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: 80 (1989)

Heft: 5

Artikel: Blitzentladungssimulation im Labor

Autor: Gockenbach, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903648

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: 05.07.2025

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

Blitzentladungssimulation im Labor

E. Gockenbach

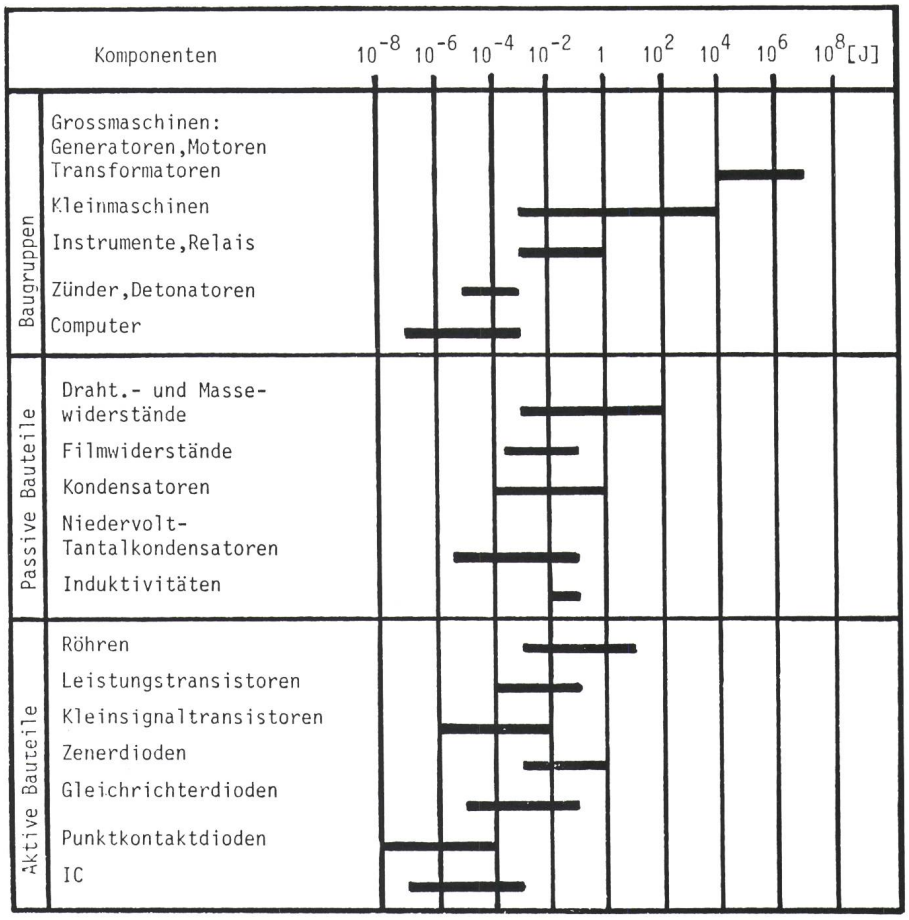
Die Simulation einer Blitzentladung im Labor, z.B. für EMC-Prüfungen an Flugzeugen, erfordert genaue Kenntnisse der physikalischen Vorgänge einer Entladung. Mit Hilfe von Messungen können Entladungsmodelle entwickelt werden. Die Ermittlung der Einschlagpunkte erfolgt durch eine Stossspannungsbeanspruchung, die Ermittlung der direkten und indirekten Stromeffekte durch eine Stossstrombeanspruchung. Für beide Prüfungen werden geeignete Laborprüfsysteme vorgestellt.

La simulation d'une décharge de foudre requiert une connaissance exacte du processus physique de la décharge. Des décharges à une échelle réduite peuvent être développées à l'aide de mesures appropriés. L'étude des points d'impact s'éffectue au moyen d'une sollicitation de tension de choc; l'étude des effets de courant directs et indirects au moyen d'une sollicitation de courant de choc. Pour ces deux essais, on procédera à la démonstration de systèmes d'essais appropriés pour la simulation en laboratoire.

Adresse des Autors
Dr. *Ernst Gockenbach*, Dipl. El.-Ing., Technischer Leiter Prüfanlagen, Haefely & Cie. AG, 4028 Basel.

Die Simulation von Blitzentladungen im Labor ist in der elektrischen Energietechnik ein bekanntes Prüfverfahren. Im Bereich der Energieerzeugung und -verteilung werden z. B. simulierte Blitzentladungen als Bemessungsgrundlage für die dielektrische Festigkeit verwendet. Mit einer Blitzentladung wird ausserdem eine elektromagnetische Welle erzeugt, die zur Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit elektronischer Komponenten eingesetzt werden kann. Die Bedeutung dieser Prüfung ist vor allem in der Luft- und Raumfahrt sehr hoch, da der Einsatz der Elektronik in diesem Gebiet ständig zugenommen hat und die Anforderungen an die spezifische Leistungsfähigkeit, d. h. die Leistungsfähigkeit pro Gewichts- oder Volumeneinheit, zur Entwicklung von elektronischen Komponenten mit extrem hoher Leistung und sehr geringem Gewicht und Volumen geführt haben. Die Empfindlichkeit der elektrischen und elektronischen Komponenten gegen elektromagnetische Störungen ist dabei mit zunehmender Integrationsdichte und Verarbeitungsgeschwindigkeit gestiegen.

In Figur 1 ist die zur Zerstörung erforderliche Energiegrenze für ver-



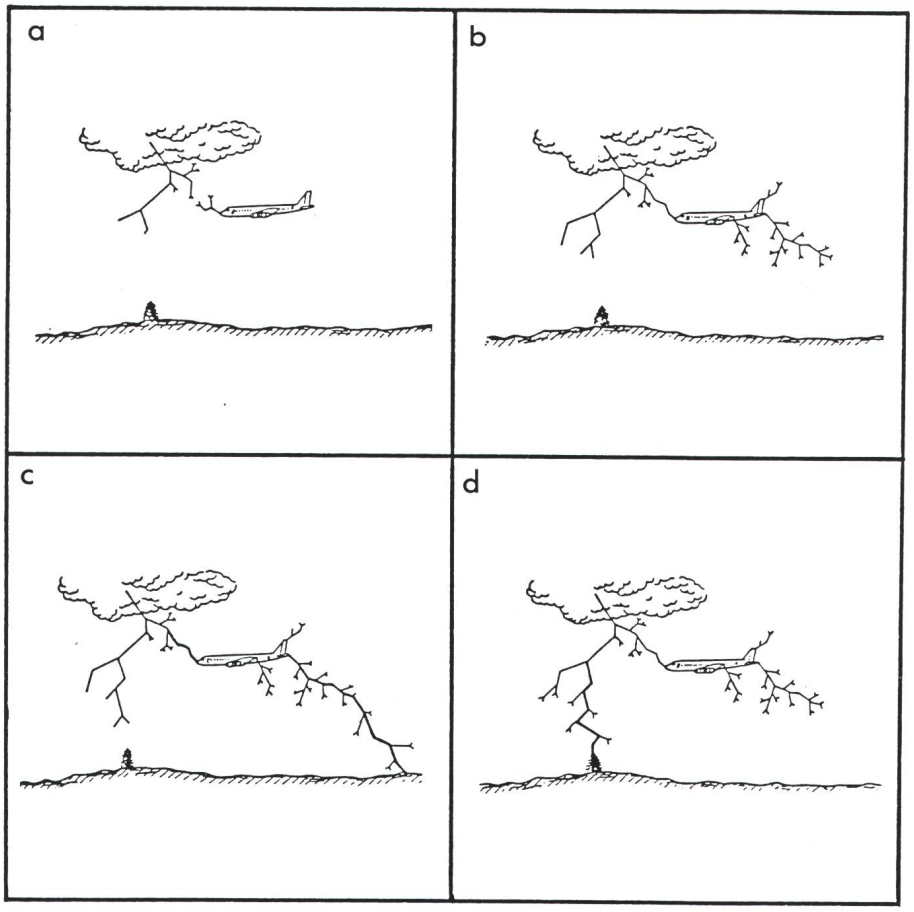
Figur 1 Zerstörenergie verschiedener Komponenten

schiedene Komponenten dargestellt. Die Grenze für eine Störung liegt erfahrungsgemäss noch etwa eine Zehnerpotenz unter der Zerstörgrenze [1].

Die Bedeutung der Zuverlässigkeit der Elektronik in der Luftfahrt soll nur beispielhaft mit den folgenden, die Tendenzen angebenden Aussagen veranschaulicht werden:

- In einem modernen Verkehrsflugzeug mittlerer Grösse sind nur noch Pilot und Co-Pilot im Cockpit. Die Aufgaben des Bordingenieurs werden zum geringen Teil von den beiden Piloten, zum weitaus grösseren Teil von der umfangreichen Elektronik übernommen.
- Die Befehlsübertragung vom Cockpit zu den mechanisch bewegten Teilen an den Flügeln oder am Heck erfolgt durch elektrische Signale, die dann an den entsprechenden Stellen mit Hilfe der Elektronik in mechanische Bewegungen umgesetzt werden (Fly by Wire).

Aus diesen Aussagen geht sehr deutlich die Abhängigkeit der Flugtüchtigkeit von der Zuverlässigkeit der Elektronik hervor. Der Begriff Zuverlässigkeit beinhaltet, dass unter Betriebsbedingungen die Eigenschaften eines Teiles ohne Beeinträchtigungen gewährleistet sind. Der Nachweis der Zuverlässigkeit kann durch Prüfungen unter wirklichen Betriebsbedingungen erbracht werden. In der Regel können die wirklichen Betriebsbedingungen jedoch nicht nachgebildet werden, so dass Annahmen und Vereinfachungen erforderlich sind. Die Aussagekraft der Prüfungen ist aber um so grösser, je zutreffender die Annahmen und Vereinfachungen sind. Aus der Vielzahl von möglichen Prüfungen der elektrischen Ausrüstung und Elektronik sollen im weiteren nur die Prüfungen mit Blitzentladungen auf Luftfahrzeuge beschrieben werden.



Figur 2 Entwicklung einer Blitzentladung

Zunächst wachsen aus der Wolke und dem Flugzeug Leader gegeneinander vor (a). Die beiden Leader treffen sich, und das Flugzeug ist ein Teil des Leaders (b). Nachdem der Leader die Erde erreicht hat, erfolgt die Hauptentladung mit einem sehr hohen Strom, wobei der Strom durch das Flugzeug (c) oder nicht durch das Flugzeug fliessen kann (d).

Blitzentladung

Beschreibung des Vorganges

Die Prüfung der Blitzentladung auf ein Luftfahrzeug bedingt zunächst einmal die genaue Kenntnis der physikalischen Vorgänge während einer Blitzentladung. Die Untersuchungen von Blitzentladungen haben gezeigt, dass die Durchschlagsentwicklung in Stufen erfolgt. Ausgehend von den Elektroden der Entladungsstrecke wachsen die Leader stufenweise mit verschiedenen Verzweigungen vor. Dabei weist im allgemeinen die positive Elektrode den längeren Leader auf. Nach dem Zusammentreffen der gegeneinander vorwachsenden Leader erfolgt die Hauptentladung mit einem sehr hohen Strom. In Figur 2 sind die verschiedenen Phasen der Blitzentladung vereinfacht dargestellt [2].

Zunächst wachsen aus der Wolke und dem Flugzeug Leader gegeneinander vor. Die beiden Leader treffen sich, und das Flugzeug ist Teil eines Leaders. Nachdem der Leader die Erde erreicht hat, erfolgt die Hauptentladung mit einem sehr hohen Strom, wobei der Strom durch das Flugzeug oder nicht durch das Flugzeug fliessen kann. Anschliessend können noch weitere Entladungen erfolgen, wobei die Wahrscheinlichkeit polaritätsabhängig ist. Positive Entladungen bestehen in der Mehrzahl aus einer Entladung, wobei allerdings der Energieinhalt und der Ladungstransport grösser sind als bei negativen Entladungen. Negative Entladungen bestehen meistens aus mehreren Entladungen mit einer Phase konstanten Stromes zwischen den einzelnen Entladungen.

In Figur 3 sind Modelle typischer Abläufe von Blitzentladungen dargestellt [2].

Neben dem zeitlichen Verlauf der Blitzentladung sind auch die weiteren Parameter wie Scheitelwerte des Stromes, Anstiegszeit, Ladung und Aktionsintegral von Bedeutung.

In Tabelle I sind die Resultate der statistischen Auswertung der Blitzstrommessungen auf dem Monte San Salvatore von 1963 bis 1971 dargestellt.

Simulation der Blitzentladung

Die wirkliche Blitzentladung kann im Labor nicht nachgebildet werden, da zur Nachbildung der letzten Stufen des Leadervorwachsens eine sehr hohe Spannung und zur Nachbildung der Stromeffekte nach dem Zusammentreffen der Leaderkanäle ein sehr hoher Strom verbunden mit einer sehr

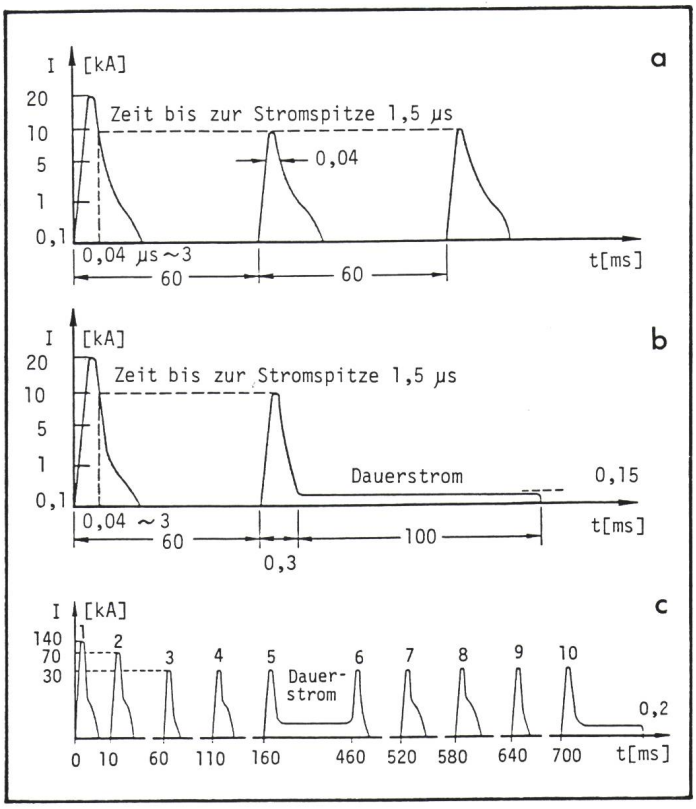
grossen Stromänderung erforderlich ist. Die Nachbildung der Blitzentladung wird daher in zwei Komponenten zerlegt, die Simulation der Durchschlagsentwicklung und Feststellen der Einschlagpunkte durch eine Stossspannungsprüfung sowie die Simulation der Stromeffekte durch eine Stossstromprüfung.

Simulation der Blitzspannung

Grundlagen

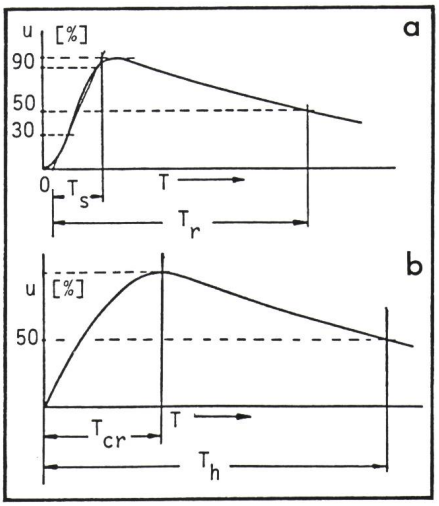
Die Blitzentladung auf ein Flugzeug entspricht im wesentlichen dem Durchschlag einer inhomogenen Funkenstrecke in Luft, die im Labor durch eine Stab-Platte-Elektrodenanordnung nachgebildet werden kann. Diese Elektrodenanordnung wird auch in der Hochspannungstechnik als kritischste Anordnung bezüglich des Durchschlagverhaltens eingesetzt. Die dabei am häufigsten verwendeten, genormten Prüfspannungen, die Blitzstossspannung und die Schaltstossspannung [4], sind in Figur 4 dargestellt.

Das Durchschlagverhalten einer Stab-Platte-Funkenstrecke ist abhängig von der *Frontzeit* und der *Polarität* der angelegten Stossspannung sowie den Eigenschaften der Luft wie Dichte, Temperatur und Feuchtigkeit. Da die Eigenschaften der Luft im wesentlichen nur die Höhe der Durchschlag-



Figur 3
Modelle typischer Blitzentladungsabläufe

I Stromstärke
t Zeit
a Verlauf mit mehreren Entladungen ohne konstanten Strom zwischen den Entladungen.
b Mehrere Entladungen, jedoch mit einem konstanten Strom nach der letzten Entladung.



Figur 4 Genormte Blitz- und Schaltstossspannung

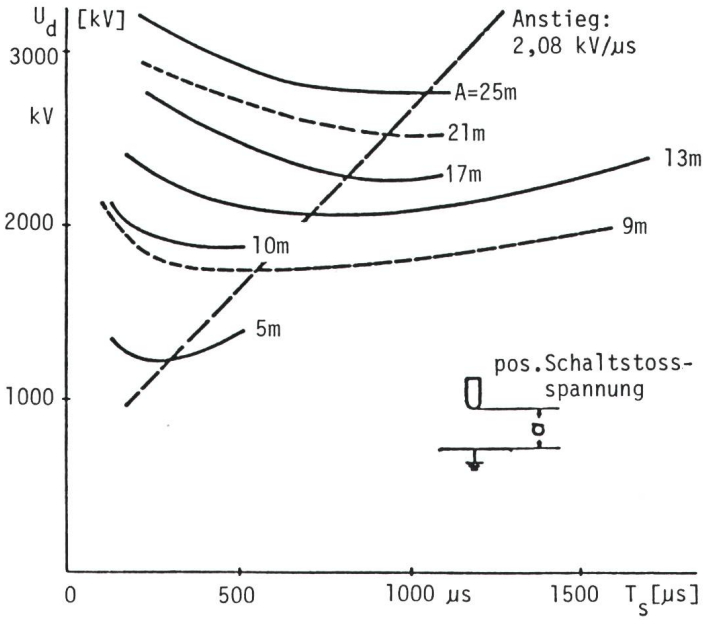
a Blitzstoss
b Schaltstoss

Die Blitzstossspannung hat eine Frontzeit T_s von 1,2 µs und eine Rückenhalbwertzeit T_h von 50 µs, die Schaltstossspannung eine Scheitelwertzeit T_{cr} von 250 µs und eine Rückenhalbwertzeit T_h von 2500 µs.

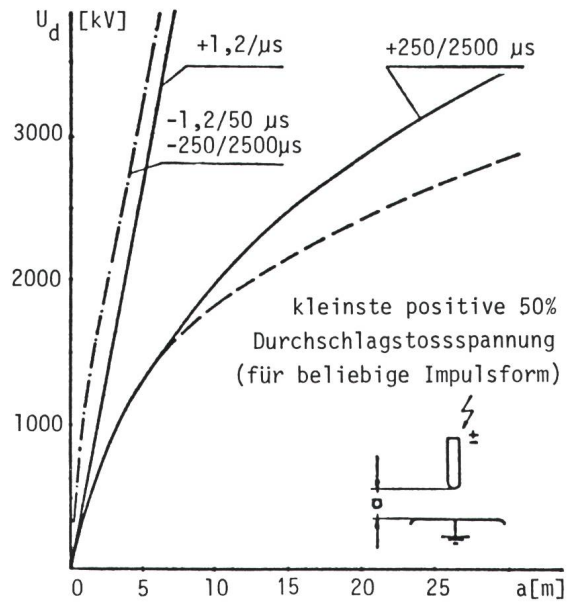
Tabelle 1
Blitzstromparameter aus [3]

Dargestellt sind die Resultate der statistischen Auswertung der Blitzstrommessungen auf dem Monte San Salvatore von 1963 bis 1971.

Anzahl Vorgaenge	Parameter	Einheit	Ueberschreitung der Tabellenwerte 95 %	50 %	5 %
	Strom-Scheitelwert				
99	Neg. erste Teilblitze	kA	14	30	80
137	Neg. Folgeblitze	kA	4.6	12	30
28	Pos. Blitze(ohne Folgebl.)	kA	4.6	35	250
	Ladung				
91	Neg. erste Teilblitze	C	1.1	5.2	24
124	Neg. Folgeblitze	C	0.2	1.4	11
88	Neg. Gesamtblitze	C	1.3	7.5	40
26	Pos. Blitze	C	20	80	350
	Impuls-Ladung				
88	Neg. erste Teilblitze	C	1.1	4.5	20
119	Neg. Folgeblitze	C	0.2	0.9	4
25	Pos. Blitze(nur 1 Teilbl.)	C	2.0	16	150
	Frontzeit				
87	Neg. erste Teilblitze	µs	1.8	5.5	18
120	Neg. Folgeblitze	µs	0.2	1.1	4.5
19	Pos. Blitze	µs	3.5	22	200
	Steilheit				
90	Neg. erste Teilblitze	kA/µs	5.5	12	18
124	Neg. Folgeblitze	kA/µs	12	40	120
21	Pos. Blitze	kA/µs	0.2	2.4	32
	Rueckenhalbwertzeit				
78	Neg. erste Teilblitze	µs	30	75	200
104	Neg. Folgeblitze	µs	6.5	32	140
16	Pos. Blitze	µs	25	230	2000
	Aktions-Integral				
89	Neg. erste Teilblitze	kA^2s	6.0	55	550
64	Neg. Folgeblitze	kA^2s	0.5	6.0	52
26	Pos. Blitze	kA^2s	25	650	15000
	Zeitintervall zwischen neg. Teilblitzen				
133		ms	7	33	150
	Dauer des Gesamtblitzes				
92	Negative (total)	ms	0.1	13	1100
39	Negative (ohne Einfachbl.)	ms	31	180	900
26	Positive	ms	14	85	500



Figur 5 Einfluss der Frontzeit auf die Durchschlagspannung



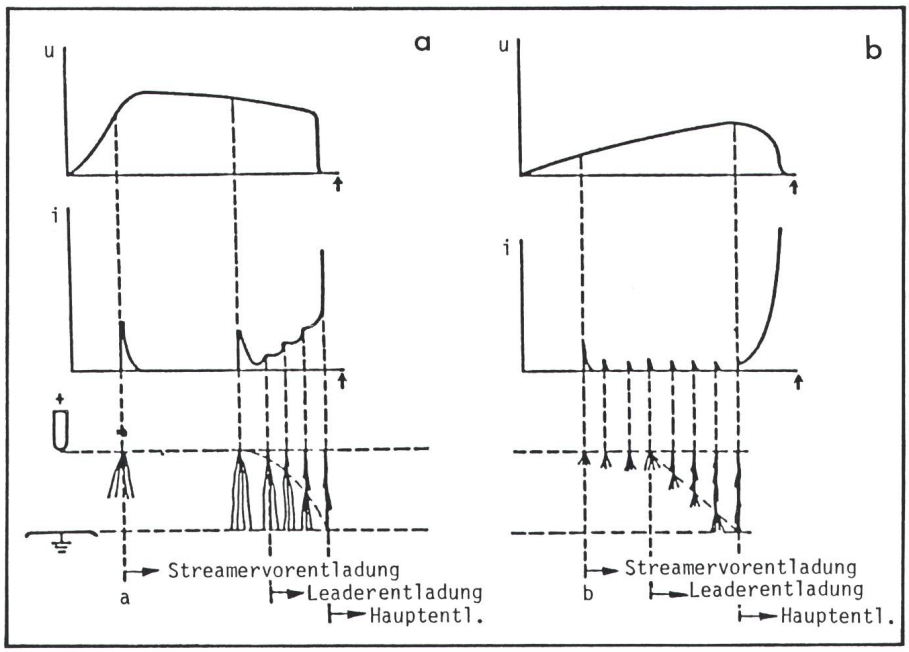
Figur 6 Durchschlagspannung in Abhängigkeit des Abstandes und der Spannungsform

spannung beeinflussen, können sie für die Beschreibung der Durchschlagentwicklung vernachlässigt werden. In Figur 5 ist der Einfluss der Frontzeit auf das Durchschlagverhalten einer Stab-Platte-Funkenstrecke in Luft bei positiver Polarität dargestellt [5]. Die Verbindung der Kurvenpunkte mit der geringsten Durchschlagspannung bei konstantem Funkenstreckenabstand ergibt eine Gerade, deren Steigung etwa 2 kV/µs beträgt. Das bedeutet, dass zu jeder Spannung eine kritische Frontzeit existiert, bei der die Durchschlagspannung ihr Minimum aufweist.

Die Durchschlagspannung einer Stab-Platte-Funkenstrecke ist vom Abstand und von der Polarität der Spannung abhängig. In Figur 6 ist die Durchschlagspannung einer Stab-Platte-Funkenstrecke in Abhängigkeit des Funkenstreckenabstandes und der Form sowie der Polarität der Spannung dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei gleichem Abstand die Durchschlagspannung sehr stark von der Dauer des Spannungsimpulses abhängt. Bei der Blitzstossspannung ergibt sich ausserdem wegen der sehr kurzen Frontzeit eine geringe Polaritätsabhängigkeit der Durchschlagspannung. Bei Schaltspannung dagegen ist die positive Durchschlagspannung sehr viel niedriger als die negative, wobei sich die Differenz mit zunehmendem Abstand vergrössert.

Der Durchschlag einer Stab-Platte-Funkenstrecke kann durch zwei unterschiedliche Durchschlagmechanismen, den Streamer- und den Leadermechanismus, beschrieben werden. In Figur 7 sind die beiden Durchschlagmechanismen schematisch dargestellt. Die Streamerentladung ist charakteristisch bei einem Durchschlag mit Blitzstossspannung, die Leaderentladung bei einem Durchschlag mit Schaltstossspannung. Die Streamervorentladung entsteht in der Front der Blitzstossspannung, wenn die kritische Feldstärke an der Stabelektrode erreicht ist. Der dabei entstehende Stromimpuls ist proportional zur Einsatzspannung. Die dabei entstehende Raumladung verhindert zunächst weitere Streamerentladungen. Nach einiger Zeit können durch Abwanderung der Ionen oder durch das Ansteigen der Spannung weitere Streamervorentladungen erfolgen. Erreicht die Streamerentladung die Gegenelektrode, kommt es zur Ausbildung eines Leaderkanales von der positiven Elektrode aus. Für diese letzte Phase der Durchschlagentwicklung ist aber keine Zunahme der Spannung mehr erforderlich, wie aus dem Spannungsverlauf deutlich hervorgeht. Der Spannungszusammenbruch erfolgt sehr

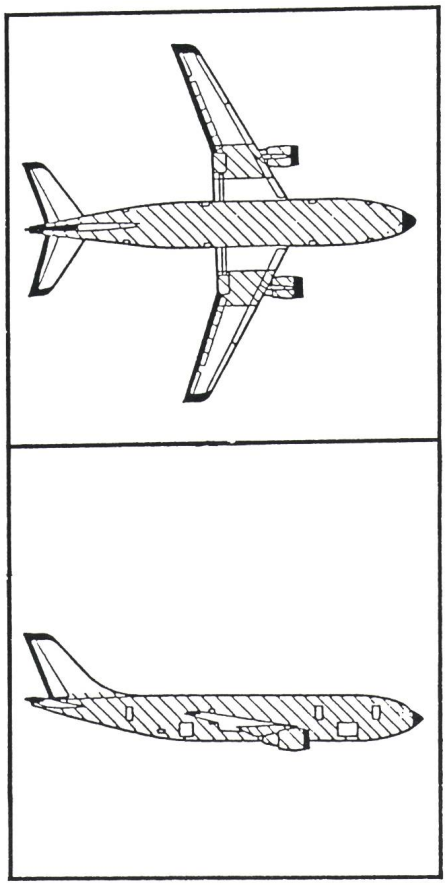


Figur 7 Schematische Entwicklung des Durchschlags einer Stab-Platte-Funkenstrecke

schnell, da der Leader bereits sehr niederohmig ist. Der erforderliche Spannungsabfall in der Streamerentladung beträgt etwa 5 kV/cm.

Bei der Schaltstossspannung sind zu Beginn der Durchschlagentwicklung eine Folge von Streamerentladungen zu beobachten. Aus den zahlreichen Stromimpulsen kann eine Leaderbildung von der positiven Stabelektrode aus erfolgen, bevor die Streamer die Gegenelektrode erreicht haben. Der Leader wächst nun mit Streamerentladungen am Kopf weiter vor, wobei die Spannung entsprechend dem Spannungsbedarf weiter ansteigen muss. Bei einer mittleren Vorwachsgeschwindigkeit von 1,5 cm/µs und einem kritischen Spannungsanstieg von ungefähr 2 kV/µs ergibt sich ein Spannungsabfall von 1,4 kV/cm, unter der Annahme, dass der gesamte Spannungszuwachs für den vorwachsenden Leader benötigt wird. Der Spannungszusammenbruch erfolgt langsam, da der die Funkenstrecke überbrückende Leaderkanal noch hochohmig ist und der Strom langsam ansteigt.

Der Vergleich der beiden Mechanismen zeigt deutlich die Unterschiede in der Durchschlagsentwicklung. Beim Durchschlag aus der Streamervorentladung beginnt die Leaderentladung erst, wenn die Streamer die Gegenelektrode erreicht haben. In der Leaderentladung ist der Spannungsabfall klein, die Vorwachsgeschwindigkeit nimmt exponentiell zu, und für den Durchschlag ist kein weiterer Spannungsanstieg erforderlich. Beim Durchschlag nach dem Leadermechanismus ist die Vorwachsgeschwindigkeit des Leaders konstant, wobei die angelegte Spannung weiter ansteigen muss. Damit können auch die verschiedenen Durchschlagspannungen in Abhängigkeit des Funkenstreckenabstandes in Figur 6 erklärt werden. Bei der Blitzstossspannung benötigt die Streamerentladung einen Spannungsabfall von 4...5 kV/cm, damit der Durchschlag erfolgt. Das ergibt eine lineare Abhängigkeit zwischen der Durchschlagspannung und dem Funkenstreckenabstand mit einer Steigung von etwa 5,4 kV/cm. Bei der Schaltstossspannung wird die Funkenstrecke von einem Leader mit einem Spannungsabfall von etwa 1...2 kV/cm und einem Streamer mit einem Spannungsabfall von 4...5 kV/cm überbrückt. Je grösser die Schlagweite wird, um so grösser ist der Anteil des Leaders. Daher weicht die Kennlinie mit zunehmendem Funkenstreckenabstand immer mehr von der linearen Kennlinie der Blitzstossspannung ab.



Figur 8 Darstellung der typischen Einschlagzonen

Zone 1 Zone 3
Zone 2

Ermittlung der Einschlagpunkte

Die Spannungsprüfung dient im wesentlichen zur Ermittlung der Einschlagpunkte am Flugzeug. Da die Elektrodenanordnung Stab-Platte bzw. Spitze-Platte die geringste Durchschlagspannung aufweist, sind insbesondere die Ecken und Kanten eines Flugzeuges als Einschlagpunkte bevorzugt. Ein Flugzeug wird daher in 3 Zonen mit unterschiedlicher Einschlagwahrscheinlichkeit eingeteilt. Die Figur 8 zeigt die verschiedenen Zonen für ein typisches Flugzeug.

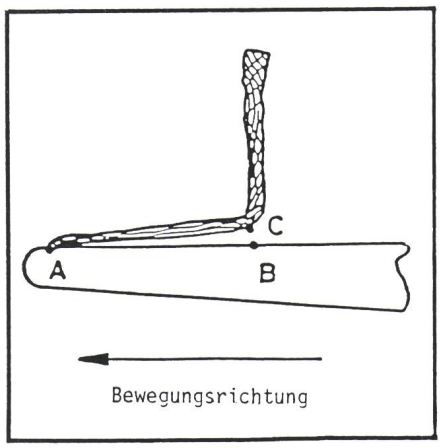
Die Zone 1 stellt das Gebiet mit hoher Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlages dar. Die Zone 2 ist ebenfalls ein Gebiet mit hoher Einschlagwahrscheinlichkeit, wobei der Einschlag in Zone 1 stattgefunden hat und in Zone 2 weitergewandert ist. Diese beiden Gebiet werden im allgemeinen nochmals in Zonen A und B unterteilt. Die Zone A ist dadurch bestimmt, dass eine hohe Wahrscheinlichkeit vorhanden ist, dass der Einschlagpunkt wandert. Die Zone B hat eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass der Einschlagpunkt nicht wandert. Die Zone 3 ist das Gebiet mit einer niedrigen Einschlagwahrscheinlichkeit, wobei dieses Gebiet unter Umständen den hohen Entladestrom führen muss.

Die Unterscheidung in Zone 1 und 2 ist sinnvoll, da das Flugzeug in der Regel sich gegenüber dem Leader bewegt und damit der Einschlagpunkt auf dem Flugzeug wandert (Fig. 9). Ob der Einschlagpunkt auf dem Flugzeug wandert, hängt zusätzlich von der Elektrodengeometrie ab. Der Einschlagpunkt kann stationär bleiben, wenn z.B. eine sehr scharfe Spitze vorhanden ist.

Simulation des Blitzstromes

Die Auswirkungen des Stromes einer Blitzentladung auf ein Flugzeug sind sehr viel komplexer als die Auswirkungen der Spannung. Die Stromauswirkungen werden daher in zwei Bereiche eingeteilt, die direkten und die indirekten Effekte. In Tabelle II sind die beiden Effekte und ihre Auswirkungen mit den dazugehörigen wichtigsten Parametern aufgelistet.

Aus dem in Figur 3 dargestellten Entladungsverlauf und den in Tabelle I angegebenen Werten der Blitzstromparameter werden idealisierte Stromverläufe zur Ermittlung der direkten Effekte festgelegt. In Figur 10 ist der Verlauf gemäss SAE, MIL-STD und RE.AERO [2;7;...;9] dargestellt.



Figur 9 Bewegung des Einschlagpunktes

Der Entladungskanal ist stationär im Raum, so dass durch die Bewegung des Flugzeuges der Einschlagpunkt von A nach B wandert. Falls die Luftstrecke zwischen Punkt C und B bei einer weiteren Entladung durchschlägt, wird B erneut ein Einschlagpunkt sein.

Die Blitzentladung wird dabei in 4 Komponenten unterteilt. Komponente A stellt die erste Entladung nach dem Zusammentreffen der Leader dar. Sie ist gekennzeichnet durch einen Scheitelwert von 200 kA, ein Aktionsintegral von $2 \cdot 10^6 A^2s$ und eine Dauer von weniger als 500 µs. Die anschliessende Komponente B ist ein Übergangsbereich mit einem etwa rechteckförmigen Stromverlauf, gekennzeichnet durch eine Ladung von 10 C und einem mittleren Stromscheitelwert von 2 kA. Die Komponente C stellt den konstanten Strom zwischen den einzelnen Entladungen dar, gekennzeichnet durch eine Ladung von 200 C. Die abschliessende Komponente D stellt eine erneute Entladung dar, die durch einen Stromscheitelwert von 100 kA und ein Aktionsintegral von $0{,}25 \cdot 10^6 A^2s$ gekennzeichnet ist.

Ein etwas anderer Stromverlauf wird von der Nasa angenommen [2]. Der wesentliche Unterschied im Bereich der Komponente A ist die Vorgabe der Stromänderung mit 100 kA/µs. Die Dauer der Komponente A ist genauer definiert, weicht aber nur unwesentlich von der SAE-Definition ab. Die Komponente B ist vergleichbar, die Komponente C allerdings wesentlich kleiner im Hinblick auf die Ladung. Bei Komponente D ist wiederum eine Stromänderung definiert, die 25 kA/µs beträgt, wobei der geforderte Scheitelwert nur 50% der SAE-Definition beträgt.

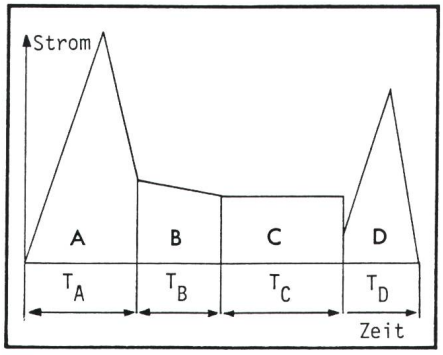
Die Stromänderung ist eine wichtige Kenngrösse für die direkten und indirekten Effekte, da die induzierte Spannung direkt proportional der Induktivität und der Stromänderung ist. Aus Tabelle I geht hervor, dass die negativen Folgeblitze die höchste Stromänderung aufweisen, wobei 5% eine Stromänderung von grösser 120 kA/µs haben. Neuere Messergebnisse aus dem Jahre 1983 [10] mit Wiederholung der Messungen aus den Jahren 1963–1971 [3] haben gezeigt, dass die Stromänderungen höher liegen; mit 5%iger Wahrscheinlichkeit treten nach den neuen Messungen Stromänderungen von mehr als 200 kA/µs (gegenüber den ursprünglichen 120 kA (µs) auf. Die Abweichungen der Messergebnisse sind vermutlich dadurch zu erklären, dass bei den früheren Messungen die Bandbreite der Messgeräte nicht entsprechend gross gewesen ist. Es muss daher beachtet werden, dass die in den beiden idealisierten Beschreibungen des Stromverlaufes angenommenen Stromänderungen nicht ausreichend sein können.

Die indirekten Effekte sind im wesentlichen durch die Stromänderung bestimmt. In Figur 11 sind die idealisierten Stromverläufe dargestellt [9].

Der Entladungskanal ist stationär im Raum, so dass durch die Bewegung des Flugzeuges der Einschlagpunkt von A nach B wandert. Falls die Luftstrecke zwischen Punkt C und B bei einer weiteren Entladung durchschlägt, wird B erneut ein Einschlagpunkt sein. Damit ist die Verweilzeit der Entladung an einem Punkt von der Elektrodengeometrie, der Oberflächenbeschaffenheit, der Spannungsform und der Geschwindigkeit des

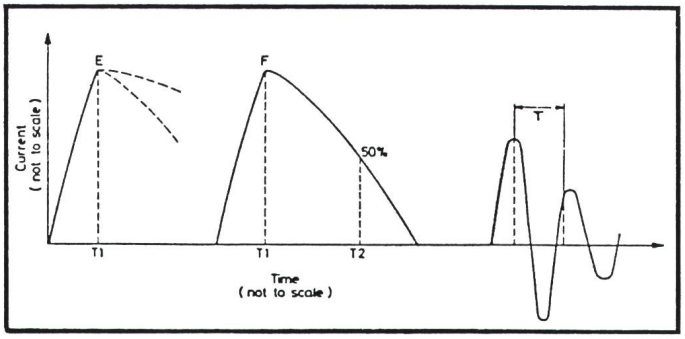
Tabelle II Stromeffekte mit ihren Auswirkungen und den wichtigsten Parametern aus [6]

Effekt	Wichtige Parameter
Direkte Effekte	
Durchschlag der Metallhaut	
Erosion	Stromscheitelwert
Lokale Erhitzung	
Mechanische Beschädigung	Ladung
Magnetische Kräfte	
Beschädigung nichtmetallischer Bauteile	Aktionsintegral
Treibstoffzündung	Stromänderung
Zerstörung von Ableitern	
Funken	
Indirekte Effekte	
Elektrisches Feld	Anzahl Entladungen
Magnetisches Feld	
Induzierte Spannung	Stromscheitelwert
Überschläge	
Funken	Stromänderung
Treibstoffzündung	



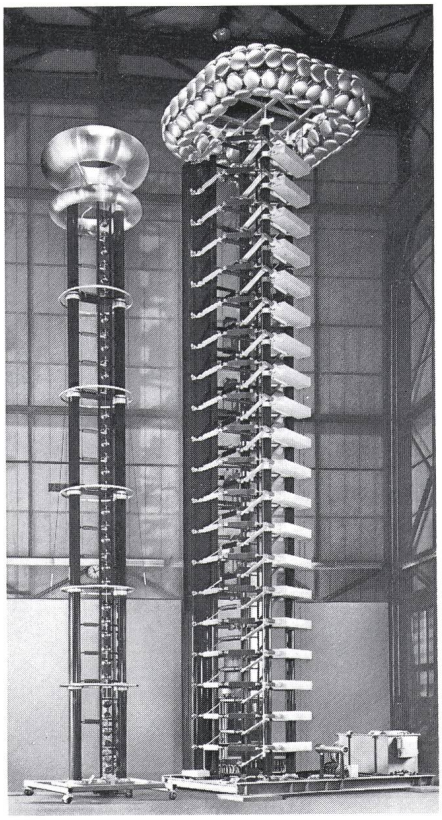
Figur 10 Idealisierter Stromverlauf nach SAE

Zeitabschnitte: $T_A < 500$ µs
$T_B < 5$ µs
$T_C < 1$ s
$T_D < 500$ µs



Figur 11 Idealisierter Stromverlauf für indirekte Effekte

Die beiden Stromimpulse E und F haben einen doppelexponentiellen Verlauf. Der Scheitelwert für Stromimpuls E beträgt 50 kA bei einer Stromänderung von 25 kA/µs während 0,5 µs. Der Stromimpuls F ist gekennzeichnet durch eine Frontzeit von 2 µs und eine Rückenhalbwertzeit von 50 µs bei einem Scheitelwert von 250 A. Der Stromimpuls G hat einen oszillierenden Verlauf und wird noch in G1 und G2 unterschieden, wobei G1 einen Scheitelwert von 20 kA bei einer Frequenz von 2 kHz und G2 einen Scheitelwert von 10 kA bei einer Frequenz von 100 kHz aufweist.



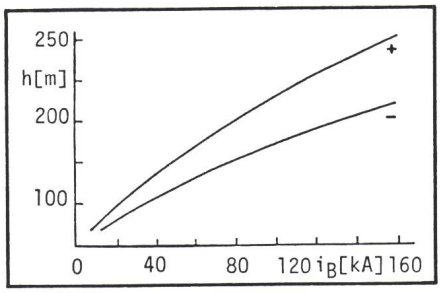
Figur 12 Stossspannungsgenerator 4000 kV, 300 kJ mit Abschneidefunkenstrecke für 3600 kV

Flugzeuges abhängig. In der Regel erfolgen die Entladungen an neuen Punkten, da die Festigkeit zwischen Punkt C und B gross ist und die nachfolgenden Entladungen dem bereits vorhandenen leitfähigen Kanal folgen. Dabei kann jedoch eine Spannung erzeugt werden, die höher ist als die durch eine Stromänderung induzierte und die Durchschläge von nichtmetallischen Teilen oder Isolierbeschichtungen verursachen kann.

Generatoren zur Spannungsprüfung

Für diese Prüfungen eignet sich ein mehrstufiger Standard-Stossspannungsgenerator, der Blitz- und Schaltstossspannungsimpulse (Fig. 4) erzeugen kann (Figur 12). Die Spannung wird durch die bekannte Marxsche Schaltung erzeugt, bei der einzelne Generatorstufen parallel aufgeladen und mit Hilfe von Funkenstrecken anschliessend in Reihe geschaltet werden. Die erforderliche Ausgangsspannung beträgt für den Blitzstoss etwa 3600 kV, für den Schaltstoss etwa 3000 kV. Damit kann eine Stab-Platte-Funkenstrecke von etwa 20 m mit Schaltstossspannung überschlagen werden. Diese Spannungsform ist besonders wichtig, da die Entladung nach dem Leadermechanismus erfolgt, der die beste Nachbildung der echten Blitzentladung darstellt (Fig. 2).

Die letzte Phase des Leadervorwachsens kann jedoch auch mit einem solchen Generator nicht nachgebildet werden. In Figur 13 ist der Verlauf des Entladestromes in Abhängigkeit von der Höhe in der letzten Phase des Vorwachsens dargestellt. Bei einem Scheitelwert von 200 kA ergibt sich für positive Polarität eine Höhe von mehr als 250 m, was im Labor nicht mehr simuliert werden kann. Eine andere Möglichkeit besteht jedoch in Form von Modellmessungen, für die der dargestellte Generator ebenfalls eingesetzt werden kann. Die Versuchsanordnung bestimmt man dabei wie folgt:
Der Abstand zwischen Erde und Hochspannungselektrode betrage 6 m, was einer Durchschlagspannung von etwa 1400 kV bei positiver Polarität und etwa 3000 kV bei negativer Polarität entspricht. Der Massstab kann mit Hilfe von Figur 13 abgeschätzt werden. Bei einem Stromscheitelwert von 100 kA ergibt sich etwa eine Höhe von 150 m für die letzte Phase des Vorwachsens der Leader. Bei einem Funkenstreckenabstand von 6 m ergibt das



Figur 13 Letzte Vorwachsstrecke in Abhängigkeit des Stromes

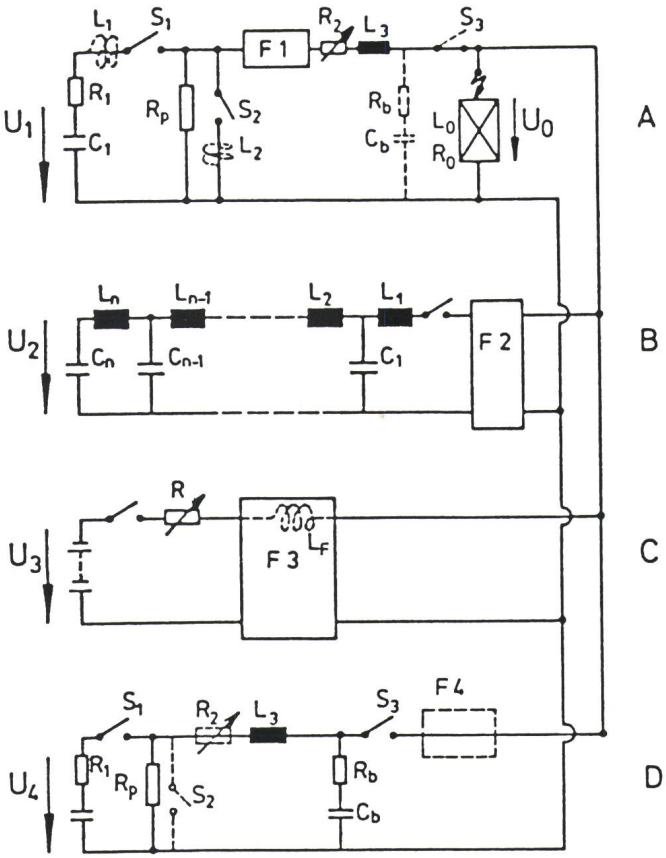
Bei einem Scheitelwert von 200 kA ergibt sich eine Höhe von mehr als 250 m für positive Polarität, was im Labor nicht mehr simuliert werden kann.

einen Modellmassstab von 1:25, so dass ein 25 m langes Flugzeug durch ein Modell von 1 m nachzubilden ist.

Generatoren zur Stromprüfung

Die bereits bei der Beschreibung der Stromauswirkungen vorhandene Aufteilung in direkte und indirekte Effekte wird auch bei der Darstellung der für die Stromprüfung notwendigen Prüfanlagen beibehalten, da die erforderlichen Anlagen ebenfalls sehr verschieden sind.

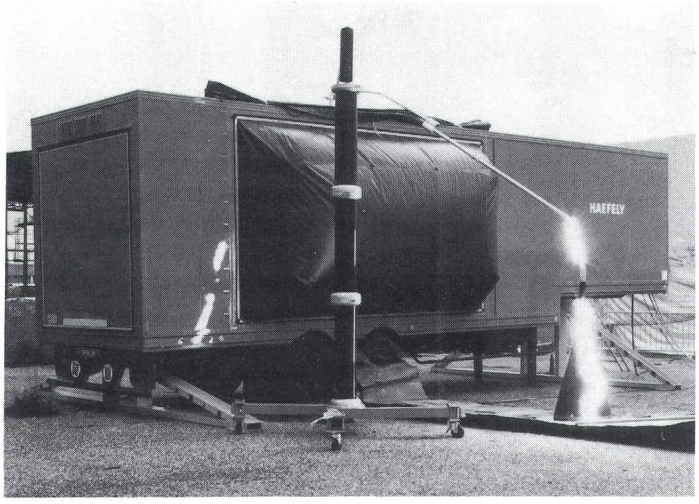
Figur 14 Ersatzschaltbild für 4-Komponenten-Prüfung



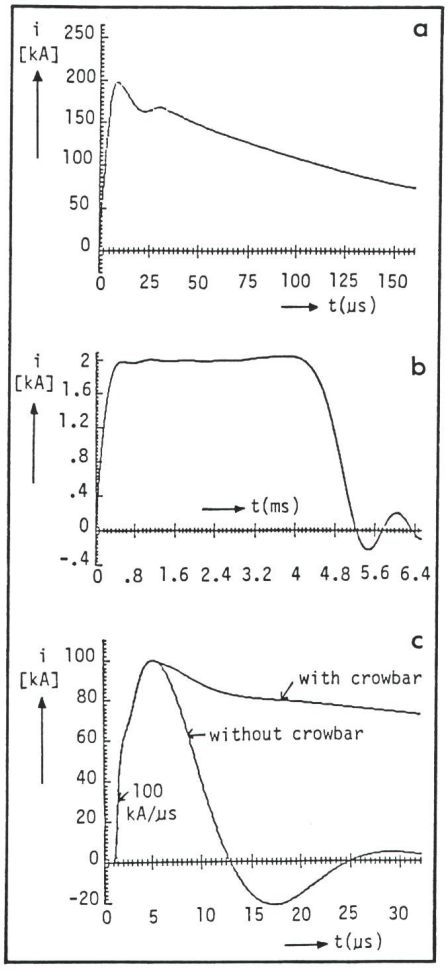
Direkte Effekte

Die Nachbildung der in Figur 10 dargestellten 4 Komponenten zur Prüfung der direkten Effekte ist im Labor möglich. Die Figur 14 zeigt das Ersatzschaltbild einer solchen Prüfanlage [11].

Die Komponente A wird mit dem bereits in Abschnitt «Spannungsprüfungen beschriebenen Standard-Stossspannungsgenerator erzeugt, wobei in Abhängigkeit der Energie ein zweiter Generator erforderlich sein kann. Die Ladung und das Aktionsintegral können durch einen sogenannten Crowbar-Schalter wesentlich erhöht werden, indem die Entladung der in den Induktivitäten L_3 und L_0 gespeicherten Energie über den Prüfling mit einer grossen Zeitkonstante erfolgt. Der Crow-bar entkoppelt gleichzeitig die Kondensatorbank C_1 vom Entladekreis. Mit dem Widerstand R_2 können die Ladung und das Aktionsintegral genau den Prüfbedingungen angepasst werden.



Figur 16 Mobile Einrichtung zur Prüfung von indirekten Effekten



Figur 15 Stromverläufe der verschiedenen Komponenten

a Komponente A
b Komponente B
c Komponente D

Die Komponente C (Dauerstrom) ist nicht dargestellt.

Die Figur 15 a zeigt den Verlauf des Stromes der Komponente A. Die Komponente B wird mit einem Rechteckstromgenerator erzeugt, der im wesentlichen aus einem Kette von Induktivitäten und Kapazitäten besteht. Diese Art von Stromgenerator bietet sich insbesondere deshalb an, weil in der Ableiterprüfung der Rechteckstrom eine Standardprüfung darstellt.

Der berechnete und gemessene Stromverlauf der Komponente B ist in Fig. 15 b dargestellt. Die Komponente C kann mit einer einfachen Batterie erzeugt werden. Die Komponente D benötigt etwa den gleichen Generator wie die Komponente A. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bereits in Tabelle I die Folgentladungen, die durch die Komponente D dargestellt werden, eine sehr grosse Stromänderung aufweisen und dass die neuesten Messungen, wie bereits ausgeführt, noch höhere Werte zeigen. Ausserdem wird in der neuesten SAE-Empfehlung eine Stromänderung von 100 kA/µs für die Komponenten D und A gefordert [12]. Um diese Steilheiten zu erzeugen, ist eine sehr hohe Ladespannung erforderlich, da die Stromänderung durch das Verhältnis Ladespannung zu Induktivität des Kreises bestimmt wird. Eine kostengünstigere Lösung kann durch einen sogenannten Peaking-Kreis erreicht werden. Dabei wird die erforderliche Stromänderung zu Beginn des Stromimpulses vom Peaking-Kreis und der Hauptstrom vom eigentlichen Entladekreis erzeugt. Der Verlauf der Komponente D ist in Figur 15 c dargestellt. Die Stromänderung zu Beginn des Impulses beträgt 100 kA/µs, der Scheitelwert 100 kA. Das erforderliche Aktionsintegral kann wiederum mit einem Crow-bar erzeugt werden.

Da Komponente D nicht unbedingt direkt den Komponenten A, B und C folgen muss, kann z. B. der Generator von Komponente A auch für D verwendet werden, so dass die Prüfanlage wesentlich kostengünstiger wird.

Selbstverständlich ist bei einer Kombination von Generatoren die gegenseitige Beeinflussung zu berücksichtigen, so dass für jede Komponente entsprechende Schutz- und Trennelemente vorzusehen sind. In Figur 14 sind diese Elemente mit F_1 bis F_4 bezeichnet. Der Aufbau hängt jeweils von der Komponente ab, die vom dazugehörigen Generator erzeugt wird, und von den Komponenten, gegenüber denen der entsprechende Generator zu schützen ist. Für Prüflinge mit kleiner Induktivität, z.B. Materialproben, genügt ein Generator mit kleinerer Spannung und Energie zur Erzeugung der Komponente D. Mit einem Generator z. B., der eine Ladespannung von 50 kV und eine Energie von 50 kJ besitzt, lässt sich ein Stromscheitelwert von 140 kA und eine Stromänderung (zu Beginn des Impulses von 100 kA/µs während 1 µs erreichen.

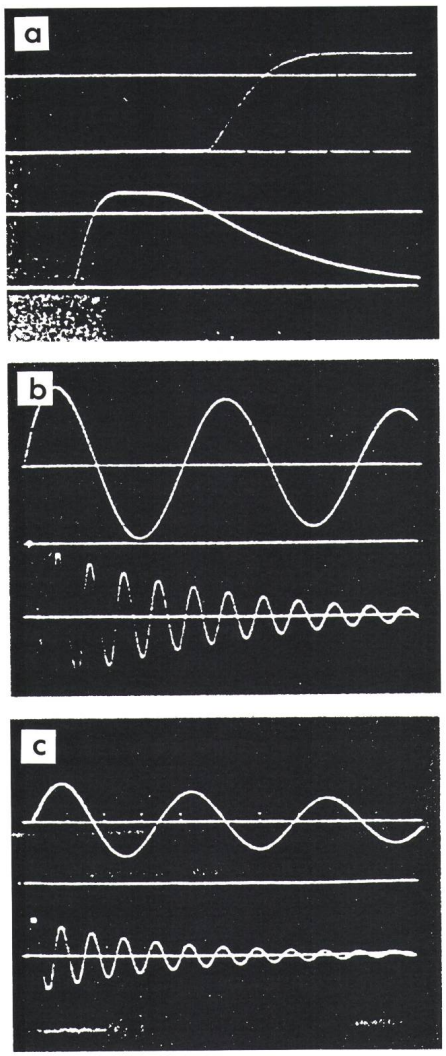
Indirekte Effekte

Die Prüfung der indirekten Effekte kann bei entsprechender Auslegung der Prüfeinrichtung mit einem Generator erfolgen. In Figur 16 ist ein mobiler Generator dargestellt, der sehr einfach zum Prüfobjekt gebracht werden kann. Der Generator besteht aus zwei dreistufigen Stossstromgeneratoren

mit 200 kV Ladespannung und 30 kJ Energie pro Stufe. Diese Stufenkombination macht es möglich, mit sehr geringen Modifikationen die Impulsformen E bis G mit einer Prüfanlage zu erzeugen. In Figur 17 a ist der gemessene Verlauf des Stromimpulses E dargestellt. Der Scheitelwert beträgt 52 kA, die Stromänderung während 0,5 µs 35 kA/µs. Die Ankopplung an das Prüfobjekt erfolgt dabei über eine Stab-Platte-Funkenstrecke mit 1 m Funkenstreckenabstand.

Die Erzeugung der Komponente F stellt keine Probleme dar. Mit der in Figur 16 dargestellten Anlage kann ein Scheitelwert zwischen 100 A und 1,5 kA erzeugt werden. Durch die Möglichkeit der Parallel- und Reihenschaltung der einzelnen Stufen kann auch die Impulsform G mit den Varianten G_1 und G_2 erzeugt werden. In den Figuren 17 b und 17 c sind die beiden gemessenen Stromverläufe dargestellt.

Für die Impulsform G_1 beträgt der Scheitelwert 20,5 kA und die Frequenz 2,5 kHz, für die Impulsform G_2 10,2 kA und 122 kHz. Bei der Impulsform G_1 ist noch zu beachten, dass der Kondensator eine sehr starke Umladung erfährt, was eine unmittelbare Auswirkung auf die Lebensdauer des Kondensators hat. Die Anzahl der Versuche mit dieser Impulsform ist daher so gering wie möglich zu halten.



Figur 17 Gemessene Stromverläufe der Komponenten E und G

a Stromverlauf von E
b Stromverlauf von G_1
c Stromverlauf von G_2

Zusammenfassung

Die Simulation einer Blitzentladung im Labor zur Prüfung eines Luft- oder Raumfahrzeuges bedingt die Kenntnis der physikalischen Vorgänge einer Blitzentladung. Anhand zahlreicher Messungen von Blitzentladungen können typische Modelle von Blitzentladungsverläufen mit ihren charakteristischen Parametern entwickelt werden. Die Analogie bezüglich des Durchschlagmechanismus zwischen einer Blitzentladung und dem Durchschlag einer Stab-Platte-Funkenstrekke bei Schaltstossspannungsbeanspruchung erlaubt die Ermittlung der Einschlagpunkte auf einem Flugzeug durch eine Stossspannungsprüfung. Der für eine Blitzentladung typische Stromverlauf kann mit einem geeigneten Prüfsystem nachgebildet werden, wobei die einzelnen Komponenten mit je einem Prüfgenerator erzeugt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen kann es sinnvoll sein, nicht alle Komponenten in einem Prüfzyklus nachzubilden, so dass einzelne Generatoren zur Erzeugung verschiedener Komponenten eingesetzt werden können.

Literatur

[1] *E. Gockenbach* und *M. Lutz:* Systeme zur NEMP-Simulation. SEV-Informationstagung über den nuklearen elektromagnetischen Impuls (NEMP) «NEMP-Simulation - NEMP-Schutz». Bern, 7. Mai 1985. Zürich, SEV, 1985; S. 65...87.

[2] *F.A. Fischer* and *J.A. Plumer:* Lightning protection of aircraft. NASA Reference Publication 1008. Washington, NASA scientific and technical information office.

[3] *K. Berger, R.B. Anderson* et *H. Kröninger:* Paramètres des coups de foudre. Electra - (1975) 41, p. 23...37.

[4] Techniques des essais à haute tension. Part 1/4. Publications de la CEI 60-1/60-2/60-3/60-4, 1973/76.

[5] *K. Feser:* Probleme bei der Erzeugung hoher Schaltstossspannungen im Prüffeld. Bull. SEV/VSE 65 (1974) 7, S. 496...508.

[6] *J. Phillpott:* Recommended practice for lightning simulation and testing techniques for aircraft. Culham Laboratory Report 163. Abingdon/GB, Culham Laboratory, 1977.

[7] Lightning test waveforms and techniques for aerospace vehicles and hardware. Report of SAE Committee AE4L. Warrendale/Pa., Society of Automotive Engineers, June 20, 1978.

[8] Lightning qualification test techniques for aerospace vehicles and hardware. Revision A of the 20 July 1983. MIL-Standard 1757A, 1983.

[9] Protection des aéronefs contre les effets de l'électricité atmosphérique. Essais de validation. RE.AERO 702 51.

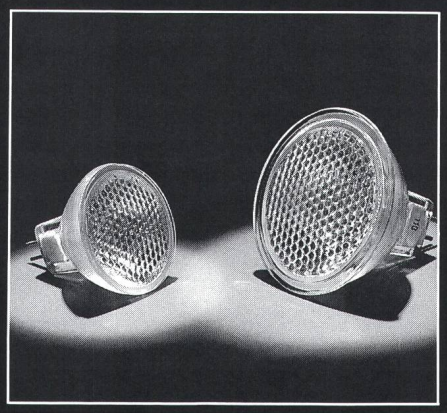
[10] *M.A. Uman:* Application of advances in lightning research to lightning protection. International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Orlando/Florida, June 26...28, 1984; technical paper 1-1.

[11] *M. Modrusan* and *P. Walther:* Aircraft testing with simulated lightning currents of high amplitudes and high rate of rise. 10th International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE), Paris, 1985; paper 3A-5.

[12] Protection of aircraft electrical/electronic systems against the indirect effects of lightning. Report of SAE Committee AE4L. Warrendale/Pa, Society of Automotive Engineers, February 1987.

Vom Ei... zum Huhn... und alles was dazwischen liegt

Jetzt erscheint alles im besten Licht: Im Licht von Tru-Aim Professional, der neuen Halogenlampe für höchste Ansprüche. Tru-Aim Professional bietet die grösste Auswahl an Niederspannungs-Tungsten-Halogenlampen mit dem einzigartigen Frontglas für optimale Lichteffekte und gleichbleibende Brillanz während der gesamten, langen Lebensdauer. Sicheres und problemloses Handling geben Ihnen grösste Freiheit beim Gestalten kreativer Lichteffekte. 22 dichroische Niedervolt-Halogenlampen mit 35 und 50 mm ø und verschiedenen Leistungen stehen zu



Ihrer Verfügung. Tru-Aim Professional – Halogenlicht in Perfektion.

TRU-AIM PROFESSIONAL

Setzt alles ins richtige Licht

SYLVANIA GTE

GTE Sylvania A.G. 4, ch. des Léchères, CH-1217 Meyrin,
Tel. 022/820072, Telex 419059, Telefax 022/820742