



# Transiente 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

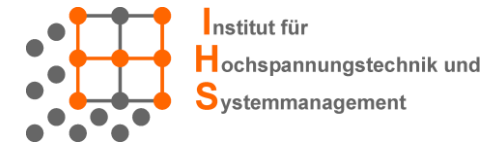
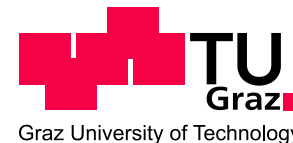
- Leiter der Abteilung Licht- u. Energiedienstleistungen Energie Graz
- Anlagenverantwortlicher Öffentl. Beleuchtungsanlage Stadt Graz
- Betriebsführung, Contracting, Licht Gemeinden Planung, Errichtung
- Vorstandsmitglied der LTG
- Leiter des Arbeitskreises: Licht im Verkehrsraum – Die Betreiberplattform

 **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

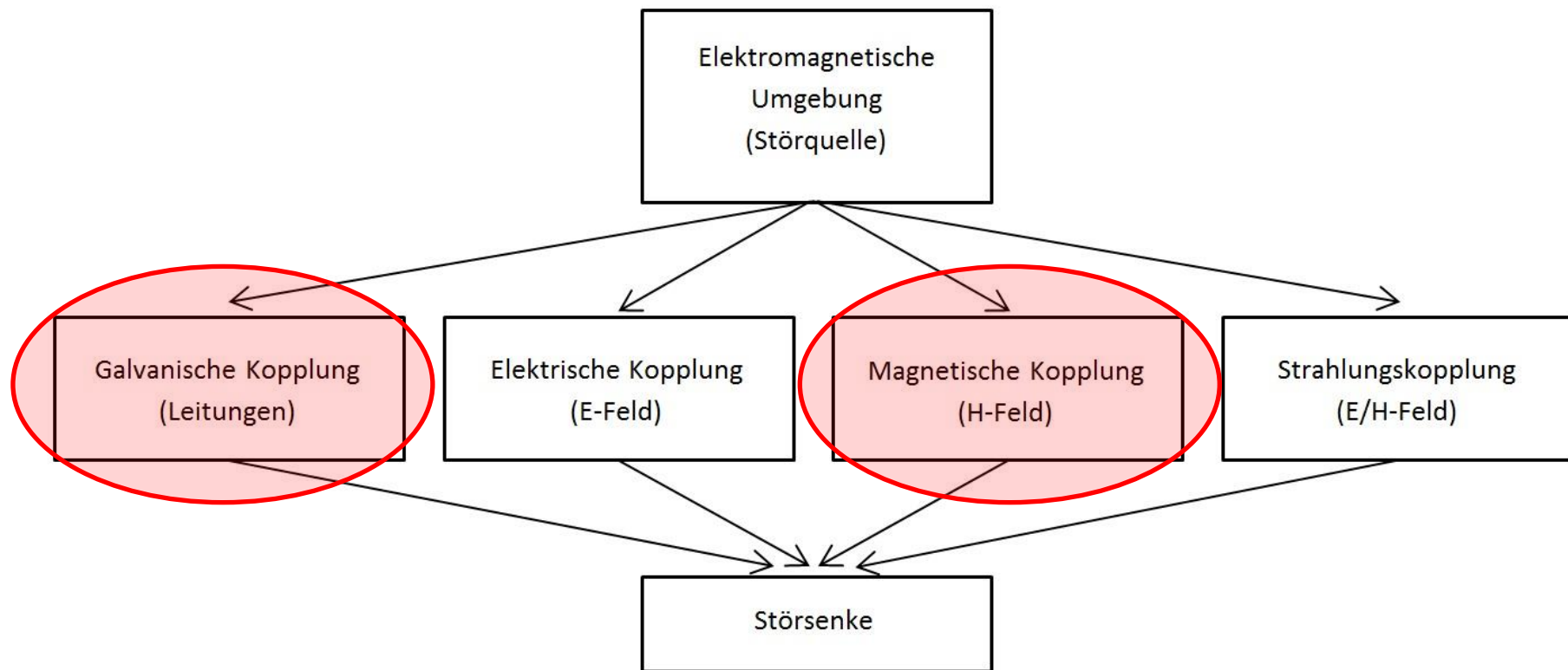


## Datenerhebung - Befragung von Anlagenbetreibern und Anlagenverantwortlichen

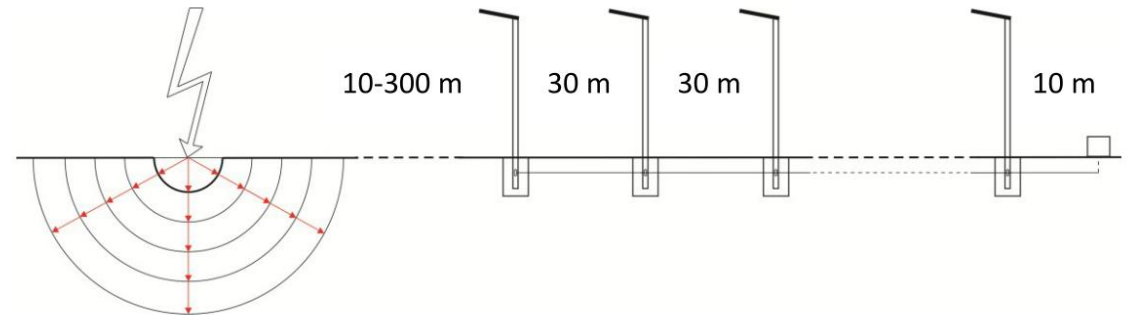
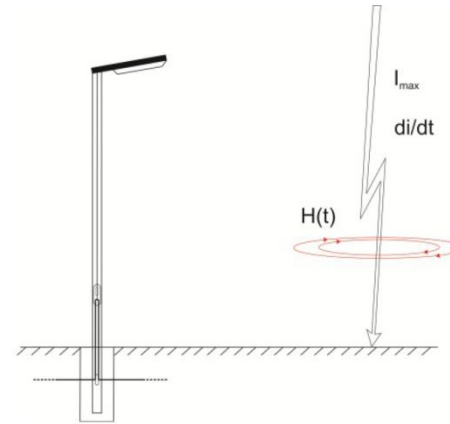
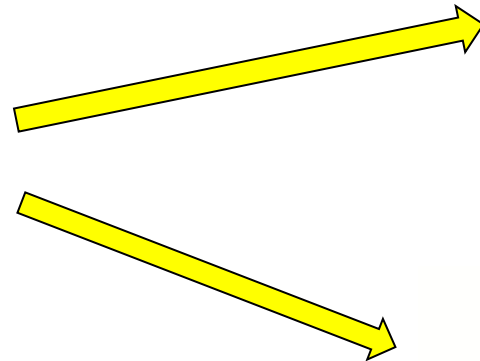
- Allgemeine Fragestellung
  - Schutz vor transienten Überspannungen ist ein wesentliches Thema (>60%)
  - Störfälle wurden bereits beobachtet (>50%)
  - Zusammenhang mit Gewitteraktivität kann weder bestätigt noch widerlegt werden
- Beschreibung einer verkabelten lichttechnischen Anlage
  - Gegenüberstellung 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 <sub>1</sub> /T <sub>2</sub>	µs/µs	10/350			
Erster negativer Stoßstrom			LPL			
Stromparameter	Symbol	Einheit	I	II	III	IV
Scheitelwert	I	kA	100	75	50	
Mittlere Steilheit	di/dt	kA/µs	100	75	50	
Zeitparameter	T <sub>1</sub> /T <sub>2</sub>	µs/µs	1/200			
Folgestoßstrom			LPL			
Stromparameter	Symbol	Einheit	I	II	III	IV
Scheitelwert	I	kA	50	37,5	25	
Mittlere Steilheit	di/dt	kA/µs	200	150	100	
Zeitparameter	T <sub>1</sub> /T <sub>2</sub>	µs/µs	0,25/100			



# Induktive Kopplung

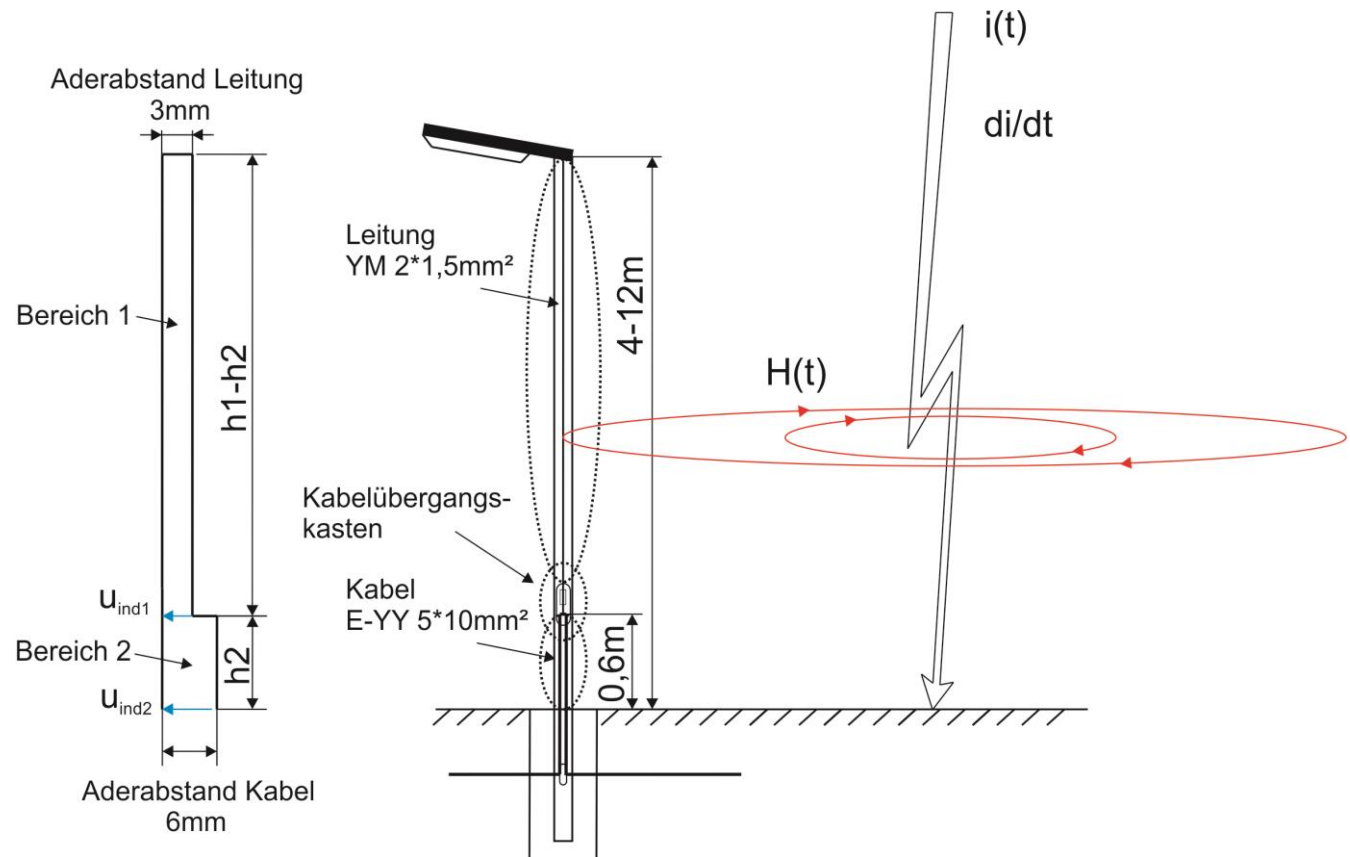
## Induktive Kopplung – Energieversorgungsleitung des Masts

- 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/ $\mu$ s
- Mast-/Schleifenhöhe: 4 - 12 m
- Abstand zum Blitzkanal: 12 - 86 m

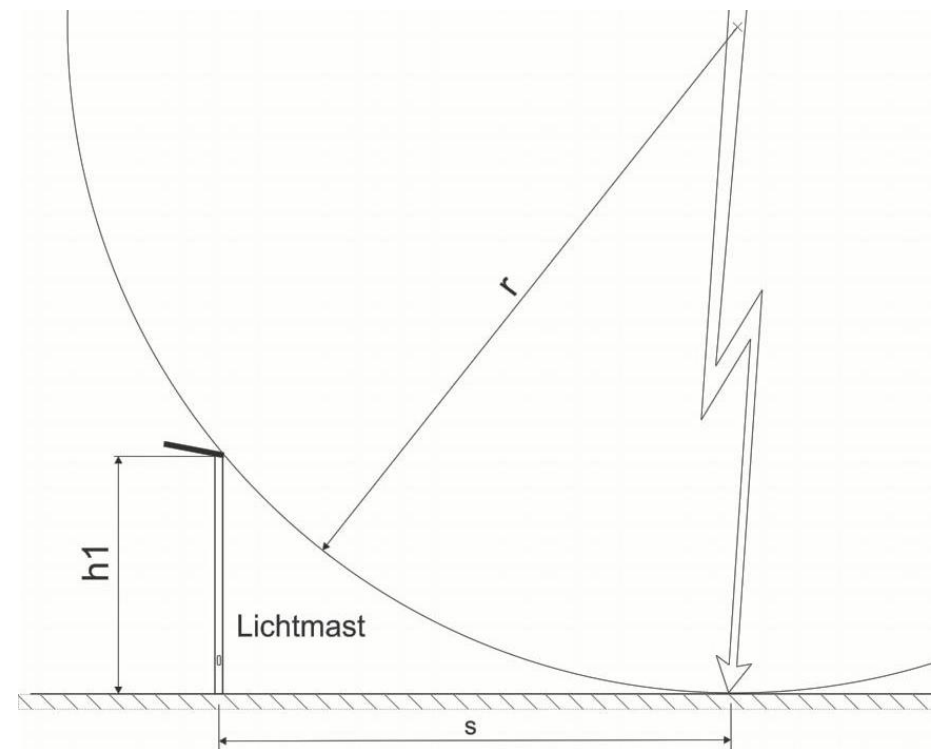
Ergebnisse (Größenordnung):

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

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)

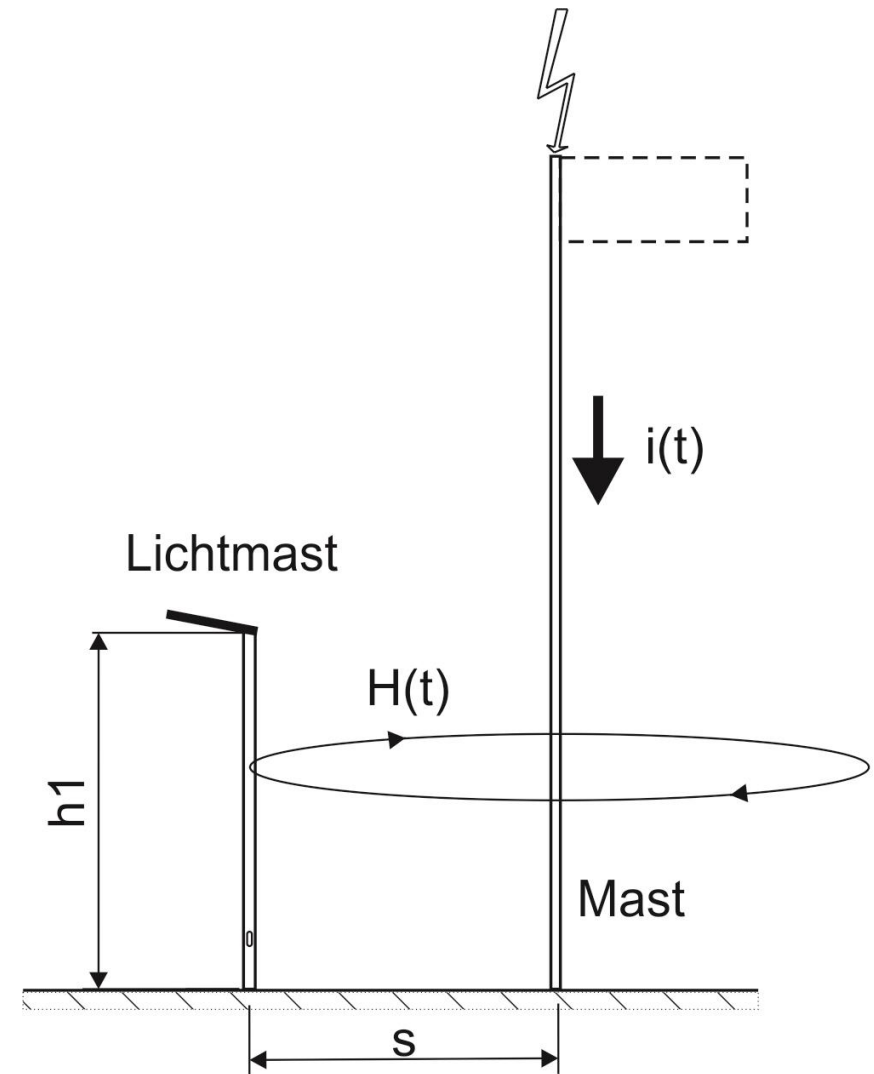
Blitzstrom wird von einer Ableitung nahe dem Lichtmast geführt (Abstand s)

Parametervariation:

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

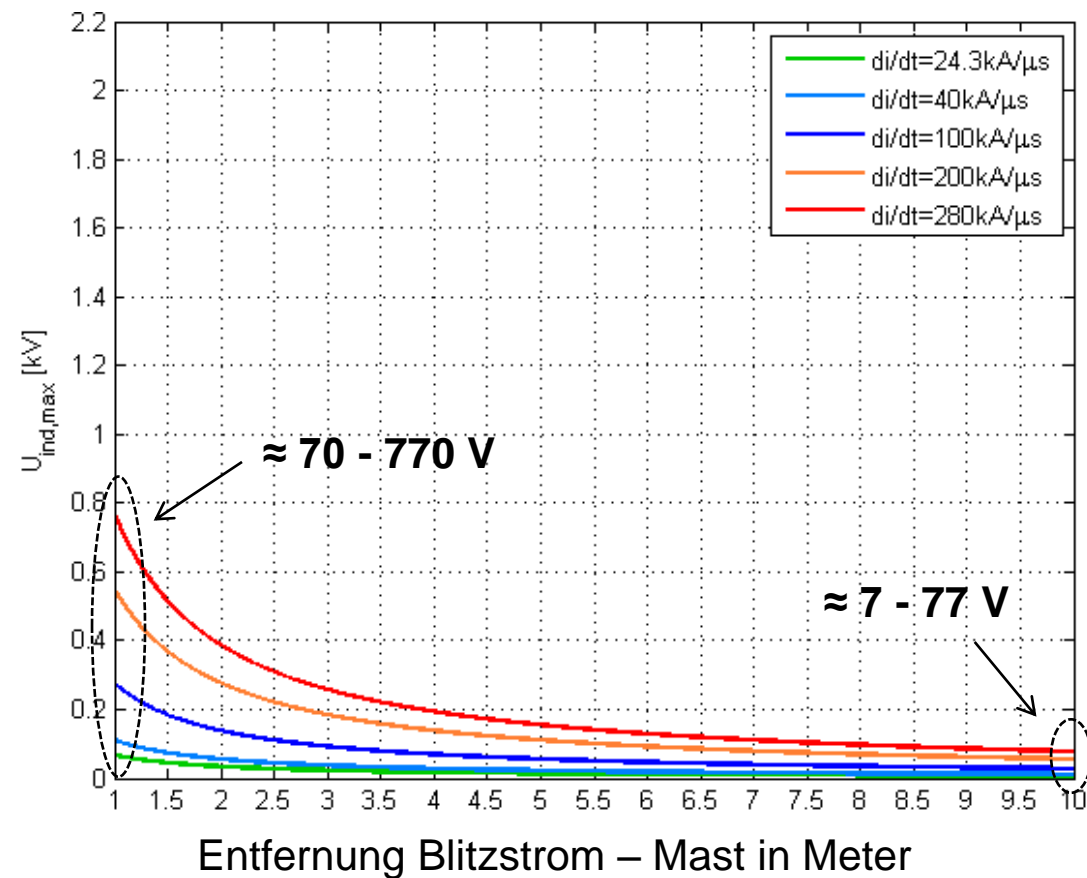
Ergebnisse:

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

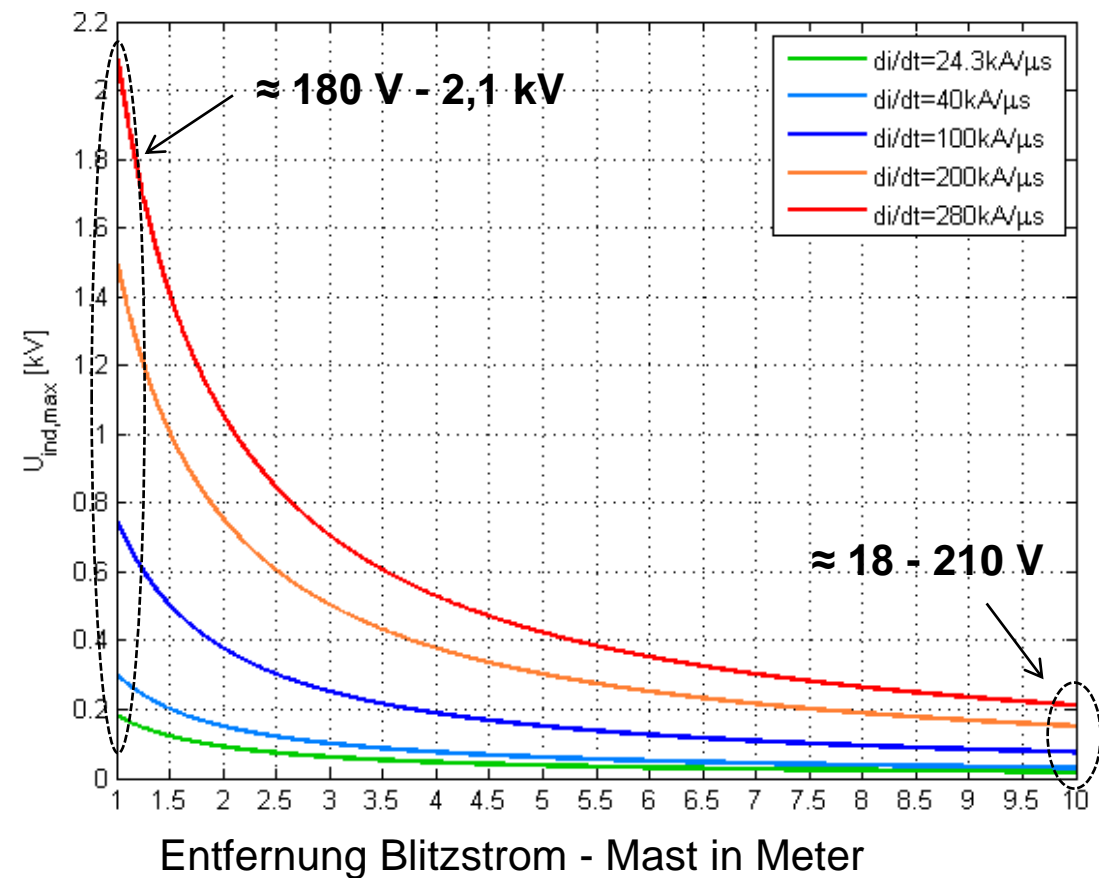


## Kunststoffmast

Masthöhe 4m,  $di/dt$  variabel:

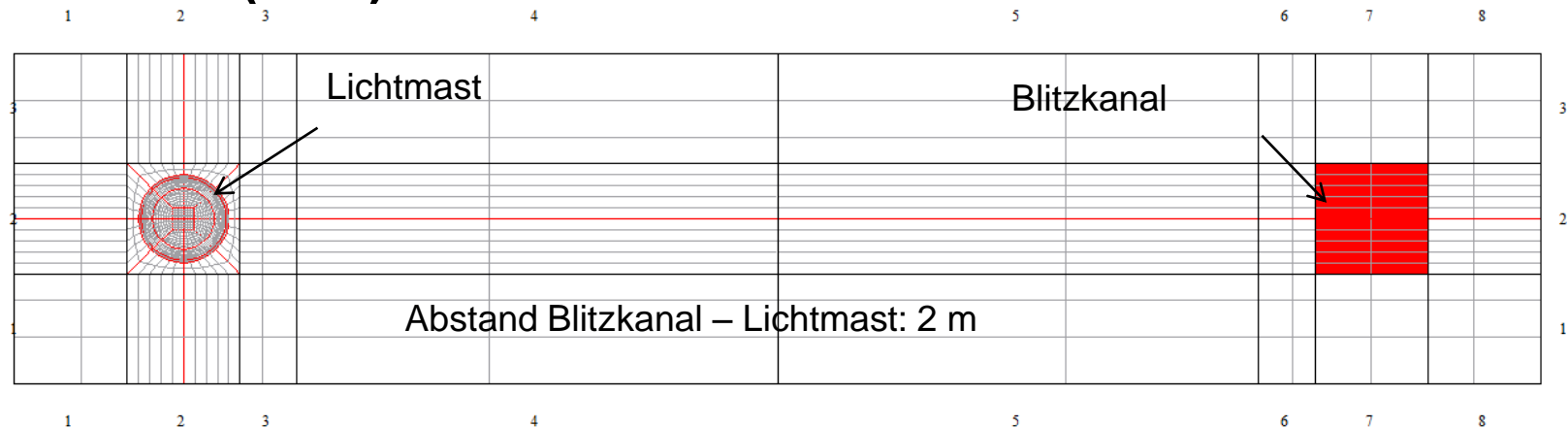


Masthöhe 12m ,  $di/dt$  variabel

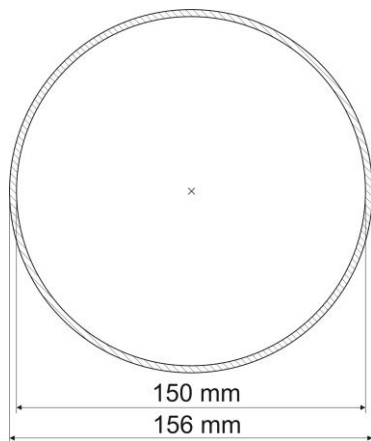


## Induktive Kopplung bei Stahl- und Aluminiummasten Finite Elemente Methode (FEM)

Modelbildung in  
EleFAnT2D

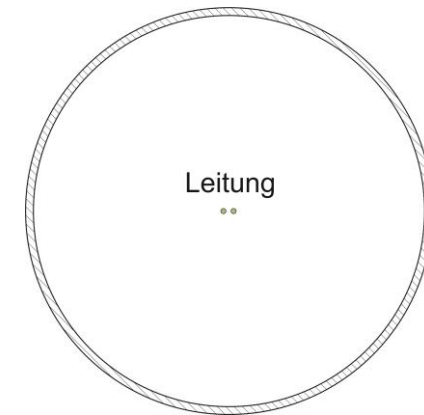
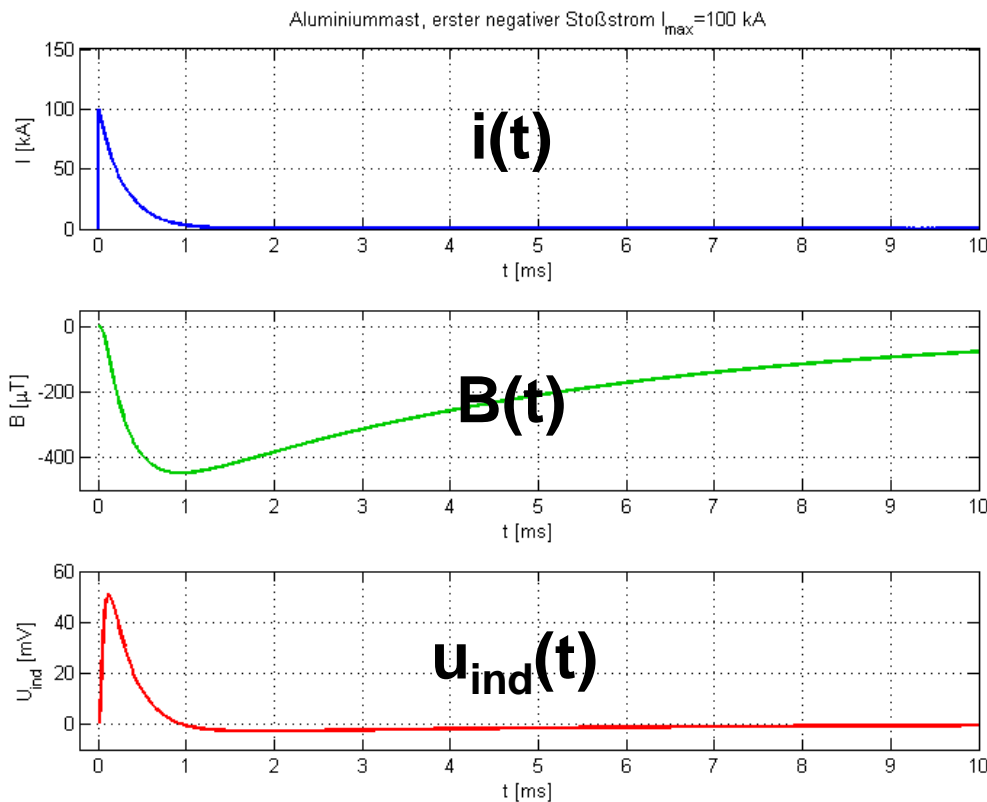


Mastabmessungen



- 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)



Maximalwerte der induzierten Spannung

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

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

→ „sehr geringe“ induktive Kopplung





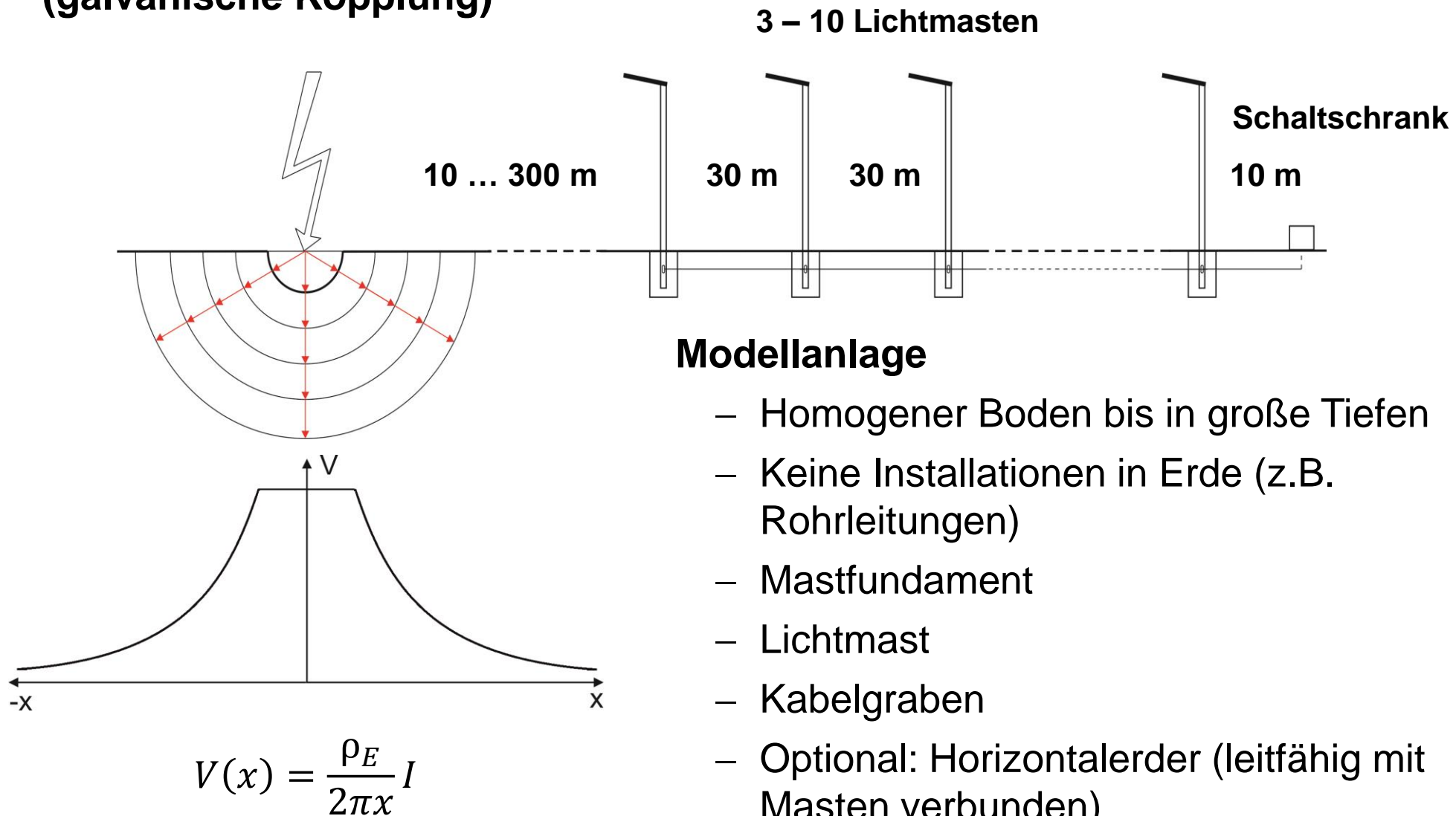
## Induktiven Kopplung - Resümee

- Kunststoffmast: Blitzeinschlag im Nahbereich (Blitzkugelverfahren)
  - Masthöhe = 4 - 12 m  $\rightarrow s \approx 12 - 86$  m  $\rightarrow u_{\text{ind,max}} \approx 3 - 30$  V
- Kunststoffmast: Blitzeinschlag in unmittelbarer Nähe ( $s = 1-10$  m)
  - Masthöhe = 4 m  $\rightarrow u_{\text{ind,max}} \approx 7 - 770$  V
  - Masthöhe = 12 m  $\rightarrow u_{\text{ind,max}} \approx 18$  V - 2,1 kV
- Stahl- und Aluminiummast (12 m): Blitzeinschlag in 2 m Abstand
  - $u_{\text{ind,max}}$  im  $\mu\text{V}$ - 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)



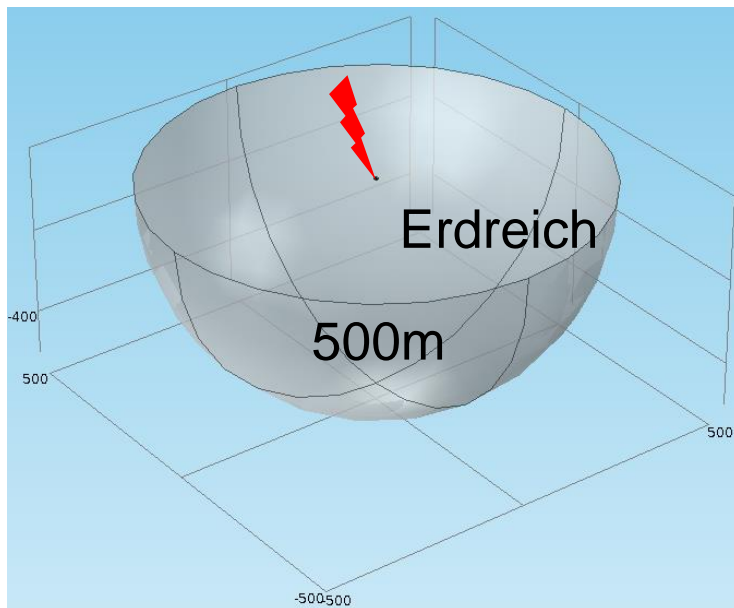
### Modellanlage

- Homogener Boden bis in große Tiefen
- Keine Installationen in Erde (z.B. Rohrleitungen)
- Mastfundament
- Lichtmast
- Kabelgraben
- Optional: Horizontalerder (leitfähig mit Masten verbunden)

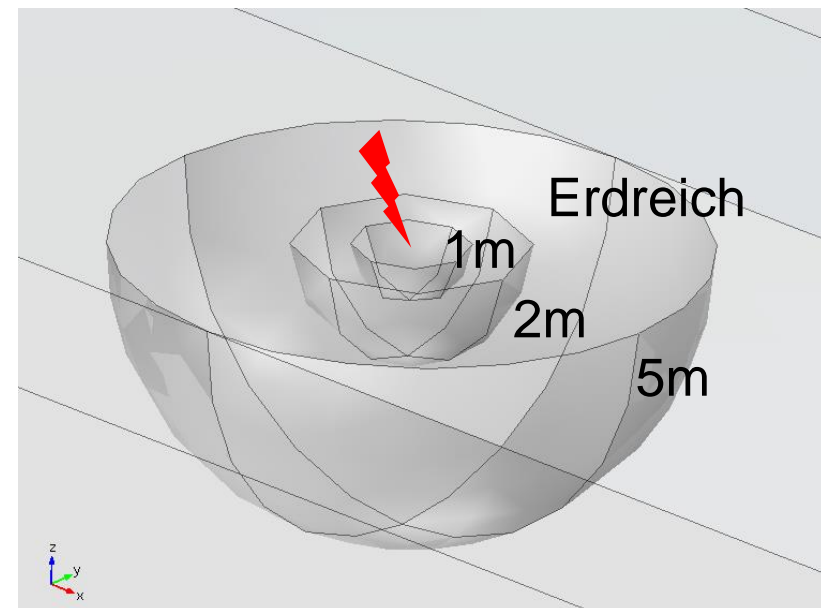
## Simulationsumgebung - FEM

### Modellbildung in COMSOL Multiphysics

Basismodell



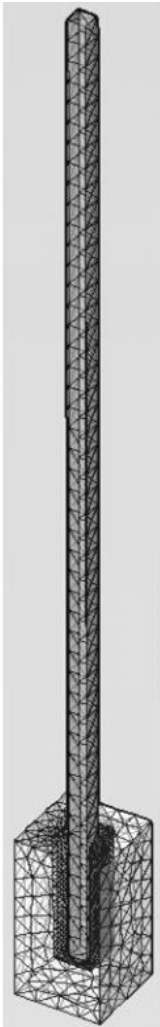
Blitzfußpunkt



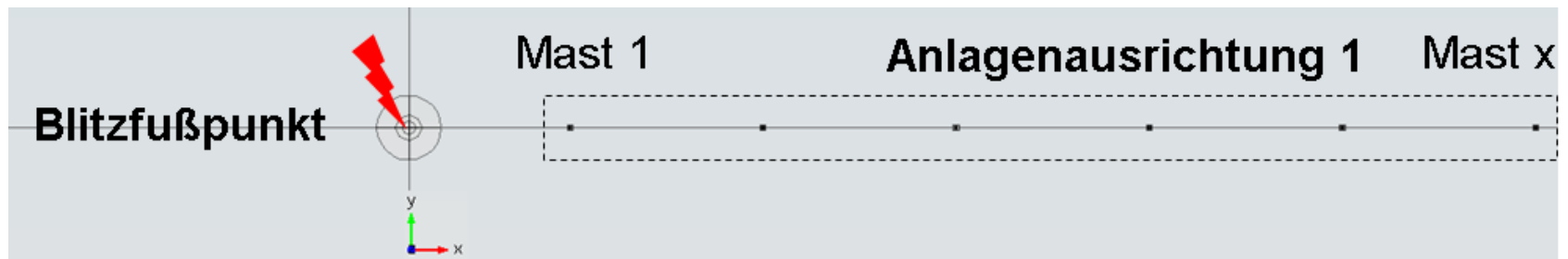
Simulationsparameter:  $\hat{I} = 100 \text{ kA (10/350}\mu\text{s)}$ ,  $\rho_E = 100 \Omega\text{m}$

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

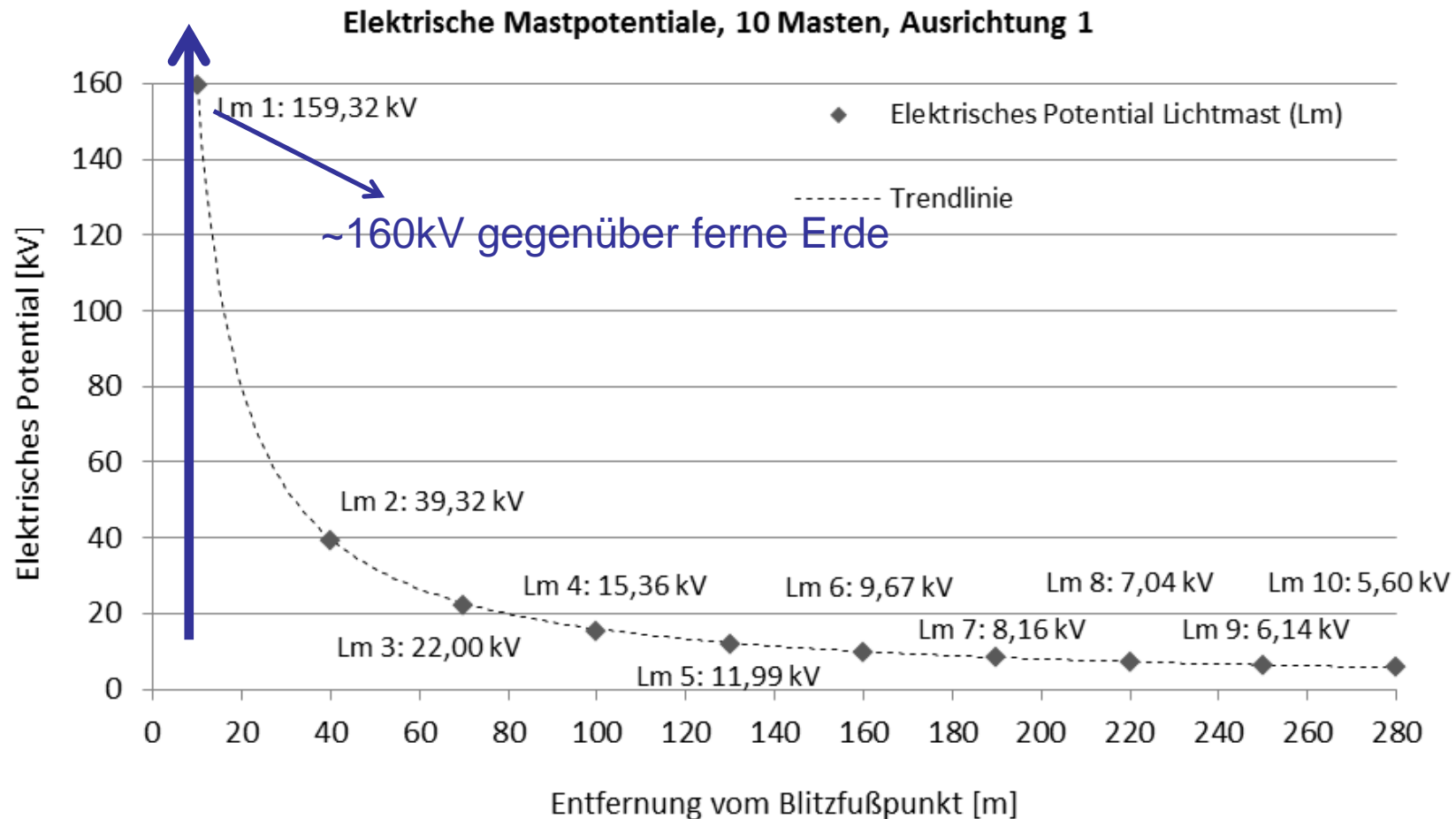
## Simulationsumgebung und Simulationsparameter



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

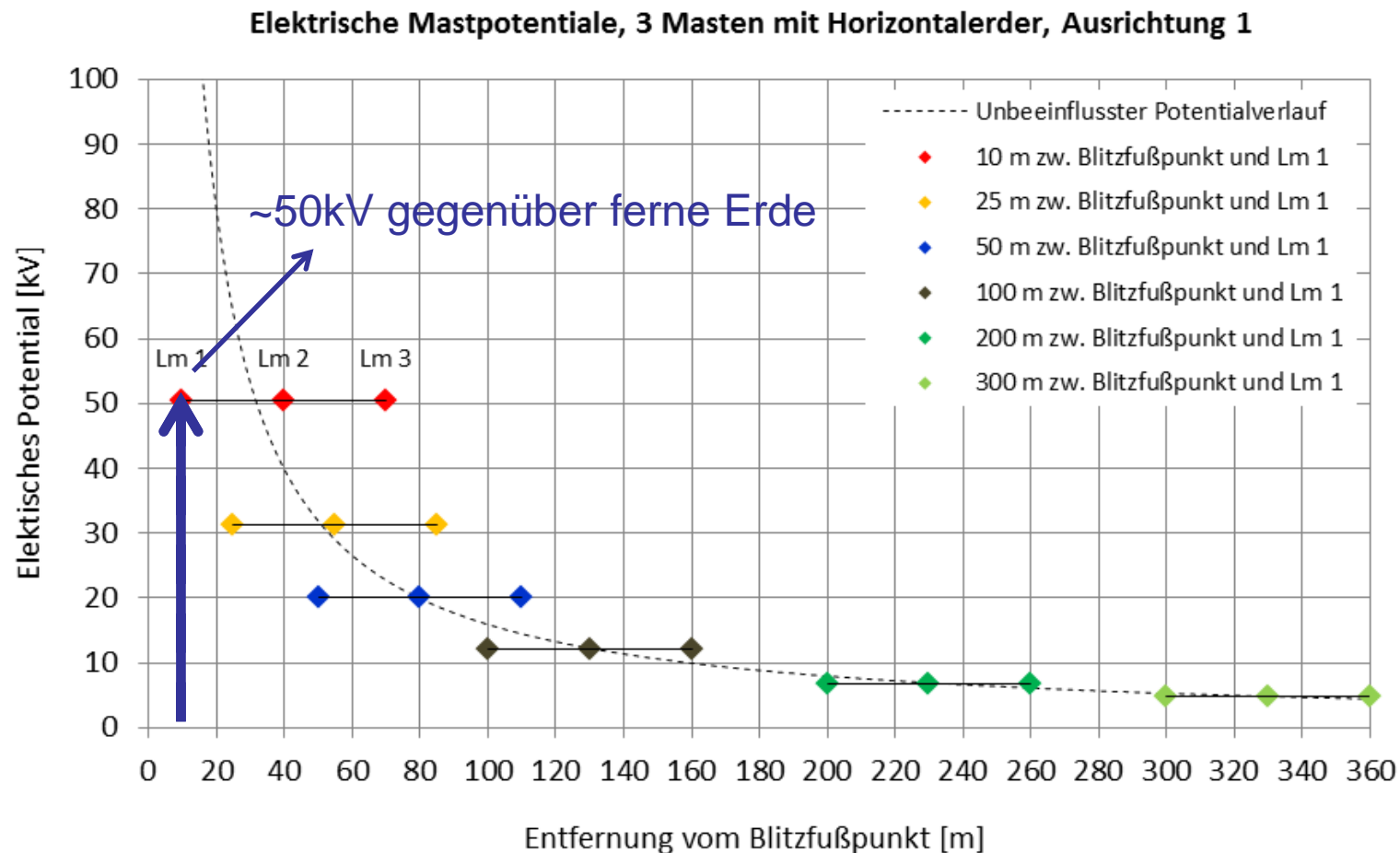


## Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 10 einzelnen Masten (galvanisch Kopplung, ohne horizontalen Begleiterder)



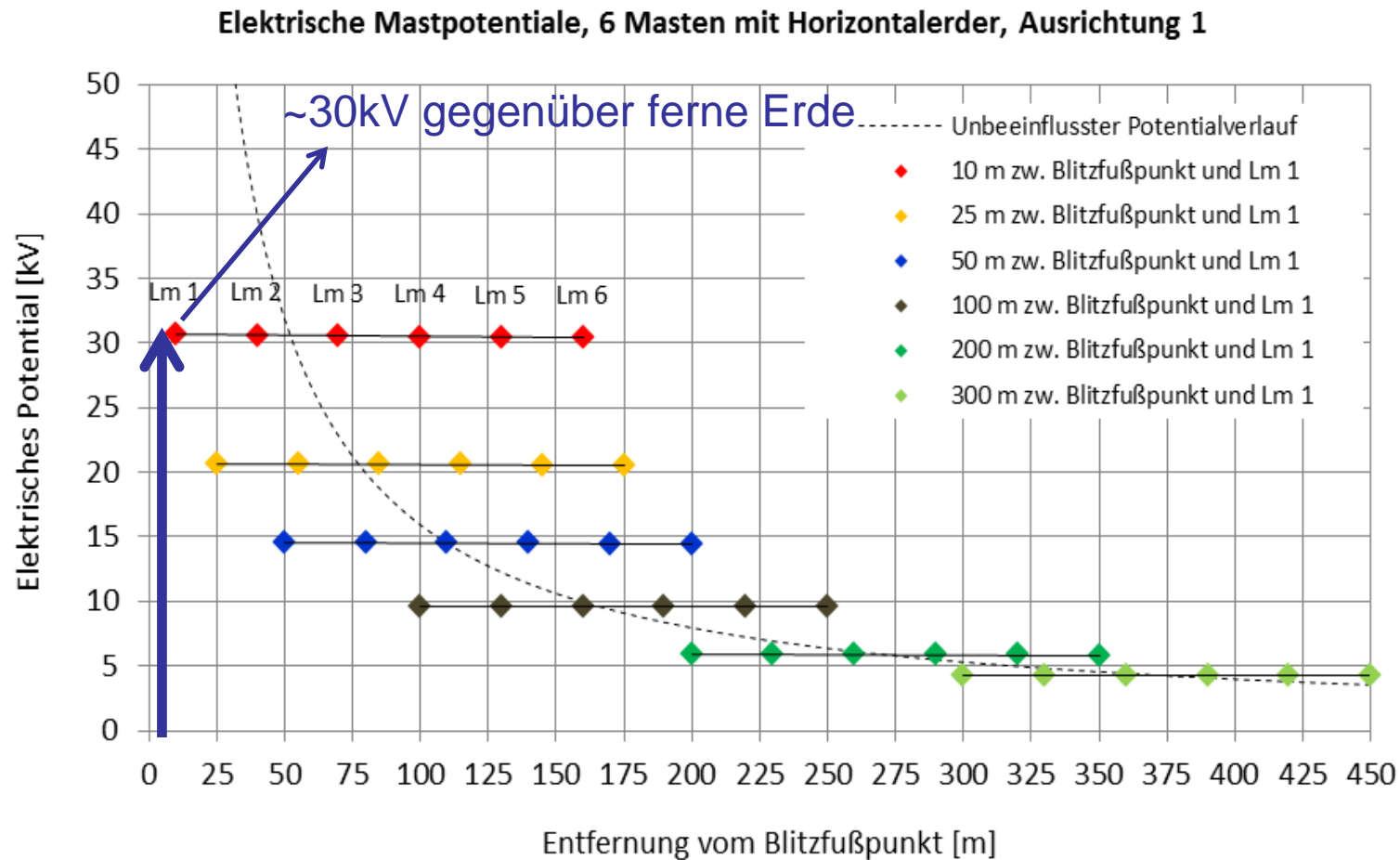
Masten nehmen in etwa elektrische Potential des unbeeinflussten Potentialverlaufs an

## 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 ( $\mu\text{V}$ - 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



## Transiente Spannungsbeanspruchung kabelgebundener lichttechnischer Anlagen im Außenbereich

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