

Zum Problem des Personenblitzschutzes ¹⁾

Von K. Berger, Zürich

621.316.933

Nachdem es mit der grosszügigen Hilfe der FKH²⁾ möglich war, den Blitz während mehr als 25 Jahren auf Herz und Nieren zu untersuchen, ist es wohl an der Zeit, die gewonnenen Erkenntnisse auf den Blitzschutz anzuwenden. Eigentlich tun wir das schon seit langem, indem ja die Blitzforschung in allererster Linie den Schutz elektrischer Anlagen bezweckt. Heute aber soll ein besonderes Kapitel des Blitzschutzes angeschnitten werden, nämlich die Frage, wie sich der einzelne Mensch gegen den Blitz schützen kann. Wohl bekannt sind die volkstümlichen Schutzregeln, die sich aus den Erfahrungen von Generationen gebildet haben. Nachdem aber heute der Blitzvorgang viel besser bekannt ist als früher, muss man sich fragen, was denn eigentlich beim Blitzeinschlag in den Menschen in elektrischer Beziehung passiert. Die Frage hat praktische Bedeutung z.B. für einen Berggänger oder Leitungskontrolleur, der vom Gewitter überrascht wird und dem sich weit und breit kein geschützter Unterstand anbietet. Das Thema ist jedoch auch von einem zweiten Gesichtspunkt aus interessant, weil nämlich aus der Betrachtung des Blitzzunfalles vielleicht Schlüsse gezogen werden können über die zulässigen Gefährdungsspannungen bei Einwirkungsdauern auf Lebewesen von weniger als 1 s. Diese Frage wird z.Zt. in den Erdungskommissionen der Schweiz und von Deutschland heftig diskutiert im Zusammenhang mit der Neufassung der Starkstromverordnungen.

Betrachten wir somit, was in elektrischer Beziehung beim Blitzeinschlag in einen Menschen passiert, und zwar zunächst im Flachland. Der aus der Gewitterwolke herunterfahrende Blitz nähert sich während ungefähr einer hundertstel Sekunde dem menschlichen Körper, bis über die Fangentladung die Verbindung zum geladenen Blitzkanal entsteht. Der dem Körper aufgedrückte Blitzstrom hat eine steile Front von wenigen μ s Anstiegszeit; er erreicht Scheitelwerte von einigen kA bis in seltenen Fällen rund 200 kA. Beim Abfliessen über den Körper entsteht ein Spannungsabfall. Den Körperwiderstand, der für den hohen Strom und den Strompfad vom Kopf zu den Füßen eher bei 500 als bei 1000 Ω liegen dürfte, setzen wir trotzdem der Einfachheit halber mit 1000 Ω an. Dann

wird bei 1000 A Blitzstrom die Spannung am Körper, z.B. zwischen Kopf und Füßen 1000 kV erreichen und es kommt zum Funkenüberschlag. Die Körperspannung fällt damit auf die Spannung am Lichtbogen ab. Diese beträgt bei 2 m Funkenlänge und ca. 20 V/cm Feldstärke ca. 4 kV. Der Körperstrom geht damit auf etwa 4 A zurück und bleibt auf diesem Wert während der ganzen Dauer des Teilblitzes. Bei Mehrfachblitzen wiederholt sich der Vorgang.

Damit ist die Beanspruchung des Körpers festgelegt. Es fragt sich nun andererseits, wieviel der Körper ohne bleibenden Schaden aushält. Leider sind die Kenntnisse in dieser Beziehung sehr unvollständig und zum Teil bestritten. Bekannt ist beim Menschen die Grenze der Ströme, bei denen eine Elektrode nicht mehr losgelassen werden kann, der sog. Loslassstrom. Er wurde fast ausschliesslich bei üblichem Wechselstrom, seltener bei Gleichstrom bestimmt. Weitergehende Untersuchungen sind von *Dalziel* und *Kouwenhoven* an Hunden und Schafen durchgeführt worden [1]³⁾. *Dalziel* misst bis zur Grenze, wo Herzflimmern auftritt. Von ärztlicher Seite liegen mit Ausnahme der Unfalluntersuchungen der Prof. Dr. *Koepfen* und *Panse* [2] und einer experimentellen Arbeit von *Osyka* [3] wenig experimentelle Resultate an Menschen vor. Auch *Dalziel* hat sich grosse Mühe gegeben, Elektrounfälle von Menschen durch persönliche Rückfragen auf der ganzen Welt auszuwerten.

Für die Unfallgefahr in elektrischen Anlagen ist nun die Einwirkungsdauer der Körperströme von ausserordentlich grosser Bedeutung. Die meisten Untersuchungen beziehen sich auf Einwirkungszeiten der Grössenordnung Sekunden. Die Messungen von *Dalziel* gehen zum Teil bis auf eine Periode der Frequenz 60 herunter. Für kürzere Zeiten, wie sie beim Blitz vorkommen, liegen die Untersuchungen von *Kouwenhoven* mit Kondensator-Entladungen vor.

Ganz abgesehen von der verschiedenen Empfindlichkeit des Herzens während der verschiedenen Phasen des Pulses stehen zwei Gefährdungsziffern für die Kurzzeitbeanspruchung des Herzens und die Entstehung des gefürchteten Herzflimmerns im Vordergrund der Diskussion:

Die erste basiert auf der das Herz bzw. den Körper durchströmenden Ladung $\int i dt$; die zweite rechnet mit der im Kör-

¹⁾ Erweitertes Referat, gehalten an der FKH-Versammlung in Luzern vom 3. Dezember 1970.

²⁾ FKH = Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen.

³⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

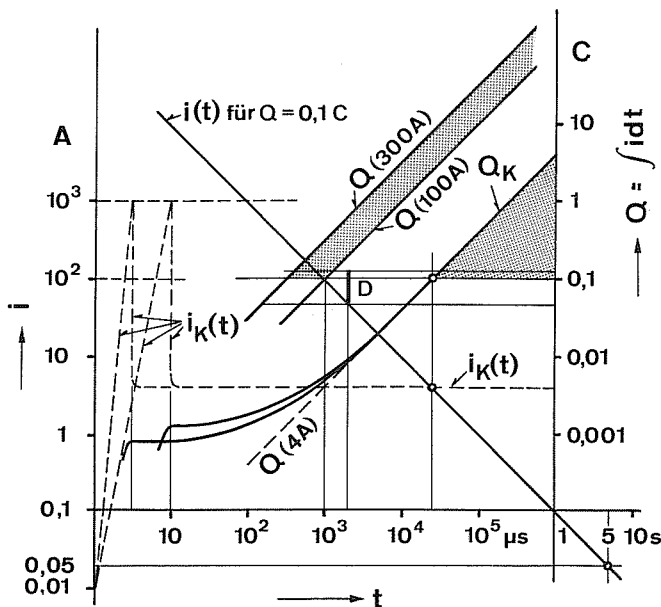


Fig. 1

Zeitlicher Verlauf von Strom i_K und Ladung Q_K beim Blitzeinschlag in den stehenden menschlichen Körper, sowie zulässiger Stromimpuls $i(t)$ für eine zulässige Ladung von $Q = 0,1$ C (nach Osypka)

$i_K(t)$ Stromverlauf im blitzbetroffenen Körper; $i(t)$ für $Q = 0,1$ C: Stromamplitude eines Rechteck-Impulses mit der Ladung $0,1$ C und der Dauer gleich dem Abszissenwert t ; $Q = \int i dt$ elektrische Ladung des Stromes i ; Q_K Ladung im blitzbetroffenen Körper infolge des Stromes $i_K(t)$; t Zeit, $1 \mu s \dots 10 s$; D Ladungsgröße eines Defibrillators mit 2 ms minimaler Impulsdauer t

per umgesetzten Stossenergie $R_K \int i^2 dt$ bzw. $\int i^2 \cdot dt$ (R_K ist der Körperwiderstand).

Anhand von zwei Figuren sollen die Konsequenzen dieser beiden Hypothesen in Beziehung auf den Blitzeinschlag in den Menschen gezeigt werden. Fig. 1 setzt als Mass für diese Gefährdung eine bestimmte elektrische Ladung $\int i dt$ voraus, z. B. gemäss Osypka [3] $0,1$ C. Ihr entspricht im logarithmischen Maßstab eine Gerade $i(t)$. Zum Vergleich muss auch die vom Blitz bewirkte Beanspruchung $\int i dt$ als Ladung Q_K dargestellt werden. Diese besteht aus einem μs -Impuls bis zum Überschlag des Körpers, plus einer linearen Zunahme infolge des konstanten Körperstromes von ca. 4 A. Die graue Fläche stellt den Gefahrenbereich eines Abwärtsblitzes mit einem beliebig grösseren Strom als 1000 A dar. Infolge des Überschlages über den Körper besteht Gefährdung durch Herzflimmern dann, wenn der Blitzstrom mindestens ungefähr $1/10$ s dauert.

Vergleichen wir den Fall eines Aufwärtsblitzes, wie er in den Bergen vorkommt: In diesem Fall besteht ein Blitzstrom von ca. $100 \dots 300$ A während hundertstel bis zu einigen Zehntelsekunden. Die Fläche (Fig. 1) der entsprechenden Ladung $\int i dt$ liegt so hoch über $0,1$ C, dass praktisch bei jedem solchen Aufwärtsblitz Herzflimmern zu erwarten ist.

Fig. 1 zeigt somit, dass der Überschlag den vom Blitz getroffenen Menschen retten kann. In der Tat werden nicht selten Fälle bekannt, wo von Überschlagsfunken Metallteile am Körper angeschmolzen oder verschweisst werden (Reissverschlüsse, Uhren, Schnallen), oder wo Gleitfiguren (Lichtenbergfiguren) oder Haarverbrennungen am Körper vorkommen, ohne dass der Betreffende tödlich verletzt wird.

Fig. 2 stellt die Blitzgefährdung dar unter der Annahme, dass nicht eine bestimmte Ladung Q_K des Körperstromes für

die Gefährdung durch Herzflimmern massgebend ist, sondern die im Körper umgesetzte Wärme-Energie $R_K \int i^2 dt$. Diese Annahme entspricht der Auffassung und den Resultaten von Dalziel für grössere Stromdauer. Die Kurven zeigen, dass bereits die vor dem Überschlag entstehende hohe Stromspitze eines Abwärtsblitzes einen grossen Beitrag an das $\int i^2 dt$ liefert. Sie kann bereits die kritische Grenze des zulässigen Wertes erreichen, der nach Dalziel bei $0,03 \dots 0,1$ A²s, d. h. an 1000Ω bei $30 \dots 100$ Ws liegen dürfte. Auch hier ist die Gefährdung durch einen Aufwärtsblitz mit $100 \dots 300$ A viel grösser als durch den stromstarken Blitz mit beliebig vielen kA. Aufwärtsblitze führen nach beiden Hypothesen für den Menschen zum Herzflimmern.

Vergleichen wir nun kurz beide Hypothesen: Nach Fig. 1 (Ladung $Q =$ konstant z. B. $0,1$ C) ist es möglich, dass auch sehr stromstarke Blitzschläge kein Herzflimmern ergeben. Bei Fig. 2 (Energie $W =$ konstant, z. B. $\int i^2 dt = 0,1$ A²s) ist praktisch jeder Blitzschlag in den Menschen tödlich. Der Unterschied beider Hypothesen wird noch grösser, wenn der Blitz aus mehreren Teilblitzen besteht. Vergleichen wir damit die Erfahrung, so zeigen z. B. die Akten eines schweren Blitzunfalles in Japan im Jahre 1967, dass von 13 Personen, die deutliche Spuren des Überschlages zeigten, 9 Personen tot waren, während 4 ohne bleibenden Schaden davorkamen.

Daraus ist zu schliessen, dass für sehr kurze Einwirkungszeiten eher die Ladung Q_K als die Energie W_K massgebend ist, oder, was ebenfalls zu erwägen ist, dass bei starken, aber kurzen Impulsen von höchstens ms Dauer überhaupt kein Herzflimmern entsteht. Wenn die ausserordentliche Mannigfaltig-

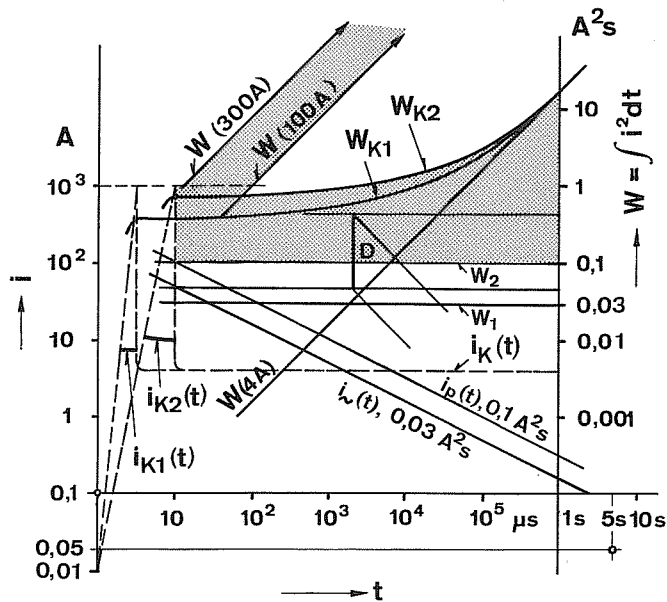


Fig. 2

Zeitlicher Verlauf von Strom i_K und Energieimpuls pro Ω Körperwiderstand W_K beim Blitzeinschlag in den stehenden menschlichen Körper, sowie zulässiger Stromimpuls $i_p(t)$ bzw. Wechselstrom $i_{\sim}(t)$ für $0,10$ bzw. $0,03$ A²s (nach Dalziel)

$i_K(t) - i_{K1}(t) - i_{K2}(t)$ Stromverlauf im blitzbetroffenen Körper; $i_{\sim}(t)$ Stromamplitude eines Wechselstromes der Dauer t ; $i_p(t)$ Stromamplitude eines rechteckigen Stromimpulses der Dauer t ; $W = \int i^2 dt$ umgesetzte Energie pro Ω Widerstand; W_{K1} Energie pro Ω Körperwiderstand infolge des Körperstromes $i_{K1}(t)$; W_{K2} Energie pro 1Ω Körperwiderstand infolge des Körperstromes $i_{K2}(t)$; W_1 zulässige Energie pro 1Ω Körperwiderstand bei Wechselstrom; W_2 zulässige Energie pro 1Ω Körperwiderstand bei einem kurzen Stromimpuls; t Zeit, $1 \mu s \dots 10 s$; D Energieinhalt eines Defibrillators ($50 \dots 400$ Ws an 1000Ω)

keit des Blitzstromverlaufes bedacht wird, so ist ersichtlich, dass die Beurteilung der Blitzgefährdung von Lebewesen ein sehr komplexes Problem bildet [4].

In dieser Beziehung taucht auch die Frage nach der Heilung des Herzflimmerns durch kurze Stromimpulse auf. Dazu sind die sog. Defibrillatoren zu erwähnen. Das sind kleine Stoss-Generatoren mit ca. 50...400 Ws Energieinhalt, die von den Herzspezialisten im Spital zur Wiederbelebung bei Herzflimmern verwendet werden. Benützt werden z. B. Defibrillatoren mit 20 μ F, und 2300...6300 V Ladespannung. Die Ladung liegt somit zwischen 0,04 und 0,12 C. Mit 1000 Ω Körperwiderstand ergeben sich Entladezeitkonstanten von 20 ms [5]. Der Bereich dieser Defibrillatoren ist in den Fig. 1 und 2 eingetragen und mit *D* bezeichnet worden. Die Elektroden werden bei der Entflimmerung auf die Brust in Herzgegend ange-drückt, so dass möglichst viel Strom über das Herz fliesst. Man erkennt, dass hier mit ganz beträchtlichen Energien und Ladungen gearbeitet wird. Offenbar muss diese Energie höher liegen als die untere Grenze für Herzflimmern, soll ja doch vom Defibrillator der Herzmuskel zur vollständigen Kontraktion gezwungen werden, so dass er nachher den Puls wieder normal übernehmen kann.

Schliesslich nun noch kurz etwas über den Personenblitzschutz im freien Gelände: Nach unserer Auffassung ist die beste Schutzstellung das Knien auf dem Boden oder Sitzen nach Japanerart auf dem Fussrücken und Unterschenkel, oder das Hocken auf einer Isolierunterlage, natürlich mit geschlossenen Füßen. Für berufsmässig der Blitzgefahr ausgesetzte Leute, Berggänger, Grenzwächter usw. kommt ein Schutzkäfig in Form eines Zeltes (ca. 4 kg Gewicht) in Betracht, wie er im Institut von Prof. H. Prinz an der Techn. Universität in München von J. Wiesinger entwickelt wurde [6].

Es lässt sich auch ein Schutzkäfig aus feinem Drahtgeflecht denken, das mit oder ohne innere Isolierhaut über die bei Berggängern übliche Pelerine gelegt oder auf ihrer Aussenseite z. B. eingenäht ist, wobei die Person sich bei Blitzgefahr in die Pelerine samt Kapuze hüllt, und mit geschlossenen Knien auf der Innenseite der Pelerine kniet. Ein Schaden am Metallnetz

und am Mantel muss beim Einschlag in Kauf genommen werden; eine schwere Gefährdung der eingehüllten Person scheint aber durchaus vermeidbar.

Eine weitere Schutzmöglichkeit besteht darin, den früher oft mitgeführten langen Bergstock von ca. 1,5...2 m Länge als Blitzableiter mit Isolierhülle auszubilden und auf ein Metallgewebe zu knien, in das der leitende Bergstock solid eingesteckt oder -geschraubt ist. Die Isolierhülle aus Polyäthylen oder Polyester mit Glasfaserverstärkung kann ohne wesentliches Mehrgewicht so bemessen werden, dass sie den Stromdurchgang zum eng angeschmiegteten Körper verhindert. Dieser ist nur über die Schuhe mit dem Metallgewebe am Boden verbunden. Eventuelles Knien auf dem Metallgewebe bewirkt eine grosse Überhöhung des Stockes über den Körper, so dass die Fangentladung vom Stock, nicht aber vom Körper ausgeht.

Es ist einleuchtend, dass die Sicherheit der Schutzwirkung für beide letzteren Methoden experimentell nachzuweisen sein wird, bevor sie zur Anwendung kommen. Alle drei genannten Methoden gewähren Schutz nur bei stillstehenden Menschen; ein Schutz während des Gehens ist schwieriger zu verwirklichen.

Literatur

- [1a] C. F. Dalziel: Threshold 60-cycle fibrillating currents. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 79(1960)-, p. 667...673.
- [1b] C. F. Dalziel: A study of the hazards of impulse currents. Trans. AIEE Power Apparatus and Systems 72(1953)-, p. 1032...1043.
- [1c] C. F. Dalziel: Deterious effects of electric shock. Central Office of the IEC, Geneva, 1962.
- [2] S. Koeppen und F. Panse: Klinische Elektropathologie. Stuttgart, Georg Thieme Verlag, 1955.
- [3] P. Osypka: Messtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier, Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen. Elektromedizin 8(1963)3, S. 153...170 + Nr. 4, S. 194...214.
- [4] K. Berger und E. Vogelsanger: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.
- [5] G. Hossli und I. Babotai: Herzmassage und elektrische Defibrillation in Klinik und Praxis, unter besonderer Berücksichtigung des Elektrounfalltes, vom Standpunkt des Anästhesisten. In: R. Hauf: Beiträge zur Ersten Hilfe und Behandlung von Unfällen durch elektrischen Strom. Frankfurt/M., Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke, 1968; S. 128...135.
- [6] J. Wiesinger: Blitzsichere Zelte. Bull. SEV 59(1968)21, S. 1012...1017.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. K. Berger, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich.