

GSA Tagung 3.Nov. 2015

Fachhochschule Südwestfalen, Soest

Ein Initiative von
Prof.Dr.-Ing. Jan Meppelink
Markus Schonland

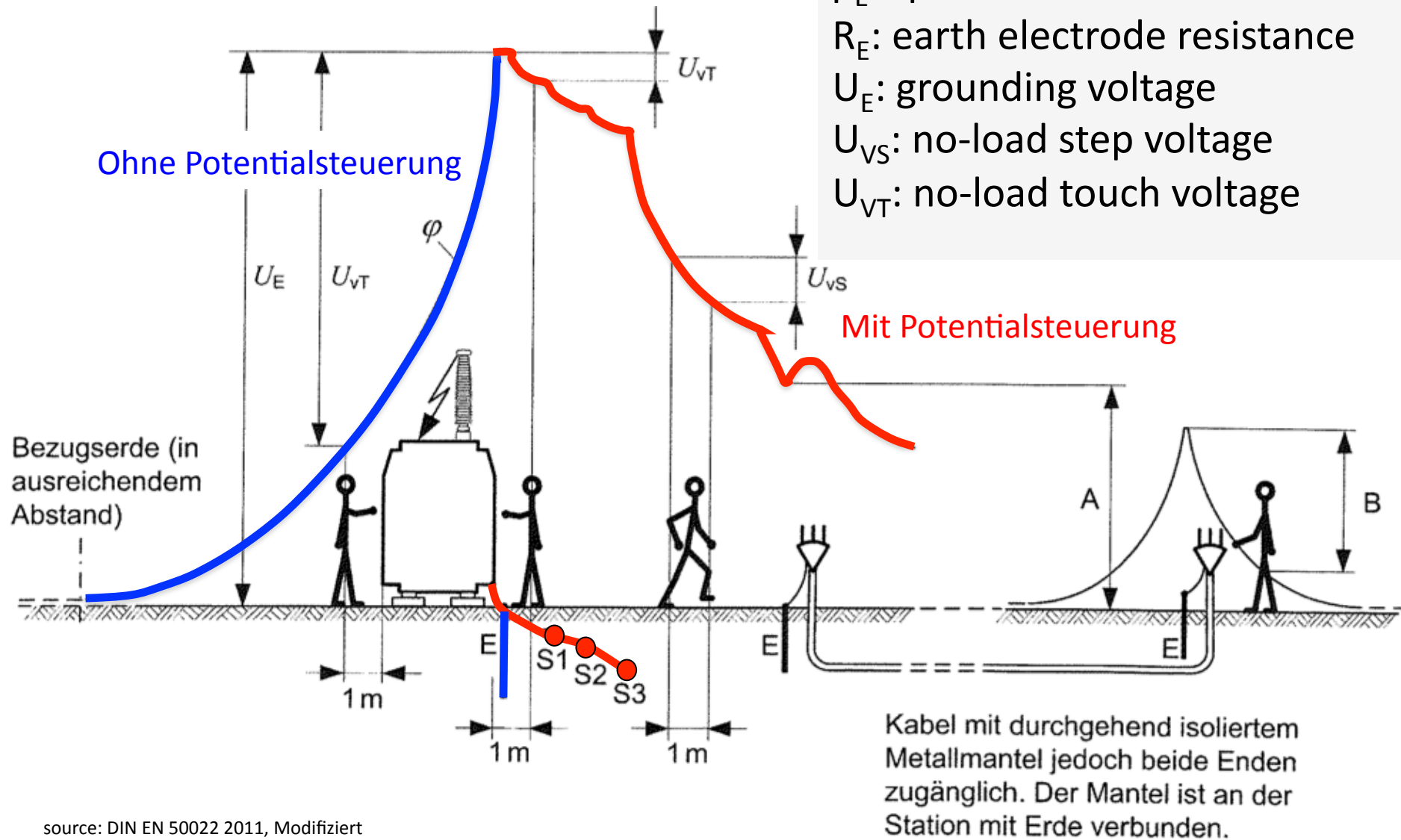


Agenda

Thema	Referent	Zeitplan incl. Diskussion min
1. Einführung in die Thematik Erdungssysteme im Blitzschutz und in elektrischen Anlagen. (Introduction into requirements for grounding systems for lightning and power systems)	Scholand	45
2. Berechnungsmethoden für Erdersysteme im Blitzrelevanten Frequenzbereich (Methodes of calculation for grounding systems in the frequency range of lightning))	Meppelink	45
3. Die aktuelle Version von GSA wird vorgestellt anhand einiger ausgewählter Beispiele. Die Referenten kommen von SINT Ingegneria Presentation of the latest GSA Version, presented by SINT Ingegneria) http://www.sintingegneria.com	Cuccarollo Andolfato	60
4. Mittagspause (Lunch) around 12:30		30
5. Continue GSA		60
6. Welche weiteren Anforderungen gibt es seitens der Experten Other requirements from expert's point of view.	Open discussion	30
7. EMV Anforderungen an die Berechnung von Erdersystemen zu stellen? EMC Requirements for grounding systems	Open discussion	30
8. Abschlussdiskussion, Ausblick und weiteres Vorgehen. Concluding discussion and future Actions		30
End of Meeting around 16:00		

Definitionen
EN 50022 2011

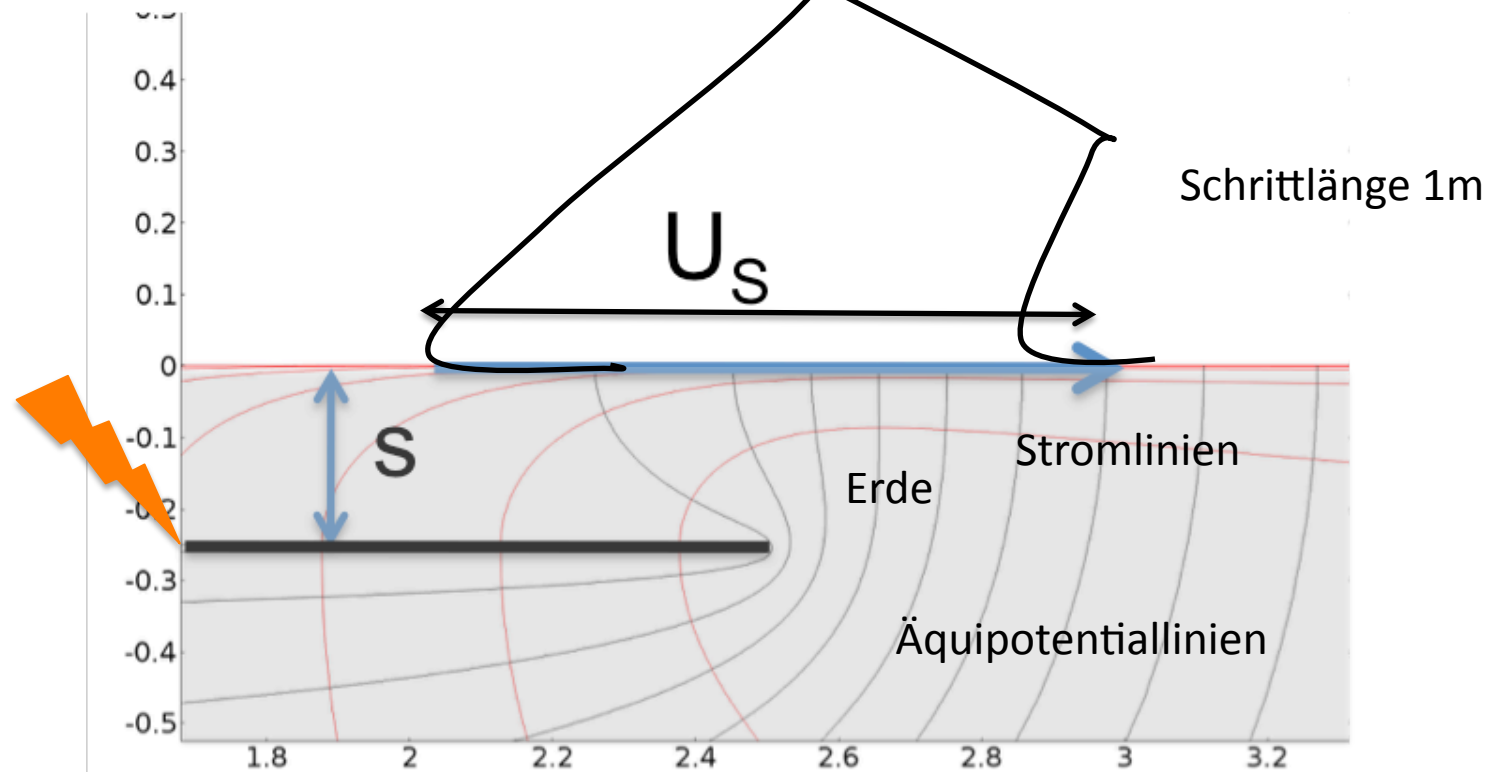
E: earth electrode
 ρ_E : specific earth resistance
 R_E : earth electrode resistance
 U_E : grounding voltage
 U_{VS} : no-load step voltage
 U_{VT} : no-load touch voltage



source: DIN EN 50022 2011, Modifiziert

25 kV 10 / 350

Berechnung der Schrittspannung im blitzrelevanten Frequenzbereich



Ziel dieses Vortrags

0,25/100

1/200

10/350

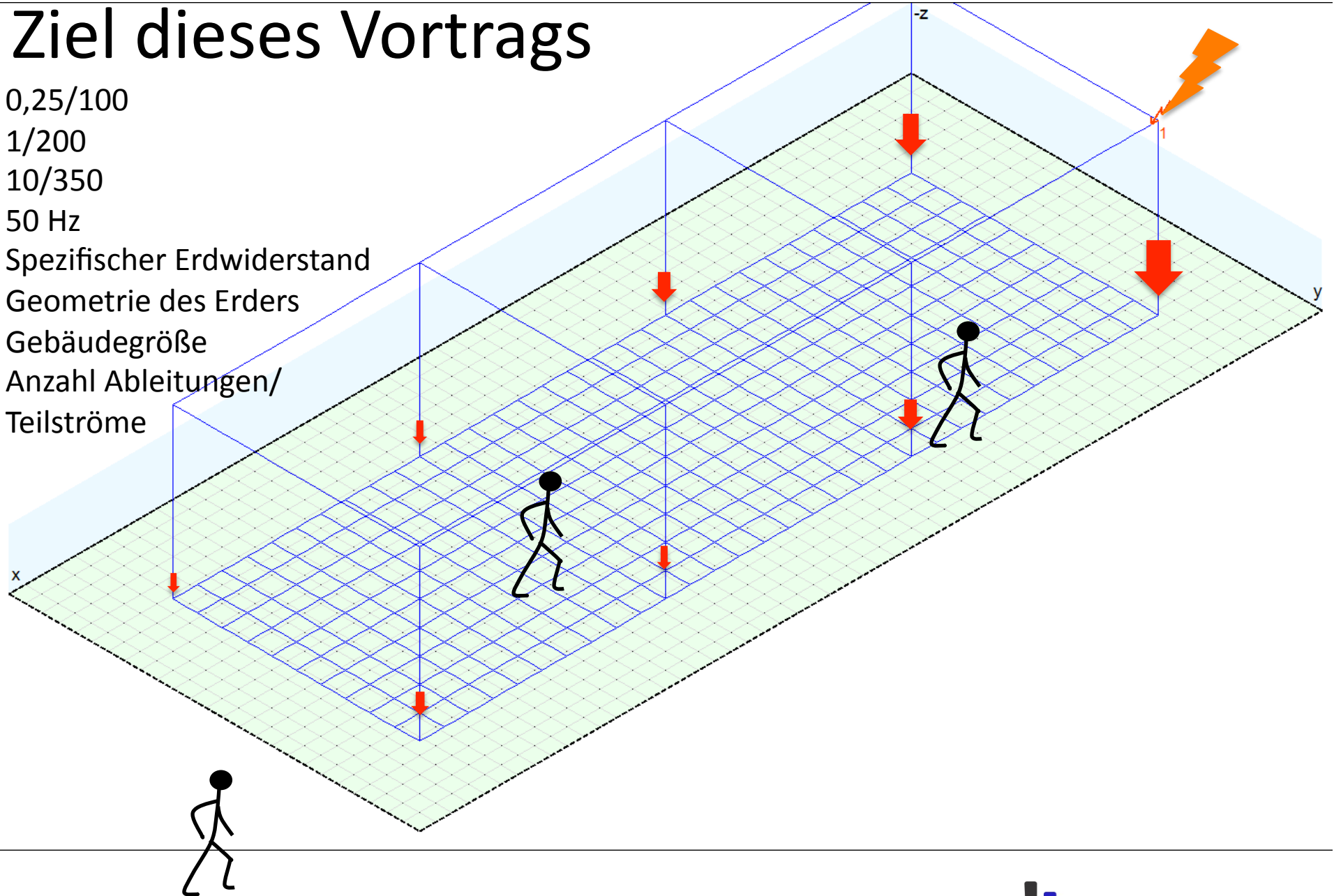
50 Hz

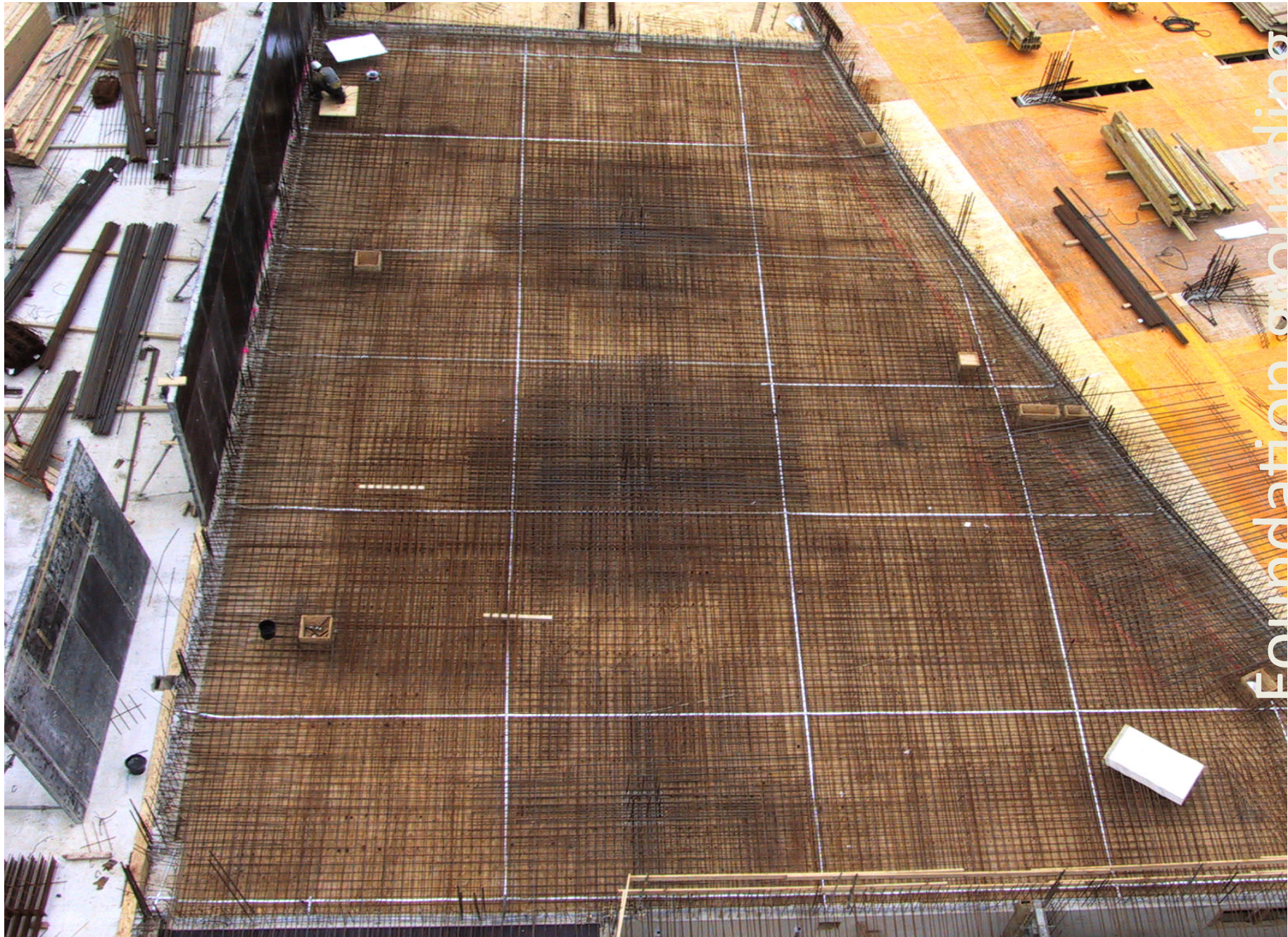
Spezifischer Erdwiderstand

Geometrie des Erders

Gebäudegröße

Anzahl Ableitungen/
Teilströme





Foundation grounding

electrodes

Berechnungsmethoden Schrittspannung

Analytisch

- Begrenzt
- Kompliziert
- Unterschiedliche Formeln
- Von Fall zu Fall richtiges Ergebnis
- Nur für **DC, 50 Hz** gültig
- Meist nur Re als Formel

FEM

- Comsol Multiphysics
- Andere am Markt
- Lösung für finite Elemente in 3D
- Spezialkenntnisse in der Bedienung
- Support nötig
- Lange Rechenzeit
- Auch **bis ... MHz**
- Ergebnisse sind plausibel
- Schnelle Rechner

Maxwell Sommerfeld

- Spezielle Erdungsprogramme (GSA)
- Andere am Markt
- Lösung für finite Leitungselemente
- Normkonforme Darstellung
- **Bis 1 MHz**
- 6 GB RAM
- Standardrechner
- Schnell erlernbar

Beispiel IEC 61400-24 Ed.1.0: Wind turbines - Part 24: Lightning protection

bare buried ring electrode	$R_1 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2ad}}$	J.16
n buried radial electrodes radiating horizontally and symmetrically from a common point	$R_2 = \frac{\rho}{n\pi L} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt{2ad}} - 1 + \sum_{m=1}^{n-1} \ln \frac{1 + \sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)}{\sin\left(\frac{\pi m}{n}\right)} \right)$	J.17
mutual earthing resistance between the ring electrode and the n buried radial electrodes radiating symmetrically from a common point	$R_3 = \frac{\rho}{\pi^2 D} \ln \frac{4D}{\sqrt{2 \frac{L}{e} d}}$	J.18
combined resistance	$R = \frac{R_1 R_2 - R_3^2}{R_1 + R_2 - 2R_3}$	J.19

Keine Formel für die Schritt bzw. Berührungsspannung

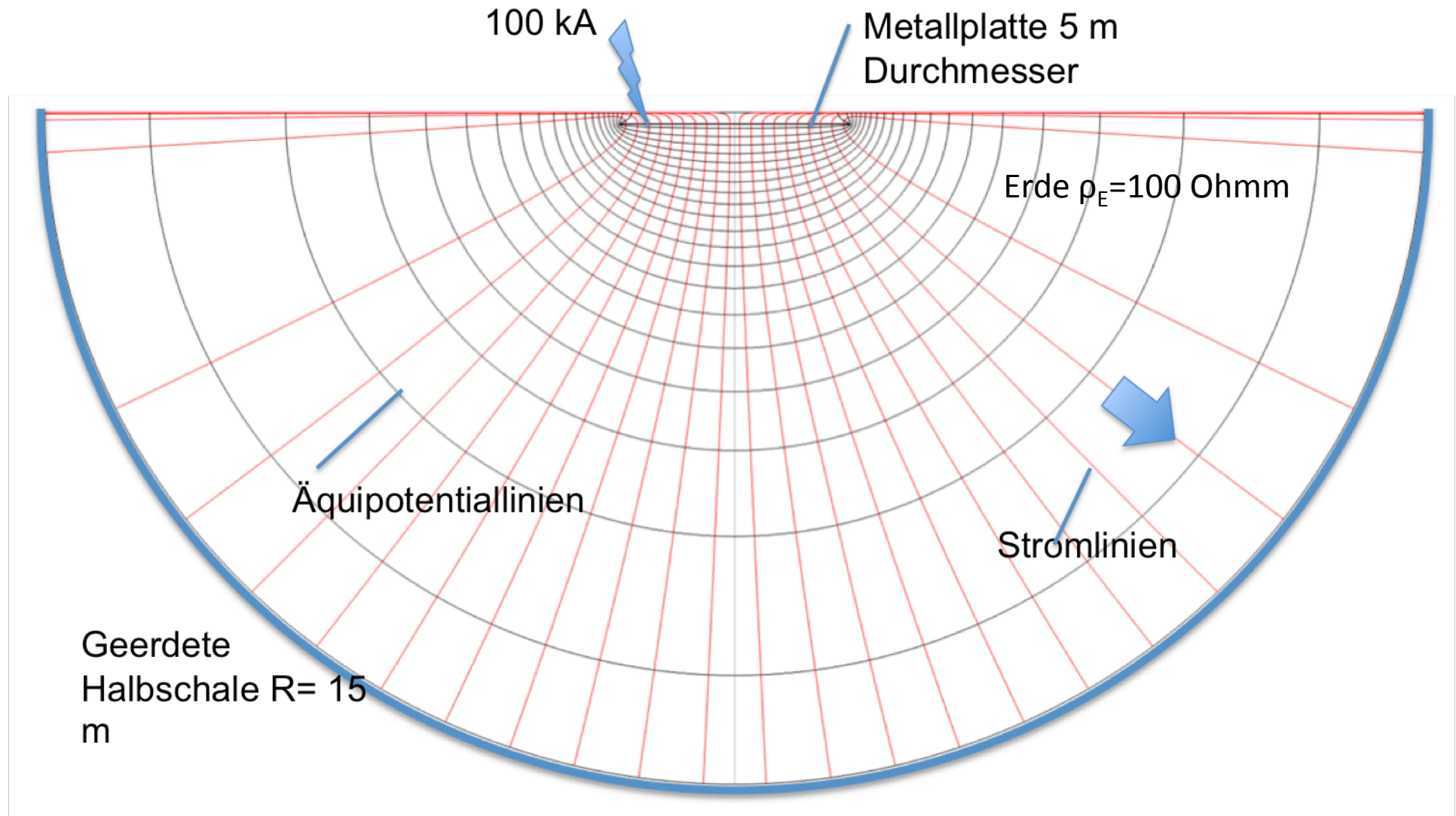
Aus Literatur

- Z.B. Koch : Erdungen, 2. Auflage Formeln für Stab und Bänder
- Sato,S., Zaengl,W.: Effective grounding mesh calculation technik. IEEE ??
- CIGRE Report 400-03, 1985. Potential rise calculation for an economical design of earthing system for high voltage substations. By: Gerhardt,W

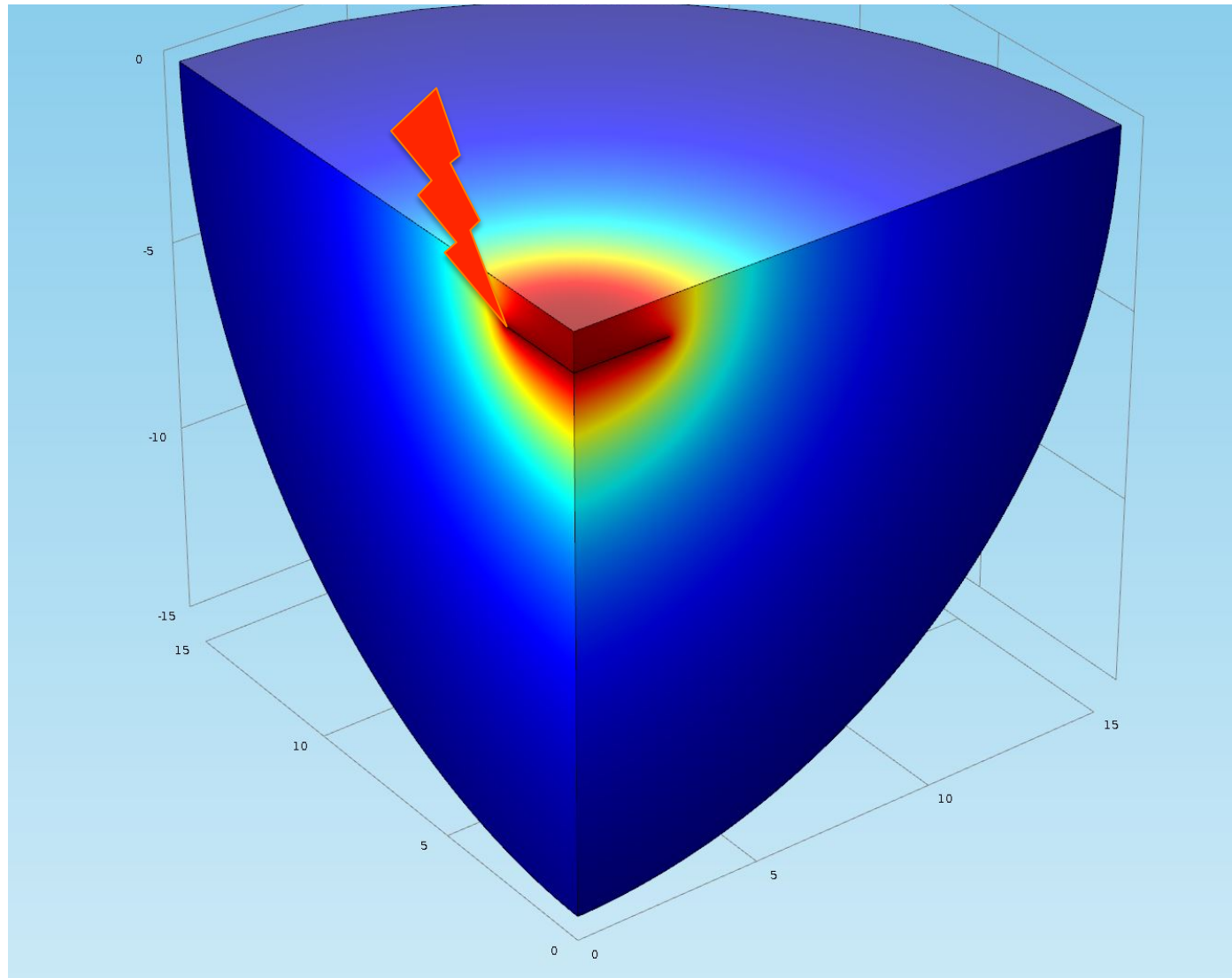
Bewertung: Sehr viel Erfahrung erforderlich,
Berechnung ist auf Standardanordnungen und
auf 50 Hz begrenzt.

FEM Programm

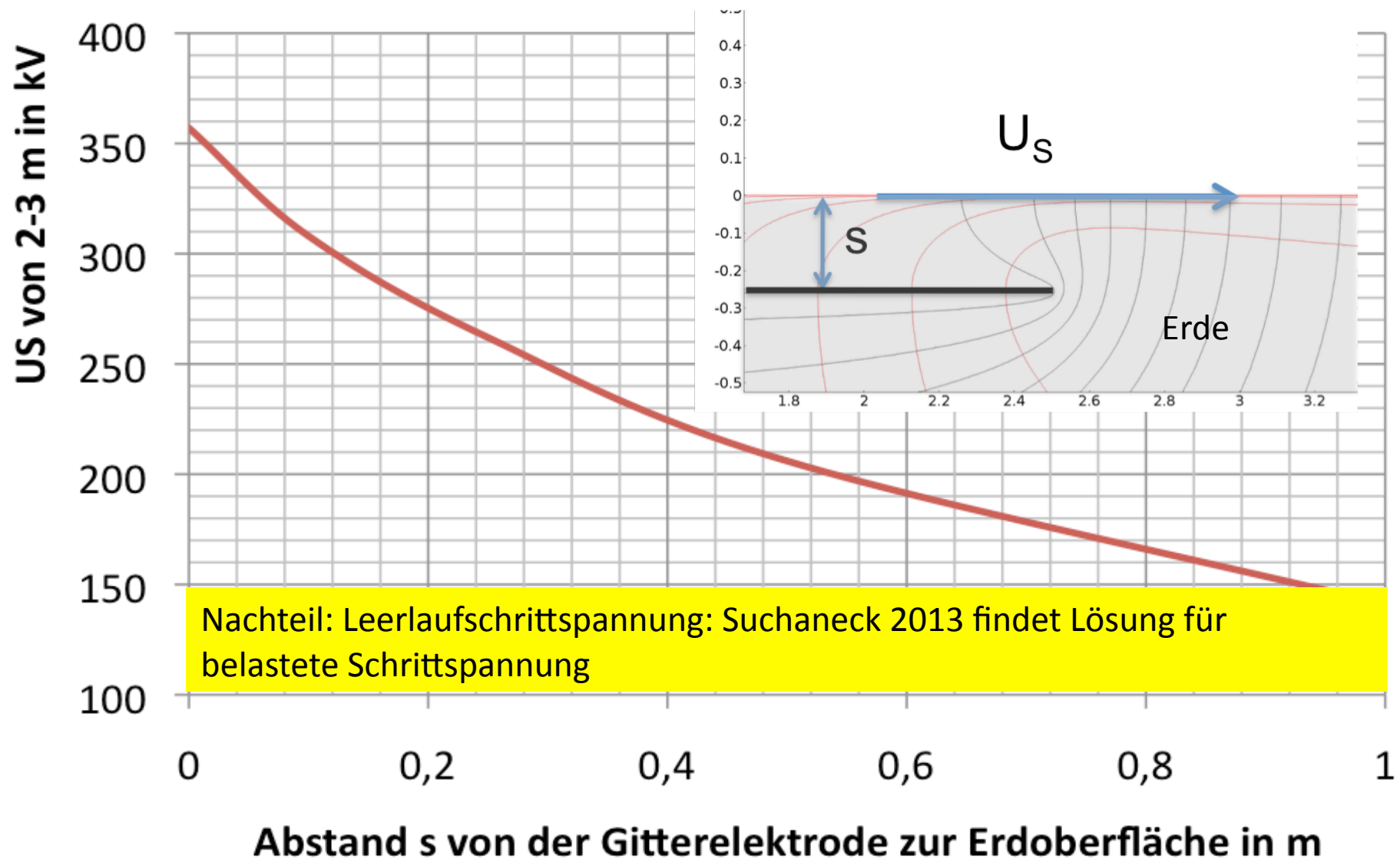
Comsol Multiphysics



Modellberechnung: Modell erstellen: 2 Std . Maschen: 30 min, 8 Mio Volumenelemente
Rechenzeit 8 min, Rechner 120 GB RAM



Leerlauf-Schrittspannung U_S



Berechnungsmethoden

Zeitbereich

- **Aufwendige Modellierung und Zeitaufwenig**
- ρ_E und ε_E sind zeitabhängig
- Mit Comsol Multiphysics möglich
- Leerlaufspannungen
- Belastete Schritt- und Berührungsspannung sind sehr aufwendig (Suchaneck 2011)
- Energiebetrachtungen (Hugo Modell (Suchaneck))
- Berücksichtigt Stromanstieg, Scheitelwert und Impulsdauer

Frequenzbereich

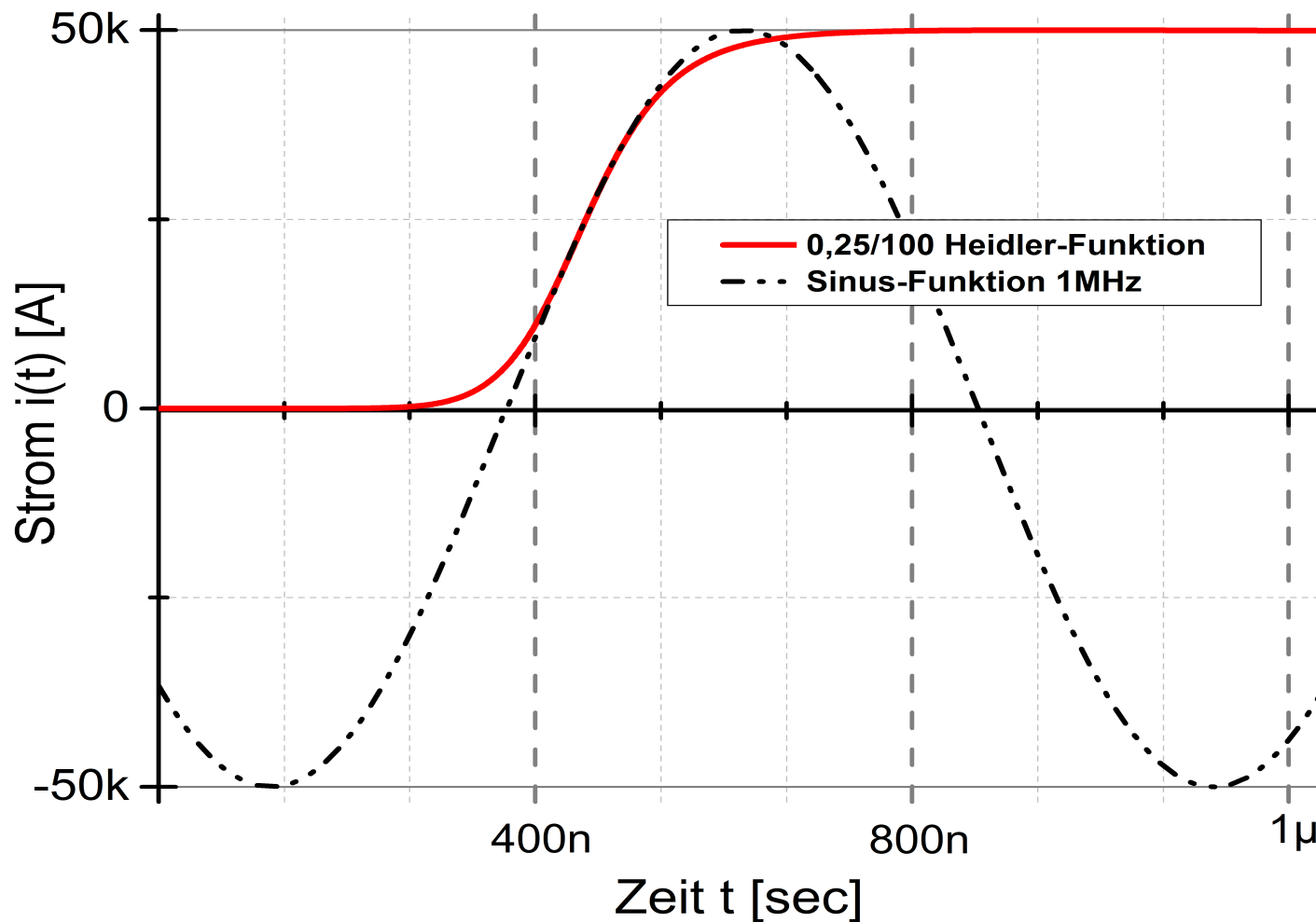
- **Einfache Modellierung, schnell und Zielführend**
- ρ_E und ε_E sind frequenzabhängig bekannt
- Die meisten kommerziellen Erdungsberechnungsprogramme arbeiten im Frequenzbereich
- Berechnet Schritt und Berührungsspannung normkonform
- Energiebetrachtungen im 50 Hz – Bereich über Abschaltzeit möglich
- Berücksichtigt Stromanstieg und Stromscheitelwert

Die Stoßströme nach DIN EN 62305-1

Stoßstrom T_1/T_2	Scheitelwert LPL 1	Äquivalente Sinus- schwingung	Frequenz f
0,25/100	50 kA	$f=1/(4 \times T_1)$	1 MHz
1/200	100 kA		250 kHz
10/350	200 kA		25 kHz

Transfer in den Frequenzbereich

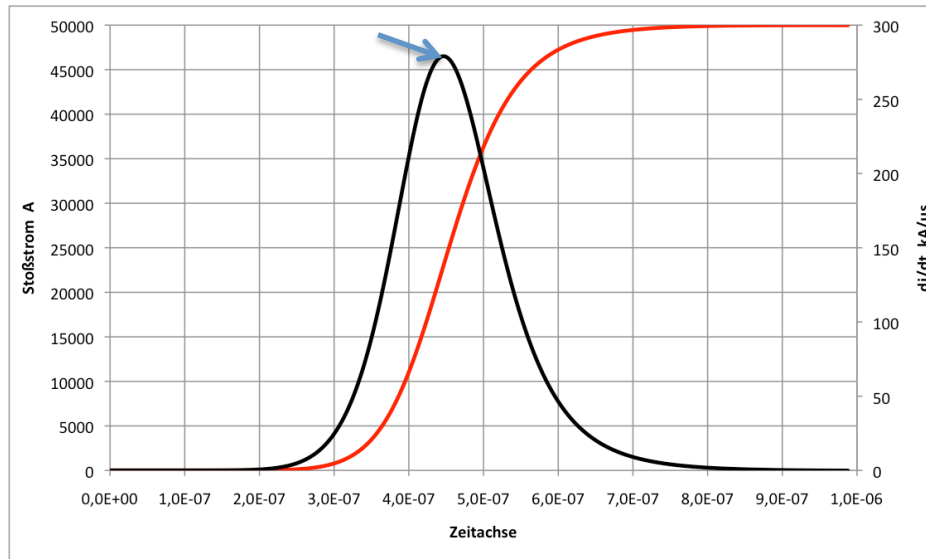
Der blitzrelevante Frequenzbereich für 0,25/100



di/dt beim Sinus
etwas größer
gegenüber Heidler

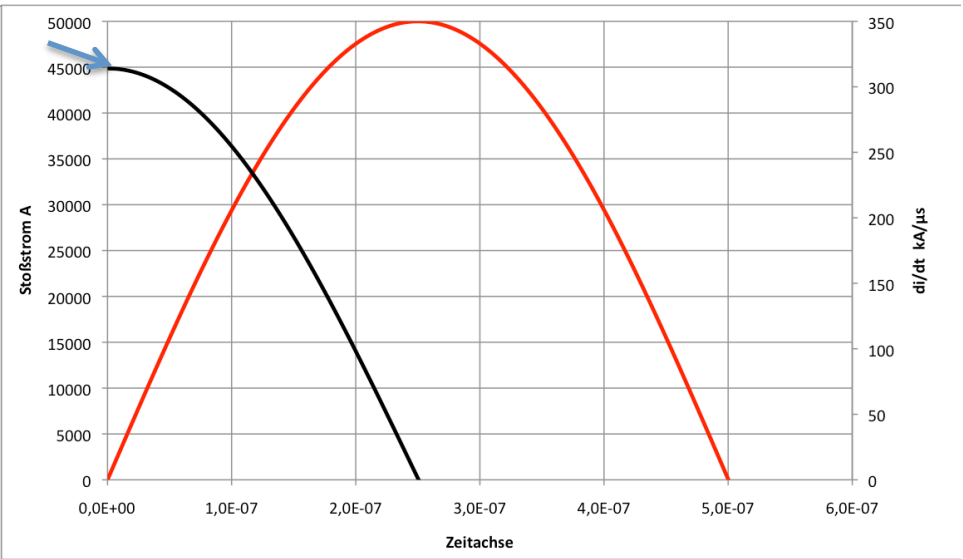
Vergleich di/dt 0,25/100 und Sinus 1 MHz

Heidler funktion 50 kA peak



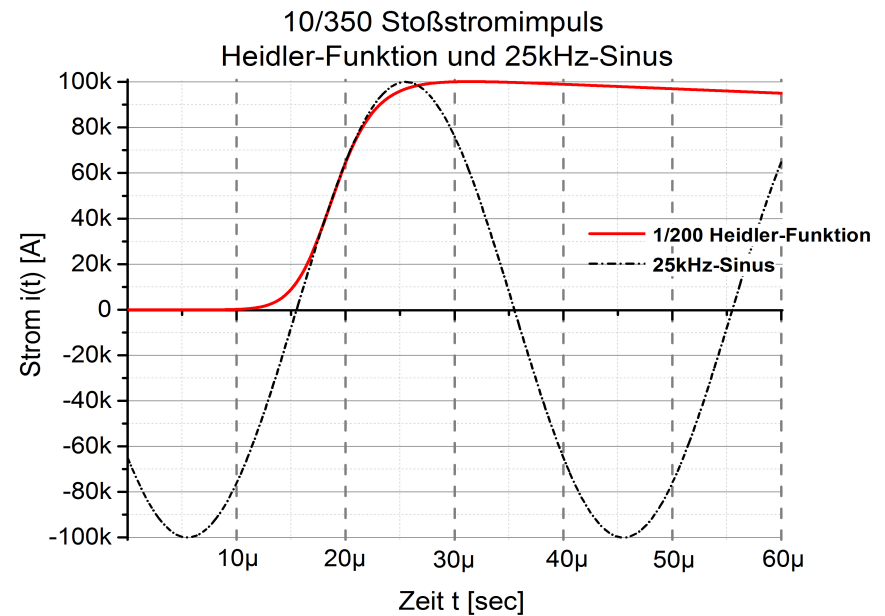
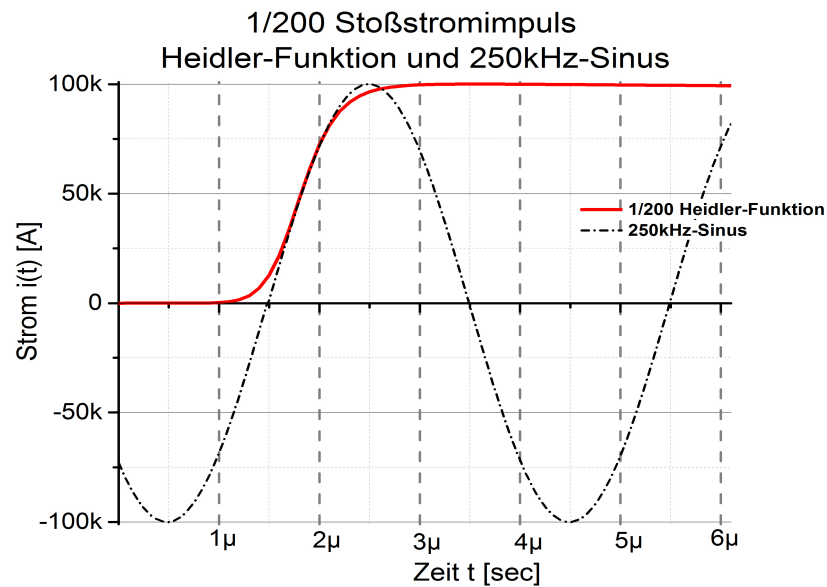
$di/dt_{max}=280$ kA/ μ s

Sinusfunktion 50 kA peak

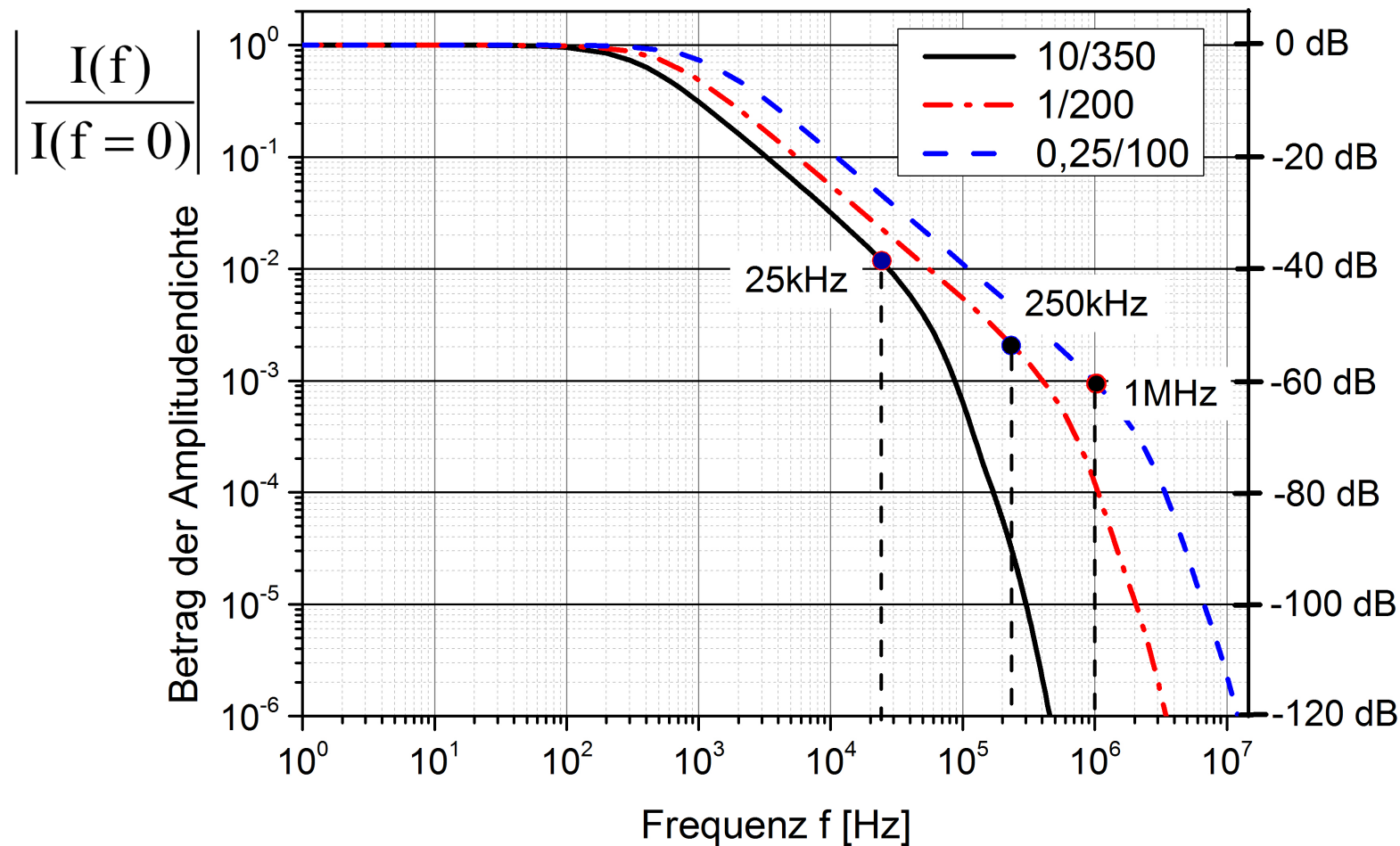


$di/dt_{max}=314$ kA/ μ s

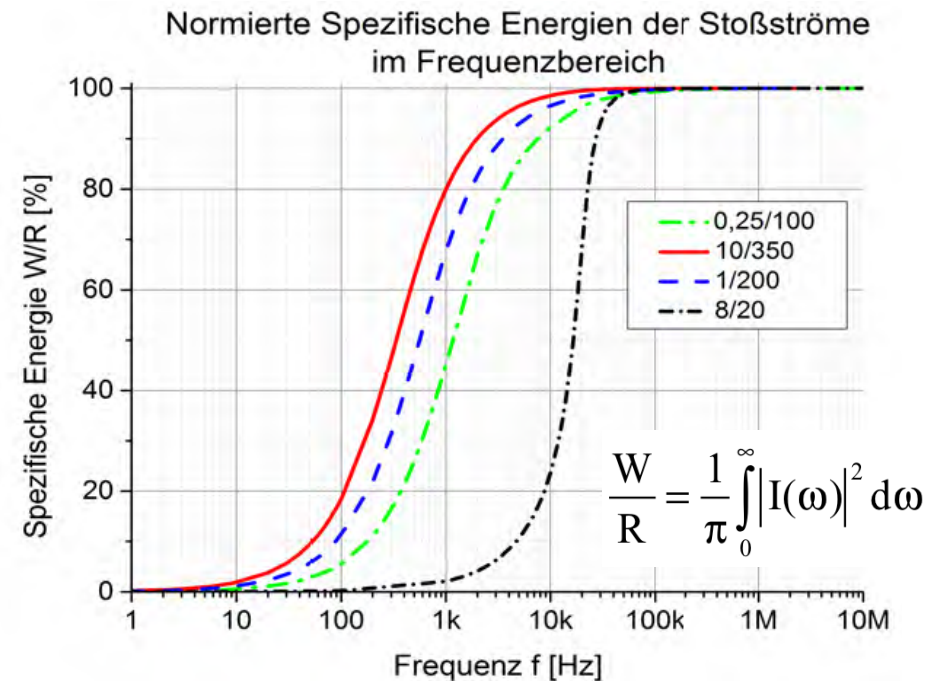
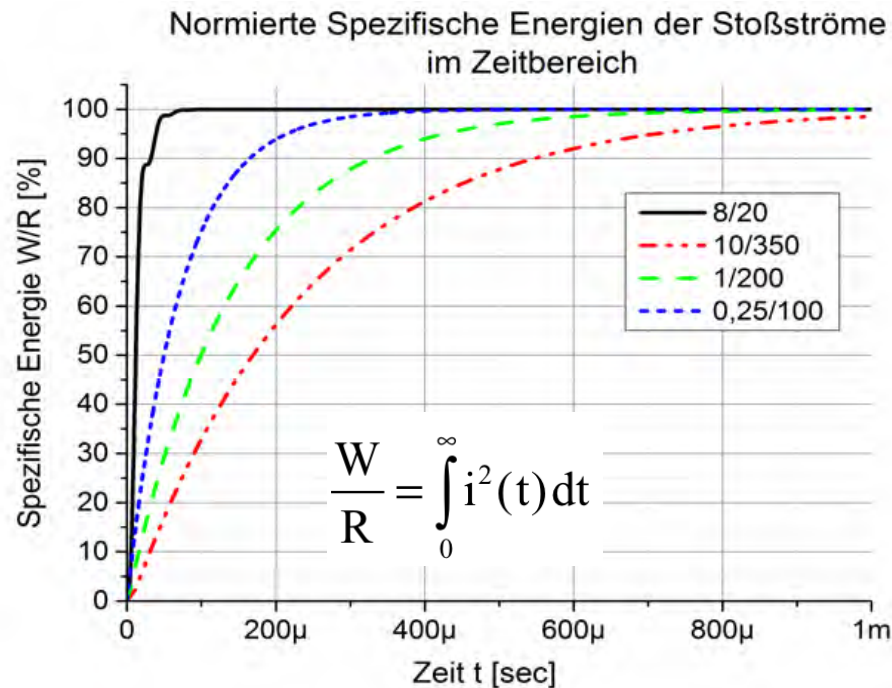
Der blitzrelevante Frequenzbereich für 1/200 und 10/350



Amplitudendichten der Stoßströme nach IEC 62305-1



Vergleich der spezifischen Energien



Das Parseval'sche Theorem stellt die Kohärenz der Signalenergie im Zeit- und Frequenzbereich her.
 Marc-Antoine Parseval 1755-1836

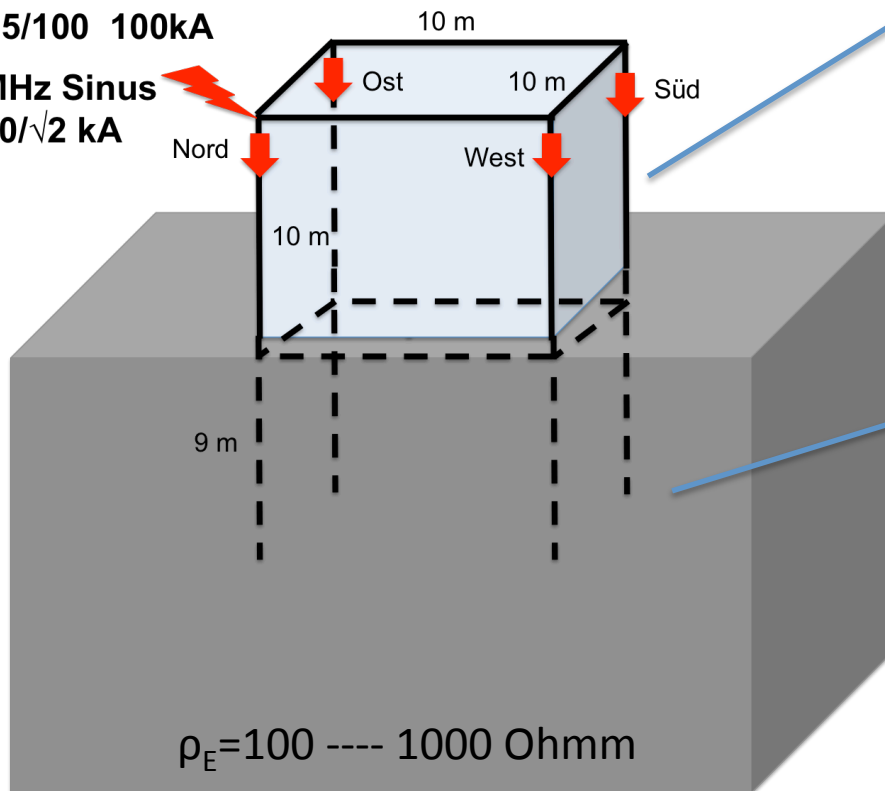
Quelle: Bachelorarbeit Kemper 2015

Nachweis der Äquivalenz von Zeit- und Frequenzbereich

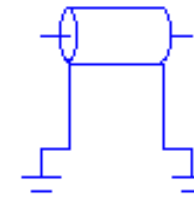
Nur zur % Rechnung 100 kA

0,25/100 100kA

1 MHz Sinus
100/ $\sqrt{2}$ kA



- R',L',C'-Wanderwellenmodell für vertikale und horizontale Ableitungen in Luft

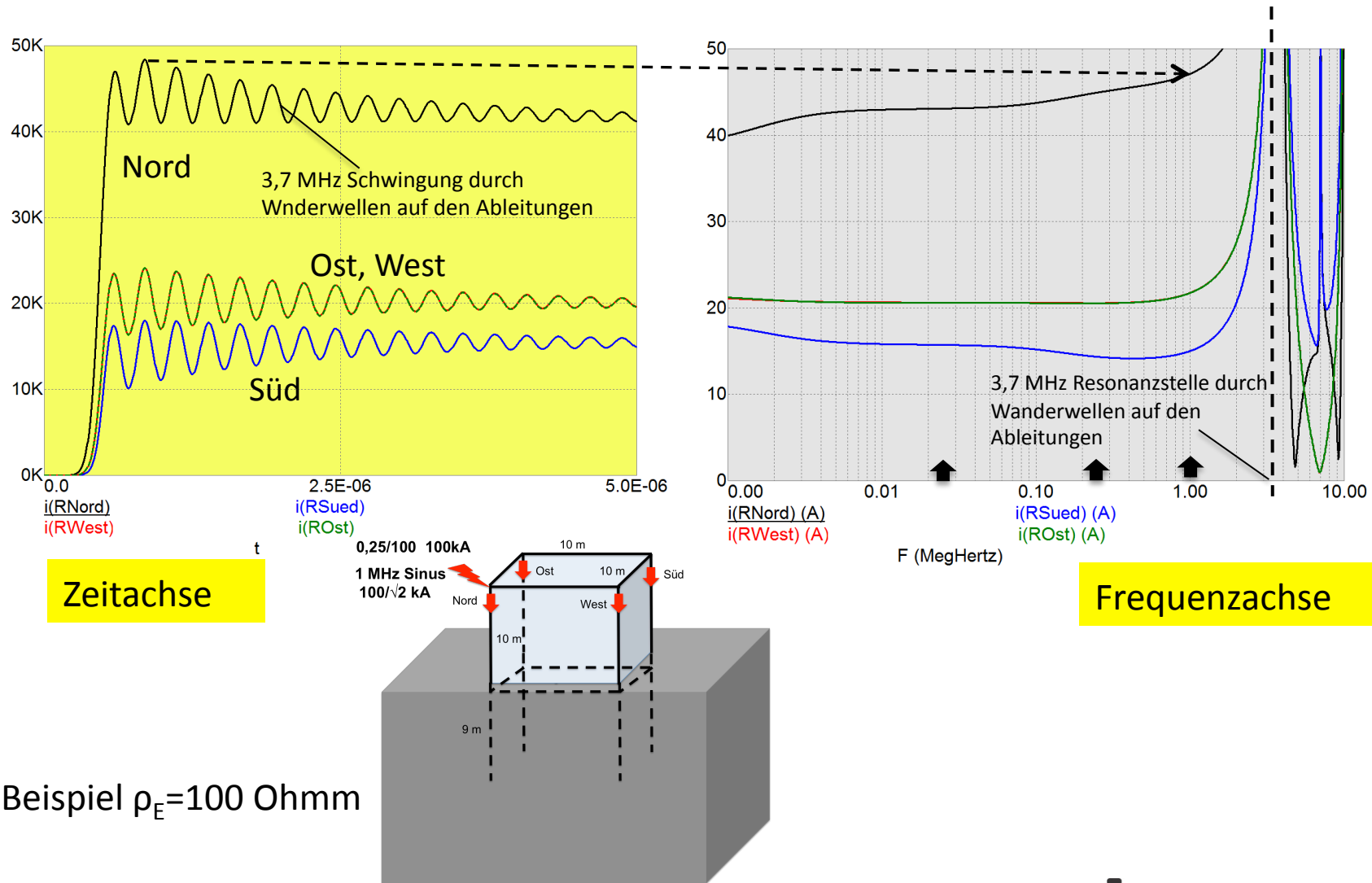


LEN=10 R=13e-3 C=7e-12 L=1.8e-6

- R,L,C,G-Kettenleitermodell für Vertikal-

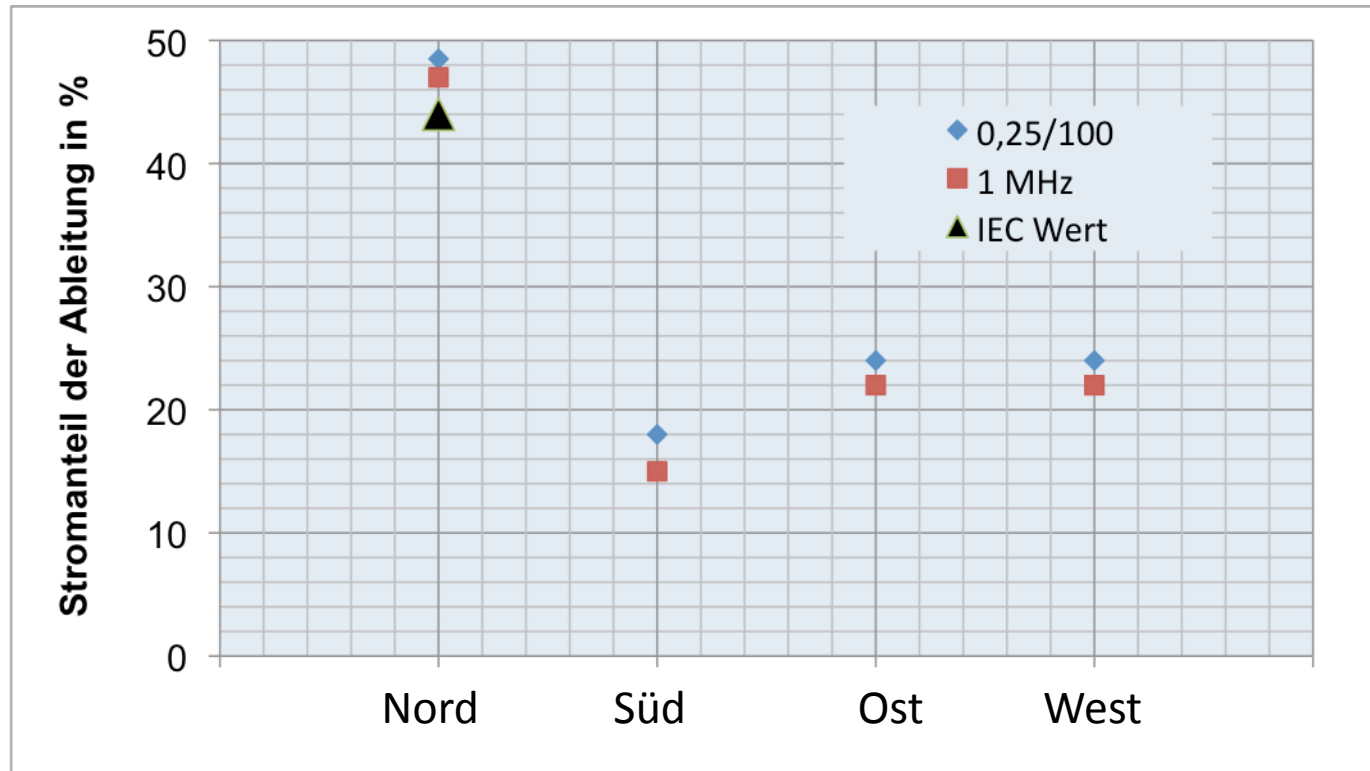


Äquivalenz von Zeitbereich und Frequenzbereich



Beispiel $\rho_E = 100 \text{ Ohmm}$

Vergleich der Teilströme (k_c -Wert)



Folgerung: Berechnung des Frequenzgangs gibt Information für alle drei Stoßströme

Anwendung auf Beispielhaftes Gebäude mit 8 Ableitungen: 45 m x 15 m x 10 m mit 6 mm Gitter 1,5 m x 1,5 m; 0,25 m tief.

0,25/100: 1 MHz

1/200: 250 kHz

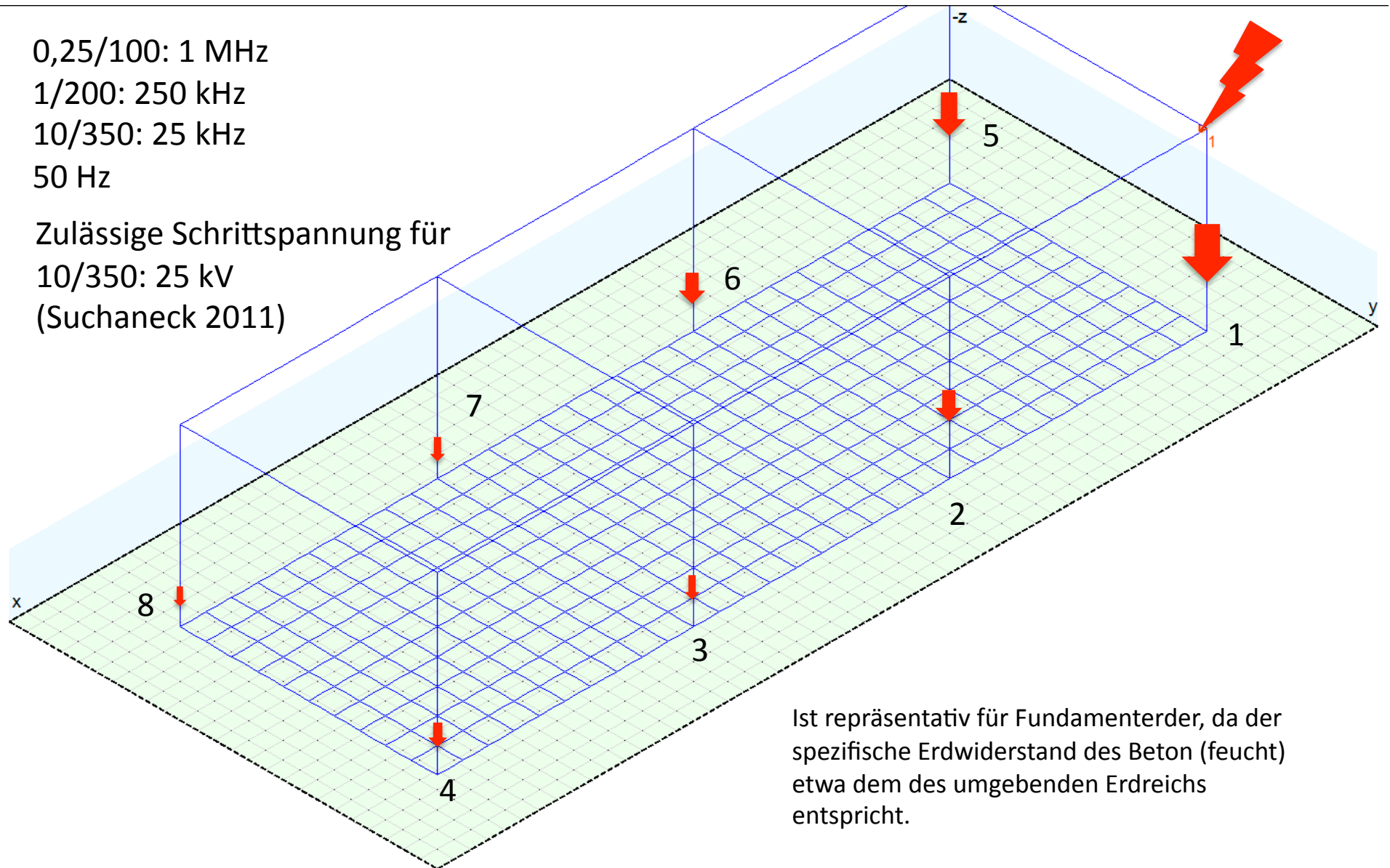
10/350: 25 kHz

50 Hz

Zulässige Schrittspannung für

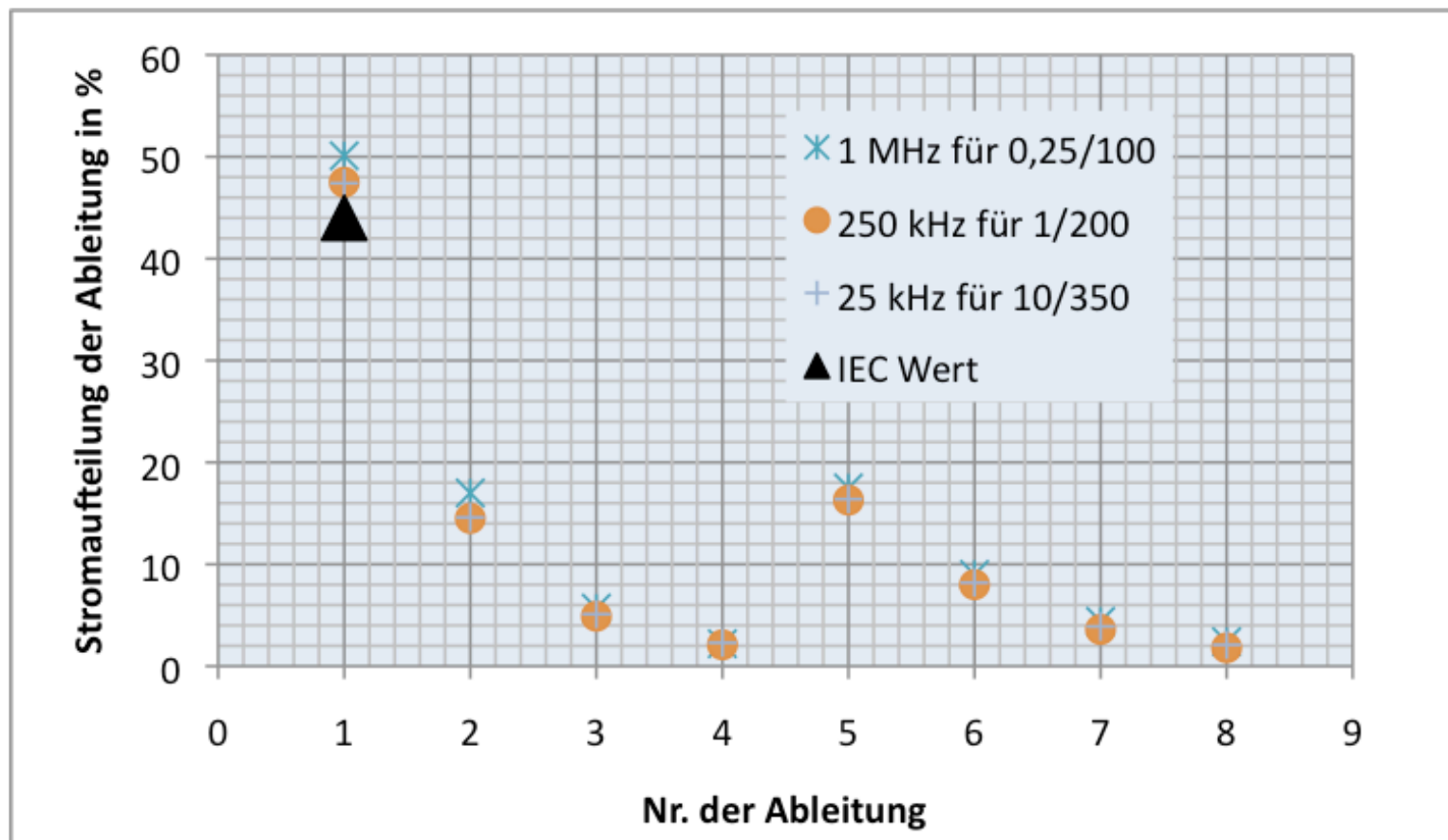
10/350: 25 kV

(Suchaneck 2011)



Ist repräsentativ für Fundamenterder, da der spezifische Erdwiderstand des Beton (feucht) etwa dem des umgebenden Erdreichs entspricht.

Stromverteilung, berechnet aus dem Frequenzgang, Einspeisung N1. (k_c -Wert)



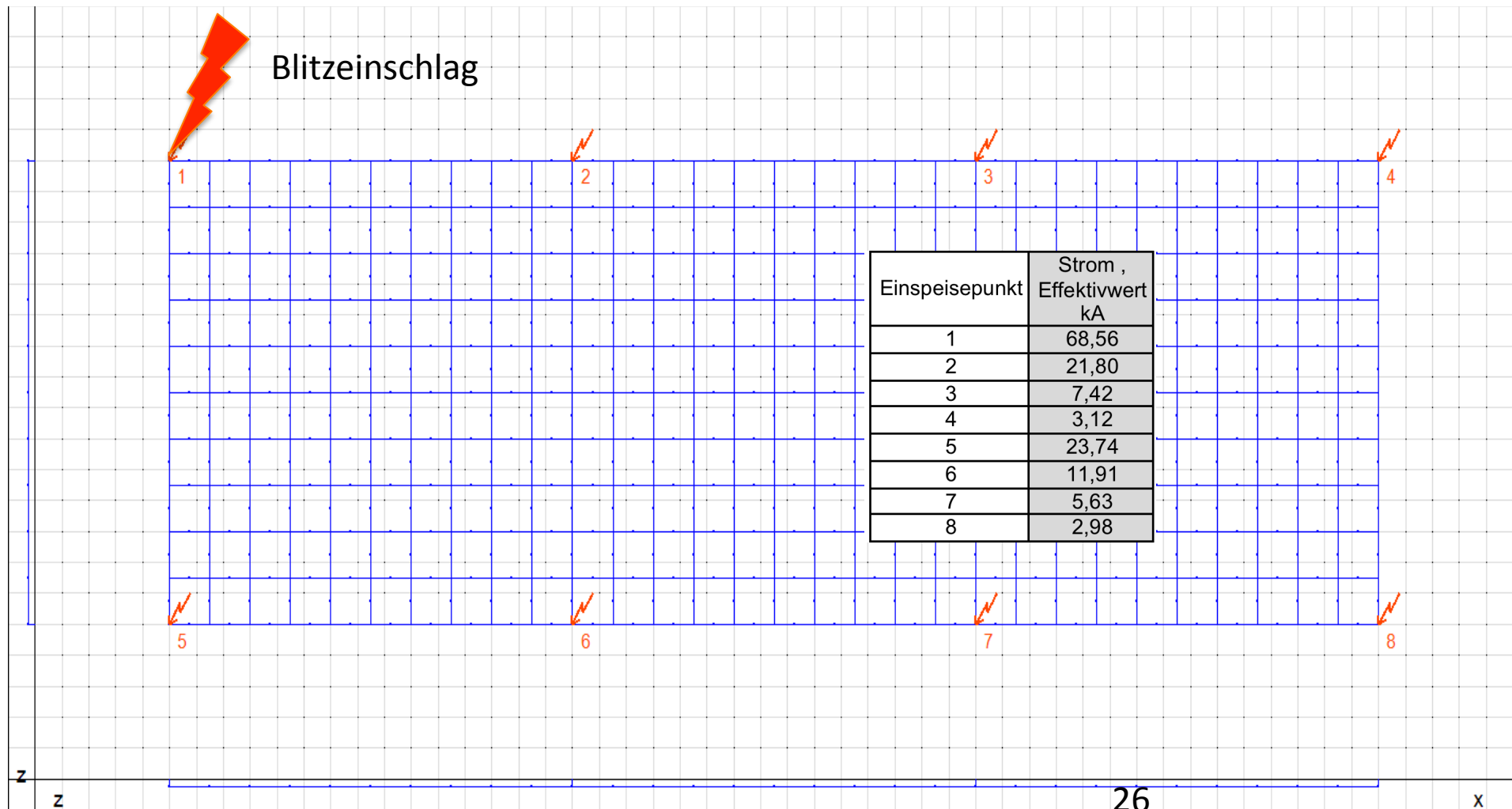
Folgerung: Berechnung des Frequenzgangs gibt Information für alle drei Stoßströme

Vorbereitung für Berechnung in GSA

Achtung: **GSA rechnet mit Effektivwerten**

Ableitung	0,25/100	1/200	10/350	Mittelwert	Standard- abweichung %	Teilstrom 10/350 Klasse 1	Effektivwert 25 kHz Sinus
Nr	%	%	%	%	%	kA	kA
1	50,1	47,5	47,4	48,3	3,2	96,7	68,6
2	17	14,5	14,6	15,4	9,2	30,7	21,8
3	5,7	4,9	5,1	5,2	8,0	10,5	7,4
4	2,2	2,1	2,3	2,2	4,5	4,4	3,1
5	17,5	16,3	16,4	16,7	4,0	33,5	23,7
6	9	8	8,2	8,4	6,3	16,8	11,9
7	4,4	3,6	3,9	4,0	10,2	7,9	5,6
8	2,4	1,8	2,1	2,1	14,3	4,2	3,0

2-D Modell des Erders und Stromeinspeisung in die Ableitungen 1-8

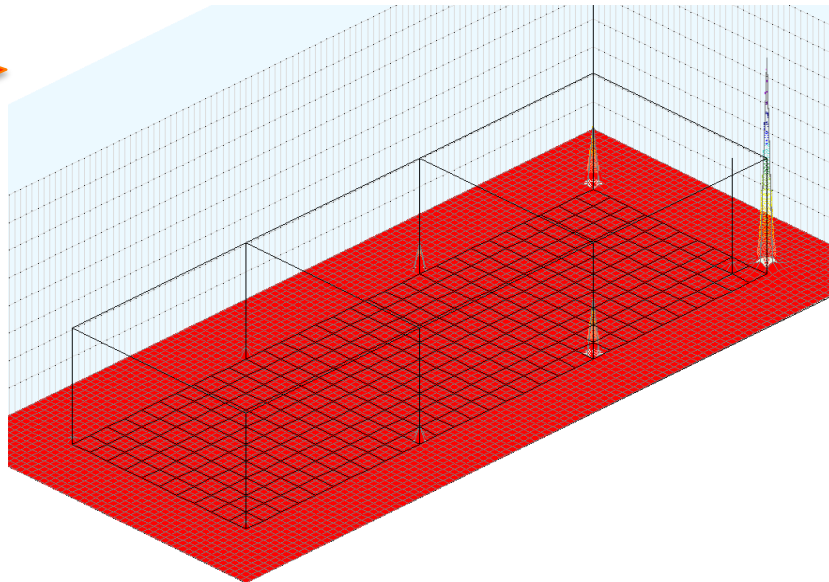
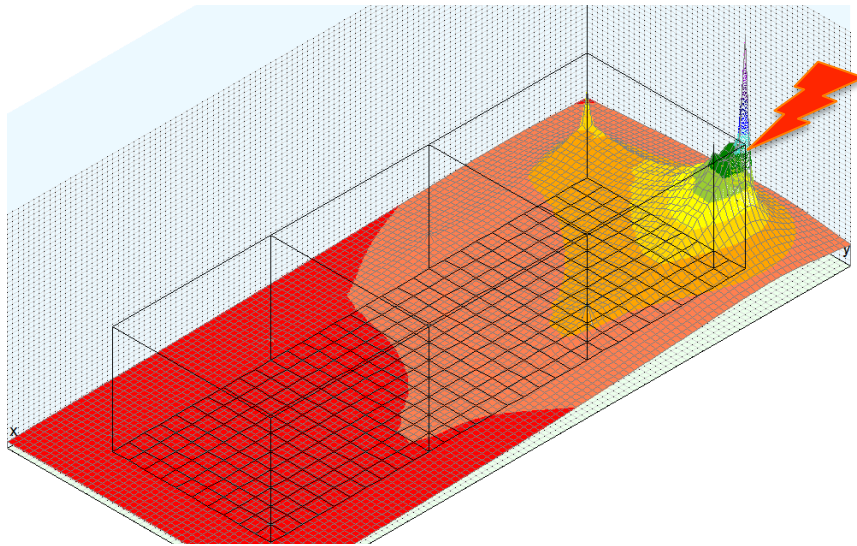


Erklärung für Erdoberflächenpotential; $z=0$

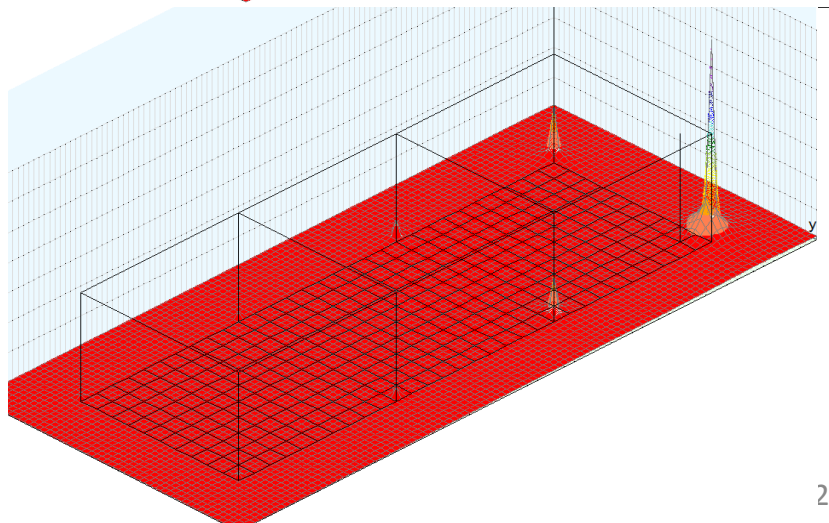
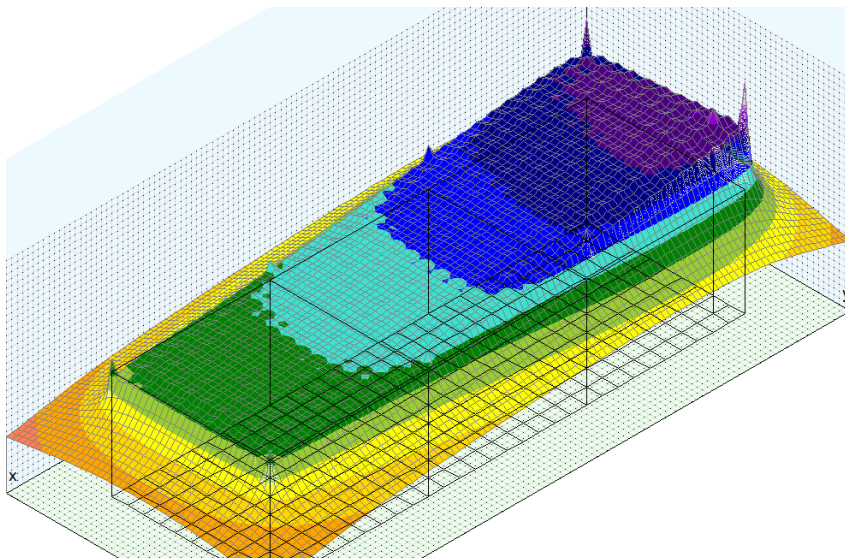
100 Ohmm

0,1 Ohmm

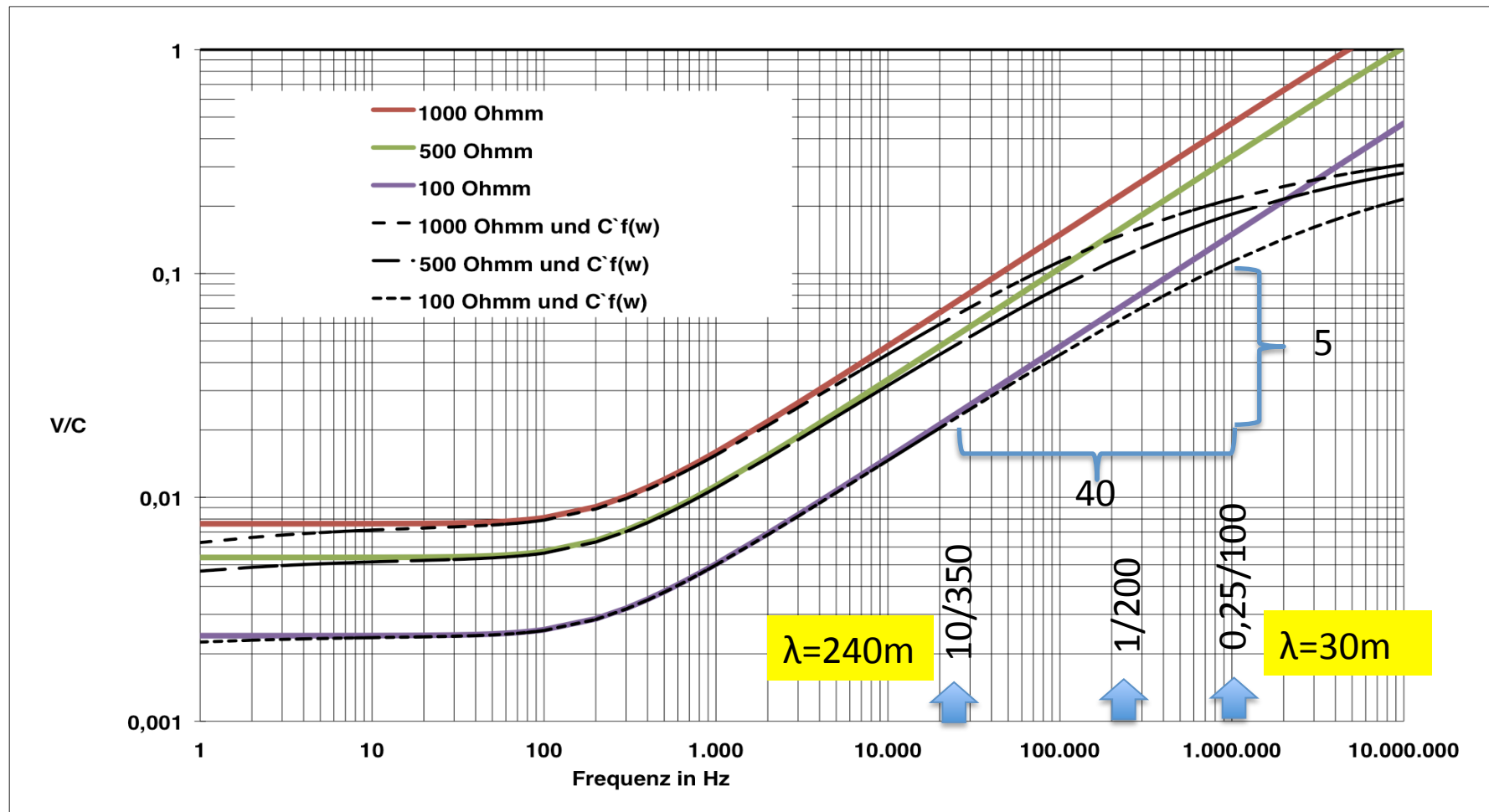
0,25/100



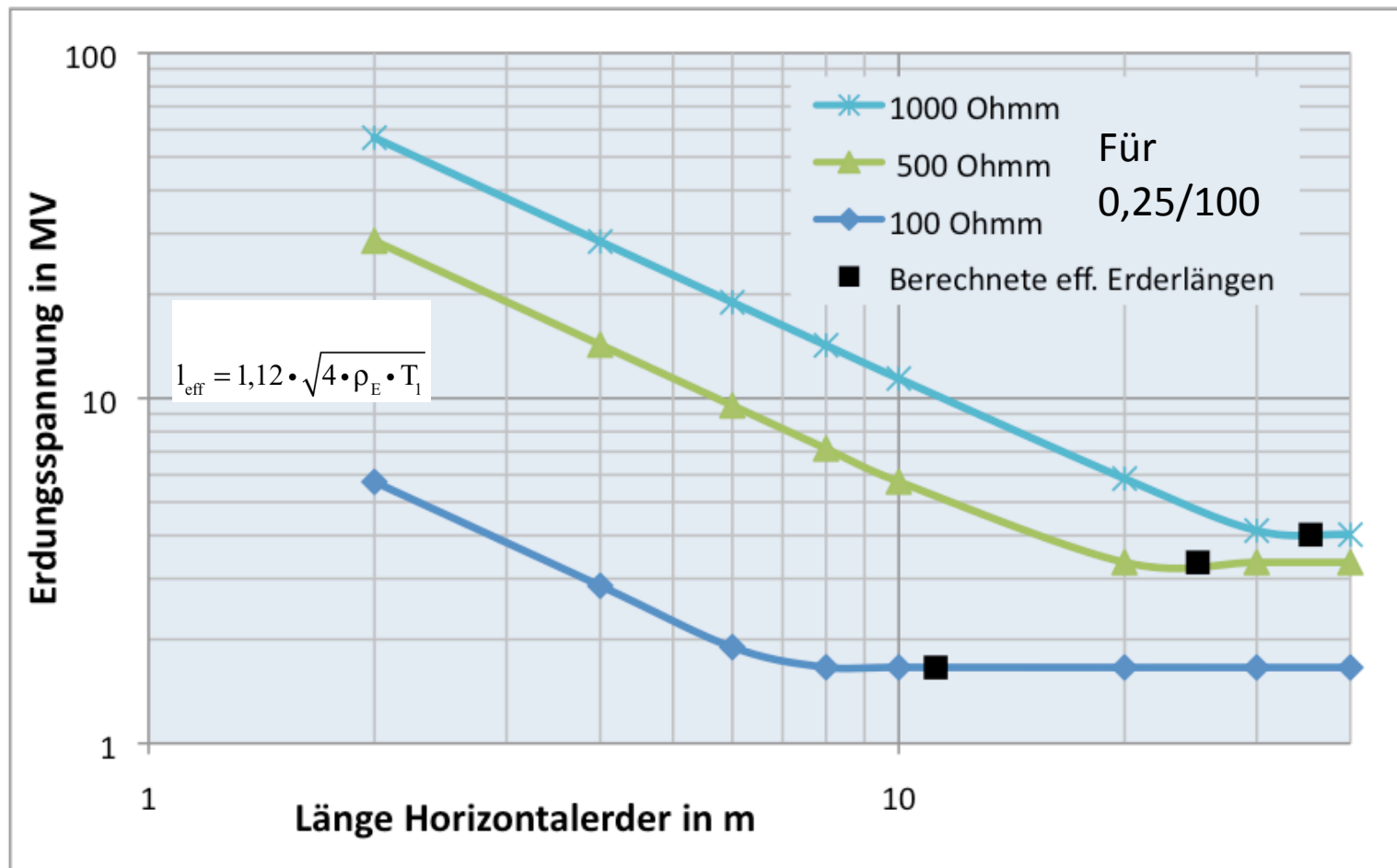
10/350



Frequenzabhängigkeit der bezogenen Phasengeschwindigkeit v/c

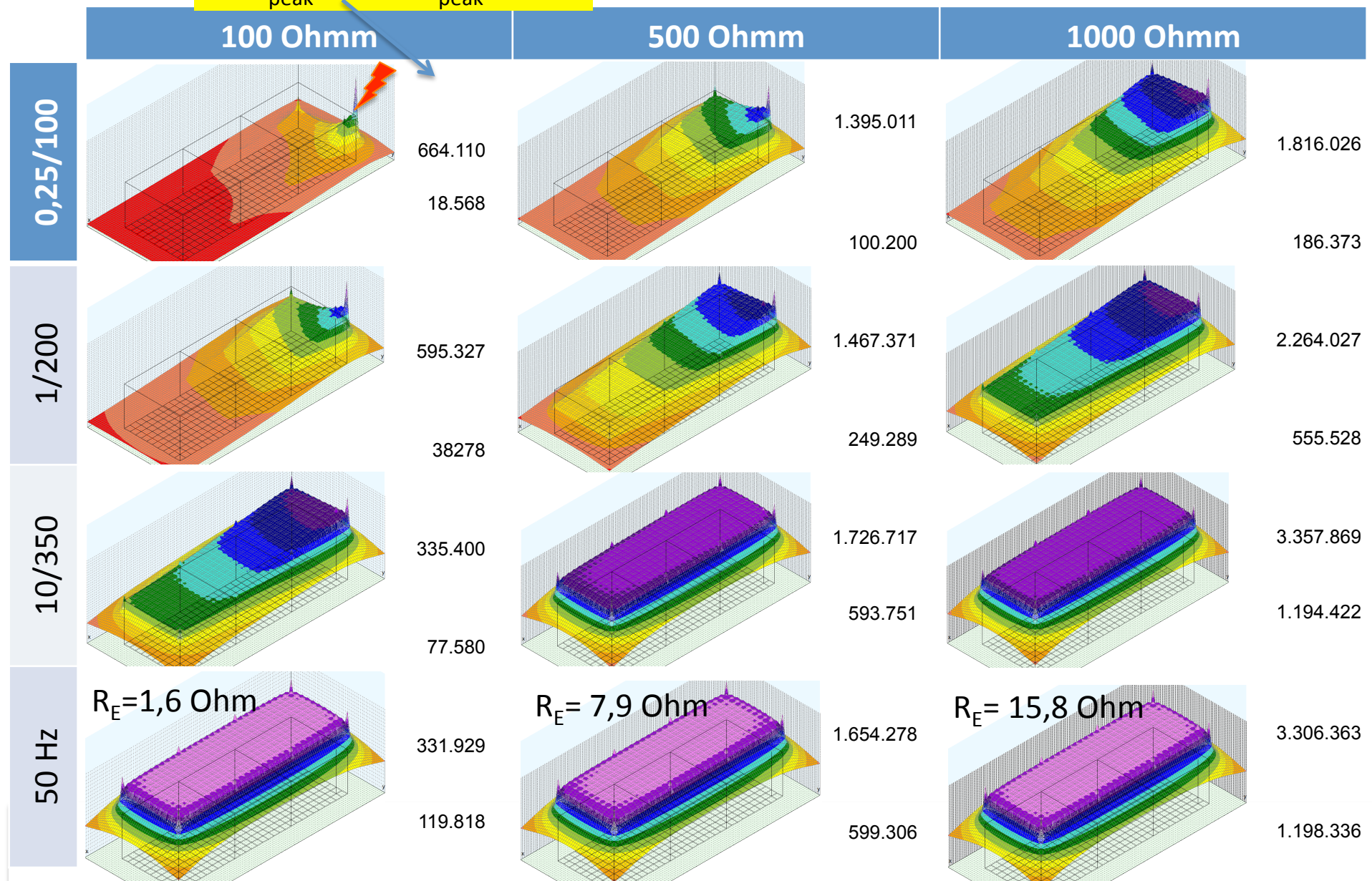


Effektive Länge eines Bandleiters 30 mm x 5 mm in 0,5 m Tiefe für **0,25/100**

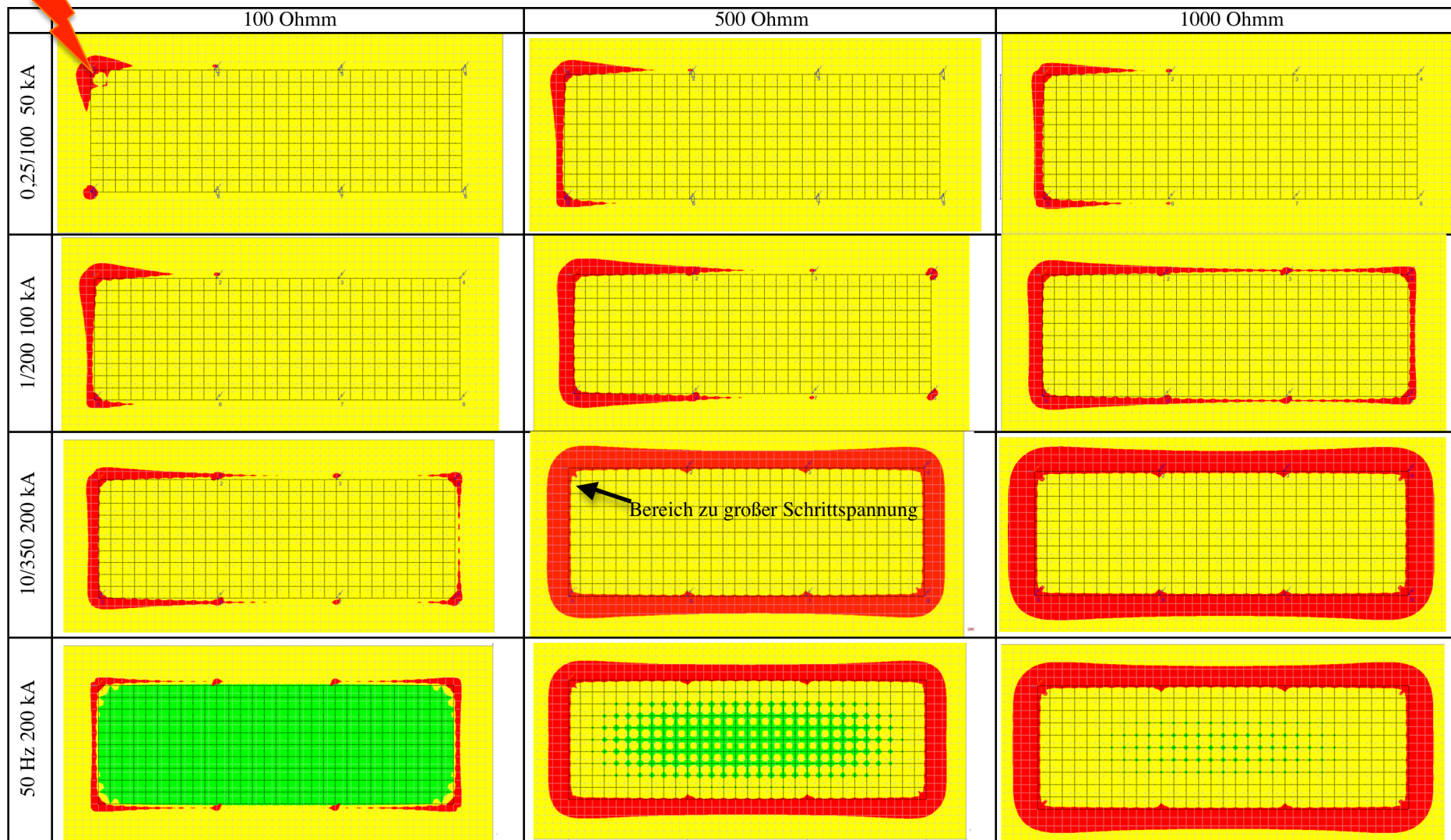


Erdoberflächenpotential. Berechnung für LPS – Schutzklasse I.

Max_{peak} und Min_{peak} in V



Bereiche sicherer (gelb) und gefährlicher (rot) Schrittspannung für LPS – Schutzklasse I.
Zulässige Grenze der Schrittspannung : 25 kV für 10/350



Vergleich sicherer (gelb) und gefährlicher (rot) Schrittspannung

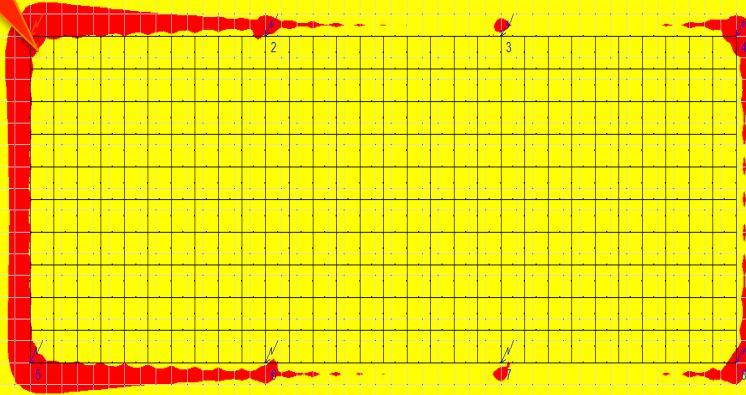
LPS-Klasse 1: 200 kA 10/350 oder 141 kA_{eff} 50 Hz

100 Ohmm

500 Ohmm

10/350

200 kA 10/350

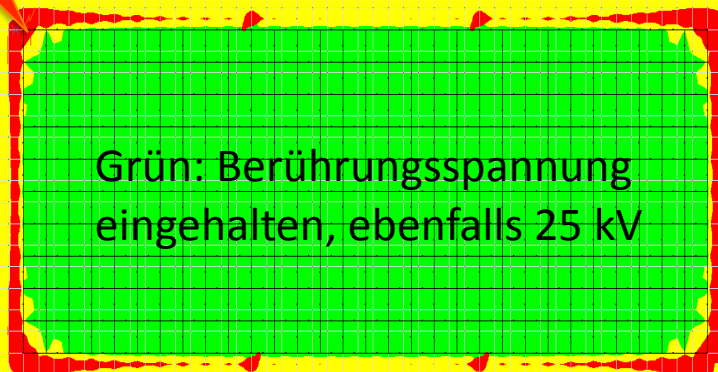


Einspeisepunkt	Strom , Effektivwert kA
1	68,56
2	21,80
3	7,42
4	3,12
5	23,74
6	11,91
7	5,63
8	2,98

GROU

50 Hz

141 kA eff, 50 Hz



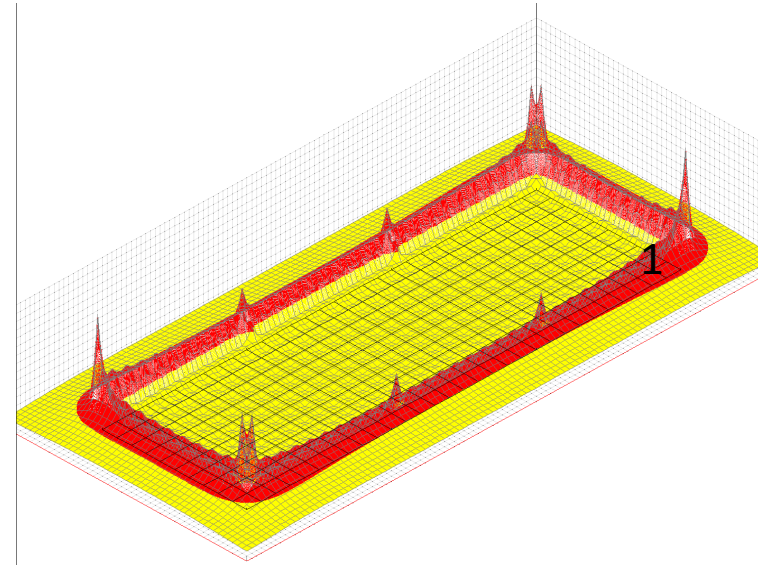
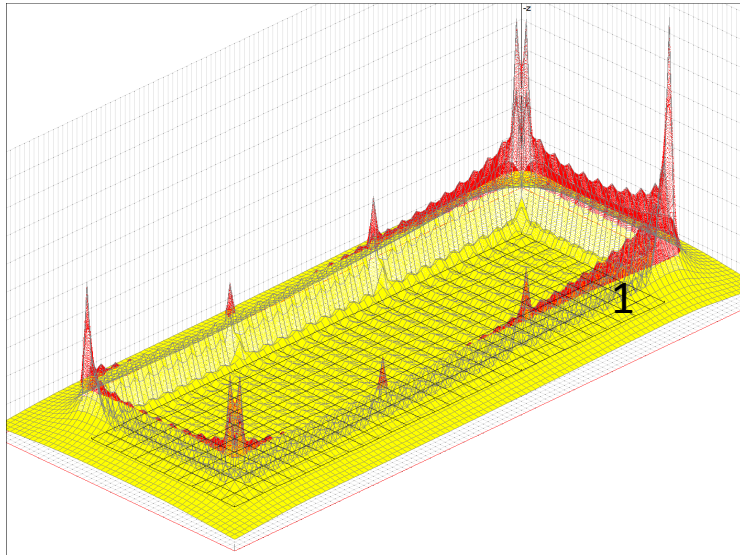
3-D Schrittspannung

LPS-Klasse 1: 200 kA 10/350 oder 141 kA_{eff} 50 Hz

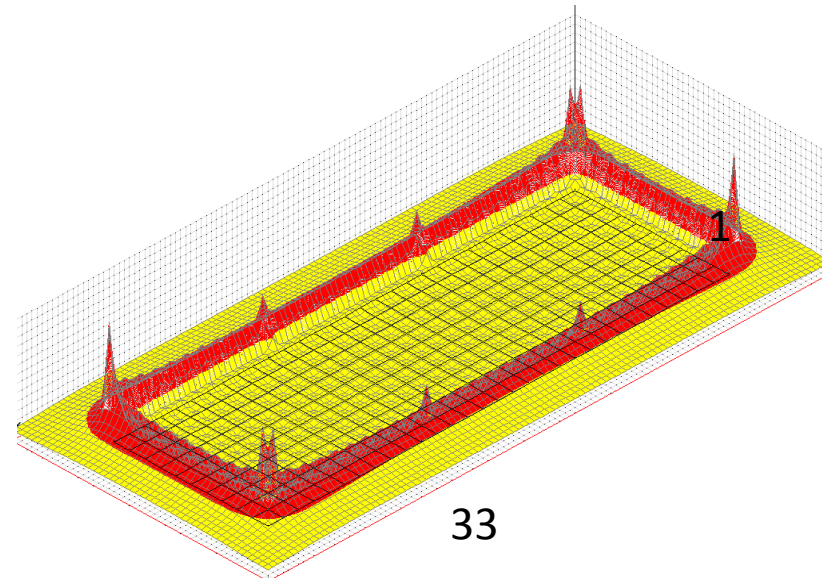
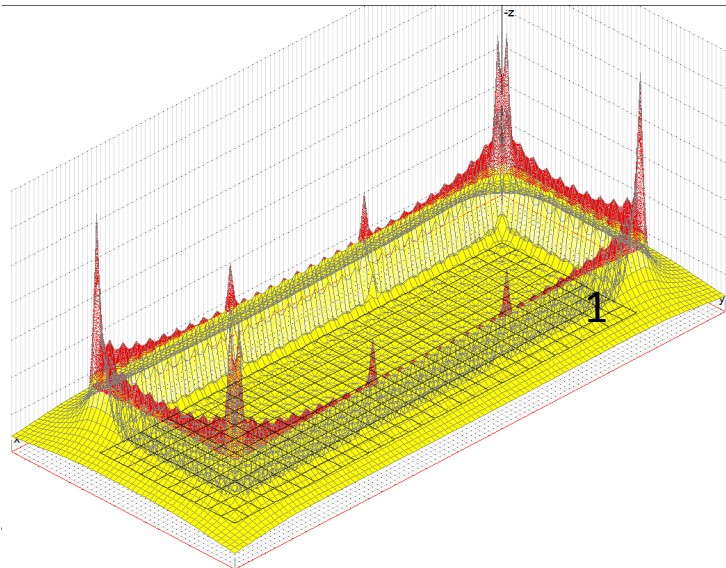
100 Ohmm

500 Ohmm

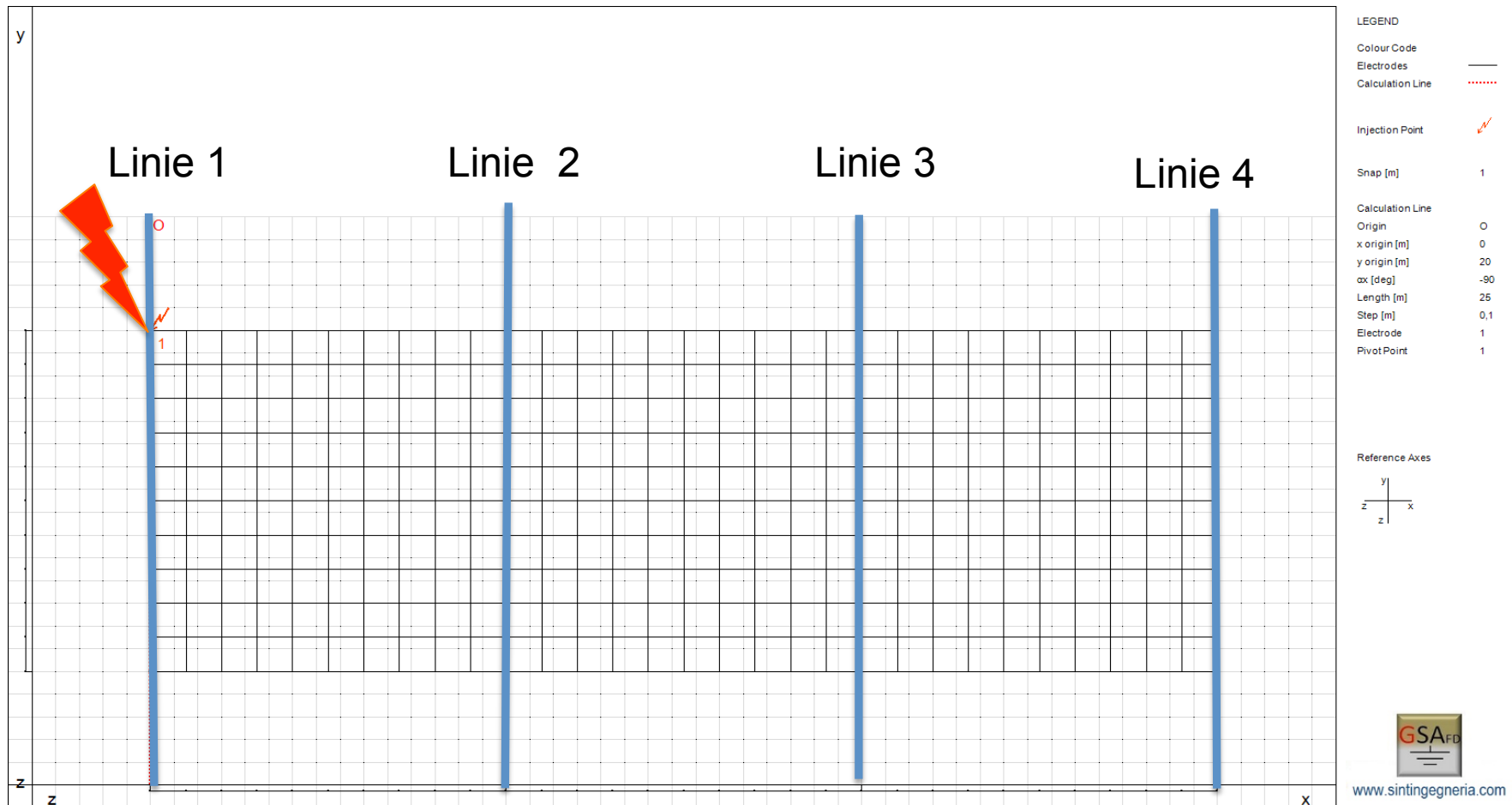
10/350



50 Hz



Analyse der Schrittspannungen auf 4 vertikalen Linien



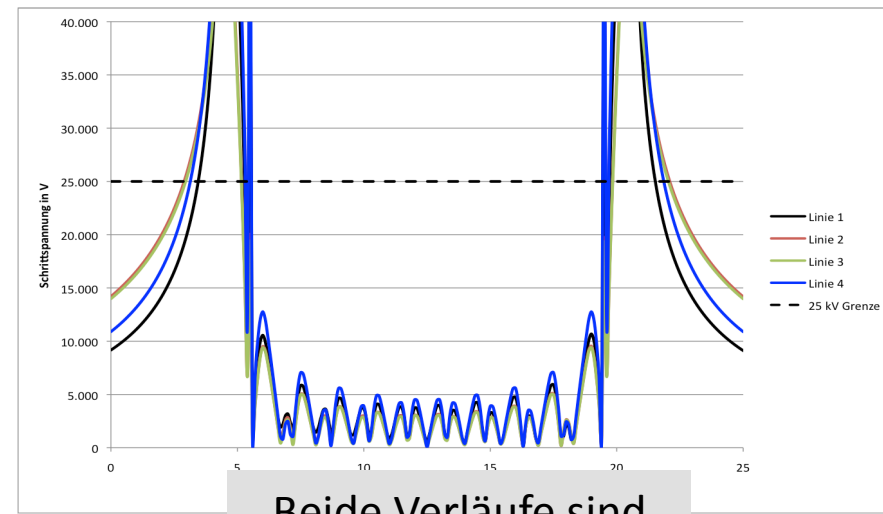
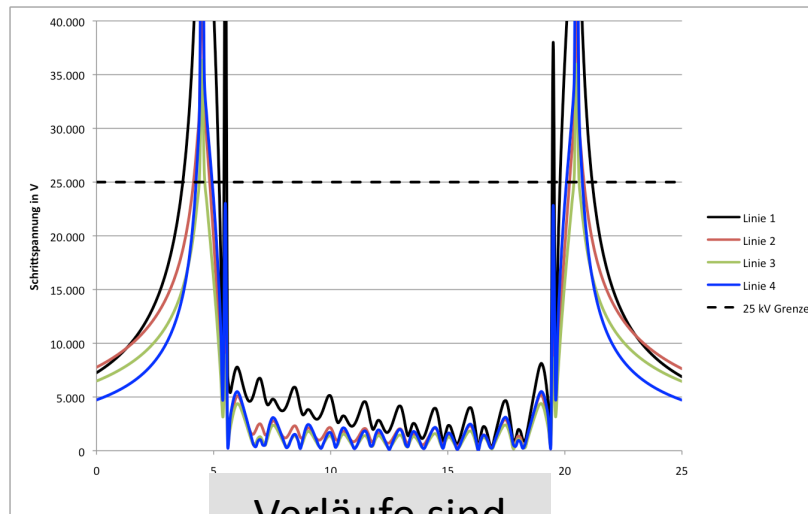
Schrittspannung Linien 1-4

LPS-Klasse 1 200 kA 10/350 oder 141 kA_{eff} 50 Hz

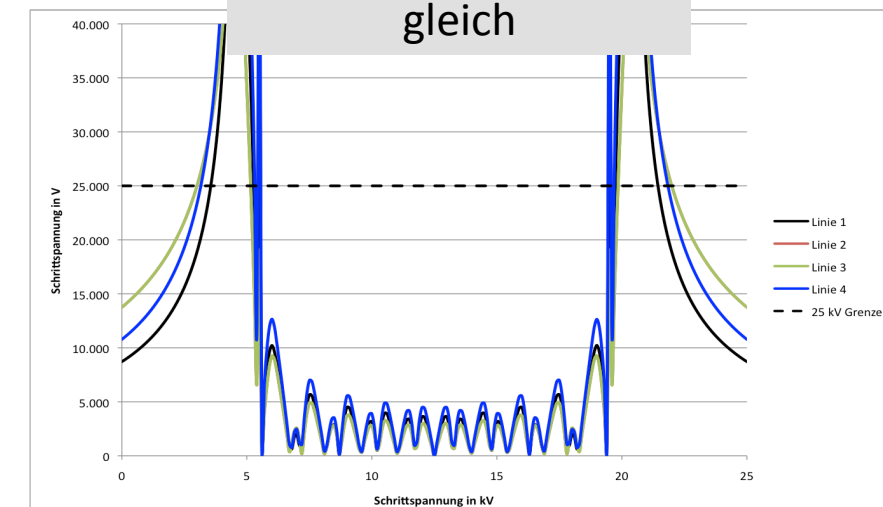
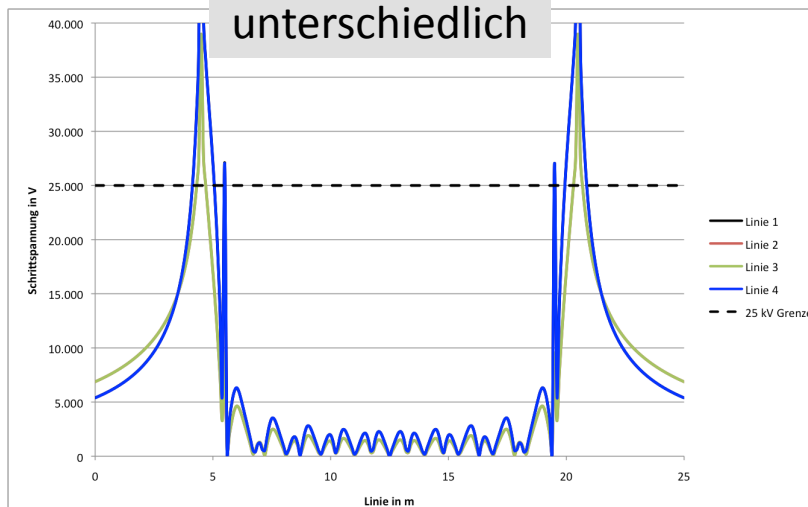
100 Ohmm

500 Ohmm

10/350



50 Hz

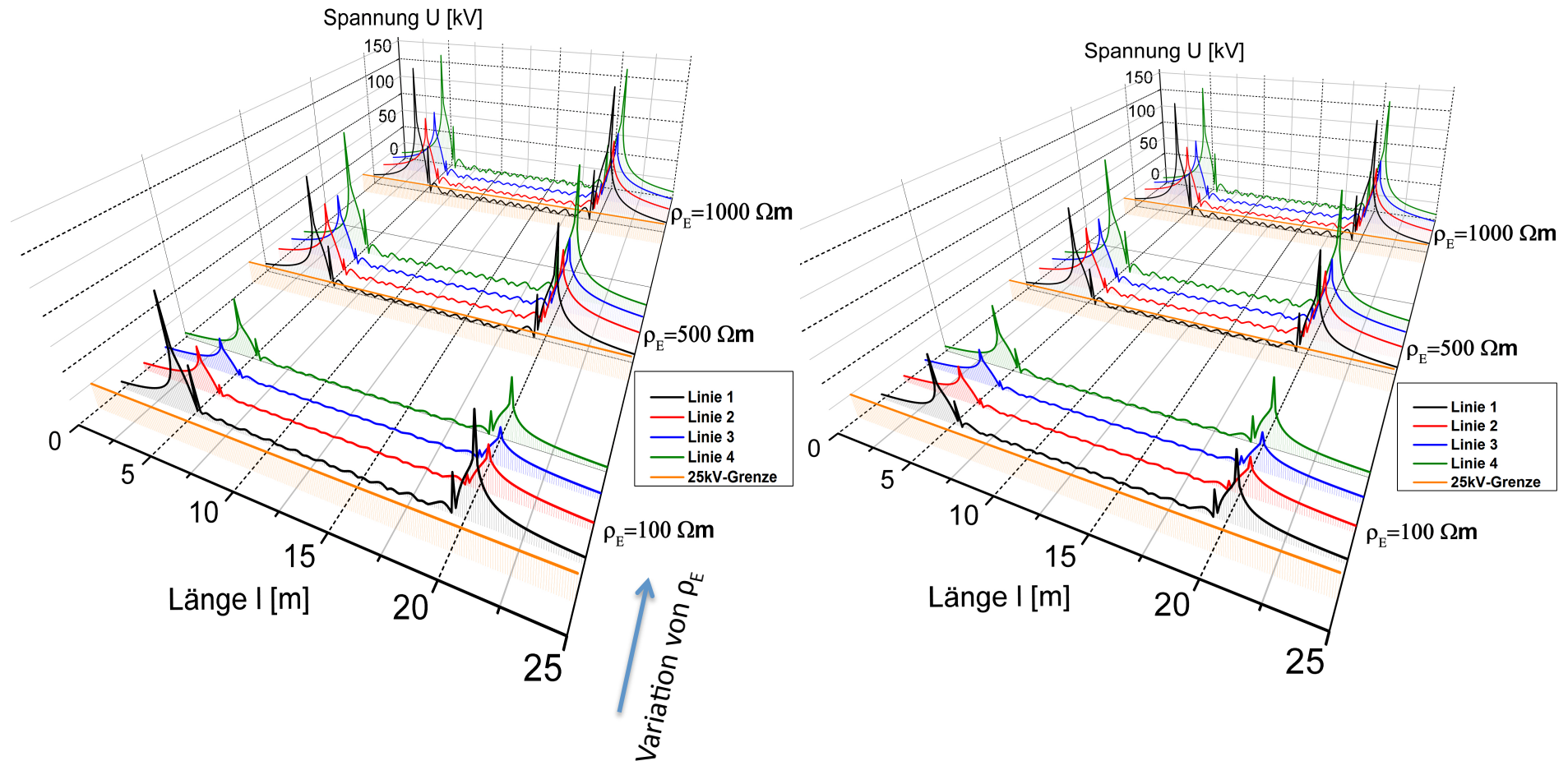


Schrittspannung Linien 1-4

LPS-Klasse 1 200 kA 10/350 oder 141 kA_{eff} 50 Hz

10/350

50 Hz



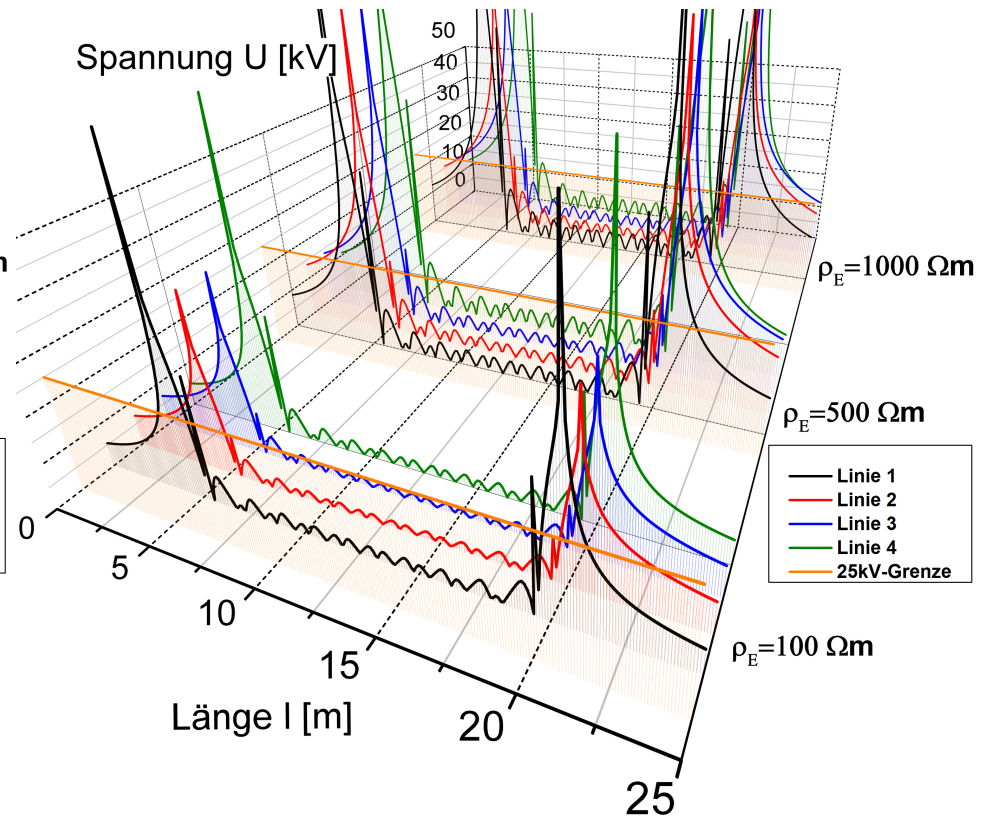
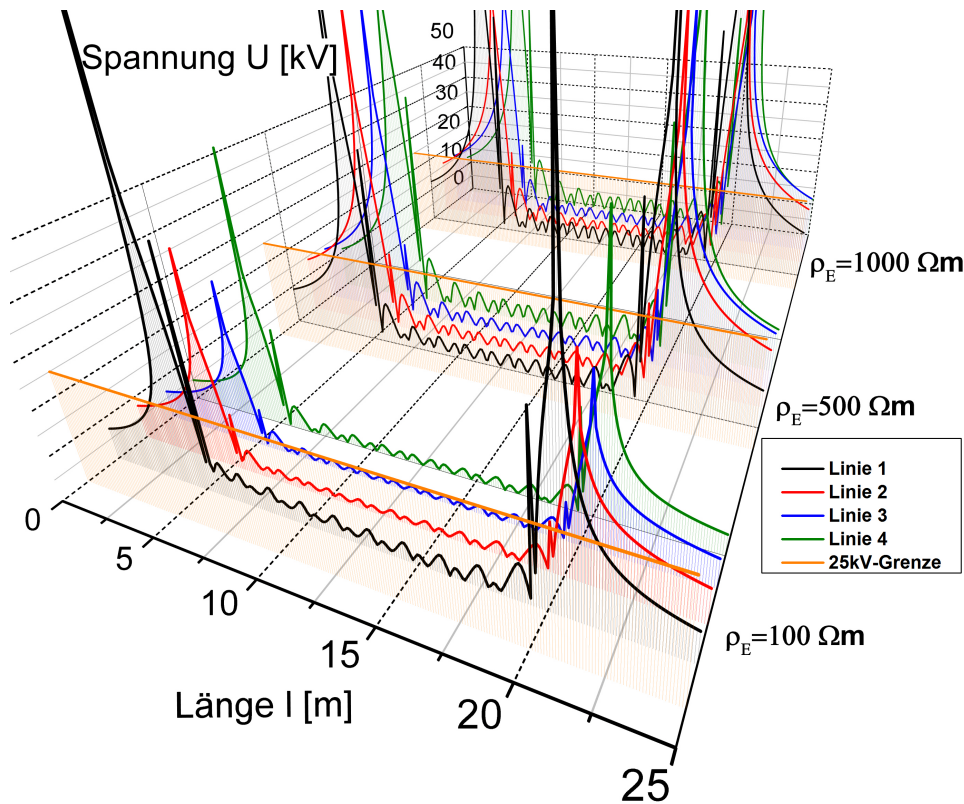
Quelle: Grafik: Jan Kemper

Schrittspannung Linien 1-4 vergrößerte Darstellung

LPS-Klasse 1 200 kA 10/350 oder 200 kA 50 Hz

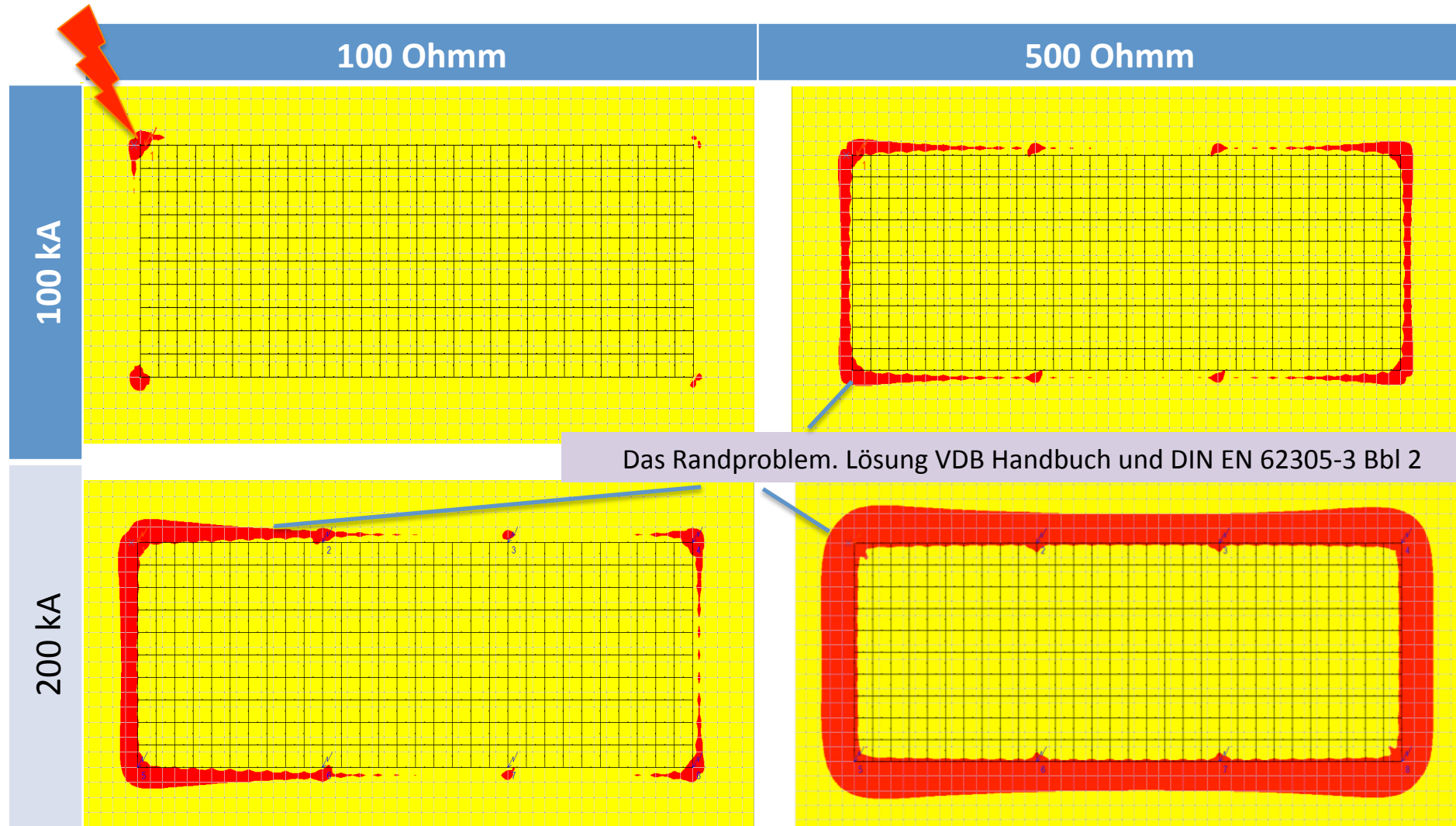
10/350

50 Hz



Quelle: Grafik: Jan Kemper

Vergleich LPS- Klasse 1 und 3 / 4 für 10/350



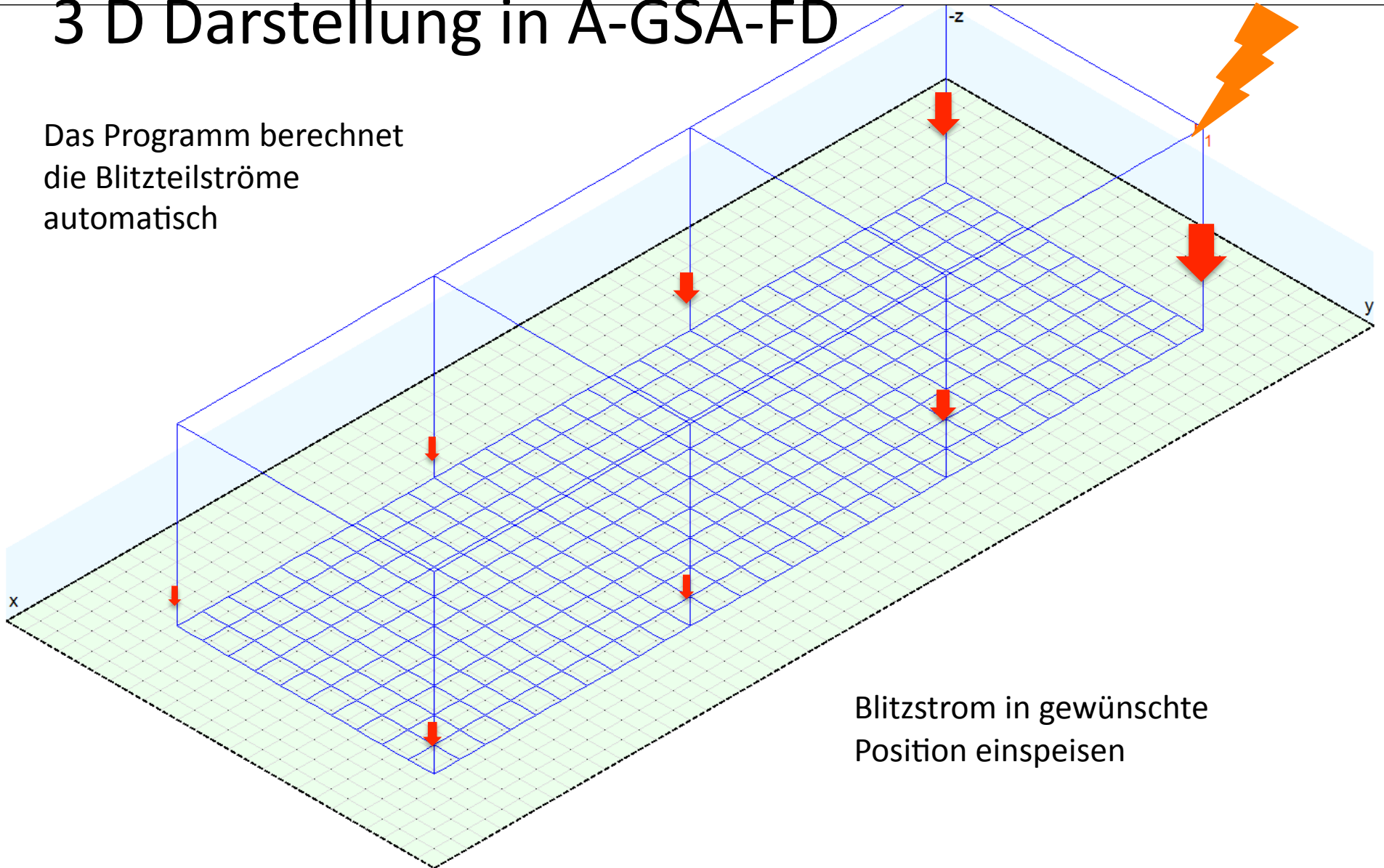
Neu:

Lösung für Gebäude mit Ableitungen und Erder

- Neue **Version A-GSA-FD** erlaubt die Modellierung und Lösung einschließlich der Ableitungen (mit Mutual Inductance) mit **Maxwellschen Gleichungen** bis zu einigen MHz
- Eine vorherige Berechnung der Stromaufteilung auf die einzelne Ableitungen mit einem Netzwerkanalyseprogramm (Wanderwellen- und Kettenleitermodelle) entfällt dann.

3 D Darstellung in A-GSA-FD

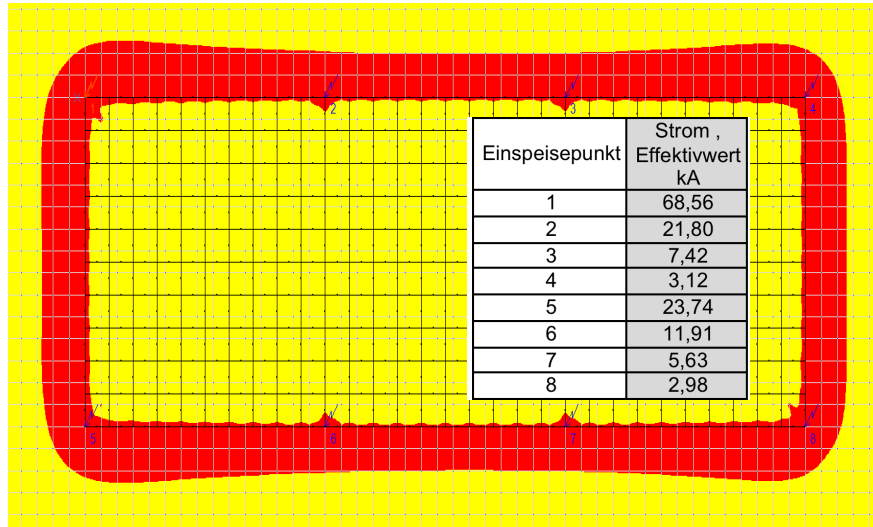
Das Programm berechnet
die Blitzteilströme
automatisch



Vergleich sicherer (gelb) und gefährlicher (rot) Schrittspannung

Vergleich beider Lösungen für 500 Ohmm

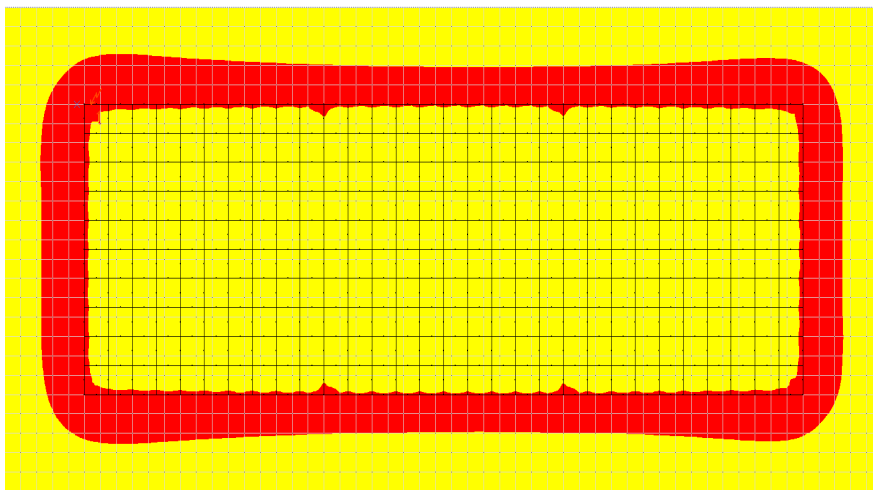
10/350 GSA_FD



Lösung GSA_FD

mit vorheriger Berechnung der Stromaufteilung mit Wanderwellenprogramm **nach Meppelink** (Lösung der Maxwellschen Gleichungen im Erdsystem)

10/30 A_GSA_FD

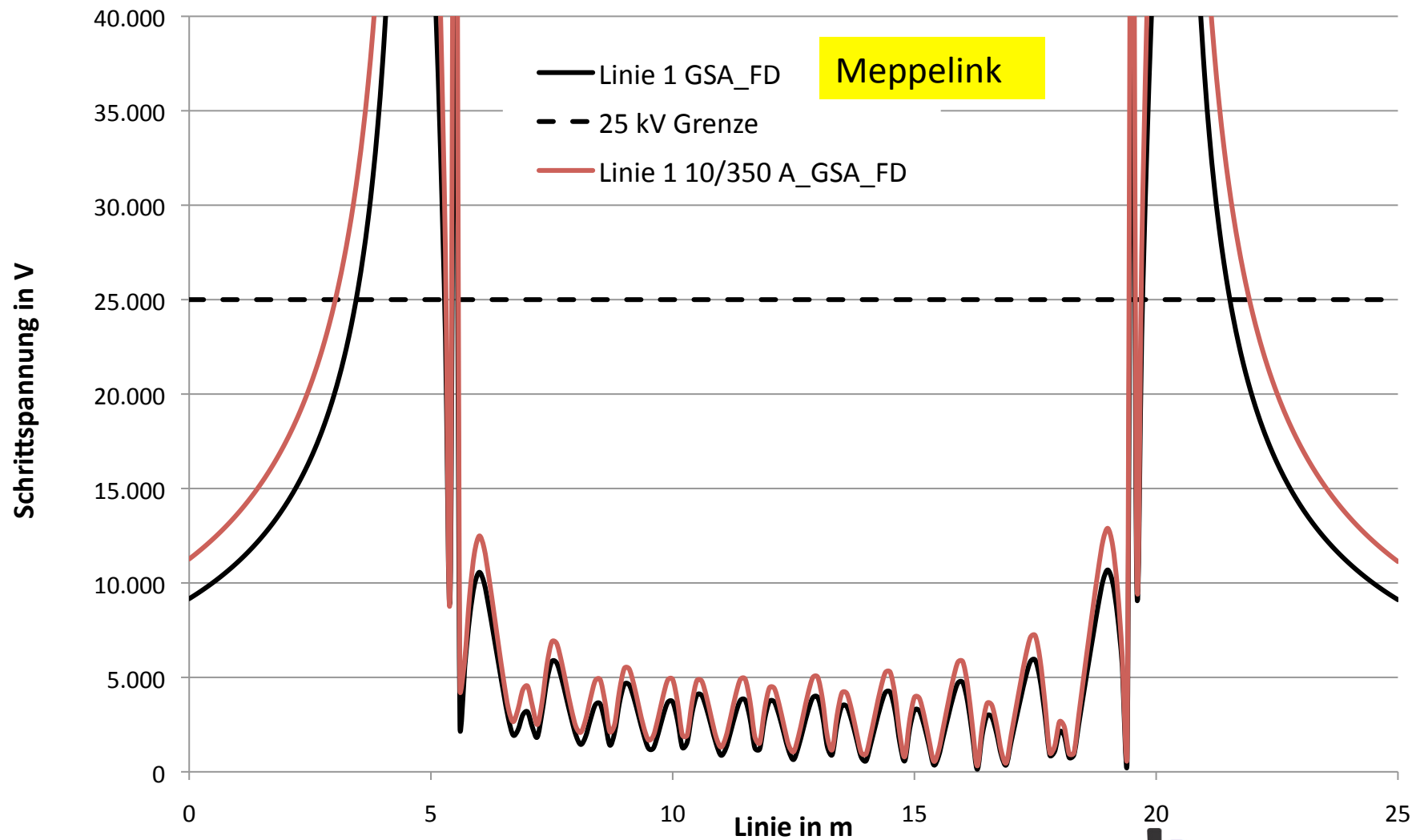


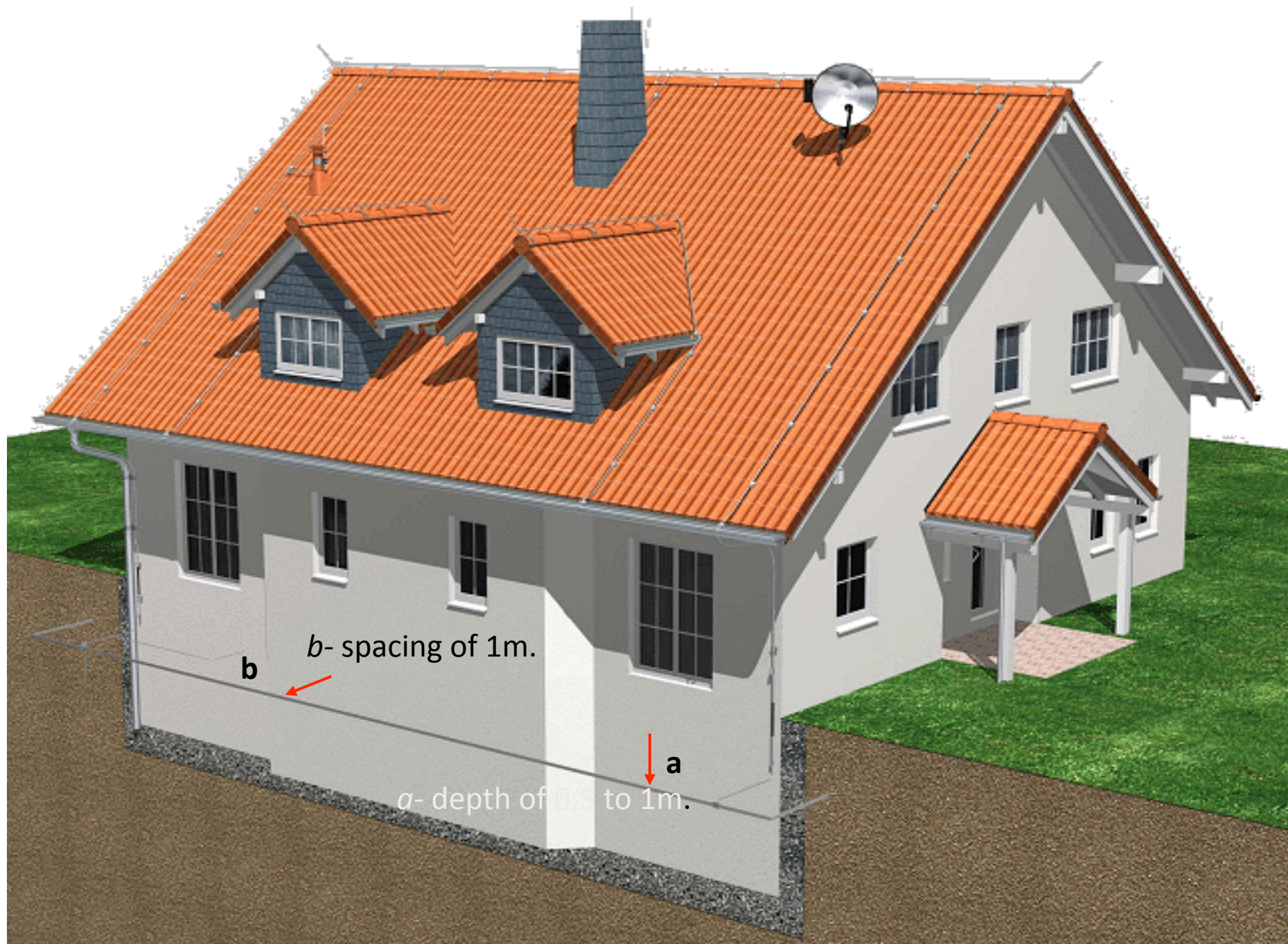
Lösung A_GSA_FD

mit den Maxwellschen Gleichungen für das gesamte System aus Ableitungen und Erdungssystem mit magnetischer Kopplung.

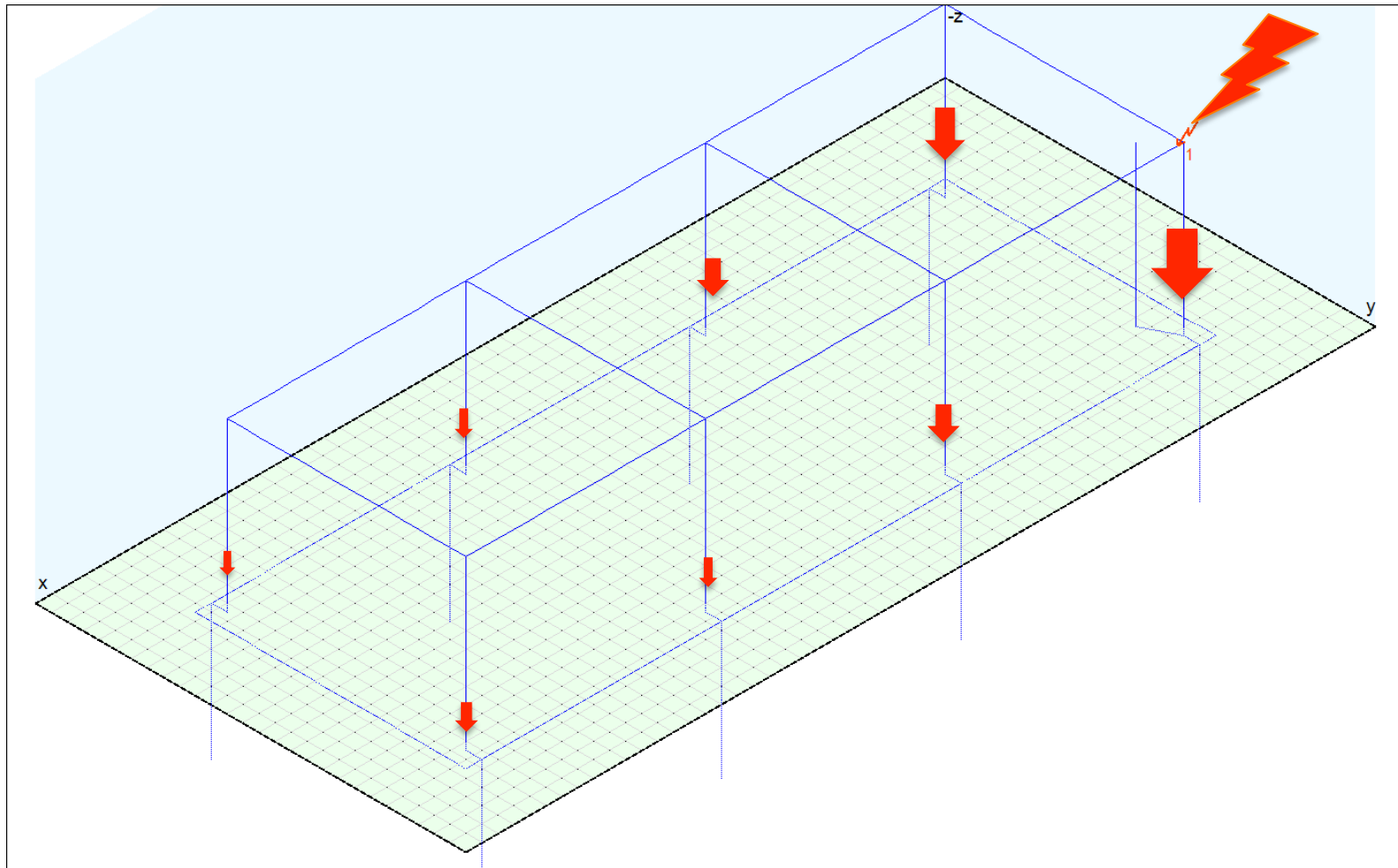
Schrittspannung Linie 1

Vergleich beider Lösungen

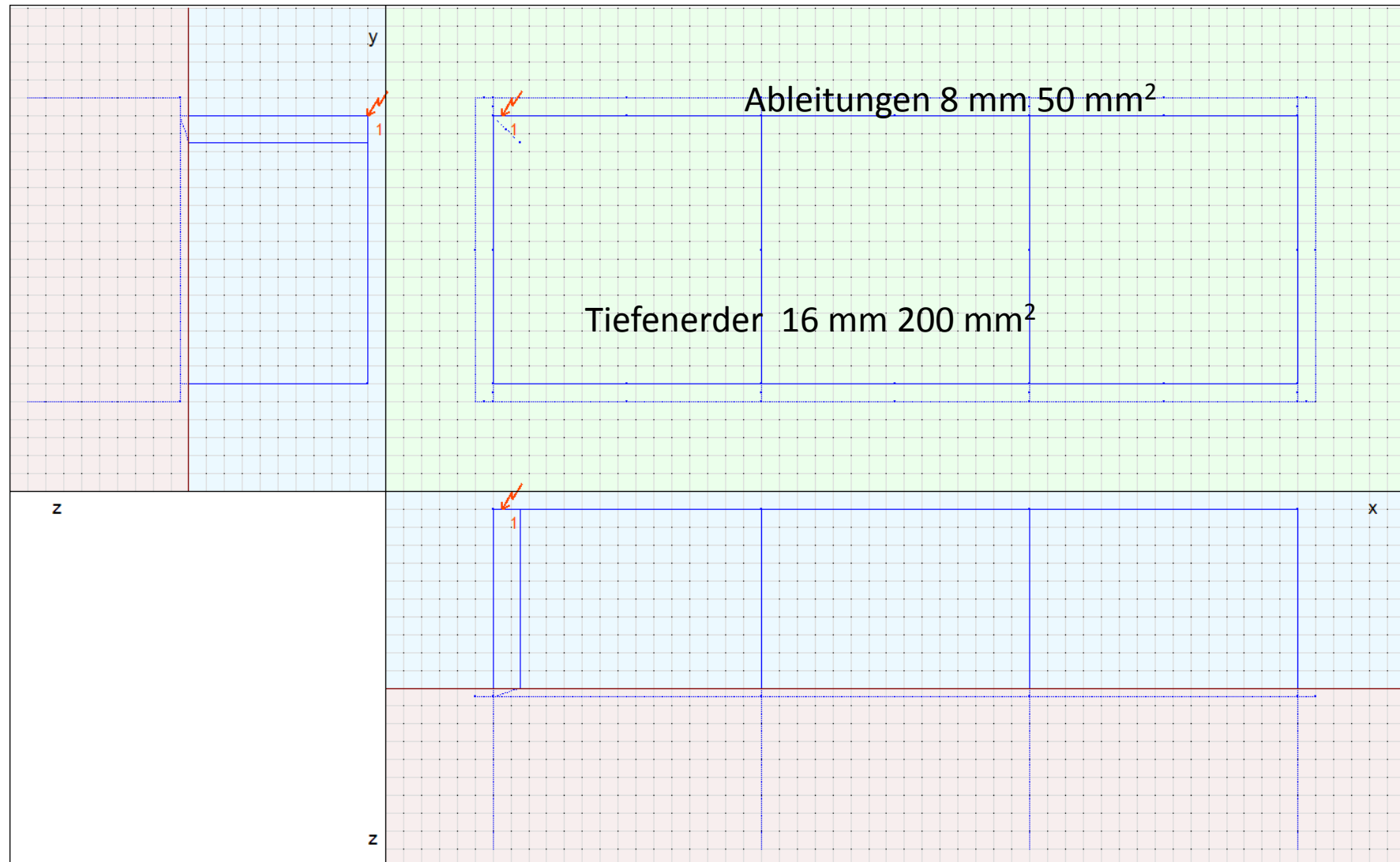




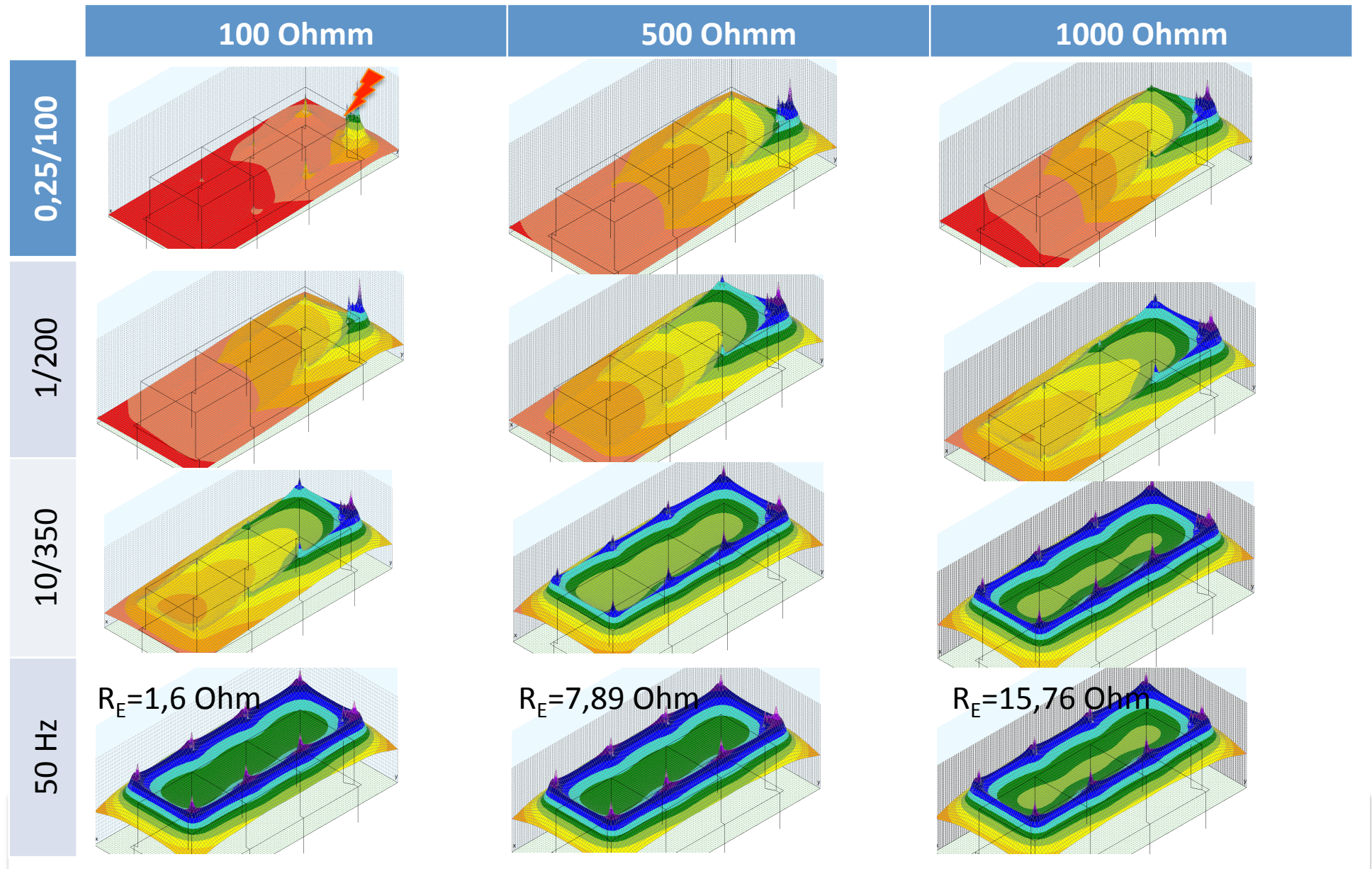
Vergleich mit Gebäude 15m x 45 m x 10 m mit 8 Ableitungen und 8 Tiefenerdern a 9 m



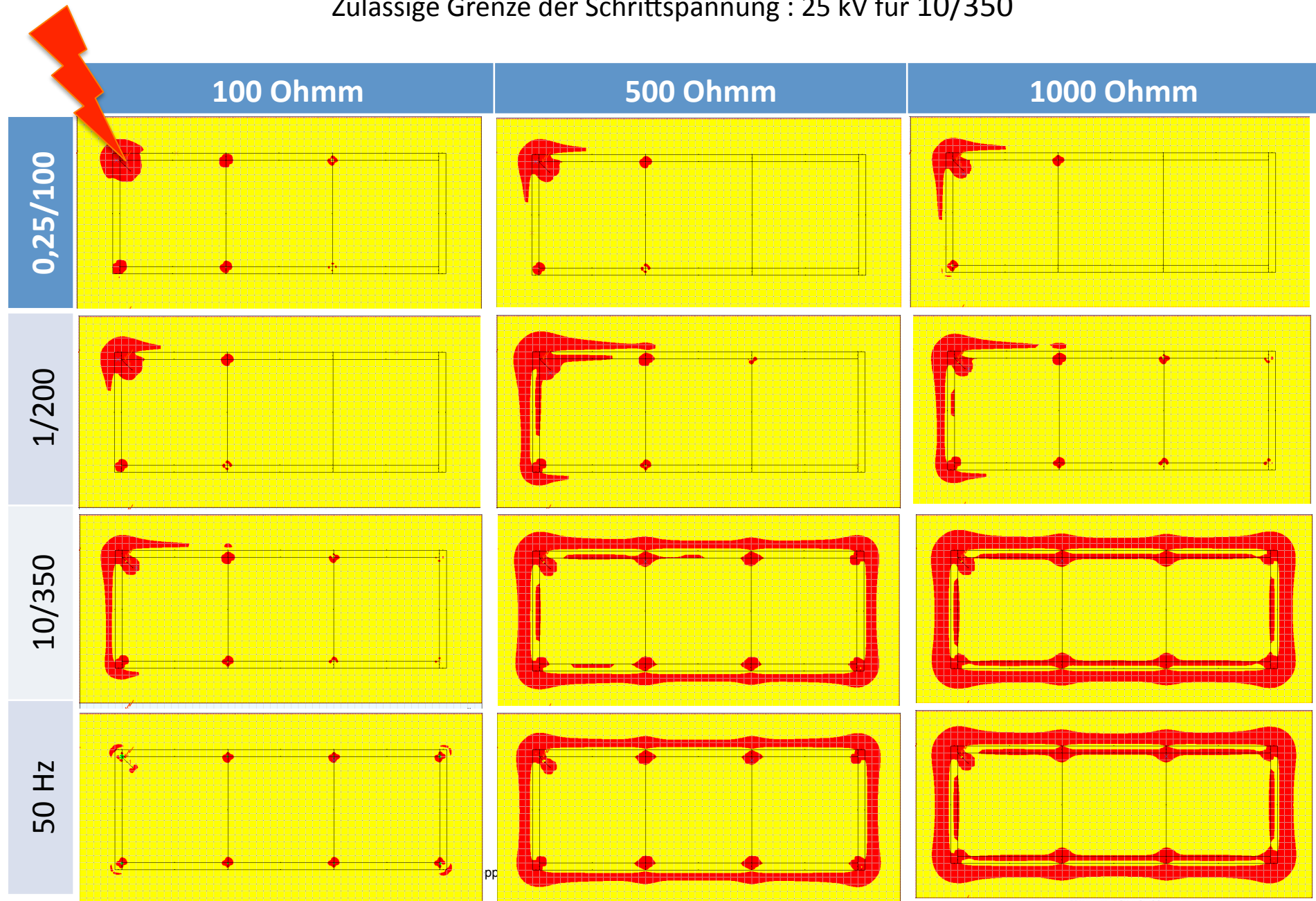
Isometrische Darstellung



Erdoberflächenpotential. Berechnung für LPS – Schutzklasse I.



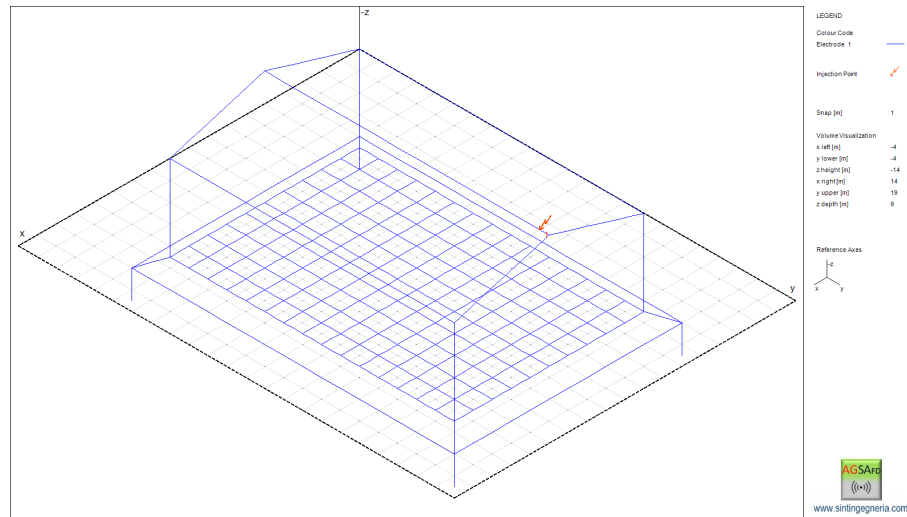
Bereiche sicherer (gelb) und gefährlicher (rot) Schrittspannung für LPS – Schutzklasse I.
Zulässige Grenze der Schrittspannung : 25 kV für 10/350



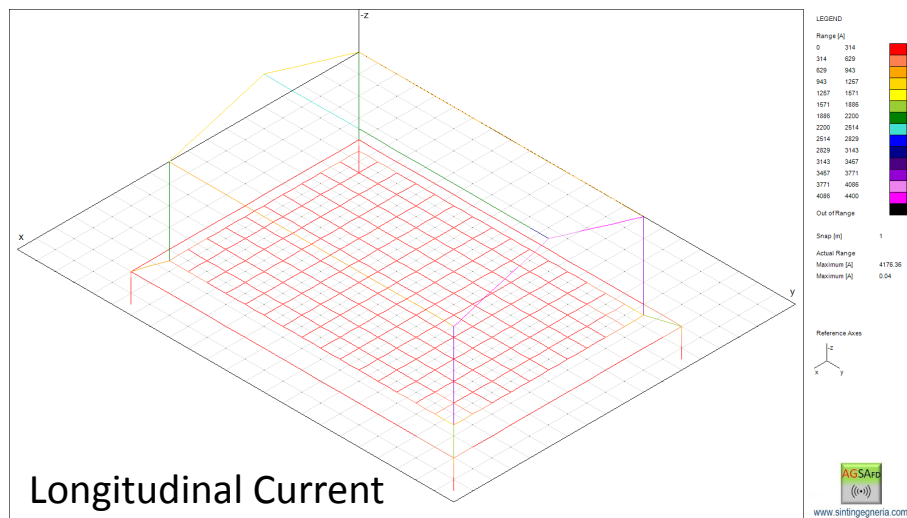
Weitere Berechnungsmöglichkeiten

- Elektrische und magnetische Felder
- Induzierte Spannungen
- Kopplungen von Hochspannungsleitungen in Pipeleines
-

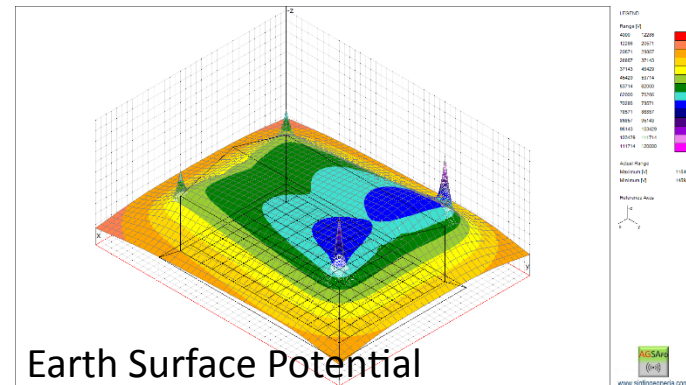
LIGHTNING EFFECTS WITH XGSA_FD



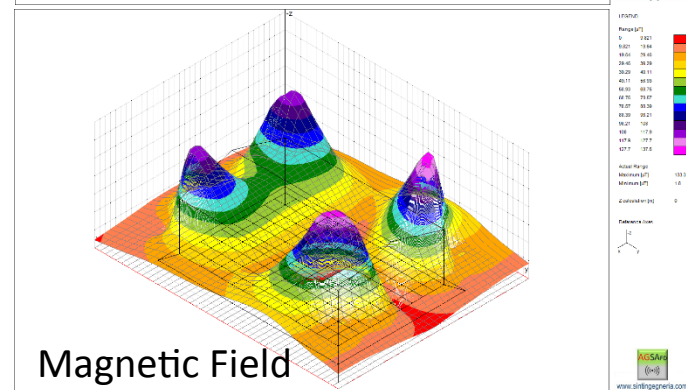
Injected current: 10 kA – 25 kHz



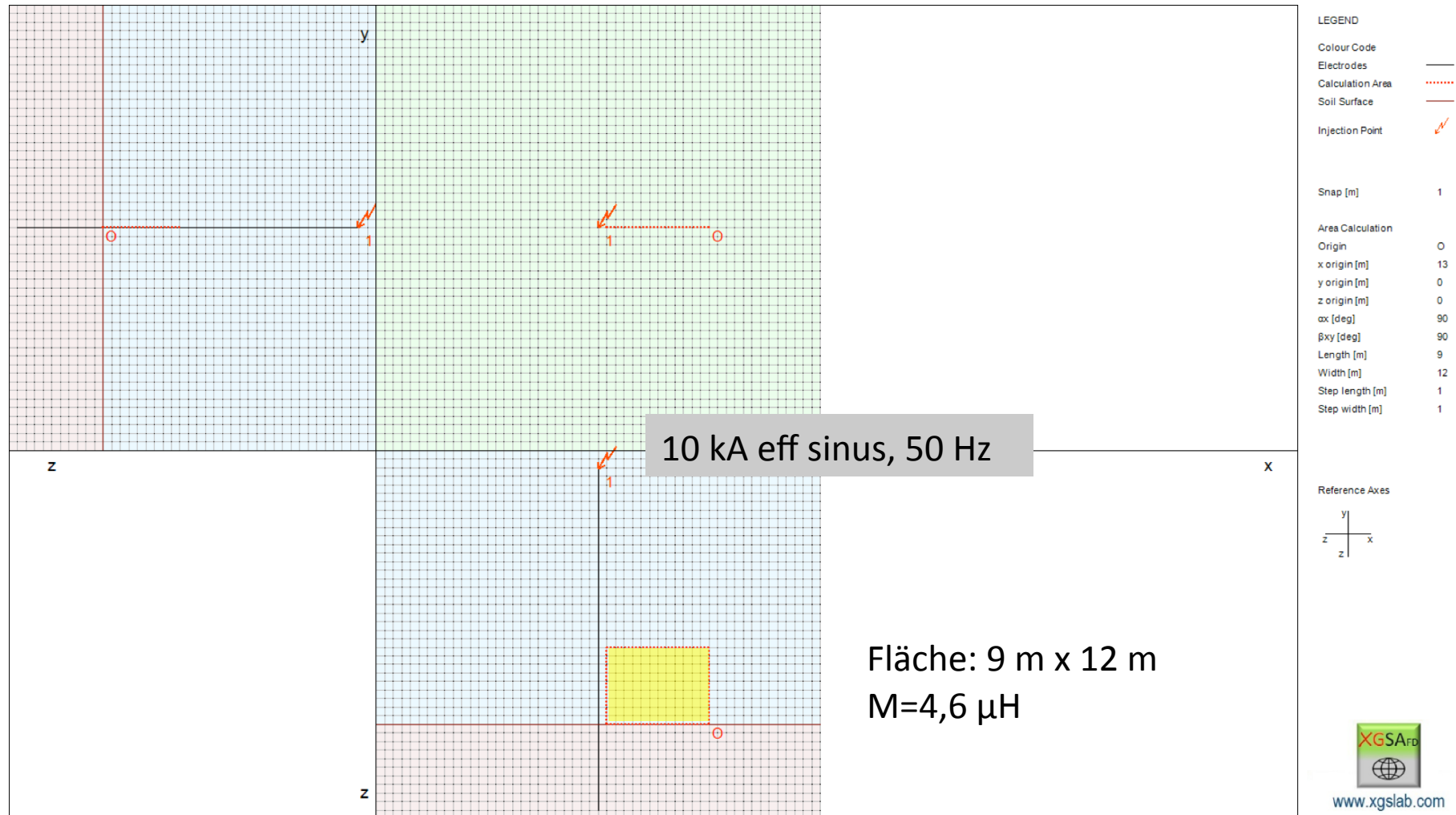
Longitudinal Current



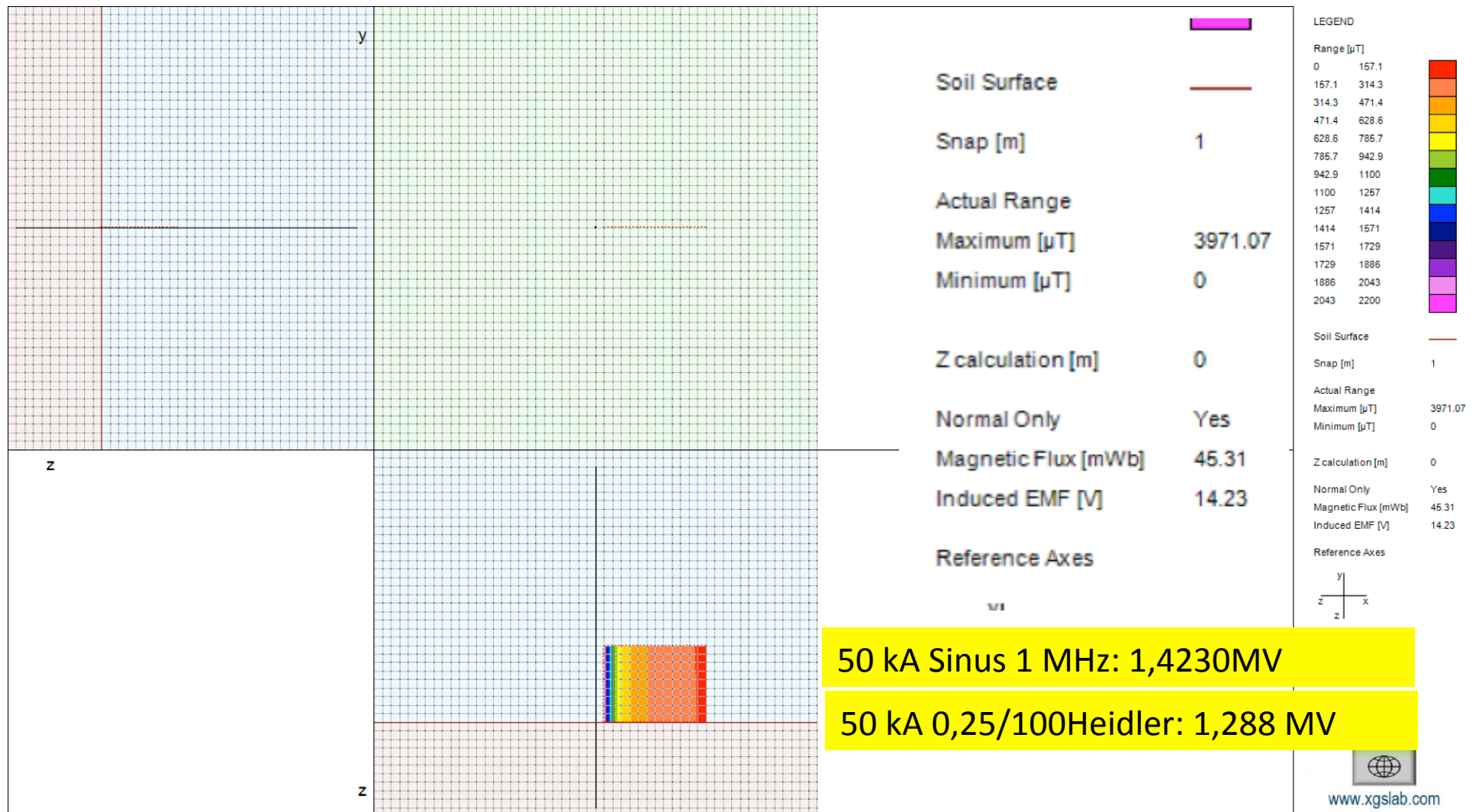
Earth Surface Potential



Neue Features: Induzierte Spannung



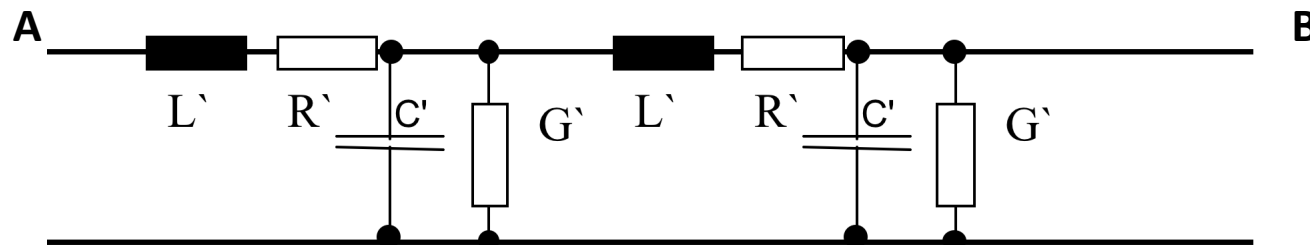
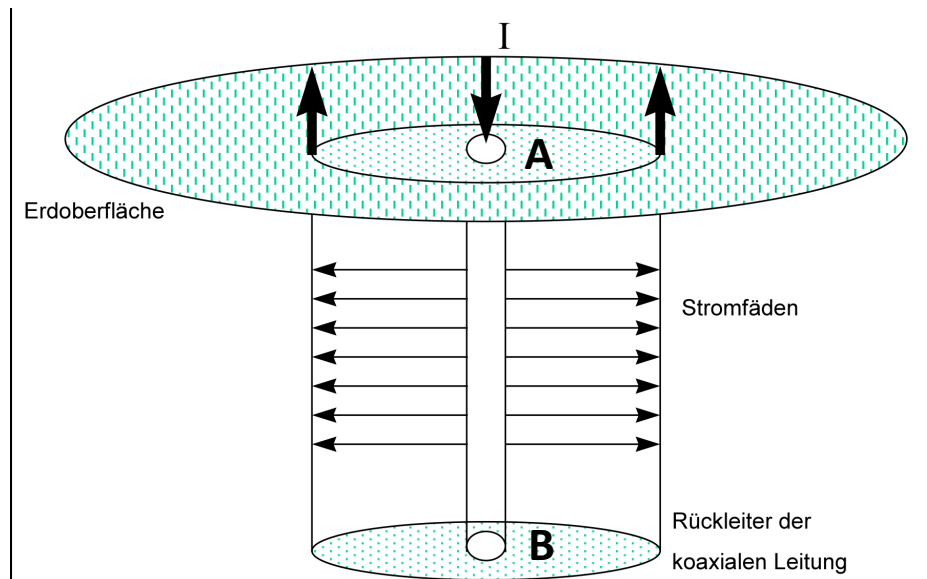
Berechnung induzierter Spannung



Fazit: Berechnung mit GSA

- Einfache und schnelle Berechnung der Schrittspannung mit GSA auch für Frequenzen bis 1 MHz.
- Anwendbar auf große bauliche Anlagen
- Dxf-Import (Ableitungen, Erder) direkt in das Programm
- **Der 10/350 mit 25 kHz ist in allen LPS-Klassen der dominierende Stoßstrom.**
- **Ab 500 Ohmm** sind die Stromverteilungen bei 10/350 und 50 Hz etwa gleich, d.h. eine **50 Hz Berechnung** reicht aus.
- An den Rändern von Gittererdern besteht Gefahr !!!!!!!!!!!!!
Lösung: VDB Handbuch
- Elektrische und magnetische Felder werden mit ausgewiesen
- Umfangreiche Analysetools

Modell eines Vertikalereders



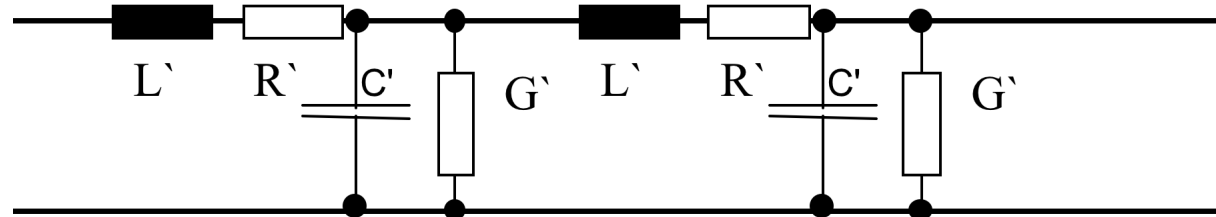
Exakte Berechnung einer Leitung im Frequenzbereich

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

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \frac{1}{\cosh \frac{\delta_R - \delta_G}{2}}$$

$$\sinh \delta_R = \frac{R'}{\omega L'} \quad \sinh \delta_G = \frac{G'}{\omega C'}$$

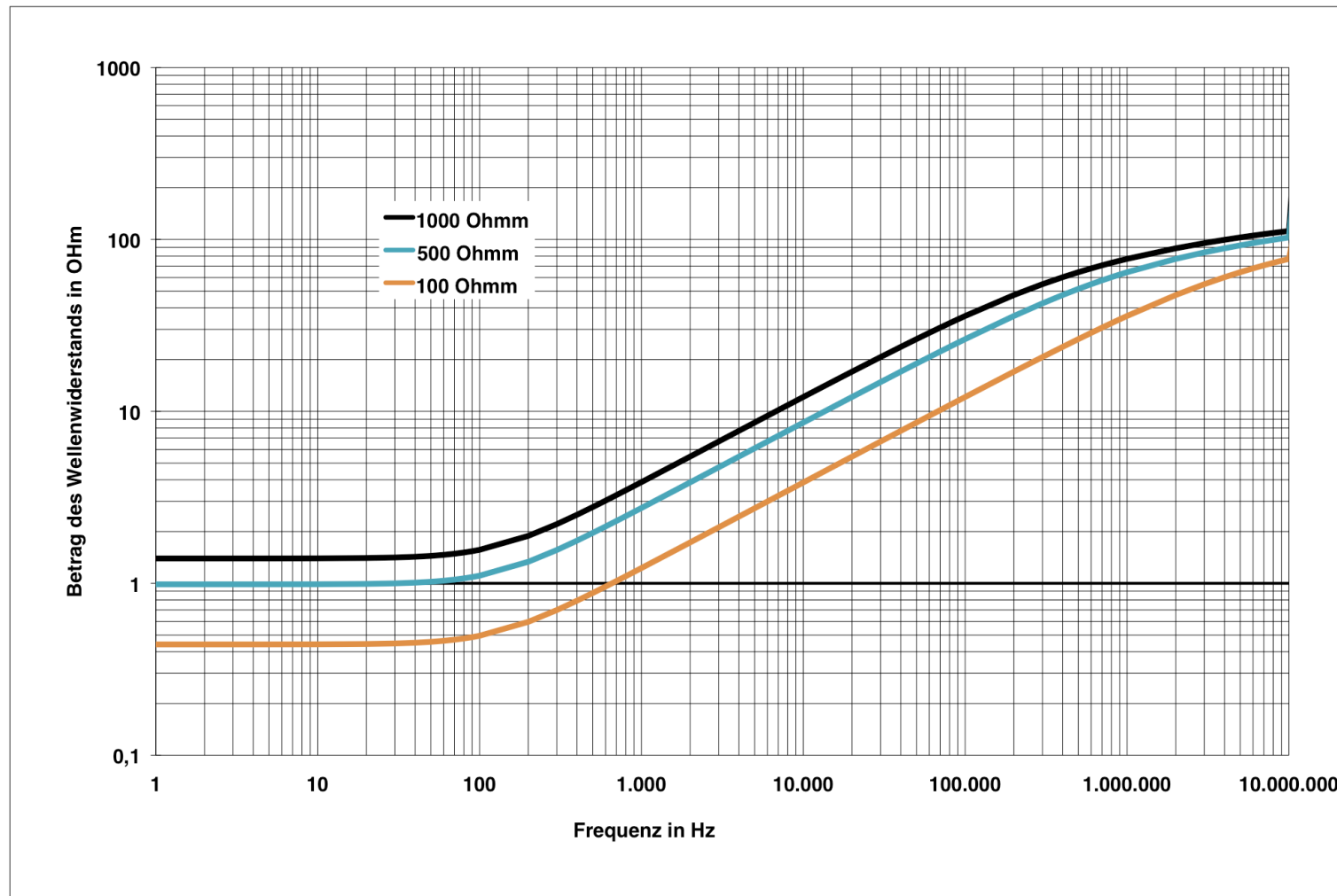
$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_{\infty} \epsilon_0 + \sqrt{\frac{2 \epsilon_{\infty} \epsilon_0}{\rho_E \omega}}$$



ϵ_{∞} :Grenze der Dielektrizitätszahl bei

hohen Frequenzen : Wird in der Literatur mit 4...8 angegeben

Wellenwiderstand Vertikalerder: Stange 20 mm Durchmesser. Durchmesser des Außenradius des Zylinders für die R bzw. G-Berechnung: 9m



Berechnungshintergrund l_{eff} für Horizontalerder

$$L' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \ln \frac{r_a}{r_i}$$

$$G' = \frac{\pi}{\rho_E \cdot \ln \frac{r_a}{r_i}}$$

$$L' \cdot G' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \rho_E}$$

$$v = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot f}{L' \cdot G'}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot 2 \cdot \rho_E}{\mu_0}} \quad \text{mit } f = \frac{1}{4 \cdot T_1}$$

$$v = \sqrt{\frac{\pi}{\mu_0}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_E}{T_1}}$$

$$l_{\text{eff}} = v \cdot T_1 = \sqrt{\frac{\pi}{\mu_0}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_E}{T_1}} \cdot T_1$$

$$l_{\text{eff}} = v \cdot T_1 = \sqrt{\frac{\pi}{\mu_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{4 \cdot \rho_E \cdot T_1} = 1,12 \cdot \sqrt{4 \cdot \rho_E \cdot T_1}$$