

**Über das Teilentladungsverhalten
von
strombegrenzenden Hochspannungs-
Hochleistungssicherungen**

Der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jürgen-Peter Gärtner
geboren am 8. September 1966 in Zweibrücken

2007

Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr.-Ing. habil. B. R. Oswald
1. Referent:	Prof. Dr.-Ing. E. Gockenbach
2. Referent:	Prof. Dr.-Ing. M. Kurrat
3. Referent:	Prof. Dr.-Ing. habil. H. Borsi
Gutachter:	Dr.-Ing. H. Bessei

Datum der mündlichen Prüfung: 11. Mai 2007

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Fachgebiet Hochspannungstechnik (Schering-Institut) der Leibniz Universität Hannover und später neben meiner Anstellung am RRZN (Regionales Rechenzentrum für Niedersachsen).

Mein besonderer Dank gilt dem Institutsdirektor und Leiter des Fachgebietes Hochspannungstechnik Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Gockenbach und dem ehemaligen technischen Direktor der Fa. EFEN, Herrn Dr.-Ing. H. Bessei, die diese Arbeit anregten, den Herren Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat und Prof. habil. Dr.-Ing. Hossein Borsi für die Übernahme des Korreferats und Herrn Prof. habil. Dr.-Ing. Bernd Oswald für die Leitung des Prüfungsausschusses.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach und Prof. Dr.-Ing. habil. Hossein Borsi danke ich sehr herzlich dafür, daß sie diese Arbeit überhaupt ermöglichten, sie in jeder Hinsicht großzügig und geduldig unterstützten, für die gründliche und zeitnahe Durchsicht des Manuskriptes und die hilfreichen Ratschläge und Anregungen, die sich nicht nur auf fachliche Fragen beschränkten.

Der Firma EFEN, Eltville danke ich für die finanzielle, fachliche und materielle Unterstützung, vor allem für die Fertigung der diversen Prüflinge. Neben Herrn Dr.-Ing. Herbert Bessei möchte ich Herrn Dipl.-Ing. (FH) Michael Drothen erwähnen, der mich in die Geheimnisse des Sicherungsbaus einweihte und bei Schaltprüfungen unterstützte. Herrn Dipl.-Ing. (FH) Gunter Faßbinder (ehemals Fa. Höchst CeramTec), danke ich für die fruchtbare Zusammenarbeit bei der Herstellung der keramischen Beschichtungen. Dem Verein „zur Förderung des umweltgerechten Recycling von abgeschalteten NH/HH-Sicherungseinsätzen“ e.V. danke ich für die finanzielle Unterstützung in Form des „Forschungspreises 1997“. Weiterhin danke ich den Firmen Alpha-Lacke (Aschaffenburg), Elektroschmelzwerk Kempten, Felten & Guillaume (Nordenham), Honeywell (Offenbach), Siemens AG (Berlin) für die Bereitstellung diverser Muster, Proben oder Prüfschichten.

Stellvertretend für die vielen Kollegen am Institut möchte ich den Herren Dr.-Ing. Gundolf Schiller, Dr.-Ing. Karsten Straßburg, Dr.-Ing. Ralf Kotte, Dr.-Ing. Peter Werle, Dipl.-Ing. Klaus Hackemack und Dipl.-Ing. Mark Reuter für die sehr gute Zusammenarbeit danken, aber auch den studentischen Hilfskräften, Studien- und Diplomarbeitern die dieser Arbeit zugearbeitet haben, besonders den Herren Dipl.-Ing. Martin Berndsen und Dipl.-Ing. Ralf Jochem. Große Unterstützung erhielt ich auch durch die ständigen Mitarbeiter des Instituts, insbesondere durch die Mitarbeiter der Werkstatt, den Herren Karl Maske, Klaus Hasselberg und Erich Semke.

Meiner Familie, meinen Verwandten und Freunden danke ich für die stete Motivation und Unterstützung, sowie für die unendliche Geduld und das Verständnis, das mit entgegengebracht wurde, ebenso meinen Kollegen am RRZN, Frau Dipl.-Ing. (FH) Olga Urbach und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Ansgar Giesker, die mir oft den Rücken frei hielten.

Schließlich möchte ich die Verdienste meines ehemaligen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Matthias Krins besonders hervorheben, der mich ohne Unterlaß während der gesamten, langen Zeit motivierte, mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand, und die extrem mühevollen und zeitaufwendigen Vorabkorrektur des Manuskripts übernahm.

Inhaltsverzeichnis

Akronyme und Formelzeichen	iv
Kurzfassung	vii
Abstract	viii
1 Einleitung	1
1.1 Problematik der Teilentladungen bei Sicherungen	1
1.2 Untersuchungsziele	4
1.2.1 Ermittlung des TE-Verhaltens von Sicherungen	4
1.2.2 Auswirkungen von TE auf Sicherungen	5
1.2.3 Maßnahmen zur TE-Reduktion	5
2 Grundlagen	8
2.1 Hochspannungs-Hochleistungssicherungen	8
2.1.1 Historie	8
2.1.2 Bauformen	10
2.1.3 Wirkungsweise	11
2.1.4 Einfluß der Schmelzleiter auf das Schaltverhalten	12
2.1.5 Einfluß des Löschmittels auf das Schaltverhalten	13
2.2 Teilentladungen	14
2.2.1 Spezielle Aspekte von TE in HH-Sicherungen	15
2.2.2 TE-Analyseverfahren	16
2.3 Spezielle Eigenschaften des Löschmittels	20
2.3.1 Granulare und poröse Medien	20
2.3.2 Feste Phase	23
2.3.3 Gasförmige Phase	27
2.4 Gasentladungen	27
2.4.1 Generationendurchschlag	28
2.4.2 Lawinendurchschlag	30
2.4.3 Koronaentladung	32
2.4.4 Barriere- und behinderte Entladung	32
2.5 Voruntersuchungen	35
2.5.1 Praktischer Teil	35
2.5.2 Feldsimulation	37
3 Prüflinge, Versuchsaufbauten und Meßmethoden	40
3.1 Sicherungen	40
3.1.1 Löschmittel	40
3.1.2 Beschichtungen für Sicherungsrohre	42
3.1.3 Kapselungen für HH-Sicherungen	45
3.2 Versuchsaufbauten zur TE-Messung	46
3.2.1 Stromlaufplan	46

3.2.2	Prüfkondensatoren für TE-Messungen an Sicherungen (SiPK)	47
3.2.3	Untersuchungen zum Einfluß der Gasart	50
3.2.4	TE-Meßtechnik	50
3.3	Prüfeinrichtungen für Schaltprüfungen	55
3.3.1	Synthetische Prüfeinrichtung	55
3.3.2	Hochleistungsprüffeld der FGH Mannheim	56
3.3.3	Hochleistungsprüffeld der Siemens AG, Berlin	56
3.4	Prüfung von SMG nach DIN VDE 0278	57
3.4.1	Abschaltversuche	58
3.4.2	Untersuchungen an geschalteten SMG	58
3.5	Modellanordnung zur Ermittlung des TE-Verhaltens von Sicherungen	58
3.5.1	Elektrodenanordnung und Prüfgefäß	58
3.5.2	Einstellung und Kontrolle der Feuchte	59
3.6	Feldsimulation	59
3.6.1	Dreidimensionale FEM-Simulation einer HH-Sicherung	59
3.6.2	Zweidimensionale FEM-Simulation granularer Materie	61
4	Simulations- und Meßergebnisse	62
4.1	Feldverhältnisse	62
4.1.1	Zweidimensionale Simulation eines granularen Mediums	62
4.1.2	Dreidimensionale Feldsimulation einer Sicherung	65
4.2	Teilentladungsverhalten	66
4.2.1	Allgemeine Beobachtungen	66
4.2.2	Abhängigkeit der TE-Aktivität von der Prüfspannung	75
4.2.3	Absenkung der TE-Aktivität über der Meßzeit	78
4.2.4	Einfluß der Stromstärke	82
4.2.5	Einfluß der Gasphase	85
4.2.6	Einfluß der Einbaulage	87
4.2.7	Einfluß von Zuschlagstoffen im Löschmittel	88
4.3	Löschmittelmodifikationen zur Reduktion der TE-Aktivität	90
4.3.1	Einfluß der Feuchte	90
4.3.2	Einfluß von SiC	91
4.3.3	Einfluß von Quarzmehl	92
4.3.4	Einfluß von polymerem Siliziumdioxid (SiO ₂) _x „stone sand“	93
4.4	Feldsteuernde Beschichtungen	94
4.4.1	Keramische Beschichtungen	94
4.4.2	Organische Binder	96
4.4.3	Gekapselte Sicherungen	98
4.5	Schaltversuche	99
4.5.1	Sicherungen mit leitfähiger Beschichtung	99

4.5.2	Sicherungen mit modifiziertem Füllstoff (W12-Zusatz)	101
4.5.3	Sicherungen mit Schmelzleitervariationen	102
4.6	Vergleich und Bewertung TE-reduzierender Maßnahmen	103
4.6.1	Technische Betrachtung	103
4.6.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	104
5	Zusammenfassung	105
	Literaturverzeichnis	109
	Lebenslauf	121

Häufig verwendete Akronyme und Formelzeichen

Hinweise: (x) = Platzhalter für Buchstaben, (i) = Platzhalter für Ziffern, [] optional

Akronyme

AKV	Ankopplungsvierpol
DBD	Dielektrisch behinderte Entladung (engl. <i>dielectric barrier discharge</i>)
ESB	Ersatzschaltbild
F32	Herstellerbezeichnung für Quarzsand
FEM	Finite Elemente Methode
H31	Herstellerbezeichnung für Quarzsand
MAM 1	Herstellerbezeichnung für Quarzsand
PRPDA	Phasenaufgelöste TE-Analyse (engl. <i>phase resolved partial discharge analysis</i>)
SiPK	Sicherungsprüfkondensator
SMG	Sicherungs-Muffen-Garnitur
TE	Teilentladung
TRV	Unbeeinflusste Wiederkehrspannung (engl. <i>transient recovery voltage</i>)
W12	Herstellerbezeichnung für Quarzmehl

Formelzeichen

$A_{[i]}, \mathbf{A}_{[i]}$	Fläche
A, B	Gaskonstanten (Paschengesetz)
α	1. Townsend'schen Ionisierungskoeffizient
$C_{[i x]}$	Kapazität, Kondensator
\mathbf{D}, D	Elektrische Verschiebungsdichte
D, \emptyset	Durchmesser
$d_{[i x]}$	Abstand, Schlagweite, piezoelektrischer Koeffizient
ΔU_{TE}	Senkung der TE-Einsetzspannung
$\Delta t_{[i x]}$	Zeitdifferenz
\mathbf{E}, E	Elektrische Feldstärke
e	Stichmaß von Sicherungen [DIN46253], Porenzahl
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante, Permittivität des Vakuums
$\epsilon_{r[x]}$	Relative Permittivität
η	Anlagerungskoeffizient
ϕ	Porosität
ϕ, Φ	Korrelationskoeffizient, -vektor
f_m	Mittelfrequenz
f_o	Obere Grenzfrequenz

f_u	Untere Grenzfrequenz
γ	Sekundäremissionskoeffizient
$I_{(x i)}, i_{(x i)}$	Strom
i, j, m, n	Zählindizes
I_1, I_2, I_3	Prüfströme [EN60282]
i_m	Meßstrom
I_N	Nennstrom
I_p, i_p	Prüfstrom
I_R	Strom bei Widerstandsmessung
K_{St}	Streamerkonstante
k	Boltzmannkonstante ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), vertikale Dimension einer Matrix
k, \mathbf{k}	Kalibrierfaktor, Kalibriervektor
l	Horizontale Dimension einer Matrix
$l_{(x)}$	Länge
$\lambda_{[(x i)]}$	Freie Weglänge
M	Impulsmatrix (roh)
$m_{i;j}$	Matrizelement
$\mu_{[(i x)]}$	Ladungsträgermobilität
N	Anzahl, Impulsrate
N	Impulsmatrix (phasenskaliert)
P, P	Polarisation
p	Druck
$\varphi_{[(x i)]}$	Phasenwinkel, Potential
φ_{inc}	TE-Einsatzwinkel
Q	Ladungsmatrix
$Q_{(x i)}, q_{(x i)}$	Ladung
Q_k	Kalibrierladung
Q_S	Summenladung
Q_{TE}	scheinbare Ladung
q_e	Elektronenladung ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C)
$R_{[(x i)]}$	Widerstand
$R_{[(x i)]}$	Radius
ρ	spezifischer Widerstand
r, φ, z	Laufvariablen (zylindrisch)
S	Stromdichte
$\sigma_{[(x i)]}$	Spannungskomponente (mechanisch)
T, ϑ	Temperatur, Temperaturdifferenz
$t_{[(x i)]}$	Zeit
t_e	Lichtbogenendzeitpunkt

t_m	Schmelzzeit
t_M	Meßintervall
$t_{\text{meß}}$	Meßzeit
$\tan \delta$	Dielektrischer Verlustfaktor
$U_{(x i)}, u_{(x i)}$	Spannung
U_N	Nennspannung
U_p, u_p	Prüfspannung
U_R	Spannung bei Widerstandsmessungen
u_{TE}	Teilentladungseinsetzspannung
$V_{[(x i)]}$	Verstärkungs- oder Abschwächungsfaktor, Verhältnis zweier Größen
\mathbf{v}, v	Geschwindigkeit
\mathbf{W}	Energiematrix
$\mathbf{x}_{(x)}$	Vektor
$\mathbf{X}_{(x)}$	Matrix
x, y, z	Laufvariablen (kartesisch)
χ	Elektrische Suszeptibilität
$Z_{(x i)}$	Impedanz

Kurzfassung

Über das Teilentladungsverhalten von strombegrenzenden Hochspannungs-Hochleistungssicherungen

Schlagworte: Schaltgerät — Hochspannungssicherung — Teilentladung — Löschmittel — Feldsteuerung — leitfähige Beschichtung — granulare Materie — Gasentladung — Oberflächenentladung — FEM-Simulation

Die vorliegende Arbeit berichtet über das Teilentladungsverhalten von strombegrenzenden Hochspannungs-Hochleistungssicherungen kontinentaler Bauart. Neben der Ermittlung des TE-Verhaltens in Abhängigkeit von diversen Parametern und der Untersuchung ihrer Ursachen wurden verschiedene Möglichkeiten zur TE-Reduktion entwickelt und verglichen.

Die Bestimmung des TE-Verhaltens stützt sich auf bekannte Meßverfahren der TE-Diagnostik wie Impulsladungsbestimmung und phasenaufgelöste TE-Analyse (PRPDA). Die Messungen wurden in eigens entwickelten Prüfgefäßen (SiPK) durchgeführt, die es erlaubten, die Sicherungen definierten Prüfparametern auszusetzen. Die Prüfparameter waren Spannungshöhe, Stromstärke, Druck, Gasart, Temperatur, sowie Art und Feuchte des Löschmittels. Das Löschmittel ist der Hauptverursacher der TE in Sicherungen. In ihm spielen sich sowohl Volumen- als auch Oberflächenentladungsprozesse ab, weshalb das Ladungsspektrum von wenigen pC bis zu mehreren hundert nC reicht. Entsprechend schwankt auch die Impulsrate von wenigen Impulsen pro Sekunde bis zu mehreren hunderttausend. Die TE-Parameter (Q_{TE} , N) sind über der Prüfzeit ($t_{meß} = 40$ min) nicht konstant, sondern sinken in Abhängigkeit verschiedener Parameter. Die stärkste Absenkung wurde bei Strombelastung gefunden. Die Absenkung wird auf die Leitfähigkeit der Sandkornoberflächen und plasmachemische Prozesse wie Ozonbildung zurückgeführt. Die Auswirkungen der TE auf das Schaltverhalten waren bei den untersuchten Prüflingen selbst bei längerer Belastung gering, obwohl eine Erosion der Schmelzleiter festgestellt werden konnte.

Zur Verminderung der TE in Sicherungen wurden verschiedene Verfahren implementiert: Variation von Konstruktionsparametern mit Hilfe einer FEM-Simulation, kapazitive und resistive Feldsteuerung der Sicherung sowie der Sicherungskapselung, Variation der Löschmittelporosität und -feuchte. Die stärkste TE-Reduktion konnte mit einer Imprägnierung des Löschmittels durch polymeres Siliziumdioxid erreicht werden, wodurch aber die zum Löschen erforderliche Porosität vollständig eliminiert wird. Aus wirtschaftlicher Sicht ist die Reduktion der Löschmittelporosität durch Verwendung bi- oder multidisperser Löschmittelkörnungen am besten geeignet, da kaum Änderungen im Fertigungsprozeß der Sicherungen erforderlich sind und sich hohe Reduktionswerte erreichen lassen. Problematisch sind dabei der Einfluß auf das Schaltverhalten und die Segregation. Diese Effekte traten bei feldsteuernden Maßnahmen nicht auf. Die Feldsteuerung wurde mit Siliziumkarbid als leitfähiger Komponente realisiert, das in organische oder keramische Matrizen eingebunden war. Auch hier konnten hohe Reduktionswerte erreicht werden, allerdings erfordern Feldsteuerungen einen Mehraufwand in Konstruktion und Fertigung.

Abstract

On the partial discharge behaviour of current limiting high-voltage high breaking capacity fuses

Keywords: electrical switching device — hv-fuse — partial discharge — quenching agent — field-grading — conductive layer — granular matter — gas discharge — surface discharge — finite element method simulation

The work reports on the partial discharge behaviour of current limiting high-voltage high-breaking-capability fuses of continental design. Apart from the determination of the pd-behavior as a function of various parameters and the investigation of their causes, different methods for pd-reduction were developed and compared.

The determination of the pd-behaviour was done using the well-known measuring procedures of pd-diagnostics such as impulse charge recording and phase-resolved pd-analysis (PRPDA). The measurements were accomplished in a particularly developed test vessel (SiPK), which permitted to expose the fuses to defined test parameters. The test parameters were voltage stress, amperage, gas pressure, kind of gas, temperature, as well as kind and moisture of the quenching agent. The quenching agent is the main cause for pd in fuses, since volume and surface discharge processes can take place, therefore the charge spectrum ranges from a few pC to several hundred nC. Accordingly, also the impulse rate varies from a few impulses per second up to several hundred thousands. In the test duties, the levels of the pd-values (Q_{TE} , N) were not constant, but a strong decay in dependence on different parameters was found. The strongest decrease was found when the fuses were current loaded. The decay is mainly attributed to the conductivity of the sand grain surfaces and plasma-chemical processes like ozone formation. The effects of the pd on the switching performance of the fuses were found to be negligible for the examined test specimens, although an erosion of the fusible elements could be observed.

Reduction of pd in fuses was achieved by different means: Variation of construction parameters with the help of an FEM simulation, capacitive and resistive field grading of the fuses as well as their enclosure, and variation of the quenching agents' porosity and moisture. The strongest pd-reduction was achieved by impregnating the quenching agent with polymeric silicon dioxide („stone-sand“), thus completely eliminating the sands' porosity that severely affects the arc interruption process. From an economic point of view the reduction of the quenching agents' porosity using bi- or multidisperse granulations is best suited, since only minor changes in the manufacturing process of the fuses are necessary, and high reduction values can be reached. In this respect the influence on the switching behaviour and the segregation of the quenching agents' granulometric components are problematic. These effects did not arise using field-grading measures. The field grading was realised with silicon carbide as conductive component, which was merged into organic or ceramic mastics. Also here high reduction values could be obtained, however, field grading requires an additional expenditure in the construction and manufacturing process.

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

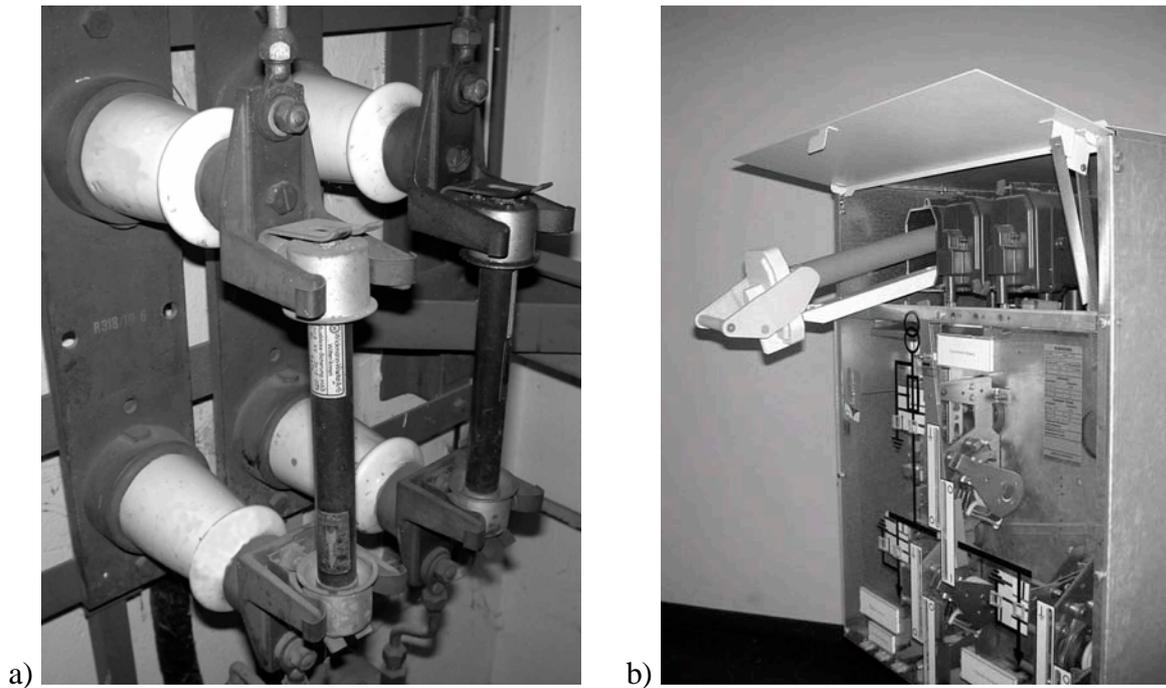


Bild 1.1: Anordnung von Sicherungen in Schaltanlagen
a) luftisoliert, b) Kompaktschaltanlage

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 Schmelzeiterebene 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

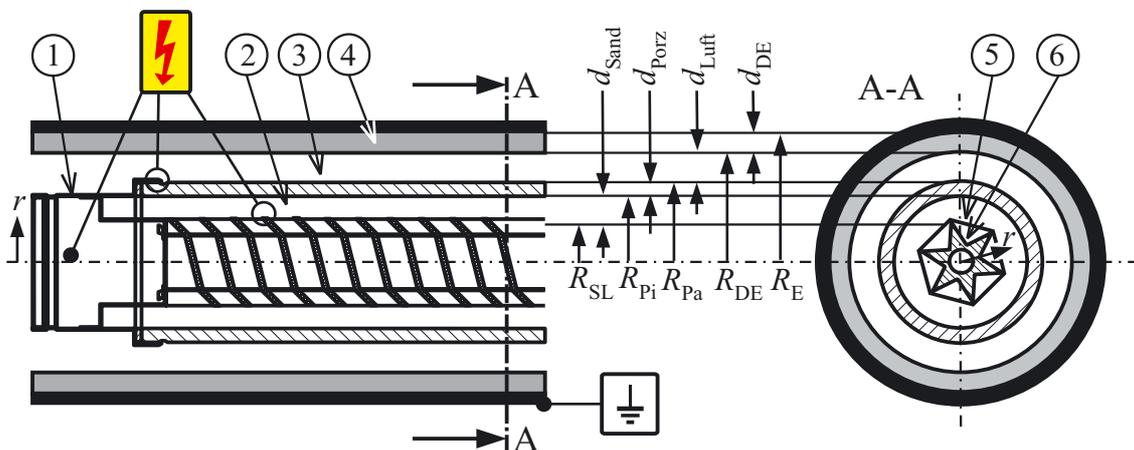


Bild 1.2: Sicherung mit Kapselung (schematisch)

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

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.

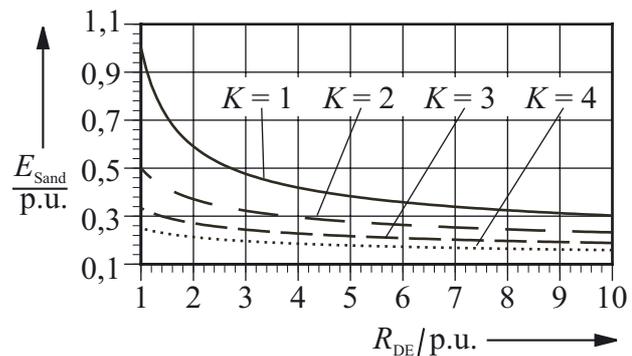


Bild 1.3: Verlauf der Funktion aus Gl. 1.1 mit K als Parameter

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

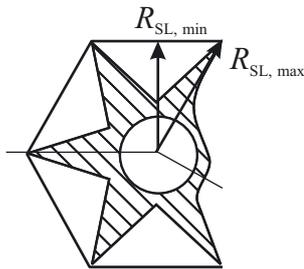


Bild 1.4: Variation von R_{SL} durch den Schmelzleiterträger

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-

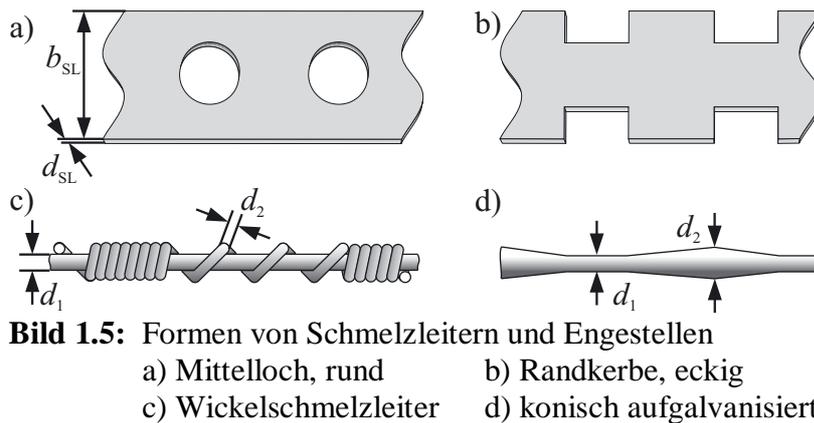


Bild 1.5: Formen von Schmelzleitern und Engstellen
 a) Mittelloch, rund b) Randkerbe, eckig
 c) Wickelschmelzleiter d) konisch aufgalvanisiert

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

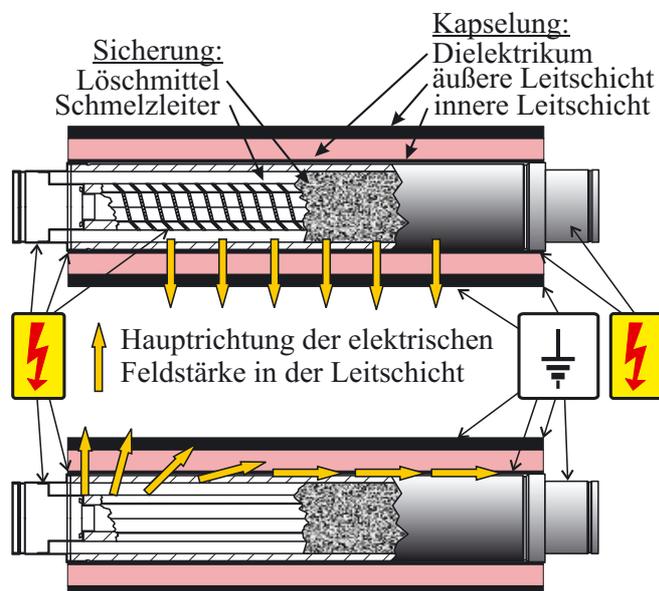


Bild 1.6: Schema der Feldverhältnisse in Sicherungskapselungen (oben: Normalbetrieb, unten: nach dem Schalten)

(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.

2 Grundlagen

Die heute gebräuchlichen HH-Sicherungen haben eine lange Entwicklungsgeschichte hinter sich, die anschließend kurz beleuchtet wird. Danach werden der Aufbau und die Wirkungsweise der hier verwendeten strombegrenzenden HH-Sicherungen behandelt, sowie die Möglichkeiten und Grenzen der Modifikationen aufgezeigt. Zur Beurteilung des TE-Verhaltens von Bauteilen in der Hochspannungstechnik sind verschiedene Verfahren bekannt, deren Grundlagen im folgenden erläutert werden. Das Löschmittel der Sicherungen stellt ein Mischdielektrikum aus einer festen und einer gasförmigen Phase dar. Daher erscheint es sinnvoll, auf die Unterschiede zu herkömmlichen Isolierstoffen hinzuweisen und die grundlegenden physikalischen Prozesse im Feststoff sowie im Gas zu erläutern. Den Abschluß des Kapitels bildet die Wiedergabe von Ergebnissen orientierender Messungen.

2.1 Hochspannungs-Hochleistungssicherungen

2.1.1 Historie

Vermutlich wurde das Prinzip der Sicherung zunächst „unfreiwillig“ erkannt, als mit dem Auftreten höherer Ströme in den Stromkreisen Verkabelungen bei Überlastung beschädigt wurden. Zum Schutz vor Überlastungen wurden Stromkreise deshalb durch Einfügen einer „Sollbruchstelle“ abgesichert, so daß bei Überlastung nur das Sicherungselement in Mitleidenschaft gezogen wurde, der Rest des Schaltkreises aber intakt blieb. Erste Anwendungen von Sicherungen sind bei Telegraphen-Seekabeln ab 1864 bekannt [New77]. Zur Absicherung von Energiesystemen kamen Sicherungen nach Einführung der elektrischen Beleuchtung ab ca. 1880 zum Einsatz, wie ein Patent von T. A. Edison zeigt [Edi80]. Mit dem Aufkommen der elektrischen Beleuchtung entstand ein großer Anstieg in der Nachfrage nach elektrischer Energie, und es fand eine Verbreitung der Elektrizität in die Haushalte statt [Vog29, New77]. Ein weiteres Anwachsen des Verbrauchs elektrischer Energie war mit der Einführung elektrischer Antriebe verbunden: So erzeugten die Berliner Elektrizitäts-Werke bereits 1899 mehr „Kraft-“ als „Lichtstrom“, im Jahre 1906 insgesamt 145.106 kWh [WilK07].

Die Verbreitung der elektrischen Energienutzung führte zur Entwicklung einfach handhabbarer und einheitlicher Sicherungseinsätze für die Niederspannungsebene, aber auch zur Entwicklung von Hochleistungs- und Hochspannungssicherungen in den „Centralen“, den zentralen Stromerzeugungswerken. Allerdings waren die „Hochspannungen“ mit ca. 2 kV noch recht gering. Größere Probleme verursachten die hohen Ströme insbesondere in den Generatoren. In den Energieverteilungsnetzen höherer Spannung (bis 20 kV) waren Sicherungen oft die einzigen Schaltelemente, da Schalthandlungen vorzugsweise auf der Niederspannungsebene vollzogen wurden. So war bereits die Drehstromübertragung von Lauffen nach Frankfurt mit Kurzschlußbügeln ausgestattet, die in Verbindung mit Schmelzsicherungen eine sofortige Abschaltung der Leitung in Notfällen ermöglichten [Det91]. Zum Einsatz kamen anfangs offene Sicherungen, bei denen der Schmelzdraht in Luft gespannt wurde, oder Rohrsicherungen, bei denen der Draht in Kammern oder einem Rohr geführt wurde, so daß der beim Schalten entstehende Druck den Löschvorgang unterstützte. Die bei höheren Strömen auftretenden explosionsartigen Vorgänge wurden jedoch schon damals als gefährlich eingestuft [Fel08], und den steigenden Kurzschlußleistungen waren diese Sicherungen durch ihre geringe Schaltleistung bald nicht mehr gewachsen.

Problematisch beim Schalten von höheren Spannungen war und ist die elektrische Festigkeit nach dem Schaltvorgang. Die wiederkehrende Spannung kann je nach vorliegendem Netz und Fehlerbedingung dauerhaft die volle Phasenspannung erreichen [Läp31, Kes35], transient wegen immer vorhandener Induktivitäten im Schaltaugenblick noch sehr viel höhere Werte. Als Entlastung der Sicherung wurde diese daher mit Hornableitern kombiniert, welche den Schaltlichtbogen übernahmen und zum Verlöschen brachten [Vog29]. Eine Verbesserung des Löschverhaltens konnte mit der Löschung unter Öl erreicht werden, bei dem der Schmelzleiter in Öl eingebettet war. Prinzipbedingt erfolgt die Löschung des Schaltlichtbogens bei den bisher besprochenen offenen und ölgefüllten Sicherungen aber erst im Stromnulldurchgang, so daß kaum eine Strombegrenzung eintritt und demnach keine Vorteile zu Schaltern erkennbar sind.

Die Vorgänge beim Schalten höherer Spannungen führten, da sie oft mit Bränden verbunden waren, ab ca. 1903 zum Einsatz von (Lösch-) Sand als Einbettungsmedium für Schmelzleiter [Läp37], in England war diese Technik allerdings schon 1890 bekannt [New77]. Der Sand verbesserte neben seinen brandverhindernden Eigenschaften auch das Schaltverhalten der Sicherungen. Durch die intensive Kühlung und Entionisierung des Schaltlichtbogens steigt die Brennspannung und in Folge dessen sinkt der Strom [Est29, Loh34a, Kro42]. Gleichzeitig konnte durch den Einsatz körniger Löschmittel die Spannungsfestigkeit der Sicherungen nach dem Schalten erhöht werden. Eine der ersten brauchbaren Anordnungen für höhere Spannungen beschrieb Fellenberg 1908 [Fel08]: Dabei wurden diskrete Kammern („Normalelemente“, „Patronen“) verwendet, in denen die Schmelzleiter durch mehrfache „zickzackförmige Führung“ künstlich verlängert wurden, um die nötige Spannungsfestigkeit zu erreichen. Als Löschmittel kam Talkum zum Einsatz, die Schmelzleiter waren aus Kupfer. Durch Verwendung von parallel geschalteten Schmelzleitern konnte die „Schaltflamme“ verringert werden. Diese Anordnung setzte sich jedoch nicht durch, und es wurden weiterhin offene, Öl- oder Rohrsicherungen eingesetzt. Allen damaligen Sicherungen war die geringe Schaltleistung gemein, so daß sie bald von den Ölschaltern verdrängt wurden [Paz21, Vog29].

Erst die starke Verbreitung der Energieversorgung auch in ländliche Bereiche verlangte nach größeren Mengen kosteneffizienter Schaltanlagen [Est29, Kön34], die eine „Renaissance“ der Hochspannungssicherungen zur Folge hatte. Zugleich konnte die Schaltleistung der Sicherungen erheblich gesteigert werden, durch die Verlängerung des Schmelzleiters mittels „lockenförmiger Ausspannung“ [Läp31]. Die in diesen Sicherungen verwendeten, zum Teil sehr dünnen Schmelzdrähte brachten ein Problem mit sich, das auch für diese Arbeit von Bedeutung ist. Durch das hohe Feld am Schmelzleiter entstand Korona oder Teilentladungen nach heutigem Sprachgebrauch, die durch Elektroerosion einen negativen Effekt auf die Haltbarkeit der Schmelzleiter hatte [Sie11]. Um dem zu begegnen, wurden die Schmelzleiter durch feldsteuernde Röhren [Sie11], Hilfsschmelzleiter [Est29] und metallische Hülsen geschützt [Loh61] oder auf Wickelkörper gewunden [Loh38]. In [Est29] wird erstmals der Begriff „Hochspannungs-Hochleistungssicherung“ (HH-Sicherung) verwendet, in dem die im Vergleich zu früheren Konstruktionen höhere Abschaltleistung durch den Zusatz „Hochleistung“ hervorgehoben wird.

Weitere Verbesserungen der HH-Sicherungen brachte die Einführung von gestuften und perforierten Schmelzleitern [Läp34-39, Joh54, Krie57], bei denen der Schmelzleiter Engstellen aufwies, die eine Aufspaltung des Lichtbogens und eine Verlangsamung des Schmelzleiterabbrandes [Loh34b, Will40, Bok94] bewirkten, sowie die Verwendung spezieller Wickelkörper [Loh34b, Brü00]. Die Entwicklung der Sicherung war dann geprägt von der

systematischen Erforschung der Schaltvorgänge und Kennlinien [u.a. Joh54, Loh64, Ver69, Huhn71, Hof86], deren Simulation und Berechnung [u.a. Wei71, Sten72, WilR75, Tre84, Ege90, Ehr99, Roc02], der Verfeinerung des Schaltprinzips [u.a. Sey68, Pohl69, Miu79, Buc82, Sche84, Haas90, Dre94], der Vereinheitlichung der Bauformen [Dre01, EN60282, DIN43625] sowie der Entwicklung völlig neuer Sicherungstypen wie Vakuum- oder SF₆-Sicherungen [Tro88, Bre93] und assistierten Sicherungen mit elektrischen, chemischen oder pyrotechnischen Hilfseinrichtungen [z.B. Brü58, Ran90, Czu99, Bün00]. Eine Spezialkonferenz über Sicherungen (ICEFA) sowie mehrere tausend Veröffentlichungen und Patente zeigen die Bedeutung der Sicherungen.

2.1.2 Bauformen

Im Bereich der HH-Sicherungen sind heute nur noch zwei Grundtypen in Gebrauch: die Ausblattsicherungen, bei denen die Lichtbogenlöschung durch Ausblasen des Schmelzleiters aus einem Rohr erfolgt, und die strombegrenzenden Sicherungen, bei denen die Schmelzleiter in einem körnigen Löschmedium eingebettet sind. Da Ausblattsicherungen aber nicht als strombegrenzend gelten, wird hier nicht weiter auf sie eingegangen.

Strombegrenzende Sicherungen (Bild 2.1) bestehen aus mehreren parallel geschalteten Schmelzleitern (4), die meist aus Feinsilber gefertigt werden. An die Stelle der diskreten

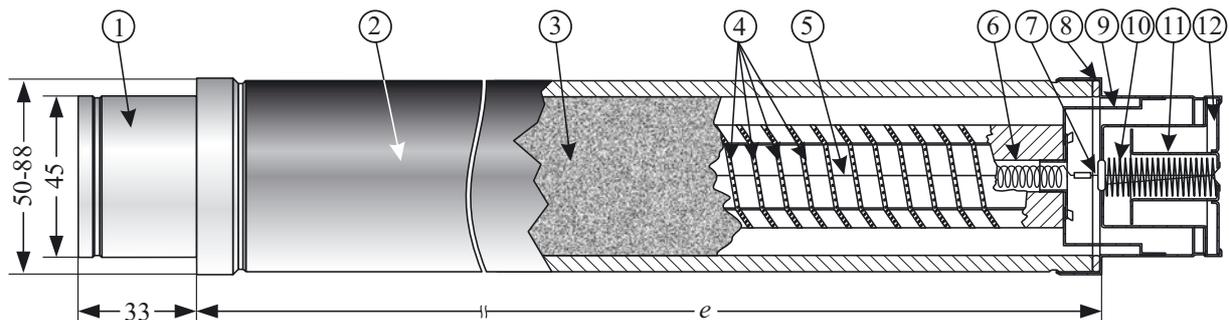


Bild 2.1: HH-Sicherung (schematisch), Erläuterungen siehe Text

Löschkammern ist ein durchgängiges Porzellanrohr (2) getreten, das über Dichtungen (8) und Kontaktkappen (1) hermetisch verschlossen ist. Die Länge des Rohres (Stichmaß „e“) sowie der maximale Rohrdurchmesser sind durch Normung festgelegt [DIN43625] und von Nennspannung und -strom abhängig. Der Lichtbogen wird durch speziell geformte Schmelzleiterprofile mit Engstellen in Teillichtbögen aufgespalten, um die Brennspannung der Teillichtbögen zu begrenzen bzw. die Nennspannung der Sicherung zu erhöhen. Zur Beherrschung des Überstrombereichs werden mehrere Schmelzleiter parallel geschaltet. Die Schmelzleiter werden zwecks Verlängerung des Lichtbogens auf sternförmige Schmelzleiterträger (5) aufgewickelt. Zur Kontaktierung der Schmelzleiter mit den Kappen dienen Anschlußbänder (9).

Heutige Sicherungen verwenden als Löschmittel hauptsächlich hochreinen Sand (3). Als Ansprechindikator dient ein Schlagstift (11), der von einem Federspeicher (10) oder durch pyrotechnische Einrichtungen angetrieben wird. Der Schlagstift wird durch einen besonderen Hilfsschmelzleiter (6) ausgelöst, der parallel zu den Hauptschmelzleitern geschaltet ist und für ein Abschmelzen des Haltedrahtes (7) sorgt. Der Schlagstift des Kennmelders tritt durch einen versiegelten Deckel (12) aus und kann zur Auslösung eines Lastschalters, Lasttrenners oder einer Meldeeinrichtung verwendet werden.

2.1.3 Wirkungsweise

Das Schaltverhalten von Sicherungen wird in drei Phasen eingeteilt: die Aufheiz- oder Schmelzphase (engl. *pre-arcing*), das Lichtbogenintervall (engl. *arcing*) und das lichtbogenfreie Intervall nach dem Schalten (engl. *post-arcing*). Beim Ansprechen einer Sicherung werden diese Phasen der Reihe nach durchlaufen, wobei ihre zeitliche Länge von der Höhe des Stromes abhängt [Zins83]. Die Aufheizphase ist in Bezug auf das Teilentladungsverhalten die relevanteste, da sie den normalen Betriebszustand (Sicherung hat nicht angesprochen) darstellt und mehrere Jahrzehnte andauern kann.

In der Aufheizphase befindet sich die Sicherung in einem thermischen Gleichgewicht, das von der entstehenden Stromwärme und deren Abgabe an die Umgebung der Sicherung abhängt [Wei71, Sten72, Asp94]. Je nach Kennlinie der Sicherung [Zins83, Hof86, Ege90] und dem durch die Sicherung fließenden Strom schmelzen Teile der Schmelzleiter auf, wodurch sich ihr Widerstand erhöht [Ver69, Bok94]. Die weitere Erwärmung geschieht nicht gleichmäßig, sondern durch vorgefertigte Engstellen oder Undulid-Bildung [Löp37, Nas64, Loh64] schnürt sich der Schmelzleiter in bestimmten Bereichen ein. An diesen Stellen verdampft das Schmelzleitermaterial. Nach Erreichen des Verdampfungspunktes beginnt die Lichtbogenphase [Ver80], in der sich ein Lichtbogen in der Sicherung ausbildet, der durch das Löschmedium gekühlt wird. Die Kühlung bewirkt eine starke Strombegrenzung, die aufgrund der Induktivitäten des Stromkreises zu einer Spannungsspitze führt, für deren Limitierung die Aufteilung der Brennspannung auf mehrere Schmelzleiterabschnitte durch die Engstellen relevant ist [Krie57]. Nach dem Verlöschen des Lichtbogens muß die Sicherung ohne Wiederspülen der wiederkehrenden Spannung widerstehen [Huhn71, Sten72, Ehr99]. In dieser Phase tritt die nicht unerhebliche Schaltenergie in Form von Wärme aus der Sicherung aus, was eine starke Temperaturerhöhung auf der Oberfläche des Sicherungsrohres bewirkt. Die Temperaturverteilung wird durch die Art und Anordnung der Engstellen beeinflusst [Wei71, Ehr99].

Wegen der sehr unterschiedlichen Vorgänge in Abhängigkeit des einwirkenden Stromes werden in Normung und Literatur [Zins83, Dre94, Wri04, EN60282] drei Arbeitsbereiche unterschieden:

- Der Strom I_1 ist mit mehreren zehn kA der größte und für Kurzschlußabschaltungen typisch. Die Schmelzphase ist adiabatisch und die Lichtbogenphase relativ kurz. Die dynamischen Belastungen sind hier am höchsten.
- I_2 bezeichnet einen mittleren Strom (einige kA), bei dem die höchste Lichtbogenenergie in der Sicherung umgesetzt wird. Die Schmelzphase ist auch hier adiabatisch, in der Lichtbogenphase spielt besonders das Löschmittel eine große Rolle. Wegen der hohen thermischen Belastung besteht die Gefahr von Wiederspülen [Ehr99].
- Der kleinste Strom I_3 (1...100 A) bezeichnet den Mindestausschaltstrom der Sicherung. Unterhalb dieses Wertes kann eine Teilbereichs-Sicherung nicht löschen, da nur ein Teil des Schmelzleiters abschmilzt und die abgeschmolzene Länge nicht ausreicht, die Wiederekehrspannung zu halten. Der Lichtbogen zündet in jeder Periode erneut, was nach kurzer Zeit zum thermischen Versagen der Sicherung führt.

2.1.4 Einfluß der Schmelzleiter auf das Schaltverhalten

Die Schmelzleiter stellen den wichtigsten Teil der Sicherung beim Schalten dar. Nicht nur ihre Anordnung und Form, sondern auch das Material beeinflussen den Schaltvorgang vital.

Heute werden mehrere parallel geschaltete Schmelzleiter mit einer bestimmten Formgebung verwendet. Die Parallelschaltung mehrerer Schmelzleiter verbessert die Schaltleistung und das Schaltverhalten durch Stromaufteilung auf mehrere Pfade [Loh34a, West82]. Durch diese Verteilung ist die Schmelzenergie pro Strompfad geringer [Sey68], und es sinken Durchlaßstrom und Schaltspannung [Hibn73]. Die Kommutierungsvorgänge zwischen den parallel geschalteten Schmelzleitern verbessern das Schalten im Überlastbereich der Sicherungen [Mik64, West82, Ehr99].

Die Stufenschmelzleiter begrenzen die Schaltspannung durch „Verlangsamung“ des Schmelzleiterabbrandes [Loh34b, Will40, Bok94], Limitierung und Aufteilung der Brennspannung auf mehrere Schmelzleiterabschnitte [Krie57]. Dadurch erhöhen sich die Gesamtbrennspannung und die Wiederzündfestigkeit [Huhn71, Ehr99]. Zudem wird die Schmelzenergie durch Reihenschaltung mehrerer Engstellen besser auf die Sicherungslänge verteilt [Ehr99]. Dabei spielen die Form und Anzahl der Engstellen eine entscheidende Rolle [Joh54, WilR75,

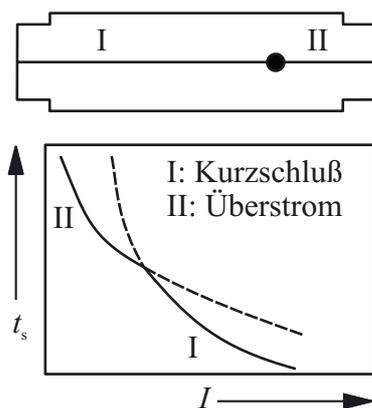


Bild 2.2: Sicherung mit getrennten Kurzschluß- und Überlast-Schmelzleitern (nach [Dre02])

Nar79, Ege90, Cwi93]. Eine hohe Anzahl von Engstellen ist zwar günstig für die Spannungsfestigkeit, es besteht aber die Gefahr, daß durch den Abbrand Engstellen zusammenwachsen und so die Spannungsfestigkeit wieder reduzieren. Die Form und Anzahl der Engstellen wirkt sich auch auf die Länge der Schmelzleiter aus, da eine Mindestanzahl von Engstellen nicht unterschritten werden darf. Die Anzahl der notwendigen Engstellen ist von ihrer Spannungsfestigkeit abhängig, die ca. 750 V beträgt [Olb57, Sten72, Ver80], sowie von der Abschmelzgeschwindigkeit des Materials.

Großen Einfluß auf das Schaltverhalten hat das Schmelzleitersmaterial. Im Schmelzintervall ist die Schmelztemperatur des Schmelzleiters entscheidend, weshalb neben den üblichen Silber-Schmelzleitern auch Materialien wie

Kadmium [West82], Zinn, Kupfer [Hibn73] oder Aluminium [Nam89] sowie verschiedene Komposite [SchJ44, Nar79] und Legierungen verwendet werden [Miu79, Haas90]. Schmelzleitersmaterialien mit niedrigem Schmelzpunkt (z.B. Zn, Pb, Cd) werden vorzugsweise für geringe Ansprechströme und flache Kennlinien verwendet, hoch schmelzende (z.B. Ag, Cu, Al) für Kurzschlußunterbrechungen und steile Kennlinien [Mik76]. Eine besondere Form der Legierung ist bei Schmelzleitern mit punktuellm Lotauftrag gegeben („M-Effekt“ [Ege90, Bea93, Wri04]), wo durch Erwärmung bei Strombelastung die hoch schmelzenden Materialien in Legierung mit dem Lotauftrag gehen und so bei erheblich niedrigeren Temperaturen ansprechen als bei Verwendung des reinen Materials. Allerdings kann die Kennlinie solcher Sicherungen durch kurze Überlastungen mit der Zeit altern [Ege90, Slo98]. Einige Konstruktionen verwenden daher eine Reihenschaltung von separaten Schmelzleitern mit hoch und niedrig schmelzenden Werkstoffen, um eine Vollbereichscharakteristik ohne Alterungseffekte zu erhalten (Bild 2.2) [Loh37, Mik64, Link74, Dre02]. In der Lichtbogenphase sind die Abbrandgeschwindigkeit [Kro42], die Schmelz- und Verdampfungsenthalpien

[Joh78] sowie die Ionisierungsverhältnisse [May34] des Schmelzleitermaterials ausschlaggebend. Ein Einfluß des Schmelzleitermaterials auf das TE-Verhalten ist bei konstanter Geometrie nicht zu erwarten.

Auch die geometrische Anordnung der Schmelzleiter innerhalb der Sicherung entscheidet über das Schaltverhalten. So stellten einige Autoren fest, daß Sicherungen ohne Schmelzleiterträger ein besseres Schaltverhalten haben [Olb57, Nar79, West82], während andere dessen Wichtigkeit für die richtige Positionierung der Schmelzleiter und ihrer Engstellen unterstreichen [Zins83, Sche84, Bün00]. Weitere Konstruktionen verwenden zusätzliche Schmelzleiter (engl. *auxiliary filament*), auf die der Strom während der Lichtbogenphase kommutiert [Mik64], oder spezielle Erwärmungszonen [Haas90] und Blasvorrichtungen [Huhn71, Link74], um das Schaltverhalten der Sicherungen zu verbessern. Die Anordnung der Schmelzleiter, ihre Anzahl und Länge haben einen Einfluß auf die Korona- oder TE-Festigkeit von Sicherungen [Löp31, Zot87]. Es ist offensichtlich, daß eine homogene Anordnung wie in [Loh36] oder [Sche84] eine Verbesserung der Feldsituation und damit eine Reduktion der TE bewirkt.

2.1.5 Einfluß des Löschmittels auf das Schaltverhalten

Das Löschmittel beeinflusst nicht nur die thermischen Verhältnisse in der Aufheizphase [Wei71, Sten72, Tro88, Bok94], sondern auch entscheidend die Lichtbogenphase. In der Lichtbogenphase muß das Löschmittel die entstehenden Metaldämpfe absorbieren [Joh54], wozu eine gewisse Porosität erforderlich ist (Bild 2.3) [Roc02], und es muß ein Druckaufbau im Lichtbogenkanal möglich sein, um eine Lichtbogenlöschung zu erlauben, wozu das Löschmittel nicht zu porös sein darf [Tur73]. Eine hohe Porosität verringert zudem die Wärmeleitfähigkeit des Löschmittels, welche im Überlastbereich große Bedeutung hat [Ehr99]. Der Druck im Lichtbogenkanal beträgt nach [Tre84, Nam89, Bus01] mehrere 10^5 Pa und beeinflusst direkt den Lichtbogenwiderstand [Joh78]. Die Porengröße des Löschmittels hängt vom Korndurchmesser, dessen statistischer Verteilung sowie von der Kornform ab [Hira00, Roc02]. Üblicherweise werden bei Sicherungen Körnungen zwischen 0,1-1 mm verwendet, wobei 0,2-0,6 mm als optimal angesehen werden (Bild 2.4) [Dan40, Oss73, Tur73]. Kleinere Körnungen führen zu einer schnelleren und steileren Kennlinie [Tro88].

Um einen hohen Füllgrad zu erreichen, werden die Sicherungen beim Einfüllen des Löschmittels gerüttelt [CheS87], wodurch eine Gewichtszunahme von bis zu 20 % erreicht werden kann [Hibn73]. Die Verdichtung ist dabei von der Intensität des Rüttelns und dessen Zeitdauer abhängig [Meht94]. Durch Verwendung eines Gemisches unterschiedlich großer Körnungen läßt sich der Füllgrad noch weiter erhöhen [Her35, Ily99]. Insgesamt beeinflussen die Wahl der Körnung und die Höhe der Verdichtung sowohl die Kennlinie der Sicherung, den I^2t -Wert [Oss73, CheS87, Bus01], als auch die Feldstärke im Lichtbogenkanal [Huhn71] und damit die Schaltspannung der Sicherung [Nam83]. Im Lichtbogenintervall hat neben dem Lichtbogen auch das stark aufgeheizte Löschmittel eine Leitfähigkeit, welche den Abschaltvorgang mitbestimmt [Dan42, Loh64, Tur73].

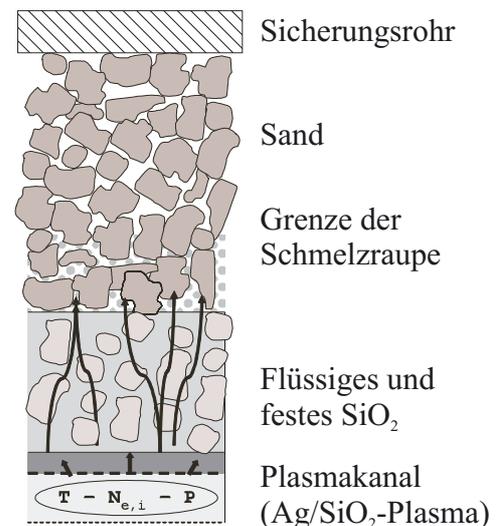


Bild 2.3: Wirkung des Löschmittels in der Lichtbogenphase (nach [Roc02])

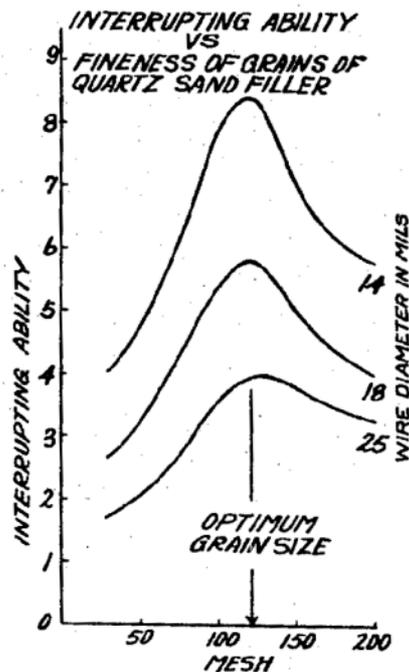


Bild 2.4: Optimale Korngröße des Löschmittels in Bezug auf die Abschaltfähigkeit von Sicherungen, „Mesh“ bezeichnet die Siebgröße (Drähte/inch) [Schu44]

Diese Leitfähigkeit dämpft zwar die Schaltspannungsspitze der Sicherung und ist daher erwünscht [Loh38], belastet aber durch die zusätzlich aufgenommene Energie die Sicherung.

Üblicherweise werden als Löschmittel Sande mit hoher Reinheit ($> 98\% \text{ SiO}_2$) verwendet [Krie57], da schon geringe Verunreinigungen wie Eisenoxid das Schaltverhalten negativ beeinflussen [Schu44, Krie57, Olb57, Nar79]. Zur Kühlung und Entionisierung des Lichtbogenkanals können dem Löschmittel Stoffe zugesetzt werden [Pau87], neben gasabgebenden Feststoffen wie Melamin und Harnstoffverbindungen [Het82, Smi95] auch wasserabgebende Stoffe wie Marmorgrieß [Dan40, Kro42] oder Aluminiumhydrat [Jone72]. Ferner werden reine Gase wie H_2 [Est36], CO_2 [Loh64] oder SF_6 [Tro88] angewendet.

Gase haben allerdings den Nachteil, daß sie durch Leckagen entweichen oder ausdiffundieren können. Gleiches gilt im umgekehrten Sinne für Sicherungen, bei denen Vakuum eingesetzt wird [Bre93]. Bei gasabgebenden Stoffen kann die Gasentwicklung schon im Normalbetrieb einsetzen, ebenso

die Wasserabgabe bei Hydraten, was dann zur Korrosion der Schmelzleiter führt [Smi95]. Zur Minderung der TE würde sich SF_6 empfehlen, da es eine ca. dreifach höhere Durchschlagfeldstärke als Luft besitzt und stark elektronegativ ist [Bey86], allerdings wird SF_6 als ökologisch bedenklich angesehen [Ruh02].

Vom Standpunkt der Hochspannungstechnik ist es vorteilhaft, die gasförmige Phase des Löschmittels etwa durch Verfüllung der Hohlräume mit Isolierstoffen zu eliminieren, um elektrische Entladungen in der Gaskomponente zu verhindern. Aus der Literatur und zahlreichen Patenten sind Verfahren zur Verfüllung der Hohlräume bekannt. In [Lip92] wird Tetraethylsilan eingesetzt, welches unter Wärmeeinfluß zu SiO_2 -Ketten polymerisiert und so die Sandkörner zu einer festen Masse (engl. *stone-sand*) verbindet. Ähnliches läßt sich auch mit Kieselöl [Fri73] oder Wasserglas [Loh43] erreichen. Allerdings steigt durch das Verfüllen der Hohlräume die Schaltspannung [Lip95], und die Wiederspülfestigkeit kann durch freigesetzte Ionen sinken. Andere Entwicklungen verwenden Polymere auf Basis von Silikon, Phenol, Epoxy, Acryl oder Melamin [Holl60, Smi94, Kalt01] sowie Mineralien wie Marmorgrieß [Dan40], die entionisierend wirken sollen. Nach [Fri73] haben diese Materialien aber den Nachteil, sich bei Hitzeentwicklung zu zersetzen oder beim Schalten Ionen oder Kohlenstoff freizusetzen, was den Abschaltvorgang behindert. Bei Kurzschlußunterbrechungen hat sich reiner, granularer Quarz (Sand) als bestes Löschmittel herausgestellt [Saq99] und findet daher überwiegend Anwendung.

2.2 Teilentladungen

Teilentladungen sind Entladungen in Hochspannungsisolierungen, die nicht unmittelbar zu deren Versagen führen, aber ein Anzeichen für Anomalien sein können. Die TE-Meßtechnik

stellt daher ein wichtiges Werkzeug zur Zustandsbeurteilung und in der Qualitätssicherung elektrischer Isolierungen dar. Entsprechend umfangreich ist das Schrifttum zur Teilentladungsthematik [Bey86, Kre89, Gul91, IEEE93, Bar02, EN60270]. Hier sollen nur einige Grundlagen wiedergegeben werden, die für die Arbeit relevant sind.

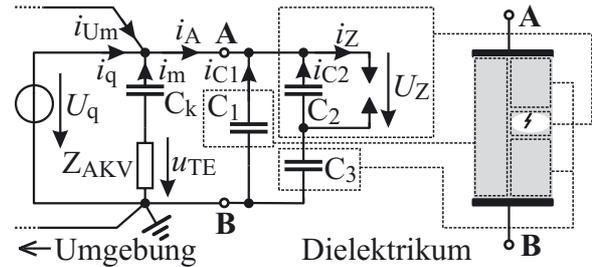


Bild 2.5: Teilentladungs-ESB

TE entstehen in fehlerstellenbehafteten Dielektrika, z.B. in einem Hohlraum, durch Entladungen innerhalb der Fehlstelle (Bild 2.5): Das Dielektrikum wird von der Spannungsquelle U_q aufgeladen bis die Fehlstelle zündet (U_Z), wodurch der Kondensator C_2 entladen wird und sich ein Umladeprozess ausbildet. Der intakte Teil des Dielektrikums (C_2) wird durch die anderen Teile (C_1 , C_3) und äußere Kondensatoren (C_K) nachgeladen. Falls U_Z erneut erreicht wird, wiederholt sich dieser Prozess. Koronaentladungen lassen sich mit ähnlichen Modellen behandeln [Kre89].

TE werden elektrisch durch Messung des äußeren Ladestroms i_A nachgewiesen: Durch einen Koppelkondensator C_K und den in dessen Erdzweig liegenden Ankopplungsvierpol Z_{AKV} wird derjenige Ladungsanteil, den C_K in das Dielektrikum liefert, über den Strom i_m gemessen. Im Idealfall ist i_m proportional zu der in C_2 umgesetzten Ladung Q_2 , der genaue Wert dieser Ladung ist jedoch nicht bekannt, da die Kapazitäten C_2 und C_3 unbekannt sind. Daher wird bei TE-Messungen der Wert einer „scheinbaren“ Ladung Q_s angegeben. Direkt am Dielektrikum können TE auch durch nicht-elektrische Messungen nachgewiesen werden, z.B. durch akustische [Har90], chemische [Dum98] oder optische [Kre88] Verfahren.

Auch die Spannungsquelle U_q und sonstige Bauelemente in der Umgebung der TE-Quelle liefern ihren Ladungsbeitrag (i_q , i_{Um}), d.h. die in der Sicherung entstehenden TE treten auch in der Umgebung in Erscheinung [Berl01, GolB01], was dort störend wirkt, wenn an dortigen Bauteilen (z.B. an Kabeln) empfindliche TE-Messungen durchzuführen sind. So ist bei sensiblen Messungen – besonders unter Vor-Ort-Bedingungen – oft ein hoher Aufwand zur Stör- unterdrückung notwendig [Bors00]. Ein Beispiel für die Anwendung hochempfindlicher TE-Messungen ist die Prüfung von Kunststoffkabeln [Schi96], die aus Polyethylen hergestellt werden, einem Material, das sensibel auf Feldstärkeüberhöhung und die damit verbundene TE reagiert [SchG96]. Neben der leitungsgebundenen Verbreitung der TE-Impulse ist durch hohe Frequenzanteile oder magnetische Kopplung auch eine feldgebundene möglich [Sto97, Tung00].

2.2.1 Spezielle Aspekte von TE in HH-Sicherungen

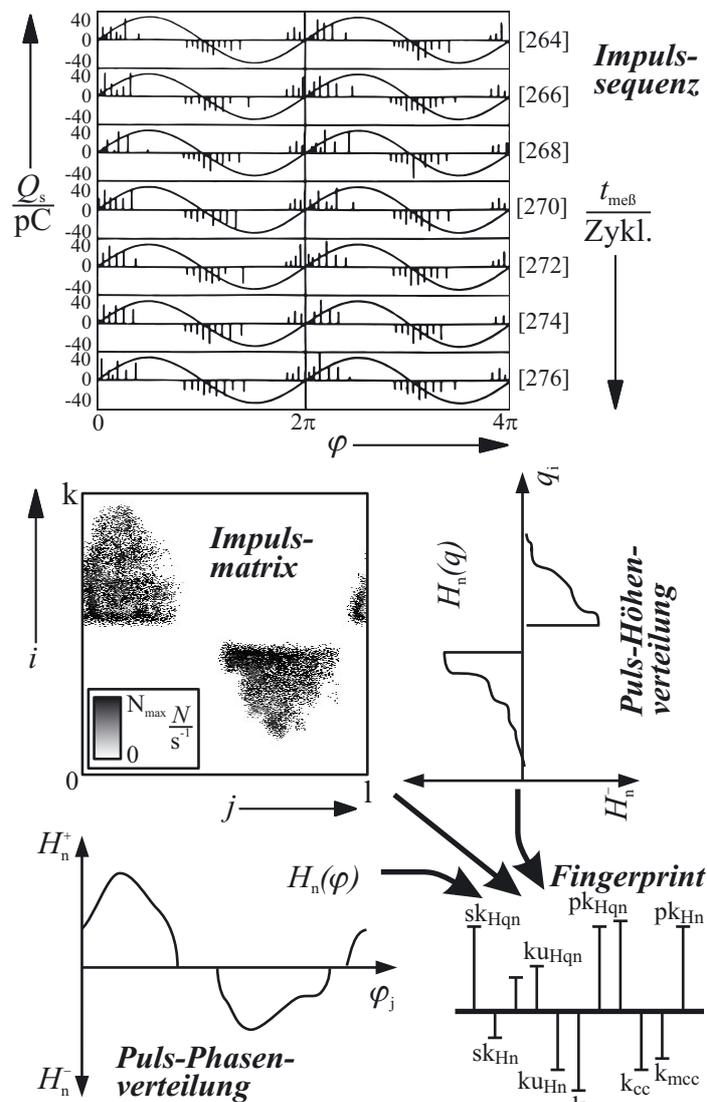
Der Raum zwischen den Schmelzleitern und dem Sicherungsrohr ist mit körnigem Löschmittel ausgefüllt, einem Gemisch aus festem (Sandkorn, SiO_2) und gasförmigem Dielektrikum (Luft). Dieses Mischdielektrikum ist von sehr komplexer Art. Die chaotische, dreidimensionale Anordnung der Sandkörner bildet eine Vielzahl von Hohlräumen unterschiedlicher Längen und Geometrien, in denen Entladungen entstehen können. Die oben dargelegten Sachverhalte für TE in Dielektrika mit nur einer einzelnen Fehlstelle treffen für körnige Löschmittel nur bedingt zu. Jeder Hohlraum stellt eine potentielle Fehlstelle dar, in der sich TE bilden können. Dies ergibt eine enorme Vielzahl von Reihen- und Parallelschaltungen aus C_1 , C_2 und C_3 nach Bild 2.5, deren Komponenten unterschiedliche Charakteristika haben und sich zudem gegenseitig beeinflussen. Wird von einer Füllmenge der Sicherungen von 1,3 l Sand

ausgegangen und eine mittleren Sandkorngröße von 300 μm angenommen, ergibt sich in grober Schätzung eine Anzahl von $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / [(4/3)\pi \cdot (150 \cdot 10^{-6} \text{ m})^3] \approx 92$ Millionen Partikeln. Diese Anzahl ist wegen der verschiedenartigen Kopplungen zwischen den Körnern und der dadurch entstehenden Fülle von Freiheitsgraden auch mit heutigen Höchstleistungsrechnern nicht vollständig modellierbar.

2.2.2 TE-Analyseverfahren

Die Charakteristika der TE-Impulse, wie Impulshöhe und -form, zeitliche Abfolge der Impulse, Frequenzspektren und Korrelation zur Prüfspannung werden mit verschiedenen Analysemethoden untersucht. Ziel ist es dabei, charakteristische Kenngrößen (engl. *fingerprints*) zu finden, die eine Klassifizierung der TE-Quelle erlauben oder Aufschluß über den Zustand des Dielektrikums geben. Gegenüberstellungen verschiedener Methoden finden sich u.a. in [Bam87, Gul91, Jam95, Hoof97, Bar02]. In dieser Arbeit wird die „phasenaufgelöste TE-Analyse“ (engl. *phase resolved partial discharge analysis*, PRPDA) angewandt.

Bild 2.6 zeigt im oberen Teil eine Folge von TE-Impulsen in einem LDPE-Dielektrikum mit künstlicher Fehlstelle über der Prüfzeit $t_{\text{meß}}$ [Suw00]. Es ist zu erkennen, daß die Impulse



relativ periodisch über der Phase φ auftauchen und sich im betrachteten Zeitraum (Zyklus 264 bis 276 der Prüfspannung) kaum verändern, aber stochastisch verteilt sind. Wird die Phase der angelegten Wechselspannung bzw. die Höhe der Impulse als statistisches Ereignis interpretiert, können diesen die Impulsanzahlen zugeordnet werden, wodurch sich die Puls-Höhen- und Puls-Phasenverteilungen ergeben. Auf diese werden dann statistische Operatoren angewandt, aus denen die Fingerprints abgeleitet werden.

Eine kompakte Darstellung ergibt sich, wenn die Impulsanzahl zu einer Impulsmatrix (engl. *map*) zusammengefaßt wird (Bild 2.6, Gl. 2.1). In dieser $k \times l$ -Matrix \mathbf{M} entspricht jedes Element $m_{i,j}$ der Anzahl n von Impulsen einer bestimmten Ladungsmenge $q(i)$ bei einer bestimmten Phasenlage $\varphi(j)$. Während der Phasenindex meist linear mit dem Phasenwinkel korreliert ($\varphi(j) = 2\pi \cdot j/l + \varphi_0$), ist die Zuordnung $q(i) = f(i)$ eventuell funktional (z.B. logarithmisch) gewählt, um eine höhere Dynamik abbilden zu können.

Bild 2.6: PRPD-Analyse (schematisch, Impulsfolge aus [Suw00])

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{1;1} & \cdots & m_{1;j} & \cdots & m_{1;l} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ m_{i;1} & \cdots & m_{i;j} & \cdots & m_{i;l} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{k;1} & \cdots & m_{k;j} & \cdots & m_{k;l} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

mit:

$m_{i;j}$ = Impulsanzahl mit Ladung i und Phase j

k, l = Anzahl der Ladungs- und Phasenfenster.

Die Zuordnungsfunktion $q(i) = f(i)$ ist zudem abhängig von der Polarität der Impulse, der Kalibrierung des Meßgerätes und vom eingestellten Meßbereich. Die Dimensionen k und l der Matrix \mathbf{M} sind vom verwendeten Meßsystem vorgegeben, das imstande sein muß, für jedes Element $m_{i;j}$ eine Speicherzelle zu allozieren und die entsprechenden Phasen- bzw. Ladungsdifferenzen aufzulösen. In dieser Arbeit wird ein kommerzielles Meßsystem mit 256 Ladungs- und Phasenfenstern ($k = l = 256$) eingesetzt.

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{k}) \cdot \mathbf{M} \quad (2.2)$$

mit:

\mathbf{k} = Kalibriervektor

$$\mathbf{W} = \text{diag}(\mathbf{u}_p) \cdot \mathbf{Q} \quad (2.3)$$

mit:

\mathbf{u}_p = Prüfspannungsvektor.

Die Impulsmatrix \mathbf{M} kann mit Hilfe von Kalibriervektoren in die Ladungsmatrix \mathbf{Q} (Gl. 2.2) und mit dem Spannungsvektor in die Energiematrix \mathbf{W} (Gl. 2.3) umgerechnet werden [Gu191]. Dann stellt $q_{i;j}$ die Ladung, $w_{i;j}$ die Energie bei einem bestimmten Ladungs- und Phasenindex dar. Auf diese Matrizen werden verschiedene statistische und mathematische Verfahren angewandt [Sac72, Hau84, Okam86, Gu191, Cac96, Boz98, Okam01, Alt02, Bar02], die eine Klassifizierung der TE-Ursache oder die Beschreibung des Zustandes des Dielektrikums erlauben sollen. Mehrere dieser Kennwerte werden zu charakterisierenden „Fingerabdrücken“ zusammengefaßt.

Einige Kenngrößen sind in Tabelle 2.1 wiedergegeben und kommentiert. Besondere Bedeutung haben die Randverteilungen (Zeilen 5-7), auf die stochastische Operatoren (Zeilen 9-12) angewendet werden. Neben der Randverteilung über dem Phasenwinkel $H(\varphi)$ (Spaltensumme von \mathbf{M}) sind auch Randverteilungen über der Ladung möglich $H(q)$ (Zeilensumme von \mathbf{M}), auf die ebenfalls stochastische und mathematische Operatoren angewendet werden können. In diesem Fall spricht man von Pulshöhenverteilungsanalyse (engl. *partial discharge pulse height distribution analysis* [Bar02]).

Tabelle 2.1: Stochastische und mathematische Kenngrößen [Sac72, Hau84, Gul91, Jam95]

	Name	Formel	Beschreibung
1	N_q	$N_q = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l m_{i,j}$	Gesamtanzahl der Impulse
2	Q_S	$Q_S = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l q_{i,j} $	Summenladung
3	W_S	$W_S = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l w_{i,j} $	Energiesumme
4	U_{TE}	$U_{TE} = u_p(\varphi) \Big _{n_\varphi > 0; n_{\varphi-1} = 0}$	TE-Einsatzspannung
5	$H_n(\varphi)$	$H_n(\varphi) = \left[\sum_{i=1}^k m_{i,1} \quad \sum_{i=1}^k m_{i,2} \quad \cdots \quad \sum_{i=1}^k m_{i,l} \right]$	Puls-Phasen-Verteilung (Spaltensummen von \mathbf{M})
6	$H_n(q)$	$H_n(q) = \left[\sum_{j=1}^l m_{1,j} \quad \sum_{j=1}^l m_{2,j} \quad \cdots \quad \sum_{j=1}^l m_{k,j} \right]$	Puls-Höhen-Verteilung (Zeilensummen von \mathbf{M})
7	$H_{qn}(\varphi)$	$H_{qn}(\varphi) = \left[\frac{h_{q1}}{h_{n1}} \quad \cdots \quad \frac{h_{ql}}{h_{nl}} \right]$	Verteilung der mittleren Impulsstärke
8	$\rho(H)$	$\rho(H) = \frac{H}{\sum H} = [p_1 \quad \cdots \quad p_k], \quad \sum p_i = 1$	bedingte Wahrscheinlichkeiten einer Häufigkeitsverteilung
9	μ	$\mu = \mu_1 = \sum_{i=1}^n (x_i - a) \cdot p_i = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_i$	Mittelwert, erstes statistisches Momentum $n = \text{Anz. der Meßpunkte}$ $a = \text{Bezugswert (hier: } a = 0)$
10	σ	$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \cdot p_i$	Streuung, zweites zentrales Momentum der Statistik
11	sk	$\text{sk}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 \cdot p_i}{\sigma^3}$	Schiefe (engl. <i>skewness</i>), drittes Momentum, Maß für die Symmetrie einer Verteilung: sk > 0: rechtslastig sk = 0: symmetrisch sk < 0: linkslastig
12	ku	$\text{ku}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4 \cdot p_i}{\sigma^4} - 3$	Kurtosis (Exzeß), viertes Momentum, Maß für die „Steilheit“ einer Verteilung ku > 0: steilgipfliger als Normalvert. ku < 0: flachgipfliger als Normalvert.
13	Q_{sum}	$Q_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l q_{i,j}$	Ladungsbilanz
14	I_{NQS}	$I_{NQS} = Q_S / t_{\text{Meß}}$	Durch TE scheinbar verursachter Stromfluß

Fortsetzung Tabelle 2.1.

15	k_Q	$k_Q = \frac{Q_S^- / N_q^-}{Q_S^+ / N_q^+}$	Ladungsasymmetrie, +/- bezeichnet die Polarität der Prüfspannungsperiode
16	k_φ	$k_\varphi = \frac{\varphi_{inc}^-}{\varphi_{inc}^+}$	Phasenasymmetrie (Quotient der Ein- bzw. Aussetzwinkel)
17	k_{cc}	$k_{cc} = H_{qn}^+(\varphi) * H_{qn}^-(\varphi)$	Kreuzkorrelationsfaktor
18	k_{mcc}	$k_{mcc} = k_\varphi \cdot k_Q \cdot k_{cc}$, mit $k_\varphi \equiv 1$	modifizierter Kreuzkorrelationsfaktor
19	pk_{Hx}	$pk_{Hx} = \sum f_{peak}(H)$, $f_{peak} = \begin{cases} 1, \text{ für } h_i \mapsto \text{Gipfel} \\ 0, \text{ sonst} \end{cases}$	Anzahl der lokalen Maxima einer Verteilung H_x

Die Vielzahl dieser Kenngrößen wird noch erhöht durch unterschiedliche Normierungen (Normierung auf maximale Ladung, Mittelwert der Ladung usw.) oder Zerlegung der Map in Polarität der Impulse (Index „pos“/„neg“) oder Prüfspannungshalbwelle (Index „+“/„-“).

Tabelle 2.2: Partitionierungen der Impulsmatrix

	Name	Formel	Beschreibung
1	$\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ $\mathbf{X}_3, \mathbf{X}_4$	$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 & \mathbf{X}_4 \end{bmatrix}$	Einteilung der Matrix \mathbf{X} in Sektoren
2	$\mathbf{X}^+, \mathbf{X}^-$	$\mathbf{X}^+ = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_3 \end{bmatrix}, \mathbf{X}^- = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_4 \end{bmatrix}$	Einteilung der Matrix \mathbf{X} nach positiver oder negativer Phasenlage
3	\mathbf{X}_{pos} , \mathbf{X}_{neg}	$\mathbf{X}_{pos} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 & \mathbf{X}_2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{X}_{neg} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_3 & \mathbf{X}_4 \end{bmatrix}$	Einteilung der Matrix \mathbf{X} in positive oder negative Ladungspolarität

Um verschiedenen Partitionierungsangaben in der Literatur zu genügen [Gul91, Tan95], wird in dieser Arbeit eine Einteilung der Impulsmatrix in Sektoren vorgenommen (Tab. 2.2). Zudem wird die Impulsmatrix horizontal in eine „Normlage“ verschoben, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen:

$$\mathbf{N} = \mathbf{M}(\varphi + \Delta\varphi) \tag{2.4}$$

mit:

$\Delta\varphi =$ Verschiebungswinkel.

Oft wird der Verschiebungswinkel so gewählt, daß die Impulsmatrix in den Phasen-Nullpunkt verschoben wird.

Die gewonnenen Kenngrößen werden in weiteren Schritten verglichen und klassifiziert, wofür Verfahren der Bildverarbeitung [Kriv99], neuronale Netze oder Koordinatentransformationen [Kriv95, Wen98], Datenbanken und Expertensysteme [Lap00, Wes02] herangezogen werden. Oft sind für diese Verfahren Referenzmuster erforderlich, die bei neu zu klassifizierenden TE-Mustern zunächst nicht vorhanden sind.

2.3 Spezielle Eigenschaften des Löschmittels

Das Löschmittel (Sand) besteht aus einer festen und einer gasförmigen Komponente. Daraus ergeben sich spezielle Eigenschaften, auf die hier eingegangen wird.

2.3.1 Granulare und poröse Medien

Den physikalischen und chemischen Eigenschaften von „granularer Materie“ widmet sich eine interdisziplinäre Forschergemeinschaft. Die „chaotische“ Anordnung von Korpuskeln (z.B. Sandkörnern, Getreide) ist nicht nur für die Chaos-Theorie interessant [Chaos99], sondern ergibt besondere mechanische Eigenschaften, in denen granulare Materie als Feststoff, Flüssigkeit oder Gas agiert [Jae96, Mü196, Cla99, Raj00, Beh01]. Die Übergänge zwischen diesen Zuständen sind oft abrupt, wie im Falle der Siloentleerung [Cla99], wo durch den Zerfall sogenannter Kraftketten (Bild 2.7) plötzliche Übergänge von fest nach fließend und umgekehrt möglich sind, was zu Problemen bei der Bemessung führen kann. Für Sicherungen sind Kraftketten insofern relevant, als durch sie lokale Inhomogenitäten oder Hohlräume im Löschmittel entstehen können, die eine Ausbreitung von Entladungskanälen behindern oder fördern können.

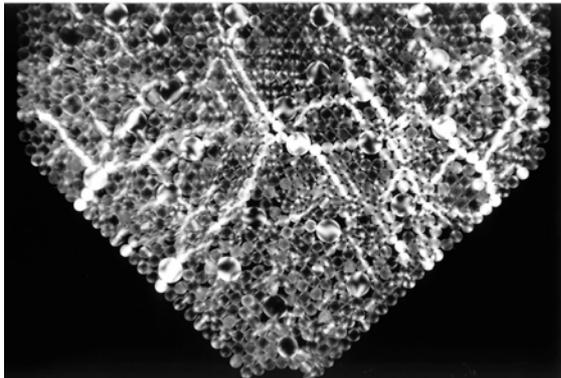


Bild 2.7: Kraftketten in einer Schichtung photoelastischer Stäbe [Cla99]

Der Hohlraum zwischen den Körnern kann mit verschiedenen Stoffen gefüllt sein, etwa Luft, Wasser oder Erdöl, was in der Geologie von Erdöllagerstätten [Hira00] oder im Grundwasserhaushalt eine Rolle spielt. Die Durchströmung mit Gas oder Plasma ist beim Schalten von Sicherungen relevant [Roc02]. Für eine Durchströmung eines Stoffes ist es nicht notwendig, daß er in granularer, kohäsionsloser Form vorliegt, sondern es ist hinreichend, daß er eine Porosität aufweist. Ein Schwamm ist beispielsweise porös, aber nicht kohäsionslos.

Die elektrischen Eigenschaften granularer oder poröser Stoffe zeigen ebenfalls Besonderheiten auf [Net96, Tunc02, Ser04, Hus05]. In der Hochspannungstechnik werden poröse Dielektrika als Elektrete [Gün91], granulare Stoffe als Füllstoff für Formstoffe wie Gießharze angewendet [Kot00]. Neuerdings erlangen Füllstoffsysteme als „nano-dielectrics“ besondere Beachtung [Dis04]. Es ist jedoch nur eine Anwendung bekannt, in der ein granulares Medium direkt, ohne Verwendung von Formstoffen als Isolierstoff untersucht wurde, und zwar bei lunaren Energieversorgungssystemen [Kir93].

2.3.1.1 Porosität

Ein wichtiger Parameter bei porösen Stoffen ist die Porosität. Je nach Porenart (Bild 2.8) werden verschiedene Arten von Porosität unterschieden: Die totale Porosität ϕ ist das Verhältnis des gesamten Porenvolumens V_{por} zum Gesamtvolumen der Probe V_{ges} . Bei der effektiven Porosität [HeuH90, Hil00] wird das gesamte Volumen offener Poren (Kanal- und Sackporen) berücksichtigt, bei der „offenen“ oder „scheinbaren“ Porosität ϕ_s nur das Volumen der Kanalporen [HeuH90]. Wegen der Sackporen sind die totale und die effektive Porosität abhängig vom Druck, da die

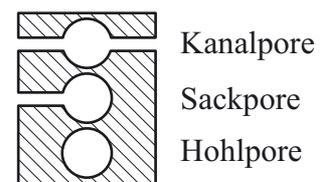


Bild 2.8: Porentypen

Sackporen wie kleine Druckspeicher wirken. Der Anteil der Hohlporen an der totalen Porosität ist meßtechnisch nur schwer zu erfassen, da die abgeschlossenen Volumina von außen unzugänglich sind.

Im folgenden wird mit der offenen Porosität gearbeitet, da Sack- und Hohlporen wegen ihres geringen Einflusses auf die elektrischen Entladungsvorgänge vernachlässigt werden können. Daher werden ϕ_s und ϕ synonym benutzt. Die Zusammenhänge zwischen ϕ und den verschiedenen Volumina sind in Tabelle 2.3 zusammengefaßt. Theoretisch liegen die Werte von ϕ bei Annahme einer Kugelpackung mit Kugeln identischen Durchmessers (monodisperse Durchmesser-Verteilung) zwischen 0,48 bei kubischer Kugelpackung und 0,26 bei rhomboedrischer [Col61].

Tabelle 2.3: Zusammenhänge zwischen Porosität und Volumen [Mün87, Hil00]

Größe	Formel
Gesamt-volumen	$V_{\text{ges}} = V_s + V_{\text{por}} \quad (2.5)$
Feststoff-volumen	$V_s = m_s / \rho_s \quad (2.6)$ mit: $m_s = \text{Feststoffmasse}$ $\rho_s = \text{spez. Gewicht}$
Gasvolumen	$V_{\text{por}} = V_{\text{ges}} - V_s \quad (2.7)$
Porosität	$\phi = \frac{V_{\text{por}}}{V_{\text{ges}}} = \frac{e_{\text{fl}}}{1 + e_{\text{fl}}} \quad (2.8)$
Porenzahl	$e_{\text{fl}} = \frac{V_{\text{por}}}{V_s} = \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (2.9)$

In der Hochspannungstechnik werden meist homogene Isolierstoffe verwendet, in denen Poren unerwünscht sind und allenfalls als diskrete Fehlstelle vorkommen [z.B. Net96]. Die Betrachtung beschränkt sich auf singuläre Poren mit einer definierten Geometrie (z.B. kugelförmige Fehlstellen). Im Gegensatz hierzu ist Sand offenporig und die Anzahl der Fehlstellen, und ihrer Geometrien ist nahezu unbeschränkt.

2.3.1.2 Durchströmte poröse Medien

Eng verbunden mit der Porosität sind Durchströmungsprobleme in porösen Medien, z.B. der Grundwasserfluß in einer Sandschicht. Eine Übersicht von Strömungsproblemen in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen ist in Tabelle 2.4 wiedergegeben: Allgemein bewirken Unterschiede in einer Dichtefunktion ein Potential ϕ , das einen Ausgleich in Form eines Flusses \mathbf{j} verursacht. Im Zusammenhang mit Sicherungen sind neben den Verknüpfungen von elektrischen und thermischen Größen auch die fluidmechanischen Größen von Interesse, da im Schalt Augenblick die entstehenden Gase und das Plasma in die Sandschüttung eindringen [Roc02].

Durch die komplexe Anordnung der Materie sind die Differentialgleichungen zur Beschreibung von Strömungsproblemen nicht mehr einfach lösbar [Cla99, Hil00]. Wird ein poröses

Tabelle 2.4: Strömungsprobleme in porösen Medien [Hil00]

Potential ϕ Fluß \mathbf{j}	Druck	el. Potential	Temperatur	Konzentration
Volumen	Darcy-Gesetz	Elektrosmose	therm. Osmose	chem. Osmose
el. Ladung	ström. Potential	Ohm'sches Gesetz	Seebeck-Effekt	Sedimentierungs-Elektrizität
Wärme	therm. Filtration	Peltier-Effekt	Fourier-Gesetz	Dufour-Effekt
Partikel	Ultrafiltration	Elektrophorese	Soret-Effekt	Fick'sches Gesetz

oder heterogenes Medium $\mathbb{S} = \mathbb{P} \cup \mathbb{M}$, zusammengesetzt aus den Komponenten \mathbb{P} (Poren) und \mathbb{M} (Matrix) betrachtet, gilt für die in Tabelle 2.4 genannten stationären Strömungsprobleme:

$$\nabla \cdot \mathbf{j}(\mathbf{r}) = 0, \mathbf{r} \in \mathbb{S} \quad (2.10)$$

und

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}) + C(\mathbf{r})\nabla\varphi(\mathbf{r}) = 0, \mathbf{r} \in \mathbb{S}. \quad (2.11)$$

Problematisch sind bei porösen Materialien die Materialkonstanten $C(\mathbf{r})$, da sie eine Funktion des Raumes sind:

$$C(\mathbf{r}) = C_{\mathbb{P}}\chi_{\mathbb{P}}(\mathbf{r}) + C_{\mathbb{M}}\chi_{\mathbb{M}}(\mathbf{r}), \quad (2.12)$$

mit:

$C_{\mathbb{X}}$ = Materialkonstante des Materials \mathbb{X} ,

$$\chi_{\mathbb{X}}(\mathbf{r}) = \begin{cases} 1 & \text{für } \mathbf{r} \in \mathbb{X} \\ 0 & \text{für } \mathbf{r} \notin \mathbb{X} \end{cases}.$$

$\chi_{\mathbb{X}}(\mathbf{r})$ wird auch als Indikatorfunktion des Gebietes \mathbb{X} bezeichnet: Sie gibt an, welche der Materialkonstanten im Aufpunkt \mathbf{r} Gültigkeit hat. Beim Wechsel von einer Komponente zur anderen treten Unstetigkeiten auf, die nur mit speziellen Randbedingungen oder nichtlinearen Verfahren gelöst werden können. Oft wird die Feinstruktur des Mediums vernachlässigt, das Material trotz seiner Struktur als homogen angesehen und die Materialkonstanten aus Mittelwerten oder empirischen Werten berechnet.

2.3.1.3 Lichte Weite in Kugelpackungen

Für TE oder elektrische Entladungen in einem Gasraum ist die Größe desselben bzw. die lichte Weite zwischen den begrenzenden Feststoffkörpern ein entscheidender Parameter. Wird ein granulares Material durch eine Schüttung von Kugeln gleichen Durchmessers nachgebildet, läßt sich aus der geometrischen Anordnung der Kugeln die maximale freie Weglänge ableiten, die im Gasraum zurückgelegt werden kann:

$$l_{\text{Pmax, kub}} = \sqrt{2} \cdot D \quad (2.13)$$

mit:

D = Korndurchmesser.

Dies ist der Abstand der punktförmig angenommenen Kontaktflächen in der 110-Ebene (Bild 2.9) der kubischen Elementarzelle. Da die Hauptachsen der Elementarzelle nicht durch Nachbarzellen abgedeckt

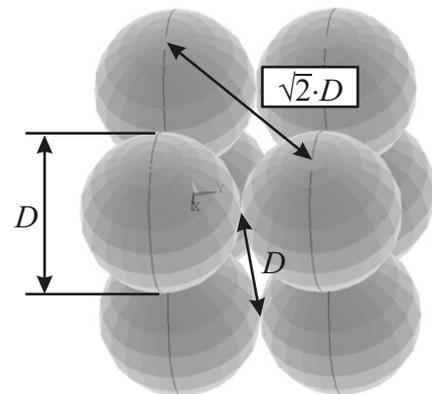


Bild 2.9: Wegstrecken in einer kubischen Elementarzelle

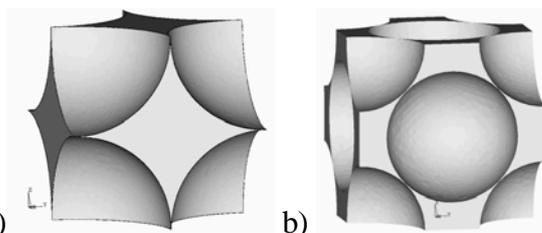


Bild 2.10: Porenvolumina

a) kubisch

b) kubisch-flächenzentriert

werden, sind jedoch längere Wegstrecken durch mehrere Elementarzellen hindurch möglich.

Bei dichtester Kugelpackung sind die erreichbaren Wegstrecken geringer [Kris81], da die Hauptachsen durch Nachbarzellen abgedeckt werden, wie an den Porenvolumina erkennbar ist (Bild 2.10). Die maximale Weglänge ergibt sich aus dem

Abstand zweier diametral versetzter Eckkörner vermindert um den 2-fachen Kornradius zu:

$$l_{\text{Pmax, kfz}} = |\mathbf{r}_{1,1,1}| \cdot a - D = (\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} - 1)D = 1,45D \quad (2.14)$$

mit:

$|\mathbf{r}_{1,1,1}| = \text{Abstand der Eckkörner}$

$a = D \cdot \sqrt{2}$, Gitterkonstante [Mün85].

Bei hexagonal dichtester Kugelpackung entspricht die maximale Weglänge der Höhe der Elementarzelle ($2 \cdot D \cdot \sqrt{2/3}$ [Mün85]) vermindert um den 2-fachen Kornradius:

$$l_{\text{Pmax, hex}} = (2\sqrt{2/3} - 1)D = 0,633D. \quad (2.15)$$

Entsprechend ist die Porenzahl e_{fl} bei dichtester Kugelpackung geringer als bei einfach-kubischer Anordnung. In [Cub02] wird e_{fl} mit 0,9 für einfach-kubische und mit 0,35 für dichteste Kugelpackung angegeben, entsprechend einer Porosität ϕ von 0,47 bzw. 0,26.

2.3.1.4 Bidisperse Kornmischungen

Bei bidispersen Korngrößenverteilungen können kleinere Körner in die Zwischenräume der großen eindringen und so die Porosität verringern (Bild 2.11). Dadurch reduzieren sich die freien Weglängen. Ein kritischer Punkt mit minimaler Porosität (engl. *critical porosity*) wird erreicht, wenn die Hohlräume zwischen den großen Körnern gerade von den kleinen

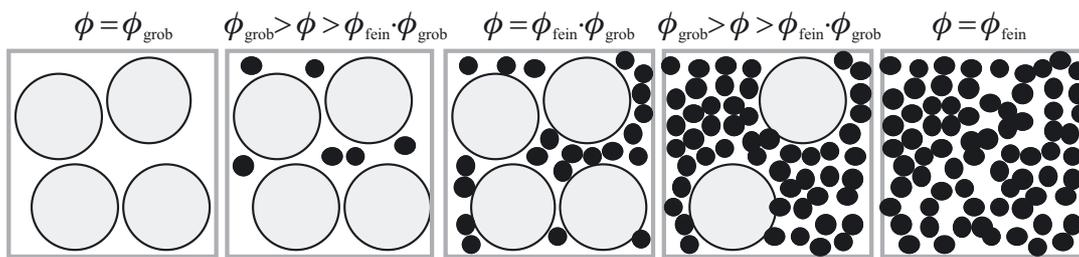


Bild 2.11: Porosität bei bidisperser Korngrößenverteilung (nach [Dvo01])

ausgefüllt werden [Yin92]. Wird die Zugabe kleiner Körner weiter erhöht, steigt die Porosität wieder an, bis sie den der kleinen Körnung eigenen Wert erreicht [ebd., Dvo01]. Wegen des Durchmessers D in den Gln. 2.13-15 bleibt die freie Weglänge entsprechend dem Korndurchmesser der kleineren Körnung aber klein.

2.3.2 Feste Phase

Die feste Phase des Sandes besteht überwiegend aus Siliziumdioxid (SiO_2) in seiner natürlichen Form, dem Quarz. SiO_2 kommt mit 12,6 % und in mindestens 14 Modifikationsformen (Polymorphismen) in der Erdkruste vor [Blan94]. Die Kristallisationsformen von SiO_2 sind vielfältig und abhängig von äußeren Gegebenheiten wie Druck und Temperatur. Unter normalen Bedingungen ist der Tief-Quarz stabil, der sich bei Temperaturerhöhung (573 °C) in den Hoch-Quarz umwandelt [HeuH90]. Tief- und Hoch-Quarz werden auch als α - und β -Quarz bezeichnet [Dem99]. Neben der kristallinen Form kommt SiO_2 noch amorph als Polymer, Gel oder Glas vor. In der Halbleitertechnik spielen SiO_2 -Filme als Gateoxid bei Feldeffekttransistoren oder als Passivierungsschicht eine wichtige Rolle. Wegen der Verwendung von SiO_2 und Si in der Halbleitertechnik sind deren Eigenschaften sehr gut erforscht und werden mittlerweile durch molekular-dynamische Simulationen mit hoher Genauigkeit nachgebildet [Chel02].

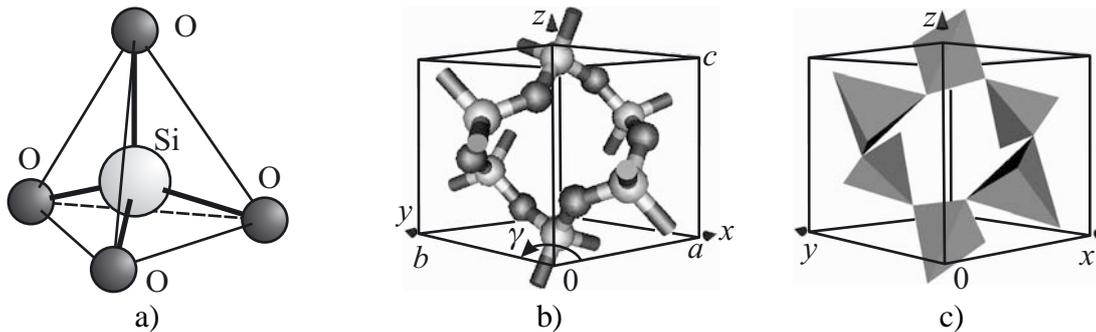


Bild 2.12: a) SiO_4 -Tetraeder
 b) Atomstruktur der Elementarzelle von α -Quarz
 c) Orientierung der SiO_4 -Tetraeder
 $a = b = 4,826 \text{ \AA}$, $c = 5,336 \text{ \AA}$, $\gamma = 120^\circ$ [Jorg78]

Viele Kristallisationsformen von Quarz basieren auf SiO_4 -Tetraedern, die sich die vier Sauerstoffatome mit ihren Nachbarn teilen (Bild 2.12a). Die Achsen der Tetraeder sind nicht parallel, sondern triagonal im Raum angeordnet (Bilder 2.12b-c). In der z -Achse ergibt sich

dadurch eine spiralförmige Struktur, was die Anzahl der Polymorphismen verdoppelt, da die Spirale links- oder rechtsläufig sein kann [Blan94, Dem99]. Die Verteilung der Drehrichtung (Chiralität) ist bei natürlichen Quarzkristallen paritätisch. Je nach Genese erscheint Quarz durchsichtig bis milchig-trüb oder zitronenfarbig. Fremdatome wie Aluminium, Eisenoxid oder Titan verleihen den Kristallen andere Farben (Rauch- und Rosenquarze, Amethyst usw.).

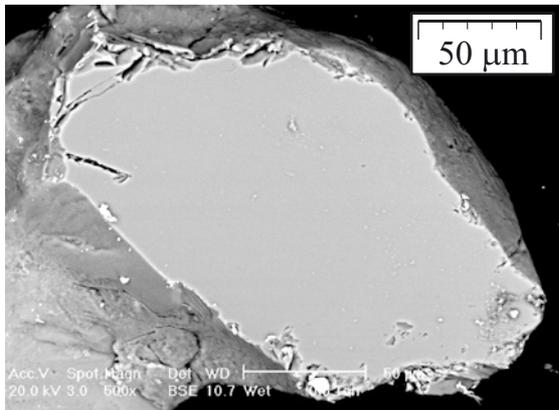


Bild 2.13: SEM-Aufnahme eines angeschliffenen Sandkorns (nach [Kuh01])

Sandkörner entstehen in der Natur durch Verwitterung von Quarzkristallen oder quarzhaltigen Gesteinen [Blan94]. Da SiO_2 chemisch inert ist, überwiegt bei den Verwitterungsprozessen die mechanische Zerkleinerung. Die zerkleinerten Teilchen werden durch Wind (äolisch), Wasser (fluviatil, marin) oder Eis (glazial) in die Lagerstätten transportiert. Dabei werden die Teilchen mehr oder weniger abgerundet. Die Oberfläche weist je nach Verwitterungs- und Transportmechanismus eine Mikrostruktur aus Rissen (Fissuren) und Poren auf (Bild 2.13). Durch Diffusionsprozesse ist die Kornoberfläche oft mit Eisenoxiden verunreinigt, was eine rötliche Färbung bewirkt [Kuh01]. Bei der Sedimentierung in den Lagerstätten werden neben Sandkörnern Beimengungen von organischen Bestandteilen und anderen Kristallen wie Opak, Turmalin und Rutil abgelagert [Blan94].

2.3.2.1 Elektrische Eigenschaften

Die elektrischen Eigenschaften von Quarz sind entsprechend der Kristallstruktur anisotrop und temperaturabhängig [Mün87, Blan94]. Die Permittivitätszahl ϵ_r schwankt abhängig von der Kristallhauptachse (z -Achse in Bild 2.12) zwischen 4,3 und 4,7, die Durchschlagfeldstärke E_d zwischen 3,75 MV/cm und 6,7 MV/cm und der spez. Widerstand ρ zwischen $2 \cdot 10^{13} \Omega\text{cm}$ und $10^{15} \Omega\text{cm}$. Der Verlustfaktor $\tan\delta$ ist abhängig von der Frequenz und liegt zwischen $1,5 \cdot 10^{-4}$ und $2,0 \cdot 10^{-4}$. Quarz ist außerdem piezoelektrisch und photoelastisch

[Mün87, Abr94]. Chirale Quarze wie α -Quarz sind optisch aktiv, d.h. die Polarisationsachse des einfallenden Lichtes wird beim Durchlaufen eines Kristalls gedreht. Synthetisch erzeugte SiO_2 -Filme sind je nach Oberflächenbeschaffenheit in der Lage, über lange Zeiträume elektrische Ladung zu speichern, weshalb sie als elektretisches Material verwendet werden [Gün91].

Natürliche Rohstoffe enthalten immer Verunreinigungen, daher ist ihre Leitfähigkeit wesentlich höher als die von synthetischen Kristallen oder Filmen. Dies verdeutlicht Bild 2.14, das einen Arrheniusplot der Stromdichte in natürlichem α -Quarz im

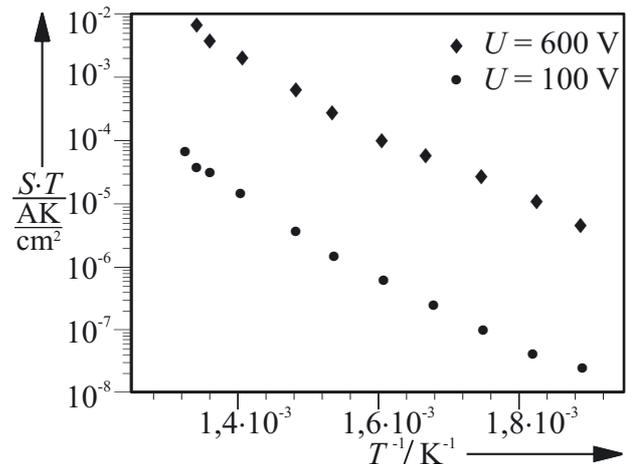


Bild 2.14: Arrheniusplot der Stromdichte S für natürlichen α -Quarz bei unterschiedlichen Spannungen (nach [Enc98])

Temperaturbereich zwischen $250 \text{ }^\circ\text{C}$ und $500 \text{ }^\circ\text{C}$ bei unterschiedlichen Prüfspannungen zeigt [Enc98]. Die Stromdichte variiert in etwa exponentiell über dem Kehrwert der Temperatur und die Charakteristik ist spannungsabhängig. Bei 600 V ist der Verlauf nicht ganz so steil wie bei 100 V . Die Leitfähigkeit wird hauptsächlich auf Verunreinigungen mit Aluminium zurückgeführt, das eine Ionenleitung bewirkt, die Änderung der Charakteristik bei unterschiedlichen Spannungen weist auf Raumladungsvorgänge hin [Cal87]. Die Ionenleitfähigkeit durch Al-Verunreinigungen wird durch den Umstand begünstigt, daß Al^{3+} -Ionen wie Si eine Tetraederstruktur bilden (AlO_4 -Tetraeder) und sich mit minimalen Gitterverzerrungen in das SiO_2 -Gitter integrieren [Mag00]. Kristallfehler und Verunreinigungen führen zu lokalen Störstellen im Material (engl. *localized states*), in denen Ladungsträger „haften“ können (engl. *trapping*). Zwischen den Fehlstellen können sich Ladungsträger durch Sprungprozesse bewegen (engl. *hopping*) und so zur Leitfähigkeit eines elektrischen Isolators beitragen [Blai01].

Die makroskopische Leitfähigkeit von Sand ist neben der Feststoffleitfähigkeit von der Granularität bestimmt. Die Sandkörner berühren sich nur an den Kontaktpunkten und die Oberflächenleitfähigkeit spielt eine wichtige Rolle [Alb66, Hus05]. In [Alb66] wird die Leitfähigkeit von Sand (mittlere Korngröße von $1,2 \text{ mm}$) zu $\sim 10^{-8} \text{ S/cm}$ angegeben, wobei die Leitfähigkeit stark von der Feuchte des Sandes abhängt. Durch Zugabe von Wasser steigt sie nichtlinear um mehrere Dekaden, um bei $1 \%_{\text{Gew.}} \text{ H}_2\text{O}$ einen Endwert von 10^{-5} S/cm zu erreichen. Im Vergleich zur reinen Feststoffleitfähigkeit sind diese Werte um Größenordnungen höher, so daß vermutet werden kann, daß Oberflächenprozesse bei Raumtemperatur überwiegen.

2.3.2.2 Polarisation

Im Gegensatz zur gasförmigen Phase sind Feststoffe polarisierbar, d.h. die Materie widersetzt sich einem äußeren elektrischen Feld durch den Aufbau eines Polarisationsfeldes \mathbf{P} . Der Zusammenhang zwischen Polarisation und elektrischem Feld wird deutlich, wenn die bekannte Verknüpfung $\mathbf{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mathbf{E}$ zwischen Verschiebungsdichte \mathbf{D} und Feldstärke \mathbf{E} gemäß [Mün87, Abr94, Tunc02] umgeschrieben wird zu

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \cdot \mathbf{E} + \mathbf{P} \tag{2.16}$$

Die Polarisationsmechanismen sind vielfältig und im gesamten elektromagnetischen Frequenzspektrum zu bemerken. Die wichtigsten Polarisationsmechanismen sind die elektronische Polarisation, bei der eine Verlagerung der Ladungsschwerpunkte innerhalb von Atomen stattfindet, die ionische Polarisation, bei der es zu einer Verschiebung von Ionen kommt, und die Orientierungspolarisation, die durch Orientierung molekularer Dipole bewirkt wird. An Grenzflächen kann durch Ladungsträger zusätzlich eine Grenzflächenpolarisation auftreten [Bey86].

Ist die Polarisation proportional zur elektrischen Feldstärke, so ergibt sich durch Einführen der elektrischen Suszeptibilität χ (auch als Polarisationskoeffizient bezeichnet) der Zusammenhang

$$\chi = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{E}}. \quad (2.17)$$

Mit χ können die einzelnen Polarisationsanteile aufsummiert werden [Mün87], entsprechend

$$\chi = \chi_{\text{elektronisch}} + \chi_{\text{ionisch}} + \chi_{\text{Orientierung}} + \chi_{\text{Grenzfl.}}, \quad (2.18)$$

bzw. wegen $\epsilon_r = 1 + \chi$

$$\epsilon_r = 1 + \chi_{\text{elektronisch}} + \chi_{\text{ionisch}} + \chi_{\text{Orientierung}} + \chi_{\text{Grenzfl.}}. \quad (2.19)$$

Die einzelnen Polarisationsanteile sind von verschiedenen Einflüssen abhängig, insbesondere von der Temperatur und der Frequenz. Während bei Erhöhung der Frequenz des angelegten elektrischen Feldes zunächst die Grenzflächen-, dann die Orientierungs- und schließlich die elektronische Polarisation aussetzen, steigt die Polarisation bei Temperaturerhöhung durch „Auftauen“ von orientierbaren Dipolen und Mobilisierung von Ladungsträgern an [Bey86].

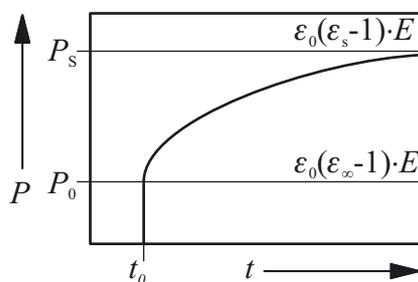


Bild 2.15: Polarisationsverlauf über der Zeit (nach [Tunc02])

Die Polarisation tritt bei einem sprunghaft angelegten Feld nicht schlagartig auf, sondern mit der sog. dielektrischen Antwort (Bild 2.15). Zunächst bewirken die schnellen Polarisationsmechanismen eine spontane Polarisation P_0 , die sich für $t \rightarrow \infty$ asymptotisch der statischen Polarisation P_s annähert [Tunc02]. Entsprechend unterscheidet man zwischen statischer (ϵ_s) und Hochfrequenz-Permittivitätszahl (ϵ_∞). Der hier zu betrachtende Frequenzbereich (Netzfrequenz) ist weit vom Hochfrequenzbereich entfernt, so daß von der statischen Permittivitätszahl

ausgegangen werden kann. Eine dielektrische Antwort tritt auch bei Wegnahme des Feldes auf, dann spricht man von Depolarisation. Depolarisationsstrommessungen gewinnen zunehmend an Bedeutung in der Hochspannungsdiagnostik [Reu03].

Zur dielektrischen Polarisation muß bei kristallinem Quarz noch der Anteil aus der piezoelektrischen Polarisation

$$P_{\text{piez}, i} = d_{ij} \cdot \sigma_j, \quad (2.20)$$

mit:

d_{ij} = piezoelektrischer Koeffizient

σ_j = Komponente des Spannungsfeldes

i = Index der Koordinationsachse

j = Komponente der Normal- oder Schubspannung

hinguzerechnet werden [Abr94]. α -Quarz besitzt die piezoelektrischen Koeffizienten $d_{11} = 2,3 \cdot 10^{-12}$ As/N und $d_{14} = 0,67 \cdot 10^{-12}$ As/N [Mün87]. Bei der hier betrachteten chaotischen Anordnung der Sandkörner im Sand sind die Kristallachsen der einzelnen Körner i.d.R. nicht parallel ausgerichtet, so daß sich bestenfalls eine Mischform der verschiedenen piezoelektrischen Anteile ergibt.

2.3.3 Gasförmige Phase

Die gasförmige Phase innerhalb des Löschmittels ist in den meisten Fällen Luft, ein Gasgemisch aus Stickstoff (N_2 , 78 %) und Sauerstoff (O_2 , 21 %) sowie Argon, Kohlendioxid, weiteren Edelgasen und Methan [Iri80]. Zudem enthält atmosphärische Luft nicht unerhebliche Mengen von Wasser. In Hannover-Langenhagen beträgt die relative Luftfeuchte w_{rel} im Mittel 80 % [Wöh99], was ca. 1 %_{Gew.} bei 20 °C und 1000 hPa entspricht. Luft ist, bezogen auf die installierte Systemlänge, der wichtigste Isolierstoff in der Elektrotechnik. Die elektrische Durchschlagfestigkeit E_d liegt bei ca. 30 kV/cm.

Im Gegensatz zur festen Phase haben Gase allgemein eine Permittivitätszahl von etwa $\epsilon_r \approx 1$, sie sind daher wenig polarisierbar. Die Leitfähigkeit von Gasen ist geringer als die von festen Isolierstoffen, sie ist aber stark feldstärkeabhängig (Bild 2.16). Zur Realisierung eines Stromflusses ist der Transport elektrischer Ladungsträger notwendig. Diese entstehen im Gasraum durch Ionisierung von Gasmolekülen, z.B. durch kosmische Strahlung, und werden durch das elektrische Feld in Richtung der Elektroden beschleunigt [Bey86]. Durch Kollision mit anderen Gasmolekülen werden die Ladungsträger abgebremst, und es stellt sich eine konstante Geschwindigkeit v_{drift} ein. Die Driftgeschwindigkeit ist hauptsächlich von der Gasdichte abhängig, aber auch von der Größe der Gasmoleküle, die den Wirkquerschnitt bestimmt, mit dem die Ladungsträger und Gasmoleküle kollidieren. Im Bereich I herrscht ein Gleichgewicht zwischen Ladungsträgererzeugung und -vernichtung, die Charakteristik ist nahezu ohm'sch. Ab einer Sättigungsfeldstärke E_s reicht die Produktion von Ladungsträgern nicht mehr aus, um die ohm'sche Charakteristik zu befriedigen, und es fließt ein Sättigungsstrom (Dunkelstrom) entsprechend der Sättigungsstromdichte S_s . Wegen der Bereitstellung von Ladungsträgern durch äußere Mechanismen werden die Bereiche I-II mit „unselbständige Entladung“ bezeichnet. Beim Übergang in den Bereich III kommt es im Gas zu Ionisationsprozessen und es können sich selbständige Entladungen ausbilden.

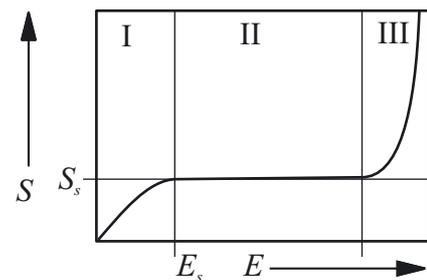


Bild 2.16: Stromdichte über der Feldstärke (nach [Bey86])

2.4 Gasentladungen

Gasförmige Dielektrika und die darin stattfindenden Vorgänge sind seit langem für die Elektrotechnik von Bedeutung, entsprechend umfangreich ist die Literatur hierzu [bspw. Com30, Eng32, Gän53, Rae64, Loeb65, Ped89, Bey86, Chr90, Rai97, Brai00, CheJ02]. In der praktischen Anwendung von Gasentladungen ist zwischen verschiedenen Elektrodenkonfigurationen (homogen/inhomogen) und angelegten Spannungsformen (Gleich-, Wechsel-, Stoß-, Hochfrequenzspannung) zu unterscheiden. Zusätzlich sind die physiko-chemischen Randbedingungen zu berücksichtigen (Gasart, Temperatur, Druck, etc.) [Bey86, Phi88, Brai00].

Tabelle 2.5: Beispiele von Elektronen-Molekül-Wechselwirkungen (nach [Sir02])
(AB: zweiatomiges Molekül, e: Elektron, M: beliebiger dritter Stoßpartner;
Indizes: ⁺ positiv geladen, ⁻ negativ geladen, * angeregt)

Wechselwirkung	Elektronenstoßprozeß	Elektronen-Energieverlust
Elastischer Elektronenstoß (Translation)	$e + AB \rightarrow AB + e$	< 0,5 eV
Rotationsanregung	$AB(\text{rot1}) + e \rightarrow AB(\text{rot2}) + e$	0,5 - 1 eV
Schwingungsanregung	$AB(\text{vib1}) + e \rightarrow AB(\text{vib2}) + e$	0,5 - 1 eV
Elektronische Molekülanregung	$e + AB \rightarrow AB^* + e$	1 - 10 eV
Dissoziation (Radikalbildung)	$e + AB \rightarrow A + B + e$	> 6 eV
Ionisation	$e + AB \rightarrow AB^+ + 2e$ $e + AB \rightarrow A + B^+ + 2e$	> 10 eV (O ₂ : 12 eV; N ₂ : 15,6 eV)
Elektronenanlagerung	$e + AB \rightarrow AB^-$ $e + AB \rightarrow A + B^-$	-
Rekombination	$AB^+ + M + e \rightarrow AB + M$	-

Für eine selbständige Gasentladung (Bereich III, Bild 2.16) ist ein Ionisationsprozeß notwendig, der die dem Entladungsprozeß entzogenen Ladungsträger ersetzt oder sogar vermehrt. Ein solcher Prozeß ist die Stoßionisation [Bey86, Brai00]. Je nach Gasart, Druck, Temperatur, Feldstärke, Masse und Polarität können Ladungsträger, die sich in einer einem elektrischen Feld ausgesetzten Gassäule bewegen, nach einer bestimmten Flugzeit mit Stoßpartnern (Gasmolekülen, Wandungen, Elektroden) kollidieren und mit diesen Energie austauschen.

Der Energieaustausch zwischen den Stoßpartnern ist auf vielfältige Art möglich. Es finden elastische, unelastische und superelastische Kollisionen statt. Dabei werden Oberflächen- und Volumenprozesse unterschieden. Oberflächenprozesse sind Vorgänge, die sich an der Wandung des Gasvolumens abspielen, z.B. thermische und elektrische Emission, Photoemission ($h \cdot \nu >$ Austrittsarbeit), sowie Oberflächenrekombination und 3-Körper-Reaktionen (Katalyse). Im Gasvolumen können die Ladungsträger neutrale Stoßpartner ionisieren, in angeregte Zustände versetzen oder sich an diese anlagern. Durch Kollision mit entgegengesetzt geladenen Partnern ist eine Rekombination möglich. Oft sind die Energiezustände der Stoßpartner nicht kompatibel, so daß Energiequanten (z.B. Photonen) abgegeben werden oder Energie in „angeregten Zuständen“ von Atomen oder Molekülen zwischengespeichert wird. Tabelle 2.5 listet Beispiele von Elektronen-Molekül-Wechselwirkungen im nicht-thermischen Plasma und zugehörige Elektronenenergieverluste auf.

2.4.1 Generationendurchschlag

Im homogenen Feld zwischen zwei Elektroden mit dem Abstand d legen die Ladungsträger entsprechend der Driftgeschwindigkeit $\mathbf{v}_{\text{drift}} = \mu \cdot \mathbf{E}$, die von ihrer Mobilität μ und dem einwirkenden Feld \mathbf{E} abhängig ist, pro Zeiteinheit eine bestimmte Strecke zurück. Wird dabei die freie Weglänge λ überschritten, kollidieren die Ladungsträger, überwiegend Elektronen wegen der hohen Mobilität, mit einem Stoßpartner. Führt die Kollision zu einer Ionisation, steigt die Anzahl der Elektronen pro Längenelement dx um

$$dN = N \cdot dx / \lambda_1 \quad (2.21)$$

mit:

N = lokale Elektronenanzahl

λ_1 = Weglänge für Ionisierung.

Eine Integration ergibt die Multiplikationsrate pro Längeneinheit

$$N = N_0 \cdot e^{x/\lambda_1}$$

mit:

$$N_0 = \text{Anzahl der Anfangselektronen.} \quad (2.22)$$

Durch die Einführung des ersten Townsend'schen Ionisierungskoeffizienten

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_1} = \frac{\text{konst.}}{\lambda} e^{\left(\frac{-V_1}{E \cdot \lambda}\right)} \quad (2.23)$$

mit:

λ = tatsächliche freie Weglänge,

V_1 = Ionisierungsspannung

folgt für Gl. 2.22 der Ausdruck $N(x) = N_0 \cdot e^{\alpha x}$. Wird $x = d$ gesetzt, ergibt sie die Anzahl von Ladungsträgern, die in der Anordnung mit dem Elektrodenabstand d erzeugt werden. Allerdings muß noch die Anzahl N_0 der Anfangsladungsträger abgezogen werden, so daß sich $N(d) = N_0 \cdot (e^{\alpha d} - 1)$ ergibt.

Weil λ umgekehrt proportional zur Gasdichte bzw. zum Druck p ist ($\lambda \sim 1/p$), läßt sich α umschreiben zu:

$$\alpha = A \cdot p \cdot e^{\left(\frac{-B \cdot p}{E}\right)} \quad (2.24)$$

mit:

A, B = Gaskonstanten.

Die positiven Ionen wandern zur Kathode und führen dort zur Sekundäremission von Elektronen, die im Gasraum eine neue Generation von Ionen erzeugen. Die Effizienz, mit der die Sekundäremission erfolgt, wird mit dem Sekundäremissionskoeffizienten γ ausgedrückt.

Damit sich die Entladung selbsttätig erhält, muß die erste Generation, d.h. die ursprüngliche Anzahl N_0 von Elektronen, wieder bereitgestellt werden: $N_{0, \text{neu}} = N_{0, \text{alt}} = \gamma N_0 \cdot (e^{\alpha d} - 1)$, bzw.

$$\alpha \cdot d = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right). \quad (2.25)$$

Die Sekundäremission γ ist abhängig von Material und Beschaffenheit der Elektrodenoberfläche, der Energie und dem Einfallswinkel der Elektronen sowie von Temperatur, Druck und Feldstärke (magnetisch und elektrisch) an der Einschlagstelle [Kol56].

Aus der Kombination der Gln. 2.22-25 resultiert das *Paschengesetz*

$$A \cdot p \cdot d \cdot e^{\left(\frac{-B \cdot p}{E}\right)} = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right), \quad (2.26)$$

das die Durchschlagspannung U_d einer Gasstrecke im homogenen Feld ($U_d = E \cdot d$) liefert

$$U_d = \frac{B \cdot pd}{\ln(A \cdot pd) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]}. \quad (2.27)$$

U_d hängt nur vom Produkt $p \cdot d$ ab. Der Funktionsgraph $U_d = f(p \cdot d)$ hat bei logarithmischer Einteilung der Koordinatenachsen einen parabelförmigen Verlauf mit einem ausgeprägten Minimum (Paschenminimum). Das Minimum liegt für Luft bei $p \cdot d = 0,73 \cdot 10^{-3}$ bar·cm bzw. 352 V [Bey86]. Der Bereich links des Minimums wird als Nahdurchschlag bezeichnet, rechts davon als Weidurchschlag. Durch Anwendung der Ähnlichkeitsgesetze ist das Paschengesetz auch auf andere Elektrodenkonfigurationen übertragbar.

Wird aus Gl. 2.27 die minimale Schlagweite d_{\min} bei Normaldruck bestimmt, folgen aus unterschiedlichen Literaturangaben Werte zwischen $d_{\min} = 7,3 \dots 15 \mu\text{m}$ [Bey86, Rüc02]. Nach Gl. 2.15 würde demnach eine Korngröße kleiner $11,5 \dots 23,7 \mu\text{m}$ den Generationendurchschlag im Sand unterbinden.

2.4.2 Lawinendurchschlag

Gleichung 2.27 und die dazugehörige Theorie erklären nicht den Durchschlag in Anordnungen ohne metallische Elektroden ($\gamma < 1$) oder im inhomogenen Feld ($U \neq E \cdot d$) und Besonderheiten des homogenen Durchschlags (Durchschlagzeit $<$ Flugzeit der Ladungsträger, verzögerter Durchschlag) [Chr90]. Dies liegt an Mechanismen wie der Elektronenanlagerung, die der Ionisation entgegenwirken, an der Photoionisation, die von „mechanischen“ Stößen unabhängig mit hoher Geschwindigkeit größere Distanzen überbrücken kann, und an Raumladungen, die zu lokalen Feldverzerrungen führen können. Die Elektronenanlagerung wird im Anlagerungskoeffizienten η zusammengefaßt, so daß sich ein effektiver Ionisationskoeffizient

$$\alpha' = \alpha \cdot \eta \quad (2.28)$$

ergibt.

Eine Ursache für Raumladungen ist in der unterschiedlichen Masse und Größe von Elektronen und Ionen begründet, woraus unterschiedliche Mobilitäten und Driftgeschwindigkeiten resultieren ($v_e/v_{\text{Ion}} \geq 200$) [Bey86]. In der Praxis können die Ionen daher als ruhend angenommen werden. Ferner führen die unterschiedlichen Wirkquerschnitte und Reaktionsmodi zu einem zeitabhängigen Ungleichgewicht der Ladungsträger.

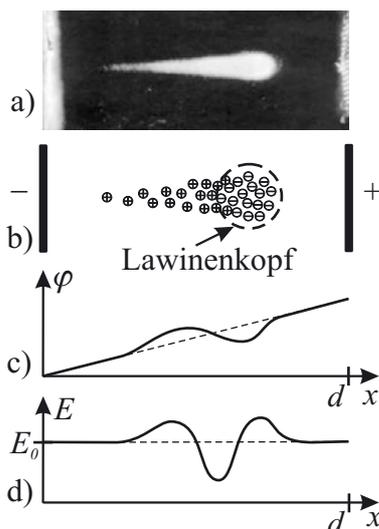


Bild 2.17: Lawinenbildung
a) Nebelkammerbild
b) Ladungsverteilung
c) Potentialverlauf
d) Feldstärkeverlauf

Bild 2.17 zeigt schematisch die Bildung einer Elektronenlawine, die durch die unterschiedlichen Ladungsträgergeschwindigkeiten zustande kommt und in Nebelkammern nachgewiesen wird (Bild 2.17a, [Rae64]): Während die Elektronen sehr schnell zur Anode wandern, bleiben im Schwanz der Lawine positive Ionen zurück (Bild 2.17b). Dies bewirkt eine Anhebung des Potentials φ im Schwanz der Lawine, während es im Kopf abgesenkt wird (Bild 2.17c), woraus Feldverzerrungen resultieren (Bild 2.17d).

Zur Berechnung der Elektronenlawine wird die negative Ladung des Lawinenkopfes als Kugel angenommen (gestrichelter Kreis in Bild 2.17b), die dem Grundfeld E_0 ein Feld E_L überlagert [Bey86]:

$$E_L = \frac{N_e \cdot q_e}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_L^2} = \frac{q_e \cdot e^{(\alpha' \cdot x)}}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r_L^2} \quad (2.29)$$

mit:

N_e = Anzahl der Elektronen

r_L = Radius des Lawinenkopfes.

Der Radius des Lawinenkopfes ergibt sich aus der Diffusionskonstanten D der Elektronen und ihrer Geschwindigkeit $v_e = x/t = \mu_e \cdot E_0$ zu

$$r_L^2 = 4D \frac{x}{\mu_e \cdot E_0}, \quad (2.30)$$

mit μ_e = Elektronenbeweglichkeit.

Diese Gleichung gilt nur, wenn die Anzahl der Ladungsträger im Lawinenkopf 10^7 nicht übersteigt, d.h. der Einfluß von E_L klein gegenüber E_0 ist.

Wird für D die Einstein'sche Beziehung $D/\mu_e = k \cdot T/q_e$ eingesetzt, kann E_L in Abhängigkeit des Grundfeldes dargestellt werden:

$$E_L = \frac{q_e^2 \cdot e^{(\alpha' \cdot x)}}{16\pi \cdot \epsilon_0 \cdot k \cdot T \cdot x} E_0. \quad (2.31)$$

Ist $E_L = E_0$, wird die Lawine kritisch [Chr90], d.h. Gl. 2.21 ist nicht mehr gültig, da aufgrund des hohen Wertes von E_L Photoionisation auftritt. Die Photonen überbrücken dabei mit Lichtgeschwindigkeit Distanzen, die von der Photonen-Absorptionsfähigkeit des Gases abhängen. Durch diese zusätzliche Ionisierung bildet sich in sehr kurzer Zeit ein ionisierter Kanal (*Streamer*) aus, der im homogenen Fall den Gasraum zwischen den Elektroden überbrückt, im inhomogenen Fall zu Entladungskanälen mit einer Länge entsprechend der Größe des Hochfeldbereiches führt, in dem $E_L \geq E_0$ ist.

Das Durchschlagkriterium für Streamer läßt sich mit $E_L \equiv E_0$ und Einsetzen einer kritischen Länge x_{cr} aus Gl. 2.31 ableiten:

$$16\pi \cdot \epsilon_0 \cdot k \cdot T \cdot x_{cr} = q_e^2 \cdot e^{(\alpha' \cdot x_{cr})}, \text{ bzw. } N_{cr} = e^{(\alpha' \cdot x_{cr})}. \quad (2.32)$$

Ist x_{cr} gleich dem Elektrodenabstand d , erfolgt im Homogenfeld der Durchschlag. Soll Gl. 2.32 auf inhomogene Anordnungen angewandt werden, darf der effektive Ionisationskoeffizient α' nicht mehr als konstant angenommen werden, sondern muß „lokal“ ausgewertet werden [Ped89]. Gl. 2.32 geht dann über in

$$N_{cr} = e^{\int_0^{x_{cr}} [\alpha(x) - \eta(x)] dx}; x_{cr} \leq d \quad (2.33)$$

bzw.

$$\int_0^{x_{cr}} [\alpha(x) - \eta(x)] dx = \ln(N_{cr}) = K_{St}. \quad (2.34)$$

Die Streamerkonstante K_{St} hat im homogenen Feld Werte im Bereich von 13,8...18,4 [Bey86], im inhomogenen Fall ist eine Angabe bestimmter Werte wegen der räumlichen Variation der Größe von E und α' nur schwer möglich und die Gültigkeit auf die jeweilige Anordnung beschränkt.

Für die Entstehung von Lawinen oder Streamern in porösen Medien muß gewährleistet sein, daß unter den lokalen Voraussetzungen (Feldstärke, effektiver Ionisationskoeffizient) die kri-

tische Streamerlänge x_{cr} zur Verfügung steht. [Vel01] gibt hierfür einen Wert von 1 mm bei 1 bar in Luft an.

2.4.3 Koronaentladung

Koronaentladungen treten im stark inhomogenen Feld auf und sind dadurch gekennzeichnet, daß die elektrische Feldstärke ausgehend von einer stark gekrümmten (scharfen) Elektrode in Richtung einer weniger gekrümmten (flächigeren) abfällt (z.B. Nadel-Platte-Anordnung, Reuse). Doppelt-inhomogene Anordnungen (Kugel-Kugel, Stab-Stab, Nadel-Nadel) können oft durch Interpretation einer Äquipotentialfläche als Gegenelektrode in eine einfach-inhomogene Anordnung überführt werden [Phi88].

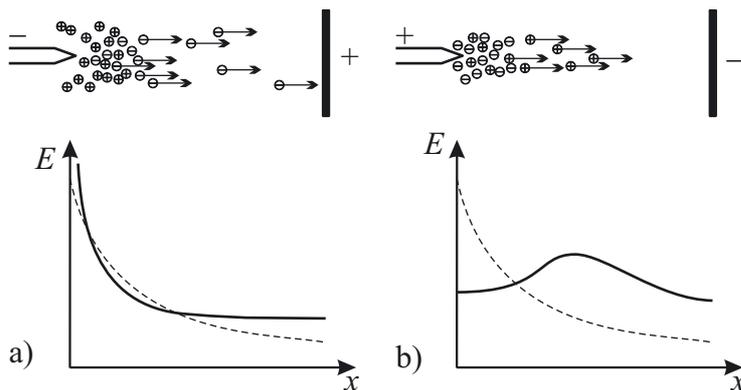


Bild 2.18: Feldverläufe der Spitzenentladung

a) negative, b) positive Spitze

— mit, -- ohne Berücksichtigung der Raumladung (nach [Bey86])

Elektronenlawinen und Streamer im Hochfeldbereich nahe der scharfen Elektrode führen zwar zu einer Ionisierung und einem meßbaren Koronastrom, aber nicht notwendigerweise zum Durchschlag. Die Entladung kann bei geeigneter Einstellung der Versorgungsspannung weit in den Feldraum hinein reichen, ohne diesen komplett zu überbrücken.

Wegen der unterschiedlichen Ladungsträgermobilitäten sind im inhomogenen Feld Polari-

tätseffekte vorhanden, wie Bild 2.18 zeigt. Dort ist der Feldverlauf einer Nadel-Platten-Anordnung jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Raumladungen für positive und negative Polarität skizziert. Bei negativer Spitze (Bild 2.18a) sinkt die Feldstärke ausgehend von der Spitze durch die positiver Raumladung schnell auf einen niedrigen Wert. Bei positiver Spitze ist der Feldraum jedoch insgesamt höher belastet. Daher ist die Durchschlagsspannung U_d für positive Spitze niedriger als für die negative ($U_{d, pos} < U_{d, neg}$) [Bey86].

Da Koronaentladungen nicht zum Durchschlag führen, aber durch Ionisation des Gasraums Energie in diesen eintragen, sind Koronaentladungen gut für elektrochemische Prozesse geeignet, in denen das Plasma zur Umwandlung chemischer Komponenten verwendet wird [Cha91, Vel01, CheJ02]. Eine weitere wichtige Anwendung von Koronaentladungen ist die elektrische Entstaubung [Miz00].

2.4.4 Barriere- und behinderte Entladung

Eine besondere Form der Entladung liegt vor, wenn in den Feldraum eine Barriere (Schirm) eingefügt wird. Diese Barriere wirkt einem Austausch von Ionen entgegen, und es können sich an ihr Ladungsträger ansammeln, so daß die Durchschlagsspannung der Anordnung in Abhängigkeit von der Position des Schirmes beträchtlich ansteigen kann [Gän53, Sjö03]. Ist die Barriere ein dielektrischer Werkstoff, wird von einer dielektrischen Barriereentladung (engl. *dielectric barrier discharge*, DBD) gesprochen [Kog03]. Neben einer mechanischen Behinderung von Ladungsträgern kann eine dielektrische Barriere durch Wahl eines Materials mit hoher Permittivität Feldverzerrungen hervorrufen und durch Oberflächenprozesse wie La-

Entladungsträgerspeicherung, Rekombination und Sekundäremission Entladungen unterstützen oder behindern.

Einige Oberflächenprozesse sind in Bild 2.19 dargestellt [Gol02]: Durch Adsorptionszentren können Elektronen eingefangen werden (Prozeß A), die mit positiven Ladungsträgern rekombinieren können (Oberflächenrekombination, Prozeß B). Die Reaktionszentren der Prozesse sind örtlich beschränkt, so daß vor der Reaktion eine Oberflächendiffusion erforderlich ist. Die Ionen hinterlassen beim Aufschlag eine positive Vakanz auf der Oberfläche (Prozeß C) und können, wenn die Energie hoch genug ist, zu Ionen- oder Elektronenemissionen führen (Prozeß D). Photoemission (Prozeß E) ist stark von der Wellenlänge des Photons abhängig. Der Generierungsprozeß von Photonen hängt von der Gasart und Temperatur ab. Schließlich können angeregte Moleküle oder Thermionen zu einer Bereitstellung von Elektronen führen (Prozesse F, G). Ferner ist bei sehr hohen Feldstärken eine direkte Bereitstellung von Elektronen durch Kaltkathodenemission (Röntgeneffekt) möglich.

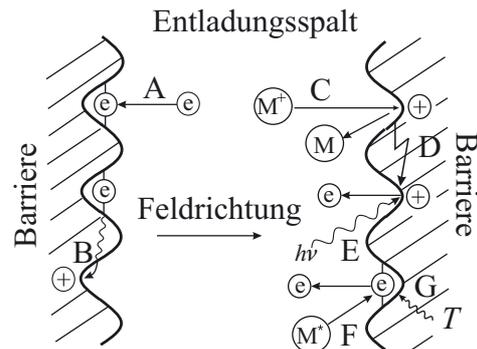


Bild 2.19: Oberflächenprozesse bei DBD (nach [Gol02])

Meist wird die dielektrische Beschichtung auf die weniger gekrümmte Elektrode aufgebracht. Verschiedene Grundtypen von DBD-Anordnungen zeigt Bild 2.20. Anordnungen mit einer beschichteten Elektrode (Bild 2.20a) werden für Volumenentladungen (engl. *volume discharge*, VD) eingesetzt, für Oberflächenentladungen (engl. *surface discharge*, SD) eignen sich Anordnungen mit aufgesetzten oder eingelassenen Elektroden (Bild 2.20b-c) und Feststoffschüttungen erzeugen sowohl Oberflächen- als auch Volumenentladungen (Bild 2.20d). Während die Anordnungen b) und c) nur flächig ausgeführt werden können, sind a) und d) häufig als Zylinderkondensator oder Reuse zu finden.

Das Einsatzgebiet der DBD ist breit gefächert [Cha91, Tas95, Samo97, Rai97, Hac00, Kog03, Bec05] und umfaßt insbesondere Plasma-Anwendungen. Eines der frühesten Anwendungsgebiete war nach [Kog03] die Erzeugung von Ozon im Siemens-Ozonisator, weitere Beispiele sind die Oberflächenbehandlung [Mas98, Borc03], die Abgasbehandlung [Klein95, Sir02, Tam02] und die Luftverbesserung [Kur00].

Entsprechend der Zusammensetzung des der Entladung zugeführten Gases, im Falle von Luft hauptsächlich N₂ und O₂, sind vielfältige chemische Reaktionen möglich [Kos92]. In [Klein95] werden über 900 Reaktionsgleichungen und Wirkquerschnitte bei der Anwendung von DBD zur Abgasbehandlung angegeben. [Brau91] nennt 78 Reaktionsgleichungen für Ozonisatoren, [Tas95] referenziert immerhin noch 45 Reaktionsgleichungen eines „vereinfachten“ O₂-NO-H₂O-Reaktionssystems.

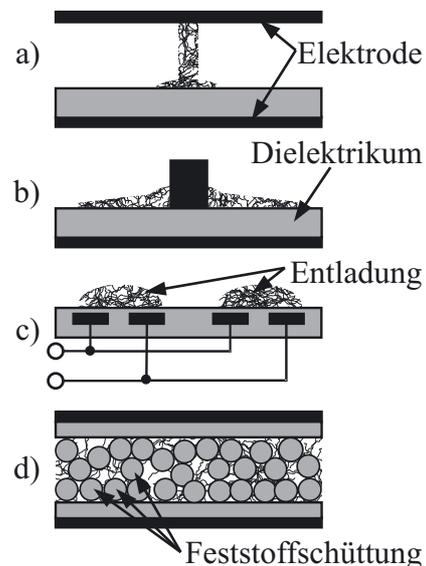


Bild 2.20: DBD-Anordnungen (nach [Gib00])

- a) Volumenentladung
- b) Oberflächenentladung
- c) Oberflächenentladung (coplanar)
- d) Feststoffbett

Dem Aufbau einer Sicherung kommt offensichtlich die DBD-Anordnung in Bild 2.20d mit Feststoffschüttbett am nächsten, die als „packed bed reactor“ (PBR) Verwendung findet [Russ99, Hac00, Rüc02, Kang03]. Signifikante Unterschiede bestehen in den verwendeten Feststoffschüttungen (PBR: BaTiO_3 , $\epsilon_r \approx 2000$; Sicherung: SiO_2 , $\epsilon_r \approx 2,6$), der Korngröße, die beim PBR monodispers ist und einige cm beträgt, bei Sicherungen in einer statistischen Korngrößenverteilung um 0,1 mm vorliegt, und in den Spannungsformen, die beim PBR aus gepulsten Spannungen mit einer Pulsfrequenz von mehreren kHz, bei Sicherungen aus einer sinusförmigen Wechselspannung mit 50 Hz besteht. PBR verwenden oft dielektrisch beschichtete Elektroden, die eine Funkenbildung verhindern (stabilisierter PBR [Rüc02]). In Sicherungen ist eine der Elektroden, der Schmelzleiter, unbedeckt, die Gegenelektrode ist durch das Porzellanrohr mit seiner hohen Durchschlagfeldstärke ($E_{d, \text{porz}} \approx 300 \text{ kV/cm}$ [HeuH90, Bey86]) abgeschirmt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen PBR und Sicherungen ist in der Durchströmung zu sehen:

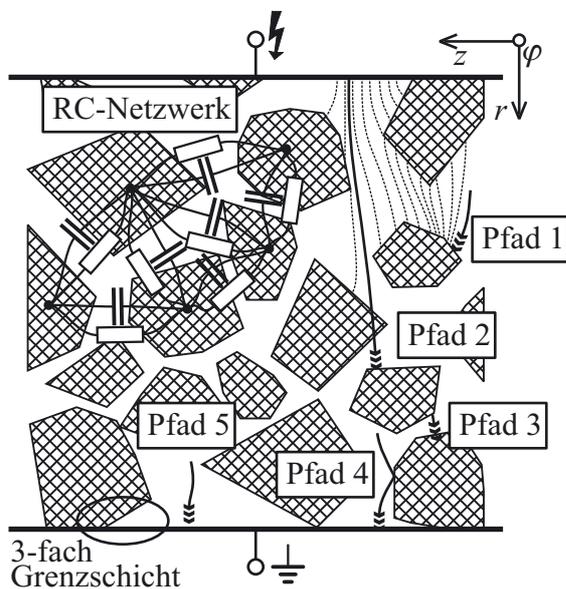


Bild 2.21: Elektrische Verhältnisse in einer Schüttung (schematisch)

Während PBR vom Prozeßgas durchströmt werden, sind Sicherungen in der Regel hermetisch abgeschlossen, so daß kein Stofftransport zur Umgebung stattfinden kann.

Die komplizierten Feldverhältnisse in einer Schüttung sind in Bild 2.21 angedeutet. Das als koaxial angenommene Feld wird durch die unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen des Gases und der Feststoffschüttung verzerrt. Wegen der höheren Permittivität von SiO_2 , dem Hauptbestandteil von Sand, werden die Feldlinien in die Sandkörner hereingebrochen ($\epsilon_{\text{Sand}} > \epsilon_{\text{Luft}}$). Die Feldverzerrung erfolgt nicht nur in der r - z -Ebene, sondern auch in der r - ϕ -Ebene. Die Körner der Schüttung berühren sich teilweise oder sind kapazitiv gekoppelt (RC-Netzwerk). Die Widerstände und Kapazitäten setzen sich aus den Feststoff- und Gas-

sowie Übergangsparemern zusammen und sind im allgemeinen nichtlinear. Entsprechend bildet sich mikroskopisch ein sehr komplexes Feld aus, an dem sich Ladungsträger orientieren. Je nach der Ausprägung der 3-dimensionalen Struktur der dielektrischen Schüttung ergeben sich mehr oder weniger lange Flugstrecken (vgl. Pfad 1 und Pfad 2 in Bild 2.21). Die Ladungsträger können frontal oder tangential auf Oberflächen stoßen (Pfad 2 vs. Pfad 4) oder direkt auf die Elektrode treffen (Pfad 5). Neben den klassischen Freisetzungsmechanismen der Ladungsträger im Gasraum oder an den Elektroden (Pfade 2, 5) sind Freisetzungen auch an den dielektrischen Grenzflächen möglich (Pfad 3).

Eine PBR-Anordnung, die eine sandähnliche Schüttung (granuläres SiO_2) verwendet, ist in [Schm96] angegeben. Dort wird der Einfluß verschiedener Schüttungen auf die Ozonerzeugung bei unterschiedlichen Entladungsspaltlängen und Durchflußraten untersucht. Für geringe Durchflußraten, kleine Entladungsspalte und Verwendung einer Schüttung mit grobkörnigem ($d_{\text{Korn}} \approx 0,5\text{-}0,8 \text{ mm}$) SiO_2 -Material hoher spezifischer Oberfläche konnten signifikant erhöhte Ozonausbeuten erreicht werden, bis zu 180 % gegenüber einer Anordnung ohne Schüttung. Dies wird mit einer katalytischen Wirkung der SiO_2 -Schüttung begründet, die auf einer verbesserten Dissoziation der O_2 -Moleküle beruht. In [Tas95] wird dieser Effekt

auf „Abschnürung“ (engl. *quenching*) der Oberflächenentladung zurückgeführt, die eine instantane Zersetzung des gebildeten O_3 verhindert, und es wird auf die zu kleine freie Weglänge innerhalb der Poren verwiesen, in denen daher keine Entladungen stattfinden können. Untersuchungen zum Einfluß von Staubpartikeln (u.a. SiO_2) auf atmosphärisches O_3 [Oya00] und von unterschiedlichen Schüttungen im PBR [Oue96] weisen dagegen eine katalytische Unterstützung der O_3 -Zersetzung nach.

2.5 Voruntersuchungen

2.5.1 Praktischer Teil

Im folgenden werden Ergebnisse von orientierenden Messungen wiedergegeben [Gär95]. Die Untersuchungen wurden an handelsüblichen Sicherungen (10/12 kV, 40 A) durchgeführt. Die Hochspannungsquelle (Prüftransformator MWB TEO 220 V/100 kV, 100 mA) wurde über einen Vorwiderstand (100 k Ω) an die Schmelzleiter der Sicherung angeschlossen. Die TE wurden mit einem TE-Meßgerät MWB DTM87 erfaßt. Als Meßelektrode kam eine Kugelkalotte mit einem Durchmesser von $D = 30$ mm zum Einsatz (Bild 2.22). Um TE in Luft zu vermeiden, wurde die Versuchsanordnung in Öl eingebettet. Der Abstand d der Kugel zur Oberfläche der Sicherung wurde zu Null gesetzt.

Bild 2.23 zeigt den Verlauf der TE-Einsatzspannung über der Längskoordinate x der Sicherung. Offenbar macht sich der innere Aufbau der Sicherung, die diskrete Verteilung der Schmelzleiter in axialer Richtung, nach außen hin nicht bemerkbar.

Auch eine Messung über dem Umfangswinkel φ (Bild 2.24) zeigt keine signifikanten Anzeichen des inneren Aufbaus der Sicherung auf die TE-Einsatzspannung, obwohl zu erwarten wäre, daß sich der sternförmige Wickelkörper bemerkbar macht.

In Bild 2.25 sind der Einfluß der Schmelzleiterform auf das TE-Verhalten sowie der typische Verlauf der scheinbaren Ladung über der Spannung dargestellt. Die TE-Einsatzspannungen für die verschiedenen Schmelzleiterformen unterscheiden sich nur marginal, die Ladungsmenge steigt nach dem Einsetzen auf einen Pegel von 1000 pC, um Werte von bis zu

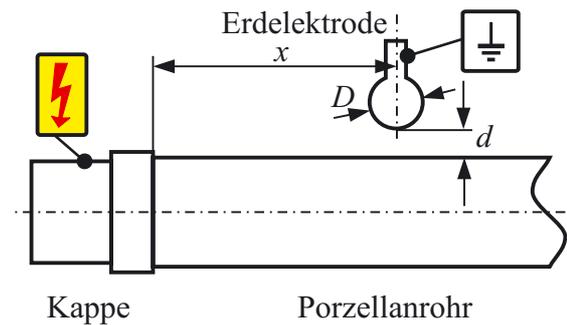


Bild 2.22: Messung der TE-Einsatzspannung über der Länge und dem Winkel

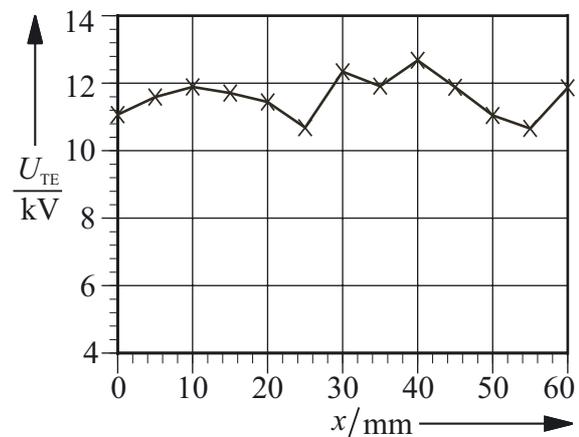


Bild 2.23: TE-Einsatzspannung über der Längenkoordinate

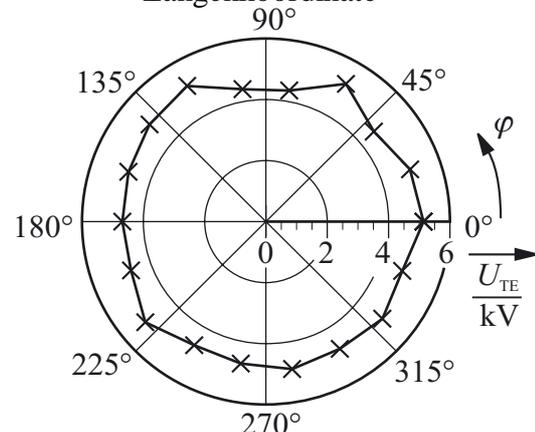


Bild 2.24: TE-Einsatzspannung über dem Umfangswinkel

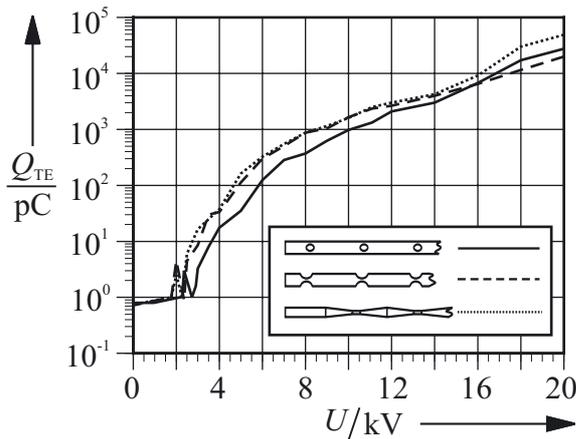


Bild 2.25: Einfluß der Schmelzleiterform auf das TE-Verhalten in Abhängigkeit von der Spannung

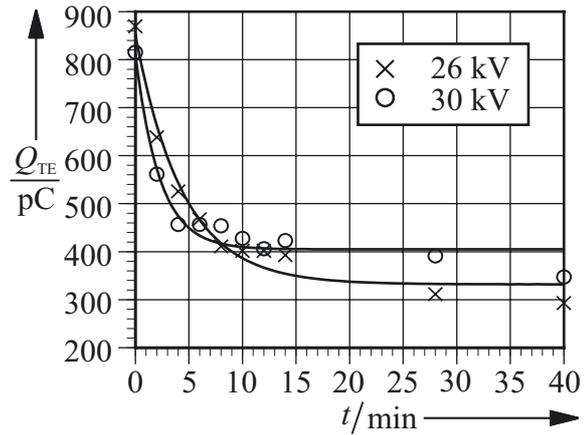


Bild 2.26: TE-Pegel über der Zeit bei unterschiedlicher Beanspruchung

10 nC zu erreichen. Auch auf den Verlauf über der Spannung hat die Schmelzleiterform kaum einen Einfluß. Das günstigste TE-Verhalten zeigt der Schmelzleiter mit Mittelloch, die mit Randkerbe und Konus liegen etwas schlechter. Die scheinbare Ladung sinkt bei konstanter Prüfspannung mit zunehmender Beanspruchungsdauer stark ab (Bild 2.26). Bei höherer Prüfspannung (36 kV) erfolgt der Abfall schneller.

Für eine Langzeituntersuchung wurden die Sicherungen in dem in Bild 2.27 skizzierten Versuchsaufbau eingesetzt. Als Erdelektrode diente eine Metallfolie, welche direkt auf den Sicherungsröhren aufgeklebt war und mit Toroiden abgesteuert wurde. Um Zwickelentladungen zu vermeiden, wurde zwischen den Toroiden eine leitfähige Steuerschicht aufgebracht (s. Detail A, Bild 2.27). Zur Aufzeichnung des Verlaufes der TE wurde ein automatisches Meßsystem [Har90] verwendet, das über einen Koppelkondensator und Ankopplungsvierpol (AKV) angeschlossen war. Es wurden 10 Prüflinge gemessen, die in regelmäßigen Abständen für eine bestimmte Zeit durch den Umschalter mit dem Meßsystem verbunden wurden.

Die Langzeitaufzeichnung des TE-Verhaltens über 1000 h (Bild 2.28) zeigt im Mittel eine leicht abnehmende Charakteristik der scheinbaren Ladung, bei einigen Mustern wurde jedoch ein Anstieg der Aktivität beobachtet. Nach dem Versuch konnte festgestellt werden, daß sich an den Schmelzleiterkanten im Hochfeldbereich eine schwärzliche Substanz (vermutlich Silberoxid) abgelagert hatte, die mit dem umgebenden Sand verbacken war.

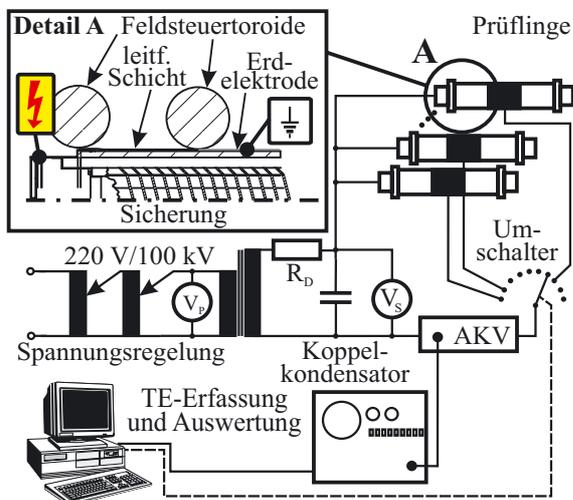


Bild 2.27: Prüfaufbau für die TE-Langzeitmessungen

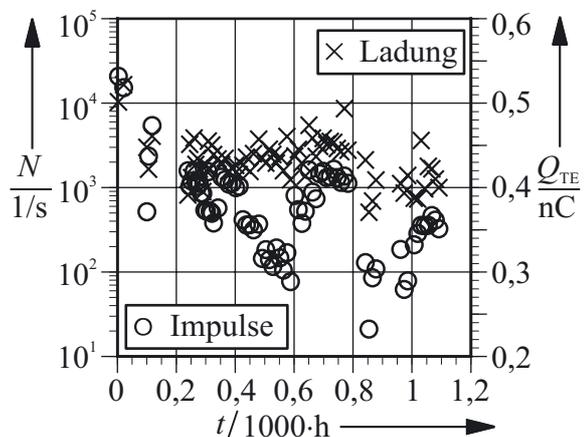


Bild 2.28: Impulsrate und Ladung über der Zeit (1000-h-Dauerversuch)

Aufnahmen einer mikroskopische Untersuchung der Schmelzleiter nach dem 1000-h-Test sind in Bild 2.29 dargestellt. Die Schmelzleiteroberfläche ist von feinen Kratern übersät, die offenbar von Fußpunkten der TE herrühren. Die TE bilden sich in den Hohlräumen zwischen den Sandkörnern und entladen sich in den durch die Anordnung der Körner vorgegebenen Kanälen. Das durch die Elektroerosion exkavierte Material lagert sich in der Umgebung ab und verklebt mit dem Sand.

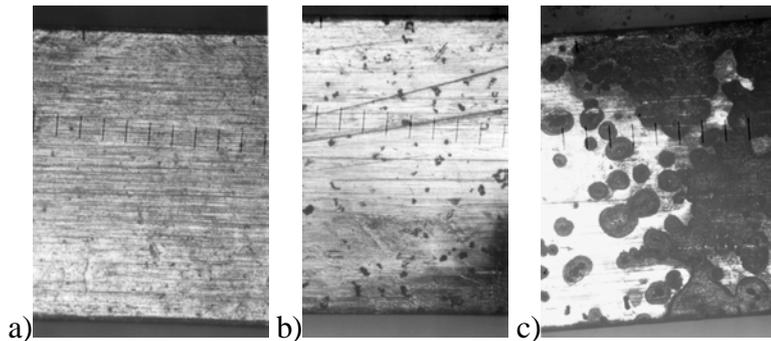


Bild 2.29: Mikroskopische Aufnahme des gealterten Schmelzleiters (1 Skt. = 0,14 mm)
 a) feldloser Bereich
 b) Schwachfeldbereich
 c) Hochfeldbereich

Wegen des Abtrags von Schmelzleitersmaterial wurde der Einfluß der Alterung auf die Schaltcharakteristik der Sicherungen bestimmt (Bild 2.30). Es ist nur ein unwesentlicher Einfluß der Alterung auf die Kennlinie zu erkennen, die Prüflinge liegen im Toleranzband des Herstellers. Der leichte Anstieg der virtuellen Schmelzzeit zu hohen Strömen hin läßt sich durch den anhaftenden Sand erklären. Durch den besseren Kontakt mit den Sandkörnern wird die thermische Kapazität in der direkten Umgebung des Schmelzleiters erhöht, dadurch ist etwas mehr Energie zum Abschmelzen der Schmelzleiter notwendig.

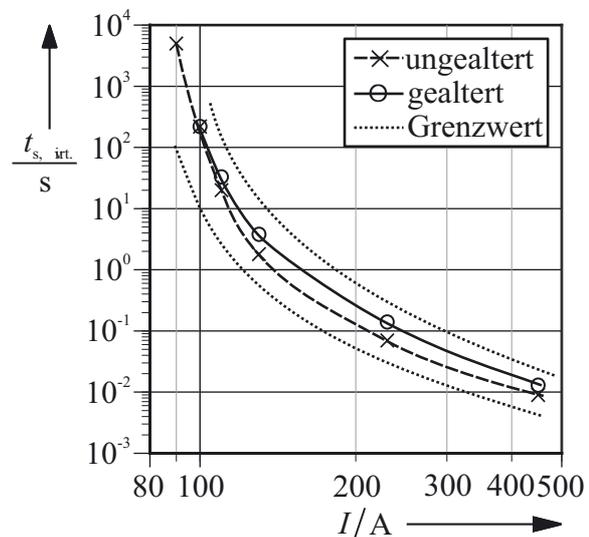


Bild 2.30: Vergleich der Kennlinien von gealterten und ungealterten Sicherungen

2.5.2 Feldsimulation

Die Feldsituation wurde anhand einer Simulation auf Basis der finiten Elemente Methode (FEM) mit Hilfe eines kommerziellen Programmpakets [Rot94] analysiert. Dabei wurde zur Vereinfachung nur ein Segment der Sicherung simuliert, die anderen durch symmetrische Randbedingungen emuliert. Auch das Innere der Sicherung wurde durch solche Randbedingungen simuliert. Bild 2.31 zeigt den vermaschten Grundkörper in den drei orthogonalen Ansichten und in einer isometrischen 3D-Darstellung. Je nach Zackenzahl des Schmelzleiterträgers und der Windungsanzahl der Schmelzleiter werden mehrere dieser Grundkörper in z-Richtung aneinandergereiht. Die x-Richtung entspricht der radialen Richtung aus Bild 1.2. Die unsymmetrische Form der Elemente ergibt sich aus der dreidimensionalen Helix-Anordnung der Schmelzleiter.

Bild 2.32 zeigt einen Querschnitt der Sicherung in der xy-Ebene durch den Schmelzleiterbereich. Während der Schmelzleiter durch die schraubenförmige Bewicklung in Längsrichtung den Scheitelpunkt des Schmelzleiterträgers ($R_{SL, max}$) schräg durchsetzt, wurde die Querschnittsfläche senkrecht zur Hauptachse der Sicherung gelegt. Deutlich ist eine Feldüberhöhung an der Spitze des Schmelzleiterträgers zu erkennen, die sich ebenfalls aus der

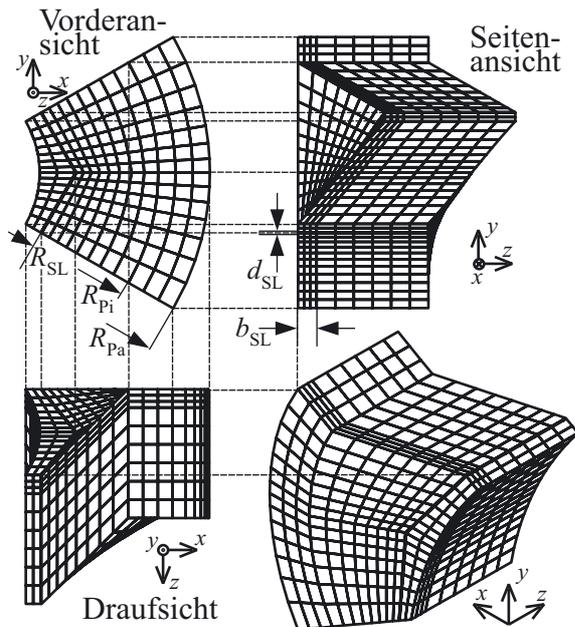


Bild 2.31: Feldsimulation, Darstellung der vermaschten Grundkörper

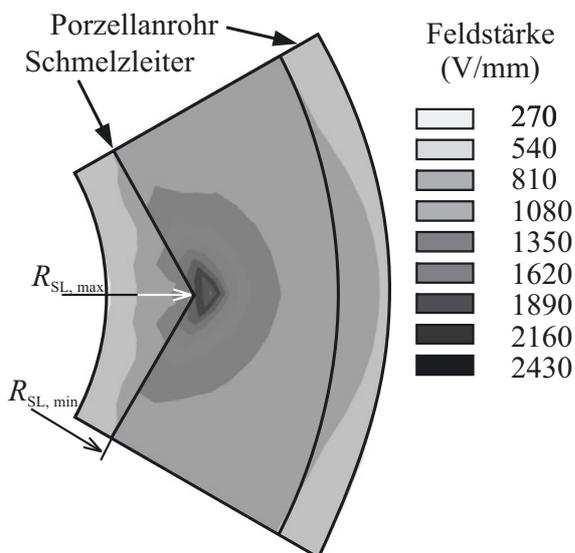


Bild 2.32: Simulation der Feldstärke in der xy -Ebene im Schmelzleiterbereich

gewählten Schnittebene ergibt. Tatsächlich beträgt die Feldüberhöhung am Schmelzleiter in der Nähe des Scheitelpunktes des Schmelzleiterträgers am Radius $R_{SL, \max}$ im Vergleich zum Randbereich beim Radius $R_{SL, \min}$ nur etwa 10 %. Markant ist die „Aufwölbung“ der 810 V/m-Äquipotential-Fläche in den Bereich des Porzellanrohres, die durch die hervorstehende Kante des Schmelzleiterträgers verursacht wird.

Das FEM-Modell wurde so implementiert, daß die Geometrie parametrisch aufgebaut werden konnte. Die Berechnung der geometrischen Größen entspricht den in [Wei71] hergeleiteten Beziehungen. Durch Verwendung eines parametrischen Modells konnte sehr einfach eine Vielzahl von Konstruktionsparametern variiert und die Auswirkungen auf bestimmte Kenngrößen betrachtet werden. Dies ist in den Bildern 2.33a-d dargestellt. Bild 2.33a zeigt den Einfluß der Variation des Außenradius auf die Feldstärke in Relation zu einer $1/r$ -Funktion. Es ist erkennbar, daß die simulierten Ergebnisse gut mit dieser Funktion korrelieren, so daß die komplexe Geometrie der aufgewickelten Schmelzleiter feldstärke-mäßig ähnlich einem Zylinderkondensator aufzufassen ist.

Der simulierte Einfluß der Permittivitäten (Bild 2.33b) entspricht der Erwartung, daß hohe Werte im Sand zu einer Verdrängung des elektrischen Feldes in das Porzellanrohr führen, da es sich um eine Serienschaltung zweier Dielektrika handelt. Allerdings muß die Permittivität des Sandes erheblich über

derjenigen des Porzellans liegen, um einen merklichen Effekt zu erzielen. Erwartungsgemäß sollte bei Variation der Anzahl der Kanten des Schmelzleiterträgers die Feldstärke sinken, da durch eine Erhöhung der Kantenanzahl die Schmelzleiterführung kreisförmiger und somit homogener erfolgt. Dies wird durch die Simulation jedoch nicht bestätigt (Bild 2.33c). Der Einfluß der Kantenanzahl ist verschwindend gering, was mit der diskreten Verteilung der Schmelzleiter am Umfang zu erklären ist. Die Inhomogenität durch die Bewicklungslücken ist sehr viel größer als die durch den kantigen Schmelzleiterträger hervorgerufene.

Im Umkehrschluß sollte eine Verringerung der Bewicklungslücke eine Verbesserung der Feldsituation ergeben. Die Bewicklungslücke ist abhängig von der Anzahl und Länge der Schmelzleiter. Dieser Effekt ist deutlich in Bild 2.33d erkennbar, welches die Ergebnisse der Variation der Schmelzleiterlänge darstellt.

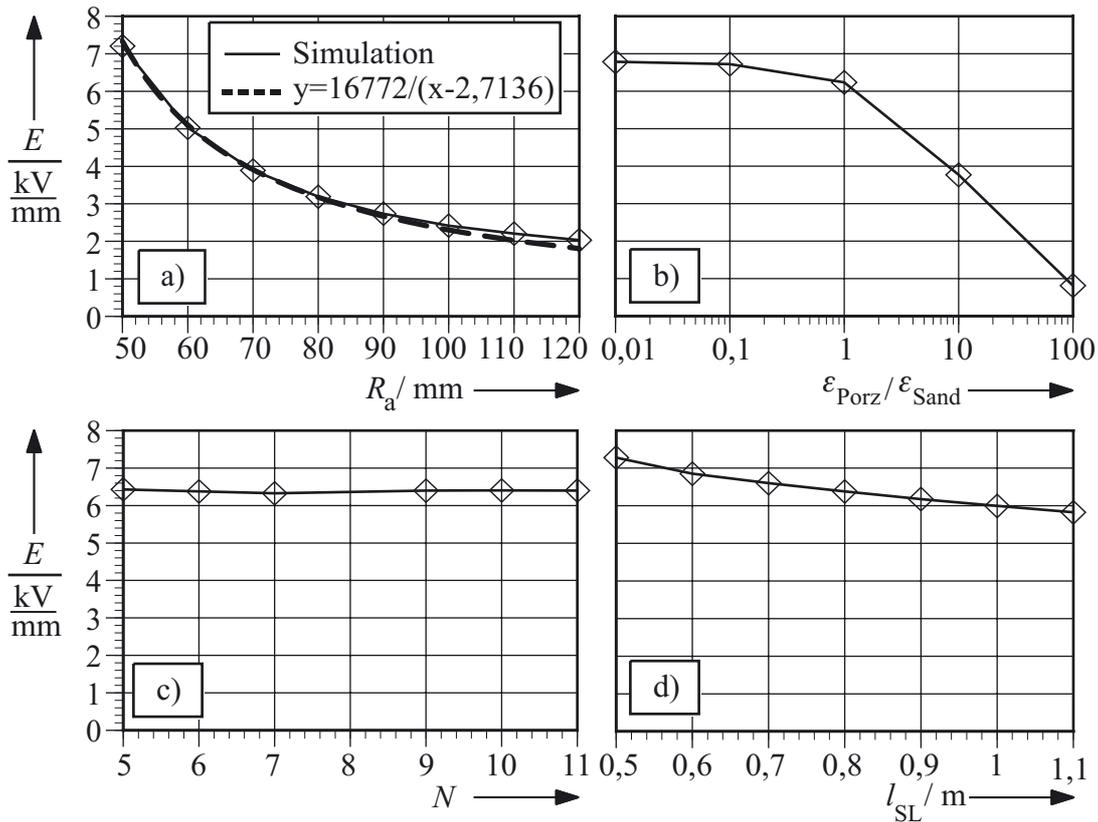


Bild 2.33: Simulation des Einflusses verschiedener Konstruktionsparameter auf die Feldstärke
 a) Außenradius, b) Verhältnis der Permittivitäten, c) Anzahl der Zacken des Schmelzleiterträgers, d) Länge der Schmelzleiter

Insgesamt ist bei allen Simulationsergebnissen eine sehr hohe Feldstärke zu beobachten (bis zu 8 kV/mm). Obwohl die Trends der Simulation einfachen Überlegungen folgen und plausibel erscheinen, muß die Gültigkeit der Ergebnisse in bezug auf die absoluten Feldstärkewerte angezweifelt werden, da die gewählte rechteckige Form der Schmelzleiter zu einer starken Überbewertung des Feldes an den Kanten führt. Daher scheint es angebracht, das FEM-Modell so zu verbessern, daß die Genauigkeit der absoluten Feldstärkewerte verbessert wird. Zudem berücksichtigt die Feldsimulation nicht die heterogene Struktur des Löschmittels.

Zusammenfassend kann aus den Voruntersuchungen abgeleitet werden, daß Sicherungen unter ungünstigen Bedingungen hohe TE-Pegel erzeugen, die zudem zu einer Elektroerosion der Schmelzleiter führen, aber nur marginale Veränderungen der Sicherungskennlinie hervorrufen. Aus den Ergebnissen der Feldsimulation geht hervor, daß eine Verbesserung der Feldsituation in der Sicherung nicht ohne weiteres zu bewerkstelligen ist. Den größten Einfluß haben der Außenradius und das Verhältnis der Permittivitäten, wobei dem Außenradius durch Normung und Baugröße Schranken gesetzt sind, dem Verhältnis der Permittivitäten die zur Löschung im Kurzschlußfall erforderlichen Eigenschaften des Löschmittels (vgl. Kap. 2.1.5).

3 Prüflinge, Versuchsaufbauten und Meßmethoden



Bild 3.1: Sicherung mit Schraubverschluß

In diesem Kapitel werden die verwendeten Prüflinge und Materialien dargestellt. Neben Standardsicherungen wurden Sicherungen mit Modifikationen zur TE-Reduktion eingesetzt, deren Herstellung erläutert wird. Es wurden bidisperse Löschmittel, feldsteuernde Beschichtungen und Sicherungskapselungen verwendet. Die Versuchsaufbauten gliedern sich in Aufbauten zur TE-Messung, zur Widerstandsbestimmung und Leistungsprüfung von Sicherungen. Entsprechend vielfältig sind die angewandten Meßverfahren. Manche Messungen sind nur schwer an vollständigen Sicherungen möglich. Daher wurde eine Ersatzanordnung entwickelt. Spezielle Aspekte des TE-Verhaltens entziehen sich der meßtechnischen Erfassung oder sind nur mit sehr hohem Aufwand zu realisieren. Diese Aspekte werden mit Hilfe einer Simulation ermittelt.

3.1 Sicherungen

Die verwendeten Sicherungen lassen sich in drei Gruppen einteilen:

1. Sicherungen mit 40-A-Einlage (3 x 1,8 mm x 0,23 mm, Silberband, Mittelloch) im Porzellanrohr für 6/12 kV
2. Sicherungen mit 40-A-Einlage im Porzellanrohr für 10/24 kV
3. Sicherungen nach Gruppe 1 mit modifiziertem Löschmittel.

Die Prototyp-Sicherungen wurden durch Modifikation von Standardsicherungen hergestellt, was den Vorteil hat, daß die meisten Parameter der Standardsicherung erhalten bleiben und die Meßergebnisse der Prototypen mit denen von Standardtypen verglichen werden können.

Sicherungen der Gruppe 1 wurden mit unterschiedlichen Beschichtungen und Kapselungen versehen, um eine Reduktion der TE durch Feldsteuerung zu erreichen. An Sicherungen der Gruppe 2 wurde der Einfluß verschiedener Löschmittel auf das TE-Verhalten getestet. Die Sicherungen wurden zu diesem Zweck mit einem Schraubverschluß ausgeführt, der den Austausch des Löschmittels ohne erneutes Rollieren der Kappen erlaubt (Bild 3.1). Sicherungen der Gruppe 3 wurden im Werk nach Standardmethoden gefertigt und mit modifiziertem Löschmittel gefüllt.

3.1.1 Löschmittel

Die Herstellerangaben zu den als Löschmittel verwendeten Quarzrohstoffen sind in Tabelle 3.1 dargestellt, wobei einige Werte durch eigene Messungen bestimmt werden mußten. Bei F32 handelt es sich um einen Sand aus der Lagerstätte Frechen, H31 stammt aus Haltern, MAM1 aus Maasmechelen (Belgien) und wird wegen des geringen Metallgehaltes als Referenz benutzt. W12 ist ein Quarzmehl, das aus Frechener Sanden gewonnen wird. Die Quarzrohstoffe wurden überwiegend im Anlieferungszustand genutzt.

Tabelle 3.1: Chemische und physikalische Eigenschaften der verwendeten Quarzrohstoffe
(* = eigene Messung, k.A. = keine Angabe)

Eigenschaft	F32	H31	MAM 1	W12
SiO ₂ (% _{Gew.})	99,7	99,8	99,8	99,0
Fe ₂ O ₃ (% _{Gew.})	0,03	0,04	~0,01	0,05
Al ₂ O ₃ (% _{Gew.})	0,20	0,10	0,04	0,30
CaO+MgO (% _{Gew.})	k.A.	k.A.	0,01	0,10
Glühverlust (% _{Gew.})	0,10	0,10	0,05	0,25
Korngröße (µm)	240	360	210	50
Schüttgewicht (t/m ³)	~1,3	1,4	1,5	0,9
spez. Oberfläche (cm ² /g)	101	68	110	3800
ε _r (20 °C)*	2,6	-	2,7	-
tan δ (20 °C)*	2,8·10 ⁻²	-	4,8·10 ⁻²	-
κ _{DC} (20 °C)* (S/cm)	1·10 ⁻¹⁴	-	1·10 ⁻¹⁴	-

3.1.1.1 Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften von Sanden

Zur Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften wurde ein zylindrischer Meßkondensator mit Schutzelektroden verwendet (Bild 3.2), der durch eine Heizpatrone temperiert werden konnte. Um Wärmeverluste und -gradienten durch die Gefäßwände zu vermeiden, wurde der Meßkondensator in einem Dawaer-Gefäß untergebracht, die Temperatur wurde mit Pt 100-Sensoren überwacht und einem 2-Punktregler nachgeführt. Die Messungen der dielektrischen Eigenschaften (Verlustfaktor $\tan \delta$, Permittivitätszahl ϵ_r) wurden mit einer Schering-Brücke [Bey86] bei Wechselstrom (50 Hz) durchgeführt, die Ermittlung der Gleichstromleitfähigkeit erfolgte mit einer Gleichstromquelle und einem hochempfindlichen Strommeßgerät.

3.1.1.2 Löschmittelvariationen

Es wurden verschiedene Löschmittelvariationen hergestellt, indem Zuschlagstoffe nach Tabelle 3.2 dem unmodifizierten Löschmittel (Tab. 3.1) in unterschiedlichen Mengen zugesetzt wurden.

Mischungen von H31 mit W12, SiC und TiO₂ wurden in einer Trommel angesetzt, die mit ca. 30 Umdrehungen/min rotierte. Das Gemenge verblieb so lange in der Trommel, bis die Mischung einen optisch homogenen Zustand erreichte, mindestens aber 15 min. Bei höheren W12-Konzentrationen trat eine starke Segregation auf, die durch periodisch wechselnde Rotationsrichtung der Trommel teilweise kompensiert werden konnte. Nach Beendigung des Mischvorgangs wurde die Mischung in Sicherungen der Gruppe 2 gefüllt und durch Rütteln verdichtet.

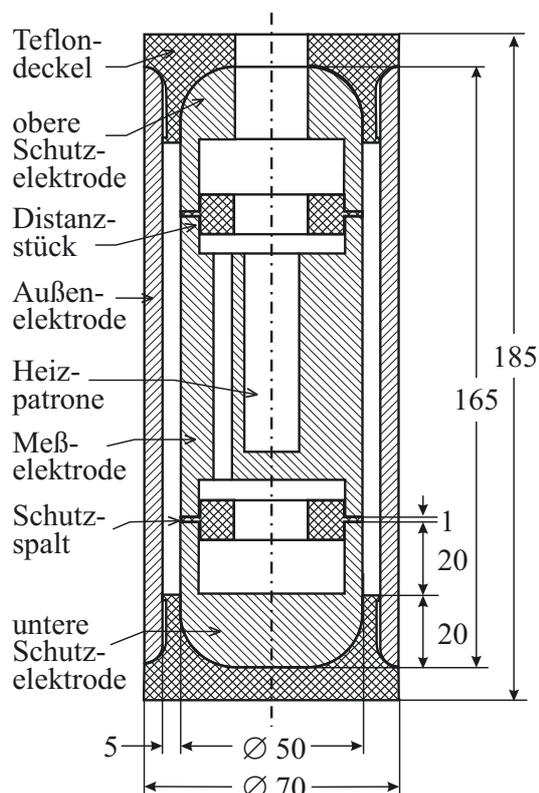


Bild 3.2: Prüfcondensator für dielektrische Messungen an Sand

Tabelle 3.2: Zuschlagstoffe für Löschmittelvariationen

	Füllstoff	Variationsbereich	Gewünschter Effekt
1	W12 (Quarzmehl)	0-50 % _{Gew.}	Verfüllung der Kornzwischenräume
2	Kieselol ($[\text{SiO}_2]^x$)	0-200 ml	Verfüllung der Kornzwischenräume, Verfestigung des Löschmittels
3	Siliziumkarbid (SiC)	0-10 % _{Gew.}	resistive, feldabhängige Feldsteuerung
4	Titandioxid (TiO_2)	0-10 % _{Gew.}	dielektrische Feldsteuerung (Erhöhung der Permittivität)
5	Wasser (H_2O)	0-1,3 ml	Erhöhung der Leitfähigkeit, Minderung von Oberflächenprozessen

Kieselol und Wasser wurden den fertig montierten und mit Löschmittel gefüllten Sicherungen der Gruppe 2 zugesetzt. Im Falle von Kieselol erfolgte nach dem Einfüllen eine Aushärtung im Ofen bei 150° C über 48 h, bei Wasser eine Temperung bei 90° C über 24 h.

3.1.2 Beschichtungen für Sicherungsrohre

Zur Realisierung einer feldsteuernden Beschichtung wurden leitfähige Mischungen auf die Sicherungsrohre aufgebracht. Als leitfähige Agenzien wurden Siliziumkarbid (SiC) und Kohlenstoff (Ruß) verwendet. Das SiC wird im Acheson-Verfahren durch Reduktion von Siliziumdioxid und Kohlenstoff bei Temperaturen um 2000 °C hergestellt [Mehr92]. Neben unterschiedlichen Korngrößen wurden auch verschiedene SiC-Qualitäten benutzt, undotiertes SiC, das eine graue Färbung hat, p-dotiertes „SiC extra“ mit einer schwärzlichen Färbung, die durch das enthaltene Aluminium entsteht, und n-dotiertes SiC, das seine grüne Farbe durch den als Donator verwendeten Stickstoff erhält. „Undotiertes“ SiC ist durch Verunreinigung mit Luftstickstoff immer n-dotiert [Zob75].

Im Vergleich zu Zinkoxid (ZnO) ist die Nichtlinearität der spannungsabhängigen Leitfähigkeit von SiC weniger stark ausgeprägt, wodurch die Widerstandseigenschaften der erstellten Beschichtungen in weiten Bereichen beherrschbar bleiben.

3.1.2.1 Anorganische Beschichtungen (Glasuren, Engoben)

Glasuren sind die ideale Beschichtung für Porzellane, da sie beim Brennvorgang eine innige Verbindung miteinander eingehen. Die Grundlage von Glasuren sind Glasbildner, Flußmittel und farbgebende Metalloxide [Bin71, HeuH90]. Die unterschiedlichen Komponenten werden zusammen gemahlen, mit Wasser zum sogenannten Versatz vermengt und durch Tauchen oder Sprühen auf den getrockneten Scherben appliziert. Nach dem Antrocknen wird der Scherben gebrannt, wodurch eine glasartige Schicht entsteht, welche die Eigenschaften einer unterkühlten Schmelze hat. Die Kunst bei der Zusammenstellung eines Versatzes besteht darin, die glasbildenden Komponenten so zu bestimmen, daß eine Abfuhr der bei den chemischen Reaktionen auftretenden Gase möglich ist, da die Glasur sonst Blasen schlägt, und trotzdem ein geschlossener Überzug entsteht, der den Scherben vor Umwelteinflüssen schützt. Einen großen Einfluß auf die Glasur wie auch auf den Scherben selbst hat die Brandführung, bei der neben Temperatur-Zeit-Profilen auch die Wahl der oxidativen oder reduktiven Brandatmosphäre eine Rolle spielt.

Eine spezielle Form der Glasur stellt die Engobe dar [HeuH90], bei der anstatt glasbildender Komponenten die gleichen Grundstoffe wie bei der Grundmasse des Scherbens verwendet werden (Kaolin, Quarz, Feldspat). Dadurch entsteht eine undurchsichtige, poröse Beschich-

tung, deren physiko-chemische Eigenschaften nahezu denen des Scherbens entsprechen. Engoben haben durch ihre Porosität den Vorteil, daß Gasausscheidungen bis zum Brennende entweichen können.

Die hier verwendete Engobe wurde zur Erhöhung der Leitfähigkeit mit Siliziumkarbid (SiC) unterschiedlicher Korngrößen und Eigenschaften versetzt (Tab. 3.3). Da SiC bei etwa 1300 °C sublimiert und Hartporzellane bei Temperaturen in diesem Bereich gebrannt werden müssen, ist ein Brennverlust von vornherein in der

Versatzformel zu berücksichtigen. Trotz des hohen SiC-Gehaltes ergaben sich zunächst nur mangelhafte Beschichtungen. Die SiC-Körner waren entweder von der Engobenmasse eingeschlossen („verglast“), so daß sich kein elektrischer Kontakt zwischen den SiC-Körnern einstellte, oder das SiC war so stark sublimiert, daß keine Leitfähigkeit feststellbar war. Andere Prüflinge zeigten zwar eine geschlossene SiC-Schicht, die jedoch eine schlechte Haftung auf dem Scherben aufwies und ablätterte. Abhilfe schaffte eine Modifikation des Aufbereitungsprozesses der Engobenmasse, bei dem das SiC erst nach Abschluß des Mahlvorgangs der übrigen Komponenten zugegeben wurde (sog. Schlämmversatz). Dadurch konnte die Größe der SiC-Körner erhalten bleiben und verhinderte durch die kleinere spezifische Oberfläche einen zu hohen Brennverlust [Faß06].

Die Engobe wurde zunächst auf zylindrische Porzellanprobekörper ($\varnothing = 27$ mm, $l = 80$ mm) aufgetragen und dann in unterschiedlichen Öfen mit verschiedenen Brennprogrammen gebrannt. Proben der Reihe „T“ wurden im Tunnelofen, die der Reihe „H“ im Herdwagenofen gebrannt. Die Brenntemperatur variierte von 1300 °C bis 1380 °C. Die sich an die Reihe anschließende Nummer gibt den verwendeten Versatz wieder (bspw. H33: Herdwagen, Versatz 33). Im Tunnelofen ist kaum eine Variation der Brandführung möglich, da der Prozeß auf die unterschiedlichsten Brenngüter abgestimmt sein muß. Die Verweildauer in den verschiedenen Temperatur- und Brandzonen (oxidierend/reduzierend) geschieht über den Vorschub, mit dem die Scherben durch den Tunnelofen gefahren werden, und die Länge der Zonen. Beim Herdwagenofen lassen sich hingegen sehr genaue Vorgaben zur Brandführung machen, da kompatible Scherben zu Chargen zusammengefaßt werden können, die dann „individuell“ in einem programmgesteuerten Ofen gebrannt werden. Zudem können der Ofenatmosphäre gezielt Gase zugesetzt werden, die eine reduzierende oder oxidierende Wirkung haben. Hier wurden zwei Brennprogramme (Pr1, Pr4) mit gleichem Temperaturprofil aber unterschiedlicher Programmdauer verwendet ($t_{Pr4} = 2 t_{Pr1}$).

3.1.2.2 Beschichtungen auf Basis organischer Bindemittel

Ein Nachteil von Glasuren, Engoben oder Emaille ist die hohe Verarbeitungstemperatur, die es unmöglich macht, die Beschichtung auf Kunststoffrohre aufzubringen. Daher wurden verschiedene organische Matrixbildner auf ihre Verwendbarkeit für Sicherungsrohre untersucht. Neben einer einfachen Verarbeitung stand die Temperaturbeständigkeit im Vordergrund, da beim Betrieb der Sicherungen durch die Verlustleistung, insbesondere aber nach dem Schaltvorgang durch die absorbierte Schaltleistung, hohe Temperaturen am Sicherungsrohr auftreten können. Als hitzebeständig gelten vor allem Polymere auf Basis von

Tabelle 3.3: Für Engoben verwendete SiC-Körnungen und Versätze [Faß06]

Versatz	SiC	SiC extra	Körnung (μm)
21	F600		8,3-10,3
22	F500		11,8-13,8
23	F400		16,3-18,3
24	F320		27,7-30,7
26	F600		8,3-10,3
	F400		16,3-18,3
33		F800	5,5-7,5
34		F280	35,0-38,0
35		F100	150-160
		F800	5,5-7,5

Polyorganosiloxanen (Silikon) und temperaturfeste Epoxidharze. Zusätzlich wurden Silikonkautschuk und ein PVC-Heißkleber untersucht.

Eine einfache Verarbeitung liegt bei Einkomponenten-Lacken vor, da die Vernetzung bzw. Härtung durch Trocknung oder Temperung unter Luft ausgelöst wird. Der Prozeß läßt sich durch verdünnende Lösungsmittel steuern, wodurch bestimmte Eigenschaften wie Viskosität, Verarbeitungsdauer und Aufnahmevermögen von Beimengungen variiert werden können. Bei Mehrkomponenten-Systemen beginnt der Vernetzungsprozeß nach der Vermengung der Komponenten mit dem Härter, wodurch die Verarbeitungszeit fest definiert ist.

Ein wichtiges Maß für die Beurteilung der Leitfähigkeit von Beschichtungen ist der Füllgrad. Dies ist der Quotient aus der Masse der Beimengung zur Gesamtmasse. Der Anteil des Lösungsmittels bleibt dabei unberücksichtigt, da dieses bei der Trocknung verdunstet und somit keinen Beitrag zur Gesamtmasse beisteuert. Um eine hohe Leitfähigkeit zu erreichen, mußte eine große Menge an SiC zugegeben werden, so daß sich Füllgrade von bis zu 89 % ergaben. Die Zubereitung wurde im Tauchverfahren auf Rohrabschnitte ($\varnothing = 53 \text{ mm}$, $l = 60 \text{ mm}$) aufgebracht, anschließend bei Raumtemperatur luftgetrocknet und – falls notwendig – im Wärmeschrank bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgehärtet.

Nach Auswahl der optimalen Beschichtungsvariante wurden Sicherungsrohre mit dieser versehen, komplette Sicherungen daraus gefertigt und auf TE und Schaltfähigkeit geprüft.

3.1.2.3 Widerstandsmessungen

Die Prüflinge nach 3.1.2.1 wurden zur Kontaktierung mit je vier Elektroden aus Silberleitlack versehen, so daß je Prüfling drei Messungen durchgeführt werden konnten. Prüflinge nach 3.1.2.2 konnten nicht mit dem Silberleitlack behandelt werden, da dieser die Leitschicht auflöste. Statt dessen wurde zur Kontaktierung eine Manschette aus Kupfergewebe verwendet.

Der Aufbau zur Widerstandsmessung (Bild 3.3) besteht aus einer Gleichspannungsquelle (0...3000 V, 100 mA) und einem empfindlichen Meßgerät (KEITHLEY 621). Zur Bestimmung der Leitfähigkeit wurden der Spannungswert U_R und der Stromwert I_R eingesetzt. Der Spannungsabfall über dem Strommeßzweig war in allen Fällen vernachlässigbar klein ($< 1 \text{ }^\circ\text{‰}$ der anliegenden Spannung).

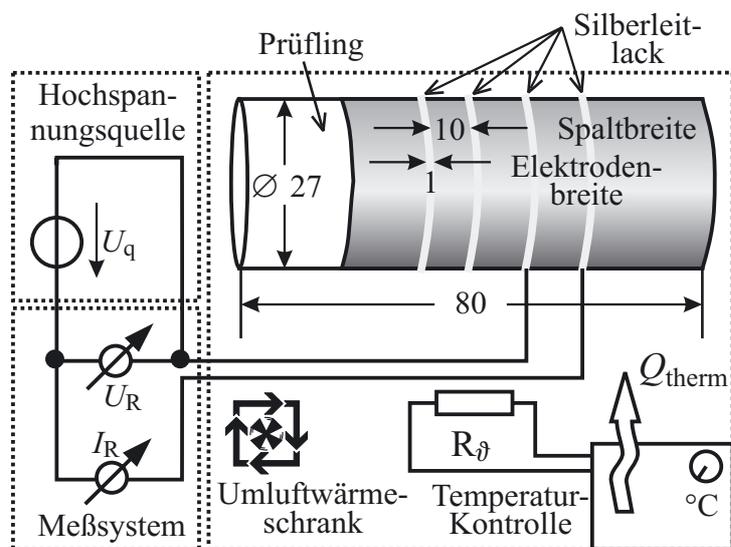


Bild 3.3: Anordnung zur Leitfähigkeitsmessung nach [VDE0303]

In Anlehnung an [VDE0303] wurden die Meßwerte zur Bestimmung der Leitfähigkeit 60 s nach Anlegen der Spannung abgelesen. Die Messungen erfolgten überwiegend bei Raumtemperatur. Eine Serie von Prüfkörpern mit keramischer Glasur wurde zusätzlich in einem Umluftwärmeschrank bei verschiedenen Temperaturen untersucht, um den Temperatureinfluß zu bestimmen. Die Temperatur wurde mit Präzisionswiderständen Pt 100 (R_ϑ in Bild 3.3) ermittelt. Langzeiteinflüsse wurden in einem Dauerversuch mit einer protokollierenden Meß-

einrichtung (12-Kanal Meßschreiber LINSEIS LPD12) erfaßt.

Zusätzlich wurden Messungen bei Wechselspannung ausgeführt. Dazu wurden die Strom- und Spannungsverläufe digital aufgezeichnet und durch entsprechende Rechenoperationen die Wirkleistung des Prüflings in Echtzeit bestimmt.

3.1.3 Kapselungen für HH-Sicherungen

Eine spezielle Form der Beschichtung stellt die Kapselung von Sicherungen dar. Im Gegensatz zu Beschichtungen, die direkt auf das Sicherungsrohr aufgebracht werden (s.o.), ist hier die Feldsteuerschicht in ein separates Bauteil verlagert. Damit entfallen die sehr aufwendigen Typprüfungen an Sicherungen. Lediglich das feldsteuernde Bauteil muß typgeprüft werden. Als Realisierungsmöglichkeit bieten sich Verbindungsmuffen an, wie sie in der Kabeltechnik Verwendung finden [Hav86, Gae96]. Anstelle des üblichen Verbindungselementes (Preßverbinder) wird die Sicherung eingebaut, so daß sich eine Sicherungs-Muffen-Garnitur (SMG) ergibt.

Es gibt verschiedene Arten typgeprüfter vorgefertigter Muffen, Aufschiebemuffen und solche aus warschrumpfenden Komponenten. Handgefertigte Muffen sind aufgrund ihrer Individualität nicht typprüfbar. Zur Kapselung von Sicherungen müssen die Standardbauteile an-

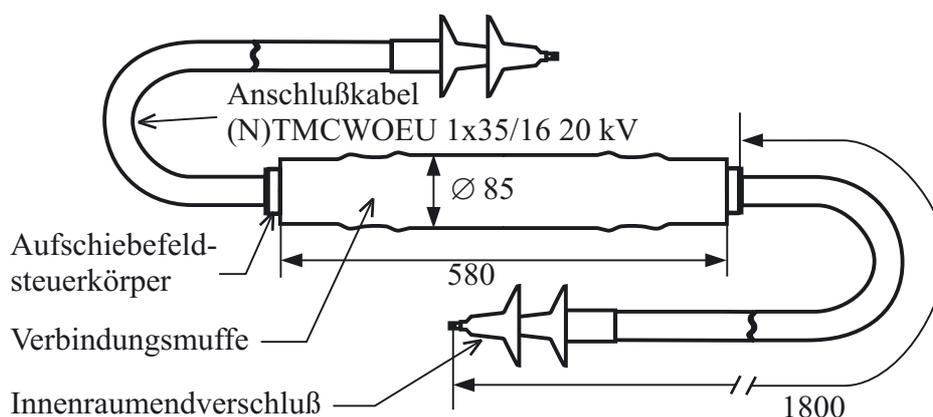


Bild 3.4: Sicherungs-Muffen-Garnitur (SMG)

gepaßt werden. Zunächst ist die von der Muffe zu überbrückende Länge der „Verbindungsstelle“ sehr viel größer (Stichmaß „e“ plus Kappenlänge und Länge der Anschlußgarnitur) als bei Kabelverbindungen (einige 100 mm), darüber hinaus sind die üblichen Feldsteuerbauteile den Gegebenheiten anzupassen.

Zur Reduzierung der Überbrückungslänge wurden Sicherungen mit verkürzter Kappenlänge (10 mm anstatt 33 mm) verwendet. Diese Sicherungen wurden mit Übergangsstücken an handelsübliche Kabelgarnituren angeschlossen, die an einem Ende mit einem Aufschiebefeldsteuerkörper, am anderen mit einem Innenraumendverschluß ausgestattet waren (Bild 3.4). Der Aufschiebefeldsteuerkörper diente zur Einführung des Hochspannungspotentials in die SMG, der Innenraumendverschluß zum Anschluß an die Prüfstromquelle. Als Anschlußkabel wurden Verbindungstrassen vom Typ (N)TMCWOEU 1x35/16 20 kV verwendet.

3.1.3.1 Sicherungs-Muffen-Garnituren (SMG) mit Warschrumpfmuffe

Warschrumpfende Bauteile sind für weite Einsatzbereiche und diverse Abmessungen erhältlich. Ihr Prinzip basiert auf der thermoplastischen Verformung vorgespannter Elastomere [Hav86]. Die hier verwendete warschrumpfende Muffe besteht aus einem Außenrohr und

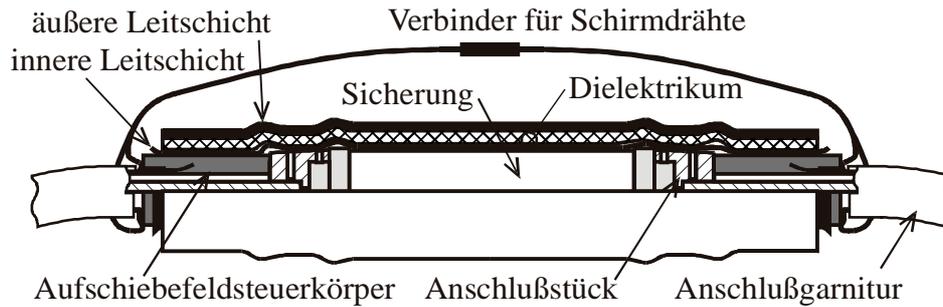


Bild 3.5: SMG mit wärmschrumpfender Muffe

einem separaten leitfähigen Schrumpfschlauch, der als innere Leitschicht fungiert (Bild 3.5). Das Außenrohr ist aus zwei miteinander verbundenen Schichten hergestellt. Die äußere Schicht besteht aus einem leitfähigen, thermoplastischen Polymer, die innere aus einem isolierenden, vorgespannten Elastomer. Die äußere Schicht hält das Rohr offen, bis es auf den Verbindungsbereich geschoben und erhitzt wird. Durch die Erwärmung zieht sich die Muffe aufgrund der Rückstellkraft der Elastomerschicht zusammen und preßt sich auf den Verbindungsbereich.

Nach der Montage von Sicherung, Anschlußstücken und Anschlußgarnitur wurde zunächst der leitfähige Schrumpfschlauch auf die Verbindungsstelle aufgeschraubt. Hohlräume wurden zuvor mit Mastikband aufgefüllt. Danach wurde der äußere Muffenkörper über der Verbindungsstelle positioniert und durch Erwärmung aufgebracht.

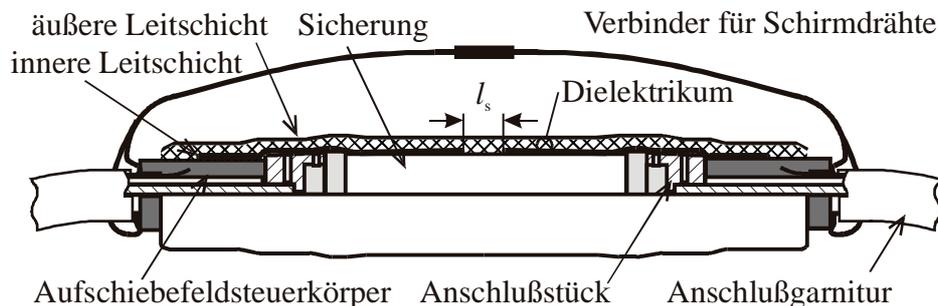


Bild 3.6: SMG mit Aufschiebemuffe

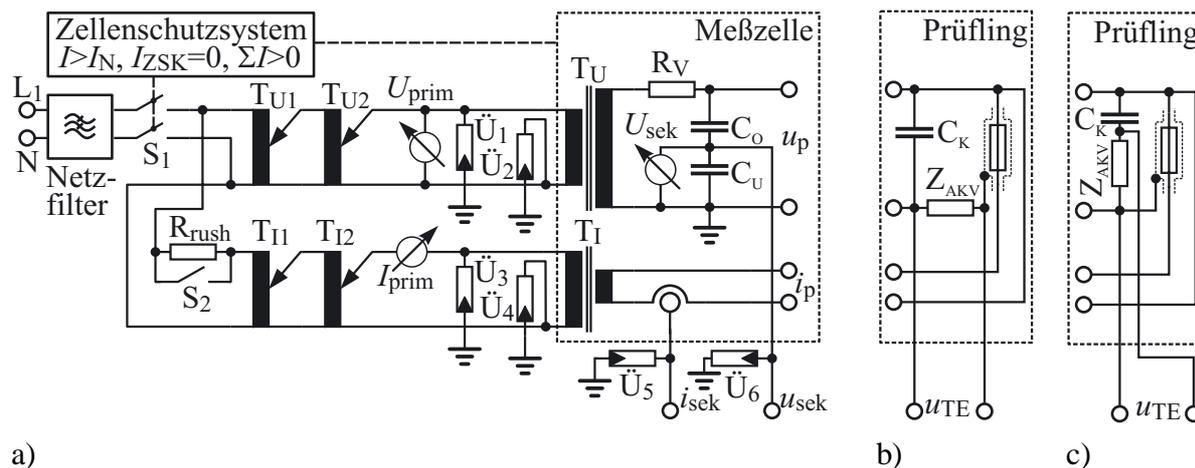
3.1.3.2 Sicherungs-Muffen-Garnituren (SMG) mit Aufschiebemuffe

Im Gegensatz zu 3.1.3.1 sind bei der Aufschiebemuffe sämtliche Leitschichten, Dielektrika und Feldsteuerbauteile in einem Bauteil integriert (Bild 3.6). Der verwendete Prototyp wurde aus einer Standardmuffe abgeleitet, indem zwei Muffenhälften aneinander gesetzt und verklebt wurden. Wegen des vom Hersteller eingesetzten stark leitfähigen Rußcompounds wurde die innere Leitschicht nicht durchgängig, sondern mit Spaltmaßen von $l_s = 20$ mm bzw. $l_s = 50$ mm ausgeführt. Um TE im ungesteuerten Bereich der Sicherung zu vermeiden, wurden Sicherungsrohre mit H23-Engobe (vgl. 3.1.2.1) verwendet.

3.2 Versuchsaufbauten zur TE-Messung

3.2.1 Stromlaufplan

Die Hochspannungsarbeitsplätze (Bild 3.7) waren über ein Zellschutzsystem abgesichert, welches beim Betreten des Gefahrenbereichs, unzulässig hohen Strömen oder Fehlerströmen die Versorgungsspannung allphasig abschaltet (S_1). TE-Messungen wurden in geschirmten



a)

Bild 3.7: Stromlaufplan für die TE-Messungen

a) Spannungs- und Stromversorgung

b) Prüflingskreis mit serieller TE-Auskopplung

c) Prüflingskreis mit paralleler TE-Auskopplung

Kabinen durchgeführt, die über Netzfilter verfügen, um Messungen kleiner Ladungsmengen bis herab zu einigen pC zu ermöglichen. Zur Spannungsregelung wurde eine Serienschaltung von zwei Regeltransformatoren (T_{U1} , T_{U2}) verwendet, einer zur Grob-, der andere zur Feineinstellung der Prüfspannung. Die Hochspannung wurde durch einen Prüftransformator 220 V/100 kV-100 mA (MWB TEO100/10) erzeugt (T_U). Zum Schutz bei möglichen Durchschlägen wurde der Prüfaufbau mit einem Vorwiderstand $R_V = 50 \text{ k}\Omega$ vom Prüfrafo entkoppelt. Die Spannung wurde primärseitig durch ein Analog-Voltmeter, hochspannungsseitig über einen kapazitiven Teiler ($C_O/C_U = 100 \text{ pF}/100 \text{ nF}$) gemessen. Zur Aufzeichnung des transienten Spannungsverlaufs wurde ein Abgriff am Teiler verwendet (u_{sek}).

Für Messungen mit Stromeinspeisung wurde zur Einkopplung des Stromes ein Ringkernwandler (T_I) eingesetzt, der ebenfalls durch Regeltransformatoren (T_{I1} , T_{I2}) versorgt wurde. Zur Vermeidung des Einschalttrushes wurde in den Stromeinspeisungskreis ein Vorwiderstand R_{rush} eingeschleift, der nach Abklingen des Einschaltvorgangs überbrückt wurde. Transiente Ströme wurden mit einem geschirmten Shunt bzw. elektronischem Stromwandler erfaßt (i_{sek}). Alle Versorgungs- und Meßleitungen, welche in die Zelle hinein- oder hinausführten, wurden mit Überspannungsableitern (\ddot{U}_1 - \ddot{U}_6) abgesichert.

Für TE-Messungen wurde in den Erdzweig des Prüflings (Bild 3.7b) bzw. des Koppelkondensators (Bild 3.7c) der Ankopplungsvierpol des jeweils verwendeten TE-Meßsystems geschaltet (Z_{AKV}), über dem die transiente TE-Spannung u_{TE} abgenommen werden konnte.

3.2.2 Prüfkondensatoren für TE-Messungen an Sicherungen (SiPK)

Während in den Voruntersuchungen die meisten Messungen in Luft durchgeführt wurden, waren für die folgenden Messungen spezielle ölgefüllte Prüfgefäße notwendig (Bild 3.8). Die Gefäße bestehen aus einer Halterung für die Sicherung und einer konzentrischen Erdelektrode. Der Spalt zwischen Sicherungsröhr und Erdelektrode ist mit Isolierflüssigkeit gefüllt, so daß TE außerhalb der Sicherung vermieden werden. Wegen der Ähnlichkeit zu Zylinderkondensatoren werden die Prüfgefäße als Sicherungsprüfkondensatoren (SiPK) bezeichnet.

Die Sicherungen wurden vertikal in die SiPK montiert, durch Klopfen wurden anhaftende Gasblasen abgeschüttelt. Die TE-Freiheit der Versuchseinrichtungen wurde vor Meßbeginn

mit einem Metalldummy getestet, der die gleiche Form und Abmessungen wie die Sicherung hatte. Ebenso erfolgte vor Versuchsbeginn eine Kalibrierung der TE-Meßeinrichtungen.

3.2.2.1 SiPK1

Für TE-Messungen an 6/12-kV-Sicherungen wurde die Anordnung in Bild 3.8 verwendet. Die Sicherung wird von zwei Haltestücken fixiert, die durch Stützer mit dem Gefäßdeckel bzw. -boden verbunden sind. Zwischen der Sicherung und dem Außenrohr war die Erdelektrode eingefügt, welche einen Innendurchmesser von 80 mm

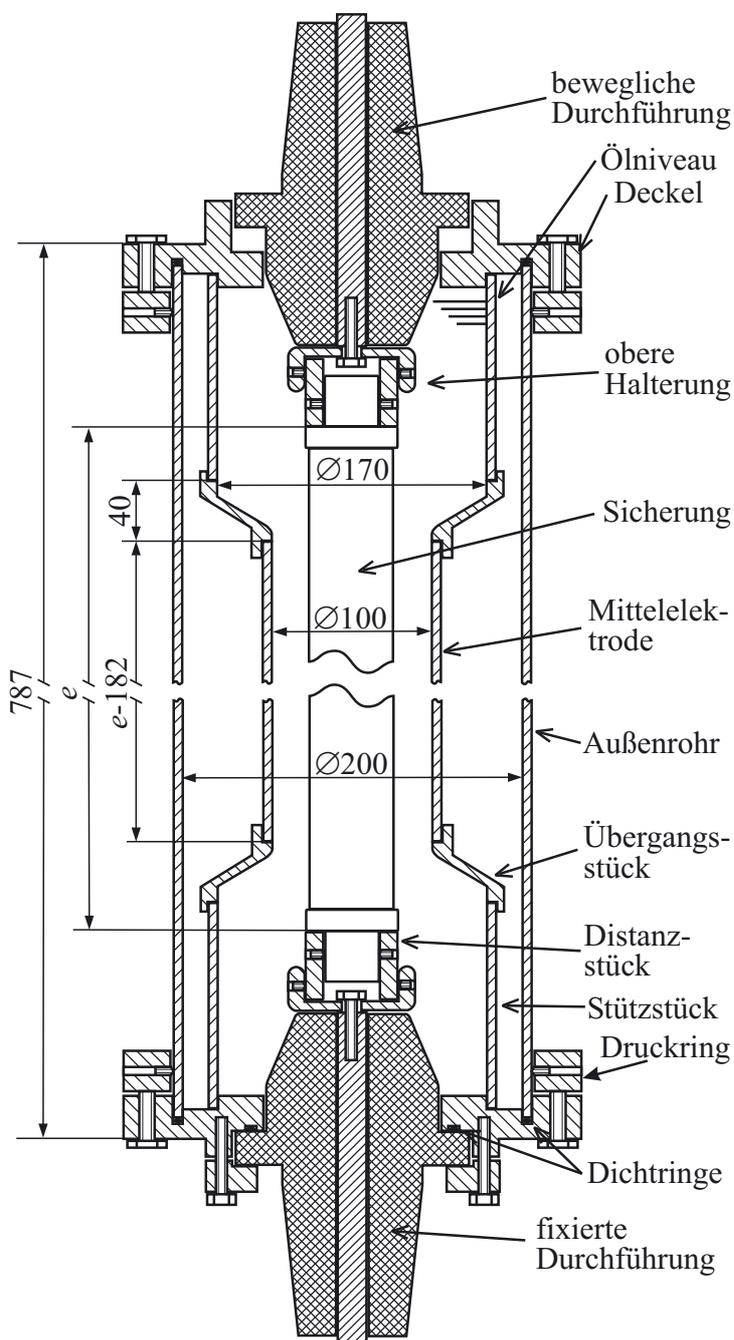


Bild 3.9: SiPK2 (vereinfacht)

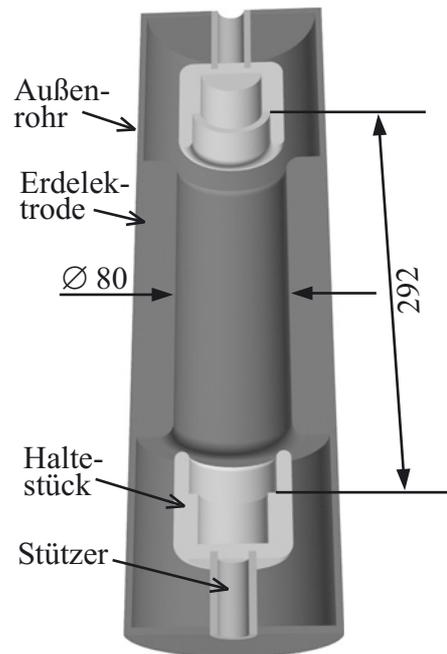


Bild 3.8: SiPK1

hatte. Die Erdelektrode war über den metallischen Prüfgefäßboden mit Erdpotential bzw. dem TE-Meßsystem verbunden. Die Hochspannungszuführung erfolgte über den Gehäusedeckel durch eine Aussparung. Das Gefäß war mit der Isolierflüssigkeit *SHELL DIALA D* gefüllt. Wegen der max. Prüfspannung von 30 kV waren keine besonderen Maßnahmen zur Behandlung oder Regenerierung der Isolierflüssigkeit erforderlich. Lediglich eine Grobfiltrierung der Isolierflüssigkeit und eine gründliche Reinigung des Gefäßes waren wegen der nicht zu vermeidenden Verschmutzung durchzuführen.

3.2.2.2 SiPK2

Während SiPK1 zur Messung der TE an 6/12-kV-Sicherungen ausgelegt war, wurde SiPK2 für Sicherungen bis 36 kV und Rohrdurchmesser bis 88 mm dimensioniert (Bilder 3.9-10). Dies wurde durch ein modular steckbares Erdelektrodensystem mit einem

Durchmesser von 100 mm in der aktiven Zone erreicht. Das System bestand aus einem Mittelstück definierter Länge und zwei Adapterstücken zum Übergang auf den Radius der beiden Stützstücke. Das Mittelstück wurde in verschiedenen Längen, entsprechend der Rohrlänge der Sicherungen, gefertigt. Die Stützstücke hatten eine zum Mittelstück komplementäre Länge, so daß sich für jede Sicherungslänge eine konstante Gesamtlänge des Elektrodensystems ergab, weshalb die Länge des Außenrohres konstant gehalten werden konnte. Das Außenrohr war in einen Druckring eingespannt, der mittels Schrauben an den Deckel bzw. Boden gepreßt wurde und so einen definierten Druck auf die Dichtringe ausübte.

Da die Mittelelektrode und die Stützstücke aus geraden Rohrenden gefertigt waren, konnten die Elektrodenkonfigurationen kostengünstig an beliebige Sicherungslängen angepaßt werden. Die kompliziert zu fertigenden Übergangsstücke blieben jeweils erhalten. Auch die Nuten für die Verbindung der Elektrodenstücke waren in den Übergangsstücken enthalten, so daß eine einfache Längen Anpassung möglich war. Die Adaption an unterschiedliche Rohrdurchmesser der Sicherung erfolgte elektrisch über die Wahl der Prüfspannung.

Der grundlegende Unterschied zum SiPK1 besteht in der Möglichkeit, die Sicherung mit Strom belasten zu können. Dazu wurden zwei Gießharzdurchführungen verwendet, an die handelsübliche Hochspannungskabelgarnituren angeschlossen werden konnten. Wegen des hohen Gewichtes der Kabelgarnituren wurde der Prüfgefäßdeckel mit einem Flaschenzug ausgerüstet. Die Prüflinge wurden mittels Madenschrauben in der oberen Halterung fixiert und dann in das Prüfgefäß eingelassen, bis sie in der unteren Halterung einrasteten. Die Halterung war durch Verwendung unterschiedlicher Distanzstücke ebenfalls modular aufgebaut, um eine einfache Anpassung an verschiedene Sicherungen zu gewährleisten.

Für TE-Messungen ohne Stromeinspeisung wurde die untere Anschlußgarnitur zur Spannungsversorgung verwendet, die obere Durchführung wurde mit einem Blindstopfen abgeschlossen. Da beim Prüflingswechsel nur die obere Durchführung angehoben werden mußte und keine anderen Komponenten des Versuchsaufbaus verändert wurden, konnte ein hoher Prüflingsdurchsatz bei minimalem Fehlbedienungsrisiko erreicht werden.

Aufgrund des größeren Durchmessers der Erdelektrode beim SiPK2 im Vergleich zum SiPK1 ist beim SiPK2 von einer wesentlich höheren TE-Einsetzspannung auszugehen. Dies resultiert aus der geringeren Feldstärke an den Schmelzleiterkanten.

Beim Vergleich verschieden langer Sicherungen muß die unterschiedliche Länge der aktiven Zone berücksichtigt werden, die sich

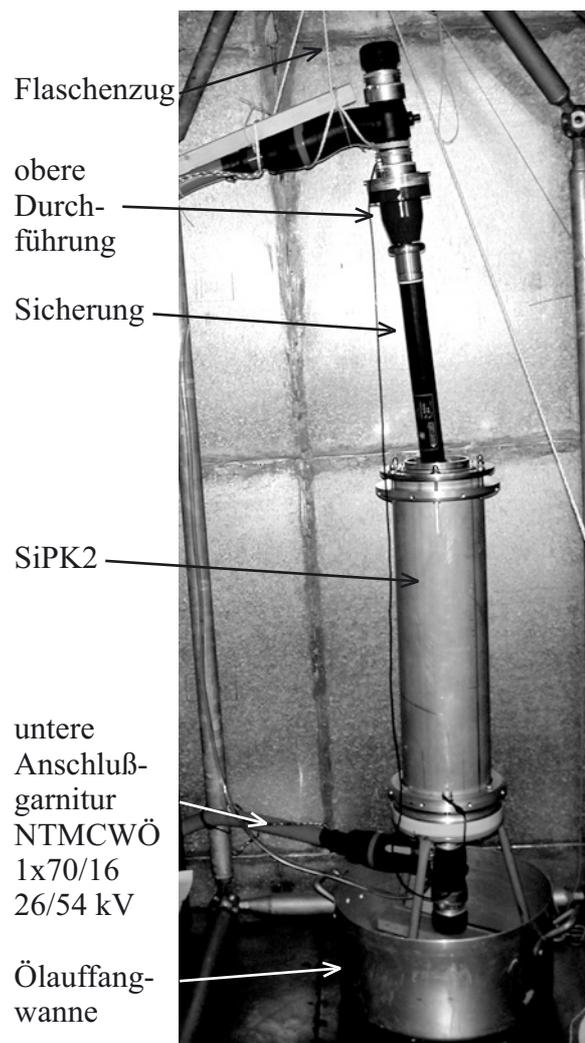


Bild 3.10: Prüfaufbau mit SiPK2

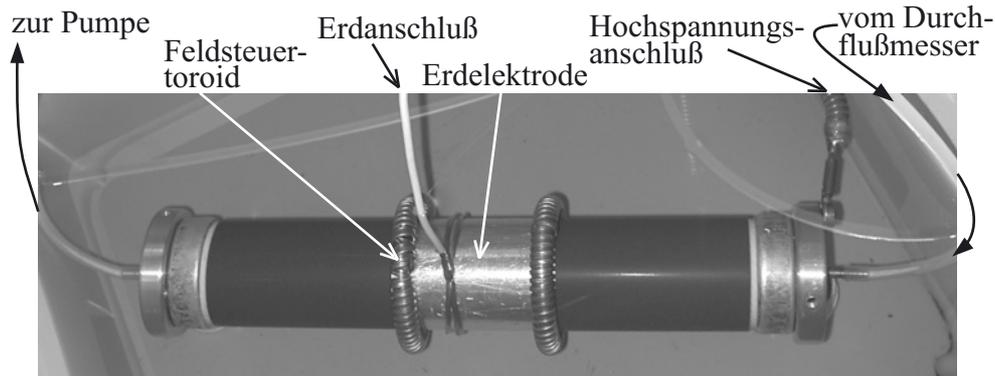


Bild 3.11: Anordnung zur Bestimmung des Einflusses der Gasart

bei längeren Sicherungen vergrößert und dadurch eine höhere Wahrscheinlichkeit von TE-Ereignissen verursacht, und so zu einer höheren Anzahl von TE-Impulsen führt.

3.2.3 Untersuchungen zum Einfluß der Gasart

Um den Einfluß des in Sicherungen enthaltenen Gases auf das TE-Verhalten zu messen, wurde eine Sicherung der Gruppe 1 an den Enden aufgebohrt und mit Schlaucholiven versehen (Bild 3.11). Mit Hilfe einer Pumpe konnte Gas aus der Sicherung abgesaugt werden, wodurch auf der anderen Seite Gas in die Sicherung einströmte und in der Sicherung eine Gasströmung entstand. Der Ansaugschlauch konnte mit unterschiedlichen Gasen beaufschlagt werden. Neben normaler Luft wurde reiner Stickstoff verwendet. Die Messung der Gasmenge erfolgt mit einem elektronischen Mikrobrücken-Luftstromsensor [Hon94]. Zur Vermeidung äußerer TE war die Anordnung in Isolierflüssigkeit *SHELL DIALA D* eingebettet. Als Erdelektrode wurde eine direkt auf das Porzellanrohr aufgeklebte Metallfolie verwendet. Der Erdanschluß war mit dem TE-Meßsystem verbunden.

3.2.4 TE-Meßtechnik

3.2.4.1 Versuchsaufbau

Zur Messung von TE wurde der Hochspannungsaufbau nach Bild 3.7a durch einen Koppelkondensator ($C_K = 10 \text{ nF}$) und einen Ankopplungsvierpol (AKV) ergänzt (Bilder 3.7b-c). Der Koppelkondensator wurde parallel zum Meßkondensator des Spannungsmeßzweiges geschaltet, der AKV wahlweise in Reihe zum Prüfling (Serienauskopplung, Bild 3.7b) oder zum Koppelkondensator (Parallelauskopplung, Bild 3.7c). Die Parallelauskopplung hat zwar eine geringere Empfindlichkeit, ist jedoch robuster in Bezug auf Prüflingsdurchschläge. Wegen des Porzellanrohrs der Prüflinge und der Einbettung in Isolierflüssigkeit waren keine Durchschläge zu erwarten, daher wurde überwiegend die Serienauskopplung angewendet. Bei Prüflingen, die über Kabelgarnituren mit der Hochspannungsquelle verbunden waren, wurde zur Erhöhung der Koppelkapazität der Kabelschirm parallelgeschaltet.

3.2.4.2 Meßgeräte

Großen Einfluß auf die Meßergebnisse haben die benutzten TE-Meßsysteme, die in zwei Klassen, schmal- und breitbandige Meßgeräte, unterschieden werden. Erstere verwenden ein schmal begrenztes Frequenzband, das zur Ausblendung frequenzkonstanter Störer verschiebbar ist, die anderen messen über einen mehr oder weniger großen Frequenzbereich, wodurch ein höheres Energiespektrum aber auch mehr Störungen erfaßt werden. Auch die Ausgabe der Meßergebnisse unterscheidet sich stark. Herkömmliche (analoge) Meßgeräte

Tabelle 3.4: Verwendete TE-Meßgeräte

Nr.	Bezeichnung	Meßprinzip	Technische Daten
1	HFM62	Schmalbandig (Superhet-Prinzip), Röhrentechnologie mit elektronisch-mechanischer Bewertung nach VDE 0876/12.55	Hersteller: MWB, Baujahr: 1962 Bandbreite: ± 9 kHz Mittenfrequenz: 1,9 MHz ± 5 % Meßbereich: 0...75 dB (ca. 10...50.000 pC) Anzeige: analog
2	DTM82	Schmalbandig (Schaltfilter), analog-elektronische und mechanische Bewertung	Hersteller: MWB, Baujahr: 1982 Bandbreite: ± 9 kHz Mittenfrequenz: 0,12...4,8 MHz Meßbereich: 1...10.000 pC Anzeige: analog und digital
3	EKARTESI +ERA PD3	Bedingt breitbandig, Röhrentechnologie (Meßgerät) mit Registrierung durch spez. Meßkarte und PC, Offline-Bewertung durch Software	Hersteller: ERA (Meßgerät), Schering-Institut (Meßkarte) f_o : 220 kHz, f_u : 40 kHz Meßbereich: 1...10.000 pC Anzeige: analog (Meßgerät) Phasenquantisierung: 16 Stufen (Meßkarte) Ladungsquantisierung: nicht vorhanden
4	<i>icm</i> -System	Bedingt breitbandig, Online-Bewertung durch Mikroprozessor, Offline-Bewertung der Meßergebnisse durch Software möglich	Hersteller: PowerDiagnostix, Baujahr: 1997 f_o : 800 kHz, f_u : 40 kHz Meßbereich: $V = V_{Pre} \cdot V_{Main}$ V_{Pre} : 0, 1, 10, 100 (Vorverstärker) V_{Main} : 1...800 (Hauptverstärker) Anzeige: grafische Oberfläche Phasenquantisierung: 256 Stufen Ladungsquantisierung: 256 Stufen

liefern meist einen elektronisch oder bei Zeigerinstrumenten elektro-mechanisch bewerteten zeitlichen Mittelwert der scheinbaren Ladung Q_{TE} oder eine äquivalente Störspannung. Moderne Meßgeräte erlauben die zeit-, phasen- und ladungsgenaue Aufzeichnung einzelner TE-Impulse und deren statistische Verteilung. Hier werden beide Meßsysteme verwendet (Tabelle 3.4).

Die analogen Meßgeräte ohne computerunterstützte Meßwertauswertung (Geräte 1-2, Tab. 3.4) sind beide schmalbandig mit elektro-mechanischer Bewertung durch ein analoges Zeigergerät. Im Falle des HFM62 erfolgt die Filterung auf Mittenfrequenz durch das Superhet-Prinzip, das DTM82 verwendet hingegen einen analogen Schaltfilter und verfügt über eine zusätzliche Digitalanzeige mit elektronischer Bewertung.

Das Meßsystem „EKARTESI“ (Gerät 3, Tab. 3.4) besteht aus einer speziellen Meßwert-erfassungskarte [Har90] und einem handelsüblichen TE-Meßgerät. In diesem Fall wurde ein breitbandiges Meßgerät der Firma ERA verwendet.

Bei Messungen mit dem *icm*-System (Gerät 4, Tab. 3.4) wurde die Verstärkung V den Erfordernissen der TE-Situation entsprechend angepaßt. Es wurde ausschließlich der „logarithmisch-bipolare“ Meßmodus benutzt, bei dem positive und negative TE-Impulse jeweils getrennt in einem logarithmischen Maßstab aufgezeichnet werden. Die Dynamik der TE-Impulse darf dabei zwei Dekaden umfassen. Die Impulsmatrix wurde bei Wechselspannungsuntersuchungen über der Phase der Prüfspannung aufgezeichnet. Um trotzdem eine zeitliche Auflösung zu erhalten, wurde das Meßintervall t_M , das ist die Zeit, während der die Impuls-

matrix erfaßt wird, auf 60 s begrenzt. Die Gesamtmeßzeit $t_{\text{meß}}$ war 40 min, so daß pro Prüfling und Meßreihe 40 Impulsmatrizen generiert wurden.

3.2.4.3 Meßwertbehandlung

Während die Meßergebnisse der analogen Meßgeräte (Geräte 1-2, Tab. 3.4) außer einer Skalierung keiner weiteren Behandlung bedürfen, ist bei den computergestützten Meßverfahren (Geräte 3-4, Tab. 3.4) eine Weiterverarbeitung erforderlich. Bei Gerät 3 erfolgt die Auswertung asynchron im Anschluß an die Messung mit Hilfe von speziellen Programmen [Har90], die z.B. eine Summation der TE-Ereignisse über der Phase durchführen.

Das *icm*-System liefert umfangreiche Online-Daten und speichert diverse Ergebnisse in Dateien ab [ICM00]. Die Daten liegen in binärer Form vor, aus denen die interessierenden Datentupel extrahiert werden müssen. Neben der Impulsmatrix sind Verwaltungsdaten enthalten, wie Informationen zur Einstellung der Verstärker, Kalibrierladung, Meßmodus, Höhe und Form der Prüfspannung, Phasenlage des Triggerzeitpunktes, Uhrzeit, Datum und Länge des Meßintervalls t_M . Für eine Zeitreihendarstellung müssen die einzelnen Datensätze zudem chronologisch sortiert und entsprechend aneinander gereiht werden.

Die Extraktion der Ergebnisse sowie die Weiterberechnung wurden mit MATLAB-Skripten realisiert, die den Vorteil der Plattformunabhängigkeit haben, so daß die Auswertung sowohl auf PC's wie auch auf Hochleistungsrechnern des Rechenzentrums erfolgen konnte.

3.2.4.4 Skalierung der *icm*-Daten

Zur Umrechnung der vertikalen Indizierung der Impulsmatrix in die entsprechende Ladungsmenge wurden die jeweiligen Hälften (positiv/negativ) separat betrachtet (Bild 3.12). Dabei wurde die Richtung der Indizierung entsprechend der Ladungsskala gewählt. Die folgenden Gleichungen wurden für die positive Map hergeleitet.

Die Anzeige n_X in der logarithmischen Ebene entspricht einer mit dem Verstärkungsfaktor V_X multiplizierten Ladung Q_X . Gleiches gilt für die Kalibrierladung Q_K , wobei V_K der Verstärkungsfaktor zum Zeitpunkt der Kalibrierung ist und n_K den zugehörigen Index in der log.

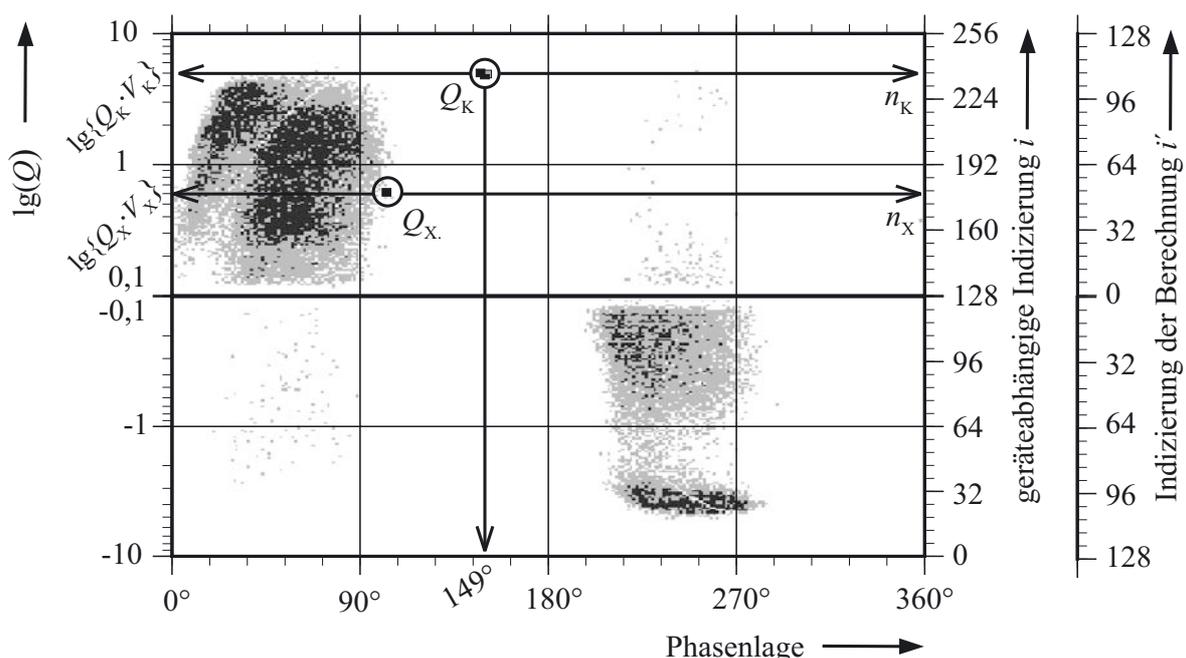


Bild 3.12: Umrechnung der Map von geräteabhängiger Indizierung auf Ladung

Ebene bezeichnet. Es gilt dann:

$$\lg(Q_X \cdot V_X) - \lg(Q_K \cdot V_K) = n_X / k_X - n_K / k_K \quad (3.1)$$

mit:

Q_X = gesuchte Ladung

V_X = Verstärkungsfaktor zum Zeitpunkt der Messung

Q_K = Kalibrierladung

V_K = Verstärkungsfaktor zum Zeitpunkt der Kalibrierung

n_X = Index der gesuchten Ladung in der log. Ebene

n_K = Index der Kalibrierladung in der log. Ebene

k_X, k_K = Skalierungsfaktoren für Fenstergröße.

Dieser Ausdruck läßt sich umformen zu:

$$\lg\left(\frac{Q_X \cdot V_X}{Q_K \cdot V_K}\right) = n_X / k_X - n_K / k_K \quad (3.2)$$

$$Q_X = 10^{(n_X - n_K)/k} \cdot \frac{V_K}{V_X} \cdot Q_K \quad (3.3)$$

mit:

k = gemeinsamer Skalierungsfaktor.

Da die Indizes in der Berechnungsebene i' von 1...128 laufen, was einem Meßfenster von 2 Dekaden entspricht, ist $k = 64$ zu wählen ($128/64 = 2$, entspricht zwei Dekaden), so daß sich ergibt:

$$Q_X = 10^{(n_X - n_K)/64} \cdot \frac{V_K}{V_X} \cdot Q_K \quad (3.4)$$

Das *icm*-Betriebssystem verfügt über ein undokumentiertes „Feature“, welches den Index n_K bereits delogarithmiert abspeichert ($k_{\text{MapCal}} = 10^{n_K}$), allerdings ohne die Normierung auf 2 Dekaden zu berücksichtigen (Faktor 100/128). Daher lautet die tatsächlich zu verwendende Formel, die auch experimentell verifiziert wurde:

$$Q_X = 10^{(n_X)/64} \cdot \frac{V_K}{V_X} \cdot Q_K \cdot 100 / (128 \cdot k_{\text{MapCal}}) \quad (3.5)$$

mit:

k_{MapCal} = vom Gerät berechneter Kalibrierfaktor.

Mit Gl. 3.5 wird ein Skalierungsvektor \mathbf{k} berechnet, der mit der Impulsmatrix \mathbf{N} multipliziert wird, und so die Ladungsmatrix \mathbf{Q} ergibt:

$$\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{k}) \cdot \mathbf{N} = \begin{bmatrix} m_{1;1} \cdot k_1 & \cdots & m_{1;256} \cdot k_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{256;1} \cdot k_{256} & \cdots & m_{256;256} \cdot k_{256} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Der Skalierungsvektor \mathbf{k} ist wie folgt zusammengesetzt:

$$\mathbf{k} = [k_1 \quad \cdots \quad k_{256}] = [x_{128} \quad \cdots \quad x_1 \quad -x_1 \quad \cdots \quad -x_{128}] \quad (3.7)$$

mit:

$$x_i = 10^{i/64} \cdot \frac{V_K}{V_X} \cdot Q_K \cdot 100 / (128 \cdot k_{\text{MapCal}}), \quad i = 1 \dots 128.$$

Zusätzlich sind in den Dateien die Form und die Höhe der Meßspannung abgelegt. Mit Hilfe des Vektors \mathbf{u}_p kann ein Energieäquivalent der TE bestimmt werden:

$$\mathbf{W} = \text{diag}(\mathbf{u}_p) \cdot \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{1;1} \cdot u_1 & \cdots & q_{1;256} \cdot u_{256} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{256;1} \cdot u_1 & \cdots & q_{256;256} \cdot u_{256} \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Dabei gibt \mathbf{u}_p die für den jeweiligen Phasenwinkel anliegende Spannung an.

Zur Vereinfachung wurde die Bestimmung der statistischen und mathematischen Kenngrößen (s. Tab. 2.1) in der logarithmischen Ebene durchgeführt. Durch die logarithmische Skalierung ist bei der Berechnung polaritätsbehafteter Größen eine Absolutwertbildung notwendig, da negative oder Nullwerte im Logarithmischen nicht dargestellt werden können. Es sind somit neben den polaritätsbehafteten Verteilungen wie H_q auch die Verteilungen der Absolutwerte

$$H_{|q|}(\varphi) = \left[\sum_{j=1}^l |q_{j;1}| \quad \sum_{j=1}^l |q_{j;2}| \quad \cdots \quad \sum_{j=1}^l |q_{j;m}| \right] \quad (3.9)$$

notwendig. Nullwerte wurden durch entsprechende Wahl der Achsenabschnitte eliminiert.

3.2.4.5 Ermittlung des Phasennullwinkels, Verschiebung der Impulsmatrix

Die Impulsmatrix kann je nach Triggereinstellung des Meßsystems gegenüber der Phasenlage der Prüfspannung verschoben sein, d.h. der Phasenindex $j = 0$ korreliert nicht notwendigerweise mit dem Phasenwinkel $\varphi = 0^\circ$. Zudem entspricht die Indizierung mit 256 Einheiten nicht der normalen Einteilung des Spannungszyklus in 360° , sondern eine Einheit entspricht $1,41^\circ$. Zum besseren Vergleich der Meßdaten wurde die Impulsmatrix daher in eine normierte Lage verschoben: Durch die Auswertung der Prüfspannungsform $\mathbf{u}_p = [u_p(\varphi_1) \ u_p(\varphi_2) \ \dots \ u_p(\varphi_{256})]$ läßt sich ein Index l_0 feststellen, an dem der positive Nulldurchgang der Prüfspannung erfolgt. Dies wird durch Kreuzkorrelation von \mathbf{u}_p mit dem Einheitssprung $\varepsilon(k)$ [Kam98] realisiert:

$$\phi(m) = \sum_{i=1}^{256} u_p(i) \cdot \varepsilon(i+m) \quad (3.10)$$

mit:

$$\varepsilon(i) = \begin{cases} 0 & \text{für } i < 128 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}.$$

Wird m von 1 bis 256 variiert, führt dies zu einer Folge von Korrelationskoeffizienten $\phi = [\phi_1 \ \dots \ \phi_m]$, deren Maximum den positiven Nulldurchgang der Prüfspannungsfolge \mathbf{u}_p kennzeichnet:

$$l_0 = \text{index}(\max(\phi)). \quad (3.11)$$

Die auf den positiven Nulldurchgang verschobene Matrix \mathbf{N} entsteht aus \mathbf{M} durch:

$$\mathbf{N} = [\mathbf{M}(1:256; \ l_0:256) \ \mathbf{M}(1:256; \ 1:(l_0-1))] \\ = \begin{bmatrix} m_{1;l_0} & \cdots & m_{1;256} & m_{1;1} & \cdots & m_{1;l_0-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{256;l_0} & \cdots & m_{256;256} & m_{256;1} & \cdots & m_{256;l_0-1} \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Damit liegen Impulse, welche in der positiven Halbwelle der Prüfspannung aufgezeichnet wurden, im Bereich $i = 1 \dots 128$, die der negativen Halbwelle im Bereich $i = 129 \dots 256$.

Auch die Matrizen \mathbf{Q} und \mathbf{W} (s. Gl. 3.6 und 3.8) können zur Ermittlung des Nullphasenwinkels herangezogen werden, allerdings sind dann andere Gewichtungsfunktionen zu verwenden. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erleichtern, wird im weiteren mit einer konstanten Verschiebung von -21 Einheiten (entsprechend -30°) gearbeitet. Dadurch ist eine gute Erfassung der statistischen Parameter gewährleistet.

3.2.4.6 Schwellwert-Diskriminator

Bild 3.13 zeigt die Impulsverteilung über der Ladungsskala. Durch die bipolar-logarithmische Skalierung des Meßfensters ist die Abszisse zweigeteilt, die linke Hälfte gilt für negative, die rechte für positive TE-Impulse. Deutlich ist ein Höchstwert von $13 \cdot 10^3$ Impulsen in der Nähe der Meßfenstermitte (bei ± 1 nC) zu erkennen. Dies ist auf die Logarithmierung im Meßsystem zurückzuführen, die auch Werte unterhalb der Meßfenstergrenze ($< \pm 1$ nC) erfaßt. Anderenfalls müßte sich der Peak bei einem Meßbereichswechsel entsprechend verschieben oder aus dem Darstellungsbereich verschwinden, was nicht der Fall ist. Der Peak bleibt auch bei einer Änderung des Meßbereiches bestehen, lediglich seine Höhe ändert sich.

Der Peak wird daher durch einen Schwellwert-Diskriminator (Löschen der entsprechenden Zeilen in der Impulsmatrix) ausgeblendet, da sonst eine fälschliche Überbewertung der Impulsverteilung unterhalb der Meßbereichsgrenzen auftritt. Allerdings macht die Ladungsmenge in diesem Bereich nur 0,85 % der Gesamtladungsmenge aus, so daß der Einfluß auf integrale Größen wie Summenladung Q_s und TE-Strom I_{NQS} vernachlässigbar ist.

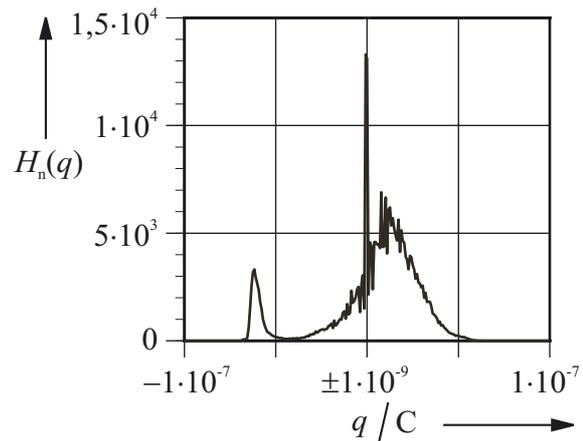


Bild 3.13: $H_n(q)$ ohne Schwellwert-Diskriminator über dem Meßfenster

3.3 Prüfeinrichtungen für Schaltprüfungen

3.3.1 Synthetische Prüfeinrichtung

Schaltprüfungen an HH-Sicherungen erfordern normalerweise sehr große Prüffeldleistungen, da z.B. bei Prüfung des I_2 mehrere kA Prüfstrom bei Nennspannung der Sicherung bereitgestellt werden müssen. Nach [EN60282] ist jedoch auch eine Prüfung mit „synthetischer Prüfquelle“ erlaubt, bei der Strom und Spannung unterschiedlichen Quellen entnommen und entsprechend überlagert werden. Hier wurde die sog. „gesteuerte Stromüberlagerung“ verwendet [Sla63, Bet94], bei der die Stromkomponente durch einen Reihenschwingkreis, bestehend aus einer Kondensatorbank mit einer Kapazität von $C = 214 \mu\text{F}$ und einer Luftspule mit einer Induktivität von $L = 42$ mH, erzeugt wird, während die Hochspannungskomponente U_w über einen Hochspannungstransformator dem normalen Netz entnommen wird (Bild 3.14). Die Kondensatorbank wurde über die Ladevorrichtung I_L und R_L auf eine dem Prüfstrom äquivalente Spannung aufgeladen, danach wurde die Ladeeinrichtung durch den Ladetrennschalter S_L vom Versuchsaufbau getrennt. Als Draufschalter S_a diente eine Funkenstrecke, der Blockierschalter S_b war ein

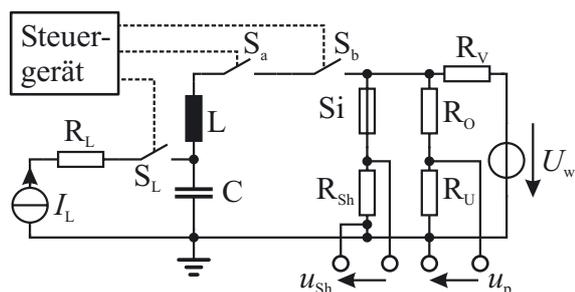


Bild 3.14: Synthetische Prüfanlage

Vakuumleistungsschalter. Zur Messung der Prüfspannung wurde ein ohm'scher Teiler (R_O , R_U), für den Prüfstrom ein Shunt R_{Sh} verwendet. Mit der Anlage konnten Ströme bis zu 1,2 kA Scheitelwert bei 48,95 Hz erzeugt werden.

Durch ein Steuergerät wurde nach dem Einschalten der Hochspannungskomponente und dem Auslösen des Blockierschalters der Draufschalter ausgelöst, wodurch sich der Reihenschwingkreis über den Prüfling S_i entlud. Die Auslösung erfolgte nach einer eingestellten Wartezeit, die sich aus der Eigenzeit des Blockierschalters und der gewünschten Phasenlage der Wiederkehrspannung ergab. Bereits nach einer Halbwelle wurde die Stromkomponente durch den präventiv ausgelösten Blockierschalter unterbrochen, und die Wiederkehrspannung konnte sich aufbauen.

Als Kriterium für ein ordnungsgemäßes Schalten der Sicherung wurde die Wiederkehrspannung herangezogen. Baute sich keine Spannung auf oder brach diese im weiteren Verlauf der Messung zusammen, wurde die Prüfung negativ bewertet, anderenfalls positiv. Durch die begrenzte Energie bei einer synthetischen Prüfung werden Versager im Gegensatz zur direkten Prüfung nicht vollständig zerstört, so daß versagensrelevante Konstruktionsmängel meist klar erkennbar bleiben und bei der Weiterentwicklung berücksichtigt werden können.

3.3.2 Hochleistungsprüffeld der FGH Mannheim

Direkte Prüfungen geben die Gegebenheiten des realen Einsatzes der Sicherung besser wieder. Allerdings sind sehr hohe Leistungen erforderlich, die nur in wenigen Prüffeldern zur Verfügung stehen. Im Prüffeld der FGH Mannheim wird die notwendige Leistung direkt aus

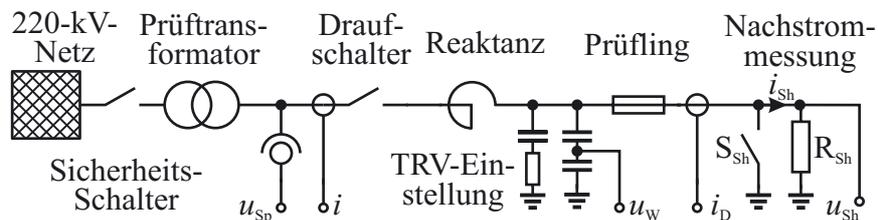


Bild 3.15: 1-phasiges ESB des Hochleistungsprüffeldes der FGH Mannheim

dem 220-kV-Verbundnetz entnommen. Dies erlaubt direkte Prüfungen bei Sicherungs-Nennspannung mit bis zu 63 kA Prüfstrom.

Ein Blockschaltbild der Anlage ist in Bild 3.15 dargestellt. Über einen Sicherheitsschalter wird der Prüftransformator an das 220-kV-Netz geschaltet. Der Transformator ist über einen Draufschalter mit dem Prüfling verbunden. Mit der Reaktanz wird die Höhe des Prüfstromes, mit der TRV-Einstellung die Form der unbeeinflussten Wiederkehrspannung beeinflusst.

Zur Messung des Stromes nach dem Schaltvorgang wurde bei Sicherungen mit leitfähiger Beschichtung durch Öffnen des Schalters S_{sh} ein Meßshunt in den Erdkreis der Sicherung eingeschleift, der sensible Strommessungen bis zu einigen Milliampere ermöglichte.

3.3.3 Hochleistungsprüffeld der Siemens AG, Berlin

Im Gegensatz zum FGH-Prüffeld wird bei dieser Anlage die Prüfleistung einem Generator entnommen (Bild 3.16). Die Drauf- und Sicherheitsschalter sowie die Reaktanz sind

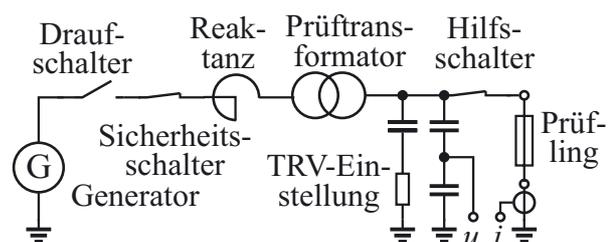


Bild 3.16: 1-phasiges ESB des Hochleistungsprüffeldes der Siemens AG, Berlin

auf der Primärseite des Prüftransformators angeordnet, auf der Sekundärseite befinden sich die TRV-Einstellung und ein Hilfsschalter, der für Einstellversuche verwendet wird.

3.4 Prüfung von SMG nach DIN VDE 0278

Nach [VDE0278] ist für typgeprüfte Mittelspannungskomponenten ein umfangreiches Prüfprogramm vorgeschrieben. Einige Prüfungen können an den SMG nicht durchgeführt werden, andere sind nicht relevant. Daher wurde das Prüfprogramm nach [VDE0278] in einigen Punkten abgeändert (vgl. Tabelle 3.5): Die Sicherung würde mit hoher Wahrscheinlichkeit bei einer Prüfung der thermischen Kurzschlußfestigkeit (Punkt 7) auslösen und somit nicht mehr für eine Schaltprüfung [EN60282] zur Verfügung stehen. Daher wurde dieser Punkt ausgelassen.

Für eine Beurteilung des SMG-Konzeptes ist eine I_2 -Prüfung nach [EN60282] unerlässlich. Die I_2 -Prüfung wurde daher im Anschluß an die TE-Prüfung (Punkt 9) als Punkt 9a eingefügt. Um die Auswirkungen des Schaltversuches auf das TE-Verhalten zu bestimmen, wurde nach diesem eine weitere TE-Messung durchgeführt (Punkt 9b). Drei Muster nach 3.1.3.1 wurden in einem Versuchsstand nach Bild 3.17 den in Tab. 3.5 geforderten Lastzyklen und Beanspruchungen ausgesetzt. Die SMG waren bei den Lastwechseluntersuchungen in Reihe ge-

Tabelle 3.5: Prüfplan in Anlehnung an [VDE0278]

Reihenfolge	Prüfverfahren nach DIN VDE 0278, Teil 1	Prüfgröße für Nennspannung 10 kV	U_p (kV)	Kriterium
1	Wechselspannungsprüfung	Prüfdauer: 1 min	28	Es darf kein Durchschlag auftreten
2	Teilentladungsprüfung		12	TE-Pegel < 20 pC
3	Blitzstoßspannungsprüfung		75	Es darf kein Durchschlag auftreten, jeweils 1 Überschlag je Polarität zulässig
4	Dauerwechselspannungsprüfung mit Lastwechseln	Prüfstrom: 1,5facher Trafo-Nennstrom Lastwechsel: 3	15	wie Zeile 1
5	Teilentladungsprüfung		12	wie Zeile 2
6	Dauerwechselspannungsprüfung mit Lastwechseln	Prüfstrom: 1,5facher Trafo-Nennstrom Lastwechsel: 60	15	wie Zeile 1
7	Prüfung der thermischen Kurzschlußfestigkeit	entfällt, wegen Schaltversuchen	--	--
8	Dauerwechselspannungsprüfung mit Lastwechseln, ohne Wasserbad oder Beregnung	Prüfstrom: 1,5facher Trafo-Nennstrom Lastwechsel: 63	15	wie Zeile 1
9	Teilentladungsprüfung		12	wie Zeile 2
9a	I_2 -Schaltprüfung mit Anstehen der Prüfspannung nach dem Schalten	Prüfstrom: $I_2 = 5,5$ kA	10,5	Sicherung muß einwandfrei abschalten, kein Durchschlag der Garnitur
9b	Teilentladungsprüfung		12	wie Zeile 2
10	Blitzstoßspannungsprüfung		75	wie Zeile 3
11	Gleichspannungsprüfung	Prüfdauer: 1 min	48	Weder ein Durch- noch Überschlag

schaltet und wurden durch eine potentialfreie Stromquelle mit Strom sowie durch eine geregelte Wechselspannungsquelle mit der Prüfspannung belastet. Der Widerstand R_V diente zur Entkopplung des Versuchsaufbaus im Falle eines Durchschlages.

Die Anzahl der Lastwechsel, deren zeitliche Abfolge sowie die Höhe der Wechselspannung u_q und des Wechselstromes i_q wurden von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) geregelt und überwacht.

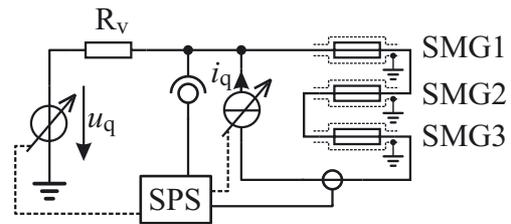


Bild 3.17: Aufbau für die Lastwechselbeanspruchungen

3.4.1 Abschaltversuche

Die SMG wurden im Hochleistungsprüffeld der FGH (vgl. 3.3.2) entsprechend [EN60282] einer I_2 -Prüfung unterzogen. Der Aufbau ist in Bild 3.18 dargestellt. Die Muffe war auf einem Träger fixiert, um ein Wegfliegen von Teilen im Fehlerfall zu verhindern. Die ebenfalls fixierten Anschlußgarnituren waren mit den Sammelschienen der Prüfeinrichtung verbunden.

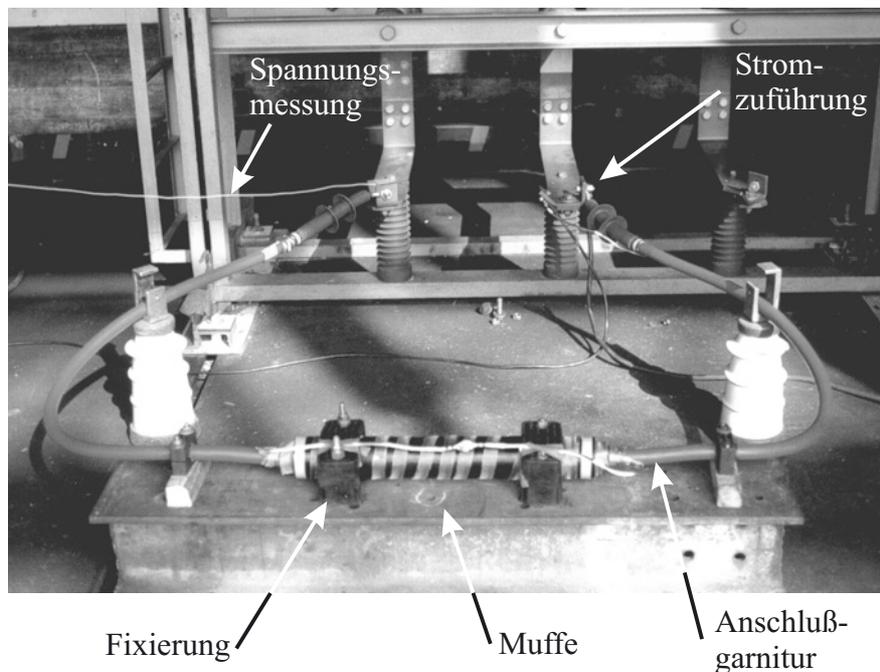


Bild 3.18: SMG im Hochleistungsprüffeld

3.4.2 Untersuchungen an geschalteten SMG

Nach den Schaltversuchen und den abschließenden Belastungen nach Tab. 3.5 wurden die SMG, sofern es noch möglich war, geöffnet und die einzelnen Komponenten optisch untersucht. Die Sicherungen wurden ebenfalls geöffnet, um mögliche Unterschiede zu geschalteten normalen Sicherungen ohne Kapselung festzustellen.

3.5 Modellanordnung zur Ermittlung des TE-Verhaltens von Sicherungen

3.5.1 Elektrodenanordnung und Prüfgefäß

Als Modell für den in Sicherungen auftretenden TE-Prozeß wurde eine Nadel-Platten-Anordnung mit einer Schlagweite von 40 mm gewählt (Bild 3.19). Die Wolframnadel hatte

einen Spitzenradius von $80\ \mu\text{m}$ bei einem Schaftdurchmesser von $0,8\ \text{mm}$. Der Sand wurde zur Simulation des Porzellanrohres in einem Glasbecher untergebracht, der im Bodenbereich von außen mit einer leitfähigen Schicht versehen war. Um den Einfluß der Temperatur und des Druckes auf das TE-Verhalten darzustellen, wurde die Anordnung in Gefäße eingebaut, die sich heizen und begasen ließen. Die TE-Messungen wurden unter Verwendung der Meßgeräte HFM62 und EKARTESI durchgeführt.

In einigen Fällen wurde anstelle der Nadel eine Kanüle eingesetzt, um die an der Spitze vorhandenen Gase abzusaugen. Das Gas wurde mit Meßröhren [Lei73] auf Ozon hin analysiert.

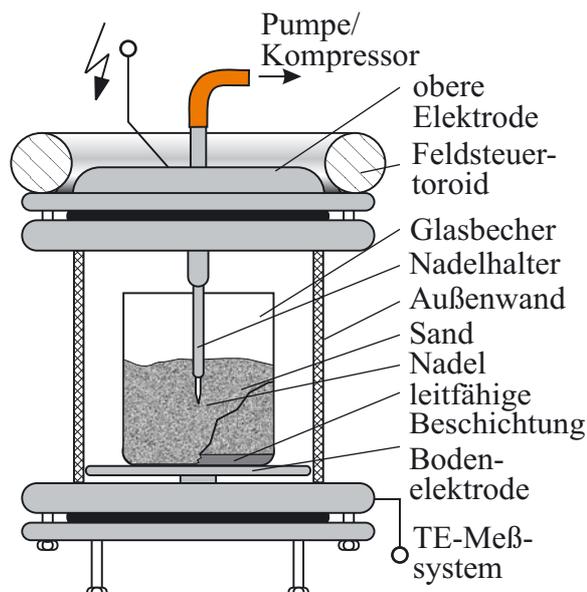


Bild 3.19: Modellanordnung zur Messung der TE-Eigenschaften von Sanden

3.5.2 Einstellung und Kontrolle der Feuchte

Zur Bestimmung des Einflusses der Feuchte des Sandes auf das TE-Verhalten wurden Proben von F32 und MAM 1 (vgl. Tab. 3.1) bei einer konstanter Temperatur von $70\ ^\circ\text{C}$ in einem Wärmeschrank mit offenem Wasserreservoir gelagert, wodurch sich über den Mechanismus der konstanten relativen Feuchten eine definierte Feuchte im Sand einstellte. Die Endfeuchte wurde mittels Karl-Fischer-Titration [Scho84] kontrolliert, wobei zur Bestimmung des Anteils von Kristallwasser eine Erhitzung der Proben unter Schutzgas (N_2) erfolgte.

3.6 Feldsimulation

Aufgrund inkompatibler Änderungen im Coding des verwendeten Programmpaketes zur FEM-Analyse (ANSYS 7.1) mußte das in den Voruntersuchungen (Kap. 2.5.2) verwendete Modell neu erstellt werden. Zusätzlich wurde eine zweidimensionale Simulation des Sandes ausgeführt. Durch den Einsatz der neuen Programmversion konnten finite Elemente verwendet werden, die durch Adaption der Polynome in der Approximationsfunktion eine höhere Genauigkeit ermöglichen (p-Elemente, [WanJ00]).

3.6.1 Dreidimensionale FEM-Simulation einer HH-Sicherung

Wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben, wurde auch hier ein voll parametrisiertes Modell verwendet, wodurch eine einfache Variation diverser Konstruktionsparameter ermöglicht wurde. Auch die bewährte Einteilung des Modells in Abschnitte, Segmente und Schalen wurde aus den Voruntersuchungen übernommen (Bild 3.20). Wie dort wurde nur ein Segment simuliert, die anderen wurden durch Setzen entsprechender Randbedingungen emuliert. Das Hochspannungspotential wurde den Schmelzleitern zugeordnet, das Erdpotential der Außenseite des Umgebungsbereiches. Die Geometrieerzeugung wurde in einem zylindrischen Koordinatensystem durchgeführt.

Zusätzlich zur Variation der Konstruktionsparameter wurden verschiedene Auswertungen vorgenommen, z.B. die Erfassung von Größen längs definierter Pfade, wie in der Detailver-

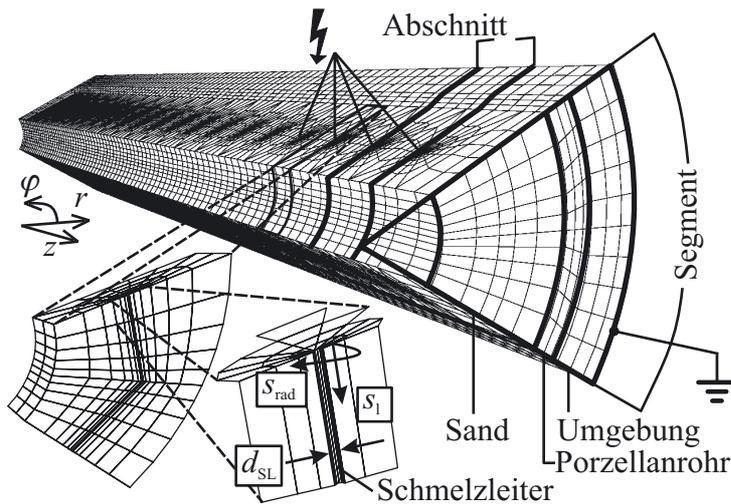


Bild 3.20: Übersicht zur Feldsimulation

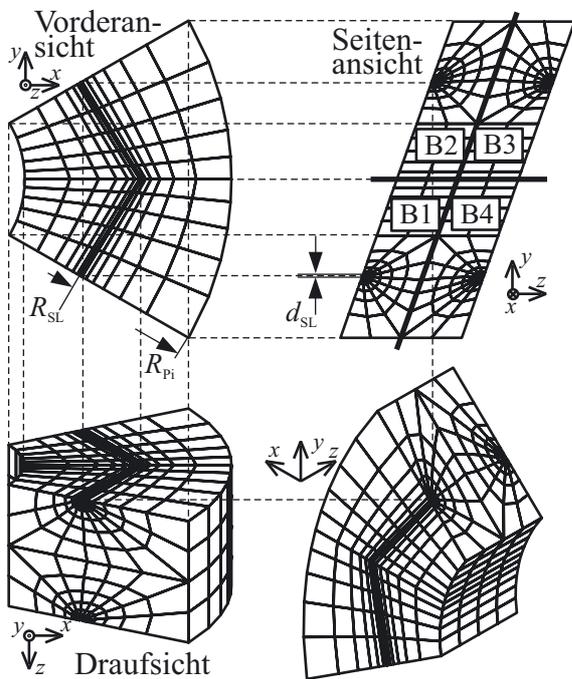


Bild 3.21: Feldsimulation, Darstellung der vermaschten Grundkörper

der Genauigkeit mit sich bringt. So läuft die Maschendichte spinnwebenartig auf den Schmelzleiter zu, was durch eine spezielle Steuerung des Vermaschungsablaufs erreicht wurde. Die Vermaschung verläuft zudem schneller und „robuster“, d.h. die Anzahl der Abbrüche des Netzgenerators konnte erheblich reduziert werden.

Im Gegensatz zu den Voruntersuchungen wurden nur runde Schmelzleiter simuliert (Bild 3.22), als zusätzlicher Parameter ergibt sich daher der Schmelzleiterdurchmesser d_{SL} . Die Wahl eines runden Schmelzleiters geschah

größerung der Schmelzleitervermaschung in Bild 3.20 zu erkennen ist. Es wurden zwei Auswertungspfade in axialer Richtung des Schmelzleiters (s_1) und in Umfangsrichtung (s_{rad}) definiert, auf die Größen wie Feldstärke, Flußdichte oder Potential abgebildet und ausgewertet werden konnten.

In Bild 3.21 sind die vermaschten Grundkörper des Sandbereiches dargestellt. Der Grundkörper besteht aus 4 Blöcken (B1-B4), die zwar identisch aufgebaut sind, aber durch den Wickeleinschlag der Schmelzleiter und die daraus resultierende Schrägung individuelle geometrische Eigenschaften haben. Wie in den Voruntersuchungen wurden entsprechend der sich ergebenden Anzahl von Wicklungen mehrere Grundkörper in z -Richtung aneinandergereiht. Durch die Aneinanderreihung ergibt sich ein geschlossener, zylindrischer Schmelzleiterkanal (Bild 3.20).

Verglichen mit Bild 2.31 sind die Grundkörper geometrisch homogener und quasi symmetrisch, wodurch sich numerische Probleme bei der Modellerstellung, Darstellung und Berechnung vermeiden lassen. Zudem läßt sich die Vermaschung in den kritischen Bereichen besser einstellen, was eine weitere Erhöhung

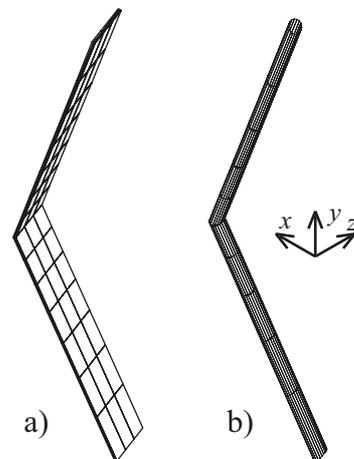


Bild 3.22: Vergleich der Schmelzleitervermaschungen
a) altes b) neues Modell

aus der Überlegung, daß die Feldsimulation nie die wahren Gegebenheiten an den Kanten von bandförmigen Schmelzleitern bestimmen kann, da dort die Feldstärke theoretisch unendlich hoch ist.

3.6.2 Zweidimensionale FEM-Simulation granularer Materie

Zur Klärung der Feldverhältnisse in dem Sand-Luftgemisch des Löschmittels wurde eine zweidimensionale FEM-Simulation in einer planparallelen Elektrodenanordnung durchgeführt (Bild 3.23).

Die Form der Sandkörner, ihre Größe und Position wurden durch einen Zufallsalgorithmus bestimmt, der zunächst n -Ecke mit einer Kantenanzahl zwischen 3 und 10 erzeugt, wobei die Abstände der Kanten zum Schwerpunkt des n -Ecks ebenfalls zufällig variiert wurden.

Dann wurde versucht, die entstandenen Flächen im Berechnungsgebiet zu plazieren. Nach einem Plazierungsversuch wurde eine Kollisionserkennung durchgeführt, um zu verhindern, daß sich die Flächen überlappen. Trat eine Überlappung auf, wurde ein neuer Plazierungsversuch unternommen. Konnte eine Fläche nach 10 Versuchen nicht überlappungsfrei plaziert werden, wurde die Fläche mit einer Zufallszahl skaliert, gedreht und dann erneut plaziert.

Die Geometrieerzeugung wurde in kartesischen Koordinaten vorgenommen, die Auswertungen und Berechnungen in zylindrischen Koordinaten. Zur näherungsweise Berücksichtigung der dreidimensionalen Anordnung der Sandkörner wurde das Modell mit radialsymmetrischen Elementen vermascht, d.h. die Flächen in Bild 3.23 stellen die Querschnittsflächen von Toroiden dar, die um die z -Achse herum angeordnet sind. Diese Vereinfachung mußte aufgrund von lizenzrechtlichen Beschränkungen in der maximalen Anzahl von FEM-Elementen der verwendeten Software vorgenommen werden.

Innerhalb der Berechnungsfläche wurden verschiedene Auswertungen entlang definierter Pfade vorgenommen, wobei die Pfade teilweise auf Grundlage der berechneten Feldverhältnisse erzeugt wurden (Bild 3.24). Ausgehend von einem Randknoten (N_1) einer Sandkornfläche A_1 wurde die lokale elektrische Feldstärke bestimmt (E_1) und ein neuer Stützpunkt N_2 in der Entfernung Δs zum Knoten entgegen der Feldstärkerichtung erzeugt. Im neuen Stützpunkt wurde wieder die lokale Feldstärke bestimmt und analog der nächste Stützpunkt generiert. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt ($N_3, N_4, N_5 \dots$), bis der Gasraum überbrückt war, d.h. der zu erzeugende Stützpunkt wieder auf ein Sandkorn oder eine Elektrodenoberfläche traf oder den Berechnungsraum verlies. Auf den so erzeugten Pfaden konnten dann verschiedene Größen wie Feldstärke, Flußdichte usw. abgebildet und ausgewertet werden. Dabei wurden lokale Bedingungen, wie die Größe des betrachteten Elements (l_{FEM}), dessen Fläche und Volumen oder der Winkel zum Flächennormal (dA_1), berücksichtigt.

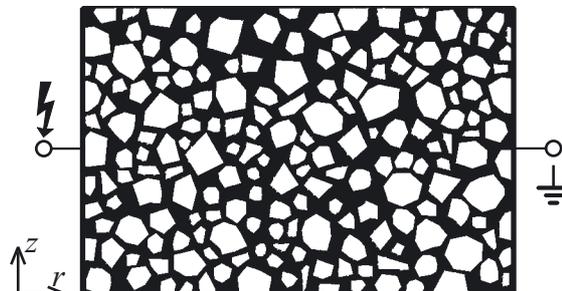


Bild 3.23: Konfiguration zur 2D-Feldsimulation granularer Materie

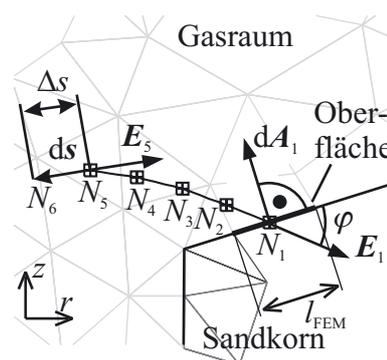


Bild 3.24: Zur Berechnung von Auswertungspfaden

4 Simulations- und Meßergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Feldsimulation sowie der ausgeführten Messungen vorgestellt und anhand der einschlägigen Literatur diskutiert. Zunächst werden die

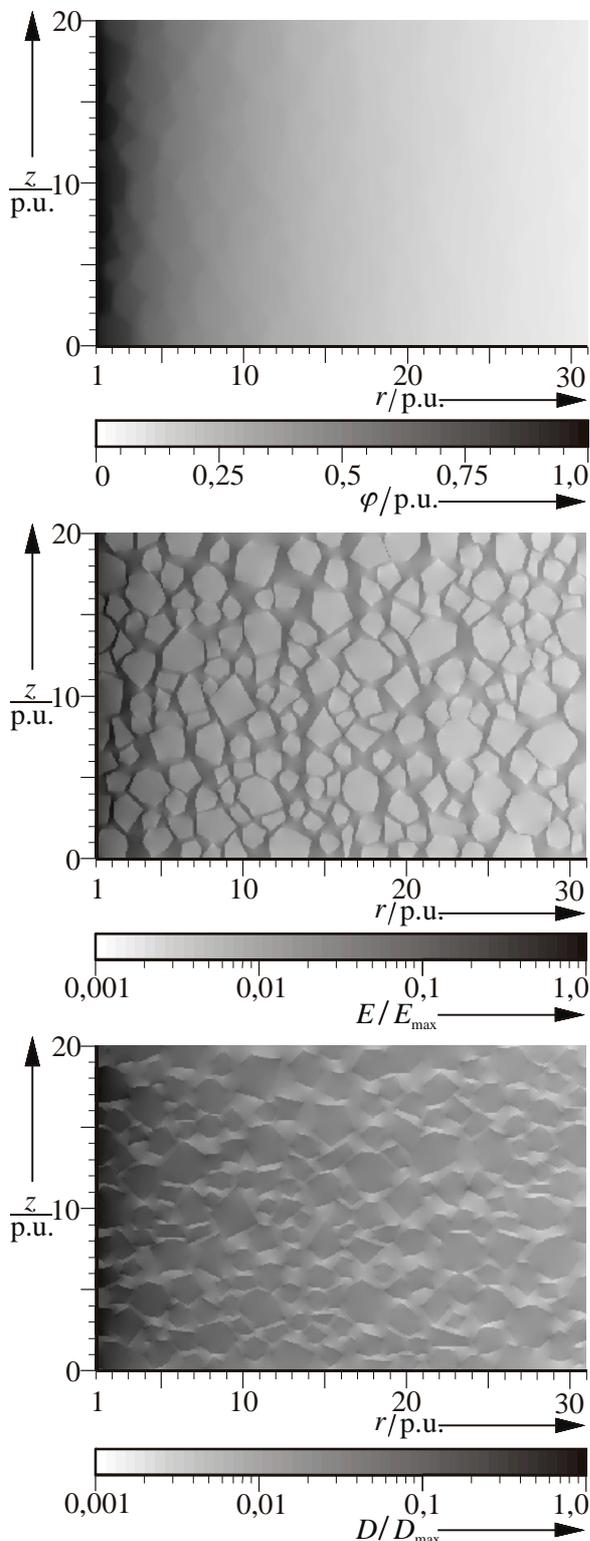


Bild 4.1: Potential-, Feldstärke- und Flußdichteverteilung im granularen Medium (elektrostatisch simuliert)

Ergebnisse der Feldsimulationen präsentiert und interpretiert. Anschließend wird auf die TE-Messungen an Sicherungen und die verschiedenen Einflußgrößen wie Strom- und Spannungshöhe, Dauer der Einwirkung, Gasart und Gasströmung eingegangen. Aus den Meßwerten werden statistische Kenngrößen ermittelt. Es folgt eine Zusammenstellung der Eigenschaften von Sicherungen, die mit verschiedenen Löschmittelzusätzen und Feldsteuerschichten modifiziert wurden, sowie eine Gegenüberstellung der TE-Reduktionsmaßnahmen.

4.1 Feldverhältnisse

4.1.1 Zweidimensionale Simulation eines granularen Mediums

Die Komplexität der Feldverhältnisse im granularen Medium wird durch die Feldberechnung erkennbar (vgl. Kap. 3.6.2), deren Ergebnisse in Bild 4.1 dargestellt sind. Zur Verstärkung des Kontrastes sind Feldstärke und Flußdichte auf den jeweiligen Maximalwert bezogen und in einer logarithmischen Skalierung schattiert. Die Angabe arbiträrer Einheiten (p.u.) spiegelt die prinzipbedingt dimensionslose Verarbeitung von Größen in der Simulationssoftware wider. Für reale Anordnungen würde durch Einsetzen realer Größen ($U = 1 \text{ kV}$, $r_i = 1 \text{ mm}$, $r_a = 31 \text{ mm}$) beispielsweise ein Wert von $0,7 \text{ kV/mm}$ für die maximale Feldstärke folgen.

Erwartungsgemäß ist die Feldstärke im Gasraum höher als im Feststoff und ihr Verlauf über dem Radius ist reziprok zu diesem ($\sim 1/r$). Daher findet sich der Maximalwert der Feldstärke von $0,7 \text{ p.u.}$ am Mittelleiter ($r = 1 \text{ p.u.}$, $z = 0,6 \text{ p.u.}$) in einem Element des Gasvolumens. Die minimale Feldstärke beträgt lokal $0,0028 \text{ p.u.}$ am äußeren Rand ($r = 27,8 \text{ p.u.}$, $z = 20 \text{ p.u.}$) der Simulationsdomäne. Dies er-

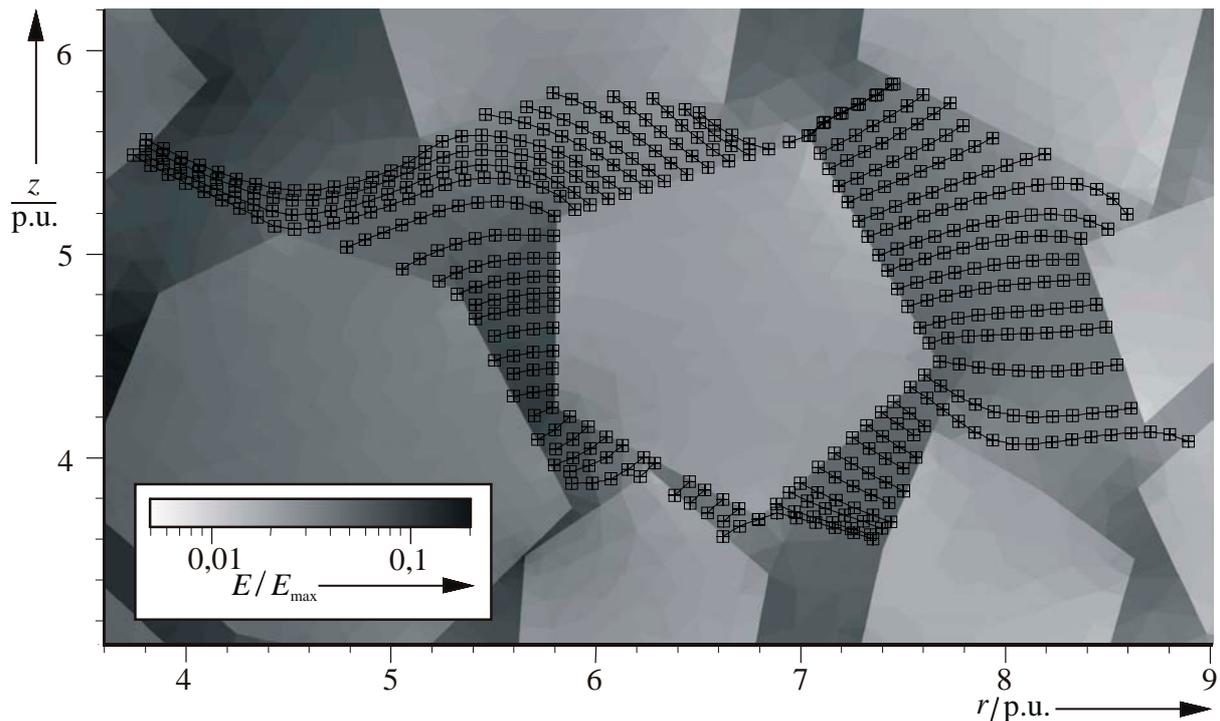


Bild 4.2: Detail aus Bild 4.1 mit berechneten Flugbahnen geladener Teilchen (ohne Berücksichtigung der durch das Teilchen entstehenden Feldverzerrung)

gibt eine Feldüberhöhung im Vergleich zu einem homogenen Dielektrikum mit $\epsilon_r = 2,6$ und Verwendung der Formel für Koaxialkondensatoren (vgl. Gl. 1.1) von $0,7/0,122 = 6,25$ an der Innenseite bzw. $0,003/0,0036 = 0,78$ außen. Die Stelle der höchsten Feldbeanspruchung befindet sich im Gasraum, die der geringsten in einem Sandkorn. Die Simulationsdomäne enthält 188 Sandkörner und erreicht einen Flächenfüllgrad in der r - ϕ -Ebene von 60,2 %. Die Simulation erfolgte unter Verwendung von Elementen mit radialsymmetrischen Eigenschaften, so daß die Ergebnisse eingeschränkt dreidimensional interpretiert werden können. Die Flächen der Körner entsprechen den Querschnittsflächen von Toroiden, die um die z -Achse herum positioniert sind. Aus den Geometriedaten der Simulation ergibt sich eine Porosität von $\phi = V_{\text{Gas}}/V_{\text{Korn}} = 23981,9/60318,6 = 39,7 \%$, ein Wert, der etwas höher ist als bei normalem Sand (37,1 %).

Bild 4.2 zeigt einen Ausschnitt der Feldverteilung von Bild 4.1 im Bereich $r = 3,6 \dots 9$ p.u. und $z = 3,2 \dots 6,2$ p.u., in dem zusätzlich zur Feldschattierung Trajektorien eingezeichnet sind, die geladene Partikel aufgrund der Feldverteilung nehmen, wenn sie an der Oberfläche des eingezeichneten Kornes starten oder enden (vgl. Bild 3.24). Beachtenswert sind die unterschiedlichen Längen der zurückgelegten Flugbahnen, die sich aus der geometrischen Anordnung der Körner ergibt. Dies hat verschiedene Konsequenzen für die in Kap. 2.4 dargelegten Prozesse der Gasentladung. Nach Gl. 2.33 ist für die Bildung einer Entladung eine bestimmte Elektronenanzahl oder Weglänge erforderlich, die vom Wert des effektiven lokalen Ionisierungskoeffizienten α' abhängt, der wiederum feldstärkeabhängig ist (siehe Gln. 2.24 und 2.28). Entsprechend werden Entladungen bevorzugt in Regionen hoher Feldstärke oder am Ende von Pfaden mit einem hohen Wert des Streamer-Integrals (Gl. 2.34) entstehen.

Weiterhin ist gut zu erkennen, daß die Feldstärke besonders hoch wird, wenn die Spaltgröße in Feldrichtung zwischen zwei Körnern gering ist (z.B. $r = 5,6$ p.u., $z = 3,5$ p.u.) aber reduziert, wenn der Gasraum in Feldrichtung von Feststoffgrenzflächen flankiert wird (z.B. im Gebiet um $r = 5,8$ p.u., $z = 5,4$ p.u.). Ähnliche Resultate zeigen Simulationen und Messungen

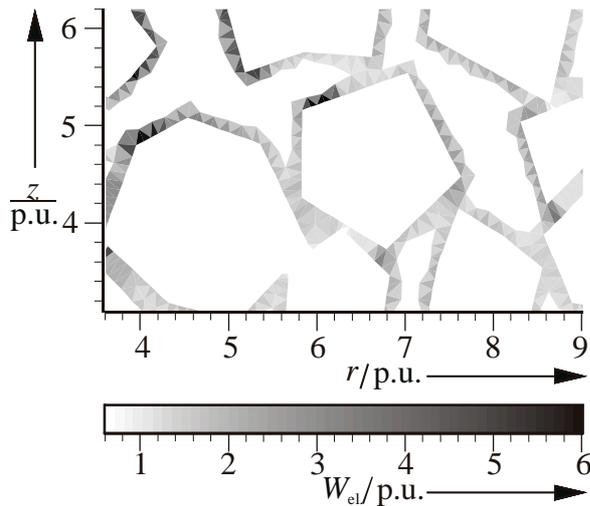


Bild 4.3: Elektrische Arbeit W_{el} am Ende der Pfade nach Bild 4.2, berechnet an den Kornoberflächen

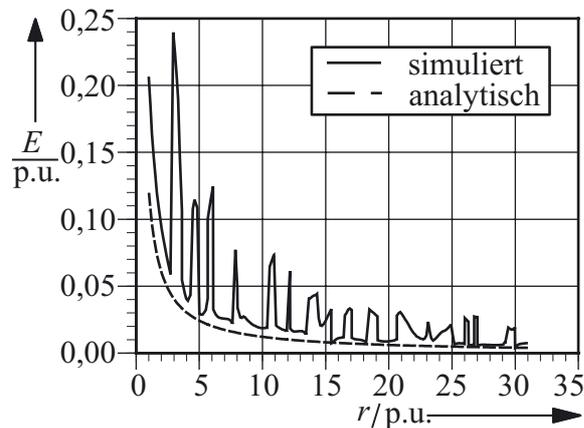


Bild 4.4: Feldstärkeverlauf in der Mitte der Simulationsdomäne im Vergleich zur analytischen Lösung

an Ballotini (gleichförmigen Kugeln) oder an Grenzflächen [Russ99, Holz03, Kang03]. Besonders niedrige Feldstärken werden an konkaven Oberflächen beobachtet (z.B. $r = 5,8$ p.u., $z = 5,8$ p.u.), was sich mit Ergebnissen aus anderen Simulationen deckt [Kei98], wo gezeigt wird, daß sich die Oberflächen von dielektrischen Partikeln in einem Plasma entsprechend ihrer Form unterschiedlich stark aufladen. Die einer hohen Feldstärke ausgesetzten Oberflächen unterliegen hohen Ionenflüssen und laden sich daher stärker auf als Oberflächen, die einer niedrigeren Feldstärke und Ionenflüssen ausgesetzt sind.

Wird als Maß für die Ionisierungsvorgänge die elektrische Feldarbeit entlang der Pfade nach Bild 4.2 aufintegriert und auf die Randelemente der Sandkörner projiziert, ergibt sich die Darstellung in Bild 4.3. Entsprechend des Ionisierungsintegrals (Gl. 2.34) ist dies die Menge der eintreffenden Ionen bei linearer Abhängigkeit des Ionisationskoeffizienten von der Feldstärke. Es ist zu erkennen, daß diese Menge am Ende von langen Pfaden (z.B. $r = 6,1$ p.u., $z = 5,1$ p.u.) oder von Pfaden, die einen Bereich mit hoher Feldstärke durchlaufen (z.B. $r = 5$ p.u., $z = 6$ p.u.), besonders hoch ist. Ähnliche Ergebnisse werden bei der Simulation von Wasserbäumchen in Polyethylen gefunden [Ser04]. Die inhomogene Ladungsverteilung sorgt für inhomogene Feldverhältnisse an der Grenzschicht, was Oberflächenentladungen begünstigt.

Durch die Sprünge in der elektrischen Feldstärke am Übergang Feststoff/Gas treten wegen der Grenzflächenpolarisation Ladungsträger in der Grenzschicht auf, die zu einer Reduzierung der elektrischen Festigkeit führen können. Der Verlauf der Feldstärke auf einem Pfad in der Mitte der Simulationsdomäne von $r = 1$ p.u., $z = 10$ p.u. nach $r = 31$ p.u., $z = 10$ p.u. ist in Bild 4.4 dargestellt und mit der analytischen Funktion für ein Dielektrikum mit $\epsilon_r = 2,6$ verglichen. Deutlich sind Sprünge an den Korngrenzen sowie ein Offset des Verlaufs im Vergleich zur analytischen Lösung zu erkennen. Dieser Offset resultiert aus der Verwendung des Absolutbetrags der Feldstärke in der Darstellung, die auch Komponenten quer zur Richtung des Radialfeldes berücksichtigt, und der in der Simulation erzielten Packungsdichte, die einem homogenen Dielektrikum mit $\epsilon_r = 2,11$ entspricht, wie sich aus den Geometriedaten und der Feldenergie ableiten läßt.

4.1.2 Dreidimensionale Feldsimulation einer Sicherung

Die Ergebnisse der dreidimensionalen Simulation sind in Bild 4.5 dargestellt. Es zeigt die simulierte elektrische Feldstärke in einem Abschnitt (vgl. Bild 3.20) in der Mitte einer Sicherung mit vier Schmelzleitern bei einem Schmelzleiterdurchmesser von $d_{SL} = 0,01$ p.u. Aufgrund lizenzrechtlicher Beschränkungen konnte der Sand in der 3D-Simulation nur als homogenes Dielektrikum mit $\epsilon_r = 2,6$ dargestellt werden. Trotz der getroffenen Vereinfachungen besteht das Modell je nach verwendetem Parametersatz aus bis zu 26.950 FEM-Elementen mit 124.318 Knoten. Durch die Verwendung eines homogenen Dielektrikums erübrigt sich die Darstellung der elektrischen Flußdichte D , da diese über $D = \epsilon \cdot E$ linear mit der Feldstärke gekoppelt ist.

Die Feldstärke ist mit 1,961 p.u. maximal am Schmelzleiter in der Nähe der Kante des Wickelkörpers. Die Stelle des Feldminimums befindet sich im Bereich der zur z -Achse gerichteten Fläche der Simulationsdomäne. Werden reale Einheiten (Längeneinheiten: 1 p.u. \cong 1 mm, Potential: 1 p.u. \cong 1 V) eingesetzt, entspricht die ermittelte maximale Feldstärke $E_{max} = 1,96$ p.u. \cong 1,96 V/mm. Umgerechnet auf die Betriebsspannung der Sicherung folgt ein Wert von $E_{max} = 11,76$ kV/mm für 6/12-kV-Sicherungen bzw. $E_{max} = 19,6$ kV/mm für 10/24-kV-Sicherungen. Die Werte sind etwas höher als die Werte, die in der Voruntersuchung (vgl. Kap. 2.5.2) ermittelt wurden (~ 8 kV/mm), was an der veränderten Geometrie und den damit verbundenen Änderungen in der Ermittlung der maximalen Feldstärke liegt. Durch die gröbere Vermaschung in der Voruntersuchung ist dort die auf das Volumen der finiten Elemente bezogene Feldstärke geringer, was auf die Werte der Feldstärke an den Knoten rückwirkt.

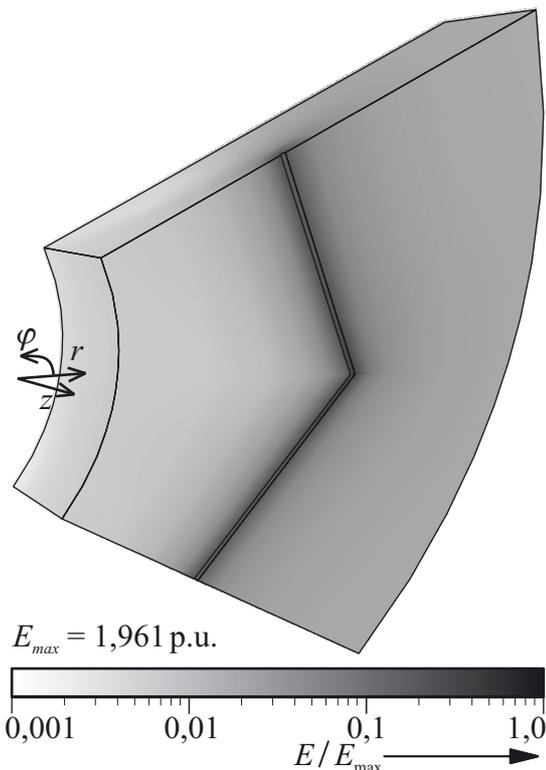


Bild 4.5: Feldstärkeverteilung im mittleren Segment einer Sicherung

Ein Vergleich mit analytischen Ergebnissen ist bei der Komplexität der Anordnung nicht mehr möglich. In [Phi88] finden sich Angaben zu einer Elektrodenkonfiguration eines 4er-Leiterbündels, das von einem Zylinder eingeschlossen ist und Ähnlichkeiten mit der Sicherungsgeometrie aufweist. Das außen geerdete Porzellanrohr spiegelt den Außenzylinder wieder, die vier Schmelzleiter das 4er-Bündel. Durch Berechnung der entsprechenden Geometriefaktoren und Extrapolation der in [Phi88] angegebenen Diagramme ergibt sich ein Homogenitätsgrad von $\eta_{trans} \approx 0,06$. Daraus läßt sich eine maximale Feldstärke von $E_{max} = U/d / \eta_{trans} = 1/(10,5 \cdot 0,06)$ V/mm = 1,59 V/mm berechnen. Der Unterschied zum Simulationsergebnis (1,96 V/mm) ergibt sich aus der helikalen Anordnung der Schmelzleiter im Vergleich zur achsenparallelen Anordnung des obigen Ansatzes und der Berücksichtigung des Porzellanrohrs, das eine höhere Permittivität hat als der Sand.

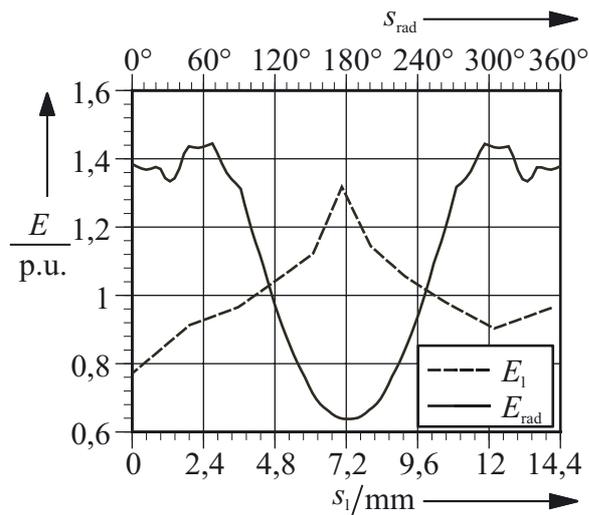


Bild 4.6: Feldstärke E am Schmelzleiter entlang der Pfade s_1 und s_{rad} aus Bild 3.20

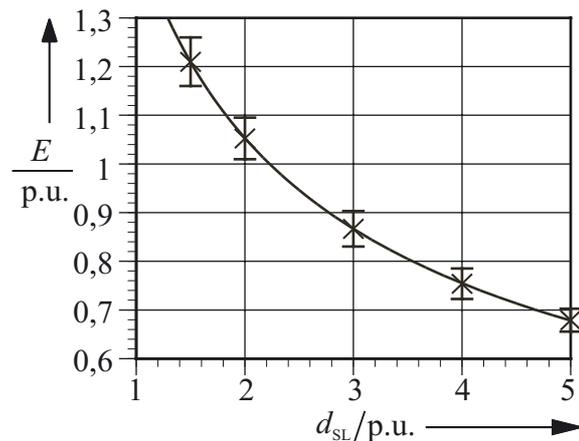


Bild 4.7: Feldstärke E über dem Schmelzleiterdurchmesser d_{SL}

Die Feldstärke am Schmelzleiter ist sowohl in Umfangsrichtung als auch in axialer Richtung nicht konstant. Da der Schmelzleiter über die Stege des Wickelkörpers gespannt ist, variiert sein Abstand zum geerdeten Äußeren, und die Feldstärke ändert sich entsprechend. Dies zeigt sich, wenn die Feldstärke E_1 entlang des Schmelzleiters am Pfad s_1 (vgl. Bild 3.20) aufgetragen wird (Bild 4.6). Analog ist auch die Feldstärke am Umfang des Schmelzleiters E_{rad} nicht konstant (Pfad s_{rad} in Bild 3.20). Die maximale Feldstärke tritt an der Außenseite des Schmelzleiters bei $s_{\text{rad}} = 0^\circ$ oder 360° auf. In Schmelzleiterlängsrichtung tritt die maximale Feldstärke an der Wickelkörperkante bei $s_1 = 7$ mm auf. Die unsymmetrische Kurvenform resultiert aus der Überlappung der helikal angeordneten Schmelzleiterwendel, was bei der innen liegenden Wendel zu einer Feldschwächung führt, bei der äußeren zu einer Verstärkung. Die unterschiedlichen Maximalwerte der Feldstärke ($E_{\text{rad}} = 1,4$ p.u. versus $E_1 = 1,3$ p.u.) erklären sich aus der vom Programm gewählten Selektion von Interpolationspunkten und der verwendeten Mittelwertbildung.

Die Ergebnisse der Variation von Konstruktionsparametern aus der Voruntersuchung (vgl. Kap. 2.5.2) konnten qualitativ bestätigt werden. Zusätzlich wurde in dieser Simulation der Durchmesser des Schmelzleiters als Parameter eingeführt. Bild 4.7 zeigt dessen Einfluß auf die Feldstärke. Der Verlauf der Feldstärke E ist nahezu reziprok zum Schmelzleiterdurchmesser d_{SL} .

4.2 Teilentladungsverhalten

4.2.1 Allgemeine Beobachtungen

Bereits aus den Rohdaten (Bild 4.8) sind einige Besonderheiten des TE-Verhaltens von Sicherungen zu erkennen. Obwohl die Matrix noch nicht in die Normallage verschoben ist, kann eine starke Asymmetrie des TE-Verhaltens zwischen der positiven und der negativen Halbwelle der Prüfspannung erkannt werden. Während bei positiver Prüfspannung bereits im Nulldurchgang Impulse festzustellen sind, beginnen sie in der negativen Halbwelle erst, nachdem die Prüfspannung ca. 10 kV überschritten hat. In beiden Halbwellen überwiegt die TE-Tätigkeit im Spannungsanstieg der Prüfspannung. Während das Einsetzen von TE im Nulldurchgang typisch für „innere TE“ ist, sind Impulse in der Nähe des Spannungs-

maximums, wie hier in der negativen Halbwelle, eher für „äußere TE“ charakteristisch [Bey86, Alt02, Bar02]. Auch sind deutliche Unterschiede in der Formgebung der Cluster festzustellen, mit denen die Impulse in der φ - q -Ebene angeordnet sind. Die Verteilung in der positiven Halbwelle wirkt homogener als in der negativen, wo zwei deutlich abgegrenzte Bereiche erkennbar sind und der Winkelbereich, in dem die Impulse auftreten, enger gefaßt ist. Zudem sind in der positiven wie negativen Halbwelle Impulse mit entgegengesetzter Polarität zu erkennen, wenngleich deren Anzahl gering ist.

Die Impulsmuster sind zeitlich nicht konstant, sondern verändern sich im Laufe der Messung bei sonst konstanten Versuchsparametern. Die Meßergebnisse variieren stark von Prüfling zu Prüfling, was in der stochastischen Anordnung des Löschmittels begründet ist. Aus diesem Grunde werden die Impulsverteilungen zunächst exemplarisch anhand eines einzelnen Musters diskutiert.

4.2.1.1 Aufbereitung der Meßergebnisse

Die mit dem Meßsystem *icm* gemessenen Daten liegen in Form binärer Dateien vor und müssen analog Kap. 3.2.4.4 aufgearbeitet werden. Bild 4.8 zeigt eine typische Impulsmatrix \mathbf{M} und den zugehörigen Verlauf der Prüfspannung u_p an einer unmodifizierten 10/24-kV-Sicherung für ein Meßintervall mit $t_M = 1$ min. Die gebräuchlichste Darstellung der Impulsmatrix ist ein farbkodiertes Konturendiagramm (engl. *contour map*). Die Farbskalierung der Konturen wurde hier so gewählt, daß die kleinste darzustellende Größe ($N = 1$) der Farbe schwarz entspricht, Bereiche ohne Impulse der Farbe weiß. Dies erleichtert das Auffinden von Einzelimpulsen abseits der Impulscluster. Die Werte bis zum Maximalwert wurden linear einer Grautönung zugeordnet (200 Impulse \cong 20 % Schwarzpegel). Die Skalierung der Impulsanzahl mit maximal 200 Impulsen erscheint gering, sie gilt aber pro Pixel, so daß die Gesamtimpulssumme bei 256x256 Pixeln leicht mehrere hunderttausend Impulse pro Messung erreichen kann. Die realen Impulssummen dürften zudem höher liegen, da das Meßsystem eine Totzeit (engl. *dead time*) besitzt, in der es nach Auslösung durch einen Impuls keine weiteren Impulse mehr akquiriert [ICM00, Alt02].

Zur Umrechnung auf eine Impulsrate muß berücksichtigt werden, daß das Meßsystem eine gewisse Zeit zum Speichern der Datensätze benötigt, d.h. das Meßintervall $t_M = 60$ s entspricht nicht der tatsächlichen Meßzeit $t_{aq} = 40$ s. Daher werden im folgenden die Impulsraten

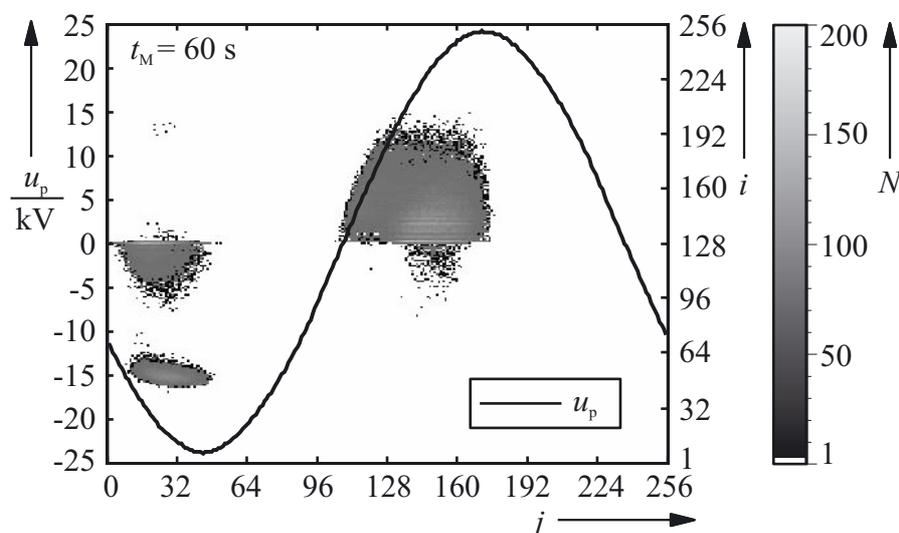


Bild 4.8: Rohdaten der Wertematrix \mathbf{M} und des Prüfspannungsvektors \mathbf{u}_p über dem Phasenwinkel bei einer 10/24-kV-Sicherung ($\varphi \cong j$, $q \cong i$, $U_p = 17$ kV, $I_p = 0$ A)

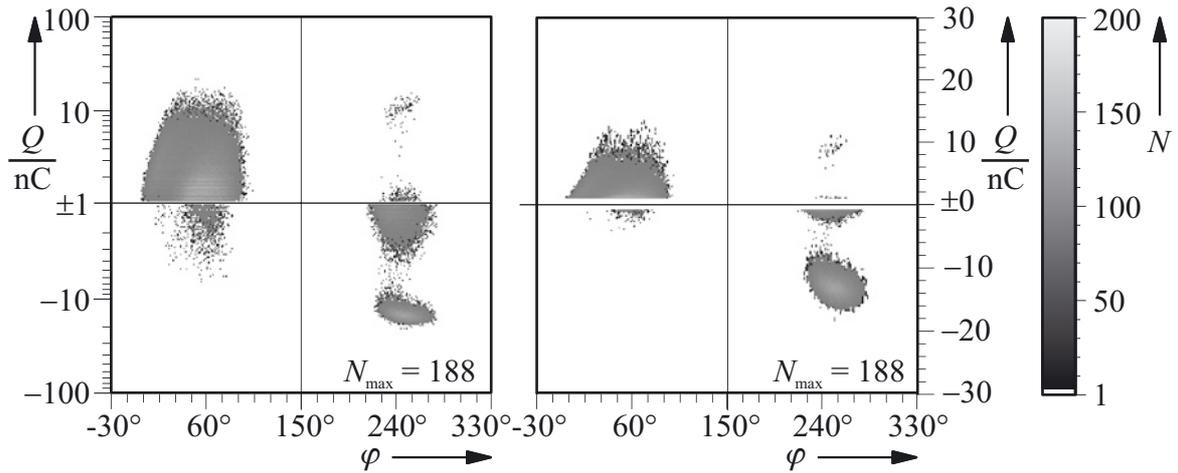


Bild 4.9: Vergleich der Maps in logarithmischer (links) und linearer Skalierung (rechts)

aus der tatsächlichen Meßzeit t_{aq} abgeleitet. Für Bild 4.8 ergibt sich somit eine Impulsrate $\sum N/t_{\text{aq}} = 149.544/(40 \text{ s}) = 3,7 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$. Pro Pixel ergibt sich eine maximale Impulsrate von $N_{\max}/t_{\text{aq}} = 188/(40 \text{ s}) = 4,7 \text{ s}^{-1}$.

4.2.1.2 Skalierung und Phasennormierung

Bild 4.9 zeigt einen Vergleich des gleichen Datensatzes in logarithmischer und linearer Skalierung. Da das Meßgerät wegen der hohen Dynamik der TE-Aktivität im logarithmisch-bipolaren Modus betrieben wurde, ist für die linear skalierte Darstellung eine Umrechnung

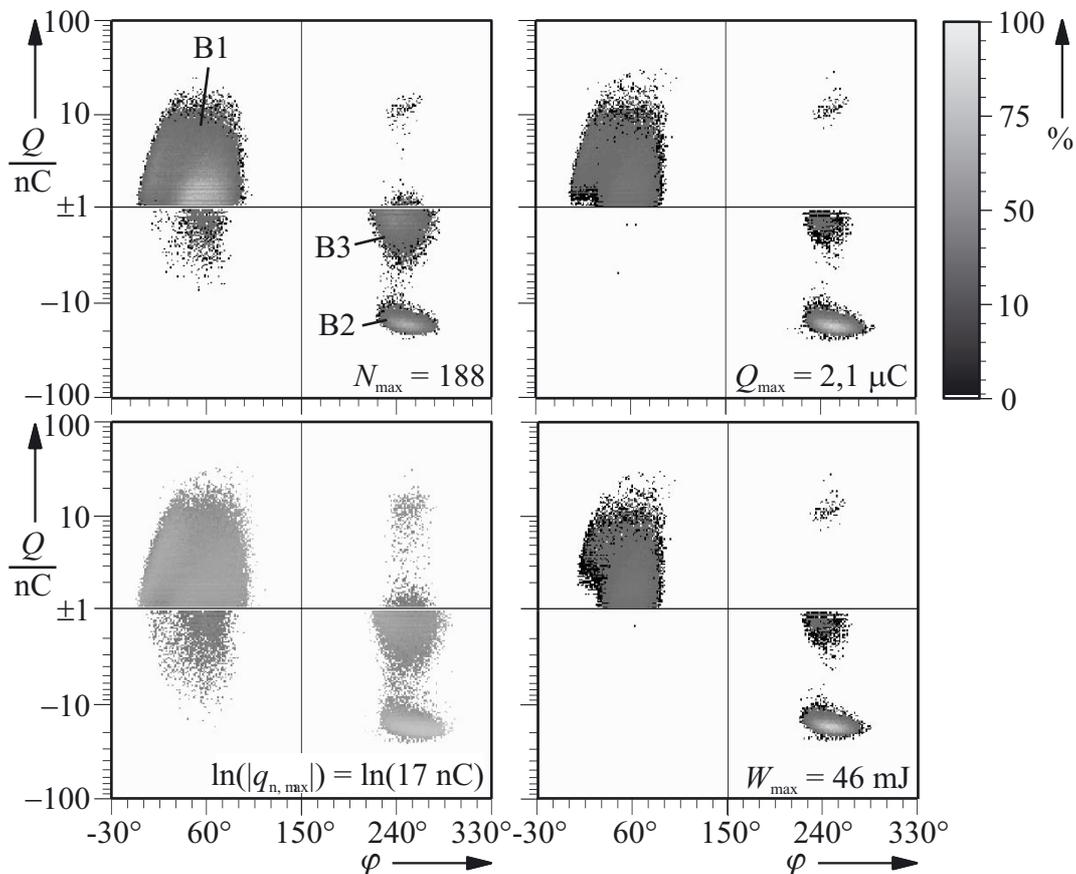


Bild 4.10: Konturendiagramme der Impulsverteilung N , Ladungsverteilung Q , mittleren Impulsladungverteilung q_n und TE-Energie W in der φ - q -Ebene an einer unmodifizierten 10/24-kV-Sicherung ($U_p = 20 \text{ kV}$, $I_p = 0 \text{ A}$)

erforderlich, die zu zusätzlichen Fehlern führt. Daher wird im folgenden grundsätzlich die logarithmische Darstellung verwendet, sofern nicht anders angegeben.

Die Verteilungen der Größen Impulsanzahl N , Ladung Q , mittlere Impulsladung q_n und Energie W in der φ - q -Ebene sind in Bild 4.10 dargestellt. Die jeweiligen Größen sind wie in Bild 4.8 auf ihren Maximalwert bezogen und in Prozent als Farbkontur dargestellt. Die mittlere Impulsladung q_n weist so starke Schwankungen auf, daß die Schattierung in logarithmischer Farbachse vorgenommen wurde. Vorzeichenbehaftete Größen sind als Absolutwert angegeben. Die Phasennormierung (s. Kap. 3.2.4.5) wurde wegen der teilweise vor dem Nulldurchgang einsetzenden Vorgänge auf den Bereich $-30\dots330^\circ$ vorgenommen.

In der positiven Halbwelle sind die Verteilungen meist homogen und hauptsächlich auf den ersten Sektor (vgl. Tab. 2.2) beschränkt (Bereich B1), in der negativen Halbwelle sind die Impulse auf zwei Bereiche in der Nähe des Prüfspannungsmaximums konzentriert (Bereiche B2 und B3, Bild 4.10), einen Bereich mit sehr hohen Pegeln (B2) und einen in der Nähe der φ -Achse (B3). Die TE setzen in der positiven Halbwelle in der Nähe des Nulldurchgangs der Prüfspannung ein ($\varphi_{TE, pos} = -10\dots+5^\circ$), in der negativen deutlich verzögert ($\varphi_{TE, neg} = 10\dots30^\circ$). Die höchsten Ladungs- und Energiemengen finden sich in B2, allerdings werden die Impulsraten von B1 nicht erreicht. B3 ähnelt von der Form und mittleren Ladung her B1, aber bei deutlich kleineren Ladungswerten. Die mittlere Impulsladung (q_n) ist ebenfalls in B2 am höchsten, in den Sektoren 2 und 3 am geringsten.

Die Aufteilung in unterschiedliche Bereiche läßt die Einwirkung verschiedener Entladungserscheinungen erkennen. Während die bogenförmige Ausprägung der Verteilung im positiven Zyklus auf Oberflächenentladungen zurückgeführt wird, sind die flächigen Bereiche „inneren“ TE, d.h. dem Durchschlag kleiner Hohlräume zuzuordnen [Fru95, Wai97, Hei99]. Das Verhalten in B2 – eine hohe Anzahl starker Impulse kurz vor dem Spannungsmaximum in der negativen Halbwelle – ist typisch für Korona- und Trichelentladungen, wie sie beispielsweise an Nadel-Platte-Anordnungen beobachtet werden [Cac96].

Die Bereiche B1 und B3 weisen horizontale, bandförmige Feinstrukturen in der Impulsanzahl (Bild 4.11) auf, die auf eine bevorzugte Ausbildung von Entladungen mit bestimmten Ladungspegeln schließen lassen. Die Lage der Bänder ist über der Phase und im Verlauf der Messung annähernd konstant. Da die Wahrscheinlichkeit für einen Durchschlag in einem Hohlraum von der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Anfangselektrons und damit von seiner Größe abhängig ist [Nie95, Kali99], können die Bandstrukturen einer bestimmten Fehlstellengröße zugeordnet werden. Untersuchungen an dielektrischen Mikrospalten zeigen ebenfalls eine Abhängigkeit der transferierten Ladung von der Schlagweite [Gib00, Rüc02], die Impulsladungsmenge ist dabei unabhängig von der Prüfspannungshöhe, d.h. die Bandstrukturen deuten auf Hohlräume distinkter Größe im Sand hin, die sich aus der stochastischen Anordnung der Sandkörner ergeben.

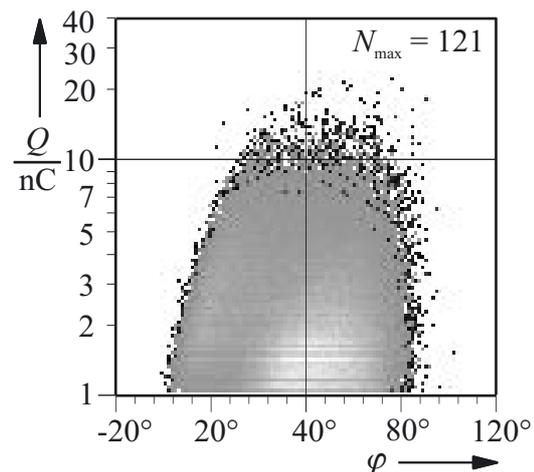


Bild 4.11: Ausschnitt des 1. Sektors, Farbskalierung wie in Bild 4.10

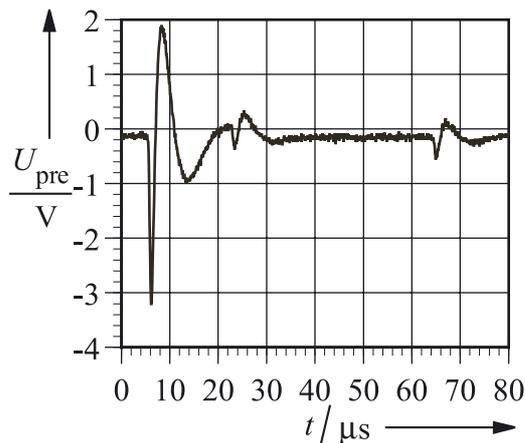


Bild 4.12: Negative TE-Impulse am Ausgang des Vorverstärkers des TE-Meßsystems ($U_p = 20$ kV, $I_p = 0$ A)

klein gewählt werden mußte ($t_{\text{dead}} = 20$ μs). Andererseits sind bei DBD-Anordnungen aber sog. Rückzündimpulse (engl. *back corona*) beobachtet worden [Sjö03], und die chaotische Anordnung der Sandkörner erlaubt Strukturen, in denen mehrere Fehlstellen gleichzeitig zünden und im Zusammenspiel mit Bereichen, die nicht durchschlagen, zu einer transienten Spannungsvervielfachung führen, ähnlich wie bei einem Marx-Generator [Bey86]. Solche Impulse sind jedoch aufgrund ihrer Impulsbreite (einige ns) von außen nur schwer zu detektieren und ihre Amplitude ist so gering, daß sie allenfalls bei niedrigen TE-Pegeln relevant sind. Jedenfalls liegt der Anteil der Impulse mit negativer TE-Energie an der Summenladung des jeweiligen Spannungszyklus gegenüber denen mit positiver Energie bei nur einigen Prozent ($Q_{s, X3}/Q_{s, X1} = 9,8 \cdot 10^{-6}/6,8 \cdot 10^{-4} = 0,014$, $Q_{s, X2}/Q_{s, X4} = 6,6 \cdot 10^{-6}/3,3 \cdot 10^{-4} = 0,02$), ebenso ihre Anzahl ($N_{X3}/N_{X1} = 4648/133300 = 0,035$, $N_{X2}/N_{X4} = 1340/31820 = 0,04$).

Insgesamt lassen die Beobachtungen auf einen komplizierten TE-Prozeß schließen, der sich aus Entladungen in den Gasräumen und an den von den Sandkörnern bereitgestellten Längs- und Quergrenzschichten zusammensetzt.

4.2.1.3 Zeitreihenanalyse und statistische Kenngrößen

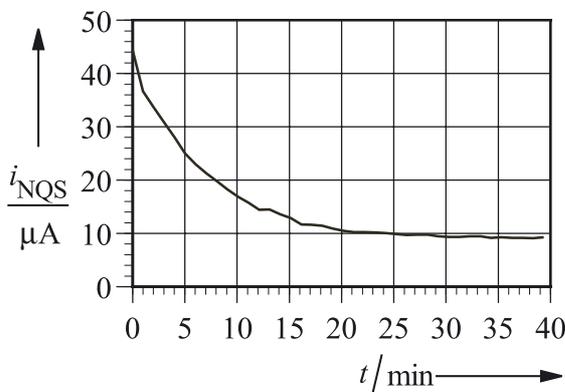


Bild 4.13: Scheinbarer TE-Stromfluß i_{NQS} über der Zeit ($U_p = 20$ kV, $I_p = 10$ A)

Neben der TE-Aktivität in den Sektoren mit positiver TE-Energiebilanz (X1, X4, s. Tab. 2.2) finden sich auch Impulse in den Sektoren mit negativer Energiebilanz (X2, X3). Diese Impulse werden üblicherweise einer Fehltriggerung des TE-Meßsystems durch eine falsch gewählte Totzeit zugeordnet [Boz95, Osv95], da die Fehlstellen als Verbraucher angesehen werden und nur Energie aufnehmen können.

Eine durch Fehltriggerung ausgelöste Aufzeichnung von Impulsen kann auch bei den hier durchgeführten Messungen nicht ausgeschlossen werden, da die Totzeit des TE-Meßsystems wegen der teilweise hohen Impulsfolge ($\Delta t_{\text{Imp.}} \approx 20$ μs , Bild 4.12) relativ

klein gewählt werden mußte ($t_{\text{dead}} = 20$ μs). Andererseits sind bei DBD-Anordnungen aber sog. Rückzündimpulse (engl. *back corona*) beobachtet worden [Sjö03], und die chaotische Anordnung der Sandkörner erlaubt Strukturen, in denen mehrere Fehlstellen gleichzeitig zünden und im Zusammenspiel mit Bereichen, die nicht durchschlagen, zu einer transienten Spannungsvervielfachung führen, ähnlich wie bei einem Marx-Generator [Bey86]. Solche Impulse sind jedoch aufgrund ihrer Impulsbreite (einige ns) von außen nur schwer zu detektieren und ihre Amplitude ist so gering, daß sie allenfalls bei niedrigen TE-Pegeln relevant sind. Jedenfalls liegt der Anteil der Impulse mit negativer TE-Energie an der Summenladung des jeweiligen Spannungszyklus gegenüber denen mit positiver Energie bei nur einigen Prozent ($Q_{s, X3}/Q_{s, X1} = 9,8 \cdot 10^{-6}/6,8 \cdot 10^{-4} = 0,014$, $Q_{s, X2}/Q_{s, X4} = 6,6 \cdot 10^{-6}/3,3 \cdot 10^{-4} = 0,02$), ebenso ihre Anzahl ($N_{X3}/N_{X1} = 4648/133300 = 0,035$, $N_{X2}/N_{X4} = 1340/31820 = 0,04$).

Insgesamt lassen die Beobachtungen auf einen komplizierten TE-Prozeß schließen, der sich aus Entladungen in den Gasräumen und an den von den Sandkörnern bereitgestellten Längs- und Quergrenzschichten zusammensetzt.

Nach der Sortierung der einzelnen Datensätze über die Gesamtprüfzeit $t_{\text{meß}}$ können die verschiedenen Meßgrößen als Zeitreihen dargestellt werden. Skalare Größen ergeben Kurvenzüge (Bild 4.13), vektorielle dreidimensionale Flächen (Bild 4.14).

Als Beispiel für eine skalare Größe ist in Bild 4.13 der mittlere TE-Strom i_{NQS} (vgl. Tab. 2.1) bei einer Prüfspannung von $U_p = 20$ kV und einem Prüfstrom von $I_p = 10$ A dargestellt. Deutlich ist eine exponentielle Abnahme der TE-Aktivität über der Prüfzeit zu erkennen. Diese Abnahme ist stark vom durch die Sicherung fließenden Prüfstrom abhängig.

In den Bildern 4.14-4.18 sind verschiedene Histogramme der Impuls- bzw. Ladungsverteilungen über der Prüfzeit dargestellt. Werden die Punkte der Profile verbunden, entsteht eine dreidimensionale Fläche (Bild 4.14), die optisch einen guten Eindruck der zeitlichen Entwicklung der TE-Aktivität vermittelt. So sind ohne weitere Berechnungen statistische Größen wie Schiefe, Steilheit, Gewichtung usw. ablesbar.

In der schattierten Darstellung in Bild 4.14 können je nach gewähltem Sichtpunkt Vorgänge durch die nicht vorhandene Transparenz der Fläche verdeckt werden. Beispielsweise ist der Verlauf zu niedrigen Ladungsintensitäten hin ($< 10^{-8}$ C) durch die Abdeckung der Fläche nicht klar zu erkennen. Daher werden im folgenden nur die Querschnittslinien der jeweiligen Größe zu einem gegebenen Zeitpunkt dargestellt (Bild 4.15). Allerdings sind sehr feine Details wie der in Bild 4.14 gut zu beobachtende Verlauf der Feinstrukturen über der Ladungsintensität (vgl. Bild 4.11) weniger gut sichtbar.

Die Impulsverteilung über der Phase (Bild 4.15) zeigt eine deutliche Überzahl der Impulse in der positiven Halbwelle gegenüber der negativen, und die Anzahl bleibt über der Meßzeit $t_{\text{meß}}$ annähernd konstant, während sie in der negativen Halbwelle abnimmt. Entsprechend der Flächenform liegt der Mittelwert (bzw. Schwerpunkt) der TE-Aktivität anfangs bei $\varphi = 125,5^\circ$ und verschiebt sich im Verlauf der Messung weiter zur positiven Halbwelle ($\varphi = 108,5^\circ$). Die Gesamtverteilung ist linkssteil ($sk_{H_n} = 1$) und flachgipfliger ($ku_{H_n} = -0,7$) als die Normalverteilung [Sac72]. Vergleichbare Verteilungen werden bei DBD-Reaktoren gefunden [Gib01].

Der Impulsverteilung ähnlich ist die Verteilung der Ladung über der Phase (Bild 4.16), allerdings wird in der negativen Halbwelle zunächst deutlich mehr Ladung transportiert als in der positiven, d.h die Einzelimpulsladung ist dort höher. Im Verlauf der Messung nimmt die Ladung insgesamt ab, in der ne-

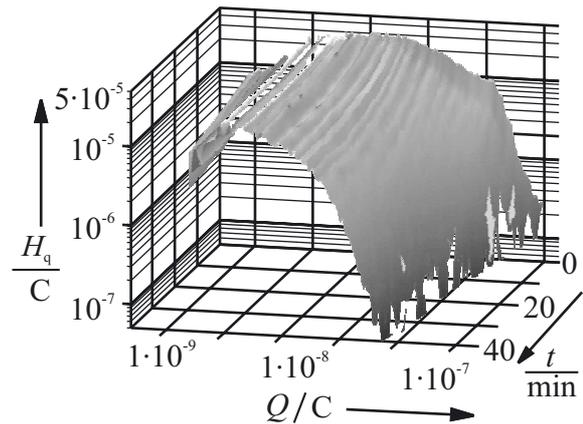


Bild 4.14: Ladungsverteilung $H_q(Q)$ über der Zeit und Ladungsintensität für positive Ladungen, Farbskalierung wie in Bild 4.10 ($U_p = 20$ kV, $I_p = 10$ A)

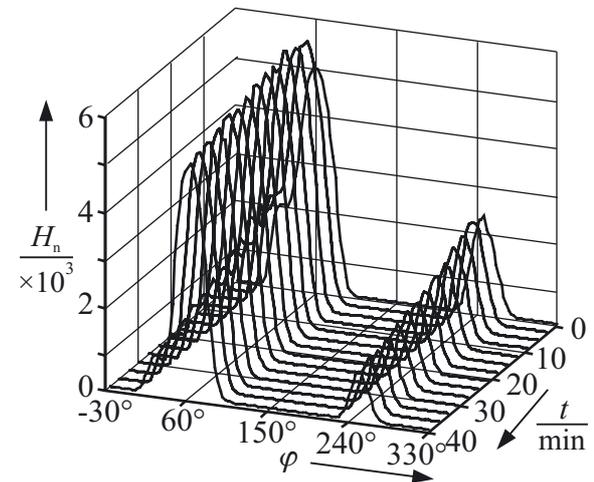


Bild 4.15: Impulsverteilung $H_n(\varphi)$ über der Zeit und Phase ($U_p = 20$ kV, $I_p = 10$ A)

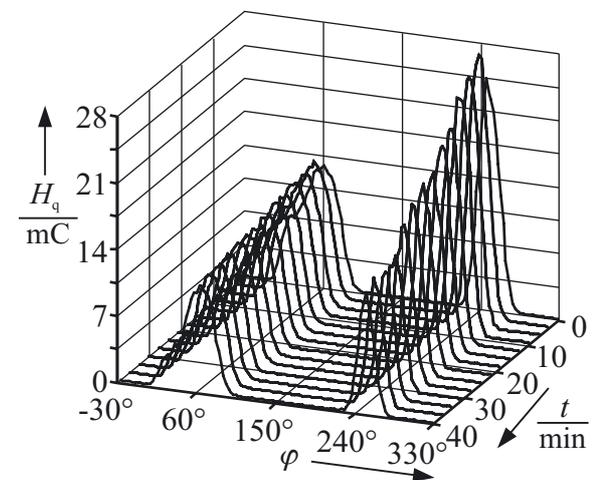


Bild 4.16: Impuls Ladungsverteilung $H_q(\varphi)$ über der Phase und Zeit ($U_p = 20$ kV, $I_p = 10$ A)

gativen Phase deutlicher. Daher liegt der Ladungsschwerpunkt zunächst bei $\varphi = 179^\circ$, später bei $\varphi = 99,5^\circ$.

Eine Aggregation über der Ladung (Bild 4.17) zeigt, daß besonders am Anfang der Messung mehr negative Ladung transportiert wird als die positive. Die Verteilung ist für negative Ladungswerte deutlich höher, allerdings ist die Verteilungsbreite schmäler als die der positiven, was sich in den Werten der Kurtosis widerspiegelt ($ku_{H_q(Q)}^- = -0,4 \dots 2,4$). Für positive Ladungen bleibt die Verteilung und Breite ($ku_{H_q(Q)}^+ = -1,1 \dots -1,4$) näherungsweise konstant.

Gegen Ende der Messung ($t_{\text{meß}} = 40 \text{ min}$) ist die Gesamtladungsmenge (Fläche unter $H_q(Q)$) bzw. $H_q(\varphi)$ der positiven Impulse größer als die der negativen. Die Abnahme der TE-Tätigkeit in der negativen Halbwelle ist noch ausgeprägter, wenn die Sicherung mit einem Strom beaufschlagt wird.

Die Verteilung der mittleren Ladung pro Impuls bleibt im Verlauf der Messung für positive Impulse etwa konstant, während sie in der negativen Halbwelle abnimmt, wie Bild 4.18 zeigt. Zur Verdeutlichung des Zeitverhaltens sind die Werte in Bild 4.18 auf den Maximalwert des ersten Meßzyklus bezogen. Zur Hervorhebung der Entwicklung von TE-Ein- und -Aussetzwinkel ist der Sichtpunkt des Diagramms im Vergleich zu den vorherigen frontal gewählt. In der positiven Halbwelle ist die mittlere Impulsladung geringer als in der negativen. Die Form der Verteilung ist in der positiven Halbwelle flacher als in der negativen, d.h. die Impulse haben dort in etwa die gleiche Ladungsamplitude, während sie in der negativen Halbwelle deutlich absinkt. Die Breite der Verteilung nimmt in beiden Halbwellen über der Meßzeit ab, d.h. TE-Ein- und Aussetzwinkel verschieben sich zu Werten, die einer höheren Momentanspannung entsprechen. Im TE-Ein- bzw. -Aussetz zeigen die Verläufe zum Teil große Unstetigkeiten, was nach [Kriv95] typisch für Entladungen in „dielektrisch umschlossenen Hohlräumen“ sein soll. Andere Quellen [Gib01, Pet02] bezeichnen dieses Verhalten als typisch für Oberflächenentladungen und DBD's.

4.2.1.4 Statistische Merkmale (Fingerprints)

Zur Klassifizierung der gefundenen TE-Muster wurden verschiedene Verfahren evaluiert. Aufgrund des zur Verfügung stehenden Meßsystems war die Untersuchung auf Verfahren beschränkt, die auf der Analyse von Meßgrößen in der φ - q -Ebene beruhen. Diese Verfahren

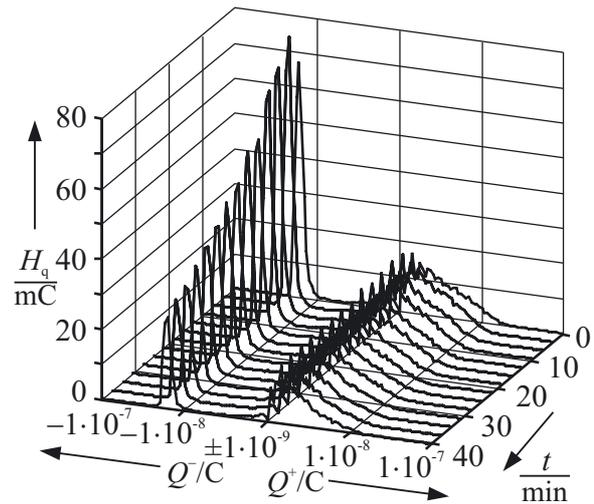


Bild 4.17: Ladungsverteilung $H_q(Q)$ über der Ladungsintensität und Zeit ($U_p = 20 \text{ kV}$, $I_p = 10 \text{ A}$)

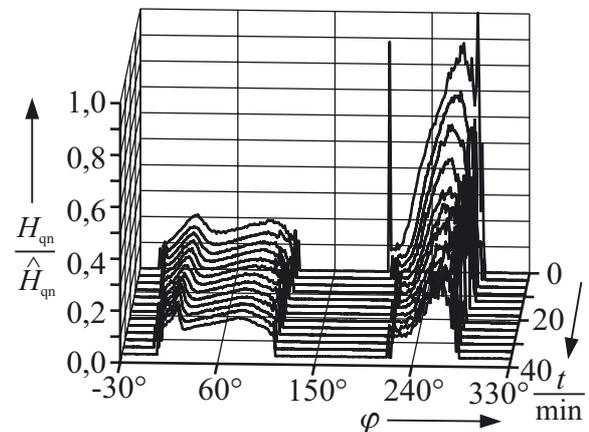


Bild 4.18: Verteilung der auf den Maximalwert bezogenen mittleren Impulsladung $H_{qn}(\varphi)$ über der Zeit und Phase ($U_p = 20 \text{ kV}$, $I_p = 10 \text{ A}$)

basieren meist auf der Untersuchung der statistischen Verteilungen von Größen, die aus der Impulsmatrix abgeleitet werden (s. Kap. 2.2.2).

Nach [Cac96, Boz98] ist die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion F , mit der ein TE-Ereignis bei einer bestimmten Ladungsmenge auftritt, ein Indiz für den zugrundeliegenden TE-Mechanismus. Hierzu wird die Impulsverteilung $H_n(Q)$ (s. Tab. 2.1) als Häufigkeitsverteilung interpretiert und entsprechend analysiert. Bild 4.19 zeigt die kumulierte Verteilung für eine Impulsverteilung nach Bild 4.17 zum Zeitpunkt $t = 0$ min in einer Weibull-Darstellung. Wie auch in [Cac96] sind in der positiven und negativen Halbwelle unterschiedliche Verteilungen zu erkennen, die sich im Bereich 2...10 nC durch Geraden divergierender Steigungen annähern lassen. Dies ist nach [ebd.] ein Indiz für das Vorhandensein verschiedener TE-Ursachen, nämlich einem Oberflächen- und einem Koronaprozeß. Durch den Koronaprozeß (entspricht dem Bereich B2 in Bild 4.10) entsteht ein zusätzlicher steiler Anstieg in der Verteilungsfunktion im Bereich hohen Ladungen (10...20 nC), der bei positiver Polarität fehlt. Die Form der Verteilungsfunktion ist über der Meßdauer (40 min) annähernd zeitinvariant und unabhängig von der Strombelastung.

Besondere Beachtung wird in einigen Untersuchungen dem Verlauf der Schrägung der Impulsverteilung geschenkt [Tan95], indem die Schrägung der Verteilung der Impulse mit negativer Ladung über derjenigen der positiven aufgetragen wird. Ein solcher Verlauf ist für eine Sicherung in Bild 4.20 wiedergegeben. Prinzipiell zeigen auch Sicherungen den in [ebd.] beschriebenen Verlauf von positiven Schrägungswerten der positiven Verteilung hin zu negativen Werten bei gleichzeitigem Absinken der Schrägung der negativen Verteilung, was ein Indikator für einen bevorstehenden Isolationsfehler sein soll [ebd.]. Es kam allerdings bei den Sicherungen zu keinem Durchschlag, und die Werte gingen nach einer belastungsfreien Phase von 24 h wieder auf die Ausgangswerte zurück.

Bild 4.21 zeigt die statistischen Kenngrößen nach [Gul91] (s. Tab. 2.1), wie sie an unmodifizierten 12/24-kV-Sicherungen bei 20 kV Prüfspannung mit und ohne Strombelastung ermittelt wurden. Wegen der starken Veränderung während der Prüfdauer wurden jeweils Werte für das entsprechende Drittel der Prüfzeit angegeben und über drei Prüflinge gemittelt.

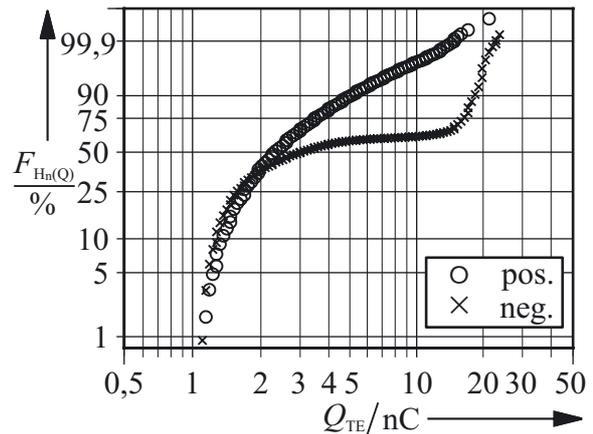


Bild 4.19: Verteilungsfunktion $F(H_n(Q))$ bei $t = 0$ min in Weibull-Darstellung ($U_p = 20$ kV, $I_p = 10$ A)

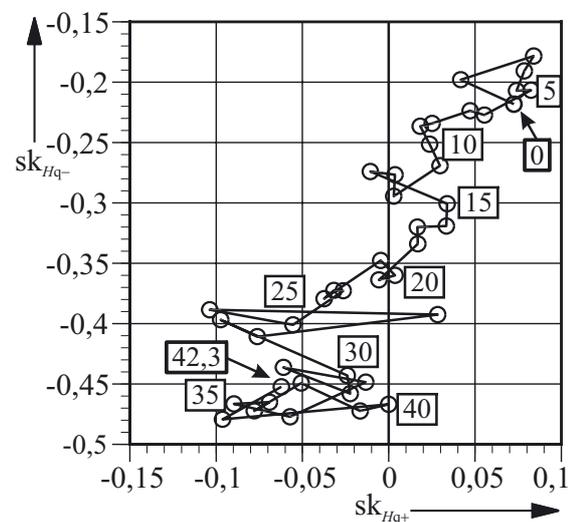


Bild 4.20: Verlauf der Schrägung von $H_q(\varphi)$ während einer 40 min Belastung, ($U_p = 20$ kV, $I_p = 10$ A)

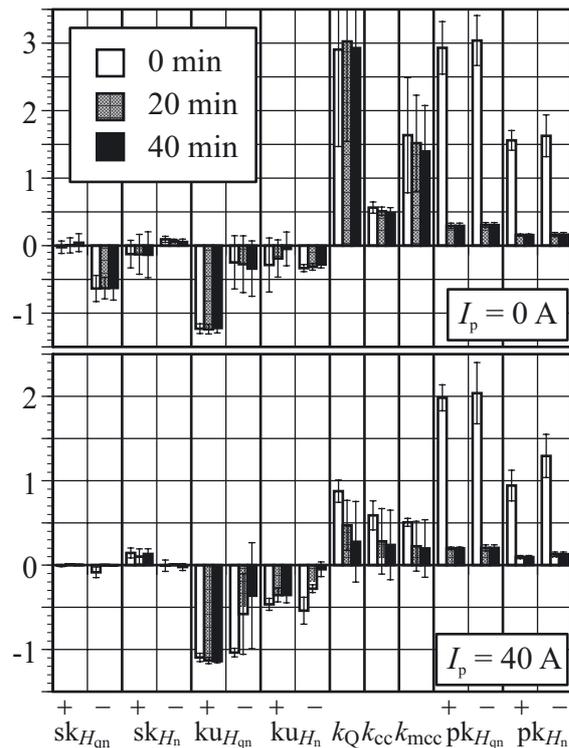


Bild 4.21: Fingerprint nach [Gul91] bei $U_p = 20$ kV und verschiedenen Prüfströmen. Bezeichnungen nach Tab. 2.1

verteilungen (pk_{Hqn} , pk_{Hn}) von der Anzahl der Meßkanäle des TE-Meßsystems und der Länge des Meßintervalls $t_{meß}$ abhängig, die hier im Vergleich zu [ebd.] unterschiedlich gewählt wurden. Einen großen Einfluß auf die statistischen Werte haben auch die Prüfbedingungen, wie schon am Stromfluß durch die Sicherung demonstriert und die Prüfspannung, wie später gezeigt noch wird.

4.2.1.5 Vergleich der TE-Meßsysteme

Analoge Meßgeräte zeigen eine „bewertete“ Meßgröße an [EN60270, HFM62], die einerseits die scheinbare Ladung Q_{TE} , andererseits auch die Impulsanzahl N berücksichtigen soll, da

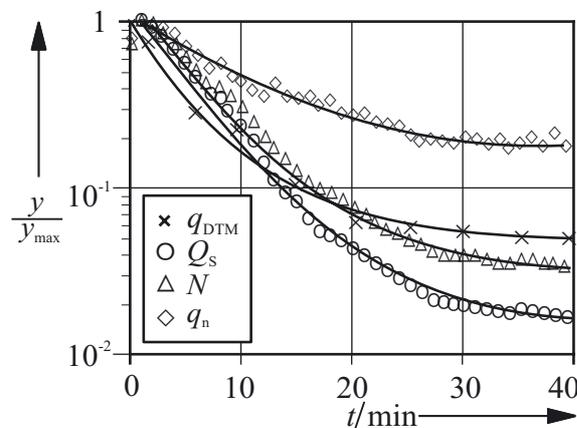


Bild 4.22: Vergleich verschiedener TE-Größen und -Meßsysteme bei gleichen Randbedingungen ($U_p = 20$ kV, $I_p = 40$ A)

Aufgrund der stochastischen Anordnung des Löschmittels schwanken die Werte sehr stark, was sich in einer starken Streuung zeigt.

Im Vergleich zu den in [Gul91] angegebenen Schemata sind keine klaren Übereinstimmungen zu finden, am ehesten ist bei $I_p = 0$ A eine Ähnlichkeit mit den Fehlertypen „längliche Fehlstelle in Feldrichtung im festen Isolierstoff“ (engl. *narrow cavity in solid material*) und „Mehrnadelanordnung in Luft gegen Platte“ (engl. *multiple point-plane configuration in air*) erkennbar, bei $I_p = 40$ A hingegen eher mit dem Fehlertyp „mehrfache Fehlstelle im festen Isolierstoff“ (engl. *multiple cavity in solid material*).

Insbesondere die hohen Werte der Ladungsasymmetrie k_Q sind mit [Gul91] nicht vergleichbar, d.h. TE in Sicherungen können durch ihre hohe Ladungsasymmetrie klassifiziert werden. Weitere Unterschiede ergeben sich aus den verwendeten Meßsystemen und Versuchsaufbauten. Beispielsweise ist die Anzahl der lokalen Maxima in den Häufigkeits-

verteilungen (pk_{Hqn} , pk_{Hn}) von der Anzahl der Meßkanäle des TE-Meßsystems und der Länge des Meßintervalls $t_{meß}$ abhängig, die hier im Vergleich zu [ebd.] unterschiedlich gewählt wurden. Einen großen Einfluß auf die statistischen Werte haben auch die Prüfbedingungen, wie schon am Stromfluß durch die Sicherung demonstriert und die Prüfspannung, wie später gezeigt noch wird.

beide Größen über ein einziges Anzeigegerät ausgegeben werden. Gleichzeitig findet durch Zeitglieder und die Trägheit des Anzeigegerätes eine zeitliche Mittelwertbildung statt. Zudem wird eine Spitzenwertgleichrichtung durchgeführt, wodurch keine Aussage über die Polarität der Impulse mehr möglich ist. Daher ist eine direkte Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der phasenaufgelösten Messung schwierig.

Bild 4.22 zeigt die Verläufe der auf den jeweiligen Maximalwert normierten Größen q_{DTM} (scheinbare Ladung) des Meßsystems DTM sowie von Summenladung Q_S , Impulsanzahl N und mittlerer Impulsladung q_n

des Meßsystems ICM. Es ist zu erkennen, daß die Impulsanzahl N noch die beste Korrelation zur Meßgröße des analogen Meßgerätes hat, d.h. bei gleichbleibender mittlerer Impulsladung wäre eine Vergleichbarkeit möglich.

Die Abhängigkeit der mit dem analogen Meßgerät ermittelten scheinbaren Ladung von der Anzahl der Impulse $q_{DTM} = f(N)$, die auch beim Meßsystem HFM (vgl. Tab. 3.4) beobachtet wurde, ist im Aufbau der Meßsysteme begründet. Die Zeitkonstante des Meßsystems ist so ausgelegt, daß auch einzelne Impulse detektiert und mit korrektem Ladungswert angezeigt werden können. Die hohe Impulsrate führt dann wegen der Zeitkonstanten und Spitzenwertgleichrichtung zu einer höheren Anzeige der Ladung.

Letztendlich sind bei den hier verwendeten Meßsystemen nur die TE-Einsatzspannungen unmittelbar vergleichbar, wobei diese besser mit den analogen Meßgeräten zu bestimmen sind, da hier eine direkte Ausgabe der Meßergebnisse erfolgt, während bei digitalen Meßsystemen oft eine Verzögerung durch die Datenübertragung und -auswertung auftritt, die zu einem verspäteten Ablesen der Spannungswerte und damit zu Fehlern führen kann.

Da im Feld überwiegend einfache TE-Meßgeräte im Einsatz sind, werden für die Evaluation der TE-reduzierenden Maßnahmen überwiegend die Ergebnisse von konventionellen TE-Meßsystemen verwendet, während die phasenaufgelösten Meßergebnisse für die Erläuterung der TE-Mechanismen herangezogen werden.

4.2.2 Abhängigkeit der TE-Aktivität von der Prüfspannung

Bild 4.23 zeigt die Abhängigkeit der Impulsverteilung in der φ - q -Ebene von der Prüfspannung. Um eine kompakte Darstellung zu erreichen, sind die Ladungsskalen und Impulsraten

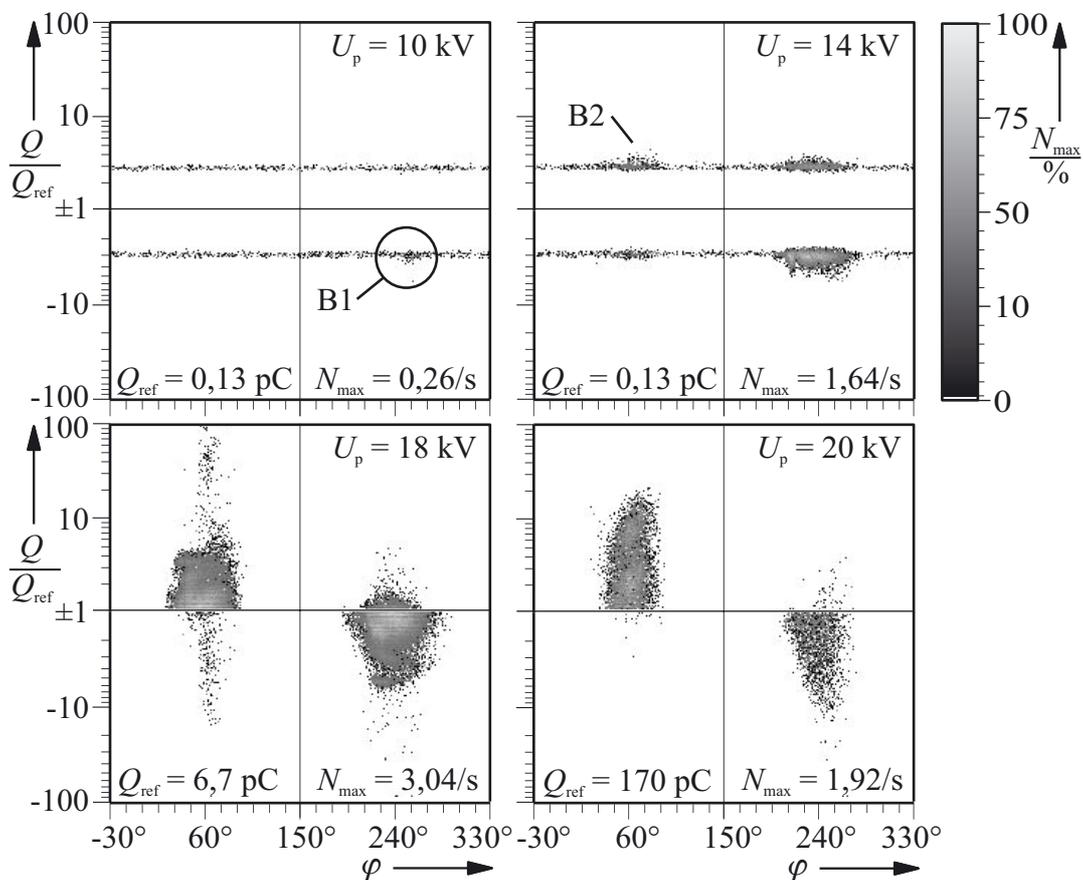


Bild 4.23: Impulsratenverteilung in der φ - q -Ebene bei verschiedenen Prüfspannungen ($I_p = 0$ A)

auf einen Referenzpegel bezogen, der jeweils im Diagramm angegeben ist. Zunächst beschränkt sich die Aktivität – von den bandartigen Störungen bei $Q = 0,39 \text{ pC} \cong Q/Q_{\text{ref}} = 3$ abgesehen – nach dem TE-Einsatz auf die negative Halbwelle der Prüfspannung (Bereich B1 in Bild 4.23), um bei $U_p = 14 \text{ kV}$ auch in der positiven Halbwelle einzusetzen (Bereich B2 in Bild 4.23). Schließlich sind bei $U_p = 20 \text{ kV}$ Impulsrate und Ladungsumsatz in der positiven Halbwelle höher als in der negativen. Nur bei $U_p \approx 18 \text{ kV}$ ist die Impulsrate in beiden Halbwellen ausgeglichen, ansonsten überwiegt die Aktivität entweder in der positiven (bei höheren Spannungen) oder in der negativen Halbwelle (bei geringeren Spannungen).

Die geringere Impulsrate bei $U_p = 20 \text{ kV}$ im Vergleich zu $U_p = 18 \text{ kV}$ folgt aus der Verwendung unterschiedlicher Meßbereiche. Bei $U_p = 20 \text{ kV}$ wurde ein weniger empfindlicher Bereich gewählt, wodurch sich das Meßfenster des TE-Meßgerätes zu höheren Werten verschiebt. Dadurch werden die Impulse mit geringerer Impulsladung als die untere Meßfensterbegrenzung ausgeblendet. Daher erscheint die TE-Aktivität geringer, allerdings ist der Ladungsumsatz wegen der höheren Ladungsskalierung um eine Größenordnung höher. Im Vergleich zu Bild 4.10 fällt auf, daß eine Trennung der TE-Aktivität in drei Bereiche bei diesem Prüfling nicht zu beobachten ist. Die Aktivität ist auch auf einen schmaleren Phasenbereich beschränkt.

Zur Deutung der beobachteten Unterschiede in der Ausprägung der TE-Anteile in der positiven und negativen Halbwelle sowie der Variation über der Prüfspannungshöhe sind verschiedene Effekte zu berücksichtigen (s.a. Kap. 2.4 und Bild 2.19):

- Raumladungsphänomene und Oberflächenladungen:

Ladungen an dielektrischen Oberflächen beeinflussen abhängig von Polarität und Spannungshöhe die Ausdehnung und Form von Oberflächenentladungen [Tor61, Ama89, Mura95, WanY98, Gib00, Yeh00, Pet02, Sav02, Koz03, Sak03, Sjö03, Zha03]. Überwiegend werden bei positiver Polarität ausgeprägtere Oberflächenentladungen gefunden als bei negativer, insbesondere bei höheren Feldstärken [Ama89, Mura95, Sama01, Hum02]. Allerdings zeigen neuere Arbeiten zur Ozonerzeugung mit Oberflächenentladungen [Hum02, Sav02], daß die

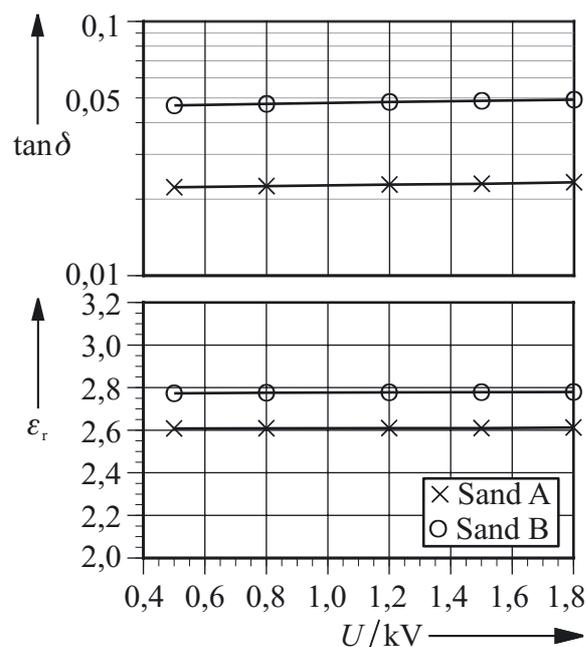


Bild 4.24: Verlustfaktor $\tan \delta$ und Permittivitätszahl ϵ_r für Sande über der Spannung bei 20° C

Entladungskanäle und die übertragene Ladung bei Wechselfspannung in etwa gleich groß sind, da die Initiierung von Entladungen durch zurückgebliebene Oberflächenladungen aus der vorangegangenen Periode begünstigt wird. Für den heterogenen Isolierstoff Sand werden bei Blitzstoßspannungsentladungen und positiver Polarität zwei- bis dreifach längere Entladungskanäle als bei negativer beobachtet [Cab93a-b].

- Einflüsse des Feststoffmaterials:

Durch den Feldstärkeeinfluß und die von den Entladungen herrührende UV-Strahlung werden Feld-, Photo- und Sekundäremission [Hibb76, Vig83, Nie95, Amj00, Schr02] von Elektronen sowie Oberflächen- und Feststoffzustände [Vig83, Blai01] angeregt, teilweise polaritätsabhängig [Amj00]. Die feste Phase kann durch Polarisierungseffekte ebenfalls zur

Spannungs- und Polaritätsabhängigkeit der TE-Aktivität führen. Die Messung der dielektrischen Eigenschaften der verwendeten Sande zeigt aber keinen Spannungseinfluß (Bild 4.24). Daher kann angenommen werden, daß ausschließlich die Feststoffoberfläche eine Rolle spielt. Sand B hat einen höheren $\tan \delta$ als Sand A, was auf Grenzflächenpolarisation zurückgeführt werden kann (s.u.). Die Unterschiede in der Permittivitätszahl ϵ_r sind in der Korngrößenzusammensetzung der Sande (s. Tab 3.1) begründet, die bei Sand A zu einer höheren Porosität und damit zu einem geringeren Volumenanteil an SiO_2 führt.

- Feldabhängige Änderung der Entladungsparameter in der Gasphase:

Durch die Erhöhung der Feldstärke steigen die Energien der geladenen Teilchen und deren Population [Chr90, Rai97, Bec05]. Dies führt zu einer Feldstärkeabhängigkeit des Ionisierungskoeffizienten α (vgl. Kap. 2.4.2). Durch die in Kap. 2.4.4 erläuterten Zusammenhänge ist zudem ein starker Einfluß der Polarität gegeben. So ist die Länge von Streamerentladungen bei positiver Polarität deutlich größer als bei negativer [Sama01]. Neben der Ionisation finden plasmachemische Umwandlungen statt, die zur Bildung von Stickoxiden, Ozon und anderen metastabilen Verbindungen führen [HeuC84, HeuC85, Eli87, Fal97, CheJ02, Rüc02, Holz03, Ono04, Bec05]. Beispielsweise wirkt Ozon durch Elektronenanlagerung stark elektronegativ [Klop82, HeuC85, Rah99] und hat durch seinen Molekulaufbau Dipoleigenschaften [Oya00]. Die Reaktionsgleichgewichte der Ozonerzeugung sind polaritätsabhängig [HeuC84, Mec89, Yeh00, Gib01, Sama01, CheJ03], d.h. in der negativen Halbwelle wird mehr Ozon erzeugt als in der positiven, was eine verstärkte Elektronenabsorption und damit einen geringeren Ladungstransfer in der negativen Halbwelle hervorruft [HeuC85] und somit das Ladungsdefizit im negativen Spannungszyklus (Bild 4.23d) erklärt. [Ebd.] zeigt ebenfalls, daß die Ladungsmenge der Impulse mit steigender Ozonkonzentration abnimmt, was den Abfall der TE-Aktivität über der Zeit erklärt (Bild 4.18).

Eine der Konsequenzen der spannungs- bzw. feldabhängigen Einflüsse ist eine Änderung der Entladungsform. [Pet02] weist auf impulslose Entladungsformen hin, die mit den hier verwendeten TE-Meßgeräten nicht nachgewiesen werden können [Nov00]. Die impulslosen Entladungen treten besonders in der negativen Halbwelle auf und sind abhängig von der Prüfspannungshöhe [Aki02, Pet02]. Daher ist durch das Meßprinzip bedingt ein weiterer Anteil am Ladungsungleichgewicht zwischen positiver und negativer Halbwelle zu vermuten. In [Okaz93, Tep03] wird dargelegt, daß homogene (d.h. impulslose) Entladungen auch bei niedrigen Frequenzen der Speisespannung existieren können, wenn die Außenseite der dielektrischen Barriere eines DBD-Reaktors nicht vollständig, sondern mit einem feinen Maschendraht kontaktiert wird. [Tep03] führt dies auf eine Art resistive Steuerung zurück, die sich durch die unvollständige Kontaktierung ergibt. Es ist anzunehmen, daß die feinen Kanäle zwischen den Sandkörnern eine ähnliche Wirkung haben wie die Maschen des in [Ebd.] verwendeten Drahtgitters.

Den Verlauf der Summenladung Q_s über der Prüfspannung zeigt Bild 4.25. Nach dem TE-Einsatz bei $U_p \approx 10$ kV erhöht sich die Amplitude zunächst langsam, dann exponentiell

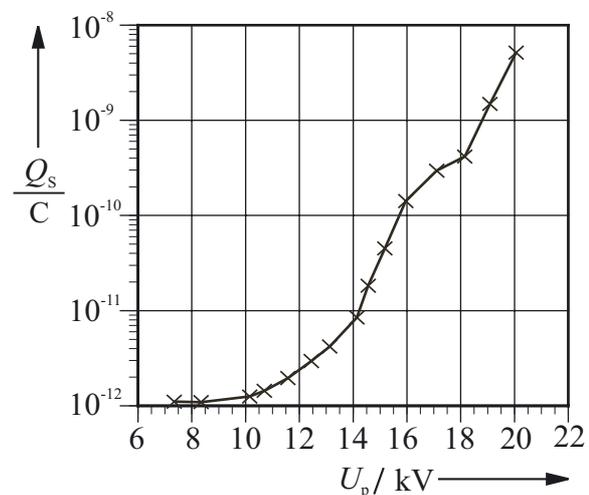


Bild 4.25: Summenladung Q_s über der Prüfspannung ($I_p = 0\text{A}$)

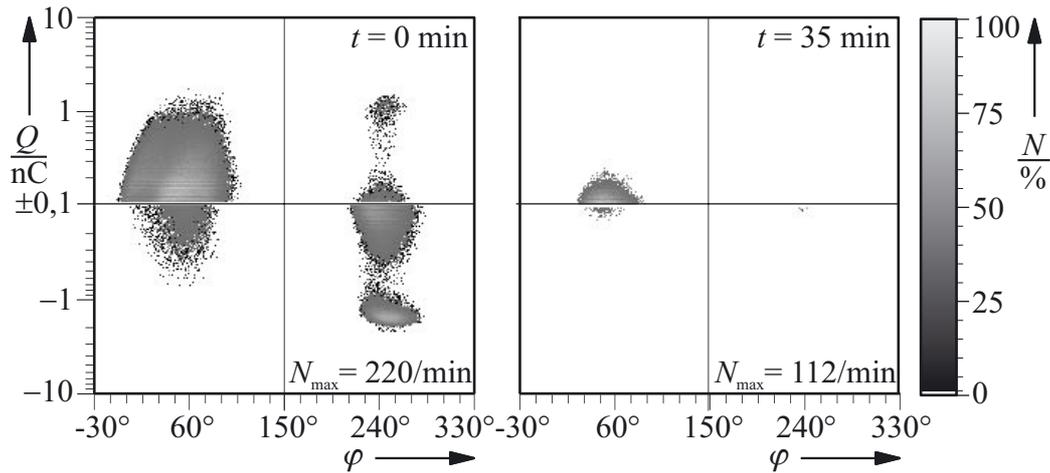


Bild 4.26: Impulsverteilung bei Strombelastung $I_p = 40\text{A}$, bei $t = 0\text{ min}$ und $t = 35\text{ min}$ ($U_p = 20\text{ kV}$)

bis auf einen Maximalwert von 5 nC bei 20 kV . Der Verlauf ist monoton steigend. Wird Q_s als „Koronastrom“ interpretiert, so ist die Kurvenform vergleichbar mit U - I -Kennlinien von Wechselspannungs-DBD-Reaktoren [Gib00, Yeh00, Rüc02].

4.2.3 Absenkung der TE-Aktivität über der Meßzeit

Im Verlauf einer Prüfung nimmt die TE-Aktivität generell ab (Bilder 4.13-4.18, 4.22, 4.26). Dieses Absinken ist um so ausgeprägter, je höher der Strom durch die Sicherung ist. Für eine Belastung mit einem Prüfstrom von $I_p = 40\text{A}$ sind die Verhältnisse in Bild 4.26 wiedergegeben. Während zunächst in beiden Halbwellen der Prüfspannung TE-Aktivität zu verzeichnen ist ($Q_s = 6 \cdot 10^{-4}\text{ C}$), läßt diese im Verlauf der Messung nach ($Q_s = 1,3 \cdot 10^{-5}\text{ C}$). In der negativen Halbwelle ist fast keine Aktivität mehr feststellbar. Dabei sinken nicht nur die Pegel der Impulse, sondern auch deren Anzahl.

Bild 4.27 zeigt die auf den Maximalwert der jeweiligen Meßgröße normierten Zeitverläufe der Summenladung Q_s , der Impulsrate N und der mittleren Impulsladung q_n bei einer Messung mit $I_p = 10\text{ A}$. Den stärksten Abfall zeigt die Summenladung Q_s , den geringsten die Impulsanzahl N . Entsprechend liegt die mittlere Impulsladung q_n dazwischen, da sie aus N und Q abgeleitet wird (Tab. 2.1). Im Vergleich zu Bild 4.22 sind die Absenkungen der TE-

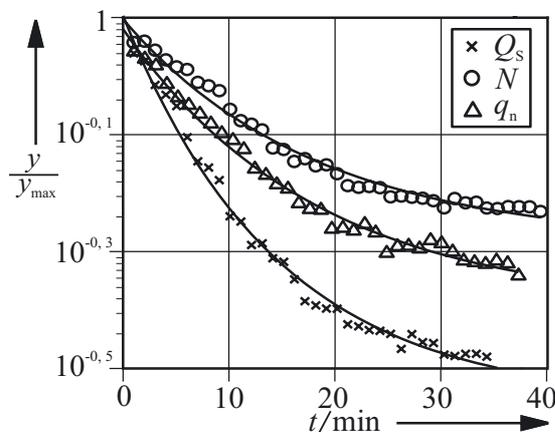


Bild 4.27: Absenkung der auf den Maximalwert normierten TE-Größen über der Prüfzeit ($U_p = 20\text{ kV}$, $I_p = 10\text{ A}$)

Größen mit maximal einer $\frac{1}{2}$ Dekade deutlich geringer, was an dem kleineren eingepprägten Strom liegt.

Nach einer spannungsfreien Ruhephase erholen sich die Prüflinge wieder und die TE-Einsatzspannung sowie der TE-Pegel erreichen ihre Ausgangswerte (Bild 4.28). Während die TE-Einsatzspannung im Schnitt nach 40 min Belastung um $1,2\text{ kV}$ ansteigt, ist nach 24 h Ruhephase kein Einfluß der Belastung auf U_{TE} mehr feststellbar. Die Messung des Zeitverlaufes einer solchen Erholung ist problematisch, da das Anlegen einer Prüfspannung zur Bestimmung der TE-Einsatzspannung Streß verursacht, der zu einer weiteren Ver-

minderung der TE-Aktivität führt bzw. die Erholungsphase stark verlangsamt. Die in Bild 4.28 erkennbare Streuung zwischen den Prüflingen resultiert aus der individuellen Anordnung der Sandkörner im Löschmittel, wie später gezeigt wird (s. Kap. 4.2.6).

Das Absinken der TE-Aktivität ist von mehreren Faktoren abhängig. Neben plasmachemischen Erklärungsansätzen sind Überlegungen zur Wirkung der dielektrischen Barriere, die das Porzellanrohr darstellt, und von Materialeinflüssen des Löschmittels wie Polarisation und Aufladung der Grenzflächen an den Sandkörnern zu beachten. Diese Einflüsse werden im folgenden erläutert.

4.2.3.1 Plasmachemische Einflüsse

Durch die Entladungen finden diverse Prozesse in der Gasphase statt [Rai97], die – wie schon in 4.2.2 erläutert – zu metastabilen Verbindungen wie Ozon führen, das elektronegativ wirkt. Ein ähnlicher Absenkungseffekt ist in DBD-Reaktoren zu beobachten [HeuC85, Rah99] und wird dort als „Selbstvergiftung“ (engl. *discharge poisoning*) bezeichnet. Die Vermutung, daß Ozon eine wichtige Rolle spielt, folgt aus der Tatsache, daß die meisten metastabilen Verbindungen nur sehr kurze Lebenszeiten haben [Eli87, Brau91, Rai97, Bec05], die weit unterhalb der in Bild 4.27 zu erkennenden Zeitkonstanten ($\tau \sim 15$ min) liegen.

Die Absenkung der TE-Aktivität kann auch bei Messungen an der Modellanordnung (s. Kap. 3.5) beobachtet werden, wie in Bild 4.29 dargestellt ist. Die Spannungsabhängigkeit der TE-Aktivität ist aber nicht so ausgeprägt wie bei den Sicherungen. Dieses Verhalten resultiert aus den unterschiedlichen Versuchsaufbauten. Während die Sicherung hermetisch gekapselt ist, so daß kein Gasaustausch mit der Umgebung möglich ist, ist bei der Modellanordnung ein größeres Gasvolumen vorhanden, in das gasförmige Entladungsprodukte diffundieren können. Deshalb sind der Spannungsdurchgriff und die zeitliche Absenkung der TE-Aktivität geringer, da die Absenkung maßgeblich durch Veränderungen im Gas induziert wird und nicht durch die Feststoffphase.

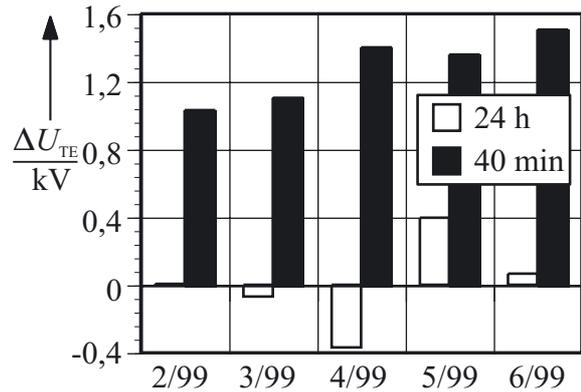


Bild 4.28: Änderung von U_{TE} nach einer Ruhephase von 24 h und nach 40 min Belastung an verschiedenen Prüflingen ($U_p = 20$ kV, $I_p = 0$ A)

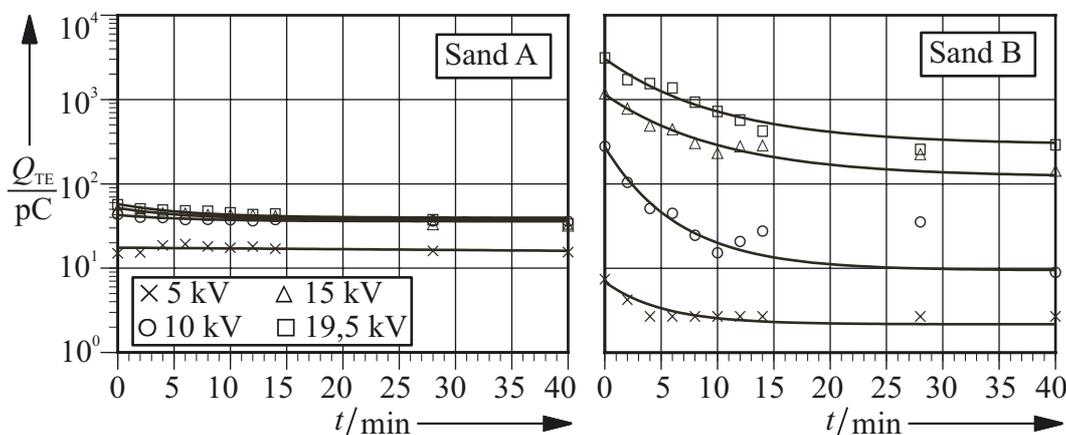


Bild 4.29: Scheinbare Ladung Q_{TE} über der Prüfzeit t an der Modellanordnung bei unterschiedlichen Prüfspannungen und Sanden

Zudem ist in Bild 4.29 eine Abhängigkeit der Absenkung von der Sandart zu erkennen. Sand A zeigt ein nur sehr schwaches Absinken über der Belastungsdauer und einen geringen Spannungseinfluß. Die Unterschiede ergeben sich aus den Verunreinigungen, die in den Sanden enthalten sind. Während Sand B relativ rein ist ($> 99,8\%_{\text{Gew}} \text{SiO}_2$), enthält Sand A höhere Konzentrationen von Fe_3O_2 , Al_2O_3 und Mangan (s. Tab. 3.1), die als ozonerstörend gelten [Oya00, Jod03, Ein04]. Durch die katalytischen Eigenschaften der Verunreinigungen wird Ozon abgebaut und die Absenkung geringer. [Schm96] findet in mit Quarzsand gefüllten DBD-Reaktoren besonders hohe O_3 -Konzentrationen und führt dies auf eine katalytische Reaktion an der SiO_2 -Oberfläche zurück. [Jod03] vermutet hingegen eine Verhinderung der O_3 - und N_2O -Zersetzung.

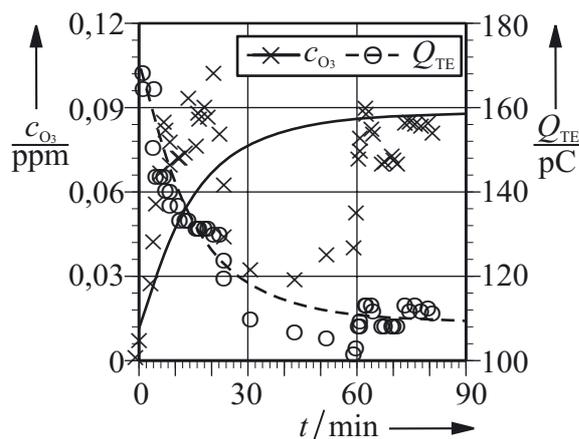


Bild 4.30: Ozonkonzentration und scheinbare Ladung während einer Belastung mit $U_p = 10 \text{ kV}$ im Sand B an der Modellanordnung

Tatsächlich wird in der Entladung Ozon erzeugt, wie Messungen mit einer Hohnadel an der Ersatzanordnung zeigen (Bild 4.30). Die Ozonkonzentration c_{O_3} steigt nach dem Anlegen der Spannung im gleichen Maße wie die scheinbare Ladung Q_{TE} absinkt. Die Ozonmessung ist jedoch mit Fehlern behaftet, da sie mangels geeigneter Meßgeräte mit Ozonmeßröhrchen durchgeführt werden mußte, die aufgrund der Abhängigkeit des Anzeigewertes von Durchflußmenge und Einwirkzeit relativ ungenau sind und zudem eine Querempfindlichkeit gegenüber Stickoxiden haben, die ebenfalls in elektrischen Entladungen produziert werden. Stickoxide führen aber zu einer Verfärbung der Meßröhrchen [Lei73], die hier nicht beobachtet

wurde. Ferner führt die Absaugung des Gases zu einer direkten Beeinflussung des Entladungsmechanismus, da das elektronegativ wirkende Ozon dem Entladungsraum entzogen wird.

4.2.3.2 Einflüsse der Barriere

Eine weitere Möglichkeit, den beobachteten Effekt der Absenkung zu erklären, ist das Vorhandensein der durch das Porzellanrohr gebildeten Barriere. Diese blockiert den Austausch von geladenen Partikeln mit der Außenelektrode, führt damit zu einer Aufladung an der Grenzschicht und trägt zu einer Absenkung der TE-Aktivität durch das von den Ladungen induzierte Gegenfeld bei [Sjö03]. Daher wurden an der Modellanordnung Messungen ohne Barriere durchgeführt. Es konnte jedoch kein signifikanter Einfluß festgestellt werden. Auch bei den Messungen an Sicherungen wurden keine Aufladungserscheinungen beobachtet, die sich angesichts einer über der Meßzeit aus der Ladungsbilanz Q_S akkumulierten Ladungsmenge von 10 mC zwingend hätte ergeben müssen. Immerhin würde diese Ladungsmenge auf der Porzellanrohroberfläche rein rechnerisch ein Feld von $E = Q/(2\pi\epsilon l r) = 0,01 \text{ C}/(2\pi\epsilon_0 \cdot 2,6 \cdot 0,47 \text{ m} \cdot 2,7 \text{ mm}) = 5.448.094 \text{ kV/m}$ induzieren (Zylinderkondensator [Wolf68]). Zudem bedingt eine Aufladung mit einer bestimmten Polarität bei Messungen mit Wechselspannung zwar ein Absinken der TE-Aktivität in der Halbwelle der selben Polarität, führt in der anderen Halbwelle aber zu einem Ansteigen, da dort das Feld dann erhöht wird. Die

beobachtete Absenkung der TE-Aktivität ist daher nicht, oder nur in geringem Maße, auf eine Aufladung der Barriere (Porzellanrohr) zurückzuführen.

4.2.3.3 Materialeinflüsse

Schließlich können Polarisationseffekte die Ursache der Absenkung sein (vgl. Kap. 2.3.2.2). Durch die Polarisation der Feststoffphase kann ein dem äußeren Feld entgegenwirkendes Polarisationsfeld induziert werden, das die TE-Aktivität vermindert. Um dies zu überprüfen, wurde eine Sicherung 40 min im TE-Meßstand beansprucht und anschließend die Relaxation mit der in [Reu03] angegebenen Apparatur gemessen. Das Resultat ist in Bild 4.31 wiedergegeben.

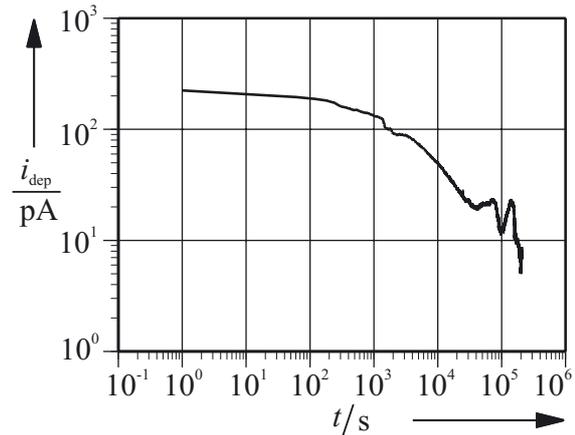


Bild 4.31: Depolarisationsstrom i_{dep} nach einer 40-min-Belastung mit $U_p = 20$ kV ($I_p = 0$ A)

Der Depolarisationsstrom sinkt im Verlauf von drei Tagen von 250 pA auf unter 10 pA. Die Ausschläge am Ende der Messung sind auf den Temperaturgang der Meßeinrichtung zurückzuführen, die den Tagesgang der Raumtemperatur widerspiegelt. Der Verlauf der idealisierten Kurve entspricht einer dielektrischen Debye- bzw. einer dipolaren Antwort [Jons92, Ani93]. Reiner Quarz zeigt hingegen einen zunächst stärker abfallenden, dann flacheren Verlauf [Cal87]. [Ani93] begründet den dipolaren Charakter der Relaxation mit der Entstehung von „giant dipoles“ durch die Aufladung der dem elektrischen Feld zugewandten Stirnflächen von Sandkörnern (s. Bild 4.2). Aufgrund der hohen Anzahl von Grenzflächen im Löschmittel ist davon auszugehen, daß die Polarisationserscheinungen zum überwiegenden Teil auf Grenzflächenpolarisation zurückzuführen sind, was die hohe Zeitkonstante des Verlaufs erklärt [Zae03]. Gleichzeitig zeigt die Messung, daß die Absenkung nicht auf die Aufladung der Porzellan-Sand-Grenzschicht zurückzuführen ist, da die Integration des Depolarisationsstroms über der Zeit nur eine Ladung von $Q_{dep} = \int i_{dep} \cdot dt = 4,3 \mu\text{C}$ ergibt, die wesentlich kleiner ist, als die im vorherigen Kapitel angegebene.

Die Grenzflächenpolarisation im Sand zeigt sich auch in den Verläufen des dielektrischen Verlustfaktors $\tan \delta$ (Bild 4.32). Dieser weist für Sand B bei 50° C ein Maximum auf, das auf Grenzflächenpolarisation schließen läßt [Bey86]. Die Werte der Permittivitätszahl ϵ_r zeigen ebenfalls den aus der Literatur bekannten Anstieg zu höheren Temperaturen. Die Unterschiede zwischen den Sanden ergeben sich wieder aus dem höheren Gehalt an Verunreinigungen bei Sand A, was bei diesem zu einer „Verschmierung“ der Polarisationsmaxima und deren Verschiebung zu tieferen Temperaturen führt.

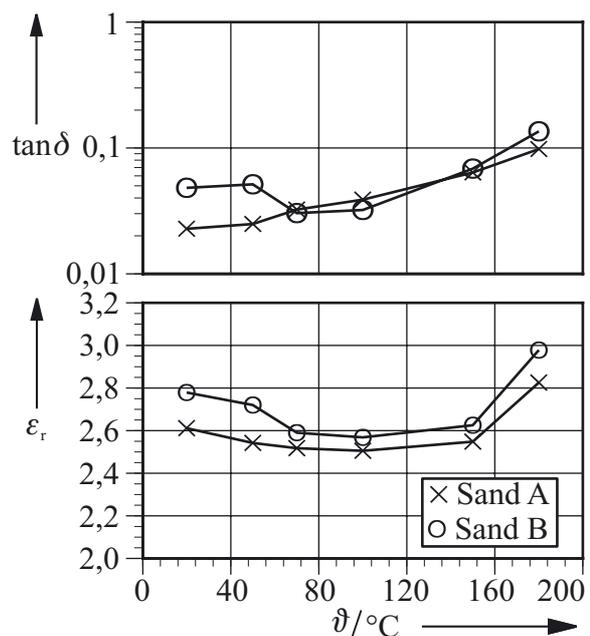


Bild 4.32: Verlustfaktor $\tan \delta$ und Permittivitätszahl ϵ_r für Sande über der Temperatur bei 1,2 kV

4.2.4 Einfluß der Stromstärke

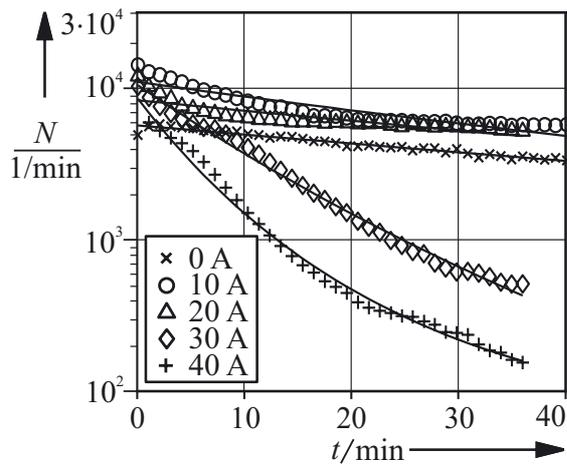


Bild 4.33: Impulsrate N über der Zeit bei unterschiedlichen Strömen ($U_p = 20$ kV)

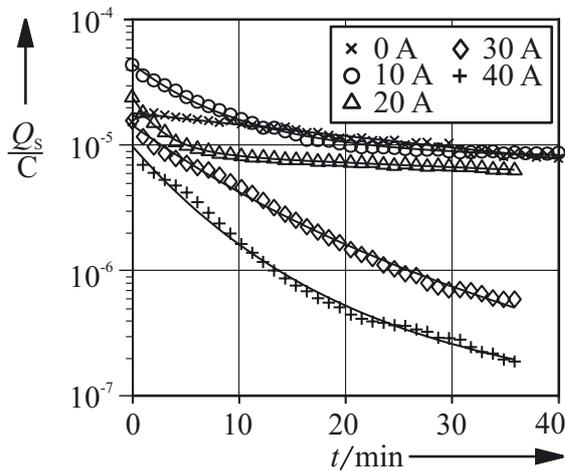


Bild 4.34: Summenladung Q_s über der Zeit bei unterschiedlichen Strömen ($U_p = 20$ kV)

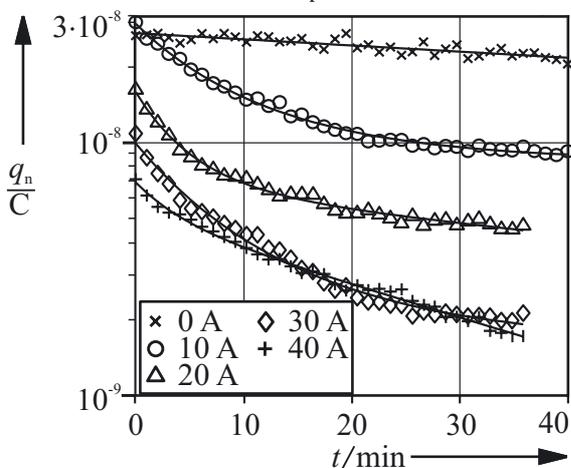


Bild 4.35: Mittlere Impulsladung q_n über der Zeit bei unterschiedlichen Strömen ($U_p = 20$ kV)

Die Bilder 4.33-4.35 zeigen die Anzahl, Ladung und mittlere Ladung der TE-Impulse bei unterschiedlichen Stromstärken über der Prüfzeit. Im Gegensatz zu Bild 4.27 sind hier die absoluten Werte angegeben. Da eine Normierung bei logarithmischer Skalierung eine Parallelverschiebung bedeutet, ergibt sich qualitativ ein ähnlicher Verlauf wie dort.

Die Zeitreihen der Impulsrate (Bild 4.33) und der Ladung (Bild 4.34) starten jeweils bei nahezu gleichen Anfangswerten. Tendenziell ist jedoch eine Abschwächung mit zunehmender Stromstärke zu erkennen. Im Zeitverlauf führt eine Stromerhöhung zu einem schnelleren und stärkeren Abfall der Meßgrößen. Dies wird besonders deutlich, wenn man sich die Größen normiert auf den Maximalwert vorstellt (ähnlich Bilder 4.22 und 4.27), was einer Parallelverschiebung in einen gemeinsamen Ausgangspunkt auf der y-Achse entspricht. Je nach Stromstärke beträgt der Abfall über der Zeit etwa zwei Dekaden.

Die mittlere Ladung pro Impuls (Bild 4.35) zeigt ebenfalls einen Einfluß der Stromstärke auf die Anfangswerte. Die Streuung über dem Parameter Stromstärke beträgt etwa eine halbe Dekade, wie auch bei den anderen Meßgrößen. Die exponentielle Absenkung ist mit ca. $\frac{1}{2}$ Dekade deutlich schwächer als bei N und Q_s .

Eine Variation der Stromstärke hat mehrere Einflüsse auf das Entladungsverhalten der Sicherungen. Durch die Belastung mit Strom erwärmen sich die Schmelzleiter um mehrere 100 K [Wei71, Asp94]. Diese Erwärmung beeinflusst den Gasdruck innerhalb der Sicherung ($p \sim T$), weshalb sich die Durchschlagspannung des Gases erhöht (s. Kap. 2.4, [Bey86]). Zudem verändern sich die Reaktionsgleichgewichte der plasmachemischen Reaktionen [Brau91, Kos92, Klein95, CheJ02, Bec05]. Auch die Sekundäremissionskoeffizienten γ der Schmelzleiter [CheJ02] und des Sandes [Hibb76, Schr02] werden größer, wodurch mehr Ladungsträger

zur Verfügung gestellt werden. Darüber hinaus nehmen die Rekombinationsverluste an den Kornoberflächen zu [Deu95]. Diese Effekte führen zu einer höheren Leitfähigkeit in der Gasphase und so zu einer Verminderung der Feldstärke.

Die Temperaturerhöhung durch Stromwärme hat einen großen Einfluß auf die Leitfähigkeit des Sandes [Alb66]. Die Leitfähigkeit der Feststoffphase des Sandes (SiO_2) steigt stark [Mün85] und durch die thermische Ausdehnung der Sandkörner steigt der Druck der Korngrenzen aufeinander, wodurch die Kontaktwiderstände zwischen den Körnern herabgesetzt werden [Zinc98].

Den Gleichstromwiderstand der hier verwendeten Sande zeigt Bild 4.36. Ab ca. 100 °C steigt die Leitfähigkeit nahezu exponentiell mit ca. einer Dekade pro 100 K an. Durch die erhöhte Leitfähigkeit verringert sich die Wahrscheinlichkeit von Ladungsansammlungen innerhalb des Sandes, die zu TE führen können, und die TE-Aktivität nimmt ab.

Die Erhöhung der Leitfähigkeit des Sandes ist auch am Einsatzwinkel φ_{inc} der TE zu erkennen (Bild 4.37). Der Einsatz liegt in der positiven Halbwelle zunächst bei ca. -10° , also vor dem Nulldurchgang, was auf Ladungsansammlungen hindeutet. Im Verlauf der Messung steigt der Winkel stromabhängig an und erreicht seinen Maximalwert bei $\varphi_{\text{inc}+} \approx 25^\circ$. Der Anstieg erfolgt um so schneller, je höher der Prüfstrom ist. In der negativen Halbwelle bleibt der Einsatzwinkel über dem Strom hingegen weitgehend konstant bei $\varphi_{\text{inc}-} \approx 20^\circ$ und steigt im Verlauf der Messung nur schwach. Gegen Ende der Messung sind die Werte bei hohen Strömen in der negativen Halbwelle instabil, da kaum noch TE-Ereignisse auftreten. Das Ansteigen des Einsatzwinkels in der positiven Halbwelle ist mit der Verminderung von Oberflächenladungen zu erklären. Diese werden bei höheren Temperaturen durch die höhere Leitfähigkeit des Sandes schneller eliminiert, so daß die TE später initiiert werden, wodurch der Einsatzwinkel ansteigt. Ab etwa 20° steigt der Winkel kaum mehr an, da dann Hohlrumentladungen signifikant werden.

Die Modellanordnung zeigt einen anderen Temperatureinfluß (Bild 4.38). Die Absenkung der TE-Aktivität über der Prüfzeit ist umgekehrt proportional zur Temperatur, d.h. bei höheren Temperaturen ist sie schwächer. Dies ist aus plasmachemischer Sicht erklärbar, da bei

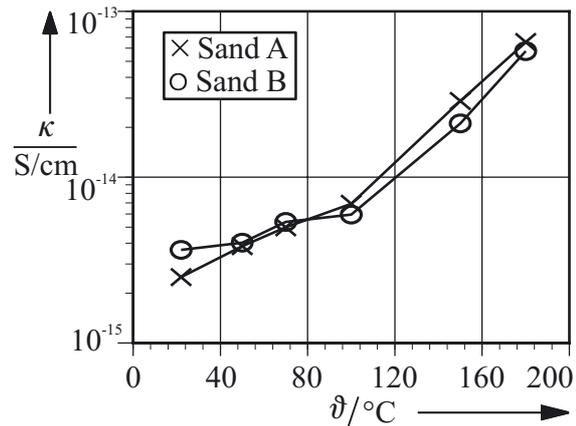


Bild 4.36: Gleichstromleitfähigkeit κ der Sande A und B über der Temperatur

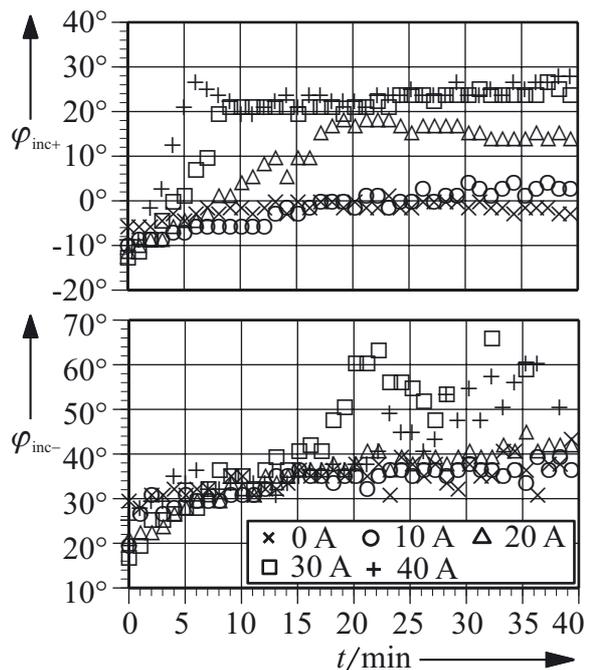


Bild 4.37: TE-Einsatzwinkel φ_{inc} bei verschiedenen Stromstärken, getrennt nach positiver und negativer Halbwelle ($U_p = 20 \text{ kV}$)

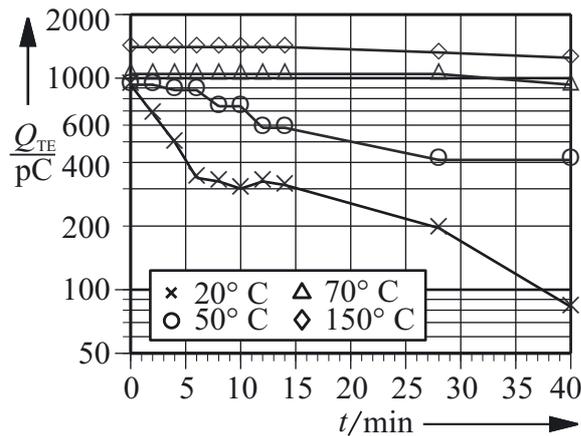


Bild 4.38: Q_{TE} an der Modellanordnung bei verschiedenen Temperaturen ($U_p = 19,5$ kV, Sand B)

zeitig als Elektroden wirken, sind Vorgänge wie Elektronenemission und verstärkte Sekundäremission möglich, die zu einer Überflutung des inhomogenen Dielektrikums Sand mit negativen Ladungsträgern führen. Dies erklärt die starke Abnahme der TE-Aktivität in der negativen Halbwelle, da die erhöhte Leitfähigkeit des Sandes und die zusätzlichen Ladungsträger zu einer virtuellen Vergrößerung des Schmelzleiterradius führen. Anders als in der Modellanordnung, in der das gesamte Prüfgefäß inklusive des Gasraums und der Nadelelektrode beheizt wurde, können sich in der Sicherung Temperaturgradienten ausbilden, die zu einer weiteren Inhomogenisierung der elektrischen und physico-chemischen Verhältnisse führen. [Wei71] weist eine Temperaturerhöhung um mehrere 100 K nach, die zudem durch die Formgebung der Schmelzleiter inhomogen an der Schmelzleiterachse verteilt ist. Daher gibt es in der Sicherung einen Bereich nahe der Schmelzleiter, der elektrisch und thermisch stark beansprucht wird und elektrostatisch als sehr leitfähig angesehen werden kann. Die Größe des Bereichs ist von der Temperatur und somit von der Stromstärke abhängig. Aus diesem Grund sinkt die TE-Aktivität in der Sicherung bei zunehmendem Strom (vgl. Bilder 4.34 und 4.38). Da der thermisch beanspruchte Bereich in der Sicherung kleiner ist, kann sich im weniger beanspruchten Bereich Ozon ansammeln, das zur beobachteten Absenkung der TE-Aktivität führt und nicht, wie bei der Modellanordnung, zu einer Erhöhung.

Eine weitere Quelle einer Stromabhängigkeit ist das durch den Stromfluß verursachte magnetische Feld [Rad06]. Dort wird ein Absinken der Durchschlagspannung mit steigendem Magnetfeld beobachtet. Tatsächlich werden die hierzu erforderlichen Feldstärken direkt am Schmelzleiter erreicht ($B = \mu \cdot H \approx \mu \cdot I_{SL} / 2\pi \cdot R_{SL} = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am} \cdot 40\text{A} / 2\pi \cdot 1\text{mm} = 80 \text{ mT}$), aber die Wirkung müßte schlagartig einsetzen, nicht verzögert wie in Bild 4.37 ersichtlich und würde wegen der Absenkung der Durchschlagspannung zu einem stromabhängigen Anstieg der TE-Aktivität oder Abfall der TE-Einsetzspannung führen. Der hier beobachtete Anstieg der TE-Einsetzspannung ergibt sich aus dem kurzen Zeitraum, der versuchsbedingt zwischen Spannungs- und Stromeinprägung liegt. Der Effekt ist zudem auf das Gebiet des Nahdurchschlages (s. Kap. 2.4.1) beschränkt, das hier wegen der stochastischen Anordnung der Sandkörner nie erreicht werden kann. Es ist daher anzunehmen, daß der Rückgang der TE-Aktivität eher auf den oben beschriebenen thermischen Effekten beruht als auf magnetischen.

höheren Temperaturen die Produktion von Ozon gehemmt und ozonzerstörende Mechanismen verstärkt werden [Hirt80, Brau91, Schm96, Rah99, Oya00, Hum02, Tam02, Holz03]. Dieses unterschiedliche Verhalten im Vergleich zur Sicherung liegt in den Versuchsaufbauten begründet. Wie bereits erwähnt, ist in der Modellanordnung auch ein viel größeres Gasvolumen vorhanden, in das Entladungsprodukte diffundieren können.

Der Vergleich zwischen Sicherung und Modellanordnung weist auf zusätzliche Mechanismen hin, die nur in der Sicherung wirksam sind. Durch die direkte Beheizung der Schmelzleiter, die in der Sicherung gleich-

4.2.5 Einfluß der Gasphase

4.2.5.1 Einfluß einer Durchströmung

Bild 4.39 zeigt die Ergebnisse eines Durchströmungsversuchs mit Luft ($\dot{V} = 150 \text{ ml/min}$) an einer 6/12-kV-Sicherung bei 10 kV. Zunächst wurde die Sicherung ohne Durchströmung betrieben, zum Zeitpunkt $t = 7 \text{ min}$ wurde die Pumpe eingeschaltet, bei $t = 24 \text{ min}$ abgeschaltet. Sofort nach dem Einschalten der Pumpe steigt die TE-Aktivität. Während sich Q_s und q_n nach ein paar Minuten stabilisieren, steigt die Ladungsanzahl N langsam weiter. Nach dem Abschalten der Pumpe erreichen die Werte in etwa wieder den Ausgangszustand. Offenbar ist für das Absinken der TE-Aktivität ein ruhendes Gasvolumen erforderlich. Dies deckt sich mit Untersuchungen an DBD-Reaktoren [Yeh00, CheJ02], in denen ein Ansteigen der Entladungsenergie oder -stärke mit zunehmender Durchströmungsgeschwindigkeit des Prozeßgases beobachtet wird. Insbesondere scheint die Bildung von Ozon eine Rolle zu spielen. Während bei ruhendem Gas das Ozon seine TE-mindernde Wirkung (s. Erläuterungen in Abschnitt 4.2.2) entfalten kann und sich mit der Zeit ein Gleichgewichtszustand einstellt, wird das Ozon der Sicherung bei Durchströmung entzogen und entsprechend steigt die TE-Aktivität.

Im Normalfall sind die Sicherungen hermetisch versiegelt, und es findet keine Durchströmung oder Gasaustausch mit der Umgebung statt. Dies ist einer der Hauptunterschiede im Vergleich zu DBD-Reaktoren, die zur Zuführung von Prozeßgasen und zur Gewinnung der Reaktionsprodukte immer durchströmt werden [CheJ02, Kog03].

4.2.5.2 Einfluß der Gasart

Wird anstelle von Luft reiner Stickstoff verwendet, steigt bei ruhendem Gas die mittlere Ladung pro Impuls um ca. eine Dekade (Bild 4.40). Auch die Impulsrate N verdoppelt sich und hat im Gegensatz zu Luft eine über der Zeit ansteigende Charakteristik. Die Summen-

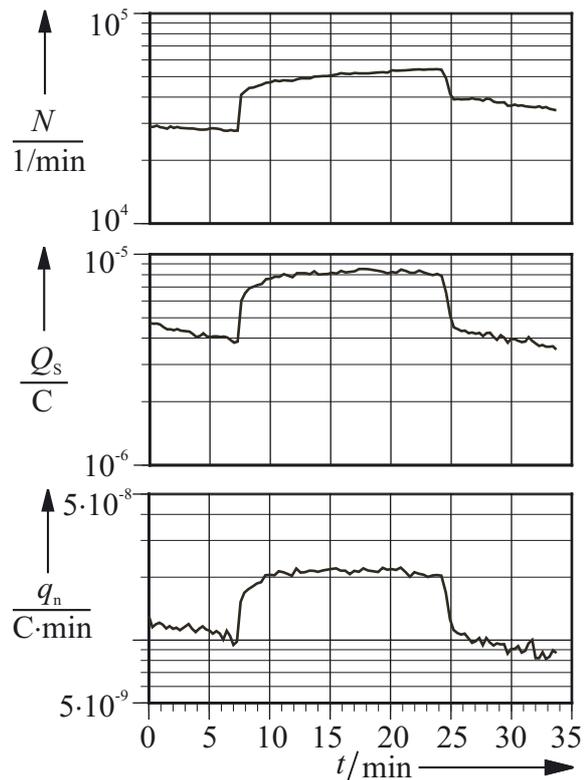


Bild 4.39: Einfluß der Gasströmung auf N , Q_s und q_n . Pumpe ein: $t = 7 \text{ min}$, aus: $t = 24 \text{ min}$ ($U_p = 10 \text{ kV}$, 6/12-kV-Prüfling)

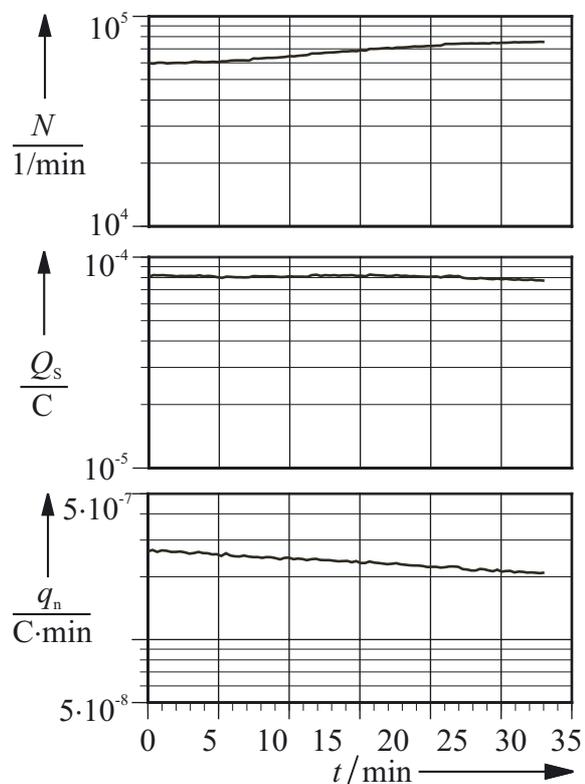


Bild 4.40: N , Q_s und q_n nach Durchströmung mit reinem Stickstoff ($U_p = 10 \text{ kV}$, 6/12-kV-Prüfling)

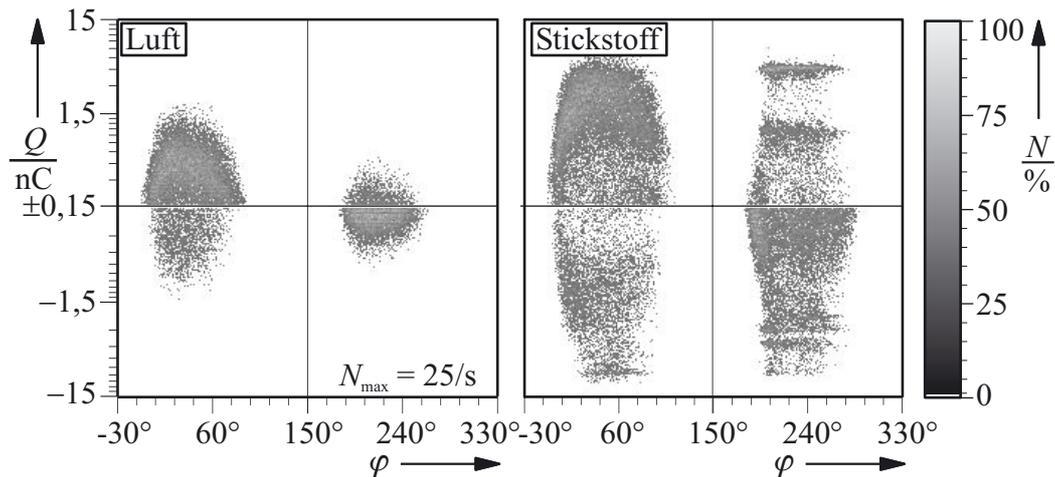


Bild 4.41: Vergleich der Impulsverteilungen bei Füllung der Sicherung mit Luft bzw. Stickstoff nach 5 min ($U_p = 15$ kV, 6/12-kV-Prüfling)

ladung Q_s ist um den Faktor 17 höher als bei ruhender Luft und bleibt im Verlauf der Messung konstant. Durch das Ansteigen der Impulsanzahl bei konstanter Ladung muß die mittlere Impulsladung absinken, wie auch in Bild 4.40 dargestellt und liegt um ca. eine Dekade höher, als in Luft. Nach einer Spülung mit Luft gehen die TE-Größen wieder auf die Werte von Bild 4.39 zurück.

Ein Vergleich der Impulsverteilungen von Luft und Stickstoff (Bild 4.41) zeigt ebenfalls markante Unterschiede. Während bei Luft geringere Ladungspegel und ein homogenes, abgerundetes Muster sichtbar sind, ist die Verteilung bei Stickstoff trapezförmiger, weniger homogen und zu höheren Ladungspegeln hin verschoben. Zudem ist eine höhere Aktivität in den Sektoren mit negativer TE-Energiebilanz (Sektoren X2 und X3, vgl. Tab. 2.2) zu verzeichnen, die zweierlei Ursachen hat. Einerseits ist die Impulslänge in Stickstoff höher [HeuC85], so daß die Totzeit des TE-Meßsystem nicht mehr optimal angepaßt war und Polaritätsfehler durch Fehltriggerung auftraten [Boz95], andererseits nimmt die Anzahl der Rückzündungen (engl. *back corona*) zu [Sjö03].

Die Verhältnisse der Größen Q_s und N in den Sektoren mit negativer TE-Energie zu denen mit positiver sind im Vergleich zu Bild 4.10 um den Faktor 10 erhöht ($Q_{s,x3}/Q_{s,x1} = 10,4 \cdot 10^{-7}/6,95 \cdot 10^{-6} = 0,14$, $Q_{s,x2}/Q_{s,x4} = 5,5 \cdot 10^{-7}/2,81 \cdot 10^{-6} = 0,19$, $N_{s,x3}/N_{s,x1} = 2753/16070 = 0,17$, $N_{s,x2}/N_{s,x4} = 2656/12300 = 0,21$).

Die insgesamt höhere TE-Aktivität von Stickstoff ist mit der niedrigeren minimalen Durchschlagspannung von Stickstoff im Vergleich zu Luft (240 V gegenüber 352 V [Bey86]) erklärbar, wodurch die Hohlräume entsprechend öfter zünden, was eine größere Impulsrate zur Folge hat. Wegen der fehlenden Elektronegativität des Stickstoffs sind auch die Ladungsverteilungen der positiven und negativen Halbwellen weniger unterschiedlich. Während in Luft die bekannte Verteilung mit überwiegender TE-Aktivität in der positiven Halbwelle erkennbar ist, sind bei Stickstoff beide Phasen nahezu gleichberechtigt.

Das Ausbleiben des Absinkens der TE-Aktivität über der Meßzeit bei Verwendung von Stickstoff ist offenbar charakteristisch. Eine Ursache hierfür ist, daß Stickstoff im Gegensatz zu Sauerstoff nicht elektrophil ist [HeuC85, Fal97]. Aus der Plasmachemie ist darüber hinaus bekannt, daß Entladungen in reinem Stickstoff homogen brennen und nicht filamentieren [Wag00]. Durch die vorgegebenen Hohlräume im Sand sind die Entladungen jedoch zwangsläufig filamentiert, was die vermehrte Anzahl und höhere Ladung der Impulse erklärt.

Der Vergleich des TE-Verhaltens zwischen Stick- und Sauerstoff unterstreicht die These, daß das beobachtete Absinken der TE-Aktivität, aber auch die Höhe der Summenladung mit der Elektronegativität des Sauerstoffs und seiner Entladungsprodukte zusammenhängt.

4.2.5.3 Einfluß des Gasdrucks

Entsprechend den Grundlagen des Gasdurchschlags (Kap. 2.4) ist es nicht verwunderlich, wenn das TE-Verhalten vom Gasdruck abhängt. Bild 4.42 zeigt die in der Modellanordnung gemessene Durchschlagsspannung sowie die Kurven konstanter TE-Aktivität in Abhängigkeit des Gasdrucks (z.B. $U_{1000\text{pC}}$ = Prüfspannung für einen TE-Pegel von 1000 pC). Die Messungen wurden mit dem analogen Meßsystem durchgeführt. Während die Durchschlagsspannung eindeutig im Bereich des Weitdurchschlags (rechts vom Paschenminimum) liegt, weist die TE-Einsatzspannung ein Minimum im Bereich von 70-80 mbar auf. Dieses erklärt sich aus der Schlagweite des Porenrest-Volumens (vgl. Kap. 2.3.1.1), die für den hier betrachteten Fall (Sand A) und Annahme einer monodispersen Korngrößenverteilung bei ca. 99,4 µm liegt. Für das gemessene Paschenminimum folgt ein Druck-Schlagweite-Produkt von $p \cdot s = 89,5$ mm·mbar, das gut mit Literaturwerten für das Paschenminimum ($p \cdot s = 80$ mm·mbar) übereinstimmt [Bey86]. Das Paschenminimum verschiebt sich für höhere TE-Pegel nach links, da die Entladungskanäle eine größere Länge haben, was eine größere Schlagweite impliziert. Die Durchschlagsspannung liegt erheblich (ca. eine Dekade) unter derjenigen des Durchschlags im homogenen Feld, jedoch höher als es für reine Nadel-Platte-Anordnungen der Fall wäre.

Bild 4.43 zeigt die Druckabhängigkeit der Absenkung der TE-Aktivität nach einer Anfangsbelastung von 1000 pC. Prinzipiell steigt die Absenkung für beide Sande mit dem Druck. Dies ist eine Folge der mit steigendem Druck zunehmenden Gasdichte, die zu einer verstärkten Ozonbildung führt. Das Ausbleiben der Absenkung in Sand A bei niedrigen Drücken liegt an dem höheren Anteil von katalytischen Verunreinigungen im Sand, die eine Ozonbildung verhindern.

4.2.6 Einfluß der Einbaulage

Bild 4.44 zeigt, daß die TE-Aktivität zusätzlich von der Einbaulage der Sicherung abhängig ist. Dabei ist mit „oben“ bzw. „unten“ die Position des Kennmelders (s. Bild 2.1) gemeint, mit dem die Sicherungen ausgestattet waren. Die Sicherungen waren in beiden Fällen vertikal

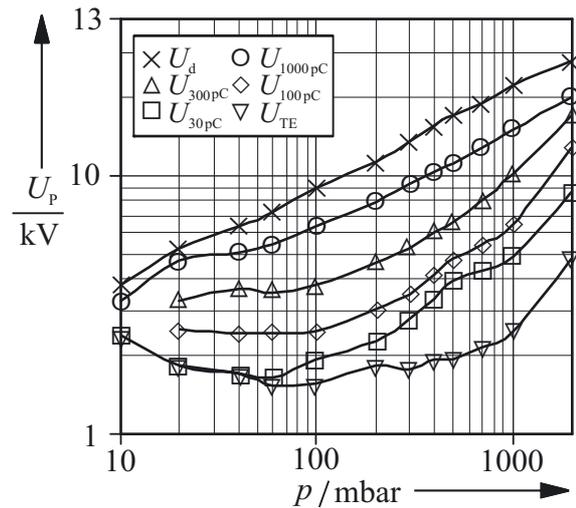


Bild 4.42: Erforderliche Prüfspannung U_p für konstante TE-Pegel oder Durchschlag über dem Druck

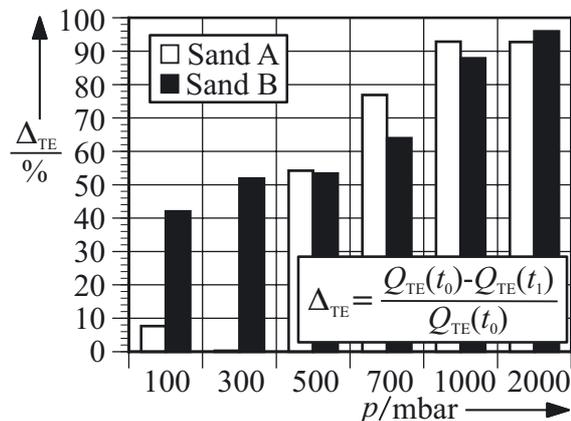


Bild 4.43: Absenkung des TE-Pegels Δ_{TE} von $Q_{TE} = 1000$ pC in Abhängigkeit vom Druck ($t_0 = 0$ min, $t_1 = 40$ min)

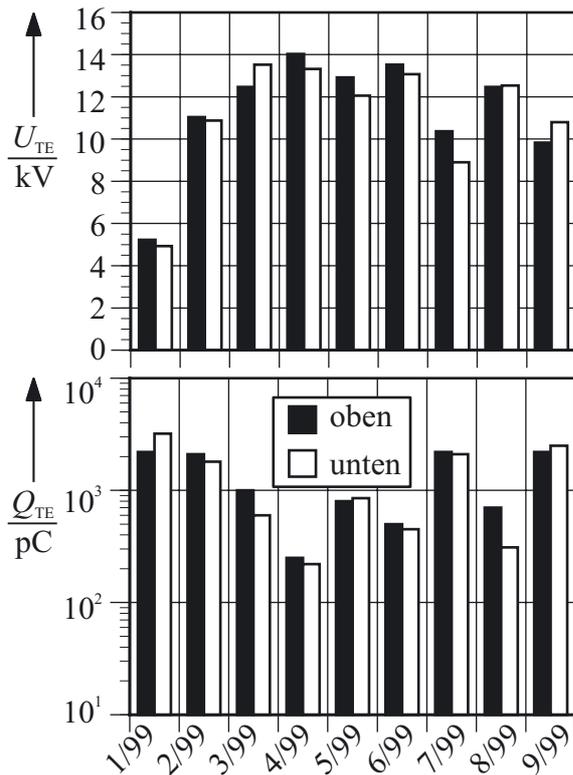


Bild 4.44: TE-Einsatzspannung U_{TE} und Ladungspegel Q_{TE} an verschiedenen Prüflingen in Abhängigkeit von der Einbaulage ($I_p = 0$ A)

der TE-Aktivität führen. Diese Unterschiede im Gefüge führen zu einer schlechten Reproduzierbarkeit der Messungen (s.a. Bild 4.28) und zu einer hohen Streuung in den Ergebnissen, wie bereits in 4.2.1.4 angedeutet. Ein anderer Einflußfaktor auf die hohe Streuung der Werte ist die Bewicklung der Schmelzleiter, die von Prüfling zu Prüfling leicht variieren kann. Die Lage der Schmelzleiterwickel und der Engstellen ist bei den hier verwendeten Sicherungen nicht eindeutig vorgegeben und durch Variation des Bewicklungszuges beim Aufbringen der

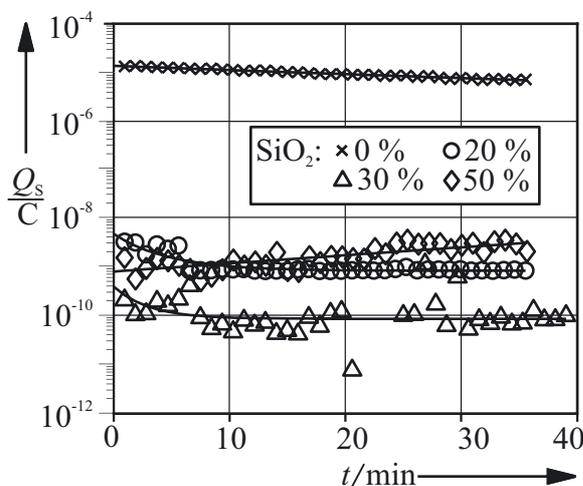


Bild 4.45: Summenladung Q_S bei Zuschlag von W12 ($U_p = 20$ kV, $I_p = 0$ A)

montiert und wurden mit dem analogen Meßsystem geprüft. Die TE-Einsatzspannung ist für jeden Prüfling unterschiedlich und schwankt je nach Einbaulage bei einzelnen Prüflingen um bis zu 10 %. Eine Signifikanz der Spannung einer bestimmten Einbaulage kann nicht festgestellt werden. Die scheinbare Ladung Q_{TE} zeigt ebenfalls keinen nennenswerten Einfluß der Einbaulage und folgt der TE-Einsatzspannung reziprok, d.h. bei geringen TE-Einsatzspannungen finden sich hohe Ladungspegel.

Die Schwankungen der Werte der TE-Einsatzspannung zwischen den verschiedenen Prüflingen, aber auch bei Messungen ein- und desselben Prüflings nach einem Ein- und Ausbau in die Versuchseinrichtung, sind auf Verschiebungen im Löschmittel zurückzuführen. Durch „Kraftketten“ [Cla99] (s. Bild 2.7) können sich Hohlräume oder Spalte ausbilden [Jae96], in denen die TE bessere Zündbedingungen vorfinden und so zu einer niedrigeren TE-Einsatzspannung und höheren TE-Aktivität führen. Entsprechend kann eine kompaktere Schüttung zu einer Verminderung der TE-Aktivität führen. Diese Unterschiede im Gefüge führen zu einer schlechten Reproduzierbarkeit der Messungen (s.a. Bild 4.28) und zu einer hohen Streuung in den Ergebnissen, wie bereits in 4.2.1.4 angedeutet. Ein anderer Einflußfaktor auf die hohe Streuung der Werte ist die Bewicklung der Schmelzleiter, die von Prüfling zu Prüfling leicht variieren kann. Die Lage der Schmelzleiterwickel und der Engstellen ist bei den hier verwendeten Sicherungen nicht eindeutig vorgegeben und durch Variation des Bewicklungszuges beim Aufbringen der Schmelzleiter können Ausbeulungen entstanden sein, die zu einer Feldstärkung bzw. -schwächung führen.

4.2.7 Einfluß von Zuschlagstoffen im Löschmittel

4.2.7.1 Quarzmehl W12

Zur Verfüllung der Hohlräume zwischen den Sandkörnern wurden unterschiedliche Mengen von Quarzmehl W12 dem Sand zugegeben. Bis zu einem Gewichtsanteil von 20-30 % sinkt die Summenladung Q_S stark ab (Bild 4.45). Bei höheren Dosierungen (50 %_{Gew.} W12) zeigen die Prüflinge keine Verbesserung. Anscheinend ist nach dem Überschrei-

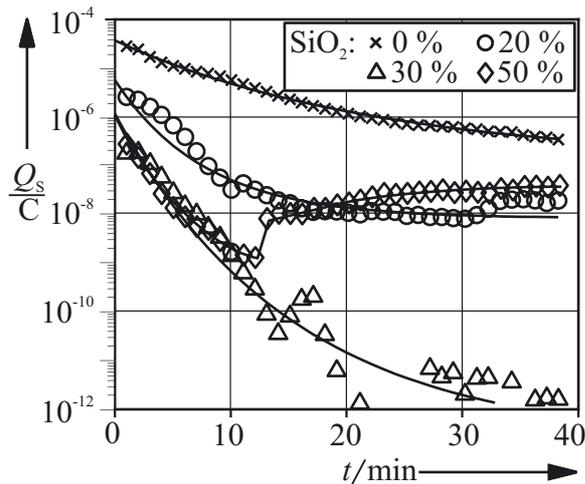


Bild 4.46: Summenladung Q_S bei Zuschlag von W12 und Strombelastung ($U_p = 20$ kV, $I_p = 40$ A)

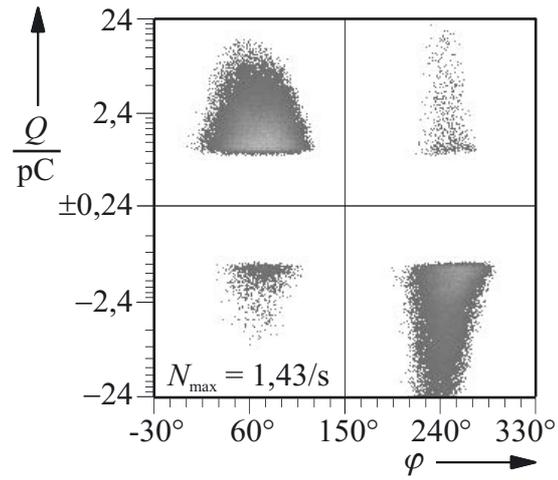


Bild 4.47: Impulsverteilung $H_n(\varphi)$ bei Zuschlag von 20%_{Gew.} W12, Farbskalierung wie in Bild 4.41 ($U_p = 20$ kV, $I_p = 40$ A)

ten der kritischen Porosität (vgl. Kap. 2.3.1.4) keine Verbesserung des TE-Verhaltens mehr möglich, sondern es verschlechtert sich, da sich in dem sehr feinen Material Hohlräume und durch Segregation starke Inhomogenitäten im Gefüge des Löschmittels ausbilden.

Die Verläufe der Impulsanzahl sind, bis auf die Skalierung, nahezu koinzident zur Summenladung (Bild 4.45), so daß sich eine Darstellung erübrigt und die Darstellung der relativen Impulsstärke q_n keine weiteren Erkenntnisse liefert.

Bei Belastung mit Prüfstrom streuen die Anfangswerte nicht so stark wie bei einer reinen Spannungsbeanspruchung (Bild 4.46). Durch den Zusatz wird die Absenkung der TE-Aktivität forciert und deren Zeitkonstante verkürzt. Die höchste Reduktion wird mit einer Zugabe von 30 % W12 erreicht. Die Meßreihe mit 50 % W12 zeigt bei $t = 12$ min einen plötzlichen Anstieg, was auf eine thermisch induzierte Reißbildung schließen läßt. Wegen der Unstetigkeit mußte die Ausgleichskurve von Hand eingefügt werden und konnte nicht wie bei den anderen Kurven durch ein mathematisches Verfahren (Methode der kleinsten Fehlerquadrate) berechnet werden.

Verglichen mit einer normalen Sicherung (z.B. Bild 4.26) zeigt ein Muster mit einer 20 %-igen Quarzmehlzugabe im Löschmittel in der Impulsverteilung (Bild 4.47) ein deutlich verbessertes TE-Verhalten. Die TE-Aktivität ist in beiden Halbwellen der Prüfspannung in etwa gleich groß, die Impulsrate verringert sich um 73 % und die Ladungsintensität um fast zwei Dekaden. Das Erscheinungsbild der Impulsverteilung ist homogener, der abgesetzte Bereich (B2, Bild 4.10) ist nicht mehr zu erkennen, ebenfalls nicht mehr die horizontalen Streifen (Bilder 4.11 und 4.23), was auf eine effektive Unterdrückung der Hohlräumentladungen schließen läßt.

4.2.7.2 Titandioxid (TiO₂)

Die Zugabe von TiO₂ zeigte im Rahmen der Meßgenauigkeit keine Wirkung (Bild 4.48). Lediglich eine leichte Verstärkung der exponentiellen Absenkung ist zu erkennen, obwohl keine Strombelastung erfolgte. Diese Verstär-

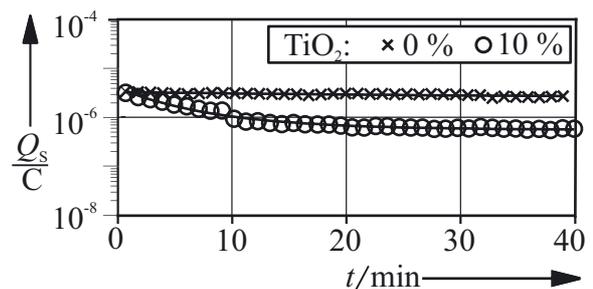


Bild 4.48: Q_S bei Zuschlag von TiO₂ ($U_p = 20$ kV, $I_p = 0$ A)

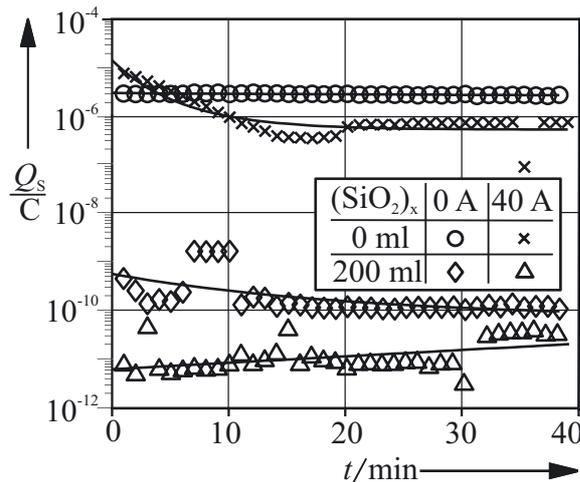


Bild 4.49: Q_S bei Zuschlag von $(SiO_2)_x$ ($U_p = 20$ kV, $I_p = 0$ bzw. 40 A)

kung resultiert vermutlich aus katalytischen Reaktionen, die eine Zersetzung des Ozons verhindern [Oya00].

4.2.7.3 Polymeres Siliziumdioxid $(SiO_2)_x$ „stone sand“

Polymeres Siliziumdioxid $(SiO_2)_x$ erzielt eine fast vollständige Hemmung der TE (Bild 4.49), da die Hohlräume nahezu komplett verschlossen werden. Allerdings ist durch den Verschluß mit einem Ansteigen der Schaltspannung der Sicherung zu rechnen [Lip92], da die Porosität des Sandes stark herabgesetzt ist. Zudem besteht bei Erwärmung die Gefahr der Ribbildung, was zum Einsetzen von TE und einer Verschlechterung des Schaltverhaltens führen kann.

4.3 Löschmittelmodifikationen zur Reduktion der TE-Aktivität

Die systematische Untersuchung der Eigenschaften von Löschmittelmodifikationen wurde mit konventioneller Meßtechnik (DTM82, vgl. Tab. 3.4) durchgeführt. Hauptzweck waren die Bestimmung der Abhängigkeit des TE-Verhaltens von der Prüfspannung, sowie die Ermittlung der zeitlichen Entwicklung und der Relation zur Menge des Modifikators. Wegen der in 4.2.1.5 genannten Problematik (mangelnde Vergleichbarkeit der Meßsysteme) und der stark ansteigenden Ladungs-Spannungs-Charakteristik (z.B. Bild 4.25) ist der Fokus auf die TE-Einsatzspannung gelegt, die den höchsten Aussagewert hat. Um eine gute Vergleichbarkeit zu erreichen, ist in den Diagrammen die Erhöhung der TE-Einsatzspannung ΔU_{TE} bezogen auf den Mittelwert der unmodifizierten Prüflinge angegeben.

4.3.1 Einfluß der Feuchte

Einen deutlichen Einfluß auf das TE-Verhalten hat die Zugabe von Wasser zum Löschmittel (Bild 4.50). Die TE-Einsatzspannung steigt, und die Verläufe der scheinbaren Ladung Q_{TE} über der Prüfspannung werden zu deutlich höheren Spannungen verschoben.

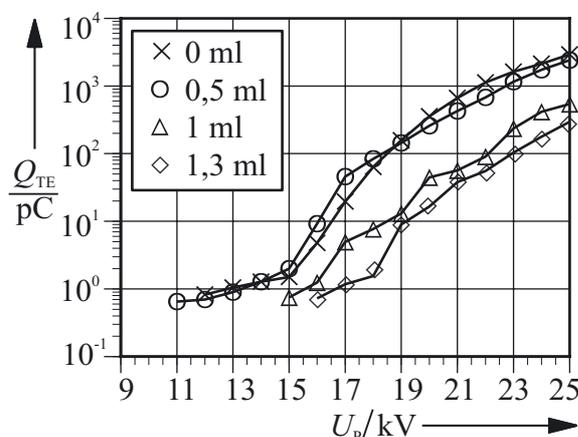


Bild 4.50: Einfluß der Feuchte des Löschmittels auf das TE-Verhalten

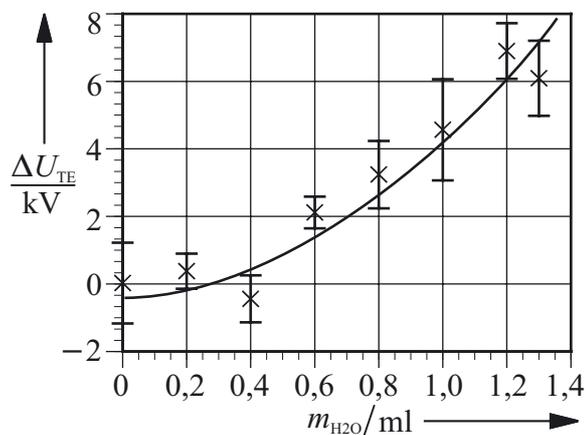


Bild 4.51: Erhöhung der TE-Einsatzspannung ΔU_{TE} durch Wasserzugabe

Die TE-Einsatzspannung steigt überproportional mit zunehmender Feuchte an (Bild 4.51). Diese Wirkung ist durch mehrere Effekte erklärbar. Die Durchschlagfestigkeit von Luft nimmt mit steigender Feuchte leicht zu [Loeb65], die Bildung von Ozon verringert sich [Fal97, Pla02], und die Leitfähigkeit an den Grenzflächen der Sandkörner und somit im Sand-Luft-Gemisch steigt stark an [Alb66, Hirt80, Hus05], was TE-verursachende Ladungsansammlungen und Feldverzerrungen verhindert.

Allerdings verschwinden die TE-mindernden Eigenschaften der Wasserzugabe bei Strombelastung (Bild 4.52). Nach ca. 25 min ist die scheinbare Ladung um zwei Dekaden gestiegen und verharrt in etwa auf diesem Niveau. Offenbar wird das Wasser durch die starke Erwärmung der Schmelzleiter aus dem Hochfeldbereich ausgetrieben, so daß sich dort wieder TE bilden können.

Die TE-Reduktion verschwindet zudem nach längerer belastungsfreier Lagerung. In einer Kontrollmessung nach 100 Tagen zeigten die Sicherungen ein Verhalten wie unmodifizierte Prüflinge, was durch das Einbinden von Wasser in die Kristall- und Porenstruktur des Sandes erklärlich ist [HeuH90].

Die Erhöhung der Leitfähigkeit des Sandes spiegelt sich in den dielektrischen Werten wider, wie in Bild 4.53 für Sand A gezeigt. Der Verlustfaktor $\tan \delta$ erhöht sich gegenüber trockenem Sand um mehr als eine 1/2 Dekade, während die Permittivitätszahl kaum gesteigert wird und dem Wert entspricht, der aus Berechnungen mit der Lichteneggerformel ($\epsilon_{r, \text{theo}} = 2,78$) zu erwarten ist. Die Feuchte des Sandes wurde mittels Karl-Fischer-Titration [Scho84] zu 0,16 %_{Gew.} bestimmt. Dieser geringe Anteil an der Gesamtmasse erklärt den geringen Einfluß der Wasserzugabe auf die Permittivitätszahl und verdeutlicht die Bedeutung der Oberflächenprozesse.

4.3.2 Einfluß von SiC

SiC zeigt eine geringere TE-Reduktion als Wasser (Bild 4.54). Die TE-Einsatzspannung wird nur leicht erhöht (Bild 4.55), und die Meßwerte streuen sehr stark. Dieser geringe Einfluß deutet darauf hin, daß die Reduktion eher auf mechanischen Effekten (vgl. Kap. 2.3.1.4)

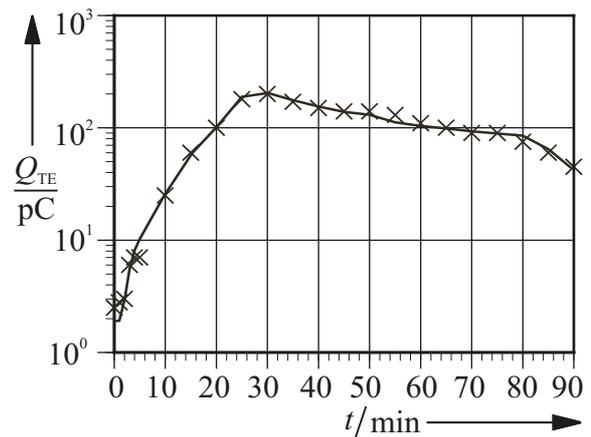


Bild 4.52: Zeitverhalten der scheinbaren Ladung Q_{TE} bei Zugabe von Wasser (1,3 ml) und Strombelastung ($I_p = 40$ A)

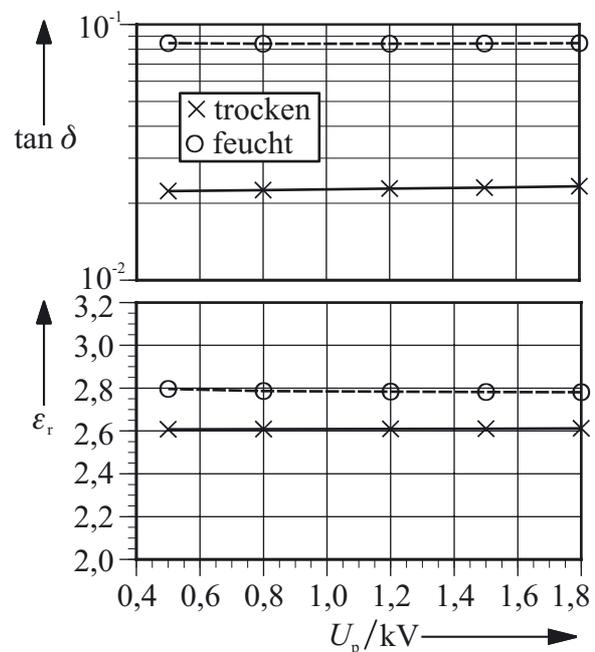


Bild 4.53: Verlustfaktor $\tan \delta$ und Permittivitätszahl ϵ_r für Sand A über der Spannung bei unterschiedlicher Feuchte

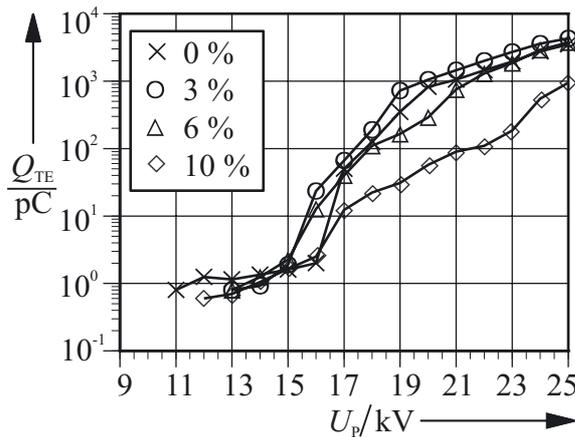


Bild 4.54: TE-Verhalten über der Prüfspannung bei Zugabe von SiC (%-Angaben in Massenanteilen)

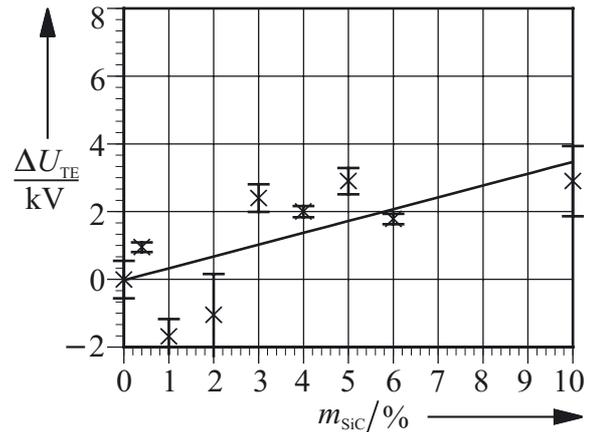


Bild 4.55: Einfluß der SiC-Zugabe auf die TE-Einsatzspannung (%-Angaben in Massenanteilen)

durch die Zumischung der feineren SiC-Körnung beruht als auf den feldsteuernden Eigenschaften des SiC.

4.3.3 Einfluß von Quarzmehl

In Bild 4.56 ist die $Q-U$ -Kennlinie bei Zugabe von Quarzmehl wiedergegeben. Es ist zu erkennen, daß der Verlauf der scheinbaren Ladung über der Prüfspannung bis ca. 40 % Gewichtsanteil W12 im Löschmittel günstigere Werte als bei einem Prüfling ohne Zugabe manifestiert, sich aber bei 60 % wieder zeigt. Der Anstieg über der Prüfspannung verläuft mit zunehmendem Füllgrad flacher. Dies ist eine Folge der Hohlräumverfüllung, da Entladungen nicht mehr im Gasraum entstehen können, sondern sich an den Grenzflächen der Sandkörner ausbreiten (vgl. Kap. 4.2.7.1).

Die Verschlechterung des TE-Verhaltens bei hohen Füllgraden kann mit der Porosität erklärt werden, die nach Überschreitung eines bestimmten Mischungsverhältnisses zwischen Sand und Quarzmehl wieder zunimmt (kritische Porosität, s. 2.3.1.4). Durch die erhöhte Porosität können dann wieder vermehrt TE entstehen.

Die TE-Einsatzspannung steigt mit dem Füllgrad an (Bild 4.57). Anders als bei Wasserzugabe (vgl. 4.3.1) strebt die Kennlinie einem lokalen Maximalwert bei 40 % entgegen. Dies ist

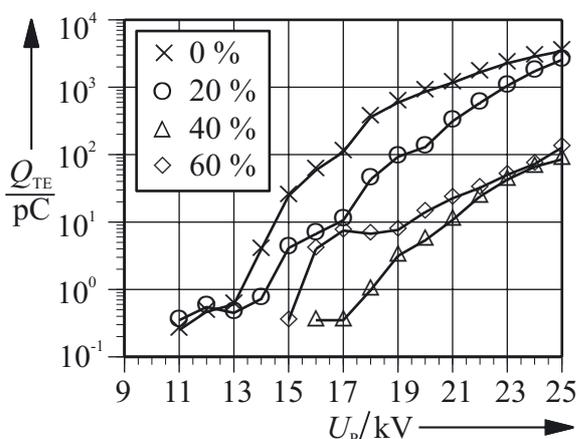


Bild 4.56: TE-Verhalten über der Prüfspannung bei unterschiedlicher Quarzmehlzugabe (%-Angaben in Massenanteilen)

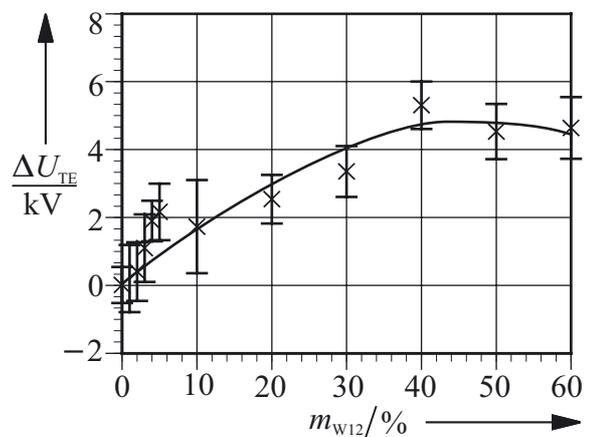


Bild 4.57: Einfluß der Quarzmehlzugabe auf die TE-Einsatzspannung (%-Angaben in Massenanteilen)

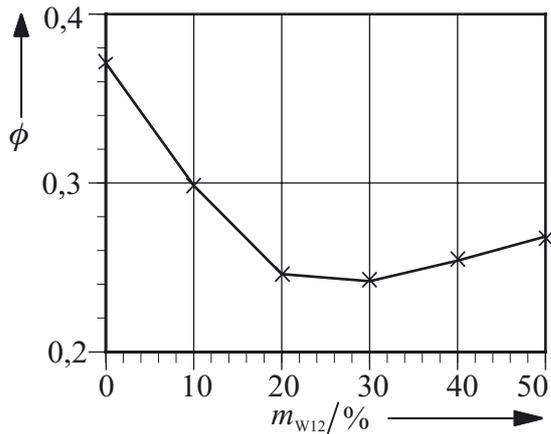


Bild 4.58: Einfluß der Quarzmehlzugabe auf die Porosität (%-Angaben in Massenanteilen)

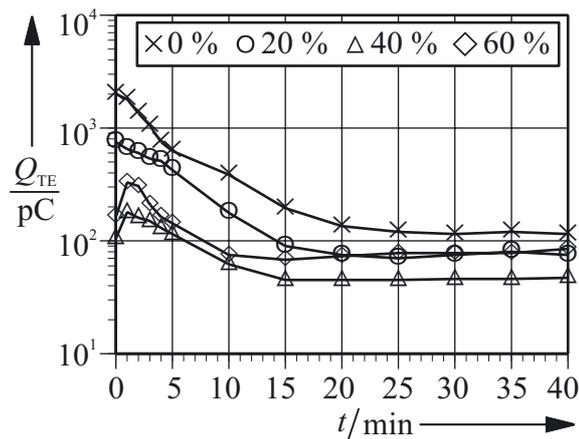


Bild 4.59: TE-Aktivität über der Zeit bei $I_p = 40$ A und unterschiedlichen Quarzmehlanteilen

verständlich, da bei einer vollständigen Verfüllung der Hohlräume zwischen den Sandkörnern das Zünden von TE im Gasraum unterbunden wird und wegen der Oberflächenentladungen keine weitere Verbesserung zu erwarten ist. Durch die Zunahme der Porosität zu höheren Füllgraden hin nimmt die TE-Einsatzspannung oberhalb von 40 % wieder ab.

Die Porosität des Sand/W12-Gemisches zeigt Bild 4.58. Tatsächlich steigt die Porosität ab 30 % Massenanteil W12 wieder an, jedoch nicht so stark, wie aus den theoretischen Überlegungen (s. Kap. 2.3.1.4) zu erwarten wäre. Dies liegt an der Gestalt der Sandkörner, die nicht ideal kugelförmig sondern arbiträr ist.

Die durch Zugabe von Quarzmehl maximal erreichbare Erhöhung der TE-Einsatzspannung ist mit 5 kV nicht so hoch wie bei Wasser (s. 4.3.1), aber größer als bei der Zugabe von SiC. Im Gegensatz zur Wasserzugabe bleiben die TE-mindernden Eigenschaften auch bei Strombelastung (Bild 4.59) und nach längerer Lagerung erhalten.

4.3.4 Einfluß von polymerem Siliziumdioxid (SiO_2)_x „stone sand“

Bild 4.60 zeigt schließlich den Effekt der Zugabe von polymerem Siliziumdioxid auf das TE-Verhalten, welches eine Erhöhung der TE-Einsatzspannung um ca. 8 kV bewirkt und den Verlauf der TE-Aktivität über der Spannung nahezu eliminiert. Da der Sand entweder nur ungebunden oder vollständig mit polymerem Siliziumdioxid imprägniert vorliegen kann, ergibt sich nur ein einzelner Datenpunkt, so daß sich eine grafische Darstellung der Erhöhung der TE-Einsatzspannung ΔU_{TE} über dem Anteil an polymerem Siliziumdioxid erübrigt. Die Zugabe an (SiO_2)_x betrug ca. 10 %_{Gew}. Durch die Versiegelung der Hohlräume wird das Dielektrikum vom offenen in den Zustand geschlossener Poren überführt, so daß nur noch Hohlräumenentladungen auftreten können. Die Hohlräume haben einen relativ kleinen Durchmesser, da die Ladungspegel recht klein sind [Kali99, Rück02]. Zudem wird die Ausbildung von Oberflächen-

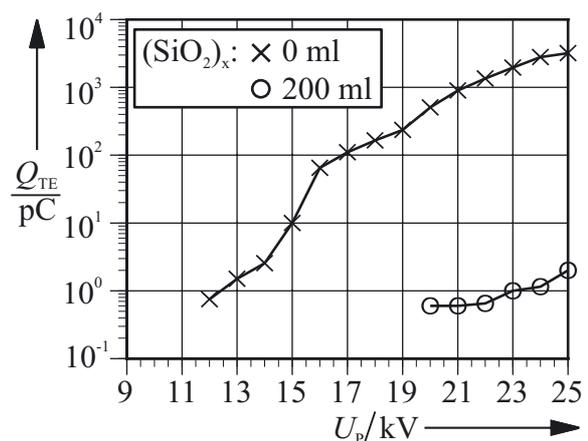


Bild 4.60: Einfluß der Zugabe von (SiO_2)_x auf das TE-Verhalten

entladungen verhindert, da eine Ausbreitung von TE-Kanälen entlang der Grenzflächen der Sandkörner unterbunden wird.

4.4 Feldsteuernde Beschichtungen

Die feldsteuernden Schichten wurden sowohl an Probekörpern als auch an Sicherungsrohren getestet. Während die Messungen an den Probekörpern der Ermittlung des Gleichstromwiderstandes dienten, wurde das TE-Verhalten an Sicherungsprototypen mit entsprechend behandelten Sicherungsrohren gemessen.

4.4.1 Keramische Beschichtungen

4.4.1.1 Gleichstromwiderstand

Bild 4.61 zeigt die Widerstandskennlinien einer Auswahl von Glasurversätzen (vgl. Tab. 3.3). Es ist ersichtlich, daß sich ein weiter Bereich an Charakteristiken einstellen läßt, deren Einflußfaktoren im folgenden dargelegt werden. Einen entscheidenden Einfluß hat die Körnung der SiC-Zugabe. Der Widerstand steigt mit der Siebzahl bzw. mit sinkender Korngröße (H24: F320, H22: F500, H21: F600), d.h. gröbere Körnungen ergeben höhere Leitfähigkeiten. Dies läßt sich mit dem Brennverlust erklären, der bei kleinen Körnungen wegen der spezifischen Oberfläche höher ist, und mit der Anzahl und Eigenschaft der Kontaktflächen zwischen den Körnern. Die Anzahl der Kontakte ist zwar bei kleinen Körnungen höher, ihre Fläche jedoch geringer [Zob75]. Zudem ist die Anzahl der Kontakte in Stromflußrichtung bei kleineren Körnungen höher, d.h. es sind mehr Übergänge in Reihe geschaltet als bei größeren Körnungen. Ein ähnliches Verhalten zeigen Beschichtungssysteme, die auf einer EPDM-Matrix basieren [Önn01] und Sinterkörper aus SiC [Zob75]. Noch höhere Leitfähigkeiten als die in Bild 4.61 gezeigten lassen sich durch die Verwendung von dotiertem SiC („SiC extra“) erreichen.

Die bidispersen Versätze (H26, T26) zeigen etwas flachere Kennlinien als die monodispersen, ebenso die Versätze mit kleinem Korndurchmesser. Der direkte Vergleich zwischen H26 und T26 zeigt den Einfluß des Brennverfahrens (H26: Herdwagen, T26: Tunnelofen). Im Tunnelofen werden etwas weniger leitfähige Beschichtungen erreicht, was darauf hindeutet,

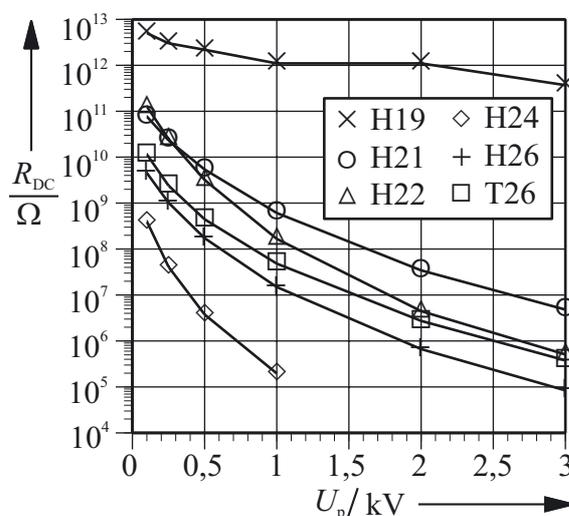


Bild 4.61: Gleichstromwiderstand R_{DC} diverser Versätze über der Prüfspannung

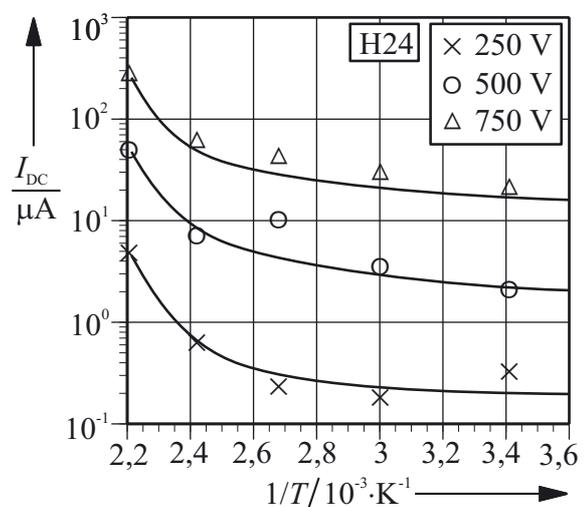


Bild 4.62: Ableitstrom I_{DC} über der Temperatur bei verschiedenen Prüfspannungen (Arrhenius-Darstellung)

daß der Brennverlust dort höher ist, da im Tunnelofen eine stärker oxidierende Ofenatmosphäre vorhanden ist.

Ein Vergleich der Versätze H19 und H21 zeigt den großen Einfluß der Aufbereitung auf die elektrischen Kennwerte der Versätze. Durch den Mahlvorgang in der Kugelmühle werden die SiC-Körner offenbar gebrochen, und die Korngröße sinkt, so daß sich ein ähnlicher Effekt wie bei Versätzen mit kleiner Körnung ergibt.

Wie in Bild 4.62 zu erkennen ist, ändert sich der Widerstand der Engobe stark über der Temperatur, was auch an Sinterkörpern aus SiC beobachtet wird [Zob75]. Dies muß bei der Konzeption eines Beschichtungssystems berücksichtigt werden, da sich die Sicherungen nach dem Schalten aufgrund austretender Schalthwärme stark erwärmen. Die unterschiedlichen Steigungen des Anstiegs des Ableitstroms deuten auf halbleitende Eigenschaften der Engobe hin [Mün85, Auc97].

Die Struktur der Engoben zeigt Bild 4.63. Die SiC-Partikel zeichnen sich aufgrund der Polarisation der Beleuchtung in der Draufsicht dunkel, im Schnittbild hell ab. Zwischen den Körnern ist im Schnittbild die Glasmatrix zu erkennen (grau) sowie Gaseinschlüsse (dunkelgrau), die aus der Zersetzung des SiC beim Brand resultieren. Diese Gaseinschlüsse reichern sich besonders in der Grenzschicht zum Porzellankörper (hellgraue Struktur) an, weshalb eine hohe Porosität der Engobe gewährleistet sein muß, da die Schicht durch das entstehende Gas anderenfalls Blasen schlagen oder abplatzen wird [Faß06].

Trotz der hohen Leitfähigkeit (vgl. Bild 4.61) sind im Schnittbild nur relativ wenige SiC-Körner und Kornkontakte zu erkennen. Allerdings ist in der Aufnahme naturgemäß die dreidimensionale Vernetzung der Körner nicht wiedergegeben, auf die der Hauptanteil der Leitfähigkeit zurückzuführen ist.

Im Langzeitversuch bei konstanter Temperatur im Umluftofen zeigten sich langsame, über der Zeit exponentiell ansteigende Verläufe des Ableitstroms (Bild 4.64), die bei einer unbeschichteten Vergleichsprobe nicht auftraten. Dieses Verhalten deutet auf elektronische Aktivierungsprozesse in der Leitschicht hin, die einige Zeit in Anspruch nehmen [Blai01]. Dies steht im Gegensatz zu herkömmlichen Leitglasuren [Bin71], die durch Oxidation der metallischen Komponenten ihrer Versätze in Mit-

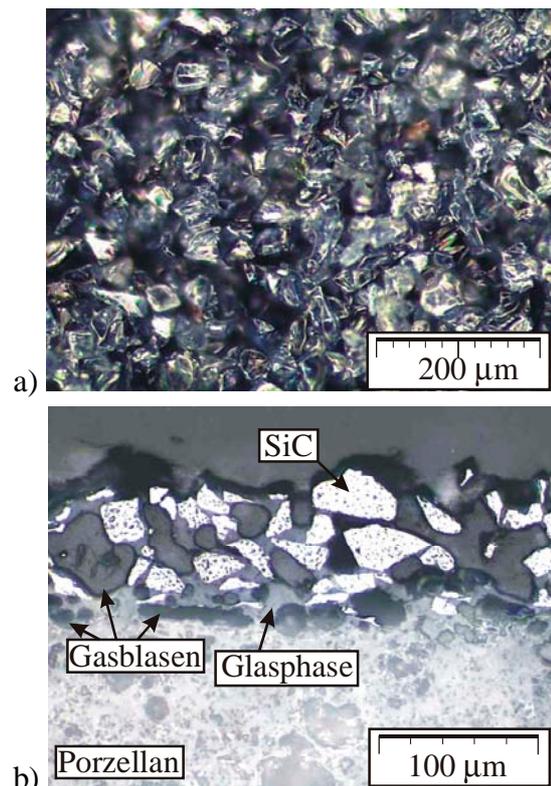


Bild 4.63: Mikroskopien der Engobe H24, a) Draufsicht, b) Schnittbild [Faß06]

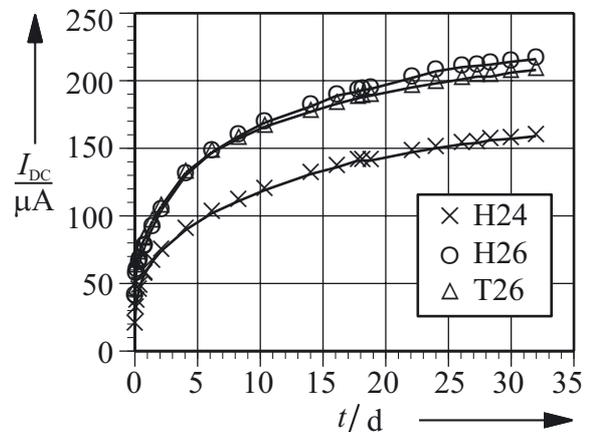


Bild 4.64: Ableitstrom I_{DC} verschiedener Glasuren über der Zeit bei 150 °C

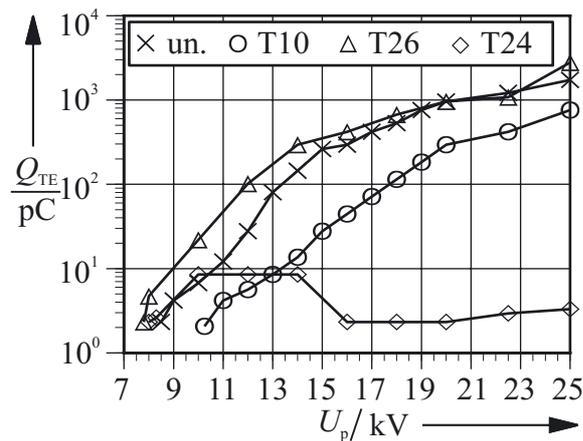


Bild 4.65: Scheinbare Ladung Q_{TE} über der Prüfspannung bei 6/12-kV-Sicherungen mit keramischer Beschichtung

der TE-Pegel von T24 über der Prüfspannung nahezu konstant, obwohl die TE-Einsatzspannung in etwa identisch ist. Eine höhere TE-Einsatzspannung erzielt zwar der Versatz T10, Q_{TE} steigt aber mit der Prüfspannung an.

4.4.2 Organische Binder

4.4.2.1 Gleichstromwiderstand

Die Widerstandskennlinien für Beschichtungen mit organischen Bindern sind in Bild 4.66 dargestellt. Die höchste Leitfähigkeit wird mit Epoxidharz als Binder erreicht, die schlechteste mit Silikonkautschuk. Es wird vermutet, daß dies an der Vernetzung des Kautschuks liegt, da mit Silikonlack bessere Leitfähigkeiten erzielt wurden. Die auf Silikon basierenden Beschichtungen zeigen eine deutlich stärkere Nichtlinearität als die aus Epoxidharz. Eine bidisperse Mischung aus jeweils 50 % F100 und F280 verringert gegenüber den monodispersen Schichten den Spannungsdurchgriff, was sich mit den Beobachtungen an

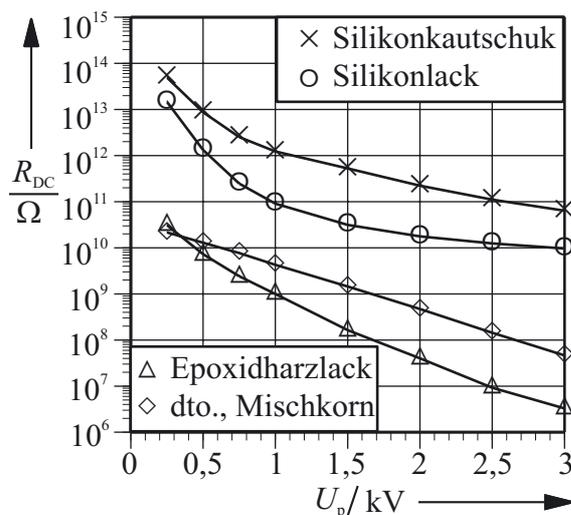


Bild 4.66: Widerstandskennlinien für Beschichtungen mit organischen Bindern (SiC extra, Füllgrad 65 %)

leidenschaft gezogen werden und über der Zeit ihre Leitfähigkeit verlieren [Ull03].

Die mechanischen Eigenschaften der Engoben auf Probekörpern und Porzellanrohren wurden in [Faß06] untersucht. Es zeigten sich keine Unterschiede im Vergleich zu Prüflingen mit normaler Glasur.

4.4.1.2 TE-Verhalten

Das TE-Minderungsvermögen der Glasuren ist in Bild 4.65 dem einer unbeschichteten Sicherung gegenübergestellt. Erst der sehr leitfähige Versatz T24 bringt eine deutliche Verbesserung.

Im Vergleich zum ungesteuerten Muster bleibt

der TE-Pegel von T24 über der Prüfspannung nahezu konstant, obwohl die TE-Einsatzspannung in etwa identisch ist. Eine höhere TE-Einsatzspannung erzielt zwar der Versatz T10, Q_{TE} steigt aber mit der Prüfspannung an.

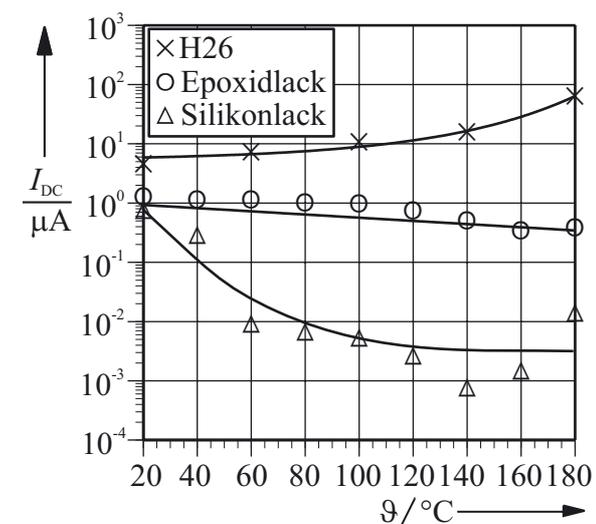


Bild 4.67: Vergleich der Ableitströme organischer und keramischer Beschichtungen über der Temperatur ($U_p = 500$ V)

keramischen Schichten deckt (s. 4.4.1.1). Ebenso wurde auch hier ein Einfluß der SiC-Körnung auf die Leitfähigkeit gefunden, jedoch nicht so deutlich wie bei den keramischen Beschichtungen. Der Durchgriff der Prüfspannung auf den Widerstand ist mit ca. einer Dekade pro kV ebenfalls geringer als bei keramischen Leitschichten.

Die Leitfähigkeit ist stark von der Schichtdicke und dem Füllgrad abhängig. Es wurden Füllgrade von bis zu 85 % erreicht, allerdings war die Konsistenz des Gemisches ab 80 % pastös und schlecht applizierbar. Oberhalb eines Füllgrades von 85 % haftete die Paste nicht mehr auf dem Untergrund. Durch Zugabe von Lösungsmitteln (Xylol) konnte die Schichtdicke zusätzlich variiert werden. Die Leitfähigkeit läßt sich durch Zugabe von verrußtem Xylol noch um ein bis zwei Dekaden steigern. Bei den Lacken kann eine weitere Steigerung der Leitfähigkeit um eine Dekade durch Tempern bei 180 °C während 30 Minuten erreicht werden.

In Bild 4.67 ist die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von organischen Beschichtungen derjenigen einer keramischen Leitschicht gegenübergestellt. Im Vergleich zur keramischen Beschichtung (H26) ist der Temperaturkoeffizient bei Epoxidharzlack wesentlich geringer und leicht negativ. Silikonlack hat eine zunächst fallende Charakteristik, über 140 °C steigt der Widerstand wieder an. Der Abfall ist durch den sehr hohen Füllgrad (82 %) erklärlich, da die SiC-Körner mit zunehmender Temperatur durch die Silikon- bzw. Epoxidmatrix auseinander gedrückt werden. Das Ansteigen der Ableitung bei Silikonlack oberhalb von 140 °C ist durch die einsetzende Eigenleitung der Matrix zu erklären [Bur92, Auc97]. Das dargestellte Temperaturverhalten stellt sich bei Silikonlack erst nach zwei bis drei Temperaturzyklen ein.

Bild 4.68 zeigt die Wirkung unterschiedlicher Dotierungen auf den Gleichstromwiderstand. Undotiertes SiC besitzt die geringste, n-dotiertes eine mittlere und p-dotiertes SiC („SiC extra“) die höchste Leitfähigkeit und den stärksten Spannungsdurchgriff. „SiC extra“ zeigte auch bei den keramischen Beschichtungen die höchste Leitfähigkeit.

4.4.2.2 TE-Verhalten

Das TE-Verhalten zweier 6/12-kV-Muster, die mit einer besonders leitfähigen Beschichtung aus Epoxidharzlack, „SiC extra“ und verrußtem Xylol versehen wurden, ist in Bild 4.69 dargestellt. Muster 1 zeigt eine niedrigere TE-Einsatzspannung als das ungesteuerte Muster, unterschreitet aber bei Spannungssteigerung dessen Pegel. Muster 2 zeigt ein befriedigen-

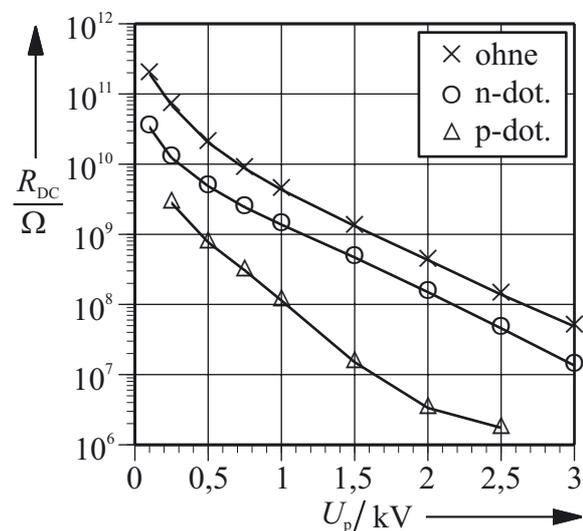


Bild 4.68: Einfluß der Dotierung auf den Widerstand R_{DC} von Epoxidharzlack-Beschichtungen

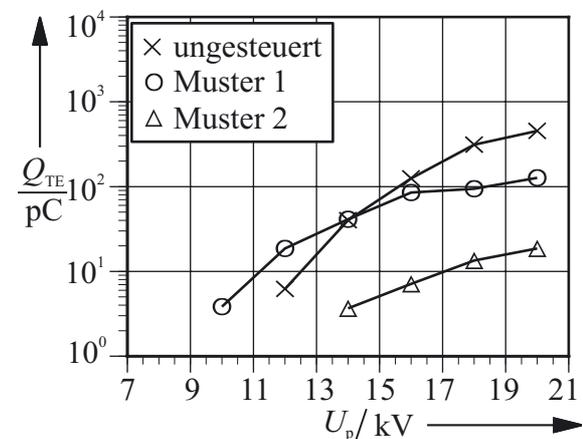


Bild 4.69: TE-Verhalten organischer Beschichtungen über der Prüfspannung (Epoxidlack, verrußt)

des Verhalten, da der TE-Pegel unter dem vorgeschriebenen Schwellwert von 20 pC bleibt und die TE-Einsatzspannung deutlich höher als bei der ungesteuerten Sicherung ist ($\Delta U_{TE} \approx 2$ kV).

Die Unterschiede zwischen den Mustern ergeben sich aus der manuellen Fertigung. Bei einem Füllgrad von 82 % ist das Schichtmaterial pastös und mußte mit einem Spachtel aufgetragen werden, so daß Variationen in Schichtstärke und -form unvermeidlich waren. Muster 1 zeigt gegenüber Muster 2 starke Unebenheiten und eine reduzierte Schichtdicke, was durch Inhomogenitäten und verminderte Steuerwirkung eine Reduktion der TE-Einsatzspannung bedingt.

4.4.3 Gekapselte Sicherungen

Die mit warschrumpfenden Muffen gekapselten Sicherungen zeigten nach der Typprüfung [VDE0278] einen Verlust der TE-Schirmwirkung. Die TE-Einsatzspannung fiel von ursprünglich 11 kV auf 7 kV und die Ladungspegel stiegen von 0 pC auf 250 pC. Dies liegt an

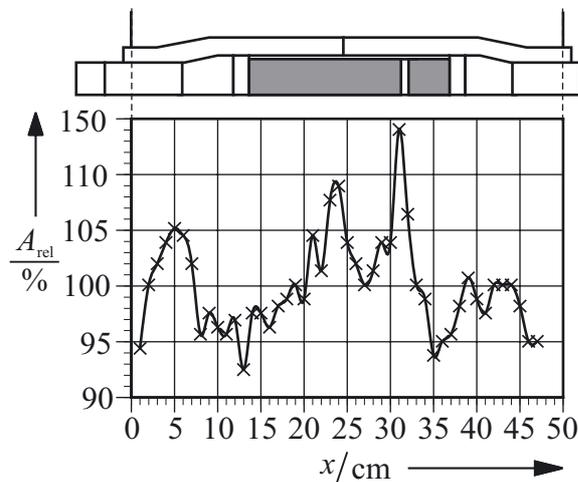


Bild 4.70: Relativer akustischer TE-Pegel einer A_{rel} Kapselung mit einer Aufschiebemuffe ($U_p = 20$ kV)

(Bild 4.70). Der Verlauf des akustischen Geräuschpegels (relativ zu einer Messung ohne Spannungsbeanspruchung) zeigt, daß die TE insbesondere an den Durchmesserübergängen ($x = 5$ cm, $x = 40$ cm) entstehen, obwohl die Hohlräume mit reichlich Silikonpaste verfüllt waren. Der Peak bei $x = 32$ cm wird durch eine Meßelektrode aus Silberleitlack verursacht, die für eine Widerstandsmessung benötigt worden war.

In der Mitte der Anordnung ($x = 25$ cm) konnte eine Fehlstelle im Muffenkörper nachgewiesen werden, die auf eine schlechte Verklebung der Muffenhälften zurückzuführen ist, aus denen der Muffenkörper gefertigt war. Die Pegel bei Spannungsbelastung liegen z.T. unterhalb des Referenzpegels von 100 % (z.B. bei $x = 13$ cm), was durch die Meßgenauigkeit und durch akustische Auslöschungseffekte begründet ist.

der Feldsteuerung durch den leitfähigen Schrumpfschlauch, einem Elastomer-Ruß-Compound, das offenbar an Leitfähigkeit einbüßt. Solche Effekte sind von Leitschichtcompounds in Kabelleitschichten her bekannt [Jäg02] und werden durch mechanischen Streß verursacht [Ste98], der durch das „Kneten“ während der Heiz- und Abkühlungsphasen entsteht und die leitfähigen Rußbrücken auseinander reißt.

Kapselungen mit Aufschiebemuffen und keramischer Beschichtung T24 zeigen diese Effekte nicht. Auch nach der thermischen Beanspruchung bleiben die TE-Pegel unter 20 pC. Trotzdem bietet die Anordnung Möglichkeiten zur Verbesserung, wie die Auswertung einer akustischen Messung zeigt

4.5 Schaltversuche

4.5.1 Sicherungen mit leitfähiger Beschichtung

Die I_2 -Schaltprüfungen an Sicherungen mit Steuerschicht und Silikonkautschukkapselung zeigen in der oszillographischen Auswertung keine Unterschiede zu „normalen“ Sicherungen (Bild 4.71). Die Schmelzzeit beträgt $t_m = 4$ ms und die Schaltspannung erreicht 28 kV. Der Durchlaßstrom hat ein Maximum von $i_D = 5,4$ kA, und die Löschzeit (Lichtbogendauer) beträgt $t_{arc} = t_e - t_m = 6,8$ ms bei einem I^2t -Wert (Schmelzintegral) von $111,5$ kA²s. Ähnliche Werte werden auch bei gesteuerten und ungesteuerten Sicherungen ohne Kapselung erreicht. Die Kapselung und Steuerschicht beeinflussen das Schaltverhalten nicht.

Allerdings ist wegen des erforderlichen großen Strommeßbereichs der Reststrom nach dem Schalten in Bild 4.71 nicht erkennbar. Die in Bild 3.15 dargestellte Erweiterung des Prüfkreises zur Feinmessung des Reststromes zeigt jedoch, daß ein kleiner Nachstrom i_{sh} gemessen werden kann, dessen Zeitverlauf in Bild 4.72 wiedergegeben ist. Die Form zeigt deutliche Nichtlinearitäten, die durch die Widerstandscharakteristik der Steuerschicht verursacht werden und für Siliziumkarbid typisch sind [Wesn71, Zob75].

Ist der Leitwert der Steuerschicht zu niedrig gewählt, wie im Fall des Prüflings 97/140, kann es zu einer selbstentfachenden Stromsteigerung in der Leitschicht kommen, wie in Bild 4.73 gezeigt. Dort sind die Effektivwerte der Restströme zweier Muster über einen längeren Zeitraum (10 min) nach dem Löschen gegenübergestellt. Beide Prüflinge zeigen zunächst ein Absinken des Reststroms, was durch den in der abkühlenden Schmelzleiter-raupe fließenden Strom bedingt ist. Der insgesamt nach oben verschobene Verlauf bei Prüfling 97/140 resultiert aus der geringeren Spaltweite der Leitschicht des Muffenkörpers. Nach 7 Minuten ist ein Anstieg des Reststroms im

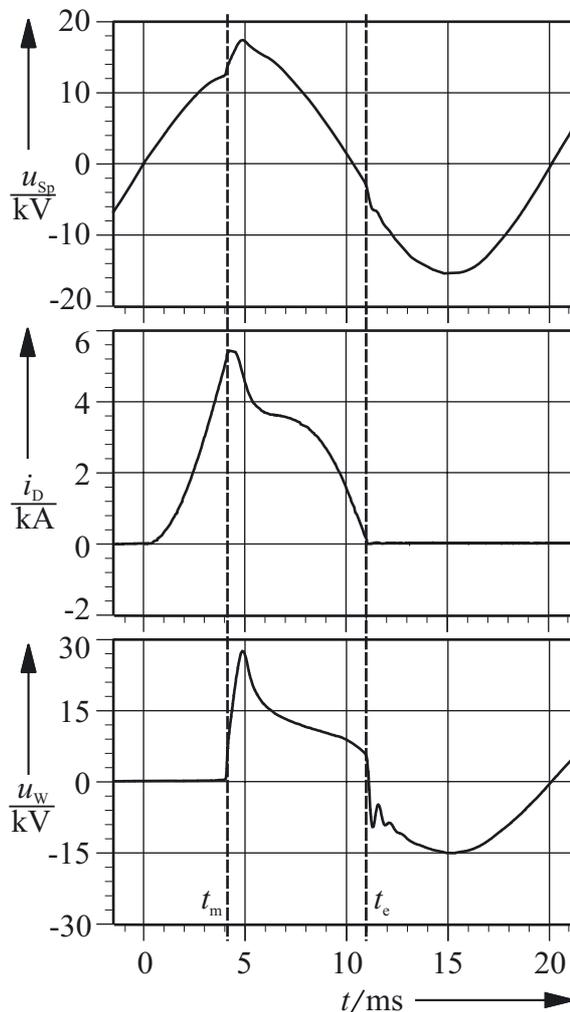


Bild 4.71: Speisespannung u_{sp} , Durchlaßstrom i_D und Prüflingsspannung u_w bei einer I_2 -Prüfung (SMG „B“, H26-Leitschicht)

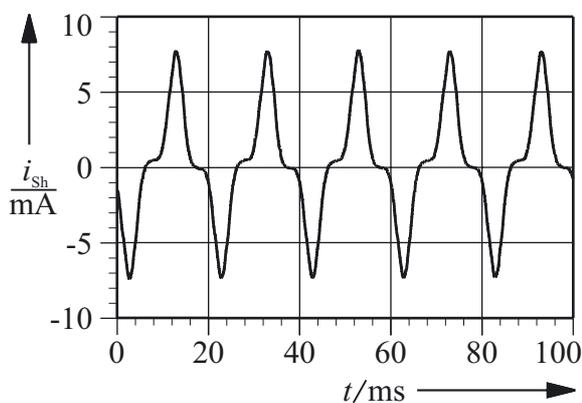


Bild 4.72: Transienter Reststrom i_{sh} nach einer I_2 -Prüfung (SMG „B“, H26-Leitschicht)

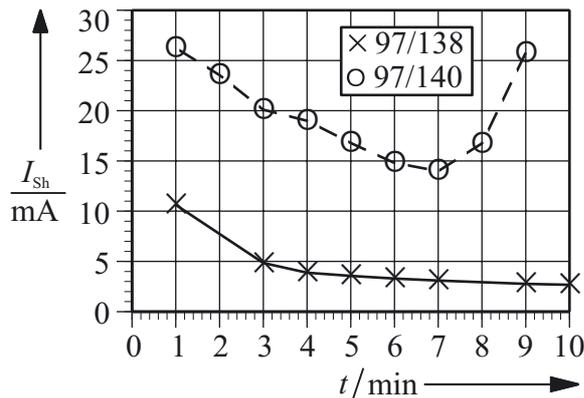


Bild 4.73: Effektivwert des Reststroms I_{Sh} nach einer I_2 -Prüfung (SMG „B“, H26-Leitschicht)

Versagen von Muster 97/140 haben die Sicherungen den Schaltversuch nach [EN60282] bestanden, da die Normung als Kriterium für das einwandfreie Abschalten der Sicherung nur das „Standhalten der Sicherung gegenüber der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung“ für mind. 60 s heranzieht, also für einen sehr viel kürzeren Zeitraum als den hier verwendeten (600 s). Definitionen über die Form und den maximalen Pegel des Reststroms sind in [EN60282] nicht enthalten.

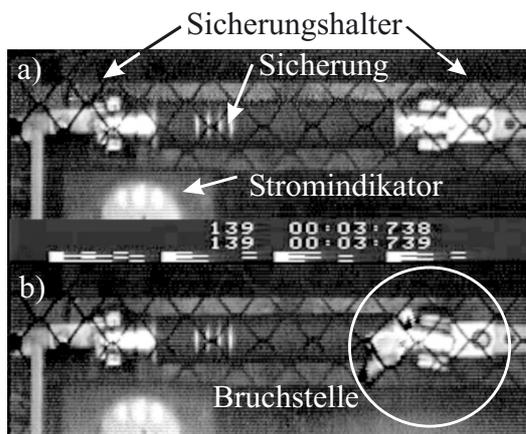


Bild 4.74: Aufnahmen einer I_2 -Prüfung mit keramischer Leitschicht. a) 7 ms, b) 8 ms nach Löscheintritt

Prüfling 97/140 zu erkennen, der durch die aus der Sicherung austretende Schaltwärme verursacht wird. Die daraus resultierende Temperaturerhöhung in der Leitschicht führt wegen des negativen Temperaturkoeffizienten [Zob75] zu einem höheren Stromfluß, der wiederum zu einer weiteren Temperatursteigerung und einer Selbstentfachung des Prozesses führt. Die extreme Wärmeentwicklung führte schließlich zu einem Längsdurchschlag in der Grenzschicht Muffe-Sicherung, wodurch der Muffenkörper zerstört wurde. Die Sicherung selbst blieb jedoch intakt.

Trotz der gemessenen Restströme und des Versagens von Muster 97/140 haben die Sicherungen den Schaltversuch nach [EN60282] bestanden, da die Normung als Kriterium für das einwandfreie Abschalten der Sicherung nur das „Standhalten der Sicherung gegenüber der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung“ für mind. 60 s heranzieht, also für einen sehr viel kürzeren Zeitraum als den hier verwendeten (600 s). Definitionen über die Form und den maximalen Pegel des Reststroms sind in [EN60282] nicht enthalten.

Einige Prüflinge versagten jedoch völlig. Durch Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera während des Schaltversuchs konnte dies auf mechanische Probleme im Bereich der Sicherungskappen zurückgeführt werden. In Bild 4.74 ist zu erkennen, daß die obere Kappe (rechts im Bild) inklusive des Futters des Sicherungshalters nicht mehr axial zum Rest der Sicherung steht und Plasma austritt, was schließlich zum Versagen der Sicherung führt. Grund hierfür könnte eine Beschädigung des Porzellanrohres beim Aufrollieren der Kappen oder eine mangelnde Haftung der Kappe auf der Glasur gewesen sein.

Bei gekapselten Sicherungen mit Wärmeschrumpf-Muffe konnte hingegen ein Platzen der Sicherung durch das sehr stabile Muffenrohr und den hohen Anpreßdruck, den dieses auf das Porzellanrohr ausübt, verhindert werden. Bei einer Nachuntersuchung der SMG konnte in einem Fall ein Längsriß im Porzellanrohr festgestellt werden, der eindeutig vor dem Schaltversuch aufgetreten war und ohne das Muffenrohr zum Versagen der Sicherung geführt hätte.

Ferner wurde bei geschalteten SMG auf der Innenseite des Porzellanrohres ein punktförmiges Muster eines Niederschlages festgestellt. Der Ort dieser Spots korreliert mit den Orten höchster Feldbeanspruchung an den Kanten des Schmelzleiterträgers, wo die Schmelzleiter den geringsten Abstand zum Porzellanrohr haben. Die niedergeschlagene Substanz besteht zum größten Teil aus SiO_2 und nur zu geringen Anteilen aus Silber (Verhältnis $\text{SiO}_2/\text{Ag} =$

1000/1), wie eine massenspektrographische Analyse zeigte. Unklar ist, ob diese Flecken bei der Vorbelastung während der Typprüfung (vgl. Kap. 3.4) oder bei der Schaltbeanspruchung entstanden sind. Sie wurden an Sicherungen ohne Kapselung noch nicht beobachtet. Es ist bekannt, daß Niederschläge des verdampften Schmelzleiters eine Rolle bei SF₆-Sicherungen spielen [Bre93], bei Sicherungen mit Sandfüllung werden jedoch nur geringe Mengen in radialer Richtung des Schmelzleiters abgegeben [Muri00]. Daher ist zu vermuten, daß die Spots durch Elektrophorese feiner Staubpartikel des Löschmittels während der Vorbelastung entstanden sind.

4.5.2 Sicherungen mit modifiziertem Füllstoff (W12-Zusatz)

Sicherungen mit unterschiedlichen Anteilen an Quarzmehl im Löschmittel wurden ebenfalls einer I₂-Schaltprüfung unterzogen. Die Ergebnisse sind in den Bildern 4.75 und 4.76 zusammengefaßt. Es ist zu erkennen, daß bis zum Einsetzen des Lichtbogenintervalls (bei t_m ≈ 4 ms) keine Differenzen im Schaltverhalten auftreten, obwohl die Menge des Löschmittelzusatzes variiert wurde. Sowohl die Kurvenverläufe als auch die Joule-Integralwerte variieren nur marginal untereinander und sind mit gesteuerten bzw. unmodifizierten Sicherungen vergleichbar (s. Kap. 4.5.1). Dies deckt sich mit Untersuchungen an Modellsicherungen mit Löschmitteln unterschiedlicher Packungsdichte [Bus01] und ist eine Folge des nahezu adiabaten Schmelzprozesses in diesem Abschnitt des Schaltvorgangs (s. Kap. 2.1.3).

Im Lichtbogenintervall ist ein deutliches Sinken der Schaltspannungsspitze mit steigender Quarzmehl-Konzentration erkennbar. Allerdings ist der Abfall mit einem Anstieg der Strom- und Joule-Integralwerte verbunden (Bild 4.76), was eine höhere Belastung der Sicherung bedeutet. Bei einem Füllgrad von 30 % ist die Sicherung nicht mehr in der Lage zu löschen, der Strom folgt 1 ms nach Zündung des Lichtbogens dem prospektiven Stromverlauf. Daraus resultieren hohen Joule-Integralwerte im Lichtbogenintervall (Bild 4.76).

Das Absinken der Schaltspannung mit zunehmendem Gehalt an W12 steht im Wider-

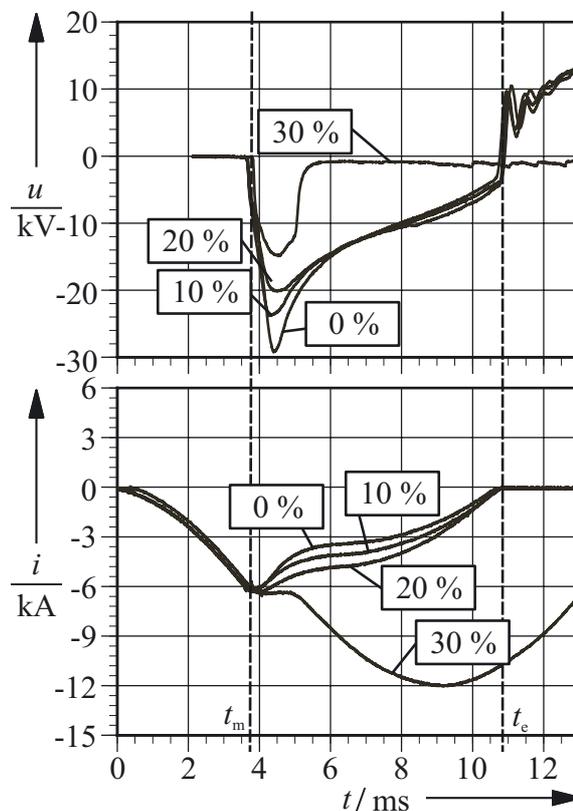


Bild 4.75: Prüfstrom i und -spannung u über der Zeit bei einer I₂-Prüfung mit modifiziertem Löschmittel (%-Angaben in Massenanteilen W12)

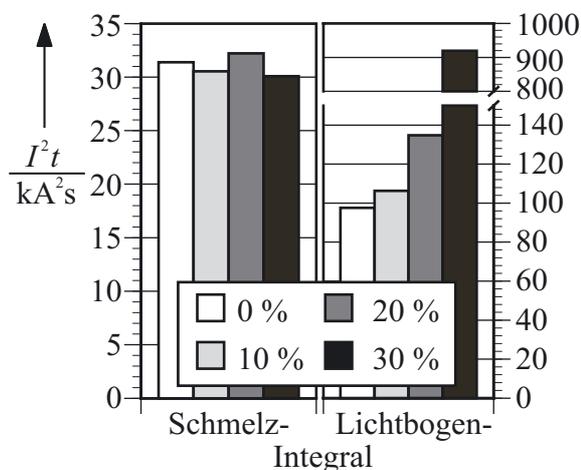


Bild 4.76: Schmelz- und Lichtbogenintegrale I^2t bei modifiziertem Löschmittel (%-Angaben in Massenanteilen W12)

spruch zum steigenden Druck in der Lichtbogensäule, der sich aus der verminderten hydraulischen Permeabilität des Löschmittels ergeben müßte [Roc02], ist aber durch die geringere Schmelzenthalpie der W12-Partikel im Vergleich zum restlichen Füllstoff begründet: Durch die höhere spezifische Oberfläche schmelzen und verdampfen die kleinen Partikel früher als die großen und tragen so zur Verstärkung des Lichtbogenplasmas bei, das einen dämpfenden Einfluß auf die Schaltspannungsspitze hat [Tur73, Saq99, Bus00].

Auch in [Bus00-01] wird eine Abnahme der Schaltspannung mit sinkendem Korndurchmesser des Löschmittels gefunden. Allerdings ist der Effekt dort auch reziprok zur „Packungsdichte“ des Löschmittels, was im Widerspruch zur hier gefundenen Abnahme der Schaltspannung mit zunehmender Porosität (Abnahme der Porosität $\hat{=}$ Zunahme der Packungsdichte) steht. Bussière verwendet jedoch ein Löschmittel mit monodisperser Korngrößenverteilung und

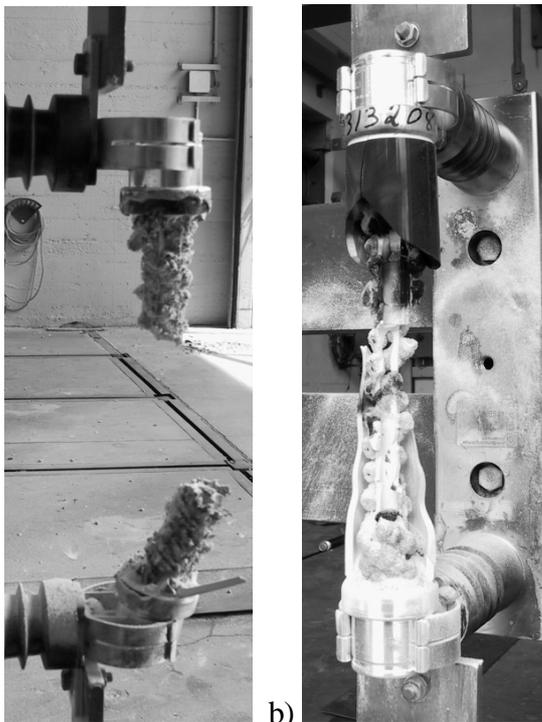


Bild 4.77: Prototypen mit 30 % W12 im Löschmittel nach Schaltversuch

- a) Längsüberschlag
- b) Segradation

Gleichspannung, während hier eine bidisperse Mischung und Wechsellspannung benutzt wurden.

Das Versagen der Sicherungen mit hohem Füllgrad an W12 (Bild 4.77) ist auf die geringe Porosität des Löschmittels zurückzuführen, die nahe 30 % minimal ist (s. Bild 4.58). Zwar wurden für hohe Packungsdichten die geringsten Lichtbogenenergien gefunden worden [Nam83, Bus01], jedoch an Modellsicherungen mit nur einer Engstelle und unter Laborbedingungen. Bei den hier verwendeten „Fullscale“-Prototypen mit mehreren Engstellen und wegen der Prüfung mit Hochspannung ist neben der Schaltenergie auch die Spannungsfestigkeit relevant. Durch die arbiträre Form der Sandkörner und das zugemischte W12 ist die Elastizität des Löschmittels besonders hoch [Yin92], wodurch es durch die beim Schalten entstehende Druckwelle aus dem Lichtbogenbereich zurückgedrängt wird und seine Kühlwirkung nicht mehr voll entfalten kann. Es bilden sich längere und dickere Lichtbogen-Segmente, die schließlich zusammenwachsen und so eine Löschung verhindern. Die versagenden Sicherungen wiesen tatsächlich keine Schmelzraupen auf (Bild 4.77 a)), was auf einen Längsdurchschlag am Schmelzleiterträger hindeutet. Andere Prüflinge zeigten eine sehr inhomogene Schmelzraupenausprägung (Bild 4.77 b)), was auf eine ungünstige Verteilung des Löschmittels zurückzuführen ist, die bei der Fertigung der Prüflinge durch Segradation beim Einfüllen und Verfestigen des Löschmittels entstanden ist.

4.5.3 Sicherungen mit Schmelzleitervariationen

Mit der in Kap. 3.3.1 beschriebenen synthetischen Prüfanlage wurden verschiedene Schmelzleitervariationen getestet, die für eine Verbesserung des TE-Verhaltens relevant sind. Nach Bild 2.33 d) führt eine Verlängerung der Schmelzleiter, d.h. die Erhöhung der Wickelanzahl, zu einer Reduzierung des elektrischen Feldes und folglich zu einer Absenkung der TE-

Aktivität. In Bild 4.78 sind Schmelzraupen einer Versuchsserie dargestellt, bei der die Anzahl der Windungen des Schmelzleiters (CuNi10-Legierung, $\varnothing = 0,185 \text{ mm}$) sukzessive erhöht wurde. Es ist zu erkennen, daß bei einer Windungsanzahl von $n = 60$ keine durchgängige Schmelzraupe mehr vorhanden ist. Die Erhöhung der Windungsanzahl führt bis $n = 40$ zu einer Erhöhung der Schaltspannung, obwohl der Prüfstrom konstant gehalten wurde, was am zunehmenden Widerstand liegt. Der Durchlaßstrom lag bis zum Erreichen des Lichtbogenintervalls bei ca. 270 A. Eine Erhöhung der Windungsanzahl über $n = 40$ hinaus führt wegen der Wicklungsüberschläge zu einem Absinken der Schaltspannung, aber auch zu einem Versagen der Sicherung (s. Bild 4.78, $n = 60$).

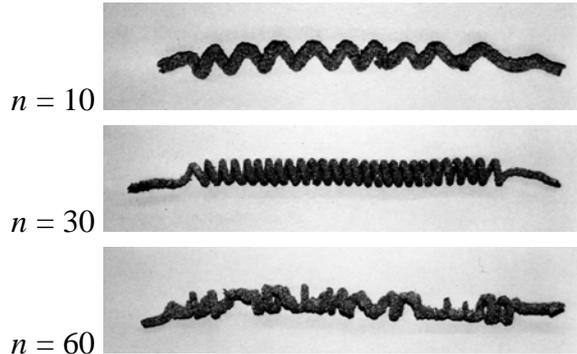


Bild 4.78: Schmelzraupen von Schmelzleiteranordnungen mit unterschiedlichen Windungszahlen n ($\hat{i}_p = 470 \text{ A}$, $U_p = 11 \text{ kV}$)

Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei Schaltprüfungen in den Leistungsprüffeldern sind in Bild 4.78 trotz des Versagens der Schmelzleiteranordnung noch Details der Schmelzraupe zu erkennen. Dies liegt an der geringeren eingebrachten Energie, die durch die Ladung des Kondensators der synthetischen Prüfeinrichtung begrenzt ist.

4.6 Vergleich und Bewertung TE-reduzierender Maßnahmen

4.6.1 Technische Betrachtung

Als Vergleichswerte für die Effektivität der TE-reduzierenden Maßnahmen sind in Bild 4.79 die Differenzen ΔU_{TE} der TE-Einsatzspannungen und der Quotient V_Q der TE-Pegel bei 20 kV der betrachteten Modifikationen gegenüber unmodifizierten Mustern dargestellt. Die Sicherungskapselungen wurden nicht berücksichtigt, da sie von vornherein auf TE-Freiheit ausgelegt waren und diesen Zustand im betrachteten Spannungsbereich zumindest anfangs auch erreichten.

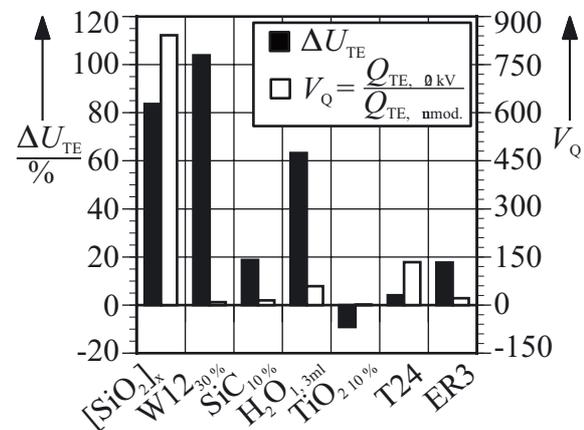


Bild 4.79: Vergleich der TE-reduzierenden Maßnahmen

Die besten Werte in der Erhöhung der TE-Einsatzspannung werden durch die Addition von polymeren Siliziumdioxid $[\text{SiO}_2]_x$ und Quarzmehl W12 zum Löschmittel erreicht, allerdings ist der Reduktionsfaktor für Quarzmehl deutlich geringer als für $[\text{SiO}_2]_x$, das den höchsten Reduktionsfaktor erzielt. Die Zugabe von Wasser erhöht ebenfalls die TE-Einsatzspannung und die Reduktion der scheinbaren Ladung bei 20 kV ist ebenfalls sehr gut, allerdings ist dieser Effekt nur von kurzer Dauer (s. 4.3.1) und abhängig vom Stromfluß durch die Sicherung. Die Addition von SiC und TiO_2 zum Löschmittel brachte kaum Verbesserungen. Die leitfähige Beschichtung ER3 liefert bessere TE-Einsatzspannungen als die leitfähige Glasur T24, deren Reduktionsfaktor ist jedoch höher.

Zudem ist die keramische Beschichtung besser zu verarbeiten und erzielt eine höhere Haftung auf dem Porzellanrohr.

Die Löschmittelmodifikationen erreichen im Durchschnitt eine höhere Reduktionsperformanz als die Beschichtungssysteme und Kapselungen, haben aber Einfluß auf das Schaltverhalten, wie in 4.5.2 gezeigt wurde. Dieser Nachteil könnte jedoch in einen Vorteil überführt werden, wenn TE- und Schaltverhalten gemeinsam optimiert werden. So deuten die Versuche mit Quarzmehlzugabe zum Löschmittel auf ein Optimum im Bereich 10-20 % hin, in dem die TE-Reduktion schon recht hoch ist, die Sicherung aber noch sicher schaltet und als zusätzlichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Sicherungen eine reduzierte Schaltspannung erreicht. Eleganter in Bezug auf das Schaltverhalten sind die Beschichtungssysteme und Kapselungen, da diese nicht in die Löschprozesse der Sicherung eingreifen.

4.6.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Aus ökonomischer Sicht ist die Addition von W12 zum Löschmittel am günstigsten, da die Fertigungsschritte der Sicherung kaum modifiziert werden müssen und das Quarzmehl im Vergleich zu SiC oder TiO₂ preisgünstig ist. Die Herstellung von Löschmitteln mit multidisperser Korngrößenverteilung ist in der Baustoffindustrie durchaus üblich und mit sehr geringen Zusatzkosten verbunden. Die Addition von [SiO₂]_x oder Wasser erfordert ein Tempern der Sicherung, was einen weiteren Fertigungsschritt darstellt. Zusätzliche Fertigungsschritte bedingen Investitionen in Maschinen oder größeren Personalaufwand, erhöhen damit den Produktpreis und sind daher unerwünscht.

Die Beschichtungsvarianten erfordern zwar keine zusätzlichen Fertigungsschritte, da die Sicherungsröhre sowieso beschichtet werden müssen, die Herstellung der Beschichtungen ist jedoch komplizierter als bei herkömmlichen Systemen. Der Anteil der Kosten für die Beschichtung am Gesamtpreis der Sicherung ist allerdings gering, so daß auch nur geringe Mehrkosten zu erwarten sind.

Hohe Kosten verursachen Sicherungskapselungen, wenn diese zusätzlich an der Sicherung angebracht werden, da dies entsprechende Fertigungsschritte und Bauteile erfordert. Wird die Sicherung in einer gekapselten Schaltanlage verwendet, sind ohnehin Vorrichtungen zur Aufnahme der Sicherung notwendig, die ohne großen Aufwand mit einer Feldsteuerschicht versehen werden können, so daß diese Maßnahme etwa kostenneutral ist.

Alle genannten Verfahren erfordern höhere Aufwände in der Auslegung der Sicherung (z.B. Einstellung der Leitfähigkeit eines Beschichtungssystems zur Feldsteuerung) und in der Qualitätskontrolle (z.B. TE-Prüfung, Überwachung der Leitfähigkeit). Verfahren zur TE-Reduktion, die das Löschmittel betreffen, bedingen zusätzlich eine Überprüfung des Schaltverhaltens, die recht kostenintensiv ist.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit dem Teilentladungsverhalten von quarzsandgefüllten strombegrenzenden HH-Sicherungen. Motivation zu ihrer Erstellung war die zunehmende Miniaturisierung im Schaltanlagenbau, von der auch die Sicherungen als integraler Bestandteil solcher Anlagen betroffen sind.

Die Untersuchungsziele waren die Bestimmung des Teilentladungsverhaltens und der beeinflussenden Parameter, die Ermittlung der Auswirkungen von Teilentladungen auf das Schaltverhalten sowie die Verbesserung der Sicherungen hinsichtlich der Vermeidung von Teilentladungen.

Die Untersuchungen wurden sowohl an handelsüblichen Sicherungen wie auch an einer Modellanordnung vorgenommen. Zur Messung des TE-Verhaltens wurden spezielle ölgefüllte Prüfgefäße entwickelt, die sensitive TE-Messungen auch bei Strombelastung der Prüflinge zuließen. Die Einflüsse von geometrischen Konstruktionsparametern auf die Feldverteilung innerhalb der Sicherung wurden an einem FEM-Modell untersucht.

Zur Verbesserung des TE-Verhaltens wurden verschiedene Verfahren getestet und implementiert, die auf der Feldsteuerung des Sicherungsrohrs oder der Sicherungskapselung beruhen, sowie auf der Modifikation des Löschmittels und der Schmelzleiter.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Teilentladungsverhalten

Teilentladungen in Sicherungen entstehen an den meist sehr feinen Schmelzleitern innerhalb der Sicherung und breiten sich in das umgebende Löschmittel (Sand) aus, das ein heterogenes Gemisch aus Feststoff- und Gasisolation darstellt. Die TE-Impulse erreichen je nach eingestellten Versuchsparametern Ladungswerte von wenigen 10^{-12} C bis hin zu mehreren hundert 10^{-9} C. Die Impulsrate variiert dabei von Einzelimpulsen bis hin zu mehreren hundert tausend Impulsen pro Sekunde.

- Das Charakteristikum der TE in Sicherungen ist ein komplexer Prozeß gleichzeitig auftretender Oberflächen- und Hohlräumentladungen, die in dem kohäsionslosen Löschmittel Sand entstehen, das Hohlräume unterschiedlichster Größe und Form enthält, die miteinander verbunden und nicht abgeschlossen sind wie in herkömmlichen Isolierstoffsystemen.
- Einsatz und Stärke der TE hängen von der angelegten Spannung bzw. von der Feldstärke ab, die in einer FEM-Simulation untersucht wurde. Die Feldstärke hängt stark vom Abstand der Sicherung zu geerdeten Bauteilen, von der Schmelzleiterdicke und von der Permittivität des Löschmittels ab, mäßig von der Schmelzleiterlänge und nur schwach von der Anzahl der Stege des Schmelzleiterträgers. Das Feld wird durch die inhomogene Struktur des Löschmittels auf den 6-fachen Wert einer homogenen Anordnung angehoben. Zusammen mit dem geringen geometrischen Ausnutzungsfaktor von nur einigen Prozent ergeben sich Feldstärken an den Schmelzleitern von mehreren 10 kV/mm.
- Anhand von φ - q - n -Pattern und deren statistischer Auswertung wurde das TE-Verhalten als typisch für Mehrfachfehlstellen in festem Isolierstoff bzw. multiple Nadelanordnung in Luft identifiziert. Dieses Verhalten folgt aus der Mischform von Oberflächen- und Hohlräumentladungen, die sich durch die chaotische Anordnung der Sandkörner ergibt.

Die Impulse treten bei geringen Spannungen bevorzugt in der negativen Halbwelle auf, bei höheren Spannungen in der positiven. In der negativen Halbwelle sind die Impulse stärker auf den Bereich vor dem Spannungsmaximum konzentriert und zeigen Ähnlichkeit mit Trichelimpulsen, während in der positiven Halbwelle das diffuse Muster von Oberflächenentladungen vorherrscht.

- Die TE-Aktivität ist bei konstanter Prüfspannung zeitabhängig. Im Verlauf der Prüfung sinkt sowohl die Anzahl der TE-Impulse als auch deren Stärke. Die Absenkung ist stark vom Strom durch die Schmelzleiter abhängig. Dabei sinkt die TE-Aktivität im negativen Spannungszyklus bedeutend stärker als im positiven. Die Absenkung ist reversibel: Nach einer belastungsfreien Phase stellt sich das ursprüngliche TE-Verhalten wieder ein. Die Absenkung wird auf das Zusammenspiel plasmachemischer und katalytischer Vorgänge an den Sandkornoberflächen zurückgeführt.
- In der Ersatzanordnung tritt bei Temperaturerhöhung eine Steigerung der TE-Aktivität auf, und die Absenkung der TE-Aktivität über der Prüfzeit vermindert sich. Bei stromdurchflossenen Sicherungen nimmt die TE-Aktivität hingegen deutlich ab, und die Absenkung erfolgt schneller. Als Ursache wurde das relativ große Gasdepot der Ersatzanordnung ermittelt, in das Entladungsprodukte zur Rekombination abdiffundieren können. Dieses Depot ist bei Sicherungen nicht vorhanden, da sie hermetisch abgeschlossen sind. Dies ist auch der wesentliche Unterschied zu plasmachemischen Reaktoren, deren sonstiges Entladungsverhalten viele Übereinstimmungen mit dem von Sicherungen zeigt.
- Gasart und der Druck beeinflussen das TE-Verhalten entscheidend. Sowohl eine Füllung mit Stickstoff als auch eine Durchströmung der Sicherung mit Luft erhöhen die TE-Aktivität um mehrere Dekaden und verhindern die Absenkung der TE-Aktivität über der Prüfzeit. Dies wird auf die Entstehung von Ozon zurückgeführt, einem stark elektronegativen Gas, das sich in Stickstoff nicht bilden kann bzw. bei Durchströmung dem Hochfeldbereich entzogen wird. Das Ozon konnte nachgewiesen werden, und seine Konzentration verhält sich reziprok zur TE-Aktivität. Der Druckeinfluß spiegelt die zu erwartende Paschencharakteristik wider, wobei die minimale Durchschlagsspannung von der Hohlraumgröße und damit von der Körnung des Löschmittels abhängt.
- Das TE-Verhalten streut nicht nur stark von Prüfling zu Prüfling, sondern auch an einzelnen Exemplaren, wenn diese zwischen den Versuchen bewegt werden. Grund hierfür ist das kohäsionslose Löschmittel, dessen Körner sich je nach Einbaulage und Art der Bewegung neu anordnen und so durch mechanische Effekte (Kraftbrücken, Segregation) zu einem stark veränderten TE-Verhalten führen.
- Aufgrund der Anzahl und Vielfalt von möglichen Entladungsformen im Löschmittel und wegen der hohen Streuung ist es nicht möglich, ein einzelnes verlässliches Kriterium zur Identifikation sicherungsspezifischer TE anzugeben. Typisch sind die zahlreichen Impulse mit geringer Ladungsintensität, die durch die Oberflächenentladungen verursacht werden und von sporadischen, sehr starken Impulsen durch die Hohlraumdurchschläge überlagert werden.
- Die TE hatten bei den hier verwendeten Sicherungen (6/12 kV, 40 A) keinen nennenswerten Einfluß auf das Schaltverhalten. Zwar wurde Elektroerosion an den Schmelzleitern festgestellt, diese hatte aber nur einen minimalen Effekt auf die Strom-Zeit-Kennlinie.

TE-reduzierende Maßnahmen

- Zur Reduktion der TE-Aktivität wurden verschiedene Modifikationen des Löschmittels entwickelt und getestet. Die stärkste TE-Minderung (bis zu 99,9 %) konnte durch eine Versiegelung der Hohlräume mittels polymerem Siliziumdioxid erreicht werden, da das Löschmittel hierdurch vom offen- in den geschlossenenporigen Zustand überführt wird. Die Zumischung einer feineren Körnung (W12) zum Löschmittel senkte die TE-Aktivität durch Verminderung der Porosität um mehrere Dekaden, der Einfluß auf die TE-Einsetzspannung war jedoch geringer als bei polymerem Siliziumdioxid. Die optimale Porosität zur Unterdrückung von TE ist mit der kritischen identisch, die in dieser Untersuchung bei 30 % lag. Allerdings waren die Sicherungen dann nicht mehr in der Lage zu löschen. Durch die Zumischung sinkt die Schaltspannung, aber die Schaltwärme steigt. Der Zuschlag von Stoffen zur Erhöhung der Leitfähigkeit (SiC-Pulver) oder Permittivität (TiO₂-Mehl) des Löschmittels zeigte nur eine geringe Wirkung.
- Die Erhöhung der Löschmittelfeuchte reduzierte die TE-Aktivität durch Leitfähigkeitssteigerung insbesondere an den Sandkornoberflächen, was TE-fördernde Ladungsansammlungen oder Feldverzerrungen vermindert. Der Effekt ist jedoch nicht nachhaltig, da das Wasser durch Migration in Sackporen der Sandkornoberflächen oder Einbau in die Kristallstruktur des SiO₂ dem Entladungsraum entzogen wird.
- Auch mit Feldsteuerschichten konnten die TE abgesenkt oder eliminiert werden. Es wurde eine Engobe auf SiC-Basis entwickelt, die zusammen mit dem Porzellanrohr gebrannt werden kann und deren Widerstand sich in großen Bereichen einstellen läßt. Die Wahl des Widerstandes ist kritisch, da zur TE-Minderung niedrige Werte erforderlich sind, nach dem Schalten der Sicherung aber kein Strom mehr fließen darf. Prüflinge mit zu hoch eingestellter Leitfähigkeit versagten nach dem Schalten, da sie sich durch den Reststrom stark erwärmten.
- Durch Verwendung vorgefertigter Muffenkörper und Feldsteuerbauteile aus der Kabeltechnik konnten Garnituren gefertigt werden, die anfangs keine TE aufwiesen. Bei Wärmeschrumpfmuffen kam es nach Lastwechselversuchen zu einem Verlust der Steuerwirkung, und es waren wieder TE feststellbar. Garnituren aus Silikonkautschuk behielten ihre schirmende Wirkung. Wie auch bei den Feldsteuerschichten konnte kein Einfluß der Modifikation auf das Schaltverhalten festgestellt werden.

Für die Praxis lassen sich aus der Arbeit folgende Hinweise ableiten:

- Das TE-Verhalten marktüblicher strombegrenzender Sicherungen mit Sandfüllung ist in konventionellen Schaltanlagen meist unkritisch. Probleme ergeben sich, wenn der Abstand zu geerdeten Teilen in der Umgebung reduziert wird, z.B. bei Kompaktschaltanlagen oder wenn die Sicherung in den Kessel von Transformatoren integriert wird.
- Ist das Auftreten von TE tolerabel, sind bei mittleren TE-Pegeln und den hier untersuchten Sicherungen keine besonderen Maßnahmen erforderlich. Es konnten keine gravierenden Veränderungen am Schaltverhalten der Sicherungen festgestellt werden, obschon Elektroerosion an den Schmelzleitern beobachtet wurde.
- Obwohl das TE-Verhalten von Sicherungen charakteristische Merkmale aufweist, nämlich das gleichzeitige Auftreten von Hohlraum- und Oberflächenentladungen, ist es im Feld

nur schwer möglich, diese der Sicherung zuzuordnen, da andere Fehler in Mittelspannungsanlagen ähnliche TE-Muster provozieren können.

- Eine Reduzierung der TE ist am einfachsten durch eine Modifikation der Löschmittelkörnungen möglich, da die sonstigen Fertigungsschritte von Sicherungen nicht verändert werden müssen. Die Reduktion der Porosität des Löschmittels führt aber zu einem Anstieg der Schaltwärme, der beachtet werden muß.
- TE-Reduktion ist auch durch Feldsteuerung möglich. Die Feldsteuerung kann am Sicherungsrohr oder an der Sicherungskapselung angebracht werden. Vorsicht ist bei der Wahl der Leitfähigkeit der Feldsteuerschicht geboten.

Die vorgestellten Sachverhalte und Konzepte können einzeln oder kombiniert zur Verbesserung der Sicherungen beitragen. Der Sicherungshersteller kann anhand der Parameterstudien aus der Feldsimulation Tendenzen für eine Verbesserung der Schmelzleiterkonfiguration ablesen und durch Veränderung der Korngrößenverhältnisse im Löschmittel oder Aufbringen einer Feldsteuerschicht die inherenten TE-Eigenschaften der Sicherungen verbessern. Der Schaltanlagen- oder Transformatorenhersteller kann dies durch Feldsteuermaßnahmen oder feldmindernde Konstruktion der Sicherungskammern unterstützen und so kompaktere Betriebsmittel fertigen, die dem Kundenwunsch nach Platzersparnis entgegenkommen.

Ausblick

Weitere Verbesserungen von Sicherungen in Bezug auf das TE-Verhalten sind durch folgende Maßnahmen denkbar:

- Multidisperse Korngrößenverteilungen im Löschmittel. Aus dem NH-Bereich sind Löschmittel mit bis zu fünf verschiedenen Korngrößenfraktionen bekannt, die ursprünglich zur Verbesserung des Schaltverhaltens gedacht waren [Ily99]. Es ist zu prüfen, ob die beobachtete Absenkung der TE-Aktivität beim Einsatz bidisperser Korngrößenverteilungen durch multidisperse noch gesteigert werden kann.
- Unkonventionelle Schmelzleitersysteme. Konventionelle Sicherungen verwenden Schmelzleitersysteme, die auf das Schaltverhalten optimiert sind. Sie bestehen aus wendelförmigen Schmelzleitern, die in Sand eingebettet sind. Eine Verbesserung könnte die Anordnung der Schmelzleiter auf Substraten bringen, ähnlich wie in [Sche84] beschrieben.
- Völlig neue Perspektiven eröffnen sich, wenn von der wendelförmigen Anordnung der Schmelzleiter abgegangen wird, da diese durch die diskrete Anordnung einzelner Leiter und die notwendigen Abstände der einzelnen Wendel immer einen schlechten Ausnutzungsfaktor erreicht (s. Kap. 4.1.2). Wird statt dessen ein Gestricke oder Gewebe eingesetzt [Dro96], könnte dieses schlauchförmig ausgebildet werden, so daß sich zusammen mit dem Sicherungsrohr eine nahezu konzentrische Anordnung ergibt, deren verbesserte Feld- und damit auch TE-Situation offensichtlich ist.

Literaturverzeichnis

- Abr94 Abrahams SC: *Structure relationship to dielectric, elastic and chiral properties*. Acta Cryst. A50(1994), H. 6, S. 658-85
- Aki02 Akishev Y; Grushin M; Napartovich A; Trushkin N: *Novel AC and DC non-thermal plasma sources for cold surface treatment of polymer films and fabrics at atmospheric pressure*. Plasm. Polym. 7(2002), H. 3, S. 261-89
- Alb66 Alberts L; Bohlmann M; Meiring GL: *The influence of low moisture content on the conductivities of a granular substance such as sand*. Brit. Journ. App. Phys. 17(1966), H. 7, S. 951-5
- Alfa95 N.N.: *Technische Information 01/1995*. Firmenschr., Aschaffenburg Lack- und Farbenfabrik, Aschaffenburg, 1995
- Alt02 Altenburger R; Heitz C; Timmer J: *Analysis of phase-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach*. Journ. Phys. D 35(2002), S. 1149-63
- Ama89 Amara K; Goldman A; Goldman M; Sigmond RS: *Current imbalance and charge build-up on insulators in AC air coronas*. Konf., 3rd Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Trondheim (Schweden), 3.-6. Juli 1989, S. 20-4
- Amj00 Amjadi H: *The mechanism of voltage decay in corona-charged layers of silicon dioxide during UV irradiation*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 7(2000), H. 2, S. 222-8
- Ani93 Anis MK; Jonscher AK: *Frequency and time-domain measurements on humid sand and soil*. Journal of Materials Science 28(1993), S. 3626-34
- Asp94 Aspas J; Garay-Gordovil JM; Llobell J: *Thermal behaviour of different fuse enclosure packages in 24 kV-SF6 main units*. Konf., 4th Int. Conf. on Trends in Distribution Switchgear, London (England), 7.-9. Nov. 1994, S. 71-5
- Auc97 Auckland DW; Su W; Varlow BR: *Nonlinear fillers in electrical insulation*. Proc.-Sci. Meas. Techn. 144(1997), H. 3, S. 127-33
- Bam87 Bammert U: *Bestimmung des Teilentladungs(TE)-Verhaltens von gefülltem Epoxidharz anhand automatisch erfaßter Kenngrößen*. Diss., Univ. Hannover, 1987
- Bar02 Bartnikas R: *Partial Discharges*. IEEE Trans. on Electrical Insulation 9(2002), H. 5, S. 763-808
- Bea93 Beaujean DA; Newbery PG; Jayne MG: *Long-time operation of high breaking capacity fuses*. Proc.-Sci. Meas. Techn. 140(1993), H. 4, S. 331-7
- Bec05 Becker KH; Kogelschatz U; Schoenbach KH; Barker RJ: *Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure*. Monogr., Inst. of Physics, Bristol [u.a.], ISBN: 0-7503-0962-8, 2005
- Beh01 Behringer PB; Clément E; Geng J; Howell D; Kondic L; Metcalfe G; O'Hern C; Reydeller G; Tennakoon S; Vanel L; Veje C: *Science in the Sandbox: Fluctuations, Friction and Instabilities*. Lecture Notes in Physics, 567(2001), S. 351-91
- Berl01 Berler Z; Blokhintsev I; Golubev A: *Partial discharge on-line monitoring in switchgears and bus ducts*. Konf., 7th Int. Conf. on Solid Dielectrics, Eindhoven (Niederlande), 25.-29. Juli 2001, S. 355-60
- Bert73 Bertein H: *Charges on insulators generated by breakdown of gas*. Journ. Phys. D 6(1973), S. 1910-6
- Bes83 Bessei H: *Auswahlkriterien für den Einsatz von Elastomeren in Mittelspannungsgarnituren*. Elektrizitätswirtschaft 82(1983), H. 8, S. 249-53
- Bet94 Betz T; König D: *Synthetische Prüfanlagen zur Untersuchung des Löschverhaltens von Mittelspannungssicherungen*. Elektrotechnische Zeitung 115(1994), H. 18, S. 1044-51
- Bey86 Beyer M; Boeck W; Möller K; Zaengl W: *Hochspannungstechnik: Theoretische und praktische Grundlagen*. Monogr., Springer Verlag, Berlin [u.a.], 1986
- Bin71 Binns DB: *Conducting-Glazes I-II*. Trans. Journ. Brit. Ceram. Soc., Teil I: 70(1971), H. 7, S. 253-63; Teil II: 73(1974), H. 1, S. 7-17
- Blai01 Blaise G: *Charge localization and transport in disordered dielectric materials*. Journ. of Electrostatics 50(2001), H. 2, S. 69-89
- Blan94 Blankenburg H-J; Götze J; Schulz H: *Quarzhrohstoffe*. Monogr., Dt. Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig [u.a.], 1994
- Bok94 Bokor A; Gonda G: *Model of Warming and Breaking of Fusible Filaments in High Voltage Fuses*. Periodica Polytechnica Ser. Electrical Eng. 38(1994), S. 17-27
- Borc03 Borcia G; Anderson CA; Brown NMD: *Dielectric barrier discharge for surface treatment: Application to selected polymers in film and fibre form*. Plasma Sourc. Sci. Tech. 12(2003), S. 335-44

- Bors00 Borsi H: *A PD measuring and evaluation system based on digital signal processing*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 7(2000), H. 1, S. 21-9
- Boz95 Bozzo R; Gemme C; Guastavino F: *The influence of digital measurement system characteristics on PD patterns*. Konf., Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach (VA, USA), 22.-25. Okt. 1995, S. 347-52
- Boz98 Bozzo R; Gemme C; Guastavino F; Cacciari M; Contin A; Montanari GC: *Aging diagnosis of insulation systems by PD measurements. Extraction of partial discharge features in electrical treeing*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 5(1998), H. 1, S. 118-24
- Brai00 Braithwaite NSJ: *Introduction to gas discharges*. Plasma Sourc. Sci. Tech. 9(2000), S. 517-27
- Brau91 Braun D: *Zum Wirkungsgrad von Ozonerzeugern*. Diss., RWTH Aachen, 1991
- Bre93 Brechtken D: *Untersuchungen zum Einsatz von SF6 und Vakuum in Hochspannungssicherungen*. Diss., TH Darmstadt, 1993
- Buc82 Bucher TG: *Encapsulated Current-Limiting Fuses: Grounded-Front Design*. Trans. on Power Apparatus and Systems 101(1982), H. 7, S. 1975-78
- Bün00 Bünger S; Grote M; Nellen U: *Zukunftsweisende HH-Ganzbereichsicherung als Komplettschutz von Mittelspannungsgeräten*. Elektrizitätswirtschaft 99(2000), H. 4, S. 31-7
- Bur92 Burns NM; Eichhorn RM; Reid CG: *Stress controlling semiconductive shields in medium voltage power distribution cables*. IEEE Electrical Insulation Magazine 8(1992), H. 5, S. 8-24
- Bus00 Bussière W: *Mesure des grandeurs (T,Ne,P) au sein du plasma d'arc des fusibles Moyenne Tension*. Diss., Univ. Blaise Pascal - Clermont-Ferrand, 2000
- Bus01 Bussière W: *Influence of sand granulometry on electrical characteristics, temperature and electron density during high-voltage fuse arc extinction*. Journ. Phys. D 34(2001), S. 925-35
- Cab93a Cabrera VM: *Photographic Investigations of Electric Discharges in Sandy Media*. Journ. of Electrostatics 30(1993), H. 5, S. 47-56
- Cab93b Cabrera VM; Lundquist S; Cooray V: *On the Physical Properties of discharges in Sand Under Lightning Impulses*. Journ. of Electrostatics 30(1993), H. 5, S. 17-28
- Cac96 Cacciari M; Contin A; Mazzanti G; Montanari GC: *Identification and separation of two concurrent pd discharge phenomena*. Konf., Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Millbrae (CA, USA), 20.-23. Okt. 1996, Bd. 2, S. 476-9
- Cal87 Calamiotou M; Psicharis V; Filippakis SE; Anastassakis E: *Space-charge polarisation and extinction reduction in α -quartz*. Journ. Phys. C: Solid State Phys. 20(1987), S. 5641-53
- Cha91 Chang JS; Lawless A; Yamamoto T: *Corona Discharge Processes*. IEEE Trans. on Plasma Science 19(1991), H. 6, S. 1152-66
- Chaos99 Behringer R; Jaeger H; Nagel S (Edts.): *Focus Issue: Granular Materials*. Chaos 9(1999), H. 3, S. 509-817
- CheJ02 Chen J: *Direct Current Corona-Enhanced Chemical Reactions*. Diss., Univ. Minnesota, 2002
- CheJ03 Chen J; Davidson H: *Ozone Production in the Negative DC Corona: The Dependence of Discharge Polarity*. Plasma Chem. Plasma Proc. 23(2003), H. 3, S. 501-18
- Chel02 Chelikowsky J: *Silicon in All Its Forms*. Mat. Res. Soc. Bull. [Nebentitel: MRS Bulletin] 27(2002), H. 12, S. 951-60
- CheS87 Chen S: *Research on the Technique of Filling Quartz Sand in Fuse*. Konf., 3rd Int. Conf. on Electric Fuses and their Application, Eindhoven (Niederlande), 11.-13. Mai 1987, S. 93-8
- Chr90 Christophorou LG; Pinnaduwege LA: *Basic physics of gaseous dielectrics*. IEEE Trans. on Electrical Insulation 25(1990), H. 1, S. 55-74
- Cla99 Claudin P: *La physique des tas de sable*. Annales de Physique 24(1999), H. 2, S. 1-207
- Cli01 Cliteur GJ; Wetzter JM: *Condition assessment of power transmission and distribution components*. Konf., 16th Int. Conf. and Exhib. on Electricity Distribution (IEE Conf. Publ. No. 482), Amsterdam (Niederlande) 18.-21. Juni 2001, Beitrag 1.26
- Col61 Collins RE: *Flow of Fluids through Porous Materials*. Monogr., Reinhold Publ. Cor., New York, 1961
- Com30 Compton KT; Langmuir I: *Electrical Discharges in Gases, Part 1&2*. Rev. of Modern Physics, Teil 1: 2(1930), S. 123-242; Teil 2: 3(1931), S. 191-257
- Cub02 Cubrinovski M; Ishihara K: *Maximum and minimum void ratio characteristics of sands*. Soils and foundations 42(2002), H. 6, S. 65-78
- Cwi93 Cwidak K; Lipski T: *Post-Arc Resistance in h.b.c Fuses*. Konf., 7th Int. Conf. on Switching Arc Phenomena, Lodz (Polen), 27. Sept.-1. Okt. 1993, S. 202-5

- Czu99 Czucha J; Lipski T; Zyborski J: *New Current-Limiting and Interrupting Device Contra Current-Limiting Fuses*. Konf., 6th Int. Conf. on Electric Fuses and their Application, Turin (Italien), 20.-22. Sept. 1999, S. 293-8
- Dan40 Dannenberg K: *High tension fuse*. Pat., US2216661, 1940
- Dan42 Dannenberg K; John WJ: *A High-Voltage High-Rupturing-Capacity Cartridge Fuse and its Effect on Protection Technique*. Journ. IEE 89(1942), S. 565-84
- Dem99 Demuth T; Jeanvoine Y; Hafner J; Angyan JG: *Polymorphism in silica studied in the local density and generalized-gradient approximations*. Journ. Phys.: Condensed Matter 11(1999), S. 3833-74
- Det91 Dettmar G; Humburg K: *Die Entwicklung der Starkstromtechnik in Deutschland, Teil 2*. Monogr., Hrsg. von K. Jäger, vde-verlag, Berlin und Offenbach, 1991
- Deu95 Deutschmann O; Riedel U; Warnatz J: *Modeling of Nitrogen and Oxygen Recombination on Partial Catalytic Surfaces*. Journ. of Heat Transfer 177(1995), H. 2, S. 495-501
- DIN43625 N.N.: *Hochspannungs-Sicherungen Nennspannung 3,6 bis 36 kV / Maße für Sicherungseinsätze*. Norm, 11/83, Beuth Verlag, Berlin, 1983
- Dir86 Dirks R: *Ist die HH-Sicherung als Transformatorschutz noch zeitgemäß?*. Elektrizitätswirtschaft 85(1986), H. 16/17, S. 619-21
- Dir88 Dirks R: *Die HH-Sicherung als Herausforderung an den Schaltanlagen-Konstrukteur*. Elektrizitätswirtschaft 87(1988), H. 16/17, S. 781-2
- Dis04 Dissado LA; Fothergill JC: *Dielectrics and nanotechnology*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 11(2004), H. 5, S. 737-9
- Dre01 Dreischke W: *Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen haben sich seit Jahrzehnten bewährt, Teil 1*. EVU-Betriebspraxis 40(2001), H. 11, S. 22-6
- Dre02 Dreischke W: *Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen haben sich seit Jahrzehnten bewährt, Teil 5*. EVU-Betriebspraxis 41(2002), H. 6, S. 28
- Dre94 Dreischke W: *Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen (Technische Information)*. Firmenschr., E1T1 1994, Wickmann Werke GmbH, Witten, 1994
- Dro96 Drothen M: *pers. Gespräch 29.4.1996*.
- Dum98 Dumke K: *Untersuchungen an einer Esterflüssigkeit als Isolierstoff für Transformatoren*. Diss., Univ. Hannover, 1998
- Dvo01 Dvorkin J; Gutierrez MA: *Grain Sorting, Porosity, and Elasticity*. Online-Ressource, 24. Juli 2001, Dept. of Geophysics, Stanford Univ., URL:<http://pangea.stanford.edu/~jack/Bimodal.pdf>, gesichtet: 7. März 2003
- Edi80 Edison TA: *Safety-Conductor for Electric Lights*. Pat., US227226, 1880
- Ege90 Eger D: *Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung der physikalischen Vorgänge in Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen*. Diss., TH Ilmenau, 1990
- Ehr99 Ehrhardt A: *Schaltverhalten von Sicherungen bei kleinen Überlastströmen unter besonderer Berücksichtigung des Wiederzündens*. Diss., TU Ilmenau, 1999
- Ein04 Einaga H; Futamura S: *Comparative study on the catalytic activities of alumina-supported metal oxides for oxidation of benzene and cyclohexane with ozone*. Reac. Kin. Cat. Letters 81(2004), S. 121-8
- Eli87 Eliasson B; Hirth M; Kogelschatz U: *Ozone synthesis from oxygen in dielectric barrier discharges*. Journ. Phys. D 20 (1987), S. 1421-1437
- EN60270 N.N.: *DIN EN 60270: Hochspannungs-Prüftechnik - Teilentladungsmessungen*. Norm, Vers. 08/01, VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 2001
- EN60282 N.N.: *DIN EN 60282-1: Hochspannungssicherungen*. Norm, Vers. 02/98, VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1998
- Enc98 Enculescu I; Iliescu B: *Current voltage characteristics of alpha-quartz*. Europ. Phys. Journ. - App. Phys. 2(1998), H. 3, S. 203-7
- Eng32 Engel, von A; Steenbeck M: *Elektrische Gasentladungen*. Monogr., Bd. 1, Springer Verlag, Berlin, 1932, [Bd. 2, 1934]
- Erl85 Erlenhof A; Grote J; Heiß W; Müller HJ; Siebel KH; Wittek L: *Platzsparender und berührungssicherer Kurzschlußschutz von Transformatoren und Mittelspannungs-Netzstationen*. Elektrizitätswirtschaft 84(1985), H. 10, S. 356-60
- Est29 Estorff W: *Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen*. VDE-Fachberichte 4(1929), S. 13
- Est36 Estorff W: *Elektrische Schmelzsicherung*. Pat., DRP631359, 1936
- Fal97 Falkenstein Z; Coogan JJ: *Microdischarge behaviour in the silent discharge of nitrogen - oxygen and*

- water - air mixtures*. Journ. Phys. D 30(1997), S. 817-25
- Faß06 Faßbinder G; Gärtner J: *Monolithische Verbindung von Porzellan und Siliciumcarbid*. Teil 1: Keram. Z. 58(2006), H. 3, S. 180-3, Teil 2: H. 4, S. 252-5
- Fel03 Fellenberg W: *Feuer- Knall und explosions sichere geschlossene Schmelzsicherung mit mehreren parallel geführten Schmelzdrähten*. Pat., DRP155861, 1903
- Fel08 Fellenberg W: *Neue geschlossene Hochspannungssicherungen der AEG*. Elektrotechnische Zeitung 29(1908), H. 3, S. 45-9, Forts.: H. 4, S. 76-80
- Fri73 Frind G; Owens ML; Damsky BL: *Strombegrenzungssicherung*. Pat., DE2363896, 1973
- Fru95 Fruth BA; Gross DW: *Modelling of streamer Discharges between insulating and conducting surfaces*. Konf., 5th Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Leicester (England), 10.-13. Juli 1995, S. 350-5
- Gae96 Gaedeke P; Krabs R: *Prefabricated cold-shrink splice system for MV power cables*. IEEE Power Eng. Journ. 10(1996), H. 6, S. 268-72
- Gän53 Gänger B: *Der elektrische Durchschlag von Gasen*. Monogr., Springer Verlag, Berlin [u.a.], 1953
- Gär95 Gärtner J: *Teilentladungsarme Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen*. Jahresbericht 1995, Schering-Institut, Univ. Hannover, S. 12-4
- Geo02 Georgilakis PS; Preve C; Deschamps P; Londos N; Bidaut A: *A novel ultra compact distribution substation*. Konf., IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Chicago (IL, USA), 21.-25. Juli 2002, Vol. 1, S. 212-9
- Gib00 Gibalov VI; Pietsch GJ: *The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces*. Journ. Phys. D 33(2000), S. 2618-36
- Gib01 Gibalov VI; Novikov PS; Rakhimov AT; Saenko VB; Saveliev AB: *The Structure and Productivity of the Barrier Discharge*. Konf., APP Spring Meeting, Bad Honnef, 18.-21. Feb. 2001
- Gla95 Glaese U: *Entwicklung eines automatisierten Monitoring-Systems für Hochspannungskabel*. Diss., Univ. Hannover, 1995
- Gol02 Golubovskii YB; Maiorov VA; Behnke J; Behnke JF: *Influence of interaction between charged particles and dielectric surface over a homogeneous barrier discharge in nitrogen*. Journ. Phys. D 35(2002), S. 751-61
- Golu01 Golubev A; Blokhintsev I; Paoletti G; Modrowski J: *On-line partial discharge applications to MV electrical switchgear*. Konf., Electrical Insulation Conf. and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Cincinnati (OH, USA) 16.-18. Okt. 2001
- Gri01 Grima T; Faltermeier JF: *Advances in ML/LV Substations*. Konf., Int. Conf. and Exhib. on Electricity Distribution, Amsterdam (Niederlande), 18.-21. Juni 2001, IEE Conf. Pub. No. 482, Beitrag 1.11
- Gul91 Gulski E: *Computer-Aided Recognition of PD Using Statistical Tools*. Diss., TU Delft, 1991
- Gün91 Günther P: *Mechanism of charge storage in electron-beam or corona-charged silicon-dioxide electrets*. IEEE Trans. on Electrical Insulation 26(1991), H. 1, S. 42-8
- Haas90 Haas HU: *Der VS-Schutz - Ein neues Schutzkonzept für Mittelspannungsschaltanlagen*. Elektrik 44(1990), H. 11, S. 429-32
- Hac00 Hackam R; Akiyama H: *Air pollution control by electrical discharges*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 7(2000), H. 5, S. 654-83
- Ham92 Hampel W; Hartmann E; Kalscheuer W; Tenberge W: *Schutz von Verteilungstransformatoren*. Elektrizitätswirtschaft 91(1992), H. 25, S. 1660-3
- Har90 Hartje M: *Erfassung von Teilentladungen an Leistungstransformatoren im Netzbetrieb*. Diss., TH Hannover, 1990
- Hau84 Hauschild W; Mosch W: *Statistik für Elektrotechniker*. Monogr., VEB Verlag Technik, Berlin, 1984
- Hav86 Haverkamp W: *Neue Muffen-Technologie für Mittelspannungskabel*. Elektrizitätswirtschaft 85(1986), H. 4, S. 127-30
- Hei99 Heitz C: *A generalized model for partial discharge processes based on a stochastic process approach*. Journ. Phys. D 32(1999), S. 1012-23
- Her35 Herbst AH: *Filling or Packing Material*. Pat., US1986819, 1935
- Het82 Hettewer PF: *Arc-Interruption and Gas-Evolving Characteristics of Common Polymeric Materials*. Trans. on Power Apparatus and Systems 101(1982), H. 6, S. 1689-96
- HeuC84 Heuser C: *Zur Ozonerzeugung in elektrischen Gasentladungen*. Diss., RWTH Aachen, 1984
- HeuC85 Heuser C; Pietsch G: *The influence of Ozone Concentration on Discharge Mechanism in Ozonizers*. Konf., 8th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, Oxford (England), 16.-20. Sept. 1985, S. 485-8

- HeuH90 Heuschkel H; Heuschkel G; Muche K: *ABC Keramik*. Monogr., 2. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Berlin, 1990
- HFM62 N.N.: *Störspannungsmessgerät HFM62*. Firmenschrift, Meßwandler-Bau GmbH, Bamberg, 1962
- Hibb76 Hibbert DB; Robertson AJB: *The emission of electrons from glass induced by a strong electric field and the mechanism of the silent electric discharge*. Proc. R. Soc. A 349(1976), S. 63-79
- Hibn73 Hibner J: *Calculation of Overvoltage Peak-Values when Breaking Short-Circuits by Means of Multi-Strip Fuses*. Konf., 2nd Int. Conf. on Switching Arc Phenomena, Lodz (Polen), 25.-27. Sept. 1973, S. 269-74
- Hil00 Hilfer R: *Local Porosity Theory and Stochastic Reconstruction for Porous Media*. Lecture Notes in Physics 554(2002), S. 203-41
- Hira00 Hirasaki GJ: *Flow and Transport in Porous Media*. Skriptum, Kurs CENG571, Rice Univ., 2000
- Hirt80 Hirth M: *Teilprozesse bei der Ozonerzeugung mittels stiller elektrischer Entladungen 1+2*. Beiträge Plasma Physik 20(1980), H. 1, S. 1-27
- Hof86 Hofmann M: *Experimentelle und rechnerische Untersuchung von Ansprechennlinien und Alterungsvorgängen bei Sicherungsschmelzleitern*. Diss., TU Berlin, 1986
- Holl60 Hollmann F: *Verfahren zum Herstellen von Sicherungspatronen*. Pat., DE1296693, 1960
- Holz03 Holzer F: *Oxidation von organischen Verbindungen unter Nutzung von porösen und unporösen Feststoffen im nichtthermischen Plasma*. Diss., Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, 2003
- Hon94 N.N.: *Drucksensoren*. Firmenschrift, Katalog E15, Ausgabe 2, Honeywell AG, Offenbach, 1994
- Hoof97 Hoof M: *Impulsfolgen-Analyse: Ein neues Verfahren in der Teilentladungsdiagnose*. Diss., UGH Siegen, 1997
- Huhn71 Huhn P: *Über das Verhalten eines durch Drahtexplosion eingeleiteten Lichtbogens in körnigem Medium*. Diss., TU Hannover, 1971
- Hum02 Humpert C: *Modellierung des dynamischen Verhaltens von Oberflächen-Barrierentladungen und der Ozonerzeugung*. Diss., TH Aachen, 2002
- Hus05 Husain A; Ahmed SS: *Low Frequency Dispersion in Non-conducting Contacts in Humidity*. Turk. Journ. Phys. 29(2005), S. 97-104
- ICM00 N.N.: *The ICMsystem - User Manual*. Firmenschr., Power Diagnostix Systems GmbH, Aachen, 2000
- IEC502 N.N.: *IEC 60502-2 (2005-03): Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*. Norm, Int. Electrotechnical Commission (IEC), Genf, 2005
- IEEE93 N.N.: *IEEE Std 1291: IEEE Guide for Partial Discharge Measurement in Power Switchgear*. Norm, Inst. of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, 1993
- Ily99 Ilyina NA; Zhemerov GG; Zaika EI; Shklovsky IG: *The Basic Principles to Engineer a High Quality's Fuse for Power Semiconductor Convertors*. Konf., 6th Int. Conf. on Electric Fuses and their Application, Turin (Italien), 20.-22. Sept. 1999, S. 315-8
- Iri80 Iribarne J; Cho HR: *Atmospheric Physics*. Monogr., D. Reidel Publ., Dordrecht, 1980
- Jae96 Jaeger HM; Nagel SR; Behringer RP: *Granular solids, liquids, and gases*. Rev. of Mod. Phys. 68(1996), H. 4, S. 1259-73
- Jäg02 Jäger KM; McQueen DH; Vilcák J: *AC conductance and capacitance of carbon black polymer composites during thermal cycling*. Journ. Phys. D 35(2002), S. 1068-75
- Jam95 James RE; Phung BT: *Development of computer-based measurements and their application to PD pattern analysis*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 2(1995), H. 5, S. 838-56
- Jod03 Jodzis S: *Effect of Silica Packing on Ozone Synthesis from Oxygen-Nitrogen Mixtures*. Ozone: Sci. Eng. 25(2003), H. 1, S. 63-72
- Joh54 Johann H: *Die Lenkung des Schaltvorgangs in Hochspannungs-Sicherungen mit körnigem Löschmittel*. VDE-Fachberichte 18(1954), S. 34-8
- Joh78 Johann H: *Ausschaltlichtbögen in elektrischen Sicherungen mit körnigem Löschmittel, Teil 1-3*. Siemens Forsch.- u. Entwickl.-Ber., Springer Verlag, Berlin [u.a.], Teil 1: 7(1978), S. 208-13; Teil 2: 9(1980), S. 205-9; Teil 3: 10(1981), S. 139-44
- Jone72 Jones PW: *Lichtbogenlöschende Substanz und Vorrichtung mit einer lichtbogenlöschenden Substanz*. Pat., DE2107337, 1972
- Jons92 Jonscher AK: *The Universal Dielectric response and its Physical Significance*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 27(1992), H. 3, S. 407-23
- Jorg78 Jorgensen JD: *Compression mechanisms in a-quartz structures - SiO₂ and GeO₂*. Journ. App. Phys. 49(1978), H. 11, S. 5473-78

- Jud02 Judd MD; McArthur SDJ; McDonald JR; Farish O: *Intelligent condition monitoring and asset management. Partial discharge monitoring for power transformers*. IEEE Power Eng. Journal 16(2002), H. 6, S. 297-304
- Kai01 Kaindl A: *Einfluß von Epoxidharzformulierung, Verarbeitungsparameter und Betriebsbedingungen auf das Teilentladungsverhalten von epoxidharzimpregnierten Spulen*. Diss., Univ. Hannover, 2001
- Kali99 Kalicki T; Densley J: *Partial Discharge Characteristics of Voids in Extruded Insulations - Theoretical Studies*. Konf., 11th Int. Symp. on High Voltage Engineering, London (England), 23-27. Aug. 1999, S. 4.200.P2-4.203.P2
- Kalt01 Kaltenborn U; Rocks J; Skryten PK: *Löschmedium zum Löschen von Lichtbögen*. Pat., EP1162640A1, 2001
- Kam98 Kammeyer K-D: *Digitale Signalverarbeitung*. Monogr., Teubner Verlag, Stuttgart, 1998
- Kang03 Kang WS; Park JM; Kim Y; Hong SH: *Numerical study on influences of barrier arrangements on dielectric barrier discharge characteristics*. IEEE IEEE Trans. on Plasma Science 31(2003), H. 4, S. 504-10
- Kei98 Keiter ER; Kushner MJ: *Plasma Transport Around Dust Particles Having Complex Shapes*. Journ. App. Phys. 83(1998), H. 11, S. 5670-7
- Kes35 Kesselring F; Koppelman F: *Das Schaltproblem der Hochspannungstechnik*. Sonderdr., Arch. Elt. 19(1935), H. 1, S. 1-33
- Kir93 Kirkici H; Rose MF: *High voltage transmission line operation in simulated lunar environment*. Konf., 9th Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque (NM, USA), 21.-23. Juni 1993, S. 59-62
- Klein95 Klein M: *Barriereentladungen zur Entstückung motorischer Abgase*. Diss., Univ. Fred. Karlsruhe, 1995
- Klop82 Klopovskii KS; Osipov AP; Persiantsev IG; Rakhimov AT; Rakhimova TV; Suetin NV; Timofeev MA: *Influence of plasma-chemical processes of formation of electronegative molecules on the parameters of non-self-sustained discharges*. Sov. Phys. Dokl. 27(1982), H. 11, S. 951-3
- Kog03 Kogelschatz U: *Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications*. Plasma Chem. 23(2003), H. 1, S. 1-46
- Kol56 Kollath R: *Sekundärelektronen-Emission fester Körper bei Bestrahlung mit Elektronen*. Monogr., Handbuch der Physik, Bd. XXI, Gasentladung I, Springer Verlag, Berlin [u.a.], 1956, S. 233-303
- Kön34 König E: *Wirtschaftliche und technische Vorteile der Verwendung von Hochleistungssicherungen in Schaltstationen*. VDE-Fachber. 6(1934), S. 70-2
- Kos92 Kosyia IA; Kostinsky AY; Matveyev AA; Silakov VP: *Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures*. Plasma Sourc. Sci. Tech. 1(1992), S. 207-20
- Kot00 Kotte R; Gockenbach E; Borsi H: *Influence of the filler on the breakdown and partial discharge behavior of heat-resistant cast resins*. Konf., ISEI, Anaheim (CA, USA), S. 176-9
- Koz03 Kozlov MV; Sokolova MV; Temnikov AG; Timatkov VV; Vereshchagin IP: *Nanosecond surface corona discharge for different types of strip electrodes and ceramic or polymer dielectrics*. Plasmas and Polym. 8(2003), H. 8, S. 179-97
- Kre88 Kreuger FH; Morshuis PHF; Sonneveld WA: *Optical detection of surface discharges*. IEEE Trans. on Electrical Insulation 23(1988), H. 3, S. 447-9
- Kre89 Kreuger FH: *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. Monogr., Butterworths, London, 1989
- Krie57 Kriechbaum K: *Neue Hochspannungs-Hochleistungssicherungen*. AEG-Mitteilungen 47(1957), H. 7/8, S. 265-70
- Kris81 Krishna P; Pandey D: *Close-Packed Structures*. Monogr., Univ. College Cardiff Press, Cardiff (GB), 1981
- Kriv95 Krivda A: *Recognition of discharges. Discrimination and classification*. Diss., Delft Univ. Tech., 1995
- Kriv99 Krivda A; Birtwhistle D: *Recognition of multiple partial discharge patterns*. Konf., 11th Int. Symp. on High Voltage Engineering, London (England), 23-27. Aug. 1999, S. 5.17.S8-5.20.S8
- Kro42 Kroemer H: *Der Lichtbogen an Schmelzleitern in Sand*. Arch. Elt. 36(1942), H. 8, S. 455-70
- Kru74 Kruspe P: *Elektrisch halbleitende Glasuren und Überzüge für Hochspannungsporzellan*. Silikatechnik 25(1974), H. 11, S. 375-80
- Kuh01 Kuhlman KR; Marshall J; Evans ND; Luttge A: *Australian Red Dune Sand: A Potential Martian Regolith Analog*. Konf., Field Trip and Workshop on the Martian Highlands and Mojave Desert Analogs, Barstow (CA, USA), 20.-27. Okt. 2001, Beitrag 4021
- Kur00 Kuroki T; Okubo M; Yamamoto T: *Control of Cigarette Smoke Using Non-Equilibrium Plasma*.

- Konf., 4th ESA/IEJ Joint Symposium in Electrostatics, Kyoto, 25.-26. Sept. 2000, S.164-173
- Lap00 Lapp A; Kranz HG: *The use of the CIGRE data format for PD diagnosis*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 7(2000), H. 1, S. 102-12
- Läp31 Läßle H: *Die neue Hochspannungs-Hochleistungssicherung (HH-Sicherung) der SSW*. Siemenszeitschr. 11(1931), H. 2, S. 65-70
- Läp34 Läßle H: *Die Vorgänge bei der Kurzschluß-Unterbrechung durch schnellabschaltende Hochspannungssicherungen*. VDE-Fachber. 6(1934), S. 72-4
- Läp39 Läßle H: *Hochspannungssicherung*. Pat., DRP676781, 1939
- Läp37 Läßle H: *Die Lichtbogenlöschung in körnigen Löschmitteln bei Hochspannungssicherungen*. Elektrotechnische Zeitung 58(1937), H. 14, S. 369-72; Forts.: H. 16, S. 426-8
- Lei73 Leichnetz K: *Prüfröhrchen-Taschenbuch*. Firmenschr., Drägerwerke, Lübeck, 1973
- Lely55 Lely JA: *Darstellung von Einkristallen von Siliziumcarbid und Beherrschung von Art und Menge der eingebauten Verunreinigungen*. Ber. der Deutschen Keram. Ges. 32(1955), H. 8, S. 229-31
- Lie02 Liethschmidt K: *Silicon Carbide*. Monogr., Ullmann's Encyclopedia of Ind. Chem., CD-Ausgabe, Wiley-CHV, Weinheim, 2002
- Lind90 Lindwedel E: *Auswirkungen innerer Teilentladungen auf das elektrische Alterungsverhalten eines gefüllten Epoxidharzformstoffes*. Diss., Univ. Hannover, 1990
- Link74 Link EA: *Strombegrenzende sandgefüllte elektrische Sicherung*. Pat., DT2412688, 1974
- Lip92 Lipski T: *Behaviour of stone-sand fuses in short-circuit conditions*. Konf., 10th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, Swansea (England), 13.-18. Sept. 1992, S. 204-7
- Lip95 Lipski T; Pikon M: *A Comparison of Current Interruption by Sand SiO₂ and Sand SiO₂/Gas SF₆ Fuses*. Konf., 5th Int. Conf. on Electric Fuses and their Application, Ilmenau, 25.-27. Sept. 1995, S. 176-9
- Loeb65 Loeb LB: *Electrical Coronas*. Monogr., Univ. of California Press, Berkley [u.a.], 1965
- Loh34a Lohausen KA: *Diskussion zu [Läp34a]*. VDE-Fachberichte 6(1934), S. 74-5
- Loh34b Lohausen KA: *Hochspannungssicherung*. Pat., DRP744478, 1934
- Loh36 Lohausen KA: *Hochspannungssicherung für hohe Stromstärken*. Pat., DRP687671, 1936
- Loh37 Lohausen KA: *Hochspannungssicherungsanordnung*. Pat., DRP694962, 1937
- Loh38 Lohausen KA: *Fortschritte im Bau von Hochspannungssicherungen*. Elektrotechnische Zeitung 59(1938), H. 9, S. 222-5
- Loh43 Lohausen KA: *Hochspannungssicherung*. Pat., DE764357, 1943
- Loh61 Lohausen KA: *Koronaschutz für Hochspannungssicherungen*. Pat., DD21962, 1961
- Loh64 Lohausen KA: *Überstromunterbrechung mit strombegrenzenden Hochspannungssicherungen für Gleich- und Wechselstrom*. Elektrie 1964, H. 1, S. 24-9
- Mag00 Magagnini M; Giannozzi P; Corso AD: *Microscopic structure of the substitutional Al defect in quartz*. Phys. Rev. B 61(2000), H. 4, S. 2621-25
- Mas98 Massines F; Gouda G: *A comparison of polypropylene-surface treatment by filamentary, homogeneous and glow discharges in helium at atmospheric pressure*. Journ. Phys. D. 31(1998), S. 3411-20
- May34 Mayr O: *Hochleistungsschalter ohne Öl*. Elektrotechnische Zeitung 55(1934), Teil 1: H. 31, S. 757-60; Teil 2: H. 32, S. 791-4; Teil 3: H. 34, S. 837-40
- Mec89 Mechttersheimer G; Eliasson B; Kogelschatz U: *Influence of the voltage polarity on the ozone formation in N₂-O₂ mixtures*. Konf., Wasser: Kongress und Ausstellung (Nebentitel: Ozone and UV in the treatment of water and other liquids), Berlin, 4.-16. Sept. 1989, S. II.2.1-II.2.10
- Mehr92 Mehrwald KH: *Entwicklung und wirtschaftliche Aspekte der technischen SiC-Herstellung*. cfi 69(1992), H. 3, S. 72-81
- Meht94 Mehta A; Barker GC: *The dynamics of sand*. Rep. Prog. Phys. 57(1994), H. 4, S. 383-416
- Mey07 Meyer GJ: *Theoretisches und Praktisches über Abschmelzsicherungen*. Elektrotechnische Zeitung 27(1907), S. 430-5; Forts.: S. 460-4
- Mik64 Mikulecky HW: *Current Limiting Fuse*. Pat., US3243552, 1964
- Mik76 Mikulecky HW: *Oil Imersible Full Range Energy-Limiting Fuses for Protection of Underground Distribution Transformers*. Konf., IEEE Underground Transmission and Distribution Conference, Atlantic City (NJ, USA), 27. Sept.-1. Okt. 1976, S. 561-3
- Miu79 Miura H; Takakoka N; Tanahashi Y; Ono Y; Kito Y: *New Dual-Element Current-Limiting Power Fuse With Full Protection Capability Against any Fault*. Trans. on Power Apparatus and Systems 98(1979), H. 6, S. 1885-94

- Miz00 Mizuno A: *Electrostatic Precipitation*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 7(2000), H. 5, S. 615-24
- Mül96 Müller D: *Techniques informatiques efficaces pour la simulation de milieux granulaires par des méthodes d'éléments distincts*. Diss., École Poly. Lausanne, 1996
- Mün85 Münch W: *Werkstoffe der Elektrotechnik*. Monogr., 5. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart, 1985
- Mün87 Münch W: *Elektrische und magnetische Eigenschaften der Materie*. Monogr., Leitfaden der Elektrotechnik, Bd. 1, Teil 3, Teubner Verlag, Stuttgart, 1987
- Mura95 Murata T; Tatsukawa M; Okita Y; Yasuoka K: *Polarity Effect of Silent Discharge*. Ozone: Sci. Eng. 17(1995), S. 575-85
- Muri00 Murin-Borel V; Lieutier M; Parizet MJ; Barrault M; Melquiond S; Rambaud T; Vérité J-C: *Silver mass flow in high-voltage fuses*. Journ. Phys. D 33(2000), S. 753-6
- Nam83 Namitokov KK; Frenkel ZM: *Influence of quartz-filler density on arc processes in a fuse*. Sov. Electrical Eng. 54(1983), H. 8, S. 70-2
- Nam89 Namitokov KK; Frenkel ZM: *Pressure in the Electric Arc Channel of a Fusible Link*. Sov. Electrical Eng. 60(1989), H. 12, S. 102-9
- Nar79 Narancic V; Braunovic M; Westrom AC: *The Composite Fuse - A New Technology for Current Limiting Fuses*. Konf., 7th Transmission and Distrib. Conf. and Exp., Atlanta (GA, USA), 1.-6. Juni 1979, S. 462-9
- Nas64 Nasilowski J: *Undulids and Striated Disintegration of Wires*. Konf., 3rd Conf. on Expl. Wire Phen., Boston (MA, USA), 10.-12. März 1964, S. 295-313
- Net96 Nettelblad B: *Dielectric properties of liquid-impregnated porous solids*. Diss., Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, 1996
- New77 Newbery PG; Wright A: *Electric Fuses*. Proc. IEE [Nebentitel: IEE Reviews] 124(1977), H. 11R, S. 909-24
- Nie95 Niemeyer L: *A generalized approach to partial discharge modeling*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 2(1995), H. 4, S. 510-28
- Nov00 Novak JP; Bartnikas R: *Effect of dielectric surfaces on the nature of partial discharges*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 7(2000), H. 1, S. 146-51
- Okam01 Okamoto T; Kato T; Yokomizu Y; Suzuoki Y: *Fluctuation Analysis of Partial Discharge Pulse Occurrence with an Integral*. Electrical Engineering in Japan 136(2001), H. 1, S. 16-28
- Okam86 Okamoto T; Tanaka T: *Novel Partial Discharge Measurement / Computer-Aided Measurement Systems*. IEEE Trans. on Electrical Insulation 21(1986), H. 6, S. 1015-19
- Okaz93 Okazaki S; Kogoma M; Uehara M; Kimura Y: *Appearance of stable glow discharge in air, argon, oxygen and nitrogen at atmospheric pressure using a 50 Hz source*. Journ. Phys. D 26(1993), S. 889-92
- Olb57 Olbricht H: *Überlastfeste Hochspannungs-Hochleistungssicherungen*. CEIG-Berichte [Berichte der Continental-Elektroindustrie AG] 3(1957), H. April/Juni, S. 90-7
- Önn01 Onneby C; Martensson E; Gäfvert U; Gustafsson A; Palmqvist L: *Electrical properties of field grading materials influenced by the silicon carbide grain size*. Konf., 7th Int. Conf. on Solid Dielect., Eindhoven (Niederlande), 25.-29. Juni 2001, S. 43-5
- Ono04 Ono R; Oda T: *Spatial distribution of ozone density in pulsed corona discharges observed by two-dimensional laser absorption method*. Journ. Phys. D 37(2004), S. 730-5
- Oss73 Ossowicki J: *Influence of quartz-filler granulation on breaking d.c. overloads by means of strip fuses*. Konf., Int. Conf. on Switching Arc Phenomena, Lodz (Polen), 25.-27. Sept. 1973, S. 262-4
- Osv95 Osvath P: *Comment and discussion on digital processing of PD pulses*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 2(1995), H. 4, S. 685-699
- Oue96 Ouederni A; Limvorapituk Q; Bes R; Mora JC: *Ozone decomposition on glass and silica*. Ozone: Sci. Eng., 18(1996), H. 5, S. 385-416
- Oya00 Oyama ST: *Chemical and Catalytic Properties of Ozone*. Catal. Rev.-Sci. Eng. 42(2000), H. 3, S. 279-322
- Pau87 Paukert J: *Search for new extinguishing media for LV fuses*. Konf., 3rd Int. Conf. on Electric Fuses and their Application, Eindhoven (Niederlande), 11.-13. Mai 1987, S. 44-9
- Paz21 Pazelt F: *Hochspannungssicherungen mit Dämpfungswiderständen für Spannungswandler*. Elektrotechnische Zeitung 24(1921), H. 14, S. 343-4
- Ped89 Pedersen A: *On the electrical breakdown of gaseous dielectrics - an engineering approach*. IEEE Trans. on Electrical Insulation 5(1989), H. 5, S. 721-39
- Pei99 Peier D; Temmen K: *Beurteilung der Degeneration von Isolierungen mittels Teilentladungsmessung*.

- Elektrie 53(1999), H. 9-10, S. 314-9
- Pet02 Petit M; Jidenko N; Goldman A; Goldman M; Borra JP: *Electrical characterization of gas discharges using a numerical treatment. Application to dielectric barrier discharges*. Rev. Sci. Inst. 73(2002), H. 7, S. 2705-12
- Phi88 Philippow E: *Systeme der Energietechnik*. Monogr., Taschenbuch der Elektrotechnik, Bd. 6, 2. Auflage, Verlag Technik, Berlin, 1988
- Pik01 Pikkert ARA; Schoonenberg GC; Voulon PR: *Upgrading of compact load break switches to a circuit breaker function*. Konf., Int. Conf. and Exhib. on Electricity Distribution, Amsterdam (Niederlande), 18.-21. Juni 2001, Beitrag 1.7
- Pla02 Plank T: *Positive Corona at Combined DC and AC Voltage*. Diss., Univ. Tartu, 2002
- Rad06 Radmilovic-Radjenovic M; Radjenovic B: *The effect of magnetic field on the electrical breakdown characteristics*. Journ. Phys. D 39(2006), S. 3002-9
- Rae64 Raether H: *Electron Avalanches and Breakdown in Gases*. Monogr., Butterworth Ltd., London [u.a.], 1964
- Rah99 Rahel J; Pavlik M; Holubcik L; Sobek V; Skalny JD: *Relaxing phenomena in negative corona discharge: New aspects*. Contrib. Plasma Phys. 39(1999), H. 6, S. 501-13
- Rai97 Raizer YP: *Gas Discharge Physics*. Monogr., 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin [u.a.], 1997
- Raj00 Rajchenbach J: *Granular Flows*. Adv. in Phys. 49(2000), H. 2, S. 229-56
- Ran90 Ranjan R; Frind G; Peterson CE; Carroll JJ: *An advancement in the design and application of current-limiting fuses*. Konf., 3rd Int. Conf. on Future Trends in Distribution Switchgears, London (England), 23.-25. Aug. 1990, S. 36-44
- Rei93 Reineri CA; Gomez JC; Magnago F: *Experimental Determination of Fuse Filler Thermal Conductivity*. Konf., 7th Int. Conf. on Switching Arc Phenomena, Lodz (Polen), 27. Sept.-1. Okt. 1993, S. 220-3
- Reu03 Reuter M; Gockenbach E; Borsi H: *Dielectric and electric parameters used for insulation characterization of multistress aged XLPE-cables*. Konf., 13th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Delft (Niederlande), 25.-29. Aug. 2003, S. 386-9
- Riv99 Rivenc JP; Lebey T: *An overview of electrical properties for stress grading optimization*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 6(1999), H. 3, S. 309-18
- Roc02 Rochette D: *Modelisation et simulation de la decharge d'arc électrique dans un fusible moyenne tension*. Diss., Univ. Clermont-Ferrand, 2002
- Roc04 Rochette D; Bussière W: *Pressure evolution during HBC fuse operation*. Plasma Sources Sci. Technol. 13 (2004), S. 293-302
- Rot94 Rother K [Übers.]: *ANSYS Benutzerhandbuch*. Monogr., CAD FEM, Garching [u.a.], 1994
- Rüc02 Rückauf A: *Zur Entladungscharakteristik und Stoffwandlung im nichtthermischen Plasma des ferroelektrischen Schüttungsreaktors*. Diss., Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, 2002
- Ruh02 Ruhland SA; Riedl U: *Ecological switchgear concept for secondary distribution*. Konf., Transmission and Distrib. Conf. and Exp., Yokohama (Japan), 6.-10. Okt. 2002, Bd. 3, S. 1802-6
- Russ99 Russ H; Neiger M; Lang JE: *Simulation of Micro Discharges for the Optimization of Energy Requirements for Removal of NOx from Exhaust Gases*. IEEE Trans. on Plasma Science 27(1999), H. 1, S. 38-9
- Sac72 Sachs L: *Statistische Auswertungsmethoden*. Monogr., 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin [u.a.], 1972
- Sak03 Sakamoto N; Kuninaka Y; Ueno H; Nakayama H: *Local corona behavior and creeping discharge on (needle-dielectric, semiconductor) composite electrodes*. Electrical Engineering in Japan 145(2003), H. 1, S. 1-9
- Sla63 Slamecka E: *Systeme synthetischer Prüfschaltungen*. Elektrotechnische Zeitung-A 84(1963), H. 18, S. 581-6
- Sama01 Samaranayake WJM; Namihira E; Katsuki S; Miyahara Y; Sakugawa T; Hackam R; Akiyama H: *Pulsed power production of ozone using nonthermal gas discharges*. Electrical Ins. Magazine 17(2001), H. 4, S. 17-25
- Samo97 Samojlovic VG; Gibalov VI; Kozlov KV: *Physical Chemistry of the Barrier Discharge*. Monogr., 2. Auflage, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1997
- Saq99 Saqib MA; Stokes AD: *Characteristics of Fuse Arcing in Different Fillers*. Konf., 6th Int. Conf. on Electric Fuses and their Application, Turin (Italien), 20.-22. Sept. 1999, S. 275-8
- Sav02 Saveliev AB; Pietsch GJ: *On the structure of Dielectric Barrier Surface Discharges*. Konf., 8th Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Pühajärve (Estonia), 21.-25. Juli 2002,

- [keine Seitenangaben]
- Sche84 van der Scheer D; Reith HFJ: *High Voltage Current Limiting Fuse-Links Capable of Breaking all Currents that Cause Melting of the Fuse-Element*. Konf., 2nd Int. Conf. on Electric Fuses and their Application, Trondheim (Norwegen), 13.-15. Juni 1984, S. 150-9
- SchG96 Schiller G: *Das Durchschlagverhalten von vernetztem Polyethylen (VPE) bei unterschiedlichen Spannungsformen und Vorbeanspruchungen*. Diss., Univ. Hannover, 1996
- Schi96 Schichler U: *Erfassung von Teilentladungen an polymerisierten Kabeln bei der Vor-Ort-Prüfung und im Netzbetrieb*. Diss., Univ. Hannover, 1996
- SchJ44 Schatz J: *Eignung von Kupfer-Silber-Manteldrähten zu Schmelzeinsätzen in elektrischen Sicherungen*. Elektrotechnische Zeitung 65(1944), H. 43/44, S. 341-7
- Schm96 Schmidt-Szalowski K: *Catalytic properties of silica packings under ozone synthesis conditions*. Ozone: Sci. Eng. 18(1996), H. 1, S. 41-56
- SchN01 van Schaik N; Steennis EF; van Dam A; Grotenhuis BJ; van Riet MJ; Verhoeven CJ: *Condition based maintenance on MV cable circuits as part of asset management; philosophy, diagnostic methods, experiences, results and the future*. Konf., 16th Int. Conf. and Exhib. on Electricity Distribution (IEE Conf. Publ. No. 482), Amsterdam (Niederlande), 18.-21. Juni 2001, Beitrag 1.28
- Scho84 Scholz E: *Karl-Fischer-Titration: Methoden zur Wasserbestimmung*. Monogr., Springer Verlag, Berlin [u.a], 1984
- Schr02 Schreiber E; Fitting HJ: *Monte Carlo simulation of secondary electron emission from the insulator SiO₂*. Journ. Electron Spect. Rel. Phen. 124(2002), S. 25-37
- Schu44 Schuck CL: *Current Limiting Fuse*. Pat., US2439674, 1944
- Ser04 Serdyuk YV: *Computer modelling of electrophysical phenomena in high voltage insulation*. Diss., Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, 2004
- Sey68 Seysen R: *Strombegrenzende Hochspannungs-Hochleistungssicherungen mit sicherer Ausschaltung im Bereich kleiner Überströme*. Conti-Elektro Berichte 14(1968), H. 1, S. 56-60
- Sha71 Shackman N: *Separable Insulated Connector Incorporating A Current-Limiting Fuse*. Konf., IEEE Conf. on Underground Distribution, Detroit (IL, USA), 27. Sept.-1. Okt. 1971, S. 506-9
- Sie11 N.N.: *Einrichtung an Hochspannungssicherungen*. Pat., DRP267894, 1911
- Sir02 Sircar A: *Untersuchung der Emissionen aus Einäscherungsanlagen und der Einsatzmöglichkeiten von Barrierenentladungen zur Verringerung des PCDD/F-Austrages*. Diss., Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2002
- Sjö03 Sjöberg M: *Charge Accumulation in Hybrid High-Voltage Insulation*. Diss., Chalmers Univ. of Technology, Göteborg, 2003
- Slo98 Sloom JGJ; Meng XZ; Vermij L: *Fuse Characteristics Determined by Melting or Ageing?*. Europ. Trans. Electrical Power 8(1998), H. 3, S. 213-5
- Smi95 Smith JDB; Crooks WR: *Arc-quenching filler for high voltage current limiting fuses and circuit interrupters*. Pat., US5406245, 1995
- Ste98 Steinfeld K: *Zur "spannungsinduzierten elektrochemischen Degradation" (SIED) der inneren Leitschicht kunststoffisolierter Mittelspannungskabel*. Diss., TU Berlin, 1998
- Sten72 Stenzel HD: *Auswirkungen der Verlustleistung in Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen auf den Betrieb mit kleinem Überlaststrom*. Diss., TU Hannover, 1972
- Sto97 Stone GC; Campbell SR; Sedding HG: *Development of a continuous on-line partial discharge monitoring system for medium voltage motors*. Konf., 8th Int. Conf. on Electrical Machines and Drives, Cambridge (GB), 1.-3. Sept. 1997, S.123-7
- Str00 Strobl R; Haverkamp W; Malin G: *I(O)XSU-F - Neue Generation wärmeschrumpfender Mittelspannungsendverschlüsse basierend auf ZnO-Technologie*. Elektrizitätswirtschaft 99(2000), H. 26, S. 68-73
- Stu03 Sturm M: *Systeme zur zukünftigen Energieoptimierung und -vermarktung I*. Skriptum, Univ. Hannover, 2003
- Suw00 Suwarno: *A Comparison between Void and Electrical Treeing Discharges in Polyethylene*. Konf., 6th Int. Conf. on Properties and Applications of Diel. Materials, Xi'an (China), 21.-26. Juni 2000, S. 493-6
- Tam02 Tamm U: *Beseitigung von organischen Schadstoffen in Abgasen durch Oxidation mit Ozon*. Diss, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2002
- Tan95 Tanaka T: *Partial discharge pulse distribution pattern analysis*. Proc.-Sci. Meas. Techn. 142(1995), H. 1, S. 46-50
- Tas95 Tas MA: *Plasma-Induced Catalysis; A feasibility study and fundamentals*. Diss., Techn. Univ.

- Eindhoven, 1995
- Tep03 Tepper J; Lindmayer M: *Erforschung neuer homogener atmosphärischer Plasmen und ausgewählter Anwendungen: Teilverhaben: Untersuchungen der Einflüsse der Elektroden- und Spannungsformen auf die Plasmaausbildung*. Abschlußbericht, Univ. Braunschweig, BMFT-Förderkennz. 13N7345/6, 2003
- Tor61 Toriyama Y: *Dust Figures of Surface Discharge and its Applications*. Monogr., Kinokuniya Bookstore Co. Ltd., Tokyo, 1961
- Tre84 Trebinski R; Trzcinski W; Wlodarczyk-E: *A theoretical model of the mechanical phenomena accompanying the explosion of a fuse-link in an electric fuse*. Journ. Tech. Phys. (pol.) 25(1984), H. 2, S.163-76
- Tro88 Trott J: *Untersuchungen zur Lichtbogenlöschung in Hochspannungs-Hybridsicherungen*. Diss., TU Darmstadt, 1988
- Tunc02 Tuncer E; Serdyuk YV; Gubanski SM: *Dielectric mixtures: Electrical properties and modeling*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 9(2002), H. 5, S. 809-28
- Tung00 Tungkanawanich A; Kawasaki Z.-I; Abe J; Matsuura K: *Location of partial discharge source on distribution line by measuring emitted pulse-train electromagnetic waves*. Konf., IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, Singapur (Indonesien), 23.-27. Jan. 2000, Bd. 4, S. 2453-8
- Tur73 Turner HW; Turner C: *Phenomena occurring during the extinction of arcs in fuses*. Konf., 2nd Int. Conf. on Switching Arc Phenomena, Lodz (Polen), 25.-27. Sept. 1973, S. 253-6
- Ull03 Ullrich H; Gubanski SM: *Surface characterization of new and aged semiconducting glazes*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 10(2003), H. 3, S. 375-84
- VDE0278 N.N.: *DIN VDE 0278 Teil 2: Starkstromkabel-Garnituren mit Nennspannungen U bis 30 kV; Muffen über 1 kV*. Norm, Vers. 2/91, VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1991
- VDE0303 N.N.: *DIN VDE 0303 Teil 3: Prüfungen von Werkstoffen für die Elektrotechnik / Messung des el. Widerstandes von nichtmetallinen Werkstoffen*. Norm, Vers. 5/83, VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1983
- Vel01 Veldhuizen EM; Rutgers WR: *Corona discharges: fundamentals and diagnostics*. Konf., Workshop on Frontiers in Low Temperature Plasma Diagnostics IV; Roloduc (Niederlande), 25.-29. März 2001, [keine Seitenangaben]
- Ver69 Vermij L: *Electrical Behaviour of Fuse Elements*. Diss, TH Eindhoven, 1969
- Ver80 Vermij L: *The Voltage Across a Fuse During the Current Interruption Process*. Trans. Plasm. Sci. 8(1980), H. 4, S. 460-8
- Vig83 Vigouroux JP; Lee DO; Le Gressus C; Juret C; Boiziau C: *Surface processes occurring during breakdown of high-voltage devices*. IEEE Trans. on Electrical Insulation 18(1983), H. 3, S. 287-91
- Vog29 Vogelsang M: *Die geschichtliche Entwicklung der Hochspannungs-Schalttechnik*. Monogr., Geschichtliche Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik, Bd. 2, Springer Verlag, Berlin, 1929
- Wag00 Wagner HE; Brandenburg R; Michel P; Massines F; Kozlov KV: *Dielectric Barrier Discharges in Nitrogen: Transition from the Filamentary to the Glow Mode*. Konf., 7th Int. Symp. on High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Greifswald, 10.-13. Sept. 2000, S. 93-7
- Wai97 Wai GL; Bonwick WJ: *Subspecies analysis of partial discharge data from a generator stator conductor*. Proc.-Sci. Meas. Techn. 144(1997), H. 6, S. 287-93
- Wal98 Walz RD; Büscher A; Primus IF: *Die neue ökonomische 24-kV-Schaltstation, schlüsselfertig am Kranhaken*. Elektrizitätswirtschaft 97(1998), H. 4, S. 26-34
- WanJ00 Wang JS; Ida N: *Three-dimensional p-adaptive computation of electrostatic force and energy*. IEEE Trans. Magn., Vol. 36(2000), H. 4, S. 728-31
- WanY98 Wang Y; Han X; Van Brunt RJ; Las T; Slowikowska H; Howath JC; Schweickart DL: *Digital recording and analysis of partial discharges in point-dielectric gaps*. Konf., Int. Symp. on Electrical Insulation, Arlington (VA, USA), 7.-10. Juni 1998, S. 440-3
- Wee86 Weedy BM; Turvey NJ: *Resistive Stress Relieving Materials for XLPE Cable Joints*. Konf., 2nd Int. Conf. on Power Cables and Accessories, London (England), 26.-28. Nov. 1986, S. 92-6
- Wei71 Weißgerber W: *Untersuchungen über die Temperaturfelder von Hochspannungs-Hochleistungs-Sicherungen*. Diss., TU Hannover, 1971
- Wen98 Wenzel D: *Teilentladungsmessungen an Transformatoren im Netz mit Verfahren der digitalen Signalverarbeitung und Mustererkennung*. Diss., Univ. Hannover, 1998
- Wes02 Wester FJ; Gulski E; Smit JJ; Groot E: *PD knowledge rules support for CBM of distribution power cables*. Konf., Int. Symp. Electrical Insulation, Boston (MA, USA), 7.-10. April 2002, S. 66-9
- West82 Westrom AC; Crooks WR; Narancic V: *Current Limiting Fuses - A Comparative Evaluation*. Trans.

- on Power Apparatus and Systems 101(1982), H. 7, S. 1870-7
- WilK07 Wilkens K: *Die Berliner Elektrizitäts-Werke zu Beginn des Jahres 1907*. Elektrotechnische Zeitung 28(1907), H. 40, S. 959-63
- Will40 Williams EA; Schuck CL: *Control of the Switching Surge Voltages Produced by the Current-Limiting Power Fuse*. Trans. American IEE 60(1940), S. 214-7
- WilR75 Wilkins R; McEwan PM: *A. C. short-circuit performance of notched fuse elements*. Proc. IEE 122(1975), H. 3, S. 289-92
- Wöh99 Wöhler V: *Aufbereitete Aluminium-Salzschlacke als Rekultivierungsmaterial*. Diss., UG Kassel, 1999
- Wolf68 Wolf I: *Grundlagen und Anwendungen der Maxwellschen Theorie I*. Monogr., Wissenschaftsverlag, Mannheim [u.a.], 1968
- Wri04 Wright A; Newbery PG: *Electric Fuses*. Monogr., IEE Power Series, Vol. 20, 3. Auflage, IEE Publ. Ltd., London, 2004
- Yeh00 Yehia A; Mizuno A; Takashima K: *On the characteristics of the corona discharge in a wire-duct reactor*. Journ. Phys. D 33(2000), S. 2807-14
- Yin92 Yin H: *Acoustic Velocity and Attenuation of Rocks: Isotropy, Intrinsic Anisotropy, and Stress Induced Anisotropy*. Diss., Stanford Univ., 1992
- Zae03 Zaengl WS: *Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment*. IEEE Electrical Insulation Magazine 19(2003), H. 5, S. 5-22
- Zha03 Zhang CH; MacAlpine JMK: *A phase-related investigation of AC corona in air*. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation 10(2003), H. 2, S. 312-19
- Zinc98 Zinchenko AZ: *Effective conductivity of loaded granular materials by numerical simulation*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 356(1998), S. 2953-98
- Zins83 Zinser W: *Aufbau, Wirkungsweise und Einsatz von HH-Sicherungen*. Elektrizitätswirtschaft 82(1983), H. 8, S. 264-71
- Zob75 Zobel M: *Elektrische Messungen am SiC-Widerstandspulver und Beitrag zur Deutung seines Leitfähigkeitsverhaltens*. Diss., Univ. Stuttgart, 1975
- Zot87 Zotov AY; Ovsienko LF; Shishkin VF: *Designing corona-resistant fuse links for expulsion fuses*. Sov. Electrical Eng. 58(1987), H. 3, S. 14-20

Abkürzungen der Quellenart

Monogr.	Monographie
Diss.	Dissertationsschrift
Pat.	Patentschrift
Konf.	Konferenzbeitrag
Firmenschr.	Firmenschrift

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name Jürgen-Peter Gärtner
geboren am 8. September 1966 in Zweibrücken (Rheinland Pfalz)
Familienstand ledig

Schulbildung:

7/1972 - 6/1982 Freie Waldorfschule Frankfurt am Main
7/1982 - 6/1983 École R. Steiner, La Boissière-en-Thelle, Frankreich
7/1983 - 6/1986 Freie Waldorfschule Frankfurt am Main, Abschluß: Hochschulreife (Abitur)

Wehrdienst:

7/1986 - 9/1987 Grundwehrdienst im Pionierbataillon 2, Hann. Münden

Akademische Ausbildung:

10/1987 - 4/1995 Studium der Elektrotechnik, Vertiefungsrichtung Energietechnik /Energieversorgung an der Universität Hannover. Abschluß: Diplom-Ingenieur (Hochschulgrad)

Berufliche Tätigkeiten:

6/1988 - 8/1995 Wissenschaftliche Hilfskraft an universitären Einrichtungen und studentischer Mitarbeiter in der Industrie (mit Unterbrechungen)
9/1995 - 12/1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Schering-Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen der Universität Hannover
1/2000 – 6/2000 Freier Mitarbeiter am Schering-Institut für Hochspannungstechnik und Hochspannungsanlagen der Universität Hannover
seit 6/2000 Mitarbeiter am Regionalen Rechenzentrum für Niedersachsen (RRZN), im Projekt "Uni2001" (Einführung der kaufmännischen Rechnung)