungen. 150
8.3.2 Stromaufteilung im Frequenz und Zeitbereich für alle Ableitungen. 152
8.3.2.1 Horizontalleiter von 10 m Länge. 152
8.3.2.2 Horizontalleiter von 20 m Länge. 153
8.3.2.3 Horizontalleiter von 30 m Länge. 154

9 Fallstudie Gebäude mit Kettenleitermodellierung der Erder und Wanderwellenmodellierung der Ableitungen für Gebäude mit einer Breite von 10 m und 10 m Höhe bei veränderter Gebäudelänge und konstantem Abstand der Ableitungen von 10m. 155

10 Anhang Bestimmung der Leitungsdaten von im Erdreich verlegten Energieversorgungsleitungen und Telefonleitungen 166
10.1 Energieversorgungsleitungen 166
10.2 Telefonleitungen 169

11 Anhang Bestimmung der Leitungsdaten von Vertikal- und Horizontalableitungen. 172
11.1 Vertikale Ableitung an einem gewöhnlichen Gebäude ohne Armierung 172
11.2 Horizontale Ableitung an einem gewöhnlichen Gebäude ohne Armierung 173

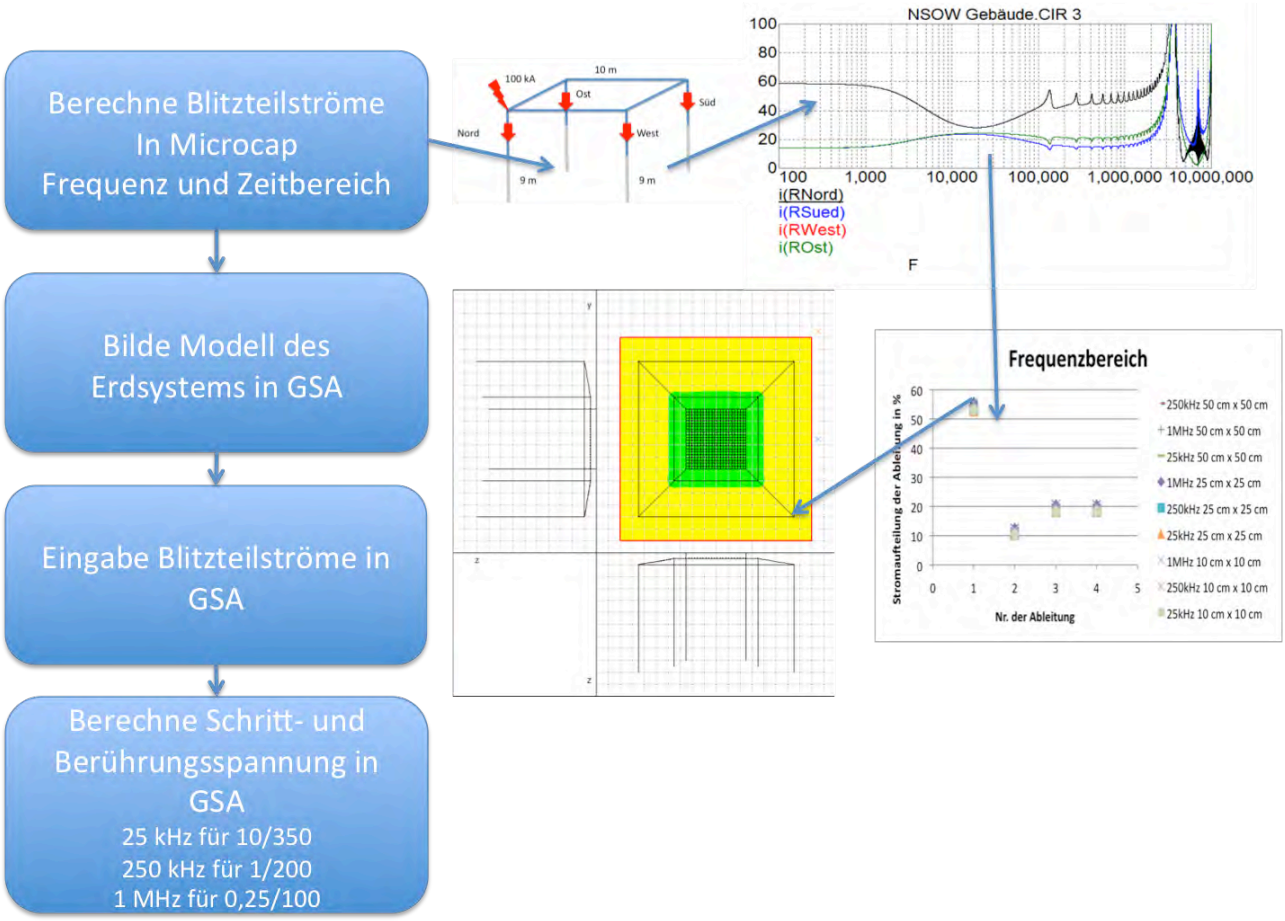
12 Anhang Modellierung eines Gitters für die Simulation in Microcap. 174
12.1 Berechnung der Impedanzwerte R`und L` 174
12.2 Berechnung des Ausbreitungswiderstands eines Einheitsgitters von 1m x 1m 176
12.3 Berechnung der Kapazität eines Gitters gegen ferne Erde 179
12.4 Modellbildung für die Berechnung der Stromverteilung mit Microcap 182

13 Anhang Test Microcap C(W) 184

14 Anhang Impedanzen Z, R`und L´ von Ableitungen 185

Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die Berechnung der Schritt und Berührungsspannung mit dem Programm GSALab bis 1 MHz ist die Kenntnis der Blitzteilströme in den einzelnen Ableitungen erforderlich. Die Berechnung erfolgt mit Microcap unter Berücksichtigung der Wanderwellen im Erdsystem. Diese Berechnung erfolgt im Frequenz- und im Zeitbereich. Damit können diese Blitzteilströme in die einzelnen Anschlüsse des Erdsystems eingespeist werden. Dazu wurden verschiedene Modelle untersucht. Der Berechnungsgang ist in der folgenden Grafik gezeigt.

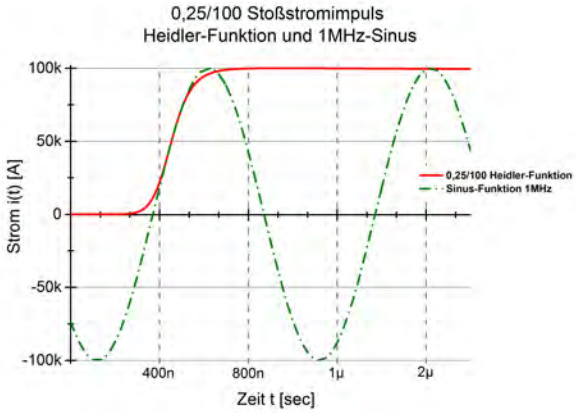


Berechnungsgang

Der Eckeinschlag in ein Gebäude ist der Worst case. Dabei fließt der größte Blitzteilstrom in die direkt betroffene Ableitung. Daher wird nur dieser Fall untersucht.

Die k_c-Koeffizienten in IEC 62305-3 wurden mit konzentrierten Elementen **ohne Berücksichtigung des Erdsystems** bestimmt. Eine Nachrechnung der Werte aus einer Veröffentlichung von Beierl/Steinbiegler mit dem Simulationsprogramm Microcap hat diese Werte an einem Gebäude mit 10 Ableitungen bestätigt. Weiterhin wurden Gebäude mit 12 und 24 Ableitungen verifiziert. Microcap eignet sich vollumfänglich für die einfache Berechnung der Stromaufteilung.

Eine zentrale Annahme ist die Dualität von Frequenz- und Zeitbereich. Dabei wird der Anstieg eines Blitzstromes durch einen sinusförmigen Strom angenähert.



Beispiel der Äquivalenz der Stromanstiege für den 0,25/100 Impuls, der im Anstieg durch eine Sinusfunktion mit einer Frequenz von 1 MHz angenähert wird.

Stromform Zeitbereich	Viertelperiodendauer Sinusform	Periodendauer Sinusform	Äquivalente Frequenz im Anstieg des Stoßstroms
0,25/100	0,25 µs	1 µs	1 MHz

1/200	1 µs	4 µs	250 kHz
10/350	10 µs	40 µs	25 kHz

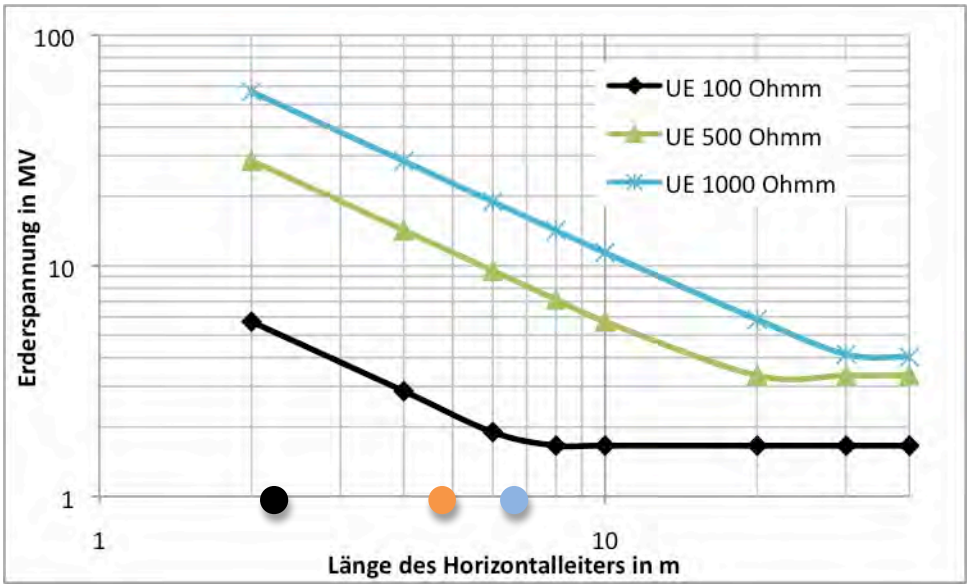
Eine Berechnung der Stromaufteilung im Frequenzbereich von 1 Hz bis 1 MHz deckt daher in einem Berechnungsgang alle drei Stromimpulse ab. Durch einige vergleichende Untersuchungen im Zeit-und Frequenzbereich, siehe Abschnitt 7, konnte nachgewiesen werden, dass diese Annahmen zutreffen und die Stromaufteilung aus dem Frequenzgang ziemlich genau mit der aus der Berechnung im Zeitbereich übereinstimmt. Daher reicht für die Berechnung mit GSALab aus, die Ergebnisse aus dem Frequenzbereich zu verwenden, da sie in einem Rechengang alle Informationen für die drei Blitzstromformen bereitstellen.

Bei den Simulationen der Vertikal und Horizontalleiter zeigt sich beim 0,25/100 – Impuls in der Zeitbereichssimulation das ausgeprägte Resonanzverhalten durch überlagerte Schwingungen. Im Frequenzbereich treten diese Überschwingungen als Resonanzstelle auf.

Soll das Erdsystem für die Berechnung der Schritt- und Berührungsspannung mit berücksichtigt werden, muss der Laufzeiteffekt im Erdsystem modelliert werden. Detaillierte Untersuchungen haben gezeigt, dass die in der Literatur angegebenen Modelle mit Wanderwellenleitungen mit den Parametern R`,L,` und G` nicht geeignet sind, da deren Wellenwiderstände sich für kleine Frequenzen nicht mit den Werten des Ausbreitungswiderstands decken. Das Problem liegt darin begründet, dass die R`,L,` und G` Modellierung nur für elektrisch lange Leitungen gilt. Diese Voraussetzung ist aber bei Erdern von 10 m Länge nicht erfüllt. Rechnet man mit den berechneten Wellenwiderständen aus den Veröffentlichungen (Hasse/Wiesinger, Handbuch Blitzschutz und Erdung), ergeben sich sehr stark überschwingende Stromverläufe. Daher wurden für die Berechnungen der Stromaufteilung mit Erdsystem Kettenleitermodelle verwendet, deren Wellenwiderstand sich bei kleinen Frequenzen mit dem Ausbreitungswiderstand deckt. Damit lassen sich aussagekräftige Ergebnisse erzielen.

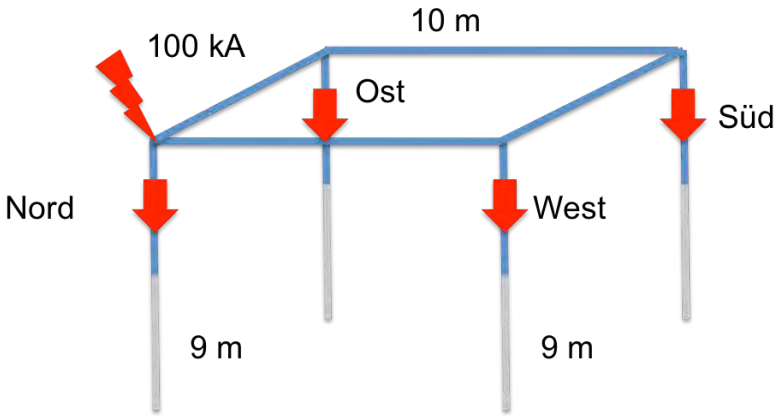
Für Vertikal und Horizontalerder wurden die Modelle unter Berücksichtigung der Frequenzabhängigen Kapazität für Microcap entwickelt und verifiziert. Speziell für Gittererder wurden die Impedanzparameter bestimmt und Modelle für die Simulation im Zeit- und Frequenzbereich entwickelt.

Als Nebenaspekt ist die Frage der effektiven Erderlänge untersucht worden. Dabei zeigt die Simulation, daß eine Verlängerung eines Erders über die effektive Länge hinaus keine weitere Reduktion der Erderspannung bringt. Der Effekt ist besonders bei einem kleinen Wert des spezifischen Erdwiderstands sichtbar. So beträgt die effektive Erderlänge bei einem Wert von 100 Ohmm etwa 10 m.



Abhängigkeit der Erderspannung von der Länge des Horizontalleiters. Die Kreise auf der Längenachse zeigen die berechneten effektiven Erderlängen nach der Formel von Wiesinger mit 4,4 m; 10m und 14 m.

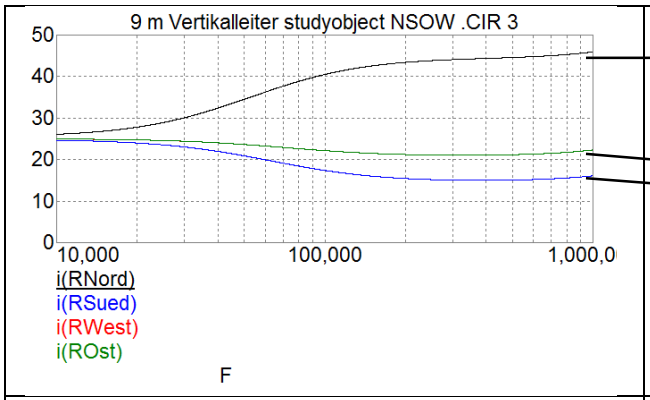
Eine Analyse eines **10 m x 10 m- Gebäudes mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern** zeigt folgende Ergebnisse:



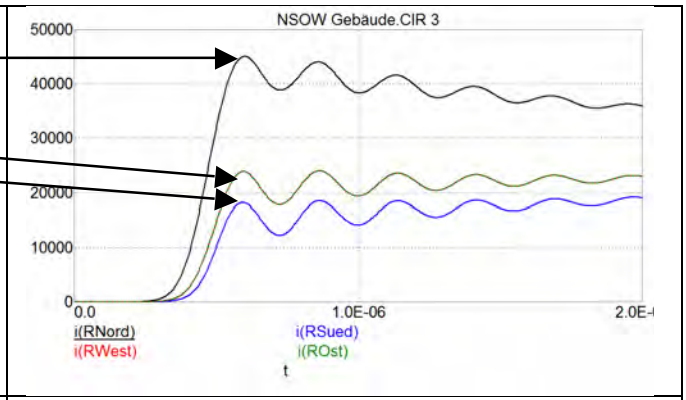
Modell des Gebäudes mit Kennzeichnung der Ströme i den Ableitungen.
In den Simulationen wird auf Nord-Süd-Ost-West bezogen.
In Exceldiagrammen sind die Ableitungen mit 1,2,3,4 benannt wobei 1=Nord, 2=Süd usw.

Stromaufteilung in der Simulation **mit Erdsystem:**

Die Stromaufteilung, die sich aus der Frequenzbereichssimulation stimmt gut mit der Zeitbereichssimulation überein.

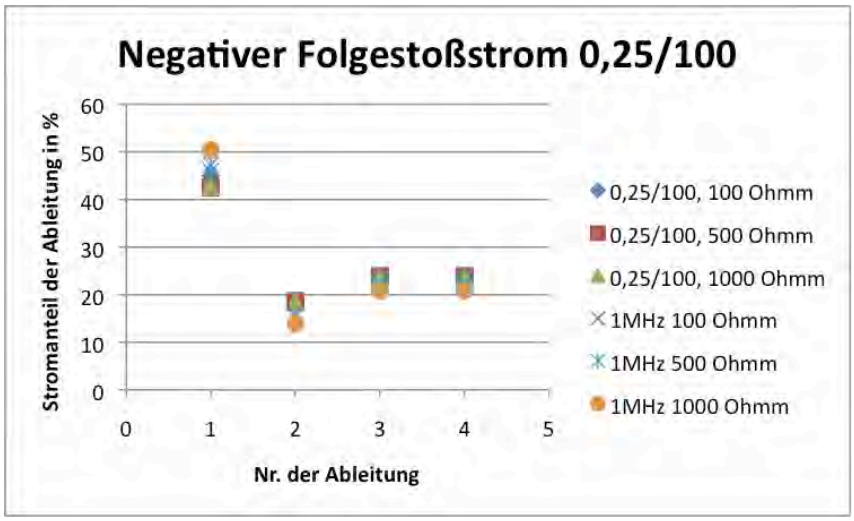


Stromaufteilung als Frequenzgang, ρ_E=100 Ohmm

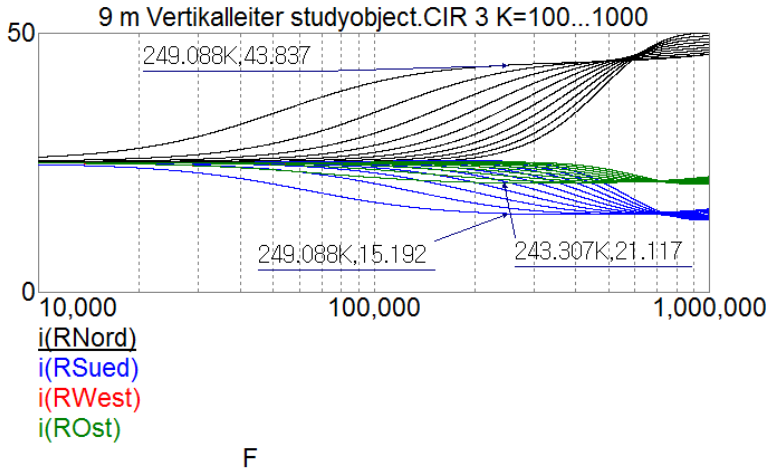


Stromaufteilung für den negativen Folgestoßstrom 0,25/100, ρ_E=100 Ohmm

Vergleich: Frequenzgang und Zeitbereichsanalyse



Auswertung der Stromverteilung für ein Gebäude 10 m x 10 m mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern für 0,25/100

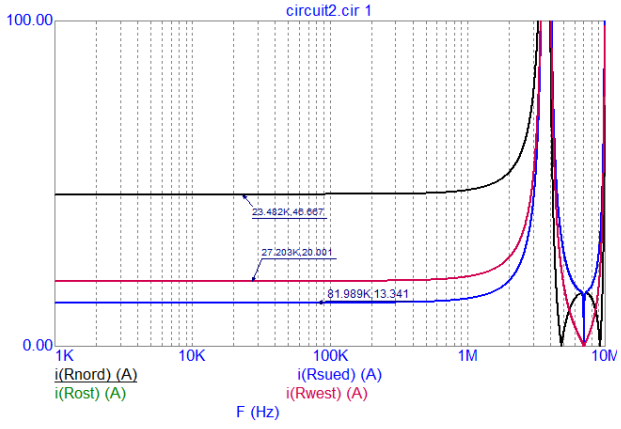


Stromaufteilung als Frequenzgang mit stepping des spezifischen Erdwiderstands von ρ_E=100 Ohmm....1000 Ohmm. Die Indikatoren geben die Werte für 1000 Ohmm an.

Beim 1/200 – Impuls zeigt sich allerdings eine größere Streuung, abhängig vom spezifischen Erdwiderstand. Für ein Gebäude mit 4 Ableitungen gibt IEC 62305-3 einen k_c Wert (Dabei ist nach IEC kein Erdungssystem berücksichtigt) von 0,44 an. IEC 62305 gibt andererseits keine Werte für die Blitzteilströme in den anderen Ableitungen. Für den negativen Folgestoßstrom 0,25/100 bzw. für 1 MHz passt der berechnete Wert zu dem IEC – Wert. Für die anderen Impulsformen verschiebt sich die Stromaufteilung in Richtung kleinerer Teilströme. Der spezifische Erdwiderstand hat nur einen geringen Einfluss auf die Stromaufteilung.

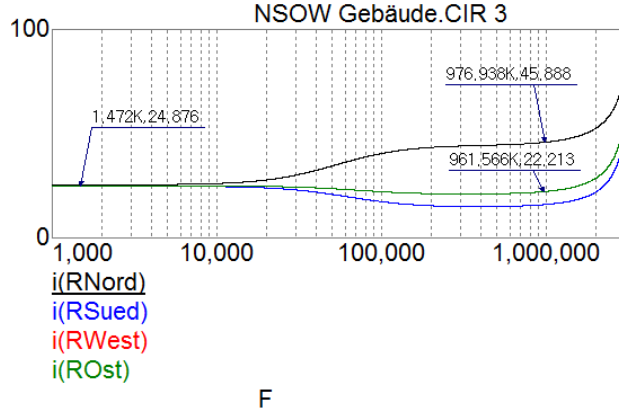
Stromaufteilung ohne Erdsystem.

Im Frequenzbereich zeigt sich eine nahezu frequenzunabhängige Stromverteilung bis zu Frequenzen oberhalb 1 MHz. Erst danach zeigen sich ausgeprägte Resonanzen durch Wanderwellenschwingungen. Dieser Effekt ist darin begründet, dass die Ableitungen nicht frequenzabhängig sind, sondern durch den Wellenwiderstand (konstant) und die Laufzeit (konstant) bestimmt sind.
Im Zeitbereich, für 0,25/100, zeigt die Simulation ohne Erdungssystem in dem Stromverlauf etwas stärker ausgeprägte überlagerte Schwingungen als im Fall mit Erdungssystem. Die Berechnung mit Erdsystem liefert für die Nordableitung einen k_c-Wert von 0,45 und ohne Erdsystem von 0,48. Man liegt daher mit der Berücksichtigung des Erdsystems auf der sicheren Seite. Das die IEC Werte passen, liegt daran, dass die IEC Werte mit Ableitungen aus konzentrierten Elementen berechnet wurden, wobei keine Wanderwellenschwingungen auftreten.
Die Werte aus der Frequenzbereichsanalyse liegen gering unter denen aus der Zeitbereichsanalyse. Das ist durch die im Zeitbereich ausgeprägten überlagerten Schwingungen bedingt. Für die anderen Impulsformen 1/200 und 10/350 zeigen sich größere Unterschiede für die Ableitung Nord. **Für die spätere Berechnung der Schrittspannung mit GSA werden aber stets die Werte mit Erdungssystem verwendet**.



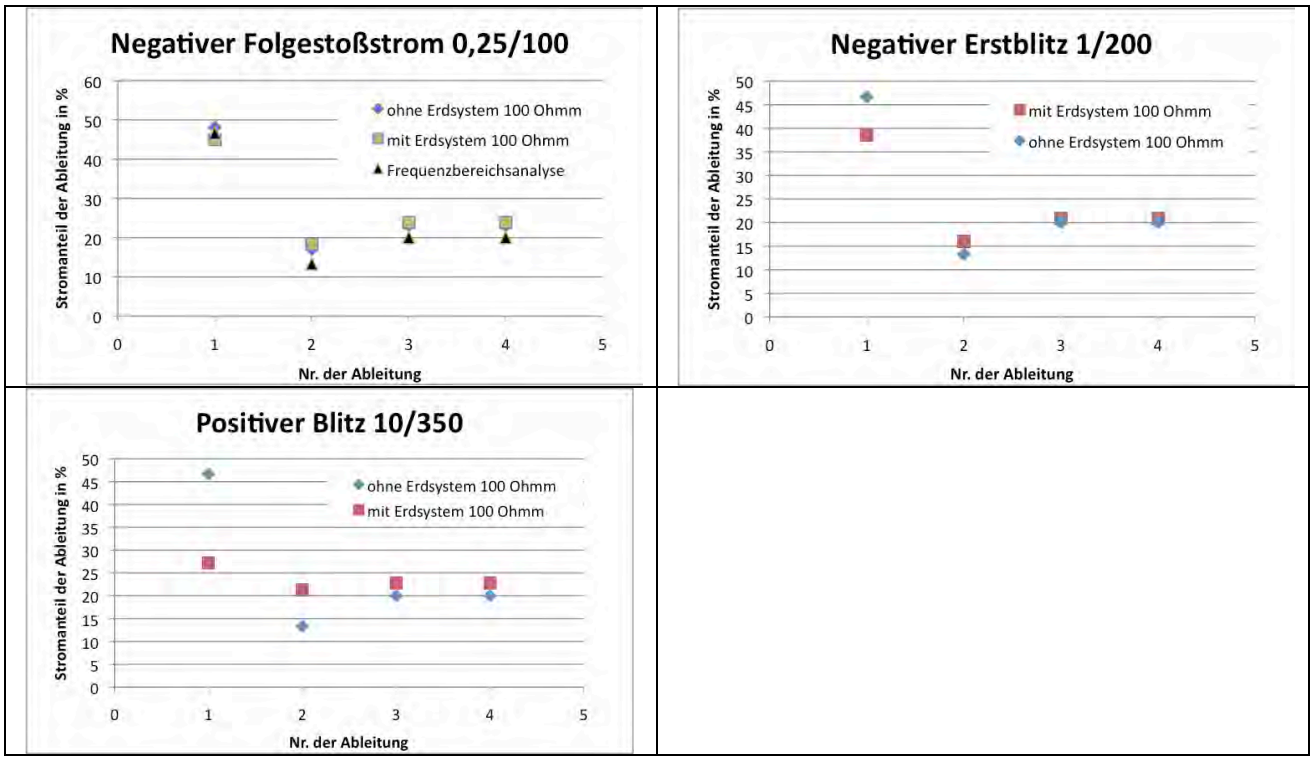
Stromverteilung **ohne Erdsystem**:
Frequenzbereichsanalyse der Stromverteilung.
ρ_E ist hier nicht anwendbar, da kein Erdsystem.

10 m x 10 m Gebäude mit 4 Ableitungen



Stromverteilung **mit Erdsystem** und ρ_E=100 Ohmm.
Frequenzbereichsanalyse der Stromverteilung

10 m x 10 m Gebäude mit 4 Ableitungen und vier Tiefenerdern 9m



Vergleich der Stromaufteilung **ohne und mit Erdungssystem** in einem Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Vertikalableitungen für ρ_E=100 Ohmm. Ausgewertet wurden die Peakwerte der Teilströme.

Einfluss einer Netzversorgungsleitung

Eine Netzversorgungsleitung wurde modelliert und bei der Berechnung der Stromverteilung berücksichtigt.

Die Stromaufteilung für 0,25/100 auf die Ableitungen bleibt unabhängig davon, ob ein Netzkabel angeschlossen wird oder nicht. Für die Berechnung des Näherungsabstands ändert sich daher nichts, wenn ein Netzkabel angeschlossen wird.

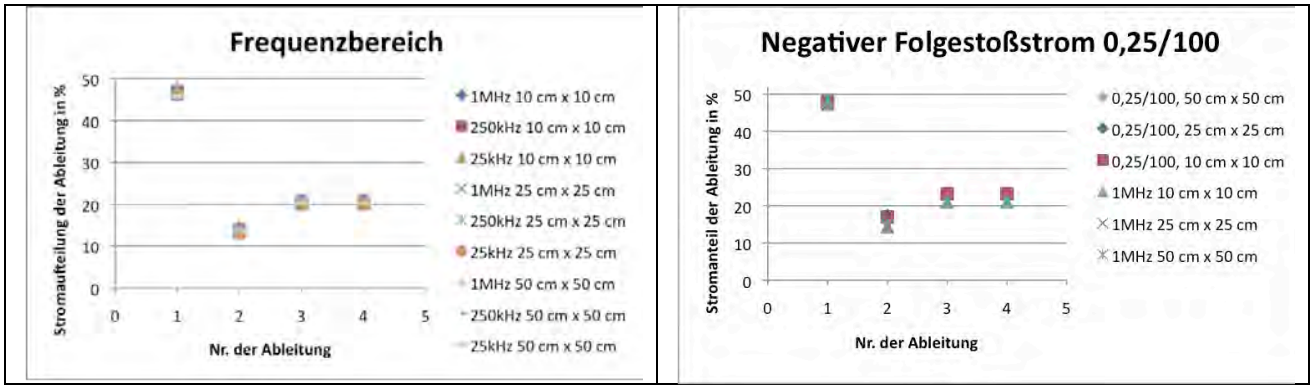
Für den 0,25/100-Impuls: Der Teilstrom im Erder Nord (Einspeisung des Blitzstroms) wird mit zunehmendem spezifischen Erdwiderstand geringer weil mehr Strom in das Netzkabel abfließen kann. **Für die Betrachtung der Schrittspannung ist daher der Anschluss eines Netzkabels vorteilhaft, weil dadurch der Teilstrom im Erder kleiner und damit auch die Schrittspannung kleiner wird.**

Für den 1/200 und den 10/350-Impuls ergeben sich für die Nordableitung deutlichere Unterschiede in der Stromaufteilung ohne bzw. mit Netzkabel.

Schwieriger wird die Aussage zu den Teilströmen bei 1/200 und 10/350. Da die Maxima zu deutlichen unterschiedlichen Zeiten auftreten, ist ein Vergleich problematisch. Hier muss im Einzelfall der Strom in den Erder Nord analysiert und in die Berechnung der Schrittspannung für GSALab1MHz eingegeben werden.

Eine Analyse eines **10 m x 10 m- Gebäudes mit 4 Ableitungen und Gittererder** zeigt folgende Ergebnisse:

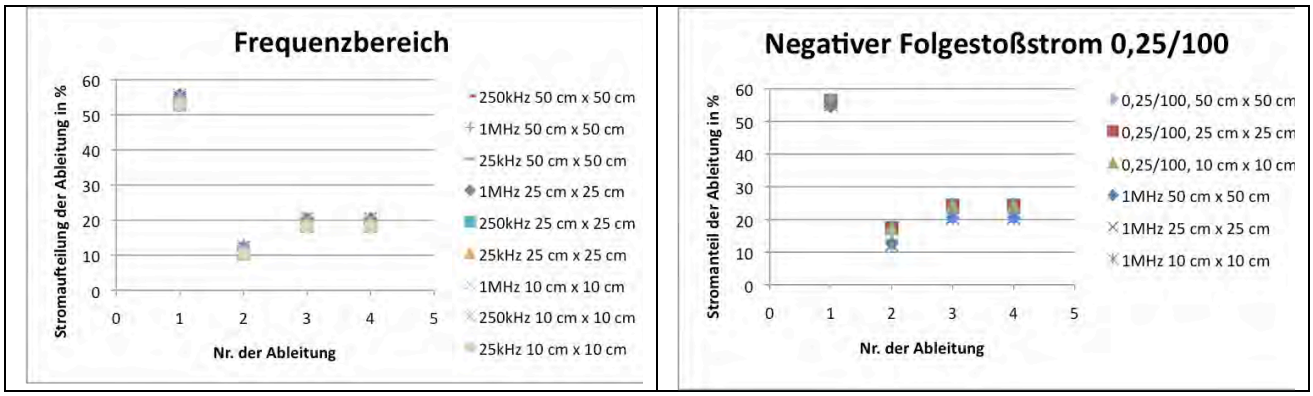
Die Analyse zeigt, **dass der spezifische Erdwiderstand die Stromverteilung nur unmerklich beeinflusst.** Das ist durch das stark kapazitive Verhalten eines Gittererders bedingt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt ebenfalls eine vernachlässigbare Abhängigkeit der Stromaufteilung von der Kapazität. Bedingt durch stärkere Schwingungen im Zeitbereich liegen die Werte etwas über denen aus dem Frequenzbereich.



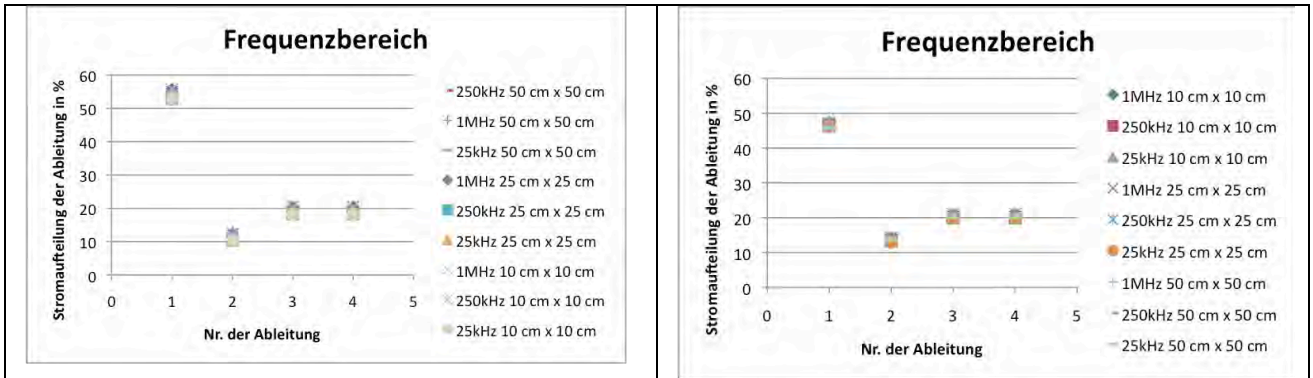
Gebäude 10 m x 10 m mit 4 Ableitungen und Gittererder im Frequenzbereich und für 0,25/100.
Gültig für ρ_E=100 Ohmm.... 1000 Ohmm.

Eine Analyse eines **15 m x 15 m- Gebäudes mit 4 Ableitungen und Gittererder** zeigt folgende Ergebnisse:

Die Analyse zeigt, **dass der spezifische Erdwiderstand die Stromverteilung nur unmerklich beeinflusst.** Die Stromaufteilung ist bei allen Gitterformen nahezu gleich. Weder die Frequenz, noch die Impulsform beeinflussen die Stromaufteilung. Beim 0,25/100 Impuls sind die Werte etwas größer als die aus der Frequenzbereichsanalyse. Das ist durch stärkeres Überschwingen aufgrund längerer Ableitungen auf dem Gebäude (15 m statt 10 m) begründet. Damit vereinfacht sich die Berechnung der Schrittspannung mit GSA, da immer die gleichen Werte der Stromeinspeisung in die einzelnen Ableitungen verwendet werden können.
Gegenüber den Ergebnissen eines 10 m x 10 m Gebäudes kann aber festgestellt werden, dass die Ableitung 1 einen größeren Strom führt.



Gebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen und Gittererder im Frequenzbereich und für 0,25/100**.**
Gültig für ρ_E=100 Ohmm.... 1000 Ohmm



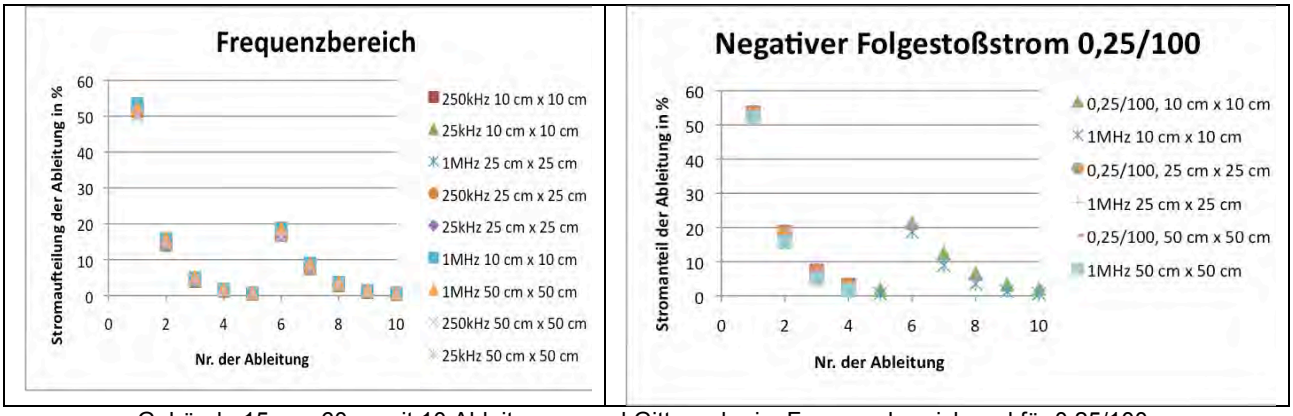
Gebäude 15 m x 15 m	Gebäude 10 m x 10 m

Vergleich zweier Gebäude , 1 m x 10 m und 15 m x 15 m.
Gültig für ρ_E=100 Ohmm.... 1000 Ohmm

Eine Analyse eines **15 m x 60 m- Gebäudes mit 10 Ableitungen und Gittererder** zeigt folgende Ergebnisse:

Die Analyse zeigt, **dass der spezifische Erdwiderstand die Stromverteilung nur unmerklich beeinflusst.** Die Stromaufteilung ist bei allen Gitterformen nahezu gleich. Weder die Frequenz, noch die Impulsform beeinflussen die Stromaufteilung. Beim 0,25/100 Impuls sind die Werte etwas größer als die aus der Frequenzbereichsanalyse. Das ist durch stärkeres Überschwingen aufgrund längerer Ableitungen auf dem Gebäude begründet. Damit vereinfacht sich die Berechnung der Schrittspannung mit GSA, da immer die gleichen Werte der Stromeinspeisung in die einzelnen Ableitungen verwendet werden können.

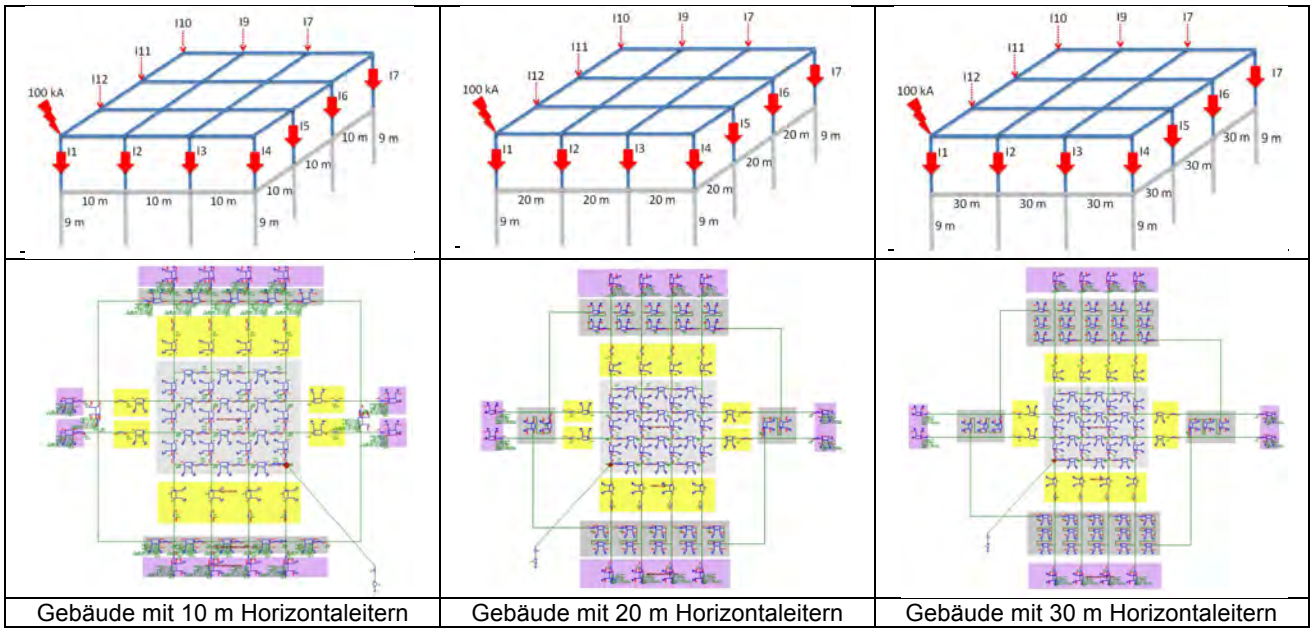
Gegenüber den Ergebnissen eines 10 m x 10 m Gebäudes kann aber festgestellt werden, dass die Ableitung 1 einen etwas größeren Strom führt.



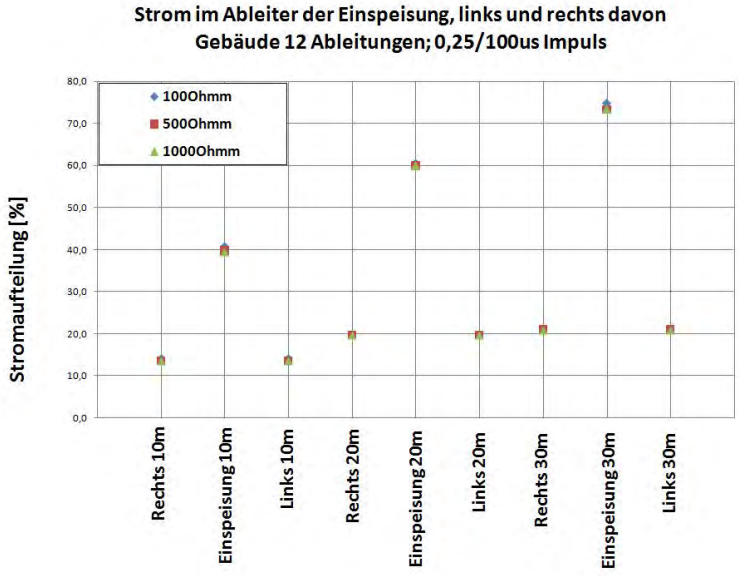
Gebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen und Gittererder im Frequenzbereich und für 0,25/100.
Gültig für ρ_E=100 Ohmm.... 1000 Ohmm

Untersuchungen für Gebäude mit 12 und 24 Ableitungen mit 9m Vertikal- und 10,20,30m Horizontaleitern.

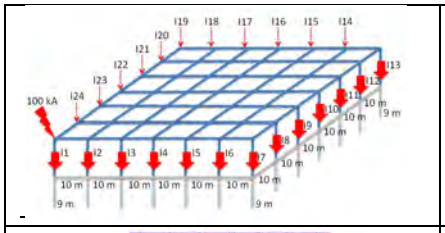
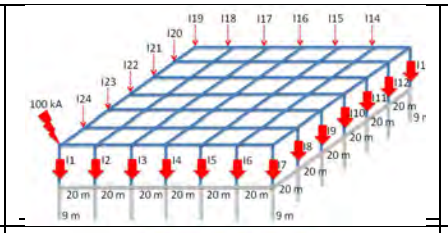
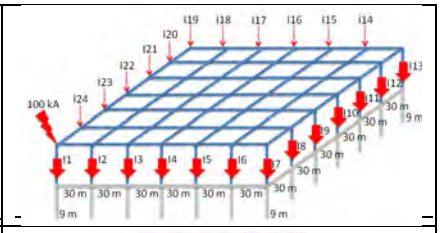
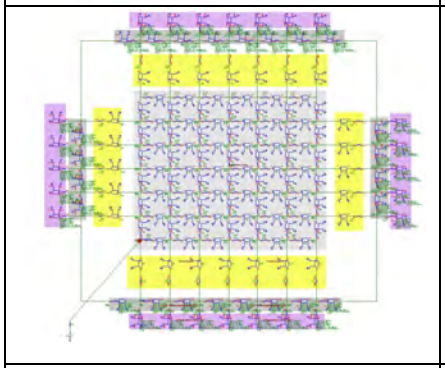
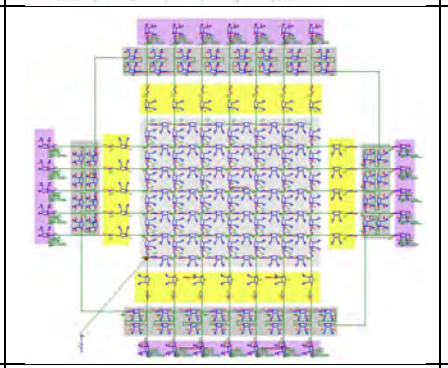
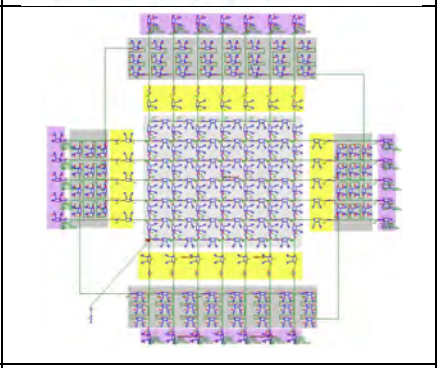
Das wichtigste Ergebnis ist der lineare Anstieg des Stromes in der Einspeiseableitung mit der Länge des Horizontalerders. Der Anstieg fällt ist bei 12 Ableitungen größer als bei 24 Ableitungen. Der spezifische Erdwiderstand hat kaum einen Einfluss auf die Stromverteilung.

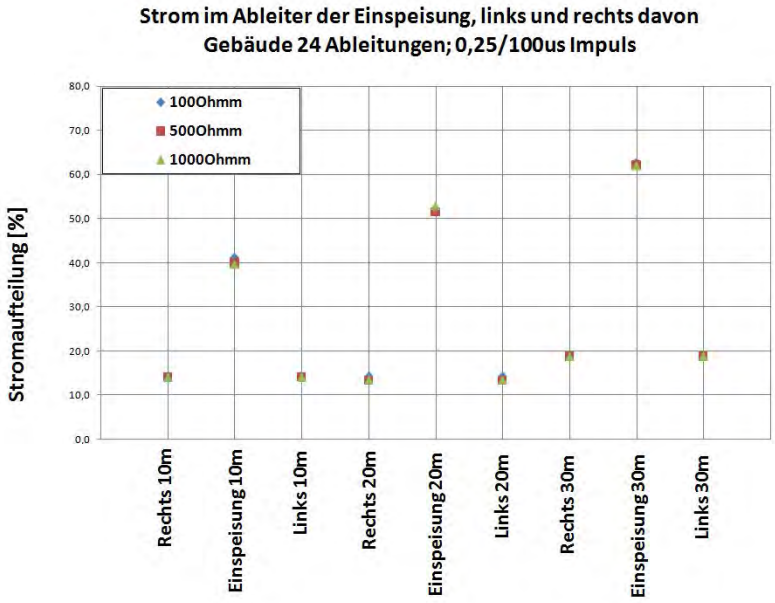


Gebäude mit 10 m Horizontaleitern	Gebäude mit 20 m Horizontaleitern	Gebäude mit 30 m Horizontaleitern



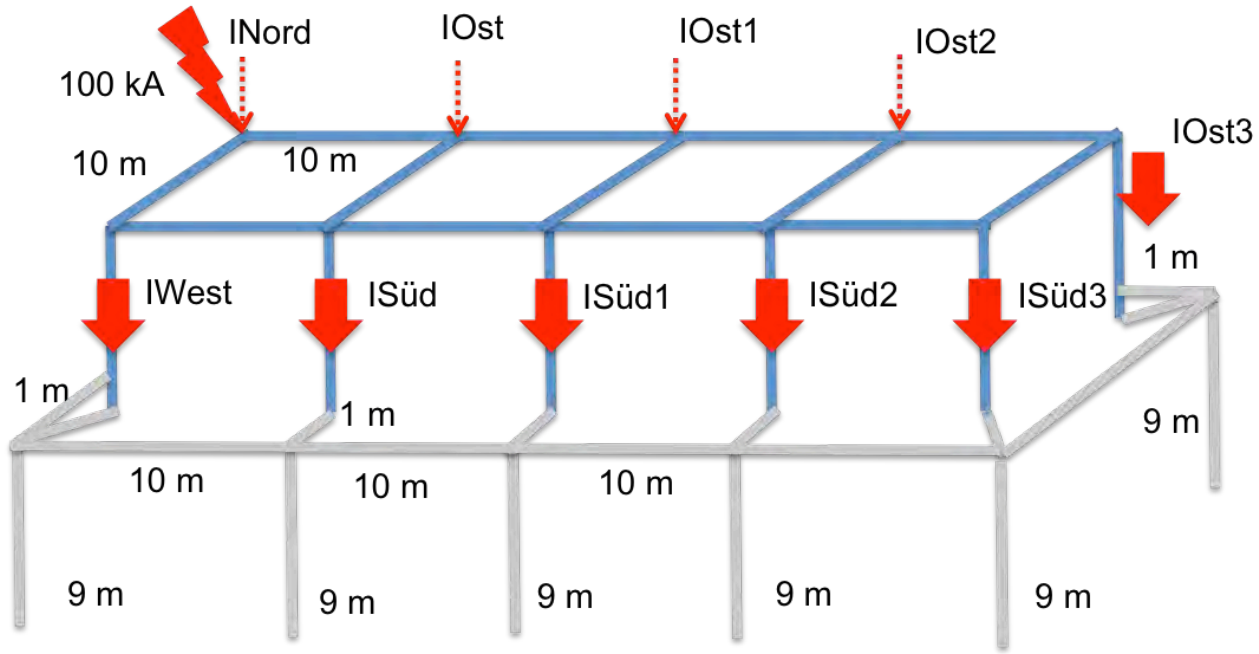
Stromaufteilung der Einspeiseableitung und der beiden benachbarten Ableitungen bei Einspeisung in eine Ecke und verschiedenen Abständen der Ableitungen für 0,25 /100 Impuls und spezifischem Erdwiderstand von ρ_E=100----1000 Ohmm.

		
		
Gebäude mit 10 m Horizontaleitern	Gebäude mit 20 m Horizontaleitern	Gebäude mit 30 m Horizontaleitern



Stromaufteilung der Einspeiseableitung und der beiden benachbarten Ableitungen bei Einspeisung in eine Ecke und verschiedenen Abständen der Ableitungen für 0,25 /100 Impuls und spezifischem Erdwiderstand von ρ_E=100----1000 Ohmm.

Untersuchungen für Gebäude mit 10 m Breite und variabler Länge mit 9m Vertikal- und 10m Horizontaleitern bei konstantem Abstand der Ableitungen von 10m.



Beispiel eines berechneten Gebäudes mit einer Breite von 10m und einer Länge von 40 m. Abstand der Ableitungen= konstant 10m. Anschlüsse an Horizontalerder über 1 m Verbindungen in der Erde. Tiefenerder 9 m, 20 mm Edelstahl.

Einfluss des spezifischen Erdwiderstands auf die Stromaufteilung:
Bild 9-3 bis Bild 9-6 zeigen den Einfluss des spezifischen Erdwiderstands. Für den 1/200 Impuls (250kHz) zeigt sich der stärkste Einfluss.

Stromaufteilung für die drei Stoßstromformen in Abhängigkeit von der Gebäudelänge.
Bild 9-7 bis Bild 9-9 zeigt eine fallende Tendenz mit zunehmender Gebäudelänge. Aussagekräftiger aber die Grafiken , die in Tabelle 9-4 bis Tabelle 9-6 dargestellt sind. Für 0,25/100 und 1/200 ist praktisch nach 20 m keine Änderung mehr feststellbar. Nur bei 10/350 fällen die Werte weiter ab mit zunehmender Gebäudelänge.

Weitere Parameterstudien wie Gebäudehöhe, Gebäudebreite und Abstand der Ableitungen wurden nicht mehr durchgeführt. Dies muss im Einzelfall für eine Berechnung der Schrittspannung in GSA vorbereitet werden. Diese Fallstudie zeigt daher die Tendenzen auf.

Handlungsempfehlung für die Berechnung in GASLab:
Für eine erste Analyse reicht die Frequenzbereichsanalyse aus. Der spezifische Bodenwiderstand kann für die Berechnung der Stromaufteilung in den Ableitungen für erste Analyse vernachlässigt werden. Allgemeine Aussagen können natürlich nicht gemacht werden. Es ist daher immer im Einzelfall zu prüfen, wie die Stromverteilung gelagert ist, insbesondere bei größeren Gebäuden.

1 Ziel dieser Arbeit

Mit dem neuen Programm GSALab 1MHz ist es möglich, die Schritt und Berührungsspannung von ausgedehnten Erdsystemen bis zu Frequenzen von 1 MHz zu berechnen.
Für die Berechnung der Schritt und Berührungsspannung ist die Kenntnis des eingespeisten Stroms in jeden einzelnen Erder erforderlich. Daher ist eine umfangreiche Vorbereitung erforderlich.
Der Gegenstand dieser Studie ist die Berechnung der Stromaufteilung für Vertikalerder, Horizontalerder und Gitterförmige Erder. Dabei werden die Stromverteilungen sowohl im Frequenzbereich als auch im Zeitbereich durchgeführt. Dazu ist eine detaillierte Modellierung der Ableitungen und des Erders im Zeit – und Frequenzbereich sinnvoll.
Darüber hinaus wird an einem Beispiel auch der Einfluss einer Stromversorgungsleitung untersucht.

2 Stand der Wissenschaft

Die Berechnung der Stromverteilung in einem Gebäude mit Ableitungen wurde erstmalig von Steinbigler publiziert. Diese Berechnung zeigt die k_c-Koeffizienten, allerdings ohne Berücksichtigung des Erdungssystems.
Die Stromverteilung mit Berücksichtigung des Erdungssystems ist nicht bekannt.
Mit der Möglichkeit, die Schritt- und Berührungsspannung auch im Frequenzbereich bis 1 MHz zu berechnen, muss daher die Stromverteilung (k_c-Koeffizienten) neu berechnet werden.

Literatur: Beierl, O. Steinbiegler , H.: Induzierte Überspannungen im Bereich von Ableitungen bei Blitzschutzanlagen mit maschenförmigen Fanganordnungen, ICLP 1985.

3 Normativer Hintergrund

IEC 62305-1; IEC 62305-3.

4 Berechnungsmethoden

4.1 Analytische Methoden

Die Berechnung der Schritt- und Berührungsspannung ist begrenzt für Einzeleiter möglich, jedoch nicht für komplexe Konfigurationen, wie vermaschte Erder oder Gittererder.

4.2 Numerische Feldberechnung mit FEM

Sehr großer Aufwand an Modellierung und Rechenzeit ist erforderlich.

4.3 GSALab

Pragmatische Anwendung durch Lösen von Gleichungen von Leitern im Erdreich durch Spiegelung. Wegen analytischer Lösungen mit einem Rechenalgorithmus sehr schnelles Ergebnis.

4.3.1 GSALab Berechnungsgang

Das Vorgehen ist in Bild 4-1 dargestellt. Da ein Erdsystem in GSALab bei höheren Frequenzen als 50/60Hz nicht mehr als Äquipotentialfläche gilt, müssen die in das Erdsystem eingeleiteten Blitzteilströme berechnet werden. Dies erfolgt nicht in GSALab sondern muss mittels Netzwerkanalyseprogramm bestimmt werden. Dazu ist eine genaue Modellierung des Erdsystems unter Berücksichtigung höherer Frequenzen bzw. unter Berücksichtigung der Wanderwellenausbreitung erforderlich. Nach vorliegen der Aufteilung des Blitzstroms auf die einzelnen Ableitungen und damit in die Einspeisepunkte des Erdsystems kann dann in GSALab die Schritt- und Berührungsspannung bestimmt werden.

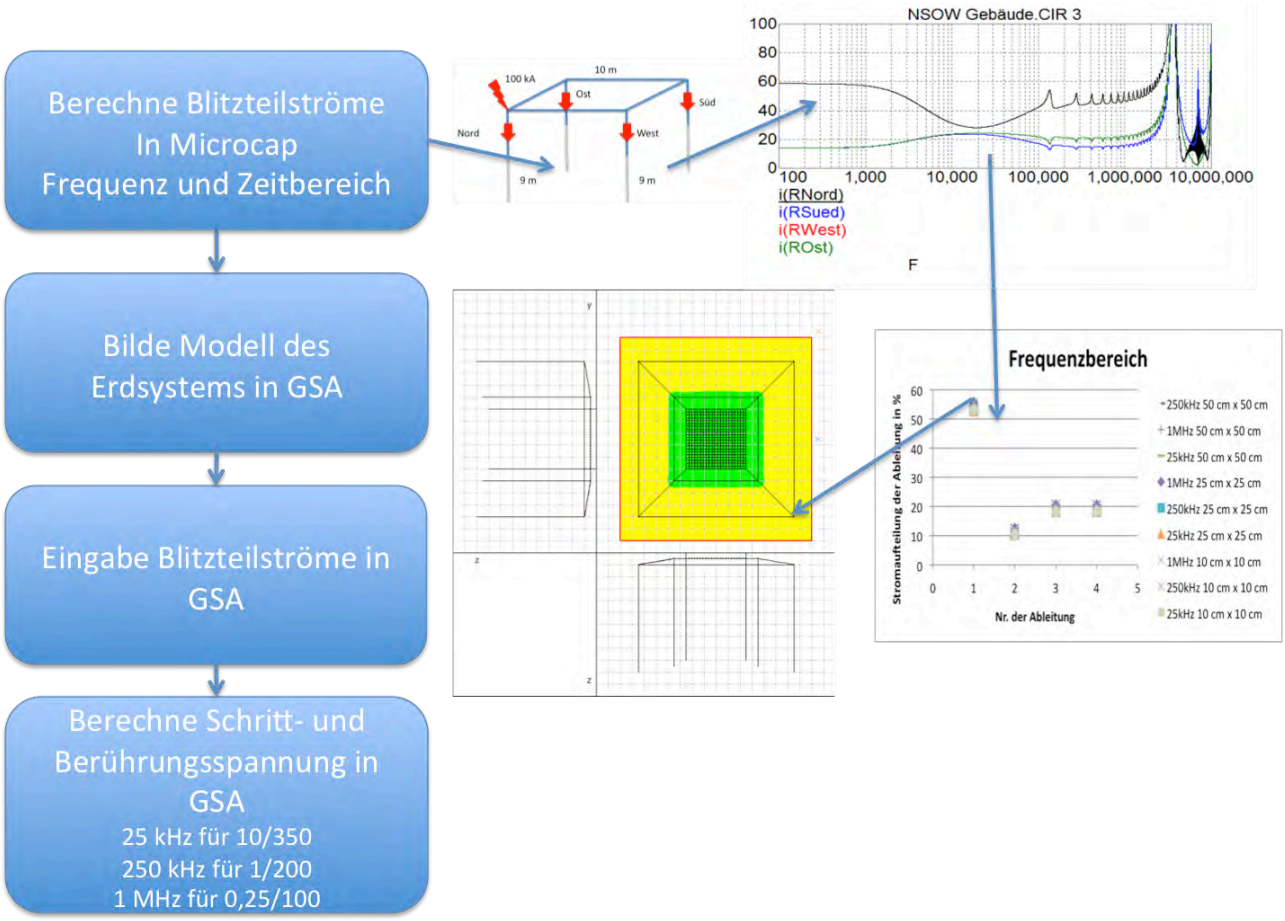


Bild 4-1 Berechnungsgang

4.3.2 Bemerkungen zum Zeit- und Frequenzbereich

Ein Impuls existiert real nur im Zeitbereich. Tabelle 4-2 zeigt zur Orientierung den Zeitverlauf der Impulse (Heidlerfunktionen nach IEC 62305-1) in zwei Zeitbereichen.
Nach Fourier kann ein Zeitbereichsimpuls aber auch als Summe einzelner Teilschwingungen dargestellt werden, Bild 4-2.

Eine wichtige Kenngröße ist die Impulsenergie. In Bild 4-3 ist die spezifische Energie im Zeitbereich dargestellt. Die Lösung findet man analytisch. Die Grafik zeigt, wann 100 % der Energie des Impulses in einem widerstand von 1 Ohm umgesetzt sind. In Bild 4-4 ist die spezifische Energie über der Frequenz dargestellt. Dieses Bild sagt aus, wie viel Energie bis zu welcher Frequenz umgesetzt wird. Für alle drei Stoßstromformen ist bis 100 kHz bereits die gesamte Energie umgesetzt.

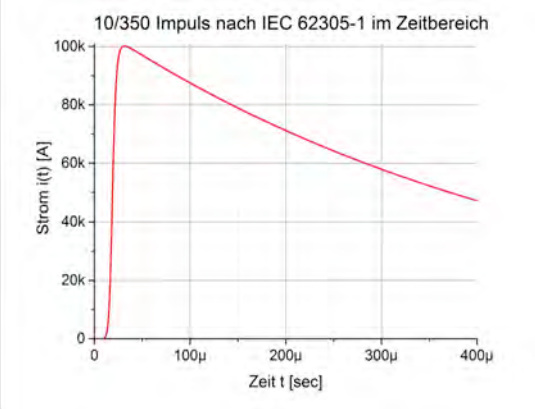
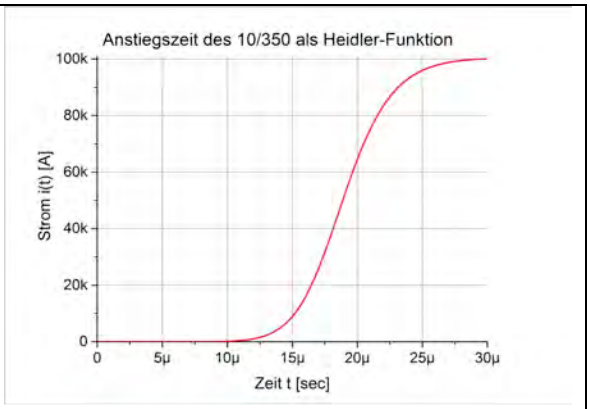
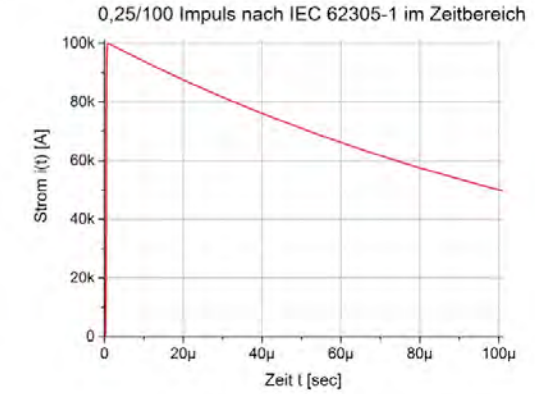
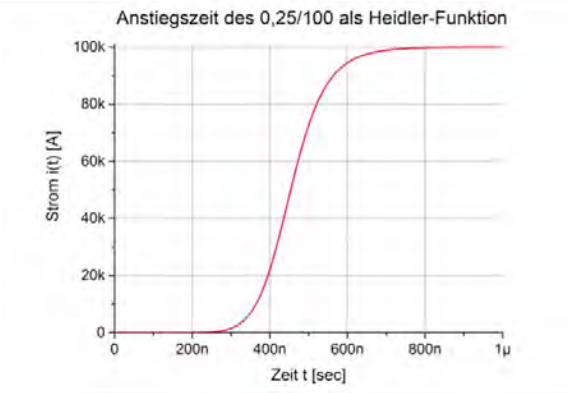
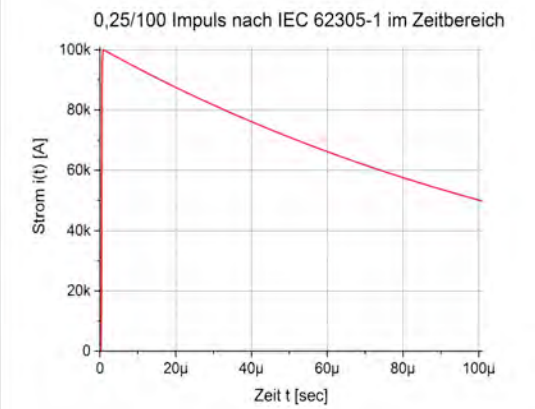
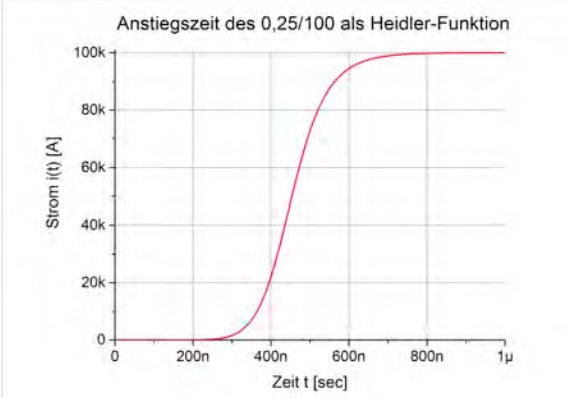
Die Dualität von Frequenz- und Zeitbereich kann für die Berechnung der Stromverteilung in Ableitungen genutzt werden. Dabei wird der **Anstieg eines Blitzstromes,** wie in Bild 4-5 gezeigt, durch einen sinusförmigen Strom angenähert. Tabelle 4-1 zeigt die Gegenüberstellung für alle Stromformen.

Tabelle 4-1 Vergleich der Stromformen und deren Repräsentation durch eine Sinusfunktion im Bereich des Anstiegs.

Stromform Zeitbereich	Viertelperiodendauer Sinusform	Periodendauer Sinusform	Äquivalente Frequenz im Anstieg des Stoßstroms
0,25/100	0,25 µs	1 µs	1 MHz
1/200	1 µs	4 µs	250 kHz
10/350	10 µs	40 µs	25 kHz

Eine Berechnung der Stromaufteilung im Frequenzbereich von 1 Hz bis 1 MHz deckt daher in einem Berechnungsgang alle drei Stromimpulse ab. Durch einige vergleichende Untersuchungen im Zeit-und Frequenzbereich, siehe Abschnitt 7, konnte nachgewiesen werden, dass diese Annahmen zutreffen und die Stromaufteilung aus dem Frequenzgang ziemlich genau mit der aus der Berechnung im Zeitbereich übereinstimmt. Daher reicht für die Berechnung mit GSALab aus, die Ergebnisse aus dem Frequenzbereich zu verwenden, da sie in einem Rechengang alle Informationen für die drei Blitzstromformen bereitstellen.

Tabelle 4-2 Darstellung der in IEC 62305-1 definierten Blitzstromimpulse in zwei Zeitbereichen. Quelle: Bachelorarbeit Kemper 2015.

	
	
	
Impulsform nach IEC 62305-1	

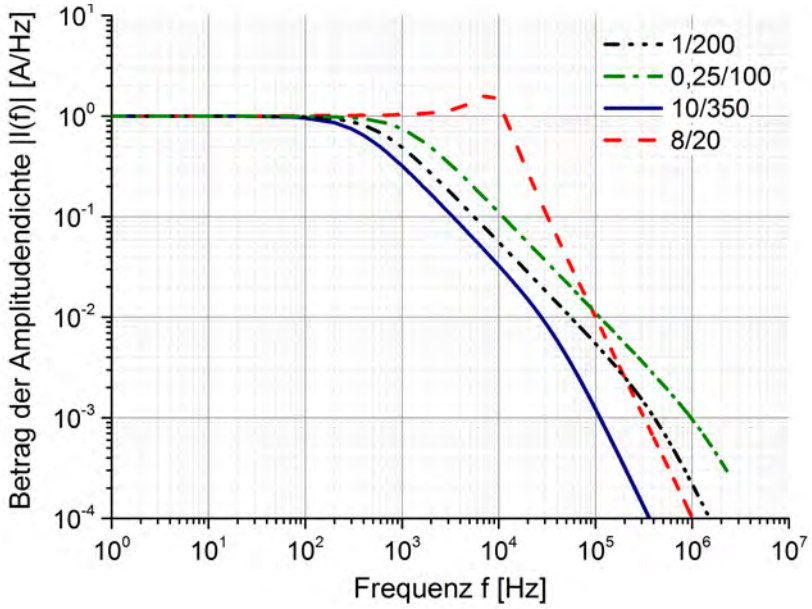
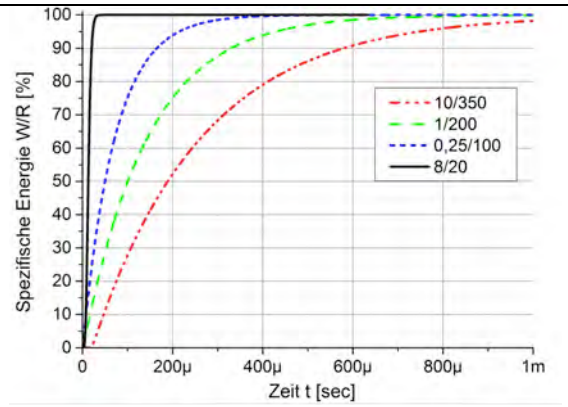


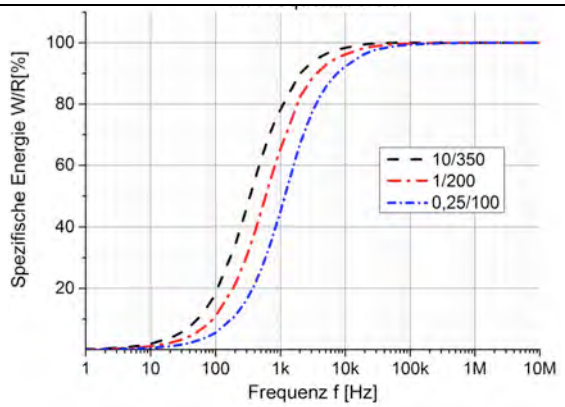
Bild 4-2 Betrag der auf 1 normierten Amplitudendichte der drei Stoßstromformen nach IEC 62305-1 und 8/20 Impuls zum Vergleich. Quelle: Bachelorarbeit Kemper 2015.



Analytische Darstellung

$$\frac{W}{R} = \int \frac{\hat{i}}{k} \cdot \left[\frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}}{1+\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right]^2 dt$$

Bild 4-3 Betrag der normierten spezifischen Energien der drei Stoßstromformen nach IEC 62305-1 und 8/20 Impuls zum Vergleich im Zeitbereich. Quelle: Bachelorarbeit Kemper 2015.



Numerische Integration im Frequenzbereich

$$\frac{W}{R} = I(f_0) + (I(f_1) + I(f_2))^2 \cdot (f_2 - f_1)$$

Bild 4-4 Betrag der normierten spezifischen Energien der drei Stoßstromformen nach IEC 62305-1 und 8/20 Impuls zum Vergleich im Frequenzbereich. Quelle: Bachelorarbeit Kemper 2015.

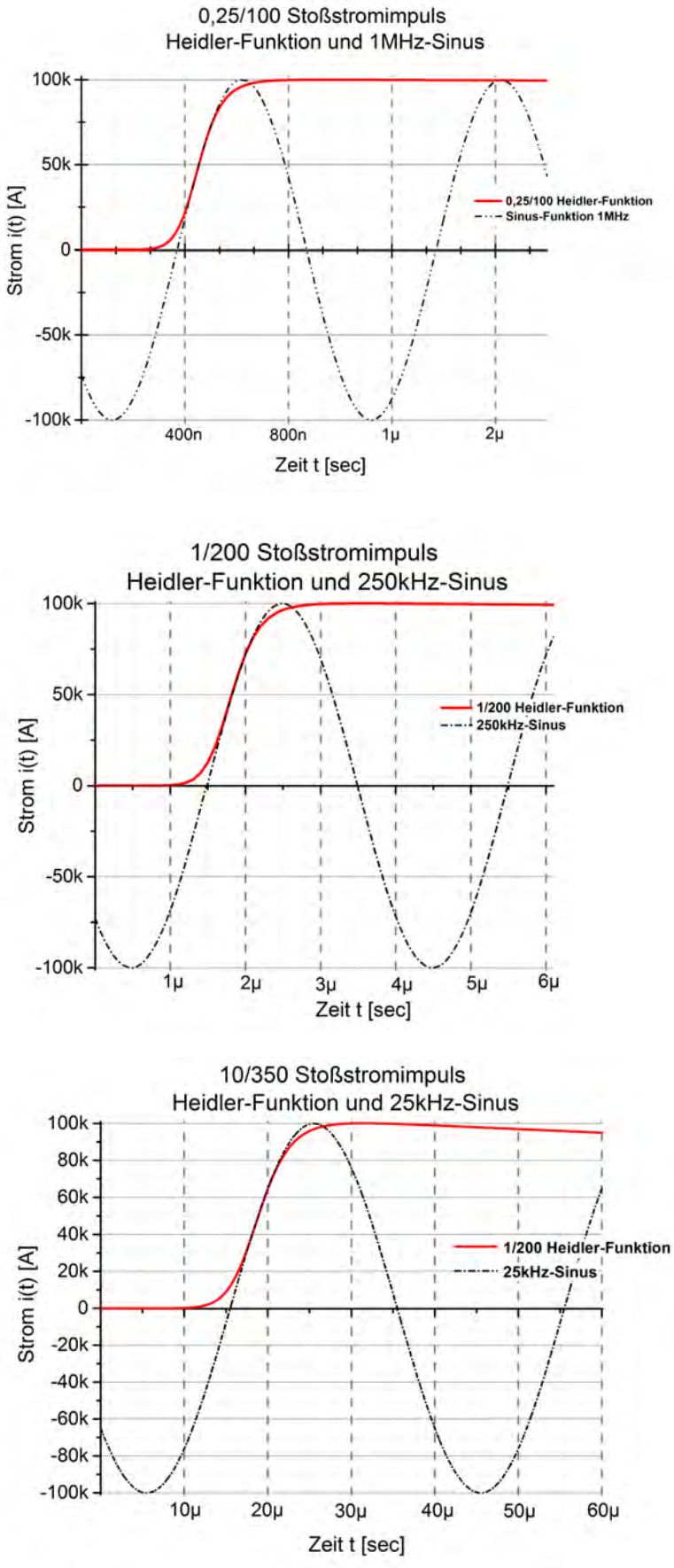


Bild 4-5 Vergleich der Heidler Funktion für 0,25/100 Stoßstrom nach IEC 62305-1 und eine Sinusfunktion die so gelegt ist, dass die Wendepunkte der Funktionen aufeinanderliegen. Quelle: Bachelorarbeit Kemper.

5 Stromverteilung in Ableitungen

5.1 Quasistationäre Berechnung der Stromverteilung in den Ableitungen ohne Berücksichtigung des Erdsystems.

In einer quasistationären Berechnung geht man davon aus, dass die Anstiegszeit des Stoßstroms groß gegenüber der Laufzeit des Gebäudes ist. Ein 40 m langes Gebäude würde eine maximale Laufzeit von T_L= 50m/c = 165 ns aufweisen. Diese Zeit liegt in der Größenordnung der Anstiegszeit eines negativen Folgestoßstroms 0,25/100. Es können daher nur annähernd quasistationäre Verhältnisse angenommen werden. Bei einem Gebäude von 10m x10m wäre das Verhältnis besser, T_L= 20m/c = 66ns.

5.1.1 Nachrechnung der Steinbieglerwerte für 0,25/100

Zunächst soll die Berechnungsmethode mit den bekannten Ergebnissen von Steinbiegler und Beierl verglichen werden. Diese Werte sind die Grundlage der k_C-Koeffizienten in der IEC 62305-3. Bild 5-1 zeigt das Modell von Beierl/Steinbiegler. Dieses Modell wurde in Microcap mit konzentrierten Elementen (L,R) in Bild 5-2 modelliert und für einen negativen Folgestoßstrom 0,25/100 berechnet. Dabei wurde der Worst Case eines Eckeneinschlags betrachtet. Ein Erdungssystem wurde nicht modelliert.
Das Ergebnis in Bild 5-3 zeigt, dass die Berechnung mit konzentrierten Elementen mit den Ergebnissen von Beierl/Steinbiegler übereinstimmt.

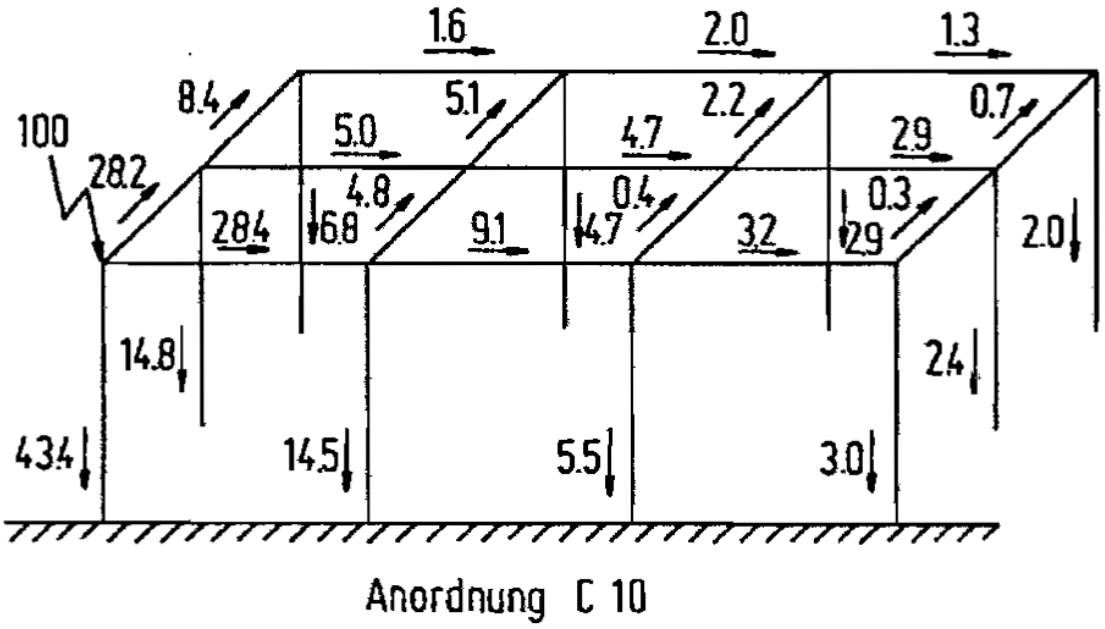
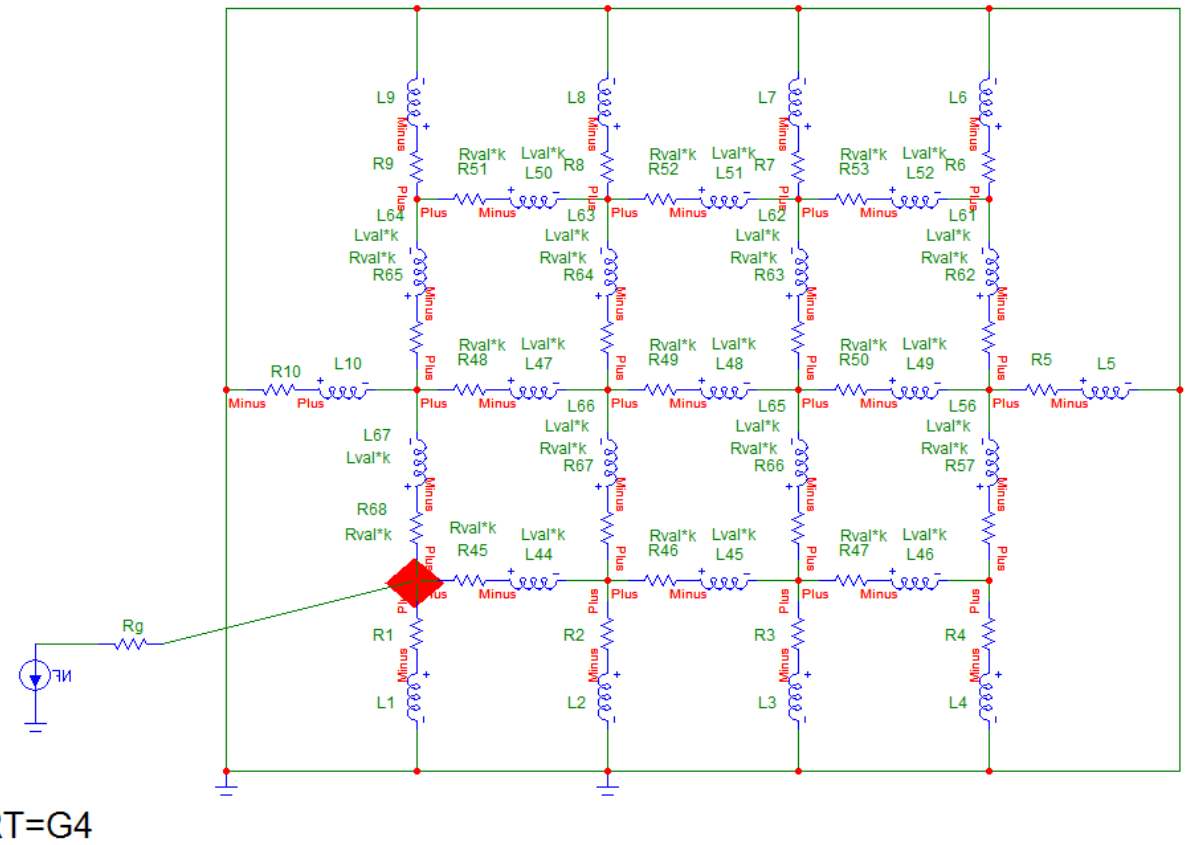


Bild 5-1 Das Modell von Steinbiegler / Beierl. l=d=20m.



PART=G4

Bild 5-2 Das Modell von Steinbiegler / Zischank nachgebildet mit konzentrierten Elementen in Microcap.

Tabelle 5-1 Vergleich der Teilströme Modell Beierl/Steinbiegler und Berechnung Microcap für 0,25/100.

Ableitung	Beierl/Steinbiegler	Microcapsimulation
1	43,4	43,3
2	14,5	14,7
3	5,5	5,7
4	3	2,7
5	2,4	2,5
6	2	1,8
7	2,9	3
8	4,7	4,9
9	6,8	6,6
10	14,8	15

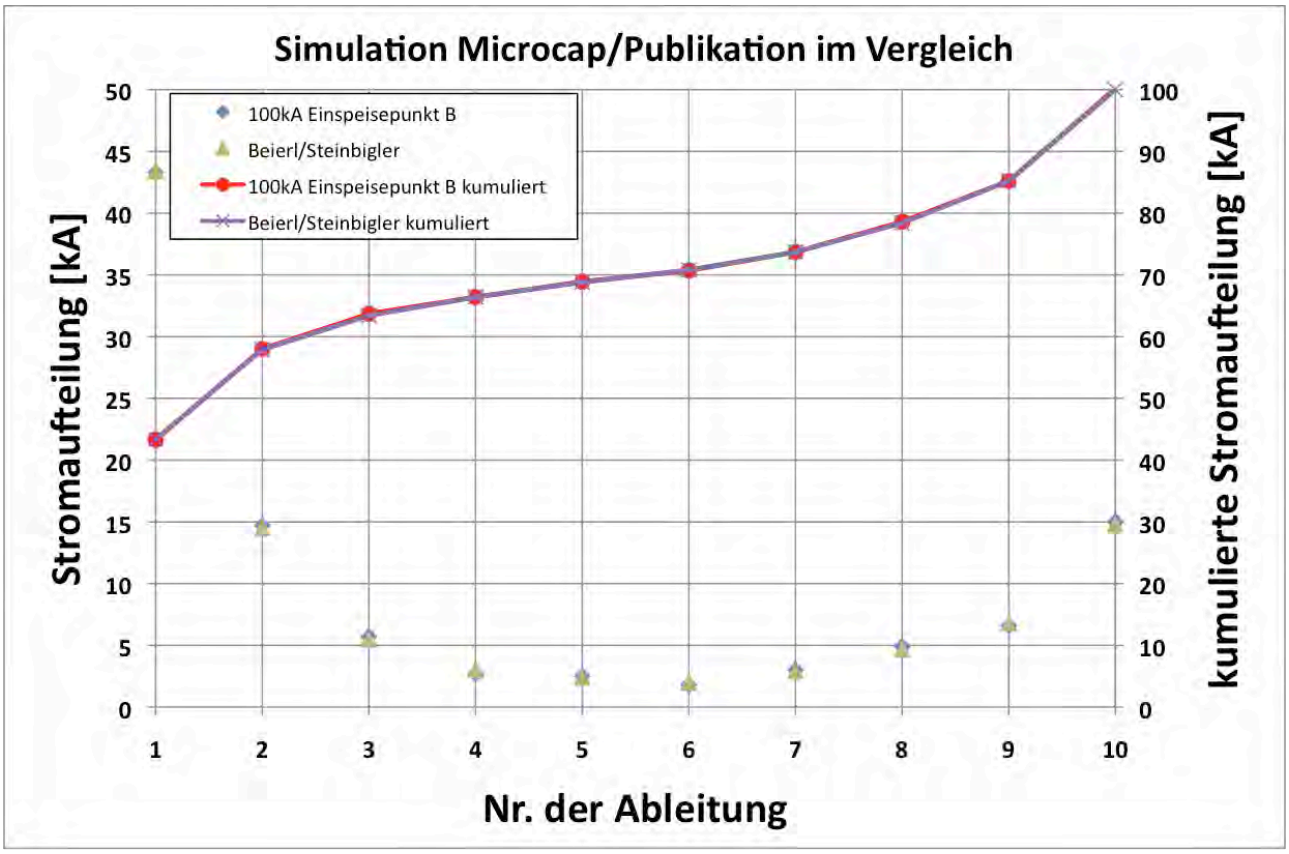


Bild 5-3 Stromaufteilung des negativen Folgestoßstromes 0,25/100 bei einem Eckeneinschlag gemäß Bild 5-1 bzw. Bild 5-2.

5.1.2 IEC Gebäude kubisch und mit k für 0,25/100

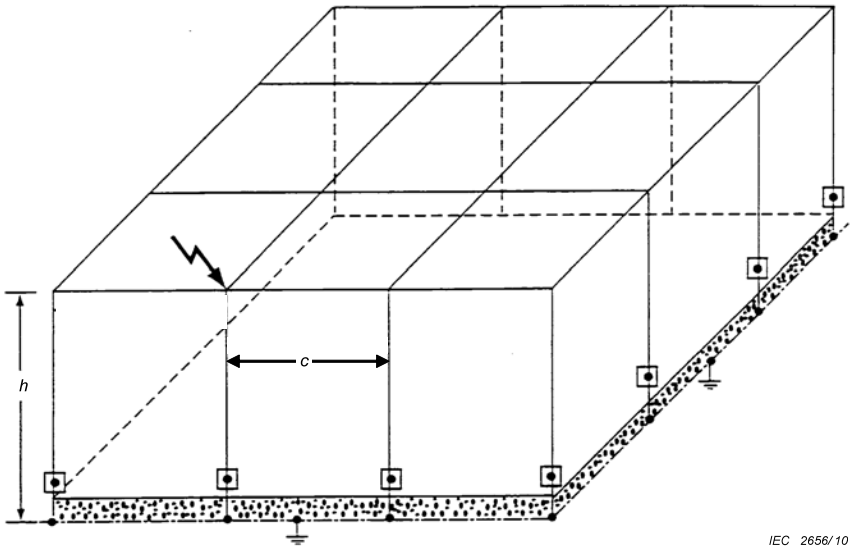
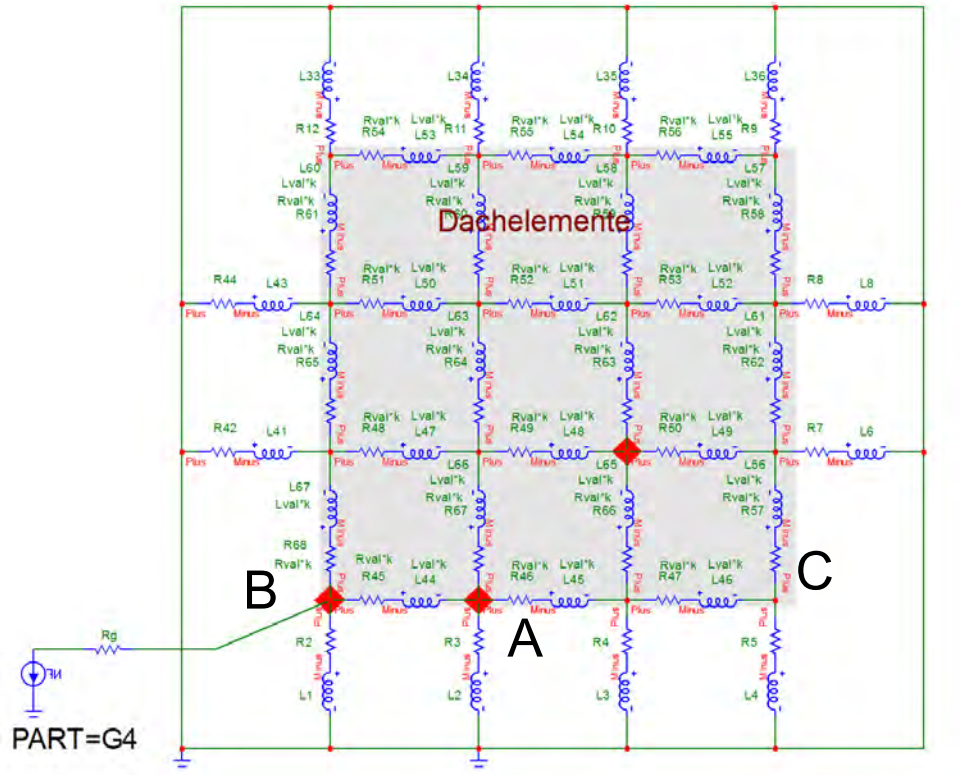


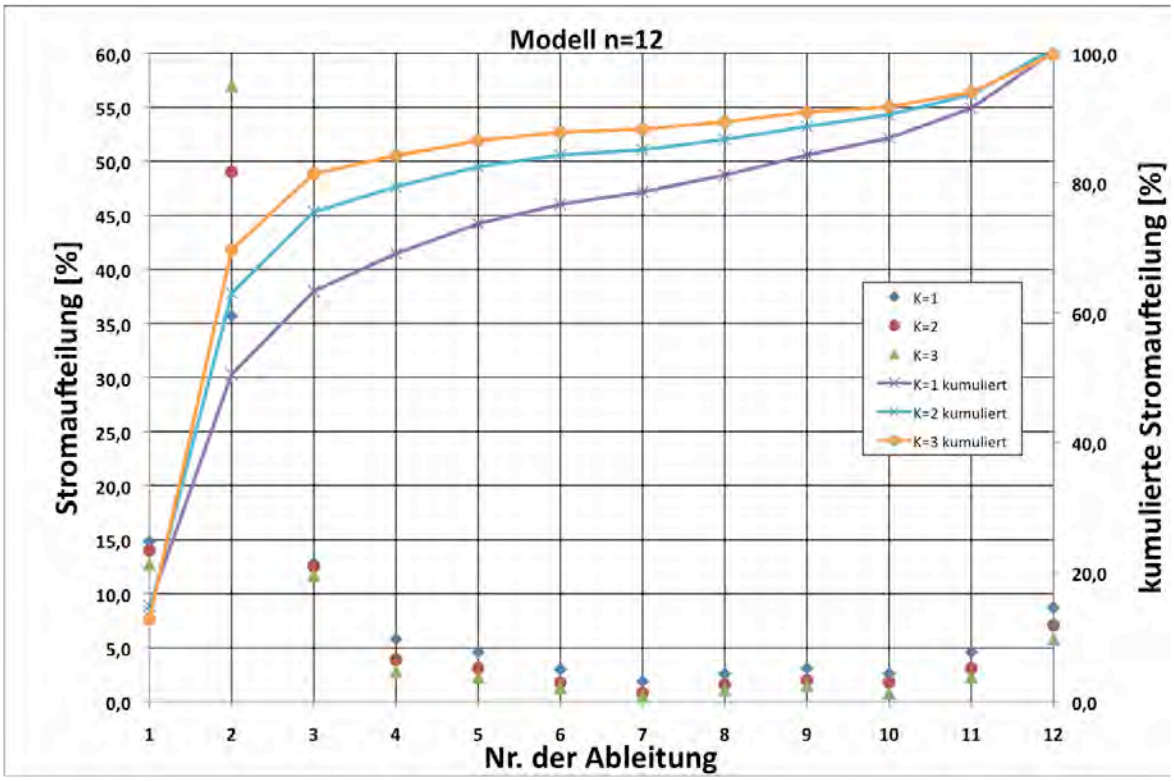
Bild 5-4 Modell nach IEC 62305-3 .



k=1: 30X30X10 m 12 Ableitungen Abstand der Ableitungen: 10 m
k=2: 60x60x10 m 12 Ableitungen Abstand der Ableitungen: 20 m
k=3: 90x90x10 m 12 Ableitungen Abstand der Ableitungen: 30 m

Bild 5-5 Modell nachgebildet mit konzentrierten Elementen in Microcap.

5.1.2.1 IEC Gebäude kubisch und mit k Einspeiseort A



k=1: 30X30X10 m 12 Ableitungen Abstand der Ableitungen: 10 m
k=2: 60x60x10 m 12 Ableitungen Abstand der Ableitungen: 20 m
k=2: 90x90x10 m 12 Ableitungen Abstand der Ableitungen: 30 m

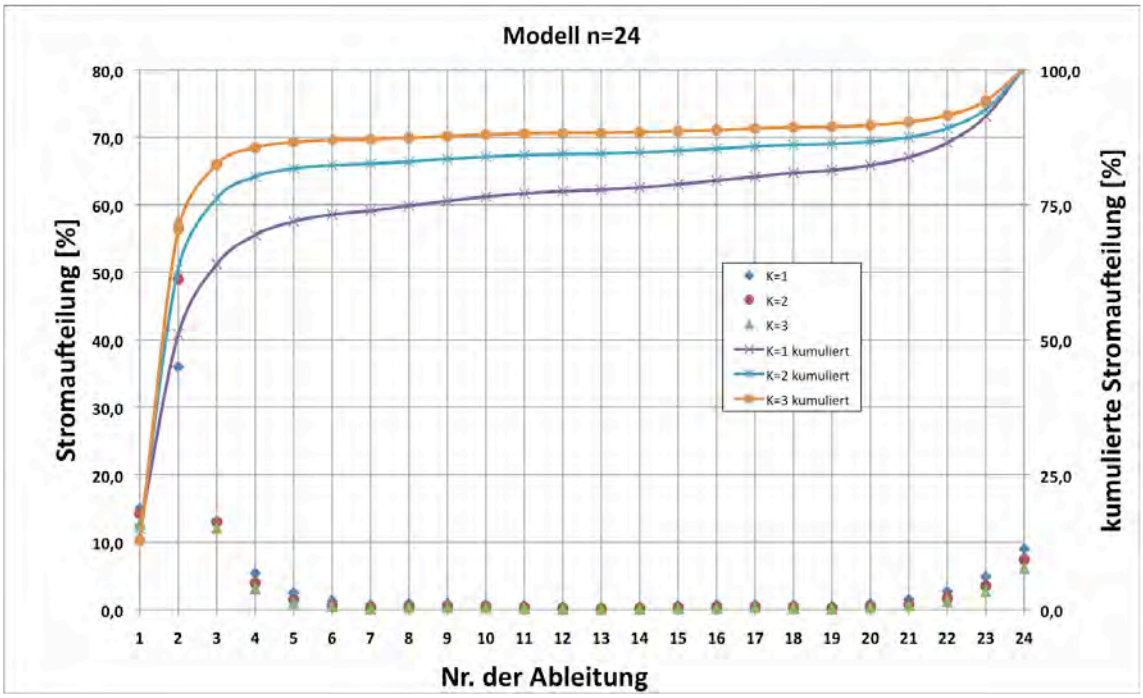
Bild 5-6 Einspeisepunkt A n=12 Ableitungen.

Die berechneten Werte mit Microcap stimmen für kubische Struktur, also k=1 mit der IEC Formel (Gilt nur für Einspeiseort A) überein. **Für k>1 gilt diese Formel nicht.**

$$k_c = \frac{1}{2n} + 0{,}1 + 0{,}2 \cdot \sqrt[3]{\frac{c}{h}}$$

Formel nach IEC für kubische Struktur und Einspeiseort A in Bild 5-5.
c: Abstand der Ableitungen
h: Höhe des Gebäudes

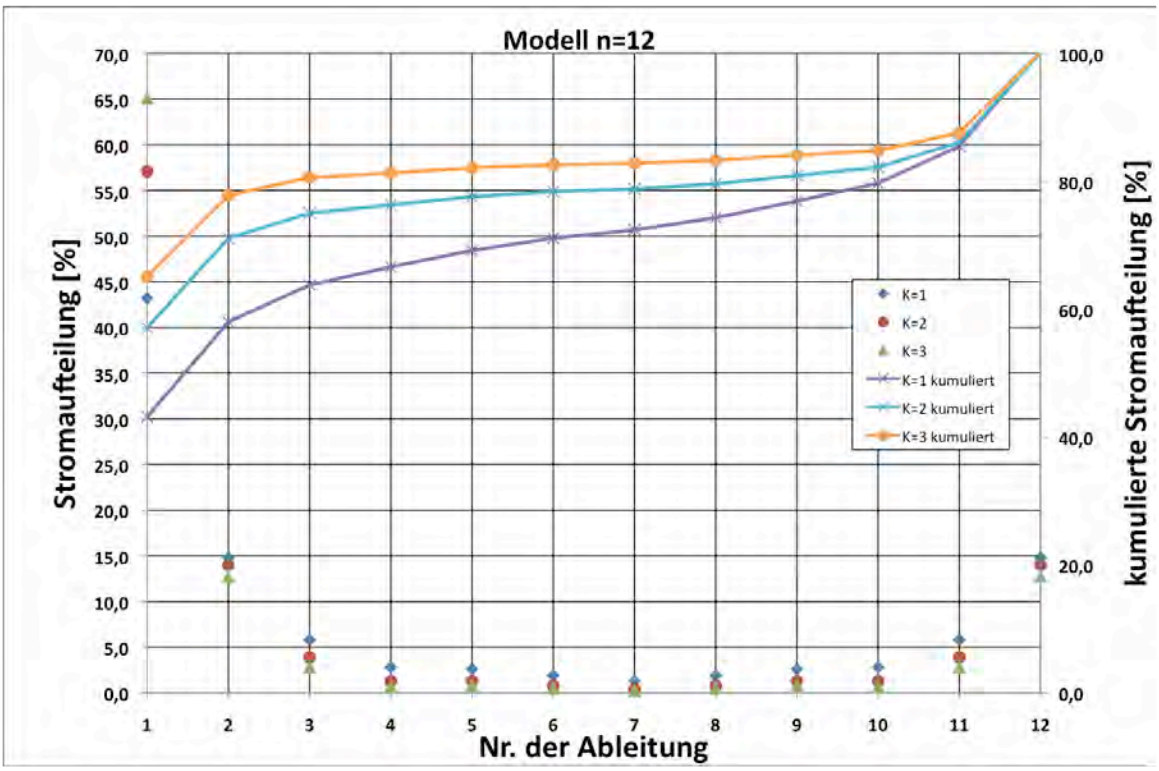
Für n=12 und c=10m und h=10 m ergibt sich ein Wert von k_c=0,34. Mit Microcap wird 0,36 berechnet.



k=1: 30x30x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 10 m
k=2: 60x60x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 20 m
k=2: 90x90x10 m 12 Ableitungen .Abstand der Ableitungen: 30 m

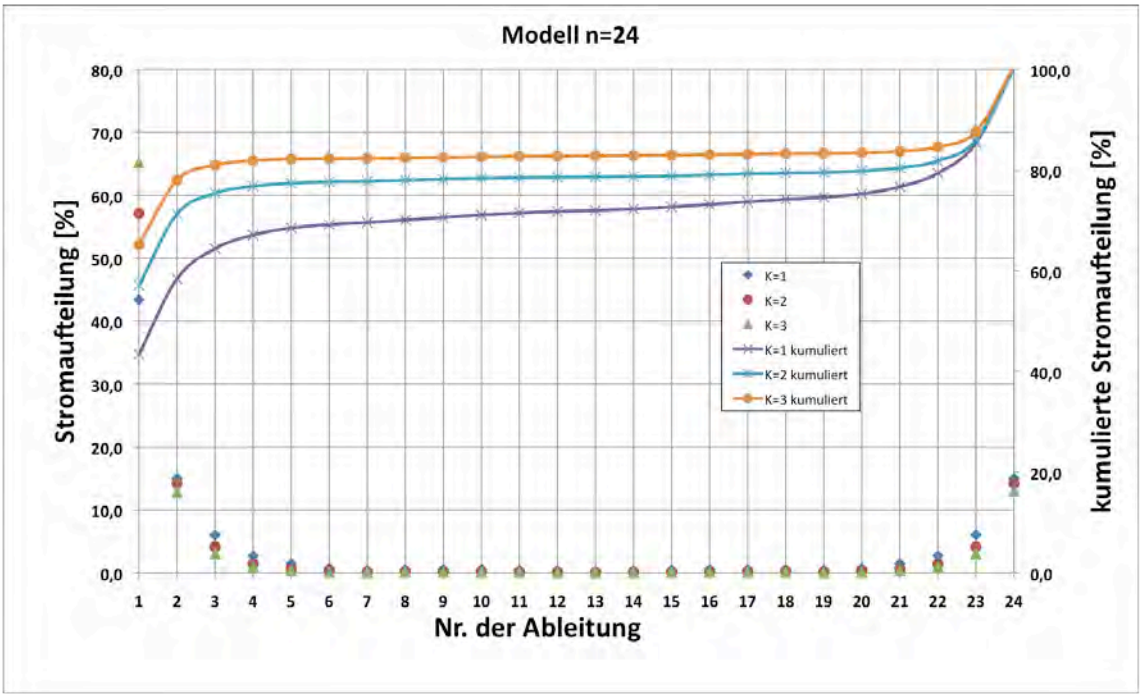
Bild 5-7Einspeiseort A n=24

5.1.2.2 IEC Gebäude kubisch und mit k Einspeiseort B



k=1: 30x30x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 10 m
k=2: 60x60x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 20 m
k=2: 90x90x10 m 12 Ableitungen .Abstand der Ableitungen: 30 m

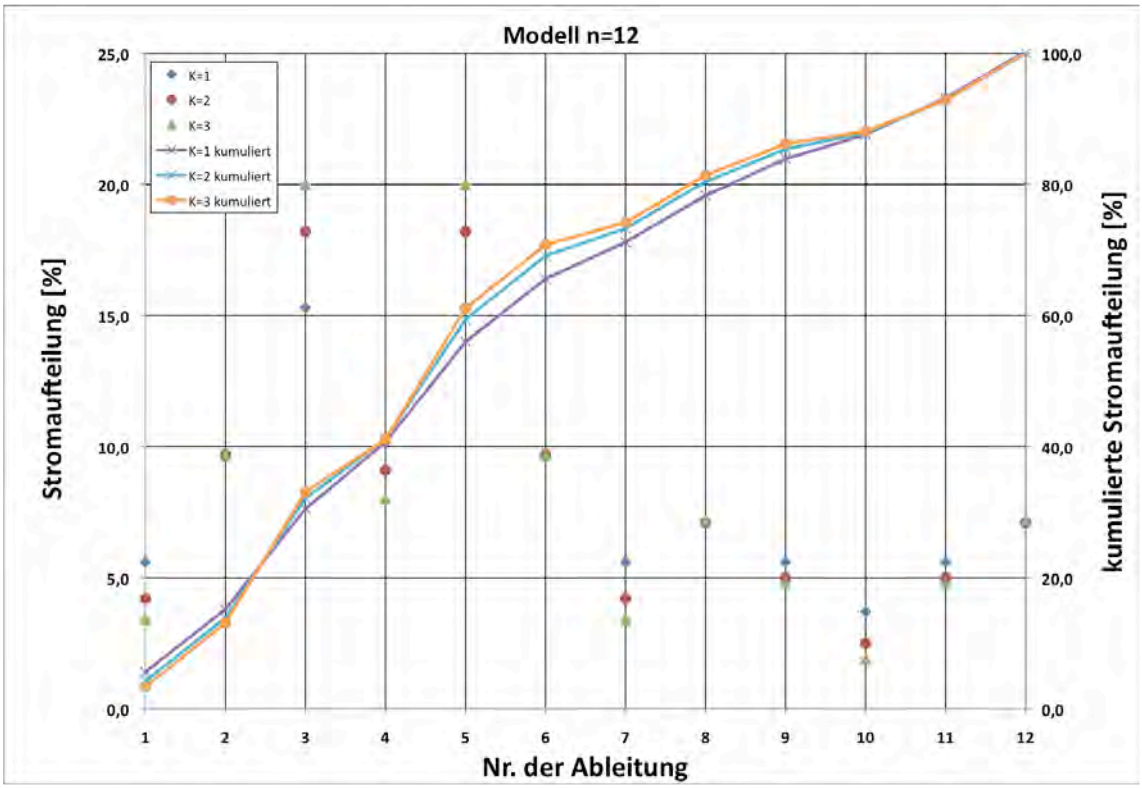
Bild 5-8 Einspeiseort B n=12



k=1: 30x30x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 10 m
k=2: 60x60x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 20 m
k=2: 90x90x10 m 12 Ableitungen .Abstand der Ableitungen: 30 m

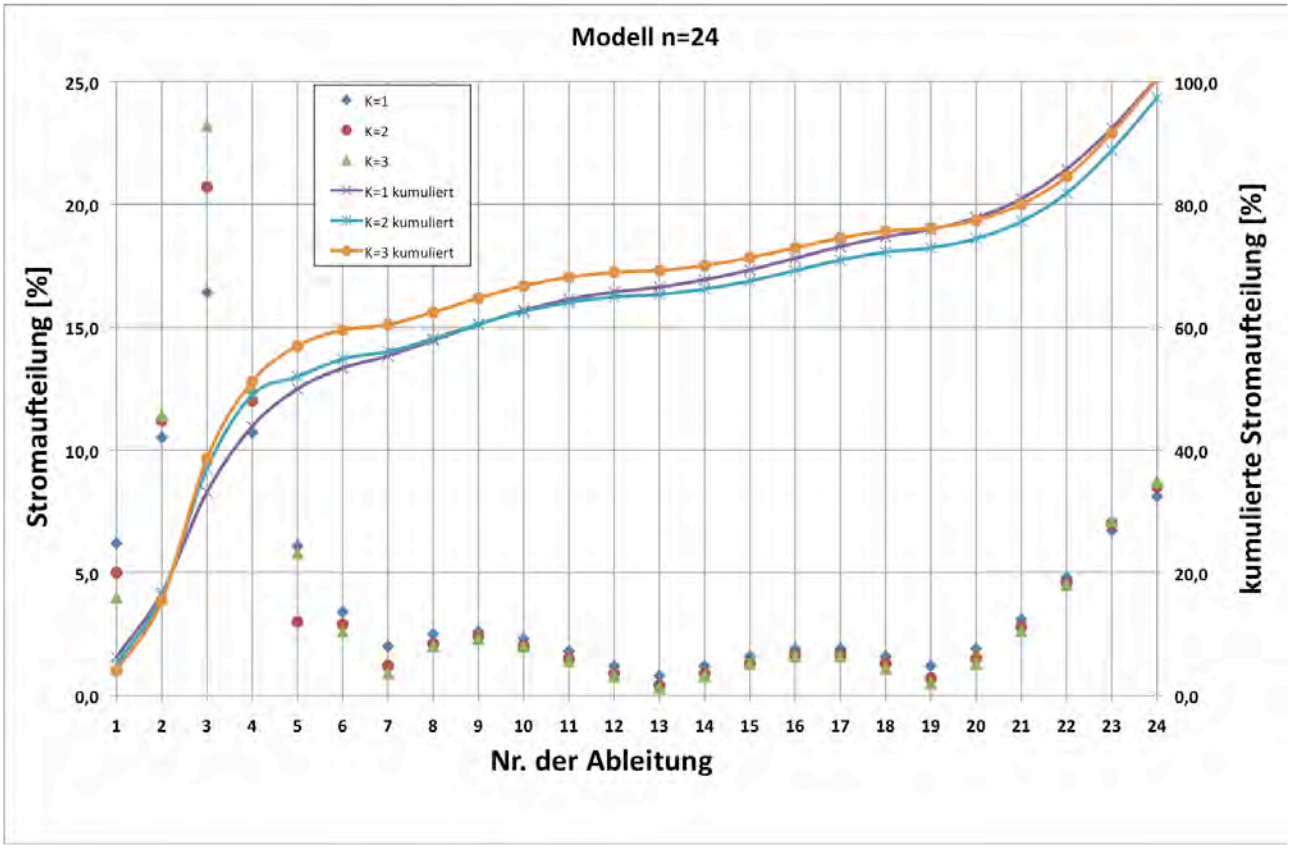
Bild 5-9 Einspeiseort B n=24

5.1.2.3 IEC Gebäude kubisch und mit k Einspeiseort C



k=1: 30x30x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 10 m
k=2: 60x60x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 20 m
k=2: 90x90x10 m 12 Ableitungen .Abstand der Ableitungen: 30 m

Bild 5-10 Einspeiseort C n=12



k=1: 30x30x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 10 m
k=2: 60x60x10 m 12 Ableitungen. Abstand der Ableitungen: 20 m
k=2: 90x90x10 m 12 Ableitungen .Abstand der Ableitungen: 30 m

Bild 5-11 Einspeiseort C n=24

5.2 Instationäre Berechnung der Stromverteilung mit Wanderwellenleitungen mit (Z_0,T) für die Ableitungen und Erder

In einer instationären Berechnung geht man davon aus, dass die Anstiegszeit des Stoßstroms klein gegenüber der Laufzeit des Gebäudes ist. Ein 100 m langes Gebäude würde eine maximale Laufzeit von T_L= 100m/c = 330 ns aufweisen. Diese Zeit ist bereits größer als die Anstiegszeit eines negativen Folgestoßstroms 0,25/100. Die Ableitungen und die Vertikalerder werden hier als Wanderwellenleitungen mit konstantem Wellenwiderstand Z_0 und konstanter Laufzeit T nach Abschnitt 6 nachgebildet, siehe Bild 5-12.

Die Ergebnisse zeigen starke Wanderwellenschwingungen. Die Stromsumme ist >100 %, siehe Bild 5-13. **Dieses Modell ist nicht geeignet**, da die Dämpfung im Erdsystem hier nicht korrekt nachgebildet wird. Da Microcap kein Wanderwellenmodell RLG bereitstellt, muss die Berechnung mit Kettenleitern erfolgen. Dazu sind gründliche Überlegungen erforderlich. Die Grundlagen dazu sind in Abschnitt 6 ausführlich begründet. In Abschnitt 7 ist dann die korrekte Berechnung der Stromverteilung für ein Modellgebäude analysiert und dargestellt.

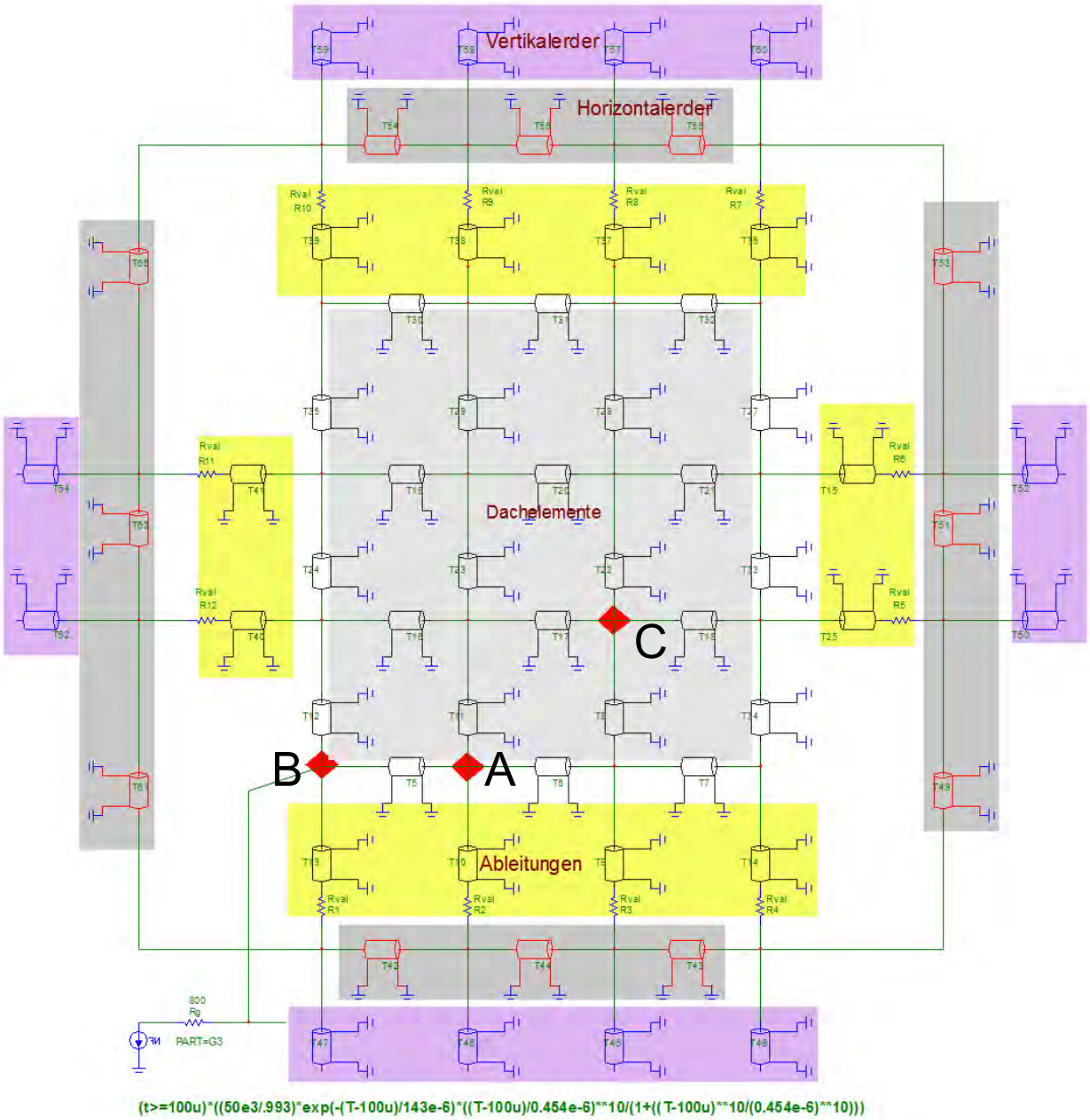


Bild 5-12 Microcapmodell für ein Gebäude mit 12 Ableitungen und 12 Vertikalerdern und ringförmiger Verbindung der Vertikalerder.

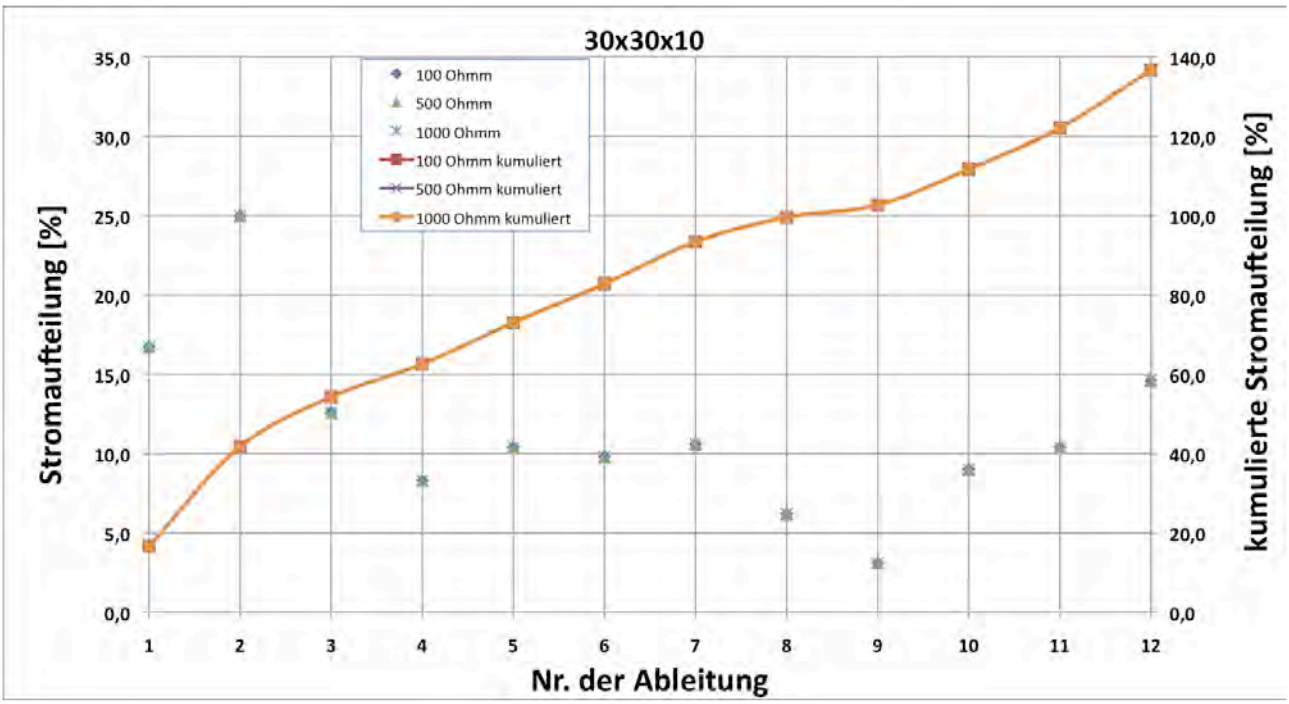


Bild 5-13 Analyse der Stromaufteilung für 0,25/100 , Einspeiseort A.

6 Wanderwellenausbreitung auf Vertikal- und Horizontalerdern im Erdboden

6.1.1 Exakte Berechnung einer unendlich langen Leitung im Erdreich mit 4 Parametern im Frequenzbereich

Achtung, die folgenden Gleichungen gelten nur für unendlich lange Leitungen. Das resultiert aus der Annahme der Berechnung, dass die Leitung aus differentiell kleinen Elementen dx nachgebildet wird. Für die Lösung der Differentialgleichungen im Frequenzbereich lässt man dann dx gegen Null gehen. Daher gilt strenggenommen die Lösung nur für unendlich lange Leitungen.

Für praktische Fälle, bei denen die Anstiegszeit eines eingespeisten Stromimpulses klein gegenüber der Laufzeit der Leitung ist, kann diese Theorie angewendet werden. Das Problem besteht darin, dass die Laufzeit der Leitung frequenzabhängig ist. Eine abschließende Bemerkung zur Anwendbarkeit ist im Abschnitt 6.1.1.3 zu finden.

Literatur: Sunde

Exakte Berechnung nach Zinke Brunswick Die Auswertung erfolgt in Excel :

$$\underline{Z}_L = \frac{\sqrt{\frac{L'}{C'}}}{\cosh\delta_G}\left(\cosh\frac{\delta_R+\delta_G}{2} - j\sinh\frac{\delta_R-\delta_G}{2}\right) \quad \text{Gleichung 6-1}$$

$$\sinh\delta_R = \frac{R'}{\omega L'} \quad \sinh\delta_G = \frac{G'}{\omega C'} \quad \text{Gleichung 6-2}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}\frac{1}{\cosh\frac{\delta_R-\delta_G}{2}} \quad \text{Gleichung 6-3}$$

Der Kapazitätsbelag ist frequenzabhängig. Nach GSALab kann für die Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätszahl der folgende Ausdruck verwendet werden:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_{r\infty}\varepsilon_0 + \sqrt{\frac{2\varepsilon_{r\infty}\varepsilon_0}{\rho_E\omega}}$$

$\varepsilon_{r\infty}$:Grenze der Dielektrizitätszahl bei hohen Frequenzen : Wird in der Literatur mit 4...8 angegeben Gleichung 6-4

ε_0 :8,85e−12As / Vm

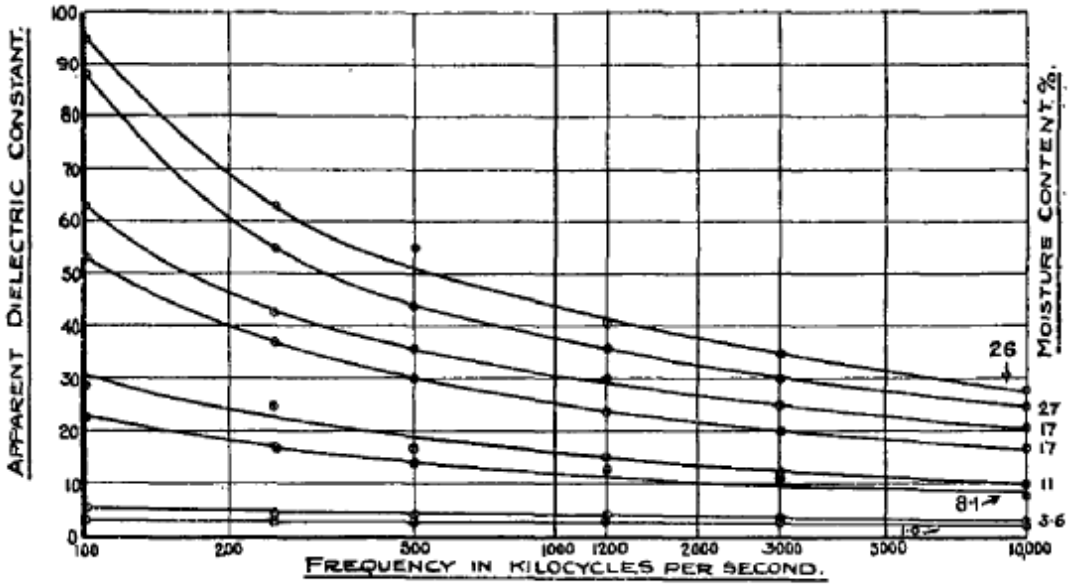


FIG. 3.—Relation of apparent dielectric constant to frequency and moisture content for soil from Site I (N.P.L.).

Bild 6-1 Erstveröffentlichung der Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätszahl im Erdreich von der Frequenz. Quelle: Smith-Rose: The electrical properties of soil for alternating currents at radio frequencies. Proceedings IEEE No. 75 1934

Erklärung: Bei Wechselstrom bildet sich ein molekularer Film auf den metallenen Elektroden. Dieser Film wirkt wie ein Kondensator mit sehr großer Kapazität in Serie mit dem Erdreich.

Die Darstellung der Ergebnisse für Vertikalleiter und Horizontaleiter in Bild 6-2 bis Bild 6-7 zeigt den theoretisch korrekten Verlauf in Übereinstimmung mit der Literatur.

Es fällt auf, dass der Wellenwiderstand der Leitung frequenzabhängig ist und für kleine Frequenzen gegen den Wert $Z = \sqrt{\frac{R'}{G'}}$ annimmt.

Weiterhin fällt auf, dass die Phasengeschwindigkeit v für kleine Frequenzen auf weniger als 1 % der Lichtgeschwindigkeit fällt.

Im Bereich der interessierenden Frequenzen eines negativen Folgestoßstroms der Form 0,25/100 beträgt die Phasengeschwindigkeit noch 10-30% der Lichtgeschwindigkeit, je nach spezifischem Erdwiderstand.

Berechnet man die Leitung mit geringem Kapazitätsbelag, steigt die Phasengeschwindigkeit über den Wert der Lichtgeschwindigkeit an. Das ist zunächst ein Widerspruch zu Einsteins Relativitätstheorie. Dennoch gibt es in der Literatur Hinweise auf eine höhere Geschwindigkeit als Lichtgeschwindigkeit. Quelle: http://hp.physnet.uni-hamburg.de/heyszenau/prosem/Aschraf%20Aktuell.pdf.

Der Wellenwiderstand ist unabhängig von der Länge der Leitung.

6.1.1.1 Vertikale Leitung

Für das zylindrische Modell mit Außendurchmesser 9 m gelten folgende Bestimmungsgleichungen

Mit :
D_A: Durchmesser der Röhre für das koaxiale Modell nach Wiesinger
D_I: Durchmesser des Erders

Widerstandsbelag (Kehrwert des Ableitungsbelags G `)

$$R'_E = \frac{\rho_E}{2\pi} \ln(D_A / D_I)$$ Gleichung 6-5

Für den Kapazitätsbelag einer zylindrischen Anordnung (Wanderwellenmodell) gilt:

$$C' = 2\pi\varepsilon_{eff} / \ln\frac{D_A}{D_I}$$ Gleichung 6-6

Mit der effektiven Dielektrizitätszahl nach Gleichung 6-4 gilt für den Kapazitätsbelag:

$$C' = 2\pi\left[\varepsilon_{r\infty}\varepsilon_0 + \sqrt{\frac{2\varepsilon_{r\infty}\varepsilon_0}{\rho_E\omega}}\right] / \ln\frac{D_A}{D_I}$$ Gleichung 6-7

Für den Ausbreitungswiderstand nach konventioneller Rechnung gilt nach Frei:

$$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln(4L / D)$$ Gleichung 6-8

L: Länge des Vertikaleiters
D: Durchmesser des Erders

Mit D_I=20 mm, D_A=9m ergeben sich folgende Werte

Tabelle 6-1 Zusammenstellung der Leitungsparameter für 3 Werte des spezifischen Erdwiderstands und der aus der Gleichstrombetrachtung errechnete Wert des Ausbreitungswiderstands, L`= 1,2µH/m.

Spezifischer Erdwiderstand ρ_E	Spezifischer Ausbreitungswiderstand R'_E	Spezifischer Ausbreitungsleitwert $G`_E$	Ausbreitungswiderstand nach Frei für Länge = 9m
Ohmm	Ohm/m	m/Ohm	Ohm
100	97,3	0,01028	13,26
500	486,4	0,00206	66,3
1000	972,8	0,000102	132,6

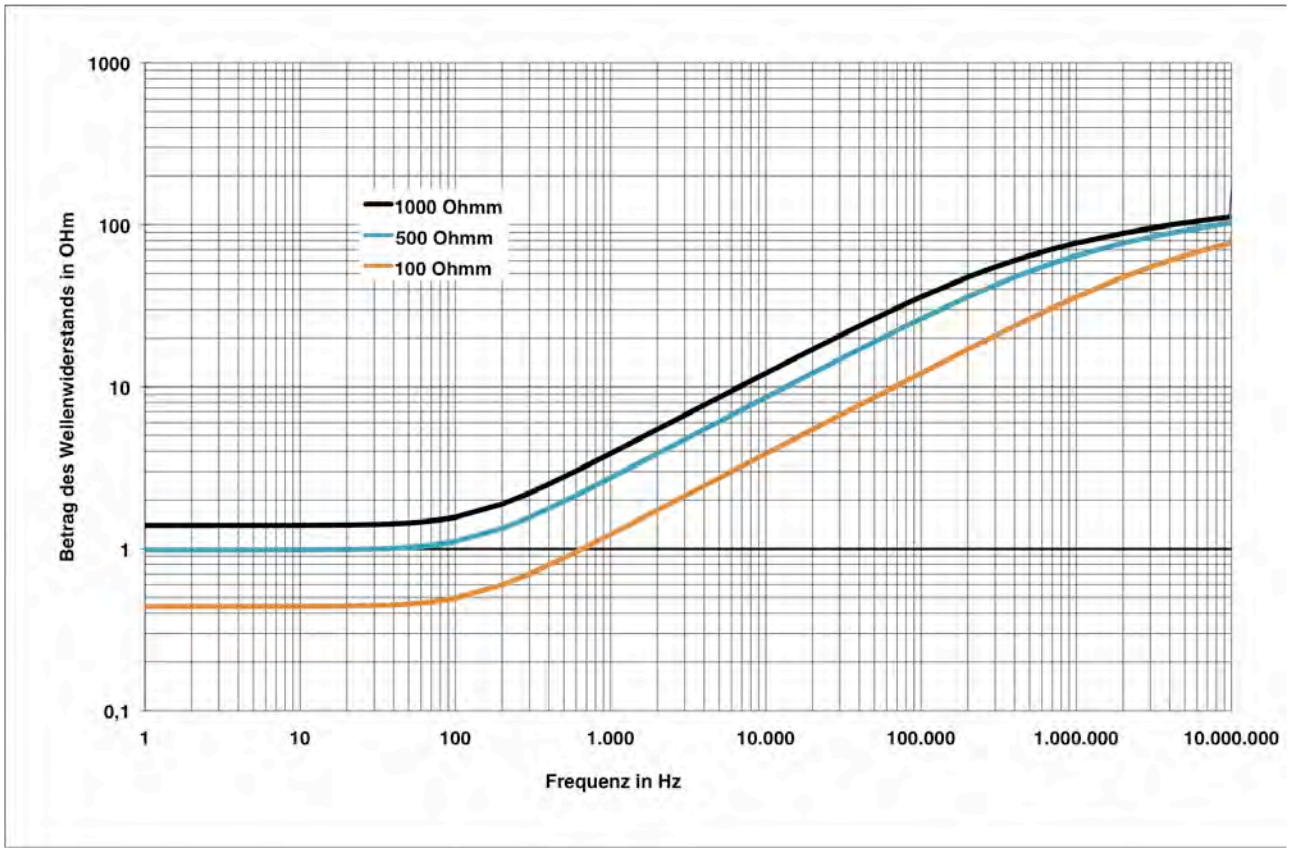


Bild 6-2 Vertikalerder Stange 20 mm Durchmesser. Durchmesser des Aussenradius des Zylinders für die R bzw. G-Berechnung: 9m

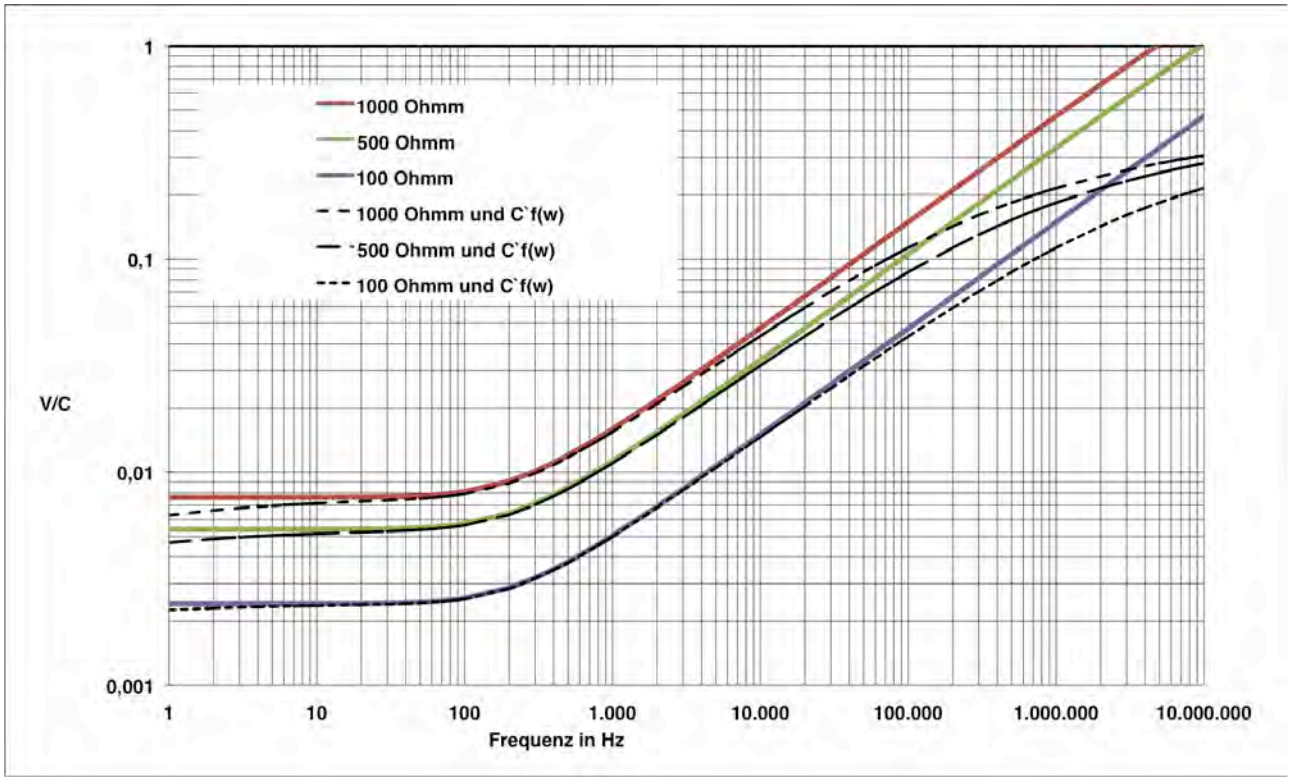


Bild 6-3 Ausbreitungsgeschwindigkeit Vertikalerder bezogen auf die Lichtgeschwindigkeit

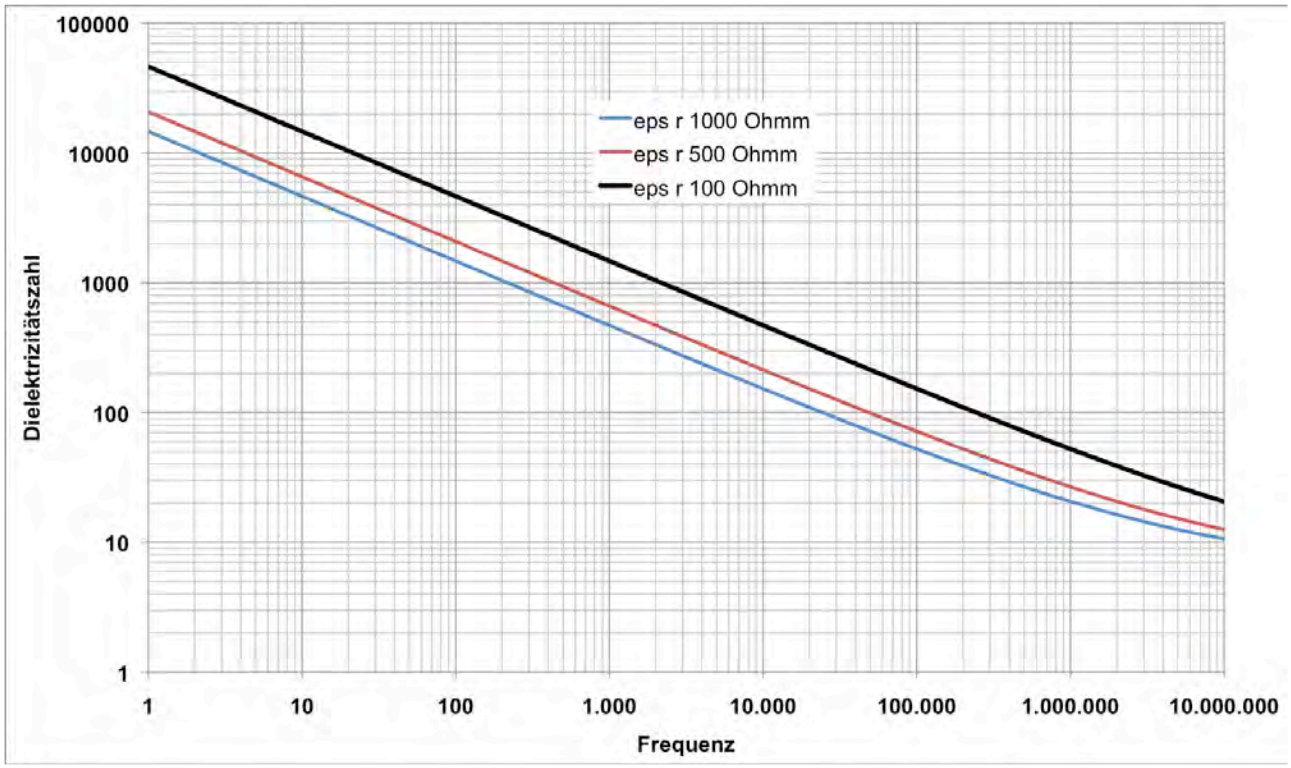


Bild 6-4 Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätszahl von der Frequenz für einen Vertikaleiter für spezifischen Erdwiderstand von 100 Ohmm, 500 Ohmm und 1000 Ohmm.

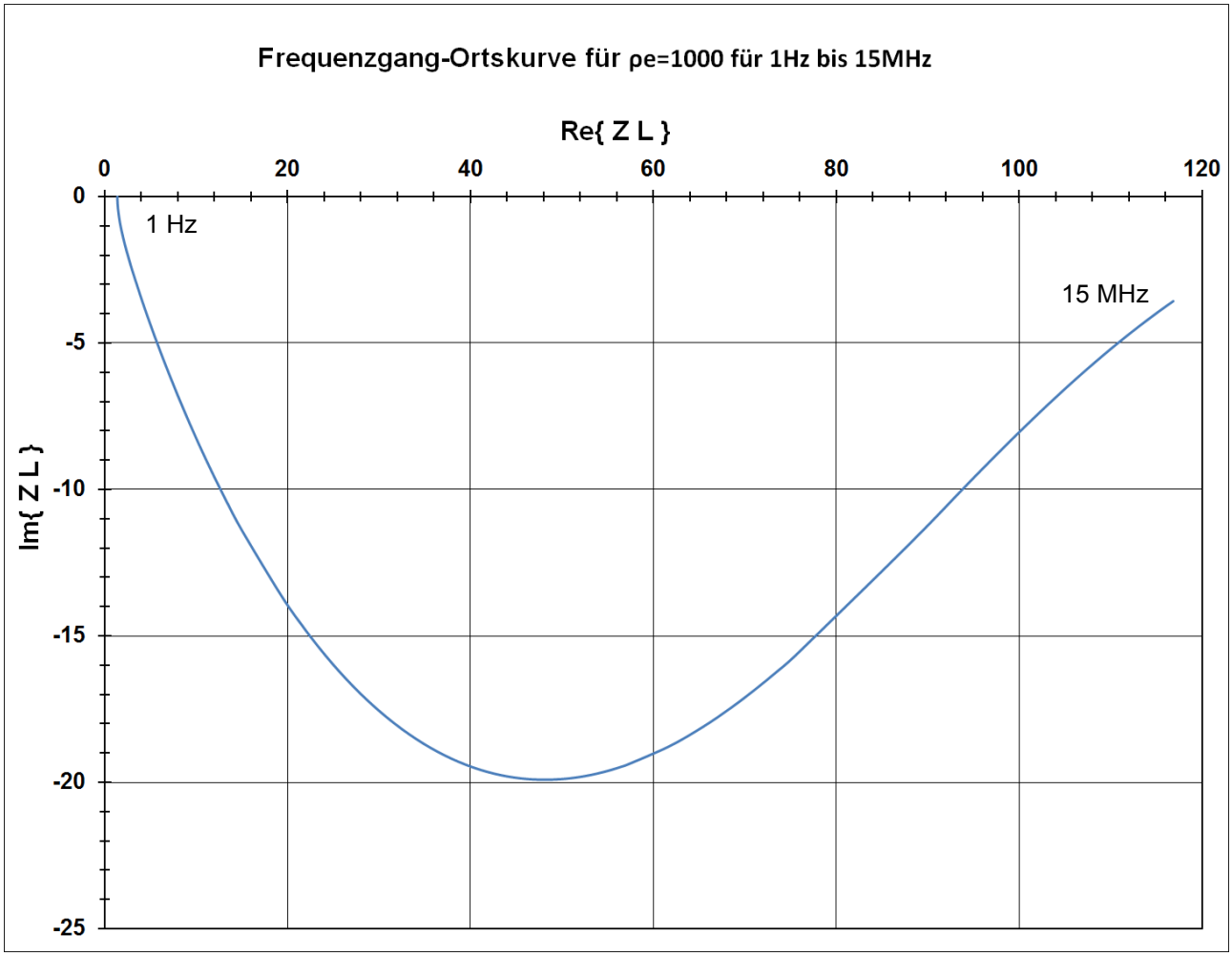


Bild 6-5 Ortskurve der Impedanz eines 9 m Vertikalerders.

6.1.1.2 Horizontale Leitung

Für das zylindrische Modell mit Außendurchmesser der Röhre nach Wiesinger: 9 m, gelten folgende Bestimmungsgleichungen

Mit:

D_A: Durchmesser der Röhre für das koaxiale Modell nach Wiesinger

D_I: Durchmesser des Erders

$$R'_E = \frac{\rho_E}{\pi} \ln(D_A / D_I)$$ Gleichung 6-9

Für den Kapazitätsbelag gilt:

$$C' = \pi \varepsilon_{eff} / \ln \frac{D_A}{D_I}$$ Gleichung 6-10

Mit der effektiven Dielektrizitätszahl nach Gleichung 6.4 gilt für den Kapazitätsbelag:

$$C' = \pi \left[\varepsilon_{r\infty} \varepsilon_0 + \sqrt{\frac{2 \varepsilon_{r\infty} \varepsilon_0}{\rho_E \omega}} \right] / \ln \frac{D_A}{D_I}$$ Gleichung 6-11

Für den Ausbreitungswiderstand nach konventioneller Rechnung gilt nach Frei:

$$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln(2L / D)$$ Gleichung 6-12

L: Länge des Horizontalleiters

D: Durchmesser des Erders

Mit DI=15 mm (Äquivalent zu einem 30 mm breiten Banderder, D_A=9m ergeben sich folgende Werte

Tabelle 6-2 Zusammenstellung der Leitungsparameter für 3 Werte des spezifischen Erdwiderstands und der aus der Gleichstrombetrachtung errechnete Wert des Ausbreitungswiderstands, L`=1,2µH/m.

Spezifischer Erdwiderstand ρ_E	Spezifischer Ausbreitungswiderstand R'_E	Spezifischer Ausbreitungsleitwert $G`_E$	Ausbreitungswiderstand nach Frei für Länge = 10m
Ohmm	Ohm/m	m/Ohm	Ohm
100	229	0,004366	22,9
500	1145	0,000873	114,5
1000	2291	0,000436	229

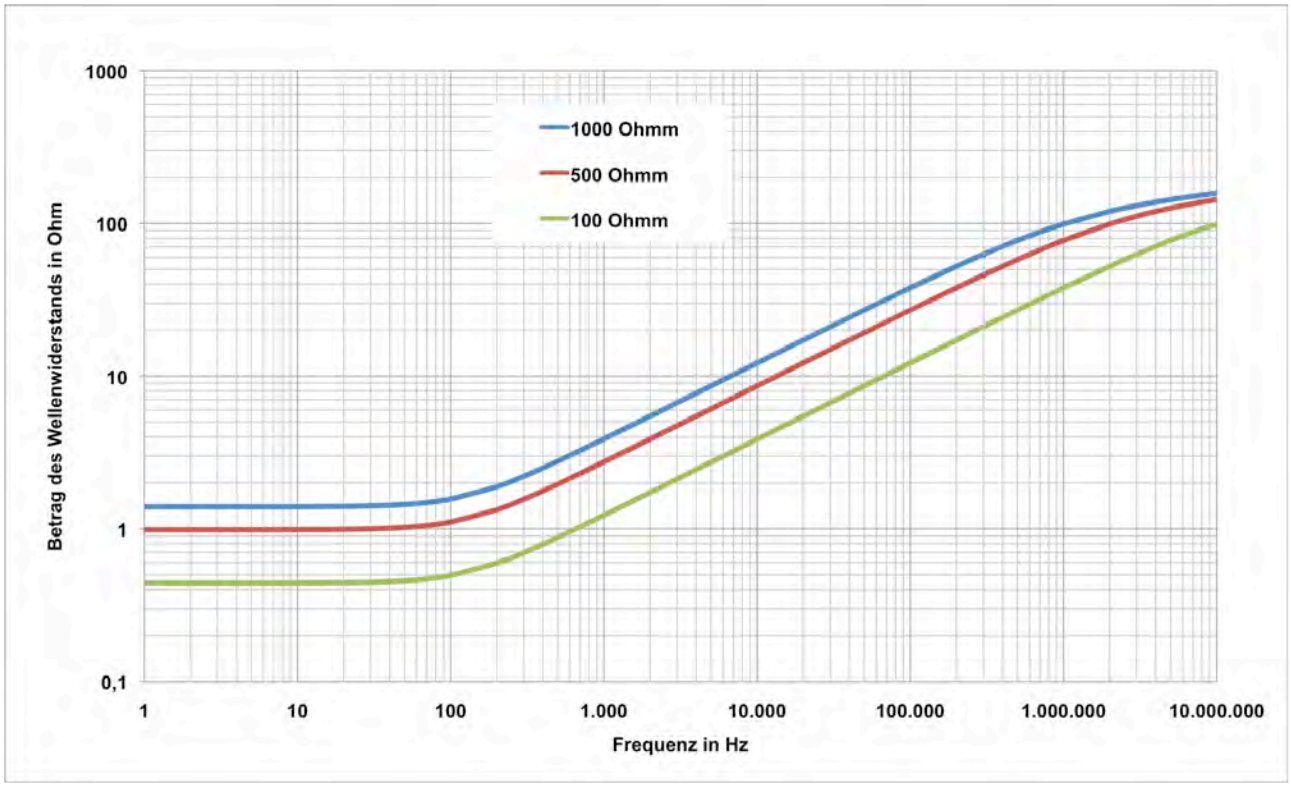


Bild 6-6 Wellenwiderstand für Horizontalleiter 30x5 mm entsprechend Rundleiter von 15mm Durchmesser. Durchmesser des Aussenradius des Zylinders für die R bzw. G-Berechnung: 9m.

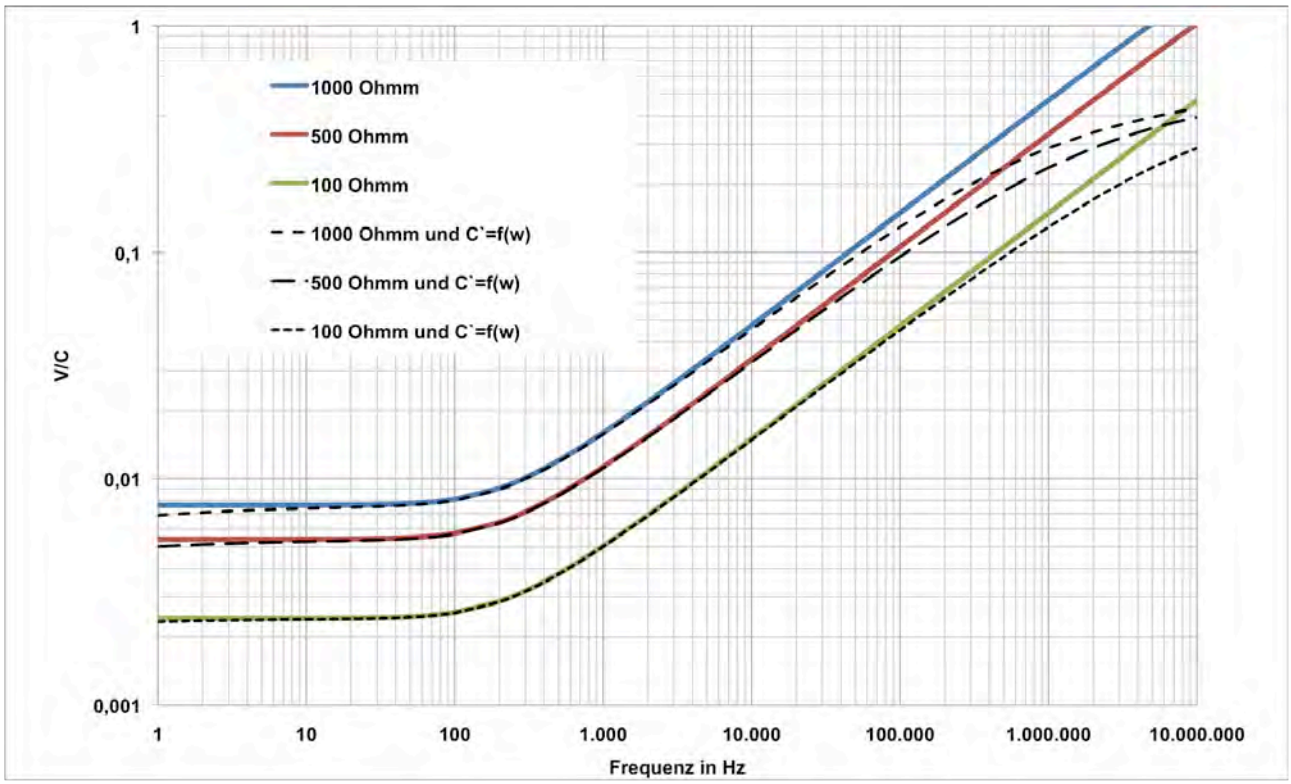


Bild 6-7 Ausbreitungsgeschwindigkeit Horizontalleiter bezogen auf die Lichtgeschwindigkeit

6.1.1.3 Anwendbarkeit der Leitungstheorie auf Leitungen endlicher Länge

Der Wellenwiderstand konvergiert für kleine Frequenzen gegen

$$Z = \sqrt{\frac{R'}{G'}}$$ Gleichung 6-13

und damit sehr kleine Werte. Das stimmt nicht mit der Realität einer **endlichen Leitung** überein. Man kann jedoch mit den Verhältnissen von Anstiegszeit zu Laufzeit argumentieren. Die Laufzeit der Leitung T_L soll mindestens 10 x Anstiegszeit des Impulses T_A entsprechen, dann ist man bei instationären Vorgängen und kann die Leitungsgleichungen anwenden. Das Problem ist dabei die frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit.
Aus der Forderung

$$T_L \geq 10 \bullet T_A$$ Gleichung 6-14

ergibt sich nach einfacher Rechnung folgendes Resultat

$$T_L \geq 10 \bullet T_A$$
$$\frac{L}{k \bullet c} \geq 10 \bullet T_A$$
$$L \geq 10 \bullet k \bullet c \bullet T_A$$
$$\frac{L}{[m]} \geq k \bullet 3000 \bullet \frac{T_A}{[\mu s]}$$ Gleichung 6-15

L : Mindestlänge der Leitung

$k = v / c$, Verhältnis der Phasengeschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit

Bild 6-8 zeigt die notwendige Mindestlänge einer Leitung, welche die Forderung $T_L \geq 10 \bullet T_A$ erfüllt in

Abhängigkeit von der Stirnzeit eines Stoßstromimpulses.

Beispiel: Ein negativer Folgestoßstrom mit einer Anstiegszeit[1] von T_A=0,25µs breitet sich auf einem Vertikalerder nach den Leitungsgleichungen bei einem spezifischen Erdwiderstand von 100 Ohmm mit einer Phasengeschwindigkeit von 0,1*c aus, d.h. k=0,1, siehe Bild 6-3. Die Mindestlänge der Leitung ergibt sich dann aus L=0,1*3000*0,25=75m. Ab dieser Länge erst können die Leitungsgleichungen angewendet werden. Man erkennt aus Bild 6-8 , das für realistische spezifische Erdwiderstände oberhalb 100 Ohmm die notwendige Länge steigt und außerhalb der realen Anwendung liegt. Für einen 1/200 oder 10/350 Impuls ist daher das Verfahren der Leitungsgleichungen aus dem Frequenzbereich überhaupt nicht mehr anwendbar.

Zur Verdeutlichung ist in Bild 6-9 eine Simulation eines Horizontaleiters mit einer Länge von 75 m als Wanderwellenleitung durchgeführt worden. Der Horizontalleiter wird mit einem negativen Folgestoßstrom 0,25/100 erregt. Die äquivalente Frequenz beträgt hier 1 MHz. Aus den Bildern Bild 6-2 und Bild 6-3 lassen sich für einen spezifischen Erdwiderstand von 100 Ohmm folgende Werte ermitteln:

Wellenwiderstand beträgt rund 30 Ohm

[1] Der Einfachheit halber ist hier Anstiegszeit und Stirnzeit gleichgesetzt.

Die Phasengeschwindigkeit beträgt 10% der Lichtgeschwindigkeit. Damit errechnet sich dien Laufzeit der 75 m Leitung zu 2,5 µs.

Das Ergebnis der Simulation in Bild 6-10 zeigt ein reines Verzögerungsverhalten, da das Wanderwellenmodell für einen konstanten Wellenwiderstand ausgelegt ist. Es tritt eine reine Zeitverzögerung um 2,5µs auf. Eine Verzerrung wird nicht beobachtet. Das entspricht nicht der Realität. Eine Modellierung mit Wanderwellenleitungen mit konstantem Wellenwiderstand und konstanter Laufzeit ist daher nicht zielführend.

Eine Lösung des obigen Problems ist die Behandlung als Kettenleiter, die im nächsten Abschnitt beschrieben ist.

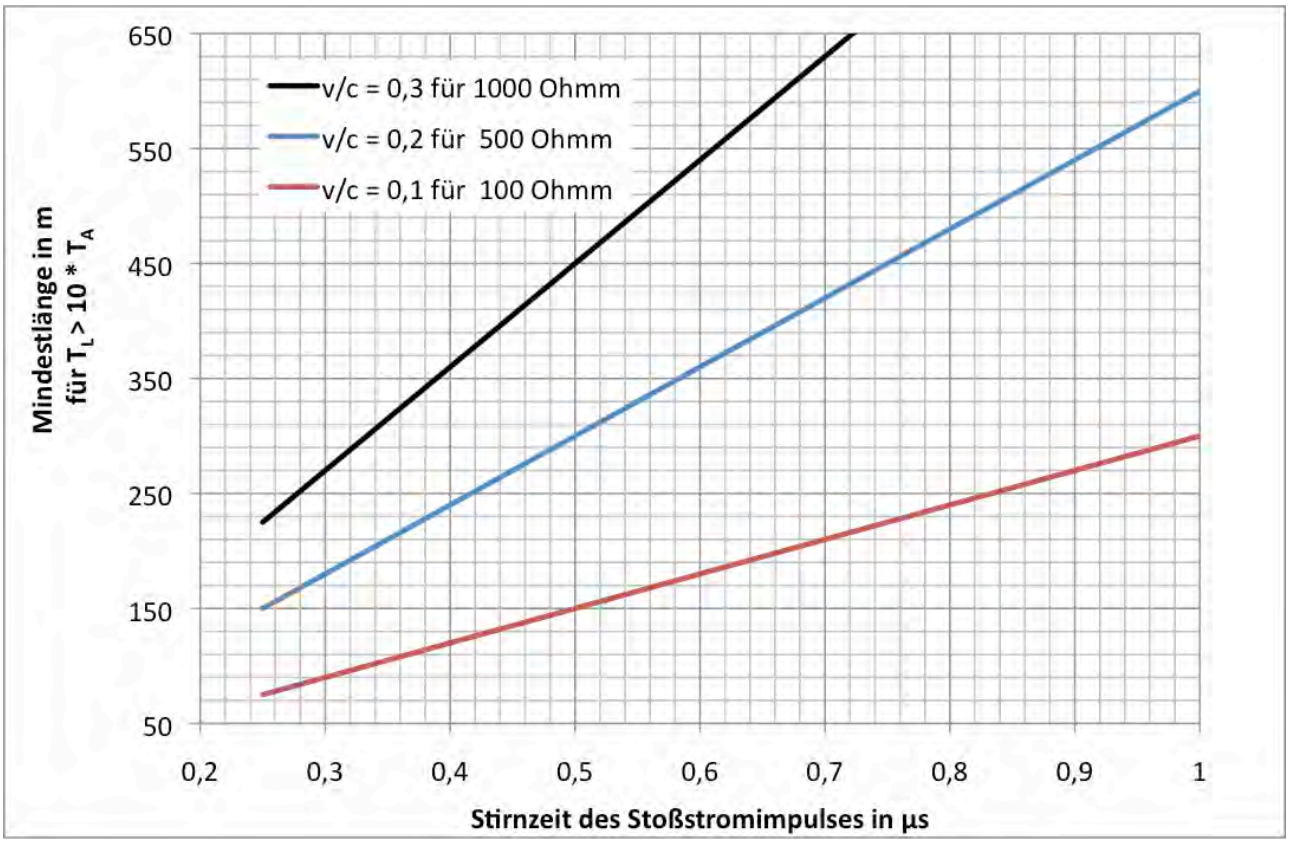
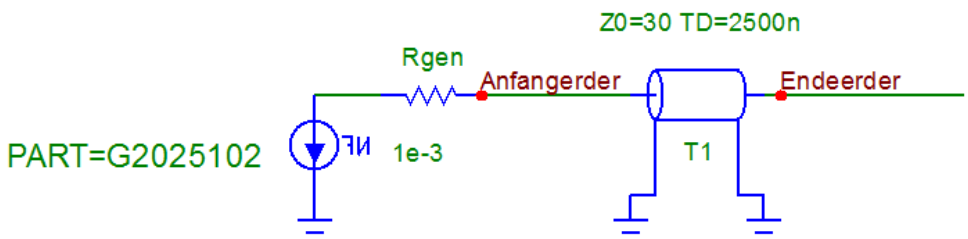


Bild 6-8 Notwendige Länge eines Erders, damit die Bedingung T_L>10*T_A erfüllt ist. T_L: Laufzeit der Leitung, T_A: Anstiegszeit des Stromimpulses.



((50e3/.993)*exp(-(T)/143e-6)*((T)/0.454e-6)10/(1+((T)**10/(0.454e-6)**10)))**

Bild 6-9 Modellierung eines Horizontalerders mit einer Länge von 75 m im Erdreich mit einem spezifischen Erdwiderstand von 100 Ohmm mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 10 % der Lichtgeschwindigkeit (entsprechen einer Laufzeit von 2,5µs) und einem Wellenwiderstand von ca. 30 Ohm gemäß Bild 6-2 und Bild 6-3. Erregender Strom ist ein negativer Folgestoßstrom 0,25/100 mit 50 kA Scheitelwert.

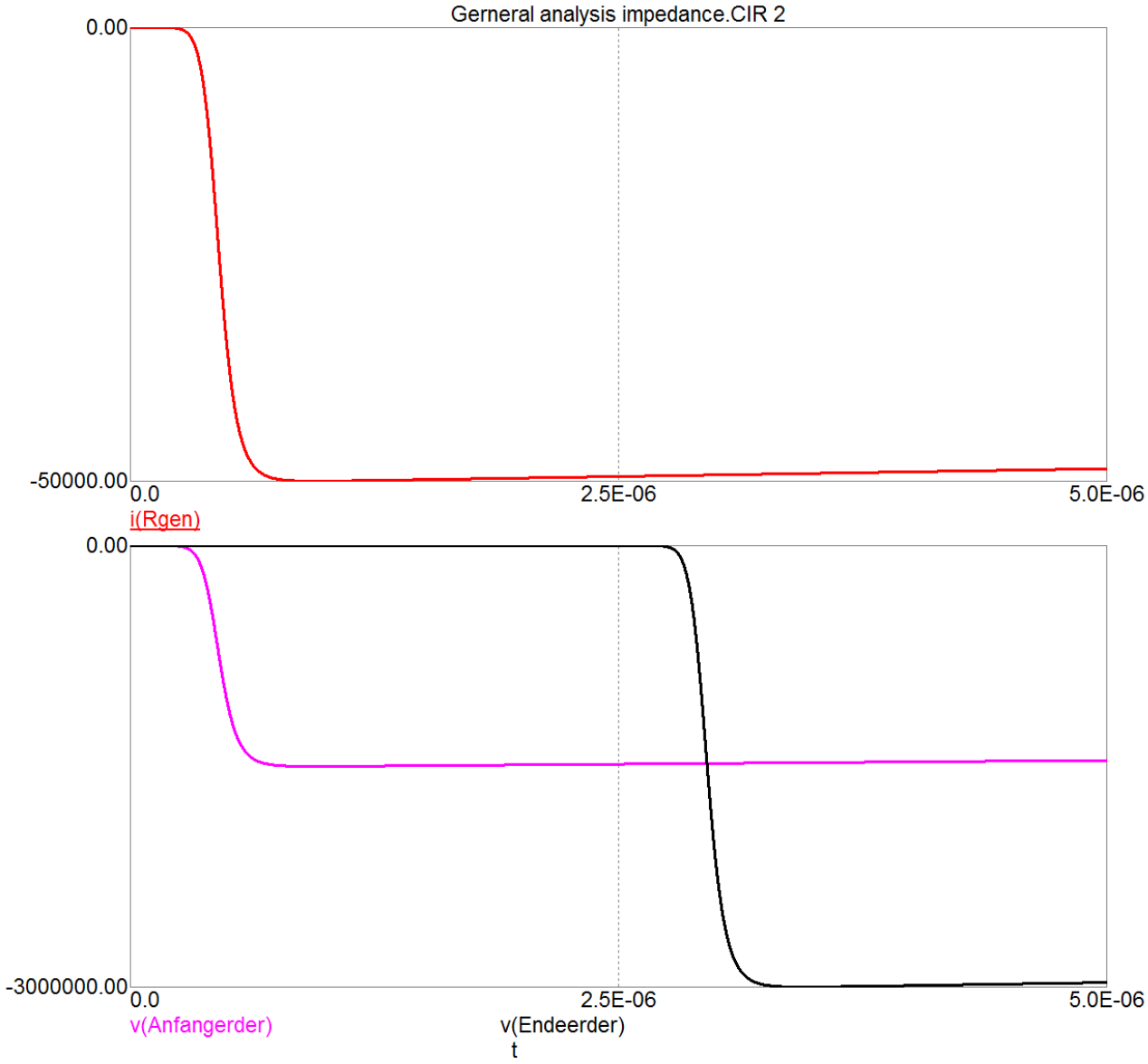


Bild 6-10 Eingespeister Strom und Spannungen am Anfang und Ende der Wanderwellenleitung

6.1.2 Die Verhältnisse bei einer Modellierung als Kettenleiter mit Microcap

6.1.2.1 Vertikalerder als Kettenleiter

Das Kettenleitermodell für einen Vertikalleiter zeigt Bild 6-11.

Die Gesamtkapazität eines 9 m langen Vertikalerders wird mit 45 Elementen modelliert, d.h. 5 Elemente pro Meter. Bei 5 Elementen pro Meter ergibt sich

Vertikalleiter: mit C `nach Gleichung 6-7

$$C_{VALV} = \frac{C'}{5} = 0{,}4 \cdot \pi \cdot \left[\varepsilon_{r\infty} \cdot \varepsilon_0 + \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_{r\infty} \cdot \varepsilon_0}{\rho_E \cdot \omega}} \right] / \ln \frac{D_A}{D_I}$$ Gleichung 6-16

Hinweis $\varepsilon_{r\infty}$ wird nach Literaturangaben (GSALab) 6 angesetzt

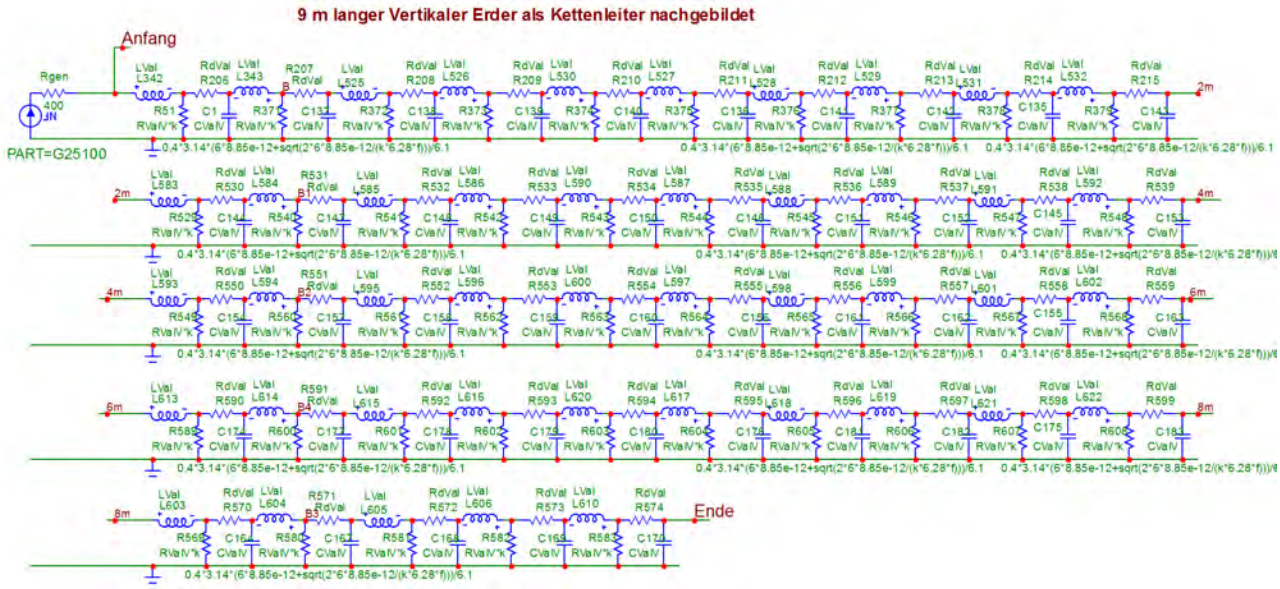


Bild 6-11 Kettenleitermodell für einen 9 m Vertikalerder mit berücksichtigter Frequenzabhängigkeit der Kapazität $C_1=C_{Val}=C´/5$. L`=1,27µH/m

Der Induktivitätsbelag einer vertikalen Leitung ergibt sich aus folgender Überlegung:

Literaturangaben: In der Literatur wird für L` =1,8 µH/m vorgeschlagen. Quelle: Bulla,W.: Der Stoßausbreitungswiderstand von Erdern, Die Technik 2. (1952) S. 129-136.
Nach Wiesinger: Handbuch Blitzschutz und Erdung gilt

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_a}{r}$$ Gleichung 6-17

wobei: r_a willkürlich zu 1 anzusetzen ist und r der Radius des Eders ist. Damit ergibt sich für einen Leiterradius von 10 mm (2 cm Erdungsstange) ein Wert von 0,92 µH/m. Setz man hingegen ra=9m wie bei der Kapazitätsberechnung, ergibt sich ein Wert von 1,36 µH/m.
Für die Berechnungen in Microcap wir ein Wert mit r_a=4,5 m (9m Durchmesser der Röhre nach Wiesinger)von 1,27 µH/m verwendet.

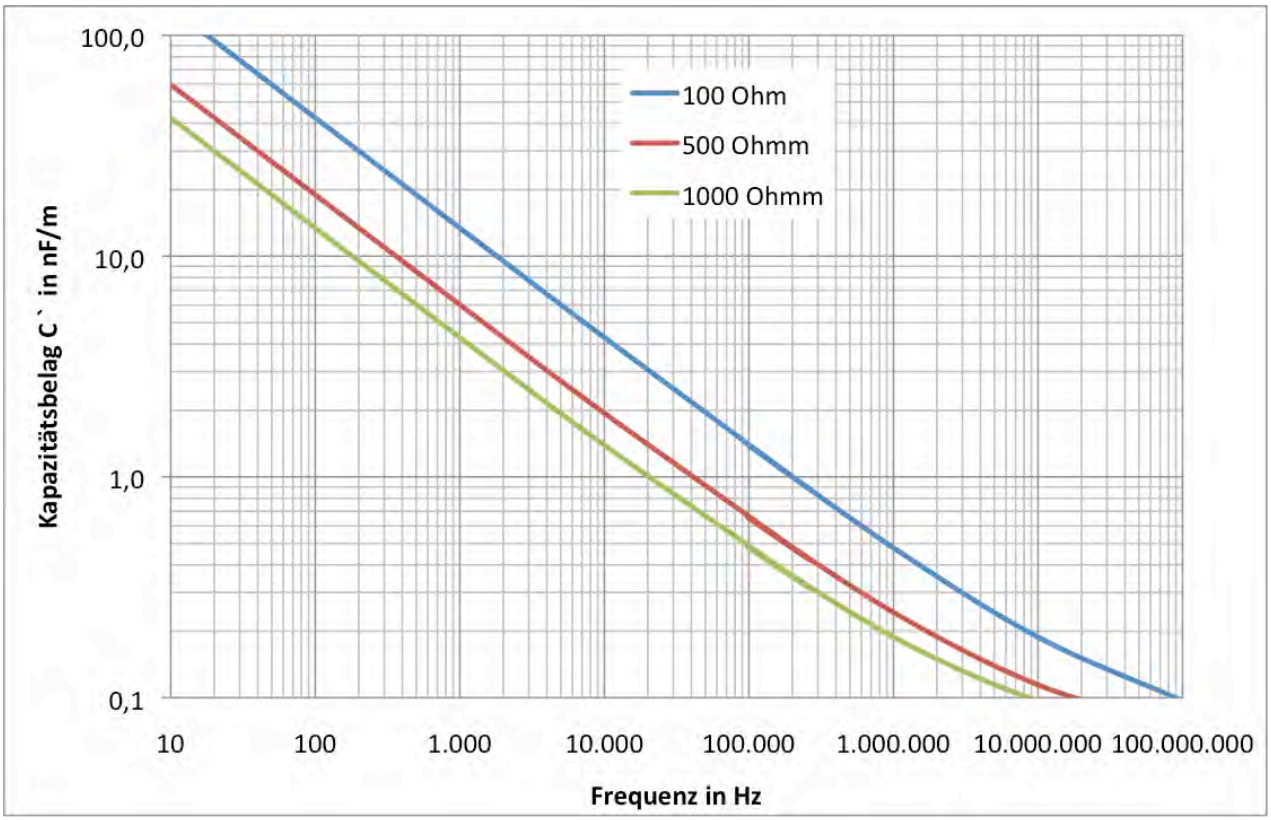


Bild 6-12 Kapazitätsbelag einer vertikalen Leitung (Außendurchmesser des Zylinders nach Wiesinger: 9m) Edelstahlstab mit 20 mm Durchmesser in Abhängigkeit von der Frequenz. Parameter: Spezifischer Erdwiderstand. Hinweis ε_{r_∞} wird mit 6 angesetzt

Tabelle 6-3 Kapazitätswerte Cval in nF für die Simulation im Zeitbereich mit Microcap.

	Cval=C´/5		
Frequenz in Hz	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm
25.000	0,54	0,25	0,18
250.000	0,18	0,086	0,064
1.000.000	0,09	0,048	0,037

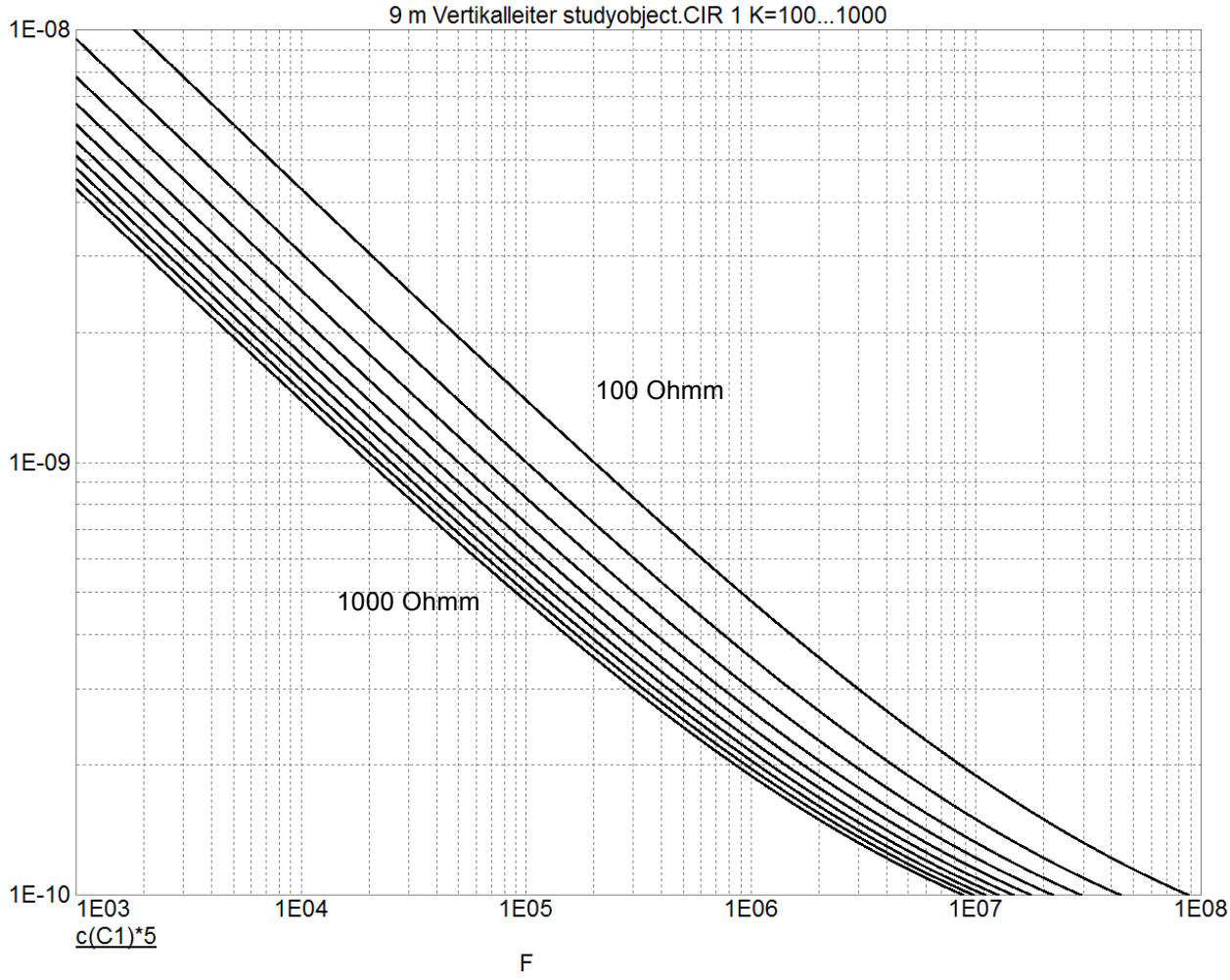


Bild 6-13 Kapazitätsbelag C berechnet mit Microcap. Vertikale Leitung (Außendurchmesser des Zylinders nach Wiesinger: 9m) Edelstahlstab mit 20 mm Durchmesser in Abhängigkeit von der Frequenz. Parameter: Spezifischer Erdwiderstand. Hinweis ε_{r_∞} wird mit 6 angesetzt.

6.1.2.1.1 Frequenzbereichsanalyse für Vertikalerder als Kettenleiter

Rechnet man mit einer Leitungslänge ℓ die Resonanzfrequenz einer offenen Leitung, ergibt sich:

$$f_{res} = \frac{1}{4T} = \frac{v}{4s} = \frac{1}{4s} v(\omega)$$

s: Länge der Leitung
v(w) Frequenzabhängige Geschwindigkeit.

Die Resonanzfrequenz lässt sich nicht analytisch berechnen, da die Kapazität und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit frequenzabhängig ist.

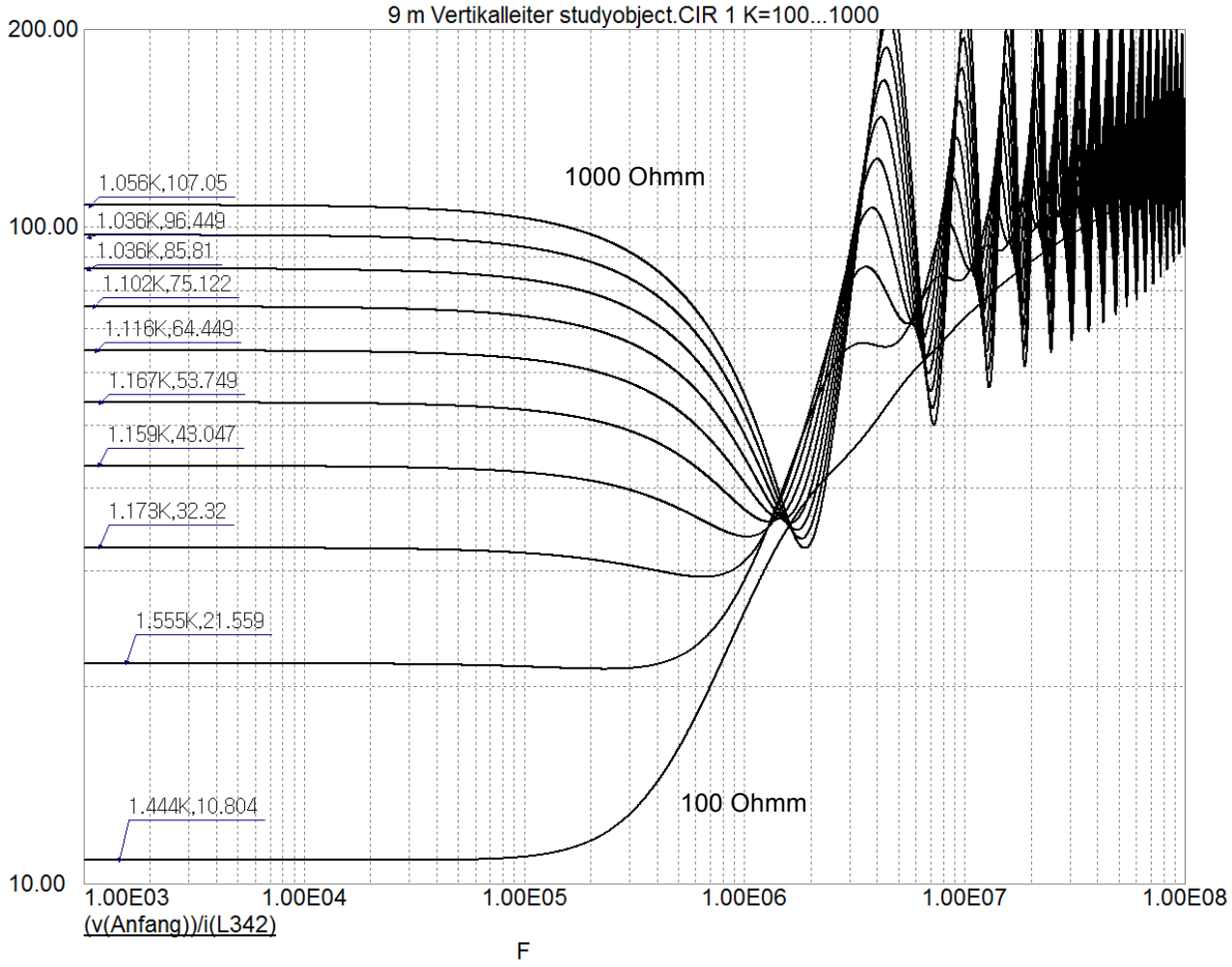


Bild 6-14 Impedanz Z=U/I für ρ_E 100 Ohmm bis 1000 Ohmm mit frequenzabhängiger Kapazität nach Gleichung 6-16 gerechnet. Für Vertikaleiter (Außendurchmesser nach Wiesinger: 9m) Länge des Kettenleiters =Länge des Vertikalerders: 9m. Edelstahlstab 20 mm Durchmesser.

6.1.2.1.2 Zeitbereichsanalyse für Vertikalerder als Kettenleiter

6.1.2.1.3 Für 0,25/100 Impuls 50 kA

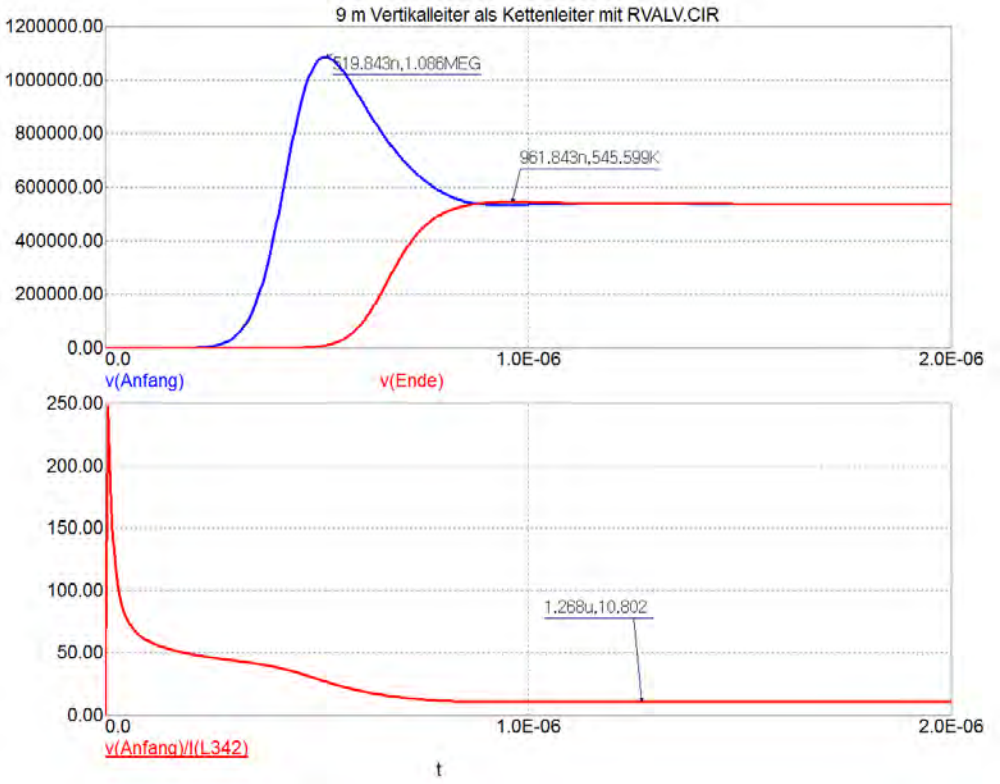


Bild 6-15 Verhältnisse bei 0,25/100 Einspeisung 50kA, ρ_E=100 Ohmm

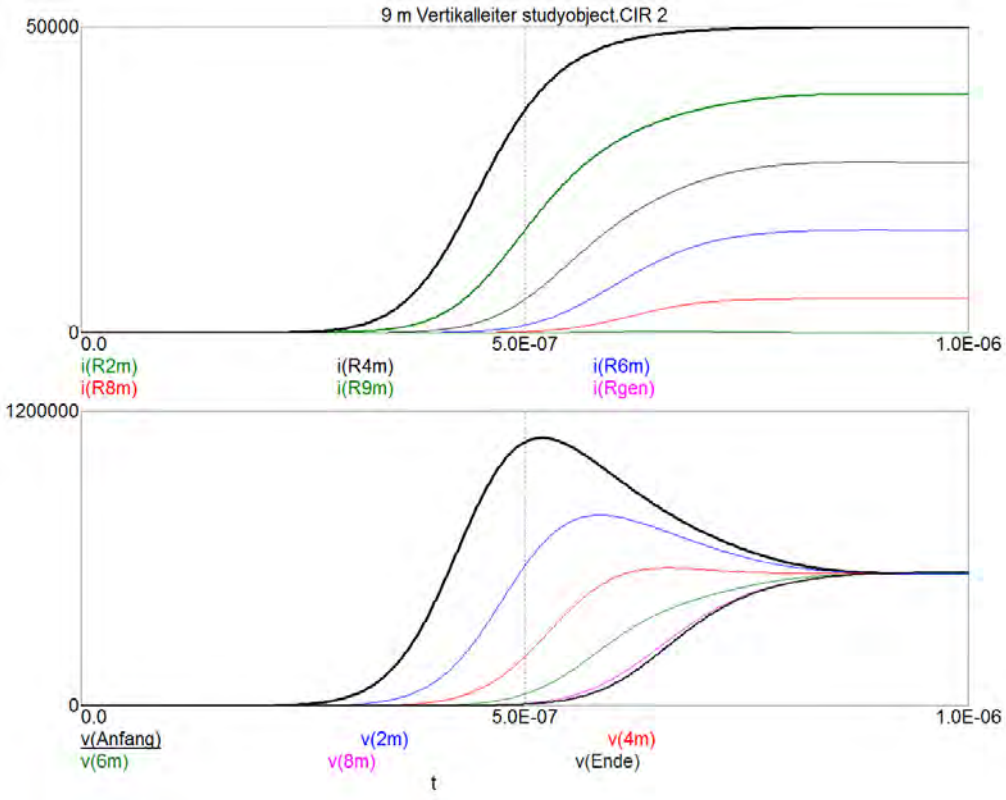


Bild 6-16 Strom und Spannungsverteilung längs des Vertikalerders (vergl.Bild 6-11) bei 0,25/100 Einspeisung 50kA, ρ_E=100 Ohmm

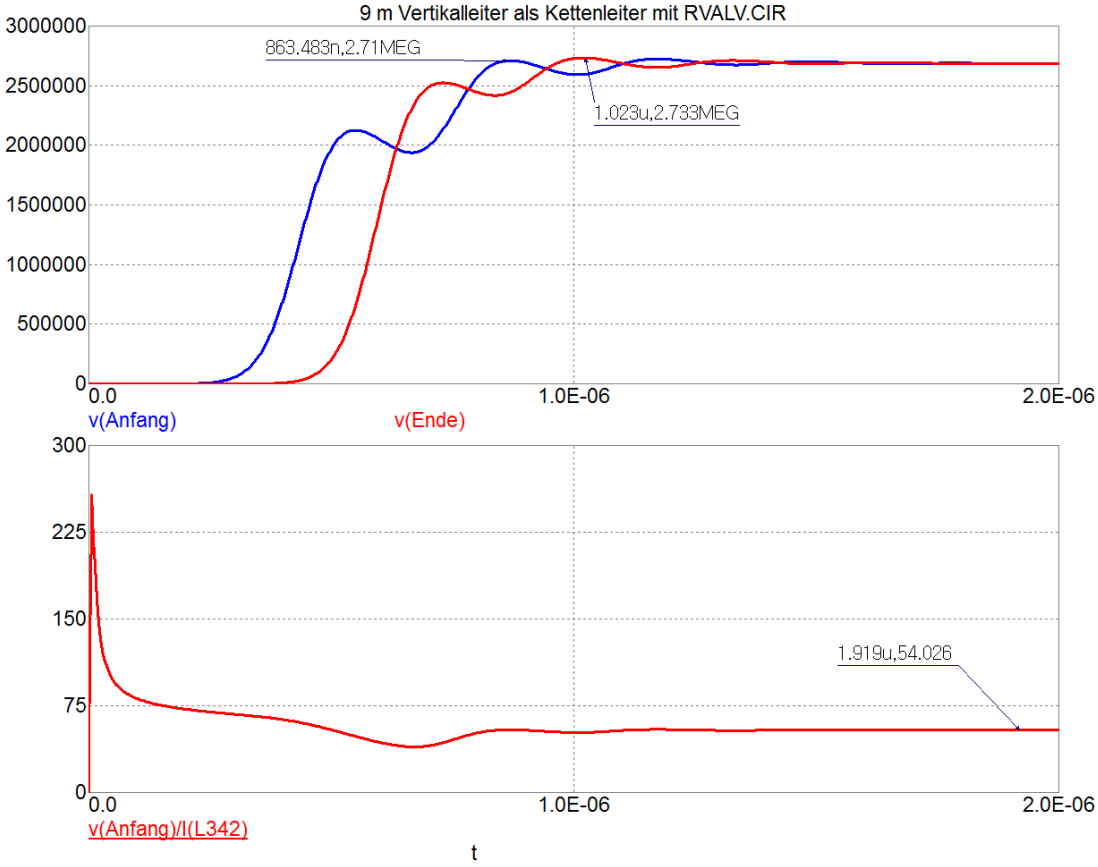


Bild 6-17 Verhältnisse bei 0,25/100 Einspeisung 50kA, ρ_E=500 Ohmm

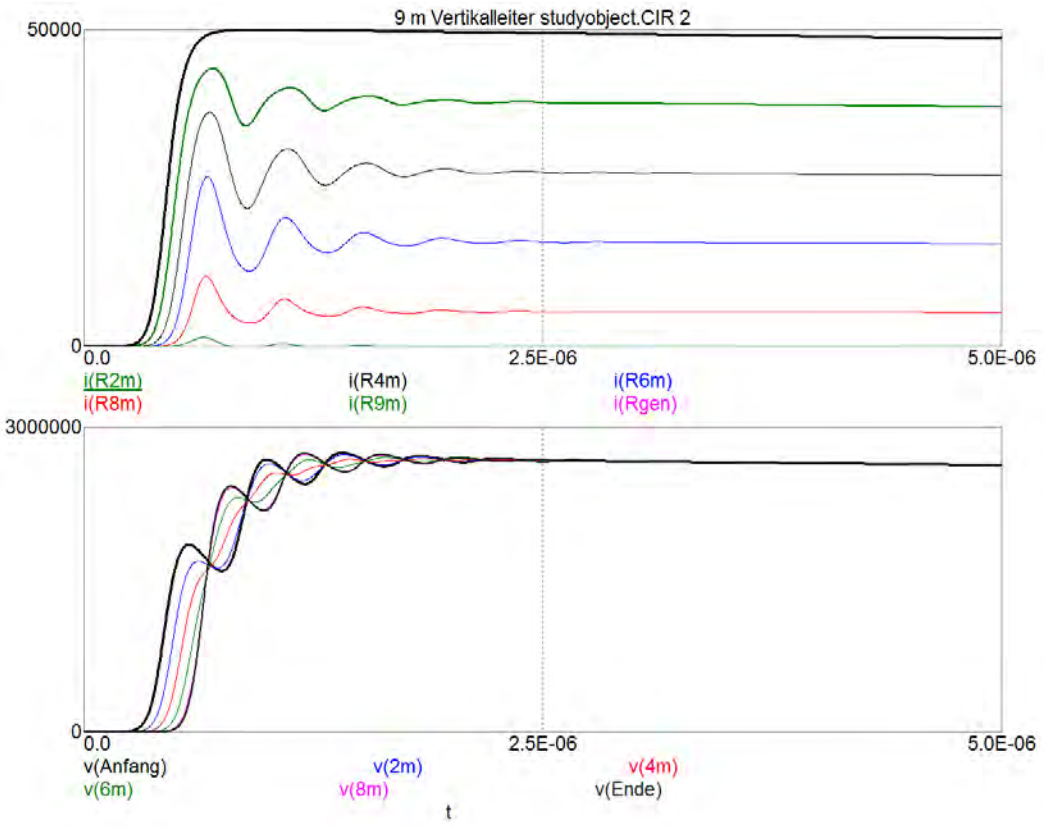


Bild 6-18 Strom und Spannungsverteilung längs des Vertikalerders (vergl.Bild 6-11) bei 0,25/100 Einspeisung 50kA, ρ_E=500 Ohmm

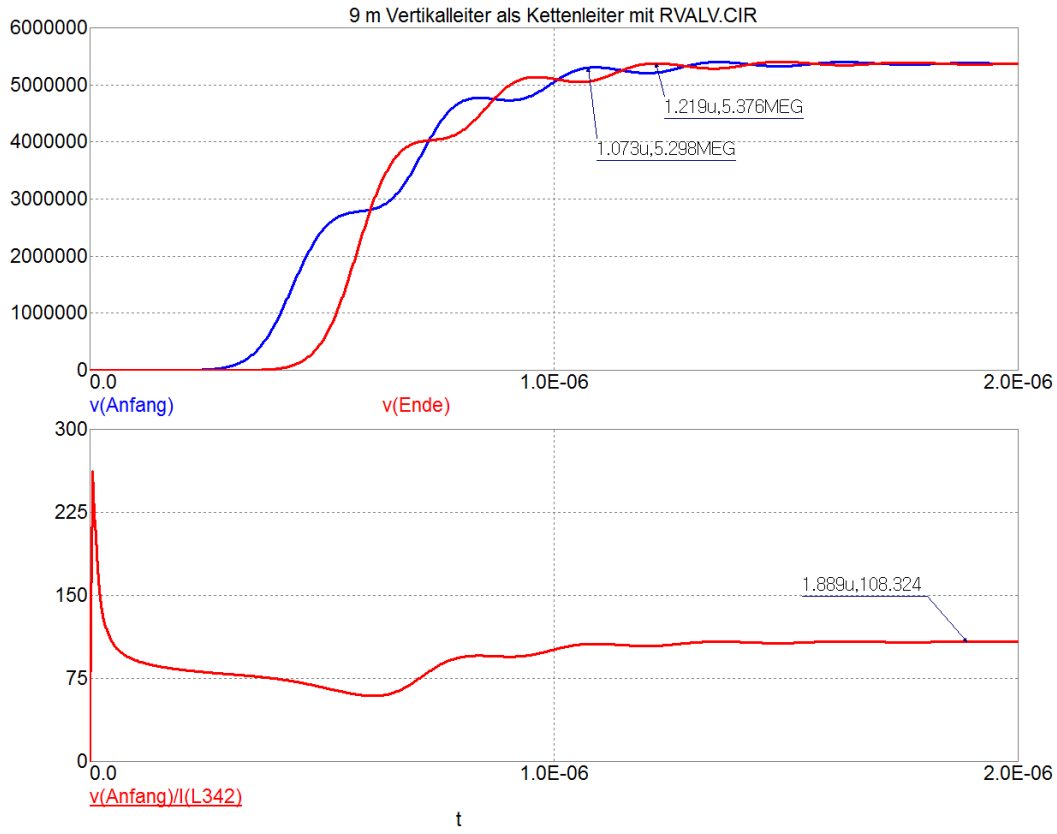


Bild 6-19 Verhältnisse bei 0,25/100 Einspeisung 50kA, ρ_E=1000 Ohmm

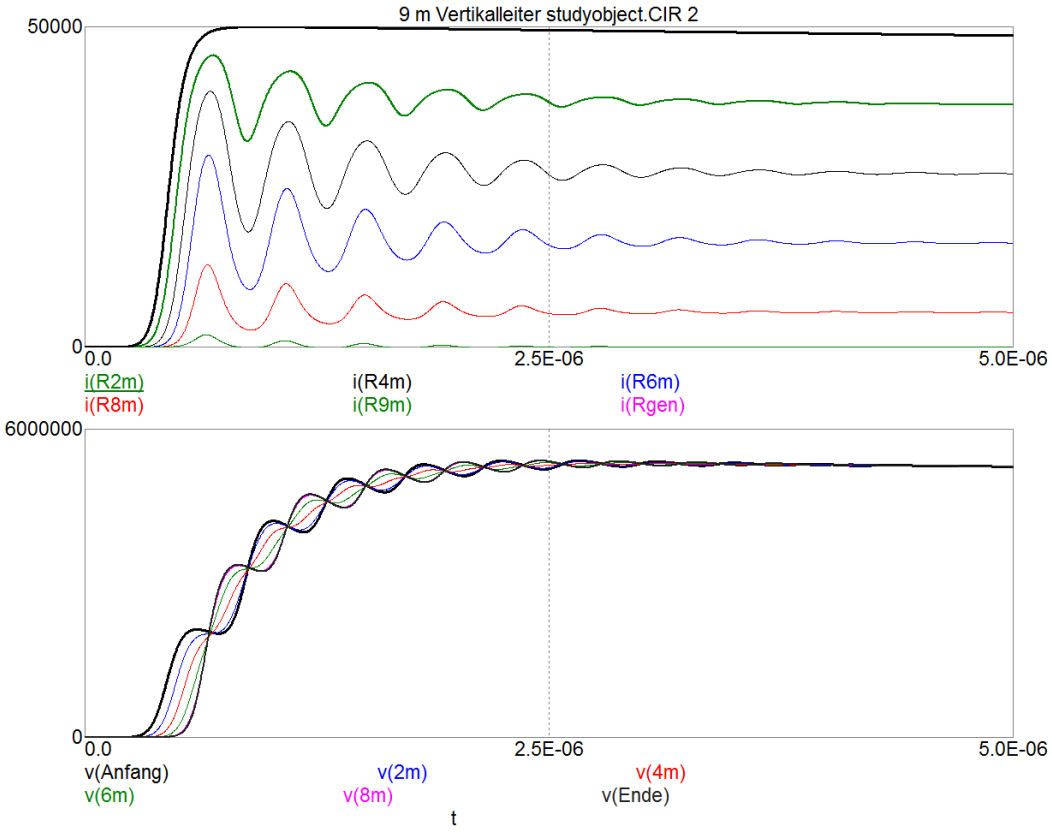


Bild 6-20 Strom und Spannungsverteilung längs des Vertikalerders (vergl.Bild 6-11) bei 0,25/100 Einspeisung 50kA, ρ_E=1000 Ohmm

6.1.2.1.4 Für 1/200 Impuls 100 kA

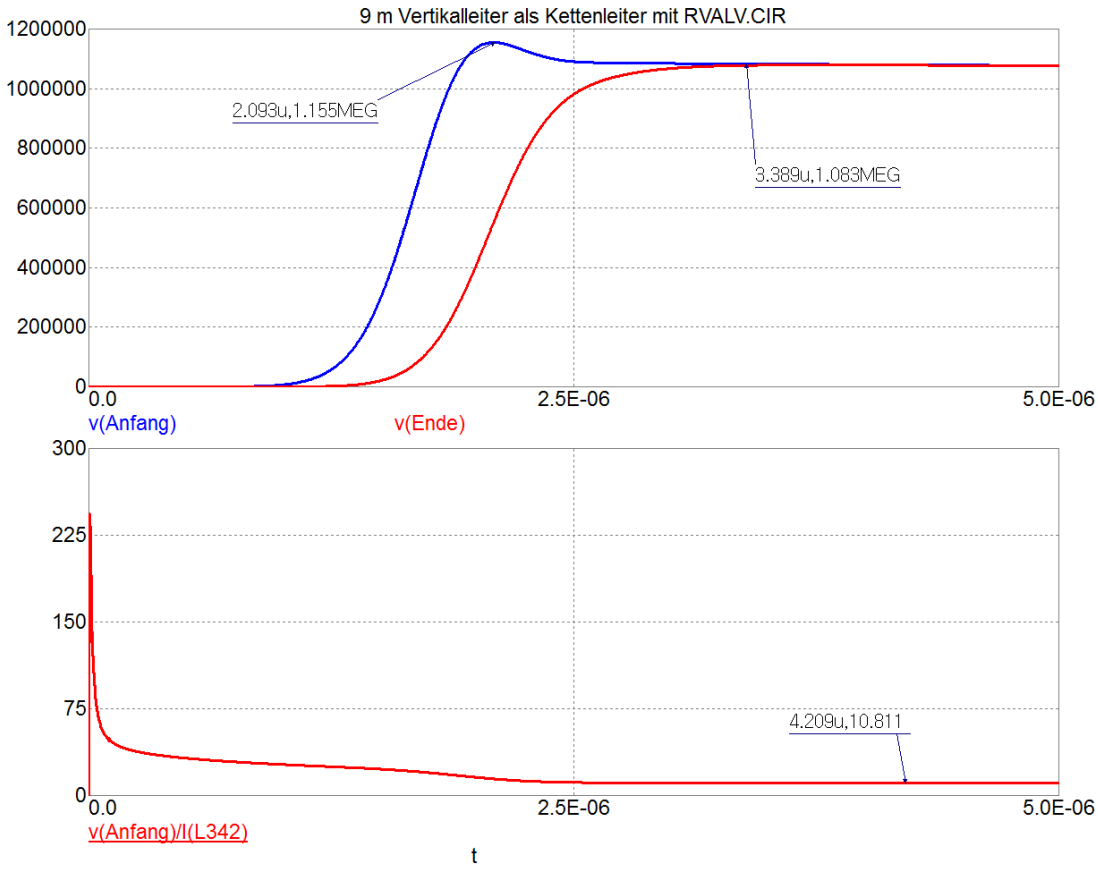


Bild 6-21 Verhältnisse bei 1/200 Einspeisung 100kA, ρ_E=100 Ohmm. DeltaTmax= 297 ns.

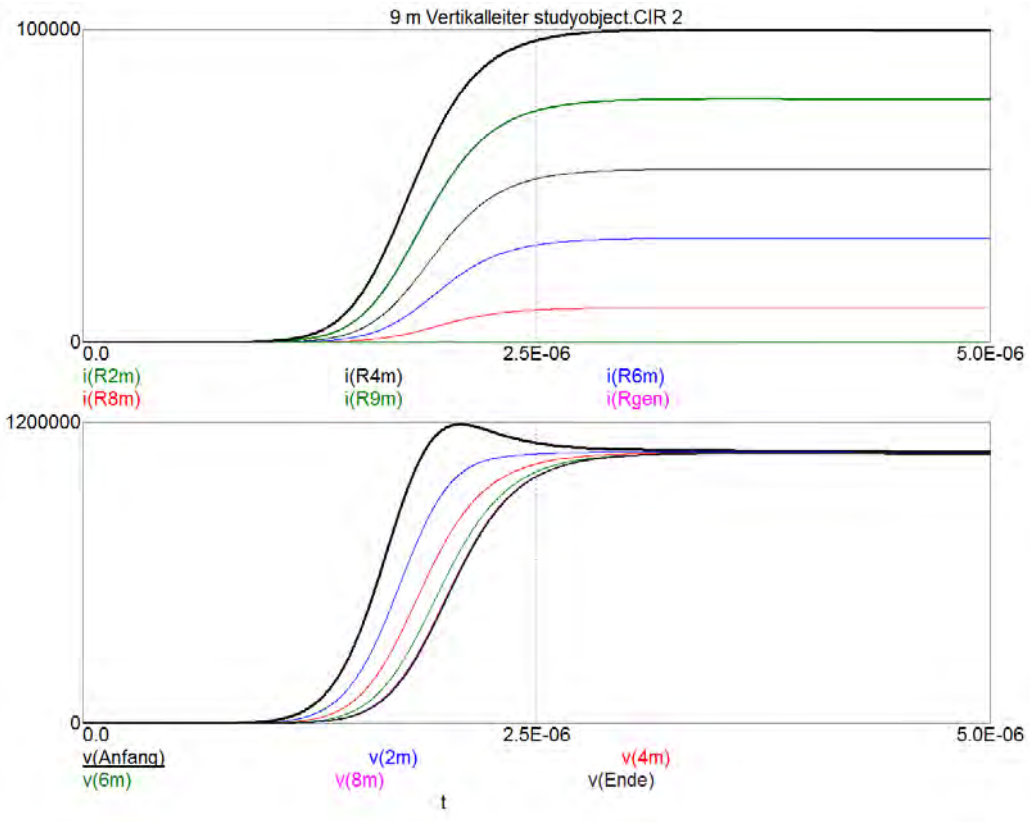


Bild 6-22 Strom und Spannungsverteilung längs des Vertikalerders (vergl. Bild 6-11) bei 1/200 Einspeisung 100kA, ρ_E=100 Ohmm

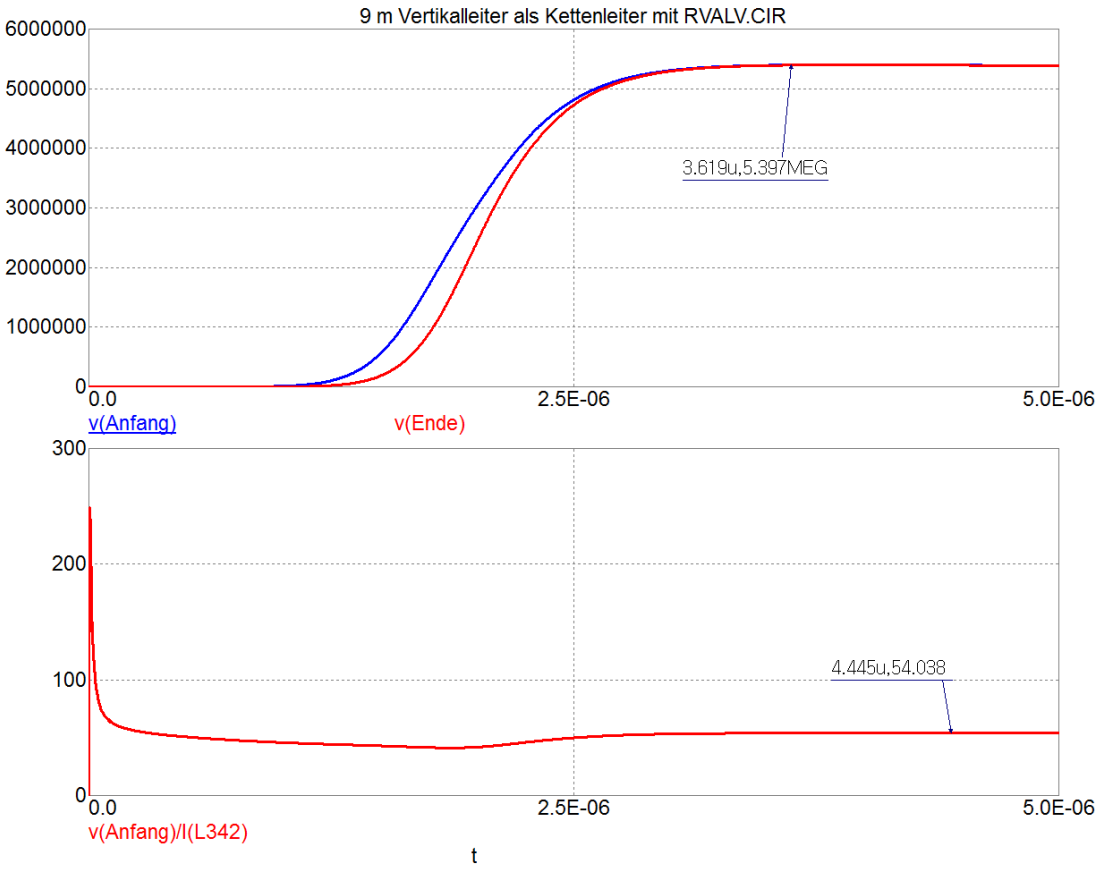


Bild 6-23 Verhältnisse bei 1/200 Einspeisung 100kA, ρ_E=500 Ohmm. DeltaTmax= 203 ns.

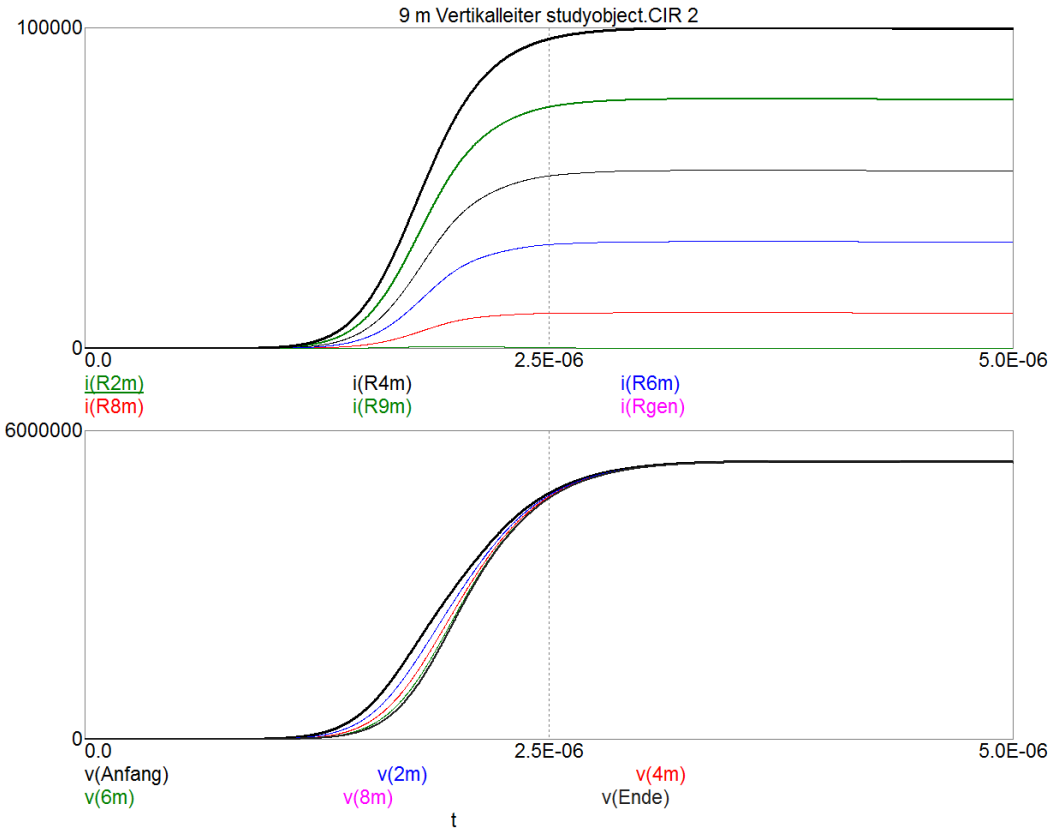


Bild 6-24 Strom und Spannungsverteilung längs des Vertikalerders (vergl. Bild 6-11) bei 1/200 Einspeisung 100kA, ρ_E=500 Ohmm

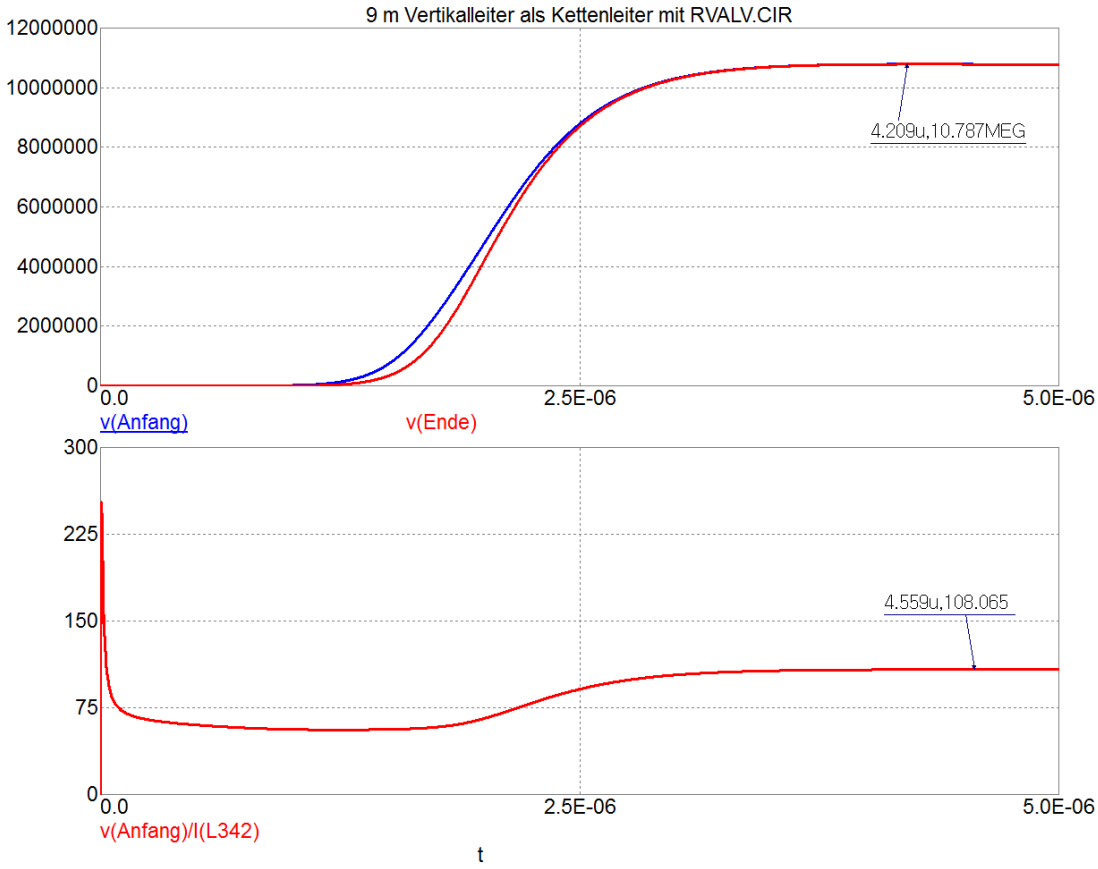


Bild 6-25 Verhältnisse bei 1/200 Einspeisung 100kA, ρ_E=1000 Ohmm. DeltaTmax= 175 ns.

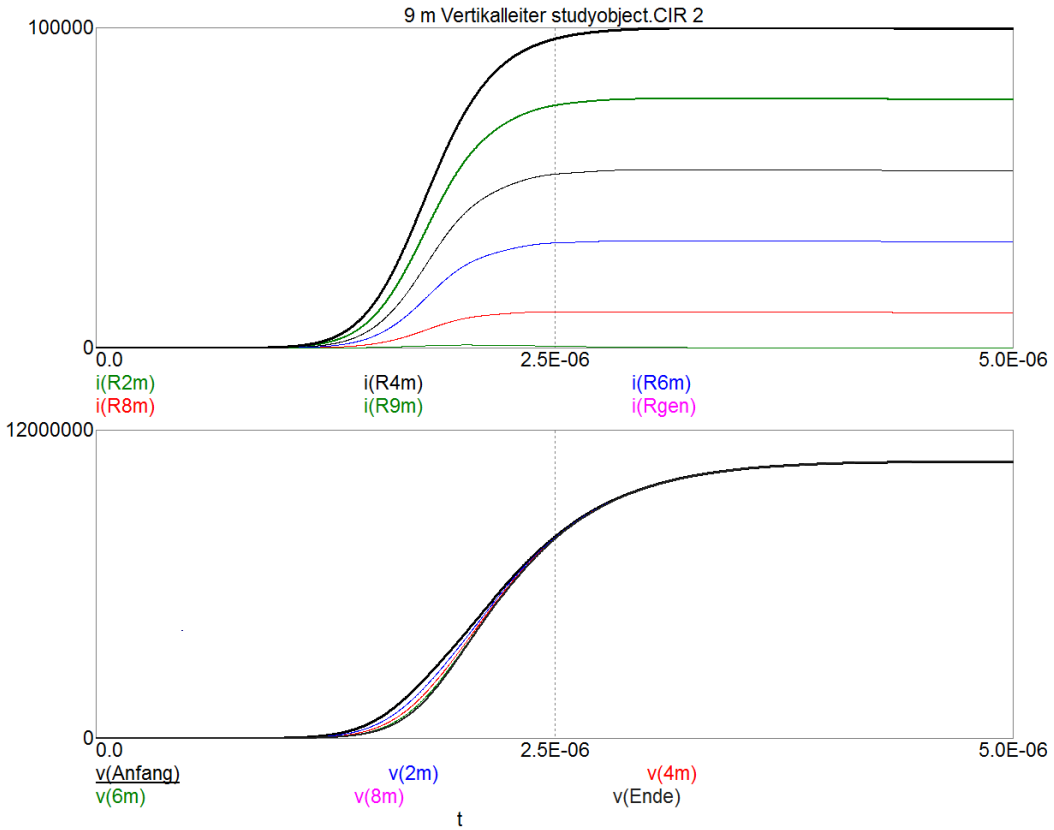


Bild 6-26 Strom und Spannungsverteilung längs des Vertikalerders (vergl. Bild 6-11) bei 1/200 Einspeisung 100kA, ρ_E=1000 Ohmm

6.1.2.1.5 Für 10/350 Impuls 200 kA

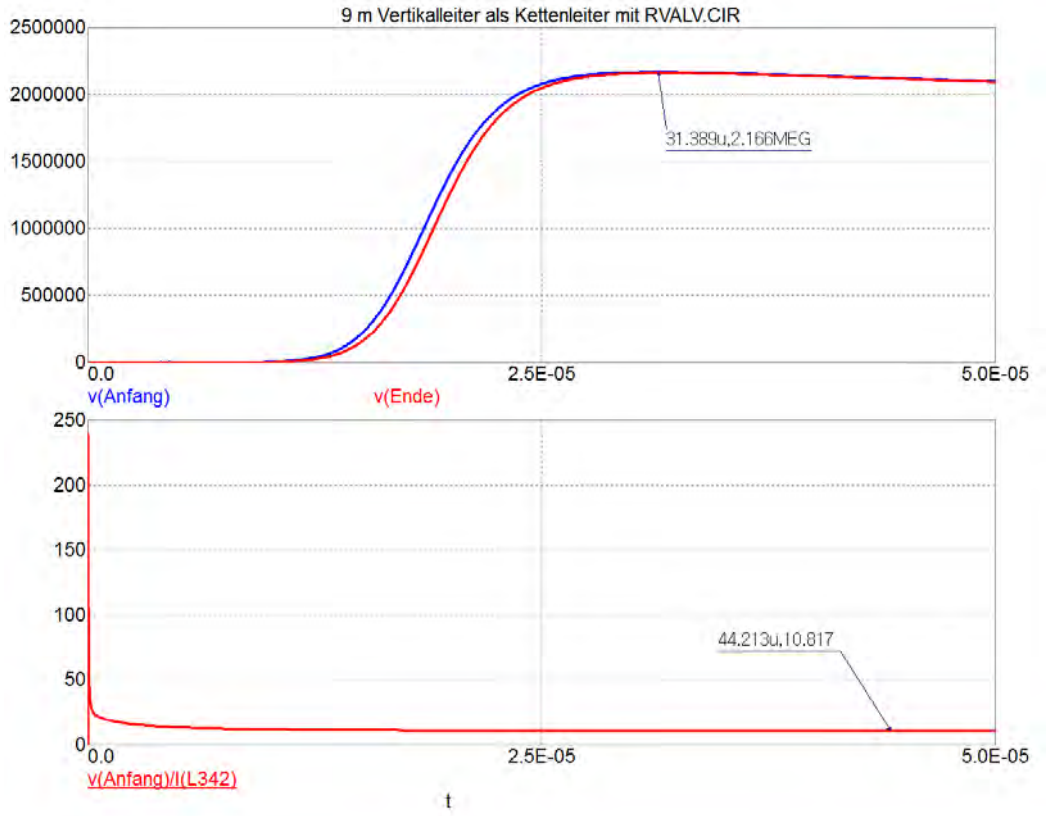


Bild 6-27 Verhältnisse bei 10/350 Einspeisung 200kA, ρ_E=100 Ohmm. DeltaTmax= ns.

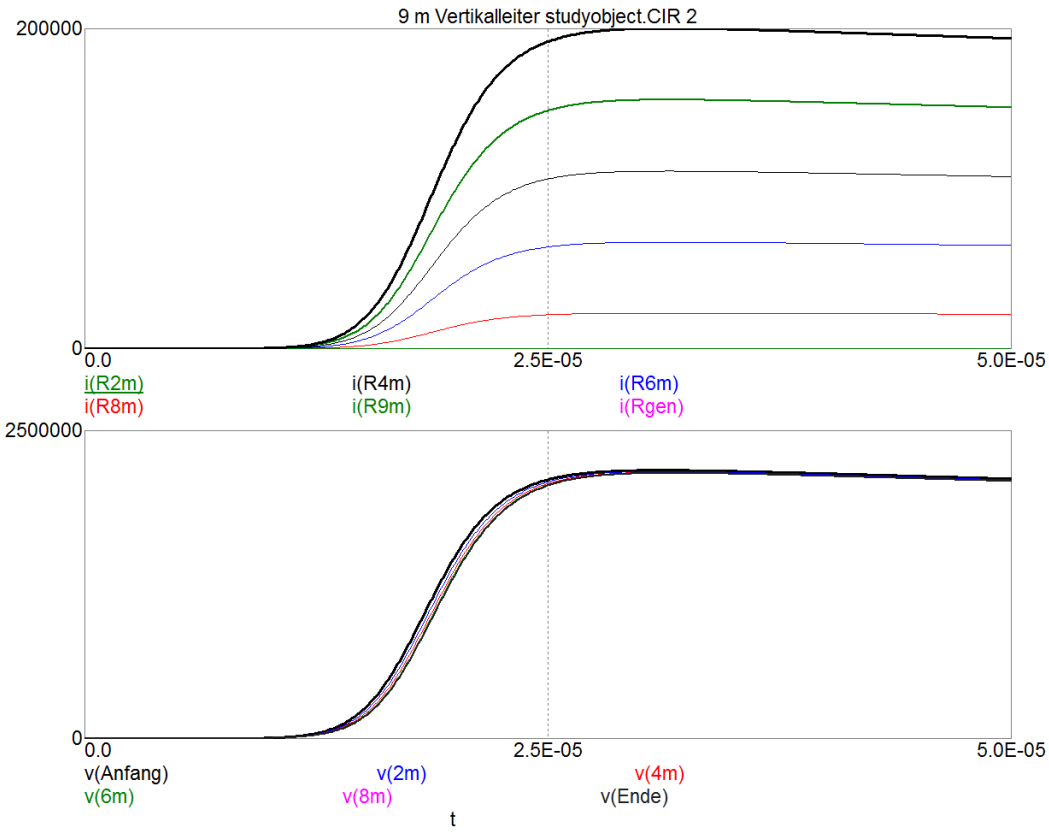


Bild 6-28 Strom und Spannungsverteilung längs des Vertikalerders (vergl. Bild 6-11) bei 10/350 Einspeisung 200kA, ρ_E=100 Ohmm

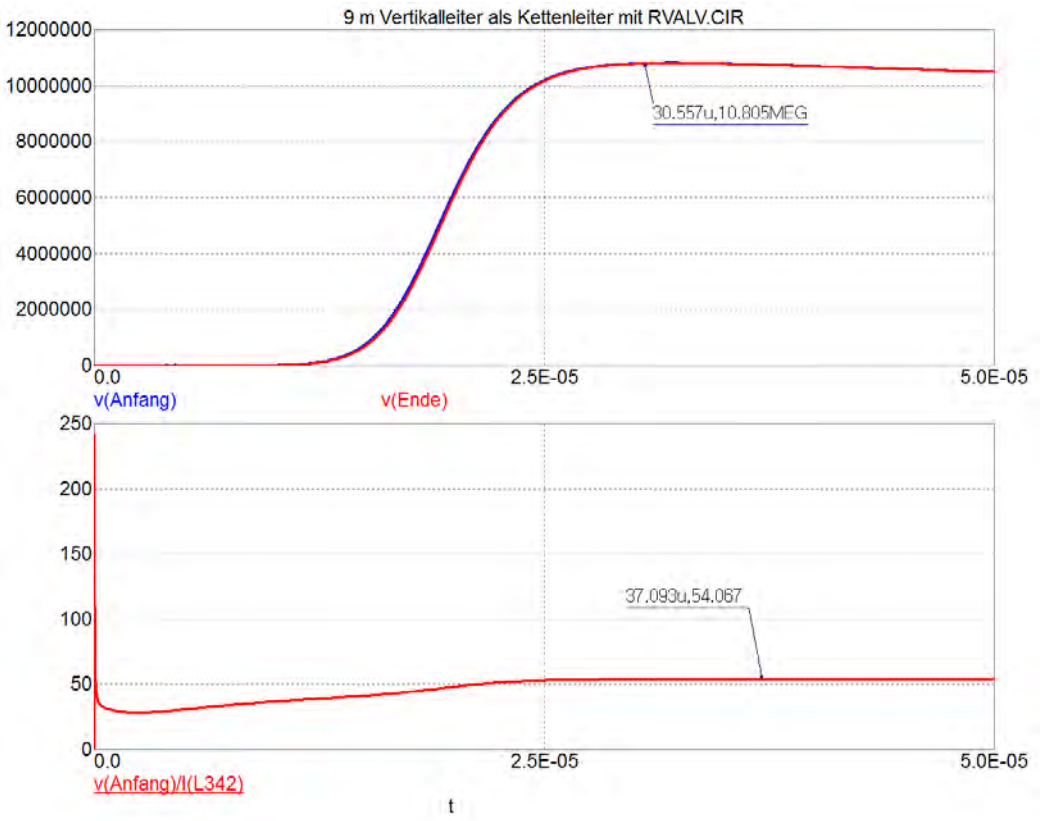


Bild 6-29 Verhältnisse bei 10/350 Einspeisung 200kA, ρ_E=500 Ohmm. DeltaTmax= 112ns.

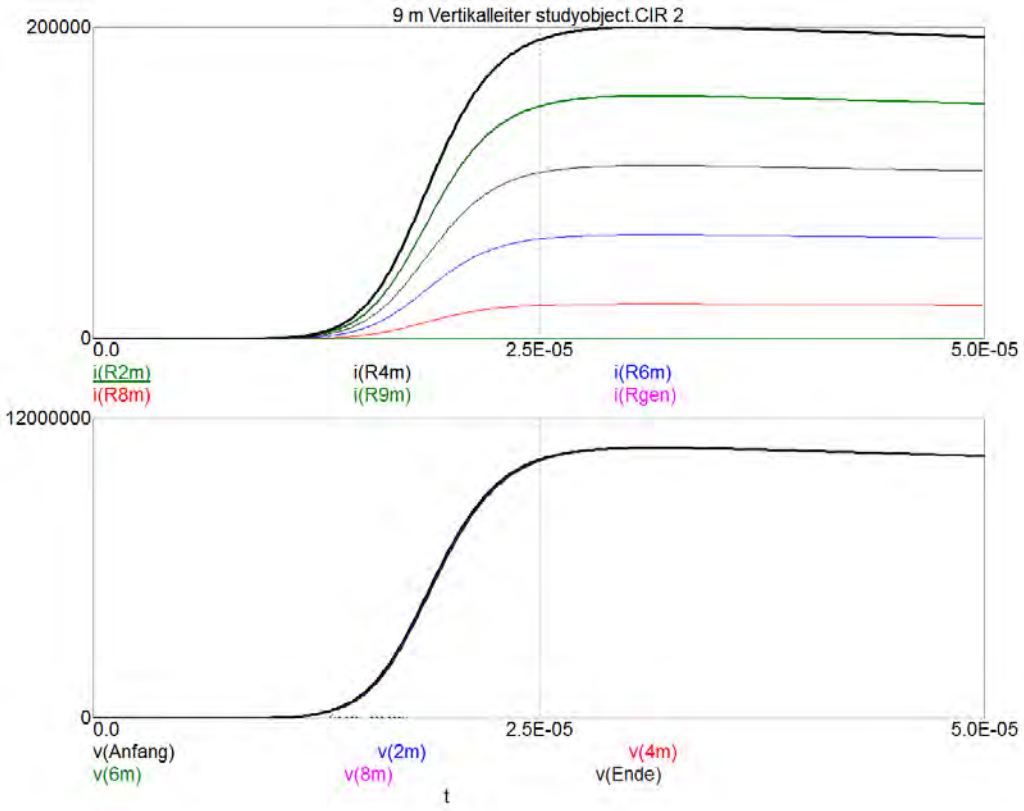


Bild 6-30 Strom und Spannungsverteilung längs des Vertikalerders (verglBild 6-11) bei 10/350 Einspeisung 200kA, ρ_E=500 Ohmm

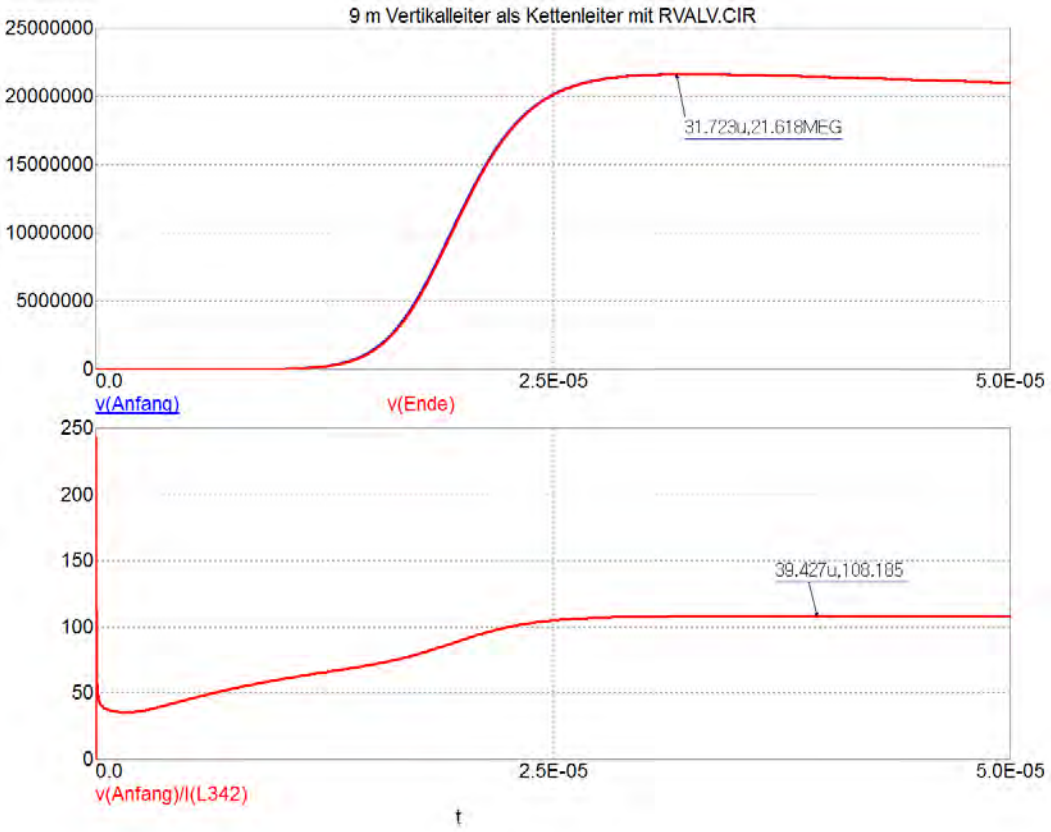


Bild 6-31 Verhältnisse bei 10/350 Einspeisung 200kA, ρ_E=1000 Ohmm. DeltaTmax= 50ns.

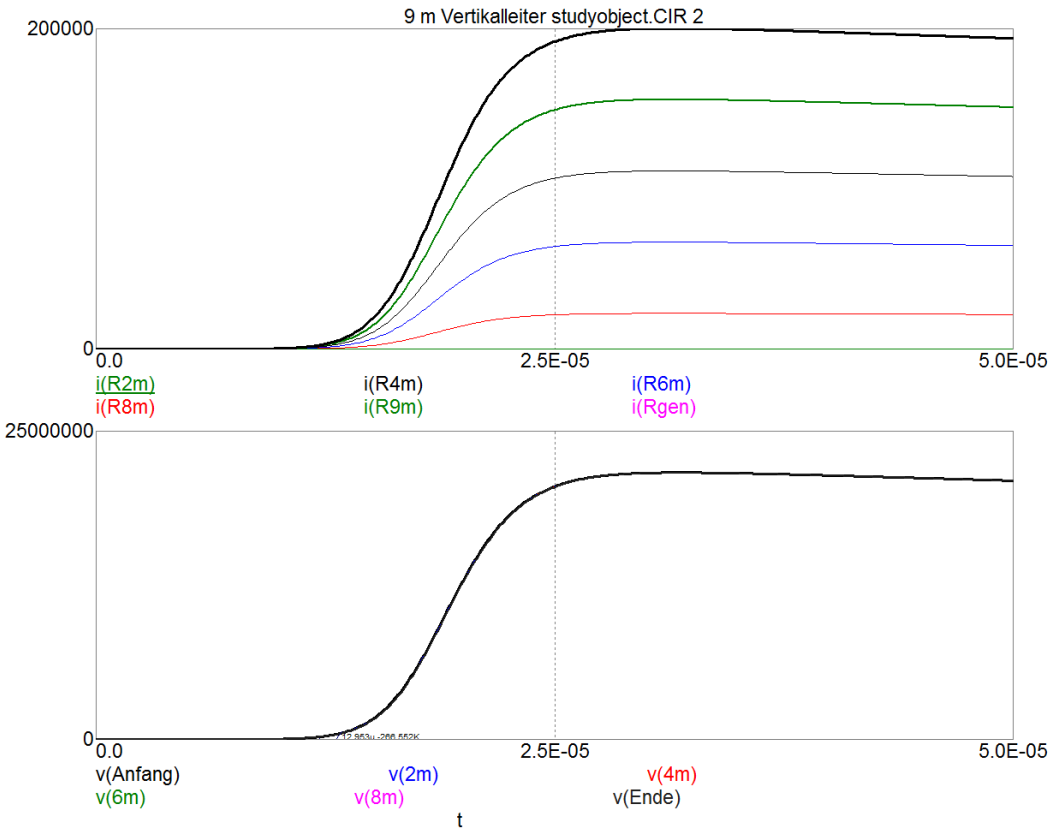


Bild 6-32 Strom und Spannungsverteilung längs des Vertikalerders (vergl. Bild 6-11) bei 10/350 Einspeisung 200kA, ρ_E=1000 Ohmm

6.1.2.1.5.1 Vergleich der Ergebnisse

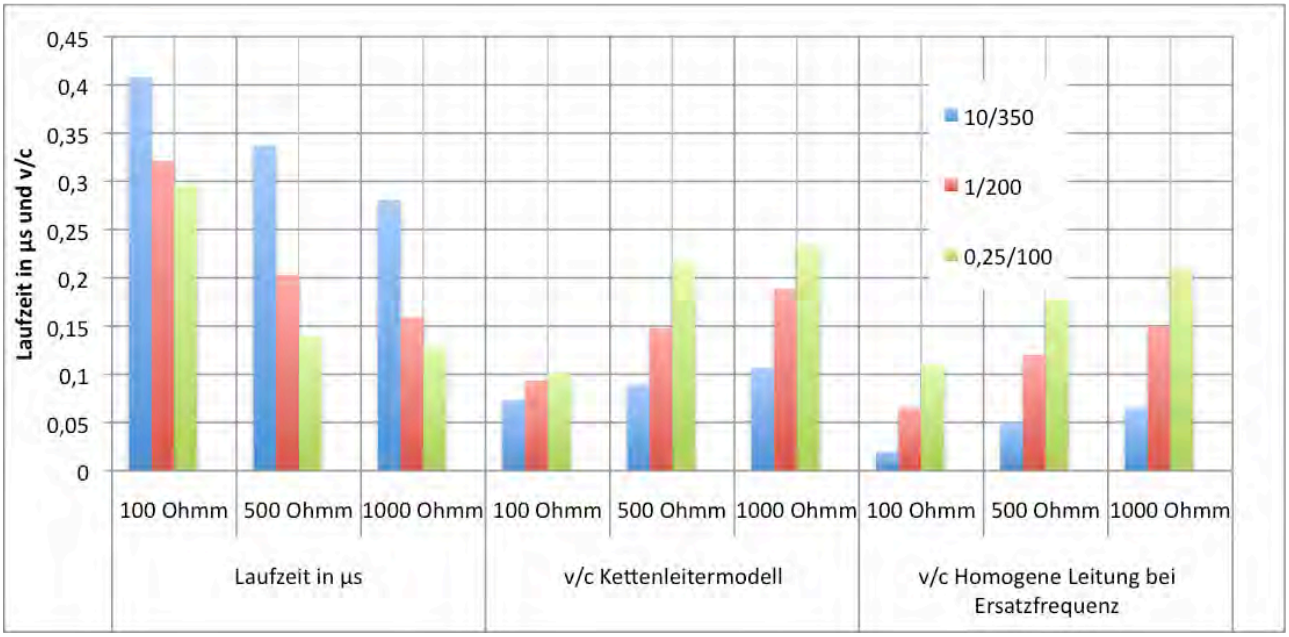


Bild 6-33 Vergleich der Ergebnisse für die Laufzeiten aus der Simulation des Vertikalleiters mit Microcap für 0,25/100; 1/200 und 10 /350 Stoßströme.

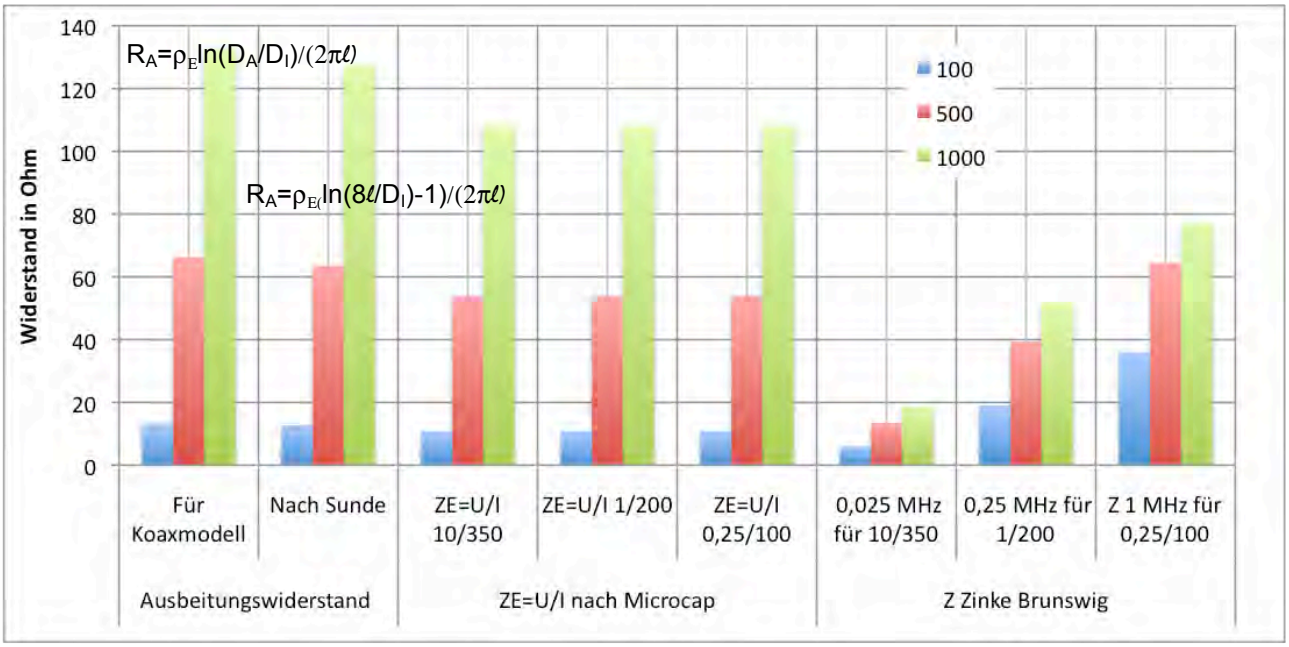


Bild 6-34 Vergleich der Ergebnisse für die Impedanzen aus der Simulation des Vertikalleiters mit Microcap für 0,25/100; 1/200 und 10 /350 Stoßströme.

6.1.2.2 Horizontalerder als Kettenleiter

Verhält sich ähnlich wie ein Vertikalleiter.

Horizontaleiter: Mit C` nach Gleichung 6.11

$$C_{VALH} = \frac{C'}{5} = 0{,}2 \bullet \pi \bullet \left[\varepsilon_{r\infty} \bullet \varepsilon_0 + \sqrt{\frac{2 \bullet \varepsilon_{r\infty} \bullet \varepsilon_0}{\rho_E \bullet \omega}} \right] / \ln \frac{D_A}{D_I}$$ Gleichung 6-18

Hinweis $\varepsilon_{r\infty}$ wird 6 angesetzt

Der Induktivitätsbelag einer vertikalen Leitung ergibt sich aus folgender Überlegung:

Literaturangaben: In der Literatur wird für L` =1,8 µH/m vorgeschlagen. Quelle: Bulla,W.: Der Stoßausbreitungswiderstand von Erdern, Die Technik 2. (1952) S. 129-136.
Nach Wiesinger: Handbuch Blitzschutz und Erdung gilt

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_a}{r}$$ Gleichung 6-19

wobei: r_a willkürlich zu 1 anzusetzen ist und r der Radius des Eders ist. Damit ergibt sich für einen Leiterradius von 10 mm (2 cm Erdungsstange) ein Wert von 0,92 µH/m. Setz man hingegen r_a=4,5m wie bei der Kapazitätsberechnung, ergibt sich ein Wert von 1,36 µH/m.
Für die Berechnungen in Microcap wird ein Wert mit r_a=4,5 m (9m Durchmesser der Röhre nach Wiesinger)von 1,27 µH/m verwendet.

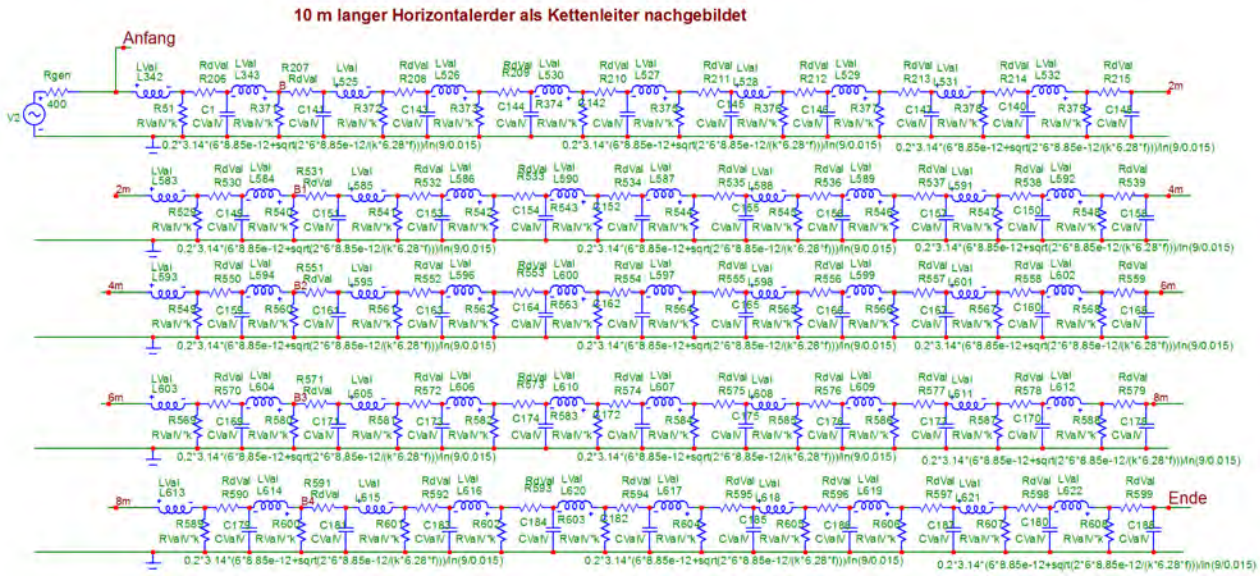


Bild 6-35 Kettenleitermodell für einen 9 m Horizontalerder mit berücksichtigter Frequenzabhängigkeit der Kapazität. L`= 1,27µH/m

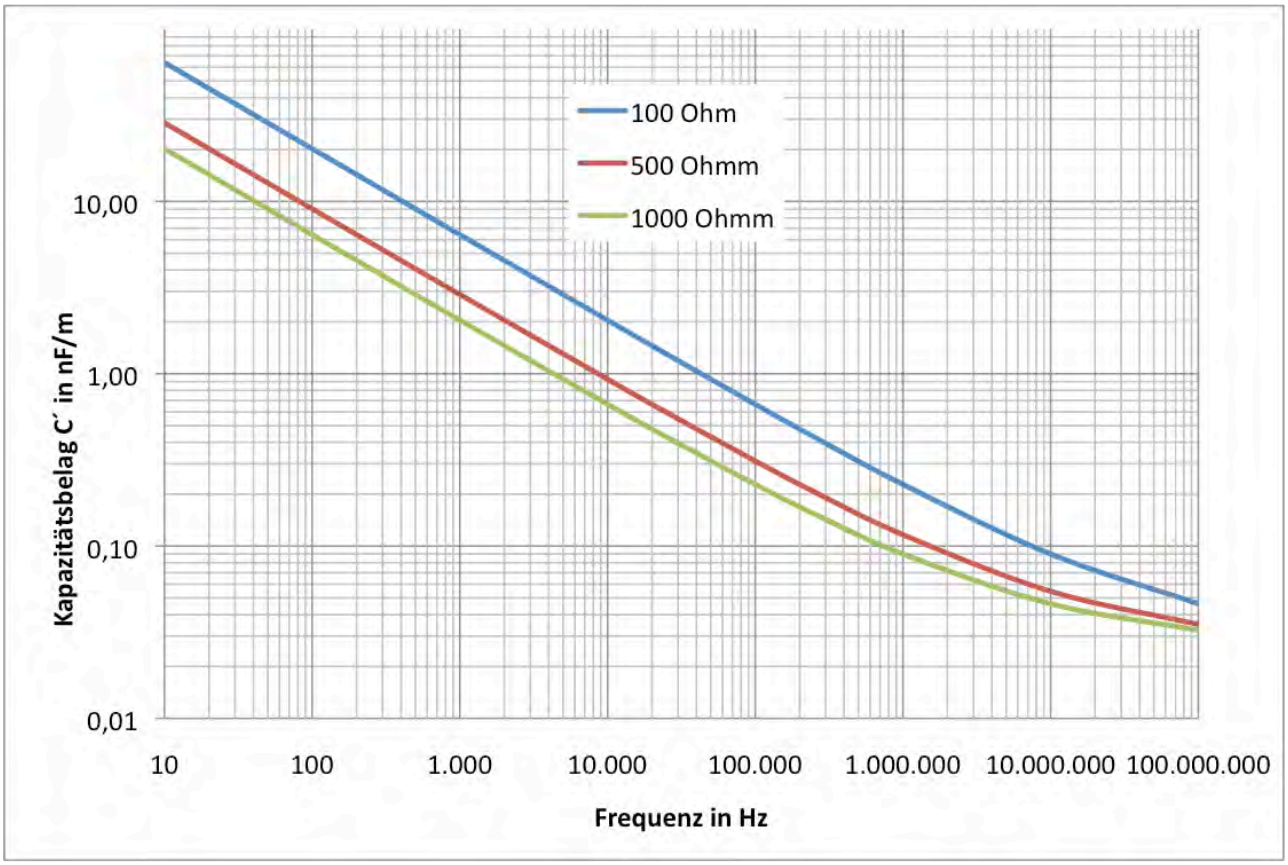


Bild 6-36 Kapazitätsbelag einer horizontalen Leitung (Außendurchmesser des Zylinders nach Wiesinger: 9m) Verzinkter Stahl Banderder 30x5 mm entsprechend 15 mm Durchmesser in Abhängigkeit von der Frequenz. Parameter: Spezifischer Erdwiderstand. Hinweis $\varepsilon_{r\infty}$ wird mit 6 angesetzt

Tabelle 6-4 Kapazitätswerte C_{VAL} in nF für die Simulation im Zeitbereich mit Microcap.

	CVAL=C`/5		
	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm
25.000	0,27	0,13	0,09
250.000	0,09	0,04	0,03
1.000.000	0,05	0,02	0,02

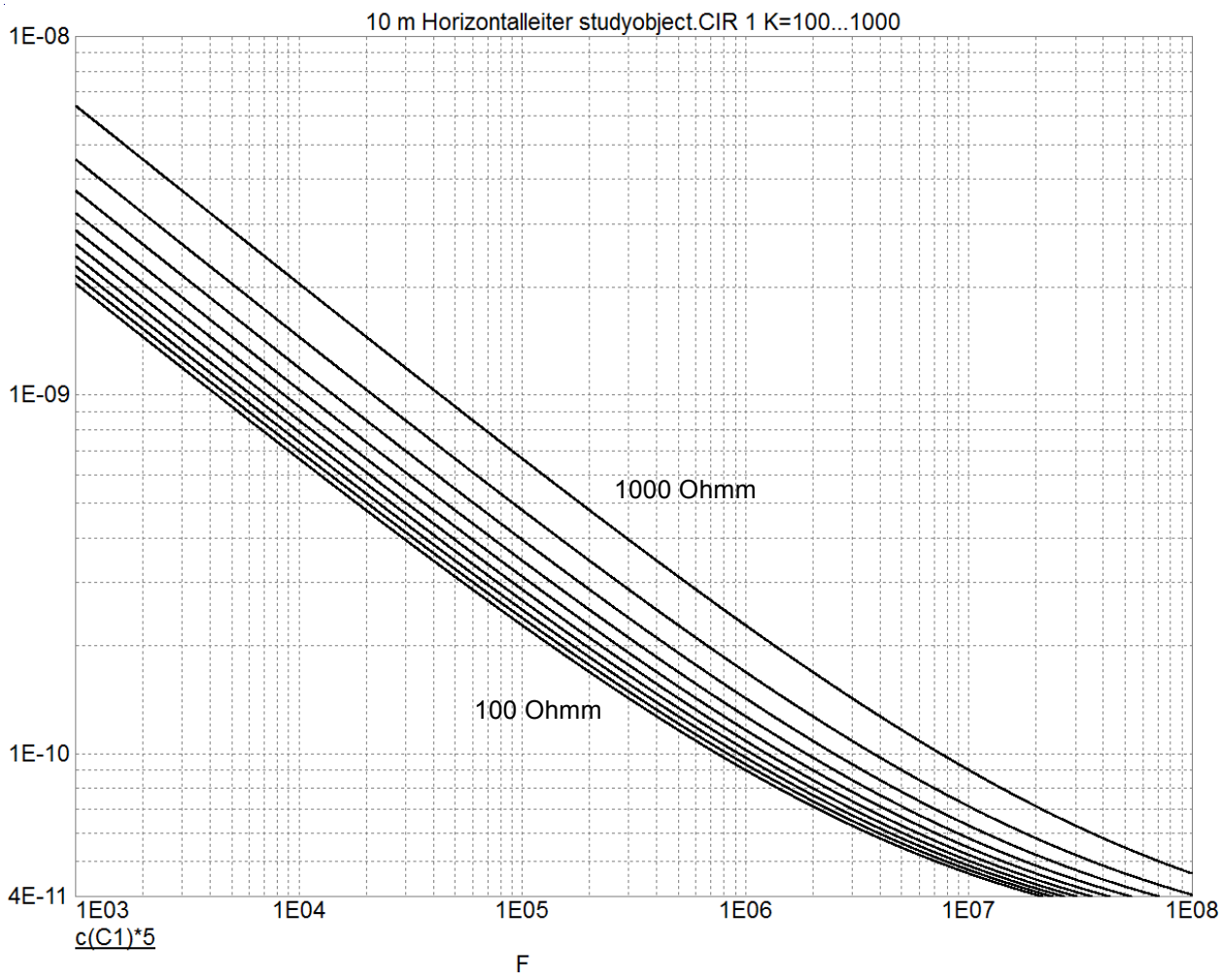


Bild 6-37 Kapazitätsbelag C` berechnet mit Microcap. Horizontale Leitung (Außendurchmesser des Zylinders nach Wiesinger: 9m) Bandeisen 30x5mm entsprechend 15 mm Rundleiter in Abhängigkeit von der Frequenz. Parameter: Spezifischer Erdwiderstand. Hinweis $\varepsilon_{r\infty}$ wird mit 6 angesetzt. $C`=C_{VAL}*5$

6.1.2.2.1 Frequenzbereichsanalyse für Horizontalerder als Kettenleiter

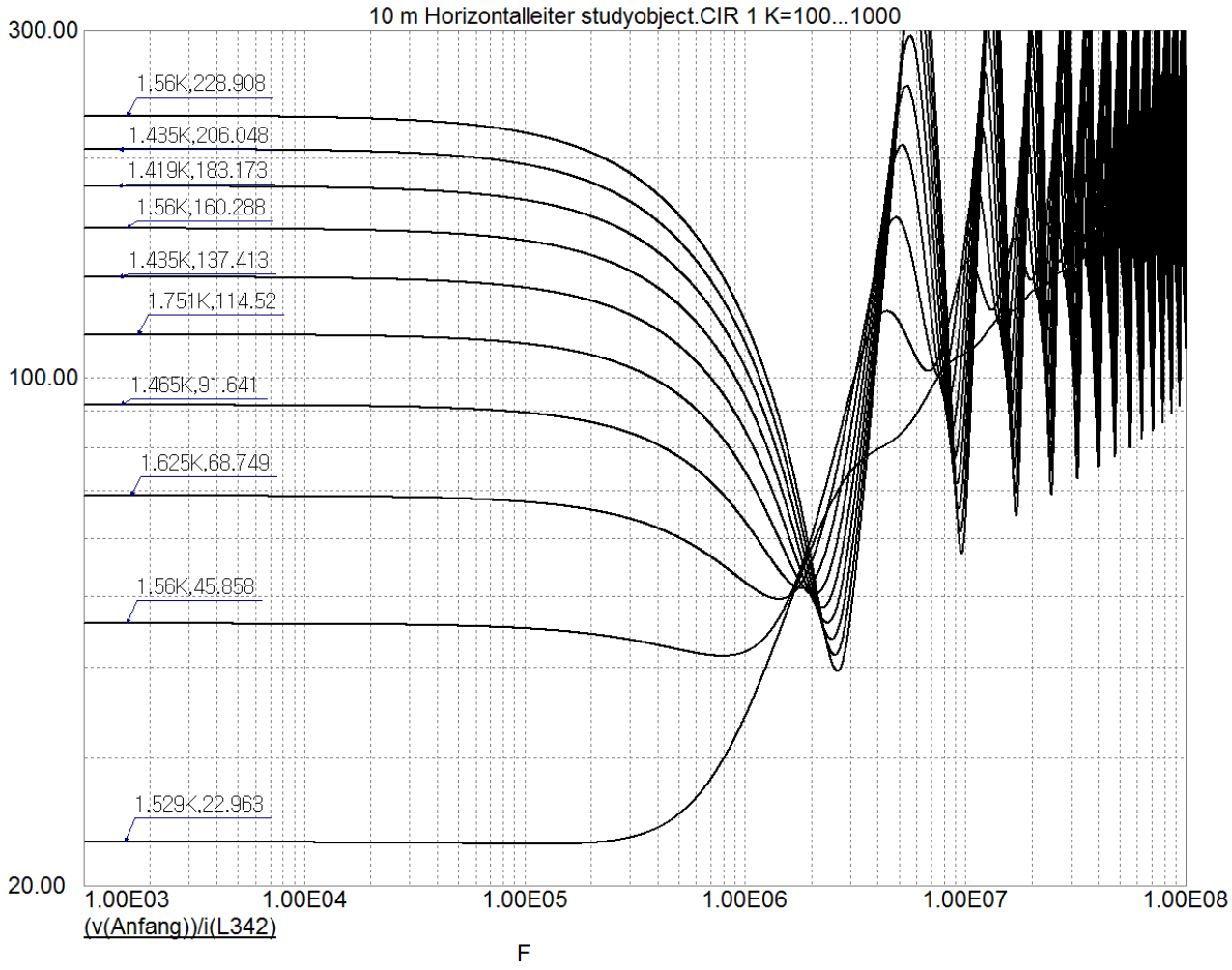


Bild 6-38 Impedanz Z=U/I für ρ_E 100 Ohmm bis 1000 Ohmm mit frequenzabhängiger Kapazität nach Gleichung 6-16 gerechnet. Für Horizontalleiter (Außendurchmesser nach Wiesinger: 9m) Länge des Kettenleiters =Länge des Horizontalerders 10m. Verzinktes Bandeisen 30x5mm entsprechend 15 mm Rundleiter.

6.1.2.2.2 Zeitbereichsanalyse für Horizontalerder als Kettenleiter

6.1.2.2.2.1 Für 0,25/100 Impuls 50 kA

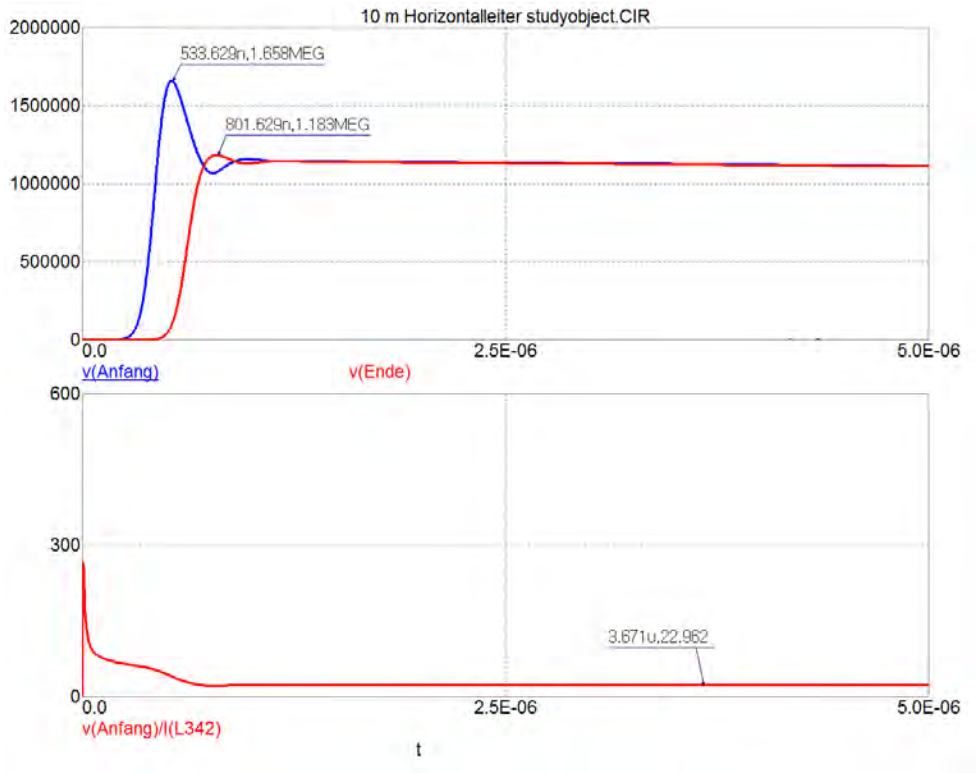


Bild 6-39 Verhältnisse bei 0,25/100 Einspeisung 50kA, ρ_E=100 Ohmm

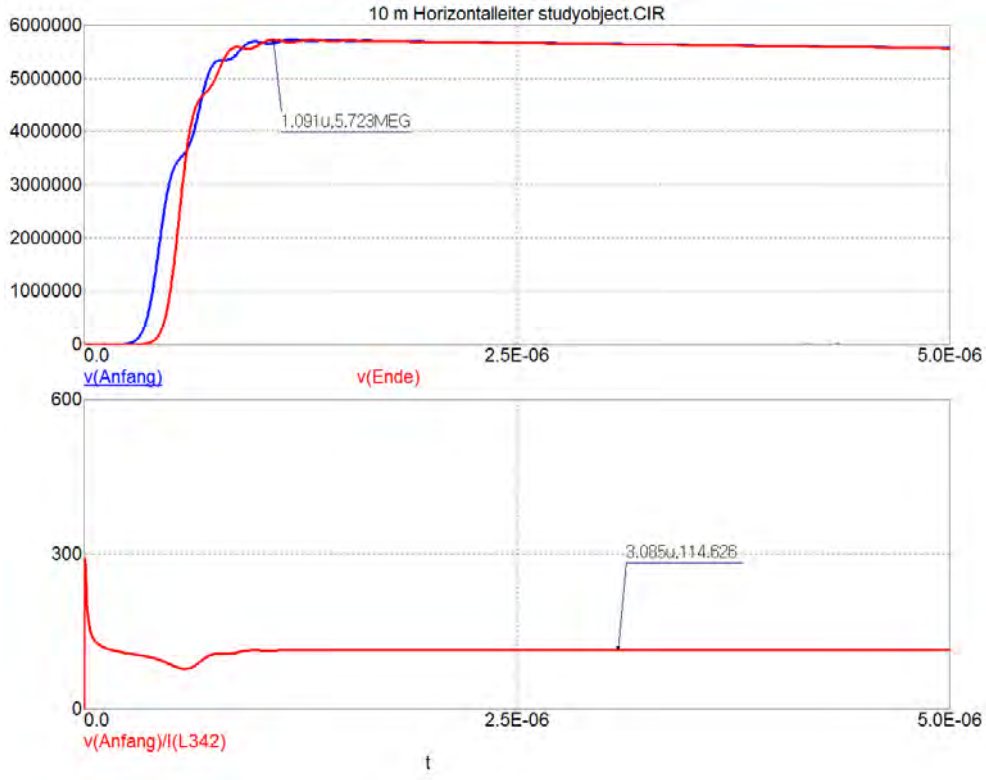


Bild 6-40 Verhältnisse bei 0,25/100 Einspeisung 50kA, ρ_E=500 Ohmm

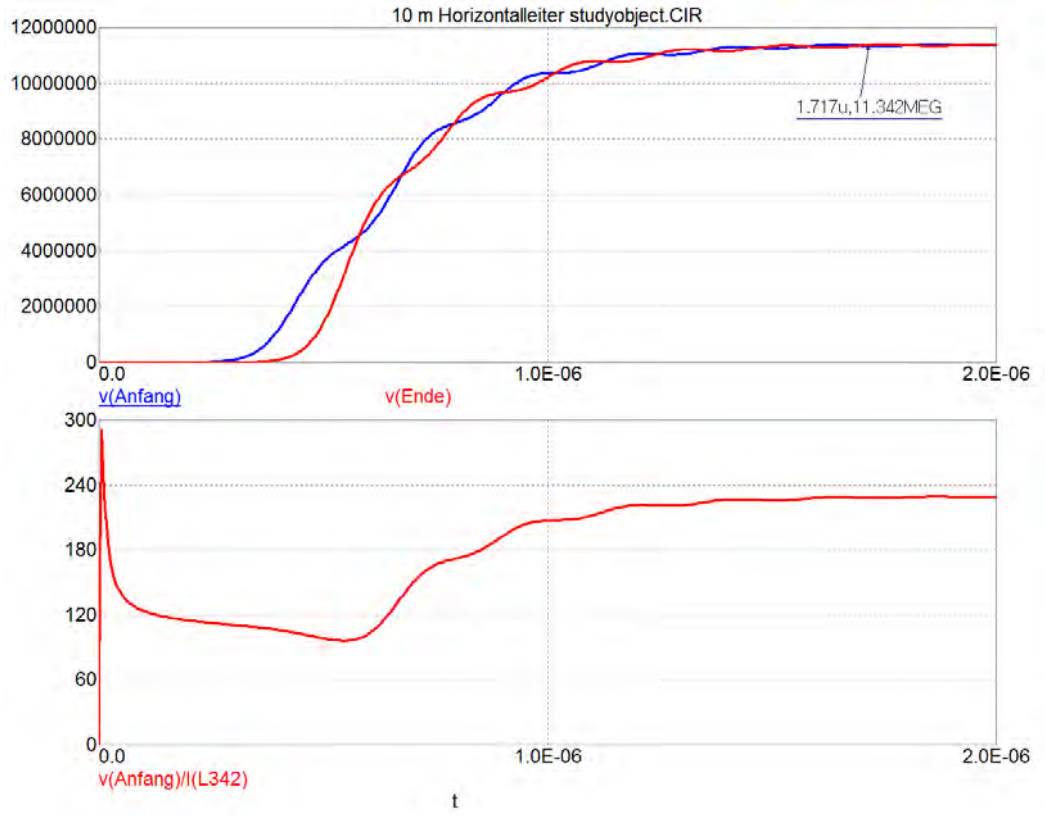


Bild 6-41 Verhältnisse bei 0,25/100 Einspeisung 50kA, ρ_E=1000 Ohmm

6.1.2.2.2.2 Für 1/200 Impuls 100 kA

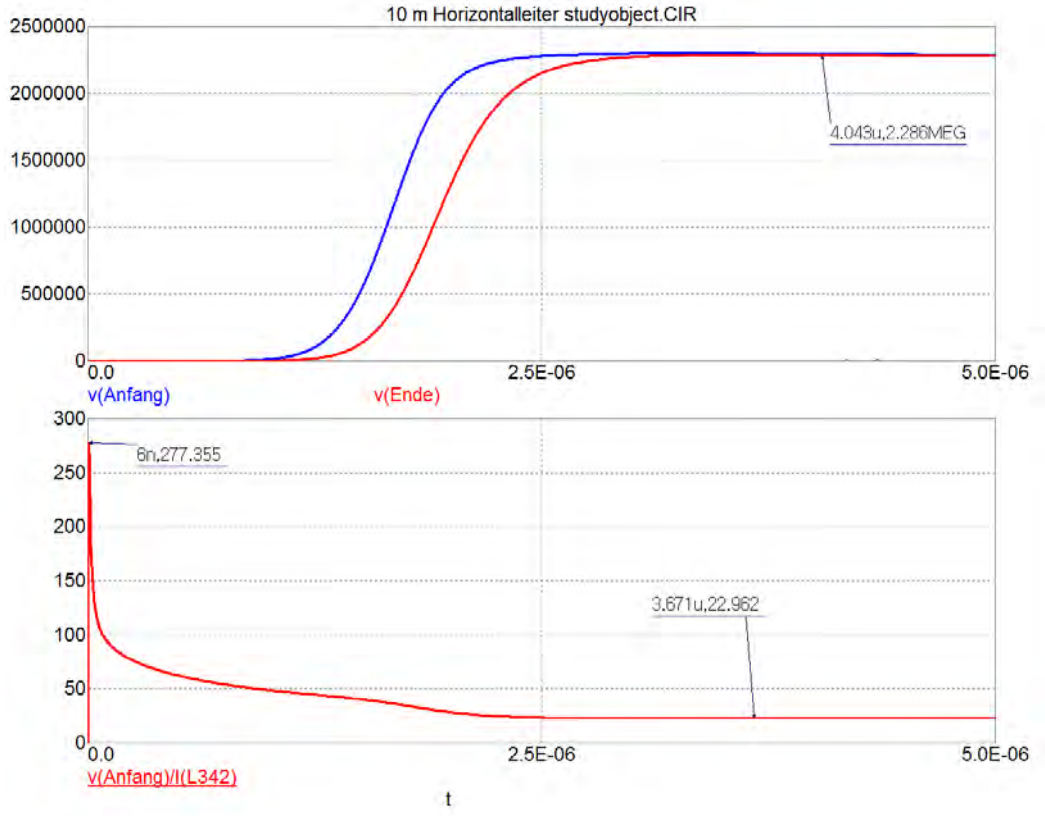


Bild 6-42 Verhältnisse bei 1/200 Einspeisung 100kA, ρ_E=100 Ohmm

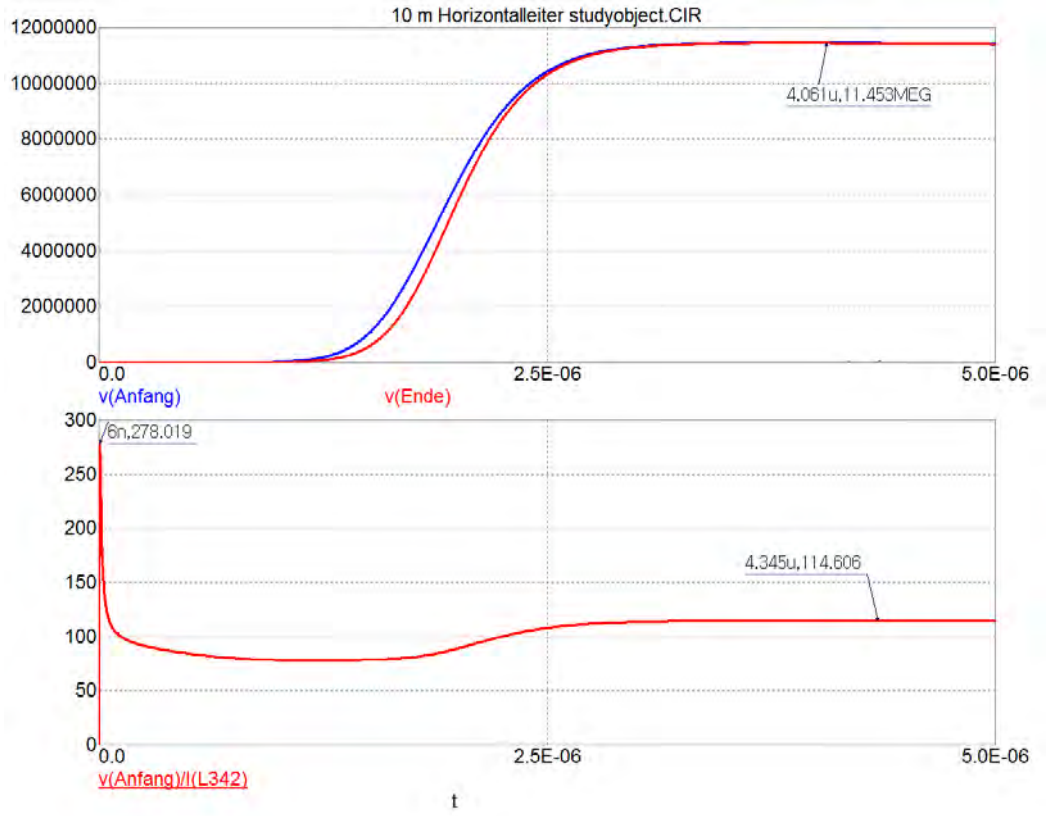


Bild 6-43 Verhältnisse bei 1/200 Einspeisung 100kA, ρ_E=500 Ohmm

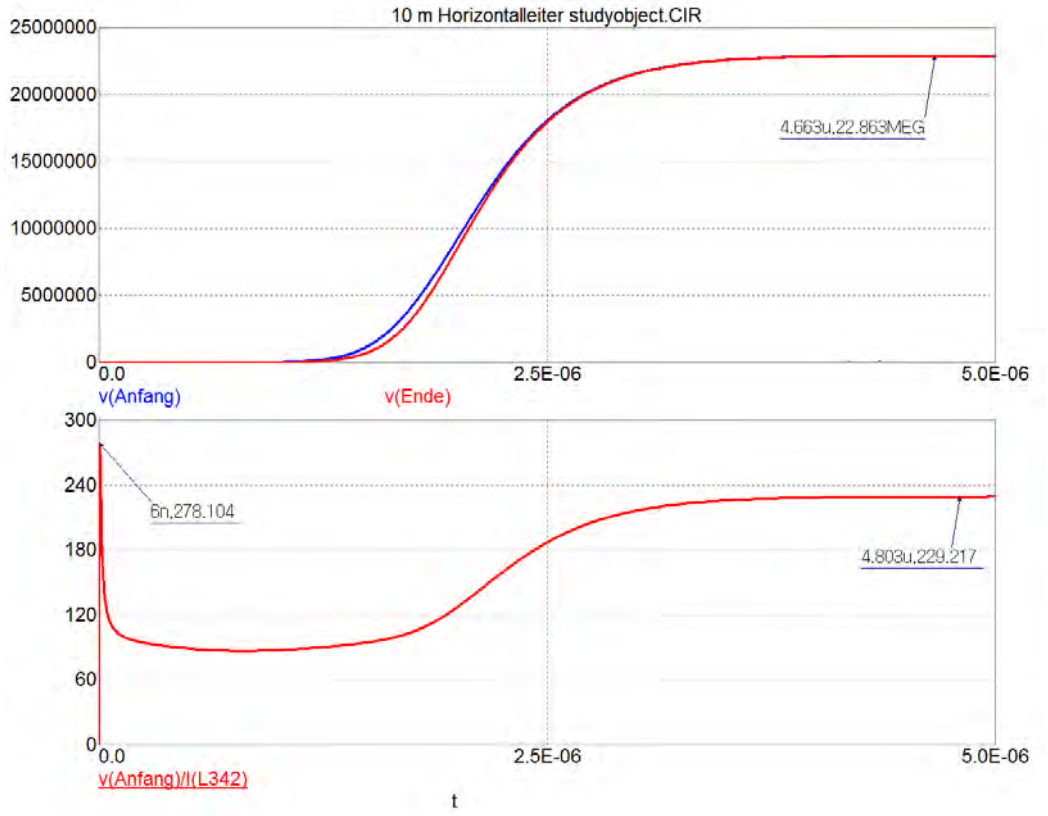


Bild 6-44 Verhältnisse bei 1/200 Einspeisung 100kA, ρ_E=1000 Ohmm

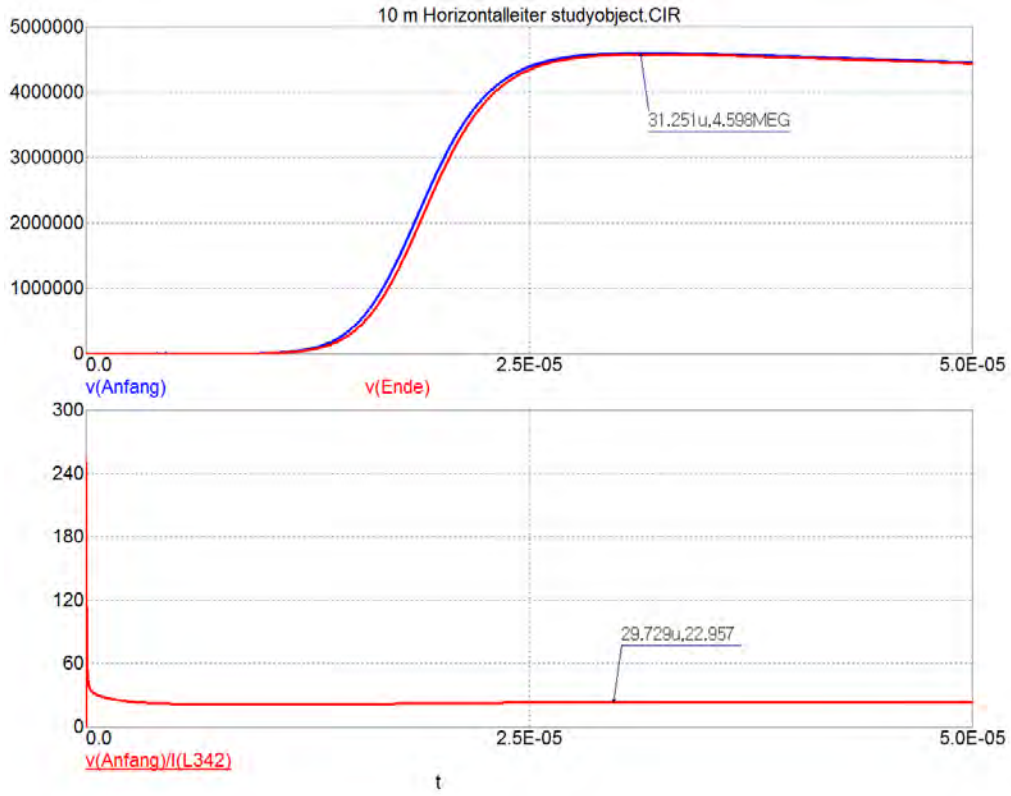


Bild 6-45 Verhältnisse bei 10/350 Einspeisung 200kA, ρ_E=100 Ohmm

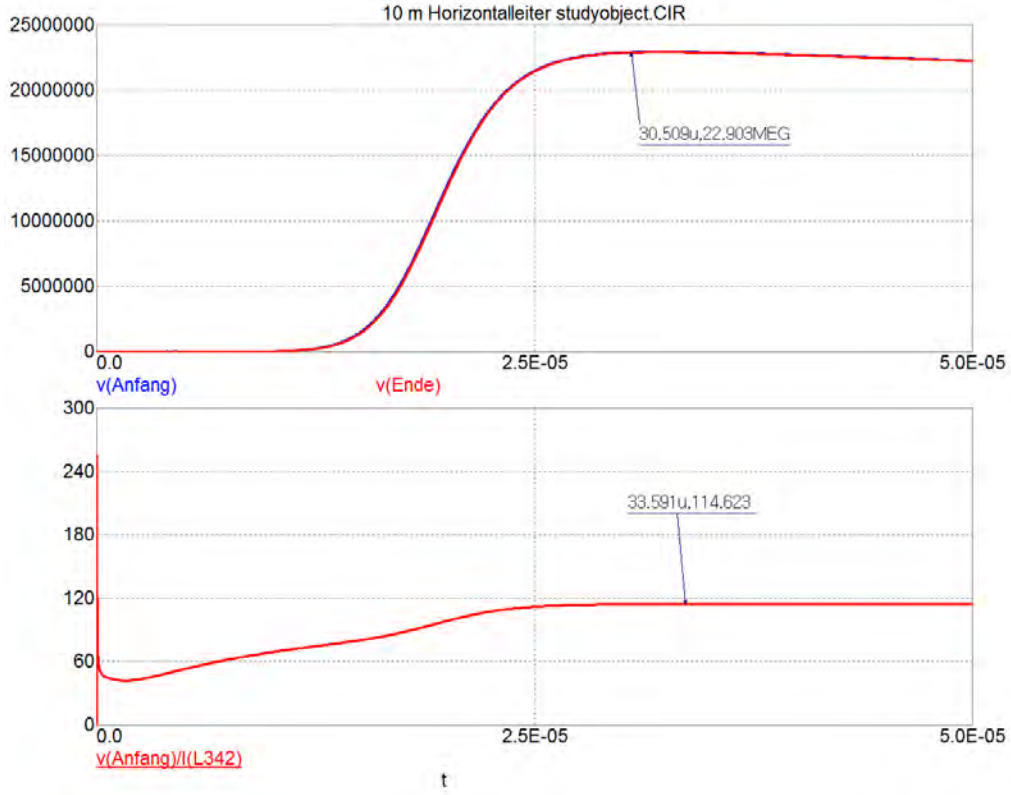


Bild 6-46 Verhältnisse bei 10/350 Einspeisung 200kA, ρ_E=500 Ohmm

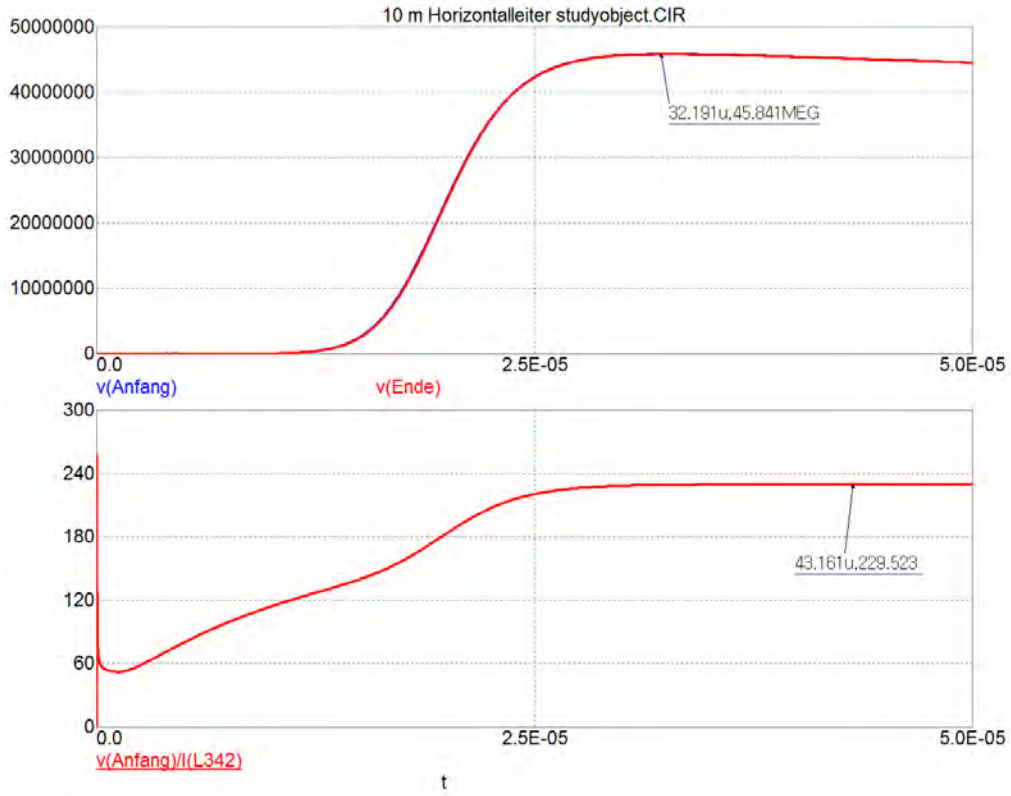


Bild 6-47 Verhältnisse bei 10/350 Einspeisung 200kA, ρ_E=1000 Ohmm

6.1.2.3 Längenabhängigkeit der Spannungs- und Stromverteilung in einem Horizontalleiter als Kettenleiter

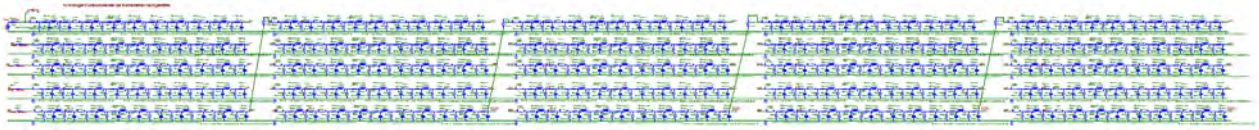
Die folgende Simulation soll die effektive Erderlänge untersuchen. Nach den Angaben von Wiesinger (Handbuch für Blitzschutz und Erdung lässt sich die effektive Erderlänge wie folgt berechnen:

$$L_{eff} \approx \sqrt{\frac{T_1}{L'G'}}$$ Gleichung 6-20

Tabelle 6-5 Berechnete effektive Erderlänge nach Wiesinger.

100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm
4,44 m	9,92 m	14,03 m

Für die Simulation wird der in Abschnitt 6.1.2.2 beschriebene Kettenleiter in einer Gesamtlänge bis 50 m analysiert. Dabei können die Erderspannung und der Ausbreitungswiderstand abhängig von der Länge bestimmt werden.



6.1.2.3.1 Frequenzgang

In Bild 6-48 ist die Verteilung der Spannung über der Länge eines 50 m langen Horizontalerders mit ρ_E=100 Ohmm gezeigt. Deutlich erkennbar ist der Anstieg der Spannungen mit zunehmender Frequenz.

In Bild 6-49 ist die Stromverteilung entlang des Horizontalleiters gezeigt. Deutlich ist zu erkennen, dass mit zunehmender Länge immer weniger Strom längs des Horizontalleiters fließt. Eine Verlängerung über 10 m hinaus scheint nicht mehr sinnvoll zu sein.

In Bild 6-50 wird in einer Stepping Simulation mit ρ_E=100 Ohmm..... 1000 Ohmm der Einfluss des spezifischen Erdwiderstands deutlich. Bei ρ_E = 1000 Ohmm kommt es zu Resonanzerscheinungen, die sich auch im Zeitbereich , siehe Bild 6-53, als Wanderwellenschwingung zeigen.

In Bild 6-51 ist zur Kontrolle der Frequenzgang des Ausbreitungswiderstands gezeigt, der bei 1 MHz in den Stoßerdungswiderstand übergeht.

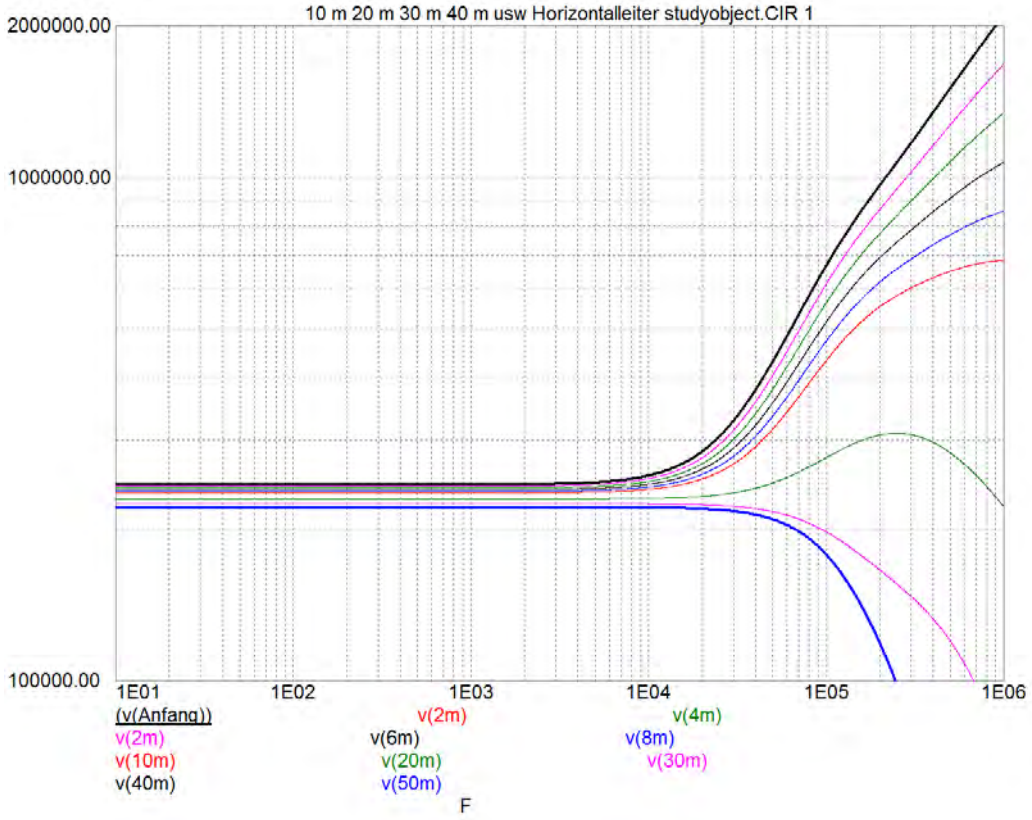


Bild 6-48 Frequenzgang der Spannungsverteilung längs eines 50 m langen Horizontaleiters ρ_E=100 Ohmm.

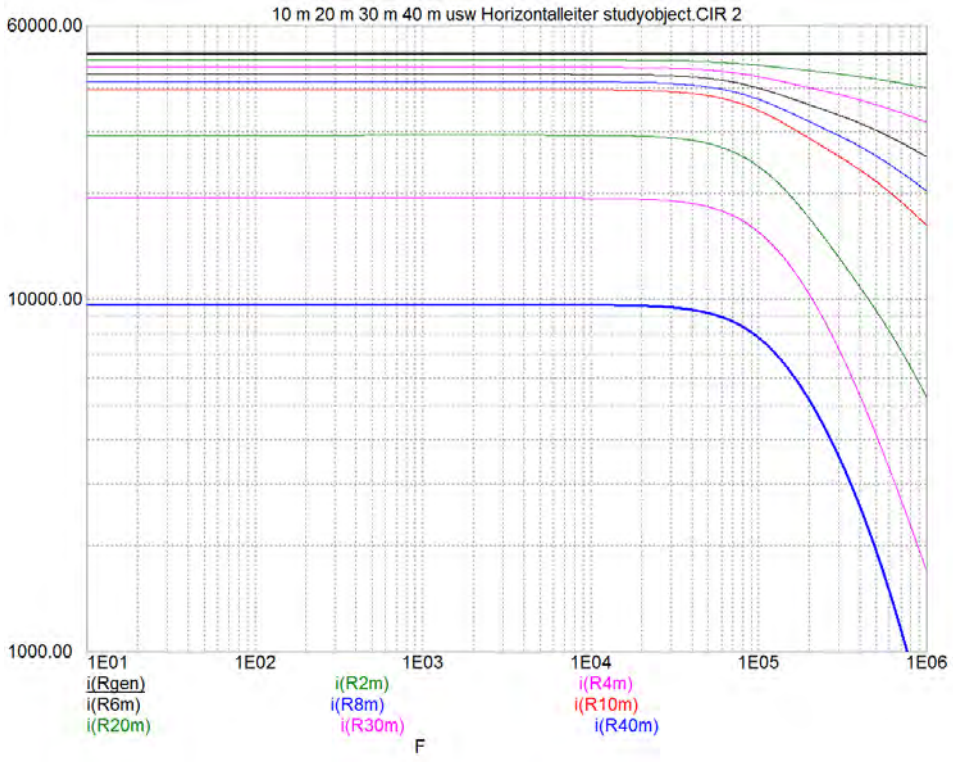


Bild 6-49 Frequenzgang der Stromverteilung längs eines 50 m langen Horizontaleiters ρ_E=100 Ohmm

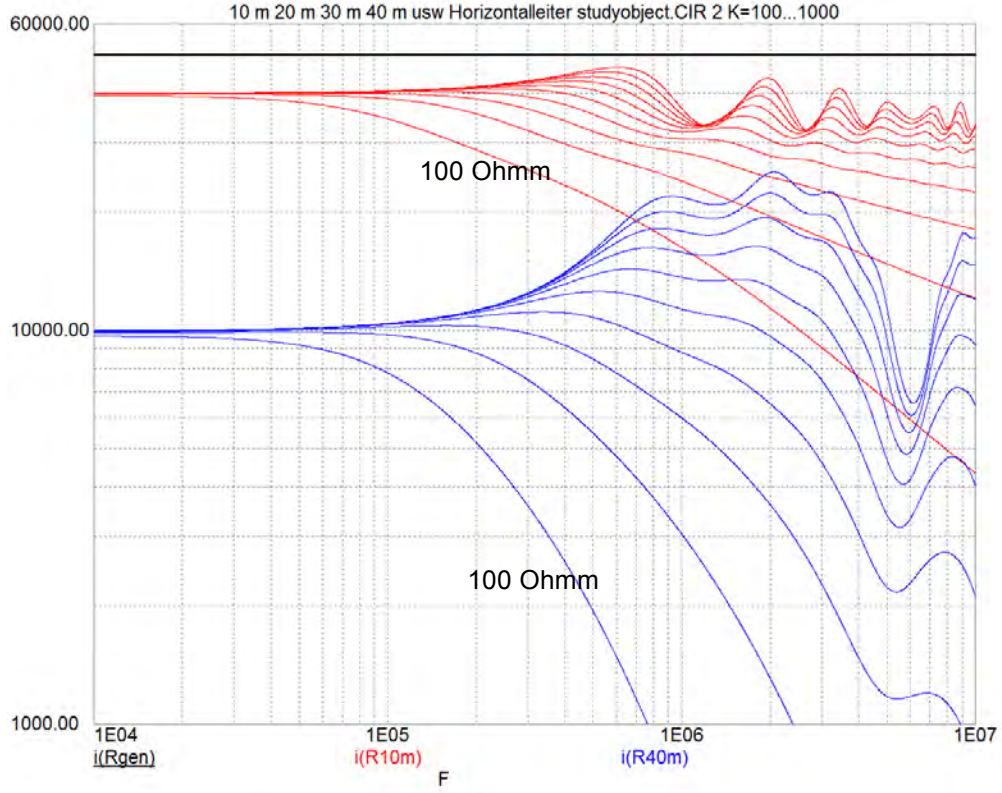


Bild 6-50 Frequenzgang der Stromverteilung längs eines 50 m langen Horizontaleiters ρ_E=100 Ohmm...1000 Ohmm

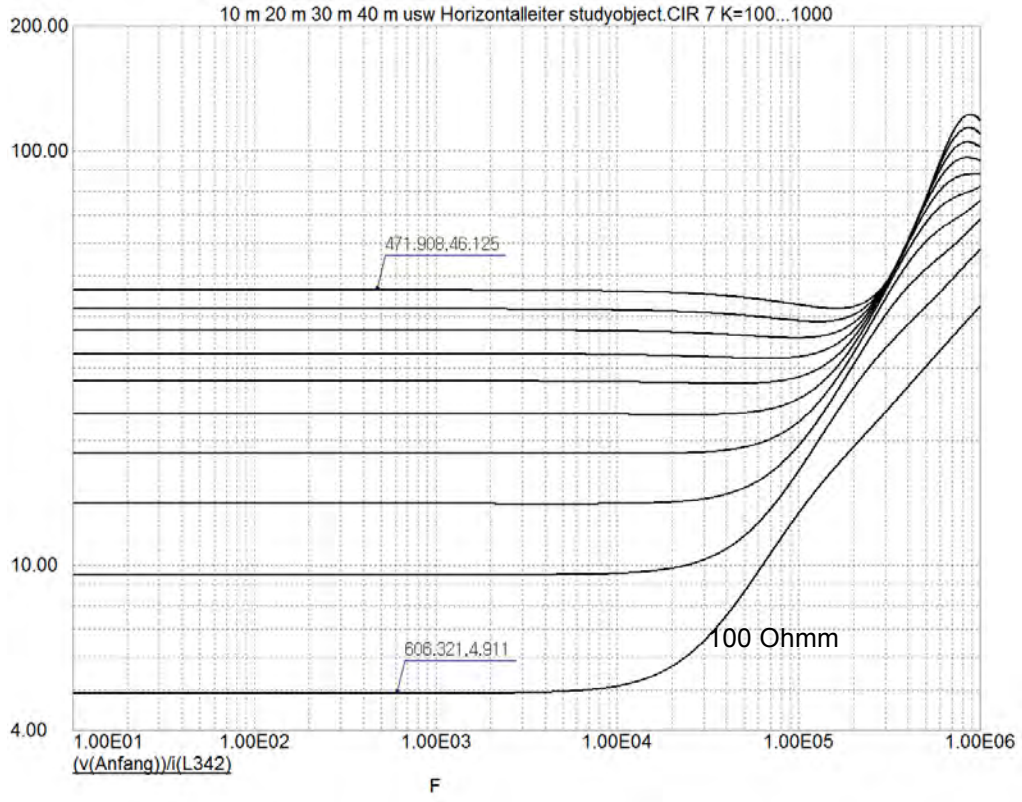
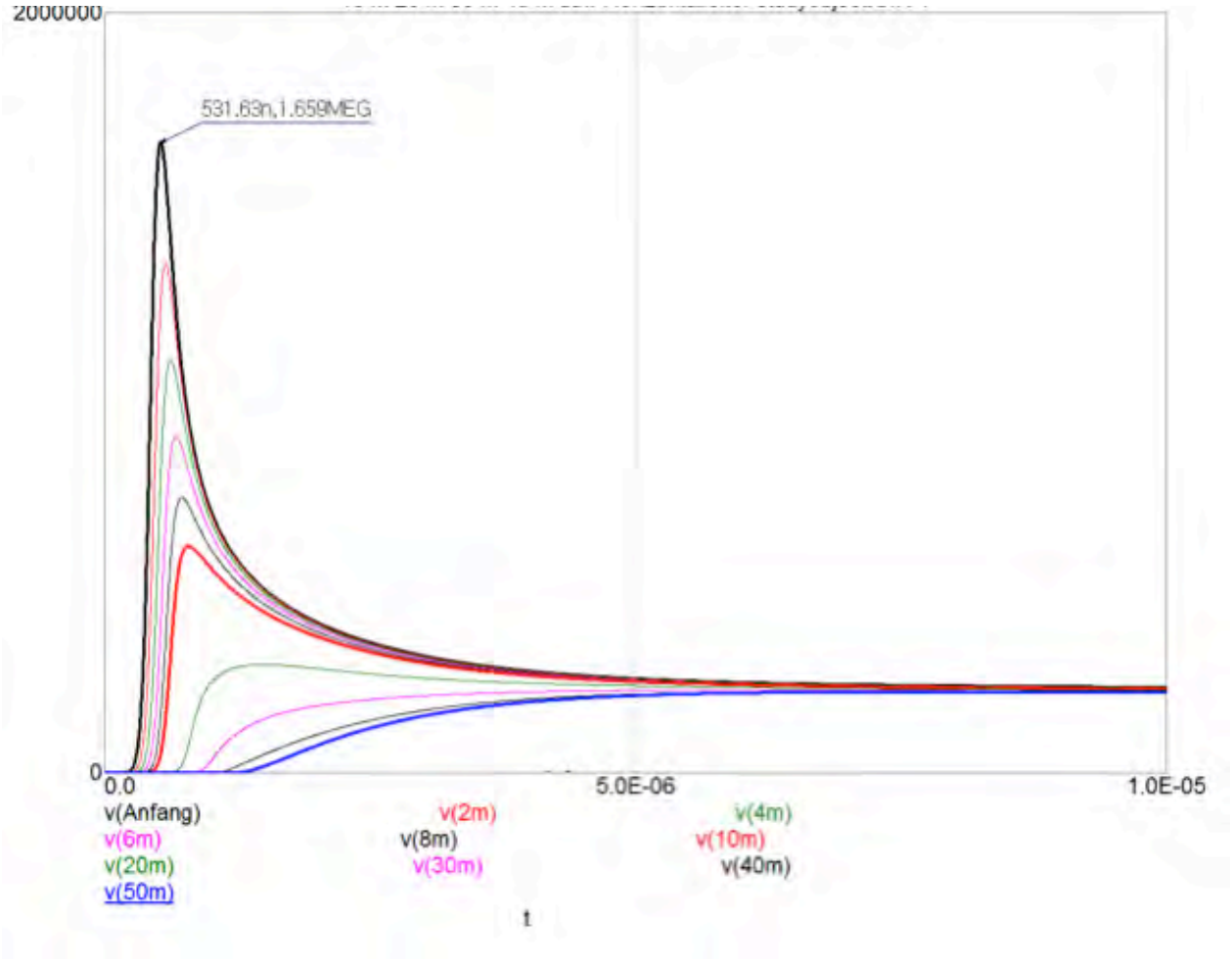


Bild 6-51 Frequenzgang des Ausbreitungswiderstands I eines 50 m langen Horizontaleiters ρ_E=100 Ohmm...1000 Ohmm



6.1.2.3.2 Zeitbereichsanalyse

Die Zeitbereichsanalyse zeigt in Bild 6-52 und Bild 6-52 die Spannungsverteilung längs eines 50 m langen Horizontalleiters. Die größte Spannung tritt am Anfang auf und ist proportional dem Stoßerdungswiderstand. Interessant ist die Ausprägung von Wanderwellenschwingungen bei einem spezifischen Erdwiderstand von 1000 Ohmm.

Die Stromverteilung in Bild 6-54 zeigt für 100 Ohmm, dass eine Verlängerung über 10 m hinaus nicht sinnvoll ist. Bei 1000 Ohmm, Bild 6-55 verschiebt sich die Grenze hin zu etwas größeren Längen.

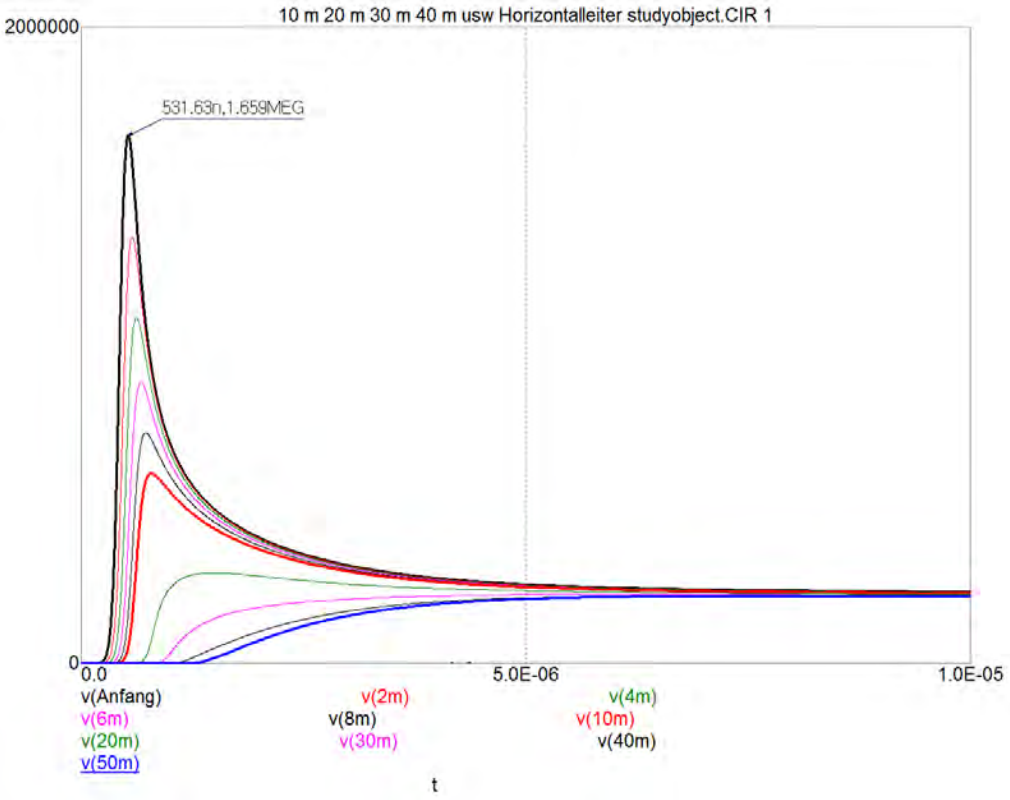


Bild 6-52 Spannungsverteilung entlang eines 50 m langen Horizontalleiters. ρ_E=100 Ohmm.

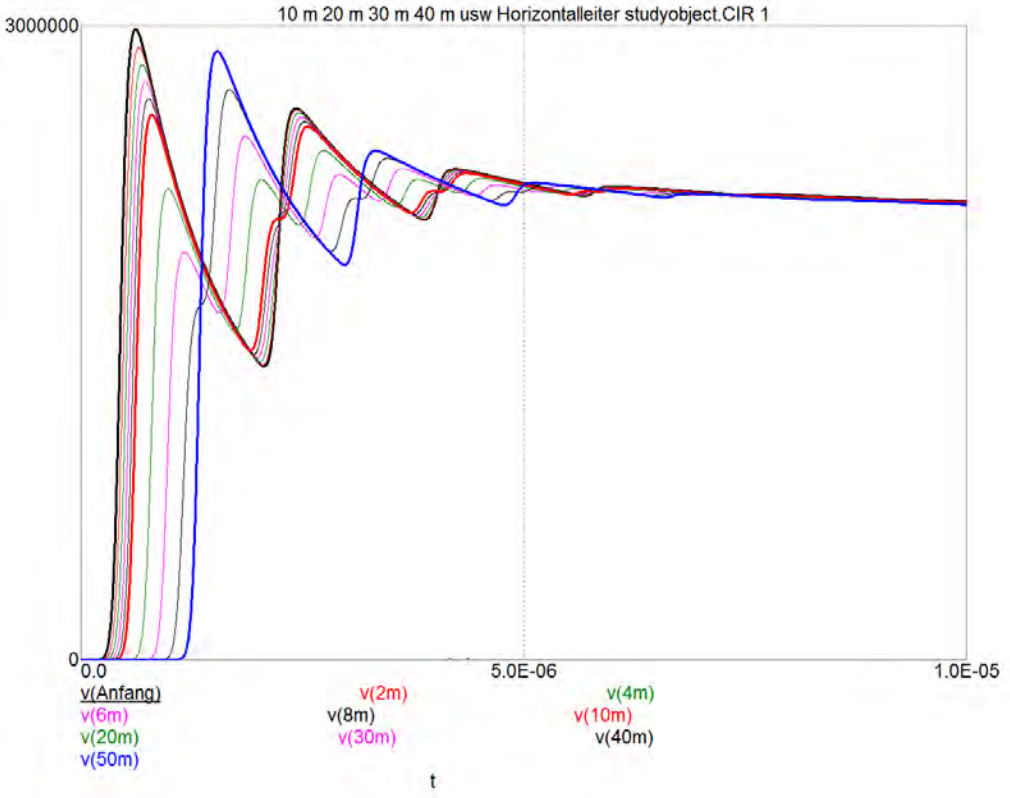


Bild 6-53 Spannungsverteilung entlang eines 50 m langen Horizontalleiters. ρ_E=1000 Ohmm.

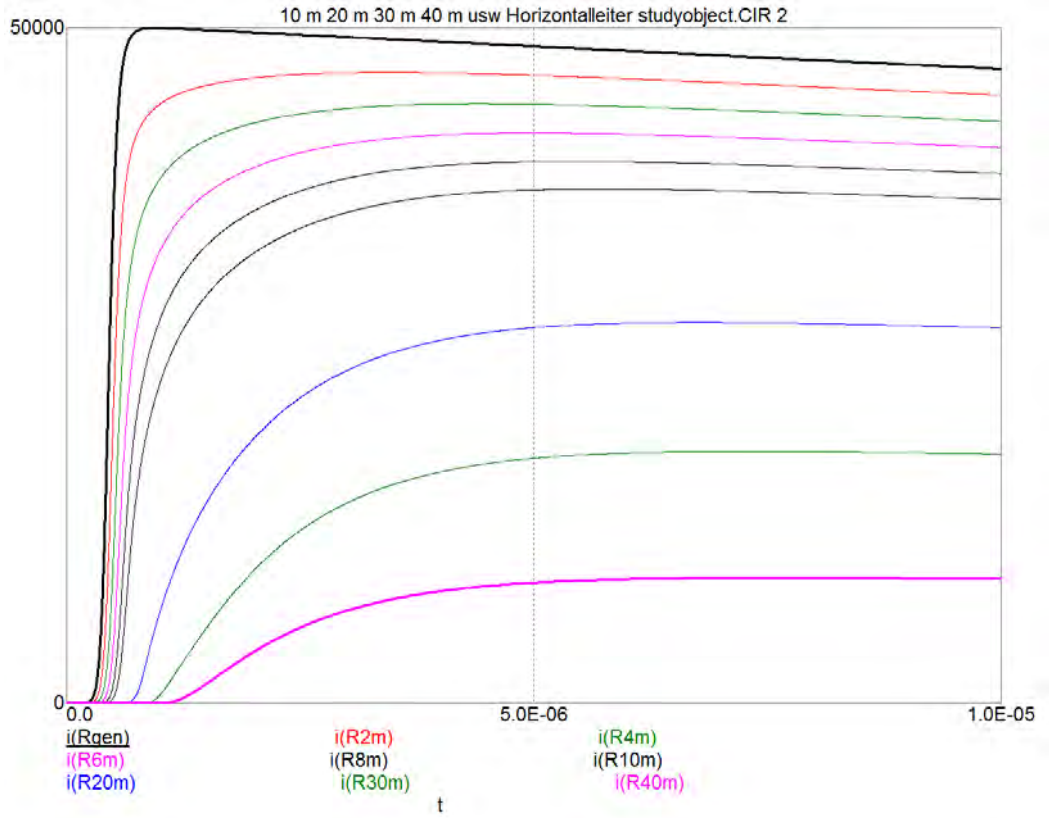


Bild 6-54 Stromverteilung entlang eines 50 m langen Horizontalleiters. ρ_E=100 Ohmm.

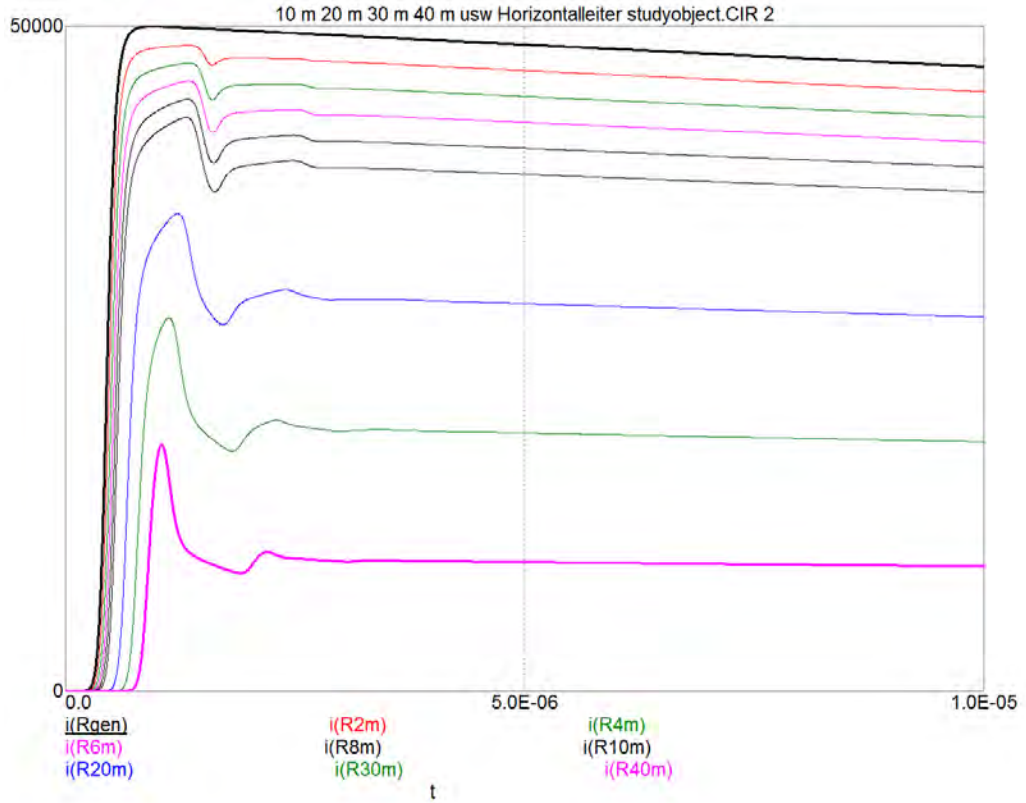


Bild 6-55 Stromverteilung entlang eines 50 m langen Horizontalleiters. ρ_E=1000 Ohmm.

6.1.2.3.3 Analyse der effektiven Erderlänge

Mit der Simulation der Spannungs- und Stromverteilung kann auch die analytische Formel zur effektiven Erderlänge überprüft werden. Dazu wird die Länge des Horizontalleiters schrittweise erhöht. Dabei wird dann jeweils die Erderspannung am Anfang des Horizontalleiters bestimmt. Aus diesen Werten lässt sich Bild 6-56 darstellen. Die Erderspannung nimmt mit zunehmender Länge des Horizontaleiters zunächst proportional ab, verharrt dann aber bei einem konstanten Wert. Dieser Knick kann als effektive Erderlänge aufgefasst werden. Ein Vergleich mit den berechneten effektiven Erderlängen nach Wiesinger zeigt in Tabelle 6-6 Abweichungen gegenüber der Simulation mit Microcap. Zur Kontrolle zeigt Bild 6-57 den Verlauf des Ausbreitungswiderstands (Gleichstromwert).

Tabelle 6-6 Berechnete effektive Erderlänge nach Wiesinger.

100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm
4,44 m	9,92 m	14,03 m

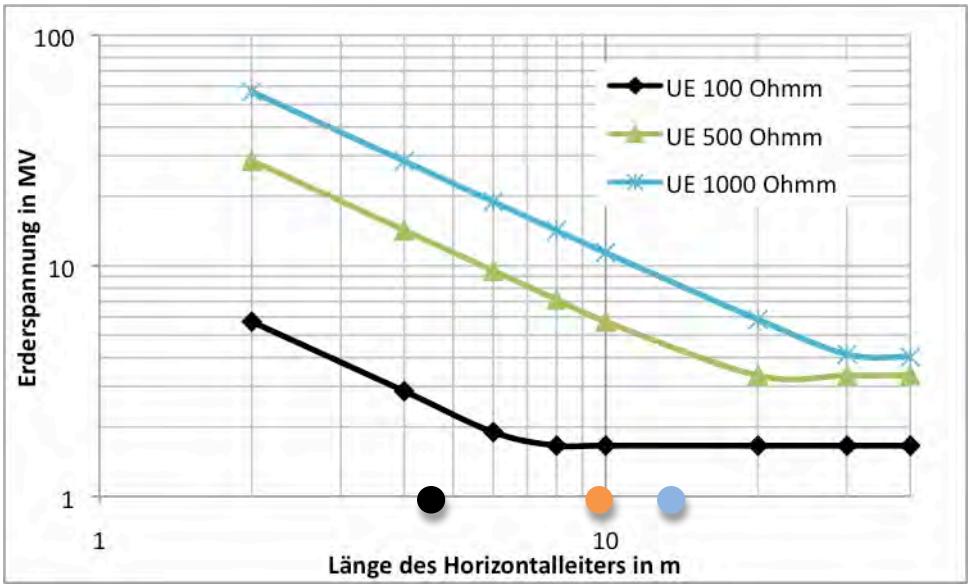


Bild 6-56 Abhängigkeit der Erderspannung von der Länge des Horizontalleiters. Die Kreise auf der Längenachse zeigen die berechneten effektiven Erderlängen nach der Formel von Wiesinger mit 4,4 m; 10m und 14 m..

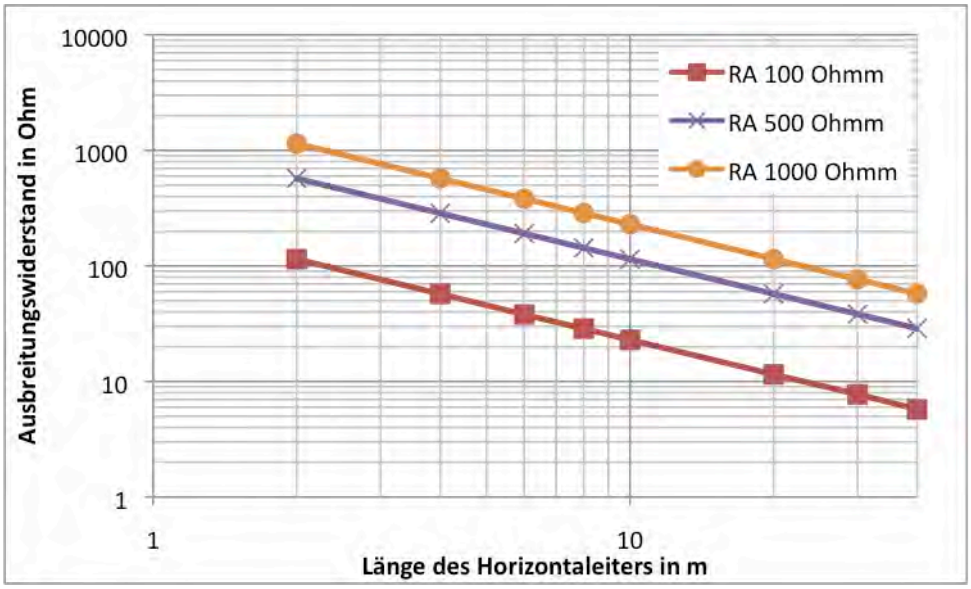


Bild 6-57 Abhängigkeit des Ausbreitungswiderstands (Niederfrequenzwert bzw. Gleichstromwert) von der Länge des Horizontalleiters.

6.1.3 Die Verhältnisse bei einer Modellierung mit Maxwellschen Gleichungen

In der Literatur : Corvay: Lightning protection ist ein Vergleich verschiedener Rechenmethoden dargestellt. Als Beispiel soll hier ein horizontaler Leiter verglichen werden. Bild 6-58 zeigt die Veröffentlichung von Corvay mit den Ergebnissen für Wanderwellenmodelle und nach den Maxwellschen Gleichungen. Im Vergleich dazu zeigt Bild 6-59 die Ergebnisse der Berechnung mit Microcap für einen ähnlichen Horizontalleiter. Die Unterschiede sind gering und rühren daher, dass in der Veröffentlichung von Corvay die Verlegetiefe nicht angegeben ist.

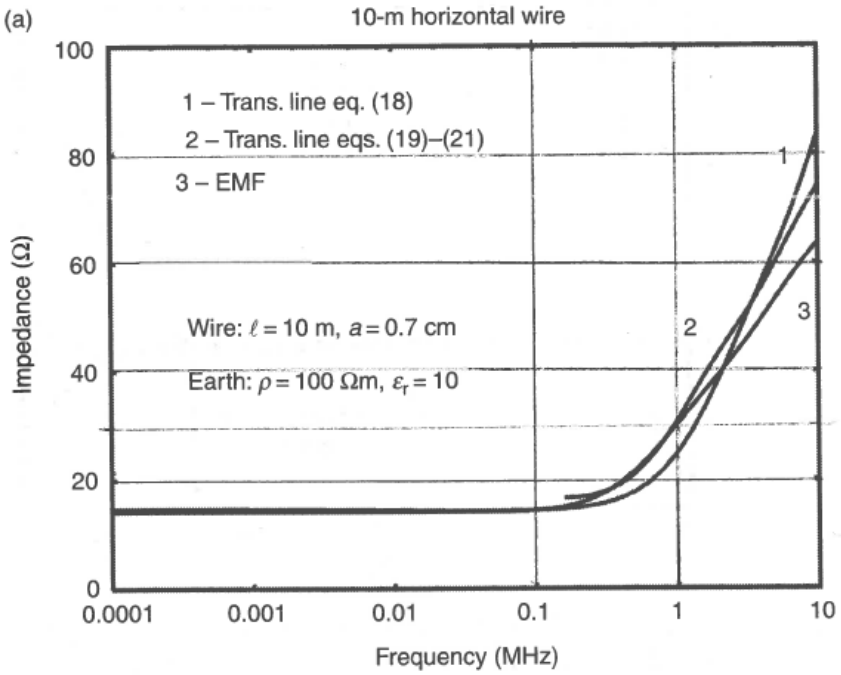


Bild 6-58 Ausbreitungswiderstand eines Horizontalleiters nach Corvay.

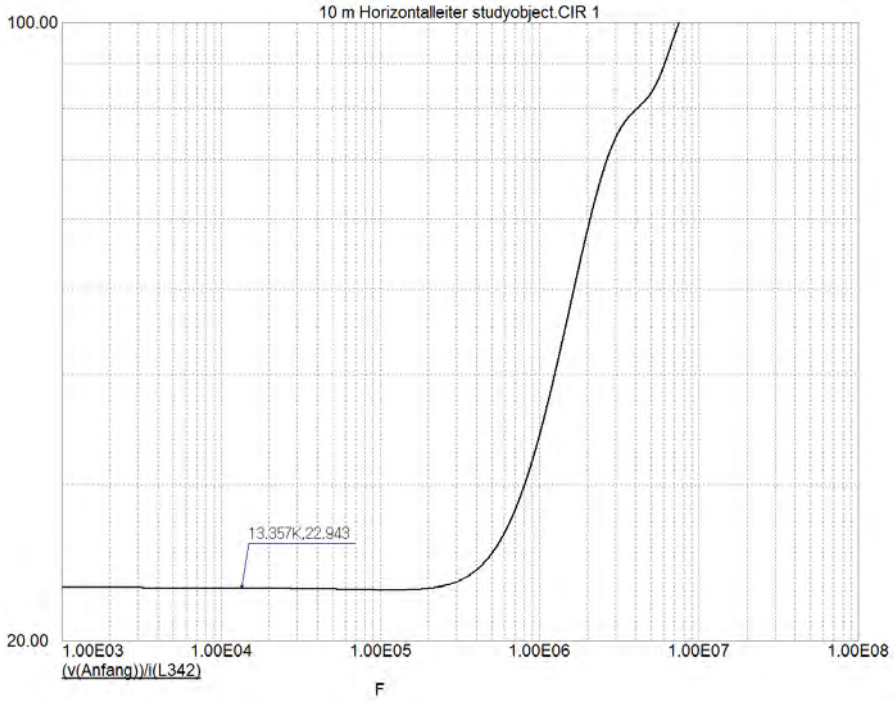


Bild 6-59 Impedanz Z=U/I für ρ_E 100 Ohmm mit frequenzabhängiger Kapazität nach Gleichung 6-16 gerechnet. Für Horizontalleiter (Außendurchmesser nach Wiesinger: 9m) Länge des Kettenleiters =Länge des Horizontalerders 10m. Verzinktes Bandeisen 30x5mm entsprechend 15 mm Rundleiter bzw. a=7,5 mm.

7 Fallstudie der Stromverteilung an einem Gebäude 10m x 10m, 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen und 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen im Frequenz- und Zeitbereich

Die folgende Berechnung zeigt die Übereinstimung der Berechnungsverfahren im Frequenz-und Zeitbereich. Es ist möglich, die Stromverteilung in den 4 Ableitungen als Frequenzgang darzustellen.

7.1 Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern

Das folgende Modell in Bild 7-1 zeigt ein Gebäude mit einer Kantenlänge von 10x10x10m mit 4 Ableitungen 50 mm^2 und 4 Vertikalerdern 20mm Edelstahl von 9 m Länge. Für dieses äußere Blitzschutzsystem wird die Stromverteilung in den Ableitungen im Frequenz- und Zeitbereich berechnet. Die Ableitungen werden nach den Angaben in Abschnitt 11 und die Vertikalerder nach den Angaben in Abschnitt 6.1.2 modelliert.
Für ρ_E=100 Ohmm ergibt sich ein Ausbreitungswiderstand R_E= 2,8 Ohm. Bild 7-2 zeigt den Ausbreitungswiderstand als Funktion der Frequenz.

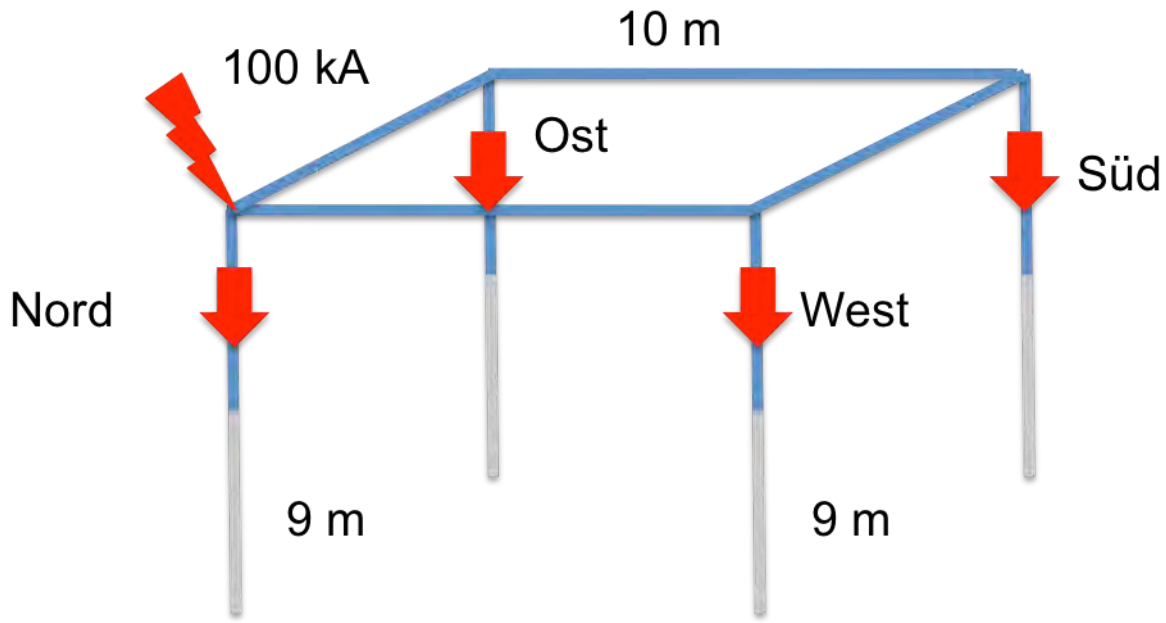


Bild 7-1 Modellgebäude mit 4 Ableitungen und Erdsystem bestehend aus 4 Vertikalerdern.

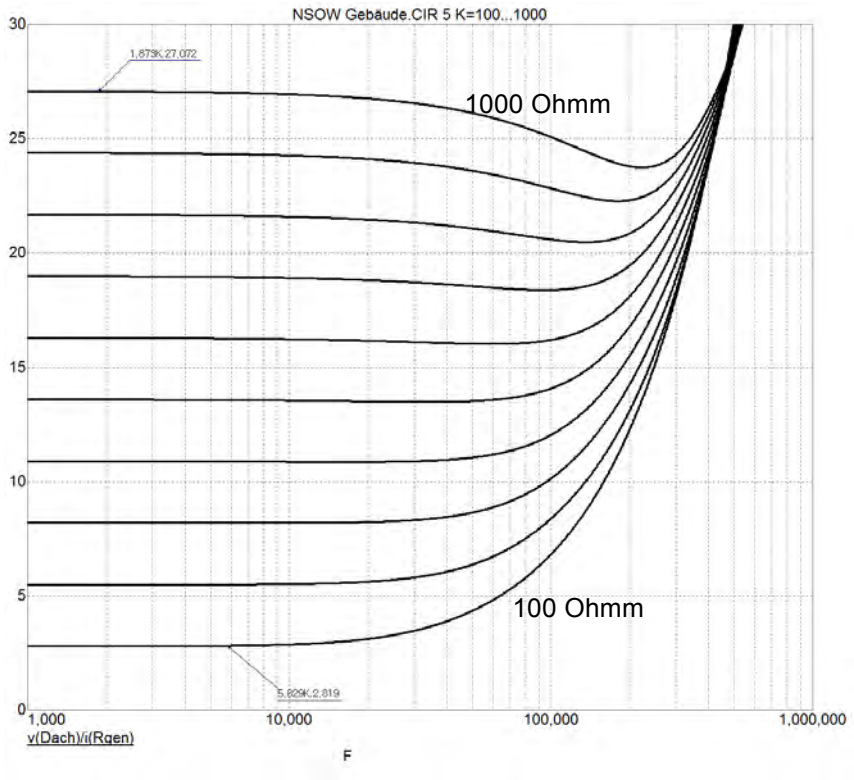


Bild 7-2 Ausbreitungswiderstand des Modellgebäudes für ρ_E=100 ...1000 Ohmm

7.1.1 Frequenzbereichsanalyse

Die Frequenzbereichsanalyse zeigt in Bild 7-3 bis Bild 7-5 die Stromaufteilung für die verschiedenen Blitzstromformen. Es ist klar ersichtlich, dass die steilste Stromform 0,25/100 die schlechteste Stromaufteilung ergibt. Andererseits zeigen sich oberhalb 3 MHz deutliche Resonanzüberhöhungen, die sich auch in der Zeitbereichsanalyse als Überschwinger zeigen, siehe Abschnitt 7.1.2 . Die Resonanzüberhöhungen ergeben sich durch stehende Wellen auf den am Ende offenen Vertikalleitungen. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf der Vertikalleitung frequenzabhängig ist, kann die Resonanzfrequenz nicht analytisch berechnet werden.

Eine vergleichende grafische Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 7.1.5. Weitere Parameterstudien sind in Bild 7-6 bis Bild 7-9 dargestellt.

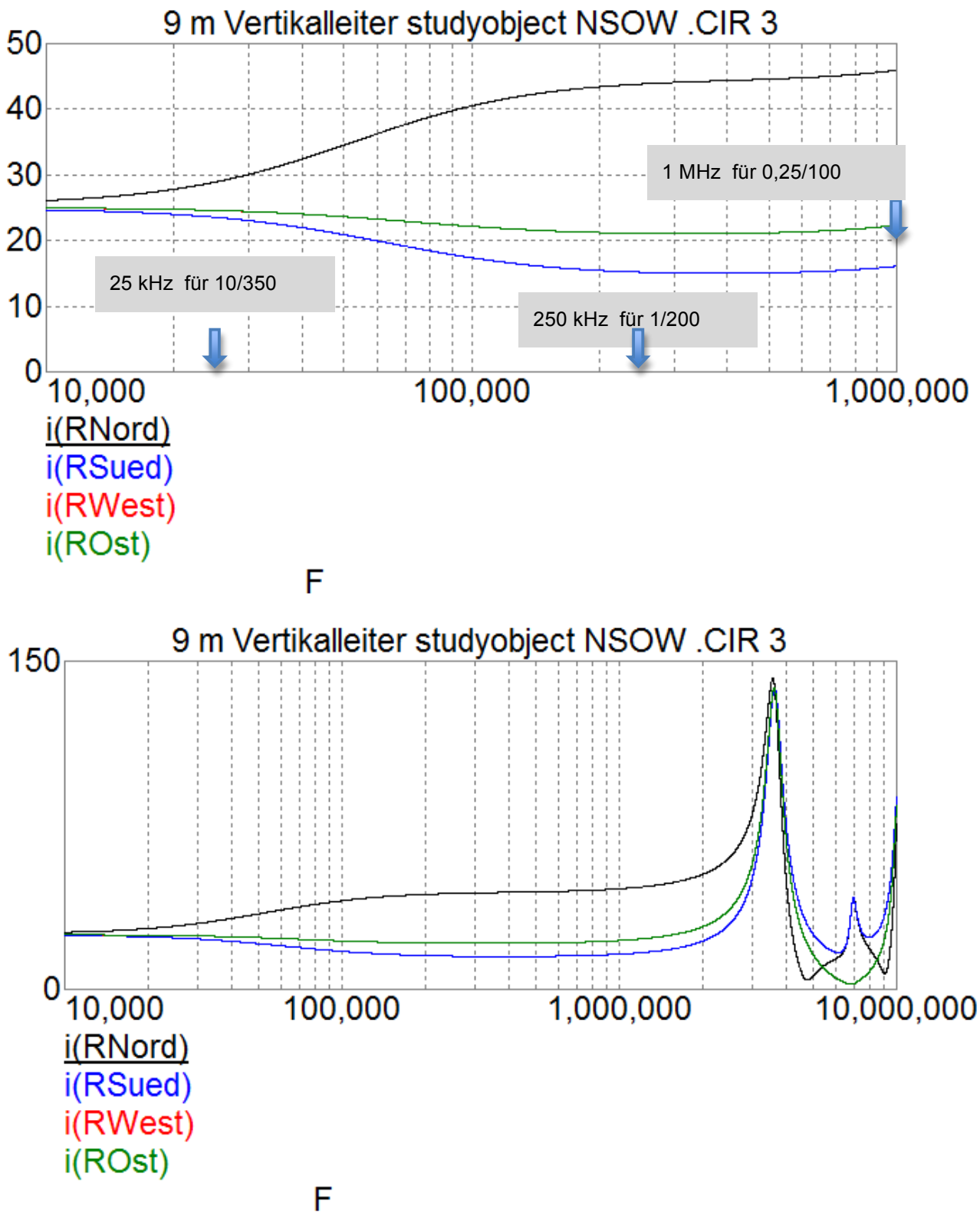


Bild 7-3 Stromverteilung für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Frequenzbereich ρ_E=100 Ohmm

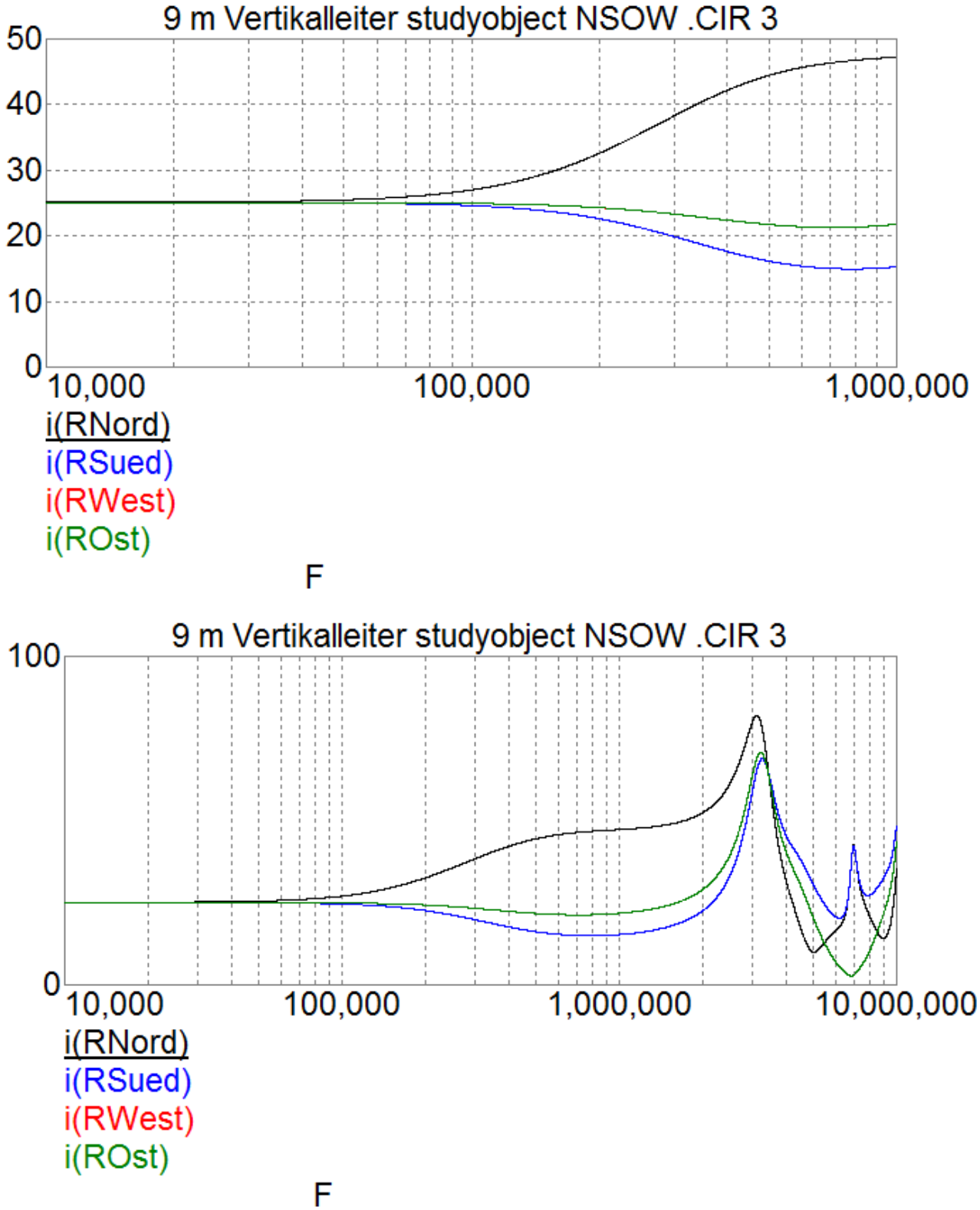


Bild 7-4 Stromverteilung für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Frequenzbereich ρ_E=500 Ohmm

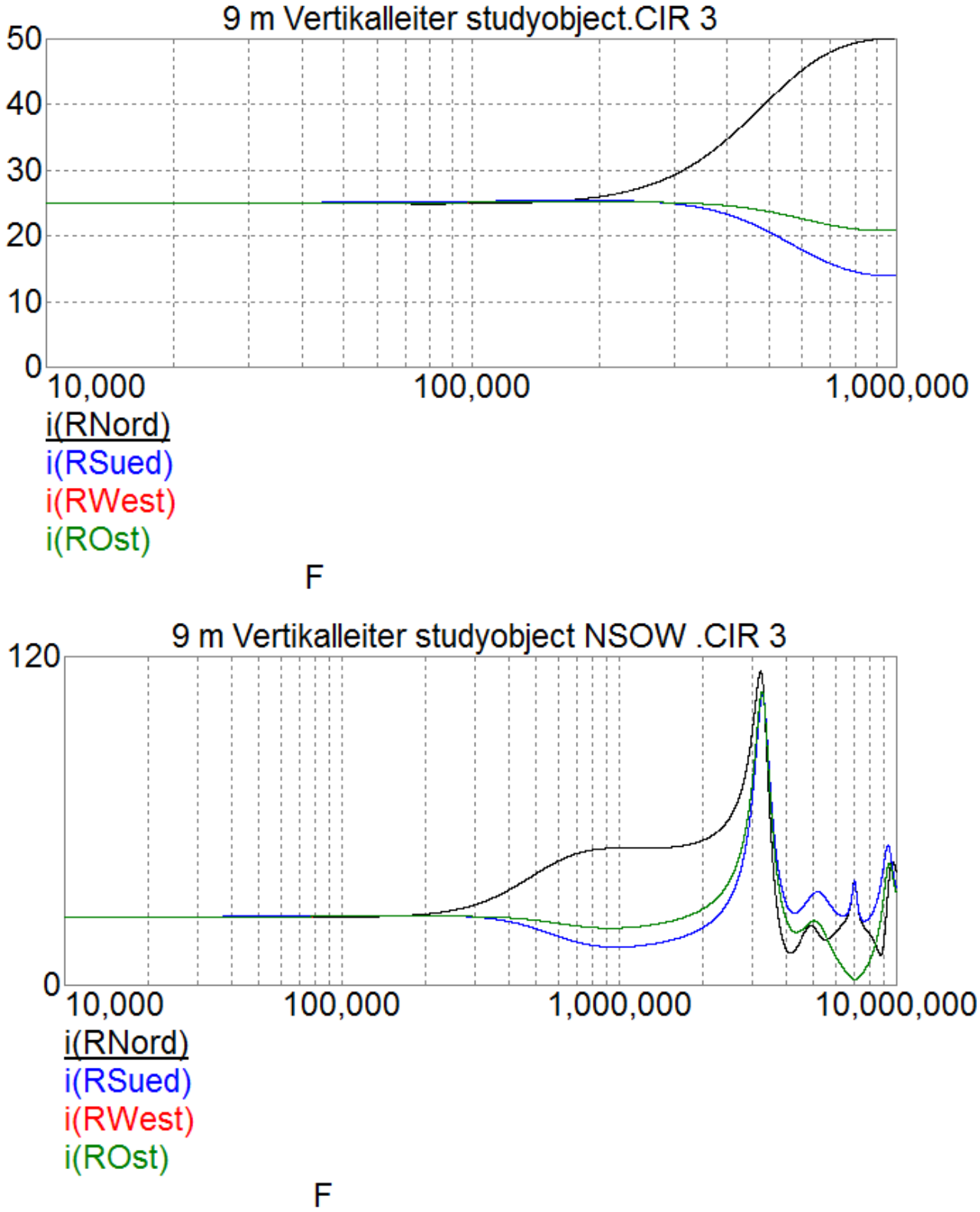


Bild 7-5 Stromverteilung für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Frequenzbereich ρ_E=1000 Ohmm

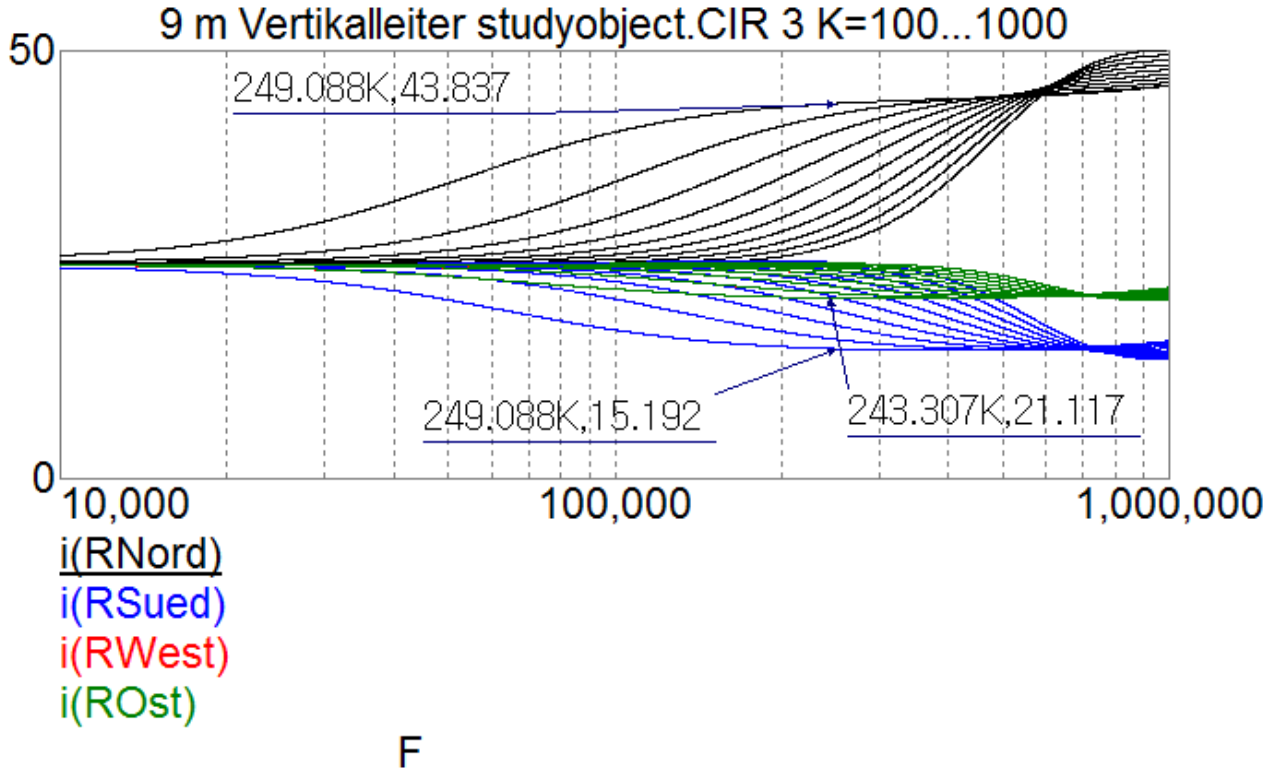


Bild 7-6 Stromverteilung für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Frequenzbereich. ρ_E=100..1000 Ohmm. Die Indikatoren geben die Werte für ρ_E =1000 Ohmm an

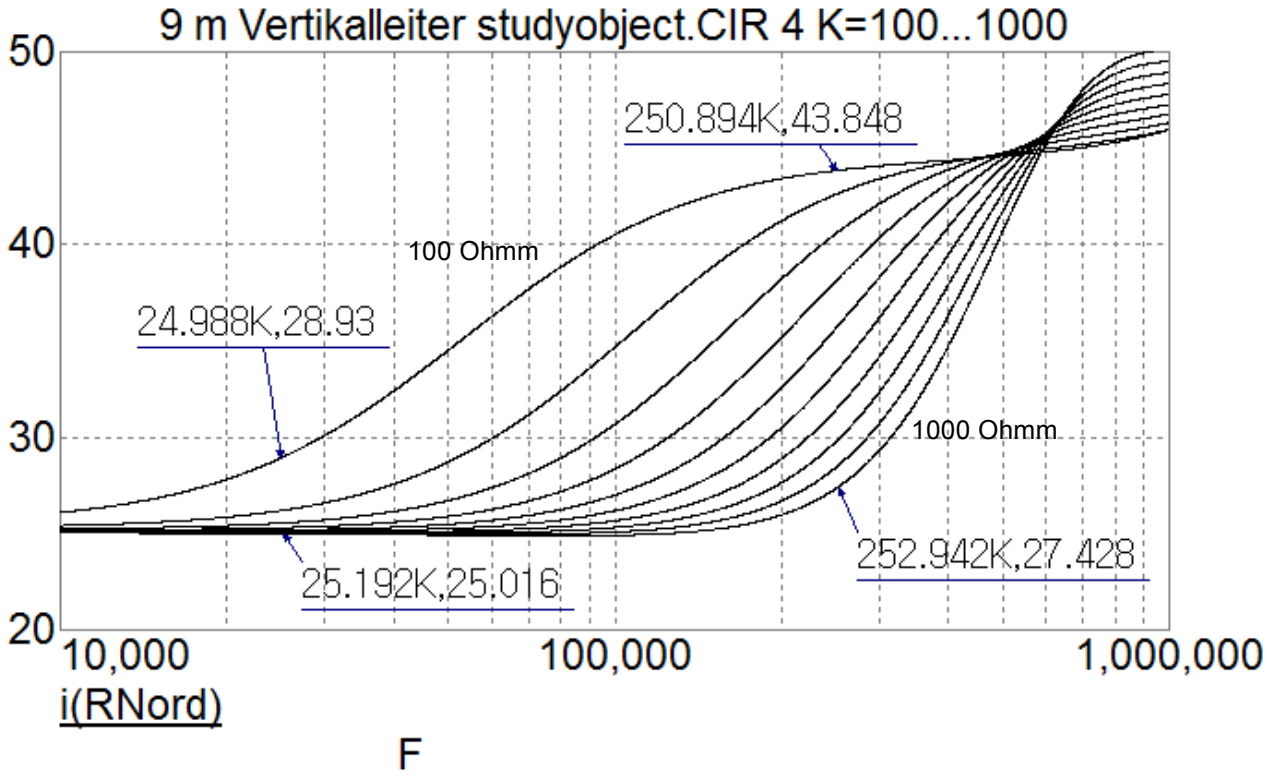


Bild 7-7 Strom in der Ableitung Nord für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Frequenzbereich. ρ_E=100..1000 Ohmm. Die Indikatoren geben die Werte für 25kHz; 250 kHz und 1MHz an.

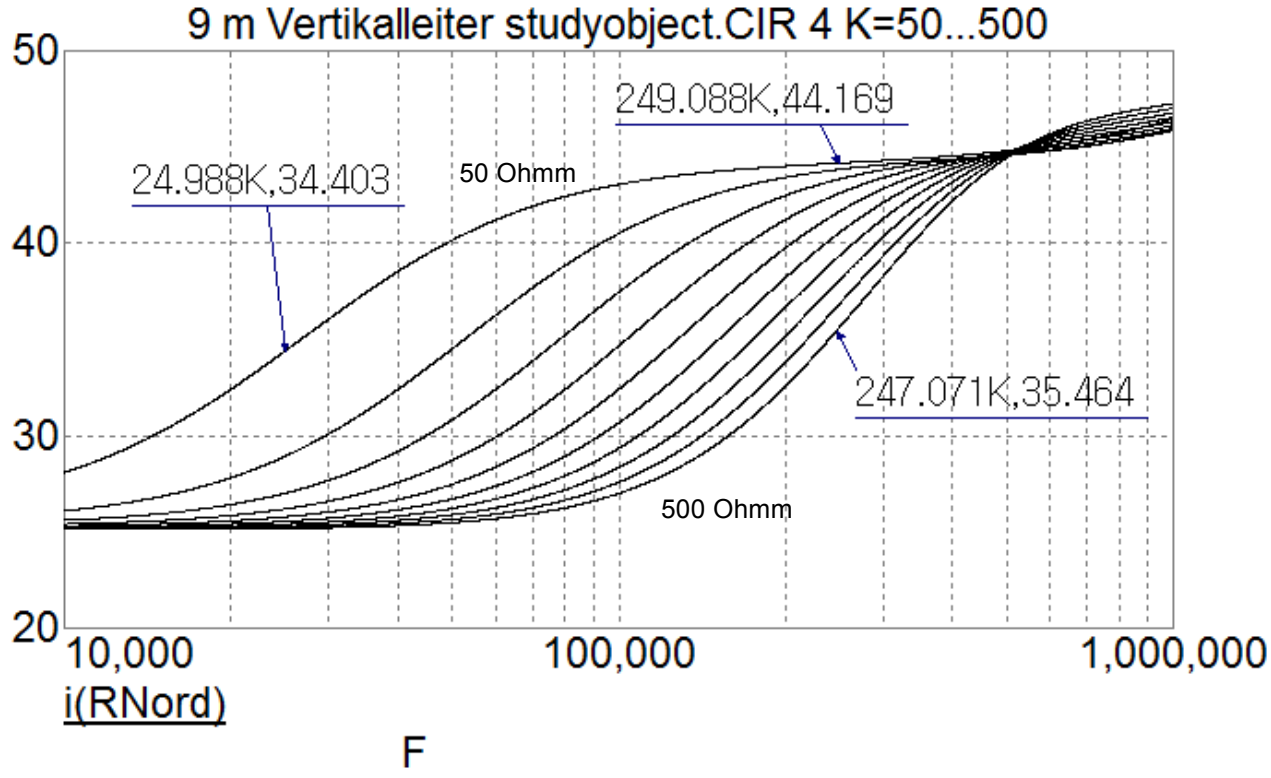


Bild 7-8 Strom in der Ableitung Nord für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Frequenzbereich. ρ_E=50..500 Ohmm. Die Indikatoren geben die Werte für 25kHz; 250 kHz an.

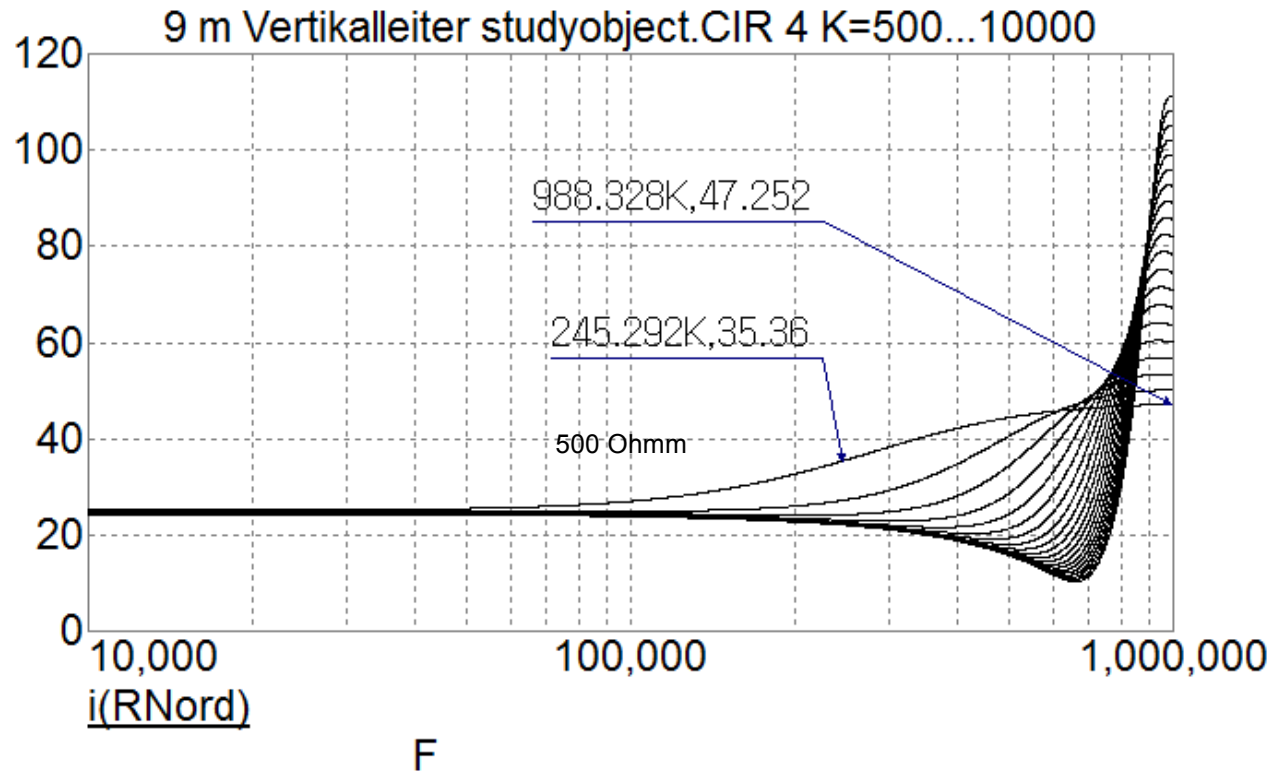


Bild 7-9 Strom in der Ableitung Nord für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Frequenzbereich. ρ_E=500..10000 Ohmm. Die Indikatoren geben die Werte für 250 kHz und 1 MHz an.

7.1.2 Zeitbereichsanalyse

7.1.2.1 0,25/100

Im Vergleich zum Frequenzbereich soll folgend die Stromaufteilung für die Blitzstromformen im Zeitbereich dargestellt werden. Die daraus folgende Stromaufteilung kann dann mit den Ergebnissen aus dem Frequenzbereich verglichen werden.
Bild 7-10 zeigt die Stromverteilung als Steppinganalyse für spezifischen Erdwiderstand von 100 bis 1000 Ohmm.
Auffällig ist die überlagerte Schwingung im Stromverlauf, deren Frequenz von 3,8 MHz aber genau mit der Resonanzüberhöhung im Frequenzbereich übereinstimmt, siehe Bild 7-4. Eine Erklärung ist in Abschnitt 7.1.3 gegeben.

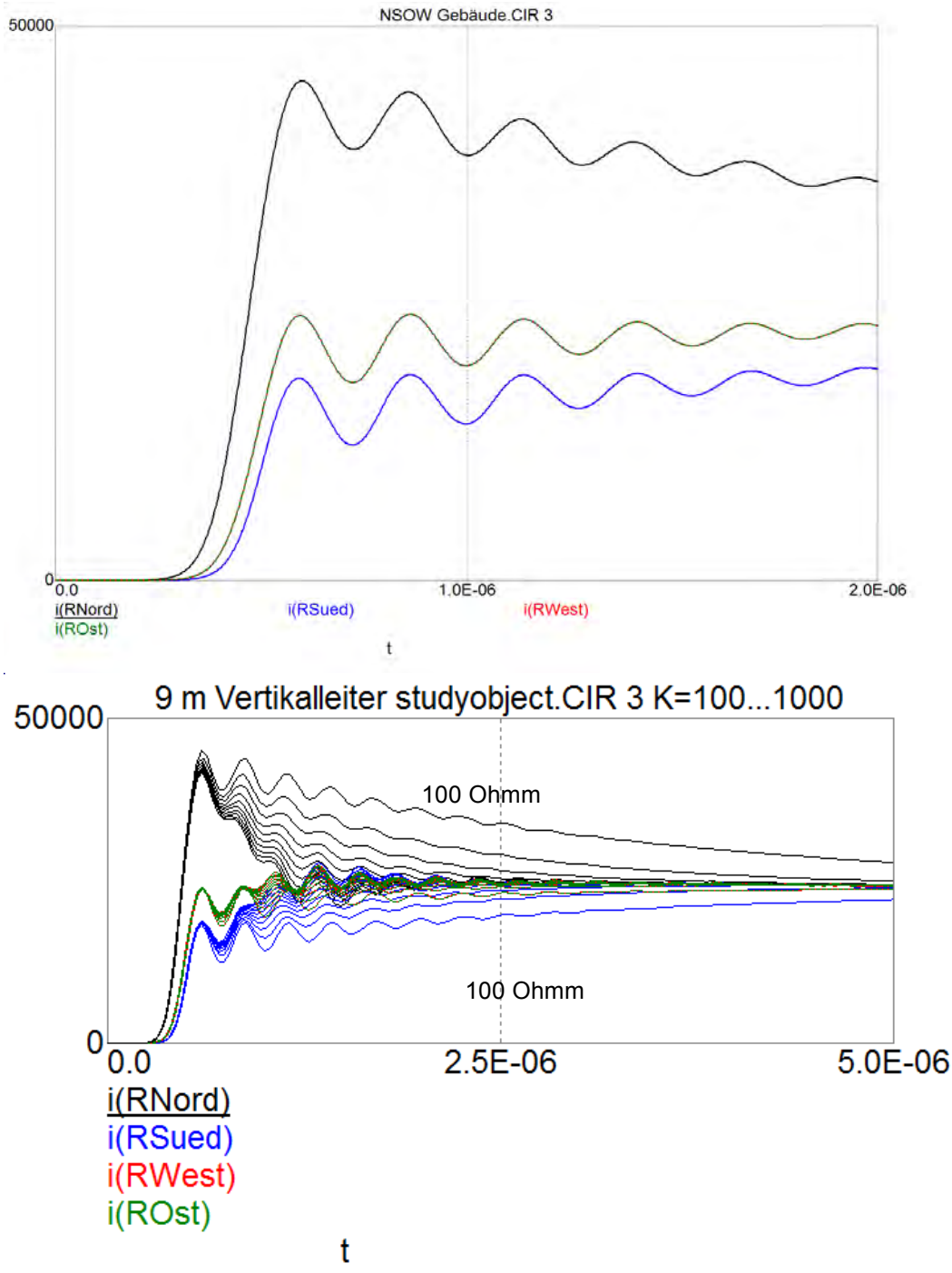


Bild 7-10 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. Oben: ρ_E=100Ohmm. Unten: Stepping: ρ_E=100 ----10000 Ohmm. Überlagerte Schwingung mit 3,8 MHz.

7.1.2.2 1/200

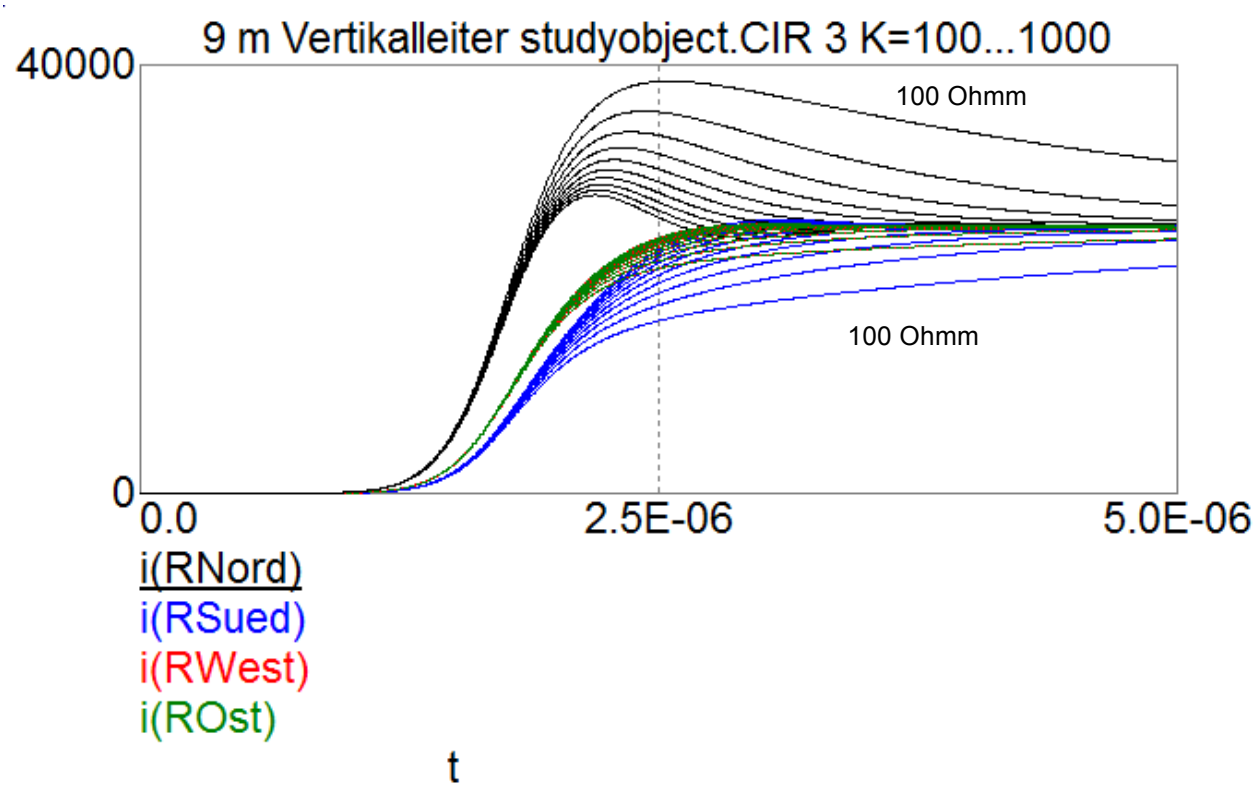


Bild 7-11 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Zeitbereich für negativen Erstblitz 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm.

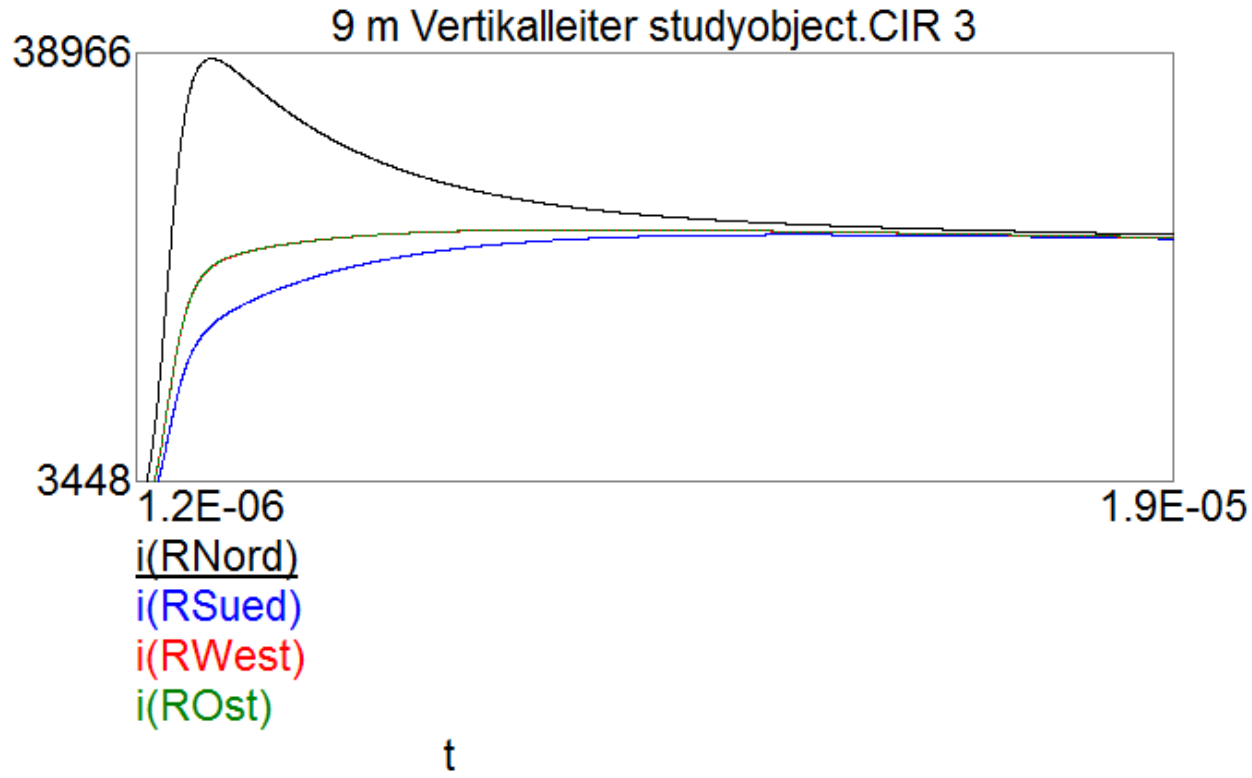


Bild 7-12 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Zeitbereich für negativen Erstblitz 1/200. ρ_E=100 Ohmm.

7.1.2.3 10/350

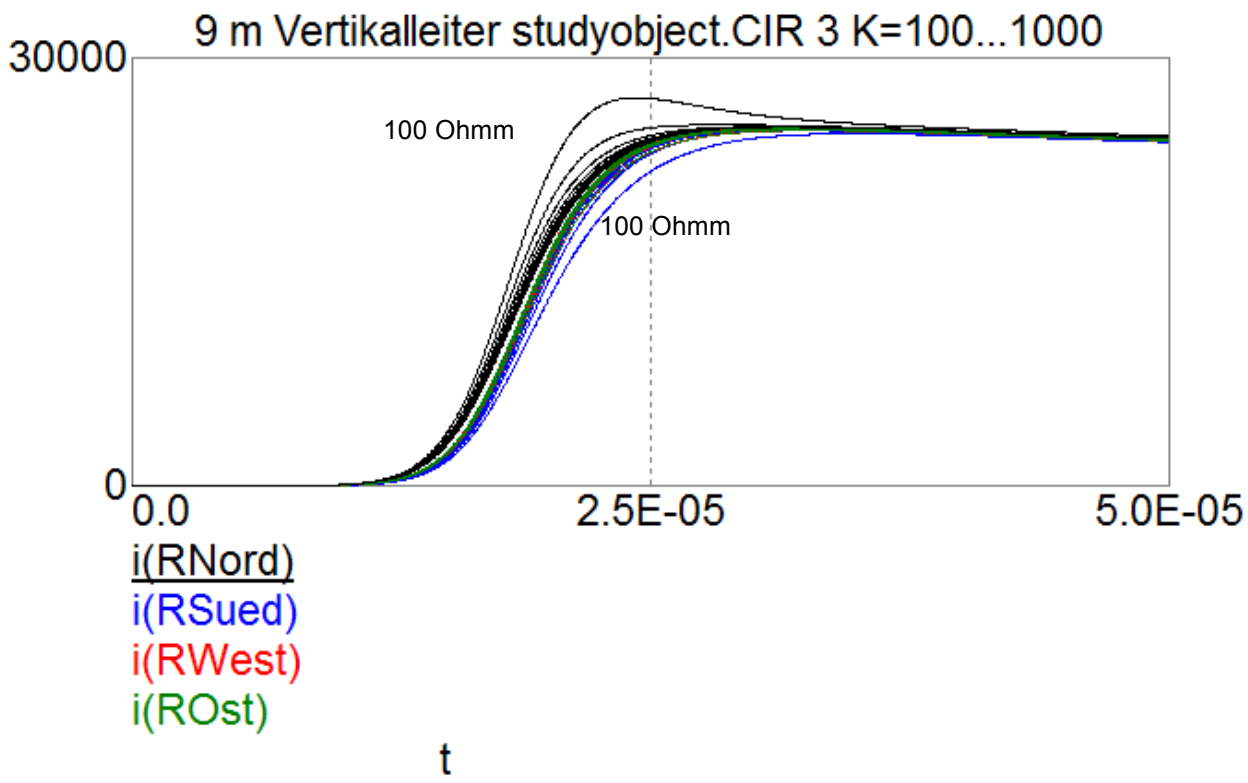


Bild 7-13 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern im Zeitbereich für negativen Erstblitz 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm.

7.1.3 Erklärung der überlagerten Schwingungen in der Zeitbereichsanalyse

Der Grund für überlagerte Schwingungen ist der Anschluss des Vertikalerders über eine Ableitung. Die Ableitung wird nach den angaben in Abschnitt 11 als Wanderwellenleitung modelliert. Die Simulation erfolgt gemäß der Schaltung in Bild 7-14. Die Auswertung zeigt folgendes Ergebnis:
Resonanzfrequenz in der Frequenzbereichssimulation in Bild 7-15: 6,76 MHz.
Resonanzfrequenz in der Zeitbereichssimulation in Bild 7-16 : 7 MHz. Eine Leitung von 10 m Länge schwingt mit 7,5 MHz. Die Schwingungen sind daher auf die Ableitungen zurückzuführen.

Daher sind die Schwingungen, die in Bild 7-10 bei ρ_E=100 Ohm besonders ausgeprägt sind, auf den Anschluss der 4 Vertikalerder und deren Querverbindungen mit Wanderwellenleitungen zurückzuführen und daher plausibel.

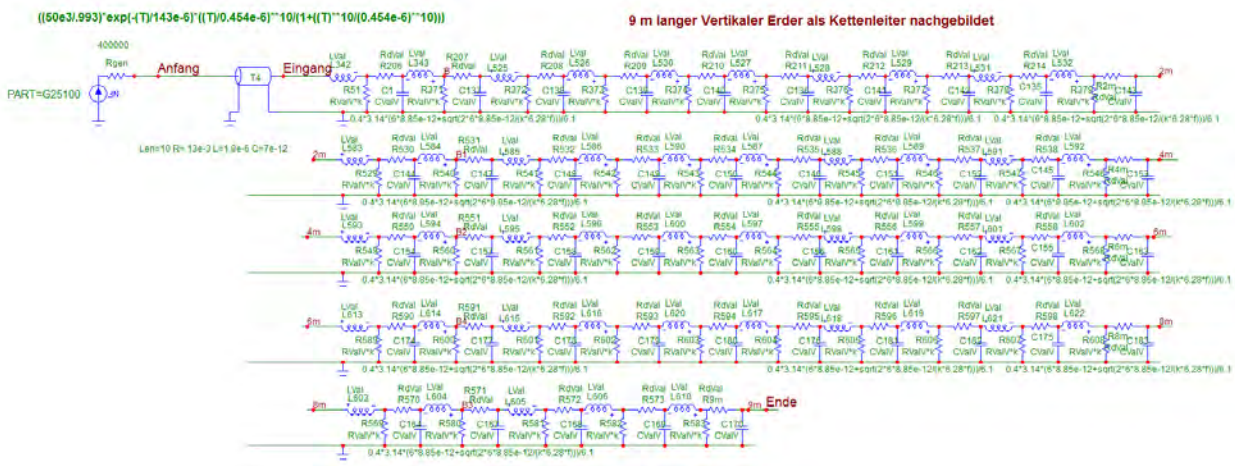


Bild 7-14 Vertikalerder über eine Ableitung von 10 m eingespeist.

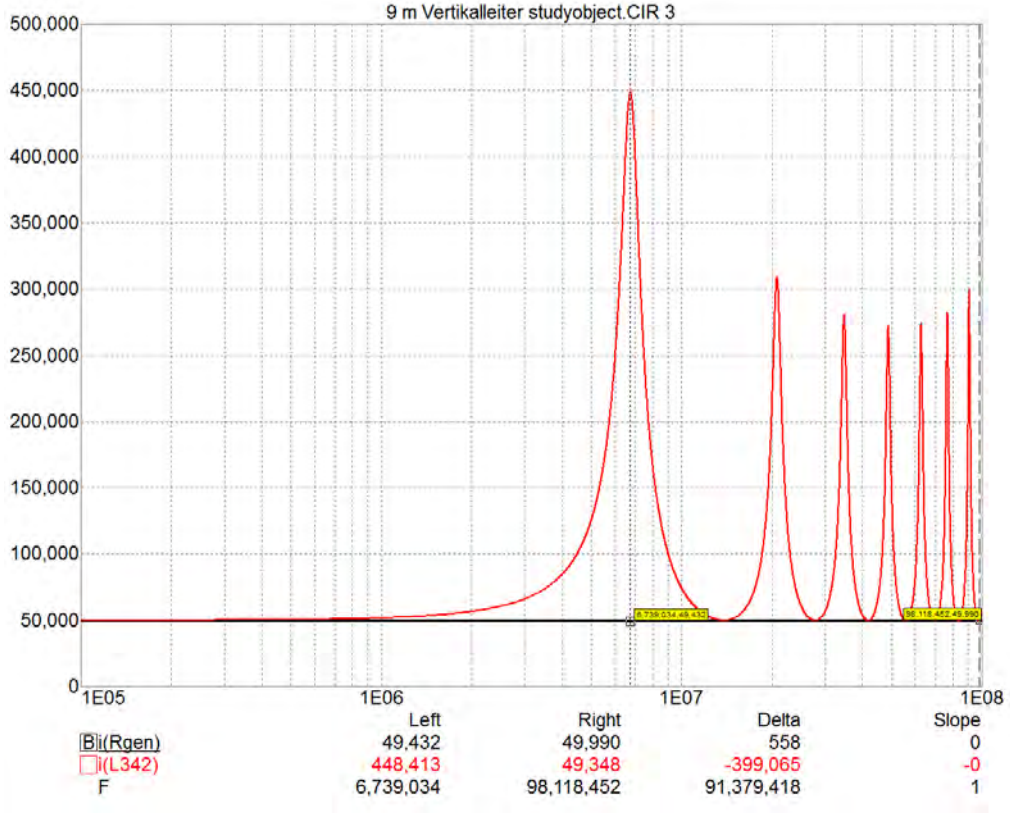


Bild 7-15 Frequenzbereichsanalyse des Vertikalerders nach Bild 7-14, der über eine Ableitung von 10 m eingespeist wird. Die erste Resonanzfrequenz beträgt 6,76 MHz. ρ_E=100 Ohmm.

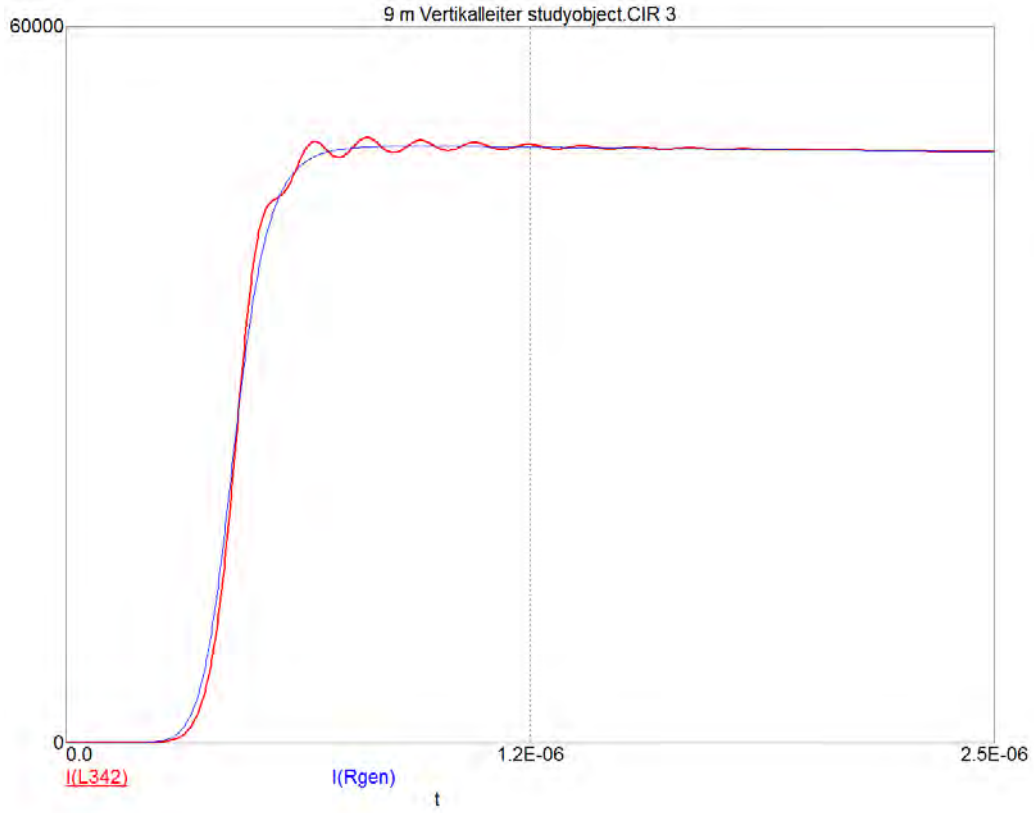


Bild 7-16 Zeitbereichsanalyse des Vertikalerders nach Bild 7-14, der über eine Ableitung von 10 m eingespeist wird. Die Frequenz der überlagerten Schwingung beträgt 7 MHz. ρ_E=100 Ohmm.

7.1.4 Einfluss des Erdungssystems auf die Stromverteilung

Interessehalber soll im Folgenden untersucht werden, ob die Stromaufteilung an dem Modellgebäude ohne und mit Erdungssystem unterschiedliche Werte liefert. Dazu wird das Gebäude auf eine gedachte Äquipotentialfläche gestellt. Die Ströme in den Ableitungen werden berechnet und im Abschnitt 7.1.5 miteinander verglichen. Die Berechnung wurde nur im Zeitbereich für ρ_E=100 Ohmm durchgeführt. Auffällig ist, dass die Stromaufteilung mit Erdsystem im Rücken vergleichmäßigt, während ohne Erdsystem eine stark unterschiedliche Aufteilung auch im Rücken vorhanden ist.

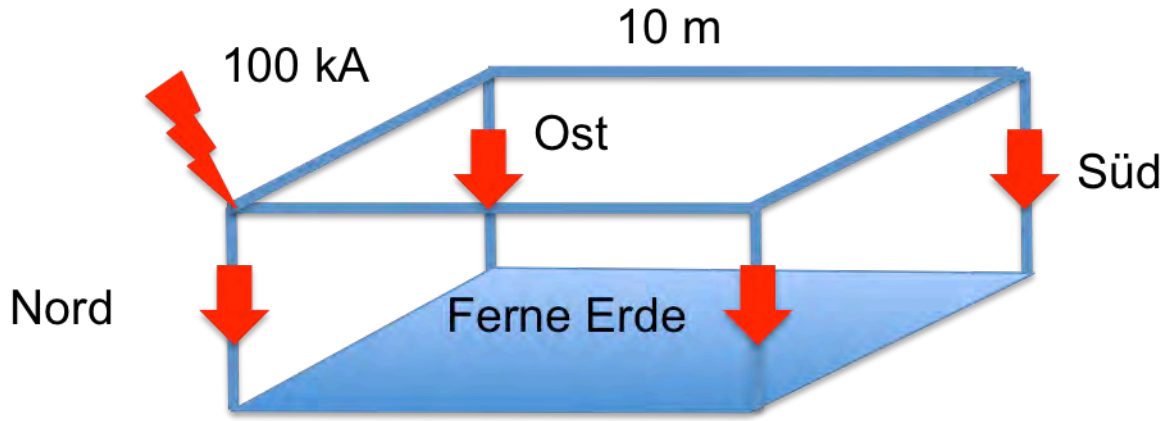


Bild 7-17 Modellgebäude mit 4 Ableitungen ohne Erdsystem.

7.1.4.1 Frequenzbereichsanalyse

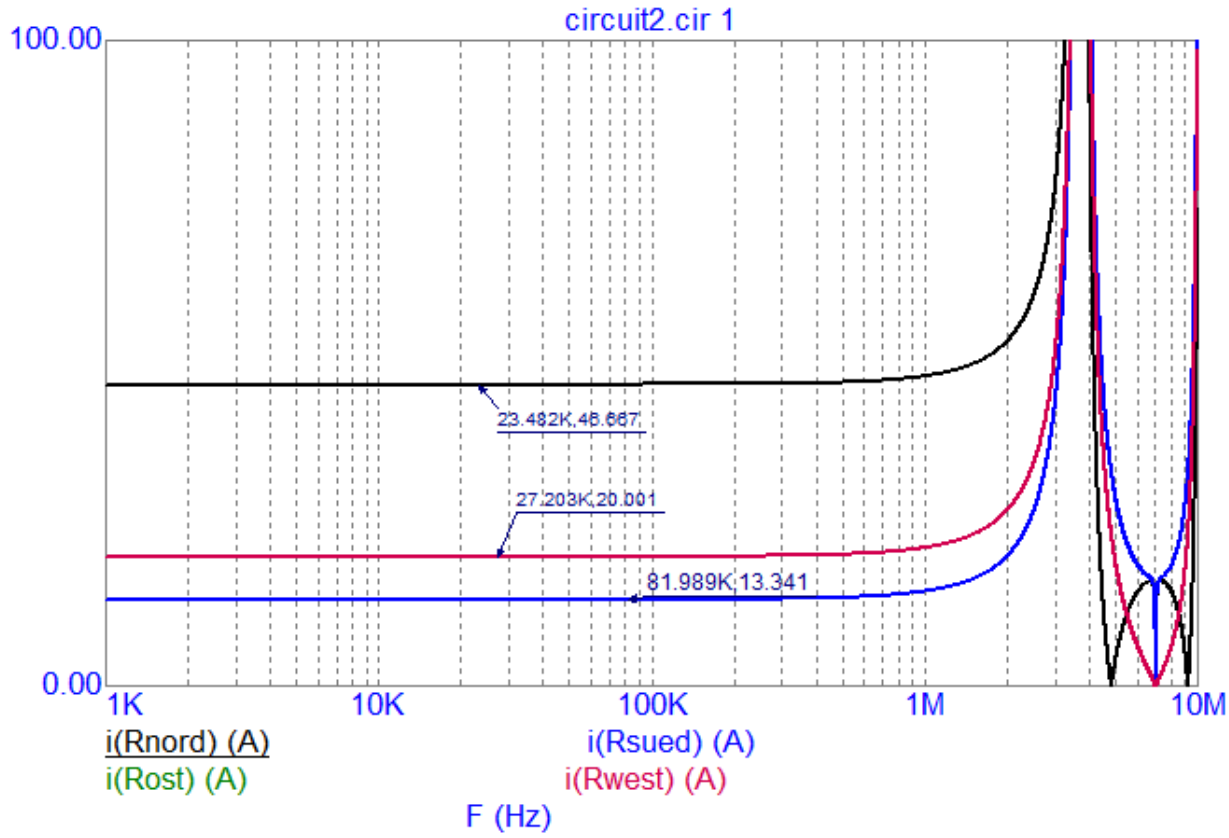


Bild 7-18 Stromverteilung **ohne Erdsystem**: Frequenzbereichsanalyse der Stromverteilung

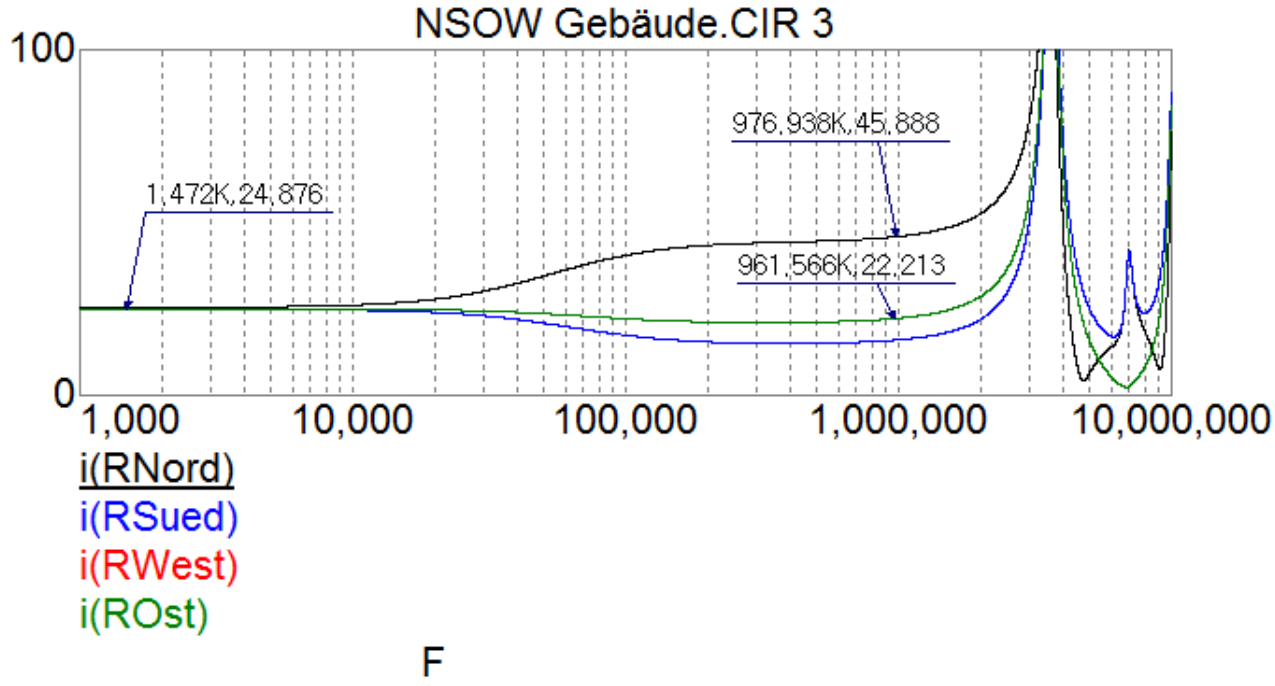


Bild 7-19 Stromverteilung **mit Erdsystem** und ρ_E=100 Ohmm. Frequenzbereichsanalyse der Stromverteilung

7.1.4.2 Zeitbereichsanalyse

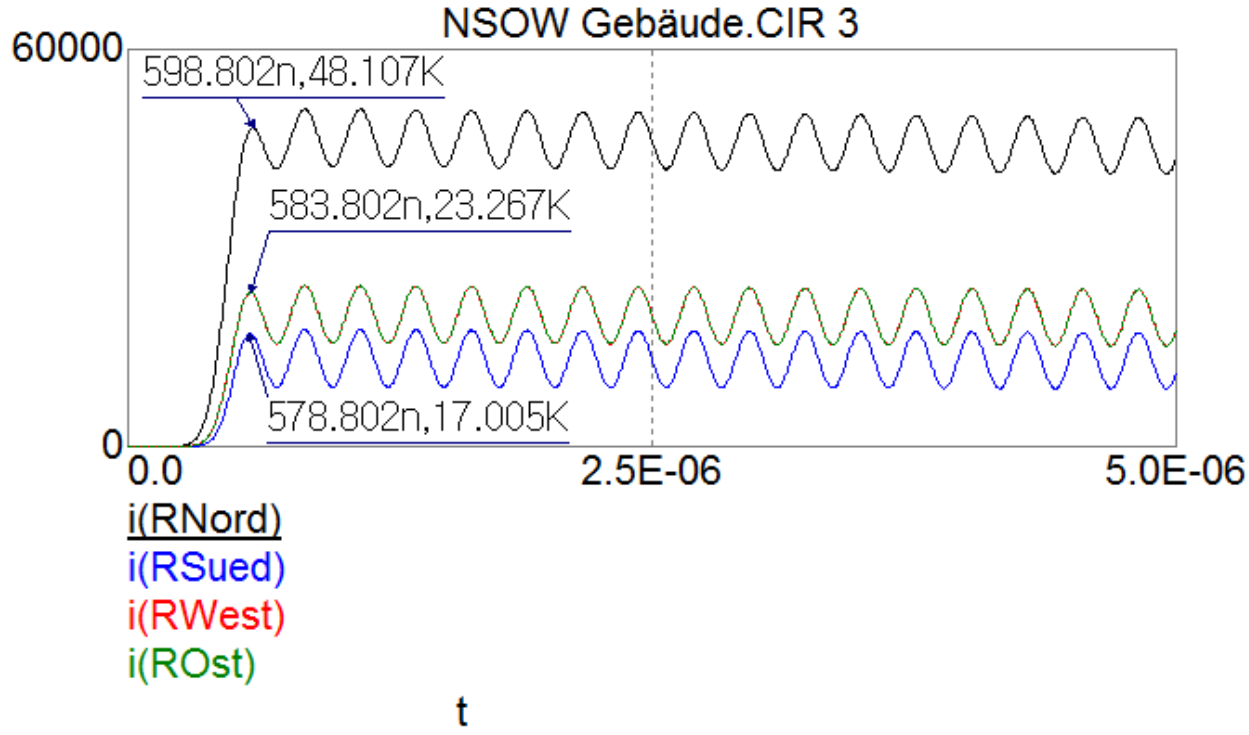


Bild 7-20 Stromverteilung **ohne Erdsystem** für 0,25/100 Impuls

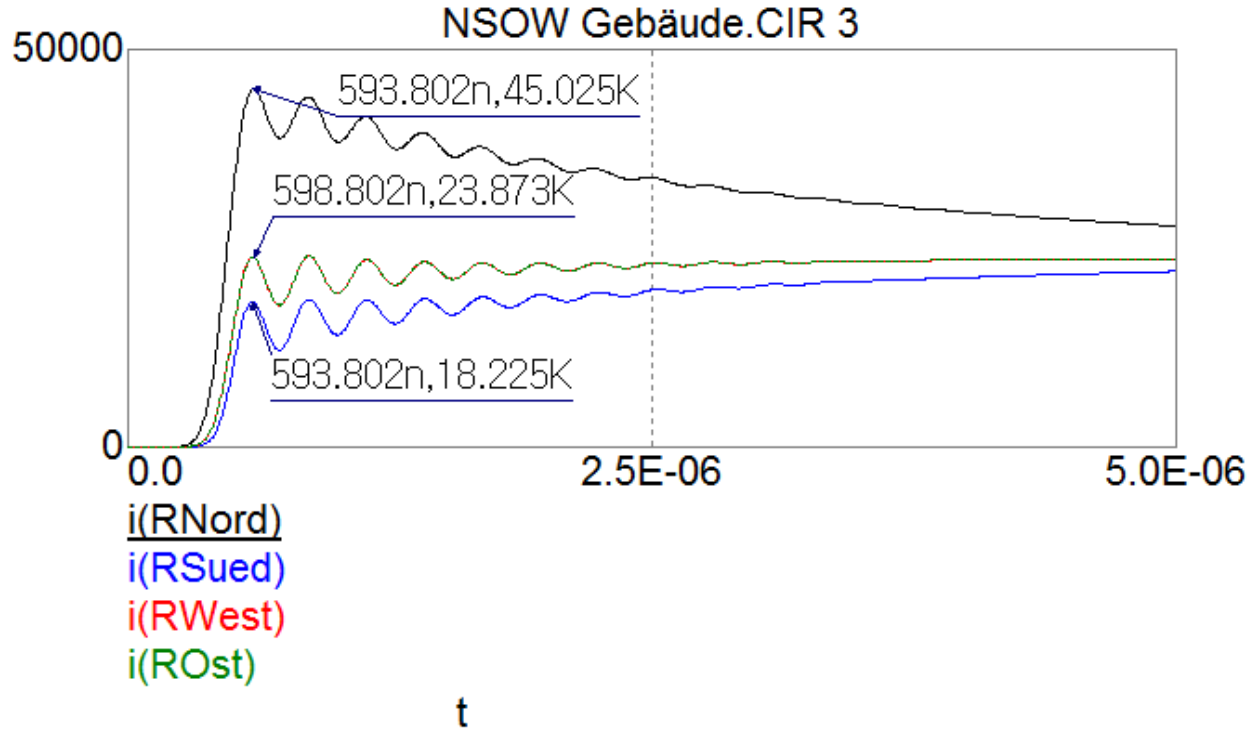


Bild 7-21 Stromverteilung **mit Erdsystem** für 0,25/100 Impuls und ρ_E=100 Ohmm

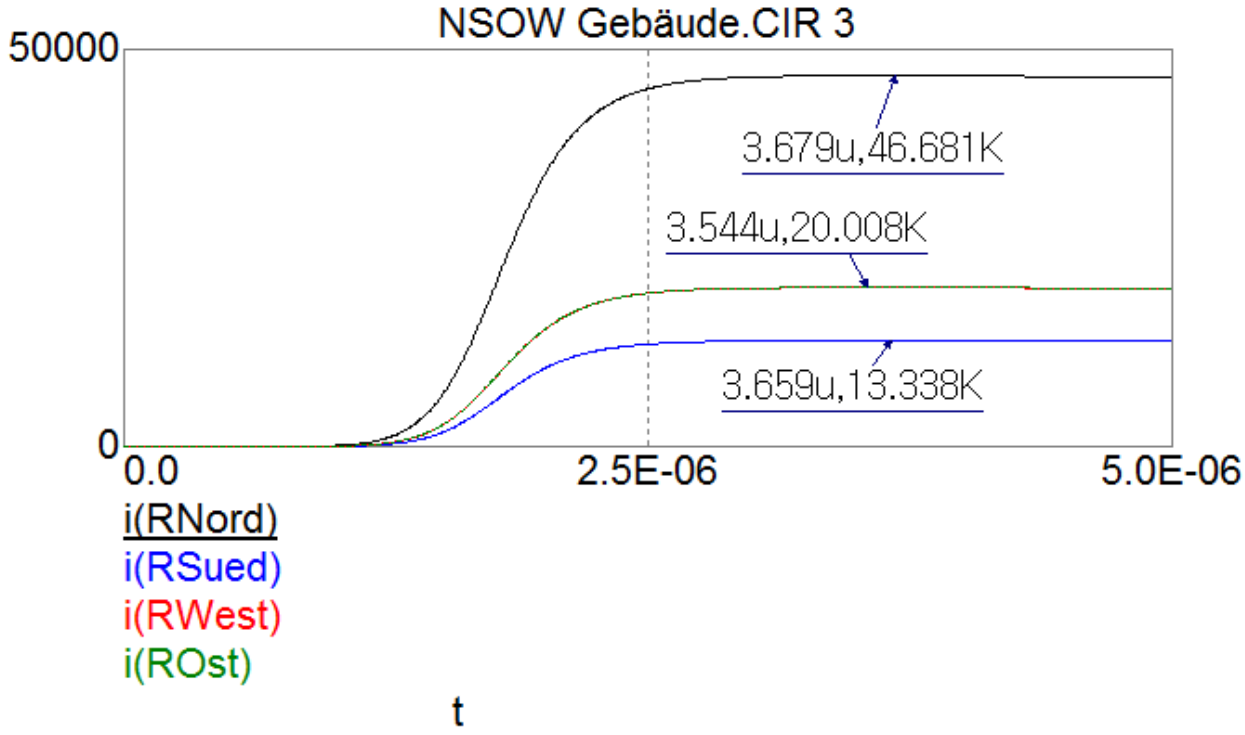


Bild 7-22 Stromverteilung **ohne Erdsystem** für 1/200 Impuls

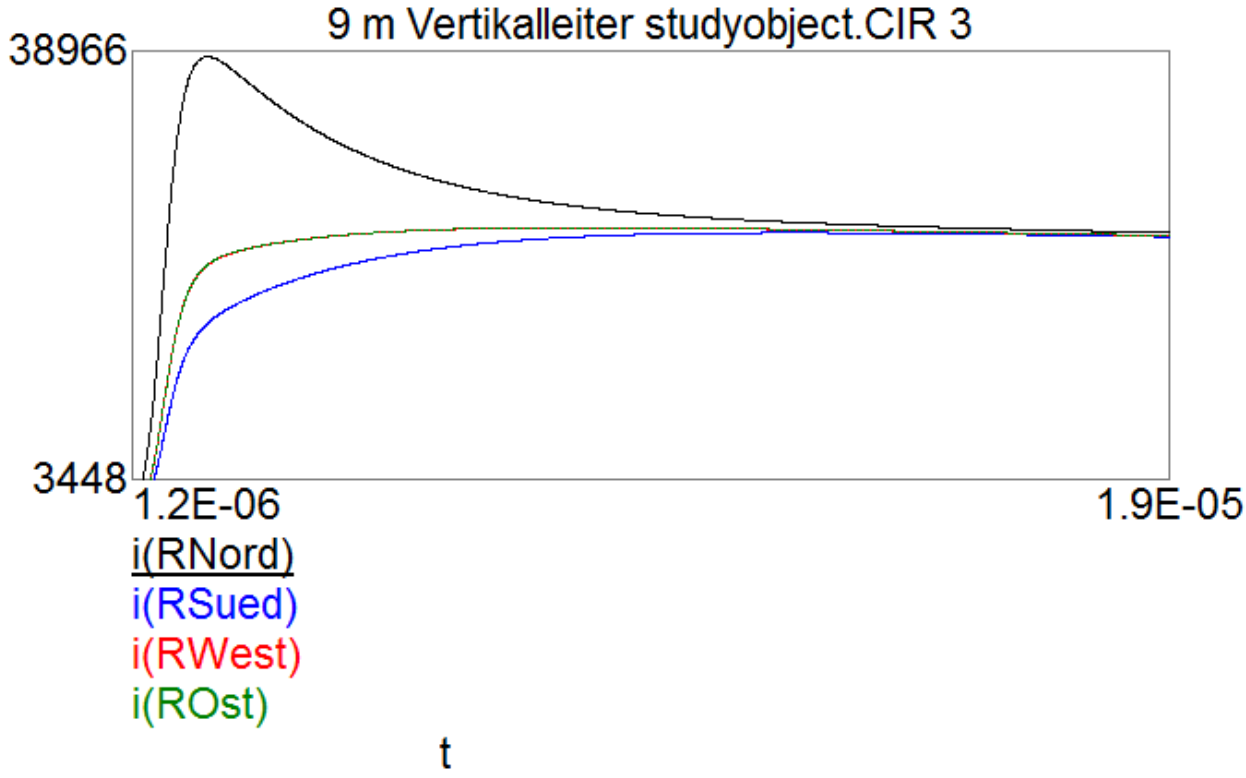


Bild 7-23 Stromverteilung **mit Erdsystem** für 1/200 Impuls und ρ_E=100 Ohmm

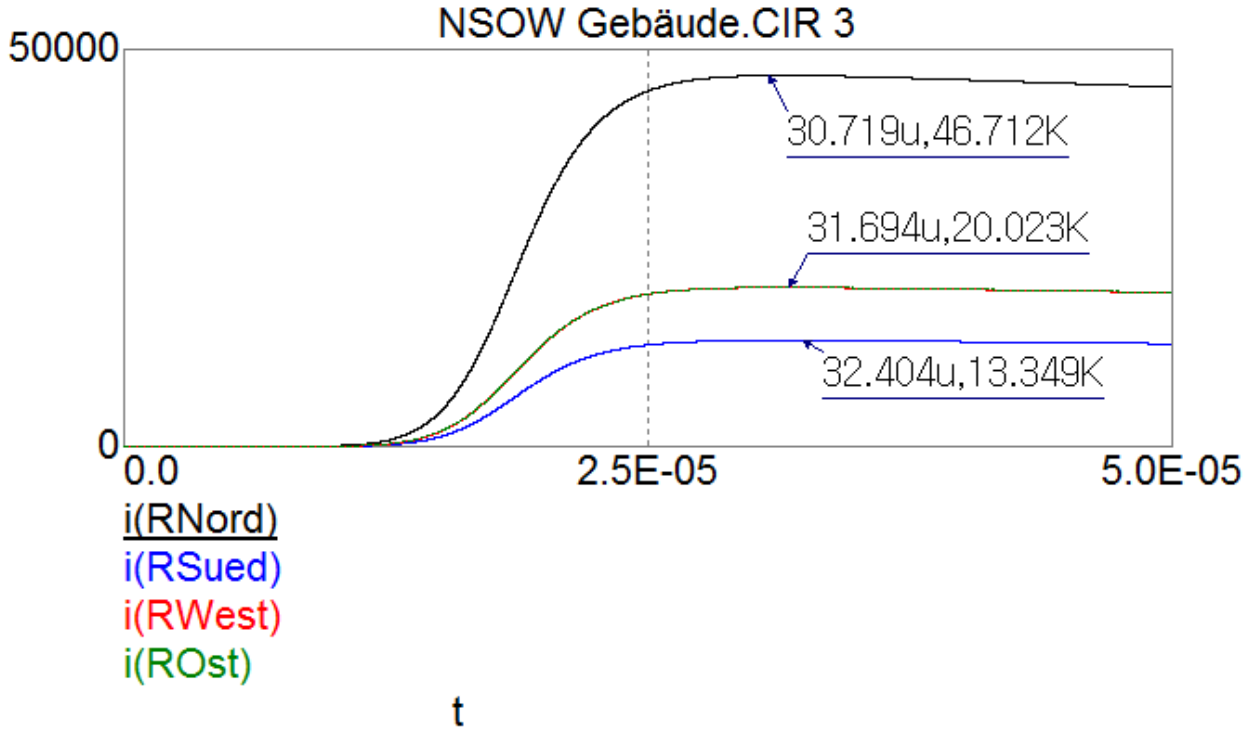


Bild 7-24 Stromverteilung **ohne Erdsystem** für 10/350 Impuls

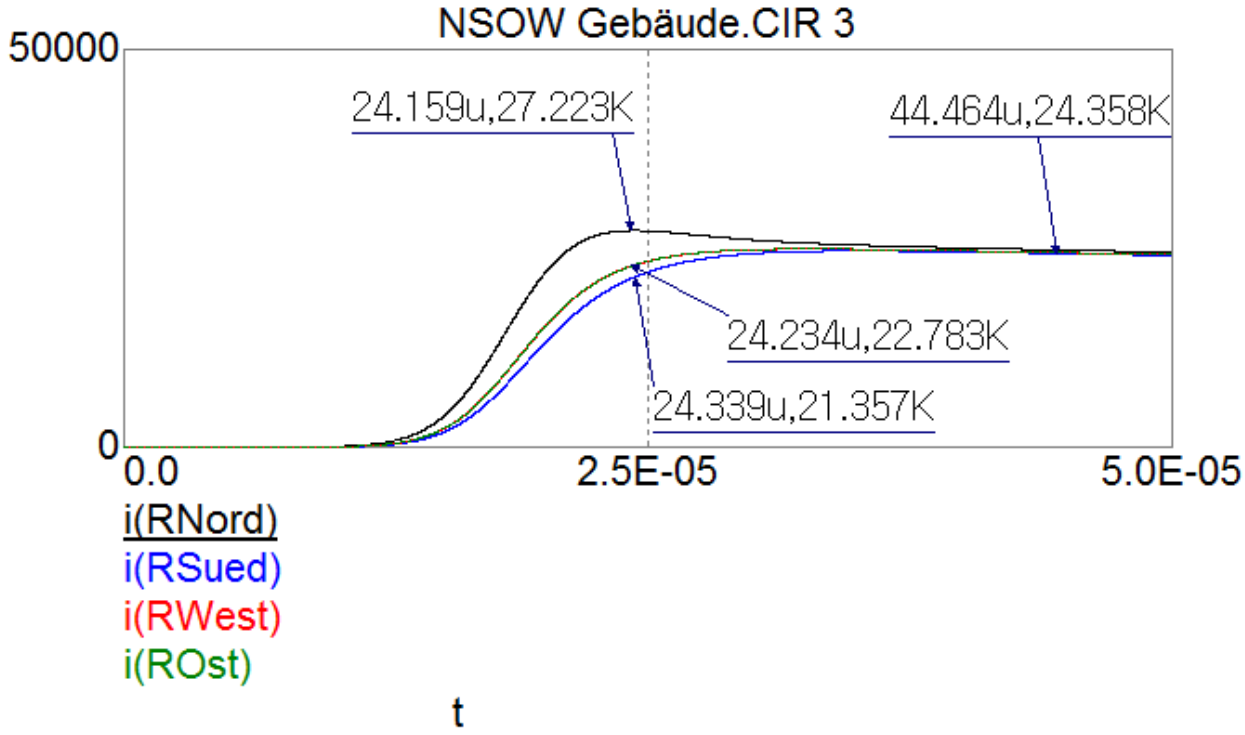


Bild 7-25 Stromverteilung **mit Erdsystem** für 10/350 Impuls und ρ_E=100 Ohmm

7.1.5 Vergleich der Ergebnisse

Stromaufteilung in der Simulation mit Erdsystem:
Die Stromaufteilung, die sich aus der Frequenzbereichssimulation nach Abschnitt 7.1.1 ergibt, stimmt gut mit der Zeitbereichssimulation aus Abschnitt 7.1.2 überein. Beim 1/200 – Impuls zeigt sich allerdings eine größere Streuung, abhängig vom spezifischen Erdwiderstand.

Für ein Gebäude mit 4 Ableitungen gibt IEC 62305-3 einen kc Wert (Dabei ist nach IEC kein Erdungssystem berücksichtigt) von 0,44 an. IEC 62305 gibt andererseits keine Werte für die Blitzteilströme in den anderen Ableitungen.
Für den negativen Folgestoßstrom 0,25/100 bzw. für 1 MHz passt der berechnete Wert zu dem IEC – Wert, siehe Bild 7-26
Für die anderen Impulsformen verschiebt sich die Stromaufteilung in Richtung kleinerer Teilströme, siehe Bild 7-27 und Bild 7-28.

Stromaufteilung ohne Erdsystem.
Im Frequenzbereich Bild 7-18 zeigt sich eine nahezu frequenzunabhängige Stromverteilung bis zu Frequenzen oberhalb 1 MHz. Erst danach zeigen sich ausgeprägte Resonanzen durch Wanderwellenschwingungnen. Dieser Effekt ist darin begründet, dass die Ableitungen nicht frequenzabhängig sind, sondern durch den Wellenwiderstand (konstant) und die Laufzeit (konstant) bestimmt sind.
Im Zeitbereich, für 0,25/100, zeigt die Simulation ohne Erdungssystem in dem Stromverlauf (siehe Bild 7-20) etwas stärker ausgeprägte überlagerte Schwingungen als im Fall mit Erdungssystem (siehe Bild 7-21). Ein Vergleich ist in Bild 7-29 gezeigt. Die Berechnung mit Erdsystem liefert für die Nordableitung einen kC-Wert von 0,45 und ohne Erdsystem von 0,48. Man liegt daher mit der Berücksichtigung des Erdsystems auf der sicheren Seite. Das die IEC Werte passen, liegt daran, dass die IEC Werte mit Ableitungen aus konzentrierten Elementen berechnet wurden, wobei keine Wanderwellenschwingungen auftreten.
Die Werte aus der Frequenzbereichsanalyse, Bild 7-18 liegen in Bild 7-29 gering unter denen aus der Zeitbereichsanalyse. Das ist durch die im Zeitbereich ausgeprägten überlagerten Schwingungen bedingt, siehe Bild 7-20. Für die anderen Impulsformen 1/200 und 10/350 zeigen sich größere Unterschiede für die Ableitung Nord. Für die spätere Berechnung der Schrittspannung mit GSA werden aber stets die Werte mit Erdungssystem verwendet.

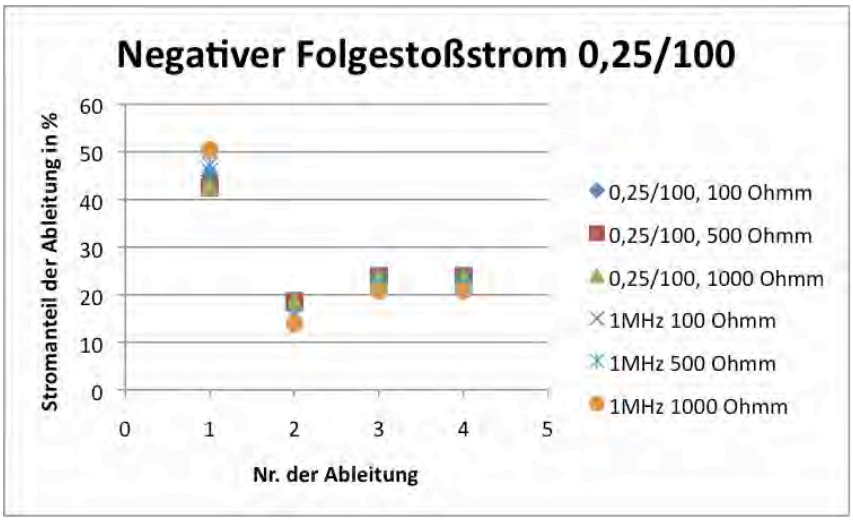


Bild 7-26 Stromaufteilung in einem Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Vertikalableitungen für Stoßstrom 0,25/100. Ausgewertet wurden die Peakwerte der Teilströme.

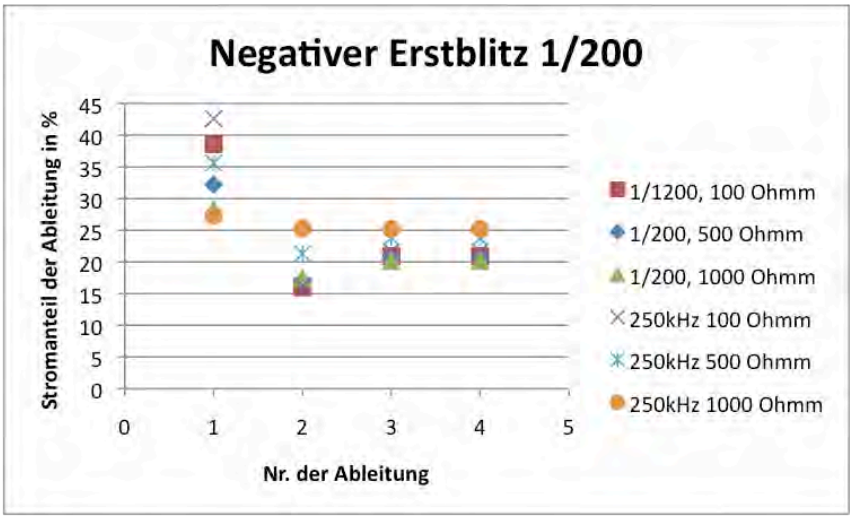


Bild 7-27 Stromaufteilung in einem Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Vertikalableitungen für Stoßstrom 0,25/100. Ausgewertet wurden die Peakwerte der Teilströme.

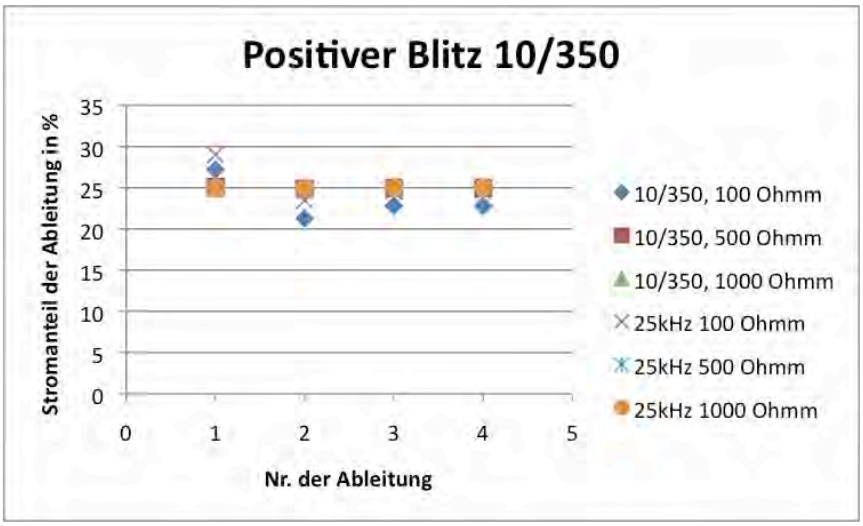


Bild 7-28 Stromaufteilung in einem Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Vertikalableitungen für Stoßstrom 0,25/100. Ausgewertet wurden die Peakwerte der Teilströme.

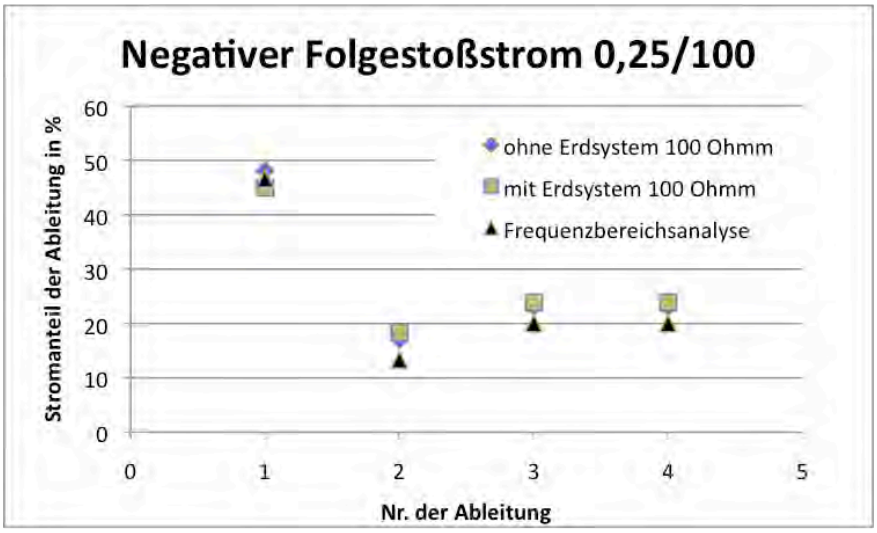


Bild 7-29 Vergleich der Stromaufteilung **ohne und mit Erdungssystem** in einem Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Vertikalableitungen für Stoßstrom 0,25/100 und ρ_E=100 Ohmm. Ausgewertet wurden die Peakwerte der Teilströme. Zum Vergleich sind die Werte aus der Frequenzbereichsanalyse dargestellt.

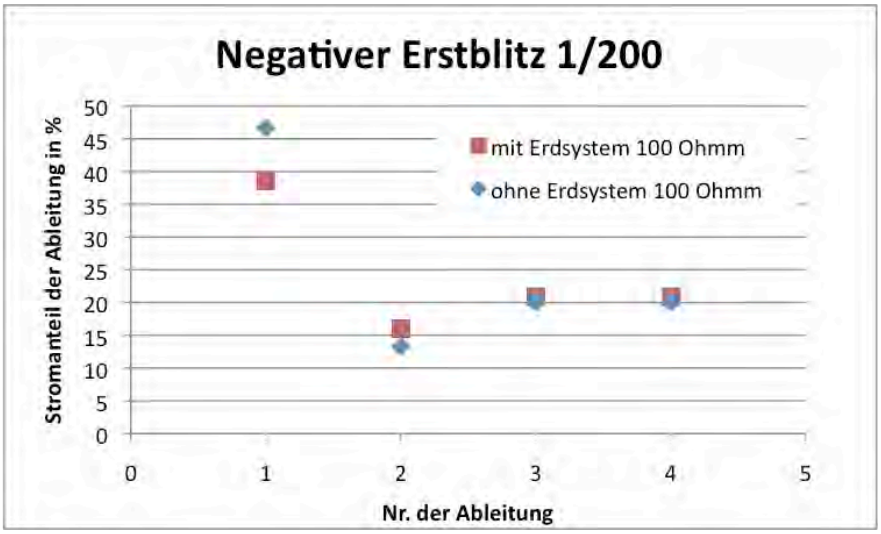


Bild 7-30 Vergleich der Stromaufteilung **ohne und mit Erdungssystem** in einem Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Vertikalableitungen für Stoßstrom 1/200 und ρ_E=100 Ohmm. Ausgewertet wurden die Peakwerte der Teilströme.

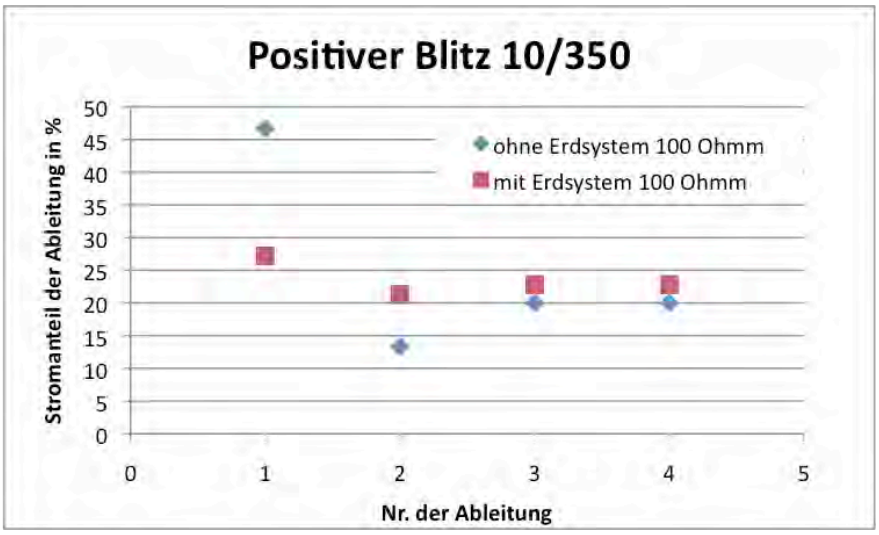


Bild 7-31 Vergleich der Stromaufteilung **ohne und mit Erdungssystem** in einem Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Vertikalableitungen für Stoßstrom 10/350 und ρ_E=100 Ohmm. Ausgewertet wurden die Peakwerte der Teilströme.

7.2 Einfluss einer Netzversorgungsleitung nach Ansprechen der Class I Ableiter: Gebäude mit 4 Ableitungen und 4 Tiefenerdern

Die in Bild 7-32 gezeigte Anordnung wird im Frequenz- und Zeitbereich untersucht. Der Einfluss der Netzkabel auf die Stromaufteilung soll gezeigt werden. Weiterhin soll der in das Netzkabel abfließende Strom bestimmt werden. In allen Fällen wird ein Strom mit einem Scheitelwert von 100 kA eingespeist. Von Interesse sind die Ströme in den Ableitungen und im Netzkabel sowie die Stromaufteilung auf die Ableitung Nord, das Netzkabel und den Erder Nord.

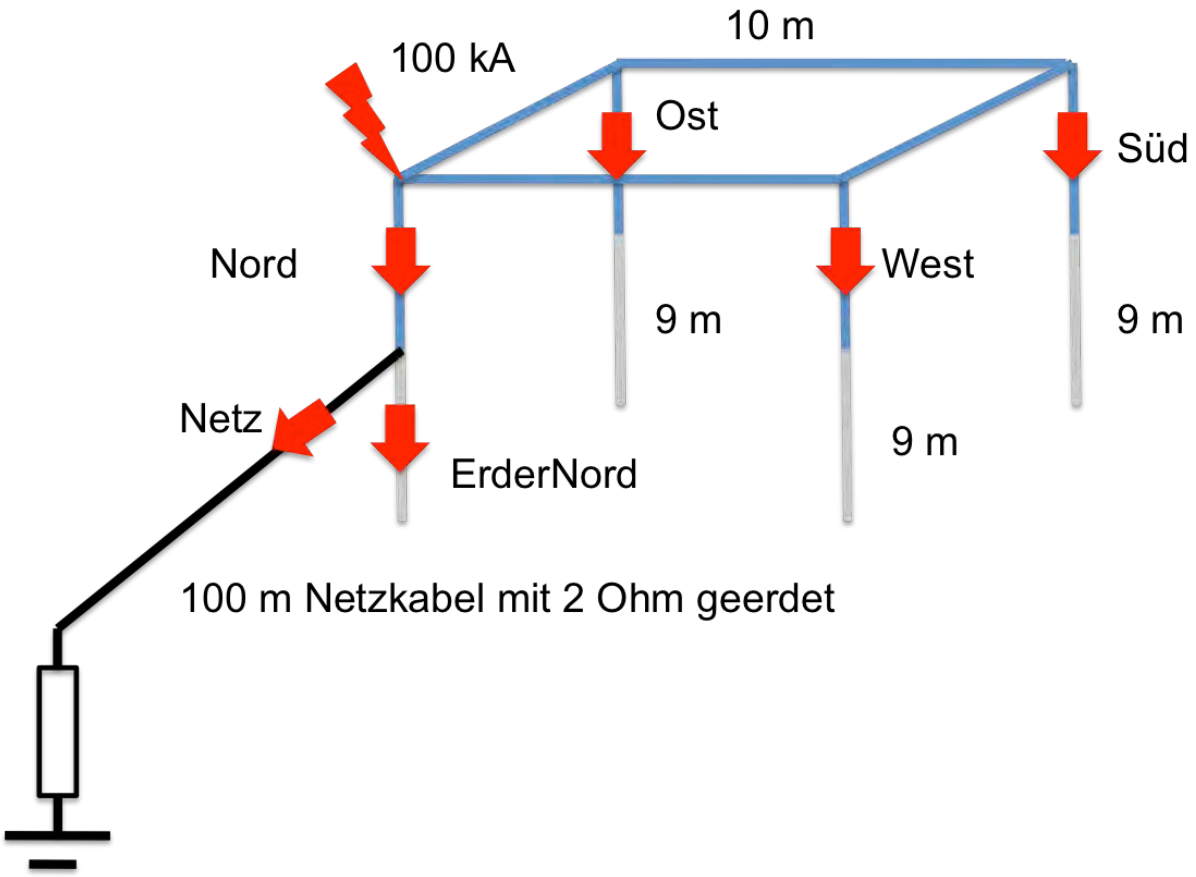


Bild 7-32 Anordnung des Gebäudes mit Ableitungen und einer angeschlossenen Netzversorgungsleitung von 100 m Länge mit den Parametern nach Abschnitt 10.1. Das Kabel ist am Ende mit einem konzentrierten Widerstand von 2 Ohm geerdet.

7.2.1 Frequenzbereichsanalyse

7.2.1.1 Frequenzbereichsanalyse der Ableitungsströme

Bedingt durch die am Ende mit 2 Ohm abgeschlossene Netzkabel mit Z=65 Ohm Wellenimpedanz zeigen sich deutliche Wanderwellenschwingungen auf der Leitung und die Stromaufteilung für die charakteristischen Frequenzen von 25, 250 und 1000 kHz ändert sich geringfügig gegenüber dem Fall ohne Netzkabel. Eine Auswertung im Frequenzbereich erscheint oberhalb 25 kHz wegen der Resonanzüberhöhung nicht sinnvoll.

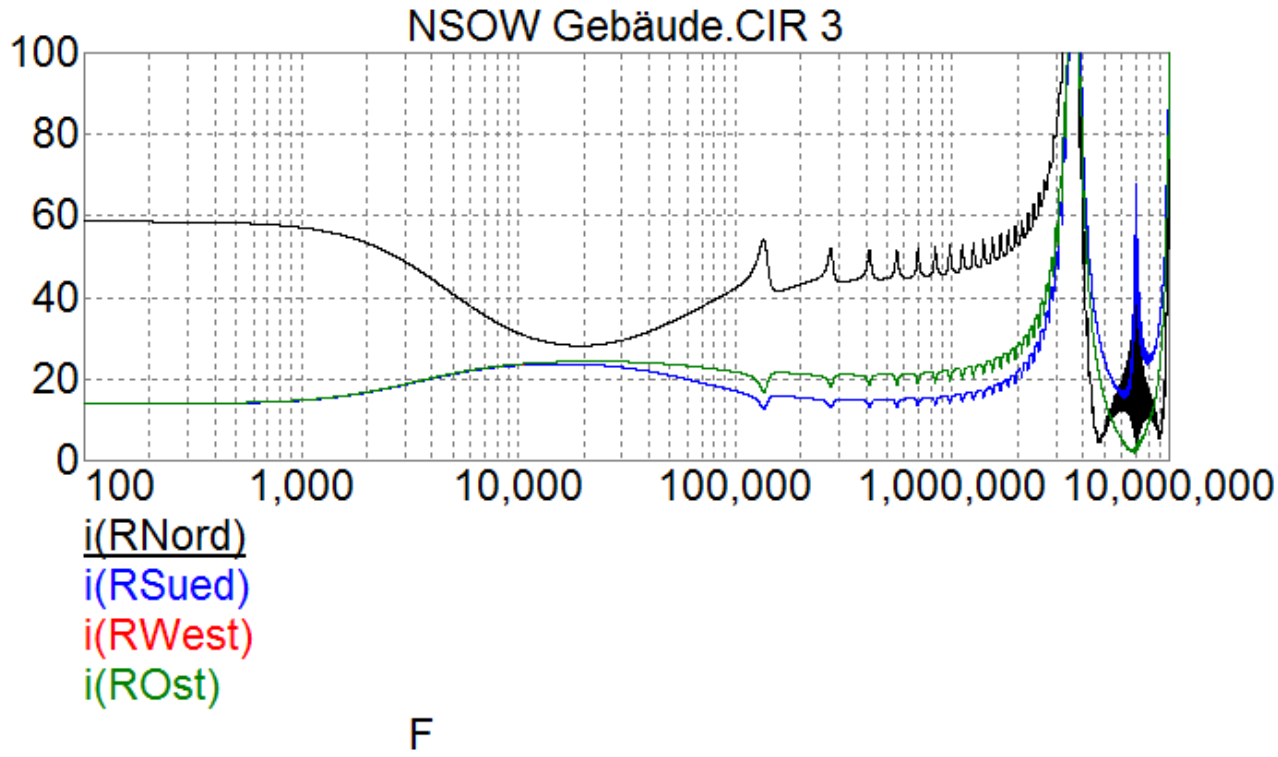


Bild 7-33 Frequenzbereichsanalyse für ρ_E=100 Ohmm.

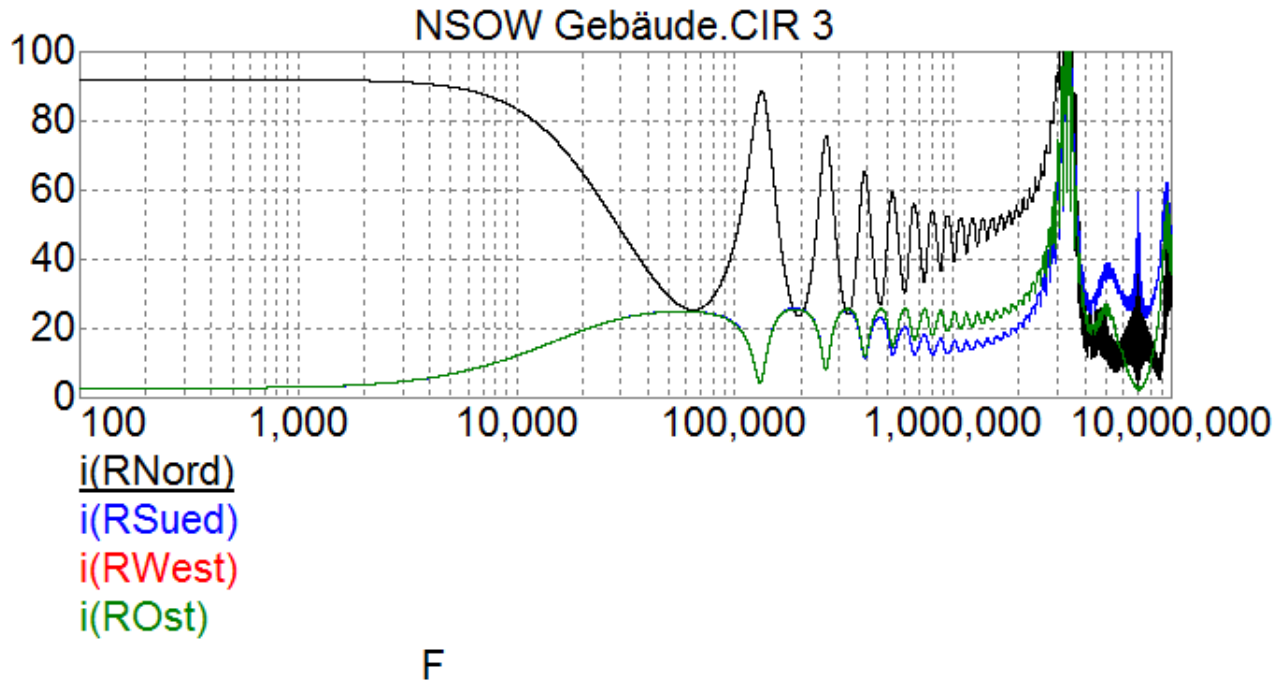


Bild 7-34 Frequenzbereichsanalyse für ρ_E=1000 Ohmm.

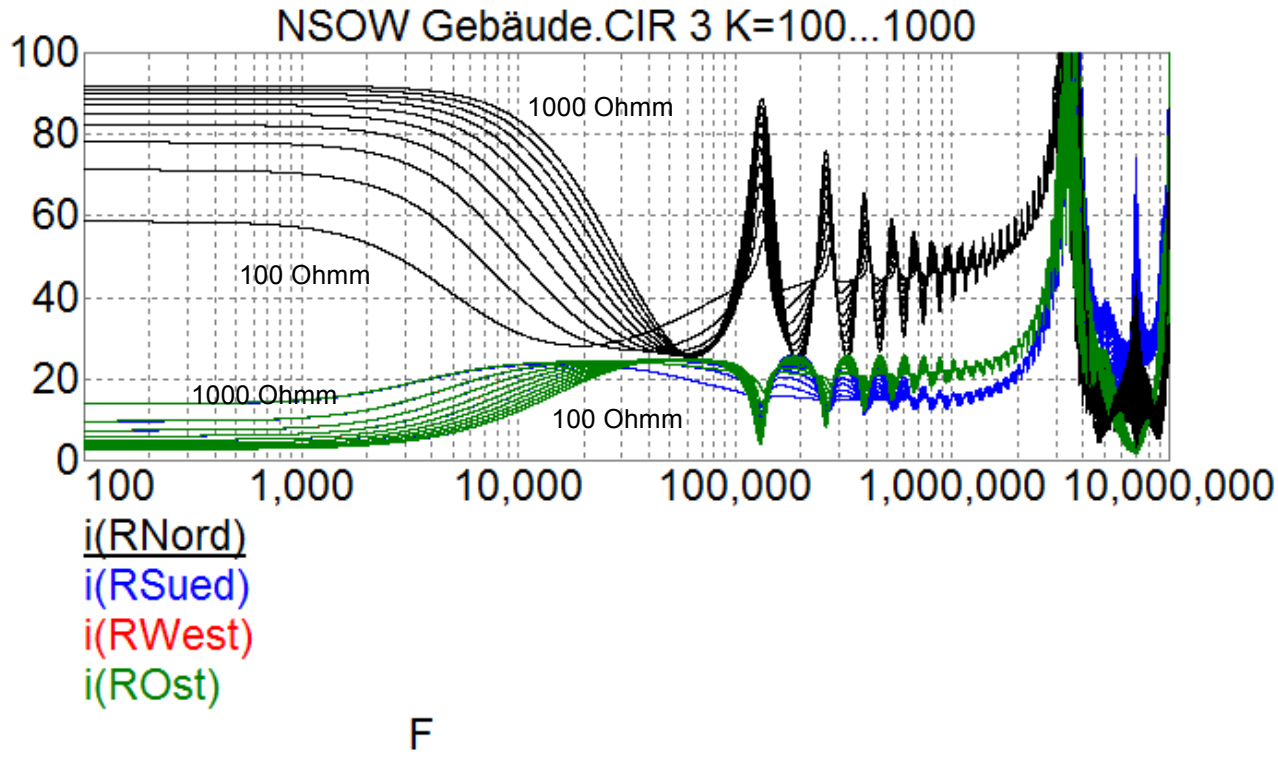


Bild 7-35 Frequenzbereichsanalyse mit Stepping für ρ_E=100 Ohmm bis 1000 Ohmm.

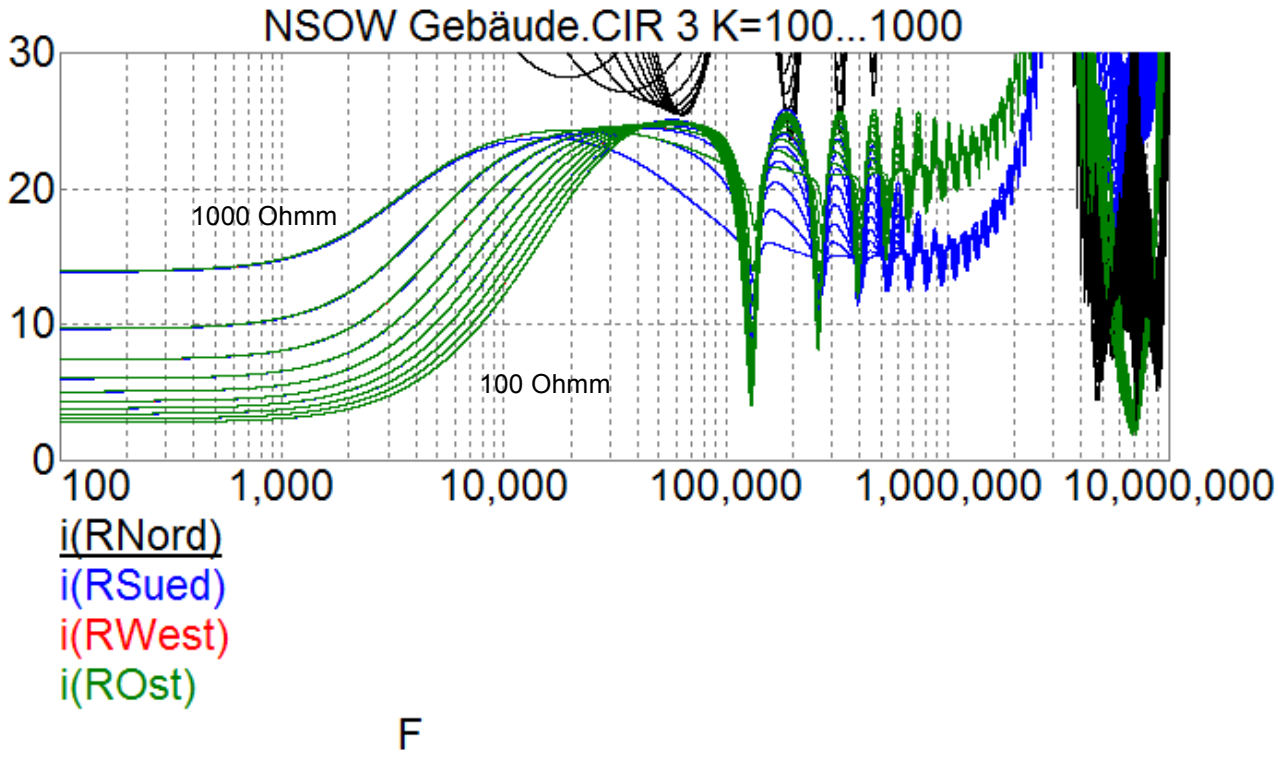


Bild 7-36 Frequenzbereichsanalyse mit Stepping für ρ_E=100 Ohmm bis 1000 Ohmm. Höhere Auflösung für West und Ost Ableitung.

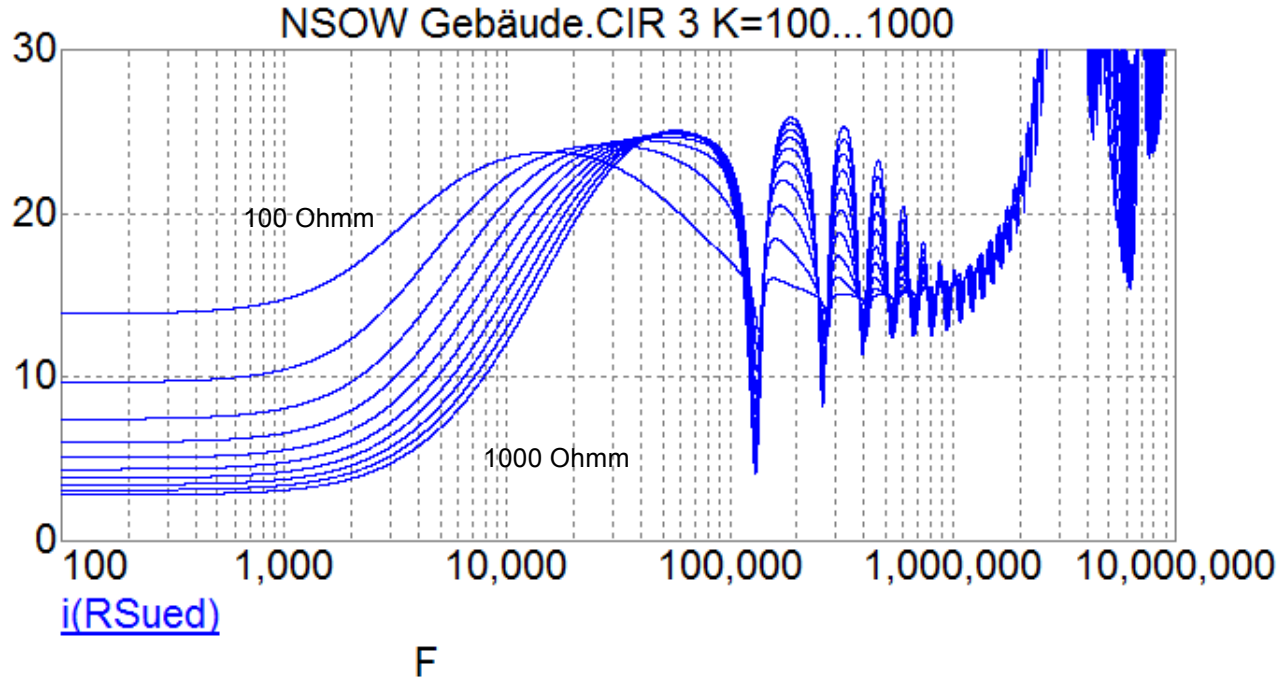


Bild 7-37 Frequenzbereichsanalyse mit Stepping für ρ_E=100 Ohmm bis 1000 Ohmm. Höhere Auflösun für Süd-Ableitung.

7.2.1.2 *Frequnzbereichsanalyse des Ableitungsstroms Nord, Netzkabel und Erder Nord*

Auffällig ist bei 1000 Ohmm dass der Strom in der Nordableitung im unteren Frequenzbereich deutlich größer wird, siehe Bild 7-39. Das hat seinen Grund in dem als konstant angenommenen Erdungswiderstand von 2 Ohm am Ende der Netzkabel (Trafostation). Diese Annahme ist berechtigt, denn unabhängig von den lokalen Gegebenheiten wird der Energieversorger den Sternpunkt des Transformators mit < 2 Ohm erden.

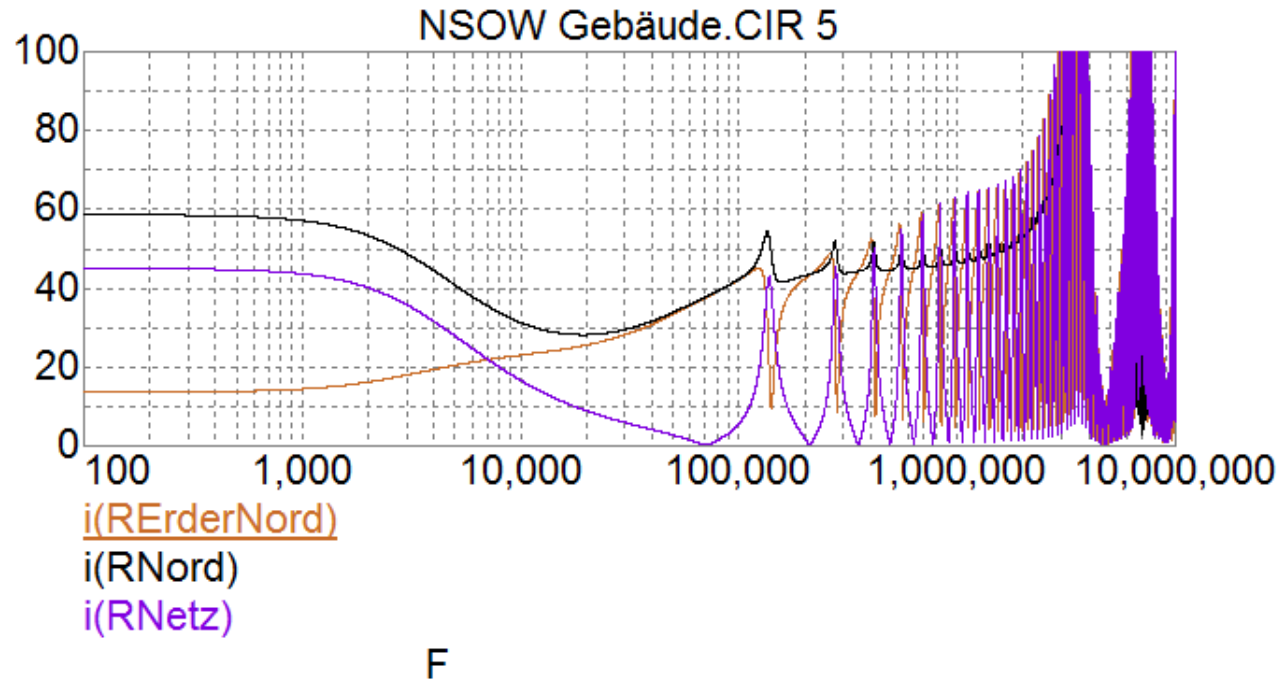


Bild 7-38 Frequenzbereichsanalyse für ρ_E=100 Ohmm .

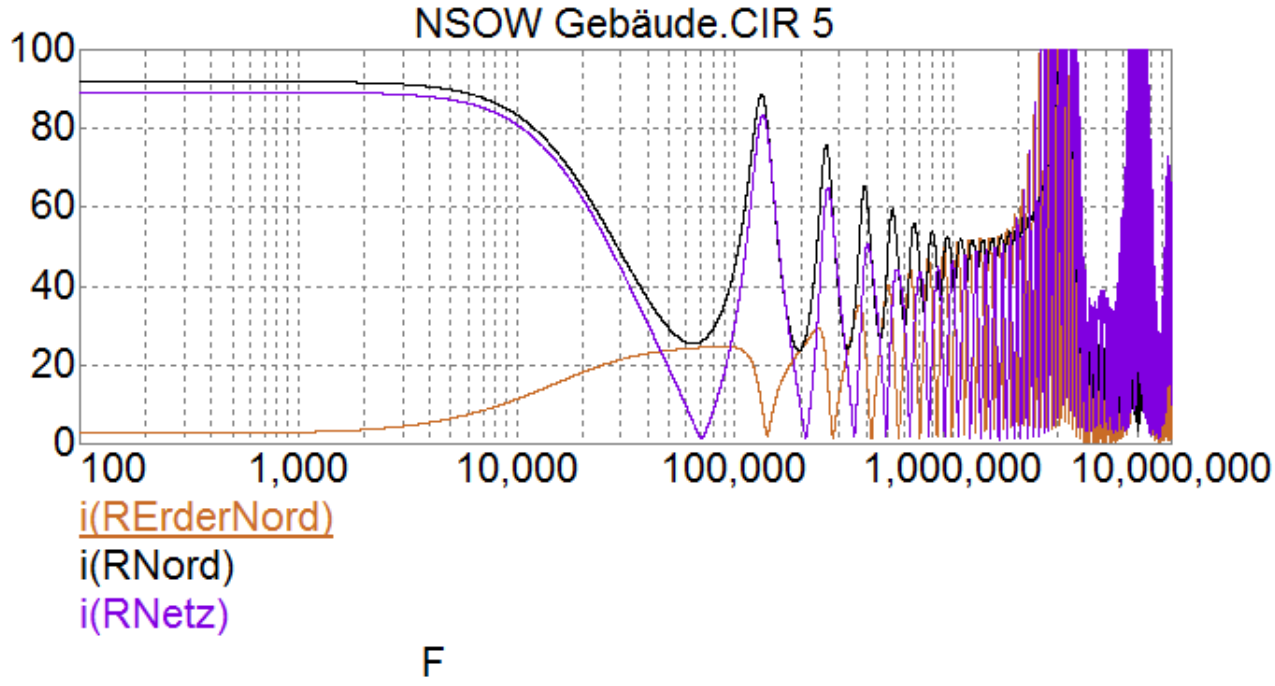


Bild 7-39 Frequenzbereichsanalyse für ρ_E=1000 Ohmm .

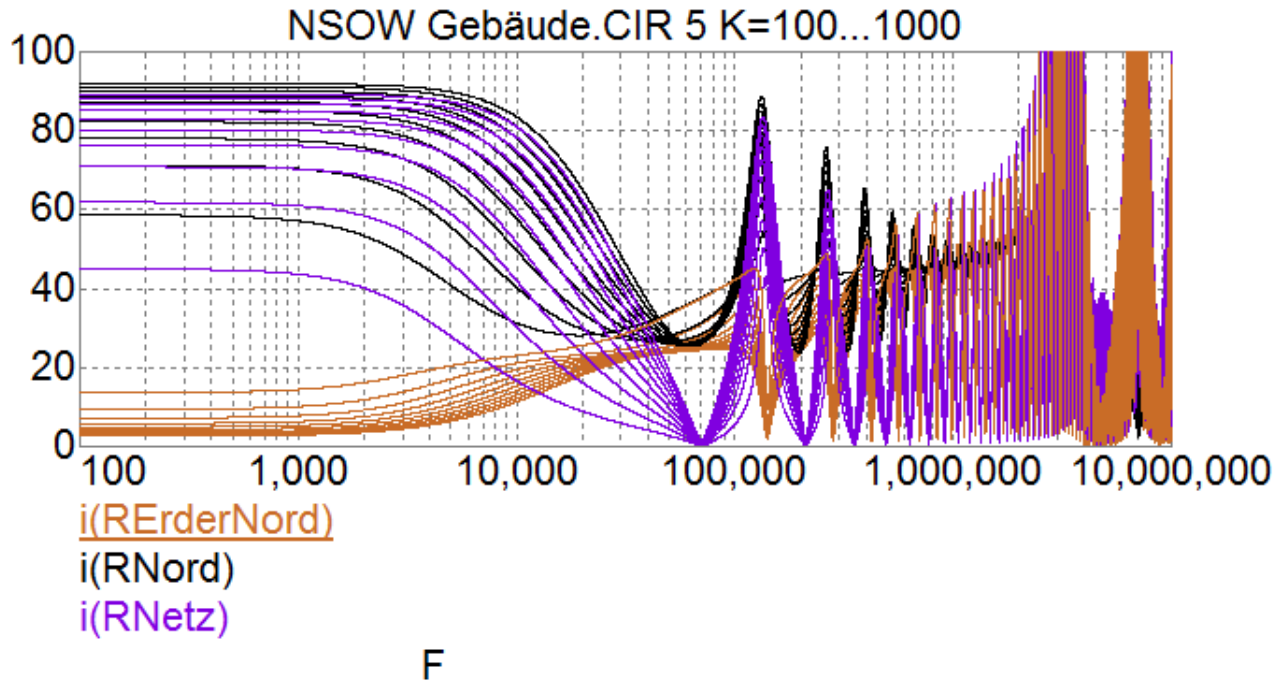


Bild 7-40 Frequenzbereichsanalyse für ρ_E=100.....1000 Ohmm .

7.2.2 Zeitbereichsanalyse

7.2.2.1 Zeitbereichsanalyse der Ableitungsströme

7.2.2.1.1 0,25/100

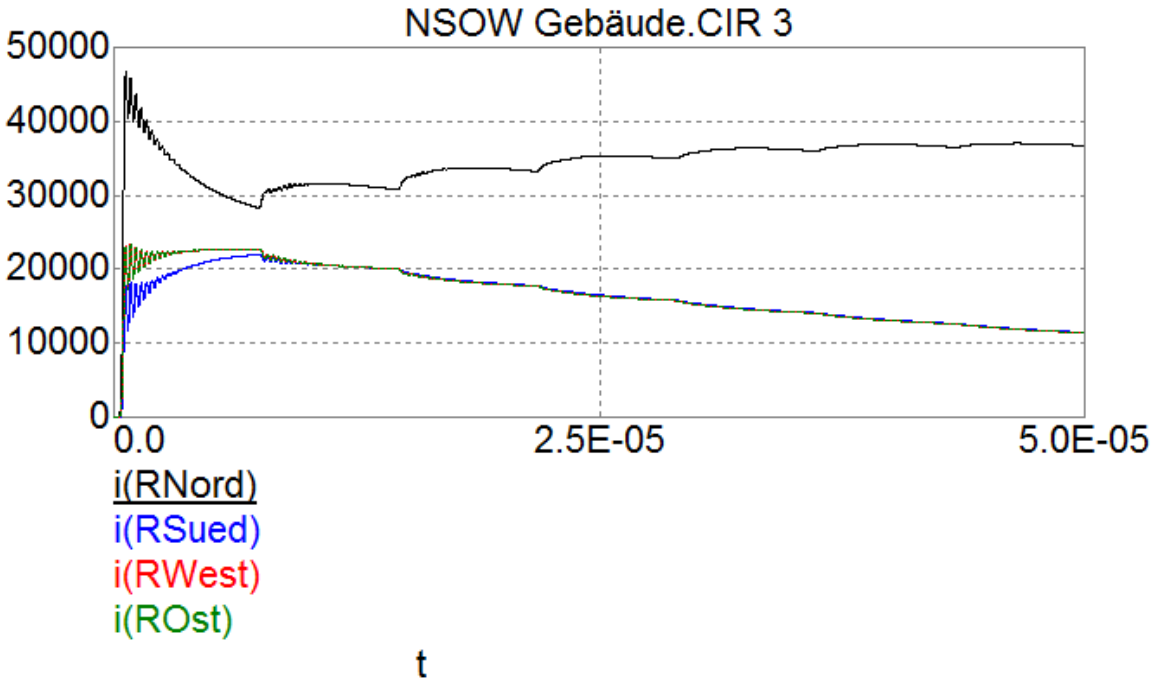


Bild 7-41 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=100 Ohmm und 0,25/100 Impuls für 50 µs.

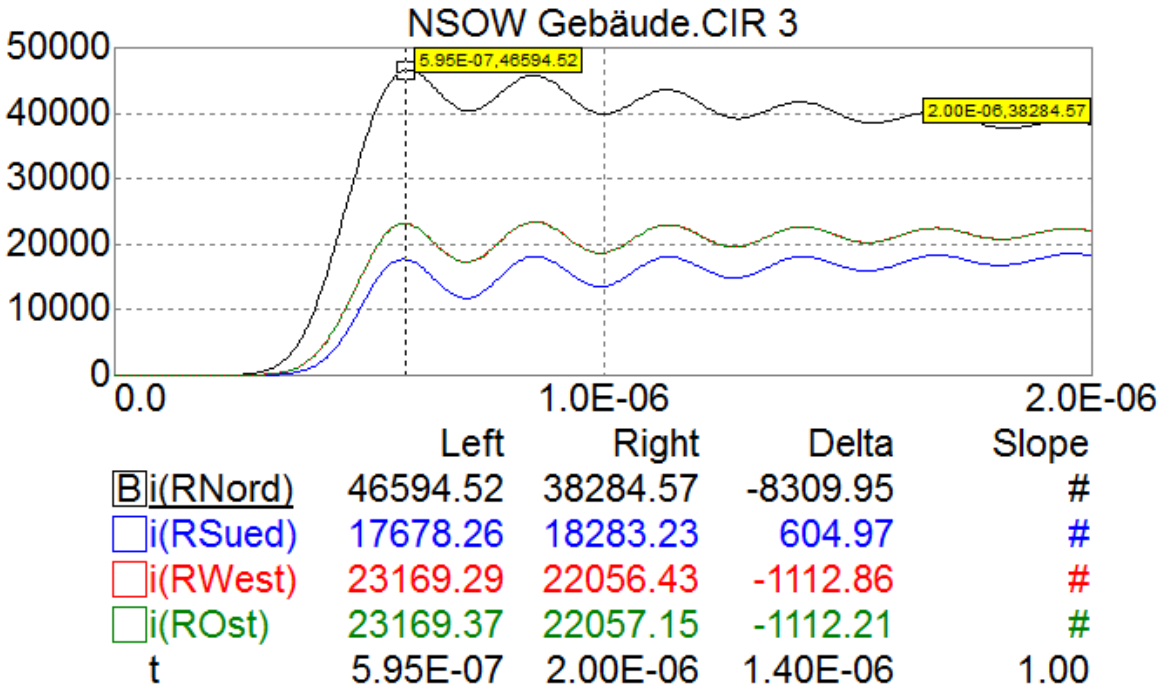


Bild 7-42 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=100 Ohmm und 0,25/100 Impuls. Höhere Zeitauflösung von Bild 7-41.

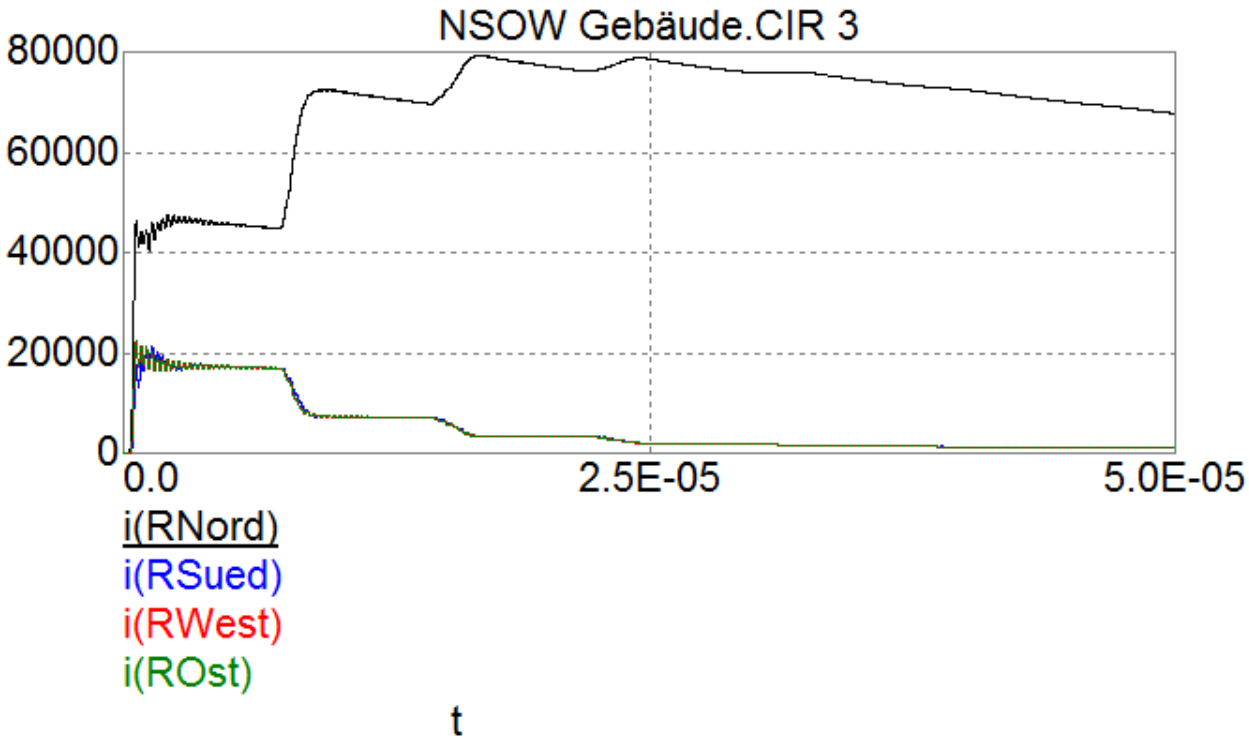


Bild 7-43 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=1000 Ohmm und 0,25/100 Impuls für den Zeitbereich bis 50 µs.

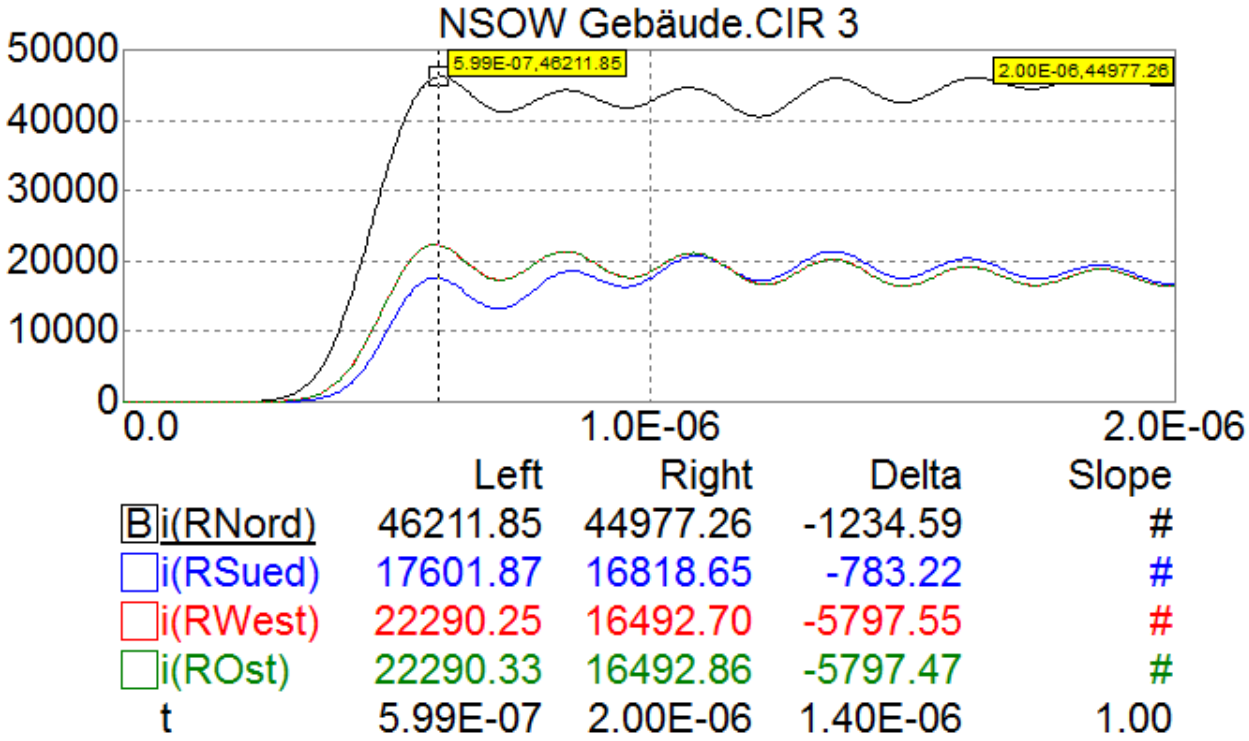


Bild 7-44 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=1000 Ohmm und 0,25/100 Impuls. Höhere Zeitauflösung von Bild 7-43.

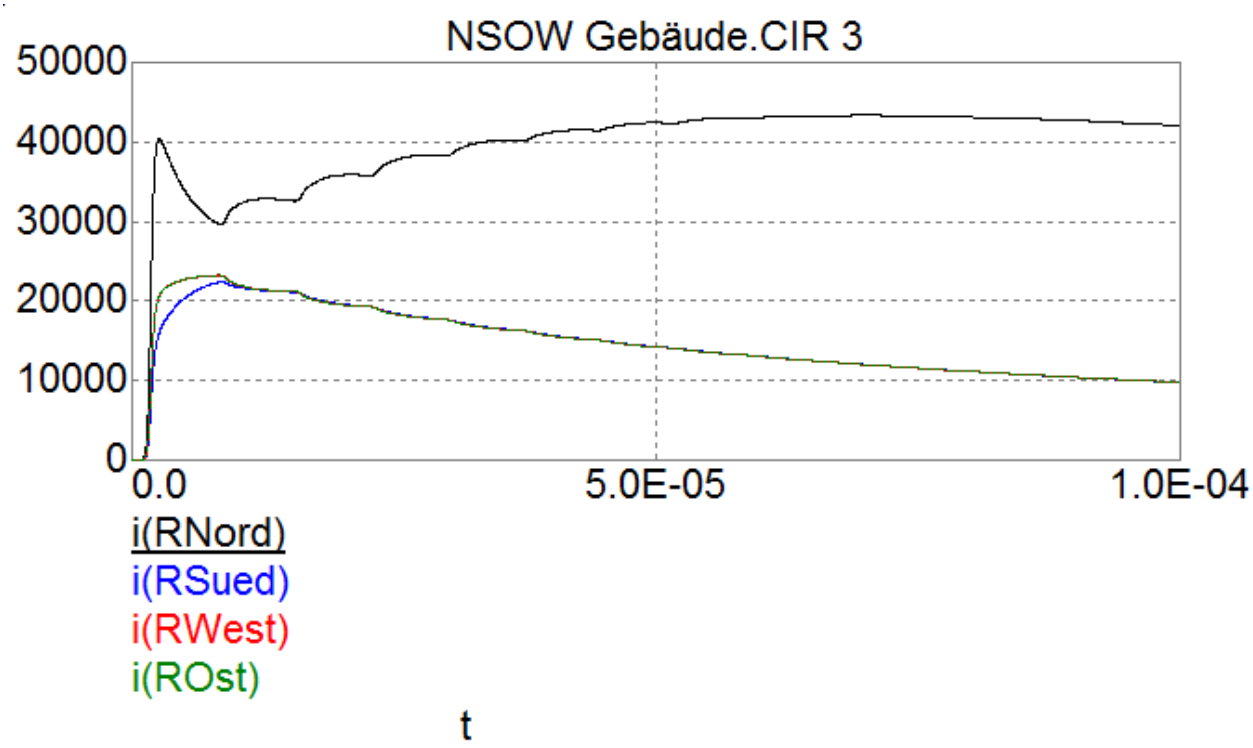


Bild 7-45 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=100 Ohmm und 1/200 Impuls.

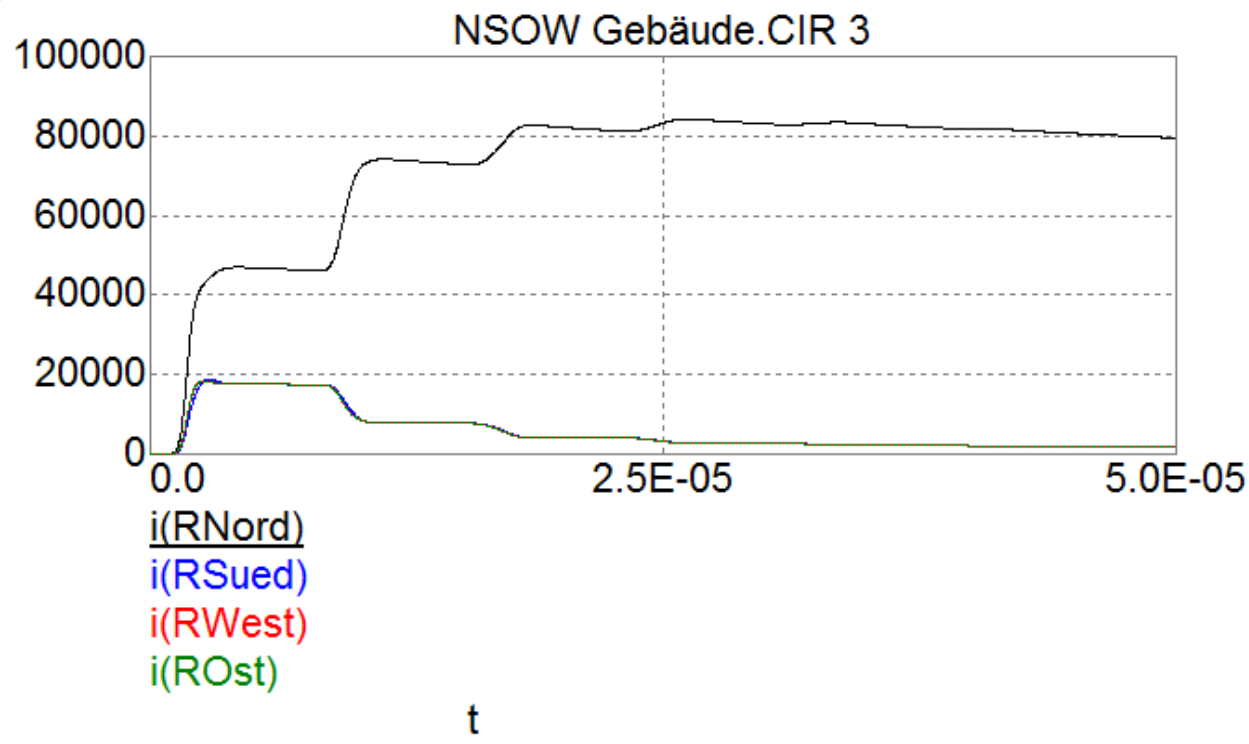


Bild 7-46 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=1000 Ohmm und 1/200 Impuls.

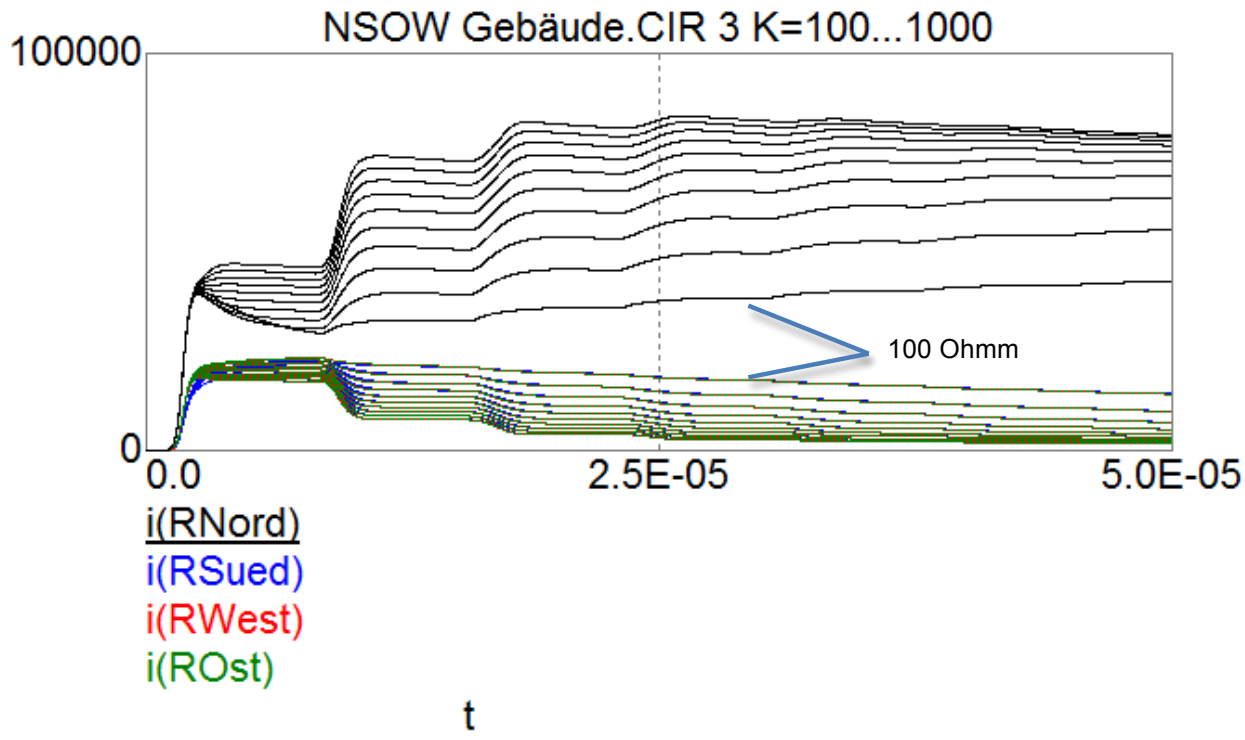


Bild 7-47 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=100------1000 Ohmm und 1/200 Impuls.

7.2.2.1.3 10/350

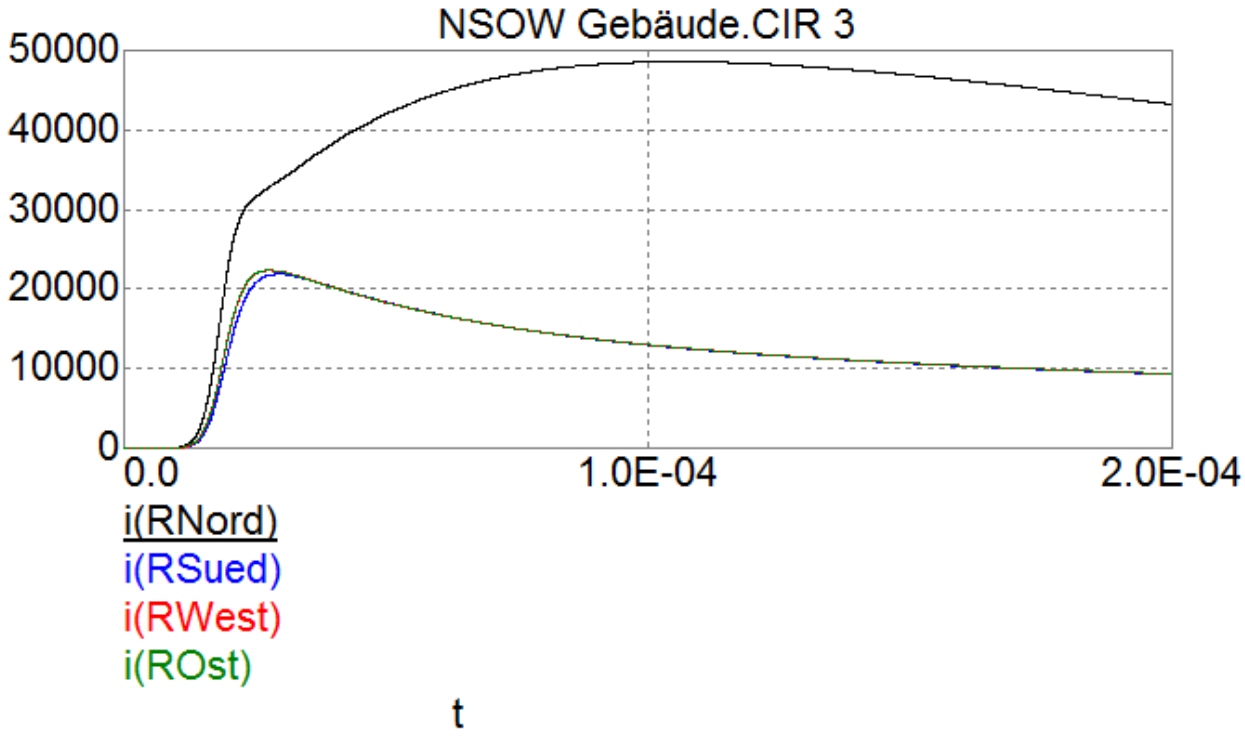


Bild 7-48 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=100 Ohmm und 10/350 Impuls.

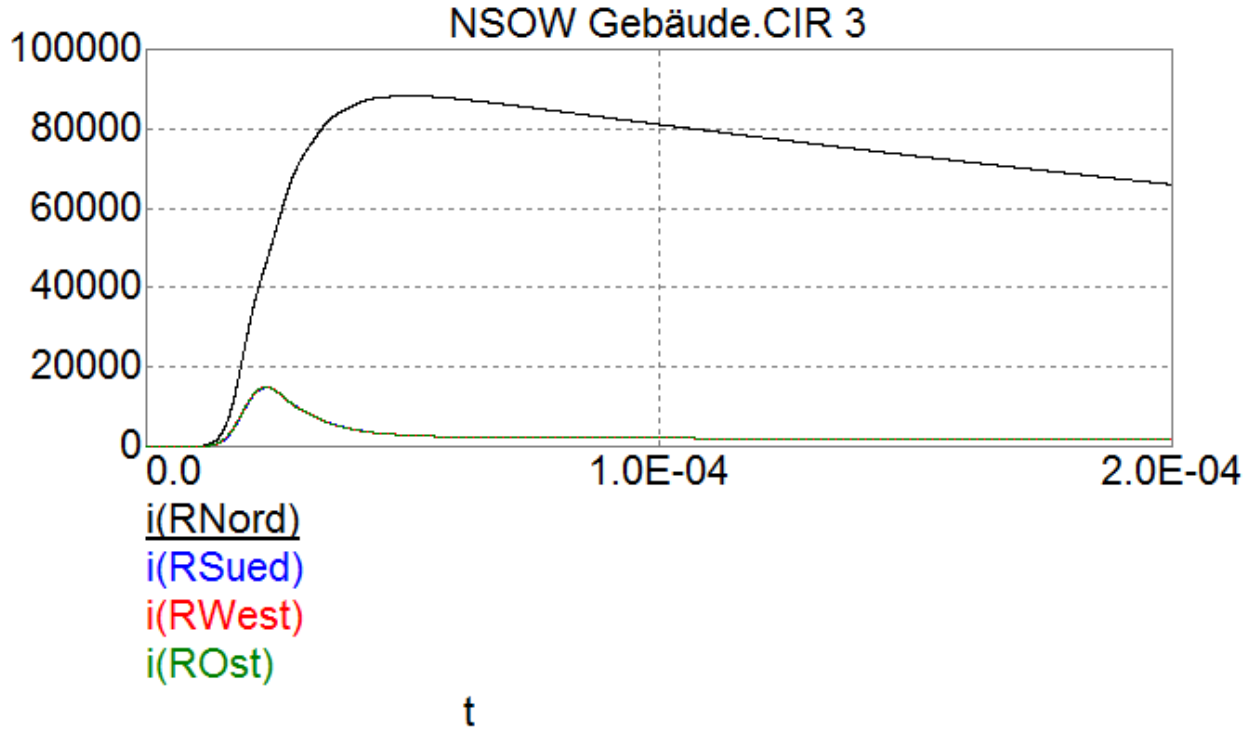


Bild 7-49 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=1000 Ohmm und 10/350 Impuls.

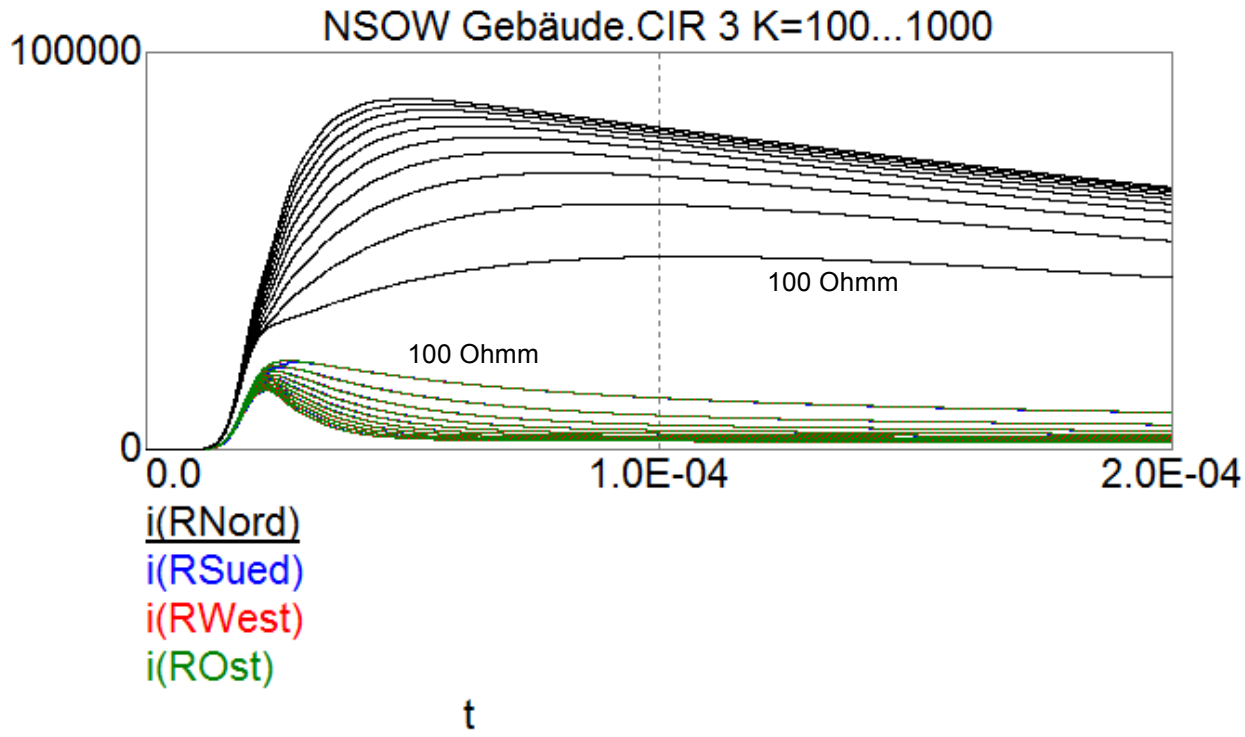


Bild 7-50 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in den Ableitungen für für ρ_E=100 -----1000 Ohmm und 10/350 Impuls.

7.2.2.2 Zeitbereichsanalyse des Ableitungsstromes Nord, Netzkabel und Vertikalerder Nord

7.2.2.2.1 0,25/100

Die Simulation zeigt deutliche Wanderwelleneffekte im Netzkabel, der Ableitung und dem Erder. Der Strom im Netzkabel hängt deutlich vom spezifischen Erdwiderstand ab. Für ρ_E=100 Ohmm fliesst weniger Strom im Netzkabel als für ρ_E=1000 Ohmm. Der Erder Nord führt hingegen bei einem Wert von ρ_E=1000 Ohmm weniger Strom als bei ρ_E=100 Ohmm, siehe Bild 7-55. Im Hinblick auf die Schrittspannungsberechnung mit GSALab1MHz ist der Worst case ein Gebäude ohne Netzkabel. Mit dem Modell lässt sich aber im Einzelfall jede Konfiguration berechnen. Der Strom im einzelnen Erder ist damit für die Berechnung in GSALab1MHz bekannt.
Weiterhin zeigt sich, dass nach einigen Reflexionen der Wanderwellen, also im Bereich einiger µs die Stromverteilung sich der für niedrige Frequenzen annähert. Der Strom über das Netzkabel wird dann größer als der Strom im Erder.

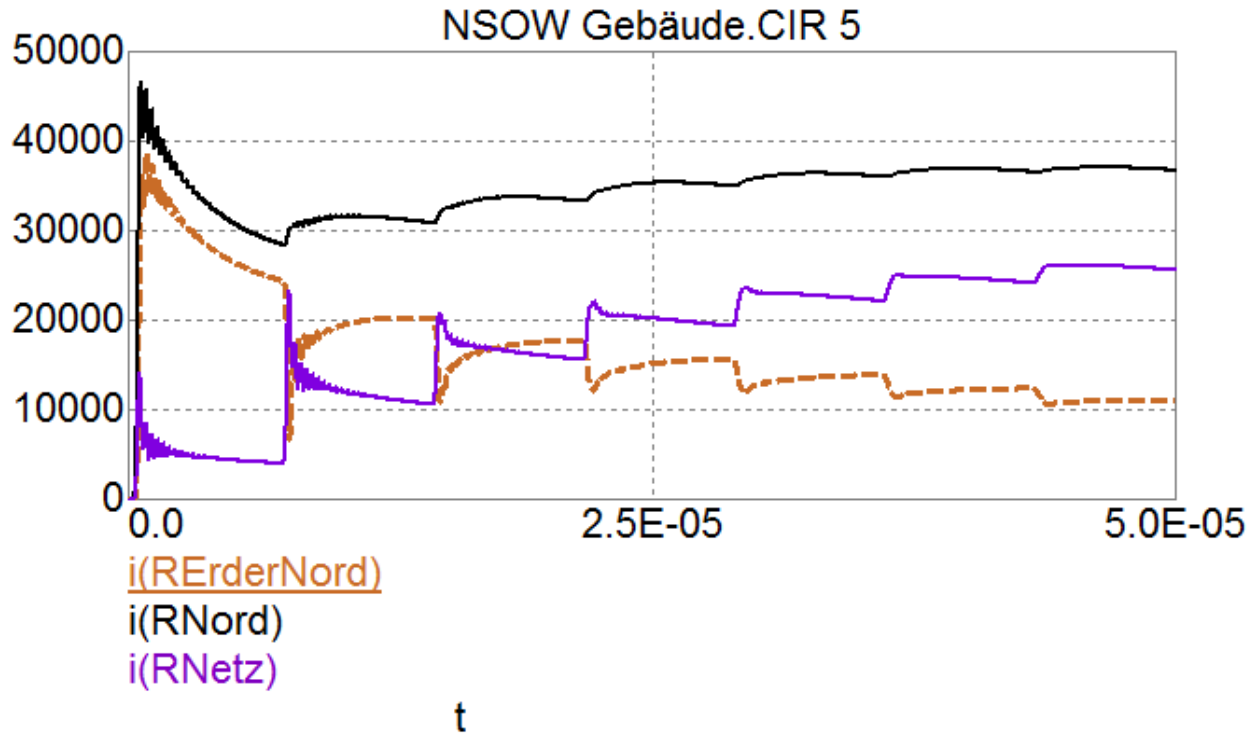


Bild 7-51 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=100 Ohmm und 0,25/100 Impuls.

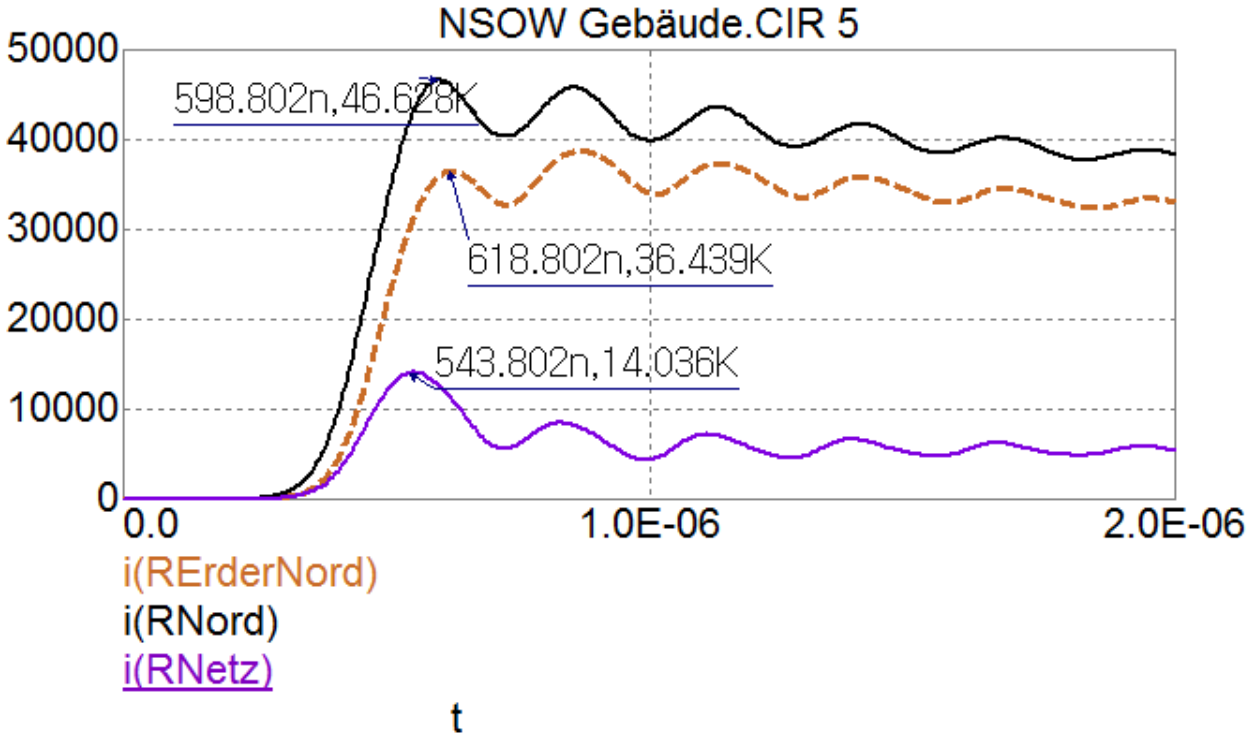


Bild 7-52 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=100 Ohmm und 0,25/100 Impuls. Höhere Zeitauflösung aus Bild 7-51.

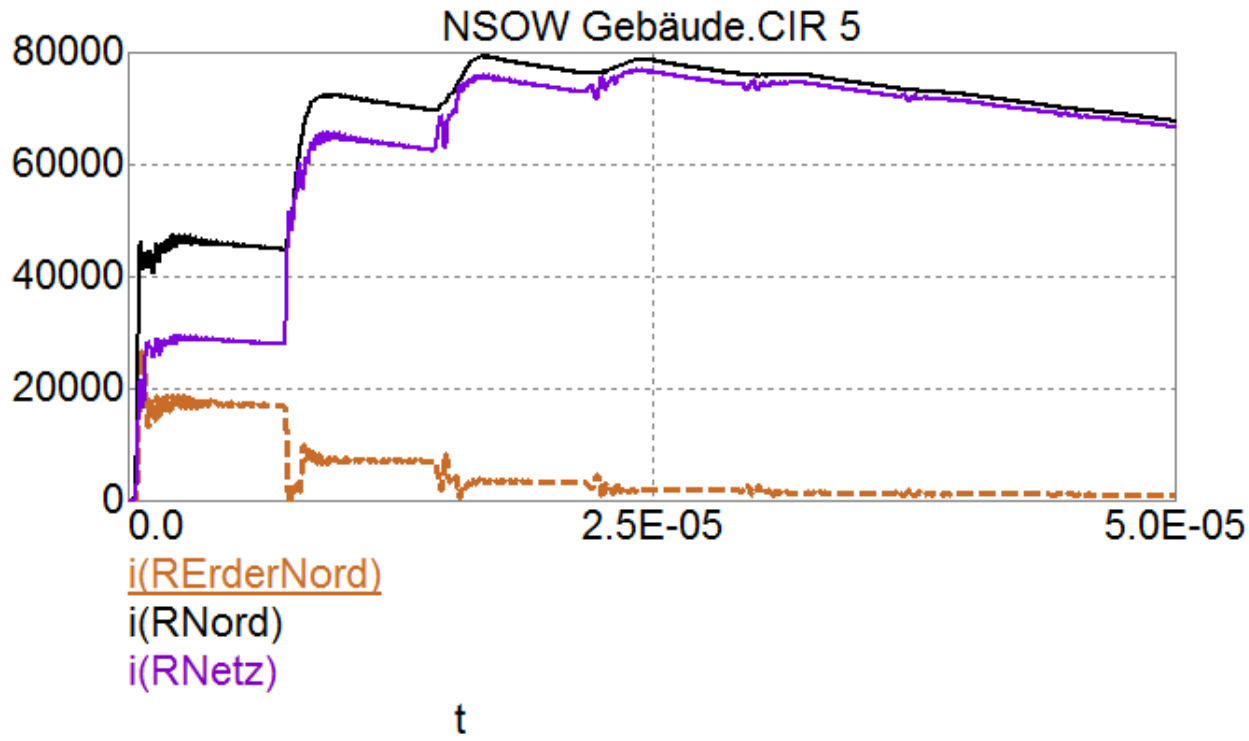


Bild 7-53 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=1000 Ohmm und 0,25/100 Impuls.

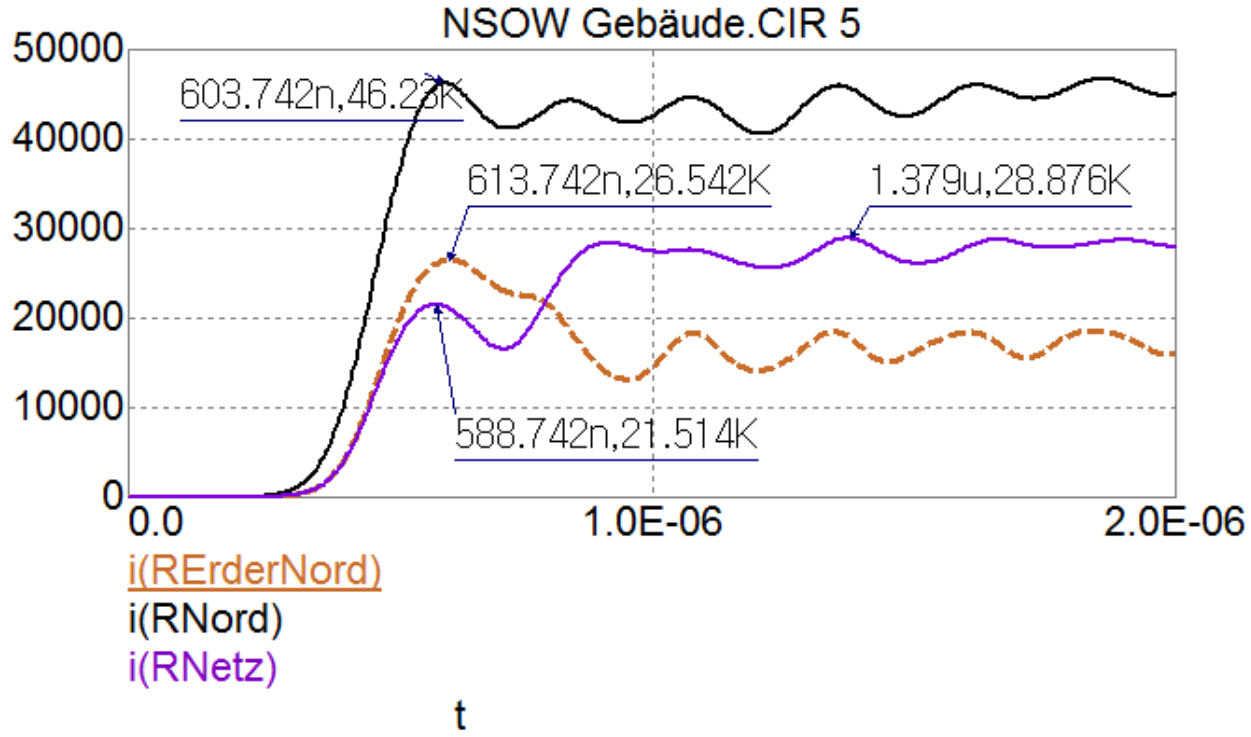


Bild 7-54 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=1000 Ohmm und 0,25/100 Impuls.

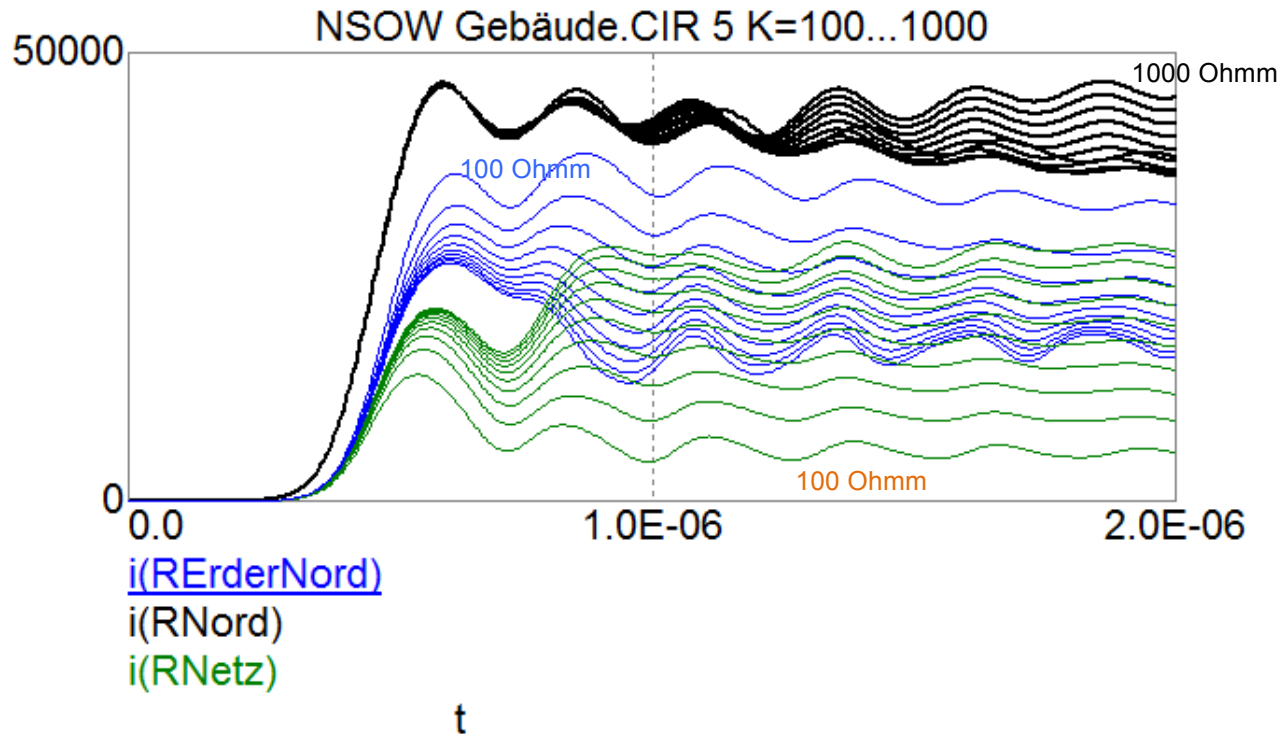


Bild 7-55 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=100------ 1000 Ohmm und 0,25/100 Impuls.

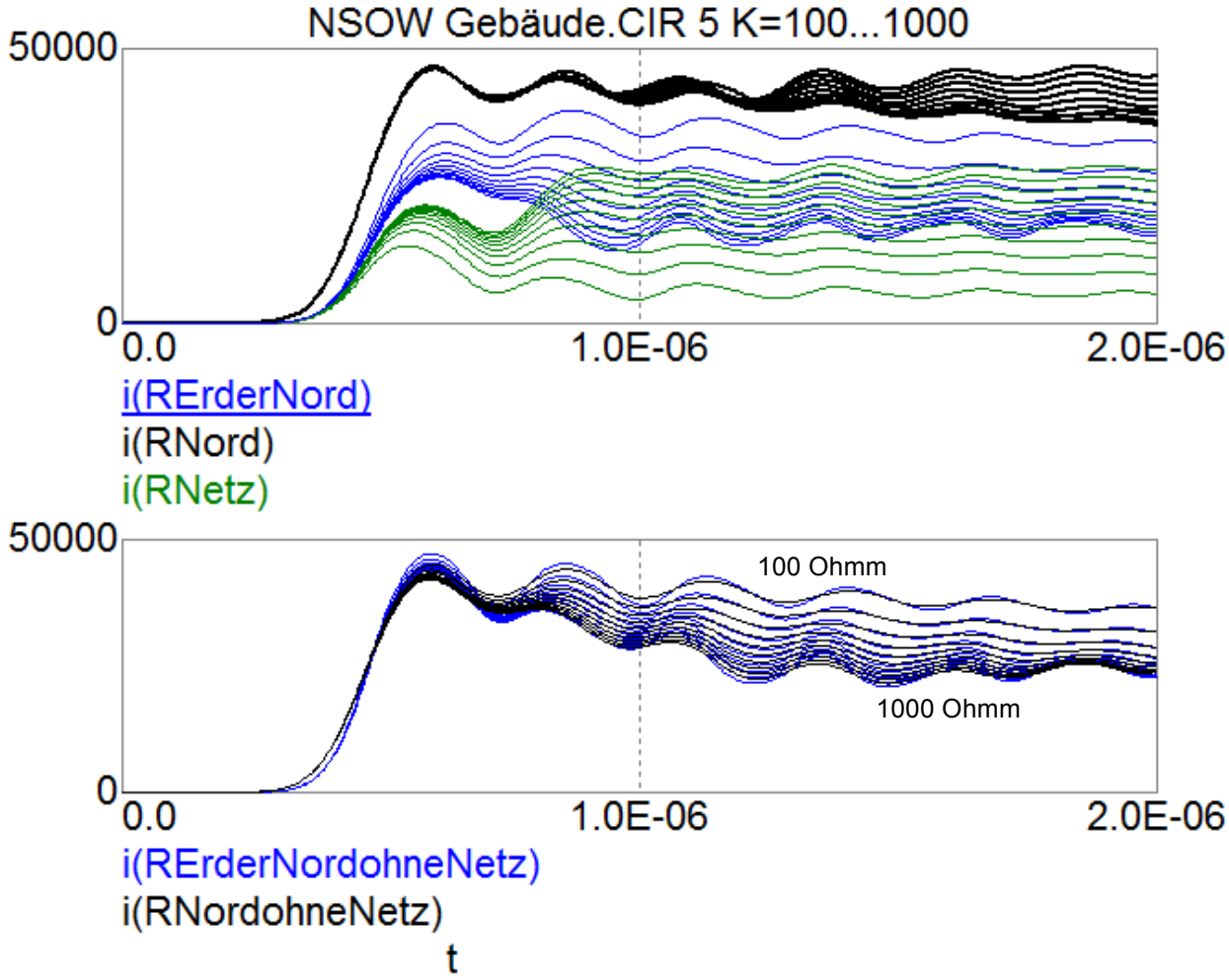


Bild 7-56 Gegenüberstellung der Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=100------1000 Ohmm und 0,25/100 Impuls. Das obere Bild entspricht exakt Bild 7-55. Hinweis: Der Strom im Erder wird am Eingang des Vertikalerders Nord gemessen, der Strom in der Abeitung Nord wird oben am Dach in 10 m Höhe gemessen. Daher gibt es geringe zeitverschiebungen durch Wanderwellen auf der Ableitung Nord.

7.2.2.2.2 1/200

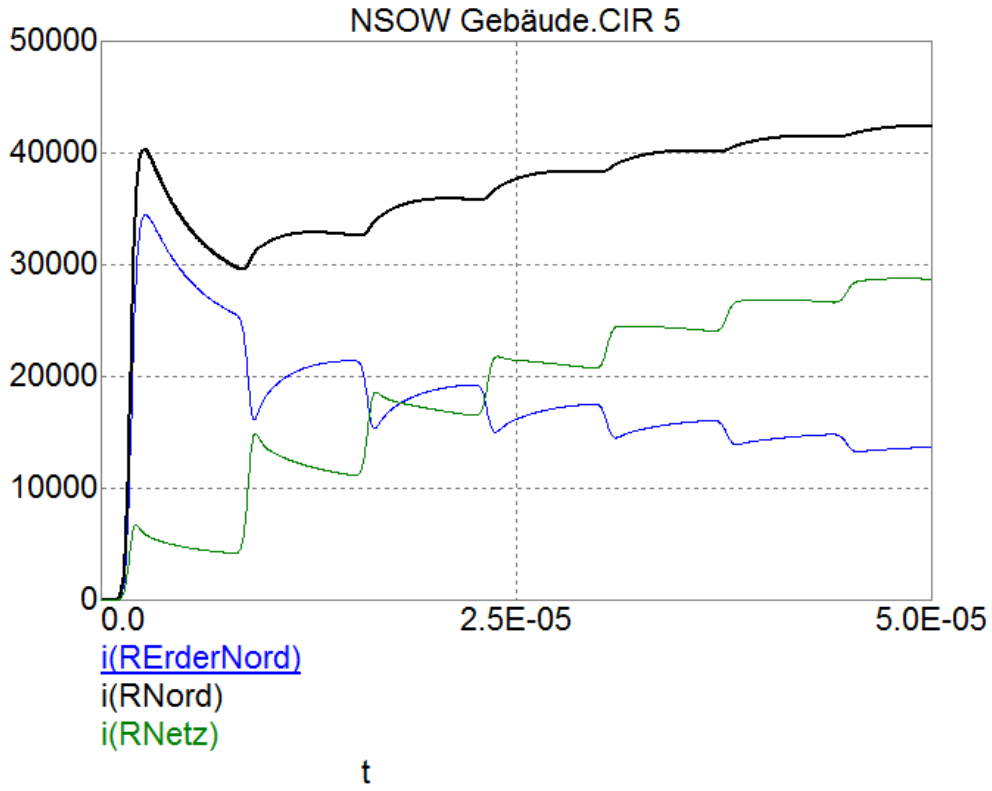


Bild 7-57 Zeitbereichsanlyse für die Ströme in der Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=100 Ohmm und 1/200 Impuls.

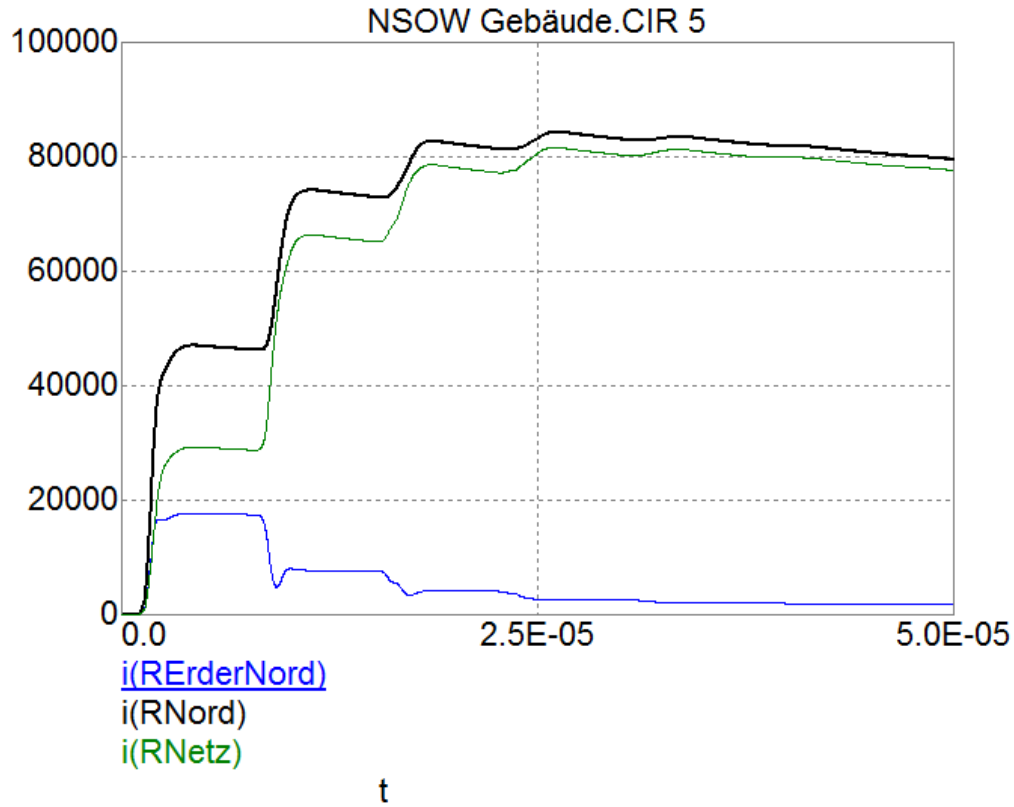


Bild 7-58 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=1000 Ohmm und 1/200 Impuls.

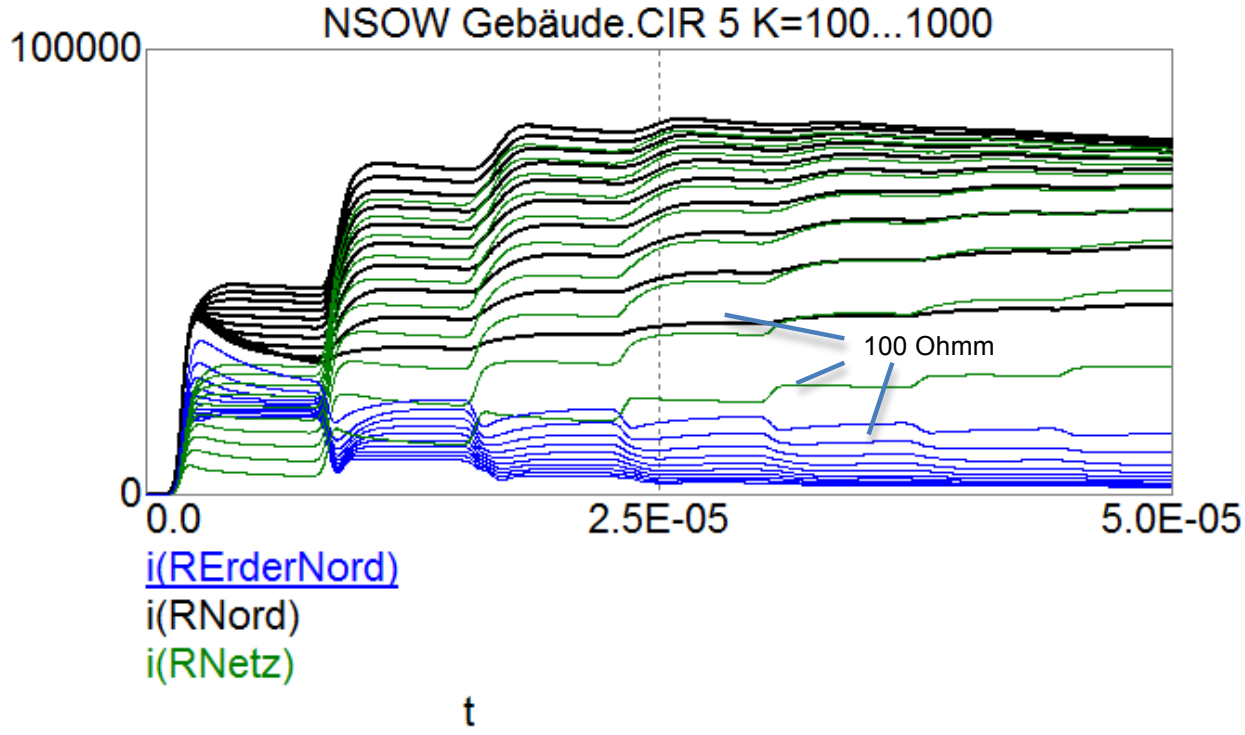


Bild 7-59 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=100------- 1000 Ohmm und 1/200 Impuls.

7.2.2.2.3 10/350

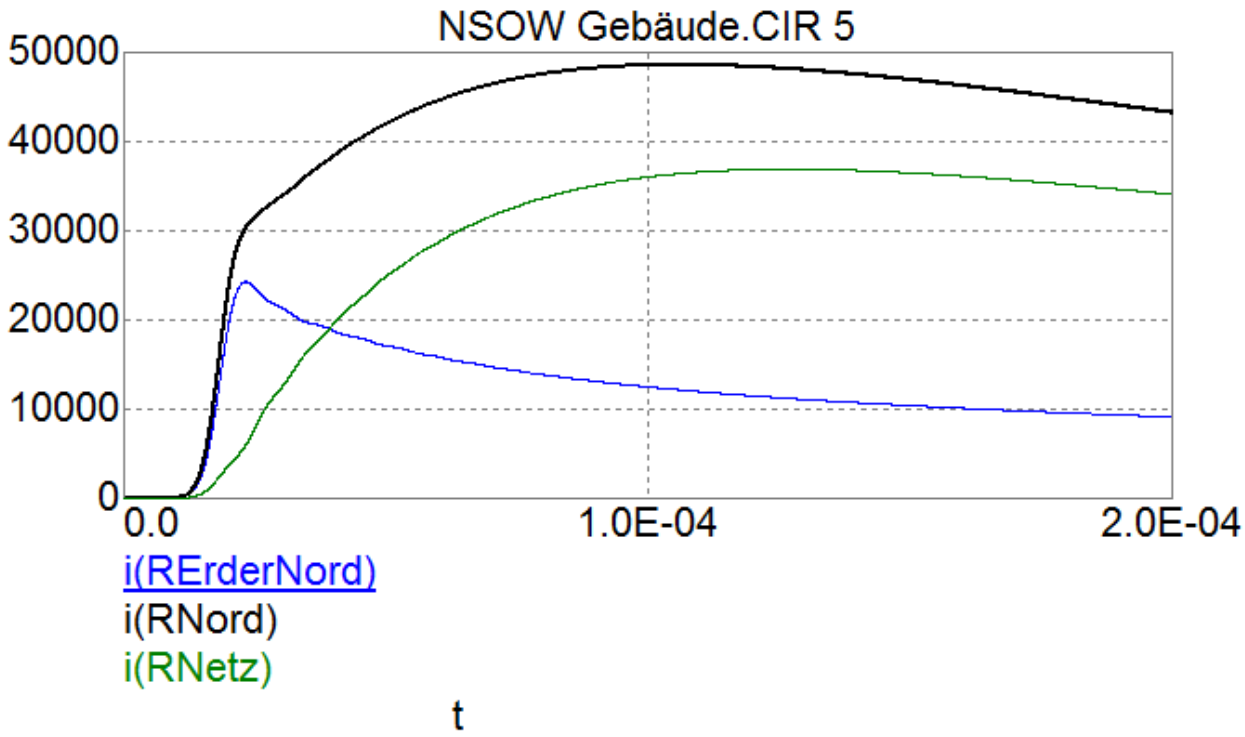


Bild 7-60 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=100 Ohmm und 10/350 Impuls.

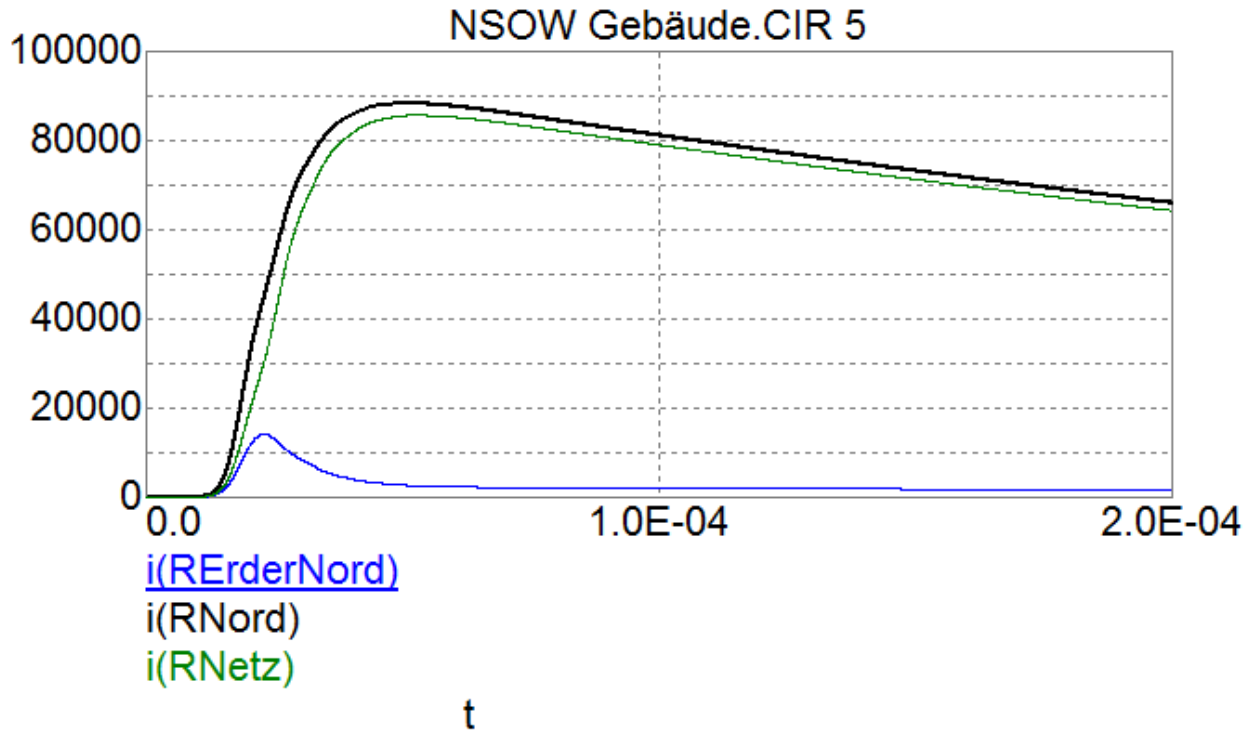


Bild 7-61 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=1000 Ohmm und 10/350 Impuls.

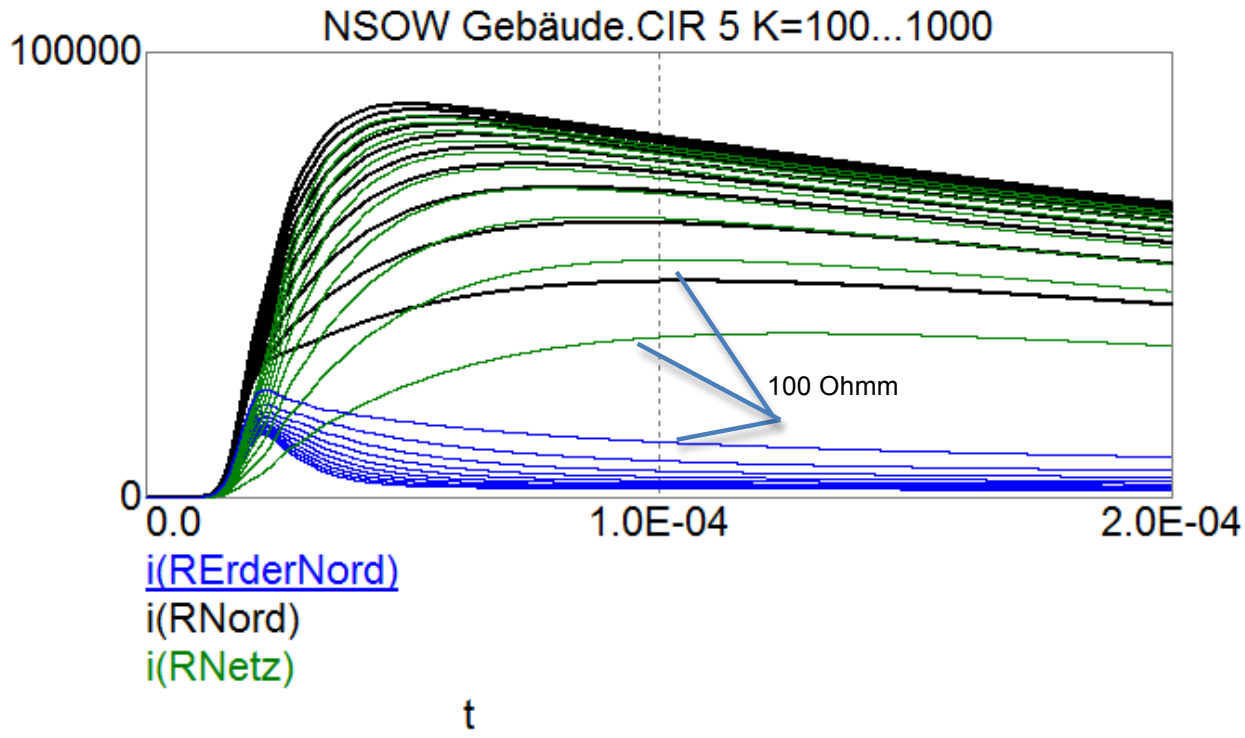


Bild 7-62 Zeitbereichsanlyse für die Ströme im Netzkabel, im Erder Nord und in der Ableitung Nord für für ρ_E=100----1000 Ohmm und 10/350 Impuls.

7.2.3 Vergleich der Ergebnisse

Die Stromaufteilung für 0,25/100 auf die Ableitungen bleibt unabhängig davon, ob ein Netzkabel angeschlossen wird oder nicht, siehe Bild 7-63. Für die Berechnung des Näherungsabstands ändert sich daher nichts, wenn ein Netzkabel angeschlossen wird.
Für den 1/200 und den 10/350-Impuls ergeben sich für die Nordableitung deutlichere Unterschiede in der Stromaufteilung ohne bzw. mit Netzkabel.

Für den 0,25/100-Impuls: Der Teilstrom im Erder Nord (Einspeisung des Blitzstroms) wird mit zunehmendem spezifischen Erdwiderstand geringer weil mehr Strom in das Netzkabel abfließen kann, siehe Bild 7-66 . Für die Betrachtung der Schrittspannung ist daher der Anschluss eines Netzkabels vorteilhaft, weil dadurch der Teilstrom im Erder kleiner und damit auch die Schrittspannung kleiner wird.

Schwieriger wird die Aussage zu den Teilströmen bei 1/200 und 10/350. Da die Maxima zu deutlichn unterschiedlichen Zeiten auftreten, ist ein Vergleich problematisch. Hier muss im Einzelfall der Strom in den Erder Nord analysiert und in die Berechnung der Schrittspannung für GSALab1MHz eingegeben werden. Dennoch sind die Teilströme in Bild 7-67 und Bild 7-68 dargestellt.

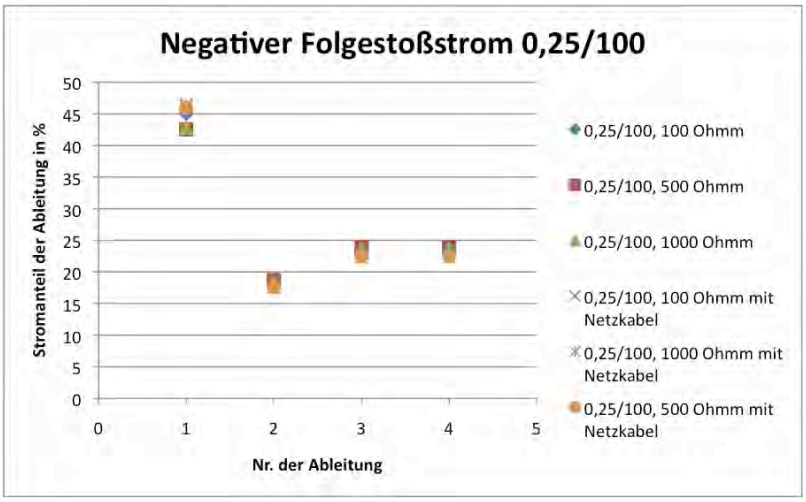


Bild 7-63 Auswertung der Teilströme auf den Ableitungen Nord=1, Süd=2, Ost=3, West=4 im Vergleich mit den Teilströmen wenn zusätzlich ein Netzkabel angeschlossen ist. Werte für 0,25/100. Ausgewertet wurden die ersten Maxima, vergl. Bild 7-42.

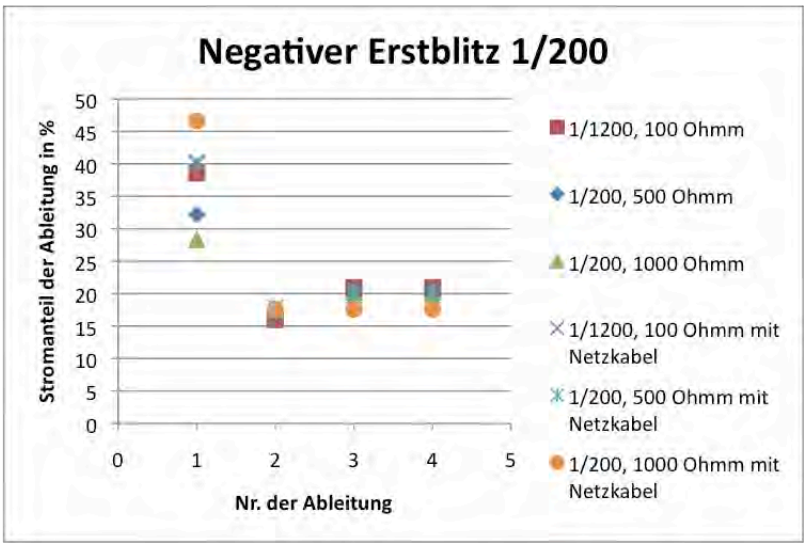


Bild 7-64 Auswertung der Teilströme auf den Ableitungen Nord=1, Süd=2, Ost=3, West=4 im Vergleich mit den Teilströmen wenn zusätzlich ein Netzkabel angeschlossen ist. Werte für 1/200. Ausgewertet wurden die ersten Maxima, vergl. Bild 7-42.

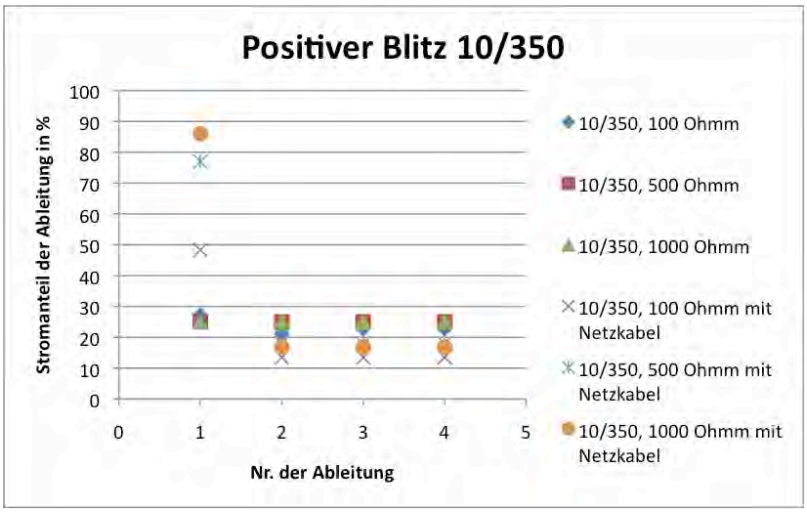


Bild 7-65 Auswertung der Teilströme auf den Ableitungen Nord=1, Süd=2, Ost=3, West=4 im Vergleich mit den Teilströmen wenn zusätzlich ein Netzkabel angeschlossen ist. Werte für 10/350. Ausgewertet wurden die ersten Maxima, vergl. Bild 7-42.

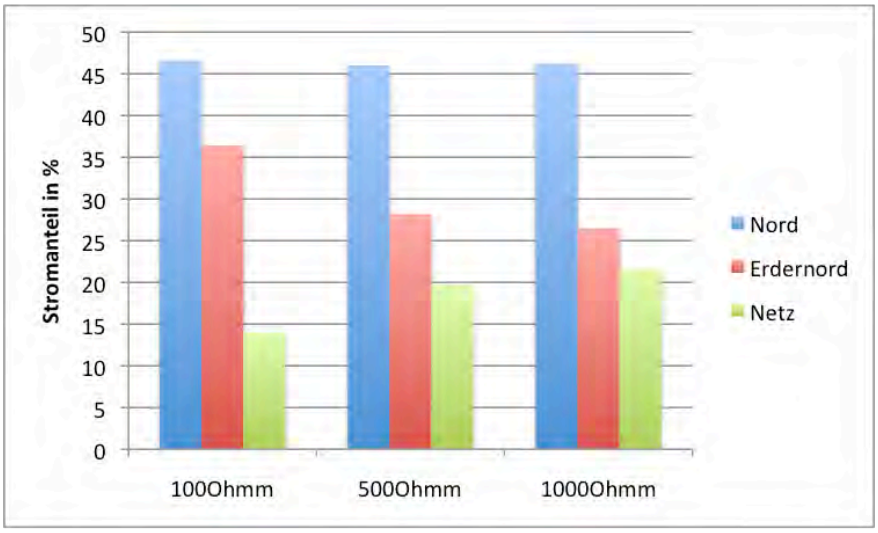


Bild 7-66 Auswertung der Teilströme Ableitung Nord, Erdernord und Netzstrom Werte für 0,25/100. Ausgewertet wurden die ersten Maxima, vergl. Bild 7-42.

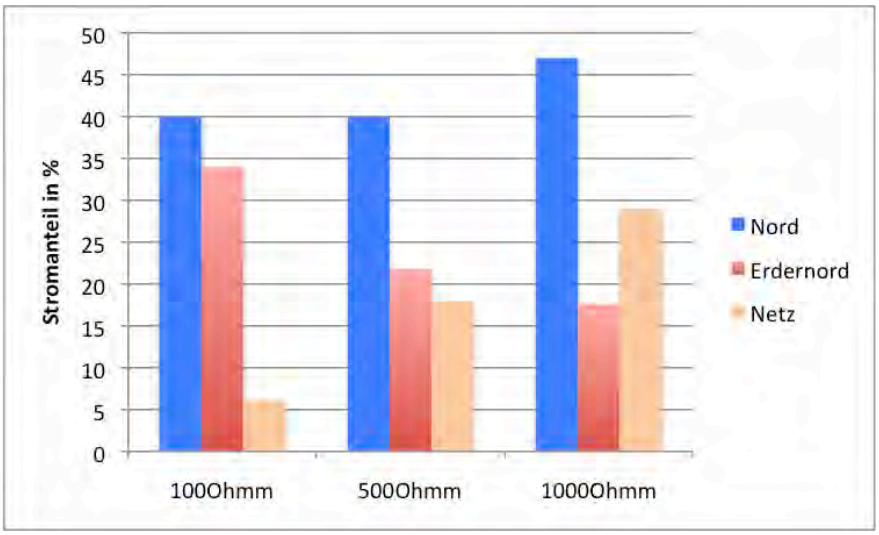


Bild 7-67 Auswertung der Teilströme Ableitung Nord, Erdernord und Netzstrom Werte für 1/200. Ausgewertet wurden die ersten Maxima, vergl. Bild 7-57

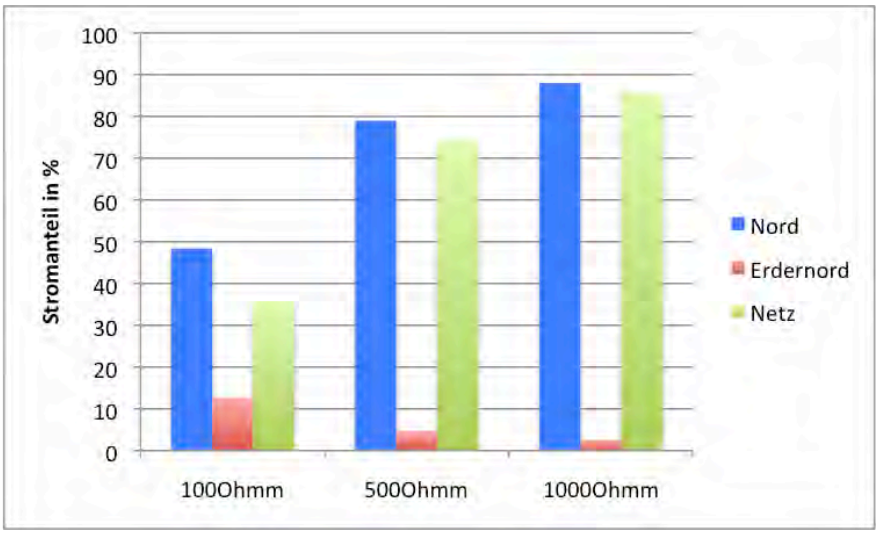


Bild 7-68 Auswertung der Teilströme Ableitung Nord, Erdernord und Netzstrom Werte für 10/350. Ausgewertet wurden die ersten Maxima, vergl. Bild 7-60.Bild 7-57

7.3 Gebäude 10 m x 10 m mit 4 Ableitungen und Gittererder aus 6 mm Edelstahldraht

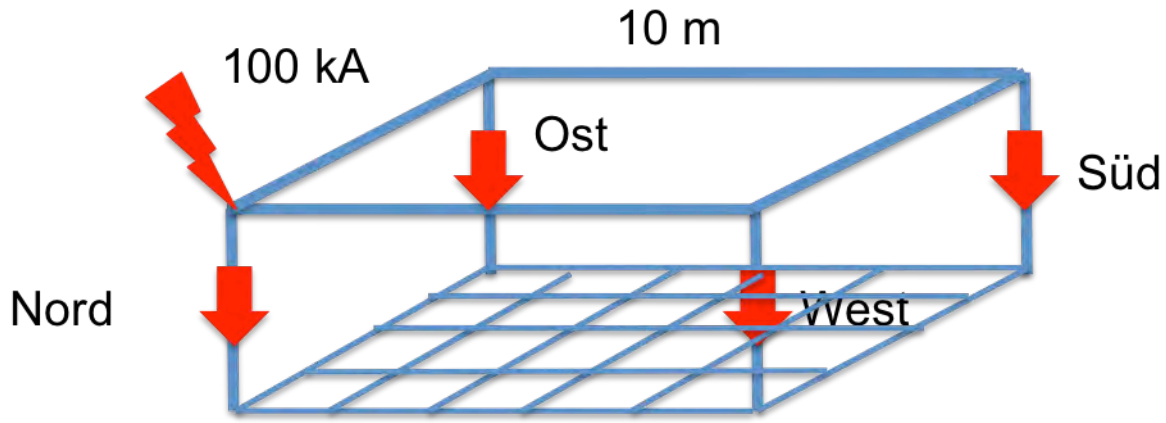


Bild 7-69 Gebäude mit 4 Ableitungen und einem Gitter als Erdsystem.

7.3.1 Frequenzbereichsanalyse

7.3.1.1 Gitter 10 cm x 10 cm

Die Analyse zeigt, dass der spezifische Erdwiderstand kaum einen Einfluss auf die Stromverteilung zeigt. Das ist durch das stark kapazitive Verhalten eines Gittererders bedingt. Der Ausbreitungswiderstand in Bild 7-71 wird korrekt wiedergegeben. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt ebenfalls eine vernachlässigbare Abhängigkeit der Stromaufteilung von der Kapazität.

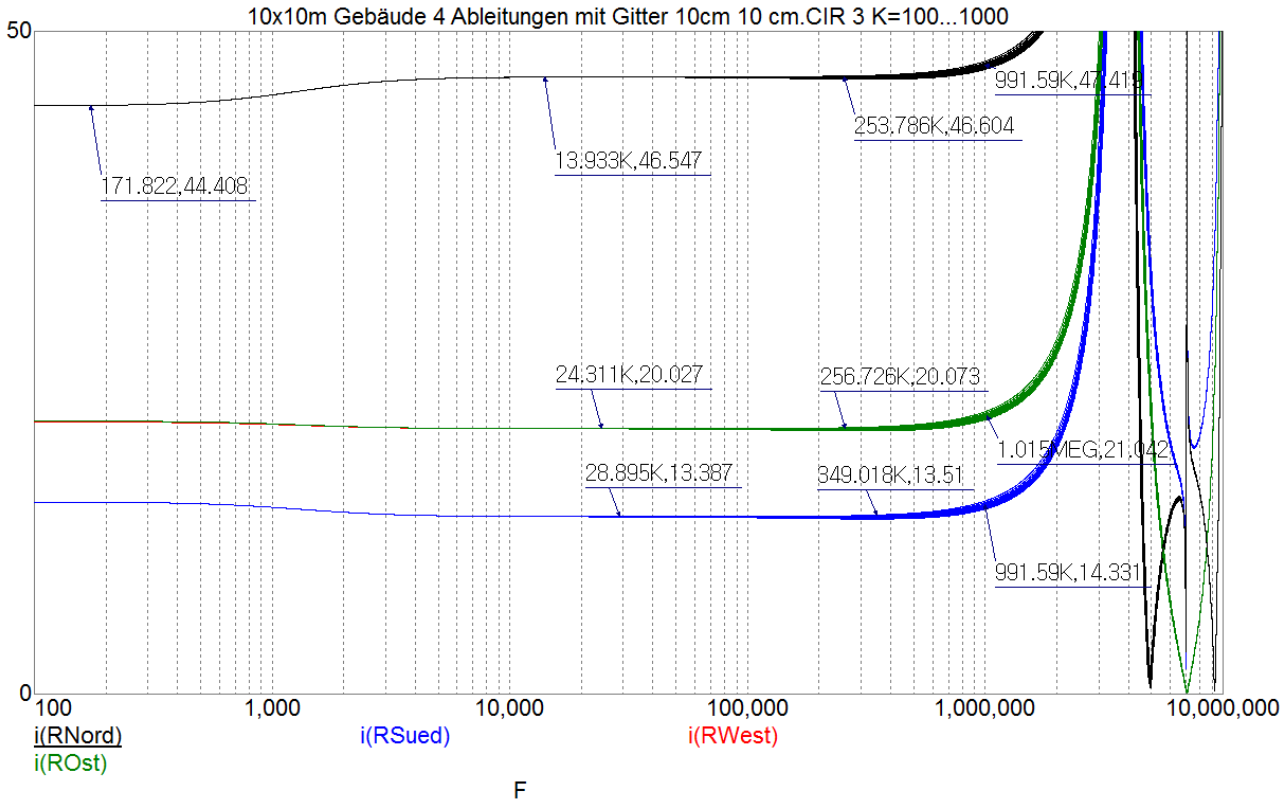


Bild 7-70 Frequenzbereichsanalyse der Stromaufteilung für Gitter 10 cm x 10 cm. Gittererder insgesamt: 10 m x 10 m = 100 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm. L´=49nH, R´=8,8 mOhm

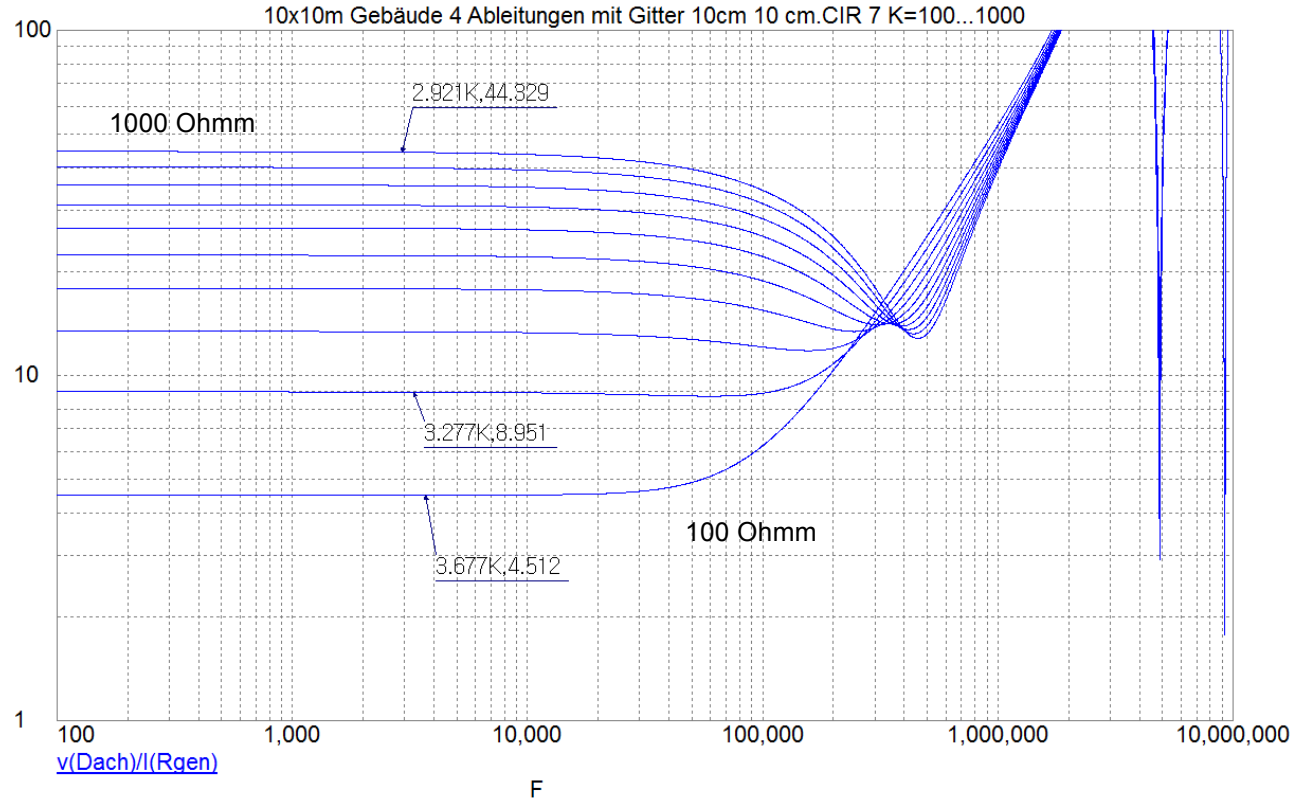
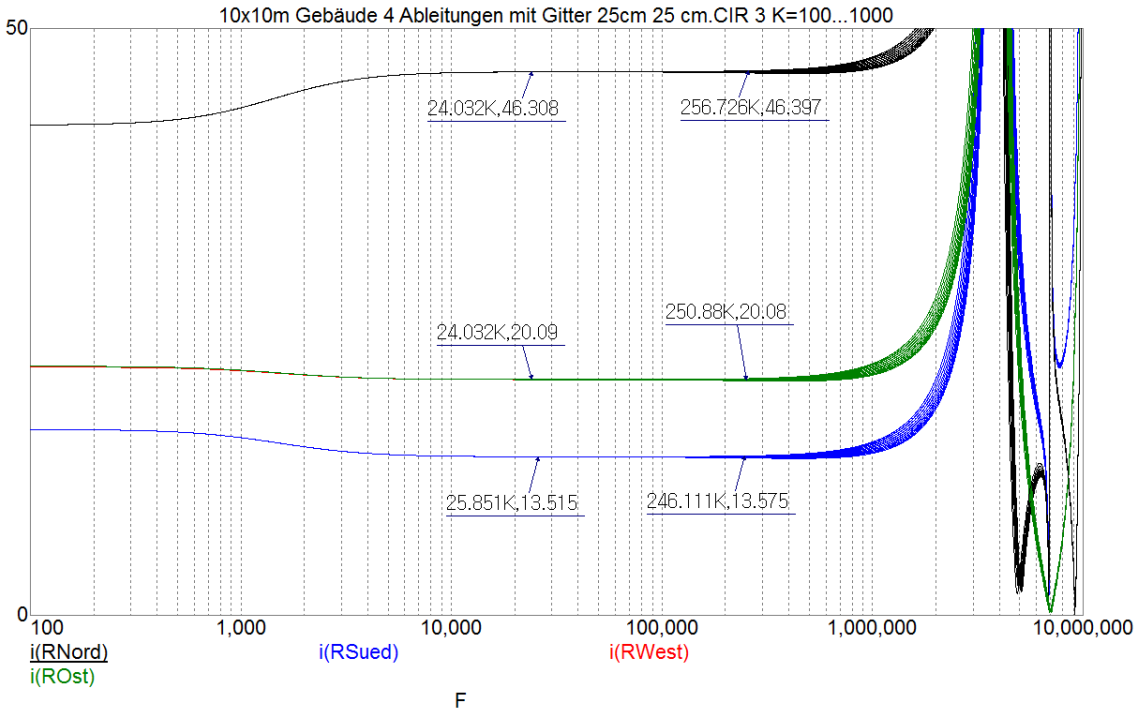


Bild 7-71 Frequenzbereichsanalyse des Ausbreitungswiderstands für Gitter 10 cm x 10 cm. Gittererder insgesamt: 10 m x 10 m = 100 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm. L´=49nH, R´=8,8 mOhm

7.3.1.2 Gitter 25 cm x 25 cm

Die Analyse zeigt, dass der spezifische Erdwiderstand kaum einen Einfluss auf die Stromverteilung zeigt. Das ist durch das stark kapazitive Verhalten eines Gittererders bedingt. Der Ausbreitungswiderstand in Bild 7-72 wird korrekt wiedergegeben. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt ebenfalls eine vernachlässigbare Abhängigkeit der Stromaufteilung von der Kapazität.



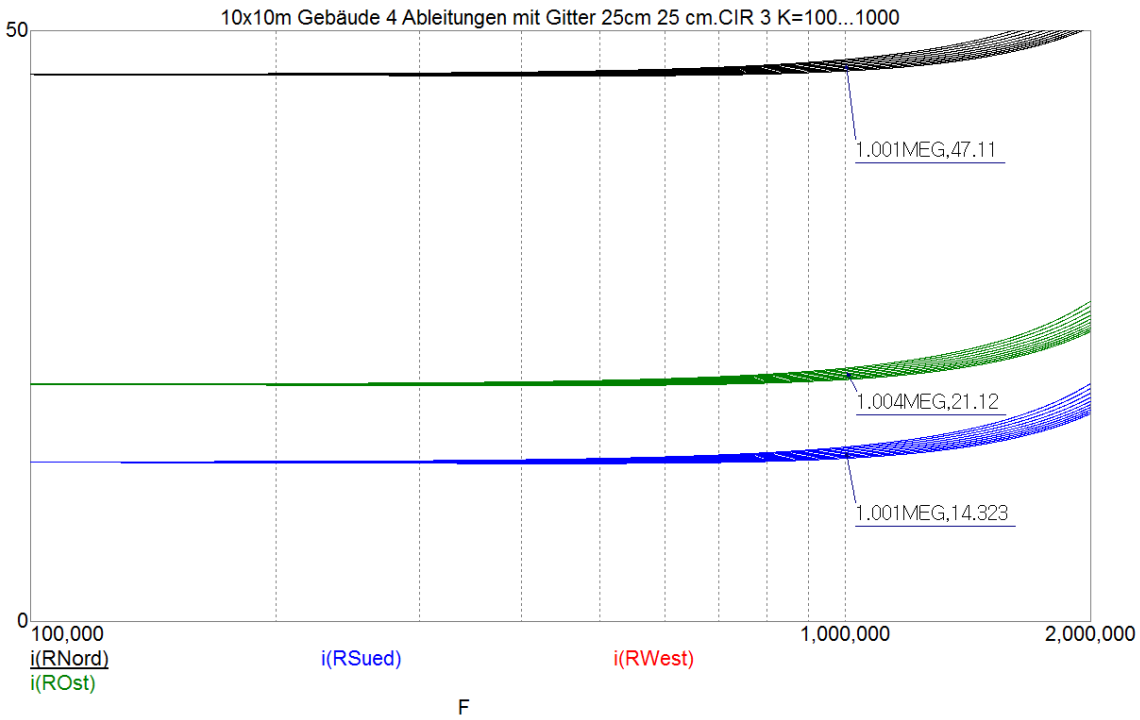


Bild 7-72 Frequenzbereichsanalyse der Stromaufteilung für Gitter 25 cm x 25 cm. Gittererder insgesamt: 10 m x 10 m = 100 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm. L´=167nH, R´=22 mOhm

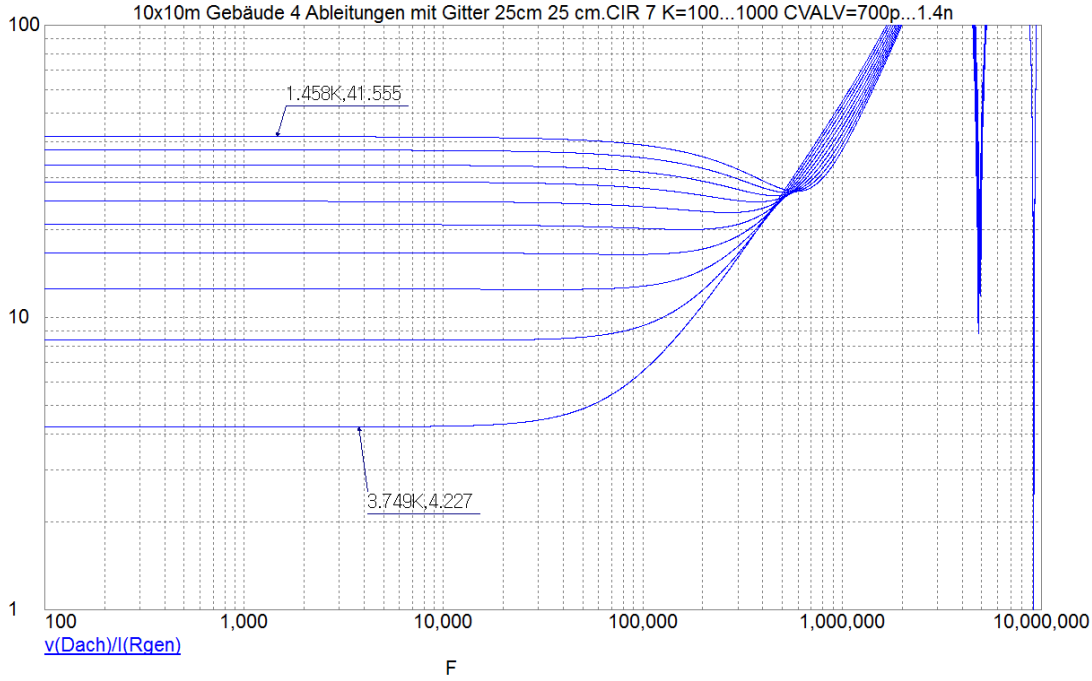


Bild 7-73 Frequenzbereichsanalyse des Ausbreitungswiderstands für Gitter 25 cm x 25 cm. Gittererder insgesamt: 10 m x 10 m = 100 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, $C`_{E:}$ 0,8...1,4 nF. L´=167nH, R´=22 mOhm.

7.3.1.3 Gitter 50 cm x 50 cm

Die Analyse zeigt, dass der spezifische Erdwiderstand kaum einen Einfluss auf die Stromverteilung zeigt. Das ist durch das stark kapazitive Verhalten eines Gittererders bedingt. Der Ausbreitungswiderstand in Bild 7-75 wird korrekt wiedergegeben. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt ebenfalls eine vernachlässigbare Abhängigkeit der Stromaufteilung von der Kapazität.

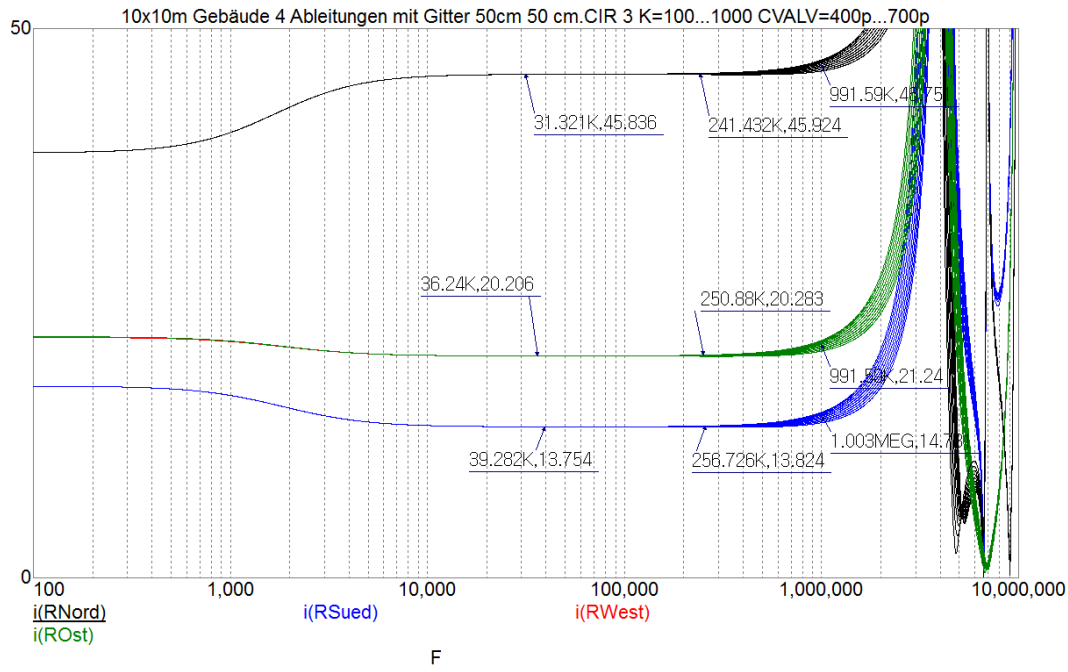


Bild 7-74 Frequenzbereichsanalyse der Stromaufteilung für Gitter 50 cm x 50 cm. Gittererder insgesamt: 10 m x 10 m = 100 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm; $C`_{E:}$ 0,4...0,7 nF. L´=404nH, R´=44 mOhm

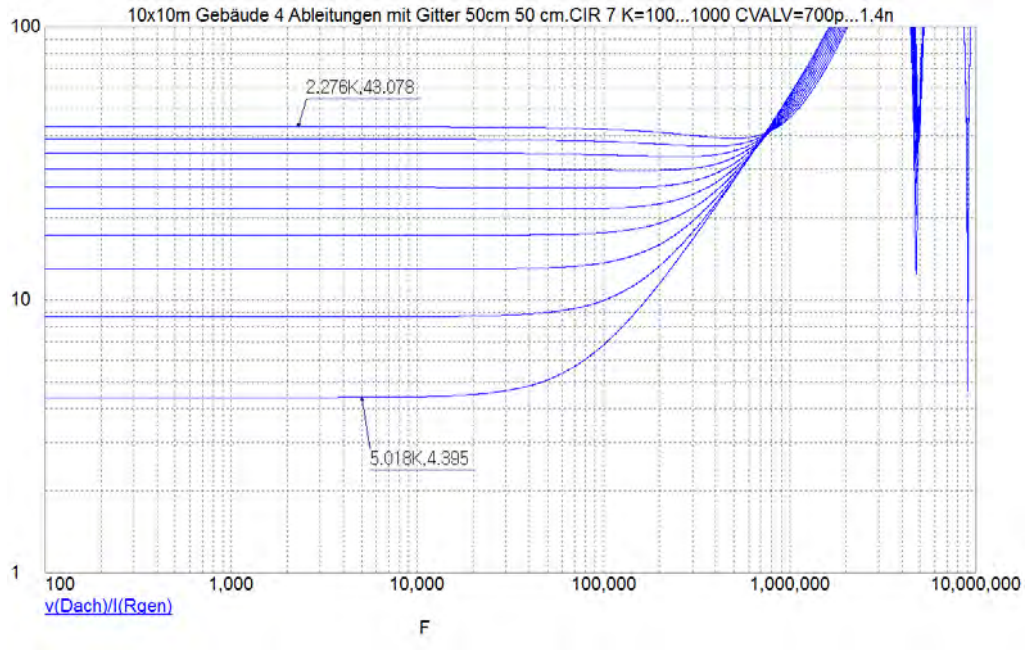


Bild 7-75 Frequenzbereichsanalyse des Ausbreitungswiderstands für Gitter 50 cm x 50 cm. Gittererder insgesamt: 10 m x 10 m = 100 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, C`$_E$: 0,4...0.7 nF. L´=404nH, R´=44 mOhm.

7.3.2 Zeitbereichsanalyse

Die Analyse zeigt, dass der spezifische Erdwiderstand kaum einen Einfluss auf die Stromverteilung zeigt. Das ist durch das stark kapazitive Verhalten eines Gittererders bedingt. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt ebenfalls eine vernachlässigbare Abhängigkeit der Stromaufteilung von der Kapazität.

7.3.2.1 Gitter 10 cm x 10 cm

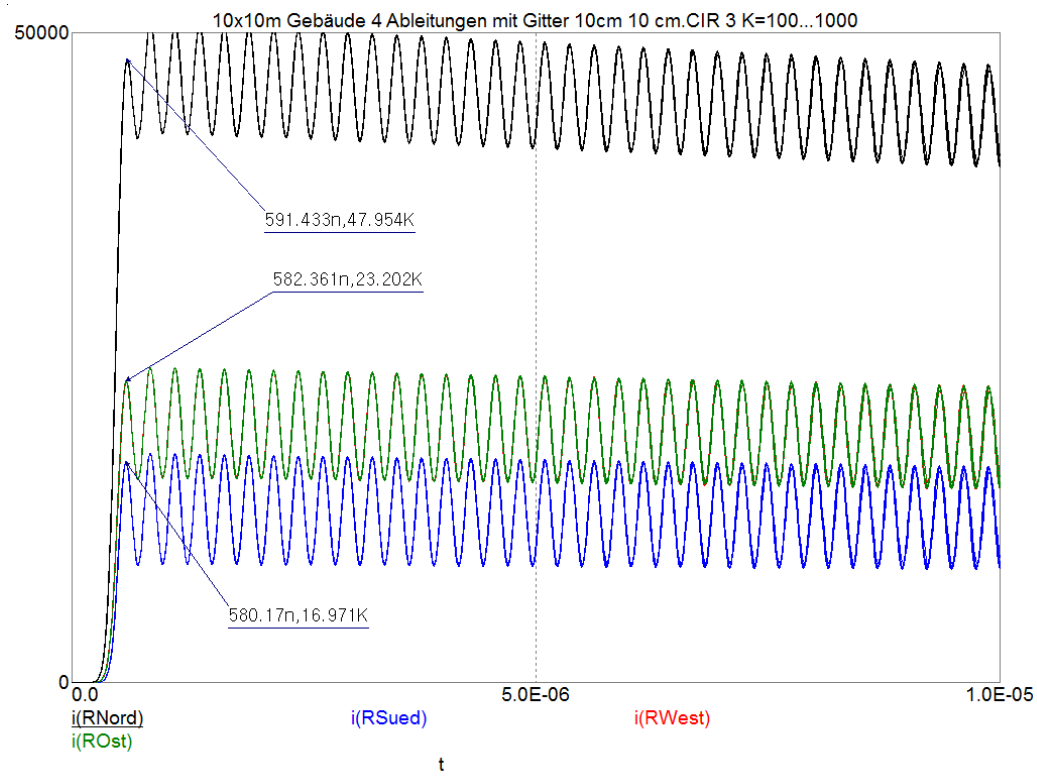


Bild 7-76 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen Gittererder 10 cm x 10 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. ρ_E=100 ----10000 Ohmm. L´=49nH, R´=8,8 mOhm C`$_E$=3nF Überlagerte Schwingung mit 3,8 MHz.

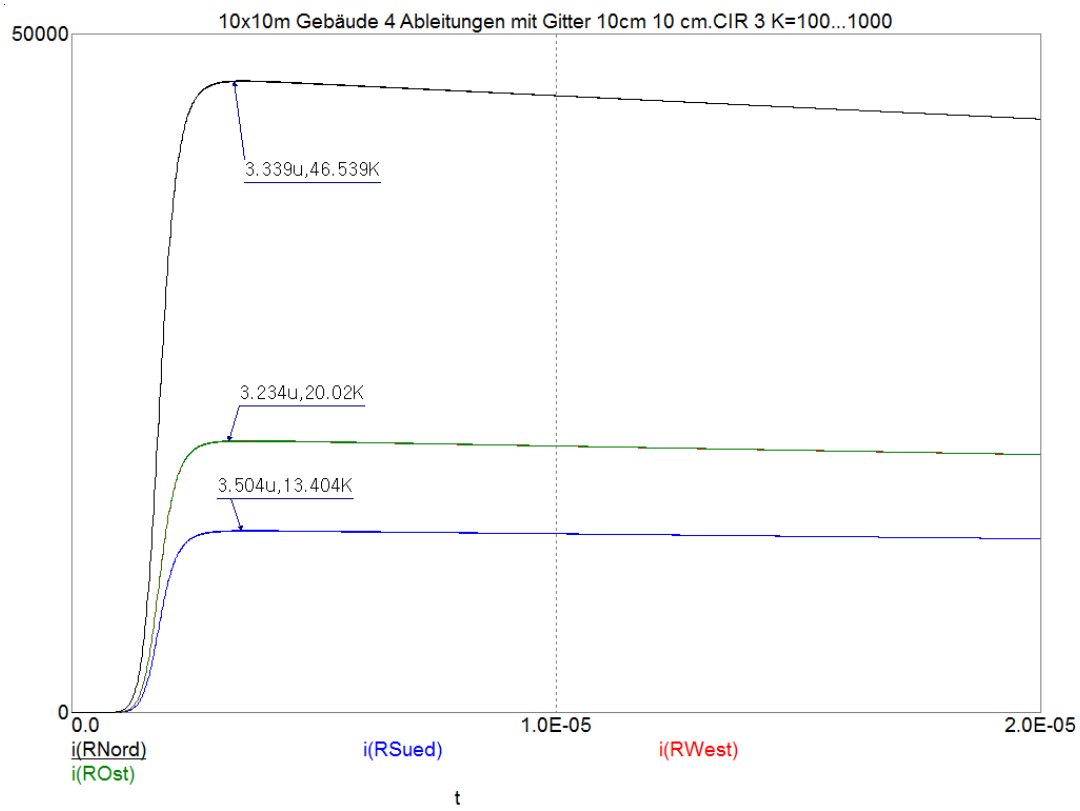


Bild 7-77 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen Gittererder 10 cm x 10 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm. L´=49nH, R´=8,8 mOhm C`$_E$=3nF

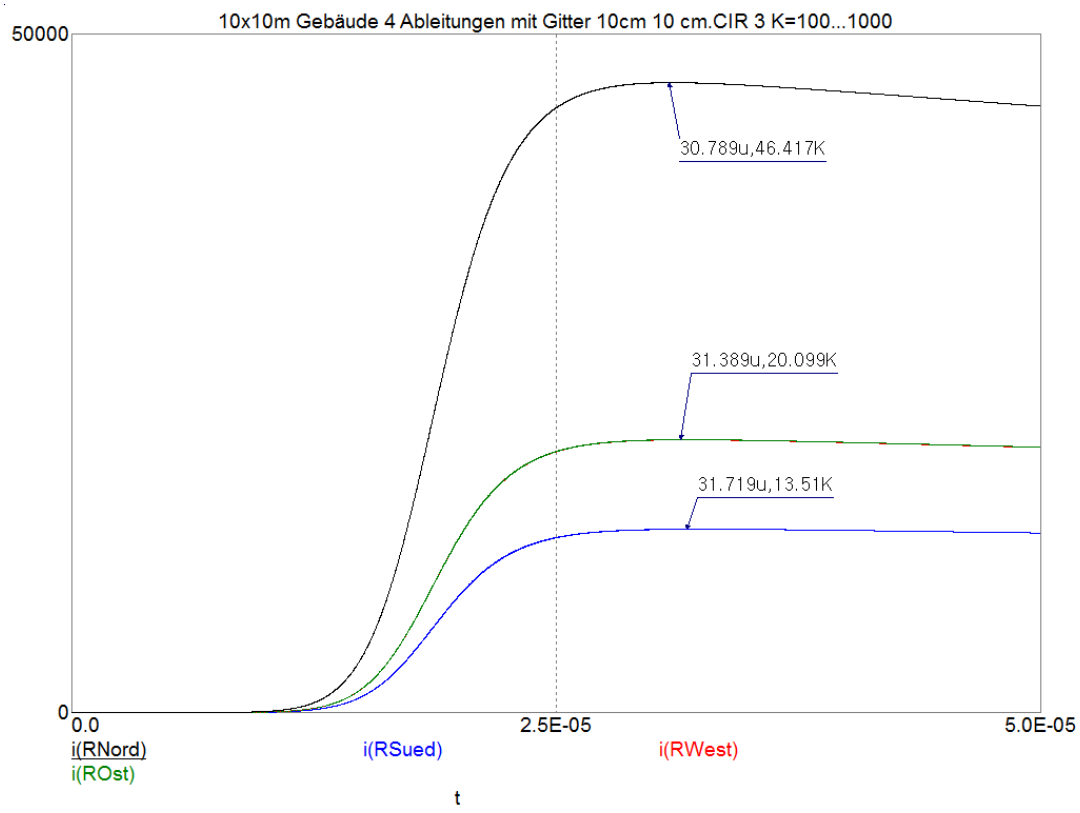


Bild 7-78 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen Gittererder 10 cm x 10 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm. L´=49nH, R´=8,8 mOhm C`$_E$=3nF

7.3.2.2 Gitter 25 cm x 25 cm

Die Sensitivityanalyse in Bild 7-79 zeigt, dass der spezifische Bodenwiderstand als auch die Kapazität vernachlässigbaren Einfluss auf die initiale Stromverteilung haben.

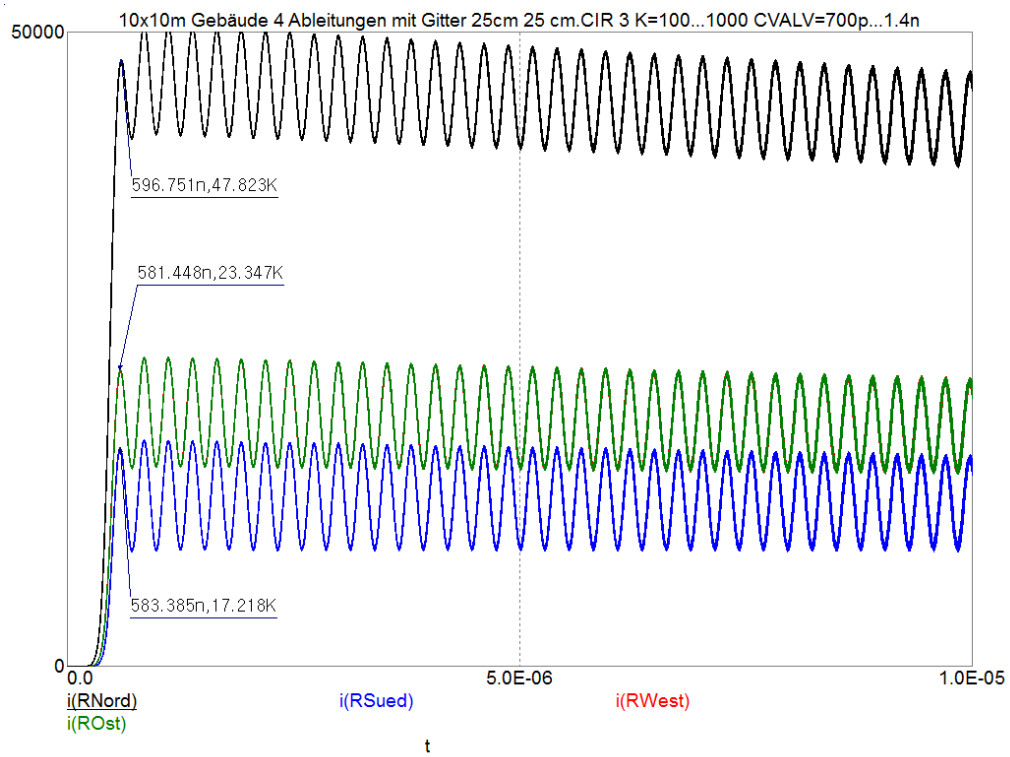


Bild 7-79 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen Gittererder 25 cm x 25 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. ρ_E=100 ----10000 Ohmm und C`$_{E:}$ 0,7...1,4 nF. L´=167nH, R´=22 mOhm. Überlagerte Schwingung mit 3,8 MHz.

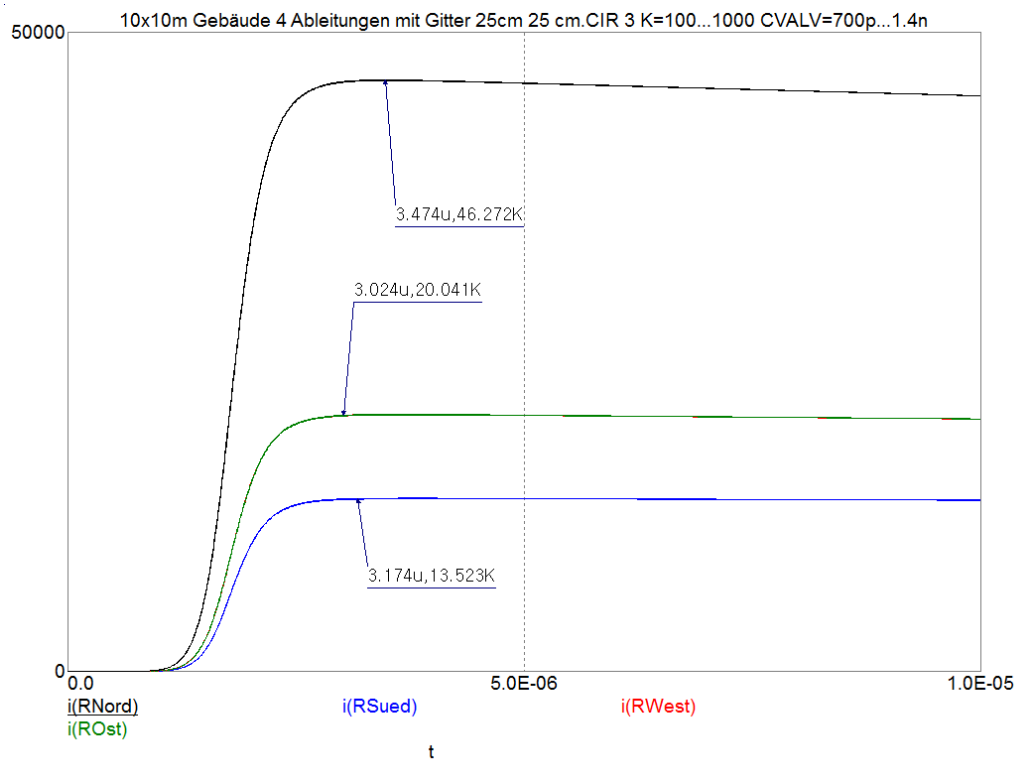


Bild 7-80 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen Gittererder 25 cm x 25 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm und C`$_{E:}$ 0,7...1,4 nF. L´=167nH, R´=22 mOhm.

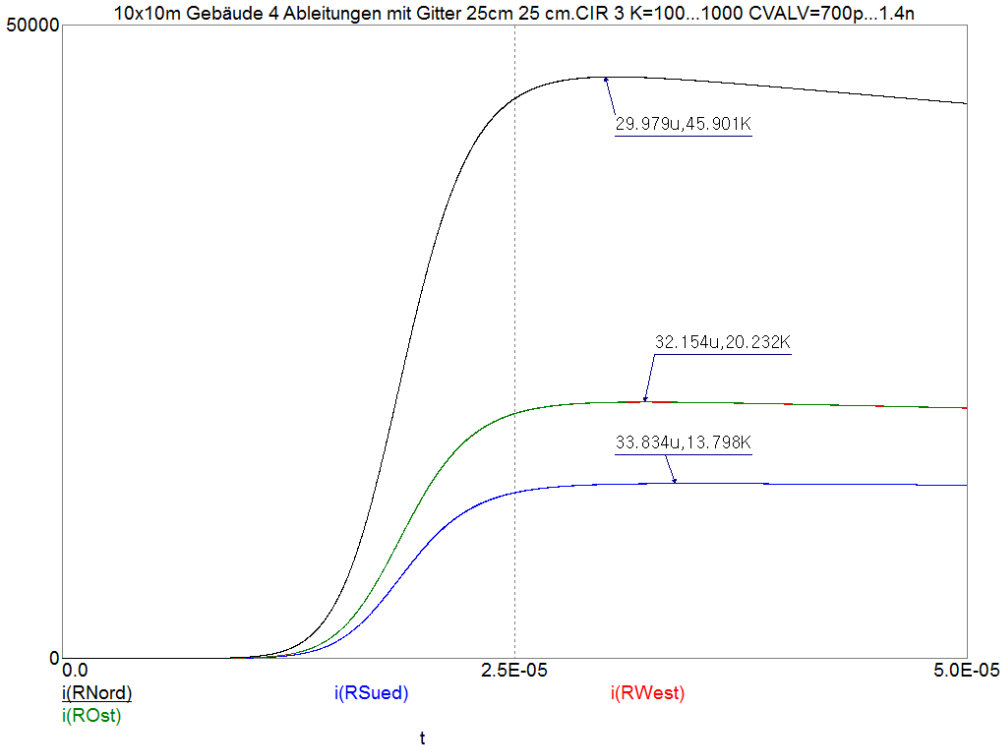


Bild 7-81 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen Gittererder 25 cm x 25 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm und C`$_{E:}$ 0,7...1,4 nF. L´=167nH, R´=22 mOhm.

7.3.2.3 Gitter 50 cm x 50 cm

Beim 0,25/100 Impuls zeigen sich im hinteren Zeitbereich kleinere Schwingungen. Die initiale Stromverteilung ist aber unabhängig vom spezifischen Erdwiderstand und unabhängig von der Kapazität.

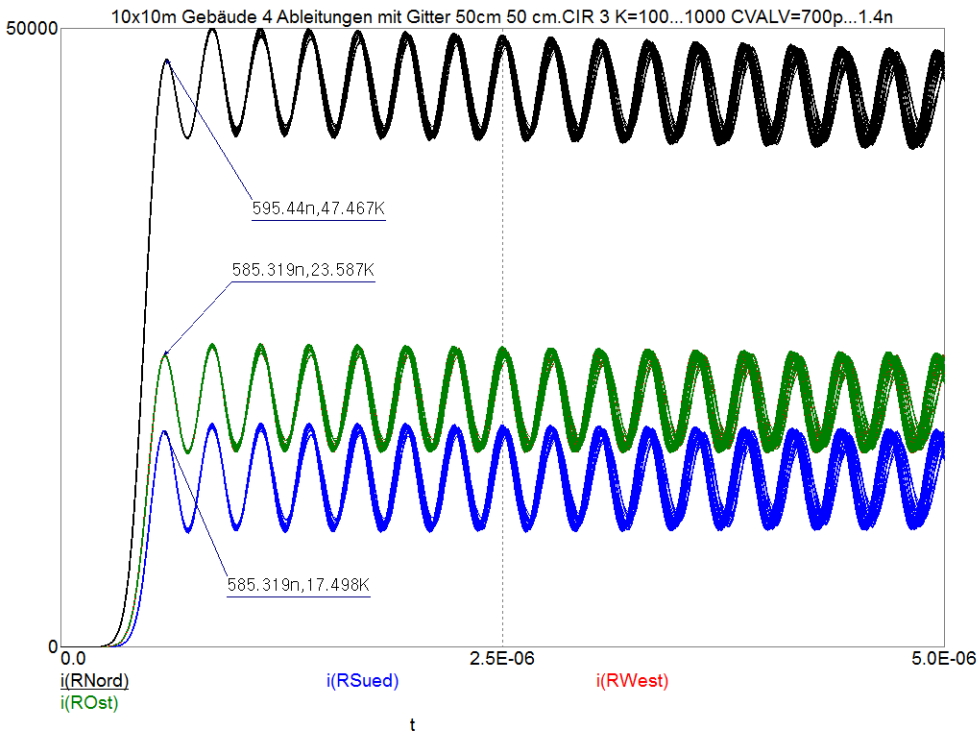


Bild 7-82 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. ρ_E=100 ----10000 Ohmm und C`$_{E:}$ 0,4...0,4 nF. L´=404nH, R´=44 mOhm.

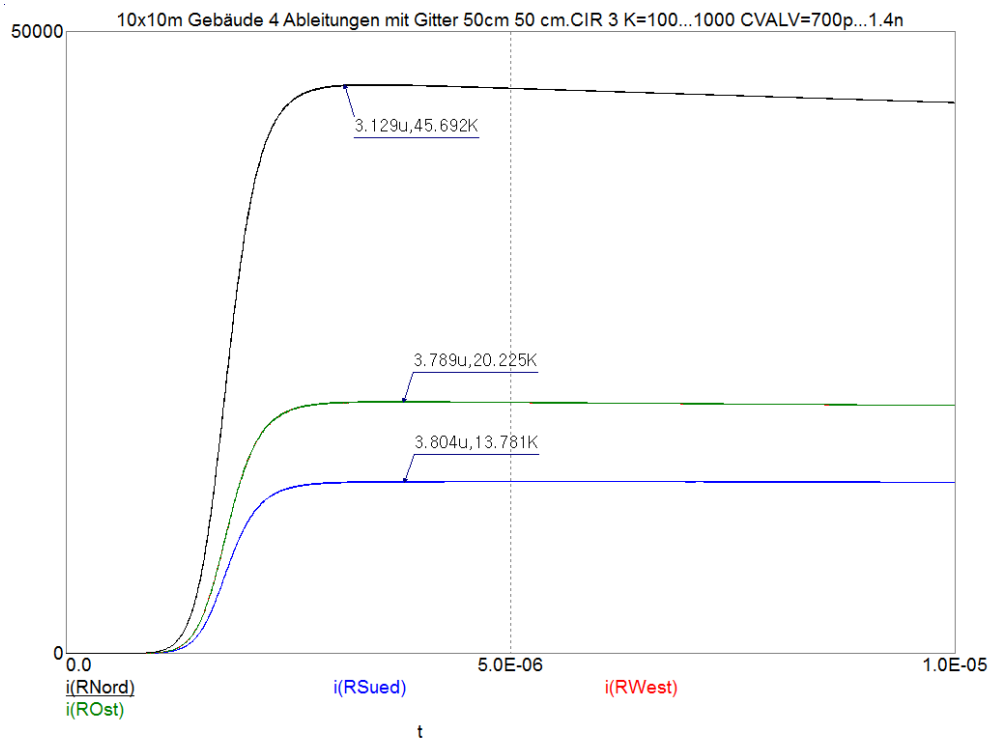


Bild 7-83 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm und C`$_{E:}$ 0,4...0,4 nF. L´=404nH, R´=44 mOhm.

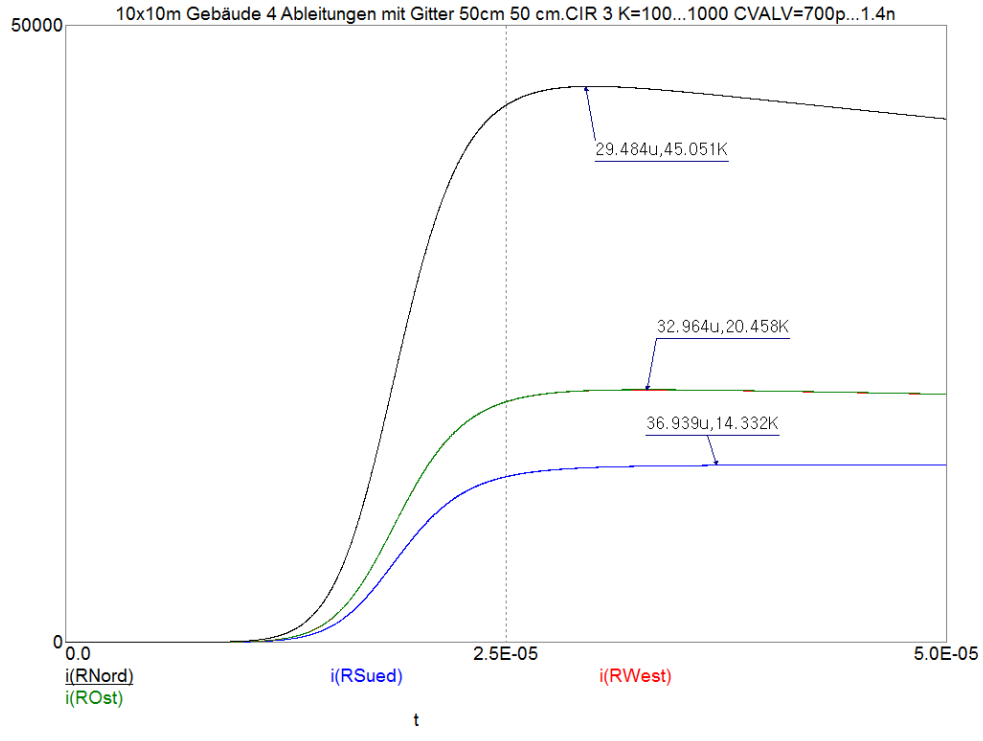


Bild 7-84 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude mit 4 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm und C`$_{E:}$ 0,4...0,4 nF. L´=404nH, R´=44 mOhm.

7.3.3 Vergleich der Ergebnisse

Die Stromaufteilung ist bei allen Gitterformen nahezu gleich. Weder die Frequenz, noch die Impulsform beeinflussen die Stromaufteilung. Der spezifische Erdwiderstand beeinflusst kaum die Stromverteilung. Damit verinfacht sich die Berechnung der Schrittspannung mit GSA , da immer die gleichen Werte der Stromeinspeisung in die einzelnen Ableitungen verwendet werden können.

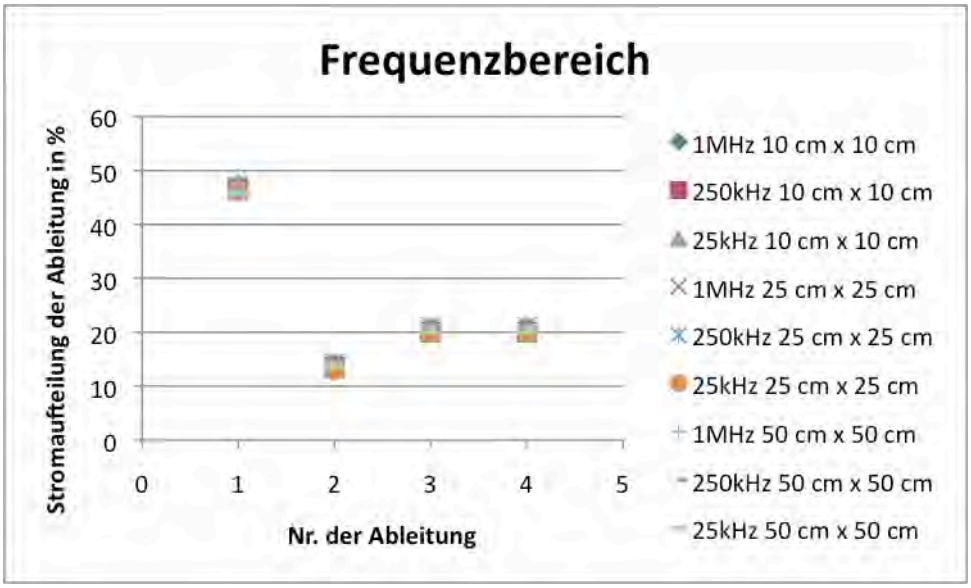


Bild 7-85 Stromaufteilung im Frequenzbereich. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.... 1000 Ohmm

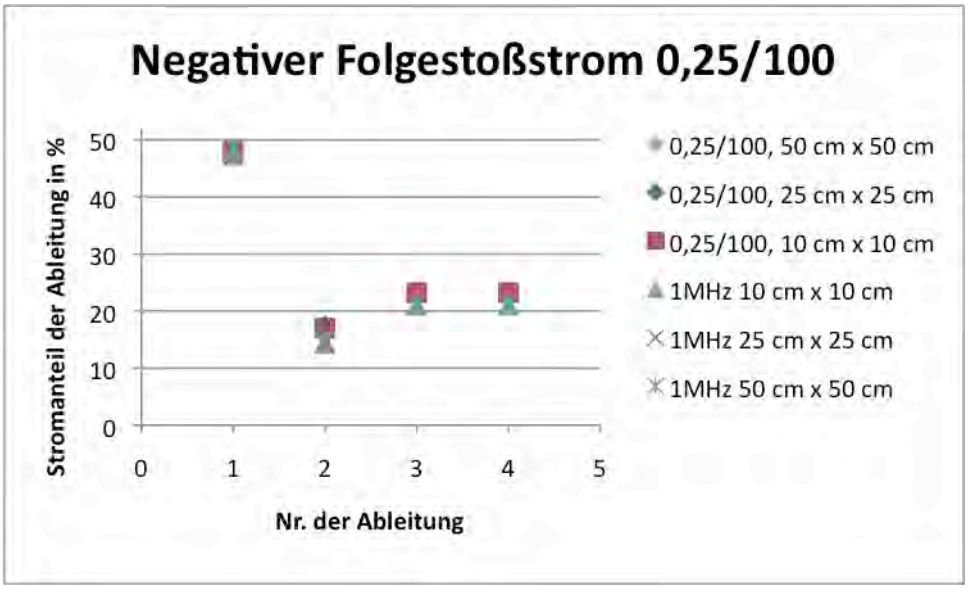


Bild 7-86 Stromaufteilung für 0,25/100 Impuls im Vergleich mit 1 MHz. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.... 1000 Ohmm

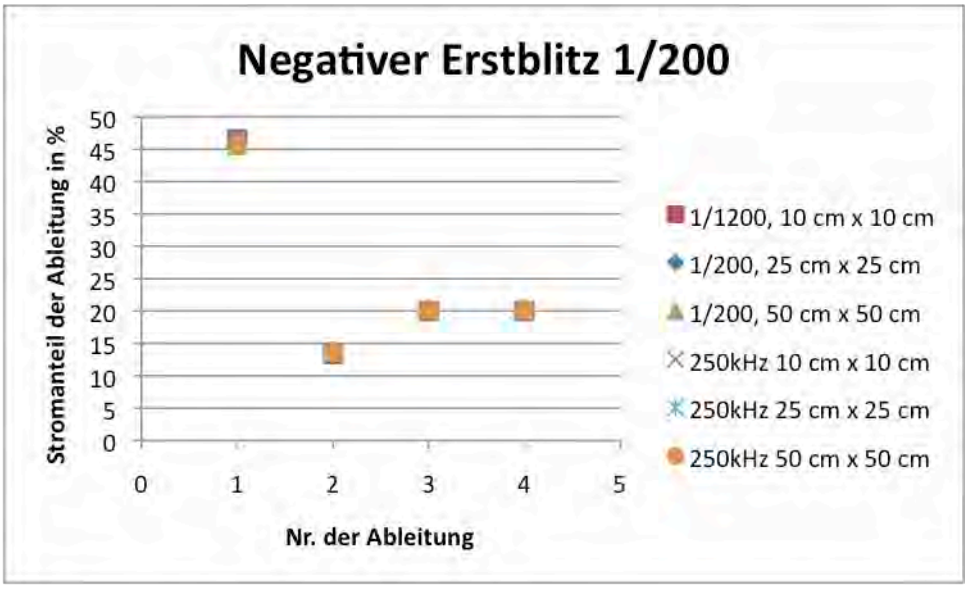


Bild 7-87 Stromaufteilung für 1/200 Impuls im Vergleich mit 250 kHz. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.... 1000 Ohmm

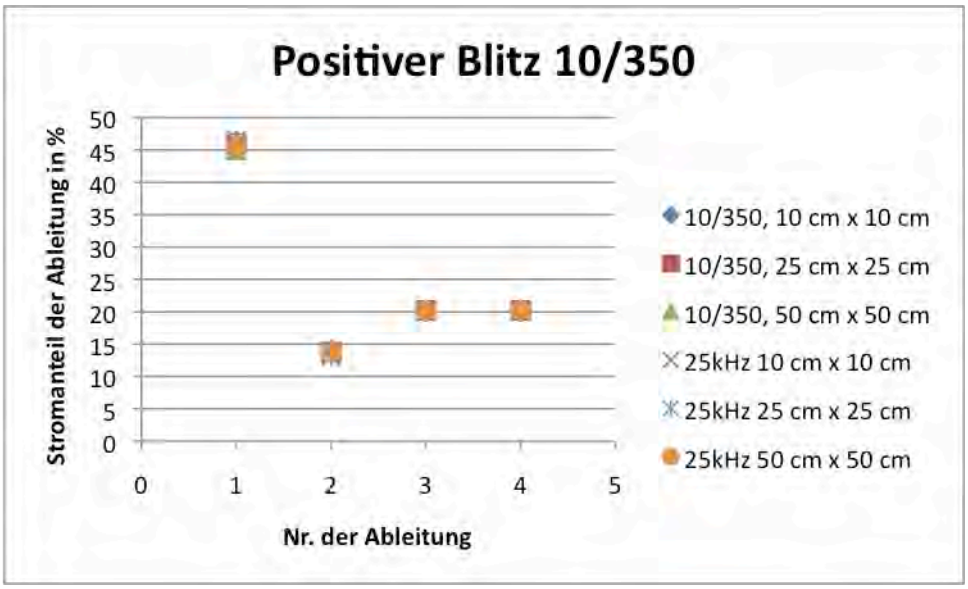


Bild 7-88 Stromaufteilung für 10/350 Impuls im Vergleich mit 25 kHz. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.... 1000 Ohmm

7.4 Gebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen 10 m und Gittererder aus 6 mm Edelstahldraht

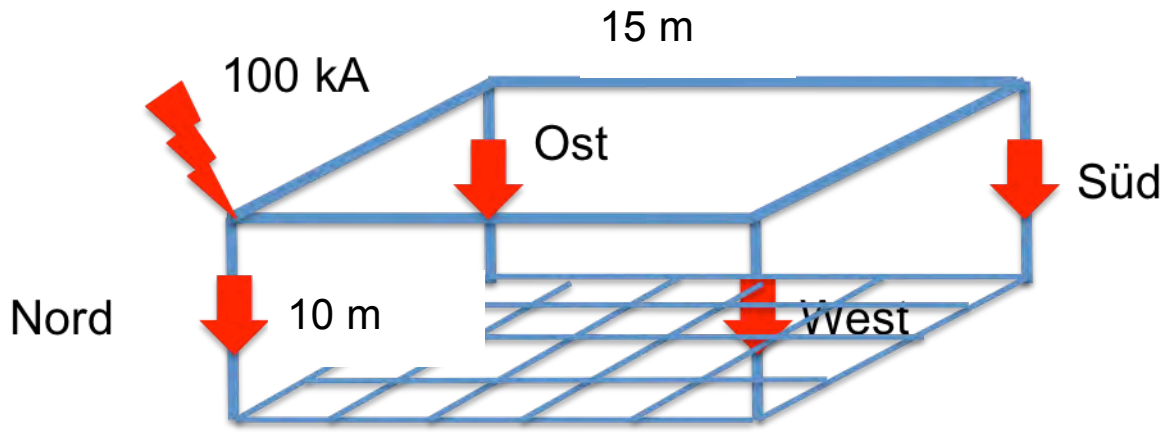


Bild 7-89 Gebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen und einem Gitter als Erdsystem.

7.4.1 Frequenzbereichsanalyse

7.4.1.1 Gitter 10 cm x 10 cm

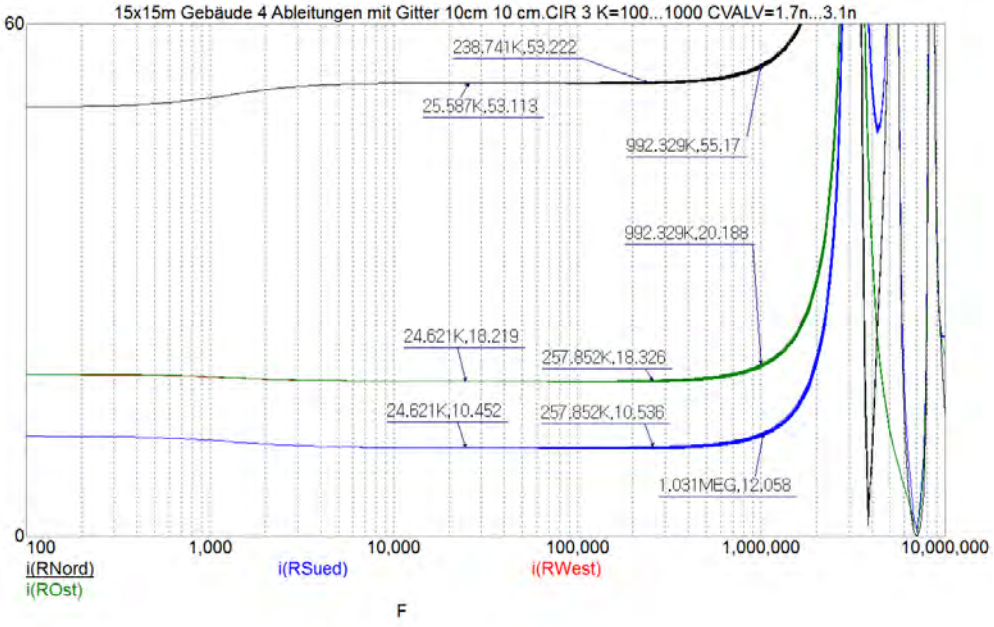


Bild 7-90 Frequenzbereichsanalyse der Stromaufteilung für Gitter 10 cm x 10 cm. Gittererder insgesamt: 15 m x 15 m = 225 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, L´=49nH, R´=8.8 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

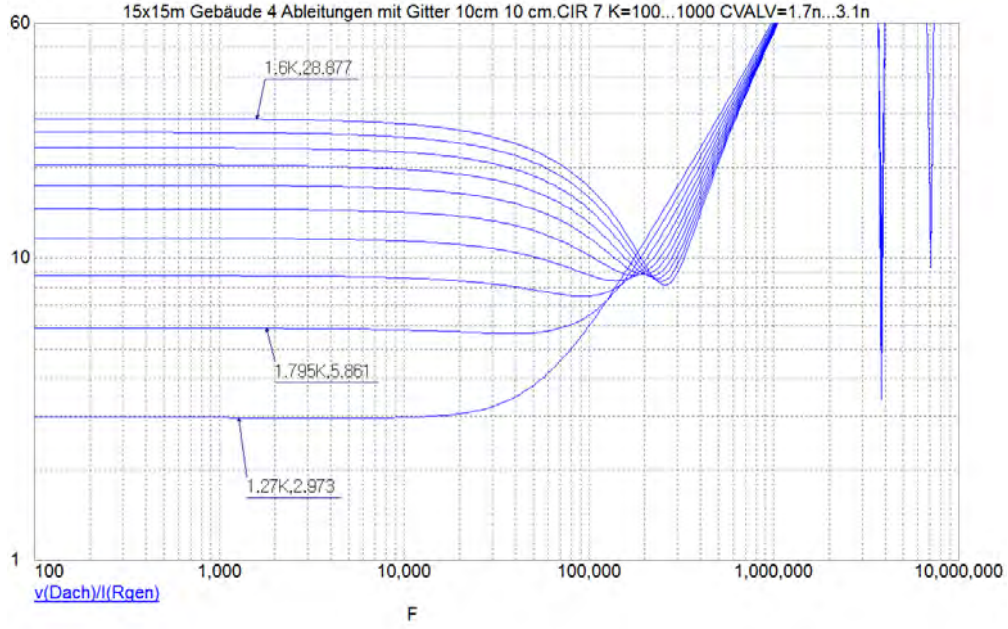


Bild 7-91 Frequenzbereichsanalyse des Ausbreitungswiderstands für Gitter 10 cm x 10 cm. Gittererder insgesamt: 15 m x 15 m = 225 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, L´=49nH, R´=8.8 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

7.4.1.2 Gitter 25 cm x 25 cm

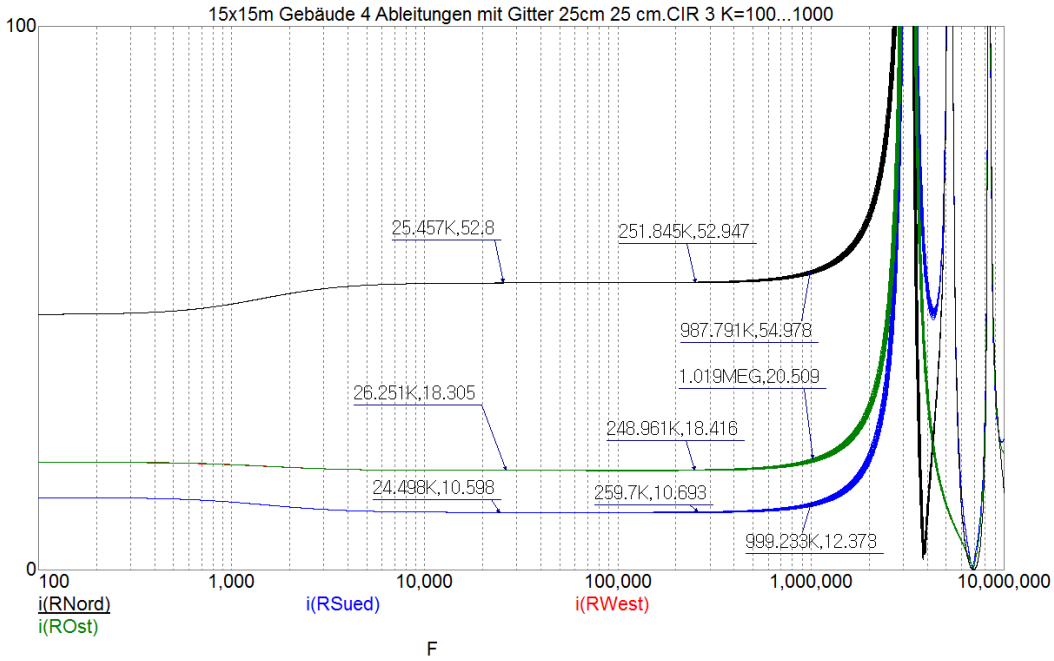


Bild 7-92 Frequenzbereichsanalyse der Stromaufteilung für Gitter 25 cm x 25 cm. Gittererder insgesamt: 15 m x 15 m = 225 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, C`$_E$=0,8..1,4nF. L´=167nH, R´=22 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

Bild 7-93 Frequenzbereichsanalyse des Ausbreitungswiderstands für Gitter 25 cm x 25 cm. Gittererder insgesamt: 15 m x 15 m = 225 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, C`$_E$=0,8..1,4nF. L´=167nH, R´=22 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

7.4.1.3 Gitter 50 cm x 50 cm

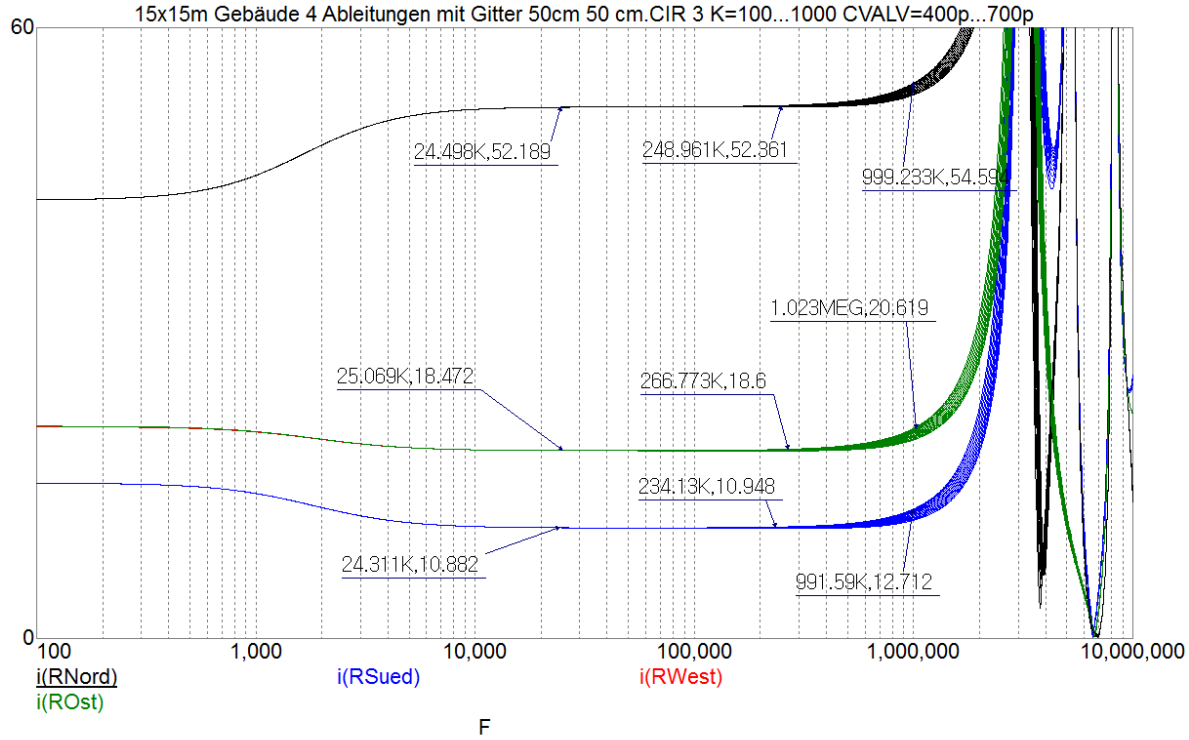


Bild 7-94 Frequenzbereichsanalyse der Stromaufteilung für Gitter 50 cm x 50 cm. Gittererder insgesamt: 15 m x 15 m = 225 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, C`$_E$=0,4..0,7nF. L´=404nH, R´=44 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

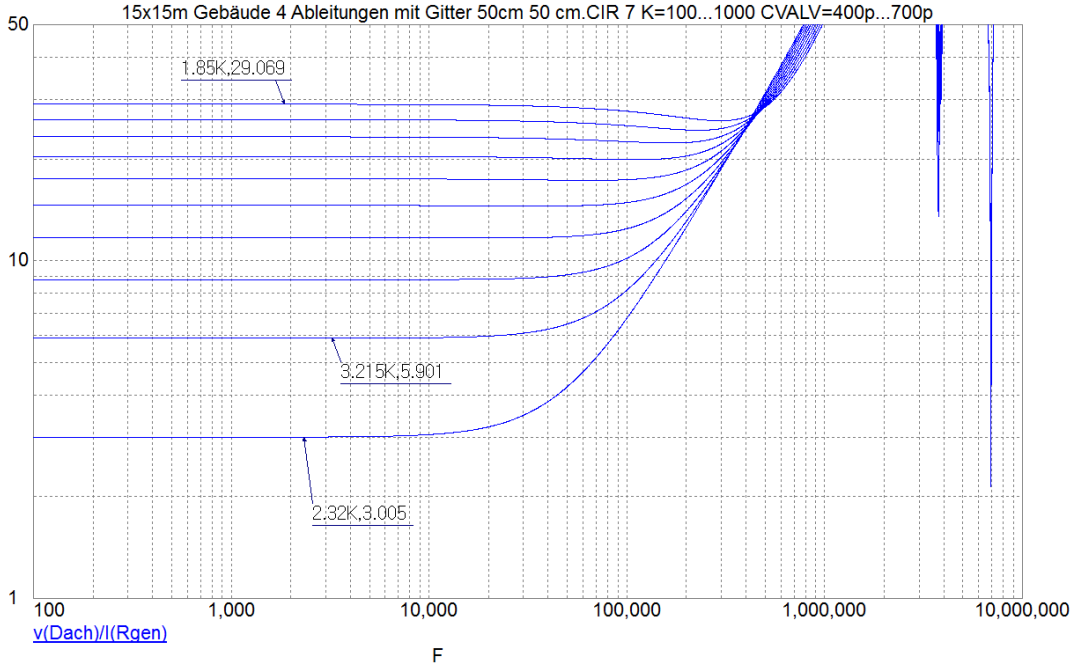


Bild 7-95 Frequenzbereichsanalyse des Ausbreitungswiderstands für Gitter 50 cm x 50 cm. Gittererder insgesamt: 15 m x 15 m = 225 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, C`$_E$: 0,4...0.7 nF. L´=404nH, R´=44 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

7.4.2 Zeitbereichsanalyse

7.4.2.1 Gitter 10 cm x 10 cm

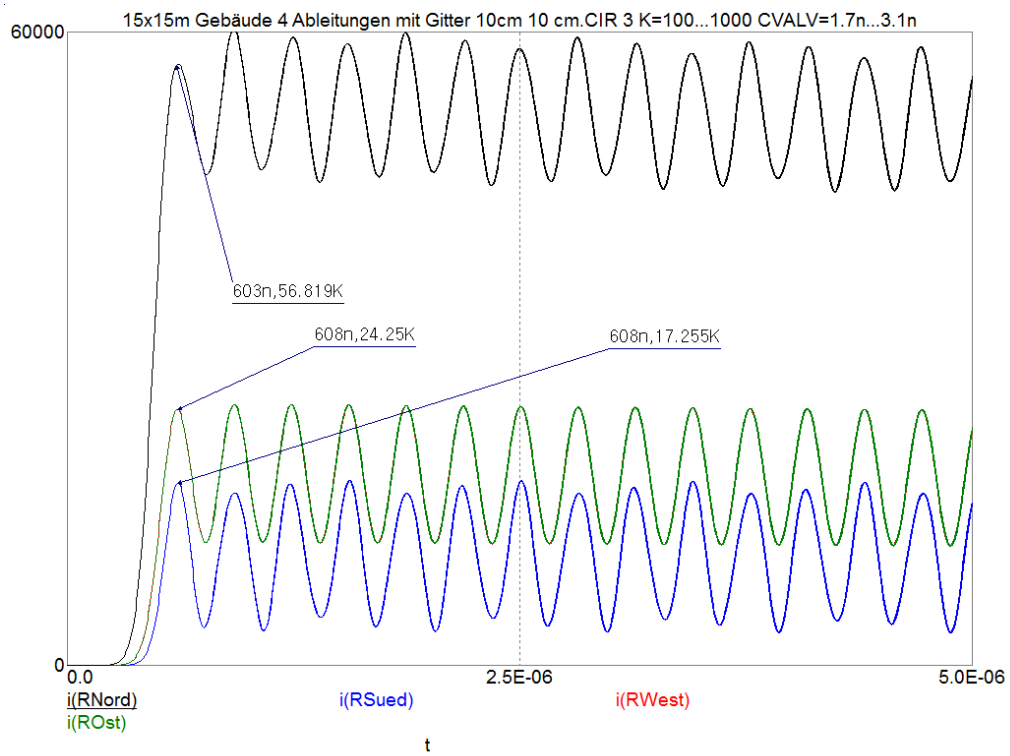


Bild 7-96 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 10 cm x 10 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=1,7..3,1nF. L´=49 nH, R´=8,8 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz. REval=6,52 Ohm

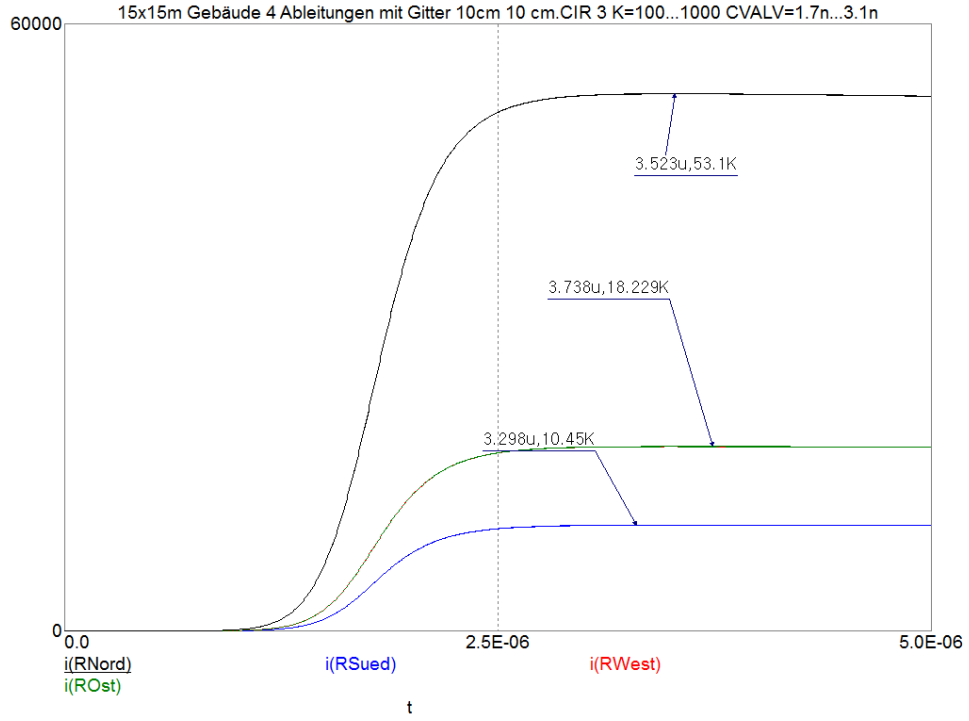


Bild 7-97 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 10 cm x 10 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, $C`_E$=1,7..3,1nF. L´=49 nH, R´=8,8 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz. REval=6,52 Ohm

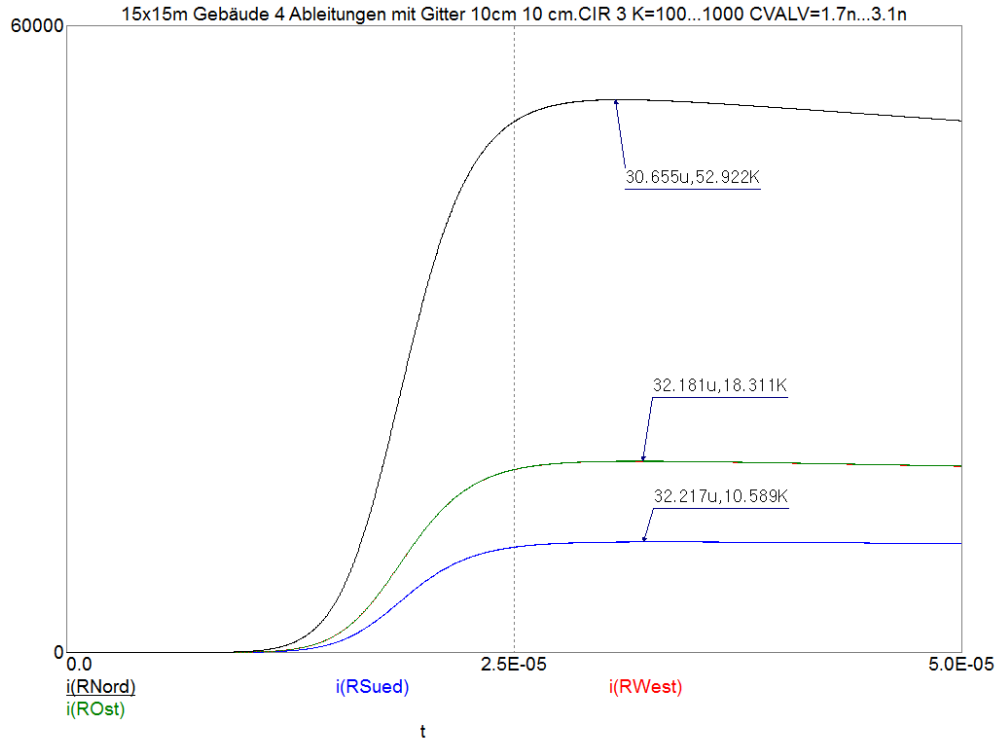


Bild 7-98 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 10 cm x 10 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, $C`_E$=1,7..3,1nF. L´=49 nH, R´=8,8 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz. REval=6,52 Ohm

7.4.2.2 Gitter 25 cm x 25 cm

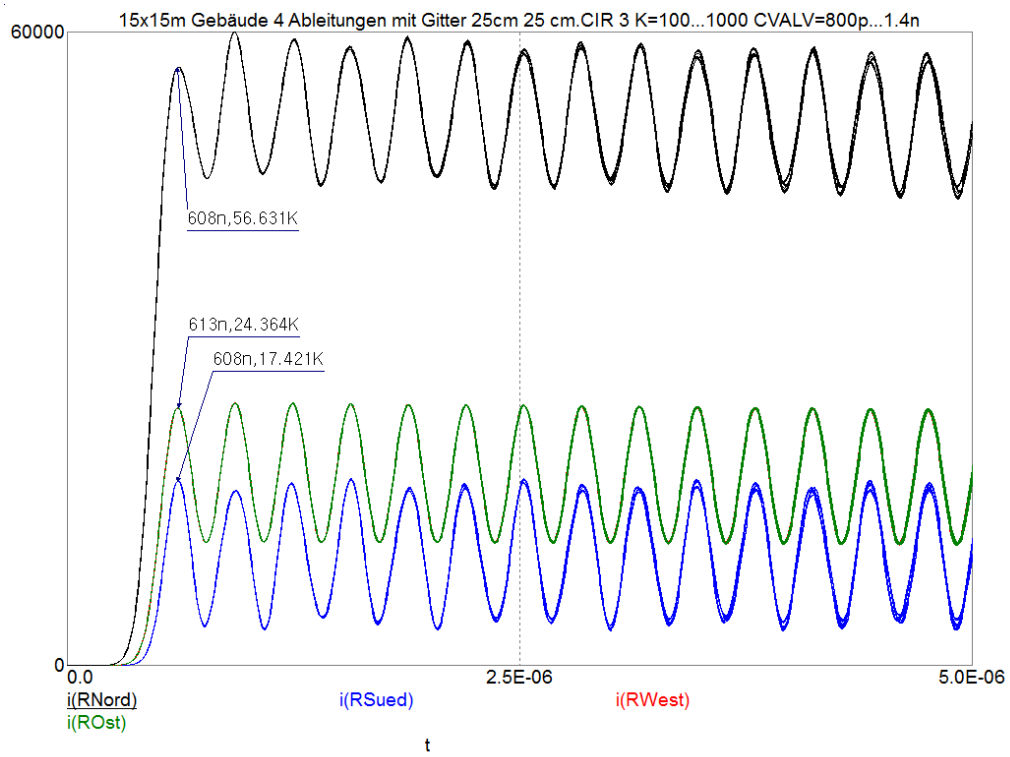


Bild 7-99 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 25 cm x 25 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=0,8..1.4nF. L´=167 nH, R´=22 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz. REval=6,52 Ohm

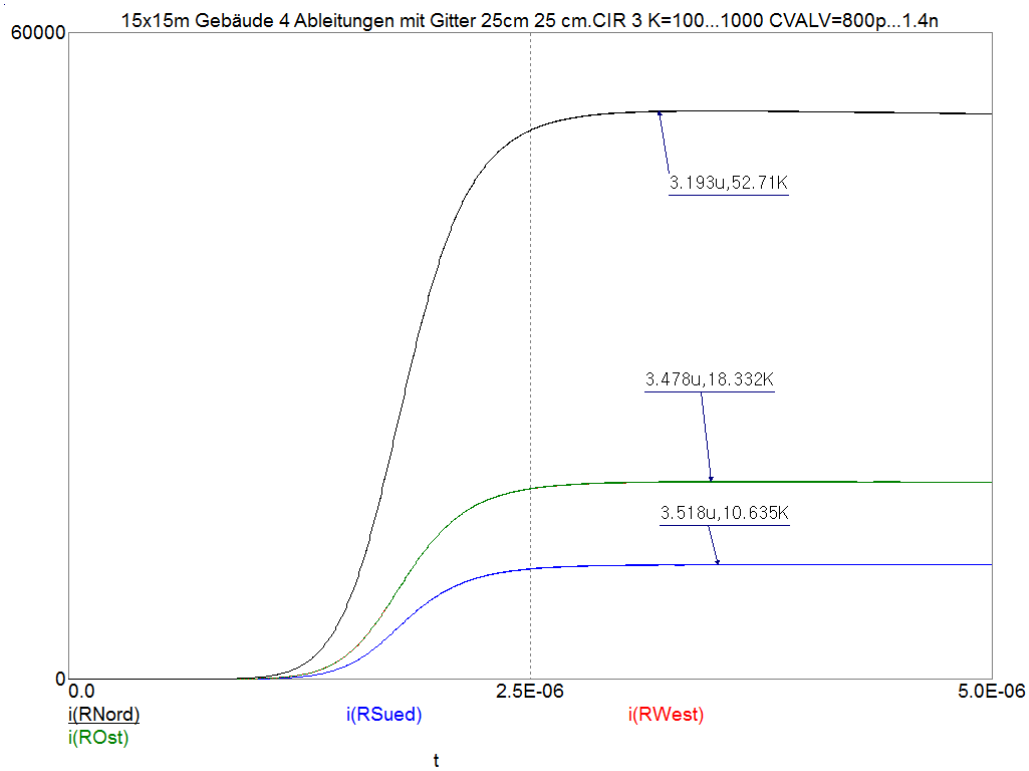


Bild 7-100 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 25 cm x 25 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=0,8..1.4nF. L´=167nH, R´=22 mOhm . REval=6,52 Ohm

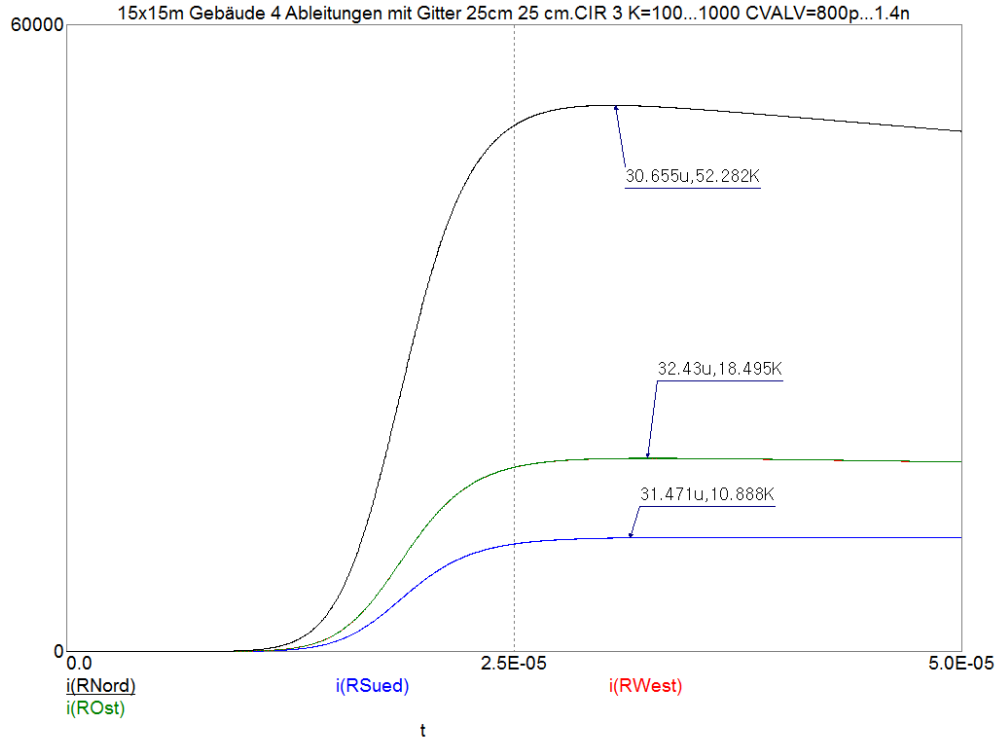


Bild 7-101 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, $C`_E$=0,8..1.4nF. L´=167nH, R´=22 mOhm. REval=6,52 Ohm

7.4.2.3 Gitter 50 cm x 50 cm

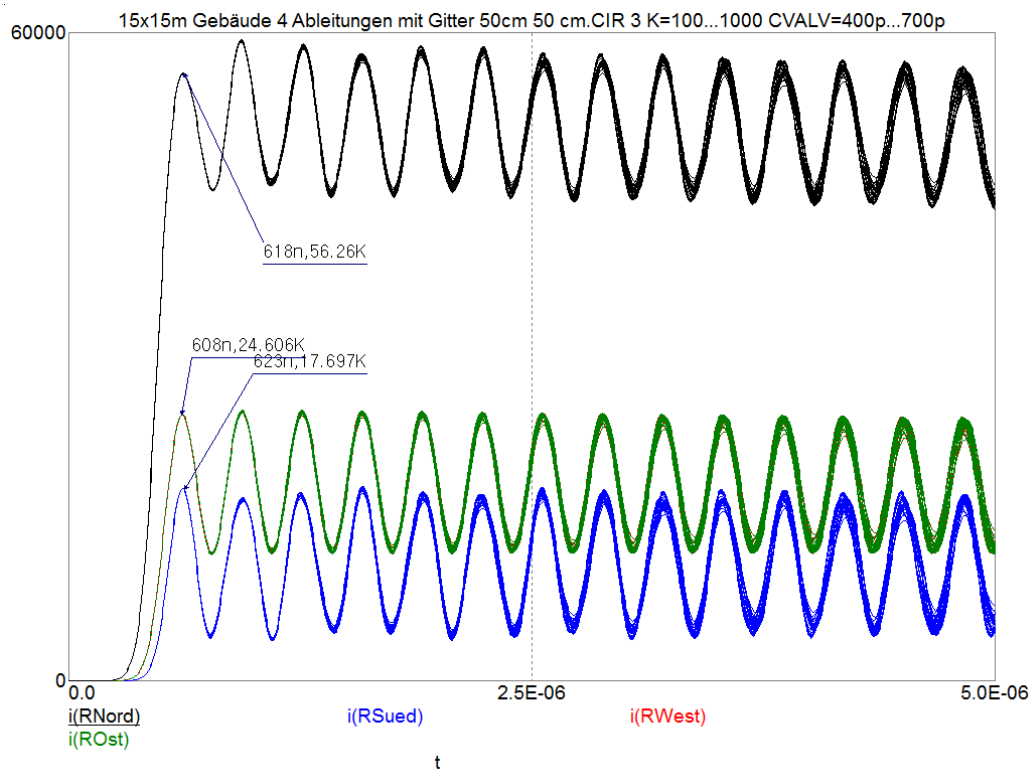


Bild 7-102 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, $C`_E$=0,4..0,7nF. L´=404nH, R´=44 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz.

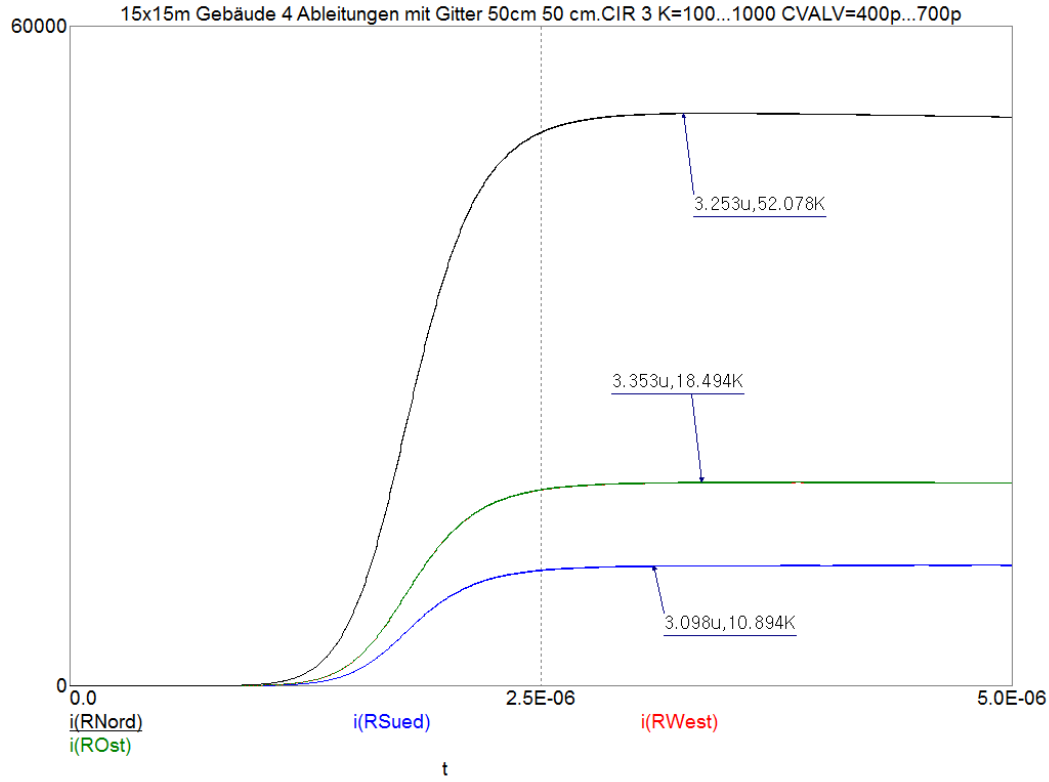


Bild 7-103 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, $C`_E$=0,4..0,7nF. L´=404nH, R´=44 mOhm

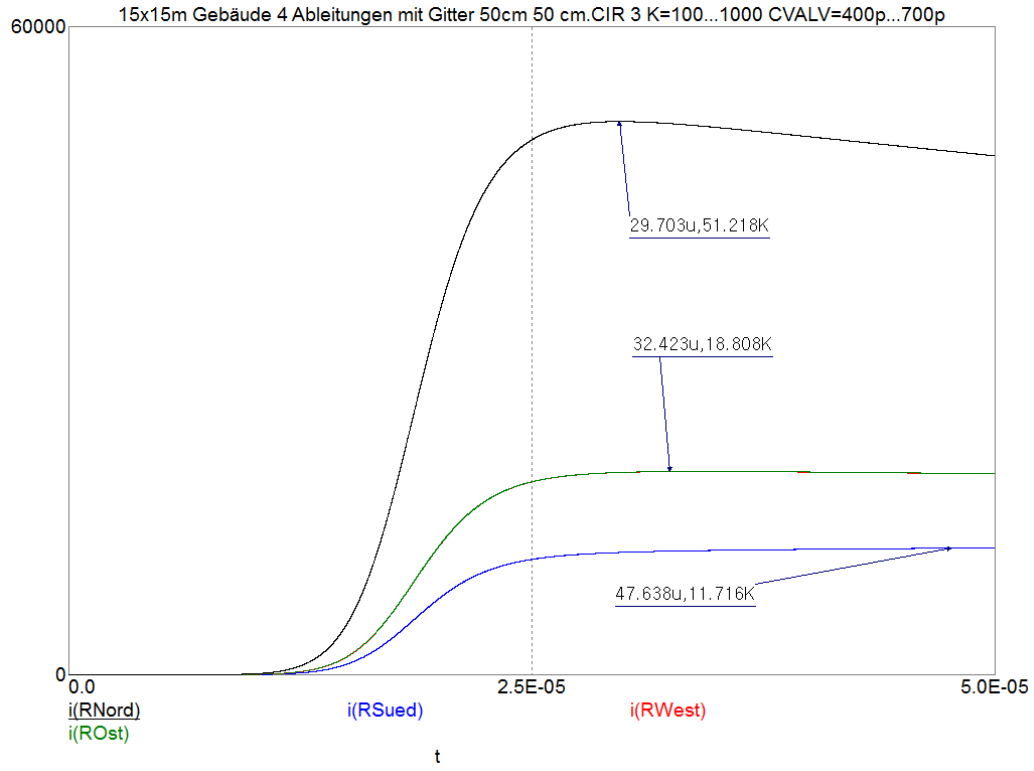


Bild 7-104 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, $C`_E$=0,4..0,7nF. L´=404nH, R´=44 mOhm

7.4.3 Vergleich der Ergebnisse

Die Stromaufteilung ist bei allen Gitterformen nahezu gleich. Weder die Frequenz, noch die Impulsform beeinflussen die Stromaufteilung. Beim 0,25/100 Impuls sind die Werte etwas größer als die aus der Frequenzbereichsanalyse. Das ist durch stärkeres Überschwingen aufgrund längerer Ableitungen auf dem Gebäude (15 m statt 10 m) begründet, siehe z.B. Bild 7-97. Damit verinfacht sich die Berechnung der Schrittspannung mit GSA, da imer die gleichen Werte der Stromeinspeisung in die einzelnen Ableitungen verwendet werden können.
Gegenüber den Ergebnissen eines 10 m x 10 m Gebäudes kann aber festgestellt werden, dass die Ableitung 1 einen größeren Strom führt. In Bild 7-109 sind die Ergebnisse für beide Gebäude verglichen.

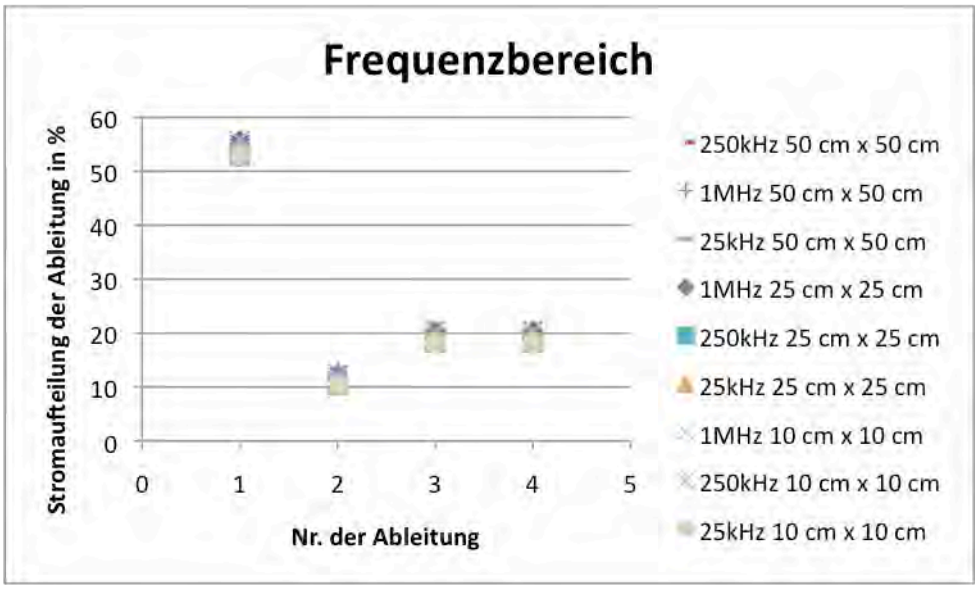


Bild 7-105 Stromaufteilung im Frequenzbereich. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm

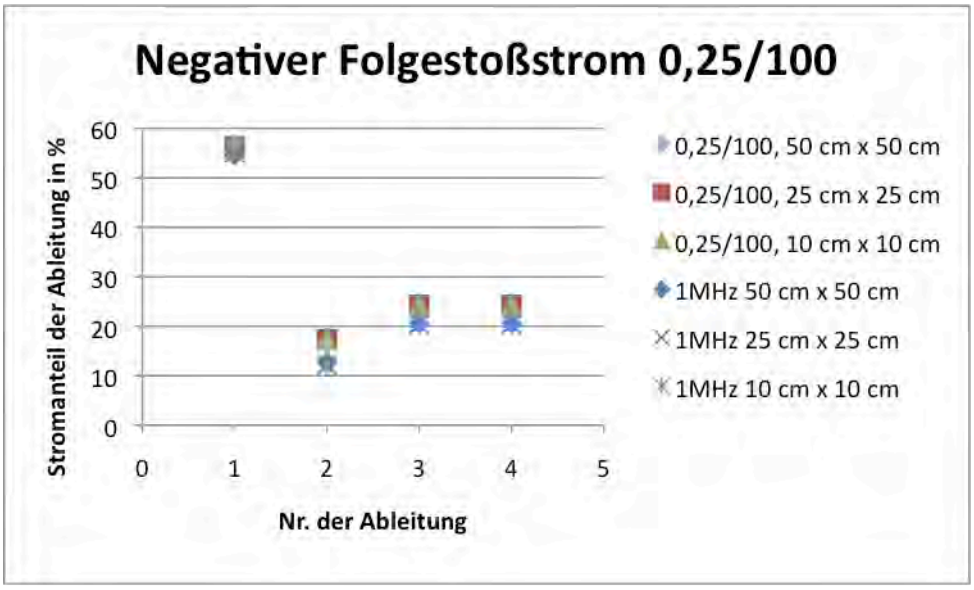


Bild 7-106 Stromaufteilung für 0,25/100 Impuls im Vergleich mit 1 MHz. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm

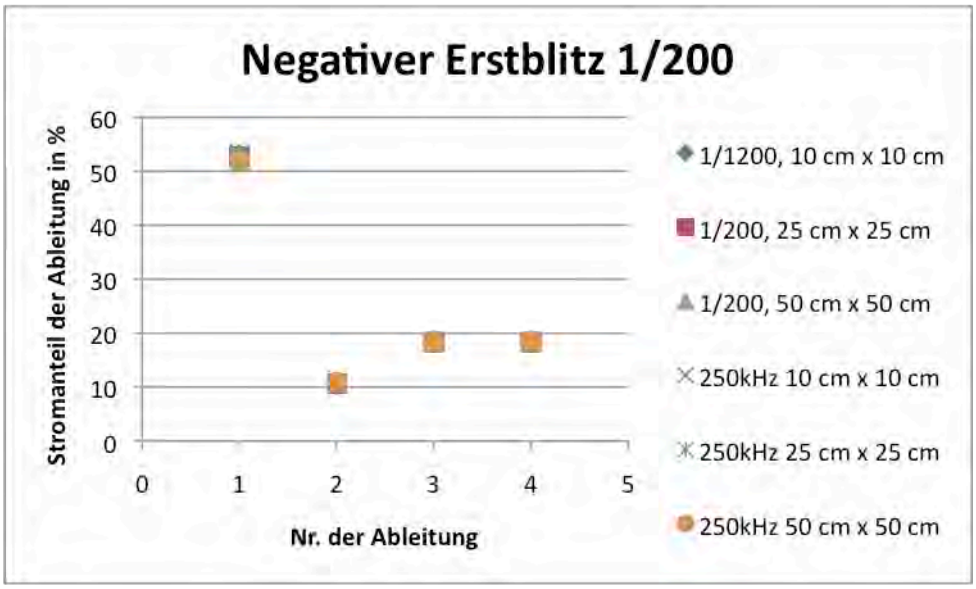


Bild 7-107 Stromaufteilung für 1/200 Impuls im Vergleich mit 250 kHz. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm

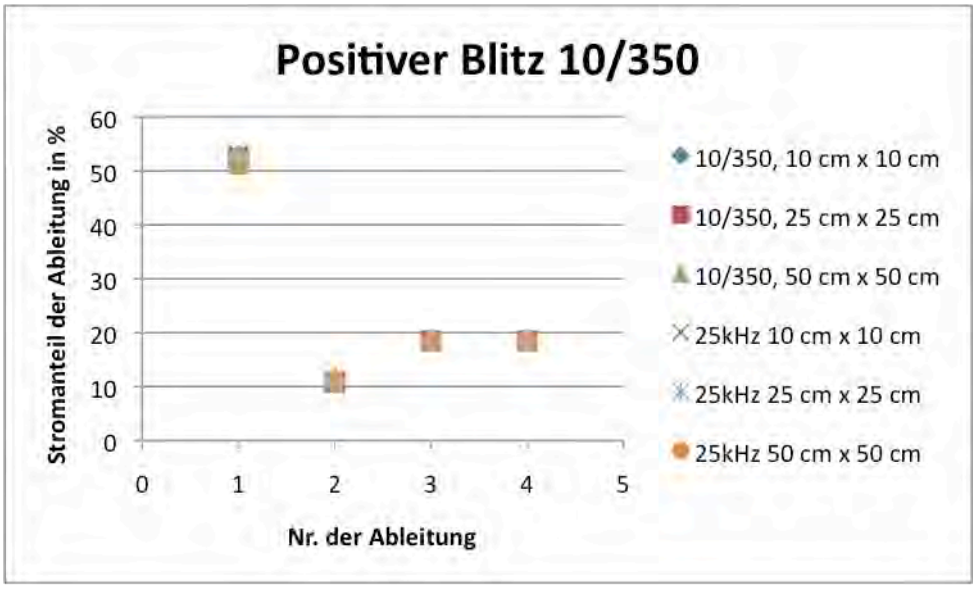
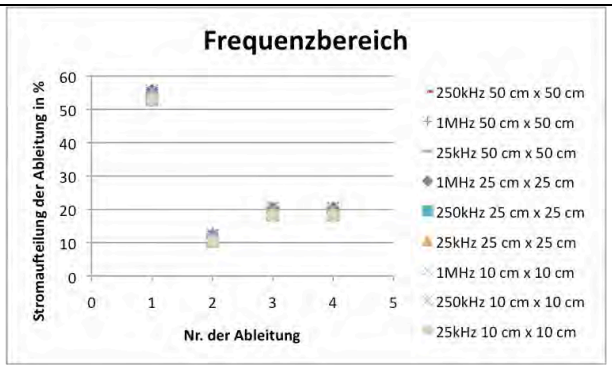
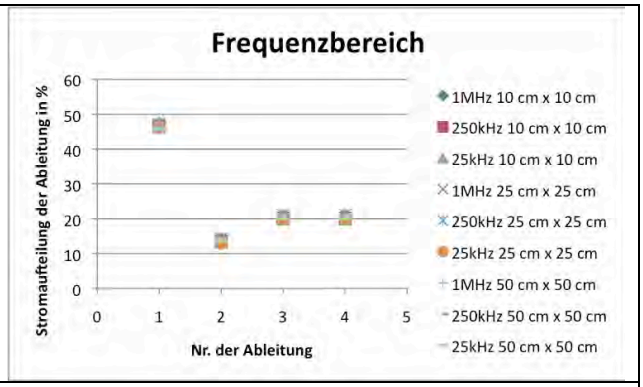


Bild 7-108 Stromaufteilung für 10/350 Impuls im Vergleich mit 25 kHz. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm



Gebäude 15 m x 15 m



Gebäude 10 m x 10 m

Bild 7-109 Stromaufteilung im Vergleich: 15 m x 15 m und 10 m x 10 m Gebäude im Frequenzbereich. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm

7.5 Gebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen 10 m und Gittererder aus 6 mm Edelstahldraht

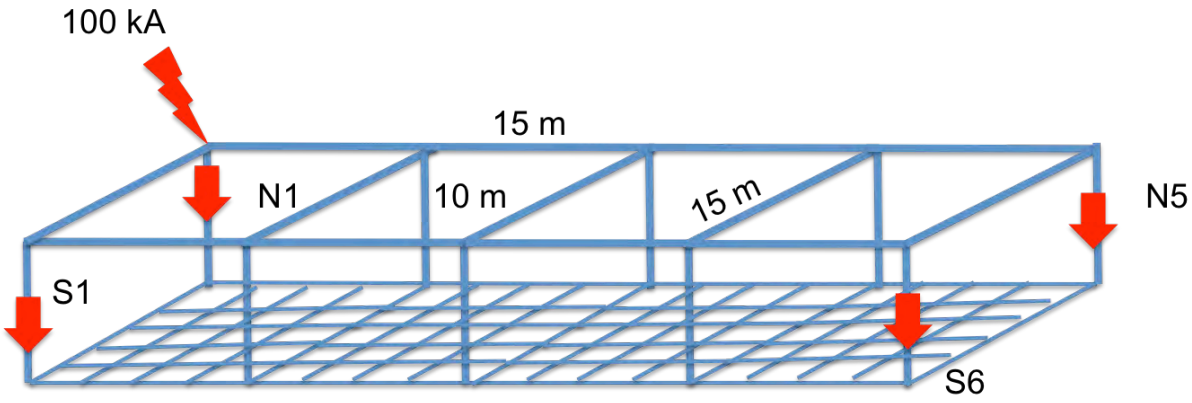


Bild 7-110 Gebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen und einem Gitter als Erdsystem.

7.5.1 Frequenzbereichsanalyse

7.5.1.1 Gitter 10 cm x 10 cm

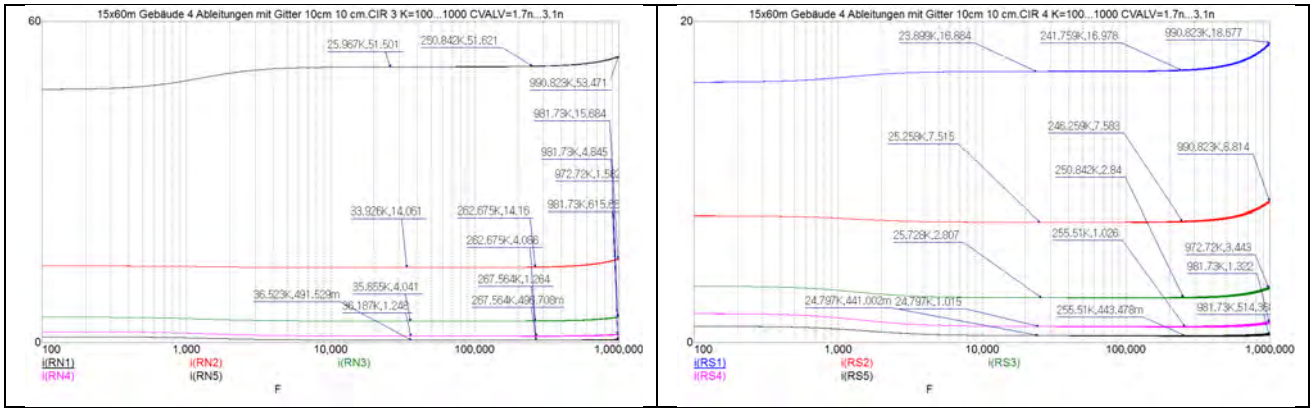


Bild 7-111 Frequenzbereichsanalyse der Stromaufteilung für Gitter 10 cm x 10 cm. Gittererder insgesamt: 15 m x 60 m = 900 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, L´=49nH, R´=8.8 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

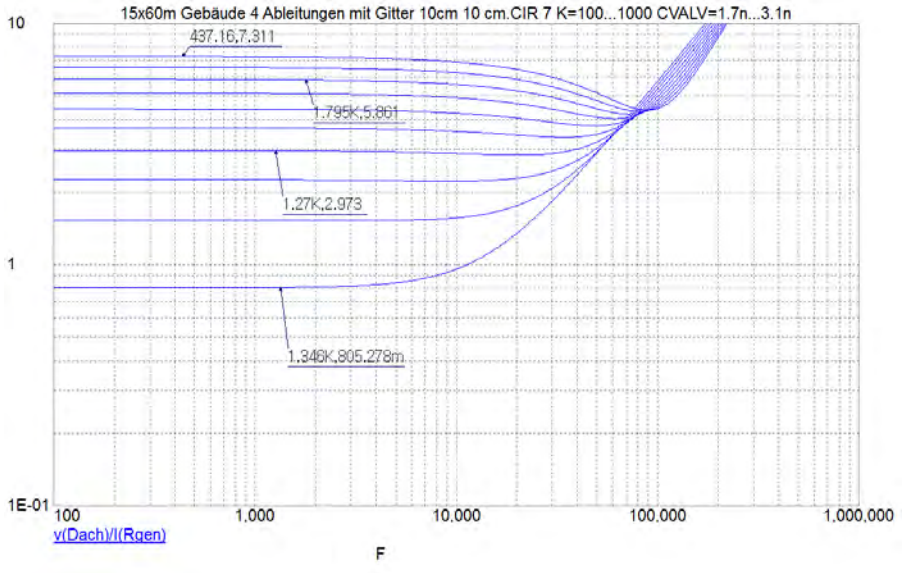


Bild 7-112 Frequenzbereichsanalyse des Ausbreitungswiderstands für Gitter 10 cm x 10 cm. Gittererder insgesamt: . Gittererder insgesamt: 15 m x 60 m = 900 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, L´=49nH, R´=8.8 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

7.5.1.2 Gitter 25 cm x 25 cm

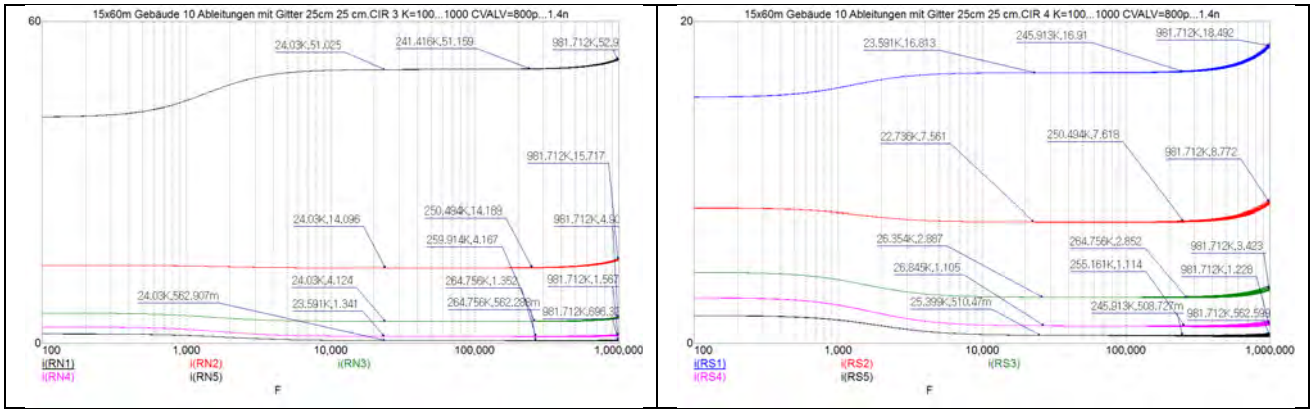


Bild 7-113 Frequenzbereichsanalyse der Stromaufteilung für Gitter 25 cm x 25 cm. Gittererder insgesamt: . Gittererder insgesamt: 15 m x 60 m = 900 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, L´=167nH, R´=22 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

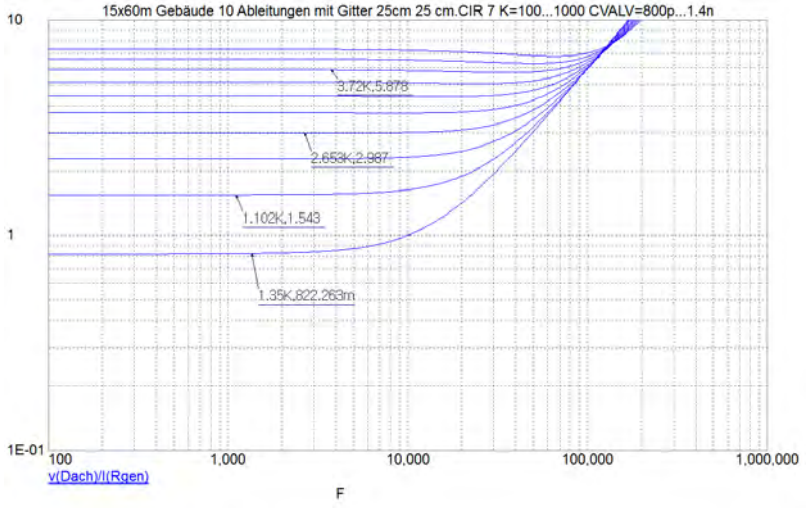


Bild 7-114 Frequenzbereichsanalyse des Ausbreitungswiderstands für Gitter 25 cm x 25 cm. Gittererder insgesamt: . Gittererder insgesamt: 15 m x 60 m = 900 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, L´=167nH, R´=22 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

7.5.1.3 Gitter 50 cm x 50 cm

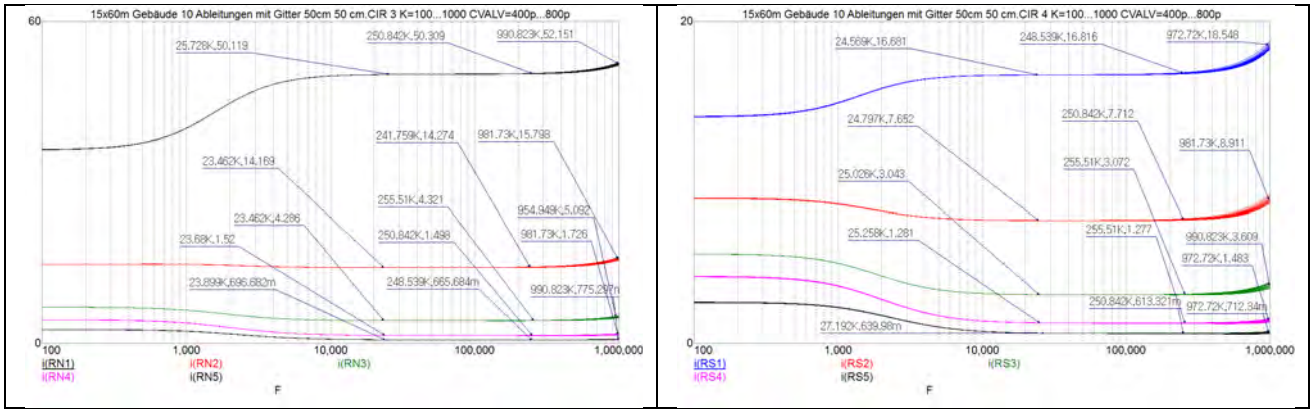


Bild 7-115 Frequenzbereichsanalyse der Stromaufteilung für Gitter 50 cm x 50 cm. Gittererder insgesamt: . Gittererder insgesamt: 15 m x 60 m = 900 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, L´=404nH, R´=44 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

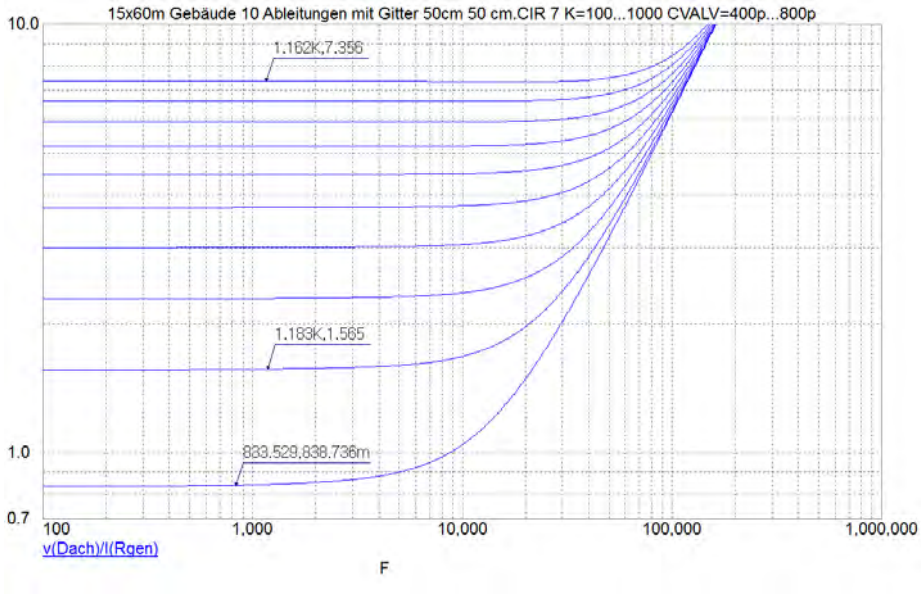


Bild 7-116 Frequenzbereichsanalyse des Ausbreitungswiderstands für Gitter 50 cm x 50 cm. Gittererder insgesamt: . Gittererder insgesamt: 15 m x 60 m = 900 Gitter je 1 m x 1m. Stepping ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm, L´=404nH, R´=44 mOhm. REVal=6,52 Ohm.

7.5.2 Zeitbereichsanalyse

7.5.2.1 Gitter 10 cm x 10 cm

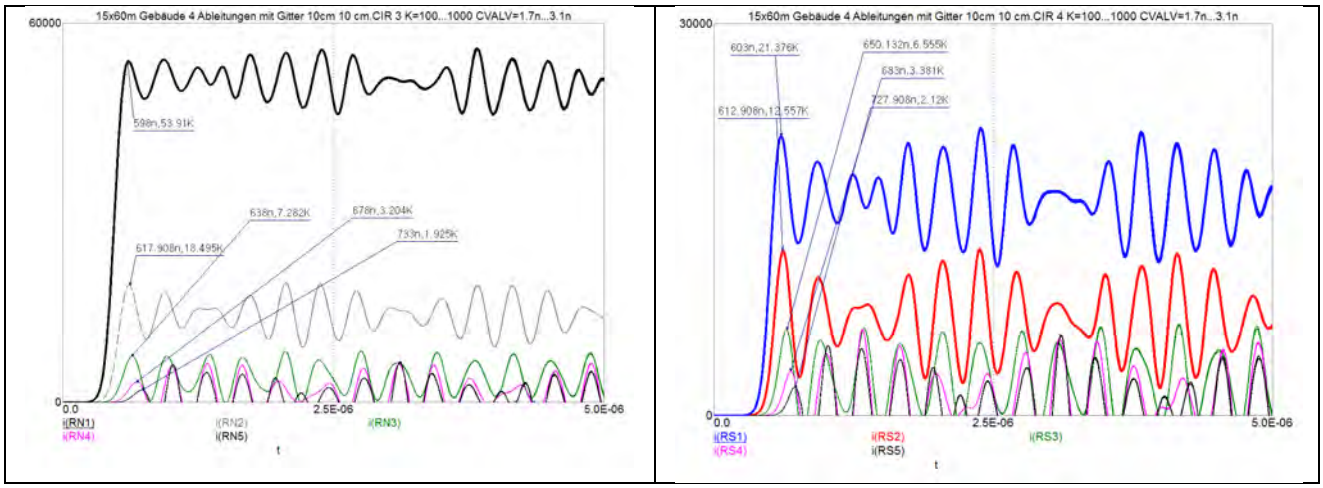


Bild 7-117 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen Gittererder 10 cm x 10 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=1,7..3,1nF. L´=49 nH, R´=8,8 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz. REval=6,52 Ohm

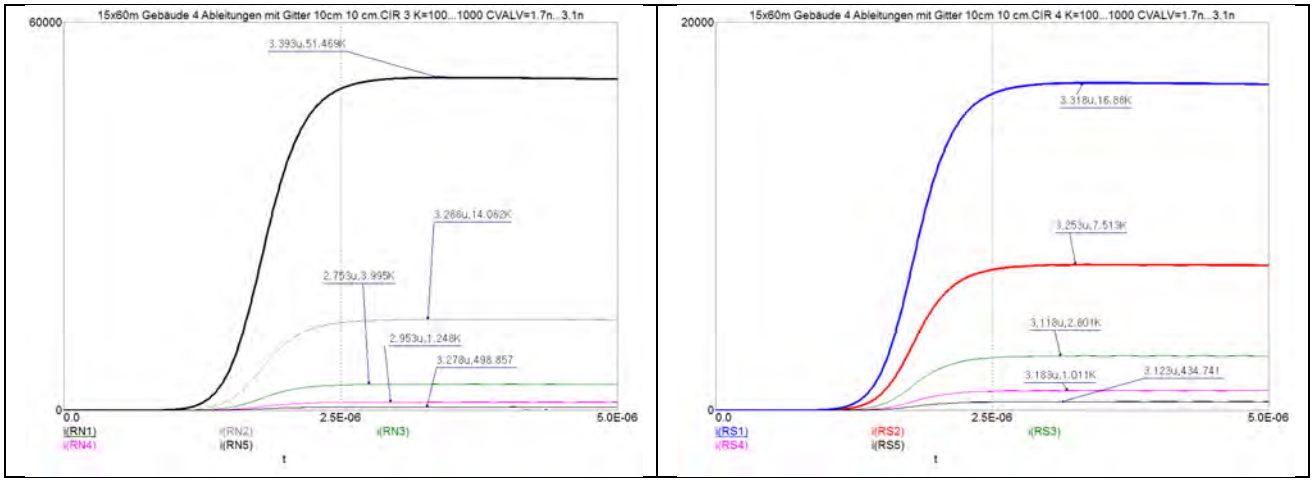


Bild 7-118 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen Gittererder 10 cm x 10 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=1,7..3,1nF. L´=49 nH, R´=8,8 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz. REval=6,52 Ohm

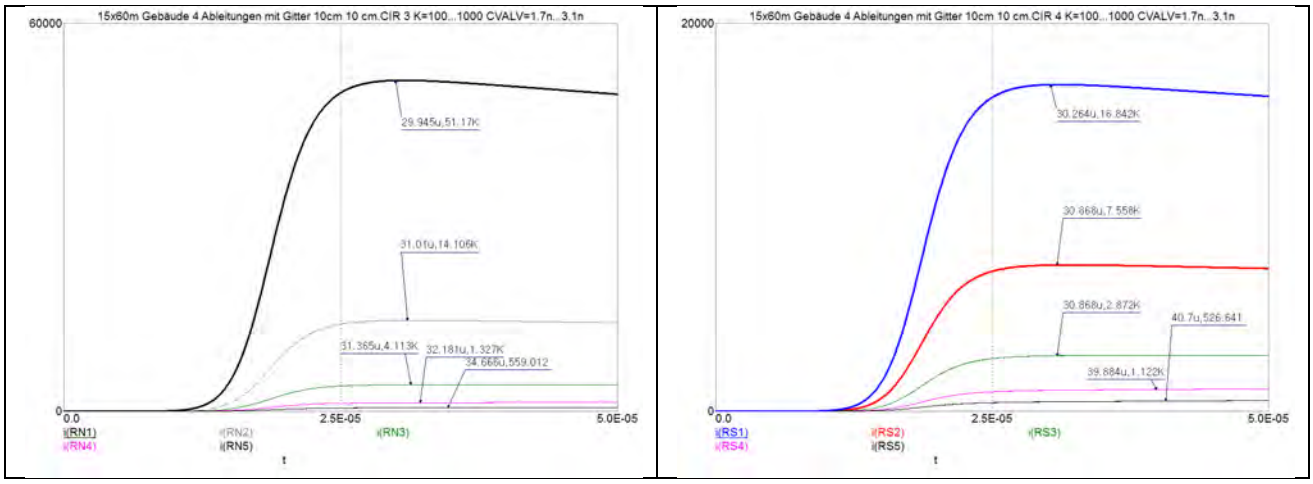


Bild 7-119 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen Gittererder 10 cm x 10 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=1,7..3,1nF. L´=49 nH, R´=8,8 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz. REval=6,52 Ohm

7.5.2.2 Gitter 25 cm x 25 cm

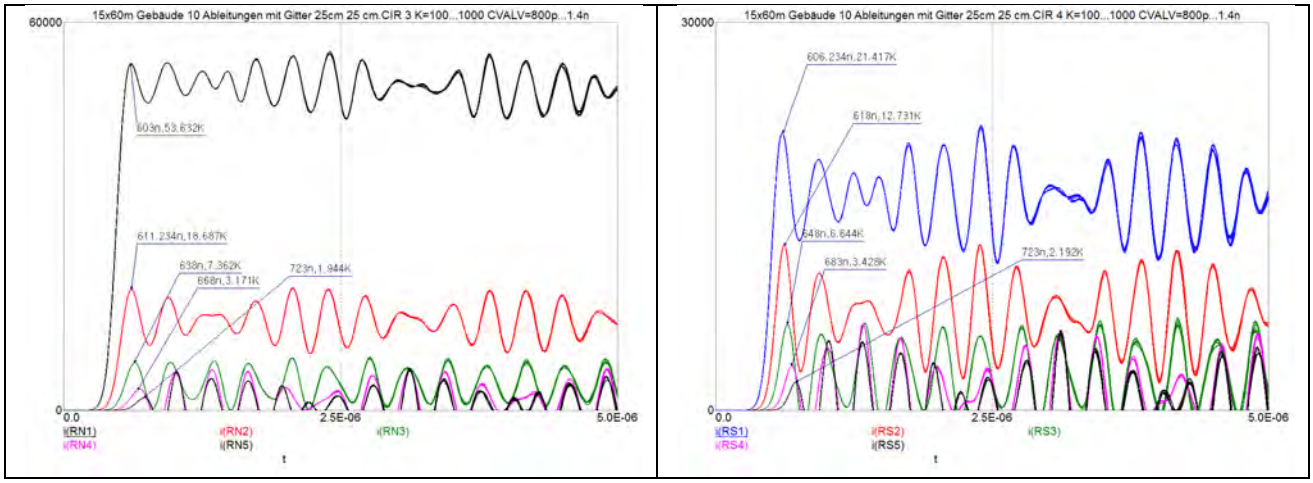


Bild 7-120 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen Gittererder 25 cm x 25 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=0,8..1.4nF. L´=167 nH, R´=22 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz. REval=6,52 Ohm

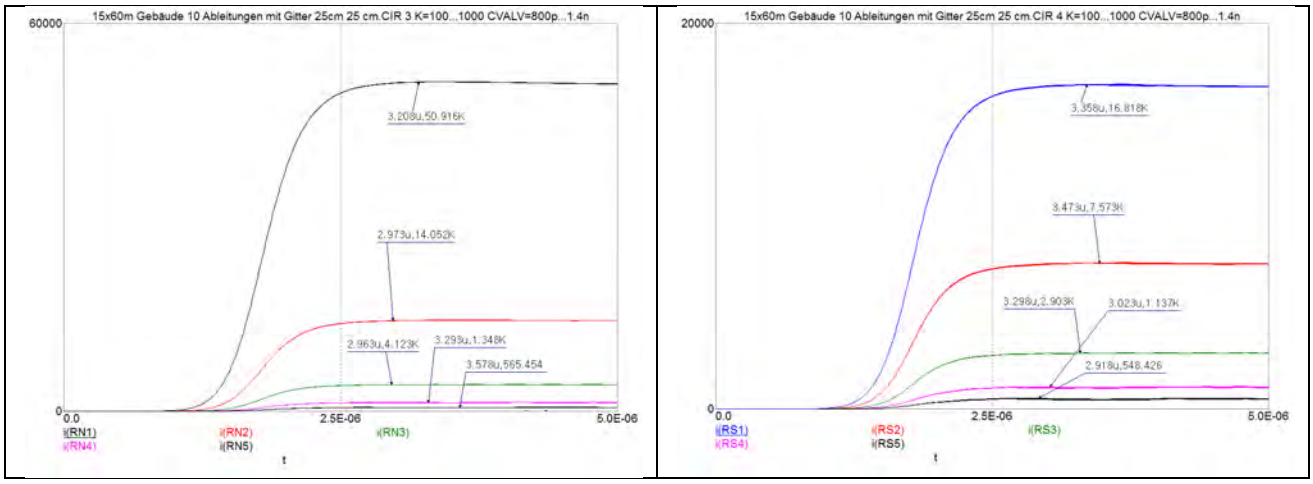


Bild 7-121 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen Gittererder 25 cm x 25 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=0,8..1.4nF. L´=167nH, R´=22 mOhm . REval=6,52 Ohm

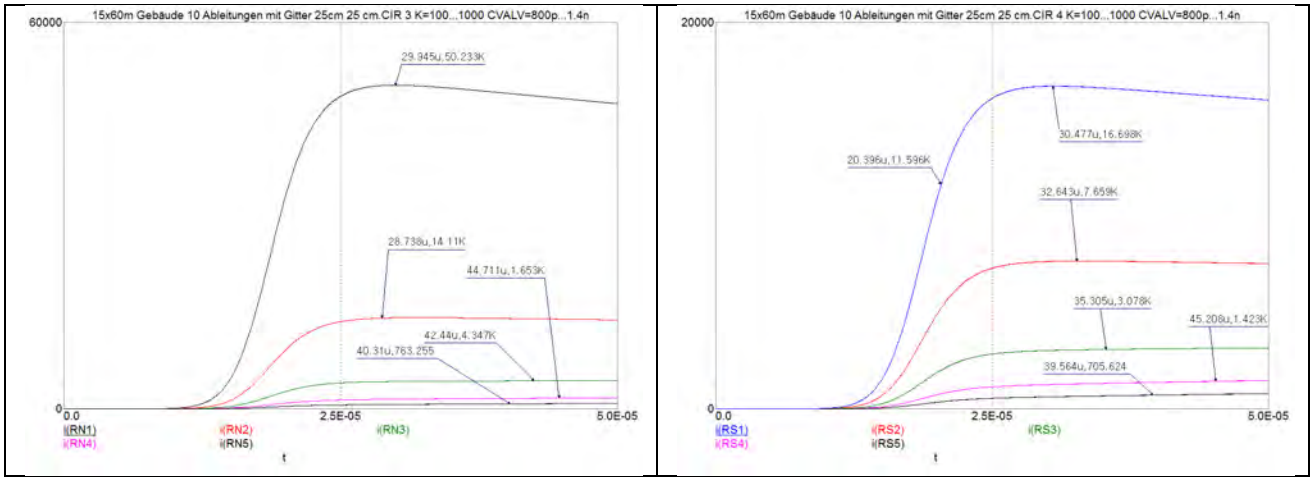


Bild 7-122 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=0,8..1.4nF. L´=167nH, R´=22 mOhm. REval=6,52 Ohm

7.5.2.3 Gitter 50 cm x 50 cm

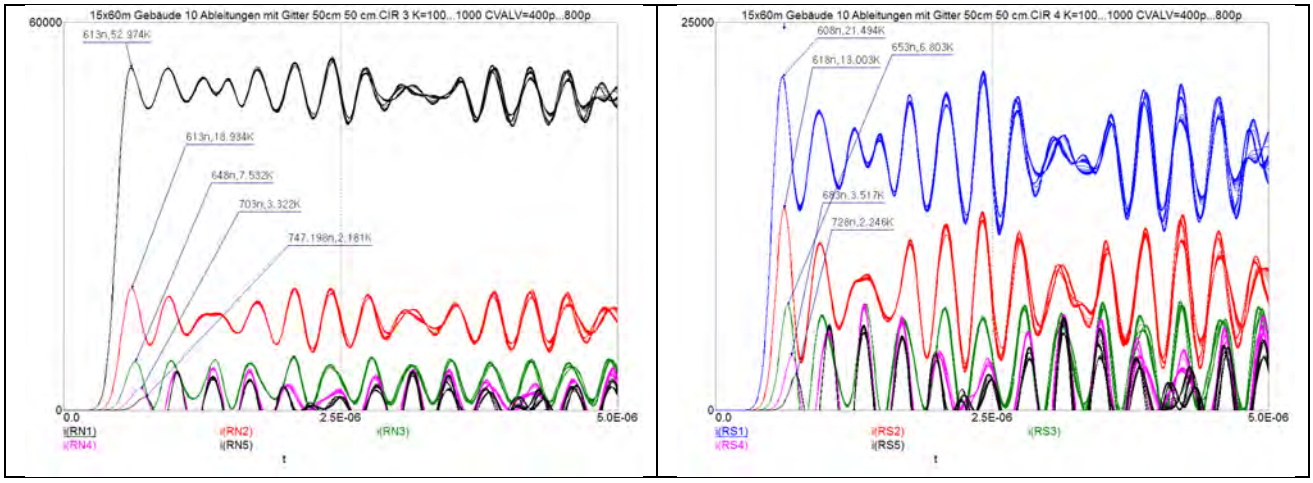


Bild 7-123 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 0,25/100. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=0,4..0,7nF. L´=404nH, R´=44 mOhm Überlagerte Schwingung mit 3 MHz.

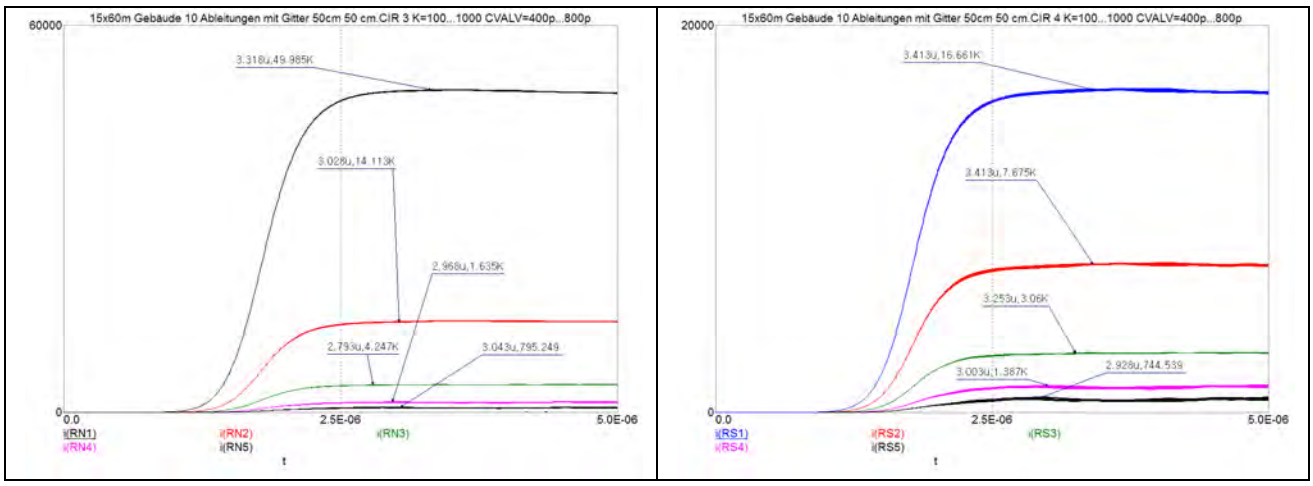


Bild 7-124 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 15 m mit 4 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 1/200. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=0,4..0,7nF. L´=404nH, R´=44 mOhm

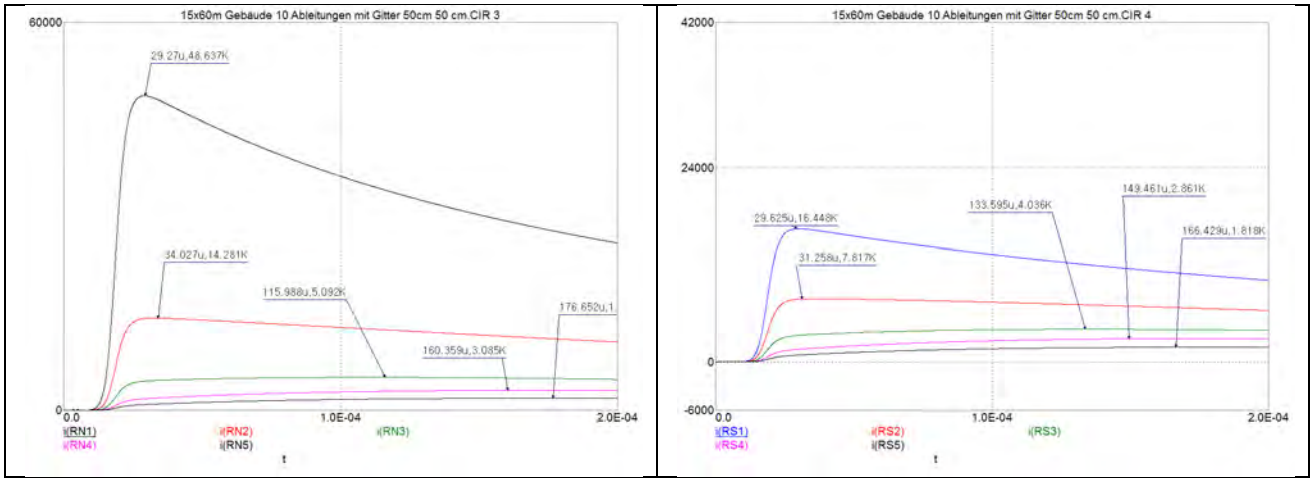


Bild 7-125 Strom in den Ableitungen für Modellgebäude 15 m x 60 m mit 10 Ableitungen Gittererder 50 cm x 50 cm Maschenweite im Zeitbereich für negativen Folgestoßstrom 10/350. ρ_E=100 ----10000 Ohmm, C`$_E$=0,4..0,7nF. L´=404nH, R´=44 mOhm

7.5.3 Vergleich der Ergebnisse

Die Stromaufteilung ist bei allen Gitterformen nahezu gleich. Weder die Frequenz, noch die Impulsform beeinflussen die Stromaufteilung. Beim 0,25/100 Impuls sind die Werte etwas größer als die aus der Frequenzbereichsanalyse. Das ist durch stärkeres Überschwingen aufgrund längerer Ableitungen auf dem Gebäude begründet, siehe z.B. Bild 7-123. Damit vereinfacht sich die Berechnung der Schrittspannung mit GSA, da immer die gleichen Werte der Stromeinspeisung in die einzelnen Ableitungen verwendet werden können.
Gegenüber den Ergebnissen eines 10 m x 10 m Gebäudes kann aber festgestellt werden, dass die Ableitung 1 einen etwas größeren Strom führt. In Bild 7-130 sind die Ergebnisse für alle drei Gebäude verglichen.

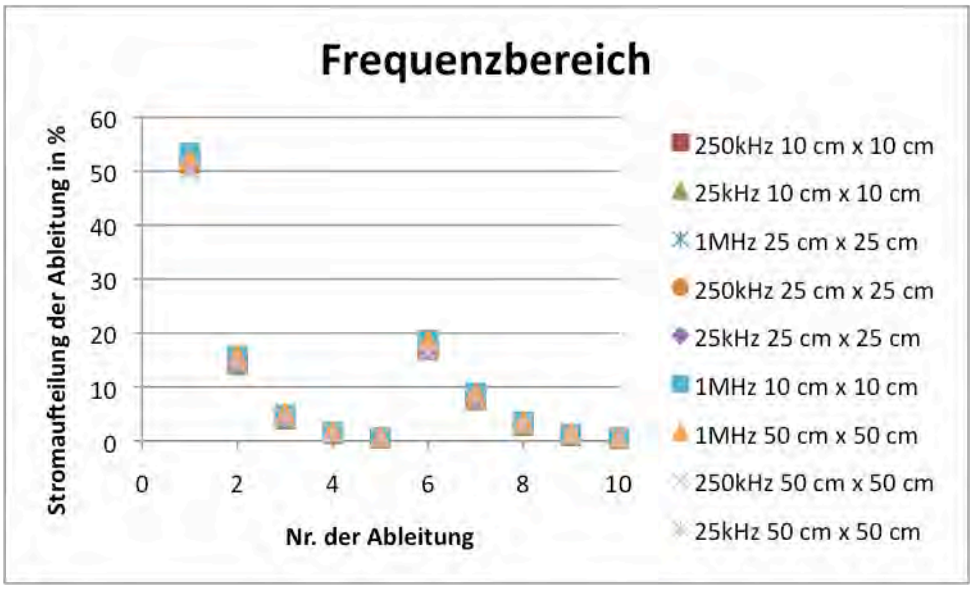


Bild 7-126 Stromaufteilung im Frequenzbereich. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm

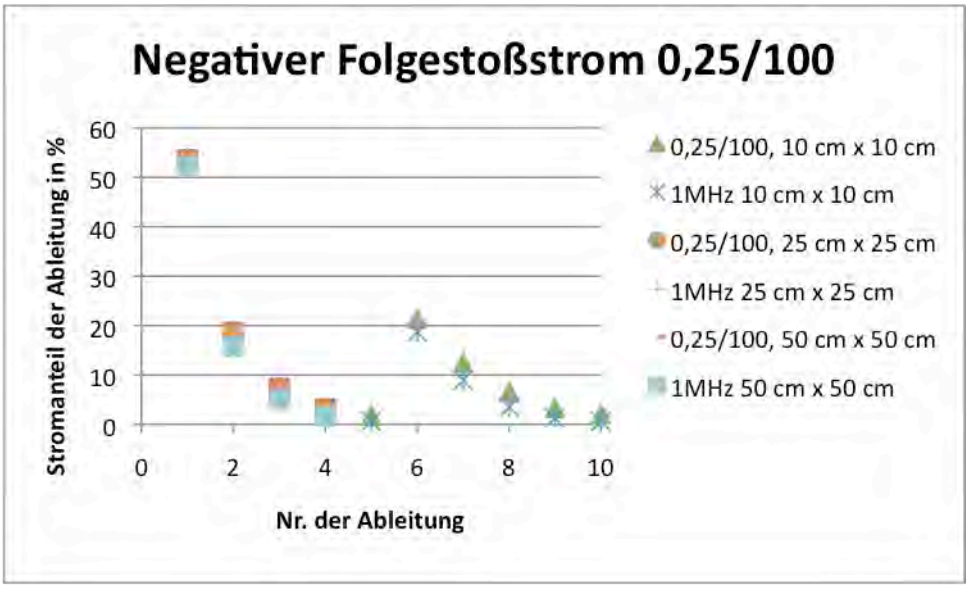


Bild 7-127 Stromaufteilung für 0,25/100 Impuls im Vergleich mit 1 MHz. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm

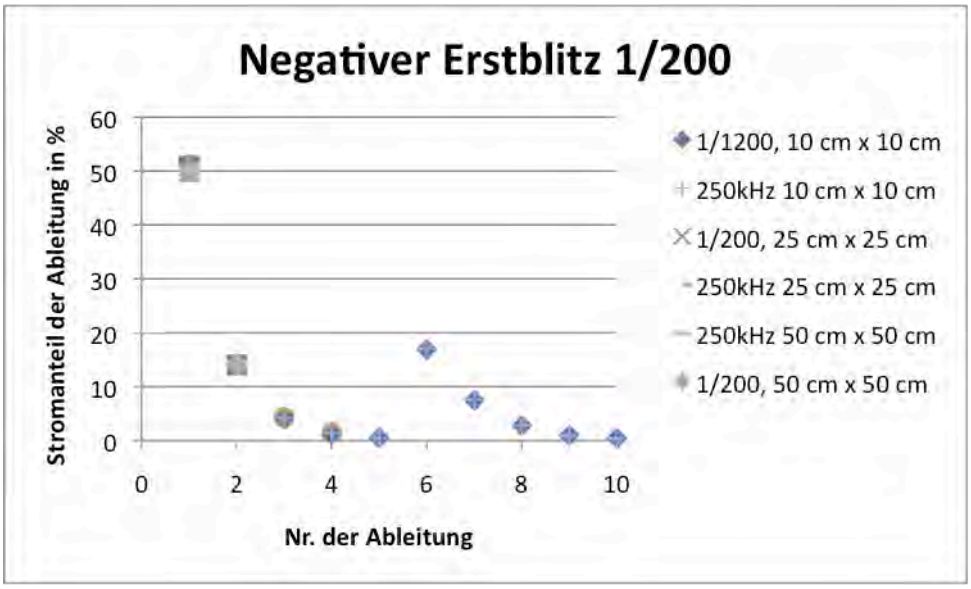


Bild 7-128 Stromaufteilung für 1/200 Impuls im Vergleich mit 250 kHz. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm

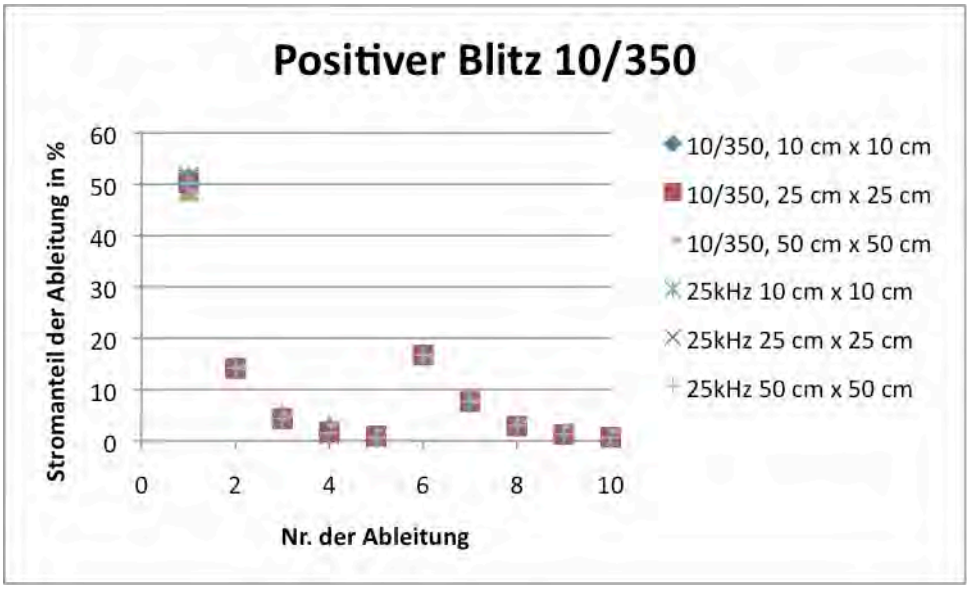
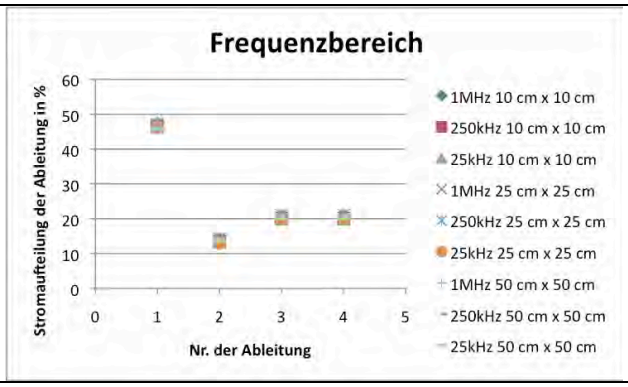
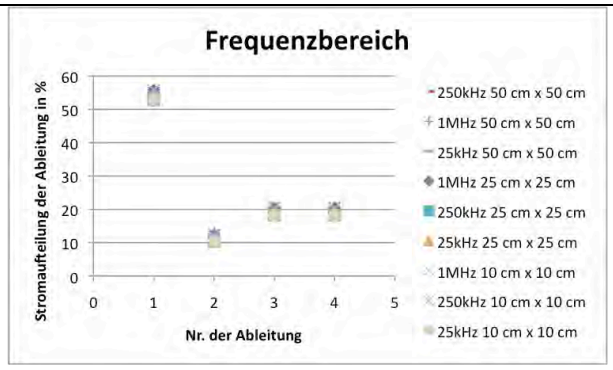


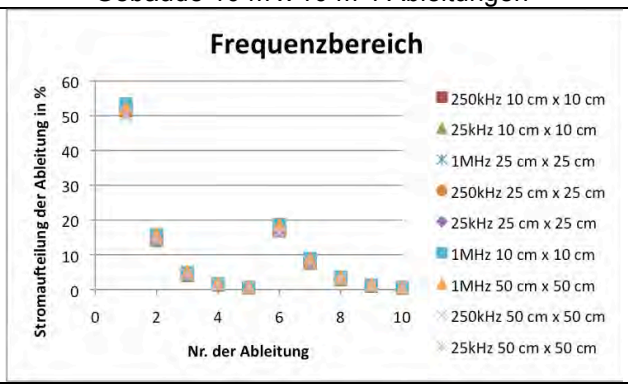
Bild 7-129 Stromaufteilung für 10/350 Impuls im Vergleich mit 25 kHz. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm



Gebäude 10 m x 10 m 4 Ableitungen



Gebäude 15 m x 15 m 4 Ableitungen



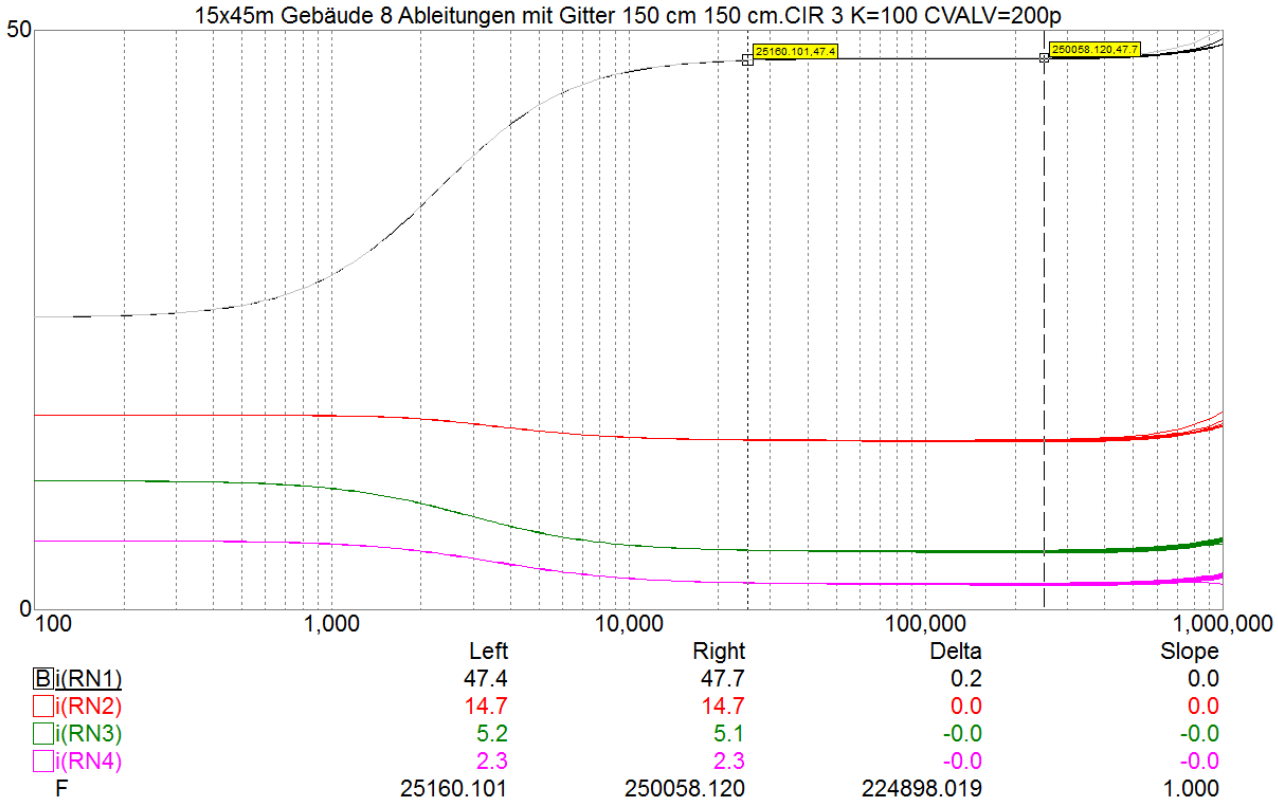
Gebäude 15 m x 60 m 10 Ableitungen

Bild 7-130 Stromaufteilung im Vergleich: 15m x 60 m, 15 m x 15 m und 10 m x 10 m Gebäude im Frequenzbereich. Gültig für ρ_E=100 Ohmm.....1000 Ohmm

7.6 Gebäude 15 m x 45 m mit 8 Ableitungen 10 m und Gittererder aus 6 mm Edelstahldraht mit Maschenweite 150 cm x 150 cm.

Auf Wunsch des VDB sollte diese Abmessung untersucht werden.
Die erste Modellierung in GSALab ergab aber bereits bei einer Maschenweite von 75 cm eine Anzahl von 5000 Elementen. Dadurch sind die Grenzen des Programms erreicht.
Daher wird in GSALab nur bis zu einer mimalen Maschenweite von 75 cm gerechnet. Im Folgenden werden die Werte für die Stromaufteilung als Vorbereitung für die Simulation in GSA berechnet.

Aus den vorliegenden Erkenntnissen der ersten GSA Simulation ist aber bekannt, dass der 10/350 den Worst case für die Schrittspannung darstellt. Daher werden hier nicht mehr alle Formen berechnet, sondern nur noch ein Frequenzgang der Stromaufteilung berechnet.



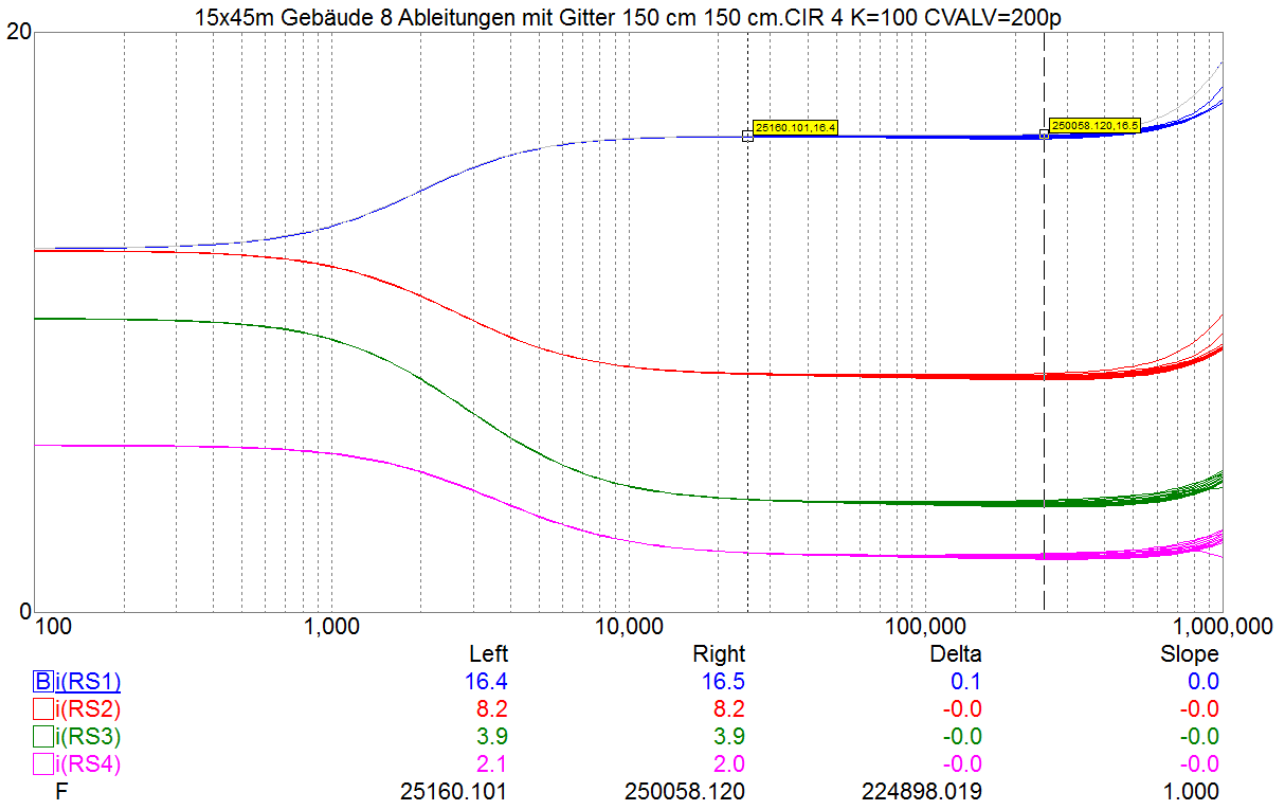
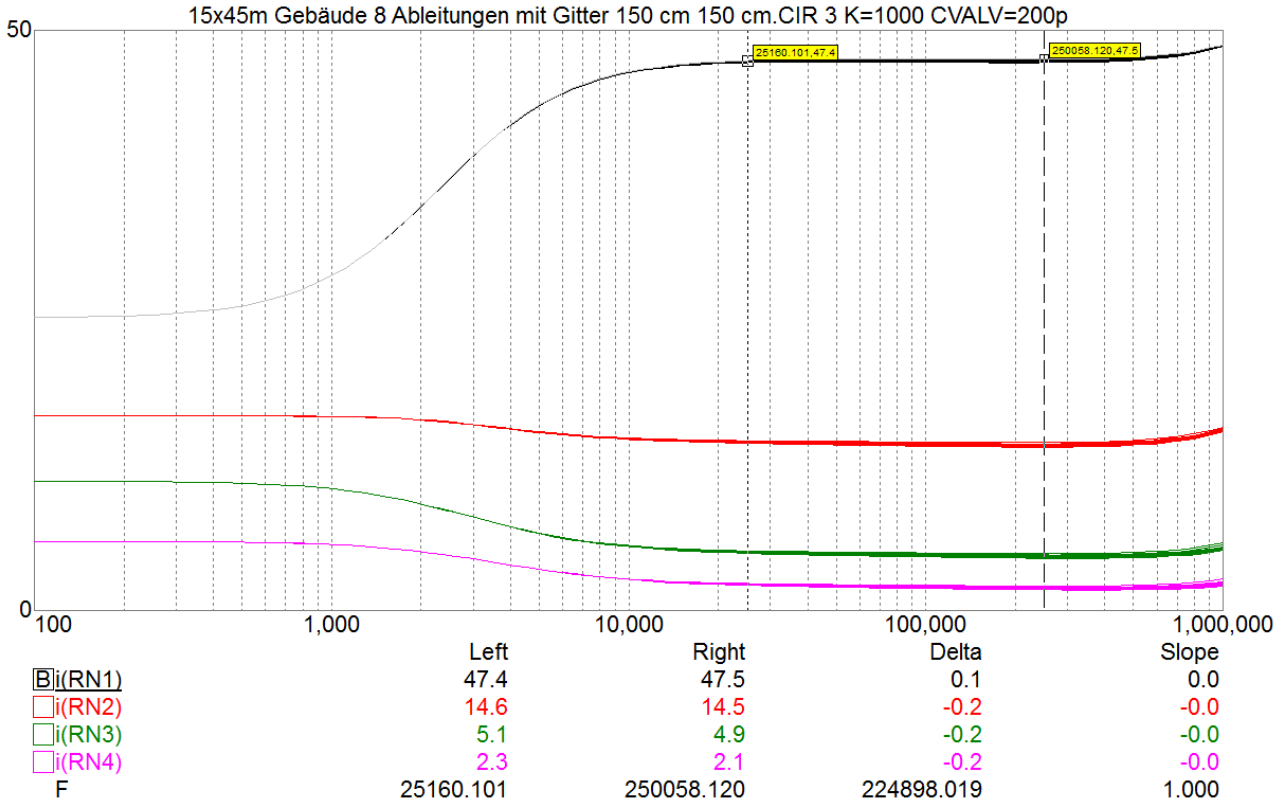


Bild 7-131 Stepping 100..1000 Ohmm und Cval 0,2...1,8 nF 150 x 150 cm



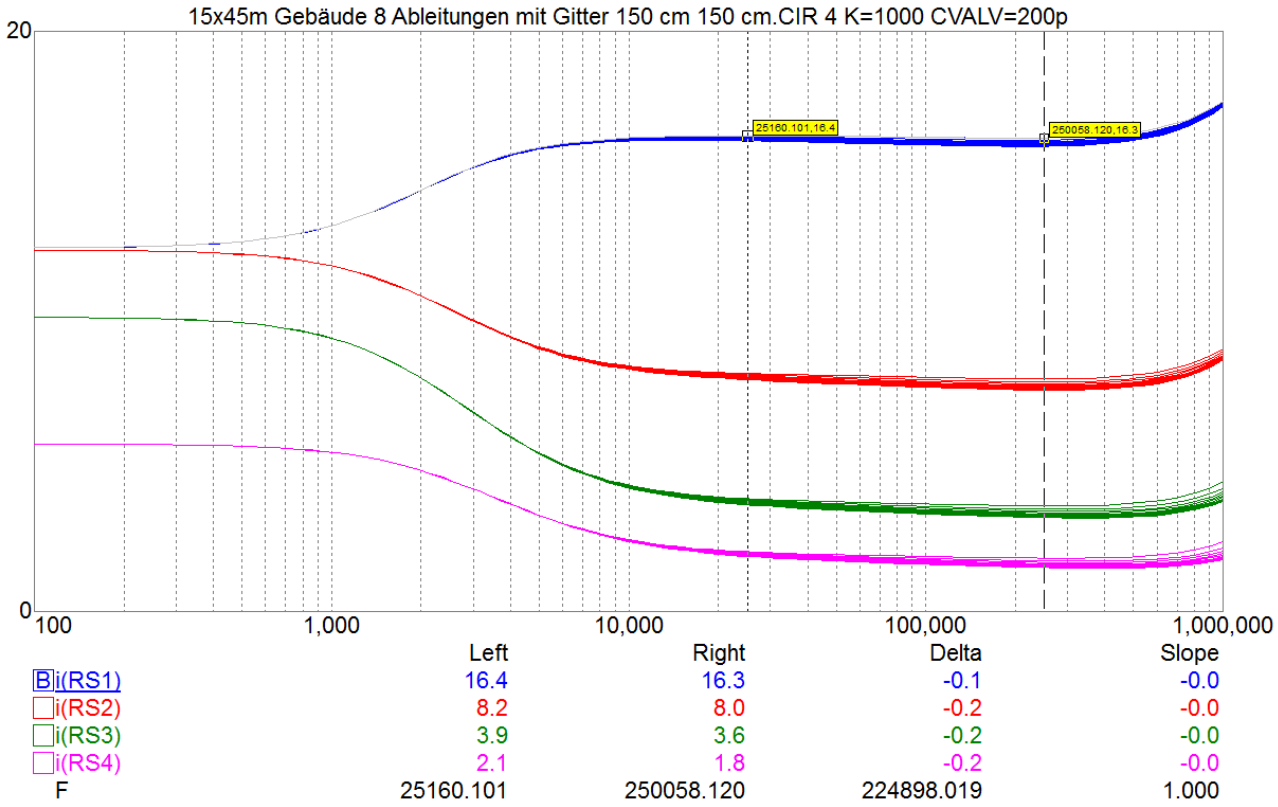


Bild 7-132 Stepping 1000..10000 Ohmm und Cval 0,2...1,8 nF 150 x 150 cm

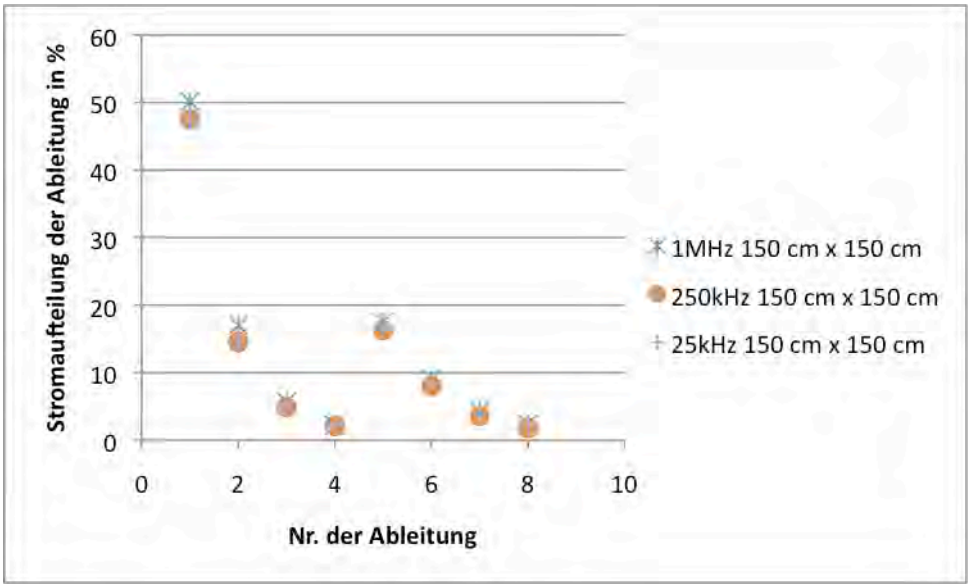


Bild 7-133 Stromaufteilung für ein Gitter 150 x 150 cm und Gebäude 15 m x 45 m.

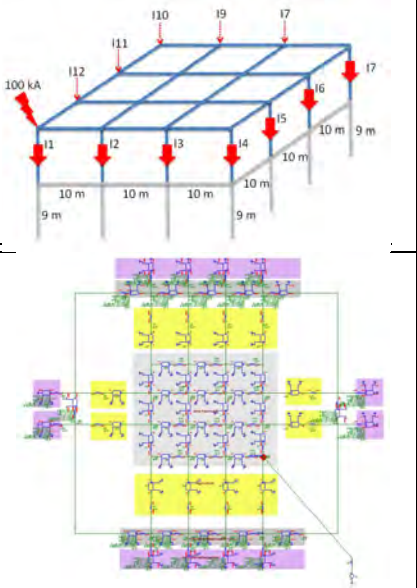
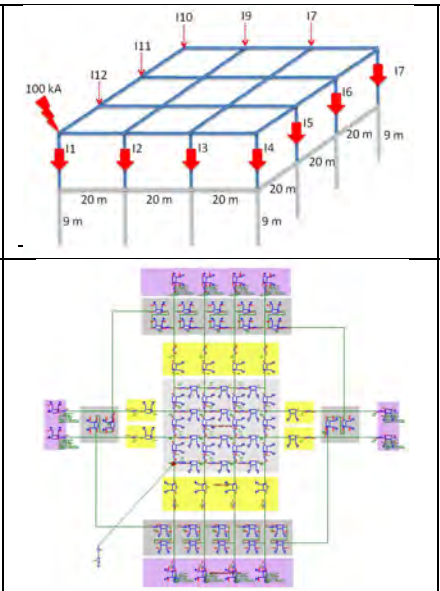
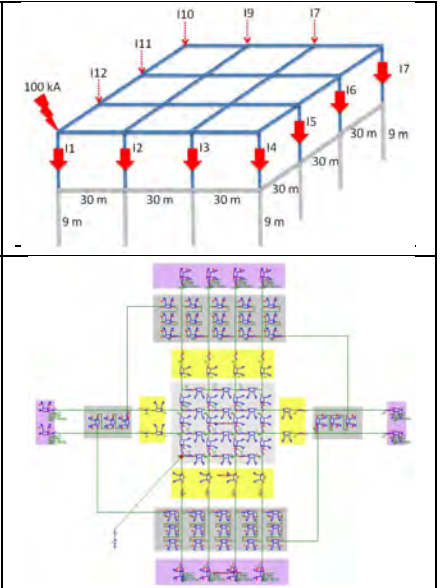
8 Fallstudie Gebäude mit Kettenleitermodellierung der Horizontalerder 10m, 20 m und 30m und Vertikalerder 9 m und Wanderwellenmodellierung der Ableitungen für Gebäude mit 12 und 24 Ableitungen.

8.1 Gebäude mit 12 Ableitungen und Horizontalleitern 10,20 und 30m.

Diese Fallstudie zeigt die Stromverteilungen in den Ableitungen für komplexere Gebäude.
Die Übersicht in Tabelle 8-1 und Tabelle 8-5 zeigt die Geometrie und Modellierung der Gebäude.
Die Stromverteilung ist deutlich von der Länge der Horizontalerder abhängig.

8.2 Gebäude mit 12 Ableitungen und Horizontalleitern 10,20 und 30m.

Tabelle 8-1 Gebäude mit 12 Ableitungen. Geometrie und Repräsentation in Microcap.

		
Gebäude mit 10 m Horizontaleitern	Gebäude mit 20 m Horizontaleitern	Gebäude mit 30 m Horizontaleitern

8.2.1 Stromaufteilung der Einspeisung und der benachbarten Ableitungen.

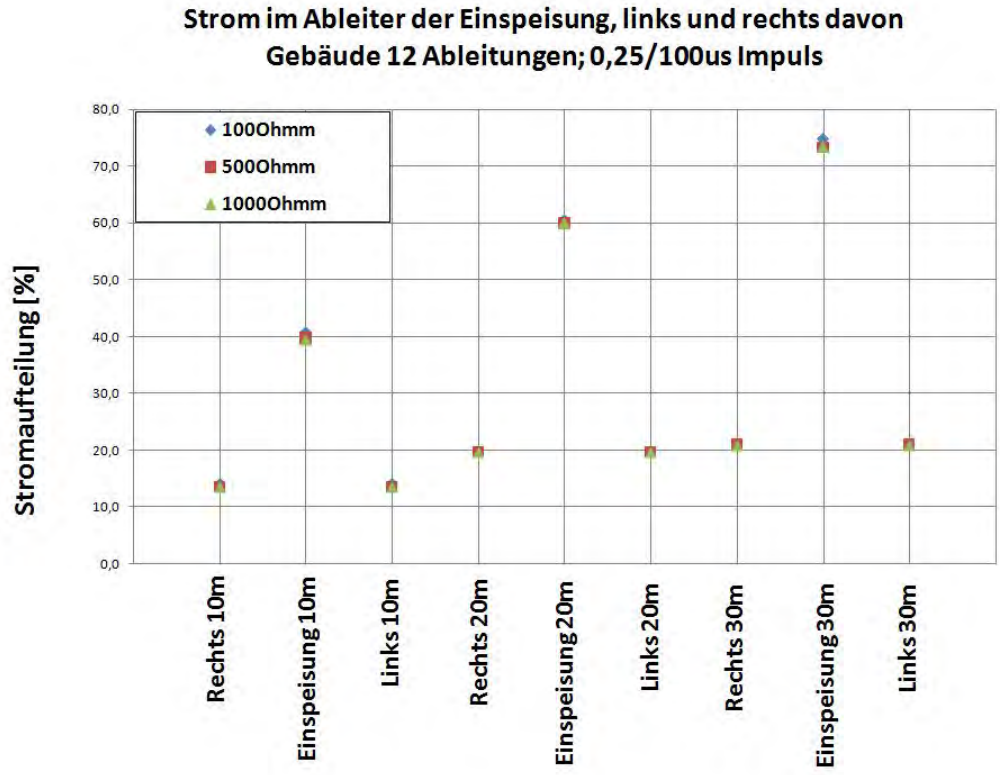


Bild 8-1 Stromaufteilung der Einspeiseableitung und der beiden benachbarten Ableitungen bei Einspeisung in eine Ecke und verschiedenen Abständen der Ableitungen nach Tabelle 8-1 für 0,25 /100 Impuls und spezifischem Erdwiderstand von ρ_E=100----1000 Ohmm.

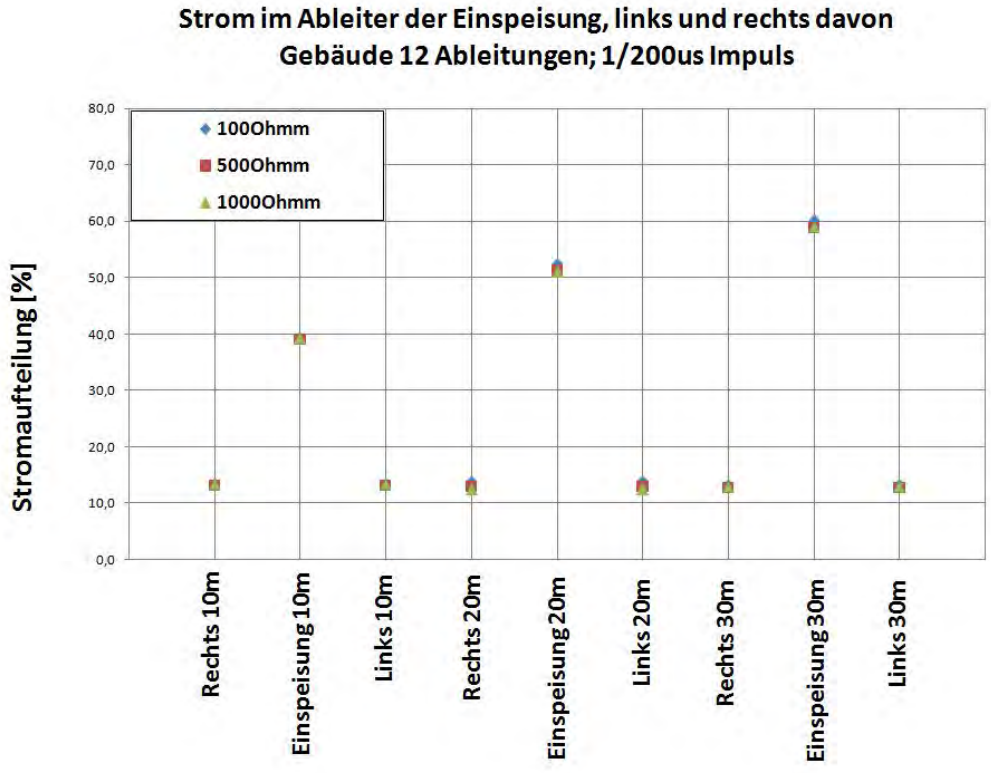


Bild 8-2 Stromaufteilung der Einspeiseableitung und der beiden benachbarten Ableitungen bei Einspeisung in eine Ecke und verschiedenen Abständen der Ableitungen nach Tabelle 8-1 für 1/200 Impuls und spezifischem Erdwiderstand von ρ_E=100----1000 Ohmm.

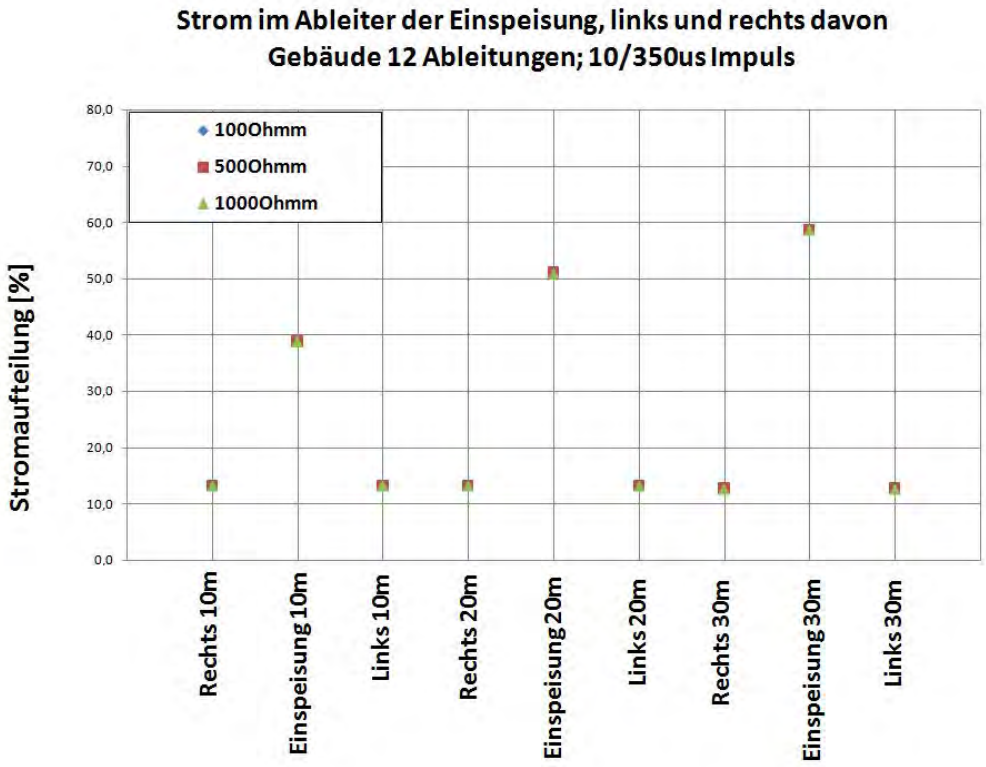
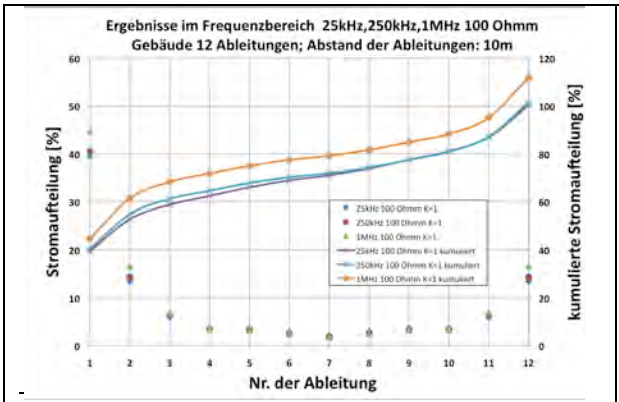
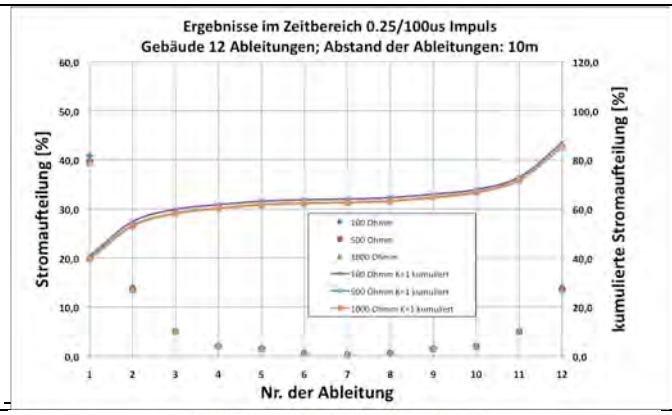
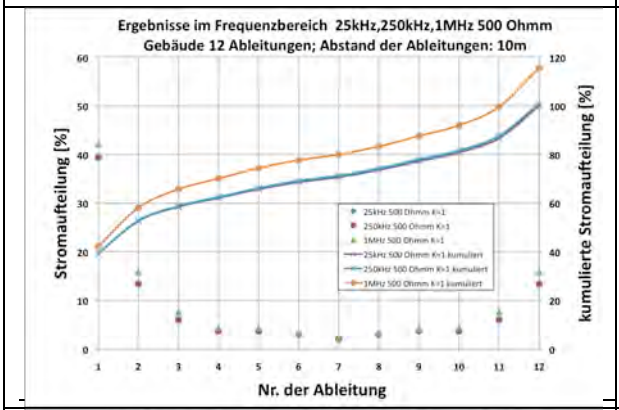
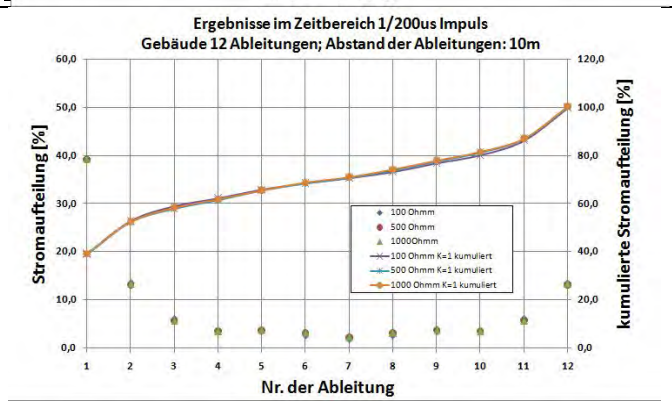
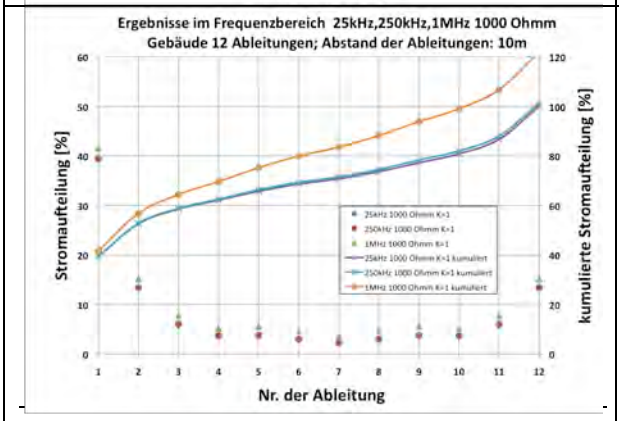
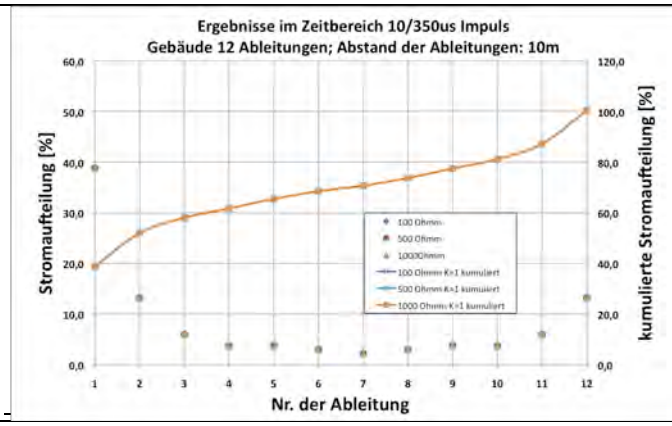


Bild 8-3 Stromaufteilung der Einspeiseableitung und der beiden benachbarten Ableitungen bei Einspeisung in eine Ecke und verschiedenen Abständen der Ableitungen nach Tabelle 8-1 für 10/350 Impuls und spezifischem Erdwiderstand von ρ_E=100----1000 Ohmm.

8.2.2 Stromaufteilung im Frequenz und Zeitbereich für alle Ableitungen.

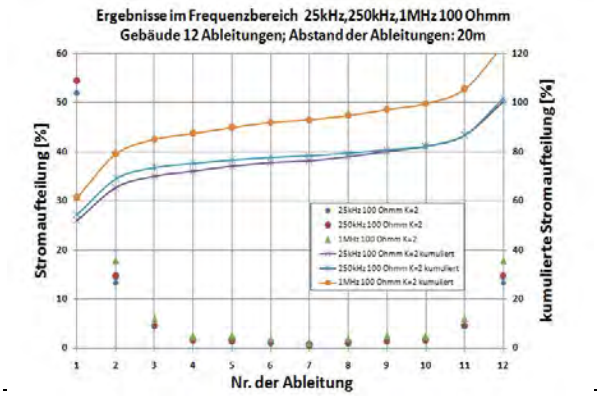
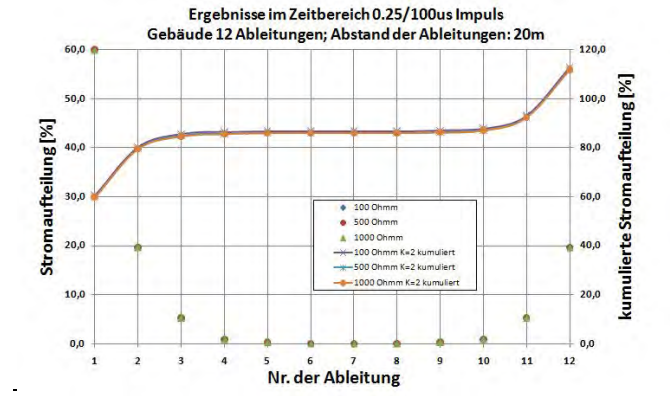
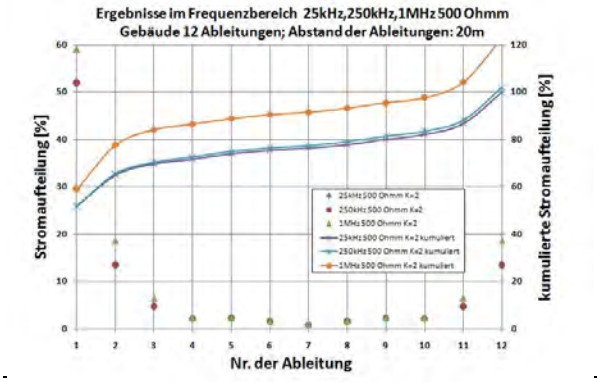
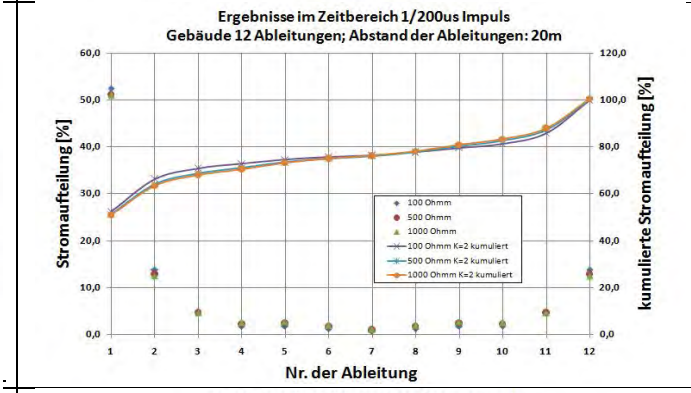
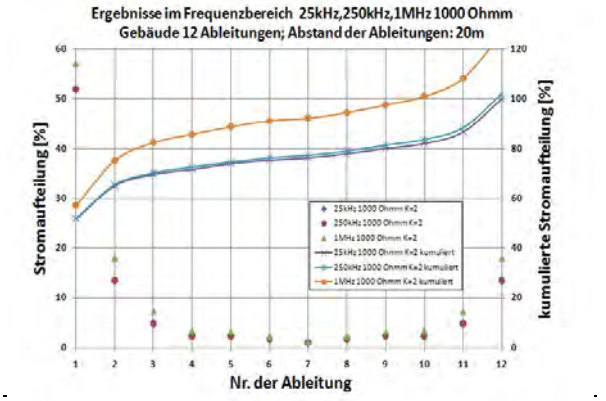
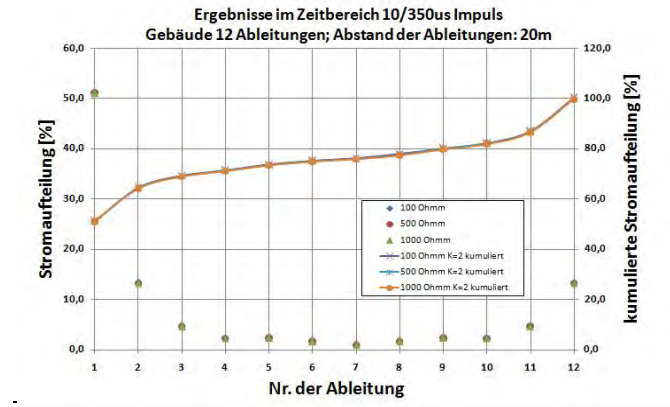
8.2.2.1 Horizontalleiter von 10 m Länge.

Tabelle 8-2 Stromverteilung der Ableitungen

	
	
	
Frequenzbereich für ρ_E=100, 500 und 1000 Ohmm	Zeitbereich für 0,25/100 1/200 und 10/350

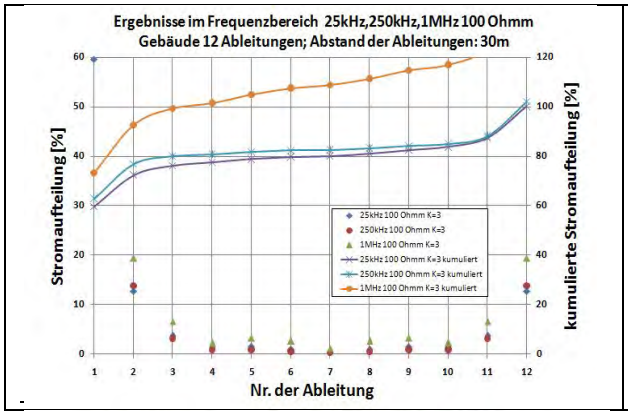
8.2.2.2 Horizontalleiter von 20 m Länge.

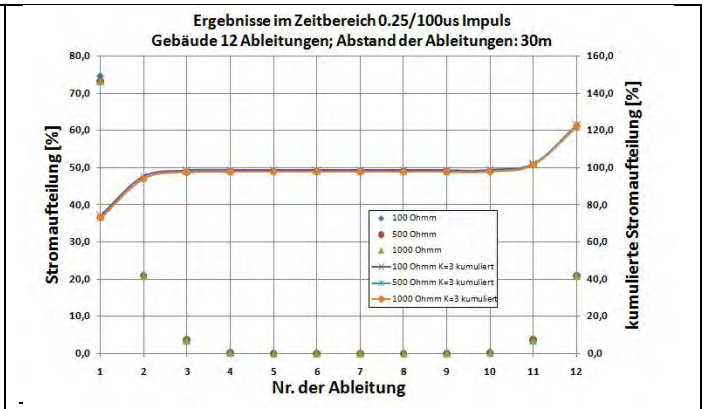
Tabelle 8-3Stromverteilung in den Ableitungen

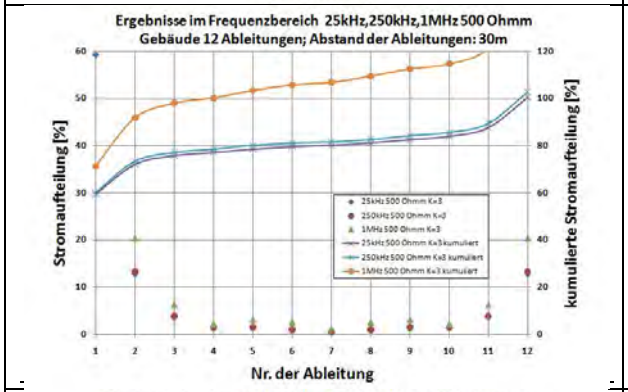
	
	
	
Frequenzbereich für ρ_E=100, 500 und 1000 Ohmm	Zeitbereich für 0,25/100 1/200 und 10/350

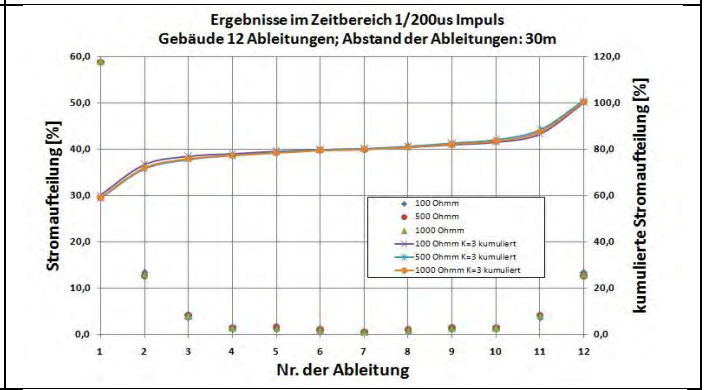
8.2.2.3 Horizontalleiter von 30 m Länge.

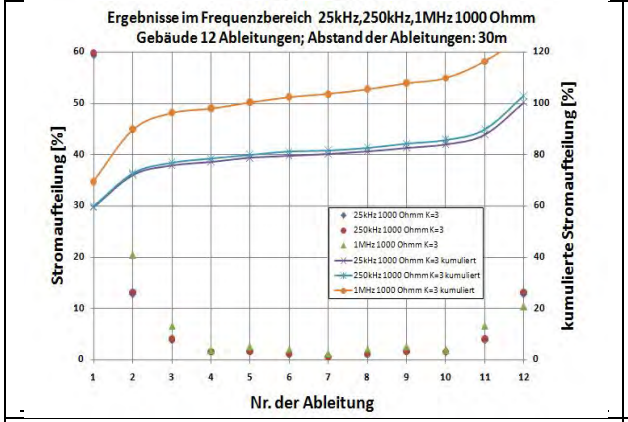
Tabelle 8-4Stromverteilung in den Ableitungen

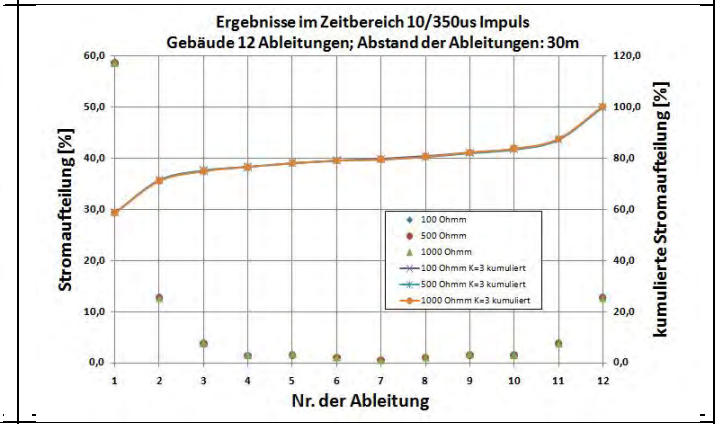








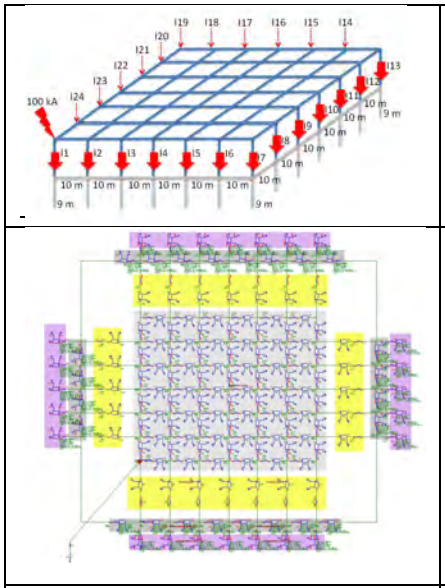
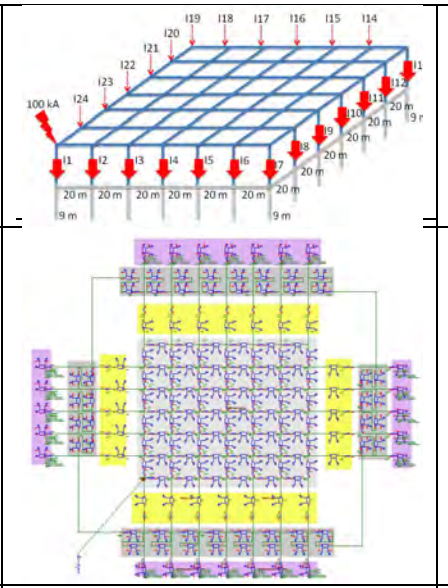
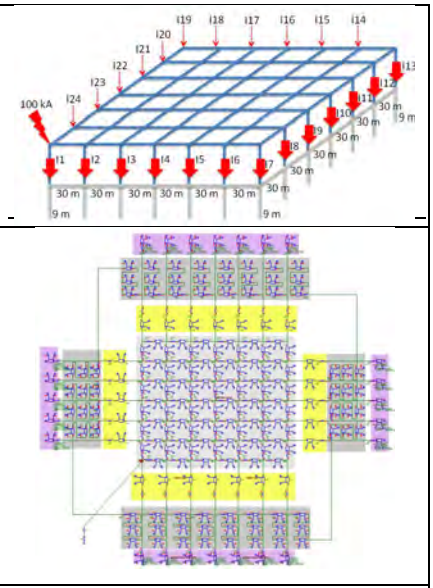




Frequenzbereich für ρ_E=100, 500 und 1000 Ohmm	Zeitbereich für 0,25/100 1/200 und 10/350

8.3 Gebäude mit 24 Ableitungen.

Tabelle 8-5 Gebäude mit 24 Ableitungen. Geometrie und Repräsentation in Microcap.

		
Gebäude mit 10 m Horizontaleitern	Gebäude mit 20 m Horizontaleitern	Gebäude mit 30 m Horizontaleitern

8.3.1 Stromaufteilung der Einspeisung und der benachbarten Ableitungen.

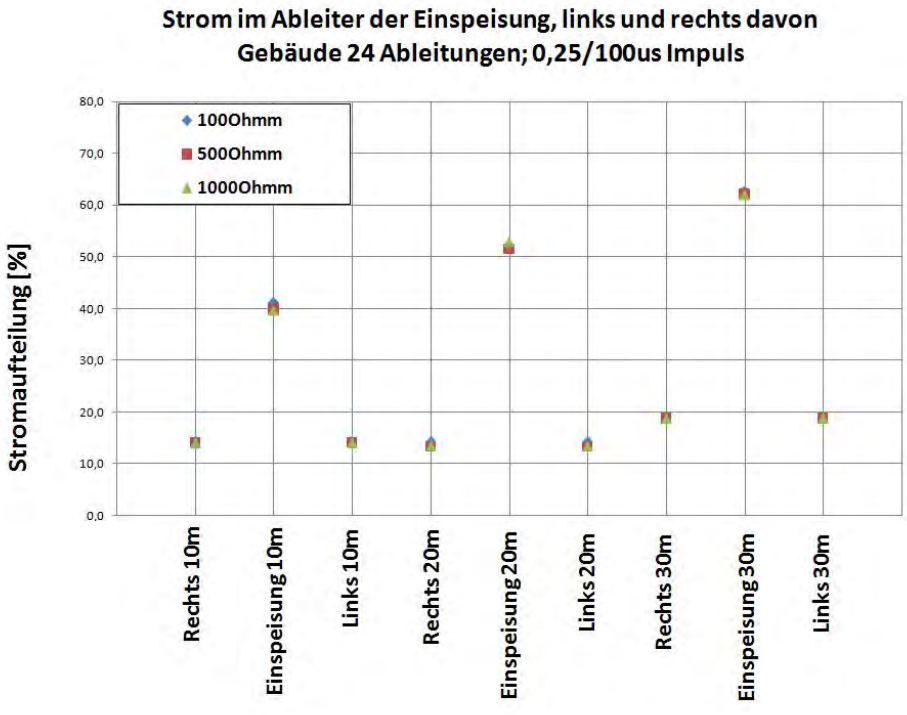


Bild 8-4 Stromaufteilung der Einspeiseableitung und der beiden benachbarten Ableitungen bei Einspeisung in eine Ecke und verschiedenen Abständen der Ableitungen nach Tabelle 8-5 für 0,25 /100 Impuls und spezifischem Erdwiderstand von ρ_E=100----1000 Ohmm.

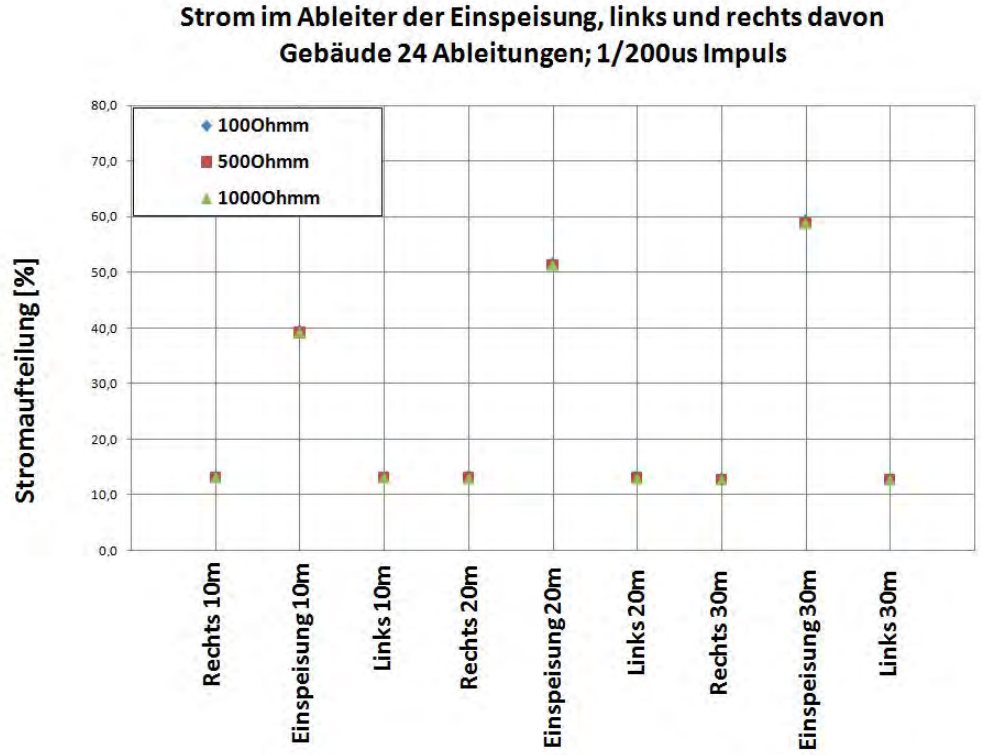


Bild 8-5 Stromaufteilung der Einspeiseableitung und der beiden benachbarten Ableitungen bei Einspeisung in eine Ecke und verschiedenen Abständen der Ableitungen nach Tabelle 8-5für 1/200 Impuls und spezifischem Erdwiderstand von ρ_E=100----1000 Ohmm.

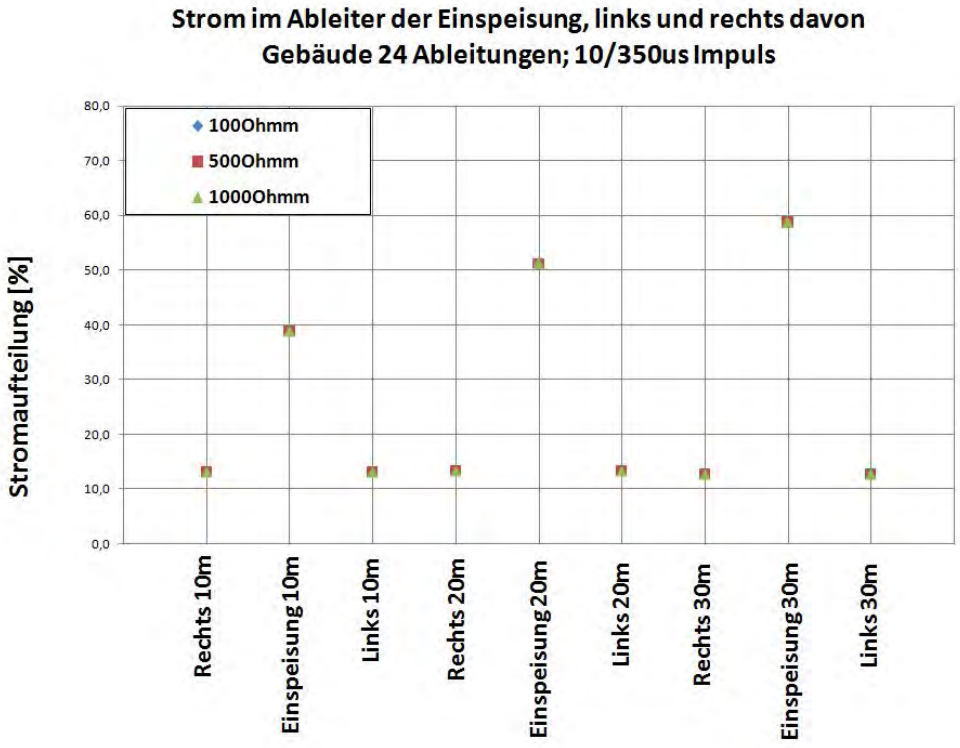
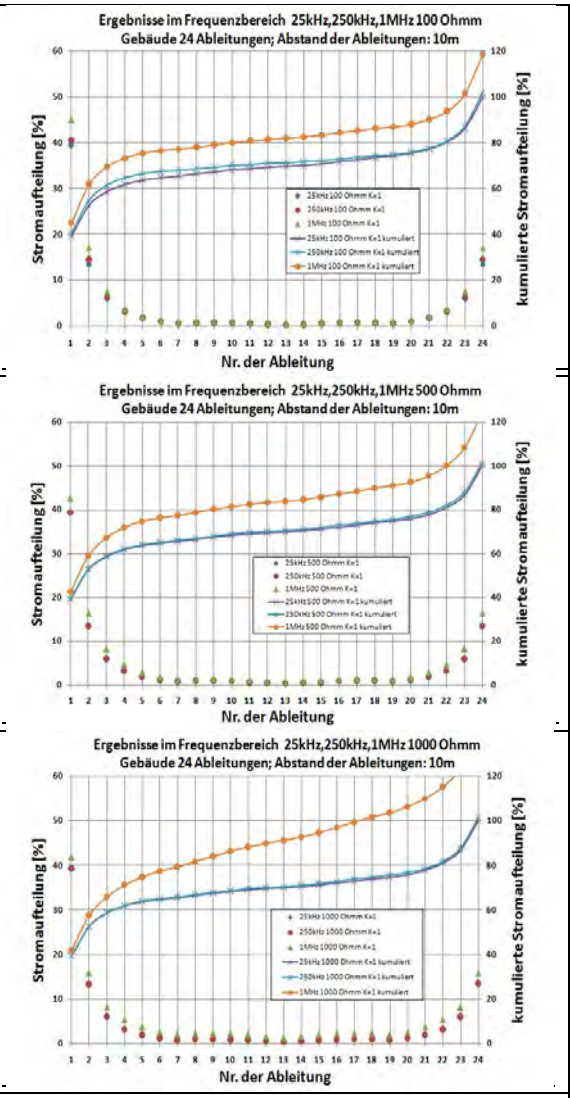
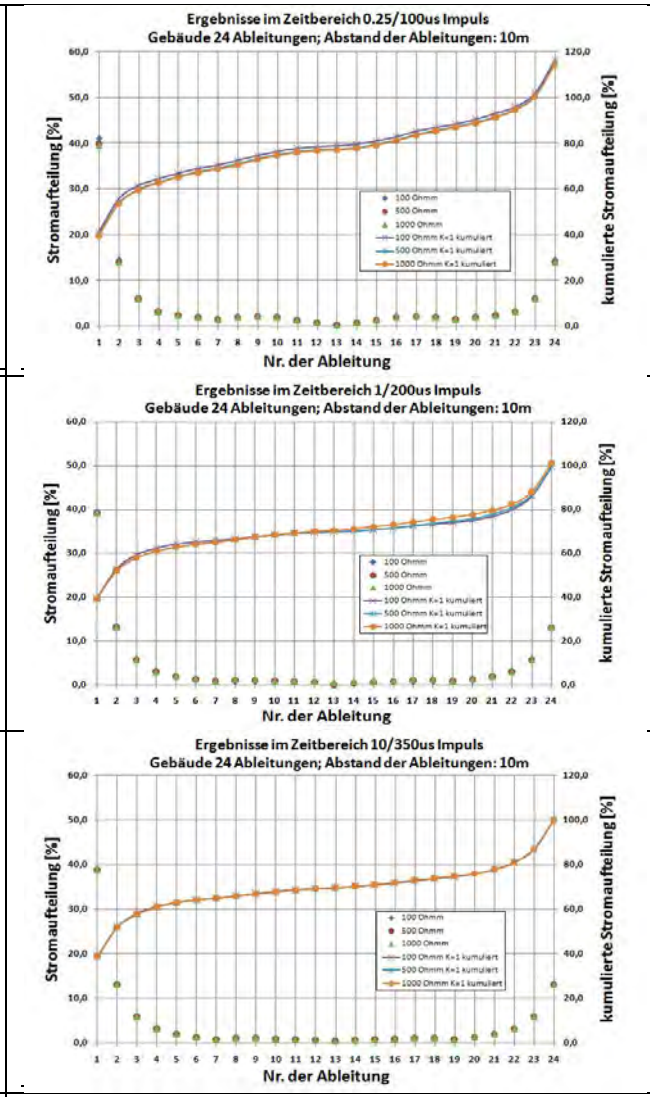


Bild 8-6 Stromaufteilung der Einspeiseableitung und der beiden benachbarten Ableitungen bei Einspeisung in eine Ecke und verschiedenen Abständen der Ableitungen nach Tabelle 8-5für 10/350 Impuls und spezifischem Erdwiderstand von ρ_E=100----1000 Ohmm.

8.3.2 Stromaufteilung im Frequenz und Zeitbereich für alle Ableitungen.

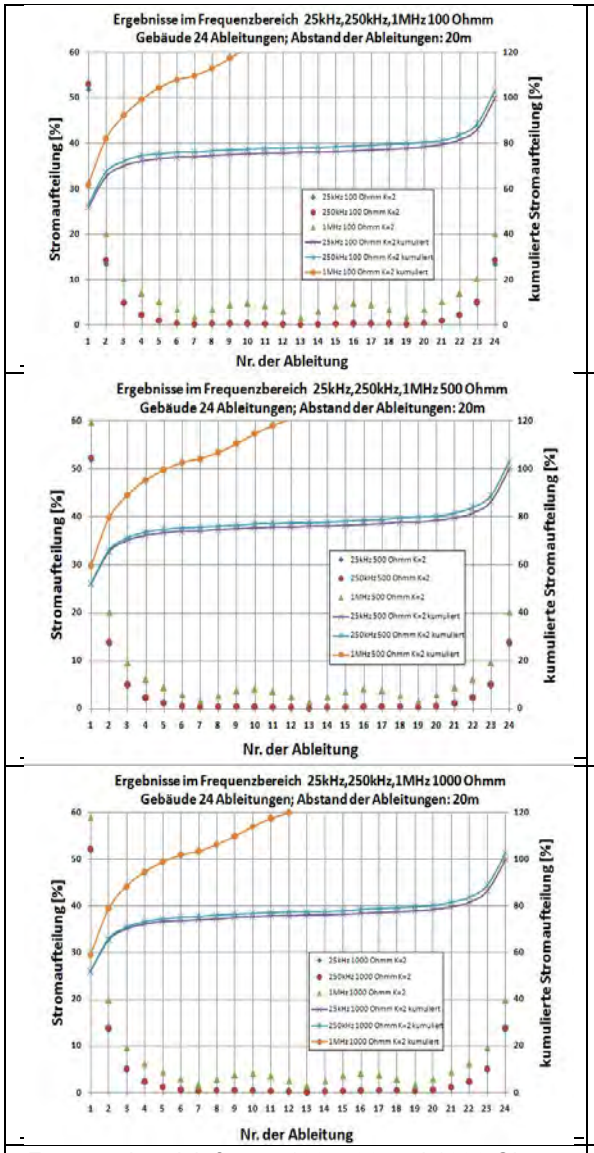
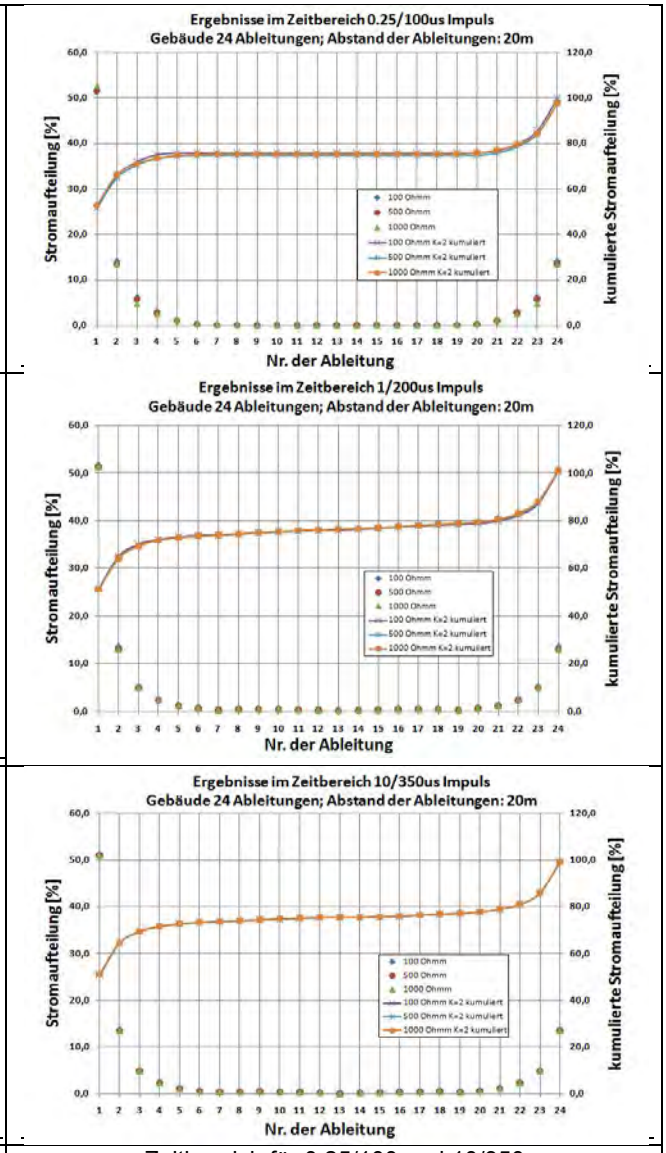
8.3.2.1 Horizontalleiter von 10 m Länge.

Tabelle 8-6Stromverteilung in den Ableitungen

	
Frequenzbereich für ρ_E=100, 500 und 1000 Ohmm	Zeitbereich für 0,25/100 und 10/350

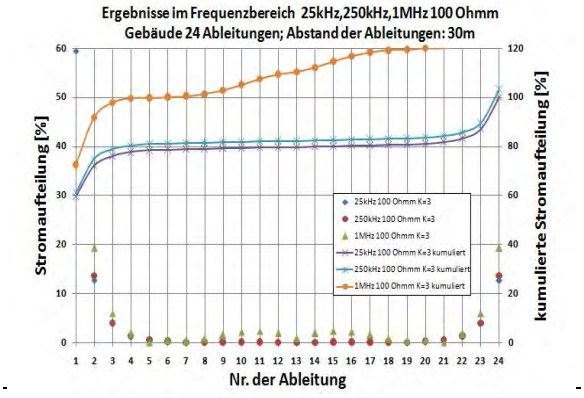
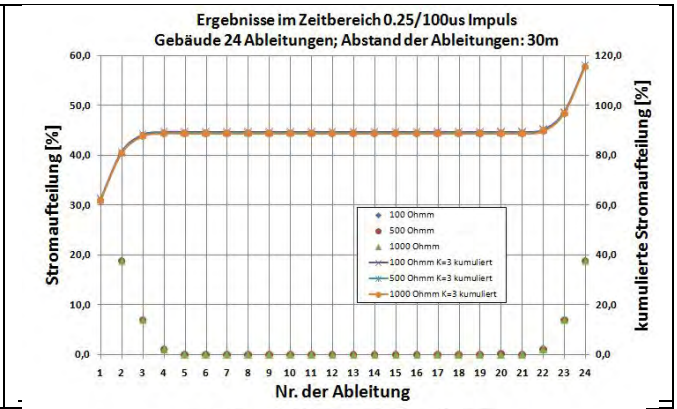
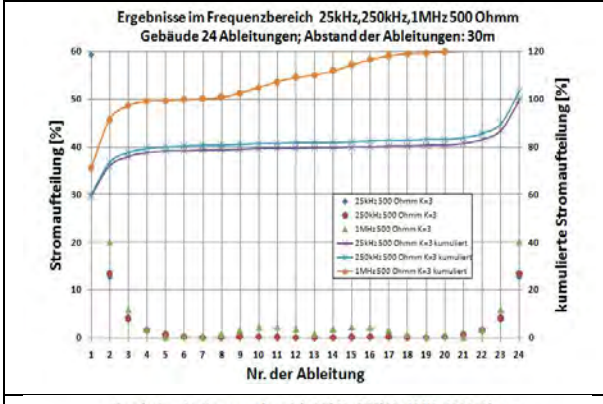
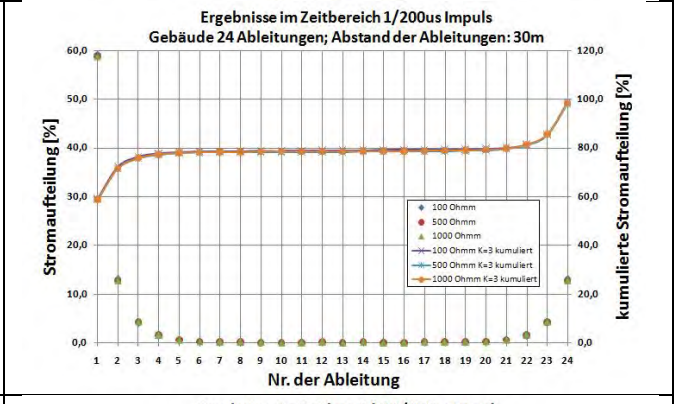
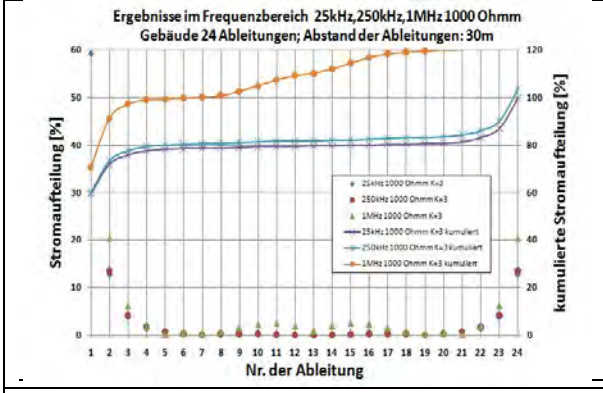
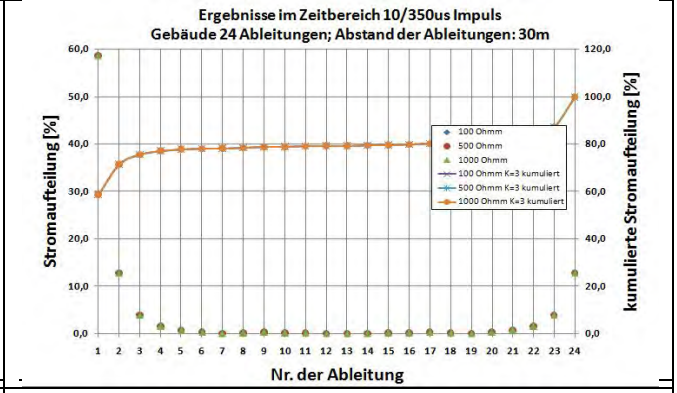
8.3.2.2 Horizontalleiter von 20 m Länge.

Tabelle 8-7Stromverteilung in den Ableitungen

	
Frequenzbereich für ρ_E=100, 500 und 1000 Ohmm	Zeitbereich für 0,25/100 und 10/350

8.3.2.3 Horizontalleiter von 30 m Länge.

Tabelle 1 Stromverteilung in den Ableitungen

	
	
	
Frequenzbereich für ρ_E=100, 500 und 1000 Ohmm	Zeitbereich für 0,25/100 und 10/350

9 Fallstudie Gebäude mit Kettenleitermodellierung der Erder und Wanderwellenmodellierung der Ableitungen für Gebäude mit einer Breite von 10 m und 10 m Höhe bei veränderter Gebäudelänge und konstantem Abstand der Ableitungen von 10m.

Auf Anforderung von OBO wurde die folgende Fallstudie durchgeführt. Dabei sollte insbesondere der Abstand der Ableitungen kostant gelassen werden und die Gebäudelänge verändert werden.
Das Modell ist in Bild 9-1 gezeigt. Die Ableitungen auf dem Gebäude und an den Wänden sind je 10 m lang. Über je 1 m lange Verbinder in der Erde werden die 10 m langen Horizontalerder angeschlossen. An den Eckpunkten werden die 9 m langen Vertikalerder angeschlossen.
Die Umsetzung in Microcap zeigt Bild 9-2. Die Berechnungen wurden hier ausschließlich im Frequenzbereich durchfgeführt. Aus den Frequenzgängen wurden die Stromaufteilungen für die Stromimpulse 10/350 = 25 kHz; 1/200=250kHz und 0,25/100=1MHz entnommen.

Die Ergebnisse sind in den folgenden Bildern, Tabellen und Grafiken dargestellt.

Einfluss des spezifischen Erdwiderstands auf die Stromaufteilung:
Bild 9-3 bis Bild 9-6 zeigen den Einfluss des spezifischen Erdwiderstands. Für den 1/200 Impuls (250kHz) zeigt sich der stärkste Einfluss.

Stromaufteilung für die drei Stoßstromformen in Abhängigkeit von der Gebäudelänge.
Bild 9-7 bis Bild 9-9 zeigt eine fallende Tendenz mit zunehmender Gebäudelänge. Aussagekräftiger aber die Grafiken , die in Tabelle 9-4 bis Tabelle 9-6 dargestellt sind. Für 0,25/100 und 1/200 ist praktisch nach 20 m keine Änderung mehr feststellbar. Nur bei 10/350 fällen die Werte weiter ab mit zunehmender Gebäudelänge.

Weitere Parameterstudien wie Gebäudehöhe, Gebäudebreite und Abstand der Ableitungen wurden nicht mehr durchgeführt. Dies muss im Einzelfall für eine Berechnung der Schrittspannung in GSA vorbereitet werden. Diese Fallstudie zeigt daher die Tendenzen auf.

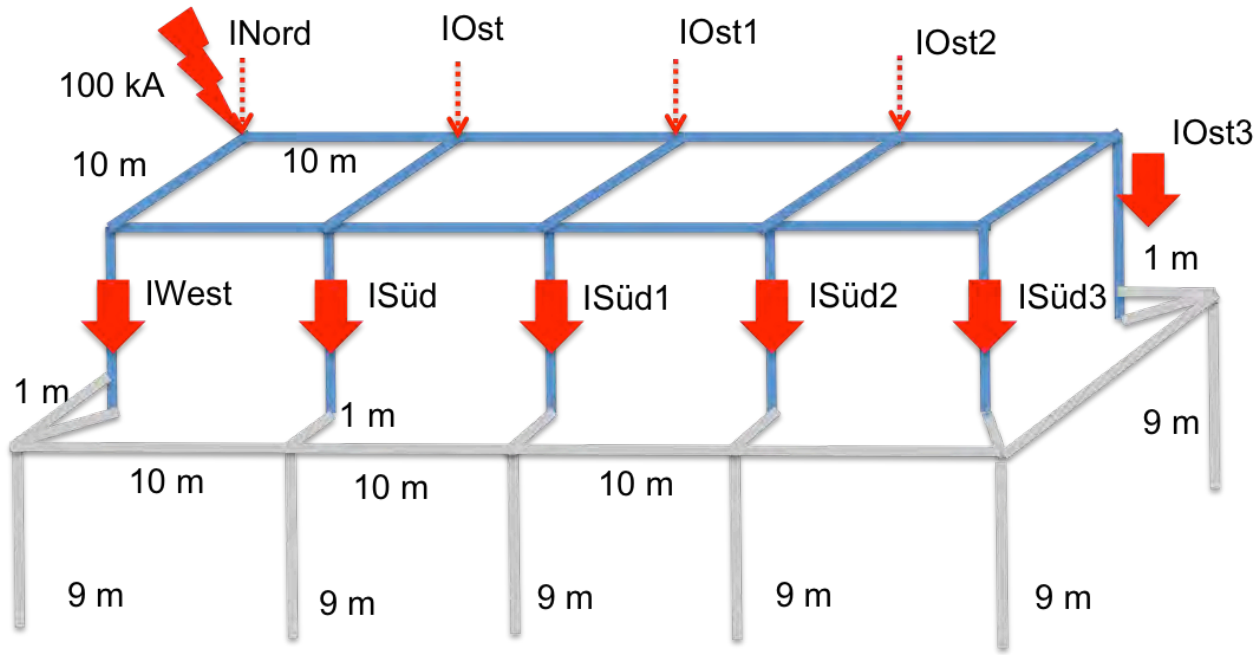


Bild 9-1 Beispiel eines berechneten Gebäudes mit einer Breite von 10m und einer Länge von 40 m. Abstand der Ableitungen= konstant 10m. Anschlüsse an Horizontalerder über 1 m Verbindungen in der Erde. Tiefenerder 9 m, 20 mm Edelstahl.

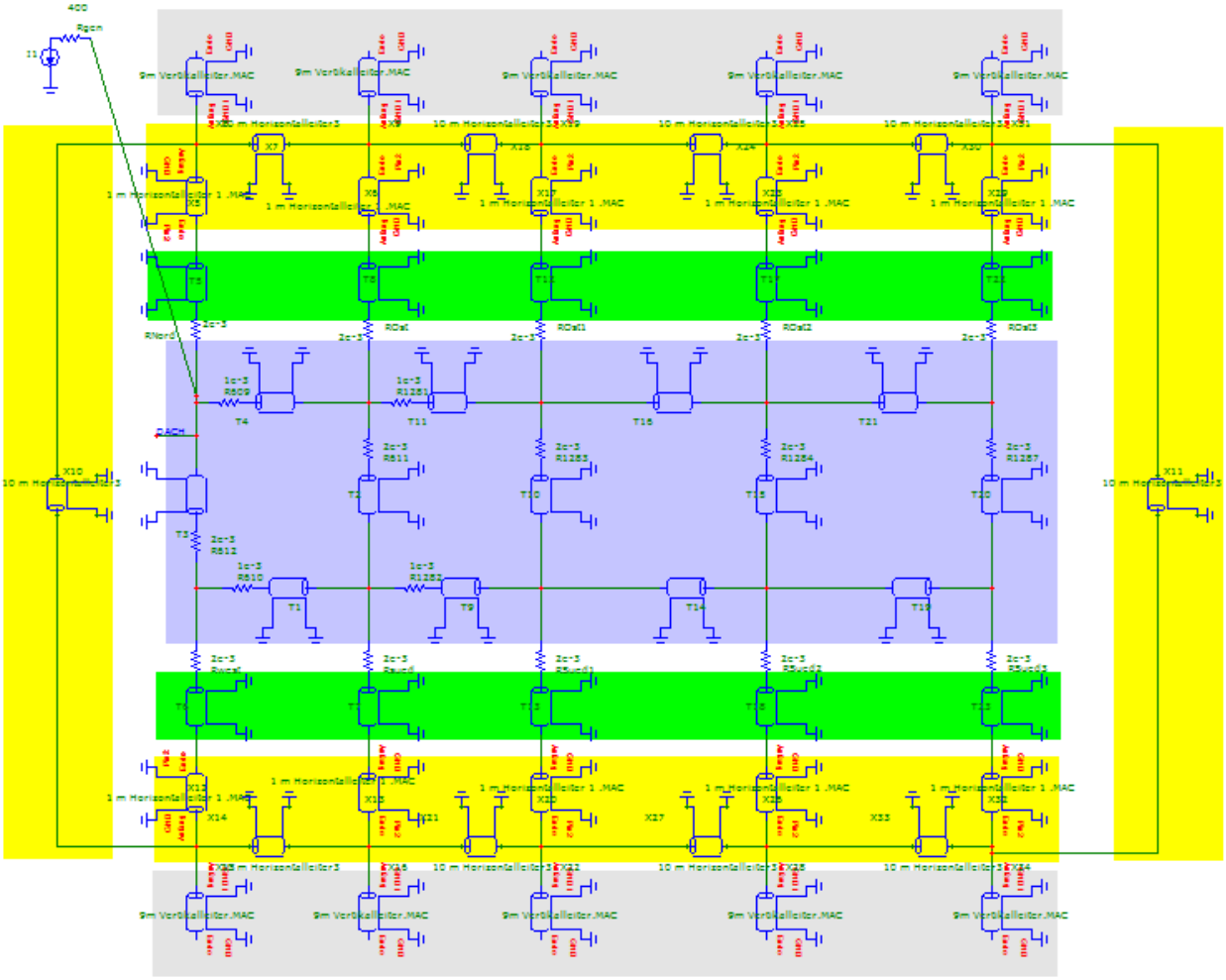


Bild 9-2 Modell für ein Gebäude, 10 m x 40 m

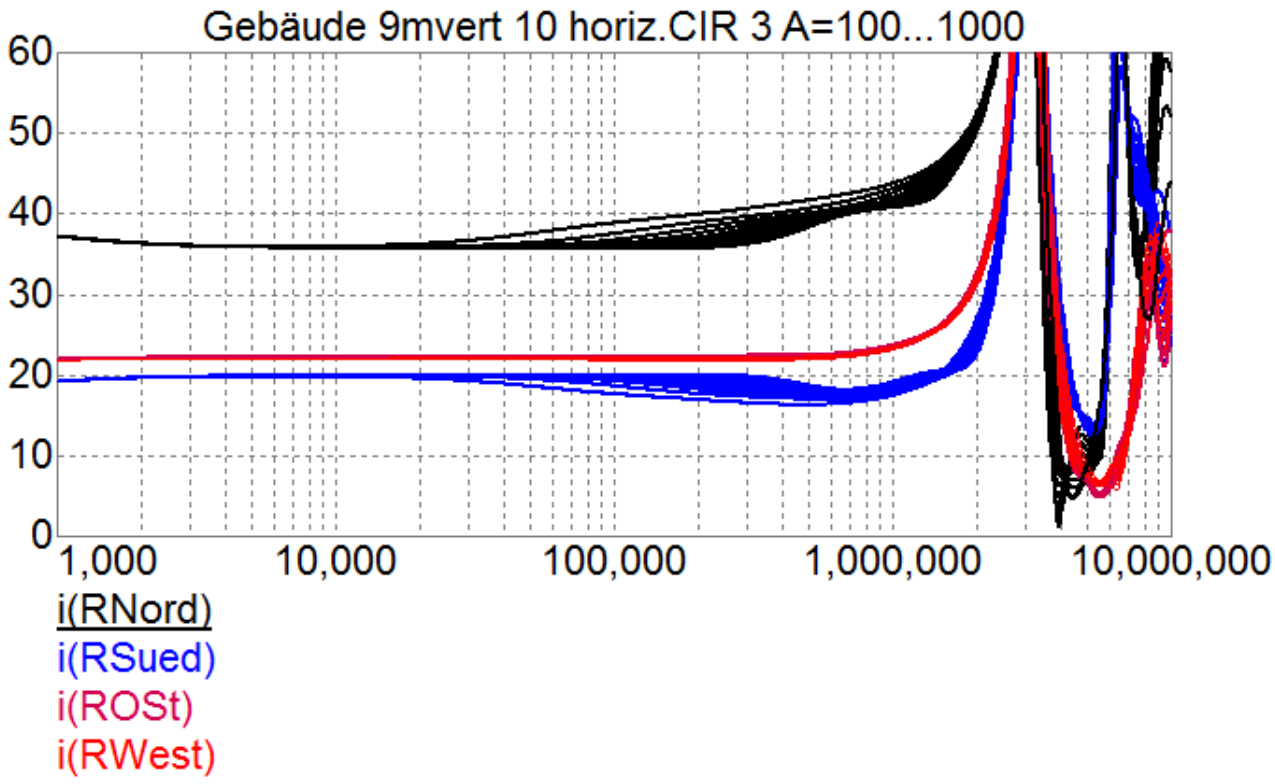


Bild 9-3 Frequenzgang der Ableitungsströme für Gebäude 10m x 10m. Bezug der Ströme, siehe Bild 9-1. Stepping des spezifischen Erdwiderstands von 100 Ohm ...1000 Ohmm.

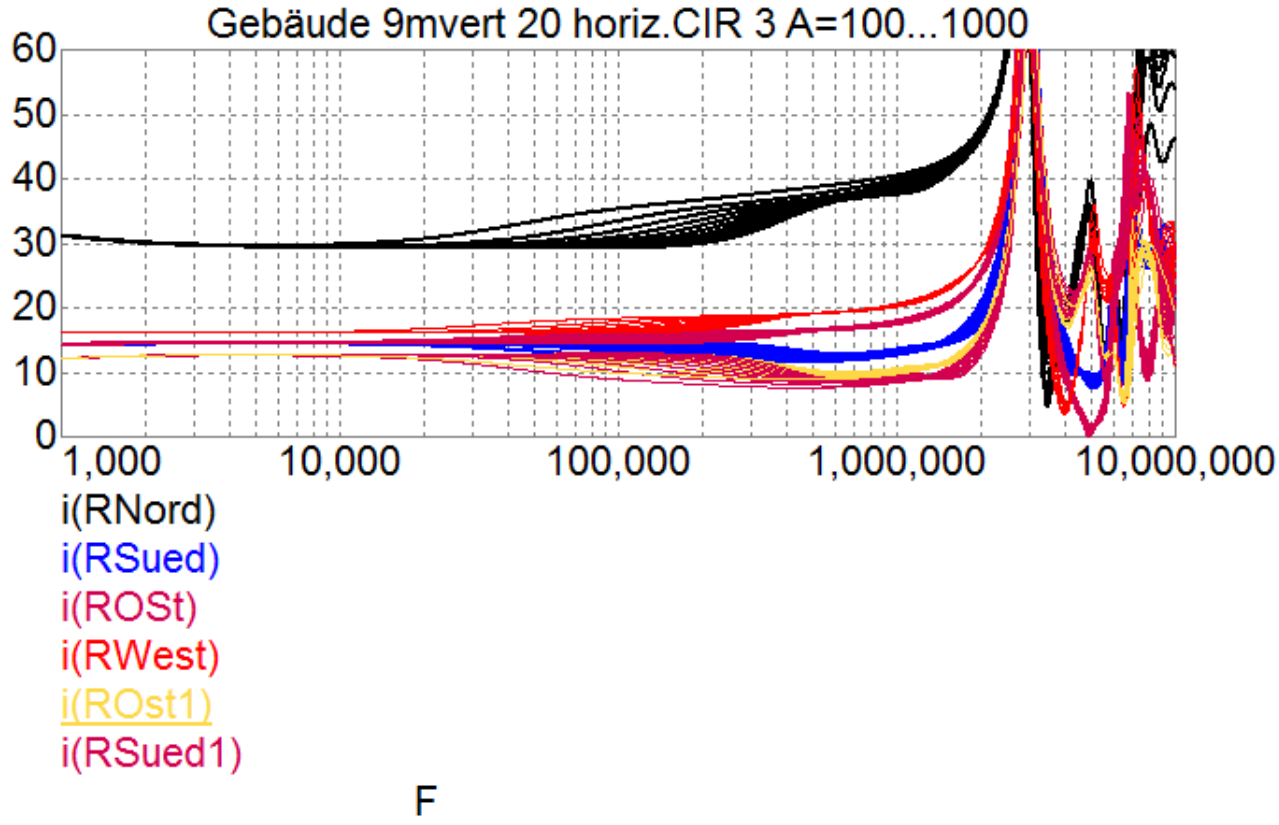
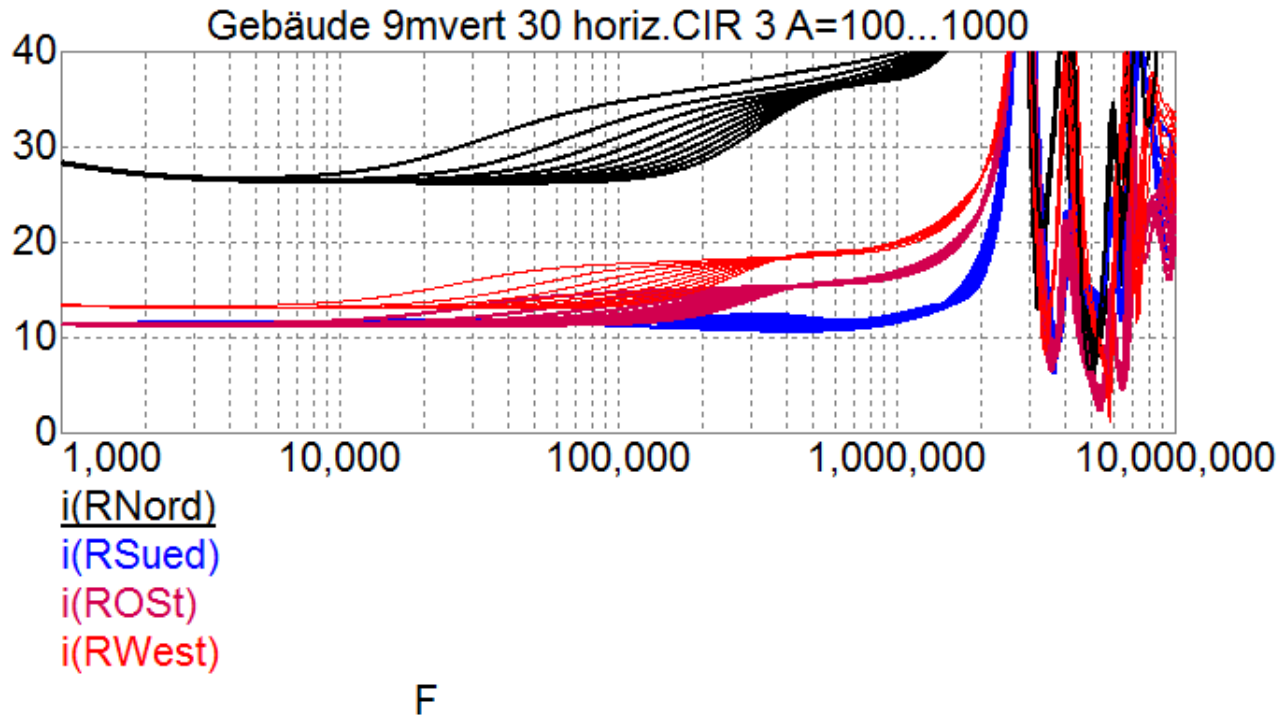


Bild 9-4 Frequenzgang der Ableitungsströme für Gebäude 10m x 20m. Bezug der Ströme, siehe Bild 9-1. Stepping des spezifischen Erdwiderstands von 100 Ohm ...1000 Ohmm.



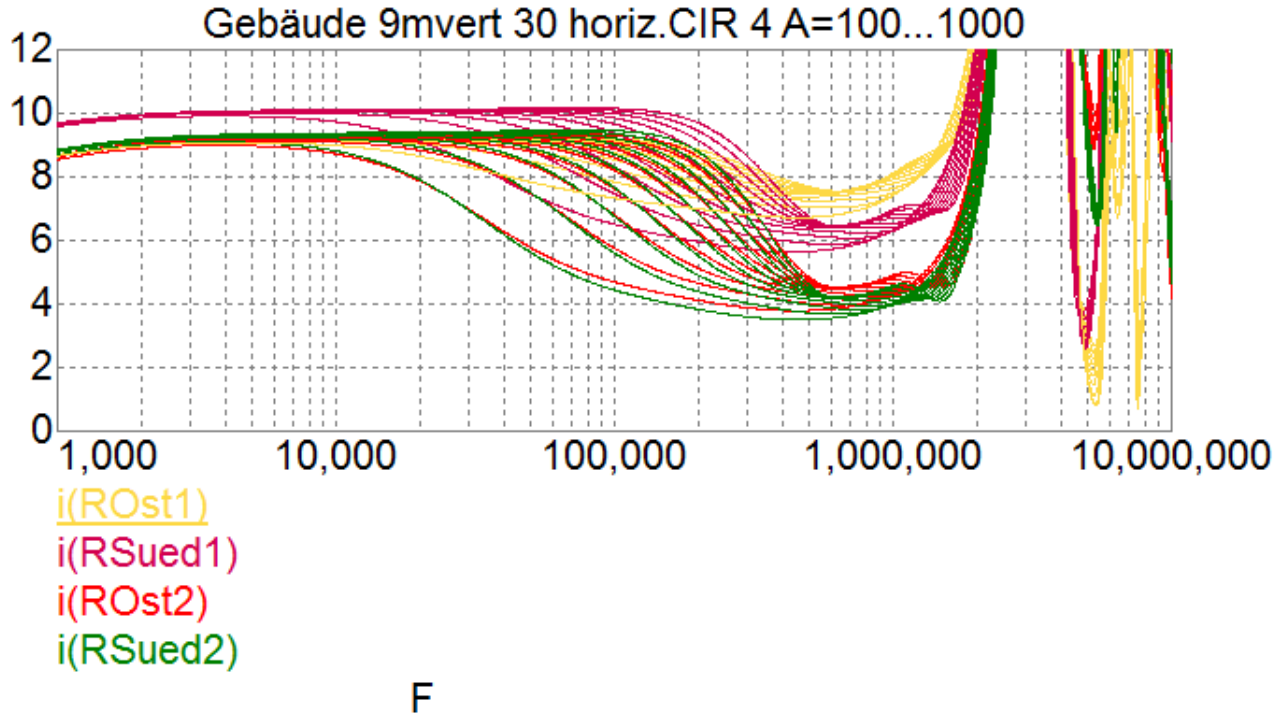
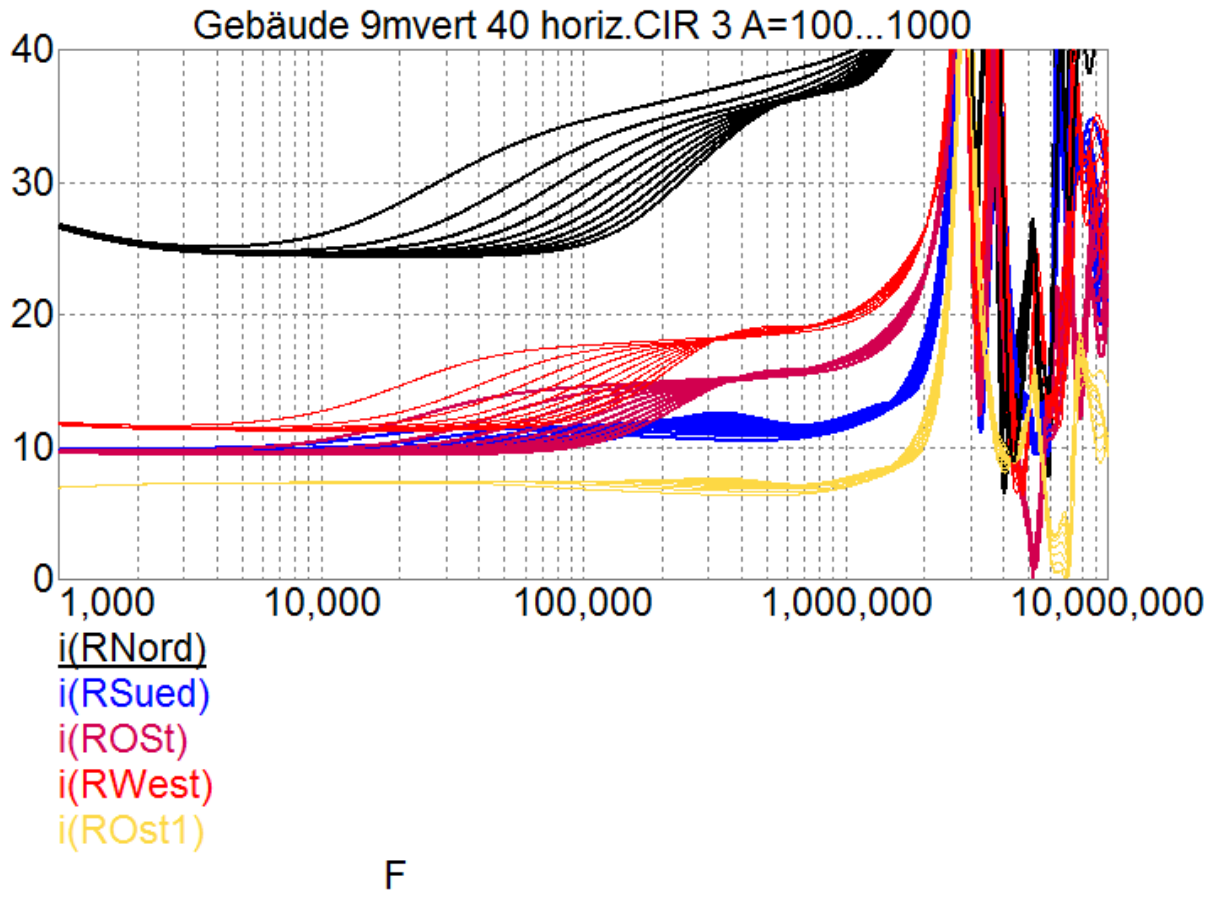


Bild 9-5 Frequenzgang der Ableitungsströme für Gebäude 10m x 30m. Bezug der Ströme, siehe Bild 9-1. Stepping des spezifischen Erdwiderstands von 100 Ohm ...1000 Ohmm.



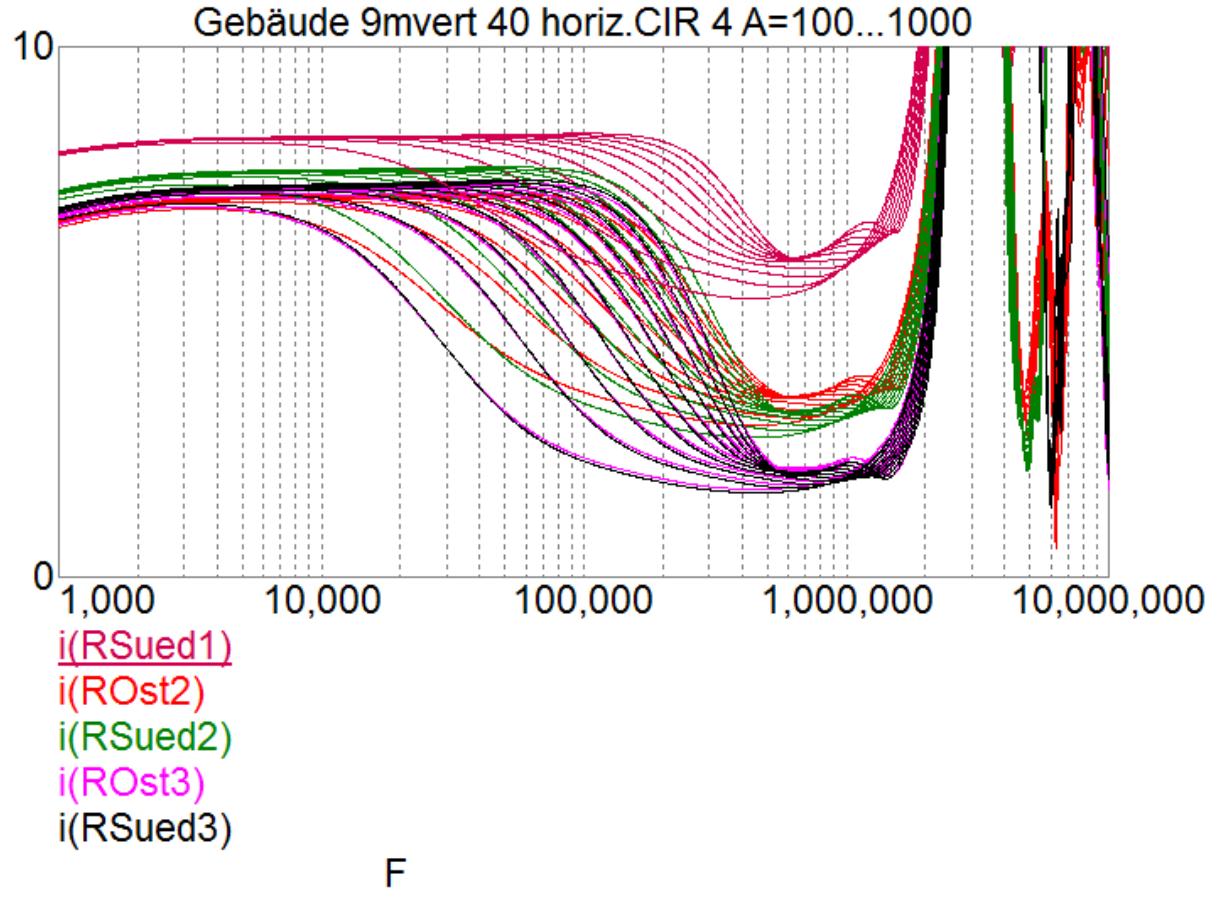


Bild 9-6 Frequenzgang der Ableitungsströme für Gebäude 10m x 40m. Bezug der Ströme, siehe Bild 9-1. Stepping des spezifischen Erdwiderstands von 100 Ohm ...1000 Ohmm.

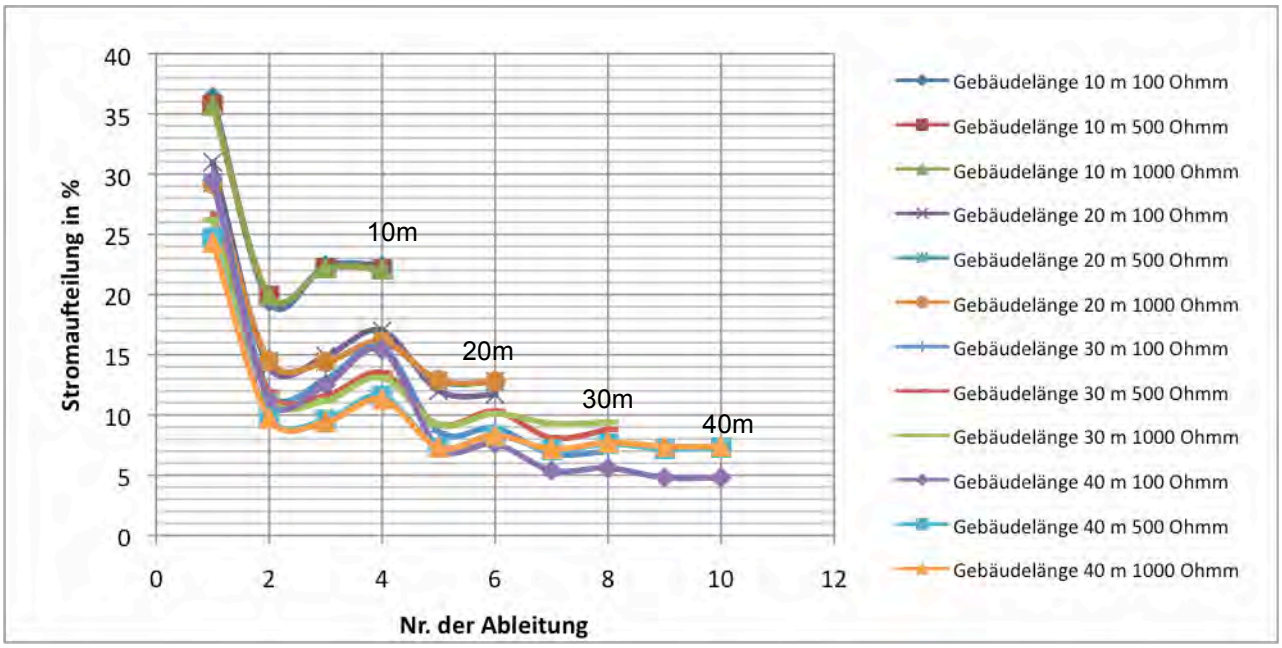


Bild 9-7 Stromaufteilung auf die einzelnen Ableitungen für Gebäude 1m Breite und 10 m, 20m, 30 m und 40 m Länge für **Stromimpuls 10/350**. 1: INord; 2 Isüd; 3: Iost; 4: Iwest; 5: Iost1; 6: Isüd1; 7: IOst2; 8: Isüd2; 9: IOst3; 10: Isüd3. Zuordnung der Ströme: Siehe Bild 9-1.

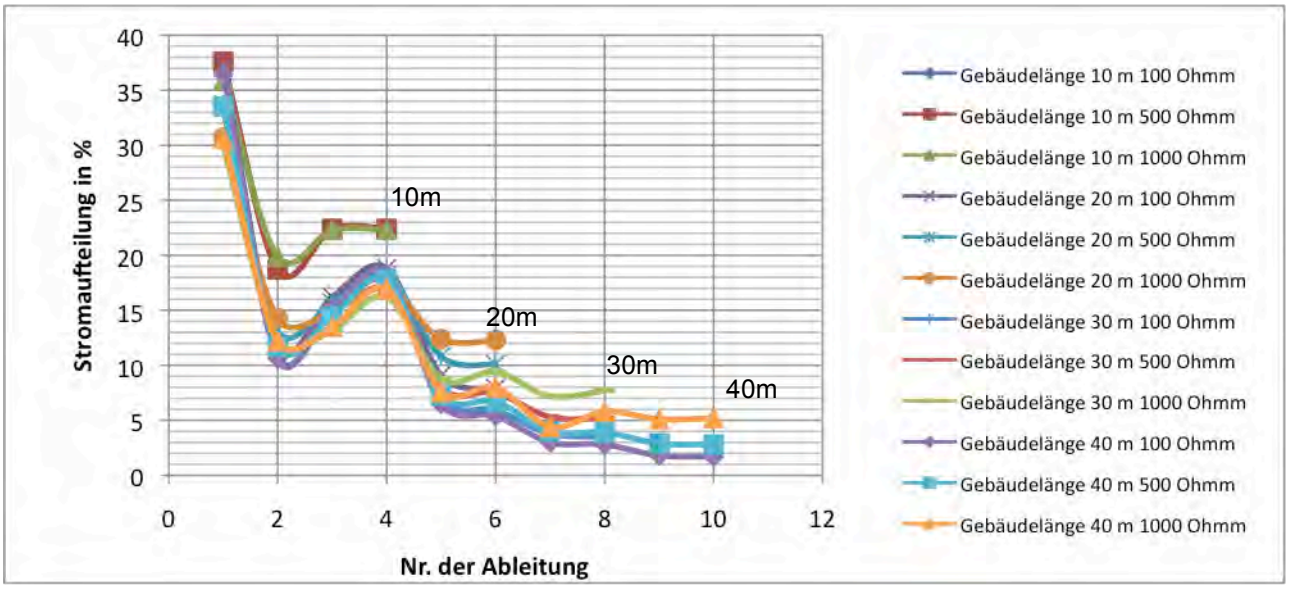


Bild 9-8 Stromaufteilung auf die einzelnen Ableitungen für Gebäude 1m Breite und 10 m, 20m, 30 m und 40 m Länge für **Stromimpuls 1/200**. 1: INord; 2 Isüd; 3: Iost; 4: Iwest; 5: Iost1; 6: Isüd1; 7: IOst2; 8: Isüd2; 9: IOst3; 10: Isüd3. Zuordnung der Ströme: Siehe Bild 9-1.

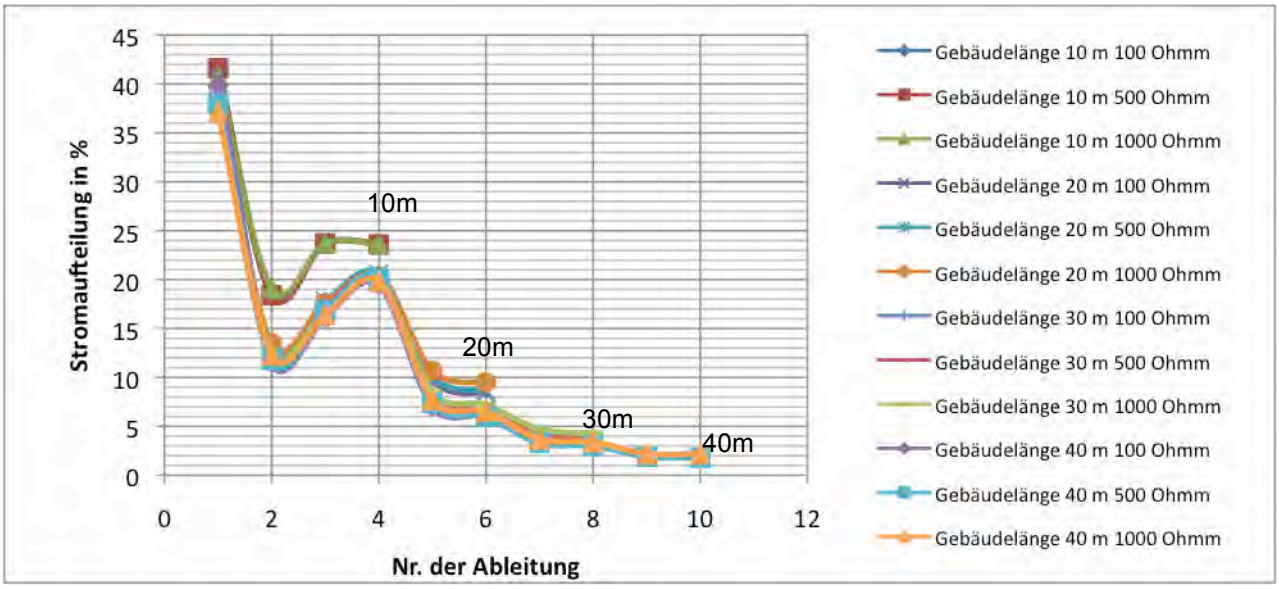
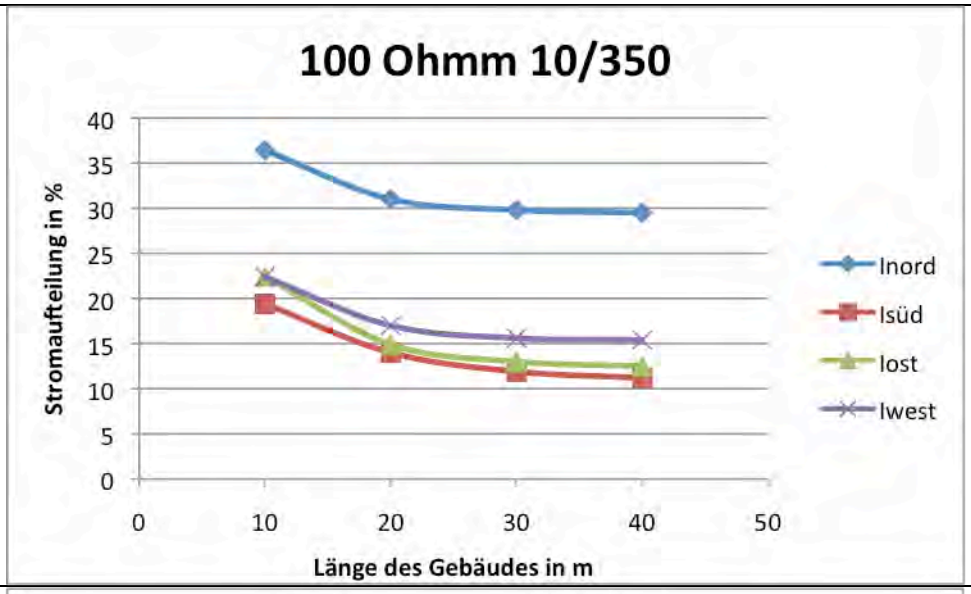
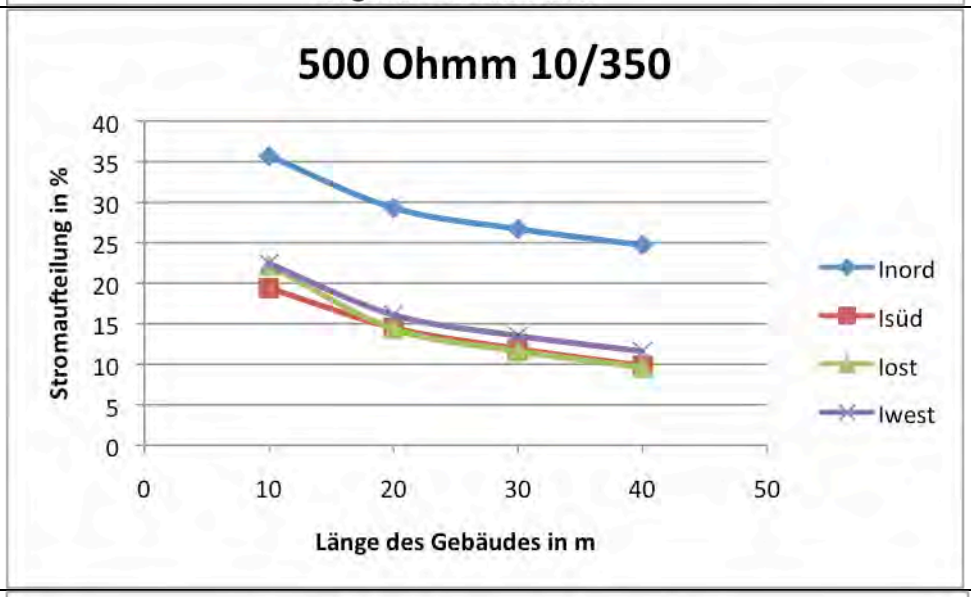
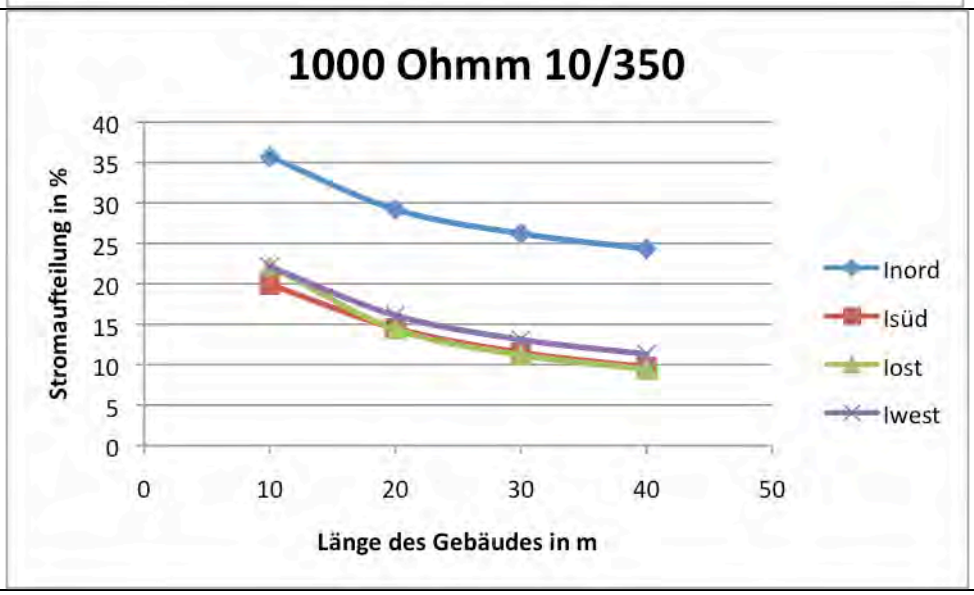


Bild 9-9 Stromaufteilung auf die einzelnen Ableitungen für Gebäude 1m Breite und 10 m, 20m, 30 m und 40 m Länge für **Stromimpuls 0,25/100**. 1: INord; 2 Isüd; 3: Iost; 4: Iwest; 5: Iost1; 6: Isüd1; 7: IOst2; 8: Isüd2; 9: IOst3; 10: Isüd3. Zuordnung der Ströme: Siehe Bild 9-1.

Tabelle 9-1 Stromaufteilung auf die ersten 4 Ableitungen, siehe Bild 9-1, in Abhängigkeit von der Länge des Gebäudes für den **Stromimpuls 10/350.**

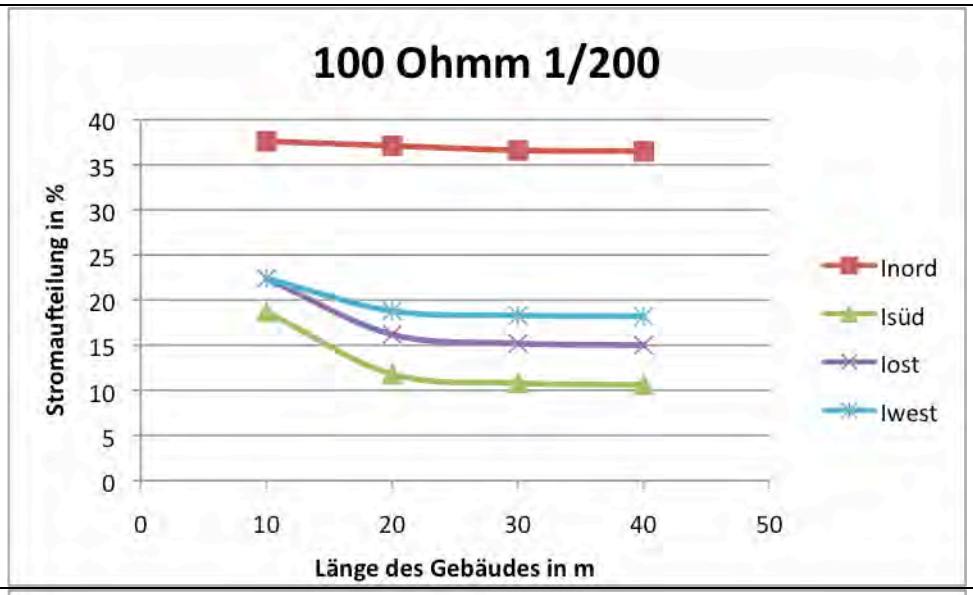


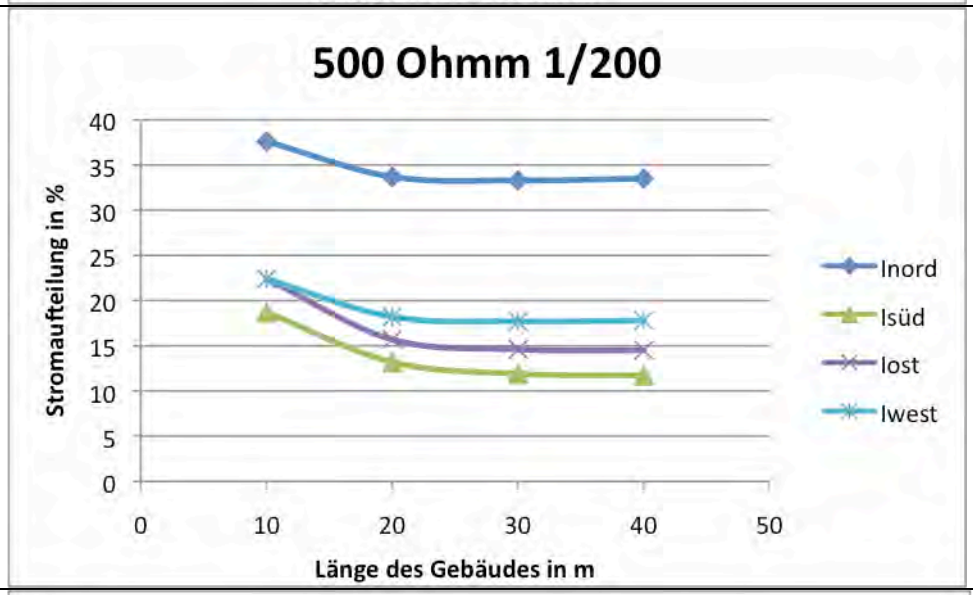




Gebäude 10 m breit und variable Länge

Tabelle 9-2 Stromaufteilung auf die ersten 4 Ableitungen, siehe Bild 9-1, in Abhängigkeit von der Länge des Gebäudes für den **Stromimpuls 1/200.**





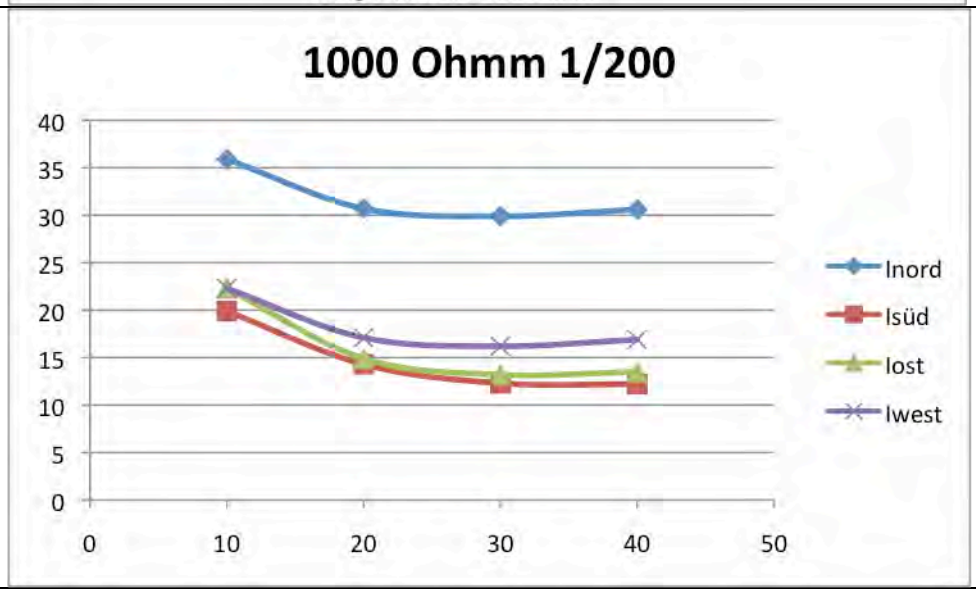
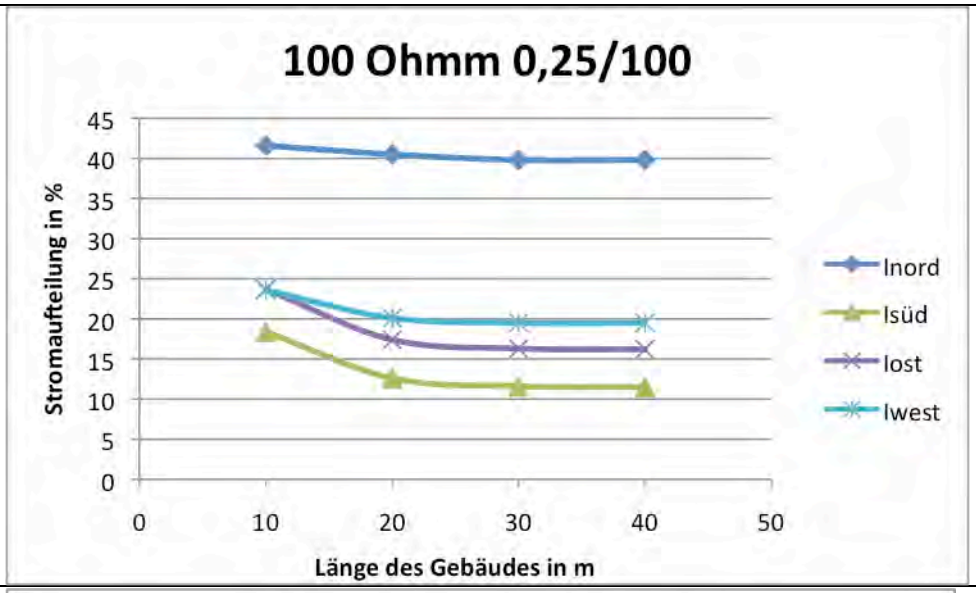
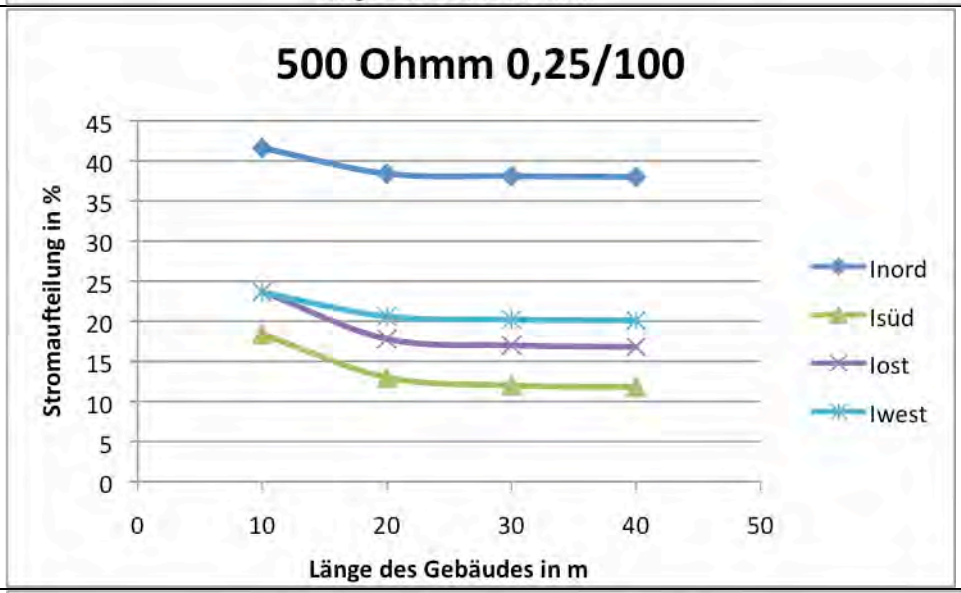


Tabelle 9-3 Stromaufteilung auf die ersten 4 Ableitungen, siehe Bild 9-1, in Abhängigkeit von der Länge des Gebäudes für den **Stromimpuls 0,25/100.**





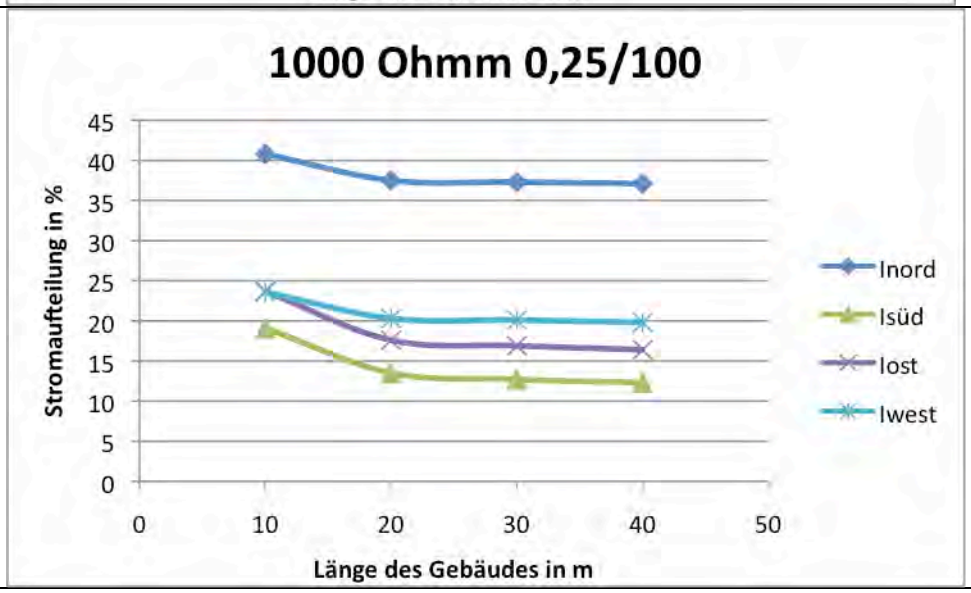


Tabelle 9-4 Errechnete Werte der prozentualen Stromaufteilung für Stromimpuls 10/350

	Gebäudelänge 10 m			Gebäudelänge 20 m			Gebäudelänge 30 m			Gebäudelänge 40 m		
	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm
Inord	36,4	35,7	35,7	31	29,3	29,2	29,8	26,7	26,2	29,5	24,7	24,3
Isüd	19,4	19,9	19,9	14	14,5	14,5	11,9	11,9	11,5	11,2	9,8	9,7
Iost	22,4	22,2	22,2	14,9	14,4	14,4	13	11,6	11,2	12,5	9,6	9,4
Iwest	22,4	22,1	22,1	17	16,1	16,1	15,6	13,5	13,1	15,4	11,6	11,3
Iost1				12	12,8	12,9	8,6	9,2	9,2	7,3	7,3	7,3
Isüd1				11,7	12,8	12,8	8,9	10,3	10,1	7,6	8,3	8,3
IOst2							6,8	8,1	9,3	5,4	7,1	7,2
Isüd2							7	8,8	9,4	5,6	7,6	7,7
IOst3										4,8	7,2	7,4
Isüd3										4,8	7,3	7,4

Tabelle 9-5 Errechnete Werte der prozentualen Stromaufteilung für Stromimpuls 1/200

	Gebäudelänge 10 m			Gebäudelänge 20 m			Gebäudelänge 30 m			Gebäudelänge 40 m		
	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm
Inord	37,6	37,6	35,9	37,1	33,7	30,7	36,6	33,3	29,9	36,5	33,5	30,6
Isüd	18,7	18,7	19,9	11,8	13,2	14,3	10,8	11,9	12,3	10,6	11,7	12,2
Iost	22,4	22,4	22,3	16,2	15,7	14,9	15,2	14,6	13,2	15	14,5	13,5
Iwest	22,4	22,4	22,3	18,8	18,2	17,1	18,3	17,7	16,2	18,2	17,8	16,9
Iost1				9,1	10,8	12,4	7	8	8,8	6,5	7,3	7,6
Isüd1				7,9	10,1	12,3	5,9	7,5	9,4	5,4	6,7	8
IOst2							3,8	5,3	7,2	3	4	4,4
Isüd2							3,5	5,2	7,7	2,8	3,9	5,8
IOst3										1,8	2,9	5,1
Isüd3										1,7	2,8	5,2

Tabelle 9-6 Errechnete Werte der prozentualen Stromaufteilung für Stromimpuls 0,25/100

	Gebäudelänge 10 m			Gebäudelänge 20 m			Gebäudelänge 30 m			Gebäudelänge 40 m		
	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm
Inord	41,6	41,6	40,8	40,5	38,4	37,5	39,8	38,1	37,3	39,8	38	37,1
Isüd	18,4	18,4	19,1	12,6	13	13,5	11,6	12	12,7	11,5	11,8	12,3
Iost	23,7	23,7	23,7	17,4	17,8	17,6	16,3	17	16,9	16,2	16,8	16,4
Iwest	23,6	23,6	23,6	20,1	20,6	20,3	19,5	20,2	20,1	19,5	20,1	19,8
Iost1				9,7	10,1	10,7	7,4	8	8,5	7	7,4	7,7
Isüd1				8,4	8,7	9,5	6,4	6,6	7,2	6	6	6,5
IOst2							4,3	4,2	4,7	3,3	3,3	3,7
Isüd2							4	3,8	4,3	3,1	3	3,4
IOst3										2	1,9	2,2
Isüd3										1,9	1,8	2,2

10 Anhang Bestimmung der Leitungsdaten von im Erdreich verlegten Energieversorgungsleitungen und Telefonleitungen

10.1 Energieversorgungsleitungen

Für die Energieversorgung von Gebäuden werden Erdkabel NYY-J verwendet.

Tabelle 10-1 Technische Daten von Energieversorgungskabeln. Quelle: Internet, Prysmian Kabel.

NAYY 0,6/1 kV

Bestelldaten und konstruktive Merkmale

Aderzahl und Leiternenn-querschnitt mm²	Material-Nummer NAYY-O	NAYY-J	Dicke der Isolierung (Nennwert) mm	Dicke des Außenmantels (Nennwert) mm	Außen-durchmesser (Richtwert) mm	Gewicht netto ca. kg/km
4-adrig						
4 x 25 RE	-	5BA2 0410GY	1,2	1,8	25	950
4 x 35 RE	-	5BA2 0410HY	1,2	1,8	27	1150
4 x 50 SE	5BA2 0406JY	5BA2 0416JY	1,4	1,9	29	1250
4 x 70 SE	5BA2 0406KY	5BA2 0416KY	1,4	2,1	33	1700
4 x 95 SE	5BA2 0406LY	5BA2 0416LY	1,6	2,2	37	2150
4 x 120 SE	5BA2 0406MY	5BA2 0416MY	1,6	2,4	41	2650
4 x 150 SE	5BA2 0406NY	5BA2 0416NY	1,8	2,5	45	3100
4 x 185 SE	5BA2 0406PY	5BA2 0416PY	2,0	2,7	50	3850
4 x 240 SE	5BA2 0406QY	5BA2 0416QY	2,2	2,9	55	4800

Bei einem Blitzeinschlag fließt nach Ansprechen der Blitzstromableiter ein common mode Strom zur fernen Erde. Dabei haben alle Leiter das gleiche transiente Potential. Zur Bestimmung der Leitungsparameter wurde der Kapazitätsbelag messtechnisch be4stimmt und der Induktivitätsbelag rechnerisch aus der magnetischen Energie bestimmt.

Zwei Muster einer Länge von 25 cm mit einem Querschnitt von 35 mm2 wurden im Labor untersucht. Der Kapazitätsbelag aller 4 Leiter gegen einen auf dem Außenmantel aufgebrachten Schirm wurde messtechnisch erfasst.

Bild 10-1 Zwei Kabelmuster für die Messung der Kapazität

Die gemessene Kapazität variiert leicht mit der Frequenz. Ein Mittelwert von 550 pF/m wurde bei einer Frequenz von 10 kHz ermittelt.

Der Induktivitätsbelag ergibt sich aus dem magnetischen Feldbild. Der Hinleiter führt nur einen Teil des Verschiebungsstromes, der sich wieder zur geladenen Wolke hin schließt. Die Berechnung der Induktivität kann daher aus der magnetischen Energie ermittelt werden, die vom Leiter in dem Bereich zwischen Erde und der sich entladenden Wolke in der Höhe R vorherrscht. Die Berechnung ist in den folgenden Schritten dargelegt. Die im Leiter selbst gespeicherte Energie ist klein gegenüber der außerhalb des Leiters vorhandenen Energie und wird hier nicht mit berücksichtigt.

$$H_1 = \frac{I}{2\pi r} \qquad r > r_0$$

$$w_{1,2} = \frac{1}{2}\mu H_1^2; \quad \textit{Energiedichte}$$

$$W_{1,2} = \frac{\mu I^2}{8\pi^2}\int_{r=r_0}^{r=R}\int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi}\int_{z=0}^{z=l}\frac{1}{r^2}\,r\,dr\,d\varphi\,dz; \quad \textit{Energie}$$

$$W_{1,2} = \frac{\mu I^2}{8\pi^2}\ln\frac{R}{r_0}\cdot 2\pi l$$

$$W_{1,2} = \frac{\mu I^2}{8\pi^2}\ln\frac{R}{r_0}\cdot 2\pi l = \frac{1}{2}LI^2$$

$$L = \frac{\mu l}{2\pi}\ln\frac{R}{r_0}$$

Gleichung für die Induktivität des horizontalen Leiters. Der Induktivitätsbelag L´ergibt sich zu

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0}$$

R: Abstand zur sich entladenden Wolke,
l :Länge des Leiters in m,
r_0 : Radius des Leiters. In diesem Fall der äquivalente Radius aller 4 Leiter

Eine von Auswertung in Bild 10-2 zeigt für Wolkenabstände von R = 1 bis 5 km und die Abmessungen des Leiters nach obiger Gleichung Induktivitätswerte von 2...2,6 µH.

Für die Modellierung in Microcap ergeben sich

LEN: variabel ; R´=12 mOhm/m; C´=550pF/m, L`=2,3µH/m

Mit diesen Werten ergibt sich eine Leitungswellenimpedanz

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = 65\ \text{Ohm}$$

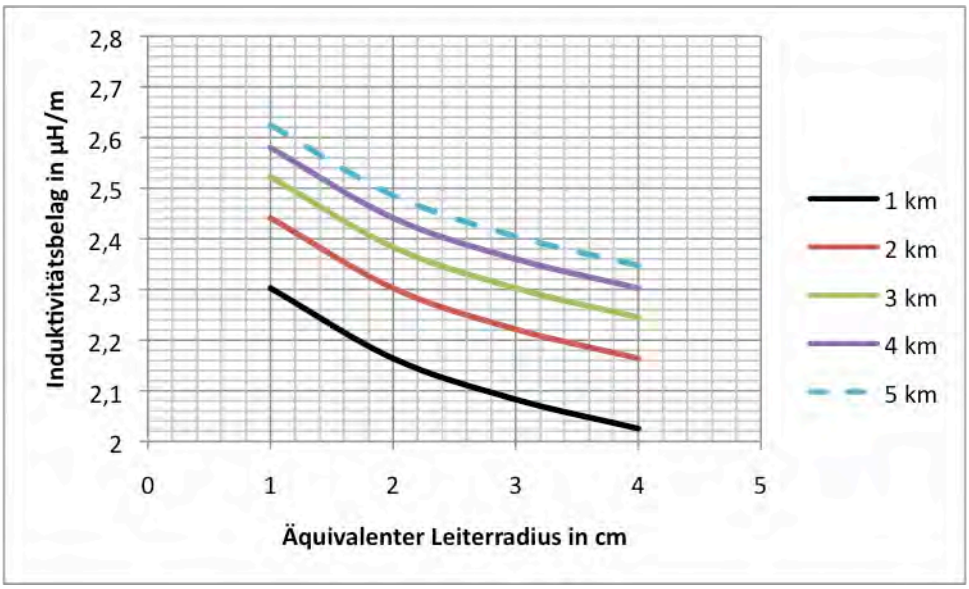


Bild 10-2 Induktivitätsbelag von 4 adrigen Energieversorgungskabeln NYY-J mit einem äquivalenten Leiterradius von 1-4 cm. Parameter: Wolkenhöhe.

10.2 Telefonleitungen

Zwei Telefonleitungen wurden untersucht:

Typ A-024YSF(L)2Y 10x2x0,5mm^2

Kapazität 182 pF/m
R=39 mOhm/m alle Adern parallel für 1 MHz
L= 2,5µH/m

Mit diesen Werten ergibt sich eine Leitungswellenimpedanz

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = 117\text{Ohm}$$

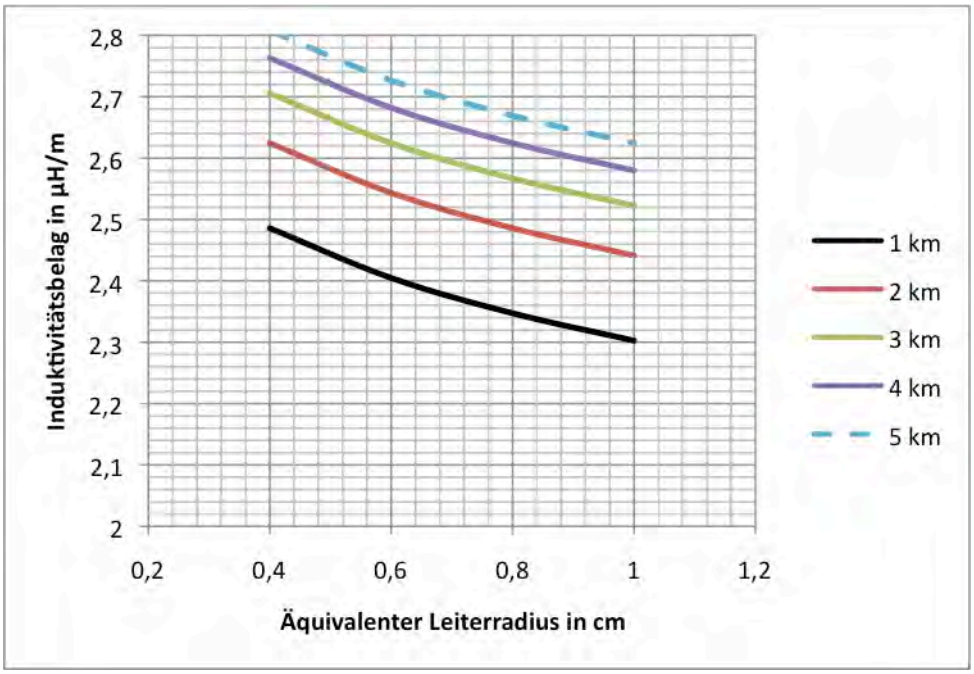


Bild 10-3 Induktivitätsbelag von mehradrigen Telefonkabeln mit einem äquivalenten Leiterradius von 0,4-1 cm. Parameter: Wolkenhöhe.

Bild 10-4 Zwei Telefonkabeltypen

11 Anhang Bestimmung der Leitungsdaten von Vertikal- und Horizontalableitungen.

Für die Berechnung im Zeit-und Frequenzbereich werden folgend die Leitungsdaten berechnet.

11.1 Vertikale Ableitung an einem gewöhnlichen Gebäude ohne Armierung

Der Leitungsparameter C` für die vertikale Leitung sind nicht konstant. Die Kapazität hängt von der Höhe ab. Eine Berechnung dieser Kapazität findet man in der Literatur (Zaengl) Seite 311 wie folgt.

$$C'_E = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(1{,}156\frac{H}{D}\right)}$$

H : Höhe des Zylinders

D : Durchmesser der Ableitung

Für den Induktivitätsbelag wird 1,8 µH angesetzt, damit die Lichtgeschwindigkeit erhalten bleibt.

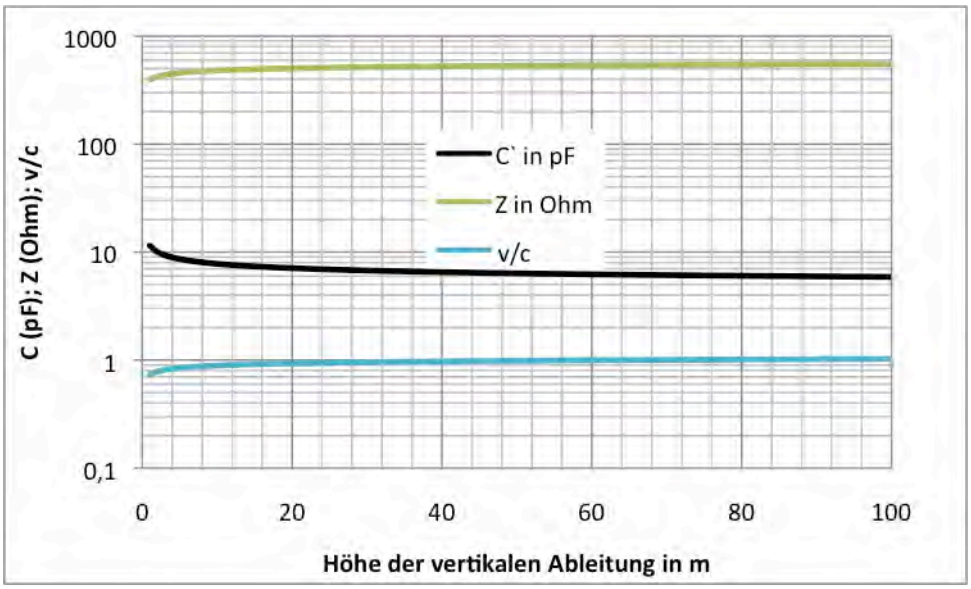


Bild 11-1 Parameter einer vertikalen Ableitung in Luft mit einem Durchmesser von 8mm.

Tabelle 11-1 Parameter für Höhenabschnitte von 10 m.

	L`	C`
h	µH	pF
1-10 m	1,8	8,9
10-20 m	1,8	7,4
20-30 m	1,8	6,9
30-40 m	1,8	6,6

Für die Berechnung in Microcap ergeben sich dann die Mittelwerte für Höhen von 10 - 40 m für Aluminiumleiter wie folgt: Für den Widerstandsbelag R´ ist als Worst case der höchste Wert für1 MHz genomen worden, siehe Tabelle 14-1.

LEN: variabel; C`= 7 pF/m; L`= 1,8 µH/m und R`= 13,6 mOhm/m

11.2 Horizontale Ableitung an einem gewöhnlichen Gebäude ohne Armierung

Da bei horizontalen Ableitungen in Luft die Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist, sind die Beläge einfach aus der Leitungswellenimpedanz Z zu bestimmen.
Für Z gilt nach Lührmann :

$Z = \frac{377}{2\pi} \ln \frac{4h}{D}$ h : Höhe über Erde D : Durchmesser der Ableitung	$C' = \frac{1}{c \bullet Z}$ c : Lichtgeschwindigkeit	$L' = Z^2 \bullet C'$

In Bild 11-2 sind die Verhältnisse dargestellt. Für die VBerechnung in Microcap werden folgende Mittelwerte für Höhen von 10-40 m verwendet:

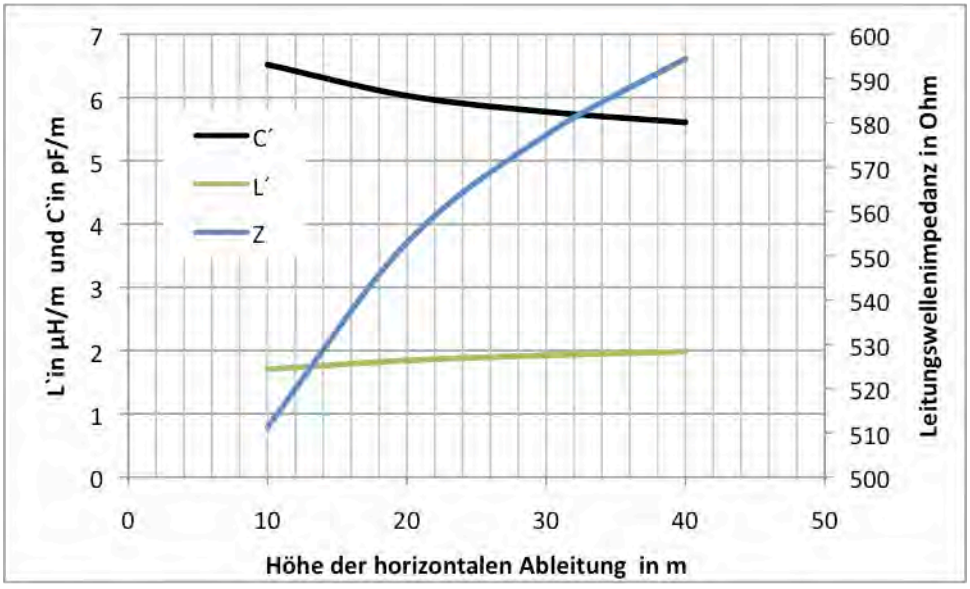


Bild 11-2 Leitungswellenimpedanz Z, Kapazitätsbelag C`und Induktivitätsberlag L` einer horizontalen Ableitung in Luft für einen Leiter mit 8 mm Durchmesser.

Tabelle 11-2 Parameter für Horizontalleiter mit einer Höhe von 10 bis 40 m.

Höhe	Z	C´	L´
m	Ohm	pF	µH
10	511,3	6,52	1,70
20	552,9	6,03	1,84
30	577,2	5,77	1,92
40	594,5	5,61	1,98

Für die Berechnung in Microcap ergeben sich dann die Mittelwerte für Höhen von 10-40 m für Aluminiumleiter wie folgt: Für den Widerstandsbelag R´ ist als Worst case der höchste Wert für1 MHz genommen worden, siehe Tabelle 14-1.

LEN: variabel; C`= 6 pF/m;  L`= 1,86 µH/m und R`= 13,6 mOhm/m

12 Anhang Modellierung eines Gitters für die Simulation in Microcap.

Die Berechnung der Stromverteilung in einem in Erde eingelegten Gitters erfordert die Kenntnis der Impedanzwerte des metallenen Gitters, des eigentlichen Ausbreitungswiderstands und der wirksamen Kapazität des Gitters gegen ferne Erde. Mit diesen Werten kann ein Gitter dann in Microcap modeliert und die Stromaufteilung berechnet werden. Das Gitter soll dabei als Einheitsgitter mit einer Größe von 1x1m modelliert werden, so dass beliebig große Gitter modelliert werden.

12.1 Berechnung der Impedanzwerte R`und L`

Die Impedanzwerte R`und L eines Gitters lassen sich pro Flächeneinheit wie folgt mit den Angaben in Bild 12-1 berechnen:

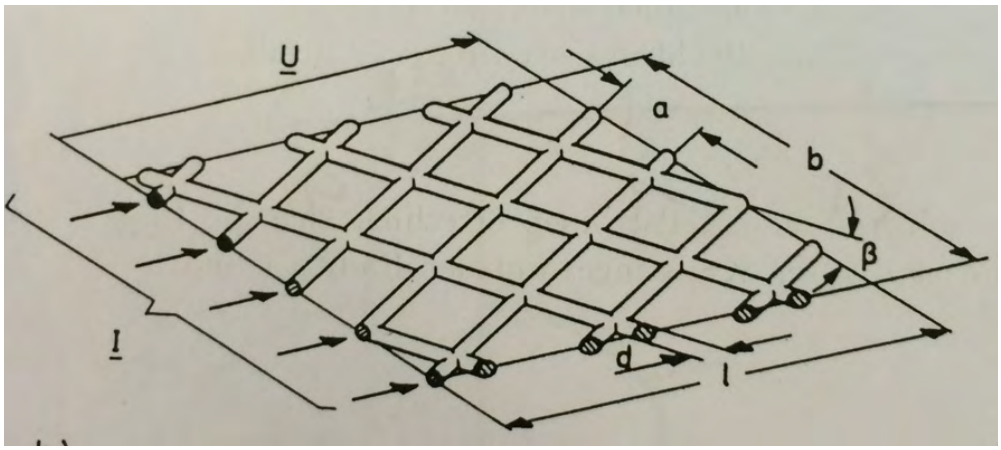


Bild 12-1 Gitter mit paralleler Teilstromrichtung. A: Gitterabstand; d Durchmesser des Gitterleiters, l,b. Einheitslänge , I: eingespeister Strom, U: Längsspannungsabfall. Quelle: Sirait,T.: Elektrische Ausgleichsvorgänge in den Erdflächenleitern von Hochspannungslaboratorien. Dissertation TH Braunschweig 1966.

$$Für\ d \gg \delta\ gilt$$

$$L' = \frac{R'}{\omega} - \frac{\mu_0 a}{2\pi}\ln(\sin\frac{\pi d}{2a})$$

$$R' = \frac{a}{\kappa\pi d\delta}$$

Für Gitter mit einem Drahtdurchmesser von 6 mm ist zu prüfen, ob die Bedingung $d \gg \delta$ erfüllt ist. In Bild 12-2 ist die Eindringtiefe für die üblichen Metalle dargestellt. Für Edelstahlleiter ist die obige Bedingung für Frequenzen oberhalb 100 kHz gut erfüllt. Bei 25 kHz ist die Erfüllung grenzwertig.
Die berechneten Impedanzwerte R`und L` sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

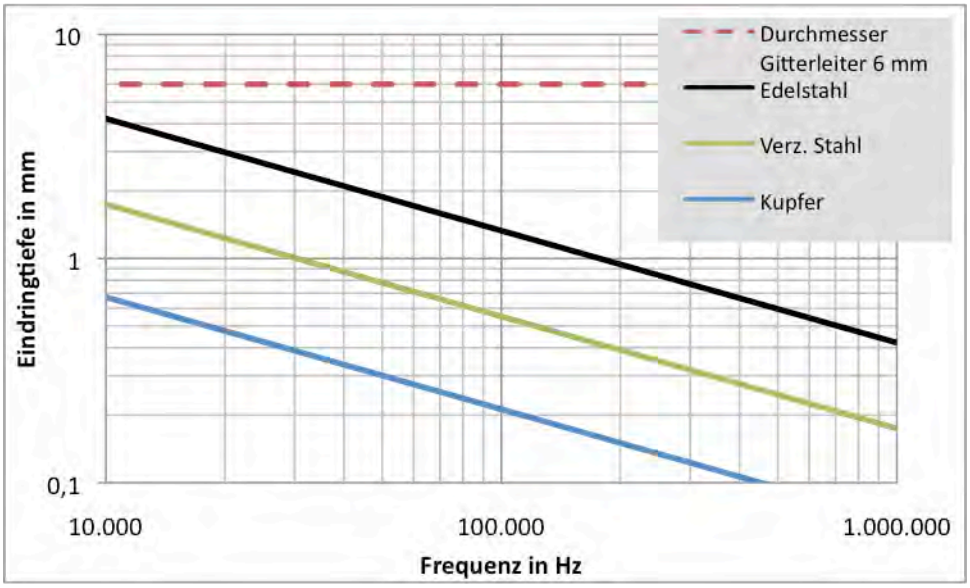


Bild 12-2 Eindringtiefe als Funktion der Frequenz

Tabelle 12-1Werte für R`und L`von Gittermatten bei 25 kHz

	Edelstahl		Stahl verzinkt		Kupfer	
Gitter	R`	L`	R`	L`	R`	L`
cm x cm	mOhm	nH	mOhm	nH	mOhm	nH
10	1,4	56	0,6	51	0,09	49
25	3,4	186	1,4	173	0,2	165
50	6,9	441	2,8	415	0,4	400
75 1)	**10,35**	**661,5**	**4,2**	**622,5**	**0,6**	**600**
150 1)	**20,7**	**1323**	**8,4**	**1245**	**1,2**	**1200**

1) Werte extrapoliert

Tabelle 12-2 Werte für R`und L`von Gittermatten bei 250 kHz

	Edelstahl		Stahl verzinkt		Kupfer	
Gitter	R`	L`	R`	L`	R`	L`
cm x cm	mOhm	nH	mOhm	nH	mOhm	nH
10	4,4	50	1,8	48	0,29	40
25	11	170	4,5	167	0,73	163
50	22	411	9,1	400	1,4	472
75 1)	**33**	**616,5**	**13,65**	**600**	**2,1**	**708**
150 1)	**66**	**1233**	**27,3**	**1200**	**4,2**	**1416**

1) Werte extrapoliert

Tabelle 12-3 Werte für R`und L`von Gittermatten bei 1 MHz

	Edelstahl		Stahl verzinkt		Kupfer	
Gitter	R`	L`	R`	L`	R`	L`
cm x cm	mOhm	nH	mOhm	nH	mOhm	nH
10	8,8	49	3,6	48	0,6	47
25	22	167	9,1	165	1,4	164
50	44	404	18	400	2,9	397
75 1)	**66**	**606**	**27**	**600**	**4,35**	**595,5**
150 1)	**132**	**1212**	**54**	**1200**	**8,7**	**1191**

1) Werte extrapoliert

12.2 Berechnung des Ausbreitungswiderstands eines Einheitsgitters von 1m x 1m

Aus früheren Berechnungen der Schrittspannung sind Werte des Ausbreitungswiderstands R_A bekannt. Die berechneten Werte wurden analysiert und sind in Tabelle 12-4 dargestellt. Die grafische Darstellung zeigt Bild 12-3 In der Analyse fällt auf, dass der spezifische Ausbreitungswiderstand (R_A`= R_A *Einheiten) überwiegend von der Abmessung des Erders abhängt und die Maschengröße und die Tiefe eine untergeordnete Rolle spielen. Gleichwohl ist die Maschengröße für die Berechnung der Schrittspannung massgebend.

Tabelle 12-4 Daten von bereneten Gittererdern. Quelle:VDB Studie König Oktober 2014.

			Spezifischer Ausbreitungswiderstand **eines einzelnen** 1m x 1m Gitters		
Gitter-abmessungen	Erderab-messung	Anzahl Einheiten Von 1m x 1m	ρ_E=200	ρ_E=500	ρ_E =1000
m	m		Ohm		
1x1	3x3	9	270	675	1350
0,25x0,25	3x3	9	248	621	1242
0,05x0,05	3x3	9	242	605	1211
1x1	6x6	36	533	1332	2664
0,5x0,5	6x6	36	518	1296	2592
1x1	8x8	64	717	1792	3584
0,5x0,5	8x8	64	691	1728	3456
1x1	10x10	100	890	2225	4450
0,5x0,5	10x10	100	860	2150	4300
0,5x0,5	15x15	225	1305	3263	6525
1x1	15x15	225	1328	3319	6638
1,5x1,5	15x45	675	3983	9956	19913

Hinweis: Der Ausbreitungswiderstand eines Gitters ergibt sich aus dem spezifischen Ausbreitungswiderstand/ Anzahl der Einheiten. Beispiel: 10x10m: 0,5m x 0,5 m. Für 200 Ohmm ergibt sich ein Wert von 860 Ohm für 1 Einzelgitter. Bei 100 Einzelgittern ergibt sich der Ausbreitungswiderstand zu 8,9 Ohm.
Hinweis: In Microcap wird RE´ für ein Element für ρE=1Ohmm eingegeben und mit dem k-Faktor multipliziert. Beispiel:
Für R_E´=4,45 Ohm ergibt sich mit k = 200 der Wert von 890 Ohm für ein Gitterelement von 1 m x 1 m.
Für R_E´=6,52 Ohm ergibt sich mit k = 200 der Wert von 1305 Ohm für ein Gitterelement von 1 m x 1 m.
Oder:
Gitterabmessung 1,5x1,5m: Für 200 Ohmm hat ein 1mx1m Giter einen wert von 3983 Ohm. Für einen Wert von 1 Ohmm ergibt sich dann der Wert 3983/200=19,95
Gitterabmessung 0,75x0,75m: Für 200 Ohmm hat ein 1mx1m Giter einen wert von 3983 Ohm. Für einen Wert von 1 Ohmm ergibt sich dann der Wert

Mach neue tabelle mit rval

Bild 12-3 Ausbreitungswiderstand eines Gitters von 1mx1m in Abhängigkeit von der Anzahl der 1m x 1m Gitter bzw. von der Fläche des Erders nach den Daten von Tabelle 12-4.

Beispiel: Ein Erder mit 10m x10m Abmessungen besteht aus 100 Einzelgittern von 1m x 1m. Aus Bild 12-3 ergibt sich dann für einen spezifischen Erdwiderstand von 1000 Ohmm ein Ausbreitungswiderstand des 1m x 1m Gitters von 4300 - 4400 Ohm. Dieser Wert ist dann in das Microcapmodell einzusetzen, siehe Abschnitt 12.4 und Bild 12-11.

Ein Vergleich mit einer analytischen Lösung ist in Bild 12-4 gezeigt. Es zeigt sich eine einigermassen gute Übereinstimung, obwohl der Plattenerder nach Neuhaus einen kreisförmigen Querschnitt hat. Für eine erste Abschätzung kann die Neuhaus-formel jedoch für größere Abmessungen verwendet werden. Alternativ kann in jedem einzelfall der Ausbreitungswiderstand mit GSA berechnet werden.

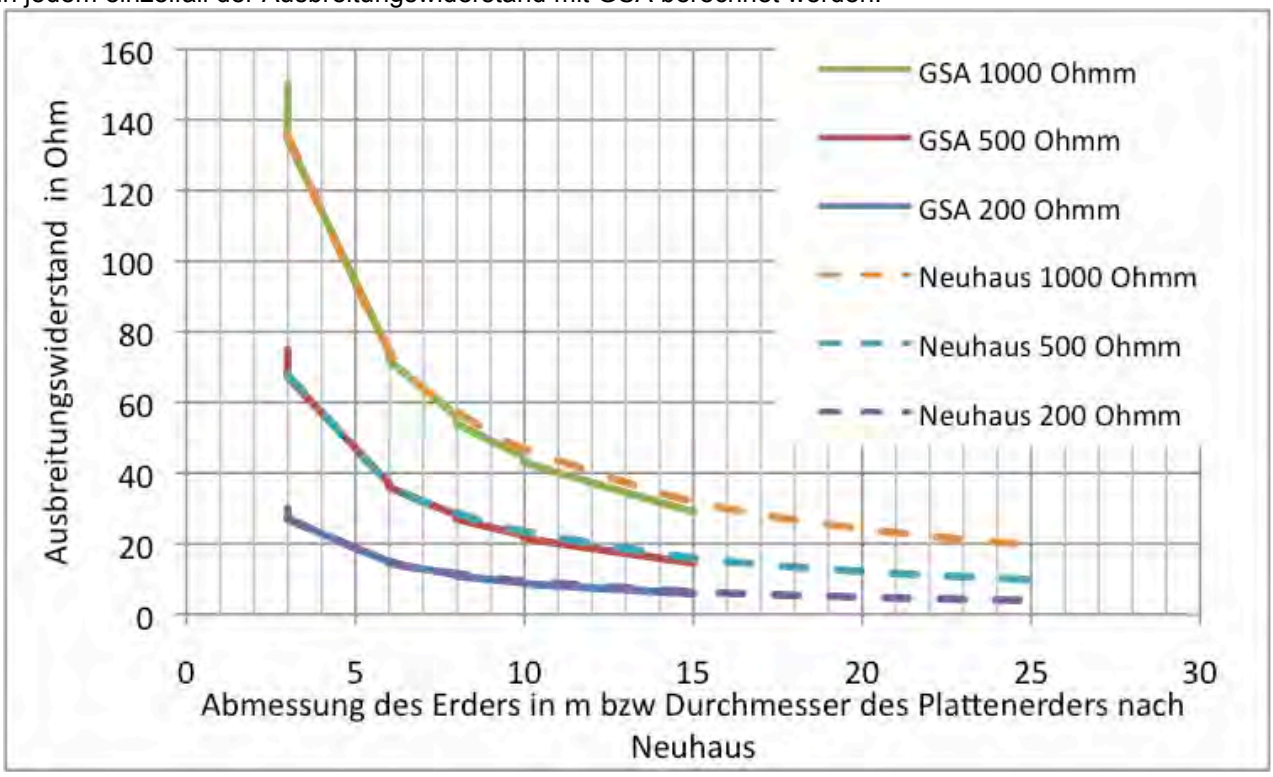


Bild 12-4 Vergleich der mit GSA berechneten (Tabelle 12-4) und mit einer Formel von Neuhaus berechneten Ausbreitungswiderstände. Für Gittererder mit quadratischer Geometrie und für Kreisförmige massive Platten nach Neuhaus

6	Kreisplatten = Maschenerder	$R = \frac{\rho}{2D}$		auf der Erde
7	desgleichen	$R = \frac{\rho}{4D} \cdot \left(1 + \frac{2}{\pi} \text{ arc tg } \frac{D}{4t}\right)$	$R = \frac{\rho}{2D}$	in der Erde

Es bedeuten:	l = Länge	(m)
R in Ω	d = Durchmesser von Draht, Band, Stab	(m)
ρ in Ωm	D = Durchmesser von Ring, Kreis, Halbkugel	(m)
	t = Tiefe ab Erdoberfläche	(m)
	a = Kantenlänge einer quadratischen Platte	(m)
	$U \triangleq$ Umfang eines unregelmäßigen Ringerders	(m)
	V = Volumen eines Einzelfundamentes	(m^3)
	$A \triangleq$ Flächeninhalt einer unregelmäßigen Masche	(m^2)

Bild 12-5 Formel zur Berechnung eines kreisförmigen Plattenerders.

12.3 Berechnung der Kapazität eines Gitters gegen ferne Erde

Die Kapazität wird mit Gleichung 10-1 berechnet wie ein Horizontalleiter. Die einzelnen Stäbe des Gitters werdfen hier als einzelne Horizontalleiter berechnet und je nach Anzahl der Stäbe in einem Gitter multipliziert. Dabei ist zu beachten, dass der angrenzende Gitterstab zum nächsten 1mx1m-Gitter nicht doppelt zählt, also bei 10cm x 10cm sind es 20 Gitterstäbe insgesamt aber 18 werden gezählt.
Die Kapazitätsabhängigkeiten sind in den folgenden Bildern dargestellt.

$$C' = \pi\left[\varepsilon_{r\infty}\varepsilon_0 + \sqrt{\frac{2\varepsilon_{r\infty}\varepsilon_0}{\rho_E\omega}}\right] / \ln\frac{D_A}{D_I}$$

C' : Kapazität eines Gitterstabs

$\varepsilon_{r\infty}$: 8

ε_0 : $8{,}85 * 10^{-12}$

ρ_E : Spezifischer Erdwiderstand

ω : Kreisfrequenz

D_A : 9m

D_I : 0,006m

C' : Kapazität eines einzelnen Stabes pro meter

Gleichung 12-1

Tabelle 12-5 Kapazität von 1m x 1m Gittern mit unterschiedlicher Gitterzahl in nF

	Gitter mit 1 x 1 m 10 cm x 10 cm			Gitter mit 1 x 1 m 25 cm x 25 cm			Gitter mit 1 x 1 m 50 cm x 50 cm			Gitter mit 1 x 1 m 75 cm x 75 cm		
	200 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	200 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	200 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm	200 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm
Frequenz												
1	2595,5	1641,7	1161,0	865,2	547,2	387,0	576,8	364,8	258,0	288,4	182,4	129,0
10	821,1	519,5	367,5	273,7	173,2	122,5	182,5	115,5	81,7	91,2	57,7	40,8
100	260,0	164,7	116,6	86,7	54,9	38,9	57,8	36,6	25,9	28,9	18,3	13,0
1.000	82,6	52,4	37,2	27,5	17,5	12,4	18,4	11,7	8,3	9,2	5,8	4,1
10.000	26,5	17,0	12,2	8,8	5,7	4,1	5,9	3,8	2,7	2,9	1,9	1,4
25.000	17,0	10,9	7,9	5,7	3,6	2,6	3,8	2,4	1,8	1,9	1,2	0,9
100.000	8,8	5,7	4,2	2,9	1,9	1,4	1,9	1,3	0,9	1,0	0,6	0,5
250.000	5,7	3,8	2,9	1,9	1,3	1,0	1,3	0,9	0,6	0,6	0,4	0,3
1.000.000	3,1	2,2	1,7	1,0	0,7	0,6	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2

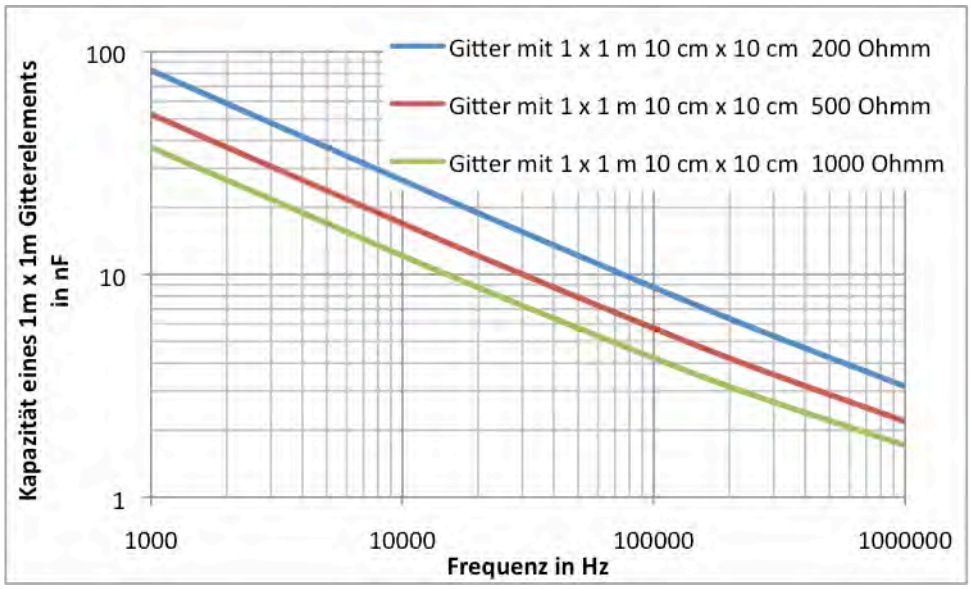


Bild 12-6 Kapazitätsabhängigkeit eines 1m x 1m Gitters mit 10 cm Maschenweite nach Gleichung 10-1

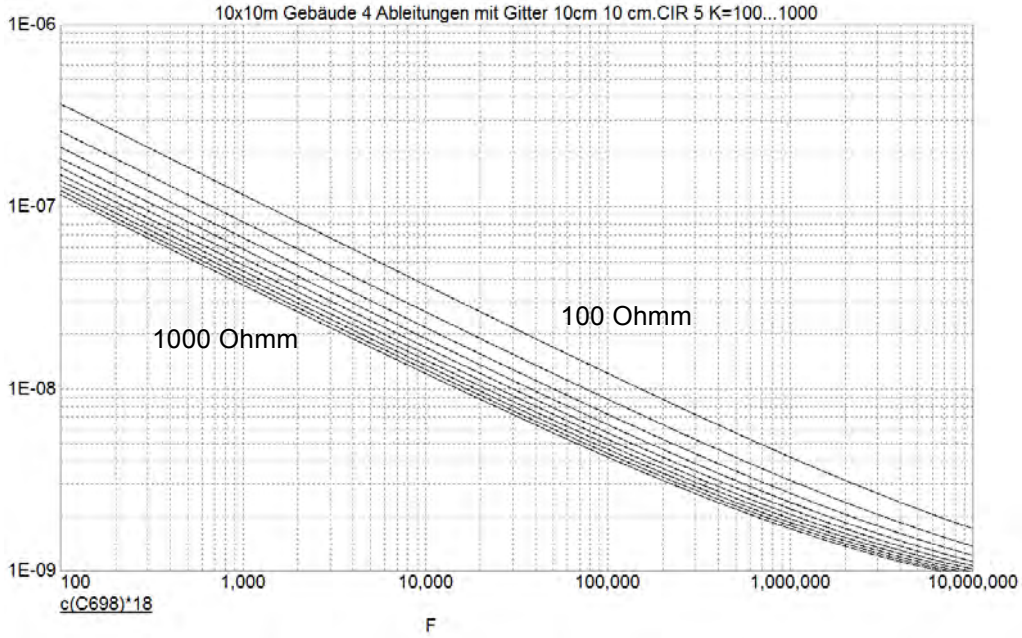


Bild 12-7 Kapazitätsabhängigkeit eines 1m x 1m Gitters mit 10 cm Maschenweite mit Microcap. Steping 100 Ohmm bis 1000 Ohmm.

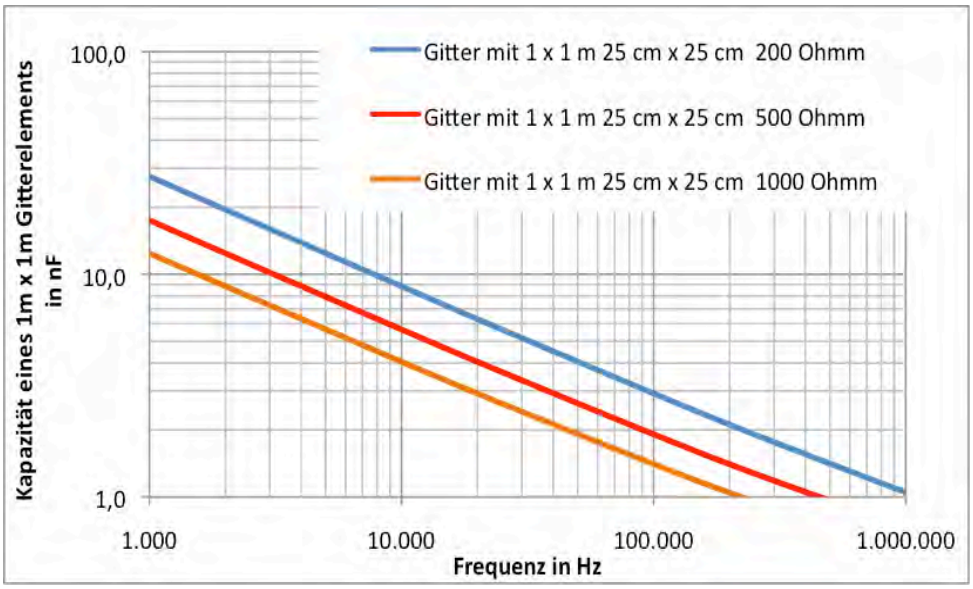


Bild 12-8 Kapazitätsabhängigkeit eines 1m x 1m Gitters mit 25 cm Maschenweite nach Gleichung 10-1

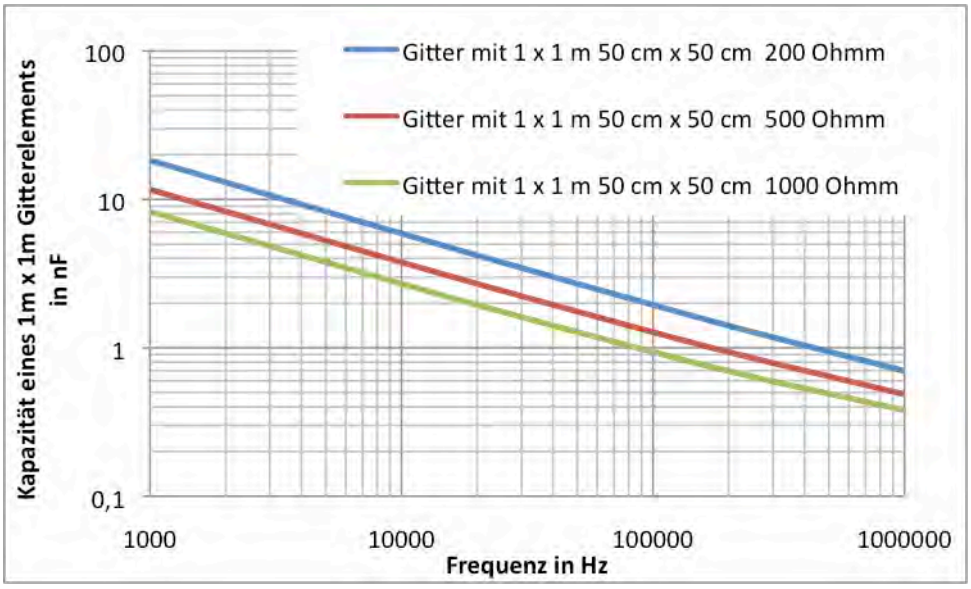


Bild 12-9 Kapazitätsabhängigkeit eines 1m x 1m Gitters mit 50 cm Maschenweite nach Gleichung 10-1

12.4 Modellbildung für die Berechnung der Stromverteilung mit Microcap

Ausgehend von den Voruntersuchungen wird hier das Simulationsmodell in Microcap aufgebaut. Das in Bild 12-10 gezeigte Gitter wird in Microcap entsprechend Bild 12-11 modelliert.

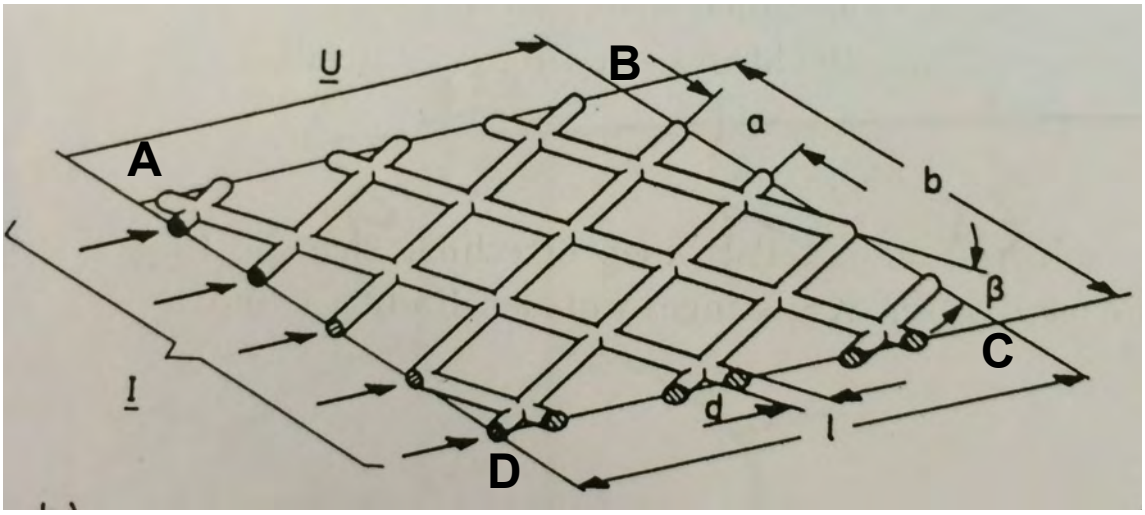


Bild 12-10 Gitter mit paralleler Teilstromrichtung. A: Gitterabstand; d Durchmesser des Gitterleiters, l,b. Einheitslänge , I: eingespeister Strom, U: Längsspannungsabfall. Quelle: Sirait,T.: Elektrische Ausgleichsvorgänge in den Erdflächenleitern von Hochspannungslaboratorien. Dissertation TH Braunschweig 1966.

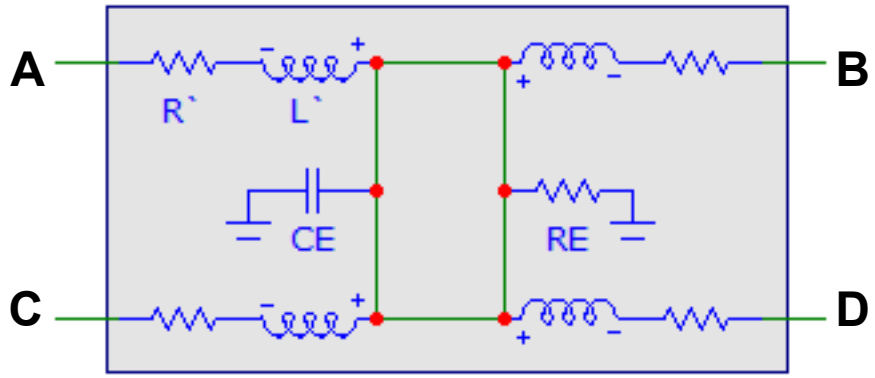


Bild 12-11 Modellbildung eines Einzelgitters 1m x 1m in Microcap.

R` und L`: Widerstandsbelag nach Tabelle 12-1, Tabelle 12-2 und Tabelle 12-3
R_E: Ausbreitungswiderstand nach Tabelle 12-4
C_E: Kapazität nach Tabelle 12-5

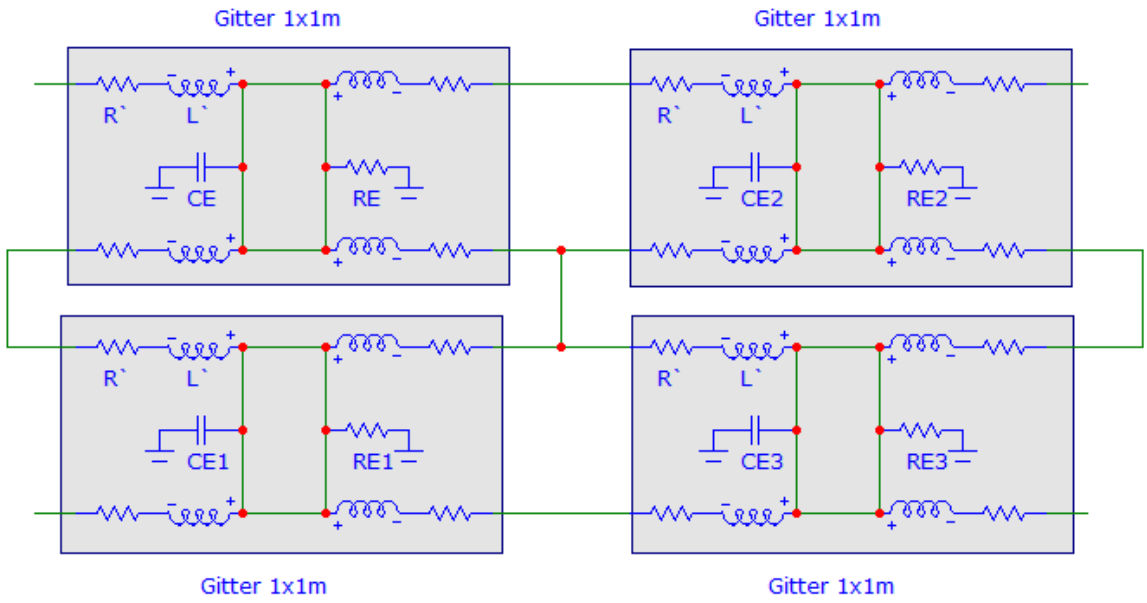


Bild 12-12 4 Ein 4x4m Gitter dargestellt aus 4 Einzelgittern.

13 Anhang Test Microcap C(W)

Die Formel für die Frequenzabhängigkeit wird direkt in das C- Feld unter Freq=.... eingetragen. Die absolute Größe von C1 im C-Feld spielt keine Rolle.

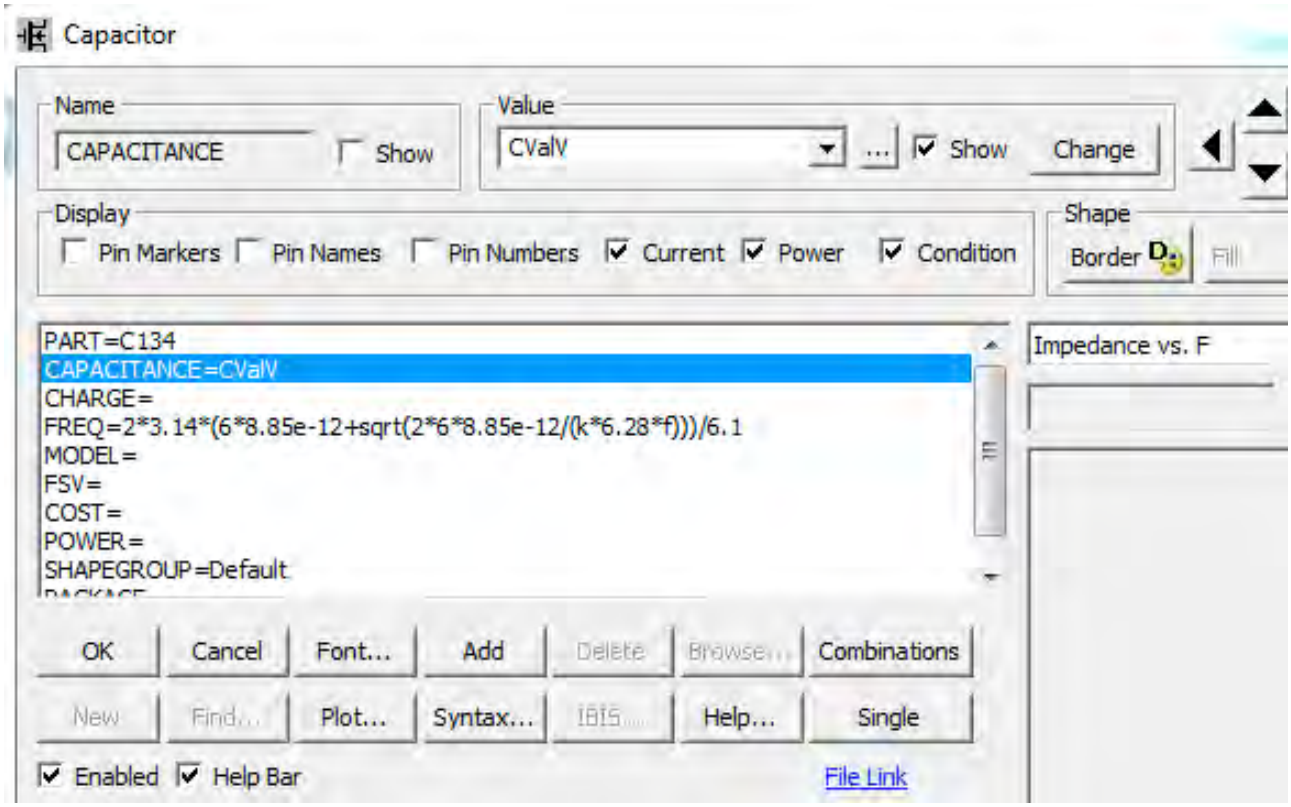


Bild 13-1 Eingabemaske Microcap.

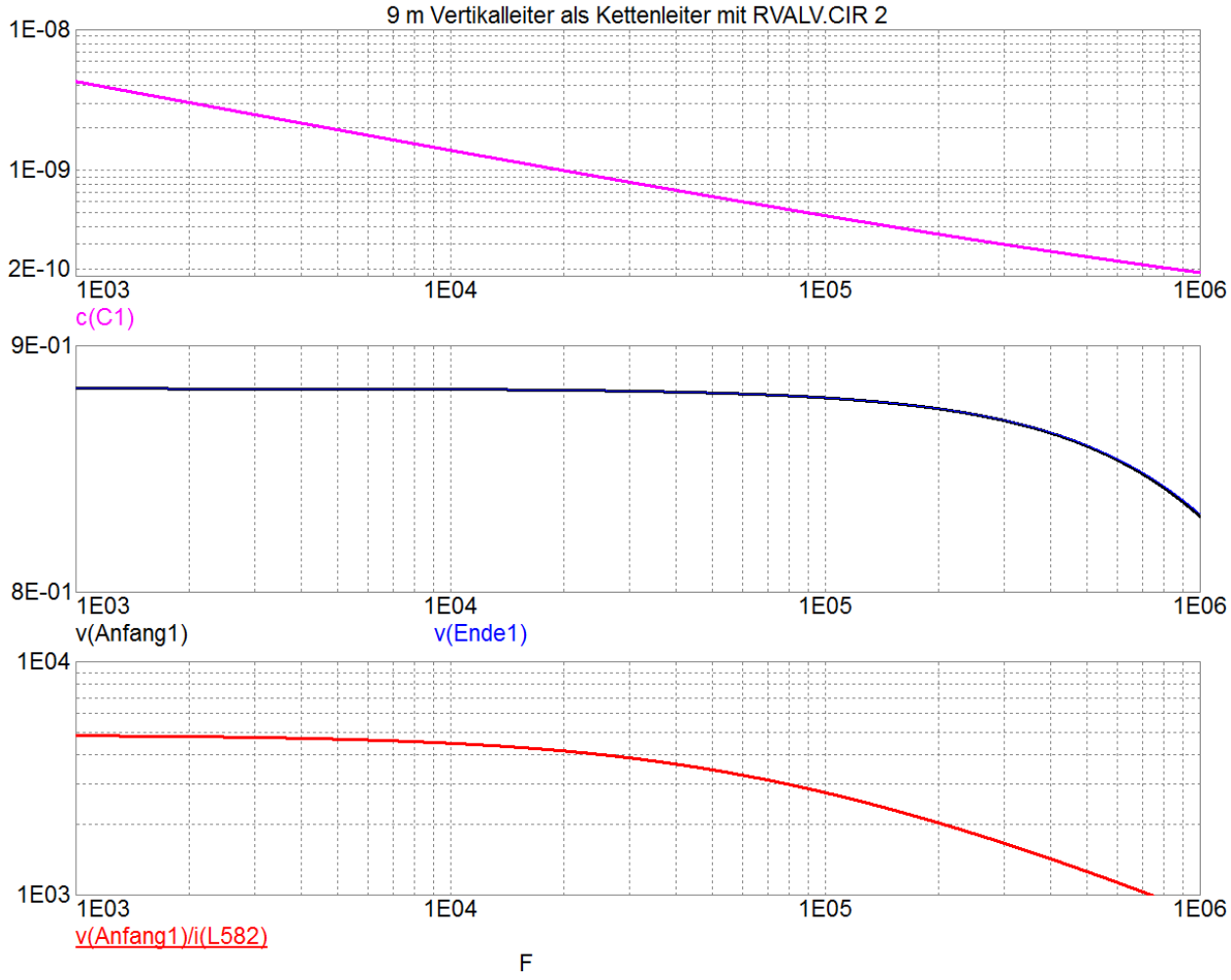


Bild 13-2 Berecneter Frequenzgang und Darstellung der frequenzabhängigen Kapazität

14 Anhang Impedanzen Z, R`und L´ von Ableitungen

Quelle: Bericht Meppelink: Schutzhütten

Tabelle 14-1 Frequenzabhängigkeit der längenbezogenen Werte für Rundleiter für negativen Folgestoßstrom 0,25/100 mit einer Ersatzfrequenz von 1 MHz und negativen Erstblitz 1/200 mit 250 kHz

Material	**Querschnitt**	**Gleichstrom-widerstand Pro meter**	**Widerstand Pro meter**		**Innere Induktivität Pro meter**		**Betrag der Impedanz Z Pro meter**	
		R_0	R´		L_i´		Z Betrag	
	mm^2	mOhm/m	mOhm/m		nH/m		mOhm/m	
			250 kHz	1 MHz	250 kHz	1 MHz	250 kHz	1 MHz
Kupfer	50	0,345	5,3	10,5	3,31	1,66	7,4	14,8
	35	0,492	6,17	12,6	3,85	1,97	8,6	17,7
	28	0,616	7,33	14,1	4,56	2,21	10,3	19,8
Aluminium	50	0,58	6,9	13,6	4,3	2,15	9,65	19,2
	35	0,828	8,27	16,3	5,13	2,56	11,55	22,95
	28	1,037	9,28	18,3	5,74	2,87	12,95	25,70
Stahl verzinkt μ=2 für 250 kHz μ=1 für 1 MHz	50	2,4	20	28	6,20	4,3	27,9	39,2
	35	3,427	24,08	33,7	7,37	5,22	33,41	47
	28	4,29	27,06	37	8,25	5,8	37,45	52,6
	D=15 mm 177mm^2 Für Banderder 30x5mm	0,67	7,4	20,4	4,65	2,32	10,3	20,48
Edelstahl	50	14	37,8	71,5	20,9	10,5	50,5	98,5
	35	19,97	45	84,3	24,95	12,58	59,51	115,42
	28	25	51,16	95,1	27,8	14,07	67,25	129,75
	D=20mm 314mm^2	2,2	14	27	8,4	4,2	19	37