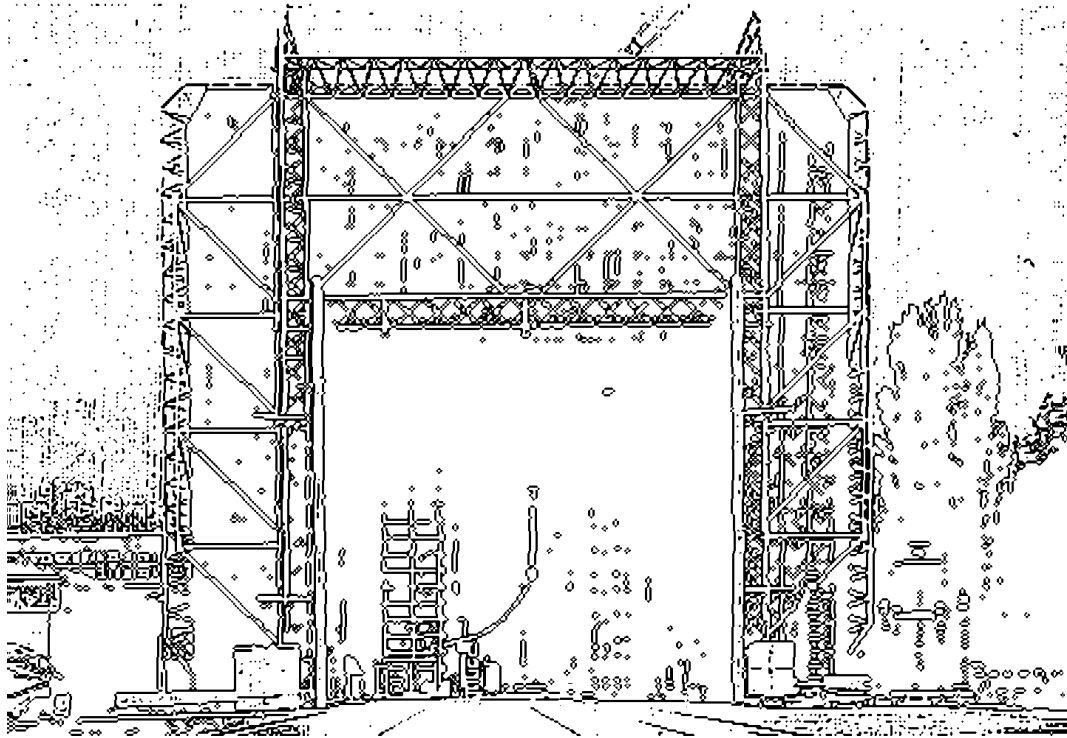


TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ

**DISSERTATION**



INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK  
UND SYSTEMMANAGEMENT



# **TEILENTLADUNGEN (TE) BEI GENERATORSTAB-ISOLIERSYSTEMEN**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der technischen Wissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Markus Lerchbacher

- 1. Begutachter: Em.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr, TU Graz
- 2. Begutachter: Ao.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Erich Schmidt, TU Wien
- 3. Begutachter: Univ.-Doz. DI Dr.techn. Christof Sumereder, TU Graz



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement  
Technische Universität Graz

Graz, im März 2014



---

## **DANKSAGUNG**

An dieser Stelle möchte ich mich in aller Kürze aber aufrichtig bei all jenen Menschen bedanken, die mich in irgendeiner Weise unterstützt und gefördert haben und so schlussendlich zur Vervollendung meiner Doktorarbeit beigetragen haben.

Besonders zu erwähnen sind dabei von Seiten der TU Graz Prof. Michael Muhr und Dr. Christof Sumereder. Beide haben mich in den vergangenen Jahren stets unterstützt und gefördert.

Aus dem Kreise der Familie möchte ich vor allem meine Frau Corinna und meine beiden Söhne Lars und Lino nennen, welche viel Geduld zeigen mussten.

In diesem Sinne, auch den vielen nicht namentlich erwähnten Menschen,

ein herzliches Dankeschön!



---

## VORWORT

Während meiner Projektstätigkeit am Institut für Hochspannungstechnik durfte ich mich mit verschiedenen Aspekten der Hochspannungstechnik beschäftigen. So begann ich nach meiner Zeit als Diplomand im Bereich Elektrofilter und einer anschließenden sommerlichen Auszeit, die ich zur Regeneration und Gedankenpause nutzte, als Projektmitarbeiter interessante Einblicke in den Themenbereich Erdung, Blitzschutz und Potentialausgleich zu gewinnen. Schließlich ergab sich die Möglichkeit, mich als Universitäts-Projektassistent an einem mehrjährigen Kooperationsprojekt im Bereich der Isolationstechnik gemeinsam mit einem namhaften steirischen Industrieunternehmen zu engagieren. Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Isoliersysteme großer Generatoren waren ab nun bestimmender Teil meiner täglichen Arbeit. Neben der fachlichen Weiterbildung, welche ich am Institut für Hochspannungstechnik über mehrere Jahre hinweg genießen durfte, zähle ich das Kennenlernen betrieblicher Abläufe, Prioritätenvergabe und mehr oder minder zwangsläufig flexible Projektgestaltung mit zu den spannendsten Erfahrungen meiner Zeit als Doktorand. All dies, so bin ich der festen Überzeugung, wird mir zukünftig, zumindest in meinem beruflichen Leben von Nutzen sein und ich betrachte auch die, zweifelsohne zum Teil leidvollen, Erfahrungen als wertvolle.

Der Themenbereich Isolationstechnik also, vor allem in Bezug auf große, rotierende elektrische Maschinen, ist jener, der mich die letzten Jahre beschäftigt hat und der auch auf den nun folgenden Seiten seinen Wiederklang findet.

Gern hätt' ich vieles noch gemacht, manches wär' noch genauer zu untersuchen gewesen, aber um mit den Worten eines ganz Großen zu enden, erlaube ich mir das Vorwort gewissermaßen mit dem ersten Nachsatz zu schließen:

*„So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muss sie für fertig erklären, wenn man nach Zeit und Umständen das möglichste getan hat.“<sup>1</sup>*

Ein steirisches Glück auf

Graz, im März 2014

---

<sup>1</sup> J.W.v.Goethe brachte in einem Briefwechsel während einer Italienreise 1787 die Mühsal der Überarbeitung seiner *Iphigenie auf Tauris* zum Ausdruck.





---

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt und die, den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, den 16. März 2014

.....  
Markus Lerchbacher

## **STATUTORY DECLARATION**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, 16<sup>th</sup> March 2014

.....  
Markus Lerchbacher



---

## KURZFASSUNG

Aktuelle und stets fortschreitende Entwicklungen im Bereich elektrischer Betriebsmittel, insbesondere jener der Energietechnik, führen seit Jahrzehnten zu immer höheren Anforderungen an deren Eigenschaften. Für die im Rahmen dieser Dissertation explizit betrachteten großen, rotierenden elektrischen Maschinen bedeutet dies, der Forderung nach höchster Effizienz im Sinne der Ausnutzung von elektrischen, thermischen aber auch mechanischen Spielräumen bis an deren Grenzen, manchmal auch darüber hinaus, zu genügen. Die Auslegung der Maschinen unter Berücksichtigung eines Ressourcen schonenden Designs spielt dabei eine wesentliche Rolle.

Die vorliegende Arbeit bietet einige grundlegende Untersuchungen, welche zu einem verbesserten Verständnis von Teilentladungen bei Anordnungen isolierter Elektroden unter verschiedenen Umgebungsbedingungen sowie in Mikrohohlräumen verhilft. Der Einfluss von Größen wie Temperatur oder Hohlraumdurchmesser auf die Entladungsaktivität in Mikrohohlräumen wurde ebenso betrachtet wie die Auswirkungen der entsprechenden Entladungsaktivität. Außerdem wurden verschiedene Methoden zur Detektion der Entladungsaktivität in Mikrohohlräumen angewandt und im speziellen eine Detektions- und Analysemethode für Teilentladungen mit optischen Entladungserscheinungen entwickelt.

Aus Sicht des Autors liegt der Mehrwert der vorliegenden Arbeit dabei zum einen in den Überlegungen zur Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes auf isolierte Elektrodenpaare und der Möglichkeit der direkten Nutzung beim Design des Wickelkopfs sowie auf der entwickelten Methode zur Sichtbarmachung und Analyse von optischen Emissionen mittels digitaler Spiegelreflexkamera und nachträglicher Bildüberlagerung. Es konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Verfahren dazu beitragen kann, eine Korrelation zwischen lokalen Entladungsphänomenen und dem elektrischen Teilentladungssignal herzustellen. Durch Erweiterung der messtechnischen Ausführung um andere Sensorsysteme mit zusätzlichen Korrelationsmöglichkeiten ist ein für vielfältige Anwendungsbereiche interessanter Ansatz aufgezeigt worden.

### Schlagworte:

- Isoliertes System
- Generatorstäbe
- Isolierstoffproben
- Mikrofehlstellen
- Paschen-Gesetz
- Teilentladungsmessungen
- Teilentladungsdetektionsmethoden



---

## ABSTRACT

On-going development of electrical apparatus, in particular in the field of energy technology, has for decades lead to ever increasing demands on their properties. For large rotating electrical machines, which have been considered for the purposes of this dissertation, the demand for the highest efficiency has to be satisfied in terms of electrical, thermal but also mechanical clearances to the limits, sometimes even beyond. This plays a significant role in resource efficient design of such machines.

This thesis provides some basic research, which contributes to a better understanding of partial discharges at insulated electrode systems under various environmental conditions as well as in microvoids. The influences of parameters, such as temperature or cavity diameter, on the discharge behaviour of microcavities as well as the effects of the corresponding discharge activity were considered. In addition, various methods for micro-cavity partial discharge detection were compared as well as a method for detection and analysis of optical partial discharge phenomena was developed.

From the perspective of the author, the benefit of this work lies firstly in the reflections on the applicability of the Paschen's law on insulated electrodes and the possibility of direct use in the field of endwinding design as well as on the method developed for the visualization and analysis of optical emissions through digital SLR and subsequent image overlay. It has been shown that the method developed helps to establish a correlation between the local discharge phenomena and electric partial discharge signals. The possibility of extending the herein used measurement techniques to a variety of interesting applications through the use of other sensor systems with additional correlation possibilities has been shown.

### Keywords:

- Insulation system
- Generator stator bars
- Insulating material samples
- Microvoids
- Paschen's law
- Partial discharge measurements
- Partial discharge detection methods



---

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines.....	1
1.2	Definitionen.....	1
1.3	Fragestellung und Ansatz.....	3
1.4	Ziele und Aufbau der Dissertation.....	4
<b>2</b>	<b>STAND DES WISSENS</b>	<b>7</b>
2.1	Allgemeines.....	7
2.2	Isoliersystem bei Generatorstäben.....	7
2.2.1	<i>Aufgabe, Anforderungen und Aufbau.....</i>	<i>7</i>
2.2.2	<i>Materialien und ihre Eigenschaften.....</i>	<i>9</i>
2.2.3	<i>Thermische Ausnutzung und Feldstärke.....</i>	<i>13</i>
2.2.4	<i>Prüfungen und Normen.....</i>	<i>14</i>
2.3	Beanspruchungen des Isoliersystems von Generatorstäben.....	14
2.3.1	<i>Beanspruchung und Lebensdauer von Isoliersystemen.....</i>	<i>14</i>
2.3.2	<i>Kombinierte Stressfaktoren, Überbeanspruchung und Teilentladungen.....</i>	<i>15</i>
2.3.3	<i>Kritische Bereiche bei Generatorstäben – Mögliche Teilentladungsquellen.....</i>	<i>17</i>
2.4	Physikalische Zusammenhänge bezüglich Fehlstellen und Entladungen.....	20
2.4.1	<i>Zum Einfluss der Temperatur.....</i>	<i>20</i>
2.4.2	<i>Entladungserscheinungen in Feststoffen und Gasen.....</i>	<i>23</i>
2.4.3	<i>Theoretische Grundlagen zu Gasentladungen.....</i>	<i>30</i>
2.4.4	<i>Energieumsatz von Teilentladungen in Fehlstellen.....</i>	<i>34</i>
2.5	Methoden zur Detektion von Fehlstellen im Isoliersystem von Generatorstäben.....	36
2.5.1	<i>Allgemeines zu Diagnosemethoden bei Generatoren.....</i>	<i>36</i>
2.5.2	<i>Nichtelektrische Detektionsmethoden.....</i>	<i>37</i>
2.5.3	<i>Elektrische Detektionsmethoden.....</i>	<i>37</i>
2.5.4	<i>Elektrische Teilentladungen.....</i>	<i>38</i>
2.6	Zusammenfassung.....	42
<b>3</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG</b>	<b>45</b>
3.1	Allgemeines.....	45
3.2	Teilentladungen bei Modell-Isoliersystemen.....	45
3.3	Teilentladungen in Mikrofehlstellen.....	46
3.4	Schwerpunkte der Arbeit.....	46
<b>4</b>	<b>TEILENTLADUNGEN BEI MODELL-ISOLIERSYSTEMEN</b>	<b>49</b>
4.1	Allgemeines.....	49
4.2	Ziele und Erwartungen.....	49

4.3	Versuchsvorbereitung und Aufbau .....	50
4.3.1	<i>Prüfplatzvorbereitungen</i> .....	50
4.3.2	<i>Messschaltung</i> .....	51
4.3.3	<i>Messgeräte und Messverfahren</i> .....	51
4.4	Spezielles Prüfgefäß und Prüflinge .....	53
4.4.1	<i>Prüfgefäß</i> .....	53
4.4.2	<i>Prüflinge (Testelektroden)</i> .....	54
4.5	Versuchsdurchführung .....	55
4.5.1	<i>Definitionen und Erläuterungen</i> .....	55
4.5.2	<i>Vorversuche zur Bestimmung einer Messroutine</i> .....	56
4.5.3	<i>Versuche unter synthetischer Luft und Wasserstoff</i> .....	57
4.6	Ergebnisse und Auswertemethodik .....	58
4.7	Zusammenfassung .....	61
<b>5</b>	<b>TEILENTLADUNGEN IN MIKROFEHLSTELLEN</b> .....	<b>63</b>
5.1	Allgemeines .....	63
5.2	Ziele und Erwartungen .....	63
5.3	Materialuntersuchungen und Vorversuche .....	64
5.3.1	<i>Größenfraktionierung und Untersuchungen der Glas-Mikrohohlkugeln</i> .....	64
5.3.2	<i>Permittivität ausgewählter Materialien</i> .....	67
5.3.3	<i>Vorversuche mit Teilentladungsmessungen an Plexiglas-Proben</i> .....	68
5.4	Teilentladungsverhalten von Harzproben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln .....	70
5.4.1	<i>Versuchsaufbau, Messschaltung, Messgeräte und Messverfahren</i> .....	70
5.4.2	<i>Probenentwicklung</i> .....	71
5.4.3	<i>Versuchsdurchführung</i> .....	74
5.4.4	<i>Ergebnisse und Auswertemethodik</i> .....	75
5.5	Teilentladungsverhalten von Proben aus harzgetränktem Bandisoliermaterial .....	80
5.5.1	<i>Probenentwicklung der Bänderprobe</i> .....	80
5.5.2	<i>Versuchsaufbau, Messschaltung, Messgeräte und Messverfahren</i> .....	83
5.5.3	<i>Verfahren zur Verstärkung und Analyse optischer Entladungserscheinungen</i> .....	88
5.5.4	<i>Methodenvergleich</i> .....	90
5.5.5	<i>Versuchsdurchführung</i> .....	91
5.5.6	<i>Ergebnisse und Auswertemethodik</i> .....	92
5.6	TE-Verhalten von Teststäben und Stabstücken .....	96
5.6.1	<i>Ziele und Erwartungen</i> .....	96
5.6.2	<i>Versuchsaufbau, Prüfkreis und Prüflinge</i> .....	97
5.6.3	<i>Versuchsdurchführung</i> .....	98
5.6.4	<i>Ergebnisse und Auswertemethodik</i> .....	98

---



5.7	Zusammenfassung .....	102
<b>6</b>	<b>THEORETISCHE ANALYSEN DER TEILENTLADUNGSMECHANISMEN</b>	<b>105</b>
6.1	Allgemeines .....	105
6.2	Numerische Berechnungen zu den untersuchten Modellgeometrien .....	105
6.2.1	<i>Materialeigenschaften, Geometrie, Randbedingungen, Netzeigenschaften und Simulation</i> .....	106
6.2.2	<i>Nachbildung und Simulation einer Plättchenprobe</i> .....	106
6.2.3	<i>Nachbildung und Simulation einer Bänderprobe</i> .....	109
6.2.4	<i>Nachbildung und Simulation eines Stabschnittes</i> .....	110
6.3	Überlegungen zum Temperatureinfluss auf Entladungen in Mikrohohlkugeln .....	112
6.4	Energieumsatz und Entladungsleistung bei Teilentladungen in Mikrofehlstellen .....	115
6.5	Zusammenfassung .....	116
<b>7</b>	<b>DISKUSSION UND INTERPRETATION</b>	<b>119</b>
7.1	Allgemeines .....	119
7.2	Die Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes .....	120
7.2.1	<i>Bereiche der Paschen-Kurve</i> .....	120
7.2.2	<i>Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Anordnungen mit isolierten Elektroden</i> .....	121
7.2.3	<i>Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Mikrofehlstellen</i> .....	121
7.3	Teilentladungen in Mikrofehlstellen innerhalb der Feststoff-Isolierung .....	122
7.3.1	<i>Einflussgrößen auf die Entladungsaktivität in Mikrohohlräumen</i> .....	123
7.3.2	<i>Entladungen in Hohlräumen mit optischen Erscheinungen</i> .....	125
7.3.3	<i>Auswirkungen von Teilentladungen in Mikrohohlräumen</i> .....	127
7.4	Detektion und Analyse von Entladungen .....	130
7.4.1	<i>Optische Detektion und Analyse von Entladungen innerhalb der Isolierung</i> .....	130
7.4.2	<i>Betrachtungen zu unterschiedlichen Detektionsmethoden</i> .....	131
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>133</b>
8.1	Ausgangssituation und Fragestellung .....	133
8.2	Untersuchungen und wesentliche Ergebnisse .....	133
8.2.1	<i>Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Anordnungen isolierter Elektrodenpaare</i> .....	133
8.2.2	<i>Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Entladungen in Mikrohohlräumen</i> .....	134
8.2.3	<i>Einflussgrößen auf die Entladungsaktivität in Mikrohohlräumen</i> .....	134
8.2.4	<i>Auswirkungen der Entladungsaktivität in Mikrohohlräumen</i> .....	135
8.2.5	<i>Methoden zur Detektion der Entladungsaktivität in Mikrohohlräumen</i> .....	135
8.2.6	<i>Detektions- bzw. Analysemethode für TE mit optischen Entladungserscheinungen</i> .....	135
8.3	Anregungen für weitere Forschungstätigkeit .....	136
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>139</b>

**ANHANG**

**151**

---

Anhang A	Ergänzung zur optischen Methode zur TE-Analyse .....	i
Anhang B	Ergänzungen zu den numerischen Berechnungen.....	v

---





---

## HÄUFIGE ABKÜRZUNGEN & FORMELZEICHEN

<i>A</i>	Konstante aus der Formulierung des Paschen-Gesetzes, abhängig von Abstand <i>d</i>
<i>AGS</i>	Aussenglimmschutz
<i>B</i>	Konstante aus der Formulierung des Paschen-Gesetzes, Feldstärke-abhängig
<i>c</i>	Lichtgeschwindigkeit oder spezifische Wärmekapazität
<i>C</i>	Kapazität
<i>CCD</i>	Sensortype (Charge-coupled Device)
<i>C<sub>m</sub></i>	molare Wärmekapazität
<i>C<sub>mp</sub>, C<sub>mV</sub></i>	molare Wärmekapazität bei konstantem Druck bzw. konstantem Volumen
<i>d</i>	Materialdicke, Schlagweite oder Hohlraumdurchmesser
<i>D</i>	quadratisch Ladungsgröße (erweiterte Grundgröße bei Teilentladungen)
<i>E</i>	Elektrische Feldstärke
<i>EGS</i>	Endenglimmschutz
<i>E<sub>Z</sub></i>	Elektrische Zündfeldstärke
<i>E<sub>0</sub>, E<sub>MHK</sub></i>	Elektrische Grundfeldstärke bzw. Feldstärke innerhalb einer Mikrohohlkugel
<i>E<sub>Ein</sub>, E<sub>Aus</sub></i>	Elektrische Feldstärke bei Einsetzen bzw. Aussetzen von Teilentladungen
<i>HF</i>	High Frequency
<i>HGW</i>	Hartgewebe
<i>HV</i>	High Voltage
<i>I</i>	Strom
<i>IEC</i>	International Electrotechnical Commission
<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>IPS</i>	Innenpotentialsteuerung
<i>IR</i>	Infrarot
<i>k</i>	(empirische) Konstante
<i>LWL</i>	Lichtwellenleiter
<i>m</i>	Masse
<i>m<sub>M</sub></i>	relative Molekülmasse
<i>M<sub>mol</sub></i>	molare Masse
<i>MHK</i>	Mikrohohlkugel(n), hier aus Glas unter der Annahme ideal-sphärischer Form
<i>MHR</i>	Mikrohohlraum/räume, d.h. keine Glaswand und keine bestimmte Form
<i>n</i>	Molzahl
<i>N</i>	Anzahl der (Start-)Elektronen
<i>p</i>	Gasdruck
<i>P<sub>TE</sub></i>	Entladungsleistung
<i>PD</i>	Partial Discharge
<i>q, Q</i>	Ladung

## Teilentladungen (TE) in Feststoff-Isoliersystemen

---

$q_{si}$	scheinbare Ladung
$R$	Widerstand
$R_G$	Spezielle Gaskonstante
$R_m$	universelle (molare) Gaskonstante
$RR$	Rich Resin (Fertigungsverfahren bei Generatorstäben)
$t$	Zeit, Dauer
$T_{Index}$	Temperatur oder Zeitdauer
$TE$	Teilentladung(en)
$u, U$	Spannung
$U_d$	Durchschlagspannung
$U_{Ein}, U_{Aus}$	Korona-Ein- bzw. Aussetzspannung oder TE-Ein- bzw. Aussetzspannung
$u_Z, U_Z$	Zündspannung
$UHF$	Ultra High Frequency
$UV$	Ultraviolett
$V$	Volumen
$VHF$	Very High Frequency
$v_m$	mittlere Molekülgeschwindigkeit
$v_e$	Geschwindigkeit eines Elektrons
$VIS$	sichtbarer Frequenzbereich (Visible)
$VPI$	Vacuum Pressure Impregnation (Fertigungsverfahren bei Generatorstäben)
$w_e$	Energiedichte eines elektrischen Feldes
$W_a$	von außen zugeführte Energie
$W_{Phot}$	Energie eines Photons
$W_{TE}$	am Entladungsort umgesetzte Energie
$Z$	Impedanz
<hr/>	
$\alpha$	materialspezifischer Ausdehnungskoeffizient
$\alpha, \alpha_{eff}$	Ionisierungskoeffizient (1. Townsend-Koeffizient), effektiver Ionisierungskoeffizient
$\beta$	materialspezifischer Ausdehnungskoeffizient
$\gamma$	Rückwirkungskoeffizient (2. Townsend-Koeffizient)
$\Delta q$	scheinbare Ladung
$\Delta Q$	zugeführte Wärmemenge
$\Delta T$	Temperaturerhöhung
$\varepsilon, \varepsilon_r$	Permittivität, relative Permittivität
$\eta$	Anlagerungskoeffizient
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit oder Wellenlänge
$\nu$	Frequenz

---







---

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Allgemeines

Technischer Fortschritt geht zumeist auch einher mit steigenden Anforderungen an Betriebsmittel und so ergeben sich auch für die hier betrachteten großen, rotierenden elektrischen Maschinen immer wieder neue Herausforderungen in Bezug auf eingesetzte Materialien und das Design. Im Rahmen dieser Arbeit erfahren dabei hochbeanspruchte Isoliersysteme, wie es jenes von Generatorstäben darstellt, besondere Betrachtung. Die dabei eingesetzten Isolierstoffe (feinglimmerhaltige, harzgetränkte Glasgewebebandagen) unterliegen zwar ebenfalls stetigen Entwicklungen und werden hinsichtlich ihrer Belastbarkeit laufend optimiert, dennoch können Fehlstellen, teils fertigungstechnisch bedingt, teils durch betriebliche Belastungen hervorgerufen, nicht gänzlich vermieden werden. Diese Fehlstellen verschiedenster Art und Ursache können, abhängig von ihrer exakten Lage im Stabaufbau, ganz unterschiedliches Schädigungspotential bergen. Auf Herstellerseite besteht darüber hinaus das Bestreben, ein möglichst teilentladungsfreies Design entwickeln zu können.

## 1.2 Definitionen

Einleitend soll nun der gewählte Titel der vorliegenden Arbeit – gleichsam als sanfter Einstieg in die behandelte Thematik – erklärt und der Rahmen der zugrundeliegenden Forschungsaktivität am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement skizziert werden. Eine Definition der Begrifflichkeit des *Isoliersystems* erscheint an dieser Stelle ebenso sinnvoll und notwendig, wie das Abstecken der tatsächlich im weiteren Kontext betrachteten Fragestellungen, welchen sowohl in theoretischer als auch praktischer Weise nachgegangen wurde.

*Was also ist unter dem Terminus „Teilentladungen (TE) bei Generatorstab-Isoliersystemen“ zu verstehen, worum geht es in der folgenden Abhandlung?*

Entladungen stehen innerhalb dieser Arbeit nahezu ausschließlich für elektrische Teilentladungen, oft nur als TE bezeichnet. Solche Teilentladungen können vielfältige Erscheinungsbilder aufweisen und unterschiedliche Ursachen haben (siehe z.B. [47, 48, 88]). Für die gegenständlichen Untersuchungen spielen zum einen äußere TE in Form von Korona-Entladungen im Gasraum zwischen isolierten Elektroden eine Rolle (siehe z.B. [9, 10, 29]), und zum anderen als innere TE

bezeichnete Entladungen in gasgefüllten Hohlräumen innerhalb der eigentlichen Isolierung (vgl. z.B. [27, 66, 98]).

Diese elektrischen Teilentladungen sind nicht nur anhand elektrischer Größen (Strom oder Spannung) bestimmbar, sondern senden Energie auch in anderen Formen aus. So können diese sogenannten Emissionen<sup>1</sup> z.B. die Form optischer oder akustischer Strahlung annehmen oder auch als Wärmestrahlung (nicht zu verwechseln mit der *thermischen Emission* von Elektronen) auftreten und sind unter bestimmten Umständen detektierbar. Insgesamt muss, dem Energieerhaltungssatz entsprechend, die zugeführte gleich der abgeführten Energie sein.

Um den Begriff Generatorstab-Isoliersystem gemäß der weiteren Verwendung zu definieren, ist vorweg zu sagen, dass es eine Vielzahl an Einsatzgebieten und Anwendungsmöglichkeiten für elektrische Isoliersysteme gibt, deren umfassende Behandlung und Untersuchung im Rahmen eines zeitlich begrenzten Forschungsvorhabens unmöglich erscheinen muss. Die weiteren Betrachtungen beschränken sich daher auf Isoliersysteme, wie sie im Stator großer Generatoren – bei verröbelten Generatorstäben ohne direkte Leiterkühlung – zum Einsatz kommen. Bei diesen Isolieranordnungen handelt es sich zuallererst um ein Feststoff-Isoliersystem, wobei sich die Bezeichnung Feststoff auf den dominierenden Teil der Anordnung bezieht. Bei großen, rotierenden elektrischen Maschinen muss man aber – dies gilt insbesondere für Anordnungen im Wickelkopf – eigentlich von Mischsystemen sprechen, da das Kühlgas (vornehmlich Luft bzw. Wasserstoff) auch einen erheblichen Teil zur Isolation beiträgt, und somit sowohl feste als auch gasförmige Isolierstoffe zur Isolation beitragen.

Bei der Verwendung von Begriffen wie z.B. *Isolierung* oder *Isoliersystem* wird im Weiteren der entsprechenden Zusammenfassung nach *Sumereder (2010)* [97] gefolgt (vgl. auch [121]). Unter dem Begriff *Isoliersystem* ist dieser Definition nach die Gesamtheit aller Materialien zu verstehen, welche gemeinsam mit den entsprechenden leitenden Teilen in einem elektrotechnischen Gerät eingesetzt werden<sup>2,3</sup>. Während die Bezeichnung *Isolierung* alle Materialien und Teile beschreibt, die verwendet werden, um leitende Elemente eines Gerätes zu isolieren<sup>4</sup>, versteht man unter dem Begriff *Isolation* hingegen die Eigenschaften, welche die Funktionalität der Isolierung gewährleis-

---

<sup>1</sup> Definition nach [96]: lat. *emittere* = ausschicken, hier: die Aussendung einer Wellen- oder Teilchenstrahlung

<sup>2</sup> Electric insulation system: insulating structure containing one or more insulating materials together with associated conducting parts employed in an electrotechnical device, vgl. Index 212-11-08 [121]

<sup>3</sup> Insulation system: insulating material, or an assembly of insulation materials, to be considered in relation with associated conducting parts, as applied to a particular type or size or part of electrical equipment, vgl. Index 411-39-25 [121]

<sup>4</sup> Insulation (1): all the materials and parts used to insulate conductive elements of a device, vgl. Index 151-15-41 [121]

ten<sup>5</sup>. Das eigentliche Material, welches zum Einsatz kommt, bezeichnet man korrekterweise als *Isolierstoff*<sup>6</sup>.

### 1.3 Fragestellung und Ansatz

Wird nun die Isolierung als Teil eines Systems zweier gegeneinander isolierter Elektroden betrachtet, so baut sich entsprechend den Eigenschaften dieses Isoliersystems bzw. der anliegenden Potentialdifferenz ein elektrisches Feld auf. Dieses Feld, welches insbesondere an den Oberflächen bzw. im Inneren der Isolierung von besonderem Interesse ist, entwickelt sich im Fall der Beanspruchung mit Wechselspannung<sup>7</sup> entsprechend der relativen Permittivitätszahlen der eingesetzten Komponenten. Bei entsprechend hohen Feldstärken kann es innerhalb der oder angrenzend zur Isolieranordnung zu Teilentladungen kommen. Der TE-Einsatz kann allerdings bereits bei Feldstärken weit unterhalb der eigentlichen Festigkeitsgrenze geschehen, da verschiedene Phänomene<sup>8</sup> eine lokal stark erhöhte Feldbeanspruchung zur Folge haben können. Durch diese elektrischen Teilentladungen kommt es örtlich zu einer impulsartigen Energiezufuhr, welche die bereits erwähnten Emissionen auslösen kann.

Der erste Fragenkomplex befasste sich mit den grundlegenden Zusammenhängen von Entladungen an der Elektrodenoberfläche bzw. im Gasspalt zwischen isolierten Elektroden und den vorherrschenden Umgebungsbedingungen (Gasart, Gasdruck, Elektrodenabstand und Temperatur). Überdies lag ein Fokus auf den Möglichkeiten der Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Modell-Isoliersysteme, wobei sich hier insbesondere drei Kriterien ergaben:

- I)     blanke Metallelektroden ↔ isolierte Metallelektroden
- II)    Durchschlagspannung ↔ TE-Einsatzspannung
- III)    Umgebung Luft ↔ Umgebung Wasserstoff

Dazu soll anhand der durchgeführten Untersuchungen der gewonnene Erkenntnisstand dargelegt werden und in Gegenüberstellung mit der Literatur diskutiert werden.

Ein zweiter Fragenkomplex ergab sich rund um das Auftreten von Teilentladungen in Mikrohohlräumen innerhalb der Feststoff-Isolierung, deren Auswirkungen, dabei detektierbare Emissionen und die Eignung verschiedener Detektionsmethoden. Die grundlegende Idee hierbei basiert auf Überlegungen zum Energieumsatz aufgrund von Teilentladungen innerhalb der Isolierung. Insbe-

---

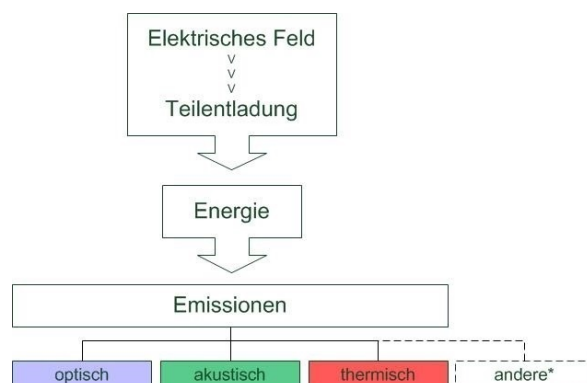
<sup>5</sup> Insulation (2): set of properties which characterize the ability of an insulation to provide its function, vgl. Index 151-15-42 [121]

<sup>6</sup> Insulating material

<sup>7</sup> Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich die Beanspruchung des Isoliersystems mit 50 bzw. 60 Hz Wechselspannung bzw. entsprechenden Feldgrößen betrachtet

<sup>8</sup> z.B. Feldverdrängung in gasgefüllte Schwachstellen (Voids, Cracks, Lunker, Delaminationen etc.) oder lokale Feldüberhöhung durch Protrusionen oder Materialunreinheiten

sondere lag das Interesse darauf, welche Anteile des emittierten Spektrums erfasst werden können und ob die detektierten Emissionen, welche sich auf verschiedene Weise manifestieren, mit den elektrischen TE-Messsignalen in Korrelation zu bringen sind, siehe dazu Abb. 1-1.



\*) ..... neben optischen, akustischen und thermischen Emissionen existieren auch „andere“ Formen (z.B. Radio-Frequenzen), welche im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht weiter betrachtet werden.

Abb. 1-1: Überlegung zum Energieumsatz: Energiezufuhr und Emissionen

Für die Detektion möglicher Emissionen wurde grundsätzlich jede technische Variante, optische, akustische oder thermische Strahlung zu erfassen, in Betracht gezogen. Vor allem die Anwendung von optischen Detektionsmethoden wurde von Beginn an als vielversprechend betrachtet, aber auch gänzlich andere Zugänge, wie beispielsweise die Vibrometrie aus dem Bereich der Schwingungsmesstechnik, wurden auf ihre Eignung hin überprüft.

### 1.4 Ziele und Aufbau der Dissertation

Zu den Zielen der vorliegenden Dissertation im Themenbereich Generatorstab-Isoliersystem, Mikrofehlstellen und Paschen-Gesetz gehören zum einen allgemeine Punkte, wie die Erarbeitung des aktuellen Standes bzgl. Theorie und Praxis in Bezug auf die Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes [56-59], zum anderen aber auch ganz konkrete und zum Teil sehr spezielle Absichten, wie die Durchführung optischer, akustischer und elektrischer Untersuchungen an Isolierstoffproben mit Mikrohohlräumen, welche Erkenntnisse um Emissionen und etwaige Schädigungsmechanismen von Fehlstellen erbringen sollen [60]. Wünschenswert wäre außerdem, wenn die Ergebnisse zur Entwicklung einer Detektionsmethode für Entladungen in Feststoff-Isoliersystemen beitragen könnten.

In Anbetracht der zukünftig stark steigenden Anforderungen hinsichtlich elektrischer und thermischer Belastungen, werfen sich während der Arbeit auf diesem Forschungsgebiet unweigerlich viele interessante Fragen auf, welche aber nicht Teil dieser Abhandlung waren und es auch nicht sein konnten. So ist hier vor allem die Untersuchung von Auswirkungen der detektierten Teilentladungen auf das Isoliersystem zu nennen, wobei neben der Frage nach einer etwaigen Langzeitwirkung in Form einer verminderten Lebensdauer, sich eine weitere ebenso interessante Frage

stellt, nämlich die nach einer bereits kurzfristig schädigungsrelevanten zusätzlichen Beanspruchung durch Teilentladungen.

Im Anschluss an diese einleitenden Seiten wird in *Kapitel 2 Stand des Wissens* der Versuch unternommen ein allgemeines sowie in speziellen Punkten vertieftes Verständnis für den fachlichen Bereich der zugrundeliegenden Fragestellungen und die dafür nötigen theoretischen Zusammenhänge aufzubauen. In *Kapitel 3* werden die festgelegten Ziele nochmals klar definiert und die daraus resultierende Aufgabenstellung dargelegt. Mit *Kapitel 4 Teilentladungen bei Modell-Isoliersystemen* und *Kapitel 5 Teilentladungen in Mikrofehlstellen* folgen jene beiden Abschnitte, welche die Ziele der praktischen Untersuchungen, Versuchsaufbauten und Probenentwicklung beschreiben. Überdies behandeln beide Kapitel auch die Umsetzung der durchgeführten Versuche sowie in einem ersten Schritt jeweils die daraus erlangten Erkenntnisse. Die numerischen Feldberechnungen gemeinsam mit den angestellten Überlegungen zur Theorie finden sich in *Kapitel 6 Theoretische Analysen der Teilentladungsmechanismen* wieder. Das *Kapitel 7 Diskussion und Interpretation* widmet sich der kritischen Betrachtung der Resultate unter Berücksichtigung von Vergleichen mit bekannter Theorie und, soweit verfügbar, auch mit Ergebnissen anderer Wissenschaftler bzw. Forschungsinstitutionen. Im abschließenden *Kapitel 8 Zusammenfassung* wird der erreichte Fortschritt im Bewusstsein der zu Beginn gefassten Zielsetzungen dargelegt und eine Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich einer zukünftigen Nutzbarkeit versucht. Schließlich findet diese Arbeit mit einem kurzen Ausblick auf mögliche weitere Forschungsaktivitäten im behandelten Gebiet ihren Ausklang.



---

## 2 STAND DES WISSENS

### 2.1 Allgemeines

Unter Zuhilfenahme der verfügbaren fach einschlägigen Literatur werden im nun folgenden Abschnitt die für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wesentlichen Grundlagen zum Isoliersystem bei Generatorstäben dargestellt. Dabei wird sowohl auf den prinzipiellen Aufbau und die verwendeten Materialien sowie auf die zu erwartenden Beanspruchungen des Isoliersystems eingegangen. Danach werden Methoden zur Detektion von Fehlstellen im Isoliersystem behandelt, um schließlich interessante Aspekte aus dem Gebiet der Physik in Bezug auf das Isoliersystem von Generatorstäben aufzugreifen.

Die dabei einbezogene Literatur soll einen Einblick in den Stand der Technik und des allgemeinen Wissens geben, wie er sich nach den einführenden Literaturrecherchen zu Beginn der Arbeit dargestellt hat. Neuere Publikationen, die zur Entwicklung der Thematik wesentlich beigetragen haben, finden vorwiegend im *Kapitel 7 Diskussion und Interpretation* Eingang in diese Arbeit und werden an gegebener Stelle zum Vergleich mit eigenen Ergebnissen herangezogen.

### 2.2 Isoliersystem bei Generatorstäben

#### 2.2.1 Aufgabe, Anforderungen und Aufbau

Die Aufgabe des Isoliersystems besteht darin, Teile unterschiedlichen Potentials elektrisch zu trennen und elektrische Potentiale entlang von Oberflächen so zu steuern, dass Durchschläge bzw. Überschläge verhindert werden. Daneben bestehen Anforderungen an die Isolierung den auftretenden thermischen und mechanischen Beanspruchungen standzuhalten bzw. diese abzuführen. Schließlich erfüllt die Isolierung auch den Zweck, den meist verröbelten Generatorstäben selbst mechanischen Halt zu verleihen.

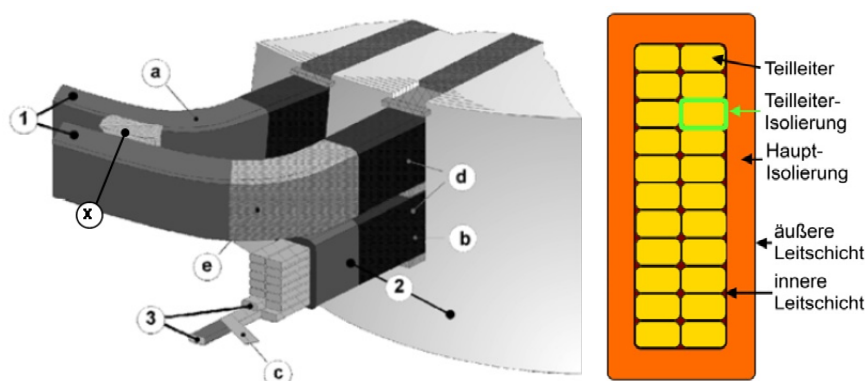
Um die vielfältigen Aufgaben und Anforderungen zu erfüllen, werden die Abstände zwischen aktiven Teilen eines Betriebsmittels so gewählt, dass eine entsprechende Luft bzw. Gasisolierung einen Teil der Isolation übernimmt und Wärmeabfuhr ermöglicht. Da aus praktischen Gründen allerdings die Abstände nicht beliebig groß gewählt werden können, greift man auf Materialien mit geeigneten dielektrischen Kennwerten als Isolierstoffe zurück, die ihrerseits ebenfalls einen beträchtlichen Teil der Isolation übernehmen. Ferner sind inhomogene Feldgeometrien nie gänz-

lich vermeidbar, was die Schädigung einer Isolierung begünstigen könnte, daher ist es notwendig an besonders beanspruchten Stellen zusätzlich feldsteuernde Maßnahmen durch den Einsatz entsprechender Materialien<sup>1</sup> zu treffen.

Das Prinzip des Aufbaus der Isolierung, dieser kann je nach Hersteller bzw. Fertigungsverfahren variieren, besteht aus mehreren Komponenten, die jeweils bestimmte Teilaufgaben zu erfüllen haben, wie dies in Abb. 2-1 dargestellt ist. Die beiden heute üblichen Fertigungsverfahren<sup>2</sup> sind das VPI-Verfahren (Vacuum Pressure Impregnation/Vakuum-Druck-Imprägnier-Verfahren) und das RR-Verfahren (Resin-Rich/Spulenpressverfahren). Je nach Hersteller werden durchaus unterschiedliche Bezeichnungen für die in ihrer Funktionalität identen Teile des Aufbaus der Isolierung verwendet, wobei das Isoliersystem von Generatorstäben stets aus drei wesentlichen Teilen besteht [47, 112]:

- Hauptisolierung (feinglimmerhaltige Bandagen<sup>3</sup>)
- Nutenglimmschutz (leitfähige Bandagen oder Lacke)
- Endenglimmschutz im Wickelkopfbereich (halbleitfähige Lacke oder Bandagen)

Überdies existieren Teileiterisolierungen und es können zusätzlich innere Potentialsteuerbeläge oder unterschiedliche Abstufungen der äußeren halbleitenden Bänder zur Anwendung kommen.



- |         |                              |         |                                  |
|---------|------------------------------|---------|----------------------------------|
| a ..... | Leiter-/Wickelkopfisolierung | x ..... | Abstandshalter                   |
| b ..... | Masseisolierung              | 1 ..... | Leiter-Leiter                    |
| c ..... | Teilleiterisolierung         | 2 ..... | Leiter-Erde-Isolierung           |
| d ..... | Nutenglimmschutz             | 3 ..... | Teilleiter-Teilleiter-Isolierung |
| e ..... | Endenglimmschutz             |         |                                  |

Abb. 2-1: Aufbau einer typischen Generatorstab-Isolierung, nach [112] bzw. Prinzip des Stabquerschnitts

<sup>1</sup> z.B. halbleitende Bänder oder Lacke mit definierten Widerstandswerten

<sup>2</sup> Es wird aber auch an Verbesserungen der Verfahren hinsichtlich der Umweltverträglichkeit, Durchträngung etc. geforscht (z.B. [84]).

<sup>3</sup> Beim VPI-Verfahren kommen poröse Bänder, beim RR-Verfahren dagegen harzreiche Bänder zum Einsatz.



Abweichend von der ursprünglichen Abbildung aus der Norm [112] findet sich in Abb. 2-1 auch die Beschriftung „x“ wieder, welche auf einen Abstandshalter hinweist. Diese isolierenden Abstandshalter bzw. Stützelemente (engl. Spacer) sind bei der Dimensionierung der Wickelkopfabstände von Bedeutung, da sie einen verfrühten Teilentladungseinsatz oder sogar einen Überschlag bewirken können (vgl. [5, 30, 34, 50, 51, 53]).

### 2.2.2 *Materialien und ihre Eigenschaften*

Isoliersysteme von Generatorstäben werden seit vielen Jahrzehnten nach ähnlichen Prinzipien hergestellt und verbaut. Die wichtigsten Materialien dabei sind

- Glimmer
- Trägermaterial für den Glimmer
- Füllmaterial

Verändert wurde im Laufe der Zeit vor allem das Trägermaterial für den Glimmer, welches in Verbindung mit einem Füllmaterial die Isolierung bildet. Die Verwendung von Glimmer ist wegen seiner Eigenschaft der Teilentladungsresistenz in Verbindung mit der thermischen und chemischen Beständigkeit ein unverzichtbarer Bestandteil der Isolationstechnik geworden. Zu Beginn der Entwicklung von Hochspannungsisolierungen wurden Kombinationen aus Papier, Glimmer und Schellack bzw. Bitumen verwendet. Heute aktuelle Varianten werden bevorzugt aus Polyestervliesen, Glasmatten oder Glasgewebe als Trägermaterial für den Glimmer in Verbindung mit verschiedenen Harzen gefertigt. Für große Generatoren eignet sich insbesondere Glasgewebe als Trägermaterial, da es am ehesten den hohen betrieblichen und vielfältigen fertigungstechnischen Ansprüchen gerecht wird [63, 97].

Glasfasern mit Durchmesser im Bereich 1-100  $\mu\text{m}$  eignen sich aufgrund höchster Zugfestigkeit als Verstärkungsmaterial und daher auch für isolierende Bänder. Für den Einsatz in der Hochspannungsisolierung von rotierenden, elektrischen Maschinen kommt E-Glas zur Anwendung. Diese Glasfasern werden aus speziell entwickelten Borsilikaten hergestellt und zeichnen sich durch ihre thermische und chemische Stabilität, gute Feuchtigkeitsbeständigkeit und eine äußerst niedrige Leitfähigkeit<sup>4</sup> aus. Das Glas selbst ist nicht brennbar. Außerdem sind nichtorganische Materialien wie Glas auch zu einem hohen Maße teilentladungsresistent [25, 63, 122].

Standardmaterial für den Einsatz in Hochspannungsisoliersystemen wird unter Nutzung der Leinwandbindung, welche sich durch eine sehr enge Verkreuzung der Fäden auszeichnet, als verdrehtes Bandmaterial gefertigt. In jüngerer Zeit wurde eine Alternative zum verdrehten Glasgewebe, das Flachglas entwickelt, bei dem anstelle einer Verdrehung die Einzelfäden gezielt parallel

---

<sup>4</sup> Bei Raumtemperatur weisen E-Glasfasern einen spezifischen Widerstand im Bereich von  $10^{15} \Omega/\text{cm}$  auf, ihre relative Permittivitätszahl liegt bei etwa 6 [122].

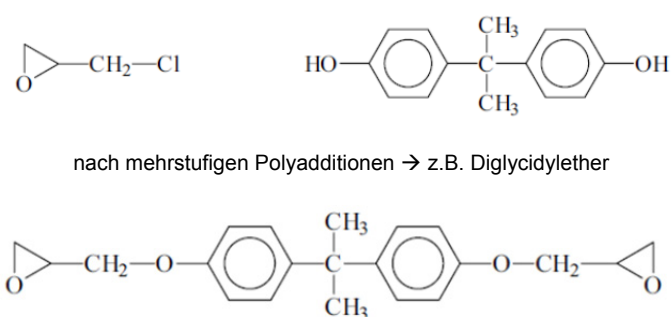
angeordnet werden. Dieses zeichnet sich besonders durch Merkmale wie die geringere Dicke (-20%) bei ähnlichem Flächengewicht und die größere Oberfläche (+30%) zur Anbindung an das Glimmerpapier aus. Hauptvorteile durch die Verwendung von Flachglas liegen in der Möglichkeit der kompakteren Bauweise durch die um ca. 15% dünnere Isolierwandstärke der Stäbe sowie in der erhöhten Effizienz, die sich in der besseren Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem Einsatz von herkömmlichem Glasgewebe ergibt [38, 63].

Je nach Art der Anwendung bzw. Fertigungsverfahren und der vorgesehenen Beanspruchung werden Epoxidharze, Polyesterimidharze, Polyesterharze, Silikonharze etc. zum Einsatz gebracht. Bei großen, rotierenden elektrischen Maschinen stellt Epoxidharz eine übliche Variante für das Hochspannungsisoliersystem dar [63, 97].

Epoxidharze zählen zu den duroplastischen Polymeren und werden durch Polyaddition erzeugt. Sie besitzen im Gegensatz zu anderen Polymeren keine C-C Hauptketten, sondern bestehen je nach Rezeptur aus Kettenmolekülen, vornehmlich unter Beteiligung von C, O, N, S und Si. Ihre Eigenschaften ergeben sich aus ihrem makro-molekularen Aufbau (chemische Bestandteile, Bindungen, Molekülkonfiguration, Kettenlängen, Verzweigungen, Vernetzungen, Copolymere, Kristallisation), den beteiligten Stoffen (Polymer-Mischungen, Verstärkungsmittel, Antioxidantien, Weichmacher, Füll- und Farbstoffe) und werden von der eingesetzten Herstellungstechnologie bestimmt [25, 75].

Zusätzlich lassen sich durch den Einsatz mikro- oder nanoskaliger Füllstoffe mechanische, thermische oder auch elektrische Eigenschaften von Epoxidharzen beeinflussen und den Anforderungen entsprechend gezielt einstellen (vgl. [7, 12, 46]).

Die meisten Epoxidharze werden durch Polyaddition oder Polykondensation ausgehend von einem Harzanteil und einem Anteil Bisphenol A hergestellt. Nach mehrstufigen Reaktionen entstehen in Abhängigkeit vom gewählten Mengenverhältnis schließlich Moleküle mit leicht unterschiedlichem Aufbau bzw. verschiedenen molaren Massen (siehe Abb. 2-2) [16].



Oben links: ..... Epichlorhydrin

Oben rechts: .. Bisphenol A

Unten: ..... Epoxidmolekül (nach mehrstufigen Polyadditionen)

Abb. 2-2: Strukturformel der Bestandteile eines Epoxidharzes, nach [16]

Um Aussagen über den Zustand und das gewünschte Mischungsverhältnis des Harzes in der Tränkanlage zu erhalten, werden Proben genommen, Harzparameter wie die Verseifungszahl, Gesamtsäurezahl, Esterzahl oder Epoxidwert bestimmt und interpretiert [74].

Neben dem eigentlichen Harzanteil werden schließlich noch Katalysatoren als Härter (z.B. Anhydride) und, da die Härtereaktionen meist sehr langsam ablaufen, als Beschleuniger benötigt. Diese Reaktionsbeschleuniger können, wie das beim VPI-Verfahren der Fall ist, bereits in den Glimmerbändern eingebracht sein (*beschleunigte Bänder*) und auf diese Weise während des Tränkvorganges ihre Wirkung an Ort und Stelle entfalten [52, 74].

Bei der Verarbeitung in der Tränkanlage ist eine rasche Durchdringung der mehrlagigen Glimmerbänder erforderlich. Diese hängt vor allem von der Viskosität des Harzes ab, was insbesondere beim VPI-Verfahren von Bedeutung ist [73]. Überdies ist die Wärmeentwicklung während des Tränk- und Härteprozesses zu kontrollieren, da die Polyaddition stark exotherm verläuft und bei Überschreiten der zulässigen Temperaturen bereits eine Vorschädigung der Polymer-Matrix eintreten kann. Ziel ist es, nach dem Abschluss aller Reaktionen, einen möglichst hohen Vernetzungsgrad zu erhalten, wie dies in Abb. 2-3 beispielhaft dargestellt ist, da dieser wesentlich für die Beständigkeit des ausgehärteten Harzes ist [16, 28].

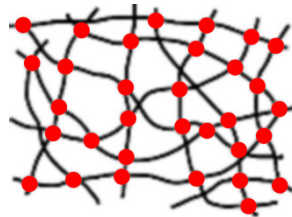


Abb. 2-3: Räumlich engmaschig, chemisch vernetzter Duroplast, nach [33]

Wichtige Material-Parameter für Epoxidharze, welche bei der Auslegung der thermischen Belastung eines Betriebsmittels zu beachten sind, stellen die Glasstemperatur  $T_G$ , die Schmelztemperatur  $T_m$  und die Zersetzungstemperatur  $T_Z$  dar [16].

$T_G$  ..... Glasstemperatur, amorphe Anteile gehen vom glasartig harten in einen weichen, hochviskosen Zustand über ( $T_G$  steigt mit Vernetzungsgrad)

$T_m$  ..... Schmelztemperatur, allmählich Verlustigkeit der intermolekularen Kräfte, nach und nach Erweichen ( $T_G/T_m = \text{ca. } 2/3$ )

$T_Z$  ..... Zersetzungstemperatur, Beginn der thermischen Zersetzung des Polymers  $\rightarrow$  chemische Veränderungen im Aufbau (z.B. Aufbrechen von kovalenten Bindungen)

Bei Duroplasten bleibt der harte Zustand bis zur Zersetzungstemperatur erhalten (vgl. Verlauf des Elastizitätsmoduls in Abb. 2-4), davor ist die Bewegung der eng vernetzten Moleküle stark eingeschränkt (kaum Erweichungs- oder Schmelzprozesse) [16, 25].

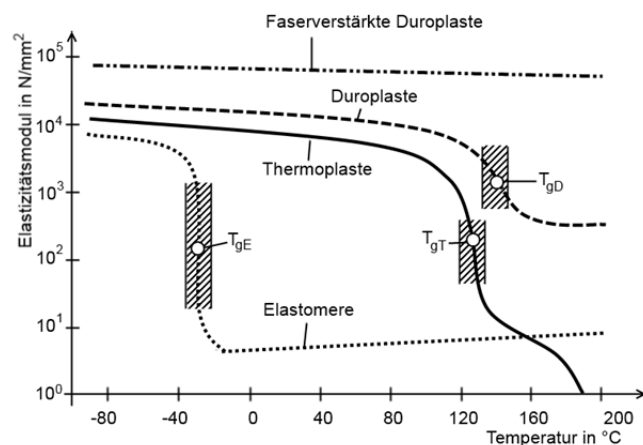


Abb. 2-4: Elastizitätsmodul von Polymeren, nach [28]

Zwar müssen die einzelnen Materialien (verschiedene Bänder, Harze, Lacke) gewisse Anforderungen erfüllen, insgesamt sind aber die Eigenschaften des kompletten Isoliersystems (und diese können von jenen der Einzelmaterialien durchaus abweichen) ausschlaggebend für die Funktionalität. Deshalb ist bei der Auswahl der Komponenten auf die Verträglichkeit der Materialien untereinander und auf das Gesamtergebnis hinsichtlich der Parameter zu achten. Zu den wichtigsten Charakteristika des Isoliersystems von Generatorstäben zählen

- Elektrische Festigkeit, TE-Resistenz, Permittivität und Verlustfaktor
- Oberflächenleitfähigkeit bzw. Kriechstromfestigkeit
- Temperaturbeständigkeit, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit
- Beständigkeit gegen Feuchtigkeit und Chemikalien

aber auch allgemeinere wie Dichte bzw. Masse und nicht zu vernachlässigen auch die Kosten.

Im Zusammenhang mit Isoliersystemen großer, rotierender elektrischer Maschinen müssen auch Gase ihre Erwähnung finden. Gase werden seit langer Zeit als Isoliermedium bei Hochspannungsanlagen und deren Betriebsmittel eingesetzt. Im Besonderen trifft dies auf die beiden Isoliergase Luft und Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) zu. Bei Hochspannungsanlagen und Geräten, bei denen das Isoliergas zusätzlich auch die Funktion eines Kühlgases übernehmen muss, kommt wegen der besseren thermischen Eigenschaften neben Luft vor allem Wasserstoff zum Einsatz.

Wasserstoff ist das Element mit der kleinsten relativen Atommasse und in Form seines  $\text{H}_2$ -Moleküls das leichteste Gas mit ausgeprägtem Diffusionsvermögen und daraus resultierend einer hohen Wärmeleitfähigkeit. Außerdem ist Wasserstoff in der Lage vor Oxidbildung zu schützen, kann aber vor allem bei Stählen zur sogenannten *Wasserstoff-Versprödung* führen [16].

Die Anforderungen an Isoliergase für elektrotechnische Einrichtungen der Hochspannungstechnik (z.B. elektrische Festigkeit, gute dielektrische Eigenschaften, stabile Moleküle, geringe Neigung zur Zersetzung etc.) werden von Wasserstoff nur zum Teil erfüllt. Durch die Erhöhung des Gasdrucks, bei entsprechender Kapselung der Anlage, verbessert man das Verhalten (insbesondere

die elektrische Festigkeit) von Wasserstoffgas soweit, dass auch mit Wasserstoffgas gutes Isoliervermögen erreicht wird.

### 2.2.3 Thermische Ausnutzung und Feldstärke

Die Bewertung und Einteilung von Isolierstoffen und Systemen in thermische Klassen erfolgt nach IEC 60085 [116] (vgl. Tab. 2-1). Bei Generatorstäben wird heute die Klasse F (155°C) vielfach bereits vollends ausgenutzt, der Trend hin zu höheren thermischen Klassen spiegelt auch den Bedarf an Entwicklung auf dem Materialsektor wider.

Tab. 2-1: Thermische Klassenzuordnung für Isolierstoffe, nach [116]

Bezeichnung	Thermische Klasse in °C	ATE oder RTE <sup>5</sup> in °C	
B	130	≥ 130	< 155
F	155	≥ 155	< 180
H	180	≥ 180	< 200
N	200	≥ 200	< 220

Möglichkeiten, die thermischen Belastungsgrenzen einhalten zu können, stellen neben entsprechender Kühlung, die Reduktion der Dicke der Isolierung und das Beigeben gut wärmeleitender metallischer Füllstoffe dar. In den letzten 100 Jahren ging die Entwicklung beispielsweise für eine Nennspannung von  $U_{Nenn} = 13,8$  kV von etwa 10 mm hin zu aktuellen Isolierwandstärken im Bereich von 3 mm [63]. Aufgrund des dadurch verbesserten Wärmetransportes ergibt sich die Möglichkeit zur höheren Ausnutzung der Maschinen (siehe Abb. 2-5 [102]). Allerdings stößt man durch die verringerten Dicken der Hauptisolierung an Grenzen in Bezug auf die elektrische Feldstärke<sup>6</sup>. Auch in diesem Bereich zeigt sich der Bedarf an Weiterentwicklungen.

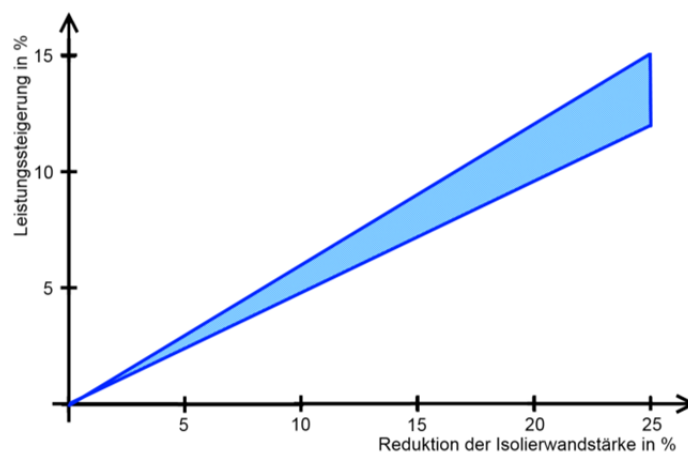


Abb. 2-5: Zusammenhang Reduktion der Isolierwandstärke und möglicher Leistungssteigerung eines Generators, nach [102]

<sup>5</sup> ATE: Festgelegter thermischer Beständigkeitsindex / RTE: Relativer thermischer Beständigkeitsindex, nach [116]

<sup>6</sup> dzt. üblich: Betriebsfeldstärke ca. 3kV/mm, Prüffeldstärke z.B. 10kV/mm (15kV/mm bei beschleunigter Alterung)

### 2.2.4 Prüfungen und Normen

Für die standardisierte Überprüfung von Isoliermaterialien bzw. Isoliersystemen von Generatorstäben existieren international anerkannte Normen bzw. Standards, welche von Gremien wie *IEEE* oder *IEC* ausgearbeitet wurden. Diese stellen Richtlinien zu Prüflingsform, Messaufbau, Belastungsgrößen, Bewertungsmuster etc. dar, um nachvollziehbare und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Über die Jahre haben auch viele Hersteller ihre eigenen Betriebsnormen entwickelt, die speziell auf das angewandte Fertigungsverfahren, die zukünftigen Betriebsbedingungen etc. ausgelegt sind und in jüngster Zeit auch immer öfter mit Kunden akkordiert werden.

Zu den wichtigsten Regelwerken aus dem Bereich der Normung und Standardisierung, welche das Generatorstab-Isoliersystem betreffen, zählen der Normen-Komplex *IEC 60034 (Drehende Elektrische Maschinen)* mit verschiedenen Einzelnormen zur Bewertung, Prüfung etc. [114, 115] sowie die *IEC 60270* als klassische Norm zur Teilentladungsmesstechnik im Hochspannungsbereich [117]. Aus dem *IEEE* Angebot ist vor allem der *IEEE Std 1434 (2000 IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testings of Form-Wound Bars and Coils)* zu nennen [118].

## 2.3 Beanspruchungen des Isoliersystems von Generatorstäben

### 2.3.1 Beanspruchung und Lebensdauer von Isoliersystemen

Beanspruchungen und Lebensdauer sind entscheidende Kriterien für die Auslegung von Generatorstäben und großen Generatoren im Allgemeinen, da diese Betriebsmittel nicht zuletzt aufgrund der hohen Kosten für eine vergleichsweise lange Betriebsdauer vorgesehen werden. Sie sollen daher allen auftretenden Beanspruchungen über viele Jahre hinweg standhalten können.

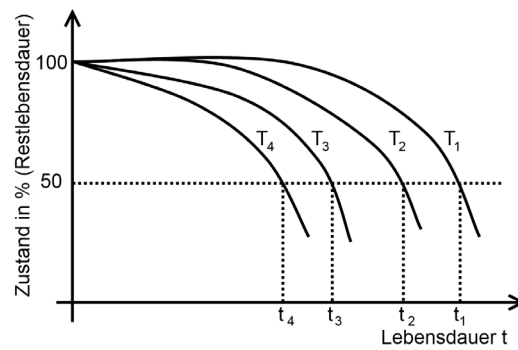
Das Isoliersystem von Generatorstäben wird dabei einerseits durch betriebsmäßige Beanspruchungen und andererseits durch nicht gänzlich vermeidbare Überbeanspruchungen belastet. Sofern die Überschreitung nur kurzzeitig und innerhalb der Auslegungsgrenzen bleibt, wird die Isolierung keinen Schaden nehmen. Erst bei längerer Überschreitung von Grenzwerten kann es zu nachhaltiger Schädigung der Isoliermaterialien kommen.

Neben den elektrischen treten auch thermische und mechanische Beanspruchungen, vor allem im Wickelkopf zum Teil auch stark umgebungsbedingte Einflüsse, auf. Eine besondere Belastung kann dabei der Betrieb mit häufigem Lastwechsel [14, 18]<sup>7</sup> darstellen. Die Wirkung, welche die Summe der Beanspruchungen auf die Lebensdauer von Isoliersystemen ausübt, kann gemäß den Zusammenhängen verschiedener Lebensdauer-gesetz-Modelle abgeschätzt werden, wie es bei-

---

<sup>7</sup> Blecken (1997) nennt Lastzyklen (pro Tag bis zu 80 mal innerhalb von 10 Sekunden auf Volllastbetrieb) als Ursache für Delaminationen bei Generatorstabisolierungen. Brügger (2011) konnte trotz irreversibler Schädigungen am Isoliersystem aufgrund von zyklischem Betrieb keine Lebenszeitverkürzung an untersuchten Teststäben feststellen.

spielsweise für den Zusammenhang von Temperatur und Zustand (Restlebensdauer) in nachfolgender Abb. 2-6 dargestellt ist [47, 69, 97].



$t_i$  ..... Lebensdauer

$T_i$  ..... Beanspruchung (z.B. in °C) mit  $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$

Abb. 2-6: Alterungsverlauf und Beanspruchung, nach [69]

Grundsätzliche Aussage dieser Gesetze ist stets, dass die Zunahme der Beanspruchungen über einen Grenzwert eine beschleunigte Alterung zur Folge hat (vgl. Abb. 2-6).

Um von Untersuchungen an einzelnen Isolierstoffproben bzw. kleinen Probenserien auf die Lebensdauer von Isoliersystemen schließen zu können, müssen zusätzlich Vergrößerungsgesetze herangezogen werden. Diese berücksichtigen größere Elektrodenflächen, größeres Isolierstoffvolumen sowie längere Beanspruchungszeit, was in einer Verminderung der abschätzbaren Lebensdauer resultiert [47].

### 2.3.2 Kombinierte Stressfaktoren, Überbeanspruchung und Teilentladungen

Da für gewöhnlich kombinierte Stressfaktoren die Alterung bestimmen, kann eine klare Trennung zwischen der Wirkung von elektrischen, thermischen, mechanischen oder umgebungsbedingten Beanspruchungen meist nicht getroffen werden. Im Wesentlichen lassen sich jedoch die vielfältigen Beanspruchungen und ihre Auswirkungen in drei Bereiche unterteilen:

- Stoßionisation durch hohe Feldbeanspruchung → Elektrischer Durchschlag
- Thermische Zersetzung → Wärmedurchschlag
- Alterung → Erosionsdurchschlag

Die elektrische Beanspruchung mit betriebsmäßigen Wechselspannungen der Frequenz 50 bzw. 60 Hz entsprechender Höhe alleine hat bei intakter Isolierung (keine Fehlstellen, Abnützungen etc.) keine schädigende Wirkung. Steigt die elektrische Feldstärke allerdings lokal stark an, kann es aufgrund von Stoßionisation direkt zum elektrischen Durchschlag kommen. Besteht über einen längeren Zeitraum eine erhöhte thermische Beanspruchung, kann aufgrund von thermischer Zerstörung des Isolierstoffes der Wärmedurchschlag auftreten. Neben diesen elektrischen und thermischen Beanspruchungen, die direkt zum Durchschlag führen können, gibt es zahlreiche weitere Einflüsse, welche durch kontinuierliche Einwirkung über sehr lange Zeiträume zur Alterung beitragen und schließlich den Erosionsdurchschlag zur Folge haben können (vgl. Abb. 2-7) [47].

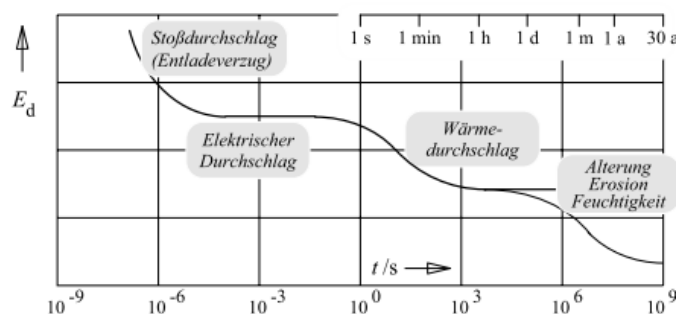
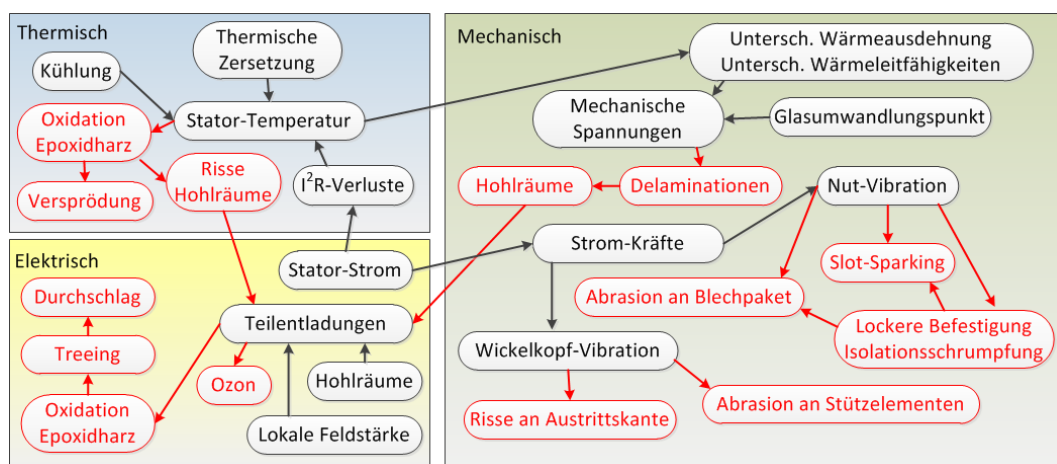


Abb. 2-7: Durchschlagsfestigkeit in Abhängigkeit der Beanspruchungszeit [47]

Von den bei Generatorstabisolierungen verwendeten Materialien unterliegen insbesondere die polymeren Anteile einer Alterung, welche sich aus der thermischen und strahlungsphysikalischen Volumenbeanspruchung ergibt. Weiterhin können mechanische Volumenbeanspruchungen (z.B. Vibrationen) zu Materialermüdung bzw. Materialbruch führen und chemische Oberflächenbeanspruchungen (z.B. Korrosion unter Einwirkung von Ozon) ebenfalls eine Alterung bewirken.

Erfährt nun die Isolierung durch Energiezufuhr in Form thermischer oder mechanischer Überbeanspruchung eine Degradation (Delaminationen, Hohlräume, Risse), so bedeutet das in vielen Fällen den Beginn oder die Verstärkung bereits vorhandener Teilentladungen mit schädigender Wirkung (vgl. Abb. 2-8). In weiterer Folge kann es zu Erosion und Treeing kommen. Im schlimmsten Fall kann das Aufbrechen der Polymer-Ketten bis zum Verlust der mechanischen und elektrischen Festigkeit führen.



Schwarz: ..... betriebs- und konstruktionsbedingte Einflussgrößen

Rot: ..... Alterungs- und Schadensmechanismen

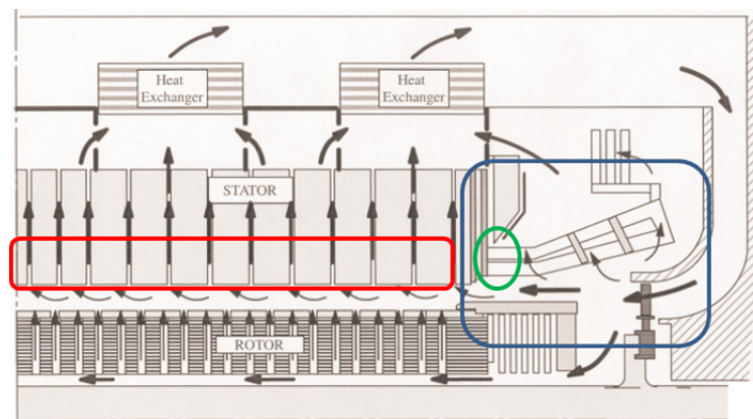
Abb. 2-8: Zusammenhänge von Schadensmechanismen, nach [17]



### 2.3.3 Kritische Bereiche bei Generatorstäben – Mögliche Teilentladungsquellen

Grundsätzlich könnte man die Ständerwicklung bei Generatoren per se als kritische Stelle bezeichnen, da mehr als die Hälfte aller Maschinenfehler bzw. Ausfälle auf Fehler im Isolationssystem der Stäbe oder Spulen im Stator zurückzuführen ist [19, 90, 97]. Dennoch muss man die verschiedenen Bereiche der Stabisolierung mit den möglichen Entladungserscheinungen und eventuellen Folgeschäden differenziert betrachten (vgl. Abb. 2-9), wie es auch die große Zahl an Publikationen zu dieser Thematik nahelegt ([37, 78, 92, 95, 109] u.a.):

- Nutbereich → Entladungen zwischen Stab und Blechpaket
- Wickelkopfbereich
  - Nutaustritt → Gleitentladungen
  - Stab-(Abstandshalter)-Stab → Korona- bzw. Gleitentladungen
  - Stab-Erde → Korona-Entladungen/Durchschlag
- Bereich der eigentlichen Isolierung → Hohlräumentladungen



Kritische Bereiche farblich markiert:      Rot: ..... Nutbereich  
 Blau: ..... Wickelkopfbereich      Grün: ..... Nutaustritt

Abb. 2-9: Skizze eines Turbo-Generators mit Kühlgasströmung, nach [102]

#### 2.3.3.1 Kritischer Bereich: Nutbereich

Im Nutbereich können durch mangelhafte Funktionalität des Außenglimmschutzes (falsche Auslegung oder alterungsbedingt), verstärkt durch die Kanten der gestanzten Bleche (Ungleichheiten im  $\mu\text{m}$ -Bereich) Entladungen auftreten. In einem langsam verlaufenden Prozess kann hier das Isoliersystem schrittweise angegriffen und erodiert werden, was zu einer verminderten elektrischen Festigkeit und zu losen Stäben (Gefahr des zusätzlichen Abriebs durch mechanische Vibrationen) führen kann [90, 93, 108].

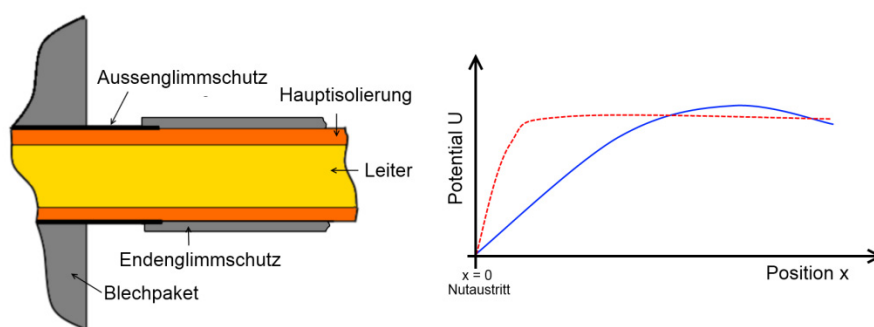
Weiters gibt es ein Entladungsphänomen, das seinen Ausgang ebenfalls im Nutbereich an losen Stäben nimmt, allerdings in Form von sogenanntem *vibration sparking* nicht nur auf Wicklungsteile an Hochspannungspotential beschränkt bleibt [94].

### 2.3.3.2 Kritischer Bereich: Wickelkopf

Der Wickelkopf eines großen Generators stellt einen Bereich vielfältiger kritischer Zonen dar. Einerseits gibt es den aus entladungstechnischer Sicht interessanten Nutaustritt und andererseits sind auch die sogenannten Wickelkopfabstände ein spezieller Punkt im Wickelkopf-Design, der zum einen geprägt ist von den Abständen zwischen den einzelnen Stäben (insbesondere zweier Stränge), zum Teil auch mit Abstandshaltern dazwischen, und zum anderen durch die nicht zu vernachlässigende Nähe zu geerdeten Teilen<sup>8</sup>[1].

#### *Kritischer Bereich: Wickelkopf - Nutaustritt*

Am Nutaustritt kann eine fehlende, falsch bemessene oder beschädigte Außenpotentialsteuerung zu Gleitentladungen vom geerdeten Blechpaket in Richtung Stabende (Hochspannung) oder sogar zum Durchschlag durch die Isolierung führen. Insbesondere ein kontinuierlicher Übergang des Potentials kann negativen Auswirkungen entgegenwirken (siehe Abb. 2-10). Hierzu existieren zahlreiche Ansätze und Systeme verschiedener Hersteller [79, 107].



Rot: ..... nicht idealer Potentialsprung direkt am Nutausgang

Blau: ..... kontinuierlicher Potentialverlauf (Einsatz von überlappenden Glimmschutzsystemen)

Abb. 2-10: Situation am Nutaustritt, Prinzip der Potentialsteuerung

#### *Kritischer Bereich: Wickelkopf – Stab-(Abstandshalter)-Stab*

Zwischen einzelnen Stäben kann es bei zu geringem Abstand zu Korona-Entladungen, an Stellen mit Abstandshaltern zu oberflächlichen Gleitentladungen kommen, welche dem allgemeinen Verständnis nach ungefährlich sind, solange die Isoliermaterialien völlig intakt sind. Neben adäquaten Design-Abständen in Verbindung mit dem Druck des Kühl- und Isoliergases spielen auch die exakte Position und der Typ der Abstandshalter im Wickelkopf eine Rolle. Wenn es dazu kommt, dass die Isolierung beschädigt wird, Abstandshalter verrutschen oder gar brechen bzw. die geforderten Stababstände bei der Montage schlichtweg nicht eingehalten wurden, können die auftretenden Teilentladungen unter Umständen doch eine weitere Schädigung einleiten.

<sup>8</sup> Diese können insbesondere bei eingeschränkter oder ausgefallener Kühlung relevant werden, da dann die Gefahr von Betauung aktiver Teile und damit erhöhtes Durchschlagsrisiko besteht.

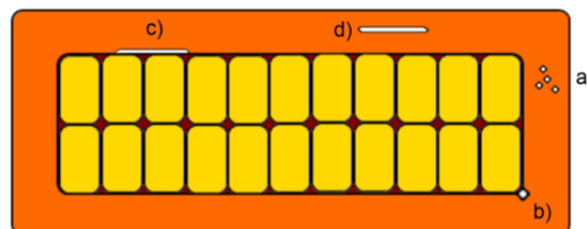
Zur Vermeidung von Schäden in diesem Bereich ist also insbesondere wichtig:

- Berücksichtigung der möglichen elektrischen Spannungen und Feldstärken
- Berücksichtigung der möglichen mechanischen und thermischen Belastungen
- Adäquate Bemessung und Applikation eines Endenglimmschutz-Systems
- Adäquate Design-Abstände und korrekte Montage der Stäbe und der Abstandshalter

Diesem Bereich der Generatorstäbe widmet sich in *Kapitel 4 Teilentladungen bei Modell-Isoliersystemen* auch der erste Teil der praktischen Untersuchungen in dieser Arbeit.

### 2.3.3.3 Kritischer Bereich: Isolierung

Die Isolierung von Generatorstäben selbst bietet wiederum mehrere Möglichkeiten für potentielle Fehler (siehe Abb. 2-11). Zum einen sind fertigungsbedingte Schwachstellen (z.B. gasgefüllte Hohlräume, Delaminationen) trotz des Technologiefortschrittes<sup>9</sup> nicht vollkommen auszuschließen und zum anderen können im Betrieb Fehlstellen entstehen oder bereits vorhandene anwachsen und sich bei ausreichender Belastung an verschiedenen Stellen zu kritischen Fehlern entwickeln [113]. Besonders zu beachten sind daher all jene Stellen an denen Feldspitzen entstehen können, wie neben Luft- bzw. Gaseinschlüssen auch Bandüberlappungskanten [103] oder Glimmerbruchstellen. Weiterhin können sich bestehende Fehlstellen auch zu *Trees* (baumartiges vorwachsen von Entladungskanälen) weiterentwickeln, dazu müssen sie allerdings die Glimmerscheibchen umwandern (vgl. [104, 105]).



- a) ..... gasgefüllte Hohlräume innerhalb der Isolierung  
 b) ..... TE-Einsatz an Leiterecken aufgrund sehr hoher Feldstärken  
 c) ..... Delaminationen der Hauptisolierung vom Leiterpaket  
 d) ..... Delaminationen zwischen einzelnen Lagen der Isolierung

Abb. 2-11: TE-Fehlerquellen in Generatorstäben, nach [97]

Setzt sich außerdem der Trend zu dünneren Isolierwandstärken und höheren Feldstärken weiterhin fort, so werden auch Mikrohohlräume an Relevanz gewinnen, da die relative Größe der Fehlstellen mit der Reduktion der Isolierwandstärke zunimmt.

<sup>9</sup> z.B. der Einsatz von Maschinenbewicklung anstelle der händischen Bewicklung von Generatorstäben [106]

## 2.4 Physikalische Zusammenhänge bezüglich Fehlstellen und Entladungen

An dieser Stelle sollen einige physikalisch-mathematische Zusammenhänge aus den Bereichen Temperatureinfluss und Entladungstheorie sowie zu Energieumsatz und Emissionen von Teilentladungen angeführt werden, welche für die Überlegungen zu den durchgeführten Versuchen und deren Interpretation in späteren Abschnitten benutzt werden. Dabei wird lediglich auf die, für das Verständnis hilfreichen und bereits vereinfachten, Formulierungen zurückgegriffen, anstelle umfassender Herleitungen finden sich entsprechende Verweise auf die Literatur wieder.

### 2.4.1 Zum Einfluss der Temperatur

Thermische Energie wird durch Wärmeleitung (findet allgemein in Materie statt), Konvektion (als Auftriebsströmung in Flüssigkeiten oder Gasen) und Wärmestrahlung (in Form elektromagnetischer Strahlung) transportiert [25]. Wie im vorangegangenen Abschnitt schon angesprochen wurde, besteht aufgrund der charakteristischen Materialeigenschaften bzgl. Längen- und Volumenausdehnung, wie sie durch die Gleichungen (2.1) ausgedrückt werden können, ein großer Temperatureinfluss (insbesondere durch Temperaturschwankungen) auf das Isoliersystem von Generatorstäben [25].

$$dl = \alpha \cdot l_0 \cdot dT \text{ bzw. } dV = \beta \cdot V_0 \cdot dT \quad (2.1)$$

$$\text{mit } \alpha = \frac{1}{l_0} \left( \frac{dl}{dT} \right) \text{ bzw. } \beta = \frac{1}{V_0} \left( \frac{dV}{dT} \right)$$

<i>dl</i> ..... Längenausdehnung	<i>l<sub>0</sub></i> ..... Länge vor der Temperaturänderung
<i>dV</i> ..... Volumenausdehnung	<i>V<sub>0</sub></i> ..... Volumen vor der Temperaturänderung
<i>dT</i> ..... Temperaturänderung	<i>α, β</i> ..... Materialspezifische Ausdehnungskoeffizienten (für isotrope Materialien gilt $\beta = 3 \cdot \alpha$ )

Temperaturbedingte Ausdehnungseffekte spielen bei Mikrohohlräumen innerhalb der Isolierung eine Rolle und müssen auch in Bezug auf Glas-Mikrohohlkugeln (MHK) Beachtung finden, wie sie bei Experimenten im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden (siehe Kapitel 5). In nachfolgender Tab. 2-2 ist der thermische Längenausdehnungskoeffizient für Kupfer, Glas und Epoxidharz angegeben, wobei man vor allem für die beiden Letzteren von einem Bereich sprechen muss, da unzählige, verschiedene Glas- oder Epoxidharzsorten existieren.

Tab. 2-2: Thermischer Längenausdehnungskoeffizient [25]

Stoff	Längenausdehnungskoeffizient $\alpha$ in $10^{-6} \cdot K^{-1}$
Kupfer	17,7
Glas	3,2 ... 10
Epoxidharz	58 ... 117

Die Speicherfähigkeit von Stoffen hängt von ihrer Wärmekapazität ab, welche als spezifische Wärmekapazität *c* oder molare Wärmekapazität *C<sub>m</sub>* (siehe Tab. 2-3) angegeben wird. Man unter-

scheidet außerdem zwischen jener bei konstantem Druck, welche für isobare Zustandsänderungen relevant ist, und derjenigen für konstantes Volumen, die bei isochoren Zustandsänderungen herangezogen wird. Schließlich ist die thermische Leitfähigkeit  $\lambda$  ein wichtiger charakteristischer Stoffwert in Bezug auf die Wärmeübertragung.

Tab. 2-3: Spezifische und molare Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit von Stoffen

Gas	$c$ in $\text{J kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$		$C_{mp}$ in $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$		$C_{mV}$ in $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$		$\lambda$ in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	
$\text{O}_2$	919	[111]	29,3	[25]	21,0	[25]	0,0254	[111]
$\text{N}_2$	1041	[111]	29,1	[25]	20,8	[25]	0,0250	[111]
$\text{H}_2$	14240	[111]	28,9	[25]	20,5	[25]	0,1769	[111]
$\text{CO}_2$	850	[111]	36,9	[25]	28,6	[25]	0,0157	[111]
Luft	0,72	[85]	29,1	[85]	20,8	[85]	0,0261	[85]
$\text{H}_2\text{O}$	4200	[85]	75,5	[123]	75,4	[85]	ca. 0,6	[96]
Kupfer	385	[25]	24,2	[120]	24,8	[85]	395	[25]
Glas	ca. 500	[25]	-	-	-	-	0,2 ... 1,6	[25]
Epoxidharz	800 ... 1700	[28]	-	-	-	-	0,18 ... 0,5	[25]

$c$  ..... spezifische Wärmekapazität

$\lambda$  ..... Wärmeleitfähigkeit

$C_m$  ..... molare Wärmekapazität (Index  $p$ : konstanter Druck bzw. Index  $V$ : konstantes Volumen)

Gemäß Gleichung (2.2) reagieren verschiedene Stoffe, je nach deren Wärmekapazität, auf eine Wärmezufuhr, mit einer Temperaturerhöhung, in Abb. 2-12 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Stoffe hoher Wärmekapazität sind in der Lage eine größere Wärmemenge aufzunehmen und erfahren eine geringere Temperaturerhöhung.

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T \text{ bzw. } \Delta Q = C_m \cdot n \cdot \Delta T \tag{2.2}$$

$$\text{somit } C_m = \frac{m}{n} c = M_{mol} \cdot c$$

$\Delta Q$  ..... zugeführte Wärmemenge

$\Delta T$  ..... Temperaturerhöhung

$c$  ..... spezifische Wärmekapazität

$C_m$  ..... molare Wärmekapazität

$m$  ..... Masse

$M_{mol}$  ..... molare Masse

$n$  ..... Molzahl

Bei Wärmezufuhr für einen längeren Zeitraum über den Grenzbereich der Schmelztemperatur hinaus, erfahren feste Stoffe drastische Veränderungen, oft irreversible Schädigungen. Für Kupfer, Glas und Epoxidharz gibt Tab. 2-4 diesbezüglich interessante Temperaturbereiche an.

Tab. 2-4: Schmelz-, Erweichungs- und Zersetzungstemperatur [25]

Stoff	Eigenschaft	$T$ in $^\circ\text{C}$
Kupfer	Schmelztemperatur $T_m$	1083
Glas	Erweichungstemperatur $T_E$	440 ... 840
Epoxidharz	Zersetzungstemperatur $T_Z$	40 ... 160

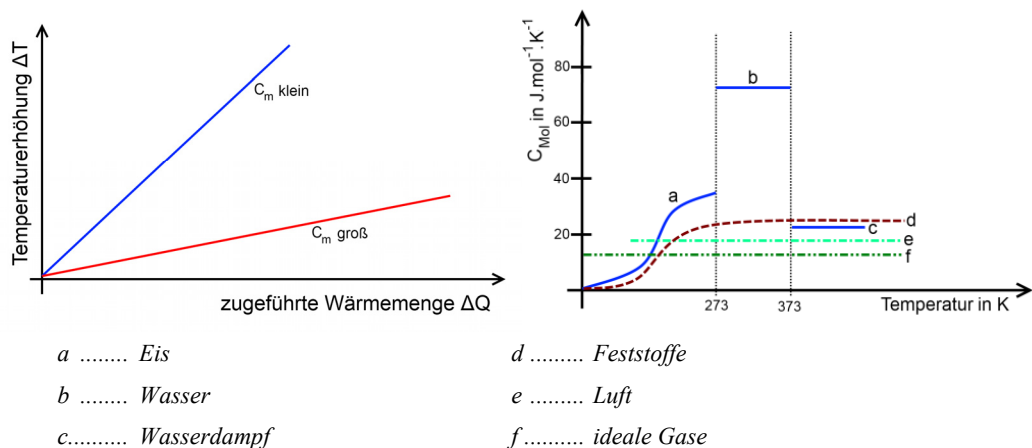


Abb. 2-12: Wärmekapazität, Wärmemenge und Temperaturerhöhung, nach [111]

Für Anwendungen in der Hochspannungstechnik bzw. der Isolationstechnik sind auch die bekannten Gasgesetze von Relevanz. Am Beginn des kurzen Exkurses in die Gasphysik soll das Gesetz von Boyle-Mariotte stehen, wonach für ein ideales Gas bei konstanter Temperatur Gleichung (2.3) gilt: Druck  $p$  und Volumen  $V$  sind zueinander indirekt proportional. Mit dem Gesetz von Gay-Lussac schließlich gilt für isobare Zustandsänderungen (konstanter Druck) Gleichung (2.4) bzw. analog dazu für isochore Zustandsänderungen Gleichung (2.5). Das bedeutet, dass Druck und Temperatur zueinander proportional sind, wie in Gleichung (2.6) dargestellt [85].

$$p \cdot V = \text{konstant} \tag{2.3}$$

$$V_{T1} = V_{T0} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T_{1-0}) \text{ mit } p = \text{konstant} \tag{2.4}$$

$$p_{T1} = p_{T0} (1 + \alpha \cdot \Delta T_{1-0}) \text{ mit } V = \text{konstant} \tag{2.5}$$

$$\text{und somit } \frac{p}{T} = \text{konstant} \tag{2.6}$$

$p$ ..... Druck	$V$ ..... Volumen
$V_{T0}$ ..... Ausgangsvolumen	$p_{T0}$ ..... Ausgangsdruck
$V_{T1}$ ..... Volumen nach $\Delta T_{1-0}$	$p_{T1}$ ..... Druck nach $\Delta T_{1-0}$
$\Delta T_{1-0}$ .. Temperaturdifferenz $T_1 - T_0$	$\alpha$ ..... empirischer Ausdehnungskoeffizient für Gase

Aus obigen Gleichungen (2.3) bis (2.5) ergibt sich die allgemeine Zustandsgleichung für das ideale Gas mit der gasabhängigen Konstante  $k$  zu Gleichung (2.7), welche sich nach Vereinfachungen zur Gasgleichung (2.8) anschreiben lässt [85].

$$\frac{p \cdot V}{T} = k \tag{2.7}$$



*schnitt 2.3.2).* Die Festigkeit kann durch Verunreinigungen oder Gaseinschlüsse innerhalb der Feststoffe vermindert werden, was zu Teilentladungen führen kann [47].

### 2.4.2.2 Gasentladungen

Gase besitzen eine niedrigere elektrische Festigkeit als feste oder flüssige Isolierstoffe, zeichnen sich dafür im Allgemeinen durch ihre Fähigkeit zur Selbstheilung aus. Bei entsprechender elektrischer Beanspruchung können Entladungen unterschiedlicher Form auftreten. Im homogenen Feld zwischen metallenen Elektroden kommt es ohne Vorentladungen direkt zum Durchschlag<sup>10</sup>, je nach Inhomogenität einer Anordnung können verschiedene Vorentladungen bis hin zum Gasdurchschlag auftreten. Bei Gasentladungen unterscheidet man die unselbstständige Entladung (Ladungsträgerbildung durch extern angeregte Stoßprozesse) und die selbstständige Entladung (Ladungsträgerbildung durch Stoßionisation aufgrund erhöhter Feldstärke). Weiters werden Entladungen danach charakterisiert, inwieweit sie raumladungsfrei oder raumladungsbehaftet verlaufen.

Anhand der U,I-Gasentladungskennlinie für quasi-homogene Feldbedingungen (Abb. 2-13) ist zu erkennen, dass sich bei Erreichen der Zündspannung aufgrund der Stoßionisation ein Stromanstieg einstellt, man spricht hier von raumladungsfreien Entladungen nach Townsend. Bei Ausbildung von Raumladungen kommt es zu Feldveränderungen und einem weiteren Stromanstieg mit optischen Entladungserscheinungen (stromstarke Glimmentladungen). Steigt der Strom weiter gewinnt die im Entladungskanal umgesetzte Stromwärme mehr und mehr an Bedeutung. Hierbei kann durch Thermoionisation<sup>11</sup> ein leitfähiges Plasma entstehen (Bogenentladung) [47].

Für die Vorgänge in Isolierstoffen bzw. Isoliersystemen sind hauptsächlich selbstständige Entladungen mit Stoßionisationsprozessen, Lawinenbildung und Photoionisation von Bedeutung. Für kleine gasgefüllte Hohlräume muss hier vom Generationenmechanismus gesprochen werden, da die Elektronenemission von den Grenzflächen ausgeht [49]. In der Praxis verlaufen die Prozesse, vor allem bei äußeren Entladungen, eher nach dem Kanalmechanismus ab [47].

In den Abschnitten zur experimentellen Arbeit werden Korona-Entladungen im Gasspalt zwischen isolierten Elektroden sowie Hohlraumentladungen innerhalb von Isolierstoffen betrachtet. Korona-Entladungen beginnen meist als Glimmentladung und entwickeln sich schließlich zu Büschel- und Stielbüschelentladungen (Leader und Streamer) weiter. Hohlraumentladungen werden auch als innere Teilentladungen bezeichnet und werden häufig zur Bewertung des Zustandes von Isoliersystemen herangezogen [47].

---

<sup>10</sup> ausgenommen der Entladestrom ist durch einen Vorwiderstand begrenzt bzw. die Entladungen werden durch eine feste Isolierung ins Gas „gezwungen“

<sup>11</sup> Thermoionisation tritt ab einigen 1000 K auf [35]



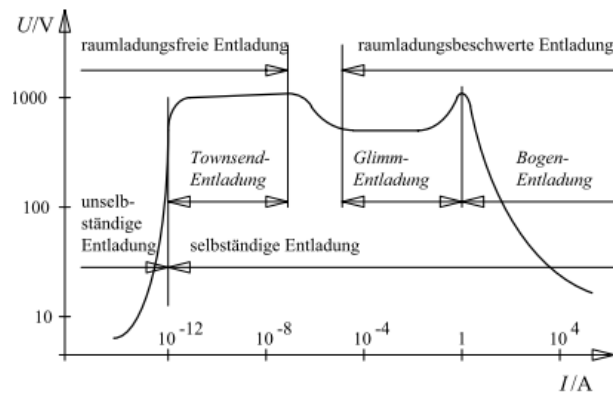


Abb. 2-13: Prinzip der  $U,I$ -Gasentladungskennlinie im quasi-homogenen Feld [47]

### 2.4.2.3 Entladungen in gasgefüllten Hohlräumen

Seit vielen Jahren werden in festen Isolierstoffen eingeschlossene Hohlräume in wissenschaftlichen Publikationen behandelt und als beachtenswert bezeichnet. *Shibuya et al. (1977)* [91] gingen davon aus, dass kleinste Entladungen (teilweise im Bereich fC) Auslöser für späteres Treeing sein können, wenn beispielsweise die Feldstärkebelastung hoch genug ist. Die Beurteilung der Gefährlichkeit von Fehlstellen anhand ihrer Größe wird durchaus unterschiedlich gesehen. Während in [91] Durchmesser ab  $1 \mu\text{m}$  potentiell als ungefährlich erachtet werden, sieht man häufig wesentlich größere Durchmesser noch als unbedenklich an. *Budde (2007)* [21] sieht aufgrund des Trends zur Reduktion der Isolierwandstärke und zur Erhöhung der zulässigen Feldstärkebelastung heute allerdings auch Entladungen in kleineren Hohlräumen als kritisch an.

Auch die Temperaturabhängigkeit der Entladungen in eingebetteten Fehlstellen wurde mehrfach untersucht. Für viele Materialien besteht eine Temperaturabhängigkeit der Permittivität  $\epsilon_r = \epsilon_r(T)$  aufgrund von Änderungen der Polarisationsmechanismen und daher auch eine Temperaturabhängigkeit der Feldverteilung in eingebetteten Hohlräumen [47, 80]. *Seghier und Mahi (2008)* [89] stellten diesbezüglich fest, dass v.a. die TE-Ein- und Aussetzspannungen mit steigender Temperatur sinken, aber auch ein Effekt steigender Einsetzspannung bei geringerer relativer Feuchte konnte beobachtet werden. Weiters erwähnen die Autoren den Rückgang der Impulswiederholrate sowie den Anstieg des TE-Pegels mit der Temperatur.

Für Hohlraumentladungen muss das Paschen-Gesetz, welches den Zusammenhang zwischen dem Produkt Druck mal Abstand und der Durchschlagspannung beschreibt, ebenso erfüllt werden wie auch die Zündbedingung nach Townsend (siehe Abschnitt 2.4.3). Außerdem muss die anliegende Spannung das Paschen-Minimum übersteigen, welches für Luft bei etwa 350 V liegt. Ebenso muss berücksichtigt werden, dass Lawinenbildung grundsätzlich nur dann möglich ist, wenn die Grenzfeldstärke  $(E/p)_0$  überschritten wird, was für Luft ab einem Wert von etwa  $2,5 \text{ kV}\cdot\text{bar}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$  der Fall ist [47].

Unter Annahme einer idealen homogenen Feldverteilung ergibt sich die Grundfeldstärke  $E_0$  im Probenmaterial entsprechend der Spannung  $U$  bzw. der Probendicke  $d_2$  nach Gleichung (2.11).

$$E_0 = \frac{U}{d_2} \quad (2.11)$$

Das elektrische Feld  $E_l$  im Hohlraum kann nun, unter Berücksichtigung der Feldverdrängung, entsprechend der Permittivitäten der beteiligten Stoffe  $\epsilon_{r1}$  und  $\epsilon_{r2}$  sowie der Beziehung nach Gleichung (2.12) für die Spannungsaufteilung in einem geschichteten Dielektrikum in Form der Gleichung (2.13) angeschrieben werden.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} \text{ bzw. } U = E_1 d_1 + E_2 d_2 \quad (2.12)$$

$$E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} d_2} \quad (2.13)$$

Zu beachten ist hierbei, dass für allseits umschlossene sphärische Hohlräume, die maximale Feldstärke durch den in Gleichung (2.14) angegebenen Ausdruck ihre Begrenzung findet.

$$E_{1,max} = E_0 \cdot \frac{3 \cdot \epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1} + 2 \cdot \epsilon_{r2}} \quad (2.14)$$

$E_0$ .....	Grundfeld im umgebenden Material	$E_2$ .....	Feldstärke direkt um den Hohlraum
$E_l$ .....	Feldstärke im Hohlraum	$E_{1,max}$ ..	Maximale Feldstärke im Hohlraum
$\epsilon_{r1}$ .....	Permittivität des Gases	$\epsilon_{r2}$ .....	Permittivität des umgebenden Materials
$d_1$ .....	Durchmesser des Hohlraumes	$d_2$ .....	Dicke des Probenmaterials

Herrscht nun zum Zeitpunkt des Einsetzens von Teilentladungen  $t_{Ein}$  in einem Hohlraum mit dem Durchmesser  $d_1$  eine Feldstärke  $E_{Ein}$  vor, so kann daraus auf die, für diesen Hohlraum notwendige Zündspannung  $U_Z$  nach Gleichung (2.15) rückgeschlossen werden.

$$U_Z = E_{Ein} \cdot d_1 \quad (2.15)$$

Dieser Berechnungsvorgang muss aber stets ein theoretischer Ansatz bleiben und kann lediglich für vergleichende Abschätzungen herangezogen werden, da aufgrund von Vernachlässigungen, in gleichem Maße aber wegen der stochastischen Prozesse bei Gasentladungen, eine exakte Berechnung nicht möglich ist. Bei kleinen Fehlstellen, wie sie Mikrohohlräume darstellen, spielt außerdem der Zündverzögerung eine große Rolle (siehe Abb. 2-14), da aufgrund des kleinen Volumens die statistische Wahrscheinlichkeit für ein Startelektron ebenfalls sehr klein ist [47].

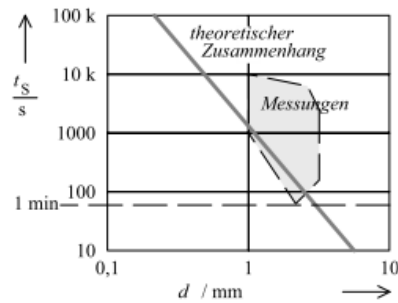


Abb. 2-14: Zündverzögerung in sphärischen Hohlräumen [47]

Im Rahmen von Untersuchungen an Mikrohöhlräumen wurde u.a. von *McAllister (1997)* [64] festgestellt, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen scheinbarer Ladung und der Hohlraumgröße besteht. Allerdings spielen bei ellipsoiden Hohlräumen deren Ausrichtung in Bezug auf die Feldgeometrie eine Rolle. In Simulationen und Messungen zeigte *Kurrat (1993)* [49] für sphärische Hohlräume eine sinkende Einsetzspannung bei steigendem Hohlraumdurchmesser (experimentell wurden Durchmesser  $\geq 1$  mm untersucht). *Illias et al. (2009)* [43] halten fest, dass die Oberflächenladungsdichte mit dem Hohlraumdurchmesser zunimmt. Während die an der Probe angelegte Spannung bei Vorliegen der Einsetzbedingungen für größere Hohlräume sinkt, steigt die Zündspannung an. In Abb. 2-15 sind die Ergebnisse der Modellbildung zu sehen, welche gut mit den Experimenten an Hohlräumen der Durchmesser 1 mm bzw. 2,3 mm übereinstimmen [43].

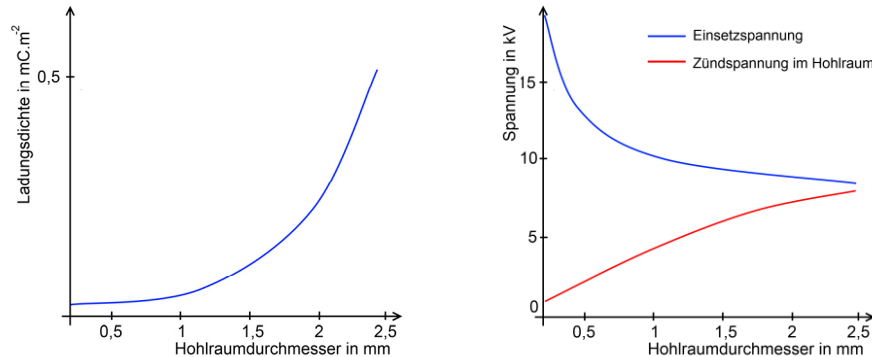


Abb. 2-15: Oberflächenladungsdichte bzw. Einsetzspannung (blau) und Zündspannung für Hohlräume (rot), Simulation für 20 kV 50 Hz, nach [43]

Die Bedeutung der Hohlraumgeometrie wurde auch von *Engel (1998)* [31] beschrieben (siehe Abb. 2-16). Demnach treten Oberflächenentladungen eher in Hohlräumen mit großem Oberflächenanteil parallel zur Feldrichtung auf, Gasentladungen eher in quer zur Feldrichtung liegenden Hohlräumen. Tree-Wachstum äußert sich in steigender scheinbarer Ladung (längerer Lawinengang) und geht eher von Ecken bzw. langgestreckten, mit dem Feld verlaufenden Hohlräumen aus. Bei sphärischen Hohlräumen sind v.a. die Scheitelpunkte von Entladungen betroffen, Oberflächenentladungen bleiben eher vernachlässigbar.

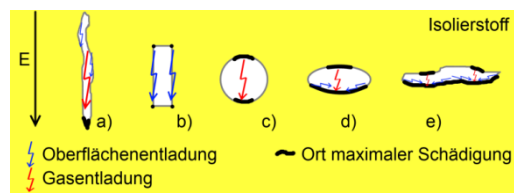


Abb. 2-16: Einfluss der Hohlraumgeometrie auf den Entladungsprozess, nach [31]

Neben fertigungsbedingten Hohlräumen standen auch künstliche Fehlstellen immer wieder im Interesse von wissenschaftlichen Untersuchungen, beispielsweise zur Überprüfung von numerischen Modellen zur TE-Interpretation und Fehler-Identifikation und Beurteilung (z.B. in [31, 49]).

Die Entwicklung von Teilentladungen in Hohlräumen wird oft anhand mehrerer Phasen erklärt. So gliedern *Gutfleisch und Niemeyer (1995)* [39] die Entwicklung der Entladungen in Hohlräumen der Größenordnung 1-3,2 mm in fünf Phasen (vgl. Tab. 2-6), die schließlich von Tree-Einsatz und z.T. von einem Durchschlag gefolgt werden. *Kurrat (1993)* [49] und *Engel (1998)* [31] beschreiben die TE-Entwicklung in vier Phasen (siehe Abb. 2-17: Initialaufbruch, Anlaufphase mit Oberflächen-erosion, Zerstörungsphase und Durchschlag).

Nach anfänglicher hoher TE-Aktivität konnten stark reduzierte Impulswiederholraten beobachtet werden, zwischenzeitlich erlöschen die TE sogar fast vollständig. Nach Alterungszeiten über 100 Stunden sind Veränderungen über die scheinbare Ladung erkennbar (der Maximalwert der Ladung blieb in etwa konstant), der Pegel nimmt deutlich zu und die Verteilung bildet die Phasenlage der Prüfspannung nach, was auf das Fehlen von Startelektronen und dadurch erhöhten Zündverzögerung zurückgeführt wird [49, 67]. Der genaue zeitliche Verlauf wird v.a. vom Isolierstoff und der Oberflächenbeschaffenheit der Fehlstelle bestimmt [31, 49].

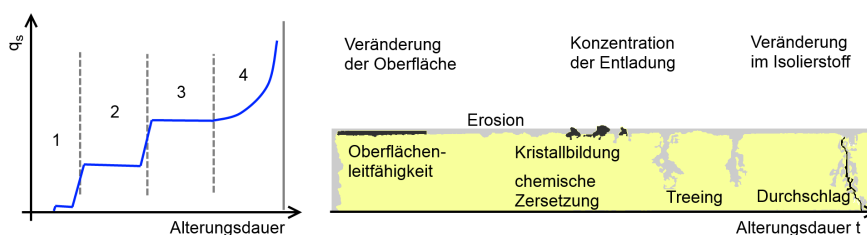
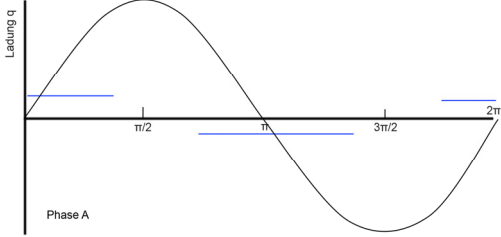
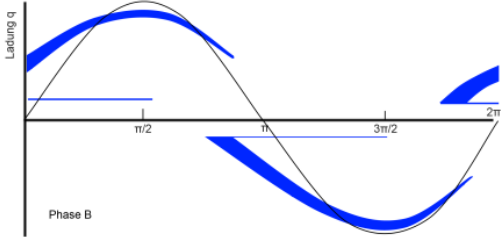
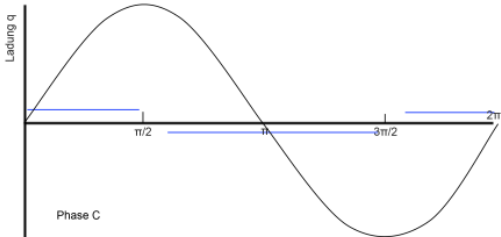
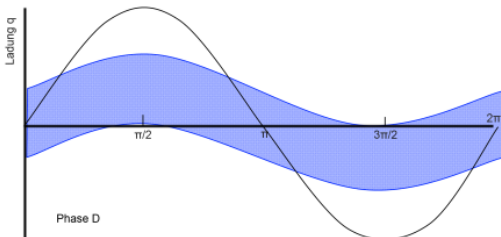
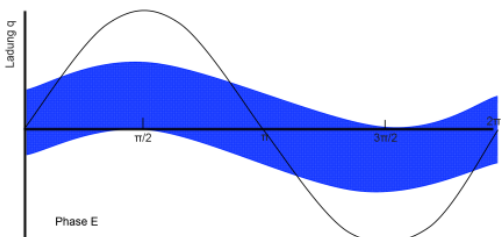


Abb. 2-17: Prinzip der Entwicklung der scheinbaren Ladung, nach [49] bzw. der TE-bedingten Schädigung mit der Alterungsdauer, nach [31]

Bezüglich der Schädigung kann unter Verweis auf die Literatur festgestellt werden, dass ein thermisches Aufschmelzen der Isolierstoffoberfläche aufgrund der geringen Energiedichte nicht erfolgen kann. Die Hohlraumoberfläche kann allerdings durch TE oxidiert werden, was sich entsprechend der Summe der Beanspruchungen aus folgenden Punkten ergibt [49]:

- UV-Strahlung und Elektronenbeschuss
- Ozon- und Stickoxid-Bildung bzw. -Eindiffusion
- Polymerisations- und feuchtebedingte Säurebildung

Tab. 2-6: Phasen der TE-Entwicklung in künstlichen Fehlstellen [39]

Phase	Beschreibung	Beobachtetes typisches TE-Muster
A	Dauer ca. 10 min Konstanter Pegel um $q_{\min}$ , beide Halbwellen jeweils $\frac{3}{4}$ , um ca. $\frac{1}{4} \pi$ nach links verschoben 5-7 Impulse/Halbwellen	
B	Dauer ca. 20-50 h wie oben, zusätzlich je Halbwellen sichelartiges Muster mit $q_{\max}$ bei $90^\circ$ bzw. $180^\circ$ ( $q_{\max} = 5$ bis $7 \times q_{\min}$ ), 3 Impulse/Halbwellen	
C	Dauer ca. 100-200 h Siehe Phase A, mit fortschreitender Versuchsdauer um 10% verminderter Ladungswert und ca. 10-fache Impulshäufigkeit, Verschiebung nach links nimmt zu	
D	Dauer ca. 1200 h Intermittierend mit Pausen von 3-20 min, $q_{\max}$ wie in Phase B, Wieder- holrate bei ca. 0,03-0,06 Impul- se/Halbwellen	
E	Dauer ca. 50 h Kontinuierliche TE, 3-4 Impul- se/Halbwellen,	

Materialabbau durch Teilentladungen beginnt als Oberflächeneffekt und kann aufgrund mechanischer Spannungen, Versetzungen, Korngrenzen oder Beschädigungen beschleunigt wirken. Die Schädigungen durch innere TE beginnen nach einigen 10 bis 100 Stunden. Mit fortschreitender Zeitdauer erfährt die Hohlraumoberfläche eine zunehmende Zerrfurchung (Rauigkeit  $< 1 \mu\text{m}$ ) und fortschreitende Kristallbildung (z.B. bei Feinglimmer-Epoxidharz ca.  $50 \mu\text{m}$ ; bei reinem Epoxidharz eher schwammartig), welche als ein Indikator für Materialabbau betrachtet werden kann. Im Weiteren kann es zu Treeing und schließlich zum Durchschlag des Isolierstoffes führen. [31, 49].

### 2.4.3 Theoretische Grundlagen zu Gasentladungen

Die für Gase interessanten Durchschlags- und Entladungsprozesse werden anhand verschiedener Mechanismen erklärt, die auf Theorien zu unterschiedlichen Ionisierungs- und Anlagerungsprozessen beruhen. Die Townsend- und die Streamer-Theorie sind hier von maßgebender Bedeutung.

#### 2.4.3.1 Die Townsend-Theorie (Generationen-Mechanismus)

Bei kleinen Drücken und Schlagweiten ist für Gasentladungen der Townsend-Mechanismus ausschlaggebend. Für eine selbstständige Entladung muss die Zündbedingung erfüllt sein. Das bedeutet, dass ein durch Fremddionisation erzeugtes Startelektron durch Lawinenbildung unter Berücksichtigung der Rückwirkung auf die Kathode mindestens ein neues Startelektron erzeugen muss. Danach erzeugt jede Lawine wiederum mindestens eine Folgelawine, was zur Bildung eines leitfähigen Entladungskanal führt. Für eine exponentiell anwachsende Elektronenlawine kann das in Gleichung (2.16) angeschrieben werden. Wird weiters der Rückwirkungskoeffizient eingeführt, so erhält man nach Reihenbildung aus der Konvergenzbedingung schließlich mit Gleichung (2.17) die sogenannte Zündbedingung für den Townsend- bzw. Generationenmechanismus. Nach einer weiteren Umformung erhält man Gleichung (2.18) mit dem stoffabhängigen Parameter  $k$  [47].

$$N = N_1 \cdot e^{\alpha_{eff} \cdot x} \text{ mit } \alpha_{eff} = \alpha - \eta \quad (2.16)$$

$$\gamma \cdot (e^{\alpha_{eff} d} - 1) \geq 1 \quad (2.17)$$

$$\alpha_{eff} \cdot d \geq \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \text{ mit } \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) = k \quad (2.18)$$

$N_1$ .....	Anzahl der Startelektronen	$\alpha_{eff}$ .....	effektiver Ionisierungskoeffizient
$N$ .....	Elektronenzahl der Folgelawine	$\alpha$ .....	Ionisierungskoeffizient (1. Townsend-Koeff.)
$d$ .....	Elektrodenabstand	$\eta$ .....	Anlagerungskoeffizient
$x$ .....	Wegelement ( $0 \rightarrow d$ )	$\gamma$ .....	Rückwirkungskoeffizient (2. Townsend-Koeff.)
$k$ .....	empirische Größe (für Luft bei 1 bar und metallische Elektroden kann $k = 7$ angenommen werden)		
für $\alpha$ bzw. $\alpha_{eff}$ gilt: Elektronenanzahl pro Längeneinheit			

Als untere Grenze  $k$  für Entladungen nach dem Townsend-Mechanismus wird in der Literatur z.B. für Luft ein empirisch Wert von  $k = 7$  angegeben. Der Townsend- oder Generationenmechanismus bleibt ca. bis zu Werten von  $k = 14 \dots 18$  gültig. Größere Werte  $k$  (d.h. größere Elektrodenabstände  $d$  und größere Ionisierungszahl  $\alpha_{eff}$ ) sind gleichbedeutend mit der zunehmenden Existenz von Raumladungen. Hierfür muss das Modell der Kanalentladungen herangezogen werden.

#### 2.4.3.2 Die Streamer-Theorie (Kanal-Mechanismus)

Die Streamer-Theorie bzw. der Kanal-Mechanismus kommt bei größeren Drücken und Schlagweiten zum Tragen. Je größer das  $p \cdot d$ -Produkt ist, desto unwahrscheinlicher ist es, dass eine einzelne Lawine vor Erreichen der kritischen Verstärkung die Entladungsstrecke durchlaufen kann;

d.h. der Kanal-Mechanismus wird immer wahrscheinlicher. Eine steigende Elektronenanzahl bewirkt eine maßgebliche Erhöhung der Feldstärke und führt zur Ausbildung eines Lawinenkopfes der von einem Startelektron initiierten Elektronenlawine. Raumladungen bewirken eine weitere Erhöhung der Feldstärke um den Lawinenkopf und schließlich eine von diesem ausgehende Photonen-Strahlung, die wiederum neue Lawinen auslöst. Die Summe der so entstehenden Lawinen kann zu einem sehr schnellen ruckartigen Vorwachsen des Kanals und zum Durchschlag führen.

### 2.4.3.3 Das Paschen-Gesetz

Das nach F. Paschen benannte Gesetz<sup>12</sup> ist eines der elementaren Gasgesetze mit hoher Bedeutung für die Elektrotechnik und besagt, dass die Durchschlagspannung zwischen zwei blanken metallenen Elektroden hauptsächlich eine Funktion des  $p \cdot d$ -Produktes, also des Produktes aus Druck und Schlagweite ist. In Gleichung (2.19) ist das Paschen-Gesetz in allgemeiner Form angeschrieben.

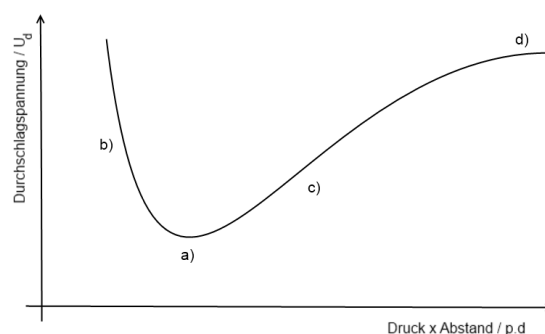
$$U_d = U_d(p \cdot d) \quad (2.19)$$

$U_d$  ..... Durchschlagspannung

$p$  ..... Gasdruck

$d$  ..... Gasspalt (Elektrodenabstand)

Der Zusammenhang von Gasdruck, Schlagweite und Durchschlagspannung (Zündspannung) kann als so genannte Paschen-Kurve graphisch dargestellt werden, welche für kleine  $p \cdot d$ -Werte ihr Minimum besitzt (Abb. 2-18.a). Im Bereich des Nahdurchschlags links vom Minimum (Abb. 2-18.b) steigt die Durchschlagspannung wieder an, rechts vom Minimum (Weitdurchschlag, Abb. 2-18.c) gibt es einen quasi-linearen Bereich (doppelt logarithmische Darstellung), der schließlich von einem Sättigungsbereich (Abb. 2-18.d) bei sehr hohen  $p \cdot d$ -Werten mit hohen Durchschlagspannungen gefolgt wird.



a) ..... Paschen-Minimum

b) ..... Bereich des Nahdurchschlags

c) ..... quasi-linearer Bereich des Weitdurchschlags

d) ..... Sättigungsbereich bei großen  $p \cdot d$ -Werten

Abb. 2-18: Die Paschen-Kurve, doppelt logarithmische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Druck  $p$  und Durchschlagspannung  $U_d$

<sup>12</sup> Friedrich Paschen (1889) erarbeitete im Rahmen seiner Dissertationstätigkeit [71] die grundlegenden Zusammenhänge, die Townsend wenig später in einer mathematischen Formulierung, dem Paschen-Gesetz, zusammenfasste.

Formulierung des Paschen-Gesetzes nach Townsend

Zur näherungsweisen Berechnung kann die empirisch ermittelte Beziehung herangezogen werden wie sie in Gleichung (2.20) angegeben ist. Die Gültigkeit ist dabei auf den raumladungsfreien Generationenmechanismus beschränkt (entspricht etwa dem Bereich zwischen Abb. 2-18.c und Abb. 2-18.d der Paschen-Kurve). Häufig wird zur Berücksichtigung der tatsächlichen Temperatur ein Korrekturfaktor  $T_0/T$  herangezogen [47].

$$U_d = \frac{B \cdot pd}{\ln \frac{A \cdot pd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \cdot \frac{T_0}{T} \tag{2.20}$$

- |             |   |                |   |
|-------------|---|----------------|---|
| $U_d$ ..... | Durchschlagspannung in kV               | $A$ .....      | vom Abstand $d$ abh. Konstante in $1/(\text{bar} \cdot \text{mm})$            |
| $p$ .....   | Gasdruck in Pa                          | $B$ .....      | von der Feldstärke abh. Konstante in $\text{kV}/(\text{bar} \cdot \text{mm})$ |
| $d$ .....   | Elektrodenabstand in mm                 | $\gamma$ ..... | Rückwirkungskoeffizient (2. Townsend-Koeffizient)                             |
| $T_0/T$ ... | Korrekturfaktor mit $T_0=293 \text{ K}$ |                |   |

Gültigkeitsgrenzen des Paschen-Gesetzes

Die Gültigkeitsgrenzen des Paschen-Gesetzes wurden wiederholt von WissenschaftlerInnen untersucht ([26] u.a.). Dabei wurde dokumentiert, dass für jedes Gas eine begrenzte Gültigkeit besteht [24, 70]. Außerhalb des Gültigkeitsbereiches nimmt die Durchschlagspannung mit steigendem  $p \cdot d$ -Produkt weniger zu als es dem Gesetz entspricht [15, 70] und für sehr kleine Abstände kann es weit unterhalb des Paschen-Minimums zum Durchschlag kommen [15]. Außerdem werden immer wieder Oberflächenrauigkeit der Elektroden und Protrusionen ebenso wie Gasunreinheiten als Ursache für Abweichungen nach unten genannt [24, 65, 70]. Unabhängig von Elektrodenmaterial, Gasart, Gasdruck und Schlagweite konnte eine Grenzfeldstärke im Bereich von 10-20 kV/mm beobachtet werden, die den Beginn der Abweichungen vom Paschen-Gesetz markieren, was der einsetzenden Elektronenemission zugeschrieben wird [24, 65, 70]. Die Gesetzmäßigkeit der Abweichung wurde von *Oppermann (1974)* [70] mittels einer in Abb. 2-19 dargestellten, druckspezifischen Feldstärke beschrieben, die mit zunehmendem Druck abnimmt und ab ca. 15 bar einen konstanten Wert von etwa  $4,3 \text{ kV} \cdot \text{bar}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$  annimmt.

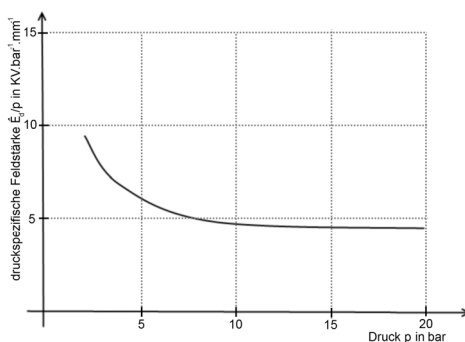


Abb. 2-19: Druckspezifische Feldstärke  $\hat{E}/p$  über  $p$ , nach [70]



2.4.3.4 Teilentladungen

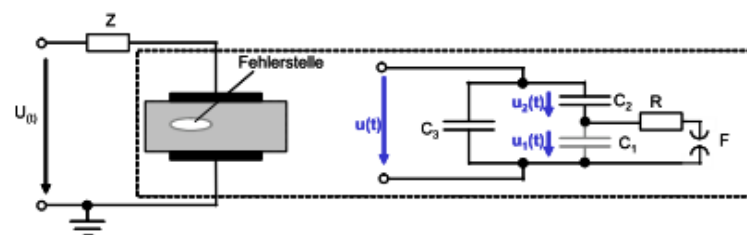
Unter dem Begriff elektrische Teilentladung (TE) ist eine teilweise Überbrückung der Isolation zwischen zwei Leitern zu verstehen, man spricht auch von Teildurchschlag. Meist handelt es sich hierbei um Gasentladungen verschiedener Ausprägung, die als innere oder äußere Teilentladungen auftreten können (typische Anordnungen siehe Abb. 2-20). Außerdem zeichnen sich TE durch ihre extrem schnell verlaufenden Vorgänge der Ladungsträgerbewegung aus [87].



Abb. 2-20: Typische Anordnungen von Teilentladungen [87]

Hervorgerufen werden Teilentladungen durch lokale Feldüberhöhungen (z.B. an Spitzen), durch Schwachstellen (z.B. Grenzschichten mit erhöhter Tangentialfeldstärke) oder durch Hohlräume, die aufgrund des Feldverdrängungseffektes höheren Feldstärken ausgesetzt sind. Wenn für eine gegebene Anordnung die Spannung  $u_{10}(t)$  über einer Schwach- bzw. Fehlstelle  $C_1$  in Gleichung (2.21) bzw. Abb. 2-21 die Höhe der Zündspannung  $U_Z$  erreicht, ist eine Entladung möglich [87].

$$u_{10}(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u(t) \geq U_Z \tag{2.21}$$



- $C_1$  ..... Kapazität der Fehlerstelle
- $C_2$  ..... Kapazität in Serie zur Fehlerstelle
- $C_3$  ..... Prüflingskapazität
- $R$  ..... Widerstand des Entladungskanals
- $F$  ..... Funkenstrecke
- $Z$  ..... Impedanz

Abb. 2-21: Prinzip und Ersatzschaltbild für innere Teilentladungen [87]

Der Teilentladungseinsatz ist abhängig vom Vorhandensein von Startelektronen und wird überdies von Gasvolumen und beanspruchter Oberfläche beeinflusst (vgl. Zündverzögerung bzw. Vergrößerungsgesetze). Hat eine Entladung stattgefunden, folgen die als Um- und Nachladen bezeichneten Ausgleichsvorgänge. Diese Ent-, Um- und Nachladevorgänge können mehrmals pro Periode auftreten (siehe Abb. 2-22). Dabei kommt es zu einem Spannungszusammenbruch an  $C_1$  sowie zu einer Ladungsanhebung an  $C_2$  und schließlich zu einem Spannungseinbruch an  $C_3$  (siehe Abb.

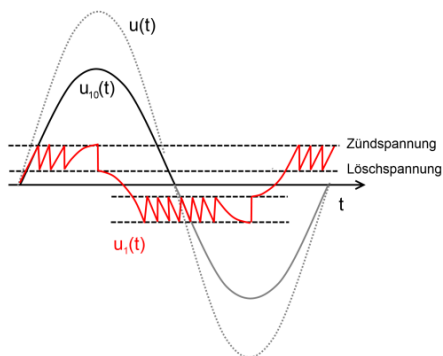
2-21). Die Ladung, welche über die Funkenstrecke F abfließt, entspricht  $\Delta q_i$ , die tatsächlich messbare *scheinbare*<sup>13</sup> Ladung entspricht  $\Delta q$  aus den Gleichungen (2.22) [47, 87].

$$\Delta q_i = (C_1 + C_2) \cdot u_z \text{ bzw. } \Delta q = C_2 \cdot u_z \quad (2.22)$$

$\Delta q_i$  ..... abfließende Ladung

$\Delta q$  ..... scheinbare Ladung

$u_z$  ..... Zündspannung



$u(t)$  ..... angelegte Spannung

$u_{10}(t)$  .. Spannung an der Fehlstelle

$u_1(t)$  ... Spannung an der Fehlstelle mit TE

Abb. 2-22: Spannungseinbruch aufgrund von Teilentladungen, nach [47]

Grundsätzlich sind alle TE-Vorgänge nach der ersten Entladung voneinander abhängig, da sich jeweils neue Raum- und Oberflächenladungsverhältnisse einstellen. Die Intensität und die Frequenz der auftretenden Entladungen gemeinsam mit der Art der Emissionen sind schließlich entscheidend für die jeweilige Wirkung und das Schädigungspotential der TE. Zusätzlich besteht eine Abhängigkeit vom beanspruchten Material selbst [31, 49].

#### 2.4.4 Energieumsatz von Teilentladungen in Fehlstellen

Der Energieumsatz von Teilentladungen ist meist recht gering und erst über den repetierenden Charakter und die Konzentration auf kleine Volumina bzw. Oberflächen ergibt sich ihr Einfluss auf die Alterung von Isolierstoffen [87]. Spricht man über die Bewertung der Isolierstoffalterung, so ist v.a. die Energiedichte in Hohlräumen von Bedeutung, über deren Analyse Schädigungsprognosen möglich sind [49]. Außerdem sind Energieumsatz und Emissionen, die von Entladungen ausgehen, bestimmend für deren Detektierbarkeit mit nichtelektrischen Methoden. Der größte Teil der gesamten Entladungsenergie  $W_{TE}$  wird in Wärme umgesetzt [49, 87], daneben entfallen nicht unwesentliche Anteile auf Elektronenstoßprozesse und UV-Strahlung [49].

<sup>13</sup> Die beschriebene Interpretation der physikalischen Zusammenhänge bei inneren Teilentladungen entspricht der allgemein anerkannten Methode nach IEC 60270. Diese Vorgehensweise und der Umgang mit dem Messwert Ladung  $\Delta q$  sind nicht gänzlich unumstritten. Es gibt andere Ansätze, die in Diskussion stehen, z.B. die hier nicht weiterverfolgten Überlegungen nach Pedersen (1991) [72] bzw. Lemke (2012, 2013) [54, 55], welche die gemessene Ladung auch als tatsächlich an  $C_1$  geflossene Ladung definieren.

Die Gesamtenergie, welche in Teilentladungen steckt, entspricht etwa der Summe der Produkte aus scheinbarer Ladung und Spannung (Momentanwerte) und lässt sich mit Gleichung (2.23) ausdrücken, die Entladungsleistung mit Gleichung (2.24) [49]. Die Energiedichte  $w_e$  eines linearen, isotropen elektrischen Feldes kann nach Gleichung (2.25) angegeben werden [86].

$$W_{TE} = \sum_i q_{si} \cdot u(t) \tag{2.23}$$

$$P_{TE} = \frac{W_{TE}}{t_{Mess}} \tag{2.24}$$

$$w_e = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E^2 \tag{2.25}$$

$W_{TE}$  .... Impulsenergie der Teilentladung       $P_{TE}$  ..... Entladungsleistung  
 $q_{si}$  ..... scheinbare Ladung                       $t_{Mess}$  .... Messdauer  
 $u(t)$  ..... Momentanwert der Spannung       $w_e$  ..... Energiedichte eines elektrischen Feldes

Nach *Kurrat (1993)* [49] ist die mittlere Gesamtenergiedichte nicht für die Beurteilung der Schädigungsrelevanz geeignet, daher werden diesbezüglich radiale Schichten betrachtet, zum Teil wird auch nach Ladungsträgerart unterschieden. Insbesondere sind die Energiedichte an der Oberfläche und jene im Gasraum zu unterscheiden (Abb. 2-23). Bei kleineren Hohlräumen ergibt sich eine größere Energiedichte bei geringerer Gesamtenergie, wie Abb. 2-24 und Abb. 2-25 zeigen.

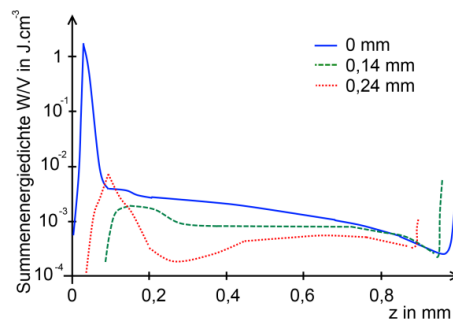


Abb. 2-23: Summenenergiedichte der Elektronen in einem sphärischen Hohlraum in unterschiedlichen radialen Schichten, nach [49]

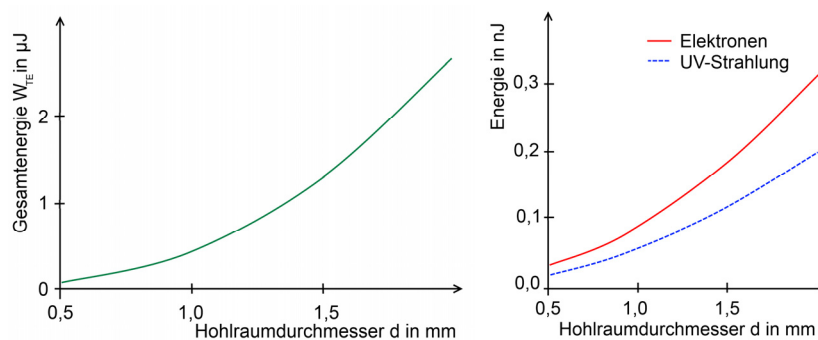


Abb. 2-24: Gesamtenergie  $W_{TE}$  und Energie der Elektronen bzw. UV-Strahlung in sphärischen Hohlräumen, nach [49]

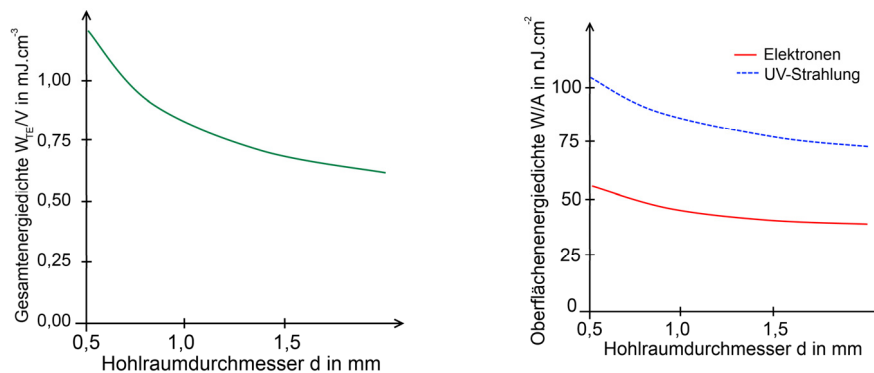


Abb. 2-25: Energiedichte  $W_{TE}/V$  bzw. maximale Oberflächenenergiedichte  $W/A$  der Elektronen bzw. UV-Strahlung für sphärische Hohlräume, nach [49]

Der Isolierstoff bestimmt nicht nur durch Bereitstellung eines Startelektrons, sondern auch über den Emissionskoeffizienten für Sekundärelektronen, die erste und alle weiteren Entladungen [31].

Künstliche Mehrphasensysteme, wie sie auch die harzgetränkten Feinglimmerisolierungen von Generatorstäben darstellen, weisen aufgrund von Strukturunregelmäßigkeiten (Fremdmoleküle, unterschiedliche Vernetzungsdichten, Kettenenden, Kettenfaltung etc.) viele innere Grenzschichten auf. Sie besitzen daher lokal durchaus unterschiedliche Energieniveaus, was die Austrittsarbeit bzw. die Wahrscheinlichkeit für Elektronenemission beeinflusst [31].

## 2.5 Methoden zur Detektion von Fehlstellen im Isoliersystem von Generatorstäben

### 2.5.1 Allgemeines zu Diagnosemethoden bei Generatoren

Bei Einrichtungen, die nicht einfach ersetzbar sind, ist man meist von einer ereignisorientierten Instandhaltung abgekommen (Qualität und Zuverlässigkeit sind durchgehend gefordert). Daher spielt die Thematik der Diagnostik bei Betriebsmitteln der Hochspannungstechnik, insbesondere in für die Energieversorgung relevanten Anlagen eine zunehmend wichtigere Rolle. Obwohl gleichzeitig auch die Anforderung an eine qualitativ hochwertige Fertigung der Betriebsmittel steigt und Produktionsverfahren ohne Zweifel eine ungeheure Entwicklung erfahren haben, lassen sich wie auch immer geartete Fehlstellen nie ganz vermeiden. Bei Generatoren, und dies gilt für den Stator ebenso wie für den Rotor, gilt es im Rahmen der Diagnostik grundsätzlich darauf zu achten, dass die Funktionalität in Bezug auf die Beherrschung des Magnetkreises, des elektrischen Kreises, der Wärmeabfuhr sowie der mechanischen Kräfte und Bewegungen erhalten bleibt [76]. Kann dies für nur einen Punkt nicht gewährleistet werden, so sind Maßnahmen zu ergreifen, da andernfalls Probleme bzw. Fehler vorprogrammiert sind. Zur Diagnose bedarf es verschiedener Verfahren, die je nach Anwendung und Strategie variieren können. Neben nichtelektrischen Methoden kommen im Bereich der elektrischen Methoden Spannungsprüfungen, oft in Verbindung mit zerstörungsfreien Methoden (TE-Messung oder dielektrische Verfahren), zum Einsatz.

### 2.5.2 *Nichtelektrische Detektionsmethoden*

Im Anwendungsbereich der großen Generatoren zählen zu den nichtelektrischen Methoden z.B. visuelle, mechanische, akustische, chemische und magnetische Verfahren [76]. Diese sind meist kostengünstig und mit geringem Aufwand verbunden, da sie je nach Zugänglichkeit der zu überprüfenden Teile oft auch während routinemäßiger Kontrollen durchgeführt werden können, ohne dass das betreffende Gerät außer Betrieb gestellt werden muss. An dieser Stelle sollen zwei Verfahren herausgegriffen werden, die bei den später beschriebenen Experimenten eine Rolle spielen:

- Visuelle Verfahren
- Akustische Verfahren

#### 2.5.2.1 Visuelle Verfahren

Die visuelle Überprüfung ist die einfachste Möglichkeit, von außen erkennbare Unstimmigkeiten an elektrischen Maschinen zu erkennen. Allerdings bedarf es eines geschulten Auges und nicht alle Fehlerarten können ohne weiteres gefunden werden. Zu den visuellen Verfahren zählen Foto- bzw. Videografie und Endoskopie ebenso wie Thermovision [76]. Zuletzt genannte erlaubt das Bestimmen und Darstellen der Oberflächentemperatur und somit ein rasches Lokalisieren von äußeren Heißstellen, wie es auch bei einem Teil der Experimente angewandt wurde. Die optische Zugänglichkeit des zu überprüfenden Teils bleibt dabei stets Grundvoraussetzung für einen Einsatz visueller Verfahren.

#### 2.5.2.2 Akustische Verfahren

Akustische Methoden bieten die Möglichkeit der Detektion durch den Menschen (wiederum ist eine Expertin bzw. ein Experte mit geschultem Ohr von Nöten) und auch mittels automatisierter Verfahren. Typische Maschinengeräusche (im Schall- bzw. Ultraschallbereich) können beispielsweise über Pegel-Schwellwerte oder Frequenzspektren analysiert und bewertet werden. Schließlich werden akustische Verfahren auch zur Teilentladungsdetektion eingesetzt (siehe Abschnitt 2.5.4) [76]. Voraussetzung dabei ist eine entsprechend gute Übertragung der Schallimpulse von der Quelle über alle Überträgermedien hin zum Empfänger.

### 2.5.3 *Elektrische Detektionsmethoden*

Zu den elektrischen Methoden zählen solche, die auf Verfahren der Spannungsprüfung, auf dielektrische Verfahren und auf Verfahren unter Nutzung der elektrischen Teilentladungsmesstechnik basieren. Der TE-Detektion wird aufgrund der Bedeutung innerhalb dieser Arbeit ein eigener Abschnitt gewidmet (siehe Abschnitt 2.5.4).

#### 2.5.3.1 Spannungsprüfungen

Spannungsprüfungen zählen nicht zu den zerstörungsfreien Prüfungen, haben aber Bedeutung bei der Analyse und Bewertung nahezu aller Betriebsmittel der Hochspannungstechnik. Das Bestehen

einer Prüfung (Stehspannung, Impulsspannung) ist gleichbedeutend mit dem Ausschluss von Fehlstellen. Der Nachweis von Fehlerhaftigkeit wird durch Nichtbestehen z.B. durch verfrühten Durchschlag erbracht. Spannungsprüfungen werden häufig auch in Kombination mit dielektrischen Verfahren angewandt. Man ist dadurch in der Lage mehr Informationen über den Zustand einer Maschinenisolierung zu gewinnen bzw. Aussagen zur Restlebensdauer zu tätigen.

Bei Betriebsmitteln, die vor der regulären Außerbetriebnahme stehen und ersetzt werden sollen, nutzt man gelegentlich zerstörende Spannungsprüfungen, um Kennwerte aus begleitenden nicht zerstörenden Verfahren zu überprüfen. Das Bedienen von Datenbanken mit solchen empirischen Werten kann wesentlich zur Verbesserung der Aussagekraft von Modellen und der Analysemöglichkeiten beitragen.

### 2.5.3.2 Dielektrische Verfahren

Als dielektrische Verfahren werden solche bezeichnet, die Bewertungen aufgrund von Messungen des Isolationswiderstands bzw. Isolationsstroms sowie der Kapazität bzw. des Verlustfaktors ermöglichen sollen. Die gewonnenen Parameter können zur Beurteilung des Ist-Zustandes bzw. für etwaige Vorhersagen herangezogen werden, hierbei sind allerdings Referenzwerte früherer Messungen eine wichtige Voraussetzung (Vergleich mit Soll-Zustand).

### 2.5.4 Elektrische Teilentladungen

Die Methode zur Fehlstellen-Detektion unter Ausnutzung von elektrischen Teilentladungen kann eigentlich nicht eindeutig den elektrischen oder den nichtelektrischen Verfahren zugeordnet werden. Es gibt mehrere Ansätze, sowohl elektrische als auch nichtelektrische, zur Detektion von TE. Allerdings stellt die klassische Variante, welche in den allermeisten Fällen gemeint ist, die Detektion unter Verwendung der sogenannten konventionellen elektrischen Messtechnik nach der Norm IEC 60270 [117] dar.

Teilentladungen können neben elektrischen Ausgleichsvorgängen in direkter Folge auch verschiedene Emissionen bewirken, die je nach Emissionsspektrum (siehe Abb. 2-26) beispielsweise mit Hilfe von optischen oder akustischen Methoden detektierbar sind. Schließlich besteht auch die Möglichkeit, durch TE bedingte chemische Veränderungen in Isoliermedien festzustellen [87].

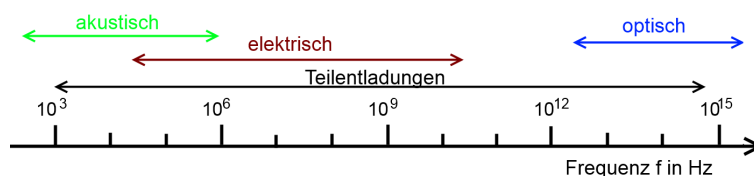


Abb. 2-26: Spektralbereich von Teilentladungen, nach [87]

Gemeinsam ist den verschiedenen Entladungserscheinungen, die sich durch den Ort ihres Auftretens, ihre Einsatzcharakteristik etc. unterscheiden lassen, dass ihre Wirkung sowohl kurzfristig

(z.B. momentane Verluste bzw.  $\tan \delta$ ) als auch langfristig (z.B. irreversible Veränderungen des Isoliermaterials bzw. Degradation) Einfluss auf den Betrieb einer elektrischen Maschine bzw. eines Generators haben kann.

Die Messtechnik, welche heute zur Detektion von Fehlstellen innerhalb des Isoliersystems von Generatorstäben eingesetzt wird, kann unter anderem aus elektrischen, optischen, akustischen und chemischen Systemen oder einer Kombination aus mehreren messtechnischen Systemen bestehen. Je nach Anwendung und Einsatzbereich gibt es viele spezielle Lösungen, welche teils nur unter Laborbedingungen ausgezeichnete Ergebnisse liefern. Die bislang einzige Möglichkeit, Teilentladungen anhand ihrer Amplitude vergleichbar zu machen, ist die elektrische TE-Messung. Alle übrigen Verfahren müssen korrekterweise als Nachweisverfahren bezeichnet werden und erfordern zur Quantifizierung der Teilentladungsimpulse den parallelen Einsatz eines elektrischen TE-Messsystems.

#### 2.5.4.1 Elektrische Methoden zur Detektion von Teilentladungen

Die elektrische Methode zur Teilentladungsdetektion kann im Gegensatz zu Spannungsprüfungen oder dielektrischen Verfahren sowohl offline als auch online eingesetzt werden. Immer häufiger findet sie auch Anwendung in dauerhaft installierten Diagnose- und Monitoring-Systemen.

Bei der elektrischen Teilentladungsmessung bestehen drei Möglichkeiten der Grundschaltung (Abb. 2-27), aus denen je nach Anforderung und Möglichkeit auszuwählen ist [88]:

- Messimpedanz in Serie zum Koppelkondensator und parallel zur Prüflingskapazität
- Messimpedanz in Serie zur Prüflingskapazität und parallel zum Koppelkondensator
- Brückenschaltung: Messimpedanz jeweils in Serie zu Prüflingskapazität bzw. zum Koppelkondensator

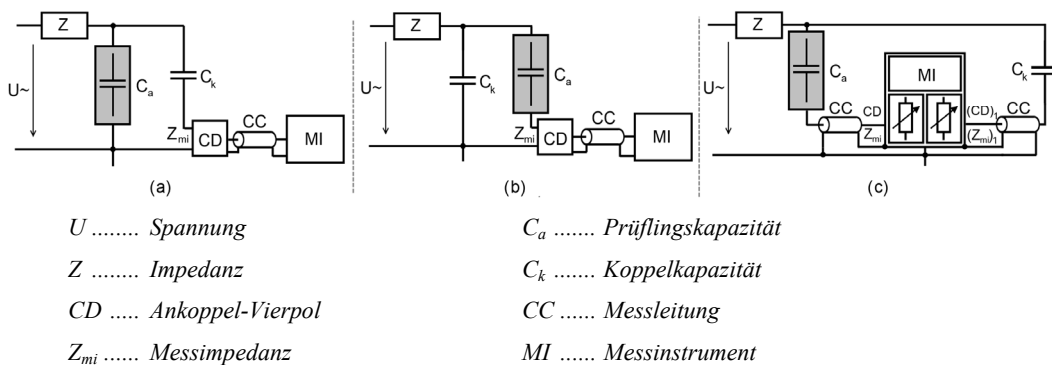


Abb. 2-27: Grundschaltungen der TE-Messtechnik, nach [117]

Neben der erwähnten konventionellen TE-Messtechnik nach IEC 60270 gibt es noch Varianten unter Nutzung höherer Frequenzen, die sich heute bereits bewährt haben (siehe Tab. 2-7). Es sind dies die HF/VHF-Methode sowie die UHF-Methode, welche je nach Situation (z.B. störbehaftete Umgebung oder sehr hochfrequente TE-Impulse) besser geeignet sein können.

Tab. 2-7: Elektrische TE-Messtechnik – Varianten, nach [87]

Methode	Bereich	Bandbreite	
Konventionell (IEC 60270)	Integration im Frequenzbereich	schmalbandig begrenzt breitbandig	10 kHz 50-500kHz
	Integration im Zeitbereich	breitbandig	>1 MHz
HF/VHF	10-400 MHz	schmalbandig	<2 MHz
		breitbandig	>50MHz
UHF	0,2-3 GHz	schmalbandig	<2 MHz
		breitbandig	>50MHz

Zur elektrischen Messung von TE und der entsprechenden Interpretation wird in internationaler Übereinkunft heute üblicherweise nach der Norm IEC 60270 [117] vorgegangen, wobei hier zwischen der anhand des an den Kontaktelektroden gemessenen Nachladestroms berechneten scheinbaren Ladung  $\Delta q$  und der tatsächlichen Ladungsverschiebung  $\Delta q_i$  aufgrund der TE im Inneren der Isolierung unterschieden wird. Wie bereits angemerkt, gibt es einen weiteren Ansatz, der davon ausgeht, dass die gemessene Ladung der tatsächlich abfließenden entspricht (vgl. [54, 55, 72]).

Spricht man von TE-Messtechnik und der Beurteilung der Schädigungsrelevanz von Teilentladungen, so bezieht man sich meist auf das Bestimmen der Grundgrößen scheinbare Ladung, Polarität, Phasenwinkel und Ein- bzw. Aussetzspannung (siehe Tab. 2-8). Es können aber auch erweiterte Grundgrößen wie die umgesetzte Energie, die Anzahl der Entladungen, die mittlere Entladungsmenge, die mittlere Entladungsenergie oder die Summenentladung als Bewertungskriterien herangezogen werden [76, 87, 117].

Tab. 2-8: Kenngrößen der elektrischen TE-Messung, nach [87]

Grundgrößen	Symbol	Einheit
Scheinbare Ladung bzw. Intensität	q bzw. $\Delta q$	pC oder nC
Phasenlage	$\Phi$	Grad
Polarität		
Impulshäufigkeit	N	Impulse/s
Einsetzspannung	$U_{Ein}$	V
Aussetzspannung	$U_{Aus}$	V
Erweiterte Grundgrößen	Symbol	Einheit
Kumulierte scheinbare Ladung	$q_{Kum}$	pC oder nC
Mittlerer Entladestrom	I	$\mu A$
Quadratische Ladungsgröße	D	$(nC)^2 \cdot s^{-1}$
Entladungsleistung	P	W

Die Resultate der konventionellen elektrischen TE-Messung werden für Wechselspannung vor allem anhand der sogenannten TE-Muster (auch PD-Fingerprint oder PD-Pattern) analysiert, einer phasenbezogenen Darstellung von Amplitude und Häufigkeit der TE-Impulse. Die Interpretation der TE-Muster erlaubt die Bewertung der TE-Aktivität und die Zuordnung zu bestimmten Fehl-



stellen anhand charakteristischer Merkmale. Aufgrund der Überlagerung mehrerer TE-Quellen sowie äußerer und netzbedingter Störeinflüsse bleibt jedoch oft eine Restunsicherheit bestehen.

#### 2.5.4.2 Optische Methoden zur Detektion von Teilentladungen

Unter dem Begriff Licht bzw. optische Strahlung versteht man im weiteren Sinne elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von etwa 100 nm bis 1mm, Grenzen zwischen ultraviolettem und sichtbarem Licht bzw. Infrarot-Strahlung und den angrenzenden lang- oder kurzwelligeren Bereichen verlaufen dabei fließend. Das Modell der Licht-Quanten beschreibt die Energie eines Photons nach Gleichung (2.26), wobei die Emission von Licht auf energetischen Übergängen in der Elektronenhülle der Atome basieren [96].

$$W_{Phot} = h \cdot \nu = h \cdot c \cdot \frac{1}{\lambda} \tag{2.26}$$

*W<sub>Phot</sub> .. Energie eines Photons*                      *h .....* Plancksches Wirkungsquantum  
*ν .....* Frequenz                                      *c .....* Lichtgeschwindigkeit  
*λ .....* Wellenlänge

Bei Gasentladungen kommt es u.a. zur Emission von optischer Strahlung, wobei deren Anteil an der umgesetzten Energie etwa 1% beträgt [97]. Je nach Ausprägung, Umgebungsbedingung und Zugänglichkeit eignen sich zur Detektion unterschiedliche Methoden und Gerätschaften (siehe Tab. 2-9). Nach IEC 60034-27 [113] eignen sich visuelle bzw. optische Methoden nur zur Detektion und Lokalisierung von Oberflächenentladungen. Durch den Einsatz mitverbauter Elemente (z.B. fluoreszierende Lichtwellenleiter/LWL) können optische Methoden aber auch an von außen nicht zugänglichen Stellen Anwendung finden.

Tab. 2-9: Beispiele für Methoden bzw. Gerätschaften zur Detektion optischer Strahlung

Methoden/Gerätschaft	Wellenlängenbereich	Anwendungsbereich
CoronaScope	UV	Äußere TE, Restlichtverstärkung
LWL mit Verstärkung	UV/VIS/IR	TE-Detektion mit bekanntem Fokusbereich
LWL fluoreszierend mit Verstärkung	UV/VIS/IR	TE-Detektion an unzugänglichen Stellen (mitverbaubar)
Thermovisionskamera	IR	Bestimmung der Oberflächentemperatur (eventuell als Folge von TE)

Prinzipiell könnten auch mechanische Schwingungen unter Ausnutzung von optischen Verfahren detektiert werden (z.B. mittels Laser-Vibrometrie), wie dies im Bereich der Baustatik zur Schwingungsanalyse geschieht. Der Einsatz zur Analyse von Generatorstäben oder speziellen Proben wäre denkbar, allerdings sind die Schwingungen aufgrund von TE vermutlich an oder unter der nötigen Intensitätsschwelle.

#### 2.5.4.3 Akustische Methoden zur Detektion von Teilentladungen

Unter Schall versteht man mechanische Schwingungen oder Wellen eines materiellen elastischen Mediums. Als Longitudinalwellen kann Schall in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern auftreten, Transversalwellen sind auf Festkörper beschränkt. Ab Frequenzen von etwa 20 kHz spricht man von Ultraschall [96].

Wenn die Ausbreitungsbedingungen für akustische Wellen es zulassen, können Teilentladungen auch Emissionen im hörbaren Schall- sowie im Ultraschallbereich zur Folge haben. Einerseits ist eine Detektion und Lokalisierung über Luftkopplung möglich (z.B. mittels Ultraschallspiegel) und andererseits kann über den Effekt des Körperschalls mit fest montierten Sensoren TE-Detektion und Fehlstellenortung betrieben werden.

Das Erfassen von Teilentladungen mit akustischen Mitteln erfordert eine geräuscharme Umgebung. Außerdem ist die Detektion von TE in der Hauptisolierung erst bei besonders großer TE-Aktivität möglich [113].

#### 2.5.4.4 Chemische Methoden zur Detektion von Teilentladungen

Bei Generatoren besteht zusätzlich die Möglichkeit, durch chemische Analyse des Kühlgases auf TE-Aktivität zu schließen. Jedes Gas neigt dazu, bestimmte Zersetzungsprodukte zu bilden, wenn energiereiche Entladungsvorgänge (d.h. thermische Überbeanspruchung) vonstattengehen. Sensoren mit physikalisch/chemischen Halbleiterelementen nutzen dies zur Detektion der gasförmigen Reaktionsprodukte, um beispielsweise beim Einsatz von Luft als Kühlgas über die Ozon-Analyse eine entsprechende Bewertung vorzunehmen. Voraussetzung für diese Methode ist ein geschlossener Kühlkreislauf, was bei großen, hochausgenutzten Generatoren meist der Fall ist. Tendenzielle Änderungen lassen sich mit diesem Verfahren sehr gut erfassen. Nachteil bei einer Kühlgasanalyse ist allerdings, dass aufgrund der integrierenden Funktionsweise plötzlich bzw. kurzfristig auftretende Fehler unentdeckt bleiben können [76, 87, 113].

## 2.6 Zusammenfassung

Das Isoliersystem von Generatorstäben hat neben der elektrischen Potentialtrennung die Aufgabe alle anfallenden mechanischen, thermischen oder chemischen Kräfte und Energien aufzunehmen und ohne Verlust der Funktionalität wieder abzuführen. Die eingesetzten Materialien unterliegen höchsten Beanspruchungen, weshalb die Entwicklung einen kontinuierlichen Prozess darstellt. Heute übliche Feinglimmer-Isoliersysteme werden meist aus Glasgewebetragern für den Glimmer, dem Glimmer selbst und einem Epoxidharz als Füllmasse nach dem VPI- oder dem RR-Verfahren hergestellt.

Lebensdauer und Alterung elektrischer Isoliersysteme lassen sich anhand von Modellen abschätzen, dennoch sind wegen der komplexen Kombinationen aus unterschiedlichen Beanspruchungen

und wegen der vielfältigen Wechselwirkungen nur beschränkt gültige Aussagen möglich. Es ist daher unumgänglich alle kritischen Bereiche wie den Nutbereich, den Nutaustritt oder den Wickelkopfbereich des Isoliersystems von Generatorstäben durch geeignete Maßnahmen vor Beschädigung zu bewahren.

Die Entwicklung von Fehlstellen und damit potentiellen TE-Quellen hängt stark von der thermischen Belastung eines Betriebsmittels ab. Grundsätzlich kommen in Feststoffen aufgrund der hohen elektrischen Festigkeit kaum TE vor. Allerdings weisen reale Feststoffisolierungen stets unvermeidliche, fertigungsbedingte Fehlstellen auf. Meist handelt es sich um Formen von gasgefüllten Hohlräumen innerhalb derer es zu Gas- und Oberflächenentladungen kommen kann. Vor allem als Einzelereignis und über kurze Zeiträume betrachtet können diese TE auch harmlos sein, durch ihren repetierenden Charakter können sie jedoch über ihre Frequenz und die Ladung auch bedeutendes Schädigungspotential erlangen. Es ist nicht restlos geklärt, ab welcher Hohlraumgröße schädigende Prozesse möglich sind, da die Alterungswirkung sehr langsam verläuft. Außerdem ist die tatsächliche Hohlraumgeometrie ein entscheidender Faktor in Bezug auf die TE-Entwicklung und deren Alterungseinfluss.

Für einfache Geometrien ist es inzwischen möglich, über Modelle und Simulationen auf die Energiedichten in Fehlstellen rückzuschließen und damit den möglichen Verlauf des TE-Einflusses abzuschätzen. In dieser Hinsicht wird zukünftig die rechnergestützte Unterscheidung von Oberflächenladungsdichte und Energiedichte im Gasraum besonders interessant, wenn die entsprechenden Modelle für verschiedene reale Hohlraumgeometrien gültige Aussagen liefern können.

Bei der Fehlstellen-Detektion ist nach wie vor die konventionelle elektrische TE-Messung und ihre Interpretation nach *IEC 60270* Stand der Technik. Alternative Detektionsmethoden werden meist nur zusätzlich eingesetzt, diese benötigen zur quantifizierenden Bewertung immer auch eine parallele elektrische TE-Messung. Die Energie, welche bei inneren TE umgesetzt wird, wird größtenteils in Wärme umgewandelt, nur ein geringer Anteil wird als Emission optischer oder akustischer Strahlung freigesetzt.



---

## 3 AUFGABENSTELLUNG

### 3.1 Allgemeines

Teilentladungen in Bezug auf Generatorstäbe sind nach wie vor v.a. in zweierlei Form interessant. Zum einen entstehen Korona-Entladungen im Gasraum zwischen aktiven Teilen und zum anderen kommt es innerhalb der Isolierung in gasgefüllten Mikrohohlräumen zu TE. Da verschiedene und zum Teil sehr spezielle Fragestellungen anhand der verfügbaren Literatur nicht zufriedenstellend beantwortet werden konnten, wurde die nachfolgende Aufgabenstellung formuliert und mit ersten Lösungsansätzen die Richtung für diese Arbeit gewiesen.

### 3.2 Teilentladungen bei Modell-Isoliersystemen

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf Fragestellungen zum Teilentladungsverhalten von Modell-Isoliersystemen in Anlehnung an die Situation im Wickelkopf von großen Synchrongeneratoren. In der Literatur wurden zwar einige Hinweise auf das Verhalten verschiedener isolierter Elektrodenysteme gefunden, allerdings waren kaum Publikationen verfügbar, welche die expliziten Zusammenhänge zwischen dem Paschen-Gesetz und der TE- bzw. Korona-Einsatzspannung von isolierten Elektroden behandeln.

Deshalb sollte ein geeignetes Umfeld für die experimentellen Untersuchungen vorbereitet werden und umfassende Versuche an Anordnungen mit isolierten Elektrodenpaaren mit reinem Gasspalt sowie Anordnungen mit dazwischen positioniertem Abstandshalter (Spacer) durchgeführt werden.

Gegenstand der Forschungstätigkeit sollte insbesondere sein, den Einfluss von Gas, Gasdruck, Gastemperatur und Prüflingsabstand sowie die Auswirkung von Abstandshaltern auf das Verhalten der Modell-Isoliersysteme im quasi-homogenen Feld zu beobachten.

Als Arbeitshypothese wurde von der Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf die Korona-Einsatzspannung bei Anordnungen mit isolierten Elektrodenpaaren ausgegangen. Weitere spezielle Fragestellungen betrafen dabei vor allem die Gültigkeitsgrenzen der Übertragbarkeit:

- Einfluss der Gasart auf die Übertragbarkeit
- Einfluss der Temperatur auf die Übertragbarkeit
- Einfluss von Druck und Abstand auf die Übertragbarkeit
- Einfluss von Abstandshaltern auf die Übertragbarkeit

### 3.3 Teilentladungen in Mikrofehlstellen

Der zweite Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf so genannten gasgefüllten Mikrohohlräumen und den darin vorkommenden Teilentladungen. Meist als harmlos eingestuft, bergen diese Fehlstellen unter Umständen doch beachtliches Gefahrenpotential, weshalb stets ein großes Interesse an der Detektierbarkeit gegeben ist.

Zu den Zielen dieser Arbeit zählte daher die Nachbildung und messtechnische Erfassung künstlicher Fehlstellen in Feststoffen bzw. Feststoff-Isoliersystemen. Zu den weiteren Aufgaben im Rahmen der Versuchsvorbereitung zählte die Probenplanung und Fertigung sowie die Auswahl und Adaption geeigneter TE-Detektionsmethoden. Nach der Durchführung entsprechender Experimente sollten Analysen der Entladungen bzgl. ihrer Emissionen und vergleichende Simulationen den Abschluss der Arbeit bilden.

Als Arbeitshypothese wurde von Mikrohohlräumen innerhalb der Feinglimmerisolierung ausgegangen, welche TE mit zunehmender Materialerosion zur Folge haben. Dazu wurde eine Herangehensweise mit stufenweiser Steigerung des Realitäts- und Komplexitätsgrades gewählt:

- Stufe I: Epoxidharz-Proben mit eingebetteten Glas-Mikrohohlkugeln (MHK)
- Stufe II: Probenmodelle mit Feinglimmer-Isolierung, teilweise mit eingebetteten MHK
- Stufe III: Teststäbe bzw. Stabstücke mit realem Isoliersystem

Besonderes Interesse hierbei lag für alle drei Stufen auf der grundsätzlichen Detektierbarkeit von Fehlstellen und der Bewertung hinsichtlich ihrer Entladungsaktivität. Spezielle Fragestellungen betrafen vor allem Ausprägung und Auswirkung der Entladungen, die verwendeten Detektionsmethoden sowie die Möglichkeit der Korrelation verschiedener Fehlstellen-Charakteristika.

### 3.4 Schwerpunkte der Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation sollte zwei Schwerpunkten aus dem Bereich der Hochspannungs-Isolationstechnik nachgegangen werden:

- *TE bei Modell-Isoliersystemen* in Anlehnung an die Situation im Wickelkopf großer, rotierender elektrischer Maschinen
- *TE in Mikrofehlstellen* innerhalb der Isolierung verschiedener Probenmodelle in Anlehnung an gasgefüllte Mikrohohlräume bei Generatorstäben

Als Ausgangspunkt für die Forschungstätigkeit wurden dazu zwei Arbeitshypothesen aufgestellt:

*Arbeitshypothese I: Das Paschen-Gesetz ist auf die Korona-Einsatzspannung von Anordnungen mit isolierten Elektrodenpaaren übertragbar.*

*Arbeitshypothese II: Mikrohohlräume innerhalb der Feststoff-Isolierung haben TE mit zunehmender Materialerosion zur Folge.*

In weiterer Folge sollten einerseits Versuche an Anordnungen isolierter Elektroden unter synthetischer Luft bzw. Wasserstoff vorbereitet und durchgeführt werden, wobei die Parametervariationen von Gas, Gasdruck, Temperatur und Elektrodenabstand evaluiert werden sollten und andererseits sollten optische, akustische und elektrische Untersuchungen an Isolierstoffproben durchgeführt und ausgewertet werden. Nach den erforderlichen Literaturrecherchen lagen die Herausforderungen insbesondere im Vorbereiten geeigneter Versuchsumgebungen sowie der Durchführung entsprechender Experimente an verschiedenen Probenmodellen mit dem schließlichen Ziel, die aufgestellten Arbeitshypothesen unter Einbeziehung relevanter Literatur überprüfen zu können.

Die speziellen Fragestellungen, welche es nun zu untersuchen galt, können in folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes
  - auf Anordnungen isolierter Elektrodenpaare
  - auf Entladungen in Mikrohohlräumen
- Entladungsaktivität in Mikrohohlräumen
  - Einflussgrößen auf TE in Mikrohohlräumen
  - Auswirkungen von TE in Mikrohohlräumen
  - Evaluierung von Detektionsmethoden
  - Detektions- und Analyseverfahren für TE mit optischen Entladungserscheinungen





---

## 4 TEILENTLADUNGEN BEI MODELL-ISOLIERSYSTEMEN

### 4.1 Allgemeines

Modernen, großen, rotierenden elektrischen Maschinen wird ein höchstmögliches Maß an Effizienz abverlangt, was Optimierungen in allen Bereichen erfordert. Im Wickelkopf kommt es dabei durch das Verringern der Abstände nebeneinander liegender Stäbe und Windungen sowie der Reduktion der Isolierwandstärken bei gleichbleibender oder erhöhter Feldstärkebelastung zu gesteigerten Anforderungen an das Isolationssystem. Um einen möglichen, zusätzlichen alternden Einfluss ausschließen zu können, ist man bestrebt, das Wickelkopf-Design hinsichtlich der bislang tolerierten Korona-Entladungen zu optimieren [56].

Im nun folgenden Abschnitt werden experimentelle Versuche beschrieben, die sich – in Anlehnung an die Situation im Wickelkopf – mit dem Teilentladungsverhalten von Anordnungen zweier isolierter Elektroden mit variabler Gasspaltlänge, Druck und Temperatur sowie zum Teil mit Abstandshalter befassen. Hierzu werden zuerst die Ziele und Erwartungen zu diesen Untersuchungen dargelegt. Anschließend wird auf einige notwendige Besonderheiten bei der Vorbereitung des Prüfplatzes eingegangen, bevor der eigentliche Prüfaufbau, der verwendete Prüfkreis sowie Messverfahren und eingesetzte Messgeräte erläutert werden. Danach folgen Beschreibungen zu den untersuchten Prüflingen und ein kurzer Abschnitt zur Versuchsdurchführung. Abschließend wird auf die verwendeten Auswertemethoden eingegangen um schließlich – dem *Kapitel 7 Diskussion und Interpretation* voreingehend – erste Ergebnisse und Aussagen anzuführen.

### 4.2 Ziele und Erwartungen

Ziel der Untersuchungen war es, das Verhalten eines einfachen Isolationsmodells unter synthetischer Luft zu bestimmen und einen Vergleich zum Verhalten desselben Modells unter Wasserstoff zu ermöglichen. Aus der Evaluation der Parameter-Variationen von Abstand, Druck und Temperatur wurden Erkenntnisse zu deren Einfluss auf das TE-Verhalten von isolierten Elektroden erwartet. Insbesondere erwartete man Aufschlüsse darüber zu gewinnen, unter welchen Voraussetzungen bzw. mit welchen Einschränkungen die Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf die ganz speziellen Gegebenheiten der untersuchten Isolieranordnungen möglich sei.

### 4.3 Versuchsvorbereitung und Aufbau

#### 4.3.1 Prüfplatzvorbereitungen

Aufgrund des Einsatzes von Gasen (u.a. Wasserstoff-Gas) in größeren Mengen musste ein Prüfplatz für den Versuchsaufbau adaptiert werden, der sowohl alle messtechnischen wie auch sicherheitsrelevanten Anforderungen erfüllt. Dazu war es erforderlich auch gebäudetechnische Maßnahmen zu überlegen und umzusetzen (Kennzeichnung der EX-Zonen ähnliche Bereiche und der Fluchtwege, Vorkehrungen für eine sichere Gaslagerstätte, Installation einer standortfixierten Gaswarnanlage, Montage einer Überdachabgasleitung). Zusätzlich mussten in Zusammenarbeit mit den zuständigen Sicherheitsbeauftragten der TU Graz speziell angepasste Betriebs- und Wartungsanweisungen ausgearbeitet werden. Im nachfolgenden Blockschaltbild (Abb. 4-1) sind alle wesentlichen Einrichtungen zu erkennen, mit denen der Versuchsstand ausgestattet wurde.

- Mess- und PC-Arbeitsplatz zur Messdatenerfassung und Aufzeichnung
- Spannungsversorgung durch Stelltransformator bzw. Hochspannungstransformator
- Sicherheitskreis entsprechend den in HV-Laboratorien üblichen Standards
- Prüfgefäß mit Prüfling
- Permanent installierte Gaswarnanlage für brennbare Gase
- Gaselager zur sicheren Verwahrung der verwendeten Prüf- und Spülgase

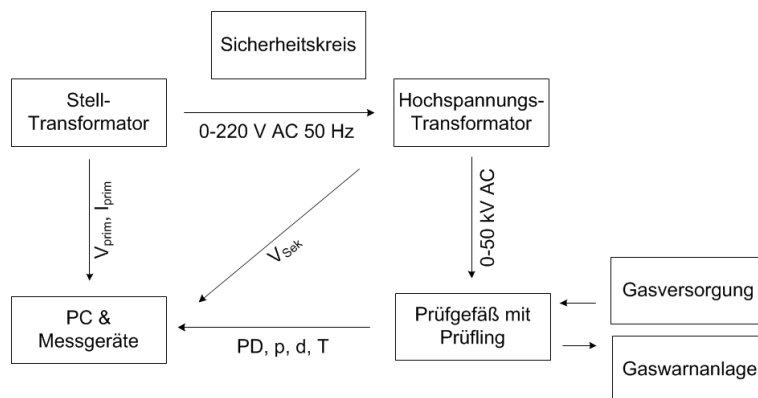


Abb. 4-1: Blockschaltbild - Versuchsaufbau mit den wesentlichen Einrichtungen

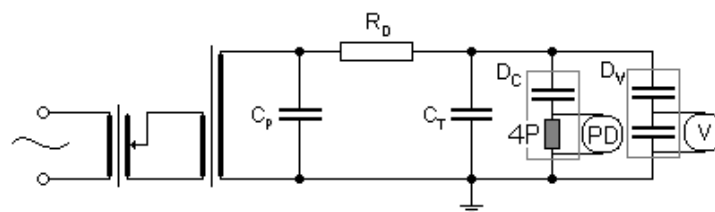
Aus Sicht der elektrischen Messtechnik, insbesondere der Teilentladungsmesstechnik, lag bei dem zur Verfügung stehenden Prüffeld<sup>1</sup> eine Situation ähnlich der bei Vor-Ort-Prüfungen vor. Um die Schirmungs- und Erdungsverhältnisse im Sinne eines verringerten Grundstörepiegels zu verbessern, mussten deshalb Schritte, wie das Einbeziehen der Absperrgitter in die Erdungsmaßnahmen oder

<sup>1</sup> Aus Gründen der Sicherheit beim Umgang mit Wasserstoffgas mussten die Experimente in einem gut belüftbaren Prüffeld mit möglichst großem Raumvolumen stattfinden, geschlossene und speziell geschirmte Labore waren daher nicht geeignet.

die Schaffung von Anbindungspunkten ans Erdungssystem für alle Messgeräte sowie metallenen Teile der Aufbauten gesetzt werden.

#### 4.3.2 Messschaltung

Der Prüfkreis bestand aus dem Stelltransformator (bis 220 VAC, 50 Hz), einem Hochspannungstransformator (MWB TEO 100/10) mit parallel geschaltetem Belastungskondensator ( $C_P$ ), dem über einen Vorwiderstand ( $R_D$ ) angeschlossenen Prüfgefäß ( $C_T$ ), dem Spannungsteiler ( $D_V$ ) zur Spannungsmessung und schließlich dem Koppelkondensator mit einem Ankoppelvierpol ( $D_C$ ) zur Messung der Teilentladungen. Das Prüfgefäß ( $C_T$ ) mit den eingebauten Prüflingen ist entsprechend Abb. 4-2 in den Prüfkreis integriert.



- |  |   |
|--|---|
| $R_D$ ..... Vorwiderstand (20 k $\Omega$ ) | $C_P$ ..... Belastungskondensator (Spannungsglättung, 1,2 nF) |
| $C_T$ ..... Prüfgefäß mit Testobjekt       | $D_C$ ..... Koppelkapazität mit integriertem Vierpol          |
| 4P ..... Ankoppelvierpol                   | PD ..... Teilentladungsmesssystem am Ankoppelvierpol          |
| $D_V$ ..... Spannungsteiler (1:1000)       | V ..... Spannungsmesssystem an Spannungsteiler                |

Abb. 4-2: Prinzip des Prüfkreises

Um eine entsprechende Güte der Hochspannung (bis 50 kV, 50 Hz) zu gewährleisten, wurde einerseits ein vorgeschaltetes Netzfilter eingesetzt und andererseits wurden die Komponenten  $C_P$  und  $R_D$  so gewählt, dass diese zusätzlich zu ihrer eigentlichen Funktion, die einer der Hochspannungsversorgung nachgeschalteten Filters übernahmen (siehe Abb. 4-3).

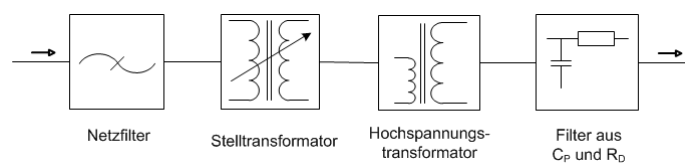


Abb. 4-3: Blockschaltbild der realisierten Spannungsversorgung

#### 4.3.3 Messgeräte und Messverfahren

##### 4.3.3.1 Teilentladungsdetektion

Die Detektion und Auswertung der Teilentladungen erfolgte bei diesen Versuchen mittels konventioneller elektrischer Methode nach IEC 60270, für einzelne Messungen wurde auch ein optisches Messsystem (CoronaScope™) zur Überprüfung herangezogen. Zur elektrischen TE-Detektion kam das ICM-System® (Hardware Ver. 7.61, Software Ver. 3.71) der Firma Power Diagnostix zur Anwendung, welches über einen Koppelkondensator sowie einen Vierpol mit dazugehörigem Vorverstärker in den Prüfkreis integriert wurde. Neben der zeitkontinuierlichen Dar-

stellung der angelegten Spannung und des detektierten Teilentladungspegels ermöglichte das System u.a. die Aufzeichnung eines phasenaufgelösten TE-Musters (TE-Fingerprint). Aus den möglichen Messschaltungen (vgl. Abschnitt 2.5.3) wurde Variante I gewählt, obwohl diese nicht die empfindlichste Variante darstellt, da der erwartete TE-Pegel dies zuließ und die Gefahr eines Überschlags zwischen den Elektroden nicht gänzlich ausgeschlossen werden konnte.

#### 4.3.3.2 Spannungsmessung

Die Spannungsmessung wurde durch das Abgreifen der Spannung an einem kapazitiven Teiler (Pressgaskondensator plus Unterkapazität, 1:1000) in Verbindung mit einem Digitalmultimeter umgesetzt (Keithley 2001 Multimeter, Fluke 87 III bzw. Fluke 25), wobei mittels Referenzmesssystem (Bezugsnormal MU14 sowie Messkondensator MCP200) für alle Geräte eine Kalibrier- und Korrekturkurve aufgenommen wurde.

#### 4.3.3.3 Druckmessung

Die Messung des Gasdrucks im Prüfgefäß wurde mit einem analogen und einem digitalen Instrument durchgeführt. Das analoge Manometer wurde entsprechend der Druckgeräte-Richtlinie (DGRL) dauerhaft am Druckgefäß angebracht und ermöglichte das jederzeitige Ablesen des im Gefäß vorherrschenden Gasdrucks. Im Versuchsbetrieb kam ein präzises, digitales Mess-System (Pfeiffer Vacuum SingleGauge TPG261 mit Piezzo-Sensor APR266) zur Anwendung um eine höhere Genauigkeit zu ermöglichen.

#### 4.3.3.4 Beheizung - Temperaturmessung

Zur Beheizung des Prüfgefäßes bzw. zur Erreichung der erforderlichen Gastemperatur wurde ein regelbares Heizbandsystem in EX-Ausführung eingesetzt. Für die Versuchsplanung war es wichtig die entsprechenden Aufheiz- und Abkühlzeiten (Abb. 4-4) zu berücksichtigen. Die Temperaturmessung selbst erfolgte über einen PT 100 Messfühler, der im nahezu feldfreien Raum unterhalb der geerdeten Elektrode im Boden des Prüfgefäßes eingeschraubt war. Die Temperatur wurde mit einem digitalen Signalrekorder (Yokogawa DX1006) kontrolliert und dokumentiert.

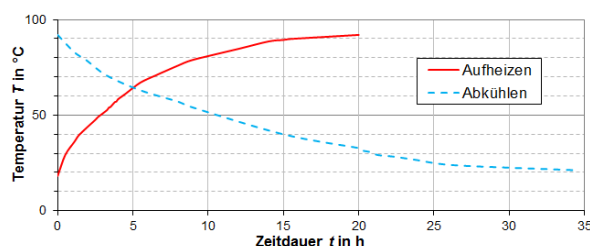


Abb. 4-4: Aufheiz- und Abkühlcharakteristik des Prüfgefäßes

## 4.4 Spezielles Prüfgefäß und Prüflinge

### 4.4.1 Prüfgefäß

Das verwendete Prüfgefäß (Abb. 4-5) wurde von einem darauf spezialisierten Betrieb in Einzelanfertigung hergestellt und wies eine im Deckelbereich eingebaute Hochspannungsdurchführung (Euromold 400AR-2), sowie Möglichkeiten der Zu- und Ableitung von Prüf- und Spülgasen auf. Eine analoge Druckanzeige war dauerhaft am Prüfgefäß angeschlossen. Des Weiteren wurden senkrecht zueinander zwei Schaugläser ausgeführt, welche eine Sichtkontrolle der Prüfanordnung in dem hermetisch abgeschlossenen Druckgefäß ermöglichten. Um die für die Untersuchungen erforderlichen Temperaturen zu erreichen, wurde über das erwähnte externe Heizsystem eine etwa 10 cm dicke Schicht Wärmedämmung angebracht.

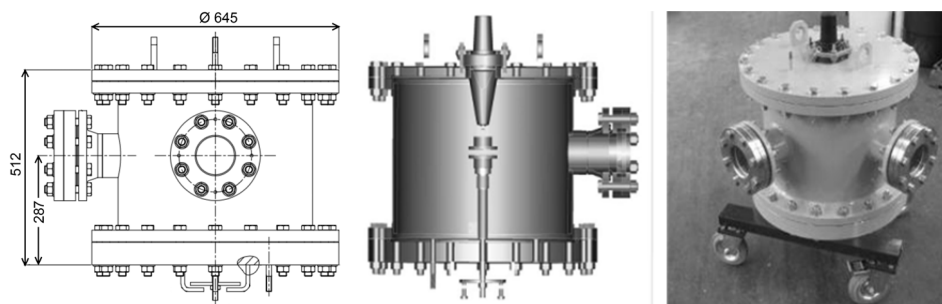


Abb. 4-5: Konstruktionszeichnungen<sup>2</sup> und Foto des Prüfgefäßes

Tab. 4-1: Ausgewählte Eigenschaften des Prüfgefäßes

Eigenschaft	Beschreibung
Gewicht	ca. 400 kg
Schaugläser	2 Stück, senkrecht zueinander
Deckel	Aufnahme der HV-Durchführung abnehmbar (20 Schrauben, Kran-Hebeösen)
Gasanschlüsse	1 x Zuleitung (inkl. Rückschlagventil) 1 x Anschluss Vakuumpumpe 1 x Anschluss Druckanzeige 1 x Anschluss Abgasleitung (inkl. Überdruckventil, 6 bar absolut)
Zulässiger Druck	Maximaler Betriebsdruck 5 bar absolut Prüfdruck 8 bar absolut
Zulässige Temperatur	Geeignet bis max. 110°C
Montage des Prüflings	HV-Elektrode an Durchführung Gegenelektrode an flexiblem Metallbalg
Verstelleinrichtung	Flexibler Metallbalg von unten einstellbar Abstand ablesbar an Messuhr (Mikrometer)

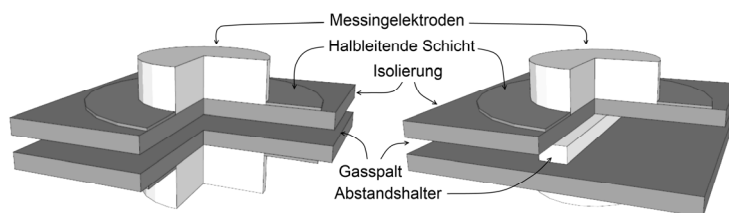
Die Befestigung der Prüflinge (Elektrodenpaare) erfolgt hochspannungsseitig direkt am unteren Ende der Hochspannungsdurchführung. Die Gegenelektrode wird am oberen Ende des verstellba-

<sup>2</sup> Quelle der Konstruktionszeichnungen: Andritz Hydro GmbH Weiz, Ing. M. Auer

ren Metallbalgs angeschraubt, wodurch sich die Länge des Gasspaltes variabel einstellen lässt. Um die Portabilität zu gewährleisten, wurde das Prüfgefäß mit vier Schwerlastrollen versehen. Von besonderer Bedeutung sind außerdem die Kran-Hebeösen, da bei der Prüflingsmontage sowie allen Arbeiten im Inneren des Gefäßes der Deckel abgenommen werden musste. In obiger Tab. 4-1 sind die wesentlichen Merkmale des verwendeten Prüfgefäßes angeführt.

#### 4.4.2 Prüflinge (Testelektroden)

Die verwendeten Prüflinge bzw. Testelektrodenpaare (siehe Abb. 4-6) bestehen aus Messingzylindern (Durchmesser ca. 50 mm, Höhe ca. 25 mm) mit einseitig aufgebracht Radien (5 mm). Auf die Metallzylinder wurden Platten aus Isoliermaterial aufgeklebt, wie es bei Generatorstäben zur Anwendung kommt (Feinglimmer-Epoxidharzisolierung in VPI-Technologie). Um Hohlräume zwischen Metallelektrode und Isolation zu vermeiden, wurde ein leitfähiger Klebstoff auf Epoxidharzbasis verwendet. Zur Potentialsteuerung wurde um die zylindrischen Messingelektroden eine Schicht aus halbleitendem Lack aufgetragen.



*Isolierung: ..... Feinglimm-Epoxidharzisolierung in VPI-Technologie*

*Spacer: ..... HGW-Plättchen mit epoxidharzgetränktem Vlies umwickelt*

*Abb. 4-6: Prinzip des Probenaufbaus mit und ohne Abstandshalter*

Für die später beschriebenen Versuche mit Spacer-Anordnungen wurde zwischen die beiden Isolationsplatten ein Abstandshalter (Dicke 6 mm, Breite ca. 10 mm, siehe Abb. 4-6) eingebracht. Dafür übliches Material ist beispielsweise ein HGW-Plättchen<sup>3</sup>, welches mit einem Stück harzgetränktem Filz<sup>4</sup> umwickelt wird. Durch die Pressung zwischen den beiden Elektroden und durch die temperaturbedingte Aushärtung wird die so gestaltete Anordnung verklebt.

Die Ergebnisse der numerischen Feldberechnung aus Abb. 4-7 bzw. Tab. 4-2 zeigen mittels zweier beispielhafter Werte, die Aufteilung der Feldstärke auf den festen bzw. den gasförmigen Isolierstoff und belegen quasi-homogene Feldbedingungen in einem großen Bereich des Gasspaltes zwischen den beiden isolierten Elektroden.

---

<sup>3</sup> Das hier verwendete HGW-Material entspricht EPGC 203 der Dicke 1 mm.

<sup>4</sup> Epoxidharz-imprägnierter Polyester-Filz der Dicke 3 mm, wärmehärtend bei Temperaturen > 85°C.

Tab. 4-2: Feldsimulation des Modell-Isoliersystems ohne Abstandshalter

Abstand	$ E_{\text{Isolierung}} $ in $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$	$ E_{\text{Gasspalt}} $ in $\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$
2 mm	0,9	3,5
5 mm	0,6	2,2

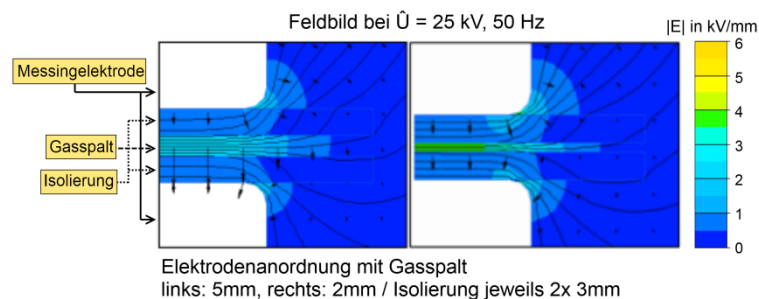


Abb. 4-7: Feldsimulation der Modell-Isolierung ohne Abstandshalter

## 4.5 Versuchsdurchführung

### 4.5.1 Definitionen und Erläuterungen

Einige Begriffe, die für die experimentellen Untersuchungen und deren Auswertung Bedeutung haben, bedürfen der Eindeutigkeit halber einer gesonderten Erklärung. Nachfolgend seien daher die wichtigsten Bezeichnungen und Abkürzungen mit einer kurzen Beschreibung angeführt.

#### 4.5.1.1 Spannungsangaben

Alle Spannungsangaben sind, anders als in der Gasentladungsphysik häufig üblich, nicht auf den Spitzenwert sondern auf den Effektivwert der sinusförmigen Wechselspannung bezogen, um einen direkten Vergleich mit Werten für die Betriebsspannung zu ermöglichen.

#### 4.5.1.2 Korona-Ein- und Aussetzspannung

Für die durchgeführten Untersuchungen waren die Korona-Einsatzspannung  $U_{\text{ein}}$  sowie die Korona-Aussetzspannung  $U_{\text{aus}}$  von besonderer Bedeutung. Zur Ermittlung von  $U_{\text{ein}}$  wurde die am Prüfling angelegte Spannung solange mit konstanter Geschwindigkeit gesteigert bis das Einsetzen von konstanten Teilentladungen (hier: äußere TE in Form von Korona-Entladungen) detektierbar war. Analog dazu wurde die  $U_{\text{aus}}$  bestimmt, indem die angelegte Spannung solange verringert wurde, bis die Korona erlosch.

#### 4.5.1.3 Angelegte Spannung und auf den Gasspalt bezogene Spannung bzw. Feldstärke

Sowohl für  $U_{\text{Ein}}$  als auch für  $U_{\text{Aus}}$  werden im Weiteren immer wieder die Bezeichnungen *angelegte Spannung*  $U_{\text{tot}}$  (bzw.  $U_{\text{Ein\_tot}}$  und  $U_{\text{Aus\_tot}}$ ) und *auf den Gasspalt bezogene Spannung*  $U_{\text{gap}}$  (bzw.  $U_{\text{Ein\_gap}}$  und  $U_{\text{Aus\_gap}}$ ) verwendet. Insbesondere für die Interpretation der Versuchsergebnisse stellen die auf den Gasspalt bezogenen (d.h. berechneten) Spannungswerte die interessanteren Größen dar. Die Berechnung dieser bezogenen Spannung folgt der, auf den einfachen Zusammenhän-

gen eines Kondensators mit Mehrschichtdielektrikum basierenden, Gleichung (4.1). Als Einsetzfeldstärke  $E_{Ein}$  wird dabei jener Feldstärkewert bezeichnet, der sich nach Gleichung (4.2) aus dem Quotienten aus der auf den Gasspalt bezogenen Einsetzspannung  $U_{Ein\_gap}$  und der Gasspaltlänge  $d$  ergibt. Analoges gilt für die Aussetzfeldstärke  $U_{Aus}$ .

$$U_{gap} = U_{tot} \cdot \frac{d}{d + 2 \cdot \frac{a}{\epsilon_r}} \tag{4.1}$$

$$E = \frac{U_{gap}}{d} \tag{4.2}$$

$U_{tot}$  ..... angelegte Spannung                       $U_{gap}$  .... auf den Gasspalt bezogene Spannung  
 $d$  ..... Gasspaltlänge                                       $a$  ..... Dicke einer Isolationsplatte  
 $\epsilon_r$  ..... relative Dielektrizitätszahl des Isolationsmaterials (Annahme:  $\epsilon_r$  ist konstant)

Weiters sei angemerkt, dass die angeführten und in Diagrammen eingetragenen Werte arithmetische Mittelwerte darstellen, denen 3-10 Einzelmesswerte zugrunde liegen.

#### 4.5.2 Vorversuche zur Bestimmung einer Messroutine

Ziel der Vorversuche war es, eine geeignete Messroutine zur Bestimmung von Korona-Ein- und Aussetzspannung zu finden, die bei minimalen Mess- und Wartezeiten möglichst unabhängige Ergebnisse liefert. Dazu wurden Untersuchungen durchgeführt, bei denen der Einfluss von Abänderungen der Messroutine evaluiert wurde. Für die Messroutine wurde ein in der Hochspannungstechnik übliches Prinzip gewählt (siehe Abb. 4-8) bei dem die Spannung zunächst bis zum Einsetzen der Korona gesteigert wird ( $U_{Ein}$ ). Danach wird die angelegte Spannung um einen gewissen Prozentsatz ( $X$ ) über die Einsetzspannung weiter erhöht und für eine bestimmte Zeitdauer ( $T_1$ ) gehalten. Schließlich wird die Spannung bis zum Aussetzen der Korona verringert ( $U_{Aus}$ ). Nachdem die angelegte Spannung ganz zurückgefahren wurde, wird für eine bestimmte Zeitdauer ( $T_0$ ) in spannungslosem Zustand verharrt, bevor mit dem dreiteiligen Messzyklus fortgefahren wird. Bei Erreichen der TE-Einsetzspannung während der jeweils zweiten Messung eines Messzyklus wurde mit dem Teilentladungsmesssystem 30 Sekunden lang ein phasenbezogenes TE-Muster aufgezeichnet.

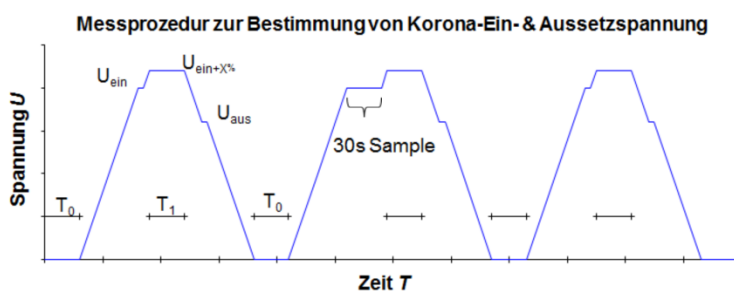


Abb. 4-8: Prinzip des Messablaufes zur Bestimmung von  $U_{ein}$  und  $U_{aus}$



Während Spannungssteigerungsgeschwindigkeit und Aufzeichnungsdauer des TE-Muster für alle Messungen unverändert geblieben sind, wurden die Parameter  $T_0$  (Haltedauer in spannungslosem Zustand vor bzw. zwischen den Messungen),  $X$  (Spannungsüberhöhung über der Einsetzspannung in %) und  $T_1$  (Haltedauer der Spannungsüberhöhung über der Einsetzspannung) entsprechend Tab. 4-3 variiert. Anhand der Ergebnisse wurden relevante Parameterpaare auf Korrelation evaluiert und so eine geeignete Messroutine ermittelt, welche für unterschiedliche Temperaturen sowie veränderten Druck und Abstand unabhängige Resultate gewährleistet.

Tab. 4-3: Variationen der Parameter der Messroutine

Parameter	Bezeichnung	Variationen / Bereich
Spannungssteigerungsgeschwindigkeit	$v$ in V/s	konstant ca. 400
Aufzeichnungsdauer des TE-Musters	$T_{\text{Sample}}$ in s	konstant 30
Haltedauer in spannungslosem Zustand vor bzw. zwischen den Messungen	$T_0$ in s	1, 30*, 60 und 90
Haltedauer der Spannungserhöhung	$T_1$ in s	30*, 60, 120 und 180
Spannungserhöhung $X$ über $U_{\text{ein}}$	$X$ in %	5, 10* und 20

\* ..... Für die weiterführenden Messungen gewählte Parameter-Werte

#### 4.5.3 Versuche unter synthetischer Luft und Wasserstoff

Nach der Bestimmung einer geeigneten Messroutine wurden Untersuchungen unter synthetischer Luft sowie unter Wasserstoff durchgeführt. Dabei wurden die schon in *Abschnitt 4.4 Spezielles Prüfgefäß und Prüflinge* beschriebenen Messingelektroden mit aufgeklebter Isolierung (ohne bzw. mit Abstandshalter) verwendet.

Ziel der Versuche war es aus den Experimenten unter Luft und Wasserstoff charakteristische Kurven bzgl. des TE-Verhaltens zu ermitteln und diese mit früheren Untersuchungen, v.a. mit dem auf umfangreicher Datenbasis beruhenden Cigré-Reports nach *Dakin et al. (1977)* [26], zu vergleichen. Damit sollte die Möglichkeit der Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes, welches die Durchschlagspannung bei blanken Metallelektroden beschreibt, auf Anordnungen mit isolierten Metallelektroden überprüft werden. Bei diesen Untersuchungen wurden Druck und Prüflingsabstand (Gasspaltlänge) sowie die Gastemperatur variiert (25°C, 50°C, 70°C und 90°C), um deren Einfluss auf das Isolationsverhalten der Modelle zu beobachten. Zusätzlich sollte der Einfluss von Abstandshalter (Spacer)<sup>5</sup> auf das Isolationsverhalten der Anordnung untersucht werden und Unterschiede im TE-Verhalten unter Luft bzw. Wasserstoff herausgearbeitet werden. Aus einigen 1000 Einzelmesswerten (vgl. Abb. 4-9) wurden so charakteristische Kurven für das TE-Verhalten der untersuchten Anordnungen unter synthetischer Luft oder Wasserstoff bestimmt.

<sup>5</sup> Die Untersuchungen an Anordnungen mit Abstandshalter unter Luft konnten lediglich bei 90°C durchgeführt werden.

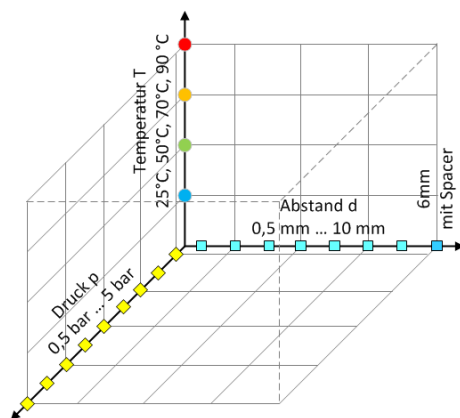


Abb. 4-9: Versuchsmatrix zur Bestimmung der TE-Charakteristik von Modell-Isolieranordnungen unter synthetischer Luft und unter Wasserstoff

### 4.6 Ergebnisse und Auswertemethodik

Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse beruht auf der Bestimmung der Korona-Ein- bzw. Aussetzspannung und der entsprechenden TE-Pegel. Je Messpunkt (vgl. Abb. 4-9) wurden 3-10 Messwerte von  $U_{ein}$  bzw.  $U_{aus}$  experimentell bestimmt. Aus den Einzelwerten der Wiederholungen wurde anschließend der Mittelwert bestimmt, um die statistische Streuung mit einem Mindestmaß zu berücksichtigen<sup>6</sup>. Aus den gemessenen Spannungswerten wurden anschließend die auf den Spalt bezogenen Spannungswerte entsprechend Gleichung (4.1) berechnet. In den nachfolgenden Übersichtsdiagrammen (Abb. 4-10 bis Abb. 4-13) sind schließlich die gesammelten Ergebnisse in der Form von Ausgleichskurven dargestellt (vgl. Tab. 4-4).

Durch eine Verringerung der Spannungssteigerungsgeschwindigkeit sowie einer Erhöhung der Messgenauigkeit ließen sich exaktere Daten ermitteln. Eine größere Anzahl an Versuchswiederholungen könnte die Resultate hinsichtlich der den Prozessen innewohnenden Stochastik und der dadurch bedingten Streuung verbessern. An dieser Stelle werden die Ergebnisse nur kurz erläutert, weiterführende Betrachtungen und vergleichende Gegenüberstellungen mit früheren wie aktuellen Ergebnissen aus der Literatur sollen in *Kapitel 7 Diskussion und Interpretation* folgen.

Tab. 4-4: Rechnergestützte Regression der Messdaten – Bestimmtheitswert  $R^2$

Modell-Anordnung	$R^2_{min} - R^2_{max}$	R2
mit reiner Gasstrecke (polynomische Regression 2. Ordnung)	0,978 ... 0,998	0,99
mit Abstandshalter (logarithmische Regression 2. Ordnung)	0,902 ... 0,976	0,96

In Abb. 4-10 ist die auf den Gasspalt bezogene Einsetzspannung, in Abb. 4-11 die Aussetzspannung bei reiner Gasstrecke für synthetische Luft bzw. Wasserstoff eingetragen. Als zusätzlicher Anhaltspunkt ist jeweils für Luft und Wasserstoff die Kurve für die Durchschlagspannung bei

<sup>6</sup> Auf eine ausführlichere statistische Analyse der Messdaten wurde aufgrund der geringen Anzahl der Messwiederholungen sowie der stochastischen Prozesse bei Gasentladungen verzichtet.

metallenen Elektroden nach [26] eingezeichnet. Man erkennt zwei Kurvenscharen, wobei jene bei höheren Spannungswerten die Ergebnisse unter Luft (durchgezogene Linie), die andere die Ergebnisse unter Wasserstoff (gestrichelte Linie) bei unterschiedlichen Temperaturen darstellt. Die Resultate der Untersuchungen für Anordnungen mit reiner Gasstrecke ergaben unter Luft eine deutliche Abhängigkeit der Ein- und Aussetzspannung von der Temperatur, mit niedrigeren Spannungswerten  $U_{ein}$  bei höheren Temperaturen (Abb. 4-10). Im Vergleich dazu war unter Wasserstoff eine deutlich geringere Temperaturabhängigkeit der Einsetzspannung zu beobachten, und die ermittelte Aussetzspannung unter Wasserstoff lag nicht für 90°C sondern für 70°C am niedrigsten (siehe Abb. 4-11). Die Experimente zum Einfluss von Abstandshaltern zeigten für beide Gase starke Abweichungen von der Kennlinie nach Paschen, wobei weder für die Ein- noch die Aussetzspannung eine klare Abhängigkeit von der Temperatur feststellbar war (siehe Abb. 4-12 und Abb. 4-13)

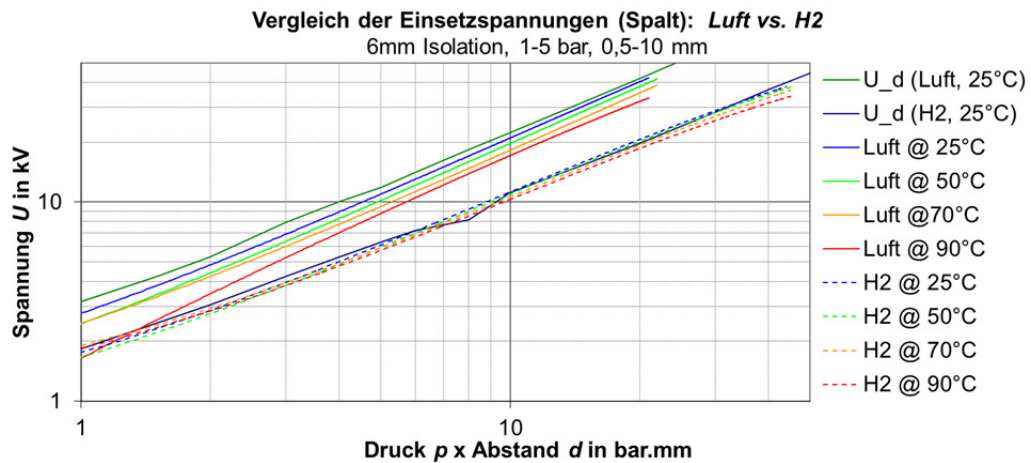


Abb. 4-10: Korona-Einsetzspannung für Luft und H<sub>2</sub> bei reiner Gasstrecke

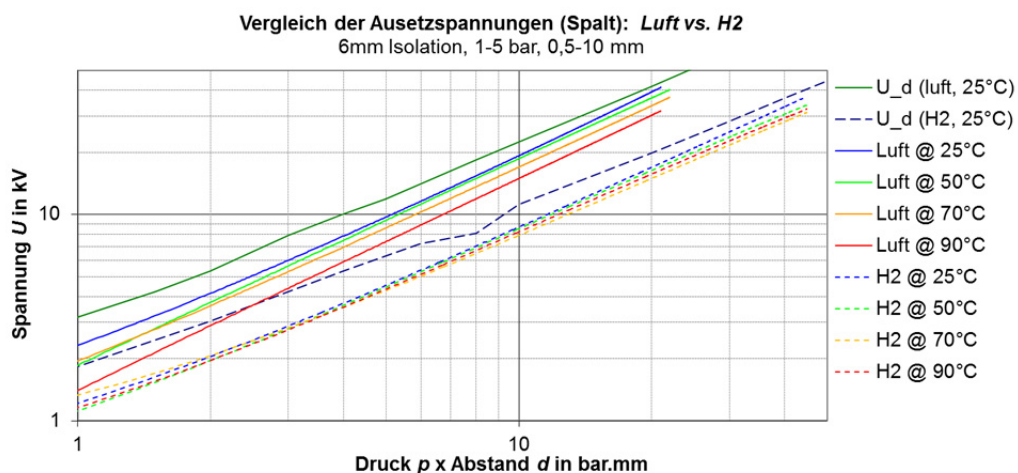


Abb. 4-11: Korona-Aussetzspannung für Luft und H<sub>2</sub> bei reiner Gasstrecke

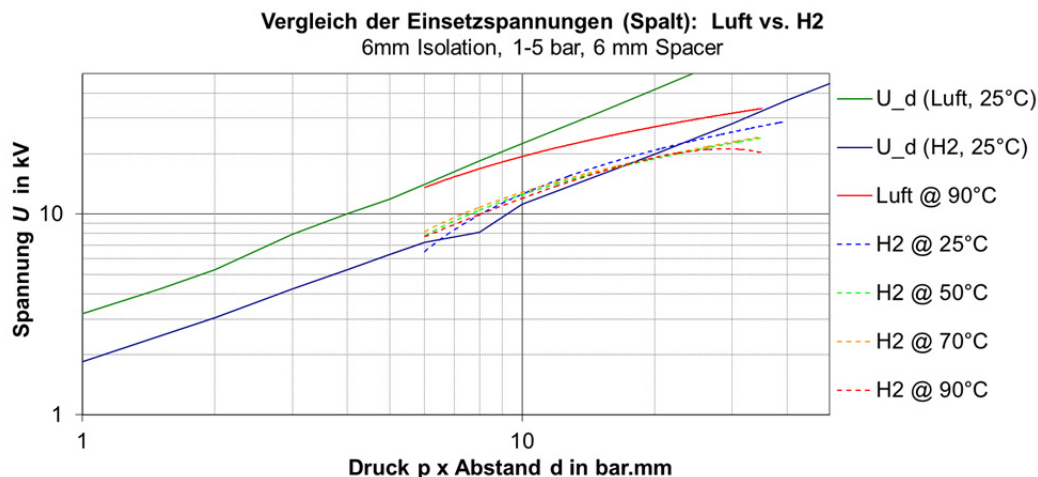


Abb. 4-12: Korona-Einsatzspannung für Luft und H<sub>2</sub> bei Abstandshalter

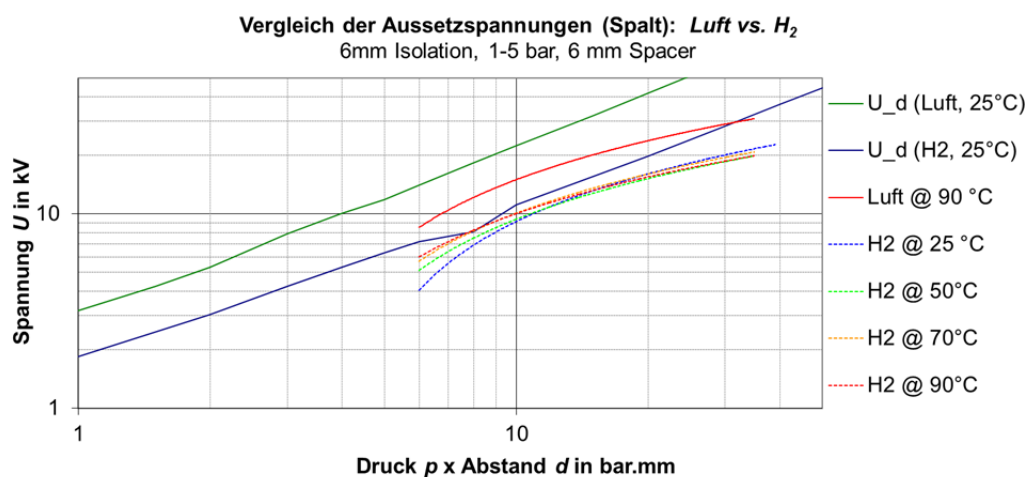


Abb. 4-13: Korona-Aussetzspannung für Luft und H<sub>2</sub> bei Abstandshalter

Der beobachtete TE-Pegel, welcher die Höhe der Entladungen (in pC bzw. nC) bei Ein- bzw. Aussetzspannungsniveau beschreibt, lag bei den Experimenten unter Wasserstoff tendenziell höher als bei jenen unter synthetischer Luft. Außerdem konnte bei den Versuchen an Anordnungen mit Abstandshalter unter Wasserstoff bei höheren Drücken (4 bzw. 4,5 bar) zum Teil ein stufenweises Ein- und Aussetzen der Teilentladungen beobachtet werden. Das zweistufige Einsetzen äußerte sich in als Glimmentladungen erkennbaren Vorgängen bei sehr niedrigen TE-Pegeln, welche sich bei weiterer Spannungssteigerung zu Streamer-artigen Entladungen mit höheren TE-Pegeln entwickelten. Der stufenweise Aussetzvorgang verlief analog dazu in umgekehrter Reihenfolge, wobei der TE-Pegel von 20-30 nC bei einer Verringerung der Spannung um ca. 3 kV vorerst auf etwa 2-8 nC abfiel. Erst bei einer weiteren Verringerung der Spannung erfolgte das vollständige Erlöschen der Teilentladungen.

#### 4.7 Zusammenfassung

Es wurden Versuche an Modellisolieranordnungen mit reiner Gasstrecke bzw. mit Abstandshalter durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss von Gasart, Abstand, Druck und Temperatur zu ermitteln und die Möglichkeiten der Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes zu überprüfen. Neben den messtechnischen Anforderungen waren aufgrund des Einsatzes von Wasserstoffgas auch spezielle Prüfplatzvorbereitungen zur Erfüllung aller sicherheitstechnischen Erfordernisse notwendig. Die untersuchten Prüflinge bestanden aus Messingelektroden mit aufgeklebten Isolierplatten und variabler Gasspaltlänge sowie isolierten Messingelektroden mit einem Abstandshalter der Stärke 6 mm. Diese wurden für die Experimente in einem hermetisch abgeschlossenen Gasdruckgefäß montiert, wobei unter Anwendung der konventionellen TE-Messtechnik nach *IEC 60270*, mit dem Messzweig (Koppelkapazität und Vierpol) parallel zur Prüflingskapazität die Korona-Einsatzspannung und der entsprechende TE-Pegel sowie die Korona-Aussetzspannung bestimmt wurden. Als erste Erkenntnisse der Untersuchungen können für den betrachteten Bereich von Druck (0,5-5 bar), Elektrodenabstand (0,5-10 mm) und Temperatur (25°C, 50°C, 70°C und 90°C) folgende Punkte zusammengefasst werden:

- Bei Isolieranordnungen mit quasihomogenen Feldbedingungen kommt es wie erwartet und im Gegensatz zu blanken Metallelektroden, nicht direkt zum Durchschlag.
- Es waren Vorentladungen in Form von Glimmen bzw. Korona messbar.
- Optische Entladungserscheinungen konnten sowohl für Luft als auch für Wasserstoff durch die Sichtgläser hindurch deutlich wahrgenommen werden.
- Unter synthetischer Luft war eine deutliche Temperaturabhängigkeit feststellbar, für Wasserstoff gilt das nicht in gleichem Maße.
- Für Anordnungen mit reiner Gasstrecke konnte ein charakteristisches Verhalten der Korona-Einsatzspannung mit einem Verlauf ähnlich der Paschen-Kurve festgestellt werden.
- Abstandshalter führen zu deutlich früherem Ein- bzw. späterem Aussetzen von TE.



---

## 5 TEILENTLADUNGEN IN MIKROFEHLSTELLEN

### 5.1 Allgemeines

Fehlstellen im Isolationssystem von Stator-Wicklungen entstehen bekanntlich auf vielfältige Weise, sowohl fertigungstechnisch bedingt als auch aufgrund fortschreitender Alterung. Durch Verbesserungen im Fertigungsprozess können viele mögliche Fehlerquellen von vornherein vermieden und das Auftreten von Gefahrenstellen auf ein Minimum reduziert werden, gänzlich verhindern lassen sich diese entsprechend der angewandten Technologie jedoch nicht. Betriebliche Belastungen von elektrischen Maschinen können je nach Einsatzart (Zyklen, Dauer etc.) das Wachstum bestehender Defekte des Isolationssystems bewirken und beschleunigen oder auch neue Fehlstellen hervorrufen. Es besteht daher erhebliches Interesse zu eruieren, inwieweit kleinste Fehlstellen, die bereits ab Werk existieren können, messtechnisch erfassbar sind. Dabei ist von Interesse, welche Auswirkungen diese Mikrohohlräume im Betrieb haben können und ob von ihnen die Gefahr ausgeht anzuwachsen und sich zu größeren Fehlstellen heranzubilden. Außerdem sollen unterschiedliche Detektionsmethoden auf ihre Anwendbarkeit bei Generatorstab-Isoliersystemen großer, rotierender elektrischer Maschinen überprüft werden.

Im nachfolgenden Abschnitt wird die entwickelte mehrphasige Herangehensweise anhand der einzelnen Stufen beschrieben. Die wichtigsten Materialuntersuchungen finden ebenso Erwähnung wie die eingesetzte Messtechnik und die jeweiligen Prüfaufbauten. Nach der Probenentwicklung und der Fertigung der einzelnen Modelle werden schließlich die wichtigsten Ergebnisse der Versuche und erste Aussagen dargelegt.

### 5.2 Ziele und Erwartungen

Planung und Entwurf der später zu untersuchenden Proben lag die Idee zugrunde, definierte Fehlstellen gezielt innerhalb eines Isolationssystems zu positionieren, deren Auswirkungen beobachten und die Detektierbarkeit überprüfen zu können. Da die Stabisolation von großen, rotierenden elektrischen Maschinen ein Isolationssystem komplexer Struktur darstellt, sollte durch einen stufenweisen Lösungsansatz versucht werden den Zielvorstellungen einer realistischen Probe schrittweise näherzukommen. Zunächst sollte der Fokus auf das möglichst isolierte Problem einer einzelnen Fehlstelle in einem sonst homogenen Isoliermedium gelegt werden, um unerwünschte

und unbekannte Einflüsse zu einem hohen Grad auszuschließen. Erst in weiteren Schritten sollten schließlich Modelle mit gesteigertem Realitäts- und Komplexitätsgrad untersucht werden.

### Umsetzung eines Stufenmodells

- Stufe 0: Vorversuche mit TE-Messungen (elektrische Methode nach *IEC 60270*) an Plexiglasproben mit unterschiedlichen Fehlstellen
- Stufe I: Versuche mit TE-Messungen (elektrische Methode nach *IEC 60270*) an reinen Harzproben sowie an Harzproben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln aus Glas
- Stufe II: Versuche mit TE-Messungen (elektrische, optische und akustische Detektionsmethoden) an Bänderproben mit Feinglimmerisolierung in VPI-Technologie
- Stufe III: Versuche mit TE-Messungen (elektrische Methode nach *IEC 60270*) an Modellstäben

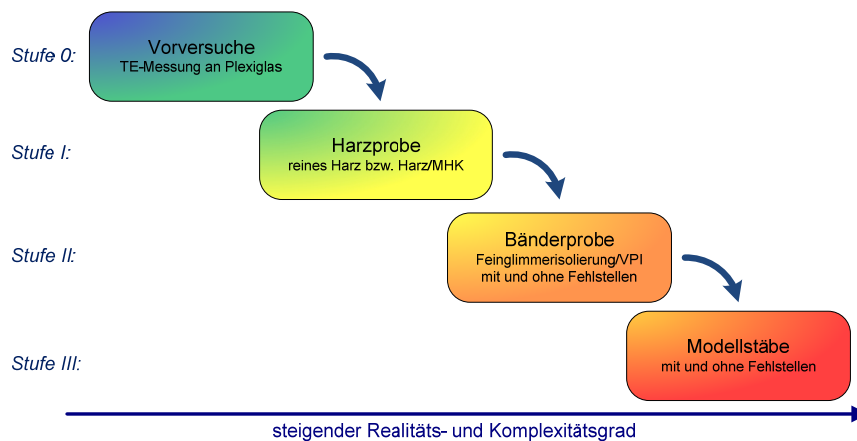


Abb. 5-1: Stufenmodell zur schrittweisen Steigerung des Realitätsgrades

## 5.3 Materialuntersuchungen und Vorversuche

### 5.3.1 Größenfraktionierung und Untersuchungen der Glas-Mikrohohlkugeln

Mikrohohlkugeln aus Glas werden üblicherweise im Sprühtrocknungs- oder Schmelzprozess-Verfahren hergestellt. Die Größenverteilung hängt von einer Vielzahl an Prozessparametern ab und kann nur in groben Bereichen eingestellt werden, da die Zusammenhänge zwischen Prozessbedingungen und Eigenschaften der Mikrohohlkugeln noch nicht vollständig geklärt sind [13].

Für die geplanten Proben wurden Mikrohohlkugeln aus Glas unterschiedlicher Größenfraktionen beschafft. Da die gewünschten Durchmesser nicht von einem einzigen Hersteller bezogen werden konnten, wurden vorfraktionierte Ware vom Typ A und MHK mit Durchmessern von 10-300  $\mu\text{m}$  vom Typ B angekauft. Aus den Mikrosphären des Typ B wurden danach mittels Siebturm (siehe Abb. 5-2) mehrere Größenbereiche extrahiert, von denen drei zur Probenherstellung verwendet wurden (vgl. Tab. 5-1).



Tab. 5-1: Verwendete Mikrohohlkugeln und ausgewählte Eigenschaften

Typ	Firma	Größe	Wandstärke	Gastyp	Gasdruck
A	NSA Ltd.	10-20 $\mu\text{m}$ 40-63 $\mu\text{m}$ 75-106 $\mu\text{m}$	0,5-1 $\mu\text{m}$	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	ca. 1/3 bar*
B	Olan Int. Ltd.	160-200 $\mu\text{m}$ 200-250 $\mu\text{m}$ 250-300 $\mu\text{m}$	1-2 $\mu\text{m}$	Luft oder luftähnliches Gasgemisch	ca. 4/5 bar*

\* ..... Herstellerangabe ohne exakten Wert

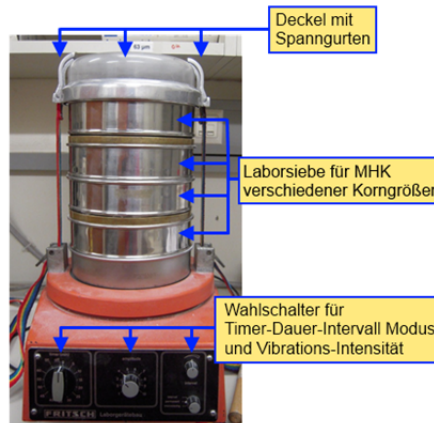


Abb. 5-2: Siebturm zur Selektion der Mikrohohlkugeln nach Korngrößen

Die Vermessung (mikroskopische Analyse) entsprechender Proben der Glas-Mikrohohlkugeln wurde teils am Institut für Hochspannungstechnik (IHS) und teils am PCCL<sup>1</sup> [82, 83] durchgeführt. Zur mikroskopischen Untersuchung der Glas-Mikrohohlkugeln wurden Proben der unterschiedlichen Größen auf einen Glasobjektträger aufgebracht. Die Bestimmung von Außendurchmesser und Wandstärken (siehe Tab. 5-2) erfolgte bei HAW<sup>2</sup> mit der Software *Analysis 5* [82], am IHS kam dazu die Software *MikroCamLab Vers.6.1.4.0* zum Einsatz.

Tab. 5-2: Abmessungen der verwendeten Mikrohohlkugeln

Probenbezeichnung	Durchmesser		Wandstärke
	Mittelwert	Stabw.	
Probe 1 (10 - 20 $\mu\text{m}$ ) [82]	11 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$	0,4 – 1,0 $\mu\text{m}$
Probe 2 (40 - 63 $\mu\text{m}$ ) [82]	48 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$	0,4 – 1,0 $\mu\text{m}$
Probe 3 (75 - 106 $\mu\text{m}$ ) [82]	84 $\mu\text{m}$	9 $\mu\text{m}$	0,4 – 1,0 $\mu\text{m}$
Probe 4 (160 - 200 $\mu\text{m}$ )	151 $\mu\text{m}$	39 $\mu\text{m}$	1-2 $\mu\text{m}$ (lt. Distributor)*
Probe 5 (200 - 250 $\mu\text{m}$ )	198 $\mu\text{m}$	42 $\mu\text{m}$	1-2 $\mu\text{m}$ (lt. Distributor)*
Probe 6 (250 - 300 $\mu\text{m}$ )	243 $\mu\text{m}$	67 $\mu\text{m}$	1-2 $\mu\text{m}$ (lt. Distributor)*

\* ..... Die Überprüfung am Institut war aufgrund der schaumartigen Oberfläche nicht möglich

<sup>1</sup> Projektpartner Polymer Competence Center Leoben GmbH

<sup>2</sup> Projektpartner Andritz Hydro GmbH Weiz

Neben den Basiseigenschaften Durchmesser und Wandstärke wurde auch die Struktur der Glaswand betrachtet (siehe Abb. 5-3 und Abb. 5-4). Bei den mikroskopischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Mikrohohlkugeln vom Typ B eine andere Oberflächenstruktur aufwiesen, als jene vom Typ A. Bei MHK vom Typ B scheint die Glaswand in einer als schaumartig beschreibbaren Form vorzuliegen, wobei hierbei auch Unterschiede der verschiedenen Größenfraktionen zu erkennen waren. Je größer der Durchmesser der Mikrohohlkugeln, desto schaumartiger scheint die Wandstruktur zu sein. Die MHK vom Typ A hingegen weisen eine kompakte und glatte Glasoberfläche auf.

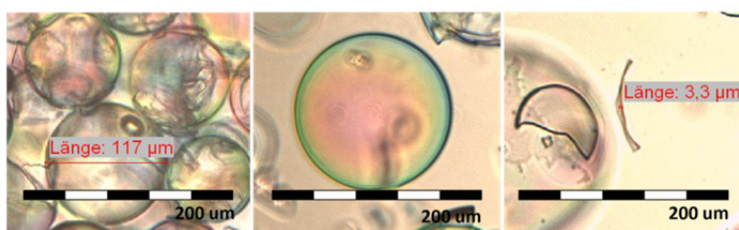


Abb. 5-3: Mikroskopische Aufnahmen einer Typ A MHK-Probe (75-106 µm)

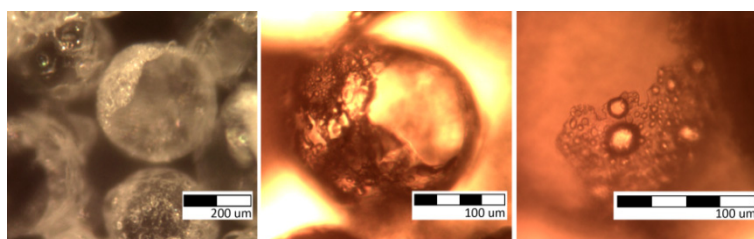


Abb. 5-4: Mikroskopische Aufnahmen einer Typ B MHK-Probe (200-250 µm)

Eines der ursprünglichen Ziele in Bezug auf die Probenfertigung war es, Bänderproben mit eingebetteten Glas-Mikrohohlkugeln zu fertigen. Da der Fertigungsprozess der Bänderproben auch Beanspruchungen in höheren Druck- und Temperaturbereichen mit sich bringt, wurden die zur Auswahl stehenden MHK (Typ B) den zu erwartenden Drücken und Temperaturen ausgesetzt um ihre Stabilität diesbezüglich zu überprüfen. Diese Untersuchungen wurden bei HAW und am PCCL ausgeführt (siehe Tab. 5-3). Der MHK-Test bei HAW ergab, dass die MHK sowohl das Vakuum (ca. 20 mbar) als auch eine Temperatur von 60 °C (in Kombination - Vakuum und 60 °C bei ca. 24 Stunden) ohne nennenswerte Beschädigungen überstanden haben. Bei den Untersuchungen am PCCL wurde für eine Dauer von vier Stunden ein Druck von 6 bar angelegt, ohne dass Schädigungen in großem Maße auftraten (siehe Abb. 5-5).

Tab. 5-3: Beanspruchungen der Mikrohohlkugeln vom Typ B

Prüfstelle	Druck	Temperatur	Dauer
HAW	20 mbar	60°C	24 h
PCCL	6 bar	-	4 h

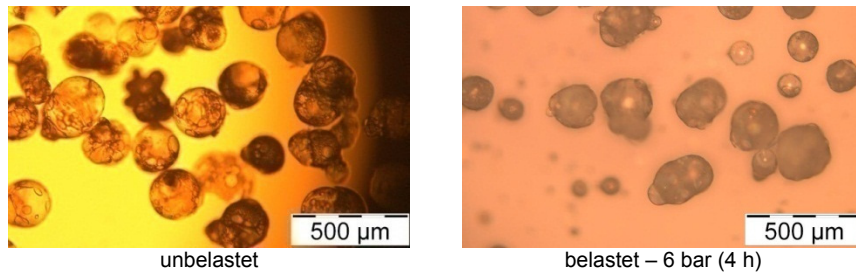


Abb. 5-5: Mikroskopische Aufnahmen eines MHK Samples (200-250 µm) [81]

### 5.3.2 Permittivität ausgewählter Materialien

Für ausgewählte Materialien, die bei der Fertigung der Proben zum Einsatz kamen, wurde die Permittivität in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Dazu wurden die Materialproben aus ESG-Glas, Borofloat-Glas, Epoxidharz EPO Thin und Feinglimmerbandisulationsmaterial mittels einer TETTEX Messzelle Typ 2904 für feste Isolierstoffe sowie dem Kapazitäts- bzw. Verlustfaktor-Messsystem LDIC LDV-6 untersucht (siehe Abb. 5-7) und anschließend die Permittivität berechnet. Im aufgenommenen Temperaturbereich (25°C bis 90°C) wurden jeweils 7 bis 10 Messpunkte festgehalten, wobei aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Experimenten vor allem auf die Werte bei 22°C, 35°C, 50°C und 85°C geachtet wurde. Die entsprechenden Ergebnisse für die Permittivität der betrachteten Materialien sind für diese vier Temperaturwerte in Tab. 5-4 eingetragen und in Abb. 5-6 dargestellt.

Tab. 5-4: Temperaturabhängigkeit der relativen Permittivität

Material	$\epsilon_r$ @ 22°C	$\epsilon_r$ @ 35°C	$\epsilon_r$ @ 50°C	$\epsilon_r$ @ 85°C
EPO Thin Harz	3,8	4	5,7	11,2
ESG Glas	8,5	n.d.*)	n.d.*)	n.d.*)
Borofloat Glas	4,8	4,8	4,9	5,4
Bandisolation	3,9	3,9	4	4,1

\*).....Messungen an ESG-Glas bei höheren Temperaturen waren nicht durchführbar, da die verfügbare Probengröße die Abmessungen der Prü fzelle überstiegen.

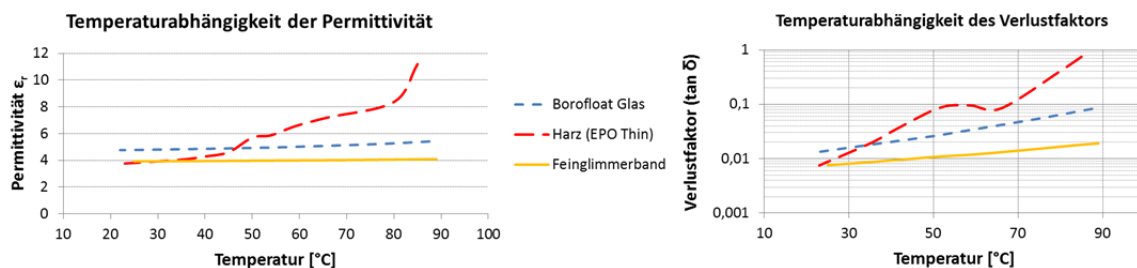
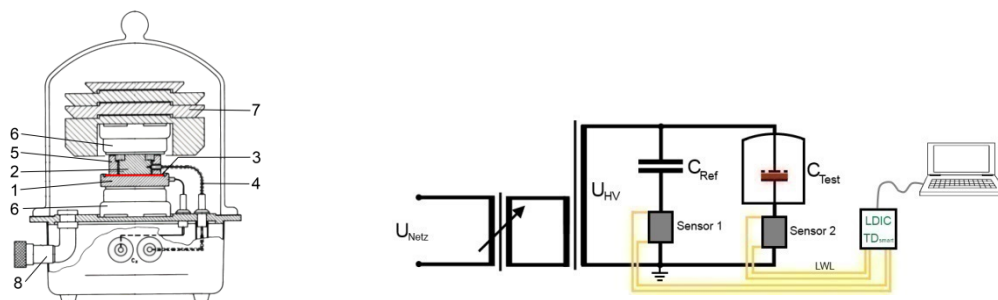


Abb. 5-6: Temperaturabhängigkeit von relativer Permittivität und Verlustfaktor



Messzelle TETTEX 2904:

- 1 ..... HV-Elektrode mit Temperaturfühler
- 2 ..... Messelektrode mit Temperaturfühler
- 3 ..... Messobjekt
- 4 ..... Anschluss für Messelektrode
- 5 ..... Schutzring
- 6 ..... Heizung
- 7 ..... Auflagegewichte
- 8 ..... Vakuumanschluss

LDIC LDV-6 C/tan  $\delta$ -Messsystem:

- $U_{\text{Netz}}$  ... Versorgungsspannung (220 V)
- $U_{\text{HV}}$  ... Hochspannung (1-2 kV)
- $C_{\text{Ref}}$  ..... Normalkondensator (1000 pF)
- Sensor 1 ..... Referenz-Sensor
- $C_{\text{TEST}}$  .. Testobjekt
- Sensor 2 ..... Messsensor
- LWL ... Lichtwellenleiter
- LDIC TD<sub>smart</sub> .. USB-Messeinheit

Abb. 5-7: Messzelle nach [99] und Messbrückenschaltung zur Kapazitäts- und Verlustfaktor-Bestimmung an festen Isolierstoffen

### 5.3.3 Vorversuche mit Teilentladungsmessungen an Plexiglas-Proben

Im Rahmen von Vorversuchen wurden TE-Messungen (verwendetes Mess-System LDIC LDS-6) an Plexiglas-Scheiben (Durchmesser 150 mm, Dicke 1,5/2/3,5 mm) durchgeführt, welche mit verschiedenen Fehlstellen versehen waren. Den auf diese Weise provozierten Teilentladungen konnten – gewissermaßen als Referenz für spätere Untersuchungen – prinzipielle Charakteristika in Form von phasenaufgelösten TE-Fingerprints zugeordnet werden. Abb. 5-8 zeigt das Prinzip einer mit 25 Bohrlochern versehenen Plexiglasprobe, wie sie für die Versuche vorbereitet wurde.

Folgende Versuche wurden an Plexiglasscheiben durchgeführt:

- TE-Messung an klaren unversehrten Scheiben (1,5 mm bzw. 3,5 mm)
- TE-Messung an einer unversehrten Scheibe (1,5 mm) mit aufgelegter Kopierfolie
- TE-Messung an unversehrten bzw. mit Bohrlochern versehenen Scheiben jeweils mit aufgeklebter Buchfolie (2 mm bzw. 3,5 mm)

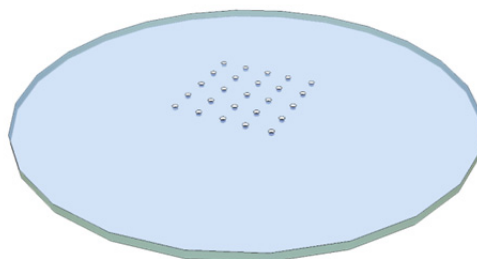
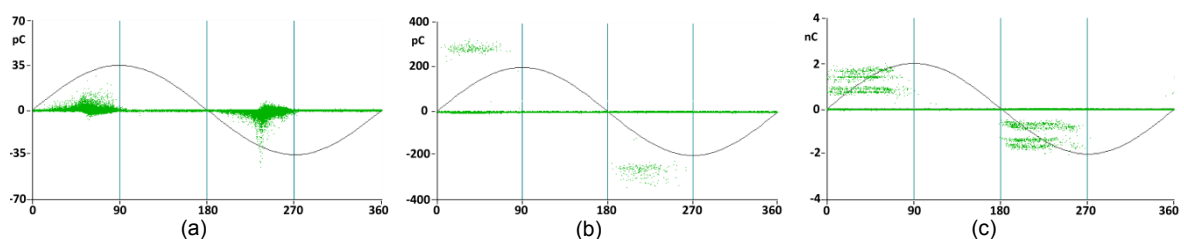


Abb. 5-8: Skizze einer Plexiglasprobe mit 25 Bohrungen

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse der Vorversuche mit Plexiglasproben dargelegt, welche auch in Tab. 5-5 eingetragen sind. Bei unversehrter 1,5 mm Scheibe lag die Einsetzfeldstärke bei ca. 21 kV/mm, bei unversehrter 1,5 mm Scheibe mit aufgelegter Kopierfolie kam es erwartungsgemäß zu Teilentladungen (Grenzschicht Scheibe-Folie, siehe Abb. 5-9.a), was sich in der etwa halbierten Einsetzfeldstärke von etwa 10,4 kV/mm widerspiegelte. Während bei unversehrter 2 mm Scheibe mit aufgeklebter Buchfolie bei 21,1 kV noch keine nennenswerten TE feststellbar waren, wies die mit Bohrlöchern versehene 2 mm Scheibe bereits bei 5,8 kV deutliche TE-Aktivität auf (siehe Abb. 5-9.b). Versuche mit der 3,5 mm Scheibe ergaben für die unversehrte Scheibe mit und ohne aufgeklebte Kopierfolie TE-Freiheit bis ca. 21 kV. Während des Versuchs mit der mit Bohrlöchern versehenen 3,5 mm Scheibe mit aufgeklebter Buchfolie kam es bei etwa 11,2 kV zum TE-Einsatz (siehe Abb. 5-9.c). Mehrmalige Wiederholungen ergaben jeweils ähnliche Werte (+/- 0,2 kV).

Tab. 5-5: Ergebnisse der Vorversuche an Plexiglasscheiben

Probe		$U_{\text{ein}}$	TE-Pegel
1,5 mm	Unversehrt	$U_{\text{ein}}$ bei 21,1 kV	~5 pC
	unversehrt, aufgelegte Kopierfolie	$U_{\text{ein}}$ bei 10,4 kV	20 – 80 pC
2,0 mm	unversehrt, aufgeklebte Buchfolie	TE-frei bis ~21 kV (durch Aufbau begrenzt)	-
	gebohrt, aufgeklebte Buchfolie	$U_{\text{ein}}$ bei 5,8 kV	~300 pC
3,5 mm	Unversehrt	TE-frei bis ~21 kV (durch Aufbau begrenzt)	-
	unversehrt, aufgeklebte Buchfolie	TE-frei bis ~21 kV (durch Aufbau begrenzt)	-
	gebohrt, aufgeklebte Buchfolie	$U_{\text{ein}}$ bei 11,2 kV	~1,8 nC



- a) ..... unversehrte 1,5 mm Scheibe mit aufgelegter Kopierfolie
- b) ..... 2 mm Scheibe mit 25 Bohrlöchern mit aufgeklebter Buchfolie
- c) ..... 3,5 mm Scheibe mit 25 Bohrlöchern mit aufgeklebter Buchfolie

Abb. 5-9: Charakteristische TE-Muster aus den Vorversuchen an Plexiglasproben

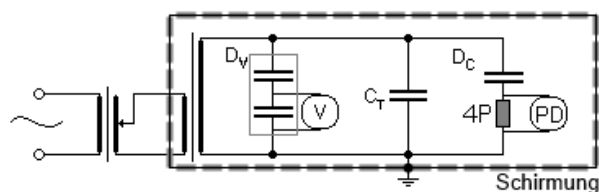
## 5.4 Teilentladungsverhalten von Harzproben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln

Um das isolierte Problem eines Mikrohohlraumes näher zu betrachten, wurde in Stufe I das TE-Verhalten von Harzproben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln untersucht. Dabei wurde dem Ansatz entsprechend versucht, Fehlstellen definierter Eigenschaften in einem homogenen Isoliermedium zu platzieren. Bezüglich der Probenpräparation wurde überlegt, entweder Lufteinschlüsse mittels Injektionsspritzen zu erzeugen oder gasgefüllte MHK aus Glas in einen Harzkörper einzubringen. Da die Auswirkungen der Aushärtung der Harzprobe bzw. des dabei auftretenden Materialschrumpfs auf injizierte Luftbläschen nicht einschätzbar waren, wurde die Variante der gasgefüllten Glas-Mikrohohlkugeln gewählt. Eine besondere Herausforderung lag dabei in der Beschaffung wohldefinierter Mikrohohlkugeln aus Glas, wie bereits in Abschnitt 5.3.1 erwähnt wurde.

Nachfolgend werden die wichtigsten Punkte zu Versuchsaufbau und Messtechnik sowie zur Probenentwicklung erwähnt. Anschließend wird die eigentliche Versuchsdurchführung erläutert und die wesentlichen Ergebnisse dargelegt.

### 5.4.1 Versuchsaufbau, Messschaltung, Messgeräte und Messverfahren

Die TE-Messungen an den Plättchenproben wurden in speziell geschirmten Laboratorien (200 kV-Labor mit Kupferschirm bzw. TE-Messzelle) durchgeführt. Aufgrund der Vorversuche und entsprechender Hinweise aus der Literatur wurden sehr niedrige TE-Pegel erwartet, welche einen möglichst niedrigen Grundstörspegel erforderlich machten. Das Prinzip des Prüfkreises, wie er in der TE-Messzelle umgesetzt wurde, ist in Abb. 5-10 dargestellt. Für die Versuche im 200 kV Labor mit Kupferschirm besteht der wesentliche Unterschied darin, dass sich dort auch der Stelltransformator innerhalb des geschirmten Bereichs befand. Daneben sind unterschiedliche Bauteilwerte des Spannungsteilers (1:1000) und der Koppelkapazität (600 pF) zu nennen. In beiden Laboratorien wurden zusätzlich Netzfilter eingesetzt, um äußere Störeinflüsse gering zu halten.



$C_T$  ..... Prüfgefäß mit Testobjekt

$D_C$  ..... Koppelkapazität (1200 pF)

4P ..... Ankoppelvierpol

PD ..... Teilentladungsmesssystem am Ankoppelvierpol (4P)

$D_V$  ..... Spannungsteiler (1:10000)

V ..... Spannungsmesssystem an Spannungsteiler

Abb. 5-10: Schaltung für TE-Messungen an Plättchenproben in der TE-Messzelle

#### 5.4.1.1 Teilentladungsdetektion

Die Detektion und Auswertung der Teilentladungen erfolgte bei diesen Versuchen mittels konventioneller elektrischer Methode nach IEC 60270 mit einem Omicron System (Hardware MPD

600 an MCU 502, Software Ver. 1.5.3). Der MPD 600 Sensor, welcher dabei in Serie zur Kopplkapazität in den Prüfkreis integriert wurde, ist mittels LWL an der Kontroll- und Auswerteeinheit MCU 502 angeschlossen. Aus den möglichen Messschaltungen (vgl. Abschnitt 2.5.3) wurde Variante I gewählt, obwohl diese nicht die empfindlichste Variante darstellt, da das verwendete beheizbare Prüfgefäß ein geerdetes Gehäuse aufwies. Zudem konnte die Gefahr eines Durch- oder Überschlags nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

#### 5.4.1.2 Spannungsmessung

Die Spannungsmessung wurde durch das Abgreifen der Spannung an einem kapazitiven Teiler (Pressgaskondensator plus Unterkapazität, 1:10000) in Verbindung mit einem Digitalmultimeter (Fluke 187) umgesetzt.

#### 5.4.1.3 Beheizung - Temperaturmessung

Bei dem verwendeten Prüfgefäß handelte es sich um einen Einkochautomat mit integrierter regelbarer Beheizung. Die Temperaturmessung selbst erfolgte über zwei PT 100 Messfühler, welche in unterschiedlichen Höhen montiert die Öltemperatur aufnahmen. Zur Anzeige und Aufzeichnung der Temperaturdaten wurde ein digitaler Signalrekorder (Yokogawa DX1006) eingesetzt.

#### 5.4.2 Probenentwicklung

Zur Dimensionierung der Harzprobe wurden Feldsimulationen mit den Softwarepaketen *Quickfield 5.2* bzw. *Elecnet 7.3* durchgeführt. Von besonderem Interesse hierbei war die Elektrodenform in Verbindung mit dem zu wählenden Elektrodenabstand zur Schaffung einer geeigneten Feldkonfiguration. Ursprünglich wurde eine würfelförmige Probenform mit eingebetteten Kugelelektroden als geeignet befunden (beispielhafte Feldsimulation siehe Abb. 5-11.a). Aufgrund der Einschränkungen durch das Fertigungsverfahren wurden schließlich Stabelektroden eingesetzt (beispielhafte Feldsimulation siehe Abb. 5-11.b), wie dies weiter unten beschrieben wird.



a) ..... Harzprobe mit Kugelelektrode ( $\varnothing$  15 mm)

b) ..... Plättchenprobe ( $\varnothing$  20 mm) mit Stabelektroden ( $\varnothing$  10 mm)

Abb. 5-11: Feldsimulationen der Harzproben-Varianten mit eingebetteten MHK

Die Simulation für einen einzelnen Hohlraum zwischen den Elektroden ergab für beide Probenvarianten, wie erwartet, einen Sprung der Feldstärke um etwa ein Drittel nach oben. Gleichzeitig

kann man aus dem Diagramm (Abb. 5-12) erkennen, dass die Verteilung im Inneren des Hohlraumes annähernd konstant ist (die Glaswand wurde hier nicht berücksichtigt).

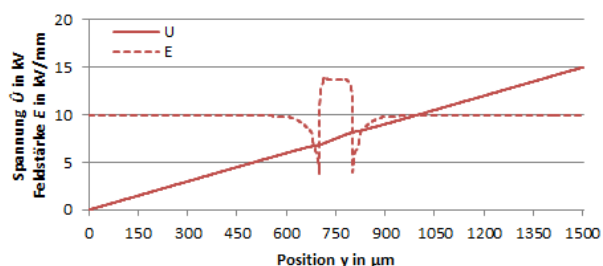


Abb. 5-12: Plättchenprobe mit einzelner MHK ( $d=50 \mu\text{m}$ ), Simulation @  $\hat{U} = 15 \text{ kV}$

Anhand der verfügbaren Informationen zu möglichen Fertigungsverfahren wurde von zwei grundsätzlichen Möglichkeiten zur Herstellung von Harzproben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln ausgegangen:

- Aus einer ausgehärteten Harz-MHK-Mischung Bereiche mit einer oder mehreren Mikrohohlkugeln entnehmen, in einer neuen Gießform positionieren und erneut vergießen
- Ein Harz-MHK-Gemisch anrühren, für homogene Verteilung der MHK sorgen und anschließend vergießen

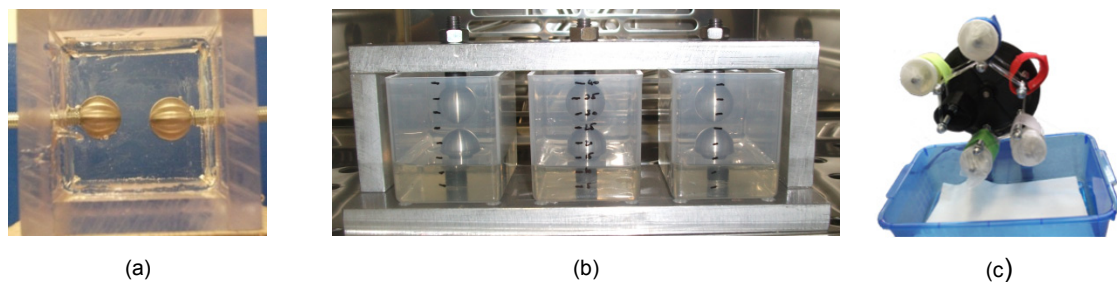
Variante a stellt einen Ansatz dar, der häufig gewählt wird. Dabei müssen allerdings mögliche innere Grenzschichten zwischen den Harzbereichen in Kauf genommen werden. Variante b birgt einige Herausforderungen (z.B. MHK-Verteilung oder die Bläschenbildung), wurde aber für die hier beschriebenen Untersuchungen gewählt.

Im Rahmen der Probenentwicklung mussten intensive Recherchen durchgeführt werden, da es sich nicht um Standardapplikationen handelte und der Aufbau der geplanten Prüflinge spezielle Anforderungen an die einzusetzenden Materialien stellte. Besondere Herausforderung bedeutete dabei die Beschaffung eines entsprechenden Harzsystems, geeigneter Mikrohohlkugeln, passender Gießformen und der notwendigen Elektroden. Als Harzsystem wurde ein kalthärtendes Epoxidharz (Bühler EPO Thin) gewählt, welches sich auch zum Vergießen metallener Teile wie z.B. Elektroden eignet. Zur Einbettung in die Harzproben wurden Mikrohohlkugeln verschiedener Größenbereiche beschafft (vgl. Abschnitt 5.3.1) und als Elektroden wurden bei den ersten Versuchen Edelstahlkugeln<sup>3</sup> aus Massenfertigung verwendet. Durch die später verwendete Plättchenform musste schließlich auf andere Elektroden zurückgegriffen werden. So fiel die Wahl nach einigen Überlegungen gestützt durch Feldsimulationen auf Stabelektroden aus Messing mit definierten Radien.

<sup>3</sup> Die Eignung der Kugeln als Hochspannungselektrode wurde von *Imamovic (2011)* [44] bereits nachgewiesen.



Als Gießform haben sich offene Behältnisse für reine Harzproben als geeignet erwiesen. Nach ersten Versuchen mit Plexiglasformen wurde schließlich auf Formen aus Polypropylen (PP)<sup>4</sup> zurückgegriffen. PP hat den Vorteil, dass die ausgehärteten Harzproben zerstörungsfrei aus den Formen gelöst werden konnten. Eine selbst konstruierte Vorrichtung erlaubte das schichtweise<sup>5</sup> Vergießen von jeweils 3 Proben mit eingebetteten Elektroden gleichzeitig (Abb. 5-13.b). Für Harzproben mit eingebetteten MHK mussten verschließbare Gießformen verwendet werden, da es trotz verschiedener Dispergieradditive nicht gelang, das Agglomerieren und Aufschwimmen der MHK in ruhenden Formen zu verhindern. Es wurde eine Vorrichtung konstruiert, welche für bis zu 6 geschlossene Behältnisse das langsam rotierende (ca. 8 U/min) Aushärten der Harz-MHK-Mischung ermöglichte (Abb. 5-13.c). Der erste Ansatz mit Filmdosen und eingebetteten Elektroden erbrachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da sich stets unterschiedlich große Gasblasen im Harz bildeten. Wesentlich bessere Resultate konnte mit Spritzenmaterial aus PP erzielt werden. Das vorbereitete Harz-Härter-MHK-Gemisch mit guter Verteilung der Mikrohohlkugeln wurde in die Spritzen aufgezogen, welche anschließend mit Teflonband abgedichtet und an der Aushärtevorrichtung montiert wurden. Auf diese Weise konnten geeignete Harzblöcke mit homogener MHK-Verteilung gefertigt werden. Das so gefertigte zylindrische Material wurde danach in dünne Plättchen geschnitten, die einzelnen Plättchen schließlich geschliffen, poliert und katalogisiert. Nachteilig bei dieser Probenvariante war, dass die Elektroden nicht mitvergossen werden konnten, so mussten die Plättchenproben im Rahmen der Versuche zwischen geeignete Elektroden geklemmt werden, wie dies in Abschnitt 5.4.3 beschrieben wird.



a) ..... Erster Prüfling in Plexiglasform      b) ..... Gießvorrichtung für reine Harzproben  
 c) ..... Konstruktion zur rotierenden Aushärtung der Harzproben mit Mikrohohlkugeln

Abb. 5-13: Erste gegossene Prüflinge, Gießformen und Aushärtekonstruktionen

Das Schneiden der Harz/MHK-Zylinder in ca. 1,5 mm dicke Harzplättchen mit einer Niedertouren-Diamantsäge (*Bühler Isomet*, siehe Abb. 5-14.a und b) in Plättchen benötigte je Plättchen zwischen eineinhalb und drei Tagen, die Zeit für Schleif- und Polierarbeiten mit dem *Disc Polis-*

<sup>4</sup> Durch die Verwendung von PP konnte auf das bei metallenen Gießformen nötige Trennmittel verzichtet werden.

<sup>5</sup> Es wurden jeweils Schichthöhen von etwa 5-10 mm gegossen und nach dem „Angelieren“ mit der nächsten Harzschicht fortgefahren, da es andernfalls immer wieder zu Bläschenbildung kam.

her DP 9 (siehe Abb. 5-14.c) betrug etwa 20 Minuten pro Probe. Nach Abschluss der äußerst zeitintensiven Fertigungsphase standen 15 Probenserien mit insgesamt knapp 100 Einzelproben für die Versuche zur Verfügung (fertige Plättchenprobe siehe Abb. 5-14.d). Um zusätzlich zum Einfluss der Durchmesser der Mikrohohlkugeln gegebenenfalls auch Auswirkungen des Probendurchmessers (d.h. Kriechweglänge) zu bestimmen, wurden zum Teil auch Plättchen-Proben mit einem vergrößerten Durchmesser von 30 mm gefertigt. Neben den Plättchenproben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln wurden zu Vergleichszwecken auch einige Reinharz-Proben ohne MHK gefertigt.



Abb. 5-14: Probenfertigung - Schneiden und Polieren der Plättchenproben

### 5.4.3 Versuchsdurchführung

Im Rahmen der Versuche wurden die Plättchenproben in einem Isolierölbad einem Spannungssteigerungsversuch unterzogen. Bei konstanter Temperatur wurde die Spannung in Stufen von etwa 1kV bis zum Teilentladungseinsatz erhöht. Nach einer weiteren Steigerung der Spannung um 5-10% wurde diese wieder verringert bis die Teilentladungen erloschen. Die TE-Messung wurde mit einem konventionellen, elektrischen TE-System (nach IEC 60270) durchgeführt. Für die Versuche bei Raumtemperatur (22°C) kam ein vorhandenes Ölprüfgefäß zum Einsatz, für jene Experimente bei höheren Temperaturen (32°C, 50°C und 85°C) wurde auf ein artfremdes beheizbares Gefäß (Einkochautomat) zurückgegriffen<sup>6</sup>. Die höchste Temperatur von 85°C ergab sich durch das Probenmaterial (Epoxidharz EPO Thin), welches mit zunehmender Temperatur seine mechanische Festigkeit zu verlieren begann.

Aus zeitlichen Gründen war es nicht möglich den gesamten Probenumfang bei allen Temperaturstufen zu untersuchen, daher wurde nach den Experimenten bei Raumtemperatur mit allen Proben nur eine Auswahl an Plättchenproben bei höheren Temperaturen untersucht (vgl. Tab. 5-6). Bei den hier und in *Kapitel 7 Diskussion und Interpretation* folgenden Auswertungen werden daher in erster Linie jene Proben berücksichtigt, welche bei 22°C, 50°C und 85 °C untersucht wurden.

---

<sup>6</sup> Die Eignung des Prüfgefäßes für höhere Temperaturen in Bezug auf die Heizhysterese, den Temperaturgradienten sowie hinsichtlich des Einflusses auf die TE-Messung wurde in Vorversuchen überprüft und bestätigt.

Tab. 5-6: Untersuchte Probenserien – Plättchenproben mit Mikrohohlkugeln

Proben-serie	Typ	MHK ( $\mu\text{m}$ -Bereich)	$\varnothing$ (mm)	Temperaturstufen*			
				22°C	32°C	50°C	85°C
A-E	Typ A	75-106 $\mu\text{m}$	20	■	■	■	■
G***	Typ A	75-106 $\mu\text{m}$	20	■		■	■
H**	Typ A	75-106 $\mu\text{m}$	30	■			
J	Typ B	250-300 $\mu\text{m}$	20	■		■	■
K**	Typ B	250-300 $\mu\text{m}$	30	■			
L**	Typ B	200-250 $\mu\text{m}$	20	■			
M	Typ B	200-250 $\mu\text{m}$	20	■		■	■
N**	Typ B	200-250 $\mu\text{m}$	30	■			
O	Typ B	160-200 $\mu\text{m}$	20	■		■	■
P**	Typ B	160-200 $\mu\text{m}$	30	■			
Q**	Typ B	160-200 $\mu\text{m}$	20	■			

\* ..... farbige Kästchen bedeuten, dass die Probe bei der entsprechenden Temperatur untersucht wurde

\*\* ..... diese Proben wurden aus zeitlichen Gründen nicht bei höheren Temperaturen untersucht

\*\*\* ..... Probenserie G weist neben den MHK auch Gasbläschen mit einem Durchmesser von ca. 300  $\mu\text{m}$  auf, welche sich während des Gieß- bzw. Aushärtprozesses gebildet haben

#### 5.4.4 Ergebnisse und Auswertemethodik

In den Versuchen wurden für jede Probe die Einsetzspannung und der TE-Pegel sowie die Aussetzspannung je Temperaturstufe bestimmt. Gemäß der in Abschnitt 2.4.2 angegebenen Zusammenhänge nach Gleichung (2.11) bis (2.14) wurde aus den gemessenen Spannungswerten die mittlere Feldstärke  $E_{\text{ein}}$  im Probenmaterial sowie die Feldstärke im Hohlraum  $E_{\text{MHK}}$  ermittelt. Auf diese Weise wurde aus fünf Messwiederholungen das charakteristische Verhalten jeder Einzelprobe bestimmt. Die Mittelung über alle Proben einer Serie<sup>7</sup> ergab die Charakteristik einer Probenserie. So ergab sich für die Teilentladungs-Ein- bzw. Aussetzfeldstärke jeder Probenserie ein Kurvenpaar ähnlichen Verhaltens, wie dies in Abb. 5-15 im linken Diagramm für alle Serien mit MHK vom Typ A und im rechten Diagramm für all jene Probenserien mit MHK vom Typ B zusammengefasst dargestellt ist. Während bei der Betrachtung der Ergebnisse die Temperaturabhängigkeit der Permittivität des Harzes Berücksichtigung fand, wurde das Grundfeld im Probenmaterial gemäß dem Zusammenhang nach Gleichung (2.11) als homogen und ungestört angenommen und der Einfluss der Glaswand der Mikrohöhlräume vernachlässigt.

Verbesserungen der Ergebnisse hinsichtlich Genauigkeit und Streuung könnten durch kleinere Spannungsstufen und höhere Probenanzahl erreicht werden. Längere Wartezeiten sind nur bedingt sinnvoll, wenn man unter Berücksichtigung der Volumen-Zeit-Gesetze von einem möglichen

<sup>7</sup> Eine Probenserie umfasst alle Plättchenproben, die aus demselben Harzkörper geschnitten wurden. Eigenschaften wie MHK-Größe und Verteilung sowie die Vernetzung des Polymers können daher als ident angesehen werden.

Zündverzug von bis zu  $10^6$  Sekunden (ca. 277 Stunden) [47, 67] ausgeht. Die Größenbereiche der Mikrohohlkugeln enger zu fassen bzw. die Siebresultate zur MHK-Selektion zu verfeinern würde die Aussagekraft hinsichtlich der betrachteten Hohlraumdurchmesser erhöhen. Die Verwendung unterschiedlicher Typen von Mikrohohlkugeln wirkt sich erschwerend auf die Interpretation der Ergebnisse aus und sollte bei zukünftigen Untersuchungen vermieden werden.

#### 5.4.4.1 Einfluss der Probenserien (MHK Typen) auf die Resultate

Für Probenserien A-E mit MHK vom Typ A (75-106  $\mu\text{m}$ ) schienen die jeweils aufgenommenen Werte bei steigender Temperatur (22°C, 32°C und 50°C) zunächst leicht anzusteigen (siehe Abb. 5-15 links). Aufgrund der bei den Versuchen ermittelten Standardabweichung kann dieser Anstieg allerdings als statistisch insignifikant und daher als beinahe konstant gewertet werden. Erst bei einer weiteren Erhöhung der Temperatur konnten deutlich geringere Werte für das Ein- bzw. Aussetzen der detektierten Teilentladungen festgestellt werden. Der Unterschied zwischen TE-Ein- und TE-Aussatzfeldstärke scheint mit zunehmender Temperatur zu sinken. Bei einer Temperatur von 85°C war eine deutlich geringere Streuung der Ergebnisse zu bemerken.

Die Probenserie G (mit MHK vom Typ A) stellte wie erwähnt eine Besonderheit dar, da sie neben den bewusst eingebrachten Mikrohohlkugeln aus Glas auch Hohlräume mit Durchmessern von etwa 300  $\mu\text{m}$  aufwies, welche sich im Zuge der Gieß- und Aushärteprozesse bildeten. Trotz dieses Unterschiedes konnte bei 22°C ein ähnliches Verhalten wie bei den Probenserien A-E festgestellt werden (siehe Abb. 5-15 links). Mit steigender Temperatur änderte sich die Charakteristik jedoch und ähnelte zunehmend jenen Proben mit MHK vom Typ B (vgl. Abb. 5-20 bis Abb. 5-22).

Bei den Probenserien J, M und O mit MHK vom Typ B verschiedener Größenbereiche konnte im betrachteten Temperaturbereich keine Abhängigkeit des TE-Verhaltens von der Temperatur festgestellt werden. Allenfalls ließe sich eine Tendenz zu niedrigeren Feldstärkewerten bei höheren Temperaturen vermuten, was jedoch aufgrund der gegebenen Streuung der Resultate nicht als signifikant angenommen werden kann. Überdies scheinen bei diesen Proben größere Durchmesser auch höhere Feldstärkewerte zu bewirken, was gleichermaßen für die Ein- und Aussetzbedingung gilt (siehe Tab. 5-7 bzw. Abb. 5-15 rechts).

Tab. 5-7: Mittlere TE-Einsetzfeldstärke im Probenmaterial ( $E_{\text{ein}}$ ) in kV/mm

	Typ A (A-E)	Typ A (G)	Typ B (O)	Typ B (M)	Typ B (J)
$T = 22^\circ\text{C}$	17,2+/-3,5	17,8+/-4,6	4,3+/-0,6	4,6+/-0,7	7,3+/-2,0
$T = 50^\circ\text{C}$	16,0+/-3,9	10,2+/-2,2	4,5+/-0,5	5,1+/-0,6	7,1+/-2,2
$T = 85^\circ\text{C}$	10,0+/-1,5	5,6+/-1,9	3,4+/-0,4	3,6+/-0,4	5,1+/-1,7

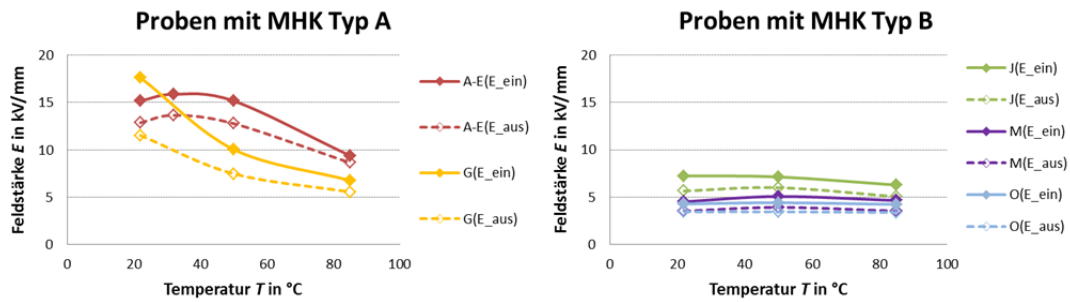


Abb. 5-15: Resultat nach Probenserien für 22-85°C – links: Probenserie A-E und G (MHK Typ A), rechts: Probenserien J, M und O (MHK Typ B)<sup>8</sup>

#### 5.4.4.2 Einfluss der Hohlraumgröße auf die Resultate

Betrachtet man die Ergebnisse nach der Hohlraumgröße, so kann hinsichtlich der beiden Mikro-hohlkugeltypen kein einheitliches Bild erkannt werden. Die Tendenz höherer Einsetzfeldstärken bei größeren Durchmessern, wie sie bei MHK vom Typ B beobachtet werden kann, steht im Gegensatz zu den vergleichsweise sehr hohen Feldstärkewerten bei Proben mit deutlich kleineren MHK vom Typ A (vgl. Abb. 5-16).

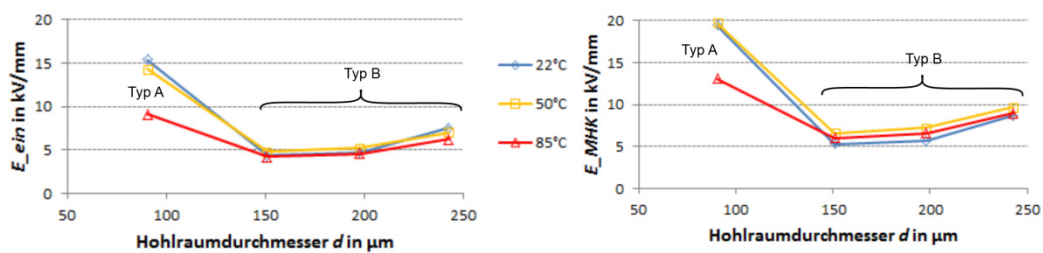


Abb. 5-16: Grundfeld  $E_{ein}$  bzw. Feldstärke im Hohlraum nach MHK-Durchmesser<sup>9</sup>

In Hinblick auf die gemessene Ladung (siehe Abb. 5-17) ergibt sich hinsichtlich der Hohlraumgröße eher ein einheitliches Bild. Je größer der MHK-Durchmesser, desto höhere Werte ergaben sich für die scheinbare Ladung  $Q_{iec}$  bzw. ihren Spitzenwert  $Q_{peak}$ . Lediglich die Probenserie J mit MHK der Größenordnung von ca. 250 µm zeigt diesbezüglich abweichende Ergebnisse. Die TE-Fingerprints hatten für Proben mit MHK vom Typ A meist die in Abb. 5-18 links dargestellte Form mit typischerweise  $Q_{iec} = 1-5$  pC, Proben mit MHK vom Typ B zeigten meist das in Abb. 5-18 rechts dargestellte Verhalten. Die Anzahl der Entladungen  $n$  pro Periode, welche sich bei TE-Einsatz ergaben, lag ebenso wie die vom Messsystem ermittelte Entladungsleistung  $P_{TE}$  bei kleineren Durchmessern sehr niedrig und scheint tendenziell mit der MHK-Größe anzusteigen

<sup>8</sup> In Abb. 5-15 sind die Mittelwerte der Feldstärke bei Ein- bzw. Aussetzbedingung eingetragen. Die zugehörige Standardabweichung kann Tab. 5-7 entnommen werden.

<sup>9</sup> In Abb. 5-16, Abb. 5-17 und Abb. 5-19 wurde die Probenserie G nicht berücksichtigt, da aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser der Glas-MHK und der im Zuge der Fertigung entstandenen Hohlräume keine eindeutige Zuordnung getroffen werden kann.

(siehe Abb. 5-19). Ausnahme hierbei stellen wieder die Proben mit den größten Mikrohohlkugeln (ca. 250  $\mu\text{m}$ ) dar, welche wiederum sehr niedrige Werte für  $n/\text{Periode}$  bzw.  $P_{TE}$  zeigten.

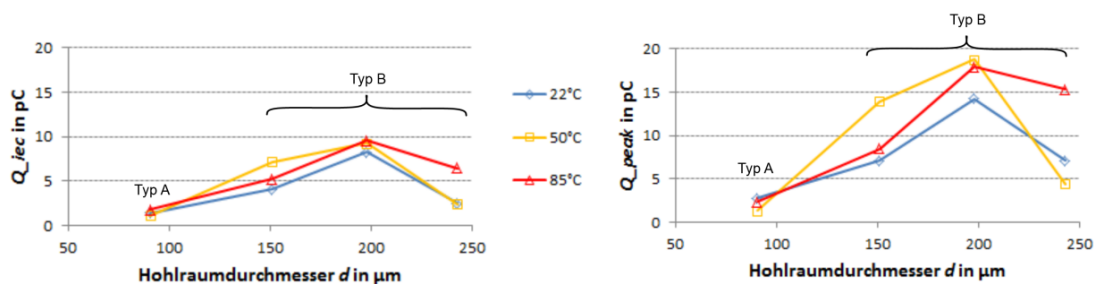


Abb. 5-17: Scheinbare Ladung  $Q_{iec}$  bzw. Spitzenwert  $Q_{peak}$  nach MHK-Größe<sup>9</sup>

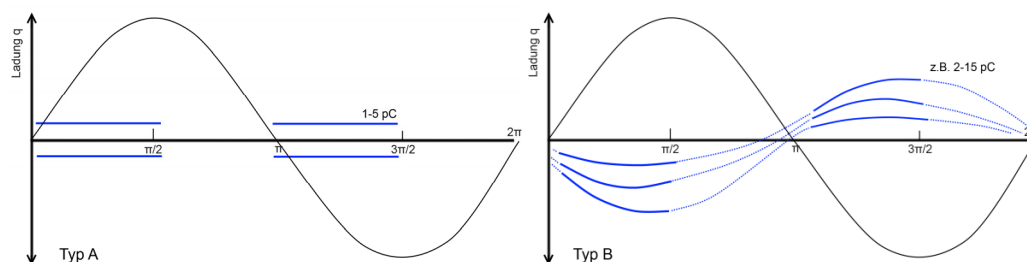


Abb. 5-18: Typische TE-Muster der Plättchenproben mit MHK Typ A bzw. Typ B

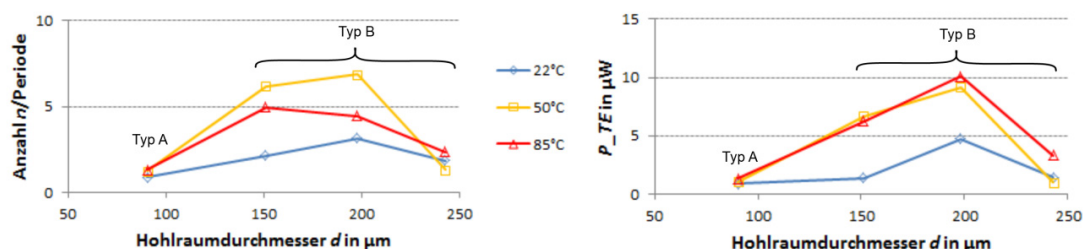


Abb. 5-19: TE- Anzahl  $n/\text{Periode}$  bzw. Entladungsleistung  $P_{TE}$ <sup>9</sup>

Betrachtet man die bei TE-Einsatz im Hohlraum vorliegende Feldstärke aus Tab. 5-8 bzw. anhand der Weibull-Darstellungen in Abb. 5-20 (bei 22°C), Abb. 5-21 (bei 50°C) und Abb. 5-22 (bei 85°C), so zeigt sich für Proben mit MHK vom Typ B ein relativ konstantes, von der Temperatur unabhängiges Verhalten. Weiters zeigt sich, dass bei 22°C alle Proben mit MHK vom Typ A annähernd dieselbe Charakteristik zeigen. Bei Temperaturen von 50°C und 85°C nähern sich die Resultate der Probenserie G jenen der Probenserie J an. Bemerkenswert dabei ist, dass die Durchmesser der im Fertigungsprozess der Probenserie G entstandenen Hohlräume (ca. 300  $\mu\text{m}$ ) jenen der eingebrachten MHK der Probenserie J (ca. 250  $\mu\text{m}$ ) sehr nahe kommen.

Tab. 5-8: TE-Einsatzfeldstärke im Hohlraum ( $E_{MHK}$ ) in  $\text{kV}/\text{mm}$  für 50% Einsatzwahrscheinlichkeit sowie die jeweilige Standardabweichung

	Typ A (A-E)	Typ A (G)	Typ B (O)	Typ B (M)	Typ B (J)
$T = 22^\circ\text{C}$	16,1+/-3,3	16,7+/-4,3	4,1+/-0,6	4,3+/-0,7	6,7+/-1,8
$T = 50^\circ\text{C}$	15,7+/-3,9	9,9+/-2,1	4,3+/-0,5	5,0+/-0,6	7,0+/-2,1
$T = 85^\circ\text{C}$	10,1+/-1,5	6,9+/-2,3	4,3+/-0,6	4,8+/-0,5	6,4+/-1,9

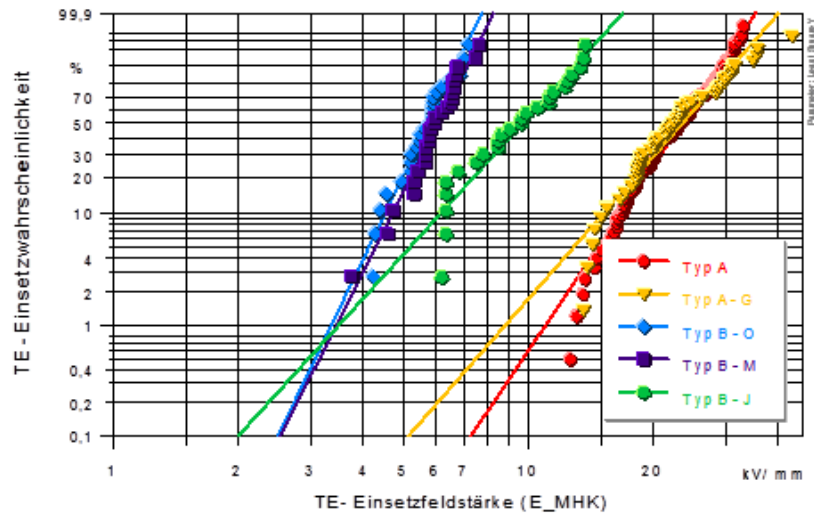


Abb. 5-20: Weibull-Darstellung der Feldstärke  $E_{MHK}$  im Hohlraum bei 22°C

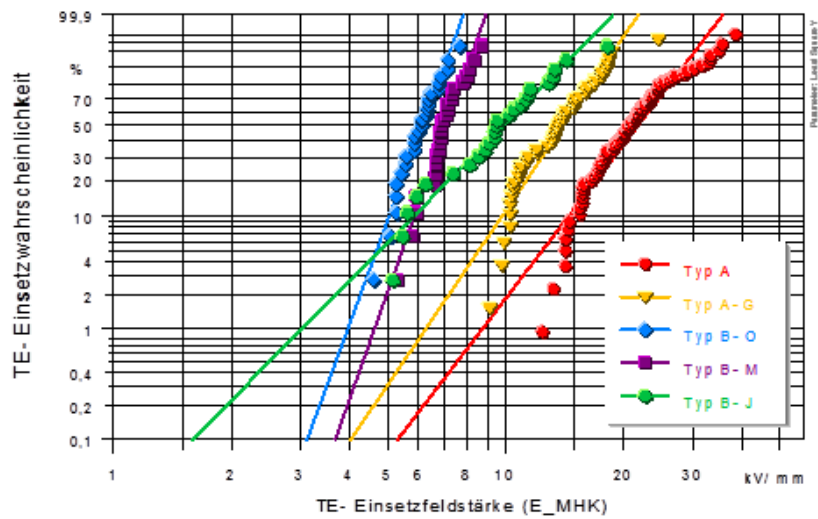


Abb. 5-21: Weibull-Darstellung der Feldstärke  $E_{MHK}$  im Hohlraum bei 50°C

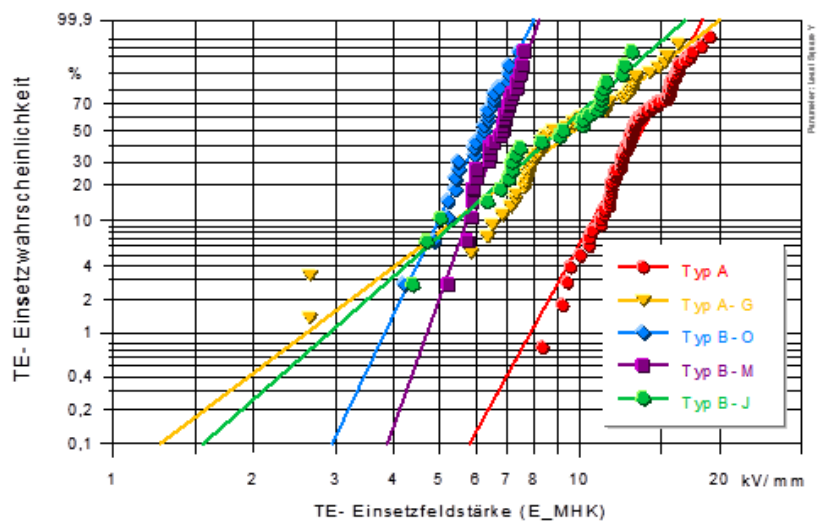


Abb. 5-22: Weibull-Darstellung der Feldstärke  $E_{MHK}$  im Hohlraum bei 85°C

#### 5.4.4.3 Zusammenfassende Feststellungen:

- Das TE-Verhalten von Harzproben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln unterliegt teils großen Streuungen.
- Aus den betrachteten Größen lassen sich bei Einsatzbedingung eher keine Indikatoren für die vorliegende Hohlraumgröße ableiten.
- Das Niveau der Entladungsleistung und damit der umgesetzten Energie liegt mit Werten im  $\mu\text{W}$ -Bereich bei TE-Einsatz sehr niedrig.
- Die Gewichtung des Einflusses der Mikrohohlkugeln aus Glas bzw. etwaiger fertigungsbedingter, gasgefüllter Hohlräume auf den TE-Einsatz scheint sich mit der Temperatur zu ändern („natürliche Gasbläschen“ gewinnen bei höheren Temperaturen an Einfluss).

### 5.5 Teilentladungsverhalten von Proben aus harzgetränktem Bandisoliermaterial

Schritt II des Stufenmodells sah vor, Proben aus harzgetränktem Isoliermaterial, im Weiteren als Bänderprobe bezeichnet, mit und ohne eingebettete Mikrohohlkugeln aus Glas zu untersuchen. Diese Bänderproben zeichnen sich gegenüber den bisher untersuchten Proben durch einen deutlich gesteigerten Realitätsgrad aus, da beim Probenbau großteils auf Originalmaterial aus der Stabfertigung zurückgegriffen wurde. Zur Detektion von Teilentladungen bzw. zur Beobachtung der künstlichen Fehlstellen wurde eine elektrische (nach *IEC 60270*), eine optische (Detektion von Emissionen im UV-Bereich via Photomultiplier) und eine akustische (Detektion von Emissionen im Ultraschall-Bereich via US-Sensor) Methode ausgewählt.

Im folgenden Abschnitt werden die wesentlichen Punkte zu Probenentwicklung und Detektionsmethoden dargelegt und die wichtigsten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen angegeben. Die durchgeführten Versuche mit elektrischen Teilentladungsmessungen wurden teils mit einem LDIC LDS-6 System (Vorversuche) und teils mit einem OMICRON MPD 600 System durchgeführt.

#### 5.5.1 Probenentwicklung der Bänderprobe

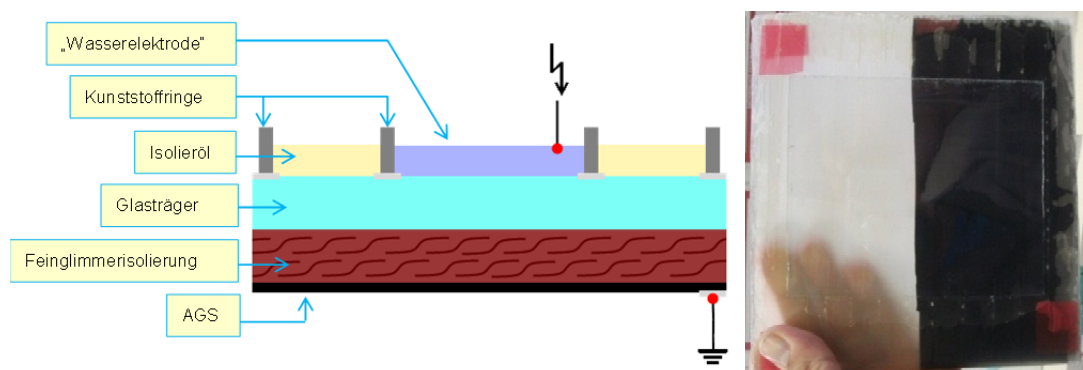
##### 5.5.1.1 Prinzip der Bänderprobe

Ziel der Untersuchungen an Bänderproben war es, Entladungserscheinungen die unterhalb der AGS-Schicht vermutet werden, schon von Beginn ihrer Aktivität an detektieren und beobachten zu können. Um eine optische Detektion von Teilentladungen zu ermöglichen, die im Inneren der Bandisolation (d.h. im Bereich zwischen Glasträger und Außenglimmschutz) auftreten, wurde der Aufbau, wie in Abb. 5-23 dargestellt, entwickelt. Dabei waren die folgenden Punkte von besonderer Bedeutung:



- Transparenz des Isoliermaterials
- Anhaftung des Isoliermaterials am Glasträger
- Gefahr des Bersten des Glases während und nach der Fertigung
- Kontaktierung der Probe mittels transparenter Hochspannungselektrode
- Feldsteuerung um den Bereich der Hochspannungselektrode

Die halbtransparente Isolierung aus ungefärbten, feinglimmerhaltigen Bändern (in Abb. 5-23 braun mit schwarz angedeuteten überlappenden Bandlagen) und einer leitfähigen AGS-Schicht (in Abb. 5-23 schwarz, auf Erd-Potential) an der Unterseite ist auf einem Glasträger aufgebracht. Am Glasträger auf Silberleitlackstreifen (im Bild graue Streifen) aufgeklebt sind zwei Kunststoffringe (im Bild grau) zu erkennen. Der innere Ring ist mit Salzwasser gefüllt und wird an Hochspannung gelegt, der Bereich zwischen innerem und äußerem Ring wird mit feldsteuernden Maßnahmen versehen (in Abb. 5-23 dargestellt ist eine Isolierölfüllung, zum Teil wurde dieser Bereich auch mit halbleitendem EGS und Isolations-Lack bestrichen). Die so gestalteten Proben sollten es ermöglichen, Entladungen, die unterhalb des wassergefüllten Kreisringes passieren, von oben durch das Wasser, durch den transparenten Glasträger und durch die halbtransparenten Bänder hindurch zu beobachten.



li.:.....Prinzip Bänderprobe

re.:.....ungefärbtes Band bzw. mit schwarzem AGS-Band

Abb. 5-23: Prinzip der Bänderproben bzw. erster Fertigungsversuch

### 5.5.1.2 Fertigung der Bänderprobe

Die Komplexität in Bezug auf die Fertigung des Basismaterials, die Aufbringung einer adäquaten Maßnahme zur Feldsteuerung an den Oberflächen, die Ausführung einer geeigneten Kontaktierung etc. spiegeln sich in einer Anzahl an Fertigungsversuchen wider. Die erfolgreich gefertigten Proben und ihre Eigenschaften sind in Tab. 5-9 eingetragen. Ursprünglich sollte ein mit ITO<sup>10</sup> beschichteter Glasträger als Hochspannungselektrode dienen. Aufgrund der Komplexität des Fertigungsprozesses und des hohen Preises für ITO-Glas wurde im Rahmen dieser Versuche aller-

<sup>10</sup> Indium-Zinn-Oxid, transparente und leitfähige Beschichtung, welche auf Glas- oder Kunststoffträger aufgebracht wird um z.B. bei Flachbildschirmen zum Einsatz zu kommen.

dings stets eine „Wasserelektrode“ verwendet (Erfüllung der Mindestanforderung: transparent und leitfähig). Als Gegenelektrode diente bei diesem Probenmodell, wie im Prinzip-Bild (Abb. 5-23) dargestellt, die leitfähige Unterseite (AGS), welche jeweils über einen leitenden Silberlackstreifen kontaktiert wird. Als Stabilisierungsmaßnahme für die, aus einigen Bandlagen und einer dünnen Glasplatte bestehende wenige Millimeter dicke Probe wurde zusätzlich eine HGW-Platte an der Unterseite der Probe aufgebracht. Ein Foto einer gefertigten Probe ist in untenstehender Abb. 5-24 dargestellt.

Tab. 5-9: Übersicht der gefertigten Bänderproben

Proben	Glas	Isolierung	Sonstiges
PT1	-	transp./schwarz	Prototyp, nicht für Messungen geeignet
PT2	4 mm ESG	ca. 0,7 mm	Rückwärts verstärkt
PT3	1,75 mm BF	ca. 0,7 mm	Feinglimmerband, leicht gebogen später: AGS kreisförmig abgeschliffen (ca. Ø 10 mm)
#1	1,1 mm BF	ca. 0,7 mm	Feinglimmer-Bandmaterial, Rückwärts verstärkt
PT4	1,1 mm BF	ca. 0,7 mm	Rückwärts verstärkt, Rand oberseitig verstärkt
#2	1,1 mm BF	ca. 0,7 mm	Feinglimmer-Bandmaterial Ober- und Unterseite verstärkt
#3	1,1 mm BF	ca. 0,7 mm	1 Lage Feinglimmer-Flächenmaterial, darunter Bandmaterial, Ober- und Unterseite verstärkt
#4	1,1 mm BF	ca. 0,7 mm	Feinglimmer-Flächenmaterial, Ober- und Unterseite verstärkt
#5	1,1 mm BF	ca. 0,7 mm	Feinglimmer-Flächenmaterial, MHK auf das Isoliermaterial unterhalb der Glasplatte aufgestreut, Ober- und Unterseite verstärkt
#6	1,1 mm BF	ca. 0,7 mm	Feinglimmer-Flächenmaterial, MHK auf das Isoliermaterial unterhalb der Glasplatte aufgestreut, Ober- und Unterseite verstärkt

ESG ... Glastyp Splitex®-ESG

BF ..... Glastyp BOROFLOAT® 33 Borosilikatglas

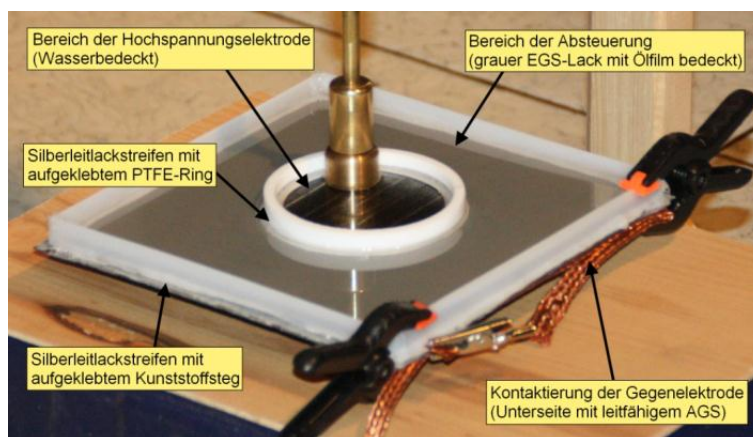


Abb. 5-24: Bänderprobe mit Maßnahmen zur Feldsteuerung und Kontaktierung

5.5.1.3 Auswirkung mangelhafter Probenfertigung/Materialfehler

Materialfehler oder mangelhafte Ausführung beim Probenaufbau hatten ungewollte Effekte, wie Gleitentladungen bzw. Überschläge an der feldsteuernden Lackierung zur Folge.

Probleme traten insbesondere auf bei:

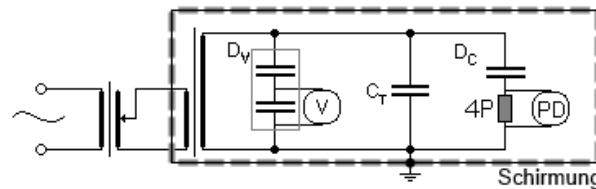
- Aufbau nur mit halbleitender Lackierung (grauer EGS-Lack) – Verzicht auf Isolieröl
- Aufweichung der feldsteuernden Schicht (grauer EGS-Lack) durch einsickerndes Isolieröl
- Materialfehler im Glasträger

Ein sorgfältiger und sauberer Aufbau der Proben ist für deren Funktionalität von höchster Wichtigkeit, wobei sich der Aufbau mit folgenden Komponenten als zweckmäßig erwies:

- Halbleitende Lackierung (grau)
- Zusätzlich Isolierlack (rot)
- Einsatz einer Isolierölschicht (ca. 2 mm)

5.5.2 Versuchsaufbau, Messschaltung, Messgeräte und Messverfahren

Aufgrund vieler verschiedener Vorversuche in unterschiedlichen Laborräumen konnte nicht mit einem einheitlichen Versuchsaufbau gearbeitet werden, allerdings wurde der Schaltungsaufbau bei allen elektrischen Teilentladungsmessungen nach IEC 60270 dem Prinzip nach Abb. 5-25 umgesetzt. Da die erwarteten Teilentladungspegel in Mikrohohlräumen sehr nieder waren, wurden alle Versuche soweit möglich in einem geschirmten Labor durchgeführt.



$C_T$  ..... Prüflinge

4P ..... Ankoppelvierpol

$D_V$  ..... Spannungsteiler (1:10000)

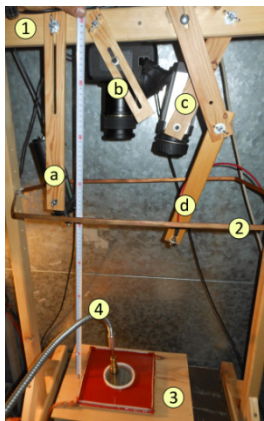
$D_C$  ..... Koppelkapazität (1200 pF)

PD ..... Teilentladungsmesssystem am Ankoppelvierpol (4P)

V ..... Spannungsmesssystem am Spannungsteiler

Abb. 5-25: Schaltung für TE-Messungen an Bänderproben in der TE-Messzelle

Zur Detektion von Teilentladungen wurden verschiedene Methoden eingesetzt. Es waren dies die konventionelle elektrische Methode, verschiedene Varianten zur optischen Detektion von TE, sowie akustische Detektionsverfahren mittels Ultraschall-Luftkopplung. Bei jenen Versuchen, bei denen mehrere Detektionsmethoden gleichzeitig zum Einsatz kamen, wurde ein Trägersystem (Abb. 5-26) zur Montage der Sensorgeräte verwendet, welches die Einstellung des jeweils geeigneten Abstandes zur Probe ermöglichte. Die angewandten Methoden und die dabei eingesetzten Geräte sind im Folgenden näher beschrieben.



- 1 ..... Trägersystem mit verstellbaren Montagearmen
- 2 ..... Erdungsbügel (Geräteschutz)
- 3 ..... Probentischchen mit platzierter Probe
- 4 ..... Hochspannungszuleitung
- a ..... Akustisches System (US)
- b ..... Digitalkamera
- c ..... Thermovisionskamera
- d ..... Kollimationsoptik an LWL (optisches TE-System)

Abb. 5-26: Trägersystem mit verschiedenen Sensorsystemen zur TE-Detektion

### 5.5.2.1 Konventionelle elektrische Detektion von Teilentladungen

Im Rahmen der Versuche kam die konventionelle Methode zur elektrischen Teilentladungsmessung entsprechend der internationalen Norm *IEC 60270* zum Einsatz. Bei dem verwendeten Messsystem handelt es sich um ein Modell, das die über den Vierpol ausgekoppelten TE-Impulse über Koaxialkabel an den Sensor und von diesem mittels Lichtwellenleiter an die Auswerteeinheit bzw. den Rechner sendet. Diese Technologie hat sich bei höchster Empfindlichkeit als äußerst robust und störunempfindlich erwiesen. Das System wurde bei einer Frequenz von 680 kHz mit einer Bandbreite von 650 kHz betrieben.

### 5.5.2.2 Optische Detektion von Teilentladungen

Die optische Detektion von Teilentladungen zählt zu den unkonventionellen nichtelektrischen Methoden der Erfassung von elektrischen Teilentladungen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere von einer Detektion und nicht von Messung zu sprechen, da eine Quantifizierung nur im direkten Vergleich und sehr eingeschränkt möglich ist.

Während der hier beschriebenen Experimente wurden drei verschiedene Systeme mit unterschiedlichen Eigenschaften genutzt – teils zeitgleich, teils wechselweise – um die optischen Emissionen zu detektieren, welche während des Teilentladungsprozesses entstehen.

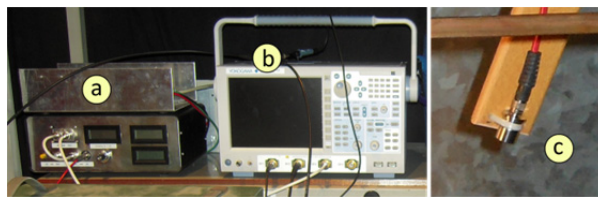
#### *Optisch TE-Detektion mit Eigenentwicklung des IHS (Dr. Schwarz)*

Das am IHS von Dr. Schwarz entwickelte System zur optischen Detektion von Teilentladungen (siehe Tab. 5-10) besteht aus einer Kollimationsoptik zur Einkopplung der optischen Signale, einem Lichtwellenleiter zur Übertragung der Signale an die eigentliche Erfassungs- und Verstärkereinheit, dem Photomultiplier (oder wahlweise der Pindiode) zur Umsetzung des optischen in ein elektrisches Signal und schließlich dem elektronischen Verstärker-Bauteil. Dem Ausgang des Gerätes wird ein digitales Speicheroszilloskop nachgeschaltet, dessen zeitliche Auflösung hoch genug sein muss (im Bereich GS) um die schnellen TE-Signale unterscheiden und darstellen zu

können. Auf diesem System höchster Empfindlichkeit ruhten ursprünglich die höchsten Erwartungen hinsichtlich der späteren TE-Detektion.

Tab. 5-10: *Optisches TE Detektionssystem - Komponenten und ihre Aufgaben*

Komponente	Aufgabe
<i>Kollimationsoptik</i>	Einkopplung von Licht (emittierten Photonen) in den LWL
<i>Lichtwellenleiter (LWL)</i>	Weiterleitung des eingekoppelten Lichtes
<i>Photomultiplier</i>	Optisch-elektrische Umsetzung und erste Verstärkung
<i>Elektronischer Verstärker</i>	Verstärkung des elektrischen Signales
<i>Oszilloskop</i>	Darstellung u. Speicherung d. erfassten u. verstärkten Signale



- a ..... Umsetzer- und Verstärkereinheit
- b ..... Oszilloskop zur Signaldarstellung
- c ..... Kollimationsoptik und LWL zur „Lichterfassung“

Abb. 5-27: *Optisches TE-System IHS (Dr. Schwarz)*

*Optisch TE-Detektion mit herkömmlicher digitaler Spiegelreflexkamera*

Ursprünglich zu Dokumentationszwecken eingesetzt, wurde die verwendete digitale Spiegelreflexkamera als probates Mittel erkannt, die auftretenden Teilentladungen zu erfassen. Bei dem verwendeten Modell handelt es sich um ein herkömmliches, im Handel erhältliches Gehäuse, welches in Kombination mit einem 90mm Makro-Objektiv eingesetzt wurde (siehe Tab. 5-11).

Tab. 5-11: *Verwendete digitale Spiegelreflexkamera und Objektiv*

Ausgewählte Eigenschaften	
<i>Gehäuse</i>	Canon EOS 550D
<i>Chip/Sensor</i>	22,3 x 14,9 mm C-MOS mit 18.000.000 Bildpunkten
<i>Lichtempfindlichkeit</i>	ISO 100-6400 (automatisch) ISO 100/200/400/800/1600/3200/6400/12800 (manuell)
<i>Objektiv</i>	Tamron SP AF 90mm F2,8 Di Macro
<i>Optischer Aufbau</i>	10 Linsen in 9 Gruppen
<i>Gewählte Einstellungen</i>	
<i>Belichtungszeit</i>	25 Sek
<i>Blende</i>	F2,8
<i>ISO-Wert</i>	ISO 100

Die Kamera bietet die Möglichkeit, über eine *RemoteCapture*-Software von der Bedienwarte aus alle Einstellungen und Aufnahmefunktionen per PC zu wählen und auszulösen. Eine Verschlusszeit von 25 Sekunden bei fixer Blendenzahl des Makro-Objektivs hat sich als geeignet erwiesen. Ein speziell entwickeltes Verfahren zur Aufbereitung der Aufnahmen mittels Fotobearbeitungsprogrammen (siehe Abschnitt 5.5.3) ermöglichte es, lokale Entladungen im Sichtbereich der Ka-

mera (abhängig vom Objektiv) zu erfassen und eine Beurteilung nach Form (punktuell, strichförmig, strahlenförmig etc.) bzw. nach Intensität durchzuführen sowie eine Korrelation zwischen optischen Erscheinungen mit den TE-Fingerprints herzustellen.

### *UV-empfindliche Kamera mit CCD-Sensor*

Der Einsatz einer industriell erprobten Kamera mit CCD-Sensor mit hoher Empfindlichkeit im UV-Bereich (siehe Abb. 5-28) sollte dazu dienen die auftretenden Entladungen auch als Videoformat abzuspeichern zu können. Das verwendete Kameramodell erlaubt sowohl Einzelaufnahmen, Serienaufnahmen als auch die Aufnahme von Videosequenzen. Trotz der besonderen Eigenschaften im UV-Bereich stellte sich diese Variante bislang allerdings als wenig geeignet dafür heraus, die auftretenden Teilentladungen niedriger Intensität zu erfassen.



Abb. 5-28: CCD Kamera und spektrale Empfindlichkeit (Herstellerangabe)

### *UV-Restlichtverstärker (CoronaScope) zur optischen TE-Erfassung*

Außer den bereits angeführten Geräten zur optischen Erfassung von Teilentladungen wurde auch ein CoronaScope verwendet (siehe Abb. 5-29), bei dem das Prinzip der Restlichtverstärkung im UV-Bereich und Darstellung in einem für den Menschen sichtbaren Spektralbereich zur Anwendung kommt. Bei Versuchen mit hinter den CoronaScope-Linsen montierten Videokameras konnten Entladungen aufgezeichnet werden. Die Qualität der Aufnahmen ließ jedoch eine solche Nutzung weiterhin als wenig sinnvoll erscheinen und ist daher nicht weiter verfolgt worden.

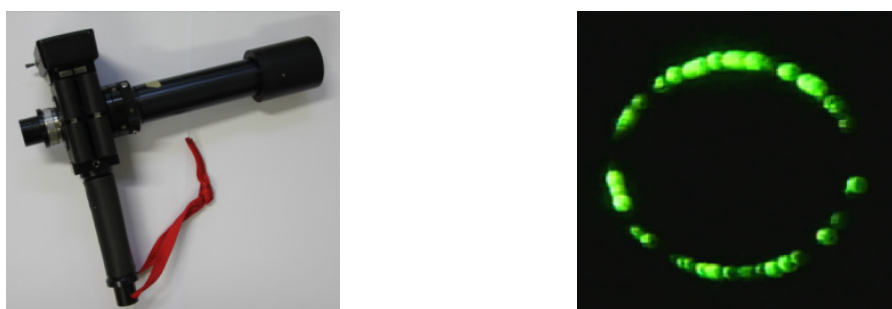


Abb. 5-29: Das verwendete CoronaScope bzw. eine Aufnahme optischer TE-Erscheinungen mittels USB-Kamera und CoronaScope

Neuere Weiterentwicklungen des CoronaScope wurden bereits für die Verwendung gemeinsam mit einer digitalen Kamera vorgesehen, konnten aufgrund des finanziellen Projektrahmens allerdings nicht angekauft werden. Ein solches Modell im Besitz von HAW kam an einem Messtag

zum Einsatz, lieferte aber ebenfalls keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Schließlich wurde das verfügbare CoronaScope immer dann eingesetzt, wenn es galt konventionell elektrisch detektierte Entladungen zu verifizieren und gegebenenfalls zu lokalisieren.

### 5.5.2.3 Akustische Detektion von Teilentladungen

Die akustische Detektion von Teilentladungen stellt, vor allem bei äußeren TE an Oberflächen von Prüflingen, eine gängige Möglichkeit zur Erfassung von Entladungserscheinungen dar. Aber auch Entladungen im Inneren von Prüflingen, je nach Dämpfung der speziellen Anordnung bzw. der verwendeten Materialien, können gegebenenfalls mit akustischen Methoden erfasst werden.

Neben der klassischen Luftkopplung besteht außerdem die Möglichkeit TE-Impulse mit geeigneten Sensoren über Materialkopplung als Körperschall zu erfassen. Schließlich stand im Rahmen des aktuellen Projektes auch die Verwendung von Laser-Vibrometrie zur Diskussion. Diese Technologie stellt eine relativ moderne Methode zur Erfassung von Schwingungen von Festkörpern dar und kommt in verschiedensten Anwendungsbereichen zum Einsatz. Einschränkend gilt für die akustische Methode wie für die optische Detektion, dass keine quantitative Aussage möglich ist, sondern lediglich eine Trendbeurteilung.

Unter Einbeziehung von Expertenmeinungen sowie eines diesbezüglichen technischen Berichtes [32] wurde der mögliche Nutzen gegen den nötigen technischen und finanziellen Aufwand abgewogen und auf die Nutzung der Methode der Laser-Vibrometrie verzichtet. Aufgrund der Schwierigkeiten, in einem Umfeld mit Hochspannung führenden Teilen, Körperschallsensoren auf Prüflinge zu montieren, wurde auch diese Variante nicht angewandt. Schließlich wurden auch Informationen zur Anwendung von Ultraschalldetektoren mit Luft-Kopplung gesammelt, letztlich aber gegen die Anschaffung von neuen Geräten und für den begleitenden Einsatz des verfügbaren Ultraschalldetektors LDA 5/S (Luft-Kopplung) entschieden (Prinzip siehe Abb. 5-30).

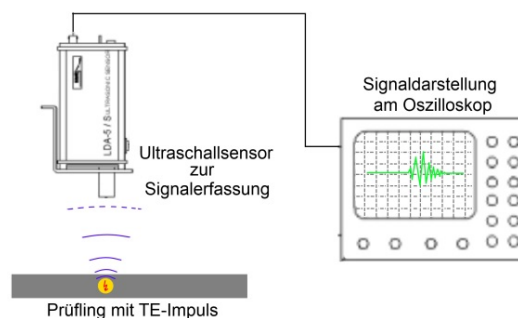


Abb. 5-30: Skizze der TE-Impulserfassung mittels Ultraschall-Luftkopplung

### 5.5.2.4 Unterstützender Einsatz von Thermovision

Während der Versuche wurde bei einigen Experimenten zusätzlich eine Thermovisionskamera eingesetzt (siehe Abb. 5-31), um das Temperaturprofil der Probenoberfläche beobachten und etwaige thermische Emissionen aufgrund der auftretenden Teilentladungen feststellen zu können.

Die geringe Intensität der Entladungen sowie der Probenaufbau bzw. die Wasserelektrode ließen eine Detektion der Teilentladungen im Isoliermaterial selbst allerdings nicht zu.

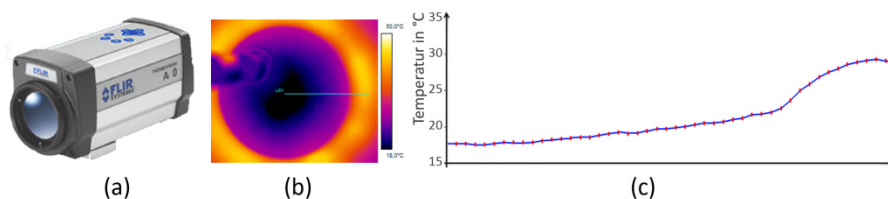


Abb. 5-31: Die verwendete Thermovisionskamera FLIR A20 (a), Beispielhaftes Wärmebild der Probenoberfläche (b) und Temperaturprofil (c)

### 5.5.2.5 Spannungsmessung

Die Spannungsmessung wurde durch das Abgreifen der Spannung an einem kapazitiven Teiler (Pressgaskondensator plus Unterkapazität, 1:10.000) in Verbindung mit einem Digitalmultimeter (Fluke 187) umgesetzt.

### 5.5.3 Verfahren zur Verstärkung und Analyse optischer Entladungserscheinungen

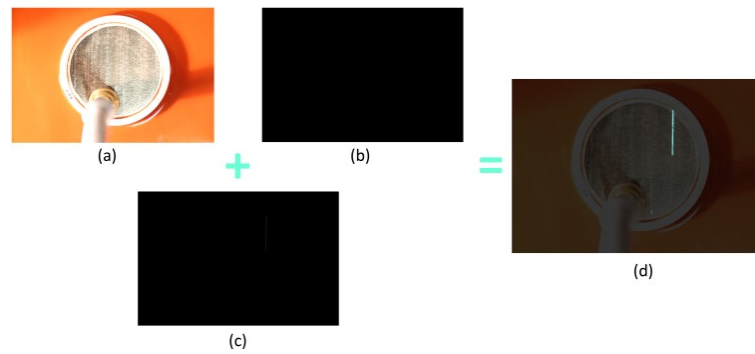
Im Rahmen der hier beschriebenen Arbeiten wurde gemeinsam mit *M.-O. Anaca (2012)* [6] ein Verfahren entwickelt, welches eine optische TE-Detektion durch geeignete Überlagerung mehrerer fotografischer Aufnahmen erlaubt. Dieses Verfahren gestattet auch die anschließende Analyse der Entladungserscheinungen mittels Gegenüberstellung der bearbeiteten Fotos und der TE-Fingerprints. Nachteilig dabei ist, dass Entladungen nicht zeitsynchron mit dem Messvorgang erkannt werden können, sondern erst nach der entsprechenden Foto-Nachbearbeitung. Außerdem eignet sich die Methode nicht zur Erkennung von singulären Entladungserscheinungen in Folge von Einzelimpulsen, da erst durch die integrierende Wirkung der Langzeitbelichtung (25 sek) gute Ergebnisse mit deutlich erkennbaren optischen Emissionen erzielt werden.

#### 5.5.3.1 Prinzip des Verfahrens – Erläuterung anhand eines Fallbeispiels:

Während der Versuche mit TE-Messungen an Bänderproben wurden bei jeder Spannungsstufe (Kurzversuch) bzw. bei konstanter Spannung jeweils alle vier Minuten (Langzeitversuch) sogenannte TE Fingerprints aufgezeichnet. Zeitgleich dazu erfolgte die Aufnahme eines Fotos mit einer digitalen Spiegelreflexkamera. Um optische Entladungserscheinungen sichtbar zu machen bzw. zu verstärken, wurden jeweils drei Aufnahmen überlagert wie in Abb. 5-32 angedeutet ist.

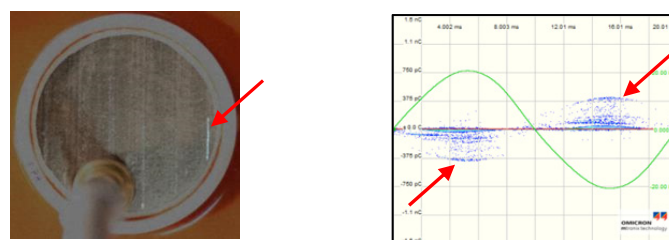
Die solchermaßen gewonnenen Darstellungen der Emissionen von Teilentladungen können für Vergleiche mit den entsprechenden TE-Fingerprints herangezogen werden. In Abb. 5-33 wird beispielhaft für drei aufeinanderfolgende Messzeitpunkte gezeigt, dass somit die Zuordnung einzelner Teile des charakteristischen TE-Musters zu optischen Phänomenen möglich wird.



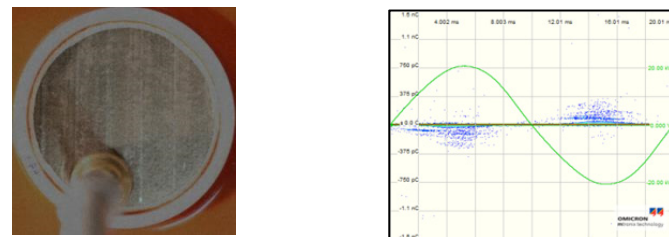


- a) ..... Foto bei Licht vor Messbeginn      b) ..... Foto bei Dunkelheit vor Messbeginn  
 c) ..... Foto während der Messung      d) ..... Resultat aus der Überlagerung

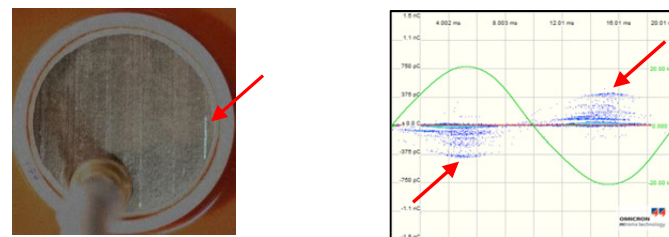
Abb. 5-32: Prinzip der Fotoüberlagerung aus drei Einzelbildern



(a)  $T_0$ :  $Q_{\text{iec}} 246 \text{ pC}$  /  $Q_{\text{peak}} 417 \text{ pC}$  /  $P_{\text{TE}} 2,3 \text{ mW}$



(b)  $T_1 = T_0 + 4 \text{ min}$ :  $Q_{\text{iec}} 178 \text{ pC}$  /  $Q_{\text{peak}} 1,6 \text{ nC}$  /  $P_{\text{TE}} 3,5 \text{ mW}$



(c)  $T_2 = T_1 + 4 \text{ min}$ :  $Q_{\text{iec}} 313 \text{ pC}$  /  $Q_{\text{peak}} 1,2 \text{ nC}$  /  $P_{\text{TE}} 2,7 \text{ mW}$

Abb. 5-33: Vergleich der Fotos und TE-Fingerprints für drei Messzeitpunkte

Für einige der untersuchten Proben konnten auf diese Weise mit Hilfe von *Gating*<sup>11</sup> aus den TE-Fingerprints Kenngrößen für einzelne der beobachteten Hohlräume ermittelt werden. So ergab sich für das Beispiel aus Abb. 5-33 die Entladungsleistung  $P_{\text{TE}}$  zu etwa  $100 \mu\text{W}$ , für andere Proben beispielsweise Werte zwischen  $20 \mu\text{W}$  und  $70 \mu\text{W}$  (siehe Anhang A).

<sup>11</sup> Das eingesetzte Mess-System erlaubte mit der Funktion „Gating“ frei wählbare Bereiche des Phasenwinkelhistogramms auszublenden.

5.5.4 Methodenvergleich

Ein Methodenvergleich, der in Abschnitt 5.5.2 beschriebenen Detektionsmethoden und Gerätschaften, wurde anhand einer definierten Spitze-Platte Anordnung durchgeführt. Dabei wurde der Abstand des Messing-Elektrodenpaars zwischen 20 und 30 mm variiert. Bei diesen Versuchen konnte der Fokus des jeweiligen Sensorsystems exakt ausgerichtet werden, da mit der Spitze jene Stelle vorgegeben war, an der es zu Entladungen kommen würde. In Abb. 5-34 ist für die Versuchsanordnung *Spitze an Hochspannung/Platte auf Erdpotential/Abstand 22 mm* ein beispielhaftes Resultat angegeben, wobei die Aufnahmen der Spiegelreflexkamera (a), der CCD-Kamera (b), ein Oszilloskop-Bild (c) mit Signalen von optischem und akustischem TE-Detektionssystem sowie der entsprechende TE-Fingerprint des elektrischen TE-Mess-Systems dargestellt sind. Die Entladungsleistung bei TE-Einsatz betrug im Messzeitraum etwa  $P_{TE} = 1,5 \text{ mW}$ , es konnten aber auch Werte bis etwa 50 mW beobachtet werden.

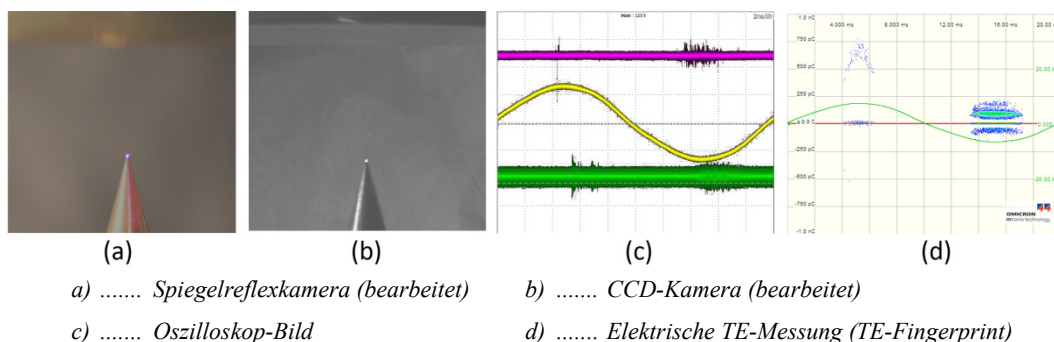
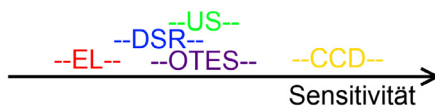


Abb. 5-34: Spitze (5 kV) Platte (Gnd),  $d = 22 \text{ mm}$ ,  $Q_{iec} 335,1 \text{ pC}$  ( $Q_{peak} 743,5 \text{ pC}$ )

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse<sup>12</sup> ergab wie erwartet das beste Resultat für die elektrische Messung. Mit der Spiegelreflexkamera, dem optischen TE-System IHS/Schwarz<sup>13</sup>, sowie dem akustischen System konnte etwa die gleiche Empfindlichkeit erreicht werden. Deutlich unempfindlicher und daher weniger geeignet zeigte sich die CCD-Kamera.



EL ..... Elektrisches TE-System      OTSE ..... Optisches TE-System IHS/Schwarz  
 DSR ..... Digitale Spiegelreflexkamera      US ..... Akustisches System (Ultraschall)  
 CCD ..... CCD-Kamera (UV-empfindlich)

Abb. 5-35: Ergebnis der Sensitivitätsanalyse

<sup>12</sup> Die festgestellten Unterschiede waren zum Teil marginal, was sich mit den relativ hohen TE-Pegeln aufgrund der Charakteristik der verwendeten Anordnung begründen lässt.

<sup>13</sup> Das optische TE-System IHS/Schwarz benötigt zur Ausschöpfung seiner Sensitivität eine vollständig abgedunkelte Umgebung ohne Reststreulicht, weshalb es hier nicht die höchste Sensitivität erreichen konnte.

5.5.5 Versuchsdurchführung

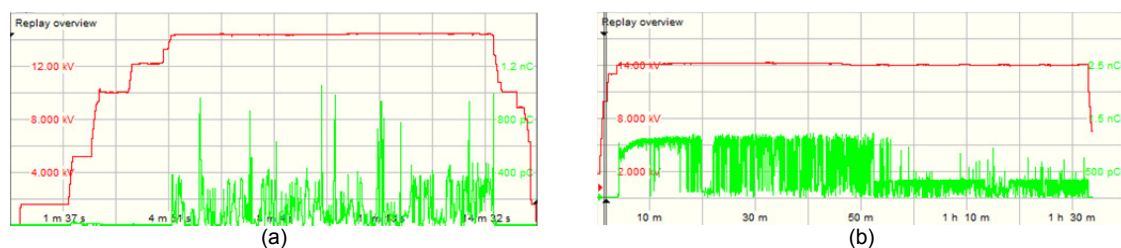
Die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden in einer geschirmten und abgedunkelten TE-Messzelle durchgeführt. Die einzelnen Experimente unterschieden sich in der Versuchsdauer (Kurz- bzw. Langzeitversuch) und es wurden zusätzlich Versuche zum Einfluss der Proben-temperatur auf die TE-Aktivität unternommen. Nach Möglichkeit wurde für jede getestete Probe eine Versuchsabfolge *Kurz-Lang-Kurz* durchgeführt, deren Ziel es war die TE-Aktivität jeder Probe zu bestimmen und diese auf Veränderungen im Entladungsverhalten aufgrund der Beanspruchungen während des Langzeitversuchs zu untersuchen. Die TE-Detektion erfolgte dabei stets, wie in Abschnitt 5.5.2 ausgeführt, mittels elektrischer, akustischer und optischer Methoden, zur Dokumentation des Temperaturprofils der Probenoberfläche wurde eine Thermovisionskamera eingesetzt.

5.5.5.1 Kurzversuch:

Bei den Kurzversuchen (siehe Abb. 5-36.a), welche im Weiteren auch als Std.-Versuch bezeichnet werden, wurde die Spannung in Stufen gesteigert und die TE-Einsatzspannung sowie jene Spannung bestimmt, bei der die Entladungen auch optisch (mittels digitaler Spiegelreflexkamera) detektierbar waren. Nach einer weiteren Erhöhung der Spannung um 5-10% wurde die TE-Aktivität der Probe für etwa 15 Minuten beobachtet. Anschließend wurde die Spannung in Stufen verringert und der Spannungswert bestimmt, bei der eine optische Detektion nicht mehr möglich war. Schließlich wurde auch die TE-Aussetzspannung ermittelt.

5.5.5.2 Langzeitversuch:

Bei den Langzeitversuchen (siehe Abb. 5-36.b), welche im Weiteren auch als 1h-Versuch bezeichnet werden, wurde die Spannung in Stufen gesteigert und die TE-Einsatzspannung sowie jene Spannung bestimmt, bei der die Entladungen auch optisch (mittels digitaler Spiegelreflexkamera) detektierbar waren. Nach einer weiteren Erhöhung der Spannung um 5-10% wurde die TE-Aktivität der Probe für eine Zeitdauer von 1-3 Stunden beobachtet. Anschließend wurde die Spannung in Stufen verringert und der Spannungswert bestimmt, bei der eine optische Detektion nicht mehr möglich war. Schließlich wurde auch hier die TE-Aussetzspannung ermittelt.



rot:..... Spannung  $u(t)_{RMS}$       grün: ..... TE-Pegel  $q(t)_{iec}$   
 Skala (a):..... 2 kV/Div bzw. 200 pC/Div      Skala (b): ..... 1,5 kV/Div bzw. 500 pC/Div

Abb. 5-36: Beispiel für den Kurz- bzw. Langzeitversuch: Probe #1

### 5.5.5.3 Präkonditionierung der Probertemperatur

Versuche mit präkonditionierten Proben wurden durchgeführt um den Einfluss der Probertemperatur auf das Entladungsverhalten zu beobachten. Zunächst wurde die Probe bei 5°C vorgekühlt, in einem weiteren Experiment bei 75°C vorgewärmt, um diese schließlich wie im zuvor beschriebenen Kurzversuch zu untersuchen.

### 5.5.6 Ergebnisse und Auswertemethodik

Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse beruht auf der Bestimmung der Korona-Ein- bzw. Aussetzspannung, der entsprechenden TE-Pegel bzw. der Entladungsleistung  $P_{TE}$ . Jede der untersuchten Proben wurde einer Versuchsabfolge *Std – 1h – Std* unterzogen, bei der die Entladungsaktivität konventionell (elektrisch nach *IEC 60270*) gemessen sowie mit optischen und akustischen Mess-Systemen zum Teil auch unter Einsatz von Thermovision beobachtet wurde. Um der Frage nachzugehen, unter welchen Bedingungen optische Teilentladungen mit welcher Ausprägung auftreten, wurde ein besonderes Augenmerk auf die folgenden drei Punkte gelegt:

1. Wann konnten TE provoziert werden und wann nicht?
2. Wann und wie waren diese optisch und/oder akustisch detektierbar?
3. Wie, wann und warum änderte sich das TE-Verhalten im Zuge der Experimente?

#### 5.5.6.1 Ergebnisse

Die beobachtbaren optischen Entladungserscheinungen traten sporadisch auf, schwankten in ihrer Intensität und verschwanden zwischenzeitlich wieder, ehe sie an denselben Stellen wieder wahrgenommen werden konnten. Der Entladungspegel lag dabei zumeist im Bereich von einer Dekade etwa 10-100 pC bzw. 100-1.000 pC (siehe Abb. 5-37 links). Der Wert der Entladungsleistung konnte zumeist ebenfalls im Bereich einer Dekade etwa bei 1-10 mW beobachtet werden, selten darüber (siehe Abb. 5-37 rechts). Akustische Entladungsaktivität konnte bei den Bänderproben kaum festgestellt werden.

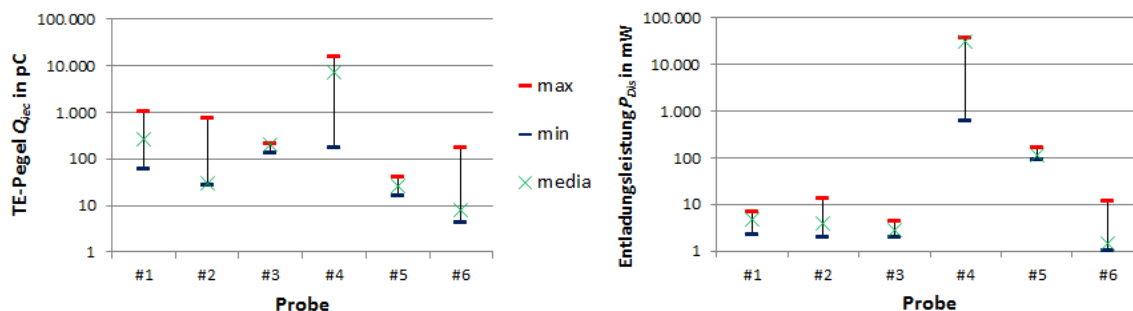


Abb. 5-37: Beobachtete TE-Pegel  $Q_{iec}$  sowie Pegel der Entladungsleistung  $P_{TE}$

Der Probenaufbau war insofern von Bedeutung, als bei Verwendung von Bandisolationmaterial, bevorzugt an den Überlappungsstellen, Entladungen mit teils deutlich erkennbaren optischen Ent-

ladungserscheinungen auftraten. Unter Verwendung von Feinglimmer-Flächenmaterial konnten entsprechende längliche Hohlräume zwar vermieden werden, es bildeten sich allerdings je nach Probe in Form und Anzahl unterschiedliche Ansammlungen von punktförmigen Fehlstellen, die wiederum teils intensive optische Emissionen zur Folge hatten (vgl. Abb. 5-38). Die Proben mit Isolationsaufbau aus Feinglimmer-Band- (Abb. 5-38.a und b) bzw. Flächenmaterial (Abb. 5-38.c bis e) zeigten bei konstanter Spannung von ca. 15 kV stets einen probenspezifischen TE-Grundpegel. Während der Versuche konnten zum Teil intensive Entladungserscheinungen beobachtet werden, wobei der Ladungswert ( $Q_{iec}/Q_{Peak}$ ) bis zu Maximalwerten von etwa 10 nC (siehe Abb. 5-38.c) anstieg. Während der TE-Pegel sich offenbar in Abhängigkeit der optischen Entladungserscheinungen änderte (mehr bzw. intensivere Entladungserscheinungen gingen mit höheren TE-Pegeln einher), unterlag der Wert der Entladungsleistung  $P_{TE}$  nur geringfügigen Schwankungen bzw. konnten diese nicht mit den optischen Erscheinungen in Verbindung gebracht werden.

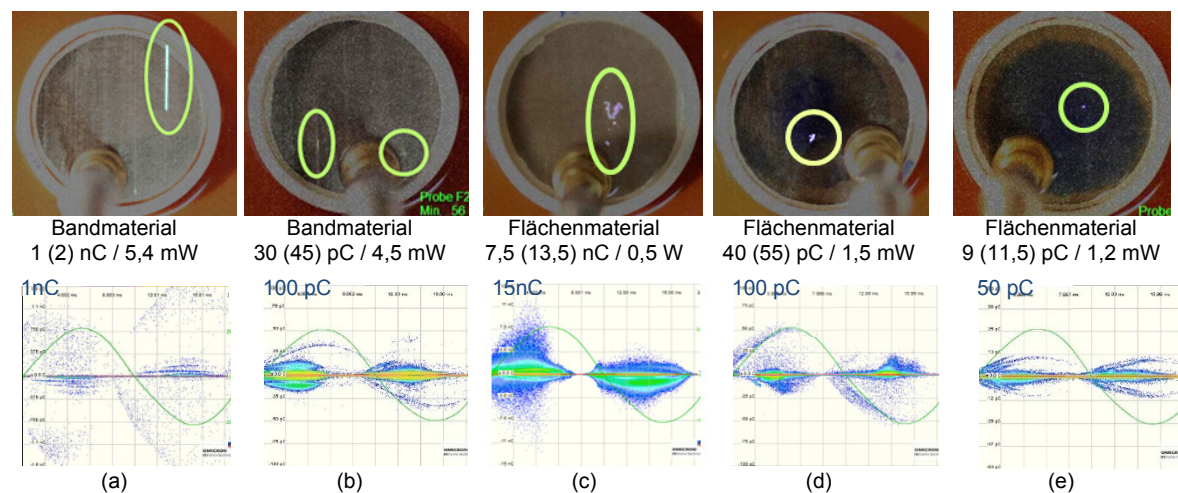


Abb. 5-38: Formen optischer Entladungserscheinungen mit TE-Fingerprints mit Angaben zu Ladungswerten  $Q_{iec}$  ( $Q_{Peak}$ ) bzw. Entladungsleistung  $P_{TE}$

Jene Proben die mit Feinglimmer-Flächenmaterial gefertigt wurden und bei denen zusätzlich Mikrohohlkugeln aus Glas zwischen das Isolationsmaterial und den Glasträger eingebracht wurden (Abb. 5-38.d und e) unterschieden sich in ihrem Entladungsverhalten nicht signifikant von anderen Proben. Die beobachtbare optische Entladungsaktivität hat ihren Ursprung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht in den eingebrachten MHK, sondern lässt sich vielmehr auf gasgefüllte Hohlräume zurückführen, welche sich im Zuge der Probenfertigung gebildet hatten.

Die Beanspruchung durch den gewählten Versuchsablauf *Std – 1h – Std* schien, unabhängig vom Probenaufbau, etwa bei der Hälfte der untersuchten Proben keine bleibende Veränderung des Entladungsverhaltens nach sich zu ziehen (siehe z.B. Abb. 5-39). Dort, wo Änderungen des Entladungsverhaltens festgestellt werden konnten, sank bei Feinglimmer-Bandmaterial der TE-Pegel eher ab, wohingegen Proben mit Feinglimmer-Flächenmaterial steigende TE-Pegel aufwiesen (siehe z.B. Abb. 5-40). Der Vergleich der fotografischen Aufnahmen aus den Langzeitversuchen

mit den jeweiligen TE-Fingerprints verdeutlicht, dass ein direkter Zusammenhang zwischen Entladungserscheinung und TE-Aktivität herstellbar ist. So lassen sich anhand der Bilder die optisch detektierbaren Entladungsstellen sehr gut den verschiedenen Teilen der TE-Muster zuordnen und zumeist die, für Hohraumentladungen charakteristischen, sichelförmigen Anteile der phasenaufgelösten TE-Darstellung erkennen (vgl. Abschnitt 5.5.3 bzw. Abb. 5-33).

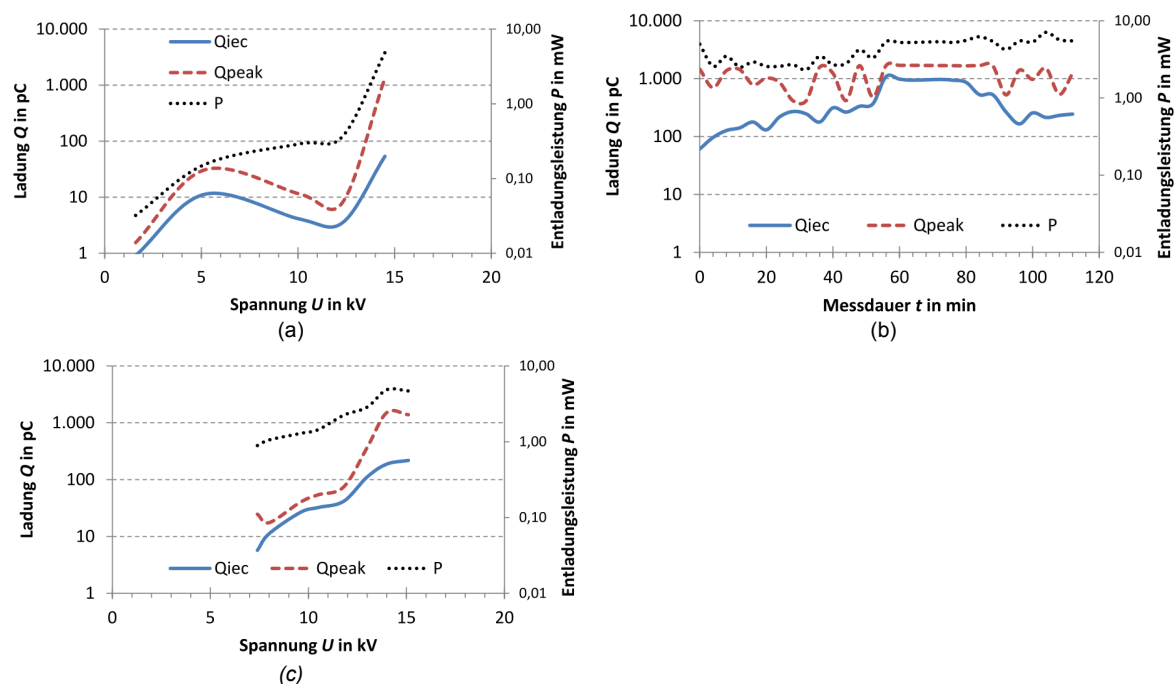


Abb. 5-39: Beispiel für die TE-Aktivität: Probe #1, Versuchsabfolge Std-1h-Std

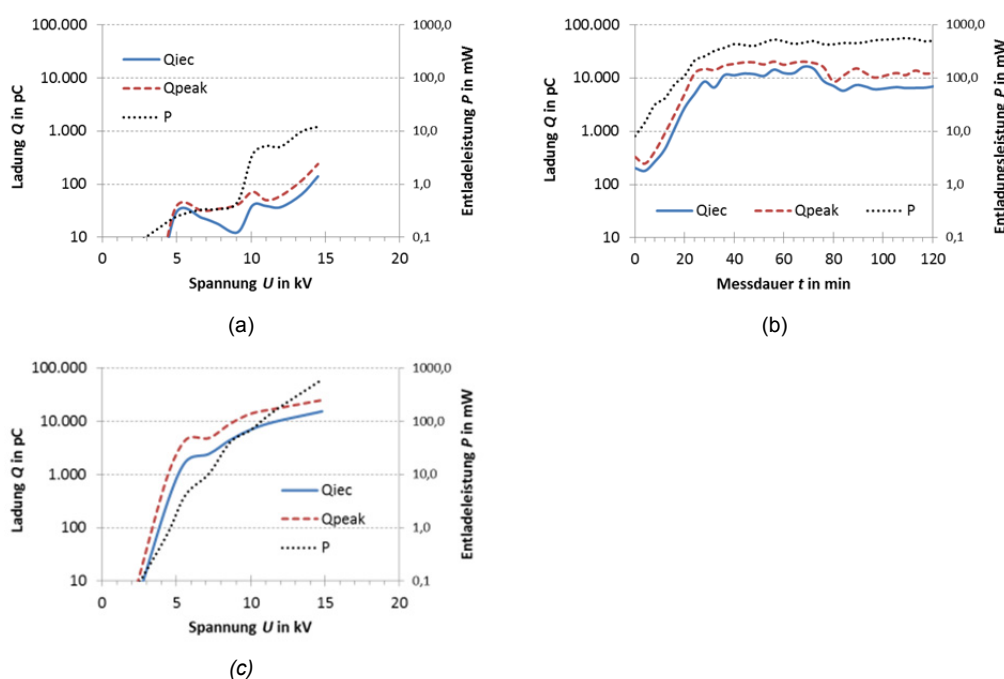


Abb. 5-40: Beispiel für die TE-Aktivität: Probe #4, Versuchsabfolge Std-1h-Std

Die durchgeführte Präkonditionierung der Proben­temperatur hatte nur unwesentliche Änderungen des TE-Verhaltens der untersuchten Probe zur Folge (vgl. Abb. 5-41). Lediglich mit einer Vor­kühlung bei 5°C konnte die Entladungsaktivität der Probe beeinflusst werden. Es ergab sich eine gleichmäßigere TE-Aktivität mit weniger Spitzen und niedrigeren TE-Pegeln, was sich auch in den entsprechenden „gedämpften“ TE-Fingerprints widerspiegelte. Das Verhalten „normalisierte“ sich nach ca. 15 Minuten mit dem Erreichen von etwa Raumtemperatur wieder. Die Vorwärmung der Probe auf 75°C zeigte keinerlei erkennbare Auswirkungen auf deren TE-Aktivität. Sowohl die TE-Pegel  $Q_{iec}/Q_{Peak}$  und die Höhe der Entladungsleistung  $P_{TE}$ , wie auch die entsprechenden TE-Fingerprints zeigten keine Veränderungen (vgl. Abb. 5-41).

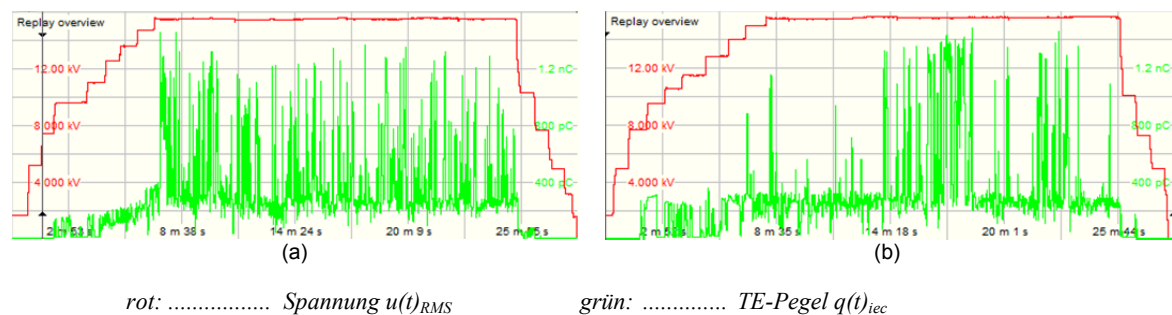


Abb. 5-41: Präkonditionierung der Proben­temperatur: (a) 75°C, (b) 5°C

### 5.5.6.2 Zusammenfassende Feststellungen

- Es konnten stark variierende und wandernde Entladungserscheinungen mit optischen Mitteln detektiert werden, welche sporadisch aber reproduzierbar auftraten (bei Bandmaterial linienförmig, bei Flächenmaterial punktförmig bzw. als Ansammlung mehrerer Punkte).
- Der Entladungspegel lag zumeist innerhalb einer Dekade, etwa 10-100 bzw. 100-1.000 pC, die Entladungsleistung innerhalb einer Dekade etwa bei 1-10 mW.
- Die bei einigen Proben eingebrachten Mikrohohlkugeln aus Glas konnten nicht als Ausgangspunkt der optischen Entladungserscheinungen festgemacht werden, vielmehr gehen diese von gasgefüllten Hohlräumen aus.
- Das plötzliche Erlöschen von zuvor beobachtbaren Entladungserscheinungen ging stets einher mit dem Absinken des TE-Pegels und dem Wegfallen bestimmter Teile des TE-Fingerprints. Die Schwankungen der Entladungsleistung  $P_{TE}$  hingegen korrelierten nicht mit optischen oder akustischen Entladungserscheinungen. Die Analyse dieses Parameters scheint daher nicht zur Gewinnung von Aussagen in Bezug auf optische oder akustische Entladungserscheinungen geeignet.
- Die Beanspruchungen während der Langzeitversuche hatten bei der Hälfte der untersuchten Proben keinen dauerhaften Einfluss auf ihr Entladungsverhalten. Es scheint naheliegend, dass es sich bei den signifikanten, aber nicht dauerhaften TE-Pegel-Änderungen um thermisch bedingte Effekte handelt, da die TE nach Abkühlen der Proben bei Wiederholungs-

versuchen wieder ähnliche Pegel zeigten wie zu Beginn der Langzeitversuche. Die andere Hälfte der Proben zeigte nach einiger Zeit bleibende Veränderungen der Entladungsaktivität (Absinken des TE-Pegels und verringerte Intensität der optischen Emissionen bei Bandmaterial, Ansteigen des TE-Pegels und der Entladungsleistung bei Flächenmaterial).

- Die Präkonditionierung der Proben im Ofen bei 75°C erbrachte keinen Unterschied im TE-Verhalten (optische Erscheinungen bei gleichen Pegeln und identen TE-Fingerprints).
- Die Präkonditionierung der Proben im Kühlschrank bei 5°C hatte eine gedämpfte TE-Aktivität (gleichmäßigere und geringere TE-Pegel) zur Folge. Das Verhalten normalisierte sich bei Erwärmung während des Experiments auf etwa Raumtemperatur.
- Die untersuchten Bänderproben stellen eine Entwicklungsserie dar, wobei sich die einzelnen Proben in ihren Eigenschaften unterscheiden. Die Experimente stellen daher Einzelversuche dar, deren Ergebnisse nur mit Einschränkung für statistische Aussagen herangezogen werden können.

### 5.6 TE-Verhalten von Teststäben und Stabstücken

Schritt III des Stufenmodells sah vor, originalgetreue Generatorstäbe zu untersuchen. Einerseits sollte es sich dabei um möglichst fehlerlos gefertigte Stäbe handeln und andererseits sollten einige Stäbe mit künstlichen Fehlstellen versehen werden. Für die Experimente konnte schließlich auf fünf Teststäbe bzw. Stabstücke zurückgegriffen werden, die zum Teil neu und unbelastet, zum Teil durch Alterungsversuche bereits vorbelastet waren. Die Einbringung von künstlichen Fehlstellen (z.B. Mikrohohlkugeln aus Glas) bzw. die Gewährleistung der Beobachtbarkeit der Fehlstellen konnte im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht gelöst werden.

Im folgenden Abschnitt werden die Versuche zur TE-Detektion (zur Anwendung kam ein konventionelles elektrisches System sowie zur optischen wie akustischen Verifikation ein Corona-Scope bzw. ein Ultraschalldetektor) sowie deren wichtigsten Ergebnisse dargelegt.

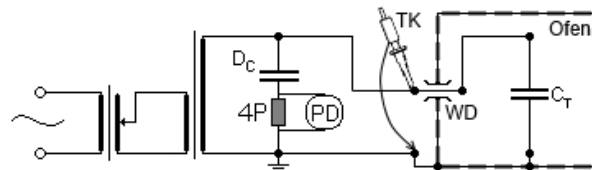
#### 5.6.1 Ziele und Erwartungen

Ziel der Versuche an den Teststäben war es, das TE-Verhalten von möglichst realistischen Proben ohne die verschiedenen Einschränkungen der vorangehend beschriebenen Plättchen- bzw. Bänderproben zu untersuchen. Die Abhängigkeit von der Temperatur wurde dabei ebenso betrachtet wie der Einfluss einer vorangegangenen thermisch-elektrischen Alterung. Vom Vergleich der TE-Fingerprints mit jenen der früheren Experimente an Plättchen- bzw. Bänderproben wurden Aufschlüsse über die zu erwartende TE-Aktivität und ihre Emissionen im Inneren der optisch unzugänglichen Isolierung von Generatorstäben erwartet. Überdies sollte die Gültigkeit der im Zuge des Stufenmodells abgeleiteten Schlüsse bestätigt oder widerlegt werden.



5.6.2 Versuchsaufbau, Prüfkreis und Prüflinge

Der Aufbau für die Versuche (Abb. 5-42) in einem Prüffeld mit beheizbarer Kammer (Ofen) bestand aus dem Koppelkondensator  $D_C$ , dem Vierpol  $4P$  mit angeschlossenem TE-Mess-System  $PD$  sowie der Wanddurchführung  $WD$  zur Einführung der Hochspannung in die Kammer und dem Prüfling  $C_T$  selbst. Die vom Hochspannungstransformator zur Verfügung gestellte und am Prüfling anliegende Spannung wurde über einen Hochspannungs-Tastkopf  $TK$  abgegriffen und gleichzeitig vom TE-Mess-System erfasst.

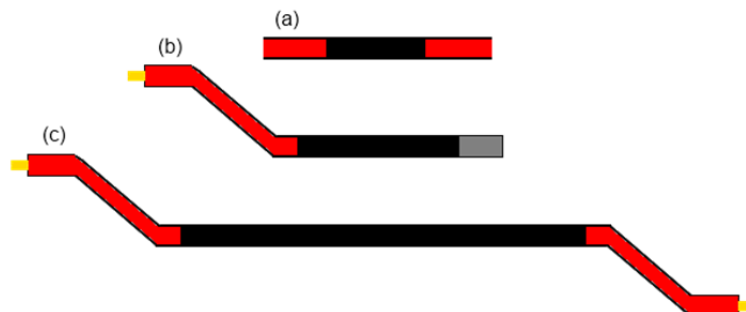


- $D_C$ : ..... Koppelkondensator  
 $C_T$ : ..... Prüfling  
 $TK$ : .... HV-Tastkopf (Spannungsmessung)  
 $4P$ : ..... Vierpol zur TE-Messung  
 $PD$ : .... TE-Mess-System  
 $WD$ : ... Wanddurchführung

Abb. 5-42: Schaltungsprinzip der TE/Temperatur-Versuche an Teststäben

Aufgrund der Versuchstemperaturen bis  $155^\circ\text{C}$  konnte das TE-Mess-System nicht in unmittelbarer Nähe zum Prüfling angeordnet werden. Um einen etwaigen Einfluss von Zuleitung bzw. Wanddurchführung ausschließen zu können, wurde in Vorversuchen die TE-Freiheit des gesamten Aufbaus jedoch ohne Prüflinge nachgewiesen.

Die Prüflinge selbst (Abb. 5-43) wurden auf einem Trägestell montiert, wobei der Nutteil (im Bild schwarz) zur erdseitigen Kontaktierung mit Goldband umwickelt wurde. Die Hochspannung wurde von der Wanddurchführung über eine temperaturfeste Leitung an die Kontaktenden der Stäbe geführt. Eigenschaften wie der Stabtyp, die Isolierwandstärken sowie der Zustand der jeweiligen Prüflinge zu Beginn der Versuche sind Tab. 5-12 zu entnehmen.



- (a) ..... Nutteilstück  
 (b) ..... halber Stab  
 (c) ..... kompletter Stab  
 rot: ..... Bereich mit Endenglimmschutz  
 schwarz: ..... Bereich mit Außenglimmschutz  
 grau: .. Bereich mit halbleitenden Bandagen

Abb. 5-43: Skizze der untersuchten Teststäbe und Stabstücke

Tab. 5-12: Ausgewählte Eigenschaften der untersuchten Klasse F Teststäbe

Teststab	Typ	Isolation Breit-/Schmalseite	Zustand / Vorbelastung
#1	(b)	3,3 mm / 3,0 mm	Vorbelastet, 900 h / 130°C / 33 kV
#2	(a)	3,0 mm / 2,7 mm	Neu und unbelastet
#3	(a)	3,0 mm / 2,7 mm	Neu und unbelastet
#4	(c)	3,0 mm / 2,7 mm	Vorbelastet, 700 h / 155°C / 30 kV
#5	(c)	3,0 mm / 2,7 mm	Neu und unbelastet

### 5.6.3 Versuchsdurchführung

In Temperaturzyklus-Versuchen *Raumtemperatur (RT)-155°C-Raumtemperatur (RT)* wurde bei 10 Spannungsstufen (2,2 kV bis 22 kV) eine TE-Messung durchgeführt. Nach der ersten TE-Messung bei RT wurde die Temperatur auf 155°C gebracht und nach einer Wartezeit von mehreren Stunden eine weitere TE-Messung unternommen. Nach ca. 12 Stunden Abkühlzeit wurde erneut bei RT die dritte TE-Messung durchgeführt. Zusätzlich wurden TE-Messungen während Temperatursteigerungs-Versuchen durchgeführt. Beginnend bei RT (ca. 15°C) wurde dabei die Temperatur in Stufen erhöht und nach einer Wartezeit von ca. 2 Stunden bei konstanter Temperatur wiederum bei 10 Spannungsstufen (2,2 kV bis 22 kV) eine TE-Messung durchgeführt.

### 5.6.4 Ergebnisse und Auswertemethodik

Es standen fünf Teststäbe bzw. Stabstücke zur Verfügung, welche Teilentladungsmessungen mit Temperaturvariationen unterzogen wurden. Wie in Abschnitt 5.6.3 beschrieben, wurde einerseits ein Temperaturzyklus (RT-155°C-RT) durchfahren um temperaturbedingte Veränderungen bzw. etwaige dauerhafte Schädigungen feststellen zu können und andererseits wurden Versuche mit stufenweiser Temperatursteigerung (RT-155°C) unternommen.

Die Auswertung beruht auf dem Vergleich der Versuchsergebnisse in Form von Kurven der TE-Pegel bzw. auch der aufgezeichneten TE-Fingerprints bei verschiedenen Spannungshöhen bzw. Temperaturen. Insbesondere wurde dabei auch auf Unterschiede im TE-Verhalten von vorbelasteten (gealterten) Teststäben und neuen, unbelasteten Prüflingen gelegt. Messtechnisch lag das Augenmerk hierbei auf der konventionellen elektrischen TE-Messung, optische und akustische Detektion kamen nur am Rande zum Einsatz und dienten als Mittel zur Überprüfung des Aufbaus.

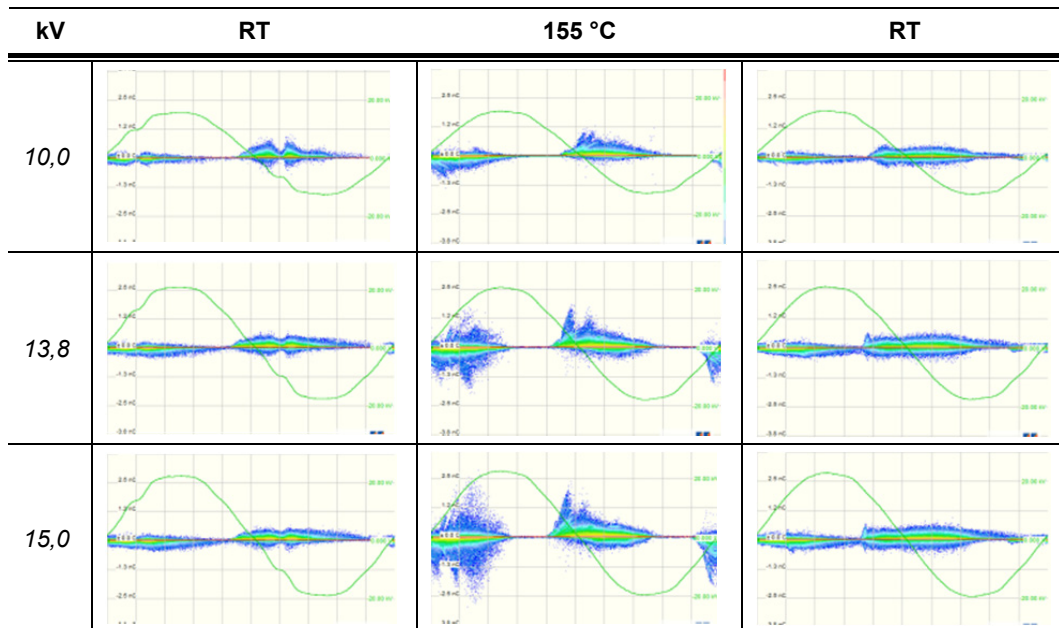
Der verwendete Versuchsaufbau wies einige Unschärfepunkte bzgl. der Messergebnisse auf. Vor allem der mit Goldband umwickelte Nutbereich, welcher die Positionierung des Stabes im Blechpaket repräsentiert muss als verbesserungswürdig betrachtet werden. Eine solche Verbesserung stellt beispielsweise das von *Klasna et al. (2010)* [45] umgesetzte Stator-Nut-Modell dar, bei dem auch der Nutbereich durch ein originalgetreues Segment des Statorblechpakets berücksichtigt

wird. Den so erlangten TE-Mustern kann wegen des hohen Realitätsgrades der gesamten Versuchsanordnung besondere Aussagekraft zugesprochen werden.

### 5.6.4.1 Ergebnisse

Die Versuche mit Temperaturzyklus ergaben für vorbelastete, gealterte Teststäbe keine bleibende Veränderung im TE-Verhalten aufgrund der Belastungen bei 155°C (siehe z.B. Abb. 5-44.a), während das für neue, unbelastete Prüflinge nicht zutrifft (siehe z.B. Abb. 5-44.b). Die Gegenüberstellung der beiden typgleichen Teststäbe #4 und #5 in Abb. 5-44 verdeutlichen dies. Es ist ersichtlich, dass der vorbelastete Prüfling #4 ein von Spannung und Temperatur nur wenig abhängiges TE-Verhalten zeigte, während das Verhalten des unbelasteten Teststabs #5 deutlich höheren Schwankungen unterlag und offenbar auch eine bleibende Veränderung erfahren hat. Auch anhand der TE-Muster lassen sich kaum Unterschiede festmachen. In Tab. 5-13 sind für den Temperaturzyklus mit Teststab #1 die TE-Fingerprints für jeweils drei Spannungswerte eingetragen.

Tab. 5-13: TE-Fingerprints zum Temperaturzyklus-Versuch an Teststab #1



Anmerkung: Skalierung der TE-Fingerprints - TE-Pegel: +/-5 nC, Spannungswert: 10 kV/Division  
 Während der ersten Messserie bei RT (linke Spalte) wurde die Spannungsform durch netzseitige Störungen beeinträchtigt, was sich auch im TE-Fingerprint niederschlug.

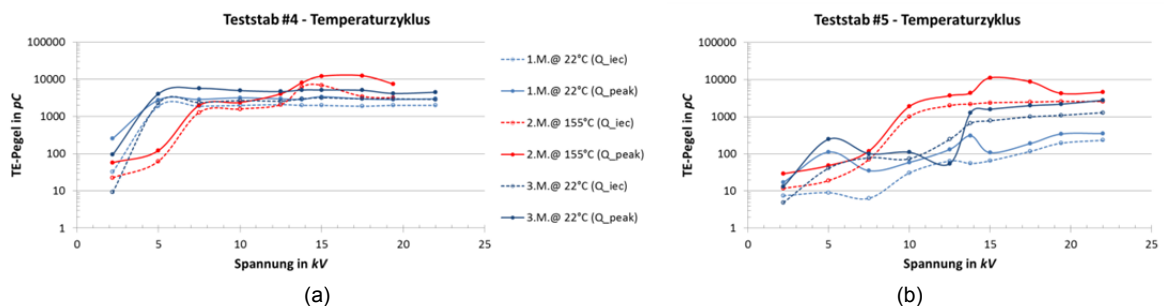
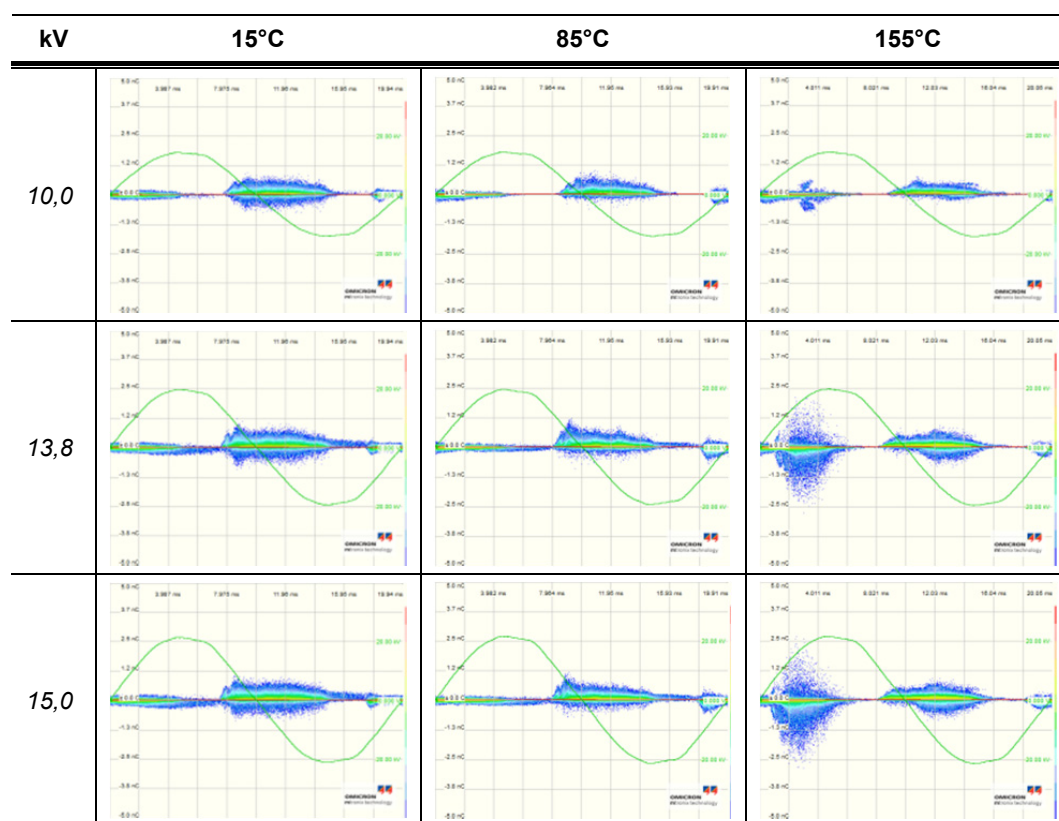


Abb. 5-44: TE-Verhalten im Temperaturzyklus – (a) gealterter, (b) neuer Teststab

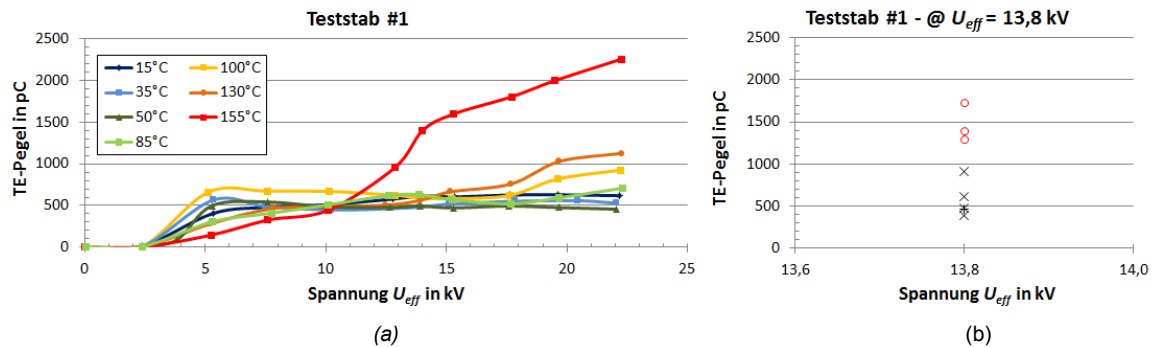
Der Temperatursteigerungsversuch ergab im Bereich 15°C bis 130°C ein konstantes TE-Verhalten. Erst beim Temperaturschritt von 130°C auf 155°C änderte sich das TE-Verhalten bei Spannungen ab ca. 10 kV deutlich (siehe Abb. 5-45.a). Abb. 5-45.b zeigt zum Vergleich alle an Teststab #1 bei RT bzw. 155°C gemessenen Werte für  $U_{Nenn} = 13,8$  kV. Die TE-Fingerprints ausgewählter Messungen (Tab. 5-14 für 15°C, 85°C und 155°C) zeigen vor allem in der positiven Spannungshalbwelle ein vermehrtes Auftreten von TE-Impulsen mit Spitzenwerten im Bereich einiger nC. Begründbar ist dies mit unterschiedlichem Dehnungsverhalten der verwendeten Materialien aufgrund thermischer Einflüsse. Die Prädominanz der TE-Impulse in der positiven Spannungshalbwelle deutet auf Entladungsaktivität in Hohlräumen zwischen Innenpotentialsteuerung und Hauptisolation hin und unterstützt diese These. Bei neuen Teststäben könnte auch der Glasübergangspunkt des Imprägnierharzes innerhalb der Isolierung zum Tragen kommen.

Tab. 5-14: TE-Fingerprints zum Temperatursteigerungs-Versuch an Teststab #1



Anmerkung: Skalierung der TE-Fingerprints - TE-Pegel: +/-5 nC, Spannungswert: 10 kV/Division

Betrachtet man die bei 155°C gemessenen TE-Pegel aller fünf Klasse F Teststäbe im Vergleich bei 10 kV (Abb. 5-46.a) und 13,8 kV (Abb. 5-46.b) so wird klar, dass aufgrund der TE-Pegel alleine kaum Schlussfolgerungen bzgl. des Zustandes des Prüflings und der auftretenden Entladungen möglich sind. Jeder Stab hat aufgrund seiner Fertigungs- und Beanspruchungshistorie ganz spezielle Eigenschaften und kann daher nur aufgrund dieser Daten in Verbindung mit TE-Fingerprints aus verschiedenen Beanspruchungsphasen beurteilt werden.



(a) ..... Temperatursteigerung

(b) .....  $Q_{iec}$ -Werte bei 13,8 kV für RT sowie für 155°C

Abb. 5-45: TE-Verhalten des Teststab #1 in Abhängigkeit der Temperatur

Im Vergleich der aus den Versuchen an den Teststäben aufgezeichneten TE-Fingerprints mit jenen TE-Fingerprints von Plättchenproben (vgl. Abschnitt 5.4.4) konnte wenig Übereinstimmung gefunden werden. Einige TE-Fingerprints aus Untersuchungen an Bänderproben (vgl. Abschnitt 5.5.6) weisen durchaus große Ähnlichkeit mit den hier bei 155°C erhaltenen TE-Fingerprints auf.

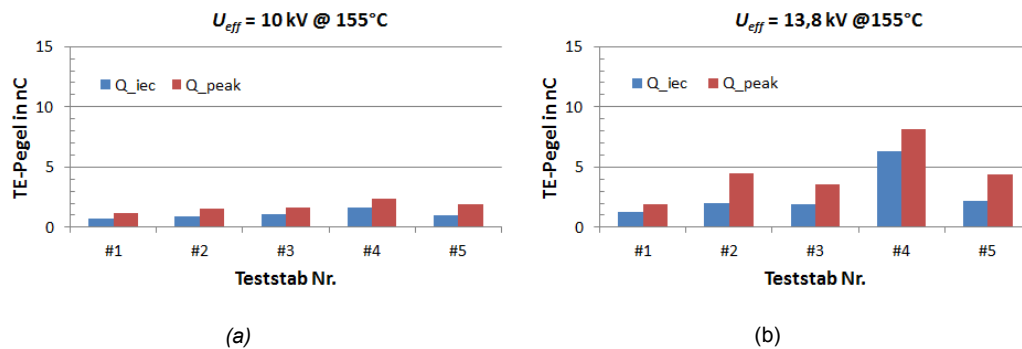


Abb. 5-46: Teststäbe im Vergleich: TE-Pegel bei  $U_{eff} = 10$  bzw. 13,8 kV @ 155°C

#### 5.6.4.2 Zusammenfassende Feststellungen

- Die Temperatursteigerungs-Versuche zeigten, dass sich ab etwa 100°C das Teilentladungsverhalten zu ändern beginnt und zwischen 130°C und 155°C eine sprunghafte Anhebung der Amplitude der Entladungen feststellbar ist.
- Temperaturzyklus-Versuche ergaben, dass die thermische Belastung bei 155°C kaum bzw. keine bleibenden Veränderungen in der Isolierung von vorbelasteten bzw. gealterten Teststäben bewirkt, wohingegen neue, unbelastete Teststäbe durchwegs bleibende Veränderungen erfuhren. Die beiden Prüflinge, welche bereits vorbelastet waren (Teststäbe #1 und #4), zeigten nach dem Einsetzen der Entladungen einen relativ konstanten Pegel über den gesamten Spannungsbereich bei allen drei Messungen des Temperaturzyklus-Versuchs. Bei den neuen und unbelasteten Prüflingen dürften hierbei noch verschiedene Prozesse stattfinden, die nach Erreichen eines gewissen stationären Verhaltens nicht mehr auftreten.

- Optische Emissionen (Detektion mittels CoronaScope) konnten lediglich an den Kontaktenden bei genügend hoher Spannung (meist erst bei 22 kV) festgestellt werden. Akustische Detektion war etwa ab 10 kV erfolgreich, jedoch ohne Möglichkeit zur Lokalisierung. Ein Temperatureinfluss auf die Emissionen dieser ausnahmslos äußeren TE konnte nicht festgestellt werden. Aufgrund des Einsatzes von gefärbtem Bandisolationmaterial sowie der Umwicklung der Nutteile mit Goldband war eine Beobachtung etwaiger TE im Inneren der Isolierung nicht möglich. Eine beobachtbare Glimmstellenentwicklung hat vermutlich aufgrund der zu kurzen und zu geringen Beanspruchung weder bei den vorbelasteten noch bei den neuen unbelasteten Prüflingen eingesetzt.
- Der Vergleich von TE-Fingerprints der Teststäbe mit solchen von Bänderproben zeigte einige Ähnlichkeit und könnte entsprechend auf ähnliche Entladungsaktivität hinweisen.

### 5.7 Zusammenfassung

Dem entwickelten Stufenplan folgend wurden vier verschiedene Probenvarianten untersucht. Dabei wurde mit elektrischen, optischen und akustischen Detektionsmethoden die Entladungsaktivität von künstlichen Fehlstellen und fertigungsbedingten Hohlräumen erfasst und analysiert.

In Vorversuchen (Stufe 0) wurden einige Materialeigenschaften für die späteren Probenentwicklungen ermittelt und es konnten grundlegende Charakteristika des TE-Verhaltens verschiedener Fehlstellen (Hohlräume, Delaminationen) bestimmt werden.

Die Versuche an zahlreichen Harzproben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln (Stufe I) zeigten, dass die TE-Aktivität kleinster Hohlräume (im Bereich 75 – 300  $\mu\text{m}$ ) großen Streuungen unterliegt. Außerdem erreicht die Entladungsleistung und somit die umgesetzte Energie nur sehr geringe Pegel. Bemerkenswert ist der Umstand, dass sich die Gewichtung des Einflusses von künstlichen und fertigungsbedingten Fehlstellen scheinbar mit der Temperatur ändert (fertigungsbedingte Gasbläschen gewinnen bei höheren Temperaturen an Einfluss).

Die Untersuchungen an Proben aus harzgetränktem Bandmaterial (Stufe II) markieren in Hinblick auf optische und akustische TE-Aktivität den wichtigsten Punkt der experimentellen Arbeiten. Besonders zu erwähnen ist hierbei vor allem der Ansatz der optischen Detektion von Entladungserscheinungen mit einer an die Versuche anschließenden Analyse durch Nachbearbeitung der aufgenommenen Bilder. Die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführte Sensitivitätsanalyse ergab, dass nach der konventionellen elektrischen TE-Messung die Detektion mittels digitaler Spiegelreflexkamera die nächstbesten Ergebnisse erzielte. Besonders geeignet war diese Methode auch, weil sich der Fokusbereich der Kamera dabei sehr gut mit dem Beobachtungsbereich der Proben deckte. Die beobachtbaren Entladungserscheinungen waren von variierender bzw. wandernder, aber immer reproduzierbarer Eigenschaft gekennzeichnet, wobei die detektierten TE-

Pegel meist im Bereich von 10-1000 pC lagen, selten darunter oder darüber. Die gemessene Entladungsleistung lag im mW-Bereich, in Bezug auf die Hohlräume konnten Werte von 20-100  $\mu$ W ermittelt werden.

Als vierter Schritt des Stufenmodells (Stufe III) wurde das TE-Verhalten von Teststäben in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht. Es standen sowohl vorbelastete als auch neue Prüflinge zur Verfügung. Die TE-Aktivität bereits gealterter Teststäbe zeigte kaum Abhängigkeiten von Temperatur und Spannung. Neue unbelastete Stäbe hingegen unterliegen bei Belastung verschiedenen Effekten, die den Anschein einer stärkeren Temperaturabhängigkeit erwecken. Diese klingt mit zunehmender Beanspruchungsdauer jedoch zu einem stationären TE-Verhalten mit geringeren Schwankungen ab. Optische bzw. akustische Detektionsmethoden konnten bei den aus herkömmlichem, gefärbtem Material gefertigten Teststäben nicht eingesetzt werden. Die geplante Fertigung von Teststäben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln aus Glas konnte im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht umgesetzt werden.





---

## 6 THEORETISCHE ANALYSEN DER TEILENTLADUNGSMECHANISMEN

### 6.1 Allgemeines

Vor und während der in *Kapitel 4* und *Kapitel 5* beschriebenen Untersuchungen wurden begleitende Analysen in Form numerischer Berechnungen und verschiedener Abschätzungen in Hinblick auf die theoretische Zündfähigkeit von Hohlraum-Anordnungen durchgeführt. Gemeinsam mit Überlegungen zum Einfluss der Temperatur sowie der bei Teilentladungen umgesetzten Energie werden in nachfolgendem Abschnitt die wichtigsten Aspekte dazu dargelegt. Sämtliche Simulationen wurden dabei mit dem FEM-Tool *Infolytica Elecnet 7.3* [119] durchgeführt.

### 6.2 Numerische Berechnungen zu den untersuchten Modellgeometrien

Die Wahl der untersuchten Modellgeometrien war neben Überlegungen zum Homogenitätsgrad vor allem von der Realitätsnähe der betreffenden Anordnungen geprägt. Daher erschien es nötig, die Feldgegebenheiten numerisch zu berechnen und für Gegenüberstellungen aufzubereiten. Aufgrund der Vielzahl an Simulationsdaten wird hier jedoch nur ein Auszug der Resultate angeführt. Ziel der verschiedenen Simulationen war es, den Vergleich der jeweiligen (lokalen) Feldbeanspruchung bei unterschiedlichen Spannungshöhen zu ermöglichen und berechneten Feldbeanspruchungen mit den Ergebnissen der auf Laborversuchen basierenden Berechnungen gegenüberzustellen.

Im Bereich der Hochspannungstechnik bzw. der Isolierstofftechnik geht man bei der Betrachtung des elektrischen Feldes üblicherweise von quasistationären Feldern aus. Die hier verwendete Software stellt mit dem *static-solver* ein Tool zur Verfügung, welches die Nachbildung einfacher Quellen mit sinusförmiger Spannung frei wählbarer Amplitude und Frequenz ermöglicht und den diesbezüglichen Anforderungen genügt. Hinsichtlich der betrachteten Feldgrößen gilt für alle Darstellung in den entsprechenden Diagrammen und Feldbildern zu den numerischen Berechnungen, dass der Betrag des elektrischen Feldvektors  $|E|$  dargestellt wurde, der im Falle der angenommenen Verhältnisse nahezu ident der Komponente des elektrischen Feldes in  $y$ -Richtung  $E_y$  ist, da die anderen Komponenten vernachlässigbar klein bleiben.

### 6.2.1 Materialeigenschaften, Geometrie, Randbedingungen, Netzeigenschaften und Simulation

Im Rahmen der Modellerstellung wurden sowohl für die Simulation der Plättchenprobe als auch der Bänderprobe und des Stabschnittes im Wesentlichen die gleichen Materialien mit entsprechenden Parametern verwendet, je nach Probenaufbau fallen einige weg oder kommen andere hinzu. Neben den Materialien, die aus der Materialbibliothek des Simulationsprogrammes übernommen werden konnten (wie z.B. Kupfer oder Epoxidharz), mussten andere mit Materialien unter Vorgabe der bestimmenden Materialparameter neu angelegt werden. Die für die AC-Feldverteilung maßgebliche Materialeigenschaft ist die relative Permittivität und kann neben anderen Daten zum Modell aus den Tabellen im Anhang B nachgelesen werden.

Die Geometrie ergab sich in erster Linie anhand der nachzubildenden Probenvarianten (vgl. Abschnitte 5.4, 5.5 und 5.6). Materialunregelmäßigkeiten wie nichtideale Oberflächen oder ähnliches fanden keine Berücksichtigung. Zur Vereinfachung der Simulationen bzw. zur Verringerung der benötigten Rechenzeit wurde die Geometrie jeweils nur zu einem Viertel dargestellt, was aufgrund der Symmetrie und der den Symmetrieebenen zugewiesenen Randbedingung *flux tangential* (Normalkomponente der elektrischen Flussdichte  $\vec{D}_{normal} = 0$ ) möglich war. Um die Geometrie wurde bei Bedarf eine sogenannte *Airbox* angelegt, wobei deren Abmessungen gegenüber dem eigentlichen Untersuchungsobjekt um mindestens den Faktor 10 größer gewählt wurden. An der Hochspannungselektrode der jeweiligen Probennachbildung wurde das Potential in Form des Spitzenwertes vorgegeben (die Frequenz von 50 Hz wurde über die Einstellungen des *solvers* gewählt), die im Laborversuch geerdete Elektrode wurde für die Berechnung mit dem Potential 0 V definiert. Als Randbedingungen für die übrigen Außenflächen der *Airbox* wurde ebenfalls *flux tangential* gewählt, da dieser Ansatz für zutreffender erachtet wurde, als die Definition eines willkürlich gewählten Potentials an jenen Flächen.

Das Netz für die numerische Berechnung wurde an den Stellen, die besondere Betrachtung erfordern, durch die Vorgabe maximaler Elementgrößen fein strukturiert und im übrigen Gebiet entsprechend einer globalen Voreinstellung etwas grobmaschiger aufgebaut. Für jede Probenvariante wurde eine Gitterunabhängigkeitsanalyse durchgeführt. Unter Nutzung der verschiedenen Möglichkeiten zur Erhöhung der Lösungsgenauigkeit (Diskretisierung bzw. Adaption der Algorithmen) wurden dabei die Auswirkungen auf das Ergebnis gegenübergestellt, um in Abwägung der zur Verfügung stehenden Prozessorleistung, der Speicherkapazität sowie der nötigen Rechenzeit ein zufriedenstellendes Simulationsergebnis zu erzielen. Erst danach wurden unter Variation der Spannung weitere Berechnungen mit unterschiedlichen Hohlraumanordnungen durchgeführt.

### 6.2.2 Nachbildung und Simulation einer Plättchenprobe

Die untersuchten Harzproben mit eingebetteten MHK wurden in Anlehnung an die tatsächlich untersuchten Plättchenproben nachgebildet, wobei Anzahl, Größe und Position der Mikroohl-

räume (MHR, die Glaswand blieb unberücksichtigt) für die Simulationen gemäß Tab. 6-1 variiert wurden. In Abb. 6-1.a ist die Geometrie des Simulationsmodells zu sehen, Abb. 6-1.b zeigt das entsprechende Feldbild bei einer an den Elektroden anliegenden Spannung  $\hat{U}$  von 15 kV. Die verschiedenen Anordnungen der Mikrohohlkugeln im Bereich zwischen den Elektroden sind in Abb. 6-2.a (Modell A mit 27 im Quadrat angeordneten 100  $\mu\text{m}$ -MHR), Abb. 6-2.b (Modell B mit einem einzelnen zentrierten 100  $\mu\text{m}$ -MHR) und Abb. 6-2.c (Modell C mit drei 100  $\mu\text{m}$ -MHR) dargestellt. Anstelle einer *Airbox* wurde hier ein entsprechend großer ÖL-Bereich um die Probe definiert. Ergänzende Angaben zu Modell und Softwareeinstellungen können in Anhang B nachgelesen werden.

Tab. 6-1: Simulation unter Variation der MHR Anzahl

Modell	Anzahl der MHR	MHR-Durchmesser	Spannungsvariation $\hat{U}$
A	27 MHR	100 und 250 $\mu\text{m}$	für alle Modelle: 7.5, 10, 12.5 und 15 kV bei 50 Hz
B	Ein zentraler MHR	100, 250, 500 und 1000 $\mu\text{m}$	
C	Drei zentrale MHR	100 und 250 $\mu\text{m}$	
F	Ohne MHR	-	

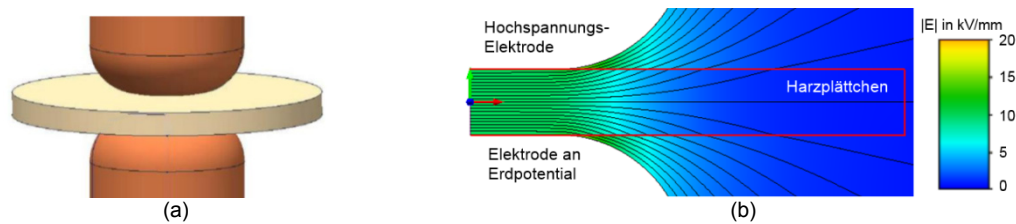


Abb. 6-1: (a) Modellgeometrie mit (b) Feldbild @  $\hat{U} = 15 \text{ kV}$  (ohne MHR)

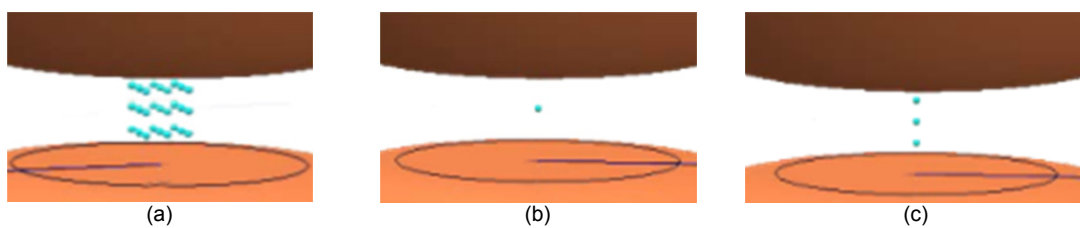


Abb. 6-2: Modell-Anordnung: (a) Modell A, (b) Modell B, (c) Modell C

Erwartungsgemäß lagen die ermittelten Feldstärkewerte in den modellierten Hohlräumen aufgrund der Feldverdrängung (siehe Abschnitt 2.4.2) jeweils etwa ein Drittel über jenen des Grundfeldes im Isoliermaterial (siehe Abb. 6-3). Es kann daher für alle Hohlräume im betrachteten Größenbereich (100-1000  $\mu\text{m}$ ) bzw. bei den simulierten Spannungswerten (7,5-15 kV) von Zündfähigkeit ausgegangen werden. Aufgrund der stochastischen Vorgänge bei Teilentladungen bzw. bei Entladungen in kleinsten Hohlräumen kann es in der Realität allerdings zu beträchtlichem Zündverzug (siehe Abschnitt 2.4.2) kommen.

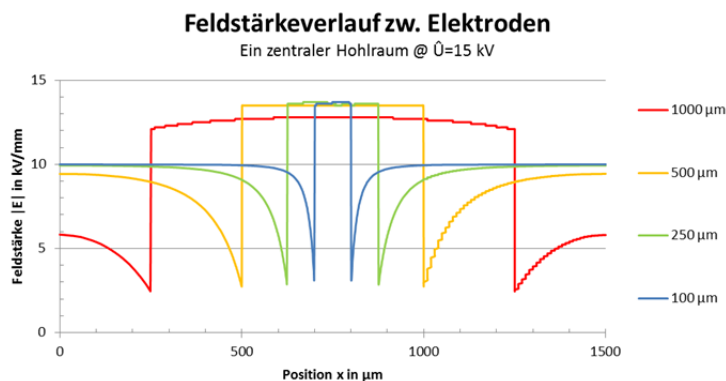
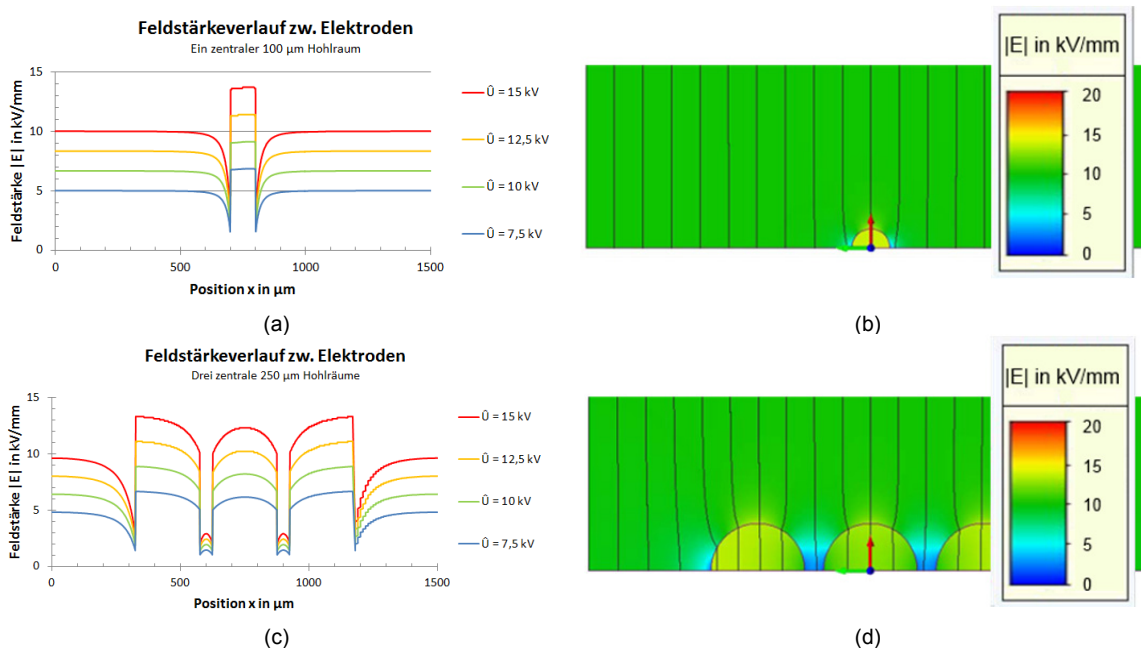


Abb. 6-3: Simulationsergebnisse für Modell B (einzeln Hohlraum)<sup>1</sup>

Ein einzelner gasgefüllter Hohlraum alleine, wie in Abb. 6-4.a und Abb. 6-4.b gezeigt, kann in Folge stetiger Entladungsaktivität in Abhängigkeit von der Gaszusammensetzung nur durch langsam verlaufende Prozesse der Oberflächenerosion eine schädigende Wirkung entfalten und bleibt aus diesem Gesichtspunkt eher vernachlässigbar. Von größerer Bedeutung erscheinen in Feldrichtung durch dünne Isolierschichten unterbrochene kettenförmige Anordnungen von mehreren Hohlräumen (siehe z.B. Abb. 6-4.c und Abb. 6-4.d). Diese können bei Wegfall einzelner Isolierschichten schlagartig längliche Hohlräume bilden. Das Durchzünden dieser länglichen Fehlstellen birgt ein mit der Hohlraumlänge zunehmendes Gefahrenpotential.



(a) ..... Feldverlauf für Modell B  
 (b) ..... Feldbild für Modell B @ 15 kV  
 (c) ..... Feldverlauf für Modell C  
 (d) ..... Feldbild für Modell C @ 15 kV

Abb. 6-4: Simulationsergebnisse für Modell B (a bzw. b) und Modell C (c bzw. d)

<sup>1</sup> Ein ähnlicher Ansatz entstand zeitgleich zu dieser Arbeit und wurde von Illias et al. [42] bereits 2011 veröffentlicht.

6.2.3 Nachbildung und Simulation einer Bänderprobe

Die untersuchten Bänderproben (vgl. Abschnitt 5.5) wurden für Feldsimulationen nachgebildet. Um die Modellerstellung zu vereinfachen, wurde die quadratische Form in eine kreisförmige geändert, ohne die grundlegenden Eigenschaften des Probenaufbaus zu variieren. Weiters konnte im Rahmen der Nachbildung aufgrund der gegebenen Symmetrie der Rechenaufwand optimiert werden, indem lediglich ein Viertel der Geometrie gezeichnet und berechnet wurde (siehe Abb. 6-5). Außerdem wurde bei der Modellierung der Einfachheit halber ein homogenes Isoliermaterial angenommen und auf die Unterscheidung der einzelnen Bänder bzw. der Glimmeranteile verzichtet. Die eigentliche Probe wurde, wie eingangs erwähnt, mit einer *Airbox* umgeben. Ergänzende Angaben zu Modell und Softwareeinstellungen können in Anhang B nachgelesen werden.

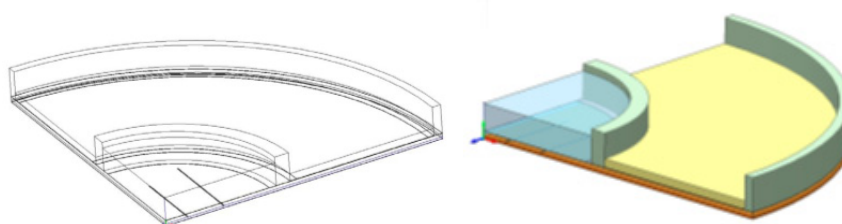


Abb. 6-5: Modellgeometrie der Bänderprobe mit zwei linienförmigen Hohlräumen

Um die Feldgegebenheiten bei verschiedenartigen Fehlstellen zu untersuchen, wurden fünf Hohlraumformen modelliert. In Abb. 6-6 ist für das Modell ohne Hohlraum (a) sowie für jede Hohlraumvariante (b-f) jeweils ein Feldbild bei  $\hat{U}=15$  kV dargestellt. Man kann deutlich die Beeinflussung des grundsätzlich homogenen Feldverlaufs durch die verschiedenen Hohlraumformen erkennen. Die Diagramme in Abb. 6-7 zeigen den Feldverlauf für jede dieser Hohlraumformen. Die höchste Feldstärkebelastung tritt dabei im Modellhohlraum mit rechteckigem Querschnitt (0,3 mm x 0,1 mm) auf (siehe Abb. 6-7.b). Bei Berücksichtigung der Townsend'schen Zündbedingung, unter Annahme eines Druckes von 1 bar im Hohlraum, liegt für die untersuchten Spannungswerte von 5-15 kV (entspricht einem Feldstärkebereich von 3-9 kV/mm im Isoliermaterial) bei allen simulierten Hohlraumtypen theoretisch Zündfähigkeit vor. Allgemein ist der Schädigungsmechanismus der Oberflächenerosion bei TE in Hohlräumen zu beachten, besonderes Schädigungspotential aber bergen spaltförmige Hohlräume mit hohem Oberflächenanteil parallel zur Feldrichtung (tangente Grenzschichtbeanspruchung).

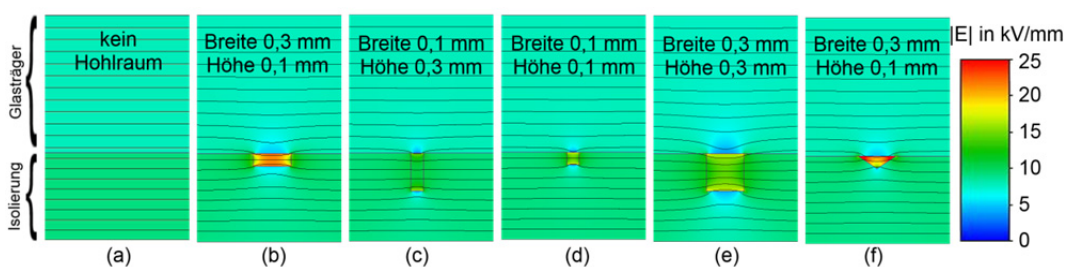


Abb. 6-6: Simulation Bänderprobe mit verschiedenen Hohlraumformen bei 15 kV

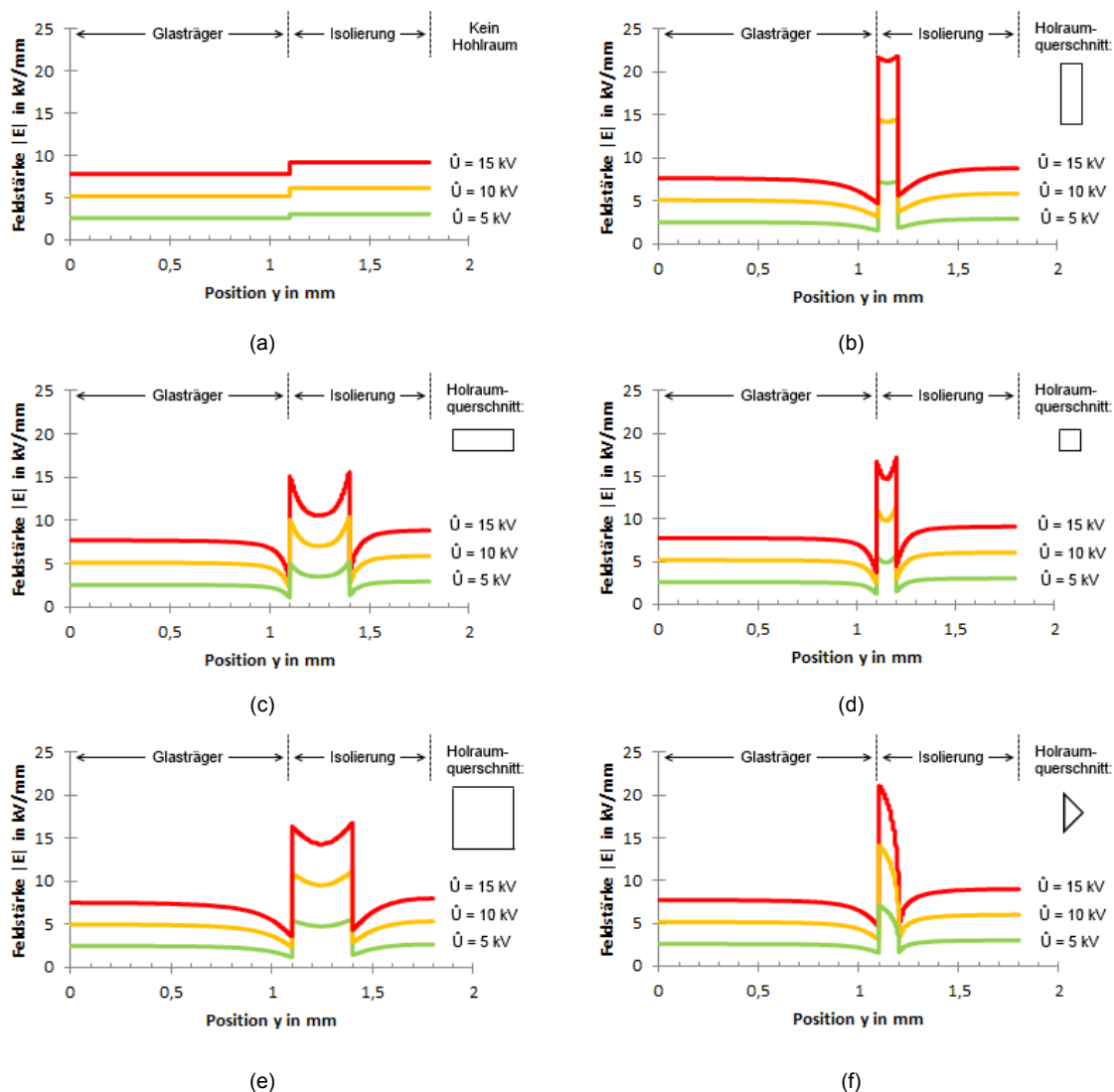


Abb. 6-7: Simulation der Feldverteilung bei verschiedenen Hohlraumformen

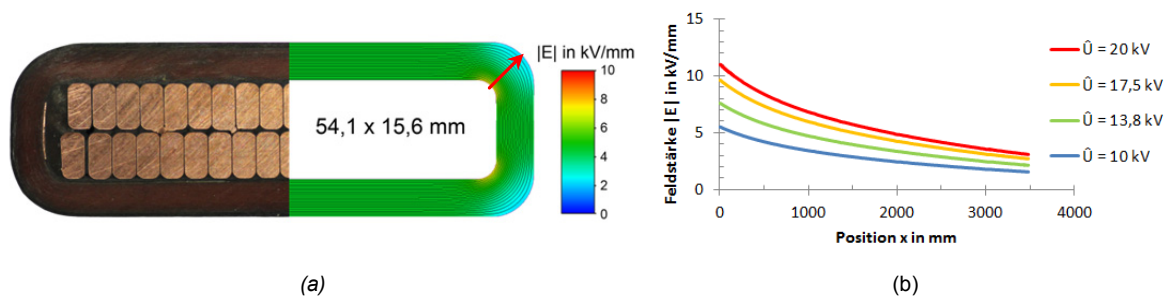
### 6.2.4 Nachbildung und Simulation eines Stabschnittes

Ergänzend zu den messtechnischen Untersuchungen an Teststäben wurde der Querschnitt eines Generatorstabs nachgebildet (siehe Abb. 6-8.a, Abmessungen siehe Tab. 6-2). Die Feldverteilung zwischen der Hochspannung führenden Innenpotentialsteuerung bzw. dem Außenglimmschutz auf Erdpotential wurde berechnet, wobei besonderes Augenmerk auf die Stabecken gelegt wurde (roter Pfeil in Abb. 6-8.a), da diese den höchsten Feldstärken ausgesetzt sind. Die Isolierung wurde als homogenes Material angenommen, auf eine Unterscheidung der einzelnen Bandlagen und Glimmerteilchen wurde verzichtet. Da bei diesem Modell das Feld immer zwischen den beiden definierten Elektroden aufgebaut wird, konnte auf eine zusätzliche *Airbox* verzichtet werden. Der betrachtete Spannungsbereich lag in Anlehnung an reale Maschinen bei Werten für  $\hat{U}$  von 10-20 kV. Für die numerischen Berechnungen mit dem FEM-Tool *Elecnet 7.3* wurden verschiedene Anordnungen von Hohlräumen (100-500  $\mu\text{m}$ ) in das Modell integriert (siehe Tab. 6-3). Abb. 6-8.b

zeigt den Feldstärkeverlauf für ein Simulationsmodell ohne Hohlraum. Ergänzende Angaben zu Modell und Softwareeinstellungen können in Anhang B nachgelesen werden.

Tab. 6-2: Abmessungen des Stabmodells zur Feldsimulation

Abmessungen des Stabmodells	Maß
Länge x Breite	54,10 mm x 15,60 mm
Dicke der Isolierung	3,00 mm (Breit- und Schmalseite)
Radius innen / außen	1,50 mm / 3,35 mm



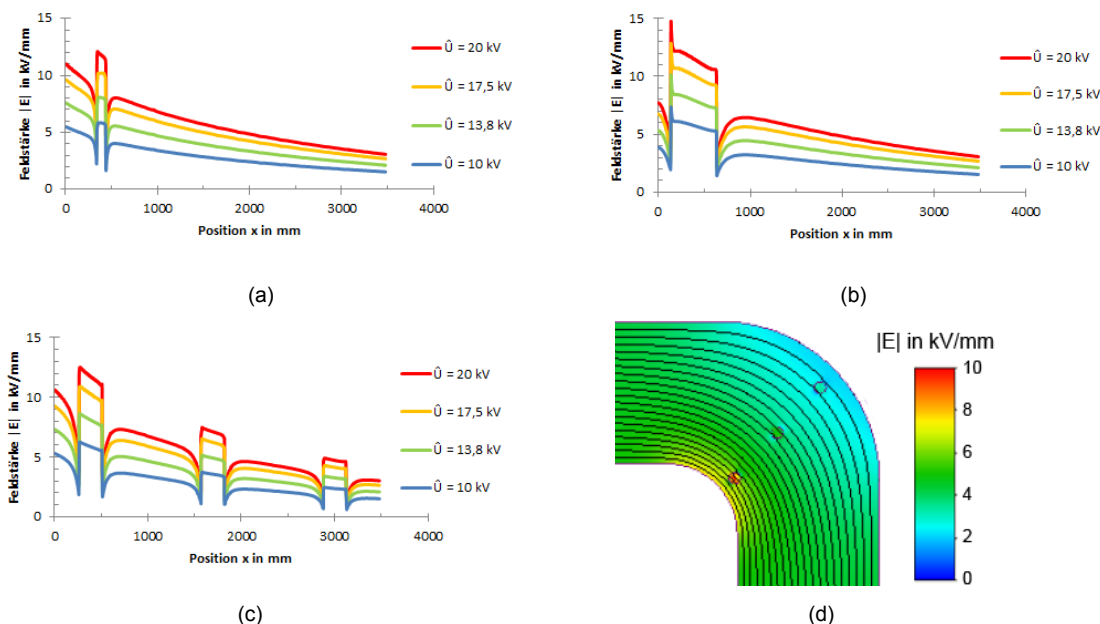
(a) ..... Stabschnitt / Feldbild @  $\hat{U}=13,8 \text{ kV}$  (b) ..... Simulationsergebnisse – Feldstärkeverlauf  $|E|$

Abb. 6-8: Geometrie des Simulationsmodells Stab ohne Hohlräume

Tab. 6-3: Simulation eines Stabschnittes - Variation der Hohlraumgröße, der Position bzw. Kombinationen aus mehreren Hohlräumen

Variation	MHR-Größe - innen	MHR-Größe -mitte	MHR-Größe - außen	
Ohne MHR	X	X	X	
Nur innen	100, 250 bzw. 500	X	X	
Nur mitte	X	100, 250 bzw. 500	X	
Nur außen	X	X	100, 250 bzw. 500	
Kombinationen	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">}</div> <div style="margin-right: 5px;">100</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">}</div> <div style="margin-right: 5px;">500</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">}</div> <div style="margin-right: 5px;">100</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">}</div> <div style="margin-right: 5px;">250</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="font-size: 2em; margin-right: 5px;">}</div> <div style="margin-right: 5px;">500</div> </div>	100, 500	X	
		100, 500	X	
		100	100	100
		250	250	250
		500	500	500

Für die Simulationen wurden an drei Positionen (innen, mitte, außen) Mikrohohlräume (MHR) mit den Durchmessern 100, 250 bzw. 500  $\mu\text{m}$  in unterschiedlichen Kombinationen angeordnet (siehe Tab. 6-3). In Abb. 6-9.a bis Abb. 6-9.c ist beispielhaft der Feldstärkeverlauf dargestellt, Abb. 6-9.d zeigt außerdem für eine Anordnung von drei 250  $\mu\text{m}$  MHR das Feldbild bei einer Spannung  $\hat{U}$  von 13,8 kV. Wiederum ist die höhere Feldstärkebelastung im Hohlraum aufgrund des Feldverdrängungseffektes erkennbar. Es ist davon auszugehen, dass für nahezu alle betrachteten Hohlräume bei den angenommenen Randbedingungen theoretische Zündfähigkeit vorliegt, nur bei Spannungen  $\hat{U}$  von  $\leq 10 \text{ kV}$  erreicht die Feldstärke in Hohlräumen, die an der Stabaußen-seite positioniert sind, nicht die für den Entladungsvorgang nötige Höhe (vgl. Tab. 6-4).



(a) .....  $E$  für 100  $\mu\text{m}$  Hohlraum innen      (b) .....  $E$  für 500  $\mu\text{m}$  Hohlraum innen  
 (c) .....  $E$  für 3 x 250  $\mu\text{m}$  Hohlraum      (d) ..... 3 x 250  $\mu\text{m}$  Hohlraum Feldbild @  $\dot{U}=13,8 \text{ kV}$

Abb. 6-9: Simulationsergebnisse des Stabschnittmodells mit verschiedenen Hohlraumanordnungen

Tab. 6-4: Theoretische Zündfähigkeit nach Townsend bei 1 bar im MHR

Spannung $\dot{U}$	MHR innen	MHR mitte	MHR außen
	100 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
10,0 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✗ nicht zündfähig
13,8 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✓ zündfähig
17,5 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✓ zündfähig
20,0 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✓ zündfähig
	250 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$
10,0 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✗ nicht zündfähig
13,8 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✓ zündfähig
17,5 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✓ zündfähig
20,0 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✓ zündfähig
	500 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$
10,0 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✗ nicht zündfähig
13,8 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✓ zündfähig
17,5 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✓ zündfähig
20,0 kV	✓ zündfähig	✓ zündfähig	✓ zündfähig

### 6.3 Überlegungen zum Temperatureinfluss auf Entladungen in Mikrohohlkugeln

Entladungen in Mikrohohlkugeln (MHK) bzw. die Zündfähigkeit gasgefüllter Hohlräume ist abhängig von der Hohlraum-Geometrie (Größe und Form), von der Oberflächenbeschaffenheit des Hohlraumes und wird unter anderem maßgeblich vom Gas selbst bestimmt. Einerseits ist dabei die Gasart von Bedeutung, andererseits üben Parameter wie z.B. der Gasdruck und die Gastempe-



ratur großen Einfluss aus. An dieser Stelle soll der Zusammenhang von Druck und Volumen in Abhängigkeit von Temperatur bei Mikrohohlkugeln beleuchtet werden, da hier unter Umständen direkte Auswirkungen auf messtechnische Untersuchungen möglich sind.

Geht man von einer ideal sphärischen Mikrohohlkugel aus Glas mit definiertem Durchmesser  $d_{MHK}$  und Wandstärke  $d_W$  aus, so ergibt sich für ein Gas konstanter Stoffmenge  $n$  bei einer Temperatur  $T_0$  ein Ausgangsvolumen  $V_0$  mit einem Ausgangsdruck  $p_0$ . Wird nun die Temperatur um  $\Delta T = T_1 - T_0$  erhöht, so ergibt sich nach Gleichung (2.1) aufgrund von Materialausdehnung der Glaswand ein neues Volumen  $V_1$  (die Ausdehnung in Richtung Wandstärke wird dabei vernachlässigt, siehe Abb. 6-10). Der neue Druck im eingeschlossenen Volumen ergibt sich seinerseits aus der Volumenvergrößerung um  $\Delta V$  und andererseits durch die Temperaturerhöhung um  $\Delta T$  zu

$$p_1 = p_0 - \Delta p \quad (6.1)$$

$$\text{mit } p_1 = p_1(\Delta T, \Delta V)$$

Für die näherungsweise Berechnung wurde angenommen, dass sich die Volumenänderung ausschließlich aufgrund der Längenänderung der Glaswand entlang des MHK-Umfanges ergibt und sich das Isoliermaterial rund um die Mikrohohlkugel (MHK) mit ausdehnt. Der Temperatureinfluss auf die Glaswandstärke wurde nicht berücksichtigt.

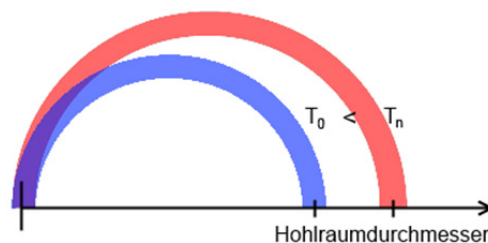


Abb. 6-10: Temperaturbedingte Längendehnung der Mikrohohlkugel-Glaswand

Ausgehend von einem Gasdruck von  $p = 0,8$  bar bei  $T_0 = 22^\circ\text{C}$  ergeben sich für eine Mikrohohlkugel mit dem Durchmesser  $d_{MHK} = 100 \mu\text{m}$ , der Wandstärke  $d_W = 1 \mu\text{m}$  und dem materialspezifischen Wärmedehnungskoeffizient von  $\alpha = 3,3 \cdot 10^{-6}/\text{K}$  die in Tab. 6-5 angegebenen Volumen- und Druckerhöhungen (siehe auch Abb. 6-12.a) bzw.  $p \cdot d$ -Werte. Das Diagramm in Abb. 6-12.b zeigt für die getroffenen Annahmen neben dem temperaturabhängigen  $p \cdot d$ -Produkt die minimal erforderliche Zündspannung  $U_Z$  bzw. Zündfeldstärke  $E_Z$  im Hohlraum sowie jene Feldstärke  $E_{isol}$ , welche im Isoliermaterial vorherrschen muss, um Entladungen in einer Mikrohohlkugel zu ermöglichen. Der Wärmedehnungskoeffizient vieler Materialien liegt im Bereich von  $\alpha = 10^{-6}/\text{K}$ , einige Kunststoffe weisen Werte um  $\alpha = 10^{-4}/\text{K}$  auf, eine Umkehrung der Drucksteigerung bei Temperaturerhöhung wäre allerdings erst ab  $\alpha > 10^{-3}/\text{K}$  erreichbar (siehe Abb. 6-11).

Tab. 6-5: Theoretischer Temperatureinfluss auf die Eigenschaften einer MHK

	T <sub>1</sub> (50°C)	T <sub>2</sub> (85°C)
$\Delta d_{MHK}$	$0,9 \cdot 10^{-8} \mu\text{m}$	$2,1 \cdot 10^{-8} \mu\text{m}$
$\Delta V$	$138 \mu\text{m}^3$	$311 \mu\text{m}^3$
$\Delta p$	0,08 bar	0,18 bar
$p \cdot d$	0,088 bar.mm	0,098 bar.mm

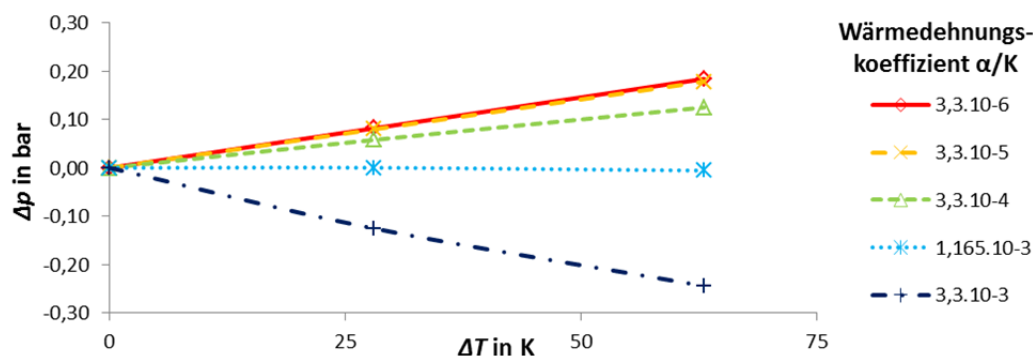


Abb. 6-11: Einfluss des Wärmedehnungskoeffizienten auf die temperaturbedingte Druckänderung in einer 100  $\mu\text{m}$ -Mikrohohlkugel

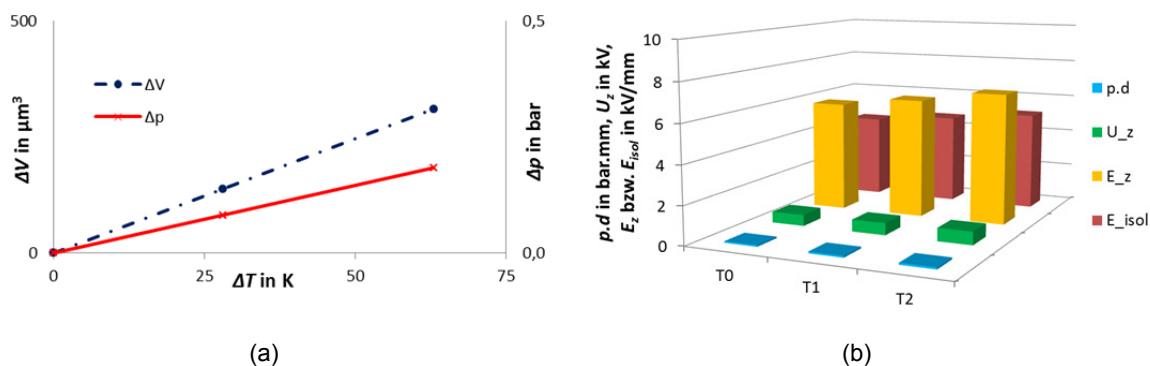


Abb. 6-12: Theoretischer Temperatureinfluss auf die Zündfähigkeit einer MHK

Aus obigen Darstellungen ist ersichtlich, dass sich unter genannten Voraussetzungen ein Anstieg der Temperatur ebenfalls in einem Anstieg der Zündspannung bzw. Zündfeldstärke widerspiegeln sollte. Allerdings berücksichtigen diese Grafiken nicht die Tatsache, dass Gasteilchen und freie Ladungsträger gleichermaßen aufgrund einer erhöhten Temperatur unter Umständen auch eine höhere kinetische Energie besitzen, wodurch eine höhere Zündwahrscheinlichkeit vorliegen kann. Die mittlere freie Weglänge auf der Teilchen Energie aufnehmen können ist nach Gleichung (2.9) proportional der Temperatur und indirekt proportional dem Druck, außerdem indirekt proportional dem Quadrat des Teilchendurchmessers (siehe Abschnitt 2.4.1).

#### 6.4 Energieumsatz und Entladungsleistung bei Teilentladungen in Mikrofehlstellen

Um die bei TE wirksamen Energieanteile und ihre Auswirkung abzuschätzen, muss man zunächst die gesamte zugeführte Energie betrachten, welche im Wesentlichen derjenigen des elektrischen Feldes entspricht. Wie in [49] ausgeführt, handelt es sich bei den Energieanteilen mit Schädigungspotential für die Isolierstoffoberfläche (d.h. Hohlraumwand) um die kinetische Energie der Ladungsträger, die Energie der UV-Strahlung, die Anregungs- und Bindungsenergie im Gasraum sowie um die thermische Energie des Gases. Die von außen zugeführte Energie  $W_a$  entspricht dabei nach [8, 49] der am Entladungsort umgesetzten Energie  $W_{TE}$  dann, wenn diese jeweils über einen längeren Zeitraum aufsummiert wird:

$$\sum W_{TE} = \sum W_a \quad (6.2)$$

Über die Beobachtungs- bzw. Messdauer  $t_{Mess}$  lässt sich nach Gleichung (2.24) der Zusammenhang zwischen der Entladungsleistung  $P_{TE}$  und der umgesetzten Energie  $W_{TE}$  herstellen.

In nachfolgender Tab. 6-6 sind die bei den unterschiedlichen Probenotypen vom Mess-System ermittelten Werte für die Entladungsleistung  $P_{TE}$  sowie zur Veranschaulichung auch das näherungsweise bestimmte Isolierstoff-Volumen eingetragen, das entsprechende Diagramm ist in Abb. 6-13 zu sehen. Während sich bei den Untersuchungen an Plättchenproben Werte im Bereich von 1-10  $\mu\text{W}$  ergaben, konnten bei den Bänderproben mit etwa 10-fachem Volumen an beanspruchtem Isoliermaterial etwa der 1000-fache Wert von 1-10 mW festgestellt werden. Die Untersuchungen an einem Teststab, dessen relevantes Isolierstoffvolumen etwa dem 1000-fachen der Plättchenprobe entsprach, ergaben bei Nennspannung tatsächlich eine Entladungsleistung von ca. 200 mW, was in etwa dem 20.000-fachen Wert entspricht. Es ist also nicht möglich, von einer volumenproportionalen Steigerung der Entladungsleistung bzw. der bei den Entladungen umgesetzten Energie auszugehen. Bei Untersuchungen an Bänderproben konnten mittels Gating (vgl. Abschnitt 5.5.3) einzelnen Hohlraumentladungen mit optischen Entladungserscheinungen Werte für die Entladungsleistung im Bereich von 20-100  $\mu\text{W}$  zugeordnet werden, was sehr gut mit den Plättchenproben in Einklang zu bringen ist.

Tab. 6-6: Beanspruchtes Isolierstoff-Volumen und gemessene Entladungsleistung

Testobjekt	Beanspruchtes Volumen*	Entladungsleistung $P_{TE}$ **
Plättchenprobe	ca. 470 mm <sup>3</sup>	1-10 $\mu\text{W}$ (@ $U_{Ein}$ )
Bänderprobe	ca. 3.500 mm <sup>3</sup>	1-10 mW (@ 14 kV)
Bänderprobe	Einzelne Hohlraumentladung	20-100 $\mu\text{W}$ (@ 14 kV)
Teststab	480.000 mm <sup>3</sup>	ca. 200 mW (@ 13,8kV)

\* ) ..... Anteil des mit nahezu homogenem Feld beanspruchten Isolierstoffvolumen

\*\* ) ..... Entladungsleistung (Wert vom Mess-System ermittelt)

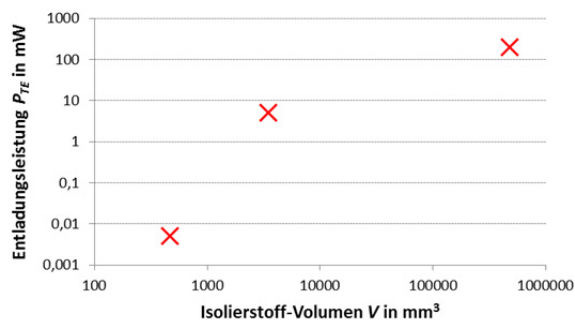


Abb. 6-13: Entladungsleistung  $P_{TE}$  und Isolierstoffvolumen

Bezüglich der verschiedenen Energieanteile sei an dieser Stelle lediglich erwähnt, dass der Großteil der Energie  $W_{TE}$  in Wärme umgesetzt wird und am Entladungsort zu geringfügigen Temperaturerhöhungen führt [49]. Da eine Schädigung aufgrund thermischer Überbelastung nur dann erfolgen kann, wenn die zugeführte Wärme ständig höher ist als die abgeführte, so bleibt die Temperaturerhöhung des Isolierstoffes aufgrund von TE vernachlässigbar. Obwohl jener Energieanteil, welcher der erzeugten UV-Strahlung zuzuordnen ist, lediglich bei etwa 1% liegt (*Kurrat (1993)* [49] gibt dafür etwa 1/100 nJ (entspricht ca.  $62 \times 10^6$  eV) für 500  $\mu\text{m}$  Hohlräume an), kann er dennoch schädigende Wirkung an der Isolierstoff-Oberfläche entfalten. Davon ist wiederum nur ein verschwindend geringer Teil im spektralen Grenzbereich zwischen UV- bzw. sichtbarem Licht für die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte optische Detektion nutzbar.

## 6.5 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Feldsimulationen wurde zur besseren Bewertung der angewandten Detektionsmethoden eine Spitze-Platte-Anordnung nachgebildet. Bei dieser stark inhomogenen Anordnung ergab sich eine gravierende Feldminderung bereits nach einem 1/100 des Elektrodenabstandes.

Die Nachbildungen der drei Probenmodelle (Plättchenprobe, Bänderprobe bzw. Stabschnitt) mit jeweils unterschiedlichen Hohlraumanordnungen wurden ebenfalls numerischen Berechnungen unterzogen. Dabei zeigte sich, dass für die betrachteten Hohlraumgrößen sowohl bei den Plättchenproben (Sphärendurchmesser 100-1000  $\mu\text{m}$ ) als auch bei den Bänderproben (längliche Hohlräume mit verschiedenen Querschnittsformen im Bereich 100-300  $\mu\text{m}$ ) und den Stabschnitten (Sphärendurchmesser 100-500  $\mu\text{m}$ ) im betrachteten Spannungs- bzw. Feldstärkebereich nahezu immer Zündfähigkeit vorlag. Die Ergebnisse verdeutlichen auch, dass einzelne Mikrohohlräume nicht unmittelbar großes Gefahrenpotential darstellen, sich jedoch die Kombination aus mehreren Hohlräumen gegebenenfalls schlagartig zu einer bedeutenden Gefahrenstelle entwickeln kann.

Die Betrachtungen zum Temperatureinfluss auf Entladungen in gasgefüllten Mikrohohlräumen zeigten, dass das thermische Dehnungsverhalten des umgebenden Isolierstoffes den bestimmenden Faktor darstellt. Für die meisten Materialien bedeutet eine Erhöhung der Temperatur gleich-

zeitig einen Anstieg des Gasdruckes (und somit eine Reduktion der mittleren freien Weglänge) innerhalb eines Hohlraumes. Lediglich einige Kunststoffe weisen thermische Längendehnungskoeffizienten in einem Größenbereich auf, der ein Abnehmen des Druckes zur Folge haben könnte. Im Besonderen ist dies bei Komposit-Materialien zu beachten. Der temperaturbedingte Einfluss auf die kinetische Energie von Gasteilchen und freien Ladungsträgern wurde hierbei nicht berücksichtigt.

Zusammenfassende Feststellungen:

- Mikrohöhlräume der untersuchten Größenordnung ab 100  $\mu\text{m}$  weisen im relevanten Spannungs- bzw. Feldstärkebereich nahezu immer theoretische Zündfähigkeit auf.
- Einzelne Mikrohöhlräume können nur durch langsame Erosionsprozesse schädigend wirken. Kombinationen von mehreren Mikrohöhlräumen können sich unter Umständen plötzlich zu gefährlichen Fehlstellen mit nicht zu vernachlässigender Größe entwickeln.
- Temperaturerhöhungen wirken sich bei gasgefüllten Hohlräumen in Isolierstoffen meist in einer Drucksteigerung aus. Eine verringerte mittlere freie Weglänge ist die Folge.
- Es nicht möglich von einer volumenproportionalen Steigerung der Entladungsleistung bzw. der bei den Entladungen umgesetzten Energie des gesamten Testobjektes auszugehen.
- Die bei Bänderproben erhaltenen Leistungswerte einzelner Hohlraumentladungen (Gating) lassen sich sehr gut mit den bei Plättchenproben festgestellten Werten in Einklang bringen.



---

## 7 DISKUSSION UND INTERPRETATION

### 7.1 Allgemeines

Die einleitend festgehaltenen Ziele dieser Arbeit, an welchen sich die nun folgende Diskussion orientieren wird, werden an dieser Stelle noch einmal in ihren wesentlichen Punkten dargelegt:

- Überprüfung der Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes auf isolierte Elektrodenpaare
- Bestimmung des TE-Verhaltens von Isolierstoffproben mit Mikrohöhlräumen
- Einsatz und Vergleich unterschiedlicher Detektionsmethoden für TE in Mikrofehlstellen

Zur Verfolgung der Aufgabenstellung wurden zwei Arbeitshypothesen aufgestellt, welche es zu bestätigen bzw. gegebenenfalls zu widerlegen galt:

- I) Das Paschen-Gesetz ist auf die Korona-Einsatzspannung von Anordnungen mit isolierten Elektrodenpaaren übertragbar.
- II) Mikrohöhlräume innerhalb der Isolierung haben TE mit zunehmender Materialerosion zur Folge.

Dazu wurden zuerst Versuche zur Bestimmung des Korona-Verhaltens von Anordnungen isolierter Elektroden durchgeführt (siehe Kapitel 4). Weiters wurden künstliche Fehlstellen in Form von gasgefüllten und in Epoxidharzplättchen eingebetteten Mikrohöhlkugeln aus Glas untersucht (siehe Abschnitt 5.4). Danach waren Proben aus harzgetränktem Feinglimmerisoliermaterial mit und ohne künstliche Fehlstellen (siehe Abschnitt 5.5) Gegenstand der Forschungsarbeit, bevor Versuche an Teststäben die experimentellen Untersuchungen abschlossen (siehe Abschnitt 5.6).

Theoretische Überlegungen, numerische Feldberechnungen und experimentelle Untersuchungen hatten zum Ziel, den Einfluss von Gasart, Temperatur, Druck und Elektrodenabstand auf die Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Anordnungen isolierter Elektroden zu bestimmen sowie das TE-Verhalten von Mikrohöhlräumen zu beleuchten. Weiters sollten Möglichkeiten zur Detektion von gasgefüllten Mikrohöhlräumen in festen Isolierstoffen evaluiert sowie etwaige Korrelationen zwischen Fehlstellengröße und messbaren Teilentladungen bzw. den dabei beobachtbaren Emissionen als auch deren Ausprägung aufgezeigt werden.

Im Rahmen der vorangegangenen Abschnitte wurden die durchgeführten Untersuchungen beschrieben und deren Auswertung in den Grundzügen dargelegt. Im nun folgenden Abschnitt wer-

den die gesammelten Ergebnisse aus den praktischen wie theoretischen Untersuchungen zusammengefasst dargelegt und in Hinblick auf die Aufgabenstellung besprochen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden diskutiert und es wird der Versuch unternommen, die zu Beginn formulierten Arbeitshypothesen anhand beobachteter Phänomene zu bestätigen bzw. mit theoretischen Ansätzen zu erklären. Dabei wird der Stand des Wissens, wie er sich zu Beginn dieser Arbeit dargestellt hat, ebenso betrachtet wie aktuelle Resultate und Aussagen der jüngeren Literatur, die sich etwa zeitgleich mit der vorliegenden Arbeit ergeben haben. Abschließend wird auf die Bedeutung der Arbeit und mögliche Auswirkungen auf Forschung und technische Anwendung eingegangen.

## 7.2 Die Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes

Von wesentlicher Bedeutung im Rahmen dieser Arbeit war die Frage nach der Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Modell-Isoliersysteme. Insbesondere der Einfluss unterschiedlicher Gase und deren Eigenschaften Druck bzw. Temperatur sowie die Schlagweite zwischen isolierten Elektroden lagen im Interesse. Überdies wurde bei den experimentellen Untersuchungen die Wirkung von Abstandhaltern beleuchtet. Im Weiteren stellte sich die Frage der Gültigkeit des Paschen-Gesetzes bei Entladungen in Mikrohohlräumen.

### 7.2.1 Bereiche der Paschen-Kurve

Das Paschen-Gesetz selbst, welches aus der Dissertationsarbeit von *F. Paschen* [71] hervorging und von *J. Townsend* erstmals ausformuliert wurde, blieb über die Jahre nicht gänzlich unangetastet. So gibt es sowohl für kleine und kleinste  $p \cdot d$ -Werte (Bereich I in Abb. 7-1), wie auch bei sehr hohen  $p \cdot d$ -Werten (Bereich III in Abb. 7-1) Beobachtungen, die von der Paschen-Kurve abweichende Ergebnisse zeigen. Neuere Veröffentlichungen wie jene von *Carey et al. (2011)* [23] zeigten beispielsweise Abweichungen bei höheren  $p \cdot d$ -Produkten (ab ca. 20 bar.mm), wobei sich eine unterschiedliche Gewichtung von Druck und Abstand feststellen ließ. Der Bereich sehr niedriger  $p \cdot d$ -Werte links des Paschen-Minimum bis hin zu eben jenem Wendepunkt steht wie bei *Radmilović-Radjenović et al. (2012)* [77] in jüngster Zeit häufig im Mittelpunkt von Forschungsinteressen, da er z.B. im Feld der MEMS (micro-electro-mechanical-systems) von Bedeutung ist.

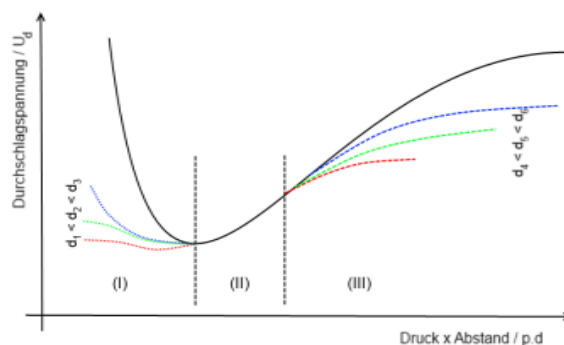


Abb. 7-1: Paschen-Kurve mit Bereichen bekannter Abweichungen



Für die Bereiche von Druck und Abstand, die in dieser Arbeit betrachtet wurden – d.h. im bereits „linearen Bereich“ rechts des Paschen-Minimums (Bereich II in Abb. 7-1) – herrscht jedoch größtenteils Übereinstimmung über die Gültigkeit des Zusammenhangs nach Paschen bzw. Townsend.

### 7.2.2 Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Anordnungen mit isolierten Elektroden

Die Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf die Korona-Einsatzspannung bei Anordnungen von isolierten Elektrodenpaaren scheint grundsätzlich möglich zu sein. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an einem Modell-Isoliersystem unter Luft sowie unter Wasserstoff (siehe Abschnitt 4.6) zeigen, dass die ermittelte TE-Charakteristik jener des Paschen-Gesetzes entspricht. Innerhalb der beobachteten Grenzen von Druck und Elektrodenabstand und unter Berücksichtigung der speziellen Rahmenbedingungen während der Experimente kann die Arbeitshypothese I daher als bestätigt angesehen werden (d.h. eine Übertragbarkeit ist gegeben).

Die grundsätzliche Charakteristik ist für Luft und Wasserstoff ähnlich und ergab unter Wasserstoff deutlich geringere Werte für die Ein- sowie die Aussetzspannung. Bei höheren Lufttemperaturen kann nach Anwendung eines entsprechenden Korrekturfaktors gleichfalls von derselben Charakteristik ausgegangen werden. Unter Wasserstoff konnte allerdings keine derart deutliche Temperaturabhängigkeit beobachtet werden.

Bei Anordnungen mit Abstandshaltern ergab sich mit steigendem  $p \cdot d$ -Produkt (in diesem Fall gleich bedeutend mit steigendem Druck) ein zunehmendes Abweichen von der Paschen-Charakteristik. Dies kann damit erklärt werden, dass mit steigendem Druck zwar die Festigkeit von Gasstrecken steigt, die Grenzschicht zwischen Gas und festem Isolierstoff allerdings nach wie vor die Schwachstelle darstellt.

### 7.2.3 Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Mikrofehlstellen

Daran anschließend drängt sich die Frage auf, ob die bekannten Gasentladungsprozesse bzw. die gebräuchlichen physikalischen Modelle auch auf Mikrokavitäten übertragbar sind. Für die Untersuchung von definierten Mikrofehlstellen wurden Mikrohohlkugeln aus Glas unterschiedlicher Korngrößenbereiche in Harzproben (Plättchenproben) eingebettet. Alle Überlegungen bezüglich der solchermaßen isolierten *Problemstelle Mikrohohlraum* wurden unter der Annahme getroffen, dass das Entladungsverhalten der künstlich erzeugten Glas-Sphären jenem von gasgefüllten Hohlräumen entspricht, wie sie in Feststoffisolierungen vorkommen. Trägt man nun die entsprechenden Wertepaare  $U_0$  und die  $p \cdot d$ -Produkte aus Abschnitt 5.4.4 (siehe Tab. 7-1) gemeinsam mit der Paschen-Kurve in ein Diagramm ein (siehe Abb. 7-2), so zeigt sich, dass diese zum Teil auf bzw. nahe der Paschen-Kurve für Luft bzw. Stickstoff liegen (O, M und J). Lediglich ein geringer Teil der Proben wies etwas größere Abweichungen auf (G, ungeachtet dessen, welche Hohlräume berücksichtigt werden). Demnach scheint die Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Mikro-

hohlräume möglich zu sein und es wird weiterhin von der Gültigkeit innerhalb der betrachteten Grenzen ausgegangen.

Tab. 7-1: Ermittelte Ergebnisse für Proben mit MHK bei 22°C<sup>1</sup>

	$p$ in bar	$d_M$ in $\mu\text{m}$	$p \cdot d$ in bar.mm	$U_O$ in kV	$U_X$ in kV
$G_{MHK}$ ( $G_{Bläschen}$ )	1/3 (1)	90,5 (300)	0,03 (0,30)	1,5 (4,96)	0,35 (1,40)
J	4/5	275	0,22	1,87	1,16
M	4/5	225	0,18	0,95	1,00
O	4/5	180	0,14	0,72	0,90

$U_O$  ..... Zündspannung aus Messergebnissen unter Berücksichtigung der  $p \cdot d$ -Werte ermittelt

$U_X$  ..... Zündspannung als Schnittpunkt der Paschen-Kurve mit den entsprechenden  $p \cdot d$ -Werten ermittelt

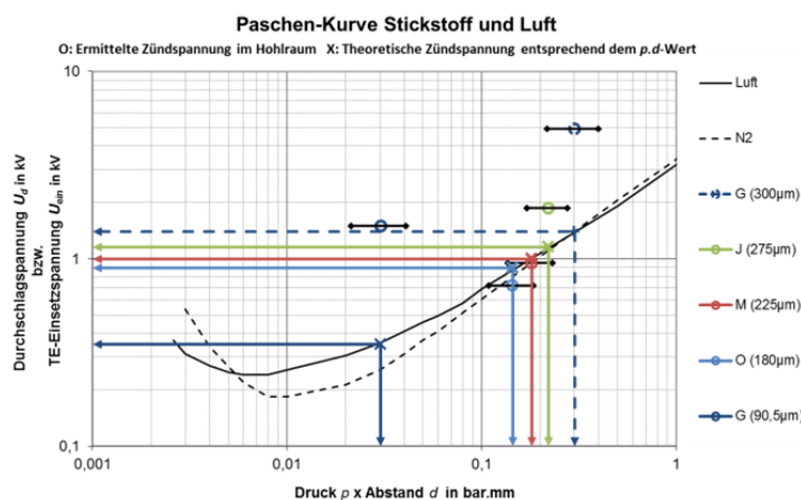


Abb. 7-2: Paschen-Kurve für Luft und Stickstoff bei 25°C sowie ermittelte TE-Einsatzspannungen der eingebetteten MHK bei 22°C

In Zusammenhang mit den untersuchten Hohlraumentladungen ist anzumerken, dass die Art der ablaufenden Prozesse nicht eindeutig geklärt ist. Während z.B. in [20] der Streamer-Mechanismus genannt wird, werden die Vorgänge in [49] vor allem aufgrund des Einflusses der Photoemission mit dem Townsend-Mechanismus beschrieben.

### 7.3 Teilentladungen in Mikrofehlstellen innerhalb der Feststoff-Isolierung

Das Auftreten von Mikrofehlstellen innerhalb fester Isolierstoffe bzw. die darin ablaufenden Entladungen bedeuteten den wesentlichsten Schwerpunkt dieser Arbeit (siehe Kapitel 5). Die Ziele der nachfolgend diskutierten Untersuchungen lagen insbesondere darin, zu eruieren inwieweit kleinste Fehlstellen detektiert werden können und welche Auswirkungen von Mikrohohlräumen ausgehen können. Außerdem sollten unter Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen unterschiedliche Detektionsmethoden auf ihre Eignung überprüft werden. Dazu wurde dem entwickel-

<sup>1</sup> Tab. 7-1 und Abb. 7-2 berücksichtigen mittlere Durchmesser bzw. Druckwerte nach Angaben der Bezugsquellen.

ten Stufenplan folgend damit begonnen, die Entladungscharakteristik definierter Fehlstellen mittels TE-Messungen an Harzproben zu bestimmen (Abschnitt 5.4), um anschließend Isolierstoffproben aus Feinglimmerbandmaterial (erhöhter Realitätsgrad) mit und ohne künstliche Fehlstellen zu untersuchen (Abschnitt 5.5). Danach wurden mit den Teststäben auch Proben mit sehr hohem Realitätsgrade untersucht (Abschnitt 5.6). Schlussendlich sollte ein Vergleich der Entladungscharakteristiken der einzelnen Stufen ermöglicht werden.

### 7.3.1 Einflussgrößen auf die Entladungsaktivität in Mikrohöhlräumen

Die verwendeten Mikrohöhlräume mussten von zwei Herstellern bezogen werden, was sich auch in der Charakteristik des Entladungsverhaltens der entsprechenden Proben widerspiegelte. So ergaben sich zunächst für Proben mit MHK vom Typ A (Größenbereich 75-106  $\mu\text{m}$ ) geringere Ein- bzw. Aussetzfeldstärken bei höheren Temperaturen, wie dies auch in [80, 89] bestätigt wird. Bei Proben mit Mikrohohlkugeln vom Typ B (Größenbereiche 160-200  $\mu\text{m}$ , 200-250  $\mu\text{m}$  und 250-300  $\mu\text{m}$ ) konnte keine Temperaturabhängigkeit festgestellt werden. Ausschlaggebend dafür könnte hierbei die Gaszusammensetzung in den Hohlräumen sein, vor allem in Anbetracht der bei Versuchen an Modell-Isoliersystemen unter Wasserstoff erlangten Resultate ähnlicher Charakteristik (siehe Tab. 7-2 bzw. Abschnitt 4.6). Eine weitere Möglichkeit liegt im Rückgang der Feuchtigkeit in den MHK bei höheren Temperaturen, wie dies auch in [80] angeführt wird.

Tab. 7-2: Einfluss von Gas- bzw. MHK-Typ auf die Temperaturabhängigkeit

	Gastyp	MHK-Typ
Temperaturabhängigkeit	unter synthetischer Luft	Typ A
Keine Temperaturabhängigkeit	unter Wasserstoff	Typ B

Bei Proben mit MHK vom Typ B konnte eine Abhängigkeit der Zündspannung  $U_Z$  bzw. der Zündfeldstärke  $E_Z$  von der Hohlraumgröße festgestellt werden. So waren bei größeren Mikrohohlkugeln auch etwas höhere Einsetzfeldstärken zu beobachten, was sich u.a. auch in [22, 49] bestätigt findet. Ebenfalls typabhängig schienen die charakteristischen TE-Fingerprints zu sein.

Ein Spezialfall unter den untersuchten Harzplättchen stellt die Probenserie G dar, die neben Mikrohohlkugeln aus Glas vom Typ A (ca. 75-106  $\mu\text{m}$ ) auch gasgefüllte Bläschen (ca. 300  $\mu\text{m}$ ) aufwies, welche sich während des Fertigungsprozesses ausbildeten. Diese Proben zeigten bei Raumtemperatur ein nahezu identes TE-Verhalten wie andere Proben mit MHK des Größenbereichs 75-106  $\mu\text{m}$  (Typ A). Mit steigender Temperatur näherte sich das TE-Verhalten allerdings zunehmend jenem von Proben mit Mikrohohlkugeln des Größenbereiches 250-300  $\mu\text{m}$  vom Typ B an, was besonders aus den Weibull-Darstellungen in Abb. 5-20 bis Abb. 5-22 (siehe Seite 79) hervorgeht.

Während sich das unterschiedliche Verhalten der gemessenen Spannungs- bzw. der entsprechenden Feldstärkewerte noch mit dem MHK Typ begründen ließe, so zeigt die Betrachtung der TE-Pegel ( $Q_{iec}$  bzw.  $Q_{Peak}$ ) bei den untersuchten Plättchenproben ein anderes Verhalten. Es wurden

sehr geringe TE-Pegel zum Teil nur wenig über 1 pC festgestellt, was z.B. auch in [20, 22] so beschrieben wurde (vgl. Abb. 7-3). Das bedeutet höchste Ansprüche an Messtechnik und Schirmung gegenüber äußeren Störeinflüssen. Erst scheint der Pegel mit der Größe der Mikrohohlkugeln und ungeachtet des MHK Typ anzusteigen (wie das auch von *Burgener (2003)* [22] festgestellt wurde), um allerdings im Falle der größten Mikrohohlkugeln wieder niedrigere Werte anzunehmen. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei Betrachtung der Anzahl der Entladungen pro Periode und der Entladungsleistung (siehe Abschnitt 5.4.4). Eine Tendenz des TE-Pegels bzw. der Impulswiederholrate in Abhängigkeit von der Temperatur, wie u.a. in [89] beschrieben, konnte nicht beobachtet werden.

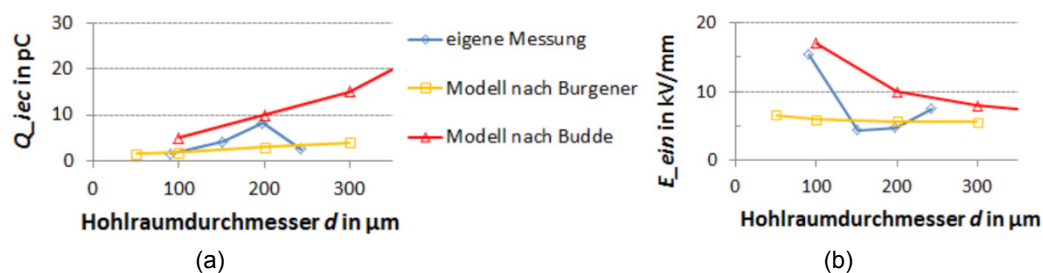


Abb. 7-3: Entladungen in MHR - Vergleich mit verschiedenen Modellen<sup>2</sup>

Abb. 7-3.a vergleicht die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ladungswerte  $Q_{iec}$  mit jenen aus den Modellen nach *Burgener (2003)* [22] bzw. nach *Budde (2010)* [20], in Abb. 7-3.b sind jeweils die Werte für die Einsetzfeldstärke (Grundfeld)  $E_{ein}$  gegenübergestellt. Zwar unterliegt die Tendenz der eigenen Ergebnisse jeweils einer Richtungsänderung, doch scheint eine allgemeine Übereinstimmung mit dem Wertebereich der Modelle nach *Burgener* bzw. *Budde* vorzuliegen.

Bei einer Bänderprobe aus harzgetränktem Feinglimmer-Isoliermaterial mit länglichen Mikrohohlräumen hatte eine thermische Vorkonditionierung bei niedriger Temperatur (ca.  $5^\circ\text{C}$ ) eine gedämpfte TE-Aktivität zur Folge (d.h. niedrigere TE-Pegel, geringere Impulsanzahl). Nachdem die Probe Raumtemperatur erreicht hatte, normalisierte sich das Verhalten wieder und die optische wie elektrische TE-Aktivität stieg wieder auf zuvor beobachtete Pegel an. Eine Vorwärmung (ca.  $75^\circ\text{C}$ ) hingegen hatte keinerlei Einfluss auf das Entladungsverhalten bzw. die beobachtete TE-Charakteristik der untersuchten Bänderprobe. Während sich die verringerte Impuls-Amplitude bei niedrigen Temperaturen bei *Seghier und Mahi (2008)* [89] bestätigt findet, beobachteten die beiden Autoren den gegenteiligen Effekt in Bezug auf die Impulswiederholrate. Neben dem Karbonisieren der Hohlraumoberfläche bei höheren Temperaturen wird auch der materialspezifischen Glasübergangstemperatur großer Einfluss zugeschrieben, mit deren Erreichen plötzliche und signifikante Änderungen einhergehen können.

<sup>2</sup> Budde betrachtet sphärische Hohlräume, bei Burgener sind es zylindrische Hohlräume ( $h=300 \mu\text{m}$ ).

### 7.3.2 Entladungen in Hohlräumen mit optischen Erscheinungen

Der Schritt von in Harzplättchen eingebetteten Mikrohohlkugeln zu den Bänderproben aus harzgetränktem, feinglimmerhaltigem Isoliermaterial bedeutete einen gesteigerten Realitäts- aber auch Komplexitätsgrad. Diese Proben erlaubten zusätzlich den Einsatz von optischen Detektionsmethoden zur Beobachtung der Entladungsaktivität im Inneren der Isolierung. Aufgrund der Tatsache, dass eine Wasserelektrode verwendet wurde (siehe Abschnitt 5.5), musste im Rahmen dieser Arbeit auf Experimente an Bänderproben bei höheren Temperaturen verzichtet werden.

#### 7.3.2.1 Untersuchte Hohlräume

Die Hohlräume bzw. deren Entladungen und die dabei aufgetretenen optischen Erscheinungen waren teils fertigungsbedingt und teils künstlicher Natur. Bei den fertigungsbedingten Hohlräumen handelte es sich um längliche Gaseinschlüsse entlang von Bandüberlappungskanten, bei Verwendung von Flächenmaterial um einzelne punktförmige Fehlstellen bzw. um Ansammlungen solcher punktförmiger Mikrohohlräume. Als künstliche Fehlstellen wurden, wie bei den Plättchenproben, Mikrohohlkugeln aus Glas eingesetzt. Im Rahmen der Simulationen wurden Bänderproben mit länglichen Hohlräumen verschiedener Querschnittsformen nachgebildet (siehe Abschnitt 6.2.3), wobei die höchsten Feldbeanspruchungen in den Formen nach Abb. 6-6.b bzw. f auftraten. Aus der Literatur geht allerdings hervor, dass vor allem spaltförmige Hohlräume parallel zum elektrischen Feld (z.B. Abb. 6-6.c) wegen der großen Grenzflächenanteile in Feldrichtung schädigende TE erfahren (vgl. Abschnitt 2.4.2).

#### 7.3.2.2 Optische und akustische Emissionen

Die bei Bänderproben beobachteten optischen Emissionen traten immer wieder an denselben Stellen auf, dennoch kann dabei wegen der stark variierenden Eigenschaften nicht von unmittelbarer Reproduzierbarkeit gesprochen werden. Eine naheliegende Schlussfolgerung ist, dass es sich bei dem zeitweiligen Verlöschen von optischen Entladungserscheinungen bei gleichzeitigem Rückgang der TE-Pegel um thermische Effekte handelt, welche gemeinsam mit wechselnder Leitfähigkeit der Hohlraumwandungen für zeitweises Verlöschen der optischen Emissionen sorgt und zu einem Rückgang des TE-Pegels führt. In jenen Fällen in denen der TE-Pegel unverändert blieb während die optischen Entladungen nicht mehr beobachtbar waren, ist eher von den aus der Literatur bekannten druckbedingten Effekten auszugehen.

#### 7.3.2.3 Zeitliche Veränderung der Entladungserscheinungen

Bei den Bänderproben ergaben sich bei längerer Versuchsdauer Veränderungen der elektrisch messbaren Entladungsaktivität sowie der detektierbaren optischen und akustischen Entladungserscheinungen (siehe Abb. 7-4 bzw. Tab. 7-3). Die Betrachtung des Entladungspegels zeigt ein sehr heterogenes Bild, was dem Umstand zuzuschreiben ist, dass sich alle Proben im Aufbau voneinander unterscheiden. Die Entladungsleistung  $P_{TE}$  (Ausgabe des Mess-Systems) lag meist inner-

halb einer Dekade etwa bei 1-10 mW und unterlag wesentlich geringeren Schwankungen als TE-Pegel bzw. optische Entladungserscheinungen. Die Analyse des Parameters  $P_{TE}$  scheint daher kaum zur Gewinnung von Aussagen in Bezug auf optische oder akustische Entladungserscheinungen geeignet.

Tab. 7-3: Messintervalle mit intensiven optischen bzw. akustischen Erscheinungen

Testobjekt	Intensive optische Erscheinungen	Intensive akustische Erscheinungen
#1	Minute 60 – Minute 80	-
#2	-	Messbeginn – Minute 30
#3	Minute 30 – Messende	Messbeginn – Minute 45
#4	Minute 20 – Messende	-
#5	Minute 30 – Minute 45	-
#6	Minute 50 – Minute 80	-

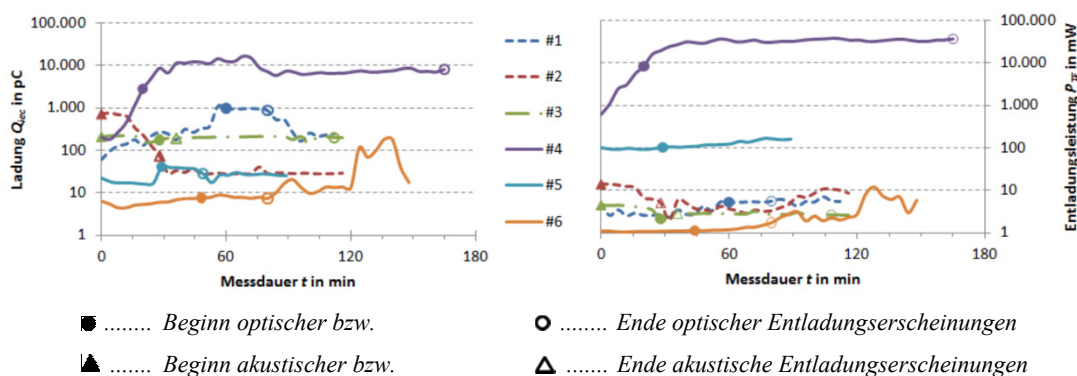


Abb. 7-4: Zeitliche Entwicklung von  $Q_{iec}$  sowie  $P_{TE}$  bei Bänderproben

Der Zusammenhang zwischen optisch detektierten Entladungserscheinungen und der elektrisch erfassten TE-Aktivität kann vorerst nur in eine Richtung festgestellt werden. So scheint der Rückschluss auf optische Entladungsaktivität aufgrund der Ermittlung bestimmter TE-Pegel nicht möglich zu sein. Der anwendungstechnisch interessantere Schluss, dass nämlich Teilentladungen mit entsprechend hohen TE-Pegeln auftreten, wenn optische Erscheinungen mit gewisser Intensität detektiert werden können, scheint zumindest beschränkte Gültigkeit zu besitzen. Die Tatsächlichen TE-Pegel bei gleichzeitigem Auftreten optischer Erscheinungen unterliegen jedoch großen Schwankungsbreiten. Eine mögliche Erklärung des Auftretens von optischen Phänomenen könnte auch in probenspezifischen Pegelunterschieden liegen.

### 7.3.2.4 Einfluss des Isoliermaterials sowie der Hohlraumform

Der Einfluss des verwendeten Isoliermaterials (feinglimmerhaltiges Band- bzw. Flächenmaterial) und der jeweils vorkommenden Hohlraumform soll anhand von Experimenten mit einer Versuchsdauer von wenigen Stunden dargelegt werden. Bei der Hälfte der untersuchten Proben konnten keine oder nur eine geringe bleibende Änderung im Entladungsverhalten festgestellt werden (vgl. #1, #3 und #5 in Abb. 7-4). Dabei beobachtete signifikante aber nicht dauerhafte TE-

Pegeländerungen können mit hoher Wahrscheinlichkeit als thermische Effekte eingestuft werden. Die andere Hälfte der Proben zeigte nach einiger Zeit, in Abhängigkeit vom verwendeten Isoliermaterial, bleibende Veränderungen der Entladungsaktivität (vgl. #2, #4 und #6 in Abb. 7-4). Probe #2 mit klassischem Bandmaterial zeigte einen sinkenden TE-Pegel und verringerte Intensität der optischen Emissionen, bei Verwendung von Flächenmaterial konnte eher ein Ansteigen des TE-Pegels und der Entladungsleistung festgestellt werden. Das könnte auf die unterschiedlichen Typen von Fehlstellen hinweisen, die je nach Basismaterial eher auftreten. Bezüglich der Hohlraumform ist vor allem der Unterschied zwischen einzelnen oder in Gruppen auftretenden sphärischen oder ellipsoiden Formen (bei Flächenmaterial) und den länglichen Formen (bei Bandmaterial) interessant. *Adhikari et al. (2012)* [2] haben in ihren Untersuchungen die Bedeutung von der Art der Fehlstelle (geschlossen bzw. an einem geschlossenen oder offenen Kanal hängend) herausgearbeitet und dabei insbesondere die Möglichkeit des Druckausgleichs mit angrenzenden Kanälen angeführt. Demnach erfahren Hohlräume mit geschlossenen Kanälen (und damit höheren Druckänderungen) die höchsten Ladungswerte und gemeinsam mit abgeschlossenen Hohlräumen auch die größte Schädigung der Isolierstoff-Oberfläche. Die bei zwei Bänderproben eingebrachten Mikrohohlkugeln aus Glas konnten nicht als Ausgangspunkt der optischen Entladungserscheinungen festgemacht werden, vielmehr wird angenommen, dass diese ebenfalls von gasgefüllten Hohlräumen ausgegangen sind, die sich im Zuge der Probenfertigung gebildet haben.

### 7.3.3 Auswirkungen von Teilentladungen in Mikrohohlräumen

Mikrohohlräume im Allgemeinen und die Auswirkung von TE in Mikrohohlräumen im Speziellen gewinnen zunehmend an Bedeutung, zumal sich im Bereich der technischen Anwendungen der Trend zu verringerten Dimensionen (Isolierwandstärken) sowie zur Erhöhung der zulässigen Beanspruchungen (Feldstärke und Temperatur) fortzusetzen scheint.

In Übereinstimmung mit der Literatur wird das Feld im Hohlraum entsprechend der am Isolierstoff anliegenden Spannung in Abhängigkeit vom Isoliermaterial und dem Füllgas aufgebaut. Außerdem kommt es je nach Leitfähigkeit und Beschaffenheit der Hohlraumwandung zu Ladungsträgeranlagerung an den Polen bzw. auch zu Raumladungsbildung im Gasvolumen. Schließlich kann es bei Überschreiten der Zündspannung (gemäß Schlagweite und Druck) und bei Existenz von Startelektronen (vgl. Zündverzögerung) zur Entladung und damit zur plötzlichen Überbrückung der bis dahin wirksamen Gasisolierung kommen, der Hohlraum wird leitfähig. Energien aus dem Feld können in unterschiedlichen Formen auf das Gas sowie den angrenzenden Isolierstoff wirken, so geht eine Entladung vornehmlich mit einer Temperaturerhöhung des Gases, sowie einer Druckerhöhung und der Aussendung von elektromagnetischer Strahlung (vornehmlich im Bereich UV bzw. sichtbaren Bereich) einher. Zusätzlich ergibt sich für das übrige feldbeanspruchte Volumen eine neue Situation mit erhöhten Belastungen für Isolierstoff und benachbarte Hohlräume.

### 7.3.3.1 Zündfähigkeit von Modellhohlräumen

Die numerischen Berechnungen anhand von Simulationsmodellen der Plättchenproben mit Mikrohöhlräumen (siehe Abschnitt 6.2.1) verdeutlichten, dass für MHR im betrachteten Bereich der Hohlraumgröße bzw. des Spannungsbereiches in Abhängigkeit der Gasfüllung (hier wird von Luft oder einem luftähnlichem Gas ausgegangen) nahezu immer theoretische Zündfähigkeit besteht. Einzelne und im Verhältnis zur Isolierwandstärke kleine Hohlräume können lediglich durch TE-bedingte Oberflächenerosion eine schädigende Wirkung ausüben. Erst mit steigendem Hohlraumdurchmesser entstünde bei Entladung und damit Überbrückung des Hohlraumes eine übermäßig hohe Feldbeanspruchung der verbleibenden Restisolierstrecke. Da aber so große Hohlräume unwahrscheinlich sind und in der Praxis eher mit Anordnungen mehrerer kleinerer gasgefüllter Hohlräume zu rechnen ist (wie auch in [20] angemerkt), wurden auch solche kombinierte Anordnungen nachgebildet. Zusammenfassend kann für die Kombination aus mehreren gleich oder auch unterschiedlich großen Mikrohöhlräumen festgestellt werden, dass auch das langsame Erodieren der Isolierstrecken zwischen den einzelnen Hohlräumen als gefährlich eingestuft werden kann. Das Entladen und damit Kurzschließen eines Hohlraumes ändert plötzlich den Einfluss auf das angrenzende Isoliermaterial sowie die benachbarten Hohlräume. Das Verschwinden einer dieser trennenden Isolierstellen würde schlagartig einen größeren, länglichen Hohlraum entstehen lassen und wiederum erhöhte Gefahr für die verbleibende Restisolierstrecke darstellen. Dass die Anordnung von Fehlstellen (d.h. ihre Anzahl und Position) ausschlaggebend für die TE-Charakteristik ist, findet sich beispielsweise auch bei *Adhikari et al. (2010)* [3] bestätigt.

### 7.3.3.2 Ausprägung der Entladungen

*Kurrat (1993)* [49] sieht in erster Linie UV-Strahlung als Grund für eine Materialschwächung. Dabei wird langsam fortschreitende Oxidation als unmittelbare Ursache genannt, auf etwaiges Fehlen von Sauerstoff wird nicht eingegangen. Der Beginn einer schädigenden Wirkung durch Ladungsträgerbombardement wird mit Energien ab etwa 100 eV beziffert.

Die bei Bänderproben beobachteten optischen Entladungserscheinungen waren im Fall der länglichen Hohlräume im Bandmaterial blau mit einer abgeschätzten Wellenlänge von etwa 480 nm, was einer Photonenenergie von ca. 2,8 eV entspricht. Die punktförmigen Hohlräume, welche bei Proben mit Flächenmaterial beobachtet werden konnten, lagen im Bereich von violett bzw. bei einer Wellenlänge von etwa 400 nm, was einer Photonenenergie von ca. 3 eV entspricht.

Wie *Kurrat (1993)* [49] mit seinem Modell gezeigt hat, ergeben sich TE-bedingte Summenenergien (Elektronen und UV-Strahlung) an den Hohlraumoberflächen im Bereich von  $10^{-11}$  bis  $10^{-10}$  J (vgl. Abschnitt 2.4.4).



### 7.3.3.3 Bewertung anhand elektrischer Kenngrößen

Die Bewertung von inneren TE und ihren Auswirkungen kann in den seltensten Fällen anhand einer einzigen Kenngröße geschehen. Mehrere zu diesen Themenbereichen veröffentlichte Arbeiten legen nahe, dass stets eine kombinierte Auswertung mehrerer Parameter anzustreben ist. Nach Möglichkeit sollte sich eine Interpretation auch nicht auf singuläre Messergebnisse stützen, sondern auf einer kontinuierlichen Messtätigkeit basieren, welche sich nicht ausschließlich auf TE-Messungen beschränken sollte.

Während *Angelhuber et al. (2008)* [8] festgehalten haben, dass das Erosionsvolumen nicht direkt mit elektrischen Kenngrößen wie Impulsleistung, scheinbarer Ladung oder maximaler Strom in Verbindung gebracht werden kann, beschrieben *Levesque und Hudon (2013)* [61] anhand ihres entwickelten Modells zur Berücksichtigung der Oberflächenladungsverteilung in luftgefüllten Hohlräumen, dass eine Degradation der Isolierstoffoberfläche großen Einfluss auf die Amplitude, aber auch auf die Anzahl der TE-Impulse hat. Gleichzeitig stellen sie allerdings fest, dass dabei auch die Leitfähigkeit beeinflusst wird und entgegengesetzt auf die TE-Eigenschaften rückwirkt. Bezüglich gealterter Hohlräume stellt *Budde (2010)* [20] eine geringere Einsetzspannung fest, konnte jedoch keine Veränderung des TE-Pegels bzw. der Impulswiederholrate bemerken. Schließlich sei noch die Arbeit von *Engel (1998)* [31] erwähnt, welche anmerkt, dass eine erhöhte Einsetzfeldstärke aufgrund von Zündverzug die Energiedichte und damit die zu erwartende Isolierstoffschädigung stark beeinflusst. Außerdem muss auch festgestellt werden, dass eine Abschätzung der Hohlraumgröße aufgrund von TE-Messungen alleine kaum sinnvoll erscheint, dies auch wegen der aus der Literatur bekannten Phasen der Entladungsaktivität von Hohlräumen (siehe Abschnitt 2.4.2 bzw. [31, 49, 67]).

### 7.3.3.4 TE bei Teststäben

Als letzter Schritt des entwickelten Stufenmodells wurden teils originalgetreue Teststäbe, teils kurze Stabstücke bzw. Nutteilstücke untersucht (siehe Abschnitt 5.6). Für die elektrischen TE-Messungen unter Temperatureinfluss standen dabei sowohl neue, als auch bereits vorbelastete Prüflinge zur Verfügung.

Aus verschiedenen Versuchen mit Temperatursteigerungen (RT-155°C) bzw. Temperaturzyklen (RT, 155°C, RT) ging hervor, dass sich das TE-Verhalten ab etwa 100°C zu ändern beginnt und zwischen 130°C und 155°C eine sprunghafte Anhebung der TE-Amplitude feststellbar ist. Außerdem zeigte sich, dass die thermische Belastung bei 155°C kaum bzw. keine bleibenden Veränderungen in der Isolierung von vorbelasteten bzw. gealterten Teststäben bewirkte, wohingegen neue, unbelastete Teststäbe durchwegs bleibende Veränderungen erfuhren. Die vorbelasteten Prüflinge wiesen vom TE-Einsatz an einen relativ konstanten Pegel über den gesamten Spannungsbereich auf. Dies blieb bei allen drei Messungen des Temperaturzyklus-Versuchs unverän-

dert. Bei den neuen, unbelasteten Prüflingen hingegen war erst ein unbeständiges TE-Verhalten zu bemerken, wobei sich mit der Versuchsdauer ein zunehmend stabiler Zustand einstellte.

Der Vergleich der bei den Versuchen an Plättchen bzw. Bänderproben und den Teststäben aufgezeichneten TE-Fingerprints lässt nur bedingt Ähnlichkeit erkennen. Vor allem der Umstand der sehr unterschiedlichen TE-Pegel (siehe Abb. 7-5) erschwert eine vergleichende Interpretation.

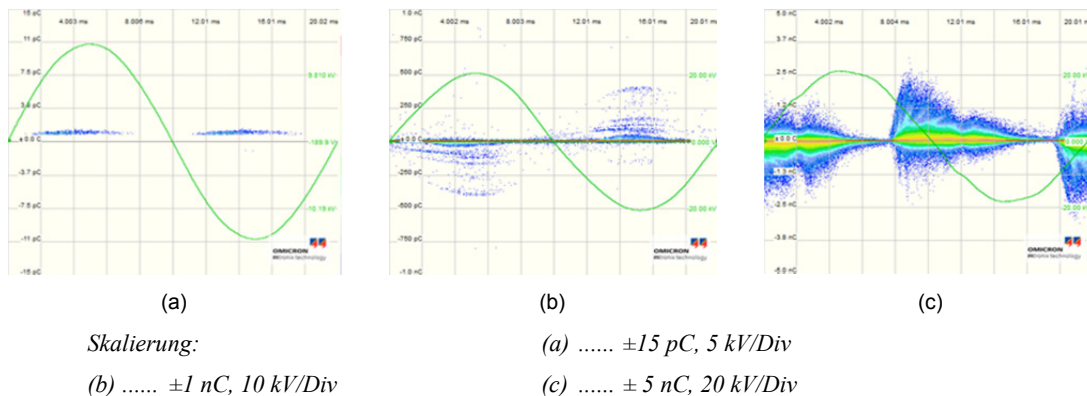


Abb. 7-5: TE-Muster: (a) Plättchenprobe, (b) Bänderprobe, (c) Teststab

Die numerischen Berechnungen anhand von Stabmodellen mit Mikrohöhlräumen (siehe Abschnitt 6.2.4) ergaben für nahezu alle untersuchten MHR-Anordnungen theoretische Zündfähigkeit. Aktuelle Publikationen (z.B. [41, 100]) weisen auf die Bedeutung von Hohlräumen innerhalb der Stabisolierung im Größenbereich um  $100 \mu\text{m}$  hin und bezeichnen Mikrohöhlräume in der Hauptisolierung sogar als eine Hauptursache für Fehlerfälle bei Generatorstäben. Die Fertigung von Stäben mit in die Isolierung eingebrachten, beobachtbaren, künstlichen Fehlstellen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr umgesetzt werden.

## 7.4 Detektion und Analyse von Entladungen

Eine besondere Herausforderung im Bereich der Detektion, Beobachtung und Analyse von Entladungen und ihren Emissionen sind die Zugänglichkeit des Entladungsortes für die jeweilige Sensortechnik sowie eine entsprechend geräuscharme Umgebung. In Bezug auf die Detektionsmethoden wie sie im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wurden war also optische bzw. akustische Durchlässigkeit der Materialien notwendig. Aus optischer Sicht konnte diese Bedingung zum Teil erfüllt werden, allerdings blieb stets eine nicht unwesentliche Dämpfung bestehen. Für akustische Detektion erwiesen sich die untersuchten Proben als wenig geeignet.

### 7.4.1 Optische Detektion und Analyse von Entladungen innerhalb der Isolierung

Die entwickelte Methode zur optischen Detektion von TE bzw. der entsprechenden Emissionen mittels digitaler Spiegelreflexkamera und Bildüberlagerung (siehe Abschnitt 5.5.3) ermöglichte es Entladungserscheinungen aufzuzeichnen (Abb. 7-6.a). In bedingt reproduzierbaren Versuchen konnten diese den TE-Fingerprints der elektrischen TE-Messung (Abb. 7-6.c) gegenübergestellt

werden. Mit Hilfe der Gating-Funktion der Mess-Software konnten aus den TE-Fingerprints Kenngrößen für einzelne der beobachteten Hohlräume ermittelt werden.

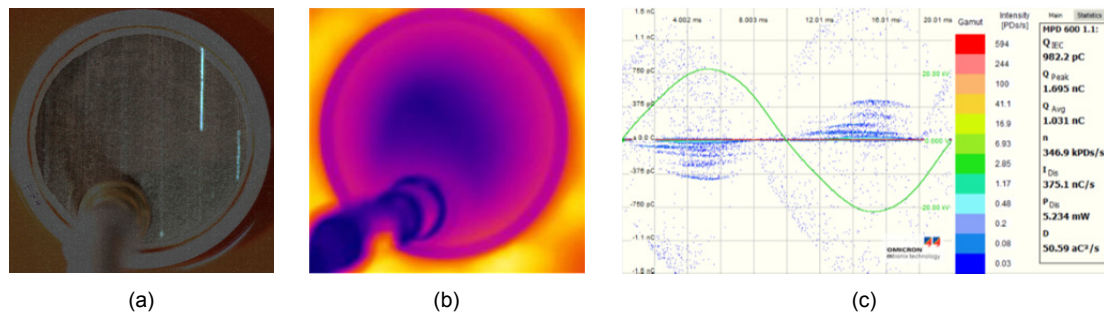


Abb. 7-6: TE mit optischen Entladungserscheinungen bei Bänderprobe #1

Der Einsatz von Oberflächenthermografie konnte nicht zur Detektion von TE beitragen, da Reflektions- und Transmissionseigenschaften von Wasser und Glasträger die Beobachtung von Temperaturänderungen im Isoliermaterial verhinderten. Die Färbung des Temperaturbildes (Abb. 7-6.b) lässt lediglich vermuten, dass unter der Lackierung mit Isolationslack bzw. halbleitendem EGS-Lack im Randbereich um den Teflonring Entladungsvorgänge stattfanden, die wesentlich zur Probenerwärmung beigetragen haben. Es sei erwähnt, dass mittels akustischer Detektion unter Einsatz eines Ultraschallsensors Signale zwar erfasst werden konnten, diese traten allerdings nur sporadisch und meist mit so geringer Intensität auf, sodass kaum auswertungswürdige Ergebnisse zur Verfügung standen.

#### 7.4.2 Betrachtungen zu unterschiedlichen Detektionsmethoden

Aus der Gesamtheit der angewandten Methoden zur Detektion und Beobachtung von Mikrofehlstellen innerhalb fester Isoliermaterialien zeigte sich, dass neben der konventionellen elektrischen TE-Messtechnik vor allem optische Methoden einige Vorteile bieten. Insbesondere ist hierbei die Störuneempfindlichkeit zu nennen, wobei es je nach System einer abgedunkelten Umgebung bedarf. Für verschiedene Betriebsmittel wurden bereits Empfehlungen für den Einsatz optischer TE-Detektionsmethoden veröffentlicht (z.B. in [11]), wobei zumeist der kombinierte Einsatz von elektrischen und optischen Systemen angeregt wird. *Hermann et al. (2011)* [40] nutzten ein optisches Detektionsverfahren zur Bestimmung des Alterungszustandes von Generatorstäben und beobachteten dabei Wellenlängen von 350-2500 nm (UV-Vis-IR). *Mansour et al. (2011)* [62] wandten für zylinderförmige Hohlräume eine Variante mit digitaler Spiegelreflexkamera ähnlich der hier angewendeten an. *Qiu et al. (2011)* [110] konnten sowohl optische als auch akustische Detektionsmethoden erfolgreich bei gasgefüllten Mikrohohlräumen <100 µm anwenden. Hinsichtlich der Analyse von optisch ermittelten Informationen gibt es noch ein weites Feld an offenen Punkten. So beschrieben *Nyamupangedengur und Jandrell (2011)* [68] beispielsweise, dass sich das Spektrum von Mikrokavitäten mit ihrem Alterungszustand ändert, was eine Interpretation erschwert. Eine andere Variante wäre es zusätzlich elektromagnetische Strahlung zu detektieren

und zur Korrelation und Analyse zu nutzen. *Ueno et al. (2011)* [101] zeigten in ihrer Arbeit, dass die Amplitude der detektierten Strahlung im MHz-Bereich und der gemessene TE-Pegel zusammenhängen. *Ahmadi et al. (2012)* [4] zeigten, dass auch bei Generatorstäben (im Labor) akustische Sensoren zur Überwachung der Alterung sinnvoll eingesetzt werden können. Die Empfindlichkeit von Sensorsystemen kann mit unterschiedlich hohem Aufwand an spezifische Anforderungen angepasst werden, sodass dem Anwendungsbereich kaum Grenzen gesetzt sind.

Abschließend soll erwähnt werden, dass – wie *Gockenbach et al. (2010)* [36] feststellten – die bei Isoliersystemen von rotierenden Hochspannungsmaschinen derzeit eingesetzten Diagnosemethoden (Isolationsstrommessung, Verlustfaktor- bzw. Kapazitätsmessung, TE-Messung) zwar alterungsbedingte Änderungen anzeigen können, allerdings sind diese nicht imstande eine klare Aussage in Bezug auf das Lebensdauerende von Betriebsmitteln zu liefern. Nicht unerwähnt bleiben soll an dieser Stelle auch der Umstand, dass die Interpretation der allgemein anerkannten konventionellen TE-Messung nicht zweifelsfrei definiert ist. Entsprechend international vereinbarten Standards (zB. [117]) gilt, dass die gemessene Ladung nicht der tatsächlich an einer Fehlstelle bei Teilentladungen wirksamen Ladungsmenge gleichkommt. *Lemke (2010)* [55] greift allerdings einen alten Ansatz erneut auf und beschreibt ein Modell, welches davon ausgeht, dass die an den äußeren Elektroden induzierte, messbare Ladung sehr wohl der tatsächlich am Ort der Fehlstelle induzierten Ladung entspricht und damit den Schweregrad der TE widerspiegelt.

---

## 8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

### 8.1 Ausgangssituation und Fragestellung

Im Forschungsfeld der Hochspannungstechnik sowie im Bereich des Einsatzes und der Entwicklung von Betriebsmitteln liegen große Herausforderungen darin, mehr Leistung mit höherer Effizienz liefern und übertragen zu können. Das ständige Bemühen, steigenden Ansprüchen zu genügen, stellt sich zwangsläufig als Gratwanderung dar, welche die Grenzen der Technik verdeutlicht. Die Wissenschaft kann dazu beitragen die Grenzen ein kleinwenig besser auszuweiten.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde verschiedenen Fragestellungen aus dem Bereich der Isolationstechnik, insbesondere in Bezug auf Teilentladungen bei Feststoff-Isoliersystemen, nachgegangen. Dabei wurden direkt praxisrelevante ebenso wie grundlagennahe Punkte beleuchtet. In einem ersten Fragenkomplex wurde die Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes hinsichtlich der Dimensionierung und Designoptimierung von elektrischen Maschinen untersucht. Dabei wurden besonders die folgenden drei Aspekte betrachtet:

- blanke Metall-Elektroden ↔ isolierte Metall-Elektroden
- Durchschlagspannung ↔ TE-Einsatzspannung
- Umgebung Luft ↔ Umgebung Wasserstoff

Der zweite Fragenkomplex beschäftigte sich mit den bei verschiedenen Isolierstoffproben auftretenden Entladungen in Mikrohohlräumen und der Detektierbarkeit ihrer Emissionen mit verschiedenen Methoden. Dabei lagen die Schwerpunkte vor allem auf den folgenden drei Punkten

- Beobachtung von Teilentladungen in Mikrohohlräumen innerhalb der Feststoffisolierung
- Einsatz und Vergleich unterschiedlicher Detektionsmethoden für TE in Mikrohohlräumen
- Finden von Korrelationen zwischen detektierbaren Anteilen und elektrischem TE-Signal

### 8.2 Untersuchungen und wesentliche Ergebnisse

#### 8.2.1 *Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Anordnungen isolierter Elektrodenpaare*

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes wurden zahlreiche experimentelle Untersuchungen an Modell-Isoliersystemen durchgeführt. Dabei wurden feinglimmerhaltige Isolierstoffproben getestet, die Versuche wurden in einem hermetisch abgeschlossenen Prüfgefäß

unter Variationen von Gasspaltlänge, Gasart, Gasdruck und Temperatur durchgeführt. Außerdem wurde der Einfluss von Abstandshaltern, ähnlich jenen in realen Maschinen, beobachtet.

Der Verlauf der Korona-Einsatzspannung in Abhängigkeit vom  $p \cdot d$ -Produkt konnte für beide untersuchten Prüfgase Luft und Wasserstoff als Paschen-ähnlich ermittelt werden. Die Ergebnisse der Versuche unter synthetischer Luft zeigten eine deutliche Temperaturabhängigkeit der Spannungswerte ( $U_{ein}$  und  $U_{aus}$ ), dies gilt hingegen nicht für Wasserstoff. Außerdem zeigte sich, dass die TE-Pegel unter Wasserstoff deutlich höher lagen als unter synthetischer Luft. Der Einsatz von Abstandshaltern zeigte lediglich geringen Einfluss bei Druckwerten unterhalb von etwa 1,5 bar. Bei höherem Druck allerdings weicht die entsprechende Kurve signifikant von der bei isolierten Elektroden mit reiner Gasstrecke beobachteten Charakteristik ab.

Somit konnte für die betrachteten Bereiche von Druck, Abstand und Temperatur die Übertragbarkeit des Paschen-Gesetzes auf die Korona-Einsatzspannung bei Anordnungen isolierter Elektrodenpaare mit reiner Gasstrecke gezeigt werden.

### 8.2.2 Anwendbarkeit des Paschen-Gesetzes auf Entladungen in Mikrohohlräumen

Das grundsätzliche TE-Verhalten von gasgefüllten Mikrohohlräumen in Feststoffisolierungen wurde anhand von Harzproben mit eingebetteten Mikrohohlkugeln aus Glas verschiedener Korngrößenbereiche untersucht.

Die ermittelten TE-Einsatzspannungen wurden entsprechend der Feld- und Geometriezusammenhänge auf die Zündspannung der Hohlräume umgerechnet. Unter Berücksichtigung der Streuung aufgrund stochastischer Effekte (z.B. Zündverzug) zeigte sich ebenfalls eine der Paschen-Kurve ähnliche Charakteristik.

### 8.2.3 Einflussgrößen auf die Entladungsaktivität in Mikrohohlräumen

In einer Anzahl von Versuchen an den Harzplättchen mit eingebetteten Mikrohohlkugeln wurde das charakteristische Verhalten in Bezug auf unterschiedliche Temperaturen untersucht. Außerdem wurde der Einfluss der Hohlraumgröße auf die Entladungsaktivität betrachtet.

Es zeigte sich ein Einfluss der Durchmesser vergleichbarer Hohlräume indem bei größeren Hohlräumen geringfügig erhöhte Zündfeldstärken beobachtet werden konnten, was sich auch in der Literatur bestätigt findet. Der Einfluss der Temperatur kann aufgrund der Beobachtung nicht eindeutig interpretiert werden. Hohlraumentladungen bei Harzplättchen schienen zum Teil einer Temperaturabhängigkeit der Einsatzbedingungen zu unterliegen, ein anderer Teil der Proben mit Mikrohohlräumen zeigte hingegen annähernd konstante Einsatzspannungen. Füllgase mit unterschiedlichen Eigenschaften oder aber in der Literatur beschriebene feuchtebedingte Effekte werden als Ursache dafür vermutet. Hinsichtlich anderer TE-Kenngrößen wie Ladungshöhe oder Impulswiederholrate konnte lediglich bei tieferen Temperaturen (im Bereich von ca. 5°C) eine

gedämpfte TE-Aktivität festgestellt werden, während Temperaturerhöhungen kaum Auswirkungen zeigten.

#### *8.2.4 Auswirkungen der Entladungsaktivität in Mikrohöhlräumen*

Die Bewertung der Entladungsaktivität hinsichtlich ihrer Auswirkungen anhand elektrischer Kenngrößen alleine ist nicht möglich. Fest steht, dass die Isolierstoffwandung von Hohlräumen durch Energieeintrag (v.a. durch Ladungsträgerbombardement und UV-Strahlung) Schaden nehmen kann. In der Literatur ist hier vor allem von Erosion und Kristallbildung als Folge von Oxidation die Rede. Unter Umständen können sich entlang der Oberfläche auch Leitfähigkeiten aufbauen, die ein weiteres Auftreten schädigender TE verhindern. Übereinstimmend mit der Literatur konnten wechselnde Ausprägungen der TE (v.a. Ladung und optische Erscheinungen) festgestellt werden. Einige dieser Effekte (verlöschen der optischen Emissionen und reduzierte TE-Pegel) scheinen thermische Ursachen zu haben, andere Beobachtungen (verlöschen der optischen Emissionen bei konstantem TE-Pegel) haben ihre Ursache vermutlich in Druckänderungen innerhalb der Hohlräume. Eine Möglichkeit zur Abschätzung der Auswirkungen von TE in Mikrohöhlräumen können Energiebetrachtungen anhand von Rechnermodellen darstellen, wie dies in der Literatur zu finden ist. Allerdings bieten weder die Verwendung solcher Modelle noch die Betrachtung elektrischer Kenngrößen eine Möglichkeit zur Bestimmung des Alterungszustandes bzw. zur Vorhersage der Restlebensdauer.

#### *8.2.5 Methoden zur Detektion der Entladungsaktivität in Mikrohöhlräumen*

Hinsichtlich von Methoden zur Detektion von Entladungen in Mikrohöhlräumen ist vorweg anzumerken, dass es bislang nur eine quantifizierende Methode zur TE-Detektion gibt, die elektrische TE-Messung. Allerdings können je nach Anwendungsbereich verschiedene Nachweisverfahren eine sinnvolle Ergänzung darstellen. Die hier betrachteten optischen Methoden bieten vor allem den Vorteil der Störuneempfindlichkeit, bedürfen allerdings einer abgedunkelten Umgebung. Wenn auch im Rahmen dieser Arbeit akustische Methoden nicht zum Ziel geführt haben, so gibt es doch Literaturstellen, die von erfolgreichen Versuchen zur akustischen Detektion von Mikrohöhlräumen unter speziellen Laborbedingungen berichten.

Ungeachtet dessen, welche Methode man betrachtet, man unterliegt stets dem Effekt der alterungsbedingten Änderungen der Teilentladungen hinsichtlich ihres emittierten Spektralbereiches. Abhilfe dabei können lediglich Monitoring-Varianten verschaffen, welche aufgrund von beobachteten Trendänderungen Rückschlüsse auf Vorgänge innerhalb von Isolierstoffen erlauben.

#### *8.2.6 Detektions- bzw. Analyseverfahren für TE mit optischen Entladungserscheinungen*

Eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode zur Erfassung von TE mit optischen Entladungserscheinungen mittels digitaler Spiegelreflexkamera konnte bei Modell-Isoliersystemen erfolgreich getestet werden. Das Verfahren ermöglicht unter Anwendung von Bildüberlagerungen

die nachträgliche Verstärkung bzw. Sichtbarmachung von optischen Emissionen. Insbesondere die Gegenüberstellung mit zeitgleich aufgezeichneten TE-Fingerprints erlaubt eine Analyse der lokalen Entladungsvorgänge. Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieser Methode ist eine hinreichende Transparenz der eingesetzten Isolierstoffe.

### **8.3 Anregungen für weitere Forschungstätigkeit**

Es gibt einige Punkte, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr vollendet werden konnten, welche aber nicht unerwähnt bleiben sollen. Als Anregungen für zukünftige Forschungsaktivitäten sollen an dieser Stelle einige sinnvoll erscheinende Ergänzungen dargelegt werden:

- Zusätzlich zu den Untersuchungen an isolierten Elektrodenpaaren wie sie in Kapitel 4 beschrieben wurden, erscheint es sinnvoll die ursprünglich geplante Variation der Isolierstoffdicke zu untersuchen. Außerdem stellt die genauere Betrachtung der verwendeten Abstandshalter bzw. der dafür verwendeten Materialien eine zweckmäßige Ergänzung dar.
- Die Untersuchungen bezüglich der Entladungen in gasgefüllten Mikrohohlräumen und ihrer Emissionen könnten eine sinnvolle Ergänzung in der Fertigung und Untersuchung einer größeren Anzahl identer Bänderproben (mit bzw. ohne MHK), der Realisierung einer transparenten Hochspannungselektrode aus ITO sowie der Untersuchung thermisch-elektrisch gealterter Bänderproben bei unterschiedlichen Temperaturen finden. Außerdem könnten Untersuchungen an Harzproben mit qualitativ höherwertigen Mikrohohlkugeln zu weiteren Erkenntnissen führen. Schließlich würde die Fertigung und Untersuchung von Teststäben mit transparentem Isoliermaterial und eingebetteten künstlichen Mikrofehlstellen eine interessante Abrundung der Arbeiten darstellen.
- Als Weiterentwicklung des Überlagerungsverfahrens würde die softwaremäßige Automation des Bildüberlagerungsprozesses für (nahezu) Echtzeit-Darstellungen der optischen Entladungserscheinungen eine wesentliche Verbesserung darstellen. Bezüglich der Detektionsmethoden wäre bei bekannter Probenkonfiguration die Entwicklung eines speziell abgestimmten akustischen oder auch eines alternativen Sensorsystems vorstellbar und nach jetzigem dafürhalten auch realisierbar.



---



---

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] VGB Power Tech e.V. (Hrsg.), Anonymous, "Handlungsempfehlung zur Vermeidung von Generatorschäden in Folge von Betauung spannungsführender Teile", Essen 2005.
- [2] D. Adhikari et al., "Comparative study of PD characteristics and degradation of PET insulation with a self-contained void, void with closed channel and void with vented channel", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, San Juan 2012.
- [3] D. Adhikari et al., "Analysis of partial discharge characteristics in artificially created voids", *International Universities Power Engineering Conference*, Cardiff 2010.
- [4] S. Ahmadi et al., "Partial discharge detection during electrical aging of generator bar using acoustic technique", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, San Juan 2012.
- [5] I. Al-Bawy und O. Farish, "Insulator flashover in SF6 under impulse voltage conditions", *IEE Proceedings A - Science, Measurement & Technology*, Vol. 138 (1), [o.O.] 1991.
- [6] IHS (Hrsg.), O. Anaca und M. Lerchbacher, "Kurzbericht: Aufbereitung der Fotos mittels Adobe Photoshop (CS5 und CS6)", TU Graz 2012.
- [7] T. Andritsch et al., "Permittivity in Epoxy based Syntactic Foam Nanocomposites", *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Quebec City 2008.
- [8] M. Anglhuber et al., "Erosion von Kunststoffoberflächen bei Koronabelastung", *ETG Fachtagung "Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen"*, Fachbericht 112 VDE-Verlag, Berlin Offenbach 2008.
- [9] R. Bartnikas, "Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 9 (5), [o.O.] 2002.
- [10] R. Bartnikas, "Some Observations on the Character of Corona Discharges in Short Gap Spaces", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 6 (2), [o.O.] 1971.
- [11] S. Behrend et al., "Synchronous Optical and Electrical PD Measurements", *International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover 2011.
- [12] T. Berg et al., "Ausgewählte technologische Entwicklungen in der Hochspannungstechnik", *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Vol. 129 (4), Springer Verlag, Wien 2012.
- [13] J. Bertling et al., "Mikrohohlkugeln", *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 75 (6), WILEY-VCH Verlag, Weinheim 2003.

- [14] W. Blecken und H. Meyer, "Service Life of Stator Winding Insulation as an Important Quality Feature of Large Hydro Generators", *Siemens Power Journal*, Vol. 97 (1), [o.O.] 1997.
- [15] W. S. Boyle und P. Kisliuk, "Departure from Paschen's Law of Breakdown in Gases", *Physical Review*, Vol. 97 [o.O.] 1955.
- [16] H. Briehl, "Chemie der Werkstoffe", 2. Auflage, B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2008.
- [17] T. Brügger, "Zyklische Isolationsalterung bei grossen Hydrogeneratoren - Einfluss höherer Startfrequenzen auf die Lebensdauer moderner Statorisolations-Systeme", *Bulletin SEV/VSE*, Jhg.103 (5), [o.O.] 2012.
- [18] T. Brügger, "Einfluss starker Lastwecheldynamik auf das Alterungsverhalten der Isolierung grosser Hydrogeneratoren", *Dissertation*, ETH Zürich 2011.
- [19] R. Brutsch et al., "Insulation Failure Mechanisms of Power Generators [Feature Article]", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 24 (4), New York 2008.
- [20] M. Budde, "Teilentladungsdiagnostik von hochbelasteten Isoliersystemen auf Epoxidharzbasis", *Dissertation*, TU Braunschweig 2010.
- [21] M. Budde et al., "Partial Discharge Detection Limits of Micro Cavities", *International Symposium on High Voltage Engineering*, Ljubljana 2007.
- [22] H. -P Burgener, "Das Teilentladungsverhalten in Mikrohohlräumen polymerer Isoliermaterialien", *Dissertation*, ETH Zürich 2003.
- [23] W. J. Carey et al., "Characterization of Paschen curve anomalies at high P\*D values", *IEEE Pulsed Power Conference*, Chicago 2011.
- [24] A. H. Cookson, "Review of high-voltage gas breakdown and insulators in compressed gas", *IEE Proceedings - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews*, Vol. 128 (4), [o.O.] 1981.
- [25] H. Czichos (Hrsg.), "Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften", 31. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2000.
- [26] Cigré. (Hrsg.), T. W. Dakin et al., "Breakdown of Gases in uniform Fields, Paschencurves for Nitrogen, Air, Sulfur Hexafluoride, Hydrogen, Carbon Dioxide and Helium", WG 15.03[o.O.] 1977.
- [27] M. G. Danikas et al., "Discussion: partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26 (3), [o.O.] 1991.
- [28] H. Domininghaus et al. (Hrsg.), "Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen", Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2008.
- [29] F. T. Emery, "Partial discharge, dissipation factor, and corona aspects for high voltage electric generator stator bars and windings", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.12 (2), [o.O.] 2005.

- 
- [30] F. T. Emery und J. F. Roach, "Electrostatic field analysis and verification of air cooled generator end turn insulation models", *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, Cincinnati 1999.
- [31] K. Engel, "Bewertung von Teilentladungen in spaltförmigen Isolierstoffdefekten", *Dissertation*, Universität Dortmund 1998.
- [32] VA TECH ELIN. (Hrsg.), J. Erhard, "Technischer Bericht, Testmessung mit Laserscanning Vibrometer an Generatorstabilisierung mit Innen-TE", TB E093/01, Weiz 2002.
- [33] P. Eyerer et al. (Hrsg.), "Polymer Engineering, Technologien und Praxis", Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2008.
- [34] O. Farish und I. Al-Bawy, "Effect of surface charge on impulse flashover of insulators in SF6", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26 (3), [o.O.] 1991.
- [35] K. Frohlich, "Elektrische Energiesysteme, Vorlesungsteil Technologien, Systemtechnologie", *Vorlesungsunterlagen*, ETH Zürich 2002.
- [36] E. Gockenbach et al., "Investigations of diagnostic tools for insulation systems of high voltage rotating machines", *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam 2010.
- [37] G. Griffith et al., "Problems with modern air-cooled generator stator winding insulation", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 16 (6), New York 2000.
- [38] W. Grubelnik et al., "A new approach in insulation systems for rotating machines", *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Conference*, Indianapolis 2005.
- [39] F. Gutfleisch und L. Niemeyer, "Measurement and simulation of PD in epoxy voids", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 2 (5), [o.O.] 1995.
- [40] H. Herman et al., "New Diagnostic Method for Determination of Temperature and Time of Thermal Ageing in Generator Stator Insulation", *International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover 2011.
- [41] C. Hudon et al., "Root cause analysis of generator failures", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, San Juan 2012.
- [42] H. Illias et al., "Modeling of partial discharge activity in spherical cavities within a dielectric material", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 27 (1), New York 2011.
- [43] H. A. Illias et al., "Modelling of partial discharge activity in different spherical cavity sizes and locations within a dielectric insulation material", *IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, Harbin, China 2009.
- [44] D. Imamovic, "Umweltfreundliche Isoliergase für gasisolierte Leitungen zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung", *Dissertation*, TU Graz 2011.
- [45] J. Klasna et al., "Partial discharges in high-voltage insulation of turbogenerators", *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam 2010.

- [46] R. Kochetov et al., "Effect of filler size on complex permittivity and thermal conductivity of epoxy-based composites filled with BN particles", *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, West Lafayette 2010.
- [47] A. Küchler, "Hochspannungstechnik, Grundlagen - Technologie - Anwendungen", 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2009.
- [48] E. Kuffel et al., "High Voltage Engineering - Fundamentals", 2. Auflage, Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.
- [49] M. Kurrat, "Modellierung und Messung von Teilentladungen in Hohlräumen zur Bestimmung schädigungsrelevanter Energien", *Dissertation*, Universität Dortmund 1993.
- [50] J. R. Laghari, "Spacer Flashover in Compressed Gases", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 20 (1), [o.O.] 1985.
- [51] J. R. Laghari und A. H. Qureshi, "Surface Flashover of Spacers in Compressed Gas Insulated Systems", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 16 (5), [o.O.] 1981.
- [52] K. Lederer, "Epoxidharze", *Vorlesungsunterlagen*, MU Leoben [o.J.].
- [53] G. Lee Moses, "Stator Insulation Practices for High-Voltage Inner-Cooled Generators", *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Part III.*, Vol. 73 (1), [o.O.] 1954.
- [54] E. Lemke, "Analysis of the partial discharge charge transfer in extruded power cables", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 29 (1), New York 2013.
- [55] E. Lemke, "A critical review of partial-discharge models", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 28 (6), New York 2012.
- [56] M. Lerchbacher et al., "Anwendung des Paschen-Gesetzes für die Optimierung des Wickelkopf-Abstandsdesigns von großen rotierenden elektrischen Maschinen", *e&i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Vol. 129 (5), Springer Verlag, Wien 2012.
- [57] M. Lerchbacher et al., "High Voltage Endwinding Design of Large Hydrogen Cooled Turbo Generators", *International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover 2011.
- [58] M. Lerchbacher et al., "Impact of Spacers Regarding Endwinding Design of Large Rotating Electrical Machines", *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Cancun 2011.
- [59] M. Lerchbacher et al., "Investigation regarding corona free endwinding design of form wound high voltage stator windings", *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, West Lafayette 2010.
- [60] M. Lerchbacher et al., "Impact of small voids in solid insulating materials", *IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, Bangalore 2012.
- [61] M. Levesque et al., "Effect of surface conditions on the electric field in air cavities", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 20 (1), [o.O.] 2013.

- [62] D. A. Mansour et al., "Partial Discharge Characteristics for Delamination Defect of Epoxy Cast Resin Power Apparatus", *International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover 2011.
- [63] P. Marek, "Neues Trägersystem für Hochspannungsisolierungen", *Dissertation*, TU Graz 2006.
- [64] I. W. Mcallister, "Partial discharges in spheroidal voids. Void orientation", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 4 (4), [o.O.] 1997.
- [65] J. M. Meek und J. D. Craggs (Hrsg.), "Electrical Breakdown of Gases", John Wiley & sons, New York 1978.
- [66] P. H. F. Morshuis, "Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12 (5), [o.O.] 2005.
- [67] L. Niemeyer, "A generalized approach to partial discharge modeling", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 2 (4), [o.O.] 1995.
- [68] C. Nyamupangedengu und I. R. Jandrell, "Evolution of Spectral Content of Cavity Discharges in Solid Polymer Dielectrics", *International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover 2011.
- [69] Ltd Three Bond Co. (Hrsg.), S. Ohta, "Temperature Classes of Electrical Insulators", *Technical News* 13, [o.O.] 1985.
- [70] G. Oppermann, "Über die Gültigkeit des Paschen-Gesetzes für Schwefelhexafluorid bei Gleich-, Wechsel- und Stoss-Spannungen", *Dissertation*, TU Berlin 1974.
- [71] F. Paschen, "Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz", *Annalen der Physik*, Vol. 273 (5), [o.O.] 1889.
- [72] A. Pedersen et al., "The theory and measurement of partial discharge transients", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26 (3), [o.O.] 1991.
- [73] Epoxylite, Division of Sterling Technology Ltd. (Hrsg.), J. Phillips, "Anwendung von Epoxidtränkharzen (Übersetzung)", Manchester [o.J.].
- [74] VA TECH HYDRO. (Hrsg.), M. Pichler, "Technischer Bericht, Chemische Grundlagen von Epoxidharzsystemen", TB E 002/01, Weiz 2002.
- [75] W. Pläßmann und D. Schulz (Hrsg.), "Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker", 5. Auflage, Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2009.
- [76] R. Porzel et al., "Diagnostik der Elektrischen Energietechnik: Techniken und Prozeduren zur Zustandsanalyse von elektrotechnischen Betriebsmitteln", expert verlag, Renningen-Malmsheim 1996.
- [77] M. Radmilović-Radenović et al., "Breakdown voltage curves in direct current discharges in molecular gases at microgaps", *IET Micro & Nano Letters*, Vol. 7 (3), [o.O.] 2012.

- [78] R. H. Rehder und M. E. Stutt, "Corona deterioration reduction in large electrical machine insulation", *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 1 (1), [o.O.] 1995.
- [79] J. P. Rivenc und T. Lebey, "An overview of electrical properties for stress grading optimization", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6 (3), [o.O.] 1999.
- [80] R. Schifani et al., "On PD mechanisms at high temperature in voids included in an epoxy resin", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 8 (4), [o.O.] 2001.
- [81] PCCL / S. Schlögl, *Mikroskopieaufnahmen von Mikrohohlkugeln nach Belastungstests*, Leoben, 2012.
- [82] PCCL. (Hrsg.), S. Schlögl, "Charakterisierung von Glas basierenden Mikrosphären mittels optischer Lichtmikroskopie", Inf. Kurzbericht KW13, Leoben 2011.
- [83] PCCL. (Hrsg.), S. Schlögl, "Charakterisierung von Glas basierenden Mikrosphären mittels optischer Lichtmikroskopie", Inf. Kurzbericht KW11, Leoben 2011.
- [84] BMVIT and M. Paula. (Hrsg.), W. Schmidt et al., "Umweltverträgliche Harzimprägnierung elektrischer Maschinen mittels Stromwärme", *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*(62/2006), Wien 2006.
- [85] H. Schön, "Handbuch der Reinsten Gase", Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2005.
- [86] A. J. Schwab, "Begriffswelt der Feldtheorie: Elektromagnetische Felder, Maxwellsche Gleichungen, Gradient, Rotation, Divergenz", 6., Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2002.
- [87] R. Schwarz, "Messtechnik und Diagnostik an Elektrischen Betriebsmitteln", *Habilitationschrift*, TU Graz 2009.
- [88] R. Schwarz, "Teilentladungen in der elektrischen Energietechnik", *Vorlesungsunterlagen*, TU Graz 2006.
- [89] T. Seghier und D. Mahi, "Investigation into partial discharge dependence in air gaps between high density polyethylene tapes", *Acta Electrotehnica*, Vol. 49 (1), Technical University of Cluj-Napoca, 2008.
- [90] F. Senn, "Untersuchung elektrisch halbleitender Materialien für den Einsatz in Glimmschutzsystemen rotierender Hochspannungsmaschinen", *Dissertation*, TU Graz 2010.
- [91] Y. Shibuya et al., "Void formation and electrical breakdown in epoxy resin", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 96 (1), [o.O.] 1977.
- [92] G. C. Stone, "Deterioration of stator winding insulation by vibration sparking", *International Symposium on Electrical Insulating Materials*, Mie 2008.
- [93] G. C. Stone et al., "Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair", Wiley Interscience, Piscataway 2004.



- 
- [94] G. C. Stone und C. Maughan, "Vibration Sparking and Slot Discharge in Stator Windings", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Vancouver 2008.
- [95] G. C. Stone und R. Wu, "Examples of stator winding insulation deterioration in new generators", *IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, Harbin 2009.
- [96] M. Strzysch und J. Weiß (Hrsg.), "Der Brockhaus in fünfzehn Bänden", Leipzig - Mannheim 1997.
- [97] C. Sumereder, "Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik", *Habilitationsschrift*, TU Graz 2010.
- [98] T. Tanaka, "Internal Partial Discharge and Material Degradation", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 21 (6), [o.O.] 1986.
- [99] TETTEX AG INSTRUMENTS, "Schutzringkondensatoren Typen 2903 und 2904", *Beschreibung und Gebrauchsanweisung*, [o.O.] 1982.
- [100] A. Turgeon et al., "Critical cavity size producing internal discharges in stator bar ground wall insulation", *IEEE Electrical Insulation Conference*, Annapolis 2011.
- [101] H. Ueno et al., "Detection of Partial Discharge and Electrical Tree Development in Solid Dielectric Insulators by Radiated Electro-Magnetic Waves", *International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover 2011.
- [102] GE Power Systems. (Hrsg.), C. L. Vandervort und E. L. Kudlacik, "GE Generator Technology Update", GER-4203 (04/01), Schenectady 2001.
- [103] R. Vogelsang et al., "The effect of tape overlappings in winding insulations on tree growth and breakdown time", *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Boulder 2004.
- [104] R. Vogelsang et al., "The effect of barriers on electrical tree propagation in composite insulation materials", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13 (2), [o.O.] 2006.
- [105] R. Vogelsang et al., "Teilentladungskennwerte der elektrischen Alterung in Isolationen von Hochspannungsgeneratoren und -motoren und deren Berücksichtigung in einem TE-Monitoringsystem", *ETG FB 97*, Köln 2004.
- [106] R. Vogelsang et al., "Electrical breakdown in high-voltage winding insulations of different manufacturing qualities", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 22 (3), New York 2006.
- [107] J. R. Weidner, "Design und Überwachung von Grenzflächen bei Ständerwicklungen großer Turbogeneratoren", *ETG FB 112*, Würzburg 2008.
- [108] A. Wilson, "Slot discharge damage in air cooled stator windings", *IEE Proceedings A - Science, Measurement & Technology*, Vol. 138 (3), [o.O.] 1991.

- [109] J. W. Wood und R. T. Hindmarch, "Deterioration of slot stress control materials on generator stator conductors by non-mechanical mechanisms", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Toronto 1990.
- [110] Xunlin Qiu et al., "Turning polymer foams or polymer-film systems into ferroelectrets: dielectric barrier discharges in voids", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18 (1), [o.O.] 2011.
- [111] H. Zabel, "Physik für Mediziner", *Vorlesungsunterlagen*, RU Bochum 2010.
- [112] Norm: DIN VDE0530-25 (VDE 0530-25):2009-08, "Drehende elektrische Maschinen - Teil 25: Leitfadens für den Entwurf und das Betriebsverhalten von Drehstrommotoren, die speziell für Umrichterbetrieb bemessen sind (IEC/TS 60034-25:2007); Deutsche Fassung CLC/TS 60034-25:2008", 2009.
- [113] Norm: E DIN IEC 60034-27 (VDE 0530-27):2005-07, "Drehende elektrische Maschinen - Teil 27: Off-Line Teilentladungsmessungen an der Statorwicklungsisolierung drehender Maschinen (IEC 2/1327/CD:2005)", 2005.
- [114] Norm: IEC 60034-11 (2004-07), "Rotating electrical machines - Part 11: Thermal protection", 2004.
- [115] Norm: IEC 60034-18-1 (2010-03), "Rotating electrical machines - Part 18-1: Functional evaluation of insulation systems - General guidelines", 2010.
- [116] Norm: IEC 60085:2007 (DIN EN 60085:2008-08), "Elektrische Isolierung - Thermische Bewertung und Bezeichnung", 2008.
- [117] Norm: IEC 60270:2000, "High-voltage test techniques - Partial discharge measurements", 2000.
- [118] Norm: IEEE Std 1043 -1996 (R2009), "IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testings of Form-Wound Bars and Coils", 2009.
- [119] Software: Infolytica Corporation, Elecnet v.7 - 2D/3D ELECTRIC FIELD SIMULATION SOFTWARE.
- [120] Webseite: "CHEMIE.DE Information Service GmbH: Plattform für Informationen der Branchen Chemie, Life Sciences und Pharma", <http://www.chemie.de/>, 11.3.2014.
- [121] Webseite: "Electropedia: The World's Online Electrotechnical Vocabulary", <http://www.electropedia.org/>, 22.02.2013.
- [122] Webseite: "R&G Wiki, Faserverbundstoffe - Composite Technology", <http://wiki.r-g.de/>, 17.03.2013.
- [123] Webseite: "Wiley Information Services GmbH: Online-Enzyklopädie zur Chemie und angrenzenden Naturwissenschaften", <http://www.chemgapedia.de/>, 11.3.2014.









---

## **ANHANG**

Anhang A	Ergänzung zur optischen Methode zur TE-Analyse.....	i
Anhang B	Ergänzungen zu den numerischen Berechnungen .....	v



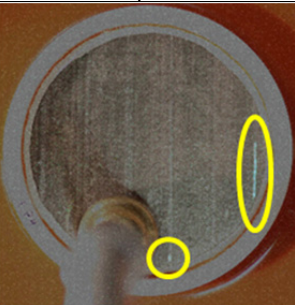
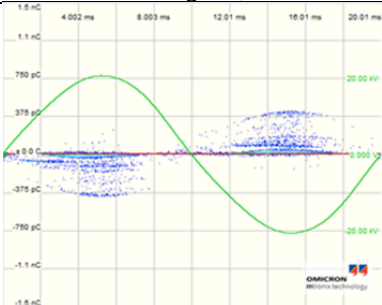
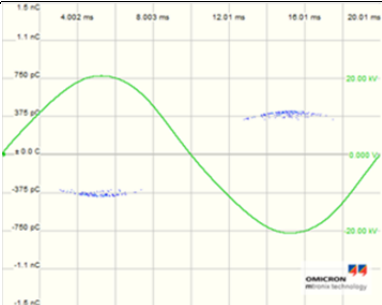
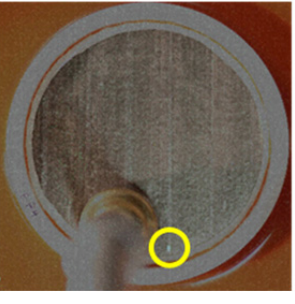
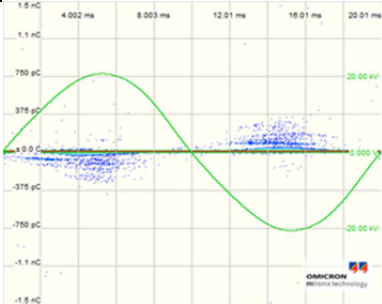
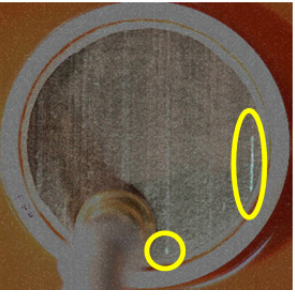
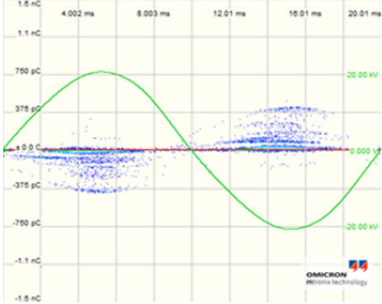
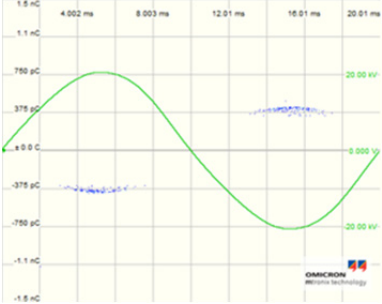


## Anhang A Ergänzung zur optischen Methode zur TE-Analyse

Die nachfolgenden Tabellen enthalten ergänzende Darstellungen zum Verfahren zur Verstärkung und Analyse optischer Entladungserscheinungen aus Abschnitt 5.5.3. Für drei beispielhaft ausgewählte Messzeitpunktfolgen (T0, T1, T2) von Versuchen an unterschiedlichen Bänderproben wird jeweils die Gegenüberstellung der fotografischen Aufnahme und der TE-Fingerprints dargestellt, um den Zusammenhang zwischen optischen Entladungserscheinungen und Charakteristika der entsprechenden TE-Fingerprints zu verdeutlichen.

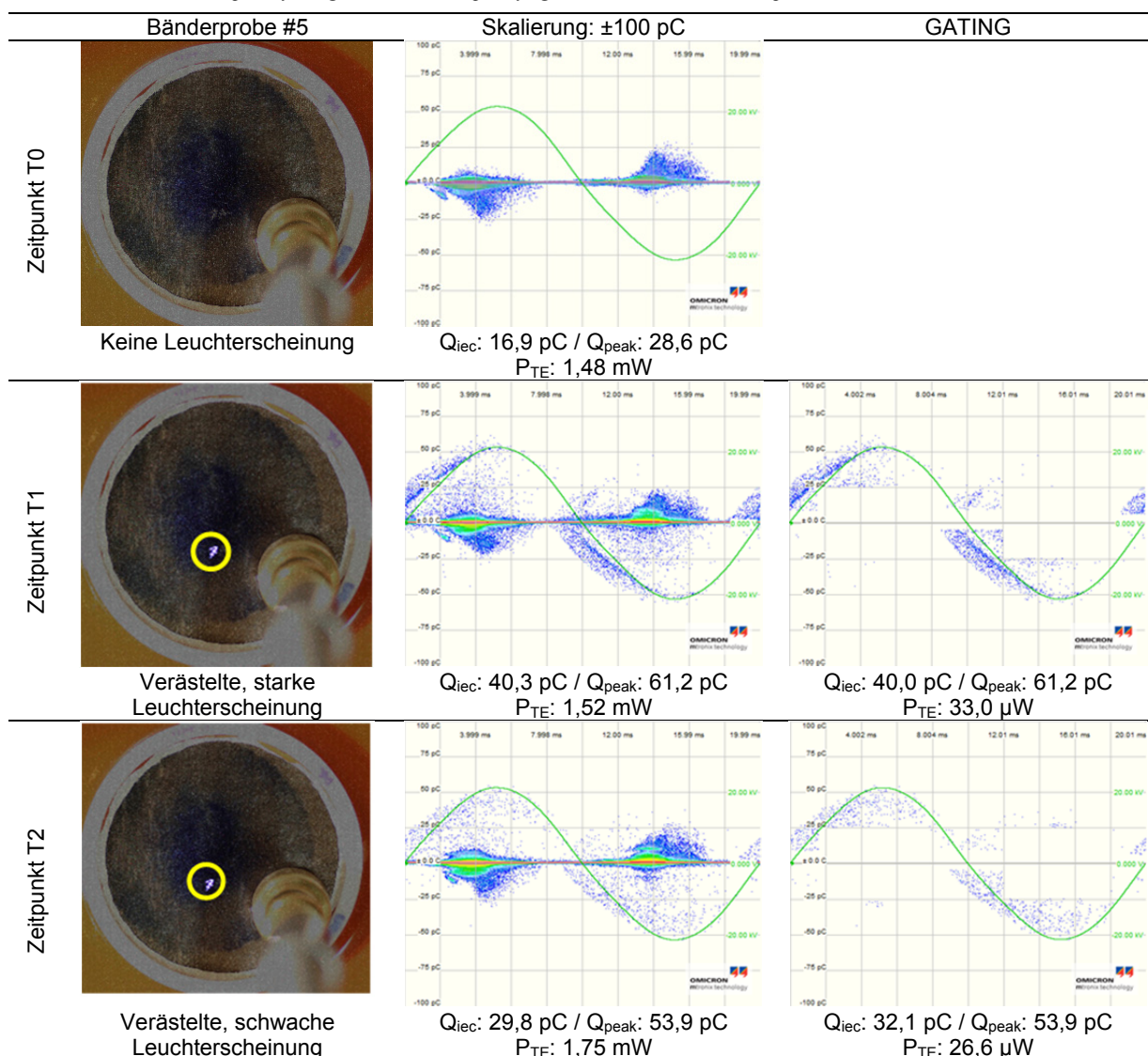
In Tab.A.1 wird für die Bänderprobe #1 gezeigt, welche Teile des charakteristischen TE-Fingerprint den optisch erkennbaren Entladungserscheinungen zuordenbar sind. Mit der Softwarefunktion *Gating* konnte jener Teil herausgefiltert werden, welcher der länglichen Entladungserscheinung in Zeitpunkt T0 und T2 entspricht, der entsprechende Wert der Entladungsleistung  $P_{TE}$  wurde direkt vom Messsystem ausgegeben.

Tab.A.1: Beispielhaft ausgewählte Messzeitpunktfolge 1 der Versuche an Bänderprobe #1

	Bänderprobe #1	Skalierung: $\pm 1,5$ nC	GATING
Zeitpunkt T0	 <p>Eine kurze und eine lange Leuchterscheinung</p>	 <p><math>Q_{iec}</math>: 245,8 pC / <math>Q_{peak}</math>: 417,4 pC <math>P_{TE}</math>: 2,32 mW</p>	 <p><math>Q_{iec}</math>: 328,7 pC / <math>Q_{peak}</math>: 417,4 pC <math>P_{TE}</math>: 104,4 <math>\mu</math>W</p>
Zeitpunkt T1	 <p>Eine kurze Leuchterscheinung</p>	 <p><math>Q_{iec}</math>: 177,9 pC / <math>Q_{peak}</math>: 1,6 nC <math>P_{TE}</math>: 3,43 mW</p>	
Zeitpunkt T2	 <p>Eine kurze und eine lange Leuchterscheinung</p>	 <p><math>Q_{iec}</math>: 313,3 pC / <math>Q_{peak}</math>: 1,2 nC <math>P_{TE}</math>: 2,7 mW</p>	 <p><math>Q_{iec}</math>: 320,8 pC / <math>Q_{peak}</math>: 1,2 nC <math>P_{TE}</math>: 85,1 <math>\mu</math>W</p>

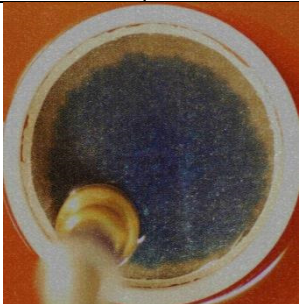
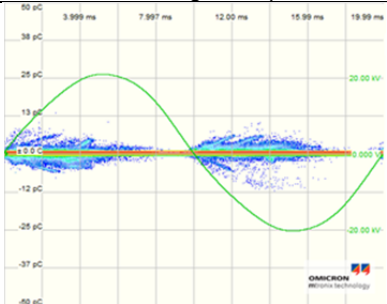
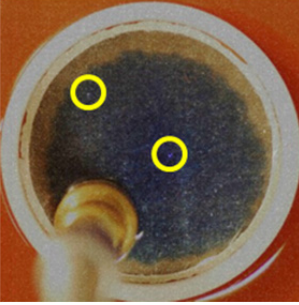
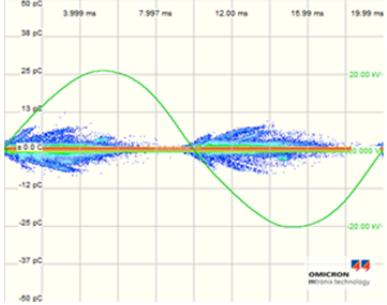
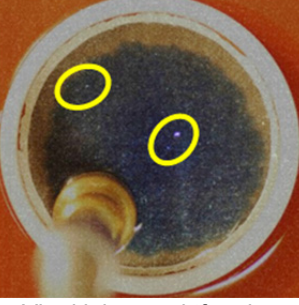
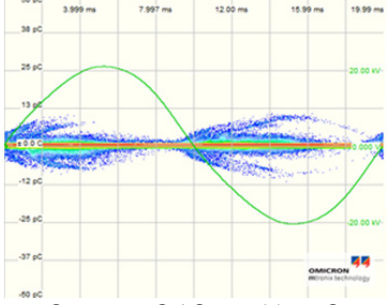
In Tab.A.2 wird für die Bänderprobe #5 gezeigt, welche Teile des charakteristischen TE-Fingerprint den optisch erkennbaren Entladungserscheinungen zuordenbar sind. Mit der Softwarefunktion *Gating* konnte jener Teil herausgefiltert werden, welcher der verästelten Entladungserscheinung in Zeitpunkt T1 und T2 entspricht, der entsprechende Wert der Entladungsleistung  $P_{TE}$  wurde direkt vom Messsystem ausgegeben.

Tab.A.2: Beispielhaft ausgewählte Messzeitpunktfolge 2 der Versuche an Bänderprobe #5



In Tab.A.3 wird für die Bänderprobe #6 gezeigt, welche Teile des charakteristischen TE-Fingerprint den optisch erkennbaren Entladungserscheinungen zuordenbar sind. Obwohl für den Betrachter eine Zuordnung einzelner Teile des TE-Fingerprints möglich erscheint, war die Nutzung der Funktion *Gating*, aufgrund der geringen Unterschiede der TE-Fingerprint, nicht in gleichem Maße anwendbar wie bei den beiden vorgenannten Beispielen. Die Bestimmung der entsprechenden Anteile der Entladungsleistung  $P_{TE}$  für die punktförmigen Entladungserscheinungen in den Zeitpunkten T1 und T2 über die Differenz  $P_{TE}(T1)-P_{TE}(T0)$  bzw.  $P_{TE}(T2)-P_{TE}(T0)$  erschien plausibel und ist in Spalte drei eingetragen.

Tab.A.3: Beispielhaft ausgewählte Messzeitpunktfolge 3 der Versuche an Bänderprobe #6

	Bänderprobe #6	Skalierung: $\pm 50$ pC	GATING nicht möglich
Zeitpunkt T0	 <p>Keine optische Entladungserscheinung</p>	 <p><math>Q_{iec}: 5,3 \text{ pC} / Q_{peak}: 13,3 \text{ pC}</math> <math>P_{TE}: 1,08 \text{ mW}</math></p>	
Zeitpunkt T1	 <p>Zwei kleine punktförmige Leuchterscheinungen</p>	 <p><math>Q_{iec}: 6,1 \text{ pC} / Q_{peak}: 10,5 \text{ pC}</math> <math>P_{TE}: 1,1 \text{ mW}</math></p>	<p>Abschätzung für die Entladungsleistung in den beiden Hohlräumen:</p> <p><math>P_{TE}(T1) - P_{TE}(T0) = 20 \mu W</math></p>
Zeitpunkt T2	 <p>Vier kleine punktförmige Leuchterscheinungen</p>	 <p><math>Q_{iec}: 7,7 \text{ pC} / Q_{peak}: 11,7 \text{ pC}</math> <math>P_{TE}: 1,15 \text{ mW}</math></p>	<p>Abschätzung für die Entladungsleistung in den vier Hohlräumen:</p> <p><math>P_{TE}(T2) - P_{TE}(T0) = 70 \mu W</math></p>



## Anhang B Ergänzungen zu den numerischen Berechnungen

Die folgenden Tabellen enthalten ergänzende Informationen zu den numerischen Berechnungen aus Kapitel 6. Neben Materialdaten sind auch die Anzahl der Netzknoten sowie die Anzahl der Tetraeder zu beispielhaften Simulationen angegeben. Außerdem finden sich Einstellungen zum *Solver* und den eingesetzten Algorithmen in entsprechenden Tabellen wieder.

### B.1 Ergänzungen zur Nachbildung und Simulation der Plättchenproben:

Die folgenden Daten beziehen sich auf das beispielhaft gewählte Modell B3\_250, welches einen zentralen Mikrohohlraum aufwies und dessen Hochspannungselektrode eine Spannung  $\hat{U}$  von 15 kV zugewiesen wurde.

Tab. B.1.1: Material und Netzeigenschaften zu Modell B3\_250

Nr.	Material	El.Widerstand in Ohm.m	Relative Permittivität	Dichte in kg/m <sup>3</sup>	Max. Ele- mentgröße	Knoten- anzahl	Anzahl der Tetraeder
0	global	-	-	-	0,001 µm	376.100 bzw. 532.112	2.209.583 bzw. 3.039.565
1	Isolieröl	10 <sup>15</sup>	3,2	-	0,001 µm		584.220
2	Harz	-	3,9	2000	0,00025		1.598.701
3	MHR/Luft	-	1	-	0,00001		26.662

Tab. B.1.2: Einstellungen des Solvers zu Modell B3\_250

Solver Options	Einstellungen
<i>Material type</i>	Default
<i>Method</i>	Newton-Raphson
<i>Max. Newton iterations</i>	20
<i>Newton tolerance</i>	1%
<i>Polynomial order</i>	2
<i>CG tolerancve</i>	0,01%
<i>Source frequency</i>	50 Hz

Tab. B.1.3: Einstellungen zum Lösungsalgorithmus zu Modell B3\_250

Adaption Options	Einstellungen
<i>Use h-adaption</i>	5%
<i>Use p-adaption</i>	10%
<i>Tolerance</i>	1%
<i>Tolerance to switch from h to p adaption</i>	10%
<i>Maximum number of steps</i>	10

## B.2 Ergänzungen zur Nachbildung und Simulation der Bänderprobe:

Die folgenden Daten beziehen sich auf das beispielhaft gewählte Modell MC2, welches zwei längliche Hohlräume mit einem Querschnitt von jeweils  $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$  aufwies und dessen Hochspannungselektrode eine Spannung  $\hat{U}$  von 15 kV zugewiesen wurde.

Tab. B.2.1: Material und Netzeigenschaften zu Modell MC2

Nr.	Material	EI.Widerstand in Ohm.m	Relative Permittivität	Max. Ele- mentgröße	Knoten- anzahl	Anzahl der Tetraeder
0	global	-	-	0,08 $\mu\text{m}$	2.050.845	11.003.192
1	AGS-Lack	$1,7 \cdot 10^{-8}$	1 @ 20°C	0,00025 bzw. 0,0005	-	-
2	Airbox	0	1	-	-	1.728.633
3	EGS-Lack	$5 \cdot 10^5$	1	-	-	174.019
4	Glasträger	$10^{25}$	4,6	0,0005 bzw. 0,00025	-	2.724.885
5	I-Lack	$10^{16}$	2,1	-	-	154.457
6	Isolieröl	$10^{15}$	3,2	0,001 $\mu\text{m}$	-	249.616
7	Isolierung	-	3,9	0,00025	-	2.665.793
8	Lufteinschlüsse	-	1	0,00005	-	26.859 bzw. 36.982
9a, 9b	PTFE-Ring innen bzw. PTFE-Ring außen	$10^{19}$	2,1	0,001 $\mu\text{m}$	-	37.982 bzw. 26.567
10	Silberringe	$1,6 \cdot 10^{-8}$	1	-	-	-
11	Wasser	-	80 @ 20°C	-	-	-

Tab. B.2.2: Einstellungen des Solvers zu Modell MC2

Solver Options	Einstellungen
Material type	Default
Method	Newton-Raphson
Max. Newton iterations	20
Newton tolerance	1%
Polynomial order	2
CG tolerance	0,01%
Source frequency	50 Hz

Tab. B.2.3: Einstellungen zum Lösungsalgorithmus zu Modell MC2

Adaption Options	Einstellungen
Use h-adaption	5%
Use p-adaption	10%
Tolerance	1%
Tolerance to switch from h to p adaption	10%
Maximum number of steps	10

### B.3 Ergänzungen zur Nachbildung und Simulation des Stabschnittes:

Die folgenden Daten beziehen sich auf das beispielhaft gewählte Modell 12b, welches drei Mikrohohlräume mit einem Durchmesser 250  $\mu\text{m}$  aufwies und dessen Hochspannungselektrode eine Spannung  $\hat{U}$  von 17,5 kV zugewiesen wurde.

Tab. B.3.1: Material und Netzeigenschaften zu Modell 12b

Nr.	Material	EI.Widerstand in Ohm.m	Relative Permittivität	Max. Ele- mentgröße	Knoten- anzahl	Anzahl der Tetraeder
0	global	-	-	0,01 $\mu\text{m}$	303.547 bzw. 419.153	1.648.382 bzw. 2.207.404
1	AGS-Lack	(Erdelektrode)	-	0,0002 bzw. 0,0005	-	-
2	IPS-Schicht	(HV-Elektrode)	-	0,0003 bzw. 0,00005	-	-
3	Isolierung	-	3,9	0,00005		1.622.700
4	Mikrohohlräume Bzw. Luft	-	1	0,00002		8.666 8.405 8611

Tab. B.3.2: Einstellungen des Solvers zu Modell 12b

Solver Options	Einstellungen
<i>Material type</i>	Default
<i>Method</i>	Newton-Raphson
<i>Max. Newton iterations</i>	10
<i>Newton tolerance</i>	1%
<i>Polynomial order</i>	3
<i>CG tolerance</i>	0,01%
<i>Source frequency</i>	50 Hz

Tab. B.3.3: Einstellungen zum Lösungsalgorithmus zu Modell 12b

Adaption Options	Einstellungen
<i>Use h-adaption</i>	3%
<i>Use p-adaption</i>	5%
<i>Tolerance</i>	1%
<i>Tolerance to switch from h to p adaption</i>	10%
<i>Maximum number of steps</i>	10