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: 87 (1996)

Heft: 23

Artikel: Spannungsfestigkeit verschmutzter Isolatoren : der Gleitlichtbogen : Schlüsselmechanismus beim Fremdschichtüberschlag an Hochspannungsisolatoren

Autor: Bräunlich, Reinhold

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902392

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: 10.12.2025

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

Eines der wichtigsten Kriterien beim Design von Hochspannungs-Freiluftisolatoren ist das Verhalten ihrer Oberfläche bei Verschmutzung im Betrieb. Der folgende Beitrag berichtet über die Ursache einer drastischen Reduktion der Spannungsfestigkeit von Isolatoroberflächen. Das Versagen eines derart verschmutzten Isolators wird durch sogenannte Gleitlichtbögen eingeleitet, welche zum Überschlag und zum Erdschluss im Hochspannungsnetz führen können. Der Artikel zeigt aufgrund einer physikalischen Betrachtungsweise des Gleitlichtbogenmechanismus praktische Konsequenzen für die Entwicklung neuer Isolatorkonstruktionen auf.

Spannungsfestigkeit verschmutzter Isolatoren

Der Gleitlichtbogen – Schlüsselmechanismus beim Fremdschichtüberschlag an Hochspannungsisolatoren

■ Reinhold Bräunlich

Das Problem der Verschmutzung von Isolatoroberflächen mit leitfähigen Fremdschichten und die damit verbundene Reduktion des Isolationsvermögens ist schon seit der Einführung von Hochspannungsisolatoren bekannt. Bei der Errichtung der ersten Hochspannungsfreileitungen im letzten Jahrhundert konnte die quantitative Auswirkung von Nässe und Verunreinigung noch nicht abgeschätzt werden. Auch war noch nicht bekannt, welche Mechanismen für die Überschläge an fremdschichtkontaminierten Isolatoroberflächen verantwortlich sind.

Als anlässlich der Weltausstellung 1891 die Hochspannungsübertragung von Lauffen nach Frankfurt (15 kV) in Betrieb kommen sollte, traute man den der Witterung ausgesetzten Porzellanisolatoroberflächen nicht und verwendete drei übereinanderliegende tellerförmige, ölgefüllte Porzellanschalen, die mit einem darüberliegenden Porzellanschirm abgedeckt waren [2]. Bei diesem Konzept wurde davon ausgegangen, dass allfälliges Wasser aus der Atmosphäre stets auf den Grund des Ölvolumens absank, womit die Öloberfläche isolationstechnisch intakt blieb.

Aufgrund der schnellen Alterung des Öls, welches der Atmosphäre direkt ausgesetzt war, und wegen der notwendigen Wartung solcher Isolatoren wurde diese Technologie jedoch bald wieder verlassen und man entwickelte Isolatorformen ohne Öl. Man lernte, dass bei Einhaltung einer ausreichenden Kriechweglänge und bei Verwendung von Schirmen, die einen zusammenhängenden Wasserfilm verhindern, Isolatoren auch bei wesentlich höheren Spannungen jahrelang der Witterung ausgesetzt werden können, ohne dass zwangsläufig Überschläge auftreten.

Obwohl es naheliegend erschien, dass Verschmutzungen und Feuchtigkeit dennoch Überschläge hervorrufen können, waren aber die entscheidenden Parameter zur Optimierung der Überschlagsfestigkeit damals noch nicht bekannt. Anfangs des zwanzigsten Jahrhunderts bestand deshalb ein Forschungsbedarf, um dem Fremdschichtproblem Herr zu werden.

Umfassende systematische Untersuchungen gingen in den Dreissigerjahren von der Isolatorenfabrik Hermsdorf Schomburg GmbH in Thüringen in Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule in Dresden (F. Obenaus [3, 4]) aus. Obenaus erkannte, dass es sich bei der Problematik des Fremdschichtüberschlags unter anderem um eine Frage der *Strom-*

Der vorliegende Aufsatz basiert auf Untersuchungsergebnissen, die im Rahmen der Dissertation des Autors an der ETH, Fachgruppe Hochspannungstechnik, unter der Leitung von Prof. Dr. W. Zaengl entstanden sind [1].

Adresse des Autors
Dr. *Reinhold Bräunlich*, Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH, Voltastr. 9
8044 Zürich

Spannungs-Stabilität von Teillichtbögen handelt.

Ergebnisse praktischer Untersuchungen an Isolatorketten wurden später in grossem Umfang in nationalen Forschungslaboratorien durchgeführt und in einer Vielzahl von Cigré-Berichten zusammengefasst. Eine oftmals unterschätzte Rolle spielt der Einfluss der Innenimpedanz der bei dielektrischen Tests an verschmutzten Isolatoren verwendeten Prüfspannungsquelle [5, 6]. Dieser für die Isolatorentwicklung wichtige Einfluss konnte leicht mit Hilfe der theoretischen Modelle erklärt und auch quantifiziert werden [7, 8].

Bis heute ist die Zahl der Publikationen über den Fremdschichtüberschlag an leitfähigen Oberflächen derart gross geworden, dass sich ein gesamthafter Überblick an dieser Stelle kaum lohnt. Eine umfassende Literaturübersicht zum Problem des Verschmutzungsüberschlags wurde von P. J. Lambeth 1971 mit 123 Literaturzitaten [9] gegeben. Die vorhandenen mathematischen Modelle stellte F. A. M. Rizk, 1981 [10], zusammen. Zumal die neuesten Anstrengungen ausschliesslich Verfeinerungen und Spezialfälle betreffen, repräsentiert letztere Zusammenstellung immer noch weitgehend den Wissensstand.

Heutzutage ist eine umfangreiche Palette von Isolatorformen bekannt, welche je nach Verwendungszweck und Verschmutzungsbedingungen mehr oder weniger ausgeklügelte Schirmsysteme aufweisen. Die Isolatorschirme dienen dabei im wesentlichen zwei Zielen: sie verlängern den Kriechweg für Entladungen an der Oberfläche, und sie schaffen Oberflächenbereiche, die vor Regen und Verunreinigungen geschützt sind.

Für die Auswahl von Freiluftisolatoren existieren Normen, in welchen vier verschiedene Verschmutzungsklassen festgelegt sind. Sie beziehen sich auf vier definierte Einsatzszenarien mit unterschiedlich starker Verschmutzung. Der Entwickler von Isolatoren hat, je nach Verschmutzungsklasse des Isolators, abgestufte Anforderungen bei den Prüfungen unter Verschmutzungssituationen zu erfüllen. Es stehen diesbezüglich zwei standardisierte Prüfverfahren zur Verfügung, der Salznebeltest und die Kieselgurmethode, nach denen die Verschmutzungsresistenz von Freiluftisolatoren quantitativ und ausreichend reproduzierbar ermittelt werden kann. Eine Gegenüberstellung der beiden genannten Methoden wird in [11] diskutiert. Die Festlegung der vier Verschmutzungsklassen gibt dem Anlagenprojektierer eine Grundlage für die Auswahl von Isolatortypen. Die zahlreichen entsprechenden Normen und Empfehlungen sind im Literaturnachweis aufgeführt [38–48], siehe auch [12].

Im Verlaufe der Untersuchungen an Freiluftisolatoren wurden neben den Schirmsystemen weitere Massnahmen zur Verhinderung von Fremdschichtüberschlägen entwickelt, welche praktische Bedeutung im Betrieb erlangten:

- Beschichtung der Oberfläche mit hydrophoben Belägen wie Fette, Wachse und Kunststoffe; durch solche Massnahmen sollen zusammenhängende Feuchtigkeitsfilme verhindert werden.
- Regelmässige Reinigung von Isolatoren im Betrieb durch Abspritzen mit entsalztem Wasser oder Dampfstrahlen.
- Überwachung von Isolatorableitströmen zur Beurteilung des Verschmutzungszustands.
- Seit etwa 20 Jahren werden auch Isolatoren aus Kunststoff eingesetzt, die zumindest im Neustadium eine hervorragende wasserabstossende Wirkung besitzen.

Unter speziellen Bedingungen treten aber auch heute noch hartnäckige Fremdschichtprobleme an Hochspannungsisolatoren auf, wobei kumulative Effekte meist über längere Zeit auch bei vorsichtig ausgelegten Isolatoren ernsthafte Schwierigkeiten bereiten. Für diese Tatsache können zwei Gründe angegeben werden:

- In manchen Fällen nimmt die Degradation der Isolierung durch Verschmutzung stetig zu, so dass kein schlechtester stabiler Endzustand erreicht wird.
- Der Verlauf des Verschmutzungsprozesses ist von vielen äusseren Faktoren abhängig und deshalb schwer vorauszusehen.

Beispiele für besonders problematische Situationen sind Regionen mit russ- und staubhaltigen Industrieemissionen oder Küstengebiete mit feuchter salzhaltiger Atmosphäre. Hohe Anforderungen an Isolatoren stellen auch Wüstengebiete dar. Der Grund dafür sind Sandstürme, die Ablagerungen auf den Isolatoren hinterlassen, und die abendliche Betauung durch den schnellen Temperaturrückgang nach Sonnenuntergang bei verhältnismässig hoher Luftfeuchtigkeit. In der Schweiz traten im Winter schon Probleme an Hochspannungsfreileitungen am Rand von Autobahnen auf. Bei nassen Fahrbahnen verfrachtete der Gischt vorbeifahrender Autos streusalzhaltige Wassertröpfchen bis zu den Isolatoren.

Die Rolle des Gleitlichtbogens beim Fremdschichtproblem

In Bild 1 sind die wichtigsten der komplex zusammenwirkenden Prozesse zusammengestellt, die für die Entstehung eines Fremdschichtüberschlags verantwortlich sind. Die Bildung von Fremdschichten an Isolatoroberflächen ist im allgemeinen ein langsamer Prozess, der in vielen Schritten durch mehrfache Ablagerung aerosolartiger oder staubförmiger Verunreinigungen abläuft [13]. Die *Benetzbarkeit* der Oberfläche, die *Leitfähigkeit* der Fremdschicht im feuchten Zustand und ihre *Haftung* sind die entscheidenden Faktoren bei der Schwächung der Überschlagsfestigkeit.

Bei Regen, Nebel und Betauung wird die vorhandene Fremdschicht auf den Isolato-

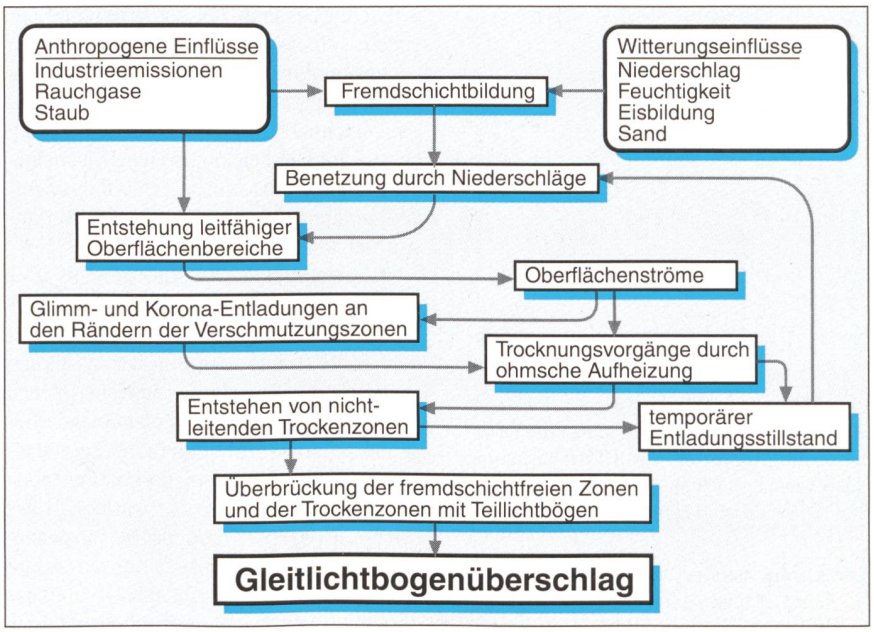

Bild 1 Im Vorfeld eines Fremdschichtüberschlags ablaufende Prozesse

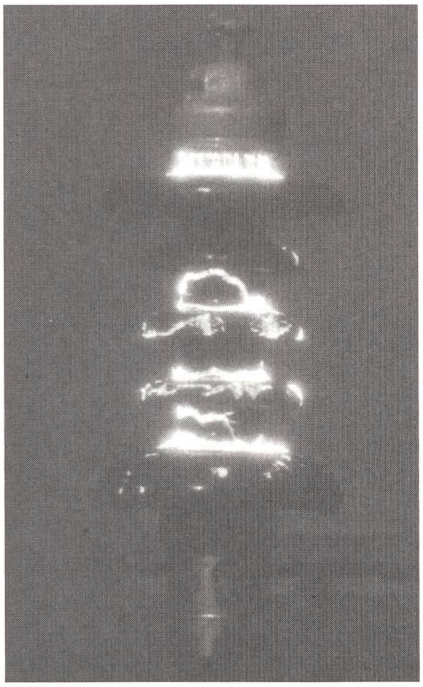

Bild 2 Funkenentladungen und Teillichtbögen an Stützisolator

Fotografische Aufnahme von Funkenentladungen und Teillichtbögen an einem Stützisolator der Nennspannung 50 kV während eines Salznebelversuchs (Foto: FKH Fachkommission für Hochspannungsfragen, 1955).

ren feucht, wobei ihre Leitfähigkeit stark zunimmt. Nebst dem Wasseraufnahmevermögen des Belags spielen vor allem die im Wasserfilm gelösten Ionen eine entscheidende Rolle, da sie die Schichtleitfähigkeit bestimmen. Je nach Schweregrad der Verschmutzung bildet sich ein stückweise zusammenhängender, elektrolytisch leitfähiger Widerstandsbelag entlang der Isolatoroberfläche. Durch den Potentialausgleich in den leitenden Bereichen steigt die Feldstärke in den noch nicht leitfähigen Bereichen an. Es kommt zu beliebig grosser Potentialversteuerung und zu Funkenentladungen. Schliesslich werden die nichtleitenden Bereiche mit Teillichtbögen überbrückt. Durch die Hitzeentwicklung der Teillichtbögen erfolgt oft ein fortschreitendes Abtrocknen der feuchten leitfähigen Bereiche, so dass die Lichtbögen verlöschen. Bei ausreichend starkem Entladungsstrom kann es aber auch zu einer Lichtbogenverlängerung kommen, was im Extremfall den im folgenden diskutierten Überschlagsprozess einleitet.

Bild 2 zeigt einen Isolator in einem Versuch in der Salznebelkammer, wo die bandförmigen Trockenbereiche unter den Isolatorschirmen mit Teillichtbögen überbrückt werden. Dabei verlaufen die Entladungen zunächst nicht zwangsläufig in Richtung der Isolatorachse. Die *Teillichtbögen* bilden sich an den kürzesten Unterbrüchen der leitfähigen Bereiche. Ausserdem spielt eine Vielzahl stochastischer Prozesse eine Rolle, wodurch eine exakte mathematische Beschreibung der Entwicklung eines Fremdschichtüberschlags nicht möglich ist.

Im Endstadium kann sich unter bestimmten Bedingungen einer der Fusspunkte eines Teillichtbogens frei über die noch bestehende elektrolytische Schicht bewegen. Er überbrückt dann mit grosser Geschwindigkeit den gesamten Isolator und leitet damit einen Kurzschluss durch einen Hochstromlichtbogen ein. Ein Vorlichtbogen, der sich auf einer leitfähigen Schicht schnell verlängert, wird im folgenden als *Gleitlichtbogen* bezeichnet. Fotografien einzelner Gleitlichtbögen sind weiter hinten in den Bildern 7 und 8 zu finden. Die Ausführungen in diesem Artikel befassen sich hauptsächlich mit dieser Entladungsform, bei welcher grosse Isolationsstrecken bei geringer Spannung überbrückt werden können. Beim Isolationsversagen durch Fremdschichteinwirkung findet im Endstadium praktisch immer ein Gleitlichtbogenprozess statt. Er bestimmt somit die Restspannungsfestigkeit eines mit Fremdschicht behafteten Isolators.

In der Praxis ist bei all den sequentiell ablaufenden Prozessen von der Ablagerung einer Fremdschicht bis zum Versagen der Isolatoren eine grosse Variationsbreite festzustellen, wobei einige Phasen im gesamten Ablauf sehr kurz sind oder ganz übersprungen werden. Auf die Verschiedenartigkeit der Bildungsmechanismen von Fremdschichten und ihrer Feuchtigkeitsdynamik soll hier nicht weiter eingegangen werden (siehe hierzu [13]).

Die Frage nach dem Vorwachsmechanismus bei Gleitlichtbögen

Die Frage nach dem physikalischen Hintergrund des Vorwachsens von Gleitlichtbögen wurde bis heute noch nicht endgültig geklärt, und es bestehen weiterhin unterschiedliche Meinungen über den Mechanismus der Lichtbogenverlängerung bei Gleitlichtbogenüberschlägen. Bei der in der Literatur anzutreffenden Behandlung des Fremdschichtüberschlags wird die Frage nach der Ursache der Lichtbogenverlängerung mit empirisch gewonnenen Gesetzen umgangen. Am häufigsten wurde von der Annahme ausgegangen, dass eine Verlängerung des Lichtbogens genau dann stattfindet, wenn sich durch diese *Verlängerung der Gesamtstrom* erhöht. Dieses weitgehend akzeptierte Axiom wurde jedoch nie bewiesen. Wohl ist leicht erkennbar, unter welchen Bedingungen eine Verlängerung des Lichtbogens zu einem Anstieg des Gesamtstroms führt. Umgekehrt ist jedoch die notwendige Rückkopplung – das heisst die Existenz eines eindeutigen Wirkungsmechanismus, wonach eine Stromzunahme den Vortrieb eines Gleitlichtbogens verstärkt – bis heute noch Bestandteil von Spekulationen geblieben [14, 15]. Im nächsten Abschnitt wird, basierend auf einer solchen empirischen Regel, eine einfache Überschlagstheorie entwickelt.

Zur Ergründung der Ursache von Gleitlichtbogenüberschlägen wurde in zahlreichen Arbeiten immer wieder nach *physikalischen Kräften* gesucht, welche den Lichtbogen zur Verlängerung veranlassen. Insgesamt wurden in der Fachliteratur für das Vorwachsen eines Gleitlichtbogens auf einer leitfähigen Oberfläche folgende physikalische Mechanismen in Betracht gezogen:

- die Kraft des Eigenmagnetfelds des Lichtbogens
- der hydrostatische Auftrieb des Lichtbogenkanals
- elektrostatische Kräfte
- Dipolkräfte auf den durch das elektrische Feld polarisierten Lichtbogenkanal
- isotherme Wanderung
- Plasmaströmungen im gekrümmten Lichtbogenfusspunkt auf der Wasseroberfläche
- Vorwärtsblasen des Lichtbogens durch rasche Wasserabdampfung hinter dem Fusspunkt
- kontinuierliche Umwandlung einer Streamercorona in einen thermischen Bogenkanal
- Stabilitätskriterien aus energetischen Überlegungen

Es kann leicht gezeigt werden, dass die aufgeführten Wirkungsmechanismen alle existieren, dass aber die meisten davon nur in speziellen Fällen entscheidende Bedeutung erlangen [1].

Stabilitätskriterien für die Entstehung eines Gleitlichtbogenüberschlags

Während dem gesamten Gleitlichtbogenvorgang müssen zwei Teilbedingungen erfüllt sein, damit es zu einem vollendeten Überschlag kommen kann [10]:

- eine Existenzbedingung für den Lichtbogen
- eine Lichtbogenvorwachsbedingung

Teilweise wurde versucht, diese Bedingungen direkt auf Extremalprinzipien der Thermodynamik irreversibler Prozesse zurückzuführen; bis heute konnte jedoch keine vollständige Ableitung aufgezeigt werden [16]. Wege zur Rechtfertigung der genannten Kriterien werden in [1] diskutiert.

Im folgenden wird zunächst der einfachste Fall einer gleichmässig leitfähigen Gleitstrecke bei konstanter Spannung be-

handelt. Die Überlegungen können auf die Verhältnisse bei Wechselspannungsbeanspruchung übertragen werden, solange Gleitüberschläge betrachtet werden, die innerhalb einer Halbwelle ablaufen.

Die Existenzbedingung und die Bedingung für das Vorwachsen einer Lichtbogenentladung auf einer resistiven Oberfläche wurden in zahlreichen Fachpublikationen auf unterschiedliche Art formuliert (siehe Tabelle I). Bei der Berechnung der Überschlagsspannung führen aber – sieht man von gewissen Verfeinerungen ab – die meisten Kriterien auf ähnliche mathematische Endergebnisse, welche sich untereinander nur um Faktoren und additive Konstanten unterscheiden. Die Ursache der unterschiedlichen Formulierungen ist darin zu suchen, dass *über die Triebkraft für die Lichtbogenverlängerung noch Unklarheit besteht* und dass deshalb für das Vorwachsen axiomatische Kriterien aus dem Erfahrungsbereich der Lichtbogenentladungen verwendet wurden.

Für einen gleichmässigen streifenförmigen Widerstandsbelag unter Gleichspannungsbeanspruchung gab als erster G. Neumärker, 1959 [17], und später L. L. Alston und S. Zoledziowski, 1963 [18], eine untere Grenze für die Überschlagsspannung an. Als Ausgangssituation wird an einem Ende des Belags ein beliebig schmaler Unterbruch angenommen, der durch eine Entladung überbrückt wird. Das elektrische Ersatzschaltbild entspricht Bild 3. Den Überlegungen von F. Obenaus, 1958 [4], folgend, setzt sich die Gesamtspannung über dieser Anordnung aus der Spannung über dem Lichtbogen und der Spannung über der unüberbrückten Fremdschicht zusammen:

$$u^* = x \cdot E_L + i \cdot R'_W (L-x) \qquad (1)$$

Dabei ist R'_W der Fremdschichtwiderstand pro Längeneinheit, $u^* = u - \Delta u_1 - \Delta u_2$ die um die Elektrodenfallspannungen reduzierte Quellenspannung, E_L die mittlere

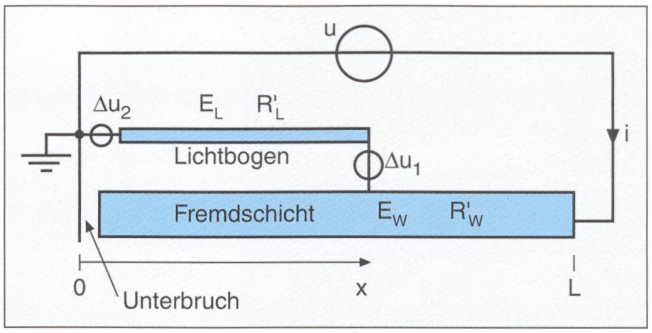

Bild 3 Elektrisches Ersatzschaltbild für einen auf einer Fremdschicht vorwachsenden Lichtbogen

axiale Feldstärke entlang der Bogensäule, L die Länge der Gleitstrecke und x die momentane Länge des Gleitlichtbogens.

Für die mittlere Feldstärke entlang der Lichtbogensäule $E_L = u_L/x$ wurde die bekannte Beziehung für die statische Lichtbogencharakteristik von W. B. Nottingham, 1923 [19] verwendet (siehe dazu auch [20]). Sie sagt aus, dass die Feldstärke E_L mit zunehmendem Strom i durch den Lichtbogen gemäss einer negativen Potenz $-n$ abfällt.

$$E_L = E_1 \cdot (i / i_1)^{-n} \qquad (2)$$

E_1 [V/m] und i_1 = 1A sind Konstanten; n bezeichnet man als Lichtbogen-Exponenten. Im Zusammenhang mit Gleitlichtbögen findet man in der Literatur für den Exponenten n Werte zwischen 0,2 und 0,8 und für die charakteristische Feldstärke E_1 100–570 V/cm [21]. Für die Gesamtspannung ergibt sich damit der Ausdruck:

$$u^* = x \cdot E_1 \cdot (i / i_1)^{-n} + (L - x) \cdot i \cdot R'_W \qquad (3)$$

Alston und Zoledziowski wendeten auf Gleichung (3) das sogenannte «Kaufmannkriterium»[1)] [22] eines Lichtbogens an, welcher in Serie mit einem Widerstand liegt. Nach diesem Kriterium muss zur Existenz der Lichtbogenentladung der negative differentielle Widerstand der Bogensäule du_L/di kleiner als derjenige eines vorgeschalteten Widerstands R_s sein.

$$\frac{du_L}{di} + R_s \geq 0 \qquad (4)$$

Mit der notwendigen Voraussetzung, dass diese Existenzbedingung während des gesamten Überschlagsvorgangs erfüllt ist, konnten Alston und Zoledziowski eine untere Grenze für die mittlere Überschlagsfeldstärke von Gleitlichtbögen angeben (Beziehung (8)).

Einen anderen Weg beschritt B. F. Hampton, 1964 [23]. Er kam aufgrund von Experimenten an Wasserstrahlen, die ihm als Modell für eine Fremdschicht dienten, zum Schluss, dass ein Gleitlichtbogen sich genau dann weiter fortpflanzt, wenn die mittlere Feldstärke der noch nicht überbrückten Gleitstrecke jene der Lichtbogensäule übersteigt:

$$E_W > E_L \qquad (5)$$

Damit wird dann auch $R'_W \geq R'_L$, was bedeutet, dass der Lichtbogen dem Strom weniger Widerstand entgegenbringt als die noch unüberbrückte Gleitstrecke. Beim kritischen Strom i_c wird aus Beziehung (5):

$$R'_W \cdot i_c = E_1 \cdot \left(\frac{i_c}{i_1}\right)^{-n} = E_c \qquad (6)$$

Löst man Gleichung (6) nach i_c auf, so erhält man für den kritischen Strom

$$\boxed{i_c = \left(\frac{E_1}{R'_W}\right)^{1/(n+1)} \cdot i_1^{n/(n+1)}} \qquad (7)$$

und schliesslich für die kritische mittlere Feldstärke E_c entlang der Gleitstrecke:

$$\boxed{E_c = E_1^{1/(n+1)} \cdot (R'_W \cdot i_1)^{n/(n+1)}} \qquad (8)$$

1) Diese Existenzbedingung geht letztlich auf die Entdeckungen und Überlegungen von W. Kaufmann, 1900, zurück. Kaufmann machte damals die berühmte Feststellung, dass Lichtbögen, die in Serie mit einem Widerstand R_s brennen, nur dann stabil sind, wenn für die Lichtbogenspannung U_L gilt: $R_s + \partial U_L / \partial I > 0$.

P. I. Shkuropat, 1957 [24]	Der Lichtbogen bewegt sich stets an diejenige Position, wo sein Energieverbrauch maximal ist[a)].
B. F. Hampton, 1964 [23]	Die notwendige Bedingung für einen Überschlag muss darin gesehen werden, dass die Feldstärke in der Gleitstrecke (gemeint: vor dem Lichtbogenkopf) jene des Lichtbogens übersteigt.
H. Naecke, 1966 [25]	Ein Gleitlichtbogen wächst instabil vor, wenn bei einer virtuellen Längenänderung die Summe der partiellen Spannungsänderungen an Gleitstrecke und Teillichtbogen abnimmt.
S. Hesketh, 1967 [26]	Der Gleitlichtbogen richtet sich jeweils so ein, dass er maximalen Strom aus der Quelle bezieht.

Tabelle I Formulierungen (sinngemässe Übersetzungen) von Stabilitätsbedingungen, welche über das Vorwachsen von Gleitlichtbögen entscheiden

a) Wiedergabe nach R. Wilkins, 1969 [16]

Der kritische Strom und die kritische mittlere Feldstärke sind über den Widerstand der Gleitstrecke pro Längeneinheit verknüpft: $E_c / i_c = R'_W$. Es zeigt sich, dass das Ergebnis (8) bei gleichförmig über der Gleitstrecke verteilter Leitfähigkeit die Vorwachsbedingung genau dann erfüllt, wenn der Lichtbogen bei jeder Lichtbogenlänge x gerade noch existieren kann. *Existenzbedingung* und *Vorwachsbedingung* führen unter den gemachten Voraussetzungen (Ersatzschaltbild, Bild 3, und *u/i*-Charakteristik des Lichtbogens) zur gleichen Überschlagsspannung.

Mit den in der Literatur angegebenen Lichtbogenparametern bewegt sich der Exponent $1 / (1+n)$ zwischen 0,56 und 0,83. Der Wert von $n / (1+n)$ liegt etwa zwischen 0,17 und 0,44. Die Abhängigkeit $i_c(R'_W)$ ist demnach hyperbelförmig; für $E_c(R'_W)$ erhält man eine wurzelähnliche Abhängigkeit (Bild 4).

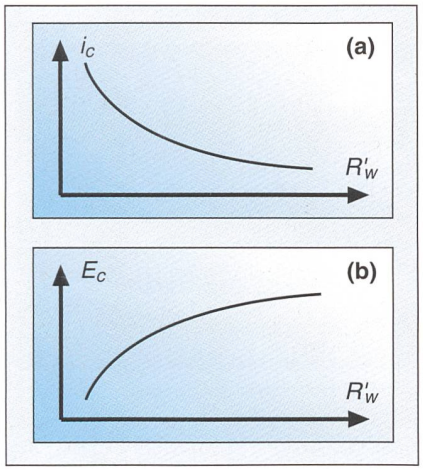

Bild 4 Charakteristiken für Gleitlichtbögen

a prinzipielle Abhängigkeit des kritischen Stroms vom längenbezogenen Fremdschichtwiderstand
b Abhängigkeit der kritischen mittleren Feldstärke vom längenbezogenen Fremdschichtwiderstand gemäss Gleichungen (7) und (8)

Es lässt sich leicht zeigen, dass bei *nicht gleichmässigem Widerstand* entlang der Gleitstrecke die reine Forderung der Existenzbedingung für den Lichtbogen nach Kaufmann (4) zu tieferen Überschlagsspannungen führt, als die Vorwachsbedingung (5). Beinhaltet eine Gleitstrecke eine Zone sehr niedrigen Widerstands pro Längeneinheit, innerhalb welcher jener der Lichtbogensäule noch unterschritten wird, so kann zwar der Lichtbogen aufrechterhalten bleiben, aber sein Fusspunkt bleibt am Ort stehen.

Während die Existenzbedingung für den Lichtbogen zu einer notwendigen, nicht aber immer hinreichenden Bedingung für das Vorwachsen des Gleitlichtbogens führt, leitete man aus Stabilitätsbetrachtungen eigentliche Vorwachskriterien ab:

In verschiedenen Publikationen trifft man eine ganze Reihe von Formulierungen für die Bedingung einer instabilen Verlängerung des Gleitlichtbogens an. Um diese Kriterien zu untermauern, wurden intuitiv einleuchtende Thesen für die Existenz von Extremalprinzipien aufgestellt (Tabelle I). Der Gleitlichtbogen sollte sich demnach hin zu einem Zustand maximalen Energieverbrauchs entwickeln. Für den speziellen Fall stark induktiver Prüfkreise bei Überschlagsversuchen an verschmutzten Isolatoren benutzte F. Obenaus, 1966 [4], zur Berechnung der Lichtbogen-Vorwachsgeschwindigkeit ein thermodynamisches Maximalprinzip[2)].

Bei der Durchsicht der Literatur über den Gleitlichtbogenüberschlag mag es erstaunen, dass gerade die Betrachtungsweise als Stabilitätsproblem die einzige war, die bis heute praktische mathematische Beziehungen für die Überschlagsspannung beziehungsweise den Überschlagsstrom lieferte. Unbefriedigend dabei ist, dass eine Rückführung von Stabilitätskriterien auf elementare physikalische Gesetze nie gelungen war. Die Anwendung physikalischer Gesetze wie Impulssatz, Energiesatz und Materialgleichungen war bisher kaum erfolgreich. Der Grund dafür liegt in einem komplexen Zusammenwirken verschiedener Entladungsmechanismen (siehe dazu den Abschnitt über eine verfeinerte Modellvorstellung des Gleitlichtbogens).

Untersuchung von Gleitlichtbögen auf Wasserkanälen

Das Verständnis des Lichtbogenvorwachsens auf benetzten Fremdschichten wurde in der Vergangenheit mehrfach an mit Wasser gefüllten Kanälen untersucht. Damit werden gut kontrollierbare und reproduzierbare Verhältnisse geschaffen, wie dies bei realen Isolatoren nicht erreichbar ist. Zur Einstellung der Leitfähigkeit werden dem Wasser Elektrolyte beigefügt (siehe Bild 5). Ein solcher Kanal besitzt an einem Ende eine geerdete Elektrode und am anderen Ende eine Spitzenelektrode, die einige wenige Millimeter über der Wasseroberfläche angebracht wird. Beim Anlegen einer hohen Spannung an diese Spitzenelektrode erfolgt zunächst ein Überschlag auf die Wasseroberfläche. Je nach den Werten der angelegten Spannung, der Geometrie und der Wasserleitfähigkeit bildet sich ein Gleitlichtbogen aus, der sich verlängert und auf die Erdelektrode zubewegt (siehe auch [27]).

Der in Bild 5 abgebildete, aus Isolierstoff bestehende Wasserkanal trägt auf der Unterseite aufgeklebte Messingstreifen, welche als kapazitive Sonden dienen können. Das zeitlich veränderliche Potential im Wasser kann damit während des Überschlagsvorgangs an verschiedenen Positionen entlang des Kanals registriert werden. Diese Methode zur Bestimmung von mittleren Feldstärken in einer leitfähigen Gleitschicht wurde auch schon in [28] angewendet.

Zur Auslösung von Gleitlichtbogenüberschlägen wird eine schrittförmige, hohe Spannung von einigen kV auf die Spitzenelektrode appliziert. Ein solcher Spannungsschritt kann leicht mit einer aufgeladenen Kondensatorbank von einigen µF Kapazität und einer triggerbaren Funkenstrecke erzeugt werden. Ein sofortiger Überschlag von der Spitzenelektrode auf die Wasseroberfläche, welche im ersten Moment noch auf Erdpotential liegt, leitet den Gleitvorgang ein (Bild 6). Zur Steuerung des Überschlagvorgangs können verschieden grosse Dämpfungswiderstände R_d in Serie mit dem Stosskreis geschaltet werden.

Die nachfolgend präsentierten Ergebnisse wurden mit folgenden messtechnischen Einrichtungen erzielt: Kleinbildkamera Nikon F801; Bildwandlerkamera zur Erzeugung von Schmierbildern (Typ EL 154, Plasmaphysik GmbH, Garching bei München). Nebst Einrichtungen für die fotografischen Aufzeichnungen kamen Stossspannungsteiler, breitbandige Stromwandler und Spannungsteiler zum Einsatz, die der oszillographischen Erfassung der zeitlichen Entwicklung von Strömen und Poten-

2) Er forderte, dass sich der Lichtbogen so bewege, dass der Stromzuwachs maximal werde ($\partial^2 i / \partial t^2 = 0$).

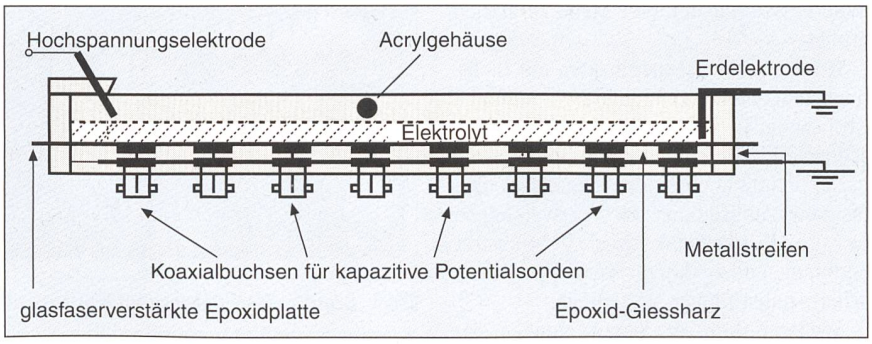

Bild 5 Skizze des für Überschlagsexperimente verwendeten Wasserkanals

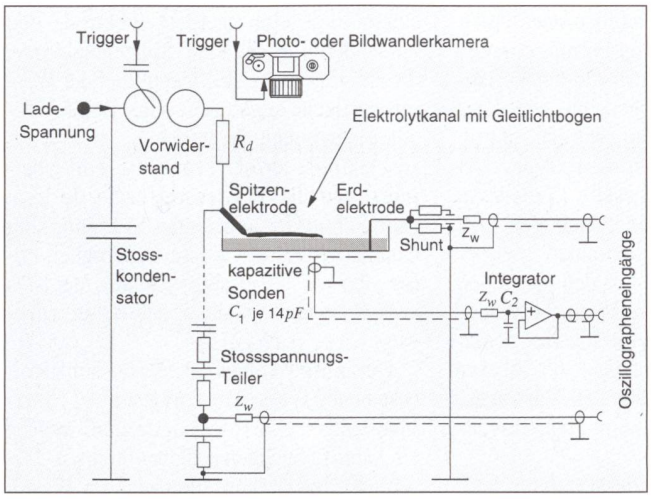

Bild 6 Versuchsanordnung für Überschlagsexperimente

Versuchsanordnung, Stosskreis und verwendete Messtechnik mit schematisch eingezeichneten kapazitiven Potentialsonden für Überschlagsexperimente am Wasserkanal.

tialen im Wasserkanal und im Lichtbogen dienten.

Versuchsergebnisse: fotografische Aufnahmen und Oszillogramme von Gleitlichtbögen

Die Bilder 7 und 8 zeigen den Vergleich von Gleitlichtbogenaufnahmen mit Normalfilm und UV-empfindlichem Film bei positiver und bei negativer Polarität der Spitzenelektrode. Das Erscheinungsbild ist bei den beiden Polaritäten sehr unterschiedlich. In beiden Fällen ist jedoch an der Entladungsspitze von Gleitlichtbögen eine schwach leuchtende Zone sichtbar, die etwa den vordersten Zentimeter der Entladungsspitze umgibt und aus sehr feinen Leuchtfäden aufgebaut ist. Diese Beobachtung weist darauf hin, dass an der Gleitlichtbogenspitze eine Streamercorona existiert, welche als Wegbereiter für den Plasmakanal dient. Auch auf Schmierbildern ist diese filamentartige Struktur von 1 bis 2 cm Länge als eine Art Saum erkennbar (siehe auch Bild 12 d, weiter hinten).

Das Auftreten von Stossionisation an der Gleitlichtbogenfront kann dadurch erklärt werden, dass die Feldstärke an dieser Stelle besonders hoch ist. Zum einen besitzt die Kathodenfallspannung auf einer Wasseroberfläche hohe Werte zwischen 700 und 1000 V. Zum anderen bewirkt der Stromeintritt an der Spitze des Gleitlichtbogens einen Potentialkegel, der die axiale und radiale Feldstärke an dieser Stelle zusätzlich erhöht.

Bei Überschlagsexperimenten mit Lichtbogenlaufzeiten von einigen wenigen Millisekunden liegen die positiven Überschlagsfeldstärken (positive Spitzenelektrode) deutlich unter den negativen. Die Neigung zur Bildung von Verzweigungen des Lichtbogenkanals wird bei höherer Spannung und bei kürzer werdenden Überschlagszeiten immer ausgeprägter.

Während kräftige Verzweigungen der Lichtbogensäule häufiger bei negativer Polarität der Spitzenelektrode auftreten, sind feine haarförmige Entladungen in erster Linie bei positiver Polarität zu beobachten (siehe auch [27]). Dafür verantwortlich ist vermutlich die Tatsache, dass durch eine etwa dreimal höhere Elektrodenfallspannung bei positiver Polarität (Elektrolyt ist Kathode) die Zone mit den Corona- oder Streamer-Entladungen an der Gleitlichtbogenspitze eine wesentlich grössere Wasseroberfläche umfasst als bei negativer Polarität (Elektrolyt ist Anode). Bei letzterer ist auch eine wesentlich grössere Stromdichte im Elektrodenfall möglich. Dadurch entsteht bei negativer Polarität ein steilerer Potentialtrichter im Elektrolyt, wodurch die Verzweigungen des Gleitlichtbogens stark begünstigt werden (vgl. Bilder 7 und 8).

Potential- und Stromverteilung im Wasserkanal und im Gleitlichtbogen

Zur Veranschaulichung der Potentialverteilung im Wasserkanal beim Vorwachsen eines Gleitlichtbogens wurden, ausgehend von den Daten aus Oszillogrammen, elektrische Feldberechnungen durchgeführt. Das Resultat ist in Form von Äquipotentiallinien-Darstellungen in Bild 9 für

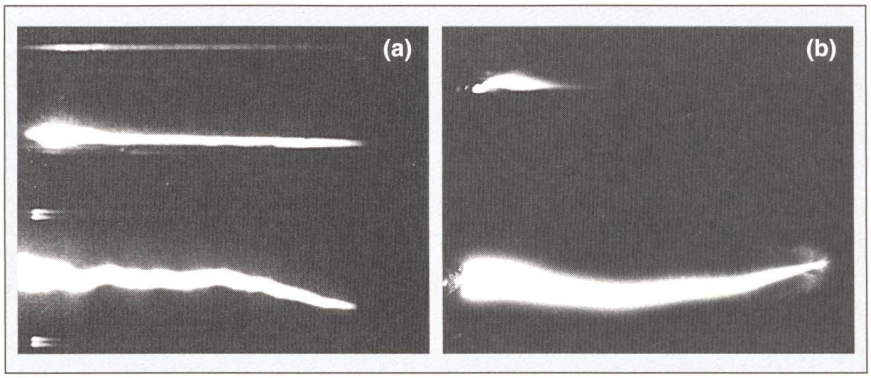

Bild 7 Positiver Gleitlichtbogen auf Wasseroberfläche

Momentaufnahmen eines *positiven* Gleitlichtbogens am einem Wasserkanal ($l \times b \times h$: 30 × 5 × 1,5 cm), aufgenommen mit einer Kleinbildkamera Nikon F801. Kanalwiderstand pro Längeneinheit R'_W = 50 Ω/cm; λ_T = 2500 mS/cm; Vorwiderstand R_d = 2,4 kΩ; Ladespannung U_L = +39 kV; Überschlagszeit Δ_t = 3,5 ms; Kameraeinstellungen: Blende 8, Belichtungszeit 1/8000.

a Kunstlichtfilm-Aufnahme

b Aufnahme mit einem UV-empfindlichen Film (UV-Optik und Filter mit Durchlassbereich der Lichtwellenlängen von etwa 250 bis 400 nm)

Die Seitenansicht (jeweils oben im Bild) konnte mit einem im Winkel von 45° aufgestellten Spiegel auf derselben Aufnahme abgebildet werden. Durch den in der rechten Aufnahme von oben nach unten durchlaufenden Schlitzverschluss der Kamera stammt die obenliegende Seitenansicht von einem etwas früheren Zeitpunkt als die Aufsicht.

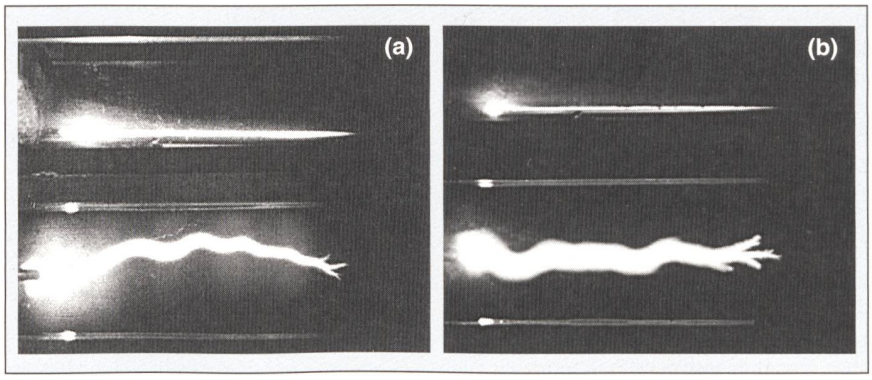

Bild 8 Negativer Gleitlichtbogen auf Wasseroberfläche

Momentaufnahmen eines negativen Gleitlichtbogens. Übrige Aufnahmebedingungen wie Bild 7.

a Kunstlichtfilm-Aufnahme

b UV-Aufnahme

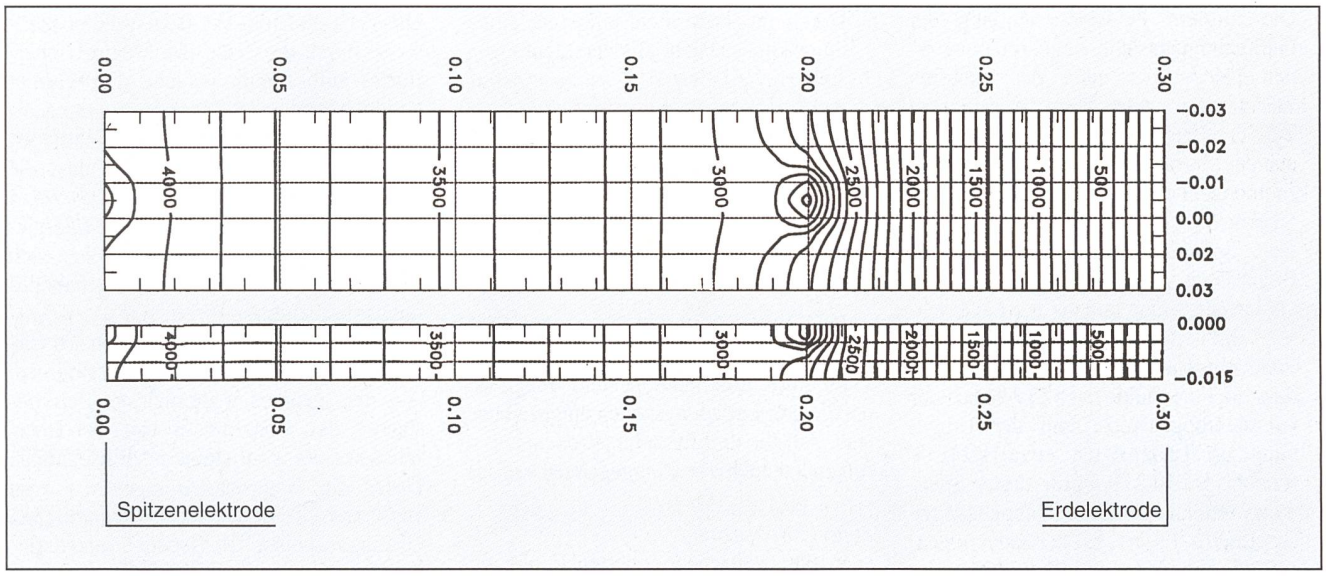

Bild 9 Potentialverteilung im Wasserkanal

Potentialverteilung im Wasserkanal ($l \times b \times h$: 30 × 5 × 1,5 cm), mit einem von links vorwachsenden Gleitlichtbogen. Die Darstellung gibt den Zeitpunkt wieder, wo die Lichtbogenspitze gerade ²/₃ der Gleitstrecke zurückgelegt hat (Abstand Entladungsspitze–Spitzenelektrode: 20 cm).
oberer Bildteil Potentialverteilung an der Wasseroberfläche
unterer Bildteil senkrechter Schnitt längs der Kanalmitte bzw. längs der Lichtbogenachse

einen definierten Zeitpunkt während des Überschlags enthalten. Die Berechnung erfolgte analytisch analog dem Spiegelladungsverfahren, wobei statt Ladungen auf der Oberfläche eingeprägte Ströme angenommen wurden. Gemäss den Ergebnissen messtechnischer Untersuchungen wurde festgelegt, dass der Strom nur an der Entladungsspitze (in diesem Beispiel: 5,5 A) und am Fusspunkt unter der Spitzenelektrode (1,5 A) auf die Wasseroberfläche übergeht.

Die Umrandungen in Bild 9 stellen die Kanalränder dar und sind in Meter [m] skaliert. Der Ursprung des Koordinatensystems $x = y = z = 0$ befindet sich auf der Wasseroberfläche unter der Spitzenelektrode. Die Äquipotentiallinien sind in Volt [V] beschriftet.

Die Resultate der Potentialberechnungen im Wasserkanal demonstrieren, dass das Feld – mit Ausnahme von der Zone, über welcher sich die Spitze des Gleitlichtbogens befindet – nahezu homogen ist. Die Feldstörung im Wasser unter der Gleitlichtbogenspitze wird etwa innerhalb einer Wegstrecke von 2 bis 3 cm abgebaut. Das im übrigen ebene Potentialfeld ist eine Voraussetzung für das im nächsten Abschnitt vorgestellte eindimensionale mathematische Modell.

Verfeinerte Modellvorstellung des Gleitlichtbogens

Im folgenden wird ein physikalisches Modell für den Gleitlichtbogen vorgestellt, das sich in erster Linie auf die Theorie stützt, dass Stossionisation am Lichtbogenkopf zu einer kontinuierlichen Verlängerung des bestehenden Plasmakanals führt. Zur Untermauerung dieser Vorstellung werden zunächst die eindimensionalen Potential- beziehungsweise Feldstärkeverhältnisse auf der Gleitlichtbogenachse während des Vorwachsens analysiert.

Die axiale Strom- und Spannungsverteilung in einem vorwachsenden Gleitlichtbogen

Ein besonders aussagekräftiges Bild über den elektrischen Zustand eines vorwachsenden Gleitlichtbogens ergibt sich, wenn eine gegenüber Bild 9 vereinfachte *eindimensionale* Strom- und Spannungsverteilung für einen definierten Moment über der Längsachse der Gleitstrecke aufgetragen wird. Hierzu geeignete Verläufe von Strömen und Spannungen wurden den oszillographischen Aufzeichnungen entnommen. Bild 10 zeigt eine Rekonstruktion der Strom- und Spannungsverteilung für den Zeitpunkt, in dem der in Bild 9 betrachtete Gleitlichtbogen eine Länge von 20 cm erreicht. Das in der Graphik festgehaltene Beispiel beinhaltet folgende Informationen:

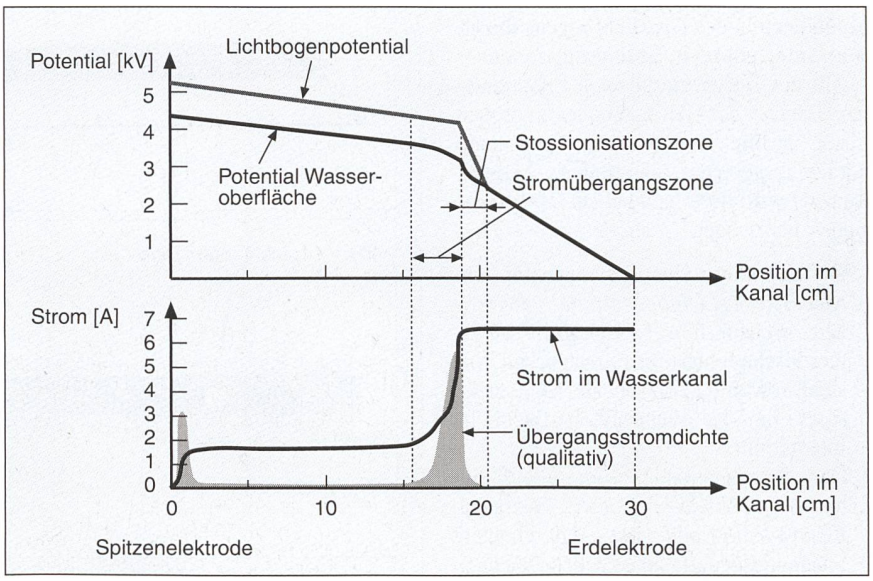

Bild 10 Potential- und Stromverteilung während eines Lichtbogenüberschlags

Momentdarstellung entlang einem Wasserkanal bei positiver Polarität der Spitzenelektrode. Die Übergangsstromdichte vom Lichtbogen auf die Elektrolytoberfläche wurde qualitativ aus dem Stromverlauf im Wasserkanal ermittelt. Der Zeichnung liegen die Werte aus Sondenmessungen zugrunde.

- Die mittlere Feldstärke entlang der Gleitlichtbogensäule liegt um etwa einen Faktor vier unter der mittleren Feldstärke im noch nicht überbrückten Teil der Gleitstrecke. Entsprechend ist auch der Strom im Wasserkanal vor dem Lichtbogenkopf viermal grösser als hinter ihm.
- Der Spannungsabfall zwischen der Bogensäule und der Wasseroberfläche variiert nur wenig entlang der Längsachse des Gleitlichtbogens. Mittels Sondenmessungen wurde festgestellt, dass die Potentialdifferenz zwischen der Gleitlichtbogenspitze und der Umgebung im Elektrolyten etwa 1200 V erreicht. In Bild 10 wurde dieser Spannungsabfall an der Gleitlichtbogenspitze dargestellt. Es ist zu berücksichtigen, dass der hohe Wert von 1200 V nicht nur aus dem Elektrodenfall besteht, sondern dass er noch einen erheblichen Potentialtrichter im Wasser mit beinhaltet, der sich mit dem extrem hohen Elektrodenfall kumuliert. Die weitaus höchste Feldstärke tritt demnach am Gleitentladungskopf in Vorwachsrichtung auf.
- Im Unterschied zum Ersatzschaltbild, Bild 3, tritt der Strom an zwei Stellen auf die Elektrolytoberfläche über: in Umgebung der Spitzenelektrode und an der Gleitlichtbogenspitze. Zwischen diesen Positionen ist die Übergangsstromdichte sehr klein. Sowohl der längenbezogene Widerstand in der Bogensäule wie auch derjenige im Elektrolytkanal sind in diesem Bereich konstant. Damit sind auch die Ströme und die mittleren Feldstärken im Lichtbogen und im dazu parallelen Teil des Kanals konstant.

Modellierung des Gleitlichtbogens durch eine Unterteilung in Entladungszonen

Mit den bisher erarbeiteten Erkenntnissen lässt sich der Gleitlichtbogen in groben Zügen in drei verschiedene koexistente Entladungsgebiete unterteilen. Dieses Konzept wird im folgenden als *Dreizonenmodell* bezeichnet:

1. Der eigentliche Gleitlichtbogen wird als *Niederstrom-Lichtbogensäule* angesehen, welche ihre Leitfähigkeit durch thermische Ionisation aufrechterhält. Sie steht sowohl thermisch als auch elektrisch mit der Elektrolytoberfläche in Interaktion.
2. Der Stromübergang vom Gleitlichtbogen geschieht in einer speziellen *Elektrodenfallzone* mit sehr hohem Spannungsbedarf; sie ist gekennzeichnet durch eine verdampfende Elektrolytelektrode tiefer Temperatur und einer durch Ionenleitung erzwungenen verhältnismässig niedrigen Stromdichte.
3. Durch die hohe Feldstärke am Entladungskopf entsteht aus der Lichtbogenspitze heraus eine Art *Coronaentladung*, welche je nach Elektrolytleitfähigkeit teils homogen erscheint, teils aber auch Streamercharakter annehmen kann. Sie grenzt sich insofern von der Lichtbogensäule ab, als ihre Leitfähigkeit wesentlich geringer ist und durch Stossionisation erzeugt wird.

Bild 11 zeigt schematische Skizzen in Seitenansicht und Aufsicht des vorderen Teils einer Gleitlichtbogenentladung, wobei die drei Entladungszonen eingezeichnet sind. Auf die drei Entladungszonen soll im folgenden noch näher eingegangen werden.

Zone 1: Bogensäule

In physikalisch orientierten Publikationen zum Mechanismus des Verschmutzungsüberschlags wurden Gleitentladungen bereits häufig als Niederstromlichtbögen beschrieben [10]. Der durch den Widerstand der Gleitstrecke gegebene hohe Vorwiderstand begrenzt den Strom, so dass verhältnismässig hohe Bogengradienten von bis zu einigen 100 V/cm resultieren können.

An verschmutzten Isolatoren mit leitender Fremdschicht treten in Gleitentladungen Ströme auf (0,1–10 A), die auf einen typischen Energieinhalt der Bogensäule von einigen 10 mJ/cm schliessen lassen[3]. Die Verlustleistung der Bogensäule ist teilweise durch die Nähe der Elektrolytoberfläche mitbestimmt, welche die Wärmeabfuhr beschleunigt. Aus den messtechnischen Untersuchungen an Gleitlichtbögen auf Wasserkanälen geht hervor, dass die Lichtbogenverlustleistung einige 100 W/cm beträgt. Aus dem Quotienten von Energieinhalt und Energieverbrauch ergeben sich Zeitkonstanten für die Lichtbogenabkühlung von mehreren 10 bis 100 µs, welche letztlich das dynamische Verhalten des vorwachsenden Gleitlichtbogens bestimmen. Aus dem genannten Bereich der Zeitkonstanten lässt sich folgern, dass bei Überschlagszeiten von einigen Millisekunden Dauer die Bogensäule, abgesehen vom vordersten Teil, im thermodynamischen Gleichgewicht ist. Dies ist der Grund dafür, dass die rechnerische Abschätzung von Überschlagsspannungen unter Verwendung statischer Lichtbogenkennlinien mit Messungen durchaus in Übereinstimmung steht.

Die Bogentemperatur, welche im wesentlichen auch den Energieinhalt der Bogensäule bestimmt, wurde von T. Matsumoto, M. Ishii, T. Kawamura, 1984 [29], spektroskopisch auf 3000–4500 K bestimmt (Strombereich: 2–6 A). Der Lichtbogendurchmesser wurde anhand von Momentaufnahmen durch Ausmessung der leuchtenden Kanalbreite zwischen zwei und fünf Millimetern geschätzt.

Zone 2: Elektrodenfall

Lichtbogenfusspunkte auf Elektrolytoberflächen wurden bereits mehrfach expe-

3) Der Energieinhalt für eine Lichtbogensäule in Luft von 2 mm Durchmesser und 4000 °C beträgt 16 mJ/cm (W. Rieder, 1969, Kapitel 5.6, Bild 42 [20]).

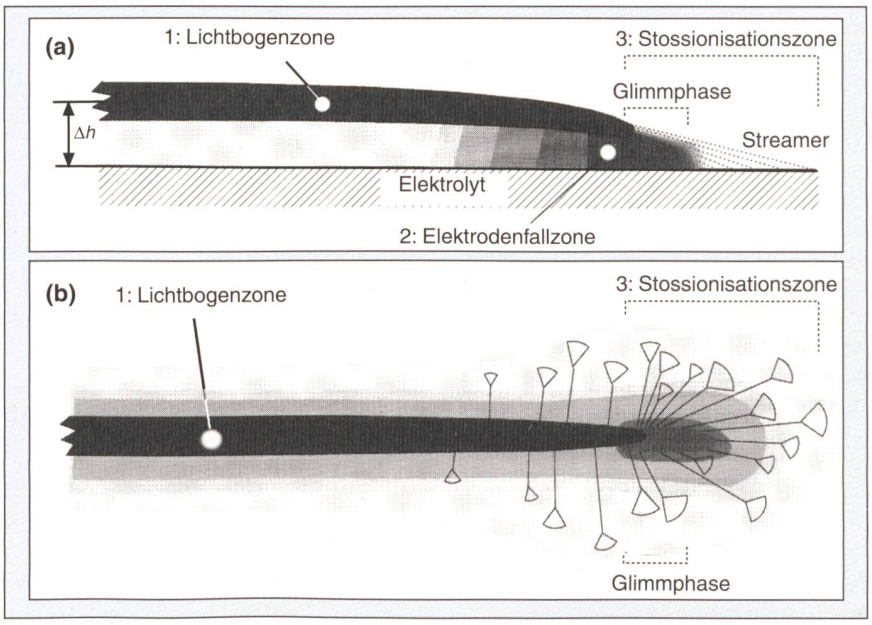

Bild 11 Dreizonenmodell

Schematische Darstellung der drei Entladungszonen in einer Gleitlichtbogenentladung auf einer leitfähigen Schicht
a Seitenansicht *b* Aufsicht

rimentell untersucht. Die Elektrodenfallspannungen und die Stromdichten scheinen nur wenig von der Stromstärke des Gleitlichtbogens und der Elektrolytleitfähigkeit abhängig zu sein. Anodenfallspannungen (200–400 V) liegen um etwa einen Faktor 3 tiefer als Kathodenfallspannungen (300 bis 1000 V). Die sich einstellenden Stromdichten sind nur wenig von der Stromstärke, aber sehr empfindlich von der Elektrolytleitfähigkeit abhängig.

Die Literatur enthält nur spärlich Hinweise für die Mechanismen, die einen Lichtbogenfusspunkt auf einer Elektrolytoberfläche aufrechterhalten. Wesentlich bessere Kenntnisse liegen über Lichtbogenfusspunkte auf Metallelektroden vor, da sie ein breites technisches Anwendungsfeld besitzen und deshalb eingehend studiert wurden. Eine Übersicht dazu findet sich bei G. Ecker, 1961 [30]. Die bekannten Theo-rien für Fusspunkte an Metallelektroden lassen sich jedoch nicht auf Elektrolyte übertragen. Dies trifft vor allem für Kathodenfälle zu: Elektrolytoberflächen besitzen weder eine ausreichend hohe Temperatur für eine thermische Freisetzung von Elektronen, noch erlaubt ihre Leitfähigkeit hohe Stromdichten und damit eine für Feldemission notwendige Fusspunktkontraktion [31, 32]. Der Kathodenmechanismus ist deshalb energetisch sehr ineffizient, und es entstehen hohe Fallspannungen.

Im Falle, wo die Elektrolytoberfläche die Anode bildet, sind die Vorgänge im Lichtbogenfusspunkt noch weniger bekannt. Da aus der Elektrolytanode keine positiven Ionen austreten, wird der Strom unmittelbar vor der Wasseroberfläche ausschliesslich durch Elektronen getragen, wobei eine schmale negative Raumladungszone entsteht. Die Elektronen müssen also im Raum zwischen Anode und Bogensäule positive Ionen durch Stösse erzeugen, um einen kontinuierlichen Übergang in ein neutrales Plasma zu schaffen. Aufgrund der hohen Gasdichte und der geringen Stromdichte läuft diese Ionenbildung ebenfalls wenig effizient ab, so dass auch der Anodenfall mehrere hundert Volt beträgt. Eine Zusammenstellung der Werte von Elektrodenfallspannungen auf Elektrolytoberflächen aus der einschlägigen Literatur sind in [1] zu finden.

Nebst einem grossen Leistungsverbrauch für Ionisation zur Erzeugung von Ladungsträgern entstehen im Lichtbogenfusspunkt grosse thermische Verluste. Es wird angenommen, dass der weitaus grösste Teil der im Fusspunkt umgesetzten Leistung, die mehr als 1 kW betragen kann, an die Elektrolytoberfläche und die Umgebung abgegeben wird. Da die Elektrodenoberfläche aus Wasser besteht, kann ihre Temperatur nicht wesentlich über 100 °C steigen, womit ständig ein sehr grosser Temperaturgradient aufrechterhalten werden muss.

Energiebilanz						
Energiezuwachs			=	Energiebedarf		
Widerstandsheizung des Lichtbogens	+	Energieumsatz durch Stossionisation	=	Bogenverlustleistung	+	Zuwachs des Energieinhalts im Lichtbogen
Lichtbogengleichung (Materialgleichung)						
Leitfähigkeit Lichtbogen			=	**exp** (Energieinhalt Lichtbogen)		
Netzwerkgleichungen						
Potential auf der Wasseroberfläche			=	**f** (Stromverteilung, Geometrie und spez. Widerstand)		
Elektrodenfall			=	const.		

Tabelle II Übersicht über die notwendigen mathematischen Beziehungen für die Aufstellung eines Modells zur mathematischen Modellierung von Gleitlichtbogenüberschlägen

Zone 3: Stossionisationszone

Wie schon anhand Bild 11 besprochen wurde, herrscht an der Gleitlichtbogenspitze eine hohe Feldstärke, welche in der Lage ist, Stossionisation zu erwirken. Die extreme *Feldstärkekonzentration* an der Gleitlichtbogenspitze hat dreierlei Gründe:

1. Das mittlere elektrische Feld in Längsrichtung vor der Gleitlichtbogenspitze wird dadurch erhöht, dass der Gleitlichtbogen durch seine gute Leitfähigkeit das hohe Potential der Spitzenelektrode nach vorne trägt.
2. Der im Gleitlichtbogen fliessende Strom tritt im wesentlichen in der Kopfregion auf den Elektrolyt über. Dadurch entsteht ein Potentialkegel, der dem mittleren Feld überlagert ist (siehe Bild 10).
3. Der hohe Elektrodenfall zwischen Gleitlichtbogen und Wasseroberfläche trägt ebenfalls additiv zu einer hohen elektrischen Feldstärke zwischen Lichtbogenspitze und der davor liegenden Elektrolytoberfläche bei.

Gemäss der vorliegenden Modellvorstellung bildet die Stossionisationszone den Vorläufer für eine kontinuierliche Neuentstehung des Plasmakanals [27]. Auf Fotografien werden vornehmlich bei positiven Gleitlichtbögen härchenartige Entladungskanäle in der Spitzenregion von Gleitlichtbögen beobachtet, welche als eine Art Streamer gedeutet werden [33, 34]. Durch die Feldverteilung konzentrieren sich diese Seitenentladungen hauptsächlich in Vorwachsrichtung, sind aber auch seitlich der Lichtbogenspitze beobachtbar. Die Corona an der Spitze des Gleitlichtbogens ist nicht immer gleich stark ausgeprägt. Bei negativer Polarität kann teilweise nur eine dünne, diffus leuchtende Haut am Entladungskopf festgestellt werden.

Es ist naheliegend, anzunehmen, dass die Umwandlung der Corona in ein thermisches Plasma über eine *Glimmentladungsphase* vonstatten geht, welche räumlich fliessend in die Fusspunktzone übergeht. Diese Glimmphase stellt im wesentlichen ein in Vorwachsrichtung verlängertes Elektrodenfallgebiet dar.

Vorwachsmechanismus

Nach dem betrachteten Modell erklärt sich der Vorwachsmechanismus aus dem Zusammenwirken der drei beschriebenen Entladungszonen. Für die dabei ablaufenden Prozesse werden folgende Thesen aufgestellt:

- Die Verlängerung der Gleitlichtbogensäule findet in der Stossionisationszone statt. Dabei besitzt die *Energiebilanz* im Übergangsbereich zwischen Corona und Bogenplasma, das heisst in der Glimmphase, zentrale Bedeutung. In der Glimmphase herrscht eine hohe Leistungsdichte. Das stossionisationsbestimmte Plasma entwickelt sich zu einem Plasma im lokalen thermischen Gleichgewicht. Die leitenden Elektronen werden dabei «thermalisiert»[4]. Bei diesem Prozess wird kontinuierlich Bogenplasma erzeugt, indem das Gas aufgeheizt wird. Das Ausmass, in welchem die in der Stossionisationszone elektrisch umgesetzte Leistung über dem Energieverlust liegt, und die Menge der in der Glimmphase produzierten *Überschussenergie* bestimmen die Vorwachsgeschwindigkeit.
- Der wirksame Energieüberschuss wird in erster Linie durch den Potentialabfall am Lichtbogenfusspunkt und durch den Strom in der Stossionisationszone bestimmt. Die wirksame Potentialdifferenz hängt von der Elektrodenfallspannung und teilweise

[4] Eine Übersicht der Vorgänge beim Übergang einer Glimmcorona in eine Plasmasäule im lokalen thermischen Gleichgewicht wurde von E. Marode, 1981 [35], gegeben.

Randbedingungen		
Masse Wasserkanal	$l \times b \times h$	25 × 5 × 1,5 cm
Elektrolytleitfähigkeit	λ_T	670 µS/cm
Widerstand pro Längeneinheit	R_W'	200 Ω/cm
schrittförmige Quellenspannung	U_q	+15 kV
Vorwiderstand	R_d	0 Ω
Parameter für das Dreizonenmodell der Gleitlichtbogenentladung		
maximale Fusspunktspannung	U_F	800 V
Abstand Gleitlichtbogen–Elektrolytoberfläche	D_h	2 mm

Tabelle III Randbedingungen und Modellparameter für das Simulationsbeispiel eines Gleitüberschlags

vom Potentialkegel im Elektrolyten ab. Der Potentialkegel seinerseits ist wiederum vom Strom durch den Lichtbogenfusspunkt abhängig. Die Energiebilanz wird folglich nicht durch eine aussen anliegende Spannung, sondern durch das *Eigenfeld* der Gleitlichtbogenspitze selbst definiert.

- Das Vorwachsverhalten wird grundsätzlich bei beiden Polaritäten des Gleitlichtbogens in gleicher Weise durch die Energiebilanz der Stossionisationszone bestimmt, wobei je nach Polarität stark unterschiedliche Fallspannungen vorliegen. Darin begründet sich, dass positive Gleitlichtbögen im oberen Feldstärkebereich für die gleiche Vorwachsgeschwindigkeit niedrigere Spannungen benötigen als negative, obwohl die Elektrolytkathode (bei positiver Polarität) eine etwa dreimal höhere Fallspannung erfordert als die Elektrolytanode (bei negativer Polarität).

Für die mathematische Beschreibung des beschriebenen Vorwachsmechanismus müssen im wesentlichen die in Tabelle II schematisch aufgeführten physikalischen Zusammenhänge berücksichtigt werden (für eine detaillierte mathematische Formulierung siehe [1]).

Beispiel einer Computersimulation mit dem Dreizonenmodell

Zur Illustration des im vorausgehenden Abschnitt aufgestellten Modells wurden die mathematischen Gleichungen für die beschriebenen Entladungszonen auf einem Arbeitsplatzrechner numerisch ausgewertet. Das im folgenden diskutierte Simulationsbeispiel geht von den in Tabelle III aufgeführten Versuchsbedingungen (Randbedingungen) aus. Die gewählten Modellparameter sind ebenfalls in Tabelle III angegeben.

Die Ausführung der Computersimulation erforderte die numerische Integration eines von der Zeit abhängigen Differentialgleichungssystems, wofür ein Runge-Kutta-Algorithmus verwendet wurde. Als Randbedingung wurde eine konstante Quellenspannung U_q vorgegeben. Der Anfangszustand entsprach dem Moment nach dem Überschlag auf die Wasseroberfläche.

Diskussion des Simulationsresultats

Bild 12 zeigt auf der linken Seite, Teilbilder *a* und *c*, das Simulationsergebnis, das heisst den zeitlichen Verlauf des Gesamtstroms in der Gleitstrecke und die Position des Gleitlichtbogenkopfs in Funktion der Zeit. Auf der rechten Hälfte von Bild 12 sind die entsprechenden experimentellen Aufzeichnungen, Stromoszillogramm b) und Schmierbild[5] d) abgebildet, bei welchen die Versuchsbedingungen den Vorgaben für die Simulation entsprechen. Die Rahmenbedingungen für die Simulationsberechnung und für das oszillografisch dargestellte Überschlagsexperiment sind der Tabelle III zu entnehmen.

Vergleicht man den aus der Simulation hervorgehenden Stromverlauf und die Vorwachsdynamik mit gemessenen Verläufen, so stellt man qualitative Übereinstimmung fest. Charakteristisch für das Simulationsresultat wie auch für die experimentellen Resultate ist, dass das Fortschreiten der relativen Position des Gleitentladungskopfs etwas weniger stark beschleunigt wird, als der Verlauf des relativen Stromanstiegs. Der Grund für dieses Verhalten ist in der thermischen Trägheit des Lichtbogens zu suchen.

Das mathematische Modell eignet sich zur Demonstration spezieller Eigenschaften eines Gleitlichtbogenüberschlags. Es bietet ferner die Möglichkeit, die Einflüsse gezielter Änderungen der Versuchsparameter zu studieren.

Zusammenfassung und praktische Konsequenzen

Obwohl der Gleitlichtbogenüberschlag seit gut sechs Jahrzehnten wissenschaftlich untersucht wird und zahlreiche Studien über dieses Phänomen veröffentlicht wurden, ist das dynamische Verhalten von Gleitlichtbögen noch nicht restlos erforscht. Der Grund dafür ist darin zu suchen, dass sich der Gleitlichtbogenüberschlag aus mehreren gleichzeitig ablaufenden und komplex zusammenwirkenden Entladungsprozessen zusammensetzt: An der Spitze von Gleitlichtbögen laufen vornehmlich elektronische Stossprozesse in einer verhältnismässig kalten Gasentladung ab, wobei sich die geladenen Teilchen nicht im thermodynamischen Gleichgewicht mit den Gasmolekülen befinden. An dieser Entladungsspitze bildet sich dann laufend ein «heisser» Lichtbogenkanal, in welchem die Bedingung für ein thermodynamisches Gleichgewicht erfüllt ist.

Eine physikalische Analyse des Gleitlichtbogenüberschlags führte zu einer Modellvorstellung, welche von drei koexistenten Entladungszonen ausgeht, welche verschiedenen physikalischen Gesetzmässigkeiten gehorchen: der Bogensäule, dem Elektrodenfall und der Stossionisationszone an der Gleitlichtbogenspitze. In der letztgenannten Zone erfolgt die Verlängerung der Bogensäule. Durch Aufstellung des Energieerhaltungssatzes und durch Einführung der elektrischen Netzwerkgleichungen im verteilten System kann der Gleitlichtbogenüberschlag mathematisch formuliert und auf Computern numerisch simuliert werden.

Ausgehend von den untersuchten physikalischen Eigenschaften von Gleitlichtbögen ergeben sich einige praktische isolationstechnische Konsequenzen, auf die im folgenden hingewiesen werden soll:

- Die Lösung von Fremdschichtproblemen stützt sich auch heute noch weitgehend auf Versuche am Isolator und auf Erfahrungen vor Ort ab. Aufgrund der *stochastischen Fremdschichtdynamik* kann die Entwicklung eines Fremdschichtüberschlags als Gesamtprozess, ausgehend von den Verschmutzungsbedingungen, theoretisch nicht vorausberechnet werden.
- Aus dem einfachen Stabilitätskriterium für die Ausbildung eines Gleitlichtbogenüberschlags folgt, dass ein Überschlag nur bei Überschreitung eines *kritischen Fremdschichtstroms* i_c möglich ist: Beziehung (7). Eine praktische Anwendung davon ist, dass die zunehmende Verschmutzung von Isolatoren durch Registrierung des Ableitstroms überwacht werden kann. Solange der kritische Strom i_c nicht überschritten wird, ist die Vorwachsbedingung nicht erfüllt und ein Isolationsversagen aufgrund eines Gleitlichtbogenüberschlags ausgeschlossen.
- Eine wichtige Konsequenz erwächst aus der Tatsache, dass der Gleitlichtbogenüberschlag, verglichen mit anderen Gasdurchschlagsprozessen, ein sehr langsamer Vor-

[5] Bei einer Schmierbildaufnahme wird das Abbild des Lichtbogens während dem Überschlagsvorgang rechtwinklig zur Lichtbogenachse abgelenkt. Mit einer Schmierbildkamera wird demnach die Verlängerung des Lichtbogens in Form eines Ort-Zeit-Diagramms aufgezeichnet.

gang ist. Während sich Gasdurchschläge normalerweise im Bereich von einigen Nanosekunden bis höchstens Mikrosekunden abspielen, besitzen Gleitlichtbögen Überschlagszeiten im Millisekundenbereich. In der Regel verlöschen Gleitlichtbögen im Nulldurchgang der Wechselspannung, wenn sie innerhalb einer Halbwelle nicht den gesamten Isolator überbrücken. Da nun eine deutliche Spannungsabhängigkeit der Lichtbogenlaufzeit vorliegt, resultiert eine Abhängigkeit der Überschlagsspannung von der Frequenz. Deshalb liegt die Überschlagsfestigkeit eines fremdschichtbehafteten Isolators bei Gleichspannungsbeanspruchung deutlich unterhalb jener bei Wechselspannung mit Netzfrequenzen von 50 Hz oder 60 Hz. Auch bei Bahnnetzen mit 16²/₃ Hz muss, verglichen mit 50 Hz, mit einer geringeren Isolationsfestigkeit bei leitfähigen Fremdschichten gerechnet werden.

- Eine einzigartige und wichtige Feststellung betrifft die extrem hohe *Fusspunktspannung* an der Übergangsstelle zwischen Lichtbogen und Elektrolyt. Der Elektrodenfall auf einer kathodischen Elektrolytoberfläche liegt zwischen 300 und 1000 V, jener auf anodischer Elektrolytoberfläche bei etwa 200–400 V. Die daraus resultierende hohe Feldstärke an der Lichtbogenspitze ermöglicht das Auftreten von Streamerentladungen durch Stossionisation. Diese Vorläuferentladungen sind letztlich für die Verlängerung der Bogensäule verantwortlich. Gelangt der Gleitlichtbogen mit seiner Spitze auf eine metallische Elektrode, so fällt die Fusspunktspannung bis auf wenige Volt zusammen. Der vergleichsweise sehr geringe Elektrodenfall auf einer Metalloberfläche von einigen Volt reicht nicht aus, um Streamerentladungen als Wegbereiter für das Weiterwachsen der Gleitentladung zu erzeugen (siehe auch [36]). Es bestehen deshalb Vorschläge, auf Stabisolatoren mehrere ringförmige Metallelektroden aufzubringen, welche vorwachsende Gleitlichtbögen aufhalten, womit die Isolationsfestigkeit unter Verschmutzungsbedingungen gesteigert würde. Der beschriebene Effekt ist auch die Ursache dafür, das Kettenisolatoren in der Regel eine grössere Isolationsfestigkeit unter Verschmutzungsbedingungen besitzen als Stabisolatoren – gleiche Kriechweglänge und Schirmzahl vorausgesetzt.

Schlussbemerkung

Der Autor dankt den Herren Stefan Neuhold und Thomas Nietlispach für die fotografischen Spezialaufnahmen von Gleitlichtbögen im Rahmen ihrer Studienarbeit in der Fachgruppe Hochspannungstechnik [37]. Gebührender Dank gilt Herrn Helmut Krauss, FKH, für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Literatur

[1] *R. Bräunlich:* Grenzen der elektrischen Beanspruchung von Wasserstrahlen in Strahlelektrokesseln. Diss. ETH Nr. 9758, 1992.

[2] *W. Weicker:* Die Leitungsisolatoren von Lauffen bis Frankfurt a. M. im Bilde der Gegenwart. Elektrotechnische Zeitschrift: 52/25, Juni 1931, S. 807 bis 808.

[3] *F. Obenaus:* Der Einfluss von Oberflächenbelag (Tau, Nebel, Salz und Schmutz) auf die Überschlagsspannung von Isolatoren. Mitteilungen der Isolatorenfabrik Hermsdorf Schomburg GmbH 12/70 (1933), S. 2203.

[4] *F. Obenaus* and *H. Böhme:* Pollution flashover tests on insulators in the laboratory and in systems and the model concept of creepage-path flashover. Cigré paper Nr. 407 (1966).

[5] *B. B. Palit:* Fremdschichtüberschlag an einer Modellanordnung. Bull. SEV/VSE: 64 (1973) 20, S. 1239–1247.

[6] *B. B. Palit:* Einfluss der Kurzschlussleistung von Speisenetzen auf den Fremdschichtüberschlag an einer Modellanordnung. Bull. SEV/VSE: 64 (1973) 22, S. 1411–1424.

[7] *F. A. M. Rizk:* Influence of AC source parameters on flashover characteristics of polluted insu-

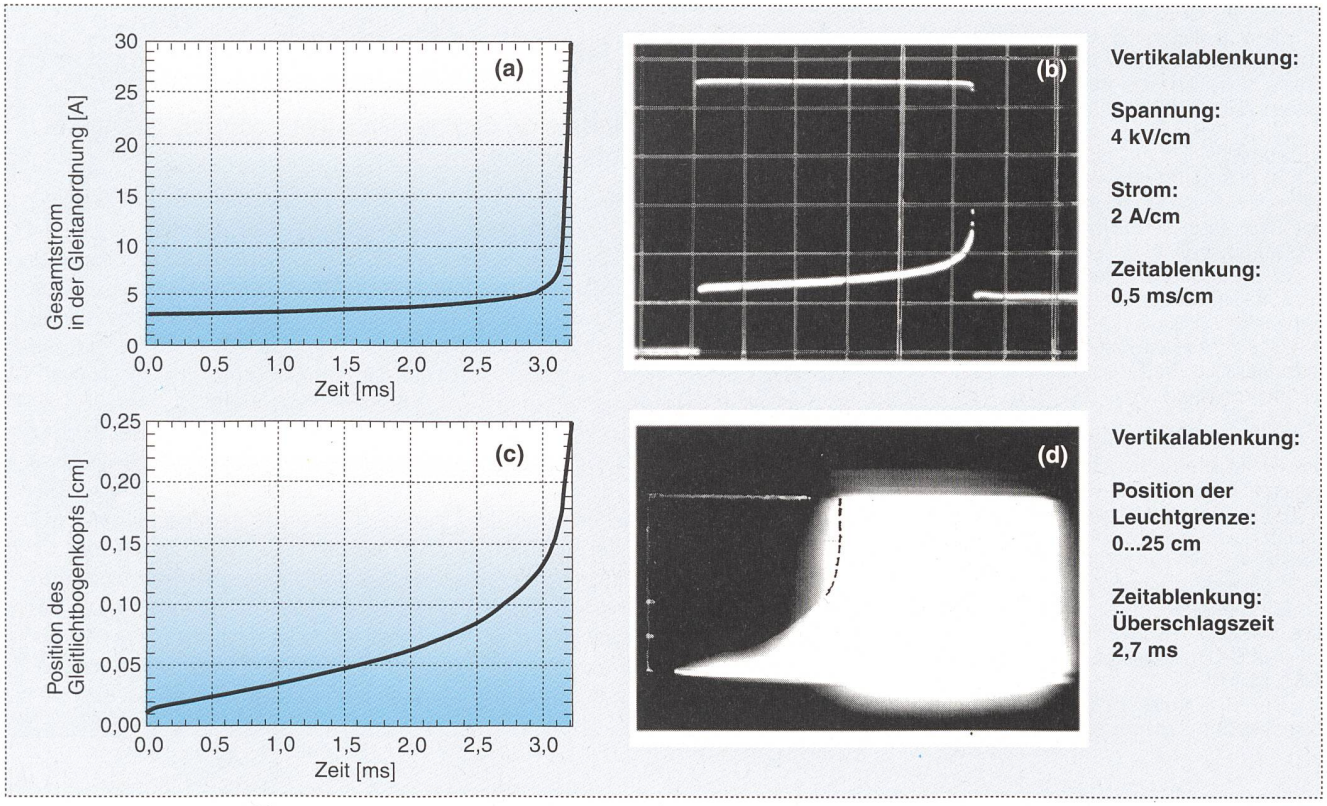

Bild 12 Vergleich Computersimulation mit Messungen für Gleitlichtbogenüberschlag

a berechneter Stromverlauf für Gleitlichtbogen
b Strom- und Spannungsoszillogramm für einen entsprechenden Gleitlichtbogenüberschlag; die Spannung bleibt nahezu konstant. Spannung (oben) Vertikalablenkung: 4 kV/Skaleneinheit; Strom (unten) Vertikalablenkung: 2 A/Skaleneinheit; Zeitablenkung (horizontal): 0,5 ms/Skaleneinheit
c zeitlicher Verlauf der Position des Gleitlichtbogenkopfs
d Schmierbildaufnahme des Gleitlichtbogenüberschlags. Vertikalablenkung: Position der Leuchtgrenze bei 0–25 cm; Zeitablenkung: Überschlagszeit 2,7 ms.

lators. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems: PAS-104/4, April, 1985, pp. 948–958.

[8] *W. Köhler:* Spannungsquellen für Fremdschichtprüfungen. Dissertation, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Juni 1988.

[9] *P. J. Lambeth:* Effect of pollution on high-voltage outdoor insulators. Proc. of the Institution of Electrical Engineers (Proc. IEE), IEE Reviews, 118/9R, September 1971, pp. 1107–1130.

[10] *F. A. M. Rizk:* Mathematical models for pollution flashover. Electra: 78, October 1981, pp. 71 to 103.

[11] *M. P. Verma, H. Niklasch, W. Heise, G. F. Luxa* and *H. Schreiber:* Cigré Conference 1978, paper 33–09.

[12] *P. Claverie* and *Y. Porcheron:* How to choose insulators for polluted areas. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems: PAS-92/3, May/June 1973, pp. 1121–1131.

[13] *E. Nasser:* Contamination flashover of outdoor insulation. ETZ-A 93 (1972), pp. 321–325.

[14] *A. A. J. Al-Baghdadi:* The mechanism of flashover on polluted insulation. Ph-D Dissertation, University of Manchester, May 1970.

[15] *D. C. Jolly:* Contamination flashover, part I: Theoretical aspects. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems: PAS-91/6, Nov./Dec. 1972, pp. 2437–2442.

[16] *R. Wilkins:* Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers (Proc. IEE), 116/3, March 1969, pp. 457–465.

[17] *G. Neumärker:* Verschmutzungszustand und Kriechweg. Monatsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften, Berlin 1(1959), S. 352–359.

[18] *L. L. Alston* and *S. Zoledziowski:* Growth of discharges on polluted insulation. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers (Proc. IEE) 110/7, July 1963, pp. 1260–1266.

[19] *W. B. Nottingham:* A new equation for the static characteristic of the normal electric arc. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, AIEE: 42 (1923), pp. 12–19.

[20] *W. Rieder:* Plasma und Lichtbogen. Vieweg Verlag, 1967.

[21] *D. A. Swift:* Flashover of polluted insulators: electric field in the arc. 6th Int. Symp. on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, 28.8. to 1.9.1989, paper 30.10.

[22] *W. Kaufmann:* Elektrodynamische Eigentümlichkeiten leitender Gase. Annalen der Physik, vierte Folge 2 (1900), S. 158–178.

[23] *B. F. Hampton:* Flashover mechanism of polluted insulation. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers (Proc. IEE) 111/5, May 1964, pp. 985–990.

[24] *P. I. Shkuropat:* Development of a discharge on a wet insulator surface with DC. N-Tekh. Inf. Byull. Leningrad Polytechnic Inst. 1 (1957), pp. 41–51.

[25] *H. Näcke:* Lichtbogenfestigkeit und Kriechstromfestigkeit von Isolierstoffen. Dissertation der Fakultät für Elektrotechnik an der Technischen Universität Berlin-Charlottenburg, Nr. D 83: (1962).

[26] *S. Hesketh:* General criterion for the prediction of pollution flashover. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers (Proc. IEE) 114/4, April 1967), pp. 531–532.

[27] *F. D. A. Boylett* and *I. G. Maclean:* Propagation of electric discharges across the surface of an electrolyte. Proc. Roy. Soc., London: A324 (1971), pp. 469–489.

[28] *L. Shunyan, Z. Renyu* and *Z. Kexiong:* Measurement of dynamic potential distribution during propagation of a local arc along a polluted surface. IEEE Transactions on Electrical Insulation: EI-25/4, August 1990, pp. 757–761.

[29] *T. Matsumoto, M. Ishii* and *T. Kawamura:* Optoelectronic measurement of partial arcs on contaminated surface. IEEE Transactions on Electrical Insulation: EI-19/6 (1984), pp. 543–549.

[30] *G. Ecker:* Electrode components of the arc discharge. Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, Herausgeber: S. Flügge, F. Trendelenburg, Band 33, Springer Verlag 1961, S. 1–103.

[31] *A. von Engel* and *A. E. Robson:* The exitation theory of arcs with evaporating cathodes. Proceedings of the Royal Society: A243 (1958), pp. 217–236.

[32] *A. von Engel* und *M. Steenbeck:* Elektrische Gasentladungen. Springer Verlag, Berlin, 1934.

[33] *Y. Nakao, H. Itoh, Y. Sakai* and *H. Tagashira:* Studies of the creepage discharge on the surface of liquids. IEEE Transactions on Electrical Insulation: EI-23/4 (1988), pp. 677–687.

[34] *Z. Guan, L. Warren, A. A. J. Al-Baghdadi* and *D. R. Goulsbra:* The polarity effect of discharges on polluted insulators. Sixth International Symposium on High Voltage Engineering, New Orleans, LA, USA, August 28–September 1, 1989, paper 30.03.

[35] *E. Marode:* The glow to arc transition. Nato Seminar 1981, pp. 119–116.

[36] *D. A. Swift:* Flashover across the surface of an electrolyte: arresting arc propagation with narrow metal strips. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers (Proc. IEE) 127/8, November 1980, pp. 553–564.

[37] *S. Neuhold* and *Th. Nietlispach:* High-Speed-Photographie von Gleitlichtbögen. Studienarbeit Nr. 244, Wintersemester 1991/92.

Normen, die im Zusammenhang mit Fremdschichten an Isolatoren stehen:

[38] ANSI C29-2: Wet process porcelain and toughened glas insulators, 1983.

[39] ANSI C77-1, American standard for wet tests: Artificial Pollution Tests on HV insulators, 1975.

[40] ASTM D 2303: Standard method of test for liquid contaminant inclined-plane tracking and erosion of insulating materials (ASTM D 2303-73).

[41] IEC 273: Dimensions of indoor and outdoor post insulators and post insulator units for systems with nominal voltages greater than 1000 V, 1979.

[42] IEC 305: Characteristics of string insulator units of cap and pin type, 1978.

[43] IEC 433: Characteristics of string insulator units of long rod type, 1980.

[44] IEC 383: Tests on ceramic/glass insulators for voltages greater than 1000 V, 1983.

[45] IEC 507: Artificial Pollution Tests on HV insulators to be used on a.c. systems, 1991.

[46] IEC 720: Characteristics of line post insulators, 1981.

[47] IEC 815: Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions, 1986.

[48] VDE 0448 / DIN 57 448: Prüfung von Isolatoren für Betriebs-Wechselspannungen über 1 kV unter Fremdschichteinfluss. Teil 1: Kieselgur-Prüfverfahren, 1975; Teil 2: Salz-Nebel-Prüfverfahren, 1977.

La résistance diélectrique des isolateurs salis

L'arc glissant – mécanisme-clé dans le claquage de couches étrangères sur les isolateurs haute tension

Un des principaux critères de conception des isolateurs haute tension de plein-air est le comportement de leur surface en cas d'encrassement en service. L'article présente les causes de la forte dégradation des isolements de surface par les couches étrangères conductrices. Il explique la manière dont la défaillance d'isolateurs encrassés est normalement provoquée par ce qu'on appelle un arc glissant, c'est-à-dire un arc couvrant une partie de la surface de l'isolateur (fig. 1–3) et dont les extrémités peuvent se déplacer librement sur la surface salie, ce qui, dans certaines conditions, peut aboutir au claquage et au court-circuit à la terre sur le réseau haute tension.

L'apparition d'un arc glissant et, ensuite, d'un claquage complet, dépend de deux conditions qui doivent être remplies: une condition de stabilité pour l'arc et celle qu'un arc une fois formé puisse continuer de croître (table II, équations 1–8, fig. 4), conditions qui sont examinées plus en détail dans l'article. Des essais de modèles avec arcs glissants sur des canaux d'eau (table II, fig. 5–9) permettent de vérifier les modèles. Un modèle plus poussé montre que l'arc glissant peut être subdivisé grossièrement en trois zones coexistantes de décharge (fig. 10 et 11). Les simulations à l'ordinateur (avec les conditions aux limites selon la table III) concordent bien avec les mesures (fig. 12). Sur la base de cette vue physique du mécanisme d'arc glissant, l'auteur décrit les conséquences pratiques pour le développement de nouvelles constructions d'isolateurs.