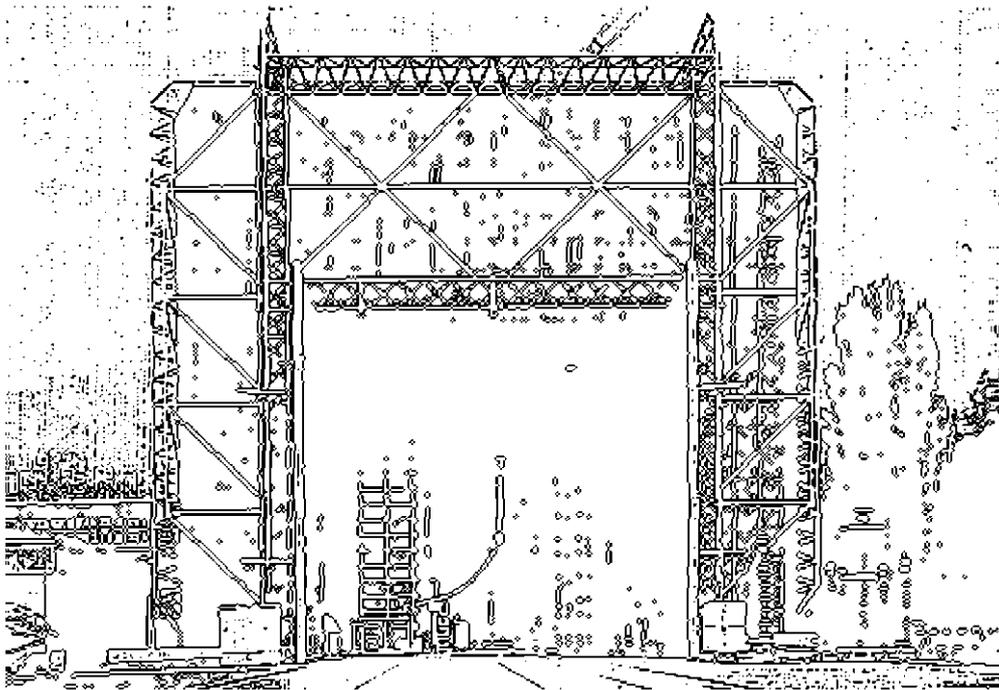


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

MASTERARBEIT

Christian Niederauer
März 2014



INSTITUT FÜR
HOCHSPANNUNGSTECHNIK UND SYSTEMMANAGEMENT
UNIV.-PROF. DR.-ING. SCHICHLER

Transiente Spannungsbeanspruchung kabelgebundener lichttechnischer Anlagen im Außenbereich

Transient voltage stress on pole
mounted street lights

Masterarbeit

von

Christian Niederauer, BSc

Graz, März 2014

Technische Universität Graz

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement



In Zusammenarbeit mit der Lichttechnische Gesellschaft Österreichs (LTG)

Arbeitskreis „Licht im Verkehrsraum – die Betreiberplattform“



Betreuer und Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack

Externe Betreuer: Ing. Robert Mark (LTG) und Mitglieder der Lichttechnischen
Gesellschaft Österreichs

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei der Lichttechnischen Gesellschaft Österreichs (LTG), im Besonderen bei Herrn Ing. Robert Mark sowie beim Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der TU Graz für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Masterarbeit bedanken.

Besonderer Dank gilt Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack für die wissenschaftliche Betreuung und Hilfestellungen über den gesamten Zeitraum dieser Masterarbeit sowie die Begutachtung, Korrektur und Prüfung der Arbeit.

Großen Dank möchte ich allen Mitgliedern der LTG für den Einsatz und das zeitliche Engagement aussprechen. Die Bereitstellung des Fachwissens, der zahlreichen Unterlagen sowie die interessanten Gespräche und Anlagenbesichtigungen haben wesentlich zu dieser Arbeit beigetragen. Zudem möchte ich mich für die Bearbeitung der von mir erstellten Datenerhebungsdokumente recht herzlich bedanken.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Kurt Preis vom Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik für die aufgewendete Zeit und kompetente Unterstützung bei der Durchführung der numerischen Simulationen.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement sowie der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH für das Mitwirken und die kollegiale Zusammenarbeit bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mir mit Rat zur Seite standen und mich stets motivieren.

Schließlich möchte ich noch meiner Familie danken, die immer hinter mir steht und ganz besonders meinen Eltern, die meine Ausbildung ermöglicht haben und mich in allen Lebenslagen unterstützen.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

(date)

.....

(signature)

Kurzfassung

Der Bereich der öffentlichen Beleuchtung ist in den letzten Jahren durch den Einzug neuer Technologien, wie LED-Systeme und die Zunahme an elektronischen Betriebsmitteln, von einer hohen Dynamik und rasanter Innovation geprägt. Im Zuge dieser Entwicklung mussten häufig Ausfälle der technologisch neuen Komponenten verzeichnet werden, wobei auch Störfälle in Zusammenhang mit einer Gewitteraktivität beobachtet wurden.

Diese Masterarbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis „Licht im Verkehrsraum – die Betreiberplattform“ der Lichttechnischen Gesellschaft Österreichs (LTG) und befasst sich mit elektromagnetischer Störbeeinflussung verkabelter lichttechnischer Straßenbeleuchtungsanlagen im Außenbereich infolge atmosphärischer Entladungen. Es wurden die Erfahrungen, Beobachtungen und Kenntnisse der Projektpartner zu dieser Thematik zusammengetragen. Zudem wurde eine Datenerhebung in Bezug auf transiente Störbeeinflussung durchgeführt.

Einen weiteren Bereich bildet die Untersuchung der induktiven Kopplung der in einem Lichtmast enthaltenen elektrischen Energieversorgung infolge einer atmosphärischen Entladung in der Nähe des Mastes. Die Ermittlung der induzierten Spannung erfolgte für Lichtmasten aus Kunststoff, Stahl und Aluminium.

Überdies wird die galvanische Kopplung bei einem Blitzeinschlag in der Nähe einer lichttechnischen Anlage behandelt. Dazu wurde eine Musteranlage definiert, auf vereinfachte Strukturen reduziert und die an diesen Strukturen auftretenden elektrischen Potentiale ermittelt.

Des Weiteren wird die galvanische Beeinflussung bei einem Direkteinschlag in einen leitfähigen Lichtmast, unter Annahme eines mit dem Mast verbundenen Horizontalerders, ausgeführt. Dadurch konnte der Einfluss der Bodenleitfähigkeit auf die Höhe des Stoßerdungswiderstandes und somit auf die Höhe der Spannung am Lichtmast verdeutlicht werden.

Schlüsselwörter:

öffentliche Beleuchtung, elektromagnetische Störbeeinflussung, verkabelte lichttechnische Straßenbeleuchtungsanlage, atmosphärische Entladung, induktive Kopplung, galvanische Kopplung

Abstract

In the last years the field of public lighting was characterized by high dynamics and rapid innovations due to the introduction of new technologies, like LED-systems and the increase of electronic devices. In the course of this development, many outages of these components have been noticed and failures were observed in context with thunderstorm activities.

This Master-Thesis is a result of the cooperation with the working group „Licht im Verkehrsraum – die Betreiberplattform“ of the “Lichttechnischen Gesellschaft Österreichs (LTG)” and deals with electromagnetic interference of pole mounted street lights caused by atmospheric lightning. The experiences, observations and knowledge of the project partners relating this topic were collected. Furthermore a data collection concerning transient interferences was carried out.

Another part of this work is the investigation of the inductive coupling of the power supply in a light pole due to a lightning strike beside the pole. The study was performed for light poles made of plastic, steel and aluminium.

Moreover the galvanic coupling due to a lightning strike to the ground in the vicinity of a lighting system was considered. Therefore an exemplary system was defined and reduced to simplified structures. Afterwards the electric potentials at these structures were determined.

Beyond that the galvanic interference caused by a direct lightning strike into an electrically conductive light pole, assuming the pole is connected with a horizontal grounding conductor, was studied. Thus the influence of the soil resistivity to the transient grounding resistance and hence to the voltage of the light pole could be clarified.

Keywords:

public lighting, electromagnetic interference, wired pole mounted street lights, cable network, atmospheric discharge, inductive coupling, galvanic coupling

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	Begriffe und Definitionen	3
2.2	Gefahren-/Störquellen für verkabelte lichttechnische Anlagen	4
2.3	Elektromagnetische Kopplungsmechanismen	6
2.4	Entstehung und Aufbau von Gewitterzellen	9
2.4.1	Entwicklungsstadien einer Gewitterzelle.....	9
2.4.2	Entstehung und Verlauf der Blitze	11
2.5	Zeitliche Stromverläufe und Kenngrößen	13
2.5.1	Blitzstromverläufe aus der Standardliteratur	14
2.5.2	Blitzstrom nach ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 1.....	14
2.5.3	Blitzstromparameter nach ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 1.....	15
2.5.4	Zeitfunktionen des Blitzstroms für Analysezwecke	17
2.6	Blitzdichte in Österreich	19
2.6.1	Polarität des Blitzstromes	20
2.6.2	Blitzstromamplituden.....	20
3	Aufbau einer verkabelten lichttechnischen Anlage	22
3.1	Versorgung der Straßenbeleuchtung mit elektrischer Energie.....	22
3.2	Lichtmasten	23
3.3	Kabeltypen.....	24
3.4	Leitungen	24
3.5	Anlagenerder/Begleiterder	24
3.6	Kabelgraben.....	25
3.7	Sicherungskasten/Kabelübergangskasten.....	25
3.8	LED-Leuchte	26
3.9	Anlagensteuerung und Lichtmanagement	28
4	Datenerhebung	30

4.1	Datenerhebung „Allgemeine Fragestellungen“	30
4.2	Datenerhebung „Beschreibung einer verkabelten lichttechnischen Anlage“	31
5	Die induktive Kopplung verkabelter lichttechnischer Anlagen	34
5.1	Grundlagen zur induktiven Kopplung	35
5.2	Die induktive Kopplung bei Kunststoffmasten	37
5.2.1	Blitzeinschlag im Nahbereich der lichttechnischen Anlage mit Berücksichtigung des Blitzkugelverfahrens	39
5.2.2	Blitzeinschlag in ein Objekt in unmittelbarer Nähe der lichttechnischen Anlage	44
5.2.3	Analytischer Verlauf der induzierten Spannung	47
5.3	Die induktive Kopplung bei Stahl- und Aluminiummasten	48
5.3.1	Modellbildung	48
5.3.2	Simulationsparameter	49
5.3.3	Auswertung	49
5.3.4	Feldbilder	54
5.4	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	57
6	Die galvanische Kopplung verkabelter lichttechnischer Anlagen	58
6.1	Grundlagen zur galvanischen Kopplung	58
6.2	Modellbildung mit der Methode der finiten Elemente	64
6.2.1	Das Basismodell	65
6.2.2	Integration lichttechnischer Strukturen in das Basismodell	67
6.2.3	Umgebungsstrukturen	84
6.2.4	Allgemeines zum Simulationsmodell	85
6.3	Analytische Ermittlung des Stoßerdungswiderstandes bei einem Blitzeinschlag in einem leitfähigen Mast unter Annahme eines mit dem Mast verbundenen Horizontalerders	86
6.3.1	Horizontalerdertheorie	86
6.3.2	Untersuchung des Stoßerdungswiderstandes	88
6.4	Interpretation und Diskussion der Ergebnisse	91
7	Weiterführende Gedanken	93
8	Zusammenfassung	94

9	Verzeichnisse.....	96
9.1	Literaturverzeichnis	96
9.2	Symbolverzeichnis	99
9.3	Abkürzungsverzeichnis	101
10	Anhang.....	102

1 Einleitung

Die Straßenbeleuchtung hat die wesentliche Aufgabe, als Bestandteil der allgemeinen öffentlichen Sicherheit und Ordnung, die Verkehrssicherheit aller Verkehrsteilnehmer in den Dunkelstunden zu verbessern. Sie dient zur Erhöhung der persönlichen Sicherheit der Bürger und soll einen Beitrag zur Steigerung der Attraktivität und Belebung von öffentlichen Bereichen leisten. [1] [2]

Zu diesen Zielsetzungen müssen zunehmend wirtschaftliche und ökologische Aspekte beachtet werden, die sich aus der Forderung zur Kostensenkung in Zusammenhang mit einer Erhöhung von Energieeffizienz, Lebensdauer und Zuverlässigkeit ergeben. Für diesen Wandel ist ebenfalls eine Verordnung der Europäischen Union zur Umsetzung von Energiesparmaßnahmen im Rahmen des Klimaschutzprogramms maßgebend. Durch den Einzug von neuen Technologien, wie LED und die Zunahme an elektronischen Betriebsmitteln und Komponenten, ist der Bereich der öffentlichen Beleuchtung in den letzten Jahren von einer hohen Dynamik geprägt. Durch die rasche Entwicklung wurden manche Betreiber und Anlagenverantwortliche mit neuen Problemen konfrontiert. Sie berichten von vermehrten Störfällen und Ausfallerscheinungen bei den technologisch neuen Komponenten, die sich von den Störfällen herkömmlicher lichttechnischer Komponenten unterscheiden. Die Schadensbilder stellen sich in jeweilig unterschiedlichem Ausmaß dar. So wurden Einzel- und Serienausfälle von lichttechnischen Komponenten auch nach ungewöhnlich kurzer Einsatzdauer verzeichnet. Die Störfälle wurden häufig in Zusammenhang mit einer Gewittertätigkeit beobachtet, wodurch die Thematik von transienten Spannungsbeanspruchungen und die zukünftigen Anforderungen bei einem Einsatz moderner elektronischer Geräte breitgetreten worden ist. Demgegenüber stehen Betreiber, die auch nach einer längeren Einsatzdauer moderner lichttechnischer Anlagen kaum Störfälle zu verzeichnen haben, was Anlass für eine genauere Untersuchung bietet.

Die Lichttechnische Gesellschaft Österreichs (LTG) hat die Zielsetzung, die Pflege und Förderung der gesamten Lichttechnik in Theorie und Praxis, insbesondere der Forschung, des Unterrichts, der Berufsausbildung und der Normung sowie der zwischenstaatlichen Zusammenarbeit auf diesem Gebiet, voranzutreiben. Mitglieder der LTG sind in Österreich ansässige und auf dem lichttechnischen Sektor tätige Industrie- und Handelsunternehmen, Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVUs), Behörden, Gemeinden, Zivilingenieure, Lichtplaner, Elektroplaner und Lichtkonsumenten. Der Arbeitskreis „Licht im Verkehrsraum – die Betreiberplattform“ besteht aus namhaften Vertretern von Außenbeleuchtungsanlagen und öffentlicher Beleuchtungen, die unter anderem in nationalen Normengremien für die Lichttechnik und dem Bereich der Elektrotechnik mitwirken.

Der Arbeitskreis hat sich an das Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz gewendet, um im Rahmen eines Untersuchungsvorhabens über mögliche transiente Spannungsbeanspruchungen und elektrostatische Impulse bei

Leuchten im Außenbereich (insbesondere bei einem künftigen Einsatz von LED-Leuchten) Erkenntnisse zu gewinnen. Das Untersuchungsvorhaben wurde im Zuge dieser Masterarbeit durchgeführt, wobei im gegenseitigen Einvernehmen eine inhaltliche Eingrenzung auf verkabelte lichttechnische Anlagen erfolgte.

Für die Startphase dieser Arbeit wurde der Schwerpunkt auf die Einbeziehung der Erfahrungen der beteiligten Unternehmen gelegt. Die Zielsetzung war, das erworbene Wissen und die Beobachtungen in Bezug auf transiente Störbeeinflussung, Ausfallerscheinungen und Lebensdauer moderner lichttechnischer Installationen zusammenzutragen. Der Informationsaustausch erfolgte durch persönliche Gespräche, Anlagenbesichtigungen vor Ort, Telefonate sowie E-Mails. Darüber hinaus wurden den Betreibern zwei Datenerhebungsunterlagen zur Bearbeitung übermittelt (siehe Anhang). Die Datenerfassungsunterlage „Allgemeine Fragestellungen“ ermöglichte den Projektpartnern die jeweilig vorliegende Situation darzustellen und deren Auffassungen und Ansichten in Zusammenhang mit der Thematik festzuhalten. Die Datenerfassungsunterlage „Beschreibung einer verkabelten lichttechnischen Anlage“ diente zur Dokumentation einer Anlage mit einem LED-System oder mit einem System aus „traditionellen“ Lampen mit elektronischen Vorschaltgeräten. Die Betreiber wurden in Bezug auf ihre Gegebenheiten aufgefordert mehrere Anlagen mit Hilfe dieses Dokuments zu beschreiben und diese Anlagen nach der Häufigkeit der Störfälle zu kategorisieren. Durch eine anschließende Gegenüberstellung der erhaltenen Anlagen wurde eine Möglichkeit geschaffen etwaige Auffälligkeiten zu erkennen, diese näher zu untersuchen und daraus Erkenntnisse für die zukünftige Planung, Installation und den Betrieb abzuleiten. Da sich im Verlauf der Datenerfassung zunehmend zeigte, dass die gewonnenen Daten keine Analyse hinsichtlich transienter Störbeeinflussung zuließen, wurde das Untersuchungsvorhaben anhand theoretischer Ansätze fortgesetzt.

Ein Bestandteil dieser Untersuchungen ist die Ermittlung der induktiven Kopplung der in einem Lichtmast enthaltenen elektrischen Energieversorgung infolge einer atmosphärischen Entladung in der Nähe des Lichtmastes. Die Ermittlung der induzierten Spannung in die Leiterstruktur erfolgte für Lichtmasten aus Kunststoff, Stahl und Aluminium.

Des Weiteren wird die galvanische Kopplung infolge des im Erdreich fließenden Stroms bei einem Blitzeinschlag in der Nähe einer lichttechnischen Anlage behandelt. Dazu wurde eine Musteranlage definiert und auf die für die galvanische Kopplung wesentlichen Strukturen reduziert. In weiterer Folge wurde die Beeinflussung des elektrischen Strömungsfeldes durch diese Strukturen untersucht und die an diesen Strukturen auftretenden elektrischen Potentiale ermittelt.

Ferner wird die galvanische Beeinflussung bei einem Direkteinschlag in einen leitfähigen Lichtmast, unter Annahme eines mit dem Lichtmast verbundenen Horizontalerders, anhand eines analytischen Ansatzes behandelt.

2 Grundlagen

2.1 Begriffe und Definitionen

Die Behandlung elektromagnetischer Störbeeinflussung und deren Wirkungen erfordert die Definition von Begriffen, die in diesem Zusammenhang stehen.

In der Vorschrift ÖVE/ÖNORM E 8001-1: 2010-03-01 [3] sind folgende Definitionen angeführt:

§ 3.10.1 Direkter Blitzschlag

Atmosphärische Entladung, die mindestens einen Teilentlade-Stromweg über das Verteilungsnetz, die Verbraucheranlage oder den Baukörper, welcher mindestens Teile der Verbraucheranlage enthält (einschließlich Blitzschutzanlage), aufweist.

§ 3.10.2 Indirekter Blitzschlag

Atmosphärische Entladung, die die Bedingung gemäß § 3.10.1 nicht erfüllt, jedoch über induktive oder kapazitive Kopplung oder infolge blitzstrombedingter Potentialanhebungen Überspannungen im Verteilungsnetz oder in der Verbraucheranlage hervorruft.

§ 3.10.3 Direkte Blitzeinwirkung

Folgen eines direkten Blitzschlages in elektrischen Anlagen.

Es handelt sich dabei um die thermischen, magnetischen und mechanischen Wirkungen des Entladestroms sowie um die aus dessen Spannungsabfall entlang des Ableitweges resultierenden Überspannungen.

§ 3.10.4 Indirekte Blitzeinwirkung

Folgen eines indirekten Blitzschlages in elektrischen Anlagen.

Wesentlich sind dabei praktisch nur die damit verbundenen Überspannungen und der Energieinhalt der einlaufenden Überspannungswelle.

In der Vorschrift ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-2: 2010-02-02 [4] sind folgende Definitionen angeführt:

§ 3.9: Elektromagnetische Verträglichkeit EMV

Fähigkeit einer Einrichtung oder eines Systems, in ihrer/seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne in diese Umgebung, zu der auch andere Einrichtungen gehören, unzulässige elektromagnetische Störgrößen einzubringen.

§ 3.10: Entladung statischer Elektrizität ESD

Übertragung elektrischer Ladung zwischen Körpern verschiedenen elektrostatischen Potentials bei deren Annäherung oder direkter Berührung.

In der Vorschrift ÖVE/ÖNORM EN 60664-1: 2008-03-01 [5] sind folgende Definitionen angeführt:

§ 3.7 Überspannung

Jede Spannung mit einem Scheitelwert, der den entsprechenden Scheitelwert der höchsten Dauerspannung bei normalen Betriebsbedingungen überschreitet.

§ 3.7.2 Transiente Überspannung

Kurzzeitige Überspannung von einigen Millisekunden Dauer oder weniger, schwingend oder nicht schwingend, in der Regel stark gedämpft.

§ 3.7.3 Schaltüberspannung

Transiente Überspannung an einem beliebigen Punkt des Systems, bewirkt durch einen bestimmten Schaltvorgang oder einen Fehler.

§ 3.7.4 Blitzüberspannung

Transiente Überspannung an einem beliebigen Punkt des Systems, bewirkt durch eine bestimmte Blitzentladung.

2.2 Gefahren-/Störquellen für verkabelte lichttechnische Anlagen

Transiente (Über)-Spannungen können verschiedene Ursachen haben. Sie entstehen vorwiegend durch [6]:

- Atmosphärische Entladungen
- Entladungen statischer Elektrizität
- Schalthandlungen
- Fehlschaltungen

In dieser Arbeit werden ausschließlich atmosphärische Entladungen als elektromagnetische Störquellen betrachtet. Die Abbildungen 2-1 und 2-2 zeigen schematisch mögliche Gefahrenquellen für verkabelte lichttechnische Anlagen, die von einer atmosphärischen Gewitteraktivität ausgehen können. Eine Untersuchung der Beeinflussung bietet zahlreiche Möglichkeiten, die sich einerseits aus den potentiellen Einschlagstellen für eine atmosphärische Entladung und andererseits aus den verschiedenen elektromagnetischen Kopplungsmechanismen (siehe Abschnitt 2.3) sowie Übertragungswege ergeben. Eine transiente Störbeeinflussung kann beispielweise durch einen Einschlag in eine vorgelagerte Versorgungsfreileitung oder durch einen Einschlag in der Nähe einer Trafostation, eines Verteiler-/Schaltschranks, eines Lichtmastes beziehungsweise durch einen Direkteinschlag in einen Lichtmast erfolgen. Zu diesen Szenarien sind zudem elektrostatische Auf- und Entladeerscheinungen denkbar, die häufig bei LED-Leuchten in Zusammenhang mit elektrisch isolierenden Lichtmasten genannt werden. Folglich und angesichts der Komplexität der Thematik wird in dieser Arbeit

nur ein Teilbereich der elektromagnetischen Beeinflussung infolge atmosphärischer Entladungen behandelt.

Bei einer atmosphärischen Entladung wird im elektrotechnischen Sinn zwischen der direkten Wirkung (thermische, magnetische, mechanische Wirkung des Entladestroms) und indirekten Wirkung (kein direkter Einschlag, induktive und/oder kapazitive Kopplung, Potentialanhebung) unterschieden [7]. Bei einem Direkteinschlag in einen Lichtmast können die direkte Wirkung (Ausschmelzung, Erwärmung, Kraftwirkung beim getroffenen Objekt) und die indirekte Wirkung (elektromagnetische Kopplung innerhalb des Systems und/oder mit dem System gekoppelte Komponenten) in kombinierter Form auftreten. Bei einem Blitzeinschlag in der Nähe einer lichttechnischen Anlage kann von einer indirekten Wirkung ausgegangen werden.

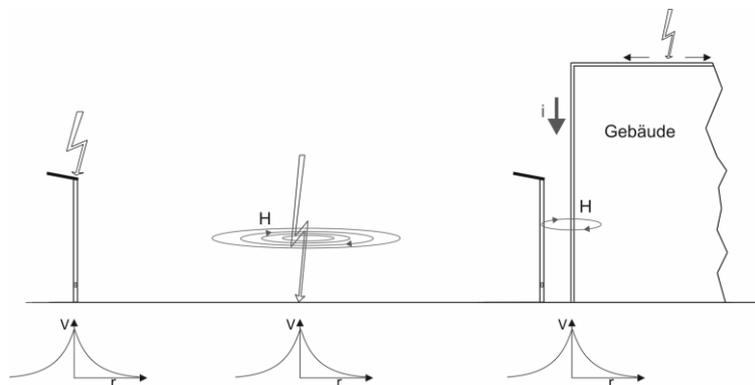


Abbildung 2-1: Gefahrenquellen, Übersicht 1

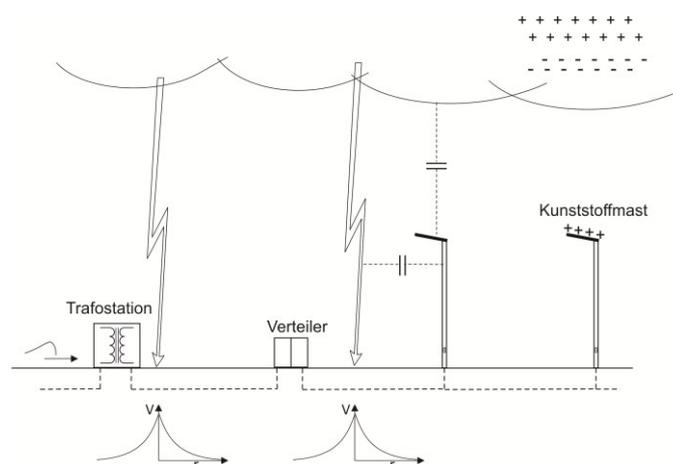


Abbildung 2-2: Gefahrenquellen, Übersicht 2

2.3 Elektromagnetische Kopplungsmechanismen

Atmosphärische Entladungen haben infolge ihres elektromagnetischen Feldes Auswirkungen auf elektrische und elektronische Einrichtungen und somit auch auf lichttechnische Installationen in ihrer Umgebung.

Störgrößen gelangen je nach Ausbreitungsmedium und Entfernung über unterschiedliche Wege und in beliebigen Kombinationen zum gestörten Empfängerstromkreis. Grundsätzlich werden folgende vier Arten von Kopplungsmechanismen unterschieden [8]:

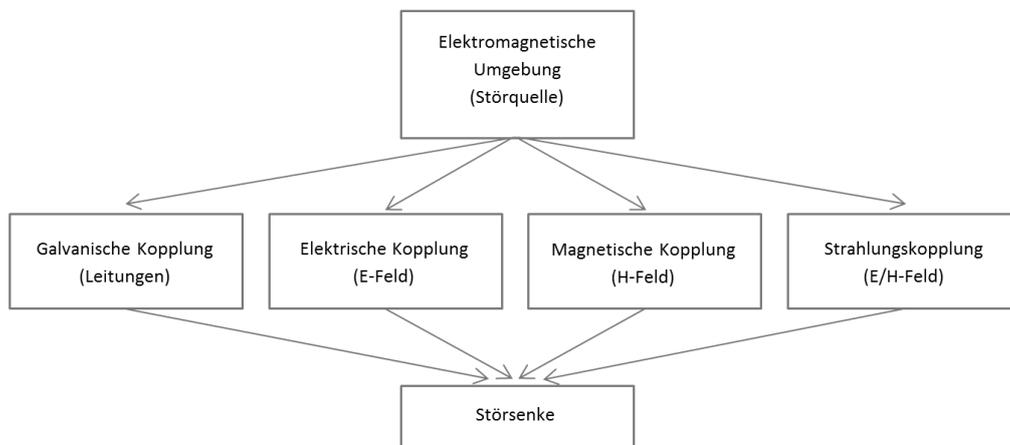


Abbildung 2-3: Kopplungsmechanismen elektromagnetischer Beeinflussungen

Galvanische Kopplung

Galvanische Kopplung tritt auf, wenn zwei Stromkreise eine gemeinsame Impedanz Z besitzen. Der Strom im Stromkreis 1 erzeugt an der Impedanz Z einen Spannungsabfall, welcher sich im Stromkreis 2 dem Nutzsignal überlagert.

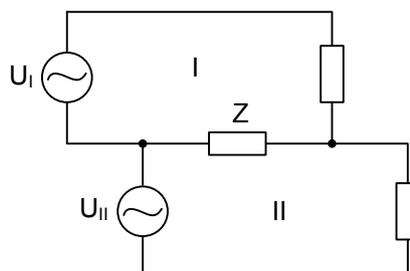


Abbildung 2-4: Galvanische Kopplung

Kapazitive Kopplung

Kapazitive (elektrische) Kopplung tritt zwischen zwei Stromkreisen auf, deren Leiter unterschiedliche Potentiale aufweisen. Die Potentialdifferenz bewirkt ein elektrisches Feld zwischen den Leitern, dessen beeinflussende Wirkung im Ersatzschaltbild durch Streukapazitäten nachgebildet werden kann. Infolge einer Änderung des elektrischen Feldes kommt es zu Verschiebungsströmen, die sich als Spannungsabfälle in einer dem Nutzsignal überlagerten Störspannung äußern.

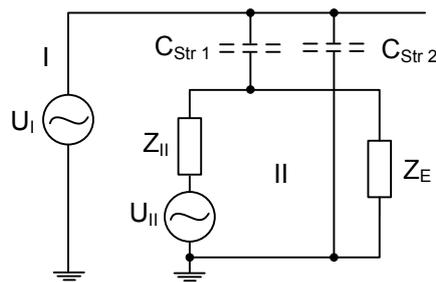


Abbildung 2-5: Kapazitive Kopplung

Die kapazitiv eingekoppelte Störspannung ist mit der Frequenz und somit der zeitlichen Änderungsgeschwindigkeit der Spannung im Kreis 1, der Koppelkapazität sowie dem ohmschen Gesamtinnenwiderstand des Systems 2 proportional.

Es ergeben sich folgende Gegenmaßnahmen um die Koppelkapazität zu verringern:

- Vergrößern des Abstandes zwischen den Leitern
- Möglichst kurze Strecken parallel geführter Leitungen
- Schirmung

Induktive Kopplung

Induktive (magnetische) Kopplung tritt zwischen zwei oder mehreren Leiterschleifen auf, von denen zumindest eine stromdurchflossen ist. Der sich im Stromkreis 1 ändernde Strom ist mit einem sich ebenso veränderlichen Magnetfeld verknüpft, welches im Stromkreis 2 nach dem Induktionsgesetz eine Spannung induziert. Die Wirkung des Magnetfeldes des Kreises 1 auf den Kreis 2 kann im Ersatzschaltbild durch eine Gegeninduktivität $M_{I/II}$ oder eine Störspannung dargestellt werden. Ist der beeinflusste Stromkreis 2 geschlossen, so treibt die Störspannung einen Störstrom über die Impedanzen der Schleife.

Bei diesen Betrachtungen wird eine Rückwirkung des 2. Systems auf das 1. System ausgeschlossen, das heißt, der Strompegel im System 1 ist um ein Vielfaches höher als der Strom-

pegel im System 2. Der an der Belastungsimpedanz Z_E auftretende Anteil der Störspannung richtet sich nach dem Spannungsteiler $Z_{II}(\omega)/Z_E(\omega)$.

Die induktiv eingekoppelte Störspannung ist mit der Frequenz, das heißt Änderungsgeschwindigkeit des Stromes im Kreis 1 sowie der Gegeninduktivität $M_{I/II}$ zwischen den Systemen und damit der Fläche A_{II} , proportional. Aus diesen Abhängigkeiten ergeben sich Gegenmaßnahmen, welche eine Verringerung der Gegeninduktivität bewirken:

- Vergrößern des Abstandes zwischen den sich störenden Systemen
- Verkleinern der Schleifenfläche beider Systeme
- Möglichst kurze Strecken parallel geführter Leitungen
- Orthogonale Anordnung der Schleifen
- Verdrillen von Hin- und Rückleiter einer oder beider Maschen
- Schirmung des 2. Systems
- Reduktionsleiter

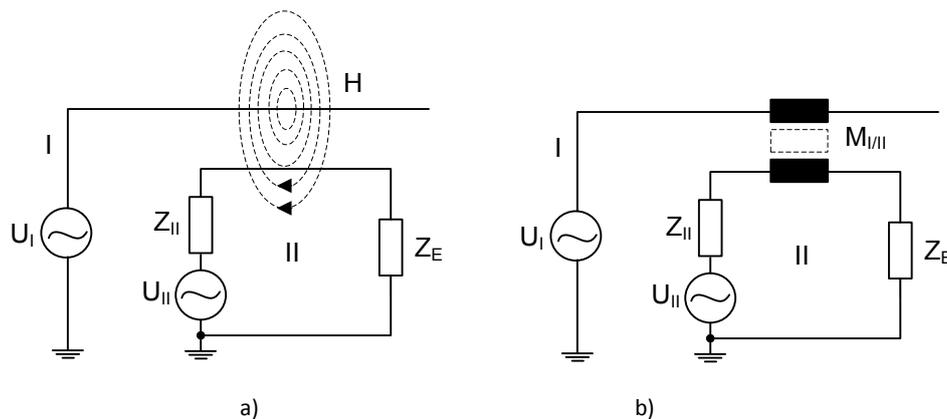


Abbildung 2-6: Induktive Kopplung: a) Feldmodell, b) Ersatzschaltbild

Strahlungskopplung

Zur Strahlungskopplung werden jene Fälle gezählt, bei denen sich das gestörte System im Fernfeld des Strahlungsfeldes von der Störquelle befindet. Elektrisches und magnetisches Feld treten hierbei gleichzeitig auf und sind über den Wellenwiderstand des freien Raumes miteinander verknüpft. Die Strahlungskopplung ist bei höheren Frequenzen von Bedeutung, sobald die Wellenlänge und Abmessungen in etwa derselben Größenordnung liegen.

2.4 Entstehung und Aufbau von Gewitterzellen

Voraussetzung für das Entstehen von Gewittern sind warme Luftmassen mit genügend hohem Wasserdampfgehalt, die in große Höhe transportiert werden. Dieser Prozess kann auf unterschiedliche Weise erfolgen und man unterscheidet daher [9] [10]:

- **Kaltfront-Gewitter:** Größere Kaltluftmassen schieben sich aufgrund des höheren spezifischen Gewichts unter die vorhandene Warmluft, wodurch diese nach oben gedrückt wird. Da diese Gewitterart durch die Temperaturdifferenz beider Luftmassen hervorgerufen wird, können sie zu jeder Tages- und Nachtzeit und auch im Winter auftreten. Typischerweise sind von der Gewittertätigkeit großräumige Gebiete betroffen. Das Kaltfront-Gewitter ist in Europa die häufigste Gewitterart.
- **Wärme-Gewitter:** Der Boden wird durch intensive Sonneneinstrahlung lokal erhitzt, wodurch bodennahe Luftschichten erwärmt werden und aufsteigen. Wärme-Gewitter kommen daher eher am Nachmittag oder späten Abend vor und sind meist lokal begrenzt.
- **Orographische Gewitter:** Hierbei werden feuchtwarme Luftmassen durch ansteigendes Gelände angehoben. Orographische Gewitter entstehen bevorzugt am Übergang vom Flachland zu Gebirgsmassiven und können innerhalb des ganzen Jahres entstehen.
- **Warmfront-Gewitter:** Sie entstehen durch Aufgleiten warmer auf kalte Luftmassen, sind sehr selten und entstehen in Europa hauptsächlich im Winter, wenn feuchte, warme Meeresluft auf kontinentale Kaltluft trifft.

Die aufsteigende Luft kühlt sich infolge der Druckabnahme ab und erreicht die Sättigungstemperatur des Wasserdampfes. Weiteres Aufsteigen bewirkt die Kondensation des überschüssigen Wasserdampfes und damit die Entstehung von Wolken. Die entstandene Kondensationswärme mindert die Abkühlung der aufsteigenden Luftmassen, was die Luft erwärmt und weiter aufsteigen lässt. An der 0°C-Grenze beginnen die Wassertröpfchen zu gefrieren, womit wiederum Gefrierwärme frei wird, die die Luft erneut erwärmt und auftreibt. Es bilden sich Aufwindschläuche mit Vertikalgeschwindigkeiten bis etwa 100 km/h, die aufgetürmte Quellwolken von typisch 5 bis 12 km Höhe und 5 bis 10 km Durchmesser erzeugen [9] [10].

2.4.1 Entwicklungsstadien einer Gewitterzelle

Ein Gewitter beinhaltet in der Regel mehrere Gewitterzellen von einigen Kilometern Durchmesser. Jede Zelle durchläuft dabei eine charakteristische Entwicklung und existiert von ihrer Entstehung bis zum Zerfall etwa eine halbe Stunde bis eine Stunde. [9] [10]

- Wachstumsstadium: Diese Phase ist ausschließlich durch Aufwind bestimmt; es fällt kein Niederschlag aus der Wolke.
- Reifestadium: Dieses Stadium zeichnet sich durch Niederschlagsbildung in Form von Regen, Schnee, Graupel und Hagel aus. Vorerst werden die Niederschlagsteilchen von dem Aufwind getragen. Mit zunehmender Menge und Größe beginnen diese aber mehr und mehr gegen den Aufwind zu fallen. Die zunehmende Niederschlagsmenge verlässt den Wolkenbereich und fällt als starker Niederschlag zur Erde. Es wird kalte Luft nach unten transportiert (Fallwind), der sich bei Annäherung an den Boden seitlich ausbreitet und hierbei Gewitter-Sturmböen verursacht.
- Zerfalls- oder Auflösestadium: Es existiert nur noch Abwind und die Zelle regnet aus.

Elektrische Ladungen in der Gewitterzelle

Der Mechanismus der Ladungstrennung sowie die Verteilung der Ladungen innerhalb einer Gewitterwolke sind bis heute nicht gänzlich geklärt. Durch Messungen und Beobachtungen weiß man jedoch, dass sich positive Ladungen vorwiegend im oberen Teil, negative Ladungen im unteren Teil einer Gewitterzelle befinden (Abbildung 2-7). Die positiven Ladungen sammeln sich bevorzugt auf gefrorenen, festen Niederschlagsteilchen an, während sich negative Ladungsträger bevorzugt auf (noch nicht gefrorenen) Regentropfen ansammeln. Der Potentialunterschied zwischen dem negativen Raumladungszentrum und der Erde beträgt ca. 50 MV bis 100 MV. Demnach würden Feldstärken von 50 kV/m bis über 100 kV/m auf dem Erdboden auftreten. Sobald jedoch die Bodenfeldstärke einige kV/m erreicht, werden z. B. an den Spitzen des Bodenbewuchses positive Koronaladungen abgesprüht. Dadurch kann ein weiteres Raumladungsgebiet unterhalb der Gewitterwolke entstehen, wodurch die Bodenfeldstärke unter 10 kV/m bis maximal 20 kV/m begrenzt wird. [9] [10]

Die hier genannte Darstellung der Ladungsverteilung genügt im Allgemeinen, um die meisten mit Gewittern verbundenen elektrischen Erscheinungen am Boden zu erklären. Aus jüngeren Untersuchungen weiß man jedoch, dass die Ladungsverteilung wesentlich komplexer sein kann. [10]

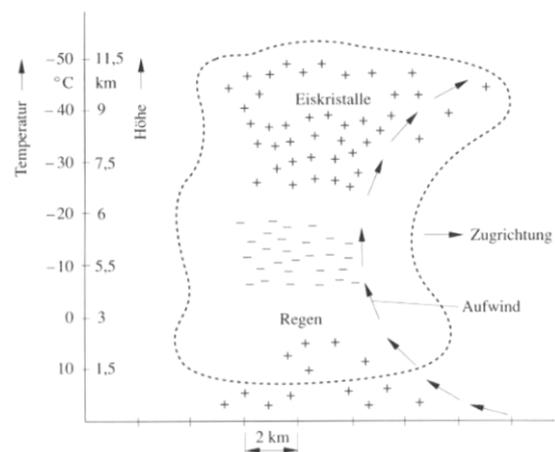


Abbildung 2-7: Typische Gewitterzelle eines Wärmegeewitters [10]

2.4.2 Entstehung und Verlauf der Blitze

Blitze sind atmosphärische Entladungen und werden auch als LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse) bezeichnet. Jeder Blitz beginnt mit einer „Leader“-Entladung (Leitblitz), wenn infolge einer zufällig vorhandenen Raumladungskonzentration die örtliche Feldstärke Werte von einigen 100 kV/m erreicht. Jeder Blitz durchläuft dabei mehrere Entwicklungsstadien. [9] [10]

Man unterscheidet folgende Blitztypen [9] [10]:

- Bei *Wolke-Wolke-Blitzen* findet ein Ausgleich zwischen positiven und negativen Wolkenladungszentren statt.
- Bei *Wolke-Erde-Blitzen (Abwärtsblitze)* entwickelt sich ein Leader aus einem Ladungszentrum einer Gewitterwolke zur Erde hinab und neutralisiert die Wolkenladungen und die auf der Erdoberfläche influenzierten Ladungen. Charakteristisch sind die zur Erde gerichteten Verästelungen. Wolke-Erde-Blitze stellen für die getroffenen Objekte eine härtere Beanspruchung dar als Erde-Wolke-Blitze und werden daher der Bemessung von Blitzschutzmaßnahmen zugrunde gelegt.
 - *Negative Wolke-Erde-Blitze*: Hierbei schiebt sich ein mit negativer Wolkenladung gefüllter Ladungskanal zur Erde vor.
 - *Positive Wolke-Erde-Blitze*: Diese können aus dem positiven Ladungsbereich der Wolke entstehen.

Der Leitblitz aus dem oberen positiven Ladungszentrum endet häufig am unteren negativen Ladungszentrum und führt so zu einem Wolke-Wolke-Blitz. Bei den Wolke-Erde-Blitzen sind daher die positiven Abwärtsblitze (ca. 10 % Anteil) seltener als die negativen (ca. 90 % Anteil).

- *Erde-Wolke-Blitze (Aufwärtsblitze)* gehen von Bergspitzen und hohen Objekten (z. B. Türme, Sendeanlagen, Kamine mit einer Objekthöhe von mindestens 100 m) aus und sind durch die zur Wolke gerichteten Verästelungen erkennbar. Die zur Auslösung einer Leader-Entladung notwendige hohe Feldstärke wird aufgrund der extrem feldverzerrenden Wirkung an der Spitze des exponierten Objektes erreicht. Um die auf der Erde notwendige Feldstärke trotz der Spitzenwirkung zu erreichen, muss sich für gewöhnlich das (untere) negative Ladungszentrum der Gewitterwolke unmittelbar über dem exponierten Objekt befinden. Das (obere) positive Ladungszentrum hat eine geringere Wirkung. Negative Erde-Wolke-Blitze (ca. 95 % Anteil) sind daher wesentlich häufiger als die positiven (ca. 5 % Anteil). An einen Erde-Wolke-Blitz kann sich infolge des von ihm geschaffenen Funkenkanals ein Wolke-Erde-Blitz anschließen.

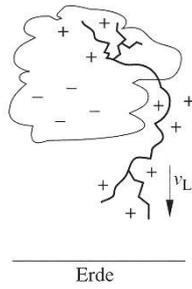
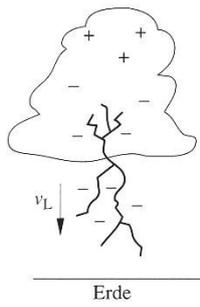


Abbildung 2-8: Negativer (links) und positiver (rechts) Wolke-Erde-Blitz [10]

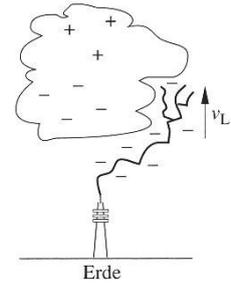
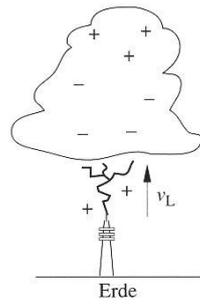


Abbildung 2-9: Negativer (links) und positiver (rechts) Erde-Wolke-Blitz [10]

Die Polarität eines Blitzes richtet sich nicht nach der Ladung des auslösenden Leaders, sondern nach der Polarität der zur Erde abgeführten Ladung [10].

Da alle Stoßstromparameter von Aufwärtsblitzen niedriger sind, als jene der Abwärtsblitze, ist anzunehmen, dass die Blitzstromparameter der Aufwärtsblitze durch die höchsten Parameter der Abwärtsblitze abgedeckt werden [11].

Der Entladungsprozess eines Wolke-Erde-Blitzes wird nun anhand des am häufigsten auftretenden, negativen Typs beschrieben. Aus dem negativen Ladungszentrum der Gewitterwolke schiebt sich ein mit Wolkenladung gefüllter, zylinderförmiger Kanal (typisch einige 10 m Durchmesser) mit einem dünnen, hochionisierten Plasmakern (typisch 1 cm Durchmesser) ruckweise zur Erde vor. Der Leitblitz hat eine Vorwachsgeschwindigkeit von ca. 300 km/s (ein Tausendstel der Lichtgeschwindigkeit) und wächst ruckartig in Abschnitten von einigen 10 m vor. Die Pausen zwischen den Ruckstufen betragen einige 10 μ s (Abbildung 2-10). [9]

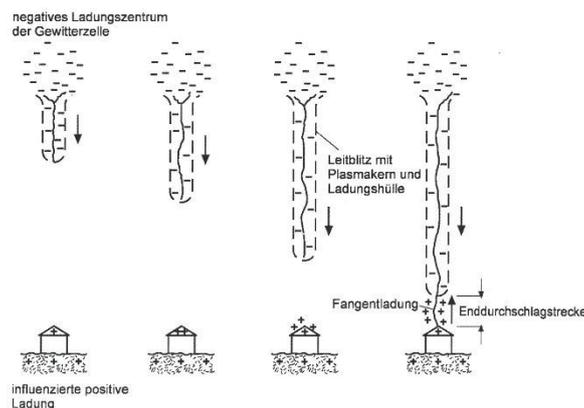


Abbildung 2-10: Entwicklung des Leitblitzes [9]

Sobald sich der Leitblitz der Erde auf einige 10 bis einige 100 m angenähert hat, erhöht sich an nahe gelegenen Spitzen (z. B. Gebäudegiebel, Bäume, Hochspannungsleitung) die elektrische Feldstärke derart, dass die elektrische Festigkeit der Luft an den Spitzen der Objekte

überschritten wird und sich von diesen weg mehrere Fangentladungen (einige 10 bis einige 100 m) ausbilden, die dem Leitblitz entgegenwachsen. Erreicht eine Fangentladung als erste die Durchschlagsstrecke zum Leitblitzkopf, so legt diese die endgültige Einschlagstelle des Blitzes fest. Die Fangentladung wächst mit etwa 100.000 km/s in den Ladungsschlauch und führt die gespeicherte Ladung in 10 bis zu einigen 100 μs zur Erde ab. Dieser Vorgang ist als die eigentliche, grell aufleuchtende Blitzentladung sichtbar und wird als Hauptentladung bezeichnet. Der Hauptblitz verläuft in umgekehrter Richtung zur Leitblitz-Entwicklung und wird daher auch als „Return-Stroke“ bezeichnet. Der Strom hat an der Einschlagstelle einen unipolaren stoßartigen Verlauf mit Maximalwerten von typisch einigen 10 kA bis zu möglichen Blitzstromspitzen von über 100 kA (Abbildung 2-12 und 2-13). [9] [10]

Während die positiven Abwärtsblitze vornehmlich Einzelblitze sind, treten bei negativen Abwärtsblitzen häufig mehrere Folgeblitze (multiple Entladungen) auf. Diese Folgeblitze können sich durch die nach dem Hauptblitz vorhandene Rest-Ionisation ausbilden, wenn ein entsprechendes Ladungsangebot in der Gewitterwolke vorhanden ist. Die Folgeblitze besitzen geringere Amplituden, jedoch höhere Stromsteilheiten, da der vorherige noch leitfähige Kanal ein schnelleres Vorwachsen ermöglicht. Die Pausenzeit zwischen aufeinanderfolgenden Teilblitzen liegt im Bereich von 40 bis 300 ms. Bei den negativen Wolke-Erde-Blitzen sind etwa 80 % bis 90 % multiple Blitze. Sie haben im Durchschnitt drei bis vier Teilblitze, wobei bis zu etwa 20 Teilblitze möglich sind. [10]

Bei manchen Blitzentladungen kann auch ein Langzeitstrom auftreten. Dieser kann über mehrere 100 ms fließen und Stromstärken bis einige 100 A aufweisen.[9] [10]

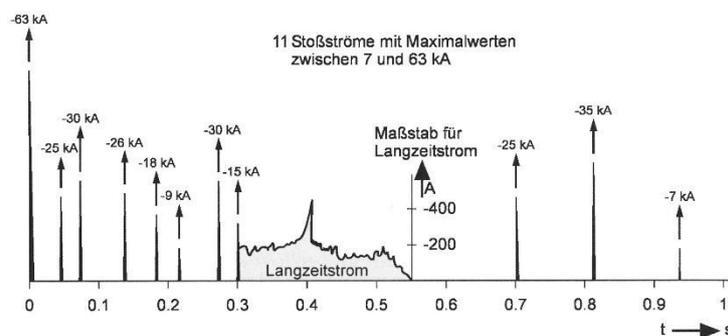


Abbildung 2-11: Multipler negativer Wolke-Erde-Blitz nach Berger [9]

2.5 Zeitliche Stromverläufe und Kenngrößen

Für die Beurteilung von Überspannungen, welche durch atmosphärische Entladungen hervorgerufen werden, sind die transienten Stromverläufe, deren Maximalwerte sowie die Blitzstromsteilheiten ausschlaggebend.

2.5.1 Blitzstromverläufe aus der Standardliteratur

Der zeitliche Verlauf von positiven Wolke-Erde-Blitzen und negativen Wolke-Erde-Blitzen ist prinzipiell ähnlich (Abbildung 2-12). Charakteristisch ist ein schneller Anstieg auf das Maximum und ein vergleichsweise langsames, näherungsweise exponentielles Abklingen. Sie unterscheiden sich in der zeitlichen Ausdehnung, in der Stromanstiegsgeschwindigkeit sowie in der transportierten Ladung. [9] [10]

Positive Blitze dauern im Durchschnitt zehnmal länger als negative und enden meist nach über 1 ms. Negative Erstblitze klingen in der Regel innerhalb von einigen 100 μs ab und die Stoßströme der negativen Folgeblitze sind meist schon nach 100 μs beendet. [9] [10]

Die Stromanstiegszeit liegt bei positiven Blitzen bei typisch 10 bis 100 μs , bei negativen Erstblitzen im Bereich von einigen Mikrosekunden und bei negativen Folgeblitzen zwischen einigen 100 ns und einigen Mikrosekunden. [9] [10]

Das Strommaximum beträgt bei Erstblitzen einige 10 kA, wobei die Stoßströme der positiven Blitze eine Amplitude von über 100 kA erreichen können. Die Strommaxima der negativen Folgeströme sind am geringsten und liegen typisch bei etwa 10 kA. [9] [10]

Positive Wolke-Erde-Blitze weisen eine wesentlich größere Ladung auf als Entladungen aus dem unteren negativen Ladungszentrum. [9] [10]

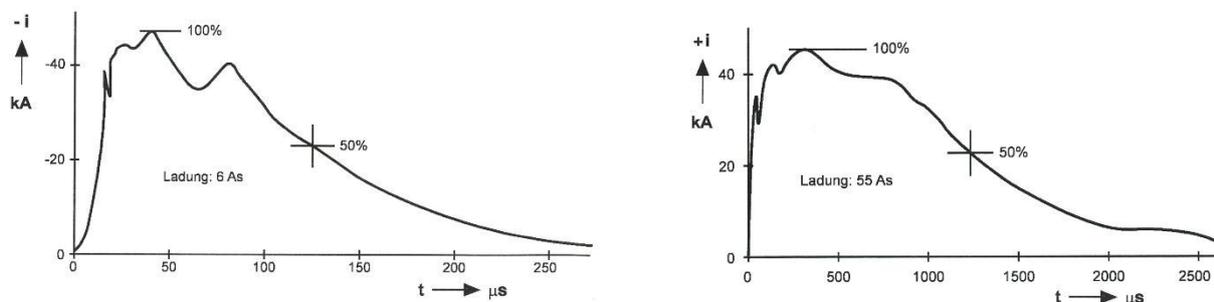


Abbildung 2-12: Negativer (links) und positiver (rechts) Wolke-Erde-Blitz [9]

2.5.2 Blitzstrom nach ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 1 [11]

In Abbildung 2-13 ist der aus den gewonnenen Erkenntnissen abgeleitete zeitliche Verlauf eines Blitzstroms mit der Stirnzeit T_1 und der Rückenhalbwertszeit T_2 dargestellt. Eine Gerade durch den 10 %-Wert und den 90 %-Wert des Strommaximums dient zur Ermittlung der Stirnzeit. Den Schnittpunkt mit der Zeitachse bezeichnet man als virtuellen Beginn des Stoßstroms. Die Zeitdifferenz zwischen dem virtuellen Beginn bis zum Schnittpunkt der Geraden mit der 100 %-Linie ergibt die Stirnzeit. Die Rückenhalbwertszeit ist die Zeitdifferenz ab dem virtuellen Beginn bis zum Abfall des Stroms auf den 50 %-Wert des Strommaximums.

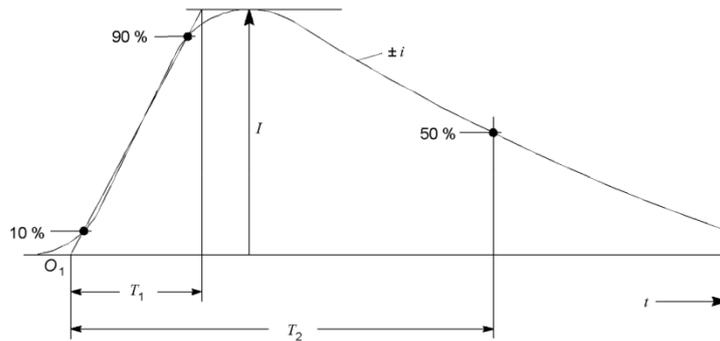


Abbildung 2-13: Festlegung der Stoßstromparameter eines Blitzstroms [11]

2.5.3 Blitzstromparameter nach ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 1 [11]

Blitzströme sind vorwiegend eingeprägte Ströme und werden von den getroffenen Objekten kaum beeinflusst. Aus den Stromverläufen lassen sich vier wesentliche Wirkungsparameter entnehmen [9] [10]:

- **Scheitelwert des Blitzstroms**

$$i_{\max} \quad [\text{A}]$$

Der Maximalwert des Blitz-Stoßstroms ist für den maximal auftretenden Spannungsabfall am Widerstand einer Erdungsanlage ausschlaggebend.

- **Maximale Stromsteilheit**

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} \quad [\text{A/s}]$$

Die maximale Stromsteilheit in der Stirn des Blitzstroms ist mitsamt den geometrischen Abmessungen (Gegeninduktivität) für die Höhe der elektromagnetisch induzierten Spannungen in allen offenen und geschlossenen Leiterschleifen verantwortlich.

- **Ladung**

$$Q = \int i \cdot dt \quad [\text{As}=\text{C}]$$

Die Ladung ist für den Energieumsatz am Einschlagpunkt und an den Überschlagsstellen des Blitzstroms maßgebend. Sie bewirkt Ausschmelzungen an den Lichtbogenfußpunkten.

- **Spezifische Energie**

$$\frac{W}{R} = \int i^2 \cdot dt \quad [\text{J}/\Omega=\text{A}^2\text{s}]$$

Die spezifische Energie (Stromquadratimpuls) ist für die Erwärmung sowie die elektrodynamische Beanspruchung blitzstromdurchflossener, metallener Leiter verantwortlich.

Für diese Arbeit wurden die Blitzstromparameter aus [11] herangezogen. Darin ist ein Satz von Maximal- (Tabelle 2-1) und Minimalwerten (Tabelle 2-2) der Blitzstromparameter entsprechend den vier Gefährdungspegeln (LPL „Lightning Protection Level“) angegeben. Die Bemessungswerte der jeweiligen Gefährdungspegel orientieren sich daran, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese bei einem Blitzeinschlag über- bzw. unterschritten werden (Tabelle 2-3).

Zu den Maximal- und Minimalwerten sind auch Mittelwerte der Blitzstromparameter angeführt (Tabelle 2-4).

Nachfolgend werden jene Parameter angegeben, die in dieser Arbeit zur Anwendung kommen.

Tabelle 2-1: Maximalwerte der Blitzstromparameter entsprechend dem Gefährdungspegel LPL [11]

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	kA/ μs	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	kA/ μs	200	150	100	
Zeitparameter	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	0,25/100			

Tabelle 2-2: Minimalwerte der Blitzstromparameter entsprechend dem Gefährdungspegel LPL [11]

			LPL			
	Symbol	Einheit	I	II	III	IV
Kleinster Scheitelwert	I	kA	3	5	10	16

Tabelle 2-3: Wahrscheinlichkeit für das Unter- bzw. Überschreiten eines festgelegten Grenzwerts [11]

Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Blitz die festgelegten Grenzwerte der Blitzstromparameter	LPL			
	I	II	III	IV
kleiner sind als die Maximalwerte nach Tabelle 2-1	99 %	98 %	95 %	95 %
größer sind als die Minimalwerte nach Tabelle 2-2	99 %	97 %	91 %	84 %

Tabelle 2-4: Logarithmische Normalverteilung der Blitzstromparameter [11]

Parameter	Einheit	Mittelwert μ	Streuung ^a σ_{\log}	Art des Teilblitzes
I	kA	(61,1)	0,576	Negativer Erstblitz ^{b, c}
		33,3	0,263	Negativer Erstblitz ^b
		11,8	0,233	Negativer Folgeblitz ^b
		33,9	0,527	(Einzelner) positiver Erstblitz ^c
di/dt _{max}	ka/μs	24,3	0,260	Negativer Erstblitz ^b
		40,0	0,369	Negativer Folgeblitz ^b
		2,53	0,670	Positiver Erstblitz ^c

a $\sigma_{\log} = \log(X_{16\%}) - \log(X_{50\%})$ mit X als dem Parameterwert
 b Diese Parameter und die angegebenen Werte sind Electra No. 69 entnommen
 c Parameter wird in dieser Arbeit nicht verwendet

2.5.4 Zeitfunktionen des Blitzstroms für Analysezwecke

Der zeitliche Verlauf des ersten positiven Stoßstroms 10/350 μs, des ersten negativen Stoßstroms 1/200 μs und des negativen Folgestoßstroms 0,25/100 μs kann definiert werden als [11]:

$$i = \frac{\hat{I}}{k} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}} \cdot e^{\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)} \quad (1)$$

- \hat{I} Stromscheitelwert [A]
- k Korrekturfaktor
- t Zeit [s]
- τ_1 Stirnzeitkonstante [s]
- τ_2 Rückenzeitkonstante [s]

Tabelle 2-5: Parameter für die Gleichung [11]

Parameter	Erster positiver Stoßstrom			Erster negativer Stoßstrom			Negativer Folgestoßstrom		
	LPL			LPL			LPL		
	I	II	III und IV	I	II	III und IV	I	II	III und IV
\hat{I} [kA]	200	150	100	100	75	50	50	37,5	25
k	0,93	0,93	0,93	0,986	0,986	0,986	0,993	0,993	0,993
τ_1 [μs]	19	19	19	1,82	1,82	1,82	0,454	0,454	0,454
τ_2 [μs]	485	485	485	285	285	285	143	143	143

Abbildung 2-14 zeigt die Blitzstromverläufe im Anstiegsbereich exemplarisch für den Gefährdungspegel 3 und 4. Die Gegenüberstellung verdeutlicht die unterschiedliche Steilheit der Stirn, was unter anderem für die Höhe der elektromagnetisch induzierten Spannung in Leiterschleifen maßgebend ist. Abbildung 2-15 stellt den gesamten Stromverlauf dar.

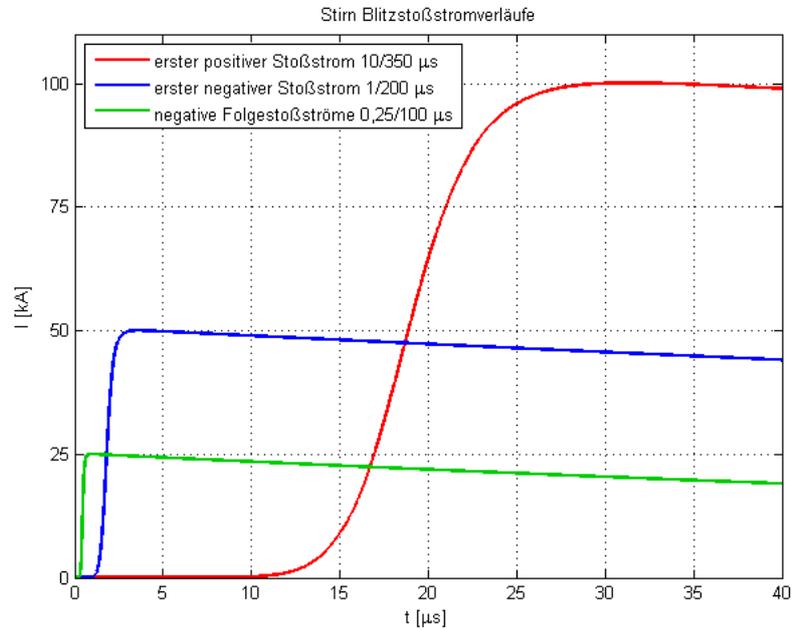


Abbildung 2-14: Gegenüberstellung der Stirn der Blitzstoßstromverläufe für Gefährdungspegel 3 und 4

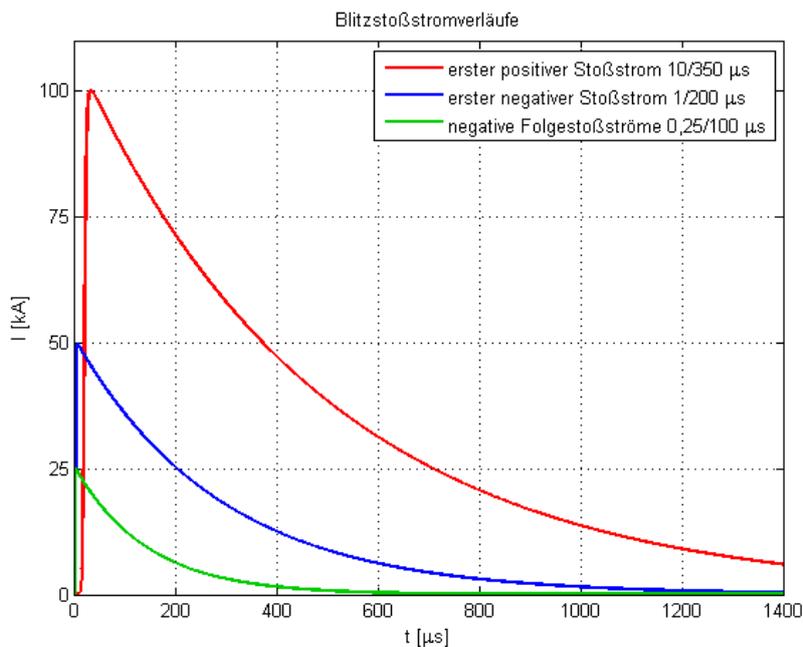


Abbildung 2-15: Gegenüberstellung der Blitzstoßstromverläufe für Gefährdungspegel 3 und 4

2.6 Blitzdichte in Österreich

Die lokale Blitzdichte ist ein wichtiges Merkmal für die Beurteilung der Gefährdung von licht-technischen Anlagen. Die Blitzdichte ist definiert als die mittlere Anzahl der Blitzschläge je km² und Jahr und durch Erdblitz-Ortungssysteme verfügbar (in Österreich: ALDIS: Austrian Lightning Detection & Information System). Die Blitzdichte in Österreich weist starke regionale Unterschiede auf (Abbildung 2-16). Die meisten Blitze entladen sich an den südlichen Ausläufern der Alpen in der Steiermark und in Kärnten. Hier ist mit lokalen Blitzdichten von mehr als 5 Blitze pro km² und Jahr zu rechnen. [12]

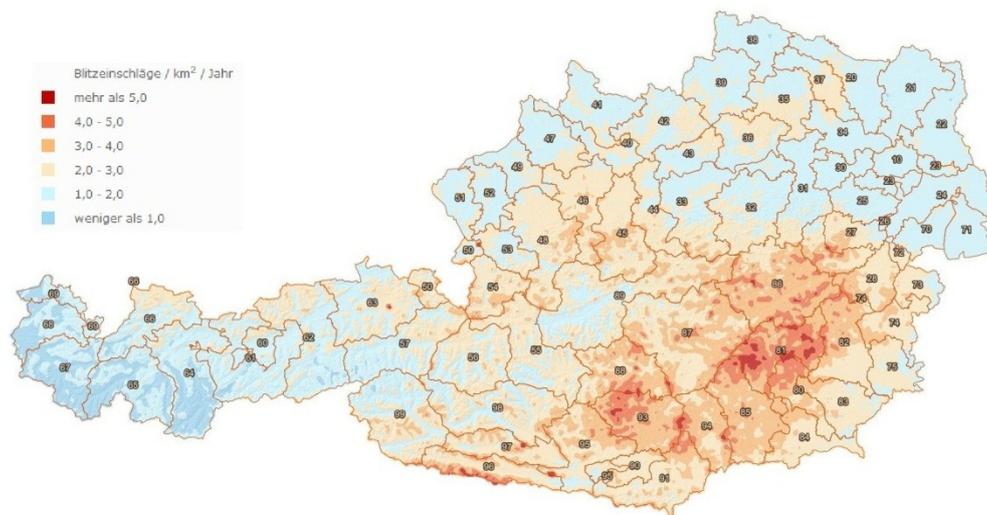


Abbildung 2-16: Blitzdichte in Österreich 1998-2011 [13]

Innerhalb des Bundesgebietes von Österreich treten pro Jahr zwischen 100.000 und 300.000 Wolke-Erde-Blitze auf (Abbildung 2-17). Bei den dargestellten Blitzhäufigkeiten handelt es sich um sogenannte nicht homogenisierte Daten, das heißt, dass der auffallende Anstieg der Blitzzahlen in den letzten Jahren auf den technischen Fortschritt der Blitzortung zurückzuführen ist und nicht zwangsläufig klimatische Ursachen hat. [12]

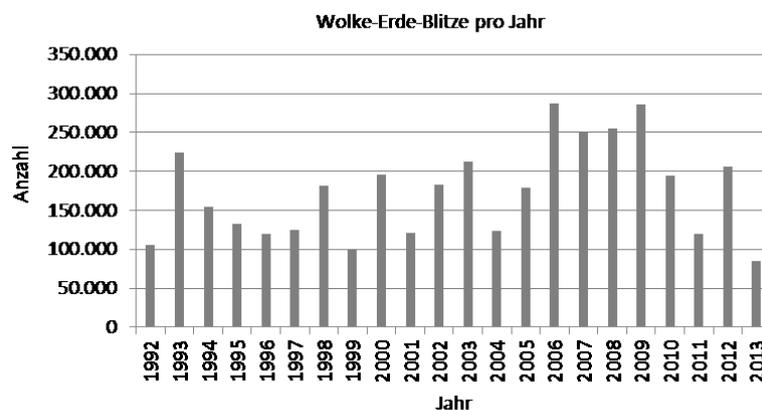


Abbildung 2-17: Anzahl der Wolke-Erde-Blitze pro Jahr innerhalb des Bundesgebietes Österreichs (eigene Darstellung, Datenquelle: [14])

Abbildung 2-18 zeigt die georteten Blitze in den jeweiligen Bundesländern für den Zeitraum von 2002-2013.

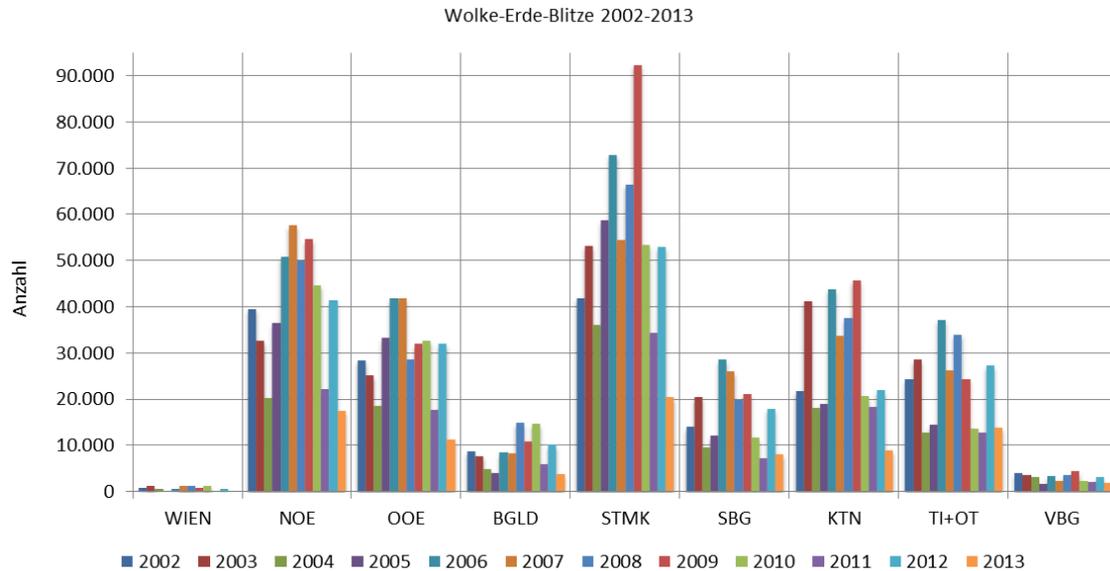


Abbildung 2-18: Anzahl der Blitze nach Region im Zeitraum 2002-2013 (eigene Darstellung, Datenquelle: [14])

2.6.1 Polarität des Blitzstromes

Bei einem Sommergewitter wird ein Anteil von 80 % bis 95 % an negativen Blitzen vermerkt. Im Vergleich dazu haben einzelne Wintergewitter einen Anteil an positiven Entladungen von über 50 %. [12]

2.6.2 Blitzstromamplituden

Die Amplituden der negativen Blitzströme weisen eine logarithmisch-normalverteilte Charakteristik auf, wobei der Median (50 %-Wert) bei etwa 10 kA liegt (Abbildung 2-19). Dies wird auch durch den annähernd geradlinigen Verlauf der Summenhäufigkeit im Wahrscheinlichkeitsnetz sichtbar (Abbildung 2-20). Demnach hat etwa die Hälfte aller von ALDIS georteten negativen Blitze eine Amplitude von mehr als 10 kA. [12]

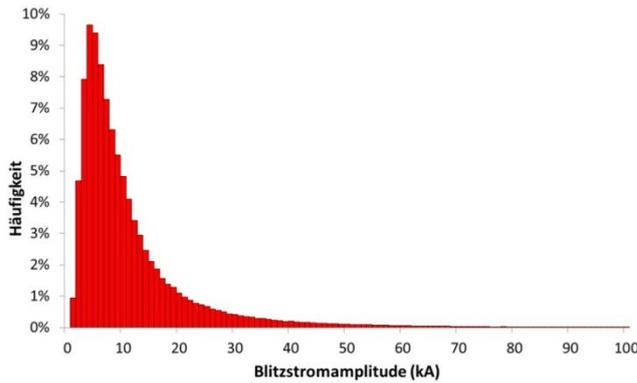


Abbildung 2-19: Häufigkeitsverteilung der Amplituden negativer Blitze 2010-2012 [15]

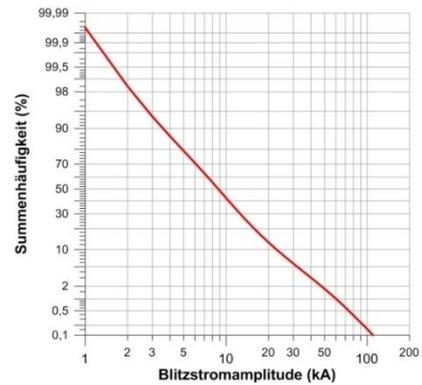


Abbildung 2-20: Summenhäufigkeit der Amplituden negativer Blitze [16]

Bei den Amplituden der positiven Blitze zeigt sich ein ähnliches Bild. Auch diese sind annähernd logarithmisch-normalverteilt mit einem etwa gleichen Medianwert von ca. 10 kA [12].

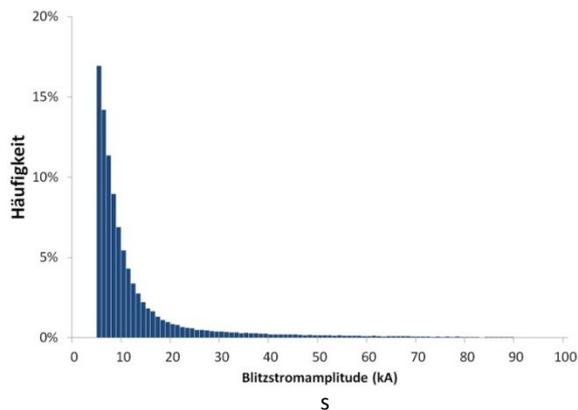


Abbildung 2-21: Häufigkeitsverteilung der Amplituden positiver Blitze 2010-2012 [17]

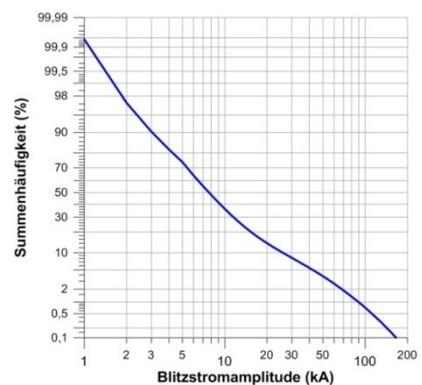


Abbildung 2-22: Summenhäufigkeit der Amplituden positiver Blitze [18]

Nach den ALDIS-Daten unterscheiden sich die Amplituden von positiven und negativen Blitzen sowie von Erst- und Folgeblitzen nur geringfügig. In unseren Breiten werden negative Blitze mit Amplituden über 100 kA selten erfasst. Hingegen werden gelegentlich einzelne extrem starke positive Blitze mit Amplituden von 200 bis 300 kA registriert. [12]

Bei etwa der Hälfte der negativen Blitze (d.h. 50 % aller Blitze) folgen im Kanal des Erstblitzes ein oder mehrere Folgeblitze nach, die in der Regel auf dieselbe Einschlagstelle treffen wie der Erstblitz. Im Mittel treten zwischen 3 und 5 Teilblitze bei einem Wolke-Erde-Blitz auf. [12]

3 Aufbau einer verkabelten lichttechnischen Anlage

Die Straßenbeleuchtung hat sich aus der Historie heraus zu einem technisch und organisatorisch komplexen System entwickelt, das besonders in den letzten Jahren von rasanter Innovation geprägt ist. Es existiert eine Vielzahl von Anlagenbauarten, Leuchtstellen, Schalt-, Steuer- und Informationseinrichtungen sowie Energieversorgungs- und Schutzkonzepte. Diese Vielfältigkeit lässt daher nur einen Überblick über die unterschiedlichen Bauarten verkabelter lichttechnischer Anlagen zu.

3.1 Versorgung der Straßenbeleuchtung mit elektrischer Energie

Die Energie für die Straßenbeleuchtung wird aus dem Niederspannungs-Verteilnetz (230/400 V) des örtlichen Energieversorgungs-Unternehmens (EVU) bezogen.

Der Anschluss der Beleuchtungsanlagen kann durch [2] [19]:

- ein separates Beleuchtungsnetz als Kabelnetz
- einen Direktanschluss an das Kabelnetz des Netzbetreibers

erfolgen.

Separates Beleuchtungsnetz

Das Beleuchtungsnetz dient allein der Versorgung der Leuchten. Die Übergabe der elektrischen Energie aus dem Niederspannungsnetz des Netzbetreibers erfolgt in Schalt- bzw. Einspeiseschränken. In diesen Übergabestellen sind in der Regel Schalt-, Steuer-, Mess- und Schutzeinrichtungen für das Beleuchtungsnetz untergebracht.

Direktanschluss an das Kabelnetz des Netzbetreibers

Die Leuchtstellen werden direkt an das Niederspannungs-Ortsnetz über Abzweigmuffen mit oder ohne Sicherung angeschlossen. Es muss jedoch seitens der EVU eine Tonfrequenzrundsteuer- bzw. Funkrundsteueranlage zur Verfügung stehen und mitbenutzt werden können oder in dem Netzkabel des EVU muss mindestens ein zusätzlicher Leiter (Beidraht) zur Steuerung der Leuchten vorhanden sein.

Schalt-/Verteilerschrank

Schalt- bzw. Verteilerschränke dienen dem Anschluss an das Versorgungsnetz sowie als Verteiler für die Beleuchtungskabel. Die Schränke enthalten in der Regel [19]:

- Sicherungen zum selektiven Schutz des Schrankes, der Kabel und der Steuereinrichtungen
- Zähleinrichtung zur Erfassung des Stromverbrauchs

- Schütze für das Ein- und Ausschalten bzw. gegebenenfalls Stufenschaltung (Ganz- und Halbnacht)
- Tonfrequenzrundsteuerempfänger, Dämmerungsschalter oder Schaltrelais für die Steuerung

Je nach Art der Lichtsteuerung, des Lichtmanagements bzw. der Regelung können ersatzweise oder zusätzlich weitere Komponenten verbaut sein.

Der Anschluss an das EVU-Netz erfolgt im Allgemeinen durch ein vieradriges Energiekabel (L1, L2, L3, PEN). Der Querschnitt ist je nach den entsprechenden Gegebenheiten und Anforderungen sowie vorgelagerten Trenn-, Verteiler- bzw. Übergabeschränken wie auch Ortsnetzstation unterschiedlich.

Netzsystem

Im Bereich der öffentlichen Beleuchtung sind das TT-System (bei „älteren“ Anlagen) sowie das TN-System (bei „neueren“ Anlagen) üblich.

3.2 Lichtmasten

Als Material für Lichtmasten werden Stahl, Aluminium, Metallguss, Kunststoff, Stahl- bzw. Schleuderbeton und Holz verwendet. Der Mast kann zylindrisch, konisch, mehreckig, abgesetzt, als Sonderform (Designer-, nostalgischer Mast), mit oder ohne Ausleger ausgeführt sein. Lichtmasten besitzen meist ein oder zwei Öffnungen zur Durchführung des Kabels und eine Masttür zur Unterbringung des Kabelübergangs- bzw. Sicherungskastens.

Die Mastgründung kann bei geringen mechanischen Anforderungen durch schichtweises Verdichten des Bodens ohne Fundament erfolgen. Meist werden Fertigbetonteile, Schüttbeton oder PVC-Rohre verwendet, wobei eine Kombination mit Sand, Schotter oder Kies eine ausreichende Standfestigkeit gewährleistet. Eine Befestigung mit Flanschplatten bzw. Stehbolzen mit Schraubverbindungen oder Abwandlungen mit geeigneten Trägerprofilen ist ebenfalls möglich (z. B. bei Bauwerken wie Brücken).

Stahlmasten

Stahlmasten werden durch Verzinkung gegen Korrosion geschützt und können als zusätzlichen Schutz mit einer Farbeschichtung versehen werden. Die Zinkschicht ist von der Wanddicke abhängig und beträgt mindestens 70 µm [2]. Der Bereich ober- sowie unterhalb der Erdoberfläche wird aufgrund der erhöhten Korrosionsgefährdung zusätzlich geschützt. Zur Anwendung kommen vor der Verzinkung aufgeschweißte Stahlmanschetten, nach der Verzinkung aufgeschrumpfte Kunststoffmanschetten, Epoxydharztränkungen sowie Kombinationen von Epoxydharz und Steinkohlenteerpech. [2] [19]

Aluminiummasten

Zur Herstellung werden korrosionsbeständige Aluminiumlegierungen oder Aluminiumguss verwendet. Im Erdbereich werden elektrisch isolierende Beschichtungen oder Manschetten als Korrosionsschutz aufgetragen. [2]

Kunststoffmasten

Als Grundmaterial für Kunststoffmasten dient Polyester oder Polyurethan, wobei die mechanischen Eigenschaften meist durch Verstärkungen aus Glasfaser oder Stahl verbessert werden [2] [19].

Betonmasten

Diese werden vorgespannt oder stahlbewehrt im Schleuder- oder Rüttelverfahren hergestellt [2].

Holzmasten

Holzmasten werden für die Straßenbeleuchtung hauptsächlich in Kombination mit Niederspannungsfreileitungen der örtlichen Energieversorgung verwendet [2] [19].

3.3 Kabeltypen

Für die Straßenbeleuchtung werden in Österreich im Allgemeinen Kunststoffkabel vom Typ E-YY (0,6/1 kV) eingesetzt. Zur Anwendung kommen meist vier- oder fünfadrig Kabel mit Nennquerschnitten von 4 mm², 6 mm² oder 10 mm². Die Kupferleiter sind einzeln mit PVC isoliert, miteinander mit einem PVC-Füllmantel oder einer Bänderung versehen und von einem Außenmantel aus PVC umgeben [20].

3.4 Leitungen

Für die Verlegung im Mast dienen Kunststoff-Mantelleitungen. Am verbreitetsten sind PVC-Mantelleitungen vom Typ (N)YM, in Sonderfällen erfolgt eine Verwendung des Typs SYM (für erhöhte Anforderungen). Der prinzipielle Aufbau entspricht der PVC-Mantelleitung (N)YM [2]. In der Regel sind Leitungen mit zwei oder drei Adern mit Nennquerschnitten 1,5 mm² oder 2,5 mm² verbaut.

3.5 Anlagenerder/Begleiterder

Der Anlagenerder wird grundsätzlich als Vertikal- oder Horizontalerder beziehungsweise einer Kombination beider Varianten ausgeführt.

- **Vertikalerder** bestehen gewöhnlich aus Stäben aus verzinkten Stahl oder Edelstahl mit einer Länge von 1 oder 1,5 m. Sie werden beim Einschlagen verschraubt oder verschweißen selbsttätig miteinander über eine Weichmetalleinlage [21]. Der Durchmesser beträgt meist 20 oder 25 mm.
- **Horizontalerder** bestehen in der Regel aus Bandmaterialien, Rundmaterialien oder Seilen. Typische Materialien sind feuerverzinkter Stahl, Edelstahl sowie Kupfer (blank oder verzinkt). Typische Abmessungen sind bei den Bänderdornen 3 mm x 30 mm bzw. 4 mm x 40 mm, bei den Rundmaterialien und Seilen 10 mm², 25 mm², 35 mm², 50 mm², 78 mm² und 95 mm². Der Horizontalerder kann entlang einer Teilstrecke oder entlang der gesamten Wegstrecke der lichttechnischen Anlage verlegt sein, wobei im zweiten Fall eine Verbindung mit leitfähigen Masten vorgenommen wird.

3.6 Kabelgraben

Das Beleuchtungskabel wird in einer Tiefe von etwa 0,7-1 m erdfühlig oder in einem Kunststoffrohr (meist Polyethylen) verlegt. Das Erdkabel beziehungsweise PE-Rohr wird in feinem Sand gebettet. Das Aushubmaterial wird über dieser Schicht angebracht.

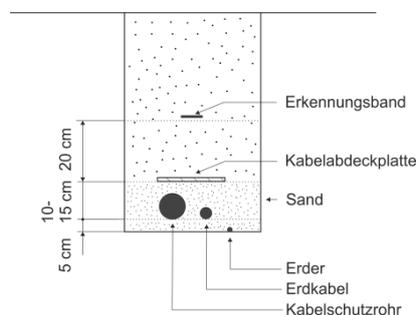


Abbildung 3-1: Beispielhafte Auslegung eines Kabelgrabens

3.7 Sicherungskasten/Kabelübergangskasten

Die Verbindung zwischen Kabel und Leuchte erfolgt im Kabelübergangskasten (Kük), in dem auch die Sicherungen zum Schutz gegen Kurzschlüsse in der Leuchte sowie der Zuleitung untergebracht sind. Sicherungskästen werden heute meist aus Kunststoff gefertigt und verfügen somit über Schutzklasse 2 [2].



Abbildung 3-2: Sicherungskasten ohne Abdeckung [22]

3.8 LED-Leuchte

Bei den LED-Leuchten wird von den Herstellern hinsichtlich Aufbau sowie Verwendung von lichttechnischen Komponenten auf unterschiedliche Konzepte gesetzt. Dabei wird zwischen modularen Systemen und fest verbauten Technologien unterschieden, wobei sich derzeit am Markt eher modulare Systeme durchsetzen [1].

In Abbildung 3-3 ist der beispielhafte Aufbau einer LED-Leuchte dargestellt.



Abbildung 3-3: Aufbau einer LED-Leuchte der Firma AE Schröder, Typ TECEO (Abbildung modifiziert, Quelle Originalbild:[23])

Das Gehäuse einer LED-Leuchte ist meist aus Aluminium-Druckguss gefertigt. Die Gehäuseoberfläche wird oft durch Beschichten bzw. Lackieren behandelt. Zur Befestigung auf bzw. an einen Lichtmast verfügt das Gehäuse über eine Vorrichtung zur Auf-/Ansatzmontage. Die durch den Mast zugeführte Leitung wird über Klemmen oder Steckverbinder mit dem Betriebsgerät (elektronisches Vorschaltgerät EVG, LED-Treiber) verbunden. Des Weiteren können auch noch zusätzliche Steuer- oder Regelgeräte sowie Komponenten zum Schutz gegen transiente Überspannungen an der Versorgungszuleitung angebracht sein. Das Betriebsgerät versorgt das LED-Modul mit konstanter Spannung oder konstanten Strom. Je nach Ausführung sowie Steuerungs- bzw. Regelungskonzept kann das Vorschaltgerät mit weiteren Anschlussmöglichkeiten ausgestattet und mit umgebenden Komponenten verbunden sein.

Die einzelnen LEDs sind auf einer Platine miteinander verschaltet. Der Aufbau und die Verbindungstechnik sind für eine ausreichende Wärmeableitung wesentlich. Eine thermische Kopplung an das Gehäuse kann hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Volumens des Moduls und der Lichtleistung erforderlich sein. Das durch die Leuchtdioden erzeugte Licht wird mit Hilfe eines optischen Systems bestehend aus Reflektoren und/oder Linsen, je nach Anforderung und Anbausituation abgestimmt, gelenkt. [1]

Die Abdeckung kann aus Glas oder Kunststoff bestehen, wobei auch eine Kombination des optischen Systems mit der Abdeckung möglich ist. [1]

LED-Aufbau

Eine Leuchtdiode (Licht Emittierende Diode LED) ist ein Halbleiterbauelement, das bei Stromfluss in Durchlassrichtung Licht emittiert. Die Freisetzung des Lichts basiert dabei auf der Rekombination von Ladungsträgern (Elektrolumineszenz). Die Lichtfarbe ist vom Herstellungsprozess sowie den verwendeten Materialien, die zur Herstellung des Chips verwendet wurden, abhängig. LEDs wandeln etwa 70 % der Leistung in Wärme um. Zur Vermeidung zu hoher Temperaturen und somit Verringerung der Lebensdauer des Kristalls, muss die Wärme konstruktiv aus dem Kristall abgeführt werden. [1]



Abbildung 3-4: Aufbau einer Hochleistungs-LED [24]

3.9 Anlagensteuerung und Lichtmanagement

Die Möglichkeiten und Konzepte zur Steuerung von lichttechnischen Anlagen sind breit gefächert. Wie der Begriff Steuerung hinweist, impliziert diese Benennung eine unidirektionale Arbeitsweise. Der Informationsaustausch wie das Ein- und Ausschalten erfolgt in eine Richtung. Gerade der Einsatz von LED-Leuchten in Kombination mit elektronischen Vorschaltgeräten bietet ein hohes Potential für den Einsatz von Lichtmanagementsystemen, um Anlagen in Abhängigkeit von diversen Parametern und Ereignissen zu regeln und somit auch einen energieeffizienten und damit wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Eine Regelung basiert auf einem bidirektionalen Informationsaustausch und setzt somit einen Rückkanal voraus. [1]

Die Steuerung von Anlagen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen einer Zentralsteuerung sowie einer dezentralen Steuerung. Bei einer zentralen Steuerung erfolgt die Steuerung der gesamten Anlage von einer zentralen Stelle aus. Das entsprechende Ein- oder Ausschaltsignal wird über das Verteilnetz oder über Funk übermittelt. Die Empfangseinheit kann im jeweiligen Steuerschrank des Teilnetzes oder an jeder Leuchtstelle (Leuchtpunkt) untergebracht sein. Für die dezentrale Steuerung kommen Schaltuhren, Dämmerungsschalter bzw. spezielle digitale Leistungsschalter zum Einsatz. Historisch bedingt gibt es auch Kombinationen obiger Steuerungsmodelle, wo z. B. der Steuerimpuls durch die sogenannte Fortweitzerschaltung übergeben wird. Das bedeutet, dass das Beleuchtungskabel zum nächsten Unterverteiler weitergeführt wird und dort wiederum einen Leistungsschutz ansteuert, das ein weiteres Beleuchtungskabel schaltet. [2]

Tonfrequenz-Rundsteueranlagen

Bei Tonfrequenz-Rundsteueranlagen erfolgt die Übertragung der Schaltbefehle über das gesamte jeweilige Versorgungsnetz (Power Line). Eine solche Anlage besteht aus einer Einrichtung zum Senden und den Empfangsrelais. Die Empfangseinheiten (Rundsteuerempfänger) ermöglichen ein Schalten der Leuchten einzeln oder in Gruppen. [2]

Funkrundsteueranlagen

Mit Hilfe von Funkrundsteueranlagen wird ein Schalttelegramm über einen Langwellensender versendet. Die Empfänger sind entweder in der Unterverteilung zur Steuerung des Beleuchtungskabels oder einzeln in jedem Leuchtpunkt zu finden. Die dezentralen Empfänger können zusätzlich mit einem Brennstundenkalender ausgestattet sein, um bei Fernbleiben des Schaltbefehls eigenständig die Betriebsmittel zu schalten. [2]

Steuerung über Datenleitung bzw. Steuerader im Energiekabel

Eine weitere Möglichkeit ist die Übermittlung des Steuerimpulses von einer Steuerzentrale zu einem Sender und von dort aus über eine Steuerader im Energiekabel zu den Schaltschränken, worin wiederum ein Relais den Schaltbefehl ausführt. [2]

Um das Beleuchtungsniveau während der nächtlichen, verkehrsschwachen Zeit entsprechend den Anforderungen zu verringern, werden elektronische Vorschaltgeräte mit Leistungsregelung eingesetzt (z. B. Ganz-, Halbnachtschaltung). Dazu wird häufig im Beleuchtungsnetz eine zusätzliche Steuerader verwendet oder eine zusätzliche Steuerleitung mitverlegt. Liegt beispielsweise an dieser Steuerader die volle Netzspannung an, so führt das EVG den Ganznachtbetrieb aus. Fällt diese Spannung weg, setzt der Halbnachtbetrieb ein. [2]

Zu den beschriebenen Varianten der Anlagensteuerung und Regelung gibt es eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten, die aber hier nicht genannt werden.

4 Datenerhebung

Zu Beginn der Arbeit wurde ein Augenmerk auf die Berücksichtigung der Erfahrungen, Kenntnisse und Beobachtungen der Projektpartner hinsichtlich transienter Störbeeinflussung gelegt. Durch die persönlichen Gespräche, Anlagenbesichtigungen, Telefonate sowie den Informationsaustausch per E-Mail konnte ein guter Gesamtüberblick über die jeweiligen Anlagenbauarten, eingesetzten Systeme und vorliegenden Gegebenheiten und Probleme gewonnen werden. Darüber hinaus wurde eine Datenerhebung mit allen Projektpartnern durchgeführt (Erhebungsunterlagen siehe Anhang).

4.1 Datenerhebung „Allgemeine Fragestellungen“

Mit Hilfe der Datenerfassungsunterlage „Allgemeine Fragestellungen“ wurde den beteiligten Unternehmen die Möglichkeit gegeben, die gegenwärtige Situation darzustellen und deren Standpunkte bezüglich der Thematik aufzuzeigen. Angesichts der grundverschiedenen Sachverhalte kann dieser Teil nur gemeingültig zusammengefasst werden.

Die Datenerhebung zeigt, dass für mehr als 60 % der in die Umfrage miteinbezogenen Betreiber der Schutz von lichttechnischen Anlagen gegen transiente Überspannungen momentan ein wesentliches Thema ist. Die Anlagenverantwortlichen berichten, dass das Thema besonders in den letzten Jahren durch den zunehmenden Einsatz von elektronischen Betriebsmitteln und die vermehrt verzeichneten Ausfälle dieser Komponenten an Bedeutung gewonnen hat. Über 50 % der befragten Unternehmen hatten bereits Störfälle in jeweilig unterschiedlichem Ausmaß zu verzeichnen, wobei in seltenen Fällen Aufzeichnungen über einen direkten Zusammenhang mit einer Gewittertätigkeit vorliegen oder oftmals keine Angaben möglich sind. So ist eine „Vorschädigung“ von lichttechnischen Komponenten während eines Gewitters und ein anschließender Teil- bzw. Ganzausfall zu einem späteren Zeitpunkt denkbar. Zudem liegt zwischen Ausfall und Störmeldung ebenfalls eine gewisse Zeitspanne. Ein Ausfall kann außerdem andere Ursachen haben. So können, um hier Beispiele zu nennen, Material-, Verarbeitungs-, Konstruktionsfehler sowie Betriebs-, Umwelt- oder Witterungseinflüsse dazu beitragen.

Die Betreiber verzeichnen unterschiedliche Schadensbilder, wie defekte elektronische Vorschaltgeräte, Ausfälle oder Blinken einzelner LED-Leuchtpunkte bzw. des gesamten LED-Moduls, Gesamtausfälle von Leuchten, ausgelöste Sicherungen in der Leuchte, wie auch schadhafte Betriebsmittel und ausgelöste Sicherungseinrichtungen im Verteiler.

Die Anlagenverantwortlichen sehen ein mangelhaftes Design und unterdimensionierte Komponenten, insbesondere der Eingangsstufen der elektronischen Vorschaltgeräte, als Schwachpunkte. Sie beanstanden einen fest verbauten Überspannungsschutz, der keine Information bei Ansprechen liefert und keine Funktionsprüfung ermöglicht.

Die Störfälle veranlassen die Betreiber Vorkehrungen zum Schutz gegen transiente Überspannungen zu ergreifen. So werden Überspannungsableiter im Verteilerkasten und/oder in der Leuchte verbaut, wobei in der Regel keine Aussagen – auch in Hinblick auf den Betrachtungszeitraum – über den wirkungsvollen Schutz dieser Maßnahmen gemacht werden können. Die teilweise berichtete „Verbesserung der Situation“ basiert eher auf subjektiver Wahrnehmung und resultiert nicht aus statistischen Aufzeichnungen.

4.2 Datenerhebung „Beschreibung einer verkabelten lichttechnischen Anlage“

Die Datenerfassungsunterlage „Beschreibung einer verkabelten lichttechnischen Anlage“ diente zur Dokumentation einer Anlage, welche entweder mit einem LED-System oder mit „traditionellen“ Lampen mit elektronischen Vorschaltgeräten ausgestattet ist. Die Anlage soll nach der Häufigkeit der Störfälle kategorisiert werden, wobei hierfür zwei gegensätzliche Zuordnungen zur Auswahl standen:

- (1) keine/auffallend wenig Ausfälle/Störfälle/Probleme
- (2) vermehrt/häufig Ausfälle/Störfälle/Probleme

Ferner wurde die Gelegenheit gegeben, die Anlage nach der möglichen Ursache der Störfälle zuzuordnen:

- Die Ursache für die Ausfälle/Störfälle/Probleme ist unklar
- Es wird vermutet, dass die Ausfälle/Störfälle/Probleme durch atmosphärische Entladungen oder Schalthandlungen im Netz verursacht wurden
- Es wird vermutet, dass die Ausfälle/Störfälle/Probleme durch die Vermischung von konventionellen Vorschaltgeräten mit elektronischen Vorschaltgeräten im Beleuchtungsnetz verursacht wurden
- Es geht aus betriebsinternen Aufzeichnungen hervor, dass diese Ausfälle/Störfälle/Probleme in unmittelbarem Zusammenhang mit atmosphärischen Entladungen bzw. einer Gewittertätigkeit stehen oder der Verdacht ist groß, dass diese Ausfälle/Störfälle/Probleme durch atmosphärischen Entladungen bzw. einer Gewittertätigkeit hervorgerufen wurden

Die Anlagendokumentation gliederte sich in folgende Punkte:

- Betriebsmittel
 - Betriebsmittel im Schaltschrank/Verteiler
 - Beleuchtungskabel
 - Netzform
 - Schutzklasse und Einbeziehung des Mastes in eine Schutzmaßnahme
 - Horizontalerder (Begleiterder)

- Betriebsmittel in Leuchte
- Leitung in Leuchte
- Lichtmast
 - Material
 - Mastform
 - Mastgründung
 - Mastabmessungen
 - Ansatz, Aufsatz, Ausleger
- Anlagenanordnung
- Anlagenstandort, Umgebungsbedingungen
- Anlagensteuerung
- Betriebsmittel, bei denen bisher vermehrt Störfälle zu verzeichnen waren
 - Betriebsmittel im Schaltschrank/Verteiler
 - Betriebsmittel in der Leuchte
- Schutzmaßnahmen der Anlage gegen transiente Überspannungen
- Sonstige Angaben, Bemerkungen zu dieser Anlage

Je Betreiber sollten maximal vier Anlagen nach dieser Zuordnung beschrieben werden. Die Zielsetzung dieses Dokuments war die erhaltenen Anlagen nach Ausfallerscheinungen, bautechnischen und elektrotechnischen Kriterien zu gruppieren und gegenüberzustellen. Anhand dieser Gegenüberstellung wurde eine Möglichkeit geschaffen, etwaige Auffälligkeiten zu erkennen, diese anschließend näher zu untersuchen und dadurch Erkenntnisse für eine zukünftige Anlagenplanung, Installation und den Betrieb abzuleiten.

Die Betreiber wurden zudem ersucht allfällige Unterlagen (z. B. Pläne, Schaltbilder, Skizzen, Datenblätter), die aus ihrer Sicht für eine ausreichende Dokumentation notwendig sind, zu übermitteln.

Im Rahmen dieser Datenerfassung wurden insgesamt 17 Anlagen zusammengetragen. Davon wurden acht Anlagen nach (1) und neun Anlagen nach (2) zugeordnet.

Die gewonnenen Daten lassen jedoch keine Gegenüberstellung und Untersuchung hinsichtlich transienter Störbeeinflussung zu. Dies ist auf verschiedene Umstände zurückzuführen, die nachstehend kurz erläutert werden.

In der Datenerfassungsunterlage wurde der Begriff „Anlage“ definiert. In der Praxis existieren hingegen unterschiedliche Auffassungen über diese Bezeichnung, häufig ist unklar in welchem Bereich eine Eingrenzung möglich und sinnvoll ist. Oftmals liegt eine Vernetzung zu seilabgespannten Systemen und Freileitungsanlagen vor, wodurch eine Einbindung in ein

Gesamtsystem gegeben ist. Eine Vermischung von Masten, Betriebsmittel, Abzweigungen zu anderen Straßenzügen, die Einbindung von Fortschaltstellen und die verschiedenen Möglichkeiten der Beschaltung von Strängen und Leiterphasen, die von einem Verteiler ausgehen können, lassen viel Raum für Interpretationen. Dieser Sachverhalt macht eine Erstellung eines Dokuments zur Beschreibung einer Anlage, worin alle Eventualitäten abgedeckt werden, schwierig. Zugleich ist der Bearbeiter dieser Unterlagen gefordert die vorliegende Anlage möglichst sachgemäß zu beschreiben. Somit war ein intensiver Informationsaustausch (Rückschleifen) erforderlich, um diverse Unklarheiten zu beseitigen. Dazu kommt, dass den Anlagenverantwortlichen die erforderlichen Daten nicht immer zur Verfügung standen und ebenfalls nicht immer von Drittfirmen eingeholt werden konnten, was in manchen Fällen zu einer unvollständigen Dokumentation führte.

Im Zuge der Datenerhebung stellte sich ebenso heraus, dass eine Vielzahl von Anlagenbauarten vorzufinden war. Es wurden unterschiedliche Auslegungen und Kombinationen des Netzsystems festgestellt, die sich in der Art der Erdverbindung und der Einbeziehung des Mastes in den Potentialausgleich sowie der Verbindung leitfähiger Masten mit einem Horizontalerder unterscheiden (Auftrennung des PEN-Leiters im Verteiler und getrennte Führung von PE-Leiter und Neutralleiter oder PEN-Leiter im gesamten System geführt, Verbindung Mast mit PE-Leiter oder ohne Verbindung, mit oder ohne Erder, Tiefen- oder Horizontalerder bzw. Kombination von beiden, Mitverlegung des Horizontalerders über die gesamte Anlage und Verbindung mit leitfähigen Masten oder Mitverlegung über eine Teilstrecke der Anlage, Erdverbindung EVU,...). Überdies verfügen die Anlagen über unterschiedliche Mastmaterialien, Mastfundamentierungen, Betriebsmittel im Schaltschrank/Verteiler, Betriebsmittel in der Leuchte.

Aufgrund der unterschiedlichen Anlagenbauweisen und der jeweilig vorliegenden Umstände sowie der begrenzten Datenverfügbarkeit und der Tatsache, dass die Ausfallerscheinungen nicht immer auf transiente Überspannungen zurückzuführen sind, konnte sich kein einheitliches Bild abzeichnen. Somit können mit den gesammelten Daten keine generalisierten Aussagen über das Auftreten von transienten Überspannungen sowie deren Auswirkungen auf kabelgebundene Anlagen gemacht werden.

5 Die induktive Kopplung verkabelter lichttechnischer Anlagen

Die induktive Kopplung umfasst die magnetische Beeinflussung durch das vom Blitzstrom hervorgerufene Magnetfeld und in weiterer Folge die durch die Änderung des magnetischen Flusses induzierten Spannungen in Leiterstrukturen. In dieser Arbeit wurde der Schwerpunkt hinsichtlich induktiver Kopplung auf die in einem Lichtmast enthaltene Energieversorgung gelegt. Für die Untersuchungen wurde angenommen, dass es zu einem Blitzeinschlag in den Erdboden in der Nähe (1-100 m) eines Lichtmastes kommt, wie Abbildung 5-1 veranschaulichen soll.

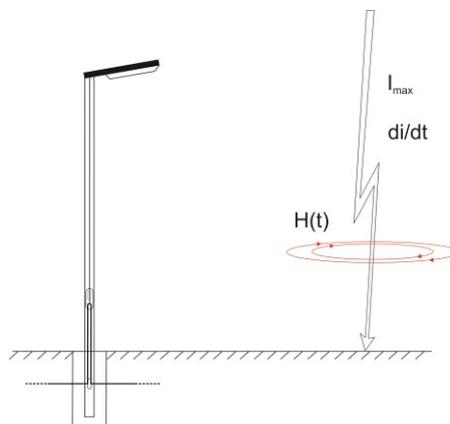


Abbildung 5-1: Blitzeinschlag in der Nähe eines Mastes

Für die nachfolgenden Berechnungen wurde von jenem Fall ausgegangen, bei der innerhalb des Mastes lediglich eine Versorgungsleitung vorhanden ist (Abbildung 5-3). Für diese Untersuchung wurden Masten aus den Materialien Kunststoff, Aluminium sowie Stahl herangezogen. Die grundverschiedenen Materialien weisen unterschiedliche elektrische und magnetische Eigenschaften auf. Während Stahl und Aluminium eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen, weicht jene von Kunststoff um viele Größenordnungen davon ab. Bei der magnetischen Leitfähigkeit (magnetische Permeabilität), also die Durchlässigkeit von Materie für magnetische Felder, muss ebenfalls differenziert werden. Hier zeigt sich bei Kunststoff und Aluminium ein ähnliches Bild. Bei diesen Materialien kann die relative Permeabilität mit $\mu_r \approx 1$ angesetzt werden. Hingegen wird Stahl aufgrund der hochpermeablen Eigenschaft zu den ferromagnetischen Stoffen gezählt, das heißt, die relative Permeabilität ist um ein Vielfaches größer als eins ($\mu_r \gg 1$). Darüber hinaus ist die Magnetisierung bei ferromagnetischen Stoffen im Allgemeinen nicht linear vom äußeren Magnetfeld abhängig. Angesichts dieser Tatsache wurden zur Ermittlung der induktiven Kopplung zwei unterschiedliche Lösungsansätze herangezogen. Bei Kunststoffmasten wurde ein analytisches, bei Aluminium- und Stahlmasten ein numerisches Verfahren angewendet.

5.1 Grundlagen zur induktiven Kopplung

Für die Berechnung der Induktionswirkung des Magnetfeldes im Nahbereich wird ein sehr langer Blitzkanal angenommen, welcher vom Blitzstrom $i(t)$ durchflossen wird (Abbildung 5-2). Der Blitzkanal steht senkrecht auf einer ideal leitenden Ebene. In unmittelbarer Nähe des Blitzkanals befindet sich eine Leiterschleife. Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass die von der Leiterschleife eingeschlossene Ebene und der blitzstromführende Kanal in derselben Ebene liegen. Das den Blitzkanal und die Leiterschleife umgebende Medium soll für diese grundlegende Betrachtung Luft sein ($\mu_r = 1$). Diese Anordnung ermöglicht eine Untersuchung der maximal induzierten Spannungen in Leiterstrukturen.

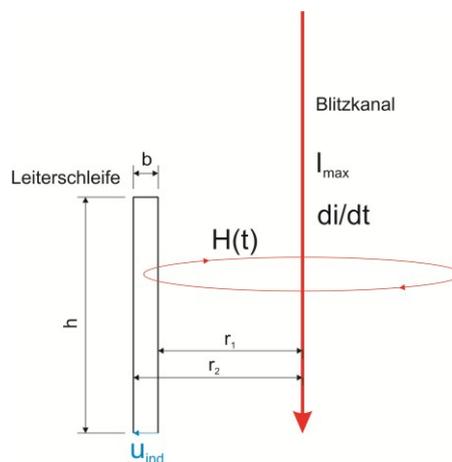


Abbildung 5-2: Spannungsinduktion in eine Leiterschleife

Für die magnetische Feldstärke im unmittelbaren Nahbereich der Einschlagstelle (Abstand $s \ll$ Blitzkanallänge, d.h. einige 100 m) gilt [9] [10]:

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

H magnetische Feldstärke [A/m]

i Blitzstrom [A]

s Entfernung [m]

Die in eine Leiterschleife induzierte Spannung berechnet sich nach dem Induktionsgesetz:

$$u_{ind} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

u_{ind} induzierte Spannung [V]

ϕ magnetischer Fluss [Wb]

t Zeit [s]

Der magnetische Fluss in einer Leiterschleife mit der Fläche Γ berechnet sich zu:

$$\phi = \int_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{\Gamma} \quad (4)$$

B magnetische Flussdichte [T]

Γ Fläche der Leiterschleife [m²]

Die magnetische Flussdichte ergibt sich aus:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (5)$$

μ_0 magnetische Feldkonstante [H/m]

Somit ergibt sich für den magnetischen Fluss pro Meter:

$$\phi' = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot i = M' \cdot i \quad (6)$$

ϕ' magnetischer Fluss pro Meter Höhe [Wb/m]

r_1 Abstand zwischen Blitzkanal und Leiterschleife Anfang [m]

r_2 Abstand zwischen Blitzkanal und Leiterschleife Ende [m]

M' Gegeninduktivität der Leiterschleife pro Meter Höhe [H/m]

Daraus lässt sich die induzierte Spannung pro Meter Schleifenhöhe ermitteln:

$$u'_{ind} = -\frac{d\phi'}{dt} = -M' \cdot \frac{di}{dt} \quad (7)$$

$$u'_{ind,max} = -M' \cdot \left(\frac{di}{dt}\right)_{max} \quad (8)$$

Die in die Leiterschleife maximal induzierte Spannung ist demnach:

$$u_{ind,max} = u'_{ind,max} \cdot h \quad (9)$$

h Höhe der Leiterschleife [m]

Gemäß den obigen Formeln ist die in eine Leiterschleife induzierte Spannung umso höher, je größer die Schleifenfläche und die Steilheit des Blitzstroms, beziehungsweise je näher der Blitzkanal zur Schleifengeometrie angeordnet ist.

5.2 Die induktive Kopplung bei Kunststoffmasten

Masten aus Kunststoff können bezüglich der magnetischen Eigenschaft mit jener von Luft gleichgestellt werden. Dieser Umstand ermöglicht die Ermittlung der induzierten Spannung in einer in einem Kunststoffmast verlaufenden Versorgungsleitung mit Hilfe der in Abschnitt 5.1 angeführten Ausdrücke. Um zum einen die maximal möglichen Spannungsbeanspruchungen abschätzen zu können und zum anderen den Rechenaufwand zweckmäßig in Grenzen zu halten, wurden mechanische Verstärkungen aus Stahl (z. B. im Masttürbereich), die bei diesem Mastmaterial integriert sein können, nicht berücksichtigt.

Für die nachfolgenden Berechnungen wird von einem vereinfachten Modell, wie in Abbildung 5-3 zu sehen ist, ausgegangen. Das Versorgungskabel verläuft durch das Kabelloch zu einem Kabelübergangskasten. Parallel dazu ist ein weiteres Kabel zur Versorgung der nachfolgenden Masten geklemmt. Über dem Kabelübergangskasten befindet sich die Leitung zur Energieversorgung der Leuchte. Das Kabel sowie die Leitung stellen für die Untersuchung geradlinige Verbindungen dar. Beim Kabel und der Leitung handelt es sich um gewöhnliche Typen. Als Kabel wurde beispielhaft ein E-YY 5x10 mm², als Leitung ein YM 2x1,5 mm² angenommen. Das Kabel und die Leitung werden jeweils gedanklich durch eine Leiterschleife ersetzt. Da der Aderabstand der Leitung geringer als beim Kabel ist, wird die erdachte Leiterschleife in zwei Bereiche, einem Bereich 1 oberhalb und einem Bereich 2 unterhalb des Übergangskastens, unterteilt. Die zwei Bereiche werden in der Berechnung separat behandelt und im Anschluss superpositioniert. Die interne Verkabelung im Übergangsbereich findet dabei keine Berücksichtigung.

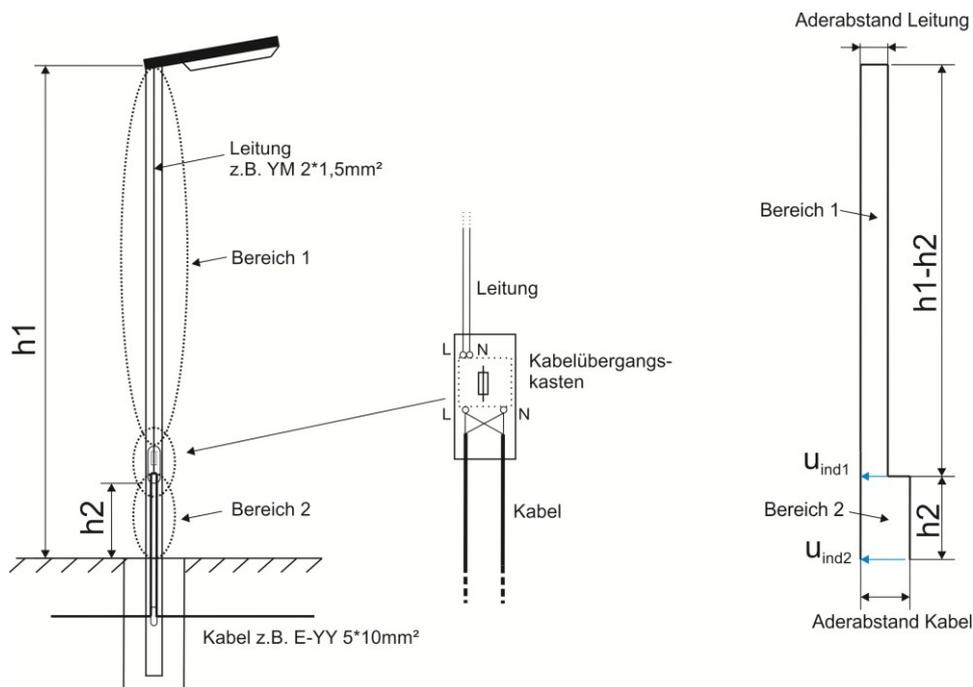


Abbildung 5-3: Modell für die induktive Kopplung bei einem Kunststoffmast (schematisch)

Die Analyse erfolgt für verschiedene Masthöhen (h_1 ab Erdbodenniveau) und für alle Masthöhen gleichbleibender Höhe zur Masttür (h_2 ab Erdbodenniveau). In Tabelle 5-1 sind die gewählten Parameter für die Schleifengeometrie angeführt.

Tabelle 5-1: Gewählte Abmessungen der Schleifengeometrie

Parameter Schleifengeometrie	
h_1 [m]	4 - 12
h_2 [m]	0,6
Aderabstand Leitung [mm]	3
Aderabstand Kabel [mm]	6

Als nächsten Schritt müssen realistische Werte für den Abstand zwischen Blitzkanal und Lichtmast gewählt werden. Dazu wurden zwei grundverschiedene Szenarien in Betracht gezogen, die sich in erster Linie durch die wahrscheinlichen Eintrittsstellen für eine Blitzentladung ergeben. Beim ersten Szenario wird davon ausgegangen, dass sich die lichttechnische Anlage in einem freien, un bebauten Gebiet befindet und es zu einer atmosphärischen Entladung in das Erdreich im Nahbereich der Anlage kommt. Die mögliche Einschlagstelle in den Erdboden wird mit Hilfe des Blitzkugelverfahrens unter Berücksichtigung der Masthöhe ermittelt (siehe Abschnitt 5.2.1). Für das zweite Szenario wird ein Einschlag in ein Objekt in unmittelbarer Nähe der lichttechnischen Anlage angenommen. Damit ist auch eine Untersuchung der magnetischen Kopplung bei geringeren Abständen möglich, die sich bei der Blitzkugelmethode nicht ergeben (siehe Abschnitt 5.2.2).

5.2.1 Blitzschlag im Nahbereich der lichttechnischen Anlage mit Berücksichtigung des Blitzkugelverfahrens

Die lichttechnische Anlage befindet sich in einem freien, unbebauten Gelände. Der mögliche Einschlagpunkt in das Erdreich ergibt sich durch Anwendung der Blitzkugelmethode.

5.2.1.1 Das Blitzkugelverfahren

Um das Volumen zu bestimmen, das gegen direkte Blitzschläge geschützt ist, kann das Blitzkugelverfahren herangezogen werden. Nach dem elektro-geometrischen Modell korreliert der Blitzkugelradius r (Enddurchschlagstrecke) mit dem Scheitelwert des ersten Stoßstroms [11].

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

r Radius der Blitzkugel [m]

\hat{I} Scheitelwert des Blitzstroms [kA]

Man geht von der Vorstellung aus, dass eine imaginäre Kugel mit dem Radius r den Leitblitzkopf umgibt und die Oberfläche dieser Kugel alle potenziellen Einschlagpunkte repräsentiert, die von dem Blitz über die Enddurchschlagstrecke erreicht werden können (Abbildung 5-4). Für einen gegebenen Blitzkugelradius r mit einem diesen Radius entsprechenden Scheitelwert des Blitzstroms kann angenommen werden, dass Blitze mit mehr als dieser vorgegebenen Stromstärke nicht in diesen Schutzbereich einschlagen. Die Stromsteilheit und das mögliche Auftreten von Folgeblitzen beeinflusst bei diesem Modell nicht den Kugelradius. Die Einschlagstelle ist per Definition durch den Erstblitz festgelegt. Die Folgeblitze nutzen in der Regel die noch ionisierte, leitfähige Blitzbahn des ersten Blitzes und schlagen daher meist in derselben Stelle ein. [25]

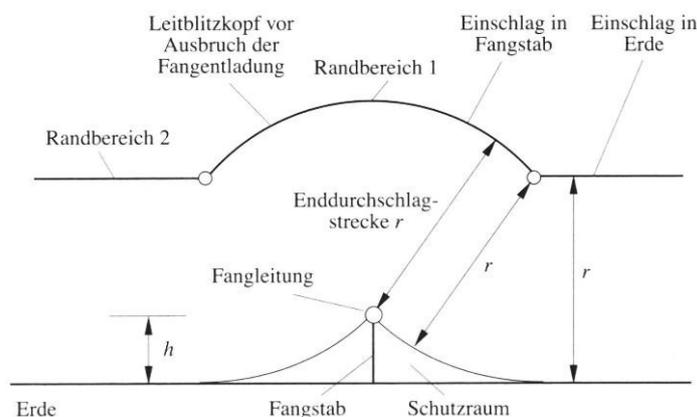


Abbildung 5-4: Blitzkugelverfahren [10]

5.2.1.2 Anwendung des Blitzkugelverfahrens bei einem Lichtmast

In Abbildung 5-5 ist die Anwendung des Blitzkugelverfahrens bei einem Lichtmast dargestellt. Die den Leitblitzkopf umgebende imaginäre Kugel wird zum Lichtmast „herangerollt“. Als Entfernung zwischen dem Einschlagpunkt und dem Lichtmast wurde jener Mindestwert s gewählt, bei dem der Blitz gerade nicht den Lichtmast trifft. Dieser Abstand ist vom Radius der Blitzkugel sowie der Höhe des Lichtmastes abhängig.

$$s = \sqrt{2 \cdot r \cdot h_1 - h_1^2} \quad \text{für } h_1 < r \quad (11)$$

$$s = r \quad \text{für } h_1 \geq r \quad (12)$$

s Abstand zwischen Einschlagpunkt und Lichtmast [m]
 h_1 Lichtmasthöhe (ab Grund) [m]

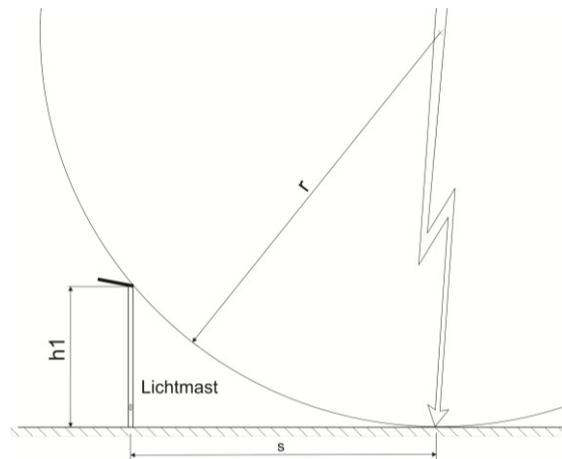


Abbildung 5-5: Anwendung des Blitzkugelverfahrens bei einem Lichtmast

Für alle nachstehenden Analysen genügt es die Leiterschleife gedanklich im Abstand s (Anfang Mast) zum Blitzkanal anzuordnen.

5.2.1.3 Ermittlung der induzierten Spannung

Für die Berechnung des Blitzkugelradius und des Scheitelwerts der induzierten Spannung wurden die Maximal-, Mittel-, und Minimalwerte der Blitzstromparameter aus [11] herangezogen. In den Tabellen 5-2 bis 5-4 ist die Auswertung der maximal induzierten Spannung \hat{u}_{ind} für die die Maximalwerte entsprechend den Gefährdungspegeln bei unterschiedlichen Masthöhen dargestellt. Da der Erstblitz den Einschlagpunkt bestimmt, wurde der Blitzkugel-

radius ebenfalls mit dem Stromsichelwert des ersten Stoßstroms ermittelt. Die Berechnung der maximal induzierten Spannung erfolgte mit der Steilheit des Folgeblitzes, da dieser Parameter für die Spannungseinkopplung maßgebend ist.

In Tabelle 5-2 wurde der erste positive Stoßstrom für die Ermittlung des Abstandes zwischen Blitzkanal und Mast verwendet. Die Entfernung zum Blitzkanal bewegt sich demnach im Bereich zwischen ca. 40 und ca. 86 m. Die maximal in die elektrische Versorgung induktiv eingekoppelte Spannung liegt im Bereich von ca. 7 bis ca. 18 V.

Tabelle 5-2: Auswertung 1: Abstand Blitzkanal - Mast und Scheitelwert induzierte Spannung. Berechnung anhand der Maximalwerte der Blitzstromparameter nach [11]

Auswertung 1: Maximalwerte			LPL					
			I		II		III & IV	
Scheitelwert erster positiver Stoßstrom	I_{\max}	[kA]	200		150		100	
Mittlere Steilheit Folgestoßstrom	di/dt	[kA/ μ s]	200		150		100	
Masthöhe			Abstand Blitzkanal - Mast, Scheitelwert induzierte Spannung					
h_1			s	\hat{u}_{ind}	s	\hat{u}_{ind}	s	\hat{u}_{ind}
[m]			[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]
4			49,9	11,06	45,4	9,12	39,8	6,94
6			61,0	12,98	55,5	10,70	48,6	8,15
8			70,3	14,67	64,0	12,10	55,9	9,22
10			78,5	16,20	71,4	13,37	62,4	10,20
12			85,8	17,61	78,0	14,53	68,2	11,09

Tabelle 5-3 zeigt die Auswertung durch die Anwendung des ersten negativen Stoßstroms, wodurch der Abstand zum Blitzkanal geringer ausfällt als im obigen Fall. Die Entfernung zum Blitzkanal liegt folglich zwischen ca. 32 und ca. 68 m. Die maximal in die elektrische Versorgung induktiv eingekoppelte Spannung liegt im Bereich von ca. 9 bis ca. 22 V.

Tabelle 5-3: Auswertung 2: Abstand Blitzkanal - Mast und Scheitelwert induzierte Spannung. Berechnung anhand der Maximalwerte der Blitzstromparameter nach [11]

Auswertung 2: Maximalwerte			LPL					
			I		II		III & IV	
Scheitelwert erster negativer Stoßstrom	I_{\max}	[kA]	100		75		50	
Mittlere Steilheit Folgestoßstrom	di/dt	[kA/ μ s]	200		150		100	
Masthöhe			Abstand Blitzkanal - Mast, Scheitelwert induzierte Spannung					
h_1			s	\hat{u}_{ind}	s	\hat{u}_{ind}	s	\hat{u}_{ind}
[m]			[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]
4			39,8	13,89	36,2	11,45	31,6	8,72
6			48,6	16,31	44,2	13,45	38,6	10,26
8			55,9	18,45	50,8	15,23	44,4	11,62
10			62,4	20,39	56,7	16,84	49,4	12,9
12			68,2	22,19	61,9	18,33	53,9	14,02

In Tabelle 5-4 wurde die maximale Blitzstromsteilheit für Folgeblitze gemäß [11] festgelegter Stromfunktion für den Gefährdungspegel 1 angewendet. Die Maximalwerte der induzierten Spannung liegen in diesem Fall im Bereich von ca. 15 bis ca. 31 V.

Tabelle 5-4: Auswertung 3: Abstand Blitzkanal - Mast und Scheitelwert induzierte Spannung. Berechnung anhand der Maximalwerte der Blitzstromparameter nach [11] festgelegter Stromfunktion für LPL 1

Auswertung 3: Maximalwerte			LPL	
			I	
Scheitelwert erster Stoßstrom	I_{\max}	[kA]	100	200
Maximale Steilheit Folgestoßstrom	di/dt_{\max}	[kA/ μ s]	280	280
Masthöhe			Abstand Blitzkanal - Mast, Scheitelwert induzierte Spannung	
h_1			s	\hat{u}_{ind}
[m]			[m]	[V]
4			39,8	19,44
6			48,6	22,83
8			55,9	25,83
10			62,4	28,55
12			68,2	31,06

Tabelle 5-5 zeigt die Auswertung mit Hilfe der Mittelwerte aus [11]. Für die Ermittlung des Blitzkugelradius wurde der Mittelwert negativer Erstblitze mit 33,3 kA, für die maximal induzierte Spannung der Mittelwert der maximalen Stoßstromsteilheit negativer Folgeblitze mit 40 kA/ μ s, angewendet. Demzufolge liegen die Abstände zum Blitzkanal zwischen ca. 28 und ca. 47 m. Die in die elektrische Versorgung maximal induktiv eingekoppelte Spannung erreicht Werte im Bereich von ca. 4 bis ca. 6 V.

Tabelle 5-5: Auswertung 4: Abstand Blitzkanal - Mast und Scheitelwert induzierte Spannung. Berechnung anhand der Mittelwerte der Blitzstromparameter nach [11]

Auswertung 4: Mittelwerte			
Mittelwert Scheitelwert negativer Erstblitz	$I_{\max,\mu}$	[kA]	33,3
Mittelwert maximale Stoßstromsteilheit negativer Folgeblitz	$di/dt_{\max,\mu}$	[kA/ μ s]	40,0
Masthöhe			Abstand Blitzkanal - Mast, Scheitelwert induzierte Spannung
h_1			s
[m]			[m]
4			27,7
6			33,7
8			38,7
10			43,0
12			46,9
			\hat{u}_{ind}
			[V]
			3,99
			4,70
			5,33
			5,91
			6,45

Die Berechnung der Abstände zwischen Blitzkanal und Mast sowie der induzierten Spannungen in Tabelle 5-6 orientieren sich an den Minimalwerten der Blitzstromparameter nach [11]. Da in der Vorschrift keine Angaben zur mittleren Steilheit negativer Folgeblitze hinsichtlich der kleinsten Scheitelwerte gemacht werden, wurde für deren Berechnung auch der Scheitelwert I_{grenz} für Folgeblitze ($T_1=0,25 \mu\text{s}$) herangezogen. Die Entfernungen zum Blitzkanal betragen zwischen 12 und 36 m. Die in die elektrische Versorgung maximal induktiv eingekoppelte Spannung erreicht Werte im Bereich von ca. 3 bis ca. 13 V.

Tabelle 5-6: Auswertung 5: Abstand Blitzkanal - Mast und Scheitelwert induzierte Spannung. Berechnung anhand der Minimalwerte der Blitzstromparameter nach [11]

Auswertung 5: Minimalwerte			LPL							
			I		II		III		IV	
Kleinsten Scheitelwert	I_{grenz}	[kA]	3		5		10		16	
Mittlere Steilheit ($I_{\text{grenz}}/0,25 \mu\text{s}$)	di/dt	[kA/ μs]	12		20		40		64	
Masthöhe			Abstand Blitzkanal - Mast, Scheitelwert induzierte Spannung							
h_1	s	\hat{u}_{ind}	s	\hat{u}_{ind}	s	\hat{u}_{ind}	s	\hat{u}_{ind}	s	\hat{u}_{ind}
[m]	[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]	[m]	[V]
4	12,0	2,76	14,9	3,69	18,5	5,95	21,5	8,2		
6	14,3	3,33	18,0	4,40	22,4	7,06	26,2	9,69		
8	16,0	3,87	20,4	5,06	25,6	8,06	29,9	11,03		
10	17,3	4,41	22,4	5,69	28,3	8,99	33,2	12,27		
12	18,3	4,95	24,0	6,30	30,6	9,88	36,0	13,44		

5.2.2 Blitzeinschlag in ein Objekt in unmittelbarer Nähe der lichttechnischen Anlage

Hierbei wird von der Annahme ausgegangen, dass es zu einem Blitzeinschlag in ein Objekt (z. B. Fahnenstange, Mast, Gebäude mit Blitzstromableitung) kommt, welches sich in unmittelbarer Nähe (1-10 m) einer lichttechnischen Anlage befindet (Abbildung 5-6). Das getroffene Objekt leitet den Blitzstrom vollständig in das Erdreich ab. Zudem wird eine größere Objekthöhe im Vergleich zu jener des Mastes vorausgesetzt. Etwaige Überschläge zwischen der blitzstromführenden Ableitung und dem Lichtmast werden dabei ausgeschlossen.

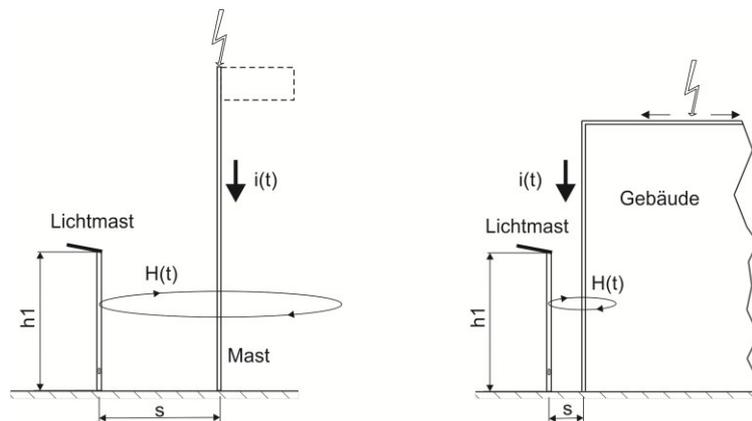


Abbildung 5-6: Blitzeinschlag in unmittelbarer Nähe eines Mastes

Als Blitzstromparameter fließt hier lediglich die Blitzstromsteilheit mit ein. Um einen möglichst großen Bereich abzudecken wurden folgende Werte gewählt:

- 24,3 kA/ μ s (Mittelwert negativer Erstblitz)
- 40,0 kA/ μ s (Mittelwert negativer Folgeblitz)
- 100 kA/ μ s (mittlere Steilheit erster negativer Stoßstrom entsprechend LPL 1 bzw. mittlere Steilheit Folgestoßstrom entsprechend LPL 3 und 4)
- 200 kA/ μ s (mittlere Steilheit Folgestoßstrom entsprechend LPL 1)
- 280 kA/ μ s (maximale Stromsteilheit nach [11] festgelegter Stromfunktion)

Die Analyse erfolgte für drei verschiedene Masthöhen (4 m, 8 m und 12 m) bei Variation der Entfernung zur blitzstromführenden Ableitung (Tabelle 5-7).

Die Abbildungen 5-7 bis 5-9 veranschaulichen die Zunahme der maximal induzierten Spannung mit der Masthöhe sowie der Stromsteilheit. Ferner zeigt sich die verkehrt proportionale Abhängigkeit der induzierten Spannung vom Abstand der Blitzstromableitung. Die induzierten Spannungen belaufen sich bei einem Abstand von 1 m und einem 4 m hohen Mast

zwischen ca. 70 und ca. 770 V, bei einem 12 m hohen Mast zwischen ca. 180 V und ca. 2,1 kV. Bei einer Entfernung von 10 m betragen diese Werte ein Zehntel.

Tabelle 5-7: Scheitelwert der induzierten Spannung bei unterschiedlichen Masthöhen, Blitzstromsteilheiten und Abständen zur Blitzstromableitung

Masthöhe h_1 [m]	Blitzstromsteilheit di/dt [kA/ μ s]	Abstand s zur Blitzstromableitung [m]		
		1	5	10
Scheitelwert induzierte Spannung \hat{u}_{ind} [kV]				
4	24,3	0,067	0,013	0,007
	40,0	0,110	0,022	0,011
	100	0,276	0,055	0,028
	200	0,551	0,110	0,055
	280	0,771	0,155	0,077
8	24,3	0,125	0,025	0,013
	40,0	0,206	0,041	0,021
	100	0,515	0,103	0,052
	200	1,030	0,206	0,103
	280	1,442	0,289	0,145
12	24,3	0,183	0,037	0,018
	40,0	0,302	0,061	0,030
	100	0,755	0,151	0,076
	200	1,510	0,302	0,151
	280	2,113	0,423	0,212

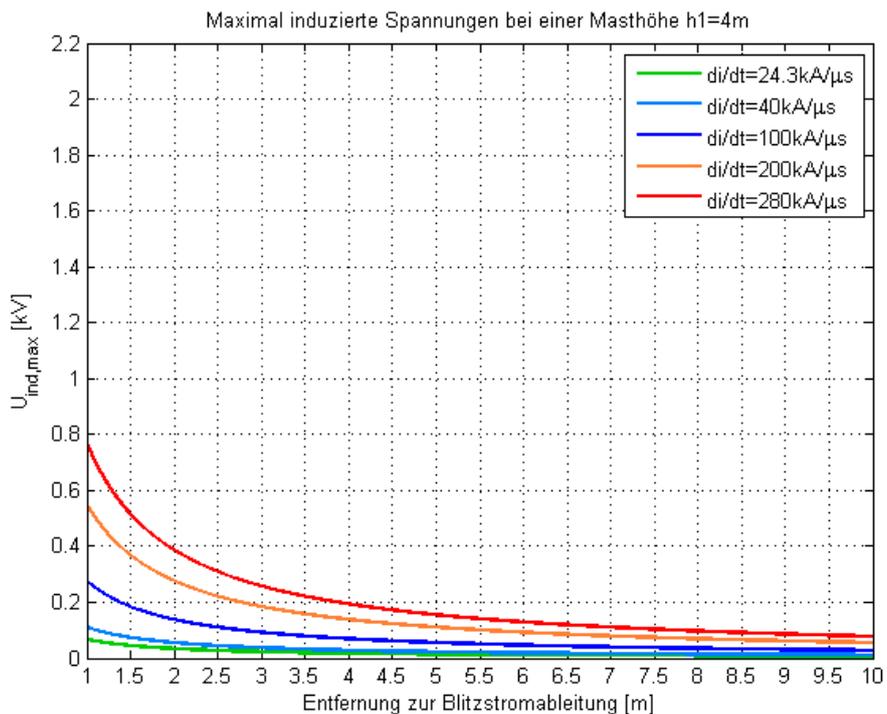


Abbildung 5-7: Scheitelwert der induzierten Spannung bei einem 4 m Mast

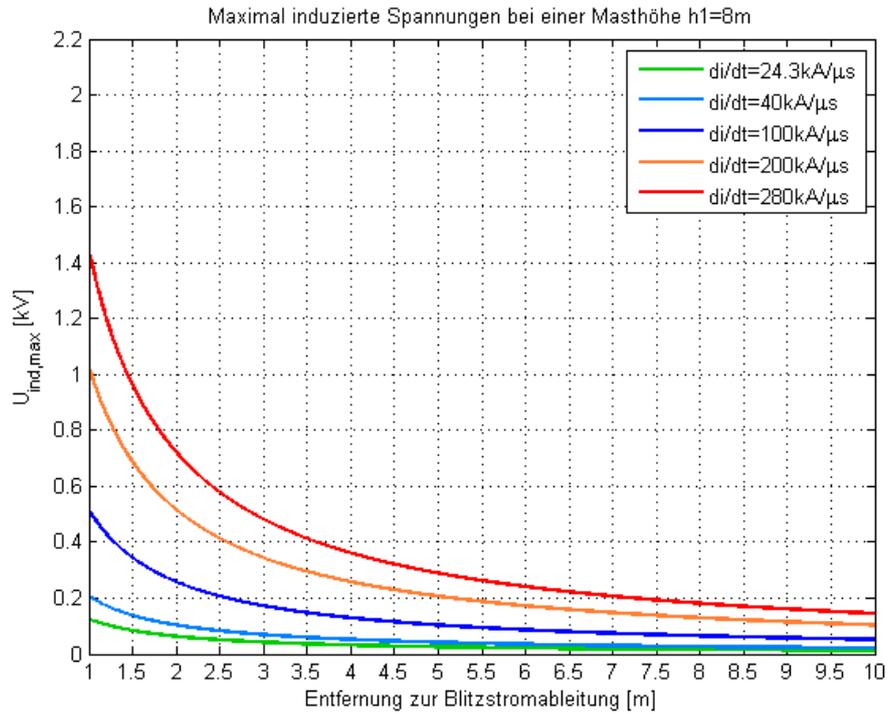


Abbildung 5-8: Scheitelwert der induzierten Spannung bei einem 8 m Mast

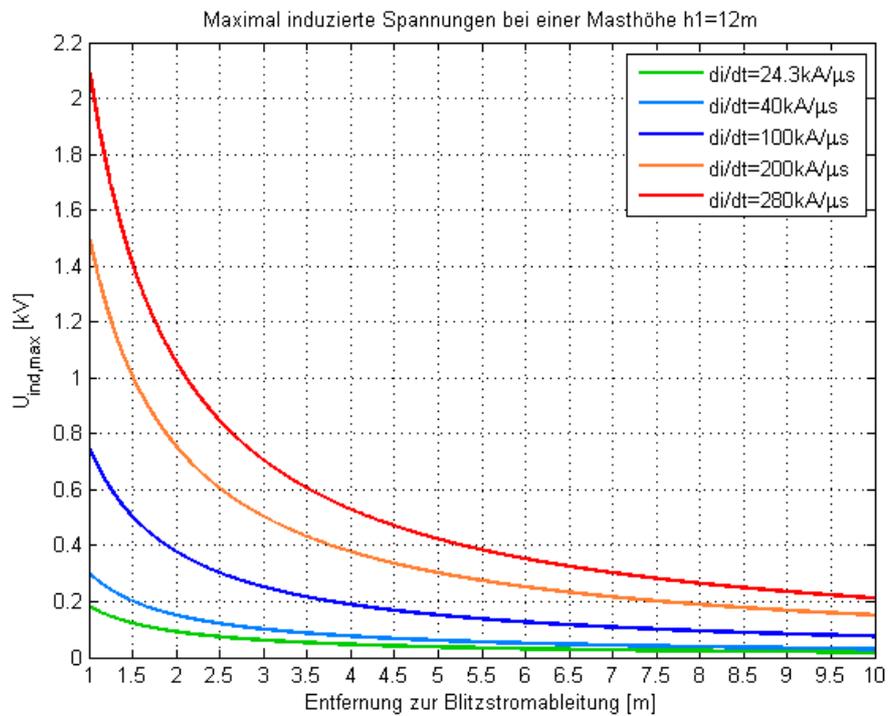


Abbildung 5-9: Scheitelwert der induzierten Spannung bei einem 12 m Mast

5.2.3 Analytischer Verlauf der induzierten Spannung

Zu den Maximalwerten sollte auch der Verlauf der in die Leiterstruktur induzierten Spannung festgehalten werden. In Abbildung 5-10 sind die induzierten Spannungskurven bei einem 8 m hohen Mast für verschiedene Blitzstromverläufe gemäß LPL 3 und 4 (vgl. Abbildung 2-14) dargestellt. Der Scheitelwert des ersten positiven Stoßstroms beträgt 100 kA, jener des ersten negativen Stoßstroms 50 kA und der des negativen Folgestoßstroms 25 kA. Die blitzstromführende Ableitung befindet sich in einer Entfernung von 5 m zum Mast. Wie in der Abbildung erkennbar ist, stellen sich bei den negativen Folgestoßströmen neben den höheren Spannungswerten auch wesentlich steilere Verläufe ein.

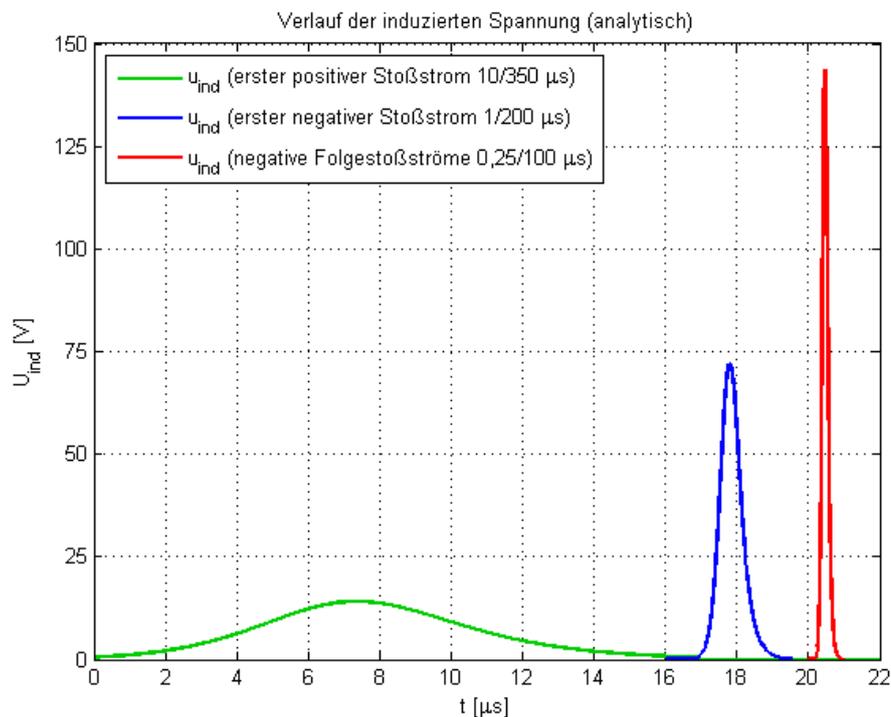


Abbildung 5-10: Verlauf der induzierten Spannung bei einem 8 m Mast, Gefährdungspegel 3 und 4 sowie 5 m Entfernung zur Blitzstromableitung

5.3 Die induktive Kopplung bei Stahl- und Aluminiummasten

Die Untersuchung der induktiven Kopplung bei Masten aus Stahl und Aluminium erfolgte mit dem Softwarepaket *EleFAnT2D*¹, das auf der Methode der finiten Elemente basiert. Als Solver kam jener für transiente Wirbelströme zum Einsatz.

5.3.1 Modellbildung

Für die Modellbildung wird wiederum davon ausgegangen, dass sich der Blitzkanal und der Mast in derselben Ebene befinden (Abbildung 5-11). Um das durch den Blitzstrom hervorgerufene Magnetfeld zu generieren, genügt es, den Blitzkanal mit einem Quadrat (Seitenlänge 0,2 m) nachzubilden. Für die Abmessungen des zylindrischen Lichtmastes wurden Durchschnittswerte gewählt. Der Innendurchmesser wurde mit 150 mm und die Wandstärke mit 3 mm angenommen (Abbildung 5-12). Da bereits bei Voruntersuchungen eine verhältnismäßig hohe Schirmdämpfung bei beiden Mastmaterialien festzustellen war, wurde für alle Berechnungen ein Abstand von 2 m zwischen Mastmitte und Anfang Blitzkanal gewählt.

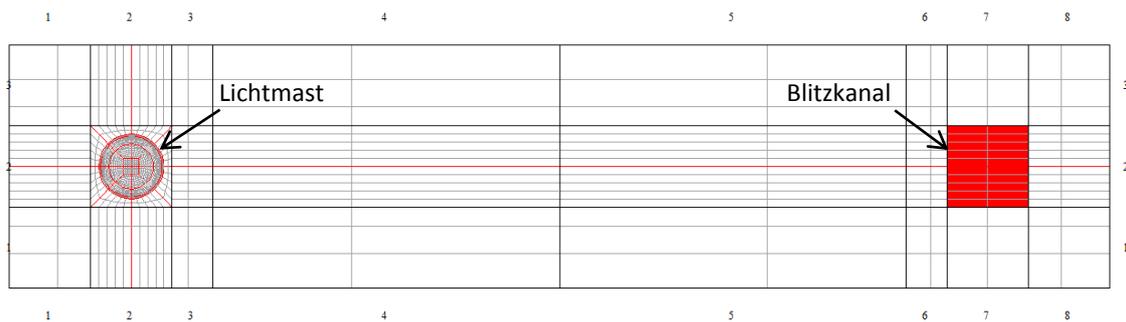


Abbildung 5-11: Simulationsumgebung EleFAnT2D

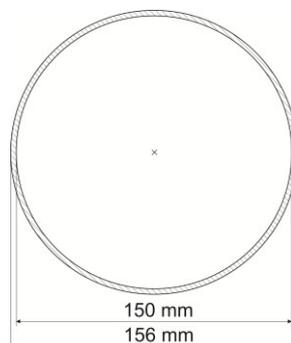


Abbildung 5-12: Abmessungen Lichtmast

¹ *Electromagnetic Field Analysis Tools, Numerisches Simulationsprogramm erstellt am Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik der TU Graz*

5.3.2 Simulationsparameter

Für die Blitzströme wurden die drei Zeitfunktionen (10/350 μ s; 1/200 μ s; 0,25/100 μ s) aus [11] herangezogen (siehe Abschnitt 2.5.5). Der Scheitelwert des ersten positiven Stoßstroms wurde mit 200 kA vorgegeben, jener des ersten negativen Stoßstroms mit 100 kA und der des negativen Folgestoßstroms mit 50 kA. Die Stromverläufe wurden durch Polygonzüge nachgebildet und die Stützpunkte in die Simulationsumgebung eingegeben. Für die anschließende Simulation wurde der Polygonzug je nach Stromsteilheit mit variablen Zeitschritten abgetastet.

Die elektrische Leitfähigkeit von Stahl wurde mit $\sigma_{St} = 4,6 \cdot 10^6$ S/m definiert, die von Aluminium mit $\sigma_{Al} = 3,5 \cdot 10^7$ S/m. Stahl weist ein nichtlineares Magnetisierungsverhalten auf, was in der Simulation durch die in Abbildung 5-13 dargestellte Magnetisierungskurve berücksichtigt wird.

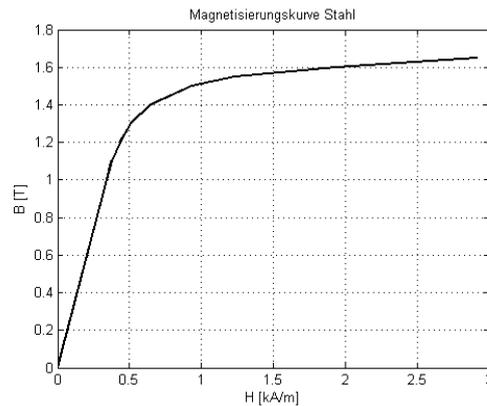


Abbildung 5-13: Magnetisierungskurve Stahl

5.3.3 Auswertung

Um die induzierte Spannung in der im Mast enthaltenen Leiterstruktur (Kabel und Leitung) zu berechnen, wurde dieselbe Schleifengeometrie wie in Abbildung 5-3 angenommen. Für alle nachfolgenden Auswertungen wurde eine Masthöhe von $h_1=12$ m vorausgesetzt. Die Leitung und das Kabel werden gedanklich in die Mitte des Mastes platziert. Die durch die Leiterstruktur aufgespannte Fläche und der Blitzkanal liegen somit in derselben Ebene. Die induzierte Spannung wurde durch die Ableitung der normal auf die Schleifenfläche gerichteten magnetischen Flussdichte in der Mitte des Mastes nach der Zeit und Multiplikation mit der Schleifenfläche ermittelt. Dies ist zulässig, da die magnetische Flussdichte in der Mitte des Mastes annähernd homogen ist. Das Vorzeichen der induzierten Spannung hat auch hier nur eine untergeordnete Rolle.

$$u_{ind}(t) = -\frac{d\phi(t)}{dt} \approx -A_{Schleife} \cdot \frac{dB_n(t)}{dt} \quad (13)$$

$A_{Schleife}$ Fläche Leitergeometrie [m²]

B_n Normalkomponente auf Leiterschleife der magnetischen Flussdichte [T]

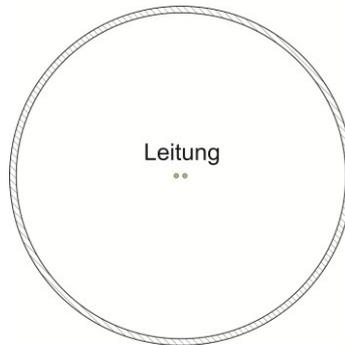


Abbildung 5-14: Gedachte Versorgungsleitung in der Mitte des Mastes

In den Abbildungen 5-15 bis 5-20 sind die zeitlichen Verläufe des Blitzstroms und die normal auf die Schleifenfläche gerichtete magnetische Flussdichte im Mittelpunkt des Hohlzylinders sowie die in die Versorgungsleitung induzierte Spannung für Stahl und Aluminium dargestellt. Aus den Verläufen der magnetischen Flussdichte und der daraus ermittelten induzierten Spannung ist die schirmende Wirkung der Masten erkennbar. Sowohl bei Stahl als auch bei Aluminium ist dieser Effekt auf die Wirbelströme (Skinneffekt) in der Mastwand zurückzuführen (elektrodynamischer Schirm). Bei Stahl kommt es aufgrund der hochpermeablen Eigenschaft zu einer Bündelung des magnetischen Flusses in der Wand (magnetostatischer Schirm), wodurch beide Schirmmechanismen miteinander kombiniert werden. Dadurch stellt sich bei Stahl eine höhere Schirmdämpfung ein als bei Aluminium. Bei Stahl beträgt die maximale Flussdichte im Mittelpunkt des Mastes je nach Blitzstromverlauf 0,02-0,12% vom Maximalwert des unbeeinflussten Falls (ohne Mast). Bei Aluminium liegt dieser Wert zwischen 2,4 und 7,5 %. Die Maximalwerte der induzierten Spannung sind bei Aluminium um etwa drei Größenordnungen höher als bei Stahl (Tabelle 5-8). Zudem stellen sich bei Aluminium wesentlich steilere Kurvenverläufe der induzierten Spannung als bei Stahl ein.

Tabelle 5-8: Maximalwerte der induzierten Spannung bei einem Stahl- und Aluminiummast

Blitzstromverlauf	Stahlmast	Aluminiummast
	$u_{ind,max}$	$u_{ind,max}$
erster positiver Stoßstrom	170 μ V	115 mV
erster negativer Stoßstrom	34 μ V	50,7 mV
negativer Folgestoßstrom	6,5 μ V	21,2 mV

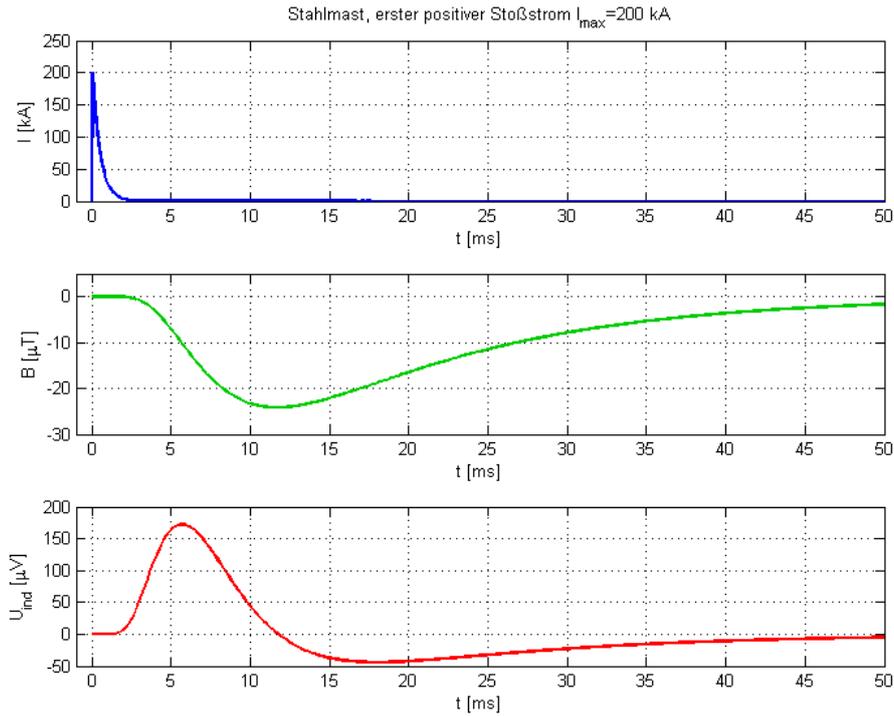


Abbildung 5-15: Zeitliche Verläufe: Erster positiver Stoßstrom ($I_{\max}=200$ kA), magnetische Flussdichte in Mastmitte und induzierte Spannung in Energieversorgung bei einem Stahlmast

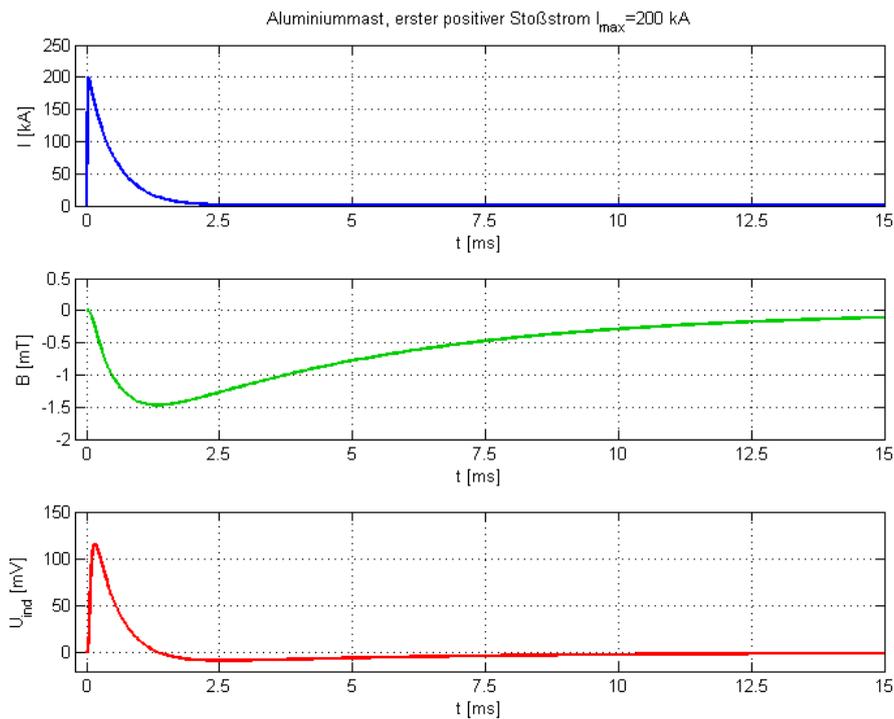


Abbildung 5-16: Zeitliche Verläufe: Erster positiver Stoßstrom ($I_{\max}=200$ kA), magnetische Flussdichte in Mastmitte und induzierte Spannung in Energieversorgung bei einem Aluminiummast

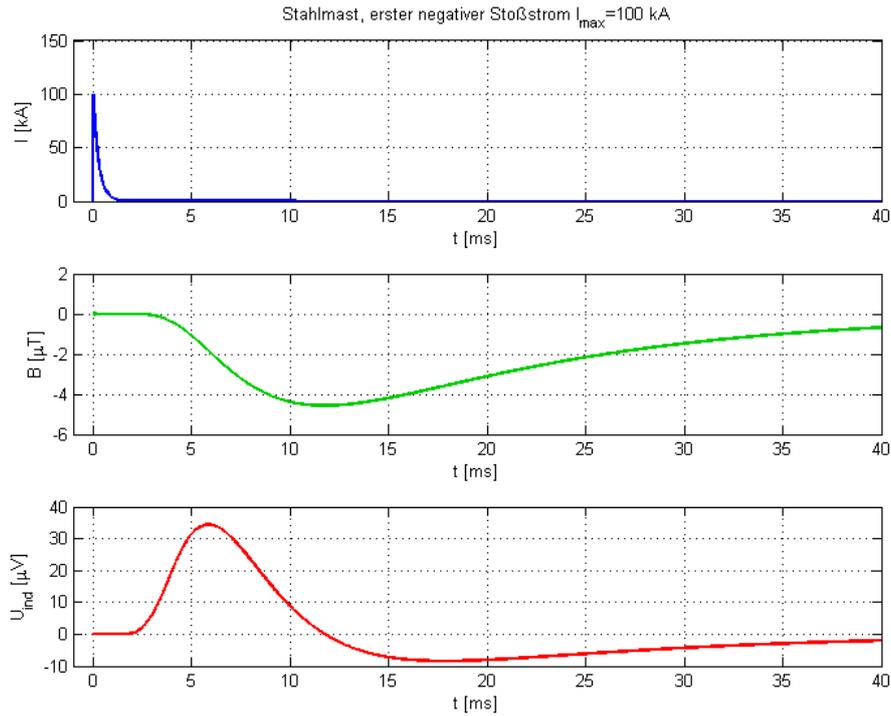


Abbildung 5-17: Zeitliche Verläufe: Erster negativer Stoßstrom ($I_{\max} = 100$ kA), magnetische Flussdichte in Mastmitte und induzierte Spannung in Energieversorgung bei einem Stahlmast

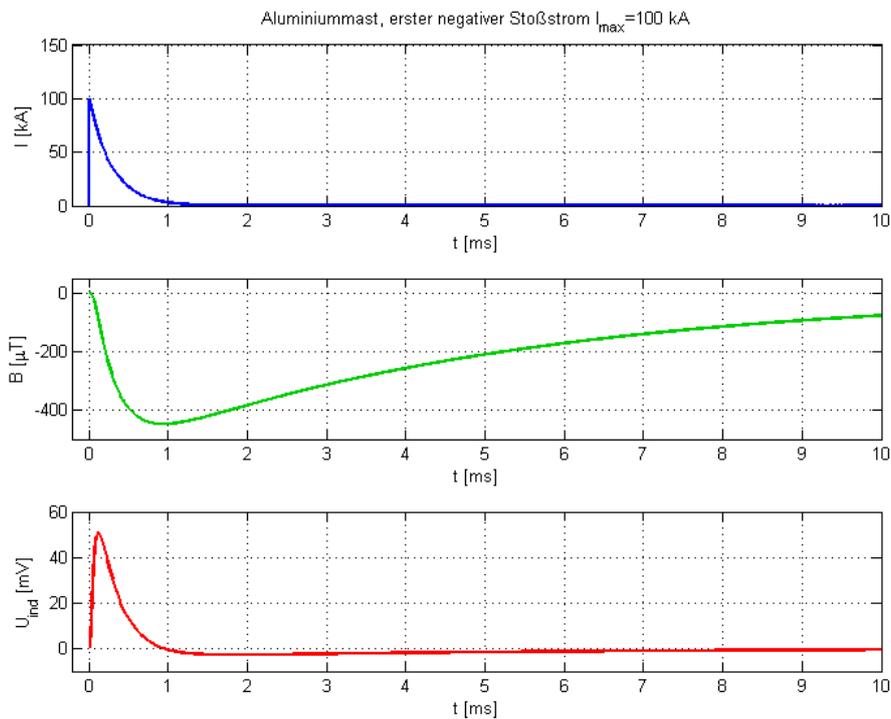


Abbildung 5-18: Zeitliche Verläufe: Erster negativer Stoßstrom ($I_{\max} = 100$ kA), magnetische Flussdichte in Mastmitte und induzierte Spannung in Energieversorgung bei einem Aluminiummast

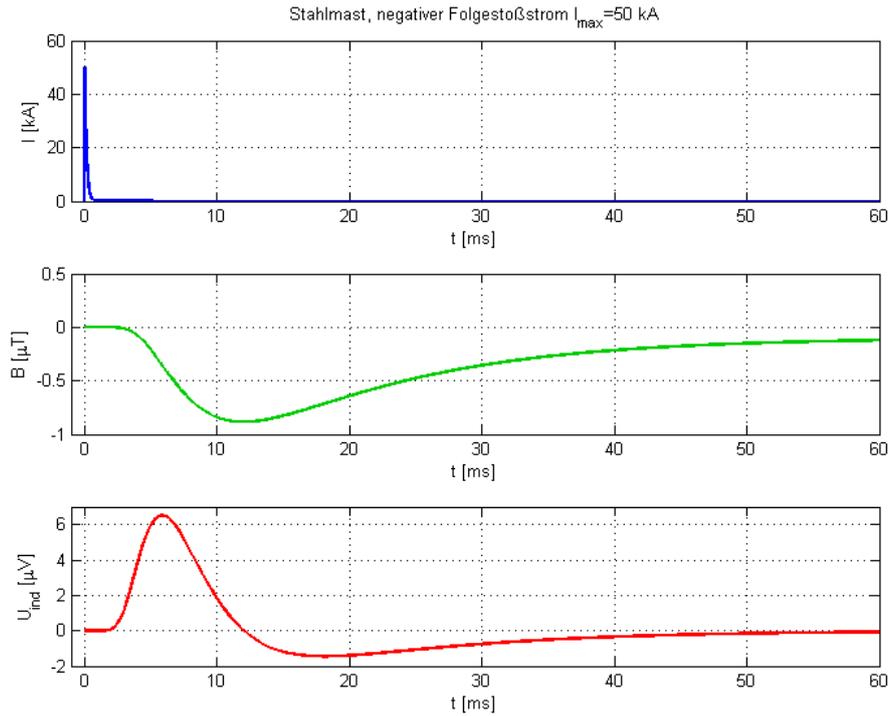


Abbildung 5-19: Zeitliche Verläufe: Negativer Folgestoßstrom ($I_{\text{max}}=50$ kA), magnetische Flussdichte in Mastmitte und induzierte Spannung in Energieversorgung bei einem Stahlmast

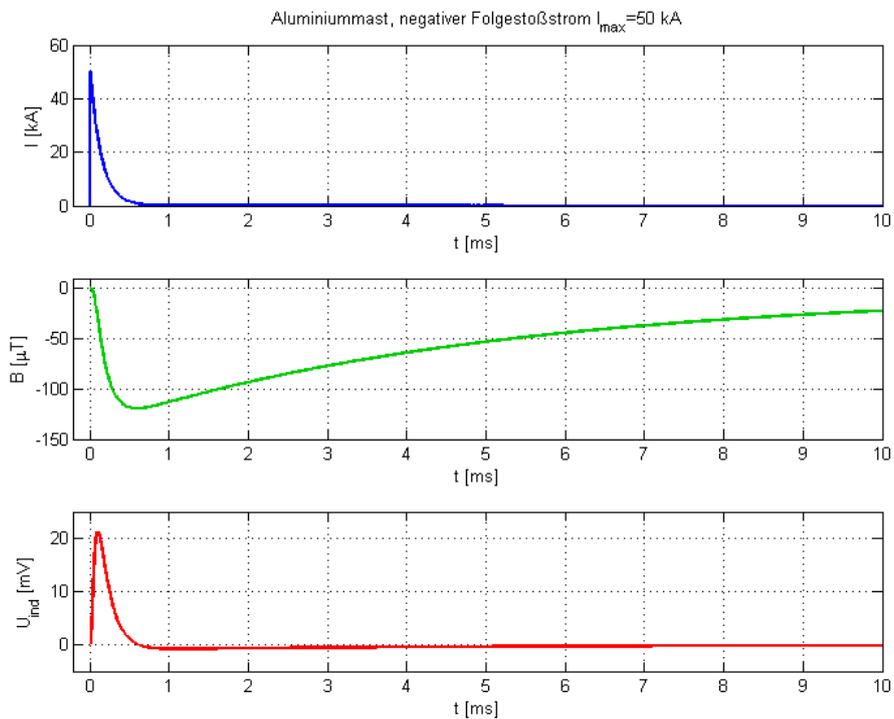


Abbildung 5-20: Zeitliche Verläufe: Negativer Folgestoßstrom ($I_{\text{max}}=50$ kA), magnetische Flussdichte in Mastmitte und induzierte Spannung in Energieversorgung bei einem Aluminiummast

5.3.4 Feldbilder

Nachfolgend sind die Feldverläufe der magnetischen Flussdichte und der Betrag der Stromdichte in der Mastwand jeweils für den ersten negativen Stoßstrom dargestellt.

In Abbildung 5-21 ist der Feldverlauf der durch den Blitzstrom hervorgerufenen magnetischen Flussdichte zum Zeitpunkt des Blitzstrommaximums dargestellt.

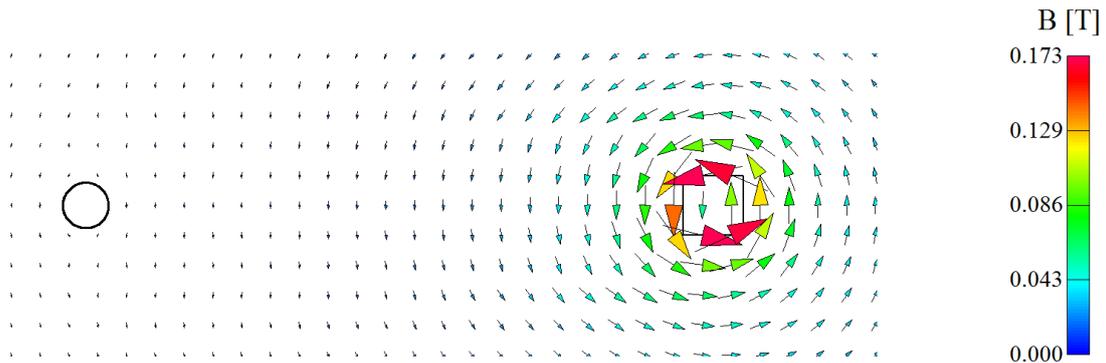


Abbildung 5-21: Magnetische Flussdichte zum Zeitpunkt I_{\max} des ersten negativen Stoßstroms

Abbildung 5-22 zeigt den Feldverlauf der magnetischen Flussdichte um den Mast beim Scheitelwert des Blitzstroms. Das gezeigte Feldbild außerhalb des Mastes ist zu diesem Zeitpunkt bei Stahl und Aluminium ähnlich.

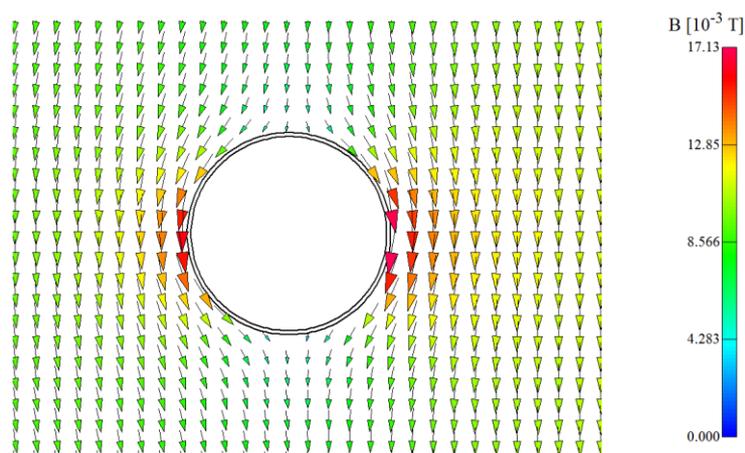


Abbildung 5-22: Magnetische Flussdichte zum Zeitpunkt I_{\max} des ersten negativen Stoßstroms (Stahl- und Aluminiummast)

Die Abbildungen 5-23 und 5-24 zeigen den Verlauf der magnetischen Flussdichte zum Zeitpunkt der maximal induzierten Spannung in die Energieversorgung für Stahl und Aluminium. Zu diesem Zeitpunkt ist der Feldverlauf innerhalb des Mastes sowohl bei Stahl, als auch bei Aluminium annähernd homogen, wie in der Zoomstufe dargestellt.

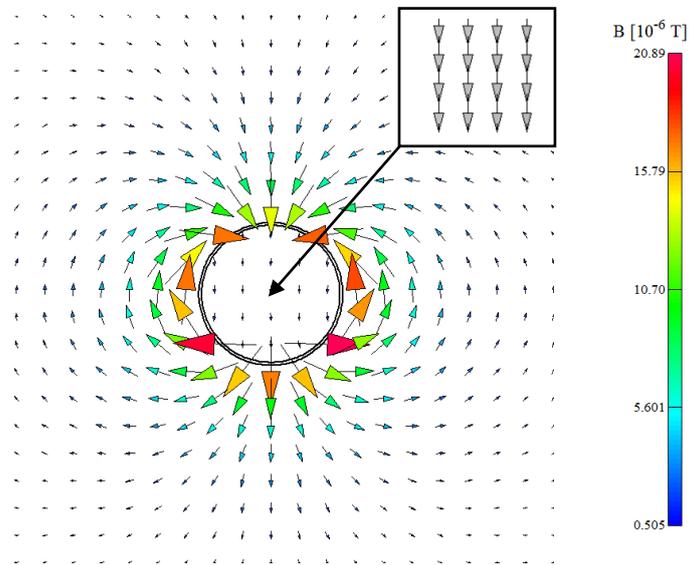


Abbildung 5-23: Magnetische Flussdichte bei einem Stahlmast zum Zeitpunkt $u_{\text{ind,max}}$ (erster negativer Stoßstrom)

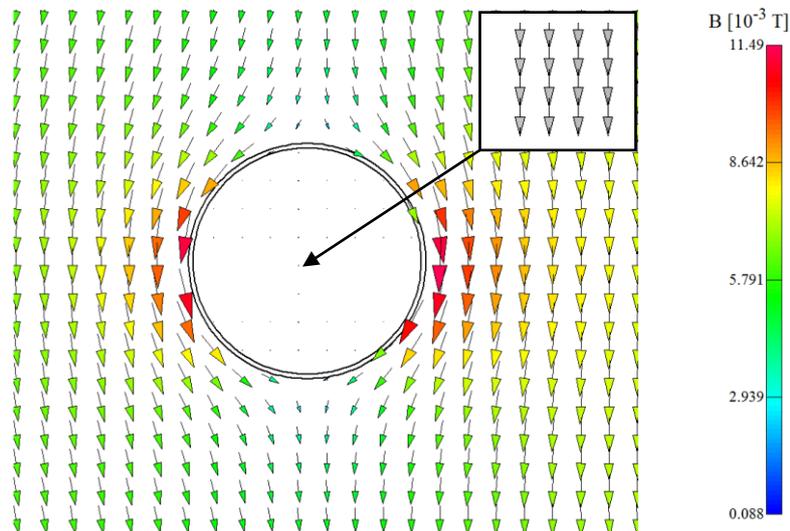


Abbildung 5-24: Magnetische Flussdichte bei einem Aluminiummast zum Zeitpunkt $u_{\text{ind,max}}$ (erster negativer Stoßstrom)

Die Abbildungen 5-25 und 5-26 stellen den Betrag der Stromdichte in der Mastwand zu verschiedenen Zeitpunkten dar. Die beim Stahlmast breiter dargestellte Wand ergibt sich aus der hierfür höher gewählten Zoomstufe. Der Betrag der Stromdichte erreicht kurzzeitig, je nach Zeitpunkt in Bezug auf den Blitzstromverlauf, Größenordnungen von 1 bis 10^6 A/mm².

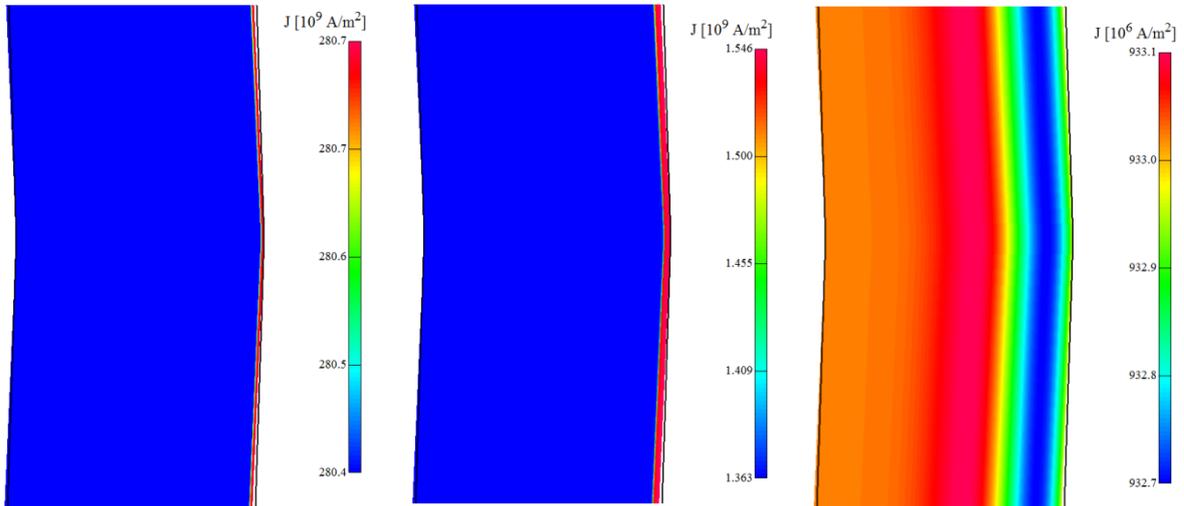


Abbildung 5-25: Betrag der Stromdichte in Stahlmastwand zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Im Anstiegsbereich des Blitzstroms (links), zum Blitzstroms Scheitelwert (Mitte), während Abklingen des Blitzstroms (rechts), erster negativer Stoßstrom

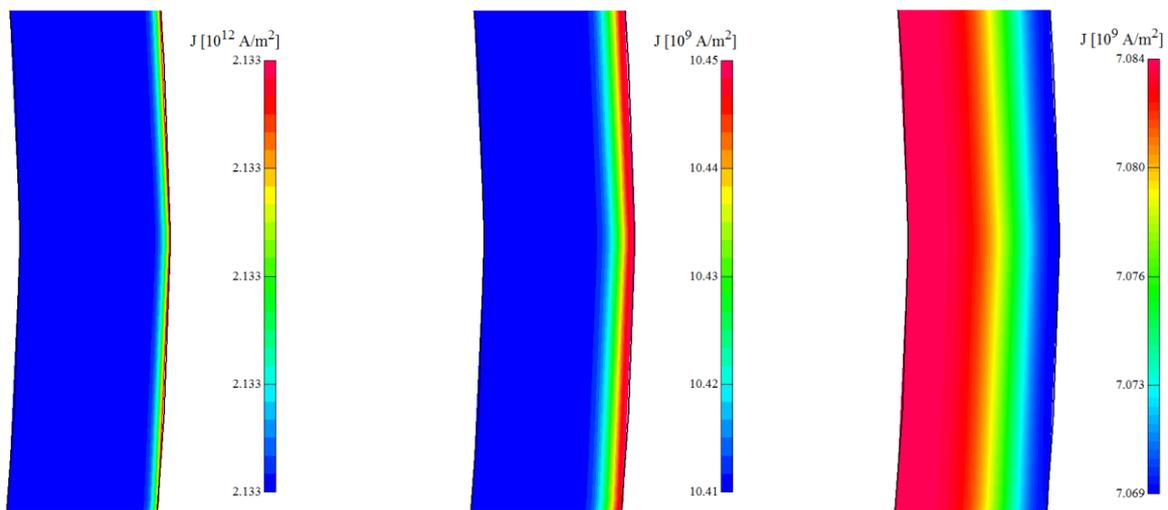


Abbildung 5-26: Betrag der Stromdichte in Aluminiummastwand zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Im Anstiegsbereich des Blitzstroms (links), zum Blitzstroms Scheitelwert (Mitte), während Abklingen des Blitzstroms (rechts), erster negativer Stoßstrom

5.4 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Bei der Ermittlung der maximal möglichen Werte der induzierten Spannung in die im Lichtmast enthaltene Versorgungsleitung wurde in Bezug auf die Schleifengeometrie und den Blitzkanal von einer „worst case“-Annahme ausgegangen. Im Allgemeinen liegen die Leiter-
schleife und der Blitz nicht in einer Ebene. Zudem steht eine Blitzentladung in der Regel nicht normal auf die Erdoberfläche und die im Mast verlegte Versorgungsleitung stellt ebenfalls keine ideale Ebene dar.

Bei einem Kunststoffmast liegt die maximal induzierte Spannung – unter Beachtung der für die Berechnung getroffenen Annahmen – je nach Masthöhe und Blitzstromparameter, bei Entfernungen von 12 bis 86 m zum Blitzkanal im Bereich von ca. 3 bis ca. 30 V. Bei geringeren Abständen von 1 bis 10 m zum Einschlagpunkt beträgt die induzierte Spannung – je nach Blitzstromsteilheit – bei einem 4 m-Mast zwischen ca. 7 und ca. 770 V und bei einem 12 m-Mast zwischen ca. 18 V und ca. 2,1 kV.

Bei Masten aus Stahl oder Aluminium kommt es zu wesentlich geringeren induzierten Spannungen in die Energieversorgung, was auf die Schirmdämpfung der Masten zurückzuführen ist. Bei den drei Blitzstromverläufen (10/350 μ s (I_{\max} =200 kA), 1/200 μ s (I_{\max} =100 kA), 0,25/100 μ s (I_{\max} =50 kA)) gemäß [11] und einem Abstand von 2 m zum Einschlagpunkt liegen die maximal induzierten Spannungen im Bereich von ca. 6 bis ca. 170 μ V bei einem 12 m hohen Stahlmast und im Bereich von ca. 20 mV bis ca. 115 mV bei einem 12 m hohen Aluminiummast. Da im Allgemeinen die Versorgungsleitung nicht in der Mitte eines Mastes verläuft, wurden die induzierten Spannungen auch im Randbereich ausgewertet. Die Spannungsverläufe unterscheiden sich dabei nur unwesentlich von den dargestellten Kurven in den Abbildungen 5-15 bis 5-20. Die gewählten Blitzstromscheitelwerte und der Abstand zum Blitzkanal stellen Extrembedingungen dar. Angesichts der Größenordnungen der induzierten Spannungen im μ V- bis mV-Bereich kann von einer sehr geringen induktiven Kopplung ausgegangen werden.

Das Vorzeichen der induzierten Spannung hat bei der Ermittlung der induktiven Kopplung nur eine untergeordnete Rolle.

6 Die galvanische Kopplung verkabelter lichttechnischer Anlagen

Die galvanische Kopplung umfasst die durch den Blitzstrom hervorgerufenen Potentialunterschiede bei ohmschen Strukturen. Für die Untersuchungen in Abschnitt 6.2 wird von einer atmosphärischen Entladung in das Erdreich in der Umgebung einer lichttechnischen Anlage ausgegangen. Die hierfür zugrunde liegenden Annahmen werden in Abschnitt 6.1 erläutert. In Abschnitt 6.3 wird die galvanische Beeinflussung bei einem Direkteinschlag in einen leitfähigen Mast, unter Annahme eines mit dem Mast verbundenen Horizontalerders, anhand eines analytischen Ansatzes behandelt.

6.1 Grundlagen zur galvanischen Kopplung

Bei einer atmosphärischen Entladung in das Erdreich wird zwischen zwei Auswirkungen, der Bodenionisation sowie der Erdpotentialanhebung, unterschieden. Es kommt zu Entladungen im Erdreich und somit zur Bodenionisation, sobald eine gewisse Einsatzfeldstärke des Erdreichs überschritten wird [9] [26]. Die Einsatzfeldstärke des Bodens hängt von den Blitzstromparametern und den Bodenverhältnissen ab. Der Wert für die Einsatzfeldstärke liegt im Bereich von etwa 600 kV/m bis über 1000 kV/m [27]. Durch Überschreiten dieses Wertes wird während des Blitzeinschlags der Bodenwiderstand stark herabgesetzt. In weiterer Folge kommt es aufgrund der Austrocknung des Bodes zu einer Erhöhung des spezifischen Erdbodenwiderstandes [26].

Bei Unterschreiten der Einsatzfeldstärke des Erdreichs kann der in den Erdboden eingeprägte Strom mit Hilfe des Modells eines Halbkugelerders beschrieben werden. Der Strom breitet sich dabei unter Annahme einer entsprechenden Erderform sowie homogener Bodenverhältnisse radialsymmetrisch ins umgebende Erdreich aus. Das Modell eines Halbkugelerders gilt näherungsweise auch für Blitzeinschläge in eine Fangeinrichtung oder einen Baum.

Es bildet sich durch die im Boden fließenden transienten Ströme ein Potentialtrichter, wobei das Erdpotential im Bereich des Stromeintritts den größten Wert annimmt und mit zunehmender Entfernung abnimmt.

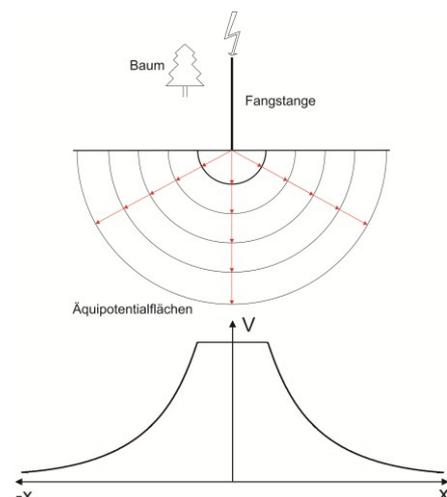


Abbildung 6-1: Modell des Halbkugelerders

Dem Strom steht zunächst ein relativ kleiner Querschnitt zur Verfügung. Mit zunehmender Entfernung vom Halbkugelerder vergrößert sich dieser Querschnitt, was mit einer Verminderung des Widerstandes einer gedachten Halbschale des Erdreichs gleichbedeutend ist.

Für den Betrag der Stromdichte gilt:

$$J = \frac{I}{2\pi x^2} = E \cdot \sigma_E \quad (14)$$

J	Stromdichte [A/m ²]
I	Blitzstrom [A]
E	elektrische Feldstärke [V/m]
σ_E	elektrische Bodenleitfähigkeit [S/m]
x	Abstand zum Einschlagpunkt [m]

Für die Spannung zwischen zwei Punkten innerhalb des Halbkugelraums gilt:

$$U = \int_{x_1}^{x_2} \vec{E} \cdot d\vec{x} \quad (15)$$

U	elektrische Spannung [V]
-----	--------------------------

Wählt man als „Gegenelektrode“ eine Halbkugelschale mit Potential 0 V in unendlich weiter Entfernung zum Einschlagpunkt, welche vom Potentialtrichter nicht beeinflusst wird, so kann für den Verlauf des Potentialtrichters folgende Abschätzung gemacht werden:

$$V(x) = \frac{\rho_E}{2\pi x} I \quad (16)$$

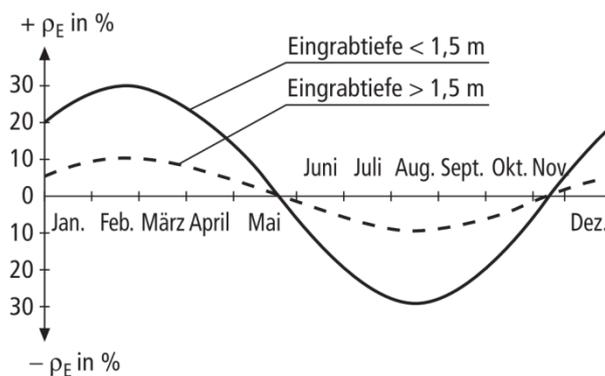
V	Erdpotential gegenüber ferne Erde [V]
ρ_E	spezifischer Erdbodenwiderstand [Ωm]

Der Ausdruck beschreibt das Potential gegenüber ferne Erde (Bezugspotential 0 V). Dies gilt auch für alle angegebenen Potentiale bei den nachfolgenden Untersuchungen.

In Tabelle 6-1 sind Richtwerte für den spezifischen Widerstand angegeben. Der spezifische Erdwiderstand ist von der Bodenzusammensetzung sowie der Bodenfeuchtigkeit abhängig und unterliegt zudem jahreszeitlichen Schwankungen, was in erster Linie auf die Bodentemperatur zurückzuführen ist (Abbildung 6-2). Die Werte erreichen ein Maximum in den Wintermonaten und ein Minimum in den Sommermonaten. [28]

Tabelle 6-1: Richtwerte für den spezifischen Widerstand [10]

Medium	Spezifischer Widerstand ρ_E [Ωm]	Bemerkung
Moorboden, Torf	5 ... 40	
Ackerboden, Lehm	20 ... 200	
Sandboden, Kies	200 ... 3.000	feucht: 200 Ωm , trocken: 3.000 Ωm
steinige Erde	$\approx 1.000 \dots 10.000$	
Fels	> 10.000	
Beton	100 ... 500	

Abbildung 6-2: Spezifischer Erdbodenwiderstand ρ_E in Abhängigkeit der Jahreszeit [29]

In Abbildung 6-3 und 6-4 sind die beispielhaften Verläufe des Potentialtrichters für einen Blitzstrom mit einem Scheitelwert \hat{I} von 33,3 kA und 100 kA bei einem spezifischen Bodenwiderstand ρ_E von 100 Ωm dargestellt. In den Abbildungen ist der Einfluss des Blitzstroms auf den Verlauf des Potentialtrichters erkennbar. Je höher der Maximalwert des Blitzstroms, umso steiler ist der Verlauf des Potentialtrichters bzw. umso größer ist das Potential im Zentrum des Trichters. Dieselben Überlegungen gelten nach obiger Formel natürlich auch für den spezifischen Erdbodenwiderstand. Demzufolge entstehen bei geringeren Bodenwiderständen und Stromscheitelwerten auch kleinere Spannungsdifferenzen innerhalb des Potentialtrichters.

Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 zeigen den Einfluss des spezifischen Bodenwiderstandes auf den Potentialverlauf. Die Potentialtrichter wurden jeweils für einen Blitzstromscheitelwert von 33,3 kA ermittelt.

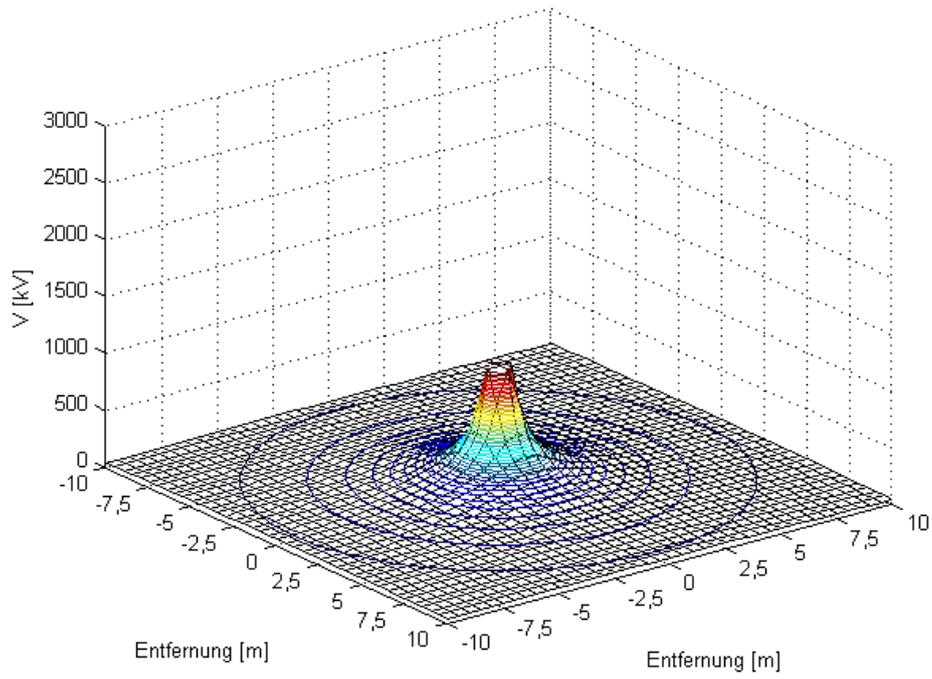


Abbildung 6-3: 3D Ansicht Potentialtrichter mit $\hat{I}=33,3$ kA und $\rho_E=100$ Ω m

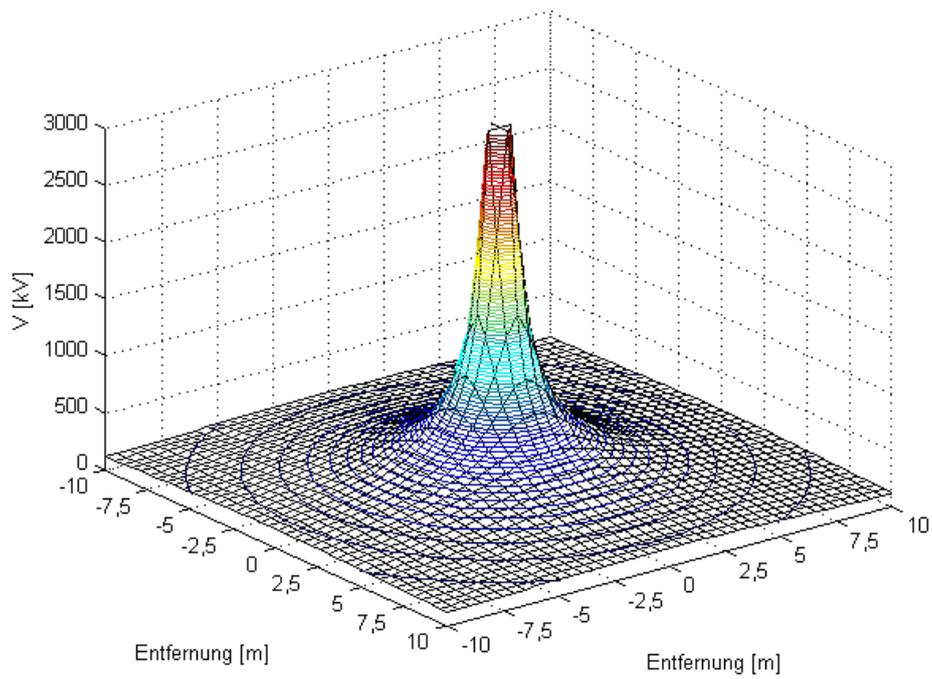


Abbildung 6-4: 3D Ansicht Potentialtrichter mit $\hat{I}=100$ kA und $\rho_E=100$ Ω m

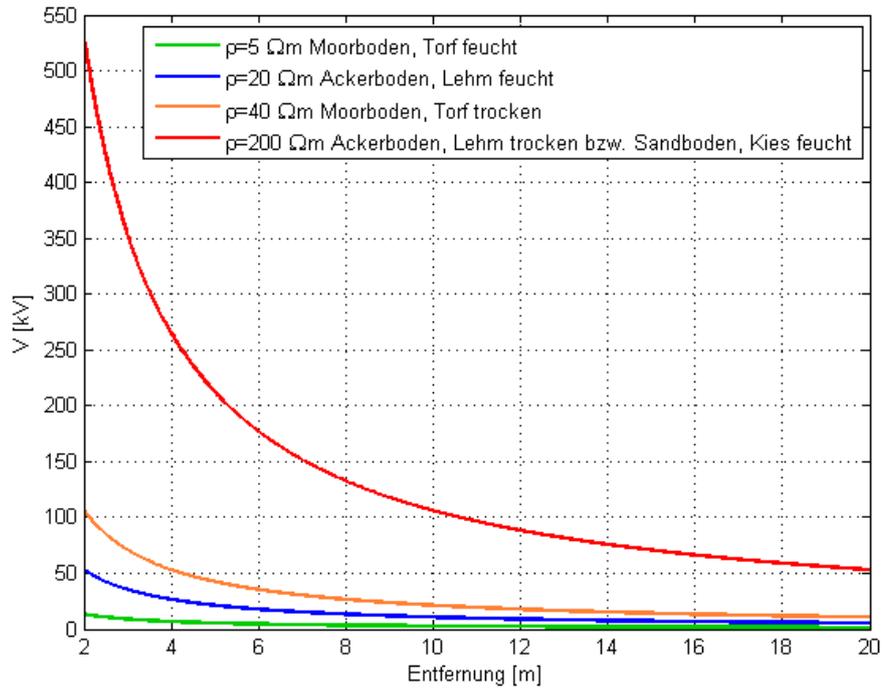


Abbildung 6-5: 2D Ansicht Potentialverlauf bei „hoher“ Bodenleitfähigkeit und $\hat{I}=33,3 \text{ kA}$

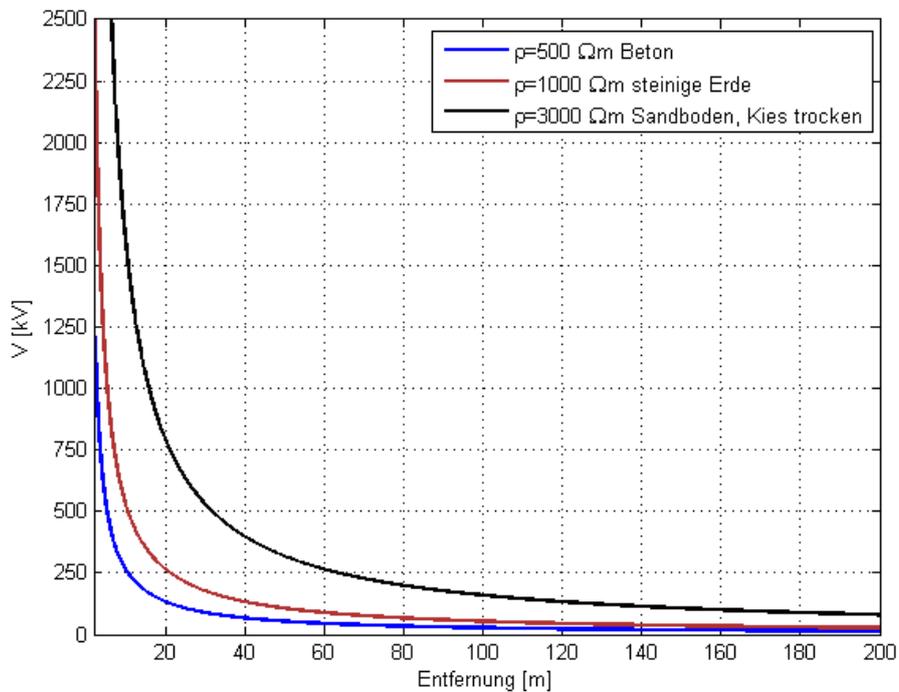


Abbildung 6-6: 2D Ansicht Potentialverlauf bei „geringer“ Bodenleitfähigkeit und $\hat{I}=33,3 \text{ kA}$

In Tabelle 6-2 sind beispielhafte Werte für das Erdpotential bei verschiedenen Blitzstromscheitelwerten, Erdbodenwiderständen und Entfernungen zum Blitzfußpunkt angeführt.

Tabelle 6-2: Erdpotential bei unterschiedlichen Blitzstromscheitelwerten gemäß [11], Erdbodenwiderständen sowie Entfernungen zum Blitzfußpunkt

ρ_E	$[\Omega m]$	100			300		
\hat{I}	$[kA]$	11,8	33,3	100	11,8	33,3	100
Entfernung zum Blitzfußpunkt		Erdpotential					
$[m]$		$[kV]$					
10		18,78	53,00	159,15	56,34	159,00	477,46
25		7,51	22,00	63,66	22,54	63,60	190,99
50		3,76	10,60	31,83	11,27	31,80	95,49
100		1,88	5,30	15,92	5,63	15,90	47,75
200		0,94	2,65	7,96	2,82	7,95	23,87
300		0,63	1,77	5,31	1,88	5,30	15,92

Die im Erdboden verlaufenden transienten Stromlinien breiten sich mit einer endlichen Geschwindigkeit v_E aus. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit ist von der relativen Permittivität ϵ_r sowie der relativen Permeabilität μ_r des Bodens abhängig. Solange sich keine ferromagnetischen Materialien im Erdboden befinden, gilt für die Permeabilitätszahl $\mu_r = 1$. Die relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r beträgt etwa 4 bei trockener Erde und etwa 80 für Wasser [30]. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Erdboden wird mit $1/3$ bis $1/2$ der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 abgeschätzt [31].

$$v_E = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \quad (17)$$

- v_E Ausbreitungsgeschwindigkeit des Blitzstroms im Erdreich [m/s]
 ϵ_r relative Permittivität des Erdbodens
 μ_r relative Permeabilität des Erdbodens

6.2 Modellbildung mit der Methode der finiten Elemente

Das Modell der Erdpotentialanhebung und eine verkabelte lichttechnische Anlage soll nun durch einen geeigneten Lösungsansatz miteinander kombiniert werden. Dabei wird von einer atmosphärischen Entladung in das Erdreich in der Umgebung (10-300 m) einer lichttechnischen Anlage ausgegangen.

Für diese Untersuchung wurde eine beispielhafte Musteranlage definiert (Abbildung 6-7). Um einerseits den Rechenaufwand zu minimieren, andererseits eine Beeinflussung durch umgebende Strukturen auszuschließen, wird zunächst angenommen, dass sich die Anlage in einem homogenen Erdreich befindet. Das Material der Masten ist elektrisch isolierend (Kunststoff) oder elektrisch leitend (Stahl, Aluminium) und die Mastfundamentierung erfolgt mit Beton. Der Abstand zwischen den Masten wurde mit 30 m gewählt, der Abstand des (gedachten) Verteilers zum nächstliegenden Mast beträgt 10 m. Im Falle von elektrisch leitfähigen Masten wird zusätzlich ein mit den Masten verbundener Horizontalerder berücksichtigt. Ferner wurde die Anlagengröße durch Änderung der Mastanzahl (3, 6 und 10 Stück) variiert.

Die Anlage wurde auf die für die galvanische Kopplung wesentlichen Komponenten reduziert. Diese Strukturen sind das Mastfundament, der Lichtmast, der Kabelgraben sowie ein optionaler Horizontalerder. Die Zielsetzung war, die Beeinflussung des elektrischen Strömungsfeldes durch diese vereinfachten Strukturen zu untersuchen und in weiterer Folge die an diesen Strukturen auftretenden elektrischen Potentiale zu ermitteln.

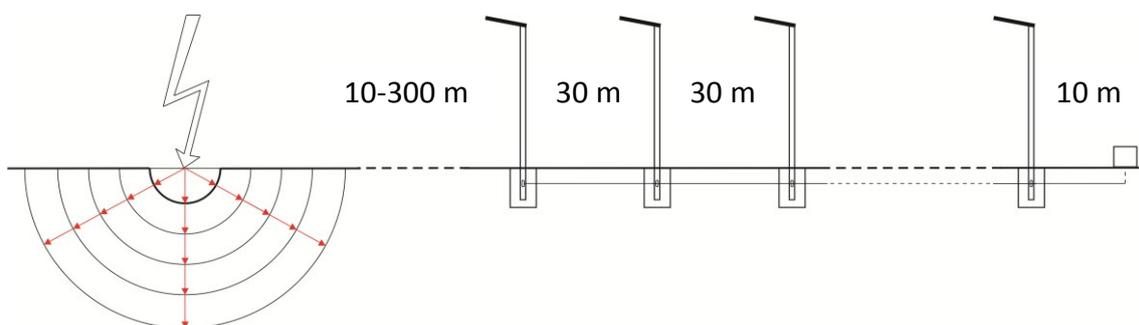


Abbildung 6-7: Musteranlage für die Untersuchung der galvanischen Kopplung

Als Lösungsmethode für die Problemstellung wurde das Softwarepaket *COMSOL Multiphysics*² gewählt, das auf der Methode der finiten Elemente (FEM) basiert. Das Programm ermöglicht eine dreidimensionale Darstellung des Erdreichs in Kombination mit den oben genannten Strukturen einer lichttechnischen Anlage. Zum Einsatz kam das „AC/DC Modul“ in Verbindung mit dem Interface „Elektrische Ströme“. Als Solver wurde jener für stationäre Strömungsfelder verwendet (Gleichstrom). Dies ist unter bestimmten Voraussetzungen zulässig, wie in Abschnitt 6.2.4 erläutert wird.

6.2.1 Das Basismodell

Die für alle nachfolgenden Berechnungen zugrundeliegende Basisgeometrie stellt das Modell der Halbkugelschalen für den Verlauf des Potentialtrichters dar (Abbildung 6-8). Für die Simulation wird als Randbedingung das Potential auf der inneren Halbkugelschale (Blitzfußpunkt) und der äußeren Halbkugelschale gemäß Ausdruck (16) definiert. Für das aufgespannte Volumen werden die elektrischen Parameter des Erdreichs festgelegt. Die zwei weiteren Halbkugelschalen um den Einschlagpunkt (Abbildung 6-9) dienen für eine feinere Unterteilung und sind ebenfalls als Erdreich definiert. Die Schnittfläche der Halbkugel stellt die Erdoberfläche dar und wurde mit der Randbedingung „Elektrische Isolation“ versehen, um normal gerichtete Feldkomponenten aus dem Erdreich in die umgebende Luft auszuschließen.

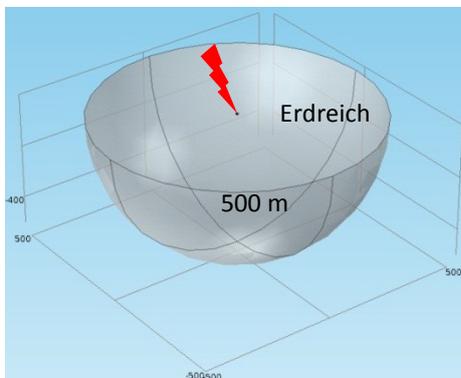


Abbildung 6-8: Basismodell gesamt

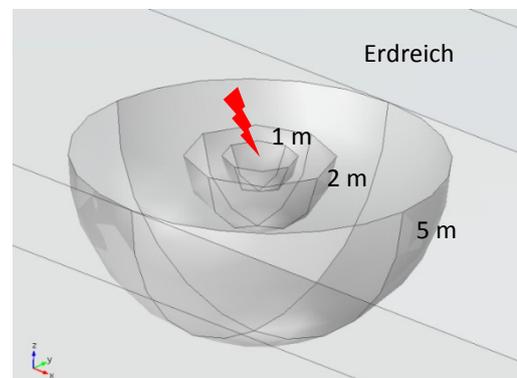


Abbildung 6-9: Detailansicht Blitzfußpunkt

In das Modell wurden zudem weitere, als Erdreich definierte Strukturen (Quader), eingefügt. Diese Strukturen sind notwendig, um eine Abstufung der unterschiedlich großen Tetraederkörper zu erhalten und um die gesamte Gitter-Struktur in der Simulationsumgebung zu generieren. Zugleich wird eine höhere Diskretisierung der Elemente und somit Rechengenauigkeit in den relevanten Geometrien erreicht.

² COMSOL 4.3a

Die gesamte Geometrie wird anschließend in finite Elemente (Tetraederformen) unterteilt, wodurch ein gitterförmiges Netz (engl.: mesh) entsteht (Abbildung 6-10).

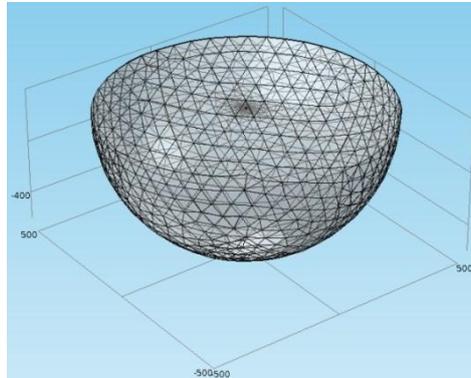


Abbildung 6-10: Basismodell mesh

Solange keine anderen Angaben gemacht werden, wird für alle nachfolgende Simulationen ein Blitzstromscheitelwert $\hat{I} = 100 \text{ kA}$ ($10/350 \text{ }\mu\text{s}$) und ein spezifischer Erdbodenwiderstand $\rho_E = 100 \text{ }\Omega\text{m}$ vorausgesetzt. Das elektrische Potential erreicht demnach in 1 m Entfernung zum Einschlagpunkt einen Wert von etwa 1,6 MV und in 500 m etwa 3,2 kV (Tabelle 6-3). Diese Potentiale werden in der Simulationsumgebung der inneren und äußeren Halbkugelschale zugewiesen, wodurch sich das elektrische Strömungsfeld radialsymmetrisch ausbreitet (Abbildung 6-11). Die nachstehenden elektrischen Potentiale stellen sich somit zum Zeitpunkt des Blitzstrommaximums ein.

Tabelle 6-3: Randbedingungen für die Simulation

Entfernung zum Blitzfußpunkt [m]	Elektrisches Potential [kV]
1	1591,55
500	3,18

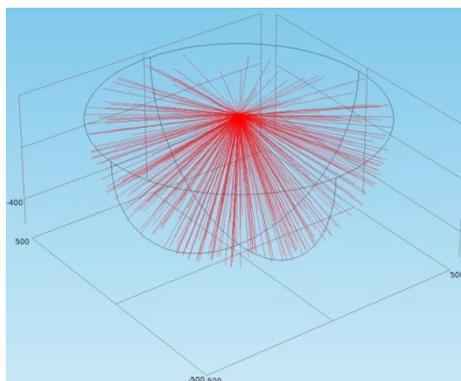


Abbildung 6-11: Radiale Ausbreitung des Strömungsfeldes

6.2.2 Integration lichttechnischer Strukturen in das Basismodell

In das erstellte Grundmodell werden die lichttechnischen Strukturen eingefügt. Die Geometrien werden eckig modelliert, was eine weniger problematische Erzeugung der Mesh-Struktur bedeutet, aber auch den nachfolgenden Rechenaufwand erheblich reduziert.

6.2.2.1 Mastfundament

Für das Fundament wurden die Außenabmessungen mit 1500 x 800 x 800 mm und die Innenabmessungen mit 1200 x 180 x 180 mm gewählt (Abbildung 6-12). Für die Simulation wurde anfangs ein in das Erdreich verbauter Körper angenommen, welcher bis zu den dargestellten Innenabmessungen ausschließlich aus Beton besteht. Der nach oben offene Hohlraum ist mit der elektrischen Leitfähigkeit von Luft definiert und stellt das Volumen für die nachfolgende Integration des Mastes dar. Das Fundament ist ebenerdig im Erdboden verbaut. Die zusätzlichen inneren Strukturen ermöglichen einerseits eine feinere Unterteilung des Gitters und somit eine höhere Genauigkeit in diesem Bereich für die Berechnung, andererseits können diesen Volumina andere Materialkennwerte (z. B. Betonrohr, Kies) zugewiesen werden. Die angeführten Koordinaten wurden aus *COMSOL* übernommen und dienen zur Veranschaulichung der nachfolgenden Diagramme.

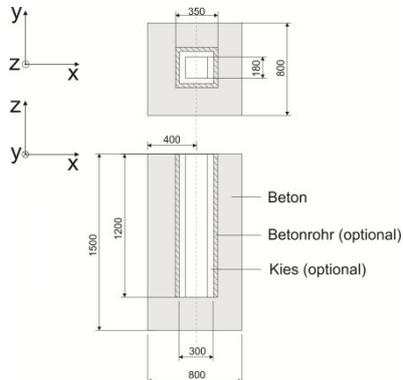


Abbildung 6-12: Abmessungen Fundament

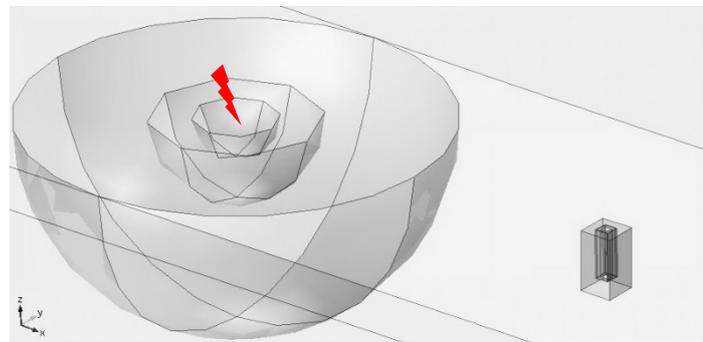


Abbildung 6-13: Mastfundament in Simulationsumgebung

Betrachtet man den reinen Betonkörper (ohne Betonrohr, Kies) und legt den spezifischen Widerstand des Betons ρ_B mit $400 \Omega\text{m}$ fest, so sind vor allem die elektrischen Potentiale auf der Innenseite des Betonvolumens (Grenzschicht zwischen Beton und Hohlraum Luft) für verschiedene Abstände des Fundaments zum Blitzfußpunkt von Interesse. Dazu wurden die Potentialverläufe entlang der Fundamentwand für die zum Blitz zugewandte (Abbildung 6-14) und abgewandte Seite (Abbildung 6-15) bei einer Entfernung von 100 m zum Blitzfußpunkt aufgezeichnet. Abbildung 6-16 zeigt den Potentialverlauf entlang des Fundamentbodens in 10 m Entfernung zum Einschlagpunkt. In Abbildung 6-17 ist dieser Verlauf für eine Entfernung von 100 m zum Blitzfußpunkt dargestellt.

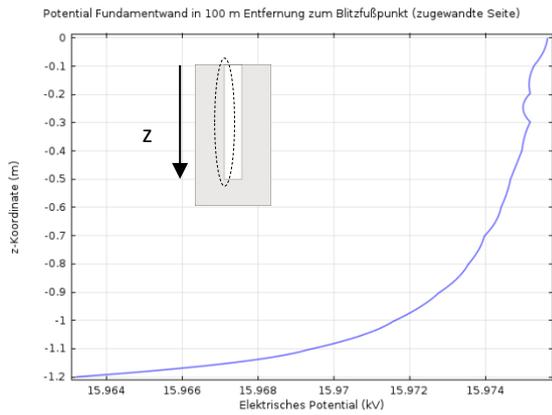


Abbildung 6-14: Potentialverlauf entlang Fundamentwand in 100 m Entfernung zum Blitzfußpunkt (zugewandte Seite)

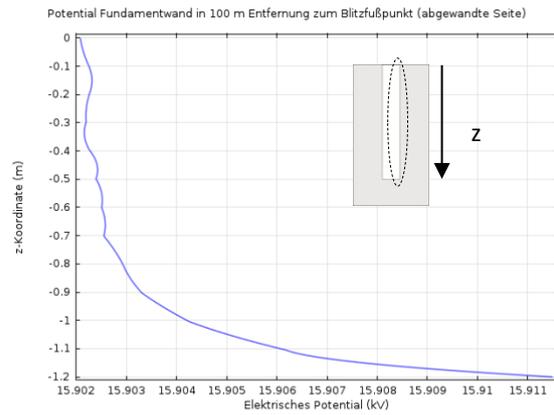


Abbildung 6-15: Potentialverlauf entlang Fundamentwand in 100 m Entfernung zum Blitzfußpunkt (abgewandte Seite)

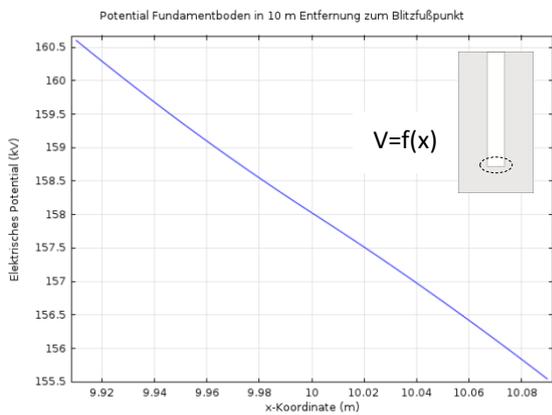


Abbildung 6-16: Potentialverlauf entlang Fundamentboden in 10 m Entfernung zum Blitzfußpunkt

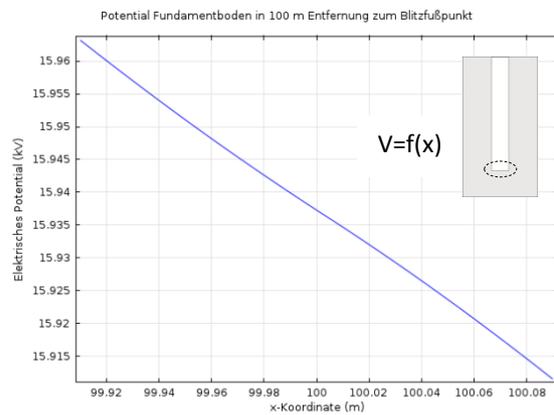


Abbildung 6-17: Potentialverlauf entlang Fundamentboden in 100 m Entfernung zum Blitzfußpunkt

Das elektrische Potential entlang der Fundamentwand und des Fundamentbodens ist nicht konstant, sondern von der Wegstrecke innerhalb des Hohlraums abhängig. Der Potentialverlauf entlang des Fundamentbodens spiegelt den Verlauf des Potentialtrichters wider. Die Spannungsdifferenz am Boden des Fundaments beträgt bei 10 m Entfernung 5 kV, bei 100 m etwa 50 V.

Abbildung 6-18 zeigt das Mastfundament im elektrischen Strömungsfeld.

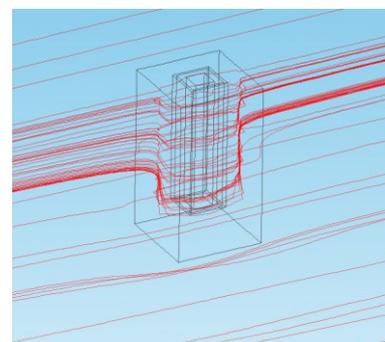


Abbildung 6-18: Mastfundament im elektrischen Strömungsfeld

Tabelle 6-4 gibt die durch die Simulationen bestimmten Maximalwerte des elektrischen Potentials an der Fundamentinnenseite für verschiedene Abstände zum Blitzfußpunkt an. An der Fundamentinnenseite stellen sich in etwa jene elektrischen Potentiale, wie im unbeeinflussten Fall (ohne Fundament, vgl. Tabelle 6-2) ein.

Tabelle 6-4: Maximales Potential an der Grenzschicht Beton – Luft

Entfernung des Fundaments zum Blitzfußpunkt	Maximales Potential an der Grenzschicht Beton - Luft
[m]	[kV]
10	162,96
25	64,26
50	31,98
100	15,95
200	7,97
300	5,31

Berücksichtigung zusätzlicher Strukturen im Fundament

Eine Modifikation der elektrischen Leitfähigkeiten der inneren Strukturen wurde ebenfalls vorgenommen, um beispielsweise eine Kombination von Betonrohr und Schüttgut (Sand, Schotter, Kies) zu berücksichtigen. Eine Variation des spezifischen Widerstandes zwischen $100 \Omega\text{m}$ und $3.000 \Omega\text{m}$ sowohl einzelner, als auch beider Strukturen, hat auf die Höhe des elektrischen Potentials kaum einen Einfluss. Für die nachfolgenden Simulationen wird daher nur der reine Betonkörper ($\rho_B = 400 \Omega\text{m}$) in Betracht gezogen.

6.2.2.2 Lichtmast

Der Lichtmast wurde in das vorgefertigte Mastfundament bis zum Fundamentboden eingefügt (Abbildung 6-19). Das Material wurde elektrisch isolierend (Kunststoff) oder leitfähig (Stahl, Aluminium) vorgegeben. Um eine problemfreie Mesh-Struktur und angepasste Rechenzeit zu erhalten, wurde die Wandstärke des Mastes mit 10 mm modelliert. Die Masthöhe ab Grund beträgt 8 m. Die Wandstärke sowie die Masthöhe haben jedoch keinen Einfluss auf die ermittelten Werte.

Isolierender Mast

Bei einem Kunststoffmast mit einer spezifischen Leitfähigkeit von $\sigma_{Kst} \approx 10^{-10} \text{ S/m} \dots 10^{-15} \text{ S/m}$ stellen sich annähernd dieselben Potentiale und Potentialverläufe ein, wie im Fall ohne Mast (siehe 6.2.2.1).

Leitfähiger Mast

Der Einbau eines leitfähigen Mastes (z. B. Stahl: $\sigma_{St} \approx 4,6 \cdot 10^6 \text{ S/m} \dots 10 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, Aluminium: $\sigma_{Al} \approx 3,5 \cdot 10^7 \text{ S/m} \dots 4 \cdot 10^7 \text{ S/m}$) bewirkt einen gleichmäßigen Potentialverlauf innerhalb des Fundamentbodens und der Fundamentwand. Die Entstehung dieser Äquipotentialfläche ist beispielhaft in Abbildung 6-20 für den Potentialverlauf entlang des Fundamentbodens in 100 m Entfernung zum Blitzfußpunkt dargestellt. Der Mast nimmt folglich das elektrische Potential der Fundamentierung an. In der gezeigten Abbildung ist dies ein Potential von etwa 16 kV.

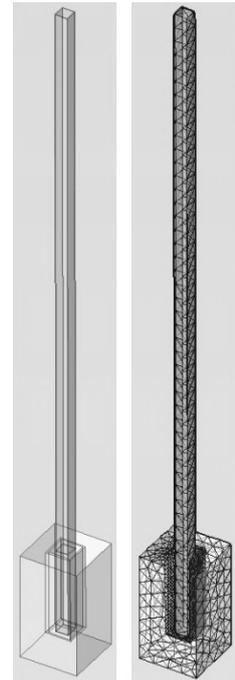


Abbildung 6-19:
Lichtmast in Betonfundament

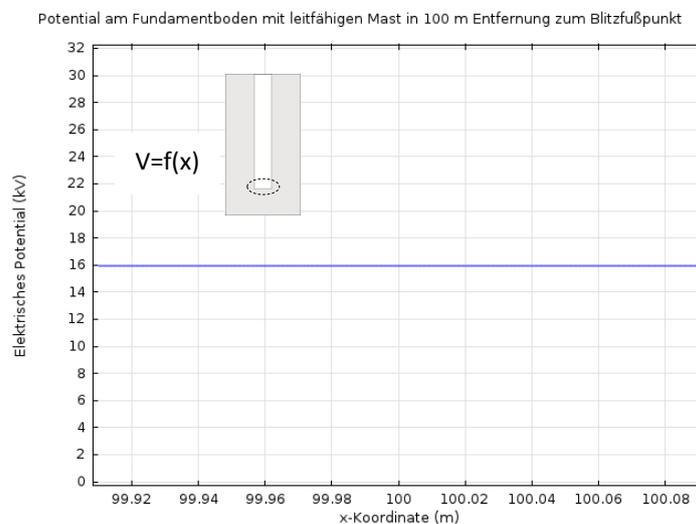


Abbildung 6-20: Potentialverlauf entlang Fundamentboden mit leitfähigen Mast in 100 m Entfernung zum Blitzfußpunkt

Integration zusätzlicher Masten in die Simulationsumgebung

Das Modell wird durch den Einbau zusätzlicher Masten erweitert. Dabei gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten die einzelnen Masten anzuordnen. Da in der Praxis weitgehend geradlinige Anordnungen vorzufinden sind, wurde hierbei hauptsächlich diese Art der Anlagenaufstellung behandelt. Die Anordnungen unterscheiden sich in dieser Arbeit durch die Ausrichtung zum Blitzfußpunkt (Abbildung 6-21). Dabei wird zwischen radialer Anlagenausrichtung (entlang Radius der Halbkugelschale) und normaler Anlagenausrichtung (gedachte Verbindung zwischen Masten steht „normal“ zum Radius der Halbkugelschale) unterschieden. Die radiale Ausrichtung wird in dieser Arbeit als „Anlagenausrichtung 1“, die „normale“ Ausrichtung als „Anlagenausrichtung 2“ bezeichnet. Bei der Anlagenausrichtung 2 wurde immer eine Symmetrierung bezüglich der y-Achse in Hinblick auf den ersten und letzten Lichtmast (Lm) durchgeführt.

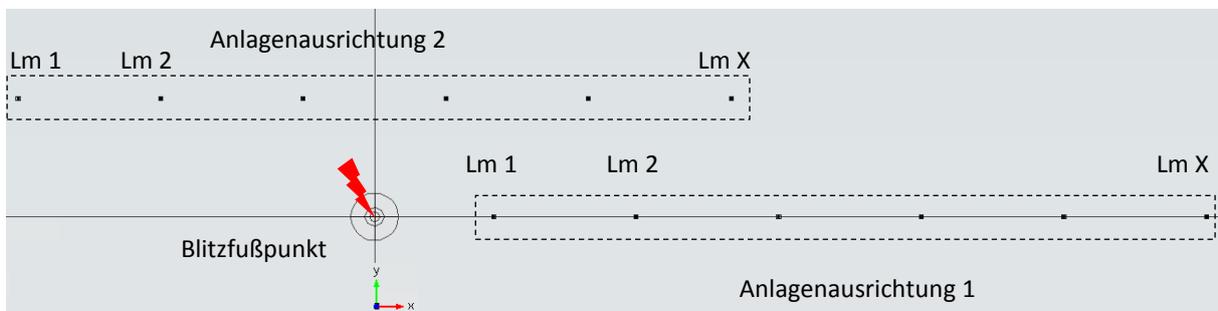


Abbildung 6-21: Anlagenausrichtungen

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse für eine Anlage mit insgesamt 10 Masten gemäß den obigen Anlagenausrichtungen angeführt.

Anlagenausrichtung 1

Die Entfernung des ersten Mastes zum Blitzfußpunkt beträgt 10 m, der Mastabstand 30 m.

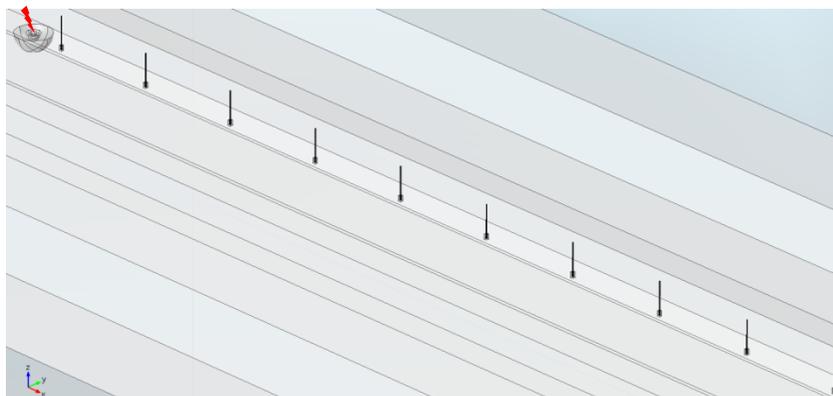


Abbildung 6-22: Simulationsumgebung mit 10 Lichtmasten, Ausrichtung 1

Für die hierbei beschriebene Simulation wurden die Masten als elektrisch leitende Körper mit $\sigma_{\text{Mast}} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ definiert. Die Auswertung der elektrischen Mastpotentiale ist in Abbildung 6-23 visualisiert. Der Lichtmast mit der geringsten Distanz zum Fußpunkt nimmt erwartungsgemäß das größte Potential, in diesem Fall 159,32 kV, jener mit der größten Distanz das kleinste Potential von 5,6 kV an. Durch die zwischen den Mastpotentialen eingefügte Trendlinie ist der Verlauf des Potentialtrichters erkennbar.

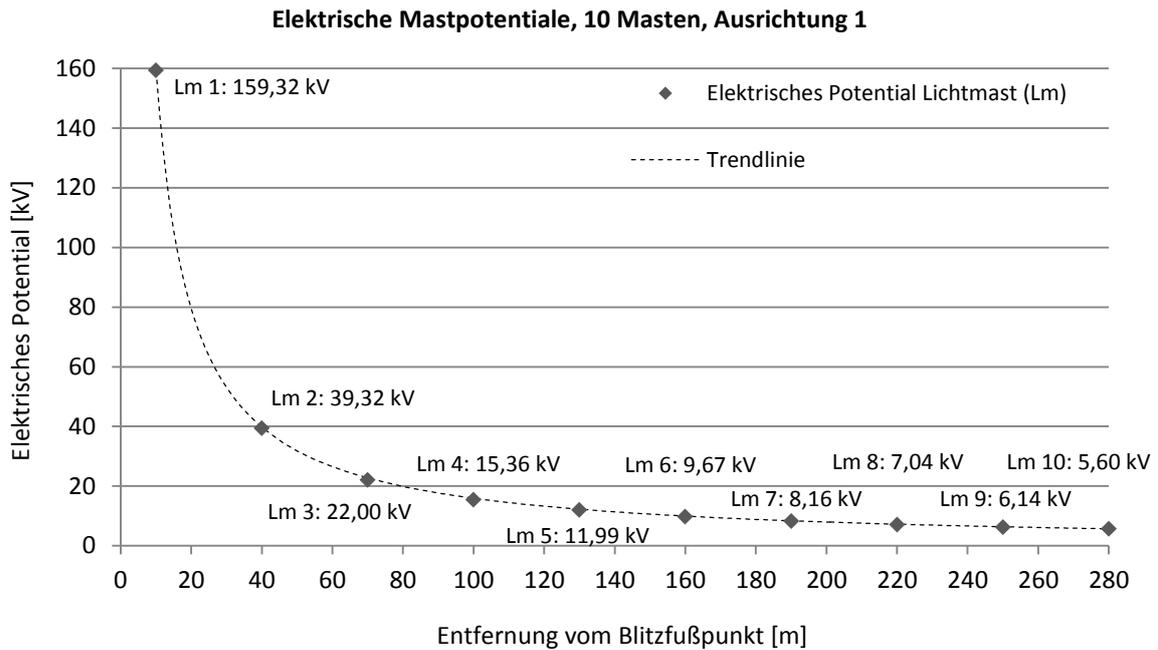


Abbildung 6-23: Elektrische Mastpotentiale, 10 Masten, Ausrichtung 1

In Abbildung 6-24 sind die Äquipotentiallinien für die Draufsicht dargestellt. Die Linien gleichen Potentials verlaufen entlang kreisförmiger Bahnen.

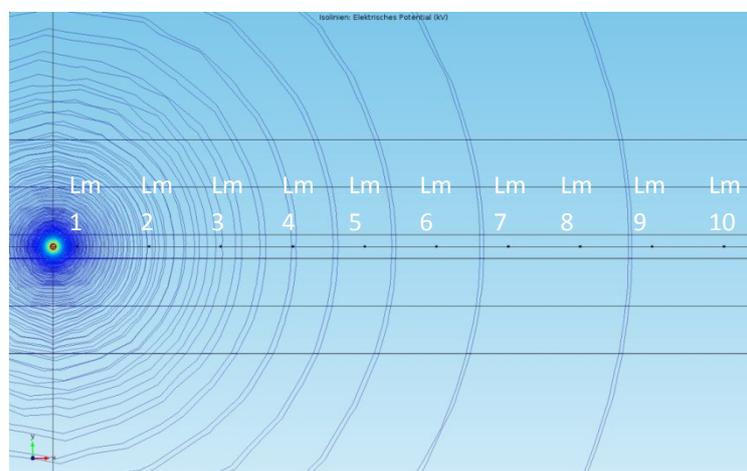


Abbildung 6-24: Äquipotentiallinien (Draufsicht), Ausrichtung 1

Anlagenausrichtung 2

Der Normalabstand der Anlage zum Blitzfußpunkt beträgt 10 m, der Mastabstand wiederum 30 m. Die Materialkennwerte sind zum vorherigen Fall unverändert.

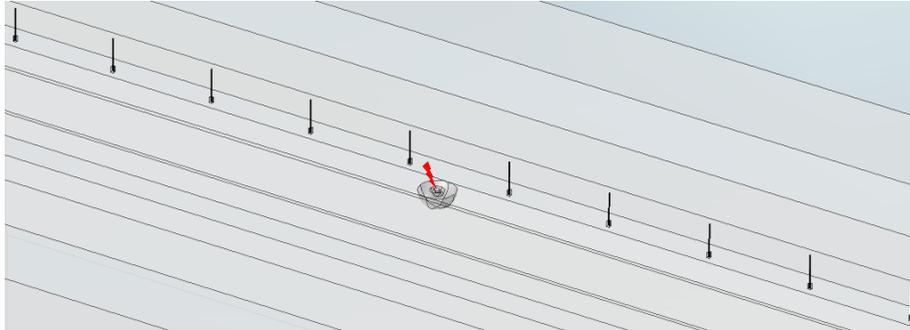


Abbildung 6-25: Simulationsumgebung mit 10 Lichtmasten, Ausrichtung 2

Die elektrischen Mastpotentiale machen auch hier den Potentialtrichterverlauf ersichtlich (Abbildung 6-26). Die dem Blitz zugewandten Masten nehmen in diesem Fall ein Potential von etwa 89 kV an, jene mit der größten Entfernung um die 12 kV.

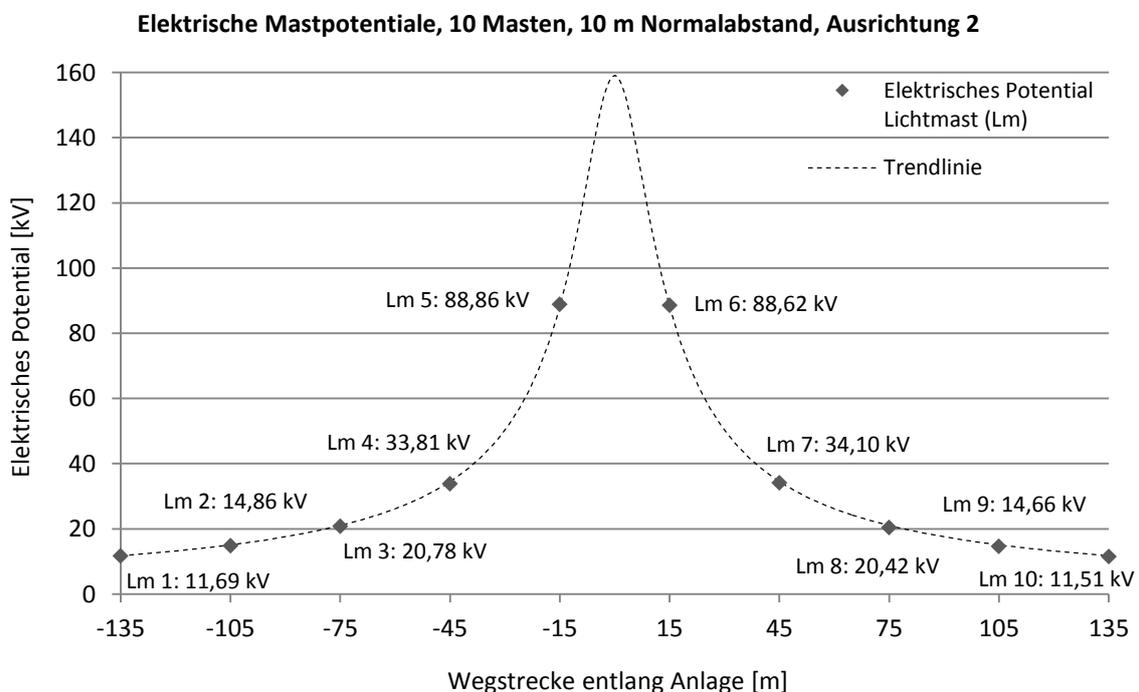


Abbildung 6-26: Elektrische Mastpotentiale, 10 Masten, 10 m Normalabstand, Ausrichtung 2

Die Simulationen zeigen, dass auch bei mehreren in die Simulationsumgebung integrierten Masten, diese annähernd dasselbe Potential des unbeeinflussten Potentialtrichters anneh-

men. Die ermittelten elektrischen Potentiale können aufgrund der linearen Zusammenhänge, unter Anwendung der Prozentrechnung, auf abweichende Bodenleitfähigkeiten umgerechnet werden. Eine Umrechnung auf differierende Blitzstromscheitelwerte ist ebenfalls möglich, solange eine Stirnzeit $T_1 \geq 10 \mu\text{s}$ vorausgesetzt wird (siehe Abschnitt 6.2.4). Daher wird an dieser Stelle auf zusätzliche Auswertungen verzichtet. Jene elektrischen Potentiale, welche sich an den Masten für weitere Abstände zum Einschlagpunkt ergeben würden, können aus den Abbildungen 6-28 bis 6-30 sowie 6-32 bis 6-34 aus den Verläufen der unbeeinflussten Potentialtrichter entnommen werden.

6.2.2.3 Horizontalerder

In diesem Abschnitt wird der Einfluss eines Horizontalerders auf die Potentialverhältnisse beschrieben. Der Erder liegt in einer Tiefe von 0,8 m und der Abstand des Erders zum Mittelpunkt der Masten beträgt 0,9 m. Die Masten sind galvanisch mit dem Erder verbunden, was einen elektrisch leitenden Mast voraussetzt ($\sigma_{\text{Mast}} = 4,6 \cdot 10^6 \text{ S/m}$). Für alle Simulationen wurde eine zusätzliche Erderlänge von 10 m berücksichtigt, was die Distanz zu einem Verteiler/Schaltschrank repräsentieren soll. Vorerst wird von einem Kupfererder mit einem Querschnitt von 78 mm^2 ausgegangen. Um eine Mesh-Struktur des Erders zu ermöglichen, wurde dieser mit den Dimensionen $44 \times 44 \text{ mm}$ modelliert, was einem Querschnitt von 1936 mm^2 entspricht. Für einen entsprechenden ohmschen Gesamtwiderstand wurde die Leitfähigkeit im Verhältnis der Querschnitte verringert.

$$\sigma_{\text{Kompensiert}} = \frac{A_{78}}{A_{1936}} \cdot \sigma_{\text{Cu}} = \frac{78 \text{ mm}^2}{1936 \text{ mm}^2} \cdot 59,1 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} = 2,38 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} \quad (18)$$

Abbildung 6-27 zeigt einen bereits inbegriffenen Kabelgraben mit einer Breite von 0,8 m und einer Tiefe von 1 m. Der dargestellte Kabelgraben dient in erster Linie für eine feinere Unterteilung der Geometrie um den Erder. Ferner ermöglicht dieses Volumen eine Variation der spezifischen Leitfähigkeit des Grabens in Kombination mit den geometrischen und elektrischen Parametern des verbauten Erders. Die Leitfähigkeit des Grabens wird vorerst mit jener des umgebenden Erdreichs ($\rho_E = 100 \Omega\text{m}$) gleichgesetzt.

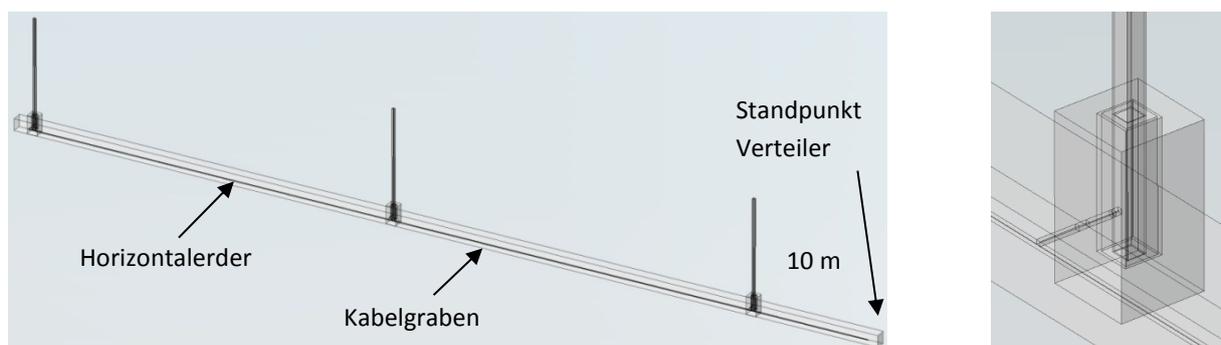


Abbildung 6-27: Integration von Horizontalerder und Kabelgraben (links), Mastverbindung Erder (rechts)

Nachfolgend werden die Simulationsergebnisse für die zwei Anlagenanordnungen für jeweils 3, 6 und 10 Masten angeführt. Die Anlagen haben mit Einbeziehung des Verteilerstandpunktes eine Gesamtlänge von 70 m, 160 m beziehungsweise 280 m.

Anlagenausrichtung 1

In den Tabellen 6-5 bis 6-7 sind die Auswertungen der elektrischen Mastpotentiale bei unterschiedlichen Anlagengrößen für die Anlagenausrichtung 1 dargestellt. Der Abstand zwischen Blitzfußpunkt und dem ersten Lichtmast wird zwischen 10 und 300 m variiert.

Die Mastpotentiale machen den Einfluss des Horizontalerders sichtbar. Die Masten nehmen in Bezug auf die Größenordnung der Potentiale annähernd dasselbe Potential an. Die Unterschiede ergeben sich durch die endliche Leitfähigkeit des Erders. Die Spannungsdifferenz zwischen dem ersten und letzten Mast ist umso größer, je näher die Anlage zum Blitzfuß gerichtet ist und umso größer die Ausdehnung der Anlage ist. Zudem ist eine Absenkung des Potentials mit zunehmender Erderlänge erkennbar.

Die Tabellen sind farblich gekennzeichnet um die unterschiedlichen Potentialverhältnisse im Vergleich zum Fall ohne Horizontalerder zu veranschaulichen. Bei den grün hinterlegten Werten sind die Potentiale geringer, bei den rot hinterlegten Werten sind sie höher, als im Fall ohne Horizontalerder. Demnach nehmen jene dem Einschlagpunkt nähergelegenen Masten ein geringeres Potential an, jedoch tritt bei den weiter entfernten Masten ein höheres Potential auf, als im unbeeinflussten Fall ohne Erder.

Tabelle 6-5: Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 3 Masten und Horizontalerder, Ausrichtung 1

Abstand Blitzfußpunkt - Lm 1	Elektrisches Potential Lichtmast		
	Lm 1	Lm 2	Lm 3
[m]	[kV]	[kV]	[kV]
10	50,548	50,506	50,474
25	31,245	31,229	31,215
50	20,203	20,195	20,190
100	12,166	12,164	12,161
200	6,837	6,836	6,835
300	4,774	4,774	4,773

Tabelle 6-6: Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 6 Masten und Horizontalerder, Ausrichtung 1

Abstand Blitzfußpunkt - Lm 1	Elektrisches Potential Lichtmast					
	Lm 1	Lm 2	Lm 3	Lm 4	Lm 5	Lm 6
[m]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
10	30,641	30,584	30,515	30,452	30,408	30,385
25	20,671	20,647	20,612	20,580	20,556	20,543
50	14,529	14,519	14,502	14,484	14,470	14,464
100	9,625	9,621	9,614	9,605	9,596	9,595
200	5,855	5,855	5,852	5,849	5,847	5,845
300	4,249	4,248	4,247	4,246	4,244	4,243

Tabelle 6-7: Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 10 Masten und Horizontalerder, Ausrichtung 1

Abstand Blitzfußpunkt - Lm 1 [m]	Elektrisches Potential Lichtmast									
	Lm 1	Lm 2	Lm 3	Lm 4	Lm 5	Lm 6	Lm 7	Lm 8	Lm 9	Lm 10
[m]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
10	21,048	20,990	20,906	20,822	20,744	20,676	20,618	20,574	20,544	20,530
25	14,934	14,909	14,866	14,820	14,774	14,734	14,700	14,672	14,654	14,643
50	11,026	11,014	10,991	10,964	10,938	10,914	10,892	10,876	10,864	10,858
100	7,692	7,687	7,676	7,663	7,650	7,637	7,626	7,616	7,610	7,606
200	5,002	5,000	4,996	4,990	4,985	4,979	4,974	4,970	4,966	4,965
300	3,756	3,755	3,754	3,751	3,747	3,744	3,741	3,739	3,737	3,736

Die Abbildungen 6-28 bis 6-30 dienen zur grafischen Veranschaulichung der Werte aus den Tabellen 6-5 bis 6-7. Die zwischen den Mastpotentialen durchgehenden Linien stellen die Potentialverläufe entlang des Horizontalerders dar. Die strichlierte Linie beschreibt den unbeeinflussten Potentialverlauf.

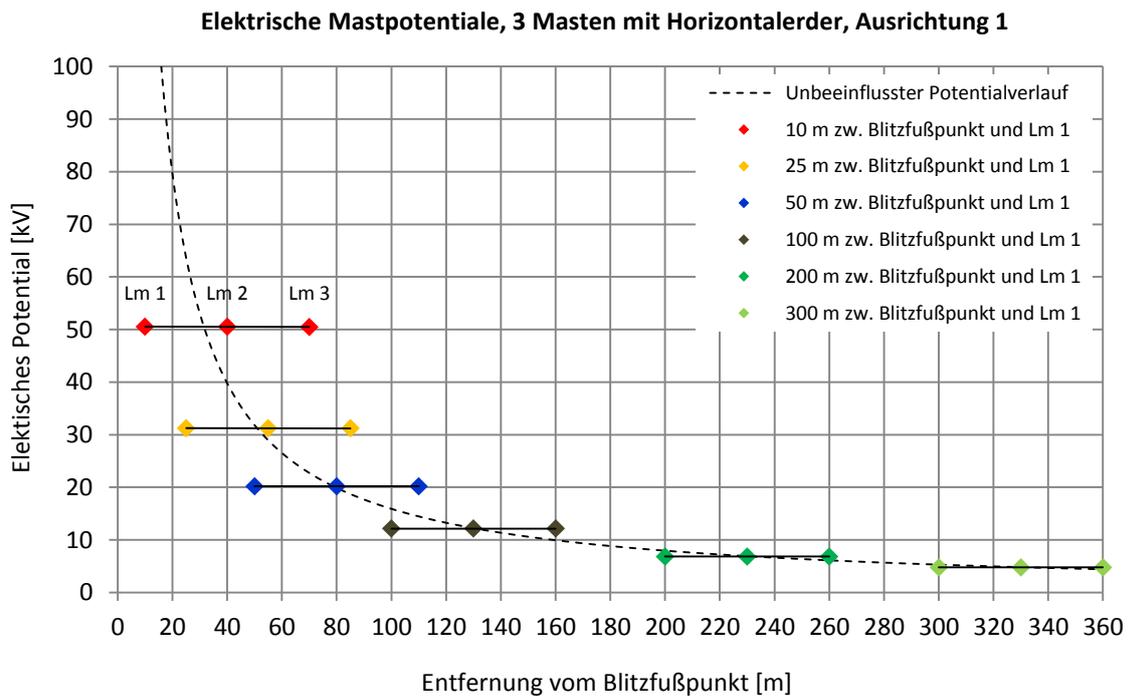


Abbildung 6-28: Elektrische Mastpotentiale, 3 Masten mit Horizontalerder, Ausrichtung 1

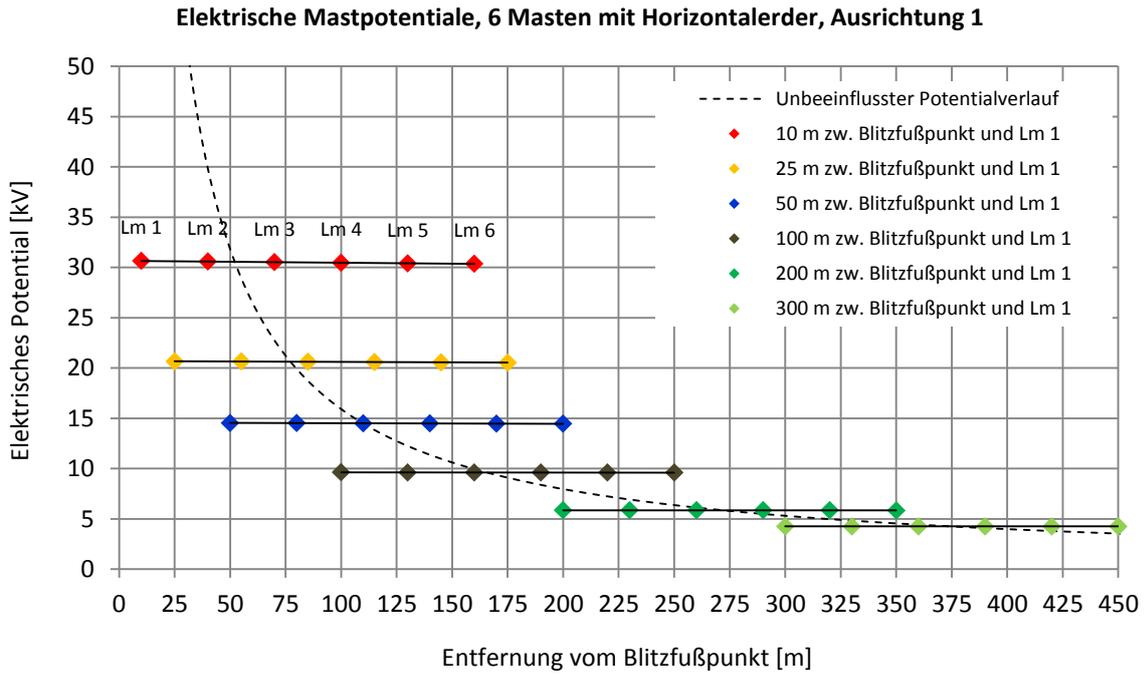


Abbildung 6-29: Elektrische Mastpotentiale, 6 Masten mit Horizontalerder, Ausrichtung 1

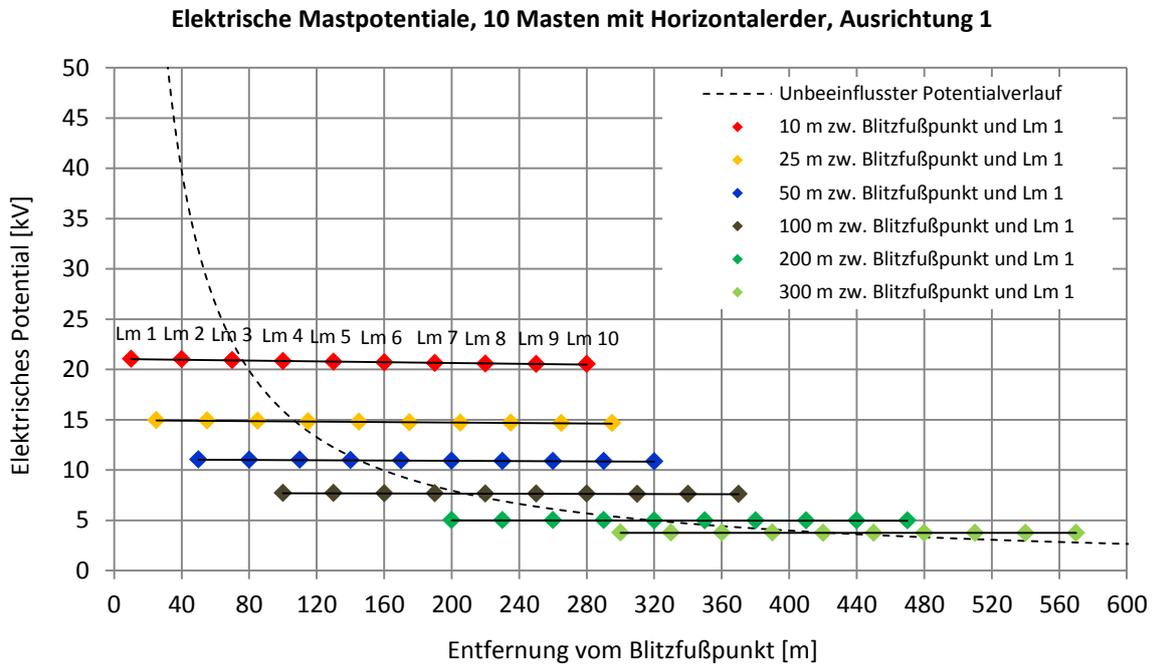


Abbildung 6-30: Elektrische Mastpotentiale, 10 Masten mit Horizontalerder, Ausrichtung 1

Der Verlauf der Äquipotentiallinien ist beispielhaft in Abbildung 6-31 für eine Anlage mit sechs Masten und Horizontalerder dargestellt. Die Linien gleichen Potentials verlaufen im Bereich der Anlage nicht mehr entlang kreisförmiger Bahnen. Sie werden durch den Erder verzerrt, was den Effekt der Potentialverschleppung kennzeichnet.

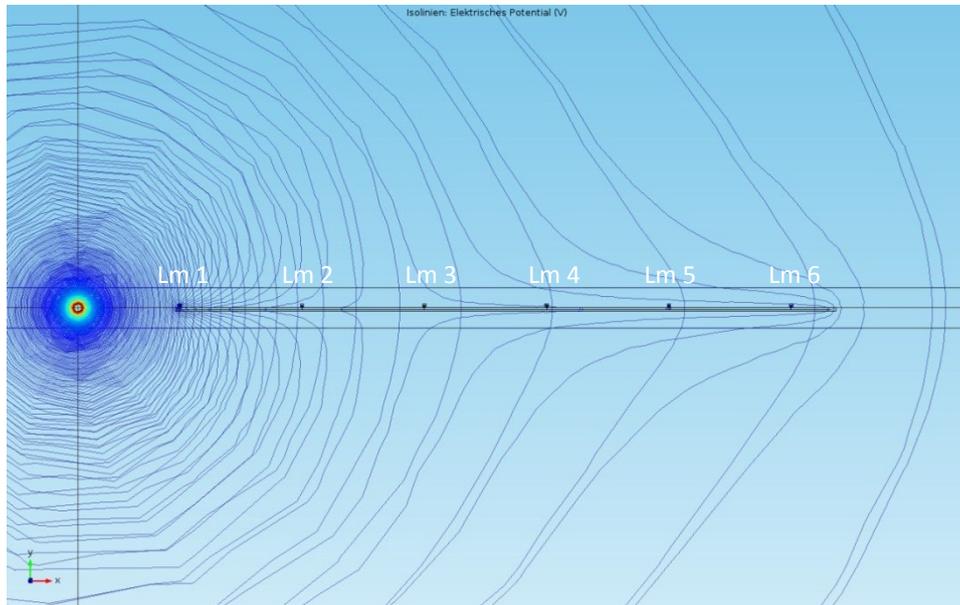


Abbildung 6-31: Darstellung der Potentialverschleppung am Beispiel der Äquipotentiallinien bei 6 Masten und Horizontalerder (Draufsicht), Ausrichtung 1

In Tabelle 6-8 sind die elektrischen Mastpotentiale für die Blitzströme $I_{\max,\mu} = 33,3 \text{ kA}$ (Mittelwert der Scheitelwerte negativer Erstblitze) und $I_{\max,\mu} = 33,3 \text{ kA}$ (Mittelwert der Scheitelwerte negativer Folgeblitze) für die spezifischen Bodenwiderstände $\rho_E = 100 \text{ }\Omega\text{m}$ und $\rho_E = 300 \text{ }\Omega\text{m}$ angeführt. Für die Ermittlung wurde der jeweilig maximale Potentialwert aller Masten aus den vorausgehenden Untersuchungen herangezogen und prozentuell auf den jeweiligen Blitzstrom sowie Bodenwiderstand umgerechnet. Der Mittelwert der Stirnzeit T_1 negativer Erstblitze beträgt $5,69 \text{ }\mu\text{s}$, jener negativer Folgeblitze $0,995 \text{ }\mu\text{s}$ [11]. Da bei diesen Stirnzeiten die Wellenlängen der Blitzströme in die Größenordnung der Abmessungen des untersuchten Simulationsgebiets kommen, sind die Werte in der nachfolgenden Tabelle nur für Blitzströme mit Stirnzeiten $T_1 \geq 10 \text{ }\mu\text{s}$ angemessen (siehe Abschnitt 6.2.4).

Tabelle 6-8: Elektrische Mastpotentiale bei unterschiedlichen Anlagengrößen, Berechnung anhand der Mittelwerte der Blitzstromamplituden gemäß [11] bei unterschiedlichen Bodenleitfähigkeiten, Anlagenausrichtung 1

Anlagenausrichtung 1					
ρ_E	[Ωm]	100		300	
$I_{\max,\mu}$	[kA]	11,8 ⁽¹⁾	33,3 ⁽¹⁾	11,8 ⁽¹⁾	33,3 ⁽¹⁾
Zusammenstellung	Abstand Blitzfußpunkt - Lm 1	Max. elektrisches Potential aller Masten			
	[m]	[kV]			
3 Masten mit Horizontalerder	10	5,965	16,832	17,894	50,497
	25	3,687	10,405	11,061	31,214
	50	2,384	6,728	7,152	20,183
	100	1,436	4,051	4,307	12,154
	200	0,807	2,277	2,420	6,830
	300	0,563	1,590	1,690	4,769
6 Masten mit Horizontalerder	10	3,616	10,203	10,847	30,610
	25	2,439	6,883	7,318	20,650
	50	1,714	4,838	5,143	14,514
	100	1,136	3,205	3,407	9,615
	200	0,691	1,950	2,073	5,849
	300	0,501	1,415	1,504	4,245
10 Masten mit Horizontalerder	10	2,484	7,009	7,451	21,027
	25	1,762	4,973	5,287	14,919
	50	1,301	3,672	3,903	11,015
	100	0,908	2,561	2,723	7,684
	200	0,590	1,666	1,771	4,997
	300	0,443	1,251	1,330	3,752

(1) nur für Stirnzeiten $T_1 \geq 10 \text{ }\mu\text{s}$ zulässig (siehe Abschnitt 6.2.4)

Anlagenausrichtung 2

In den Tabellen 6-9 bis 6-11 sind die Auswertungen der elektrischen Mastpotentiale bei unterschiedlichen Anlagengrößen für die Anlagenausrichtung 2 dargestellt. Der Normalabstand zwischen Blitzfußpunkt und der Anlage wird zwischen 10 und 300 m variiert.

Auch hier ist der Einfluss des Horizontalerders sichtbar. Die Masten nehmen ebenfalls in Bezug auf die Größenordnung der Potentiale annähernd dasselbe Potential an.

Die Tabellen kennzeichnen wiederum farblich die Unterschiede in den Potentialverhältnissen, verglichen zum Fall ohne Horizontalerder. Folglich nehmen auch hier jene dem Einschlagpunkt nähergelegenen Masten ein geringeres Potential, jene die sich weiter weg davon befinden ein höheres Potential an, als im Fall ohne Erder. Bei den gelb hinterlegten Feldern besteht praktisch kein Unterschied zum Fall ohne Horizontalerder.

Tabelle 6-9: Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 3 Masten und Horizontalerder, Ausrichtung 2

Normalabstand Blitzfußpunkt - Anlage	Elektrisches Potential Lichtmast		
	Lm 1	Lm 2	Lm 3
[m]	[kV]	[kV]	[kV]
10	89,946	89,962	89,923
25	51,852	51,855	51,845
50	29,941	29,942	29,940
100	15,751	15,751	15,751
200	7,970	7,970	7,970
300	5,318	5,318	5,318

Tabelle 6-10: Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 6 Masten und Horizontalerder, Ausrichtung 2

Normalabstand Blitzfußpunkt - Anlage	Elektrisches Potential Lichtmast					
	Lm 1	Lm 2	Lm 3	Lm 4	Lm 5	Lm 6
[m]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
10	54,978	55,004	55,057	55,050	54,984	54,945
25	36,820	36,832	36,851	36,850	36,821	36,802
50	24,596	24,601	24,606	24,605	24,596	24,588
100	14,525	14,527	14,528	14,527	14,525	14,523
200	7,757	7,757	7,757	7,757	7,757	7,756
300	5,246	5,246	5,246	5,246	5,246	5,246

Tabelle 6-11: Elektrische Mastpotentiale bei einer Anlage mit 10 Masten und Horizontalerder, Ausrichtung 2

Normalabstand Blitzfußpunkt – Anlage	Elektrisches Potential Lichtmast									
	Lm 1	Lm 2	Lm 3	Lm 4	Lm 5	Lm 6	Lm 7	Lm 8	Lm 9	Lm 10
[m]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]
10	37,750	37,765	37,810	37,880	37,950	37,954	37,865	37,790	37,735	37,710
25	27,012	27,022	27,058	27,082	27,112	27,110	27,074	27,034	27,002	26,986
50	19,592	19,598	19,612	19,626	19,638	19,636	19,622	19,604	19,586	19,577
100	12,808	12,810	12,812	12,814	12,823	12,822	12,818	12,811	12,806	12,804
200	7,396	7,396	7,397	7,397	7,399	7,399	7,398	7,397	7,395	7,394
300	5,123	5,123	5,124	5,124	5,124	5,124	5,124	5,123	5,123	5,123

Die Abbildungen 6-32 bis 6-33 visualisieren die Werte aus den Tabellen 6-9 bis 6-11. Die zwischen den Mastpotentialen durchgezogenen Linien stellen die Potentialverläufe entlang des Horizontalerders dar. Die strichlierten Linien beschreiben die unbeeinflussten Potentialverläufe für verschiedene Entfernungen zum Blitzfußpunkt.

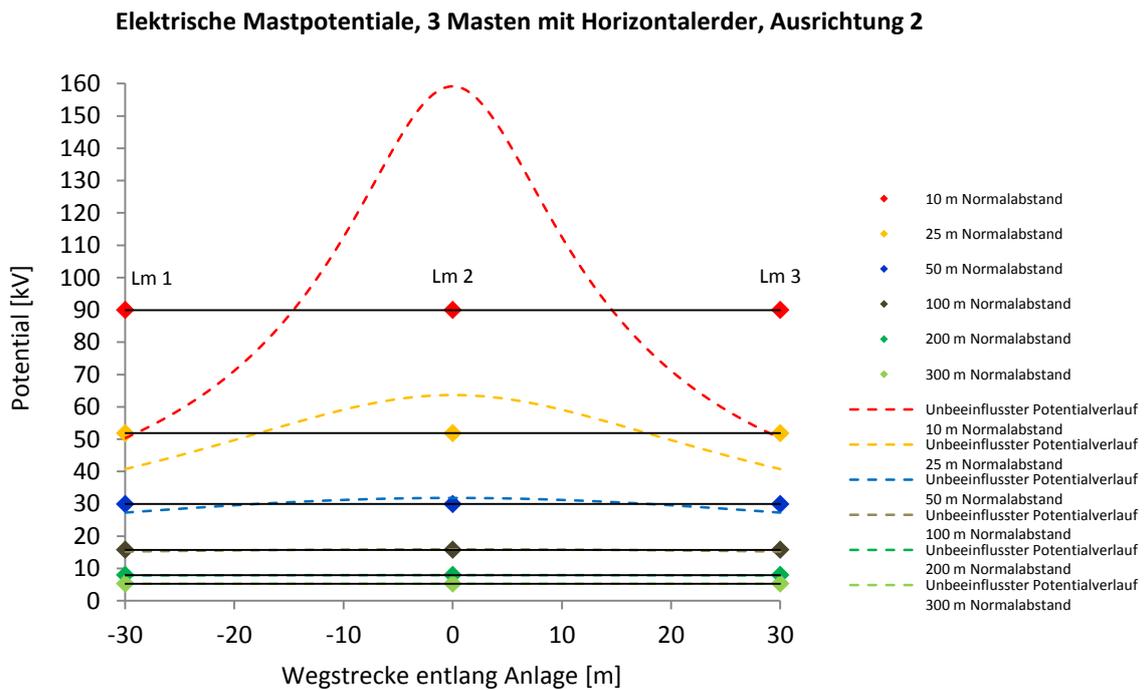


Abbildung 6-32: Elektrische Mastpotentiale, 3 Masten mit Horizontalerder, Ausrichtung 2

Elektrische Mastpotentiale, 6 Masten mit Horizontalerder, Ausrichtung 2

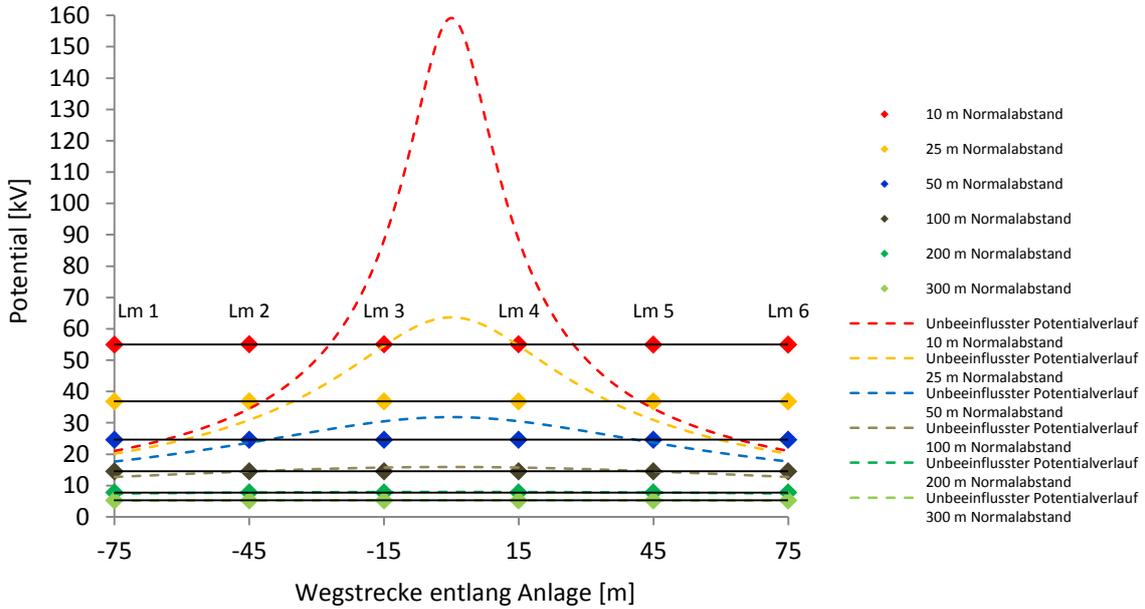


Abbildung 6-33: Elektrische Mastpotentiale, 6 Masten mit Horizontalerder, Ausrichtung 2

Elektrische Mastpotentiale, 10 Masten mit Horizontalerder, Ausrichtung 2

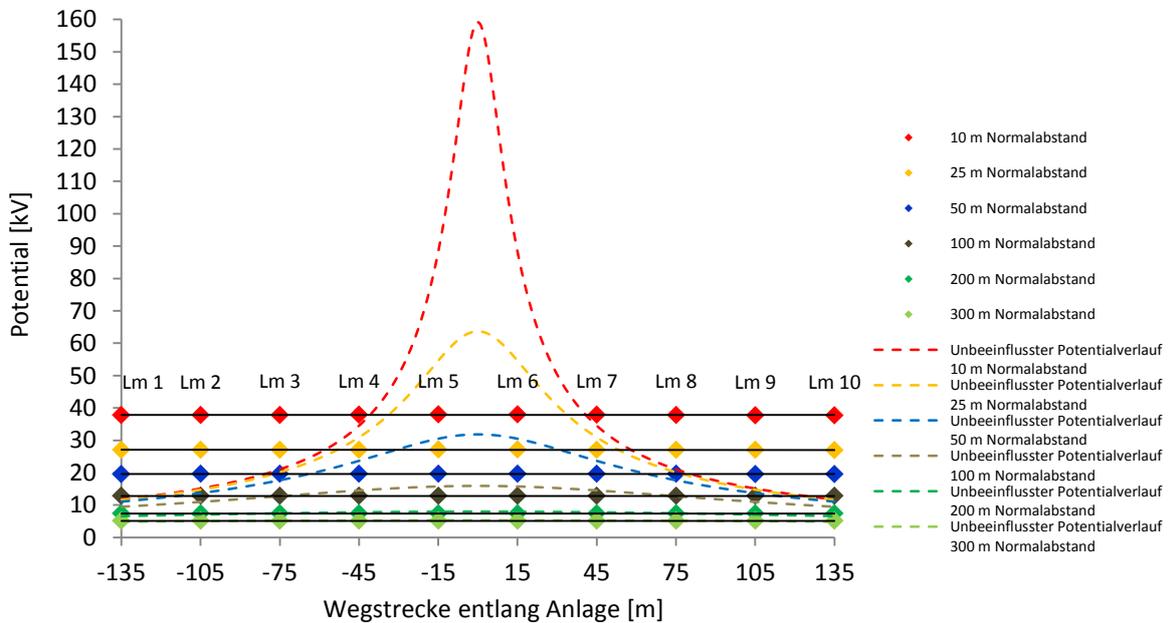


Abbildung 6-34: Elektrische Mastpotentiale, 10 Masten mit Horizontalerder, Ausrichtung 2

In Tabelle 6-12 sind die elektrischen Mastpotentiale für die Blitzströme $I_{\max,\mu} = 33,3 \text{ kA}$ (Mittelwert der Scheitelwerte negativer Erstblitze) und $I_{\max,\mu} = 33,3 \text{ kA}$ (Mittelwert der Scheitelwerte negativer Folgeblitze) für die spezifischen Bodenwiderstände $\rho_E = 100 \text{ }\Omega\text{m}$ und $\rho_E = 300 \text{ }\Omega\text{m}$ angeführt. Für die Ermittlung wurde wiederum der jeweilig maximale Potentialwert aller Masten aus den vorausgehenden Untersuchungen herangezogen und prozentuell auf den jeweiligen Blitzstrom sowie Bodenwiderstand umgerechnet. Die angegebenen Werte sind einzig für entsprechende Blitzströme mit Stirnzeiten $T_1 \geq 10 \text{ }\mu\text{s}$ angemessen (siehe Abschnitt 6.2.4).

Tabelle 6-12: Elektrische Mastpotentiale bei unterschiedlichen Anlagengrößen, Berechnung anhand der Mittelwerte der Blitzstromamplituden gemäß [11] bei unterschiedlichen Bodenleitfähigkeiten, Anlagenausrichtung 2

Anlagenausrichtung 2					
ρ_E	[Ωm]	100		300	
$I_{\max,\mu}$	[kA]	11,8 ⁽¹⁾	33,3 ⁽¹⁾	11,8 ⁽¹⁾	33,3 ⁽¹⁾
Zusammenstellung	Normalabstand Blitzfußpunkt - Anlage	Max. elektrisches Potential aller Masten			
	[m]	[kV]			
3 Masten mit Horizontalerder	10	10,616	29,957	31,847	89,872
	25	6,119	17,268	18,357	51,803
	50	3,533	9,971	10,599	29,912
	100	1,859	5,245	5,576	15,735
	200	0,940	2,654	2,821	7,962
	300	0,628	1,771	1,883	5,313
6 Masten mit Horizontalerder	10	6,497	18,334	19,490	55,002
	25	4,348	12,271	13,045	36,814
	50	2,904	8,194	8,711	24,581
	100	1,714	4,838	5,143	14,513
	200	0,915	2,583	2,746	7,749
	300	0,619	1,747	1,857	5,241
10 Masten mit Horizontalerder	10	4,479	12,639	13,436	37,916
	25	3,199	9,028	9,598	27,085
	50	2,317	6,539	6,952	19,618
	100	1,513	4,270	4,539	12,810
	200	0,873	2,464	2,619	7,392
	300	0,605	1,706	1,814	5,119

(1) nur für Stirnzeiten $T_1 \geq 10 \text{ }\mu\text{s}$ zulässig (siehe Abschnitt 6.2.4)

Änderung der Parameter des Kabelgrabens und des Erders

Infolge der um einige Größenordnungen abweichenden spezifischen Leitfähigkeiten zwischen Erdreich und Erder und angesichts der Höhe der auftretenden Potentiale, hat eine Modifikation des spezifischen Widerstandes des Grabens sowie des Erders nur einen unwesentlichen Einfluss auf die auftretenden Potentiale.

Isolierende Medien (Versorgungskabel, Kunststoffrohr)

Da elektrisch isolierende Medien wie Versorgungskabeln oder Kunststoffrohre keinen Einfluss auf die Potentialverhältnisse haben, wurden diese in der Simulation nicht berücksichtigt.

Anmerkung: Eine Kabelverlegung in einem Kabelschutzrohr bietet dennoch einen zusätzlichen Schutz des Kabelmantels vor Durchschlägen.

6.2.3 Umgebungsstrukturen

Bei einer atmosphärischen Entladung in das Erdreich haben elektrisch leitfähige Strukturen in der Umgebung einer lichttechnischen Anlage ebenfalls einen Einfluss auf die Potentialverhältnisse. Die sich einstellenden Potentiale sind von der Entfernung zur Anlage sowie von der Ausdehnung und Aufbau dieser Systeme abhängig. Die in Abbildung 6-35 dargestellten Betonfundamente in Kombination mit einem Stahl-Armierungs-Erder entlang einer Anlage führen zu einer Vergleichmäßigung des Potentialverlaufs im Bereich der Zusatzeinbauten, wie ein parallel verlegter Erder. Dieselben Überlegungen gelten auch für elektrisch leitende und erdfühlig verlegte Rohre/Systeme. Der zunehmende Einbau von Systemen, deren Leitfähigkeiten vom umgebenden Erdreich abweichen, führt jedoch zu fehlerhaften Randbedingungen, die aus dem unbeeinflussten Potentialverlauf ermittelt wurden. Der Simulation sind daher Grenzen gesetzt, wodurch dieser Punkt nicht näher erläutert wird.

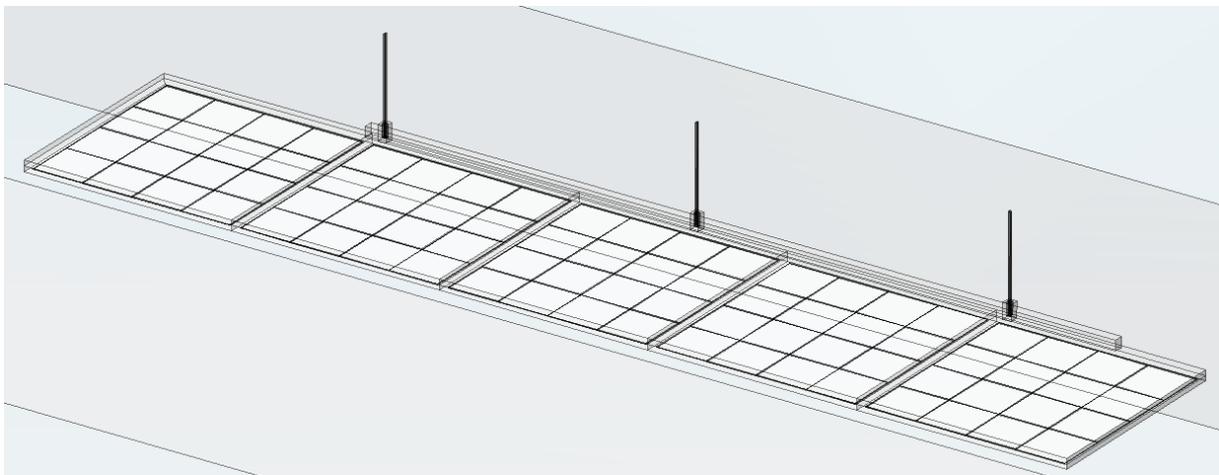


Abbildung 6-35: Betonfundament mit Fundament-Armierungs-Erder entlang einer lichttechnische Anlage

6.2.4 Allgemeines zum Simulationsmodell

Die vorausgegangenen Simulationen basieren auf einer stationären Betrachtung. Dies ist zulässig, solange die geometrischen Abmessungen des Simulationsmodells kurz, im Vergleich zur Wellenlänge der höchsten Frequenz im betrachteten Blitzstoßstrom, sind. Setzt man eine Permittivität des Erdbodens mit $\varepsilon_r = 4 - 10$ voraus, beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen im Erdboden zwischen $95 - 150 \text{ m}/\mu\text{s}$, also in etwa $1/3 - 1/2$ der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 . Für die Simulation wurde ein Blitzstrom mit einer Zeitfunktion $10/350 \mu\text{s}$ zu Grunde gelegt. Daraus folgt für die kleinste Wellenlänge des Blitzstroms im Erdboden:

$$\lambda = \frac{v_E}{f_e} = \frac{\frac{1}{3} \cdot c_0}{25 \text{ kHz}} \dots \frac{\frac{1}{2} \cdot c_0}{25 \text{ kHz}} = 4 \text{ km} \dots 6 \text{ km} \quad (19)$$

Infolgedessen kann das untersuchte Gebiet als „elektrisch kurz“ angesehen werden, wobei sich diese Betrachtung schon als Grenzfall darstellt. Bei höheren Frequenzen und zunehmender Ausdehnung des Simulationsgebietes müssen hingegen Wanderwelleneffekte beachtet werden. Eine transiente Simulation würde einen erheblich größeren Rechenaufwand bedeuten und wird daher in dieser Arbeit nicht behandelt.

6.3 Analytische Ermittlung des Stoßerdungswiderstandes bei einem Blitzeinschlag in einem leitfähigen Mast unter Annahme eines mit dem Mast verbundenen Horizontalerders

Ein Direkteinschlag in einen Lichtmast ist je nach Aufstellungsort und Umgebungsstrukturen unterschiedlich wahrscheinlich, sollte aber bei einer Untersuchung hinsichtlich galvanischer Beeinflussung miteinbezogen werden. Nachfolgend wird von einem Blitzeinschlag in einen elektrisch leitfähigen Stahl- oder Aluminiummast ausgegangen, wobei der Mast mit einem im Erdreich verlegten Horizontalerder verbunden ist (Abbildung 6-36). Für ein solches Szenario kann mit Hilfe von Näherungsformeln der Erdertheorie auf die Höhe der maximalen Spannung am Lichtmast geschlossen werden. Dabei soll der Einfluss der Bodenleitfähigkeit und somit die Art der Bettung des Erders verdeutlicht werden. Im Falle eines Einschlages in einen Lichtmast ohne Verbindung zu einem Erder müsste für die Ermittlung der am Mast auftretenden Spannung das Verhalten der Fundamentierung bei Beaufschlagung mit einem Blitzstoßstrom bekannt sein. Dieser Fall findet daher – auch unter Beachtung des eher seltenen Ereignisses – in dieser Arbeit keine Berücksichtigung.

Es wird angenommen, dass der vollständige Blitzstrom über den Erder in das Erdreich abgeleitet wird und es zu keinen Überschlägen und damit Teilblitzströmen in die Versorgungsleitung kommt (keine Elektroinstallation, PE-Leiter,...). Der Strom teilt sich je zur Hälfte entlang des Erders auf.

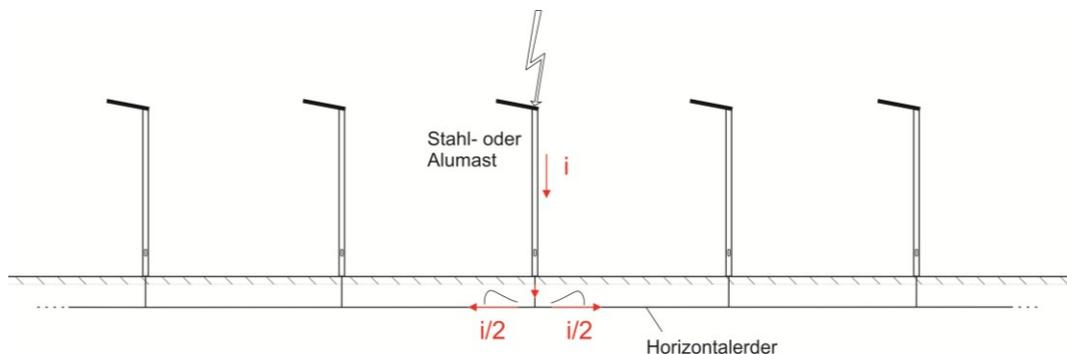


Abbildung 6-36: Blitzeinschlag in einen leitfähigen Lichtmast mit Horizontalerder

6.3.1 Horizontalerdertheorie

Ein Erder kann durch die längenbezogenen Komponenten R', G', L', C' dargestellt werden (Abbildung 6-37). Wird der Erder mit einem transienten Blitzstrom beaufschlagt, so ist nicht mehr der Ausbreitungswiderstand R_A sondern der Stoßerdungswiderstand R_{st} maßgebend. Der Stoßerdungswiderstand ist eine Rechengröße und ist definiert als das Verhältnis zwischen dem Maximalwert der Spannung am Erderanschluss (Fußpunkt Lichtmast) und dem Maximalwert des Stroms, die im Allgemeinen nicht gleichzeitig auftreten [9] [10].

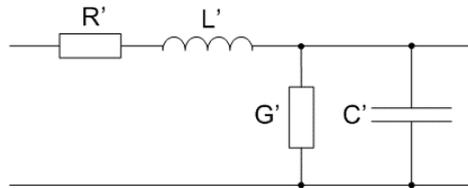


Abbildung 6-37: Ersatzschaltbild eines Erders

- R' Widerstandsbelag [Ω/m]
 L' Induktivitätsbelag [H/m]
 G' Ableitungsbelag [S/m]
 C' Kapazitätsbelag [F/m]

Zu Abschätzung des Stoßerdungswiderstandes existieren in der Fachliteratur etwas abweichende Ansätze. Nachfolgend werden die Beziehungen aus [9] angewendet:

$$R_{st} = \frac{\hat{U}_E}{\hat{I}_E} = \frac{1}{G' \cdot l_{eff}} \quad (20)$$

$$G' = \frac{\pi}{\rho_E} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{\delta}{r}\right)} \quad (21)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_E}{\pi \cdot \mu_0 \cdot f_{eq}}} \quad (22)$$

$$l_{eff} \approx 1,3 \cdot \sqrt{\rho_E \cdot T_1} \quad (23)$$

- R_{st} Stoßerdungswiderstand [Ω]
 \hat{U}_E Scheitelwert Spannung am Erderanschluss [V]
 \hat{I}_E Scheitelwert Strom am Erderanschluss [A]
 l_{eff} effektive Erderlänge [m]
 ρ_E spezifischer Erdbodenwiderstand [Ωm]
 δ Eindringtiefe im Erdboden [m]
 r Erderradius [m]
 f_{eq} äquivalente Blitzfrequenz [Hz]
 T_1 Stirnzeit des Blitzstroms [μs]

Die äquivalente Blitzfrequenz für den Anstiegsbereich von Blitzströmen berechnet sich zu [9] [10]:

$$f_{eq} = \frac{1}{4 \cdot T_1} \quad (24)$$

Tabelle 6-13: Äquivalente Frequenzen für den Anstiegsbereich von Blitzströmen

Blitztyp	Stirnzeit T_1	f_{eq}
	[μs]	[kHz]
positiver Erstblitz	10	25
negativer Erstblitz	1	250
negativer Folgeblitz	0,25	1000

Bei einem transienten Vorgang wie bei einem Blitzstrom sind der Induktivitätsbelag und der Ableitungsbelag (Querleitwertbelag) die dominierenden Faktoren, der Widerstandsbelag und der Kapazitätsbelag können vernachlässigt werden. Der Stoßerdungswiderstand ist zum Ableitungsbelag und zur effektiven Erderlänge indirekt proportional. Der Ableitungsbelag wird aus der Modellvorstellung für einen koaxialen Halbzylinder ermittelt. Die Eindringtiefe des Stroms in das Erdreich ist von der Permeabilität ($\mu = \mu_0$) und des spezifischen Widerstandes des Bodens sowie der äquivalenten Blitzstromfrequenz abhängig. Die effektive Erderlänge ist jene Länge bis zu der der Erder wirksam ist. Das heißt für den klassischen Blitzschutz, dass jeder zusätzliche Meter, der über die effektive Erderlänge hinausgeht, nicht mehr zum Wirken des Erders bei Beaufschlagung mit einem Blitzstrom, beiträgt [9] [10].

6.3.2 Untersuchung des Stoßerdungswiderstandes

Für die anschließende Berechnung des Stoßerdungswiderstandes wird von einem längeren Erder als die effektive Erderlänge ausgegangen.

Die Ersatzschaltung für das Szenario zeigt Abbildung 6-38.

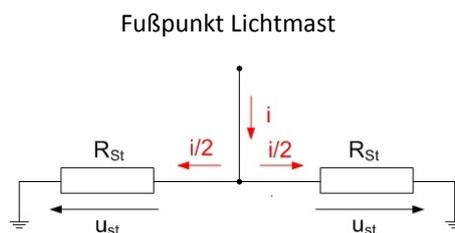


Abbildung 6-38: Ersatzschaltbild: Aufteilung des Blitzstroms durch den Horizontalerder

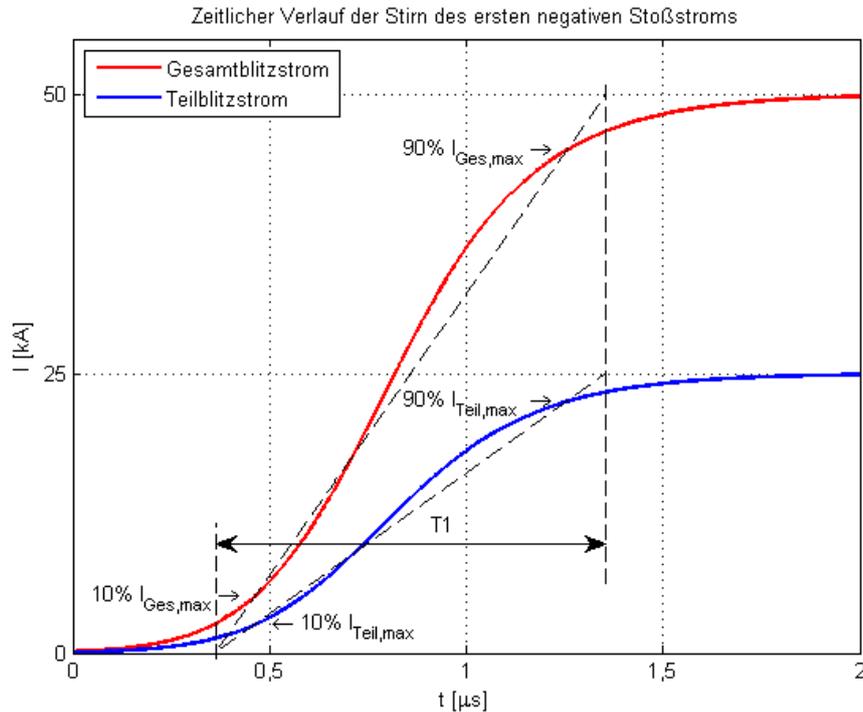


Abbildung 6-39: Gegenüberstellung der Stirn Gesamt- und Teilblitzstrom

Teilt sich nun der Blitzstrom durch die vorliegende Parallelschaltung gleichmäßig in beide Richtungen des Erders auf, so ist die Stirnzeit von Teil- und Gesamtblitzstrom gleich groß (Abbildung 6-39). Die Aufteilung wird bei der Berechnung der Stoßspannung berücksichtigt.

$$\hat{U}_E = R_{st} \cdot \frac{\hat{I}_E}{2} \quad (25)$$

Der Stoßerdungswiderstand wurde für die spezifischen Bodenwiderstände $50 \Omega\text{m}$, $200 \Omega\text{m}$ und $1000 \Omega\text{m}$ für typische Erderquerschnitte von 10 mm^2 - 95 mm^2 berechnet (Tabelle 6-14). In der Vorschrift [32] ist für den Blitzschutz, aufgrund der Stromtragfähigkeit und der mechanischen Festigkeit, ein Mindestquerschnitt für einen Erder von 50 mm^2 festgelegt. Daher wurden die ermittelten Stoßerdungswiderstände für die Querschnitte 10 mm^2 und 25 mm^2 mit einem Querstrich versehen und können nicht direkt mit den anderen Werten verglichen werden. Die Zahlenwerte zeigen, dass eine Vergrößerung des Querschnitts nur bedingt zu einem kleineren Stoßerdungswiderstand beiträgt. Hingegen führt eine Zunahme des spezifischen Erdbodenwiderstandes um das Vierfache in etwa zu einer Verdopplung des Stoßerdungswiderstandes. Da die Höhe der Spannung am Fußpunkt des Mastes direkt proportional zum Stoßerdungswiderstand ist, kann eine Verlegung des Erders in gut leitende Strukturen eine deutliche Verminderung der Spannung bewirken. In diesem Zusammenhang sollte eine (teilweise) Verlegung des Erders in einem Kabelsand vermieden werden.

Tabelle 6-14: Stoßerdungswiderstand für verschiedene Bodenleitfähigkeiten und Erderquerschnitte

Erderquerschnitt					10 mm ²	25 mm ²	50 mm ²	78 mm ²	95 mm ²
$\rho_E=50 \Omega m$									
Blitztyp	Stirnzeit [μs]	f_{eq} [kHz]	δ [m]	I_{eff} [m]	R_{st} [Ω]				
pos Erstblitz	10	25	22,5	29,1	5,17	4,92	4,73	4,61	4,55
neg Erstblitz	1	250	7,1	9,2	14,36	13,56	12,96	12,57	12,41
neg Folgeblitz	0,25	1000	3,6	4,6	26,31	24,72	23,52	22,74	22,41
$\rho_E=200 \Omega m$									
Blitztyp	Stirnzeit [μs]	f_{eq} [kHz]	δ [m]	I_{eff} [m]	R_{st} [Ω]				
pos Erstblitz	10	25	45,0	58,1	11,10	10,60	10,22	9,97	9,87
neg Erstblitz	1	250	14,2	18,4	31,11	29,52	28,32	27,54	27,21
neg Folgeblitz	0,25	1000	7,1	9,2	57,42	54,25	51,85	50,29	49,63
$\rho_E=1000 \Omega m$									
Blitztyp	Stirnzeit [μs]	f_{eq} [kHz]	δ [m]	I_{eff} [m]	R_{st} [Ω]				
pos Erstblitz	10	25	100,7	130,0	26,79	25,67	24,82	24,27	24,03
neg Erstblitz	1	250	31,8	41,1	75,80	72,25	69,57	67,82	67,08
neg Folgeblitz	0,25	1000	15,9	20,6	140,86	133,77	128,40	124,90	123,43

6.4 Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Bei einer atmosphärischen Entladung in der Umgebung einer lichttechnischen Anlage stellen sich je nach Blitzstrom, Bodenleitfähigkeit, Entfernung und Ausrichtung der Anlage zum Blitzfußpunkt sowie Anlagengröße und vorhandenen Erdungsstrukturen unterschiedlich hohe Potentiale und Potentialverhältnisse ein.

Bei einer Anlage ohne Horizontalerder und ohne potentialausgleichenden Maßnahmen nehmen die Lichtmasten in etwa das elektrische Potential des unbeeinflussten Potentialverlaufs an, solange keine elektrisch leitfähigen Erdungssysteme/Rohre entlang der Anlage verlaufen. Wird ein Blitzstromscheitelwert von 100 kA (10/350 μ s) und ein spezifischer Bodenwiderstand von 100 Ω m vorausgesetzt, so nehmen die Masten bei einer Entfernung von 10 m zum Blitzfußpunkt ein elektrisches Potential von ca. 160 kV und bei einer Entfernung von 300 m zum Blitzfußpunkt ein elektrisches Potential von ca. 5 kV an. Bei gleicher Bodenleitfähigkeit sowie Entfernungen zum Einschlagpunkt liegen die Mastpotentiale bei einem Blitzstromscheitelwert von 33,3 kA im Bereich von ca. 53 bis ca. 1,8 kV und bei einem Blitzstromscheitelwert von 11,8 kA im Bereich von ca. 19 bis ca. 0,6 kV, solange für beide Blitzströme eine Stirnzeit $T_1 \geq 10 \mu$ s angenommen wird. Nach diesem Ansatz stellen sich noch höhere elektrische Mastpotentiale bei einer geringeren Bodenleitfähigkeit ein.

Bei einer atmosphärischen Entladung in der Umgebung einer lichttechnischen Anlage mit Horizontalerder zeigt sich ein anderes Bild. Hierbei kommt es zu einer Vergleichmäßigung des Potentials entlang der Anlage. Folglich nehmen die Masten der Anlage etwa dasselbe Potential an, wobei die Potentialunterschiede eine Folge der endlichen Leitfähigkeit des Erders sind. Jene dem Blitz zugewandten Masten nehmen ein geringeres Potential an, als im unbeeinflussten Fall. Das Potential wird zu allen Masten verschleppt, wodurch sich bei weiter weg entfernten Masten ein höheres Potential einstellt, als im Fall ohne Erder. Die dazwischen liegende Grenze ist von der Anlagengröße und der Entfernung zum Einschlagpunkt abhängig. Mit zunehmender Entfernung zum Einschlagpunkt sind die Unterschiede zum unbeeinflussten Fall weniger stark ausgeprägt. Darüber hinaus wird bei zunehmender Ausdehnung der Anlage die Höhe des Potentials herabgesenkt.

Zudem zeigte sich, dass eine Änderung der spezifischen Widerstände der Fundamentstrukturen nur zu geringen Abweichungen der elektrischen Mastpotentiale führt.

Die hier angeführten Beobachtungen gelten jedoch nur dann, wenn die Anlage als „elektrisch kurz“ im Vergleich zur Wellenlänge des Blitzstroms angesehen werden kann. Bei großen Ausdehnungen und hochfrequenten Anteilen des Blitzstroms muss die Wellenausbreitung berücksichtigt werden, wodurch sich abweichende Gegebenheiten einstellen können.

Bei einem Direkteinschlag in einen leitfähigen Lichtmast, unter Annahme eines mit dem Mast verbundenen Horizontalerders, konnte der Einfluss der Bodenleitfähigkeit um den Erder auf die Höhe des Stoßerdungswiderstandes und somit auf die Höhe der Spannung am

Lichtmast verdeutlicht werden. Die Untersuchung wurde für die Erderquerschnitte 10 mm^2 , 25 mm^2 , 50 mm^2 , 78 mm^2 und 95 mm^2 bei spezifischen Bodenwiderständen von $100 \text{ } \Omega\text{m}$, $200 \text{ } \Omega\text{m}$ und $1000 \text{ } \Omega\text{m}$ durchgeführt. Demnach trägt eine Vergrößerung des Erderquerschnittes nur bedingt zu einer Verringerung des Stoßerdungswiderstandes bei. Jedoch führt eine Vervierfachung des spezifischen Bodenwiderstandes in etwa zu einer Verdopplung des Stoßerdungswiderstandes und somit Spannung am Lichtmast. In dieser Hinsicht sollte eine Verlegung des Erders in gut leitende Erdungsstrukturen bevorzugt werden.

7 Weiterführende Gedanken

Diese Arbeit umfasst einen Teilbereich der elektromagnetischen Beeinflussung verkabelter lichttechnischer Anlagen zufolge atmosphärischer Entladungen. Angesichts der möglichen Störquellen und Kopplungspfade sind weiterführende Untersuchungen zu dieser Thematik denkbar. So können transiente Überspannungen leitungsgebunden über die Energieversorgung zu lichttechnischen Installationen gelangen. Die Ursache dafür kann beispielsweise ein Blitzeinschlag in eine vorgelagerte Freileitung, eine Schalthandlung oder eine Fehlschaltung sein.

Bei LED-Leuchten werden häufig elektrostatische Auf- und Entladeerscheinungen des Lampengehäuses in Verbindung mit elektrisch isolierenden Masten bei einer Gewitteraktivität genannt. Die enge Anbindung des LED-Moduls an das Gehäuse für die Ableitung der Wärme soll einen Nachteil bezüglich der Entladung statischer Elektrizität darstellen. Da in diesem Zusammenhang parasitäre Kapazitäten genannt werden, wäre eine Untersuchung hinsichtlich der kapazitiven Kopplungsmechanismen vorstellbar.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit elektromagnetischer Störbeeinflussung verkabelter lichttechnischer Straßenbeleuchtungsanlagen infolge atmosphärischer Entladungen. Der Anlass für eine Untersuchung wurde durch die häufigen Ausfälle von technologisch neuen Komponenten, insbesondere von LED-Systemen und den mehrmalig beobachteten Zusammenhang der Störfälle mit einer Gewittertätigkeit gegeben.

Nach einer Einleitung werden die Grundlagen und Begriffe behandelt, die mit dieser Thematik in Beziehung stehen. Dazu werden Definitionen gemäß den ÖVE/ÖNORM-Vorschriften angeführt. Nachfolgend werden mögliche Gefahren-/Störquellen für verkabelte lichttechnische Anlagen dargestellt, die von einer atmosphärischen Gewitteraktivität ausgehen können. Zudem wird zwischen den verschiedenen elektromagnetischen Kopplungsmechanismen unterschieden, um die Auswirkungen auf elektrische und elektronische Einrichtungen infolge atmosphärischer Entladungen zu untersuchen. In weiterer Folge wird auf die Entstehung und den Verlauf von Gewitterzellen, die unterschiedlichen Blitztypen und die daraus abgeleiteten zeitlichen Blitzstromverläufe und Kenngrößen eingegangen. Anschließend wird der Aufbau einer verkabelten lichttechnischen Straßenbeleuchtungsanlage erläutert, wobei dieser Abschnitt aufgrund der Vielzahl der üblichen Anlagenbauarten und eingesetzten Systeme nur eine überblicksmäßige Abhandlung zulässt.

Zu Beginn der Arbeit wurde unter Einbeziehung der Erfahrungen, Kenntnisse und Beobachtungen der Projektpartner (LTG: Arbeitskreis „Licht im Verkehrsraum - die Betreiberplattform“) bezüglich transientser Störbeeinflussung die Situation mit Hilfe einer Datenerfassung, Dokumentation und Gegenüberstellung verkabelter lichttechnischer Anlagen, die mit modernen lichttechnischen Komponenten ausgestattet sind, erhoben. Aus den gewonnenen Daten konnten jedoch keine Erkenntnisse für die zukünftige Planung, Installation und den Betrieb abgeleitet werden, was unter anderem auf die unterschiedlichen Anlagenbauarten und die jeweilig voneinander abweichenden Gegebenheiten zurückzuführen ist.

In einem weiteren Abschnitt der Arbeit wird die induktive Kopplung bei einem Blitzeinschlag in der Nähe eines Lichtmastes behandelt. Hierbei wurde die induzierte Spannung in die im Lichtmast enthaltene Energieversorgungsleitung bei einem Kunststoff-, Stahl-, und Aluminiummast ermittelt. Bei einem Kunststoffmast stellen sich wesentlich höhere induzierte Spannungswerte ein, als bei einem Stahl- oder Aluminiummast. Bei einem Kunststoffmast liegt die maximal induzierte Spannung – unter Beachtung der für die Berechnung getroffenen Annahmen – je nach Masthöhe und Blitzstromparameter, im Bereich von ca. 3 V bis ca. 2,1 kV. Bei Masten aus Stahl oder Aluminium kommt es zu wesentlich geringeren induzierten Spannungen in die Energieversorgungsleitung, was auf die Schirmdämpfung der Masten zurückzuführen ist. Hierbei erreicht die induzierte Spannung bei einem 12 m hohen Lichtmast Größenordnungen im μV - bis mV -Bereich, selbst bei einem sehr geringen Abstand von 2 m zum Blitzkanal.

Den abschließenden Schwerpunkt bildet die galvanische Kopplung. Dabei wurde von einer atmosphärischen Entladung in der Umgebung einer lichttechnischen Anlage ausgegangen. Das hierfür zugrunde liegende Modell wurde mit vereinfachten lichttechnischen Strukturen kombiniert und mittels einer stationären Berechnung wurden die an diesen Strukturen auftretenden elektrischen Potentiale ermittelt. Dabei stellen sich je nach Blitzstrom, Bodenleitfähigkeit, Entfernung und Ausrichtung der Anlage zum Blitzfußpunkt sowie Anlagengröße und vorhandenen Erdungsstrukturen unterschiedliche Potentialverhältnisse und folglich Lichtmastpotentiale ein. Bei einer Anlage ohne Horizontalerder und ohne potentialausgleichenden Maßnahmen nehmen die Lichtmasten in etwa das elektrische Potential des unbeeinflussten Potentialverlaufs an, solange keine elektrisch leitfähigen Erdungssysteme/Rohre entlang der Anlage verlaufen. Sind die Lichtmasten mit einem Horizontalerder verbunden, kommt es zu einer Vergleichmäßigung des Potentialverlaufs im Bereich der Anlage. Zudem zeigte sich, dass mit zunehmender Ausdehnung der Anlage das Potential herabgesenkt wird. Mit größeren Abständen zum Blitzfußpunkt sind die Potentialunterschiede zum Fall ohne Horizontalerder weniger stark ausgeprägt.

Ferner wird die galvanische Beeinflussung bei einem Direkteinschlag in einen leitfähigen Lichtmast, unter Annahme eines mit dem Mast verbundenen Horizontalerders, behandelt. Es konnte der Einfluss der Bodenleitfähigkeit um den Erder auf die Höhe des Stoßerdungswiderstandes und somit auf die Höhe der Spannung am Lichtmast verdeutlicht werden. Eine Vergrößerung des Erderquerschnittes trägt nur bedingt zu einer Verringerung des Stoßerdungswiderstandes bei. Hingegen führt eine Vervierfachung des spezifischen Bodenwiderstandes in etwa zu einer Verdopplung des Stoßerdungswiderstandes.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] Bodenhaupt F., Lindemuth F., *Technisches Handbuch Straßen- und Außenbeleuchtung*. Frankfurt am Main: EW Medien und Kongresse GmbH (2012), 978-3-8022-0907-9
- [2] *Straßenbeleuchtung Leitfaden für Planung, Bau und Betrieb*. 5. Auflage, Frankfurt, Berlin, Heidelberg: VWEW Energieverlag GmbH (2009), 978-3-8022-0949-9
- [3] *ÖVE/ÖNORM E 8001, Teil 1: 2010-03-01, Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V -- Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)*.
- [4] *ÖVE/ÖNORM EN 61000, Teil 4-2: 2010-02-01, Prüf- und Messverfahren -- Prüfung der Störfestigkeit gegen die Entladung statischer Elektrizität*.
- [5] *ÖVE/ÖNORM EN 60664, Teil 1: 2008-03-01, Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen -- Grundsätze, Anforderungen und Prüfungen*.
- [6] Weidmüller, *Grundlagen zum Blitz- und Überspannungsschutz*, http://www.weidmueller.de/98027/Downloads/Printmedien/Produktkataloge/Ueberspannungsschutzgeraete/cw_index_v2.aspx, (2013)
- [7] Pack S., *Vorlesungsskriptum Blitz und Blitzschutz*. TU Graz (Sommersemester 2013)
- [8] Schwab A., Kürner W., *Elektromagnetische Verträglichkeit*. 6. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (2011), 978-3-642-16609-9
- [9] Hasse P., Wiesinger J., Zischak W., *Handbuch für Blitzschutz und Erdung*. 5. Auflage, Bad Kissingen, Berlin, Düsseldorf, Heidelberg: Pflaum Verlag (2006), 3-7905-0931-0
- [10] Heidler F., Stimper K., *Blitz und Blitzschutz*. Berlin, Offenbach: VDE Verlag (2009), 978-3-8007-2974-6
- [11] *ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 1: 2012-07-01, Blitzschutz -- Allgemeine Grundsätze*.
- [12] *ALDIS*, <http://www.aldis.at>, abgerufen am: 29.10.2013
- [13] *Blitzdichte in Österreich 1998-2011*, <http://www.hora.gv.at/>, abgerufen am: 29.10.2013
- [14] *Anzahl der Wolke-Erde-Blitze pro Jahr innerhalb des Bundesgebietes Österreichs 1992-2013*, [http://www.aldis.at/blitzstatistik/anzahl/details/?tx_aldisblitzstatistik_pi1\[overview\]=2&cHash=e0c1cc3e47badca3f827a0de58245afc](http://www.aldis.at/blitzstatistik/anzahl/details/?tx_aldisblitzstatistik_pi1[overview]=2&cHash=e0c1cc3e47badca3f827a0de58245afc), abgerufen am: 15.02.2014

- [15] *Häufigkeitsverteilung der Amplituden negativer Blitze 2010-2012*,
<http://www.aldis.at/blitzstatistik/amplituden/>, abgerufen am: 29.10.2013
- [16] *Summenhäufigkeit der Amplituden negativer Blitze*,
<http://www.aldis.at/blitzstatistik/amplituden/>, abgerufen am: 29.10.2013
- [17] *Häufigkeitsverteilung der Amplituden positiver Blitze 2010-2012*,
<http://www.aldis.at/blitzstatistik/amplituden/>, abgerufen am: 29.10.2013
- [18] *Summenhäufigkeit der Amplituden positiver Blitze*,
<http://www.aldis.at/blitzstatistik/amplituden/>, abgerufen am: 29.10.2013
- [19] Höhne L., Schröter H. G., *Straßenbeleuchtung*. 2. Auflage, Frankfurt am Main, Berlin, Offenbach: VWEW Energieverlag GmbH, VDE Verlag GmbH (2002), 3-8007-2699-8
- [20] Meinhart Kabel Österreich, *Kabel und Leitungen, Preisliste und Technischer Katalog*,
<http://www.meinhart.at/service/download/>, (2014)
- [21] Seyr S., Rösch G., *Elektroinstallation - Blitzschutz - Lichttechnik*. Wien: Jugend & Volk Verlag (2011), 978-3-7100-2486-3
- [22] *Sicherungskasten Langmatz*,
<http://www.langmatz.de/langmatz/de/produkte/kabeluebergangsgeraete/kabeluebergangsgeraete.htm>, abgerufen am: 06.11.2013
- [23] *Schreder Leuchte Teceo*, <http://www.aeschreder.at/cms/index.php?id=1027>, abgerufen am: 08.11.2013
- [24] Thiemann N., Aigner M., *Licht im öffentlichen Raum - Der praxisorientierte Leitfaden durch die Außenbeleuchtung*. 1. Auflage, Wien: Austrian Standards plus Publishing (2011), 978-3-85402-226-8
- [25] Diendorfer G., Hadrian W., Pigler F., *Das Blitzkugelverfahren zur Bestimmung der Blitzstromamplituden möglicher Blitzeinschläge*, *Elektrotechnik und Informationstechnik e&i*, vol. 114, issue 3, pp. 117-122, 1997, 1613-7620
- [26] Nixon K. J., Jandrell I. R., *A simplified model of the lightning performance of a driven rod earth electrode in multi-layer soil that includes the effect of soil ionisation*, vol. 4, pp. 1821-1825, *Industry Applications Conference (2006), 41st IAS Annual Meeting*, 0197-2618
- [27] Gonos I. F., Stathopoulos I. A., *Soil ionisation under lightning impulse voltages*, *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings*, vol. 151, issue 5, pp. 343-346, 2004, 1350-2344
- [28] *DEHN Blitzplaner*. 3. Auflage, (2013), 978-3-9813770-0-2
- [29] *DEHN Blitzplaner*. 2. Auflage, (2007), 978-3-00-021115-7

- [30] Haynes W. M., Lide D. R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 92. Auflage, CRC Press (2011), 1-4398-5511-0
- [31] Sekioka S., Mori K., Fukazu N., Aiba K., Okabe S., *Simulation Model for Lightning Overvoltages in Residences Caused by Lightning Strike to the Ground*, Power Delivery, IEEE, vol. 25, issue 2, pp. 970-978, 2010, 0885-8977
- [32] *ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 3: 2012-07-01, Blitzschutz -- Schutz von baulichen Anlagen und Personen.*

Verwendete Software:

MATLAB R2012a (7.14.0.739)

COMSOL Multiphysics 4.3a (4.3.1.115)

EleFAnT2D **E**lectromagnetic **F**ield **A**nalysis **T**ools (Numerisches Simulationsprogramm erstellt am Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik (IGTE) der TU Graz)

9.2 Symbolverzeichnis

Γ	Fläche der Leiterschleife [m ²]
δ	Eindringtiefe im Erdboden [m]
ε_r	relative Permittivität
λ	Wellenlänge [m]
μ	Permeabilität [H/m]
μ_0	Magnetische Feldkonstante = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]
μ_r	relative Permeabilität
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand [Ω m]
σ	elektrische Leitfähigkeit [S/m]
σ_{log}	Streuung
τ_1	Stirnzeitkonstante [s]
τ_2	Rückenzeitkonstante [s]
ϕ	magnetischer Fluss [Wb]
ϕ'	magnetischer Fluss pro Meter (Höhe) [Wb/m]
A	Querschnitt [m ²]
$A_{II}, A_{Schleife}$	Fläche Leiterschleife [m ²]
B	magnetische Flussdichte [T]
$C_{Str 1}, C_{Str 2}$	Streukapazität [F]
c_0	Vakuumlichtgeschwindigkeit $\approx 3 \cdot 10^8$ [m/s]
C'	Kapazitätsbelag [F/m]
$\frac{di}{dt}$	Blitzstromsteilheit [A/s]
$\left(\frac{di}{dt}\right)_{max}$	maximale Blitzstromsteilheit [A/s]
$\left(\frac{di}{dt}\right)_{max,\mu}$	Mittelwert der maximalen Blitzstromsteilheit [A/s]
E	elektrische Feldstärke [V/m]
f_{eq}	äquivalente Blitzfrequenz [Hz]
G'	Ableitungsbelag [S/m]
H	magnetische Feldstärke [A/m]
h	Höhe Leiterschleife [m]
h_1	Höhe Lichtmast (ab Grund) [m]
h_2	Höhe Kabelübergangskasten (ab Grund) [m]
I, i	Blitzstrom [A]
\hat{I}_E	Scheitelwert Strom am Erderanschluss [A]
I_{grenz}	Kleinster Scheitelwert gemäß Blitzschutzzone [A]
\hat{I}, I_{max}	Scheitelwert des Blitzstroms [A]
$I_{max,\mu}$	Mittelwert der Scheitelwerte [A]
J	Stromdichte [A/m ²]
k	Korrekturfaktor

l_{eff}	effektive Erderlänge [m]
L'	Induktivitätsbelag [H/m]
M'	Gegeninduktivität der Leiterschleife pro Meter (Höhe) [H/m]
$M_{I/II}$	Gegeninduktivität [H/m]
Q	Ladung [C]
r	Blitzkugelradius bzw. Erderradius [m]
R_A	Ausbreitungswiderstand [Ω]
R_{st}	Stoßerdungswiderstand [Ω]
r_1	Abstand zwischen Blitzkanal und Leiterschleife Anfang [m]
r_2	Abstand zwischen Blitzkanal und Leiterschleife Ende [m]
R'	Widerstandsbelag [Ω/m]
s	Entfernung zum Blitzkanal bzw. Abstand zwischen Blitzkanal und Leiterschleife Anfang [m]
t	Zeit [s]
T_1	Stirnzeit [s]
T_2	Rückenhalfwertszeit [s]
U	elektrische Spannung [V]
\hat{U}_E	Scheitelwert Spannung am Erderanschluss [V]
U_I, U_{II}	Spannungsquelle bzw. Spannung [V]
u_{ind}	induzierte Spannung [V]
u_{ind}'	induzierte Spannung pro Meter (Schleifenhöhe) [V]
$\hat{u}_{ind}, u_{ind,max}$	Scheitelwert induzierte Spannung [V]
V	elektrisches Potential [V]
v_E	Ausbreitungsgeschwindigkeit des Blitzstroms im Erdreich [m/s]
$\frac{W}{R}$	spezifische Energie [J/ Ω]
x	Entfernung zum Blitzfuß-/Einschlagpunkt [m]
Z, Z_{II}, Z_E	Impedanz [Ω]

9.3 Abkürzungsverzeichnis

ALDIS	Austrian Lightning Detection & Information System
EVG	Elektronisches Vorschaltgerät
EVU	Elektrizitätsversorgungsunternehmen
E-YY	Energiekabel mit PVC Ader- und Mantelisolierung
FEM	Finite Elemente Methode
Kük	Kabelübergangskasten
LED	Licht emittierende Diode
LEMP	Lightning Electromagnetic Pulse
Lm	Lichtmast
LPL	Lightning Protection Level (Blitzschutzzone)
LTG	Lichttechnische Gesellschaft Österreichs
L1, L2, L3	Außenleiter
(N)YM	PVC-Mantelleitung
PCB	Printed Circuit Board (Leiterplatte)
PE	Protective Earth (Schutzleiter) bzw. Polyethylen
PEN	Protective Earth Neutral (Leiter, der zugleich die Funktionen des Schutzleiters (PE) und des Neutralleiters (N) erfüllt)
PVC	Polyvinylchlorid
SYM	Spezial-Mantelleitung
TN	Terre Neutre (frz.) (Realisierungsart eines Niederspannungsnetzes)
TT	Terre Terre (frz.) (Realisierungsart eines Niederspannungsnetzes)

10 Anhang

Datenerhebungsunterlagen

- „Allgemeine Fragestellungen“
- „Beschreibung einer verkabelten lichttechnischen Anlage“

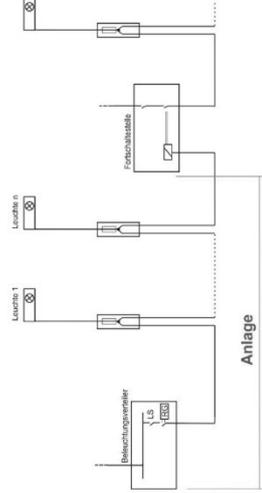
siehe nachfolgende Seiten.

1 Vorgehensweise und Erklärung zur vorliegenden Datenerfassungsunterlage

Das vorliegende Dokument dient zum Erfassen der Erfahrungen, die von Betreibern lichttechnischer Anlagen bisher mit transienten Spannungen sowie dem Überspannungsschutz in verkabelten Installationen gemacht wurden.

Diese Datenerfassungsunterlage richtet sich dabei ausschließlich an verkabelte lichttechnische Anlagen. Es soll eine möglichst gute Abgrenzung zu seilabgespannten Installationen und Freileitungsanlagen erreicht werden.

- o Die Verwendung des Begriffs „Anlage“ in diesem Dokument umfasst dabei alle (wesentlichen) Komponenten wie:
 - Jeweilig speisenden (Unter-)Verteiler/Schaltschrank und die darin enthaltenen Betriebsmittel
 - Beleuchtungskabel (Kabel zwischen Schaltschrank/Verteiler und Beleuchtungsanlage bzw. zwischen Beleuchtungsanlagen) und eventuell vorhandener Begleiter sowie mitgeführte Signal- und Steuerleitungen
 - Kabelübergangskasten (+ Betriebsmittel)
 - Betriebsmittel in Leuchte
 - Masten



Datenerfassungsunterlage

Verkabelte lichttechnische Anlagen

Allgemeine Fragestellungen

Untersuchungsvorhaben im Rahmen einer Masterarbeit über transiente Spannungen in lichttechnischen Anlagen und Installationen, wie sie durch atmosphärische Entladungen oder Schalthandlungen sowie durch elektrostatische Entladungsvorgänge hervorgerufen werden können



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Technische Universität Graz

Infieldgasse 18
8010 Graz

- ☎ (entfernt)
- 📧 (entfernt)

Kontaktpersonen:

Christian Niederauer

- ☎ (entfernt)
- ✉ (entfernt)

Ao.Univ.-Prof., Dipl.-Ing., Dr.techn. Stephan PACK

- ☎ (entfernt)
- ✉ (entfernt)

Inhaltliche Gliederung:

- Vorgehensweise und Erklärung zur vorliegenden Datenerfassungsunterlage
- Datenübermittlung
- Rückfragen
- Datenerfassung allgemein: Überspannungsschutz in verkabelten Anlagen
- Fragestellungen des Projektpartners

2 Datenübermittlung

Nach erfolgter Beantwortung bitte ich Sie dieses Dokument als „**Datenerfassungsunterlage verarbeitete lichttechnische Anlagen allgemeine Fragestellungen Firma**“ in *.docx Format abzuspeichern und an folgende email-Adresse zu übermitteln: (entfernt)

3 Rückfragen

Für allfällige Rückfragen (vorzugsweise **email**) wenden Sie sich bitte an:

Christian Niederauer

① (entfernt)

✉ (entfernt)

Die Verwendung des Begriffs „**Überspannungsschutz**“ in diesem Dokument impliziert den Schutz gegen transiente Überspannungen.

Es wird gebeten die vorliegenden Fragen in diesem Dokument in denen dafür vorgesehenen weißen Platzhaltern zu beantworten. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Beantwortung der Fragen in möglichst ausformulierter Schreibweise erfolgt und, dass abgekürzte Schreibweisen möglichst vermieden werden.

In Punkt 5 dieses Dokuments haben Sie als Projektpartner die Möglichkeit, Fragen bezüglich dieses Untersuchungsvorhabens an der TU Graz, an uns zu stellen.

Erbetenes Rücksendedatum: 10.08.2013 via email

Für den Fall, dass einzelne Daten noch nicht angegeben werden können, bitte ich Sie dennoch, mir die teilweise vorliegenden Antworten und Unterlagen bis zum obigen Datum zukommen zu lassen.

Restliche Unterlagen/Informationen bitte dann so bald als möglich nachsenden.

Falls es derzeit aus Termingründen oder Urlaub nicht möglich ist, die Unterlagen bis zum 10.08.2013 zu bearbeiten, bitte ich um kurze Information.

4 Datenerfassung allgemein: Schutz vor transienten Überspannungen in verkabelten lichttechnischen Anlagen

Ist der Schutz von verkabelten lichttechnischen Anlagen gegen transiente Überspannungen in Ihrem Unternehmen derzeit ein Thema? (ja/nein)
 (Falls die Beantwortung mit „ja“ erfolgt, so bitten ich Sie die Beantwortung der Fragen mit Punkt 4.1 fortzusetzen und Punkt 4.2 zu überspringen. Falls „nein“ bitte mit Punkt 4.2 fortsetzen.)

4.1	Der Schutz von verkabelten lichttechnischen Anlagen gegen transiente Überspannungen ist derzeit ein Thema
4.1.1	Seit wann ist der Schutz von verkabelten lichttechnischen Anlagen gegen transiente Überspannungen in Ihrem Betrieb ein Thema?
4.1.2	Durch welche Gegebenheiten, Probleme oder Störfälle bzw. durch welche Umstellung in den verkabelten Anlagen wurde dieses Thema losgetreten? Wo traten diese Probleme auf?
4.1.3	Wurden Maßnahmen in verkabelten Anlagen ergriffen, um die in Punkt 4.1.2 genannten Probleme zu lösen/mäßigen/beseitigen? (ja/nein)
4.1.4	Für den Fall, dass Maßnahmen in verkabelten Anlagen ergriffen wurden. Wie sehen diese Maßnahmen aus? Wo wurden Maßnahmen gesetzt? Wurden Überspannungsschutzgeräte installiert? Falls ja, welche Typen (1,2 oder 3) von Überspannungsschutzgeräten wurden wo installiert? Von welchem Hersteller wurden diese Geräte bezogen?

4.1.5	Inwieweit werden die in Punkt 4.1.4 genannten Vorkehrungen als erfolgreiche Schutzmaßnahme gegen transiente Überspannungen angesehen? Kann über den bisherigen Einsatz, auch in Zusammenhang mit der Zeitdauer, eine aussagekräftige Angabe über den wirkungsvollen Schutz dieser Maßnahmen gemacht werden?
4.1.6	Für den Fall, dass noch keine Maßnahmen in verkabelten Anlagen ergriffen wurden. Sind Maßnahmen in Absicht? Falls ja, wie sehen diese aus?

<p>4.3 Weitere Fragestellungen</p>	
<p>4.3.1</p>	<p>Wo sehen Sie die Schwachpunkte im gesamten verkabelten Anlagen-System bei Auftreten von transienten Überspannungen?</p>
<p>4.3.2</p>	<p>Welche Erfahrungen haben Sie bisher beim Einsatz von elektronischen Vorschalgeräten in verkabelten Anlagen gemacht?</p>
<p>4.3.3</p>	<p>Wo sehen Sie die Schwachpunkte in elektronischen Vorschalgeräten bei einem Einsatz in verkabelten Anlagen bei Auftreten von transienten Überspannungen?</p>

<p>4.2 Der Schutz von verkabelten lichttechnischen Anlagen gegen transiente Überspannungen ist derzeit kein Thema</p>	
<p>4.2.1</p>	<p>Warum ist der Schutz von verkabelten lichttechnischen Anlagen gegen transiente Überspannungen in Ihrem Betrieb derzeit <u>kein</u> Thema? Hier wäre folgende Punkte interessant: War das Problem mit transienten Überspannungen in verkabelten Anlagen in der Vergangenheit ein Thema? Haben Sie Vorkahrungen getroffen, um dieser Problematik entgegen zu wirken? Wenn ja, wie sehen diese aus? Oder: Bisher gab es nie oder kaum nennenswerte Ausfälle zu verzeichnen, die auf diese Ursache zurückzuführen wären. Bitte beschreiben Sie in ein paar Sätzen die gegebenen Umstände.</p>

<p>4.3.7</p>	<p>Welche Erfahrungen gibt es bei einer Vermischung von Leuchten mit konventionellen Vorschaltgeräten (KVG) und Leuchten mit elektronischen Vorschaltgeräten/LED-Systemen in verkabelten Anlagen?</p>
<p>4.3.8</p>	<p>Welche Vorkehrungen sehen Sie als Errichter/Betreiber/Anlagenverantwortlicher sinnvoll, um die Problematik von transienten Überspannungen in lichttechnischen Anlagen und im Speziellen in verkabelten Anlagen zu beherrschen?</p>

<p>4.3.4</p>	<p>Welche Erfahrungen haben Sie bisher beim Einsatz von LED-Systemen in verkabelten Anlagen gemacht?</p>
<p>4.3.5</p>	<p>Wo sehen Sie die Schwachpunkte bei LED-Beleuchtungssystemen (Betriebsgerät, Modul, etc.) bei einem Einsatz in verkabelten Anlagen bei Auftreten von transienten Überspannungen?</p>
<p>4.3.6</p>	<p>Wie sehen <u>allgemein</u> die Erfahrungen aus, die Sie bisher mit transienten Überspannungen bei verkabelten Anlagen gemacht haben aus? Welche Auffälligkeiten zeigen sich? Welche Beobachtungen wurden gemacht? Bitte beschreiben Sie so gut wie möglich die jeweiligen Gegebenheiten auf Systemebene sowie auch die Umgebungsbedingungen.</p>

5 Fragestellungen des Projektpartners

Sollten Sie Fragen oder Anregungen bezüglich des Untersuchungsvorhabens an der TU Graz haben, so darf ich Sie bitten, diese hier anzuführen.

--	--

4.3.9 Platz für weitere Bemerkungen

--	--

Datenerfassungsunterlage

Beschreibung einer verkabelten lichttechnischen Anlage

Untersuchungsvorhaben im Rahmen einer Masterarbeit über transiente Spannungen in lichttechnischen Anlagen und Installationen, wie sie durch atmosphärische Entladungen oder Schaltheandlungen sowie durch elektrostatische Entladevorgänge hervorgerufen werden können

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Technische Universität Graz

Infieldgasse 18
8010 Graz

(entfernt)
 (entfernt)

Kontaktpersonen:

Christian Niederauer

(entfernt)
 (entfernt)

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

(entfernt)
 (entfernt)

Inhaltliche Gliederung:

- **Vorgehensweise und Erklärung zur vorliegenden Datenerfassungsunterlage**
- **Datenübermittlung**
- **Rückfragen**
- **Datenerfassung: Beschreibung einer verkabelten Anlage**

1 Vorgehensweise und Erklärung zur vorliegenden Datenerfassungsunterlage - Beschreibung einer verkabelten Anlage

Das vorliegende Dokument dient zur Dokumentation und Beschreibung einer **verkabelten** lichttechnischen Anlage, welche entweder mit einem **LED-System** oder „**traditionellen**“ **Lampen mit elektronischen Vorschaltgeräten** ausgestattet ist.

Diese Anlage ist in Punkt 4 „**Datenerfassung: Beschreibung einer verkabelten Anlage**“ zu dokumentieren und soll dabei in Punkt 4.1 einem Lampentyp/System (**LED-System** oder „**traditionelle**“ Lampen mit **elektronischen Vorschaltgeräten**) zugeordnet werden.

In Punkt 4.2 „**Anlagenzuordnung**“ soll diese Anlage nach der Häufigkeit der Ausfälle/Störfälle/Probleme kategorisiert werden, wobei hierfür zwei gegensätzliche Zuordnungen zur Verfügung stehen:

- In der nachfolgend beschriebenen Anlage waren bisher/in letzter Zeit/in den letzten Jahren **keine/auffallend wenig** Ausfälle/Störfälle/Probleme zu verzeichnen, die von transienten Überspannungen hervorgerufen wurden.
- In der nachfolgend beschriebenen Anlage waren bisher/in letzter Zeit/in den letzten Jahren **vermehrt/häufig** Ausfälle/Störfälle/Probleme zu verzeichnen.

Anschließend ist diese Anlage in Punkt 4.3 „**Anlagenbeschreibung**“ zu erläutern.

Die Zuordnung nach 4.1 und 4.2 gilt dabei für das gesamte Dokument!

Es wird gebeten **maximal 4 („Muster“-) Anlagen**, die nach den Punkten 4.1 und 4.2 zutreffend sind, auszuwählen und anschließend jede Anlage für sich in einem einzelnen Dokument zu beschreiben. Wichtig: Dieses Dokument ist somit vor der Bearbeitung je nach Anzahl der zu beschreibenden Anlagen zu vervielfältigen!

Um den Aufwand der Dokumentation sowie die Komplexität der darauf folgenden Auswertung **möglichst gering zu halten**, bitte ich Sie („Muster“-) Anlagen zu wählen, welche mit geringem Aufwand beschrieben werden können. Das heißt, es sollte sich um Anlagen handeln, wo jede Anlage für sich

- im Idealfall mit komplett identen Betriebsmitteln (Leuchtmittel, Betriebsgeräte, Masten,...) ausgestattet ist
- strahlenförmig (Netz) angeordnet ist
- keine weiteren Abzweigungen innerhalb der Anlage (d. h. Abzweigungen von Leuchten oder zwischen den Leuchten) z. B. zu anderen Straßenleuchten mit jeweils denselben Leuchten und Masten und/oder anderen Lampentypen und Masten aufweist.
- selber keine Abzweigung einer anderen Anlage darstellt

Ich bitte Sie mir nur Unterlagen zukommen zu lassen, die auch für dieses Thema zutreffend sind. Bei Bedarf komme ich gerne auf weitere Unterlagen zurück.

Erbetenes Rücksendedatum: 10.08.2013

Für den Fall, dass einzelne Daten noch nicht angegeben werden können, bitte ich Sie dennoch, mir die teilweise vorliegenden Antworten und Unterlagen bis zum obigen Datum zukommen zu lassen.

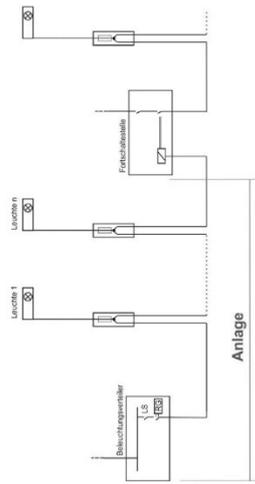
Restliche Unterlagen/Informationen bitte dann so bald als möglich nachsenden.

Falls es derzeit aus Termingründen oder Urlaub nicht möglich ist, die Unterlagen bis zum 10.08.2013 zu bearbeiten, bitte ich um kurze Information.

Es soll dabei eine möglichst gute Abgrenzung zu seilabgespannten Installationen und Freileitungsanlagen erreicht werden.

Die Verwendung des Begriffs „**Anlage**“ in diesem Dokument umfasst dabei alle (wesentlichen) Komponenten wie:

- Jeweilig speisenden (Unter-)Verteiler/Schaltschrank und die darin enthaltenen Betriebsmittel
- Beleuchtungskabel (Kabel zwischen Schaltschrank/Verteiler und Beleuchtungsanlage bzw. zwischen Beleuchtungsanlagen) und ein eventuell vorhandener Begleiter sowie mitgeführte Signal- und Steuerleitungen
- Kabelübergangskasten (+ Betriebsmittel)
- Betriebsmittel in Leuchte
- Masten



Die Verwendung des Begriffs „**Überspannungsschutz**“ in diesem Dokument impliziert den Schutz gegen transiente Überspannungen.

Es wird gebeten die vorliegenden Fragen in diesem Dokument in denen dafür vorgesehenen weißen Platzhaltern zu beantworten. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Beantwortung der Fragen in möglichst ausformulierter Schreibweise erfolgt und, dass abgekürzte Schreibweisen möglichst vermieden werden.

Sollten die gestellten Fragen aufgrund der Komplexität nicht „einfach“ zu beantworten sein oder sind weitere Informationen notwendig, so bitte ich Sie diesen Umstand in denen dafür vorgesehenen Platzhaltern („weitere Bemerkungen“) zu vermerken und auch zu begründen.

Allfällige Basisunterlagen (Pläne, Schaltbilder, Skizzen, Datenblätter usw.), die aus Ihrer Sicht für eine ausreichende Dokumentation notwendig sind, bitte ich ausschließlich mit der Funktion BigMail (entfernt) für die jeweilig zutreffende Anlage in gesammelter Form als ZIP-Datei zu übermitteln.

2 Datenübermittlung

Ich bitte Sie nach erfolgter Beantwortung dieses Dokument als „**Datenerfassungsunterlage verkabelte Anlage x Firma**“ (x=1,2,3...) in *.docx Format abzuspeichern und an folgende email-Adresse zu übermitteln:
(entfernt)

Sämtliche weitere Unterlagen wie Pläne, Schaltbilder, Skizzen, Datenblätter usw., die aus Ihrer Sicht für eine ausreichende Dokumentation notwendig sind, bitte ich Sie ausschließlich mit der Funktion BigMail (entfernt) für die jeweilig zutreffende Anlage in gesammelter Form als ZIP-Datei mit der Namensgebung „**Verkabelte Anlage x Firma.zip**“ (x=1,2,3...) zu übermitteln.

Für die Funktion BigMail steht Ihnen folgendes Formular zur Verfügung:
(entfernt)

Vorgehensweise für die Nutzung der Funktion BigMail:

1. Geben Sie Ihre email Adresse in das Feld „Ihre E-Mail-Adresse:“ ein
2. Klicken Sie auf „TAN anfordern“
3. Sie erhalten per email einen TAN-Code den Sie nun in das Formular eingeben können
4. Füllen Sie die restlichen Felder aus
5. Wählen Sie mit „Durchsuchen...“ die ZIP-Datei aus
6. Mit „Upload“ stellen Sie die Datei am BigMail Server zur Verfügung

3 Rückfragen

Für allfällige Rückfragen (vorzugsweise email) wenden Sie sich bitte an:

Christian Niederauer

① (entfernt)

✉ (entfernt)

4 Datenerfassung: Beschreibung einer verkabelten Anlage

In diesem Punkt soll eine verkabelte Anlage beschrieben werden. Diese Anlage soll in Punkt 4.1 einem „Lampentyp/System“ zugeordnet und in Punkt „4.2 Anlagenzuordnung“ kategorisiert werden. Anschließend ist diese Anlage in Punkt „4.3 Anlagenbeschreibung“ zu beschreiben.

4.1 Lampentyp/System

Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen.	
LED-Lampen-System	
„Traditionelle“ Lampen mit elektronischen Vorschaltgeräten	

4.2 Anlagenzuordnung

1	Zuordnung nach der Häufigkeit der Ausfälle/Störfälle/Probleme
Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen.	
In der nachfolgend beschriebenen Anlage waren bisher/in letzter Zeit/in den letzten Jahren keine/auf fallend wenig Ausfälle/Störfälle/Probleme zu verzeichnen, die von transienten Überspannungen hervorgerufen wurden.	
Achtung: Für diese Zuordnung der Anlage ist Punkt 6 „Betriebsmittelbeschreibung dieser Anlage, bei denen bisher/in letzter Zeit/in den letzten Jahren „vermehrt/häufig“ Ausfälle/Störfälle/Probleme zu verzeichnen waren“ hinmüßig!	
In der nachfolgend beschriebenen Anlage waren bisher/in letzter Zeit/in den letzten Jahren vermehrt/häufig Ausfälle/Störfälle/Probleme zu verzeichnen.	

2	Zuordnung nach der (möglichen) Ursache der Ausfälle/Störfälle/Probleme
Die Ursache für die Ausfälle/Störfälle/Probleme ist unklar.	
Es wird vermutet, dass die Ausfälle/Störfälle/Probleme durch atmosphärische Entladungen oder Schaltmanövern im Netz verursacht wurden.	
Es wird vermutet, dass die Ausfälle/Störfälle/Probleme durch die Vermischung von konventionellen Vorschaltgeräten mit elektronischen Vorschaltgeräten im Beleuchtungsnetz verursacht wurden.	
Es geht aus betriebsinternen Aufzeichnungen hervor, dass diese Ausfälle/Störfälle/Probleme in unmittelbarem Zusammenhang mit atmosphärischen Entladungen bzw. einer Gewittertätigkeit stehen oder der Verdacht ist groß, dass diese Ausfälle/Störfälle/Probleme durch atmosphärischen Entladungen bzw. einer Gewittertätigkeit hervorgerufen wurden.	

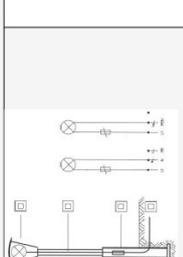
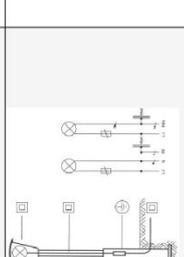
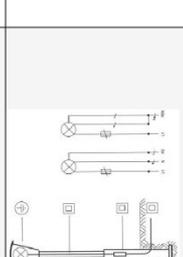
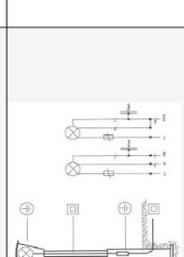
Selbst definierte Zuordnung nach der (möglichen) Ursache der Ausfälle/Störungen/Probleme: (Bitte hier Beschreibung eingeben)	
---	--

4.3 Anlagenbeschreibung

1 Betriebsmittel	
Betriebsmittel im Schaltschrank/Verteiler	
Bitte hier nur jene Betriebsmittel angeben, welche für die nachfolgend gespeisten Leuchten relevant sind!	
Betriebsmittel 1	Art des Betriebsmittels (z. B. Schütz,...) Hersteller Typenbezeichnung
Betriebsmittel 2	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung
Betriebsmittel 3	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung
Betriebsmittel 4	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung
Betriebsmittel 5	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung
Betriebsmittel 6	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung
Weitere Betriebsmittel im Schaltschrank/Verteiler	

1.3 Netzforn (zwischen Schaltschrank/Verteiler und Beleuchtungsanlage bzw. zwischen Beleuchtungsanlagen)	
Netzforn (z. B. TN-S, TN-C)	
Bitte rechts angeben.	
Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen. (Quelle Abbildungen: Höhne, et al., Straßenbeleuchtung, Anlagentechnik für elektrische Verteilungsmetze, 2. Aufl. 2002, VDE Verlag)	
1.3.1 Zweileiternetz	
1.3.2 Dreileiternetz ohne Halb-nachtschaltung	
1.3.3 Dreileiternetz mit Halb-nachtschaltung	
1.3.4 Drehstromnetz ohne Halb-nachtschaltung	
1.3.5 Drehstromnetz mit Halb-nachtschaltung	
1.3.6 Andere hier nicht angeführte Variante.	
Bitte rechts angeben.	

1.2 Beleuchtungskabel (Kabel zwischen Schaltschrank/Verteiler und Beleuchtungsanlage bzw. zwischen Beleuchtungsanlagen)	
Kabeltyp (z. B. NYJ, NYCWY)	
Adernzahl	
Nennquerschnitt [mm²]	
Verlegetiefe [m]	
Verlegeart (erdfähig, PE-Rohr, Stahlrohr, zusätzliche Abdeckung)	
Füllmaterial Kabelgraben	
Weitere Bemerkungen	

<p>1.4 Schutzklassen (SK) und Einbeziehung des Mastes in eine Schutzmaßnahme Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen. <small>(Quelle: Abbildungen: Straßenbeleuchtung, Leitfaden für Planung, Bau und Betrieb, 5. Aufl. 2009, EVW Medien u. Kongresse)</small></p>		
<p>1.4.1 Gesamtes System SK 2</p>		
<p>1.4.2 Leuchte SK 2, Sicherungskasten SK 1</p>		
<p>1.4.3 Leuchte SK 1, Sicherungskasten SK 2</p>		
<p>1.4.4 Leuchte und Sicherungskasten SK 1</p>		
<p>1.4.5 Weitere Bemerkungen zu den Schutzklassen und der Einbeziehung des Mastes in eine Schutzmaßnahme</p>		

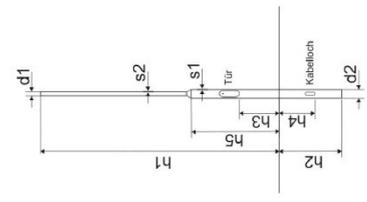
<p>Führen noch weitere Phasen/Steuerleitungen/Signalleitungen, etc. zum Kabelübergangskasten bzw. zur Leuchte? Wenn ja welche? Funktion?</p>	
<p>Weitere Bemerkungen</p>	

1.6	Betriebsmittel in Leuchte (Befinden sich mehrere Betriebsmittel desselben Typs in der Leuchte, so ist zusätzlich die Anzahl anzugeben)
Betriebsmittel 1	Art des Betriebsmittels (z. B. Leuchtmittel, elektronisches Vorschaltgerät,...) Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort (z. B. Kabelübergangskasten, Höhe Leuchtmittel) Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort
Betriebsmittel 2	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort
Betriebsmittel 3	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort
Betriebsmittel 4	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort
Betriebsmittel 5	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort
Betriebsmittel 6	Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort Art des Betriebsmittels Hersteller Typenbezeichnung Schutzklasse Einbauort
Weitere Betriebsmittel in Leuchte	

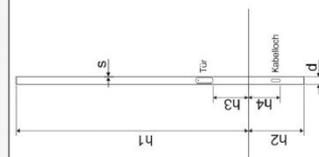
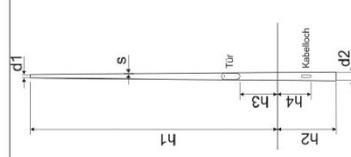
1.5	Eventuell vorhandener Begleiterder
Begleiterder vorhanden? (ja/nein)	
Typ (z. B. Seil, Bänderder)	
Material	
Abmessungen	
Verlegeart, Abstand zum Kabel,...	
Weitere Bemerkungen Begleiterder	

1.7	Leitung in Leuchte (zwischen Mastisicherungskasten/Kabelanschluss-/übergangskasten und Lampenbetriebsgerät/Vorschaltgerät)
	Leitungstyp (z. B. NYM, SYM)
	Anzahl der Adern
	Nennquerschnitt [mm ²]
	Anzahl der Leitungen im Mast (z. B. bei 2 Leuchten auf einem Mast: 2 Leitungen)
	Weitere Bemerkungen zur Leitung in der Leuchte

2	Lichtmast
2.1	Material Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen.
	Stahl (verzinkt)
	Stahlguss
	Aluminium
	Aluminiumguss
	Kunststoff
	Stahlbeton
	Schleuderbeton
	Holz
	Anderes Material oder Kombination Bitte rechts angeben.
	Weitere Bemerkungen
2.2	Mastform Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen. Mehrfachnennungen möglich!
	Gerade Masten
	Auslegermasten
	zylindrisch
	konisch
	abgesetzt
	quadratisch
	mehreckig
	Gittermasten
	Sonderformen (Designer – und nostalgische Masten)
	Weitere Bemerkungen
2.3	Mastgründung Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen.
	Eingegraben
	Fußplatte
	Weitere Bemerkungen

<p>2.4.3 Mastform zylindrisch abgesetzt (eingegraben)</p> 	<p>Abmessungen</p> <p>h1 [mm]</p> <p>h2 [mm]</p> <p>h3 [mm]</p> <p>h4 [mm]</p> <p>h5 [mm]</p> <p>Wandstärke s1 [mm]</p> <p>Wandstärke s2 [mm]</p> <p>Außen- Ø Zopf d1 [mm]</p> <p>Außen-Ø Fuß d2 [mm]</p>
	<p>Abmessungen</p> <p>h1 [mm]</p> <p>h3 [mm]</p> <p>Wandstärke s [mm]</p> <p>Außen-Ø Fuß d [mm]</p>

<p>2.4 Mastabmessungen</p> <p>Bitte bei der jeweilig zutreffenden Mastform die Abmessungen (soweit diese Daten verfügbar sind) eintragen. Falls die hier dargestellten Mastformen nicht zutreffen, so ist bei Punkt 2.4.7 Weitere Mastformen in der passenden Zeile ein „x“ einzutragen!</p>	<p>Abmessungen</p> <p>h1 [mm]</p> <p>h2 [mm]</p> <p>h3 [mm]</p> <p>h4 [mm]</p> <p>Außen-Ø d [mm]</p> <p>Wandstärke s [mm]</p>
	<p>Abmessungen</p> <p>h1 [mm]</p> <p>h2 [mm]</p> <p>h3 [mm]</p> <p>h4 [mm]</p> <p>Außen- Ø Zopf d1 [mm]</p> <p>Außen-Ø Fuß d2 [mm]</p> <p>Wandstärke s [mm]</p>

<p>2.4.1 Mastform zylindrisch (eingegraben)</p> 	<p>Abmessungen</p> <p>h1 [mm]</p> <p>h2 [mm]</p> <p>h3 [mm]</p> <p>h4 [mm]</p> <p>Außen- Ø Zopf d1 [mm]</p> <p>Außen-Ø Fuß d2 [mm]</p> <p>Wandstärke s [mm]</p>
<p>2.4.2 Mastform konisch rund (eingegraben)</p> 	<p>Abmessungen</p> <p>h1 [mm]</p> <p>h2 [mm]</p> <p>h3 [mm]</p> <p>h4 [mm]</p> <p>Außen- Ø Zopf d1 [mm]</p> <p>Außen-Ø Fuß d2 [mm]</p> <p>Wandstärke s [mm]</p>

2-armig 180°			Abmessungen (soweit Daten vorhanden sind) Außen- Ø d1 [mm] Außen- Ø d2 [mm] Auslegerweite w [mm]
2-armig 90°			
2-armig parallel			
3-armig 120°			
4-armig			
Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen. Dekorative Ausführung, Designerausführung Weitere hier nicht angeführte Ausführung			

2.4.5 Mastform konisch rund mit Fußplatte		Abmessungen
		h1 [mm]
		h3 [mm]
		Außen- Ø Zopf d1 [mm]
		Außen-Ø Fuß d2 [mm]
Wandstärke s [mm]		
2.4.6 Mastform zylindrisch abgesetzt mit Fußplatte		Abmessungen
		h1 [mm]
		h3 [mm]
		h5 [mm]
		Wandstärke s1 [mm]
Wandstärke s2 [mm]		
Außen- Ø Zopf d1 [mm]		
Außen-Ø Fuß d2 [mm]		
Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen. Feilschenmast zylindrisch abgesetzt mit konischen Übergängen Feilschenmast konisch Dekorative Ausführung, Designermast Andere hier nicht angeführte Ausführung		
2.5 Ansatz, Aufsatz, Ausleger		
Aufsatzmontage		
Ansatzmontage		
Einfachausleger		
Mehrfachausleger		
1-armig		

3.2	<p>Es befinden sich Abzweigungen innerhalb der in diesem Dokument beschriebenen Anlage oder die in diesem Dokument beschriebene Anlage ist selber eine Abzweigung innerhalb einer anderen Anlage</p> <p>Sollte dieser Fall vorliegen, bitte die Anordnung beschreiben und einen Plan mit den jeweiligen Längenmaßen und Abmessungen (Masten zueinander, Zuleitungen, etc.) beilegen (BigMail), wobei darin die in diesem Dokument beschriebene Anlage deutlich zu kennzeichnen ist. Weiters ist in diesem Plan eine Angabe über die eingesetzten Leuchtmittel (z. B. rein LED, rein traditionelle Lampen mit EVGs oder Vermischung LED, EVG sowie KVG) erforderlich.</p> <p>(Bitte hier Anordnung beschreiben)</p>
------------	---

3	<p>Anlagenanordnung</p> <p>Bitte zwischen 3.1 und 3.2 unterscheiden!</p>
3.1	<p>Es befinden sich <u>keine</u> Abzweigungen innerhalb der in diesem Dokument beschriebenen Anlage</p> <p>Achtung: Hierbei wird von jenem Fall ausgegangen, wo ein Abgang vom Verteiler/Schaltschrank eine Reihe von <u>komplett identen</u> Leuchten und Masten speist. Bei dieser Anordnung führen <u>keine</u> weiteren Abzweigungen innerhalb der Anlage (d. h. Abzweigungen von Leuchten oder zwischen den Leuchten), z. B. zu anderen Straßenzügen mit jeweils denselben Leuchten und Masten und/oder anderen Lampentypen und Masten!</p> <p>Für den Fall, dass hier <u>nicht alle Leuchten und Masten komplett ident</u> sind, d.h. eine Vermischung von verschiedenen Lampentypen und/oder Systemen bzw. unterschiedliche Masten vorliegt, so ist dies in Punkt 3.1.1 anzuführen!</p> <p>Befinden sich jedoch Abzweigungen innerhalb der in diesem Dokument beschriebenen Anlage oder die in diesem Dokument beschriebene Anlage ist selber eine Abzweigung innerhalb einer anderen Anlage, so ist Punkt 3.1 zu überspringen und die vorliegende Anlagenanordnung in Punkt 3.2 zu beschreiben!</p>
3.1.1	<p>Gibt es innerhalb dieser Anlage eine Vermischung von Lampentypen und/oder Systemen bzw. unterschiedliche Masten? (ja/nein)</p> <p>(Falls „ja“ bitte hier Anordnung beschreiben)</p>
3.1.2	<p>Abstand zwischen den Lichtmasten [m]</p>
3.1.3	<p>Abstand zwischen Schaltschrank/Verteiler und 1. Leuchte [m]</p>
3.1.4	<p>Anzahl der Masten, die von dem Verteiler/Schaltschrank gespeist werden.</p>
3.1.5	<p>Anzahl der Leuchtmittel/Verteiler</p>
3.1.6	<p>Anzahl der Lichtmasten/Verteiler</p>
3.1.7	<p>Weitere Bemerkungen</p>

6 Betriebsmittelbeschreibung dieser Anlage, bei denen bisher/in letzter Zeit/in den letzten Jahren „vermehrt/häufig“ Ausfälle/Störfälle/Probleme zu verzeichnen waren.	
Unter Betriebsmittel kann hier sowohl ein einzelnes Gerät fallen, als auch mehrere Geräte desselben Typs.	
6.1 Betriebsmittel im Schaltschrank/Verteiler	Art des Betriebsmittels (z. B. Schütz, ...)
	Hersteller
	Typenbezeichnung
	Wodurch hat sich der Ausfall geäußert?
	Welche Beobachtung wurde gemacht? (z. B. Abbrand Spule im Schütz)
	Wurden Beobachtungen hinsichtlich einer Gewitterfähigkeit in Zusammenhang mit dem Schaltzustand (Lampen ein/aus) bzw. der Störmeldung gemacht? (z. B. starke Gewitterfähigkeit bei ausgeschaltetem Zustand der Leuchten und in weiterer Folge Störmeldung bzw. Feststellung eines Defekts im „eingeschalteten“ Zustand)
Betriebsmittel 1	Bitte beantworten Sie in kurzen Sätzen folgende Fragen zu diesem Betriebsmittel: Wann wurde das Betriebsmittel eingebaut? Wie lange war es fehlerfrei in Betrieb? Wann kam es zum Ausfall? Wie viele dieser Betriebsmittel sind in welchem Zeitraum ausgefallen? Weitere Bemerkungen zu diesem Betriebsmittel

4 Anlagenstandort, Umgebungsbedingungen	
4.1	Name der Straße(n), des Platzes, etc.
4.2	Raum Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen städtisch (urban) Randbereich Stadt (suburban) ländlich (rural) Andere Raumzuordnung Bitte rechts angeben.
5 Anlagensteuerung	
Aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten der Anlagensteuerung/Managementsysteme bitte ich Sie die Steuerung der Anlage mit wenigen Sätzen zu beschreiben.	

	Weitere Bemerkungen zu diesem Betriebsmittel	
	Weitere Bemerkungen zu den Ausfällen/Störungen/Problemen der Betriebsmittel im Schalt-schrank/Verteiler	

Betriebsmittel 2	Art des Betriebsmittels	
	Hersteller	
	Typenbezeichnung	
	Wodurch hat sich der Ausfall geäußert? Welche Beobachtung wurde gemacht?	
	Wurden Beobachtungen hinsichtlich einer Gewitterfähigkeit in Zusammenhang mit dem Schaltzustand (Lampen ein/aus) bzw. der Störmeldung gemacht?	
Betriebsmittel 3	Wann wurde das Betriebsmittel eingebaut? Wie lange war es fehlerfrei in Betrieb? Wann kam es zum Ausfall? Wie viele dieser Betriebsmittel sind in welchem Zeitraum ausgefallen?	
	Weitere Bemerkungen zu diesem Betriebsmittel	
	Art des Betriebsmittels	
	Hersteller	
	Typenbezeichnung	
Betriebsmittel 3	Wodurch hat sich der Ausfall geäußert? Welche Beobachtung wurde gemacht?	
	Wurden Beobachtungen hinsichtlich einer Gewitterfähigkeit in Zusammenhang mit dem Schaltzustand (Lampen ein/aus) bzw. der Störmeldung gemacht?	
	Wann wurde das Betriebsmittel eingebaut? Wie lange war es fehlerfrei in Betrieb? Wann kam es zum Ausfall? Wie viele dieser Betriebsmittel sind in welchem Zeitraum ausgefallen?	

Betriebsmittel 2	Art des Betriebsmittels
	Hersteller
	Typenbezeichnung
	Schutzklasse
	Wodurch hat sich Ausfall geäußert?
	Welche Beobachtung wurde gemacht?
	Wurden Beobachtungen hinsichtlich einer Gewittertätigkeit in Zusammenhang mit dem Schaltzustand (Lampen ein/aus) bzw. der Störmeldung gemacht?
	Wann wurde das Betriebsmittel eingebaut? Wie lange war es fehlerfrei in Betrieb? Wann kam es zum Ausfall? Wie viele dieser Betriebsmittel sind in welchem Zeitraum ausgefallen?
	Weitere Bemerkungen zu diesem Betriebsmittel

Betriebsmittel 1	6.2 Betriebsmittel in Leuchte
	Art des Betriebsmittels (z. B. elektronisches Vorschaltgerät....)
	Hersteller
	Typenbezeichnung
	Schutzklasse
	Einbauort (z. B. Kabelübergangskasten, Höhe Leuchtmittel)
	Wodurch hat sich der Ausfall geäußert? Welche Beobachtung wurde gemacht? (z. B. Ausfall einzelner LEDs, Änderung Lichtfarbe, sichtbare Zerstörung/Durchschlag in Elektronik des Vorschaltgeräts)
	Wurden Beobachtungen hinsichtlich einer Gewittertätigkeit in Zusammenhang mit dem Schaltzustand (Lampen ein/aus) bzw. der Störmeldung gemacht? (z. B. starke Gewittertätigkeit bei ausgeschaltetem Zustand der Leuchten und in weiterer Folge Störmeldung bzw. Feststellung eines Defekts im „eingeschalteten“ Zustand)
	Wann wurde das Betriebsmittel eingebaut? Wie lange war es fehlerfrei in Betrieb? Wann kam es zum Ausfall? Wie viele dieser Betriebsmittel sind in welchem Zeitraum ausgefallen?
	Weitere Bemerkungen zu diesem Betriebsmittel

7	Schutzmaßnahmen der Anlage gegen transiente Überspannungen	
	In diesem Punkt soll geklärt werden, welche Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen vorgesehen waren.	
7.1	Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen im Schaltschrank/Verteiler	
7.1.1	Waren im Schaltschrank/Verteiler Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen vorgesehen? Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen	
	Ja (Bitte mit 7.1.2 fortfahren!)	
	Nein (Bitte mit 7.2 fortfahren!)	
7.1.2	Welche Schutzmaßnahme(n) gegen transiente Überspannungen war(en) im Schaltschrank/Verteiler vorgesehen?	
	Schutzmaßnahme gegen transiente Überspannungen im Schaltschrank/Verteiler	Hersteller Überspannungsschutz
		Typenbezeichnung
		Typ (z. B. Typ 2)
		Überspannungsschutz [kV]
		Wirkungsrichtung
		Einbaort Überspannungsschutz (z. B. unmittelbar in Zuleitung vor Schutz)
		Weitere Bemerkungen zu dieser Schutzmaßnahme
	Weitere Schutzmaßnahme gegen transiente Überspannungen im Schaltschrank/Verteiler	

Betriebsmittel 3	Art des Betriebsmittels	
	Hersteller	
	Typenbezeichnung	
	Schutzklasse	
	Wodurch hat sich Ausfall geäußert?	
	Welche Beobachtung wurde gemacht?	
	Wurden Beobachtungen hinsichtlich einer Gewitterfähigkeit in Zusammenhang mit dem Schaltzustand (Lampen ein/aus) bzw. der Störmeldung gemacht?	
	Wann wurde das Betriebsmittel eingebaut? Wie lange war es fehlerfrei in Betrieb? Wann kam es zum Ausfall? Wie viele dieser Betriebsmittel sind in welchem Zeitraum ausgefallen?	
	Weitere Bemerkungen zu diesem Betriebsmittel	
	6.3	Waren auch Ausfälle/Störfälle/Probleme bei Anlagen <u>außerhalb</u> der in diesem Dokument beschriebenen Anlage zu verzeichnen, die über eine eventuell vorhandene Fortschaltstelle mit dieser Anlage verbunden sind? Gibt es Zusammenhänge mit denen in 6.1 und 6.2 gemachten Angaben?

<p>7.2 Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen in der/den Leuchte(n)</p> <p>7.2.1 Schutz gegen transiente Überspannungen im Betriebsgerät/Vorschaltgerät</p> <p>Weiche Angaben macht der Hersteller des Betriebsgeräts/Vorschaltgeräts über den Schutz gegen transiente Überspannungen? (Stoßspannungsfestigkeit, Blitzschutz,...). Achtung: Nicht Überspannungsschutz gegen netzfrequente Überspannung. Bei Zutreffendem bitte rechts ein „x“ eintragen</p> <p>7.2.1.1 Der Hersteller des Betriebsgeräts/Vorschaltgeräts führt keine gesonderten Angaben zum Schutz gegen transiente Überspannungen an. Eine EMC-Immunität nach EN 61547 ist angegeben.</p> <p>7.2.1.2 Der Hersteller führt gesonderten Angaben zum Schutz gegen transiente Überspannungen an. (Bitte hier Hersteller-Angaben eintragen)</p>	<p>7.2.1.3 Die obigen Punkte 7.2.1.1 und 7.2.1.2 sind nicht zutreffend. Der Hersteller des Betriebsgeräts/Vorschaltgeräts macht folgende Angaben: (Bitte hier Hersteller-Angaben eintragen)</p> <p>7.2.2 Zusätzliche Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen in der/den Leuchte(n)</p> <p>(Zusätzliche) Schutzmaßnahme gegen transiente Überspannungen in der/den Leuchten</p> <p>Hersteller Überspannungsschutz</p> <p>Typenbezeichnung</p> <p>Typ (z. B. 2 oder 3)</p> <p>Überspannungsschutz [kV]</p> <p>Wirkungsrichtung</p> <p>Einbauort Überspannungsschutz (z. B. unmittelbar vor Betriebsgerät)</p> <p>Weitere Bemerkungen zu dieser Schutzmaßnahme</p>
---	--

<p>Weitere Bemerkungen zu den Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen im Schaltschrank/Verteiler</p>

TU Graz Untersuchungsvorhaben: Transiente Spannungen in lichttechnischen Anlagen

Weitere Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen in der/den Leuchten	
Weitere Bemerkungen zu den Schutzmaßnahmen gegen transiente Überspannungen in der/den Leuchten	
8 Sonstige Angaben, Bemerkungen zu dieser Anlage	