

1 Einleitung

Hochspannungs-Hochleistungssicherungen (HH-Sicherungen) sind wichtige Schutzglieder der Mittelspannungsebene. Es wird zwar angezweifelt, ob Sicherungen noch zeitgemäß sind [Erl85, Dir86, Pik01], aber aufgrund ihrer Vorteile sind sie auch heute nur schwer zu ersetzen: Sicherungen sind verglichen mit Schaltgeräten hohen Schaltvermögens sehr kosteneffizient, benötigen keine Wartung oder Hilfsenergien und wirken beim Auftreten hoher Fehlerströme durch das sofortige Einsetzen des Schaltvorgangs strombegrenzend. Dem steht der Nachteil der einmaligen, irreversiblen Schalteroperation entgegen. Daher werden Sicherungen hauptsächlich zum Schutz von Ortsnetztransformatoren eingesetzt [Gri01, Geo02], wo sie den zerstörenden Auswirkungen eines Transformatorfehlers [Erl85, Ham92] entgegenwirken.

Bei der Anwendung von HH-Sicherungen steht naturgemäß das Schaltverhalten im Vordergrund, und so findet sich eine Vielzahl von Publikationen über die diversen Zusammenhänge und Einflüsse beim Schalten. [Wri04] stellt fest, daß Sicherungen zu den am besten erforschten Schaltgeräten gehören. Dies ist in Bezug auf das Schaltverhalten unzweifelbar richtig, denn bereits Anfang 1900 erschienen wissenschaftliche Abhandlungen über die Sicherungen [Mey07, Fel08].

In dieser Arbeit steht jedoch ein anderer Aspekt im Vordergrund: das Teilentladungsverhalten. Teilentladungen (TE) sind elektrische Entladungen innerhalb elektrischer Isolierungen, die nicht direkt zum unmittelbaren Versagen der Isolierfähigkeit führen, aber ein Anzeichen für Vorgänge im Isolierstoff sein können, die zu einem Versagen und somit zu einem Ausfall des betroffenen Bauteils führen können. Daher ist die Kenntnis über die TE-Situation eines Bauteils ein wichtiges, zentrales Kriterium bei der Beurteilung des Isolationszustandes von Betriebsmitteln und ein bedeutender Entscheidungsfaktor in Bezug auf Wartung, Reparatur und Austausch (Asset-Management [Jud02, Stu03]). Bei der Entwicklung und Fertigung von Geräten und Anlagen ist das TE-Verhalten ein Beurteilungskriterium über deren Güte und spielt im Qualitätsmanagement eine große Rolle [Bar02].

In der Fachliteratur über Sicherungen finden sich kaum Beiträge zum Thema TE, meist beschäftigen sie sich mit Korona, einer speziellen Form von TE in Gasen an inhomogenen Elektrodenanordnungen [Vel01]. Bei Sicherungen wird die Inhomogenität durch den Schmelzleiter verursacht [Löp31, Zot87]. Dabei greift die Korona den Schmelzleiter durch Elektroerosion oder Bildung von Ozon und nitrosen Gase an, was unvorteilhafte Änderungen in Bezug auf das Langzeitverhalten der Sicherung mit sich bringt [Sie11]. Moderne Sicherungen sind zwar koronaresistent ausgelegt, trotzdem können TE entstehen, die sich nachteilig auf TE-Messungen an anderen Bauteilen auswirken. Ziel der Arbeit ist daher das Ausmaß der TE zu ergründen und Maßnahmen zu deren Verhinderung zu untersuchen.

1.1 Problematik der Teilentladungen bei Sicherungen

Wurden Schaltanlagen früher luftisoliert und in offener Bauweise ausgeführt (Bild 1.1a), sind heute vermehrt Kompaktschaltanlagen (Bild 1.1b) anzutreffen, wobei das für Schaltanlagen benötigte Volumen, somit auch die Größe der Bauteile, ständig sinkt [Wal98]. Die Sicherungen werden oft in speziellen Kammern, Köchern oder Gehäusen untergebracht [Sha71, Buc82, Erl85, Dir88]. Bei Transformatoren werden Sicherungen als Kurzschlußstrombegrenzer direkt in den Kessel [Gri01, Geo02] oder in Steckersysteme [Buc82] eingebaut. Während

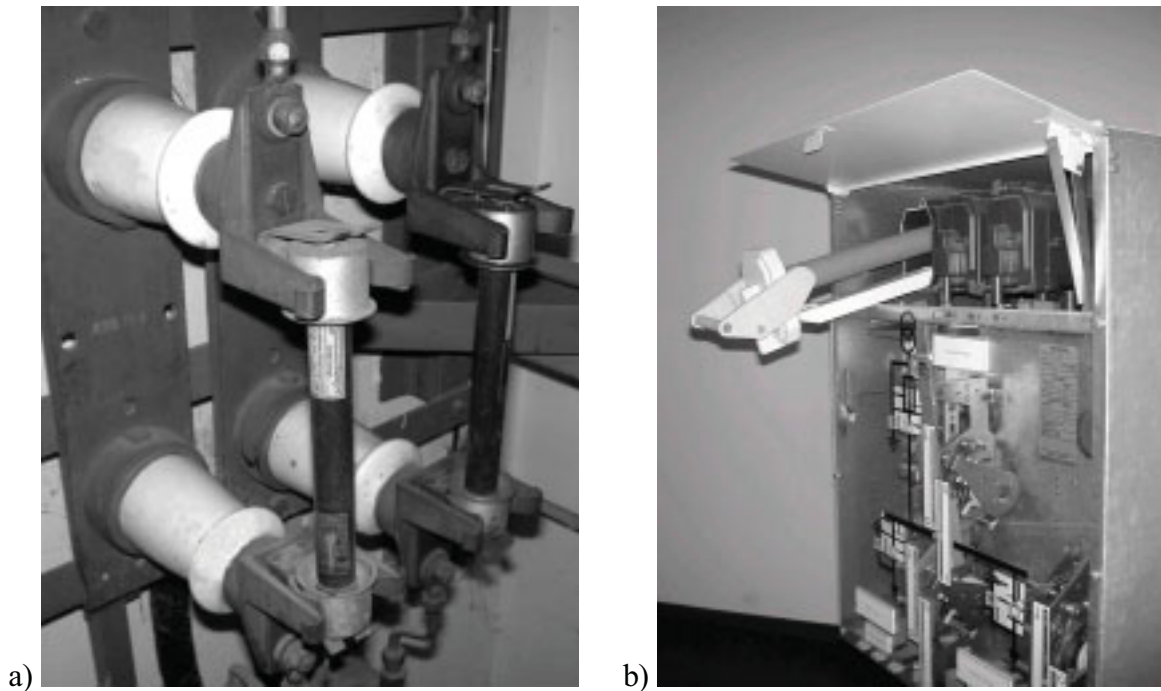


Bild 1.1: Anordnung von Sicherungen in Schaltanlagen
a) luftisoliert, b) Kompaktschaltanlage

in der luftisolierten Schaltanlage der Abstand zu geerdeten Bauteilen ca. 20 cm beträgt, sind es bei der SF₆-isolierten Schaltanlage nur noch ca. 7 cm.

Eine Sicherung in einem Gehäuse stellt prinzipiell eine konzentrische Zylinderanordnung dar (Bild 1.2). Die Sicherung (1) ist von einem Dielektrikum (4) umgeben, das nach außen durch geerdete Bauteile abgeschlossen ist. Zwischen Dielektrikum und Sicherung befindet sich ggf. ein Luftspalt (3). Der Innenraum der Sicherung (2) ist mit Sand gefüllt. Da die Schmelzleiter (5) unter Spannung stehen, die Umgebung aber Erdpotential aufweist, ergibt sich annähernd ein radiales elektrisches Feld. Die Schmelzleiter sind auf einem sternförmigen Wickelkörper (6) aufgebracht.

Je nach Abstand d_{Sand} zwischen Sicherungsrohr und Schmelzleiterebene bzw. der Dicke des Luftspaltes d_{Luft} ergibt sich nach [Wolf68] bei Annahme einer zylindrischen Anordnung mit geschichteten Dielektrika eine vom Aufpunkt r abhängige elektrische Feldstärke von

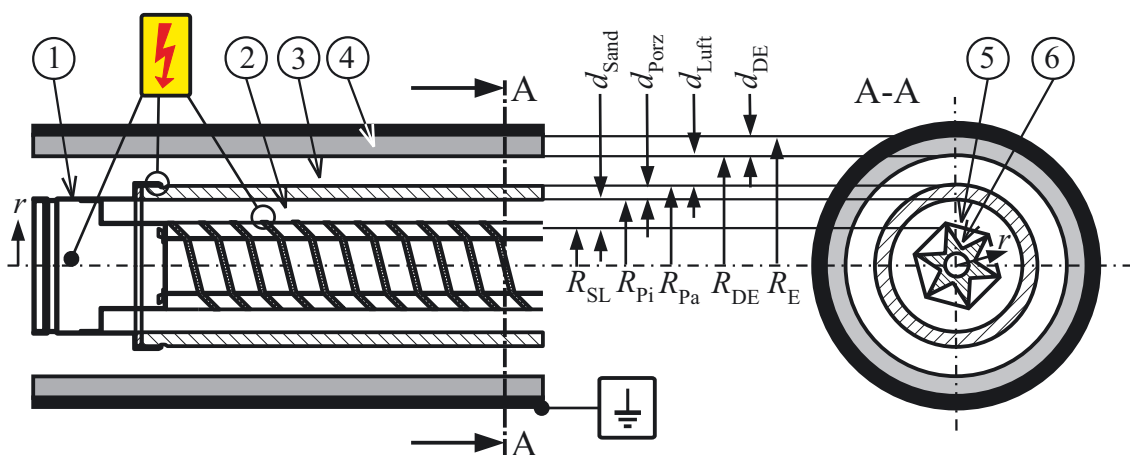


Bild 1.2: Sicherung mit Kapselung (schematisch)

$$|\vec{E}_{\text{Sand}}| = \frac{1}{r \cdot \epsilon_{\text{Sand}}} \cdot \frac{U}{\frac{1}{\epsilon_{\text{Luft}}} \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{DE}}}{R_{\text{Pa}}}\right) + K} \quad (1.1)$$

mit:

$$R_{\text{SL}} < r < R_{\text{Pi}}$$

$$K = \frac{1}{\epsilon_{\text{Sand}}} \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{Pi}}}{R_{\text{SL}}}\right) + \frac{1}{\epsilon_{\text{Porz}}} \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{Pa}}}{R_{\text{Pi}}}\right) + \frac{1}{\epsilon_{\text{DE}}} \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{E}}}{R_{\text{DE}}}\right)$$

ϵ = Permittivität des jeweiligen Materials

R_{SL} = mittlerer Schmelzleiterradius = $(R_{\text{SL, min}} + R_{\text{SL, max}})/2$

$R_{\text{Pi}}, R_{\text{Pa}}$ = Innen-, Außenradius des Porzellanrohrs

R_{DE} = Innenradius des Dielektrikums

R_{E} = Radius der Feldbegrenzung

Die Feldstärke nimmt mit kleinerem r und geringerer Luftspaltdicke $d_{\text{Luft}} = R_{\text{DE}} - R_{\text{Pa}}$ zu. Ein Maximum tritt auf, wenn $r = R_{\text{SL}}$ gesetzt wird, also an den Schmelzleitern selbst. Wird die Sicherung mit einem Dielektrikum ummantelt, dessen Permittivität ϵ_{DE} größer ist als diejenige des Luftspaltes, was bei nicht-gasförmigen Isolierstoffen immer der Fall ist, steigt die Feldstärke an den Schmelzleitern ebenfalls. Wird der Luftspalt völlig eliminiert ($R_{\text{DE}} = R_{\text{Pa}}$), ist die Feldstärke bei sonst gleichen Abmessungen maximal.

Wird Gl. 1.1 in Abhängigkeit von R_{DE} dargestellt, ergibt sich der in Bild 1.3 dargestellte Verlauf. Dabei wurden die übrigen Parameter als konstant angenommen und im Parameter K zusammengefaßt. Je höher K ist, desto geringer ist der Einfluß von R_{DE} , ansonsten folgen die Verläufe einer gebrochenrationalen Funktion des Logarithmus von R_{DE} . Wird R_{DE} von 10 auf 2 Einheiten reduziert, verdoppelt sich die Feldstärke.

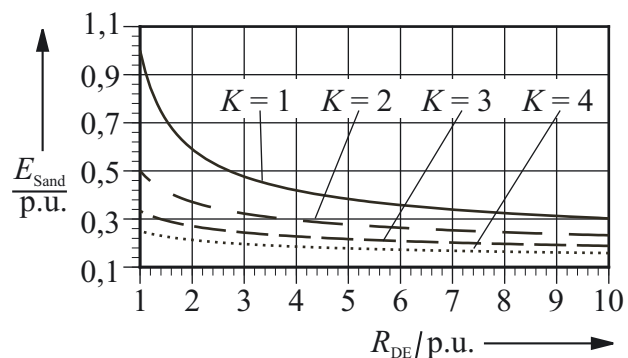


Bild 1.3: Verlauf der Funktion aus Gl. 1.1 mit K als Parameter

Die tatsächliche Feldstärke an den Schmelzleitern ist noch sehr viel höher, da

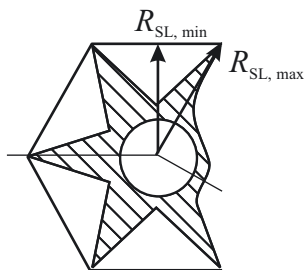


Bild 1.4: Variation von R_{SL} durch den Schmelzleiterträger

diese nicht als kontinuierliche Fläche, sondern in Form diskreter Bänder am Radius R_{SL} vorliegen und der Schmelzleiterträger zudem eine eckige Form aufweist (s. Bild 1.2, Schnitt A-A und Bild 1.4): Durch den sternförmigen Wickelkörper schwankt der Abstand der Schmelzleiter von der Achse der Sicherung zwischen $R_{\text{SL, min}}$ und $R_{\text{SL, max}}$.

Außerdem werden heute überwiegend bandförmige Schmelzleiter eingesetzt, die durch ihre kantige Form zu einer zusätzlichen Feldüberhöhung führen (Bild 1.5a-b).

Die Dicke d_{SL} der Bänder beträgt nur einige $10 \mu\text{m}$, die

Breite b_{SL} immerhin 1-5 mm. Die Aussparungen (Engstellen) werden meist durch Stanzen erzeugt, wodurch sich zusätzliche Inhomogenitäten durch Stanzgrate ergeben. Homogenere Verhältnisse scheinen beim Wickelschmelzleiter (Bild 1.5c) und bei Schmelzleitern mit konisch aufgalvanisierten Engstellen (Bild 1.5d) zu herrschen, jedoch sind bei Kerndrahtdurchmessern (d_1) um $100 \mu\text{m}$ die Bedeckungen des Wickelkörpers in axialer Rich-

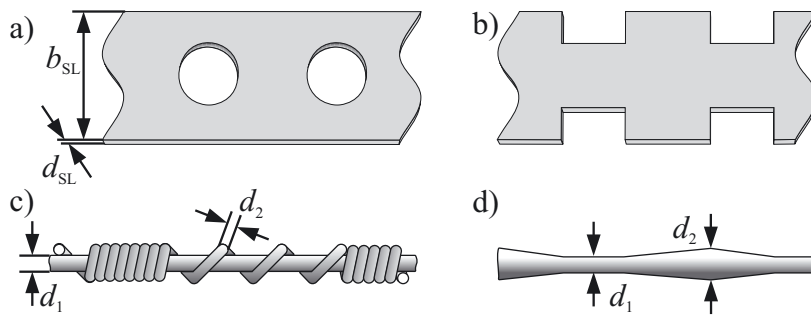


Bild 1.5: Formen von Schmelzleitern und Engstellen
 a) Mittelloch, rund b) Randkerbe, eckig
 c) Wickelschmelzleiter d) konisch aufgalvanisiert

tung noch geringer als bei Bandschmelzleitern, und die Fertigung der Schmelzleiter ist zudem kompliziert.

In Anlagen mit gekapselten Sicherungen finden sich gegenüber herkömmlichen luftisolierten Innenraumschaltanlagen reduzierte Luftspaltdicken und Di-

elektrika, welche die Sicherung umhüllen, so daß von einer höheren Feldstärke an den Schmelzleitern auszugehen ist. Zudem verringert sich die Baugröße von Schaltanlagen ständig, so daß die Problematik der TE in Sicherungen noch zunehmen wird.

Unter der hypothetischen Annahme, daß TE in Sicherungen keinen nachteiligen Einfluß auf die Sicherung und deren Betrieb haben, sind diese unerwünscht, da sie im Umfeld der Sicherung störenden Einfluß auf Meß- oder Monitoring-Geräte haben können. Wie später gezeigt wird, erzeugen Sicherungen unter ungünstigen Bedingungen TE mit Pegeln von mehreren nC, die sich in angeschlossenen Anlagenteile ausbreiten können [Berl01, GolB01], so daß Prüfungen an Schaltanlagen mit einem maximal zulässigen Pegel von 20 pC [VDE0278] oder Kabelstrecken mit einem maximalen zulässigen Pegel von 5 pC [IEC502] nicht mehr möglich sind und auf andere Meßgrößen (z.B. Überwachung des Kabelschirms [Gla95]) ausgewichen werden muß.

Im Zuge eines umfassenden Asset-Managements werden in zunehmendem Maße Monitoringgeräte eingesetzt, um Wartungskosten zu reduzieren und gleichzeitig die Versorgungsqualität zu erhöhen [Cli01, SchN01]. Ein wichtiger Monitoring-Parameter ist das TE-Verhalten [Wes02], da TE eine große Rolle bei der Degenerierung von Isolierstoffsystemen spielen [u.a. Lind90, Pei99]. Zudem können die hochfrequenten Anteile der TE-Impulse eine Beeinflussung von Informationsübertragungen verursachen [Kai01].

1.2 Untersuchungsziele

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Messung, Aufzeichnung und Auswertung von TE, die durch Sicherungen erzeugt werden. Aus den Aufzeichnungen sollen für Sicherungen charakteristische Merkmale extrahiert werden, die es erlauben, TE aus Sicherungen zu identifizieren. Des weiteren ist zu klären, ob TE die Sicherung beeinflussen und falls ja, welche Einflüsse vorhanden sind bzw. welche Mechanismen wirken. Ein dritter Schwerpunkt der Arbeit sind Maßnahmen, welche die TE in Sicherungen reduzieren oder deren Entstehung gänzlich verhindern.

1.2.1 Ermittlung des TE-Verhaltens von Sicherungen

Die TE entstehen offensichtlich im Sand als Löschmittel der Sicherung. Sand besteht aus einer festen (Quarz, SiO_2) und einer gasförmigen Komponente (Luft). Wegen der hohen Durchschlagfeldstärke von Quarz (278 kV/mm [Blan94]) ist davon auszugehen, daß Entladungen ausschließlich in der gasförmigen Komponente stattfinden und der Quarz allenfalls durch seine mechanischen und dielektrischen Eigenschaften sowie die Bereitstellung von

Oberflächen eine Rolle spielt. Daher wird erwartet, daß das TE-Verhalten von Sicherungen demjenigen von Entladungen in Luft bzw. Luft-Feststoffgrenzflächen entspricht.

HH-Sicherungen werden überwiegend in Wechselstromnetzen in der Mittelspannungsebene eingesetzt. Daher sind die Untersuchungen des TE-Verhaltens auf den Wechselspannungsbereich (50 Hz) fokussiert und erfolgen unter Verwendung konventioneller Meßtechnik, da diese den höchsten Verbreitungsgrad hat. Die einfachste und gebräuchlichste Meßmethode ist die Bestimmung der TE-Pegel in Abhängigkeit von der Prüfspannung, für die je nach Anwendungsgebiet Grenzwerte in der Normung festgelegt sind [VDE0278].

Einen höheren Informationsgehalt – allerdings auch einen größeren Aufwand bei der Aufzeichnung, Auswertung und Bewertung des TE-Verhaltens – liefern Meßmethoden, die weitere Charakteristika wie Höhe einzelner TE-Impulse, deren statistische Verteilung über der Phase der Prüfspannung oder die zeitliche Abfolge der TE-Impulse in Relation zueinander und zur Prüfspannung bestimmen. In dieser Arbeit wird die phasenaufgelöste TE-Analyse (engl. *phase resolved partial discharge diagnostic*) verwendet, welche die Relation der TE-Impulse zur Phase der Prüfspannung aufzeigt.

1.2.2 Auswirkungen von TE auf Sicherungen

TE oder Koronaentladungen an Sicherungen sind seit längerem bekannt [Läpp31]. In dieser Arbeit soll geklärt werden, ob TE auch moderne Sicherungen beeinflussen und welche Mechanismen wirksam sind. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung der Auswirkungen auf das Schaltverhalten.

1.2.3 Maßnahmen zur TE-Reduktion

Zur Verringerung oder Vermeidung der TE in HH-Sicherungen sind verschiedene Möglichkeiten denkbar: Modifikation der Sicherungen am Schmelzleitersystem, z.B. Form und Anordnung der Schmelzleiter, am Löschmedium, durch Variation der Art und Zusammensetzung des Sandes sowie des Gases, das zwischen den Sandkörnern enthalten ist, und am Sicherungsrrohr zwecks Schirmung oder Feldsteuerung. Eine Unterbringung der Sicherungen in speziellen Gehäusen kann durch Schirmung die feld- und leitungsgebundene TE-Ausbreitung verhindern oder durch Feldsteuerung eine Erhöhung der TE-Einsetzfeldstärke und damit eine Absenkung der TE-Aktivität bewirken.

Schließlich sind Verfahren in der TE-Meßtechnik möglich, die zwar eine TE-Bildung in der Sicherung zulassen, aber Maßnahmen zur Identifikation und zum Ausfiltern der sicherungsspezifischen TE-Impulse beinhalten.

1.2.3.1 Modifikation der Sicherung

Im Vordergrund bisher durchgeführter Untersuchungen zur Modifikation von Sicherungen stand meist das Schaltverhalten, insbesondere das Erreichen einer Vollbereichscharakteristik in der Strom/Zeit-Kennlinie [EN60282], die das Schalten in einem weiten Strombereich ermöglicht [Ege90, Bre93, Dre94]. Schon früh wurde der Einfluß verschiedener Schmelzleitermaterialien [Mey07] und die Wirkung unterschiedlicher Schmelzleitergeometrien untersucht [Fel08], aber die für die TE-Entstehung relevanten Verhältnisse des elektrischen Feldes innerhalb der Sicherung sind bis heute kaum bekannt. Sie lassen sich bisher lediglich anhand der Analogie zum thermischen Verhalten [Wei71] oder zu bekannten Leiteranordnungen der Energietechnik [Phi88] abschätzen. Beispielsweise trägt die Verwendung mehrerer parallel geschalteter Schmelzleiter nicht nur zur Verbesserung des Schaltverhaltens bei [Fel03, Loh38], sondern hat durch die Homogenisierung des Feldes einen Einfluß auf die TE-

Aktivität. Wie hoch dieser Einfluß ist, wurde bisher noch nicht untersucht. Daher wird der Einfluß dieses und weiterer Parameter auf das elektrische Feld anhand einer Feldsimulation geklärt und die Erkenntnisse an Modellsicherungen getestet. Allerdings sind der Schmelzleitervariation in Hinsicht auf das Schaltverhalten enge Grenzen gesetzt.

Die Einflußmöglichkeiten auf das Löschmedium sind begrenzt, da bestimmte Eigenschaften für den strombegrenzenden Löschvorgang der Sicherung unabdingbar sind. Das Löschmittel beeinflusst im Normalbetrieb, wenn die Sicherung noch nicht geschaltet hat, entscheidend das thermische Gleichgewicht [Wei71, Sten72, Bok94] und damit die Kennlinie der Sicherung [Tro88]. Die wichtigsten Parameter in dieser Phase sind die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität [Rei93, Bok94]. Außerdem darf das Löschmittel keine negativen chemischen Veränderungen an den Schmelzleitern hervorrufen, wie sie durch Verunreinigungen verursacht werden können [Olb57]. In dieser Arbeit werden Löschmittelmodifikationen in Form von Korngrößenvariationen und Hohlraumversiegelung angewendet. Zur Untersuchung des Einflusses der Gasart wird in einer Versuchsserie die in der Sicherung enthaltene Luft durch

reinen Stickstoff ersetzt. Die dielektrischen Eigenschaften des körnigen Löschmittels werden anhand einer Ersatzanordnung bestimmt.

Die Modifikation der Dimensionen des Sicherungsrohres ist durch die Normung [DIN43625] eingeschränkt. Eine dünne, feldsteuernde oder abschirmende Beschichtung scheint jedoch realisierbar [Loh61]. Diese muß im Normalbetrieb der Sicherung das starke radiale elektrische Feld vermindern, nach dem Schalten darf die überwiegend axial gerichtete Feldbelastung keinen nennenswerten Strom in der Leitschicht verursachen (Bild 1.6). Eine solche Charakteristik kann nur durch nicht-lineare, feldstärkeabhängige Widerstandsmaterialien wie Siliziumkarbid

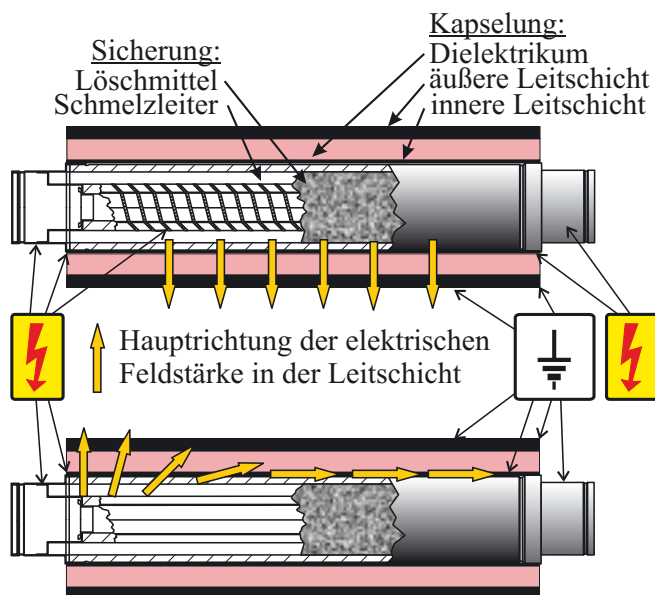


Bild 1.6: Schema der Feldverhältnisse in Sicherungskapselungen (oben: Normalbetrieb, unten: nach dem Schalten)

(SiC) [Lely55, Zob75, Wee86, Lie02] oder Zinkoxid (ZnO) [Auc97, Str00] erreicht werden oder durch eine Vielzahl kapazitiv gekoppelter metallischer Beläge [Loh61]. Zur Herstellung einer leitfähigen Beschichtung wird zu einer Grundmasse (Matrix) der leitfähige Zuschlagstoff beigemischt, das Gemenge auf die Oberfläche aufgetragen und dann ausgehärtet oder vernetzt [Bur92, Auc97, Riv99]. Keramische Oberflächen werden vorteilhafter mit leitfähigen Glasuren versehen [Bin71, Kru74, HeuH90], da sich diese intensiv mit dem Porzellanrohr verbinden und daher eine hohe Werkstoffkompatibilität haben.

Bei der Beschichtung des Sicherungsrohres ist die starke thermische Belastung zu berücksichtigen, die nach dem Schalten der Sicherung durch die Abgabe der Schaltenergie auftritt [Wei71, Sten72]. Daher liegt in diesem Teil der Arbeit der Fokus auf der Entwicklung von Beschichtungen, die auf mineralischen Widerstandsmaterialien (SiC) und temperaturfesten Bindern (Silikon-, Epoxidharzlack [Alfa95]) basieren, sowie auf leitfähigen Glasuren.

1.2.3.2 Überlegungen zur Unterbringung der Sicherung

Der Aufwand an Neuentwicklung und Prüfung von Sicherungen zur Erhöhung der TE-Festigkeit kann eingespart werden, wenn die notwendigen Modifikationen in ein externes Bauteil verlagert werden. Solche Bauteile sind spezielle Kapselungen oder Sicherungskammern, die ohnehin in den meisten modernen Schaltanlagen vorhanden sind [Sha71, Asp94] (Bild 1.1). Diese könnten so ausgelegt werden, daß TE durch Feldsteuerung in ihrer Entstehung, oder durch Schirmung in ihrer Ausbreitung gehemmt werden, wozu allerdings eine HF-feste Wandung und Durchführungen mit Tiefpaßcharakteristik notwendig wären, um die hochfrequenten TE-Impulse zu blocken, was allerdings mit sehr hohen Kosten verbunden wäre.

Feldsteuerungen können durch unterschiedliche Verfahren realisiert werden. Bei Verwendung resistiver Schichten gelten die gleichen Bedingungen wie bei Sicherungsrohren; die Leitfähigkeit muß groß genug sein, um eine Absenkung des Radialfeldes zu erreichen, nach dem Schalten aber vernachlässigbar klein sein (Bild 1.6). Die kapazitive Steuerung verwendet hingegen Hilfselektroden, Schirme oder Stoffe mit bestimmten dielektrischen Eigenschaften, um eine Reduktion der kritischen Feldstärke zu erreichen [Loh61]. Üblicherweise enthalten Bauteile der Mittelspannungsverbindungstechnik (Endverschlüsse, Muffen, Stecker) bereits Komponenten, welche das Feld kapazitiv, resistiv oder durch eine Mischform beider Varianten steuern [Bes83, Hav86, Riv99].

Sicherungen und Kapselungen müssen hinsichtlich des Schaltverhaltens eng aufeinander abgestimmt werden. Insbesondere die thermischen Randbedingungen müssen so eingestellt sein, daß sich keine negativen Einflüsse auf die Sicherungskennlinie ergeben [Hof86].

In dieser Arbeit werden selbst hergestellte wie auch industriell vorgefertigte Mittelspannungsmuffensysteme eingesetzt, die mit kapazitiver wie auch mit resistiver Feldsteuerung ausgestattet sind.

1.2.3.3 Überlegungen zur TE-Meßtechnik

Ist eine Verhinderung der Entstehung von TE nicht möglich, bieten sich Verfahren an, bei denen die entstehenden Impulse bei der TE-Messung unterdrückt oder ignoriert werden. In [Wen98] sind diverse digitale Techniken zur Störunterdrückung am Beispiel von Transformatoren dargestellt. Problematisch ist die Tatsache, daß es sich bei den von Sicherungen erzeugten Impulsen nicht um „Störer“, sondern um TE handelt, die zudem in großer Anzahl und mit hohen Amplituden auftreten, wie später gezeigt wird. Messungen an bestimmten Bauteilen können durch Richtkopplung verbessert werden, indem festgestellt wird, ob ein Impuls aus dem betrachteten Bauteil stammt oder von außen eingekoppelt wird [Schi96]. In der Umkehrung könnten die TE der Sicherung separat erfaßt und bei der Auswertung von Meßergebnissen an sensiblen Bauteilen subtrahiert werden. Alle Verfahren bedingen aber einen erhöhten Meßaufwand.

Da TE-Messung und Auswertung an anderen Stellen ausreichend diskutiert wurden ([Bar02] und Referenzen), werden in dieser Arbeit nur Aspekte untersucht, die für die Klassifizierung von in Sicherungen generierten TE maßgeblich sind.