Fachhochschule Südwestfalen
Hochschule für Technik und Wirtschaft
University of Applied Sciences

Berechnung der Schrittspannung im blitzrelevanten Frequenzbereich

Jan Meppelink FH-SWF Soest
Andreas König OBO Bettermann

OBO BETTERMANN

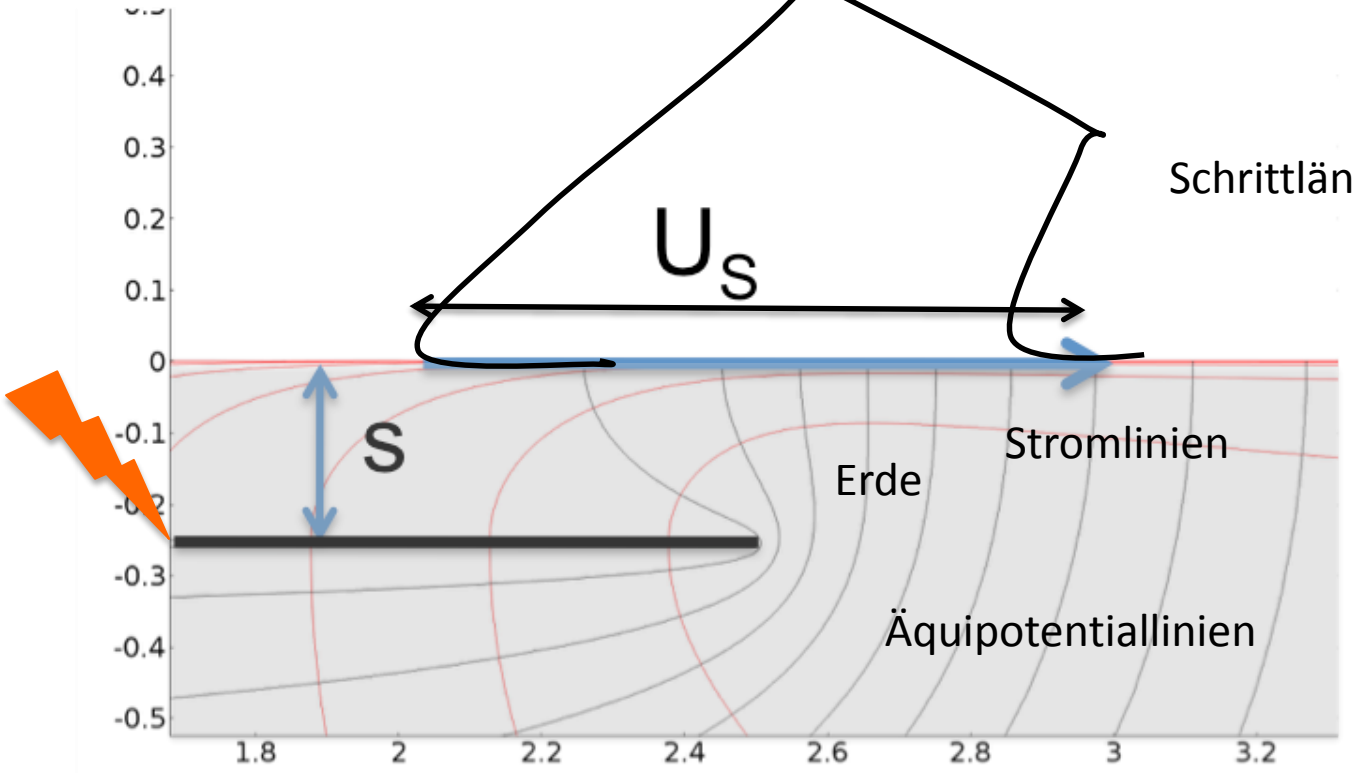
THINK CONNECTED.

Vortrag 11.VDE ABB Blitzschutztagung in Neu ULM 2015

Fachhochschule Südwestfalen
Hochschule für Technik und Wirtschaft
University of Applied Sciences

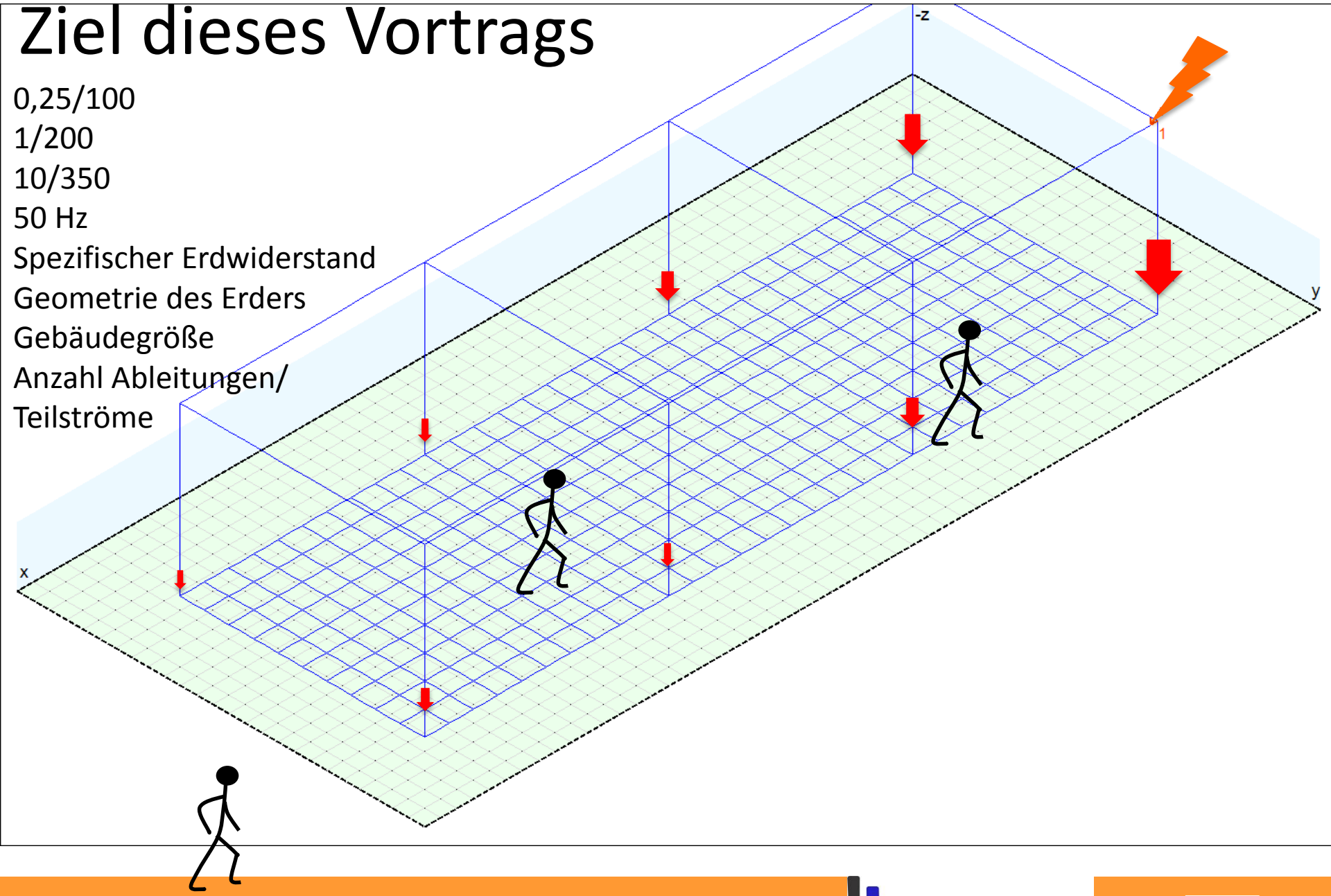
Zulässig: $U_{S\,max}$
25 kV 10 / 350

Schrittlänge 1m



Ziel dieses Vortrags

0,25/100
1/200
10/350
50 Hz
Spezifischer Erdwiderstand
Geometrie des Erders
Gebäudegröße
Anzahl Ableitungen/
Teilströme



Copyright OBO BETTERMANN 2015

Berechnungsmethoden Schrittspannung

Analytisch

- Begrenzt
- Kompliziert
- Unterschiedliche Formeln
- Von Fall zu Fall richtiges Ergebnis
- Nur für **DC, 50 Hz** gültig
- 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

Copyright OBO BETTERMANN 2015

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

Copyright OBO BETTERMANN 2015

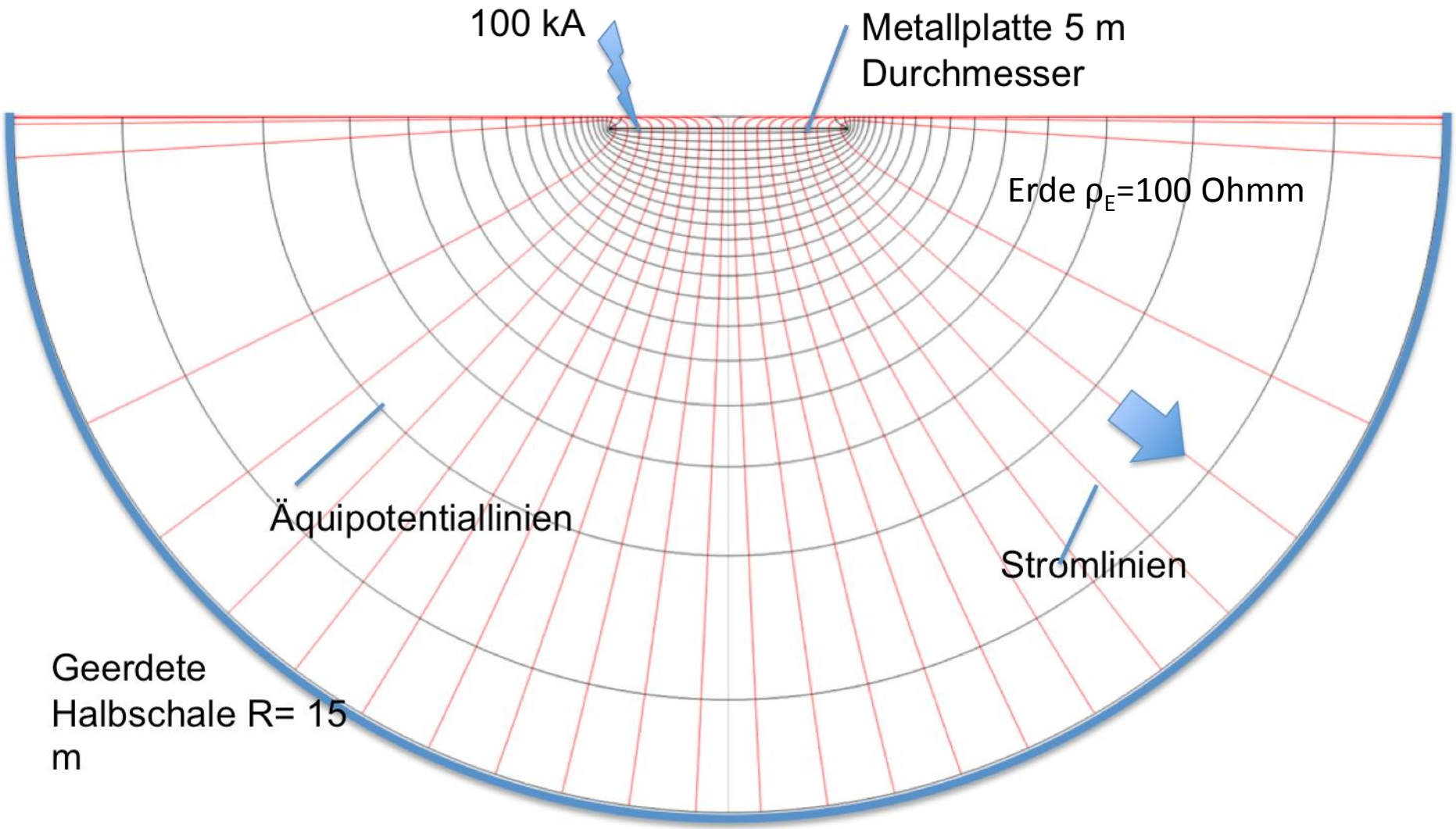
Aus Literatur

- Z.B. Koch : Erdungen, 2. Auflage Formeln für Stab und Banderder
- 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**.

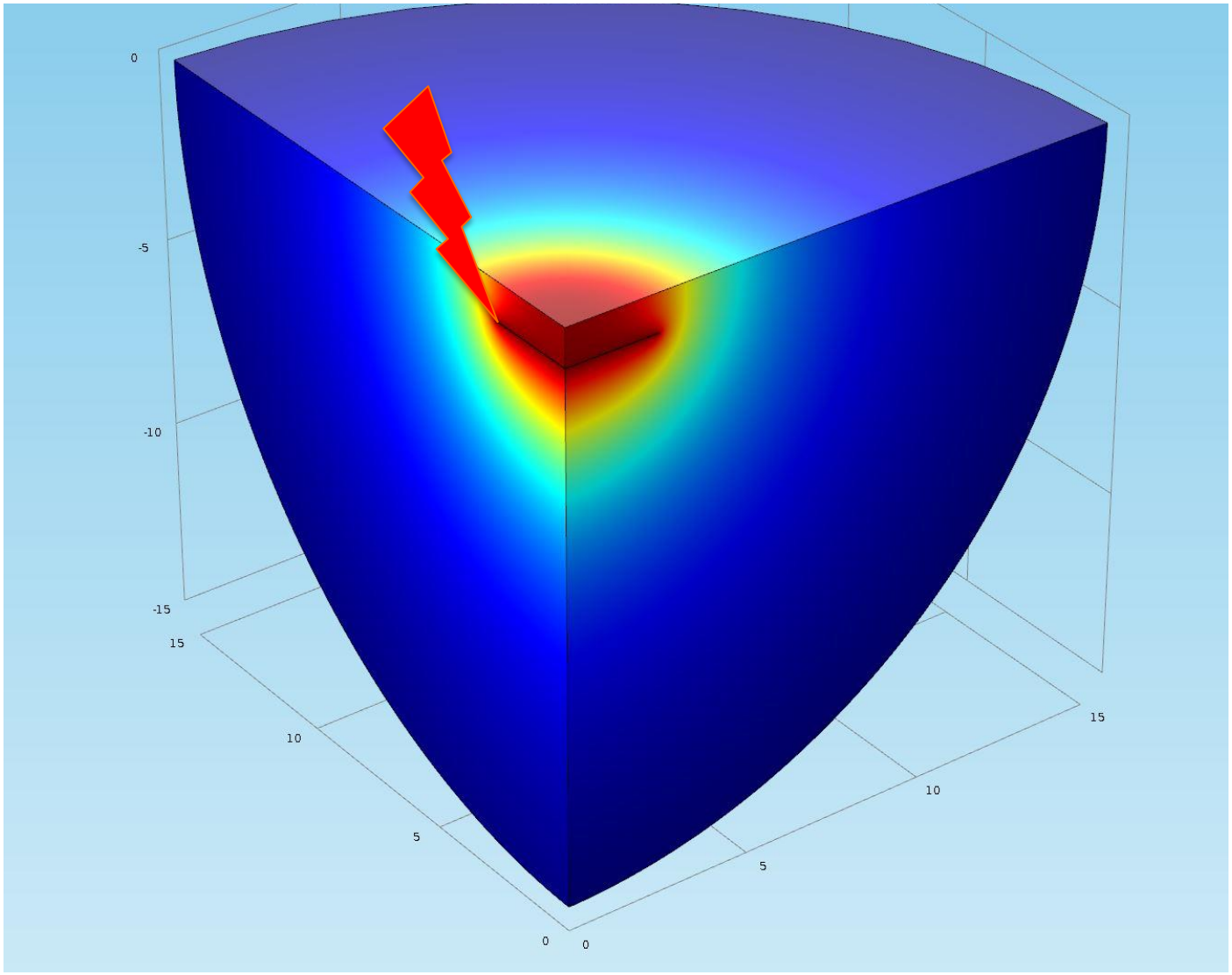
Copyright OBO BETTERMANN 2015

FEM Programm
Comsol Multiphysics



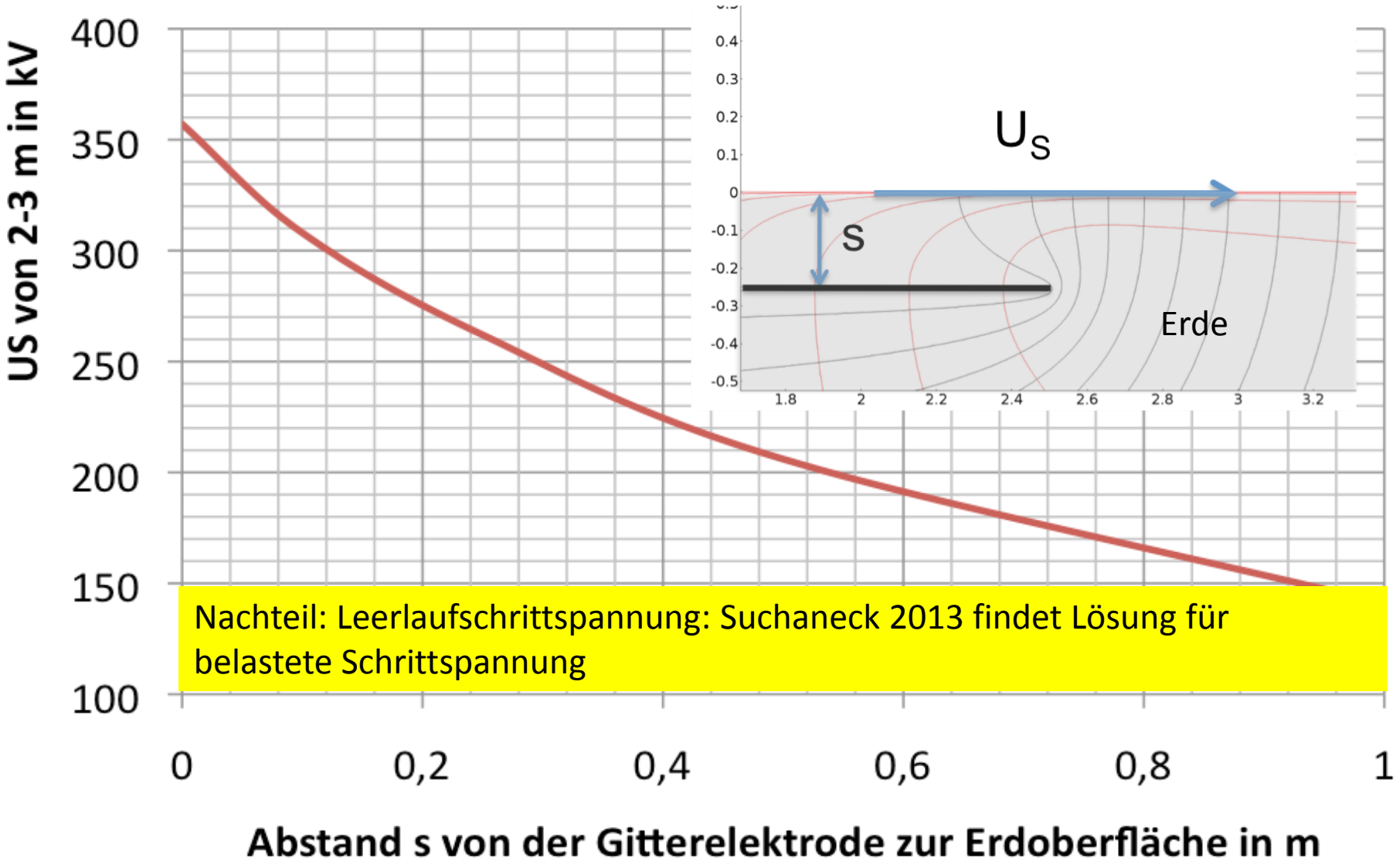
Copyright OBO BETTERMANN 2015

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



Copyright OBO BETTERMANN 2015

Leerlauf-Schrittspannung US



Nachteil: Leerlaufschrittspannung: Suchaneck 2013 findet Lösung für belastete Schrittspannung

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

Copyright OBO BETTERMANN 2015

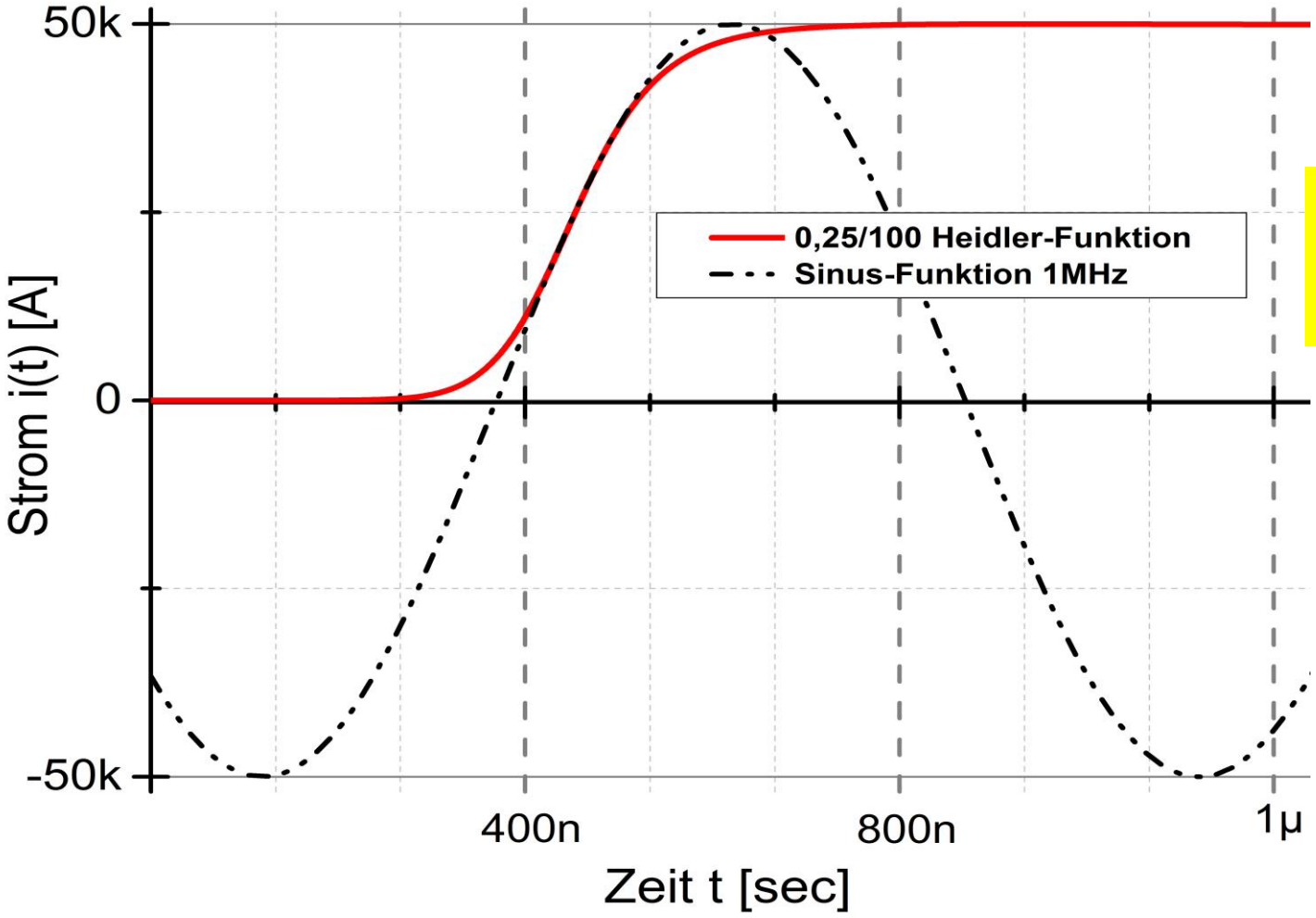
Die Stoßströme nach DIN EN 62305-1

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

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Der blitzrelevante Frequenzbereich

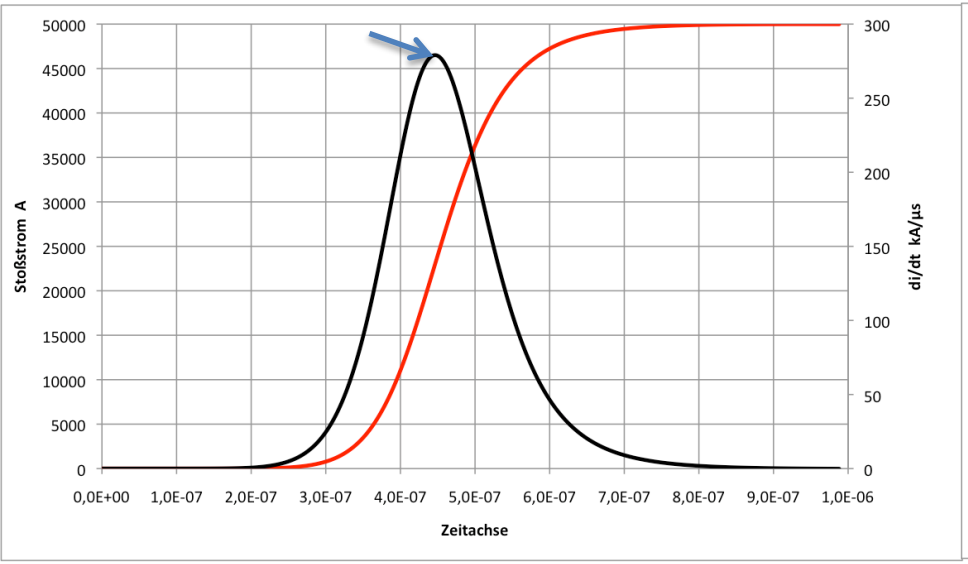


di/dt beim Sinus etwas größer gegenüber Heidler

Copyright OBO BETTERMANN 2015

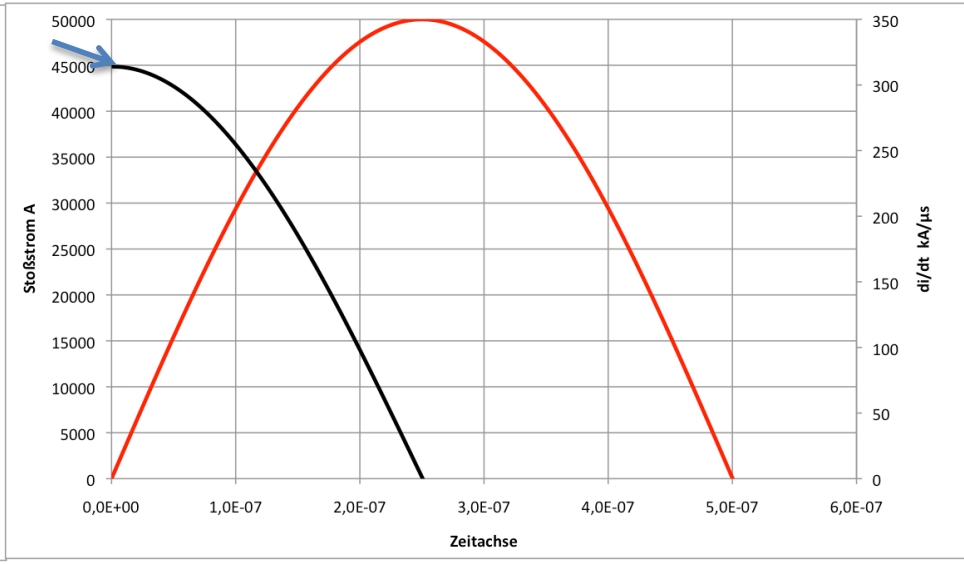
Vergleich di/dt
0,25/100 und Sinus 1 MHz

Heidler funktion 50 kA peak



di/dtmax=280 kA/µs

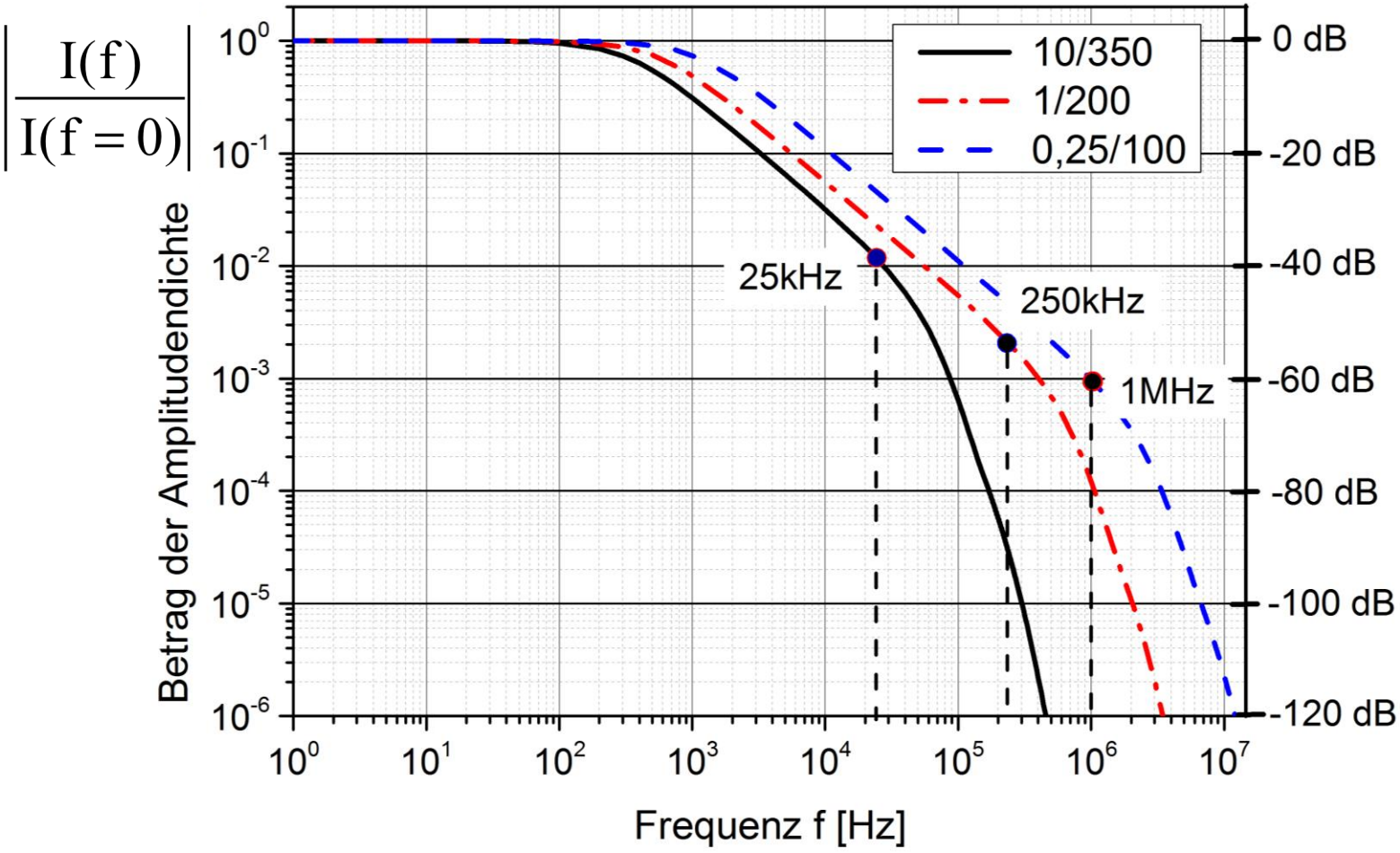
Sinusfunktion 50 kA peak



di/dtmax=314 kA/µs

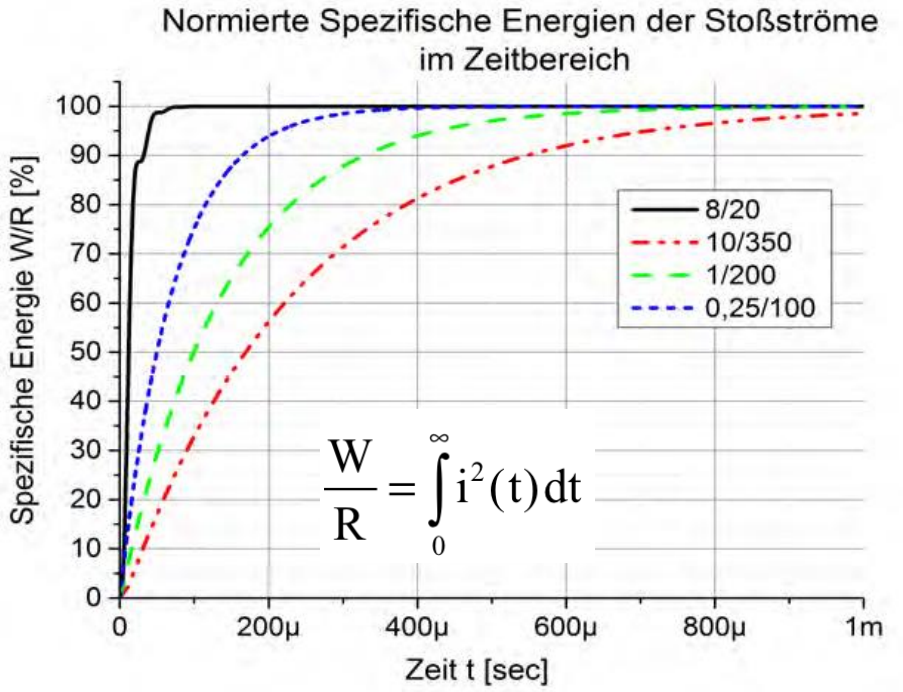
Copyright OBO BETTERMANN 2015

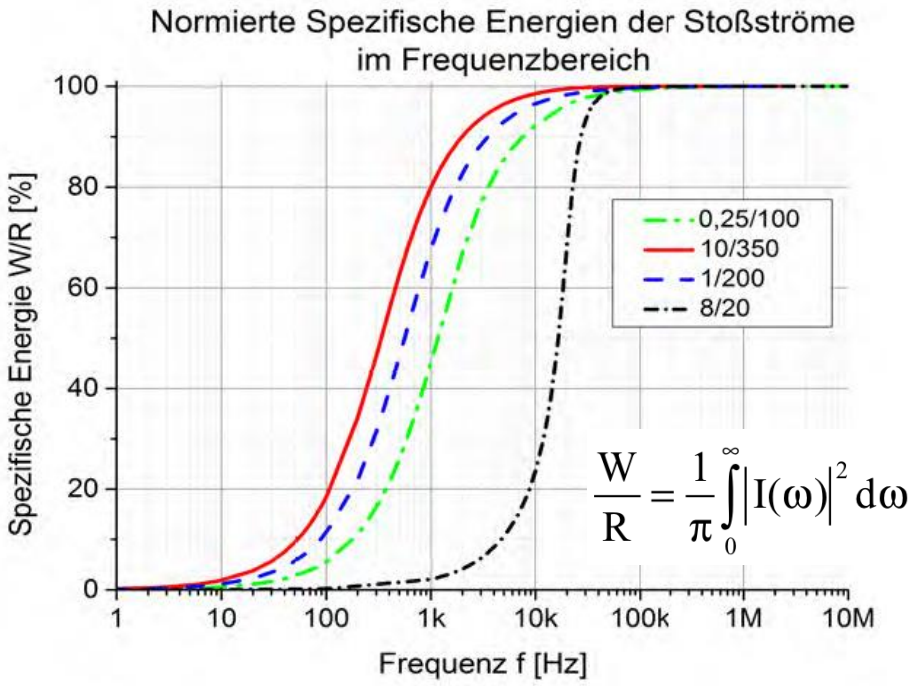
Amplitudendichten der Stoßströme nach IEC 62305-1



 Copyright OBO BETTERMANN 2015

Vergleich der spezifischen Energien





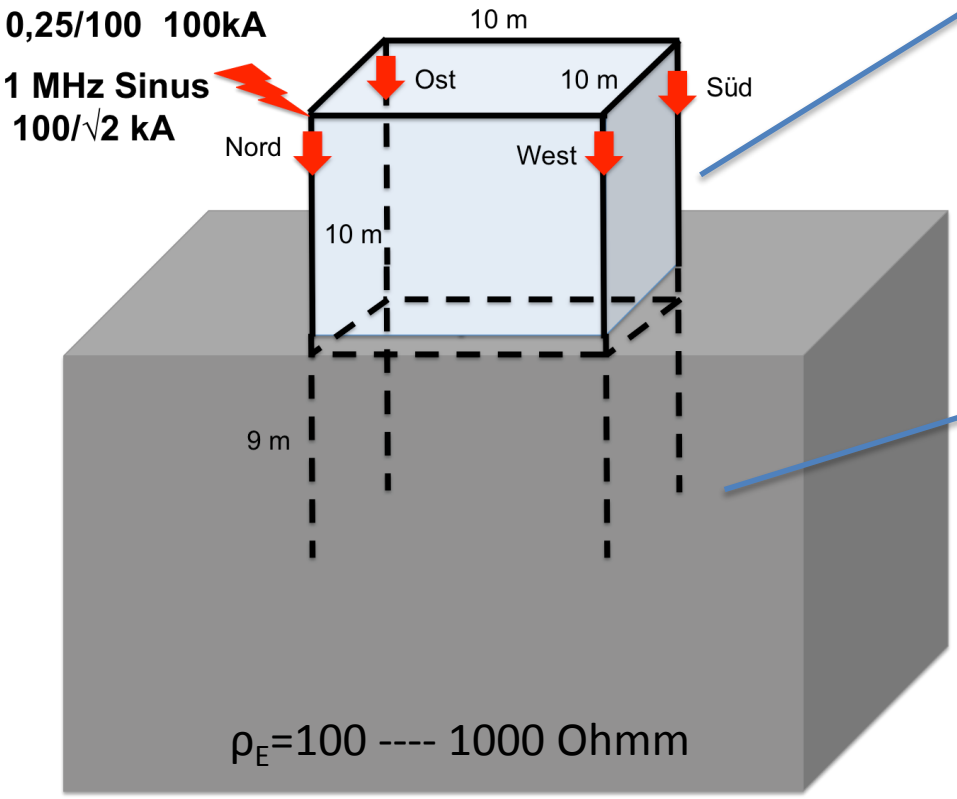
Das Parseval'sche Theorem stellt die Kohärenz der Signalenergie im Zeit- und Frequenzbereich her.
Marc-Antoine Parseval 1755-1836

Quelle: Bachelorarbeit Kemper 2015

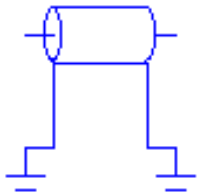
Copyright OBO BETTERMANN 2015

Nachweis der Äquivalenz von Zeit- und Frequenzbereich

Nur zur % Rechnung 100 kA



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

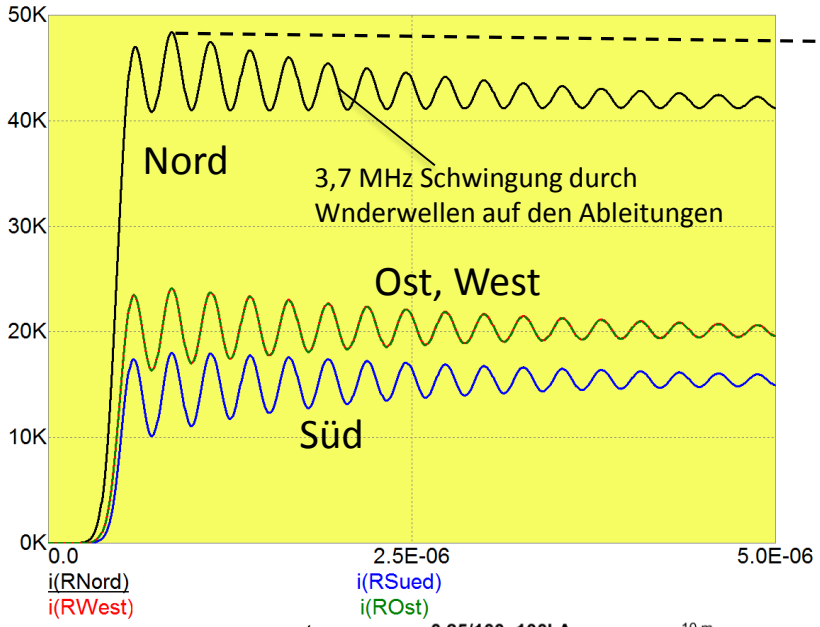


LEN=10 R=13e-3 C=7e-12 L=1.8e-6

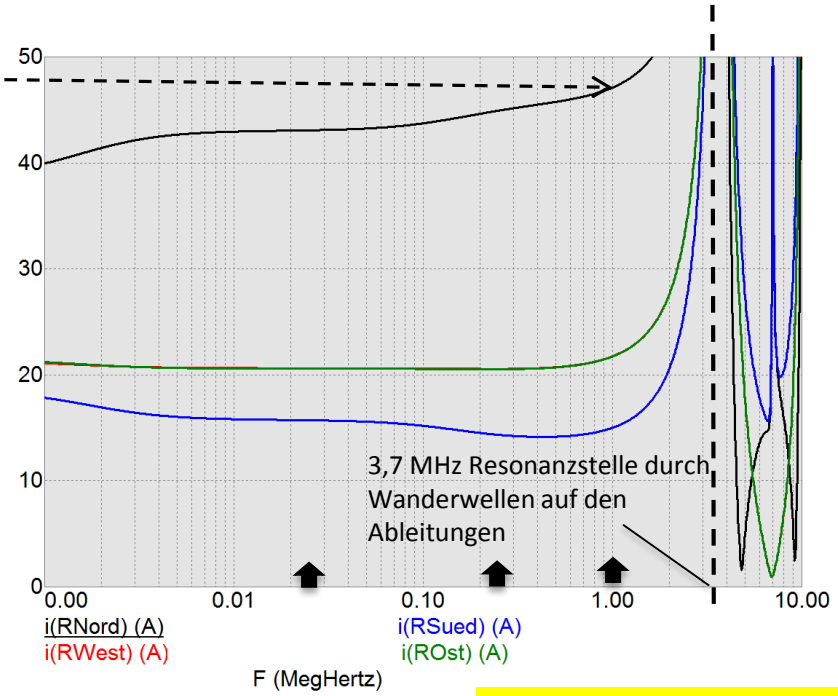
- R,L,C,G-Kettenleitermodell für Vertikal-

Copyright OBO BETTERMANN 2015

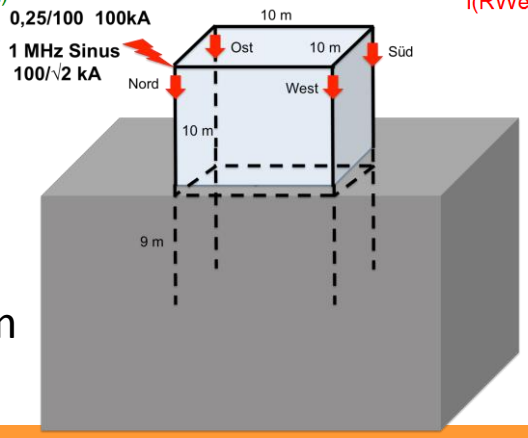
Äquivalenz von Zeitbereich und Frequenzbereich



Zeitachse



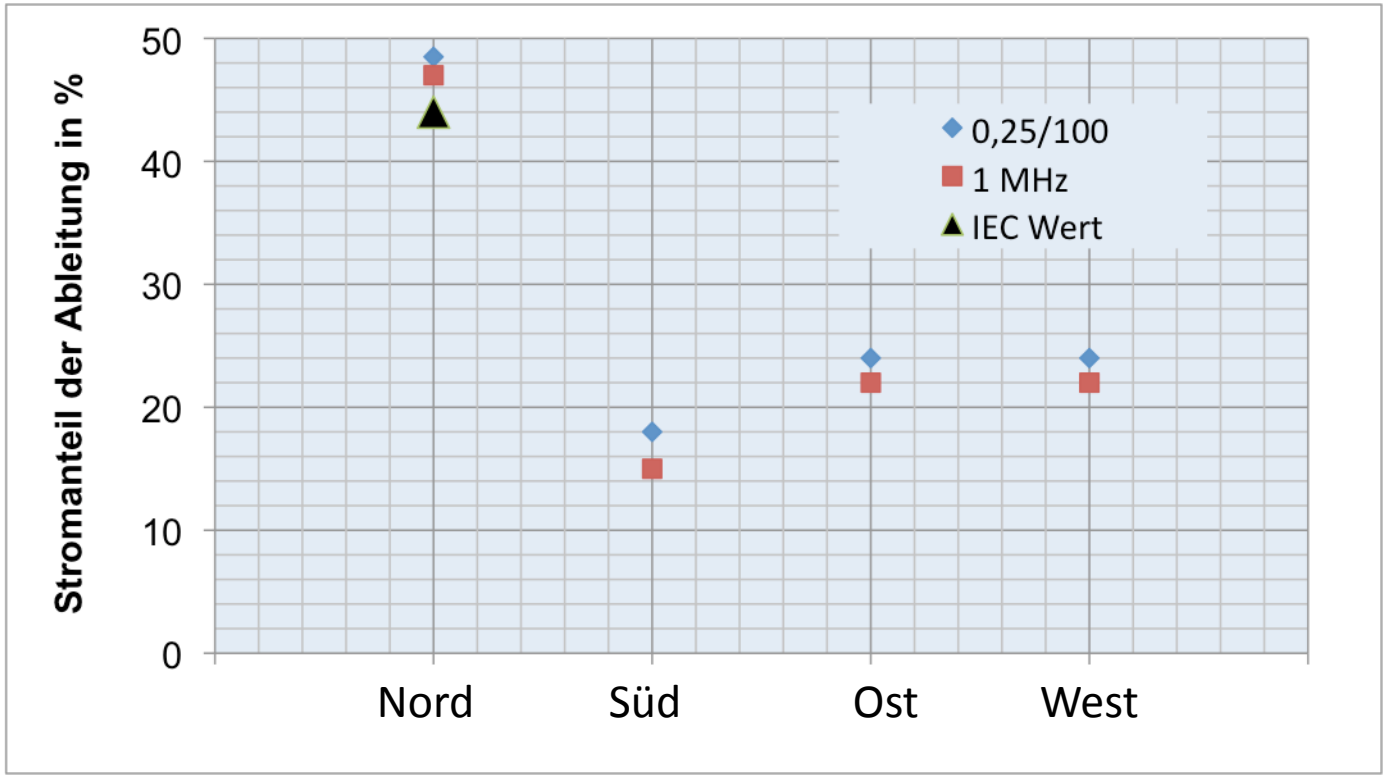
Frequenzachse



Beispiel ρ_E=100 Ohmm

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Vergleich der Teilströme (k_c-Wert)



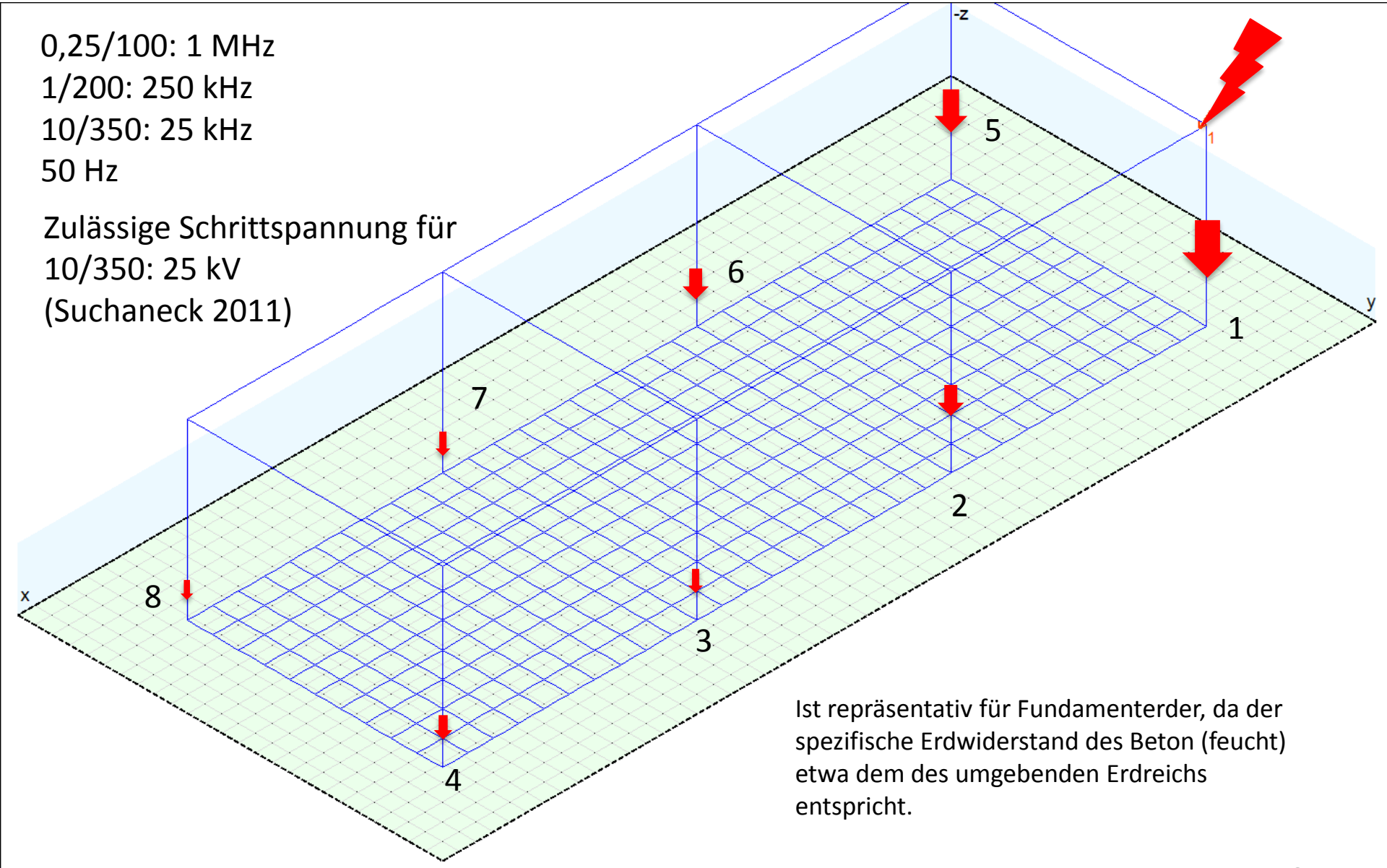
Folgerung: Berechnung des Frequenzgangs gibt Information für alle drei Stoßströme

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Anwendung auf Beispielhaftes Gebäude mit 8 Ableitungen: 45 m x 15 m x 10 m mit 6 mm Gitter 1,5 mx1,5 m; 0,25 m tief.

0,25/100: 1 MHz
1/200: 250 kHz
10/350: 25 kHz
50 Hz

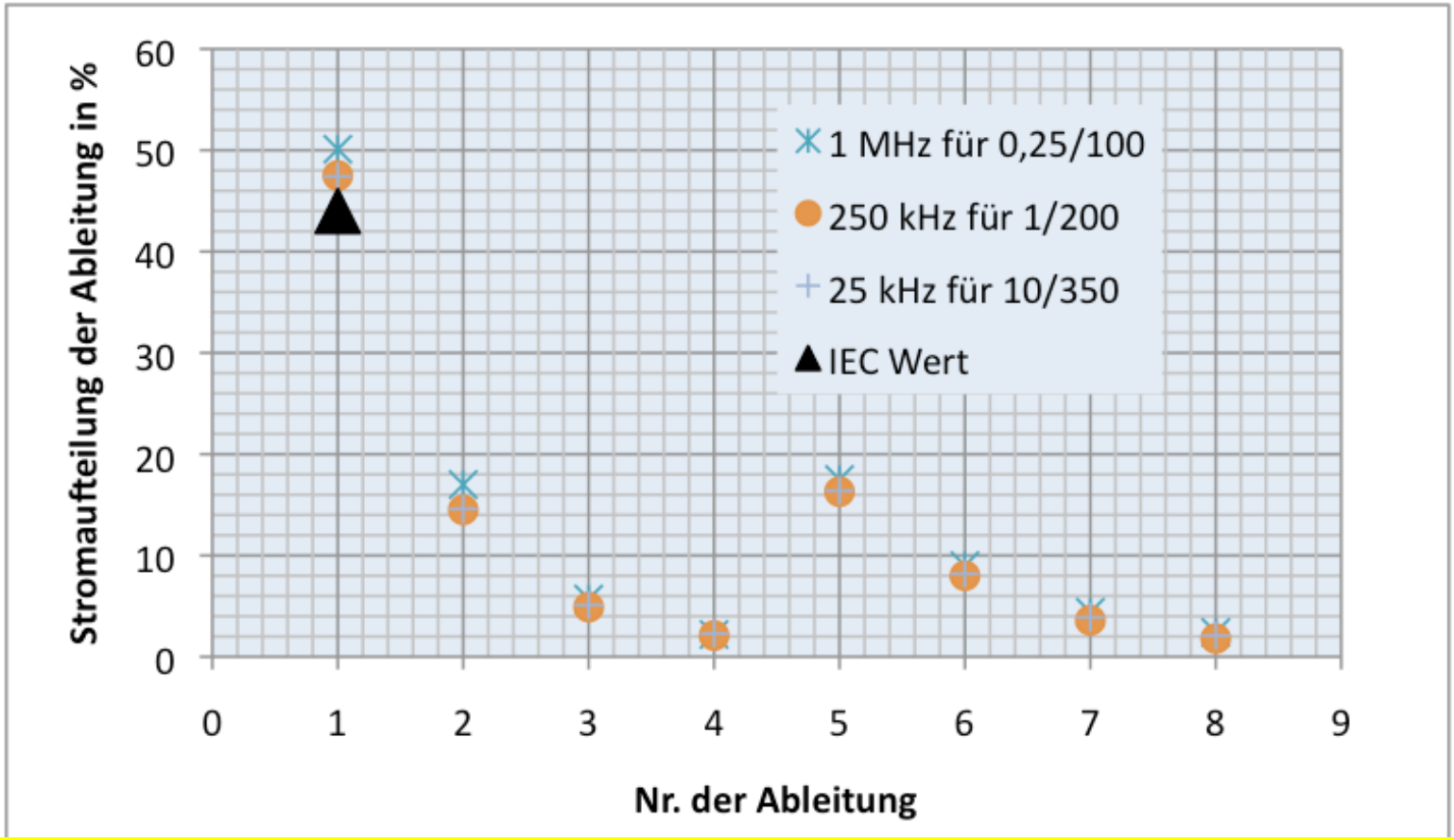
Zulässige Schrittspannung für
10/350: 25 kV
(Suchaneck 2011)



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

Copyright OBO BETTERMANN 2015

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



Folgerung: Berechnung des Frequenzgangs gibt Information für alle drei Stoßströme

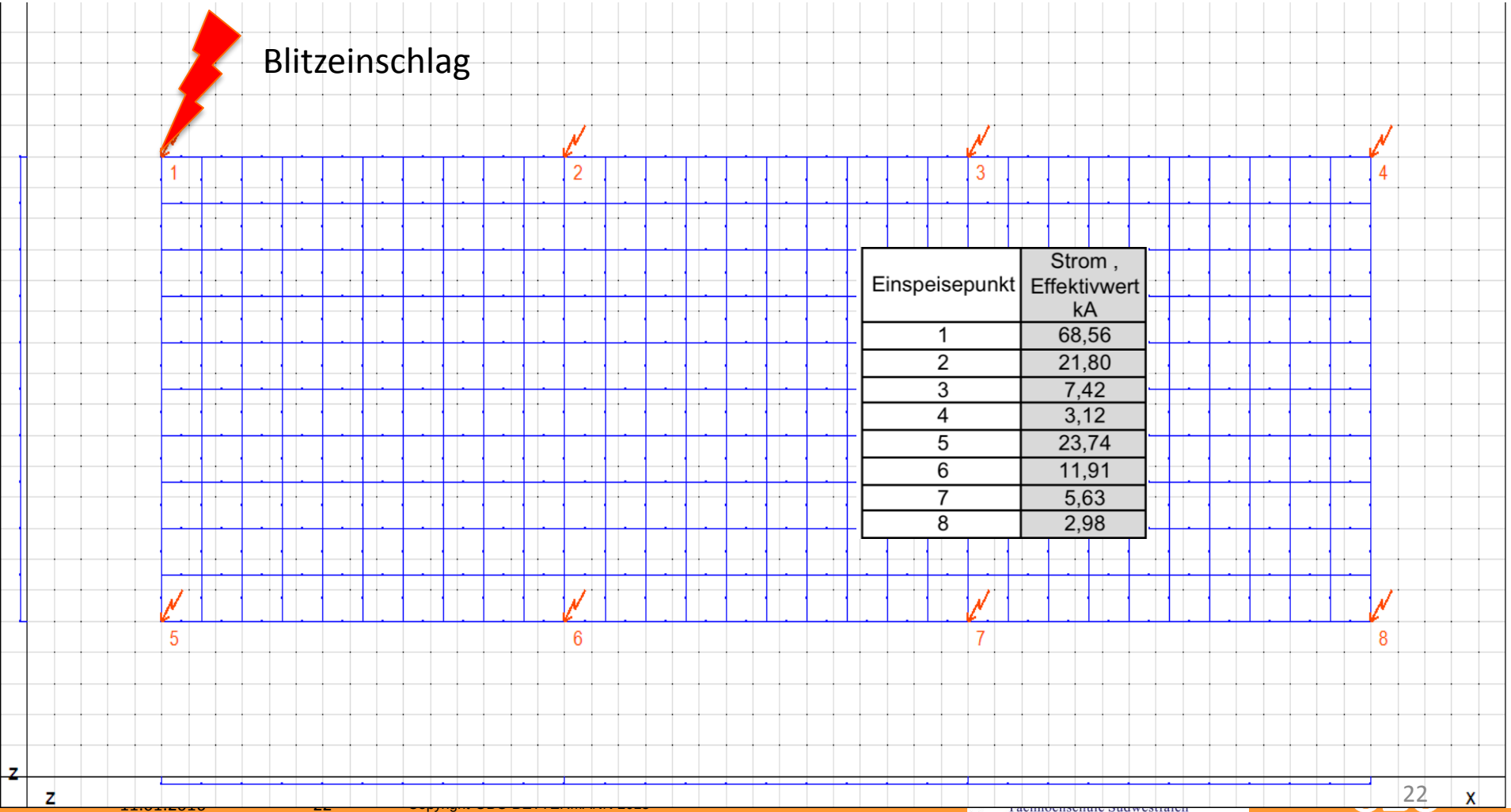
Copyright OBO BETTERMANN 2015

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

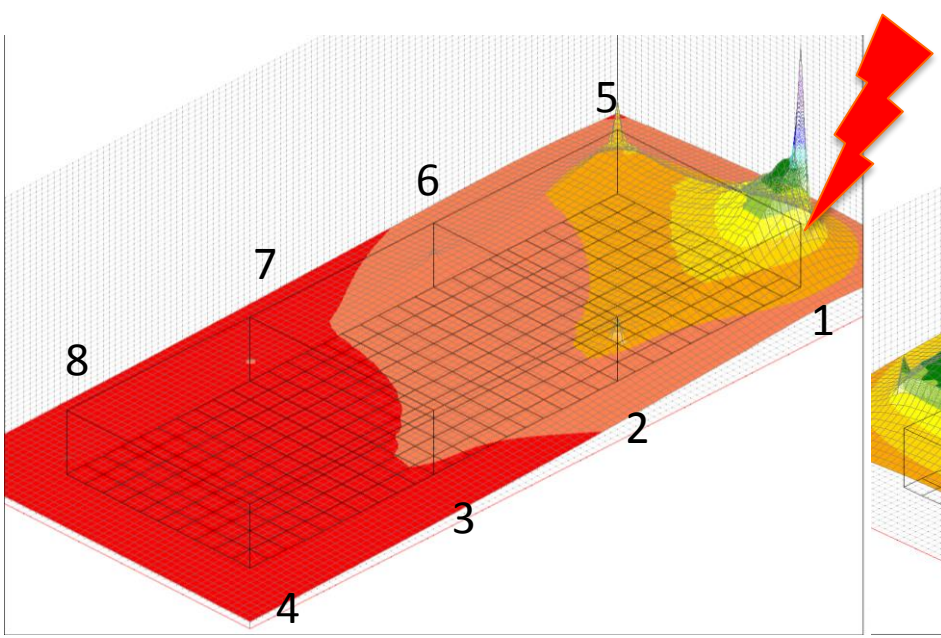
Copyright OBO BETTERMANN 2015

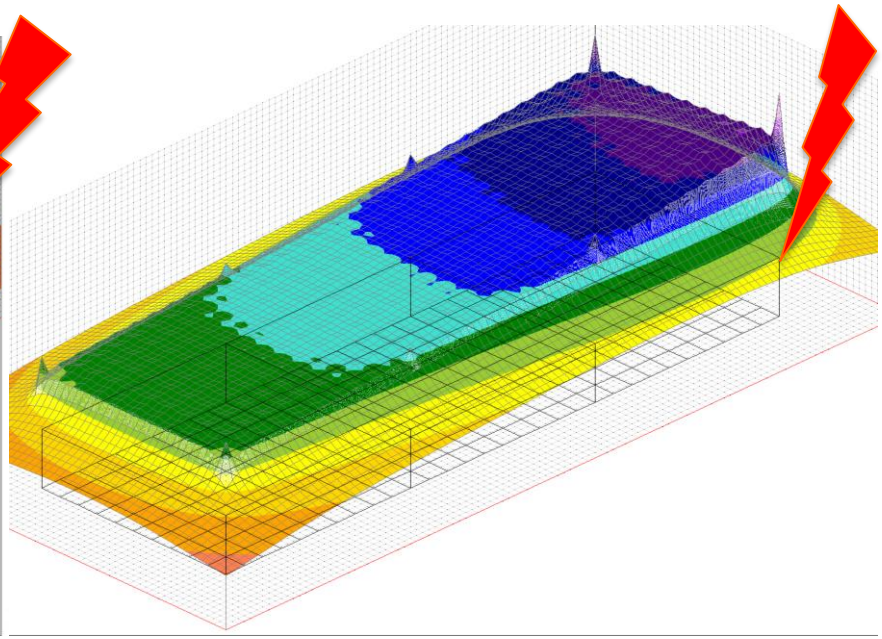
2-D Modell des Erders und Stromeinspeisung in die Ableitungen 1-8



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

Erdoberflächenpotential





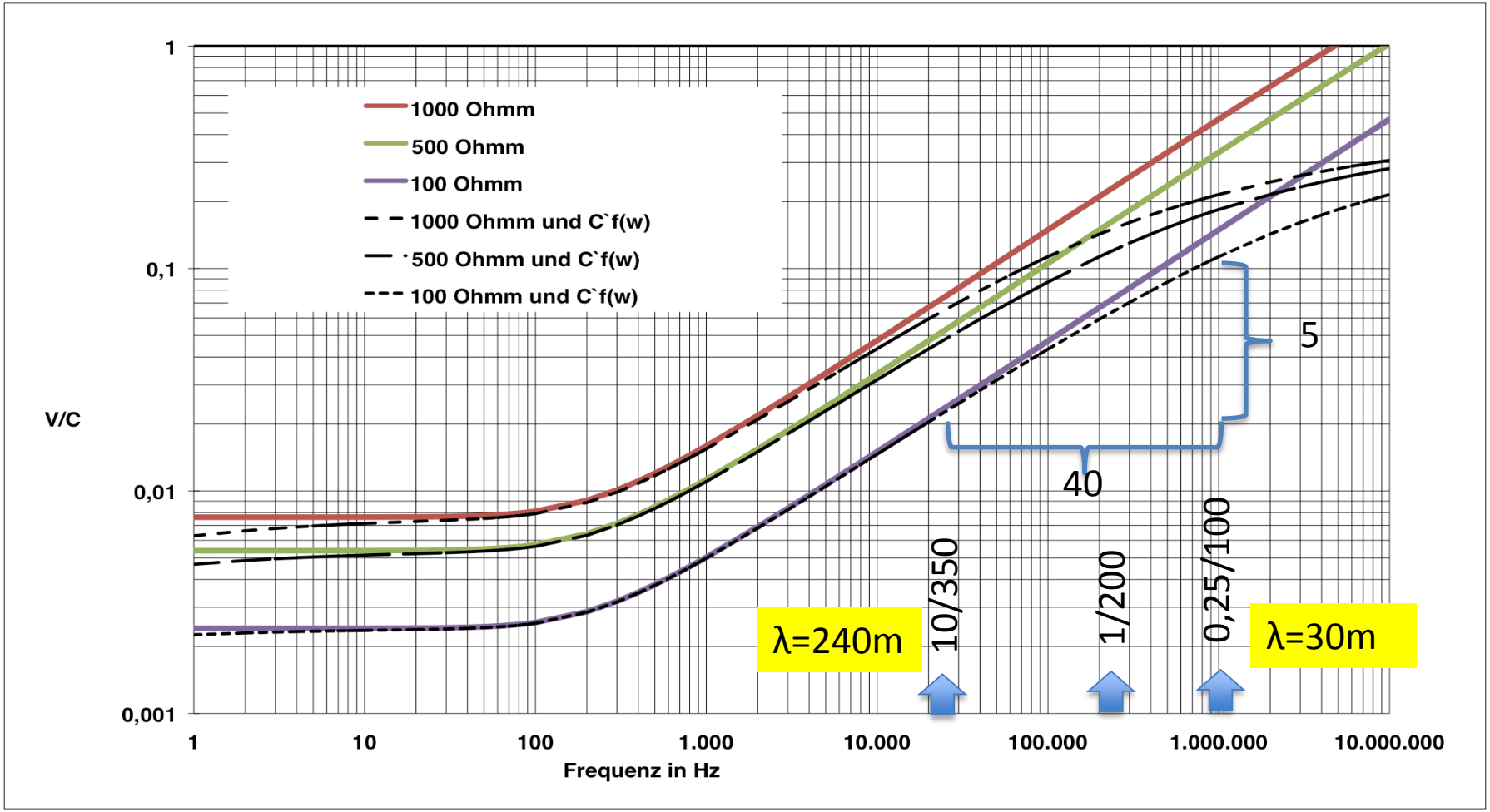
0,25/100 50 kA f=1MHz

10/350 200 kA f= 25 kHz

ρ_E=100 Ohmm

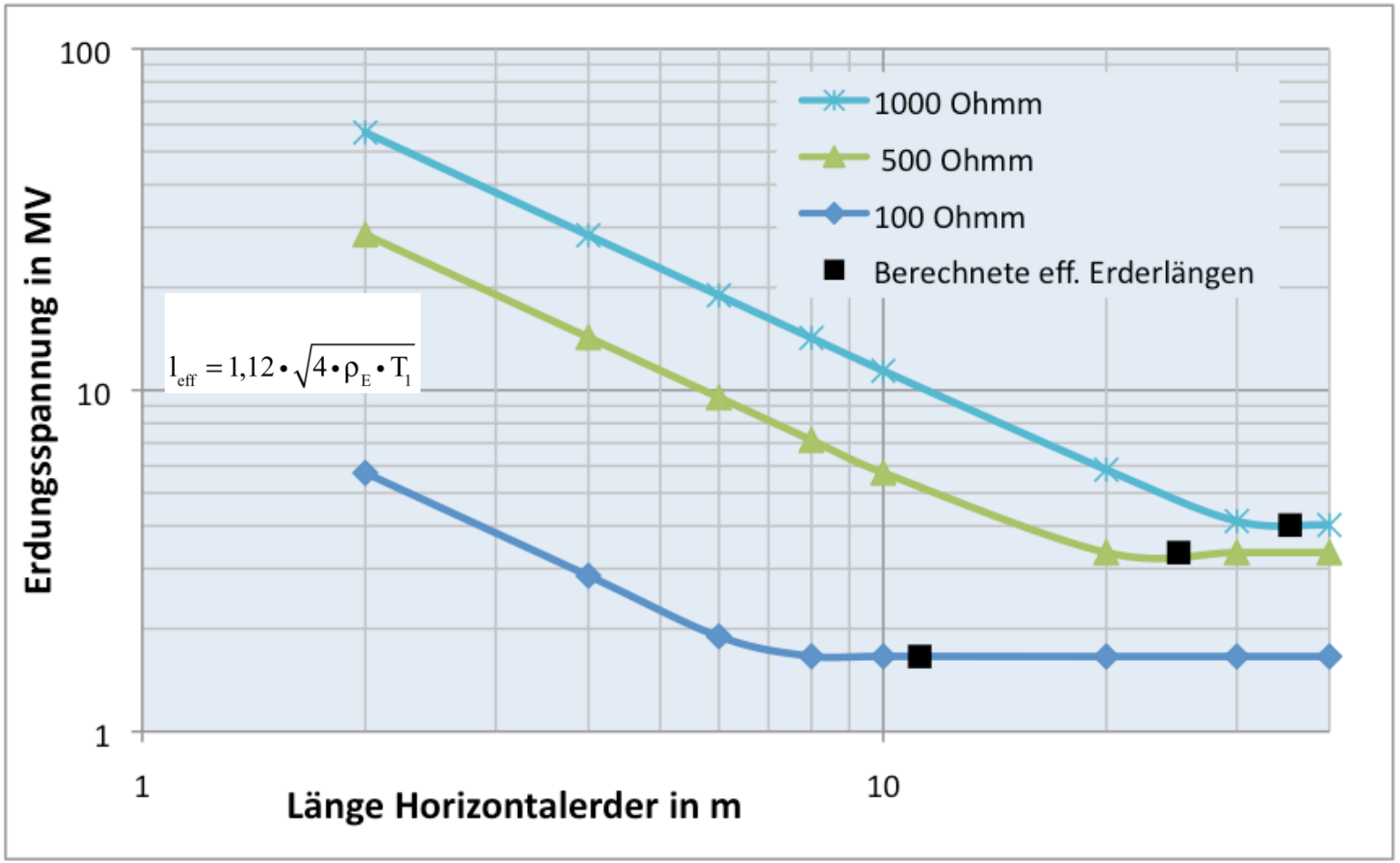
Copyright OBO BETTERMANN 2015

Frequenzabhängigkeit der bezogenen Phasengeschwindigkeit v/c



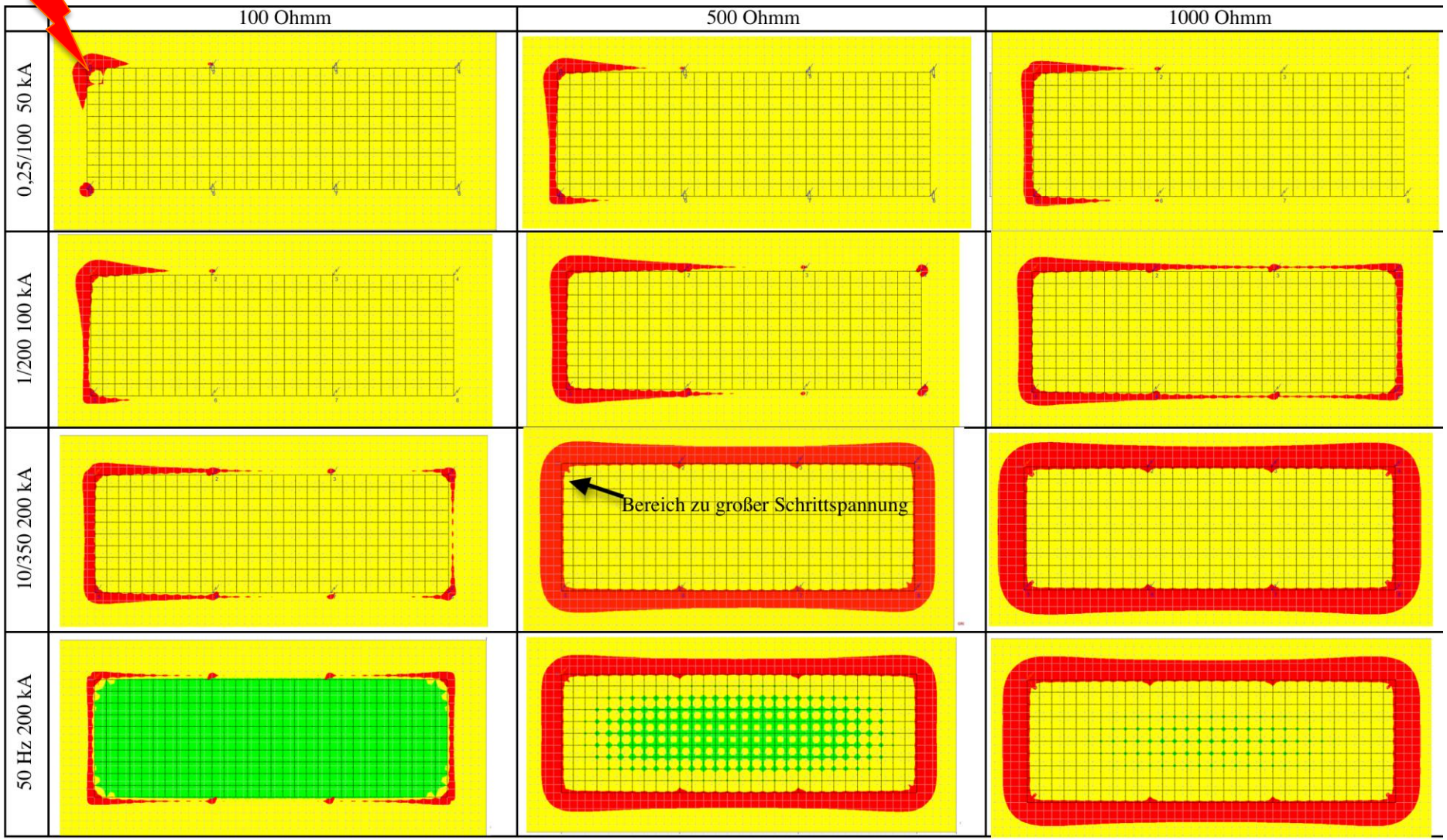
Copyright OBO BETTERMANN 2015

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



Copyright OBO BETTERMANN 2015

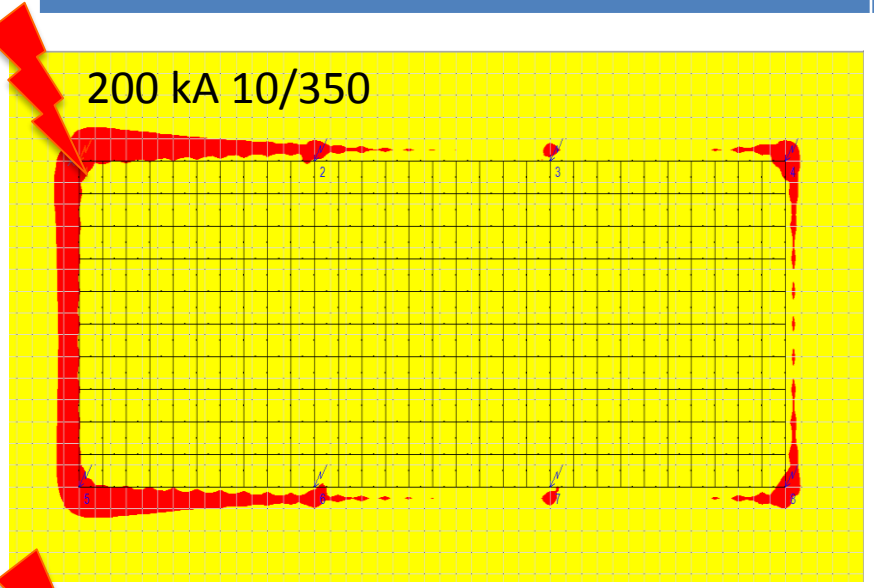
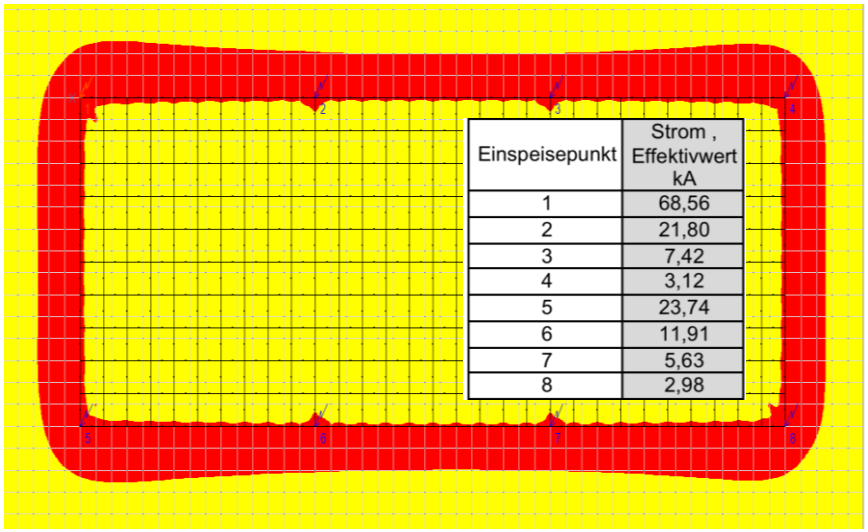
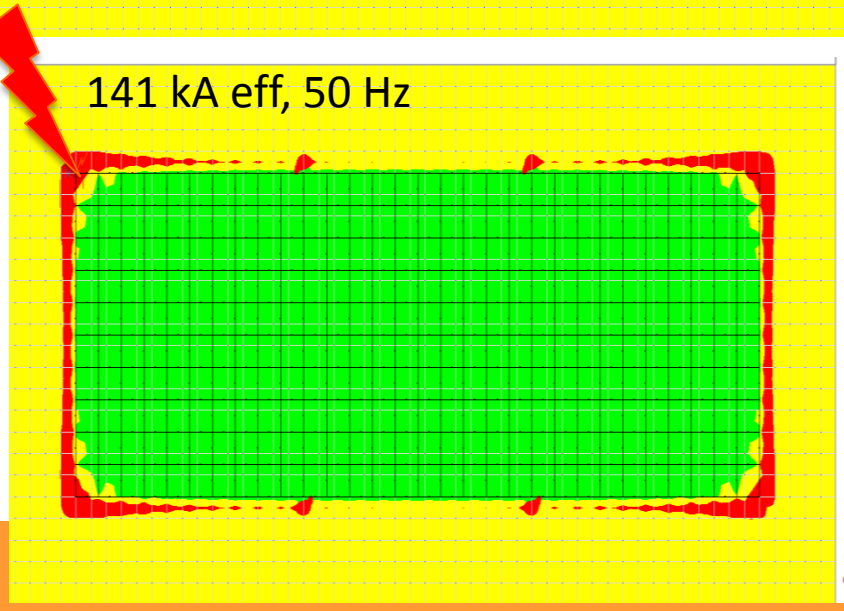
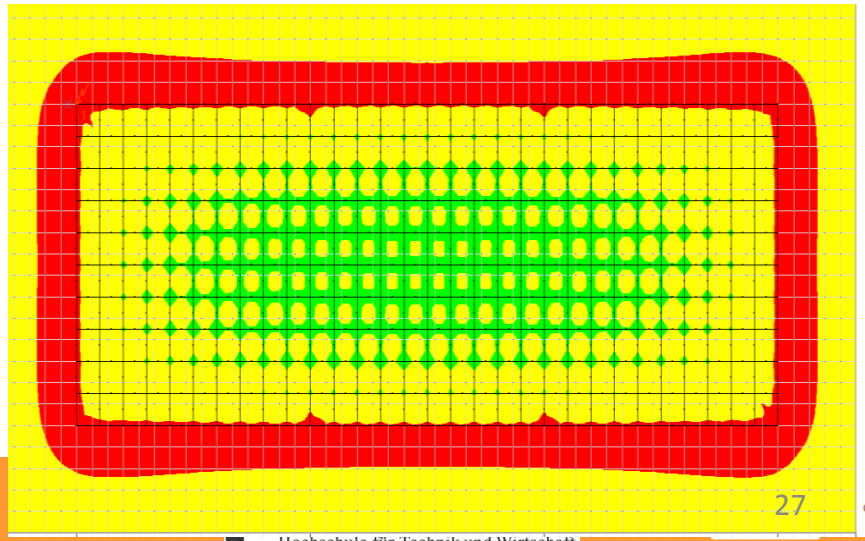
Bereiche sicherer (gelb) und gefährlicher (rot) Schrittspannung für LPS – Schutzklasse I.
Zulässige Grenze der Schrittspannung : 25 kV für 10/350



Copyright OBO BETTERMANN 2015

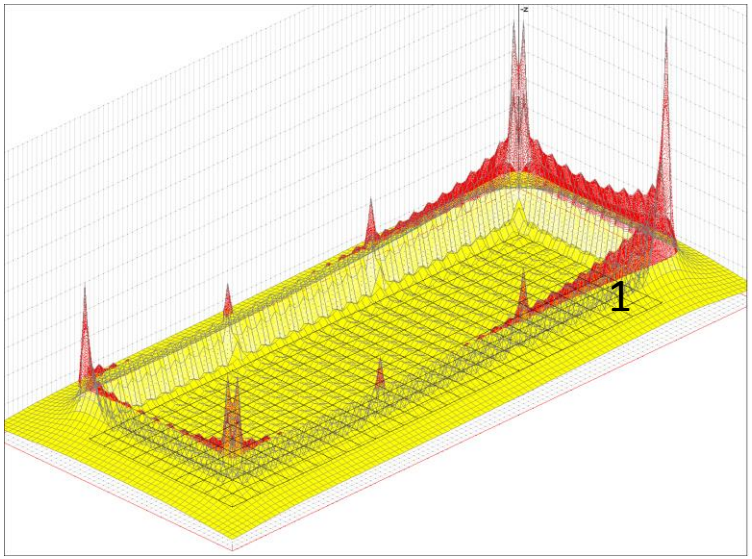
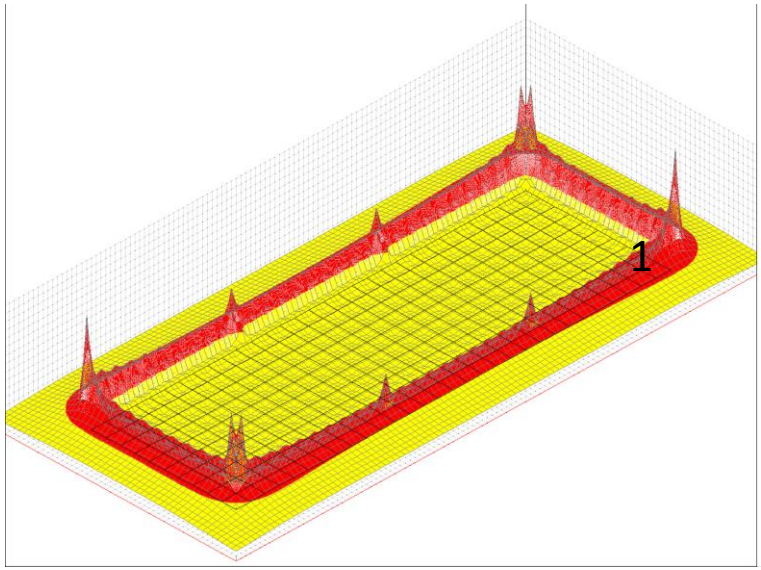
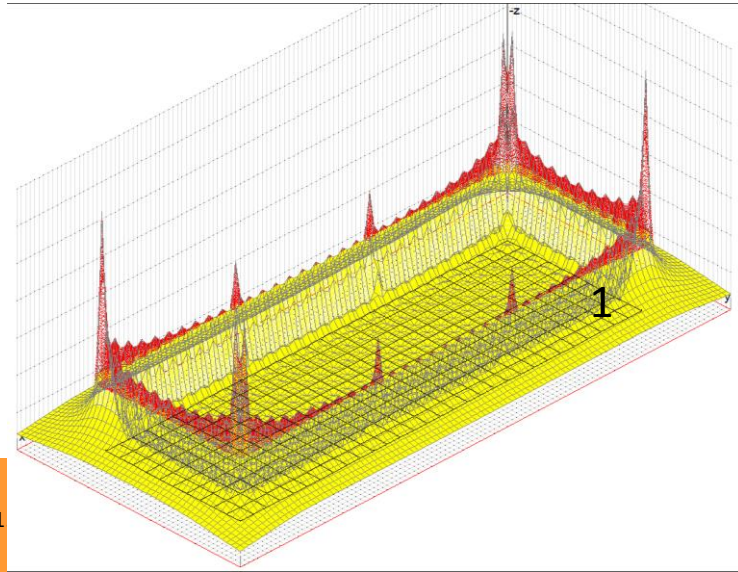
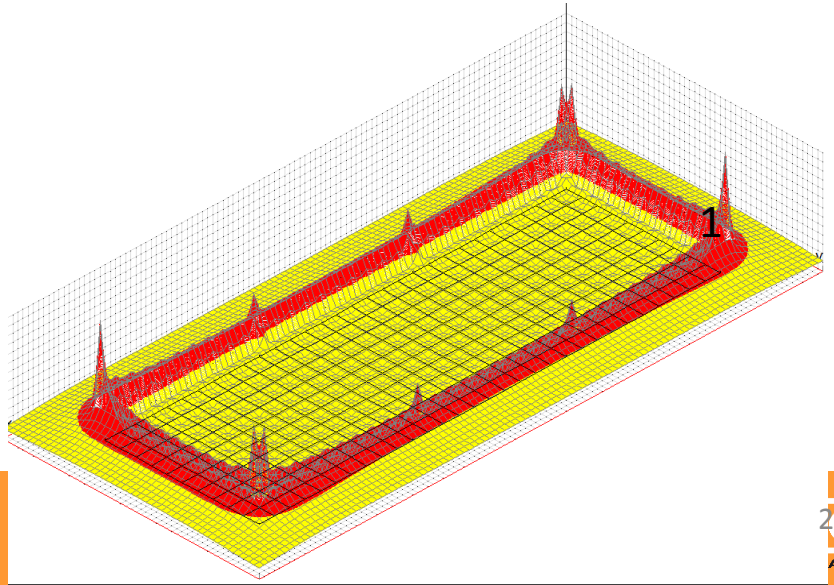
Vergleich sicherer (gelb) und gefährlicher (rot) Schrittspannung

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

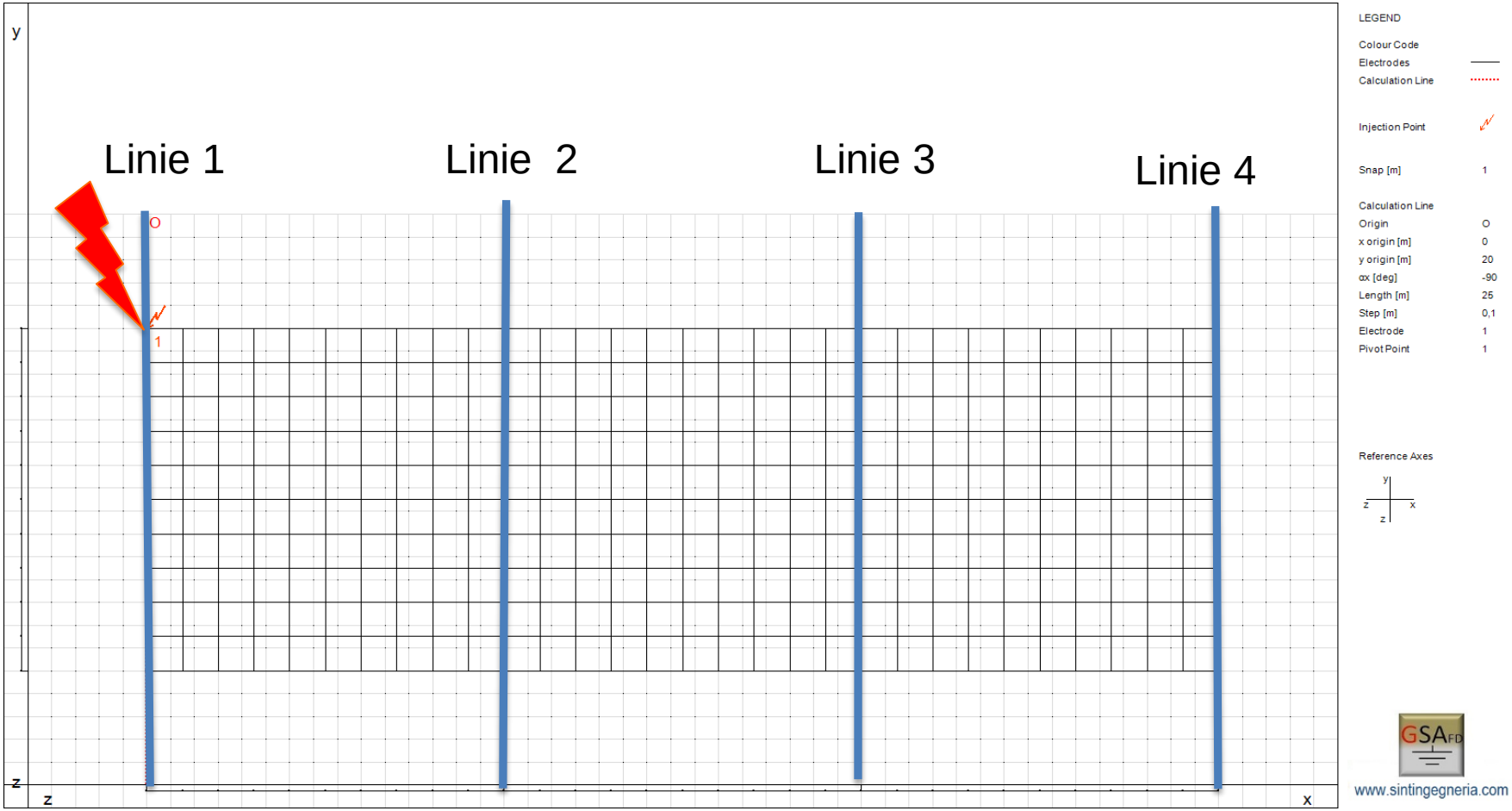
	100 Ohmm	500 Ohmm
10/350		
50 Hz		

3-D Schrittspannung

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

	100 Ohmm	500 Ohmm
10/350		
50 Hz		

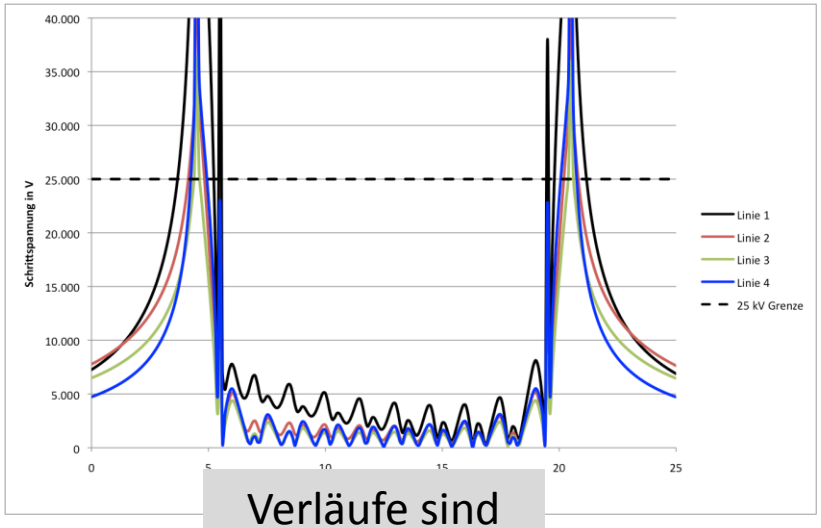
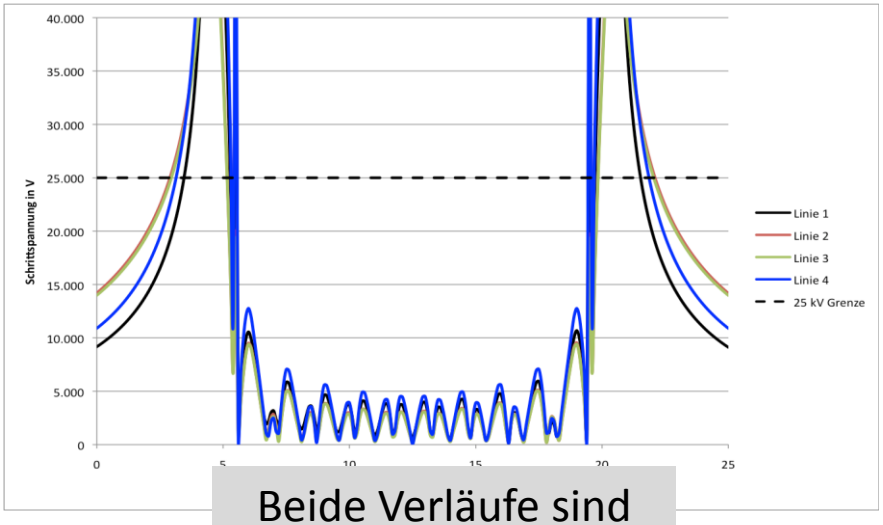
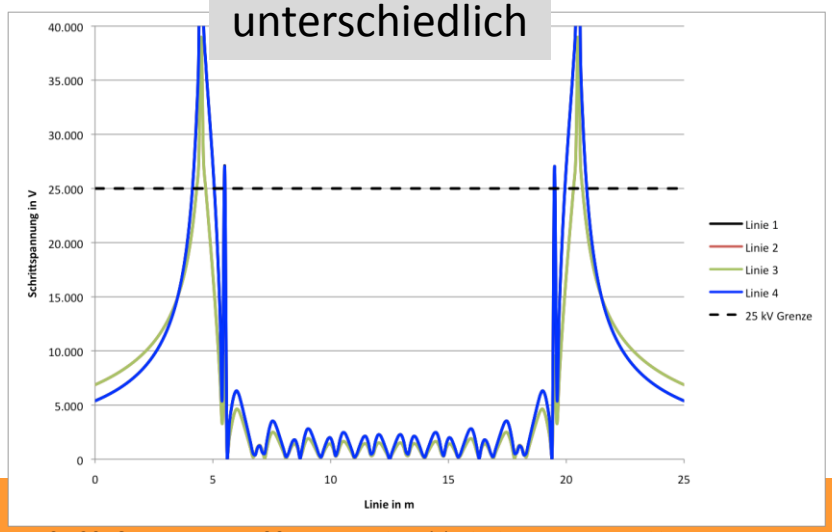
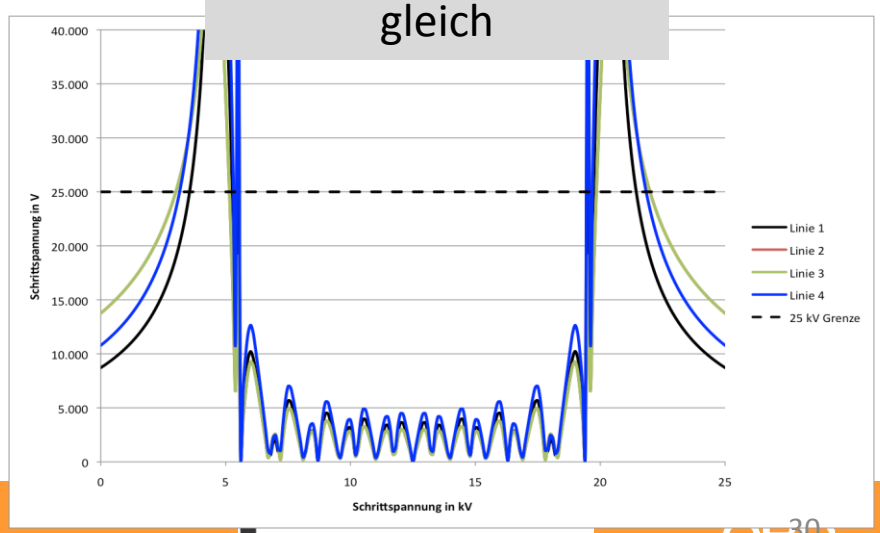
Analyse der Schrittspannungen auf 4 vertikalen Linien



Copyright OBO BETTERMANN 2015

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		

Verläufe sind unterschiedlich

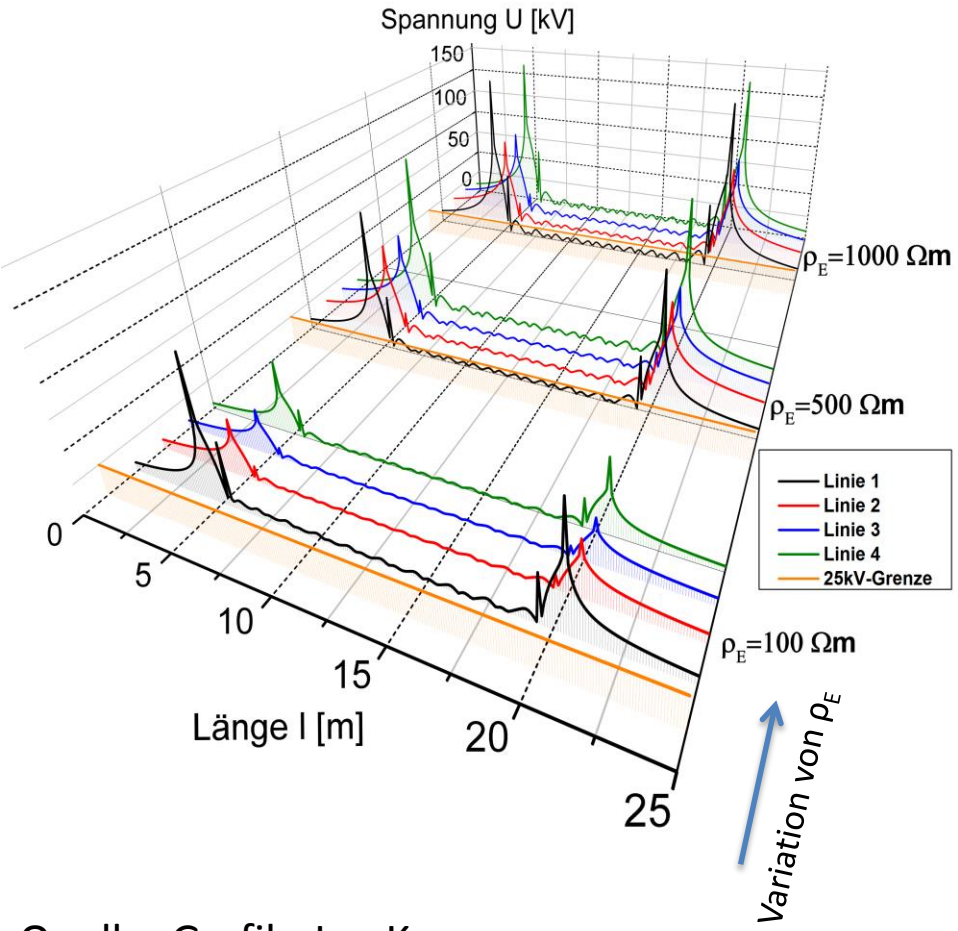
Beide Verläufe sind gleich

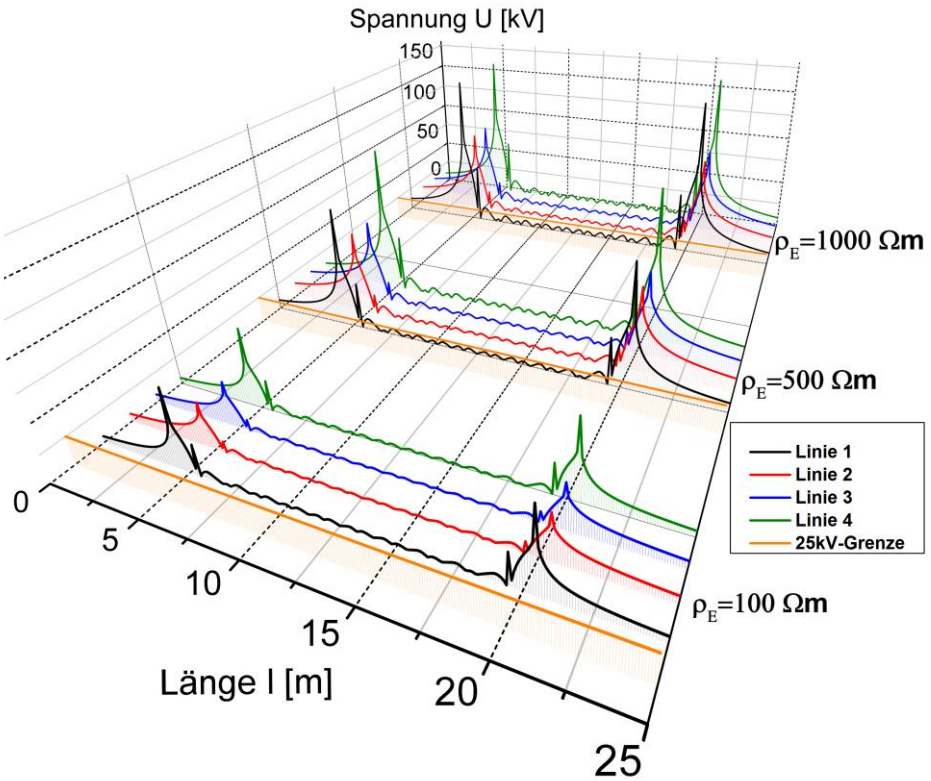
Copyright OBO BETTERMANN 2015

Schrittspannung Linien 1-4

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

10/350	50 Hz



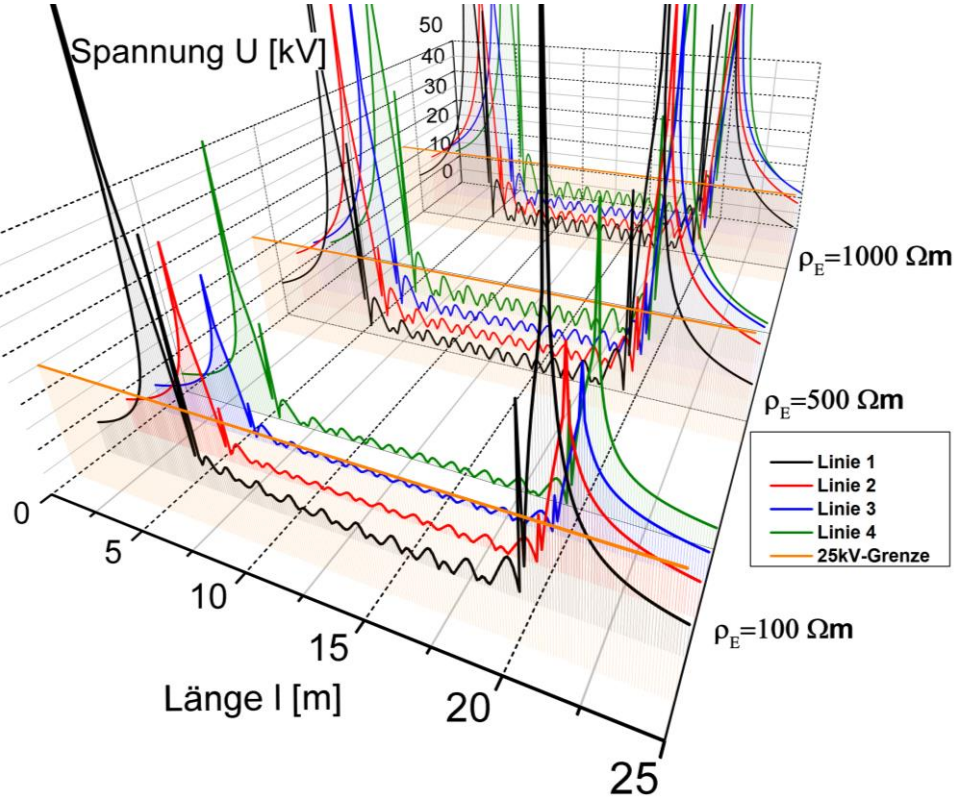


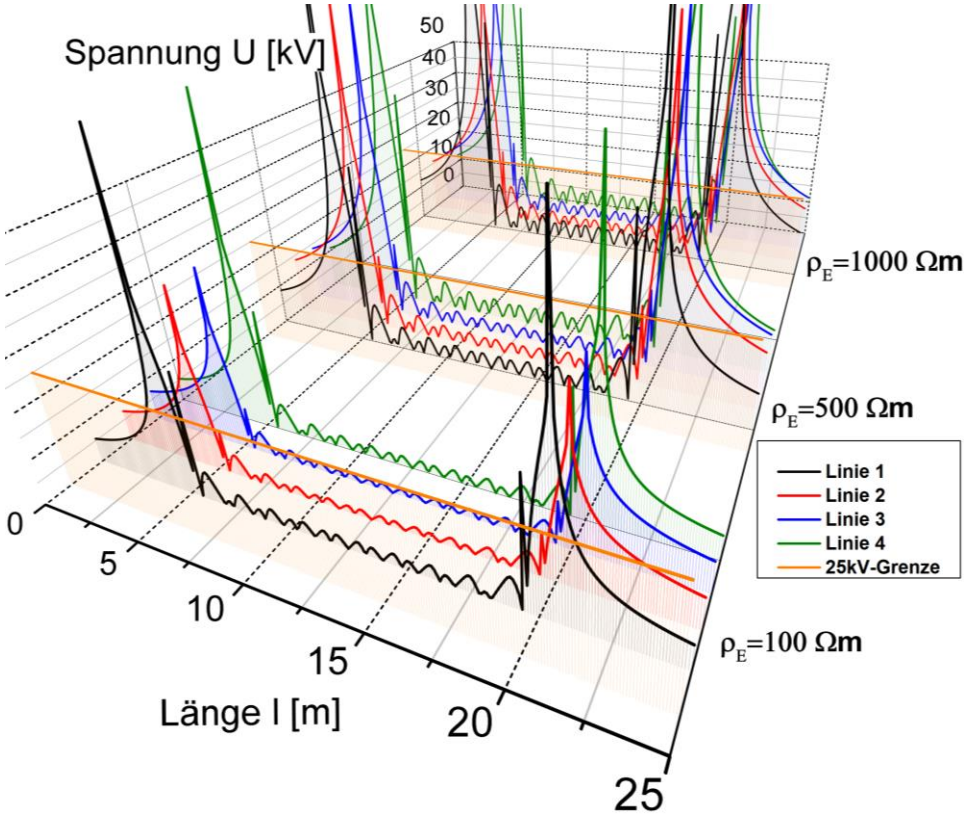
Quelle: Grafik: Jan Kemper

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Schrittspannung Linien 1-4 vergrößerte Darstellung LPS-Klasse 1 200 kA 10/350 oder 200 kA 50 Hz

10/350	50 Hz

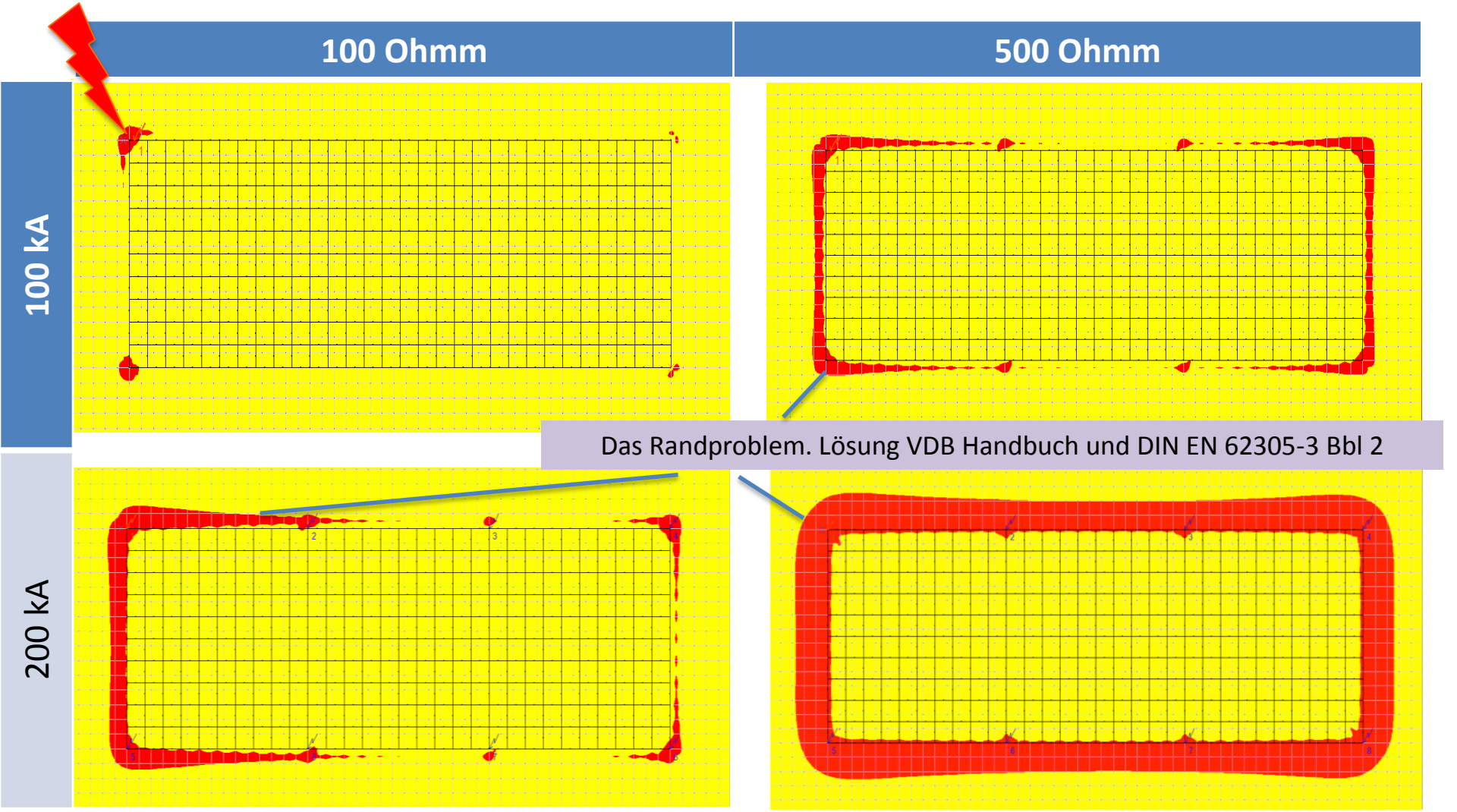




Quelle: Grafik: Jan Kemper

Copyright OBO BETTERMANN 2015

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



Copyright OBO BETTERMANN 2015

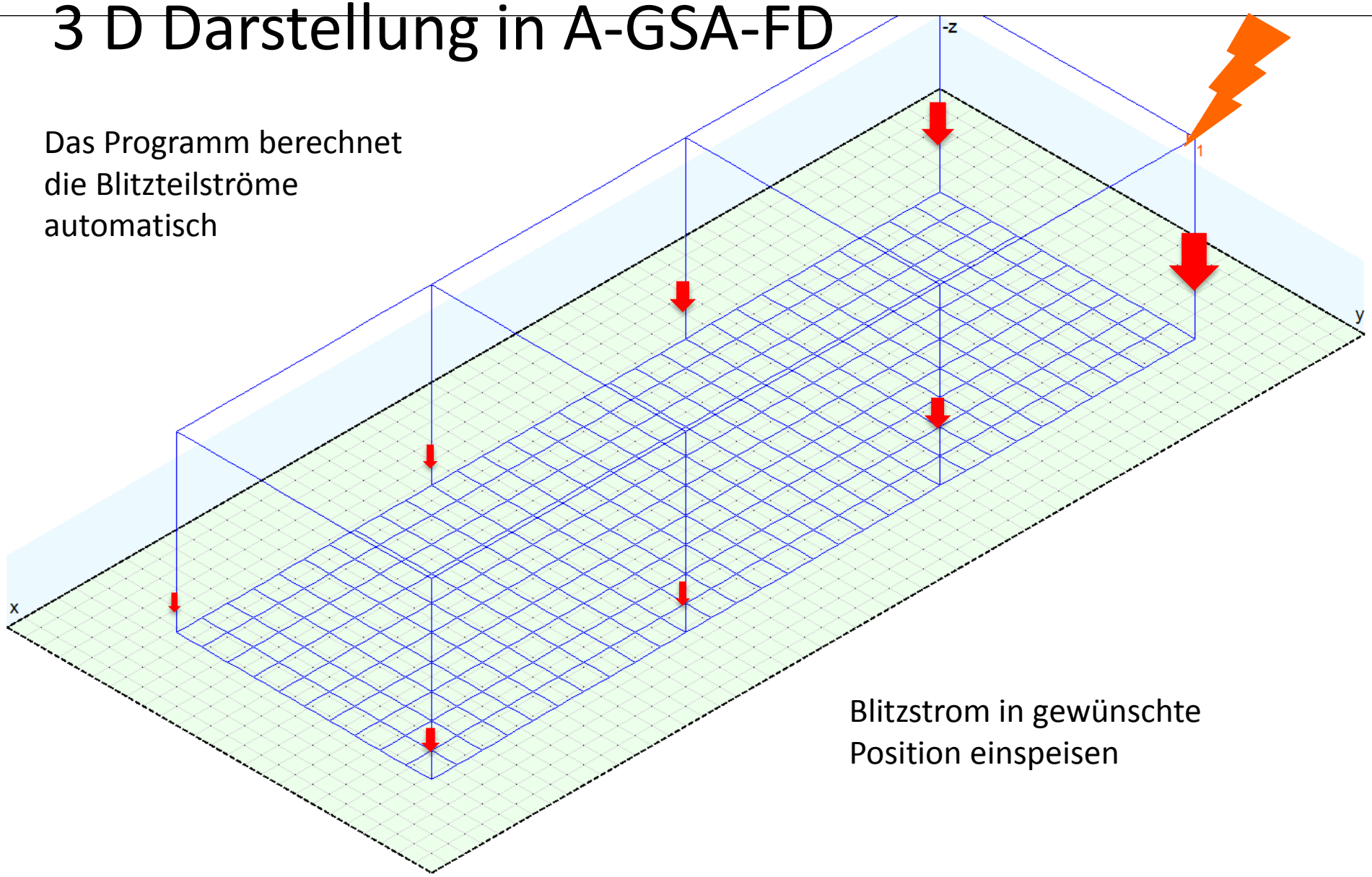
Neu:
Lösung für Gebäude mit Ableitungen und Erder

- 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 Netzwerkanalyse-programm (Wanderwellen- und Kettenleitermodelle) entfällt dann.

Copyright OBO BETTERMANN 2015

3 D Darstellung in A-GSA-FD

Das Programm berechnet
die Blitzteilströme
automatisch



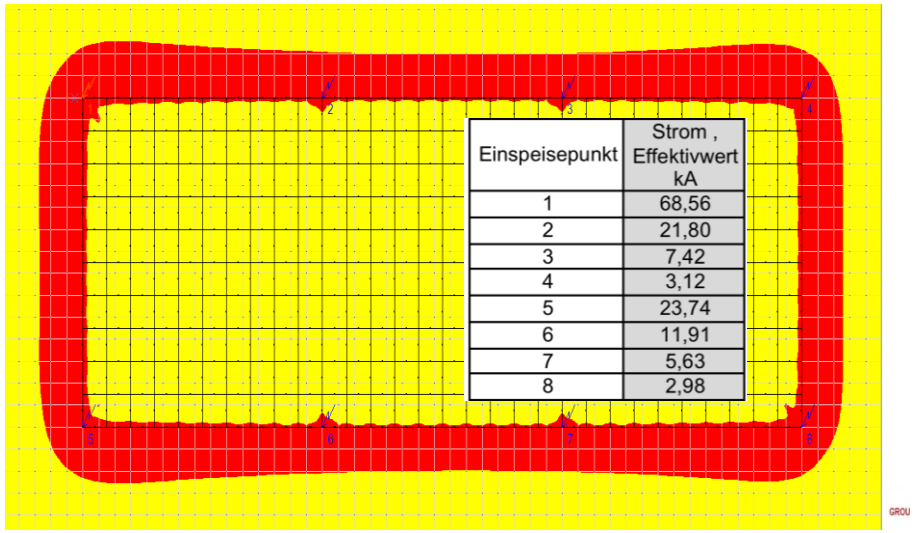
Blitzstrom in gewünschte
Position einspeisen

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Vergleich sicherer (gelb) und gefährlicher (rot) Schrittspannung

Vergleich beider Lösungen für 500 Ohmm

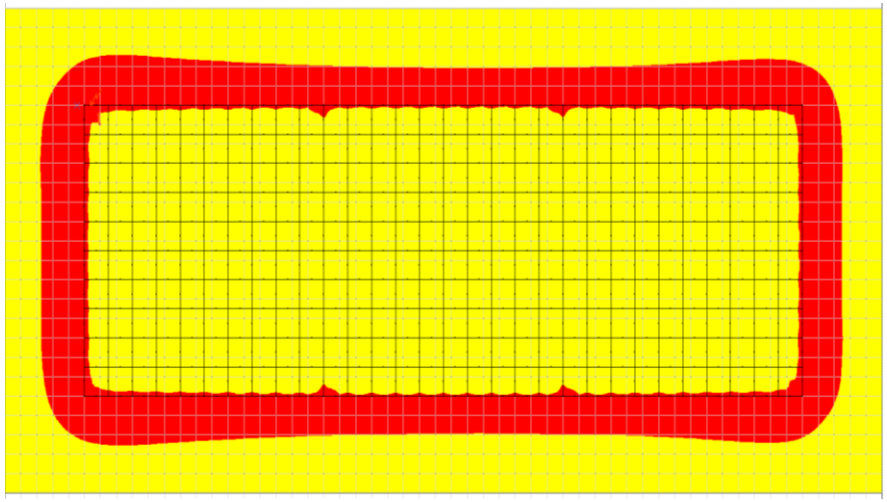
10/350 GSA_FD



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

Lösung GSA_FD
mit vorheriger Berechnung der Stromaufteilung mit Wanderwellen-programm **nach Meppelink** (Lösung der Maxwellschen Gleichungen im Erdsystem)

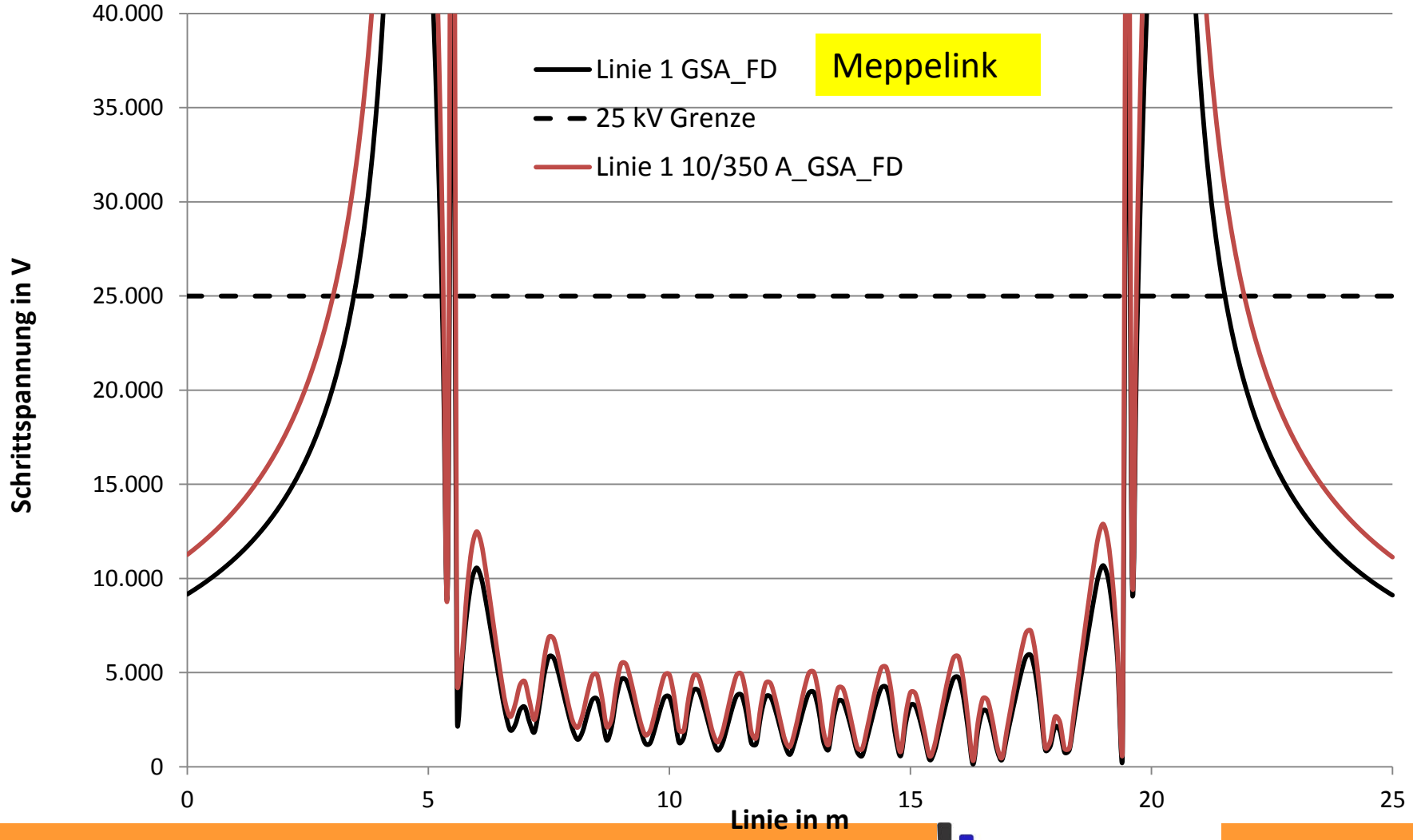
10/30 A_GSA_FD



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

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Schrittspannung Linie 1
Vergleich beider Lösungen

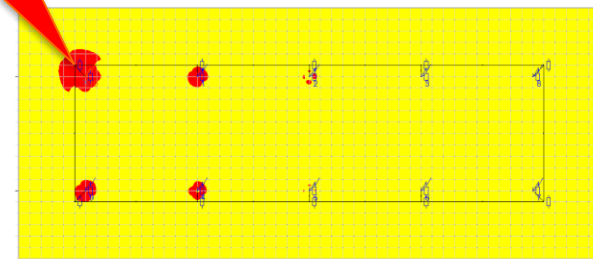
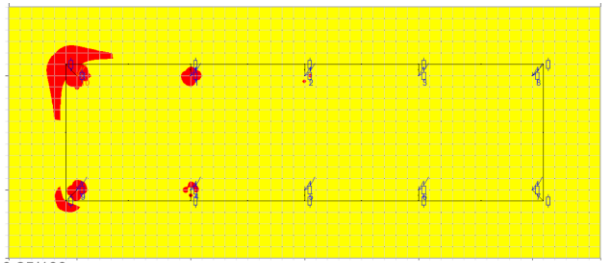
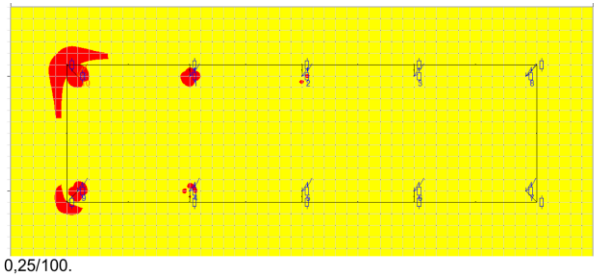
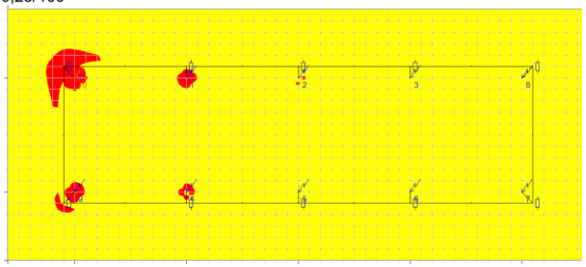
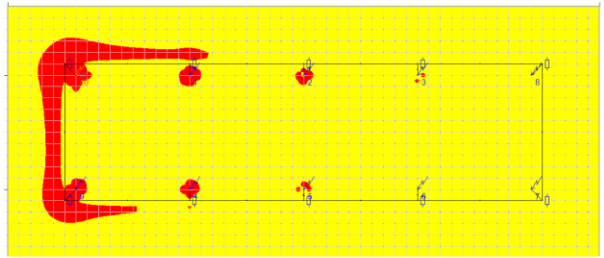
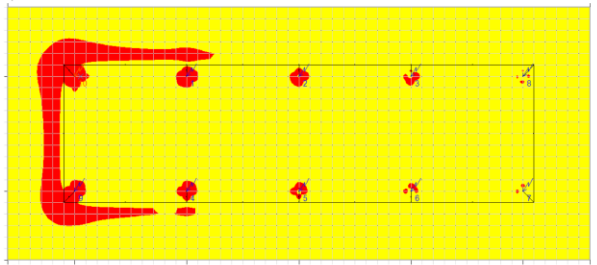
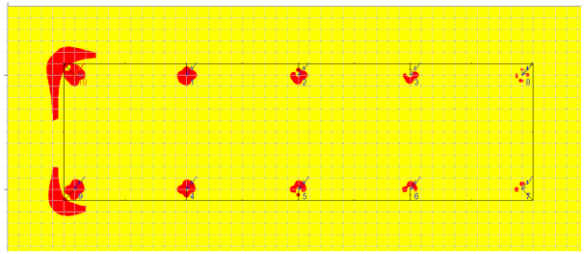
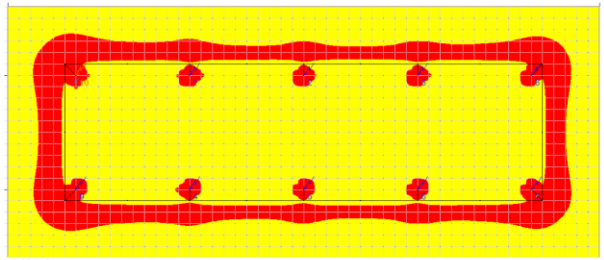
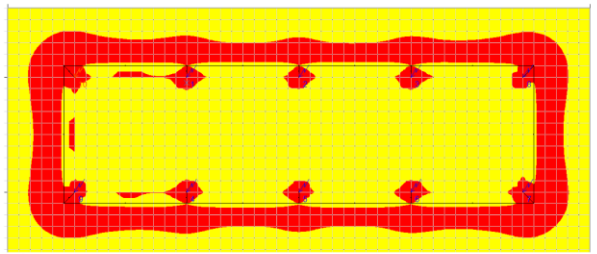
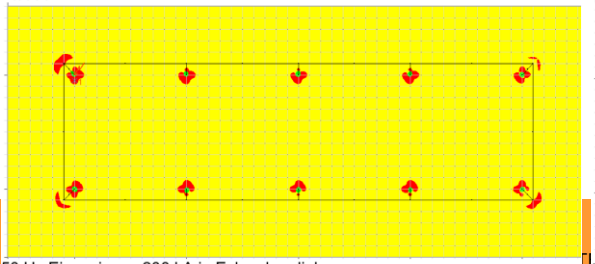
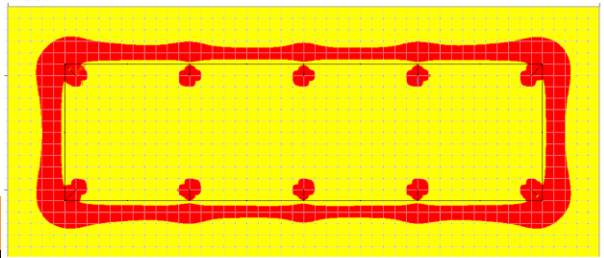
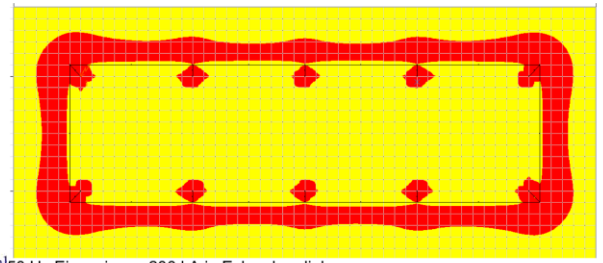


Copyright OBO BETTERMANN 2015

Vergleich mit einer normativen Lösung mit 10 Ableitungen

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Gebäude nach IEC 62305 mit 10 Tiefenerdern Safe Area Vergleich Klasse 1. U_{SP}=25 kV für 10/350

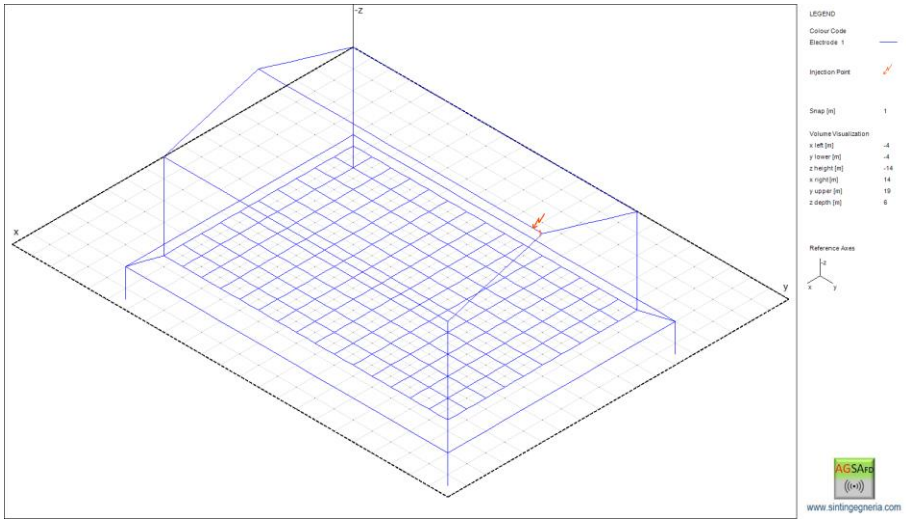
	100 Ohmm	500 Ohmm	1000 Ohmm
0,25/100	 0,25/100	 0,25/100.	 0,25/100.
1/200	 1/200	 1/200	 1/200
10/350	 10/350	 10/350	 10/350
50 Hz	 50 Hz Einspeisung 200 kA in Ecke oben links.	 50 Hz Einspeisung 200 kA in Ecke oben links.	 50 Hz Einspeisung 200 kA in Ecke oben links.

Weitere Berechnungsmöglichkeiten

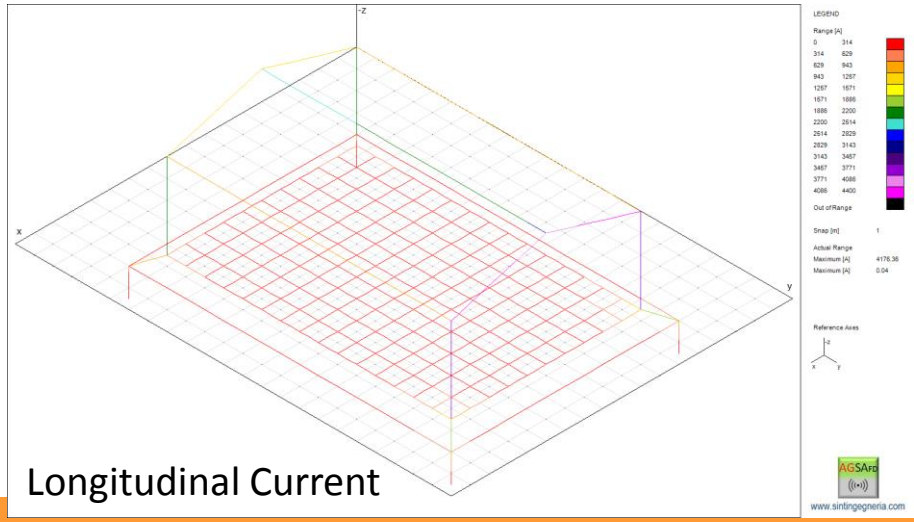
- Elektrische und magnetische Felder
- Induzierte Spannungen
- Kopplungen von Hochspannungsleitungen in Pipeleines
- ….

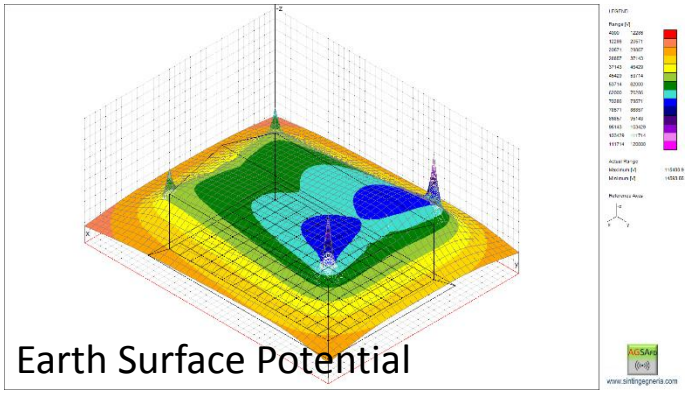
Copyright OBO BETTERMANN 2015

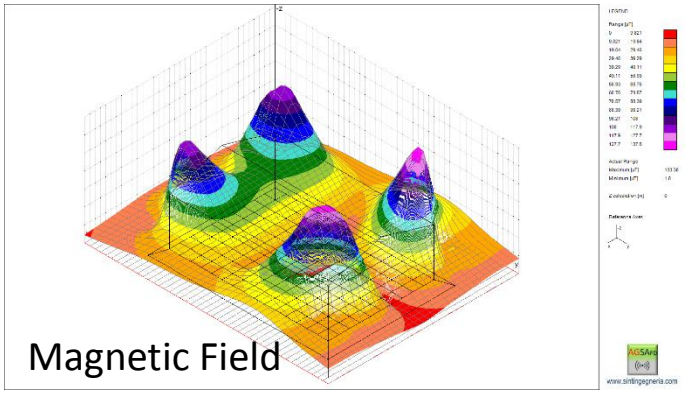
LIGHTNING EFFECTS WITH XGSA_FD

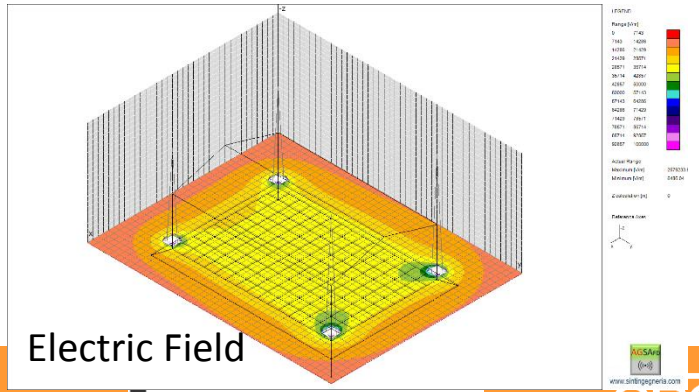


Injected current: 10 kA – 25 kHz







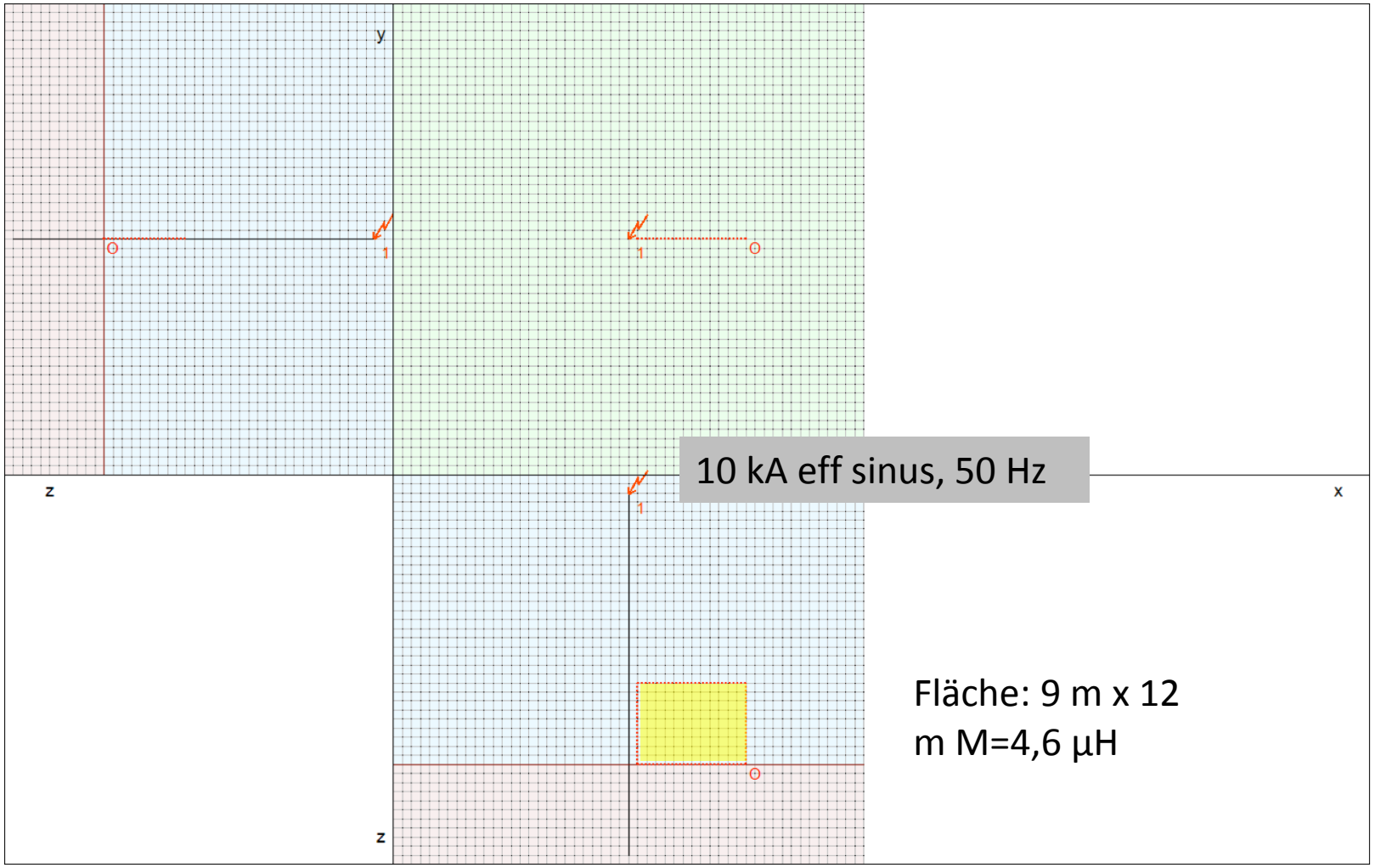


Copyright OBO BETTERMANN 2015

Fachhochschule Südwestfalen
Hochschule für Technik und Wirtschaft
University of Applied Sciences

OBO BETTERMANN

Neue Features: Induzierte Spannung



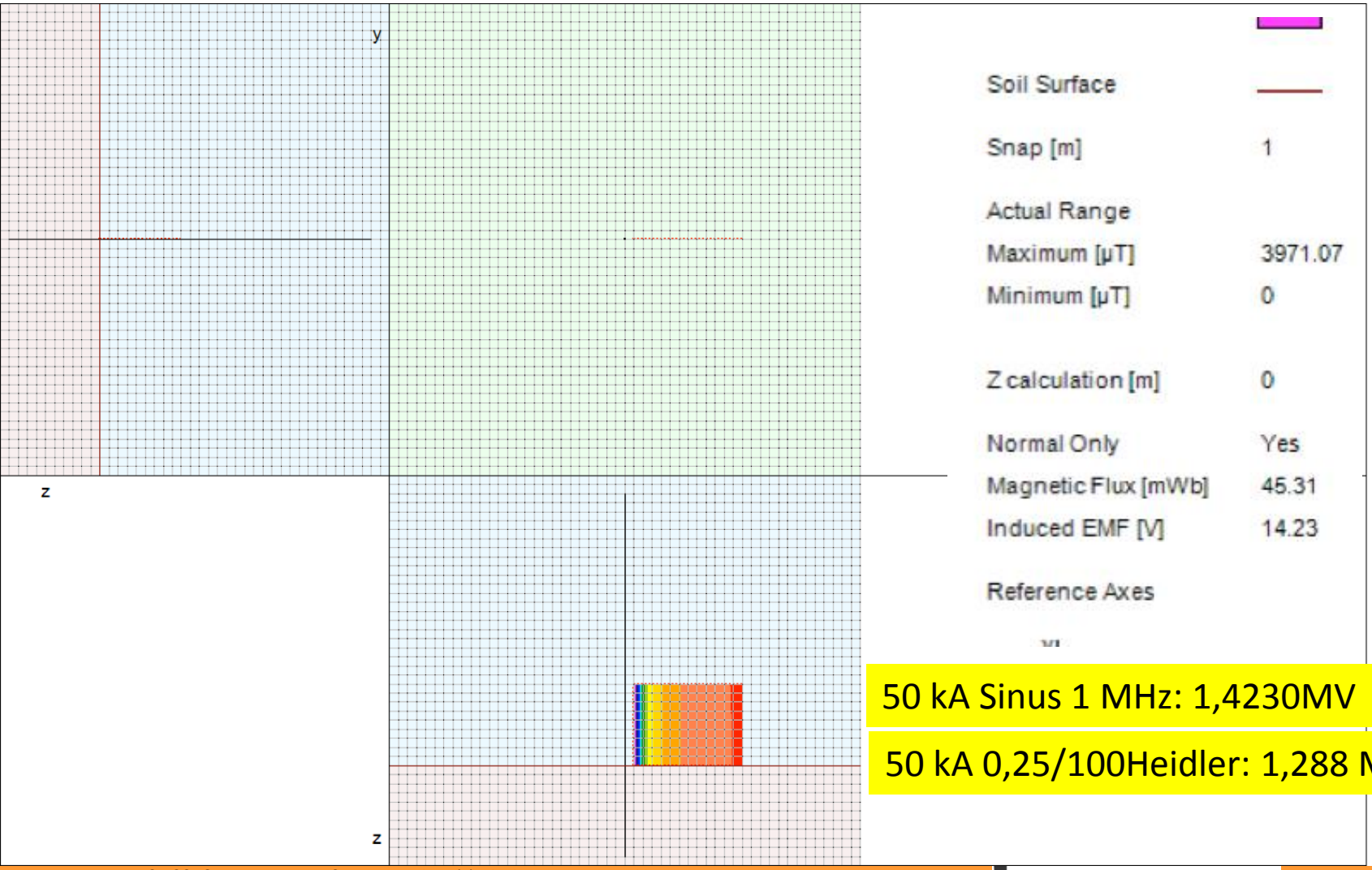
www.xgslab.com

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Fachhochschule Südwestfalen
Hochschule für Technik und Wirtschaft
University of Applied Sciences

OBO BETTERMANN

Berechnung induzierter Spannung



50 kA Sinus 1 MHz: 1,4230MV

50 kA 0,25/100Heidler: 1,288 MV

www.xgslab.com

Copyright OBO BETTERMANN 2015

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

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Reserven für spezielle Fragen

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Vergleichende Rechnung induzierte Spannung mit GSA

- GSA Simulation 50 Hz : 14.23 Volt für 10 kA eff 50 Hz oder 14,23*1,41=20,064Volt peak für 14,1 kA peak
- GSA Faktor: 20,064V/14,1kA=1,423$V_{peak50\ Hz}/kA_{peak50Hz}$
- Umrechnung mit GSA Faktor auf 50 kA 1 MHZ:

1,423Vpeak*50kA*1,423$V_{peak50\ Hz}/kA_{peak50Hz}$*$10^6$/50=1,423MV

Berechnung mit M-Wert von 4,6 µH

Für 1 MHz Sinus:

U= $M*(di/dt)_{max}$=4,6*10^{-6}Vs/A*314*10^3A/10^{-6}s=1,444MV

Für 0,25/100 Heidler Funktion

UU= $M*(di/dt)_{max}$=4,6*10^{-6}Vs/A*280*10^3A/10^{-6}s=1,288MV

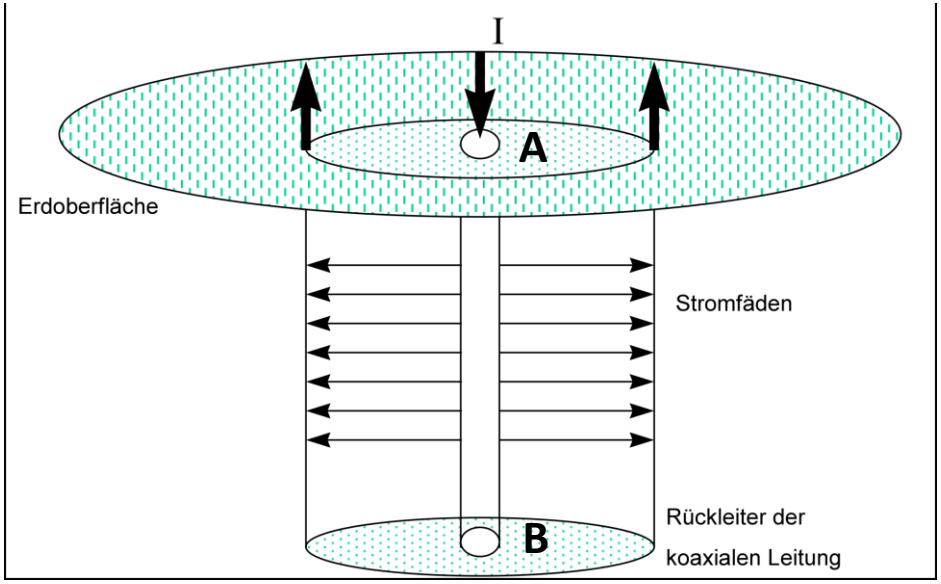
Copyright OBO BETTERMANN 2015

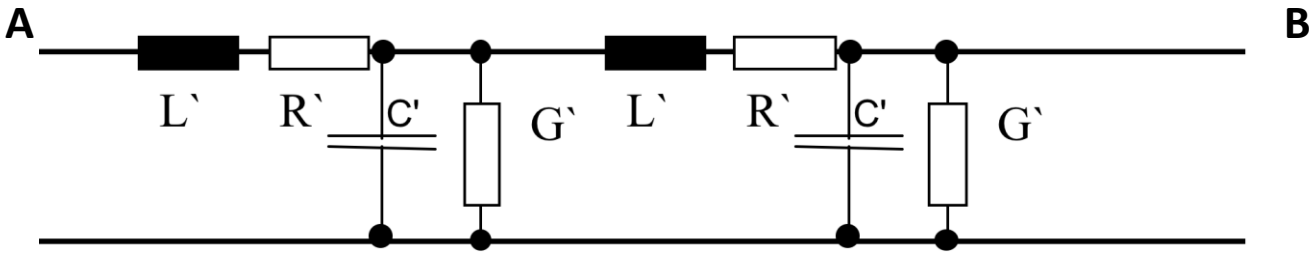
Vergleich der Ergebnisse

	GSA Simulation	Analytische Berechnung $U_{ind,max}=M*di/dt_{max}$	
	Für 50 kA peak Sinus	Für 1 MHz Sinus	Für Heidler 0,25/100
di/dt_{max}	311	311	280
$U_{ind,max}$	1,423 MV	1,444	1,288
M		4,6 µH	
Korrekturfaktor		1,423/1,288=1,10	

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Modell eines Vertikalerders





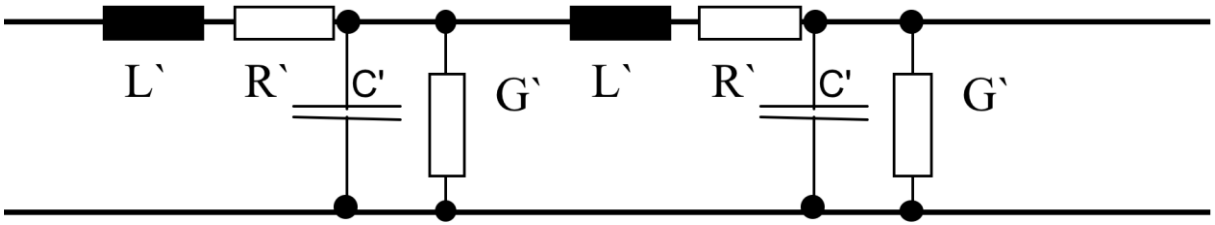
Copyright OBO BETTERMANN 2015

Exakte Berechnung einer Leitung im Frequenzbereich

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

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

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



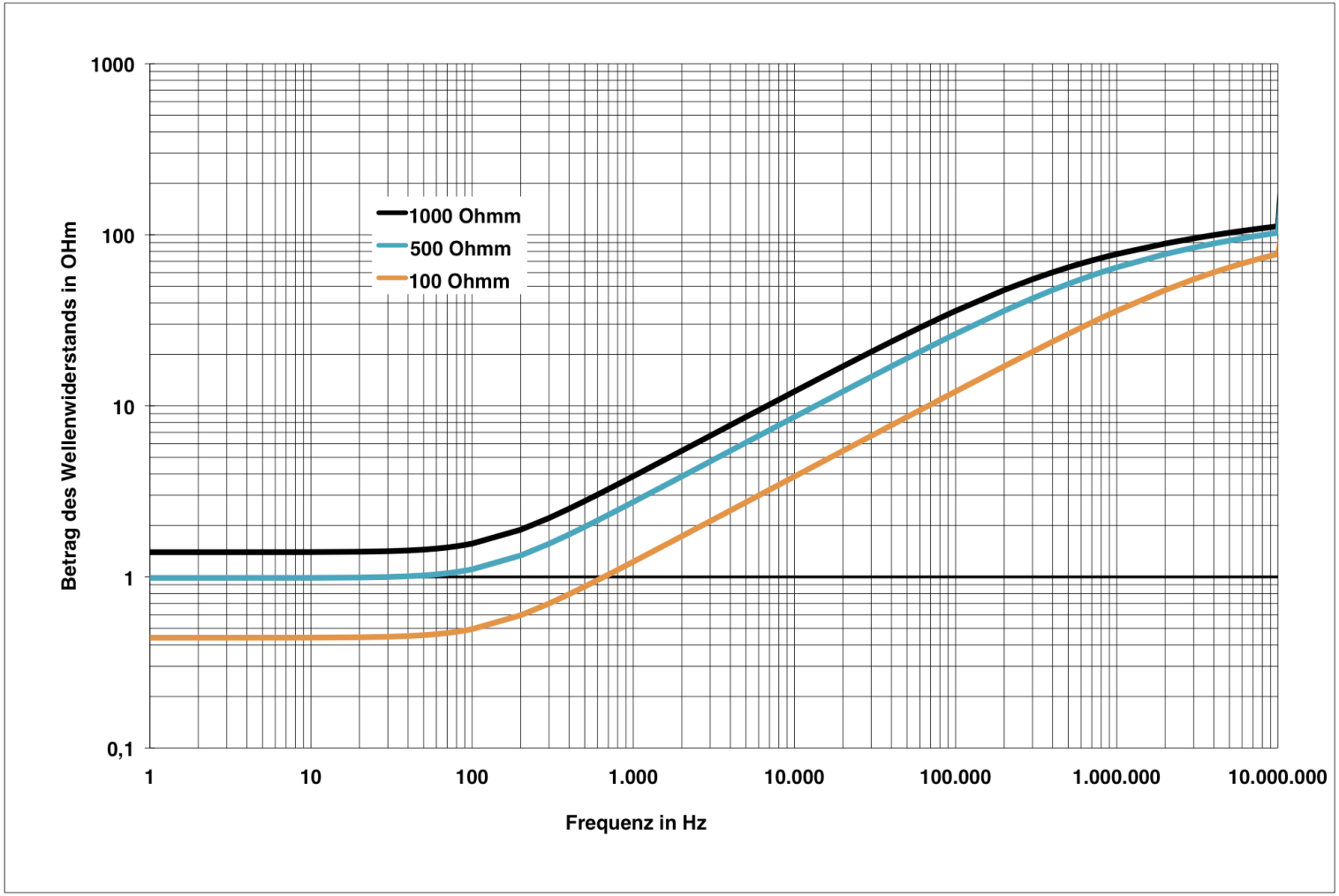
$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_{r\infty}\varepsilon_0 + \sqrt{\frac{2\varepsilon_{r\infty}\varepsilon_0}{\rho_E\omega}}$$

$\varepsilon_{r\infty}$:Grenze der DielektrizitŠtszahl bei

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

Copyright OBO BETTERMANN 2015

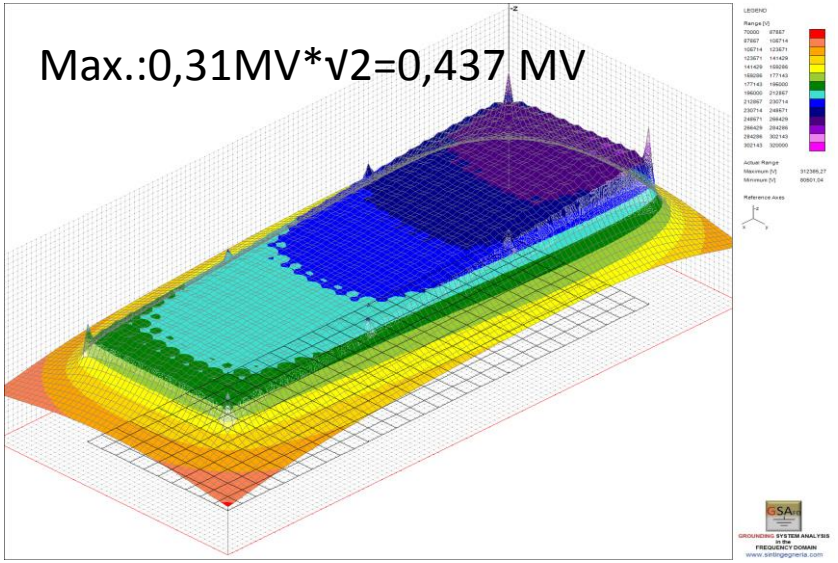
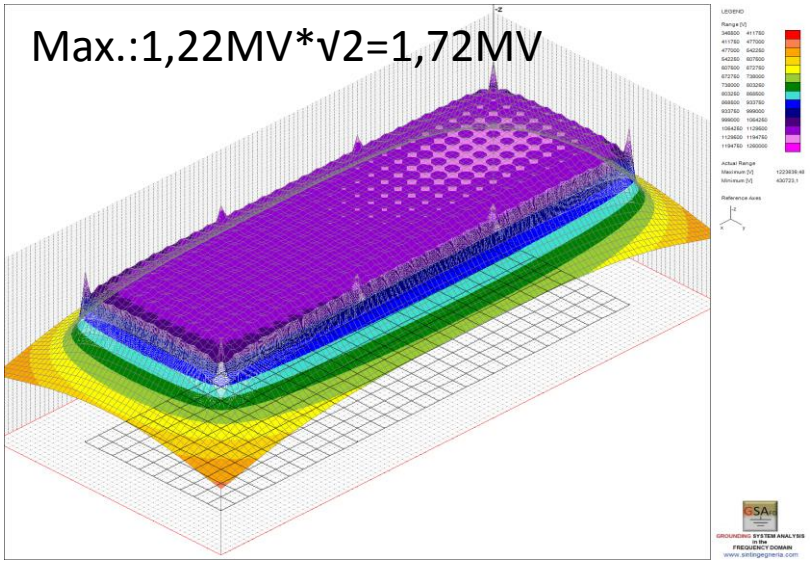
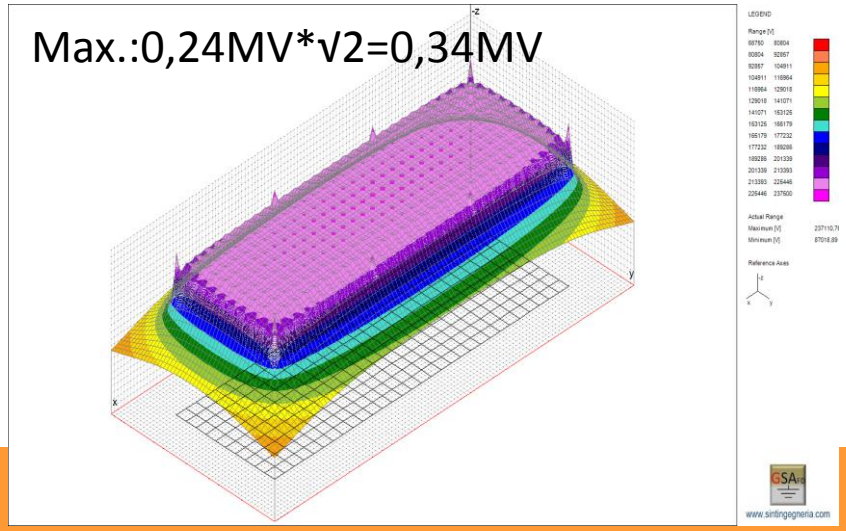
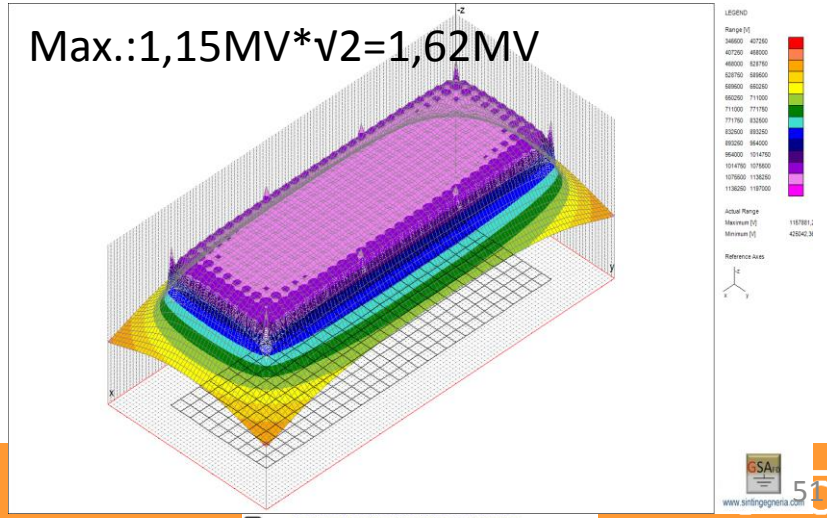
Wellenwiderstand Vertikalerder:
Stange 20 mm Durchmesser. Durchmesser des Außenradius des Zylinders für die R bzw. G-Berechnung: 9m



Copyright OBO BETTERMANN 2015

Erdoberflächenpotential

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

	100 Ohmm	500 Ohmm
10/350		
50 Hz		

Hochschule für Technik und Wirtschaft
University of Applied Sciences
BETTERMANN

Berechnungshintergrund l_{eff} für Horizontalerder

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

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

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

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

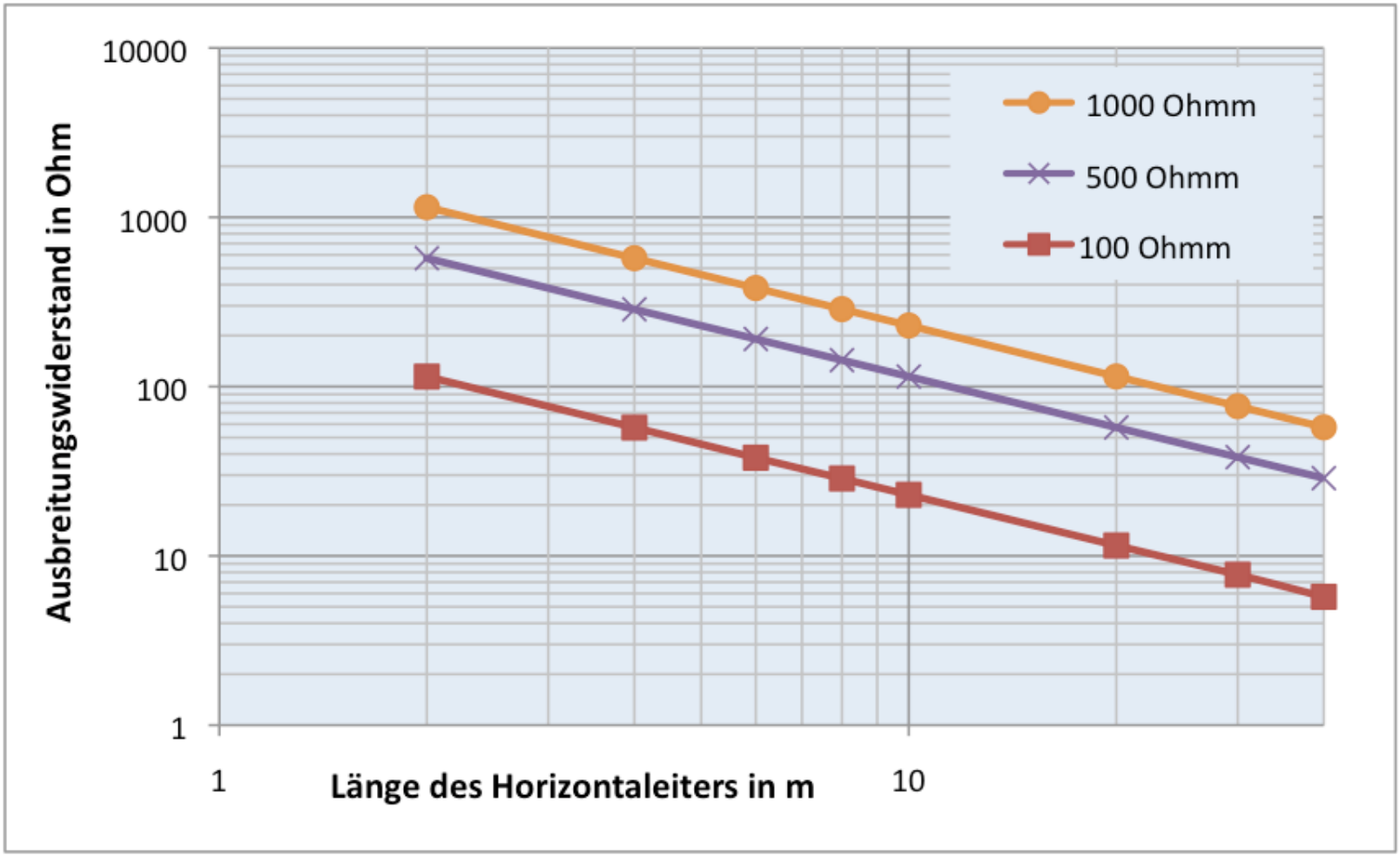
$$v = \sqrt{\frac{\pi}{\mu_0}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_E}{T_1}}$$

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

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

Copyright OBO BETTERMANN 2015

Ausbreitungswiderstand eines Bandleiters 30 mm x 5 mm in 0,5 m Tiefe



Copyright OBO BETTERMANN 2015