

Transient Spannungsbeanspruchung kabelgebundener lichttechnischer Anlagen im Außenbereich

Masterarbeit von Christian Niederauer
(Abschluss am 20. März 2014)

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz

Kooperation

- Institut für Hochspannung und Systemmanagement, TU Graz
- Lichttechnische Gesellschaft Österreichs (LTG)
- Durchgeführt von:
 - Christian Niederauer
- Betreuung der Masterarbeit:
 - Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack
 - Ing. Robert Mark
 - Mitglieder des Arbeitskreises „Licht im Verkehrsraum – Die Betreiberplattform“

Ing. Robert Mark

- Leiter der Abteilung Licht- u. Energiedienstleistungen Energie Graz
- Anlagenverantwortlicher Öffentl. Beleuchtungsanlage Stadt Graz
- Betriebsführung, Contracting, Licht Gemeinden Planung, Errichtung
- Vorstandsmitglied der LTG
- Leiter des Arbeitskreises: Licht im Verkehrsraum – Die Betreiberplattform

ENERGIE GRAZ



Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack

- Universitätsprofessor für Hochspannungstechnik
- Fachbereich Überspannungen und Blitzschutz
- Fachbereich Numerische Berechnungen transienter Spannungen
- Vorsitzender des TKBL (ÖVE), Mitarbeiter internationale Gremien



Motivation und Ziele

- „*Transiente Spannungsbeanspruchung kabelgebundener lichttechnischer Anlagen im Außenbereich*“
- Technologiewende im Bereich der öffentlichen Beleuchtung
 - LED Systeme
 - Elektronische Betriebsmittel
- Vermehrtes Auftreten von Störungen/Ausfällen
 - Möglicher Zusammenhang mit lokaler Gewitteraktivität
- Untersuchung transienter Spannungsbeanspruchung durch Blitzschlag
 - Anlagenanforderungen
 - Betriebssicherheit
 - Schadensminimierung

Übersicht

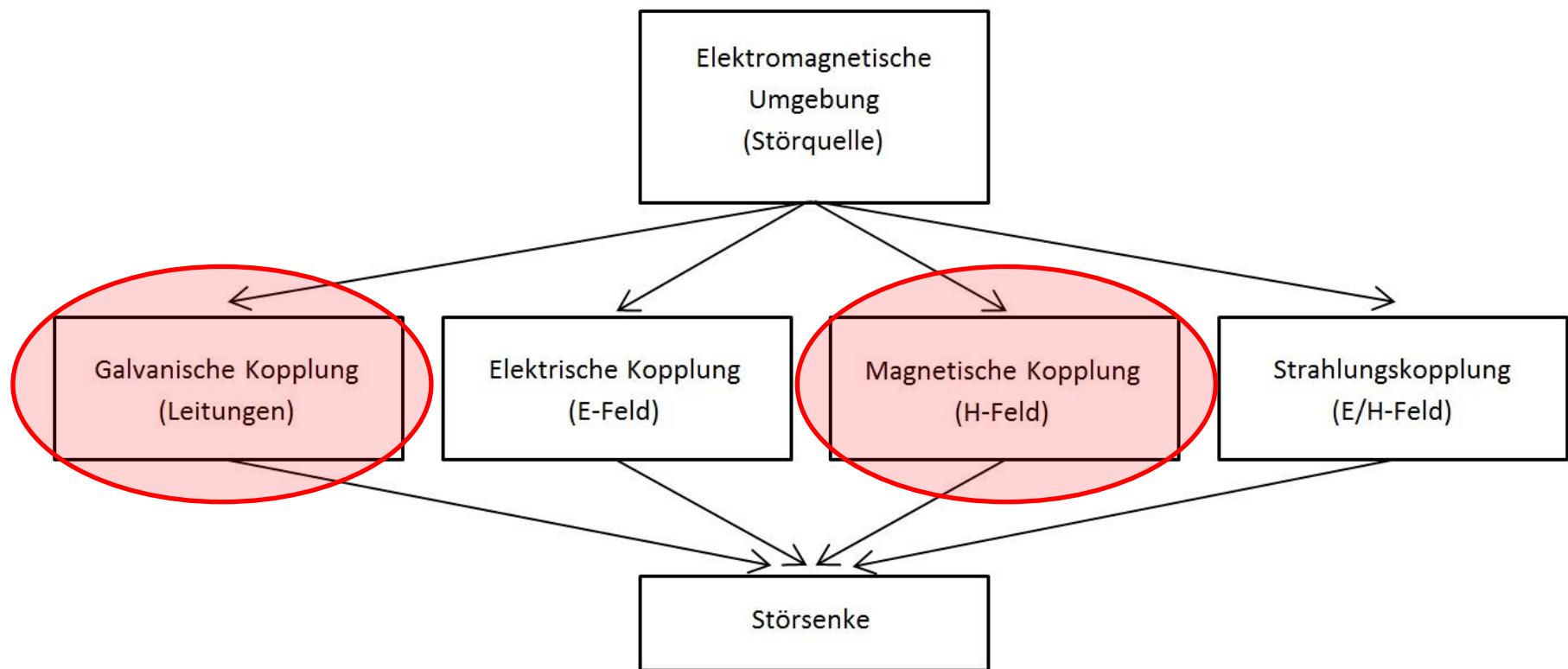
- Ermittlung der Ausgangssituation und Datenerhebung
- Elektromagnetische Kopplungsmechanismen
- Bestimmung wesentlicher Einflussfaktoren auf transiente Überspannungen bei Blitzschlag
- Induktive Kopplung
 - Kunststoffmast
 - Stahl-, Aluminiummast
- Galvanische Kopplung
 - Blitzeinschlag in der Umgebung einer lichttechnischen Anlage
 - Direkteinschlag in einen elektrisch leitfähigen Lichtmast
- Zusammenfassung

Datenerhebung - Befragung von Anlagenbetreibern und Anlagenverantwortlichen

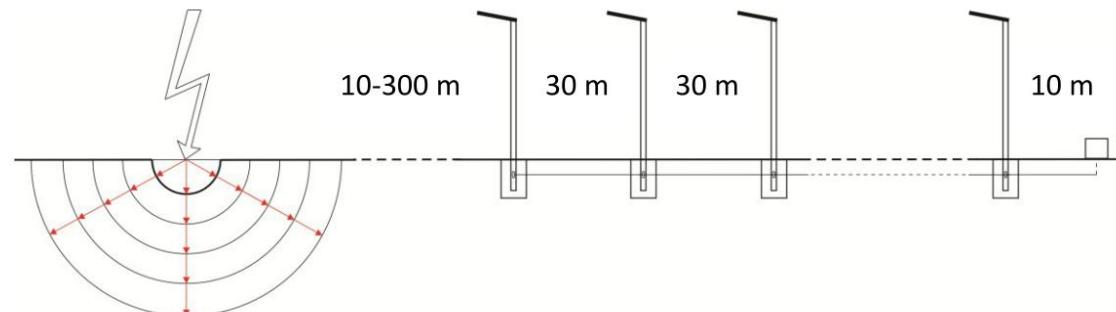
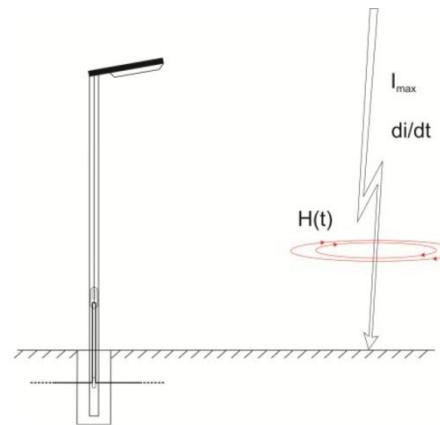
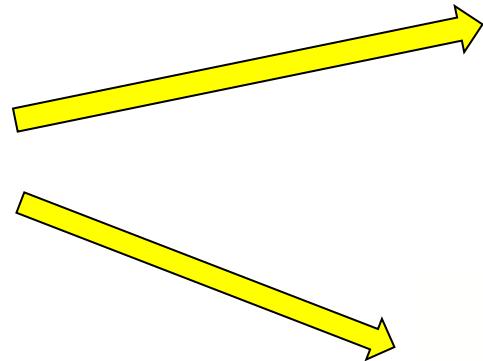
- Allgemeine Fragestellung
 - Schutz vor transienten Überspannungen ist ein wesentliches Thema (>60%)
 - Störfälle wurden bereits beobachtet (>50%)
 - Zusammenhang mit Gewitteraktivität kann weder bestätigt noch widerlegt werden
- Beschreibung einer verkabelten lichttechnischen Anlage
 - Gegenüberstellung von Anlagen bezüglich
 - Ausfallerscheinungen
 - Elektrotechnische Kriterien
 - Bauliche Aspekte
 - Datenerfassung
 - Datenblätter
 - Skizzen
 - Keine Untersuchung hinsichtlich transienter Überspannungen möglich
 - Unterschiedliche Begriffsdefinitionen (z.B. Anlage)
 - Verschiedene Anlagenarten
 - Datenmangel

Elektromagnetische Kopplungsmechanismen

Zwei Berechnungsschwerpunkte in der Masterarbeit



Reale Situation vs. Modellannahmen



- Installationen im Nahbereich
 - Rohrleitungen
 - Armierter Beton
- Nichthomogene Bodenschichten
- Kurvenformen von Blitzströmen können stark variieren (Scheitelwerte, Anstiegszeiten, etc.)
- Keine Installationen im Nahbereich
 - Anlage im „freien Feld“
- Homogener Boden bis in große Tiefen
- Blitzstromparameter und Kurvenformen laut ÖVE EN 62305-1

Blitzstromparameter gemäß EN 62305-1

Maximalwerte

Erster positiver Stoßstrom			LPL			
Stromparameter	Symbol	Einheit	I	II	III	IV
Scheitelwert	I	kA	200	150	100	
Zeitparameter	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$		10/350		
Erster negativer Stoßstrom			LPL			
Stromparameter	Symbol	Einheit	I	II	III	IV
Scheitelwert	I	kA	100	75	50	
Mittlere Steilheit	di/dt	$\text{kA}/\mu\text{s}$	100	75	50	
Zeitparameter	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$		1/200		
Folgestoßstrom			LPL			
Stromparameter	Symbol	Einheit	I	II	III	IV
Scheitelwert	I	kA	50	37,5	25	
Mittlere Steilheit	di/dt	$\text{kA}/\mu\text{s}$	200	150	100	
Zeitparameter	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$		0,25/100		



Induktive Kopplung

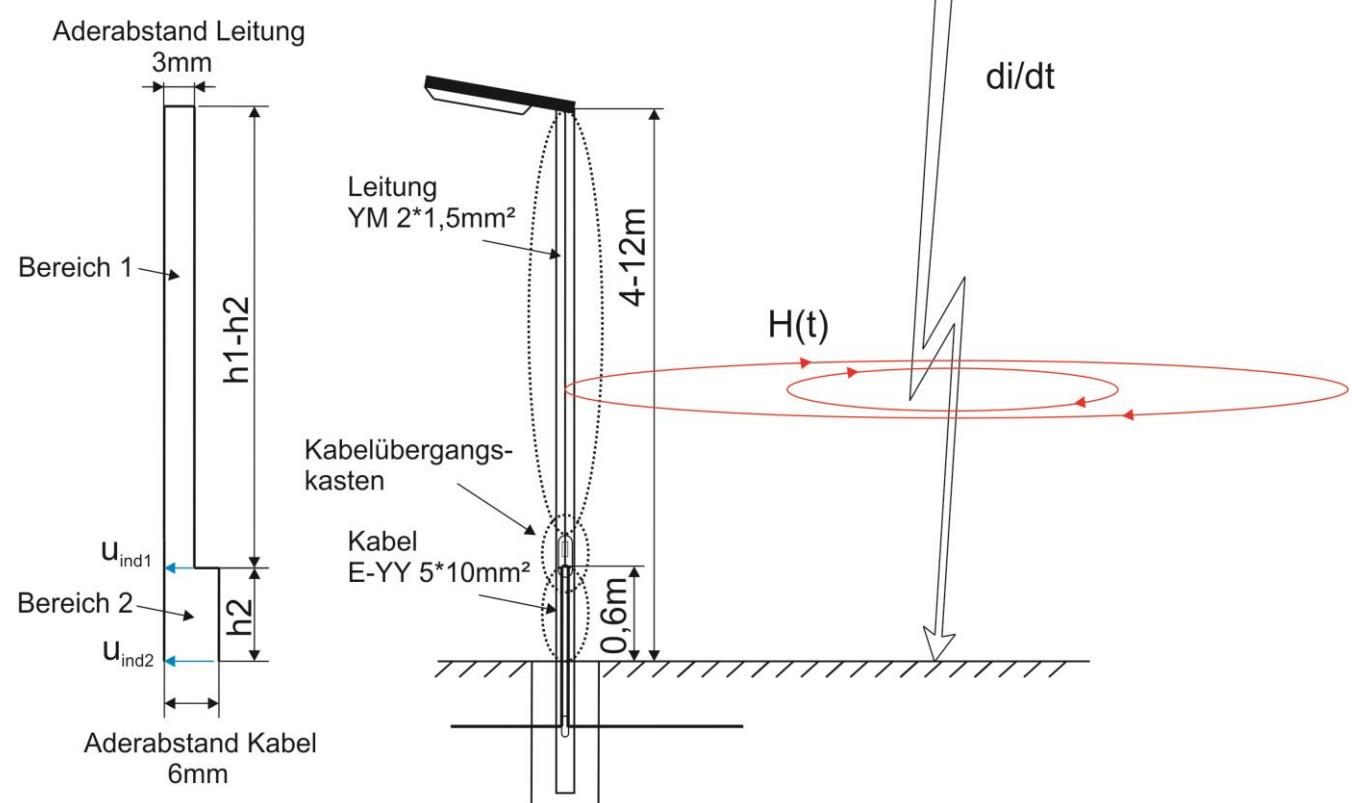
Induktive Kopplung – Energieversorgungsleitung des Masts

- Unterschiedliche Mastmaterialien
 - Kunststoff
 - Stahl
 - Aluminium

Bis zu einige 100 m gilt:

$$H(t) = \frac{i(t)}{2\pi s}$$

$$u_{ind} = -\frac{d\phi(t)}{dt}$$



Kunststoffmast

Szenario 1: Blitzkugelverfahren

Einschlagpunkt durch Erstblitz wird bestimmt durch:

- Blitzkugelradius r
- Abstand s zum Blitzkanal

Folgeblitz (größeres di/dt) → u_{ind}

Parametervariation:

- \hat{I} Erstblitz: 3 - 200 kA
- di/dt Folgeblitz(e): 12 - 280 kA/μs
- Mast-/Schleifenhöhe: 4 - 12 m
- Abstand zum Blitzkanal: 12 - 86 m

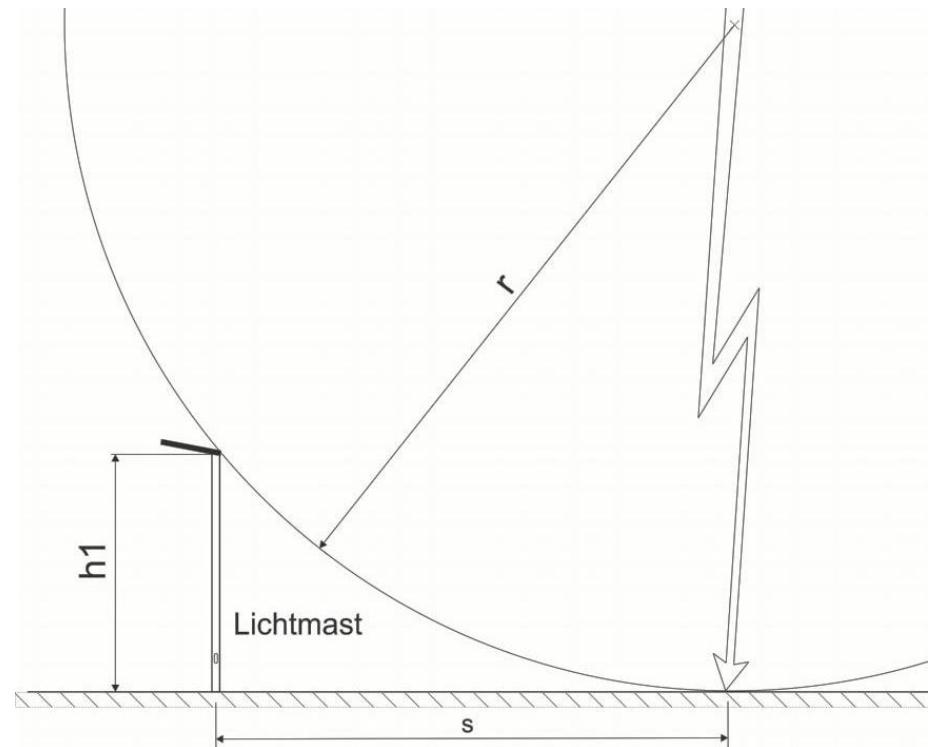
Ergebnisse (Größenordnung):

- $u_{ind,max} \approx 3 - 30 \text{ V}$

Blitzkugelradius

$$r = 10 \cdot \hat{I}^{0,65}$$

$$s = \sqrt{2 \cdot r \cdot h_1 - h_1^2}$$



Kunststoffmast

Szenario 2: Blitzeinschlag ($s = 1-10$ m)

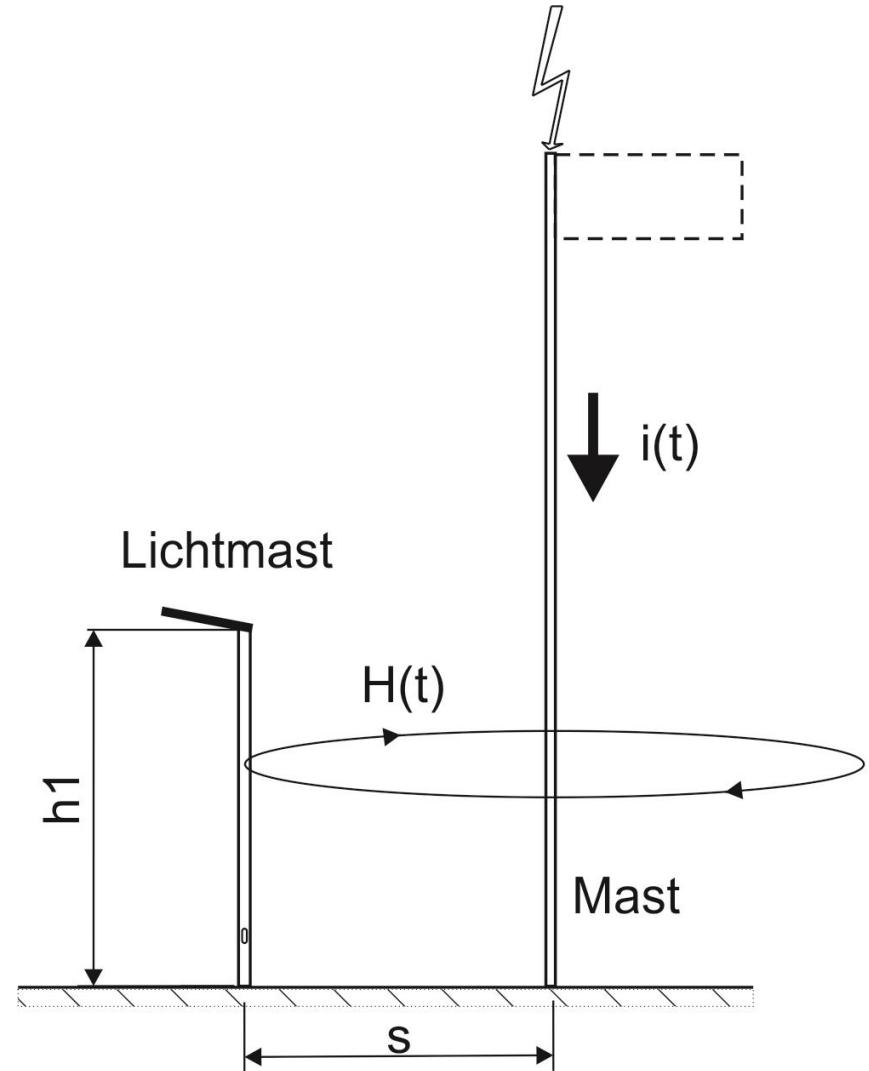
Blitzstrom wird von einer Ableitung nahe dem Lichtmast geführt (Abstand s)

Parametervariation:

- Mast-/Schleifenhöhe: 4 - 12 m
- Abstand zur blitzstromführenden Ableitung:
 $s = 1 - 10$ m
- Stromänderung: $di/dt = 24,3 - 280$ kA/ μ s

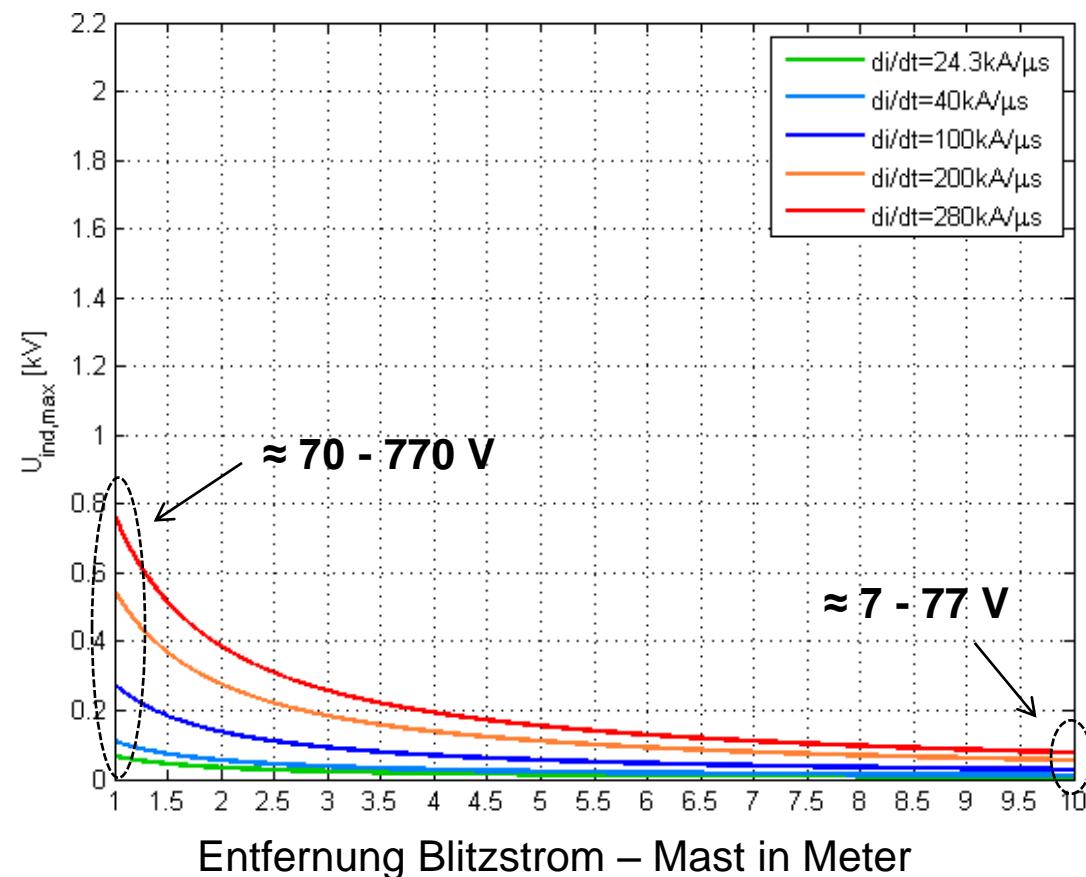
Ergebnisse:

- Masthöhe 4 m: $u_{ind,max} \approx 7 - 770$ V
- Masthöhe 12 m: $u_{ind,max} \approx 18$ V - 2,1 kV

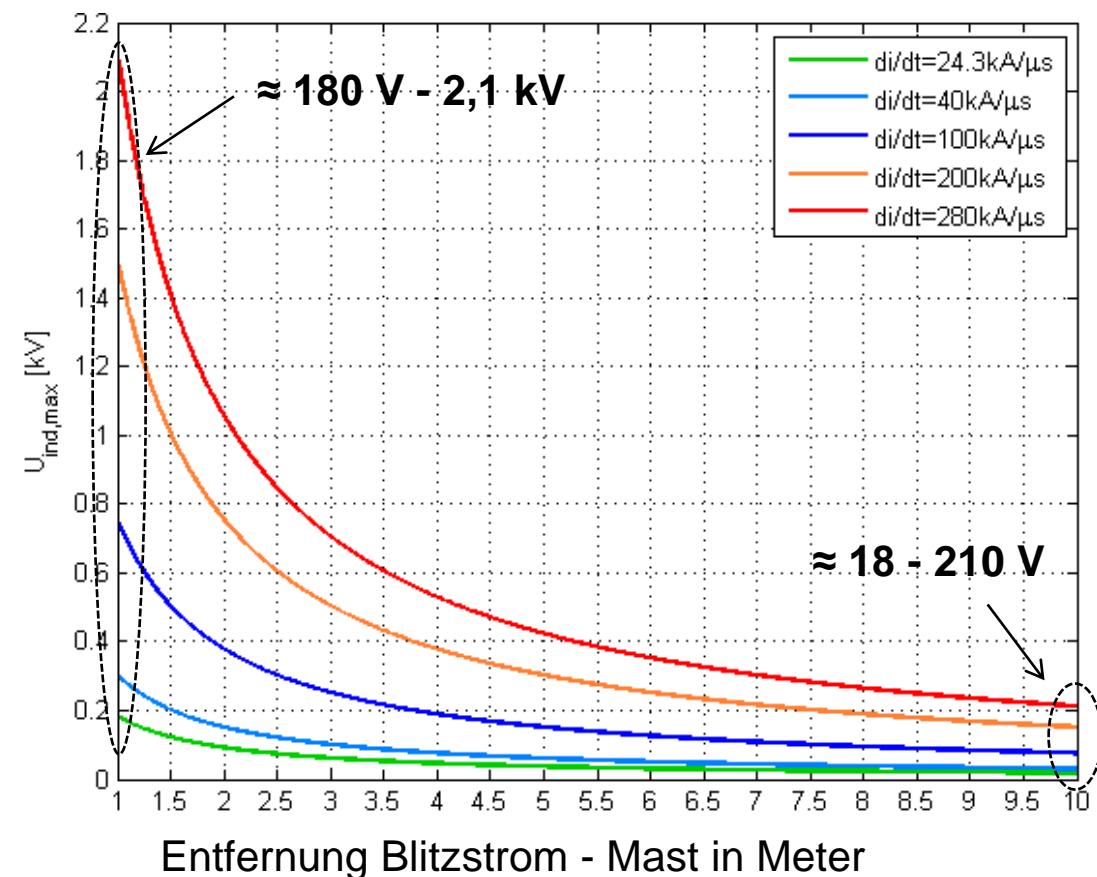


Kunststoffmast

Masthöhe 4m, di/dt variabel:



Masthöhe 12m , di/dt variabel

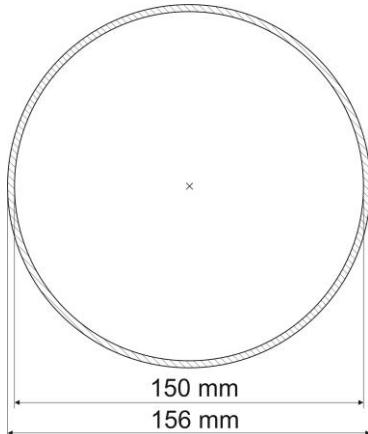


Induktive Kopplung bei Stahl- und Aluminiummasten Finite Elemente Methode (FEM)

Modelbildung in
EleFAnT2D

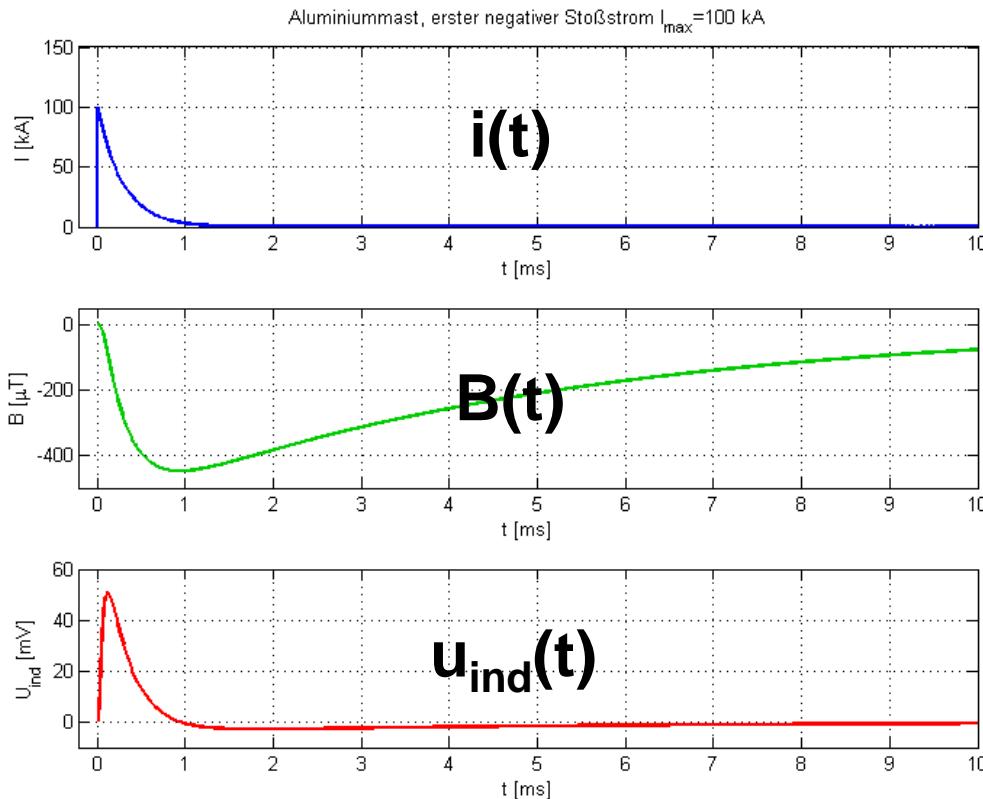


Mastabmessungen

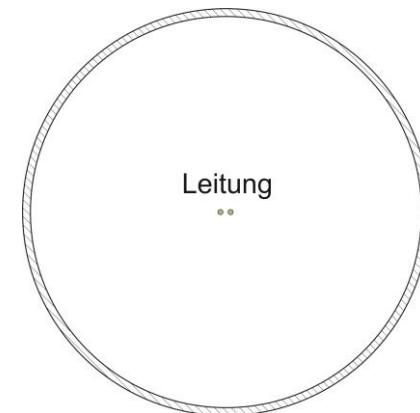


- Blitzstrom Zeitfunktionen laut OVE EN 62305-1
 - $10/350 \mu\text{s}$ ($\hat{I} = 200 \text{ kA}$)
 - $1/200 \mu\text{s}$ ($\hat{I} = 100 \text{ kA}$)
 - $0,25/100 \mu\text{s}$ ($\hat{I} = 50 \text{ kA}$)
- Mast
 - $h = 12 \text{ m}$
 - Wandstärke = 3 mm
 - $\sigma_{St} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
 - $\sigma_{Al} = 3,5 \cdot 10^7 \text{ S/m}$

Induktive Kopplung bei Stahl- und Aluminiummasten Finite Elemente Methode (FEM)



Aluminiummast ($h = 12$ m)
1. neg. Stoßstrom ($1/200$ μ s, $\hat{I} = 100$ kA)



Maximalwerte der induzierten Spannung

Blitzstromverlauf	Stahlmast	Aluminiummast
	$U_{ind,max}$	$U_{ind,max}$
1. pos. Stoßstrom	170 μV	115 mV
1. neg. Stoßstrom	34 μV	50,7 mV
neg. Folgestoßstrom	6,5 μV	21,2 mV

→ „sehr geringe“ induktive Kopplung

Induktiven Kopplung - Resümee

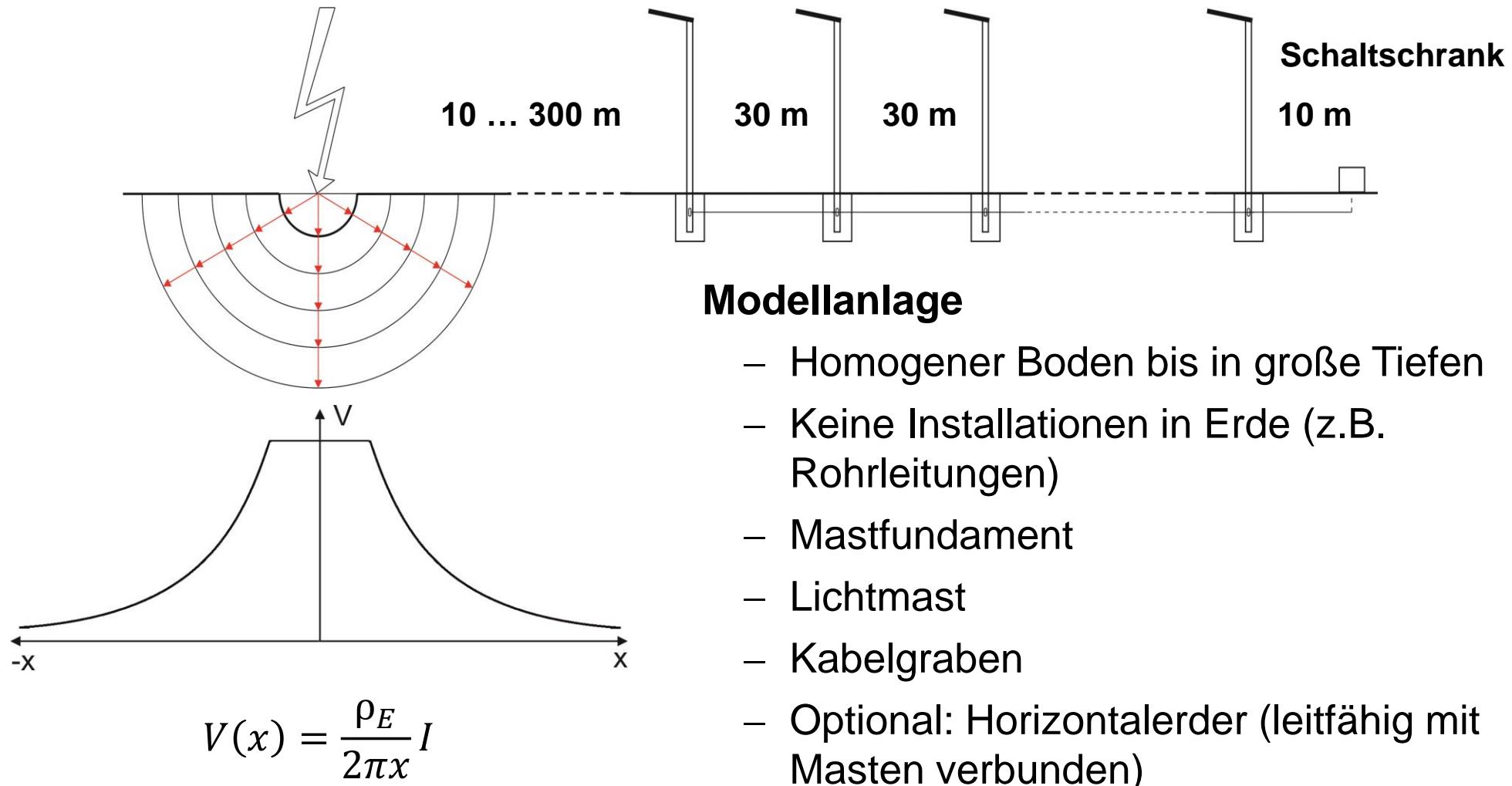
- Kunststoffmast: Blitzeinschlag im Nahbereich (Blitzkugelverfahren)
 - Masthöhe = 4 - 12 m → $s \approx 12 - 86$ m → $u_{ind,max} \approx 3 - 30$ V
- Kunststoffmast: Blitzeinschlag in unmittelbarer Nähe ($s = 1-10$ m)
 - Masthöhe = 4 m → $u_{ind,max} \approx 7 - 770$ V
 - Masthöhe = 12 m → $u_{ind,max} \approx 18$ V - 2,1 kV
- Stahl- und Aluminiummast (12 m): Blitzeinschlag in 2 m Abstand
 - $u_{ind,max}$ im μ V- bis mV-Bereich
- „worst case“ Annahme
 - Blitzentladung normal auf Erdoberfläche
 - Blitz und Leiterschleife in einer Ebene
 - Leitung als ideale Ebene



Galvanische Kopplung

Bodeneinschlag im Nahbereich einer lichttechnischen Anlage (galvanische Kopplung)

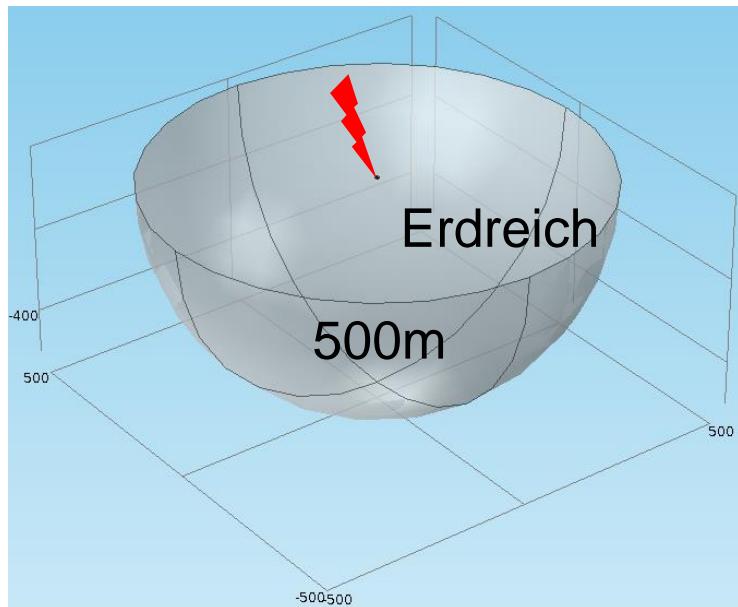
3 – 10 Lichtmasten



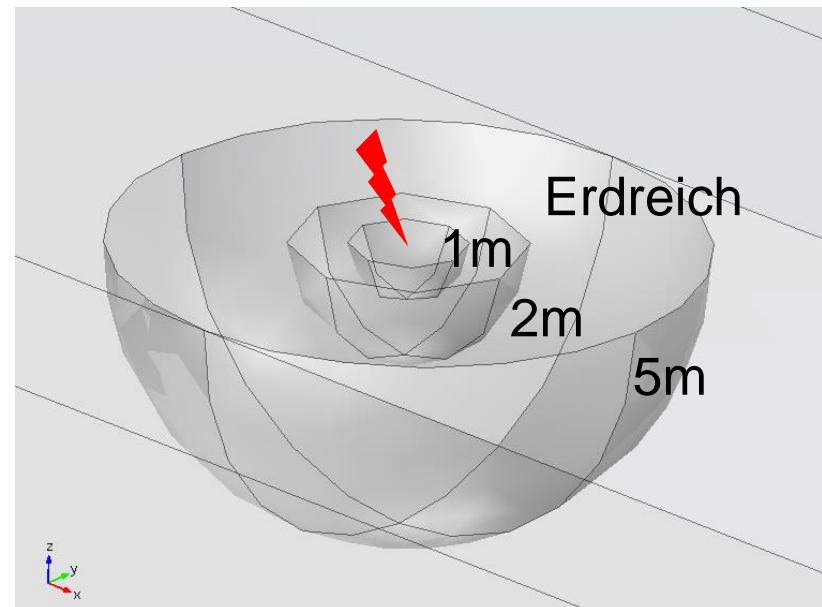
Simulationsumgebung - FEM

Modellbildung in COMSOL Multiphysics

Basismodell



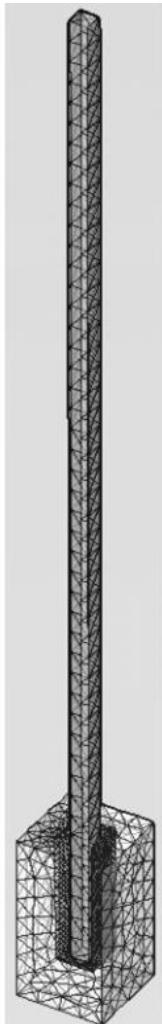
Blitzfußpunkt



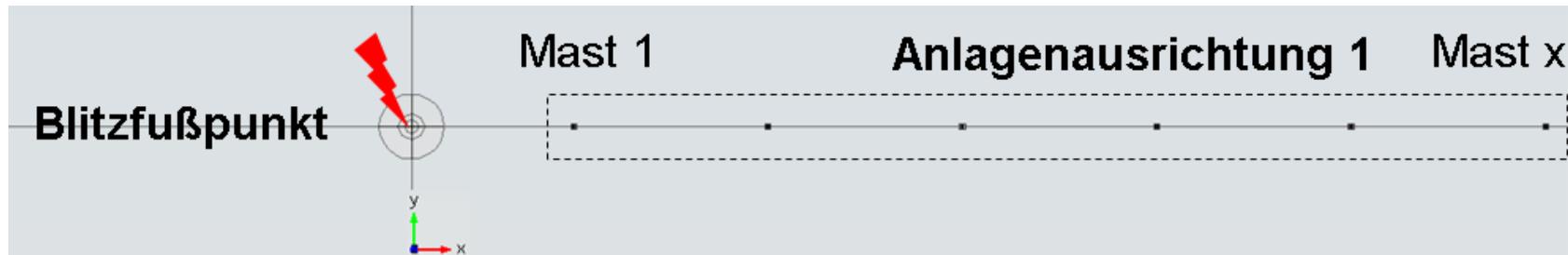
Simulationsparameter: $\hat{I} = 100 \text{ kA}$ (10/350 μs), $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

$\Rightarrow V(1\text{m}) \approx 1,6 \text{ MV}, V(500\text{m}) \approx 3,2 \text{ kV}$

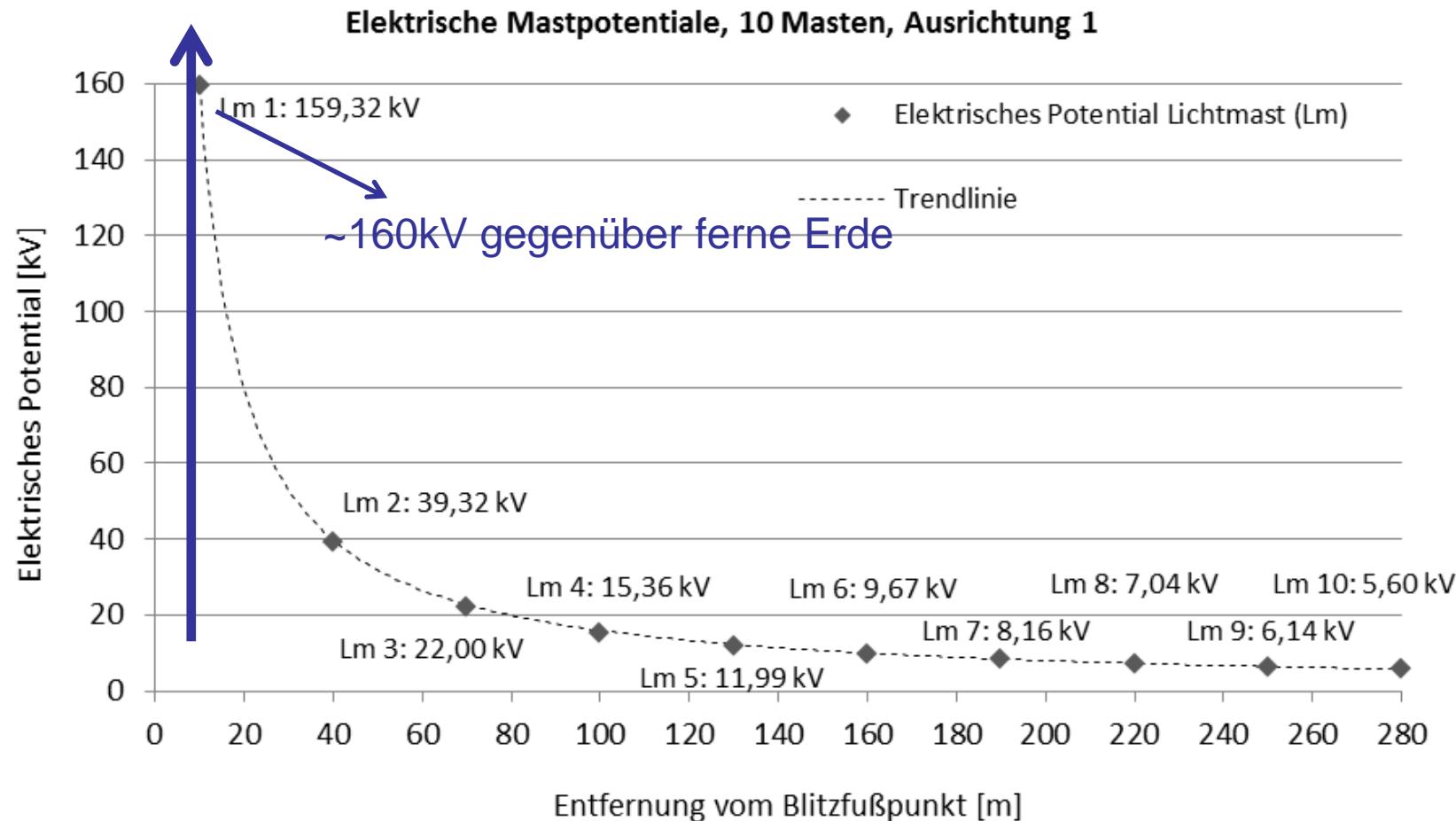
Simulationsumgebung und Simulationsparameter



- Betonfundament – Spezifischer Bodenwiderstand
 - $\rho_B = 400 \Omega\text{m}$
 - Betonrohr, Kies $\rho = 100 - 3000 \Omega\text{m}$
- Lichtmast - Leitfähigkeit
 - $\sigma_{St} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$
 - $\sigma_{Al} = 3,5 \cdot 10^7 \text{ S/m}$
 - $\sigma_{Kst} = 10^{-10} \dots 10^{-15} \text{ S/m}$
 - ($h = 8 \text{ m}$)

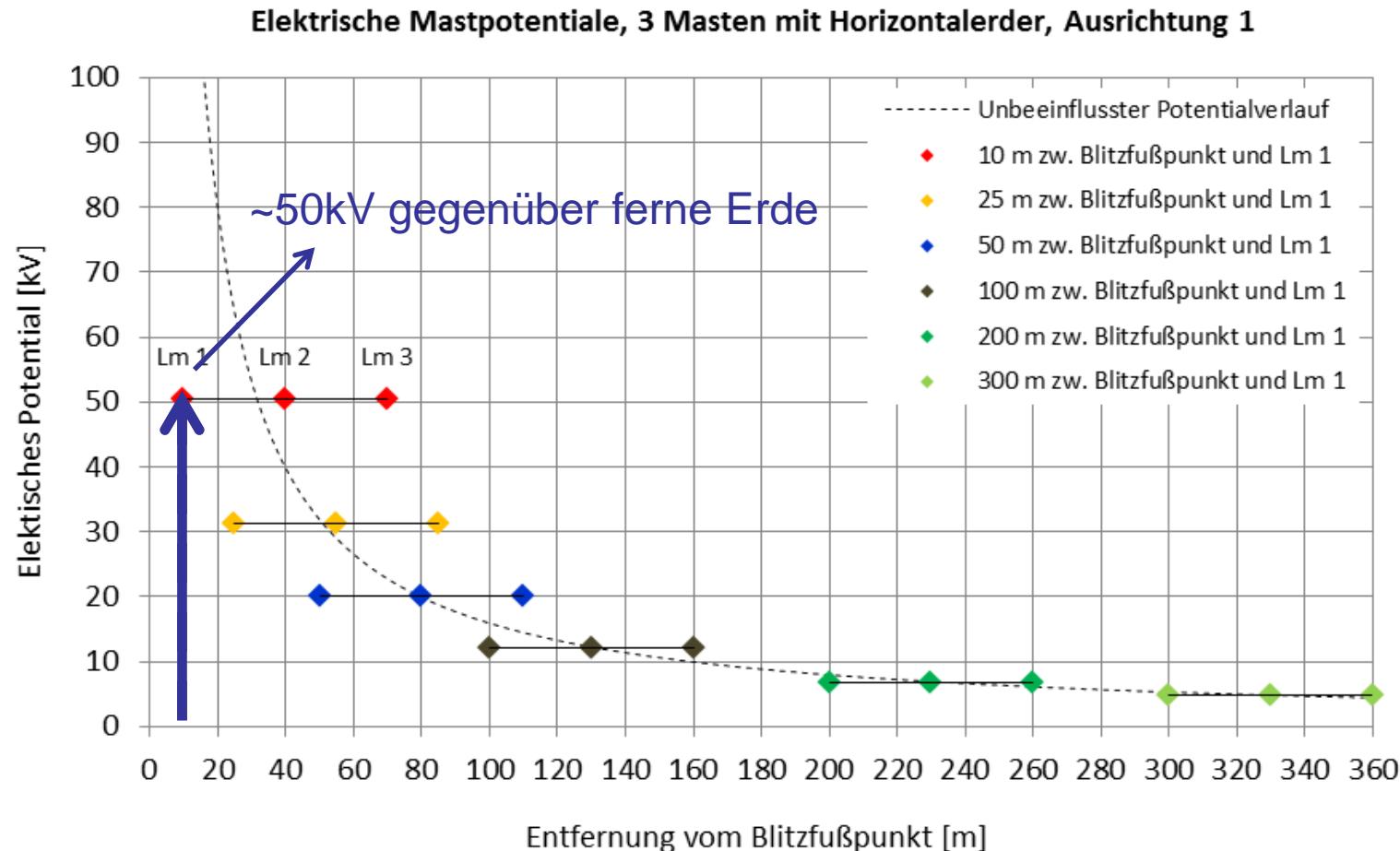


Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 10 einzelnen Masten (galvanisch Kopplung, ohne horizontalen Begleiterder)



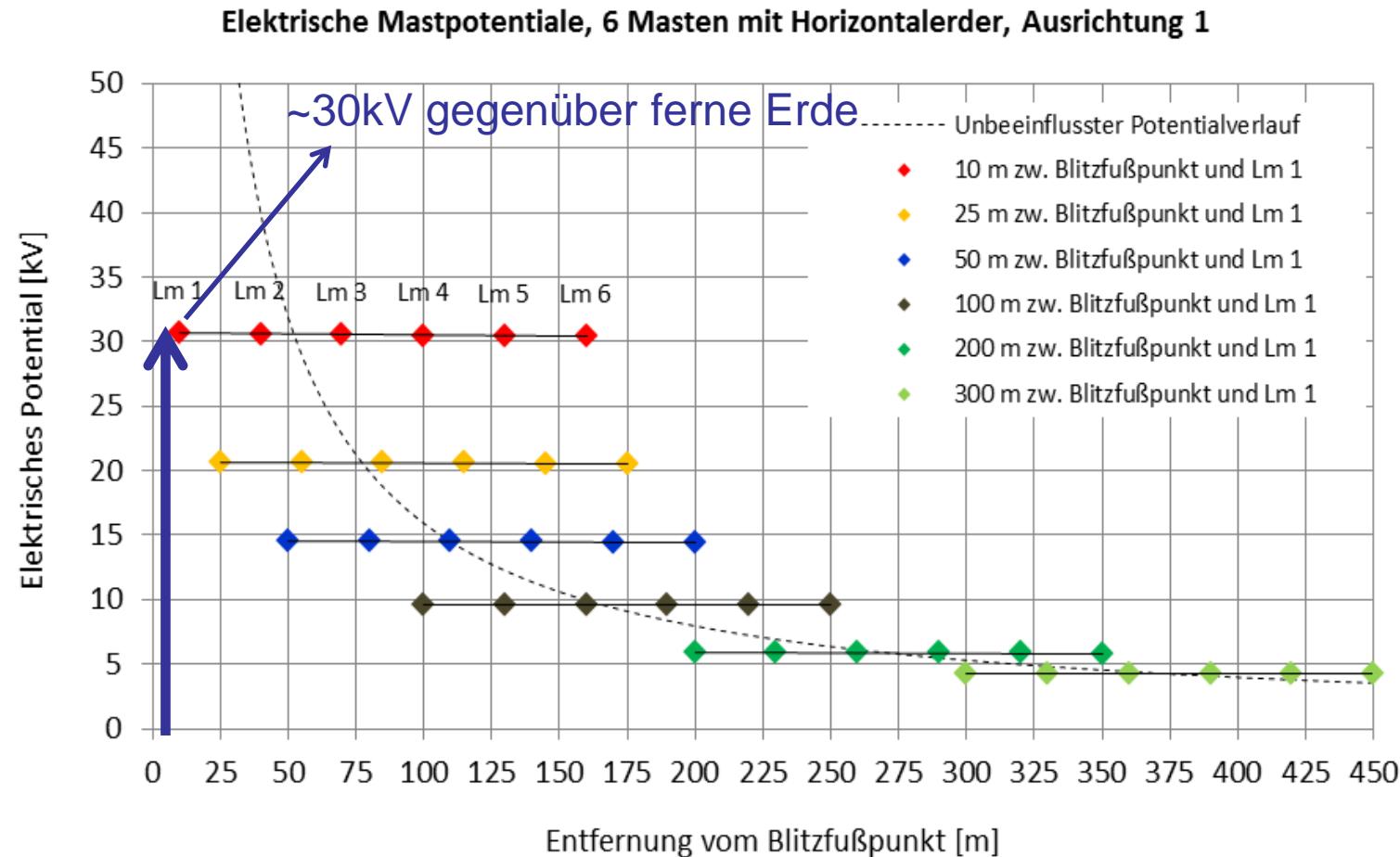
Masten nehmen in etwa elektrische Potential des unbeeinflussten Potentialverlaufs an

Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 3 verbundenen Masten (galvanisch Kopplung, mit horizontalen Begleiterder)



Verschiebung der Äquipotentiallinien durch leitfähige Bodeninstallation (z.B. Erder)

Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 6 verbundenen Masten (galvanisch Kopplung, mit horizontalen Begleiterder)



Verschiebung der Äquipotentiallinien durch leitfähige Bodeninstallation (z.B. Erder)

Galvanische Kopplung - Resümee

- Anlage ohne Horizontalerder
 - Masten nehmen etwa elektrisches Potential des unbeeinflussten Verlaufs an
- Anlage mit Horizontalerder
 - Potentialverschleppung
 - Steigende Anlagenausdehnung → Absenkung des Potentials
- Änderung der spezifischen Widerstände der Fundamentstrukturen
 - geringe Auswirkung auf Mastpotentiale

Zusammenfassung

- Datenerhebung
 - Wesentlich für Bestimmung der Anlagenart und Fehlerart (Ausgangssituation)
 - Keine Aussage über transiente Störbeeinflussungen möglich
 - Keine Systematik in der Anlagenerrichtung
- Induktive Kopplung
 - Spannungen im kV-Bereich bei hohen Kunststoffmasten und naher Blitzstromableitung (wenige Meter)
 - Ansonsten geringe induzierte Spannungen (μ V- bis einige 10 V)
- Galvanische Kopplung
 - Nicht verbundene Masten (ohne horizontalen Begleiterder): Stark unterschiedliche Potentialanhebungen, Potentiale in Blitzeinschlagnähe von einigen 10 kV bis 100 kV
 - Elektrisch verbundene Masten (mit horizontalen Begleiterder): Vergleichmäßigung der Mastpotentiale und die Spannung gegenüber ferne Erde sinkt deutlich ab, Potentiale von wenigen 10 kV

Transient Spannungsbeanspruchung kabelgebundener lichttechnischer Anlagen im Außenbereich

Ing. Robert Mark
r.mark@energie-graz.at
Energie Graz GmbH & Co KG