



Anna Aigner, BSc

Die Auswirkungen von Blitzströmen auf den menschlichen Körper am Beispiel von Blitzopfern in der Steiermark

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Biomedical Engineering

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jörg Schröttner
Institut für Health Care Engineering mit Europaprüfstelle für Medizinprodukte

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack
Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

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/Diplomarbeit/Dissertation identisch.

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

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Die Technische Universität Graz übernimmt mit der Betreuung und Bewertung einer Masterarbeit keine Haftung für die erarbeiteten Ergebnisse: Eine positive Bewertung und Anerkennung (Approbatation) einer Arbeit bescheinigt nicht notwendigerweise die vollständige Richtigkeit der Ergebnisse.

Informationen zur DSGVO

Verarbeitung personenbezogener Daten

Auf Basis der EU-Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) mit Wirksamkeit ab 25. Mai 2018, welche europaweit und somit auch in Österreich die Regelungen für die Verarbeitung personenbezogener Daten vereinheitlicht, wird darüber informiert, dass für die vorliegende Masterarbeit eine anonymisierte Datenbasis zur Verfügung gestellt wurde und daher keine personenbezogenen Daten verwendet wurden. Aufgrund dieser Vorgangsweise können weder die Leser oder Leserinnen noch die Autorin dieser Arbeit Rückschlüsse auf personenbezogene Daten ziehen.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während der gesamten Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst möchte ich mich bei meinen beiden Betreuern Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack und Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jörg Schröttner für die wissenschaftliche und fachliche Unterstützung während meiner Masterarbeit bedanken.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-HTL-Ing. Gottfried Kindermann von der Landesstelle für Brandverhütung in Steiermark für die enge Zusammenarbeit, die zahlreichen fachlichen Informationen, wissenschaftlichen Diskussionen und persönlichen Erfahrungen in diesem Fachbereich, mit denen er mich während der gesamten Bearbeitungszeit unterstützt hat. Ohne seine Mithilfe wäre diese Masterarbeit nicht zustande gekommen.

Bei ALDIS (Austrian Lightning Detection & Information System) in Wien gilt mein Dank speziell Herrn Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Diendorfer, der mir für eine vollständige Auswertung der Blitzunfälle die fehlenden Blitzortungsdaten zur Verfügung gestellt hat und der für meine Fragen immer ein offenes Ohr hatte.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie und meinen Freunden, die mich während dieser Zeit immer beraten und mir geholfen haben. Abschließend möchte ich mich besonders bei meinen Eltern bedanken, die mir das Studium überhaupt ermöglicht und mich in allen Entscheidungen unterstützt haben.

Die Auswirkungen von Blitzströmen auf den menschlichen Körper am Beispiel von Blitzopfern in der Steiermark

Blitzeinschläge bringen oft eine große Gefahr für den Menschen und seine Umwelt mit sich. Bei den zahlreichen Blizzentladungen in der Steiermark kommt es auch immer wieder zu direkten oder indirekten Blitzeinschlägen, bei denen Personen beteiligt sind. Die meisten durch Blitzschlag geschädigten Menschen überleben, tragen aber unterschiedlich schwere Gesundheitsschäden davon. Im Zeitraum von 2000 und 2017 ereigneten sich 22 Blitzunfälle mit 55 Blitzopfern, von denen vier Personen den Blitzeinschlag bzw. dessen Folgen nicht überlebten. In der vorliegenden Masterarbeit werden die Auswirkungen der Blitzströme auf den menschlichen Körper anhand der Blitzunfälle in der Steiermark beschrieben und dabei der Unfallhergang und die medizinischen Folgen diskutiert. Die Blitzunfälle werden anschließend nach verschiedenen Parametern und Eigenschaften, wie unter anderem Tageszeit der Unfälle, Alter und Geschlecht der Blitzopfer, Energieübertragungsmechanismus auf den menschlichen Körper, sichtbare Blitzspuren und Blitzstromamplituden der detektierten Teilblitze, ausgewertet und mit Angaben aus der Literatur verglichen. Durchschnittlich wurden 2 Personen pro Jahr durch eine direkte oder indirekte Wirkung eines Blitzeinschlages verletzt. Es konnte gezeigt werden, dass die Amplitude der Blizzentladung nicht für die Schwere oder das Überleben eines Blitzunfalls ausschlaggebend ist.

Schlüsselwörter: Blitzunfall, Stromwirkungen, Blitzstromparameter, pathophysiologische Veränderungen, Steiermark

The effects of lightning currents on the human body using the example of victims of lightning strikes in Styria

Lightning strikes often pose a great risk to humans and their surroundings. Due to the numerous lightning strikes in Styria individuals are occasionally struck directly or indirectly by lightning. The majority of the victims survives, however carrying away damages to health, varying in their severity. In the time period from 2000 to 2017 22 lightning accidents with 55 lightning victims occurred, with four of the victims not surviving the accidents or their consequences. In the present master thesis, the effects of lightning currents on the human body using the example of victims of lightning strikes in Styria are described. Furthermore, the circumstances of the accidents and their medical consequences are discussed. Afterwards, the lightning accidents are analyzed, focusing on several parameters and characteristics, such as daytime of the accident, age and gender of the victims, mechanisms of energy transmission to the human body, visible trails of the lightning current and amplitudes of the lightning current of the detected strokes. To conclude, the analysis of the accidents is compared to statements from the literature. On average, 2 people per year were injured by direct or indirect lightning strikes. It could be shown that the amplitude of the lightning stroke is not crucial for the severity of the accidents or the survival of the victims.

key words: lightning accident, current effects, characteristics of lightning current, pathophysiological changes, Styria

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	3
3	Blitzphysik	4
3.1	Blitzentladung	4
3.2	Multiplizität von Blitzen	6
3.3	Dauer einer Entladung	9
3.4	Blitzstromparameter	9
3.4.1	Blitzstromamplitude	10
3.4.2	Ladung des Blitzstromes	10
3.4.3	Steilheit des Blitzstromanstieges	11
3.4.4	Spezifische Energie des Blitzstromes	12
3.5	Blitzortung in Österreich	12
3.6	Blitzdichte und Blitzhäufigkeit	13
3.7	Energieübertragungsmechanismen bei einem Blitzunfall	16
4	Stromwirkungen auf den menschlichen Organismus	21
4.1	Stromart	21
4.2	Stromstärke	22
4.3	Spannungshöhe	26
4.4	Einwirkdauer des Stromes	26
4.5	Stromweg durch den Körper	27
4.6	Widerstand des Gewebes	28
4.7	Übergangswiderstand	32
5	Pathophysiologische Veränderungen durch Blitzeinwirkung	33
5.1	Augen und Ohren	33
5.2	Herz-Kreislauf-System	34
5.3	Respiratorisches System	36
5.4	Haut	36
5.4.1	Verbrennungen durch metallische Gegenstände am Körper	37
5.4.2	Lichtenberg-Figuren	38
5.5	Nervensystem	39
5.6	Psychologische Folgen	40
5.7	Stumpfes Trauma	40
5.8	Letalität von Blitzunfällen	40

5.9	Gegenüberstellung der Unterschiede der Verletzungsmuster bei Niederspannung, Hochspannung und einem Blitzeinschlag	42
6	Methoden	44
6.1	Informationen über die Unfalldaten	44
6.2	Auswertung der Blitzortungsdaten	45
7	Blitzunfälle mit Personenschäden in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017	47
7.1	Überblick über die Blitzunfälle	47
7.2	Unfall 1 - 2000	48
7.3	Unfall 2 - 2001	49
7.4	Unfall 3 - 2003	51
7.5	Unfall 4 - 2004	53
7.6	Unfall 5 - 2005	56
7.7	Unfall 6 - 2005	59
7.8	Unfall 7 - 2005	60
7.9	Unfall 8 - 2007	63
7.10	Unfall 9 - 2008	64
7.11	Unfall 10 - 2008	67
7.12	Unfall 11 - 2008	70
7.13	Unfall 12 - 2009	72
7.14	Unfall 13 - 2009	74
7.15	Unfall 14 - 2010	75
7.16	Unfall 15 - 2010	77
7.17	Unfall 16 - 2012	80
7.18	Unfall 17 - 2013	84
7.19	Unfall 18 - 2014	86
7.20	Unfall 19 - 2015	89
7.21	Unfall 20 - 2015	91
7.22	Unfall 21 - 2015	92
7.23	Unfall 22 - 2017	93
7.24	Zusammenfassung aller Blitzunfälle	95
8	Ergebnisse der Auswertung der Blitzunfälle	100
8.1	Verteilung der Blitzunfälle und der Blitzopfer nach Jahren	100
8.2	Verteilung der Blitzunfälle und der Blitzopfer nach Monaten	101
8.3	Verteilung der Blitzunfälle und der Blitzopfer nach der Tageszeit	103

8.4	Verteilung der Blitzeunfälle nach dem Wetter unmittelbar vor dem Unfallzeitpunkt	104
8.5	Verteilung der Blitzeopfer nach dem Geschlecht	105
8.6	Verteilung der Blitzeopfer nach dem Alter	107
8.7	Verteilung der Blitzeopfer nach dem Energieübertragungsmechanismus . . .	108
8.8	Verteilung der Blitzeunfälle nach der Tätigkeit der Blitzeopfer zum Unfallzeitpunkt	110
8.9	Verteilung der Blitzeunfälle nach dem Unfallort	112
8.10	Verteilung der Blitzeopfer nach sichtbaren Blitze Spuren	113
8.11	Verteilung der dokumentierten Verletzungsmuster der Blitzeopfer	114
8.12	Verteilung der Blitzeunfälle nach der Blitze Stromamplitude	115
9	Diskussion	117
10	Zusammenfassung	125
	Literaturverzeichnis	127
	Abbildungsverzeichnis	131
	Tabellenverzeichnis	135

1 Einleitung

Blitzeinschläge bringen oft eine große Gefahr für den Menschen und seine Umwelt mit sich. Es ist denkbar, dass es Blitzentladungen bereits vor der Entwicklung der Menschheit auf der Erde gab. Bei älteren Zivilisationen traten Blitz und Donner in ihrer Mythologie immer wieder auf und sie banden diese in ihre Religionen mit ein. Des Weiteren wurde vom Mittelalter bis in die Neuzeit häufig von Blitzeinschlägen in Objekte, vor allem Kirchen und Schiffe, berichtet. Dabei starben auch einige Personen, die zum Beispiel während eines Gewitters die Kirchenglocken läuteten. Bereits Mitte des 18. Jahrhunderts entwickelte Benjamin Franklin einen ersten Blitzableiter für Gebäude und entdeckte, dass Blitze in Wolken entstehen, meist in negativ geladenen Bereichen. Von dieser Zeit an wurde an den unterschiedlichsten Orten der Erde an der Entstehung der Blitze geforscht und das Blitzschutzsystem verbessert. Die Fotografie war ausschlaggebend für die weiteren Entdeckungen der Eigenschaften von Blitzentladungen. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts konnten erste Messungen des Verlaufs des elektrischen und magnetischen Feldes durchgeführt werden. K. Berger lieferte mit seiner Forschung am Monte San Salvatore (Schweiz) die umfangreichsten Daten über den Blitzstromverlauf. Bis heute forschen Wissenschaftler aus aller Welt an der Entstehung und den Eigenschaften der Blitzentladungen, welche noch nicht genau geklärt werden konnten. [1]

Blitze schlagen ungefähr 100 Mal pro Sekunde weltweit auf die Erde ein [1]. Die Anzahl der in Österreich georteten Blitze variierte in den vergangenen Jahren in etwa zwischen 100.000 und 280.000. Dabei zeigt die Blitzdichte regional starke Unterschiede. Die Gebiete mit den größten Blitzdichtewerten in Österreich liegen in der Steiermark und in Kärnten. In der Steiermark liegt die mittlere Blitzdichte der Jahre 2010 bis 2016 laut den Aufzeichnungen von ALDIS (Austrian Lightning Detection & Information System) bei 2,2 Wolke-Erde-Blitzen (Flashes) pro Jahr und km^2 . [2]

Bei den zahlreichen Blitzentladungen in der Steiermark kommt es auch immer wieder zu direkten oder indirekten Blitzeinschlägen, bei denen Personen beteiligt sind. Die meisten durch einen Blitzeinschlag geschädigten Menschen überleben, tragen aber unterschiedlich schwere Gesundheitsschäden davon.

In der vorliegenden Masterarbeit werden diese Auswirkungen der Blitzströme auf den menschlichen Körper anhand der Blitzunfälle mit Personenschäden in den vergangenen Jahren (2000 bis 2017) in der Steiermark beschrieben und nach verschiedenen Parametern ausgewertet. Die Grundlage für die Auswertung der Auswirkungen der Blitzströme auf den menschlichen Körper bildet eine anonymisierte Datenbank, in welcher die überlebenden und verstorbenen Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017

enthalten sind. Aus dieser Datenbasis können unter anderem Informationen wie das Alter, das Geschlecht, der genaue Unfallzeitpunkt und der Unfallhergang entnommen werden.

Da diese Arbeit sowohl die medizinischen und biologischen Eigenschaften des Menschen, die Auswirkungen von Strömen auf den Körper als auch die elektrotechnischen Eigenschaften der Blitzentladung vereint, wird diese in Zusammenarbeit zweier Institute der Technischen Universität Graz, dem Institut für Health Care Engineering und dem Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, durchgeführt.

2 Aufgabenstellung

Da es bei den zahlreichen Blitzentladungen in der Steiermark auch immer wieder zu direkten oder indirekten Blitzeinschlägen kommt, bei denen Personen beteiligt sind, werden die Auswirkungen der Blitzströme auf den menschlichen Körper in dieser Masterarbeit ausgearbeitet. Die meisten durch einen Blitzeinschlag geschädigten Menschen überleben, tragen aber unterschiedlich schwere Gesundheitsschäden davon.

In der vorliegenden Masterarbeit soll neben den medizinischen Aspekten der Auswirkungen der verschiedenen Blitzeinwirkungen auch auf die Blitzphysik und den Mechanismus der Blitzentladung eingegangen werden. Des Weiteren werden die unterschiedlichen Verletzungsmuster eines Niederspannungs-, eines Hochspannungs- und eines Blitzunfalls verglichen.

Der Schwerpunkt der Masterarbeit liegt in der Beschreibung und Diskussion der Auswirkungen der Blitzströme auf den menschlichen Körper anhand von Blitzunfällen mit Personenschäden in den vergangenen Jahren (2000 bis 2017) in der Steiermark. Dazu werden die Blitzunfälle einzeln beschrieben und der Unfallhergang und die medizinischen Folgen diskutiert. Die Blitzunfälle werden anschließend nach verschiedenen Parametern und Eigenschaften ausgewertet. Dabei wird auf das Monat und Jahr, die Tageszeit der Unfälle, die Anzahl der betroffenen Blitzopfer, deren Alter und Geschlecht, den Energieübertragungsmechanismus auf den menschlichen Körper, die Tätigkeit und Körperhaltung der Blitzopfer zum Zeitpunkt des Blitzunfalls, den Unfallort (im Freien oder innerhalb eines Gebäudes) und dessen Umgebung, die Bekleidung und Schuhe der Blitzopfer, sichtbare Blitzspuren am Körper, an der Kleidung und an Gegenständen, die die Blitzopfer bei sich trugen, die Verletzungen und medizinischen Folgen und die Blitzstromamplituden der detektierten Teilblitze eingegangen. Abschließend werden die Ergebnisse der Auswertungen der genannten Eigenschaften diskutiert und mit Fallbeispielen und Studien aus der Literatur verglichen.

3 Blitzphysik

In diesem Kapitel wird im Überblick beschrieben, wie Blitze entstehen, durch welche Parameter Blitzereignisse charakterisiert werden können, wie häufig sie vorkommen und welche Energieübertragungsmechanismen bei einem Blitzunfall auftreten können.

3.1 Blitzentladung

Ein Blitz ist eine natürliche atmosphärische Entladung, welche zwischen positiv und negativ geladenen Regionen auftritt. Sie hängt von einem komplizierten Zusammenspiel aus Aufwind, Feuchtigkeit, atmosphärischer Instabilität, Temperatur und weiteren Faktoren ab.

Bei einer Blitzentladung unterscheidet man zwischen Wolke-Erde- und Wolke-Wolke-Entladungen. Der Großteil der Entladungen, ungefähr drei Viertel, erreichen nicht den Boden und finden innerhalb der Gewitterwolke statt. Die für die Blitzunfälle auf der Erde verantwortlichen Blitzentladungen ereignen sich zwischen Wolke und Erde. Je nach Polarität der Ladung und Vorwachsrichtung des Leitblitzes können vier verschiedene Arten einer Blitzentladung zwischen Erde und Wolke identifiziert werden (siehe Abbildung 1). Diese vier Typen sind (a) negativer Abwärtsblitz, (b) negativer Aufwärtsblitz, (c) positiver Abwärtsblitz und (d) positiver Aufwärtsblitz.

Etwa 90 % oder mehr aller Wolke-Erde-Entladungen transportieren negative Ladung von der Wolke zur Erde und nur 10 % oder weniger positive Ladung. Die Blitzentladung, die bis heute nicht vollständig erforscht ist, wurde bisher anhand des negativen Abwärtsblitzes am genauesten untersucht. [1, 3]

Wie bereits erwähnt, existieren neben den Abwärtsblitzen auch die sogenannten Aufwärtsblitze (siehe Abbildung 1 (b) und (d)). Diese entstehen nur an hohen Objekten (höher als 100 m) oder an Objekten mittlerer Höhe, welche sich auf Berggipfel befinden und entwickeln sich von der Spitze dieser Objekte zur Wolke hinauf (auch Erde-Wolke-Blitz genannt). Diese Form der Blitzentladung kann nur stattfinden, wenn das elektrische Feld höher als der Durchschlagwert an der Spitze des Objekts ist und dadurch die notwendige Feldstärke für eine Blitzentladung erreicht wird. Der Entladungskanal des positiven Aufwärtsblitzes ist negativ geladen, jener des negativen Aufwärtsblitzes positiv. [1, 3]

Da Aufwärtsblitze nur einen geringen Anteil aller Entladungen zwischen Erde und Wolke aufweisen und sehr wenige bis gar keine Blitzunfälle mit Personen verursachen, wird im Weiteren nicht genauer auf diese Form eingegangen.

Jeder Abwärtsblitz besteht unter anderem aus einem zur Erde hinab gerichteten Leitblitz. Wie in Abbildung 1(a) und 1(c) ersichtlich, entwickelt sich dieser Leitblitz aus dem unteren, negativ geladenen Teil der Gewitterwolke bei einem negativen Abwärtsblitz und

aus dem oberen, positiv geladenen Teil der Gewitterwolke bei einem positiv geladenen Abwärtsblitz. [1, 3]

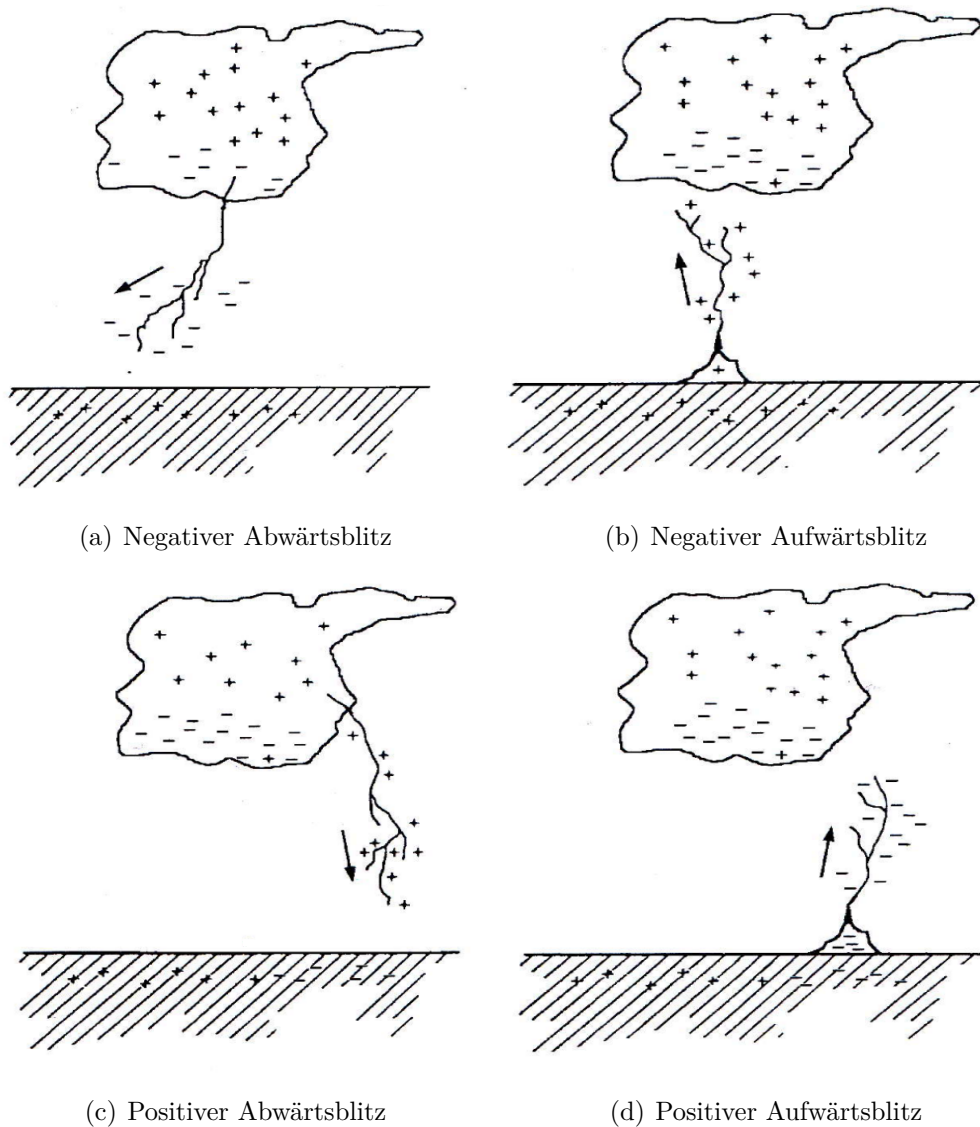


Abbildung 1: Vier Typen der Blitzentladungen zwischen Wolke und Erde. In jeder Bildunterschrift sind die Ausbreitungsrichtung des Leitblitzes und die Polarität der Entladung angegeben. [1]

Der erste, absteigende Leitblitz (*engl. stepped leader*) einer Entladung wächst in Ruckstufen und mit unterschiedlich ausgeprägter Verästelung abwärts Richtung Erde. Die einzelnen Stufen erreichen Längen im Bereich von 10 m bis 200 m und weisen eine Vorwachsgeschwindigkeit von $0,1\text{ m}/\mu\text{s}$ bis $3\text{ m}/\mu\text{s}$ auf. Der zeitliche Abstand der einzelnen Ruckstufen liegt zwischen $37\text{ }\mu\text{s}$ und $124\text{ }\mu\text{s}$ (siehe Abbildung 2(a)), laut [4] beträgt der Abstand einige $10\text{ }\mu\text{s}$.

Erreicht dieser Leitblitz die Erde bzw. die Fangentladung (siehe Abbildung 2(b)), erhöht

sich die elektrische Feldstärke an jenen Teilen an der Erdoberfläche, welche sich sehr nahe zum Leitblitz befinden. Die elektrische Feldstärke ist so groß, dass die elektrische Festigkeit der Luft überschritten wird und dem Leitblitz wächst die Fangentladung entgegen. Durch Zusammentreffen dieser mit dem Leitblitz wird der Entladungskanal vollständig geschlossen und es fließt ein impulsförmiger Stoßstrom durch oder über das getroffene Objekt auf der Erde - es kommt zu einem Blitzeinschlag. Dies wird auch als Hauptentladung (*engl. return stroke*), welche sich vom Einschlagpunkt auf der Erde mit einer mittleren Geschwindigkeit von $130\text{ m}/\mu\text{s}$ in Richtung Wolke bildet, bezeichnet (siehe Abbildung 2(c)). Während der Hauptentladung wird die im Blitzkanal gespeicherte Ladung in Richtung Erde transportiert. Bei diesem Vorgang entstehen Temperaturen von ca. $30\,000\text{ }^\circ\text{C}$ im Blitzkanal und es kommt zu einem hohen Überdruck, welcher sich durch eine Stoßwelle, dem Donner, ausgleicht. [1, 2, 3]

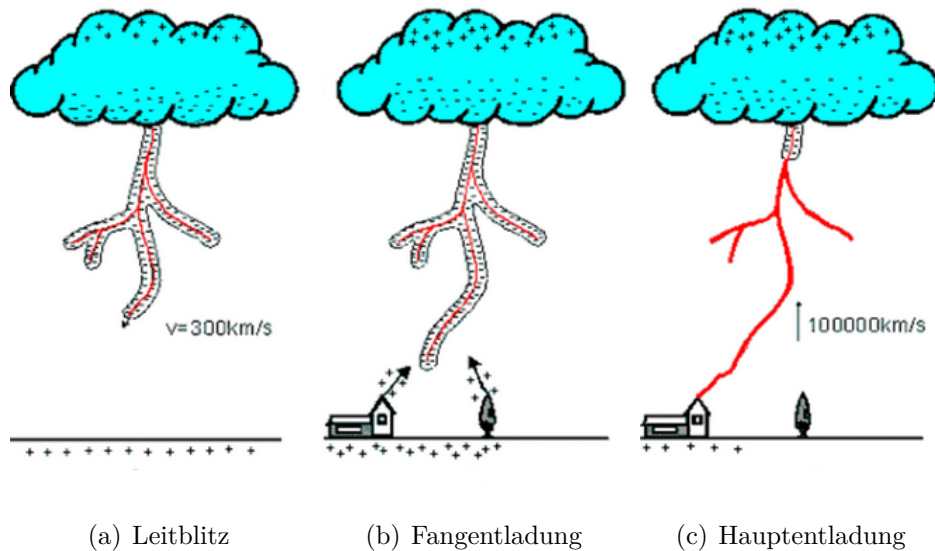


Abbildung 2: Vorgang der Blitzentladung eines negativen Abwärtsblitzes. [2]

3.2 Multiplizität von Blitzen

Oft folgt nach einem bestimmten zeitlichen Abstand ein weiterer Leitblitz, welcher in dem bereits vom Erstblitz vorionisierten Blitzkanal kontinuierlich mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von etwa $3\text{ m}/\mu\text{s}$ abwärts wächst (*engl. dart leader*). Durch diesen weiteren Leitblitz wird der Blitzkanal erneut mit Ladung gefüllt und durch den dadurch resultierenden Folgeblitz (*engl. subsequent stroke*) entladen. Der Vorgang wiederholt sich so oft, bis die Wolke vollständig entladen ist. Die durchschnittliche Anzahl an einzelnen Entladungen pro Blitz wird als Multiplizität bezeichnet. Der Blitzstrom eines multiplen negativen Abwärtsblitzes mit mehreren Stoßströmen und einem Langzeitstrom ist in Ab-

bildung 3 dargestellt. [2]

Der zeitliche Abstand zwischen den Teilentladungen wird in der Literatur meist mit ungefähr 60 ms (laut [5]; 61 ms in Publikation [6] - ermittelt aus 264 negativen Wolke-Erde-Entladungen in Brasilien) beschrieben. [2] gibt einen Wert von 35 ms an, [7] ermittelt aus 92 untersuchten multiplen Blitzen in Österreich einen Wert von 87 ms .

Die Mehrheit der negativen Abwärtsblitze sind multiple Blitze, das bedeutet, dass durchschnittlich neben dem Erstblitz bis zu drei Folgeblitze (ALDIS - 2,7 Folgeblitze pro Entladung [8]) auftreten. Positive Abwärtsblitze haben hingegen meistens nur einen Leitblitz ohne nachfolgende Teilblitze. Die Werte der Stoßströme der einzelnen Folgeblitze sind in der Regel deutlich kleiner als jene der Erstblitze. [1, 3]

In einer Studie über Eigenschaften europäischer Wolke-Erde-Entladungen [9] (32 Millionen Wolke-Erde-Entladungen aufgenommen von 2006 bis 2012 in Europa) wird ein Mittelwert an Teilblitzen pro Entladung von 2,1 für negative Blitze angegeben. Saba et al. [6] untersuchte in seiner Studie 264 negative Wolke-Erde-Entladungen an 27 Tagen mit Gewitteraktivität in den Jahren 2003 und 2004 in Brasilien und erhielt aus diesen Daten einen Mittelwert von 3,8. Ballarotti et al. [10] untersuchte 883 negative Wolke-Erde-Entladungen in unterschiedlichen Regionen der Welt und gibt eine mittlere Anzahl von 4,6 Teilblitzen pro Entladung an.

Des Weiteren kann auf einen Stoßstrom ein sogenannter Langzeitstrom (*engl. continuing current*) folgen, welcher ebenfalls Ladung von der Wolke zur Erde transportiert. Dieser kann als quasi-stationärer Lichtbogen zwischen dem Ladezentrum der Wolke und der Erde betrachtet werden. Die typischen Stromamplituden liegen im Bereich von 10 A bis einige 100 A und weisen demnach viel geringere Stromamplituden als die Stoßströme auf. Die zeitliche Dauer ist jedoch mit einigen 100 ms viel länger. [1, 3]

Laut [4] bezeichnet man einen Blitz ab einer Dauer von 2 ms als einen Langzeitstrom. Dies stimmt jedoch nicht mit den Angaben von [11] überein. In diesem Paper wird ab einer Dauer von 3 ms bis maximal 10 ms von einem kurzen Langzeitstrom gesprochen. In dieser Studie wurden 70 negative Wolke-Erde-Entladungen in Österreich untersucht. Dabei wurde ein Mittelwert von $133,0\text{ ms}$ für die Dauer eines Langzeitstromes ermittelt. Der minimale Wert lag bei einer Dauer von 40 ms , die maximale Dauer bei 580 ms . Der Mittelwert für die Dauer eines Langzeitstromes bei positiven Wolke-Erde-Entladungen liegt nach dieser Studie bei 35 untersuchten Entladungen in Österreich bei $124,0\text{ ms}$. Im Vergleich dazu sind in dieser Publikation auch Mittelwerte für Brasilien (Mittelwert aus 59 detektierten negativen Abwärtsblitzen und 20 positiven Abwärtsblitzen) und die USA (Mittelwert aus 36 detektierten negativen Abwärtsblitzen und 45 positiven Abwärtsblitzen) angegeben. Diese betragen für Brasilien $185,1\text{ ms}$ bei negativen Abwärtsblitzen und $262,0\text{ ms}$ bei positiven Abwärtsblitzen, für die USA $197,1\text{ ms}$ und $290,6\text{ ms}$.

In Österreich treten bei etwa 50% der Blitze mehrere Entladungen auf, bei welchen wie-

derum bei etwa 50 % ein Langzeitstrom festgestellt werden kann [2].

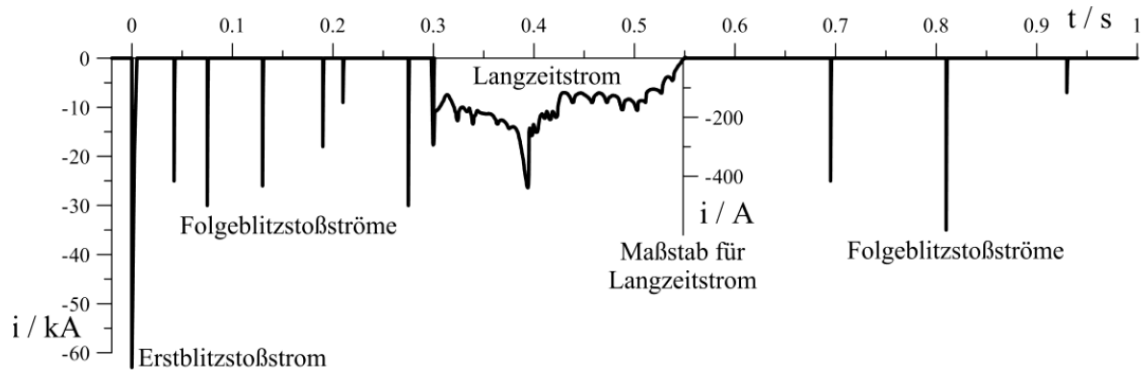


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung eines Blitzstromes eines multiplen negativen Abwärtsblitzes mit mehreren Stoßströmen und einem Langzeitstrom. [12]

Die Folgeblitze schlagen meist am gleichen Ort an der Erdoberfläche ein, sie können aber auch mehrere Einschlagpunkte besitzen. In Studien aus der Literatur wurde gezeigt, dass bis zu 50 % der negativen Wolke-Erde-Entladungen mehr als einen Einschlagsort an der Erdoberfläche aufweisen (laut ALDIS [2] 30 – 50 %). Oft ändert sich der Einschlagpunkt von einem Teilblitz (*Stroke*) zum nächsten. Der Folgeblitz wählt zu Beginn den Entladungskanal des vorigen Teilblitzes und verlässt diesen dann. Die Entfernung zwischen zwei Teilentladungen an der Erdoberfläche kann dabei von wenigen 100 Metern bis zu einigen Kilometern betragen. [2, 5, 6]

Rakov et al. [1] gibt eine Wahrscheinlichkeit von 37 % für einen auf eine Hauptentladung folgenden Folgeleitblitz mit einer Multiplizität von 2 an, dass dieser einen neuen Einschlagpunkt erzeugt (für 63 untersuchte Entladungen). Bei einer Multiplizität von 2 – 4 sinkt diese Wahrscheinlichkeit auf 25 % (bei 155 untersuchten Entladungen), bei einer Multiplizität von 5 oder mehr ist sie 0 % (bei 115 untersuchten Entladungen).

Saba et al. [6] untersuchte in seiner Studie 264 negative Wolke-Erde-Entladungen an 27 Tagen mit Gewitteraktivität in den Jahren 2003 und 2004 in Brasilien und erhielt aus diesen Daten einen durchschnittlichen Wert von 1,70 verschiedenen Einschlagsorten pro Wolke-Erde-Entladung. Mit einer Multiplizität von 3,8 Teilblitzen pro Entladung folgt, dass jeder Einschlagsort an der Erdoberfläche durchschnittlich 2,2 Mal getroffen wird. Schulz et al. [13] gibt einen durchschnittlichen Wert von 1,93 Einschlagpunkten pro Wolke-Erde-Entladung an. In diesem Paper wird aber auch darauf hingewiesen, dass dieser verglichen mit anderen Literaturquellen sehr hoch ist (sonst im Bereich von 1,45 bis 1,7). Der Grund könnte sein, dass in diesem Paper Daten aus nur zwei Gewittern (45 negative Wolke-Erde-Blitze) ausgewertet wurden.

3.3 Dauer einer Entladung

Die Dauer einer Blitzentladung ist in der Literatur unterschiedlich definiert. Saba et al. [6] und Ballarotti et al. [10] definieren sie als das Zeitintervall zwischen dem Auftreten der ersten Teilentladung und dem Ende des Langzeitstromes, welcher, wenn vorhanden, nach der letzten Teilentladung auftritt. Diendorfer et al. [8] definiert die Dauer einer Entladung als das Zeitintervall zwischen dem Beginn der ersten Teilentladung und dem Beginn der letzten Teilentladung.

50 % der ersten negativen Teilentladungen übersteigen eine Dauer von $75 \mu s$. Negative Folgeblitze weisen eine geringere Dauer auf, 50 % dieser übersteigen eine Dauer von $32 \mu s$. Eine Wolke-Erde-Entladung dauert im Gesamten zwischen $0,1 ms$ und $1 s$. [5]

In Publikation [6] wird für 233 untersuchte negative Wolke-Erde-Entladungen an 27 Tagen mit Gewitteraktivität in den Jahren 2003 und 2004 in Brasilien eine mittlere Dauer von $163 ms$ angegeben. Berger et al. [14] gibt eine mittlere Dauer der Blitzentladung von $180 ms$ an und Diendorfer et al. [8] gibt einen mittleren Wert von $175 ms$ für 15 905 untersuchte Teilblitze an.

In Tabelle 1 ist die Dauer einer negativen Blitzentladung anhand von drei Werten, welche zu unterschiedlichen Prozentsätzen (95 %, 50 %, 5 %) diese eingetragenen Werte übersteigen, zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Dauer einer Blitzentladung von negativen multiplen Blitzen [ms] unterschiedlicher Literaturquellen - Prozentsätze der Fälle, welche den angegebenen Wert übersteigen (gemäß einer logarithmischen Normalverteilung), n.a. - nicht angegeben.

	95 %	50 %	5 %
Berger et al. [5]	31	180	900
Diendorfer et al. [8]	23	175	725
Saba et al. [6]	n. a.	163	n. a.
Ballarotti et al. [10]	66	300	1366

3.4 Blitzstromparameter

Die Gefahr, welche von einer Blitzentladung ausgeht, entsteht durch die Eigenschaften des Blitzstromes, durch elektrische und magnetische Felder und durch thermische Einwirkung. Aufgrund des beschriebenen Blitzstromverlaufes lassen sich vier bedeutende Blitzstromparameter ableiten: [3, 4]

- Blitzstromamplitude I_{max} in [kA]
- Ladung des Blitzstromes Q_{Blitz} in [As]
- Steilheit des Blitzstromanstieges di/dt in [kA/ μ s]
- Spezifische Energie des Blitzstromes W/R in [MJ/ Ω]

3.4.1 Blitzstromamplitude

Ein Blitzstrom, welcher aus Stoßströmen und Langzeitströmen besteht, ist ein eingepprägter Strom. Dies bedeutet, dass die Blitzentladung als eine nahezu ideale Stromquelle angesehen werden kann. Werden leitfähige Teile von diesem eingepprägten Strom durchflossen, erzeugt dieser einen Spannungsabfall an dem durchflossenen Leiter, welcher von der Amplitude des Stromes und der Impedanz des durchflossenen Teiles bestimmt wird. [4]

Wie in Abbildung 4 ersichtlich, liegen die Stromamplituden üblicherweise im Bereich von einigen 10 kA. Die Stoßströme von positiven Abwärtsblitzen können aber auch sehr große Amplituden von vereinzelt 200 – 300 kA erreichen, negative Blitze mit Amplituden größer als 100 kA sind hingegen eher selten. [3, 15]

Der Mittelwert von negativen Abwärtsblitzen liegt laut [16] bei $-16,5$ kA, gemessen in Nordamerika. Im Paper [11] wird für 70 gemessene negative Abwärtsblitze in Österreich ein Wert der Stromamplituden von durchschnittlich $-12,2$ kA und durchschnittlich $34,2$ kA für 35 gemessene positive Abwärtsblitze angegeben. Schulz et al. [17] gibt für 154 negative Wolke-Erde-Entladungen einen Medianwert der Blitzstromamplituden von $-11,3$ kA an. Zum Vergleich dazu führt diese Publikation Werte von Brasilien (Mittelwert aus 59 detektierten negativen Abwärtsblitzen und 20 positiven Abwärtsblitzen) und USA (Mittelwert aus 36 detektierten negativen Abwärtsblitzen und 45 positiven Abwärtsblitzen) an. Diese betragen für Brasilien $-11,8$ kA bei negativen Abwärtsblitzen und $49,8$ kA bei positiven Abwärtsblitzen, für die USA $-16,3$ kA und $51,8$ kA. In der Publikation [9] wird ein Median von -14 kA für negative und 13 kA für positive Blitzentladungen, ermittelt aus 32 Millionen Wolke-Erde-Entladungen aufgenommen von 2006 bis 2012 in Europa, angegeben.

3.4.2 Ladung des Blitzstromes

Die Ladung des Blitzstromes Q_{Blitz} besteht aus den Komponenten Stoßladung $Q_{Stoß}$ des Stoßstromes und der Langzeitladung Q_{lang} des Langzeitstromes. Die Ladung

$$Q_{Blitz} = \int i dt \tag{1}$$

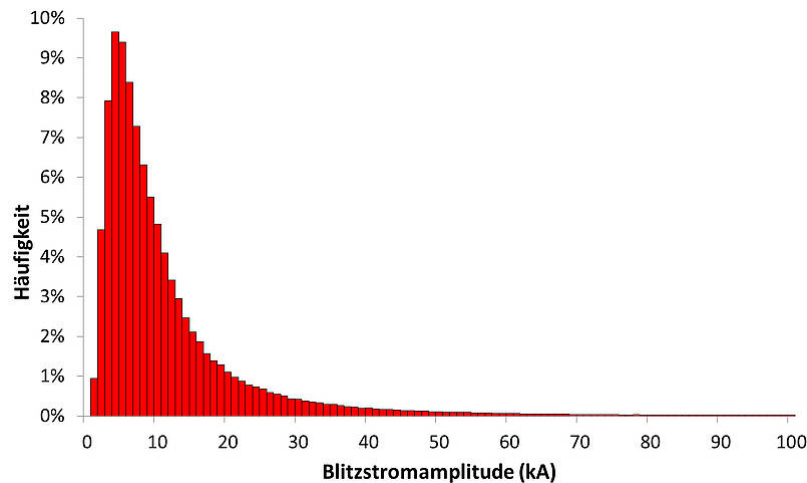


Abbildung 4: Verteilung der Häufigkeit negativer Blitzstromamplituden in Österreich. [2]

des Blitzstromes ist ein Maß für die am Einschlagpunkt umgesetzte Energie, wenn man am Fußpunkt des Lichtbogens einen nahezu konstanten Spannungsabfall annimmt. [3, 4] Die Ladung des Blitzstromes liegt im Bereich von 0,5 bis zu mehreren 100 As [15], bei negativen Abwärtsblitzen oft im Bereich von einigen wenigen Coulomb [11].

In Studie [11] wurde ein Mittelwert der transportierten Ladung während eines Langzeitstromes einer negativen Wolke-Erde-Entladung von 11,6 As (70 untersuchte Blitzentladungen in Österreich) ermittelt. Der Mittelwert der positiven Wolke-Erde-Entladungen liegt bei 50,1 As (35 untersuchte Blitzentladungen in Österreich). Im Vergleich dazu werden auch Mittelwerte aus Brasilien (Mittelwert aus 59 detektierten negativen Abwärtsblitzen und 20 positiven Abwärtsblitzen) und den USA (Mittelwert aus 36 detektierten negativen Abwärtsblitzen und 45 positiven Abwärtsblitzen) angegeben. Diese betragen für Brasilien 21,2 As bei negativen Abwärtsblitzen und 255,4 As bei positiven Abwärtsblitzen, für die USA 10,5 As und 74,9 As.

3.4.3 Steilheit des Blitzstromanstieges

Die Steilheit des Blitzstromanstieges di/dt definiert die Höhe der elektromagnetisch induzierten Spannungen. Diese werden in alle Leiterschleifen, die sich in der Nähe eines stromdurchflossenen Leiters befinden, induziert.

Der Anstieg der Stoßströme auf den Maximalwert erfolgt relativ schnell (zwischen einigen 100 ns bis zu einigen 10 μs , laut [18] liegt die mittlere Anstiegszeit bei 8 – 9 μs), im Gegensatz dazu fallen sie relativ langsam wieder ab (50 – 200 μs). Die zeitliche Dauer der Stoßströme des negativen und positiven Erstblitzes unterscheidet sich auch eindeutig. Jene des negativen Erstblitzes dauern in etwa einige 100 μs , jene des positiven Erstblitzes fließen deutlich länger (bis über 2 ms). Die Stoßströme der Folgeblitze haben wesentlich kürzere Stromanstiegszeiten als jene der Erstblitze und dadurch höhere Stromsteilheiten.

Dies lässt sich dadurch begründen, dass der Erstblitz den Blitzkanal zuerst aufbauen muss (geringere Steilheit des Blitzstromanstieges), der Folgeblitz kann hingegen im bereits vorionisierten Blitzkanal vorwärts wachsen. [3, 4, 15, 18]

Übliche Werte der Stromsteilheit liegen im Bereich von 1 bis 100 $kA/\mu s$ [15]. In Publikation [5] sind folgende maximalen Werte für den ersten negativen Teilblitz angegeben: 95 % übersteigen einen Wert von 5,5 $kA/\mu s$, 50 % übersteigen 12 $kA/\mu s$ und 5 % übersteigen 32 $kA/\mu s$. Bei positiven Entladungen liegen die Werte der Steilheit des Stromanstieges für die selben Prozentsätze bei 0,2 $kA/\mu s$, 2,4 $kA/\mu s$ und 32 $kA/\mu s$.

3.4.4 Spezifische Energie des Blitzstromes

Die freigesetzte Energie des Blitzstromimpulses W/R ist definiert als das Zeitintegral des Quadrates des Blitzstromes i über die gesamte Dauer einer Blitzentladung:

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

Sie ist ausschlaggebend für die Wärmeentwicklung in und mechanischen Kraftwirkungen auf einen stromdurchflossenen Leiter. Die spezifische Energie des Stoßstromes legt die Belastung, welche eine irreversible oder reversible Deformation der getroffenen Teile oder Objekte verursachen kann, fest. [3, 4]

Typische Werte der spezifischen Energie liegen im Bereich von 10^3 bis $10^7 A^2 s$ ($A^2 s = J/\Omega$). Für den Gefährdungspegel LPL I (Lightning Protection Level) wird für den ersten Stoßstrom ein maximaler Wert von 10 MJ/Ω angegeben. [15]

3.5 Blitzortung in Österreich

In Österreich werden die Blitzentladungen mithilfe des Blitzortungssystems ALDIS (Austrian Lightning Detection & Information System) seit 1992 aufgezeichnet. Dazu sind in Österreich acht *Sensoren* aufgestellt, welche zur Bestimmung des Feldeinfallswinkels und des exakten Ereigniszeitpunktes notwendig sind. Des Weiteren besteht das Ortungssystem aus dem *Lightning Processor*, welcher aus den Sensordaten den Einschlagpunkt berechnet. Als dritte Komponente wird ein *Display System* zur Darstellung der Gewitteraktivität benötigt. [2]

Jeder Blitz, der von einem Sensor detektiert wird, wird mit dem genauen Zeitpunkt des Einschlages versehen (mithilfe von laufender Synchronisation der GPS-Satelliten ist ein absoluter Zeitfehler von weniger als 300 ns möglich) und zum Lightning Processor übertragen. Sobald für einen Blitzschlag Daten von zwei oder mehr Sensoren zur Verfügung stehen, ist es möglich, den genauen Einschlagpunkt zu bestimmen. Die genaue Funktionsweise der Blitzortung in Österreich kann in zahlreichen Publikationen oder in [2]

nachgelesen werden.

Durch den Lightning Processor erhält man für jede erkannte Blitzentladung folgende Informationen: [2]

- Koordinaten des Einschlagpunktes
- Uhrzeit
- Polarität (positiv/negativ)
- Blitzstromamplitude in kA

In Österreich werden alle einzelnen Teilblitze (Erstblitz und anschließende Folgeblitze) getrennt voneinander geortet. Nach der Detektion werden diese zu einem Blitz (Flash) zusammengefasst. Die Gruppierung zu einem Flash erfolgt aufgrund eines Zeitkriteriums (alle Teilblitze innerhalb einer definierten Zeitspanne) und Ortskriteriums (alle Teilblitze innerhalb eines definierten Radius).

Aufgrund der großen Anzahl der Sensoren kann eine hohe Ortungsgenauigkeit von 100 – 200 m erreicht werden [2]. Schulz et al. [17] gibt eine mittlere Ortungsgenauigkeit von 120 m für die Messungen am Gaisberg-Sender in Österreich an.

Das europäische Blitzortungssystem EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection) gibt eine mittlere Ortungsgenauigkeit im Bereich von 100 m bis 600 m und eine Wahrscheinlichkeit von 95 % oder mehr für die erfolgreiche Detektion eines negativen Blitzes (*engl. detection efficiency*) an. [9]

In Publikation [13] wird eine Detection Efficiency von 98 % für 45 stattgefundene negative Wolke-Erde-Entladungen im Sommer 2009 in Österreich angegeben und eine Detection Efficiency von 84 % für 135 negative Teilentladungen. Schulz et al. [17] gibt für 154 negative Wolke-Erde-Entladungen in Österreich ebenfalls eine Detection Efficiency von 98 % und eine Detection Efficiency von 83 % für 540 negative Teilentladungen an.

3.6 Blitzdichte und Blitzhäufigkeit

Nach [2] wird die Definition der Blitzdichte wie folgt festgelegt:

„Die ‚Blitzdichte‘ ist definiert als die mittlere Anzahl der Blitzschläge pro km^2 und Jahr.“

Mithilfe von folgendem Zusammenhang (3) kann die Erd-Blitzdichte bestimmt werden: [9]

$$N_g = a T_d^b \quad [km^{-2} Jahr^{-1}] \quad (3)$$

mit N_g Erd-Blitzdichte [$km^{-2}Jahr^{-1}$], T_d Anzahl an beobachteten Tagen mit Gewitteraktivität [$Jahr^{-1}$]; a und b sind Variablen, welche von verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel der geographischen Region, abhängen.

Die Publikationen [5] und [19] geben für die beiden Parameter die Werte $a = 0,04$ und $b = 1,25$ für Europa an.

Im Zeitraum von 1992-2017 wurden in Österreich insgesamt etwa 4.300.000 Blitze von ALDIS geortet. Mittelt man diese Anzahl über die gesamte Fläche von Österreich ($83.879 km^2$), würde man eine durchschnittliche Blitzdichte von etwa 2 Blitzen pro km^2 und Jahr erhalten. Die Blitzdichte variiert aber von Region zu Region. In Österreich liegen die Regionen mit den größten Blitzdichtewerten (mehr als 4 Blitze pro km^2 und Jahr) in Kärnten und der Steiermark, jene mit den geringsten in Wien (etwa 0,75 pro km^2 und Jahr). [2]

Abbildung 5 stellt die mittlere Blitzdichte der Steiermark in Blitze pro km^2 und Jahr im Zeitraum von 2000 bis 2017 farblich dar, ermittelt aus den Blitzdaten von ALDIS über diesen Zeitraum. Auffällig ist, dass der Bezirk Weiz die höchste Blitzdichte aufweist, gefolgt von Graz-Stadt, Graz-Umgebung und Voitsberg.

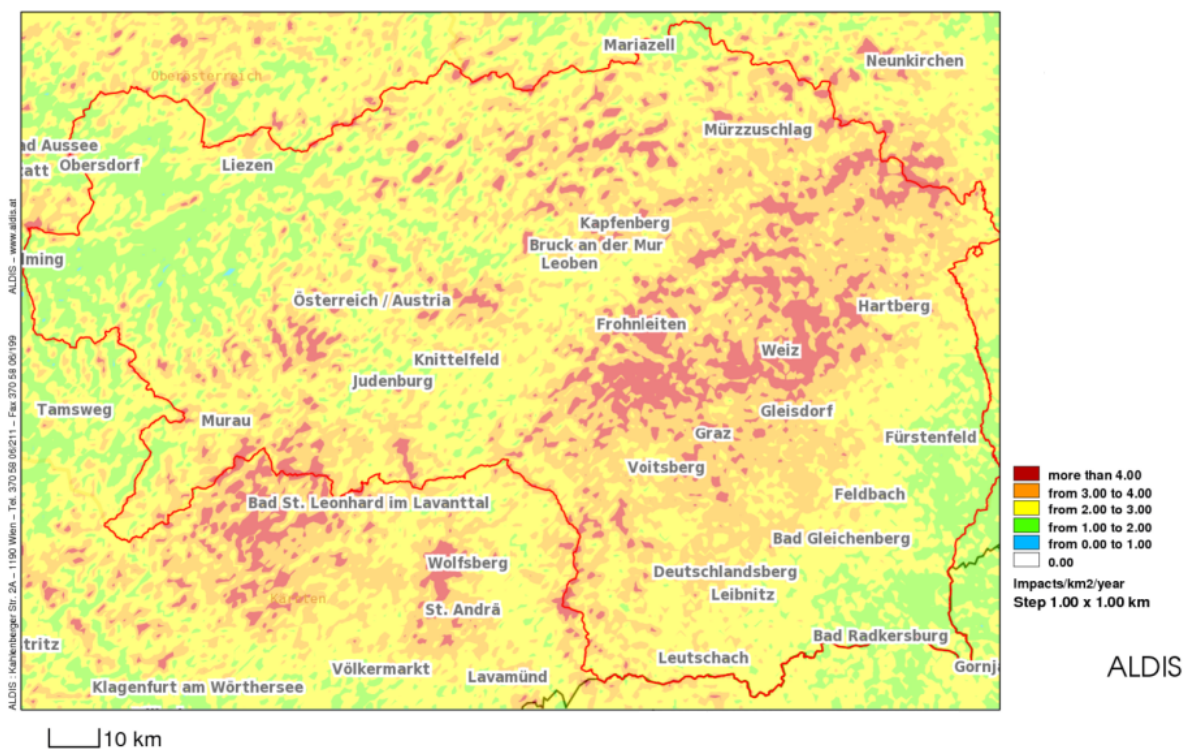


Abbildung 5: Mittlere Blitzdichte in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 - Anzahl der Blitze pro km^2 und Jahr basierend auf den von ALDIS im angegebenen Zeitraum georteten Blitzen. [2]

In Abbildung 6 ist ein Vergleich der Bundesländer von Österreich im Bezug auf die Blitz-

dichte und die Blitzopfer eines Blitzunfalls pro Jahr im Zeitraum von 2001 bis 2010 dargestellt. Wie bereits beschrieben ist auch hier ersichtlich, dass die höchste Blitzdichte in der Steiermark auftritt, gefolgt von Kärnten. Dadurch treten in diesen Regionen auch die meisten Blitzunfälle mit Personenbeteiligungen auf.

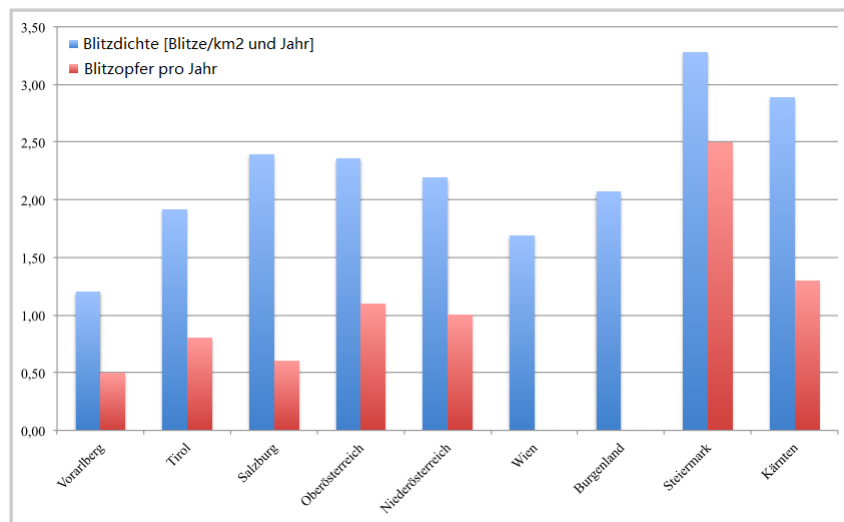


Abbildung 6: Vergleich der Bundesländer von Österreich im Bezug auf den Medianwert der Blitzdichte (Blitze pro km^2 und Jahr) und den Mittelwert der Blitzopfer pro Jahr im Zeitraum von 2001 bis 2010. Vgl. [20]

Die mittlere Blitzdichte der Wolke-Erde-Entladungen, welche aus Messungen mit dem Blitzortungsverfahren ermittelt wird, variiert über dem europäischen Kontinent. Die höchste Blitzdichte in Europa herrscht im Dreiländereck Österreich, Italien und Slowenien. Die weltweit höchste Blitzdichte liegt bei 250 Entladungen pro km^2 und Jahr (Wolke-Wolke- und Wolke-Erde-Entladungen) in Venezuela. Daraus ergibt sich ein Wert von ungefähr 56 Wolke-Erde-Entladungen pro km^2 und Jahr. [9, 21]

Die höchste Blitzaktivität in Österreich tritt von Mai bis September auf (siehe Abbildung 7). Schulz et al. [19] gibt an, dass 96 % aller Wolke-Erde-Entladungen in diesen Monaten auftreten. Die Gewittersaison erreicht ihr höchstes Ausmaß im Juli, das Minimum an Entladungen zeichnet sich im Dezember und Jänner ab. Die tägliche Aktivität nimmt ab 10:00 Uhr Lokalzeit zu, erreicht ihren Höhepunkt um etwa 16:00 Uhr Lokalzeit und nimmt dann langsam wieder ab (siehe Abbildung 8). [9, 19]

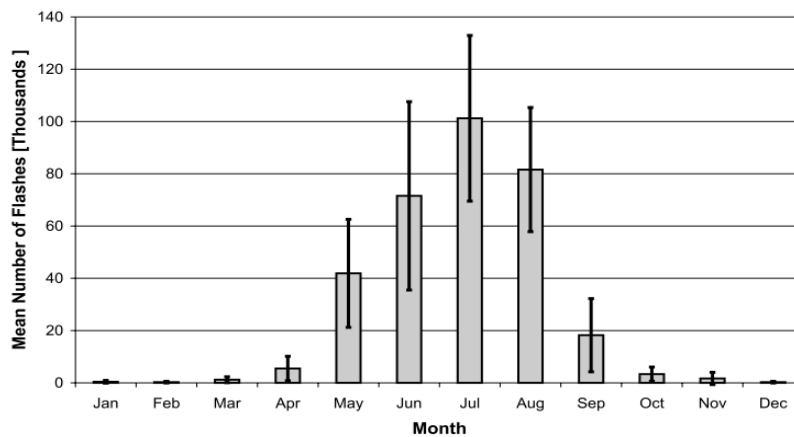


Abbildung 7: Mittlere, monatliche Anzahl der Blitzentladungen von 1992 bis 2001 in Österreich. Die Balken geben eine Standardabweichung von ± 1 an. [19]

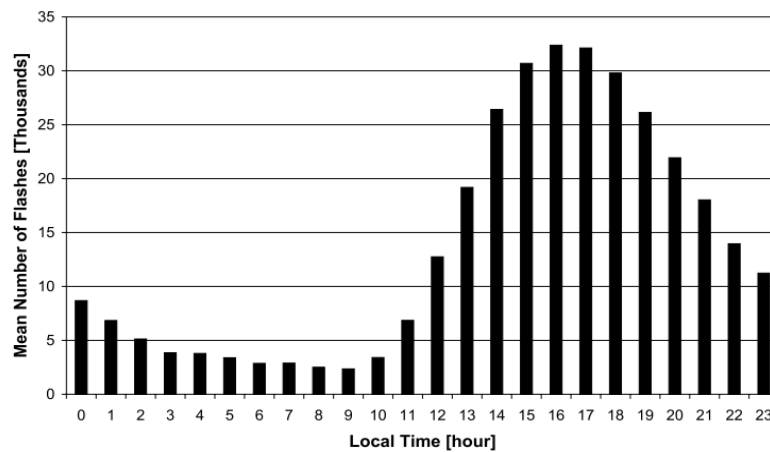


Abbildung 8: Mittlere, tägliche Anzahl der Blitzentladungen von 1992 bis 2001 in Österreich nach Uhrzeit. [19]

Auch in der amerikanischen Literatur wird ein Maximum der Gewitteraktivität im Juli angegeben. Des Weiteren treten demnach zwei Drittel der Entladungen zwischen 12:00 Uhr und 16:00 Uhr Lokalzeit auf, das Maximum wird um ca. 16:00 Uhr Lokalzeit erreicht. [1]

Agoris et al. [22] gibt an, dass 89% der Blitzunfälle, die zwischen 1990 und 2001 in Griechenland auftraten, zwischen Mai und September stattfanden.

3.7 Energieübertragungsmechanismen bei einem Blitzunfall

Der Blitzstrom kann bei einem Blitzeinschlag in einen Menschen auf verschiedenen Stromwegen im oder außerhalb des Körpers fließen. Die Art der Energieeinwirkung auf den Menschen wird in der Literatur in fünf bzw. sechs verschiedenen Mechanismen beschrieben: [21, 23, 24]

- Direkter Einschlag
- Kontakteffekt bzw. Berührungsspannung
- Seitenüberschlag
- Schrittspannung
- Kombinierte Schritt- und Berührungsspannung
- Oberflächeneffekt

Direkter Einschlag

Der direkte Einschlag (*engl. direct hit, direct strike*), dargestellt in Abbildung 9 (a), ist der für den Menschen gefährlichste Stromweg, da der Großteil des Stromes den Körper passiert. Man kann oft an den betroffenen Personen Blitzeintrittsstellen im Kopf- oder Schulterbereich und Austrittsstellen an den Füßen oder den Schuhen erkennen. Dieser Fall tritt häufig im Freigelände an exponierten Stellen (zum Beispiel im Gebirge) auf. [23]

Kontakteffekt

Der Kontakteffekt oder auch Berührungsspannung genannt (*engl. contact voltage, touch voltage*) ist jener Fall, bei dem der Blitz in ein Objekt einschlägt, welches sich in direktem Kontakt mit dem Betroffenen befindet. Beispiele für solche Objekte sind unter anderem metallische Zäune, Rohrleitungen, Telefonleitungen und über diese in weiterer Folge das Telefon, Elektrokabel oder auch Golfschläger. Die Potentialdifferenz zu einem getroffenen Objekt wird dabei vom Menschen durch dessen Berührung dieses Objekts überbrückt. Ein Teil des Blitzstromes verläuft über den menschlichen Körper. Die Größe des Körperstromes hängt von den wirksamen Körperimpedanzen ab. Dieser Mechanismus ist in Abbildung 9 (b) dargestellt. [23, 24]

Seitenüberschlag

Ein Seitenüberschlag (*engl. side splash, side flash*), siehe Abbildung 9 (c), tritt dann auf, wenn ein Objekt, zum Beispiel ein Baum, ein Metallmast oder auch eine andere Person, welches sich in der Nähe einer Person befindet, von einem Blitz getroffen wird und ein Teil der Energie über diese Person zur Erde abgeleitet wird. Dies geschieht dann, wenn die Potentialdifferenz die elektrische Durchschlagsfestigkeit des Abstandes zwischen dem getroffenen Objekt und der Person übersteigt. Der Blitzstrom wird im inversen Verhältnis zu den Impedanzen aufgeteilt. [23, 24, 25]

Schrittspannung

Als Schrittspannung (*engl. step voltage, ground strike*) wird jene Spannung bezeichnet, die zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche auftritt. Diese zwei Punkte können zum Beispiel die beiden Füße einer Person sein, welche in einem bestimmten Abstand zueinander am Boden stehen. Somit entsteht bei einem Blitzeinschlag in die Erde oder in geerdete Objekte zwischen den beiden Füßen eine Potentialdifferenz. In den meisten Fällen tritt der Strom dabei über einen der beiden Füße in den Körper ein und über den anderen wieder aus. In diesem Fall fließt der Strom nicht durch das Herz oder das Gehirn des Menschen. Die Betroffenen sind oft bei einem Stromfluss, welcher nicht durch das Herz verläuft, vorübergehend von der Hüfte abwärts gelähmt (Keraunoparalyse = Blitzlähmung). Dieser Mechanismus ist in Abbildung 9 (d) dargestellt. [23, 24, 25]

Kombinierte Schritt- und Berührungsspannung

Diese Form der Energieübertragung (*engl. step voltage with side flash*), dargestellt in Abbildung 9 (e), tritt auf, wenn ein Blitz in die Erde oder geerdete Objekte einschlägt und eine Spannungsdifferenz erzeugt. Zwischen zwei oder mehr Personen, die sich berühren, wird dann genau diese Potentialdifferenz überbrückt. Berühren sich die Personen nicht, kann es zu einem Seitenüberschlag kommen. [21, 23]

Oberflächeneffekt

Der Oberflächeneffekt (*engl. skin effect, flash-over phenomenon*) kann bei allen bereits beschriebenen Mechanismen auftreten. Bei diesem Effekt wird der Großteil des Blitzstromes entlang der Körperoberfläche Richtung Erde als Gleitentladung abtransportiert und nur ein kleiner Teil des Blitzstromes fließt durch den Körper. Dies kann durch den Spannungsabfall am menschlichen Körper aufgrund des hohen Hautwiderstandes, der großen Blitzstromamplitude und der sehr kurzen Einwirkdauer erklärt werden. Die Dauer der Energiefreisetzung ist zu gering, um den Hautwiderstand zu überwinden. Es wird entlang der Körperoberfläche Richtung Erde somit ein Entladungskanal ausgebildet, welcher einen viel geringeren Widerstand als die Haut aufweist und der Strom daher diesem folgt. So fließt nur wenig Energie direkt durch den Körper der betroffenen Person. [24, 26]

Bei einem Spitzenstrom von 30 kA fließen durch den Oberflächeneffekt nur ungefähr 60 A durch den menschlichen Körper und der Rest fließt außerhalb Richtung Erde. Bei einer Dauer einer Entladung von $100\text{ }\mu\text{s}$ beträgt die gesamte, dissipierte Energie innerhalb des Körpers 120 J . Bei einer Person mit 60 kg Gewicht entspricht dies einer Energiedissipation von 2 J/kg laut [26], $7 - 8\text{ J}$ laut [18]. Die letale Energiedissipation liegt bei $62,6\text{ J/kg}$. [26]

In der Literatur werden noch zwei weitere, denkbare, aber noch zu wenig erforschte Energieübertragungsmechanismen beschrieben.

Befindet sich eine Person auf einer exponierten Anhöhe, so ist es denkbar, dass ein Aufwärtsblitz ausgelöst werden kann (siehe Abbildung 9 (f)). In diesem Fall fließt der Blitzstrom von der Erde durch die Person Richtung Gewitterwolke. Die Fangentladung startet direkt bei der betroffenen Person. Die Schadenswirkung und der Schadensumfang sind bisher noch unbekannt. [21, 23, 24]

Weiters ungeklärt ist der Einfluss des Blitzfeldes auf den Körper. Schlägt ein Blitz in die Nähe eines Menschen ein, so könnten das magnetische und elektrische Impulsfeld Auswirkungen auf den Menschen haben. Dieser Mechanismus ist in Abbildung 9 (g) dargestellt. [21]

Meist ist ein direkter Einschlag in eine Person am gefährlichsten, da ein Großteil des Stromweges durch den Körper verläuft. Dias et al. [23] gibt an, dass Spannungen, verursacht durch einen Seitenüberschlag oder Berührungsspannung, weisen meist vorübergehende Folgen auf, Schrittspannungen sind am wenigsten gefährlich.

Tabelle 2 stellt eine prozentuale Verteilung von fünf Energieübertragungsmechanismen dar, welche Schäden bei Menschen aufgrund von Blitzentladungen zur Folge haben können.

Tabelle 2: Prozentuale Verteilung der Häufigkeit des Auftretens eines bestimmten Energieübertragungsmechanismus bei einer Blitzentladung mit Personenbeteiligung. [23, 25]

Energieübertragungsmechanismus	Häufigkeit (%)
Direkter Einschlag	3 - 5
Berührungsspannung	15 - 25
Seitenüberschlag	20 - 30
Schrittspannung	40 - 50
Aufwärtsblitz	10 - 15

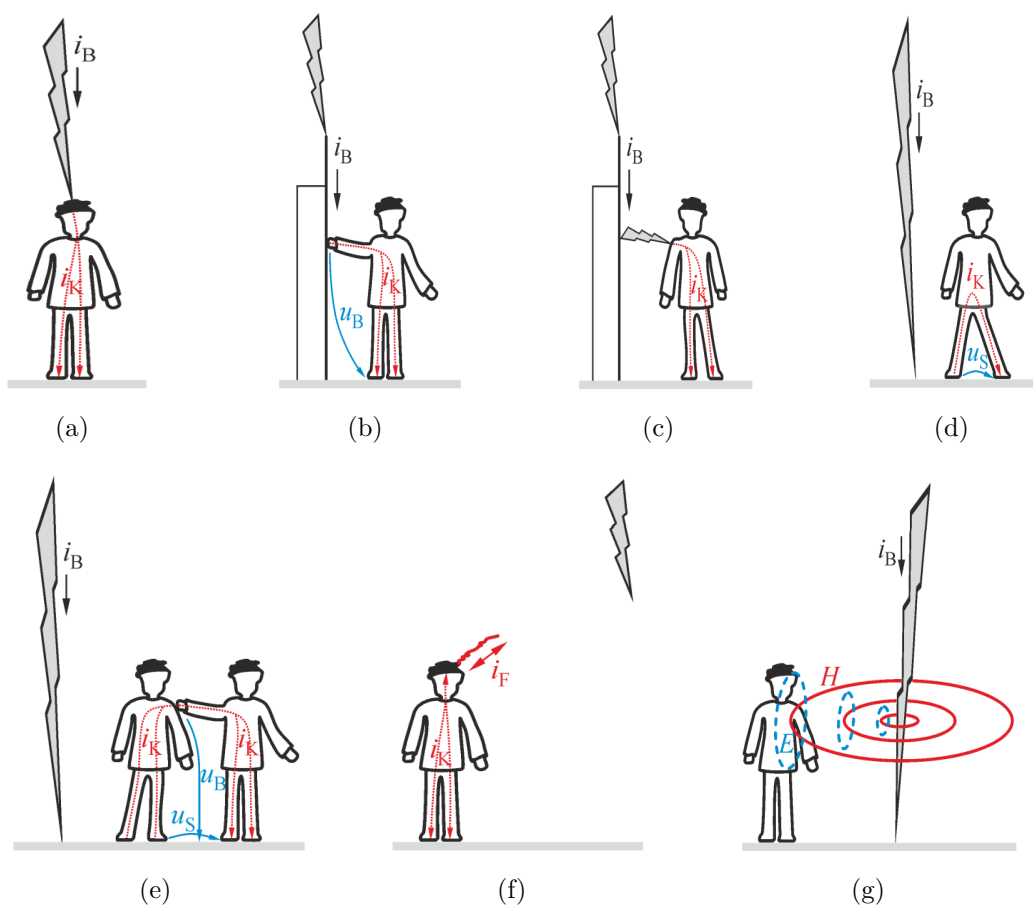


Abbildung 9: Verschiedene Energieübertragungsmechanismen auf den Menschen bei einer Blitzentladung - (a) Direkter Einschlag, (b) Kontakteffekt, (c) Seitenüberschlag, (d) Schrittspannung, (e) Kombinierte Schritt- und Berührungsspannung, (f) Aufwärtsblitz, (g) Blitzfeld. [21]

4 Stromwirkungen auf den menschlichen Organismus

Bei einer Stromverletzung können direkte und indirekte Schäden unterschieden werden. Sobald eine Person direkt mit einem Stromkreis in Kontakt tritt, kann es zu einer Stromverletzung durch den Strom selbst, durch die Wechselwirkung mit verschiedenen Körpergeweben und durch thermischen Energieumsatz kommen. Indirekte Schäden entstehen meist als Folge der primären Wirkung. Das Ausmaß der Stromverletzung hängt dabei von unterschiedlichen Faktoren ab: [27, 28]

- Stromart (Gleichstrom, Wechselstrom, Blitzstrom)
- Stromstärke
- Spannungshöhe
- Einwirkdauer des Stromes
- Stromweg durch den Körper
- Widerstand des Gewebes
- Kontaktfläche und Übergangswiderstand (Hautdicke, Hautfeuchtigkeit; Boden, Untergrund, Schuhe)

Ein weiterer, nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor ist das Alter der betroffenen Person. Mit zunehmenden Alter steigt die Häufigkeit kardialer Vorerkrankungen und damit auch die Letalität bei oder nach Stromunfällen. [29]

4.1 Stromart

Ein wesentlicher Faktor, welcher die Art und die Schwere der Stromverletzung bestimmt, ist die Stromart - entweder Gleichstrom (DC), Wechselstrom (AC) oder Blitzstrom.

Ein Kontakt mit Hochspannungs-Gleichspannung führt meist zu einfachen Muskelkrämpfen, wodurch die Betroffenen häufig von der Spannungsquelle „weggeschleudert“ werden. Dadurch entsteht eine nur kurze Einwirkdauer des Stromes, jedoch steigt die Wahrscheinlichkeit für ein stumpfes Trauma. Der kurze Kontakt mit einer Gleichspannungsquelle kann auch den Herzrhythmus, abhängig von der betroffenen Herzrhythmusphase, beeinträchtigen. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Impuls genau die vulnerable Phase im Herzrhythmus (siehe Abbildung 15) trifft und damit Rhythmusstörungen bis zum Kammerflimmern auslöst, ist aber aufgrund des einzelnen Einschaltimpulses gering. Diese elektrophysiologische Eigenschaft wird auch bei der Defibrillation ausgenutzt.

Wechselspannung gleicher Spannungshöhe ist drei bis vier Mal so gefährlich wie Gleichspannung. Bei einer Stimulation zwischen 40 und 110 Mal pro Sekunde kommt es zu

einer kontinuierlichen Muskelkontraktion bis zum Verkrampfen der Muskeln (Niederspannungsnetz 230 V, 50 Hz), wodurch der Betroffene oft nicht mehr die Stromquelle loslassen kann. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Stromimpuls genau in die vulnerable Phase des Herzzyklus fällt, ist deutlich höher als bei Gleichstrom. [27, 28, 30]

Die Eigenschaften des Blitzstromes wurden bereits im Kapitel 3 genau beschrieben.

4.2 Stromstärke

Ein weiterer wichtiger Faktor für Stromschäden im Körper ist die Stromstärke. Nach dem Ohm'schen Gesetz ist die Stromstärke proportional zur Spannung und indirekt proportional zum Widerstand. Die Spannung der Quelle ist meist bekannt, der Widerstand variiert aber je nach betroffenem Körpergewebe stark. Nach dem Joule'schen Gesetz ist die erzeugte Wärme proportional dem Quadrat der Stromstärke. [27, 28]

$$Q_W = I^2 \cdot R \cdot t \quad Q_W = E_{el} = P \cdot t \quad P = U \cdot I = R \cdot I^2 \quad (4)$$

mit Q_W Wärmeenergie [J], I Stromstärke [A], R Widerstand [Ω], t Dauer [s], E_{el} elektrische Energie, P elektrische Leistung [J/s = W], U Spannung [V].

In der Norm IEC TS 60479 - 1:2005 + AMD1:2016 CSV [31] sind folgende Begriffe, welche für die Wirkung von Strömen auf den Körper maßgeblich sind, definiert:

„Wahrnehmbarkeitsschwelle: *Minimalwert des Berührungstromes, der von einer durchströmten Person noch wahrgenommen wird“*

„Reaktionsschwelle: *Minimalwert des Berührungstromes, der unbeabsichtigte Muskelkontraktion bewirkt“*

„Loslassschwelle: *Maximalwert des Berührungstromes, bei dem eine Person, die die Elektrode hält, noch loslassen kann“*

„Schwelle des Herzkammerflimmerns: *Minimalwert des Berührungstromes, der Herzkammerflimmern bewirkt“*

Für Wechselströme und Gleichströme hängen die Schwellen von unterschiedlichen Faktoren, wie der Berührungsfläche des Stromes mit dem Körper, den Berührungsbedingungen (nass, trocken, Temperatur, Druck), dem Stromweg, der Dauer des Stromflusses und individuellen physiologischen Eigenschaften (Aufbau des Körpers, Herzfunktion) der betroffenen Person, ab. Bei Gleichströmen wird nur der Beginn und die anschließende Unterbrechung des Stromflusses, sofern dieser in der Höhe der Wahrnehmbarkeitsschwelle fließt, empfunden. [31]

In [31] werden dafür folgende Werte angegeben:

- **Reaktionsschwelle:**

- **AC:** $0,5\text{ mA}$ - unabhängig von der Einwirkdauer
- **DC:** 2 mA

- **Loslassschwelle:**

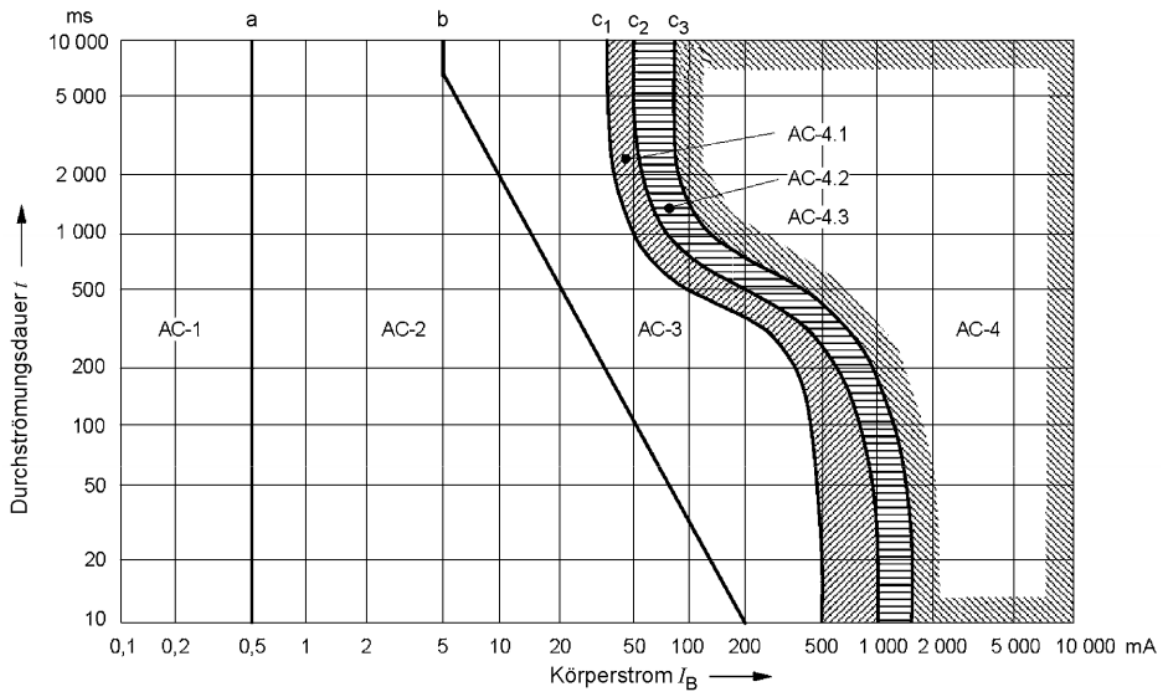
- **AC:** männliche Erwachsene - 10 mA , Gesamtpopulation - 5 mA
- **DC:** keine festgelegte Schwelle, nur Beginn und Unterbrechung führen zu krampfartigen Muskelkontraktionen

- **Schwelle des Herzkammerflimmerns:**

- **AC:** Es tritt eine große Abnahme der Schwelle bei Wechselstrom mit 50 Hz auf, wenn der Stromfluss länger als einen Herzzyklus anhält. Für Durchströmungszeiten unter $0,1\text{ s}$ und für Ströme über 500 mA wird Herzkammerflimmern vielleicht, bei Strömen von einigen Ampere wahrscheinlich ausgelöst, sofern der Stromfluss in der vulnerablen Phase eintritt (siehe Kapitel 5.2, Abbildung 15). Bei Stromstärken in dieser Größenordnung und Durchströmungszeiten länger als ein Herzzyklus kann ein Herzstillstand ausgelöst werden.
- **DC:** Für die Dauer eines Stromflusses, welcher länger als ein Herzzyklus ist, ist die Schwelle des Herzkammerflimmerns vielfach höher als bei Wechselströmen, bei einer Dauer kürzer als 200 ms ist sie annähernd gleich hoch. Die Schwelle könnte bei einem gesunden Menschen für den Stromweg linke Hand - Füße bei einer langen Durchströmungsdauer bei ungefähr 200 mA liegen. Bei krankhaften Veränderungen des Herzens liegt die Schwelle unter den Normalwerten. Der Wert der Verringerung ist nicht genau bekannt.

Die physiologischen Wirkungen der Ströme bei einer unterschiedlichen Dauer des Stromflusses auf den menschlichen Körper sind in Abbildung 10 für Wechselströme und in Abbildung 11 für Gleichströme dargestellt.

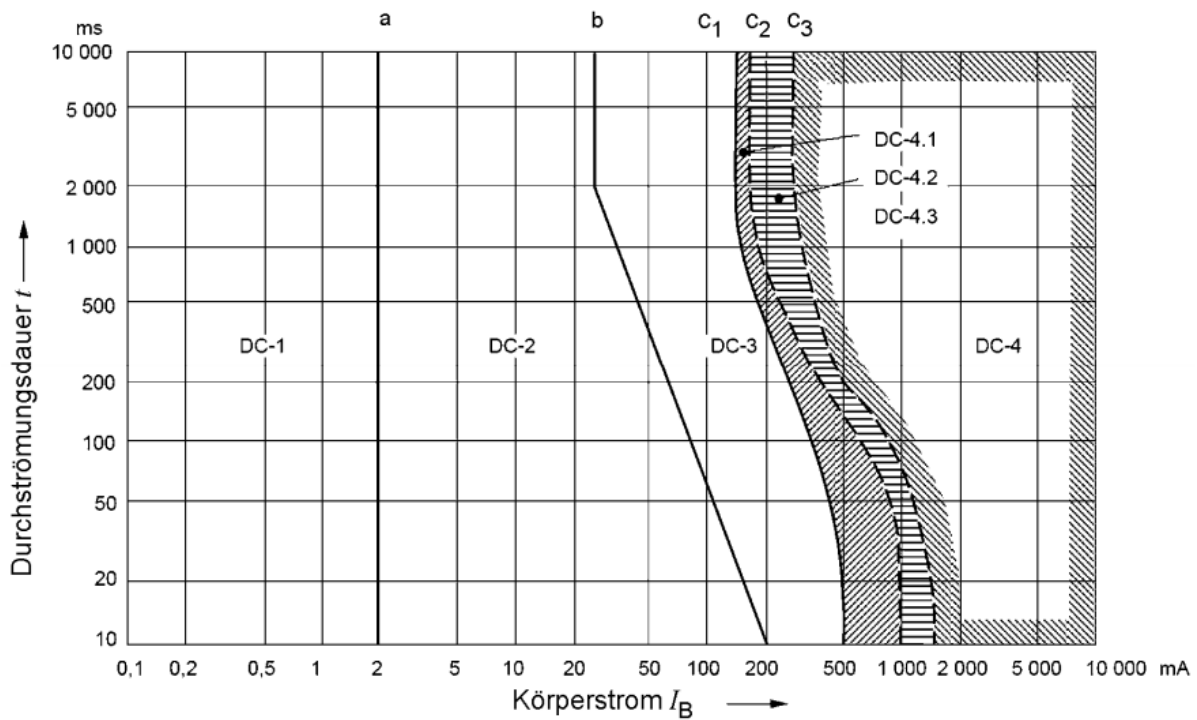
Weitere Wirkungen von Wechselstrom sind unter anderem tief liegende Verbrennungen, Verbrennungen der Hautoberfläche und weitere innere Verletzungen bei einer Durchströmungsdauer von mehreren Sekunden und Stromstärken von einigen Ampere. Hochspannungsunfälle müssen nicht immer zu Herzkammerflimmer führen. Es können auch andere Formen des Herzstillstandes ausgelöst werden. Hohe Stromstärken können auch zu anderen Todesursachen als Herzkammerflimmern führen. Es können Funktionsstörungen des Atemzentrums bis zu einem Atemstillstand oder eine Schädigung des Nervenleitsystems



Bereiche	Bereichs-grenzen	Physiologische Wirkungen
AC-1	bis zu 0,5 mA Grenzlinie a	Wahrnehmung möglich, aber im Allgemeinen keine Schreckreaktion.
AC-2	über 0,5 mA bis Grenzlinie b	Wahrnehmung und unwillkürliche Muskelkontraktionen wahrscheinlich, aber im Allgemeinen keine schädlichen physiologischen Wirkungen.
AC-3	Grenzlinie b bis Grenzlinie c ₁	Starke unwillkürliche Muskelkontraktionen. Schwierigkeiten beim Atmen. Reversible Störungen der Herzfunktion. Immobilisierung (Muskelverkrampfung) kann auftreten. Wirkungen zunehmend mit Stromstärke und Durchströmungsdauer. Im Allgemeinen ist kein organischer Schaden zu erwarten.
AC-4 ¹⁾	über der Grenzlinie c ₁ c ₁ - c ₂ c ₂ - c ₃ über der Grenzlinie c ₃	Es können pathophysiologische Wirkungen auftreten wie Herzstillstand, Atemstillstand und Verbrennungen oder andere Zellschäden. Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ansteigend mit Stromstärke und Durchströmungsdauer. AC-4.1 Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ansteigend bis etwa 5 % AC-4.2 Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ansteigend bis etwa 50 % AC-4.3 Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern über 50 %

1) Bei Durchströmungsdauer unter 200 ms tritt Herzkammerflimmern nur auf, wenn die entsprechenden Schwellenwerte in der vulnerablen Periode überschritten werden. Hinsichtlich des Herzkammerflimmerns bezieht sich dies auf die Wirkungen des Stromes beim Stromweg von der linken Hand zu den Füßen. Bei anderen Stromwegen muss der Herzstromfaktor berücksichtigt werden.

Abbildung 10: Zeit/Stromstärke-Bereiche für die Wirkung von Wechselstrom von 15 Hz bis 100 Hz auf den menschlichen Körper bei einem Stromweg von der linken Hand zu den Füßen. [31]



Bereiche	Bereichsgrenzen	Physiologische Wirkungen
DC-1	bis zu 2 mA Grenzlinie a	Leicht stechende Empfindung beim Ein- und Ausschalten oder bei schneller Änderung der Stromstärke.
DC-2	über 2 mA bis Grenzlinie b	Unwillkürliche Muskelkontraktionen wahrscheinlich, besonders beim Ein- und Ausschalten oder bei schneller Änderung des Stromes, aber üblicherweise keine schädlichen physiologischen Wirkungen.
DC-3	Grenzlinie b bis Grenzlinie c_1	Starke unwillkürliche Muskelkontraktionen und reversible Störungen der Reizbildung und Reizleitung im Herzen können zunehmend mit Stromstärke und Durchströmungsdauer auftreten. Im Allgemeinen ist kein organischer Schaden zu erwarten.
DC-4 ¹⁾	über der Grenzlinie c_1 $c_1 - c_2$ $c_2 - c_3$ über der Grenzlinie c_3	Es können pathophysiologische Wirkungen auftreten wie Herzstillstand, Atemstillstand und Verbrennungen oder andere Zellschäden. Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ansteigend mit Stromstärke und Durchströmungsdauer. DC-4.1 Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ansteigend bis etwa 5 % DC-4.2 Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ansteigend bis etwa 50 % DC-4.3 Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern über 50 %
1) Bei Durchströmungsdauern unter 200 ms tritt Herzkammerflimmern nur auf, wenn die entsprechenden Schwellenwerte in der vulnerablen Periode überschritten werden. Hinsichtlich des Herzkammerflimmerns bezieht sich dies auf die Wirkungen des Stromes beim Stromweg von der linken Hand zu den Füßen. Bei anderen Stromwegen muss der Herzstromfaktor berücksichtigt werden.		

Abbildung 11: Zeit/Stromstärke-Bereiche für die Wirkung von Gleichstrom auf den menschlichen Körper bei einem Stromweg von einer Hand zu den Füßen (Längsdurchströmung bei aufsteigendem Strom (Füße positive Polarität)). [31]

für die Muskeln auftreten. Hohe transmembrane elektrische Feldstärken (kurze Durchströmungsdauer mit hoher Stromstärke) verursachen oft Zellschädigungen, besonders entlang der Skelettmuskulatur. [31]

Bei Gleichstrom über 100 mA kann eine Wärmeentwicklung während des Stromflusses in den Extremitäten und ein schmerzhaftes Gefühl an den Berührungsflächen empfunden werden. Bei einer Querdurchströmung über mehrere Minuten bis 300 mA können mit steigender Einwirkdauer und Stromstärke Herzrhythmusstörungen, Verbrennungen, Strommarken und Schwindel auftreten. Ströme größer als 300 mA führen meist zu Bewusstlosigkeit. Bei Strömen von einigen Ampere und einer Dauer von einigen Sekunden treten häufig tiefe Verbrennungen bis hin zum Tod auf. [31]

4.3 Spannungshöhe

Elektrounfälle werden in Niederspannungs- und Hochspannungsunfälle unterschieden. Bei Niederspannungsunfällen ($< 1000\text{ V AC}$, $< 1500\text{ V DC}$) ist vor allem die Stromwirkung auf das Herz ausschlaggebend für die Schädigung des Betroffenen. Bei einer Durchströmung des Myokards mit 230 V , 50 Hz ist dieser Strom in der Lage, Kammerflimmern auszulösen. Bei einem Hochspannungsunfall ($\geq 1000\text{ V AC}$, $\geq 1500\text{ V DC}$) ist ebenso eine schädigende, kardiale Wirkung möglich, hauptsächlich kommt es aber bei dieser Art von Unfall zu Verbrennungen durch einen möglichen Lichtbogenüberschlag mit mehreren tausend Grad Celsius. Bei einem Hochspannungsunfall entsteht ein größerer Stromfluss, welcher eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine Gewebeerstörung mit sich bringt. [28, 30]

4.4 Einwirkdauer des Stromes

Allgemein lässt sich sagen, je länger die Dauer des Kontaktes mit Hochspannung ist, desto größer ist die erzeugte Wärme und der Grad der Gewebeerstörung. Sobald die Verkohlung des Gewebes begonnen hat, steigt der Widerstand an. Bei Stromstärken im Bereich von 25 bis 50 mA können Herzrhythmusstörungen und bei längerer Einwirkdauer Bewusstlosigkeit aufgrund von zerebralen Krämpfen auftreten, im Bereich von 50 bis 100 mA kommt es bei einem Stromweg durch das Herz zu Kammerflimmern. Für die schädliche, kardiale Stromwirkung ist eine Einwirkdauer von mehreren 100 ms erforderlich. Ist sie sehr kurz (zum Beispiel 1 ms bei Elektrozäunen, $5 - 20\text{ ms}$ beim Defibrillator, 175 ms bei einem Blitz) können laut Bartsch [30] Spannungsspitzen von bis zu 10 kV bzw. laut Suchanek [32] eine Schrittspannung von 25 kV bei geringen Ladungsmengen ohne oder mit nur geringen pathophysiologischen Veränderungen überlebt werden.

Bei der Blitzentladung tritt aufgrund der sehr kurzen Einwirkdauer, aber sehr hohen Spannungs- und Stromamplituden, nur ein sehr geringer Stromfluss im Inneren des Körpers auf. Der Großteil des Stromes fließt an der Körperoberfläche ab (Oberflächeneffekt - siehe Kapitel 3.7). Der bedeutendste Unterschied zwischen Blitz- und Hochspannungsunfällen ist die Dauer der Exposition des Körpers. [28, 30]

4.5 Stromweg durch den Körper

Der Stromweg durch den Körper bestimmt das gefährdete Gewebe, die Art der Verletzung und das Ausmaß der Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme bei einem Niederspannungs-, Hochspannungs- und Blitzunfall. Ein Stromdurchgang durch das Herz oder den Thorax kann zu Herzrhythmusstörungen und Herzmuskelschäden führen. Ein Stromdurchgang durch das Gehirn kann einen Atemstillstand, Krämpfe oder Lähmungen verursachen. Da der Strom oft an den Ein- und Austrittsstellen konzentriert ist, kommt es in diesen Bereichen zu den größten Schäden. [28]

Niederspannungsstrom tritt am Kontaktpunkt des Betroffenen mit der Quelle in den Körper ein (Eintrittsstelle) und verlässt diesen wieder über einen Austrittspunkt. Bei Hochspannungsunfällen kann es einerseits bei einem direkten Kontakt mit dem Betroffenen zu schwerwiegenden, tiefen Verbrennungen an den Kontaktpunkten kommen, andererseits können bei einer Lichtbogenverletzung Verbrennungen, welche mit normalen thermischen Verbrennungen vergleichbar sind, auftreten. Bei der Lichtbogenverletzung entstehen keine typischen Ein- und Austrittsstellen, da der Strom nicht durch den Körper des Betroffenen fließt. [27]

Herzwirksamer Stromweg

Für die Auswirkung des Stromes auf das menschliche Herz ist der Weg, den der Strom im Körper zwischen der Ein- und Austrittsstelle nimmt, entscheidend. Wenn das Herz vom Strom direkt durchflossen wird, ist der herzwirksame Teilstrom am höchsten. Dieser ist zum Beispiel bei einer Durchströmung von Arm zu Arm oder bei direktem Kontakt mit dem Brustkorb am größten. Bei einem Stromweg von Arm zu Bein oder Bein zu Bein ist der herzwirksame Teilstrom geringer. Die Inzidenz einer kardialen Schädigung bei einem Stromunfall liegt etwa bei 15 %. [30]

In der Norm IEC TS 60479 - 1:2005 + AMD1:2016 CSV [31] ist der Begriff *Herzstromfaktor*, welcher für das Auslösen von Herzkammerflimmern bei einem anderen Stromweg als linke Hand - Füße maßgeblich ist, wie folgt definiert:

*„**Herzstromfaktor F:** Verhältnis der elektrischen Feldstärke (Stromdichte) im Herzen bei einem gegebenen Stromweg zur elektrischen Feldstärke (Stromdichte) im Herzen, die beim Stromweg linke Hand zu den Füßen auftritt. Hierbei wird jeweils ein gleich großer Körperstrom vorausgesetzt.*

ANMERKUNG Im Herzen ist die Stromdichte proportional zur Feldstärke.“

Aus der Definition des Herzstromfaktors kann folgende Formel für die Körperströme unterschiedlicher Stromwege abgeleitet werden [31]:

$$I_h = \frac{I_{ref}}{F} \quad (5)$$

mit I_h Körperstrom für unterschiedliche Stromwege, I_{ref} Körperstrom für den Stromweg linke Hand - Füße, F Herzstromfaktor.

Aus Tabelle 3 können die Herzstromfaktoren für die verschiedenen Stromwege entnommen werden. Diese Werte gelten für Wechselstrom ebenso wie für Gleichstrom. Der Stromweg von Fuß zu Fuß ist für Stromunfälle, welche durch Schrittspannung verursacht werden, von Bedeutung.

Tabelle 3: Herzstromfaktoren F für unterschiedliche Stromwege. [31]

Stromweg	Herzstromfaktor F
Linke Hand zum linken Fuß, rechten Fuß oder beiden Füßen	1,0
Beide Hände zu beiden Füßen	1,0
Linke Hand zur rechten Hand	0,4
Rechte Hand zum linken Fuß, rechten Fuß oder zu beiden Füßen	0,8
Rücken zur rechten Hand	0,3
Rücken zur linken Hand	0,7
Brust zur rechten Hand	1,3
Brust zur linken Hand	1,5
Gesäß zur linken Hand, rechten Hand oder zu beiden Händen	0,7
Linker Fuß zum rechten Fuß	0,04

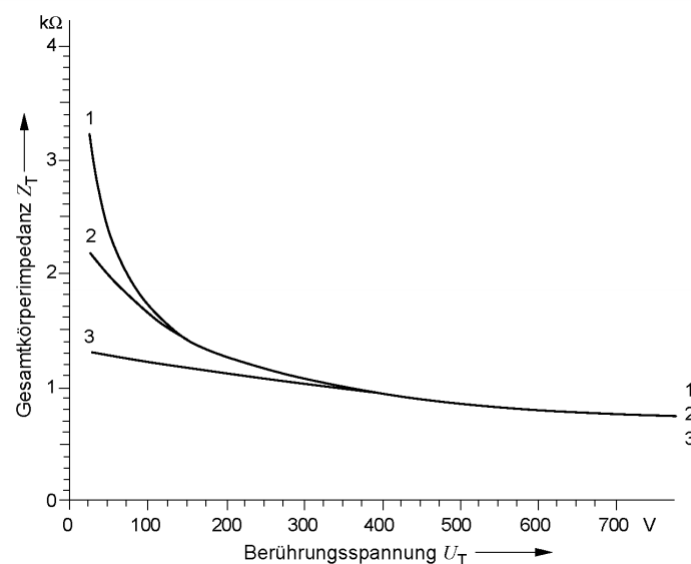
4.6 Widerstand des Gewebes

Der Widerstand ist spezifisch für ein bestimmtes Gewebe und hängt von dessen Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur und physikalischen Eigenschaften ab. Je höher der Widerstand eines Gewebes ist, desto höher ist auch die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Wärme durch die Umwandlung der elektrischen Energie. Nerven, welche elektrische Signale übertragen, Muskeln, Schleimhäute und Blutgefäße, die einen hohen Elektrolyt- und Wassergehalt besitzen, weisen einen geringen Widerstand auf und sind demnach gute Leiter.

Knochen, Bänder und Fett, die alle einen großen Teil an träger Masse besitzen, haben einen sehr hohen Widerstandswert und tendieren eher dazu sich zu erwärmen und zu koagulieren als Strom zu leiten. Die Widerstandswerte der anderen im Körper vorkommenden Gewebe liegt dazwischen. [28]

Die Gesamtkörperimpedanz setzt sich aus Körperinnenimpedanz und Hautimpedanz zusammen und besteht somit aus ohmschen und kapazitiven Anteilen. Die Gesamtkörperimpedanz sinkt bei höheren Frequenzen wegen des Einflusses der Hautkapazitäten und nähert sich über einem Wert von 5 kHz der Körperinnenimpedanz an. [31]

Die Änderung der Gesamtkörperimpedanz bei steigender Berührungsspannung bei verschiedenen Berührungsbedingungen (trocken, nass, salzwassernass) ist in Abbildung 12 dargestellt.



- 1 trockener Zustand
- 2 wassernasser Zustand
- 3 salzwassernasser Zustand

Abbildung 12: Gesamtkörperimpedanz, welche bei 50 % der Bevölkerung nicht überschritten wird - Stromweg Hand zu Hand - große Berührungsflächen (Größenordnung $10\,000\text{ mm}^2$) - Berührungsspannungen von AC 25 V bis 700 V , $50/60\text{ Hz}$. [31]

Die inneren Teilimpedanzen des menschlichen Körpers sind in Abbildung 13 dargestellt. Die eingetragenen Werte entsprechen dem prozentualen Anteil der Körperinnenimpedanz des Körperteils im Verhältnis zu einem Stromweg von einer Hand zu einem Fuß. Die Gesamtkörperimpedanz für einen gegebene Stromweg erhält man aus Addition der Körperinnenimpedanzen aller sich im Stromkreis befindlichen Teile des Körpers und der Hautimpedanzen an den Berührungsflächen. Die Zahlen außerhalb des Körpers stellen

Impedanzanteile dar und müssen bei Eintritt des Stromes an dieser Stelle dazu addiert werden. [31]

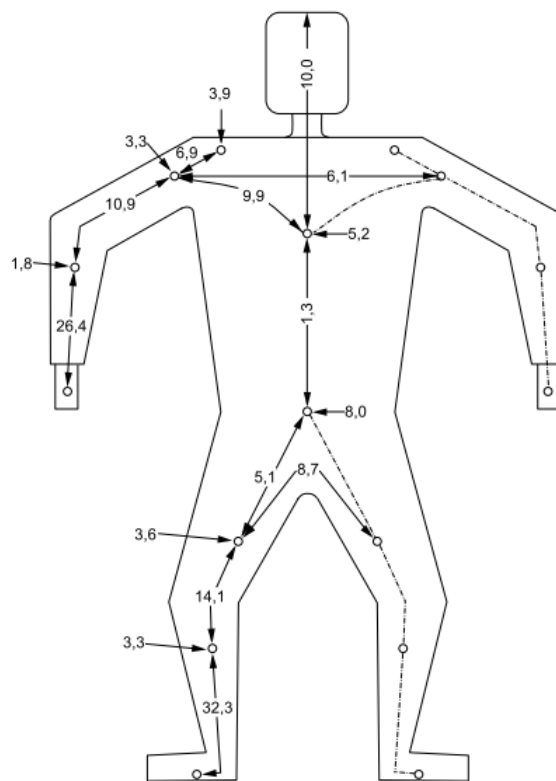
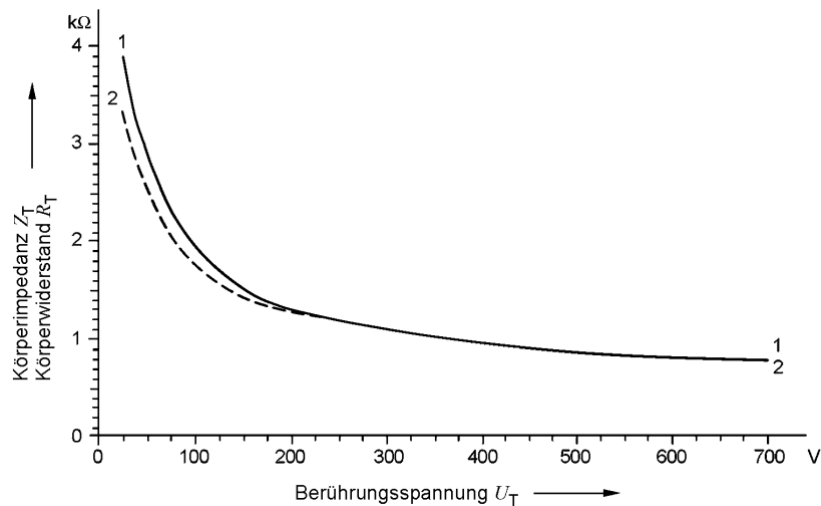


Abbildung 13: Innere Teilimpedanzen des menschlichen Körpers - prozentualer Anteil der Körperinnenimpedanz des Körperteils im Verhältnis zu einem Stromweg Hand - Fuß. [31]

Der Gesamtkörperwiderstand bei Gleichstrom ist bis ungefähr $200 V$ größer als die Gesamtkörperimpedanz bei Wechselstrom, da die Sperrwirkung durch die Kapazitäten der Haut wirksam wird. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 14 dargestellt. [31]

Die Haut ist der erste Widerstand, den der Strom beim Eindringen in den Körper überwinden muss. Die Hautimpedanz bei Wechselstrom besteht aus einem Netzwerk aus Widerständen und Kapazitäten. Dieser Wert ist individuell sehr unterschiedlich: laut [27] $40\,000$ bis $100\,000 \Omega$, abhängig von der Hautdicke; laut [30] hat feuchte Kinderhaut einige Hundert Ohm und trockene, schwielige Haut eines erwachsenen Arbeiters einige Millionen Ohm. Haut mit einer dicken Hornhautschicht kann einen um 20 bis 70 Mal größeren Widerstandswert als Haut ohne Hornhaut aufweisen. Dieser hohe Widerstandswert kann dazu führen, dass ein größerer Teil der Energie genau an jener Stelle der Hautoberfläche konzentriert auftritt, während der Strom sich seinen Weg durch die dickere Hornhautschicht bahnt. Dies bewirkt eine größere thermische Schädigung der Haut, aber einen geringeren inneren Schaden, als wenn der Strom ungehindert in tiefere Gewebeschichten



- 1 Körperwiderstand für Gleichstrom
- 2 Körperimpedanz für Wechselstrom 50 Hz

Abbildung 14: Statistischer Wert der Gesamtkörperwiderstände, welche bei 50 % der Bevölkerung nicht überschritten werden - Stromweg Hand zu Hand - große Berührungsflächen (Größenordnung $10\,000\text{ mm}^2$) - trockener Zustand. [31]

fließen könnte. Da sich die Einwirkdauer nach und nach erhöht, kommt es zur Blasenbildung und schließlich zum Durchbruch der Haut. Dies bewirkt eine Verminderung des Hautwiderstandes und somit einen Anstieg des Stromflusses im Inneren, wodurch eine Zerstörung des tiefer gelegenen Gewebes verursacht wird. Je nach Spannungshöhe erfolgt dieser Hautdurchbruch des Stromflusses zwischen 70 und 100 V [30] bzw. bei 220 V AC (50 Hz) [31]. Deshalb liegt die maximale Berührungsspannung bei 50 V Wechselstrom und 120 V Gleichstrom, bei Medizingeräten bei genau der Hälfte der Werte. Bei niedrigen Berührungsspannungen hängt die Hautimpedanz bei Wechselstrom stark von der Berührungsfläche, dem Zustand der Haut (trocken, nass) und der Temperatur ab. Bei höheren Berührungsspannungen sinkt der Wert der Hautimpedanz stark ab und wird vernachlässigbar, sobald die Haut durchschlägt. Nach dem Hautdurchbruch ist nur mehr der überwiegend ohmsche Körperinnenwiderstand wirksam, welcher mit einem Wert von $1\,100$ bis $1\,200\ \Omega$ angegeben wird. [28, 30, 31]

Feuchtigkeit reduziert den Hautwiderstand ebenso. Schwitzen kann den Widerstandswert der Haut auf $2\,500$ bis $3\,000\ \Omega$ reduzieren, das Eintauchen der Haut in Wasser reduziert den Wert weiter auf $1\,200$ bis $1\,500\ \Omega$ [28]. Lumenta et al. [27] gibt an, dass der Hautwiderstand durch Feuchtigkeit (Baden, Schwitzen) auf unter $1\,000\ \Omega$ reduziert werden kann.

4.7 Übergangswiderstand

Als Übergangswiderstand bezeichnet man unter anderem den Einfluss des Widerstandswertes des Bodens, Untergrunds oder auch der Schuhe der betroffenen Personen. Der Übergangswiderstand kann viel höher als der Hautwiderstand sein und somit die Stromwirkung reduzieren oder ganz verhindern. Neue Schuhe mit einer dicken Gummisohle weisen einen Widerstandswert von ungefähr $70\,000\ \Omega$ auf, Schuhe mit abgetragener, feuchter Ledersohle dagegen nur ungefähr $70\ \Omega$. [30]

5 Pathophysiologische Veränderungen durch Blitzeinwirkung

Der Blitzstrom, welcher im Inneren des Körpers fließt, kann zu unterschiedlichen Arten von Verletzungen durch Erwärmung des Gewebes, Beeinflussung des elektrischen Verhaltens von erregbarem Gewebe (zum Beispiel Depolarisation) und Elektrolyse führen. Diese schädlichen Wirkungen auf das Gewebe hängen dabei unter anderem vom Stromweg und der Stromverteilung im Inneren ab. Der Blitzstrom, welcher außerhalb des Körpers fließt, kann ebenfalls Verletzungen durch Wärmeentwicklung oder aufgrund der auftretenden Druckwelle bewirken. [26]

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen pathophysiologischen Veränderungen des biologischen Gewebes bei einer Durchströmung mit einem Blitzstrom genauer beschrieben.

5.1 Augen und Ohren

Das helle Licht einer Blitzenladung (starke ultraviolette und hochenergetische Strahlung) kann einige verschiedene Augenverletzungen, wie Hornhaut- oder Netzhautverletzungen, Entzündungen oder Blutungen, auslösen. Geweitete, fixierte, nicht reaktive Pupillen können besonders unmittelbar nach Blitzunfällen durch Störungen des autonomen Nervensystems auftreten, welche aber in diesem Fall kein eindeutiger Indikator für den klinischen Tod oder schwere Hirnschädigungen bei bewusstlosen Personen sind. Katarakte treten dabei oft auf und zählen zu den häufigsten, langfristigen Verletzungen nach einem Blitzeinschlag. Sie entstehen nie akut, sondern erst nach einiger Zeit. Die Ursache für das Auftreten von Katarakten kann einerseits die Erwärmung der Flüssigkeit in der Linse durch den Blitzstromfluss, andererseits die Belastung der Linse mit starker optischer Strahlung sein. [26, 27, 28]

Ein Riss des Trommelfells, welcher durch die Druckwelle ausgelöst werden kann, tritt laut Lumenta et al. [27] und Ritenour et al. [33] etwa bei der Hälfte der betroffenen Personen, laut Cooray et al. [26] bei 20 – 50% auf. Dieser kann einen vorübergehenden Hörverlust zur Folge haben. Die meisten Opfer erholen sich ohne schwerwiegende Folgen. Der Überdruck innerhalb des Blitzenladungskanals kann ungefähr 10 atm ($= 1013,25 \text{ kPa} = 10,13 \text{ bar}$) bis 20 atm ($= 2026,5 \text{ kPa} = 20,265 \text{ bar}$) erreichen [26]. Dieser Überdruck ist äquivalent zu einem Schallpegel zwischen 214 dB und 220 dB (Bezugswert für Luftschall $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$). Die akustische Schmerzschwelle liegt beim Menschen bei 120 dB . Diese wird demnach deutlich überschritten. In manchen Fällen kann daraus, auch wenn das Trommelfell intakt bleibt, ein Hörverlust, Tinnitus oder länger andauernder Schwindel resultieren. [26, 27, 28, 33]

5.2 Herz-Kreislauf-System

Die Funktion des Herzens wird durch die elektrische Depolarisation und anschließende Kontraktion einzelner Teile des Myokards geregelt. Fließt ein Blitzstrom durch das Herz, kann dieser das Myokard depolarisieren, die Gefäßwände schädigen oder arterielle Gefäßspasmen bewirken. Dies kann zu einer Störung des Myokards und somit zu Herzrhythmusstörungen, Herz-Kreislauf-Stillstand bzw. Asystolie oder zu unkontrollierten und unsynchronisierten Kontraktionen (Herzkammerflimmern, siehe Abbildung 16) führen. Asystolie ist die Haupttodesursache durch einen Blitzeinschlag und tritt bei einer Blitzentladung häufiger auf als Herzkammerflimmern. Tritt die Asystolie durch das Aussetzen des Sinusknotens ein, ist wegen der kurzen Einwirkzeit des Blitzstromes grundsätzlich ein „Wiederanspringen“ des Sinusknotens ohne weitere Auswirkungen möglich. Häufiger sind jedoch Asystolien, welche sich aus Kammerflimmern und zum Beispiel einem vorangegangenen Myokardinfarkt entwickeln. Ein Teil der Blitzopfer kann mit entsprechenden Erste-Hilfe Maßnahmen nach einem Herz-Kreislauf-Stillstand erfolgreich wiederbelebt werden.

Die Wahrscheinlichkeit, durch einen Stoßstrom Kammerflimmern auszulösen, ist nicht in jeder Herzzyklusphase gleich hoch. Wenn sich das Herz in der vulnerablen Phase (entspricht dem ersten Teil der T-Welle im EKG, siehe Abbildung 15) befindet, ist ein Teil des Myokards noch refraktär, während andere Teile bereits wieder erregbar sind. Eine Blitzentladung in dieser vulnerablen Phase des Herzens hat schwerere Folgen als in anderen Herzzyklusphasen (Abbildung 16). [26]

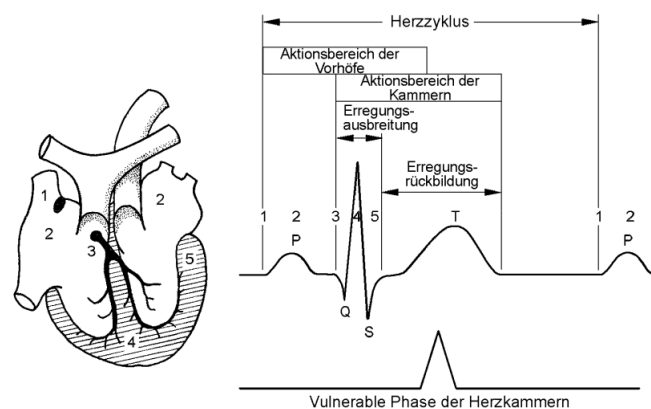


Abbildung 15: Erregungszyklus des Herzens mit vulnerabler Phase. [31]

Eine Blitzentladung kann außerdem weitere Effekte auf das Herz-Kreislauf-System haben, abhängig von der Form der Energieübertragung auf den Menschen und dem Weg des Stromes durch den Körper. Dazu zählen Erhöhung der Katecholamine, autonome Stimulationen, Tachykardie, Myokardnekrose mit Freisetzung von Kreatinphosphokinase oder arterielle Gefäßspasmen. Die Freisetzung von Herzenzymen (CK-MB - Kreatinkinase,

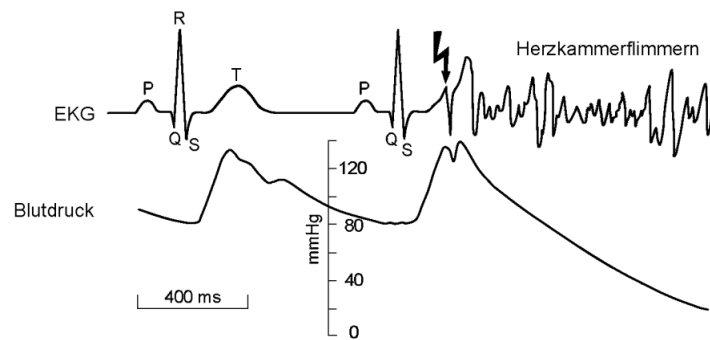


Abbildung 16: Auslösen von Herzkammerflimmern in der vulnerablen Phase des Herzens. [31]

Myokardtyp) wird bei allen Energieübertragungsmechanismen auf den Körper bei einer Auswirkung des Blitzstromes auf das Herz beschrieben und deutet eine Schädigung des Myokards an. Bei den Opfern konnte auch ein erhöhter Blutdruck festgestellt werden, welcher sich aber ohne Behandlung nach wenigen Stunden wieder normalisierte. [28, 34, 35] Tragen Personen einen Herzschrittmacher, so verliert dieser nach einer Blitzeinwirkung sehr häufig seine Funktionsfähigkeit [24].

In der Literatur wird auch oft über unspezifische Veränderungen im EKG berichtet. Dazu zählen unter anderem ein prolongiertes QT-Intervall, transiente T-Wellen Inversion und Veränderungen der ST-T-Welle, welche vor allem, aber nicht nur, bei einem direkten Einschlag in die betroffene Person beobachtet wurden und sich nach Stunden, Tagen oder Monaten von selbst normalisierten. [28, 34, 35, 36, 37, 38, 39]

Da die Dauer des QT-Intervalls frequenzabhängig ist, ändert es sich mit steigender bzw. sinkender Herzfrequenz stark. Bei einer Zunahme der Herzfrequenz von 40 *Schlägen/min* auf 180 *Schlägen/min* nimmt die Dauer des QT-Intervalls von ungefähr 500 *ms* auf 200 *ms* ab [40]. Um einen Referenzwert für ein physiologisches QT-Intervall zu erhalten, muss man diese Dauer entweder mit frequenzbezogenen Normwerten vergleichen oder die frequenzkorrigierte Dauer QTc mithilfe bestimmter Formeln berechnen. Das berechnete QTc-Intervall soll nach [41] kürzer als 440 *ms* sein. Andrews et al. [36] gibt ebenfalls eine Dauer des QTc-Intervalls von 440 *ms* als normal an. In der Literatur werden bei verschiedenen Blitzzunfällen unterschiedliche Werte für die Dauer des prolongierten QTc-Intervalls beschrieben. Lichtenberg et al. [35] gibt einen Wert für das durch einen Blitzeinschlag verlängerte QTc-Intervall von 470 *ms* bis 540 *ms*, Christophides et al. [37] 500 *ms*, McIntyre et al. [38] 500 *ms* zu Beginn der Krankenhauseinlieferung und 464 *ms* bis zum Ende des Aufenthalts an. Palmer [39] berichtet über einen Fall, bei dem die QTc-Dauer mit 460 *ms* zu Beginn der Untersuchung angegeben wird. Zwei Tage später erreichte die Dauer des QTc-Intervalls einen Wert von 680 *ms*, welcher den höchsten in der Literatur angeführten Wert darstellt und deshalb oft referenziert wird. Das QTc-Intervall dieses Patienten normalisierte sich erst wieder nach einem Monat (410 *ms*).

Allgemein kann gesagt werden, dass ein direkter Einschlag in eine Person eine hohe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer Herzschädigung mit sich bringt [35].

5.3 Respiratorisches System

Die Atmung wird beim Menschen vom Gehirn bzw. vom Atemzentrum in der Medulla oblongata gesteuert. Fließt ein Blitzstrom durch diese Hirnareale, kann es zu einem Atemstillstand kommen. Die Druckwelle bei einer Blitzentladung kann auch zu Schädigungen des respiratorischen Systems führen. Lähmung oder tetanische Kontraktion der Brustmuskulatur durch den Blitzstrom kann ebenfalls einen Atemstillstand bewirken. Auch wenn das Herz zu einer spontanen, selbstständigen Wiederherstellung der elektrischen Aktivität nach einem Blitzstromfluss fähig ist, kann ein Atemstillstand zu einem sekundären Herz-Kreislauf-Stillstand führen. Das respiratorische System besitzt diese Eigenschaft nicht und der Atemstillstand bleibt weiterhin nach Ende des Stromflusses bestehen. Dies kann zu einem Sauerstoffmangel im Myokard führen und schließlich zu einem (weiteren) Herz-Kreislauf-Stillstand. Durch den Sauerstoffmangel im Herzmuskel können bleibende Schäden im Herzen auftreten. Erhält das Gehirn zu wenig sauerstoffangereichertes Blut, können Teile des Hirngewebes absterben. [26, 33]

5.4 Haut

Verletzungen der Haut in Form von Verbrennungen durch einen Blitzeinschlag sind normalerweise gering, heilen schnell und benötigen geringe Behandlungen. Tiefliegende Verbrennungen treten bei weniger als 5% der Opfer auf. Starke Verbrennungen der Haut treten aufgrund der kurzen Einwirkdauer des Blitzstromes selten auf. Dies sind wesentliche Unterschiede zu anderen Elektrounfällen. Bei Blitzopfern kommt es meistens zu ein- oder zweitgradigen, *linearen* (bei Schweiß- oder Wasseransammlungen, zum Beispiel unter den Armen, entlang des Brustkorbes kommt es zum Verdampfen des Wassers an der Hautoberfläche), *punktuellen* (mehrere, kleine Verbrennungen, die konzentriert auf einem Gebiet auftreten), *flächigen* (treten bei Entzünden der Kleidung oder bei Metallgegenständen, welche die betroffene Person trägt oder bei sich hat, auf) oder *farnkrautartigen* (Lichtenberg-Figuren), oberflächlichen Verbrennungen oder Hautverletzungen. [26, 27, 28, 33]

Verbrennungen können bei einem Blitzeinschlag überall am Körper auftreten, vom Kopf, Nacken und Rumpf über die oberen Extremitäten und Hände bis hin zu den unteren Extremitäten und Füßen. Vor allem an den Füßen (Fußsohle und Zehen) werden oft kleine, kreisrunde (punktuelle) Verbrennungen beobachtet, welche auf die Austrittsstelle des Blitzstromes vom Körper zur Erde zurückzuführen sind. Bei nur wenigen tödlichen Blitzunfällen treten keine sichtbaren Verbrennungen auf. [26, 33]

Es muss vor allem beachtet werden, dass die Merkmale einer Blitzverletzung nicht nur von den Parametern der Blitzentladung abhängen, sondern auch stark von der Physiologie des Körpers und der Position des Opfers während der Entladung. [26]

5.4.1 Verbrennungen durch metallische Gegenstände am Körper

Bei einem Oberflächeneffekt (siehe Kapitel 3.7) wird der Entladungskanal, welcher sich an der Hautoberfläche Richtung Erde ausbreitet, sehr stark erhitzt. Da der Entladungskanal durch eine Schicht aus verdampfter Feuchtigkeit der Haut von der Haut getrennt wird, entstehen dabei mit großer Wahrscheinlichkeit nur oberflächliche Verbrennungen. Trägt die betroffene Person Metallgegenstände, wie zum Beispiel eine Halskette oder einen Reißverschluss, führt dies zu einer Unterbrechung der Oberflächenentladung und der Blitzstrom fließt durch das Metallobjekt. Dadurch schmilzt das Metallobjekt und es können in Folge tiefere Verbrennungen auf der Haut auftreten. [26]

Thermische Effekte, welche im direkten Zusammenhang mit Blitzströmen stehen, beruhen auf der Erwärmung, verursacht durch den Stromfluss über ein leitfähiges Material. Der Temperaturanstieg hängt von der spezifischen Energie des Blitzstromes W/R (siehe Kapitel 3.4) und von einigen Materialeigenschaften des metallischen Gegenstandes, wie zum Beispiel Temperaturkoeffizient, spezifischer Widerstand, Dichte, Wärmekapazität und Querschnittsfläche ab. In [42] wird eine Perlen-ähnliche Halskette aus Edelstahl, welche aus Perlen und aus dazwischen zusammenhängenden, zylindrischen Stiftchen besteht, untersucht. Es stellte sich heraus, dass die Verbrennungen der Haut von der Temperatur und der Einwirkdauer des Blitzstromes abhängen. Bei einem Gleichstrom mit 8 kA und einer Expositionszeit von $50\text{ }\mu\text{s}$ zeigte sich, dass die höchste Temperatur an den beiden Enden der kugelartigen Perlen, die an die Stiftchen angrenzen, auftritt und die geringste Temperatur im Inneren der hohlen Kugeln auftritt. Es ergibt sich eine Temperatur von 410 K ($= 136,85\text{ }^\circ\text{C}$) an den kugelartigen Perlen und 1846 K ($= 1572,85\text{ }^\circ\text{C}$) an den dazwischen liegenden Stiftchen. Die durchschnittliche Temperatur an der Kontaktfläche der Kette zur Haut beträgt bei einer Expositionszeit von $50\text{ }\mu\text{s}$ 410 K ($= 136,85\text{ }^\circ\text{C}$), siehe Abbildung 17. Der in dieser Abbildung dargestellte Zusammenhang zwischen Kontakttemperatur und Blitzstromamplitude beruht auf einer quadratischen Beziehung, welche für verschiedene Amplituden und aus der Auswertung der Oberflächentemperatur der Perlen in Abhängigkeit der Kontaktfläche auf der Haut simuliert wurde. Berechnet man die spezifische Energie mithilfe von Formel 2 für einen Blitzstrom von $8,5\text{ kA}$ erhält man einen Wert von $3,6\text{ kJ}/\Omega$. Es stellte sich weiters heraus, dass der Temperaturanstieg an der Halskette von der spezifischen Energie des Blitzstromes abhängt und nicht von der Wellenform des Blitz-Stoßstromes. [42]

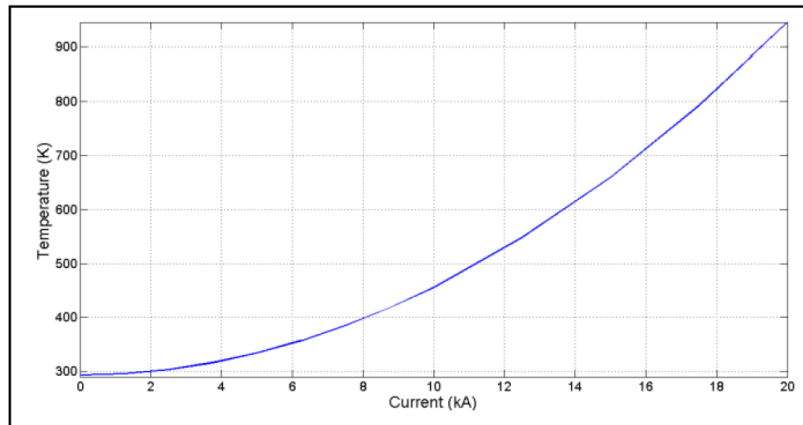


Abbildung 17: Kontakttemperatur (in K) zwischen Haut und Halskette als Funktion des Blitzstromes (in kA). [42]

Vergleicht man die spezifische Energie für den angenommenen Blitzstromwert dieser Publikation ($3,6 kJ/\Omega$) mit einer berechneten, spezifischen Energie eines Stücks Edelstahl mit einer Querschnittsfläche von $4,52 mm^2$ bei einem Stoßstrom von $1/200 \mu s$ und einer Amplitude von $100 kA$ ($1,4 MJ/\Omega$) oder dem maximalen Wert des Gefährdungspegels LPL I (Lightning Protection Level) für den ersten Stoßstrom ($10 MJ/\Omega$), ist der Wert der Publikation sehr gering. Dies kann möglicherweise dadurch erklärt werden, dass nur ein Teil des gesamten Blitzstromes über die Halskette fließt. Meist fließt ein Großteil des Stromes direkt bzw. an der Hautoberfläche (Oberflächeneffekt) Richtung Erde. In der Publikation [42] wird außerdem beschrieben, dass sich der Blitzstrom bei symmetrischen Bedingungen der Kette aufteilt. Fließt der gesamte Blitzstrom nur über einen Teil der Kette wäre der Temperaturanstieg vier mal höher. Da die Kontaktzeit der Haut mit der überhitzten, metallischen Kette sehr gering ist, sind die Verbrennungen meist nur oberflächlich. [15, 42]

5.4.2 Lichtenberg-Figuren

Lichtenberg-Figuren sind keine „echten“ Verbrennungen. Sie hinterlassen ein farn- oder baumartiges Muster auf der Hautoberfläche, welches aber von selbst nach einigen Stunden, nach einem oder mehreren Tagen bei Überlebenden und auch tödlich verunfallten Opfern wieder verschwindet. Es wird vermutet, dass sie durch eine Elektronenlawine in einem starken elektrischen Feld (ähnlich wie bei einer Streamer-Entladung), welche von der Blitzentladung ausgelöst wird und sich an der Hautoberfläche fortpflanzt, verursacht wird. Diese vorübergehende Verletzung ist typisch für einen Blitzunfall, tritt aber nicht bei allen Opfern auf (Möhle et al. [43] 20 – 30 %) und erfordert keine Therapie. [26, 28]

5.5 Nervensystem

Das Nervensystem besteht beim Menschen aus zwei Teilen - dem zentralen und dem peripheren Nervensystem. Während eines Blitzeinschlages ist häufiger das zentrale Nervensystem betroffen [33]. Die Mehrheit der Folgen eines Blitzunfalls sind neurologisch bedingt und können bei 70 % der Überlebenden gefunden werden [26].

Bis zu zwei Drittel der verletzten Opfer leiden sofort nach dem Blitzeinschlag unter einer Keraunoparalyse. Dies ist eine temporäre, typische Lähmung nach einem Blitzschlag. Sie betrifft vor allem die unteren Extremitäten, manchmal auch die oberen Extremitäten, welche oft blau, fleckig, kalt und pulslos erscheinen. Als Ursachen werden in der Literatur Schäden an den Blutgefäßen, welche die betroffenen Muskeln bzw. Nerven versorgen und Vasospasmus beschrieben, was schließlich zu Durchblutungsstörungen dieser Muskeln führt. Üblicherweise legen sich die vorübergehenden Lähmungserscheinungen nach ein paar Stunden von selbst und benötigen keine weitere Behandlung. Zusätzlich dazu treten häufig allgemeine Schwäche, Taubheit oder kribbelnde Empfindungen in den Muskeln oder Geweben auf (Parästhesie), welche bis einige Wochen oder Monate nach dem Blitzeinschlag noch wahrnehmbar sein können.

Das Verursachen von Vasospasmus und dadurch Verengungen der Blutgefäße und Beeinträchtigungen des Blutflusses kann zu einem Sauerstoffmangel im Gewebe führen. Durch den Sauerstoffmangel können verschiedene Teile des Nervensystems ebenfalls beeinträchtigt werden. Fließt ein hoher Strom durch das menschliche Gehirn, können ebenfalls neuronale Schäden bis hin zu Gehirnschädigungen auftreten. [26, 28]

Überlebende Blitzopfer verlieren häufig nach dem Blitzeinschlag das Bewusstsein für einen unterschiedlich langen Zeitraum (Ritenour et al. [33] 75 % der Überlebenden, Lederer et al. [44] 72 %). Wird durch den Einschlag das Rückenmark verletzt, kann im schlimmsten Fall eine Querschnittslähmung resultieren. Der Blitzstrom kann auch das Gedächtnis des Opfers beeinträchtigen und zu Verwirrung und Amnesie führen. Vielen fehlt jegliche Erinnerung an das Ereignis. [26, 28, 45]

24 bis 48 Stunden nach dem Blitzeinschlag nimmt die Verwirrtheit deutlich ab, Muskelschwäche und eventuelles Schmerzempfinden, Lichtempfindlichkeit und andere Störungen neurologischer Kontrollmechanismen bestehen oft länger. Nerven können ihre Funktion bereits nach Stunden wiedererlangen, aber auch Monate benötigen oder nicht mehr heilen. Letzteres ist nach Blitzunfällen eher unüblich. Neuropsychologische Langzeitfolgen nach einem Blitzunfall können unter anderem Abgeschlagenheit, Energiemangel, schlechte Konzentrationsfähigkeit, Reizbarkeit und emotionale Labilität sein. [33]

5.6 Psychologische Folgen

Zusätzlich zu den körperlichen Verletzungen treten bei manchen Opfern psychologische Probleme auf. Dazu zählen die Angst vor Gewittern und Angstzustände allgemein, Depression, Beeinträchtigung des Schlafrhythmus, Panikattacken oder Gedächtnis-, Konzentrations- und Lernstörungen. Nach einem Blitzunfall kann sich auch eine posttraumatische Belastungsstörung entwickeln. Ein Teil der Betroffenen erleben den Unfall immer wieder in Form von Erinnerungen oder Albträumen. [26]

5.7 Stumpfes Trauma

Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, entsteht bei einem Blitzeinschlag eine Druckwelle, welche nicht nur zu Schäden und Verletzungen im Ohr führen kann, sondern auch andere innere Organe wie Leber, Milz, Lunge oder Magen-Darm-Trakt schädigen kann. Darüber hinaus kann das Opfer vom ursprünglichen Standort versetzt oder „weggeschleudert“ werden, wodurch Kopf- und andere traumatische Verletzungen oder auch Prellungen auftreten können. Die Kleidung des Opfers kann ebenso zerrissen oder zerfetzt werden. [25, 26]

Verletzungen können aber auch durch herunterfallende Teile eines vom Blitz getroffenen Objekts hervorgerufen werden. Zum Beispiel können von einem vom Blitz getroffenen Baum durch die manchmal auftretende Explosion des Baumstammes Äste oder Holzsplitter auf Personen in der Nähe herunterfallen. Ein stumpfes Trauma kann ebenfalls durch Objekte, welche durch die Luft gewirbelt werden, ausgelöst werden. Dies kann auch innerhalb eines Gebäudes auftreten. [26]

5.8 Letalität von Blitzunfällen

Ein Blitzunfall mit tödlicher Folge ist relativ selten. Trotzdem können vor allem bei einem direkten Einschlag lebensbedrohliche, neurologische und kardiopulmonale Verletzungen auftreten. Die häufigste Todesursache nach einem Blitzeinschlag ist die Asystolie. Da Personen, welche von einem Blitz getroffen wurden und an Asystolie oder Herzkammerflimmern leiden, eine bessere Überlebenschance als Personen haben, welche einen Herz-Kreislauf-Stillstand anderer Ursache erleiden, ist die sofortige Reanimation besonders wichtig. Es wird von vielen Fällen berichtet, bei denen zuerst eine erfolgreiche Reanimation durchgeführt werden konnte, die Betroffenen aber trotzdem nach ein paar Tagen im Krankenhaus verstarben. Die genaue Ermittlung der Todesursache ist oft nicht möglich. Es wird in der Literatur berichtet, dass durch den Sauerstoffmangel des Gehirns nach einem Herz-Kreislauf- oder Atemstillstand eine Hirnschädigung aufgetreten ist oder es nach schweren Blitzschlagverletzungen zu einem Multiorganversagen nach einiger Zeit

oder zu weiteren Komplikationen gekommen ist. [26, 43, 46]

Sind mehrere Personen an einem Blitzunfall beteiligt, tritt bei den meisten Betroffenen eine Schädigung durch Schrittspannung auf. Dieser Energieübertragungsmechanismus weist im Vergleich zum direkten Treffer, Seitenüberschlag oder Berührungsspannung ein relativ geringes Schädigungspotential auf. Bei einem Oberflächeneffekt ist der Grad der Verletzungen auch viel geringer als bei eben genannten. Diese Umstände und die extrem kurze Einwirkdauer des Blitzstromes lassen darauf zurückschließen, dass die Zahlen der tödlichen Ausgänge nach einem Blitzeinschlag relativ gering sind. [46]

In der Literatur findet man unterschiedliche Zahlen über die Letalität von Blitzunfällen. In Tabelle 4 werden recherchierte Zahlen über Todesfälle in verschiedenen Ländern dargestellt.

Tabelle 4: Verstorbene Blitzopfer pro Jahr aus unterschiedlichen Literaturquellen für verschiedene Länder, n.a. - nicht angegeben.

Land	Quelle	Zeitraum	Verstorbene Blitzopfer pro Jahr
USA	Cooper et al. [28]	1940-1974	7000 Tote, 4-5 Mal so viele Verletzte, 50-300 Tote/Jahr
	Cooray et al. [26]	1959-1985	2566 Tote und 6720 Verletzte, 100 Tote/Jahr
	Lichtenberg et al. [35]	1968-1985	durchschnittlich 100 Tote/Jahr
	McIntyre et al. [38]	n.a.	50-300 Tote/Jahr geschätzt und 4-5 Mal so viele Verletzte
	Arden et al. [45]	n.a.	mehr als 400 Tote/Jahr
Deutschland	Cooray et al. [26]	1991-1993	19 Tote insgesamt im angegebenen Zeitraum
	Zack et al. [47]	nach 2000	3-7 Tote/Jahr
Schweden	Cooray et al. [26]	n.a.	1-2 Tote/Jahr
GB	Arden et al. [45]	n.a.	10-12 Tote/Jahr
	Cooray et al. [26]	n.a.	3 Tote/Jahr, 50 Verletzte
	Christophides et al. [37]	1988-2012	2 Tote/Jahr und 30 Verletzte
Schweiz	Cooray et al. [26]	1988-1992	12 Tote insgesamt im angegebenen Zeitraum
Österreich	Zack et al. [46]	1965-1969	48 Tote, 114 Verletzte insgesamt im angegebenen Zeitraum
	Kompacher et al. [20]	2001-2010	11 Tote insgesamt im angegebenen Zeitraum
	Holle [48]	2001-2010	1 Toter/Jahr
Uganda	Holle [48]	2007-2011	30 Tote/Jahr
	Zack et al. [46]	2007-2011	150 Tote insgesamt im angegebenen Zeitraum
Global	Cooray et al. [26]	n.a.	evtl. 1000 Tote/Jahr
	Christophides et al. [37]	n.a.	24.000 Tote/Jahr, 0.2-1.7 pro 1 Millionen Einwohner
	Holle [48]	n.a.	4176 Tote/Jahr

Wie in Tabelle 4 ersichtlich ist, ist die Anzahl der verstorbenen Blitzopfer pro Jahr regional verschieden. Die exakte Letalitätsrate nach Blitzunfällen lässt sich nicht ermitteln. Sie ist

in weniger entwickelten Ländern noch deutlich höher als in besser entwickelten. Dies liegt unter anderem an den oft nicht vorhandenen Blitzschutzsystemen, der oftmals schlechten medizinischen Versorgung und den vielen Aktivitäten und Arbeiten (Landwirtschaft) im Freien. Global betrachtet ereignen sich die meisten Blitzunfälle im Freien. [46, 48]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass zwischen 10 und 30 % der Blitzopfer den Blitzeinschlag oder die Folgen davon nicht überleben ([26]: Letalitätsrate von 20 – 30 %, [34, 35]: 30 %, [38, 44]: 10 %, [43]: 10 – 30 %, [46]: 24, 60 %).

5.9 Gegenüberstellung der Unterschiede der Verletzungsmuster bei Niederspannung, Hochspannung und einem Blitzeinschlag

Verletzungen in Folge von Blitzeinschlägen sind merklich anders als Verletzungen nach Nieder- oder Hochspannungsunfällen, unabhängig davon ob im industriellen oder privaten, häuslichen Bereich. In Tabelle 5 sind zusammenfassend die wesentlichen Unterschiede der Eigenschaften und der Verletzungsmuster bei Hochspannung, Niederspannung und bei Verletzungen durch einen Blitzeinschlag dargestellt.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Unterschiede der Eigenschaften und Verletzungsmuster eines Stromunfalls verursacht durch einen Blitzeinschlag, Hochspannung oder Niederspannung. [25, 30, 33]

	Blitzschlag	Hochspannung	Niederspannung
Spannung [V]	50 – 100 Mio.	> 1 000	< 1 000
Stromstärke [A]	bis zu 100 000	< 1 000	< 240
Dauer des Kontaktes	impulsiv und extrem kurz, obwohl Langzeitsrom auftreten kann	kurz (sofern Person weggeschleudert wird) oder lang	evtl. verlängert, wenn Loslassschwelle überschritten wird
Stromart	unidirektionaler massiver Stromimpuls, [27] Gleichstrom (DC)	Gleich- (DC)/ Wechselstrom (AC)	meistens: Wechselstrom (AC)
Ort bei Stromunfall	meist im Freien; im Haus oft telefon-, leitervermittelt	Arbeitsplatz, Industrie	Arbeitsplatz, Industrie und häuslich, es können auch Kinder betroffen sein
Energieübertragungsmechanismus	direkter Einschlag, Berührungsspannung, Seitenüberschlag, Schrittspannung, Oberflächeneffekt	Service und Reparatur der Installationen, mangelhafte Sicherheitsvorschriften oder -ausführungen, Fehlgebrauch von Geräten	Störungen bei Haushaltsgeräten und anderen elektrischen Geräten, Defekte, Amateur-Verkabelung, Leiterkontakt
Ursache des Herzstillstandes	Asystolie	Kammerflimmern wahrscheinlicher als Asystolie	Kammerflimmern
Ursache Atemlähmung	direkte Schädigung des Atemzentrums	indirekte Verletzungsform oder tetanische Kontraktion der Atemmuskulatur	tetanische Kontraktion der Atemmuskulatur

	Blitzschlag	Hochspannung	Niederspannung
Muskelerregungsform	einmalig	DC: einmalig, AC: tetanisch	tetanisch
Schädigung der Muskulatur	selten	kann auftreten	häufig
Verbrennungen der Haut	häufig aber gering, schwere Verbrennungen sehr selten	häufig, tiefgradig	meist oberflächlich
Lichtenberg-Figuren	häufig	können auftreten	nicht vorhanden
Elektroporation	[25]: noch zu bestimmen, [33]: kann auftreten	Auftreten nachgewiesen	Auftreten nachgewiesen
Ursache stumpfes Trauma, Aufprallverletzung	Druckwelle, Sturz, herunterfallende Objekte durch Explosionsfolge	Muskelkontraktionen, Sturz	selten, Sturz
Prävention	richtiges eigenverantwortliches Verhalten, Gebäudeblitzschutz	Schutzvorrichtung, Sicherheitsanweisungen	Schutzvorrichtung, richtiges eigenverantwortliches Verhalten
Erste Hilfe	sofortige Reanimation, medizinische Hilfe rufen	Verletzung des Retters bei Trennen des Opfers von der Stromquelle vermeiden, Strom abschalten, Reanimation, medizinische Hilfe	Verletzung des Retters bei Trennen des Opfers von der Stromquelle vermeiden, Strom abschalten, Reanimation, medizinische Hilfe

6 Methoden

Für die Ermittlung der Auswirkungen des Blitzstromes auf den menschlichen Körper werden in dieser Arbeit die Blitzunfälle mit Personenbeteiligung in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 ausgewertet.

6.1 Informationen über die Unfalldaten

Für die Auswertungen der Blitzströme auf den menschlichen Körper wurden anonymisierte Daten der überlebenden und verstorbenen Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 herangezogen. Die Grundlage dieser Datenbasis stellt in den meisten Fällen der Bericht der zuständigen Polizei, der Erhebungsbericht für die Zentralstatistik elektrischer Unfälle (Meldepflicht an das Ministerium), der Aktenvermerk der Landesstelle für Brandverhütung in Steiermark, die ALDIS-Blitzortungsdaten und Zeitungsberichte dar. Die in der Datenbank fehlenden ALDIS-Blitzortungsdaten wurden im Rahmen dieser Arbeit nachträglich abgefragt. Aus dieser Datenbasis können Informationen wie das Alter, das Geschlecht, der genaue Unfallzeitpunkt und der Unfallhergang entnommen werden.

Für diese Arbeit wurden die Informationen über die einzelnen Blitzunfälle aus der erwähnten Datenbasis verwendet und mithilfe der in der Literatur verfügbaren Informationen ausgewertet.

Um die Unfälle möglichst genau erfassen und auswerten zu können, wurde versucht, für jeden Unfall folgende Informationen zu ermitteln:

- Ort und Zeit (Datum, Uhrzeit, möglichst genaue Ortsangabe, Umgebung)
- Betroffene Personen (Anzahl, Geschlecht, Alter)
- Unfallbeschreibung
- Wetter (kurz vor oder beim Blitzeinschlag)
- ALDIS-Blitzdaten (Uhrzeit, Koordinaten, Stromstärke der Entladung)
- Art der Energieeinwirkung auf den Menschen
- Tätigkeit und Körperhaltung vor dem Blitzunfall
- Bekleidung, Schuhe, Bodenbeschaffenheit und Bodenart
- Blitzspuren am Körper, um auf den Stromweg im und am Körper schließen zu können
- Art der Verletzungen
- Medizinische Versorgung vor Ort und weitere Behandlungen

Die in den folgenden Kapiteln verwendeten Begriffe *Blitzunfall* und *Blitzopfer* werden wie folgt definiert:

Ein *Blitzunfall* ist ein Ereignis, bei dem eine Person an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt durch eine direkte oder indirekte Blitzeinwirkung unfreiwillig verletzt oder getötet wird.

Als *Blitzopfer* werden alle anonymisierten Personen (weiblich oder männlich), welche durch einen Blitzunfall verletzt oder getötet wurden, bezeichnet.

6.2 Auswertung der Blitzortungsdaten

Um zu überprüfen, ob beim angegebenen Ort und Zeitpunkt eines Blitzunfalls auch tatsächlich eine Wolke-Erde-Entladung stattgefunden hat, wurden von ALDIS für jeden Blitzunfall Blitzabfragen durchgeführt. Mithilfe dieser Blitzabfragen kann ein Einschlag bestätigt und die Blitzstromamplitude ermittelt werden. Für die Abfrage werden die genauen geographischen Koordinaten (geographische Breite und Länge), der Umkreis der Abfrage um diesen geographischen Punkt (in km), das Datum und der Zeitraum, in welchem die Abfrage durchgeführt werden soll, benötigt. Das Ergebnis der Abfrage ist eine tabellarische Auflistung aller Wolke-Wolke (erst seit den letzten Jahren in größerem Umfang möglich) und Wolke-Erde-Entladungen mit Entfernungen zu den abgefragten Koordinaten und den Amplituden der Blitzströme. Zusätzlich werden alle detektierten Entladungen durchnummeriert in einer Karte dargestellt. Die eingegebene geographische Koordinate wird dabei immer mit einer roten Stecknadel abgebildet. Im ausgewählten Umkreis um diesen Ort werden die detektierten Entladungen in Form eines Blitzsymbols (rot - Wolke-Wolke-Entladungen (WW-Blitz) und gelb - Wolke-Erde-Entladungen (WE-Blitz)) dargestellt.

In Abbildung 18 ist beispielhaft eine Blitzabfrage für Graz (geographische Koordinaten: 47.070852, 15.438386) vom 23.06.2017 im Zeitraum zwischen 18:00 und 19:00 Uhr dargestellt. In diesem Zeitraum wurden 13 Entladungen detektiert, welche in Tabelle 6 genauer aufgelistet sind. Dieser Tabelle kann, wie gerade beschrieben, der genaue Zeitpunkt, die Blitzstromamplitude in kA und die Entfernung zu den abgefragten Koordinaten entnommen werden.

Für die Ermittlung der Blitzstromamplitude bei den einzelnen Blitzunfällen wird jene Wolke-Erde-Entladung gewählt, die zeitlich und örtlich sowie mit weiteren relevanten Informationen am besten mit den Unfalldaten übereinstimmt.

Beginn der Abfrage: 23.06.2017, 18:00
Ende der Abfrage: 23.06.2017, 19:00
Ort: Geo-Länge: 15.438386 / Geo-Breite: 47.070852

Anzahl der Blitze: 13
Erster Blitz: 23.06.2017 18:42:02 (Ortszeit)
Letzter Blitz: 23.06.2017 18:53:27 (Ortszeit)

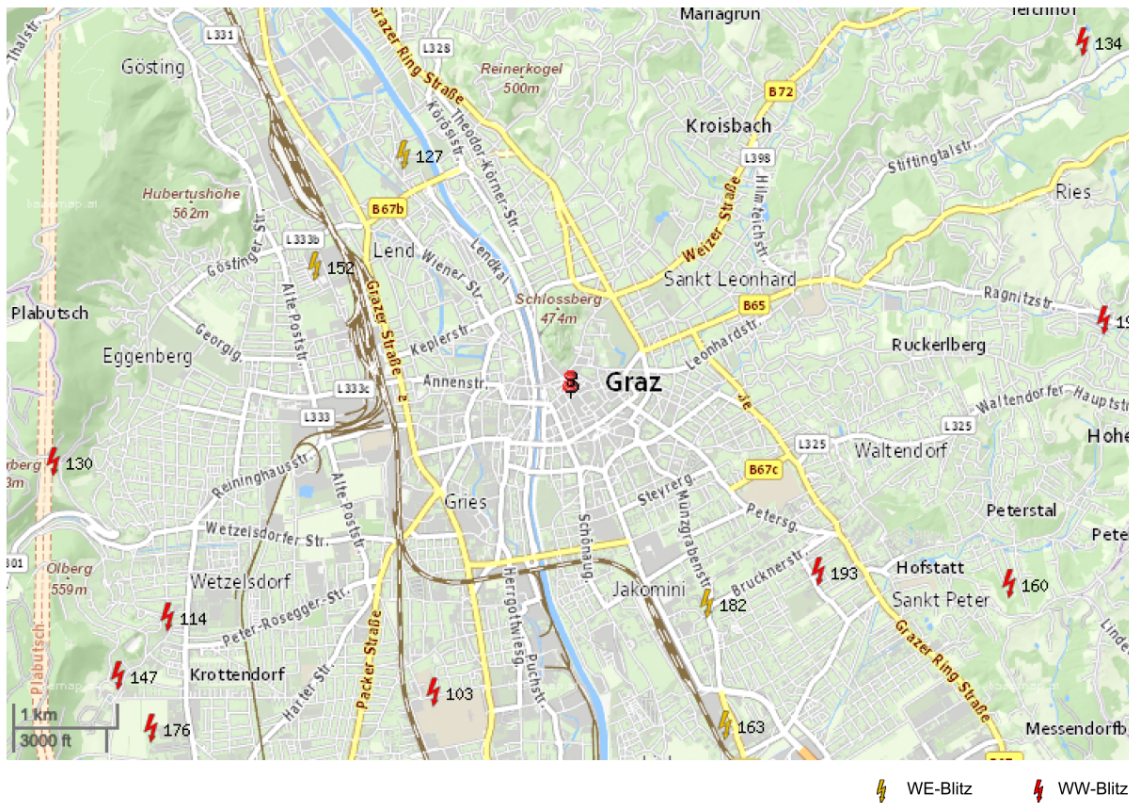


Abbildung 18: Blitzabfrage für Graz vom 23.06.2017 - Darstellung aller detektierten Entladungen auf der Karte. [2]

Tabelle 6: Blitzabfrage für Graz vom 23.06.2017 - Tabellarische Auflistung aller detektierten Entladungen. [2]

ID	Datum	Geo-Breite	Geo-Länge	Amplitude	WW/WE	Entf.[km]
103	23.06.2017 18:42:02 (Ortszeit)	47.0477	15.4224	6.8 [kA]	WW	2.8 km
114	23.06.2017 18:43:30 (Ortszeit)	47.0536	15.392	13.7 [kA]	WW	4 km
127	23.06.2017 18:45:21 (Ortszeit)	47.0895	15.4188	-14.7 [kA]	WE	2.5 km
130	23.06.2017 18:45:48 (Ortszeit)	47.0656	15.3788	6.3 [kA]	WW	4.6 km
134	23.06.2017 18:46:25 (Ortszeit)	47.0982	15.4964	1.7 [kA]	WW	5.3 km
147	23.06.2017 18:48:06 (Ortszeit)	47.049	15.3863	5.7 [kA]	WW	4.6 km
152	23.06.2017 18:48:35 (Ortszeit)	47.0808	15.4087	-12.4 [kA]	WE	2.5 km
160	23.06.2017 18:49:44 (Ortszeit)	47.0562	15.488	-4.9 [kA]	WW	4.1 km
163	23.06.2017 18:50:03 (Ortszeit)	47.0452	15.4556	-18.5 [kA]	WE	3.1 km
176	23.06.2017 18:52:05 (Ortszeit)	47.0449	15.39	6.1 [kA]	WW	4.7 km
182	23.06.2017 18:52:44 (Ortszeit)	47.0546	15.4536	-8.8 [kA]	WE	2.1 km
193	23.06.2017 18:53:27 (Ortszeit)	47.0571	15.4663	-3.5 [kA]	WW	2.6 km
195	23.06.2017 18:53:27 (Ortszeit)	47.0766	15.4989	9.1 [kA]	WW	4.6 km

7 Blitzunfälle mit Personenschäden in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017

Die Auswirkungen von Blitzströmen auf den menschlichen Körper werden in den folgenden Kapiteln anhand der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 beschrieben und diskutiert. Bei den zahlreichen Blitzen in der Steiermark kommt es auch zu direkten oder indirekten Blitzeinschlägen, bei denen Personen beteiligt sind. Die meisten durch Blitzschlag geschädigten Menschen überleben, tragen aber unterschiedlich schwere Gesundheitsschäden davon.

7.1 Überblick über die Blitzunfälle

Abbildung 19 zeigt die Anzahl der überlebenden Blitzopfer und der Blitztoten in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017. In diesem Zeitraum ereigneten sich in der Steiermark insgesamt 22 Blitzunfälle mit 55 Unfallopfern, von denen 4 Personen den Blitzschlag nicht überlebten. Daraus ist ersichtlich, dass bei manchen Unfällen mehr als eine Person gleichzeitig betroffen waren.

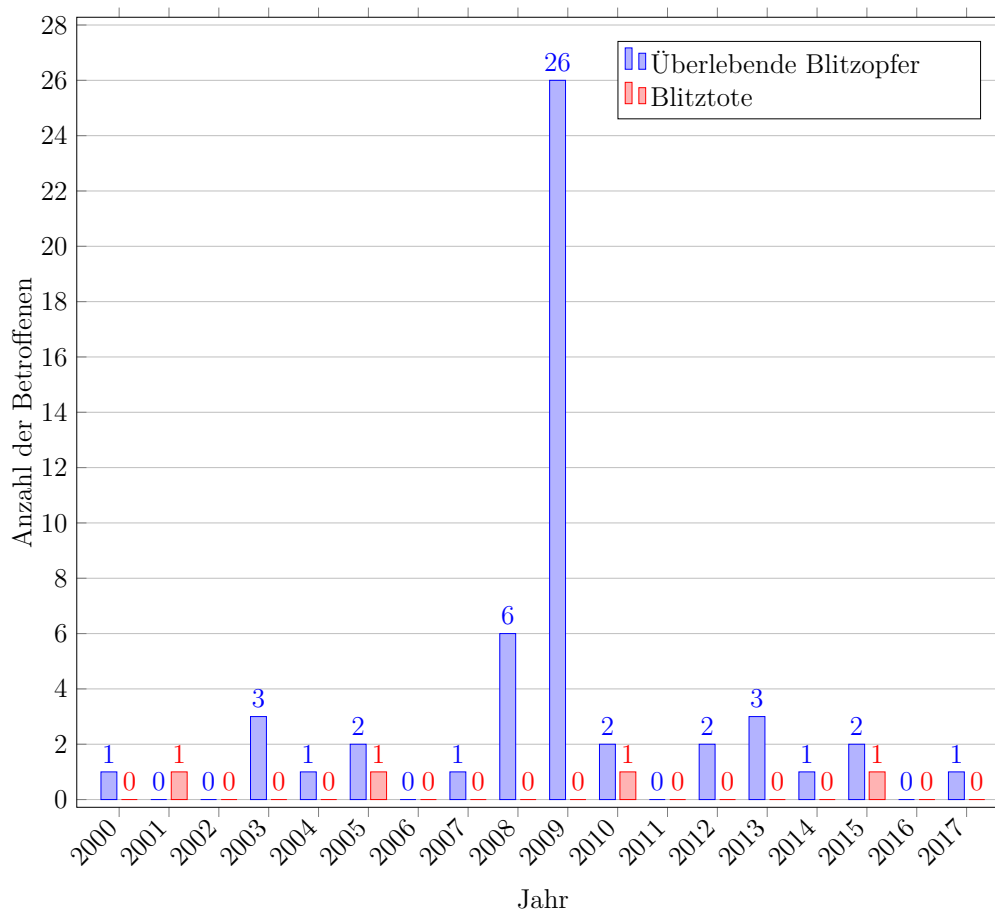


Abbildung 19: Anzahl der überlebenden Blitzopfer und der Blitztoten in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017.

7.2 Unfall 1 - 2000

Unfallbeschreibung

Ein 27-jähriger Landwirt wurde bei dem Blitzschlag im Mai 2000 am Nachmittag verletzt. Es regnete zum Unfallzeitpunkt bereits leicht. Während des Einschlages stand das Blitzopfer auf seinem Grundstück auf einem 20 – 30 cm hohen Stapel aus Betoneisenmatten in gebückter Haltung. Das Blitzopfer fiel vom Stapel und weiter eine Böschung hinunter. Nach dem Blitzunfall wurde er mit einem Notarztwagen in das nächste Krankenhaus eingeliefert.

Es befanden sich noch drei weitere Männer im Moment des Blitzeinschlages in der Nähe des Blitzopfers. Sie wurden vorsorglich ebenso in das Krankenhaus eingeliefert.

Verletzungen

Das Blitzopfer wurde nur leicht verletzt. Es hatte einige Schürfwunden und leichte Prellungen vom Sturz (stumpfes Trauma). An der Ein- und Austrittsstelle des Blitzstromes im Bereich des unteren Rückens und am rechten Oberschenkel konnten Strommarken (Brandwunden ersten Grades) identifiziert werden. Einen Tag lang konnte der Betroffene Lichtenberg-Figuren, welche wie eine Zeichnung eines Laubbaumes aussahen, am rechten Oberschenkel beobachten. Das Blitzopfer war zwei Tage nach dem Unfall normal ansprechbar. Es konnte sich an den Einschlag selbst oder einen lauten Knall nicht erinnern.

Bei den drei weiteren Männern konnten keine Verletzungen festgestellt werden, die auf einen Blitzschlag deuten würden. Sie verspürten lediglich unmittelbar vor dem Blitzeinschlag ein Kribbeln an ihren Köpfen, als würden Ameisen darauf herumlaufen. Im Moment des Blitzeinschlages konnten sie nur einen lauten Knall wahrnehmen.

Blitzstromamplitude

Innerhalb einer halben Stunde ereigneten sich im Umkreis von 2 km um den genauen Unfallort 11 Wolke-Erde-Entladungen, im Umkreis von 5 km 35 Wolke-Erde-Entladungen. Die Auswertung der Daten von ALDIS für den genauen Ort und Zeitpunkt dieses Unfalls ergibt eine Blitzstromamplitude des Wolke-Erde-Blitzes von $-8,7 \text{ kA}$. Zehn Minuten davor wurde die erste Entladung dieses Gewitters in 3,2 km Entfernung zum Unfallort und die zweite Entladung zwei Minuten vor dem Unfall in 1 km Entfernung detektiert.

Diskussion

Bei diesem Unfall handelte es sich um einen direkten Blitzeinschlag in das Blitzopfer oder einen Seitenüberschlag von einem getroffenen Objekt in der Nähe des Opfers auf dieses. Da keine Informationen über die Umgebung des Unfallortes bekannt sind, kann nicht genauer gesagt werden, ob sich Objekte in der Nähe befanden, welche der Blitz direkt traf, und somit ein Seitenüberschlag möglich gewesen wäre. Aufgrund der sichtbaren Blitzspuren kann von einem Stromfluss am bzw. im Körper durch einen direkten Stromein- und

-austritt ausgegangen werden. Die Eintrittsstelle der Blitzentladung konnte eindeutig im unteren Rücken (oberhalb des Gesäßes) aufgrund der gebückten Haltung, die Austrittsstelle beim rechten Oberschenkel identifiziert werden. Nach dem Austritt beim rechten Oberschenkel wurde der Blitzstrom weiter in die Erde abgeleitet. Da die Verletzungen gering ausfielen, ist ein Großteil des Blitzstromes an der Körperoberfläche bzw. entlang der Kleidung Richtung Erde geflossen (Oberflächeneffekt, siehe Kapitel 3.7). Die aufgetretenen Lichtenberg-Figuren sind typisch bei einem Blitzunfall und verschwinden nach kurzer Zeit ohne Behandlung von selbst, wie auch bei diesem Unfallopfer (siehe Kapitel 5.4.2).

Befindet man sich direkt im Entladungskanal, von welchem die Druckwelle ausgesandt wird, hört man den Donner nicht. Da das Blitzopfer keinen Donner wahrnahm, deutet dies ebenfalls auf einen direkten Stromein- und -austritt am Körper hin. Die drei anderen Personen, welche sich in unmittelbarer Nähe des Einschlagsortes befanden, konnten diesen lauten Donnerknall allerdings beschreiben. Die durch die Blitzentladung ausgelöste Druckwelle bzw. der aufgetretene Schrittspannungseffekt bewirkte, dass das Blitzopfer und auch die anderen Personen zu Boden fielen.

Das Empfinden, als würden Ameisen auf den Köpfen der drei anderen Männer krabbeln, kann mit dem Auftreten der Fangentladungen, welche dem Leitblitz entgegen wachsen, erklärt werden. Nähert sich der Leitblitz der Erde bzw. einer Fangentladung, erhöht sich die elektrische Feldstärke an Teilen an der Erdoberfläche.

Es kann eindeutig eine Blitzentladung dem Unfall aufgrund der geringen Distanz von 220 m zu den abgefragten Koordinaten, welche dem Wohnhaus des Betroffenen entsprechen, und der mit der Unfallbeschreibung übereinstimmenden Unfallzeit zugewiesen werden.

7.3 Unfall 2 - 2001

Unfallbeschreibung

Bei einem Blitzschlag wurde eine 56-jährige Steirerin im Juni 2001 am frühen Abend getötet. Nachdem am Nachmittag ein Gewitter über den Unfallort zog, wollte das Blitzopfer am frühen Abend bei noch anhaltendem Regen, aber zu diesem Zeitpunkt nicht mehr wahrnehmbarer Gewitteraktivität, sechs Kühe von der 200 m vom Haus entfernten Weide in den Stall treiben. Die beiden Personen, die sich im Haus befanden, bemerkten den Unfall, da sie einen heftigen Blitz und Donner mit anschließendem Stromausfall in Haus und Stall wahrnahmen. Die Kühe liefen daraufhin aufgebracht alleine in Richtung Stall. Ein Hausbewohner beobachtete das Beschriebene und eilte zur Weide. Dort sah er das Blitzopfer etwas seitlich, mit dem Kopf Richtung Tal reglos in der Wiese in der Nähe des Waldrandes liegen. Die zu Hilfe eilende Person führte 10 Minuten lang Wiederbelebungs-

versuche mit Herzdruckmassage und Mund-zu-Mund-Beatmung durch. Da dieser Versuch erfolglos blieb, wurde danach die Rettung verständigt.

Das Blitzopfer hatte einen Regenschirm und einen Stock in jeweils einer Hand und einen Apfel bei sich. Der Schirm lag neben ihr am Boden. In einer Entfernung von etwa 8–10 m vom Unfallort in Richtung Waldrand konnten bei zwei Fichten Blitzspuren erkannt werden. Bei der einen Fichte wurden Blitzspuren im oberen Bereich festgestellt. Bei der zweiten Fichte, welche ungefähr einen halben Meter entfernt steht, konnten Spuren in einer Höhe von 1,5 m gefunden werden. Teile des Apfels lagen in der Linie zwischen Fichtenbaum und Lage des Blitzopfers.

Verletzungen

Die eintreffenden Rettungskräfte und der Notarzt konnten nur noch den Tod des Blitzopfers feststellen. Der Arzt gab als Todesursache Herzkammerflimmern und einen anschließenden Herzstillstand aufgrund eines Stromunfalls an. Es konnten keine Blitzspuren oder Strommarken am Körper oder der Kleidung des Opfers sowie am Regenschirm oder dem Stock identifiziert werden.

Blitzstromamplitude

Die Auswertung der Blitzdaten des Blitzortungssystem ALDIS ergaben im Umkreis von 5 km innerhalb einer Stunde acht Wolke-Erde Entladungen. Der Großteil der Blitzeinschläge ereignete sich, wie auch von den Zeugen beschrieben, vor dem Unfall. Zum angegebenen Zeitpunkt konnte eine Wolke-Erde-Entladung mit insgesamt fünf Teilentladungen, die zum selben Zeitpunkt detektiert wurden, geortet werden. Die Einschlagpunkte lagen dabei zwischen 230 m und 3,4 km vom Wohnhaus entfernt. Jene Entladung mit der geringsten Entfernung (230 m) zum abgefragten Ort, was in diesem Fall das Wohnhaus und nicht der genaue Unfallort war, hatte eine Blitzstromamplitude von $-7,3 \text{ kA}$. Es ereigneten sich zwei weitere Entladungen in einer Entfernung von 550 m (-12 kA) und 560 m ($-10,4 \text{ kA}$) zum Wohnhaus.

Diskussion

Das Blitzopfer stand vermutlich zum Zeitpunkt des Blitzschlages Schutz suchend vor dem noch anhaltenden, leichten Gewitter am Waldrand neben bzw. unter einer der Fichten, welche eindeutige, frische Blitzspuren aufwies. Da bei der Betroffenen keine Strommarken bzw. Blitzspuren an ihrem Körper festgestellt werden konnten, ist ein Seitenüberschlag des Blitzstromes von der Fichte auf sie trotz des Regenschirms auszuschließen. Aufgrund des sehr geringen Abstandes zu dem getroffenen Baum erfuhr das Blitzopfer eine hohe Schrittspannung, welche einen Stromfluss in ihrem Körper bewirkte und damit eine tödliche Folge hatte. Durch die Druckwelle der Blitzentladung wurde die Betroffene durch die Luft gewirbelt und etwa 8–10 m vom Waldrand entfernt in der Wiese liegend gefunden. Darauf weisen auch die zwischen der Fichte und dem Opfer gefundenen Apfelstücke hin.

Da bei Blitzopfern ein Fremdverschulden ausgeschlossen werden kann, werden sie nach einem tödlichen Blitzereignis nicht obduziert. Die Todesursache, welche von den untersuchenden Ärzten angegeben wird, ist daher nur eine naheliegende Vermutung. Die häufigste Todesursache nach einem direkten Blitzeinschlag ist Asystolie.

Mithilfe der Beschreibung des Unfallortes und den vorhandenen Koordinaten der detektierten Entladungen kann eindeutig jene Entladung mit einer Amplitude von $-7,3 \text{ kA}$ dem Unfall zugeordnet werden. Der Unfallort befand sich auf der 200 m vom Wohnhaus des Blitzopfers entfernten Weide. Für die Blitzabfrage wurden die Koordinaten des Wohnhauses eingegeben. Wertet man die Koordinaten der beschriebenen Entladung aus, so sieht man deutlich, dass diese Entladung in 230 m Entfernung zum Wohnhaus auf einer Wiese, welche an einen Wald angrenzt, geortet wurde und somit dem Unfallort entspricht. Die beiden anderen Entladungen in einer Entfernung von etwa 550 m wurden in einer zu großen Entfernung detektiert und liegen auf der anderen Seite des Waldes. Diese Stellen sind vom Wohnhaus aus nicht mehr einsehbar, stimmen nicht mit dem Beschriebenen überein und werden somit von der Betrachtung ausgeschlossen.

7.4 Unfall 3 - 2003

Unfallbeschreibung

Im August 2003 ereignete sich ein heftiges Sommergewitter mit Starkregen und Hagel im Bereich des Unfallortes. Am frühen Vormittag suchten etwa 60 Personen vor diesem Gewitter Schutz in einer Hütte in einem Gipfelbereich. Der Hüttenwirt beschrieb, dass er um ca. neun Uhr damit beschäftigt war, die vielen Wanderer in seiner Hütte unterzubringen und dabei vor der Hütte beobachtete, dass es im Dachbereich zu hellen Lichterscheinungen kam. Ein paar Minuten später schlug ein Blitz in die Hütte ein. Die meisten Wanderer befanden sich bereits in der Hütte. Bei diesem Blitzeinschlag wurden drei Jugendliche, zwei Mädchen im Alter von 13 und 14 Jahren und ein Junge im Alter von 10 Jahren, verletzt. Sie saßen bei bzw. lehnten an einem Heizkörper in der Hütte während des Blitzeinschlages. Die drei Schüler wurden in das nächste Krankenhaus eingeliefert.

Der Hüttenwirt wies nach dem Unfall darauf hin, dass an der Hütte im Jahr vor dem Blitzeinschlag eine Blitzschutzanlage angebracht worden war. Die Hütte war zum Unfallzeitpunkt mit Fangeinrichtungen am Dach und weiteren Ableitungen ausgestattet. Die Aufbauten am Hüttdach sowie jene neben der Hütte waren mit den Fangeinrichtungen verbunden. Auf einer Seite der Hütte waren als Weiterführung der Fangeinrichtungen zwei Ableitungen angebracht. Diese führten zu weiteren Leitungen, welche entlang einer Felswand ca. 40 m lang an dieser befestigt waren.

In der Hütte befanden sich ein Gasofen, eine Heizungsanlage, eine elektrische Anlage, welche über Solarkollektoren betrieben wurde, eine Funkanlage und ein über einen Richtfunk-

spiegel betriebenes Telefon. Potentialausgleichsverbindungen von den Fangeinrichtungen bzw. Ableitungen der Hütte waren zu keinem berührbaren, im Fehlerfall möglicherweise spannungsführenden Teil im Inneren der Hütte installiert.

Verletzungen

Die drei Jugendlichen erlitten Veränderungen im Herzmuskelbereich, welche laut erster Diagnose nicht schwerwiegend waren. Für weitere Beobachtungen und Abklärungen wurden sie stationär im Krankenhaus aufgenommen.

Blitzstromamplitude

Zum Unfallzeitpunkt ging ein schweres Gewitter über das Gebiet um den Unfallort nieder. Die Blitzabfrage für einen Umkreis von 2 km um den Unfallort von einer Stunde vor bis einer Stunde nach dem angegebenen Unfallzeitpunkt lieferte 25 Wolke-Erde-Entladungen, welche alle eine negative Ladung aufwiesen. Im Umkreis von 20 km konnten insgesamt 625 Wolke-Erde-Entladungen (583 negative und 42 positive) detektiert werden.

In Abbildung 20 sind die Blitzeinschläge chronologisch nummeriert und maßstabsgetreu in der aufgetretenen Entfernung vom Unfallort, welcher als violetter Kreis dargestellt wird, eingezeichnet. Die Blitzentladung mit der Nummer 18 ($-2,3\text{ kA}$) konnte direkt am abgefragten Ort ermittelt werden. Daher würde man auf den ersten Blick diese Entladung dem beschriebenen Ereignis zuordnen. Sie ereignete sich um 09:10:50 Uhr. Die beiden danach nächstgelegenen Entladungen (6 ($-46,7\text{ kA}$) und 14 ($-7,6\text{ kA}$)) fanden früher statt (09:02:37 Uhr und 09:04:25 Uhr) und konnten in einer sehr geringen Entfernung zur Hütte (200 m) detektiert werden. Beide waren Teil einer Entladung mit mehreren Teilblitzen mit unterschiedlichen Einschlagpunkten auf der Erdoberfläche (Nummer 5-11 um 09:02:37 Uhr und Nummer 13-14 um 09:04:25 Uhr).

Diskussion

Durch die vermutlich ungenügenden Erdungsbedingungen und dem fehlenden Potentialausgleich kam es bei dem Blitzeinschlag zu einer Potentialanhebung der berührbaren, leitfähigen Teile, wie in diesem Fall jenem Heizkörper, der in Kontakt mit den Verletzten stand. So griffen die drei Jugendlichen eine gefährliche Spannungsdifferenz ab.

Da keine detaillierten Informationen über die Verletzungen bekannt sind, kann wenig über einen möglichen Stromweg ausgesagt werden. Da die Beschwerden und Verletzungen unmittelbar nach dem Ereignis in der Hütte als gering beschrieben wurden, dürften die drei Jugendlichen nur leichte Verletzungen davon getragen haben.

Wertet man die detektierten Blitzeinschläge nach der Entfernung zur Hütte aus, so kann diesem Unfall eindeutig eine Entladung mit einer Blitzstromamplitude von $-2,3\text{ kA}$ zugeordnet werden. Aufgrund der geringen Entfernung der beiden anderen Entladungen (Nummer 6 und 14) zur Hütte und einer Ortungsungenauigkeit des Blitzortungssystem

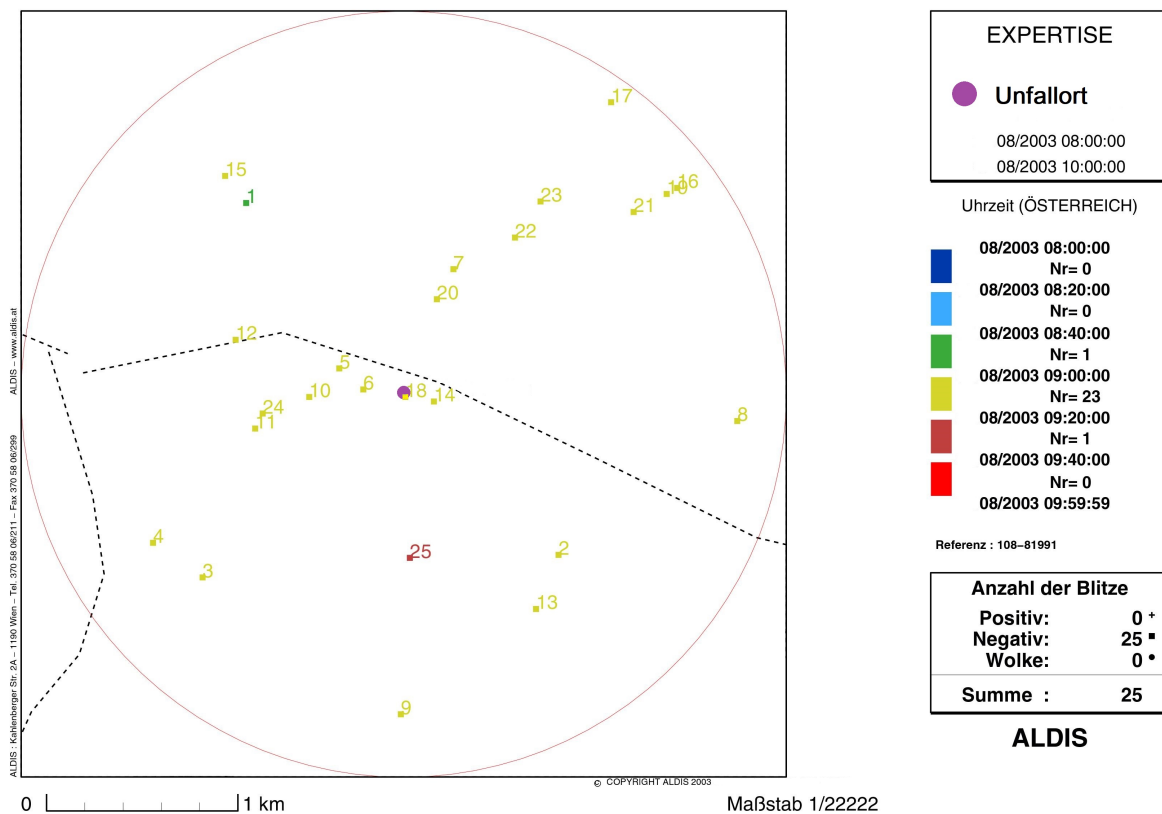


Abbildung 20: Blitzabfrage für einen Umkreis von 2 km um den Unfallort (violetter Kreis) des Unfalls 3, 2003. Die Nummern stellen die Blitzentladungen in chronologischer Reihenfolge dar. Vgl. [2]

ALDIS laut [2] von 100 – 200 m, sollten diese trotzdem nicht außer Betracht gelassen werden. Der genaue Zeitpunkt des Einschlages ist aus den Unfallbeschreibungen nicht ausreichend bekannt, da der Hüttenwirt nur angab, dass wenige Minuten nach 9 Uhr der Blitz in die Hütte einschlug. Mit dieser Information könnten alle drei beschriebenen Wolke-Erde-Entladungen (Nummer 6, 14, 18) den Unfall verursacht haben. Da der Hüttenwirt vor dem Einschlag in die Hütte bereits Entladungen im Dachbereich beobachtet hatte, kann die gesuchte Entladung nicht die erste in dieser Umgebung gewesen sein und muss somit etwas später aufgetreten sein. Weiters sind die Koordinaten des Unfallortes genau bekannt und diese stimmen mit der Entladung Nummer 18 exakt überein.

7.5 Unfall 4 - 2004

Unfallbeschreibung

Im Juli 2004 wurde eine 49-jährige Steirerin kurz nach Mittag durch einen Blitzschlag verletzt. Da das Fahrrad der Frau während ihrer Radtour kaputt geworden war, schob sie es den verbleibenden Weg auf einer asphaltierten Straße nach Hause. An die Straße grenzt auf beiden Seiten eine Wiese mit ein paar einzeln stehenden, über die Wiese verteilten,

nicht allzu hohen Bäumen. An beiden Enden der Wiese erheben sich Hügel, auf welchen ebenfalls Bäume stehen (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21: Darstellung des Standortes des Unfallopfers und der Umgebung des Unfallortes zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages, Unfall 4.

Unmittelbar vor dem Blitzeinschlag konnte die Frau eine Gewitteraktivität in der Entfernung wahrnehmen. In ihrer näheren Umgebung konnte sie noch keine Gewitteraktivität und keinen Regen bemerken. Das Blitzopfer wurde laut Zeugen direkt vom Blitz getroffen und anschließend zu Boden geworfen. Sie selbst konnte zum Unfallhergang nichts angeben und kann sich auch nicht daran erinnern. Da vorbeifahrende Autos den Vorfall beobachtet hatten, wurde sie sofort nach der Entladung am Unfallort bis zum Eintreffen der Rettungskräfte erstversorgt. Anschließend wurde sie in ein Krankenhaus gebracht. Die Betroffene war leicht bekleidet und trug ein Fahrrad T-Shirt und einen Fahrradhelm. Das T-Shirt und der Helm wurden aufgrund des Unfalls stark beschädigt bzw. zerrissen (siehe Abbildung 22). Der Helm brach im vorderen Bereich zur Hälfte auseinander. Einzelne Teile konnten in einem Umkreis von 50 m vom Unfallort entfernt gefunden werden. Das Blitzopfer trug eine Halskette, welche nach dem Unfall nicht mehr aufgefunden werden konnte. Das Fahrrad wurde ebenso in Mitleidenschaft gezogen. Da es nach dem Unfall sofort repariert wurde, konnten die Schäden nicht mehr nachvollzogen werden. Nur eine Flachstelle an der hinteren Fahrradfelge wurde direkt am Unfallort bemerkt und protokolliert. Zwei Stücke in der Größe von ungefähr $40 \times 20\text{ cm}$ wurden aus der Asphaltdecke der Straße gerissen und konnten in der angrenzenden Wiese gefunden werden.

Verletzungen

Das Blitzopfer kam erst nach den eingeleiteten Erste-Hilfe-Maßnahmen der vorbeifahrenden Ersthelfer wieder zu Bewusstsein. Die Frau erlitt durch den Blitzschlag Verletzungen am rechten Trommelfell, welche nach Angaben der behandelnden Ärzte durch thermische Schäden entstanden, und eine etwa 14 cm lange Verbrennungsnarbe an der rechten Seite des Halses. Des Weiteren gab das Blitzopfer an, dass ihre Haare beim rechten Ohr ange-



Abbildung 22: Beschädigungen des Fahrradhelms und Fahrrad T-Shirts aufgrund des Blitzeinschlages, Unfall 4.

sengt waren, sie Veränderungen der Haut im Bereich des Bauches und rote Punkte auf ihrem Oberkörper feststellen konnte. Unterhalb der Leiste wurden keine Veränderungen der Haut beobachtet. Das Blitzopfer erlitt Hautabschürfungen im Bereich der Schultern und am Kopf. Sie wurde im Krankenhaus stationär aufgenommen.

Bis auf die Verletzungen beim rechten Trommelfell und die Narbe an einer Halsseite entstanden bei der Frau keine weiteren länger anhaltenden, durch den Blitzeinschlag verursachten gesundheitlichen Schäden.

Blitzstromamplitude

In einem Umkreis von 4 km um den genau bekannten Unfallort wurden innerhalb von acht Minuten 32 Wolke-Erde-Entladungen detektiert. Die Auswertung der Blitzabfrage für diesen Blitzunfall ergab für den von den Zeugen und vom Unfallopfer angegebenen Zeitpunkt, welcher nicht exakt definiert werden konnte, und den bekannten Unfallort zwei negative Entladungen in einem zeitlichen Abstand von fast vier Minuten. Die Blitzstromamplituden dieser Entladungen betragen $-6,4\text{ kA}$ und $-6,9\text{ kA}$ und liegen örtlich nahe beieinander. Jene Entladung mit einer Amplitude von $-6,4\text{ kA}$ trat als erste in diesem Gebiet auf.

Diskussion

Im Moment des Stromflusses aufgrund des Blitzeinschlages berührte das Fahrrad mit der sichtbaren Flachstelle an der hinteren Fahrradfelge jene Straßenstelle, an welcher die beiden Asphaltstücke herausgerissen wurden. Da das Blitzopfer nur kurz das Bewusstsein verlor, nicht in Lebensgefahr schwebte und von keinen schweren Herzveränderungen berichtet wurde, wird der Stromweg des Teilstromes der direkten Blitzentladung mit großer Wahrscheinlichkeit vom Kopf über die beiden Arme und weiter über das Fahrrad in Richtung Erde verlaufen sein. Da die Frau keine Beschwerden und äußerlich erkennbare Haut-

veränderungen an den Beinen erlitt, ist ein Stromweg über das Fahrrad und nicht über ihre unteren Extremitäten wahrscheinlich. Die roten Punkte am Oberkörper deuten auf für einen Blitzunfall typische, punktförmige Verbrennungen (siehe Kapitel 5.4) hin.

Die lange Narbe und der zerrissene Bereich des T-Shirts an der Halsseite des Blitzopfers entstanden durch hohe Temperatureinwirkung. Genau an jener Stelle, wo die Narbe zurückblieb, trug die Frau eine Halskette. Die Kette wurde durch die Blitzstromeinwirkung so stark erhitzt, dass sie schmolz, eine Brandmarke hinterließ (siehe Kapitel 5.4.1) und das T-Shirt beschädigte. Wertet man Abbildung 17 für eine Blitzstromamplitude von 7 kA aus, erhält man eine Kontakttemperatur von etwa 375 K ($=101,85\text{ °C}$) [42]. In dieser Publikation wird davon ausgegangen, dass sich der Strom, welcher durch die perlenartige Edelstahl-Kette fließt, in zwei gleich große Teilströme aufteilt. Bei diesem Blitzopfer ist aufgrund der Beschädigungen des T-Shirts sichtbar, dass sich der Strom, anders als im Idealfall, nicht gleichmäßig aufteilte. Des Weiteren wird vermutet, dass die Kette des Blitzopfers aus einem anderen Material bestand und dieses auch dünner ausgeführt war. Aus den genannten Gründen kann davon ausgegangen werden, dass die Kontakttemperatur für diesen Fall deutlich höher lag.

Die Hautabschürfungen an Schulter und Kopf entstanden vermutlich durch den Sturz (stumpfes Trauma). Häufig verlieren die Betroffenen durch den Blitzeinschlag das Bewusstsein und können sich an das Ereignis nicht mehr erinnern, so wie auch bei diesem Unfall aufgrund des Stromflusses im Bereich des Kopfes.

Die beiden beschriebenen Wolke-Erde-Entladungen liegen zeitlich und örtlich nahe beieinander. Daher ist eine eindeutige Zuordnung zu einer der beiden Blitzeinschläge nicht möglich.

7.6 Unfall 5 - 2005

Unfallbeschreibung

Im Mai 2005 wurde ein 45-jähriger Wanderer am späten Nachmittag nach dem Essen bei einer Almhütte von einem Blitz getroffen und verletzt. Da es nach dem Mittagessen, welches vor der Almhütte im Freien eingenommen wurde, in großen Tropfen zu regnen begann, fingen zwei der drei Personen damit an, das Geschirr in die Hütte zu tragen. Als die beiden, die in die Hütte gingen, nach draußen blickten, sahen sie, wie der dritte der Gruppe in etwa 5 m Entfernung zur Hütte, neben welcher auch ein paar Bäume standen, stehend vom Blitz getroffen wurde und daraufhin umfiel. Der Unfallort und der Standort des Blitzopfers beim Blitzeinschlag sind in Abbildung 23 dargestellt. Nach der Erstversorgung durch die anwesenden Personen vor Ort wurde das Blitzopfer ca. 20 Minuten nach dem Blitzeinschlag ins Krankenhaus geflogen.



Abbildung 23: Darstellung des Unfallortes und des Standortes des Opfers zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages, Unfall 5.

Verletzungen

Unmittelbar nach dem Blitzeinschlag spürte das Blitzopfer seine Beine nicht. 15 Minuten danach erlangte er wieder ein Gefühl in den Beinen. Auf der linken Körperhälfte erlitt der Betroffene Verbrennungen, welche wie ein etwa 4 – 5 cm breites Band von der Innenseite des Oberarms über den Brustkorb bis hin zum Bauch und weiter über die Leiste bis zum Oberschenkel geformt waren (siehe Abbildung 24). Von diesem Band konnten laterale, abwärts zeigende Verästelungen festgestellt werden. Der behandelnde Arzt gab an, dass der Blitz an der Schulter in den Körper eintrat und am Oberschenkel im Bereich des Knies wieder aus dem Körper austrat.

Die beiden Unverletzten gaben an, dass es nach dem Blitzunfall sehr stark nach verbranntem Fleisch und Haaren roch.



Abbildung 24: Verbrennungen des Unfallopfers des Unfalls 5 - anhand des Verbrennungsmusters sind der Stromweg durch den Körper und die Lichtenberg-Figuren gut erkennbar.

Blitzstromamplitude

In einem Zeitfenster von sieben Minuten um den angegebenen Unfallzeitpunkt ereigneten sich in einem Umkreis von 3 km 43 Wolke-Erde-Entladungen. Bei näherer Betrachtung

der Ergebnisse der Blitzabfrage kommen nur zwei Entladungen in die engere Auswahl, da alle anderen in einer Entfernung von mehr als $1,5\text{ km}$ detektiert wurden. Die zeitlich frühere der beiden Entladungen ereignete sich in einer Distanz von 700 m vom abgefragten Ort und wurde als dritte Entladung in diesem Gebiet detektiert. Die Blitzstromamplitude betrug $-10,7\text{ kA}$. Die andere Entladung zählte zu einer der letzten in diesem Gebiet und fand in einer Entfernung von 200 m mit einer Amplitude von $+3,4\text{ kA}$ statt. Die beiden Entladungen traten in einem zeitlichen Abstand von etwa sieben Minuten auf.

Wolke-Wolke-Entladungen können fälschlicherweise als Wolke-Erde-Entladungen mit kleinen, positiven Amplituden detektiert werden. Aus diesem Grund werden heute alle positiven Blitzentladungen, welche eine Amplitude kleiner als $+10\text{ kA}$ besitzen, als Wolke-Wolke-Entladungen klassifiziert. [2, 19]

Diskussion

Das Blitzopfer wurde entweder von der Blitzentladung direkt getroffen oder ein Objekt in unmittelbarer Nähe (vermutlich ein Baum) wurde vom Blitz getroffen und ein Teil des Blitzstromes schlug auf das Blitzopfer über (Seitenüberschlag). Die beiden Zeugen gaben an, dass sie einen direkten Einschlag in den Betroffenen wahrnehmen konnten. Da das Blitzopfer den Unfall überlebte und die Verletzungen nicht schwerwiegend ausfielen, wird ein direkter Einschlag eher ausgeschlossen. Des Weiteren befanden sich Bäume in unmittelbarer Nähe des Opfers, womit ein Überschlag denkbar ist. Da die Angaben der Zeugen mit dem vermuteten Unfallhergang nicht übereinstimmen, kann der genaue Energieübertragungsmechanismus nicht mehr nachvollzogen werden.

Der vom Arzt angegebene Stromweg durch den Körper ist anhand der äußerlich sichtbaren Verbrennungen nachvollziehbar. Die Eintrittsstelle des Stromes könnte aufgrund der aufgetretenen Verbrennung auf der Innenseite des Oberarms auch seitlich an diesem gewesen sein. Das lateral ausgerichtete, baumähnliche Verbrennungsmuster zeigt eine Lichtenberg-Figur (siehe Kapitel 5.4.2). Dieses Verbrennungsmuster tritt häufig nach einem Blitzunfall auf und verschwindet nach einiger Zeit ohne weitere Behandlung. Die unmittelbar nach dem Blitzeinschlag wahrgenommene Lähmung entspricht der ebenfalls oft auftretenden, typischen Keraunoparalyse (siehe Kapitel 5.5). Diese Lähmungserscheinungen, welche meist die unteren Extremitäten betreffen, legen sich nach einiger Zeit wieder von selbst, wie es auch von diesem Blitzopfer beschrieben wurde.

Die beiden Zeugen gaben an, dass es sich um eine der ersten Entladungen in ihrer Umgebung handelte, welche das Blitzopfer traf. Aufgrund dieser Angabe würde man die erst genannte Blitzstromamplitude dem Unfall zuordnen. Der von den Zeugen angegebene Zeitpunkt stimmt jedoch mit der zweiten beschriebenen Entladung besser überein. Wie genau die Angabe über den Unfallzeitpunkt der beiden Zeugen stimmte, kann heute nicht mehr gesagt werden. Da die beiden Entladungen sieben Minuten auseinander lagen, ist

es durchaus möglich, dass der Zeitpunkt des Unfalls im Nachhinein nur geschätzt wurde. Da die Amplitude des zweiten beschriebenen Blitzes $+3,4\text{ kA}$ betrug, wurde diese mit hoher Wahrscheinlichkeit fälschlicherweise als Wolke-Erde-Entladung klassifiziert. Diese wird daher trotz der geringen Entfernung von der Betrachtung ausgeschlossen. Alle anderen detektierten Entladungen ereigneten sich in einer großen Entfernung zur Almhütte. Die beiden Zeugeninformationen sind nicht mit den detektierten Informationen über die Blitzentladungen in der Unfallregion vereinbar. Aufgrund der beschriebenen Umstände wird diesem Unfall aber dennoch die erste beschriebene Entladung ($-10,7\text{ kA}$) zugeordnet.

7.7 Unfall 6 - 2005

Unfallbeschreibung

Am Abend an einem Tag im Juni 2005 wurde eine 48-jährige Wanderin bei einem Blitzeinschlag in eine Hütte leicht verletzt. Das Blitzopfer und ihre Begleiterin suchten wegen des starken Gewitters Unterschlupf im Bereich des Hütteneingangs. Die Betroffene stand am nächsten beim Hütteneingang. Ihre Begleiterin wurde durch den Blitzeinschlag in die Hütte nicht verletzt. Die Betroffene konnte selbstständig von der Hütte absteigen und wurde anschließend von einem Rettungsteam untersucht und in ein Krankenhaus gebracht.

Ein Zeuge, welcher sich etwa 100 m von der Hütte entfernt befand, gab an, dass der Blitz in den gemauerten Kamin der Hütte einschlug und danach im Bereich der Hüttentüre wieder im Freien sichtbar war. Die zu diesem Zeitpunkt unbewohnte Hütte brannte durch den Blitzeinschlag vollständig nieder. Sie befand sich auf einer freien Fläche, welche von einem Nadelwald umgeben ist. Die Hütte bestand aus einer Haupthütte und einem Nebengebäude, welche beide größtenteils aus Holz bestanden. Die Eingangstüre war mit einem massiven Türschloss versperrt. Der Hochwald schließt unmittelbar hinter dem Nebengebäude an.

Verletzungen

Das Blitzopfer stand unmittelbar nach dem Blitzeinschlag in die Hütte unter Schock und wurde deshalb von dem Zeugen in Richtung Tal begleitet. Es wurden leichte Brandverletzungen festgestellt. Einem Zeitungsbericht kann entnommen werden, dass das Blitzopfer Verbrennungen im Bereich des Rückens und an beiden Beinen erlitten hatte. Sie wurde zur Beobachtung zwei Tage stationär im Krankenhaus aufgenommen.

Blitzstromamplitude

Innerhalb von 45 Minuten wurden von ALDIS 197 Wolke-Erde-Entladungen in einem Umkreis von 15 km detektiert. Die Entladungen, welche in einem Zeitraum von fünf Minuten um den genau bekannten Unfallzeitpunkt auftraten, wurden alle in einer Entfernung von $5 - 14,4\text{ km}$, eine Entladung in einer Entfernung von 2 km und eine in einer Entfernung von 500 m geortet. Diese negative Entladung in einer Entfernung von 500 m wurde eine

Minute vor dem angegebenen Unfallzeitpunkt des Zeugen mit einer Amplitude von $-2,5 \text{ kA}$ detektiert.

Diskussion

Da das Blitzopfer die Haustüre der Hütte nicht berührte, kann eine Energieübertragung in Form eines Seitenüberschlags angenommen werden. Nimmt man die Informationen aus dem Zeitungsbericht, dass die Frau Verbrennungen im Bereich des Rückens und der beiden Beine erlitt, als richtig an, wurde ein Teil des Blitzstromes vom Vorhängeschloss an der Haustüre weiter über den Rücken und die beiden Beine des Blitzopfers Richtung Erde abgeleitet. Der Strom wählt dabei immer den Weg des geringsten Widerstandes. Dieser Wert verringerte sich durch die möglicherweise bereits nasse Kleidung zusätzlich, da die beiden Wanderinnen wegen des starken Gewitters Unterschlupf suchten. Da die Person während des Blitzeinschlages im Eingangsbereich aufrecht stand, befand sich das Türschloss vermutlich auf jener Höhe des Eintrittsbereichs des Blitzstromes am Rücken. Es wurden keine wie bei einem Stromfluss durch die Beine oft typischen Lähmungserscheinungen in den unteren Extremitäten beschrieben. Dies kann dadurch erklärt werden, dass ohnehin nur mehr ein kleiner Teilstrom über das Blitzopfer zur Erde geleitet wurde und von diesem der Großteil an der Hautoberfläche Richtung Erde floss.

Zum Unfallzeitpunkt zog ein schweres Gewitter über den Unfallort. Da die detektierten Blitzenladungen, welche zeitnahe zum angegebenen Zeitpunkt des Einschlages in die Hütte in einem größeren Umkreis ($5 - 14 \text{ km}$ von der Hütte entfernt) und nur diese eine Entladung in 500 m Entfernung geortet wurde, wird die beschriebene Blitzenladung dem Unfall zugeordnet.

7.8 Unfall 7 - 2005

Unfallbeschreibung

Im September 2005 wurde an einem späten Nachmittag ein 23-jähriger Mann bei einem Blitzschlag getötet. Das Blitzopfer war mit seinem Hund an der Leine und seinen Nordic Walking Stöcken am Straßenrand eines Ortsgebietes neben einem Stacheldrahtzaun zu Fuß unterwegs (siehe Abbildung 25). In seiner Umgebung befanden sich keine Gebäude oder Bäume. Eine mit dem Auto vorbeifahrende Zeugin berichtete, dass zu diesem Zeitpunkt bereits ein schweres Gewitter mit Regenschauern niederging. Sie bemerkte den hellen Blitzeinschlag und sah, wie das Blitzopfer mit dem Gesicht nach vorne auf die asphaltierte Straße fiel. Sie stieg aus ihrem Auto aus und wollte den Mann zur Seite drehen. Da sie dies aber nicht schaffte, verständigte sie die Rettung und fuhr etwa 200 m weiter zu ihrem Lebensgefährten, um Hilfe zu holen. Die beiden fuhren anschließend wieder zum Unfallort zurück. Kurz darauf kamen auch die Rettungskräfte und ein Notarzt an.

Der Hund wurde durch den Blitzeinschlag ebenfalls getötet. An den Nordic Walking Stöcken konnten eindeutige Blitzspuren festgestellt werden. Diese sind in Abbildung 26 dargestellt.

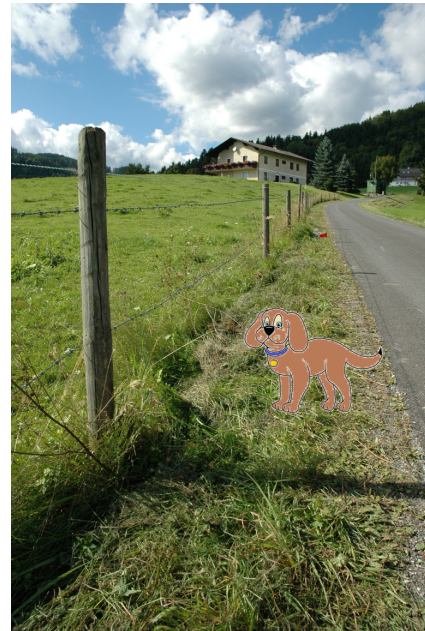
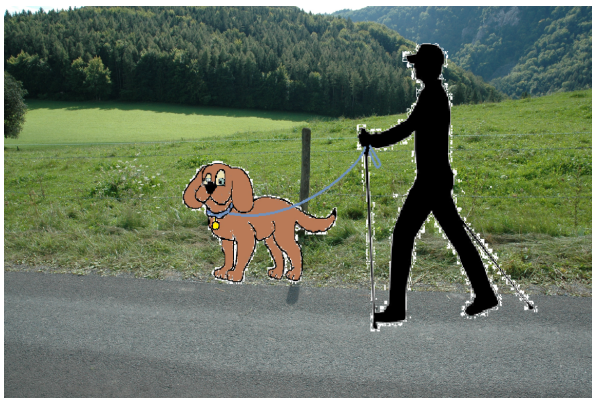


Abbildung 25: Unfallort und Standort des Blitzopfers und seines Hundes während des Blitzeinschlages, Unfall 7.



Abbildung 26: Ausschmelzungen durch den Blitzeinschlag am Nordic Walking Stock, Unfall 7.

Verletzungen

Der anwesende Notarzt versuchte noch das Blitzopfer zu reanimieren. Die Wiederbelebungsversuche blieben aber ohne Erfolg. Der Arzt gab als Todesursache einen Herzkreislaufstillstand an.

An den beiden Händen und im Schulterbereich konnten Verbrennungen und Strommarken festgestellt werden. Diese sind in Abbildung 27 zu sehen. Des Weiteren konnten beim

Blitzopfer Abschürfungen und Wunden aufgrund des Sturzes beobachtet werden (stumpfes Trauma).



(a) Linke Hand



(b) Rechte Hand



(c) Linke Schulter



(d) Rechte Schulter

Abbildung 27: Strommarken an der Ein- und Austrittsstelle an der linken und rechten Hand und Verbrennungen im Schulterbereich des Unfallopfers des Unfalls 7.

Blitzstromamplitude

Die Auswertung der Blitzabfrage von ALDIS für den genau bekannten Unfallort und durch Zeugen genau bekannten Zeitpunkt ergibt eine Blitzstromamplitude dieser Wolke-Erde-Entladung von $-4,8 \text{ kA}$ in einer Entfernung von weniger als 400 m zum Unfallort. In einem Umkreis von zwei Kilometern wurden insgesamt nur zwei Wolke-Erde-Entladungen innerhalb einer Stunde detektiert.

Diskussion

Der Blitz traf das Opfer direkt. Der Blitzstrom trat dabei im Bereich eines Handgelenks in den Körper ein, floss dann über den Schulterbereich und den Oberkörper in die andere Hand, wo ebenso im Bereich der Hand Strommarken als Hinweis auf die Austrittsstelle zu finden waren. Von der Hand ist der Blitzstrom anschließend in den Nordic Walking Stock übersprungen. Entlang dieses Stocks wurde der Blitzstrom Richtung Erde abgeleitet, wo er dann etwa 5 cm über dem Stockende in den Erdboden eintrat. Dies ist aufgrund der Verbrennungen und Strommarken an den Handgelenken und an den Schul-

tern (Abbildung 27) sowie den Abschmelzungen am Stock in Abbildung 26 zu erkennen. Meistens sind Stromwege über oder im Bereich des Herzens besonders gefährlich, wie auch in diesem Fall ein Stromweg von Hand zu Hand. Dieser Stromweg kann die Herztätigkeit stark beeinflussen und bis zum Herz-Kreislauf-Stillstand und damit zum Tod führen. Das Blitzopfer überlebte den Blitzeinschlag auch nach versuchten Wiederbelebungsmaßnahmen aufgrund eines Herz-Kreislauf-Stillstandes nicht.

Der Hund des Blitzopfers, welcher sich in der Nähe des Mannes aufhielt, überlebte den Vorfall ebenfalls nicht. Er wurde wahrscheinlich aufgrund der hohen Potentialdifferenz an der Erdoberfläche getötet. Vierbeiner überbrücken eine noch höhere Spannungsdifferenz zwischen ihren vier Füßen (vor allem zwischen den Vorder- und Hinterbeinen) als Menschen und sind bei indirekten Blitzeinschlägen durch den Effekt der Schrittspannung besonders gefährdet.

Aufgrund des genau bekannten Standortes des Blitzopfers während des Blitzeinschlages und der geringen Anzahl an Entladungen in der Umgebung ist die Zuordnung einer Blitzstromamplitude eindeutig möglich.

7.9 Unfall 8 - 2007

Unfallbeschreibung

Im August 2007 kamen ein 43-jähriger Wanderer und sein Begleiter an einem Nachmittag in ein schweres Gewitter. Daher suchten sie bereits nass vom Regen eine Schutzhütte auf. Das Blitzopfer war gerade dabei seine nassen Socken im Inneren der Hütte am Kaminofen aufzuhängen. Demnach stand er barfuß am Boden der Hütte. Er berührte beim Aufhängen der Socken mit seiner linken Hand den Eisenofen in der Hütte als er einen starken Schlag spürte und zu Boden fiel. Der Hüttenwirt verständigte sofort die Bergrettung und der Betroffene wurde mit dem Rettungshubschrauber in ein Krankenhaus geflogen.

Ein weiterer Gast und der Hüttenwirt, die sich auch in der Hütte aufhielten, nahmen den Blitzeinschlag in die Hütte als unangenehm wahr, wurden aber nicht verletzt.

Verletzungen

Das Blitzopfer blieb für kurze Zeit nach dem Blitzeinschlag in die Hütte bewusstlos am Boden liegen. Nach der Erstversorgung vor Ort wurde er mit leichten Verletzungen ins Krankenhaus geflogen. Er wurde für ein kardiales Langzeit-EKG über 24h eine Nacht stationär aufgenommen. Da es zu keinen Komplikationen kam, konnte der Betroffene das Krankenhaus am nächsten Tag beschwerdefrei verlassen.

Blitzstromamplitude

Zum Unfallzeitpunkt zog ein schweres Gewitter über das Gebiet des Unfallortes. In einem Umkreis von 5 km wurden in einem Zeitraum von einer Stunde (eine halbe Stunde

vor bis eine halbe Stunde nach dem angegebenen Unfallzeitpunkt) 62 Blitzenentladungen, davon 54 negative und 8 positive, mit teils sehr hohen Blitzstromamplituden (Spitzenwert: $-59,8 \text{ kA}$) detektiert. Ein paar Minuten vor und nach dem angegebenen Unfallzeitpunkt wurden zahlreiche Wolke-Erde-Entladungen detektiert, welche sich aber in einer eher großen Entfernung zur Hütte ereigneten. Mehrere Entladungen traten im Umkreis von $400 - 800 \text{ m}$ auf. Jene Blitzenentladung, die zeitlich und örtlich mit den angegebenen Informationen am besten übereinstimmt, hatte eine Blitzstromamplitude von $-1,9 \text{ kA}$, wurde aber in 400 m Entfernung zur Hütte geortet.

Diskussion

Im Kamin der Hütte wurde im Jahr 2007 nachträglich ein Edelstahlrohr eingezogen, welches, wie sich später herausstellte, nicht an den Potentialausgleich angeschlossen und in die Blitzschutzanlage eingebunden wurde. Vermutlich wurde daher das Blitzopfer aufgrund eines indirekten Blitzeinschlages verletzt. Der Stromweg verlief über den Kamin, weiter über das Edelstahlrohr und am Ende des Rohres erfolgte ein Seitenüberschlag zu dem barfuß, neben dem Kaminofen stehenden Wanderer. Das Blitzopfer stellte folglich den Weg des geringsten Widerstandes dar. Dieser Wert verringerte sich durch die bereits nasse Kleidung zusätzlich.

Das Blitzopfer wurde durch den Einschlag nur leicht verletzt. Viele Betroffene verlieren unmittelbar nach dem Blitzeinschlag für kurze Zeit das Bewusstsein, so wie auch dieses Blitzopfer (siehe Kapitel 5.5). Da der Betroffene mit seiner linken Hand den Kaminofen berührte und der Stromweg vermutlich zu einem oder zu beiden Füßen verlief, hatte er großes Glück, dass keine auffälligen Herzrhythmusveränderungen oder -störungen auftraten.

Da viele Blitzenentladungen in einem nahen Zeitraum und Umkreis detektiert werden konnten, ist es fraglich, ob eine Zuordnung einer einzelnen Wolke-Erde-Entladung zu dem Ereignis möglich ist. Es wurde keine weitere Entladung in geringer Entfernung zur Hütte geortet.

7.10 Unfall 9 - 2008

Unfallbeschreibung

Im Juni 2008 gerieten zwei Wanderer (Person 1 - weiblich, 25 Jahre und Person 2 - männlich, 24 Jahre) am Nachmittag beim Abstieg in einem Almgebiet in ein Gewitter und wurden unterschiedlich schwer verletzt. Als sie am Gipfel ankamen, beobachteten sie bereits ein aufziehendes Gewitter. Deshalb machten sie sich schnell wieder auf den Weg in Richtung Tal. Beim Abstieg kamen sie in ein schweres Gewitter mit Regen und Hagel. Eine Entladung verletzte beide Personen. Person 1 ging vor Person 2, als ein Blitz einschlug.

Beide konnten sich an den genauen Unfallhergang nicht erinnern. Das Blitzopfer 1 fand ihren Begleiter am Bauch liegend mit überkreuzten Beinen und bewusstlos vor. Nach erfolgreicher Reanimation machte sich Person 1 alleine auf den Weg und suchte einen Ort, an dem sie einen besseren Handyempfang hatte und daher einen Notruf absetzen konnte. Erst zwei Stunden nach dem Blitzeinschlag, fast im Tal, konnte sie die Einsatzkräfte verständigen, welche den Verletzten bargen. Beide Personen wurden anschließend ins Krankenhaus gebracht.

Verletzungen

Das Blitzopfer 1 hatte eine Rissquetschwunde am Hinterkopf, erlitt einen Schock und Lähmungserscheinungen in beiden Beinen im Bereich der Unterschenkel. Diese Lähmungen legten sich nach kurzer Zeit an der Unfallstelle von selbst. Sie wurde zur Beobachtung ins Krankenhaus gebracht, konnte es aber aufgrund der geringen Verletzungen noch am selben Tag verlassen.

Person 1 konnte schnell wieder gehen und fand Person 2 regungslos am Boden liegend vor. Da sie bemerkte, dass sich seine Gesichtsfarbe und die Lippen veränderten und blau wurden, beschloß sie, sofort eine Herzdruckmassage mit Mund-zu-Mund-Beatmung zu beginnen. Nach einigen Minuten wurde die Farbe des Blitzopfers 2 normal und die Vitalfunktionen setzten wieder ein. Daraus schloss Person 1, dass die Reanimationsversuche erfolgreich waren. Wegen des schlechten Empfanges verging einige Zeit bis zur Bergung. Das Blitzopfer wurde im Krankenhaus stationär für einige Tage aufgenommen. Im Krankenhaus wurden eine Gehirnerschütterung und Blitzstrommarken im Bereich der Brust und des rechten Schienbeins festgestellt. Weiters wurde die Körperbehaarung im Leistenbereich entlang eines klar abgegrenzten Bereichs versengt.

Neun Tage nach dem Blitzeinschlag klagte das Blitzopfer 2 noch über Schmerzen am gesamten Körper und eine starke Beeinträchtigung seines Erinnerungsvermögens.

Blitzstromamplitude

Die Auswertung der Blitzabfrage des Blitzortungssystem ALDIS ergab für einen Umkreis von 10 km um den Gipfel für einen Zeitraum von einer Stunde insgesamt 94 Blitzentladungen. Die Einschlagpunkte liegen dabei alle zwischen dem Gipfel und dem Tal (siehe Abbildung 28), also in jenem Bereich, wo sich die beiden Blitzopfer aufhielten. Die Blitzstromamplituden der 71 negativen Wolke-Erde-Entladungen liegen in einem Bereich von $-3,9\text{ kA}$ und -47 kA , jene der 13 positiven Wolke-Erde-Entladungen zwischen $+3,9\text{ kA}$ und $+20,9\text{ kA}$. Die anderen wurden als Wolke-Wolke-Entladungen klassifiziert.

Diskussion

Das Blitzopfer 1 wurde indirekt durch den Blitzeinschlag getroffen und trug deshalb geringe Verletzungen davon. Die Wunde am Hinterkopf deutet auf ein stumpfes Trauma hin, welches durch den Sturz zu Boden entstand. Da der Blitz vermutlich direkt in die unmittel-

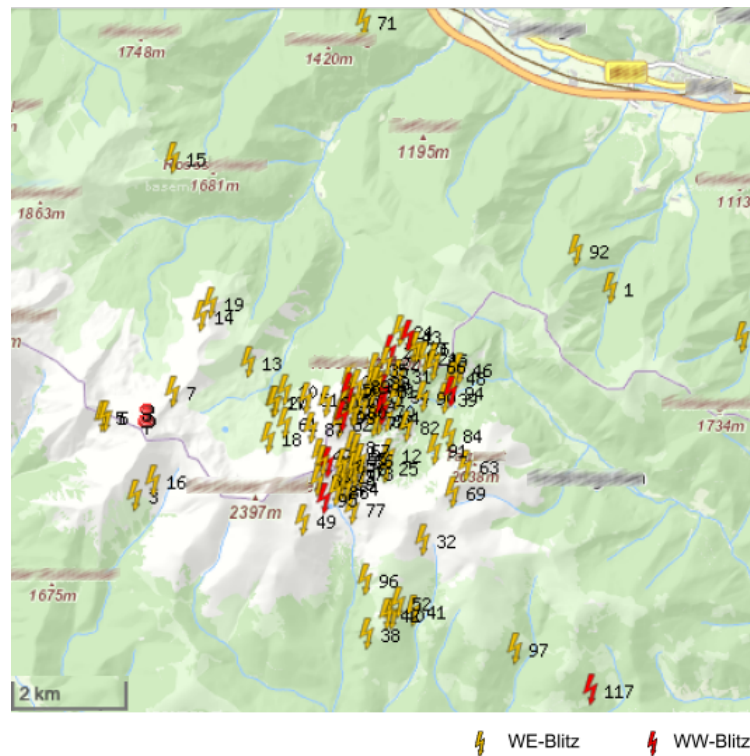


Abbildung 28: Darstellung aller detektierten Entladungen für den Unfall 9 auf der Karte. Die Stecknadel symbolisiert den Gipfel, von welchem die beiden Blitzopfer Richtung Tal unterwegs waren. [2]

bare Umgebung der Betroffenen einschlug, ist es wahrscheinlich, dass an der Erdoberfläche zwischen ihren beiden Füßen eine Schrittspannung auftrat, die einen Stromfluss durch die unteren Extremitäten bewirkte. Dieser Stromfluss kann eine vorübergehende Keraunoparalyse auslösen (siehe Kapitel 3.7). Das Blitzopfer 1 beschrieb genau diese temporären Lähmungen in ihren Beinen.

Das Blitzopfer 2 wurde aufgrund der sichtbaren Strommarken entweder direkt getroffen oder ein Objekt in unmittelbarer Nähe wurde direkt getroffen und der Blitz schlug auf den Betroffenen über. Da die Umgebung des Unfallortes nicht bekannt ist, kann der Energieübertragungsmechanismus nicht mehr genauer nachvollzogen werden. Der Blitz trat im Brustbereich in den Körper ein und im Bereich des Schienbeins am rechten Bein wieder aus. Da sich das Herz im Brustbereich bzw. im Brustkorb befindet und bei diesem Unfallopfer ein Stromfluss vom Brustbereich Richtung Bein als sehr wahrscheinlich anzunehmen ist, traten auch Herzrhythmusstörungen bzw. ein Herz-Kreislauf-Stillstand auf. Die angesengten Haare an der Leiste weisen ebenfalls auf einen Stromweg über diesen Bereich hin. Ein direkter Blitzeinschlag verursacht mit großer Wahrscheinlichkeit eine Herzschildigung [35]. Wie auch in diesem Fall, ist die Überlebenschance nach einem Herz-Kreislauf-Stillstand aufgrund eines Blitzeinschlages bei sofort eingeleiteten Erste-Hilfe-Maßnahmen sehr groß (siehe Kapitel 5.2). Die diagnostizierte Gehirnerschütterung

deutet auf ein stumpfes Trauma in Folge des Sturzes hin.

Da der genaue Unfallort nicht bekannt ist und viele Blitzentladungen zu dieser Zeit am Weg vom Gipfel Richtung Tal detektiert wurden, ist keine eindeutige Zuordnung einer Blitzstromamplitude möglich. Durch die Blitzabfrage kann aber bestätigt werden, dass eine Gewitteraktivität im Unfallgebiet zum angegebenen Zeitpunkt stattfand.

7.11 Unfall 10 - 2008

Unfallbeschreibung

An einem Nachmittag im Juni 2008 gingen zwei Frauen mit ihren Nordic Walking Stöcken spazieren. Es begann unmittelbar nach ihrem Start leicht zu regnen und die beiden konnten das herannahende Gewitter bereits wahrnehmen. Das 59-jährige Blitzopfer spannte aufgrund des Niederschlags einen Regenschirm auf und nahm seine Stöcke, welche aus Kunststoff bestanden, in die rechte Hand. Sie konnten Blitzeinschläge in ihrer direkten Umgebung wahrnehmen, entschieden sich aber, noch etwas weiter zu gehen. Kurz darauf wurde die Betroffene durch eine Entladung verletzt und zu Boden geworfen. Ihre Begleiterin, welche etwa 5 m hinter der Betroffenen ging, erlitt nur einen Schock und verständigte sofort die Rettungskräfte. Das Blitzopfer wurde geborgen, erstversorgt und in ein Krankenhaus gebracht.

Die beiden Frauen befanden sich während des Blitzeinschlages in einem Wald mit etwa 20 m hohen Bäumen. Das Blitzopfer ging in einem Abstand von ungefähr 2 m zu diesen Bäumen auf einem Waldweg. In Abbildung 29 ist der Unfallort dargestellt. An den Bäumen in der Nähe des Unfallortes konnten keine Blitzspuren festgestellt werden.



Abbildung 29: Unfallort mit Standort des Blitzopfers zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages, Unfall 10.

Die beiden Nordic Walking Stöcke wurden durch die Blitzentladung nicht beschädigt.

Beim Regenschirm wurde der Bezug an einer kleinen Stelle aufgerissen. Die Weste, das T-Shirt, die Hose, die Socken und die Schuhe zeigten deutliche Blitzspuren hervorgerufen durch eine erhöhte, thermische Beanspruchung. Die beiden Oberteile des Blitzopfers hatten im Bereich des rechten Brustkorbs ein Loch. Ihre Unterwäsche wurde durch die Entladung zerrissen. Die Blitzspuren an den Kleidungsstücken sind in Abbildung 30 (a)-(g) dargestellt.

Verletzungen

Das Blitzopfer empfand unmittelbar nach dem Einschlag eine große, innere Hitze und hatte daher den Drang, sich am Boden zu wälzen. Sie rollte sich vom Waldweg bergab und blieb etwas weiter unten bei zwei Bäumen liegen. Sie erlitt Lähmungserscheinungen an beiden Beinen und konnte diese für kurze Zeit nicht bewegen. Bei der Betroffenen wurden Verbrennungen an der rechten Körperseite von der Brust bis zum Oberschenkel festgestellt. Die Körperbehaarung wurde in diesem Bereich versengt. Sie wurde zur Beobachtung stationär im Krankenhaus aufgenommen.

Blitzstromamplitude

Die Auswertung der Blitzabfrage von ALDIS in einem Zeitraum von 25 Minuten um den angegebenen Unfallzeitpunkt ergab in einem Umkreis von 5 km 43 Blitzentladungen. Da der Ort des Unfalls genau bekannt ist, kann eindeutig eine Wolke-Erde-Entladung mit einer Blitzstromamplitude von $-8,2\text{ kA}$ und einer Entfernung von 450 m zum abgefragten Ort zugeordnet werden. Die Koordinaten des abgefragten Ortes entsprechen dabei einer Straße, welche in den Waldweg mündet, auf dem sich die beiden während des Unfalls befanden.

Wie von der Betroffenen beschrieben wurde, war dies nicht die erste Entladung in der Umgebung. Innerhalb von vier Minuten vor dem Unfall wurden bereits fünf Entladungen in einer Entfernung von $2 - 4\text{ km}$ geortet.

Diskussion

Aufgrund der Blitzspuren an den Kleidungsstücken und Schuhen der Betroffenen kam es bei diesem Blitzunfall zu einem direkten Blitzeinschlag oder einem Seitenüberschlag von einem Objekt in der Nähe (Baum) auf das Blitzopfer. Da immer wieder Fälle beschrieben werden, bei denen keine äußerlich sichtbaren Blitzspuren an direkt getroffenen Bäumen beobachtet werden, und die Überlebenschance eines direkten Einschlages eher gering ist, wird bei diesem Unfall von einem Seitenüberschlag von einem Baum auf die Betroffene ausgegangen. Des Weiteren befand sich das Unfallopfer zum Unfallzeitpunkt in einem dichten Wald. Der Stromweg verlief von der rechten Brust über das rechte Bein und den rechten Fuß Richtung Erde. Die Löcher im T-Shirt und in der Weste auf Höhe des rechten Brustkorbs weisen auf die Eintrittsstelle des Blitzstromes, die Spuren bzw. das Loch am rechten Schuh auf die Austrittsstelle hin. Da die Kleidung entlang der rechten Körperhälfte



(a) Hose

(b) T-Shirt mit Blitzeintrittsstelle



(c) Weste außen

(d) Weste innen

(e) Socken



(f) Schuhe

(g) Rechter Schuh mit Blitzaustrittsstelle

Abbildung 30: Beschädigte Bekleidung des Unfallopfers des Unfalls 10.

an mehreren Stellen zerrissen wurde und diese Stellen eine starke Wärmeentwicklung verdeutlichen, muss ein Großteil des Blitzstromes an der Oberfläche (Oberflächeneffekt, siehe Kapitel 3.7) Richtung Erde abgeleitet worden sein. Auch die geringen Verbrennungen des Blitzopfers und die versengten Haare entlang der rechten Körperseite unterstützen diese Annahme. Da ein Stromfluss durch die Beine stattfand, trat auch in diesem Fall für kurze Zeit die typische Keraunoparalyse auf.

Die Beschädigungen des Regenschirms deuten mit großer Wahrscheinlichkeit nicht auf einen Stromfluss hin. Der kleine Riss im Bezug entstand vermutlich eher aufgrund des Sturzes des Blitzopfers zu Boden.

Da sich das Unfallopfer während des Blitzeinschlages in einem Wald aufhielt und die weiteren Entladungen, welche aufgrund der Übereinstimmung mit den zeitlich und örtlich angegebenen Informationen in Betracht gezogen werden könnten, nicht in einem Wald detektiert werden konnten, ist die Zuordnung dieser Entladung zum Unfall eindeutig.

7.12 Unfall 11 - 2008

Unfallbeschreibung

Im Juni 2008 ereignete sich ein weiterer Blitzunfall. Am frühen Nachmittag schlug ein Blitz im Bereich des Vorfeldes eines Flugplatzes ein. Zum Zeitpunkt der Blitzenladung befanden sich fünf Personen im Freien, welche leicht verletzt wurden. Drei männliche Blitzopfer luden gerade Gepäckstücke aus dem Heck eines parkenden Flugzeuges aus. Das Blitzopfer 1 befand sich im Inneren des Flugzeugs im Bereich der Ladeluke. Er war gerade dabei, Gepäckstücke auf das Förderband zu legen, als er bemerkte, wie ein Blitz zwischen den beiden anderen Personen am Ende des Förderbandes einschlug. Das Blitzopfer 2 befand sich am Boden stehend am Ende des Förderbandes und nahm die Gepäckstücke von diesem und legte sie auf den Gepäckwagen. Er stand auf der linken Seite des Förderbandes in einem Abstand von etwa 1 m zu diesem und auch zum Gepäckwagen. Zum Zeitpunkt des Einschlages nahm er ein helles Leuchten hinter sich wahr. Außerdem sah er am vom Regen nassen Boden bläuliche Erscheinungen. In seiner rechten Beintasche befand sich ein Funkgerät. Dieses wies Brandspuren im Bereich des Akkus auf und war aufgrund des Blitzeinschlages funktionsunfähig. Das Blitzopfer 3 stand auf der rechten Seite des Gepäckförderbandes am Boden in einem Abstand von ungefähr $0,5\text{ m}$ zu diesem und zum Gepäckwagen. Zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages hielt er gerade kein Gepäckstück in der Hand. Er sah direkt vor ihm (zwischen ihm und Blitzopfer 2 bzw. dem Gepäckförderband) den Blitzeinschlag. In Abbildung 31 ist schematisch der Standort der drei Betroffenen dargestellt. Das Blitzopfer 1 wurde durch die Druckwelle ins Innere des Flugzeugs gestoßen, das Blitzopfer 2 konnte sich nicht mehr bewegen und fiel vorerst zu Boden, bevor es und das Blitzopfer 3 zu dem in der Nähe stehenden Bus liefen. Die drei Personen trugen zum

Unfallzeitpunkt ihre Arbeitskleidung und Sicherheitsschuhe mit Stahlkappen und antistatischer Gummisohle. Alle drei Blitzopfer wurden in umliegende Krankenhäuser gebracht. Es befanden sich noch zwei weitere Personen in der Nähe des Unfallortes im Freien. Sie hielten sich im vorderen Bereich des Flugzeuges auf.

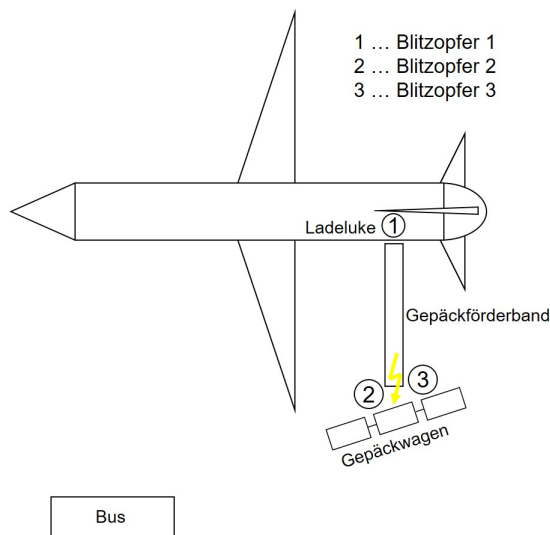


Abbildung 31: Schematische Darstellung des Unfallortes und des Standortes der drei verletzten Blitzopfer, Unfall 11.

Verletzungen

Das Blitzopfer 1 wurde durch die Druckwelle der Blitzentladung ins Innere des Flugzeugs geschleudert und erlitt dadurch Prellungen am Rücken. Hinweise auf einen Stromfluss durch oder entlang seines Körpers konnte der Betroffene nicht wahrnehmen.

Das Blitzopfer 2 nahm unmittelbar nach dem Blitzeinschlag Schmerzen in den Beinen wahr. Er konnte sich für kurze Zeit nicht mehr bewegen und fiel zu Boden. Bereits nach kurzer Zeit ließen die Lähmungserscheinungen nach. Die Schmerzen in den Beinen hielten noch etwas länger an. Zusätzlich erlitt er Verbrennungen an beiden Oberschenkelrückseiten.

Das Blitzopfer 3 empfand eine große Hitzeentwicklung an beiden Fußsohlen und musste sich deshalb sofort die Schuhe ausziehen. Er spürte Schmerzen in beiden Unterschenkeln, erlitt aber keine Lähmungserscheinungen. In diesem Bereich konnten auch leichte Verbrennungen festgestellt werden.

Alle drei Blitzopfer wurden in Krankenhäuser gebracht. Sie konnten diese noch am selben Tag wieder verlassen.

Die Verletzungen der beiden weiteren Personen sind nicht bekannt.

Blitzstromamplitude

Die Auswertung der Blitzdaten von ALDIS liefert für den beschriebenen Unfall eine Blitzstromamplitude von $-8,9 \text{ kA}$. Eine halbe Stunde vor bis eine halbe Stunde nach dem

angegeben Unfallzeitpunkt konnten drei Entladungen im Umkreis von wenigen Kilometern detektiert werden. Zum angegebenen Zeitpunkt wurde nur jene beschriebene Entladung geortet, die beiden anderen ereigneten sich 20 bzw. 30 Minuten danach.

Diskussion

Keiner der Betroffenen wurde direkt vom Blitz getroffen. Das Blitzopfer 1 erlitt lediglich ein stumpfes Trauma, welches durch die Druckwelle der Blitzentladung ausgelöst wurde. Verletzungen bedingt durch einen Stromfluss konnten nicht festgestellt werden.

Die Verletzungen und Schmerzen an den Beinen der beiden anderen Blitzopfer traten vermutlich aufgrund des Schrittspannungseffekts, welche sie zwischen ihren Füßen abriffen, auf. Da keine Ein- und Austrittsstellen des Blitzstromes an den beiden Betroffenen beobachtet werden konnten, kann ein Seitenüberschlag vom Förderband auf die Personen ausgeschlossen werden.

Der Datenbasis ist zu entnehmen, dass die drei Blitzopfer Sicherheitsschuhe mit Stahlkappen und antistatischen Gummisohlen trugen. Da im Flughafenbereich öfters Sicherheitskontrollen passiert werden müssen, gibt es mittlerweile eigene, metallfreie Sicherheitsschuhe mit Schutzkappen aus Kunststoff oder anderen Materialien. Daher ist die Richtigkeit der Angabe über Sicherheitsschuhe mit Stahlkappen fragwürdig. Trotz des Tragens von Sicherheitsschuhen mit Gummisohle ist ein Schrittspannungseffekt denkbar, da aufgrund der antistatischen Eigenschaften Materialien in die Sohle eingearbeitet werden, welche gering leitend sind. Der Oberflächenwiderstand wurde zusätzlich aufgrund der Nässe des Untergrunds zum Zeitpunkt des Blitzunfalls herabgesetzt. Eine schmutzige Oberfläche und das Schwitzen in den Schuhen begünstigen den Widerstandsabfall ebenso. Dieser Unfall zeigt deutlich, dass nicht alle Blitzopfer bei einem Stromfluss in den Beinen an einer Keraunoparalyse leiden. Treten Lähmungserscheinungen auf, so verschwinden diese aber wie auch in diesem Fall oft wieder sehr schnell von selbst ohne weitere Behandlungen.

Die beschriebene Blitzstromamplitude kann eindeutig dem Blitzunfall zugeordnet werden. Sie ereignete sich exakt zum angegebenen Zeitpunkt und fand auch örtlich eindeutig im Bereich des Vorfeldes des Flugplatzes statt.

7.13 Unfall 12 - 2009

Unfallbeschreibung

Im Mai 2009 wurde eine 14-Jährige abends indirekt durch eine Blitzentladung verletzt. Das Blitzopfer befand sich im Inneren des Wohnhauses und schloss gerade wegen des beginnenden Gewitters mit Regenfällen das Zimmerfenster und die Fensterläden. Unerwartet verspürte sie einen Schlag und wurde gegen den Kasten in ihrem Zimmer geschleudert. Da sie am nächsten Tag Schmerzen und Lähmungserscheinungen bemerkte, suchte sie erst dann mit ihren Eltern ein Krankenhaus auf.

Verletzungen

Die beschriebenen Verletzungen sind in diesem Fall sehr unterschiedlich. Laut Angaben der Polizei habe die Betroffene am nächsten Tag Lähmungserscheinungen am linken Arm vernommen. Im Krankenhaus seien zusätzlich Herzrhythmusstörungen diagnostiziert worden. Das Blitzopfer sei im Krankenhaus stationär aufgenommen worden.

Einem Interview des behandelnden Arztes in einem Zeitungsbericht zu Folge seien bei dem Blitzopfer keine äußeren Blitzspuren und keine Veränderungen im EKG festgestellt worden. Des Weiteren habe sie sich den Arm wegen des Sturzes gegen den Kasten geprellt. Der Arzt gab an, dass die Betroffene keine Hinweise auf Verletzungen bedingt durch eine Blitzentladung aufwies.

Blitzstromamplitude

Die Auswertung der ALDIS-Blitzortungsdaten ergab für den beschriebenen Fall sechs Wolke-Erde-Entladungen im Umkreis von 5 km in einem Zeitraum von 30 Minuten. Davon liegt nur ein Blitzeinschlag in einem Umkreis von weniger als 2 km . Diese Entladung stimmt zeitlich am besten mit dem angegebenen Unfallzeitpunkt überein, wurde aber dennoch in einer Entfernung von $1,7\text{ km}$ vom Unfallort detektiert. Diese Entladung trug eine Blitzstromamplitude von $-25,4\text{ kA}$.

Diskussion

Da die Informationen der vorhandenen Quellen sehr unterschiedlich sind, ist eine Auswertung dieses Falls nicht eindeutig möglich. Den Daten des Polizeiberichts sind normalerweise mehr Glaubwürdigkeit zu schenken als jenen aus der Sekundärliteratur (Zeitung). Da die Auswertung der Daten von ALDIS keine Blitzentladung in unmittelbarer Nähe des Hauses liefert, sind die aufgetretenen Verletzungen aufgrund eines Blitzeinschlages dennoch fragwürdig. Die große Entfernung der detektierten Blitzstromamplitude zum Unfallort weist darauf hin, dass es zu keinem Blitzeinschlag in das Haus oder die Betroffene kam. Lähmungserscheinungen treten in den häufigsten Fällen direkt nach der Blitzentladung auf und klingen nach kurzer Zeit wieder ab. Dass die Betroffene erst am Tag nach dem Ereignis Lähmungen aufgrund des Blitzeinschlages wahrnahm, ist deshalb unwahrscheinlich. Die Information, dass es sich um eine Prellung des linken Armes durch den Sturz handelt, ist in diesem Fall besser nachvollziehbar. Der Sturz kann durch eine Druckwelle der Blitzentladung ausgelöst worden sein. Möglicherweise erschrak das Mädchen lediglich, da es beim Schließen des Fensters eine helle Entladung sah und stürzte deshalb zu Boden. Ob es sich nun bei diesem Fall um Auswirkungen eines Blitzeinschlages in die Nähe der Betroffenen oder um eine Schreckreaktion handelte, kann nicht eindeutig geklärt werden.

7.14 Unfall 13 - 2009

Unfallbeschreibung

Im Juli 2009 ereignete sich am Abend ein Blitzunfall während eines Fußballtrainings auf einem Fußballplatz. Der Unfallort (siehe Abbildung 32) ist für Blitzeinschläge nicht als exponiertes Gebiet anzusehen. Der Fußballplatz liegt sogar eher in einer Senke als auf einer Anhöhe. Zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages konnte in der Umgebung eine Gewitteraktivität wahrgenommen werden und es regnete bereits leicht. Das Gewitter wurde von den trainierenden Personen als gering und ungefährlich eingestuft. Deshalb wurde das Training nicht unterbrochen. Erst eine Viertelstunde nach dem Unfall begann es stärker zu regnen. Zur Zeit des Blitzeinschlages befanden sich 25 männliche und weibliche Personen im Alter zwischen 17 und 59 Jahren, welche am Fußballtraining beteiligt waren, und ungefähr weitere 20 Personen, die sich im Vereinsgebäude oder unter dem Vordach dieses Gebäudes aufhielten, am Sportplatz. Trotz der vielen Personen konnte keiner eine Angabe über den genauen Einschlagsort machen. Einige anwesende Personen gaben an, dass sie einen Blitzeinschlag im Bereich hinter dem östlichen Tor wahrnehmen konnten. Es wurde das Gebiet und auch das Tor im Bereich des beschriebenen Einschlagsortes auf Blitzspuren abgesucht. Es konnten keine Spuren eines Blitzeinschlages festgestellt werden. Auch das Tor, welches aus einem metallenen Rahmen bestand, konnte als Einschlagpunkt mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Der genaue Einschlagsort blieb daher durch die Beschreibungen und Begutachtungen vor Ort vorerst unbekannt. Sechs Personen wurden durch die Blitzentladung zu Boden geschleudert. Alle betroffenen 25 Personen wurden vor Ort erstversorgt und zur Beobachtung in umliegende Krankenhäuser gebracht.



Abbildung 32: Unfallort und Umgebung des Unfalls 13.

Verletzungen

Alle 25 betroffenen Personen wurden nur leicht verletzt. Viele erlitten nur leichte Schockzustände. Alle Personen konnten nach ambulanter Untersuchung das Krankenhaus noch

am selben Tag wieder verlassen. Keine der betroffenen Personen erlitt bleibende, gesundheitliche Folgeschäden, die auf eine Blitzentladung hinwiesen.

Die weiteren 20 Personen, welche am Sportplatzgelände anwesend waren, wurden nicht verletzt.

Blitzstromamplitude

Von ALDIS konnten elf negative Wolke-Erde-Entladungen in einem Umkreis von 540 m und weniger zum Fußballplatz detektiert werden. Diese Blitzeinschläge ereigneten sich alle innerhalb von zwei Sekunden (acht zur gleichen Zeit und drei weitere eine Sekunde später). Wertet man die Information, dass ein Blitzeinschlag hinter dem östlichen Tor wahrgenommen werden konnte, aus, kann man einige der georteten Blitzentladungen ausschließen. Vier Entladungen konnten in einer Entfernung von 170 m bis 420 m vom Fußballplatz in der angegebenen Richtung detektiert werden und stimmen auch mit der zeitlichen Angabe gut überein. Diese hatten Blitzstromamplituden von $-5,1 \text{ kA}$, $-79,7 \text{ kA}$, $-4,5 \text{ kA}$ und $-4,3 \text{ kA}$.

Diskussion

Keiner der betroffenen Spieler bzw. keine der betroffenen Spielerinnen wurde direkt von einer Blitzentladung getroffen. Die sechs Personen, welche am Fußballplatz zu Boden fielen, dürften vermutlich eine Schrittspannung abgegriffen haben. Das Ausmaß der Druckwelle der Entladungen ist in einer Entfernung von 170 – 420 m zu den Opfern nicht mehr zu spüren. Die Auswirkungen der von der Blitzentladung ausgelösten Druckwelle sind nur in unmittelbarer Nähe zum Einschlagsort gefährlich. Da von keinen weiteren Verletzungen berichtet wurde, kann ein Stromfluss aufgrund der Blitzentladung in andere Körperregionen als die Beine (Schrittspannung) ausgeschlossen werden.

Eine eindeutige Zuordnung einer einzelnen Blitzstromamplitude zum Unfallereignis ist aufgrund der gleichzeitig aufgetretenen und auch örtlich nah beieinander liegenden Wolke-Erde-Entladungen nicht möglich. Besonders auffällig ist jene Blitzentladung mit einer sehr großen Blitzstromamplitude von $-79,7 \text{ kA}$. Dieser Wert ist weit über dem Medianwert der negativen Wolke-Erde-Entladungen in Österreich, welcher ungefähr bei -10 bis -12 kA liegt (siehe Kapitel 3.4.1) [2, 11]. Des Weiteren traten aufgrund des geringen zeitlichen und örtlichen Abstandes bei den detektierten Blitzentladungen viele Teilblitze auf.

7.15 Unfall 14 - 2010

Unfallbeschreibung

Am Nachmittag eines Tages im Mai 2010 wurde ein 47-Jähriger durch einen Blitzeinschlag in sein Wohnhaus indirekt verletzt. Sein Vater und er bereiteten Gartenarbeiten vor, als bereits im Gebiet des Unfallortes ein Gewitter aufzog. Es regnete zum Zeitpunkt

des Unfalls noch nicht. Das Blitzopfer steckte in der Garage des Hauses eine Kabeltrommel ein und rollte danach das Kabel in Richtung seines Vaters aus. Es hielt dabei die Kabeltrommel in der Hand. Der Blitz schlug in den elektrischen Dachständer des Hauses ein, als der Betroffene ungefähr 10 m des Kabels ausgerollt hatte. Das Blitzopfer erhielt in Folge einen Stromschlag. Die beiden am Unfallort anwesenden Personen konnten bläuliche Erscheinungen wahrnehmen. Der Betroffene wurde erstversorgt und anschließend in ein Krankenhaus gebracht. Spätere Untersuchungen eines Elektrizitätsversorgungsunternehmens bestätigten einen Blitzeinschlag in den Dachständer des Hauses. Ein Teil der elektrischen Geräte, welche sich im Inneren des Hauses befanden, wurden durch den Blitzeinschlag beschädigt.

Verletzungen

Die Verletzungen des Blitzopfers waren nicht lebensbedrohlich und es war zu jeder Zeit ansprechbar. Es erlitt eine starke Schwellung an seiner linken Hand und unwillkürliche Kontraktionen der Muskeln am ganzen Körper. Es konnten keine Blitzspuren am Körper des Betroffenen festgestellt werden. Weitere Verletzungen und Folgen des Unfalls sind nicht bekannt. Das Blitzopfer blieb zur Beobachtung eine Nacht im Krankenhaus.

Blitzstromamplitude

Der Unfallort ist bei diesem Blitzeinschlag genau bekannt. Die Auswertung der ALDIS-Blitzdaten für diesen Ort und den angegebenen Unfallzeitpunkt liefert eine Wolke-Wolke-Entladung in unmittelbarer Nähe und zwei Wolke-Erde-Entladungen in über einem Kilometer Entfernung zum bekannten Unfallort. Die Blitzstromamplitude der vom Blitzortungssystem als Wolke-Wolke-Blitz klassifizierten Entladung beträgt $40,8 \text{ kA}$.

Diskussion

Durch den Blitzeinschlag in den Dachständer des Wohnhauses kam es zu einer Potentialanhebung der Kabeltrommel gegenüber Erde, da das Blitzopfer diese an einer geerdeten Steckdose in der Garage des Hauses angesteckt hatte. Das Blitzopfer erhielt in Folge einen Stromschlag und ein Teilstrom des Blitzes floss über ihn zur Erde ab (Kontakteffekt).

Der Stromweg verlief vermutlich aufgrund der angegebenen Verletzungen von der linken Hand und weiter über die Beine Richtung Erde. Wird die Muskulatur vom Strom durchflossen, treten häufig Verkrampfungen und unwillkürliche Muskelzuckungen, wie auch bei diesem Blitzopfer, auf.

Da laut Auskunft von ALDIS Wolke-Wolke-Entladungen normalerweise viel kleinere Stromamplituden aufweisen und die Ortung dieser Art erst in den letzten Jahren sehr genau wurde, ist es wahrscheinlich, dass das Blitzortungssystem die detektierte Entladung falsch klassifizierte. Schulz et al. [19] gibt ebenfalls an, dass die meisten positiven Entladungen mit Amplituden größer als 20 kA Teilentladungen eines Wolke-Erde-Blitzes und nicht ei-

ner Wolke-Wolke-Entladung sind. Am Dachständer des Wohnhauses konnten deutliche Blitzspuren erkannt werden. Demnach muss ein Blitzeinschlag erfolgt sein. Die örtlich nächsten Wolke-Erde-Entladungen sind bereits in einer zu großen Entfernung aufgetreten, um sie diesem Unfall zuordnen zu können. Der Zeitpunkt der positiven Entladung stimmt weiters besser mit dem angegebenen überein als jener der nachfolgenden negativen Wolke-Erde-Entladungen. Aus diesem Grund wird die beschriebene, positive Entladung dem Unfall zugeordnet.

7.16 Unfall 15 - 2010

Unfallbeschreibung

Im Juli 2010 ereignete sich nach Mitternacht am Heimweg von einem Zeltfest ein Blitzunfall mit einer verletzten und einer tödlich verunglückten Person. Es war bereits dicht bewölkt und sie konnten Blitzentladungen in einiger Entfernung beobachten. Während des Heimwegs begann es in großen Tropfen zu regnen. Die beiden Blitzopfer waren Teil einer siebenköpfigen Gruppe, welche am asphaltierten Gehsteig neben einer Landesstraße hintereinander ging. Das tödlich verletzte Blitzopfer (Blitzopfer 1, männlich, 36 Jahre) und das leicht verletzte Blitzopfer (Blitzopfer 2, weiblich, 33 Jahre) befanden sich zum Unfallzeitpunkt in der Mitte der Gruppe (siehe Abbildung 33). Die beiden hielten sich an den Händen, das Blitzopfer 1 hielt mit der rechten Hand die linke Hand des Blitzopfers 2. Das Blitzopfer 1 trug ein kurzärmeliges Hemd, eine knielange, leichte Hose, Socken und Sportschuhe mit einer Gummisohle. Die linke Socke und der linke Schuh wiesen aufgrund der Blitzentladung Beschädigungen auf (siehe Abbildung 34). Das Blitzopfer 2 war ebenfalls sommerlich bekleidet und trug offene Schuhe mit Holzsohle. Die Betroffene konnte den Blitzeinschlag in das Blitzopfer 1 beobachten. Kurz darauf fielen beide nach vorne zu Boden. Die vor den beiden gehenden Personen nahmen das Blitzereignis zuerst nicht bewusst wahr. Sie leisteten Erste-Hilfe und verständigten die Rettung. Für das Blitzopfer 1 kam jede Hilfe zu spät, das Blitzopfer 2 wurde mit leichten Verletzungen in ein Krankenhaus gebracht.

Der Unfallort kann nicht als exponiert angesehen werden. Er liegt an einer Landesstraße, welche von flachen Wiesen und Feldern umgeben ist. Etwas weiter von der Straße entfernt befanden sich einige Bäume. Die Unfallstelle lag genau zwischen zwei metallenen, geerdeten Straßenlaternen (Abstand der Blitzopfer zu den beiden Laternen jeweils 28 m). Wenige Meter entfernt standen Hinweistafeln und Verkehrszeichen. Ungefähr 30 cm neben dem Einschlagpunkt befand sich am Boden ein Kanaldeckel aus Metall. Die Unfallstelle ist in Abbildung 33 dargestellt. Trotz des genau bekannten Einschlagsortes konnten keine Spuren eines Blitzeinschlages am Asphalt oder Kanaldeckel gefunden werden. Lediglich eine der beiden Straßenlaternen funktionierte nach dem Unfall nicht mehr.



Abbildung 33: Umgebung des Unfallortes und Standort der Blitzopfer und der unverletzten Personen zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages, Unfall 15.



Abbildung 34: Beschädigungen der linken Socke und des linken Schuhs des Blitzopfers 1 des Unfalls 15.

Verletzungen

Blitzopfer 1

Das Blitzopfer 1 fiel ohne Reaktion mit den Armen parallel zum Körper auf den Gehweg. Er blieb nach dem Sturz regungslos und nicht ansprechbar mit dem Gesicht zum Boden liegen. Da das Blitzopfer 2 im medizinischen Bereich arbeitete, leitete es sofort Reanimationsversuche beim Blitzopfer 1 ein. Aufgrund ihrer Bewegungsunfähigkeit gab sie die Vorgehensweise an die unverletzten Personen der Gruppe mündlich weiter. Diese wurden später vom eintreffenden Notarzt weitergeführt, blieben aber erfolglos. An der Leiche des Blitzopfers 1 konnten Blitzspuren vor allem am Oberkörper festgestellt werden. Strommarken befanden sich unter anderem im Kopf- bzw. Stirnbereich (siehe Abbildung 35 (a)), im Bereich der Brust, des Bauches, an beiden Armen und Händen (siehe Abbildung 35 (c) und (d)) und am linken Fuß. Große und deutliche Strommarken traten an der linken Stirnseite, an der linken Schulter (siehe Abbildung 35 (b)) und an den beiden Handrücken auf. Die Körperbehaarung wurde in diesen Bereichen angesengt. Im Halsbereich war eine genau definierte, oberflächliche Verbrennungsspur sichtbar, die auf eine Halskette hindeutete. Am linken Fuß konnte auch eine etwas kleinere, aber deutlich erkennbare Strommarke festgestellt werden. Durch den Sturz erlitt er ein stumpfes Trauma.

Blitzopfer 2

Das Blitzopfer 2 stürzte im selben Moment wie das Blitzopfer 1 nach vorne zu Boden und verdeckte reflexartig ihr Gesicht mit den Armen. Für eine kurze Zeit nach dem Blitzeinschlag verlor das Blitzopfer 2 das Bewusstsein. Sie erlitt Lähmungserscheinungen an der linken Hand und an beiden Beinen. Ihre Beine schmerzten vor Ort und auch später im Krankenhaus bei Berührung stark. Die Lähmungserscheinungen am linken Arm verschwanden nach kurzer Zeit, ihre beiden Füße konnte sie erst Stunden später wieder bewegen. Weiters gab das Blitzopfer an, dass sie leichte Abschürfungen bemerkte und ein großer Zeh blau wurde. Sie wurde in ein Krankenhaus gebracht und einen Tag stationär aufgenommen. Im Krankenhaus konnten keine Strommarken und äußerlichen Blitzspuren festgestellt werden.

Die anderen fünf Personen der Gruppe blieben unverletzt.



(a) linke Stirnseite



(b) linker Schulterbereich



(c) linke Hand



(d) rechte Hand

Abbildung 35: Strommarken und Blitzspuren des Blitzopfers 1 des Unfalls 15.

Blitzstromamplitude

Die Blitzentladung des beschriebenen Unfalls konnte von ALDIS exakt detektiert werden.

Im Umkreis von wenigen Kilometern konnten sieben Wolke-Erde-Entladungen innerhalb einer Stunde geortet werden. Die Blitzstromamplitude für diesen Unfall betrug $-9,6\text{ kA}$.

Diskussion

Der Blitz traf das Blitzopfer 1 direkt im Kopfbereich. Darauf weisen die Blitzspuren und Strommarken an der Leiche und die schwerwiegenden Verletzungen eindeutig hin. Als Blitzeintrittsstelle wird die linke Stirn angenommen. Durch die Beschädigung des Schuhs kann davon ausgegangen werden, dass auf jeden Fall ein Teil des Blitzstromes an den Füßen austrat. Das Blitzopfer 1 dürfte sofort nach dem Blitzeinschlag tot gewesen sein. Die Todesursache kann nicht genau festgestellt werden, da wegen Ausschluss von Fremdverschulden bei Blitzunfällen keine Obduktion durchgeführt wird. Die zahlreichen Strommarken am Oberkörper deuten mit großer Wahrscheinlichkeit auf einen Stromfluss im Bereich des Herzens hin. Aufgrund der Strommarken an der Stirn kann auch ein Stromfluss durch das Gehirn nicht ausgeschlossen werden. Das Blitzopfer könnte demnach an einem Atem- oder Herz-Kreislauf-Stillstand bzw. deren Folgen gestorben sein.

Trotz des Kontaktes der beiden Blitzopfer über die Hände und der großen Strommarken an den beiden Handrücken des Blitzopfers 1 überlebte das Blitzopfer 2 den Blitzeinschlag fast unverletzt. Die Lähmungserscheinungen an der linken Hand, welche in direktem Kontakt mit der rechten Hand des Blitzopfers 1 stand, und an beiden Beinen weisen auf einen Stromfluss hin. Der Stromweg linke Hand-Füße wird bei einem Stromunfall als besonders gefährlich angenommen, da ein Teil des Stromes über das Herz fließen und somit schwere Verletzungen auslösen kann. Es muss trotzdem ein Großteil des Stromes über das Blitzopfer 1 Richtung Erde abgeflossen sein, da die Verletzungen des Blitzopfers 2 sonst vermutlich schwerer ausgefallen wären. Die Abschürfungen und die blaue Zehe erlitt das Blitzopfer 2 wahrscheinlich durch den Sturz (stumpfes Trauma).

Da das Blitzopfer 1 bis zum Eintreffen der Einsatzkräfte am exakten Unfallort liegen blieb, ist der Einschlagbereich genau bekannt. Es konnten aber dennoch keine Blitzspuren in diesem Bereich gefunden werden. Das Blitzortungssystem ALDIS detektierte in unmittelbarer Nähe eine negative Wolke-Erde-Entladung, welche aufgrund der örtlichen und zeitlichen Übereinstimmung mit den Zeugenangaben eindeutig dem Ereignis zugeordnet werden kann.

7.17 Unfall 16 - 2012

Unfallbeschreibung

Im Juli 2012 kam es an einem Abend zu einem Blitzschlag, bei dem zwei Personen verletzt wurden. Da es für die beiden den Anschein hatte, dass das zuvor bemerkte abendliche Gewitter bereits vorbei war, machten sie sich auf den Weg zu einem Hochsitz in einem Waldgebiet. Nachdem sie ungefähr zehn Minuten am Hochsitz saßen, begann es wieder

stärker zu regnen. Während des Unfalls befanden sich beide auf diesem etwa 4 m hohen Hochsitz (siehe Abbildung 36 (a)). Das Blitzopfer 1 (weiblich, 49 Jahre) saß auf der linken Seite im Bereich der Türe, welche nach Betreten des Hochsitzes geschlossen worden war. Sie stütze sich mit den Armen auf einem Brett, das unterhalb der Fenster im Inneren des Hochsitzes angebracht war, ab (siehe Abbildung 36 (b)). Das Blitzopfer 2 (männlich, 53 Jahre) saß auf der rechten Seite des Hochsitzes. Er schloss aufgrund des Regens das Fenster vor sich. Das kleinere Fenster vor Blitzopfer 1 blieb offen. Ein paar Minuten später kam es laut Blitzopfer 2 zu einem lauten Knall und er beobachtete eine helle Erscheinung, wie ein Faden einer Glühbirne. Das Blitzopfer 1 konnte den Blitzeinschlag nicht beschreiben, da sie sich an nichts erinnerte. Das Blitzopfer 2 verließ fluchtartig den Hochsitz und realisierte erst am Weg nach unten das Geschehene. Das Blitzopfer 1 wurde vom Blitzopfer 2 teilweise tragend, teilweise stützend vom Hochsitz hinunter und weiter zu ihrem in der Nähe parkenden Auto gebracht, da sie sich nur sehr eingeschränkt bewegen konnte. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Gewitter wieder stärker. Das Blitzopfer 2 fuhr selbst mit dem Auto nach Hause und verständigte dann die Rettung. Nach der Erstversorgung vor Ort wurden die beiden in umliegende Krankenhäuser gebracht.



(a) Hochsitz



(b) Fenster im Inneren



(c) Blitzspuren an der Stiege des Hochsitzes

Abbildung 36: Ort des Blitzunfalls 16 und Umgebung.

Die Kleidung des Blitzopfers 1 war zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages nass, da es am Weg zum Hochsitz leicht regnete. An ihrer Kleidung konnten Blitzspuren in Form von Löchern festgestellt werden (siehe Abbildung 37). Sichtbare Blitzspuren konnten weder am Körper noch an der Kleidung oder den Schuhen des Blitzopfers 2 beobachtet werden.

Verletzungen

Das Blitzopfer 1 saß nach dem Blitzeinschlag im Hochsitz und konnte sich nicht bewegen. Sie spürte ihren ganzen Körper bis auf den Kopfbereich nicht. Die Betroffene konnte nur mit ihrem Begleiter sprechen. Einige Zeit später konnte sie ihre linke Hand und den rechten Fuß bewegen. Ihren ganzen Körper spürte sie erst wieder am nächsten Tag. Das

Blitzopfer 1 erlitt Verletzungen, hauptsächlich in Form von leichten Verbrennungen, am rechten Oberarm, im Brustbereich, an den Oberschenkeln und am linken Fuß. Sie wurde in ein Krankenhaus gebracht und zur Beobachtung zwei Tage lang auf die Intensivstation verlegt. Fast zwei Monate nach dem Blitzunfall hatte die Betroffene noch manchmal Taubheitsgefühle in den Fingern und verspürte teilweise ein Gefühl wie ein Drücken vom Oberarm aus.



(a) Oberteil



(b) Hose mit zwei Löchern



(c) Unterwäsche



(d) Linker Socke



(e) Linker Schuh

Abbildung 37: Blitzspuren an den Kleidungsstücken und Schuhen des Blitzopfers 1 des Unfalls 16.

Das Blitzopfer 2 erlitt Lähmungserscheinungen in seiner rechten Hand und seinem linken Fuß. Er war vorübergehend in seinen Bewegungen eingeschränkt. Dies legte sich aber rasch und er spürte seine Hände und Füße kurz nach dem Blitzeinschlag wieder. Von den Rettungskräften wurde er etwa eine Stunde erstversorgt, da er einen systolischen Blutdruckwert von ungefähr 200 mmHg hatte. Das Blitzopfer wurde dann in ein Krankenhaus gebracht und zur Beobachtung stationär aufgenommen.

Blitzstromamplitude

Das Blitzortungssystem ALDIS konnte innerhalb von 15 Minuten insgesamt 23 Wolke-Wolke- und Wolke-Erde-Entladungen in einem Umkreis von $2,3\text{ km}$ detektieren. Der Standort des Hochsitzes ist genau bekannt. Er liegt am Rand eines Waldgebietes nicht weit von einem Wohnhaus entfernt. Die Blitzabfrage für diesen Unfall ergab eine negative Wolke-Erde-Entladung mit einer Amplitude von $-6,4\text{ kA}$ in einer Entfernung von 300 m zu diesem Wohnhaus. Acht Minuten vor dieser Entladung wurde die erste dieses Gewitters in einer Entfernung von 1 km geortet.

Diskussion

Ob das Blitzopfer 1 direkt vom Blitz getroffen wurde oder der Blitz einen umliegenden Baum oder den Hochsitz selbst traf und dann auf die Person überschlug, ist nicht nachvollziehbar. Aufgrund der Spuren an der Kleidung und an ihrem Körper ist sicher, dass ein Stromfluss stattfand. Da um den Hochsitz einige Bäume standen und das Blitzopfer 1 den Unfall überlebte, wird eher ein Seitenüberschlag eines Blitzteilstromes vermutet. Der genaue Energieübertragungsmechanismus kann aber nicht mehr nachvollzogen werden. Aufgrund der geringen Verletzungen des Blitzopfers 1 wurde der Großteil des Blitzstromes an der Hautoberfläche Richtung Erde abgeleitet (Oberflächeneffekt, siehe Kapitel 3.7). Das Blitzopfer 2 wurde nicht direkt vom Blitz getroffen. Da der Betroffene Lähmungserscheinungen erlitt, aber keine äußerlichen Spuren eines Stromflusses an seinem Körper oder an der Kleidung vorhanden waren, kann von einem Schrittspannungseffekt ausgegangen werden. Die bei beiden aufgetretenen Lähmungen entsprechen der typischen, temporären Keraunoparalyse (siehe Kapitel 5.5). Die Beschwerden legten sich auch bei diesen Blitzopfern von selbst. Der erhöhte Blutdruck des Blitzopfers 2 könnte durch einen Stromfluss erklärt werden. Wahrscheinlicher ist aber das Auftreten aufgrund des Schock- und Stresszustandes, welchem das Blitzopfer zu diesem Zeitpunkt ausgesetzt war.

Das nasse Oberteil des Blitzopfers 1 wurde aufgrund der hohen Temperaturentwicklung und des daraus resultierenden Verdampfens des Wassers bei dem Blitzeinschlag zerrissen. Eine erhöhte thermische Beanspruchung ist deutlich am Metallbügel ihrer Unterwäsche zu erkennen. Es ist durchaus denkbar, dass die im Brustbereich an der darunterliegenden Haut aufgetretenen Verbrennungen dadurch erklärbar sind. Die Löcher in der Hose, an der Socke und am Schuh deuten auf Ein- bzw. Austrittsstellen des Blitzstromes hin. Da

das Blitzopfer im Inneren des Hochsitzes nach vorne gebeugt und mit den Armen vorne abgestützt saß, befanden sich die Knie in Bodennähe. Es ist wahrscheinlich, dass aufgrund der Körperhaltung ein Teil des Blitzstromes bei den sichtbaren Löchern an der Hose, welche im Bereich der Knie sind, ausgetreten und zur Wand oder zum Boden übergeschlagen ist. Ein weiterer Teil des Stromes trat am linken Fuß des Blitzopfers 1 aus. Die Blitzspuren an der Holzstiege des Hochsitzes (siehe Abbildung 36 (c)) deuten auf den weiteren Stromweg Richtung Erdboden hin. Ebenfalls durch das Verdampfen des Wassers wurde ein Teil des Holzes abgespalten, da Wasserdampf ein höheres Volumen als Wasser besitzt und erhöhter Druck zu explosionsartigen Sprengungen führen kann.

Da der Standort des Hochsitzes genau bekannt ist und eine Entladung in einer Entfernung von 300 m eines benachbarten Wohnhauses in Richtung des Waldgebietes detektiert werden konnte, ist die Zuordnung der beschriebenen Blitzstromamplitude eindeutig. Alle anderen Entladungen können aufgrund des Einschlagsortes ausgeschlossen werden.

7.18 Unfall 17 - 2013

Unfallbeschreibung

Im Juni 2013 ereignete sich am Nachmittag während einer Wanderung ein Blitzunfall mit vier Beteiligten, wobei drei von ihnen verletzt wurden. Die Gruppe startete die Wanderung am Nachmittag eines schönen Tages. Sie konnten keine Anzeichen auf ein bevorstehendes Gewitter beobachten. Nach einem Teil der Wegstrecke legten sie eine Pause ein. Das Blitzopfer 1 (weiblich, 40 Jahre) und das Blitzopfer 2 (männlich, 45 Jahre) setzten sich unter einen großen Baum auf den Boden, sodass der Rücken dem Baum zugewandt war. Das Blitzopfer 3 (weiblich, 23 Jahre) und das Blitzopfer 4 (weiblich, 64 Jahre) saßen den anderen beiden gegenüber, sodass ihr Rücken dem Baum abgewandt war. Zu Beginn ihrer Pause schien noch die Sonne. Es begann kurz darauf leicht zu regnen und der Blitzeinschlag erfolgte unmittelbar nach Einsetzen des Regens. Die Blitzopfer 1 und 2 wurden durch den Blitzeinschlag nach vorne geworfen und blieben bewusstlos am Boden liegen. Sie hatten den Blitzschlag nicht direkt wahrgenommen. Die beiden anderen blieben fast unverletzt und kümmerten sich um die Erstversorgung und die Alarmierung der Einsatzkräfte. Die Blitzopfer 1 und 2 wurden mit einem Hubschrauber ins Krankenhaus transportiert. Die beiden anderen wurden mit einem Hubschrauber ins Tal und weiter mit der Rettung in umliegende Krankenhäuser gebracht.

Die Blitzopfer 1, 2 und 3 trugen Metallgegenstände in Form von Schmuckstücken (Ehering, Uhr, Halskette) bei sich. Bei allen Betroffenen konnten weder an den Schmuckstücken noch an der Kleidung Blitzspuren erkannt werden. An einem Baum am Unfallort waren Blitzspuren sichtbar. Ein Teil eines Astes bzw. des Baumstammes war zerrissen worden.

Verletzungen

Das Blitzopfer 1 erlitt aufgrund des Sturzes Abschürfungen im Gesicht und sie blutete aus dem Mund. Sie verlor nach dem Blitzeinschlag das Bewusstsein. Die Dauer der Bewusstlosigkeit konnte danach nicht mehr genau ermittelt werden, Blitzopfer 4 gab ungefähr 10-15 Minuten an. Die Betroffene wurde nach kurzer Zeit blau im Gesicht. Weiters erlitt sie Lähmungserscheinungen in den Beinen vom Becken abwärts. Sie konnte sich nur schwer bewegen, spürte ihre Beine beim Eintreffen im Krankenhaus aber bereits wieder. Das Blitzopfer 1 wurde zur Beobachtung zwei Tage stationär im Krankenhaus aufgenommen.

Das Blitzopfer 2 erlitt aufgrund des Sturzes Abschürfungen im Gesicht. Er verlor nach dem Blitzeinschlag das Bewusstsein. Die Dauer konnte danach nicht mehr genau ermittelt werden, Blitzopfer 4 gab ungefähr 10-15 Minuten an. Der Betroffene erlitt Lähmungserscheinungen in den Beinen vom Becken abwärts. Er konnte seine Beine ohne Hilfe nicht bewegen, spürte sie aber beim Eintreffen im Krankenhaus wieder. Das Blitzopfer 2 hatte weitere Verletzungen an der Schulter und laut behandelnder Ärzte eine Strommarke am rechten Knie. Er verspürte nach dem Unfall ein starkes Durstgefühl. Das Blitzopfer 2 verbrachte eine Nacht auf der Intensivstation und konnte nach vier Tagen das Krankenhaus wieder verlassen.

Das Blitzopfer 3 erlitt durch den Blitzeinschlag einen leichten Gehörschaden. Weitere Verletzungen aufgrund einer Blitzeinwirkung konnten nicht festgestellt werden. Sie wurde zur Beobachtung eine Nacht stationär aufgenommen.

Das Blitzopfer 4 blieb durch den Blitzeinschlag völlig unverletzt, wurde aber trotzdem zur Kontrolle ins Krankenhaus gebracht.

Blitzstromamplitude

Zum Unfallzeitpunkt ging ein schweres Gewitter im Bereich des Unfallortes nieder. Es konnten einige Entladungen mit großen Blitzstromamplituden vom Blitzortungssystem ALDIS detektiert werden. Innerhalb einer Stunde wurden zwei positive und 18 negative Wolke-Erde-Entladungen in einem Umkreis von 4,2 km und 24 Wolke-Wolke-Entladungen geortet. Sieben der negativen Wolke-Erde-Entladungen hatten Amplituden bis -10 kA , vier hatten Amplituden zwischen -15 kA und -25 kA , vier zwischen -35 kA und -50 kA und drei negative Entladungen wiesen Amplituden um etwa -150 kA ($-149,8\text{ kA}$; $-150,4\text{ kA}$ und $156,4\text{ kA}$) auf. Die Entladung mit einer Amplitude von $-150,4\text{ kA}$ stimmt örtlich und zeitlich mit dem beschriebenen Unfall am besten überein. Sie wurde in einer Entfernung von 100 m zum Unfallort detektiert. Die weiteren Wolke-Erde-Entladungen wurden in einer größeren Entfernung geortet (fast alle über 1 km entfernt). Vor dem Unfall wurden fünf Entladungen in einer Entfernung von 1,2 – 4,2 km detektiert.

Diskussion

Der Blitz schlug vermutlich in der Nähe der Personengruppe in einen Baum ein. Dies kann durch die als frisch beurteilten Blitzspuren an einem Baum in der Nähe ihres Pausenplatzes begründet werden. Durch die hohe Temperaturentwicklung bei einem Blitzeinschlag verdampft das Wasser, welches im Baumstamm enthalten ist. Der so gebildete Wasserdampf hat ein höheres Volumen als das Wasser. Der erhöhte Druck führt zu Sprengungen einzelner Teile des Baumes. Die Auswirkungen einer erhöhten Schrittspannung könnten der Auslöser für die Lähmungserscheinungen und die Bewusstlosigkeit der beiden Blitzopfer 1 und 2 gewesen sein. Wurde die Auskunft der Ärzte richtig weitergegeben und anschließend richtig dokumentiert, würde die Strommarke am rechten Knie des Blitzopfers 2 auf eine Ein- bzw. Austrittsstelle des Blitzstromes hindeuten (Seitenüberschlag). Aufgrund der geringen Verletzungen muss ein Großteil des Blitzstromes an der Körperoberfläche Richtung Erdboden abgeflossen sein. Die Abschürfungen am Körper entstanden aufgrund des Sturzes nach vorne (stumpfes Trauma). Das Blitzopfer 3 erlitt durch den nahen Blitzeinschlag und der von diesem verursachten Druckwelle, als Donner hörbar, einen Gehörschaden. Eine Verletzung der Ohren tritt nach einer Blitzenladung in unmittelbarer Nähe häufig auf (siehe Kapitel 5.1).

Da die beschriebene negative Wolke-Erde-Entladung nahe zum Unfallort liegt und zeitlich mit den Beschreibungen der Gruppe übereinstimmt, kann trotz der vielen weiteren Entladungen in diesem Bereich eine Zuordnung eindeutig erfolgen.

7.19 Unfall 18 - 2014

Unfallbeschreibung

Eine 30-jährige Frau wurde im Juli 2014 kurz nach Mittag beim Rasenmähen im Garten durch einen Blitzeinschlag verletzt. Das Wetter war zum Zeitpunkt des Unfalls leicht bewölkt und es regnete noch nicht. Das Blitzopfer konnte keine Anzeichen auf ein herannahendes Gewitter bemerken. Die Betroffene trug ein leichtes Sommerkleid, Flip-Flop-Sandalen und keine Schmuckgegenstände am Körper. Sie gab an, dass sie beim Rasenmähen nicht schwitzte. Sie ging zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages hinter dem Rasenmäher nicht weit vom Wohnhaus, von einer Gartenhütte und von Bäumen entfernt. Der Unfallort ist in Abbildung 38 dargestellt. Nach dem Blitzeinschlag wurde das Blitzopfer etwa 2 m vom Rasenmäher entfernt am Boden liegend von einer Bewohnerin des Hauses gefunden. Sie gab an, dass sie plötzlich einen lauten Knall hörte und kein Geräusch des Rasenmähers mehr wahrnehmen konnte. Deshalb schaute sie nach draußen und sah das Blitzopfer verletzt am Boden liegen. Da es kurz darauf zu regnen begann, rief die Zeugin den Nachbar um Hilfe und gemeinsam brachten sie das Blitzopfer zum überdachten Hauseingang. Beide leisteten der Verletzten bis zum Eintreffen der Rettungskräfte Erste Hilfe.

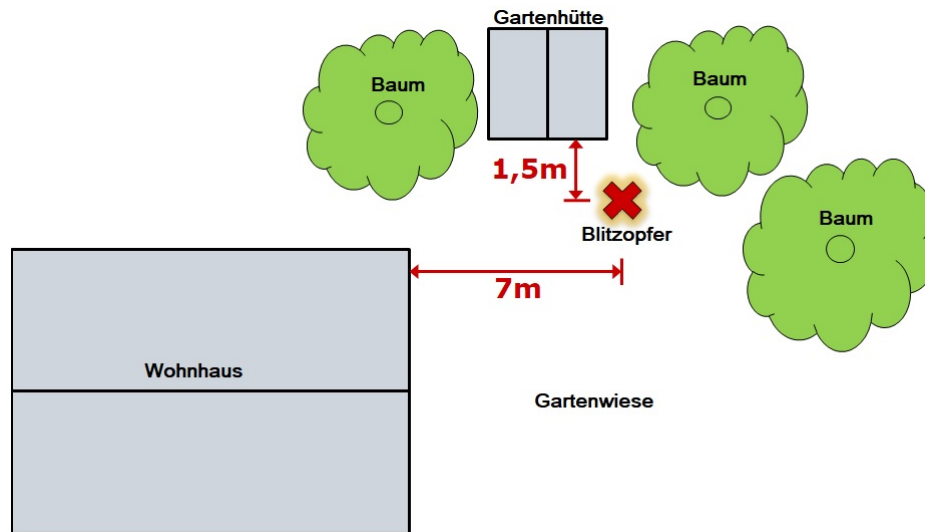


Abbildung 38: Schematische Darstellung der Umgebung des Unfallortes 18 und des Standpunktes des Blitzopfers zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages.

Das Blitzopfer wurde anschließend in ein Krankenhaus gebracht. Am Unfallort, an den Bäumen im Garten, am Wohnhaus und an der Gartenhütte konnten keine Blitzspuren festgestellt werden.

Verletzungen

Das Blitzopfer kann sich an den Blitzeinschlag nicht erinnern. Sie hatte unmittelbar nach dem Unfall das Empfinden von großer Hitze im Inneren ihres Körpers, sie litt an Bauchkrämpfen und leichten Atembeschwerden. Weiters gab sie an, dass sie schlecht sah und nichts hören konnte. Von der Hüfte abwärts nahm sie in ihren Beinen Taubheitsgefühle und Lähmungserscheinungen wahr. Nach dem Unfall musste sie sich übergeben. Die Betroffene war immer ansprechbar. Sie erlitt Verletzungen in Form von Verbrennungen (einige, punktförmige Brandwunden) an der rechten Körperseite vom Ohr, über das Kinn, den Unterarm bis zur Hüfte (siehe Abbildung 39). Ihre Haare waren im Bereich des Kopfes und im Nacken versengt. Im Krankenhaus musste sie an beiden Ohren operiert werden, da beide Innenohren und Mittelohren verletzt worden waren. Im rechten Ohr hatte sie ein Loch im Trommelfell. Aufgrund der Schwere der Verletzungen wurde sie auf die Intensivstation verlegt.

10 Tage nach dem Blitzeinschlag gab sie an, dass sie noch öfters starken Juckreiz am ganzen Körper verspürte und an Konzentrationsproblemen, Kopfschmerzen und Schlafproblemen litt. Das Blitzopfer wurde noch einige Jahre nach dem Unfall an den Folgen des Blitzeinschlages behandelt. Sie leidet unter Gleichgewichtsstörungen und hat Ohrprobleme aufgrund des geschädigten Trommelfelles.

Blitzstromamplitude

Vom Blitzortungssystem ALDIS wurden in einem Umkreis von 2 km um den genau be-

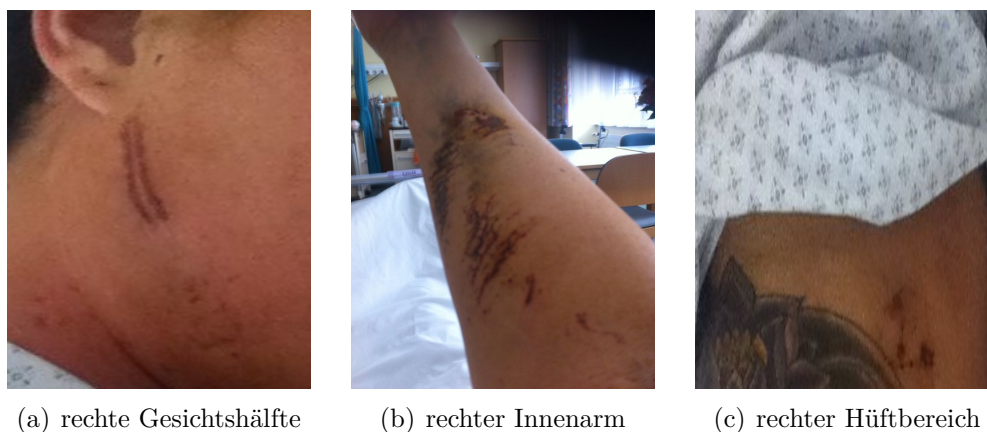


Abbildung 39: Blitzspuren in Form von Verbrennungen an der rechten Körperhälfte, Unfall 18.

kannten Unfallort zum angegebenen Unfallzeitpunkt drei Entladungen innerhalb von drei Minuten detektiert. Von diesen wurden zwei als Wolke-Wolke-Entladungen klassifiziert. Die einzige geortete Wolke-Erde-Entladung fand in einer Entfernung von 100 m zur abgefragten Wohnadresse mit einer Amplitude von $-9,1\text{ kA}$ statt. Diese war auch die erste Entladung in der Umgebung.

Diskussion

Das Blitzopfer wurde entweder von der Blitzentladung direkt getroffen oder ein Objekt in unmittelbarer Nähe (Bäume, Wohnhaus) wurde vom Blitz getroffen und ein Teil des Blitzstromes schlug auf das Blitzopfer über (Seitenüberschlag). Da immer wieder Fälle beschrieben werden, bei denen keine äußerlich sichtbaren Blitzspuren an direkt getroffenen Bäumen beobachtet werden, und die Überlebenschance eines direkten Einschlages eher gering ist, wird bei diesem Unfall von einem Seitenüberschlag von einem Baum auf die Betroffene ausgegangen. Der Energieübertragungsmechanismus kann aber nicht mehr genau ermittelt werden.

Die Blitzspuren an ihrer rechten Körperseite deuten auf Ein- und Austrittsstellen des Blitzstromes hin. Der Eintritt des Blitzstromes erfolgte vermutlich im Bereich der rechten Gesichtshälfte bzw. im Bereich der rechten Halsseite, der Austritt im Bereich der rechten Hüfte. Alle anderen bei der Betroffenen aufgetretenen Verletzungen sind ebenfalls typisch für Blitzunfälle. Auffallend ist bei diesem Blitzopfer, dass sehr viele der typischen Verletzungsmuster nach einem Blitzunfall bei ihr zu finden waren (Lähmungserscheinungen in den Beinen, großes Hitzeempfinden, Ohr- bzw. Trommelfellschäden, Verbrennungen). Die Betroffene litt auch im Unterschied zu anderen bereits behandelten Blitzopfern relativ lang an den Folgeschäden.

Die detektierte Blitzentladung stimmt mit der zeitlichen Angabe der Zeugen und dem Unfallort überein. Daher kann diese eindeutig dem Blitzunfall zugeordnet werden.

7.20 Unfall 19 - 2015

Unfallbeschreibung

Im Juni 2015 wurde ein 64-Jähriger abends bei Arbeiten an einem Weidezaun durch eine Blitzentladung verletzt. Das erste Gewitter an diesem Abend endete bereits 20 Minuten vor der Blitzentladung, die das Blitzopfer traf. Da es für ihn den Anschein hatte, dass die starke Gewitteraktivität vorbei war, ging er nach draußen und begann seine Arbeiten. Er kniete bei einem Träger eines Weidezaunes aus Holz auf einer Wiese in der Nähe seines Wohnhauses (siehe Abbildung 40). Als er gerade Isolatoren für den elektrisch betriebenen Weidezaun anbringen wollte, kam es zum Blitzeinschlag. Der Betroffene nahm den Blitzeinschlag als ein sehr lautes Geräusch wahr. Danach wurde das Blitzopfer zu Boden geschleudert. Die Frau des Blitzopfers, welche sich im Haus befand, nahm einen besonders lauten und langandauernden Blitzschlag wahr und berichtete, dass kurz danach starker Regen mit Hagel einsetzte. Das Blitzopfer verständigte mit seinem Mobiltelefon, welches er in der Hosentasche hatte, seinen Sohn, der die Rettungskräfte alarmierte. Er wurde nach der Erstversorgung vor Ort in ein Krankenhaus gebracht. Drei Kälber, welche in der Nähe des Unfallortes weideten, erlitten tödliche Verletzungen.

Zum Unfallzeitpunkt war das Blitzopfer mit einem Hemd, einer Hose und Gummistiefeln bekleidet. Er trug weder Schmuckgegenstände noch eine Uhr bei sich. In seiner Hosentasche hatte er ein Mobiltelefon, welches durch den Blitzeinschlag unversehrt blieb. Da die Kleidung nach dem Unfall entsorgt worden war, konnten keine Aussagen über Blitzspuren an dieser gemacht werden.



Abbildung 40: Verlauf des Weidezaunes in beide Richtungen vom Standort des Blitzopfers und Umgebung des Unfallortes 19 zum Unfallzeitpunkt.

Verletzungen

Das Blitzopfer hatte nach dem Blitzunfall Schwierigkeiten mit der Orientierung und sprach langsamer als gewöhnlich. Er erlitt Verletzungen auf der linken Körperseite. An seinem linken Auge wurde eine Hornhautverbrennung diagnostiziert, aufgrund welcher er nicht klar sehen konnte. Blitzspuren in Form von oberflächlichen Verbrennungen und versengten

Haaren traten am linken Oberarm, auf der linken Seite seines Oberkörpers bis zum linken Knie auf. Zusätzlich hatte der Betroffene ein taubes Gefühl in der linken Körperseite und konnte nach dem Unfall nicht gehen.

Im Krankenhaus wurde das Blitzopfer drei Tage auf der Intensivstation behandelt und nach insgesamt vier Tagen stationären Aufenthalts wieder entlassen. Ungefähr ein Monat nach dem Blitzunfall hatte er noch Probleme mit seinem Bewegungsapparat und wurde deshalb in diesem Bereich therapiert. Aufgrund der Verletzung des linken Auges war er zu diesem Zeitpunkt ebenfalls noch in ärztlicher Behandlung. Weiters berichtete er über ein stärkeres Müdigkeitsempfinden seit dem Blitzeinschlag.

Blitzstromamplitude

Das Blitzortungssystem ALDIS konnte im Umkreis von 3 km zum Wohnhaus, welches sich in der Nähe des Unfallortes befindet, in einem Zeitraum von 35 Minuten 24 Entladungen detektieren. Von diesen 24 Entladungen wurden 19 als Wolke-Erde-Entladungen klassifiziert. Die Amplituden der 18 negativen Wolke-Erde-Entladungen lagen zwischen $-4,5\text{ kA}$ und $-21,1\text{ kA}$, jene der positiven Wolke-Erde-Entladung bei $6,1\text{ kA}$. Aus den Beschreibungen des Blitzopfers und seiner Frau kann der Unfallzeitpunkt gut nachvollzogen werden. Der genaue Standort des Blitzopfers ist durch die vorhandene Angabe schwer zu bestimmen.

Diskussion

Die wahrgenommenen, lauten Donnergeräusche und die Augenverletzung durch das helle Licht einer Blitzentladung (starke ultraviolette und hochenergetische Strahlung) deuten darauf hin, dass das Blitzopfer indirekt von einem Blitz getroffen wurde. Es ist wahrscheinlich, dass ein Objekt in der Nähe vom Blitz getroffen wurde und ein Teil des Blitzstromes über den Körper des Blitzopfers abgeleitet wurde. Da das Blitzopfer in direktem Kontakt mit dem metallischen Weidezaun stand, ist ein Energieübertragungsmechanismus in Form eines Kontakteffekts (siehe Kapitel 3.7) wahrscheinlich. Da keine Informationen über Blitzspuren an Objekten in der Umgebung vorliegen, kann kein genauere Einschlagpunkt bestimmt werden. Ein Teil des Blitzstromes könnte entlang der linken Körperseite vom Oberarm bis zum Knie geflossen sein, wo er durch die kniende Körperhaltung und damit dem Kontakt des Knies mit dem Boden wieder austrat. Die Verbrennungen und versengten Haare an der linken Körperhälfte weisen ebenfalls auf diesen Stromweg hin. Eine der häufigsten, langfristigen Folgen nach einem Blitzunfall ist das Auftreten einer Trübung der Augenlinse, wie auch in diesem Fall. Das Blitzopfer musste einen Monat nach dem Unfall noch an diesen Beschwerden behandelt werden.

Da der genaue Unfallort nur schwer zu bestimmen ist und eine große Anzahl an Blitzeinschlägen in der Umgebung geortet werden konnte, ist eine eindeutige Zuordnung einer einzigen Wolke-Erde-Entladung zu diesem Unfall nicht möglich.

7.21 Unfall 20 - 2015

Unfallbeschreibung

An einem Abend im Juni 2015 ereignete sich ein Blitzeinschlag in ein Wohnhaus, wodurch eine Frau leicht verletzt wurde. Das 64-jährige Blitzopfer stand zur Zeit des Einschlages im Bereich des Eingangstors des an das Wohnhaus angrenzenden Wirtschaftsgebäudes. Sie stand auf einem unbefestigten, nassen Untergrund. Die Betroffene beschrieb, dass das heftige Gewitter mit Regen und Hagel bereits zu Ende ging, als es 15 Minuten nach dem Nachlassen der Gewitteraktivität zu dem Einschlag kam. Durch den Blitzeinschlag wurden der Rauchfangkopf, ein Teil des Daches und des Dachgeschoßes sowie das Mauerwerk beschädigt. Die verständigte Feuerwehr veranlasste, dass das Blitzopfer zur Beobachtung in ein Krankenhaus gebracht wurde.

Verletzungen

Das Blitzopfer nahm den Blitzeinschlag nicht bewusst wahr. Sie verspürte aber zum Zeitpunkt des Einschlages einen Stromfluss bzw. Stromstoß in ihren Beinen. Da sie schon einmal einen Stromschlag, verursacht durch eine elektrische Anlage, erfahren hatte, gab sie an, dass sie dieses Gefühl kannte. Weitere körperliche Verletzungen konnte sie nicht beobachten. Im Krankenhaus wurde eine etwa $1,5\text{ cm}$ lange Rötung an einer der Zehen des rechten Fußes festgestellt. Ob diese Rötung durch den Blitzstromfluss verursacht worden war oder nicht, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Zur Beobachtung wurde sie eine Nacht stationär aufgenommen.

Blitzstromamplitude

Die Blitzabfrage von ALDIS lieferte für den beschriebenen Unfall 26 Entladungen in einem Umkreis von $2,5\text{ km}$ um das Wohnhaus, in einem Zeitraum von 15 Minuten vor bis 15 Minuten nach dem angegebenen Unfallzeitpunkt. Die drei örtlich nächsten Wolke-Erde-Entladungen zum genannten Unfallzeitpunkt hatten Blitzstromamplituden von -7 kA (470 m Entfernung), $-8,6\text{ kA}$ (490 m Entfernung) und 24 kA (730 m Entfernung).

Diskussion

Da aufgrund der Schäden am Wohnhaus von einem direkten Einschlag in dieses ausgegangen werden kann, wurde die Betroffene nur indirekt durch die Entladung verletzt. Der Stromfluss in ihren Beinen kann durch die Schrittspannung, welche das Blitzopfer am Boden zwischen ihren Füßen abgriff, erklärt werden. Aufgrund der geringen Verletzungen trat vermutlich nur eine kleine Spannungsdifferenz auf.

Der genaue Unfallort ist aufgrund der bekannten Adresse des Wohnhauses feststellbar. Da im abgefragten Zeitraum keine Blitzentladung an diesem Ort detektiert werden konnte, ist eine eindeutige Zuordnung nicht möglich. Die genannten Blitzstromamplituden ereigneten sich zeitlich nur ein paar Minuten vor der vom Blitzopfer angegebenen Unfallzeit, liegen

aber etwas vom Unfallort entfernt. Möglicherweise konnte jene Blitzentladung, die den Schaden und Unfall verursachte, vom Blitzortungssystem nicht detektiert werden. Es kann aber bestätigt werden, dass zum Unfallzeitpunkt ein Gewitter über dieses Gebiet zog.

7.22 Unfall 21 - 2015

Unfallbeschreibung

Im Juli 2015 ereignete sich an einem Nachmittag ein tödlicher Blitzunfall. Der 47-jährige Betroffene stand zum Unfallzeitpunkt auf einer asphaltierten Straße, welche sich in der Nähe seines Firmengeländes befindet. Aufgrund des bereits wahrnehmbaren, starken Gewitters mit Regenschauern hielt er einen Regenschirm in seiner Hand. Angestellte der benachbarten Firma sahen nach dem Unfall eine Person mit einem aufgespannten Regenschirm am Boden liegen und eilten zu ihm. Sie brachten das regungslose Blitzopfer mit einem Kleinbus in ihre Werkstatt und begannen mit den Reanimationsversuchen. Der Betroffene wurde anschließend mit dem Rettungshubschrauber ins Krankenhaus geflogen. Am Regenschirm konnten eine eindeutige Eintrittsstelle des Blitzes und Blitzspuren festgestellt werden.

Verletzungen

Das Blitzopfer erlitt deutliche Blitzspuren in Form von Verbrennungen und versengten Haaren im Bereich des Bauches. Durch den Stoßstrom erlitt er einen Herz-Kreislaufstillstand. Die Reanimationsversuche durch die Angestellten der benachbarten Firma waren nach kurzer Zeit erfolgreich. Atmung und Herzschlag setzten beim Blitzopfer ein. Er erholte sich in weiterer Folge im Krankenhaus in den ersten Tagen nach dem Unfall gut. Sein Gesundheitszustand verschlechterte sich dann jedoch und das Blitzopfer verstarb drei Wochen nach dem Blitzunfall.

Blitzstromamplitude

Zum Unfallzeitpunkt ging ein schweres Gewitter mit vielen Blitzeinschlägen über das Unfallgebiet nieder. In einem Umkreis von $2,5\text{ km}$ um den Unfallort wurden innerhalb einer Stunde 117 Entladungen, von denen 63 als Wolke-Erde-Entladungen klassifiziert wurden, detektiert. Exakt zum angegebenen Zeitpunkt ereignete sich in 100 m Entfernung zur Adresse der Firma eine Wolke-Erde-Entladung mit einer Amplitude von $-16,5\text{ kA}$. 20 Minuten davor wurden drei weitere Entladungen in 100 m bzw. 200 m Entfernung mit Blitzstromamplituden von $-4,4\text{ kA}$; $-3,8\text{ kA}$ und $-3,2\text{ kA}$ detektiert.

Diskussion

Das Blitzopfer wurde direkt vom Blitz getroffen. Dieser schlug in den Regenschirm des Betroffenen ein, was an den Blitzspuren deutlich sichtbar war. In unmittelbarer Nähe des

Unfallortes befanden sich weiters keine Objekte, in die der Blitz einschlagen und in weiterer Folge auf das Blitzopfer überschlagen hätte können. Aufgrund der Blitzspuren kann auch ein Schrittspannungseffekt ausgeschlossen werden.

Durch den Blitzeinschlag erlitt er einen Herzstillstand. Da Personen, welche von einem Blitz getroffen wurden und an Asystolie oder Herzkammerflimmern leiden, eine bessere Überlebenschance als Personen haben, welche einen Herz-Kreislauf-Stillstand anderer Ursache erleiden, ist die sofortige Reanimation besonders wichtig. Auch bei diesem Blitzopfer setzten die Vitalfunktionen nach den Reanimationsversuchen rasch ein. In der Literatur wird häufig berichtet, dass zuerst eine erfolgreiche Reanimation durchgeführt werden konnte, die Betroffenen aber trotzdem nach ein paar Tagen im Krankenhaus verstarben. Die genaue Ermittlung der Todesursache ist oft nicht möglich. Es wird in der Literatur berichtet, dass durch den Sauerstoffmangel des Gehirns nach einem Herz-Kreislauf- oder Atemstillstand eine Hirnschädigung auftreten kann und es nach schweren Blitzschlagverletzungen zu einem Multiorganversagen nach einiger Zeit oder zu weiteren Komplikationen kommen kann (siehe Kapitel 5.8). [26, 43, 46]

Dieser Blitzunfall ereignete sich nicht wie viele andere zu Beginn eines herannahenden Gewitters. Zum Zeitpunkt des Unfalls herrschte bereits ein schweres Gewitter. Wenn die Angabe des Unfallzeitpunktes der Zeugen richtig ist, kann dem Unfallereignis eindeutig eine Entladung zugeordnet werden. Die Wolke-Erde-Entladung mit einer Amplitude von $-16,5 \text{ kA}$ wurde genau bei der angegebenen Unfallzeit an der Unfallstelle detektiert. Man darf nicht außer Betracht lassen, dass die Zeugen beim Unfall nicht vor Ort waren und nur das Blitzopfer danach am Boden liegen sahen. Daher sollte man die drei Entladungen, welche 20 Minuten früher ebenfalls in sehr geringer Entfernung geortet wurden, grundsätzlich auch beachten. Das Blitzopfer konnte erfolgreich reanimiert werden und erholte sich zu Beginn vom Unfall. Steht das Herz länger als 20 Minuten (20 Minuten bis zur angegebenen Unfallzeit der Zeugen plus die Zeit bis zum Beginn der Reanimation) still, treten in den meisten Fällen aufgrund des Sauerstoffmangels starke Hirnschäden und bleibende Schäden des Herzens auf und eine Reanimation wäre vermutlich nicht erfolgreich gewesen. Daher wird jene Entladung, die zum angegebenen Unfallzeitpunkt stattfand, diesem Unfall zugeordnet.

7.23 Unfall 22 - 2017

Unfallbeschreibung

Ein 19-jähriger Feuerwehrmann wurde im Juli 2017 in der Nacht durch einen Blitzeinschlag leicht verletzt. Vor dem Unfall konnte der Betroffene eine Gewitteraktivität wahrnehmen, welche zum Zeitpunkt des Unfalls bereits wieder weniger wurde. Er installierte eine Beleuchtung an einer Liftstütze. Der Scheinwerfer wurde von einem Notstromaggre-

gat, welches sich in der Nähe der Liftstütze bei einer Straße befand und mithilfe eines Erdspießes geerdet wurde, gespeist. Er steckte gerade den Scheinwerfer an eine Kabeltrommel an, welche vom Notstromaggregat versorgt wurde, als er ein Knistern im Bereich der Liftstütze und ein helles Licht wahrnahm. Kurz darauf bildete sich ein Lichtbogen zwischen der Stütze und seinem rechten Mittelfinger aus. Der Betroffene fiel nicht zu Boden und wurde nur leicht verletzt. Trotzdem wurde er nach der Erstversorgung zur Beobachtung ins Krankenhaus gebracht.

Verletzungen

Der Betroffene erlitt leichte Verletzungen am rechten Mittelfinger. Er hatte keine Lähmungserscheinungen und fiel nach dem Unfall nicht zu Boden. Er verspürte lediglich einen Schüttelfrost. Er wurde zur Beobachtung in einem Krankenhaus stationär aufgenommen und konnte dieses nach einer Nacht wieder verlassen, da keine gesundheitlichen Auswirkungen oder Folgen des Unfalls festgestellt wurden.

Blitzstromamplitude

Die Blitzabfrage durch ALDIS ergab für einen Zeitraum von einer halben Stunde vor bis einer halben Stunde nach dem Unfallzeitpunkt 9 Entladungen (3 Wolke-Wolke- und 6 Wolke-Erde-Entladungen) in einem Umkreis von 5 km . Davon ereigneten sich 8 der 9 detektierten Entladungen (2 Wolke-Wolke- und 6 Wolke-Erde-Entladungen) genau zum angegebenen Zeitpunkt innerhalb weniger Sekunden und 7 dieser 8 Entladungen (2 Wolke-Wolke- und 5 Wolke-Erde-Entladungen) in einer Entfernung von 1 km zum Standort des Betroffenen. Die Amplituden des Blitzstromes dieser 5 negativen Wolke-Erde-Entladungen lagen zwischen -5 kA und $-55,4\text{ kA}$.

Diskussion

Da die Blitzentladungen in einer großen Entfernung zum Unfallort detektiert und keine Verletzungen festgestellt wurden, ist ein Blitzunfall mit Stromfluss durch den Körper unwahrscheinlich. Weiters erlitt die Person keine typischen, durch einen Blitzstrom verursachten Verletzungen. Vermutlich entstand ein Funke beim Einstecken des Scheinwerfers in die Kabeltrommel aufgrund der elektrostatischen Aufladung durch das elektrische Feld, welches bei einer Blitzentladung aufgebaut wird. Der Spannungsdurchschlag ereignete sich also aufgrund der großen Potentialdifferenzen bei der elektrostatischen Entladung, welche auch in dieser Entfernung bemerkt werden können. Den Lichtbogen beschrieb auch der Betroffene beim Einstecken des Steckers. Der Schüttelfrost kann durch den Schrecken und einen leichten Schock ausgelöst worden sein.

7.24 Zusammenfassung aller Blitzunfälle

In der folgenden Tabelle 7 werden alle beschriebenen Blitzunfälle mit Personenschäden in der Steiermark noch einmal gegenübergestellt und zusammengefasst.

Tabelle 7: Übersicht über die Informationen aller Blitzunfälle mit Personenbeteiligung in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017.
blau - Überlebende Blitzopfer, rot - Blitztote, n.a. - nicht angeben, n.z. - nicht zuordenbar.

Unfall-Nr.	Monat/Jahr	Uhrzeit	Geschlecht	Alter	Energieübertragungsmechanismus	Tätigkeit	Unfallort	Untergrund, Umgebung	Bekleidung, Schuhe	Körperhaltung	Blitzspuren	Verletzungen	Blitzstromamplitude (kA)
1	Mai 2000	14:59	m	27	direkt oder Seitenüberschlag	Arbeit	im Freien	Stapel aus Betonsteinmatten	n.a.	stehend, aber gebückt	Lichtenbergfigur, Strommarken an Ein-, Austrittsstelle	stumpfes Trauma, Verbrennungen	-8,7
2	Juni 2001	17:18	w	56	Schrittspannung	Landwirtschaft	im Freien	nasse Wiese, in der Nähe eines Baumes	n.a.	stehend	keine	tödlicher Unfall	-7,3
3	August 2003	9:00	w,w,m	13,14,10	indirekt (PA-Anhebung, Spannungsdifferenz abgegriffen)	Wanderung	in einer Hütte	Holzboden	n.a.	sitzend bzw. stehend	n.a.	Veränderungen im Herzmuskelbereich	negativ, n.z.
4	Juli 2004	13:10	w	49	direkt	Freizeit - Sport	im Freien	asphaltierte Straße	leichte Bekleidung, Rad T-Shirt, Fahrradhelm, Halskette	aufrecht gehend	Spuren an Kleidung, Helm, Fahrrad, Hals, versengte Haare, Hautveränderungen	Bewusstlosigkeit, Trommelfellverletzung, Verbrennungsnarbe am Hals, Abschürfungen	-6,4 oder -6,9
5	Mai 2005	16:15	m	45	direkt oder Seitenüberschlag	Wanderung	im Freien	Almboden (Wiese), in der Nähe eines Baumes und Gebäudes	n.a.	stehend	Lichtenbergfigur, Verbrennungen	Verbrennungen entlang der linken Körperhälfte, Lähmungen in den Beinen	-10,7
6	Juni 2005	17:49	w	48	Seitenüberschlag	Wanderung	im Freien	in der Nähe eines Gebäudes	n.a.	stehend	Verbrennungen	Verbrennungen am Rücken und an den Beinen, Schock	-2,5
7	September 2005	16:31	m	23	direkt	Freizeit - Sport	im Freien	asphaltierte Straße	n.a.	aufrecht gehend	Strommarken an Ein- und Austrittsstelle (Hände), Spuren an den Stöcken	tödlicher Unfall, stumpfes Trauma, Verbrennungen	-4,8
8	August 2007	14:30	m	43	Seitenüberschlag	Wanderung	in einer Hütte	Hüttenboden	barfuß	stehend	keine	kurze Bewusstlosigkeit	n.z.

Unfall-Nr.	Monat / Jahr	Uhrzeit	Geschlecht	Alter	Energieübertragungsmechanismus	Tätigkeit	Unfallort	Untergrund, Umgebung	Bekleidung, Schuhe	Körperhaltung	Blitzspuren	Verletzungen	Blitzstromamplitude (kA)
9	Juni 2008	16:00	w	25	Schrittspannung	Wanderung	im Freien	Almboden aus Humus, Fels	Schuhe mit Kunststoffsohle	aufrecht gehend	keine	Lähmungen in den Beinen, Platzwunde am Hinterkopf	n.z.
			leicht bekleidet, Regenjacke, Schuhe mit Kunststoffsohle	Herz-Kreislauf-Stillstand, Verbrennungen, Gehirnerschütterung									
10	Juni 2008	15:14	w	59	Seitenüberschlag	Freizeit - Sport	im Freien	Waldboden, Erde, in der Nähe eines Baumes	Schuhe mit Kunststoffsohle, T-Shirt und Hose	aufrecht gehend	Spuren an Kleidung und Haut, versengte Haare	Verbrennungen an rechter Körperseite, Lähmungen in den Beinen	-8,2
11	Juni 2008	13:29	m	n.a.	indirekt (Druckwelle)	Arbeit	im Freien	Ladeluke Flugzeug	Arbeitskleidung, Sicherheitsschuhe mit antistatischer Gummisohle	stehend	keine	stumpfes Trauma	-8,9
			nasser Asphalt, ebene Fläche	Schmerzen und leichte Verbrennungen am Unterschenkel	Lähmung, Schmerzen in den Beinen; Verbrennungen an Oberschenkelrückseite								
12	Mai 2009	18:55	w	14	Verletzung durch Blitzentladung fraglich	Tätigkeit im Wohnhaus	im Wohnhaus	Zimmerboden	n.a.	stehend	keine	vermutlich stumpfes Trauma	n.z.
13	Juli 2009	19:09	19 m, 3 w, 3 n.a.	17-59	indirekt, Schrittspannung	Freizeit - Sport	im Freien	Wiese, ebene Fläche	n.a.	stehend bzw. in Bewegung	keine	leicht, Schock	n.z.

Unfall-Nr.	Monat / Jahr	Uhrzeit	Geschlecht	Alter	Energieübertragungsmechanismus	Tätigkeit	Unfallort	Untergrund, Umgebung	Bekleidung, Schuhe	Körperhaltung	Blitzspuren	Verletzungen	Blitzstromamplitude (kA)
18	Juli 2014	12:39	w	30	direkt oder Seitenüberschlag	Arbeit	im Freien	Wiese, in der Nähe eines Baumes und Gebäudes	leichtes Sommerkleid, Flip-Flop-Sandalen	aufrecht gehend	Verbrennungen	Verbrennungen an rechter Körperseite, Lähmungen in den Beinen, Verletzungen an den Ohren	-9,1
19	Juni 2015	19:50	m	64	Kontakteffekt	Arbeit	im Freien	Wiese	Hemd, Hose, Gummistiefel	knien	Verbrennungen und versengte Haare an linker Körperseite	Orientierungsschwierigkeiten, Hornhautverbrennung im linken Auge, Taubheitsgefühle, Verbrennungen an linker Körperseite	n.z.
20	Juni 2015	19:15	w	64	Schrittspannung	Tätigkeit im Wohnhaus	im Wohnhaus	unbefestigter, nasser Untergrund	Cross-Schuhe aus Kunststoff	stehend	Rötung am Zeh	verspürte Stromfluss in den Beinen	n.z.
21	Juli 2015	13:30	m	47	direkt	Arbeit	im Freien	asphaltierte Straße, in der Nähe eines Gebäudes	n.a.	stehend	Blitzspuren am Regenschirm, Verbrennungen und versengte Haare	tödlicher Unfall, Verbrennungen, Herzstillstand	-16,5
22	Juli 2017	22:29	m	19	indirekt (PA-Anhebung)	Arbeit	im Freien	Wiese	n.a.	stehend	keine	leichte Verletzung am rechten Mittelfinger	n.z.

8 Ergebnisse der Auswertung der Blitzunfälle

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung aller Blitzunfälle mit Personenschäden in der Steiermark im Zeitraum von 2010 bis 2017, welche im Kapitel 7 genau beschrieben und diskutiert wurden, dargestellt.

8.1 Verteilung der Blitzunfälle und der Blitzopfer nach Jahren

Gemäß Abbildung 19 (Kapitel 7.1) ereigneten sich in der Steiermark in einem Zeitraum von 18 Jahren insgesamt 22 Blitzunfälle mit 55 Unfallopfern, von denen vier Personen den Blitzschlag nicht überlebten. Daraus ist ersichtlich, dass bei manchen Unfällen mehr als eine Person gleichzeitig betroffen waren. Bei den Unfällen mit Todesopfern gab es in der Steiermark in diesem Zeitraum pro Unfall immer nur eine Blitztote bzw. einen Blitztoten. Besonders auffällig ist die große Anzahl an Unfallopfern im Jahr 2009. Bei dem Blitzunfall während eines Fußballtrainings (Unfall 13) wurden 25 Personen nach der Erstversorgung in ein Krankenhaus gebracht. Da in Abbildung 19 alle Betroffenen, welche eine medizinische Versorgung nach einem Blitzeinschlag erhielten, gezählt wurden, sind auch alle Fußball-Blitzopfer angeführt. Der Beschreibung des Unfalls kann entnommen werden, dass nur sechs Personen zu Boden fielen und alle anderen unverletzt blieben. Damit die Betroffenen, welche keine bemerkenswerten Verletzungen durch einen Blitzeinschlag erlitten, aber trotzdem aufgrund der Unfallbeschreibungen und vorerst unklaren Ursache der Verletzungen als Blitzopfer geführt werden, nicht die Auswertungen der Unfallverteilungen nach den Jahren verfälschen, wird für die Berechnungen eine Blitzopferzahl von 7 Überlebenden im Jahr 2009 herangezogen (sechs Personen von Unfall 13 und eine Person von Unfall 12).

In der Steiermark wurden demnach in einem Zeitraum von 18 Jahren durchschnittlich 2 Personen pro Jahr durch eine direkte oder indirekte Wirkung eines Blitzeinschlages verletzt. Es kam zu durchschnittlich 0,22 Blitztoten und 1,78 überlebenden Blitzopfern pro Jahr.

In diesem Zeitraum ereigneten sich 22 Blitzunfälle. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Anzahl von 1,22 Blitzunfällen pro Jahr für die Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017.

Bezieht man die Anzahl der Blitzopfer pro Jahr auf die Einwohnerzahlen der vergangenen Jahre in der Steiermark, so erhält man einen Wert von durchschnittlich 1,66 Blitzopfer pro 1 Million Einwohner pro Jahr. Durchschnittlich starben 0,19 Blitzopfer pro 1 Million Einwohner pro Jahr an den direkten Auswirkungen oder an den Folgen eines Blitzunfalls und durchschnittlich 1,47 Blitzopfer pro 1 Million Einwohner pro Jahr überlebten einen Blitzunfall mit unterschiedlich schweren Verletzungen.

Wertet man die Anzahl der Blitzopfer pro Jahr in Bezug auf die Jahresblitzzahlen von 2000 bis 2017 der Steiermark aus, welche der Homepage von ALDIS [2] entnommen werden können, so ergibt sich, dass durchschnittlich 1 Blitzopfer pro 30.085 Wolke-Erde-Entladungen pro Jahr auftrat. Berücksichtigt man, dass laut [2] in Österreich eine Wolke-Erde-Entladung durchschnittlich 2,7 Folgeblitze aufweist, erhält man einen durchschnittlichen Wert von einem Blitzopfer pro 81.230 Teilblitzen (*Strokes*) pro Jahr.

Im Jahr 2000 verursachten die 54.662 detektierten Wolke-Erde-Entladungen einen Blitzunfall. Dies ergibt im betrachteten Zeitraum den geringsten Mittelwert der Opfer pro Wolke-Erde-Entladungen in einem Jahr (durchschnittlich 1 Opfer pro 54.662 Wolke-Erde-Entladungen). Für das Jahr 2013 wurde in der Steiermark die geringste Jahresblitzzahl (20.336 Wolke-Erde-Entladungen) angegeben. Da es in diesem Jahr drei Unfallopfer gab, stellt der durchschnittliche Wert von 1 Opfer pro 6.779 Wolke-Erde-Entladungen den höchsten im betrachteten Zeitraum dar.

Die Jahresblitzzahl der Steiermark für das Jahr 2009 lag im betrachteten Zeitraum am höchsten (92.261 Wolke-Erde-Entladungen). In diesem Jahr wurden auch die meisten Personen durch einen Blitzeinschlag verletzt.

8.2 Verteilung der Blitzunfälle und der Blitzopfer nach Monaten

In Abbildung 42 ist die Verteilung aller Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017, bei denen Personen verletzt wurden, nach Monaten dargestellt.

Abbildung 41 zeigt die Verteilung der überlebenden Blitzopfer und der Blitztoten der Blitzunfälle mit Personenschäden in der Steiermark, welche sich im Zeitraum von 2000 bis 2017 ereigneten, nach Monaten.

Die blaue, horizontale Linie bei den überlebenden Blitzopfern im Juli stellt die Anzahl der durch eine Blitzentladung in diesem Monat in der Steiermark verletzten ohne denen, die beim Unfall 13 (Fußballtraining 2009, 25 Blitzopfer) unverletzt blieben, dar. Der Beschreibung des Unfalls kann entnommen werden, dass nur sechs Personen aufgrund des Blitzeinschlages zu Boden fielen und alle anderen unverletzt blieben. Dies bedeutet, dass für diesen Wert sechs überlebende Unfallopfer des Unfalls 13 in die Auswertung miteinbezogen wurden, was zu einem Wert von 13 überlebenden Blitzopfern im Juli führt. Der gesamte Wert von 31 überlebenden Blitzopfern im Juli ergibt sich, wenn man alle 25 beteiligten Personen des Unfalls 13 anführt.

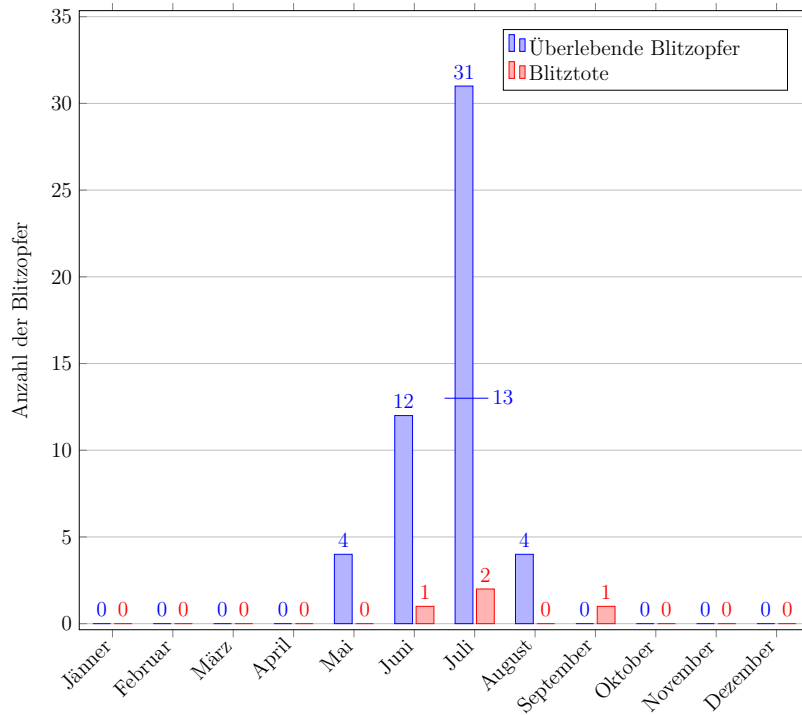


Abbildung 41: Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach Monaten.

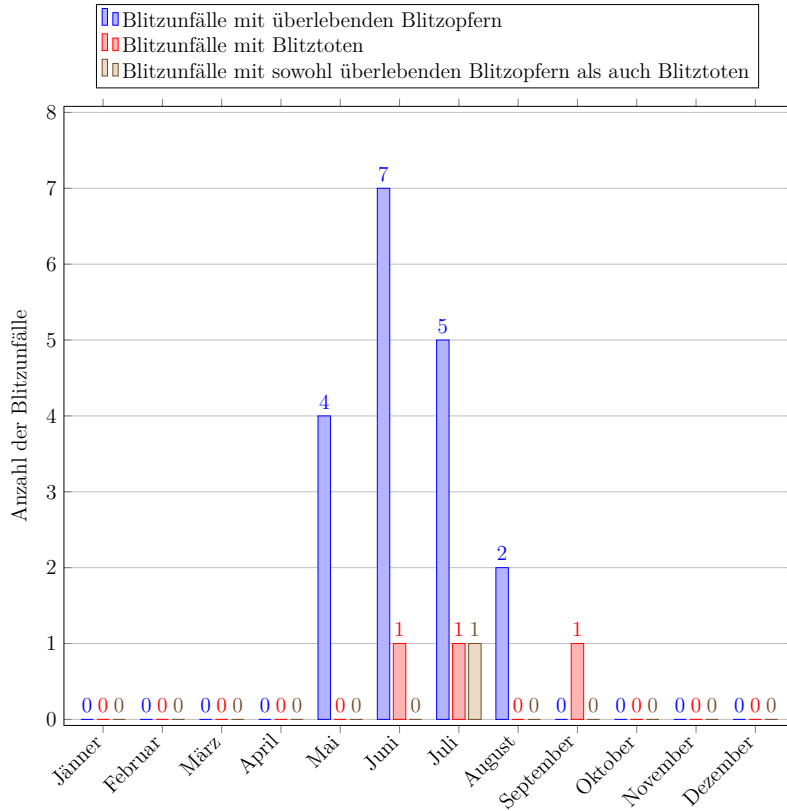


Abbildung 42: Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach Monaten.

8.3 Verteilung der Blitzunfälle und der Blitzopfer nach der Tageszeit

In Abbildung 43 ist die Verteilung aller Blitzunfälle mit Personenschäden im Zeitraum von 2000 bis 2017 in der Steiermark nach der Tageszeit (Uhrzeit) dargestellt.

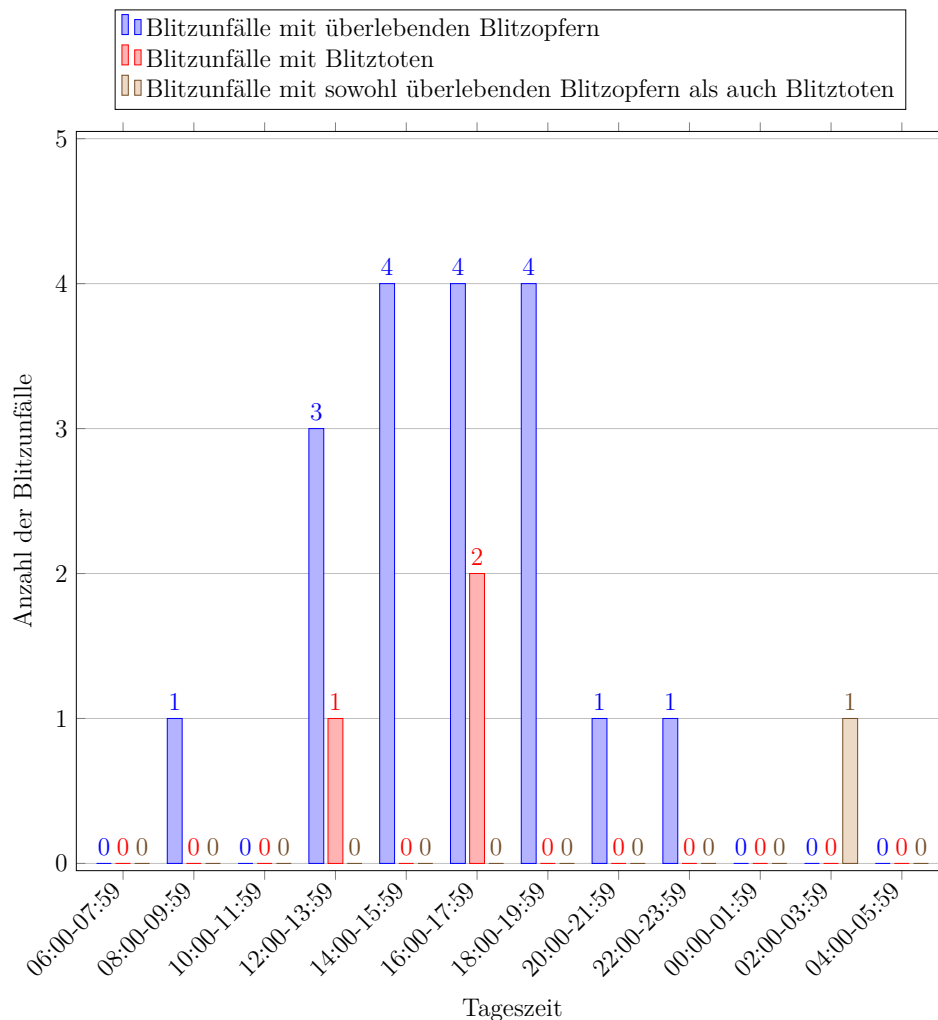


Abbildung 43: Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Tageszeit.

Abbildung 44 zeigt die Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Tageszeit (Uhrzeit).

Die blaue, horizontale Linie bei den überlebenden Blitzopfern, die zwischen 18:00 und 19:59 Uhr durch eine Blitzentladung verletzt wurden, stellt die Anzahl der durch eine Blitzentladung in diesem Zeitraum in der Steiermark verletzten ohne denen, die beim Unfall 13 (Fußballtraining 2009, 25 Blitzopfer) unverletzt blieben, dar. Der Beschreibung des Unfalls kann entnommen werden, dass nur sechs Personen aufgrund des Blitzeinschlages zu Boden fielen und alle anderen unverletzt blieben. Dies bedeutet, dass für diesen Wert sechs überlebende Unfallopfer des Unfalls 13 in die Auswertung miteinbezogen wurden,

was zu einem Wert von 9 überlebenden Blitzopfern zwischen 18:00 und 19:59 Uhr führt. Der gesamte Wert von 28 überlebenden Blitzopfern in diesem Zeitraum ergibt sich, wenn man alle 25 beteiligten Personen des Unfalls 13 anführt.

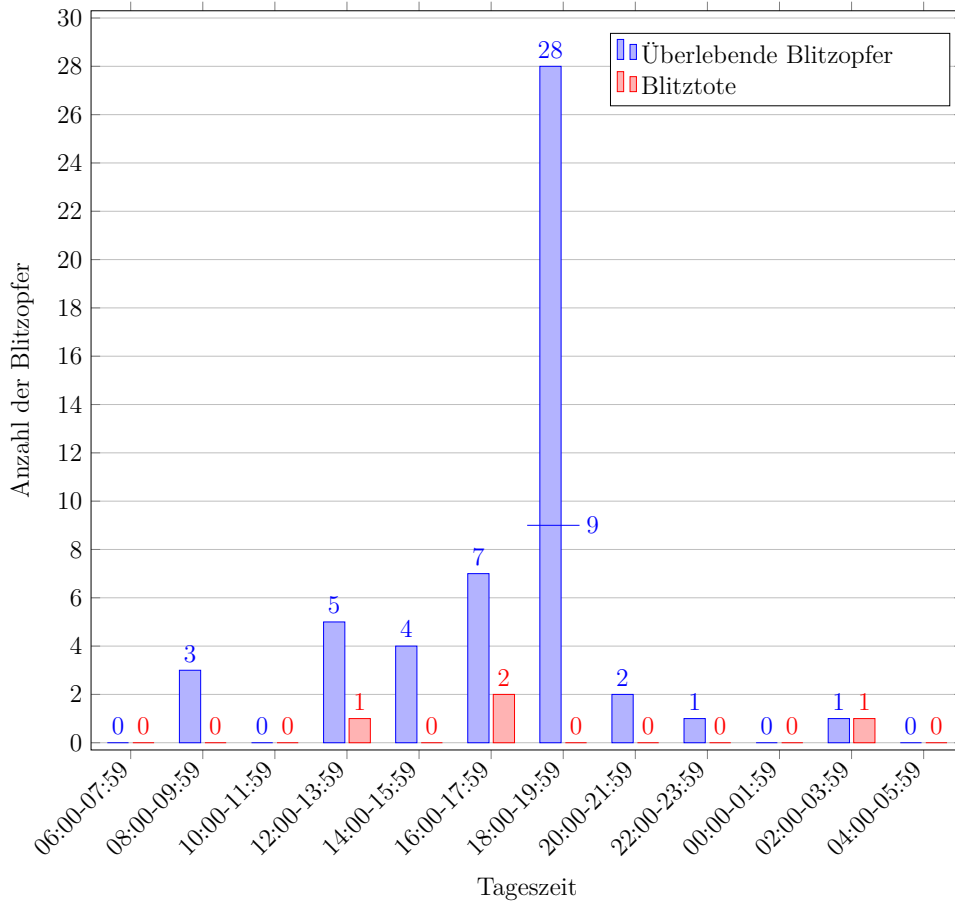


Abbildung 44: Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Tageszeit.

8.4 Verteilung der Blitzunfälle nach dem Wetter unmittelbar vor dem Unfallzeitpunkt

Die Verteilung der Blitzunfälle nach Angabe über das Wetter unmittelbar vor dem Blitzunfall ist in Abbildung 45 dargestellt. Dabei wurden die Informationen der Blitzopfer und Zeugen über das Wetter kurz vor oder zum Unfallzeitpunkt in verschiedene Kategorien eingeteilt: leichter Regen, starker Regen, es wurde bereits eine Gewitteraktivität mit oder ohne Regen wahrgenommen, es wurde bereits eine Gewitteraktivität wahrgenommen und es liegt keine Angabe über Regenschauer vor, die Blitzopfer dachten, das Gewitter sei bereits vorüber und es wurde weder Regen noch eine Gewitteraktivität wahrgenommen.

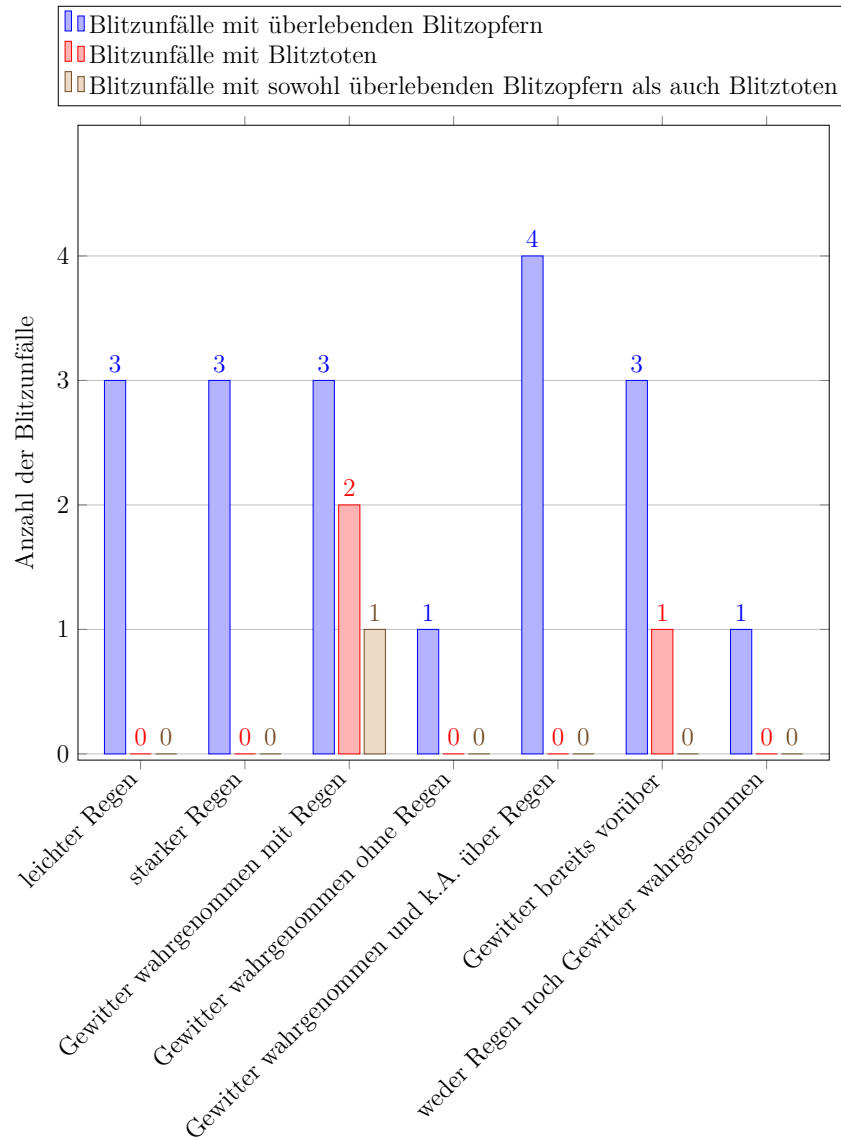


Abbildung 45: Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Angabe über das Wetter unmittelbar vor dem Blitzunfall. k.A. - keine Angabe.

Bei vier Blitzunfällen, bei denen es noch nicht oder nur leicht regnete, gaben die Betroffenen an, dass es kurz nach dem Blitzeinschlag stark zu regnen begann.

8.5 Verteilung der Blitzopfer nach dem Geschlecht

Abbildung 46 zeigt die Verteilung der überlebenden Blitzopfer und der Blitztoten im Zeitraum von 2000 bis 2017 in der Steiermark nach dem Geschlecht.

In dieser Abbildung sind alle Unfallopfer, wie sie auch in Tabelle 7 angeführt sind, berücksichtigt. Das Geschlecht der sechs tatsächlich verletzten Personen des Unfalls 13 (Fußballtraining, 25 Blitzopfer) kann nicht eindeutig zugeordnet werden, da in der Datenbank

nicht nach tatsächlich verletzen und unverletzten Personen unterschieden wird und zusätzlich bei drei der 25 Personen das Geschlecht nicht angegeben wurde. Daher ist eine Auswertung nach dem Geschlecht mit nur sechs, tatsächlich verletzten Personen der insgesamt 25 angegebenen Personen nicht möglich. Würde man den Unfall 13 von dieser Auswertung ausschließen, erhielte man bei den überlebenden Blitzopfern folgende Zahlen: 13 männliche, 13 weibliche und 0 nicht angegebene Personen.

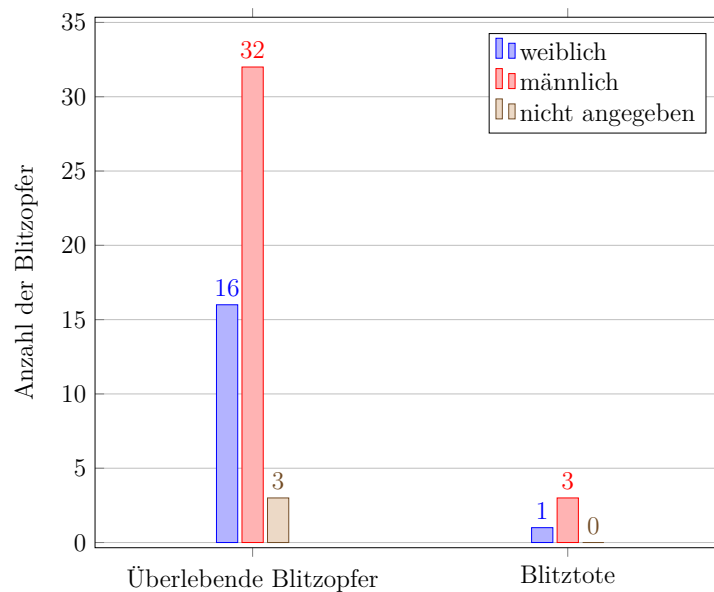


Abbildung 46: Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Geschlecht.

In Abbildung 47 ist die prozentuale Verteilung aller Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Geschlecht dargestellt.

Betrachtet man die Gesamtbevölkerung in Österreich, so liegt der Anteil der Männer bei 49 % und jener der Frauen bei 51 % (Stand 2017) [49].

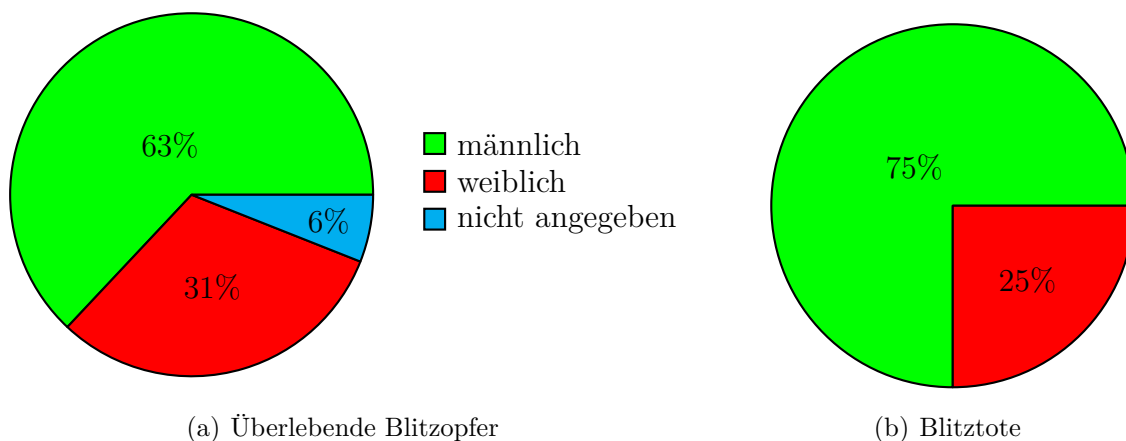


Abbildung 47: Prozentuale Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Geschlecht.

8.6 Verteilung der Blitzopfer nach dem Alter

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der überlebenden Blitzopfer und der Bliztoten in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Alter.

Abbildung 48 stellt alle Unfallopfer, wie sie auch in Tabelle 7 angeführt sind, dar. Da wiederum das Alter der sechs tatsächlich Verletzten des Unfalls 13 (Fußballtraining, 25 Blitzopfer) nicht genau bekannt ist, kann die Auswertung nur mit allen 25 überlebenden Blitzopfern (Abbildung 48) oder durch Ausschluss des Unfalls und somit aller beteiligten und auch der verletzten Personen (Abbildung 49) erfolgen.

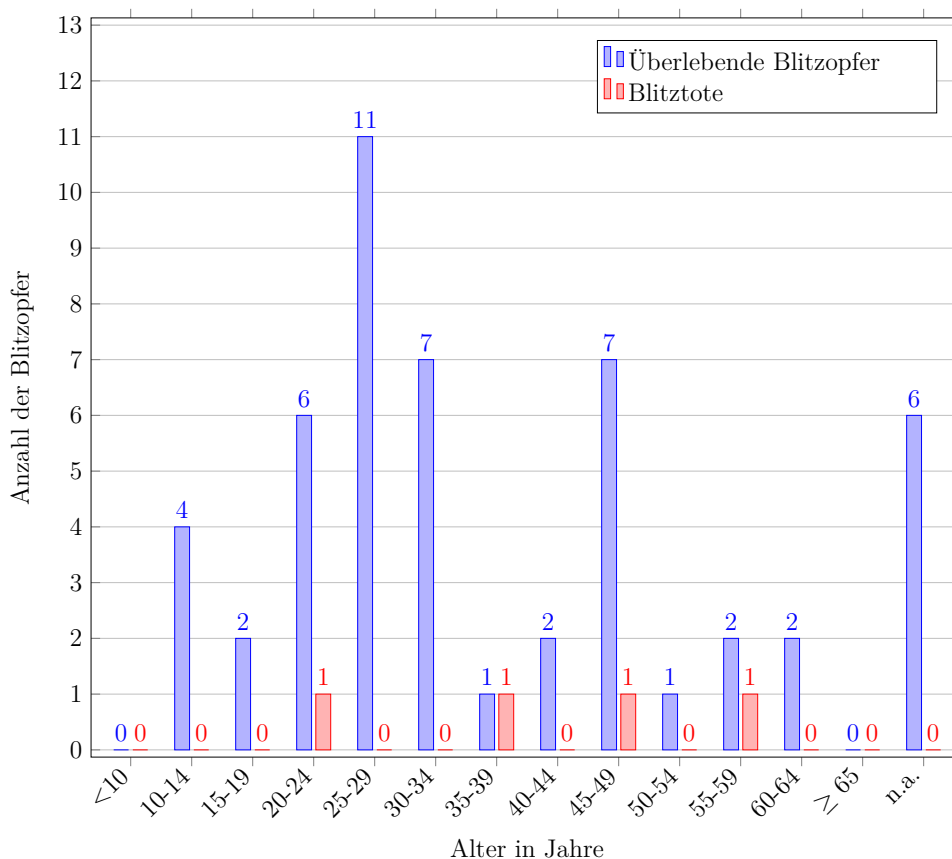


Abbildung 48: Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Alter (inkl. Unfall 13). n.a. - nicht angegeben.

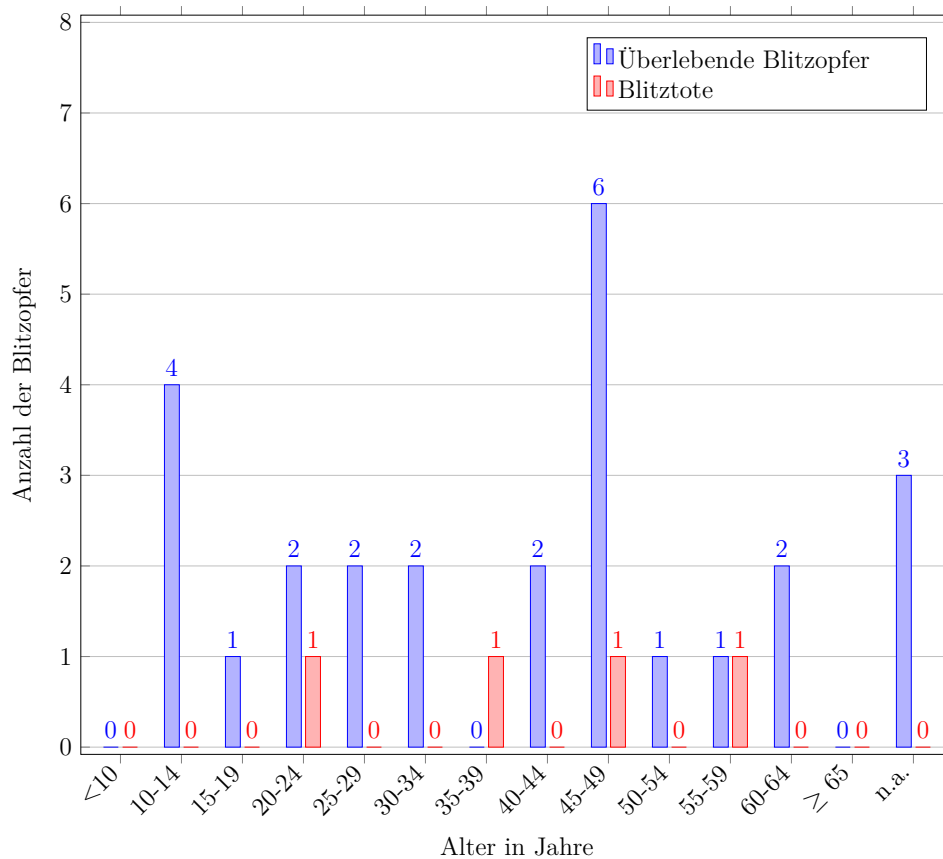


Abbildung 49: Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Alter (ohne Unfall 13). n.a. - nicht angegeben.

Das Durchschnittsalter der Blitzopfer in der Steiermark beträgt 37,0 Jahre ohne Unfall 13 (Fußballtraining) bzw. 33,9 Jahre inkl. Unfall 13 (Fußballtraining). Das Durchschnittsalter der Blitztoten ist 40,5 Jahre, jenes der überlebenden Blitzopfer ohne Unfall 13 36,4 Jahre bzw. inkl. Unfall 13 33,3 Jahre.

Das Durchschnittsalter der Bevölkerung in der Steiermark beträgt 42,5 Jahre [49].

8.7 Verteilung der Blitzopfer nach dem Energieübertragungsmechanismus

In Abbildung 50 ist die Verteilung der Blitzopfer (überlebende Blitzopfer und Blitztote) in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach den verschiedenen Energieübertragungsmechanismen auf den menschlichen Körper bei einer Blitzentladung dargestellt. Die blaue, horizontale Linie stellt die Anzahl der überlebenden Blitzopfer ohne die Betroffenen des Unfalls 13 (Fußballtraining, 25 Blitzopfer), welche unverletzt blieben, dar. Die sechs Blitzopfer, welche durch den Schrittspannungseffekt zu Boden stürzten, sind dementsprechend in dieser Abbildung bei dem Energieübertragungsmechanismus *Schrittspannung* mitgezählt. Da bei den anderen 19 Personen keine Verletzungen beschrieben

wurden und eine Auswirkung der Blitzentladung nicht vollständig geklärt werden konnte, sind diese in der letzten Spalte (Indirekt (Sonstige)) eingetragen, was somit einen Wert von insgesamt 20 ergibt.

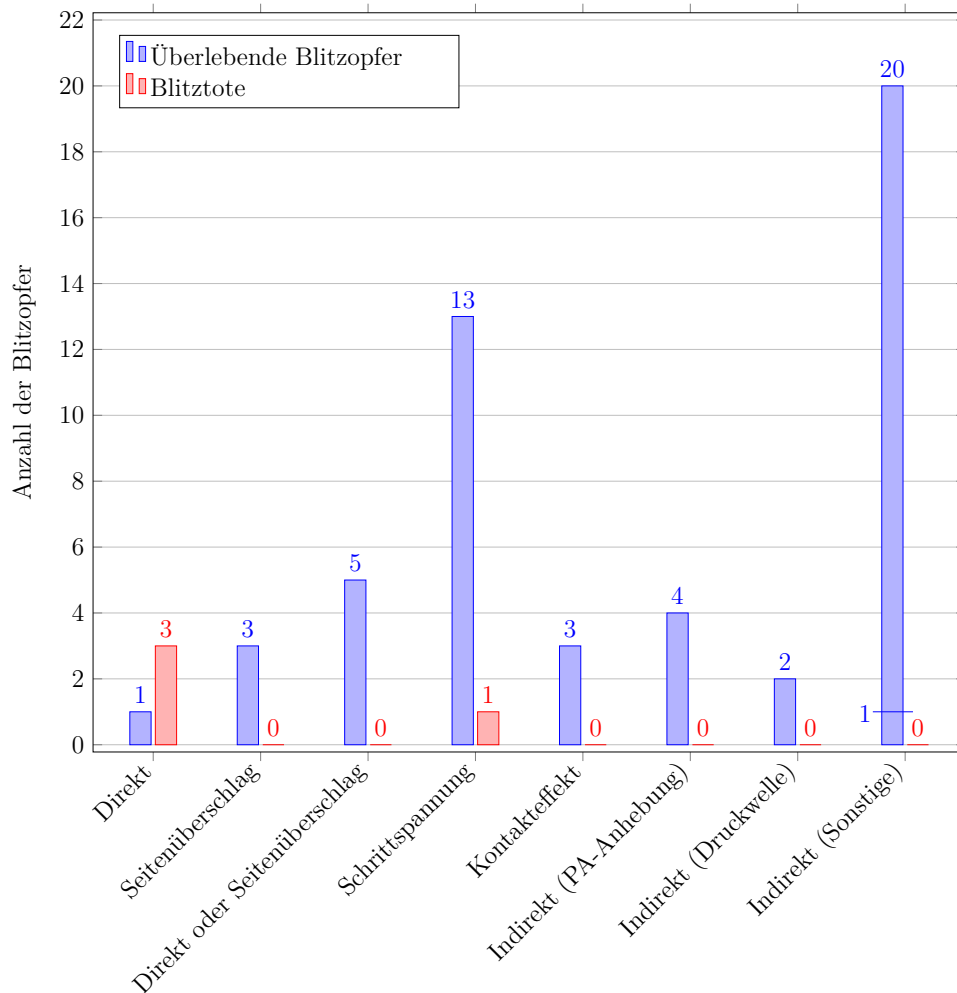


Abbildung 50: Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Art der Energieeinwirkung einer Blitzentladung auf den Menschen.

Die Abbildung 51 zeigt die prozentuale Verteilung der Häufigkeit des Auftretens eines bestimmten Energieübertragungsmechanismus bei den Blitzunfällen in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017.

Die 19 Personen des Unfalls 13 (Fußballtraining, 25 Blitzopfer), welche keine Verletzungen erlitten, sind in dieser Verteilung nicht enthalten.

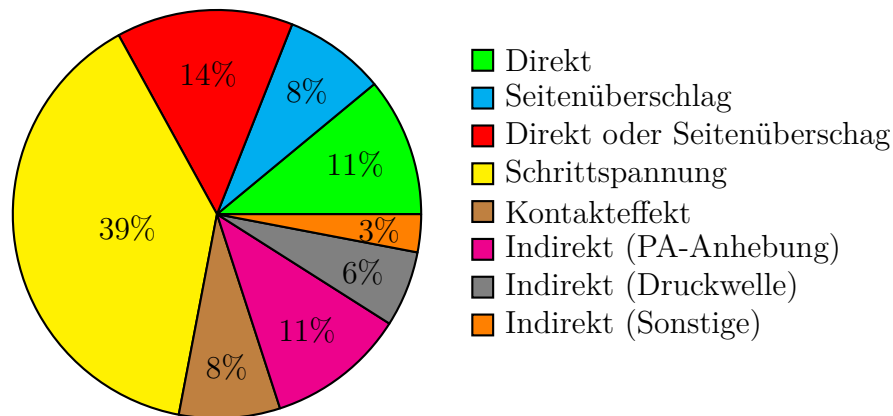


Abbildung 51: Prozentuale Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Art der Energieeinwirkung einer Blitzentladung auf den Menschen.

8.8 Verteilung der Blitzunfälle nach der Tätigkeit der Blitzopfer zum Unfallzeitpunkt

In Abbildung 52 ist die Anzahl der Blitzunfälle, die sich im Zeitraum von 2000 bis 2017 in der Steiermark ereigneten, nach der Art der Tätigkeit der Blitzopfer zum Zeitpunkt des Blitzunfalls dargestellt. Die Zuordnung der verschiedenen Unfälle zu den einzelnen Kategorien kann Tabelle 7 entnommen werden.

Abbildung 53 zeigt die prozentuale Verteilung der Tätigkeiten der Blitzopfer zum Unfallzeitpunkt. Die Einteilung der Unfälle in die jeweiligen Kategorien kann Tabelle 7 entnommen werden.

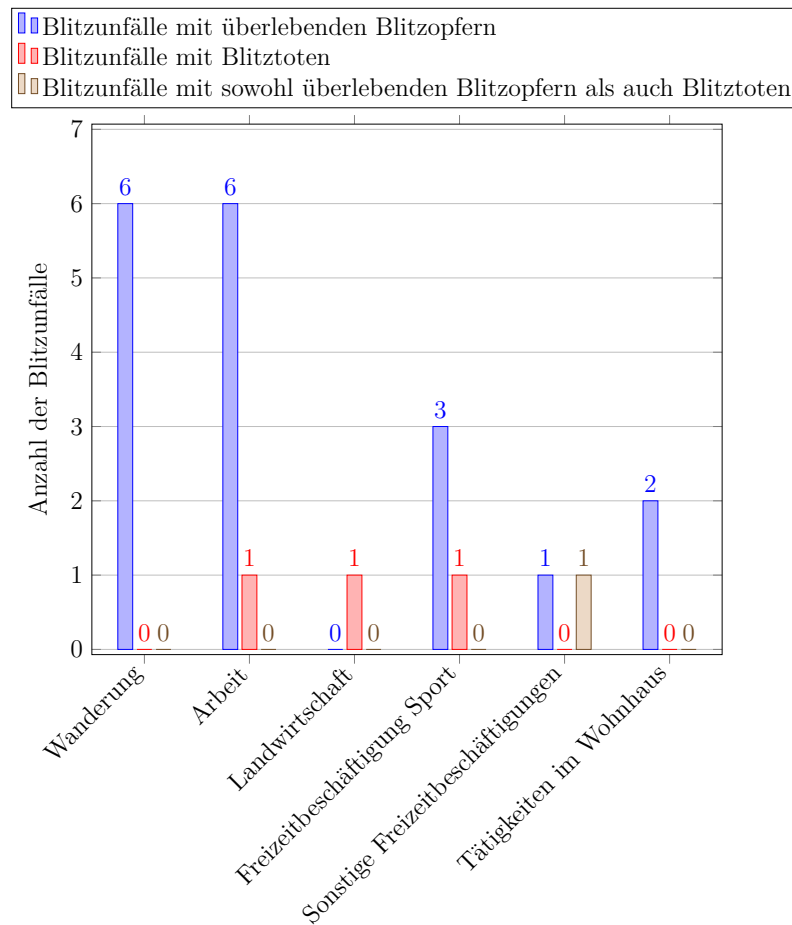


Abbildung 52: Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Tätigkeit der Blitzopfer zum Unfallzeitpunkt.

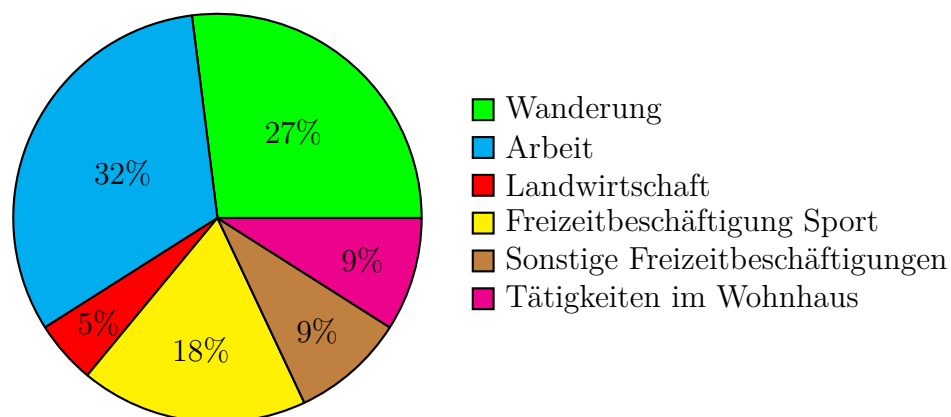


Abbildung 53: Prozentuale Verteilung nach der Tätigkeit der Blitzopfer zum Unfallzeitpunkt aller Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017.

8.9 Verteilung der Blitzunfälle nach dem Unfallort

In Abbildung 54 ist die Anzahl der Blitzunfälle mit überlebenden Blitzopfern und die Anzahl der Blitzunfälle mit Blitztoten nach dem Unfallort, im Freien oder innerhalb eines Gebäudes, welches ein Wohnhaus, eine Hütte oder ein anderes Gebäude sein kann, dargestellt.

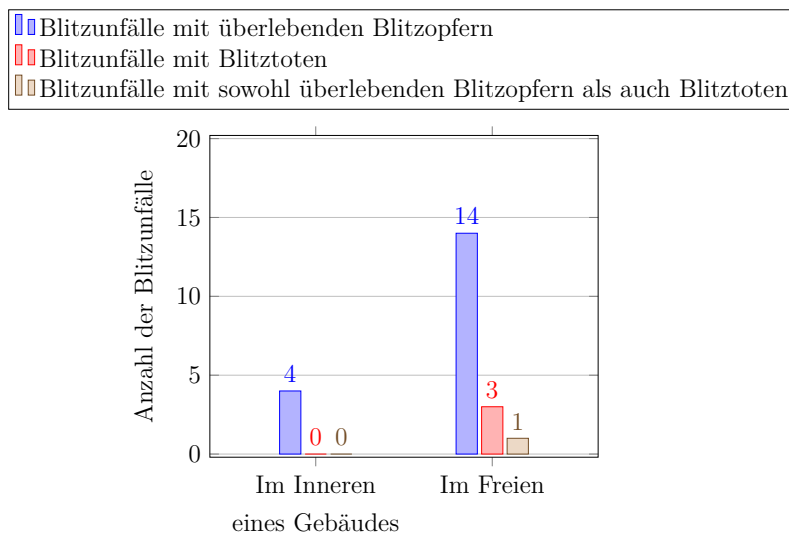


Abbildung 54: Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Unfallort.

Um die Unfallorte der zahlreichen Blitzunfälle, die sich im Freien ereigneten, und die Umgebung um diese besser beschreiben zu können, zeigt Abbildung 55 eine genauere Verteilung über die verschiedenen Unfallorte im Freien.

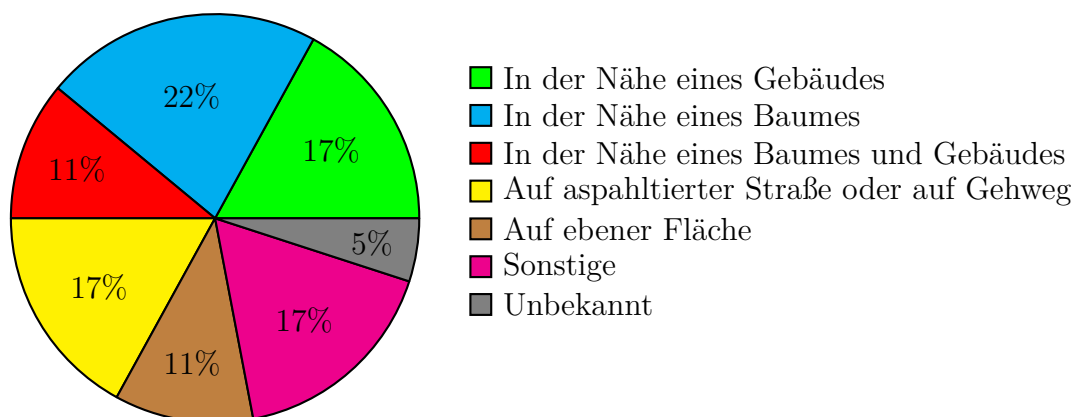


Abbildung 55: Prozentuale Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017, welche sich im Freien ereigneten, nach der Umgebung der einzelnen Unfallorte.

8.10 Verteilung der Blitzopfer nach sichtbaren Blitzspuren

Abbildung 56 zeigt die Anzahl der überlebenden Blitzopfer und Blitztoten in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017, bei denen Blitzspuren bzw. keine Blitzspuren auftraten. Blitzspuren bezeichnen dabei sowohl sichtbare Veränderungen am Körper (zum Beispiel Verbrennungen, versengte Haare, Strommarken) als auch Spuren an der Kleidung oder den Schuhen der Blitzopfer und Spuren an Gegenständen, die die Blitzopfer bei sich trugen (zum Beispiel Schmuckgegenstände, Fahrradhelm, Nordic Walking Stöcke).

Die blaue, horizontale Linie stellt die Anzahl der überlebenden Blitzopfer, bei denen keine Blitzspuren auftraten, ohne denen, die beim Unfall 13 (Fußballtraining, 25 Blitzopfer) unverletzt blieben, dar. Der Beschreibung des Unfalls kann entnommen werden, dass nur sechs Personen aufgrund des Blitzeinschlages zu Boden fielen und alle anderen unverletzt blieben. Dies bedeutet, dass für diesen Wert sechs überlebende Unfallopfer des Unfalls 13 in die Auswertung miteinbezogen wurden, was zu einem Wert von 16 überlebenden Blitzopfern ohne sichtbare Blitzspuren führt. Der gesamte Wert von 35 überlebenden Blitzopfern ohne sichtbare Blitzspuren ergibt sich, wenn man alle 25 beteiligten Personen des Unfalls 13 angibt.

Betrachtet man jene Blitzopfer, bei denen Blitzspuren vorhanden waren, so konnten bei vier der 13 überlebenden Blitzopfer und bei allen drei der Blitztoten Blitzspuren an der Kleidung oder an Gegenständen, die sie bei sich trugen, beobachtet werden.

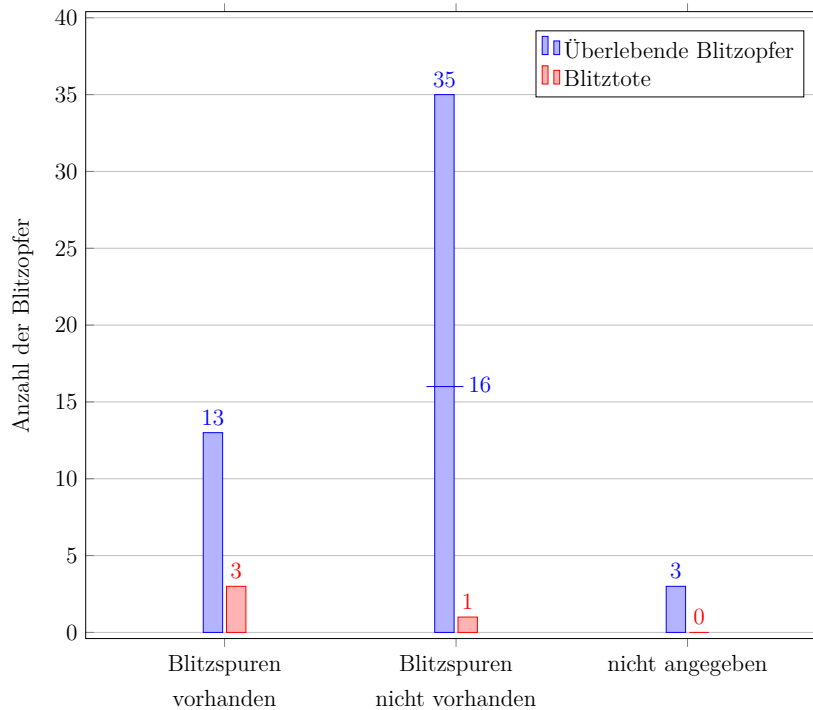


Abbildung 56: Darstellung der Anzahl der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017, bei denen Blitzspuren (sowohl am Körper als auch an der Kleidung oder Gegenständen, welche am Körper getragen wurden) bzw. keine Blitzspuren auftraten.

8.11 Verteilung der dokumentierten Verletzungsmuster der Blitzopfer

Die aufgetretenen Verletzungen der überlebenden Blitzopfer reichten von unterschiedlich langer Bewusstlosigkeit und schweren Schockzuständen über Trommelfellverletzungen und Gehörschäden, Lähmungen vor allem in den unteren Extremitäten (Keraunoparalyse), Verbrennungen der Haut an nahezu allen Körperstellen und Schmerzen bis hin zu stumpfen Traumen (größtenteils Abschürfungen). Die meisten Blitzopfer können sich an das Ereignis des Blitzeinschlages und den Blitzunfall nicht erinnern.

Bei den Blitztoten konnten hauptsächlich Verbrennungen, versengte Haare und deutliche Strommarken an den Ein- und Austrittsstellen des Blitzstromes festgestellt werden. Bei drei der vier Blitztoten wurde von den behandelnden Ärzten als Todesursache ein Herz-Kreislaufstillstand angegeben. Dieser wurde bei einem der Blitztoten vermutlich aufgrund von Herzkammerflimmern ausgelöst. Beim vierten Blitztoten kann nicht genau gesagt werden, ob er an einem Atem- oder Herz-Kreislaufstillstand verstarb.

Bei dem Blitzunfall während eines Fußballtrainings (Unfall 13, 2009) wurden 25 Personen nach der Erstversorgung in ein Krankenhaus gebracht. Der Beschreibung des Unfalls

kann entnommen werden, dass nur sechs Personen aufgrund des Blitzeinschlages zu Boden fielen und alle anderen unverletzt blieben. Damit die Betroffenen, welche keine bemerkenswerten Verletzungen durch einen Blitzeinschlag erlitten, aber trotzdem aufgrund der Unfallbeschreibungen und vorerst unklaren Ursache der Verletzungen als Blitzopfer geführt werden, nicht die Auswertungen über die Häufigkeit des Auftretens einzelner Verletzungen verfälschen, werden für die Angabe der Gesamtzahl der überlebenden Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 6 Überlebende dieses Unfalls herangezogen. Somit ergibt sich eine gesamte Anzahl von 32 überlebenden Blitzopfern.

In folgender Aufzählung wird die Häufigkeit des Auftretens einzelner Verletzungen und typischer Blitzfolgen angegeben. Als Blitzopfer werden dabei die überlebenden Blitzopfer und die Blitztoten gemeinsam bezeichnet.

- Bei fünf der 32 überlebenden Blitzopfer (15,63 %) bzw. der insgesamt 36 Blitzopfer (13,89 %) trat eine temporäre Bewusstlosigkeit unmittelbar nach dem Blitzeinschlag auf.
- Bei drei der 32 überlebenden Blitzopfer (9,38 %) bzw. der insgesamt 36 Blitzopfer (8,33 %) traten Verletzungen der Ohren (Trommelfell, Gehörschaden) auf.
- Bei elf der 32 überlebenden Blitzopfer (34,38 %) bzw. der insgesamt 36 Blitzopfer (30,56 %) trat eine temporäre Blitzlähmung (Keraunoparalyse) auf.
- Bei zwölf der 32 überlebenden Blitzopfer (37,50 %) und bei drei der vier Blitztoten (75 %) traten Verbrennungen der Haut an den unterschiedlichsten Körperstellen auf. Dies bedeutet, dass bei 15 der insgesamt 36 Blitzopfer (41,67 %) Verbrennungen festgestellt wurden.
- Bei zwei der 32 überlebenden Blitzopfer (6,25 %) bzw. der insgesamt 36 Blitzopfer (5,56 %) konnten Lichtenberg-Figuren beschrieben werden.
- Bei neun der 32 überlebenden Blitzopfer (28,13 %) und bei zwei der vier Blitztoten (50 %) trat ein stumpfes Trauma auf. Dies bedeutet, dass bei elf der insgesamt 36 Blitzopfer (30,56 %) ein stumpfes Trauma festgestellt wurde.

8.12 Verteilung der Blitzunfälle nach der Blitzstromamplitude

In Abbildung 57 ist die Verteilung der detektierten Blitzstromamplituden der Teilblitze, welche zu Blitzunfällen in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 führten, dargestellt.

Bei den 14 der 22 Blitzunfällen, bei denen eine Zuordnung eindeutig möglich war, konnte nur ein positiver Teilblitz einer Wolke-Erde-Entladung einem Unfall zugeordnet werden. Auffällig ist die besonders große Amplitude eines negativen Blitzes von $-150,4 \text{ kA}$.

Der Medianwert der Blitzstromamplituden jener Blitzentladungen, die einen Blitzunfall in der Steiermark im genannten Zeitraum verursachten, liegt bei $-8,45 \text{ kA}$.

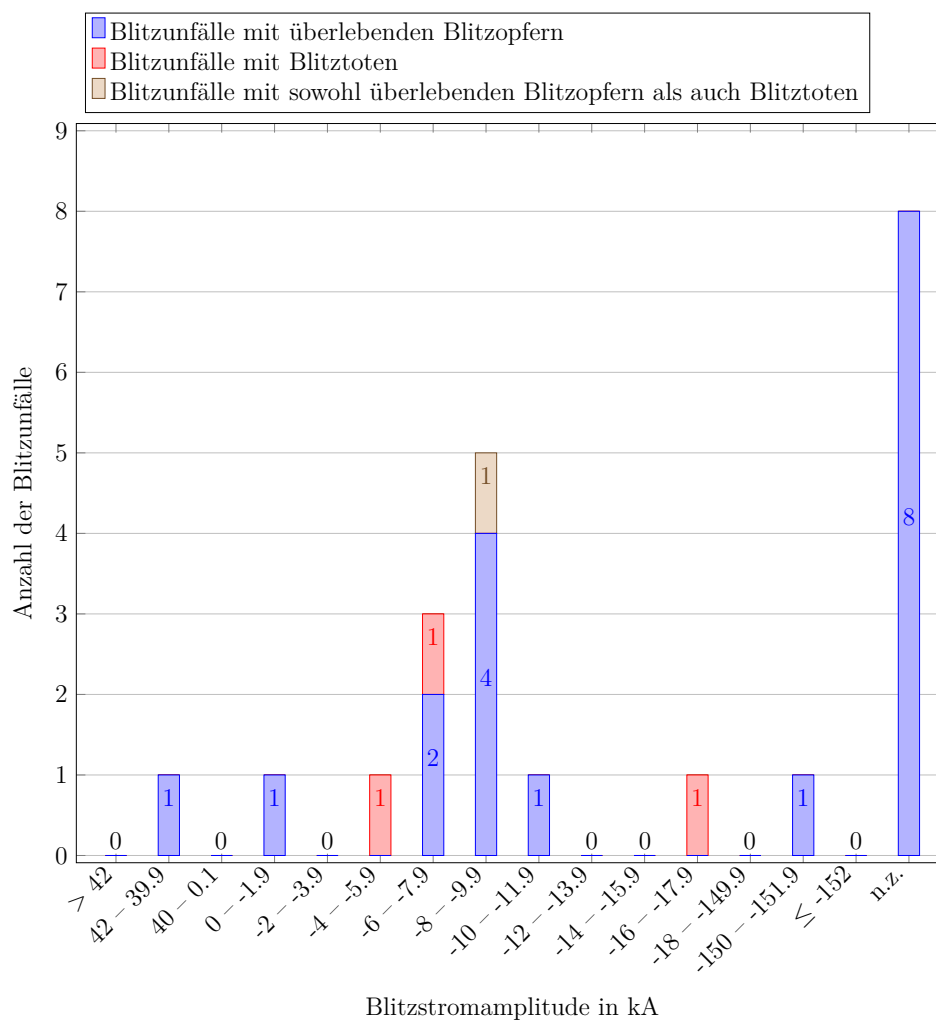


Abbildung 57: Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach den Blitzstromamplituden (kA). n.z. - nicht zuordenbar.

9 Diskussion

Die Wahrscheinlichkeit, von einem Blitz getroffen zu werden hängt unter anderem von der Blitzdichte ab. Da diese in der Steiermark sehr hoch ist, ereigneten sich in den letzten 18 Jahren 22 Blitzunfälle mit 55 Unfallopfern, von denen vier Personen den Blitzeinschlag nicht überlebten. Bis auf die Jahre 2008 und 2009 wurden pro Jahr maximal drei Personen durch einen Blitzeinschlag verletzt. In diesen beiden Jahren war die Anzahl der detektierten Blitze sehr hoch und es waren in beiden Jahren bei den einzelnen Unfällen mehrere Personen gleichzeitig betroffen.

Vergleicht man den Mittelwert von 2 Blitzopfern pro Jahr in der Steiermark mit jenem aus Abbildung 6 (Kapitel 3.6, Steiermark: 2,50 Unfälle pro Jahr [20]), so weichen diese etwas voneinander ab. Da die Informationen für die Publikation [20] nur auf Pressedaten basieren, könnte der Grund für die unterschiedlichen Mittelwerte sein, dass nicht alle angegebenen Blitzunfälle tatsächlich durch eine Blitzentladung ausgelöst wurden oder nicht alle Blitzunfälle in die verwendete Datenbasis aufgenommen wurden.

Allgemein ist die Anzahl der Todesopfer durch eine Blitzentladung in der Steiermark im Vergleich zu anderen Ländern weltweit gering. Vergleicht man den Wert von 0,22 Blitztoten pro Jahr mit den Zahlen aus Tabelle 4 (Kapitel 5.8), so liegen fast alle deutlich höher, wobei in der USA die meisten Blitztoten auftreten. Da in dieser Arbeit nur ein Bundesland von Österreich betrachtet wurde, ist jedoch ein direkter Vergleich mit anderen Staaten kritisch zu betrachten. Man darf aber nicht außer Betracht lassen, dass die Blitzdichte in der Steiermark verglichen mit anderen Regionen Europas und auch der Welt sehr hoch ist. Die Angabe von einem Blitztoten pro Jahr für Österreich (Tabelle 4) ist ebenfalls sehr gering und zählt zu einer der geringsten, angeführten Letalitätsraten aus der Literatur. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Letalitätsrate in weniger entwickelten Ländern, wie in Teilen von Asien und Afrika, viel höher ist als in Europa und auch in Österreich.

Die Auswertung der Blitzopfer pro Jahr im Bezug auf die Jahresblitzzahlen in der Steiermark (durchschnittlich 1 Blitzopfer pro 81.230 Teilblitze (Strokes) pro Jahr) zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit, von einem Blitz getroffen zu werden, sehr gering ist.

Die Verteilung der Blitzunfälle bzw. Blitzopfer in der Steiermark nach **Monaten** zeigt, dass es von Mai bis September zu Blitzentladungen, bei denen Personen verletzt wurden, kam und in den restlichen Monaten keine Blitzunfälle auftraten. Die höchste Blitzaktivität in Österreich ereignet sich genau in diesen Monaten (siehe Abbildung 7, Kapitel 3.6). In dieser Abbildung ist ersichtlich, dass die höchste Gewitteraktivität im Juli auftritt. Für die Gewitterentstehung wird unter anderem eine starke Konvektion der Luftmassen für die Ladungstrennung benötigt. Die Aufwinde können dabei durch verschiedene Arten

entstehen. In den Sommermonaten wird die Erdoberfläche durch die Sonneneinstrahlung erwärmt, die bodennahen Luftmassen werden dadurch leichter und steigen auf. Da dieser Effekt naturgemäß in den Sommermonaten vermehrt auftritt, kann auch eine höhere Gewitteraktivität in diesen Monaten beobachtet werden.

Die meisten Blitzunfälle in der Steiermark ereigneten sich im Juni (8 Blitzunfälle), dicht gefolgt vom Monat Juli mit 7 Blitzunfällen. Betrachtet man die betroffenen Blitzopfer, so kann gezeigt werden, dass sowohl die Anzahl der überlebenden Blitzopfer als auch die der Blitztoten im Juli am höchsten war. Im Juni wurde jeweils ein Blitzopfer (überlebend und verstorben) weniger als im Juli von einem Blitz getroffen oder durch seine Auswirkungen verletzt. Die Blitzunfälle in der Steiermark zwischen 2000 und 2017 ereigneten sich demnach ausschließlich in der konvektiven Phase (Sommermonate).

Die Auswertung der Blitzunfälle in der Steiermark mit Personenschäden nach der **Tageszeit** (Uhrzeit) ergibt, dass sich die meisten Blitzunfälle zwischen 16:00 Uhr und 17:59 Uhr ereigneten. Die Anzahl der Blitzunfälle mit überlebenden Blitzopfern ist zwischen 14:00 Uhr und 19:59 Uhr gleich verteilt, vier Unfälle pro 2-Stunden-Intervall. Die Anzahl der Blitzunfälle mit Blitztoten ist zwischen 16:00 Uhr und 17:59 Uhr mit zwei Blitztoten am größten.

Vergleicht man dieses Ergebnis mit der mittleren, täglichen Anzahl der Blitzenladungen in Österreich (Abbildung 8, Kapitel 3.6), so ist zu sehen, dass die tägliche Aktivität zwischen 15:00 Uhr und 18:00 Uhr sehr hoch ist und ihren Höhepunkt um 16:00 Uhr erreicht. Dies ist ebenfalls durch die notwendige Erwärmung der Erdoberfläche für das Entstehen der Aufwinde zu erklären, welche am Nachmittag durch die Sonneneinstrahlung am höchsten ist. Diese unterschiedlich starke Gewitteraktivität im Verlauf eines Tages kann auch gut im Ergebnis der Auswertung (Abbildung 43) erkannt werden. Eher unwahrscheinlich sind demnach Blitzunfälle um 09:00 Uhr (Unfall 3) und um 02:41 Uhr (Unfall 15), da die Gewitteraktivität zu diesen Zeiten geringer als am Nachmittag ist.

Betrachtet man die betroffenen Blitzopfer, so ist zu sehen, dass zwischen 16:00 Uhr und 19:59 Uhr die meisten Personen durch einen Blitzeinschlag verletzt oder getötet wurden. Der späte Nachmittag wird häufig aufgrund der vorgegebenen Normalarbeitszeiten für allfällige Arbeiten im Garten und Freizeitbeschäftigungen aller Art genutzt. Bewertet man das Ergebnis von neun Blitzopfern im Zeitraum von 18:00 bis 19:59 Uhr (inkl. sechs Verletzte des Unfalls 13 (Fußballtraining)), so ist die Anzahl der insgesamt Betroffenen zwischen 16:00 und 17:59 Uhr und 18:00 und 19:59 Uhr gleich hoch. Im Zeitraum von 18:00 bis 19:59 Uhr gab es jedoch keine Blitztoten, von 16:00 bis 17:59 Uhr gab es zwei. In diesem Zeitraum wurden somit auch die größte Anzahl an Blitztoten (zwei) verzeichnet.

Die Ergebnisse der Auswertung der Angaben der Unfallopfer und Zeugen über das **Wetter** kurz vor dem Blitzunfall zeigen, dass bei genau der Hälfte der Blitzunfälle (elf der 22 Unfälle) kurz davor eine Gewitteraktivität wahrgenommen wurde. Die meisten Blitzunfälle (sechs Unfälle) ereigneten sich bei Wetterbedingungen, bei denen die Betroffenen bereits eine Gewitteraktivität mit Regenschauern wahrnehmen konnten. Bei sechs der 22 Blitzunfälle konnte keine Gewitteraktivität, sondern nur Regen, beobachtet werden. Die Auswertung zeigt weiters, dass bei den Blitzunfällen mit Todesopfern die größte Anzahl bei wahrnehmbarer Gewitteraktivität und Regen auftrat. Bei vier der 22 Blitzunfälle dachten die Betroffenen, dass das Gewitter bereits vorüber sei und sie daher wieder ins Freie gehen könnten.

Die meisten Blitzunfälle passierten demnach am Anfang und am Ende eines Gewitters als es gerade zu regnen begann oder noch trocken war und die ersten Entladungen bereits wahrgenommen werden konnten. Es wird oft irrtümlicherweise angenommen, dass das Gewitter noch nicht so stark oder noch weiter entfernt ist und sie sich noch im Freien aufhalten können oder das Gewitter bereits vorüber ist und man wieder hinaus gehen kann. Daher ist es sehr wichtig, früh genug Schutz zu suchen und ausreichend lang nach einem Gewitter zu warten, bis man wieder ins Freie geht. Dabei sollte man die 30 – 30 Regel beachten, welche besagt, dass das Gewitter nur mehr zehn Kilometer vom Betrachter entfernt ist, wenn Blitz und Donner weniger als 30 Sekunden auseinander sind und man sich sofort in Sicherheit bringen sollte. Nach einem Gewitter sollte man noch 30 Minuten nach dem letzten, wahrgenommenen Blitz warten, um wieder ins Freie zu gehen oder den Schutzort zu verlassen.

Die Verteilung der Blitzopfer nach dem **Geschlecht** zeigt eindeutig, dass mehr Männer durch eine Blitzentladung sowohl verletzt (63 %) als auch getötet (75 %) wurden. Auch in der Literatur [22, 44] wird davon berichtet, dass mehr Männer als Frauen durch Blitzschläge verletzt werden. Rakov et. al [1] gibt an, dass es fünf Mal so wahrscheinlich ist, dass Männer von einem Blitz getötet werden als Frauen. Die Ursache für die ungleiche Verteilung der Geschlechter bei den Blitzunfällen kann nicht genau erklärt werden. Einerseits wird vermutet, dass Männer aufgrund der ausgeübten Tätigkeiten (Arbeiten im Freien, zum Beispiel auf Baustellen, Landwirtschaft) einer erhöhten Blitzgefahr ausgesetzt sind, andererseits, dass das Risikoempfinden und die Wahrnehmung von Männern in Bezug auf potentielle Gefahren oft falsch eingeschätzt bzw. unterschätzt wird.

Die Auswertung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem **Alter** der Unfallopfer zeigt, dass ein Großteil der Betroffenen zwischen 20 und 34 Jahre und zwischen 45 und 49 Jahre alt war. Bei den Bliztoten kann keine mehrfach auftretende Altersgruppe aufgezeigt werden. Betrachtet man die Verteilung über das Alter

der Blitzopfer ohne Unfall 13 (Fußballtraining, 25 Blitzopfer), bei dem nur sechs Personen tatsächlich verletzt wurden, so ist eindeutig ersichtlich, dass die meisten Betroffenen zwischen 45 und 49 Jahre alt waren.

Vergleicht man das Durchschnittsalter aller Blitzopfer (37,04 Jahre ohne Unfall 13 (Fußballtraining) bzw. 33,92 Jahre inkl. Unfall 13) mit dem Durchschnittsalter der Bevölkerung in der Steiermark (42,5 Jahre), so ist jenes der Blitzopfer deutlich geringer. Dieser Unterschied entsteht vermutlich aufgrund der Tätigkeiten, die jüngere Personen im Vergleich zu der älteren Bevölkerung noch häufiger ausüben (Arbeiten und sportliche Freizeitbeschäftigungen im Freien) und dadurch einer erhöhten Gefahr durch Blitzentladungen ausgesetzt sind. Lediglich das Durchschnittsalter der Blitztoten (40,5 Jahre) liegt nahe am Durchschnittsalter der Gesamtbevölkerung.

Die Auswertung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem **Energieübertragungsmechanismus** auf den menschlichen Körper bei einer Blitzentladung ergibt, dass die meisten Betroffenen durch eine erhöhte Schrittspannung verletzt wurden. Bei 14% der Blitzopfer kann nicht genau gesagt werden, ob es sich um einen direkten Einschlag oder einen Seitenüberschlag handelte. Da bei diesen Blitzopfern eindeutige Spuren eines Blitzstromflusses am Körper und der Kleidung festgestellt wurden, können Verletzungen aufgrund einer Potentialanhebung (Schrittspannungs- oder Berührungsspannungseffekt) ausgeschlossen werden. Weiters kann gesagt werden, dass ein direkter Blitzeinschlag meistens nicht überlebt wird. Da alle Blitzopfer dieser nicht eindeutig zuordenbaren Fälle überlebten, ist ein Seitenüberschlag viel wahrscheinlicher als ein direkter Einschlag anzunehmen. Beim Ergebnis dieser Arbeit ist auch ersichtlich, dass drei der vier Blitzopfer den direkten Einschlag nicht überlebten. Da beim Blitzunfall 4 (überlebendes Blitzopfer, direkter Einschlag) mehrere Zeugen angaben, dass sie beobachteten, dass der Blitz in das Blitzopfer einschlug, kann trotz des unüblichen Vorfalles mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass dieses Blitzopfer den direkten Einschlag überlebte.

Vergleicht man das Ergebnis mit Zahlen aus der Literatur (siehe Tabelle 2, Kapitel 3.7), so zeigt sich, dass auch in der Literatur der Schrittspannungseffekt als häufigster Energieübertragungsmechanismus bei einer Blitzentladung angegeben wird. Die Zahl der Seitenüberschläge liegt in der Literatur deutlich höher als die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen. Dies kann dadurch begründet werden, dass bei den Blitzunfällen in der Steiermark nicht alle eindeutig zugeordnet werden konnten und die tatsächliche Zahl der Seitenüberschläge daher vermutlich auch in der Steiermark höher ist. Auffällig ist, dass der Prozentsatz der direkten Einschläge größer als jener in der Literatur ist.

Die Verteilung der Blitzunfälle nach der **Tätigkeit** der Blitzopfer zum Zeitpunkt des Blitz-

unfalls zeigt, dass die meisten Blitzunfälle während Arbeiten (32 %), sowohl beruflicher als auch außerberuflicher, auftraten. Betrachtet man nur die Blitzunfälle mit überlebenden Blitzopfern, so ist die Anzahl der Unfälle während der Tätigkeiten *Arbeit* und *Wanderung* gleich hoch. Blitzunfälle bei Wanderungen traten in der Steiermark am zweithäufigsten (27%) auf. Die Tätigkeiten der Blitztoten zum Zeitpunkt des Blitzunfalls waren sehr unterschiedlich und es trat keine bestimmte Tätigkeit vermehrt auf.

Aufgrund der landschaftlichen Gegebenheiten und der vielen Berge in der Steiermark ist es nicht verwunderlich, dass sich viele Unfälle während Wanderungen ereigneten. Ein Problem stellt dabei oft das schnell aufziehende Gewitter und die dann nur schwer auffindbaren Schutzmöglichkeiten in den Bergen dar. Die meisten Unfälle ereigneten sich jedoch bei Arbeiten, die nicht weit entfernt von Schutzmöglichkeiten, wie zum Beispiel Häusern, verrichtet wurden. Einige Blitzunfälle hätten wahrscheinlich durch größere Aufmerksamkeit der Betroffenen im Bezug auf die Gewitteraktivität verhindert werden können.

Das Ergebnis der Auswertung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem **Unfallort** ergibt, dass sich fast alle Unfälle im Freien ereigneten. Lediglich vier der 22 Blitzunfälle passierten innerhalb eines Gebäudes. Bei den zahlreichen Unfällen im Freien ereigneten sich die meisten in der Nähe eines Baumes. Am zweithäufigsten traten Blitzunfälle in der Nähe eines Gebäudes und auf asphaltierten Straßen oder Gehwegen auf. Zwei der vier Blitzopfer, die sich im Inneren eines Gebäudes aufhielten, befanden sich Schutz suchend in einer Almhütte und berührten im Inneren zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages leitfähige Teile. Die beiden anderen Personen befanden sich im Inneren eines Wohnhauses und erlitten nur geringe Verletzungen.

Eine Blitztote befand sich in der Nähe eines Baumes, die drei anderen durch eine Blitzentladung getöteten Blitzopfer befanden sich zum Unfallzeitpunkt auf einer asphaltierten Straße oder einem asphaltierten Gehweg auf einer ebenen Fläche und wurden direkt von einer Entladung getroffen.

Auch in der Literatur wird berichtet, dass die meisten Unfälle im Freien auftreten. Cooray et al. [26] berichtet, dass mehr als die Hälfte der Blitzunfälle, die im Freien stattfinden, durch Seitenüberschläge von Bäumen auf die Blitzopfer entstehen, während der Baum als Unterstand vor dem Gewitter verwendet wird. Viele Blitzopfer suchen Schutz vor dem Regen unter einem Baum, vor allem bei Wanderungen oder an Orten, wo kein Gebäude in der Nähe ist, und unterschätzen dabei diese Gefahr. Auch in der Steiermark sind die Blitzunfälle in der Nähe von Bäumen am häufigsten und eine Blitztote befand sich zum Unfallzeitpunkt unter einem Baum.

Die Auswertung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 im Bezug auf sichtbare **Blitzspuren** zeigt, dass bei einem Großteil keine Blitzspuren festgestellt

werden konnten. Betrachtet man beim Unfall 13 (Fußballtraining, 25 Blitzopfer) nur jene sechs, die auch tatsächlich verletzt wurden, so ist die Anzahl der Personen, bei denen man Blitzspuren sehen konnte und bei denen keine sichtbar waren, annähernd gleich groß. Bei drei der vier Blitztoten wurde über sichtbare Blitzspuren an der Kleidung und am Körper der Betroffenen berichtet.

Allgemein kann gesagt werden, dass bei einem Schrittspannungs- bzw. Berührungsspannungseffekt der Entladungskanal eines Blitzes nicht über den menschlichen Körper verläuft und die Blitzopfer aufgrund einer Potentialanhebung eine erhöhte Spannungsdifferenz abgreifen. Daher sind keine Ein- und Austrittsstellen eines Blitzstromes und keine Spuren an der Kleidung vorhanden. Bei einem direkten Einschlag oder Seitenüberschlag bildet sich der Entladungskanal oder ein Teil davon entlang des Blitzopfers aus. Daher fließt ein unterschiedlich großer Teilblitzstrom im bzw. über den menschlichen Körper und es können Ein- und Austrittsstellen an der Kleidung oder der Haut in Form von Strommarken und weitere Blitzspuren an der Kleidung beobachtet werden. Es können unter anderem Verbrennungen auftreten.

Vergleicht man die einzelnen **Verletzungsmuster** der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 mit Angaben aus der Literatur, so sieht man, dass alle für einen Blitzunfall charakteristischen Verletzungsmuster bei den Blitzopfern in der Steiermark beobachtet werden konnten, die Häufigkeit des Auftretens aber deutlich geringer ausfiel.

Es wird angegeben, dass 70 – 75 % der überlebenden Blitzopfer nach dem Blitzeinschlag das Bewusstsein verlieren (siehe Kapitel 5.5). Die Auswertung der überlebenden Blitzopfer in der Steiermark ergab nur etwa 16 %. Die Häufigkeit des Auftretens von Verletzungen der Ohren wird in der Literatur mit sehr verschiedenen Werten angegeben ([27, 33]: etwa die Hälfte der Betroffenen, [26]: 20 – 50 %, siehe Kapitel 5.1). Es kann aber gesagt werden, dass die Anzahl der Betroffenen mit Verletzungen bzw. anschließenden Problemen der Ohren in der Steiermark mit 9 % deutlich geringer ist. Das Auftreten einer temporären Keraunoparalyse wird ebenfalls in der Literatur mit einer höheren Häufigkeit (bis zu zwei Drittel, siehe Kapitel 5.5) als bei den überlebenden Blitzopfern in der Steiermark (34 %) angegeben. Verbrennungen treten bei vielen Blitzopfern auf, diese sind meist nur gering und heilen schnell. Bei nur wenigen tödlichen Blitzunfällen werden keine Verbrennungen beobachtet (siehe Kapitel 5.4). Auch bei den Blitztoten in der Steiermark wurden nur bei einer Betroffenen keine Verbrennungen beschrieben. Insgesamt traten bei 42 % aller Blitzopfer Verbrennungen unterschiedlicher Schwere auf. Diese Ergebnisse stimmen demnach gut mit den Angaben aus der Literatur überein. Lichtenberg-Figuren sind typisch für einen Blitzunfall, treten laut Literaturangaben aber nicht bei allen Blitzopfern auf ([43]: bei 20 – 30 %, siehe Kapitel 5.4.2). Bei den Blitzunfällen in der Steiermark wurde von 6 %

der überlebenden Blitzopfer angegeben, dass sie Lichtenberg-Figuren beobachten konnten. Diese Anzahl ist um einiges geringer als jene in der Literatur. Das kann möglicherweise dadurch erklärt werden, dass diese nach bestimmter Zeit verschwinden und die Betroffenen diese gar nicht erkannten oder nicht darauf achteten. Bei den Blitzunfällen in der Steiermark gaben 32 % aller Blitzopfer an, dass sie Verletzungen aufgrund eines stumpfen Traumas erlitten. Obwohl bei einer Blitzentladung eine Druckwelle entsteht, welche die Blitzopfer oder Teile aus der Umgebung wegschleudern kann, ist die Anzahl der Blitzopfer mit Verletzungen durch stumpfe Traumen gering. Bei nur zwei der vier Blitztoten wurde angegeben, dass sie durch den Sturz verletzt wurden. Durch den Sturz erlitten mit großer Wahrscheinlichkeit auch die beiden anderen Blitztoten stumpfe Traumen. Da bei den Blitztoten die Reanimation und die Todesursache im Vordergrund stehen, wurde dies vermutlich nicht zusätzlich dokumentiert.

Die häufigste Todesursache nach einem Blitzunfall wird in der Literatur mit einer Asystolie angegeben (siehe Kapitel 5.8). Oft geht dieser ein Herzkammerflimmern voraus. Bei drei der vier Blitztoten wurde als Todesursache ein Herz-Kreislauf-Stillstand angegeben. Da aufgrund eines Ausschlusses von Fremdverschulden keine Obduktion von Blitztoten in Österreich durchgeführt wird, ist die Ursache des Herz-Kreislauf-Stillstandes bzw. die exakte Todesursache nicht feststellbar. Auch ob die Angabe, dass eine Person an Herzkammerflimmern litt, medizinisch überprüft wurde oder nur vom behandelnden Arzt vermutet wurde, ist nicht nachvollziehbar.

Die Verletzungen sind nach einem Blitzunfall im Vergleich zur Stromamplitude einer Blitzentladung sehr gering. Dies liegt daran, dass ein Großteil des Blitzstromes entlang der Körperoberfläche Richtung Erde als Gleitentladung abtransportiert wird (Oberflächeneffekt, siehe Kapitel 3.7) und nur ein kleiner Teil des Blitzstromes, wenn überhaupt, durch den Körper fließt. Dies ist auch der Grund dafür, dass fast alle Personen einen Blitz einschlag und die Auswirkungen überleben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass alle für einen Blitzunfall charakteristischen Verletzungen auch bei den Blitzopfern in der Steiermark beobachtet wurden, die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Verletzungsmuster aber deutlich geringer als die Angaben in der Literatur ausfielen. Die Informationen über die Verletzungen beruhen dabei auf den Angaben der Betroffenen. Die genauen medizinischen Diagnosen sind nicht in die Auswertung mit eingeflossen. Es ist auch in nur sehr wenigen Fällen bekannt, ob die Blitzopfer an Langzeitfolgen nach dem Blitzunfall litten bzw. leiden.

Die Auswertung der Ergebnisse der **Blitzstromamplituden** der Teilblitze, welche zu Blitzunfällen in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 führten und eindeutig zugeordnet werden konnten, ergibt, dass nur eine positive Wolke-Erde-Entladung einen Blitzunfall verursachte und alle anderen negativ geladen waren. Vergleicht man die Häu-

figkeitsverteilung der negativen Blitzstromamplituden mit jener aus der Literatur (siehe Abbildung 4, Kapitel 3.4.1), so ist zu erkennen, dass diese sehr ähnlich sind. Der Medianwert der negativen Blitzstromamplituden ($-8,45 \text{ kA}$), welche einen Blitzunfall in der Steiermark verursachten, liegt etwas unter dem Medianwert der negativen Blitzstromamplituden in Österreich ($-11,3 \text{ kA}$). Weiters kann man erkennen, dass es keinen Zusammenhang zwischen der Amplitude und der Überlebenschance bzw. den Verletzungen nach einem Blitzunfall gibt.

10 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen von Blitzströmen auf den menschlichen Körper am Beispiel von Blitzunfällen mit Personenschäden in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 darzustellen. Dazu wurden anfangs die Blitzunfälle einzeln beschrieben und diskutiert, um anschließend verschiedene Parameter auswerten und mit Angaben aus der Literatur vergleichen zu können.

Es ereigneten sich in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 22 Blitzunfälle mit 55 Blitzopfern, von denen vier Personen den Blitzeinschlag bzw. dessen Folgen nicht überlebten. Das bedeutet, dass durchschnittlich zwei Personen pro Jahr von einem Blitz getroffen wurden bzw. dass sich durchschnittlich 1,2 Blitzunfälle pro Jahr ereigneten. Blitzunfälle traten nur in den Monaten Mai bis September (konvektive Phase), mit der größten Anzahl im Juni, auf. Die meisten Blitzunfälle ereigneten sich zwischen 16:00 Uhr und 18:00 Uhr, wobei sich der Verlauf der mittleren, täglichen Blitzentladungen in Österreich im Ergebnis sehr gut widerspiegelt. Die meisten Blitzunfälle ereigneten sich zu Beginn der Gewitteraktivität, als es gerade zu regnen begann oder noch trocken war und die ersten Entladungen bereits wahrgenommen werden konnten. Bei vier der 22 Blitzunfälle dachten die Betroffenen, dass das Gewitter bereits vorüber sei. Der Großteil der Blitzopfer (sowohl der Überlebenden als auch der Blitztoten) war männlich, das Durchschnittsalter der Blitzopfer betrug 37,04 Jahre. Etwas mehr als ein Drittel der Blitzopfer wurde durch eine erhöhte Schrittspannung verletzt. Drei Viertel der Blitztoten wurden durch einen direkten Blitzeinschlag getötet. Der Großteil der Blitzunfälle ereignete sich im Freien. Fast ein Drittel der Blitzopfer verrichtete Arbeiten zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages und fast genauso viele Personen wurden während Wanderungen durch einen Blitz verletzt. Es traten alle in der Literatur als charakteristisch beschriebenen Verletzungsmuster, wie unter anderem temporäre Bewusstlosigkeit, Verletzungen der Ohren, temporäre Keraunoparalyse (Blitzlähmung), Verbrennungen, Lichtenberg-Figuren oder stumpfe Traumen, auf, die Häufigkeit der einzelnen Verletzungsmuster fiel aber bei den Blitzunfällen in der Steiermark viel geringer aus. Bis auf eine der zuordenbaren Amplituden der Blitzentladungen, welche zu einem Blitzunfall führten, trugen alle eine negative Polarität. Die Mehrheit wies Amplituden von -10 kA und weniger auf. Es konnte gezeigt werden, dass die Amplitude der Blitzentladung nicht für die Schwere oder das Überleben eines Blitzunfalls ausschlaggebend ist.

Abschließend soll darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Gefahr eines Gewitters, trotz der niedrigen Blitzopferzahlen in der Steiermark im Vergleich zu anderen Ländern, nicht unterschätzt werden sollte. Bei Aktivitäten im Freien sollte daher der Wetterbericht gelesen und bei einer Gewittervorhersage die weitere Entwicklung beobachtet werden. Es kann bei einigen Blitzinformationsdiensten im Internet (zum Beispiel ALDIS) die aktuelle

Gewitteraktivität verfolgt werden. Sobald ein Donner wahrgenommen werden kann und zwischen Donner und Blitz weniger als 30 Sekunden liegen, befindet sich das Gewitter in weniger als 10 *km* Entfernung und es sollte rasch eine Schutzgelegenheit aufgesucht werden. Oft regnet es zu diesem Zeitpunkt noch nicht und viele unterschätzen die Gefahr, dass es zu Blitzeinschlägen auf die Erde aus bereits großen Entfernungen der Gewitterwolke (Möhle et al. [43]: 16 – 20 *km*) kommen kann. Sichere Orte stellen ein Gebäude mit Blitzschutzanlage oder ein Fahrzeug dar. Wenn sich keine sichere Schutzmöglichkeit in unmittelbarer Nähe befindet, sollen Bäume, Berggipfel, Maste oder Freileitungen gemieden werden. Bäume bieten, wie von vielen fälschlicherweise gedacht, keinen Schutz vor Gewitter und bedeuten im Falle eines Blitzeinschlages eine erhöhte Gefahr für die Betroffenen (Seitenüberschlag, Schrittspannung). In diesem Fall soll man sich in einem Abstand von einigen Metern (mindestens drei Meter) von anderen Personen, Masten, Metallzäunen und zu allen Teilen eines Baumes auf den Boden an einer flachen und nicht exponierten Stelle hocken und die Füße dabei möglichst geschlossen halten. Nach einem Gewitter sollte man noch 30 Minuten nach dem letzten, wahrgenommenen Blitz warten, um wieder ins Freie zu gehen oder den Schutzort zu verlassen. [2]

Kommt es dennoch zu einem Blitzunfall mit Personenbeteiligung, soll unmittelbar mit der Erstversorgung der Verletzten begonnen werden. Da Personen, welche von einem Blitz getroffen wurden und an Asystolie oder Herzkammerflimmern leiden, eine bessere Überlebenschance als Personen haben, welche einen Herz-Kreislauf-Stillstand anderer Ursache erleiden, ist die sofortige Reanimation besonders wichtig.

Literatur

- [1] V. A. Rakov, M. A. Uman. *Lightning - Physics and Effects*. Cambridge University Press, 2003.
- [2] ALDIS - Austrian Lightning Detection & Information System. <https://www.aldis.at/>. Zuletzt eingesehen: April 2018.
- [3] F. Heidler. *Blitzstromparameter nach IEC 62305 - Hintergrund, Erfahrung und Ausblick*.
- [4] *Blitzplaner*[®]. DEHN + SÖHNE GmbH + Co.KG., 2013.
- [5] Christian Bouquegneau. Lightning Phenomenology. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Cracow, Polen, 2002.
- [6] M. M. F. Saba, M. G. Ballarotti, O. Pinto Jr. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 111, 2006.
- [7] W. Schulz, G. Diendorfer. Flash Multiplicity and Interstroke Intervals in Austria. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Kanazawa, Japan, 2006.
- [8] G. Diendorfer, W. Schulz, V. A. Rakov. Lightning Characteristics Based on Data from the Austrian Lightning Location System. *IEEE-EMC Transactions*, Vol.40, Number 4, 1998.
- [9] D. R. Poelman, W. Schulz, G. Diendorfer, M. Bernardi. European cloud-to-ground lightning characteristics. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China, 2014.
- [10] M. G. Ballarotti, C. Medeiros, M. M. F. Saba, W. Schulz, O. Pinto Jr. Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, 2012.
- [11] C. Schumann, M. M. F. Saba, A. R. de Paiva, M. A. da Silva Ferro, H. Kohlmann, W. Schulz, G. Diendorfer, T. A. Warner, J. Heldson Jr. Charge transfer in natural negative and positive downward flashes. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Estoril, Portugal, 2016.
- [12] J. Kupfer, M. Rock, T. Raphael. Blitzeinwirkungen auf Menschen und Tiere. *VDE - Ergebnisse des Arbeitskreises Blitzunfälle*, 2015.
- [13] W. Schulz, H. Pichler, G. Diendorfer. Evaluation of 45 negative flashes based on E-Field measurements, video data and lightning location data in Austria. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Cagliari, Italien, 2010.

-
- [14] K. Berger, R. B. Anderson, H. Kroeninger. Parameters of lightning flashes. *Electra* 41, 1975.
- [15] A. Küchler. *Hochspannungstechnik*. Springer-Verlag, 2017.
- [16] O. Pinto Jr. Basic Characteristics of Ground Flashes. *VII International Symposium on Lightning Protection*, Curitiba, Brasilien, 2003.
- [17] W. Schulz, C. Vergeiner, H. Pichler, G. Diendorfer, S. Pack. Validation of the Austrian Lightning Location System ALDIS for negative flashes. *CIGRE C4 Colloquium on Power Quality and Lightning*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2012.
- [18] A. Kalair, N. Abas, N. Khan. Lightning Interactions with Humans and Lifelines. *Journal of Lightning Research*, 5, 11-28, 2013.
- [19] W. Schulz, K. Cummins, G. Diendorfer, M. Dorninger. Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, D09101, 2005.
- [20] M. Kompacher, G. Kindermann, S. Pack. Fire losses and human accidents caused by lightning - an Austrian overview. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Wien, 2012.
- [21] J. Kupfer, M. Rock, W. Heuhsen. Datenerhebung nach Blitzereignissen mit Personenbeteiligung. *11. VDE/ABB-Blitzschutztagung*, Neu-Ulm, Deutschland, 2015.
- [22] D. Agoris, E. Pyrgioti, D. Vasileiou, S. Dragoumis. Analysis of Lightning Death Statistics in Greece. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Krakau, Polen, 2002.
- [23] G. Dias, D. S. Gazzana, A. S. Bretas, M. Telló. The Need for Standardization of Human Tolerability Levels for Lightning Currents and Voltages. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China, 2014.
- [24] F. Zack, M. A. Rothschild, R. Wegener. Blitzunfall - Energieübertragungsmechanismen und medizinische Folgen. *Deutsches Ärzteblatt*, Heft 51-52, 2007.
- [25] IEC TR 60479-4:2011-10, Effects of current on human beings and livestock - Part 4: Effects of lightning strokes.
- [26] C. Cooray, V. Cooray, C. J. Andrews. Lightning caused injuries in humans. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Avignon, Frankreich, 2004.
- [27] D. B. Lumenta, L.-P. Kamolz, M. Frey. Stromverletzungen. *Wiener Klinisches Magazin*, 2009.

- [28] M. A. Cooper, T. G. Price. Electrical and Lightning Injuries.
- [29] S. N. Kunz, H. Brandtner, F. Monticelli. Elektrischer Strom im menschlichen Körper - Wirkung, Anwendungsgebiete und forensischer Nachweis. *Rechtsmedizin - Springer Verlag*, 2012.
- [30] A. Bartsch. Strom- und Blitzunfall. *Notfall Rettungsmedizin - Springer Verlag*, 2013.
- [31] IEC TS 60479-1:2005+AMD1:2016 CSV, Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects (IEC 60479-1:2016-07).
- [32] S. Suchanek. Untersuchung an Blitzschutzerdungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Schrittspannung. *Dissertation*, Juni 2013.
- [33] A. E. Ritenour, M. J. Morton, J. G. McManus, D. J. Barillo, L. C. Cancio. Lightning injury: A review. *Burns* 34 (2008) 585-594.
- [34] H. Saglam, Y. Yavuz, Y. Yurumez, G. Ozkececi, C. Kilit. A case of acute myocardial infarction due to indirect lightning strike. *Journal of Electrocardiology* 40 (2007) 527-530.
- [35] R. Lichtenberg, D. Dries, K. Ward, W. Marshall, P. Scanlon. Cardiovascular Effects of Lightning Strikes. *JACC: Journal of the American College of Cardiology Vol. 21, No. 2*, 1993.
- [36] C. J. Andrews, D. M. Colquhoun, M. Darveniza. The QT interval in lightning injury with implications for the 'cessation of metabolism' hypothesis. *Journal of Wilderness Medicine* 4, 155-166, 1993.
- [37] T. Christophides, S. Khan, M. Ahmad, H. Fayed, R. Bogle. Cardiac Effects of Lightning Strikes. *Arrhythmia & Electrophysiology Review* 2017; 6(3):114-7, 2017.
- [38] W. F. McIntyre, C. S. Simpson, D. P. Redfearn, H. Abdollah, A. Baranchuk. The Lightning Heart: A Case Report and Brief Review of the Cardiovascular Complications of Lightning Injury. *Indian Pacing and Electrophysiology Journal* , 10(9): 429-434, 2010.
- [39] A. B. D. Palmer. Lightning injury causing prolongation of the Q-T interval. *Postgraduate Medical Journal* (1987) 63, 891-894.
- [40] R. F. Schmidt, G. Thews. *Physiologie des Menschen*. Springer-Verlag, 1993.
- [41] Normwert QTc-Intervall. <http://www.befund.net/Innere-Medizin/EKG-Normwerte-Uebersicht/>. Zuletzt eingesehen: März 2018.

-
- [42] C. A. Martínez, F. Román, J. A. Cristancho. Determination of the Lightning Current from its Thermal Effects. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Estoril, Portugal, 2016.
- [43] F. Möhle, J. Preuss, B. Madea, E. Doberentz. Vier Tage überlebter Blitzschlag nach zunächst erfolgreicher Reanimation. *Rechtsmedizin 25: 561-565*, 2015.
- [44] W. Lederer, F. J. Wiedermann, M. A. Baubin, G. Kroesen. Blitzschlagverletzung und kardiopulmonale Reanimation. *Notfall Rettungsmedizin 5:474-479*, 2002.
- [45] G. P. Arden, S. H. Harrison, J. Lister, R. H. Maudsley. Lightning Accident at Ascot. *British Medical Journal*, 1956.
- [46] F. Zack, S. Puchstein, A. Büttner. Letalität von Blitzunfällen. *Rechtsmedizin 26:9-11*, 2016.
- [47] F. Zack, T. Raphael, J. Kupfer, A. Jokuszies, P. M. Vogt, A. Büttner, K. Püschel, B. Schalke, M. Todt, R. Dettmeyer. Vier Todesopfer nach einem Blitzunfall auf einem Golfplatz. *Rechtsmedizin 23:114-118*, 2013.
- [48] R. L. Holle. The Number of Documented Global Lightning Fatalities. *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Estoril, Portugal, 2016.
- [49] Statistik Austria. www.statistik.at. Zuletzt eingesehen: April 2018.

Abbildungsverzeichnis

1	Vier Typen der Blitzentladungen zwischen Wolke und Erde. In jeder Bildunterschrift sind die Ausbreitungsrichtung des Leitblitzes und die Polarität der Entladung angegeben. [1]	5
2	Vorgang der Blitzentladung eines negativen Abwärtsblitzes. [2]	6
3	Beispielhafte Darstellung eines Blitzstromes eines multiplen negativen Abwärtsblitzes mit mehreren Stoßströmen und einem Langzeitstrom. [12] . . .	8
4	Verteilung der Häufigkeit negativer Blitzstromamplituden in Österreich. [2]	11
5	Mittlere Blitzdichte in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 - Anzahl der Blitze pro km^2 und Jahr basierend auf den von ALDIS im angegebenen Zeitraum georteten Blitzen. [2]	14
6	Vergleich der Bundesländer von Österreich im Bezug auf den Medianwert der Blitzdichte (Blitze pro km^2 und Jahr) und den Mittelwert der Blitzopfer pro Jahr im Zeitraum von 2001 bis 2010. Vgl. [20]	15
7	Mittlere, monatliche Anzahl der Blitzentladungen von 1992 bis 2001 in Österreich. Die Balken geben eine Standardabweichung von ± 1 an. [19] . .	16
8	Mittlere, tägliche Anzahl der Blitzentladungen von 1992 bis 2001 in Österreich nach Uhrzeit. [19]	16
9	Verschiedene Energieübertragungsmechanismen auf den Menschen bei einer Blitzentladung - (a) Direkter Einschlag, (b) Kontakteffekt, (c) Seitenüberschlag, (d) Schrittspannung, (e) Kombinierte Schritt- und Berührungsspannung, (f) Aufwärtsblitz, (g) Blitzfeld. [21]	20
10	Zeit/Stromstärke-Bereiche für die Wirkung von Wechselstrom von 15 Hz bis 100 Hz auf den menschlichen Körper bei einem Stromweg von der linken Hand zu den Füßen. [31]	24
11	Zeit/Stromstärke-Bereiche für die Wirkung von Gleichstrom auf den menschlichen Körper bei einem Stromweg von einer Hand zu den Füßen (Längsdurchströmung bei aufsteigendem Strom (Füße positive Polarität). [31] . .	25
12	Gesamtkörperimpedanz, welche bei 50 % der Bevölkerung nicht überschritten wird - Stromweg Hand zu Hand - große Berührungsflächen (Größenordnung $10\,000\text{ mm}^2$) - Berührungsspannungen von AC 25 V bis 700 V , $50/60\text{ Hz}$. [31]	29
13	Innere Teilimpedanzen des menschlichen Körpers - prozentualer Anteil der Körperinnenimpedanz des Körperteils im Verhältnis zu einem Stromweg Hand - Fuß. [31]	30
14	Statistischer Wert der Gesamtkörperwiderstände, welche bei 50 % der Bevölkerung nicht überschritten werden - Stromweg Hand zu Hand - große Berührungsflächen (Größenordnung $10\,000\text{ mm}^2$) - trockener Zustand. [31] .	31

15	Erregungszyklus des Herzens mit vulnerabler Phase. [31]	34
16	Auslösen von Herzkammerflimmern in der vulnerablen Phase des Herzens. [31]	35
17	Kontakttemperatur (in K) zwischen Haut und Halskette als Funktion des Blitzstromes (in kA). [42]	38
18	Blitzabfrage für Graz vom 23.06.2017 - Darstellung aller detektierten Ent- ladungen auf der Karte. [2]	46
19	Anzahl der überlebenden Blitzopfer und der Blitztoten in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017.	47
20	Blitzabfrage für einen Umkreis von 2 km um den Unfallort (violetter Kreis) des Unfalls 3, 2003. Die Nummern stellen die Blitzentladungen in chrono- logischer Reihenfolge dar. Vgl. [2]	53
21	Darstellung des Standortes des Unfallopfers und der Umgebung des Unfall- ortes zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages, Unfall 4.	54
22	Beschädigungen des Fahrradhelms und Fahrrad T-Shirts aufgrund des Blitz- einschlages, Unfall 4.	55
23	Darstellung des Unfallortes und des Standortes des Opfers zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages, Unfall 5.	57
24	Verbrennungen des Unfallopfers des Unfalls 5 - anhand des Verbrennungs- musters sind der Stromweg durch den Körper und die Lichtenberg-Figuren gut erkennbar.	57
25	Unfallort und Standort des Blitzopfers und seines Hundes während des Blitzeinschlages, Unfall 7.	61
26	Ausschmelzungen durch den Blitzeinschlag am Nordic Walking Stock, Un- fall 7.	61
27	Strommarken an der Ein- und Austrittsstelle an der linken und rechten Hand und Verbrennungen im Schulterbereich des Unfallopfers des Unfalls 7.	62
28	Darstellung aller detektierten Entladungen für den Unfall 9 auf der Karte. Die Stecknadel symbolisiert den Gipfel, von welchem die beiden Blitzopfer Richtung Tal unterwegs waren. [2]	66
29	Unfallort mit Standort des Blitzopfers zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages, Unfall 10.	67
30	Beschädigte Bekleidung des Unfallopfers des Unfalls 10.	69
31	Schematische Darstellung des Unfallortes und des Standortes der drei ver- letzten Blitzopfer, Unfall 11.	71
32	Unfallort und Umgebung des Unfalls 13.	74
33	Umgebung des Unfallortes und Standort der Blitzopfer und der unverletz- ten Personen zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages, Unfall 15.	78

34	Beschädigungen der linken Socke und des linken Schuhs des Blitzopfers 1 des Unfalls 15.	78
35	Strommarken und Blitzspuren des Blitzopfers 1 des Unfalls 15.	79
36	Ort des Blitzunfalls 16 und Umgebung.	81
37	Blitzspuren an den Kleidungsstücken und Schuhen des Blitzopfers 1 des Unfalls 16.	82
38	Schematische Darstellung der Umgebung des Unfallortes 18 und des Standpunktes des Blitzopfers zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages.	87
39	Blitzspuren in Form von Verbrennungen an der rechten Körperhälfte, Unfall 18.	88
40	Verlauf des Weidezaunes in beide Richtungen vom Standort des Blitzopfers und Umgebung des Unfallortes 19 zum Unfallzeitpunkt.	89
41	Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach Monaten.	102
42	Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach Monaten.	102
43	Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Tageszeit.	103
44	Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Tageszeit.	104
45	Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Angabe über das Wetter unmittelbar vor dem Blitzunfall. k.A. - keine Angabe.	105
46	Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Geschlecht.	106
47	Prozentuale Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Geschlecht.	106
48	Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Alter (inkl. Unfall 13). n.a. - nicht angegeben.	107
49	Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Alter (ohne Unfall 13). n.a. - nicht angegeben.	108
50	Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Art der Energieeinwirkung einer Blitzentladung auf den Menschen.	109
51	Prozentuale Verteilung der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Art der Energieeinwirkung einer Blitzentladung auf den Menschen.	110
52	Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach der Tätigkeit der Blitzopfer zum Unfallzeitpunkt.	111

53	Prozentuale Verteilung nach der Tätigkeit der Blitzopfer zum Unfallzeitpunkt aller Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017.	111
54	Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach dem Unfallort.	112
55	Prozentuale Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017, welche sich im Freien ereigneten, nach der Umgebung der einzelnen Unfallorte.	112
56	Darstellung der Anzahl der Blitzopfer in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017, bei denen Blitzspuren (sowohl am Körper als auch an der Kleidung oder Gegenständen, welche am Körper getragen wurden) bzw. keine Blitzspuren auftraten.	114
57	Verteilung der Blitzunfälle in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017 nach den Blitzstromamplituden (kA). n.z. - nicht zuordenbar.	116

Tabellenverzeichnis

1	Dauer einer Blitzentladung von negativen multiplen Blitzen [ms] unterschiedlicher Literaturquellen - Prozentsätze der Fälle, welche den angegebenen Wert übersteigen (gemäß einer logarithmischen Normalverteilung), n.a. - nicht angegeben.	9
2	Prozentuale Verteilung der Häufigkeit des Auftretens eines bestimmten Energieübertragungsmechanismus bei einer Blitzentladung mit Personenbeteiligung. [23, 25]	19
3	Herzstromfaktoren F für unterschiedliche Stromwege. [31]	28
4	Verstorbene Blitzopfer pro Jahr aus unterschiedlichen Literaturquellen für verschiedene Länder, n.a. - nicht angegeben.	41
5	Zusammenfassung der Unterschiede der Eigenschaften und Verletzungsmuster eines Stromunfalls verursacht durch einen Blitzeinschlag, Hochspannung oder Niederspannung. [25, 30, 33]	42
6	Blitzabfrage für Graz vom 23.06.2017 - Tabellarische Auflistung aller detektierten Entladungen. [2]	46
7	Übersicht über die Informationen aller Blitzunfälle mit Personenbeteiligung in der Steiermark im Zeitraum von 2000 bis 2017. blau - Überlebende Blitzopfer, rot - Blitztote, n.a. - nicht angegeben, n.z. - nicht zuordenbar.	96