

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Zeitschrift:</b> | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses |
| <b>Herausgeber:</b> | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen  |
| <b>Band:</b>        | 68 (1977)   |
| <b>Heft:</b>        | 12  |
| <b>Artikel:</b>     | Neue Erkenntnisse über den Lichtbogenschutz   |
| <b>Autor:</b>       | Kläy, H.  |
| <b>DOI:</b>         | <a href="https://doi.org/10.5169/seals-915039">https://doi.org/10.5169/seals-915039</a>   |

### 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:** 13.01.2026

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

# Neue Erkenntnisse über den Lichtbogenschutz

Von H. Kläy

621.316.932

Funkenstrecken mit stark inhomogenem elektrischem Feld weisen bei sehr steilen Stoßspannungen gegenüber Anordnungen mit gleichmässiger Feldverteilung einen grossen Überschlagsverzug auf und können deshalb solche Objekte nicht schützen. Schutzfunkenstrecken in Anlagen sollen ferner so gebaut sein, dass sie einen dem Zündüberschlag folgenden Erdchlusslichtbogen in Räume ablenken, wo die grosse Wärmeentwicklung möglichst wenig Schaden anrichten kann.

Sous une tension de choc très raide, le développement d'un contournement dans l'air demande plus de temps pour un éclateur à tiges que pour une installation à champ électrique plus homogène. Pour cette raison, de telles installations ne peuvent pas protéger des bobines de transformateurs. Si, dans des sous-stations, des éclateurs à tiges sont inévitables, on doit prendre soin que l'arc de court-circuit qui suit le contournement soit dirigé loin des objets qui pourraient être endommagés par la chaleur de l'arc.

## 1. Einleitung

Mit der zunehmenden Vermaschung der Hochspannungsnetze vergrössert sich auch die Stromstärke in einem Erdchlusslichtbogen. Heute schon werden Schutzarmaturen für eine Stromstärke von 50 kA verlangt. Obschon Erdschlüsse in der Regel innerhalb weniger Zehntelsekunden abgeschaltet werden, kann die dabei frei werdende Wärme erheblichen Schaden an nahen Apparaten anrichten, wenn der Lichtbogen nicht durch geeignete Schutzarmaturen weggetrieben wird.

Ein Erdchlusslichtbogen kann bei Betriebsspannung über einen verschmutzten Isolator oder durch Blitzschlag gezündet werden. Vielfach werden zur Begrenzung von Überspannungen auf der Freileitung oder in Anlagen Sicherheitsfunkensystemen mit gegenüber den Isolatoren verkürzten Schlagweiten eingebaut. Es soll im folgenden gezeigt werden, dass insbesondere Stabfunkensysteme bei sehr steilen Überspannungen nur verzögert ansprechen und dadurch deren Schutzwirkung illusorisch werden kann.

## 2. Entladungsaufbau

Man nimmt an, dass in  $10 \text{ cm}^3$  Luft durch einfallende Höhenstrahlen pro  $\mu\text{s}$  im Mittel eine Stossionisation stattfindet. Die entgegengesetzt geladenen Ionen vereinigen sich jedoch in kurzer Zeit wieder, falls sie nicht durch ein elektrisches Feld getrennt werden. Bei genügend hoher Feldstärke werden diese Ionen soweit beschleunigt, dass sie durch Stoss andere Luftmoleküle ionisieren können und damit eine Funkenentladung einleiten. Das bedingt aber, dass eine genügende Zahl von Stossionisationen in der Nähe der unter-

Spannung stehenden Elektrode stattfinden und dort eine genügend hohe Feldstärke zum Aufbau einer Ionenlawine vorhanden ist.

Die Wahrscheinlichkeit, dass bei Erreichen der Zündfeldstärke im feldkritischen Raum genügend Ionen durch Aufprall von Höhenstrahlen vorhanden sind, wächst mit dem Volumen dieses Raumes. Bei Erreichen der Minimalspannung ist sie also an einer grossflächigen Elektrode grösser als an einer Stabfunkensystem. Die Spannung an der Stabfunkensystem muss über diese minimale Zündspannung erhöht werden, bis die Wahrscheinlichkeit genügender Stossionisationen innerhalb einer Zeit unter  $1 \mu\text{s}$  gross genug wird. Dies bedeutet, dass es längere Zeit dauert, bis an der Elektrode mit kleinem feldkritischen Raum ein Überschlag aufgebaut ist (Zündverzug).

Diese Erscheinung wird mit der Überschlagscharakteristik für Stoss nach Fig. 1 dargestellt. Obschon nach der Zeit  $t_1$  die minimale Zündspannung  $\mu_1$  der Stabfunkensystem erreicht ist, ist der feldkritische Raum und damit die Wahrscheinlichkeit genügender Stossionisation noch zu klein. Erst nach Anstieg der Spannung auf  $\mu_2$  genügt das Ionisationsvolumen zur Zündung eines Überschlages. Bei der Kugelelektrode, deren minimale Zündspannung  $\mu_3$  höher sein soll, wird in  $P_4$  das kritische Ionisationsvolumen erreicht und der Überschlag eingeleitet, bevor die Stabfunkensystem zündet.

## 3. Entladungen an Schutzfunkensystemen

Diese bei sehr kurzen Zeiten ( $<1 \mu\text{s}$ ) gültigen Zündbedingungen bestimmen die Wirkungsweise von Schutzfunkensystemen bei direktem Blitzschlag [1<sup>1</sup>]. Insbesondere sind Stabanordnungen ungeeignet, auch wenn sie bei normalen Prüfspannungen richtig ansprechen.

Wird an einer unter Betriebsspannung stehenden Funkensystem durch Stoss ein Überschlag eingeleitet, so folgt diesem ein Erdchlusslichtbogen. Der erste Luftpurchschlag erzeugt einen ionisierten Luftschauch, durch welchen die Betriebsspannung einen stromstarken Lichtbogen treibt. Dieser erhitzt den Entladungsweg weiter auf einige  $1000^\circ$  und erzeugt ein gut leitendes Plasma. Mit der Stromstärke wächst die Ausdehnung dieses Plasmashlauchs.

Fig. 2 zeigt einen Überschlag einer berechneten Isolatorkette. Die erste Zündung längs der Isolatoren ionisiert diesen Entladungsweg. Der leitende Pfad wird durch einen Seitenwind abgetrieben, und bei jedem Spannungsmaximum des

<sup>1</sup>) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

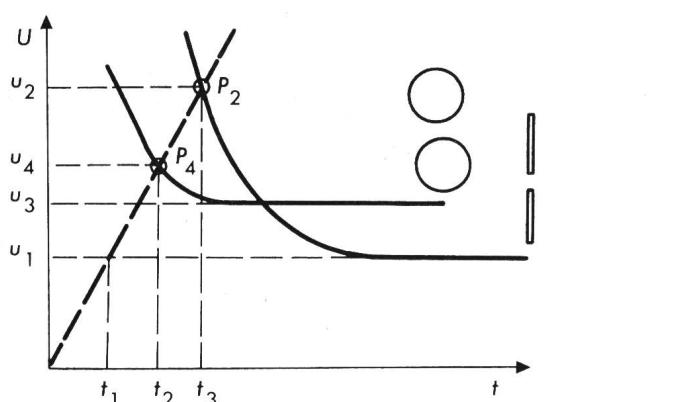


Fig. 1 Überschlagscharakteristik bei Stoss einer Stab- und einer Kugelfunkensystem

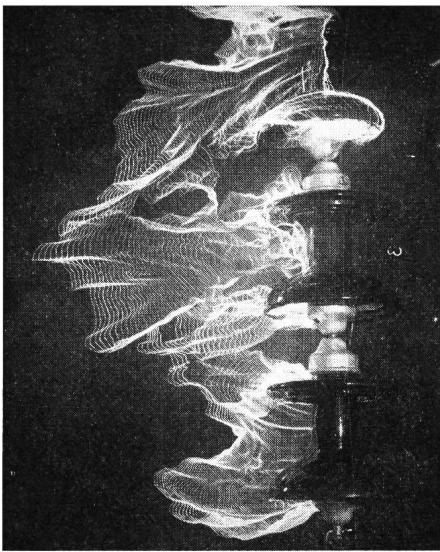


Fig. 2 Überschläge einer beregneten Isolatorenkette bei 300 kV

Wechselstromes findet eine Neuzündung durch den abgewanderten Plasmaschlauch statt. Dieser folgt den Luftwirbelungen hinter den Isolatoren. Die Stromstärke von etwa 1 A bildet einen dünnen Plasmaschlauch. Mit grösseren Strömen der Erdschlusslichtbögen ist auch der ionisierte Raum gross, und der Lichtbogen kann durch dieses leitende Plasma gleichzeitig auf mehreren Wegen fliessen (Fig. 3).

#### 4. Verhalten des Lichtbogens

Auf einen Lichtbogen wirken wie auf einen stromdurchflossenen Leiter die elektromagnetischen Kräfte:

$\vec{F} = c (\vec{I} \times \vec{B})$ , worin  $\vec{I}$  die Stromstärke im betrachteten Lichtbogenelement und  $\vec{B}$  die magnetische Induktion an dieser Stelle ist.  $\vec{B}$  ist die Resultierende der Beiträge aller stromdurchflossenen Leiter und nimmt mit deren Abstand ab. Daraus haben hauptsächlich die dem Lichtbogen nächsten Strompfade grosse Wirkung insbesondere auf den Lichtbogenstiel.

Im heißen Lichtbogenplasma sind genügend Ionen vorhanden. Am Übergang des Lichtbogens auf die kalte Elektrode (Lichtbogenfuss) müssen neue Ladungsträger erzeugt werden. Durch Aufprall stark beschleunigter Ionen auf das Metall wird dieses örtlich erhitzt und emittiert Elektronen. Zur Ionenbeschleunigung wird im Lichtbogenstiel ein grosser Spannungsabfall benötigt, und die Wärmestrahlung dieses Teiles ist entsprechend stark. Auf den Lichtbogenstiel wirkt die elektromagnetische Kraft der benachbarten Leiterelemente und treibt diesen fort. Der emittierende Ansatzpunkt auf dem Leiter wird mit dem Lichtbogenstiel fortgetrieben und muss immer wieder neu aufgebaut werden, bis er am offenen Ende des Leiters angelangt ist (Fig. 4).

Zur Stabilisierung des Lichtbogenfusses wird vorteilhaft eine Graphitelektrode auf dem Elektrodenende angebracht. Wegen der schlechten Wärmeableitung dieses Materials kann die emittierende Stelle auch über den Nulldurchgang des Wechselstromes auf genügend hoher Emissionstemperatur bleiben. Daher wird weniger Ionisationsenergie der aufprallenden Ionen benötigt und damit die Wärmestrahlung des Lichtbogenstieles kleiner: Der Lichtbogenfusspunkt bleibt stabilisiert.

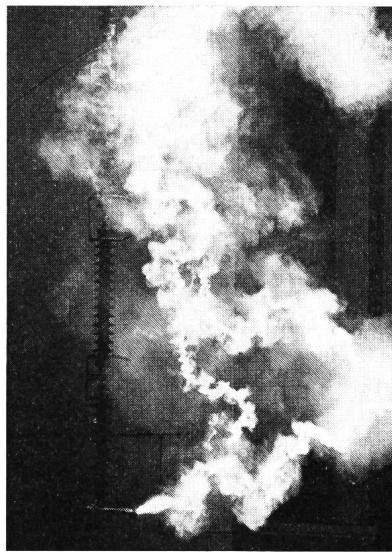


Fig. 3 Erdchlusslichtbogen mit 15 kA

#### 5. Anwendung auf Schutzfunkenstrecken in Hochspannungsanlagen

Aus dem Vergleich der Stoßüberschlagscharakteristiken verschiedener Funkenstrecken (Fig. 1) ergibt sich, dass für Überspannungen mit sehr steilem Frontanstieg (direkter Blitzschlag) kleinflächige Elektroden erst mit Verzögerungszeiten von einigen  $\mu$ s ansprechen und daher grossflächige Anordnungen wie die innere Isolation von Durchführungen und Transformatorwicklungen nicht schützen können. Um einen Durchschlag derselben zu verhindern, müssen verzögerungssarme Ableiter eingebaut werden. Sollen an solchen Objekten zum Schutze gegen einen Lichtbogen bei Zündung durch Kriechstrom über die verschmutzte Isolatoroberfläche trotzdem Schutzarmaturen angeordnet werden, so müssen die entsprechenden Lichtbogenhörner vom zu schützenden Isolator wegweisen, da nach Zündung in der unter Spannung stehenden Anlage ein stromstarker Lichtbogen

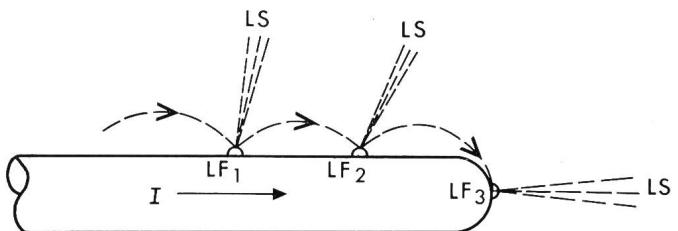


Fig. 4 Wirkung der elektromagnetischen Kräfte auf den Lichtbogenstiel  
Der Lichtbogenstiel (LS) wird in Stromrichtung weggetrieben und muss in jeder Halbwelle einen neuen Emissionspunkt (LF) erzeugen

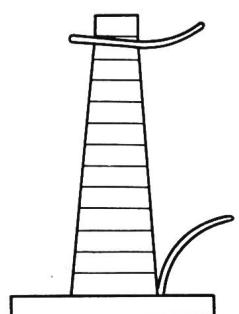


Fig. 5  
Lichtbogenhörner an Stützisolator oder Durchführung

brennen würde (Fig. 5). Es ist ferner nicht notwendig zu verlangen, dass diese Lichtbogenschutzhörner für positive und negative Stoßspannungen gleicher Höhe ansprechen sollen.

Gelegentlich werden auch auf Freileitungen vor dem Übergang in die Schaltstation an Isolatorketten Stabfunkentrecken mit verkürzter Schlagweite eingebaut. Dadurch soll verhindert werden, dass Überspannungen von der Freileitung in die Schaltstation einlaufen. Auch für diese Funkentrecken gelten die gemachten Überlegungen: Bei sehr steilen Blitzüberspannungen sprechen sie zu spät an, und wenn sie bei flachen Überspannungen doch zünden, so folgt diesem Überschlag ein stromstarker Erdschlusslichtbogen, welcher durch entsprechend geformte Lichtbogenhörner von den Isolatoren weggeleitet werden muss. Auch hier kann man sich fragen, ob solche «Sicherheitsfunkentrecken» nicht besser wegzulassen wären.

Zusammenfassend kann geschlossen werden: Der Überschlag einer Funkentrecke in Luft benötigt zur Ausbildung eine gewisse Zeit innerhalb  $\mu$ s. Dieser Zündverzug ist grösser bei Elektroden mit stark inhomogener Feldverteilung. Deshalb sollten für Schutzfunkentrecken möglichst keine Stabelektronen verwendet werden. Ferner ist dafür zu sorgen, wenn solche Sicherheitsfunkentrecken in Anlagen eingebaut werden müssen, dass der dem Überschlag folgende energiestarke Erdschlusslichtbogen durch entsprechende Ausbildung der Funkenthörner keinen Schaden anrichten kann.

#### Literatur

[1] H. Prinz: Steilstromblitze und Anlagenschutz. 9. Internationale Blitzschutzkonferenz, Lugano, 1967, Referat Nr. 21.

#### Adresse des Autors

Dr. H. Kläy, dipl. El. Ing., 1171 Bougy.

## Zénobe Théophile Gramme 1826–1901

Gramme, Buchhalter einer belgischen Zeche, hatte 12 Kinder. Das siebente, Zénobe Théophile, wurde am 4. April 1826 in Jehay-Bodignée in der Nähe von Lüttich geboren. Er war ein schlechter Schüler, aber handwerklich geschickt. Schon als 12jähriger schnitzte er hübsche Figuren, und es war sein Wunsch, Schreiner zu werden.

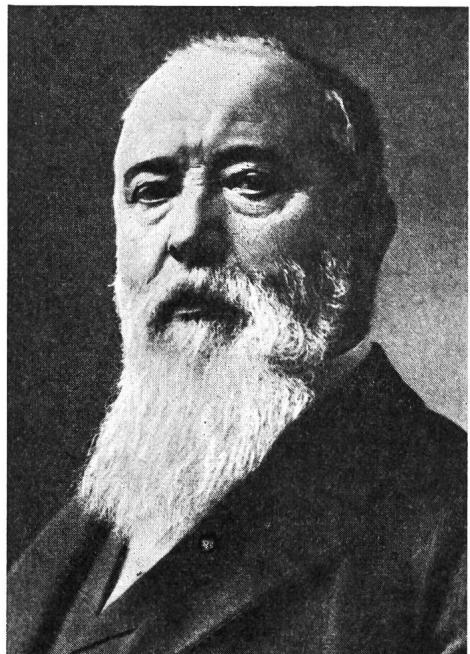
1860 trat er als Modellschreiner bei der Société Alliance ein, die kleine Dynamomaschinen System Nollet baute. Gramme bewunderte diese Dinger, verstand sie aber nicht. Er kaufte sich ein Physikbuch und arbeitete sich mühsam in die Elektrotechnik ein. Später trifft man ihn als Werkmeister in der Fabrik von Froment. 1865 besuchte Prof. Pacinotti dieses Unternehmen und zeigte Froment das Prinzip des von ihm erfundenen Ringankers. Dieser hatte jedoch kein Interesse an der neuen Maschine. Umstritten ist, ob Gramme bei dieser Vorführung anwesend war. Gramme hatte inzwischen einige technische Kenntnisse erworben. Er gab den Schreinerberuf auf, widmete sich technischen Studien und führte das Leben eines armen Erfinders.

1869 gelang es Gramme, die erste brauchbare Ringankermaschine mit einem Kollektor zu bauen und dafür ein Patent zu erhalten. Mit Unterstützung des Comte d'Ivernois gründete er im Jahr darauf die «Société des machines magnéto-électriques Gramme».

1872 ersetzte er die permanenten Magnete durch Elektromagnete und baute auf Bestellung meist Dynamos für galvanische Betriebe. Es soll ihm zu jener Zeit auch gelungen sein, eine elektrische Leistung von 50 PS über eine Entfernung von 114 km mit einem Wirkungsgrad von 52 % zu übertragen.

An der Pariser Weltausstellung von 1878 erhielt Gramme ausser einem 1. Preis eine Belohnung der französischen Regierung im Betrage von 20000 francs. Auf Anregung von Jablockhoff konstruierte er für die Pariser Elektrizitätsausstellung von 1881 einen Wechselstromdynamo für die Strassenbeleuchtung mit Jablockhoff-Kerzen. Dies trug ihm ein Ehrendiplom sowie das Kreuz der Ehrenlegion ein. Gramme hatte es nun zu einem gewissen Wohlstand gebracht und konnte sich im Bois-Colombes bei Paris eine Villa bauen. 1888 sprach ihm die Académie des Sciences den 1852 von Louis Napoléon gestifteten Volta-Preis zu. Nachdem er 1894 Lizizenzen an eine englische Firma hatte verkaufen können, zog er sich vom Geschäft zurück.

Anlässlich der Brüsseler Ausstellung von 1897 wurde ihm der belgische Leopoldsorden verliehen, und am 27. März 1898 fand in der belgischen Hauptstadt eine grosse Gramme-Feier statt. Gramme starb am 20. Januar 1901 in Paris. Seine grosse Leistung besteht darin, den von Paciotti erfundenen Ringanker-Dynamo zu einer brauchbaren Maschine gemacht zu haben. In Lüttich wurde 1905 anlässlich einer internationalen Ausstellung ein Denkmal für Gramme enthüllt.



Deutsches Museum München