



Ines Stollwitzer, BSc

Maßnahmen zur Reduzierung der Überspannungsbeanspruchung und der Fehlerhäufigkeit einer 110-kV-Hochgebirgsfreileitung

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Dipl.-Ing. Ignaz Hübl (KNG - Kärnten Netz GmbH)

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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte mich in erster Linie bei Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack für die wissenschaftliche und fachliche Unterstützung während der gesamten Betreuungszeit bedanken. Trotz des dicht gedrängten Terminkalenders hatte er immer ein offenes Ohr für meine Anliegen und nahm sich, falls nötig, auch kurzfristig Zeit für eine Besprechung.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Plesch, der mich bei den transienten Berechnungen und Simulationen tatkräftig unterstützt hat. Danken möchte ich auch allen anderen Mitarbeitern am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, die mir während dieser Zeit zur Seite gestanden sind.

Bei der Kärnten Netz GmbH gilt mein Dank speziell Herrn Dipl.-Ing. Ignaz Hübl, für die Möglichkeit der Durchführung dieses interessanten Arbeitsthemas und die gute Kooperation. Ein Dankeschön geht auch an Herrn Dipl.-Ing. Georg Wurzer, für die rasche Bereitstellung der Daten und die angenehme und unkomplizierte Zusammenarbeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie und meinen Freunden, die mich während dieser Zeit beraten und mir geholfen haben, die Dinge von einem anderen Standpunkt aus zu betrachten. Ein ganz besonderer Dank gebührt jedoch meinen Eltern, die nie an meinem Tun gezweifelt und mir dieses Studium überhaupt erst ermöglicht haben.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit einer 110-kV-Hochgebirgsfreileitung in Kärnten, die von Oberdrauburg über die Kreuzeckgruppe nach Außerfragant verläuft. Die höher gelegenen Leitungsbereiche reichen bis auf eine Seehöhe von 2300 m und sind durch ihre exponierte Lage sehr empfindlich auf atmosphärische Entladungen. Wegen des felsigen Untergrundes und der damit verbundenen hohen Mastdungswiderstände stellen vor allem rückwärtige Überschläge ein Problem für den Netzbetreiber dar. Diese Umstände zeigen sich in der Fehlerhäufigkeit und somit auch in der Versorgungszuverlässigkeit.

Im Rahmen einer Studie aus dem Jahr 2003 wurde bereits ein Teil der Hochgebirgsleitung mit modernen Metalloxid-Überspannungsableitern ausgestattet. Durch diese Maßnahme konnte ein Großteil der durch atmosphärische Überspannungen verursachten mehrpoligen Fehler vermieden werden. Im Zuge dieser Masterarbeit soll nun ein weiterer Leitungsabschnitt mit Überspannungsableitern ausgerüstet werden. Um die Ableiter aus Kosten- und Montagegründen in Phase und Ort optimiert einzusetzen, wird ein Ausrüstungskonzept mit unterschiedlich aufwändigen Lösungsansätzen angestrebt.

Für die Ermittlung des Blitzgefährdungspotentials entlang der Hochgebirgsleitung wurden die vom Blitzortungssystem ALDIS zur Verfügung gestellten Daten über einen Zeitraum von zehn Jahren ausgewertet und analysiert. Dabei wurden unter anderem Blitzdichte und Amplitudenverteilung für den betrachteten Leitungsabschnitt aufbereitet.

Für die numerischen Berechnungen wurde die Hochgebirgsleitung im Programm EMTP-RV nachgebildet. Verschiedenste Variationsberechnungen und Sensibilitätsanalysen liefern wichtige Erkenntnisse in Bezug auf die Isolationskoordination und für die örtliche Positionierung der Überspannungsableiter.

Ein weiteres Kriterium stellen die vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellten und im Rahmen der Masterarbeit aufbereiteten Störungsdaten dar. Auch Geländefaktoren, wie die Exposition einzelner Maststandorte, fließen in die Ausrüstungsstrategie mit ein.

Als Resultat dieser Masterarbeit entsteht ein mehrteiliges Ausrüstungskonzept auf Basis verschiedener Entscheidungskriterien für die Ausstattung einer Freileitung im hochalpinen Gelände mit Leitungsableitern. Dabei wurden vier Konzeptstufen herausgearbeitet, die sich in Schutzwirkung, Aufwand bzw. Kosten unterscheiden, um dem Netzbetreiber eine Entscheidung im Sinne der Versorgungssicherheit zu erleichtern.

Schlagwörter:

Hochgebirgsleitung, Blitzortung, numerische Berechnungen, Überspannungsableiter, Versorgungszuverlässigkeit

Abstract

This Master Thesis deals with an existing 110 kV high alpine overhead line in Carinthia, which reaches up to 2300 m above sea level. Due to its exposed position, the higher located sectors are very sensitive to atmospheric discharges. Moreover, the stony ground in high alpine terrain implicates high tower footing resistances. Therefore, back flashovers are the main reason for lightning-caused outages, which also reflects in the fault statistic.

In 2003, one section of the overhead line has been equipped with modern metal-oxide line surge arresters. By taking this measure, most of the multipolar faults caused by atmospheric discharges could be avoided to maintain the supply of energy for consumers. Therefore, the usage of line surge arresters shall be extended to the rest of the towers located in the high alpine section. Because of cost and installation issues, a four-level concept is developed in this thesis to protect the overhead line optimally.

For the determination of the lightning risk potential, the atmospheric discharges along the overhead line were provided by the Austrian lightning detection system ALDIS. According to this data, the lightning activity from 2003 to 2013 has been newly evaluated.

For transient investigations, the high alpine overhead line was modelled in the numerical simulation programme EMTP-RV. By varying different parameters, several numerical calculations were carried out to make findings towards insulation coordination and the positioning of the surge arresters.

Moreover, the fault data offered by the transmission system operator was taken into consideration, as well as the special geographic situation and the exposure of the single towers.

As a result of this Master Thesis, a multiple concept for the equipment of a high alpine overhead transmission line with line surge arresters is developed. The four-level concept differs in protection, effort and costs in order to support the transmission system operator in finding an adequate solution in terms of a secure energy supply.

Keywords:

high alpine overhead line, line surge arrester, lightning detection, lightning outages, power quality

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Daten und Fakten zur Hochgebirgsleitung	2
2.1	Geografisches Leitungsprofil	2
2.2	Elektrische Daten.....	5
2.2.1	Masterdungswiderstände R_E	5
2.2.2	Spezifische Bodenwiderstände ρ	7
2.3	Ausrüstungsstand	8
2.4	Störungsanalysen des Netzbetreibers.....	9
3	Theoretische Grundlagen.....	11
3.1	Transiente Spannungen.....	11
3.2	Auswirkungen atmosphärischer Überspannungen	12
3.2.1	Direkter Einschlag ins Leiterseil.....	13
3.2.2	Direkter Einschlag ins Erdseil	14
3.3	Maßnahmen zum Schutz gegen Überspannungen	15
3.4	Überspannungsableiter.....	16
3.4.1	Wirkungsweise von Leitungsableitern bei direktem Blitzeinschlag	18
3.4.2	Wirkungsweise von Leitungsableitern bei rückwärtigen Überschlägen	18
4	Ortung atmosphärischer Entladungen an der Hochgebirgsleitung	20
4.1	Blitzortung in Österreich.....	20
4.2	Lokale Blitzortung mittels Korridoranalyse.....	22
4.2.1	Blitzdichte	23
4.2.2	Dichteverteilung der „Ground Strike Points“	24
4.2.3	Amplitudenverteilung	25
4.2.4	Polarität	26
5	Numerische Berechnungen mit EMTP-RV	27
5.1	Modellbildung	27

5.2	Randbedingungen	34
5.3	Variationsberechnungen.....	36
5.3.1	Erdseileinschläge.....	37
5.3.2	Leiteseileinschläge	47
5.4	Schlussfolgerungen	52
5.4.1	Erdseileinschläge.....	52
5.4.2	Leiteseileinschläge	53
6	Entscheidungskriterien für die Positionierung der Überspannungsableiter	54
6.1	Ergebnisse der Variationsberechnungen	54
6.2	Blitzortungsdaten	56
6.2.1	Korridoranalyse.....	56
6.2.2	Störungsanalysen	58
6.3	Geländefaktoren	59
6.4	Übersicht der Entscheidungskriterien.....	60
7	Ausrüstungskonzept mit Überspannungsableitern	62
	Stufe 1: Vollausrüstung	62
	Stufe 2: Vollausrüstung mit Ausnahme der störungsfreien Bereiche.....	62
	Stufe 3: Ausrüstung nach Geländefaktoren.....	63
	Stufe 4: Minimalausrüstung	64
8	Zusammenfassung	65
9	Verzeichnisse	67
9.1	Literaturverzeichnis.....	67
9.2	Abbildungsverzeichnis.....	69
9.3	Tabellenverzeichnis.....	73

1 Einleitung

Schlagworte wie Versorgungssicherheit und Power Quality sind für den Netzbetreiber heute von großer Bedeutung. Um die Zuverlässigkeit der Energieübertragung zu gewährleisten, kann und muss dieser, je nach Gegebenheiten, zu unterschiedlichen Maßnahmen greifen. Umgelegt auf das hier betrachtete, gelöschte 110 kV-Netz bedeutet dies, dass mehrpolige Fehler zur Aufrechterhaltung der Spannungsqualität unbedingt vermieden werden müssen.

Wie eine Studie aus dem Jahr 2003 belegt, hat sich im Fall der hier betrachteten hochgebirgigen Freileitung der Einsatz von modernen Metalloxid-Überspannungsableitern bewährt (siehe [1]). Bereits damals wurde ein kleiner Teil der Freileitung mit Leitungsableitern ausgestattet, um einen lückenlosen Betrieb trotz der schlechten Erdungsverhältnisse und erhöhten Gewittertätigkeit gewährleisten zu können. Auf Grund der vorangegangenen positiven Erfahrungen soll nun auch der restliche hochalpine Leitungsabschnitt, der allerdings die dreifache Anzahl an Masten umfasst, diesem Beispiel folgen. Für den Netzbetreiber ist daher aus wirtschaftlichen Gründen ein optimiertes Konzept für die Ausrüstung der Hochgebirgsleitung notwendig.

Im einleitenden Teil dieser Arbeit werden alle relevanten Daten und Fakten der Hochgebirgsleitung, wie beispielsweise das Leitungsprofil oder der Verlauf der Masterdungswiderstände, vorgestellt.

In den theoretischen Grundlagen werden unter anderem die Auswirkungen atmosphärischer Entladungen und die Maßnahmen zum Schutz gegen Überspannungen erläutert. Anschließend wird auf den Aufbau und die Funktion des Überspannungsableiters eingegangen.

In Kapitel 4 werden zunächst die Blitzortung in Österreich, sowie einige wichtige Begriffe allgemein beschrieben. Anschließend erfolgt die Evaluierung der lokalen Blitzaktivität entlang der Hochgebirgsleitung aus den zur Verfügung gestellten Blitzortungsdaten.

Kapitel 5 widmet sich den numerischen Berechnungen und der Nachbildung der Hochgebirgsleitung als Leitungsmodell. Die anschließend durchgeführten Variationsberechnungen und daraus gezogenen Schlussfolgerungen liefern dabei einen wichtigen Beitrag zur Bildung des Ausrüstungskonzeptes.

Im nachfolgenden Kapitel werden alle Entscheidungskriterien für die örtliche Positionierung der Leitungsableiter aufgelistet. Dazu zählen neben den Ergebnissen aus der Blitzortung und den numerischen Berechnungen auch andere Kriterien, wie etwa das Geländeprofil oder die Störungsaufzeichnungen des Netzbetreibers.

Schlussendlich wird ein Ausrüstungskonzept mit unterschiedlich aufwändigen Lösungsansätzen präsentiert, das dem Netzbetreiber als Entscheidungshilfe zur Ausstattung der Hochgebirgsleitung mit Leitungsableitern dienen soll.

2 Daten und Fakten zur Hochgebirgsleitung

In diesem Kapitel werden alle relevanten Daten und Fakten der Hochgebirgsleitung (HGL) vorgestellt, die zur örtlichen Positionierung der Überspannungsableiter beitragen. Dazu zählen sowohl die geografischen, als auch die elektrischen Daten und der derzeitige Ausrüstungsstand mit Überspannungsableitern. Die Störungsstatistiken geben einen Aufschluss über die Fehlerrate der Freileitung, verursacht durch atmosphärische Entladungen. Die Daten wurden vom Netzbetreiber, der KNG – Kärnten Netz GmbH, zur Verfügung gestellt.

2.1 Geografisches Leitungsprofil

Die betrachtete HGL umfasst 108 Masten und erstreckt sich auf einer Länge von 29,49 km vom Umspannwerk Oberdrauburg über die Kreuzeckgruppe zum Umspannwerk Außerfragant in Kärnten.

Zur besseren Übersichtlichkeit wird die Leitung in fünf Abschnitte unterschiedlicher Länge gegliedert. In Abb. 1 sind die Längenangaben der Leitungsabschnitte, sowie die Mastnummern angeführt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den hochalpinen Leitungsabschnitten 3 und 4, da diese in Bezug auf atmosphärische Entladungen besonders gefährdet sind.

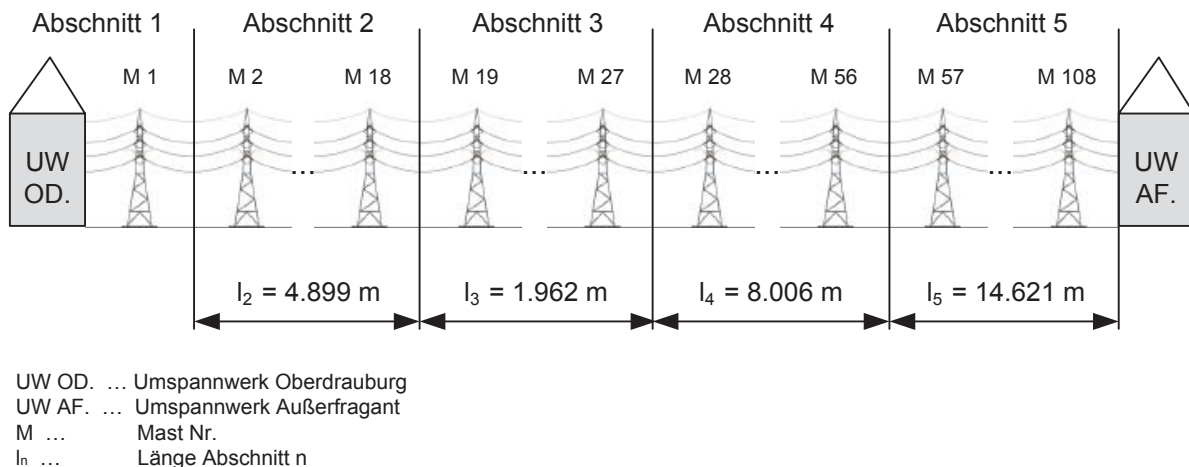


Abb. 1: Einteilung der HGL in 5 Abschnitte, mit Längenangaben für jeden Abschnitt
 (Datenquelle: KNG)

Dies wird in Abb. 2 verdeutlicht, wo die einzelnen Maststandorte nach der Seehöhe aufgetragen sind. Die Abschnitte 1, 2 und 5 und somit circa zwei Drittel der HGL liegen in tieferen Lagen bzw. im Tal. Abschnitt 3 liegt auf einer Seehöhe von 1400 m bis 2100 m, während Abschnitt 4 bis auf den höchsten Punkt der Freileitung, auf 2300 m Seehöhe reicht.

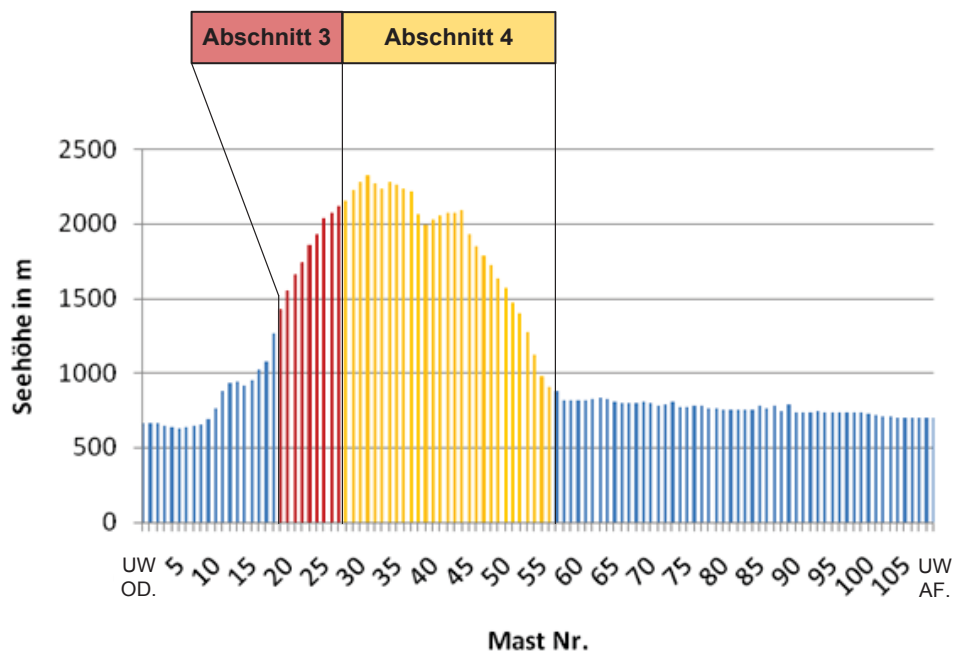


Abb. 2: Höhenprofil der HGL: hervorgehoben sind die hochalpinen Leitungsabschnitte 3 und 4, die Masten reichen bis auf 2300 m Seehöhe (Datenquelle: KNG)

Abb. 3 gibt einen Einblick in den Leitungsverlauf im noch nicht mit Leitungsableitern ausgestatteten Abschnitt 4. Weit über der Baumgrenze, an Geländekanten platzierte Masten bergen ein hohes Risiko für Leitungsschäden, verursacht durch Blitzschlag.

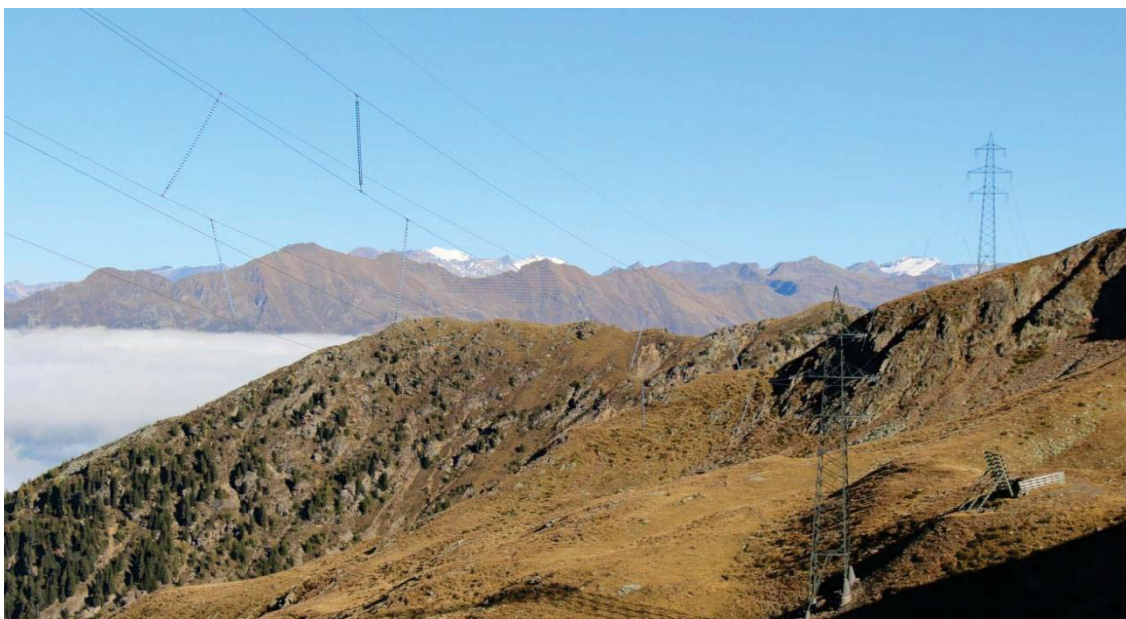


Abb. 3: Verlauf der HGL in Leitungsabschnitt 4: Blick von Mast 32 Richtung Norden zu den Masten 33 und 34

Die HGL verläuft auf der Nord-Süd-Achse über die Kreuzeckgruppe vom Drau- ins Mölltal in Kärnten. In Abb. 4 ist die kartografische Ansicht der höher gelegenen Leitungsabschnitte 3 und 4 sichtbar. Der rot markierte Abschnitt 3 ist bereits mit Leitungsableitern ausgestattet, für den gelb gekennzeichneten Abschnitt 4 soll im Zuge dieser Masterarbeit ein Ausrüstungskonzept entstehen.

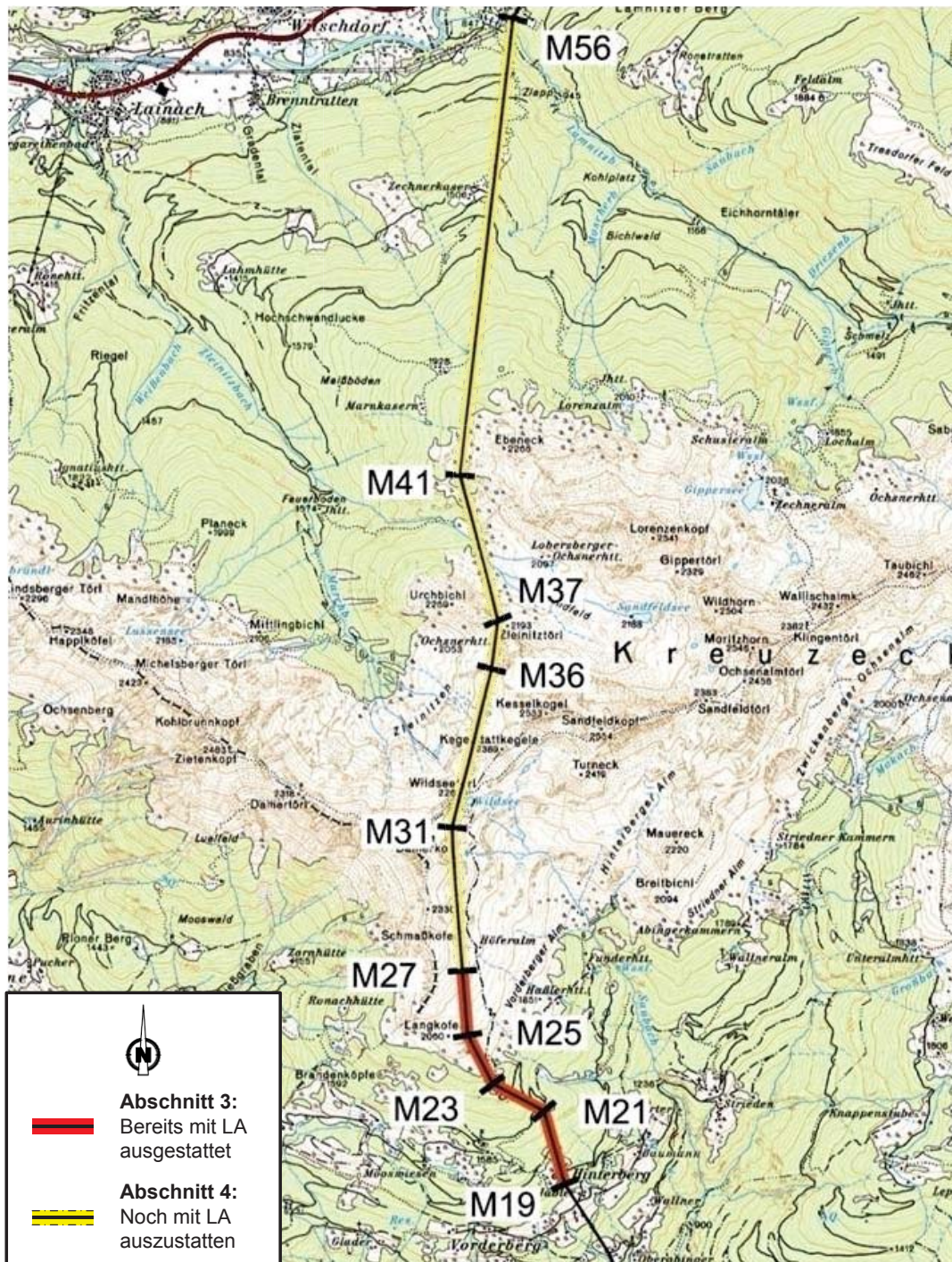


Abb. 4: Leitungsverlauf der höher gelegenen Leitungsbereiche über die Kreuzeckgruppe [1]

2.2 Elektrische Daten

Die HGL wird als Doppelsystem im gelöschten Netz mit einer Nennspannung von 110 kV betrieben, die maximal zulässige Spannung für Betriebsmittel ist mit 123 kV angegeben. Für diese Spannungsebene ist eine Bemessungs-Blitzstoßspannung von 550 kV vorgesehen, abhängig davon ist die Mindest-Luftstrecke¹ von Leiter gegen Erde mit 1100 mm (Tab. 1). [2], [3]

Tab. 1: Allgemeine elektrische Daten zur HGL [2], [3]

Nennspannung U_n	110 kV
Höchste zulässige Betriebsspannung U_m	123 kV
Bemessungs-Blitzstoßspannung	550 kV
Mindest-Luftstrecke	1100 mm

Im gelöschten Netz haben einpolige Erdschlüsse keinerlei Auswirkungen auf die Spannungsqualität. [1]

Mehrpole Kurzschlüsse sollen durch die Anwendung von Überspannungsableitern vermieden werden.

2.2.1 Masterdungswiderstände R_E

Die HGL ist gekennzeichnet durch extrem schlechte Erdungsverhältnisse auf Grund des felsdurchsetzten Untergrundes. Die hohen Erdungswiderstände der einzelnen Masten stellen eine große Herausforderung für den Netzbetreiber dar, da die Gefahr von rückwärtigen Überschlägen besteht.

Die Masterdungswerte bewegen sich in einem Bereich von knapp 10 Ω bis hin zu über 400 Ω und sind starken Schwankungen unterworfen (Abb. 5). Der höchste Wert tritt dabei im noch nicht mit Ableitern ausgestatteten Abschnitt 4 an Mast Nr. 42 auf. Die dargestellten Messwerte wurden vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellt.

¹ Anmerkung: Ohne Berücksichtigung der Höhenlage (siehe Kapitel 3.4)

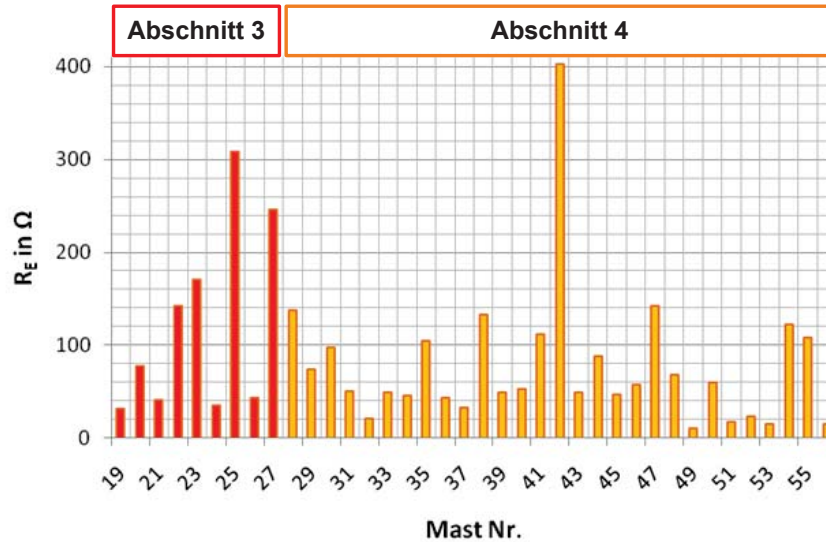


Abb. 5: Verlauf der Masterdangswerte von Abschnitt 3 (Mast Nr. 19 bis 27) und Abschnitt 4 (Mast Nr. 28 bis 56) (Datenquelle: KNG)

Die Masterdangswiderstände aus Leitungsabschnitt 4 werden vereinfachend in drei Gruppen klassifiziert (Abb. 6):

- *Sehr kritisch*: $R_E > 200 \Omega$ (rot)
- *Kritisch*: $53 \Omega < R_E < 200 \Omega$ (orange)
- *Mäßig kritisch*: $R_E < 53 \Omega$ (gelb)

Der mit Abstand höchste Wert findet sich an Mast Nr. 42 mit 402Ω , dieser wird deshalb als *sehr kritisch* eingestuft. Als *kritisch* werden jene 13 Masten eingestuft, deren Masterdangswiderstand zwischen 53Ω und 200Ω liegt, als *mäßig kritisch* die restlichen 15 Masten unter 53Ω .

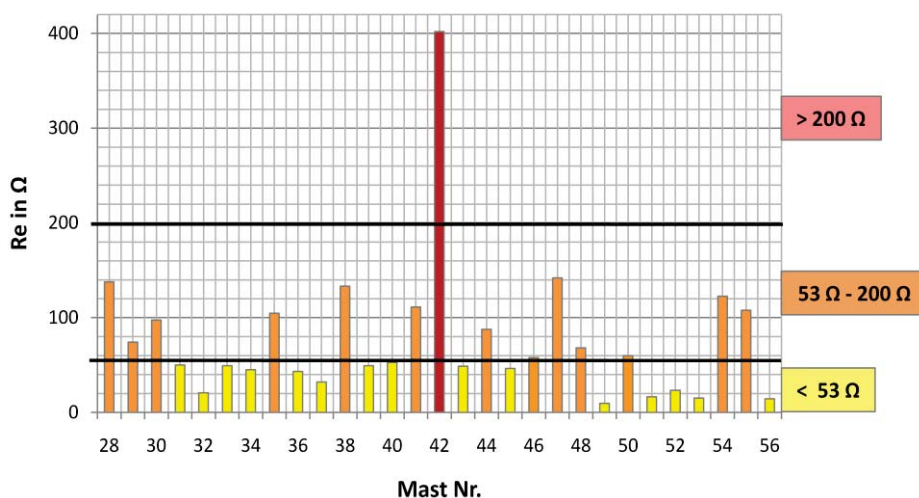


Abb. 6: Klassifizierung der Masterdangswiderstände R_E in Abschnitt 4 nach der Höhe des Widerstandes (Datenquelle: KNG)

Der Grenzwert von 53Ω stützt sich auf den berechneten Medianwert der Masterdungswiderstände in Abschnitt 4 (Tab. 2). Statistisch betrachtet liegen über 70% der Masterdungswiderstände in Abschnitt 4 unter 100Ω , knapp 50% sogar unter 50Ω . Alle Werte, die über dem 50%-Wert von $52,7 \Omega$ liegen, werden als *kritisch* betrachtet. Im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert, ist der Median robuster gegenüber extrem abweichenden Werten, wie an Mast Nr. 42.

Tab. 2: Statistische Auswertung für die Masterdungswiderstände R_E in Abschnitt 4

Wertebereich	Anzahl Masten	in %
> 400 Ω	1	3,5
301 - 400 Ω	0	0
201 - 300 Ω	0	0
101 - 200 Ω	7	24,1
0 - 100 Ω	21	72,4
davon 0 - 50 Ω	14	48,3
Mittelwert = 76,66 Ω		
Median = 52,70 Ω		

2.2.2 Spezifische Bodenwiderstände ρ

Auch die spezifischen Bodenwiderstände wurden vom Netzbetreiber erfasst und erreichen in den hochalpinen Lagen Werte bis zu knapp $50 \text{ k}\Omega\text{m}$ (Abb. 7). Der höchste spezifische Widerstand wurde an Mast Nr. 36 gemessen, während an Mast Nr. 40 scheinbar vergleichsweise günstige Erdungsbedingungen herrschten.

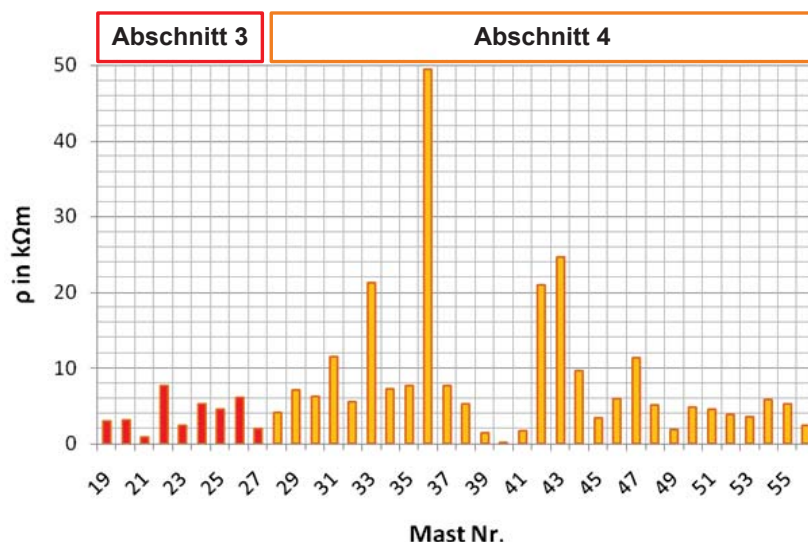


Abb. 7: Verlauf des spezifischen Bodenwiderstandes in den hochalpinen Lagen der Abschnitte 3 und 4 von Süden nach Norden (Datenquelle: KNG)

Zwischen dem Mastausbreitungswiderstand und dem spezifischen Bodenwiderstand besteht laut Literatur ein proportionaler Zusammenhang (vgl. [4]). Vergleicht man die Messwerte von beiden entlang der HGL, lassen sich jedoch keine Parallelen erkennen.

Da die Messwerte des spezifischen Bodenwiderstandes je nach Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit des Bodens, etc.) stark schwanken können und zu den Messungen keine genaueren Informationen vorhanden sind, wird für die weiteren Betrachtungen lediglich der Masterdungswiderstand herangezogen.

2.3 Ausrüstungsstand

Der derzeitige Ausrüstungsstand beschränkt sich auf die beiden Umspannwerke, in denen alle Phasen beider Systeme durch Ableiter geschützt werden, sowie auf die installierten Leitungsableiter in Abschnitt 3. Alle neun Masten (Nr. 19 bis 27) wurden mit je vier Leitungsableitern an den unteren und mittleren Auslegern bestückt, dies entspricht einer Ausstattung von zwei Ableitern pro System. Aus Gründen der Maststatik ist eine Ausstattung des oberen Auslegers laut Netzbetreiber nicht möglich.

Der auszustattende Abschnitt 4 weist die vierfache Länge und etwa die dreifache Mastanzahl (29 Masten) vom bereits ausgestatteten Abschnitt 3 auf (Tab. 3).

**Tab. 3: Gegenüberstellung der Eckdaten der hochalpinen Leitungsabschnitte 3 und 4
(Datenquelle: KNG)**

	Anzahl Masten	Mast Nr.	Leitungslänge	Ausstattung mit LA
Abschnitt 3	9	M19 – M27	1962 m	Mittlerer und unterer Ausleger (Phase L3 und L2)
Abschnitt 4	29	M28 – M56	8006 m	keine

In Abb. 8 ist ein Teil des mit Überspannungsableitern ausgestatteten Leitungsabschnittes 3 ersichtlich, die Ableiter sind jeweils unter dem mittleren und unteren Ausleger montiert. Der Blick zeigt von Mast 28, Beginn des Leitungsabschnittes 4, nach Süden Richtung Oberdrauburg zu Mast 27.



Abb. 8: Abschnitt 3 ist bereits mit Leitungsableitern ausgestattet: Blick von Mast 28 Richtung Süden zu den Masten 27 bis 25

2.4 Störungsanalysen des Netzbetreibers

Die Störungen an der HGL wurden vom Netzbetreiber aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Zu den Störungen zählen mehrpolige Kurzschlüsse mit und ohne Erdberührung, einpolige Erdschlüsse und Doppelerdschlüsse. Sogenannte Erdschlusswischer, also kurzzeitig anstehende einpolige Erdschlüsse, werden nicht als Störungen gewertet.

In Abb. 9 ist die Anzahl der Störungen an der HGL im Zeitraum 2004 bis 2013 ersichtlich, wobei im Jahr 2008 mit Abstand die meisten Störungen durch atmosphärische Entladungen auftraten. Störungen verursacht auf Grund von Eisabwurf, Seilriss oder anderen technischen Gebrechen sind in der Grafik nicht angeführt.

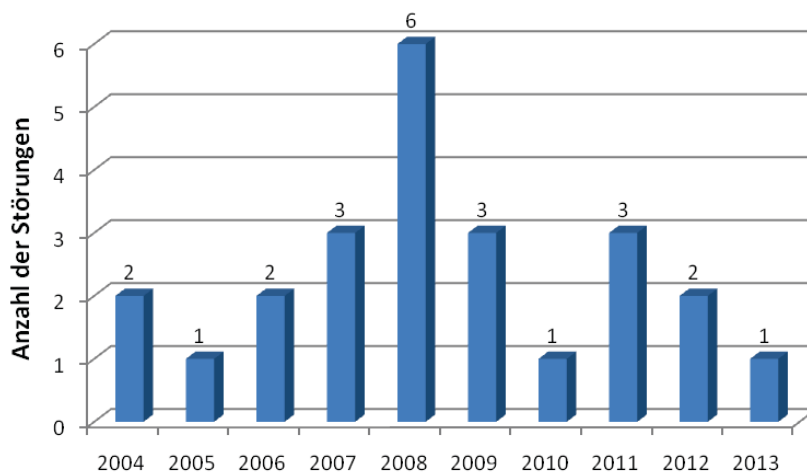


Abb. 9: Anzahl der Störungen verursacht durch atmosphärische Entladungen an der HGL im Zeitraum 2004 bis 2013 (Quelle: KNG)

In Abb. 10 ist die Anzahl der Störungen durch Blitzeinwirkung nach Monaten aufgetragen. Die meisten Störungen treten in den Sommermonaten auf, wo die Gewitteraktivität in der Regel am größten ist.

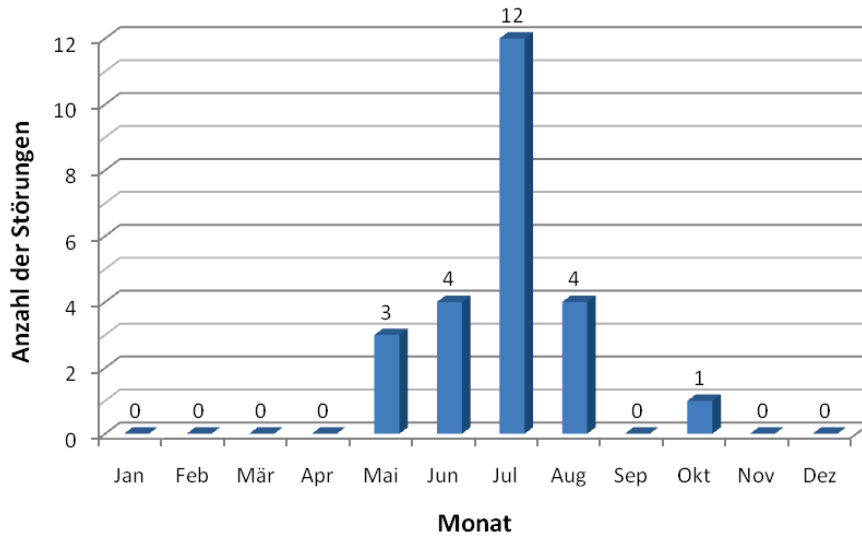


Abb. 10: Störanfällige Monate der HGL im Zeitraum 2004 bis 2013 (Quelle KNG)

3 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für die weiteren transienten Betrachtungen erläutert. Diskutiert werden die Auswirkungen atmosphärischer Entladungen und die Schutzmöglichkeiten auf Freileitungen, mit Schwerpunkt auf dem Einsatz von Überspannungsableitern.

3.1 Transiente Spannungen

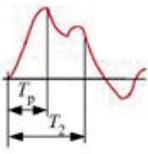
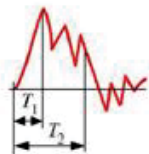
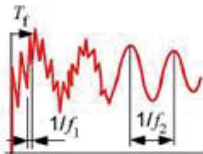
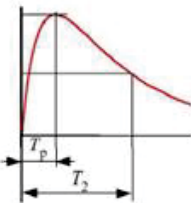
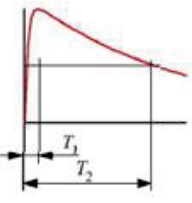
Transiente Spannungen bzw. Überspannungen treten im Allgemeinen beim Übergang von einem stationären Energiezustand in einen anderen auf und haben unterschiedliche Ausgleichsvorgänge zur Folge. Im elektrotechnischen Sinn ist unter dem Begriff *transiente Spannung* eine nicht betriebsfrequente Spannung zu verstehen. [5]

Transiente Spannungen			
Spannungsart	Atmosphärische Überspannungen ("äußere Überspannungen")	Schaltspannungen, Fehler ("innere Überspannungen")	
Vorkommen	gesamter Bereich der Hochspannungssysteme	Freiluft- und Innenraumanlagen	gasisolierte Schaltanlagen
Überspannungs- kategorie	schnell ansteigende Überspannungen	langsam ansteigende Überspannungen	Sehr schnell ansteigende Überspannungen
Frequenzbereich	10 kHz bis 5 MHz	bis 20 kHz	100 kHz bis 300 MHz

Abb. 11: Einteilung transienter Spannungen in äußere und innere Überspannungen (vgl. [5])

Grundsätzlich können transiente Spannungen in äußere und innere Überspannungen gegliedert werden (Abb. 11). Zu den äußeren Überspannungen zählen die atmosphärischen Überspannungen, da sie durch äußere Einflüsse wie Blitzentladungen verursacht werden. Diese können im gesamten Hochspannungssystem auftreten und gehören zur Kategorie der schnell ansteigenden Überspannungen, in einem Frequenzbereich von 10 kHz bis 5 MHz. Die inneren Überspannungen oder Schaltspannungen können in langsam ansteigende Überspannungen (in Freiluft- und Innenraumanlagen) und sehr schnell ansteigende Überspannungen (in gasisolierten Schaltanlagen) gegliedert werden.

Amplituden und Zeitverläufe der äußeren Überspannungen sind sehr starken Schwankungen unterworfen. Charakteristisch sind jedoch ein schneller Spannungsanstieg im Sekundenbereich und ein langsamer Rückenabfall des Überspannungsimpulses. Für die Prüfung von elektrischen Betriebsmitteln wird deshalb eine genormte Blitzstoßspannung mit einer Stirnzeit $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ und einer Rückenhalbwertszeit von $T_2 = 50 \mu\text{s}$ festgelegt (Abb. 12). [6]

Kategorie	transient		
	langsamer Anstieg	schneller Anstieg	sehr schneller Anstieg
Überspannungsformen			
Bereich der Überspannungsformen	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5\,000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Genormte Spannungsform	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2\,500 \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a)
Genormte Stehspannungsprüfung	Schaltstoßspannungsprüfung	Blitzstoßspannungsprüfung	a)

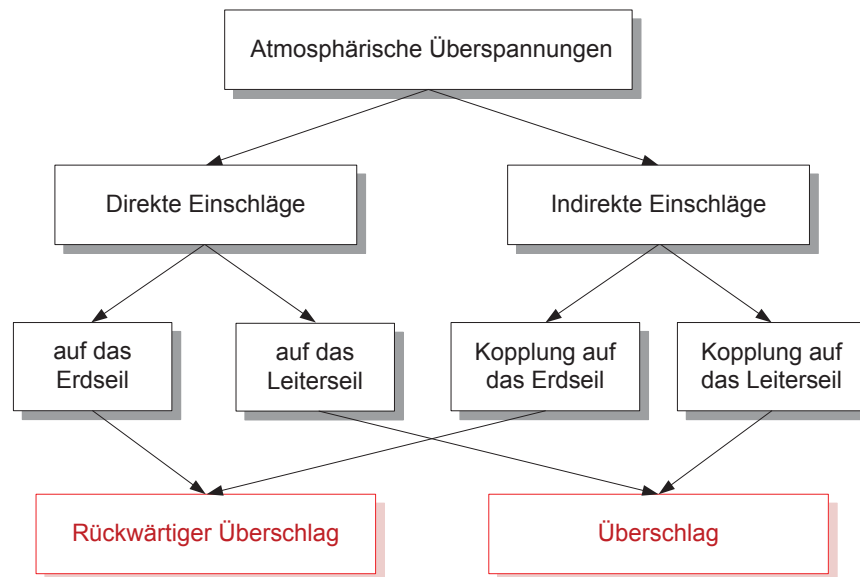
a) Festzulegen durch das zuständige Geräte-Komitee.

Abb. 12: Kategorien und genormte Spannungsformen von transienten Überspannungen (vgl. [7])

3.2 Auswirkungen atmosphärischer Überspannungen

Atmosphärische Überspannungen können durch direkte und indirekte (leitungsnahe) Einschläge verursacht werden (Abb. 13). Direkte Leitungseinschläge treten entweder in Form von Erdseil- oder Phasenseileinschlägen auf. Bei indirekten Einschlägen in die unmittelbare Umgebung der Leitung kommt es durch Kopplung auf das Erdseil und die Phasenseile zu induzierten Überspannungen auf diesen. In beiden Fällen kann es zu Überschlägen am Isolator vom Phasenseil zur Mastkonstruktion („Überschlag“), als auch zu Überschlägen vom Mast auf das Phasenseil („rückwärtiger Überschlag“) kommen. [1]

Indirekte Blitzschläge kommen zwar weit häufiger als direkte Einschläge vor, die Spannungsbeanspruchung ist im Vergleich jedoch relativ gering (in der Regel unter 400 kV) und somit für Übertragungsleitungen über 72,5 kV vernachlässigbar. [7]

**Anmerkung:**

„Überschlag“: bei Überschreitung der Isolationsfestigkeit von aktiven zu geerdeten Teilen

„Rückwärtiger Überschlag“: bei Überschreitung der Isolationsfestigkeit von geerdeten zu aktiven Teilen

Abb. 13: Auswirkungen atmosphärischer Überspannungen und deren mögliche Folgen [1]

Bei Blitzeinschlägen in geerdete Teile gehorcht die Stromaufteilung ebenfalls den Wanderwellengesetzen. Die Stoßimpedanz wird durch den Wellenwiderstand des Erdseiles und Mastes, hauptsächlich jedoch durch den Stoßerdungswiderstand R_{St} bestimmt. Dieser ist von der Art des Erdbodens, der Elektrodenform und der Elektrodenausdehnung abhängig und weicht vom Ausbreitungswiderstand für technischen Wechselstrom in der Regel ab. [1]

Rückwärtige Überschläge sind im Allgemeinen nicht zu erwarten, wenn der Stoßerdungswiderstand folgender Beziehung folgt: [8]

$$R_{St} \leq \frac{U_{St}}{I_{St}} \quad \begin{array}{l} R_{St} \dots \text{Stoßerdungswiderstand des Mastes} \\ U_{St} \dots \text{Bemessungs-Blitzstoßspannung} \\ I_{St} \dots \text{Scheitelwert des Blitzstromes am Mast} \end{array} \quad (3.1)$$

Der Stoßerdungswiderstand eines Erders weicht mehr oder weniger von seinem Ausbreitungswiderstand R_E ab. Bei Erdern geringer räumlicher Ausdehnung, kann er näherungsweise gleich dem Ausbreitungswiderstand gesetzt werden. [8]

3.2.1 Direkter Einschlag ins Leiterseil

Bei einem direkten Blitzeinschlag ins Leiterseil (1) kann es zu einem Überschreiten der Spannungsfestigkeit am nächstgelegenen Isolator und somit zum Überschlag auf den Mast (2) kommen (siehe Abb. 14). Ein Teil des Stromes wird über den Mast gegen Erde und über das Erdseil abgeleitet, der andere Teil fließt in Form von Wanderwellen am Phasenseil weiter und kann je nach Höhe der Amplituden an den nachfolgenden Masten zu weiteren

Überschlägen führen (3). Durch das Ableiten des Teilblitzstromes über den Mastfuß kommt es zu einer Potenzialanhebung am Mast infolge des Stoßerdungswiderstandes (4). Bei schlechten Erdungsverhältnissen kann dies wiederum zum Überschreiten der Spannungsfestigkeit an den Isolatoren der nicht betroffenen Phasen und somit zu einem rückwärtigen Überschlag führen (5). [1]

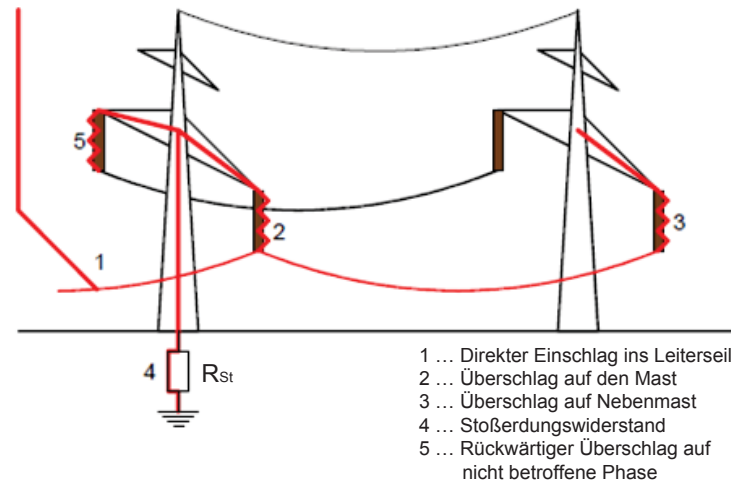


Abb. 14: Leitung ohne Schutzarmaturen bei direktem Einschlag ins Phasenseil [1]

3.2.2 Direkter Einschlag ins Erdseil

Bei einem direkten Blitzeinschlag in das Erdseil oder den Mast (1) kommt es durch das Ableiten des Blitzstromes über den Mast infolge des Stoßerdungswiderstandes (2) zu einer Potenzialanhebung am Mastportal, was bei Überschreiten der Spannungsfestigkeit an den Isolatoren zu einem rückwärtigen Überschlag auf die Phasenseile (3) führen kann (Abb. 15).

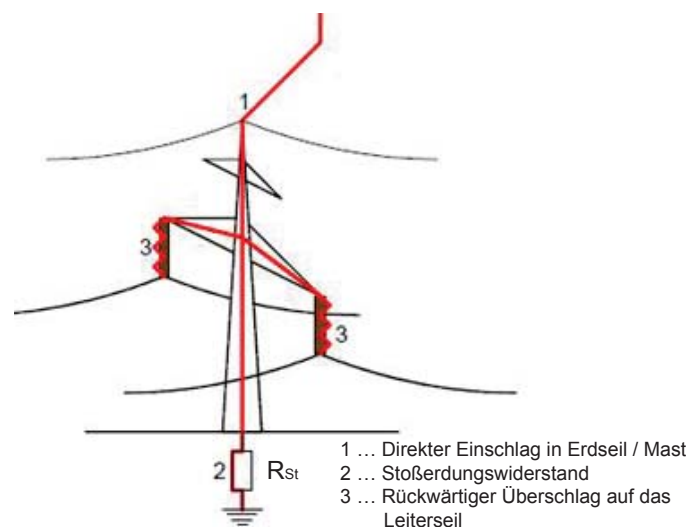


Abb. 15: Leitung ohne Schutzarmaturen bei direktem Einschlag in den Mast [1]

Bei einer Freileitung in der Ebene betreffen atmosphärische Überspannungen zum Großteil das Erdseil. Bedeutend geringer ist die Wahrscheinlichkeit eines direkten Masteinschlages oder gar eines Leiterseileinschlages. Darüberhinaus ist bei der Tonnenmastform mit relativ geringer Masthöhe ein Blitzeinschlag nur in den oberen, und seltener in den mittleren Ausleger möglich. Der untere Ausleger wird durch den Schutzbereich des mittleren Auslegers abgedeckt, die Wahrscheinlichkeit für einen Einschlag geht gegen null (vgl. [9]).

Bei einer Freileitung in unebenem Gelände können solche Aussagen jedoch nicht mehr pauschal getroffen werden und es müsste für jeden Mast bzw. jedes Spannungsfeld eine eigene Berechnung durchgeführt werden.

3.3 Maßnahmen zum Schutz gegen Überspannungen

Um eine Freileitung gegen Überspannungen zu schützen, stehen dem Netzbetreiber unterschiedliche Maßnahmen zur Verfügung (Abb. 16). Bei bestehenden Freileitungen ist die Trassenführung bereits vorgegeben. Ebenso sind bei Übertragungsleitungen in der Regel Schutzfunkenstrecken und ein Erdseil vorhanden.

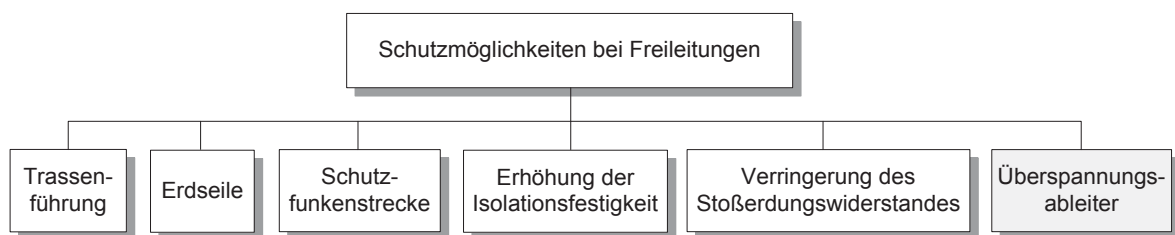


Abb. 16: Schutzmöglichkeiten bei Freileitungen gegen Überspannungen [1]

- **Zusätzliche Erdseile**

Durch das Anbringen zusätzlicher Erdseile (sofern baulich möglich) kann der Schutzbereich wesentlich vergrößert werden und somit das Einschlagsrisiko von Blitzeinschlägen mit hohen Stromamplituden für die Phasenseile reduziert werden.

- **Erhöhung der Isolationsfestigkeit**

Durch ein Verlängern der Isolatoren kann die Steh-Blitzstoßspannung und somit die Isolationsfestigkeit zwischen dem Mastpotential und den Phasenseilen erhöht werden. Bei hohen Masterdungswiderständen ist dies jedoch nur bedingt sinnvoll und auch nicht bei jeder Mastkonfiguration möglich.

Überspannungsableiter verhindern das Überschlagen an den Isolatoren durch ihre extrem nichtlineare Spannungs-Strom-Kennlinie und reduzieren die Wahrscheinlichkeit eines rückwärtigen Überschlages somit auf ein Minimum. Das Verhalten von Überspannungsableitern wird im folgenden Kapitel genauer beschrieben.

- **Verringerung des Stoßerdungswiderstandes**

Durch eine Reduktion des Stoßerdungswiderstandes kann das transiente Mastpotential bei der Ableitung von Blitzströmen gesenkt und dadurch die Gefahr von rückwärtigen Überschlügen auf die Phasenseile verringert werden. Diese Maßnahme ist jedoch aufwändig und speziell im Hochgebirge bei felsigem Untergrund nur selten möglich.

- **Überspannungsableiter**

Der Einsatz von modernen Metalloxid-Überspannungsableitern stellt heute ein wesentliches Schutzelement dar. Durch die extrem nichtlineare Spannungs-Strom-Kennlinie der Überspannungsableiter werden Überschlüge an den Isolatoren verhindert (siehe Kapitel 3.4).

3.4 Überspannungsableiter

Heute werden zum Schutz von Hochspannungsfreileitungen beinahe ausschließlich moderne funkenstreckenlose Metalloxid-Überspannungsableiter verwendet.

Im Ableiter befinden sich Ableitwiderstände aus Metalloxid, welche eine extrem nichtlineare Spannungs-Strom-Kennlinie aufweisen (Abb. 17). Die im Bereich der möglichen anliegenden betriebsfrequenten Spannungen fließenden Ströme sind so gering, dass der Ableiter sich beinahe wie ein Isolator verhält. Werden dem Ableiter jedoch Stoßströme im kA-Bereich eingepreßt, wie es beim Auftreten von Blitzüberspannungen der Fall ist, bleibt die resultierende Spannung an seinen Anschlussklemmen niedrig genug, um die Isolation der zugeordneten Betriebsmittel vor den Auswirkungen der Überspannungen zu schützen. [10]

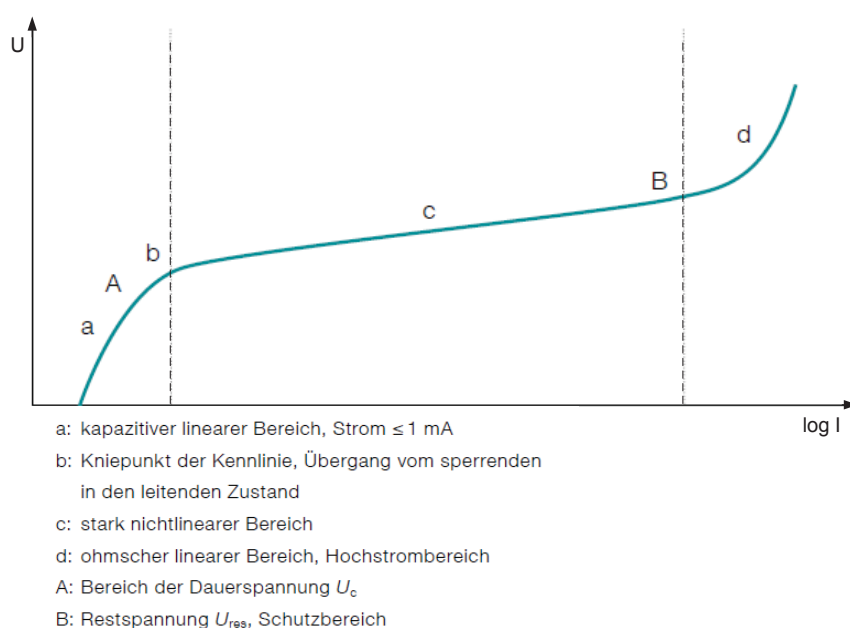


Abb. 17: Spannungs-Strom-Kennlinie eines Überspannungsableiters [11]

Abb. 18 zeigt den Aufbau eines Metalloxid-Überspannungsableiters mit Porzellanengehäuse für den Einsatz in Hochspannungsnetzen. Die Metalloxid-Widerstandssäule mitsamt zugehöriger Stützkonstruktion bildet den eigentlichen Aktivteil des Ableiters. Die Säule besteht aus einzelnen, übereinandergestapelten Metalloxid-Widerständen. Ihr Durchmesser liegt im Bereich von 30 mm in Mittelspannungsnetzen bis hin zu 100 mm für Hoch- und Höchstspannungsnetze. Die Höhe variiert dabei von 20 mm bis 45 mm. Das Volumen eines solchen Ableiters ist die bestimmende Größe für das Energieaufnahmevermögen, die Strombelastbarkeit und den Schutzpegel. [10]

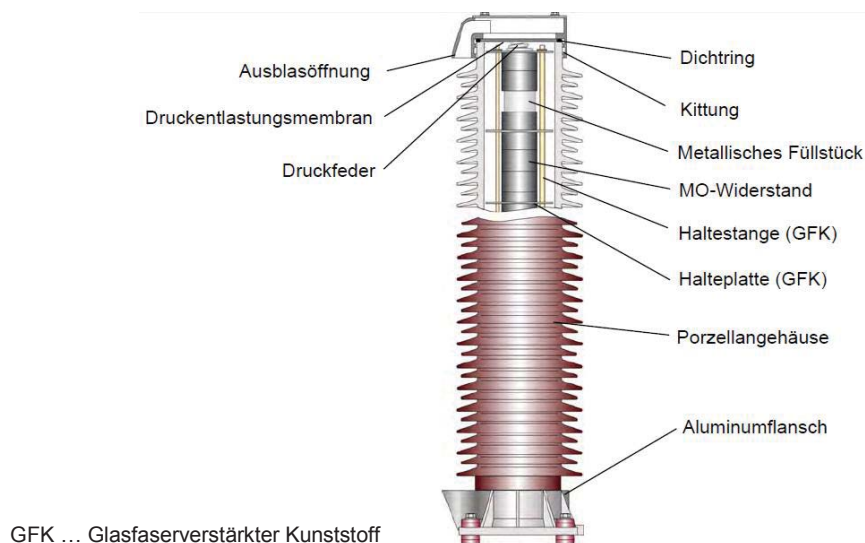


Abb. 18: Schnitt durch ein Bauglied eines Metalloxid-Ableiters mit Porzellanengehäuse [10]

Für den Einsatz von Überspannungsableitern in höheren Lagen ist auf die Notwendigkeit einer Gehäuseanpassung zu verweisen. Ab einer bestimmten Seehöhe ist die Dichte der Luft so weit abgesunken, dass die Haltespannung der Ableitergehäuse nicht mehr ausreicht und es zu einem äußeren Überschlag kommt. Für diesen Fall muss der unveränderte Aktivteil der Ableiter in einem verlängerten Gehäuse mit entsprechend größerer Schlagweite untergebracht werden.

Als Richtwert kann man annehmen, dass bei einer Einsatzhöhe oberhalb von 1800 m Seehöhe die Schlagweite des Ableitergehäuses um 12 % je 1000 m Höhe vergrößert werden muss. Bei Ableitern für die unteren Spannungsebenen sind die Schlagweiten jedoch von vornherein relativ großzügig gewählt, sodass die Mindestanforderungen an die Haltespannung in der Regel übertroffen werden. Es sollte also von Fall zu Fall nachgeprüft werden, ob eine Gehäuseanpassung tatsächlich notwendig ist. [11]

3.4.1 Wirkungsweise von Leitungsableitern bei direktem Blitzeinschlag

Bei Vorhandensein von Überspannungsableitern parallel zu den Isolatorketten (Abb. 19) wird bei einem Blitzeinschlag in das Phasenseil (1) ein Teil des Blitzstromes über den nächstgelegenen Leitungsableiter (2) gegen Erde abgeleitet.

Ein Teil der Blitzstromwellen fließt am Leiterseil weiter und verursacht je nach Höhe ein Ansprechen der Leitungsableiter am nächsten Mast (3).

Durch das Ableiten des Teilblitzstromes über den Mast kommt es zu einer Potenzialanhebung am Mastportal infolge des Stoßerdungswiderstandes (4). Dies kann bei ausreichender Spannungshöhe und schlechten Erdungsverhältnissen wiederum zum Ansprechen der Leitungsableiter einer nicht beteiligten Phase führen, was als rückwärtiges Ansprechen bezeichnet wird (5). Die spannungsbegrenzende Wirkung der Überspannungsableiter verhindert somit ein Zünden von Lichtbögen an den Isolatorketten, wodurch ein Erdschluss oder möglicherweise ein Doppelerdschluss verhindert werden kann.

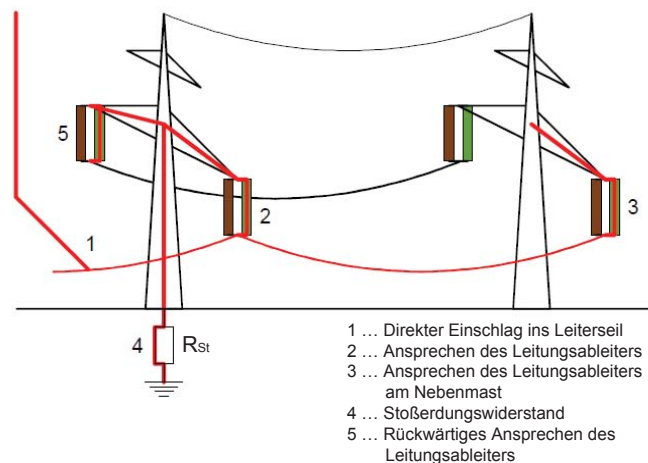


Abb. 19: Leitung mit Schutzarmaturen bei direktem Einschlag ins Phasenseil [1]

3.4.2 Wirkungsweise von Leitungsableitern bei rückwärtigen Überschlägen

Sind Leitungsableiter vorhanden, kommt es bei einem Blitzeinschlag in den Mast oder das Erdseil (1) zur Ableitung des Blitzstromes über den Mast. Der Stoßerdungswiderstand bewirkt wiederum eine Potenzialanhebung am Mastportal (2) und es kommt zum Ansprechen der Überspannungsableiter (3), die durch ihre spannungsbegrenzende Wirkung einen rückwärtigen Überschlag auf die Leiterseile verhindern [1].

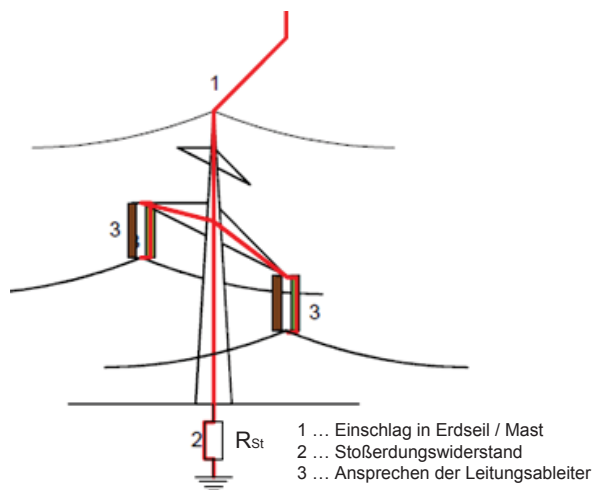


Abb. 20: Leitung mit Schutzarmaturen bei direktem Einschlag in den Mast [1]

4 Ortung atmosphärischer Entladungen an der Hochgebirgsleitung

Hochgebirgsleitung

Die Ortung atmosphärischer Entladungen an der Hochgebirgsleitung erfolgte mit den zur Verfügung gestellten Daten des österreichischen Blitzortungssystems ALDIS². Um Aussagen über Häufigkeit, Dichte, Amplitude und Polarität von atmosphärischen Entladungen entlang der HGL treffen zu können, wurde eine sogenannte *Korridoranalyse* durchgeführt und die Daten im Rahmen der Masterarbeit ausgewertet und visualisiert.

4.1 Blitzortung in Österreich

Das Blitzortungssystem ALDIS erfasst mit acht landesweit verteilten Sensoren die Blitzaktivitäten in Österreich. Über Richtung und Laufzeit des elektromagnetischen Feldes eines Blitzes wird dessen Einschlagort bestimmt. Neben Uhrzeit und Koordinaten des Einschlagpunktes werden zu jeder erfassten Blitzentladung auch Polarität und Blitzstromamplitude zur Verfügung gestellt: Für die Gesamtheit aller in Österreich georteten Blitzeinschläge kann eine durchschnittliche Ortungsgenauigkeit von 100 bis 200 Metern angenommen werden.

Entsprechend der Polarität der Ladung, die im Zuge eines Blitzschlages von der Wolke zur Erde abgeführt wird, unterscheidet man zwischen positiven und negativen Blitzen. Bei Sommergewittern ist üblicherweise nur ein relativ geringer Anteil an positiven Entladungen zu beobachten, der Anteil liegt etwa bei 20%. [12]

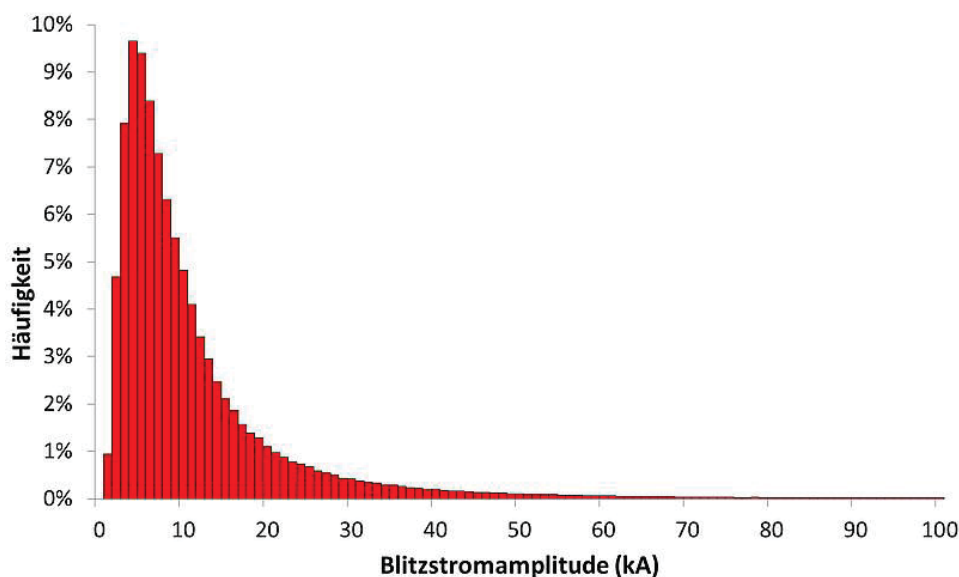


Abb. 21: Amplitudenverteilung negativer Blitze in Österreich (Zeitraum 2010 bis 2012) [12]

² Austrian Lightning Detection and Information System (Österreichisches Blitzortungssystem)

Die Häufigkeitsverteilung der Blitzamplituden entspricht in den meisten Fällen einer logarithmischen Normalverteilung. Die in Österreich ermittelten Amplituden von Blitzströmen weisen einen Median von ca. 10 kA auf. Dieser 50%-Wert gibt an, dass etwa die Hälfte aller von ALDIS georteten negativen Blitze eine Amplitude von 10 kA überschreitet (Abb. 21).

Bei etwa der Hälfte aller Blitzschläge zur Erde kommen im Kanal des so genannten Erstblitzes ein oder mehrere Folgeblitze nach und treffen in der Regel auf denselben Einschlagpunkt. Das Blitzortungssystem lokalisiert die einzelnen Teilblitze (*Strokes*) unabhängig voneinander. Nach erfolgter Ortung werden diese dann auf Basis eines Zeitkriteriums (z. B. alle Teilblitze innerhalb 1,5 Sekunden) und eines Ortskriteriums (z. B. innerhalb von 10 km) zu einem Blitz (*Flash*) zusammengruppiert. [12]

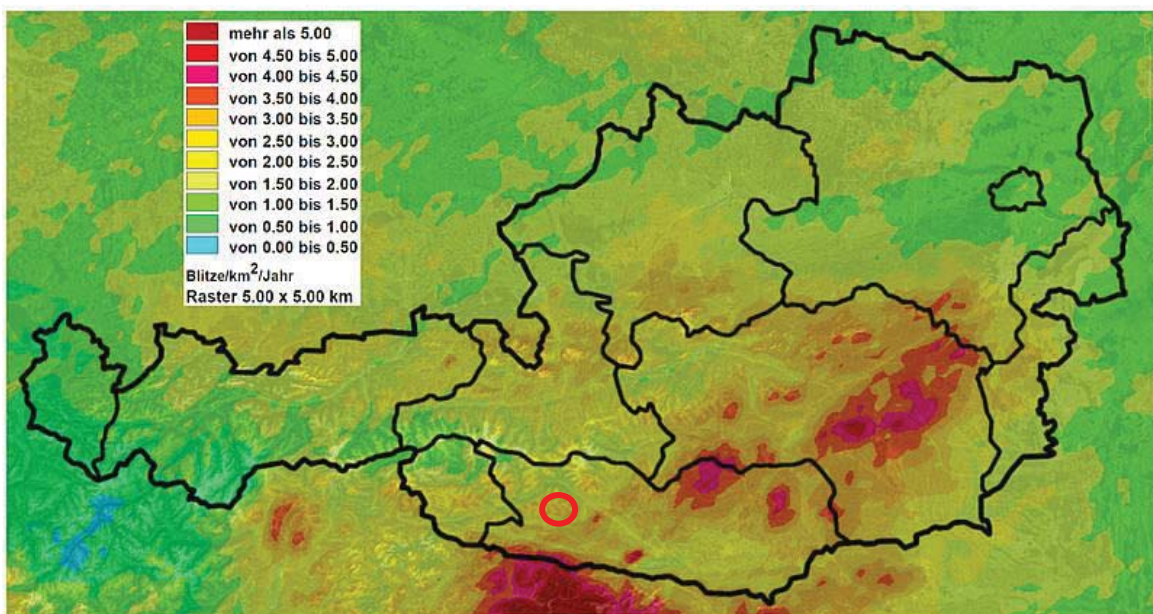


Abb. 22: Österreichische Blitzdichte-Karte mit der farblich gewichteten Blitzanzahl/km²/Jahr, Zeitraum 2003 bis 2012, der rote Kreis markiert den Standort der HGL [12]

Die Blitzdichte (*Flash Density*) gibt an, wie viele Blitze pro Quadratkilometer und Jahr in einem Gebiet auftreten und zeigt regional starke Unterschiede. In Abb. 22 ist die Blitzdichte-Grafik von Österreich zu sehen. Regionen mit außerordentlich hoher Blitzaktivität von 4 Blitzen/km²/Jahr und mehr, wie in Teilen Kärntens und der Steiermark, sind in rötlichen Farben dargestellt. Der rote Kreis liegt über der Kreuzeckgruppe in Kärnten, Standort der HGL, wo die durchschnittliche Blitzdichte laut Grafik im Bereich von etwa 3 Einschlägen/km²/Jahr liegt.

Laut Norm werden die verschiedenen Blitzdichten in fünf Kategorien unterteilt, die Klassifizierung ist in Tab. 4 ersichtlich [13].

Tab. 4: Klassifizierung der Blitzdichte in fünf Gefährdungskategorien [13]:

Blitzdichte N_g (Blitzschläge / km ² Jahr)	Gefährdungskategorie
$N_g < 1,7$	gering
$1,7 \leq N_g \leq 2,2$	mäßig
$2,2 \leq N_g \leq 2,8$	erhöht
$2,8 \leq N_g \leq 3,4$	hoch
$N_g > 3,4$	sehr hoch

Zur Auswertung der Blitzdichte werden nur die bereits aus mehreren Teilblitzen gruppierten *Flashes* herangezogen. Durch die gestiegene Ortungsgenauigkeit und die verbesserte Sensortechnik in den letzten Jahren besteht seit kurzem auch die Möglichkeit, eine Dichte-Verteilung für die einzelnen Teilblitze anzugeben. Die sogenannten *Ground Strike Points* sind laut Literatur zur Risikoabschätzung sogar besser geeignet, als die herkömmliche Blitzdichte-Verteilung. [14]

4.2 Lokale Blitzortung mittels Korridoranalyse

Für die Limitierung und Auswertung der Blitzortungsdaten entlang der HGL wurde eine sogenannte *Korridoranalyse* durchgeführt. Dabei wurde ein Korridor angenommen, der etwa im Abstand von einem Kilometer links und rechts der 30 km langen Leitung verläuft. Innerhalb dieses Korridors wurden alle Entladungen im Zeitraum 2003 bis 2013 aufgelistet. Im Rahmen der Masterarbeit wurden diese von ALDIS zur Verfügung gestellten Daten ausgewertet und analysiert. Anhand dieser Daten konnten die Einschlagorte der Entladungen, die dazugehörigen Stromstärken, sowie die Polarität der Blitze bestimmt werden.

Zunächst wurde zwischen Wolke-Wolke- bzw. Wolke-Erde-Entladungen unterschieden, da lediglich letztere für die örtliche Positionierung der Überspannungsableiter von Bedeutung sind. Die Wolke-Erde-Entladungen werden in weiterer Folge in positive und negative Entladungen unterteilt.

Abb. 23 zeigt die Auswertung der Blitzaktivität für das Jahr 2013 im Leitungsabschnitt 4 der Hochgebirgsleitung, wobei die einzelnen Masten durch rote Rechtecke gekennzeichnet sind. Die gelben Punkte kennzeichnen die negativen, die schwarzen Sterne die positiven Wolke-Erde-Entladungen, die im Vergleich dazu nur vereinzelt auftreten.

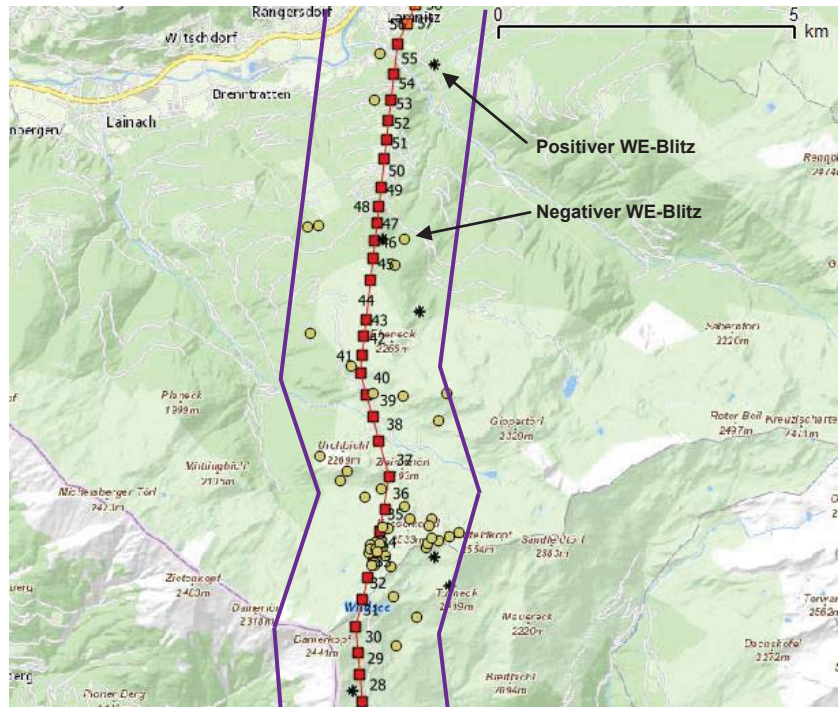


Abb. 23: Blitzaktivität 2013 in Leitungsabschnitt 4: Auswertung der positiven und negativen Wolke-Erde Blitze innerhalb des 2 km breiten Korridors (Datenquelle: ALDIS)

4.2.1 Blitzdichte

Im Zuge der Masterarbeit wurde für den Zeitraum 2003 bis 2013 eine Blitzdichte-Statistik erarbeitet (Abb. 24). Daraus ist ersichtlich, dass die lokale Blitzdichte, wie auch die Witterung im Hochgebirge, starken Schwankungen unterworfen sind. In den entladungsstärksten Jahren dieses Zeitraumes, im Jahr 2006 und 2009, lag die Blitzdichte bei etwa 4 Einschlägen/km² und Jahr. Für das zehnjährige Mittel ergibt sich an der HGL hingegen lediglich eine Blitzdichte von 2,15 Einschlägen/km² und Jahr. Für die Darstellung der Blitzdichte werden sowohl positive, als auch negative Wolke-Erde Blitze berücksichtigt.

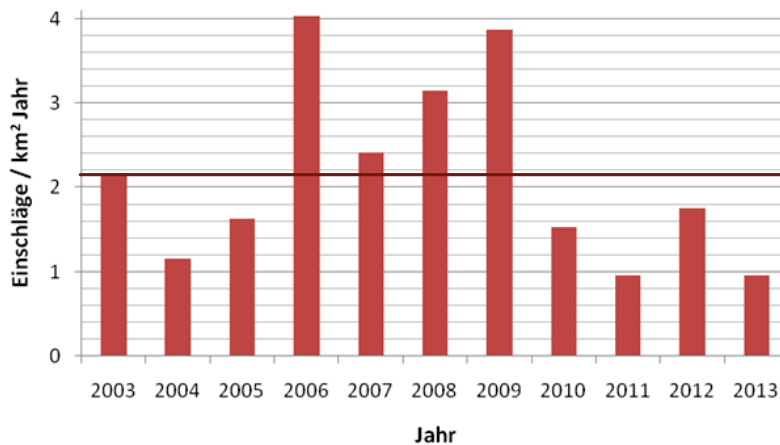


Abb. 24: Blitzdichte-Statistik für die HGL 2003 bis 2013; der Mittelwert liegt bei 2,15 Einschlägen/km²/Jahr) (Datenquelle: ALDIS)

Abb. 25 zeigt das 1 Quadratkilometer breite Raster der Korridoranalyse über dem Abschnitt 4 der HGL im Zeitraum 2004 bis 2013. Je rötlicher der Farbton, desto höher ist die Blitzdichte in diesem Bereich. Die Bereiche mit den höchsten Blitzdichten sind am rechten Bildrand nochmals aufgeführt. Auffallend hoch ist die Blitzdichte der Spannfelder 27 bis 30 mit einem Wert von 4,7 Einschlägen/km² und Jahr, zusammen mit der Blitzdichte von Mast 34 bis 37 sind diese in die Gefährdungskategorie *sehr hoch* einzustufen. Generell kann die ausgewertete Blitzdichte in Leitungsabschnitt 4 als *hoch* bezeichnet werden.

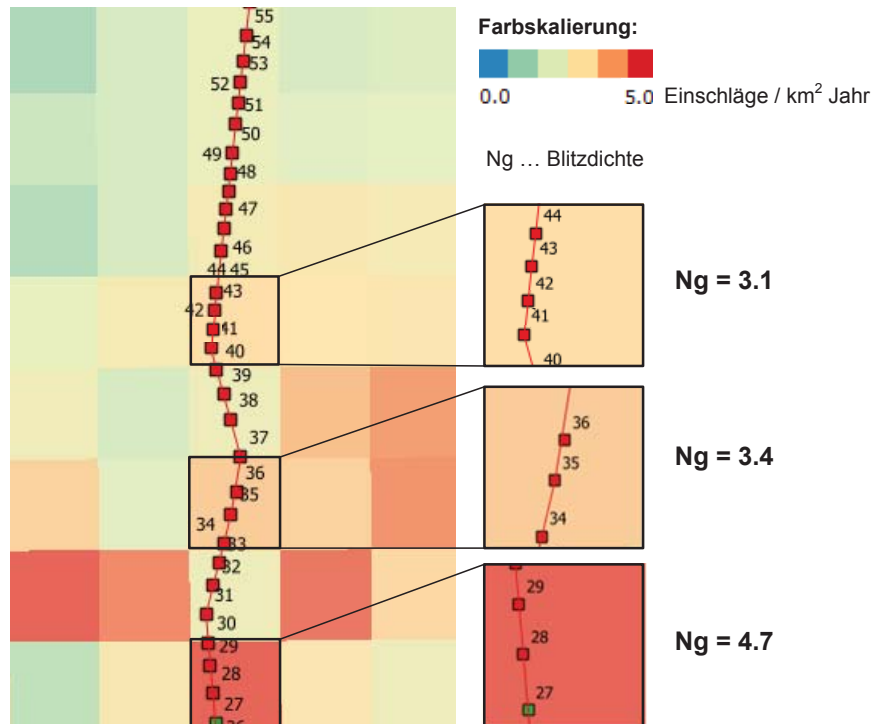


Abb. 25: Blitzdichte 2004 bis 2013 in Abschnitt 4 (Raster 1x1 km), höchste Blitzdichte tritt im Anschluss an Abschnitt 3 auf (Datenquelle: ALDIS)

4.2.2 Dichteverteilung der „Ground Strike Points“

Auf Grund der gestiegenen Ortungsgenauigkeit besteht nun auch Möglichkeit, eine Dichteverteilung der *Ground Strike Points* (Blitzfußpunkte) anzugeben. Abb. 26 zeigt die lokale Dichte der Blitzfußpunkte im Zeitraum 2011 bis 2013, nach Farben skaliert.

Der höchste Wert tritt im Bereich der Masten 30 bis 32, wieder im Anschluss an den bereits mit Leitungsableitern ausgestatteten Abschnitt 3 auf, und nimmt mit steigender Mastnummer ab. Generell entsteht im Vergleich zur Blitzdichte ein homogeneres Bild, wie an der ähnlichen Farbverteilung zu erkennen ist.

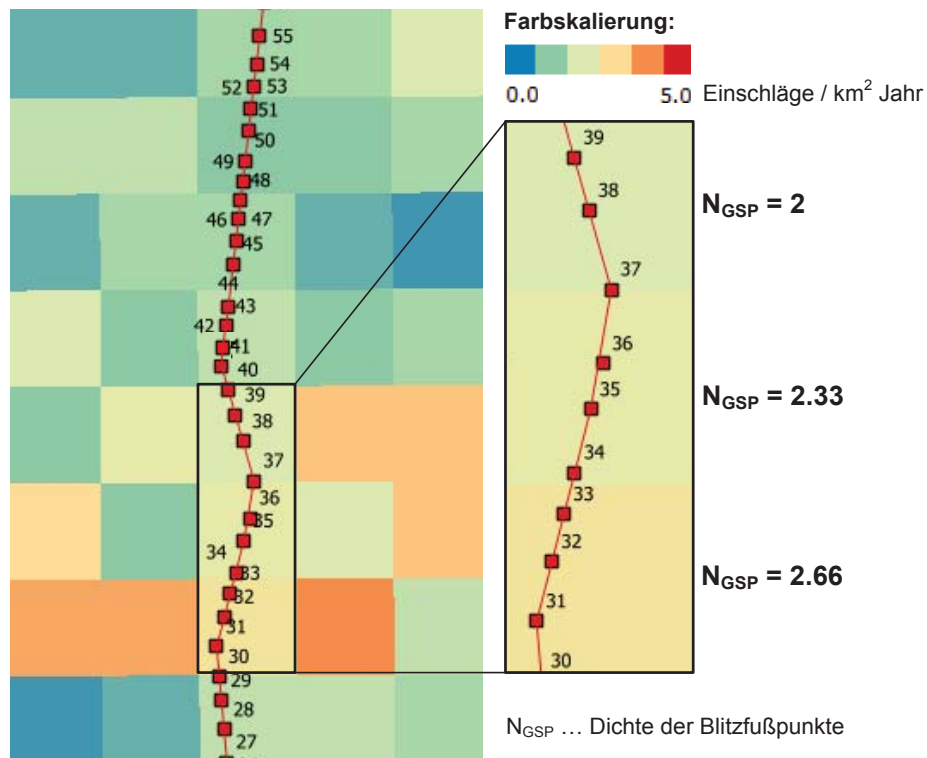


Abb. 26: Dichteverteilung der *Ground Strike Points* 2011 bis 2013 im Abschnitt 4 (Raster 1x1 km) (Datenquelle: ALDIS)

4.2.3 Amplitudenverteilung

Die Auswertung der Blitzstromamplituden aus den Blitzortungsdaten im Zeitraum 2003 bis 2013 ergab eine lokale Amplitudenverteilung für die HGL (Abb. 27). Mit einem Medianwert von knapp 5 kA weist diese Amplitudenverteilung verglichen mit der österreichweiten Verteilung (Anm.: Medianwert liegt bei ca. 10 kA) einen deutlich geringeren Wert auf.

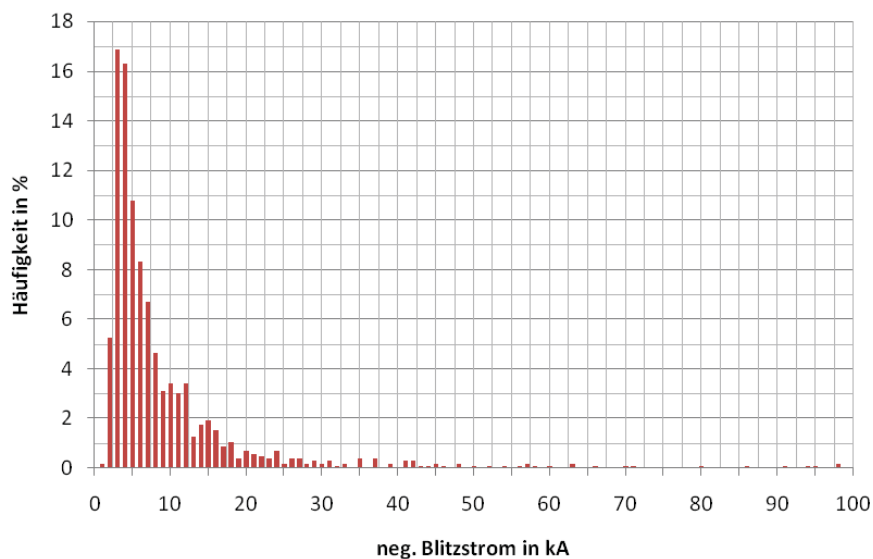


Abb. 27: Amplitudenverteilung der negativen Blitze an der HGL im Zeitraum 2003 bis 2013 (Datenquelle: ALDIS)

4.2.4 Polarität

Die ausgewertete lokale Polaritätsverteilung der Entladungen von 2003 bis 2013 ist in Abb. 28 zu sehen. Von den im Zeitraum erfassten Blitzen entspricht der Großteil (etwa 70%) den in dieser Arbeit relevanten Wolke-Erde-Entladungen, die restlichen Blitze stellen reine Wolke-Wolke-Entladungen dar und werden nicht weiter berücksichtigt. Gut die Hälfte der insgesamt detektierten Entladungen stellen negative Wolke-Erde-Blitze dar, nur bei etwa einem Fünftel handelt es sich um positive Wolke-Erde-Blitze.

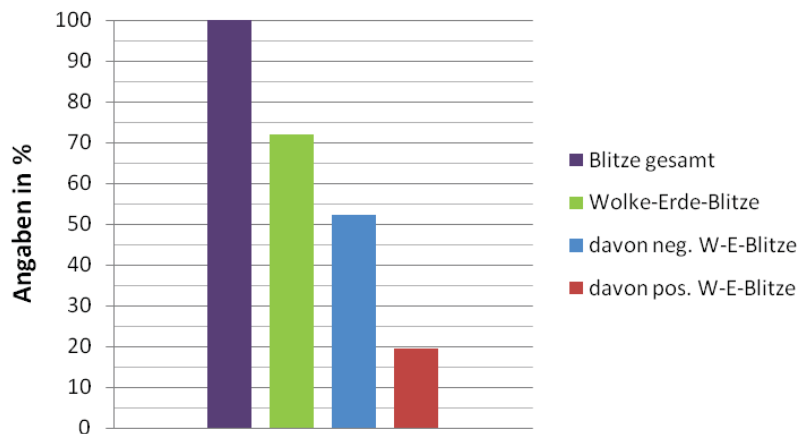


Abb. 28: Auswertung der Polarität der Wolke-Erde-Entladungen an der HGL im Zeitraum 2003 bis 2013 (Datenquelle: ALDIS)

5 Numerische Berechnungen mit EMTP-RV

Im Zuge der numerischen Simulationsberechnungen wurde die HGL im transienten Berechnungsprogramm EMTP-RV³ nachgebildet.

5.1 Modellbildung

Das Modell der Hochgebirgsleitung besteht aus 108 Masten, 36 bereits installierten und 174 möglichen, zu variierenden Überspannungsableitern. Die Anzahl der Maststandorte im Modell entspricht jener der realen Leitung. Ziel war es, das Modell möglichst modular aufzubauen, sodass trotz seines Umfangs Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit erhalten bleiben. Abb. 29 gibt einen Einblick in die Struktur des Leitungsmodells, wie sie in EMTP-RV dargestellt wird. Zu sehen sind die Blitzquelle, sowie die Freileitungskomponenten Mast, Masterdung und Leitungsableiter. Um auch Einschläge in Spannfeldmitte simulieren zu können, wurde eine eigene Einschlagstelle generiert. Die Überspannungsableiter wurden nach unten herausgeführt, um das Ein- und Ausblenden für die Variationsberechnungen in Abschnitt 4 zu erleichtern.

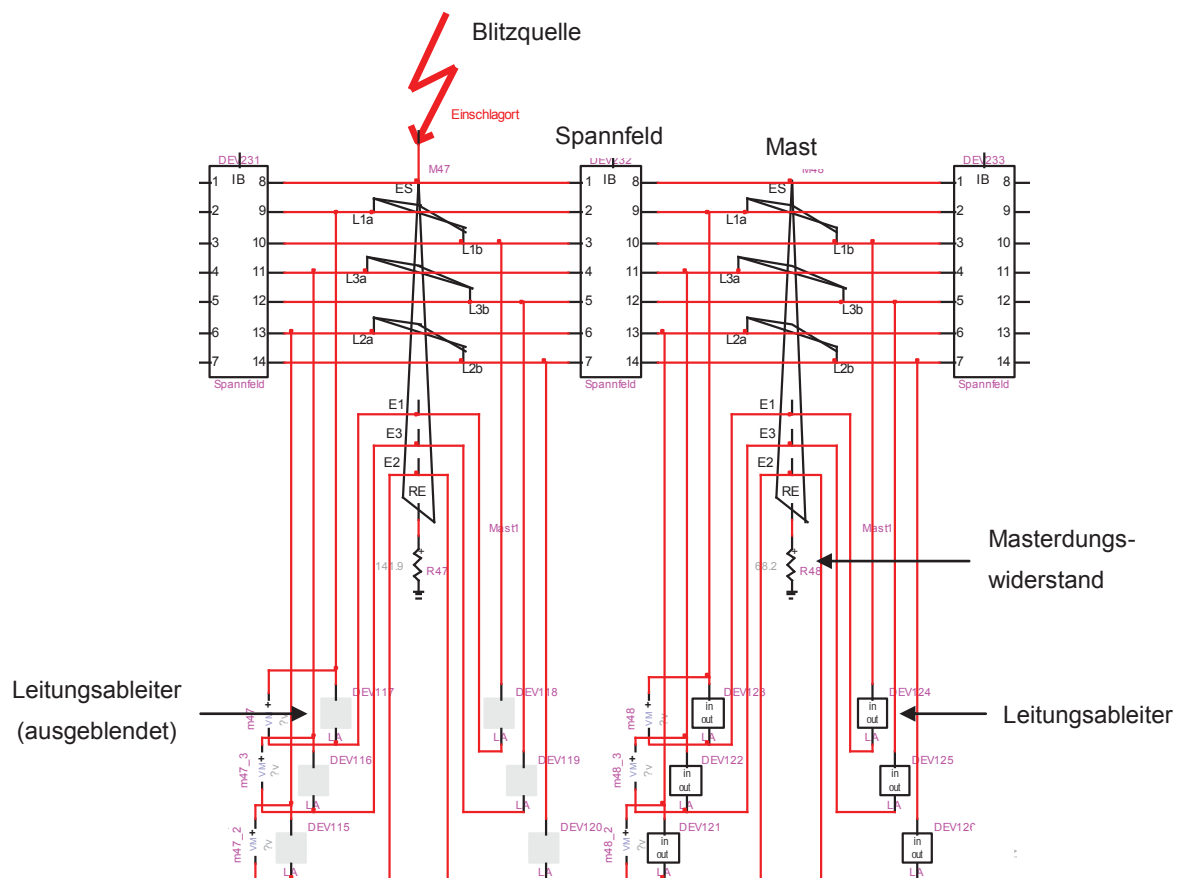


Abb. 29: Struktur des numerischen Leitungsmodells in EMTP-RV: Komponenten der Freileitung und Blitzquelle [15]

³ Electro Magnetic Transients Programme – Restructured Version; Version 2.2.1, 2009

Mast

Für die Nachbildung der Masten in EMTP-RV werden die Mastabmessungen und die Wellenwiderstände der einzelnen Mastabschnitte benötigt. Verwendet wird ein Tonnenmast mit den Abmessungen aus Abb. 30. An der realen Leitung schwanken die Masthöhen, im Modell wird für alle 108 Masten eine einheitliche Masthöhe von 31,7 m angenommen.

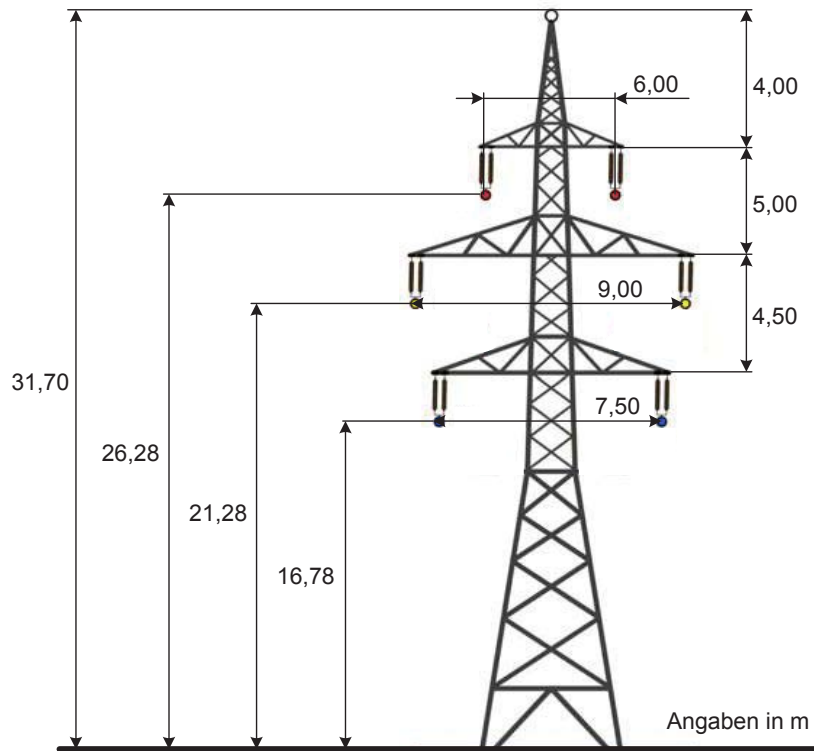


Abb. 30: Verwendeter Tonnenmast mit Abmessungen (Datenquelle: KNG)

Für die transienten Untersuchungen wurde der Mast in einzelne Teilstücke mit zugeordnetem Wellenwiderstand zerlegt (Abb. 31). Dabei wurden sowohl die Längs-, als auch die Querelemente (Ausleger) berücksichtigt, vereinfachend wurde jedoch ein einheitlicher mittlerer Stoßwiderstand für alle Elemente angenommen.

Für die Berechnung des mittleren Stoßausbreitungswiderstandes der Mastabschnitte wurde die Näherungsformel von *Sargent* und *Darveniza* verwendet: [16]

$$Z_i = 30 \ln \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \quad \begin{array}{l} h \dots \text{ Masthöhe in m} \\ 2r \dots \text{ Spreizung in m} \end{array} \quad (5.1)$$

Angewandt auf eine Masthöhe von 31,7 m und eine Spreizung von 5,7 m ergibt sich somit ein mittlerer Wellenwiderstand von 165,5 Ω. Der im Modell verwendete Wert wurde auf 170 Ω aufgerundet.

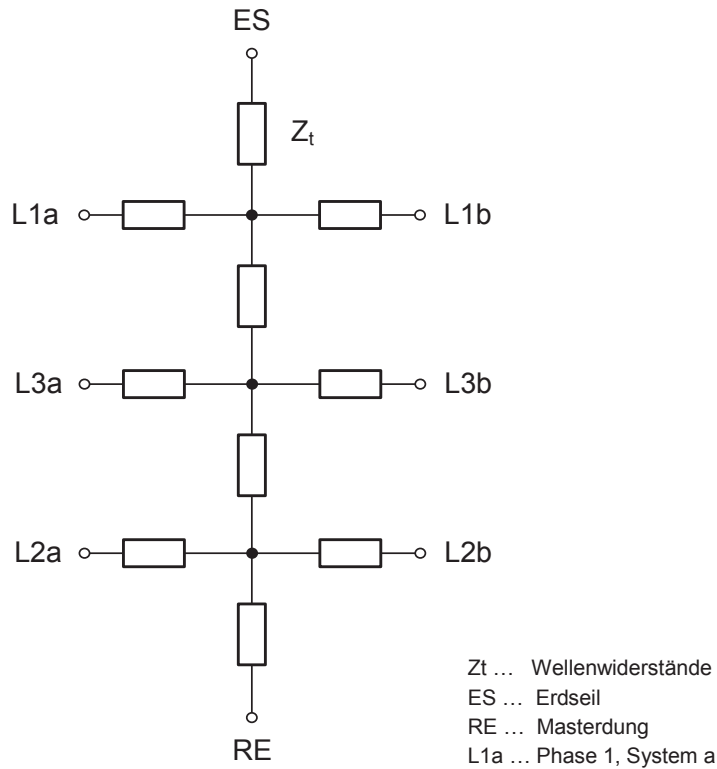


Abb. 31: Darstellung des Mastes durch Wellenwiderstände in EMTP-RV

Masterdung

Der Mastausbreitungswiderstand ist eine veränderliche statistische Größe, deren Verhalten von den Bodeneigenschaften, dem Stoßstrom, der Zeitdauer und dem Zeitpunkt des Blitzeinschlages abhängt. [17]

Im Leitungsmodell wurde die Masterdung als starr angenommen und durch einen ohmschen Widerstand nachgebildet, dessen Wert auf den Masterdungsmessungen des Netzbetreibers basiert (siehe Kapitel 2.2.1).

Spannfeld

Für die Nachbildung der Spannfelder in EMTP-RV werden die geometrischen Abmessungen des Mastes, die mittlere Spannfeldlänge, der Seildurchmesser, der Durchhang und die ohmschen Widerstandsbeläge benötigt (Abb. 32).

Die Modellierung der Leitungsstücke erfolgte mittels des frequenzabhängigen Leitungsmodells in EMTP-RV, das in der Literatur dem Modell von J. Martí entspricht. Der Wellenwiderstand und die Ausbreitungskonstante werden durch rationale Funktionen nachgebildet. Dies ist das am häufigsten verwendete Modell für die Nachbildung von Freileitungen. [18]

Wire	Phase Number	DC resistance [Ohm/km]	Outside diameter [cm]	Horizontal distance [m]	Vertical Height at tower [m]	Vertical Height at Midspan [m]
1	1	0.443	1.34	0	31.7	27.612
2	2	0.131	2.31	3	26.28	22.192
3	3	0.131	2.31	-3	26.28	22.192
4	4	0.131	2.31	4.5	21.28	17.192
5	5	0.131	2.31	-4.5	21.28	17.192
6	6	0.131	2.31	3.75	16.78	12.692
7	7	0.131	2.31	-3.75	16.78	12.692

Abb. 32: Eingabe der Leitungsparameter in EMTP-RV [15]

Wie bereits erwähnt, entspricht die Anzahl der Maststandorte im Modell jener der realen Leitung. Für jeden der vier Leitungsabschnitte wurde dabei eine mittlere Spannfeldlänge berechnet, um die tatsächliche Gesamtlänge von 29,4 km auch im Modell zu erreichen. In Tab. 5 sind die verwendeten mittleren Spannfeldlängen angegeben.

Tab. 5: Berechnete mittlere Spannfeldlängen je Leitungsabschnitt von Umspannwerk Oberdrauburg bis Umspannwerk Außerfragant (Datenquelle: KNG)

Abschnitt	Länge in m	Masten	Anzahl Spannfelder	Mittlere Spannfeldlänge in m
1,2	4899,9	UW OD. – M19	19	257,89
3	1962,7	M19 - M27	8	245,34
4	8006,4	M27 - M56	29	276,08
5	14621,0	M56 – UW AF.	53	275,87
Summe Länge:	29490,0			

Für die Simulation des Blitzeinschlags in Spannfeldmitte wurden im betrachteten Abschnitt die Spannfelder auf halber Länge aufgeteilt, um den Blitzstrom in der Mitte der Spannfelder einprägen zu können.

Blitzquelle

Für die Simulation atmosphärischer Überspannungen wird am Einschlagort ein Stoßstrom mit dem Verlauf der genormten Blitzstoß-Wellenform, mit einer Stirnzeit von $1,2 \mu\text{s}$ und einer Rückenhalbwertszeit von $50 \mu\text{s}$, eingepägt (vgl. [3])

In EMTP-RV wurde die Blitzquelle durch eine CIGRE⁴-Stromquelle (vgl. [19]) nachgebildet, um die konkave Wellenfront des Blitzstromes zu beschreiben (Abb. 33). Die Stirnzeit t_f wird durch die Ersatzgerade aus den 30%- und 90%-Werten des Maximalstromes gebildet. Sie beginnt beim Schnittpunkt der Ersatzgerade mit der Nulllinie und endet beim Erreichen des Maximalwertes I_{max} . Die Rückenhalbwertszeit t_h startet am selben Punkt und endet, wenn der Strom die Hälfte des Maximalwertes erreicht hat (nicht eingezeichnet).

⁴ Conseil International des Grands Réseaux Electriques

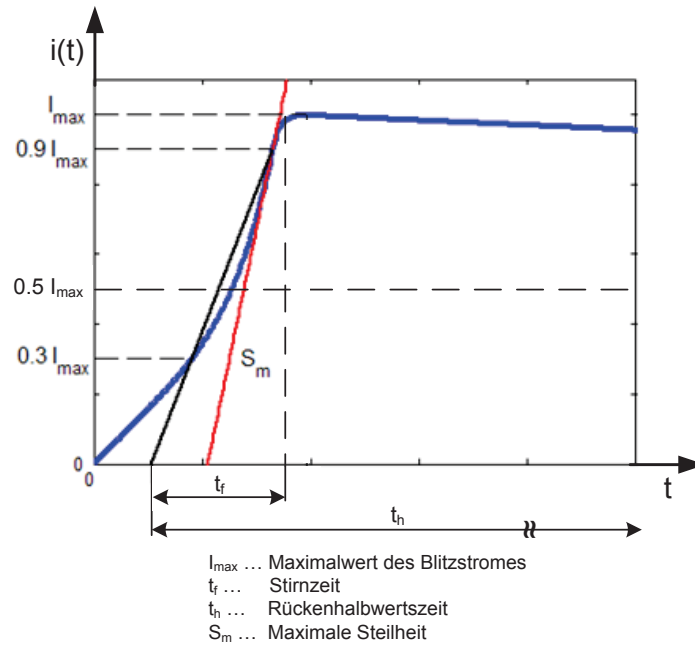


Abb. 33: Modellierung der CIGRE-Stoßstromquelle in EMTP-RV [15]

Die vollständige Parameter-Liste für die Eingabe in EMTP-RV ist in Tab. 6 angeführt. Neben den bereits genannten Parametern müssen noch die Start- und Endzeit des Stromimpulses angegeben werden.

Tab. 6: Eingabe-Parameter zur Modellierung der Blitzquelle

Abkürzung	Bezeichnung	Wert
t_{start}	Startzeit	0 s
I_{max}	Maximaler Blitzstrom	15 kA
t_f	Stirnzeit	1,2 μs
S_m	Maximale Steilheit	15 kA/ μs
t_h	Rückenhalbwegszeit	50 μs
t_{stop}	Endzeit	1e15 s

Überspannungsableiter

Der Überspannungsableiter wird im Berechnungsprogramm durch seine nichtlineare Spannungs-Strom-Charakteristik nachgebildet. Hierfür wird der Zinkoxid-Ableiter (*ZnO-Arrester*) in EMTP-RV verwendet (vgl. [15])

Bei diesem Modell ist es möglich, die Kennlinie des Ableiters in tabellarischer Form in das Programm einzugeben (Abb. 34). Die Werte sind in Tab. 7 angegeben und wurden aus dem Datenblatt der bereits installierten Leitungsableiter entnommen.

Tab. 7: Spannungs- und Stromwerte aus dem Datenblatt des Ableiters (Datenquelle: KNG)

I (kA)	0,001	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	5	10	20
U (kV)	240,39	252,13	263,51	267,91	275,25	280,02	282,96	287,36	289,93	292,13	294,33	296,54	299,11	337,64	367,00	411,04

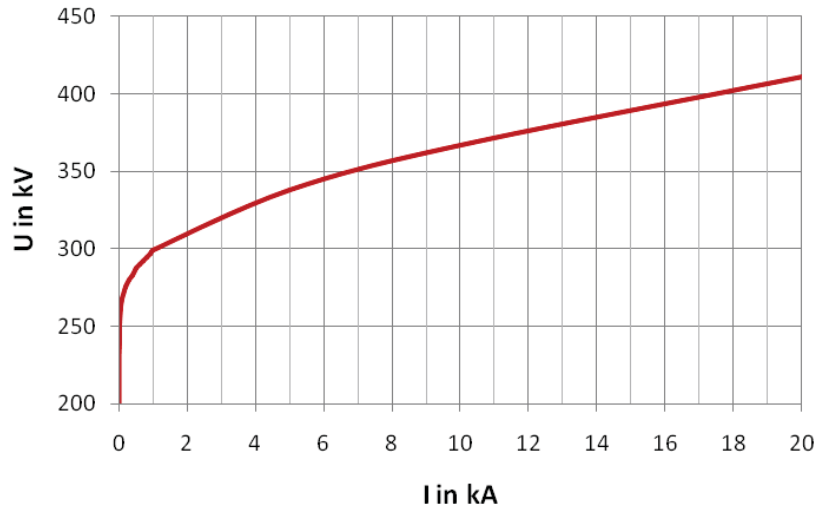


Abb. 34: Nichtlineare Spannungs-Strom-Kennlinie des Überspannungsableiters (Datenquelle: KNG)

Anmerkung: Die frequenzabhängige Nachbildung des Überspannungsableiters durch das wesentlich aufwändigere *IEEE-Modell* (vgl. [20]) wurde am numerischen Leitungsmodell in EMTP-RV getestet, es konnte jedoch kein merklicher Unterschied zum Verhalten des *ZnO-Arrester* festgestellt werden.

Umspannwerke

Der untersuchte Leitungsabschnitt 4 liegt bezogen auf die gesamte Leitungslänge in etwa mittig und weist somit zu beiden Umspannwerken eine relativ große Entfernung auf. Da nach vorhergehenden Simulationen kein signifikanter Einfluss auf die weiteren Berechnungen zu erwarten war, wurde auf eine detaillierte Modellierung der Umspannwerke verzichtet.

Die Nachbildung erfolgt vereinfacht durch einen ohmschen Widerstand und eine Stoßkapazität (Abb. 35). Das Erdseil wurde mit dem realen Erdungswiderstand der Umspannwerke abgeschlossen. Das Doppelsystem wurde durch zwei getrennte Spannungsquellen mit jeweils 123 kV (höchste zulässige Betriebsspannung) nachgebildet. Entsprechend dem derzeitigen Ausrüstungsstand wurden alle Phasen mit Überspannungsableitern ausgestattet.

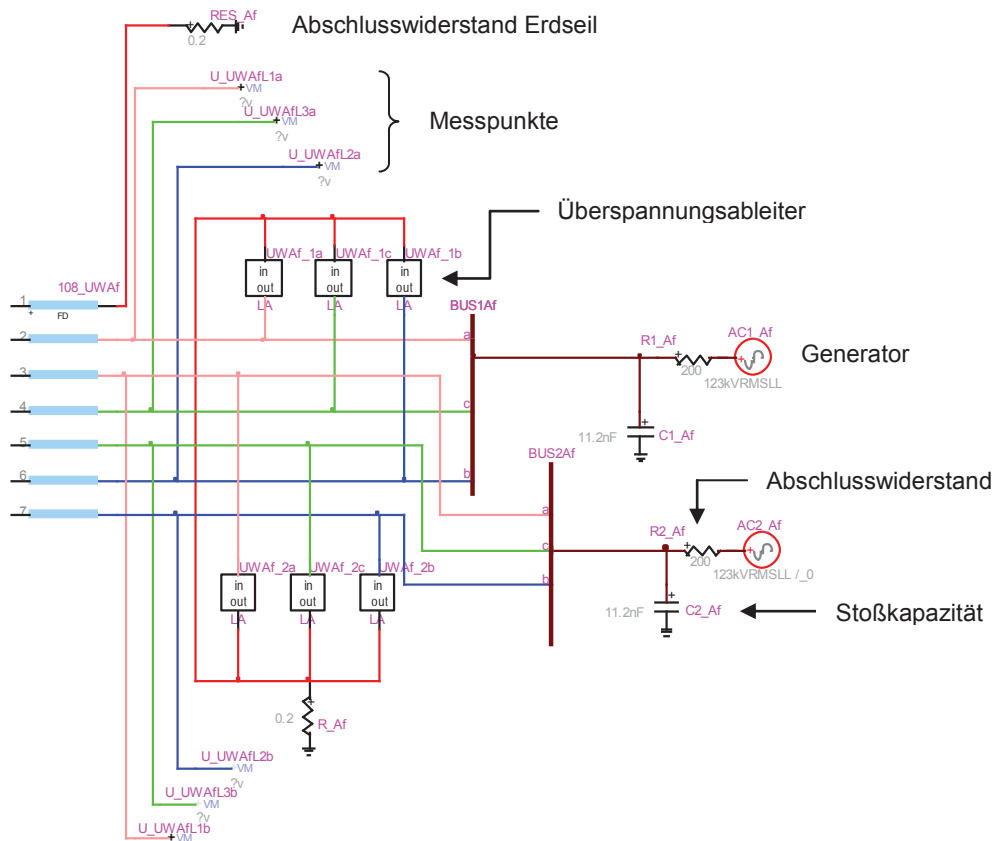


Abb. 35: Modellierung des Umspannwerkes Außerfragant mit Bezeichnung der relevanten Objekte [15]

Die in Tab. 8 angegebenen Kennwerte, die zur Modellierung der Umspannwerke herangezogen wurden, basieren auf den Daten des Netzbetreibers.

Tab. 8: Eckdaten zur Modellierung der Umspannwerke (Datenquelle: KNG)

Objekt	Bezeichnung	UW Oberdrauburg	UW Außerfragant
Ohmscher Widerstand Erdseil	RES	0,2 Ω	0,2 Ω
Ohmscher Widerstand Phasen	R	450 Ω	200 Ω
Stoßkapazität	Cs	3,2 nF	11,2 nF
Generator	AC	123 kV	123 kV
Überspannungsableiter	LA	Aktiv (alle Phasen)	Aktiv (alle Phasen)

5.2 Randbedingungen

- Die Simulationsdauer wurde mit 100 μs , die Schrittweite stets mit 10 ns gewählt.
- Auf Grund des Modellumfanges wurde die Spannfeldlänge pro Leitungsabschnitt gemittelt, auch die Masthöhe wurde für das gesamte Modell mit 31,7 m einheitlich angenommen.
- In Voruntersuchungen wurden die Spannungsverläufe beim Zusammenwirken von Schutzfunkenstrecke und Leitungsableiter teilweise stark verzerrt, was zu irreführenden Interpretationen hinsichtlich der Wirkungsweise der Leitungsableiter führte. Um das alleinige Verhalten der Leitungsableiter untersuchen zu können, wurden die Schutzfunkenstrecken bei den Berechnungen vernachlässigt. In der Realität ist von einer zusätzlichen Schutzwirkung durch den Grobschutz auszugehen.
- Für den spezifischen Bodenwiderstand wurde im Programm ein Einheitswert von 800 Ωm angenommen, da in den Probesimulationen kein Unterschied im Ergebnis feststellbar war.
- Die direkten Mast- bzw. Erdseileinschläge wurden standardmäßig mit einem Blitzstrom von 15 kA simuliert. Dieser Wert liegt deutlich höher als der Medianwert der lokalen Amplitudenverteilung von ca. 5 kA (siehe Kapitel 4.2.3) und auch über jenem Wert, der von ALDIS publizierten Amplitudenverteilung von ca. 10 kA (siehe Kapitel 4.1), jedoch unter dem von CIGRE publizierten Wert für negative Erstblitze von 30 kA (siehe [21]). Für die Variationsberechnungen wurde der Blitzstrom von 5 kA bis 100 kA variiert.
- Für die direkten Leiterseileinschläge wurde der Blitzstrom auf 10 kA verringert, da die Wahrscheinlichkeit für einen Leiterseileinschlag bei geringem Blitzstrom höher ist.
- Für die Steilheit des Blitzstromes wurde standardmäßig der Normwert für Folgeblitze (1,2/50 μs) herangezogen, die Polarität wurde negativ angenommen.

Hinweise zur Auswertung der Berechnungsergebnisse:

Die Beurteilung der Simulationsergebnisse erfolgt durch Auswertung der Maximalwerte der am Einschlagort auftretenden transienten Spannung. Als Grenzwert wird die Bemessungs-Blitzstoßspannung für 110 kV-Systeme von 550 kV herangezogen (siehe Kapitel 2.2). Überschreitet die anliegende Spannung diesen Level, ist eine Ausstattung mit Ableitern erforderlich. Für die Kennzeichnung der 550 kV-Grenze in den Kurvenauswertungen wird die amerikanische Bezeichnung BIL^5 verwendet, in den Kurvenauswertungen wird dieser als rote Linie gekennzeichnet. Zusätzlich wird noch eine Sicherheitsspanne (engl. *Safety Margin*) von 20% einkalkuliert. Diese Spannungsgrenze von 440 kV wird in den Kurvendiagrammen als grün-gestrichelte Linie dargestellt. Theoretisch sind also bereits Spannungswerte, die den

⁵ basic lightning impulse insulation level

Safety Margin von 440 kV überschreiten als kritisch zu betrachten und können eine Ausrüstung mit Ableitern erfordern.

Für die Beurteilung der Erdseileinschläge wurde standardmäßig die Spannung am oberen Ausleger (Phase L1) ausgewertet, da diese bei einem Blitzstrom bis 15 kA in der Regel der höchsten Beanspruchung ausgesetzt ist.

Die Beurteilung der Leiterseileinschläge erfolgt über die Spannung am mittleren Ausleger (Phase L3). Laut Vorgabe des Netzbetreibers ist eine Ausstattung mit Leitungsableitern des oberen Auslegers (Phase L1) aus Gründen der Maststatik nicht möglich.

Für die Auswertung der Kurvenverläufe ist es von Vorteil, die Laufzeiten zwischen dem Einschlagort und den potentiellen Reflexionsstellen abschätzen zu können. In Abb. 36 sind die wichtigsten Laufzeiten und Längenangaben für die Variationsberechnungen angegeben. Zentraler Mast in Abschnitt 4 ist Mast Nr. 42, der gleichzeitig auch den höchsten Masterdungswiderstand aufweist. Abgebildet sind die Distanzen und einfachen Laufzeiten bis zu den Enden des Abschnittes an Mast Nr. 28 und 56, sowie zu den Umspannwerken am Ende der Leitung. Verdoppelt man den Wert der Laufzeiten aus der Abbildung, erhält man die Zeit, die die Welle braucht um wieder den Einschlagort zu passieren.

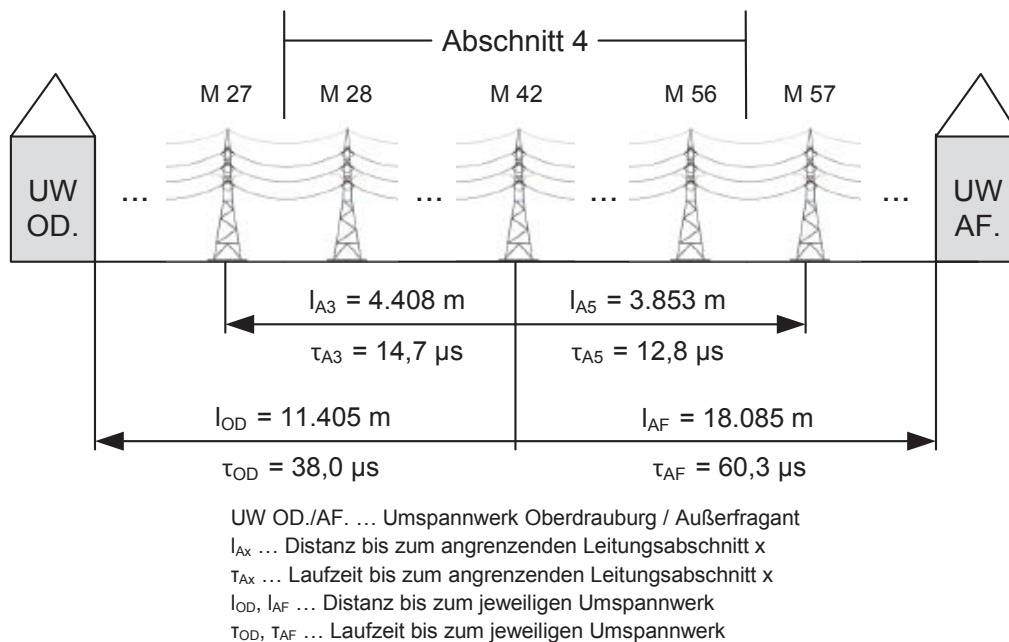


Abb. 36: Distanz und einfache Laufzeit bei Blitzschlag in die Mitte von Abschnitt 4 (Mast 42) zu den benachbarten Abschnitten bzw. Umspannwerken (Datenquelle: KNG)

Verwendete Abkürzungen:

LA ... Leitungsableiter
ES ... Erdseil
M ... Mast
SF ... Spannfeld
A4 ... Abschnitt 4
L1 ... Phase L1 (oberer Ausleger)
L3 ... Phase L3 (mittlerer Ausleger)
L2 ... Phase L2 (unterer Ausleger)
SM ... Safety Margin (Sicherheitsbereich)
BIL ... Basic Insulation Level

5.3 Variationsberechnungen

Bei den Simulationsberechnungen wurden folgende Parameter variiert:

– **Einschlagort, bezogen auf verschiedene Maststandorte**

Die Blitzquelle wurde an verschiedenen Masten im Abschnitt 4 platziert. Dabei wurde vor allem der Einfluss des Masterdungswiderstandes auf die Spannungshöhe untersucht.

– **Einschlagort, bezogen auf einen Mast**

Es wurden Direkteinschläge in die Mastspitze, Einschläge in die Spannfeldmitte des Erdseiles und Leiterseileinschläge simuliert (Abb. 37).

– **Blitzstromstärke**

Standardmäßig wurde mit 15 kA simuliert, bei den Variationsberechnungen wurde der Strom von 5 kA stufenweise bis zu einem Maximum von 100 kA variiert. Die genormte Blitzstoß-Wellenform von 1,2/50 μ s wurde bei allen Berechnungen beibehalten, da diese wegen der kurzen Anstiegszeit die größte transiente Beanspruchung hervorruft.

– **Leitungsableiter in Abschnitt 4**

Die Überspannungsableiter wurden an den jeweiligen Masten bzw. in den betroffenen Phasen gezielt aktiviert, um Erkenntnisse für ein optimiertes Ausrüstungskonzept zu gewinnen. Dabei wurde ein breites Spektrum an Masten mit unterschiedlichen Masterdungswiderständen untersucht.

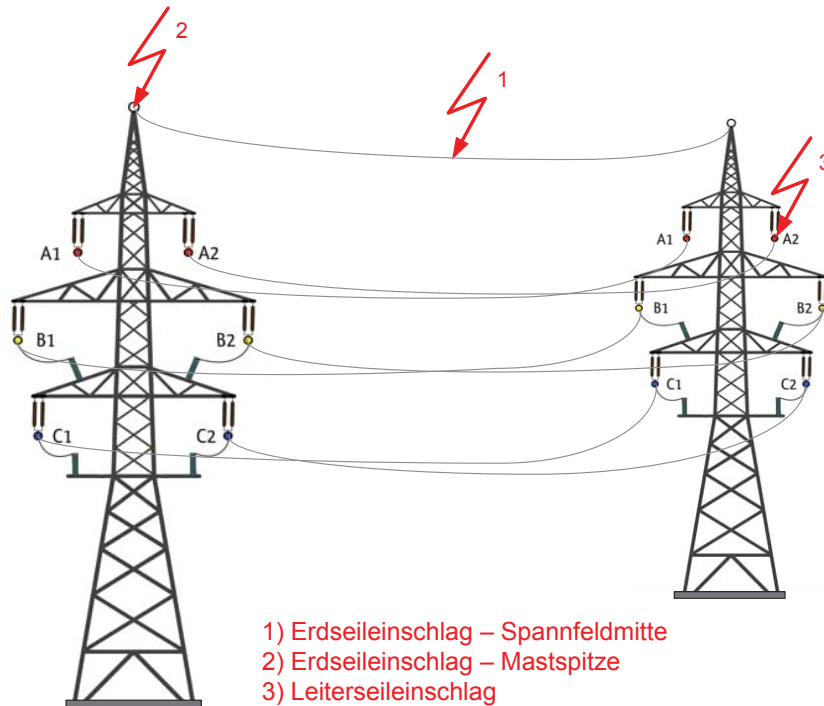


Abb. 37: Zur Variation des Einschlagortes: Einschläge ins Erdseil an Mastspitze und testweise in Spannfeldmitte, sowie Einschläge ins Leiterseil

5.3.1 Erdseileinschläge

a) Einschläge in Spannfeldmitte

Die Untersuchung der Einschläge in Spannfeldmitte des Erdseiles wurde ohne Leitungsableiter und nach folgendem Schema durchgeführt (Abb. 38):

- Einschlag in die Mastspitze
- Einschlag in die Spannfeldmitte der Nebemasten

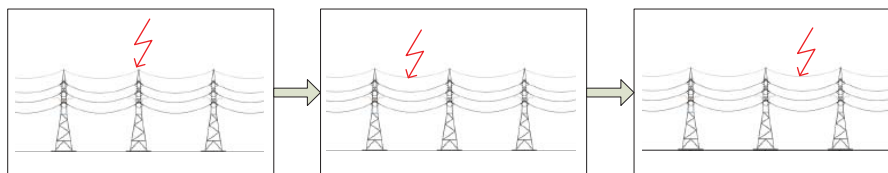


Abb. 38: Simulationsablauf bei Erdseileinschlägen in Spannfeldmitte

Es wurden sechs Simulationen, d.h. je drei Simulationen zu zwei verschiedenen Maststandorten durchgeführt. In Simulation 1 erfolgt der Einschlag in die Mastspitze von Mast 42 ($R_E = 402 \Omega$, höchster in Abschnitt 4). In Simulation 2 erfolgt der Einschlag in das Spannfeld zwischen Mast 41 ($R_E = 111,2 \Omega$) und Mast 42, in Simulation 3 in das Spannfeld zwischen Mast 42 und Mast 43 ($R_E = 48,9 \Omega$).

Tab. 9: Simulationsübersicht *Einschläge in Spannungsfeldmitte*

Simulation Nr.	Dauer in μs	Schrittweite in ns	Blitzentladung		Einschlagort		Leitungsableiter Abschnitt 4
			Amplitude in kA	Kurvenform in μs	Mast / SF	Seil	
1	100	10	-15	1,2/50	42	ES	Keine
2	100	10	-15	1,2/50	41 - 42	ES	Keine
3	100	10	-15	1,2/50	42 - 43	ES	Keine
4	100	10	-15	1,2/50	29	ES	Keine
5	100	10	-15	1,2/50	28 - 29	ES	Keine
6	100	10	-15	1,2/50	29 - 30	ES	Keine

In den folgenden Abbildungen sind die Kurvenverläufe der Simulationen 1 bis 3 zu sehen. Es wurde für alle Variationen ein Blitzstrom von 15 kA gewählt, die Leitungsableiter bleiben ausgeblendet. In der Bildunterschrift sind die wichtigsten Simulationsdaten aus obiger Tabelle in Kurzform angeführt (Abkürzungen siehe Kapitel 5.2, S. 36).

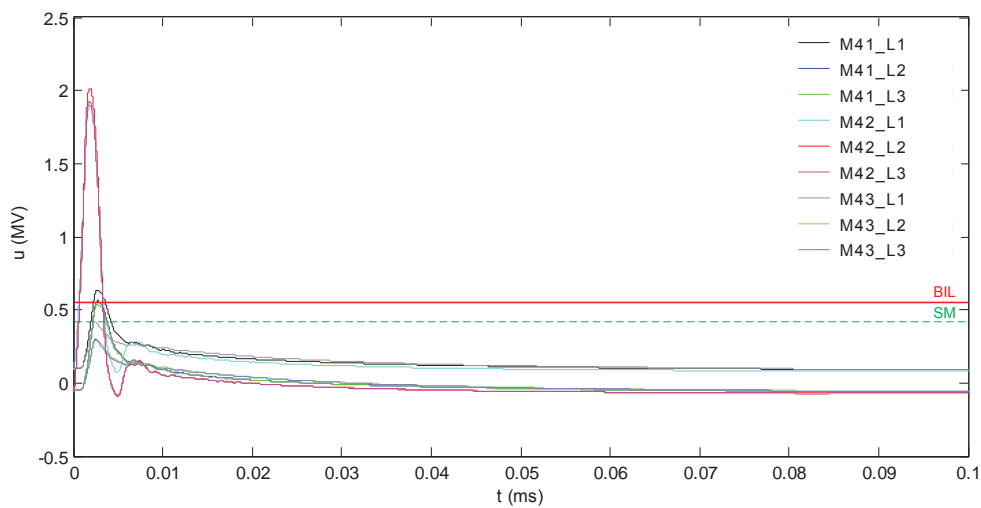


Abb. 39: Simulation 1 - Einschlagort M42, ES, keine LA in A4

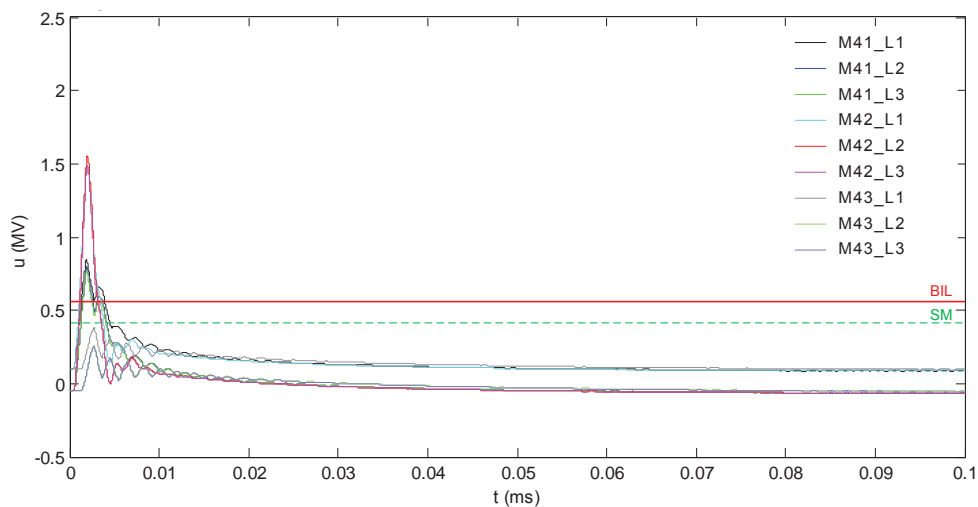


Abb. 40: Simulation 2 - Einschlagort Spannungsfeld 41-42, ES, keine LA in A4

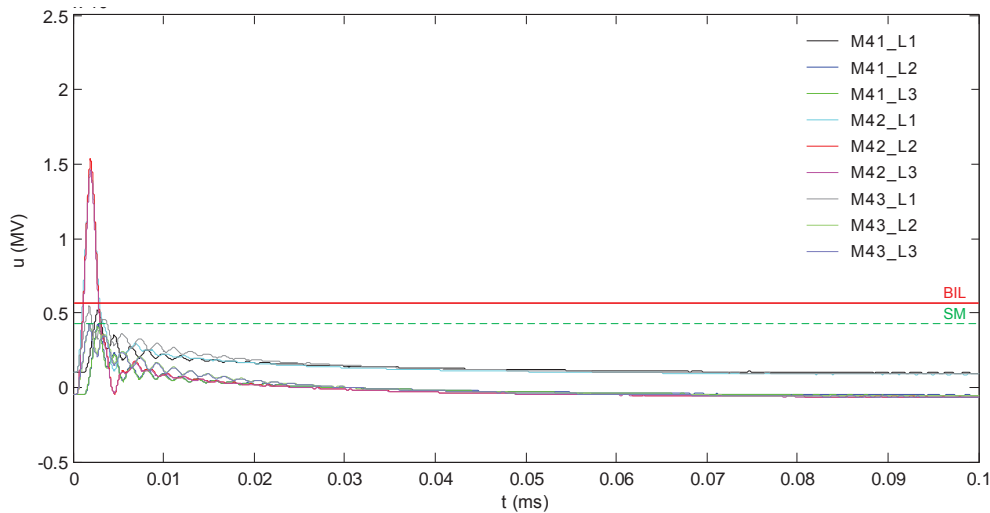


Abb. 41: Simulation 3 - Einschlagort Spannfeld 42-43, ES, keine LA in A4

Die die größte transiente Beanspruchung tritt in Simulation 1 beim direkten Einschlag ins Erdseil auf (Abb. 39). Ohne Leitungsableiter in Abschnitt 4 wird am Einschlagort Mast 42 ($R_E = 402 \Omega$) eine Spannung von 2 MV an allen Phasen erfasst. Bei den Spannfeldeinschlägen in Simulation 2 und 3 erreichen die Spannungen ein Maximum von 1,5 MV.

Die Höhe der Spannung hängt grundsätzlich vom Masterdungswiderstand und von der Wahl des Blitzstromes ab. Beim Einschlag in Spannfeld 41-42 (Simulation 2, Abb. 40) überschreitet die Spannung auch an Mast 41 ($R_E = 111,2 \Omega$) den BIL. Beim Einschlag in Spannfeld 42-43 (Simulation 3, Abb. 41) erreicht die Spannung an Mast 43 ($R_E = 48,9 \Omega$) bereits den Sicherheitsbereich, bleibt jedoch unter dem BIL.

b) Einschläge in die Mastspitze – Einfluss des Masterdungswiderstandes

Um den Einfluss des Masterdungswiderstandes auf die Spannungsbeanspruchung zu untersuchen, wurden bei gleichbleibendem Blitzstrom die Maststandorte variiert (Tab. 10).

Tab. 10: Simulationsübersicht *Einschläge in die Mastspitze - Einfluss des Masterdungswiderstandes*

Simulation Nr.	Dauer in μs	Schrittweite in ns	Blitzentladung		Einschlagort		Masterdungswiderstand in Ω	Leitungsableiter Abschnitt 4
			Amplitude in kA	Kurvenform in μs	Mast	Seil		
1	100	10	-15	1,2/50	49	ES	9,7	Keine
2	100	10	-15	1,2/50	32	ES	20,8	Keine
3	100	10	-15	1,2/50	37	ES	32,1	Keine
4	100	10	-15	1,2/50	45	ES	46,3	Keine
5	100	10	-15	1,2/50	46	ES	57,8	Keine
6	100	10	-15	1,2/50	29	ES	74,3	Keine
7	100	10	-15	1,2/50	35	ES	104,6	Keine
8	100	10	-15	1,2/50	47	ES	141,9	Keine
9	100	10	-15	1,2/50	42	ES	402,0	Keine

In Tab. 11 sind die Werte der Simulationen 1 bis 9 nach aufsteigendem Masterdungswiderstand geordnet. Man erkennt, dass die transiente Spannung proportional zur Höhe des Masterdungswiderstandes ansteigt. Zur besseren Übersicht wurden die Spannungswerte farblich gewichtet. Rot markierte Werte überschreiten den BIL von 550 kV, gelbe Werte befinden sich zwischen der 20%-Sicherheitsgrenze und dem BIL und die grünen Werte befinden sich unterhalb des 20%-Grenzwertes von 440 kV.

Tab. 11: Farblich gewichtete Werte der Spannung U_{L1} der Simulationen 1 bis 9 bei einem Blitzstrom von 15 kA

Nr.	Mast	Re in Ω	U_{L1} in kV
1	49	9,7	305
2	32	20,8	400
3	37	32,1	490
4	45	46,3	595
5	46	57,8	670
6	29	74,3	770
7	35	104,6	945
8	47	141,9	1130
9	42	402,0	1900

Rot ... $U > \text{BIL}$

Gelb ... $\text{SM} (20\%) < U < \text{BIL}$

Grün ... $U < \text{SM}$

Mast 37 weist bei einem Masterdungswiderstand von $32,1 \Omega$ und einem Blitzstrom von 15 kA eine Spannung von 490 kV, knapp unter dem BIL auf. Bei Annahme eines 15 kA-Blitzstromes müssen folglich alle Masten mit einem Masterdungswiderstand größer als $32,1 \Omega$ mit Überspannungsableitern ausgestattet werden.

c) Einschläge in die Mastspitze – Variation des Blitzstromes

Um den Einfluss des Blitzstromes auf die transiente Spannung zu untersuchen, wurde an vier Maststandorten mit unterschiedlichen Masterdungswiderständen der Blitzstrom variiert (Tab. 12).

An Mast 47 ($R_E = 9,7 \Omega$) und Mast 42 ($R_E = 402 \Omega$) wurde in sechs Stufen von 5 kA bis 100 kA simuliert. Nachdem sich ein lineares Verhalten abzeichnete, wurde an den restlichen Maststandorten M47 ($R_E = 141,9 \Omega$) und M37 ($R_E = 32,1 \Omega$) nur mehr bis 20 kA simuliert.

Tab. 12: Simulationsübersicht *Einschläge in die Mastspitze - Variation des Blitzstromes*

Simulation Nr.	Dauer in μs	Schrittweite in ns	Blitzentladung		Einschlagort		Masterdungswiderstand in Ω	Leitungsableiter Abschnitt 4
			Amplitude in kA	Kurvenform in μs	Mast	Seil		
1	100	10	-5	1,2/50	49	ES	9,7	Keine
2	100	10	-10	1,2/50	49	ES	9,7	Keine
3	100	10	-15	1,2/50	49	ES	9,7	Keine
4	100	10	-20	1,2/50	49	ES	9,7	Keine
5	100	10	-50	1,2/50	49	ES	9,7	Keine
6	100	10	-100	1,2/50	49	ES	9,7	Keine
7	100	10	-5	1,2/50	42	ES	402	Keine
8	100	10	-10	1,2/50	42	ES	402	Keine
9	100	10	-15	1,2/50	42	ES	402	Keine
10	100	10	-20	1,2/50	42	ES	402	Keine
11	100	10	-50	1,2/50	42	ES	402	Keine
12	100	10	-100	1,2/50	42	ES	402	Keine
13	50	10	-5	1,2/50	47	ES	141,9	Keine
14	50	10	-10	1,2/50	47	ES	141,9	Keine
15	50	10	-15	1,2/50	47	ES	141,9	Keine
16	50	10	-20	1,2/50	47	ES	141,9	Keine
17	50	10	-5	1,2/50	37	ES	32,1	Keine
18	50	10	-10	1,2/50	37	ES	32,1	Keine
19	50	10	-15	1,2/50	37	ES	32,1	Keine
20	50	10	-20	1,2/50	37	ES	32,1	Keine

In Abb. 42 sind die Spannungs-Spitzenwerte der Phase L1 in Abhängigkeit des Blitzstromes bis 20 kA dargestellt. Die waagrechte rote Linie markiert den BIL, die grün gestrichelte Linie die Sicherheitsspanne von 20%. Es zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Blitzstrom und der transienten Spannungsbeanspruchung.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass Masten mit außerordentlich hohen Masterdungswiderständen auch bei minimalem Blitzstrom eine Ausstattung mit Leitungsableitern erfordern. Mast 42 weist den höchsten Masterdungswiderstand in Abschnitt 4 auf, die Spannung überschreitet bereits bei einem Blitzstrom unter 5 kA den BIL. Der zweithöchste Mastwiderstand tritt an Mast 47 auf, dieser müsste ab einem Blitzstrom von 6,5 kA mit Ableitern ausgestattet werden. Bezieht man die Sicherheitsspanne von 20% mit ein, reichen schon 5 kA als Ausstattungskriterium. Mast 49 weist den kleinsten Masterdungswiderstand in Abschnitt 4 auf und bewegt sich auch bei einem Blitzstrom knapp über 20 kA noch unter der Sicherheitsgrenze von 440 kV.

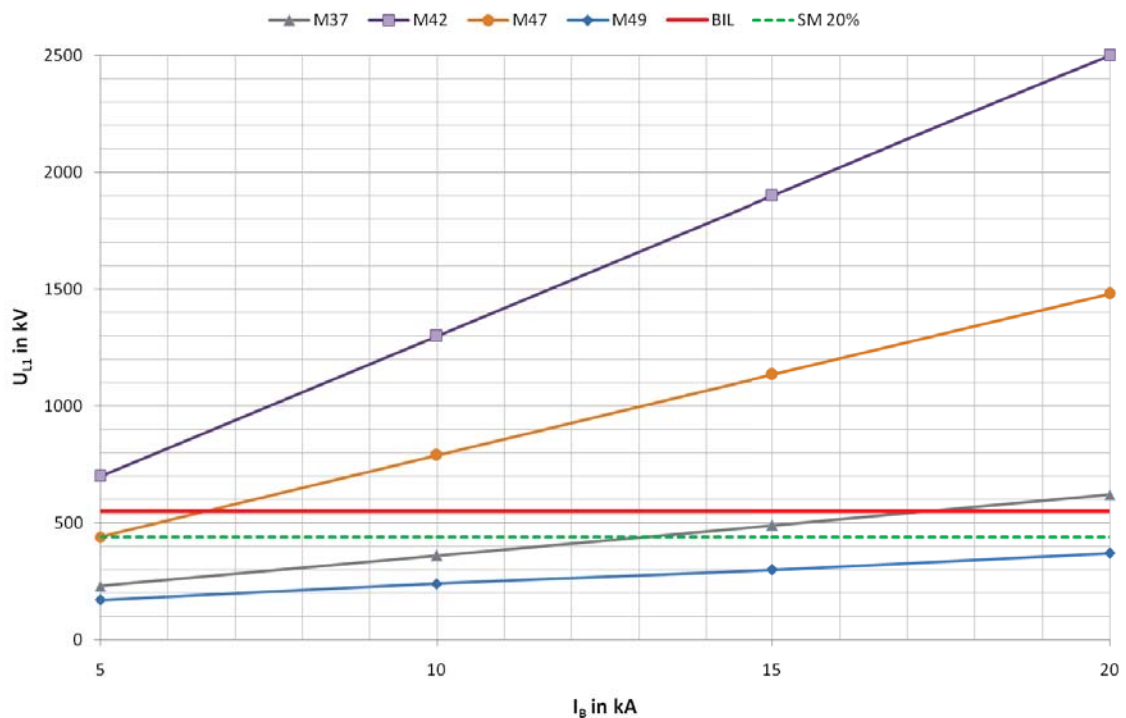


Abb. 42: Maximalwerte der Spannung an Phase L1 in Abhängigkeit des Blitzstromes - linearer Zusammenhang zwischen I_B und U_{L1}

d) Einschläge in die Mastspitze – Variation der Überspannungsableiter

Für die Variation der Überspannungsableiter wurde wie folgt vorgegangen (Abb. 43):

- Keine Leitungsableiter in Abschnitt 4
- Leitungsableiter am Einschlagort
- Leitungsableiter an beiden angrenzenden Nebenmasten des Einschlagortes
- Leitungsableiter am Einschlagort und beiden angrenzenden Nebenmasten

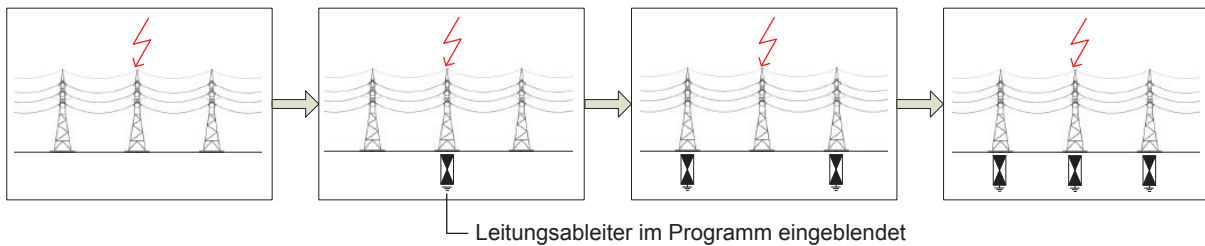


Abb. 43: Simulationsablauf bei der Variation der Überspannungsableiter beim Erdseileinschlag

Die vollständige Variationsübersicht ist in Tab. 13 ersichtlich. Die Variationsberechnungen wurden an drei verschiedenen Maststandorten durchgeführt: an Mast 29, nahe dem Leitungsabschnitt 3, Mast 35 und Mast 42, mit dem höchsten Masterdungswiderstand in Abschnitt 4. Alle Berechnungen wurden mit einem Blitzstrom von 15 kA durchgeführt.

Tab. 13: Simulationsübersicht *Einschläge in die Mastspitze - Variation der Überspannungsableiter*

Simulation Nr.	Dauer in μs	Schrittweite in ns	Blitzentladung		Einschlagort		Masterdungswiderstand in Ω	Leitungsableiter Abschnitt 4
			Amplitude in kA	Kurvenform in μs	Mast	Seil		
1	100	10	-15	1,2/50	29	ES	74,3	Keine
2	100	10	-15	1,2/50	29	ES	74,3	M29
3	100	10	-15	1,2/50	29	ES	74,3	M28, M30
4	100	10	-15	1,2/50	29	ES	74,3	M28 bis M30
5	100	10	-15	1,2/50	29	ES	74,3	Alle Phasen
6	100	10	-15	1,2/50	35	ES	104,6	Keine
7	100	10	-15	1,2/50	35	ES	104,6	M35
8	100	10	-15	1,2/50	35	ES	104,6	M34, M36
9	100	10	-15	1,2/50	35	ES	104,6	M34 bis M36
10	100	10	-15	1,2/50	35	ES	104,6	Alle Phasen
11	100	10	-15	1,2/50	42	ES	402	Keine
12	100	10	-15	1,2/50	42	ES	402	M42
13	100	10	-15	1,2/50	42	ES	402	M41, M43
14	100	10	-15	1,2/50	42	ES	402	M41 bis M43
15	100	10	-15	1,2/50	42	ES	402	Alle Phasen
16	100	10	-15	1,2/50	42	ES	402	M40 bis M44

In den folgenden Abbildungen sind die Kurvenverläufe die Ergebnisse der Simulationen 6 bis 9, mit der Variation der Überspannungsableiter an Mast 35 ($R_E = 104,6 \Omega$) abgebildet. Die Kurven von Simulation 6 und 8 (Abb. 44), sowie Simulation 7 und 9 (Abb. 45) verlaufen beinahe identisch und werden daher nur einmal abgebildet. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurde nur die Phase L1 aufgetragen.

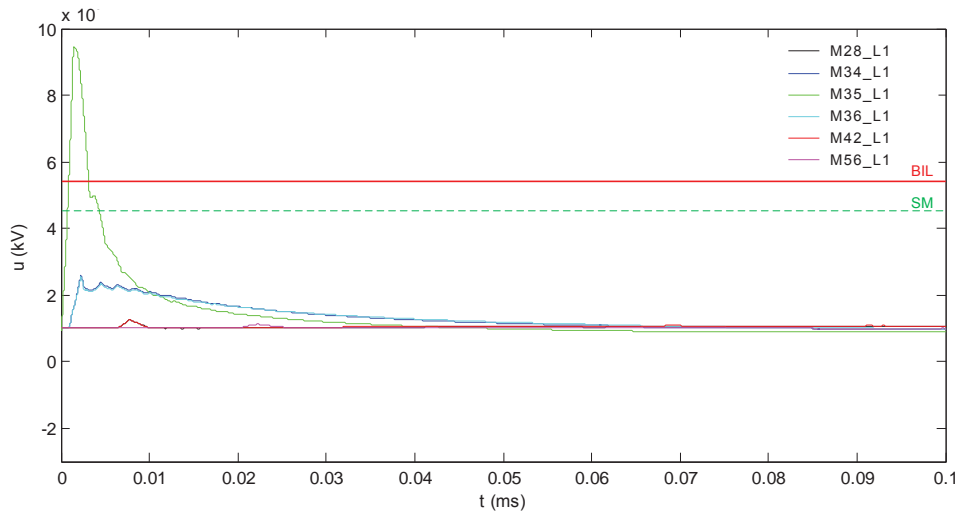


Abb. 44: Simulation 6 / Simulation 8 - Einschlagort M35 ($R_E = 104,6 \Omega$), ES, keine LA in A4 / LA an M34 und M36⁶

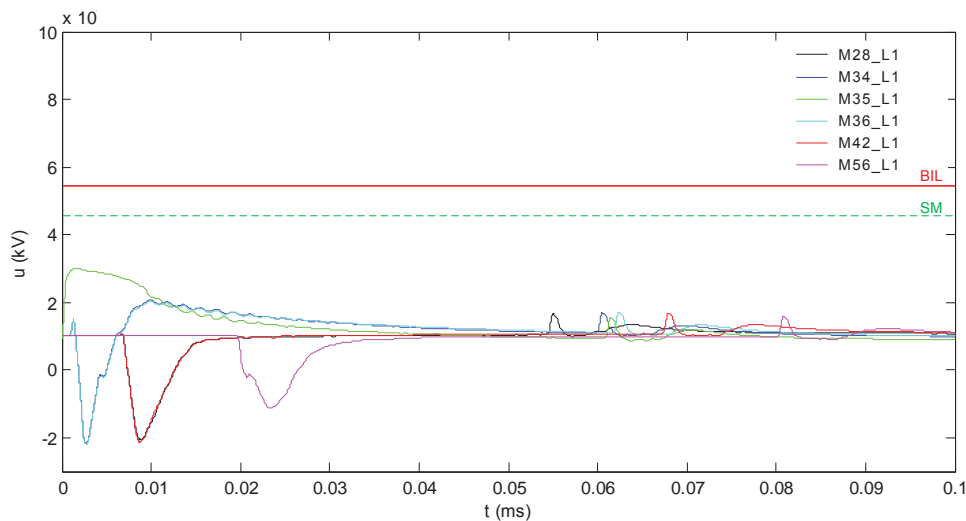


Abb. 45: Simulation 7 / Simulation 9 - Einschlagort M35 ($R_E = 104,6 \Omega$), ES, LA an M35 / LA an M34 bis M36

Ohne den Einsatz von Leitungsableitern am Einschlagort überschreitet die transiente Spannung den BIL. Die Höhe der Spannung ist abhängig vom Masterdungswiderstand am Einschlagort und dem eingepprägten Blitzstrom. Sie beläuft sich ohne Ableiter auf 950 kV.

⁶ Abkürzungen siehe Kapitel 5.2, S. 36

Werden Ableiter am Einschlagort verwendet, begrenzt sich die transiente Spannung auf 300 kV. Eine Ausstattung mit Leitungsableitern an den Nebenhasten ist bei *mäßig kritischen* und *kritischen* Masterdungswiderständen⁷ und der Annahme eines 15 kA-Blitzstromes nicht notwendig.

Eine Ausnahme bildet der als *sehr kritisch* einzustufende Mast 42 ($R_E = 402 \Omega$). Bedingt durch den hohen Masterdungswiderstand erreicht die Spannung am Einschlagort ohne Leitungsableiter 1,9 MV (Simulation 11, Abb. 46)

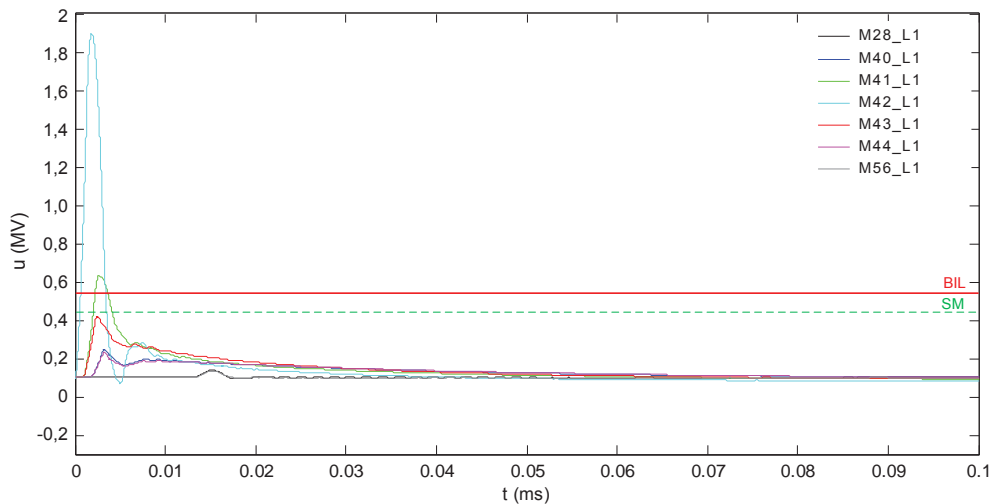


Abb. 46: Simulation 11 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), ES, keine LA in A4

Bei Ausstattung von Mast 42 mit Ableitern überschreiten die Spannungen an den Nebenhasten M40 und M44 die Sicherheitsgrenze (Simulation 12, Abb. 47). Es wird daher zumindest ein Ausrüsten der Nebenhasten M41 und M43 mit Leitungsableitern empfohlen (Simulation 14, Abb. 48).

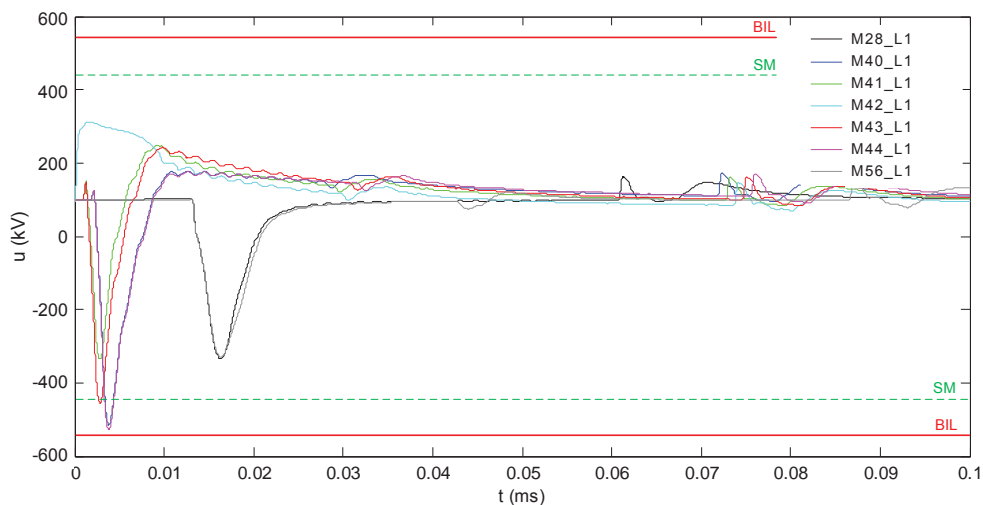


Abb. 47: Simulation 12 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), ES, LA an M42

⁷ Anmerkung: Für die Klassifikation der Masterdungswiderstände siehe Kapitel 2.2.1

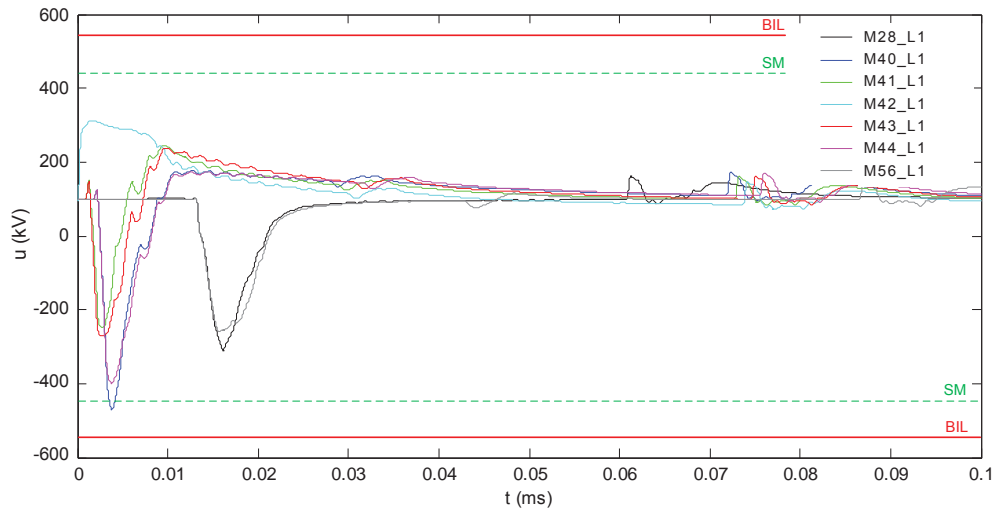


Abb. 48: Simulation 14 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), ES, LA an M41 bis M43

In Simulation 16 (Abb. 49) sind die Leitungsableiter an Mast 40 bis 44 eingeblenet, die Spannungen werden auf maximal 300 kV begrenzt. Bei dieser Variante sind auch unter der Annahme von höheren Blitzströmen die Sicherheitsreserven bis zum Erreichen der Spannungsgrenzen gegeben.

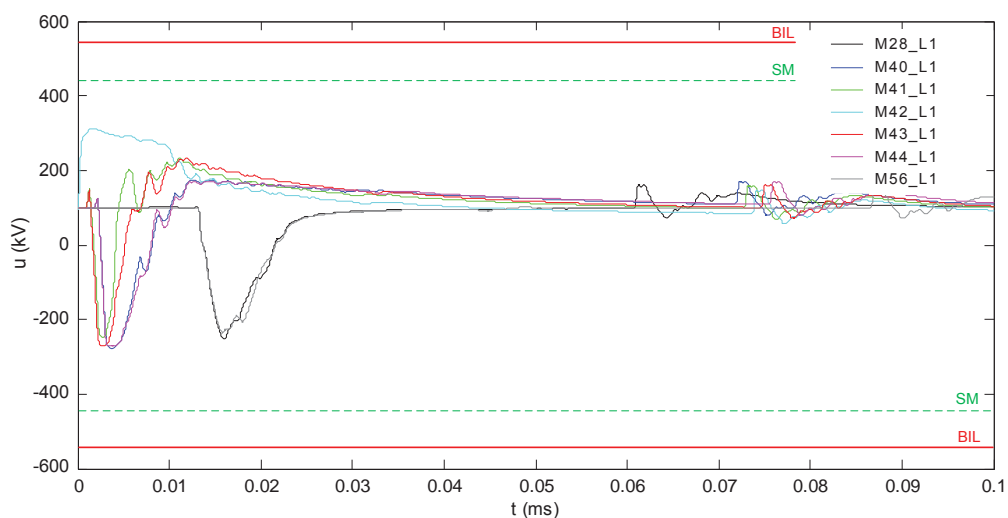


Abb. 49: Simulation 16 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), ES, LA an M40 bis M44

5.3.2 Leiterseileinschläge

Da im Fall der HGL am oberen Ausleger ein Ausrüsten mit Ableitern tabu ist, wurde für die Simulationen der Einschlagort am mittleren Ausleger (Phase L3) gewählt.

a) Leiterseileinschläge – Variation des Blitzstromes

Zur Bestimmung der transienten Spannung ohne die Schutzwirkung der Leitungsableiter wurde der negative Blitzstrom von 5 bis 15 kA variiert, da ein Leiterseileinschlag bei größeren Blitzströmen unwahrscheinlich ist. Dies wurde an zwei unterschiedlichen Maststandorten (Mast 29 und Mast 42) durchgeführt (Tab. 14).

Tab. 14: Simulationsübersicht Leiterseileinschläge - Variation des Blitzstromes

Simulation Nr.	Dauer in μs	Schrittweite in ns	Blitzentladung		Einschlagort		Leitungsableiter Abschnitt 4
			Amplitude in kA	Kurvenform in μs	Mast	Seil	
1	100	10	-5	1,2/50	29	L3	Keine
2	100	10	-10	1,2/50	29	L3	Keine
3	100	10	-15	1,2/50	29	L3	Keine
4	100	10	-5	1,2/50	42	L3	Keine
5	100	10	-10	1,2/50	42	L3	Keine
6	100	10	-15	1,2/50	42	L3	Keine

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die Kurvenverläufe aus Simulation 1 bis 3. Dieselben Spannungs-Maximalwerte am Einschlagort gelten auch für die Simulationen 4 bis 6. Diese werden deshalb nicht gesondert abgebildet.

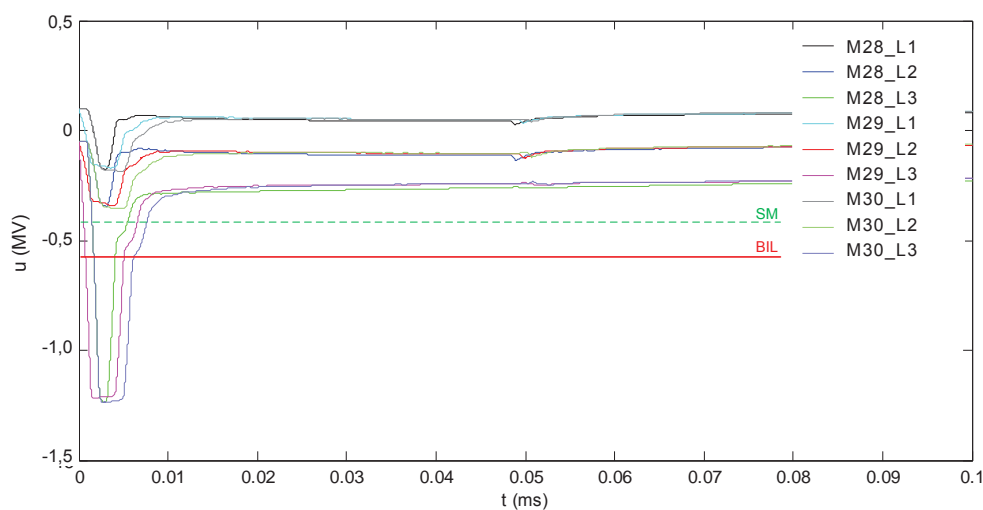


Abb. 50: Simulation 1 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -5 \text{ kA}$, keine LA in A4⁸

⁸ Abkürzungen siehe Kapitel 5.2, S. 36

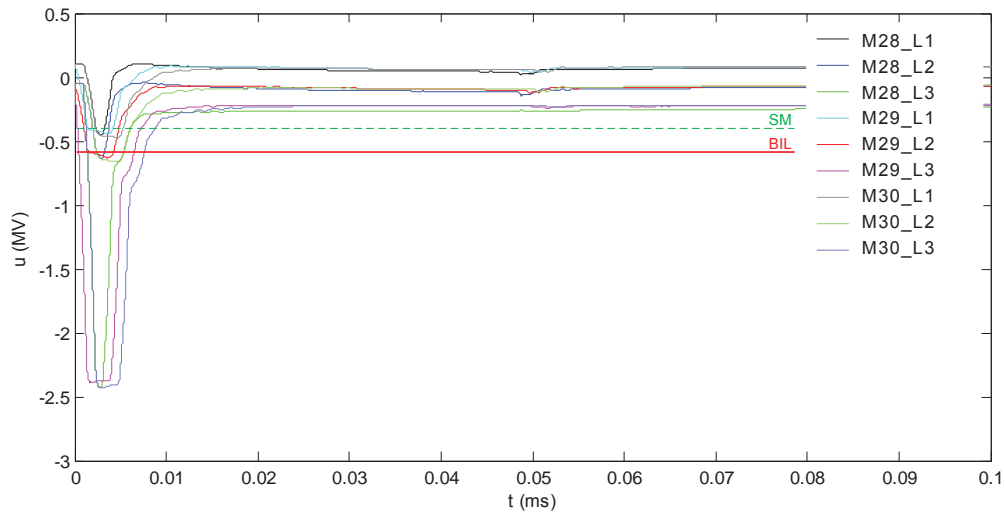


Abb. 51: Simulation 2 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, keine LA in A4

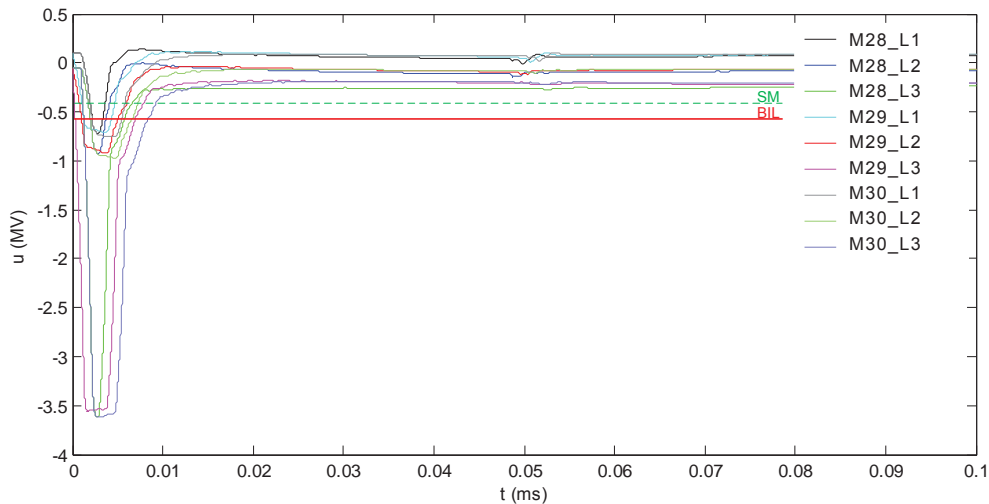


Abb. 52: Simulation 3 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -15 \text{ kA}$, keine LA in A4

Aus den Simulationen ist ersichtlich, dass die transiente Spannungsbeanspruchung wiederum proportional mit dem Blitzstrom ansteigt. Bei -5 kA (Abb. 50) erreicht die Spannung an der betroffenen Phase $1,25 \text{ MV}$, bei -10 kA (Abb. 51) $2,4 \text{ MV}$ und bei -15 kA (Abb. 52) etwa $3,5 \text{ MV}$. Ab einem Blitzstrom von -10 kA werden auch die Spannungen an den nicht betroffenen Phasen über den BIL angehoben.

b) Leiteseileinschläge – Variation der Überspannungsableiter

Um das Verhalten von Überspannungsableitern bei einem Leiteseileinschlag zu untersuchen, wurden folgende Varianten an zwei unterschiedlichen Maststandorten durchgeführt (Abb. 53):

- Keine Leitungsableiter in Abschnitt 4
- Leitungsableiter am Einschlagort, nur in betroffener Phase
- Leitungsableiter am Einschlagort, alle Phasen mit Ableitern ausgestattet
- Leitungsableiter am Einschlagort plus ein angrenzender Nebenmast links und rechts (alle Phasen)

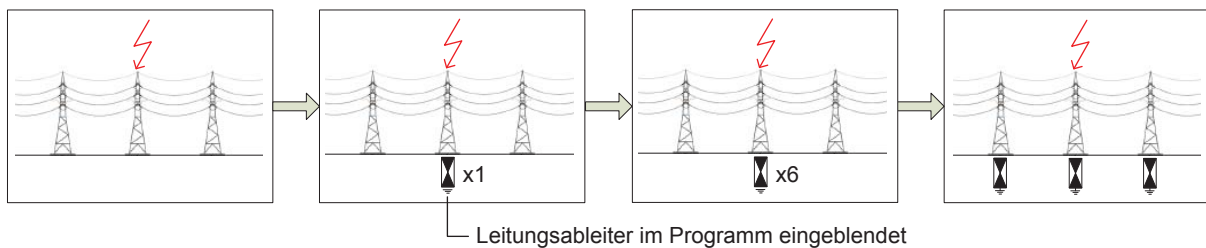


Abb. 53: Typischer Simulationsablauf bei Variation der Überspannungsableiter beim Leiteseileinschlag

Der oben angeführt Simulationsablauf wurde an Mast 30 ($R_E = 97,4 \Omega$) und an Mast 42 ($R_E = 402 \Omega$) gleichermaßen durchgeführt (Tab. 15). Die Variationen wurden mit einem negativen Blitzstrom von 10 kA berechnet.

Tab. 15: Simulationsübersicht Leiteseileinschläge - Variation der Überspannungsableiter

Simulation Nr.	Dauer in μs	Schrittweite in ns	Blitzentladung		Einschlagort		Leitungsableiter Abschnitt 4
			Amplitude in kA	Kurvenform in μs	Mast	Seil	
1	100	10	-10	1,2/50	29	L3	Keine
2	100	10	-10	1,2/50	29	L3	M29 (L3)
3	100	10	-10	1,2/50	29	L3	M29 (alle Phasen)
4	100	10	-10	1,2/50	29	L3	M28 bis M30 (alle Phasen)
5	100	10	-10	1,2/50	42	L3	Keine
6	100	10	-10	1,2/50	42	L3	M42 (L3)
7	100	10	-10	1,2/50	42	L3	M42 (alle Phasen)
8	100	10	-10	1,2/50	42	L3	M41 bis M43 (alle Phasen)
9	100	10	-10	1,2/50	42	L3	M40 bis M44 (alle Phasen)

Die folgenden drei Abbildungen zeigen die Kurvenverläufe von Simulation 2 bis 4. Der Spannungs-Maximalwert aus Simulation 1 (ohne Leitungsableiter) entspricht jenem aus Punkt a) *Leiteseileinschläge – Variation des Blitzstromes* für -10 kA und wird nicht nochmals angeführt. In Simulation 2 werden die Ableiter nur in der betroffenen Phase des Einschlagortes eingeblendet, in Simulation 3 werden alle Phasen am Einschlagort durch

Ableiter geschützt. Die Kurvenverläufe sind beinahe ident und werden nur einmal angeführt (Abb. 54). Die Spannungen an den Nebenmasten überschreiten mit 600 kV den BIL.

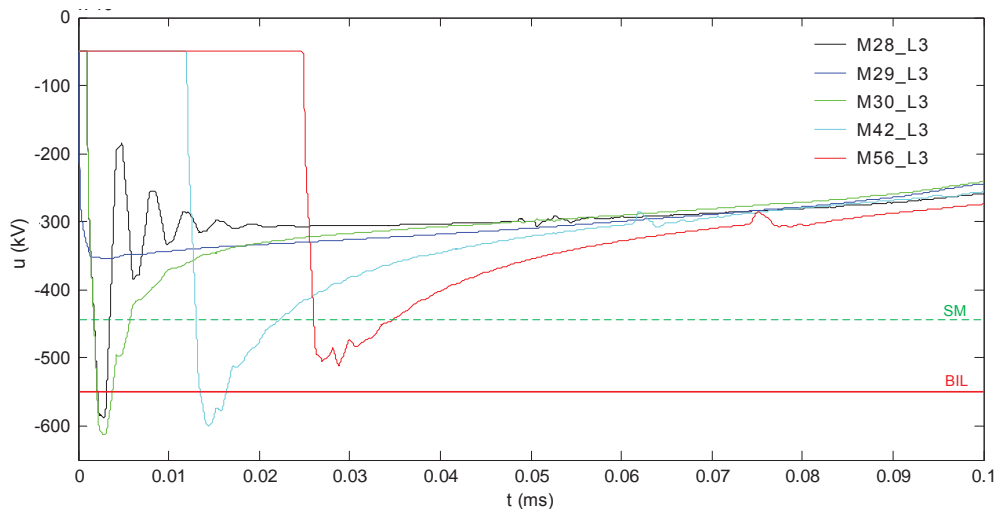


Abb. 54: Simulation 2 / Simulation 3 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, LA an M29 (L3 / alle Phasen)⁹

In Simulation 4 werden der Einschlagort Mast 29 und die beiden angrenzenden Nebenmasten M28 und M30 mit Überspannungsableitern geschützt. Alle Spannungen liegen nun unter der Sicherheitsgrenze von 440 kV.

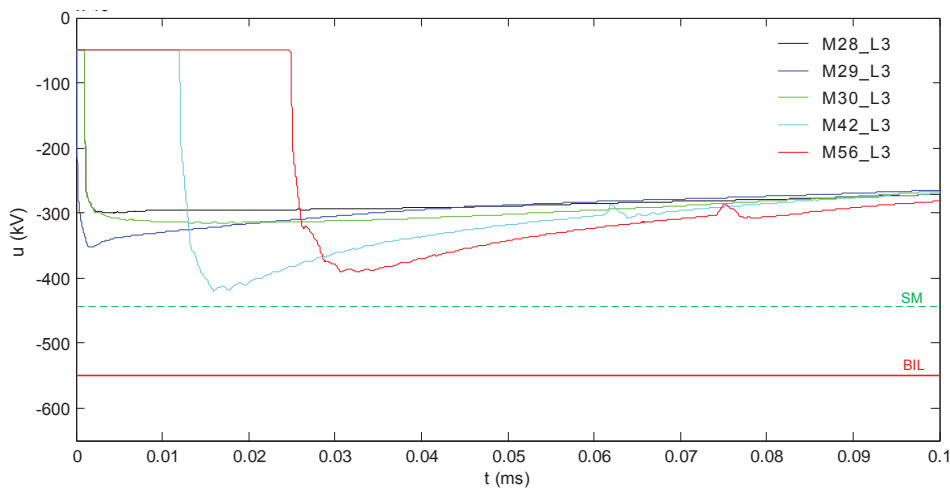


Abb. 55: Simulation 4 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, LA an M28 bis M30

In der Regel ist also die Ausstattung der direkt angrenzenden Masten ausreichend, die Ausnahme bildet wieder der Leiterseileinschlag bei Mast 42 (Simulation 8, Abb. 56). Hier kommt es an Mast 40 beinahe zur Überschreitung des BIL, in jedem Fall aber zu einer Überschreitung des Sicherheitsbereiches.

⁹ Abkürzungen siehe Kapitel 5.2, S. 36

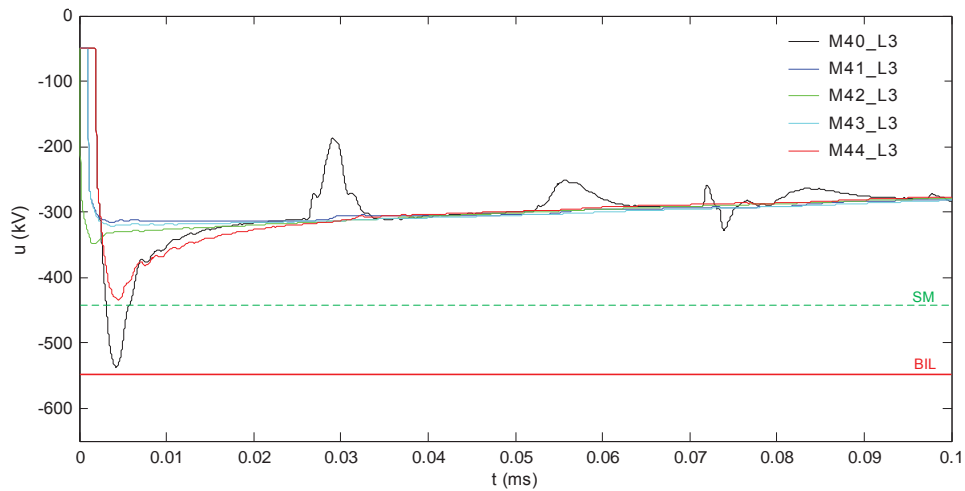


Abb. 56: Simulation 8 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, LA an M41 bis M43

Erweitert man den Einsatz der Ableiter auf Mast 40 bzw. eventuell auch auf Mast 44, ergeben sich auf 300 kV bis 350 kV begrenzte Spannungen (Simulation 9, Abb. 57)

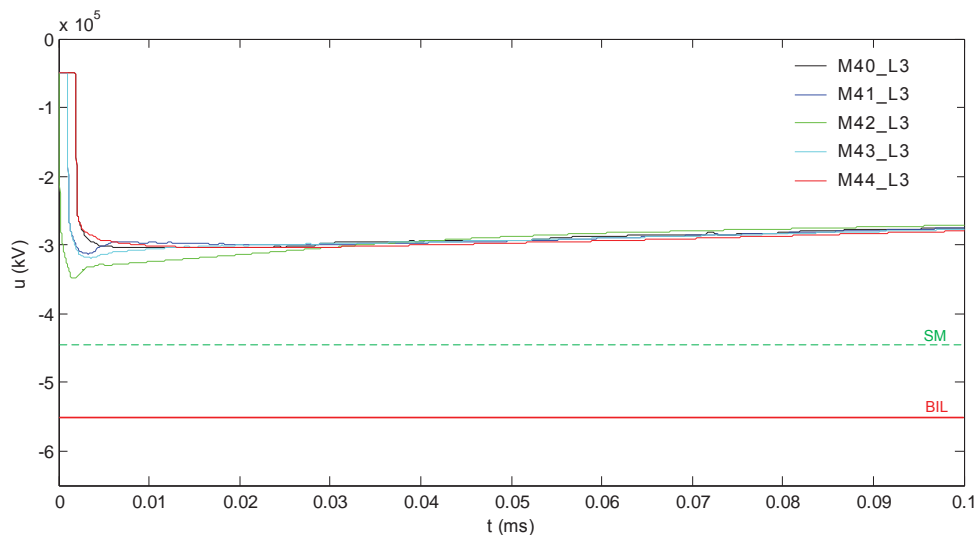


Abb. 57: Simulation 9 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, LA an M40 bis M44

5.4 Schlussfolgerungen

5.4.1 Erdseileinschläge

a) Einschläge in Spannfeldmitte

Aus den Berechnungen hat sich gezeigt, dass Einschläge in Spannfeldmitte immer geringere Auswirkungen als Einschläge direkt in die Mastspitze haben, da sich der Strom in beide Seiten gleichmäßig aufteilt. Auf eine weitere Betrachtung von Einschlägen in Spannfeldmitte wurde daher in den nachfolgenden Berechnungen verzichtet.

Die transiente Beanspruchung hängt immer vom Masterdungswiderstand der angrenzenden Masten ab, der direkte Einschlag in die Mastspitze ist jedoch immer der ungünstigste Fall.

b) Einschläge in die Mastspitze – Einfluss des Masterdungswiderstandes

Die transiente Spannung am Mast steigt proportional mit der Höhe des Masterdungswiderstandes an. Bei Annahme eines Blitzstromes von 15 kA bildet Mast 37 mit einem Masterdungswiderstand von $32,1 \Omega$ den Grenzwert für die Ableiterausstattung. Masten mit einem geringeren Erdungswiderstand rufen in diesem Fall keinen rückwärtigen Überschlag hervor, für alle Masten mit höheren Widerstandswerten empfiehlt sich die Ausstattung mit Ableitern.

c) Einschläge in die Mastspitze – Variation des Blitzstromes

Der auftretende Blitzstrom ist maßgeblich für die Höhe der transienten Spannungsbeanspruchung am Mast verantwortlich. Dabei ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem eingepprägten Blitzstrom und der transienten Spannung. Für Masten mit außerordentlich hohem Masterdungswiderstand, wie beispielsweise Mast 42, ist das Kriterium zur Ausstattung mit Ableitern schon bei minimalen Blitzströmen erfüllt.

d) Einschläge in die Mastspitze – Variation der Überspannungsableiter

Bei einem Einschlag in den Mast wird das gesamte Mastpotential angehoben, bei einem hohen Masterdungswiderstand kann dies zu einem rückwärtigen Überschlag auf die Phasenseile führen. Bei Wirken des Überspannungsableiters wird die transiente Spannung auf das Restspannungsniveau des Leitungsableiters reduziert. Daher empfiehlt es sich, sofern möglich, alle Phasen eines Mastes mit Leitungsableitern auszustatten.

Die Spannung an den Nebemasten ist abhängig von deren Masterdungswiderstand. Eine Ausstattung von benachbarten Masten mit Leitungsableitern ist im Fall eines Erdseileinschlages in der Regel nicht nötig. Die Ausnahme bildet der extrem hochohmige Mast 42. Hier empfiehlt es sich aus der Sicht des direkten Masteinschlages, die

Nebenumasten M41 und M43 ebenfalls durch Ableiter zu schützen, um die Spannungsbeanspruchung knapp unter dem BIL zu halten.

5.4.2 Leiterseileinschläge

Leiterseileinschläge spielen in der Praxis eher eine untergeordnete Rolle, da die Wahrscheinlichkeit, dass der Blitz ins Phasen- und nicht ins darüber liegende, schützende Erdseil einschlägt, wesentlich geringer ist. In unebenem Gelände kann die Wahrscheinlichkeit für einen Leiterseileinschlag, beispielsweise an Geländekanten, aber erhöht sein.

a) Leiterseileinschläge – Variation des Blitzstromes

Zur Bestimmung der transienten Spannungsbeanspruchung bei einem Leiterseileinschlag ohne Leitungsableiter wurde der Blitzstrom von 5 bis 15 kA variiert.

Die auftretende Spannung ist, ähnlich dem direkten Mastereinschlag, direkt proportional zum eingepprägten Blitzstrom (Tab. 16) und weitgehend unabhängig vom Masterdungswiderstand.

Tab. 16: Höhe der transienten Spannung beim Leiterseileinschlag ist direkt proportional zum eingepprägten Blitzstrom (Leitungsableiter in Abschnitt 4 ausgeblendet)

I_B in kA	U_{L3} in MV
-5	1,24
-10	2,45
-15	3,65

b) Leiterseileinschläge – Variation der Überspannungsableiter

Bei Einsatz von Überspannungsableitern am Einschlagort kann die transiente Spannung auf das Restspannungsniveau des Ableiters begrenzt werden. Je nach Masterdungswiderstand des betroffenen Mastes, kann es auch an den nicht betroffenen Phasen L1 und L2 zum Überschlag kommen. Eine Ausstattung aller Phasen eines Mastes ist daher sinnvoll.

Bei Blitzströmen von 10 kA und mehr empfiehlt es sich ebenfalls die Nebenumasten mit Ableitern zu schützen. Im Fall von Mast 42 sollte der Schutz durch Ableiter in jedem Fall auf Mast 40, eventuell auch auf Mast 44 erweitert werden, um Sicherheitsreserven zu gewinnen.

6 Entscheidungskriterien für die Positionierung der Überspannungsableiter

Die Entscheidungskriterien für die Positionierung der Überspannungsableiter reflektieren alle relevanten Ergebnisse und Analysen der vorhergehenden Kapitel. Folgende Kriterien werden dabei herangezogen:

- Ergebnisse der Variationsberechnungen
- Ausgewertete Blitzortungsdaten
- Störungsanalysen des Netzbetreibers
- Geländefaktoren bzw. Exposition der einzelnen Maststandorte

6.1 Ergebnisse der Variationsberechnungen

Die Ergebnisse der Variationsberechnungen liefern wichtige Hinweise für die Positionierung der Leitungsableiter in Phase und Ort.

Die Amplitude der transienten Spannung steigt proportional mit dem Masterdungswiderstand am Einschlagort an. Es wird daher empfohlen, besonders hochohmige Masten mit Ableitern auszustatten. Wegen der Gefahr von (rückwärtigen) Überschlägen sollten darüberhinaus alle Phasen eines Mastes (sofern möglich) mit Leitungsableitern bestückt werden. Eine Ausrüstung der Nebenmasten ist im Fall eines Erdseileinschlages in der Regel nicht nötig. Ausgenommen sind jene Masten, die an Mast 42 angrenzen, insbesondere Mast 41 und 43. Durch eine Erweiterung des Schutzes auf Mast 40, eventuell Mast 44 werden zusätzliche Sicherheitsreserven gewonnen. Im Fall eines Leiterseileinschlages würde auch ein Ausstatten der direkt angrenzenden Nebenmasten mit Ableitern Sinn machen.

Denkbar wäre daher eine Ausrüstung mit Leitungsableitern aller Masten, die *kritische* und *sehr kritische* Masterdungswiderstände (in Anlehnung an die Klassifizierung der Masterdungswiderstände in Kapitel 2.2.1) aufweisen. Zusätzlich wird die Ausstattung auf die angrenzenden Nebenmasten von Mast 42 erweitert. Das entspricht, im Falle einer Ausrüstung von Mast 40 bis Mast 44, einer Anzahl von 16 Masten. Zur besseren Veranschaulichung sind die betroffenen Masten in Abb. 58 entlang des Höhenprofils abgebildet und rot markiert.

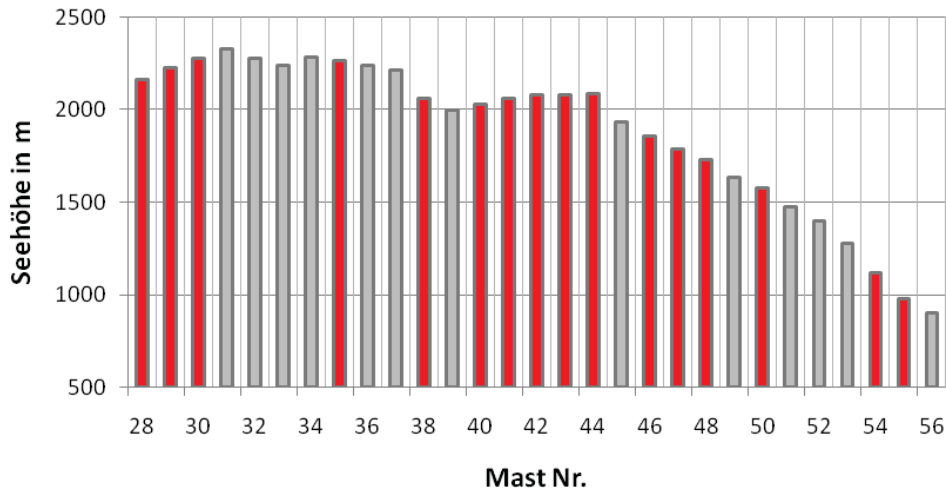


Abb. 58: Veranschaulichung der Masten mit *kritischen* und *sehr kritischen* Masterdungswiderständen anhand des Höhenprofils (rote Markierung)

Bei Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Variationsberechnungen des Blitzstromes muss die Ausstattung der Masten mit Ableitern auch auf Masten mit geringerem Masterdungswiderstand als der Medianwert von 53Ω ausgeweitet werden.

Bei Annahme eines Blitzstromes von 15 kA bildet Mast 37 mit einem Masterdungswiderstand von $32,1 \Omega$ den Grenzwert für die Ausrüstung mit Überspannungsableitern, was die Anzahl der auszurüstenden Masten und installierten Leitungsableiter erhöht (Abb. 59).

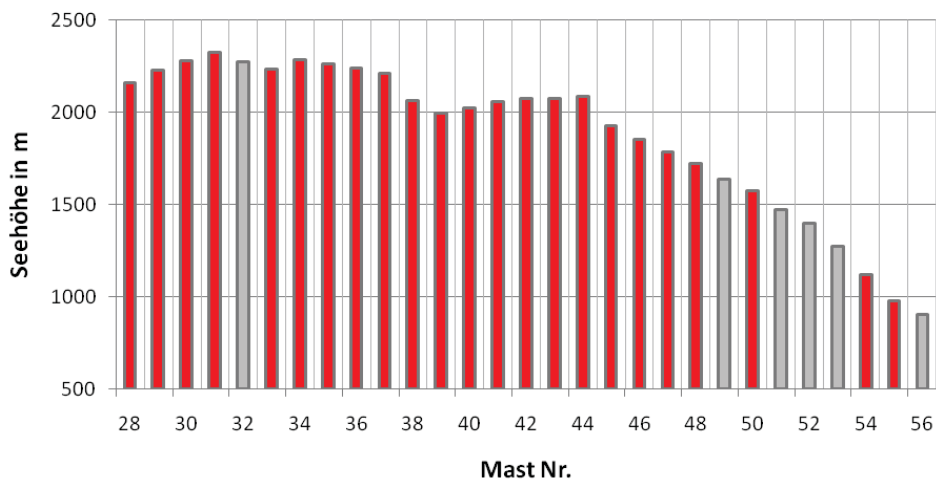


Abb. 59: Mit Ableitern auszustattende Masten (rote Markierung) bei einem Blitzstrom von 15 kA

Aus den Variationsberechnungen wurde zusätzlich noch der *Grenzblitzstrom* berechnet, bei dem alle Masten in Abschnitt 4 mit Leitungsableitern ausgestattet werden müssten. Je nach Wahl der Spannungsgrenze (mit oder ohne Sicherheitsbereich) ergeben sich unterschiedliche Stromgrenzen (Tab. 17). Bei Annahme eines Sicherheitsbereiches von 20%, bedarf es eines Stromes von 25 kA, um die Spannungsgrenze von 440 kV an allen

Masten zu überschreiten. Ohne zusätzlichen Sicherheitsbereich und einem BIL von 550 kV ergibt sich ein Blitzstrom von 33 kA zur Erfüllung dieses Kriteriums.

Tab. 17: Grenzblitzstrom mit / ohne Sicherheitsspanne, ab dem jeder Mast in Abschnitt 4 mit Ableitern ausgestattet werden müsste

	Safety Margin 20%	Safety Margin 0%
	$U_{\max} = 440 \text{ kV}$	$U_{\max} = 550 \text{ kV}$
Blitzstrom in kA	25	33

6.2 Blitzortungsdaten

6.2.1 Korridoranalyse

Aus der Korridoranalyse der Blitzortungsdaten konnten fünf Spannungsfelder mit besonders hoher Blitzaktivität herausgefiltert werden. Dafür wurden die Wolke-Erde-Entladungen aus dem Zeitraum 2003 bis 2013 in einem GIS¹⁰-Programm gezählt (Abb. 60). Spannungsfeld für Spannungsfeld wurde so die Anzahl der Entladungen in Leitungsabschnitt 4 erfasst. Fünf Spannungsfelder zeigten dabei eine erhöhte Blitzaktivität.



**Abb. 60: Erfassung der Entladungen im Abstand von 200 m bzw. 400 m zur HGL
(Datenquelle: ALDIS)**

Für die Ermittlung der Spannungsfelder mit der höchsten Blitzaktivität wurde ein Raster im Abstand von jeweils 200 m und 400 m normal zur Leitungsstrasse gezogen und die Anzahl der darin enthaltenen Wolke-Erde-Entladungen (positiv und negativ) visuell erfasst.

¹⁰ Geoinformations-Software

Dabei kristallisierten sich im Abstand von 400m fünf Spannfelder mit überdurchschnittlicher Blitzaktivität heraus (Abb. 61):

- Spannfelder von Mast 27 - 30
- Spannfeld 34 – 35
- Spannfeld 36 – 37

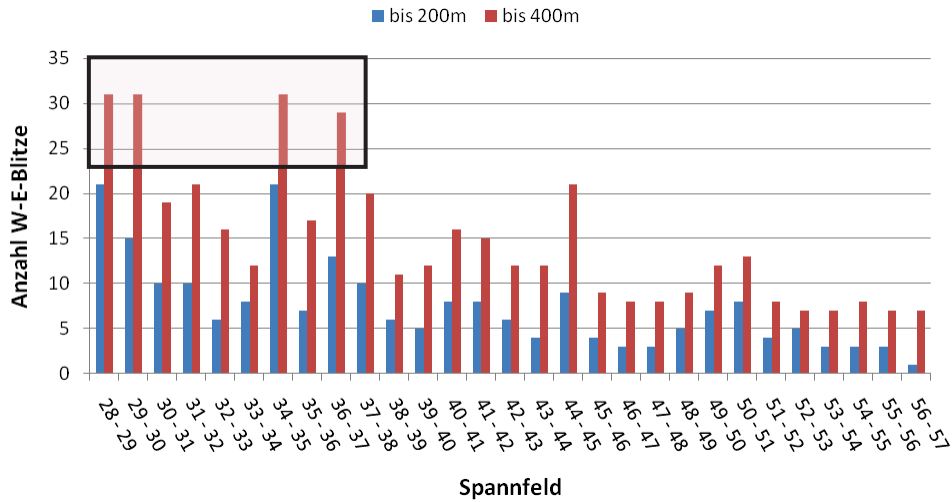


Abb. 61: Anzahl der Wolke-Erde-Blitze in Abschnitt 4 in 200 m und 400 m Abstand zur Leitung (Datenquelle: ALDIS)

Laut der Blitzdichteanalyse aus Kapitel 4.2 können die oben genannten gefährdeten Spannfelder um den Bereich von Mast 40 bis Mast 44 erweitert werden. Aus der Analyse der *Ground Strike Points* geht hervor, dass die höchste Dichte an Blitzfußpunkten im Anschluss an Abschnitt 3 liegt.

In Abb. 62 sind alle aus den Blitzortungsdaten beteiligten Masten nochmals im Höhenprofil veranschaulicht. Daraus ist zu erkennen, dass vor allem die höher gelegenen Spannfelder betroffen sind.

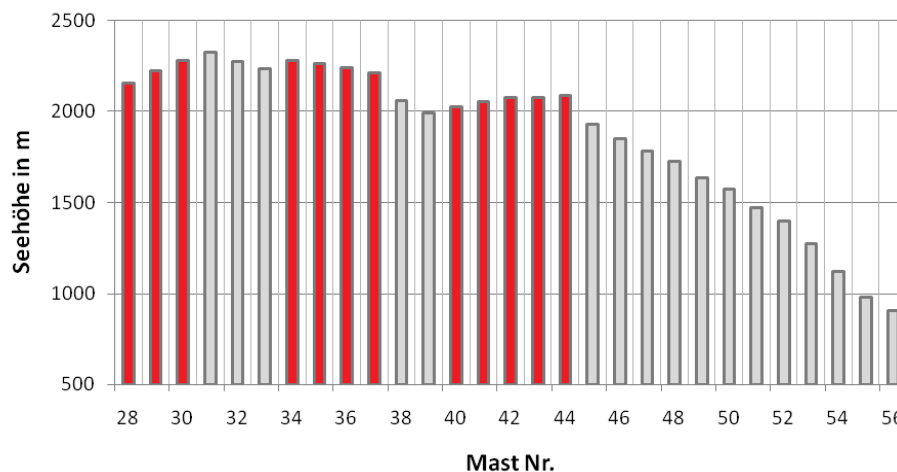


Abb. 62: Gefährdete Masten (rote Markierung) aus den Blitzortungsdaten im Zeitraum 2003 bis 2013 (Datenquelle: ALDIS)

6.2.2 Störungsanalysen

Mit Hilfe der Daten der Leitungsschutzrelais ist es dem Netzbetreiber möglich, zu einigen Störungen auch die Entfernung zum Fehlerort anzugeben. Im Zuge der Masterarbeit wurden die Kilometerangaben des Leitungsschutzes beider Umspannwerke anhand der bekannten Spannfeldlängen ausgewertet. Auf diese Weise konnten einige Störungen einem Mast bzw. Spannfeld zugeordnet werden. In Tab. 18 sind die lokalisierten Störungen in Leitungsabschnitt 4 des Zeitraumes 2008 bis 2013 aufgelistet. Jene Störungen, die nur von einem Leitungsschutzrelais detektiert wurden, sind in der Tabelle nicht aufgeführt.

Tab. 18: Auswertung der exakt lokalisierbaren Störungen in Abschnitt 4 im Zeitraum 2008 bis 2013 (Datenquelle: KNG)

Nr.	Mast Nr.	Datum	Uhrzeit	Anmerkung ¹¹
1	29	21.07.2012	01:04:24	von beiden UW geortet
2	32 - 33	09.07.2012	23:17:55	von beiden UW geortet
3	42	13.08.2009	20:36:57	von beiden UW geortet
4	43 - 44	23.06.2011	13:41:43	von beiden UW geortet
5	47 - 48	28.07.2009	07:28:12	von beiden UW geortet

In Abb. 63 sind die Masten bzw. Spannfelder aus obiger Tabelle rot markiert entlang des Höhenprofils eingetragen.

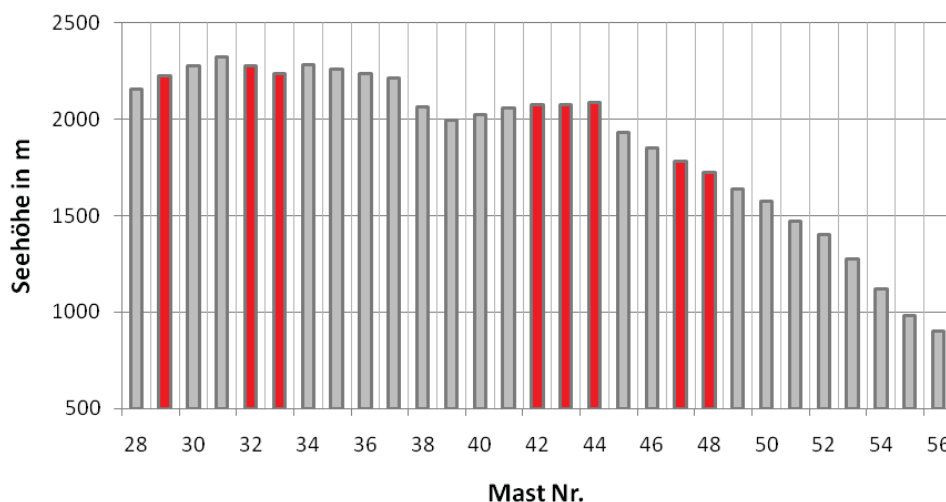


Abb. 63: Masten, denen Störungen eindeutig zugeordnet werden konnten im Höhenprofil aufgetragen

¹¹ Eine Störung kann nur dann einem Mast oder Spannfeld zugeordnet werden, wenn die angegebene Entfernung des Leitungsschutzes beider Umspannwerke übereinstimmt.

6.3 Geländefaktoren

Dieses Entscheidungskriterium berücksichtigt den Verlauf der Hochgebirgsleitung im Gelände, sowie die Exposition der einzelnen Maststandorte. Die Beurteilung erfolgte visuell durch Begehung und fand Bestätigung im Längensprofil, das vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellt wurde:

- Zu den exponierten Masten zählen laut Längensprofil: Mast 31, 34, 37 und 44
- Zu den günstig gelegenen Masten zählen: Mast 33 und Mast 39

Um die Exposition der Masten in Leitungsabschnitt 4 zu verdeutlichen ist in Abb. 64 beispielhaft Mast 37 abgebildet.



Abb. 64: Beispiel einer Mastexposition - Mast 37 in Abschnitt 4 der HGL

Einen weiteren wichtigen Punkt in der Geländebetrachtung stellt der Verlauf der Waldgrenze dar. Diese reicht im Bereich der HGL bis auf eine Seehöhe von etwa 2000 m bis 2100 m, was in etwa der Umgebung um Mast 39 und Mast 40 entspricht. Alle Masten die höher bzw. weiter südlich liegen (Mast 28 bis 38) können generell als *exponiert* betrachtet werden.

Abb. 65 zeigt die Mastexpositionen anhand des Höhenprofils der Leitung zur besseren Veranschaulichung. Die rot markierten Masten sind an Geländekanten positioniert, also begünstigt für Einwirkungen durch atmosphärische Entladungen. Gelb markierte Masten befinden sich oberhalb der Waldgrenze, was auf Mast 28 bis Mast 38 zutrifft. Die grün markierten Masten befinden sich in Geländesenken und wirken daher weniger anziehend auf Blitzentladungen.

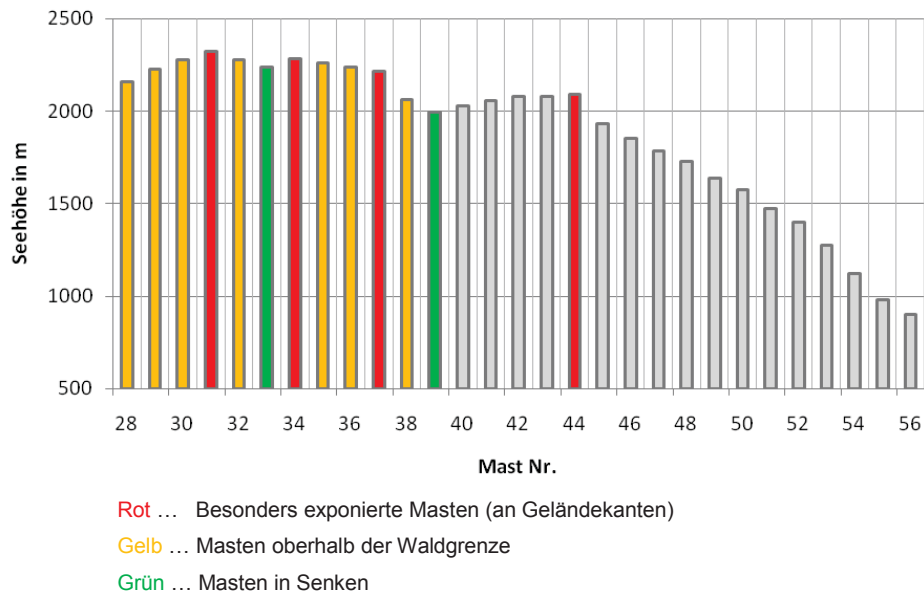


Abb. 65: Höhenprofil mit Kennzeichnung besonders exponierter Masten, Masten oberhalb der Waldgrenze und geländebegünstigter Masten (Datenquelle: KNG)

6.4 Übersicht der Entscheidungskriterien

In Tab. 19 sind die einzelnen Entscheidungskriterien mit den durch Ableiter zu schützenden Masten nebeneinander aufgereiht und farblich gekennzeichnet. Dies erleichtert den Vergleich zwischen den Entscheidungskriterien und die Ausarbeitung des gesuchten Ausrüstungskonzeptes.

Die Ergebnisse der Variationsberechnungen sind in den ersten beiden Spalten aufgelistet. Die *kritischen* und *sehr kritischen* Masterdungswiderstände (größer als 53Ω) sind in der Spalte *Var. R_E* markiert. In der Spalte *Var. I_B* werden diese Masten um die Ergebnisse aus der Variation des Blitzstromes erweitert. Alle Masten mit einem Masterdungswiderstand größer als 32Ω sind in diesem Fall farblich markiert.

In der Spalte *Var. R_E* sind die kritischen Masten aufgetragen, die aus den ausgewerteten Blitzortungsdaten hervorgehen.

Die aus den Störungsanalysen des Netzbetreibers betroffenen Masten wurden in der Spalte *Störungen* hervorgehoben.

In der Spalte *Gelände* sind alle Masten über der Waldgrenze, sowie die besonders exponierten Masten an Geländekanten farblich markiert.

Tab. 19: Übersicht der Entscheidungskriterien: Farblich markierte Felder bedeuten eine Ausstattung des jeweiligen Mastes mit Leitungsableitern

Mast Nr.	Entscheidungskriterien				
	Var. R _E	Var. I _B	Blitzortung	Störungen	Gelände
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					
41					
42					
43					
44					
45					
46					
47					
48					
49					
50					
51					
52					
53					
54					
55					
56					

7 Ausrüstungskonzept mit Überspannungsableitern

In diesem Kapitel wird das erarbeitete Ausrüstungskonzept mit Überspannungsableitern vorgestellt. Auf Basis der Entscheidungskriterien aus Kapitel 6 wurden vier Möglichkeiten herausgearbeitet, die sich in der Anzahl der auszustattenden Masten, der benötigten Leitungsableiter¹² und somit auch in Aufwand und Kosten unterscheiden.

Stufe 1: Vollaussstattung

Unter *Vollaussstattung* wird die Ausrüstung mit Überspannungsableitern aller 29 Masten in Leitungsabschnitt 4 der HGL verstanden. Dabei wird eine Anzahl von insgesamt 116 Ableitern auf beiden Systemen des mittleren und unteren Auslegers installiert. Dies entspricht einem Ausrüstungsgrad von 100% der Masten in Abschnitt 4.

Dieses Konzept gewährleistet den maximal möglichen Schutz gegen die Auswirkungen atmosphärischer Entladungen in Abschnitt 4, bringt jedoch auch die höchsten Kosten mit sich. Dabei müssen nicht nur die Kosten für die Anschaffung der Ableiter, sondern auch die Kosten für die benötigten Verstärkungen der Masten einkalkuliert werden. Speziell in Abschnitt 4 finden sich einige schwer zugängliche Masten, die unter Umständen nur über den Luftweg zu erreichen sind.

Stufe 2: Reduzierte Vollaussstattung

Unter *Reduzierte Vollaussstattung* wird die Ausrüstung mit Überspannungsableitern von 21 Masten in Leitungsabschnitt 4 der HGL verstanden. Dabei wird eine Anzahl von insgesamt 84 Ableitern auf beiden Systemen des mittleren und unteren Auslegers installiert. Dies entspricht einem Ausrüstungsgrad von 72% der Masten in Abschnitt 4.

Bei diesem Konzept wird die Vollaussstattung um den störungsfreien Bereich von Mast 49 bis Mast 56 reduziert. Die Blitzortungsdaten und Störungsanalysen weisen in diesem Teil des Leitungsabschnittes 4 keine Auffälligkeiten auf und werden daher vernachlässigt.

In Abb. 66 sind die mit Ableitern auszurüstenden Masten entlang des Höhenprofils dargestellt und rot markiert.

¹² Die Anzahl der benötigten Leitungsableiter wird stets auf die Ausstattung beider Systeme des mittleren und unteren Auslegers bezogen und stellt das Vierfache der Mastanzahl dar.

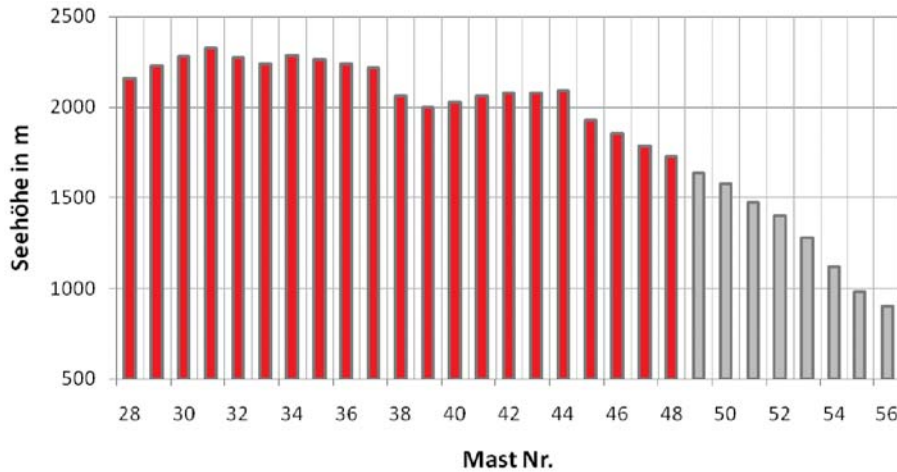


Abb. 66: Stufe 2: Reduzierte Vollausrüstung

Stufe 3: Ausstattung nach Geländefaktoren

Unter *Ausstattung nach Geländefaktoren* wird die Ausrüstung mit Überspannungsableitern von 15 Masten in Leitungsabschnitt 4 der HGL verstanden. Dabei wird eine Anzahl von insgesamt 60 Ableitern auf beiden Systemen des mittleren und unteren Auslegers installiert. Dies entspricht einem Ausrüstungsgrad von 51% der Masten in Abschnitt 4.

Bei diesem Konzept werden zunächst die besonders exponierten Masten Nr. 31, 34, 37 und 44 mit Ableitern ausgestattet. Der Schutz wird auf Grund der Störungshäufung oberhalb der Waldgrenze auf den gesamten Bereich von Mast 28 bis 38 ausgeweitet. Die Masten 40 bis 44 werden wegen des sehr kritischen Masterdungswiderstandes an Mast 42 auch in das Ausrüstungskonzept aufgenommen.

Nicht mit Ableitern ausgestattet werden die in geländebegünstigten Senken liegenden Masten Nr. 33 und 39. Auf Grund der geschützten Lage und des *mäßig kritischen* Masterdungswiderstandes wird auf einen Schutz durch Leitungsableiter verzichtet.

In Abb. 67 sind die mit Ableitern auszurüstenden Masten entlang des Höhenprofils dargestellt und rot markiert.

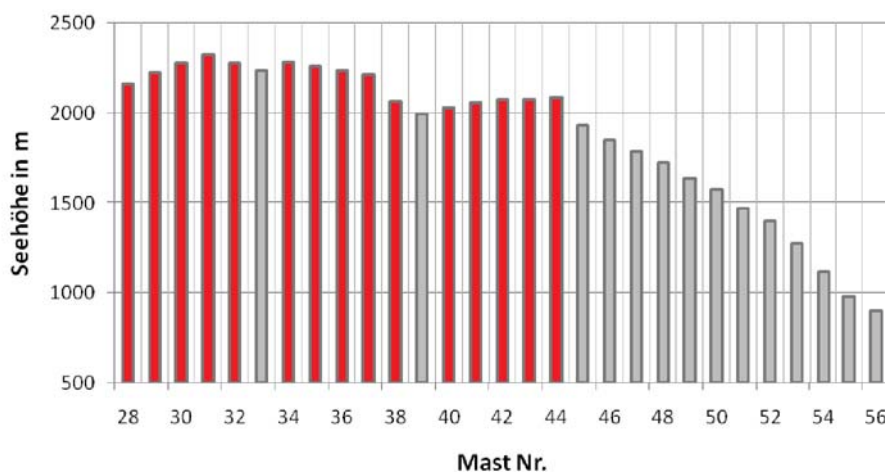


Abb. 67: Stufe 3: Ausstattung nach Geländefaktoren

Stufe 4: Minimalausstattung

Unter *Minimalausstattung* wird die Ausrüstung mit Überspannungsableitern von 13 Masten in Leitungsabschnitt 4 der HGL verstanden. Dabei wird eine Anzahl von insgesamt 52 Ableitern auf beiden Systemen des mittleren und unteren Auslegers installiert. Dies entspricht einem Ausrüstungsgrad von 45% der Masten in Abschnitt 4.

Als Basis für dieses Konzept wird die Ausrüstungsstufe 3 herangezogen und um zwei weitere Masten reduziert. Die Masten Nr. 32 und 36 weisen einen *mäßig kritischen* Masterdungswiderstand auf und werden daher nicht mit Ableitern ausgestattet.

Der Vorteil dieses Konzeptes liegt klar in der Kostenersparnis, verglichen mit der Vollausrüstung aus Stufe 1. Nachteilig ist, dass die Wahrscheinlichkeit für Überschläge an der Leitung bei Blitzeinwirkung steigt. Wie aus den Variationsberechnungen hervorgeht, können bei größeren Blitzströmen auch an den Nebenmasten des Einschlagortes transiente Überspannungen auftreten.

In Abb. 68 sind die mit Ableitern auszurüstenden Masten entlang des Höhenprofils dargestellt und rot markiert.

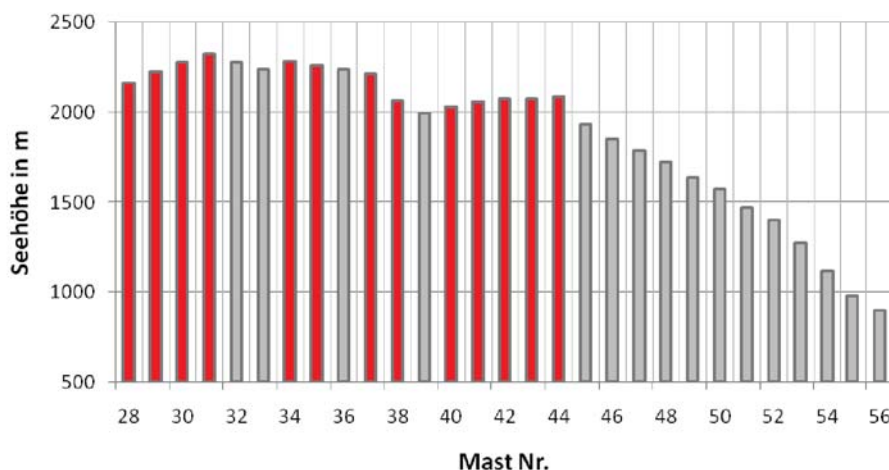


Abb. 68: Stufe 4: Minimalausstattung

In Tab. 20 ist das Ausrüstungskonzept mit den jeweils auszustattenden Masten und benötigten Leitungsableitern nochmals übersichtlich aufgeschlüsselt.

Tab. 20: Übersicht und Beschreibung der Stufen des Ausrüstungskonzeptes

Stufe	Anzahl zu schützender Masten	Anzahl benötigter Ableiter	in Prozent	Bezeichnung
1	29	116	100%	Vollausrüstung
2	21	84	72%	Reduzierte Vollausrüstung
3	15	60	52%	Ausstattung nach Geländefaktoren
4	13	52	45%	Minimalausstattung

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit einer optimierten örtlichen Positionierung von modernen Metalloxid-Überspannungsableitern entlang einer 110-kV-Hochgebirgsfreileitung in Kärnten. Auf Grund der außerordentlich hohen Mastdungswiderstände im felsigen Gelände und der Exponiertheit einiger Maststandorte kann ein verbesserter Schutz gegen atmosphärische Überspannungen nur durch den Einsatz von Leitungsableitern gewährleistet werden.

Einleitend wurden die vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellten geografischen und elektrischen Daten, sowie die Störungsstatistik der Hochgebirgsleitung der vergangenen zehn Jahre vorgestellt. Anschließend wurden die theoretischen Grundlagen für die weiteren Betrachtungen erläutert. Dabei wurden insbesondere die Auswirkungen atmosphärischer Überspannungen, sowie die möglichen Schutzmaßnahmen besprochen und die Funktionsweise von Metalloxid-Überspannungsableitern erklärt.

Das vierte Kapitel beschäftigte sich mit der lokalen Blitzortung an der Hochgebirgsleitung. Mittels Korridoranalyse wurden alle atmosphärischen Entladungen aus den Jahren 2003 bis 2013 entlang des mit Ableitern auszustattenden Abschnittes ausgewertet. Aus den zur Verfügung gestellten Daten wurde die Blitzdichte für den angegebenen Zeitraum analysiert und eine allgemeine Blitzdichtestatistik für die Hochgebirgsleitung erstellt. Eine Besonderheit stellt die Auswertung der Verteilung der sogenannten *Ground Strike Points* dar, in der die Blitzfußpunkte der einzelnen Teilblitze gesondert berücksichtigt werden. Weiters wurden die lokale Amplitudenverteilung und die Polarität der Entladungen ausgewertet, die als Anhaltspunkte für die nachfolgenden Variationsberechnungen dienen.

Einen wesentlichen Beitrag zur Positionierung der Überspannungsableiter lieferten die numerischen Simulationsberechnungen in EMTP-RV. Hierfür wurden alle 108 Masten der Freileitung im Programm nachgebildet und anschließend Variationsberechnungen durchgeführt. Variiert wurden unter anderem die Blitzstromamplitude, der Einschlagort und die Anzahl der Überspannungsableiter, um Aussagen über die transienten Spannungsbeanspruchungen an den Masten treffen zu können.

Basierend auf den Ergebnissen der numerischen Berechnungen und der ausgewerteten Blitzortungsdaten wurden die Entscheidungskriterien für die Ausrüstungsstrategie in Kapitel 6 aufgelistet. In Betracht gezogen wurden dabei auch die vom Netzbetreiber zur Verfügung gestellten Störungsdaten und die Exposition der einzelnen Maststandorte.

Abschließend wurde das Ausrüstungskonzept für den hochalpinen Leitungsabschnitt 4 der Hochgebirgsleitung vorgestellt. Dieses umfasst vier Ausrüstungsstrategien, die sich in Aufwand und Kosten, sowie im Grad des Schutzes unterscheiden.

Mit dieser Masterarbeit wird dem zuständigen Netzbetreiber ein Konzept für den optimierten Überspannungsschutz einer exponierten Freileitung im Hochgebirge mittels modernen

Metalloxid-Überspannungsableitern vorgelegt. Dabei werden nicht nur die Ergebnisse aus den numerischen Berechnungen, sondern auch lokale Gegebenheiten, wie etwa die Blitzaktivität entlang der Leitung oder das Geländeprofil berücksichtigt.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] Pack S., Kompacher M. Muhr M., "Möglichkeiten und Maßnahmen zur Reduzierung der Fehlerhäufigkeit einer 110-kV-Hochgebirgsleitung", Kärnten Netz GmbH, Projektzusammenfassung Dezember 2003.
- [2] ÖVE/ÖNORM EN 50341-1, *Freileitungen über AC 45 kV - Teil 1: Allgemeine Anforderungen - Gemeinsame Festlegungen.*, 01.01.2011.
- [3] ÖVE/ÖNORM EN 61936-1, *Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV - Teil 1: Allgemeine Bestimmungen.*, 01.12.2011.
- [4] Anton Gabbauer, "Ein Beitrag zur rechnerischen Bestimmung von Erdungsimpedanzen, Erdungsströmen und Erdungsspannungen von elektrischen Anlagen in Netzen mit niederohmiger Sternpunktserdung", Institut für Elektrische Anlagen und Hochspannungstechnik, TU Graz, Diplomarbeit September 2001.
- [5] DI Dr.techn. Pack Stephan, "Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen der Energieversorgung", Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, Graz, Österreich, Februar 1996.
- [6] Andreas Küchler, *Hochspannungstechnik, Grundlagen - Technologie - Anwendungen*, 3rd ed. Berlin Heidelberg, Deutschland: Springer, 2009.
- [7] IEC 60071-1, *Isolationskoordination - Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen.*, 01.10.2010.
- [8] ÖVE/ÖNORM E 8384, *Erdungen in Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV.*, 01.05.2007.
- [9] T. Höhn, "Blitzeinschlagwahrscheinlichkeit und transiente Modellierung von Hochspannungsmasten", Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, Juni 2014.
- [10] Hinrichsen V., *Metall-Oxid-Ableiter in Hochspannungsnetzen, Grundlagen*, 3rd ed., Siemens AG, Ed., September 2011.
- [11] ABB, *Überspannungsschutz: Metalloxidableiter in Mittelspannungsnetzen, Anwendungsrichtlinien*, 5th ed., ABB Schweiz AG, Ed. Wettingen, Schweiz, Mai 2011.
- [12] ALDIS - Austrian Lightning Detection and Information System. (April 2015) [Online]. <http://www.aldis.at>
- [13] ÖVE/ÖNORM EN 62305-1, *Blitzschutz - Teil 1: Allgemeine Grundsätze.*, 01.07.2012.
- [14] S. Pedeboy, M.M.F. Saba W. Schulz, "LLS Detection Efficiency of Ground Strike Points",

- International Conference on Lightning Protection, Shanghai, China, 2014.
- [15] EMTPWorks Version 2.2.1. <http://www.emtp.com>.
- [16] M. Darveniza M. Sargent, "Tower surge Impedance", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Mai 1969.
- [17] P. Nefzger, U. Kaintzyk F. Kießling, *Freileitungen - Planung, Berechnung, Ausführung*, 5th ed., Springer, Ed. Deutschland, September 2001.
- [18] Florian Senn, "Berechnungsverfahren zum Einsatz von Überspannungsableitern auf 110 kV Hochspannungsfreileitungen", Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, TU Graz, Graz, Juni 2005.
- [19] CIGRE WG 33.01, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines", Technical Brochure October 1991.
- [20] IEEE Standard C62.22, "IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems", 1997.
- [21] Fridolin Heidler, "Blitzstromparameter nach IEC 62305", etz, 2009.

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einteilung der HGL in 5 Abschnitte, mit Längenangaben für jeden Abschnitt (Datenquelle: KNG)	2
Abb. 2: Höhenprofil der HGL: hervorgehoben sind die hochalpinen Leitungsabschnitte 3 und 4, die Masten reichen bis auf 2300 m Seehöhe (Datenquelle: KNG).....	3
Abb. 3: Verlauf der HGL in Leitungsabschnitt 4: Blick von Mast 32 Richtung Norden zu den Masten 33 und 34	3
Abb. 4: Leitungsverlauf der höher gelegenen Leitungsbereiche über die Kreuzeckgruppe [1].....	4
Abb. 5: Verlauf der Masterdungswerte von Abschnitt 3 (Mast Nr. 19 bis 27) und Abschnitt 4 (Mast Nr. 28 bis 56) (Datenquelle: KNG).....	6
Abb. 6: Klassifizierung der Masterdungswiderstände R_E in Abschnitt 4 nach der Höhe des Widerstandes (Datenquelle: KNG)	6
Abb. 7: Verlauf des spezifischen Bodenwiderstandes in den hochalpinen Lagen der Abschnitte 3 und 4 von Süden nach Norden (Datenquelle: KNG)	7
Abb. 8: Abschnitt 3 ist bereits mit Leitungsableitern ausgestattet: Blick von Mast 28 Richtung Süden zu den Masten 27 bis 25.....	9
Abb. 9: Anzahl der Störungen verursacht durch atmosphärische Entladungen an der HGL im Zeitraum 2004 bis 2013 (Quelle: KNG)	9
Abb. 10: Störanfällige Monate der HGL im Zeitraum 2004 bis 2013 (Quelle KNG)	10
Abb. 11: Einteilung transienter Spannungen in äußere und innere Überspannungen (vgl. [5])	11
Abb. 12: Kategorien und genormte Spannungsformen von transienten Überspannungen (vgl. [7])	12
Abb. 13: Auswirkungen atmosphärischer Überspannungen und deren mögliche Folgen [1]	13
Abb. 14: Leitung ohne Schutzarmaturen bei direktem Einschlag ins Phasenseil [1]	14
Abb. 15: Leitung ohne Schutzarmaturen bei direktem Einschlag in den Mast [1].....	14
Abb. 16: Schutzmöglichkeiten bei Freileitungen gegen Überspannungen [1].....	15
Abb. 17: Spannungs-Strom-Kennlinie eines Überspannungsableiters [11]	16
Abb. 18: Schnitt durch ein Bauglied eines Metalloxid-Ableiters mit Porzellan Gehäuse [10]...	17
Abb. 19: Leitung mit Schutzarmaturen bei direktem Einschlag ins Phasenseil [1].....	18
Abb. 20: Leitung mit Schutzarmaturen bei direktem Einschlag in den Mast [1]	19
Abb. 21: Amplitudenverteilung negativer Blitze in Österreich (Zeitraum 2010 bis 2012) [12]	20

Abb. 22: Österreichische Blitzdichte-Karte mit der farblich gewichteten Blitzanzahl/km ² /Jahr, Zeitraum 2003 bis 2012, der rote Kreis markiert den Standort der HGL [12].....	21
Abb. 23: Blitzaktivität 2013 in Leitungsabschnitt 4: Auswertung der positiven und negativen Wolke-Erde Blitze innerhalb des 2 km breiten Korridors (Datenquelle: ALDIS).....	23
Abb. 24: Blitzdichte-Statistik für die HGL 2003 bis 2013; der Mittelwert liegt bei 2,15 Einschlägen/km ² /Jahr) (Datenquelle: ALDIS).....	23
Abb. 25: Blitzdichte 2004 bis 2013 in Abschnitt 4 (Raster 1x1 km), höchste Blitzdichte tritt im Anschluss an Abschnitt 3 auf (Datenquelle: ALDIS).....	24
Abb. 26: Dichteverteilung der <i>Ground Strike Points</i> 2011 bis 2013 im Abschnitt 4 (Raster 1x1 km) (Datenquelle: ALDIS).....	25
Abb. 27: Amplitudenverteilung der negativen Blitze an der HGL im Zeitraum 2003 bis 2013 (Datenquelle: ALDIS).....	25
Abb. 28: Auswertung der Polarität der Wolke-Erde-Entladungen an der HGL im Zeitraum 2003 bis 2013 (Datenquelle: ALDIS).....	26
Abb. 29: Struktur des numerischen Leitungsmodells in EMTP-RV: Komponenten der Freileitung und Blitzquelle [15].....	27
Abb. 30: Verwendeter Tonnenmast mit Abmessungen (Datenquelle: KNG).....	28
Abb. 31: Darstellung des Mastes durch Wellenwiderstände in EMTP-RV.....	29
Abb. 32: Eingabe der Leitungsparameter in EMTP-RV [15].....	30
Abb. 33: Modellierung der CIGRE-Stoßstromquelle in EMTP-RV [15].....	31
Abb. 34: Nichtlineare Spannungs-Strom-Kennlinie des Überspannungsableiters (Datenquelle: KNG).....	32
Abb. 35: Modellierung des Umspannwerkes Außerfragant mit Bezeichnung der relevanten Objekte [15].....	33
Abb. 36: Distanz und einfache Laufzeit bei Blitzeinschlag in die Mitte von Abschnitt 4 (Mast 42) zu den benachbarten Abschnitten bzw. Umspannwerken (Datenquelle: KNG).....	35
Abb. 37: Zur Variation des Einschlagortes: Einschläge ins Erdseil an Mastspitze und testweise in Spannfeldmitte, sowie Einschläge ins Leiterseil.....	37
Abb. 38: Simulationsablauf bei Erdseileinschlägen in Spannfeldmitte.....	37
Abb. 39: Simulation 1 - Einschlagort M42, ES, keine LA in A4.....	38
Abb. 40: Simulation 2 - Einschlagort Spannfeld 41-42, ES, keine LA in A4.....	38
Abb. 41: Simulation 3 - Einschlagort Spannfeld 42-43, ES, keine LA in A4.....	39
Abb. 42: Maximalwerte der Spannung an Phase L1 in Abhängigkeit des Blitzstromes - linearer Zusammenhang zwischen I_B und U_{L1}	42

Abb. 43: Simulationsablauf bei der Variation der Überspannungsableiter beim Erdseileinschlag	43
Abb. 44: Simulation 6 / Simulation 8 - Einschlagort M35 ($R_E = 104,6 \Omega$), ES, keine LA in A4 / LA an M34 und M36	44
Abb. 45: Simulation 7 / Simulation 9 - Einschlagort M35 ($R_E = 104,6 \Omega$), ES, LA an M35 / LA an M34 bis M36	44
Abb. 46: Simulation 11 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), ES, keine LA in A4	45
Abb. 47: Simulation 12 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), ES, LA an M42	45
Abb. 48: Simulation 14 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), ES, LA an M41 bis M43	46
Abb. 49: Simulation 16 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), ES, LA an M40 bis M44	46
Abb. 50: Simulation 1 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -5 \text{ kA}$, keine LA in A4	47
Abb. 51: Simulation 2 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, keine LA in A4	48
Abb. 52: Simulation 3 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -15 \text{ kA}$, keine LA in A4	48
Abb. 53: Typischer Simulationsablauf bei Variation der Überspannungsableiter beim Leiterseileinschlag	49
Abb. 54: Simulation 2 / Simulation 3 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, LA an M29 (L3 / alle Phasen)	50
Abb. 55: Simulation 4 - Einschlagort M29 ($R_E = 74,3 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, LA an M28 bis M30	50
Abb. 56: Simulation 8 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, LA an M41 bis M43	51
Abb. 57: Simulation 9 - Einschlagort M42 ($R_E = 402 \Omega$), Phase L3: $I_B = -10 \text{ kA}$, LA an M40 bis M44	51
Abb. 58: Veranschaulichung der Masten mit <i>kritischen</i> und <i>sehr kritischen</i> Masterdungswiderständen anhand des Höhenprofils (rote Markierung)	55
Abb. 59: Mit Ableitern auszustattende Masten (rote Markierung) bei einem Blitzstrom von 15 kA	55
Abb. 60: Erfassung der Entladungen im Abstand von 200 m bzw. 400 m zur HGL (Datenquelle: ALDIS)	56
Abb. 61: Anzahl der Wolke-Erde-Blitze in Abschnitt 4 in 200 m und 400 m Abstand zur Leitung (Datenquelle: ALDIS)	57
Abb. 62: Gefährdete Masten (rote Markierung) aus den Blitzortungsdaten im Zeitraum 2003 bis 2013 (Datenquelle: ALDIS)	57

Abb. 63: Masten, denen Störungen eindeutig zugeordnet werden konnten im Höhenprofil aufgetragen	58
Abb. 64: Beispiel einer Mastexposition - Mast 37 in Abschnitt 4 der HGL	59
Abb. 65: Höhenprofil mit Kennzeichnung besonders exponierter Masten, Masten oberhalb der Waldgrenze und geländebegünstigter Masten (Datenquelle: KNG)....	60
Abb. 66: Stufe 2: Vollausrüstung mit Ausnahme der störungsfreien Bereiche.....	63
Abb. 67: Stufe 3: Ausrüstung nach Geländefaktoren	63
Abb. 68: Stufe 4: Minimalausrüstung	64

9.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Allgemeine elektrische Daten zur HGL [2], [3]	5
Tab. 2: Statistische Auswertung für die Masterdungswiderstände R_E in Abschnitt 4	7
Tab. 3: Gegenüberstellung der Eckdaten der hochalpinen Leitungsabschnitte 3 und 4 (Datenquelle: KNG)	8
Tab. 4: Klassifizierung der Blitzdichte in fünf Gefährdungskategorien [14]:	22
Tab. 5: Berechnete mittlere Spannfeldlängen je Leitungsabschnitt von Umspannwerk Oberdrauburg bis Umspannwerk Außerfragant (Datenquelle: KNG)	30
Tab. 6: Eingabe-Parameter zur Modellierung der Blitzquelle	31
Tab. 7: Spannungs- und Stromwerte aus dem Datenblatt des Ableiters (Datenquelle: KNG)	32
Tab. 8: Eckdaten zur Modellierung der Umspannwerke (Datenquelle: KNG)	33
Tab. 9: Simulationsübersicht <i>Einschläge in Spannfeldmitte</i>	38
Tab. 10: Simulationsübersicht <i>Einschläge in die Mastspitze - Einfluss des Masterdungswiderstandes</i>	40
Tab. 11: Farblich gewichtete Werte der Spannung U_{L1} der Simulationen 1 bis 9 bei einem Blitzstrom von 15 kA	40
Tab. 12: Simulationsübersicht <i>Einschläge in die Mastspitze - Variation des Blitzstromes</i>	41
Tab. 13: Simulationsübersicht <i>Einschläge in die Mastspitze - Variation der Überspannungsableiter</i>	43
Tab. 14: Simulationsübersicht <i>Leitenseileinschläge - Variation des Blitzstromes</i>	47
Tab. 15: Simulationsübersicht <i>Leitenseileinschläge - Variation der Überspannungsableiter</i>	49
Tab. 16: Höhe der transienten Spannung beim Leitenseileinschlag ist direkt proportional zum eingepprägten Blitzstrom (Leitungsableiter in Abschnitt 4 ausgeblendet)	53
Tab. 17: Grenzblitzstrom mit / ohne Sicherheitsspanne, ab dem jeder Mast in Abschnitt 4 mit Ableitern ausgestattet werden müsste	56
Tab. 18: Auswertung der exakt lokalisierbaren Störungen in Abschnitt 4 im Zeitraum 2008 bis 2013 (Datenquelle: KNG)	58
Tab. 19: Übersicht der Entscheidungskriterien: Farblich markierte Felder bedeuten eine Ausstattung des jeweiligen Mastes mit Leitungsableitern	61
Tab. 20: Übersicht und Beschreibung der Stufen des Ausrüstungskonzeptes	64