



Peter Gehr, BSc

Blitzschutz von Ladestationen im Bereich der Elektromobilität

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

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

Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Graz, September 2020

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

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.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Erstellung der Masterarbeit unterstützt haben.

In erster Linie geht ein großes Dankeschön an Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack, für die wissenschaftliche und fachliche Unterstützung während der gesamten Betreuungszeit der Masterarbeit.

Bei der Firma DEHN möchte ich mich insbesondere bei Herrn Ing. Andreas Kaltenbrunner für zahlreichen Besprechungen und Diskussionen bedanken. Die Bereitstellung einer Vielzahl von Unterlagen, sowie seine fachliche Kompetenz haben wesentlich zum Inhalt dieser Arbeit beigetragen.

Weiters ein herzliches Dankeschön an die Stadtwerke Voitsberg, für die Möglichkeit der Begutachtung ihrer Ladesäulen und der Bereitstellung der dazugehörigen technischen Unterlagen.

Ein ganz besonderes Dankeschön geht an meine Eltern, die mir das Studium überhaupt erst ermöglicht haben und in jeder Lebenslage zu mir stehen.

Kurzfassung

Das Thema Elektromobilität spielt zunehmend eine größere Rolle in unserer Gesellschaft. In den letzten fünf Jahren hat der Bestand an Elektroautos und deren Ladestationen sowohl in der öffentlichen als auch in der privaten Anwendung enorm an Zuwachs gewonnen. Es ist davon auszugehen, dass Elektrofahrzeuge auch während dem Auftreten von Gewittern geladen werden. Um eine Zufriedenheit und Sicherheit der Anwender zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass keine Schäden in der Ladeinfrastruktur aufgrund von Blitzeinwirkungen auftreten.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen eines direkten- und indirekten Blitzeinschlags im Zusammenhang mit Ladestationen. Es wird für verschiedene Szenarien die induzierte Spannung und der induzierte Strom in die zur Ladesäule führende Energieversorgungsleitung und Datenleitung berechnet. Weiters wird für verschiedene Szenarien der wirksame Schutzbereich eines Überspannungsableiters berechnet. Abschließend werden die Ergebnisse gegenübergestellt und entsprechende Schutzvorschläge diskutiert.

Schlüsselwörter:

Elektromobilität, Blitz- und Überspannungsschutz, Ladeinfrastruktur, Schutzbereich Überspannungsableiter, Blitzstrom, induzierte Spannung

Abstract

The topic of electromobility is playing an increasingly important role in our society. In the past five years, the number of electric cars and their charging stations has grown enormously, in both public and private use. It can be assumed that electric vehicles will also be charged during the occurrence of lightnings. To ensure user satisfaction and safety, it must be ensured that the charging infrastructure is not damaged as a result of lightning strikes.

The master thesis deals with the effects of a direct and indirect lightning strike in connection with charging stations. The induced voltage and the induced current in the power supply line and data line leading into the charging station are calculated for various scenarios. Furthermore, the effective protection field of a surge arrester is calculated for various scenarios. Finally, the results are compared and appropriate protection proposals are discussed.

Keywords:

E-Mobility, lightning and surge protection, charging infrastructure, protection field of surge arrester, lightning induced voltage

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Blitzphysik, Blitzstromparameter und Blitzstatistik	3
2.1	Arten von Blitzentladungen.....	3
2.1.1	Abwärtsblitze (Wolke-Erde- Blitze).....	3
2.1.2	Aufwärtsblitze (Erde-Wolke- Blitze).....	5
2.2	Kenngößen des Blitzstroms nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-1.....	7
2.3	Die Zeitfunktion des Blitzstroms für Analysezwecke.....	11
2.4	Blitzstatistik in Österreich.....	12
3	Grundlagen zum Blitz- und Überspannungsschutz	14
3.1	Das Blitzschutzsystem.....	14
3.2	Das äußere Blitzschutzsystem	15
3.3	Der innere Blitzschutz.....	16
3.4	Ursachen von Überspannungen.....	18
3.5	Einkopplungsarten.....	19
3.6	Überspannungsschutz.....	20
3.6.1	Kenngößen von Überspannungsschutzgeräten.....	22
3.6.2	Einteilung der Überspannungsschutzgeräte	24
4	Ladebetriebsarten und Elektromobilität	26
4.1	Konduktive Ladebetriebsarten von E-Autos.....	26
4.2	Steckvorrichtungen.....	28
4.3	Typische Ladeleistungen.....	28
4.4	Standorte einer Ladeinfrastruktur	29
4.5	Elektromobilität in Österreich.....	30
4.5.1	E-Autos in Österreich.....	30
4.5.2	Ladepunkte in Österreich.....	32
5	Normativer Überblick	33
5.1	Kabelgebundenes Laden von Elektrofahrzeugen	33
5.2	Errichten von Niederspannungsanlagen und Überspannungsschutzeinrichtungen	36
5.3	Blitzschutznorm	37

5.4	Weitere Vorschriften für die Inbetriebnahme von Ladeeinrichtungen	38
6	Berechnung induzierter Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag	39
6.1	Magnetisches Feld innerhalb von LPZ 1 bei direktem Einschlag.....	39
6.1.1	Berechnung des Schirmfaktors	40
6.1.2	Berechnung des Sicherheitsabstandes.....	41
6.1.3	Berechnung des magnetischen Feldes	41
6.2	Berechnung von induzierten Spannungen und Strömen bei Direkteinschlag in LPZ 1.....	43
6.3	Berechnung des elektromagnetischen Feldes bei indirektem Einschlag	48
6.3.1	Berechnung nach Möglichkeit 1	49
6.3.2	Berechnung nach Möglichkeit 2 (Mindestabstand)	50
6.4	Berechnung von induzierten Spannungen und Strömen bei indirektem Einschlag in LPZ 1.....	52
6.4.1	Berechnung nach Möglichkeit 1	53
6.4.2	Berechnung nach Möglichkeit 2 (Mindestabstand)	54
6.5	Berechnung von induzierten Spannungen und Strömen bei indirektem Einschlag in LPZ 0 _B	55
7	Berechnung des wirksamen Schutzbereiches eines SPD-Schutzes hinsichtlich Ladeeinrichtungen.....	59
7.1	Schutzabstand I_{po} aufgrund von Schwingungen	61
7.1.1	Berechnung für den spannungsbegrenzenden SPD	62
7.1.2	Berechnung für den spannungsschaltenden SPD	63
7.2	Schutzabstand I_{pi} aufgrund von Induktion.....	64
7.2.1	Berechnung für den spannungsbegrenzenden SPD	66
7.2.2	Berechnung für den spannungsschaltenden SPD	68
8	Diskussion der Berechnungen.....	69
8.1	Direkter Einschlag in das Sicherheitsvolumen V_s	69
8.2	Indirekter Einschlag, Ladesäule in LPZ 1	69
8.3	Indirekter Einschlag, Ladesäule in LPZ 0	69
8.4	Schutzabstand I_{po} aufgrund von Schwingungen	70
9	Begutachtung von zwei öffentlichen Ladeparks	71

9.1	Beispiel 1: Ladepark Bahnhof.....	71
9.2	Beispiel 2: Ladestationen Hauptplatz	73
10	Schutzvorschläge.....	76
10.1	Blitzschutz- und Überspannungsschutz für den privaten Aufstellungsort.....	76
10.2	Blitzeinschlag neben der Ladesäule in eine bauliche Anlage	77
10.3	Schutzvorschlag für einen öffentlichen Parkplatz	81
10.4	Schutzvorschlag für eine öffentliche Parkgarage.....	84
11	Zusammenfassung.....	86
	Literaturverzeichnis.....	88
	Abkürzungsverzeichnis	90
	Abbildungsverzeichnis	91
	Tabellenverzeichnis.....	93

1 Einleitung

Die Elektromobilität spielt eine zentrale Rolle in der Mobilitätswende und somit in der Energiewende. Elektroautos werden für den Massenmarkt zunehmend attraktiver. Daher ist in Österreichweit ist ein jährlicher Zuwachs an E-Autos und an Ladestationen zu verzeichnen.

Die Abbildung 1-1 zeigt ein Elektroauto während des Ladevorgangs.



Abbildung 1-1: Elektroauto während des Ladevorgangs, Hauptplatz Voitsberg

Man unterscheidet zwischen dem kabelgebundenen (konduktiven) Laden, kabellosen (induktiven) Laden und dem Laden mittels Batterietausch. Für die kommerzielle Nutzung ist derzeit nur das konduktive Laden etabliert. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit nur diese Lademöglichkeit behandelt.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Elektrofahrzeuge bei Auftreten von Blitzentladungen im Außenbereich aufgeladen werden. Aus diesem Grund sind entsprechende Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen. Es muss für die Einheit bestehend aus Fahrzeug, Ladestation und Energieversorgungs- bzw. Datenleitung ein Blitz und Überspannungsschutz dimensioniert werden.

Ein Nichtvorhandensein dieser Schutzmaßnahmen kann zu einem defekten Ladesystem, zu einem Batterie- bzw. Fahrzeugschaden oder im schlimmsten Fall zu einem

Personenschaden führen. Dies ist oftmals versicherungstechnisch nicht eindeutig geklärt und daher mit hohen Folgekosten und einer Unzufriedenheit der Anwender verbunden.

Nachfolgend wird ein Überblick über die momentane Situation der Elektromobilität in Österreich gegeben. Es werden die Ladebetriebsarten für induktives Laden erklärt. Weiters wird ein grundlegender Einblick über das Entstehen von Blitzen vermittelt.

Es werden relevante Normen erläutert und die grundsätzliche Funktion eines Blitz- und Überspannungsschutzes erklärt.

Weiters werden induzierte Ströme/Spannungen in Leiterschleifen berechnet, welche von der Energieversorgungsleitung und von der Datenleitung die mit der Ladesäule verbunden sind, verursacht werden. Es wird der Einfluss einer Schirmung diskutiert. Diese tritt auf, wenn sich die Ladesäule in einem Sicherheitsvolumen, wie zum Beispiel einer Parkgarage befindet. Es wird der wirksame Bereich eines Überspannungsableiters (SPD) in Abhängigkeit seiner Entfernung zum schützenden Objekt und dem Einbauort für verschiedene Szenarien berechnet.

Schlussendlich wird für verschiedene Szenarien ein entsprechender Blitz- und Überspannungsschutz diskutiert.

2 Blitzphysik, Blitzstromparameter und Blitzstatistik

Zunächst wird das Entstehen von Gewittern und Blitzen erklärt. Anschließend werden die normativ festgelegten Blitzstromparameter erklärt und die Blitzstatistik in Österreich diskutiert.

2.1 Arten von Blitzentladungen

Blitze treten im Regelfall bei Gewittern aufgrund elektrostatischer Aufladungen auf. Ein Gewitter entsteht beim Transport warmer Luftmassen mit genügend hoher Feuchtigkeit in großen Höhen.

Prinzipiell kann man zwischen Wolkenblitze und Erdblitz unterscheiden. Wolkenblitze entstehen aufgrund eines Ladungsausgleiches zwischen positiv und negativ geladenen Wolkenzentren. Obwohl sie die Erdoberfläche nicht direkt treffen, stellen sie dennoch eine Gefährdung für elektronische Systeme aufgrund ihrer elektromagnetischen Impulsfelder (LEMP) dar. [1][2]

2.1.1 Abwärtsblitze (Wolke-Erde- Blitze)

Im Durchschnitt treffen 1/3 aller Blitzentladungen die Erde. Erdblitz lassen sich in Abwärtsblitze (Wolke-Erde Blitz) und Aufwärtsblitze (Erde-Wolke Blitz) unterteilen. Abwärtsblitze treten meist im flachen Gebiet und bei niedriger Höhe auf und sind aufgrund der zur Erde gerichteten Verästelungen erkennbar (Abb. 2-1). Am häufigsten treten negative Abwärtsblitze auf (ca. 90 %). Von der negativ geladenen Wolke bewegt sich ein negativ geladener Ladungsschlauch (Leader) zur Erdoberfläche. Ist dieser Leader nahe genug an der Erde (100 m bis einige 10 m), steigt die elektrische Feldstärke an erhöhten Objekten an der Erdoberfläche an. Diese Objekte können z.B. Bäume oder Gebäudegiebel sein. Wird nun die elektrische Festigkeit der Luft überwunden, wirkt dem Leader eine Fangentladung entgegen, die mit ihm zusammentrifft und die Hauptentladung einleitet.

Abbildung 2-2 zeigt den Entlademechanismus eines negativen Abwärtsblitzes.



Abbildung 2-1: Abwärtsblitz (Wolke-Erde-Blitz) [1]

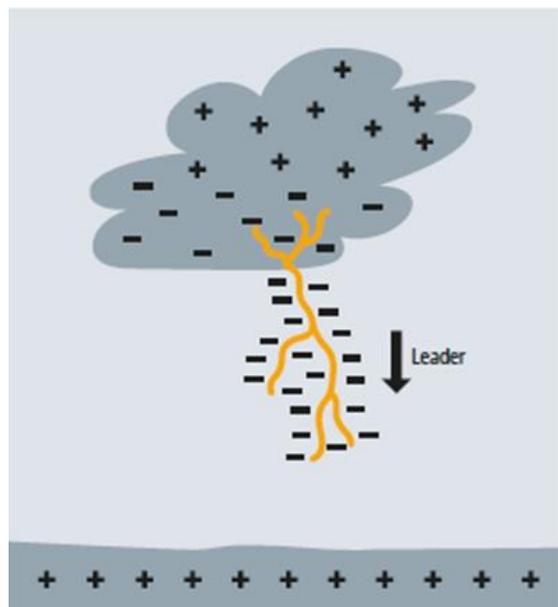


Abbildung 2-2: Entladungsmechanismus eines negativen Abwärtsblitzes
(Wolke-Erde-Blitz) [1]

Es kann aber auch positive Ladung zur Erde transportiert werden. (positiver Abwärtsblitz, ca. 10% der Fälle) In der kalten Jahreszeit ist das Auftreten für positive Abwärtsblitze wahrscheinlicher als im Hochsommer. Optisch sind negative und positive Abwärtsblitze nicht voneinander zu unterscheiden. Abbildung 2-3 zeigt den Entlademechanismus eines positiven Abwärtsblitzes. [1][2]

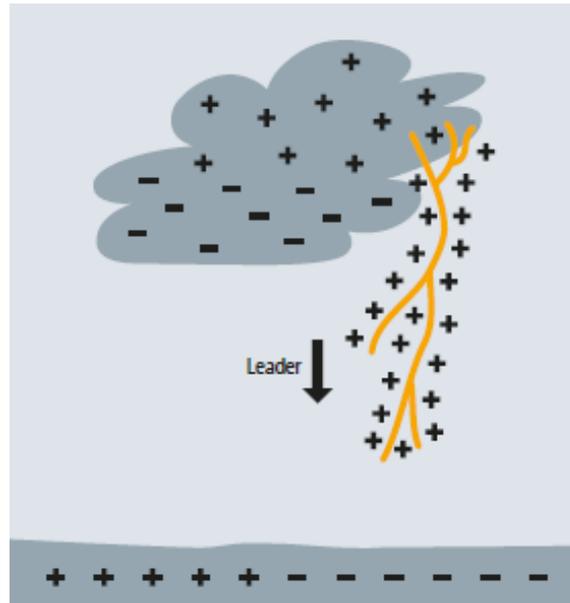


Abbildung 2-3: Entladungsmechanismus eines positiven Abwärtsblitzes (Wolke-Erde-Blitz) [1]

2.1.2 Aufwärtsblitze (Erde-Wolke- Blitze)

Aufwärtsblitze können an sehr hoch gelegenen Objekten (Kirchtürmen, Funkmasten) oder Bergspitzen auftreten. Erkennbar sind Aufwärtsblitze an von der Erde nach oben gerichteten Verzästelungen (Abb.2-4).



Abbildung 2-4: Aufwärtsblitz (Erde-Wolke-Blitz) [1]

Der Leader startet an einem sehr hoch gelegenen, exponierten Objekt, wie z.B. der Turmspitze und wächst zur Wolke hinauf. An der Turmspitze wird durch Verzerrung des elektrischen Feldes eine hohe Feldstärke erreicht. Somit wandert der Leitblitz zur Wolke hinauf.

Wiederum kann man zwischen negativen (Abb. 2-6) und positiven (Abb. 2-5) Aufwärtsblitzen unterscheiden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den entsprechenden Entlademechanismus. [1][2]

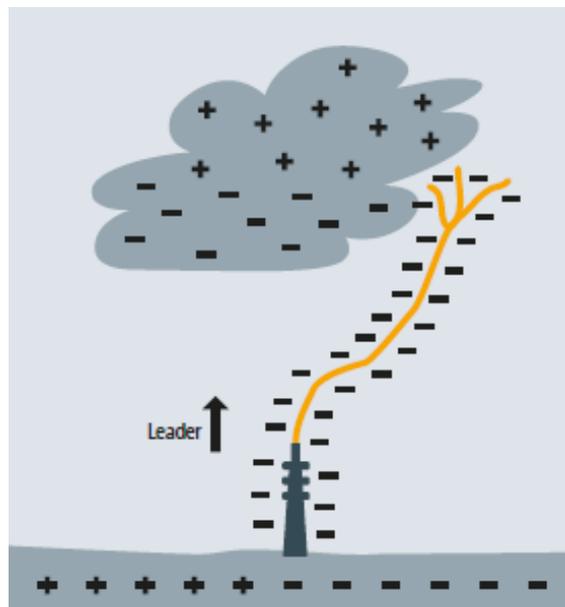


Abbildung 2-5: Entladungsmechanismus eines positiven Aufwärtsblitzes (Erde-Wolke-Blitz) [1]

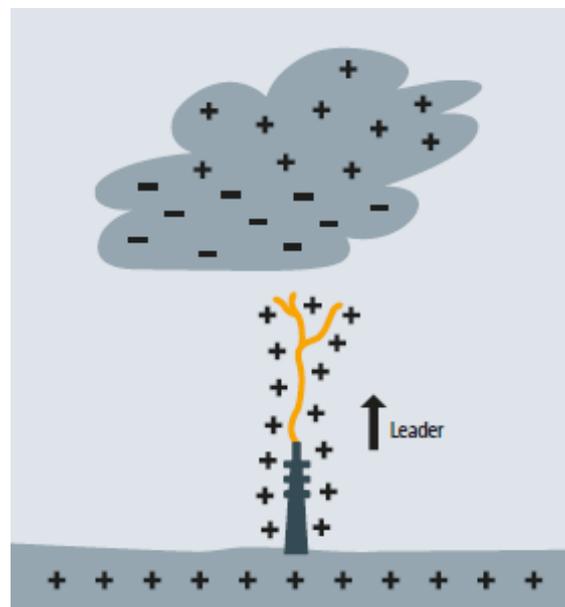


Abbildung 2-6: Entladungsmechanismus eines negativen Aufwärtsblitzes (Erde-Wolke-Blitz) [1]

2.2 Kenngrößen des Blitzstroms nach ÖVE/ÖNORM EN 62305-1

Der Blitzstrom besteht aus einem oder mehreren unterschiedlichen Teilblitzen. Unter einer Dauer von 2 ms spricht man von Stoßströme und ab einer Dauer von 2 ms von Langzeitströme. Die Gesamtheit der Stoßströme und Langzeitströme, also der Blitzstrom ist als eingeprägte Stromquelle zu betrachten. Infolge dessen üben die getroffen Objekte keine Rückwirkung auf die Blitzströme aus. [1]

Abbildung 2-7 zeigt den zeitlichen Verlauf des Blitzstromes zur Festlegung der Stoßstromparameter.

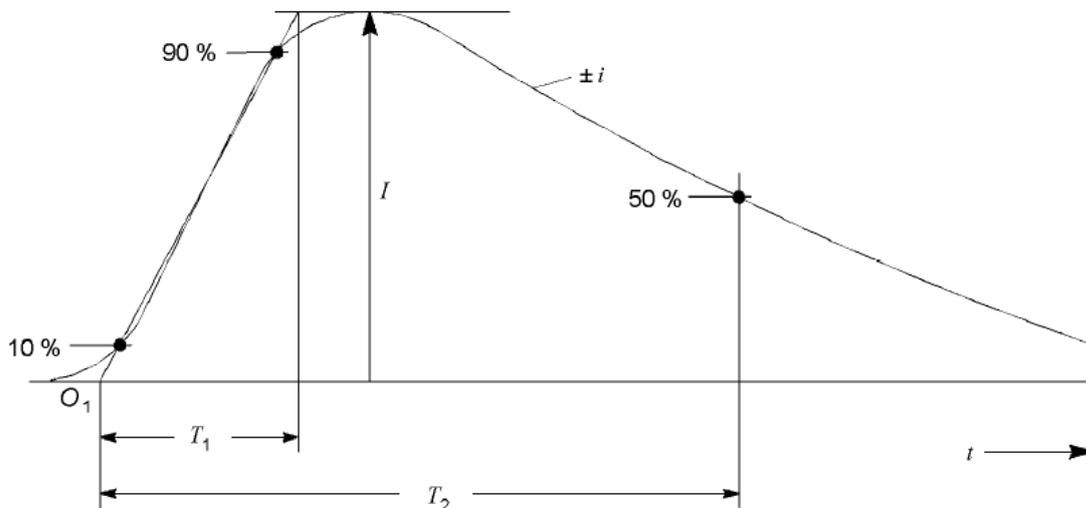


Abbildung 2-7: Zeitliche Verlauf des Blitzstroms [3]

Wesentlich sind die Stirnzeit T_1 und die Rückenhalbwertszeit T_2 . Die Rückenhalbwertszeit ist die Zeitdauer vom virtuellen Nullpunkt O_1 bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Stromscheitelwert auf 50% abgesunken ist. Die Stirnzeit wird mittels einer Geraden ermittelt, welche durch den 10% und den 90% Wert des Stromverlaufes geht. [3]

Scheitelwert des Blitzstroms

Eine Blitzentladung entspricht nahezu einer idealen Stromquelle. Werden nun leitfähige Teile von dem Blitzstrom durchflossen fällt entsprechend dem Ohm'schen Gesetz eine Spannung am leitfähigen Teil ab. (Formel 2-1) [1]

$$U = R \cdot I \quad (2-1)$$

U ... Spannungsabfall des Blitzstroms (V)

R ... Erdungswiderstand (Ω)

I ... Scheitelwert des Blitzstroms (A)

Wenn der Blitzstrom nur an einem einzigen Punkt in eine homogene leitende Fläche eintritt entsteht der sogenannte Potentialtrichter.

Die Steilheit des Blitzstromanstieges

Die Steilheit des Blitzstromanstiegs $\Delta i/\Delta t$ ist ausschlaggebend für die elektromagnetisch induzierte Spannung. In allen offenen oder geschlossenen Leiterschleifen, die sich in der Nähe des blitzstromdurchflossenen Leiters befinden wird diese Spannung induziert. [1]

Formel 2-2 beschreibt die induzierte Spannung in einer Leiterschleife.

$$U = M \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (2-2)$$

U ... induzierte Spannung (V)
 $\Delta i/\Delta t$... Steilheit des Blitzstromanstiegs
 M ... Gegeninduktivität (H)

Ladung des Blitzstroms

Die Ladung

$$Q = \int i \cdot dt \quad (2-3)$$

Q ... Ladung (C)
 i ... Blitzstrom (A)
 t ... Zeit (s)

des Blitzstroms bestimmt den Energieumsatz am Einschlagpunkt des Blitztes und an allen Stellen an denen sich der Blitzstrom als Lichtbogen äußert. Sie setzt sich zusammen aus der Stoßladung des Stoßstroms und aus der Langzeitladung des Langzeitstroms. [1]

Spezifische Energie

Die spezifische Energie ist ausschlaggebend für die vom Blitzstrom hervorgerufene Erwärmung sowie für die Kraftwirkung zwischen den vom Blitzstrom durchflossenen Leitern untereinander.

Sie ist also die Energie, die der Stoßstrom in einem Widerstand von einem Ohm umsetzt. Der Energieumsatz berechnet sich wie folgt:

$$\frac{W}{R} = \int i^2 dt \quad (2-4)$$

W ... Arbeit (J)

R ... Widerstand (Ω)

I ... Blitzstrom (A)

t ... Zeit (s)

Der Blitzstrom lässt sich in den ersten positiven Stoßstrom, den ersten negativen Stoßstrom, den Folgestoßstrom und den Langzeitstrom unterteilen. Diesen vier Komponenten lassen sich entsprechend dem Gefährdungspegel Maximalwerte zuordnen. Wesentlich ist der zeitliche Verlauf bzw. die Wellenform des Blitzstroms. Diese wird als Prüfparameter und für Analysezwecke für die Simulation von Blitzwirkungen herangezogen. [1]

Die folgende Tabelle beinhaltet die Maximalwerte von Blitzstromparametern.

Tabelle 2-1: Maximalwerte von Blitzstromparametern entsprechend dem Gefährdungspegel LPL [3]

Erster positiver Stoßstrom			LPL			
Stromparameter	Sym- bol	Einheit	I	II	III	IV
Scheitelwert	I	kA	200	150	100	
Ladung des Stoßstroms	Q_{short}	C	100	75	50	
Spezifische Energie	W/R	MJ/ Ω	10	5,5	2,5	
Zeitparameter	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	10/350			
Erster negativer Stoßstrom (Nur für Berechnungen, nicht für Prüfungen relevant)			LPL			
Stromparameter	Sym- bol	Einheit	I	II	III	IV
Scheitelwert	I	kA	100	50	50	
Mittlere Steilheit	di/dt	kA/ μs	100	50	50	
Zeitparameter	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	1/200			
Folgestoßstrom			LPL			
Stromparameter	Sym- bol	Einheit	I	II	III	IV
Scheitelwert	I	kA	50	37,5	25	
Mittlere Steilheit	di/dt	kA/ μs	200	150	100	
Zeitparameter	T_1/T_2	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$	0,25/100			
Langzeitstoßstrom			LPL			
Stromparameter	Sym- bol	Einheit	I	II	III	IV
Ladung des Langzeitstroms	Q_{long}	C	200	150	100	
Zeitparameter	T_{long}	s	0,5			
Blitz			LPL			
Stromparameter	Sym- bol	Einheit	I	II	III	IV
Ladung des Blitzes	Q_{flash}	C	300	225	150	

2.3 Die Zeitfunktion des Blitzstroms für Analysezwecke

Abbildung 2-8 zeigt den zeitlichen Verlauf des ersten positiven Stoßstroms, des ersten negativen Stoßstroms und des negativen Folgestoßstroms mit den Werten aus Tabelle 2-2 (LPL III).

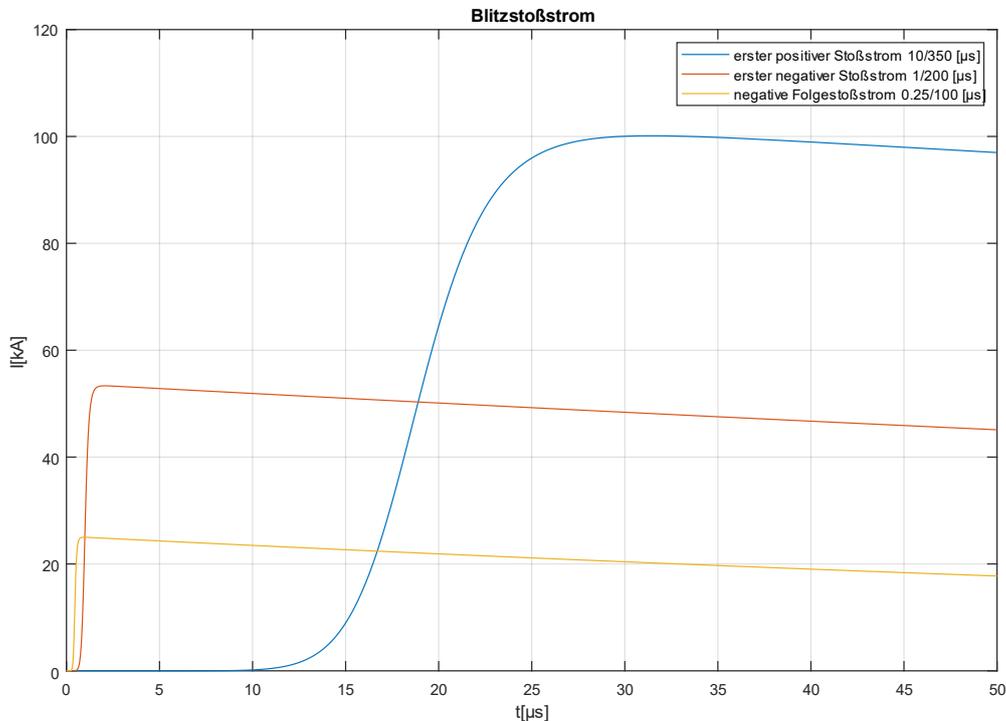


Abbildung 2-8: zeitlicher Verlauf des Blitzstoßstroms, nach Gleichung (2-5)

Der zeitliche Verlauf in Abbildung 2-8 wird in der ÖVE/ÖNORM EN 62305-1 definiert. Sie schlägt für den Stromverlauf des Blitzstroms folgende Formel vor: [3]

$$i = \frac{I}{k} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}} \cdot \exp(-t/\tau_2) \quad (2-5)$$

- I ... Stromscheitelwert (A)
- k ... Korrekturfaktor
- t ... Zeit (s)
- τ_1 ... Stirnzeitkonstante (s)
- τ_2 ... Rückenzeitkonstante (s)

Die Tabelle 2-2 beinhaltet die Parameter für die Gleichung 2-5.

Tabelle 2-2: Parameter für die Gleichung (2-5) [3]

Parameter	Erster positiver Stoßstrom			Erster negativer Stoßstrom			Negativer Folgestoßstrom		
	Wellenform 10/350 µs			Wellenform 1/200 µs			Wellenform 0,25/100 µs		
	LPL			LPL			LPL		
	I	II	III u. IV	I	II	III u. IV	I	II	III u. IV
I (kA)	200	150	100	100	75	50	50	73,5	25
k	0,93	0,93	0,93	0,986	0,986	0,986	0,993	0,993	0,993
τ_1 (µs)	19	19	19	1,82	1,82	1,82	0,454	0,454	0,454
τ_2 (µs)	485	485	485	285	285	285	143	143	143

2.4 Blitzstatistik in Österreich

Die Abbildung 2-9 zeigt die Jahresblitzzahlen (Wolke-Erde Blitze) in Österreich vom Zeitraum 1992 bis 2019.

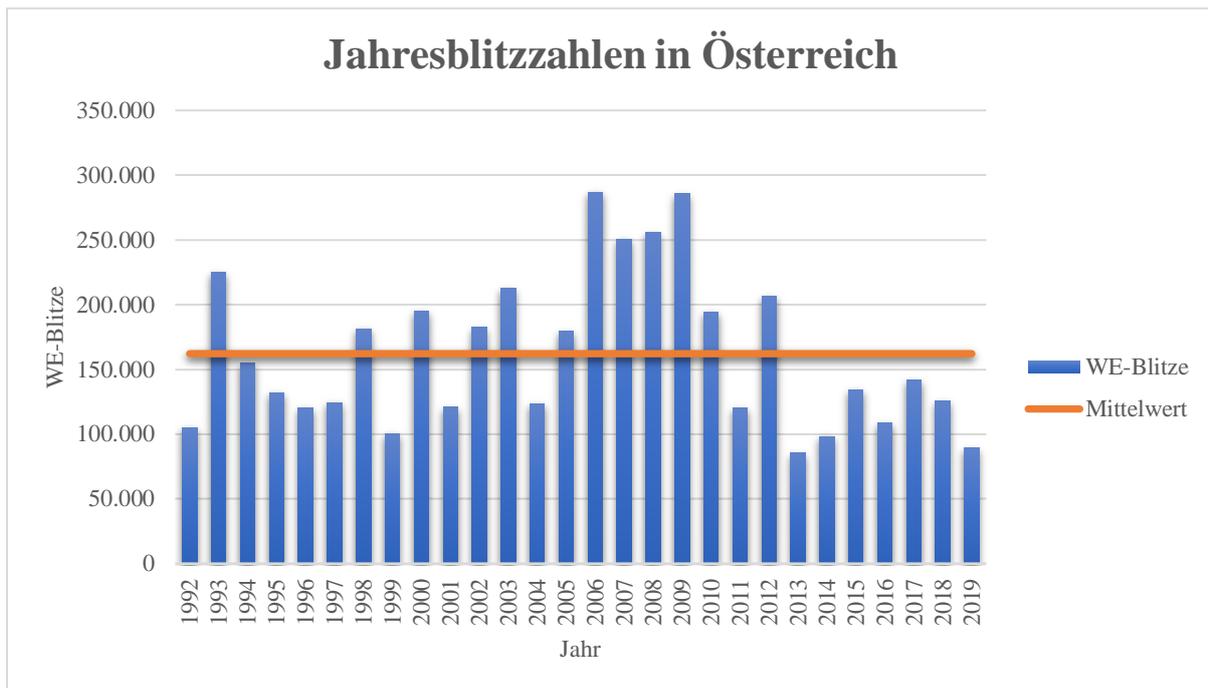


Abbildung 2-9: Jährliche Anzahl an WE-Blitze in Österreich und deren Mittelwert [2]

Eine wesentliche Rolle für eine Risikoanalyse laut OVE/ÖNORM EN 62305-2 ist die lokale Dichte der Erdblitze. Die Erdblitzdichte ist die Anzahl der Blitzeinschläge pro km^2 und Jahr.

Erfasst werden Erdblitze aus Messungen mit einem Blitzortungsverfahren. In Österreich geschieht dies über das Blitzortungssystem ALDIS. (Austrian Lightning Detection & Information System)

Die folgende Abbildung zeigt die bundesweite Erdblitzdichte über einem Zeitraum von 2003 bis 2012.

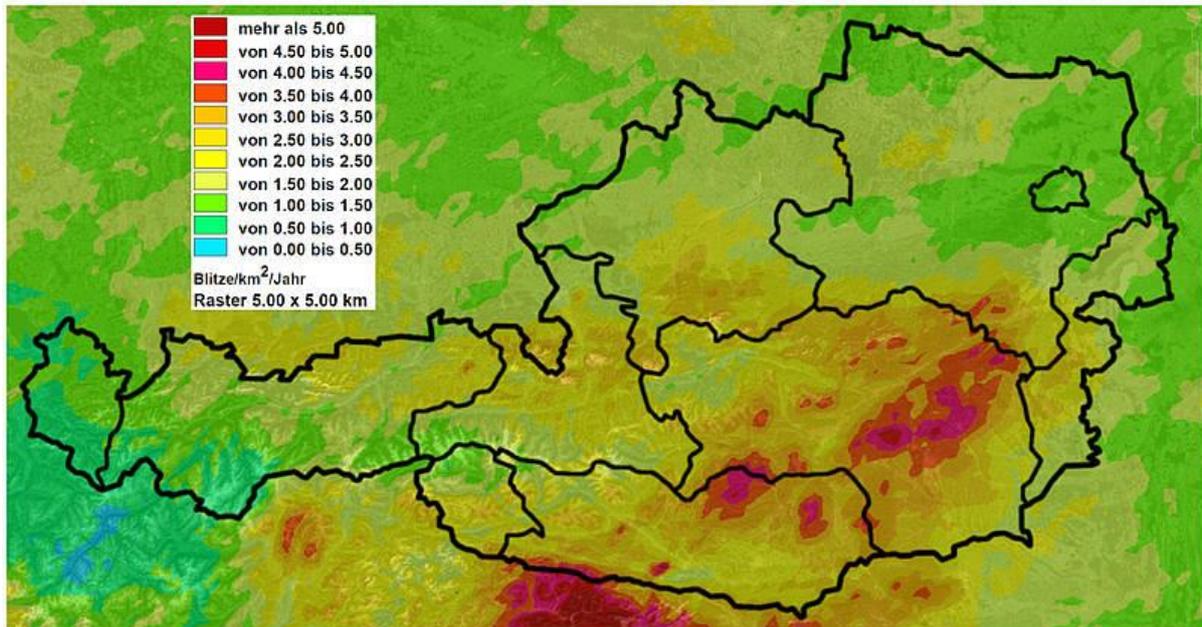


Abbildung 2-10: Erdblitzdichte in Österreich als Anzahl der Blitze pro km² und Jahr (Gitter 5 km x 5 km) auf Basis der von ALDIS georteten Blitze von 2003 – 2012 [2]

Die maximale jährliche Erdblitzdichte beträgt mehr als 5 Blitze pro km².

Zu sehen ist, dass dies in der Steiermark und in Kärnten der Fall ist.

Für die Risikoanalyse nach ÖVE/ÖNORM 62305-2 kann die lokale Erdblitzdichte verwendet werden. Die lokale Erdblitzdichte ist sowohl ein zeitlicher als auch räumlicher Mittelwert. Es wird ein Zeitraum über mehrere Jahre und ein frei wählbares Raster (z.B. 1 km² x 1 km², 10 km² x 10 km² oder einzelne Bezirke bzw. Gemeinden) betrachtet.

3 Grundlagen zum Blitz- und Überspannungsschutz

In diesem Kapitel wird der grundlegende Aufbau eines Blitzschutzsystems beschrieben. Weiters wird auf mögliche Ursachen von Überspannungen und deren Einkopplungsarten eingegangen. Zuletzt wird die Funktionsweise von Überspannungsschutzgeräten (englisch: Surge Protection Device – SPD) erklärt und ein Überblick über die unterschiedlichen SPD – Typen bzw. deren Kenngrößen gegeben.

3.1 Das Blitzschutzsystem

Ein Blitzschutzsystem (englisch: Lightning Protection System – LPS) besteht aus einem äußeren und einem inneren Blitzschutz. Laut ÖVE/ÖNORM 62305 ist ein Blitzschutzsystem aus folgenden Bestandteilen aufgebaut:

- Fangeinrichtung
- Ableitungseinrichtung
- Erdungsanlage
- Trennungsabstände
- Blitzschutz-Potentialausgleich

Der äußere Blitzschutz ist also dafür verantwortlich, dass Direkteinschläge mittels Fangeinrichtung aufgefangen werden, zur Erde abgeleitet werden und der Blitzstrom über eine Erdungsanlage ins Erdreich aufgeteilt wird.

Der innere Blitzschutz ist im Wesentlichen dafür verantwortlich, dass in der baulichen Anlage keine gefährlichen Überspannungen auftreten. Dies wird mittels Potentialausgleich oder durch einen Trennungsabstand zwischen den Bauteilen des Blitzschutzsystems und anderen elektrischen leitenden Elementen innerhalb der leitenden Anlage erreicht.

Es werden vier Gefährdungspegel (englisch: Lightning Protection Level - LPL) eingeführt. Jedem dieser Pegel wird eine Schutzklasse des LPS zugeordnet. Es gibt also vier Blitzschutzklassen I, II, III, IV von Blitzschutzsystemen. Diese Schutzklassen sind durch bestimmte Konstruktionsregeln für die Dimensionierung festgelegt, die auf den jeweiligen Gefährdungspegel beruhen. [1]

Gemäß der österreichischen Elektrotechnikverordnung darf die Blitzschutzklasse IV aufgrund zu geringer Schutzwirkung nicht angewendet werden.

3.2 Das äußere Blitzschutzsystem

Wie bereits erwähnt besteht die Aufgabe des äußeren Blitzschutzes darin, Direkteinschläge einzufangen und in das Erdreich abzuleiten. Er besteht aus Fangeinrichtung, Ableitungseinrichtung und Erdungsanlage. Die Abbildung 3-1 zeigt ein Haus mit äußerem Blitzschutz. [1]

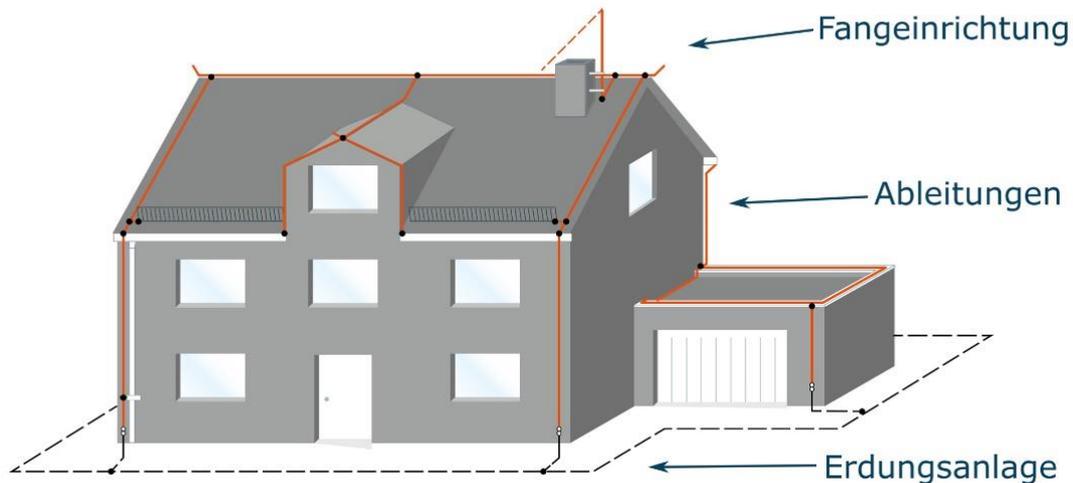


Abbildung 3-1: Der äußere Blitzschutz [4]

Fangeinrichtung

Fangeinrichtungen können aus Stangen, gespannten Seilen und vermaschten Leitern bzw. beliebigen Kombinationen dieser bestehen.

Die Dimensionierung und Auslegung von Fangeinrichtung kann nach dem Blitzkugelverfahren, dem Maschenverfahren und dem Schutzwinkelverfahren erfolgen. Das Blitzkugelverfahren ist die am universellsten einsetzbare Methode.

Ableitung

Die Aufgabe der Ableitung besteht darin, den eingefangenen Blitzstrom zur Erdungsanlage abzuleiten, ohne das am zu schützenden Gebäude ein Schaden entsteht. Sie ist also die elektrisch leitende Verbindung von Fangeinrichtung und Erdungsanlage.

Erdungsanlage

Die Erdungsanlage leitet den eingefangenen Blitzstrom ins Erdreich ab und teilt diesen dort auf. Weiters stellt die Erdungsanlage einen Potentialausgleich zwischen den Ableitungen her. Für verschiedene elektrische Systeme ist eine gemeinsame Erdungsanlage zu bevorzugen. Diese muss über die Haupterdungsschiene mit dem Potentialausgleich verbunden werden.

3.3 Der innere Blitzschutz

Hinsichtlich der Blitzgefährdung lassen sich unterschiedliche Blitzschutzzonen (englisch: lightning protection zone - LPZ) charakterisieren. Das Ziel besteht darin, Überspannungen stufenweise auf einen für das zu schützende Betriebsmittel ungefährlichen Pegel zu minimieren.

Eine Blitzschutzzone ist ein Bereich, indem das gleiche Schutzniveau gilt. Beim Übergang von einer Zone zur Anderen wird ein Potentialausgleich durchgeführt.

Es müssen koordinierte Überspannungsschutzgeräte eingesetzt werden. Die benötigte Blitzschutzklasse bestimmt das Impulsableitvermögen der entsprechenden Ableiter.

Es ist davon auszugehen, dass ca. 50 % des Blitzstroms zur Erde abgeleitet werden und die restlichen 50 % über den Hauptpotentialausgleich in die Elektroinstallation galvanisch eingekoppelt werden. [5]

Laut ÖVE/ÖNORM 62305-1 werden die jeweiligen Blitzschutzzonen wie folgt definiert:[3]

- LPZ 0_A: Zone, die durch direkte Blitzeinschläge und durch das volle elektromagnetische Feld des Blitzes gefährdet ist. Die inneren Systeme können volle oder anteilige Blitzstoßströme ausgesetzt sein.
- LPZ 0_B: Zone, die gegen direkte Blitzeinschläge geschützt, aber durch das volle elektromagnetische Feld des Blitzes gefährdet ist. Die inneren Systeme können anteilige Blitzstoßströme ausgesetzt sein.
- LPZ 1: Zone, in der die Stoßströme durch Stromaufteilung und durch isolierende Schnittstellen und/oder SPDs an der Zonengrenze begrenzt werden. Durch räumliche Schirmung kann das elektromagnetische Feld des Blitzes abgeschwächt sein.
- LPZ 2, ..., n :Zone, in der die Stoßströme durch Stromaufteilung und durch isolierende Schnittstellen und/oder zusätzliche SPDs an der Zonengrenze weiter begrenzt werden. Zusätzliche räumliche Schirmung kann verwendet werden, um das elektromagnetische Feld des Blitzes weiter abzuschwächen.

Räumliche Schirmung

Mit Hilfe einer räumlichen Schirmung kann das magnetische Feld innerhalb einer LPZ verringert werden. Das magnetische Feld kann durch direkte oder indirekte Blitzeinschläge in die bauliche Anlage verursacht werden. Stoßwellen welche z.B. in eine Ladeeinrichtung bzw. deren Zuleitungen induziert werden, können durch geeignete Leitungsführung und -schirmung oder durch eine Kombination beider Maßnahmen reduziert werden.

Abbildung 3-2 zeigt ein Beispiel für den LEMP bei einem Blitzeinschlag in die bauliche Anlage mit den entsprechenden Blitzschutzzonen. Das zu schützende System ist in LPZ 2 installiert.

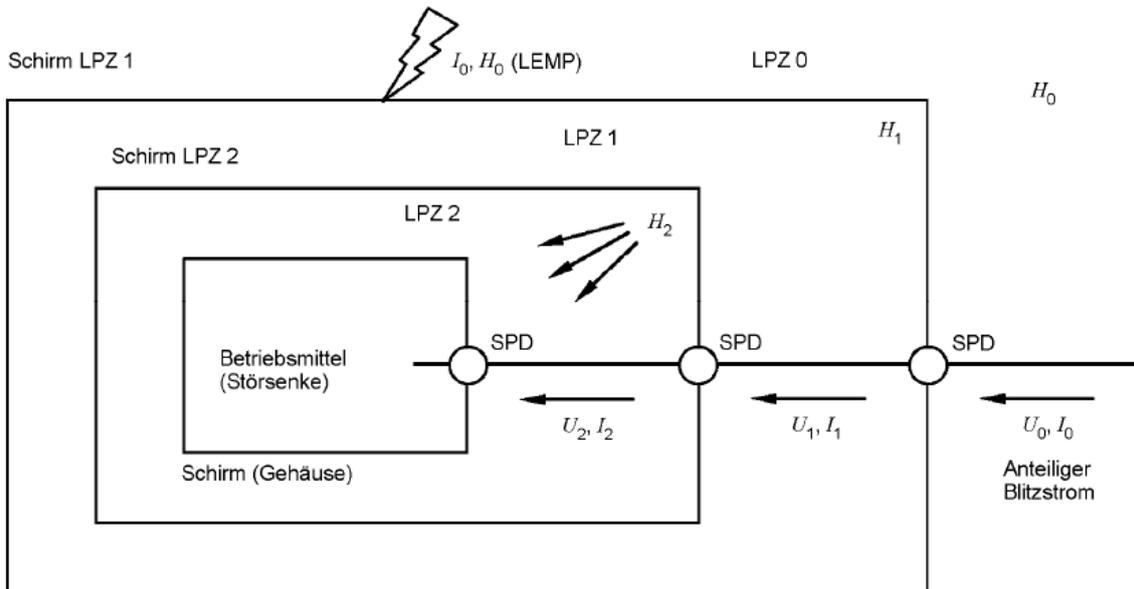


Abbildung 3-2: LEMP-Situation im Fall eines Blitzeinschlags [6]

Um nun ein Betriebsmittel vor dem magnetischen Feld schützen zu können, muss es innerhalb eines Sicherheitsvolumens aufgestellt werden, welches den Sicherheitsabstand der jeweiligen LPZ einhält. Besonders bei LPZ 1 können relative hohe Werte des magnetischen Feldes nahe dem Schirm auftreten.

In der Praxis treten gitterförmige Schirme auf, welche aus natürlichen Komponenten der baulichen Anlage aufgebaut sind. Diese Komponenten können metallene Bewehrungen in Decken, Wänden und Böden sein oder aus metallenen Rahmen, Dächern oder Fassaden bestehen. Um eine wirksame Schirmung zu gewährleisten ist eine Maschenweite kleiner als 5 m erforderlich (ÖVE/ÖNORM 62305-4: A.3.2).

Für die Berechnungen, welche in den späteren Kapiteln erfolgen, wird davon ausgegangen, dass sich Ladesäule und Fahrzeug in LPZ 1 befinden. LPZ 1 kann z.B. eine Parkgarage sein. Das zu schützende Objekt, die Ladesäule befindet sich in LPZ 2. LPZ 2 wird in der Regel vom Metallgehäuse der Ladesäule gebildet.

Die Abbildung 3-3 zeigt das Sicherheitsvolumen V_s . Das Sicherheitsvolumen stellt also die Schirmung für LPZ 1 dar. Um die Schutzwirkung des Sicherheitsvolumens zu gewährleisten, muss sich das zu schützende Objekt mit einem Sicherheitsabstand $d_{s/1}$ bzw. $d_{s/2}$ vom Sicherheitsvolumen entfernt befinden.

Das Fahrzeug und die Ladesäule befinden sich also im Sicherheitsvolumen V_s .

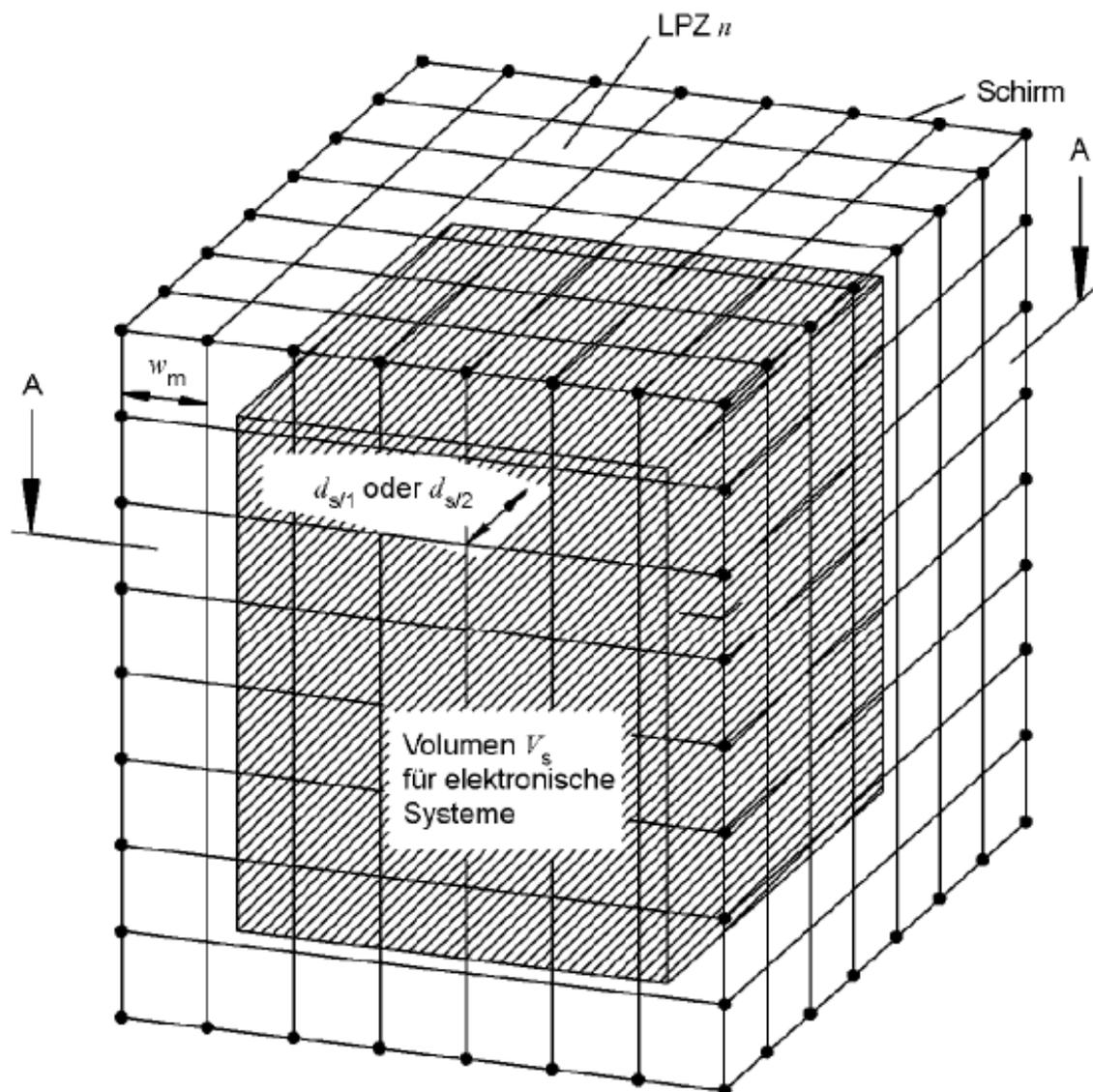


Abbildung 3-3: Sicherheitsvolumen V_s Maschenweite w_m , Sicherheitsabstände $d_{s/1}$ und $d_{s/2}$ [6]

3.4 Ursachen von Überspannungen

Überspannungen unterscheiden sich in der Regel in ihrer Dauer und Amplitude. Wird die Isolationsfestigkeit eines elektrischen Gerätes von einer auftretenden Überspannung überschritten, können schwerwiegende Schäden auftreten.

Weisen Überspannungen eine sehr kurze Dauer und hohe Amplituden auf, spricht man von transienten Überspannungen. Dies führt zu steilen und hohen Spannungsanstiegen. Abhilfe vor deren Auswirkungen kann ein entsprechender Überspannungsschutz schaffen. [5]

Blitzentladungen (LEMP)

Blitzentladungen (lightning electromagnetic pulse, LEMP) Verursachen transiente Überspannungen, die ein sehr hohes Zerstörungspotential aufweisen. Ein Blitzeinschlag in großer Entfernung kann aufgrund seiner indirekten Wirkung eine Überspannung von mehreren Kilovolt und Stoßströme von mehreren tausend Ampere verursachen. Obwohl die Dauer des Blitzstroms auf einige Mikrosekunden begrenzt ist, kann er zur totalen Zerstörung einer Installation führen. [5]

Schaltvorgänge (SEMP)

Durch das Zu- und Abschalten von Verbrauchern mit hohen Induktivitäten können elektromagnetische Impulse erzeugt werden (switching electromagnetic pulse, SEMP). Diese Impulse können wiederum zu induzierten Überspannungen führen, welche sich auf elektrischen Leitungen ausbreiten.

Auch Kurzschlüsse oder das Zuschalten von Verbrauchern mit hohen Einschaltströmen können transiente Überspannungen hervorrufen. [5]

Elektrostatiche Entladungen (ESD)

Wenn sich Körper mit unterschiedlichem Potential annähern und es zu einem Austausch von Ladungsträgern kommt, treten elektrostatiche Entladungen auf. Ist die Potentialdifferenz zwischen den Körpern groß genug kommt es zu einem Überschlag (electrostatic discharge, ESD). [5]

3.5 Einkopplungsarten

Grundsätzlich kann man zwischen 3 möglichen Einkopplungen von Überspannungen unterscheiden, welche für den Blitz- und Überspannungsschutz relevant sind.

Galvanische Einkopplung

Eine galvanische Einkopplung tritt auf, wenn zwei Stromkreise elektrisch leitfähig miteinander verbunden sind. Aufgrund der Kopplung können sie sich gegenseitig direkt beeinflussen. Kommt es zu einer Spannungs- oder Stromänderung in einem Kreis, wird eine entsprechende Änderung im zweiten Kreis hervorgerufen. [5]

Induktive Einkopplung

Ein schnell ansteigender Stromfluss erzeugt in einem elektrischen Leiter ein sich veränderliches Magnetfeld. Befindet sich eine Leiterschleife in der Nähe des Magnetfeldes, wird durch die Änderung der Magnetfeldstärke infolge des Induktionsgesetzes in der Leiterschleife eine Spannung induziert. [5]

Kapazitive Kopplung

Eine kapazitive Kopplung tritt zwischen zwei Stromkreisen mit unterschiedlichem Potential auf. Aufgrund der Potentialdifferenz entsteht ein elektrisches Feld. Befindet sich nun ein elektrischer Leiter in diesem Feld, werden entsprechend dem Prinzip der Influenz die Ladungsträger des Leiters in Richtung der Feldlinien ausgerichtet. Dadurch entsteht innerhalb des Leiters ein Potentialunterschied bzw. eine Spannungsdifferenz. [5]

3.6 Überspannungsschutz

Die Hauptaufgabe von Überspannungsschutzgeräten besteht darin, die Überspannung in ihrer Amplitude zu begrenzen, damit die Isolationsfestigkeit der Geräte nicht überschritten wird und die aufgrund von Überspannungen hervorgerufenen Stoßströme zur Erde abzuleiten. Überspannung kann als Querspannung (zwischen zwei aktiven Leitern, Abb. 3-5) oder als Längsspannung (zwischen aktiven Leiter und Schutzleiter/Erdepotential, Abb. 3-6) auftreten. [5]

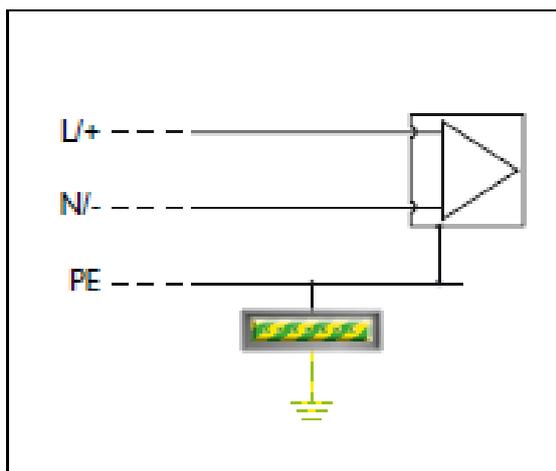


Abbildung 3-4: Schematische Stromversorgung eines Betriebsmittels [5]

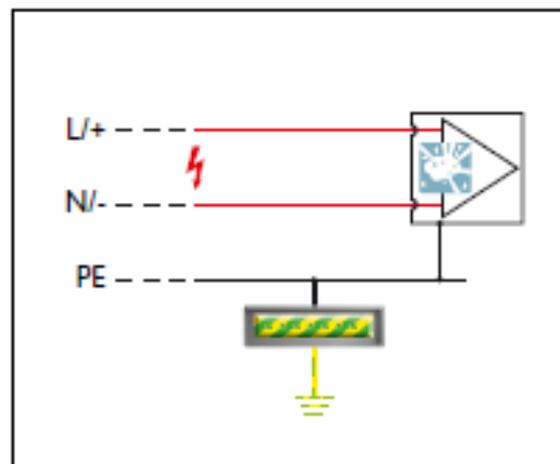


Abbildung 3-5: Auswirkung einer Überspannung als Querspannung [5]

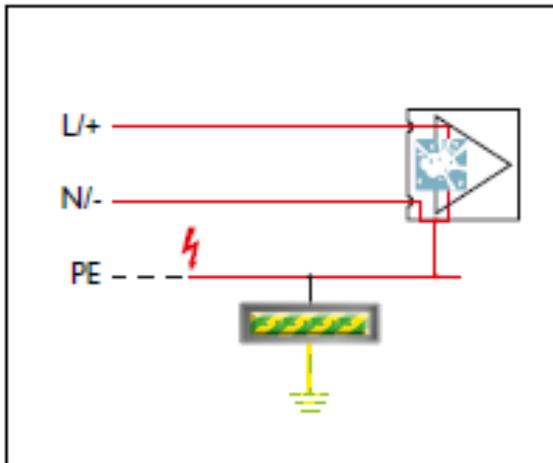


Abbildung 3-6: Auswirkung einer Überspannung als Längsspannung [5]

Überspannungsableiter werden daher jeweils parallel zum Betriebsmittel, zwischen den aktiven Leitern (Abb. 3-7) oder dem aktiven Leiter und dem Schutzleiter eingebaut (Abb. 3-8).

Tritt nun eine Überspannung auf, verhält sich die Schutzeinrichtung wie ein Schalter und erzeugt einen Kurzschluss zwischen den aktiven Leitern (Abb. 3-9) oder aktiven Leiter und Schutzleiter (Abb. 3-10). Die Stoßströme können somit über das Versorgungsnetz oder über die Erde abfließen. Somit kommt es zu einer Begrenzung der Überströme

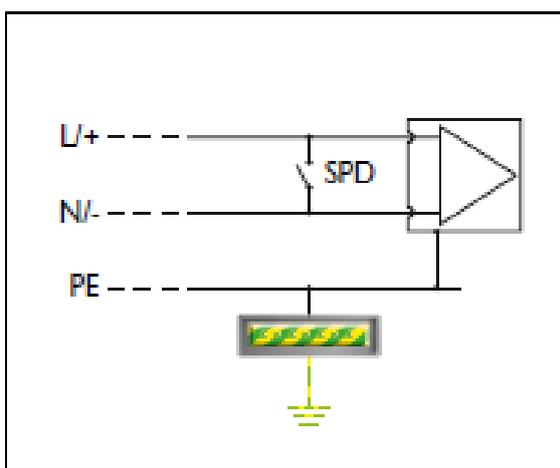


Abbildung 3-7: SPD zwischen aktiven Leitern [5]

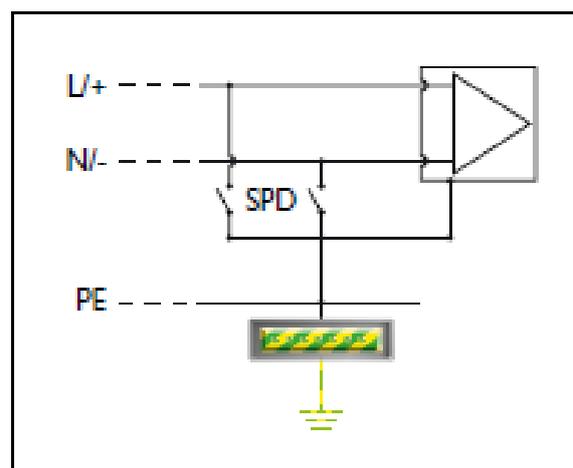


Abbildung 3-8: SPD zwischen aktiven Leitern und Schutzleiter [5]

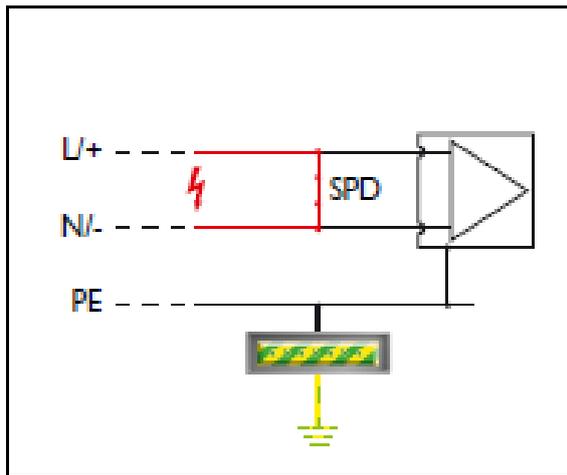


Abbildung 3-9: SPD zwischen aktiven Leitern im Fall einer Querspannung [5]

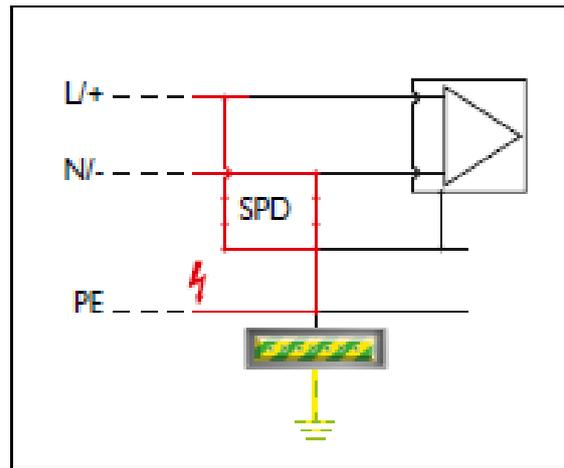


Abbildung 3-10: SPD zwischen aktivem Leiter und dem Schutzleiter im Fall einer Längsspannung [5]

3.6.1 Kenngrößen von Überspannungsschutzgeräten

Nachfolgend werden die Kenngrößen von Überspannungsableitern beschrieben. [1][5]

Nennspannung (U_N)

Die Nennspannung für eine Überspannungsschutzeinrichtung entspricht der Systemspannung für den Einsatzort des SPDs. Für ein Drehstromsystem sind dies in der Regel 230/400 V AC.

Nennlaststrom (I_L)

Der Nennlaststrom ist der maximale Effektivwert des Nennstroms der zu einer an dem geschützten Ausgang des Ableiters angeschlossenen Last fließen kann. Die betriebsstromführenden Teile des SPDs müssen der Dauerstrombelastung thermisch standhalten können und geben somit diesen Wert vor.

Kurzschlussfestigkeit (I_{SCCR})

Gibt an für welchen prospektiven Kurzschlussstrom das Überspannungsschutzgerät eingesetzt werden darf. Die Kurzschlussfestigkeit ist also ein Maß für den höchsten unbeeinflussten Kurzschlussstrom des elektrischen Netzes für den das SPD ausgelegt ist.

Höchste Dauerspannung (U_C)

Der maximale Effektivwert der Spannung die dauerhaft an den Klemmen des Überspannungsschutzgerätes angelegt werden darf. Der Wert von U_C ist abhängig von der Nennspannung des zu schützenden Systems. Er muss mindestens mehr als 10 % über dem Wert von U_N liegen. Liegen Systeme mit größeren Spannungsschwankungen vor, müssen SPDs eingesetzt werden, die eine größere Differenz von U_C und U_N aufweisen.

Schutzpegel (U_p)

Der Schutzpegel charakterisiert die Überspannungsschutzwirkung des SPDs. Er ist der maximale Momentanwert der Spannung an den Klemmen des SPDs bei Belastung. Weiters ist er dafür ausschlaggebend, die Überspannung auf einen sicheren Restwert zu begrenzen.

Der Schutzpegel kann je nach SPD-Typ aus folgenden Einzelprüfungen ermittelt werden:

- Ansprechstoßspannung 1,2/50 μ s (100 %)
- Restspannung U_{res} bei Nennableitstoßstrom

Blitzstoßstrom (I_{imp})

Beim Blitzstoßstrom handelt es sich um einen Stoßstromverlauf mit der Wellenform 10/350 μ s. Er entspricht der Hüllkurve eines natürlichen Blitzstroms und mit ihm werden direkte Blitzeinschläge simuliert. Je nach Blitzschutzklasse müssen die SPDs einen gewissen Mindestwert bezüglich des Blitzstoßstroms standhalten.

Nennableitstoßstrom (I_n)

Der Nennableitstoßstrom charakterisiert die Auswirkung eines indirekten Blitzeinschlags oder einer Schalthandlung. Er besitzt die Wellenform 8/20 μ s und dient zur Prüfung von SPDs Typ2.

Leerlaufspannung (U_{OC})

Die Leerlaufspannung wird von einem Hybridgenerator an den Anschlusspunkten des SPDs erzeugt. Im Leerlauffall erzeugt der Hybridgenerator einen Spannungsimpuls der Form 1,2/50 μ s und im Kurzschluss einen Stromimpuls der Form 8/20 μ s. Der kombinierte Stoß gleicht den Auswirkungen induzierter Überspannungen. Abhängig von der geforderten Schutzklasse muss die entsprechende Überspannungsschutzrichtung einen Mindestwert bezüglich der Leerlaufspannung erfüllen.

3.6.2 Einteilung der Überspannungsschutzgeräte

Laut ÖVE/ÖNORM 61643-11 lassen sich Überspannungsableiter in drei Typenklassen einteilen: Typ 1, Typ 2 und Typ 3.

Je nach Blitzschutzzone werden verschiedene Überspannungsableiter angewendet. Tabelle 3-1 gibt eine Übersicht, wann welcher SPD zum Einsatz kommt. [5][7]

Tabelle 3-1: SPD-Typ in Abhängigkeit des LPZ-Übergangs [5]

Zonenübergang	SPD-Typ	Bezeichnung
LPZ 0 _A → LPZ 1	Typ 1	Blitzstromableiter / Kombi-ableiter
LPZ 0 _B → LPZ 1	Typ 2	Überspannungsableiter
LPZ 1 → LPZ 2	Typ 2	Überspannungsableiter
LPZ 2 → LPZ 3	Typ 3	Geräteschutz

Blitzstromableiter Typ 1 und Kombi-ableiter Typ 1+2

Typ 1 Ableiter werden am Gebäudeeintritt eingesetzt und sollen vor den Auswirkungen direkter Blitzeinschläge schützen. Sie werden parallel zu den Außenleitern des Energienetzes angeschlossen und müssen die höchsten Anforderungen in Bezug auf Amplitude und spezifische Energie der Stoßströme erfüllen.

Weiters wird auch eine hohe Kurzschlussfestigkeit vorausgesetzt.

Es werden in der Regel spannungsschaltende SPDs mit der Funkenstreckentechnologie angewendet, da in der Praxis mit dieser Technologie die Koordination zu nachfolgenden SPDs (geräteintegriert oder extern) gewährleistet werden kann. [8]

Mittels 100 kA, 10/350 µs Impulsform werden direkte Blitzeinschläge simuliert. Kombi-ableiter Typ1+2 müssen zusätzlich für die Impulsform 8/20 µs ausgelegt sein. [5][7]

Überspannungsableiter Typ 2

Typ 2 Ableiter werden hauptsächlich in Unterverteilungen eingesetzt und müssen induzierte Überspannungen aus indirekten Blitzeinschlägen oder Schaltheandlungen ableiten. Sie werden im Regelfall in Energieflussrichtung, vor einem Fehlerstromschutz (RCD) angeschlossen, da dieser bei mangelnder Stromfestigkeit, den abgeleiteten Stoßstrom als Fehlerstrom auffasst und den Stromkreis unterbricht. Da es viele Anwendungen gibt, bei denen der SPD auch nach einem RCD installiert wird, sind immer RCDs mit entsprechender Stoßstromfestigkeit zu verwenden. (z.B, RCD Typ G) Aufgrund von induzierten Überspannungen wird die Stoßstrombelastung von Typ 2 SPDs typischerweise mittels 20 kA, 8/20 µs Impulsform simuliert.

Die Belastung durch Stoßströme ist deutlich geringer, jedoch sind Überspannungen ausgelöst durch Schaltheftungen oft deutlich dynamischer. Daher kommt häufig die Varistortechnologie zum Einsatz, welche ein schnelles Ansprechverhalten aufweist. Man spricht auch von spannungsbegrenzenden SPDs. [5][7]

Überspannungsableiter Typ 3

Typ 3 Ableiter werden zum Schutz induktiver Einkopplungen und Schaltüberspannungen in den Endgerätestromkreisen eingesetzt.

Als Technologie kommt häufig Varistortechnologie wie bei Typ 2 zum Einsatz. Jedoch sind die Anforderungen an das Ableitvermögen deutlich geringer.

In der Regel treten die Überspannungen hauptsächlich zwischen Phase (L) und Neutralleiter (N) auf. Mittels Hybridprüfimpulsen von bis zu 20 kV und 10kA der Impulsform 1,2/50 μ s und 8/20 μ s werden Überspannungen simuliert. [5][7]

Einteilung der Überspannungsschutzgeräte für die Datenleitung

SPDs für die Datenleitung lassen sich bezüglich des Ableitvermögens und der Schutzwirkung kategorisieren.

Hinsichtlich des Ableitvermögens gibt es nach ÖVE/ÖNORM 61643-21 die Kategorien A1, A2, B1, B2, B3, C1, C2, C3, D1 und D2. Im Hinblick auf Kommunikationseinrichtungen für Ladesäulen sind D1, C2 und C1 von Bedeutung. Tabelle 3-2 gibt eine Übersicht. [1]

Tabelle 3-2: Ableitvermögen eines Ableiters [1]

LPZ	ÖVE/ÖNORM 61643-21
0/1	Impuls D1 (10/350 μ s), Blitzstrom $\geq 2,5$ kA/Ader bzw. ≥ 5 kA gesamt
1/2	Impuls C2 (8/20 μ s), erhöhte Stoßbelastung $\geq 2,5$ kA/Ader bzw. ≥ 5 kA gesamt
2/3	Impuls C1 (8/20 μ s), Stoßbelastung $\geq 0,25$ kA/Ader bzw. $\geq 0,5$ kA gesamt

In Bezug auf die Schutzwirkung wird nach ÖVE/ÖNORM 61000-4-5 in 5 Prüfschärfegrade unterteilt. Für Ladesäulen kommen in der Regel SPDs mit einem Prüfschärfegrad 1 von 0,5 kV (Leitung gegen Erde) zum Einsatz.

4 Ladebetriebsarten und Elektromobilität

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten zum konduktiven Laden von E-Autos beschrieben. Es werden relevante Steckvorrichtungen erklärt, typische Ladeleistungen der jeweiligen Ladebetriebsarten und der in Österreich am meist vorkommenden E-Autos aufgeführt. Weiters werden die möglichen Standorte einer Ladeinfrastruktur besprochen. Abschließend wird ein Überblick über die momentane Anzahl an E-Autos und Ladepunkte in Österreich gegeben.

4.1 Konduktive Ladebetriebsarten von E-Autos

Die ÖVE/ÖNORM EN 61851-1 definiert 4 unterschiedliche Ladebetriebsarten (auch engl. Mode bezeichnet). Weiters wird beim kabelgebundenen Laden unterschieden ob über die Haushaltssteckdose bzw. CEE Steckdose geladen wird (Mode 1 und 2), oder ob über eine fest an das Wechselstromnetz angeschlossene Ladeeinrichtung (Mode 3 und 4) geladen wird.

Abbildung 4-1 liefert eine Übersicht über die unterschiedlichen Ladebetriebsarten.

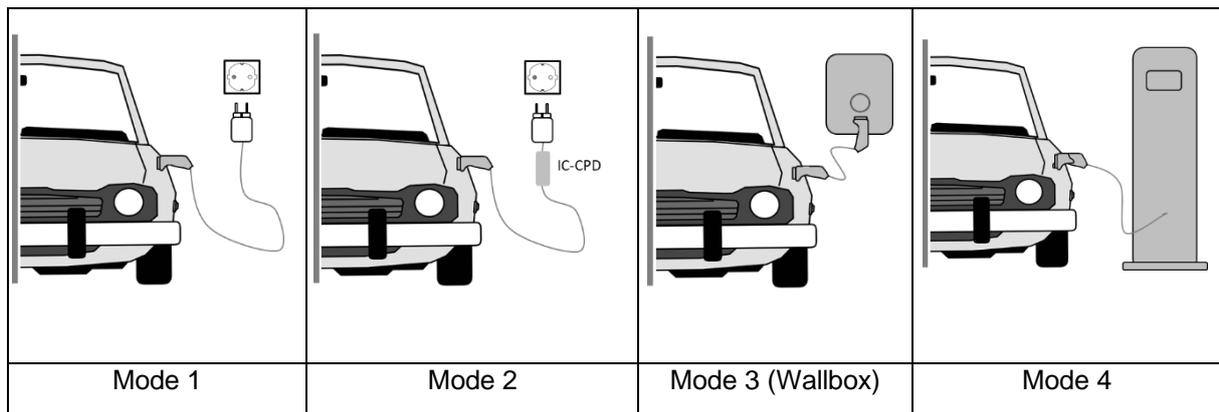


Abbildung 4-1: Ladebetriebsarten, engl. Mode [a1]

Ladebetriebsart 1 (Mode 1)

Das Laden erfolgt mittels Wechselstrom (AC), 1- oder 3-phasig über eine Schuko- oder eine CEE-Steckdose bis 16 Ampere. Es besteht keine Kommunikation zwischen dem E-Fahrzeug und der Ladeeinrichtung. Diese Ladebetriebsart wird nur von Herstellern von zweirädrigen Fahrzeugen unterstützt, da das Vorhandensein einer Fehlerstromschutzeinrichtung (englisch: Residual Current Device - RCD) zwingend erforderlich ist. Bei älteren Bestandsinstallationen ist dies oft nicht gegeben. [9]

Ladebetriebsart 2 (Mode 2)

Das Laden erfolgt mittels Wechselstrom (AC), 1- oder 3-phasig über eine Schuko- oder eine CEE-Steckdose bis 32 Ampere. (Wie Mode 1)

Zusätzlich wird eine ICCB (In-Cable-Control-Box) oder auch IC-CPD (In-Cable-Control and Protection Device) genannt, zwischen E-Fahrzeug und Energiequelle geschaltet. Die ICCB besitzt eine Funktion zum Fehlerstromschutz, welcher für diese Ladebetriebsart zwingend notwendig ist. Mit Hilfe eines Pilotsignals erfolgt ein Informationsaustausch und eine Überwachung der Schutzleitverbindung zwischen der ICCB und dem Fahrzeug. [9]

Ladebetriebsart 3 (Mode 3)

Unter Mode 3 versteht man das Laden mit Wechselstrom (AC) an einer fest installierten Ladestation. 1-phasig kann bis 20 Ampere und 3-phasig kann bis 63 Ampere geladen werden. Mittels Typ 2 Steckverbindung kann das Fahrzeug an die Ladeeinrichtung angeschlossen werden. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladeeinrichtung erfolgt über die Ladeleitung. Schutzeinrichtungen sind im Stromkreis sowie in der Ladeeinrichtung vorhanden. [9]

Mode 3 kann als Wallbox oder als Ladesäule umgesetzt werden. Eine Wallbox ist primär für die Nutzung im Innenbereich (private Garage, Tiefgarage, etc.) als Wandmontage vorgesehen.

Ladesäulen sind für die Nutzung im Außenbereich (öffentliche Parkplätze, etc.) als Bodenaufstellung vorgesehen.

Ladebetriebsart 4 (Mode 4)

Unter Mode 4 versteht man das Laden mit Gleichstrom (DC) für Schnellladungen an einer fest installierten Ladestation. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation erfolgt mittels einer Ladeleitung welche fest mit der Ladestation verbunden ist. Es wird die CCS (Combined Charging System), die CHAdeMO oder die Tesla Supercharger Steckverbindung verwendet. Schutzeinrichtungen sind im Stromkreis sowie in der Ladeeinrichtung vorhanden. Der wesentliche Unterschied zu Mode 1-3 besteht darin, dass sich das Ladegerät in der Ladestation befindet. D.h. die Umrichtung erfolgt in der Ladestation und das Fahrzeug wird direkt mit Gleichstrom versorgt. [9]

4.2 Steckvorrichtungen

In der Regel kommen zum Laden von E-Autos Typ 2 Stecker zum AC-Laden und CCS-Stecker zum DC-Laden zum Einsatz. Diese zwei Steckvorrichtungen werden in Deutschland aufgrund der Ladesäulenverordnung (LSV) für öffentlich zugängliche Ladestationen verbindlich gefordert. In der EU-Richtlinie 2014 / 94 / EU ist das CCS-System als zukünftiger europäischer Standard festgelegt worden. [9] [10]

Abbildung 4-2 zeigt einen Typ 2 Stecker und Abbildung 4-3 einen CCS-Stecker.

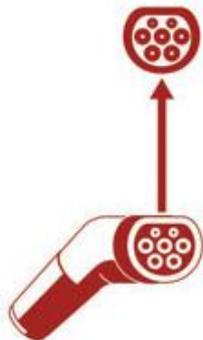


Abbildung 4-2: Typ 2 Stecker [10]

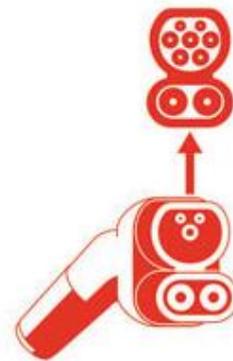


Abbildung 4-3: CCS Stecker [10]

4.3 Typische Ladeleistungen

Tabelle 4-1 liefert eine Übersicht über typische Ladeleistungen entsprechender Ladebetriebsarten

Tabelle 4-1: Typische Ladeleistungen, [9][10][11]

Art der Ladeeinrichtung	Art des Ladestromkreises	Mode	Ladestrom	typische Ladeleistungen
Schuko Steckdose 230 V/ 16 A	1-phasig, 230 V	1 oder 2	10 A	2,3 kW
CEE-Steckdose 230 V (blau)	1-phasig, 230 V	2	16 A	3,7 kW
CEE-Steckdose 400 V (rot)	3-phasig, 400 V	2	16 A/32 A	11 kW/22kW
Wallbox	1-phasig, 230 V	3	16 A/32 A	3,7 kW/ 7,4 kW
Wallbox/Ladesäule	3-phasig, 400 V	3	16 A/32 A/63 A	11 kW/ 22 kW/ 44 kW
Ladesäule DC		4	Bis 700 A	50 kW/ 150 kW/ 400 kW

Das 1-phasige Laden mit 230 V und 32 A, also mit 7,4 kW ist im österreichischen Stromnetz wegen Schiefast nicht erlaubt. Das einphasige Laden mittels Wallbox von 3,7 kW ist die derzeit häufigste Art, wie Autos für den Privatgebrauch geladen werden. [12]

Für den öffentlichen Gebrauch kommt die Variante der Ladesäule mittels 11 kW oder 22kW am häufigsten vor.

Ab 22kW spricht man von Schnellladen. 44 kW ist derzeit die Obergrenze für das AC-Laden.

Beim DC-Schnellladen sind zukünftig Leistungen bis 400 kW möglich. [10]

Tabelle 4-2 liefert eine Übersicht über die 5 am meisten zugelassenen E-Autos. (Die Buchstaben A bis E wurden zur Anonymisierung der jeweiligen Hersteller verwendet) Bei den in der Tabelle befindlichen Werten handelt es sich um Richtwerte.

Tabelle 4-2: Übersicht E-Autos [13][14]

Abkürzung, Modell	Anteil in %	Batteriekapazität	Gesamt-Reichweite elektrisch	Ladeleistung AC	Ladedauer an der AC-Ladestation	Ladeleistung DC	Ladedauer an der DC-Ladestation
A	26,1	80 kWh	530km	11 kW	8 h	200 kW	40 min
B	12,8	42 kWh	260 km	11 kW	3 h	50 kW	45 min
C	10,6	50 kWh	400 km	22 kW	2 h	50 kW	60 min
D	8,4	35 kWh	230 km	7,4 kW	5 h	50 kW	50 min
E	8,2	65 kWh	480 km	7,4 kW	10 h	78 kW	30 min

4.4 Standorte einer Ladeinfrastruktur

Grundsätzlich kann man zwischen privaten und öffentlich zugänglichen Ladeeinrichtungen unterscheiden. Diese Unterteilung spielt eine Rolle im Hinblick auf die technischen Anforderungen und auf die einschlägigen Rechtsvorschriften sowie den Fördermöglichkeiten. [9]

Privater Aufstellort

Der Zugang zu einem Ladepunkt ist nur von einer definierten Person oder Personengruppe möglich. Typische Standorte sind:

- Einzel-/Doppelgarage bzw. Stellplatz beim Eigenheim
- Parkplätze bzw. Tiefgaragen von Wohnanlagen oder Mehrfamilienhäusern
- Firmenparkplätze auf eigenem Gelände

Die Stromversorgung kann über den vorhandenen Anschluss der Anlage oder über einen separaten Anschluss an das Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz erfolgen.

Öffentlicher Aufstellort

Ein öffentlich zugänglicher Ladepunkt liegt vor, wenn der zum Ladepunkt gehörende Parkplatz von einer unbestimmten oder nach allgemeinen Kriterien bestimmten Personengruppe befahren werden darf. Typische Standorte sind:

- Autohof, Autobahn-Raststätte
- Einkaufszentren, Parkhäuser, Kundenparkplätze, Tiefgaragen
- Straßenrand/öffentliche Parkplätze

Die Stromversorgung kann in beiden Fällen über den vorhandenen Anschluss der Anlage oder über einen separaten Anschluss an das Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz erfolgen.

Als Ladetechnologie kommen entweder Ladebetriebsart 3 oder 4 zum Einsatz.

Im Gegensatz zu privat zugänglichen Ladesäulen sind öffentlich zugängliche Ladesäulen meist zusätzlich mit einer Datenanbindung ausgestattet. Dadurch kommt es in der Regel zur Bildung von Leiterschleifen mit der Energieversorgungsleitung. Dies muss bei der Installation von SPDs berücksichtigt werden (Kapitel 6 und 7).

4.5 Elektromobilität in Österreich

In diesem Unterkapitel wird eine Übersicht über die momentane Anzahl an E-Autos und der momentanen Anzahl an Ladepunkten in Österreich gegeben.

4.5.1 E-Autos in Österreich

Laut Statistik Austria liegt die Anzahl der in Österreich zugelassenen E-Autos bei 29.523 (Dezember 2019). Bis Ende Dezember 2019 sind 36.8 Prozent mehr E-Autos zugelassen worden als im Vergleichszeitraum 2018.

Die Abbildung 4-4 stellt den Bestand von E-Autos in Österreich im Zeitraum 2015-2019 dar. Es ist erkennbar, dass die Anzahl an E-Autos in den letzten fünf Jahren um ca. das 6-fache zugenommen hat.

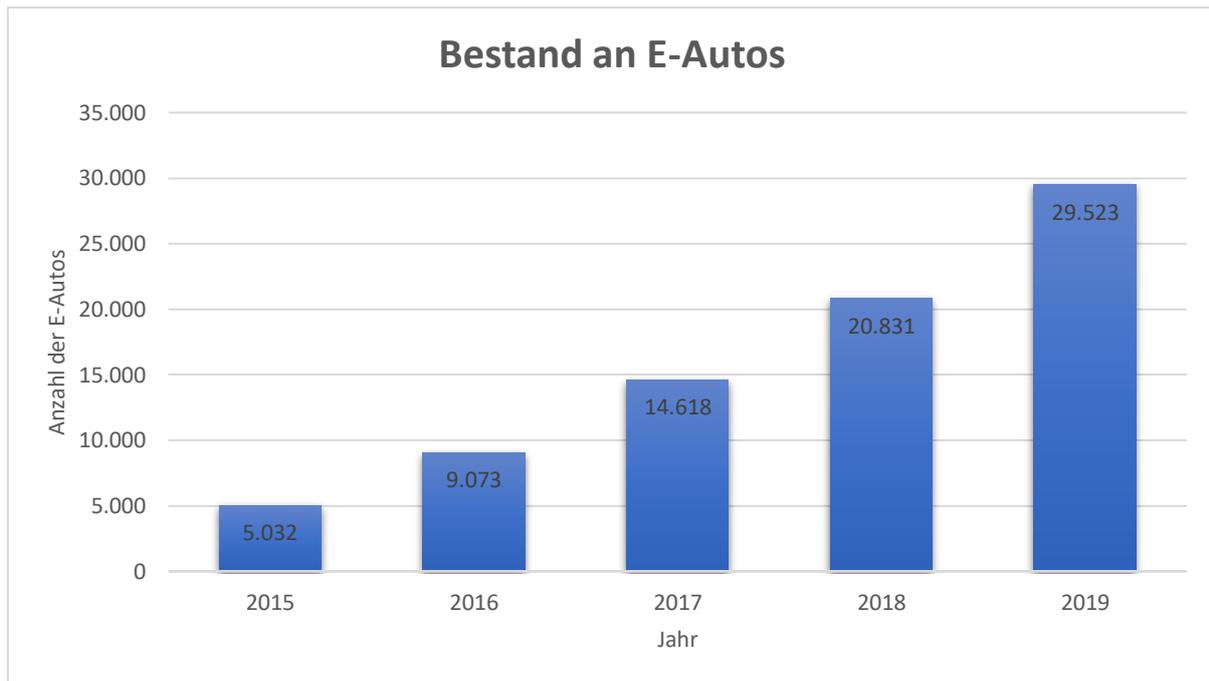


Abbildung 4-4: Bestand an E-Autos in Österreich [15]

Die Abbildung 4-5 zeigt die Anzahl an Neuzulassungen von E-Autos in den letzten fünf Jahren. Auch hier ist ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen.

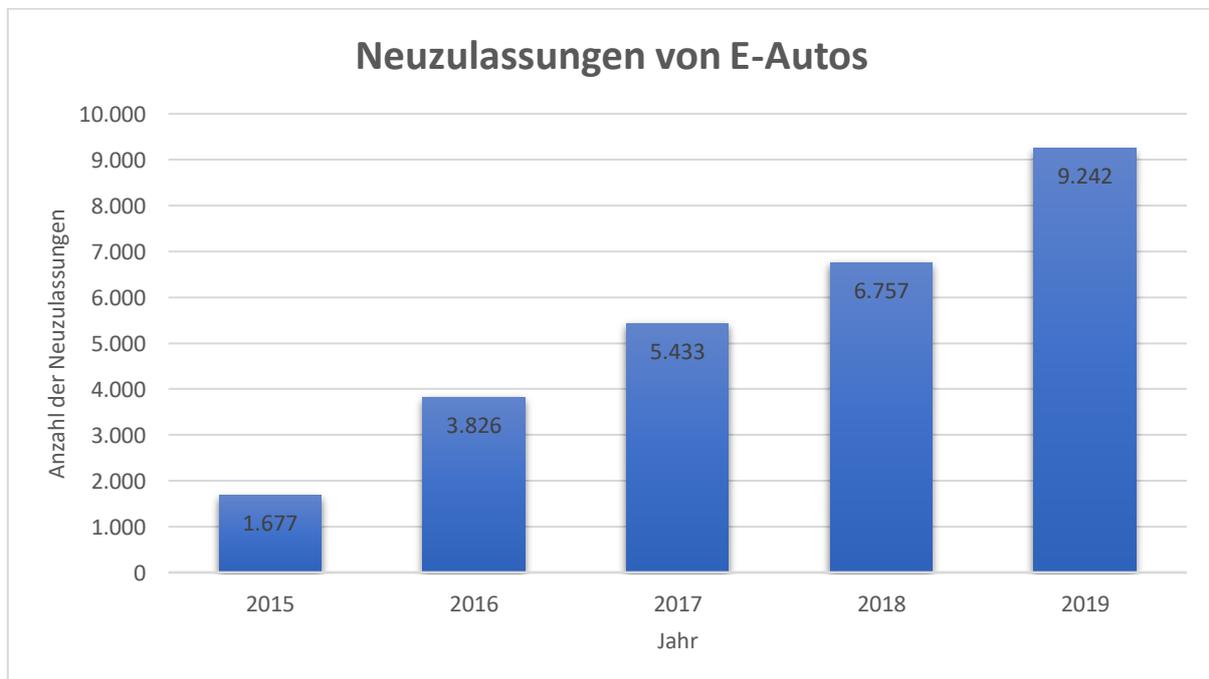


Abbildung 4-5: Neuzulassungen von E-Autos in Österreich [15]

4.5.2 Ladepunkte in Österreich

Die Abbildung 4-6 liefert eine Übersicht an öffentlichen Normal- und Schnellladepunkten in Österreich. Vor allem von 2015 auf 2016 ist ein deutlicher Anstieg an Ladepunkte zu sehen.

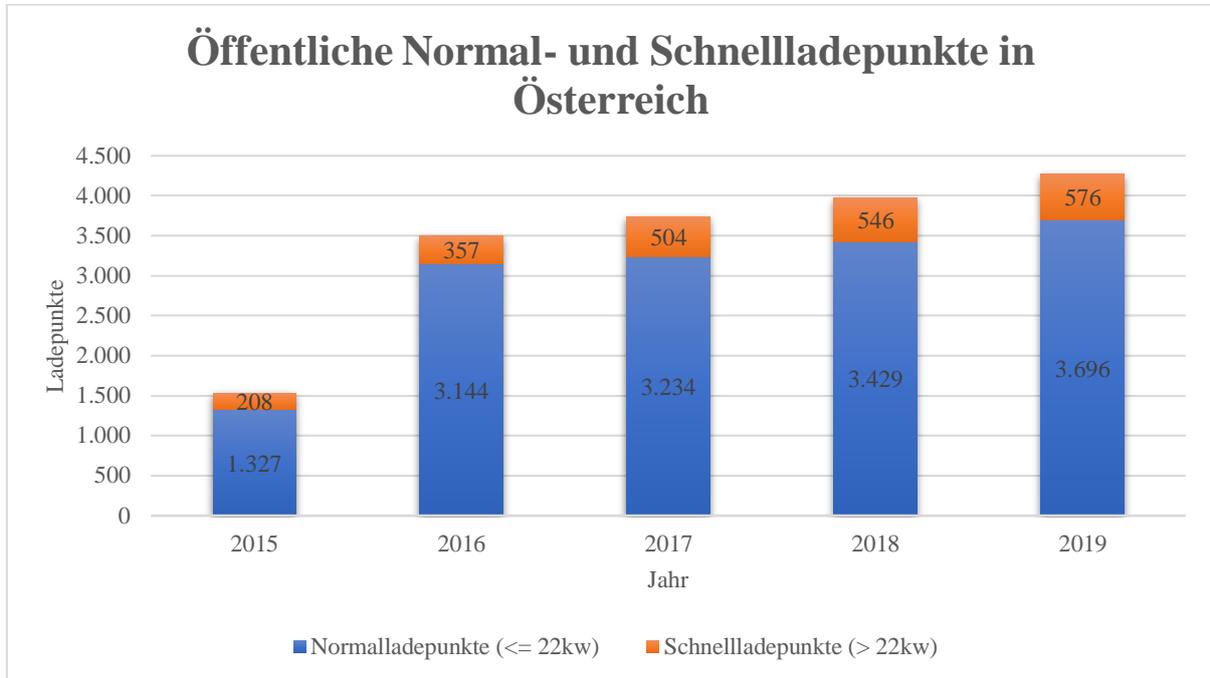


Abbildung 4-6: Anzahl der Ladepunkte in Österreich [16]

Die Abbildung 4-7 zeigt die Aufteilung der Ladepunkte in Österreich auf die einzelnen Regionen des BEÖ Netztes. Zum BEÖ (Bundesverband für Elektromobilität) Netz gehören 11 Energieunternehmen in Österreich und somit der Großteil der öffentlichen Ladepunkte.

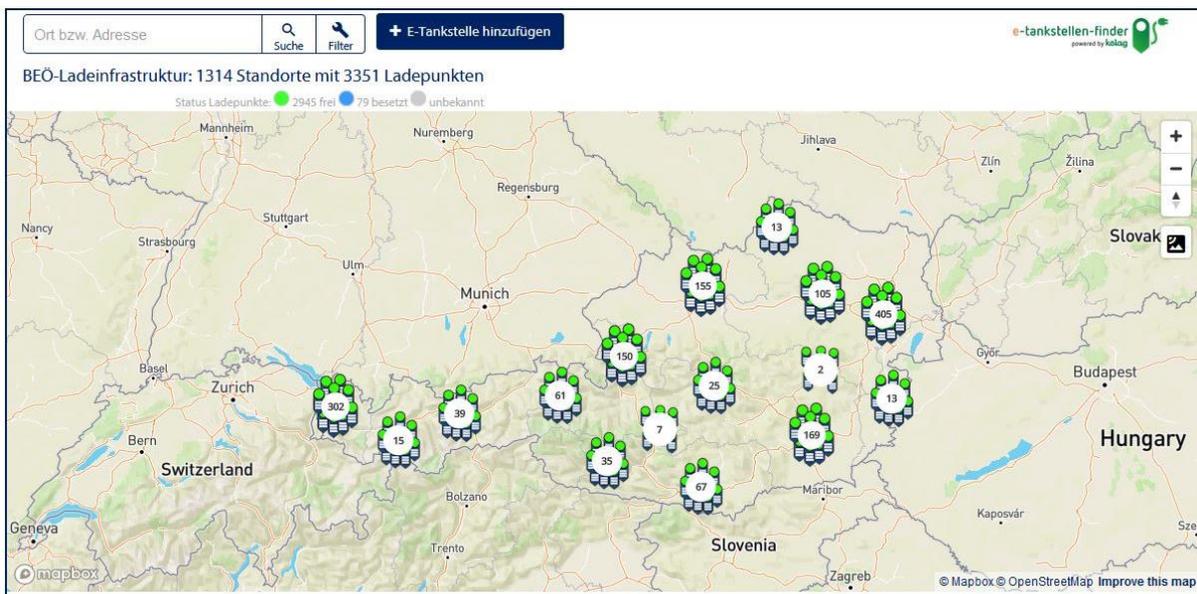


Abbildung 4-7: Ladepunkte in Österreich, BEÖ Netz [17]

5 Normativer Überblick

In diesem Abschnitt wird eine Übersicht über die für das konduktive Laden, für das Errichten von Niederspannungsanlagen (Ladestationen), für den Schutz von atmosphärischen Entladungen und für den Schutz von Überspannungen relevanten Normen gegeben.

5.1 Kabelgebundenes Laden von Elektrofahrzeugen

Abbildung 5-1 zeigt die für das konduktive Laden mit Wechselstrom und Gleichstrom relevanten Normen.

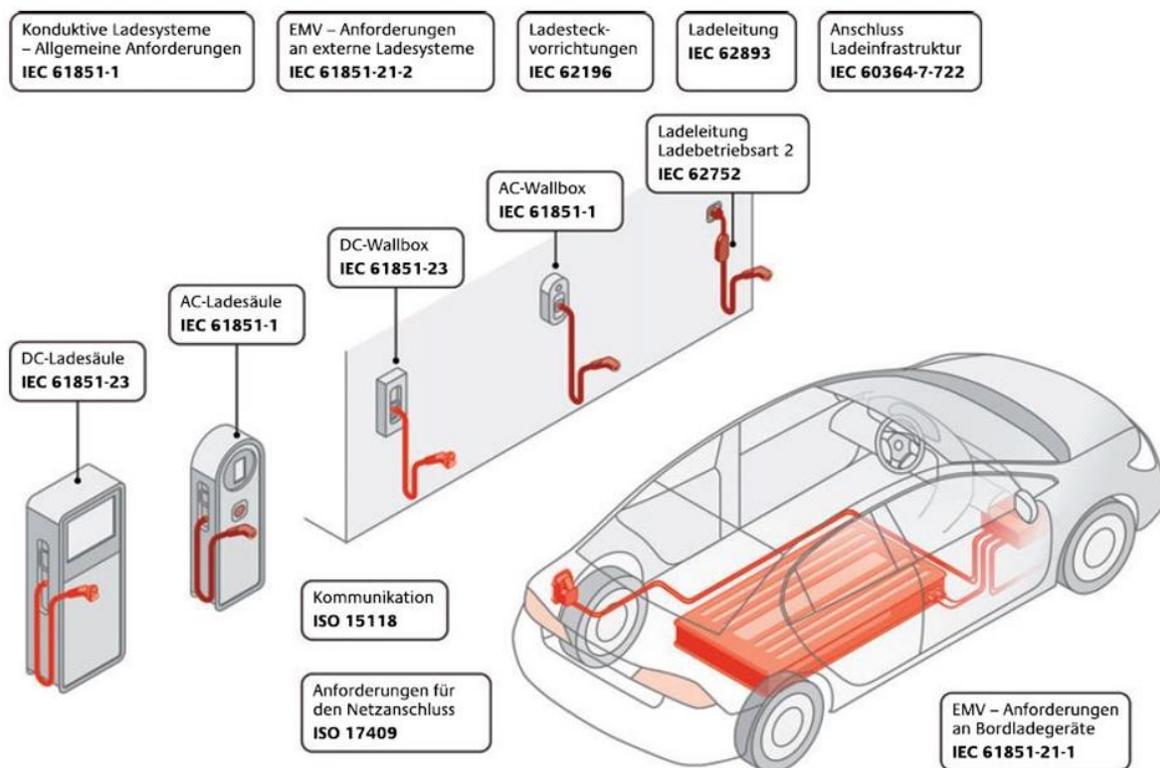


Abbildung 5-1: Normen für das konduktive Laden [10]

Die Tabelle 5-1 beschreibt die in Abbildung 5-1 genannten Normen und Vergleicht die Nummer der Internationale Norm (IEC), der deutsche Norm (DIN VDE) und der Österreichische Norm(ÖVE/ÖNORM).

Tabelle 5-1: Normen für das konduktive Laden

International	Deutschland	Österreich	Titel
IEC 61851-1	DIN VDE 0122-1	ÖVE EN IEC 61851-1	Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
IEC 62196	DIN VDE 0623-5	ÖVE/ÖNORM EN 62196	Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen
IEC 61851-21-1	DIN VDE 0122-2-1-1	ÖVE/ÖNORM EN 61851-21-1	Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge Teil 21-1: EMV-Anforderungen an Bordladegeräte für Elektrofahrzeuge mit Wechselstrom-/Gleichstromversorgung
IEC 61851-21-2	DIN VDE 0122-2-1-2	ÖVE/ÖNORM EN 61851-21-2	Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - Teil 21-2: EMV-Anforderungen an externe Ladesysteme für Elektrofahrzeuge
IEC 62893			Ladekabel für Elektrofahrzeuge für Spannungen bis 0,6/1 kV
IEC 62752	VDE 0666-10	ÖVE/ÖNORM EN 62752	Ladeleitungsintegrierte Steuer- und Schutzeinrichtung für die Ladebetriebsart 2 von Elektro-Straßenfahrzeugen (IC-CPD)
ISO 15118		ÖNORM EN ISO 15118	Straßenfahrzeuge – Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation
ISO 17409		ÖNORM EN ISO 17409	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Anschluss an eine externe Stromversorgung - Sicherheitsanforderungen

Die ÖVE EN IEC 61851-1 beschreibt die allgemeinen Anforderungen an alle im Ladesystem vorkommenden Komponenten. Es werden die Steckvorrichtungen, AC- und DC- Ladesäulen/Wallboxen, Ladeleitungen und die sicherheitstechnischen Aspekte behandelt.

Die ÖVE/ÖNORM 62196 beschreibt die für das Laden benötigten Steckvorrichtungen. Sie lässt sich in 3 Teile unterteilen. ÖVE/ÖNORM 62196-1 beinhaltet die allgemeinen Anforderungen, ÖVE/ÖNORM 62196-3 die für das AC-Laden verbindlichen Vorschriften und die ÖVE/ÖNORM 62196-3 die für das DC-Laden entsprechenden Anforderungen.

Die ÖVE/ÖNORM EN 61851-21-1 beschreibt die Anforderung bezüglich Bordladegeräte an die elektromagnetische Verträglichkeit während des Ladevorgangs.

Die ÖVE/ÖNORM EN 61851-21-2 beschreibt die Anforderung externer Ladesysteme an die elektromagnetische Verträglichkeit während des Ladevorgangs.

Die Normenreihe IEC 62893 beinhaltet die Anforderungen an die Ladeleitungen. Entsprechende DIN VDE bzw. ÖVE/ÖNORM ist derzeit nicht vorhanden.

Die ÖVE/ÖNORM EN 62752 beschreibt die Anforderungen an eine ladungsintegrierte Steuer- und Schutzeinrichtung (IC-CPD, In Cable Control and Protection Device) für die Ladebetriebsart 2.

In der Normenreihe ÖNORM EN ISO 15118 geht es im Wesentlichen um die Kommunikation von Ladeinfrastruktur und Fahrzeug. Es wird die dazu benötigte Hardware, der Ablauf und das Protokoll zur Kommunikation definiert.

Die Norm ISO 17409 legt die Sicherheitsanforderungen für das konduktive Laden beim Anschluss an einen externen Stromkreis fest. Es werden die Ladebetriebsarten 2,3 und 4 berücksichtigt.

Für das kabelgebundene Laden mit höheren Ladeleistungen müssen zusätzliche Normen berücksichtigt werden (Tabelle 5-2).

Mit den aktuellen Normungsprojekten sind momentan Ladeleistungen bis 400 kW (1 kV u. 400 A) abgedeckt. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft höhere Ladeleistungen angestrebt werden. Die Schwierigkeit hierbei liegt darin, dass zum einen die Abwärtskompatibilität zu den bisherigen Steckvorrichtungen sichergestellt werden muss und zum anderen die elektrische Sicherheit für deutlich höhere Ladeleistungen erfüllt sein müssen. [10]

Um in Zukunft das Laden mit noch höheren Ladeleistungen zu ermöglichen, müssen laut der Deutschen Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020 folgende Normen überarbeitet oder neu erstellt werden:

- IEC 62196-3-1
- IEC 62893-4
- IEC 61851-23
- ISO 17409
- ISO 15118-2

Tabelle 5-2 beinhaltet die momentan gültigen Normen für das DC Laden, die zusätzlich zur Tabelle 5-1 gültig sind

Tabelle 5-2: Normen für das konduktive Laden mit höheren Ladeleistungen

International	Deutschland	Österreich	Titel
IEC 61851-23	DIN VDE 0122-2-3	ÖVE/ÖNORM EN 61851-23	Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - Teil 23: Gleichstromladestationen für Elektrofahrzeuge
IEC 61851-24	DIN VDE 0122-2-4	ÖVE/ÖNORM EN 61851-24	Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - Teil 24: Digitale Kommunikation zwischen einer Gleichstromladestation für Elektrofahrzeuge und dem Elektrofahrzeug zur Steuerung des Gleichstromladevorgangs

5.2 Errichten von Niederspannungsanlagen und Überspannungsschutzeinrichtungen

Tabelle 5-3 zeigt die Normen die für das Errichten von Ladestationen und deren Schutzvorrichtungen.

Es ist zu erwähnen, dass die OVE E 8101 in Österreich noch nicht verbindlich ist, aber in Zukunft die ÖVE/ÖNORM E 8001, E 8002 und E 8007 ersetzen wird. Daher wird nachfolgend jeweils auf die OVE E 8101 verwiesen. In der aktuellen Elektrotechnikverordnung (01.09.2020) ist die OVE E 8101 als kundgemacht erklärt.

Tabelle 5-3: Normen für das Errichten von Niederspannungsanlagen und für einen entsprechenden Überspannungsschutz

International	Deutschland	Österreich	Titel
IEC 60364-1	DIN VDE 0100-100	OVE E 8101-1	Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmung allgemeiner Merkmale, Begriffe
IEC 60364-4-44	DIN VDE 0100-443	OVE E 8101-4-443	Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 4-44: Schutzmaßnahmen Schutz bei Störspannungen und elektromagnetischen Störgrößen Abschnitt 443: Schutz bei transienten Überspannungen infolge atmosphärischer Einflüsse oder von Schaltvorgängen
IEC 60364-5-53	DIN VDE 0100-534	OVE E 8101-5-534	Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 5-53: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel Trennen, Schalten und Steuern – Abschnitt 534: Überspannungs-Schutzeinrichtungen (SPDs)
IEC 60364-7-722	DIN VDE 0100-722	OVE E 8101-7-722	Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 7-722: Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art Stromversorgung von Elektrofahrzeugen
IEC 61643-11	DIN VDE 0675-6-11	ÖVE/ÖNORM EN 61643-11	Überspannungsschutzgeräte für Niederspannung – Teil 11: Überspannungsschutzgeräte für den Einsatz in Niederspannungsanlagen - Anforderungen und Prüfungen
IEC 61643-21	DIN VDE 0845-3-1	ÖVE/ÖNORM EN 61643-21	Überspannungsschutzgeräte für Niederspannung – Teil 21: Überspannungsschutzgeräte für den Einsatz in Telekommunikations- und signalverarbeitenden Netzwerken - Anforderungen und Prüfungen
IEC 61000-4-5	DIN VDE 0847-4-5	ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-5	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-5: Prüf- und Messverfahren - Prüfung der Störfestigkeit gegen Stoßspannungen

Für die Errichtung von Niederspannungsanlagen ist die Normenreihe OVE E 8101 zu berücksichtigen. Teil1 beinhaltet die allgemeinen Grundsätze.

Die OVE E 8101-4-443 gibt über den Schutz von transienten Überspannungen infolge atmosphärischer Einflüsse oder von Schaltvorgängen Auskunft. Es wird definiert, wann ein Überspannungsschutz zu installieren ist.

In der OVE E 8101-5-534 wird der Einsatz und die Anwendung von Überspannungsschutzeinrichtungen (SPDs) erläutert. Es wird definiert welcher Überspannungsschutz auszuwählen ist.

Die OVE E 8101-7-722 beinhaltet die Anforderungen für den Anschluss einer Stromversorgung für Elektrofahrzeuge an das Niederspannungsnetz.

In der ÖVE/ÖNORM EN 61643-11 werden die einzelnen Kategorien von Überspannungsableitern zum Schutz gegen direkte oder indirekte Blitzeinschläge definiert.

In der ÖVE/ÖNORM EN 61643-21 werden SPDs für die Datenleitung aufgrund ihres Ableitvermögens kategorisiert.

In der ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-5 wird die Schutzwirkung eines SPDs für Datenleitungen aufgrund des entsprechenden Prüfschärfegrades des zu schützenden Endgerätes festgelegt.

5.3 Blitzschutznorm

Für einen direkten oder einen indirekten Blitzeinschlag ist die Normenreihe ÖVE/ÖNORM 62305 zu berücksichtigen. Sie ist in vier Teile gegliedert: Tabelle 5-4

Tabelle 5-4: Blitzschutznormen

International	Deutschland	Österreich	Titel
IEC 62305-1	DIN VDE 0185-305-1	ÖVE/ÖNORM EN 62305-1	Blitzschutz - Teil 1: Allgemeine Grundsätze
IEC 62305-2	DIN VDE 0185-305-2	ÖVE/ÖNORM EN 62305-2	Blitzschutz - Teil 2: Risiko-Management
IEC 62305-3	DIN VDE 0185-305-3	ÖVE/ÖNORM EN 62305-3	Blitzschutz - Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen
IEC 62305-4	DIN VDE 0185-305-4	ÖVE/ÖNORM EN 62305-4	Blitzschutz - Teil 4: Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen

Teil 1 behandelt die allgemeinen Grundsätze des Blitzschutzes.

In Teil 2 wird die Vorgehensweise zur Risikoabschätzung beim Auftreten von Wolke-Erde-Blitze erläutert.

Teil 3 gibt Auskunft über den Schutz von baulichen Anlagen gegen physikalische

Schäden mit Hilfe eines Blitzschutzsystems (LPS) und für den Schutz gegen Verletzungen von Lebewesen durch Berührungs- und Schrittspannungen in der Nähe eines Blitzschutzsystems.

Teil 4 bezieht sich auf die Planung, Installation, Inspektion, Instandhaltung und Prüfung von Schutzsystemen von elektrischen Einrichtungen und auf Schutzmaßnahmen gegenüber elektromagnetischer Blitzimpulse (LEMP).

5.4 Weitere Vorschriften für die Inbetriebnahme von Ladeeinrichtungen

Die Publikation der deutschen Versicherer zur Schadenverhütung von Ladestation für Elektrostraßenfahrzeuge gibt vor, aus den Herstellerangaben der Ladeeinrichtung die entsprechende Überspannungskategorie zu ermitteln. Je nachdem welche Überspannungskategorie nach DIN VDE 0100-443 (OVE E 8101-4-443) vorliegt, muss evaluiert werden ob ein zusätzlicher Überspannungsschutz notwendig ist. Laut DIN VDE 0100-722 (OVE E 8101-7-722) muss eine Überspannungsschutzeinrichtung im versorgenden Stromkreis wirksam sein. [18]

Für öffentlich zugängliche Ladepunkte wird laut DIN VDE 0100-722 Abschnitt 443 ein Überspannungsschutz gegen transiente Überspannungen verbindlich gefordert. [9]

Die OVE E 8101-7-722-443 gibt einen Überspannungsschutz für den versorgenden Stromkreis vor, um das Fahrzeug vor möglichen Schäden, verursacht von Überspannungen zu schützen.

In der Norm OVE E 8101-5-534 werden die Anforderungen an den Überspannungsschutz erläutert.

Häufig werden öffentlich zugängliche Ladesäulen auch direkt an das Netz eines Energieversorgers angeschlossen und mit einer Zähleinrichtung ausgestattet. Hier ist in Deutschland zusätzlich die VDE-AR-N 4100 im Hinblick auf Überspannungsschutz zu berücksichtigen.[9]

In Österreich unterliegt der Anschluss den jeweiligen Ausführungsbestimmungen des Energieversorgungsunternehmens (TAEV). Das Land Steiermark gibt vor in jeder Verbraucheranlage einen Überspannungsschutz gegen indirekte Blitzeinwirkungen zu installieren. Falls in der Verbraucheranlage bereits zentrale Überspannungsschutzgeräte installiert sind, so ist die Installation von Überspannungsschutzgeräten in jeder Einzelverbraucheranlage nicht gefordert. In Gebieten mit erhöhter Blitzdichte werden diese aber empfohlen.

Der Vorzählerbereich darf nicht für den Einbau von Überspannungsschutzgeräten verwendet werden. [19]

6 Berechnung induzierter Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag

In diesem Kapitel werden induzierte Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag in die Zuleitungen der Ladesäule berechnet. In der Regel besitzt eine Ladesäule eine Anspeisung einer Datenleitung und einer Energieversorgungsleitung. Diese beiden Leitungen bilden eine Leiterschleife und abhängig von der Einschlagsstelle des Blitzes und dem Standort der Ladesäule wird eine entsprechende Spannung induziert.

Alle Berechnungen in diesem Kapitel erfolgen nach der Grundlage von ÖVE/ÖNORM 62305 Teil 4, Anhang A: Grundlagen für die Bestimmung der elektromagnetischen Umgebung in einer LPZ. [6]

6.1 Magnetisches Feld innerhalb von LPZ 1 bei direktem Einschlag

Zunächst wird das magnetische Feld in LPZ 1 berechnet, wenn der Blitz direkt in das Sicherheitsvolumen einschlägt. Abbildung 6-1 veranschaulicht dieses Szenario.

Es wird vom Beispiel einer dreistöckigen Hochgarage (Parkhaus) ausgegangen. Der Schirm eines Gebäudes (umgebender Schirm von LPZ 1) kann Teil des äußeren Blitzschutzsystems sein. Bei direktem Einschlag würden also die Blitzströme darin fließen. Es wird davon ausgegangen, dass der Blitz in das Dach der Garage einschlägt.

Für das Parkhaus wird eine Größe von 50 m x 50 m x 12 m (L x W x H) angenommen. Die Wand und das Dach bauen die Schirmung auf und sind somit natürliche Komponenten des äußeren Blitzschutzsystems.

Das zu schützende System befindet sich in LPZ 2 – also innerhalb der Ladesäule. Die Ladesäule soll ein Gehäuse bzw. einen Schirm aus Aluminium besitzen. Die nachfolgenden Berechnungen erfolgen ausschließlich in LPZ 1. Die Leiterschleifen innerhalb der Ladesäule sind vernachlässigbar klein. D.h. es würden auch aufgrund relativ hoher Feldstärken keine zerstörerischen Spannungen induziert werden.

Tabelle 6-1: Berechnung des Schirmfaktors für unterschiedliche Maschenweiten

Maschenweite w_m	Radius eines Stabes des Schirms r_c	Schirmfaktor SF
m	m	db
1 x 1	0,01	17,9
2 x 2	0,01	11,9

6.1.2 Berechnung des Sicherheitsabstandes

Der Sicherheitsabstand gibt an, wie weit das zu schützende Objekt vom Sicherheitsvolumen mindestens entfernt sein muss, damit das Sicherheitsvolumen seine Schutzwirkung aufrecht hält.

Ist der Wert von SF größer gleich 10, gilt für den Sicherheitsabstand $d_{s/1}$ innerhalb des Sicherheitsvolumens V_S folgendes:

$$d_{s/1} = w_m \cdot \frac{SF}{10} \quad \text{für } SF \geq 10 \quad (6-2)$$

$d_{s/1}$... Sicherheitsabstand (m)

SF ... Schirmfaktor (db)

w_m ... Maschenweite (m)

Ist der Wert kleiner als 10, entspricht der Sicherheitsabstand die Maschenweite:

$$d_{s/1} = w_m \quad \text{für } SF < 10 \quad (6-3)$$

$d_{s/1}$... Sicherheitsabstand (m)

SF ... Schirmfaktor (db)

w_m ... Maschenweite (m)

Laut Tabelle 6-1 ist SF größer als 10, daher muss der Sicherheitsabstand mit der Formel 6-2 berechnet werden. (Siehe Tabelle 6-2)

6.1.3 Berechnung des magnetischen Feldes

Nun wird das Magnetische Feld H_1 einmal für den Raummittelpunkt ($d_w = L/2$ und $d_r = H/2$) und einmal für den Fall $d_{s/1} = d_w$ berechnet. Der Sicherheitsabstand $d_{s/1}$ gibt also an, wie nahe sich das zu schützende Objekt am Schirm befinden darf.

Berechnung induzierter Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag

Die Formel für das Magnetische Feld H_1 lautet wie folgt:

$$H_1 = \frac{k_h \cdot I_0 \cdot w_m}{d_w \cdot \sqrt{d_r}} \quad (6-4)$$

H_1 ... magnetische Feldstärke (A/m)

k_h ... Geometriefaktor ($0,01 \frac{1}{\sqrt{m}}$)

w_m ... Maschenweite (m)

I_0 ... Blitzstrom in LPZ 0_A (A)

d_r und d_w Abstände siehe Abb. 6.1 (m)

Der Geometriefaktor k_h wird wie in der Norm mit $0,01 \frac{1}{\sqrt{m}}$ angenommen. I_0 ist der erste positive Teilblitz für die LPL III und beträgt daher 100 kA.

Tabelle 6-2 beinhaltet die Berechnung von H_1 für unterschiedliche Maschenweiten. Einmal wurde H_1 im Raummittelpunkt und einmal für den minimalen Sicherheitsabstand $d_{s/1}$ berechnet.

Tabelle 6-2: Berechnung von H_1

Abmessungen Schirm			Abstand Dach	Abstand Wand	Geometriefaktor
L	W	H	(Mittelpunkt) d_r	(Mittelpunkt) d_w	k_h
m			m	m	$\frac{1}{\sqrt{m}}$
50	50	12	6	25	0,01
Maschenweite			Sicherheitsabstand	H1 (Mittelpunkt)	H1 (worst case)
w_m			$d_{s/1}$		$d_w = d_{s/1}$
m			m	A/m	A/m
1 x 1			1,8	16,3	228,5
2 x 2			2,4	32,7	344,5

Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Maschenweite der Schirmfaktor abnimmt. Daher ist auch ein Anstieg des magnetischen Feldes zu sehen.

Weiters ist eine starke Abnahme des magnetischen Feldes mit zunehmenden Abstand d_w zu sehen. D.h. das magnetische Feld im Raummittelpunkt ist deutlich geringer als für den Fall des minimalen Sicherheitsabstandes $d_{s/1} = d_w$.

6.2 Berechnung von induzierten Spannungen und Strömen bei Direkteinschlag in LPZ 1

Ausgangspunkt ist wiederum eine dreistöckige Hochgarage mit den Abmessungen 50 m x 50 m x 12 m (L x W x H). Es werden die induzierte Spannung und der induzierte Strom in die Leiterschleife – verursacht durch Energieversorgungsleitung und Datenleitung – berechnet.

Der Blitz schlägt in das Gebäudedach ein, das Dach und die Wand stellen die natürlichen Komponenten des äußeren Blitzschutzsystems dar.

Die folgende Abbildung liefert die Seitenansicht dieser Anordnung.

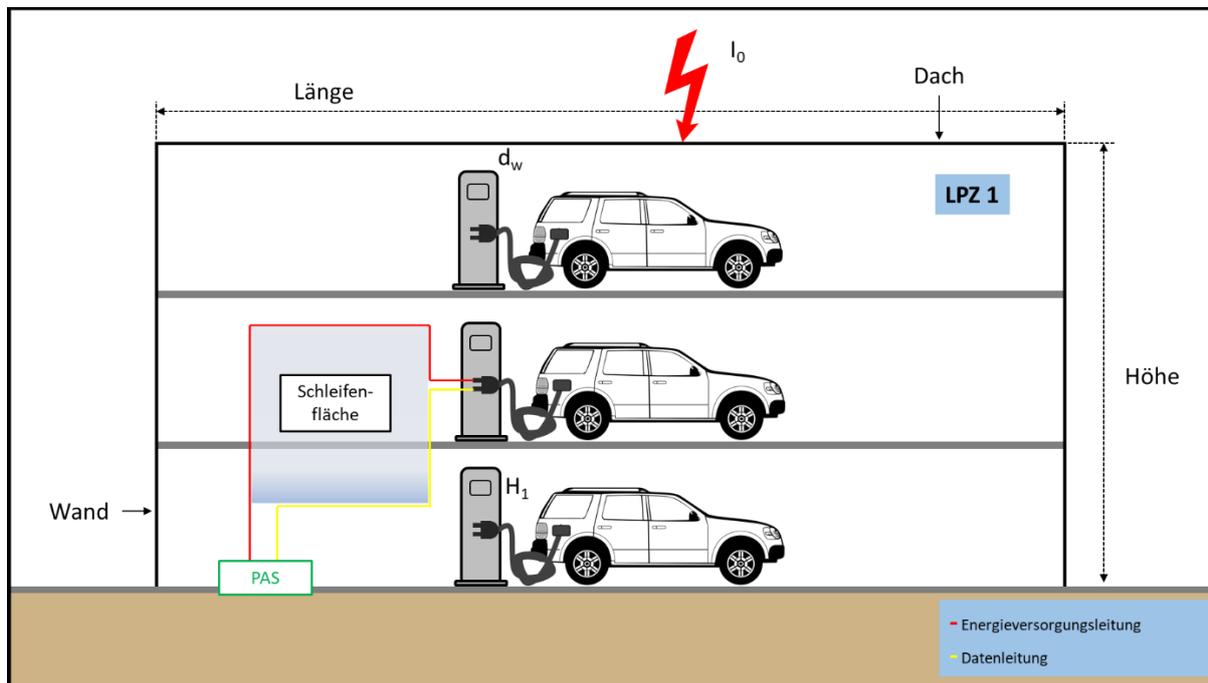


Abbildung 6-2: Dreistöckige Hochgarage mit den Abmessungen L x W x H,
PAS ... Potentialausgleichschiene [a2]

Die nächste Abbildung zeigt eine vergrößerte Ansicht bestehend aus Leiterschleife und Ladeeinrichtung.

Berechnung induzierter Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag

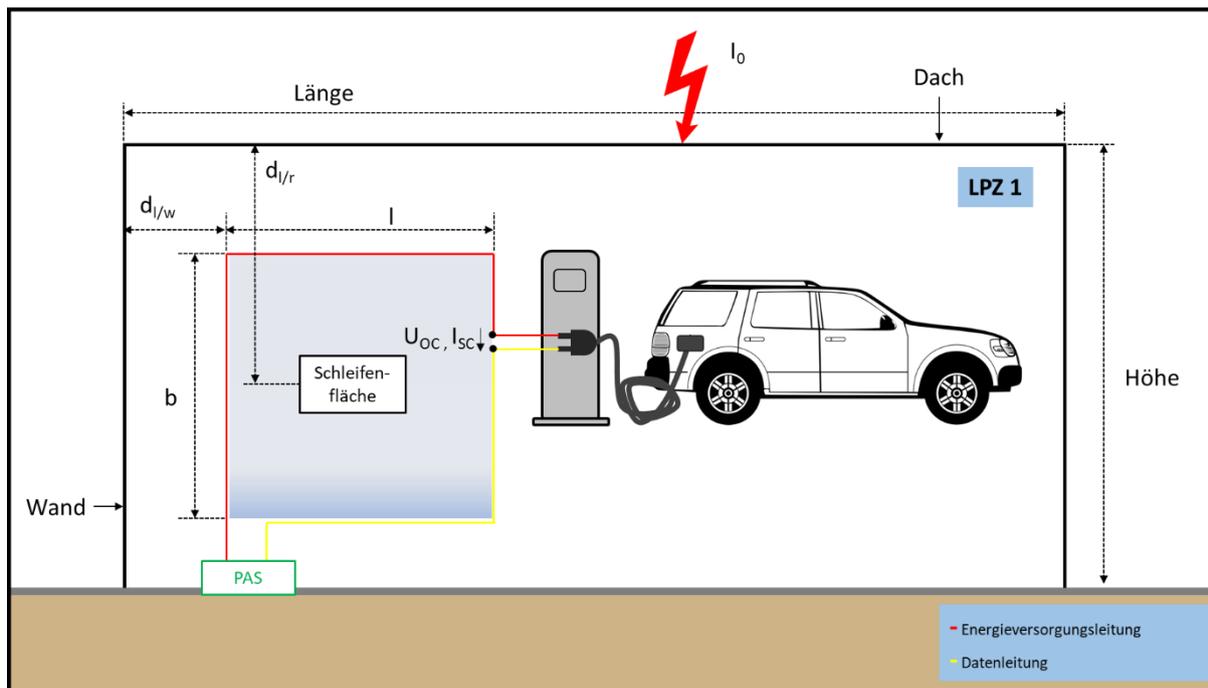


Abbildung 6-3: Leiterschleife mit der Länge l und der Breite b , gebildet aus Energieversorgungsleitung und Datenleitung, PAS ... Potentialausgleichschiene [a2]

Die Leiterschleife befindet sich innerhalb des Volumens V_s von LPZ 1 und besitzt die Länge l und die Breite b . $d_{l/w}$ ist der Abstand der Leiterschleife von der Wand des Schirms, $d_{l/r}$ ist der mittlere Abstand der Leiterschleife von der Decke des Schirms. U_{oc} ist die Leerlaufspannung und I_{sc} der Kurzschlussstrom.

Der Maximalwert der Leerlaufspannung $U_{oc/max}$ tritt während der maximalen Änderungsgeschwindigkeit d.h. der Stirnzeit T_1 auf und berechnet sich wie folgt:

$$U_{oc/max} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln \left(1 + \frac{l}{d_{l/w}} \right) \cdot k_h \cdot \left(\frac{w_m}{\sqrt{d_{l/r}}} \right) \cdot I_{0/max} \cdot \frac{1}{T_1} \quad (6-5)$$

- $U_{oc/max}$... Maximalwert der Leerlaufspannung (V)
- b ... Breite der Leiterschleife (m),
- μ_0 ... $4\pi \cdot 10^{-7}$ in Vs/Am
- l ... Länge der Leiterschleife (m)
- w_m ... Maschenweite (m)
- $d_{l/w}$... Abstand der Leiterschleife von der Wand des Schirms (m)
- $d_{l/r}$... Abstand der Leiterschleife von der Decke des Schirms (m)
- k_h ... Geometriefaktor $(0,01 \frac{1}{\sqrt{m}})$
- T_1 ... Stirnzeit des Blitzstroms in LPZ 0_A (s)
- $I_{0/max}$... Höchstwert des Blitzstroms in LPZ 0_A (A)

Der maximale Wert des Kurzschlussstromes $I_{sc/max}$ berechnet sich für die Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes des Drahtes (ungünstigster Fall) wie folgt:

$$I_{sc/max} = \mu_0 \cdot b \cdot \ln \left(1 + \frac{l}{d_{l/w}} \right) \cdot k_h \cdot \left(\frac{w_m}{\sqrt{d_{l/r}}} \right) \cdot I_{0/max} \cdot \frac{1}{L_s} \quad (6-6)$$

- $I_{sc/max}$... Maximalwert des Kurzschlussstroms (A)
- b ... Breite der Leiterschleife (m)
- μ_0 ... $4\pi \cdot 10^{-7}$ in Vs/Am
- l ... Länge der Leiterschleife (m)
- w_m ... Maschenweite (m)
- $d_{l/w}$... Abstand der Leiterschleife von der Wand des Schirms (m)
- $d_{l/r}$... Abstand der Leiterschleife von der Decke des Schirms (m)
- k_h ... Geometriefaktor ($0,01 \frac{1}{\sqrt{m}}$)
- L_s ... Eigeninduktivität der Leiterschleife (H)
- $I_{0/max}$... Höchstwert des Blitzstroms in LPZ 0A (A)

Für den ersten positiven Teilblitz ($T_1 = 10 \mu s$) der Blitzschutzklasse III ($I_{0/max} = 100 \text{ kA}$) gilt für die induzierte Spannung und den induzierten Strom folgendes:

$$U_{oc/max} = 1,26 \cdot 10^5 \cdot b \cdot \ln \left(1 + \frac{l}{d_{l/w}} \right) \cdot \left(\frac{w_m}{\sqrt{d_{l/r}}} \right) \quad (6-7)$$

$$I_{sc/max} = 1,26 \cdot b \cdot \ln \left(1 + \frac{l}{d_{l/w}} \right) \cdot \left(\frac{w_m}{\sqrt{d_{l/r}}} \right) \cdot \frac{1}{L_s} \quad (6-8)$$

Die Eigeninduktivität L_s einer rechteckigen Leiterschleife lässt sich wie folgt berechnen:

$$L_s = \left\{ 0,8 \cdot \sqrt{l^2 + b^2} - 0,8 \cdot (l + b) + 0,4 \cdot l \cdot \ln \left[\frac{2 \frac{b}{r_c}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{l}\right)^2}} \right] + 0,4 \cdot b \cdot \ln \left[\frac{2 \frac{l}{r_c}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{l}{b}\right)^2}} \right] \right\} \cdot 10^{-6} \quad (6-9)$$

- L_s ... Eigeninduktivität der Leiterschleife (H)
- b ... Breite der Leiterschleife (m),
- l ... Länge der Leiterschleife (m)
- r_c ... Radius des Drahtes der Leiterschleife (m)

Berechnung induzierter Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag

Die Formel für die Eigeninduktivität ist nur näherungsweise gültig, da in der Praxis nicht rein rechteckförmige Leiterschleifen auftreten.

Das elektromagnetische Feld H_1 wird wiederum im Raummittelpunkt berechnet, die Maschenweite wird mit $w_m = 1$ m und $w_m = 2$ m variiert

Tabelle 6-3: Berechnung von H_1

Abmessungen Schirm			Abstand Dach	Abstand Wand	Geometriefaktor	Maschenweite	H_1
L	W	H	(Mittelpunkt) d_{lr}	(Mittelpunkt) d_{lw}	k_h	w_m	(Mittelpunkt)
m			m	m	$\frac{1}{\sqrt{m}}$	m	A/m
50	50	12	6	25	0,01	2	33
50	50	12	6	25	0,01	1	16

Zu sehen ist, dass das elektromagnetische Feld H_1 mit Halbierung der Maschenweite rund um die Hälfte abnimmt.

Nachfolgend werden für verschiedene Schleifengrößen die induzierten Ströme und Spannungen berechnet. Die Parameter für die Berechnung entsprechen denen aus Tabelle 6-3.

Tabelle 6-4 beinhaltet die Berechnungen für $w_m = 2$ m und Tabelle 6-5 für $w_m = 1$ m.

Es wird von einer öffentlichen Ladesäule höherer Leistung ausgegangen, welche ein Kabel mit einem Querschnitt von 10 mm^2 als Anspeisung besitzt. Datenleitungen weisen in der Regel einen Kabeldurchmesser kleiner als 0,8 mm auf.

Für den Radius des Drahtes r_c werden daher näherungsweise 0,002 m angenommen.

Wie in der Formel zur Berechnung der Induktivität ersichtlich ist, hat der Radius des Drahtes einen nicht zu großen Einfluss auf die Größe der Induktivität.

Tabelle 6-4: Berechnung von $U_{oc/max}$, $I_{sc/max}$ und L_s

Berechnung	Maschenweite	Leiterschleife			$U_{oc max}$	L_s	$I_{sc max}$
Nr.	w_m	b	l	r_c			
	m	m			kV	H	kA
1	2	10,0	15,0	0,002	484	8,E-05	61
2	2	0,5	30,0	0,002	41	7,E-05	6
3	2	5,0	30,0	0,002	406	1,E-04	38

Tabelle 6-5: Berechnung von $U_{oc/max}$, $I_{sc/max}$ und L_s

Berechnung	Maschenweite	Leiterschleife			$U_{oc\ max}$	L_s	$I_{sc\ max}$
		b	l	r_c			
Nr.	w_m	m			kV	H	kA
1	1	10,0	15,0	0,002	242	8,E-05	30
2	1	0,5	30,0	0,002	20	7,E-05	3
3	1	5,0	30,0	0,002	203	1,E-04	19

Das Berechnungsbeispiel 1 geht davon aus, dass sich im Erdgeschoss der Parkgarage die Potentialausgleisschiene und der Energiehauptverteiler befinden. Die Ladesäule befindet sich im dritten Obergeschoss. Die Länge der Leiterschleife ist somit die Länge der Verkabelung und mit $l = 15\ m$ bestimmt. Die Anspeisung der Datenleitung befindet sich jedoch in einem anderen Raum, im gleichen Geschoß mit dem Abstand – die Breite der Leiterschleife – $b = 10\ m$.

Das Berechnungsbeispiel 2 geht davon aus, dass sich die Datenverteilungsanlage und der Energieverteiler im selben Raum befinden. Daher wird für die Breite $b\ 0,5\ m$ angenommen. Die Ladesäule befindet sich ca. $30\ m$ entfernt vom Energie- und Datenverteiler. Länge der Verkabelung beträgt $l = 30\ m$. Bei Beispiel 3 wird eine Breite von $5\ m$ angenommen.

Für die Berechnungen wurde für die Position der Leiterschleife, der Raummittelpunkt angenommen ($d_{lw} = 25\ m$ und $d_{lr} = 6\ m$). Diesbezüglich sind die Ergebnisse in Tabelle 6-4 und 6-5 nur näherungsweise gültig. Es ist aber davon auszugehen, dass sich mit einer Näherung der Position der Leiterschleife zum Schirm, die induzierte Spannung und der induzierte Strom vergrößern würden.

Zu sehen ist, dass eine Verkleinerung der Leiterschleife eine deutliche Abnahme der induzierten Spannung bewirkt. D.h. idealerweise sollten die Energieversorgungsleitung und die Datenleitung so eng wie möglich nebeneinander verlegt werden.

In der Praxis könnte man in jedem Geschoß einen Verteiler positionieren, um nicht von der untersten Etage bis zur obersten Etage eine Leitung verlegen zu müssen. Dies würde das Auftreten von langen Leiterschleifen vermeiden.

Eine Halbierung der Maschenweite bewirkt wiederum eine Verminderung der induzierten Spannung um die Hälfte.

Ladesäulen weisen in der Regel eine Bemessungstehspannung von $2,5\ kV$ oder $4\ kV$ (Überspannungskategorie II bzw. III) auf. Dies liegt deutlich unter den berechneten Werten. Daher sollte unbedingt eine Überspannungsschutzeinrichtung installiert werden.

6.3 Berechnung des elektromagnetischen Feldes bei indirektem Einschlag

Es wird von einem indirekten Blitzeinschlag ausgegangen. Die Ladeeinrichtung befindet sich in LPZ 1 bzw. dem Sicherheitsvolumen V_S im Abstand s_a entfernt vom Blitzeinschlag I_0 . (Abbildung 6-4)

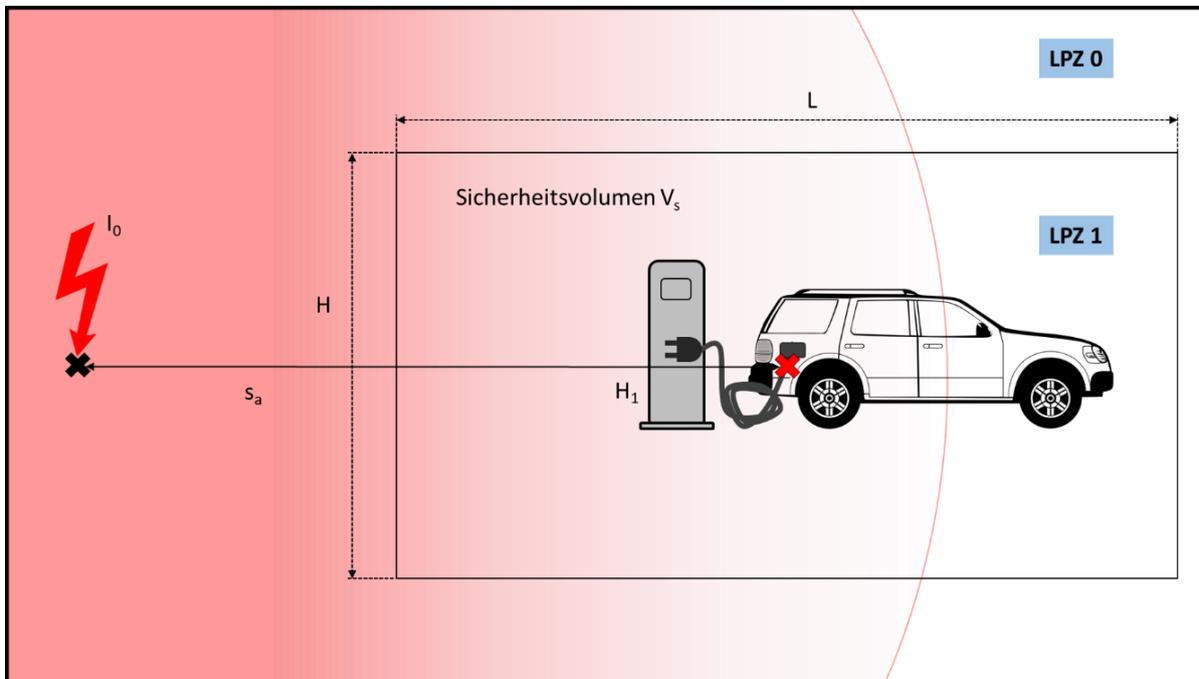


Abbildung 6-4: Indirekter Blitzeinschlag im Abstand s_a von der Ladesäule, Sicherheitsvolumen V_S mit der Länge L und der Höhe H [a2]

Die Feldstärke H_1 in der LPZ 1 bei nahen Blitzeinschlägen ist von dem Abstand s_a (Blitzkanal - Mittelpunkt LPZ 1), dem Schirmungsfaktor SF von LPZ 1 und dem maximalen Blitzstrom I_0 abhängig. Für weiterführende Berechnungen wird wieder der erste positive Teilblitz für die Blitzschutzklasse III mit 100 kA angenommen. Der Schirmfaktor SF ist eine Funktion der Maschenweite w_m .

Für den Abstand s_a ergeben sich folgende zwei Möglichkeiten:

1. Ein vorgegebener Abstand zwischen einem vom Blitz getroffenen Objekt (z.B. ein Baum oder ein benachbartes Gebäude) und dem Mittelpunkt von LPZ 1.
2. Der Mindestabstand zwischen dem Blitzkanal und dem Mittelpunkt von LPZ 1, wenn der Blitz in der Nähe von LPZ 1 in den Erdboden einschlägt.

6.3.1 Berechnung nach Möglichkeit 1

Es wird angenommen, der Blitz schlägt in einen Baum oder in ein benachbartes Gebäude mit dem Abstand s_a ein. Die Parkgarage dient wiederum als Ausgangspunkt mit den gleichen Abmessungen wie vorhin. Weiters wird wieder mit dem ersten positiven Teilblitz und dem Maximalwert aus LPL III gerechnet.

Das einfallende Magnetfeld H_0 lässt sich wie folgt berechnen:

$$H_0 = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot s_a} \quad (6-10)$$

H_0 ... einfallendes Magnetfeld (A/m)

I_0 ... Blitzstrom in LPZ 0A (A)

s_a ... der Abstand zwischen dem Einschlagpunkt und dem Mittelpunkt des geschirmten Volumen (m)

Die Abschwächung von H_0 zu H_1 innerhalb von LPZ 1 ist abhängig vom SF Wert des Schirmfaktors. Dieser wurde bereits im vorigen Kapitel (6.1.1) berechnet und wird daher von Tabelle (6.1) übernommen.

$$H_{1/max} = \frac{H_{0/max}}{10^{\frac{SF}{20}}} \quad (6-11)$$

H_1 ... abgeschwächtes Magnetfeld (A/m)

H_0 ... Magnetfeld in LPZ 0 (A/m),

SF ... Schirmfaktor (db)

Die folgenden Tabellen liefern nun die Berechnungen für verschieden Abstände von s_a . Es wird einmal die Maschenweite $w_m = 2$ m und einmal die Maschenweite $w_m = 1$ m zur Berechnung verwendet.

Berechnung induzierter Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag

Tabelle 6-6: Berechnung von $H_{0/\max}$ und $H_{1/\max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 2$ m,
SF = 11,8 db

Gebäudeabmessungen und Abstand			Magnetfeld	
L	H	s_a	$H_{0/\max}$	$H_{1/\max}$
m			A/m	
50	12	2000	8	2
50	12	1500	11	3
50	12	1000	16	4
50	12	500	32	8
50	12	250	64	16
50	12	200	80	20
50	12	150	106	27
50	12	100	159	41

Tabelle 6-7: Berechnung von $H_{0/\max}$ und $H_{1/\max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 1$ m,
SF = 17,9 db

Gebäudeabmessungen und Abstand			Magnetfeld	
L	H	s_a	H_0	$H_{1/\max}$
m			A/m	
50	12	2000	8	1
50	12	1500	11	1
50	12	1000	16	2
50	12	500	32	4
50	12	250	64	8
50	12	200	80	10
50	12	150	106	14
50	12	100	159	20

Es ist ersichtlich, dass die Feldstärke mit zunehmenden Abstand s_a kleiner wird. Eine Halbierung der Maschenweite führt wiederum zu einer Halbierung der Feldstärke.

6.3.2 Berechnung nach Möglichkeit 2 (Mindestabstand)

Möglichkeit 2 geht davon aus, dass der Blitz in Nähe von LPZ 1 in den Erdboden einschlägt.

Der Mindestabstand s_a ist abhängig von der Höhe H , der Länge L der baulichen Anlage und vom Blitzkugelradius r bzw. von $I_{0/\max}$. In Abbildung 6-5 wird dies dargestellt.

Der ungünstigste Fall ergibt sich bei kleinstmöglichem Abstand s_a und maximalen Strom $I_{0/\max}$.

Der Mindestabstand ist also der kleinstmögliche Abstand von der Einschlagstelle und der baulichen Anlage, bevor es zu einem direkten Einschlag in die bauliche Anlage kommen würde. Ist der Abstand nun kleiner als dieser Mindestwert, kommt es zu einem direkten Blitzeinschlag in die bauliche Anlage. Der Blitzkugelradius r lautet für die LPL III bei einem maximalen Blitzstrom von 100 kA, 200 m. ([6], Tabelle A.4)

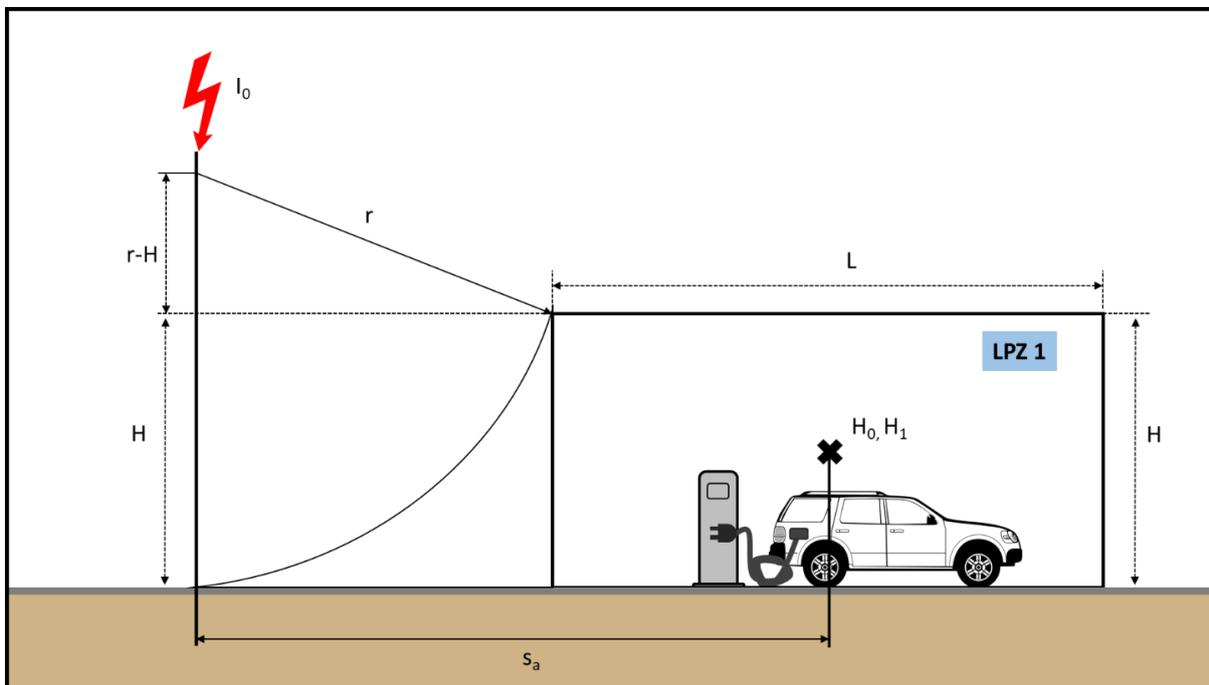


Abbildung 6-5: Indirekter Blitzeinschlag im Abstand s_a von der Ladesäule, Sicherheitsvolumen V_s mit der Länge L und der Höhe H , Blitzkugelradius r [a2]

Der Abstand s_a ergibt sich nun wie folgt:

$$s_a = \sqrt{2 \cdot r \cdot H - H^2} + \frac{L}{2} \quad \text{für } H < r \quad (6-12)$$

- s_a ... Abstand (m)
- H ... Höhe Sicherheitsvolumen (m)
- L ... Länge Sicherheitsvolumen (m)
- r ... Blitzkugelradius (m)

$$s_a = r + \frac{L}{2} \quad \text{für } H \geq r \quad (6-13)$$

- s_a ... Abstand (m)
 H ... Höhe Sicherheitsvolumen (m)
 L ... Länge Sicherheitsvolumen (m)
 r ... Blitzkugelradius (m),

Als Berechnungsbeispiel wird wiederum die Parkgarage mit der Schirmung von vorhin angenommen.

Tabelle 6-8: Berechnung von $H_{0/\max}$ und $H_{1/\max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 2$ m, $SF = 11,9$ db

Gebäudeabmessungen und Abstand			Magnetfeld	
L	H	s_a	H_0	$H_{1/\max}$
m			A/m	
50	12	93	171	44

Tabelle 6-9: Berechnung von $H_{0/\max}$ und $H_{1/\max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 1$ m, $SF = 17,9$ db

Gebäudeabmessungen und Abstand			Magnetfeld	
L	H	s_a	H_0	$H_{1/\max}$
m			A/m	
50	12	93	171	22

6.4 Berechnung von induzierten Spannungen und Strömen bei indirektem Einschlag in LPZ 1

Das magnetische Feld in LPZ 1 verursacht wiederum eine induzierte Spannung und einen induzierten Strom in eine Leiterschleife. Für die Leiterschleife gelten die gleichen Parameter wie in Kapitel 6.2.

Der Höchstwert der induzierten Spannung $U_{oc/\max}$ tritt während der Stirnzeit $T_1 = 10 \mu s$ auf und lässt sich für den ersten positiven Teilblitz wie folgt bestimmen.

$$U_{oc/\max} = 0,126 \cdot b \cdot l \cdot H_{1/\max} \quad (6-14)$$

- $U_{oc/\max}$... Maximalwert der Leerlaufspannung (V)
 b ... Breite der Leiterschleife (m)
 l ... Länge der Leiterschleife (m)
 $H_{1/\max}$... Höchstwert des magnetischen Feldes innerhalb LPZ 1 (A/m)

Für den Kurzschlussstrom gilt folgender Maximalwert:

$$I_{sc/max} = 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot b \cdot l \cdot H_{1/max} \cdot \frac{1}{L_S} \quad (6-15)$$

- $I_{sc/max}$... Maximalwert des Kurzschlussstroms (A)
- b ... Breite der Leiterschleife (m)
- l ... Länge der Leiterschleife (m)
- $H_{1/max}$... Höchstwert des magnetischen Feldes innerhalb LPZ 1 (A/m)
- L_S ... Schleifeninduktivität (H)

Wie in Kapitel 6.3 erläutert, gibt es für den Abstand s_a zwei Möglichkeiten.

Für die Abmessungen der Leiterschleife werden wieder die Beispiele aus Kapitel 6.2 herangezogen.

6.4.1 Berechnung nach Möglichkeit 1

Die folgenden Tabellen beinhalten die Berechnung der Induzierten Spannung und des induzierten Stromes in die Leiterschleife laut Abbildung 6-3. Es wurde nach der in 6.3.1. beschriebenen Variante vorgegangen. Für die erste Tabelle wurde die Maschenweite $w_m = 2$ m und für die zweite Tabelle $w_m = 1$ m gewählt.

Tabelle 6-10: Berechnung von $U_{oc/max}$ und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 2$ m, SF = 11,8 db

Abstand	Leiterschleife			$U_{oc/max}$	L_S	$I_{sc/max}$
	b	l	r_c			
m	m			V	H	A
2000	10,0	15,0	0,002	38	7,93E-05	5
1000	10,0	15,0	0,002	77	7,93E-05	10
500	10,0	15,0	0,002	154	7,93E-05	19
2000	0,5	30,0	0,002	4	6,71E-05	1
1000	0,5	30,0	0,002	8	6,71E-05	1
500	0,5	30,0	0,002	15	6,71E-05	2
2000	5,0	30,0	0,002	38	1,07E-04	4
1000	5,0	30,0	0,002	77	1,07E-04	7
500	5,0	30,0	0,002	154	1,07E-04	14

Berechnung induzierter Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag

Tabelle 6-11: Berechnung von $U_{oc/max}$ und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 1$ m, $SF = 17,9$ db

Abstand	Leiterschleife			$U_{oc/max}$	L_s	$I_{sc/max}$
s_a	b	l	r_c			
m	m			V	H	A
2000	10,0	15,0	0,002	19	7,93E-05	2
1000	10,0	15,0	0,002	38	7,93E-05	5
500	10,0	15,0	0,002	77	7,93E-05	10
2000	0,5	30,0	0,002	2	6,71E-05	0
1000	0,5	30,0	0,002	4	6,71E-05	1
500	0,5	30,0	0,002	8	6,71E-05	1
2000	5,0	30,0	0,002	19	1,07E-04	2
1000	5,0	30,0	0,002	38	1,07E-04	4
500	5,0	30,0	0,002	77	1,07E-04	7

Der Maximalwert der induzierten Spannung liegt bei der Leiterschleife mit den Abmessungen von 30 m x 5 m und einem Abstand von 500 m bei 154 V. Ladesäulen besitzen in der Regel eine Bemessungsstehstoßspannung von 2,5 kV oder 4kV. Somit ist der Schutz von LPZ 1 mit der Maschenweite $w_m = 2$ m ausreichend. Es wird zu keinem Überschlag und somit zu keinem Stoßstromfluss kommen.

Für die Datenleitung gibt es verschiedenen Prüfschärfegrade nach IEC 61000-4-5. Für die Spannung liegt der niedrigste Prüfwert bei 0,5 kV für eine Wellenform von 1,2/50 μ s.

6.4.2 Berechnung nach Möglichkeit 2 (Mindestabstand)

Nun wird nach Variante 2 wie in Kapitel 6.3.2. beschrieben gerechnet. Es wird für den Abstand s_a der Mindestabstand berechnet bevor es zu einem direkten Einschlag kommt. Wieder wird die Maschenweite w_m variiert.

Tabelle 6-12: Berechnung von $U_{oc/max}$ und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 1$ m, $SF = 17,9$ db

Abstand	Leiterschleife			$U_{oc/max}$	L_s	$I_{sc/max}$
s_a	b	l	r_c			
m	m			V	H	A
93	10,0	15	0,002	412	7,93E-05	52
93	0,5	30	0,002	41	6,71E-05	6
93	5,0	30,0	0,002	412	1,07E-04	39

Tabelle 6-13: Berechnung von $U_{oc/max}$ und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 2$ m,
SF = 11,8 db

Abstand	Leiterschleife			$U_{oc/max}$	L_s	$I_{sc/max}$
	b	l	rc			
s_a	m			V	H	A
93	10,0	15,0	0,002	825	7,93E-05	104
93	0,5	30,0	0,002	82	6,71E-05	12
93	5,0	30,0	0,002	825	1,07E-04	77

Die maximale induzierte Spannung ist erwartungsgemäß größer wie vorhin und liegt bei 825 Volt, aber dennoch für die Ladesäule unkritisch. Betrachtet man die Datenleitung, kommt man mit der am größten angenommen Leiterschleife von 30 m x 5 m bei der Maschenweite $w_m = 1$ m in den kritischen Bereich und für $w_m = 2$ m deutlich über den kritischen Bereich, wenn man vom Prüfschärfegrad mit 0,5 kV ausgeht.

6.5 Berechnung von induzierten Spannungen und Strömen bei indirektem Einschlag in LPZ 0_B

Nun wird davon ausgegangen, dass ein Blitz in eine Straßenlaterne einschlägt, welche sich im Abstand s_a von der Ladesäule entfernt befindet. Die Ladesäule befindet sich im Freien (LPZ 0) und ist daher dem vollen magnetischen Feld des Blitzes ausgesetzt. Die folgende Abbildung zeigt dieses Szenario.

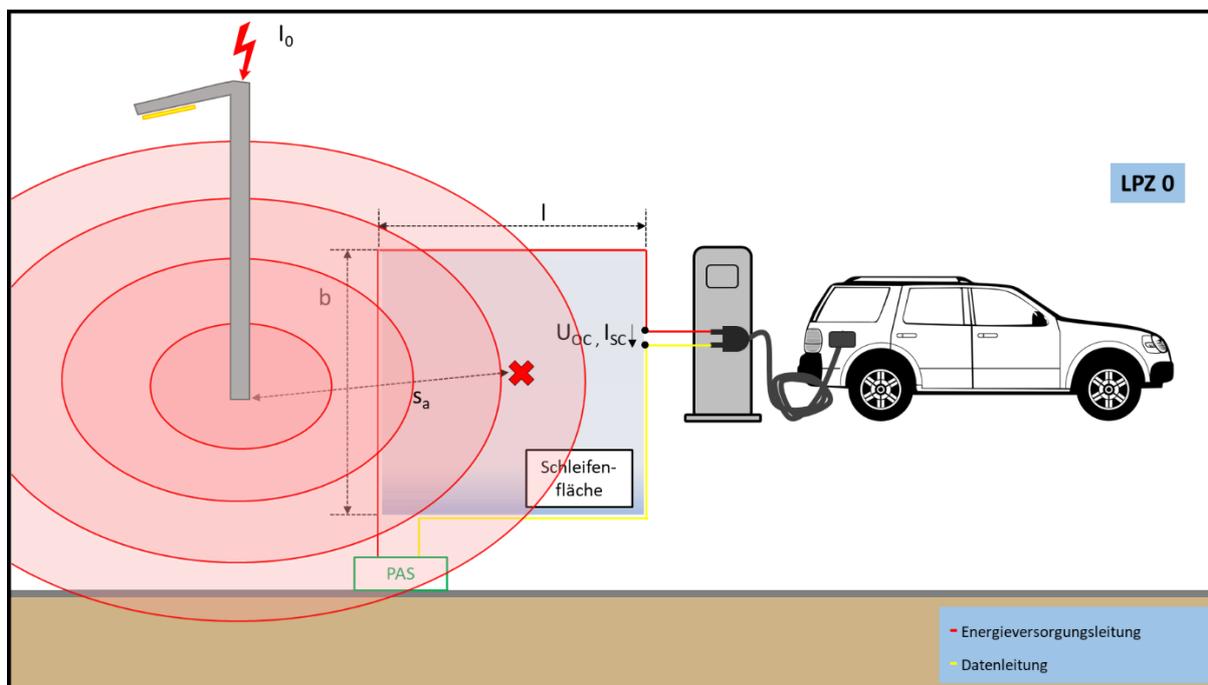


Abbildung 6-6: Indirekter Blitzeinschlag im Abstand s_a von der Ladesäule, Leiterschleife mit der Länge l und der Breite b , Ladesäule in LPZ 0 [a2]

Berechnung induzierter Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag

Die Leiterschleife besitzt wieder die Länge l und die Breite b .

Die Berechnungen erfolgen nach 6.4.1.

Für das erste Beispiel wurde ein Verlegeabstand von Energieversorgungsleitung und Datenleitung von einem Meter gewählt. Das Gebäude mit Stromverteiler und Datenverteiler befindet sich 10 m von der Ladeeinrichtung entfernt. Daher beträgt die Länge der Schleife 10 m.

Tabelle 6-14 beinhaltet die entsprechenden Berechnungen.

Man kann erkennen, dass erst bei einem Abstand s_a von 10 m die Induzierte Spannung in die Nähe der Bemessungsstoßspannung der Ladeeinrichtung von 2,5 kV bzw. 4 kV kommt.

Im Anbetracht auf die Datenleitung wird bei einem Abstand s_a von 50 m die Nähe von 500 V erreicht, wenn von dem niedrigsten Prüfschärfegrad ausgegangen wird.

Tabelle 6-14: Berechnung von $U_{oc/max}$, L_s und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a

Abstand	Magnetfeld	Leiterschleife			$U_{oc/max}$	L_s	$I_{sc/max}$
		b	l	r_c			
s_a	H_0	m			V	H	A
m	A/m	m			V	H	A
1000	16	1,0	10,0	0,002	20	2,68E-05	7
800	20	1,0	10,0	0,002	25	2,68E-05	9
600	27	1,0	10,0	0,002	33	2,68E-05	12
400	40	1,0	10,0	0,002	50	2,68E-05	19
200	80	1,0	10,0	0,002	100	2,68E-05	37
100	159	1,0	10,0	0,002	201	2,68E-05	75
50	318	1,0	10,0	0,002	401	2,68E-05	150
25	637	1,0	10,0	0,002	802	2,68E-05	299
10	1592	1,0	10,0	0,002	2005	2,68E-05	748

Als nächstes wird davon ausgegangen, dass sich das Gebäude mit Stromverteiler und Datenverteiler 50 m von der Ladeeinrichtung entfernt befinden. Die Länge der Leiterschleife beträgt daher 50 m.

Tabelle 6-15: Berechnung von $U_{oc/max}$ L_s und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a

Abstand	Magnetfeld	Leiterschleife			$U_{oc/max}$	L_s	$I_{sc/max}$
		s_a	H_0	b			
m	A/m	m			V	H	A
1000	16	1,0	50,0	0,002	100	1,26E-04	8
800	20	1,0	50,0	0,002	125	1,26E-04	10
600	27	1,0	50,0	0,002	167	1,26E-04	13
400	40	1,0	50,0	0,002	251	1,26E-04	20
200	80	1,0	50,0	0,002	501	1,26E-04	40
100	159	1,0	50,0	0,002	1003	1,26E-04	79
50	318	1,0	50,0	0,002	2005	1,26E-04	159
25	637	1,0	50,0	0,002	4011	1,26E-04	318
10	1592	1,0	50,0	0,002	10027	1,26E-04	794

Nun ist die induzierte Spannung wesentlich größer und ab 50 Meter Abstand kommt man in den kritischen Bereich für die Energieversorgungsleitung. Bei der Datenleitung wird bereits ab 200 m der Grenzwert überschritten.

Jetzt wird davon ausgegangen, dass sich Datenverteiler und Stromverteiler nicht im selben Gebäude sind. Die Breite b der Schleife ist nun 20 m, die Länge wieder 50 m.

Tabelle 6-16: Berechnung von $U_{oc/max}$ L_s und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a

Abstand	Magnetfeld	Leiterschleife			$U_{oc/max}$	L_s	$I_{sc/max}$
		s_a	H_0	b			
m	A/m	m			V	H	A
1000	16	20,0	50,0	0,002	2005	2,47E-04	81
800	20	20,0	50,0	0,002	2507	2,47E-04	102
600	27	20,0	50,0	0,002	3342	2,47E-04	136
400	40	20,0	50,0	0,002	5013	2,47E-04	203
200	80	20,0	50,0	0,002	10027	2,47E-04	407
100	159	20,0	50,0	0,002	20054	2,47E-04	813
50	318	20,0	50,0	0,002	40107	2,47E-04	1626
25	637	20,0	50,0	0,002	80214	2,47E-04	3252
10	1592	20,0	50,0	0,002	200535	2,47E-04	8131

Berechnung induzierter Ströme und Spannungen bei direktem- und indirektem Blitzeinschlag

Nun kommt es bereits bei einem Abstand von einem Kilometer zu einer induzierten Spannung von 2 kV.

Wie zu erwarten, ist die induzierte Spannung und der induzierte Strom in LPZ 0 weitaus höher wie in LPZ 1.

7 Berechnung des wirksamen Schutzbereiches eines SPD-Schutzes hinsichtlich Ladeeinrichtungen

Ladeeinrichtungen sind geschützt, wenn ihre Bemessungs-Stehstoßspannung U_w größer oder gleich dem Bedrohungspegel U_p des SPDs plus einer Zugabe ist, die für die Berücksichtigung des Einflusses von Verbindungsleitern, des Entfernungseinflusses und der Leiterschleife zwischen SPD und dem Betriebsmittel notwendig ist. Weiters ist es erforderlich, dass sie mit dem vorgeschalteten SPD energetisch koordiniert sind.

Wird ein SPD an die Ladesäule angeschlossen, addiert sich der Spannungsabfall ΔU an den verbundenen Leitern zum Schutzpegel U_P des SPDs. Daraus ergibt sich der effektive Schutzpegel $U_{P/f}$ wie folgt:

$$U_{P/f} = U_P + \Delta U \quad \text{für spannungsbegrenzende SPDs} \quad (7-1)$$

$U_{P/f}$... effektive Schutzpegel (V)
 U_p ... Begrenzungsspannung des SPD (V)
 ΔU ... induktiver Spannungsabfall (V)

$$U_{P/f} = \max (U_P, \Delta U) \quad \text{für spannungsschaltende SPDs} \quad (7-2)$$

$U_{P/f}$... effektive Schutzpegel (V)
 U_p ... Begrenzungsspannung des SPD (V)
 ΔU ... induktiver Spannungsabfall (V)

Laut OVE E 8101: 534.4.8 darf die Leitungslänge zwischen den Punkten A und B nicht größer als 0,5 m sein. Für Leitungslängen die kleiner gleich 0,5 m sind wird für das U_P für spannungsbegrenzende SPDs ein Sicherheitszuschlag von 20 % angenommen.

Können die 0,5 m Leitungslänge nicht eingehalten werden, nimmt man für ΔU laut Norm [20] 1 kV pro Meter Länge an.

Die Abbildung 7-1 zeigt diese Anordnung.

Berechnung des wirksamen Schutzbereiches eines SPD-Schutzes hinsichtlich Ladeeinrichtungen

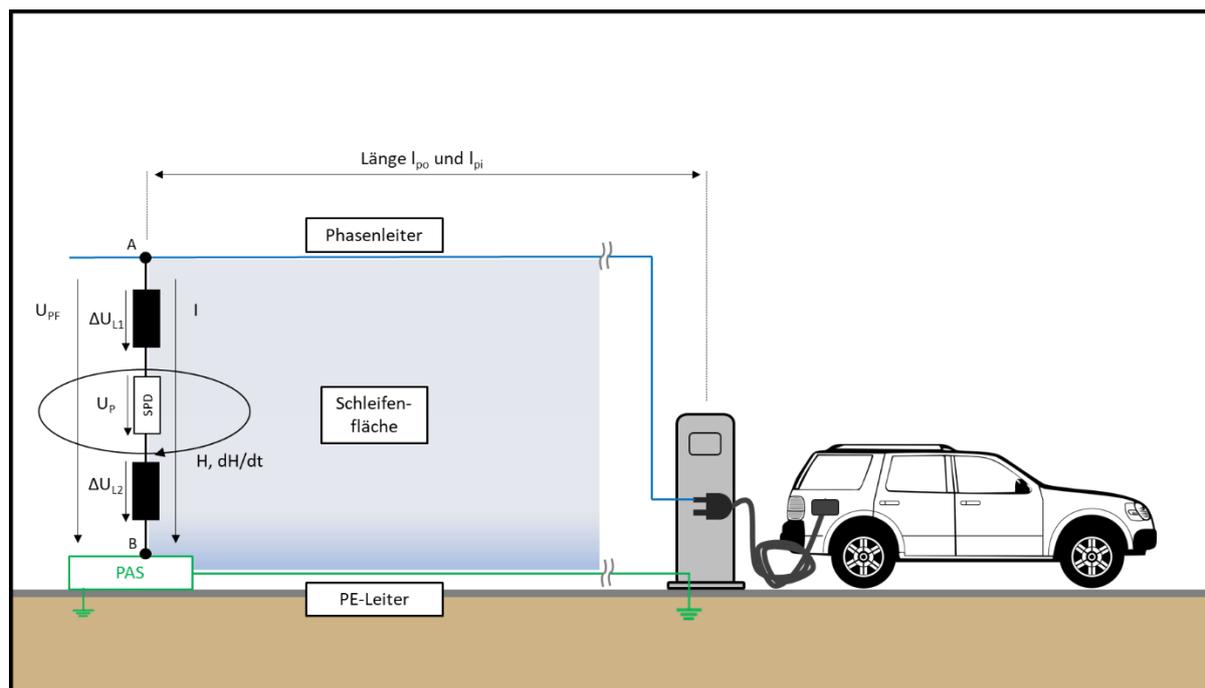


Abbildung 7-1: Stoßspannung zwischen Phasenleiter und PAS, Beschreibung siehe nachfolgende Übersicht [a3]

Beschreibung für die Abbildung 7-1.

I	anteilige Blitzstrom
$U_{P/f} = U_P + \Delta U$	Stoßspannung zwischen Phasenleiter und Potentialausgleichschiene
U_P	Begrenzungsspannung des SPD
$\Delta U = \Delta U_{L1} + \Delta U_{L2}$	induktiver Spannungsfall an den Potentialausgleichsleitern
$H, dH/dt$	magnetisches Feld und seine Ableitung nach der Zeit
A & B	Anschlusspunkte der SPD Kombination
I_{po}	Schutzabstand aufgrund von Schwingungen
I_{pi}	Schutzabstand aufgrund von Induktion

Es ist ersichtlich, dass die Stoßspannung $U_{P/f}$ zwischen der Potentialausgleichschiene und dem Phasenleiter größer als die Begrenzungsspannung U_P des SPDs ist. Ursache ist der induktive Spannungsabfall ΔU an den Potentialausgleichsleitern. Weiters induziert der anteilige Blitzstrom, der durch den SPD fließt, eine zusätzliche Spannung in die Schleife auf der geschützten Seite des Stromkreises hinter dem SPD.

Folgende Kriterien sind nun für die Wirksamkeit eines koordinierten SPD-Schutzes von Bedeutung:

1. Auswahl des richtigen SPD
2. Einbauort des SPD
3. Verbindungsleiter des SPD
4. Schutzabstand wegen Schwingungserscheinungen
5. Schutzabstand wegen Induktionserscheinungen

Alle Berechnungen in Kapitel 7 erfolgen nach der ÖVE/ÖNORM 62305-4:2008-01-01, [20]

7.1 Schutzabstand l_{po} aufgrund von Schwingungen

Grundsätzlich gibt der Schutzabstand l_{po} die maximale Leitungslänge zwischen SPD und Betriebsmittel an, für die der SPD noch wirksam ist.

Diese Parameter sind von der SPD-Technologie, den Installationsregeln und der Lastkapazität abhängig.

Schwingungen können bei zu langer Leitungslänge zwischen SPD und Betriebsmittel aufgrund der Ausbreitung von Stoßwellen auftreten. Dies kann z.B. in der Ladeeinrichtung eine Überspannung verursachen die bis auf das Zweifache von $U_{p/f}$ ansteigt.

Für $U_{p/f} < U_w/2$ bzw. einer Verkabelung kleiner als 10 m kann der Schutzabstand vernachlässigt werden.

Wenn dies nicht der Fall ist, kann der Schutzabstand aufgrund von Schwingungen mit folgender Formel abgeschätzt werden: [19]

$$l_{po} = \frac{[U_w - U_{p/f}]}{k} \quad (7-3)$$

l_{po} ... Schutzabstand aufgrund von Schwingungen (m)

k ... 25 V/m

U_w ... Bemessungsstoßspannung (V)

$U_{p/f}$... Stoßspannung (V)

Zur Berechnung wird für den SPD ein U_p von 1,5 kV und für das U_w der Ladesäule 4 kV angenommen (Überspannungskategorie III). Die Länge l ist der Abstand der Anschlusspunkte A und B der SPD-Kombination (Abb. 7-1).

7.1.1 Berechnung für den spannungsbegrenzenden SPD

Für die Länge l kleiner gleich 0,5 m wird wie bereits erwähnt ein Sicherheitszuschlag für U_p von 20 % angenommen.

Tabelle 7-1: Berechnung von I_{po} für $l < 0,5$ m, spannungsbegrenzender SPD

Länge l	Sicherheitszuschlag	U_{pff}	U_w	I_{po}
m	%	kV	kV	m
0,5	20	1,8	4	88

Dies bedeutet, die maximale Leitungslänge zwischen Ladesäule und dem Punkt A (Abb. 7-1) darf für die Überspannungskategorie III 88 m betragen. Ohne nun den äußeren Blitzschutz zu berücksichtigen und nur für das Risiko einer einlaufenden Welle auf der Leitung würde also der SPD im Verteiler ausreichen, wenn die Leitungslänge zwischen Verteiler und Ladesäule kleiner als dieser berechneten Werte ist.

Wird der Sicherheitsabstand I_{po} überschritten, muss an der Ladesäule zusätzlich ein SPD installiert werden.

Ist die Leitungslänge zwischen den Punkten A und B größer als 0,5 m muss für das ΔU 1 kV pro Meter Leitungslänge angenommen werden (Tabelle 7-2).

Tabelle 7-2: Berechnung von I_{po} für $l > 0,5$ m, spannungsbegrenzender SPD

Länge l	Induktiver Spannungsabfall ΔU	U_{pff}	I_{po}
m	kV	kV	m
0,6	0,6	2,1	76
0,8	0,8	2,3	68
1	1	2,5	60
1,2	1,2	2,7	52
1,4	1,4	2,9	44
1,6	1,6	3,1	36
1,8	1,8	3,3	28
2	2	3,5	20
2,2	2,2	3,7	12
2,4	2,4	3,9	4
2,5	2,5	4	0

Für den spannungsbegrenzenden SPD gilt Formel 7-1 für die Berechnung von $U_{p/f}$.

Der Wert für I_{po} wird mit Formel 7-3 berechnet.

Ab eine Leitungslänge von 2,5 m zwischen den Punkten (A und B) muss direkt an der Ladesäule ein SPD installiert werden, um das Auftreten von Schwingungen zu verhindern.

7.1.2 Berechnung für den spannungsschaltenden SPD

Für den Spannungsschaltenden SPD gilt Formel 7-2.

Wenn die Funkenstrecke des SPDs noch nicht gezündet hat, kann noch kein Stoßstrom auftreten. Daher kann auch kein induktiver Spannungsabfall ΔU auftreten. Erst ab einer Leitungslänge von 1,5 m ist ein Ansteigen der Spannung zu erwarten. Für kleinere Leitungslängen ist U_P stets größer als ΔU . Für die Ladesäule wird die Überspannungskategorie III bzw. $U_w = 4$ kV angenommen.

Tabelle 7-3: Berechnung von I_{po} , spannungsschaltender SPD

Länge l	Induktiver Spannungsabfall ΔU	$U_{p/f}$	I_{po}
m	kV	kV	m
1,5	1,5	1,5	100
1,7	1,7	1,7	92
1,9	1,9	1,9	84
2,1	2,1	2,1	76
2,3	2,3	2,3	68
2,5	2,5	2,5	60
2,7	2,7	2,7	52
2,9	2,9	2,9	44
3,1	3,1	3,1	36
3,3	3,3	3,3	28
3,5	3,5	3,5	20
3,7	3,7	3,7	12
3,9	3,9	3,9	4
4	4	4	0

Der maximale Wert für l_{po} beträgt 100 m. Dieser Wert gilt für eine Leitungslänge l zwischen den Punkten A und B (Abb. 7-1) kleiner gleich 1,5 m.

Ab einer Leitungslänge l größer als 4 m muss die Ladesäule direkt mit einem SPD ausgestattet werden, um Schwingungserscheinungen entgegen zu wirken.

Man sieht, dass sich der spannungsschaltende SPD mit einem Sicherheitsabstand l_{po} von 100 m deutlich günstiger als der spannungsbegrenzende SPD verhält.

In der Praxis werden Ladesäulen zumindest innerhalb von LPZ 0_B installiert. Dies bedeutet, sie sind vor direkten Blitzeinschlägen geschützt, aber dennoch dem vollen magnetischen Feld des Blitzstroms ausgesetzt. Das gleiche gilt auch für ihre Zuleitungen. Daher kommen wie in Kapitel 3.8 besprochen beim Übergang von LPZ 0_B → LPZ 1, Typ2 – also Spannungsbegrenzende SPDs - zum Einsatz.

7.2 Schutzabstand l_{pi} aufgrund von Induktion

Grundsätzlich gilt für den Schutzabstand l_{pi} aufgrund von Induktion das gleiche wie vorhin: Er ist die maximale Länge der Leitungen zwischen SPD und Betriebsmittel, für die der Schutz des SPDs unter Berücksichtigung von Induktionserscheinungen noch wirksam ist.

Aufgrund von direkten oder indirekten Blitzeinschlägen kann es durch Induktion zu Überspannungen kommen, welche sich zu U_P addieren und dadurch die Wirksamkeit des SPD verringern. Induzierte Überspannungen nehmen mit größer werdenden Abmessungen der Leiterschleife zu und können durch eine Verringerung des magnetischen Feldes abgeschwächt werden. Dies kann mittels räumlicher Schirmung (Blitzschutzzonen) oder Leitungsschirmung (geschirmte Kabel, Kabelkanäle) geschehen. Im Idealfall sollte die Leiterschleife so klein als möglich gehalten werden.

Wenn die Leiterschleife ausreichend klein ist und entsprechend geschirmt ist kann der Schutzabstand l_{pi} aufgrund von Induktionserscheinungen vernachlässigt werden.

Ansonsten kann dieser mit folgender Formel abgeschätzt werden: [20]

$$l_{pi} = \frac{[U_W - U_{p/f}]}{h} \quad (7-4)$$

l_{pi} ... Schutzabstand aufgrund von Schwingungen (m)

h ... Parameter (siehe unten),

U_W ... Bemessungsstoßspannung (V)

$U_{p/f}$... Stoßspannung (V)

Für Blitzeinschläge nahe der baulichen Anlage gilt:

$$h = 300 \cdot K_{S1} \cdot K_{S2} \cdot K_{S3} \quad \text{in V/m}$$

Nahe Blitzeinschläge werden in [20], Punkt A.3 mit 500 m definiert.

Für Blitzeinschläge in die bauliche Anlage gilt:

$$h = 30\,000 \cdot K_{S0} \cdot K_{S2} \cdot K_{S3} \quad \text{in V/m}$$

Die Parameter K_{S1} , K_{S2} und K_{S3} werden in [20] Anhang B.5 erläutert:

K_{S1} : räumliche gitterartige Schirmung durch ein äußeres LPS oder andere Schirme an der Grenze LPZ 0/1

$$K_{S1} = 0,12 \cdot w_{m1}$$

K_{S2} : räumliche gitterartige Schirmung durch Schirme an der Grenze LPZ 1/2 oder höher

$$K_{S2} = 0,12 \cdot w_{m2}$$

K_{S3} : Kennwerte der inneren Verkabelung:

Für ungeschirmte Kabel und ohne Vorkehrungen zur Vermeidung von Installations-schleifen gilt $K_{S3} = 1$.

K_{S0} ist ein Faktor, der die Schirmwirkung eines äußeren LPS an der Grenze LPZ 0/1 berücksichtigt:

$K_{S0} = 0,06 w^{0,5}$ für ein gitterförmiges äußeres LPS mit der Maschenweite w (in m).

Bei einem nicht gitterförmigen Schirm gilt $K_{S0} = k_C$. Die Berechnung des Faktors k_C wird in ÖVE/ÖNORM 62305-3 spezifiziert.

Für die nachfolgenden Berechnungen wird eine Maschenweite $w_{m1} = 2$ m bzw.

$K_{S1} = 0,24$ angenommen, wenn sich die Ladesäule im Sicherheitsvolumen befindet und $K_{S1} = 1$, wenn sich die Ladesäule im Freien bzw. außerhalb des Sicherheitsvolumen (LPZ 0) befindet. Da in LPZ 2 keine Berechnungen erfolgen, wird K_{S2} nicht berücksichtigt.

Berechnung des wirksamen Schutzbereiches eines SPD-Schutzes hinsichtlich Ladeeinrichtungen

Die Berechnung von $U_{p/f}$ erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie in Kapiteln 7.1.1 bzw. 7.1.2. (spannungsbegrenzender oder spannungsschaltender SPD)

Der maximale Schutzabstand berechnet sich nun mit Formel 7-3.

Man unterscheidet wieder zwischen spannungsbegrenzenden und spannungsschaltenden SPD.

7.2.1 Berechnung für den spannungsbegrenzenden SPD

Ist der Leitungsabstand zwischen A und B (Abb. 7-1) kleiner gleich 0,5 m werden wieder 20 % Sicherheitszuschlag für U_p angenommen. Die Berechnungen erfolgen für den direkten Einschlag, den indirekten Einschlag Ladesäule in LPZ 1 ($K_{S1} = 0,24$) und den indirekten Einschlag Ladesäule in LPZ 0 ($K_{S1} = 1$).

Für Direkteinschläge in das Sicherheitsvolumen, in dem sich die Ladesäule befindet, gilt:

Tabelle 7-4: Berechnung von I_{pi} , spannungsbegrenzender SPD, Direkteinschlag

Länge l	Sicherheitszuschlag	$U_{p/f}$	U_w	I_{pi}
m	%	kV	kV	m
0,5	20	1,8	4	1

Für indirekten Einschlag, Ladesäule in LPZ 1 gilt:

Tabelle 7-5: Berechnung von I_{pi} , spannungsbegrenzender SPD, indirekter Einschlag LPZ 1

Länge l	Sicherheitszuschlag	$U_{p/f}$	U_w	I_{pi}
m	%	kV	kV	m
0,5	20	1,8	4	31

Für indirekten Einschlag, Ladesäule in LPZ 0 gilt:

Tabelle 7-6: Berechnung von I_{pi} , spannungsbegrenzender SPD, indirekter Einschlag LPZ 0

Länge l	Sicherheitszuschlag	$U_{p/f}$	U_w	I_{pi}
m	%	kV	kV	m
0,5	20	1,8	4	7

Ist die Leitungslänge zwischen den Punkten A und B größer als 0,5 m muss für das ΔU 1 kV pro Meter Leitungslänge angenommen werden und es gilt die Formel 7-4.

Tabelle 7-7: Berechnung von I_{pi} , spannungsbegrenzender SPD, $l > 0,5m$

			direkter Ein- schlag	indirekter Ein- schlag Ladesäule in LPZ 1	indirekter Ein- schlag Ladesäule in LPZ 0
Länge l	Induktive Span- nungsabfall ΔU	$U_{p/f}$	I_{pi}	I_{pi}	I_{pi}
m	kV	kV	m	m	m
0,6	0,6	2,1	1	26	6
0,8	0,8	2,3	1	24	6
1	1	2,5	1	21	5
1,2	1,2	2,7	1	18	4
1,4	1,4	2,9	0	15	4
1,6	1,6	3,1	0	13	3
1,8	1,8	3,3	0	10	2
2	2	3,5	0	7	2
2,2	2,2	3,7	0	4	1
2,4	2,4	3,9	0	1	0
2,6	2,6	4,1	0	-1	0

Wie zu erwarten, ist der Schutzbestand I_{pi} für den Fall eines indirekten Blitzeinschlags, wenn sich die Ladesäule im Sicherheitsvolumen befindet am größten. Für Direkteinschläge in das Sicherheitsvolumen sollte unmittelbar an der Ladesäule ein SPD angebracht werden.

Auch bei einem indirekten Einschlag ist der Schutzabstand für einen Standort in LPZ 0 im Idealfall kleiner gleich 7 m und somit relativ gering.

Befindet sich die Ladesäule jedoch in LPZ 1, ist der Schutzabstand mit 31 m (im Idealfall) um einiges größer.

7.2.2 Berechnung für den spannungsschaltenden SPD

Die Berechnung für den spannungsschaltenden SPD erfolgt analog zu Kapitel 7.1.2.

Tabelle 7-8: Berechnung von I_{pi} , spannungsschaltender SPD

			direkter Ein- schlag	indirekter Ein- schlag Ladesäule in LPZ 1	indirekter Ein- schlag Ladesäule in LPZ 0
Länge l	Induktive Span- nungsabfall ΔU	$U_{p/f}$	I_{pi}	I_{pi}	I_{pi}
m	kV	kV	m	m	m
1,5	1,5	1,5	1	35	8
1,7	1,7	1,7	1	32	8
1,9	1,9	1,9	1	29	7
2,1	2,1	2,1	1	26	6
2,3	2,3	2,3	1	24	6
2,5	2,5	2,5	1	21	5
2,7	2,7	2,7	1	18	4
2,9	2,9	2,9	0	15	4
3,1	3,1	3,1	0	13	3
3,3	3,3	3,3	0	10	2
3,5	3,5	3,5	0	7	2
3,7	3,7	3,7	0	4	1
3,9	3,9	3,9	0	1	0
4	4	4	0	0	0

Wie auch bei den Berechnungen des Schutzabstandes für Schwingungen, verhält sich der spannungsschaltende SPD um einiges besser wie der spannungsbegrenzende SPD. Bei einem Direkteinschlag in z.B. die Garage, indem sich die Ladesäule befindet, müsste der SPD direkt an der Ladesäule montiert werden, um ausreichend Schutz zu gewährleisten.

8 Diskussion der Berechnungen

8.1 Direkter Einschlag in das Sicherheitsvolumen Vs

Geht man davon aus, dass sich die Ladeeinrichtung in einem Sicherheitsvolumen, wie z.B. einer Garage oder einem Parkhaus befindet und der Blitz direkt in dieses Sicherheitsvolumen einschlägt sollte unbedingt ein SPD unmittelbar an der Ladesäule installiert werden.

Die Berechnungen in Kapitel 6.2 (Tabelle 6-4 und 6-5) zeigen, dass selbst trotz Schirmung und kleiner Leiterschleifen induzierte Spannungen im zweistelligen kV Bereich auftreten. Die Berechnungen für den Schutzabstand (Kapitel 7.2.1) zeigen, dass der SPD direkt an der Ladesäule installiert sein muss, um Schutz zu gewährleisten.

Ist die Leitungslänge l zwischen den Punkten A und B der Abbildung 7-1 kleiner als 1,2 m beträgt der Schutzabstand l_{pi} aufgrund von Induktion 1 m. Ist der Abstand größer als 1,2 m beträgt der Schutzabstand 0 m für den spannungsbegrenzenden SPD (Tabelle 7-7). Für den spannungsschaltenden SPD wird der Schutzabstand l_{pi} ab einer Länge von 2,7 m null (Tabelle 7-8).

8.2 Indirekter Einschlag, Ladesäule in LPZ 1

Bei indirektem Einschlag in das Sicherheitsvolumen (Kapitel 6.4) und dem Mindestabstand in Abhängigkeit der Abmessungen des Sicherheitsvolumen kommt man bei relativ großen Leiterschleifen über den kritischen Bereich im Hinblick auf die Datenleitung. (Wenn der niedrigste Prüfschärfegrad von 500 V angenommen wird, Tabelle 6-12 und 6-13) Für die Energieversorgungsleitung ist die Bemessungsstoßspannung der Ladesäule ausreichend.

Ist die Leitungslänge l zwischen den Punkten A und B der Abbildung 7-1 kleiner als 0,5 m, beträgt der Schutzabstand l_{pi} aufgrund von Induktion 31 m (Tabelle 7-5). Ist die Leitungslänge l zwischen A und B größer als 2,4 m, beträgt der Abstand 0 m für den spannungsbegrenzenden SPD (Tabelle 7-7). Für den spannungsschaltenden SPD wird der Schutzabstand l_{pi} ab einer Länge von 3,9 m null (Tabelle 7-8).

8.3 Indirekter Einschlag, Ladesäule in LPZ 0

Befindet sich die Ladesäule in LPZ 0_B, also im ungeschützten Bereich (Kapitel 6.5), besteht bei einer Entfernung zum Einschlagsort ab einer Entfernung von 50 m Gefahr für die Datenleitung (niedrigster Prüfschärfegrad) bei bereits kleiner Leiterschleife (Tabelle 6-14)

Bei relativ großer Leiterschleife (wie in Tabelle 6-16) erhält man bei einer Entfernung von 1 km bereits eine induzierte Spannung von 2 kV.

Auch für den Schutzabstand I_{pi} für Induktion ergibt sich bei einer Bemessungsstoßspannung von 4 kV für die Ladesäule ein Schutzabstand von maximal 7 m bei indirektem Einschlag für l kleiner als 0,5 m (Tabelle 7-6). Ab einer Länge l größer als 2,4 m wird der Schutzabstand I_{pi} 0 m für den spannungsbegrenzenden SPD (Tabelle 7-7).

Für den Spannungsschaltenden SPD ist ein maximaler Schutzabstand von 8 m möglich. Ab einer Länge l von 3,9 m wird der Schutzabstand 0 m (Tabelle 7-8).

Laut OVE E 8101: 534.4.9 sollten, wenn die Leitungslänge zwischen dem SPD und dem zu schützenden Betriebsmittel größer als 10 m ist, zusätzliche Schutzvorkehrungen getroffen werden. In der OVE E 8101 wird von einem indirekten Blitzeinschlag ausgegangen. [22]

In der Praxis treten jedoch relativ selten die maximalen Blitzstromamplituden der jeweiligen Blitzschutzklasse auf. In der ÖVE/ÖNORM 62305-1 [3] wird in Tabelle 5 eine Übersicht über die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten gegeben.

8.4 Schutzabstand I_{po} aufgrund von Schwingungen

Ist die Leitungslänge l zwischen den Punkten A und B der Abbildung 7-1 kleiner als 0,6 m beträgt der Schutzabstand I_{po} aufgrund von Schwingungen 76 m. Ist der Abstand größer als 2,5 m beträgt der Schutzabstand 0 m für den spannungsbegrenzenden SPD (Tabelle 7-2). Für den spannungsschaltenden SPD wird der Schutzabstand I_{po} ab einer Länge von 4 m null (Tabelle 7-3).

9 Begutachtung von zwei öffentlichen Ladeparks

Nachfolgend werden zwei öffentliche Ladeparks am Bahnhof und am Hauptplatz in Voitsberg untersucht. In beiden Fällen wird angenommen, dass sich die Ladesäulen in LPZ 0_B befinden und sind somit dem direkten elektromagnetischen Feld des Blitzstroms ausgesetzt. Es werden die in die Zuleitungen induzierten Ströme und Spannungen bei indirektem Blitzeinschlag berechnet. Wie in den vorherigen Berechnungen wird wieder von der Blitzschutzklasse III ($I_0 = 100 \text{ kA}$) ausgegangen.

9.1 Beispiel 1: Ladepark Bahnhof

Im ersten Beispiel wird der Ladepark am Bahnhof untersucht. Abbildung 9-1 zeigt eine Seitenansicht des Parkplatzes. Zu sehen sind acht Parkplätze. Sechs davon sind mit Ladesäulen ausgestattet. In der Mitte befindet sich der Datenverteiler und rechts davon der Energieverteiler. Die Ladesäulen besitzen eine Leistung von 22 kW und eine Überspannungskategorie III (Bemessungsstehstoßspannung $U_w = 4 \text{ kV}$). Im Energieverteiler befindet sich ein Überspannungsableiter Typ 1 + Typ 2 Kombiableiter mit einem Schutzpegel $U_p(I_n) < 1,4 \text{ kV}$.



Abbildung 9-1: Ladepark, Bahnhof Voitsberg

Alle Ladesäulen sind mit einer Busleitung für die Datenkommunikation in Serie verbunden. Weiters geht zusätzlich von jeder Ladesäule eine Energieversorgungsleitung und eine Ethernet Leitung weg.

Die folgende Skizze liefert einen Überblick über die Verkabelung.

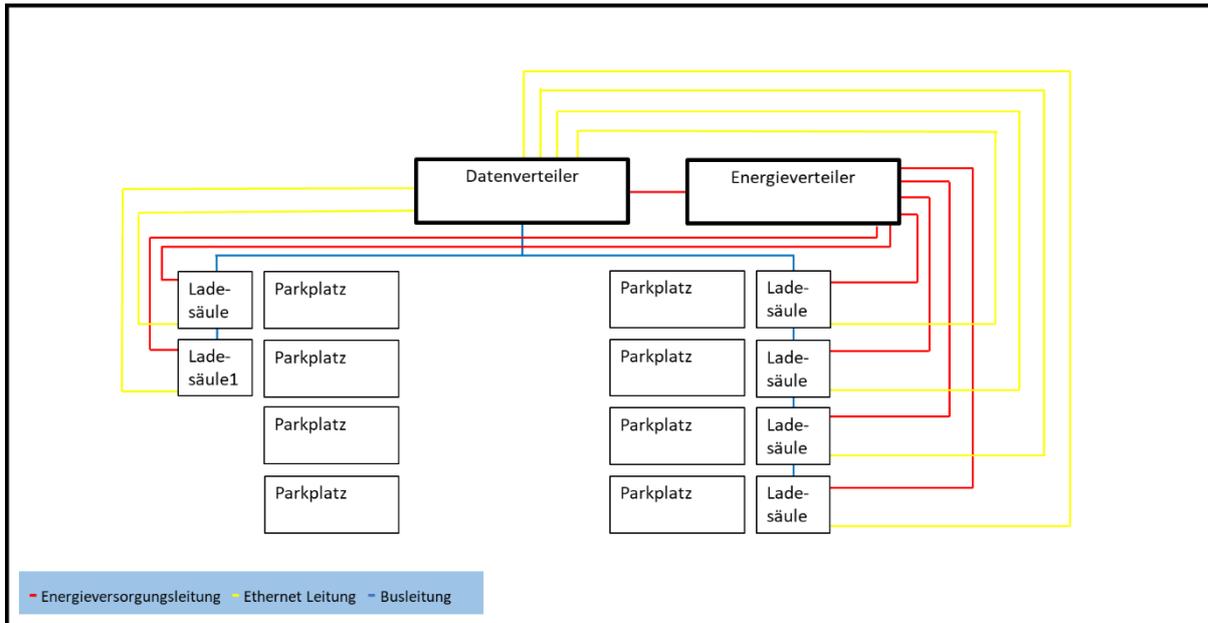


Abbildung 9-2: Verkabelung des Ladeparks

Die Ladesäule 1 auf der linken Seite ist am weitesten vom Energieverteiler entfernt. Daher wird sie für weiteren Berechnungen verwendet. Die nächste Abbildung stellt die für die weiteren Berechnungen notwendigen Leiterschleifen sowie die Kabellängen dar.

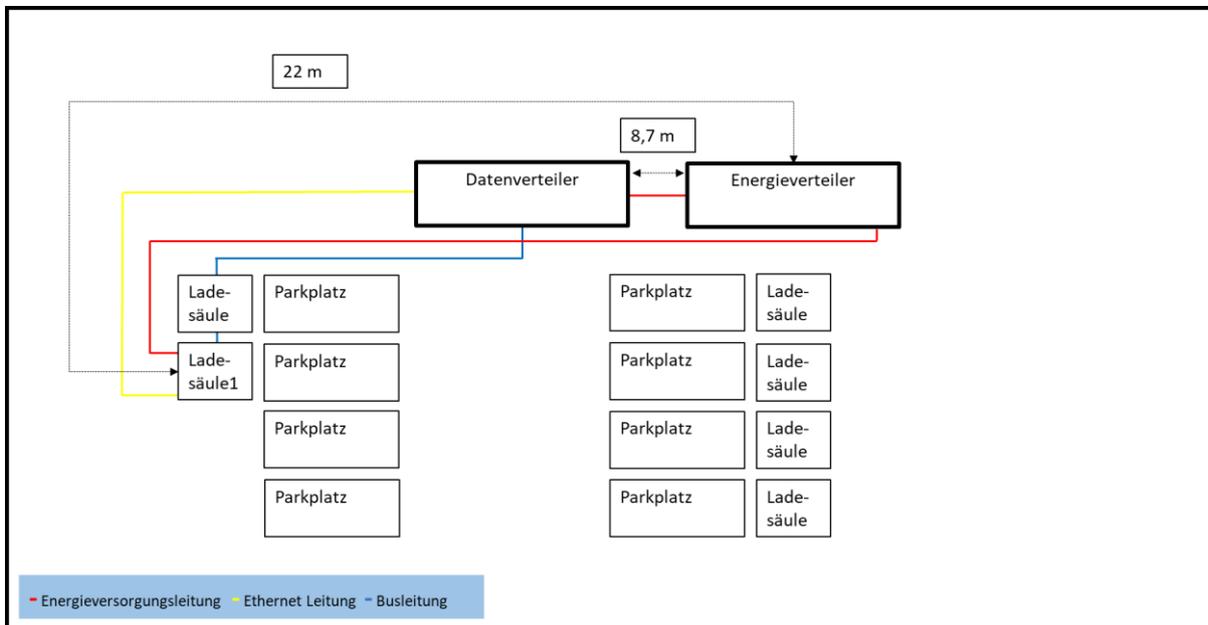


Abbildung 9-3: Leiterschleifen, Ladesäule 1

Es bilden sich drei Leiterschleifen: Energieversorgungsleitung – Ethernet Leitung, Energieversorgungsleitung – Busleitung und Busleitung – Ethernet Leitung.

Bei der Berechnung wird nur die Anordnung Energieversorgungsleitung – Ethernet Leitung berücksichtigt. Für den Radius der Leiterschleife wird wie in den Beispielen vorhin ein r_c von 0,002 m angenommen. Als Verlegeabstand bzw. Breite der Leiterschleife werden 0,5 m angenommen.

Die Tabelle 9-1 liefert die Ergebnisse der Berechnungen. Bezüglich der Rechenmethode kann auf Kapitel 6.5 verwiesen werden.

Tabelle 9-1: Berechnung der induzierten Spannung/Strom für die Ladesäule 1, Energieversorgungsleitung - Ethernetleitung

Abstand	Magnetfeld	Leiterschleife			$U_{oc/max}$	L_s	$I_{sc/max}$
		b	l	r_c			
s_a	H_0	m			V	H	A
m	A/m	m			V	H	A
1000	16	0,5	22,0	0,002	22	4,94E-05	4
800	20	0,5	22,0	0,002	28	4,94E-05	6
600	27	0,5	22,0	0,002	37	4,94E-05	7
400	40	0,5	22,0	0,002	55	4,94E-05	11
200	80	0,5	22,0	0,002	110	4,94E-05	22
100	159	0,5	22,0	0,002	221	4,94E-05	45
50	318	0,5	22,0	0,002	441	4,94E-05	89
25	637	0,5	22,0	0,002	882	4,94E-05	179
10	1592	0,5	22,0	0,002	2206	4,94E-05	446
5	3183	0,5	22,0	0,002	4412	4,94E-05	893

Die Berechnungen zeigen, dass die Bemessungsstoßspannung U_w von 4 kV der Ladesäule bis zu einer Distanz von 5 m ausreichend wäre. Ab einer Distanz von 5 m würde die Stehstoßspannung überschritten werden. Für die beiden Datenleitung kommt man jedoch ab einer Entfernung von 50 m in den kritischen Bereich von 0,5 kV. Daher empfiehlt es sich für die Datenleitung einen Überspannungsableiter zu installieren.

9.2 Beispiel 2: Ladestationen Hauptplatz

Im zweiten Beispiel werden zwei Ladesäulen am Hauptplatz untersucht. Abbildung 9-4 zeigt eine Seitenansicht des Parkplatzes.



Abbildung 9-4: Ladestationen, Hauptplatz

Rechts zu sehen ist der Energie- und Datenverteiler im selben Gehäuse, daneben befinden sich die beiden Ladesäulen. Die linke Ladesäule weist eine Ladeleistung von 22 kW auf und die rechte Ladesäule eine Ladeleistung von 44 kW. Im Energie- und Datenverteiler befindet sich kein Überspannungsschutz. Beide Ladesäulen weisen wieder ein Bemessungsstehstoßspannung von 4 kV auf. Die folgende Abbildung liefert eine Übersicht der Verkabelung.

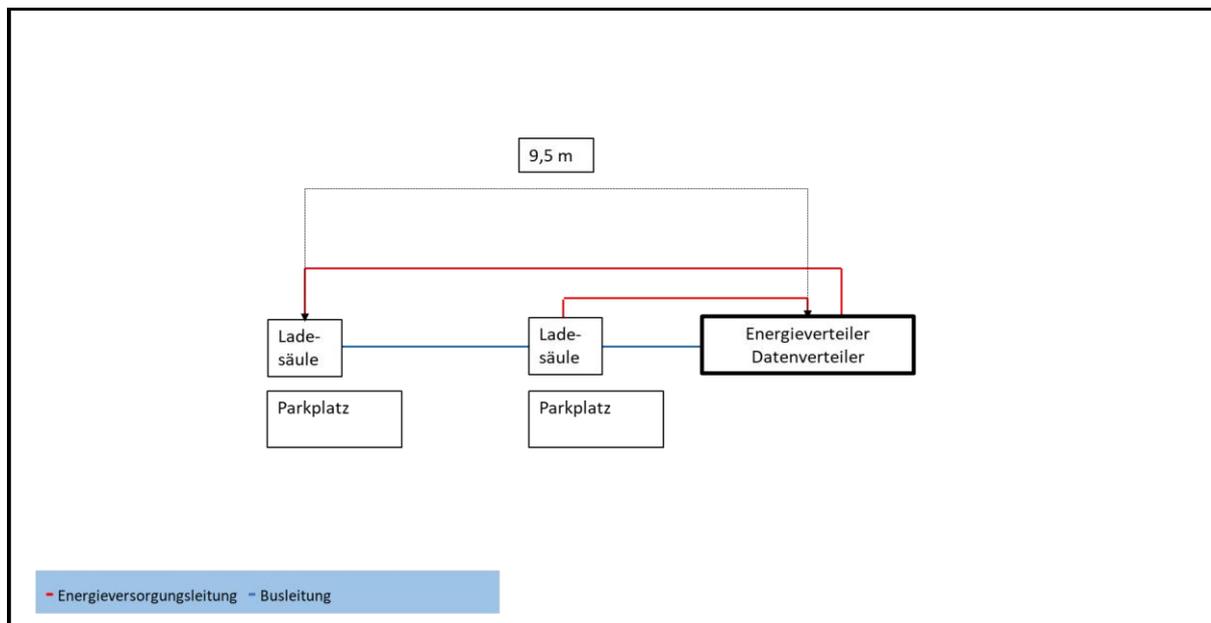


Abbildung 9-5: Leiterschleifen, Hauptplatz

Die beiden Ladesäulen sind wieder über eine Busleitung in Serie miteinander verbunden. Von jeder Ladesäule geht separat eine Energieversorgungsleitung weg. Die folgende Tabelle liefert die Berechnungsergebnisse, wenn man einen Verlegeabstand von 0,5 m bzw. eine Schleifenlänge von 9,5 m wie in der Skizze annimmt.

Tabelle 9-2: Berechnung der induzierten Spannung/Strom für die Ladesäule 1, Energieversorgungsleitung - Ethernetleitung

Abstand	Magnetfeld	Leiterschleife			U _{oc/max}	L _s	I _{sc/max}
		b	l	r _c			
s _a	H ₀	m			V	H	A
1000	16	0,5	9,5	0,002	10	2,18E-05	4
800	20	0,5	9,5	0,002	12	2,18E-05	5
600	27	0,5	9,5	0,002	16	2,18E-05	7
400	40	0,5	9,5	0,002	24	2,18E-05	11
200	80	0,5	9,5	0,002	48	2,18E-05	22
100	159	0,5	9,5	0,002	95	2,18E-05	44
50	318	0,5	9,5	0,002	191	2,18E-05	87
25	637	0,5	9,5	0,002	381	2,18E-05	175
10	1592	0,5	9,5	0,002	953	2,18E-05	437
5	3183	0,5	9,5	0,002	1905	2,18E-05	873

Da die Leiterschleife kleiner als wie vorhin ist, ist wie zu erwarten die Stehstoßspannung der Ladesäule ausreichend. Ab einer Entfernung von 25 m kommt man bei der Datenleitung in den kritischen Bereich.

10 Schutzvorschläge

In diesem Kapitel werden für verschiedene Anwendungsfälle entsprechende Schutzvorschläge diskutiert.

10.1 Blitzschutz- und Überspannungsschutz für den privaten Aufstellungsort

Für das Laden im Privatbereich kommt entweder Mode 2 oder Mode 3 zum Einsatz (Kapitel 4.1).

Erfolgt das Laden mittels Mode 2, also mit einer ICCB wird auf herkömmliche Schutzkontaktsteckdosen oder CEE-Steckvorrichtungen zurückgegriffen. Der Überspannungsschutz hat über die Gebäudeinstallation bzw. der ICCB zu erfolgen.

Häufig kommt für Heimanwendungen auch Mode 3 – das Laden über eine Wallbox – zum Einsatz. Die folgende Abbildung zeigt ein Einfamilienhaus mit nebenstehender Garage. In der Garage befindet sich eine Wallbox. Das Haus ist mit äußeren und inneren Blitzschutz ausgestattet. Die Wallbox befindet sich in LPZ 1 und ist an der Unterverteilung der Hausinstallation angeschlossen.

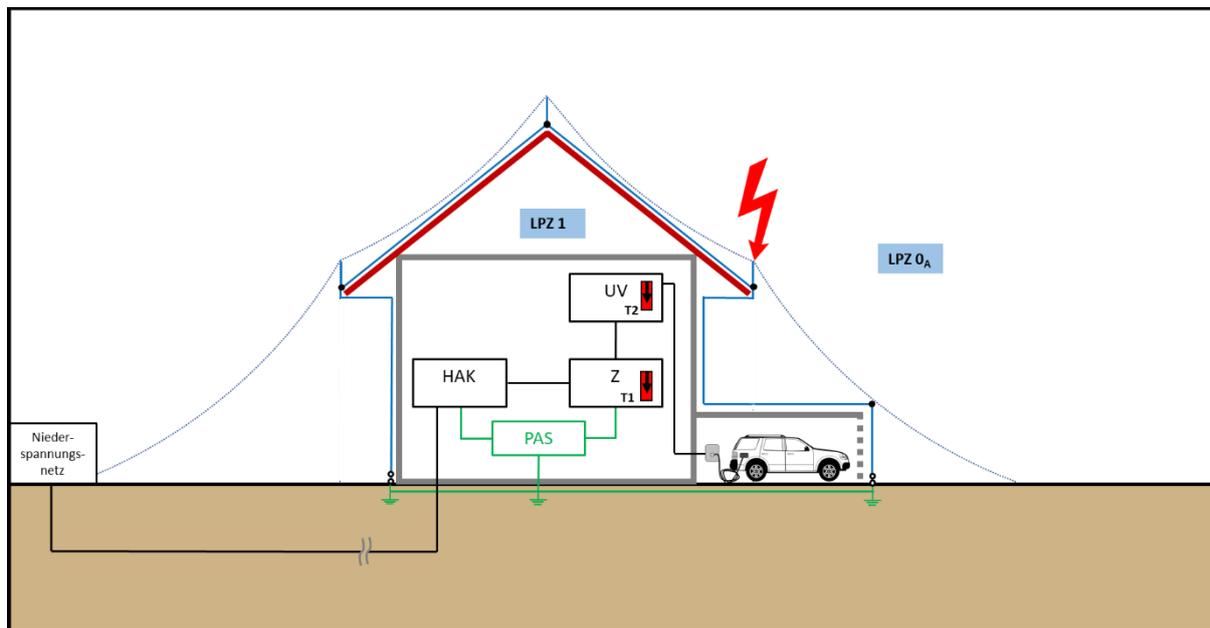


Abbildung 10-1: Wallbox, privater Aufstellungsort, HAK ... Hausanschlusskasten, PAS ... Potentialausgleichschiene, UV ... Unterverteilung, Z ... Zähler T1 ... SPD-Typ 1, T2 ... SPD-Typ 2 [a2]

Kommt es zu einem direkten Einschlag in das Gebäude muss ein SPD unmittelbar an der Wallbox installiert sein, um Schutz zu gewährleisten (Siehe Kapitel 8.1).

Kommt es zu Überspannungen aufgrund von indirekten Einschlägen in näherer Umgebung oder Einschlägen in das Versorgungsnetz, ist der Überspannungsschutz der Hausinstallation – sofern die Leitungslänge zwischen Unterverteilung und Wallbox laut [22] kleiner 10 m ist bzw. wenn die Leitungslängen l und Schutzabstände l_{pi} gemäß den vorherigen Berechnungen nicht überschritten werden - ausreichend. (Siehe Kapitel 8.2)

Ist im Hauptverteiler bzw. Zähler ein Überspannungsableiter Typ 1 oder eine Kombi-ableiter Typ 1/Typ2 vorhanden, ist in der Unterverteilung ein Typ 2 Ableiter ausreichend. Wichtig ist, dass die Koordination der einzelnen Überspannungsableiter untereinander (siehe [8]) einzuhalten ist.

Für Privatanwendungen kommen derzeit im Regelfall keine Datenleitungen zum Einsatz. Einige Hersteller bieten zwar intelligente Ladesäulen für die Anbindung an das Smart Home an. Bei diesen Ladesäulen erfolgt die Datenkommunikation aber in der Regel über W-Lan. Daher ist kein zusätzlicher Blitz- und Überspannungsschutz zu berücksichtigen. Erfolgt jedoch eine kabelgebundene Datenanbindung, sind entsprechende Schutzmaßnahmen wie für öffentliche Ladesäulen zu berücksichtigen. (Siehe nachfolgende Kapitel)

10.2 Blitzeinschlag neben der Ladesäule in eine bauliche Anlage

Die folgende Abbildung stellt das Szenario dar, wenn ein Blitz in eine Straßenlaterne einschlägt, die sich neben der Ladesäule befindet.

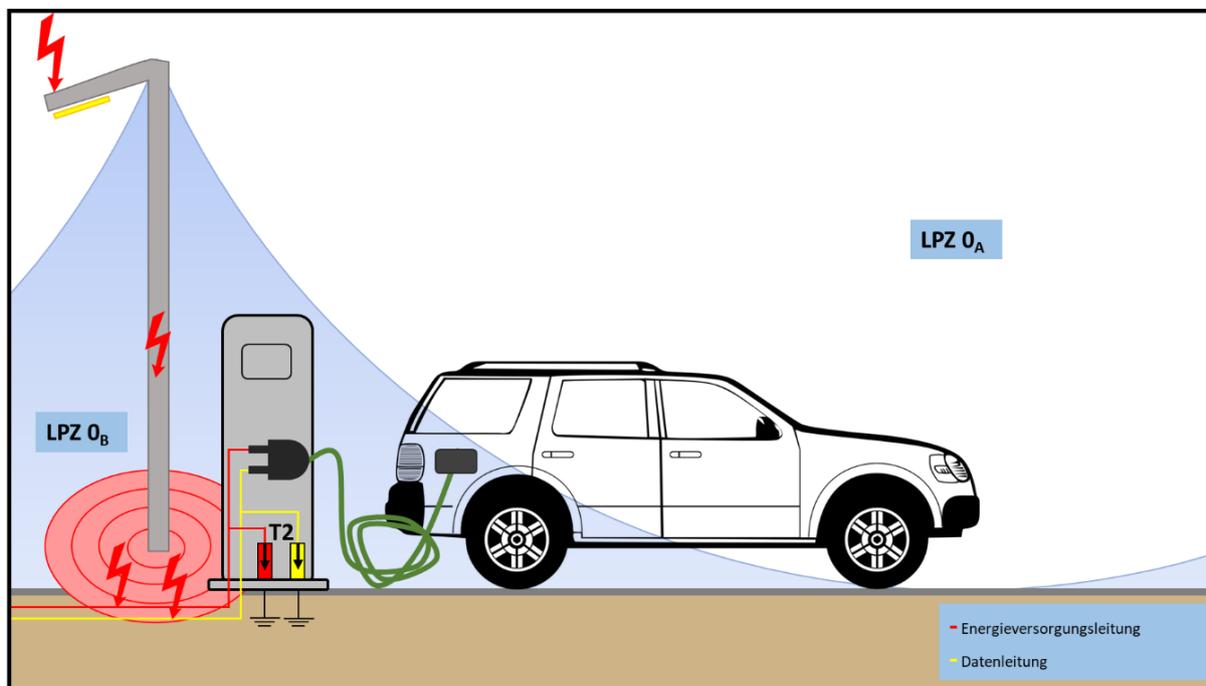


Abbildung 10-2: Ladesäule in LPZ 0_B, T2 ... SPD-Typ 2 [a2]

Die Straßenlaterne dient in diesem Fall als Fangeinrichtung. Die Ladesäule befindet sich innerhalb des Blitzkugelradius in LPZ 0_B. Somit ist die Ladesäule vor direkten Einschlägen geschützt, aber dem vollen magnetischen Feld des Blitzstroms ausgesetzt.

Der Blitzstrom fließt über die Laterne in das Erdreich. Abhängig von der Entfernung Einschlagsstelle – Ladesystem kann der Blitzstrom eine Überspannung in der Ladesäule verursachen. In die Leiterschleife gebildet aus Energieversorgungsleitung und Datenleitung, wird eine Spannung induziert, die wiederum einen Stoßstrom (Überschlag) in der Ladesäule verursachen kann. Ist das Fahrzeug an der Ladesäule angeschlossen, erweitert sich die Leiterschleife über das Ladekabel bis zum E-Auto und der Überschlag mit (Blitz-) Stoßstromfluss kann im Fahrzeug stattfinden. Dies kann zur Zerstörung der elektronischen Komponenten oder der Batterie des Fahrzeuges führen. [23]

Die Höhe der induzierten Spannung ist wie in Kapitel (6.5) berechnet im Wesentlichen von der Entfernung Straßenlaterne – Ladesäule, des Blitzstroms und der Größe der Leiterschleife bestimmt. Laut den Berechnungen sollte auch bei kleinen Leiterschleifen ein SPD direkt an der Ladesäule installiert werden. Im Idealfall darf der maximale Schutzabstand für einen spannungsbegrenzenden SPD mit $U_p = 1,5 \text{ kV}$ und einer Bemessungsstoßspannung der Ladesäule von 4 kV maximal 7 m betragen (Tabelle 7-6). Gefordert wird also ein SPD von LPZ 0_B auf LPZ 1.

Liegt eine AC-Ladesäule vor, muss für die Energieversorgungsleitung ein SPD folgende Anforderungen erfüllen:

Tabelle 10-1: Schutz für indirekten Blitzeinschlag, AC-Ladesäule [23]

SPD-Typ	Technische Daten	
	Kenngroße	Wert
z.B.: DEHNcord 3P (SPD-Typ 2+3),	Nennspannung AC (U_N)	230 V (50/60 Hz)
	Nennlaststrom AC/DC (I_L)	25 A
	Kurzschlussfestigkeit (I_{SCCR})	6 kA _{eff}
	Höchste Dauerspannung AC (U_C)	275 V [L-N], 255 V [N-PE] (50/60 Hz)
	Schutzpegel (U_P)	≤ 1,5 kV für [L-N] und [N-PE]
	Nennableitstoßstrom (I_n)	10 kA [L-N], 20 kA [N-PE]
	Kombinierter Stoß [L-N]/[N-PE] (U_{OC})	20 kV

Liegt eine DC-Ladesäule vor, welche bereits mit DC gespeist wird, muss für die Energieversorgungsleitung ein SPD folgende Anforderungen erfüllen:

Tabelle 10-2: Schutz für indirekten Blitzeinschlag, DC-Ladesäule [23]

SPD-Typ	Technische Daten	
	Kenngroße	Wert
z.B.: DEHNguard SE DC (SPD-Typ 2)	Nennspannung DC (U_N)	750 V
	Kurzschlussfestigkeit ohne Vor- sicherung DC (I_{SCCR})	100 A
	Höchste Dauerspannung DC (U_C)	900 V
	Schutzpegel (U_P)	≤ 3 kV
	Nennableitstoßstrom (I_n)	12,5 kA

Für die Datenleitung kommen folgende zwei Varianten zum Einsatz:

Tabelle 10-3: Schutz für indirekten Blitzeinschlag, Datenleitung 1 [23]

SPD-Typ	Technische Daten	
	Kenngroße	Wert
DEHNpatch	Nennspannung (U_N)	48 V
	Höchste Dauerspannung DC (U_C)	48 V
	Höchste Dauerspannung AC (U_C)	34 V
	Höchste Dauerspannung DC Pa-Pa (PoE) (U_C)	57 V
	Nennstrom (I_L)	1 A
	D1 Blitzstoßstrom (I_{imp}) pro Ader	0,5 kA
	C2 Nennableitstoßstrom Ad-Ad (I_n)	150 A
	C2 Nennableitstoßstrom Ad-Pg (I_n)	2,5 kA
	C2 Nennableitstoßstrom Pa-Pa (PoE) (I_n)	150 A
	Schutzpegel Ad-Ad bei I_n C2 (U_p)	≤ 180 V
	Schutzpegel Ad-PG bei I_n C2 (U_p)	≤ 500 V
	Schutzpegel Ad-PG Pa-Pa I_n C2 (PoE) (U_p)	≤ 600 V
	Schutzpegel Ad-Ad bei 1 kV/ μ s C3 (U_p)	≤ 180 V
	Schutzpegel Ad-PG bei 1 kV/ μ s C3 (U_p)	≤ 500 V
	Schutzpegel Pa-Pa bei 1 kV/ μ s C3 (PoE) (U_p)	≤ 600 V

Tabelle 10-4: Schutz für indirekten Blitzeinschlag, Datenleitung 1 [23]

SPD-Typ	Technische Daten	
	Kenngroße	Wert
BLITZDUCTOR connect	Nennspannung (U_N)	24 V
	Höchste Dauerspannung DC (U_C)	36 V
	Höchste Dauerspannung AC (U_C)	25,4 V
	Nennstrom (I_L)	0,75 A
	D1 Blitzstoßstrom (I_{imp}) pro Ader	1,5 kA
	C2 Nennableitstoßstrom (I_n) pro Ader	5 kA
	Schutzpegel Ad-Ad bei I_n C2 (U_p)	≤ 57 V
	Schutzpegel Ad-PG bei I_n C2 (U_p)	≤ 600 V
	Schutzpegel Ad-Ad bei I_n C1 (U_p)	≤ 57 V
	Schutzpegel Ad-PG bei I_n C1 (U_p)	≤ 600 V
	Schutzpegel Ad-Ad bei 1 kV/ μ s C3 (U_p)	≤ 46 V
	Schutzpegel Ad-PG bei 1 kV/ μ s C3 (U_p)	≤ 600 V

10.3 Schutzvorschlag für einen öffentlichen Parkplatz

Die nachfolgenden zwei Abbildungen stellen die Seitenansicht eines öffentlichen Parkplatzes dar. Zu sehen sind zwei Ladeeinrichtungen mit Fahrzeugen und dem Gebäude, in dem sich die Energieversorgung und die Datenverteilung befinden.

In der Abbildung 10-3 befinden sich beide Ladesäulen in LPZ 0_B. Die linke Ladesäule ist durch die äußere Kante des Gebäudes vor einem Direkteinschlag geschützt und die zweite von einer Straßenlaterne. Die Laterne wirkt also als Fangeinrichtung. Beide Ladesäulen sind aber dennoch dem vollen elektromagnetischen Feld des Blitzes ausgesetzt.

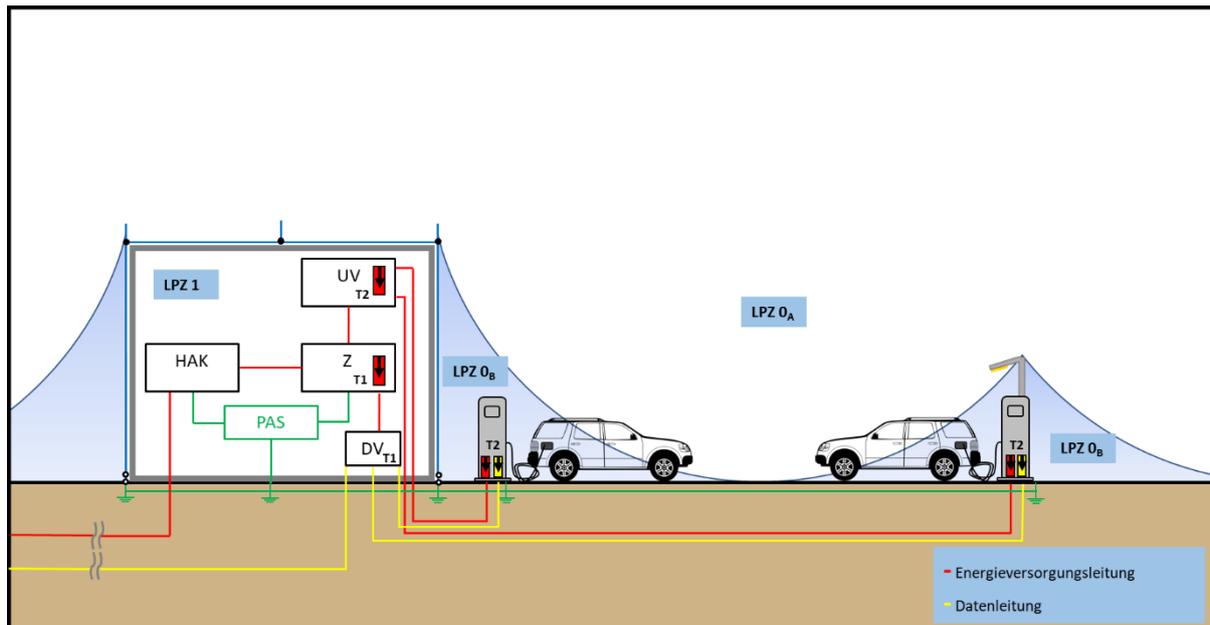


Abbildung 10-3: Parkplatz, beide Ladesäulen in LPZ 0_B, HAK ... Hausanschlusskasten, PAS ... Potentialausgleichsschiene, UV ... Unterverteilung, Z ... Zähler DV ... Datenverteiler, T1 ... SPD-Typ 1, T2 ... SPD-Typ 2 [a3]

Wie die Berechnungen in Kapitel 6 zeigen, sollte der Verlegeabstand von Datenleitung und Energieversorgungsleitung möglichst gering sein. Da sich beide Ladesäulen in LPZ 0_B befinden, gilt für den Schutzvorschlag das Gleiche wie in Kapitel 10.2.

Ist im Hauptverteiler bzw. Zähler ein Überspannungsableiter Typ 1 oder eine Kombi-ableiter Typ 1/Typ2 vorhanden, ist in der Unterverteilung ein Typ 2 Ableiter ausreichend. Wichtig ist, dass die Koordination der einzelnen Überspannungsableiter untereinander (siehe [8]) einzuhalten ist. Im Datenverteiler ist wie im Zähler ebenfalls ein SPD Typ 1 zu installieren.

Die nächste Abbildung zeigt den für die Praxis eher unüblichen Fall. Die rechte Ladesäule befindet sich in LPZ 0_A. Sie muss daher auch vor den direkten Auswirkungen eines Blitzeinschlages geschützt sein. Anders wie vorhin muss in der Unterverteilung ein SPD Typ 1 installiert werden. Kommt es, in der sich in LPZ 0_A befindlichen Ladesäule zu einem direkten Einschlag, kann ein (Teil-)Blitzstrom in die Unterverteilung galvanisch eingekoppelt werden.

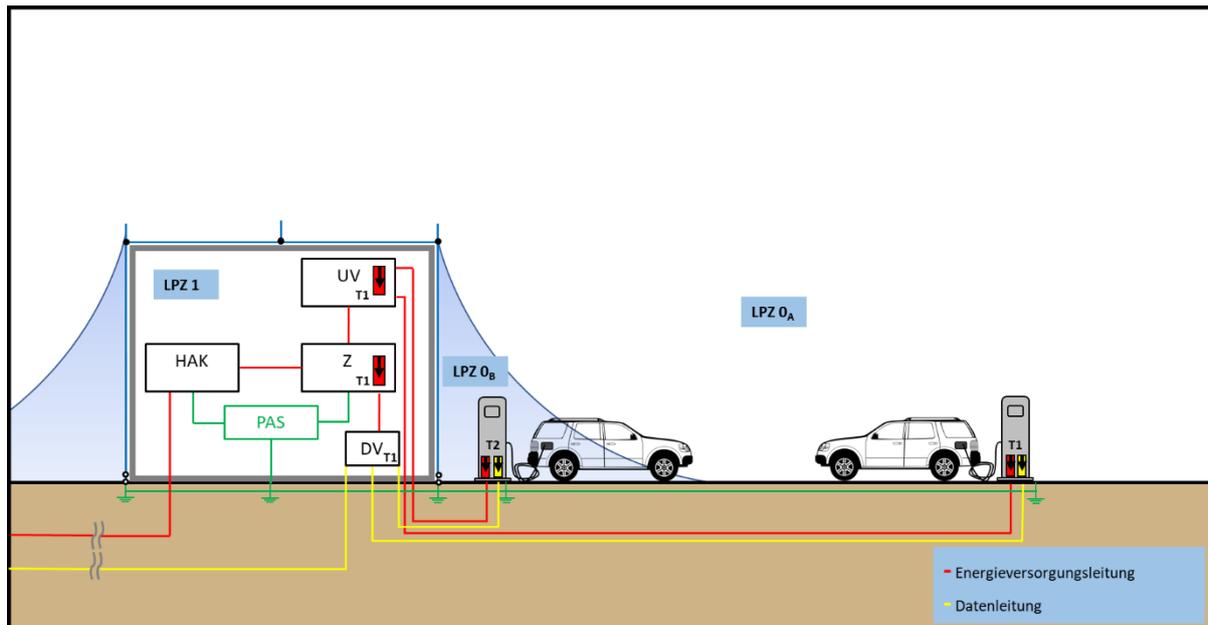


Abbildung 10-4: Parkplatz, rechte Ladesäulen in LPZ 0_A, HAK ... Hausanschlusskasten, PAS ... Potentialausgleichsschiene, UV ... Unterverteilung, Z ... Zähler, DV ... Datenverteiler, T1 ... SPD-Typ 1, T2 ... SPD-Typ 2 [a3]

Für die in Abbildung 10.4, LPZ 0_A befindlichen Ladesäule wird folgender Schutzvorschlag empfohlen:

Tabelle 10-5: Schutz für direkten Blitzeinschlag, AC-Ladesäule 1 [23]

SPD-Typ	Technische Daten	
	Kenngroße	Wert
DEHNvap EMOB (SPD-Typ 1, Typ 2)	Nennspannung AC (U_N)	230 / 400 V (50/60 Hz)
	Höchste Dauerspannung AC (U_C)	255 V [L-N], [N-PE] (50/60 Hz)
	Schutzpegel (U_P)	$\leq 1,5$ kV für [L-N] und [N-PE]
	Blitzstoßstrom (I_{imp})	12,5 kA [L-N], 50 kA [N-PE]
	Nennableitstoßstrom (I_n)	25 kA [L-N], 100 kA [N-PE]

Tabelle 10-6: Schutz für direkten Blitzeinschlag, AC-Ladesäule 2 [23]

SPD-Typ	Technische Daten	
	Kenngroße	Wert
DEHNshield ZP (SPD-Typ 1, Typ2)	Nennspannung AC (U_N)	230 / 400 V (50/60 Hz)
	Höchste Dauerspannung AC (U_C)	255 V [L-N], [N-PE] (50/60 Hz)
	Schutzpegel (U_P)	$\leq 1,5$ kV für [L-N] und [N-PE]
	Blitzstoßstrom (I_{imp})	12,5 kA [L-N]
	Nennableitstoßstrom (I_n)	25 kA [L-N], 80 kA [N-PE]

Tabelle 10-7: Schutz für direkten Blitzeinschlag, DC-Ladesäule [23]

SPD-Typ	Technische Daten	
	Kenngroße	Wert
DEHNguard ME DC (SPD-Typ 1+2)	Nennspannung DC (U_N)	860 V
	Kurzschlussfestigkeit (I_{SCCR})	500 A / 170 ms
	Blitzstoßstrom (I_{imp})	5 kA
	Höchste Dauerspannung DC (U_C)	950 V
	Schutzpegel (U_P) [DC+ -> DC-]	$\leq 3,2$ kV
	Nennableitstoßstrom (I_n)	12,5 kA

Für die Datenleitung ist der Schutzvorschlag in Tabelle 9.3 gültig.

10.4 Schutzvorschlag für eine öffentliche Parkgarage

Die folgende Abbildung zeigt die Seitenansicht einer öffentlichen Parkgarage. Ladesäulen und Fahrzeuge befinden sich in LPZ 1. Sie sind vom Sicherheitsvolumen, welches von der Parkgarage gebildet wird vom elektromagnetischen Feld des Blitzes geschützt. Im Wesentlichen kann auf die Berechnungen in Kapitel 6.2 und Kapitel 6.4 verwiesen werden.

Im Falle eines direkten Einschlags in die Parkgarage sollten SPDs jeweils für die Energieversorgungsleitung und für die Datenleitung in unmittelbarer Nähe der Ladesäule installiert werden. (Kapitel 7.2)

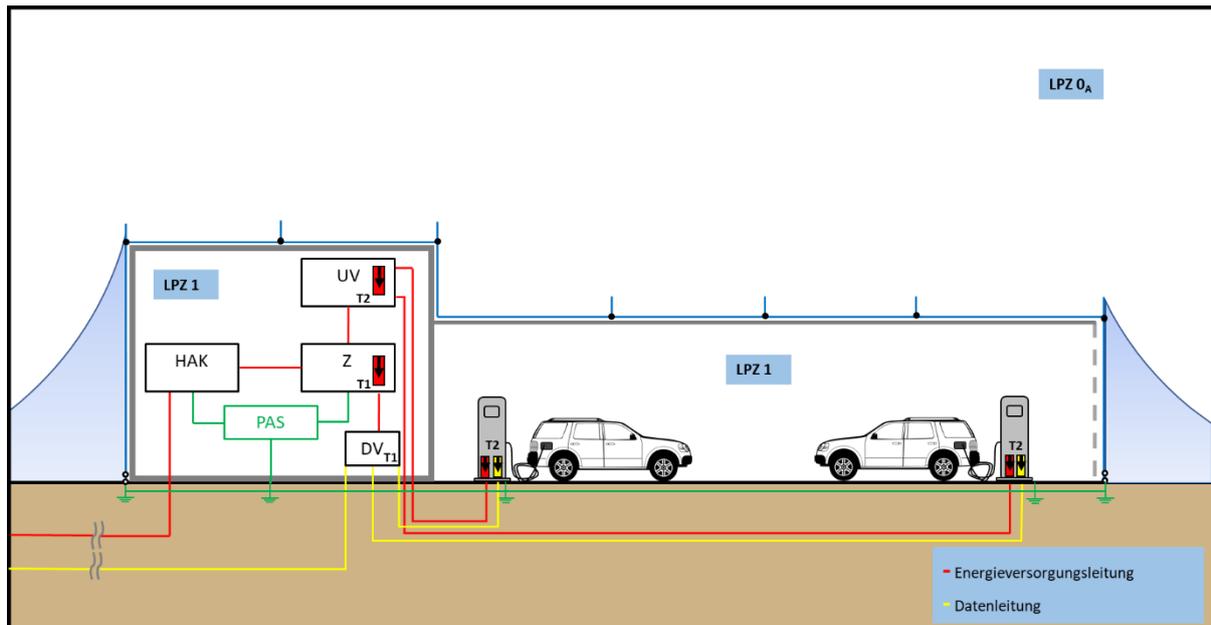


Abbildung 10-5: Parkgarage, beide Ladesäulen in LPZ 1, HAK ... Hausanschlusskasten, PAS ... Potentialausgleichsschiene, UV ... Unterverteilung, Z ... Zähler, DV ... Datenverteiler, T1 ... SPD-Typ 1, T2 ... SPD-Typ 2 [a3]

Für den Schutzvorschlag kann auf die Kapitel 10.2 und 10.3 verwiesen werden.

11 Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Blitz- und Überspannungsschutz von Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge. In den letzten Jahren hat es einen enormen Zuwachs an Elektromobilität gegeben. Da davon auszugehen ist, dass Elektroautos auch während eines Gewitters geladen werden, muss ein entsprechender Blitz- und Überspannungsschutz vorhanden sein.

Nach einer Einleitung werden die Grundlagen zur Blitzphysik behandelt. Es werden die unterschiedlichen Arten von Blitzentladungen erklärt und die Kenngrößen des Blitzstroms beschrieben. Weiters wird eine Übersicht über die Jahresblitzzahlen und der Erdblitzdichte in Österreich gegeben.

Im darauffolgenden Kapitel werden die Grundlagen zum Blitz- und Überspannungsschutz erklärt. Ein Blitzschutzsystem lässt sich in ein äußeres- und inneres Blitzschutzsystem unterteilen. Weiters werden die Ursachen von Überspannungen erklärt und deren Einkopplungsarten beschrieben. Abschließend beinhaltet Kapitel 3 die grundlegende Funktionsweise von Überspannungsschutzgeräten und deren Kenngrößen.

Im nächsten Kapitel wird ein Überblick über die unterschiedlichen Ladebetriebsarten für das konduktive Laden von Elektroautos gegeben. Es werden typische Ladeleistungen von Ladesäulen und Elektroautos besprochen. Zuletzt wird die Elektromobilität in Österreich diskutiert.

Die Inbetriebnahme von Ladesäulen und die Errichtung eines Blitzschutzsystems ist mit einer Reihe an Normen verbunden. Kapitel 5 liefert eine Übersicht über alle hierfür relevanten Normen.

Für öffentliche Anwendungen werden Ladesäulen in der Regel mit Datenleitungen ausgestattet. Diese können mit der Energieversorgungsleitung eine Leiterschleife bilden, Kommt es zu einem direkten oder indirekten Blitzeinschlag, kann es zu einer Einkopplung des Blitzstoßstroms in die Leiterschleife kommen. Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Berechnung von induzierten Spannungen und Ströme in die Leiterschleife. Es werden verschieden Szenarien bei der Berechnung berücksichtigt. Diese Szenarien ergeben sich aus dem Standort der Ladesäule und der Art des Blitzeinschlages (direkt oder indirekt).

Ladeeinrichtungen sind geschützt, wenn ihre Bemessungstehstoßspannung U_w größer oder gleich dem Bedrohungspegel U_p des SPD plus einer Zugabe ist, die für die Berücksichtigung des Einflusses von Verbindungsleitern, des Entfernungseinflusses und der Leiterschleife zwischen SPD und dem Betriebsmittel notwendig ist. Es muss der Schutzabstand aufgrund von Schwingungen I_{po} und der Schutzabstand aufgrund von Induktion I_{pi} berücksichtigt werden. In Kapitel 7 wird also für verschieden Szenarien der wirksame Bereich eines SPDs berechnet.

In Kapitel 8 werden die Berechnungen aus den Kapiteln 6 und 7 zusammengefasst und diskutiert.

Im darauffolgenden Kapitel werden zwei bereits in Betrieb genommen Ladeparks in der Stadt Voitsberg begutachtet. Es werden die Leitungslängen zwischen den Ladesäulen und Energie- und Datenverteiler ermittelt und überprüft ob für die Ladesäulen zusätzlich eine Überspannungsschutzeinrichtung notwendig ist.

Abschließend werden in Kapitel 10 die entsprechenden Schutzvorschläge für verschiedenen Anwendungsfälle diskutiert. Es muss für die Energieversorgungsleitung und für die Datenleitung in Abhängigkeit der Blitzschutzzone, welche sich aufgrund des Aufstellungsortes ergibt, ein Überspannungsschutz vorhanden sein. Wichtig ist, dass der Überspannungsschutz in der Ladesäule mit dem Überspannungsschutz im Energie- und Datenverteiler koordiniert ist.

Literaturverzeichnis

- [1] DEHN Blitzplaner, 4. Auflage (2017), ISBN 978-3-9813770-8-8
- [2] ALDIS – Austrian Lightning Detection & Information System.
<https://www.aldis.at/>, (August 2020)
- [3] ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 1: 2012-07-01, Blitzschutz – Allgemeine Grundsätze
- [4] VDE – Blitzschutz, Grafik
<https://www.vde.com/resource/blob/1931712/1edae84440709a745ef92760a45a82b5/aeusserer-blitzschutz-bild-download-data.jpg>, (August 2020)
- [5] Grundlagen Blitz- und Überspannungsschutz, Phoenix Contact.
https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_promotion/52002034_DE_DE TRABTECH Basics LoRes.pdf
(August 2020)
- [6] ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 4: 2012-07-01, Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen
- [7] OBO Betterman, Blitzschutz-Leitfaden. 2. überarbeitete Auflage 2019
- [8] ÖVE-Fachinformation: Koordination von Überspannungs-Schutzgeräten verschiedener Hersteller. 2013-11
https://www.ove.at/fileadmin/user_upload/OVE_Standardization/pdf/Fachinfo_Blitzschutz/Fachinformation_Koordination_UeSchutz_Hersteller_2013_11.pdf
- [9] VDE, Der Technische Leitfaden Ladeinfrastruktur Elektromobilität Version 3
<https://www.vde.com/resource/blob/988408/a2b8e484994d628b515b56376f809e28/technischer-leitfaden-ladeinfrastruktur-elektromobilitaet---version-3-data.pdf>
- [10] Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020
AG4 - Normung, Standardisierung und Zertifizierung
http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Publikationen/NormungsRoadmap_Elektromobilitaet_2020_bf.pdf
- [11] Ladeleistungen
<https://www.goingelectric.de/wiki/Ladung-und-Ladestecker/>, (Jänner 2020)
- [12] Ladeleistungen 2
<https://e-move.at/laden/laden-privat/steckdose-und-wallbox/?cn-reloaded=1&cn-reloaded=1>, Jänner 2020

- [13] Ladedauer E-Autos
https://www.mobilityhouse.com/de_de/ratgeber/ladezeitenuebersicht-fuer-elektroautos, (Jänner 2020)
- [14] Ladedauer E Autos 2
<https://www.goingelectric.de/elektroautos/>, aufgerufen Jänner 2020
Modell A: Tesla Model 3, performance, Modell B: BMW i3, Modell C: Renault Zoe, Modell D: VW e-Golf, Modell E: Hyundai Kona
- [15] KFZ Bestand in Österreich, 2015-2019, Statistik Austria
https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html, (Jänner 2020)
- [16] Anzahl der Ladepunkte in Österreich 2015-2019
<https://www.eafo.eu/alternative-fuels/electricity/charging-infra-stats#>, (Jänner 2020)
- [17] Stromtankstellen Österreich
<https://www.beoe.at/ladestationen/>, (April .2020)
- [18] VdS 3471 Ladestationen für Elektrostraßenfahrzeuge - Publikation der deutschen Versicherer zur Schadenverhütung
- [19] Energie Netze Steiermark, Ausführungsrichtlinien für Niederspannungsanschlüsse, Ausgabe Juni 2019
<https://www.e-netze.at/downloads-data/pdf.aspx?pdf=Ausf%C3%BChrungsrichtlinien%20f%C3%BCr%20Niederspannungsanschl%C3%BCsse.pdf>
- [20] ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 4: 2008-01-01, Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen
- [21] ÖVE/ÖNORM EN 62305, Teil 2: 2013-06-01, Risiko-Management
- [22] ÖVE E 8101: 2019-01-01, Elektrische Niederspannungsanlagen
- [23] Blitz- und Überspannungsschutz für die Elektromobilität
Schutzvorschlag – DEHN
<https://www.dehn.at/sites/default/files/media/files/WPX043-D-Elektromobilitaet.pdf>

Abkürzungsverzeichnis

Wenn im Text Abkürzungen Verwendung finden, sollten diese in einem separaten Abkürzungsverzeichnis aufgelistet werden (siehe Beispiel). Optional kann die Beschreibung auch in mehreren Sprachen erfolgen.

SPD	Surge Protection Device, Überspannungsableiter
LEMP	Lightning Electromagnetic Pulse, elektromagnetischer Impuls aufgrund von Blitzen
ALDIS	Austrian Lightning Detection & Information System
LPS	Lightning Protection System, Blitzschutzsystem
LPL	Lightning Protection Level, Blitzschutzklasse
LPZ	Lightning Protection Zone, Blitzschutzzone
SEMP	Switching Electromagnetic Pulse, elektromagnetischer Impuls aufgrund von Schaltvorgängen
ESD	Electrostatic Discharge, elektrostatische Entladung
RCD	Residual Current Device, Fehlerstrom-Schutzeinrichtung
ICCB	In-Cable-Control-Box
IC-CPD	In-Cable-Control and Protection Device
CCS	Combined Charging System
BEÖ	Bundesverband für Elektromobilität

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Elektroauto während des Ladevorgangs, Hauptplatz Voitsberg	1
Abbildung 2-1: Abwärtsblitz (Wolke-Erde-Blitz) [1]	4
Abbildung 2-2: Entladungsmechanismus eines negativen Abwärtsblitzes.....	4
Abbildung 2-3: Entladungsmechanismus eines positiven Abwärtsblitzes (Wolke-Erde-Blitz) [1].....	5
Abbildung 2-4: Aufwärtsblitz (Erde-Wolke-Blitz) [1]	5
Abbildung 2-5: Entladungsmechanismus eines positiven Aufwärtsblitzes (Erde-Wolke-Blitz) [1].....	6
Abbildung 2-6: Entladungsmechanismus eines negativen Aufwärtsblitzes (Erde-Wolke-Blitz) [1].....	6
Abbildung 2-7: Zeitliche Verlauf des Blitzstroms [3].....	7
Abbildung 2-8: zeitlicher Verlauf des Blitzstoßstroms, nach Gleichung (2-5).....	11
Abbildung 2-9: Jährliche Anzahl an WE-Blitze in Österreich und deren Mittelwert [2]	12
Abbildung 2-10: Erdblitzdichte in Österreich als Anzahl der Blitze pro km ² und Jahr (Gitter 5 km x 5 km) auf Basis der von ALDIS georteten Blitze von 2003 – 2012 [2]	13
Abbildung 3-1: Der äußere Blitzschutz [4]	15
Abbildung 3-2: LEMP-Situation im Fall eines Blitzeinschlags [6]	17
Abbildung 3-3: Sicherheitsvolumen V_s Maschenweite w_m , Sicherheitsabstände $d_{s/1}$ und $d_{s/2}$ [6]	18
Abbildung 3-4: Schematische Stromversorgung eines Betriebsmittels [5].....	20
Abbildung 3-5: Auswirkung einer Überspannung als Querspannung [5]	20
Abbildung 3-6: Auswirkung einer Überspannung als Längsspannung [5].....	21
Abbildung 3-7: SPD zwischen aktiven Leitern [5]	21
Abbildung 3-8: SPD zwischen aktiven Leitern und Schutzleiter [5].....	21
Abbildung 3-9: SPD zwischen aktiven Leitern im Fall einer Querspannung [5]	22
Abbildung 3-10: SPD zwischen aktiven Leiter und dem Schutzleiter im Fall einer Längsspannung [5]	22
Abbildung 4-1: Ladebetriebsarten, engl. Mode [a1]	26
Abbildung 4-2: Typ 2 Stecker [10]	28
Abbildung 4-3: CCS Stecker [10].....	28
Abbildung 4-4: Bestand an E-Autos in Österreich [15].....	31
Abbildung 4-5: Neuzulassungen von E-Autos in Österreich [15]	31
Abbildung 4-6: Anzahl der Ladepunkte in Österreich [16].....	32
Abbildung 4-7: Ladepunkte in Österreich, BEÖ Netz [17].....	32
Abbildung 5-1: Normen für das konduktive Laden [10].....	33
Abbildung 6-1: Dreistöckige Hochgarage mit den Abmessungen L x W x H [a2]	40

Abbildung 6-2: Dreistöckige Hochgargage mit den Abmessungen $L \times W \times H$, PAS ... Potentialausgleichschiene [a2].....	43
Abbildung 6-3: Leiterschleife mit der Länge l und der Breite b , gebildet aus Energieversorgungsleitung und Datenleitung, PAS ... Potentialausgleichschiene [a2]	44
Abbildung 6-4: Indirekter Blitzeinschlag im Abstand s_a von der Ladesäule, Sicherheitsvolumen V_S mit der Länge L und der Höhe H [a2].....	48
Abbildung 6-5: Indirekter Blitzeinschlag im Abstand s_a von der Ladesäule, Sicherheitsvolumen V_S mit der Länge L und der Höhe H , Blitzkugelradius r [a2].....	51
Abbildung 6-6: Indirekter Blitzeinschlag im Abstand s_a von der Ladesäule, Leiterschleife mit der Länge l und der Breite b , Ladesäule in LPZ 0 [a2]	55
Abbildung 7-1: Stoßspannung zwischen Phasenleiter und PAS, Beschreibung siehe nachfolgende Übersicht [a3].....	60
Abbildung 9-1: Ladepark, Bahnhof Voitsberg	71
Abbildung 9-2: Verkabelung des Ladeparks	72
Abbildung 9-3: Leiterschleifen, Ladesäule 1	72
Abbildung 9-4: Ladestationen, Hauptplatz	74
Abbildung 9-5: Leiterschleifen, Hauptplatz	74
Abbildung 10-1: Wallbox, privater Aufstellungsort, HAK ... Hausanschlusskasten, PAS ... Potentialausgleichschiene, UV ... Unterverteilung, Z ... Zähler T1 ... SPD-Typ 1, T2 ... SPD-Typ 2 [a2].....	76
Abbildung 10-2: Ladesäule in LPZ 0 _B , T2 ... SPD-Typ 2 [a2]	77
Abbildung 10-3: Parkplatz, beide Ladesäulen in LPZ 0 _B , HAK ... Hausanschlusskasten, PAS ... Potentialausgleichschiene, UV ... Unterverteilung, Z ... Zähler DV ... Datenverteiler, T1 ... SPD-Typ 1, T2 ... SPD-Typ 2 [a3].....	82
Abbildung 10-4: Parkplatz, rechte Ladesäulen in LPZ 0 _A , HAK ... Hausanschlusskasten, PAS ... Potentialausgleichschiene, UV ... Unterverteilung, Z ... Zähler DV ... Datenverteiler, T1 ... SPD-Typ 1, T2 ... SPD-Typ 2 [a3]	83
Abbildung 10-5: Parkgarage, beide Ladesäulen in LPZ 1, HAK ... Hausanschlusskasten, PAS ... Potentialausgleichschiene, UV ... Unterverteilung, Z ... Zähler DV ... Datenverteiler, T1 ... SPD-Typ 1, T2 ... SPD-Typ 2 [a3].....	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Maximalwerte von Blitzstromparametern entsprechend dem Gefährdungspegel LPL [3]	10
Tabelle 2-2: Parameter für die Gleichung (2-5) [3]	12
Tabelle 3-1: SPD-Typ in Abhängigkeit des LPZ-Übergangs [5].....	24
Tabelle 3-2: Ableitvermögen eines Ableiters [1]]	25
Tabelle 4-1: Typische Ladeleistungen, [9][10][11]	28
Tabelle 4-2: Übersicht E-Autos [13][14]	29
Tabelle 5-1: Normen für das konduktive Laden	34
Tabelle 5-2: Normen für das konduktive Laden mit höheren Ladeleistungen	35
Tabelle 5-3: Normen für das Errichten von Niederspannungsanlagen und für einen entsprechenden Überspannungsschutz.....	36
Tabelle 5-4: Blitzschutznormen	37
Tabelle 6-1: Berechnung des Schirmfaktors für unterschiedliche Maschenweiten.....	41
Tabelle 6-2: Berechnung von H_1	42
Tabelle 6-3: Berechnung von H_1	46
Tabelle 6-4: Berechnung von $U_{oc/max}$, $I_{sc/max}$ und L_S	46
Tabelle 6-5: Berechnung von $U_{oc/max}$, $I_{sc/max}$ und L_S	47
Tabelle 6-6: Berechnung von $H_{o/max}$ und $H_{1/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 2$ m, SF = 11,8 db.....	50
Tabelle 6-7: Berechnung von $H_{o/max}$ und $H_{1/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 1$ m, SF = 17,9 db.....	50
Tabelle 6-8: Berechnung von $H_{o/max}$ und $H_{1/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 2$ m, SF = 11,9 db.....	52
Tabelle 6-9: Berechnung von $H_{o/max}$ und $H_{1/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 1$ m, SF = 17,9 db.....	52
Tabelle 6-10: Berechnung von $U_{oc/max}$ und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 2$ m, SF = 11,8 db.....	53
Tabelle 6-11: Berechnung von $U_{oc/max}$ und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 1$ m, SF = 17,9 db.....	54
Tabelle 6-12: Berechnung von $U_{oc/max}$ und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 1$ m, SF = 17,9 db.....	54
Tabelle 6-13: Berechnung von $U_{oc/max}$ und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a . $w_m = 2$ m, SF = 11,8 db.....	55
Tabelle 6-14: Berechnung von $U_{oc/max}$ L_S und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a	56
Tabelle 6-15: Berechnung von $U_{oc/max}$ L_S und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a	57
Tabelle 6-16: Berechnung von $U_{oc/max}$ L_S und $I_{sc/max}$ in Abhängigkeit von s_a	57
Tabelle 7-1: Berechnung von I_{po} für $l < 0,5$ m, spannungsbegrenzender SPD	62
Tabelle 7-2: Berechnung von I_{po} für $l > 0,5$ m, spannungsbegrenzender SPD	62
Tabelle 7-3: Berechnung von I_{po} , spannungsschaltender SPD	63

Tabelle 7-4: Berechnung von I_{pi} , spannungsbegrenzender SPD, Direkteinschlag	66
Tabelle 7-5: Berechnung von I_{pi} , spannungsbegrenzender SPD, indirekter Einschlag LPZ 1	66
Tabelle 7-6: Berechnung von I_{pi} , spannungsbegrenzender SPD, indirekter Einschlag LPZ 0	66
Tabelle 7-7: Berechnung von I_{pi} , spannungsbegrenzender SPD, $l > 0,5m$	67
Tabelle 7-8: Berechnung von I_{pi} , spannungsschaltender SPD	68
Tabelle 9-1: Berechnung der induzierten Spannung/Strom für die Ladesäule 1, Energieversorgungsleitung - Ethernetleitung	73
Tabelle 9-2: Berechnung der induzierten Spannung/Strom für die Ladesäule 1, Energieversorgungsleitung - Ethernetleitung	75
Tabelle 10-1: Schutz für indirekten Blitzeinschlag, AC-Ladesäule [23]	78
Tabelle 10-2: Schutz für indirekten Blitzeinschlag, DC-Ladesäule [23]	79
Tabelle 10-3: Schutz für indirekten Blitzeinschlag, Datenleitung 1 [23]	80
Tabelle 10-4: Schutz für indirekten Blitzeinschlag, Datenleitung 1 [23]	81
Tabelle 10-5: Schutz für direkten Blitzeinschlag, AC-Ladesäule 1 [23]	83
Tabelle 10-6: Schutz für direkten Blitzeinschlag, AC-Ladesäule 2 [23]	84
Tabelle 10-7: Schutz für direkten Blitzeinschlag, DC-Ladesäule [23]	84