

Blitzeinwirkungen auf Menschen und Tiere

Ausschuss für
Blitzschutz und
Blitzforschung (ABB)

Ergebnisse des Arbeitskreises Blitzunfälle sowie der Diskussionsveranstaltung „Blitzentladung auf Mensch und Tier“ am 27.11.2014

Autoren: **Kupfer, J.; Rock, M.; Raphael, T.**

mit Beiträgen von: **Bauer, H.; Büttmeyer, R.; Gehlert, E.; Haueisen, J.; Heuhsen, W.;
Rock, M.; Schalke, B.; Silny J. und F. Zack**

Inhalt

1	Ergebnisse des Arbeitskreises Blitzunfälle	2
1.1	Merkblatt „Unfälle durch Blitzeinwirkung“	2
1.2	Literatur-Datenbank „Blitzunfälle/Blitzeinwirkung“	2
1.3	Arten der Blitzeinwirkung	3
1.4	Wirkung von Blitzströmen auf den Organismus	6
1.5	Fragebogen Blitzunfall mit Personenbeteiligung	7
1.6	Hypothese „Induktionsschleifen“	9
1.7	Lichtenberg-Figuren	13
1.8	Zur Diskussion gestellte Fragen	15
2	Diskussionsrunde „Blitzentladung auf Mensch und Tier“ am 27.11.2014	18
2.1	Arbeitskreis Blitzunfall	19
2.2	Primat der Todesfolge nach Blitzeinwirkung	20
2.3	Neurologische Auffälligkeiten – neurologischer Untersuchungsansatz	21
2.4	Elektrische Parameter zur Bewertung der Wirkung von Blitzströmen	22
2.5	Entstehung von Lichtenberg-Figuren	22
2.6	Mathematische Modellierung impulsartiger Beanspruchungen	23
2.7	Einbeziehung von Wahrscheinlichkeitsparametern	23
2.8	Wirkung von unverbundenen Fangentladungen („upward streamer“)	23
2.9	Blitzstromverteilung im Körper	23
2.10	Anwendungsfall Schritt- und Berührungsspannungen	24
2.11	Induktionswirkung von Blitzströmen auf biologische Objekte	24
2.12	Öffentlichkeitsarbeit	25
2.13	Anregungen aus der Diskussion	26
3	Links	26
4	Anlagen	27

1 Ergebnisse des Arbeitskreises Blitzunfälle

1.1 Merkblatt „Unfälle durch Blitzeinwirkung“

Das Merkblatt (Anlagen 1 und 2) nutzt weitestgehend internationale Erfahrungen und fasst fachübergreifend (u. a. Neurologie, Kardiologie, Inneres, Augen) den Stand der medizinischen Erkenntnisse zusammen. Im Mittelpunkt stehen Akut- und Spätfolgen mit den Schwerpunkten:

- Tod durch Herz-Kreislauf-Stillstand unterschiedlicher Ursachen,
- Äußere Verbrennungen und verblässende Lichtenberg-Figuren,
- Zeitweiliger Bewusstseinsverlust, Verwirrtheit,
- Muskuläre Verkrampfungen bis hin zu meist vorübergehenden Lähmungen, insbesondere der unteren Extremitäten (Keraunoparalyse),
- Subjektive Beschwerden, wie Benommenheit, Amnesie, Atemnot, Herzschmerzen,
- Verletzungen, wie Knochenbrüche, Ausrenkung von Armen, offene Wunden, u.a.,
- Zerreißung des Trommelfells,
- Augenschäden bis hin zur Erblindung.

Ergänzungen finden sich u. a. in einer von C. J. Andrews, M. A. Cooper, M. Darveniza, D. Mackerras erstellten Tabelle (1992; „Lightning Injuries: Electrical, Medical, and Legal Aspects“). Bei ihrer Anwendung sollte jedoch geprüft werden, ob mit der Zuordnung folgender Kriterien dem praktisch tätigen Arzt die Beurteilung erleichtert werden könnte:

- Eindeutiges Merkmal und bewiesen,
- Merkmal wahrscheinlich, aber international noch in der Diskussion,
- Merkmal eher unwahrscheinlich,
- Merkmal kann ausgeschlossen werden.

1.2 Literatur-Datenbank „Blitzunfälle/Blitzeinwirkung“

Aktuell verfügbare Veröffentlichungen und Literaturverzeichnisse zum Thema Blitzunfälle/Blitzeinwirkung (Mensch, Tier, Organe, Zellstrukturen) wurden recherchiert, in einer Datenbank zusammengefasst (ca. 1260 Eintragungen) und ausgewählte Volltexte im PDF-Format übernommen. Soweit möglich, wurden Abstrakt und Keywords eingefügt oder selbst erarbeitet.

Die Datenbank nutzt das Literaturverwaltungsprogramm „**Mendeley**“. Das System differenziert u. a. nach:

- Aufsätzen,
- Monographien,
- Literaturlisten, die von Autoren zusammengestellt wurden,
- Tagungsberichten,
- Normen,
- Dissertationen.

„Mendeley“ erlaubt äußerst schnellen Zugriff, u. a. über:

- Schlagworte,
- Autor,
- Publikationsorgane (z. B. Zeitschrift, Tagung usw.),
- Jahr der Veröffentlichung.

Es ist möglich, Datensätze, einzelne Dateien und Volltexte in bereits existierende eigene Recherchesysteme zu übernehmen (Import-Export-Funktion). Außerdem können im Volltext Begriffe eingegeben werden, nach denen im Text gesucht werden soll.

Eine Nutzung von „Mendeley“ ist über das Internet bis zu einem Datenvolumen von 2 GByte kostenlos und ohne Installation auf dem eigenem Computer generell möglich. Das gilt für alle Betriebssysteme.

Um die Literaturliste gemeinsam mit allen Experten weiterzuführen, wurde eine Gruppe „Blitzwirkungen“ eingerichtet. Auf Antrag kann jeder Benutzer vom Mendeley Mitglied dieser Gruppe werde und an der Zusammenstellung von Literatur mitwirken.

1.3 Arten der Blitzeinwirkung

Bei unterschiedlichen Arten der Blitzeinwirkung gleichen sich Wirkungsmechanismen (z. B. Reizung, Wärmeentwicklung, Hautirritationen) und Schadensbilder (z. B. auf Atmung, Herzkreislauf, ZNS, PNS) oft. Während die Art der Einwirkung in erster Linie physikalisch-technisch determiniert beschrieben werden kann, sind die Wirkungsmechanismen über Elektropathologie, medizinische Diagnostik und Therapie erklärbar. In der Literatur werden beide Zuordnungen oft „vermengt“, nicht zuletzt über den englisch-sprachigen Begriff „mechanism“. In Anlehnung an den Beitrag von ZACK und Mitautoren im Deutschen Ärzteblatt (2007; 104(51-52):A 3545-9) unter der Überschrift „Blitzunfall – Energieübertragungsmechanismen und medizinische Folgen“ wird im Ergebnis der bisherigen Diskussion innerhalb des AK Blitzunfälle eine Differenzierung vorgenommen:

- Blitzstromkomponenten,
- Arten der Blitzeinwirkung sowie
- Wirkung von Blitzströmen auf den Organismus

Blitzstromkomponenten

Generell ist bei Blitzenentladungen, unabhängig davon, ob sie die Erde treffen oder zwischen Wolken stattfinden, zu differenzieren in (Bild 3-1)

- Erstblitzstoßstrom (positiv oder negativ); einige 10 kA, Stirnzeit wenige μ s bis einige 10 μ s, Dauer einige 100 μ s bis über 1 ms,
- Folgeblitzstoßstrom (negativ; positive Blitze weisen selten Folgeblitze auf): meist nicht größer als 10 kA, Stirnzeit einige 100 ns bis einige μ s, Dauer kaum länger als 100 μ s
- Langzeitstrom (positiv oder negativ); einige 10 A bis einige 100 A, Dauer einige 10 ms bis einige 100 ms.

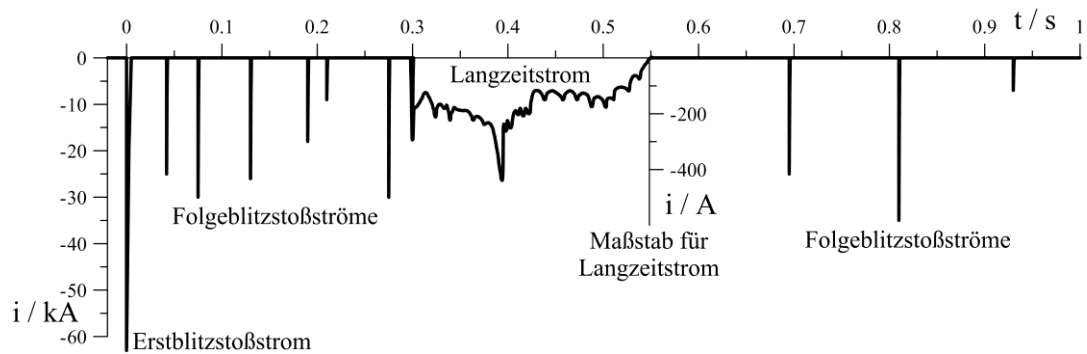


Bild 3-1: Stromkomponenten von multipler Entladung
beim häufigen negativen Wolke-Erde-Blitz

Um die Wirkung von Blitzentladungen sowohl auf technische Objekte als auch auf Personen und Tiere unterscheiden zu können, sind neben der **Stromwirkung durch den direkten Blitzeinschlag** außerdem die **feldgebundenen, schnell veränderlichen, Größen**


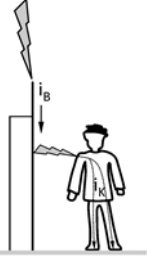
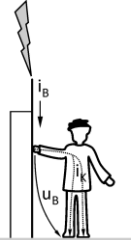
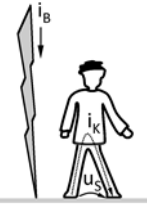
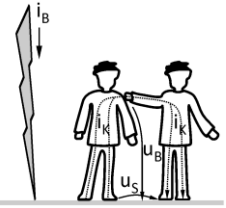

- elektrisches Blitzfeld,
- magnetisches Blitzfeld und
- elektromagnetisches Blitzfeld/elektromagnetische Strahlung

zu berücksichtigen. Hinzu kommen die dazu in ihrer Wirkung völlig unterschiedlichen **nicht-elektrischen Größen**, welche im unmittelbaren Nahbereich wirksam sind:

- Lichtstrahlung,
- Wärmestrahlung,
- Röntgenstrahlung,
- Stoß- und Druckwelle.

Arten der Blitzeinwirkung

Eine Blitzschutzfachkraft kann den Mediziner/Psychologen wirksam unterstützen, indem sie möglichst genau die Art der Energieeinwirkung bei einer Blitzentladung mit Personenbeteiligung ermittelt. Im Einzelnen ist zu differenzieren in:

	<p>Direkter Einschlag: Den Fußpunkt der Entladung bildet der Kopf oder ein anderes, den Kopf überragendes Körperteil.</p>
	<p>Überschlag: Von einem vom Blitz getroffenen Objekt z.B. einem Baum erfolgt ein Überschlag durch die Luft auf einen Menschen in der Nähe.</p>
	<p>Berührungsspannung: Es wird die Potentialdifferenz zu einem leitfähigen Gegenstand überbrückt.</p>
	<p>Schrittspannung: Der Mensch überbrückt unterschiedliche Potentiale mit den Füßen oder anderen sich auf der potentialführenden Fläche befindlichen Körperteilen (das Herz, im Oberkörper liegend, befindet sich dabei im Nebenschluss).</p>
	<p>Schritt- und Berührungsspannung: Diese Spannungen können gleichzeitig auftreten und sich addieren.</p>
	<p>Folgende Arten der Einwirkung einer Blitzentladung auf den Menschen sind unklar:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Es könnte sich um eine Fangentladung handeln, die sich nicht zu einem Blitzstromkanal ausgebildet hat („fifth mechanism of lightning injury“ nach COOPER et al). ➤ Hypothetisch: Einwirkung der mit einem nahen Blitzeinschlag verbundenen Feldeinwirkung (elektrisch oder magnetisch).

1.4 Wirkung von Blitzströmen auf den Organismus

Der Wirkungsmechanismus extrem kurzer (Mikro-/Millisekunden), aber amplitudenhoher (mehrere Kiloampere) Blitzentladungsströme ist nach wie vor mit Unsicherheiten verbunden. So hängen Folgeschäden u.a. von der Durchströmungszeit und damit von der Aufeinanderfolge der unter Punkt 1.3 beschriebenen Blitzstromkomponenten ab.

Beispiel: Eine unmittelbare Wirkung auf das Herz wäre anhand folgender Szenarien denkbar:

- Handelt es sich nur um den Erst- oder einen Folgeblitzstoßstrom, so könnte dieser, wenn er in die vulnerable Phase der Herztätigkeit trifft, unmittelbar das unbehandelt tödliche Herzkammerflimmern auslösen. Fällt der Impuls hingegen in eine Phase der Nichterregbarkeit (im EKG z.B. der Abschnitt S bis T-Anfang), so wird wahrscheinlich eine Extrasystole, aber kaum Kammerflimmern ausgelöst.
- Wird die Person oder das Tier jedoch von den in Bild 3-1 hintereinander folgenden Entladungen durchströmt, kann die Durchströmungszeit 500 ms und länger betragen. Ohne dass der Erstblitzstoßstrom gleich in die vulnerable Phase fällt, kommt es zur Auslösung aufeinanderfolgender Extrasystolen mit extremer (bis zum 12-fachen) Absenkung der Flimmerschwelle, so dass selbst bei dem amplituden-niedrigeren Langzeitstrom Kammerflimmern ausgelöst werden kann. Die thermischen und mechanischen Schäden dürften viel umfangreicher sein, als im ersten Beispiel geschildert.

Dummy- und Tierversuche konnten im letzten Jahrhundert nur bedingt zu Klärung der Wirkungsmechanismen beitragen. Versuche an lebenden Tieren verbieten sich inzwischen.

Jeder Blitzunfall ist für den Betroffenen ein dramatisches Ereignis! Unabhängig vom Ausmaß der Beeinträchtigung/Schädigung gilt es, die Gesundheit möglichst wieder herzustellen. Am Anfang steht die Diagnostik, wobei – beginnend mit der Rettung – Notfall- und Klinikpersonal vom sachkundigen Techniker wirksam unterstützt werden kann, wenn dieser zur Aufklärung der Art der Blitzeinwirkung beiträgt. Es folgen Therapie, medizinische Rehabilitation, als auch die Vermeidung sich später einstellender „posttraumatischer Belastungsstörungen“ – eine mögliche, mit elektrischer Energieeinwirkung oft beschriebene Folge. In diesem Zusammenhang wird auf dabei zu beachtende Unterschiede zum Elektrounfall hingewiesen:

- Der Verunglückte kann sofort berührt werden – es herrscht Spannungsfreiheit! Helfer sollten jedoch den Eigenschutz nicht vernachlässigen, weitere Blitze können bei noch nahem Gewitter auftreten.
- Mehr als 70% der Blitzopfer überleben, wenn bei Bewusstlosigkeit, Atem- und Kreislaufstillstand rechtzeitig reanimiert wird.
- Strommarken treten bei direkter Blitzstromeinwirkung auf. Innere Verbrennungen sind i. d. R. nicht so ausgeprägt wie beim Elektro- bzw. Hochspannungsunfall.
- Die Blitzfigur ist ein besonderes Merkmal der Blitzeinwirkung. Sie verblasst bei Überlebenden wie bei Toten innerhalb kurzer Zeit (Stunden).
- Thermische Abdrücke und das Schmelzen von Metallteilen auf der Haut sind weitere Merkmale einer direkten Blitzentladung mit Gleitentladungsbildung.
- Mechanische Zerstörungen oder Zerreißen der Bekleidung treten bei direkten Einschlägen mit und ohne Gleitentladung auf.

Nach wie vor gelten englischsprachige Veröffentlichungen zur Wirkung von Blitzentladungen auf Personen als wichtige Quellen, wie die Literatur-Datenbank „Blitzunfälle/Blitzeinwirkung“ (s. Pkt. 2.) deutlich macht. Basis für Auswertung und Schlussfolgerungen sind und bleiben auch darin Unfallereignisse.

1.5 Fragebogen Blitzunfall mit Personenbeteiligung

Ein Fragebogen wurde entwickelt, mit dem die wesentlichen Informationen eines Blitzunfalls erfasst und einer Auswertung zugeführt werden können (Anlage 4).

Schwerpunkte für Lehrinhalte (ABB-Seminare)

Noch immer ist die Bewertung nach Schadensursache, Einwirkmechanismen und medizinischer Diagnostik/Therapie bei Blitzunfällen mit Unsicherheiten behaftet. Aus der möglichst genauen Analyse dieser Unfälle lassen sich neue Erkenntnisse gewinnen. Der VDE/ABB fördert daher neben der gezielten Herausgabe von Merkblättern Maßnahmen, die der Erfassung und Bewertung von Blitzunfällen mit Personenbeteiligung dienen. Inhalte und Herangehen bei der Analyse des zugehörigen Fragebogens sollen im Rahmen von ABB-Seminaren Blitzschutzfachkräften vermittelt werden, damit diese auf Ersuchen des ABB aktive Unterstützung bei der Unfallanalyse leisten können.

Allgemeine und technische Angaben

Genauere Angaben zum Unfallort und Unfallzeitpunkt sind auch versicherungsrechtlich von Bedeutung. Dazu gehört der Abgleich mit Angaben aus einem Blitzortungssystem, möglichst ergänzt um Blitzstromstärke, Blitzart und Zeiten zu Einzel- oder zeitlich folgenden Entladungen.

Angaben zur unmittelbaren Umgebung des Unfallortes bestimmen i. d. R. Ereigniseintritt und Unfallfolgen. Deshalb sind, soweit möglich, verlässliche Angaben zum Gelände und zum Unfallumfeld zu begründen. Dazu gehören

- im Freien Hinweise zum Gelände, z.B. Wiese/Feld/Bewuchs, Wald,
- die Nähe zu Gebäuden, Unterständen (mit/ohne Blitzschutzmaßnahmen),
- Angaben zur unmittelbaren Nähe von Blitzeinschlagstellen (z. B. Bäumen, Metallmasten, Zäunen, metallenen Gegenständen, Fahrrad, Motorrad),
- Bodenbeschaffenheit zum Unfallzeitpunkt (nass, feucht, trocken),
- Bodenart (z. B. Schotter, Kies, Sand, Acker, Ton/Lehm/Mergel/Humus, Fels),
- bei befestigtem Untergrund (z. B. Straße) Hinweise zum Belag,
- Angaben zu elektrischen Leitungen/Stromverteilern nach Art, Leitungsführung, Abständen, ober- oder unterirdisch.

Bedingungen zum Unfallzeitpunkt

Angaben zu festen wie beweglichen Objekten mit möglichst metergenauer Lageskizze und Markierung der Orte, an denen der Blitzeinschlag und die Blitzfortleitung erfolgten oder wahrgenommen wurden, sollten mit Fotos, ergänzt werden. Dabei sind deren Bedeutung und Empfehlungen für das Herangehen vor Ort zu erläutern und mit folgenden Hinweisen zu ergänzen:

- Wetterbedingungen zum Zeitpunkt des Unfalls, z. B. Regen/Hagel, möglichst mit Zeitbereich (Beginn/Ende), Windverhältnissen (schwach, mittel, stark),
- Wahrnehmung von Donner (ja/nein? Wenn ja, Zeitbereich: Beginn/Ende),
- thermische und mechanische Spuren in unmittelbarer Nähe des/der Betroffenen.

Angaben zu den vom Unfall betroffenen Personen

Personen, die von einer Blitzentladung betroffen wurden, sollten – auch aus möglichen versicherungsrechtlichen Ansprüchen – aktenkundig werden. Grundsätzlich ist das die Aufgabe der zur Unfallaufnahme und Versorgung Unfallbetroffener hinzugezogenen staatlichen Stellen (z. B. Polizei, Rettungsdienste, behandelnde Ärzte). Der ABB ist auf diese Angaben angewiesen, wenn er im Rahmen der Unfallauswertung, etwa für die Prävention und zur Aufklärung der Wirkung von Blitzentladungen auf den Menschen, Erkenntnisse ableiten möchte. Möglichst bereits am Unfallort sollten daher von der Blitzschutzfachkraft erhoben werden:

- Anzahl/Geschlecht/Alter der betroffenen Personen, unterteilt in Unverletzte, Leichtverletzte, Schwerverletzte, Tote, ggfls. mitbetroffene Tiere,
- Körperhaltungen vor dem Unfall z.B. stehend, sitzend, liegend, laufend,
- unmittelbar nach dem Unfall, also vor der Einleitung von Erste-Hilfe-Maßnahmen, angetroffene Körperhaltung,
- Hinweise auf fehlende/markante Übergangswiderstände (barfuß, Schuhmaterial, Sitz- und/oder Standfläche sowie deren Materialien),
- Angaben zu offensichtlichen Verletzungen (offene Wunden, Blutungen, Verbrennungen) und Spuren einer Blitzentladung (z. B. Ein- und Austrittsstelle des Stromes, zerstörte Kleidung, „Blitz-Figuren“).

Vermutliche Einwirkungsart der Blitzentladung

Der Techniker kann den Arzt/Psychologen dahingehend wirksam unterstützen, indem er möglichst genau die Art der Energieeinwirkung ermittelt, damit daraus andere Sachkundige (z. B. behandelndes medizinisches Personal) Schlüsse auf die Wirkung des Blitzereignisses auf den Körper und einzelne Organe (z. B. Herz, Atmung, Nervensystem) ziehen können.

Die Blitzschutzfachkraft sollte nach der Schulung in der Lage sein, bei der Unfallanalyse vor Ort Anhaltspunkte für die Art des Blitzeinschlages mit Personenbeteiligung zu erkennen.

Weiterführende, nützliche Angaben

Persönliche Beobachtungen von Personen, die sich in der Nähe der Blitzentladung aufhielten, können bei der „Spurensuche“ und Analyse des Unfallherganges oft hilfreich sein. Aufgrund ihrer (auf Übereinstimmung mit anderen Mitteilungen zu prüfenden) Angaben lassen sich z. B. Hinweise auf Standort und Körperhaltung Betroffener finden. Deshalb sollten derartige Schilderungen möglichst detailliert aufgezeichnet werden.

Hat der interviewte Beobachter selbst einen „elektrischen Schlag“ oder für ihn unerklärbare elektrische oder mechanische Einwirkungen verspürt, sollte diesen Schilderungen genau nachgegangen werden (z. B. welcher Art waren die Empfindungen? Welche Körperregionen waren betroffen? Wie lange wurden sie verspürt?).

Aussagen Hinzukommender (Helfer, Feuerwehr, Polizei, Rettungsdienst, Ärzte) sollten – ohne spätere Ableitung von Rechtsansprüchen – möglichst wortgetreu, protokolliert werden. Dazu gehören erste (medizinisch) bewertete Aussagen, wie

- bereits am Unfallort erkennbare Schäden: Strommarken/Blitzfiguren,
- am Unfallort überlebt,
- bewusstlos,
- reanimiert (von wem, z. B. Unfallzeugen, Rettungsdienst, anderen),
- weitere eingeleitete Maßnahmen (von wem, welcher Art),
- Krankenseinweisung (wohin, Name, Anschrift, Telefon der Einrichtung).

Zertifikat

Blitzschutzfachkräfte sollten nach der Schulung zum „Fragebogen Blitzunfälle“ ein Zertifikat des VDE/ABB erhalten. Dieses Schriftstück könnte die Ermittlungsarbeit vor Ort, aber auch bei weiterführenden Recherchen gegenüber staatlichen Dienststellen, erleichtern.

1.6 Hypothese „Induktionsschleifen“

Es wird von der (im Schrifttum noch umstrittenen) Hypothese ausgegangen, dass außer dem bisher beurteilten Körperstrom, der bei direktem Blitzeinschlag durch den Körper fließt, auch durch andere Arten der Einwirkung ausgelöste Ströme zu berücksichtigen sind. Ursachen sind insbesondere zeitveränderliche Feldstärken:

- Elektrisches Feld (E in V/m) – insbesondere beim „upward-streamer“ ist der Gesamtorganismus starken elektrischen Feldern/Teilentladungen ausgesetzt.
- Magnetisches Feld (H in A/m) – starke Magnetfelder können vom mehrere kA führenden Blitzstrom ausgehen, wobei vor allem der steile Anstieg wirksam ist.

Berechnungsverfahren und orientierende Laborversuche zur Magnetfeldbeeinflussung

Für die These „Körperschleifen“ wurden durch Berechnungen erste Ansatzpunkte ermittelt und mit anschließenden Laboruntersuchungen bestätigt. Der Blitzkanal wird dabei als unendlich langer Leiter angenommen, durchflossen vom Blitzstrom $i(t)$ mit dem Scheitelwert \hat{i} . Die magnetische Flussdichte $b(t)$ und die in einer Leiterschleife induzierte Spannung $u(t)$ sind im Abstand r zum Blitzkanal wie folgt berechenbar:

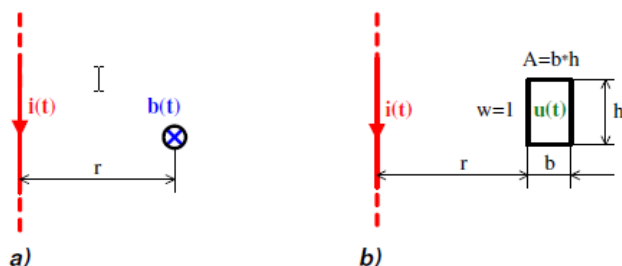


Bild 6-1: Anordnung zur Berechnung a) der magnetischen Flussdichte $b(t)$ und b) der in einer Leiterschleife induzierten Spannung $u(t)$ infolge eines Stromes $i(t)$

Erste Berechnungen wurden von Doz. BAUER (Bericht GWT EMF 2012-05-05: „Berechnung der Magnetfeldexposition und der im Körper induzierten Spannungen bei körpernahen Blitzströmen, 09.05.2012) und Dr. NAUMANN (persönliche Mitteilung), Dresden, durchgeführt. 2014 fanden diese Berechnungen ihre Fortsetzung im Rahmen einer Studienarbeit von Herrn E. GEHLERT, Berlin, mit dem Titel: „Modellierung von leitfähigen Schleifen im menschlichen Körper“.

Weitere Berechnungen und orientierende Laboruntersuchungen erfolgten an der TU Ilmenau. Die Ergebnisse sind zum Teil in die Berichterstattung vor ABB-Gremien eingeflossen: „Metallene Halskette als Induktionsschleife – thermische Wirkung“; ROCK, KUPFER, 26.11.2012 (Tabelle sowie Bilder 5-2 und 5-3).

Schleifenmaterial	Länge in cm	Ohm'scher Widerstand	Induzierte Spannung	Induzierter Strom
Kupfer Ø 0,3 mm	34	87 mΩ	424 V	2,1 kA
Silberkette	34	100 mΩ (Wert schwankt bei Kettenbewegung ^{*)})	464 V	3,9 kA (2,3 kA) ^{*)}
Isotonische Kochsalzlösung 0,9 %	34	17 kΩ	543 V	2,9 A

Tabelle: An einem Stoßstromgenerator (8/20 µs, 56 kA) mit Nachbildung einer Halskette aus unterschiedlichen Materialien wurden bei einem Abstand zwischen Hochstromnachbildung und Schleifentangente unter 0,5 cm (entspricht einer über die Haut angenommenen Entladung) induzierte Ströme über 2 kA, bei isotonischer Kochsalzlösung von ca. 3 A ermittelt.

^{*)} Stromänderungen traten aufgrund der Kettenstruktur („Funkenbildung“ zwischen den Gliedern) auf.

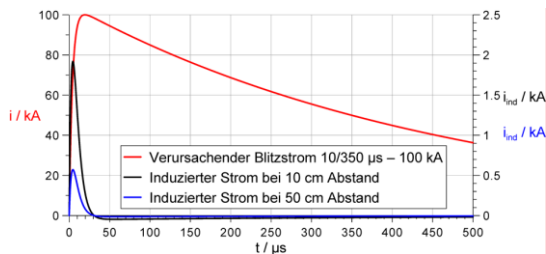


Bild 6-2: Induzierte Ströme bei positivem Erstblitzstoßstrom 10/350 µs

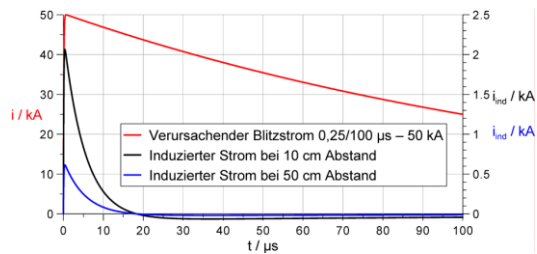


Bild 6-3: Induzierte Ströme bei negativem Folgeblitzstoßstrom 0,25/100 µs

Nimmt man im Körperinneren elektrische „Körperschleifen“ an (offene oder geschlossene; schematisches Beispiel s. Bild 6-4), könnten in diesen (hypothetische Annahme) Wirbelströme/Spannungen/Feldstärken induziert werden. Störungen des Gleichgewichtes an der Zellmembran wären möglich. Mit reizwirksamen Amplituden könnten diese körpereigene elektrische Potentiale überlagern.

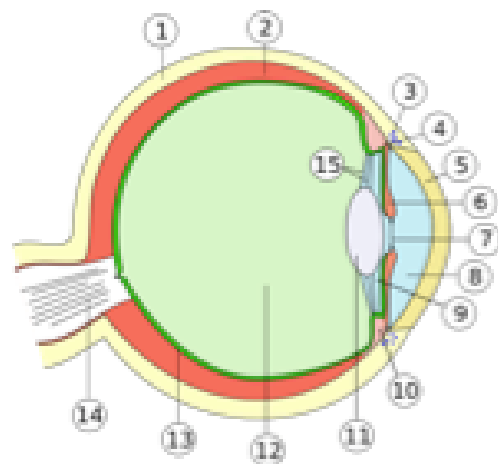
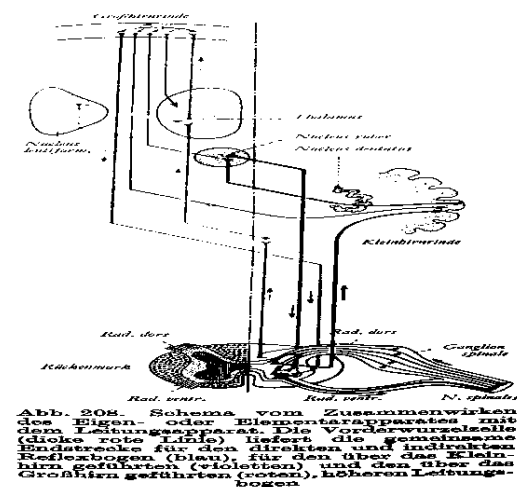


Bild 6-4 und 6-5: Schematische Darstellung von körperinneren Kommunikationsbeziehungen und möglichen „leitfähigen Schleifen“

Offene Probleme und erste Lösungsvorschläge für die Überprüfung der Hypothese: „Induktionswirkung auf innere Körperschleifen“

Zunächst wäre es wichtig, Schleifenanordnungen im Körper zu definieren, die mit Beobachtungen zur Wirkung von Blitzentladungen auf den Organismus in Zusammenhang gebracht werden können. Dazu gehören u.a. die Organe/Systeme

- Herz-Kreislaufsystem,
- Atmungssystem,
- Zentral-Nervensystem (ZNS),
- Peripheres-Nervensystem (PNS),
- Auge (Beispiel s. Bild 6-5).

Die dann erfolgenden Berechnungen sind formal für alle Größen, Abstände und Materialparameter durchführbar, solange es sich um „Dünndraht“-Schleifen handelt. Zunächst sollte von Anordnungen ausgegangen werden, bei denen ein sehr großer Leitfähigkeitsunterschied zwischen Schleifenstruktur und deren Umgebung besteht.

Der Querschnitt der Leiterschleife sollte sehr viel kleiner sein als die Schleifenabmaße, auch zum Abstand der Blitzstrom-führenden Anlage.

Für „Volumenschleifen“ (z. B. Retina des Auges, Kopf, Rumpf) sind die analytischen Berechnungsmöglichkeiten komplizierter, wie erste Ansätze von RÜCKERL, ROCK und GEHLERT zeigen.

Blitzstromparameter und Messgrößen

Aufgrund der unterschiedlich anzunehmenden Reizwirkung zwischen Einzelimpuls, Impulsfolge und Langzeitstrom sind vor allem folgende Blitzstromparameter bei der Nachbildung von Blitzentladungen zu beachten:

- Stromamplitude,
- Spannungsamplitude,
- Einwirkdauer (kurze und lange Impulse, Langzeitstrom)

Versuchsanordnungen mit „Körperschleifen“-Nachbildungen

Bei Bedarf ist in Hochstrom- und Hochspannungsversuche zu differenzieren:

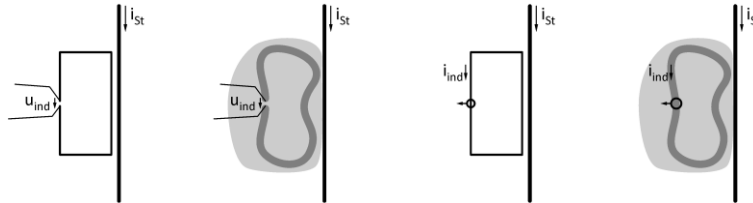
- Schwingender Stoßstrom 8/20 μ s,
- aperiodischer Blitzstoßstrom 10/350 μ s (soweit möglich mit steilerer Stirn/kürzerer Stirnzeit).

Dabei liegt der stoßstromdurchflossene Leiter/verursachender Stromfluss sehr nahe an der Schleife (minimaler Abstand < 5 cm; z. B. als Nachbildung einer Gleitentladung). Außerdem wird die Schleife isoliert/getrennt vom stoßstromdurchflossenen Leiter angeordnet. Als Messgrößen sollten vorgesehen werden:

- Spannung an offener Schleife (Spannung über Unterbrechungsstelle der Schleife, Spannung über Schleifenabschnitte); daraus können elektrische Feldstärken an abgeschätzten Abständen ermittelt werden.
- Induzierter Strom in der geschlossenen Schleife; elektrischer Schluss der Schleife über nieder- und hochohmige Verbindungselemente.

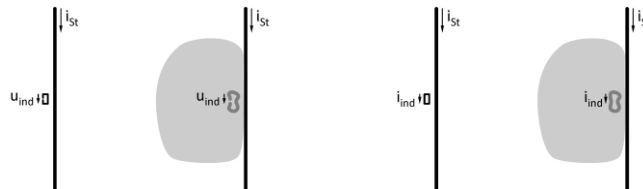
Theoretische Überlegungen

Differenziert wird in **große Schleifen** mit äußeren Schleifenabmessungen im Bereich von cm bis dm. Während eine Spannungsmessung aufgrund der Induktionswirkung in der Messschleife schwierig sein könnte, werden bei der Strommessung mit Stromwandler Probleme nicht erwartet.



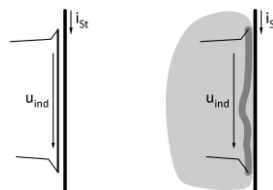
Für **kleine Körperschleifen** im mm-Bereich ist dagegen mit folgenden Schwierigkeiten zu rechnen:

- Spannungsmessung aufgrund zu erwartender Induktionseinwirkung in die Messschleife,
- Strommessung wegen der Ankopplung/des Einbringens kleiner Stromsensoren.



Für eine dritte, offene Schleifenart, die als **unvollständige Schleife** bezeichnet wird (z. B. lang gestreckter Nervenstrang im Wirbelsäulenbereich), ist mit folgenden Problemen zu rechnen:

- Die Spannungsmessung ist wegen der Induktionswirkung auf die Messschleife schwierig bis unmöglich.
- Die Induktionswirkung auf langgestreckte Leiter ist unklar (Spannung von Anfang bis Ende; Spannung über Längenabschnitte).



1.7 Lichtenberg-Figuren

Entladungen über die Körperoberfläche hinterlassen auf der Haut oft Lichtenberg-Figuren (Bild 7-1).



Bild 7-1: Beispiele für Lichtenberg Figuren, v. l. n. r.: Bereits im 18. Jh. als Blitzmerkmal erkannt; im Labor technisch nachgebildet; beim Menschen fotografiert.

Offene Fragen bei der Entstehung von Lichtenberg-Figuren

Erklärungen für das Phänomen „Lichtenberg-Figur“ auf der Haut fehlen nach bisheriger Recherche (technisch/pathophysiologisch/forensisch). Ein direkter Blitzeinschlag in einen Menschen läuft allem Anschein nach wie folgt ab: Die Fangentladung – vom Kopf des stehenden Menschen ausgehend – wird zum „Blitzkörperstrom“ (der im Unterschied zum Hochspannungsunfall geringere sichtbare innere Verbrennungen verursacht). Dieser Strom teilt sich aufgrund des hohen Spannungsabfalls über dem ca. 1.000 Ohm-Körperinnenwiderstand auf in

- Einen (reduziert) weiter fließenden Blitz-Körperstrom und
- den parallel dazu entlang der Haut-/Kleidungsoberfläche fließenden „Blitzentladungsstrom“ (Gleitentladung).

Metallteile (z. B. Halskette, BH- oder Reißverschluss, Schlüssel in der Tasche) nutzt die Gleitentladung als „Brücke“, die ihrerseits auf der Haut/Kleidung Metallisationspuren oder thermische Versetzungen hinterlassen kann.

Damit ergeben sich Fragen, die u. a. im Zusammenhang mit der Ausbildung von Lichtenberg-Figuren zur Diskussion stehen:

- Über welchen Mechanismus entstehen Lichtenberg-Figuren auf der Haut?
- Warum verblassen diese? Wovon hängt die Dauer der Sichtbarkeit ab?
- Welche labortechnischen/histologischen Methoden könnten zur Klärung beitragen?
- Wie unterscheiden sich größenordnungsmäßig für die Impulsform der Erstentladung und möglicher Folgeentladungen, einschließlich Langzeitstrom, die Amplituden der Ströme (Körperinneres zu Haut-/Kleidungsoberfläche)?
- Ist die starke Erwärmung von Metallbrücken in der äußeren Strombahn im Vergleich zu biologischen Materialien (vor allem Haut: trocken/nass; Kleidung: trocken/nass; Form; Masse) rechnerisch abschätzbar?
- Welche Modelle aus der Hochspannungstechnik könnten für die Abschätzung von Felddiagrammen und -größen beim Menschen (Tier) herangezogen werden?

- Bei Isolator-Anordnungen entwickelt sich eine Gleitentladung mit einem längenbezogenen Spannungsbedarf von ca. 5 kV/cm zum Überschlag – wie sieht es bei biologischem Material mit anderen Leitfähigkeiten und Permittivitäten aus?
- Wie können Programmsysteme, in denen Körpermaße, Körperorgane und Leitfähigkeiten modellhaft nachgebildet wurden, zur Klärung dieser und anderer (z. B. „Elektroporation“) offenen Fragen beitragen? (z. B. Ganzkörpermodell „HUGO“, Anwendung durch Dr. SUCHANEK, TU Darmstadt; Teilkörpermodell TU Ilmenau, Prof. HAUEISEN).

Erste orientierende Versuche zur Ausbildung von Gleitentladungen auf Tierpräparaten

Im Mittelpunkt standen an der TU Ilmenau zunächst orientierende Laborversuche mit (zeitveränderlicher) Hochspannung bei folgenden Parametern:

- Blitzstoßspannung 1,2/50 μ s,
- Schaltstoßspannung 250/2500 μ s (ergibt eine längere Zeit für die Ausbildung einer Gleitentladung),
- 50-Hz-Wechselspannung (quasistationäre Betrachtung des Phänomens).

Ziel war es zu überprüfen, ob mit der Spannungsbeanspruchung Gleitentladungen auf den Oberflächen (z. B. präparierte Schweinehaut, Schweinebein, Rinderbein) entstehen können und Lichtenberg-/Blitz-Figuren erkennbar sein werden. (Bild 7-2).

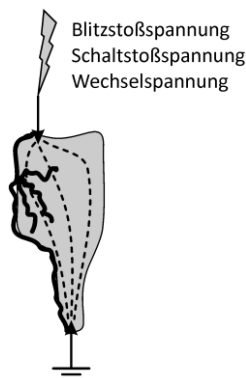
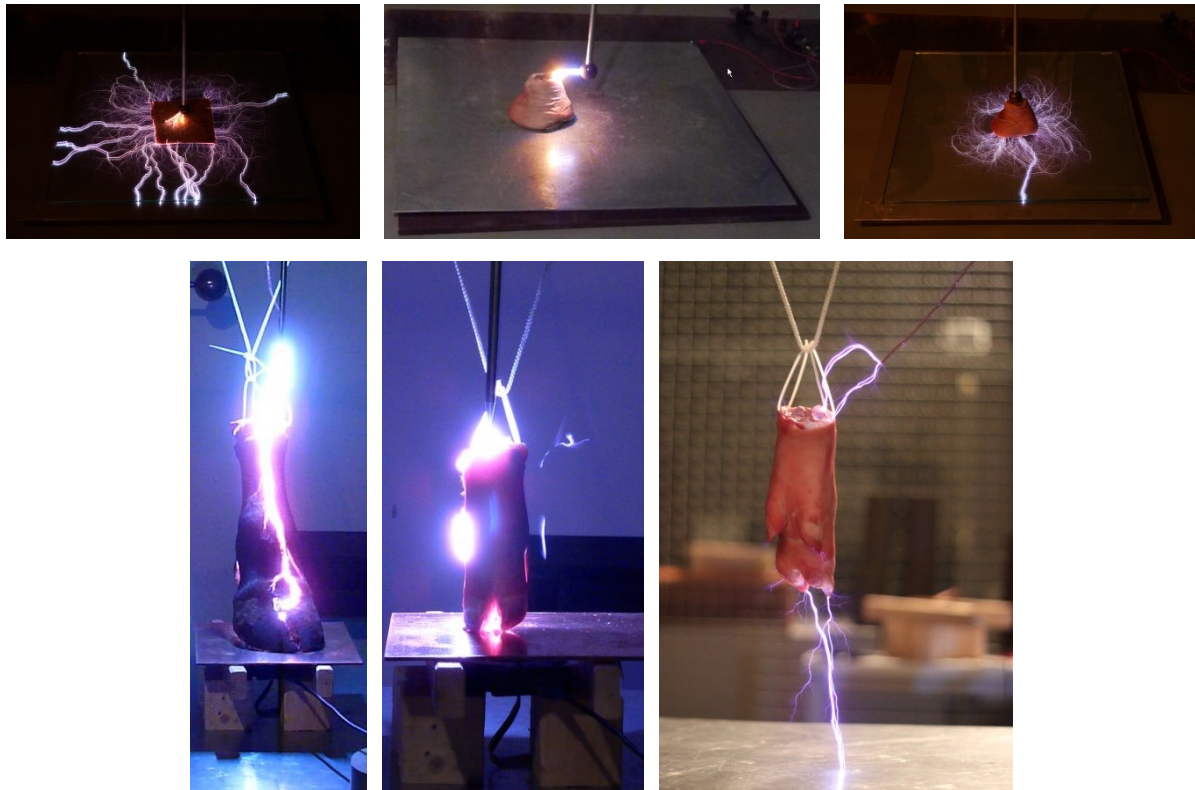


Bild 7-2: Schematische Darstellung der Beanspruchung eines Tierpräparates

Beachtet werden musste eine schnelle (< 8 h nach Schlachtung des Tieres) Integration des Präparates in den Versuchsaufbau, um signifikante Leitfähigkeitsänderungen zu vermeiden. Erste Bilddokumente (7-3 bis 7-8) ergaben neue Ansätze zu einer Diskussion, die noch nicht abgeschlossen werden konnte.



Bilder 7-3 bis 7-8: Beispiele aus Laborversuchen an Schweine-Haut/-Bein-Präparaten an der TU Ilmenau (ROCK; LEU; KUPFER; DREBENSTEDT, 2014)

1.8 Zur Diskussion gestellte Fragen

1. Direkteinschlag, Überschlag, Stromübergang (Berührung): Wie sind Merkmale und das Ausmaß von äußeren Verbrennungen sowie farnartigen Blitzfiguren (Lichtenberg-Figuren) an Körperstellen und in deren Umgebung charakterisierbar?
2. Körperüberschlag, Gleitüberschlag/Gleitentladung: Welche Bedeutung haben Körperöffnungen (Mund, Nase, Augenhöhle, Ohren) sowie leitfähige Brücken auf der Haut (Metall, Schweiß, Nässe), aber auch unbemerkte Nervenfasern?
3. Blitzstrom, Blitzteilstrom, induzierter Strom: Können Personen (oder Tiere) insgesamt als homogene elektrische Leiter (ohm'scher Körperinnenwiderstand beim Menschen ca. 1.000 Ω) betrachtet werden oder welche elektrischen Inhomogenitäten sind in Bezug auf Wirkungen/Wirkungsmechanismen zu beachten?
4. Fangentladungsstrom/Verschiebungsstrom: Wann und in welcher Größenordnung führen von der Körperoberfläche ausgehende Vorentladungen (Aufrichten von Haaren, „Elmsfeuer“) als wirksame Körperdurchströmung auch zur Reizung von Muskeln und Nerven?
5. Feldeinwirkungen (elektrische, magnetische) von Blitzentladungen in Abhängigkeit von der Entfernung: Mit welchen Intensitäten ist zu rechnen und über welche Verbindungen (z. B. „Körperschleifen“, Nerven, Muskeln, Zellen) kommt es zu Körperreaktionen? Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus diagnostischen, therapeutischen (MRT, EKT) und anderen Anwendungen (Taser-Waffen) herleiten?
6. Gewebeerwärmung/innere Verbrennungen: Welche direkten Effekte des Stromes auf innere Organe/Organstrukturen (Herz, Gehirn, Zentralnervensystem, Peripheres Nervensystem, Haut) sowie auf Zellmembranen und die Gefäße sind nachweisbar (makroskopisch/histologisch/Laborwerte)?

7. Empfohlen wird, dass sich der Mensch bei nahendem Gewitter ohne Schutzmöglichkeit von Metallteilen in Körpernähe trennen soll (z. B. beim Bergsteigen, beim Fahren mit Rädern/Motorrädern): Können dazu genauere Hintergründe oder Angaben vermittelt werden?
8. Noch immer wird die primäre Todesursache ‚Herz-Kreislauf- und/oder Atemstillstand‘ widersprüchlich diskutiert: Welche wissenschaftlichen Ansätze könnten hier zu einer Klärung beitragen?
9. Die Entstehung und Rückbildung von durch den Blitzimpuls ausgelösten Lähmungen: Ist bekannt, ob auch im Zusammenhang mit Unfällen durch Kondensatorentladungen, Gleichspannung sowie im Rahmen der Begründung für die Entwicklung von Taser-Waffen (Polizei-Einsatz) diese passagere markante gesundheitliche Störung erklärt werden kann?
10. Decken die beschriebenen „Arten der Blitzeinwirkung“ alle wesentlichen Fälle der Praxis ab?
11. Gilt die Hypothese „unmittelbare Kammerflimmerauslösung nur wenn ein Blitzimpuls in die vulnerable Phase trifft“ unwidersprochen?
12. Wird den kennzeichnenden Unterschieden zwischen Blitz- und Elektrounfall zugestimmt? Sind die Merkmale zu ergänzen?
13. Sollten die aufgeführten Akut- und Spätfolgen beim Blitzunfall deutlicher ergänzt werden durch „Posttraumatische Belastungsstörungen“ infolge Blitzeinwirkung?

Auf Anfrage wurden einige Antworten von M.A. COOPER, USA, wie folgt gegeben, deren Empfehlungen weiterverfolgt werden sollten:

Do you know of experiments in which the magnetic field effect was detected by lightning discharges?

- I know of no experiments – here is a paper that some of us wrote a few years ago: Andrews CJ, Cooper MA, Kotsos T, Kitigawa N, Mackerras D: Magnetic Effects of Lightning Strokes, Electronic Journal of Lightning Research, 1/07 – I have attached the manuscript in case you can't find the article.

Football match (youtu.be/MNJRPOltifl): How to explain pain in the head after lightning?

- I am not sure of the exact reference you are asking about as there have been several of these. A headache is VERY COMMON after lightning injury – almost everyone has it. Post-concussive and post-trauma headaches are one of the hallmarks of brain injury. They are not usually amenable to ibuprofen, aspirin or acetaminophen. They may last for days to months depending on the severity of the brain injury.

"Upward-streamer": Are current flows (body current) been demonstrated on a human model in laboratory experiments?

- Not to my knowledge, but ask Vlad Rakov, Chandima Gomes, Chris Andrews, Mat Darveniza

What (stimulation current; field strength inside the body) caused paresis e.g. in the legs?

- I have no idea

What is the background for a (temporary) respiratory arrest?

- We don't know the cause. We certainly have seen it in my rats in the lab, others have reported it in animals and human case reports, but we don't know the cause, just that it happens.

Is used in the United States a standard for the analysis and evaluation of lightning accidents?

- There is no standard that I am aware of – John Jensenius (noaa, meteorologist and father of lightning safety week) often follows up with the media, the family or the local meteorology office for more details on each fatality and some injuries. He may have a set of questions. There are autopsy (forensic) guidelines (short version attached – I can probably find the longer one somewhere or you can write Ryan Blumenthal for it – that have been published but I do not know how many autopsies actually follow these recommendations.

2 Diskussionsrunde „Blitzentladung auf Mensch und Tier“ am 27.11.2014

Die Ergebnisse des Arbeitskreises Blitzunfälle wurden in einer Diskussionsrunde mit Experten unterschiedlicher Disziplinen diskutiert. Nach der Vorstellung der Ergebnisse durch Prof. Kupfer, Leiter des AK Blitzunfälle, vertieften die Teilnehmer in Kurzbeiträge einige Themen. In der Diskussion konnten sowohl ein zusammenfassender, gemeinsam getragener Stand der Kenntnisse als auch viele offene Fragen festgehalten werden.

Im Fokus der Diskussion standen

- Antworten auf die differenzierte Wirkung von direkten (z. B. direct strike, side flash), körpernahen (Magnetfeld; cm bis ca. 1 m) und entfernten (Elektrisches Feld – „upward streamer – fifth mechanism of injury“) Blitzentladungen,
- Beurteilung und Festigung von Grundlagen zur Wirkung von Körpergewebe- und Organ-spezifischen Bezugswerten (z. B. für Strom, Ladung, Energie, Feldstärke) für blitztypische, extrem kurze und amplitudenstarke elektrische Einwirkungen sowie
- Zusammenstellung noch nicht endgültig geklärt technischer und medizinischer Phänomene (z. B. Gleitladungsbildung auf der Haut, Lichtenberg-Figuren; Wirkung auf ZNS, PNS, Atem- und Kreislaufsystem), die eine Blitzentladung mit Personen-/Tier-Beteiligung begleiten.

Seitens VDE|ABB dankte Herr Raphael den Mitgliedern des Arbeitskreises und den Teilnehmern dieser Veranstaltung für die bisher gewährte fachübergreifende Unterstützung im Rahmen des Arbeitskreises Blitzunfälle. Die Einbeziehung biologisch-medizinischer Sachverhalte in die Arbeit des VDE/ABB hat neue Akzente und Sichtweisen eröffnet und dem ABB neue Erkenntnisse ermöglicht.

Teilnehmer:

Doz. Dr.-Ing. Hartmut Bauer, Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. Ottmar Beierl, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm

Prof. Dr. med. Rolf Büttemeyer, Plastische + Ästhetische Chirurgie, Handchirurgie Charité Campus Mitte, Universitätsmedizin Berlin

Wolfgang Heuhsen, RBS+PWW GmbH, Berlin, Leiter Unterausschuss Statistik des VDE|ABB

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Kupfer, Wissenschaftliches Beratungsbüro Elektropathologie, Berlin, Leiter Arbeitskreis Blitzunfall des VDE|ABB

Thomas Raphael, VDE|ABB, Frankfurt

Prof. Dr.-Ing. Michael Rock, Technische Universität Ilmenau, Leiter Arbeitskreis Schritt- und Berührungsspannungen des VDE|ABB

Prof. Dr. med. Berthold Schalke, Klinik und Poliklinik für Neurologie der Universität am Bezirksklinikum Regensburg

Prof. Dr.-Ing. Dr. med. Jiri Silny, Universitätsklinikum Aachen AÖR, Medizinische Fakultät RWTH femu, Aachen

Priv.-Doz. Dr. med. Fred Zack, Institut für Rechtsmedizin der Universitätsmedizin Rostock

Dr.-Ing. Wolfgang Zischank, Universität der Bundeswehr, Neubiberg, Leiter Technischer Ausschuss des VDE|ABB

Dionysios Granas, Berlin

Eric Gehlert, STRABAG Rail Fahrleitungen GmbH, Berlin

Dr.-Ing. Christian Ruckerl, FTZ Leipzig e.V., Leipzig

Korrespondierend:

Prof. Dr.-Ing. Jens Haueisen, Technische Universität Ilmenau

Dr. vet. med. Martin Höltershinken, Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover

Prof. Dr.-Ing. Jan Meppelink, Hochschule Südwestfalen

Prof. Dr.-Ing. Alexander Kern, Fachhochschule Aachen, Jülich

2.1 Arbeitskreis Blitzunfall

Prof. Kupfer stellt die Schwerpunkte der Arbeiten vor. Nach der Veröffentlichung des Abschlussberichtes wird der Arbeitskreis beendet. Die Themen werden dann behandelt im

- Arbeitskreises Schritt- und Berührungsspannungen, Leitung Prof. Rock,
- Unterausschuss Statistik, Leitung Herr Heuhsen sowie
- Unterausschuss Unfallanalyse, Leitung Prof. Kupfer.

Publikationen

- Das VDE|ABB-Merkblatt „Unfälle durch Blitzeinwirkung – Pathophysiologie, Präklinische Notfallmedizin, Akut- und Spätfolgen“ (dtsch.: 2011, 2012; engl.: 2014 – Anlagen 1 und 2) hat in seiner deutsch- und englischsprachigen Ausgabe gute Resonanz erfahren. Das Merkblatt hat ohne Ergänzungen weiterhin Bestand.
- Kupfer, J.: Ein neues Informationsblatt: Wirkungen, medizinische Maßnahmen, Akut- und Spätfolgen sowie Begutachtung nach Unfällen durch Blitzeinwirkung. VDE-Fachbericht 68, 9. VDE|ABB-Blitzschutztagung. VDE-Verlag Berlin-Offenbach, 2011.
- Kupfer, J.; Rock, M.; Zack, F.: Unsicherheiten zwischen Blitzeinschlagpunkt, sichtbaren Schäden und Verletzungen, erörtert am Beispiel des Golfplatzunfalls 2012 mit vier Todesopfern. VDE-Fachbericht 70, 10. VDE|ABB-Blitzschutztagung. VDE-Verlag Berlin-Offenbach, 2013.
- Kupfer, J.; Rock, M.: Elektrosicherheit – wichtige Grundlagen, Teil 4: Blitzunfälle – Ursache und Wirkung. Elektropraktiker, Berlin 68 (2014), S. 575 – 578.

Theoretische Überlegungen und orientierende Laborversuche

Ausgewählte orientierende Berechnungen und Laborversuche wurden 2013 und 2014 an den Technischen Universitäten Ilmenau und Dresden durchgeführt. Die Arbeiten werden in Kürze beendet, darüber hinaus gehende Untersuchungen erscheinen schwierig durchführbar. Die Berechnungen und Laborversuche mit Blitzstoßströmen (z. B. Blitzstoßspannung 1,2/50 μ s bis 230 kV) galten insbesondere den Fragestellungen:

- Welche Induktionsströme und Spannungen sind in leitfähigen Schleifen zu erwarten?
- Wie verhalten sich biologische Materialien bei einer derartigen Blitzentladungsbeanspruchung?
- Sind Lichtenberg-Figuren auf Tierpräparaten zu erzeugen?

Ohne dem Abschluss dieser Aktivitäten vorzugreifen, lautet eine erste Schlussfolgerung:

An Tierpräparaten durchgeführte Untersuchungen sind nützlich und bedürfen einer intensiven, vorausgehenden theoretischen wie praktischen Planung. Auf den Wirkungsmechanismus von Blitzentladungen auf Personen oder Tiere (als Ganzes) ist jedoch nach wie vor in erster Linie aus Unfällen zu schließen. Versuche an Tieren verbieten sich aus ethischen Gründen.

Literaturdatenbank „Blitzunfälle/Blitzeinwirkung“

Die wichtigsten internationalen Quellen zum Thema Blitzeinwirkung mit Personenbeteiligung wurden gesichtet und in die Literaturdatenbank „Blitzunfälle/Blitzwirkung“ eingeordnet. Dabei kam das frei zugängliche Literaturdatenbanksystem Mendeley zum Einsatz.

Die Datenbank kann von allen interessierten Personen genutzt werden. Voraussetzung ist die Registrierung als Nutzer bei Mendeley und die Zuordnung zur Gruppe „Blitzwirkungen“.

Als Zielgruppe werden Ärzte, Gutachter und Mitarbeiter von Rettungsdiensten gesehen.

Eine Information über die Literatursammlung und deren Nutzung soll auf der VDE|ABB-Homepage als auch im Merkblatt Blitzunfälle veröffentlicht werden.

„Fragebogen Blitzunfall“

Um mehr Informationen über Blitzunfälle zu erhalten, wurde ein Fragebogen erstellt. Damit können Blitzunfälle in einheitlicher Weise erfasst und dem Unterausschuss Unfallanalyse zu Kenntnis gebracht werden. Interessierte Personen, insbesondere Blitzschutzfachkräfte und Mitarbeiter in ABB-Gremien, haben über das Internet Zugriff auf den Fragebogen.

Die Auswertung der Rückläufe erfolgt im Unterausschuss Unfallanalyse.

Im Folgenden werden Schwerpunkte und Ergebnisse der Diskussion sowie Ergänzungen (aus Tonmitschnitten) zu den gehaltenen Vorträgen dargestellt. Die Präsentationen der Teilnehmer sind in den Anlagen 5 bis 13 enthalten.

2.2 Primat der Todesfolge nach Blitzeinwirkung

Schäden am Zentral-Nervensystem und am Herzen stehen im Vordergrund des Interesses, weil es sich hier um die Beeinträchtigung zweier lebenswichtiger Organe handelt (Prof. SILNY). Bei Unfällen kommt eine Diagnose (EKG, Blutdruck, EEG etc.) i. d. R. erst nach mehreren Minuten zum Einsatz. Dieser Sachverhalt bedarf weiterer Recherchen/Beobachtungen unter Berücksichtigung forensischer Merkmale am Gehirn und am Herzen. Gegenwärtig stehen die meisten Erkenntnisse bezüglich der Schädigung des Herzens zur Verfügung (Prof. SILNY). Zusammenfassend kann von folgenden Möglichkeiten der Wirkungskette ausgegangen werden:

- Fällt ein Einzelimpuls in die vulnerable Phase (ca. T-Zacke im EKG) der Herztätigkeit führt dieser mit hoher Wahrscheinlichkeit zum (ohne Reanimation) irreversiblen Kammerflimmern bei Mensch und Großtier.
- (Tier-)Massenunfälle sprechen insofern dagegen, da ausgeschlossen werden kann, dass zeitgleich bei allen Individuen die vulnerable Phase auftritt.
- Hier gilt eher die Annahme, dass mit einer Flimmerschwellenabsenkung (bei 50 Hz: Faktor ca. 12) zu rechnen ist, bei der eine Flimmerauslösung wahrscheinlicher wird. Zur Begründung gelten: Die multiple Blitzentladung besteht aus der Aneinanderreihung von mehreren Entladungen mit Folge- und danach Langzeitstrom (das gilt für ca. 50% Blitzereignisse). Damit kann die Durchströmungszeit dann > 400 ms erreichen. Bei Tier-Blitzunfällen ist außerdem die Schrittspannung herzwirksamer, da die Tiere i. d. R. mit allen 4 Beinen auf nassfeuchter Erde stehen.
- Sauerstoffmangel durch Atemblockade noch unbekannter Ursachen ist nicht abzulehnen. Damit kann ohne schnell einsetzende Atemspende Asystolie und damit folgend ein Herzstillstand die Folge sein.
- Fazit: „Nicht Schwarz-Weiß denken!“ – Wissen fehlt! Z. Zt. ist noch von unterschiedlichen Wirkmechanismen auszugehen, einschließlich Gehirnfehlsteuerung und/oder -blockaden.

2.3 Neurologische Auffälligkeiten – neurologischer Untersuchungsansatz

Die oft unterschiedliche Erst-gutachterliche Beurteilung überlebter Blitz- und Stromunfälle liegt daran, dass es sich meistens um örtlich weit auseinander liegende und seltene Ereignisse handelt. Damit fehlen oft gutachterliche Erfahrungen der beauftragten Mediziner. Spätfolgen bleiben i. d. R. zunächst unberücksichtigt. Treten sie (nicht immer!) dennoch auf, wird (auch aus versicherungsrechtlichen Gründen) ein Kausalzusammenhang mit dem Unfallereignis abgelehnt.

Erfolgt eine neurologische Untersuchung des Patienten, sollte diese von in Elektrotraumata erfahrenen Einrichtungen mit möglichst standardisierten Verfahren vorgenommen werden. Besondere Aufmerksamkeit gilt dabei der posttraumatischen Belastungsstörung, wie sie auch nach anderen plötzlichen, traumatischen Ereignissen mit unterschiedlicher Latenzzeit beobachtet werden kann. Zu den Auffälligkeiten gehören vor allem: Sensibilitätsstörungen, verändertes Wahrnehmungsverhalten („keiner versteht den Patienten, weil er nicht mehr arbeiten, sondern nur noch leben kann“), bei erhaltener Wortflüssigkeit massiver Abbau von Gedächtnisleistungen (auch bei jungen Patienten!).

Eine Spezifik als Folge elektrischer Durchströmungen scheint die Verletzung unbemerkter Nervenfasern zu sein. Mit dem (vermutlich durchströmungsbedingten) Verlust dieser Fasern wird u. a. das Temperaturempfinden gestört. Der Nachweis dieser Zerstörung ist mit speziell in der Neurologie Regensburg entwickelten, inzwischen standardisierten Verfahren nachweisbar:

- Temperaturempfindungsmessungen und
- Biopsie von Hautarealen und umgehende histologische Aufbereitung.

Die von Herrn Prof. SCHALKE vorgetragene Ergebnisse (zunächst Schlussfolgerungen aus 26 Unfällen mit einer Vergleichsgruppe von 29 Patienten) fanden großes Interesse. Diskussions Schwerpunkte waren:

- Notwendigkeit der Anerkennung sich meist später entwickelnder Persönlichkeitsstörungen (Posttraumatische Belastungsstörung).
- Bedeutung unbemerkter Nervenfasern (z. B. gestörtes temperaturabhängiges Schmerzempfinden).
- Standardisierter Untersuchungsansatz unter Leitung eines in der Erkrankung erfahrenen Teams der Neurologie.
- Unabhängigkeit der Beschwerden vom Stromweg (z. B. Kopf oder andere Eintrittsstelle des Blitzstromes).
- Festgestellte Parallelen zum Elektrotrauma, vor allem beim Gleichstromunfall (Ein- und Ausschaltimpuls beachten!).

Im Ergebnis wurde ohne Gegenstimme deutlich, dass diesem Forschungsansatz seitens des VDE/ABB fördernde Unterstützung gewährt werden sollte. Es wurde empfohlen, den einzelnen Fällen eine fachlich begleitende elektrotechnische Analyse/Beschreibung des Unfallherganges zuzuordnen (z. B. Differenzierung zwischen Blitz-, Wechsel-, Gleichspannung; Abschätzung von Stromweg, Spannungshöhe und Dauer der Durchströmung).

2.4 Elektrische Parameter zur Bewertung der Wirkung von Blitzströmen

Während sich beim Elektrounfall Stromstärke und Stromdichte – neuerdings auch elektrische Feldstärke – am Erfolgsorgan in Abhängigkeit von der Durchströmungszeit als Beurteilungsgrößen bewährt haben, sollten impulsförmige Beanspruchungen (vor allem Blitz- und Kondensatorentladungen) hinsichtlich ihrer biologischen Wirkung zusätzlich mit anderen Kenngrößen charakterisiert werden. Zu empfehlen sind „Energie“, „Energiedichte“ sowie „Ladung“, „Ladungsdichte“. Die Größen sollten ineinander umrechenbar bleiben. Unter Berücksichtigung der Einwirkzeiten könnte die Anlehnung an andere impulsförmige Einwirkungsfälle ggfls. hilfreich sein (z. B. Weidezaunimpuls: Ohne Gefährdung des Menschen < 6 J; Taser-Waffen; Elektrofischen; Tierbetäubung).

2.5 Entstehung von Lichtenberg-Figuren

Bereits FARADAY und JELLINEK haben dieses Phänomen umfassend beschrieben und zu erklären versucht (s. M. Faraday: Experimental-Untersuchungen über Elektrizität. XII. und XIII. Reihe, Verlag Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1838 und St. Jellinek: Atlas zur Spurenkunde der Elektrizität. Springer Verlag, Wien, 1955). Dabei wurde auch die Feldeinwirkung erörtert, zumal die Figuren nicht durch anatomische Struktur vorgegeben sind.

Die Diskussion in Berlin ergab weder plausible Erklärungen noch Ansätze für geeignete Versuchsanordnungen zur Nachprüfung. Grundsätzlich gilt folgende Empfehlung (Prof. Silny):

- Letale Folgen sind aufgrund des Vorhandenseins von Lichtenberg-Figuren nicht abzuleiten.
- Lichtenberg-Figuren kennzeichnen Körperbereiche (Eintritt, Austritt, Flächen) mit Blitzstrombelastung.

Als Hypothesen für die Bildung und Verblässung der Lichtenberg-Figuren gelten: Wärmeentzug, Feuchtigkeitsverdampfung, oberflächlicher Ladungstransport, Hautkapillaren als die Figuren darstellende Gefäße, Mini-Barotraumen.

Als ein Grund für Einschränkungen von Laborversuchen wird die begrenzte Leistungsfähigkeit von Blitzstrom- oder Stoßspannungsgeneratoren vermutet, mit der energieintensive, multiple Blitzereignisse kaum nachstellbar sind.

2.6 Mathematische Modellierung impulsartiger Beanspruchungen

Aus der Literatur sind zahlreiche Versuche dazu bekannt (z. B. REYLLY, SUCHANEK). I. d. R. fehlen beweiskräftige Ansätze zur Überprüfung an biologischen Präparaten (z. B. Nerven, Muskeln, komplexe Organe). Elektrische und dielektrische Eigenschaften des gesamten Stromweges in und außerhalb beeinflussen Stromstärke und Stromform des auf den Körper wirkenden Blitzstromes und damit die zeitlichen Verläufe der elektrischen Feldstärke/Stromdichte in einzelnen Organen (Prof. SILNY). Herr Prof. HAUEISEN (TU Ilmenau) wurde gebeten, die in seinem Bereich vorgenommenen orientierenden Berechnungen zur Verfügung zu stellen.

Gewarnt wurde davor, Beanspruchungsmodelle und Ersatzschaltbilder aus dem niederfrequenten Bereich (z. B. Wechselstrom 50/60 Hz) einfach zu übernehmen.

Es wurde angeregt, dass der VDE/ABB die Suche/Entwicklung geeigneter Ansätze im Sinne des Blitzschutzes für Personen und Tiere unbedingt begleiten und fördern sollte.

2.7 Einbeziehung von Wahrscheinlichkeitsparametern

Entgegen anderer Wahrscheinlichkeitsangaben in den Vorschriften, wie z. B. der Körperimpedanz mit Perzentil-Werten, wurde empfohlen, den worst-case-Fall beim Blitzunfall anzunehmen. Zum Verständnis zwei Beispiele, bei denen aus physiologischer und ergonomischer Sicht zusätzliche Sicherheitsfaktoren diskutiert wurden:

- Die Wahrscheinlichkeit, dass der Blitzstromimpuls die vulnerable Phase des Herzens trifft, würde mit dem Faktor 0,2...0,3 reduzierend wirken, multiple Ereignisse mit Erst-, Folge- und Langzeitstrom ausgeklammert.
- Die Schrittlänge beträgt im ergonomischen Mittel nur knapp 70 cm, nicht 1 m (Faktor 0,7).

2.8 Wirkung von unverbundenen Fangentladungen („upward streamer“)

In der Literatur beschriebene Todesfälle ohne direkte Blitzstromeinwirkung (beobachtet und/oder ohne Nachweis von Ein- und Austritts-Strommarken) werden z. Zt. auf Fangentladungen zurückgeführt. Deren Fußpunkt entsteht vermutlich am Kopf und könnte eine hohe Stromdichte im Gehirn zur Folge haben. Diese „Teilentladungs-Ströme“ (bis > 100 A sind möglich; nicht nur als kapazitive Verschiebungsströme!) können bei einer Dauer bis in den Sekundenbereich ohne sichtbar zu sein mehrere Längmeter erreichen. Es wird sich daher im Körper nicht alleine um einen kapazitiven Verschiebungsstrom handeln, die Situation ist eher vergleichbar mit der in der Hochspannungstechnik definierten „Teilentladung“, bei der die Stromverteilung zu beachten ist. Messtechnische Beweise/Untersuchungen fehlen, es herrscht Erklärungsnot! (z. B.: Warum fallen bei Sportveranstaltungen – „Fußball-Videos“! – einige Spieler um oder halten sich den Kopf vor Schmerzen (?), während andere in unmittelbarer Nähe unbeeinflusst erscheinen?)

2.9 Blitzstromverteilung im Körper

Es wurde deren Abhängigkeit u.a. von folgenden Einflussgrößen diskutiert:

- Körperinnenwiderstand: Rein ohmsch. Auf zellulärer Ebene: Kapazität (ca. 2 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$) in Reihe mit ohm'scher Komponente (ca. 60 Ωcm).
- Stromdichteabhängigkeit von Gewebequerschnitten.

- Bisherige Modellberechnungen gelten im Wesentlichen nur für niederfrequente Ströme und lokale Stimulationen (z. B. Herz, Kopf).
- Für den Blitzimpuls werden erweiterte Impedanzmodelle benötigt.
- Atemzyklus beachten.
- Mit Problemen beim Anspruch auf genaue Messungen ist zu rechnen.

2.10 Anwendungsfall Schritt- und Berührungsspannungen

Der gleichnamige Arbeitskreis des VDE/ABB überprüft gegenwärtig unter Leitung von Prof. ROCK, ob die derzeitige Begründung für die Ableitung zugehöriger Grenzwerte dem Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse entspricht. Die Diskussion bestätigte bisher ermittelte Schwierigkeiten wie folgt:

- Ergebnisse von Schwellenuntersuchungen zur Reizung von Nerven/Muskeln, die im niederfrequenten Spektrum (insbesondere 50 Hz) gewonnen wurden, sind nicht ohne Einschränkung auf impulsartige Vorgänge, wie sie eine Blitzentladung charakterisieren aber auch dem Ein- und Ausschalten einer Gleichspannung nahekomen, zu übertragen (Gewebe/Organspezifika, Reiz-, Versuchs- und Messbedingungen beachten!). Gegenwärtig laufende, vergleichende Untersuchungen sollten mit verfolgt werden (von Prof. SILNY geleitetes Projekt).
- In der Literatur wurden bisher zu wenig mögliche Wirkungsunterschiede beachtet, die bei folgender in der Praxis häufigen Kombination auftreten:
 - „reine“ Schrittspannung
 - „reine“ Berührungsspannung und
 - Kombination „Schritt-Berührungsspannung“ (Z. B. muss die Induktionsschleife Mast-Fuß, bei der Berechnung berücksichtigt werden.)

Bei sich berührenden Personen den technisch anders definierten Begriff „Berührungsspannung“ anzuwenden, wurde mit Bedenken entgegen genommen.

- Es wird der Empfehlung zugestimmt, bei der Auslösung von Herzkammerflimmern vom worst-case-Fall auszugehen.
- Offen bleibt die Frage nach einem Einfluss von Atembewegungen, da diese zu Impedanzveränderungen im Körperinneren und damit zu Gradienten reizwirksamer Parameter (Körperstrom, Feldstärke) führen können.

Das von Herrn Prof. ROCK vorgestellte Konzept bildete den Ausgangspunkt intensiver Diskussionen und fand große Zustimmung, auch wenn einige dabei aufgeworfene Fragen unbeantwortet bleiben mussten.

2.11 Induktionswirkung von Blitzströmen auf biologische Objekte

Vom AK Blitzunfälle angeregte Berechnungen und orientierende Versuche ergaben Anhaltspunkte für die Größenordnung induzierter Ströme und Spannungen bei variierten Schleifenanordnungen und definierten Abständen zu dem vom Blitzstrom durchflossenen Leiter. Damit wurde deren bereits bekannte und **lokale** diagnostische wie therapeutische Anwendungen in der Medizin über einen anderen Forschungseinstieg bestätigt: Grundsätzlich besteht eine Beeinflussung biologischer Systeme durch elektromagnetische Felder, auch im Fall von Blitzstromentladungen! Bezogen auf eine Ganzkörperbeeinflussung (Mensch, Tier) kann auch eine Induktionswirkung nicht ausgeschlossen werden, Ströme anderen Ursprungs (Beispiel Fußballvideo: „upward streamer“) wird jedoch ein in Größenordnung höheres Schädigungspotential beigemessen.

Aufgrund der extrem kurzen Beanspruchungszeiten im Anstiegsbereich (bis $< \mu\text{s}$) ist bei Erst- und Folgeblitzen die höchste induktive Belastung zu erwarten, eine biologische Reaktion wäre jedoch zu beweisen! Dabei sollten folgende Bedenken beachtet werden:

- Bei direkter Blitzstromeinwirkung ist in erster Linie der durch den Körper fließende Strom für (Folge)Schäden verantwortlich.
- Körperschleifen aus biologischem Material dürften kaum eine Rolle spielen, da der gesamte Körper als Volumenleiter bei radialem Verlauf der Stromverteilung angesehen werden kann.
- Die reizwirksame induktive Beeinflussung durch einige Meter entfernt vom Menschen stattfindende Blitzentladungen ist eher unwahrscheinlich.
- Bei möglicher Induktionswirkung sollten Körperhaltung und Erdwiderstände berücksichtigt werden.

Es scheint weiterer Klärungsbedarf in folgende Richtungen nützlich:

- Modellberechnungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Gewebeleitfähigkeiten.
- Differenzierung zwischen Teilkörper- (z. B. Kopf/Gehirn, oft „Einfallstor“ für Blitz- oder Teilentladungsstrom) und Ganzkörperbeanspruchung. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass ca. 40 bis 70% der menschlichen Körpermasse aus Muskeln und Nerven bestehen (unterschiedliche Modellstrukturen für Ganz- und Teilkörper anwenden).
- Bei Laborversuchen (Präparate !) Polarität berücksichtigen.
- Bei der angewandten Messtechnik erfordern Anstiegs- (höchstes di/dt , aber extrem kurz) und Abfallflanke (Impulsrücken mit ca. 90% des Energiegehaltes bei einem Frequenzinhalt in der Größenordnung von 100 Hz) des Blitzimpulses differenzierte Behandlung/Erklärung.
- Physiologisch erfolgt die Muskerregung über zugehörige Synapsen. Welche Gesetze gelten bei induzierten Wirbelströmen im lebenden Gewebe?

Das studentische Engagement von Herrn GEHLERT (Abschlussbericht seiner Diplom-Ingenieur-Ausbildung) wurde besonders gewürdigt.

2.12 Öffentlichkeitsarbeit

Die Informationen des VDE/ABB über erhöhte Blitz-Einschlaggefahren bei Personenbeteiligung im Freizeitbereich (z. B. Fußball, Golf, Segeln) haben nach Erfahrungen der Teilnehmer wirksam dazu beigetragen, dass sich immer mehr Menschen vor Blitzunfällen schützen. Deshalb wird insbesondere auch die kindgerechte Vermittlung dieser Inhalte begrüßt! (Projekt Comic „Donner-Wetter“, Kinderkanal „KIKa“, Projektleitung Herr HEUHSEN).

Die Diskussionsrunde regte weitere Aktivitäten an:

- Wiederholung von Hinweisen auf den kostenlosen Zugang zum Merkblatt „Unfälle durch Blitzeinwirkung“ in wenigen, ausgewählten medizinischen Zeitschriften.
- Gezieltes Ansprechen von Fußballvereinen und Schiedsrichterverbänden, um – analog zum Golfspielen – Akteure und Fans mit den Gefahren herannahender Gewitter nachhaltiger vertraut zu machen. In diesem Zusammenhang sollte auch deutlich herausgestellt werden, dass Blitzwarnsysteme (ähnlich wie im Straßenverkehr) nur warnen können, aber nicht von eigenem Handeln/Verantwortlichkeiten entbinden.

- Unter Bezug auf das Merkblatt „Schutzhütten“ sollten in der Bevölkerung Schutzziel und Grenzen der Schutzmöglichkeit von Unterständen breitenwirksamer vermittelt werden (herausstellen, was zum Schutz bei unterschiedlichen Bauten/Standorten führt).

2.13 Anregungen aus der Diskussion

- Einheitliche Anwendung von Begriffen, insbesondere bezüglich reizwirksamer Parameter.
- Mangels anderer wissenschaftlicher Zugangswege wurde nochmals betont, dass der Auswertung von Blitzunfällen (auch retrospektiv) für die Bundesrepublik große Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Dazu gehören u. a. Katalogisierung der Umstände/Parameter, die zu Blitzunfällen geführt haben, ebenso wie die genaue Erfassung von Ein- und Austrittsstellen einer Durchströmung auf der Haut, Lichtenberg-Figuren eingeschlossen.
- Durchführung von Vergleichsuntersuchungen zu technischen und biologischen Materialien bei Blitzstrombeanspruchung, insbesondere hinsichtlich der Ausbildung von Lichtenberg-Figuren und deren Interpretation.
- Gegenüberstellung von Parametern und Wirkungen in der Praxis bewährter unterschiedlicher Impulsstromanwendungen (z. B. Weidezaun, Taser, Tierschlachtung).
- Gezielte Nutzung von Modellen der Reizphysiologie bei der Untersuchung und Interpretation von Blitzentladungseinwirkungen.
- Barotraumen/blitzbedingte Deformationen (z. B. Bäume, Kleidung, zelluläre Ebene) weiter aufklären.
- Der Zunahme von Gleichspannungsanwendungen (Beispiele: Photovoltaik, Automobil, Gleichspannungs-Energie-Übertragung) sollte hinsichtlich möglicher Unfallgefahren beim Berühren und Befreien spannungsführender Teile und ihrer Vergleichbarkeit mit dem Impulscharakter von Blitzströmen wissenschaftliche Aufmerksamkeit gewidmet werden.
- Um erkannte Defizite beim gegenseitigen Verständnis technischer und biologisch-medizinischer Grundlagen im Zusammenhang mit der Entstehung und Wirkung von Blitzentladungen auf den Menschen abzubauen, sollte die enge Zusammenarbeit durch den VDE/ABB weiter gefördert werden.

3 Links

Homepage VDE-Ausschuss Blitzschutz und Blitzforschung (ABB): www.vde.com/abb

Merkblatt Blitzunfälle: www.vde.com/blitzunfaelle

Fragebogen Blitzunfall: www.vde.com/blitzunfall

Literaturdatenbank Mendeley: www.mendeley.com (Gruppe „Blitzwirkungen“)

4 Anlagen

- 1 Merkblatt „Unfälle durch Blitzeinwirkung – Pathophysiologie, Präklinische Notfallmedizin, Akut- und Spätfolgen“
- 2 Merkblatt “Accidents Resulting from Lightning – Pathophysiology, Pre-Clinical Emergency Medicine, Acute and Long-Term Effect”
- 3 Literaturdatenbank Mendelej – Anleitung zur Nutzung
- 4 Fragebogen Blitzunfall
- 5 M. Rock: Einwirkmechanismen auf Menschen bei Blitzentladungen
- 6 B. Schalke: Blitzunfall und Personenschäden – Nervensystem
- 7 R. Büttemeyer: Blitzunfall versus Elektrounfall
- 8 F. Zack: Blitzunfall – Befunde beim Menschen
- 9 J. Silny: Überlegungen zu Themen des VDE/ABB, Arbeitskreis Blitzunfälle
- 10 H. Bauer: Induzierte Spannungen bei körpernahen Blitzströmen
- 11 A. Hunold, J. Haueisen: Simulationen der Stromverteilung im Kopf bei Blitzstromeinspeisung
- 12 E. Gehlert: Beeinflussungsspannungen in menschlichen Körperschleifen und deren Bewertung
- 13 W. Heuhsen: Blitz-Unfallstatistik 2007 – 2013

In der ABB-Geschäftsstelle ist darüber hinaus verfügbar:

- 14 Kupfer, J.; Rock, M.: Ein neues Informationsblatt: Wirkungen, medizinische Maßnahmen, Akut- und Spätfolgen sowie Begutachtung nach Unfällen durch Blitzeinwirkung. VDE-Fachbericht 68, 9. VDE|ABB-Blitzschutztagung. VDE-Verlag Berlin-Offenbach, 2011.
- 15 Kupfer, J.; Rock, M.; Zack, F.: Unsicherheiten zwischen Blitzeinschlagpunkt, sichtbaren Schäden und Verletzungen, erörtert am Beispiel des Golfplatzunfalls 2012 mit vier Todesopfern. VDE-Fachbericht 70, 10. VDE|ABB-Blitzschutztagung. VDE-Verlag Berlin-Offenbach, 2013.
- 16 Kupfer, J.: Elektrosicherheit – wichtige Grundlagen, Teil 4: Blitzunfälle – Ursache und Wirkung. Elektropraktiker, Berlin 68 (2014), S. 575 – 578.
- 17 Anleitung Mendely (Admin)
- 18 Adressliste der Teilnehmer Diskussionsveranstaltung am 27.11.2014

6.8.2015 ra