Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 68 (1977)

Heft: 12

Artikel: Die Blitzentladung in Vierparameterdarstellung

Autor: Prinz, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915043

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Blitzentladung in Vierparameterdarstellung

Von H. Prinz

551,594.221

Bei der Bedeutung, die den vier Wirkungsparametern einer Blitzentladung im Hinblick auf die Gefährdung von Objekten aller Art aus heutiger Sicht zugesprochen werden muss [6; 9][1]), erhebt sich die allgemein interessierende Frage, durch welche Korrelationsgleichungen diese vier Parameter mit Hilfe bestimmter Stromkreisparameter der Entladungsbahn einer Gewitterwolke darstellbar sind und ob es umgekehrt – als die noch interessantere Frage – möglich ist, von den aus Blitzstrommessungen ermittelten Wirkungsparametern auf die Stromkreisparameter der Entladungsbahn zu schliessen, mit hieraus sich ergebenden möglichen Schlussfolgerungen.

Zu diesem Zweck wird zunächst davon auszugehen sein, die Entladungsbahn durch diskrete Stromkreiselemente zu simulieren, deren Anzahl mit Rücksicht auf die abzuleitenden Korrelationen verständlicherweise einer Vierparameterdarstellung angepasst werden muss. Nach einer dann folgenden kurzen Zusammenfassung der Verantwortungsbereiche der vier Wirkungsparameter mit ihren statistisch verteilten Messwerten wird es erforderlich sein, die Bestimmungsgleichungen eines als aperiodisch bedämpft gedachten Blitzstromes anzusetzen und hieraus die gewünschten Korrelationsgleichungen für einen Rechengang in beiden Richtungen abzuleiten. Ein solches Vorgehen soll zunächst ohne und dann mit Berücksichtigung der Bogenspannung des Blitzkanals durchgeführt werden.

1. Die vier Stromkreisparameter

Für die folgenden Betrachtungen werde in Anlehnung an eine von *Humphreys* vorgetragene Darstellung angenommen [2; 4], dass sich in einem Höhenabstand a über der Erde eine Gewitterwolke der Kapazität C befinde, an der sich bei einer Wolkenladung Q die Wolkenspannung $U = Q/C$ gegen Erde einstellt (Fig. 1). Der Kapazität sei wolkenseitig der Wolkenwiderstand R_w und erdseitig der Erdungswiderstand R_e nachgeschaltet, so dass der Entladungskreis durch den Gesamtwiderstand $R = R_w + R_e$ bedämpft ist. Die eigentliche Blitzbahn werde durch die Induktivität L dargestellt, die sich in bekannter Weise aus der auf die Längeneinheit bezogenen Induktivität $L' = 1$ µH/m errechnen lässt, enthalte aber noch zusätzlich die wirksame Bogenspannung U_b, die ihrerseits aus der als konstant angenommenen Bogenfeldstärke $E_b = 1$ kV/m bestimmbar ist [3]. Somit wird der gesamte Entladungskreis durch die vier Stromkreisparameter U, C, a und R repräsentiert, wobei anstelle von U auch die Ladung Q treten kann.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

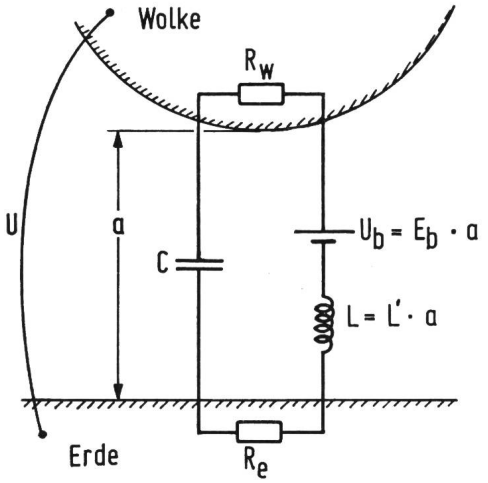

Fig. 1 Diskretisierter Entladungskreis einer Gewitterwolke

Was die Stromkreisbedämpfung anbelangt, so ist der Erdungswiderstand unter der Annahme eines *Ollendorfschen* Halbkugelerders [1] nach einer von *Wiesinger* angegebenen Formel [5] aus

$$R_e = 8{,}92 \sqrt{\frac{\varrho}{\hat{\imath}}} \text{ in Ohm}$$

berechenbar mit ϱ als dem spezifischen Bodenwiderstand in Ohm · m und mit $\hat{\imath}$ als dem Stromscheitelwert in kA. Bei möglichen Werten von $\varrho = 100$ bis 1000 Ohm · m und $\hat{\imath} = 10$ bis 100 kA würde ein $R_e = 10$ bis 100 Ohm zu erwarten sein. Obwohl über den Wolkenwiderstand bisher keine Literaturangaben zu finden sind, so muss doch angenommen werden, dass Widerstände im Bereiche einiger Hundert Ohm zur Wirksamkeit kommen, sobald die im Inneren einer grossräumigen Gewitterwolke gespeicherten Ladungen gesammelt und im weiteren Verlauf des Entladungsvorganges neutralisiert werden sollen. Demzufolge wird ebenso mit Gesamtwiderständen zu rechnen sein, die in der gleichen Grössenordnung liegen. Für die folgenden Betrachtungen wurde deshalb ein Gesamtwiderstand von 1000...2000 Ohm angenommen, der zugleich weit über dem Bedämpfungswert $2\sqrt{L/C}$ des aperiodischen Grenzfalles liegt, wie noch zu sehen sein wird.

In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, dass eine Gewitterwolke ihre Elektrizität gleichsam selbst erzeugt und ihr – wie im Falle eines Konstant-Ladungs-Generators – immer mehr Ladung zugeführt wird, bis das sie umgebende elektrische Feld so stark geworden ist, dass es zu einem Durchschlagen der darin befindlichen Luftstrecke in Form einer Blitzentladung kommt. Wie auch sonst in der Statikelektrizität ist somit die Ladung Q die primäre Grösse, die an der jeweiligen Kapazität C eine Spannung $U = Q/C$ und eine elektrische Energie $W_e = 1/2\, Q^2/C$ wirksam werden lässt.

Zur Abschätzung der Grössenordnung sei ein kugelförmiger Wolkenspeicher mit 0,5 km Radius und einem Höhenabstand von 1000 m vorausgesetzt, woraus sich eine Kapazität von rund 0,14 µF errechnen lässt. Sofern dann weiterhin eine spezifische Ladungserzeugung von 1 As/km³ · min zugrundegelegt wird, würde sich innerhalb von 30 min – das ist ungefähr die Zeit zur Bildung einer Gewitterwolke – eine Gesamtladung $Q \approx 15$ As gebildet haben, woraus sich eine Wolkenspannung von rund 100 MV und eine elektrische Energie von nahezu 900000 kWs erreichen lassen.

2. Die vier Wirkungsparameter

Wie die Erfahrung der jüngsten Zeit gelehrt hat, lassen sich die Wirkungen eines Blitzeinschlages am übersichtlichsten durch vier Parameter darstellen, nämlich erstens den Stromscheitelwert $\hat{\imath}$, der für jegliche Art von Potentialanhebungen

Wirkungsparameter nach [7] Tabelle I

Zeile	Parameter	Negative Polarität		Positive Polarität	
		5%-Wert	50%-Wert	5%-Wert	50%-Wert
1	$\hat{i}$ in kA	80	30	**250**	**35**
2	$(di/dt)_{max}$ in kA/µs	**120**	**40**	32	2,4
3	$\int i^2\,dt$ in kA² s	0,55	0,055	**15**	**0,65**
4	$\int i\,dt$ in As	40	7,5	**350**	**80**

verantwortlich ist, zweitens die maximale Stromsteilheit $(di/dt)_{max}$, die für induzierte Überspannungen in benachbarten Leiterschleifen massgebend ist, drittens den Stromquadratimpuls $\int i^2\,dt$, der als energieproportionale Grösse in Form thermischer und dynamischer Effekte in Erscheinung tritt und schliesslich viertens die Ladung $\int i\,dt$, die sich durch Ausschmelzungen an metallischen Oberflächen bemerkbar macht, die von dem Fusspunkt eines Blitzstrahles erfasst worden sind [9].

Es ist einleuchtend, dass für die Gefährdung eines Objektes der jeweilige Höchstwert entscheidend ist, der auf Grund einer statistischen Werteverteilung voraussichtlich erwartet werden kann und der beispielsweise durch den 5%-Wert gekennzeichnet sei, also einen Wert, der in 5% der Fälle möglicherweise überschritten wird. Darüber hinaus werden auch oftmals die zu erwartenden mittleren Beanspruchungen in Form der 50%-Werte für eine Beurteilung denkbarer Gefährdungen mitherangezogen. Nachdem für spätere Rechenbeispiele die beiden Prozentwerte benötigt werden, sei eine Zusammenstellung angefügt (Tab. I), die einer statistischen Auswertung der *Bergerschen* Blitzstrommessungen auf dem Monte San Salvatore entnommen wurde [7]. Ein Polaritätsvergleich lässt erkennen, dass die von negativer Wolkenladung ausgehenden Blitze, die etwa 80% aller Erdblitze ausmachen, durch ihre maximale Stromsteilheit objektgefährdend sind, während die mit etwa 20% beteiligten positiven Blitze das betroffene Objekt durch ihren Scheitelwert, ihren Stromquadratimpuls und vor allem auch durch ihre Ladung gefährden.

3. Der RLC-Kreis ohne Bogenspannung

Wie erwähnt, sollen die Korrelationsgleichungen zunächst für den Fall abgeleitet werden, dass der *RLC*-Kreis ohne Bogenspannung wirke (Fig. 2). Die dazugehörigen Differentialgleichungen lauten dann

$$u = i\,R + L\frac{di}{dt} \qquad u = -\frac{1}{C}\int i\,dt$$

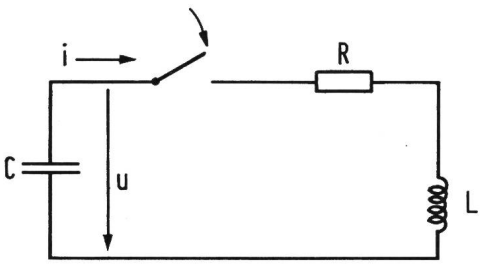

Fig. 2 *RLC*-**Kreis ohne Bogenspannung**

woraus mit $\tau = L/R$ aus der charakteristischen Gleichung der dazugehörigen Differentialgleichung 2. Ordnung die Zeitkonstanten

$$\tau_1 = \frac{2\,\tau}{1-\sqrt{1-4\,\tau^2/LC}}$$

$$\tau_2 = \frac{2\,\tau}{1+\sqrt{1-4\,\tau^2/LC}}$$

folgen. Für den Fall der aperiodischen Bedämpfung mit

$R \geqq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ wird dann unter Berücksichtigung der Grenzbedingungen ($t = 0$, $i = 0$ und $L\,di/dt = U$) der zeitliche Stromverlauf

$$i = \frac{U}{L}\,\frac{\tau_1\,\tau_2}{\tau_1-\tau_2}\left[e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}\right]$$

oder da $\tau_1\,\tau_2 = LC$ und $\tau_1 - \tau_2 = RC\sqrt{1-4\,\tau^2/LC}$

$$i = \frac{U}{R\sqrt{1-4\,\tau^2/LC}}\left[e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}\right]$$

Dies ist die Basisfunktion, die Einzelwerte zu ermitteln erlaubt und aus der sich die vier Wirkungsparameter durch die folgenden Korrelationsgleichungen darstellen lassen:

Der Stromscheitelwert für $\frac{di}{dt} = 0$ zu

$$\hat{i} = \frac{U}{R\sqrt{1-4\,\tau^2/LC}}\left[e^{-t_m/\tau_1} - e^{-t_m/\tau_2}\right]$$

mit $\frac{t_m}{\tau_1} = \frac{\ln \tau_1/\tau_2}{\tau_1/\tau_2 - 1}$ $\quad \frac{t_m}{\tau_2} = \frac{\tau_1}{\tau_2}\,\frac{\ln \tau_1/\tau_2}{\tau_1/\tau_2 - 1}$

Die maximale Stromsteilheit für $i = 0$ zu

$(di/dt)_{max} = U/L$

Der Stromquadratimpuls

$$\int i^2\,dt = \left(\frac{U}{L}\right)^2 \frac{(\tau_1\,\tau_2)^2}{2\,(\tau_1+\tau_2)}$$

oder da $\tau_1 + \tau_2 = RC$

$$\text{wird} \int i^2\,dt = \frac{\frac{1}{2}\,CU^2}{R} = \frac{W_e}{R}$$

was der Fall sein muss.

Die Ladung

$$\int i\,dt = \frac{U}{L}\,\tau_1\,\tau_2 \text{ oder } \int i\,dt = CU$$

was sich ebenfalls ergeben muss.

Für ein Rechenbeispiel mit den Stromkreisparametern $U = 100$ MV, $C = 0{,}1$ µF, $a = 1000$ m und $R = 1000$ Ohm folgen die Zwischenwerte

$L = 1$ mH und $2\sqrt{L/C} = 200$ Ohm

$\tau = L/R = 1$ µs $\quad \tau_1 = 99$ µs $\quad \tau_2 = 1{,}01$ µs

mit der Basisfunktion $i = 102\left[e^{-\frac{t}{99}} - e^{-\frac{t}{1{,}01}}\right]$ in kA

und die dazugehörigen Wirkungsparameter

$\hat{i} = 96{,}4$ kA $\quad (di/dt)_{max} = 100$ kA/µs

$\int i^2\,dt = 0{,}5$ kA²s $\quad \int i\,dt = 10$ As.

4. Der RLC-Kreis mit Bogenspannung

Nunmehr werde nach Fig. 3 angenommen, dass längs des Blitzkanals noch zusätzlich die Bogenspannung U_b wirke, die bei vorgegebenem Höhenabstand konstant ist, da die Bogenfeldstärke als konstant vorausgesetzt wurde. Die entsprechenden Differentialgleichungen lauten

$$u = iR + L\frac{di}{dt} + U_b \quad u = -\frac{1}{C}\int i\,dt$$

so dass mit den gleichen Beziehungen wie im Falle eines *RLC*-Kreises ohne Bogenspannung gerechnet werden kann, jedoch mit dem Unterschied, dass anstelle von U der Differenzausdruck $(U - U_b)$ zu setzen ist und im Stromquadratimpuls noch 2 Zusatzterme angefügt werden müssen. Somit ergeben sich die folgenden Korrelationsgleichungen:

$$\hat{i} = \frac{U - U_b}{R\sqrt{1 - 4\,\tau^2/LC}}\left[e^{-t_m/\tau_1} - e^{-t_m/\tau_2}\right]$$

$$(di/dt)_{max} = (U - U_b)/L$$

$$\int i^2\,dt = \frac{W_e - U_b \int i\,dt - 1/2\,C\,U_b^2}{R}$$

$$\int i\,dt = C\,(U - U_b)$$

Für das vorhergehende Rechenbeispiel wird dann mit $U_b = 1$ MV die Basisfunktion

$$i = 101\left[e^{-\frac{t}{99}} - e^{-\frac{t}{1{,}01}}\right] \text{ in kA}$$

und die entsprechenden Wirkungsparameter

$\hat{i} = 95{,}4$ kA $\quad (di/dt)_{max} = 99$ kA/µs
$\int i^2\,dt = 0{,}49$ kA²s $\quad \int i\,dt = 9{,}9$ As.

Nachdem die Bogenspannung in dem vorliegenden Fall nur 1 % der Wolkenspannung ausmacht, können die Unterschiede in den Parameterwerten nicht sehr gross sein.

5. Der umgekehrte Rechengang

Für den umgekehrten Rechengang sei gleich der allgemeine Fall einer endlichen Bogenspannung vorausgesetzt. Eine Überprüfung der im vorigen Abschnitt zusammengestellten Korrelationsgleichungen lässt jedoch erkennen, dass ihre explizite Auflösung nach den vier Stromkreisparametern nicht möglich ist, vor allem wegen des Klammerausdruckes in der Beziehung des Stromscheitelwertes und dann aber auch wegen des dritten Termes im Stromquadratimpuls, der aber – wie sich leicht zeigen lässt – von vorneherein vernachlässigt werden kann. Was den Klammerausdruck anbelangt, so kann dieser mit noch vertretbarer Näherung gleich 1 gesetzt werden, was bedeutet, dass die Zeitkonstante $\tau_2 = \infty$ wird und damit der Stromscheitelwert nach $t = 0$ rückt. Er soll deshalb mit $\hat{i}_0$

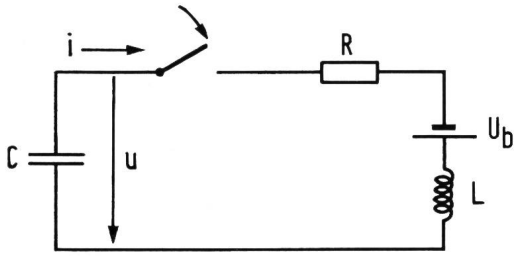

Fig. 3 *RLC*-Kreis mit Bogenspannung

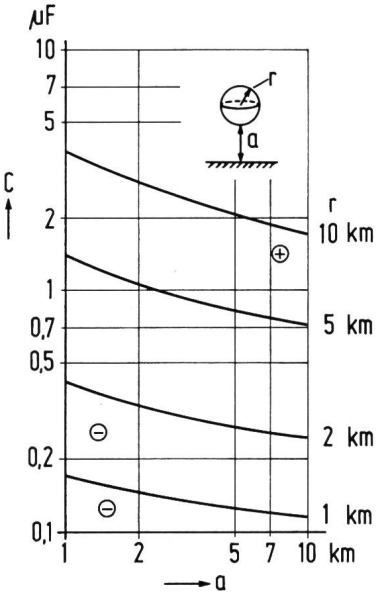

Fig. 4 **Kapazitäten *C* kugelförmiger Wolkenspeicher in Abhängigkeit vom Höhenabstand *a***

bezeichnet werden. Unter diesen Voraussetzungen lauten dann die zu invertierenden Ausgangsgleichungen:

$$\hat{i}_0 = \frac{U - U_b}{R\sqrt{1 - 4\,\tau^2/LC}}$$

$$(di/dt)_{max} = (U - U_b)/L$$

$$\int i^2\,dt = \frac{W_e - U_b \int i\,dt}{R}$$

$$\int i\,dt = C\,(U - U_b)$$

Der Versuch einer Auflösung dieser vier Gleichungen zeigt, dass jeweils nur drei der vier Wirkungsparameter eingegeben werden können und dass als vierte Eingabegrösse ein Stromkreisparameter gewählt werden muss. Von den verschiedenen Möglichkeiten scheint die Eingabevariante mit Vorgabe von $\hat{i}_0$, $(di/dt)_{max}$, $\int i\,dt$ und R die am besten geeignete zu sein, wobei sich dann die folgenden Korrelationsgleichungen ergeben:

$$\int i^2\,dt = \frac{[\int i\,dt]^2}{2\,RC}\left\{1 + \left(\frac{E_b}{L'\,(di/dt)_{max}}\right)^2\right\}$$

$$\text{mit } RC = \sqrt{\left(\frac{\int i\,dt}{\hat{i}_0}\right)^2 + \frac{4\int i\,dt}{(di/dt)_{max}}}$$

$$a = \frac{\int i\,dt}{CL'\,(di/dt)_{max}}$$

$$U = \frac{\int i\,dt}{C} + E_b\,a$$

Nachdem der E_b-Term im Stromquadratimpuls im allgemeinen $\ll 1$ ist und Durchrechnungen gezeigt haben, dass das zweite Glied im Wurzelterm von RC gegen den ersten Term vernachlässigbar ist, ist der Stromquadratimpuls näherungsweise auch über die Trio-Gleichung

$$\int i^2\,dt \approx {}^1/_2\,\hat{i}_0 \int i\,dt$$

berechenbar. Aus den dann bekannten Werten von U, C und a zusammen mit dem vorgegebenen R lässt sich schliesslich der Stromscheitelwert sowie auch die Basisfunktion bestimmen.

Tabelle II

Zeile	Parameter	Negative Polarität für $R = 2000$ Ohm		Positive Polarität für $R = 1000$ Ohm	
		für die 5%-Werte	für die 50%-Werte	für die 5%-Werte	für die 50%-Werte
1	$\int i^2\,dt$ in kA² s	1,6	0,11	43,7	1,39
2	U in MV	160	60	248	35
3	C in μF	0,25	0,125	1,41	2,3
4	a in m	1340	1500	7760	14 500

Sofern die Bogenspannung vernachlässigt wird, ergeben sich die gleichen Korrelationsbeziehungen, wobei jedoch $E_b = 0$ zu setzen ist. So wird für das Rechenbeispiel nach Abschnitt 3 bei Vorgabe von $\hat{i}_0 = 102$ kA, $(di/dt)_{max} = 100$ kA/μs, $\int i\,dt = 10$ As, $R = 1000$ Ohm, der Term $RC = 100$ μs und hieraus $\int i^2\,dt = 0{,}5$ kA²s, $C = 0{,}1$ μF, $a = 1000$ m und $U = 100$ MV, wie sich leicht nachprüfen lässt. Der Stromquadratimpuls folgt über die Trio-Beziehung zu

$$\int i^2\,dt \approx 0{,}51 \text{ kA}^2\text{s}.$$

Es ist klar, dass bei Vorgabe eines bekannten Widerstandes R jene Stromkreisparameter erhalten werden, die im ursprünglichen Rechengang nach Abschnitt 3 in die Korrelationsgleichungen eingegeben wurden. Im allgemeinen ist jedoch der Widerstand nicht bekannt, so dass unter diesen Umständen nur verbleiben kann, R einen Wert zuzuordnen, aus dem eine Kapazität folgt, die sich in die Funktionsabhängigkeit $C = f(a)$ eines Wolkenspeichers sinnvoll einordnen lässt.

6. Schlussfolgerungen

In einer abschliessenden Betrachtung sollen aus den in Tab. I zusammengestellten Wirkungsparametern die dazugehörigen Stromkreisparameter für $E_b = 0$ berechnet werden, wobei $\hat{i} = \hat{i}_0$ als erfahrungsgemäss zulässige Näherung mit maximalen Abweichungen von einigen Prozent gesetzt werde und die im vorigen Abschnitt erläuterte Eingabevariante mit $R = 1000...2000$ Ohm zugrundegelegt werden soll. Bei diesem Rechengang konnten die Parameterwerte nach Tab. II ermittelt werden.

Ein Vergleich der Stromquadratimpulse nach Zeile 1 mit den statistischen Messwerten gemäss Zeile 3 von Tab. I lässt wenigstens in der Grössenordnung eine Übereinstimmung erkennen, und mehr konnte auch nicht erwartet werden. Vermerkenswert ist des weiteren, dass der Höhenabstand bei positiver Wolkenelektrizität um ein Vielfaches höher liegt als bei negativer Wolkenladung, wenngleich der 14500-m-Wert als Folge der ausserordentlich kleinen Stromsteilheit als unrealistisch betrachtet werden muss. Dennoch lassen sich die drei verbleibenden a-Werte mit ihren dazugehörigen Kapazitäten recht gut in die $C = f(a)$-Abhängigkeit eines kugelförmigen Wolkenspeichers mit Radien von 1 bis 10 km einordnen, wie aus Fig. 4 ersichtlich ist.

Für die Prüftechnik lässt sich weiterhin die interessante Schlussfolgerung ziehen, dass von den vier Wirkungsparametern jeweils nur drei frei wählbar sind und sich der vierte Parameter aus den entsprechenden Gleichungen ganz von selbst ergibt. Sofern in Anlehnung an die 5-%-Mischwerte [9] von dem Wertetrio $\hat{i}_0 = 100$ kA $(di/dt)_{max} = 100$ kA/μs und $\int i\,dt = 100$ As ausgegangen wird, folgt aus der Trio-Gleichung

$$\int i^2\,dt \approx 5 \text{ kA}^2\text{s}$$

im Vergleich zu den statistisch ermittelten 3,5 kA²s, und die Basisfunktion für die Wirkungsparameter-Kombination 100/100/5/100 lautet dann

$$i = 100\left[e^{-\frac{t}{999}} - e^{-\frac{t}{1{,}001}}\right].$$

In gleicher Weise sind andere Parameterkombinationen darstellbar, wobei sich auch die Möglichkeit ergibt, Testkombinationen auf ihren Realitätsgehalt zu überprüfen. So würde sich beispielsweise aus der Culham-Kombination 200/100/2/200, die 1975 für das Testen von Flugzeugen festgelegt wurde [8], ein Stromquadratimpuls von 20 kA²s ergeben, während tatsächlich nur ein Wert von 2 kA²s fixiert wurde. Sofern dagegen dieser Stromquadratimpuls beibehalten werden soll, müsste entweder der Stromscheitelwert, oder die Ladung oder auch beides zusammen vermindert werden, so dass beispielsweise eine Testkombination 40/100/2/100 entstünde. Diese neue Erkenntnis sollte auch anderswo nützlich sein.

Sofern von einem aperiodisch bedämpften Stromverlauf ausgegangen wird, lässt sich zusammenfassend etwa das Folgende feststellen:

1. Die statistisch ermittelten Wirkungsparameter lassen sich in befriedigender Übereinstimmung durch eine doppel-exponentielle Basisfunktion darstellen.
2. Von den vier Wirkungsparametern lassen sich jeweils nur drei festlegen, nachdem der Stromquadratimpuls über die Trio-Formel mit dem Stromscheitelwert und der Ladung verbunden ist. Die maximale Stromsteilheit ist dann frei wählbar.
3. Die Bogenspannung kann vernachlässigt werden.
4. Eine Wirkungsparameter-Kombination 100/100/5/100 mit der dazugehörigen Basisfunktion würde recht gut die statistischen 5-%-Mischwerte wiedergeben.

Literatur

[1] *F. Ollendorf:* Potentialfelder der Elektrotechnik. Berlin, Springer-Verlag, 1932.
[2] *W. J. Humphreys:* Physics of the air. New York, Dover Publ. Inc., 1964.
[3] *W. Rieder:* Plasma und Lichtbogen. Braunschweig, Verlag Vieweg, 1967.
[4] *J. Wiesinger:* Blitzmodellversuche und Ersatzschaltungen für Erdblitze. Bull. SEV 58(1967)12, S. 517...520.
[5] *J. Wiesinger:* Integration der Gebäudeinstallation in die Blitzschutzanlage. Bull. SEV 63(1972)3, S. 117...124.
[6] *G. Frühauf:* Erkennung und Beurteilung von Blitzwirkungen. Bull. SEV/VSE 65(1974)26, S. 1903...1908.
[7] *K. Berger, R. B. Anderson* et *H. Kröninger:* Paramètres des coups de foudre. Electra (1975)41, p. 23...37.
[8] *H. Prinz:* Culham-Konferenz über Blitz- und Statikelektrizität. STZ 72(1975)50/51, S. 1193...1199.
[9] *H. Prinz:* Gewitterelektrizität als Gefahr. Bull. SEV/VSE 67(1976)24, S. 1313...1322.

Adresse des Autors

Prof. Dr.-Ing. *H. Prinz*, Hochspannungslaboratorium, TU München, Arcisstrasse 21, D-8000 München 2.