

SACHBERICHT ZUM PROJEKTABSCHLUSS

ECO-BREAK-420

Umweltfreundliche Schalttechnologien für die Höchstspannungsebene

Teilprojekt TUM: Isolationskonzepte und Schalten in Clean Air

Förderkennzeichen: 03EI6052C
Beginn: 01.03.2021
Ende: 31.10.2024

Zuwendungsempfänger: Technische Universität München
Professur für Hochspannungs- und Anlagentechnik
Arcisstr. 21
80333 München

Projektleitung TUM: Prof. Dr. sc. Myriam Koch (bis 30.09.2022)
Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen (ab 01.10.2022)

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurze Darstellung.....	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn	5
1.4.1	Trenn- und Erdschalter	5
1.4.2	Isolierstoffe und Beschichtungen	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2.	Eingehende Darstellung.....	7
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	7
2.1.1	AP2.1 Feststoffisolierung von Vakuumschaltröhren	7
2.1.2	AP2.3 Hybridisolierung von Leiterbahnen	11
2.1.3	AP4 - Konzepte für Trenn- und Erdungsschalter.....	16
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweißes.....	17
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	18
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	18
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	18
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	19
3.	Literaturverzeichnis	20

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die Nutzung von Schwefelhexafluorid (SF_6) als Isolations- und Lichtbogenlöschmedium in hochspannungstechnischen Geräten der Energieversorgung bildet zwar den aktuellen technischen Standard, weist jedoch erhebliche Nachteile hinsichtlich der Klimaverträglichkeit auf. Dies gewinnt insbesondere an Bedeutung im Kontext des Umbaus der Netzinfrastruktur im Zuge der Energiewende und der damit verbundenen Diskussion über alternative Technologien. Vor diesem Hintergrund ist die Bereitstellung klimafreundlicherer Alternativen dringend notwendig. Daher liegt ein zentraler Fokus aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf der Erforschung der Grundlagen und der Entwicklung technologischer Lösungen zur Verwendung klimaneutraler Alternativen zu SF_6 . Dieser Prozess wurde zusätzlich durch die Revision der europäischen Verordnung über fluorierte Treibhausgase im Jahr 2014 intensiviert, die den Bedarf an umweltfreundlicheren Isolations- und Löschmedien für Schaltgeräte und Schaltanlagen in Stromnetzen weiter in den Vordergrund rückt.

Im Fokus dieses Vorhabens standen umweltfreundliche, klimaneutrale Grundlagentechnologien für das Übertragungsnetz ($U_T \geq 420 \text{ kV}$) in Verbindung mit Vakuumschaltröhren als Leistungsschaltelementen. Die Aufgabe der Technischen Universität München (TUM) war hierbei die Untersuchung alternativer sowie klimaverträglicher Isolier- und Löschgase (z.B. synthetische Luft) im Vergleich zu SF_6 . Im Rahmen dieser Forschung wurden neue Materialien grundlegend charakterisiert und innovative Isolationskonzepte für den Einsatz in der Hoch- und Höchstspannungsebene entwickelt.

In den Arbeitspaketen AP2.1 und AP2.3 wurden von der TU München Isolationskonzepte für die Erhöhung der elektrischen Festigkeit der Vakuumschaltröhren und Leiterbahnen, u.a. durch Variation der eingesetzten Feststoffdicken untersucht. Zur Auswahl von geeigneten Materialien und Charakterisierung von Materialproben wurde ein entsprechendes Technikum aufgebaut. Die Materialeigenschaften wurden im Labormaßstab für die Grundlagenforschung untersucht und bezüglich ihres Einsatzpotenzials in einer in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) bewertet. Für die Arbeitspakete AP4.1 und AP4.2 wurden an der TU München grundlegende Konzepte zur Realisierung von gasisolierten Trenn- und Erdungsschaltern in synthetischer Luft erarbeitet und im Modellmaßstab erprobt.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Professur für Hochspannungs- und Anlagentechnik (HSA) der Technischen Universität München ist auf Forschungsthemen im Bereich gasförmiger und fester Isolierstoffe und deren Anwendung in Hochspannungsgeräten und -anlagen spezialisiert. Einen Schwerpunkt bildet die Forschung zum Isoliervermögen gasisolierter Systeme mit unterschiedlichen Isoliergasen (Schwefelhexafluorid, synthetische Luft sowie neue synthetische Isoliergase und entsprechende Gasgemische) bei allen betriebsrelevanten Spannungsbelastungen. Dabei kann am HSA auf eine breite Expertise bei der experimentellen Analyse und der rechnerischen Simulation der Entladungsentwicklung in Isoliergasen, insbesondere SF_6 , zurückgegriffen werden, die aktuell bei neuen Isoliergasen zum Tragen kommt. Erfahrungen liegen auch für den Einsatz von Kunststoffen in Form dünnerer und dickerer Beschichtungen von Elektroden in gasisolierten Systemen vor. Mit mehreren Hochspannungs- und Isolierstofflaboren verfügt die Professur für Hochspannungs- und Anlagentechnik über eine solide experimentelle Ausstattung.

Somit war zu Projektbeginn an der Technischen Universität München theoretisches und praktisches Wissen vorhanden, das im Rahmen dieses Projektes weiter vertieft wurde und nun der angewandten Forschung und technologischen Entwicklung zukünftiger Energietechnologien zur Verfügung steht.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Zuge des Forschungsvorhabens „Umweltfreundliche Schalttechnologien für die Höchstspannungsebene“ wurde von der TUM drei Teilarbeitspaketen bearbeitet:

- AP2.1 - Feststoffisolierung von Vakuumschaltröhren
- AP2.3 - Hybridisolierung von Leiterbahnen
- AP4 - Konzepte für Trenn- und Erdungsschalter

Der überarbeitete Zeitplan aufgrund der Projektverlängerung ist aus **Abbildung 1** zu entnehmen.

Arbeitspakete	Beteiligung	2021				2022				2023				2024			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 2.1 Feststoffisolierung von Vakuumschaltröhren																	
AP 2.1.1: Auswahl und experimentelle Charakterisierung von Materialien	TUM	Rot	Rot	Rot	Rot												
AP 2.1.2: Auslegung und Aufbau von Modellanordnungen	TUM	Rot	Rot	Rot	Rot												
AP 2.1.3: Experimentelle Charakterisierung der Modellanordnungen	TUM			Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 2.1.4: Bewertung der Materialien und Isolationskonzepte für den realen Anwendungsfall	TUM					Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 2.1.5: Übertragbarkeit auf realitätsnahe Anordnungen	SE																
Zusatz: Charakterisierung der Entladungsentwicklung in synthetischer Luft	TUM																
AP 2.3 Hybridisolierung von Leiterbahnen																	
AP 2.3.1: Auslegung und Aufbau eines Technikums zur Herstellung und Charakterisierung von Materialproben	TUM	Rot	Rot	Rot	Rot												
AP 2.3.2: Auslegung und Aufbau von Modellanordnungen	TUM	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 2.3.3: Experimentelle Charakterisierung der Modellanordnungen	TUM			Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 2.3.4: Bewertung der Materialien und Isolationskonzepte für den realen Anwendungsfall	TUM					Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 2.3.5: Übertragbarkeit auf realitätsnahe Anordnungen	SE																
Zusatz: Einfluss der thermischen Alterung auf die Lebensdauer	TUM																
Zusatz: Modellierung der relativen Permittivität in Verbundstoffen	TUM																
AP 4 Konzepte für Trenn- und Erdungsschalter																	
AP 4.1: Trennschalter	TUM	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 4.1.1: Auslegung und Aufbau des Labormusters	SE																
AP 4.1.2: Prüfung des Labormusters	SE																
AP 4.1.3: Auslegung einer Modellanordnung	TUM	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 4.1.4: Experimentelle Charakterisierung von dielektrischer Festigkeit und Schaltvermögen der Modellanordnung	TUM			Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 4.1.5: Bewertung der Ergebnisse und Übertragung auf das Labormuster	TUM									Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 4.2: Erdungsschalter	TUM	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 4.2.1: Aufbau und Auslegung des Labormusters	SE																
AP 4.2.2: Prüfung des Labormusters	SE																
AP 4.2.3: Auslegung einer Modellanordnung	TUM	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 4.2.4: Experimentelle Charakterisierung von dielektrischer Festigkeit und Schaltvermögen der Modellanordnung	TUM			Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
AP 4.2.5: Bewertung der Ergebnisse und Übertragung auf das Labormuster	TUM									Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	Rot
Zusatz: Untersuchung des Einflusses der Strömungsdynamik auf das Schaltvermögen in einem Erdungsschalter	TUM																

Abbildung 1: Arbeitsplan ECO-BREAK-420 – Rot: Verspätungen, Hellblau: geplante Verlängerungen

Die Bearbeitung der Teilarbeitspakete erfolgte durch eine klare Aufgabenverteilung und ein kontinuierliches Projektmanagement. Der Projektfortschritt wurde für alle Beteiligten durch definierte Meilensteine nachvollziehbar gemacht. Aufgrund von Projektverzögerungen war lediglich auf Seiten der TU München eine Verlängerung der Projektlaufzeit um acht Monate erforderlich. Zur Förderung des Wissenstransfers und des fachübergreifenden Austauschs fanden halbjährlich Projekttreffen statt.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

1.4.1 Trenn- und Erdschalter

Trenn- und Erdungsschalter sind für den sicheren Betrieb einer Schaltanlage notwendig. Im Bereich der Mittelspannung sind bereits Ansätze zur Realisierung von Lasttrennschaltern bis $U_r = 24$ kV unter Verwendung von natürlichen Gasen vorhanden. Die Adaption der Schaltstrecke erfordert zusätzliche Konzepte zur Löschung des Schaltlichtbogens sowie eine Anpassung der kinematischen Ketten und des Antriebs des Schaltgeräts. Eine Weiterentwicklung dieser Konzepte zum Einsatz in höheren Spannungsebenen ist bisher nicht erfolgt.

1.4.2 Isolierstoffe und Beschichtungen

In der Hochspannungstechnik werden grundsätzlich gasförmige, feste und flüssige Isolierstoffe unterschieden, die sich hinsichtlich ihrer elektrischen (z.B. Permittivität, Durchschlagfestigkeit), mechanischen (z.B. Eignung als Stützmaterial) und thermischen (z.B. Wärmeleitfähigkeit) Eigenschaften teilweise erheblich unterscheiden. In modernen gasisolierten Schaltanlagen werden lediglich gasförmige und feste Isolierstoffe eingesetzt.

Die dielektrische Festigkeit von gasförmigen Isolierstoffen hängt neben dem Gasdruck erheblich von etwaigen Verunreinigungen (z.B. Feuchtigkeit) und der Oberflächenbeschaffenheit der angrenzenden Elektroden ab. Von Schwefelhexafluorid ist bekannt, dass raue Elektrodenoberflächen bei höheren Drücken zu einer erheblichen Reduktion der dielektrischen Festigkeit der Gasisolation führen. Dünne polymere Beschichtungen können den Einfluss der Oberflächenrauheit deutlich reduzieren und so bei höheren Betriebsdrücken einem Abfall der Isolierfähigkeit des Gases entgegenwirken.

Dicke Beschichtungen (Schichtdicke größer als 1 mm) von Elektrodenoberflächen erwiesen sich hingegen insbesondere bei stark gekrümmten Elektroden, die ein hohes elektrisches Feld hervorrufen, als vorteilhaft. Durch die Beschichtung kritischer Elemente innerhalb der GIS mit festen Isolierstoffen kann der elektrische Feldverlauf deutlich beeinflusst werden. Aufgrund der höheren relativen Permittivitäten von Feststoffen im Vergleich zu gasförmigen Isoliermedien kommt es zum Feldverdrängungseffekt, bei welchem das elektrische Feld aus dem Medium höherer Permittivität in das Medium geringerer Permittivität verdrängt wird. Sehr hohe elektrische Feldstärken an den Rändern von stärker gekrümmten Bauteilen können durch den Feststoff somit deutlich abgeschwächt werden und die maximale elektrische Feldstärke im Gasraum wird reduziert. Dieser Effekt führt zu höheren Streamereinsatzspannungen im Isoliergas und damit zu einer verbesserten elektrischen Festigkeit des Gesamtsystems. Die positive Wirkung unterschiedlicher dicker Beschichtungen wurde bereits in Luft und Schwefelhexafluorid-Isolierungen untersucht. Darüber hinaus können festen Isoliermedien, die aus polymeren Werkstoffen wie z.B. Epoxidharzen oder Silikonen bestehen, verschiedene Füllstoffe zugemischt werden. Neben der Modifikation des Schrumpfverhaltens bei der Herstellung oder der Wärmeleitfähigkeit können auch gezielt die Permittivität oder die Leitfähigkeit verändert werden. Ebenso können Materialien mit nichtlinearen Eigenschaften zur gezielten Feldsteuerung eingesetzt werden.

Die Fachliteratur zeigt, dass der Durchschlag im Isoliergas in den meisten Fällen das entscheidende Kriterium zur Auslegung von hybriden Isoliersystemen mit dünnen und dicken Beschichtungen ist. Die elektrische Festigkeit von festen Isolierstoffen ist in den meisten Fällen deutlich höher als die des Isoliergases. Deshalb wurde zur Bestimmung der theoretischen Durchschlagsspannung des Gesamtsystems der elektrische Feldverlauf im Gasraum in Abhängigkeit der Elektrodengeometrie ausgewertet und anschließend das Streamerkriterium darauf angewendet. Die Untersuchungen dazu zeigten enorme theoretische Verbesserungspotentiale, insbesondere für Elektrodenanordnungen, welche mit

einer dicken Beschichtung versehen sind. Für dünne Beschichtungen entspricht die Streamereinsatzspannung einer dünn beschichteten Elektrode derjenigen einer Elektrode ohne Oberflächenrauheit.

Keine bekannten Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte wurden für diese Arbeit verwendet.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die in die Projektarbeiten eingebundenen Unternehmen sowie deren Arbeitsfelder in Bezug auf die Arbeitspakete der TUM im Forschungsvorhaben sind in **Tabelle 1** beschrieben.

Mit den Kooperationspartnern wurden jeweils Verträge abgeschlossen, in welchen die zu bearbeitenden Aufgaben definiert und in regelmäßigen Statusbesprechungen die Ergebnisse diskutiert wurden. Weiter wurden Ganztagesbesprechungen mit allen Projektbeteiligten durchgeführt, um den Projektfortschritt und Wissensstand mit allen Beteiligten zu teilen und Abhängigkeiten zu identifizieren.

Tabelle 1: Kurzbeschreibung der Projektpartner

Projektpartner	Ansprechperson	Aufgabenbereich im Projekt
Siemens Energy Global GmbH & Co. KG	Bis 31.05.2024: Dr. Paul Gregor Nikolic Ab 01.06.2024: Karsten Juhre	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung von Gasdruckbehältern und Isoliergas für die AP2.1, AP2.3 und AP4 • Bewertung von Konzepten und Isoliermaterialien in AP2.1 und AP2.3 • AP4.1: Auswahl und Bewertung von geeigneten Kombinationen von Schalttechnologie und Energiespeichertechnologie für CleanAir isolierte Trenn- und Erdungsschalter einschließlich Funktionsmuster
Siemens AG	Dr. Steffen Lang	<ul style="list-style-type: none"> • Beratung zur Auswahl der Isoliermaterialien in AP2.1 und AP2.3 • Austausch und Vergleich von diversen Messdaten zur dielektrischen Spektroskopie (AP2.1 und AP2.3) sowie Größenverteilungen von Partikeln aus Füllstoffkonstellationen (AP2.3)

Weitere Zusammenarbeit erfolgte u.a. mit den folgenden Stellen:

- TUMint-Energy Research GmbH und den Lehrstühlen für Systemverfahrenstechnik sowie für Analytische Chemie und Wasserchemie an der TU München (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (REM) und Bestimmungen volumenbasierter Partikelgrößenverteilungen mittels dynamischer Lichtstreuung von Füllstoffpartikeln in Pulverform)
- Zentrales Elektronik- und Informationstechnologielabor (ZEIT^{lab}) der TUM School of Computation, Information and Technology (CIT) an der an der TU München (Bereitstellung des konfokalen Laserscanning-Mikroskops zur Vermessung von Elektrodenoberflächen)

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Nachstehend werden die Ergebnisse der beiden inhaltlich orientierten Arbeitspakete „AP2 - Isolations-Konzepte“ und „AP4 - Konzepte für Trenn- und Erdungsschalter“ sortiert nach den von der TUM bearbeiteten Unterarbeitspaketen zusammengefasst.

2.1.1 AP2.1 Feststoffisolierung von Vakuumschaltröhren

Vakuumschaltröhren sind die Kernkomponente in gasisolierten metallgekapselten Schaltanlagen (GIS). Um eine sichere und zuverlässige Betriebs der GIS zu gewährleisten, müssen Teile der Vakuumschaltröhre sowie die damit verbundenen Leiterbahnen auf Hochspannungspotential gegenüber dem Erdpotential elektrisch isoliert werden. Neben einer reinen Gasisolierung mit synthetischer Luft ist für einige Anwendungsfälle grundsätzlich auch eine dünne Feststoffisolierung vorstellbar. Im Rahmen dieses Teilarbeitspakets wurde geeignete Isoliermaterialien ausgewählt und miteinander bezüglich ihres Einsatzpotentials in einer GIS bis zu einem Isoliergasdruck von 1,0 MPa verglichen.

AP2.1.1: Auswahl und experimentelle Charakterisierung von Materialien

Im Rahmen dieses Teilarbeitspakets wurden verschiedene Materialien für den Einsatz als dünnen Feststoffisolierung in einer GIS ausgewählt. Ein besonderer Fokus lag auf der thermischen Klassifikation der Materialien gemäß DIN EN 60085, welche die maximal zulässige Einsatztemperatur von elektrischen Isoliermaterialien definiert. Es ist jedoch zu beachten, dass das elektrische Isoliermaterial in Kombination mit leitenden Teilen als Bestandteil eines elektrischen Isoliersystems anzusehen ist. Dieses ist gemäß DIN EN 62271-1 thermisch einzustufen, wonach die Temperatur von blanken Kupfer- oder Aluminiumlegierungen in einer luftisolierten GIS 100 °C nicht überschreiten darf. Deshalb wurden für die Auswahl der Isoliermaterialien nur solche berücksichtigt, deren thermische Klasse eine Temperaturbeständigkeit von mehr als 100 °C gewährleistet.

Im Zuge der experimentellen Charakterisierung der Materialien wurden die temperaturabhängige relative Permittivität ϵ_r bestimmt. Hierfür stand an der Professur für Hochspannungs- und Anlagentechnik ein Versuchsaufbau zur dielektrischen Spektroskopie zur Verfügung. Dieser Versuchsaufbau ermöglicht die temperatur- und frequenzabhängige Analyse von Materialproben. Für die Messungen in diesem Teilarbeitspaket wurde als minimale Temperatur Raumtemperatur und als maximale Temperatur 150 °C gewählt, bei einem Frequenzspektrum von 1 Hz bis $1 \cdot 10^7$ Hz. Es ist jedoch zu beachten, dass die dielektrische Spektroskopie nicht für Sprühlacke zulässig ist, da es aufgrund von Lufteinschlüssen im Lack zu einem verfälschten Ergebnis kommen kann.

Neben der der relative Permittivität ϵ_r wurde zudem die elektrische Durchschlagsfestigkeit E_{DS} der Isoliermaterialien experimentell ermittelt. Hierfür wurde auf die DIN EN 60243-1 und die DIN EN 60464-2 zurückgegriffen. Bei der Auswertung der Ergebnisse war darauf zu achten, dass sich die elektrische Durchschlagsfestigkeit E_{DS} mit steigender Schichtdicke s invers proportional abnimmt. Vereinfacht kann dieses Verhalten durch $E_{DS} \propto s^{-0,5}$ beschrieben werden. Um E_{DS} aller Materialien miteinander vergleichen zu können, wurden die alle gemessenen Werte bezogen auf $s = 100 \mu\text{m}$ normiert.

Insgesamt wurden für das AP2.1 sieben Guss- und vier Sprühlacke ausgewählt und untersucht. Die Lackmaterialien und ihre resultierenden Eigenschaften sind in **Tabelle 2** aufgelistet.

Tabelle 2: Übersicht der Isoliermaterialien

Kürzel	Material	Verarbeitung	Thermische Klasse	ϵ_r (20 °C, 50 Hz)	E_{DS} ($s = 100 \mu\text{m}$)
AR	Acryl	Sprühen	E (120 °C)	-	104 kV/mm
EP-1	Epoxidharz	Guss	B (130 °C)	4,3	133 kV/mm
EP-2	Epoxidharz + 24 wt% BaTiO ₃	Guss	≥ B (130 °C)	5,3	89 kV/mm
EP-3	Epoxidharz+ 24 wt% SiO ₂	Guss	≥ B (130 °C)	4,3	112 kV/mm
EP-4	Epoxidharz	Guss	B (130 °C)	5,6	120 kV/mm
PESI-1	Polyesterimide	Sprühen	H (180 °C)	-	65 kV/mm
PESI-2	Polyesterimide	Guss	N (200 °C)	3,0	120 kV/mm
PUR-1	Polyurethan	Guss	E (120 °C)	3,3	109 kV/mm
PUR-2	Polyurethan	Guss	E (120 °C)	5,7	104 kV/mm
PUR-3	Polyurethan	Sprühen	E (120 °C)	-	86 kV/mm
SiR	Silikon	Sprühen	600 °C	-	63 kV/mm

AP2.1.2: Auslegung und Aufbau von Modellanordnungen

Der Homogenitätsgrad nach Schwaiger einer realen GIS liegt typischerweise zwischen 0,5 und 0,8. Daher wurde als Modellanordnung eine Halbkugel-Platten-Elektrodenanordnung mit einer Schlagweite von 40 mm und einem Homogenitätsgrad η von etwa 0,5 gewählt. Die gesamte Elektrodenanordnung war aus Aluminium gefertigt. Die geerdete Plattenelektrode, mit einem Durchmesser von 240 mm und einem Kantenradius von 10 mm, war stets poliert. Die Halbkugelelektrode hatte einen Radius r von 30 mm und konnte je nach Bedarf mit verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten ausgestattet werden. Für die Versuche ohne Lackbeschichtung standen polierte, korngeschliffene und sandgestrahlte Elektroden zur Verfügung. Die Oberflächenstrukturen wurden mit einem konfokalen Laserscanning Mikroskop und einem taktilen Oberflächenscanner bezüglich ihrer maximalen Profilhöhe R_z analysiert. Hieraus resultierte ein $R_z \approx 3 \mu\text{m}$ für polierte Elektroden und $R_z \approx 10 \mu\text{m}$ für korngeschliffene Elektroden. Die sandgestrahlten Elektroden wurden mit $R_z \approx 20 \mu\text{m}$ und $R_z \approx 60 \mu\text{m}$ spezifiziert. Diese unterschiedlichen Oberflächenstrukturen waren erforderlich, um den Einfluss der Oberflächenrauheit in einer luftisolierten GIS zu untersuchen und die Wirkung eines Isolierlacks zu bewerten. Für die lackierenden Elektroden wurden die korngeschliffenen Elektroden verwendet. Die Oberflächenrauheit der lackierten Elektroden entsprach der einer polierten Elektrode.

Im Rahmen des AP2.1 wurden zusätzlich zur beschriebenen Halbkugel-Platten-Elektrodenanordnung weitere Elektrodenkonfigurationen eingesetzt, um den bezogenen Spannungsbedarf eines Streamers in Luft zu bestimmen. Der bezogene Spannungsbedarf beschreibt die maximale Ausdehnung einer Streamerentladung und kann als Indikator für das Auftreten einer kombinierten Streamer-Leader-Entladung dienen. Für die Versuche standen zwei Ausgangsaufbauten aus Aluminium zur Verfügung: eine Platte-Platte-Elektrodenanordnung mit einer ortsfesten Störstelle sowie eine Halbkugel-Platten-Elektrodenanordnung mit einer ortsfesten Störstelle. Als Störstelle wurde eine Nadel mit abgerundeter Spitze aus Wälzlagerstahl gewählt. In der homogenen Anordnung hatte die Nadel eine Länge von 15 mm. In der schwach inhomogenen Elektrodenkonfiguration wurde entweder eine 6 mm oder eine 3 mm lange Nadel auf der Halbkugelelektrode platziert. Unabhängig von der Elektrodenkonfiguration betrug der Abstand von der Nadelspitze zur gegenüberliegenden Plattenelektrode stets 85 mm. Die resultierenden Homogenitätsgrade η des Hintergrundfeldes ohne Nadel lagen bei 1 und etwa 0,3.

AP2.1.3: Experimentelle Charakterisierung der Modellanordnungen

Zur experimentellen Charakterisierung der Halbkugelanordnung mit einer Schlagweite von 40 mm und ohne Lackbeschichtung bei Raumtemperatur wurden Spannungssteigerungsversuche durchgeführt. Die Untersuchungen umfassten sowohl positive als auch negative Blitzstoßspannungsbelastungen bei Isoliergasdrücken von 0,4 MPa, 0,7 MPa und 1,0 MPa. Ziel war die Bestimmung der 10%-Quantile U_{d10} für Halbkugelelektroden mit unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten. Das 10%-Quantil wurde ausgewählt, da es gemäß der DIN EN 60060-1 der statistischen Stehspannung entspricht und somit zur Auslegung einer GIS herangezogen werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächenrauheit einen negativen Einfluss auf die Durchschlagsfestigkeit der Modellanordnung hat, wobei dieser Effekt mit steigendem Druck zunimmt (**Abbildung 2**). Bei negativer Polarität wurde eine maximale Reduzierung der Durchschlagsspannung um etwa –12 % im Vergleich zur polierten Halbkugel festgestellt. Bei positiver Polarität war die maximale Reduzierung der Durchschlagsspannung deutlich ausgeprägter. Dieses Verhalten führte zu einem Polaritätswechsel der kritischen Durchschlagsspannung ab einem Druck von 0,7 MPa bei der Verwendung der Halbkugelelektrode mit einer Oberflächenrauheit von $R_Z \approx 60 \mu\text{m}$. Um diesen Effekt in einer luftisolierten GIS zu vermeiden, muss sichergestellt werden, dass der Grenzwert für einen Polaritätswechsel nicht überschritten wird. Dieser Grenzwert beträgt $40 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}$ und ergibt sich aus dem Produkt von Isoliergasdruck und Oberflächenrauheit R_Z .

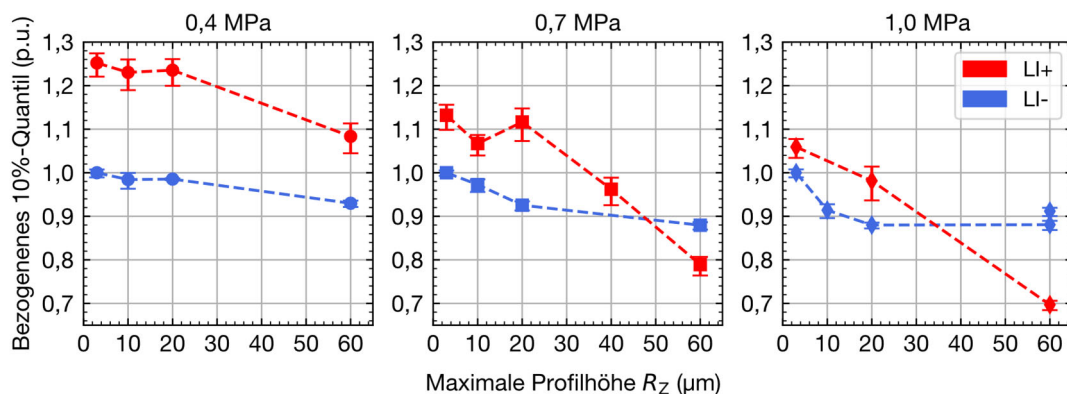


Abbildung 2: Druckabhängiger Einfluss der Oberflächenrauheit bei positiver und negativer Blitzstoßbelastung

Der negative Einfluss der Oberflächenrauheit konnte zudem durch ein Berechnungsmodell bestätigt werden, das auf der optischen Vermessung von realen Oberflächenprofilen basiert. Mithilfe dieses Modells können die kritischen Durchschlagsspannungen beider Polaritäten durch die Berechnung der Streamereinsatzspannung abgeschätzt werden. Ergänzend dazu wurde ein weiteres Modell entwickelt, das auf dem Volumen-Zeit-Gesetz basiert. Dieses Modell ist jedoch nur für polierte Elektroden anwendbar. Bei negativer Polarität erfolgt die Bereitstellung des Anfangselektrons hauptsächlich durch die Elektrodenemission aus der Kathode, während bei positiver Polarität der Detachment-Prozess eine entscheidende Rolle spielt. Diese Prozesse sind stark Abhängig vom Druck und dem anliegenden elektrischen Feld und haben somit einen wesentlichen Einfluss auf die Durchschlagsfestigkeit. Diese Prozesse sind stark abhängig vom Druck und dem anliegenden elektrischen Feld und haben somit einen wesentlichen Einfluss auf die Durchschlagsfestigkeit. Mithilfe dieses Modells ist es möglich, die kumulativen Verteilungsfunktionen der polierten Elektroden bei positiver und negativer Spannungsbelastung zu prognostizieren.

Neben der experimentellen und simulativen Untersuchung der Durchschlagsfestigkeit der Halbkugelelektroden wurde das Entladungsverhalten mithilfe eines Photomultiplier-Setups optisch aufgezeichnet. In nahezu allen Messungen zeigte sich ein reines Streamerwachstum. Ein abweichendes, stufenweises Entladungsverhalten wurde jedoch nur bei der Halbkugelelektrode mit einer Oberflächenrauheit von $60\ \mu\text{m}$ unter Bedingungen von $1,0\ \text{MPa}$ und positiver Blitzstoßbelastung beobachtet. Dieses stufenweise Verhalten deutet auf das Auftreten von Streamer-Leader-Entladungen hin. Diese Hypothese wird durch die Ergebnisse zum Spannungsbedarf eines Streamers in der alternativen Elektrodenanordnung mit ortsfester Störstelle unterstützt. Es konnte gezeigt werden, dass ein Durchschlag mit stufenweiser Entladungsentwicklung nur dann auftrat, wenn der Streamer theoretisch die vollständige Schlagweite von $40\ \text{mm}$ überbrücken konnte.

AP2.1.4: Bewertung der Materialien und Isolationskonzepte für den realen Anwendungsfall

Um den Einfluss der Oberflächenrauheit zu minimieren, können die Elektrodenoberflächen entweder poliert oder lackiert werden, wobei das Lackieren den ökonomischeren Ansatz darstellt. Da bei polierten Elektroden die negative Spannungsbelastung zum kritischen Durchschlagsfall führt, wurde das Einsatzpotenzial der Isolierlacke speziell für diese Polarität untersucht. Ein Großteil der Versuche mit beschichteten Elektroden wurde bei einem Druck von $0,7\ \text{MPa}$ durchgeführt, da das System bei diesem Druck weniger empfindlich auf mögliche Störeinflüsse wie zum Beispiel Staub reagiert als bei $1,0\ \text{MPa}$. Zudem wird die Beschichtung nach dem ersten Durchschlag irreversibel beschädigt, wodurch keine Konditionierungsdurchschläge wie bei unbeschichteten Elektroden möglich sind. Ergänzend wurden nur ausgewählte Versuche bei einem Druck von $1,0\ \text{MPa}$ wiederholt.

Je Isoliermaterial wurden mindestens drei Elektroden beschichtet und mittels eines Spannungssteigerungsversuchs auf ihre Durchschlagsfestigkeit bei negativer Blitzstoßspannungsbelastung untersucht. Zur Bewertung des Einsatzpotenzials wurde auf den Median \tilde{U}_d der Erstdurchschläge jedes Materials zurückgegriffen. Dieser entspricht dem 50%-Quantil und ist somit vergleichbar mit dem 50%-Quantil unbeschichteter Elektroden U_{d50} . Der Median und das volle gemessene Spektrum der Erstdurchschläge eines jeden Materials in Vergleich zum 50%-Quantil einer polierten Elektrode bei $0,7\ \text{MPa}$ ist in **Abbildung 3** dargestellt. Das Material mit dem größten mittleren Verbesserungspotential ist PUR-2 mit ca. $11\ \%$. Für das Material PUR-2 konnte auch bei $1,0\ \text{MPa}$ ein Verbesserungspotential von $7\ \%$ bezogen auf eine polierte Elektrode festgestellt werden.

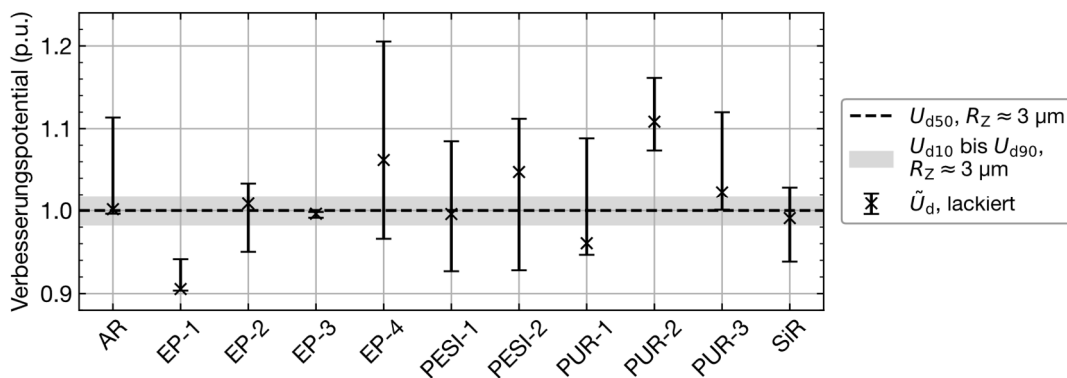


Abbildung 3: Verbesserungspotential der Isoliermaterialien bei $0,7\ \text{MPa}$ und negativer Blitzstoßbelastung

Die Daten aus **Abbildung 3** beinhalten auch die Ergebnisse der temperaturzyklischen Prüfungen nach DIN EN 62271-203 für die Materialien EP-4, PESI-2 und PUR-2. Jeweils zwei Prüflinge pro Material wurden aufgrund ihres hohen Einsatzpotentials ausgewählt. In der Norm wird das thermische Betriebsverhalten eines elektrischen Isoliersystems unter realen Bedingungen überprüft. Dabei wird der Prüfling zehn definierten Temperaturzyklen ausgesetzt, um das Verhalten des Isoliersystems zu bewerten. Anschließend erfolgt eine Sichtprüfung auf Defekte. Ist der Prüfling intakt, wird ein Spannungssteigerungsversuch durchgeführt. Alle eingesetzten Prüflinge konnten die Temperaturzyklen ohne sichtbare Beschädigungen absolvieren. Auch die Durchschlagsfestigkeit beim ersten Durchschlag wurde durch die Temperaturzyklen nicht beeinflusst.

Nach dem ersten Durchschlag zeigt sich im Lack ein Fußpunkt der bis zur Metalloberfläche reicht, wobei das Verbesserungspotential der Durchschlagsfestigkeit unabhängig vom Druck um etwa 10 % abnimmt. Insgesamt wurden bei jedem Versuch mindestens 21 Folgedurchschläge durchgeführt, um dieses Verhalten zu bewerten. Im realen Anwendungsfall eines lackierten Bauteils, das unter Hochspannung steht, ist es erforderlich, das Bauteil nach dem ersten Durchschlag auszutauschen, da die Isolationsfähigkeit nach diesem Vorfall erheblich verringert ist.

Durch die Versuche mit beschichteten Elektroden wurde nachgewiesen, dass das Durchschlagverhalten von lackierten Elektroden unabhängig von der Schichtdicke, der Rauheit der Lackoberfläche, der relativen Permittivität und der Durchschlagsfestigkeit ist. Es ist jedoch darauf zu achten, dass alle Mikrospitzen des Rauheitsprofils abgedeckt sind. Die Schichtdicken der verwendeten Lacke variierten zwischen 30 μm und 225 μm . Die relativen Permittivitäten und Durchschlagsfestigkeiten sind in **Tabelle 2** aufgeführt. Die schwankenden Durchschlagswerte der Materialien sind auf mikroskopische, mit bloßem Auge nicht sichtbare Defekte oder statistische Abweichungen zurückzuführen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die nichtleitende Beschichtung den Effekt der Feldemission aus der Kathode reduziert. Dadurch wird der Detachment-Prozess zum dominierenden Mechanismus bei der Bereitstellung der lawinenwirksamer Anfangselektronen. Basierend auf dem Volumen-Zeit-Gesetz-Modell lässt sich dadurch erklären, warum das Messspektrum lackierter Elektroden breiter ist als das Spektrum zwischen dem 10%-Quantil U_{d10} und dem 90%-Quantil U_{d90} polierter Elektroden (**Abbildung 3**).

2.1.2 AP2.3 Hybridisolierung von Leiterbahnen

Die Aufgabenstellung aus AP2.3 umfasst Grundlagenuntersuchungen zum Isoliervermögen von synthetischer Luft als Bestandteil gasisolierter Schaltanlagen in der Höchstspannungsebene im Einsatz bis zu 420 kV. Der Fokus lag auf einem kombinierten Einsatz synthetischer Luft zusammen mit festen Isolierstoffen in hybriden Isoliersystemen. Dabei soll konzeptuell die hybride Beschichtung von Leiterbahnen sowie der Einsatz an feldkritischen Elementen innerhalb der Schaltanlage untersucht werden. Die Untersuchungen wurden an der Technischen Universität München durchgeführt.

Als mögliche Alternative zum Einsatz von Schwefelhexafluorid (SF_6) in gasisolierten Schaltanlagen der Höchstspannungsebene gilt synthetische Luft als vielversprechend. Mit einem Global Warming Potential (GWP) von Null zeichnet sich synthetische Luft als besonders umweltfreundliches Substitutionsmedium aus. Aufgrund der deutlich reduzierten elektrischen Festigkeit im Vergleich zu SF_6 , werden neue Konzepte bei der Auslegung und Isolationskoordination derartiger Anlagen notwendig, um die Anlagengröße möglichst kompakt zu halten. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden die Möglichkeiten zur Verbesserung der elektrischen Festigkeit des Isoliergases durch den Ansatz hybrider Isoliersysteme über einen breiten Einsatzbereich eingehend untersucht.

Zur Ermittlung der Kriterien, die elementar für die Auslegung sind, ist ein prinzipielles Verständnis der Einflussfaktoren auf die elektrische Festigkeit derartiger Isolationskonzepte von entscheidender Bedeutung. Dazu wurden umfangreiche Untersuchungen anhand einer Kugel-Platte

Elektrodenanordnung (**Abbildung 4a**) durchgeführt, die sowohl im experimentellen als auch simulativen Bereich stattgefunden haben. Zudem ist in **Abbildung 4b** der verwendete Versuchskreis zur Stoßspannungsprüfung abgebildet.



a) Kugel-Platte Elektrodenanordnung



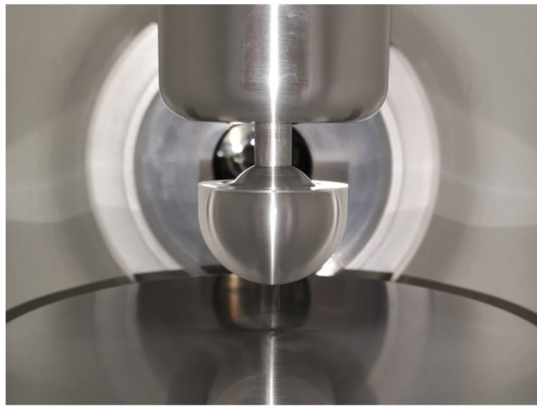
b) Prüfaufbau für Stoßspannungen

Abbildung 4: Versuchsanordnungen zur Bestimmung der elektrischen Festigkeit von synthetischer Luft

Die folgenden Einflussfaktoren stellten dabei den Hauptbestandteil der durchgeführten Untersuchungen dar:

- Gasdruck von synthetischer Luft über einen weiten Bereich (0,1 MPa – 1,0 MPa)
- Polarität der Blitzstoßspannungsbeanspruchung (positiv & negativ)
- Elektrische Festigkeit der blanken und beschichteten Elektrodenanordnung (experimentell)
- Homogenitätsgrad (0,33 – 0,58) bestimmt durch den Elektrodenabstand (20 mm – 60 mm)
- Materialklassen der Beschichtung (Epoxidharzformstoff, Silikonelastomer & Polyurethan)
- Relative Permittivität der Beschichtung (2,7 – 5,0)
- Beschichtungsdicke (2 mm – 10 mm)
- Elektrischer Feldverlauf in Abhängigkeit der Elektrodengeometrie (simulativ)

Die Voruntersuchungen zur elektrischen Festigkeit von synthetischer Luft wurden an der Kugel-Platte Anordnung mit blanken Elektroden durchgeführt und dabei zuverlässig reproduzierbare und belastbare Ergebnisse erzielt. Aus den Versuchen resultiert, dass die elektrische Durchschlagsfestigkeit des Isoliergases bei Blitzstoßspannungsbelastung einen linearen Anstieg mit dem Druck aufweist. Über den gesamten untersuchten Druckbereich konnte bei polierten Elektrodenoberflächen die negative Blitzstoßspannung als kritische Polarität mit den geringeren Durchschlagsspannungen der Geometrie nachgewiesen werden. Folglich beschränkten sich die anschließenden Untersuchungen der übrigen Einflussfaktoren auf den kritischen Fall der negativen Polarität, um den Versuchsumfang in einem überschaubaren Rahmen zu halten.



a) Beschichtete Kugel-Platte Elektrodenanordnung mit einem Silikonelastomer



b) Entladung beim Spannungszusammenbruch der hybriden Isolieranordnung [Gam24]

Abbildung 5: Versuchsanordnungen zur Bestimmung der Verbesserungspotentiale von hybriden Isoliersystemen

Abbildung 5 zeigt die beschichtete Kugelelektrode in einem hybriden Isoliersystem sowie den üblicherweise auftretenden Spannungszusammenbruch der Isolieranordnung. Dabei wird das Gas als Isoliermedium in der kürzesten Wegstrecke zwischen dem Pol der Kugelbeschichtung und der Plattenelektrode direkt durchschlagen. Über die Beschichtungsoberfläche bilden sich mehrfach Kanäle einer Gleitentladung aus. Untersuchungen mit einem entkoppelten Versuchsaufbau, bei der ausschließlich die Gleitentladung über die Oberfläche untersucht wurde, haben gezeigt, dass der Spannungsbedarf der Gleitentladung insbesondere bei hohen Drücken wesentlich kleiner ist als die benötigte Spannung zum Durchschlag der Gastrecke. Dementsprechend ist das entscheidende Kriterium zur Auslegung der Modellanordnung die elektrische Festigkeit des Isoliergases in Abhängigkeit des elektrischen Feldverlaufs, der durch die Feststoffschicht beeinflusst wird. Unter allen Versuchsreihen wurde die Isolierschicht auf der Kugelelektrode nur bei einer Versuchsreihe durchschlagen. Dieses Phänomen war voraussichtlich auf einen fehlerhaften Beschichtungsprozess zurückzuführen. Die Versuchsergebnisse zeigen Verbesserungspotentiale, in Abhängigkeit des Homogenitätsgrades, der Beschichtungsdicke sowie des Beschichtungsmaterials, in einem Bereich zwischen 10% und 40%. Dabei wurde beobachtet, dass die Effektivität der Beschichtung mit stärkerer Inhomogenität der Anordnung deutlich steigt. Insbesondere Materialien mit niedrigerer relativer Permittivität, wie beispielsweise Silikone, zeigten deutlich erhöhte Verbesserungspotentiale im Vergleich zu anderen polymeren Materialgruppen.

Zur theoretischen Betrachtung des Isoliervermögens wurde das Streamerkriterium über den elektrischen Feldverlauf im Gasraum ausgewertet. Dazu wurde ein 2D-rotationssymmetrisches Simulationsmodell in COMSOL Multiphysics aufgebaut und mittels der Finite Elemente Methode (FEM) simuliert. Der Einfluss der Feststoffschicht auf den elektrischen Feldverlauf wurde dabei ausgiebig untersucht. Zur Auswertung des Streamerkriteriums wurden verschiedene effektive Ionisationskoeffizienten aus der Literatur herangezogen und verglichen. Ein Ansatz zeigte besondere Kongruenz mit den Ergebnissen. Die letztlich resultierende theoretische Durchschlagsspannung wird in **Abbildung 6** mit den experimentellen Ergebnissen verglichen und eine prozentuale Abweichung angegeben. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Modell. Auch Untersuchungen mit mehrfachen Beschichtungen (2-4 Schichten unterschiedlicher Permittivität) konnten die Erkenntnisse bestätigen. Dabei wurden die Schichten stets nach demselben Schema angeordnet. Das Material mit der höchsten Permittivität befindet sich an der Kugeloberfläche und die restlichen Materialien sind mit der Permittivität abfallend nach außen hin gestaffelt.

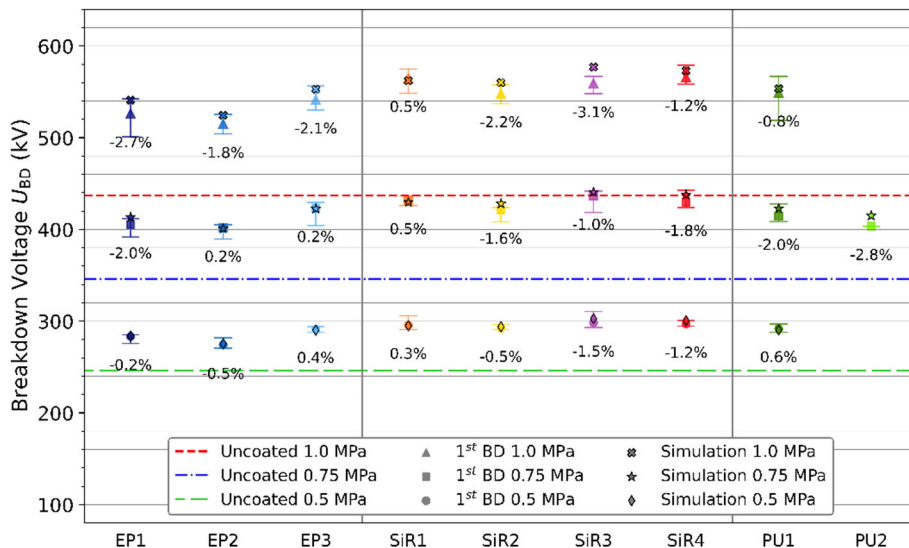


Abbildung 6: Vergleich der theoretischen und experimentellen Durchschlagsspannungen der Kugelplatte Anordnung in Abhängigkeit verschiedener Beschichtungswerkstoffe [Gam24]

Für die Untersuchung der Beschichtungsdicke wurden die Ergebnisse ebenfalls verglichen und sind in **Abbildung 7** exemplarisch für einen Epoxidharzformstoff dargestellt. Andere Materialgruppen, wie Silikonelastomere, wurden ebenfalls untersucht und zeigen ähnliche Tendenzen. Der Einfluss der Beschichtungsdicke konnte für diese Anordnung bei verschiedenen Druckstufen reproduzierbar und mit guter Übereinstimmung nachgewiesen werden.

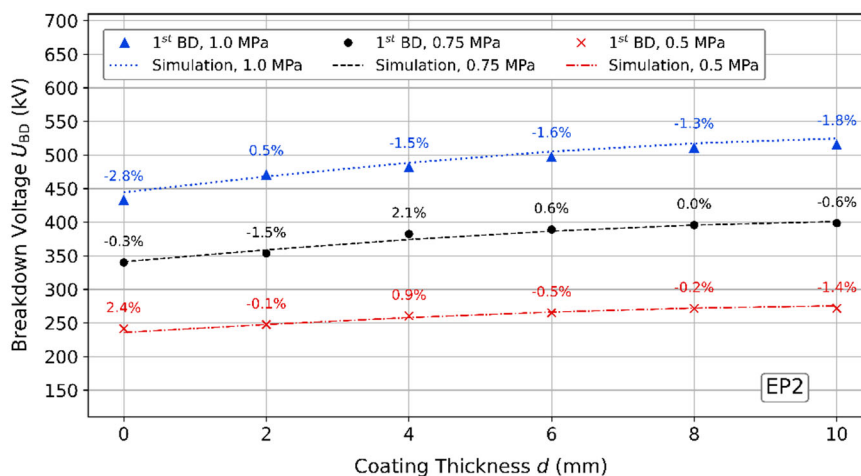


Abbildung 7: Vergleich der theoretischen und experimentellen Durchschlagsspannungen der Kugelplatte Anordnung in Abhängigkeit der Beschichtungsdicke für einen Epoxidharzformstoff bei unterschiedlichen Drücken [Gam24]

Die Ergebnisse des variierenden Elektrodenabstands zeigen kein konsistentes Verhalten. Für niedrigere absolute Drücke (bis 0,5 MPa) stimmen die Werte mit den theoretischen Ergebnissen auch bei größeren Elektrodenabständen und damit geringeren Homogenitätsgraden hervorragend überein. Für erhöhte Drücke im Bereich bis 1,0 MPa weichen die Ergebnisse teils stärker von der Simulation ab und es wird eine generell verminderte elektrische Festigkeit der synthetischen Luft registriert (**Abbildung 8**). Dies gilt insbesondere für erhöhte Elektrodenabstände über 40 mm.

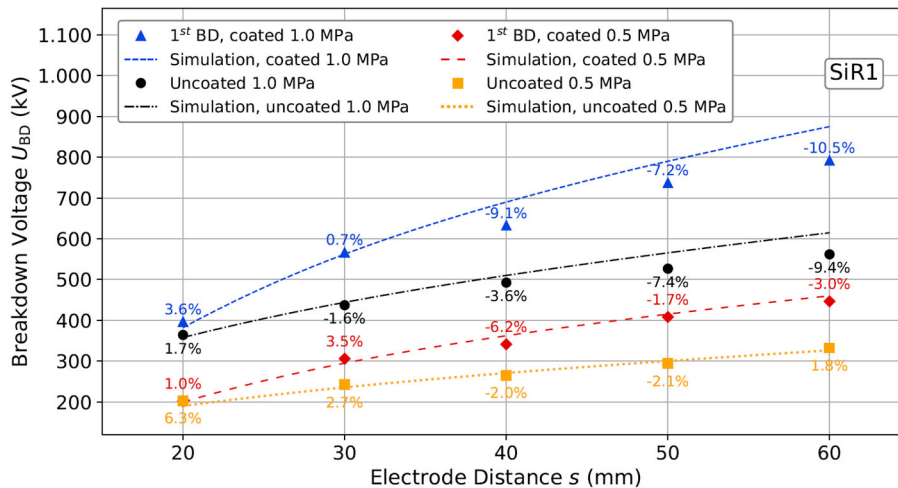


Abbildung 8: Vergleich der theoretischen und experimentellen Durchschlagsspannungen der Kugel-Platte Anordnung in Abhängigkeit des Elektrodenabstands und Gasdrucks [Gam24]

Ergebnisse aus Versuchen zu dielektrisch beschichteten Leiterbahnen im Modellmaßstab an einer koaxialen Elektrodenanordnung bestätigen die Erkenntnisse der Kugel-Platten Anordnung. Die kritische Polarität ist auch bei einer polierten koaxialen Anordnung die negative Blitzstoßspannung. Bis zu einem Druck von 0,75 MPa kann das Durchschlagsverhalten sehr gut mit dem Simulationsprogramm abgebildet werden. Danach tritt eine abflachende elektrische Festigkeit des Gases auf. Die Beschichtung der inneren Leiterelektrode zeigte sowohl in den theoretischen Überlegungen als auch in den Versuchen keine wesentlichen Verbesserungspotentiale. Lediglich die Beschichtung mit wenigen Millimetern Silikon zeigte eine leichte Erhöhung der Durchschlagsspannung. Eine rentable Verbesserung konnte in diesen Maßstabsverhältnissen jedoch nicht erzielt werden.

Die Simulation zu den theoretischen Verbesserungspotentialen wurde auf eine realitätsnahe Geometrie einer Vakuumschaltröhre und dazugehöriger Halterung übertragen. Die Abmessungen der Vakuumschaltröhrenanordnung wurden maßstabsgetreu aus Abbildungen der einschlägigen Literatur entnommen. Die theoretischen Untersuchungen zeigen eine mögliche Verbesserung des Isoliervermögens von über 100 % und damit einhergehend das Potential zu einem deutlich kompakteren Schaltanlagen-Design.

In einem weiteren Schritt wurde ein Programm aufgebaut, welches die Vor- und Nachteile bei mehrschichtigen Isolierkonzepten in hybriden Ansätzen gegeneinander abwägt und basierend auf einem Algorithmus die optimale Beschichtungskonfiguration in Abhängigkeit der Anforderungen vorschlägt. Dabei werden mit dem elektrischen Feldverlauf im Gasraum, der maximal auftretenden Feldstärke im festen Isolierstoff sowie der Homogenität des Feldverlaufs über das mehrschichtige Feststoffsystem mit unterschiedlichen Permittivitäten die drei wesentlichen Kriterien ausgewertet und anschließend ein Ranking der Kombinationen erstellt. Je nach Anwendungsfall und Materialwahl kann zusätzlich eine Gewichtung der unterschiedlichen Kriterien eingestellt werden. Das Modell kann auf sämtliche Geometrien ausgeweitet werden, insofern sich der Homogenitätsgrad der Anordnung nicht wesentlich von den in dieser Arbeit untersuchten Modellgeometrien unterscheidet. Die Konzepte sollten im Idealfall an einer realen Anordnung mit Feststoffisolation an den kritischen Feldbereichen getestet und auf Plausibilität geprüft werden.

Ein weiterer kritischer Nebenaspekt der hier behandelten Forschung ist der Einfluss durch Füllstoffe in Kompositmaterialien auf die dielektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften. Insbesondere der Einfluss auf die relative Permittivität in Abhängigkeit der Füllstoffkonzentration und Partikelgröße stand hier im Fokus. Die Modellbildung zur Gesamtpermittivität von Kompositmaterialien

umfasst Untersuchungen zur Füllstoff- sowie Matrixpermittivität, Partikelgröße, Partikelgeometrie, stochastischen Partikelgrößenverteilung, räumlich zufällig angeordneter Ausrichtung sowie Position der Partikel im Matrixmaterial bei mikroskaligen Füllstoffkomponenten. Außerdem wurde zusätzlich der Einfluss von Randbereichen, wie etwa die Interphase, bei nanoskaligen Füllstoffen gezielt untersucht.

Insbesondere die Partikelgeometrie zeigte hier einen bedeutenden Einfluss auf die relative Permittivität der Komposite. Die Ergebnisse der theoretischen und experimentellen Untersuchungen deuten darauf hin, dass für eine effiziente Ausnutzung des Volumenverhältnisses aus Füllstoff und Matrix die Partikelgrößenverteilung, Agglomeratbildung und Partikelgeometrie als wesentliche Bestandteile berücksichtigt werden sollten. Zum Simulationsverfahren wurden diverse Methodiken untersucht, unter anderem die Messgröße für FEM-Verfahren in einem akzeptablen Genauigkeitsbereich zu generieren bei gleichzeitiger Recheneffizienz des Programms.

2.1.3 AP4 - Konzepte für Trenn- und Erdungsschalter

Da das Schaltvermögen von synthetischer Luft gegenüber SF_6 deutlich reduziert ist, bedarf es einer experimentellen Charakterisierung des Ausschaltvermögens und ggf. neue Ansätze für die Lichtbogenlöschung bei höheren Spannungsebenen. Für Trennschalter ist die Funktionsfähigkeit in synthetischer Luft bereits experimentell nachgewiesen und stellt eine geringere Herausforderung gegenüber einem Erdungsschalter bei der Auslegung neuer Hochspannungsschaltanlagen dar. Während bei Trennschalter ein hoher Strom im niedrigen Kiloamperebereich bei niedrigen Spannungen bei der Sammelschienenkommutierung geschaltet werden muss, müssen Erdungsschalter den Lichtbogen bei niedrigen Strömen, aber bei relativ hohen transienten Wiederkehrspannungen löschen können. Um diese Herausforderung experimentell zu untersuchen wurde an der TU München ein entsprechender Prüfkreis (siehe **Abbildung 9**) für induzierte Ströme in Anlehnung an IEC 62271-102 (2018) ausgelegt und aufgebaut wurde. Die Schaltversuche wurden in einem Modellversuchsaufbau durchgeführt, der die folgende Parametervariation erlaubt:

- Systemspannung: 1 kV bis 6 kV
- Induzierte Ströme bis 250 A
- Gasdruck im Device Under Test (DUT) bis 0,8 MPa

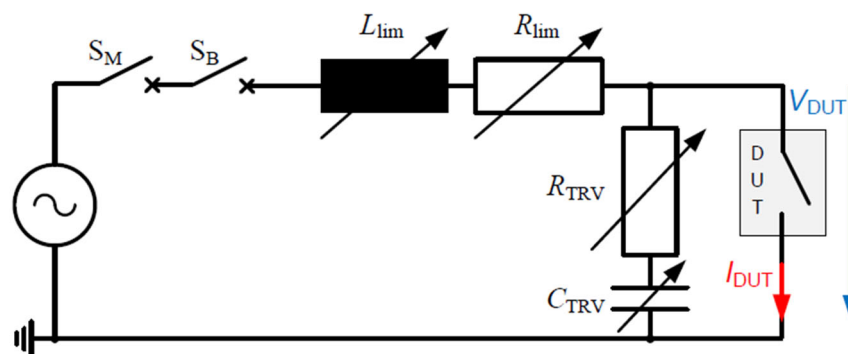


Abbildung 9: Prüfkreis für induzierte Ströme in Anlehnung an IEC 62271-102

Die Ausschaltgeschwindigkeit des Kontaktstiftes betrug im Mittel mehr als 3 m/s nach Kontakttrennung, sodass der Versuchsaufbau im Bereich eines Schnellerders liegt. Das untersuchte Kontaktsystem besitzt keine weiteren Maßnahmen zur Beeinflussung des Lichtbogens, das heißt es wurde keine forcierte Kühlung des Lichtbogens oder Düse eingesetzt. Der Einsatz der Kontakttrennung erfolgte bei zufälliger Phasenlage und für jede Einstellung eines Parameters wurden 10 Versuche durchgeführt. Für die Auswertung wurde die Lichtbogenspannung, der Lichtbogenstrom, das Löschverhalten im

Stromnulldurchgang und die Anzahl der Wiederzündungen herangezogen. Die transiente Wiederkehrspannung wurde in Anlehnung an IEC 62271-102 eingestellt.

Die Ergebnisse (**Abbildung 10**: Stromausschaltvermögen über dem Druck bezogen auf 0.1 MPa bei 1 kV Systemspannung **Abbildung 10**) zeigen ein steigendes Stromausschaltvermögen mit erhöhtem Druck. Insbesondere bei Drücken über 0,7 MPa wird ein signifikantes Verbesserungspotential festgestellt. Für die Stromunterbrechung wurde ein optimales Zeitfenster bei 2 ms bis 3 ms nach Kontaktrennung gefunden, bei der eine erfolgreiche Unterbrechung im ersten Stromnulldurchgang mit großer Wahrscheinlichkeit auftritt.

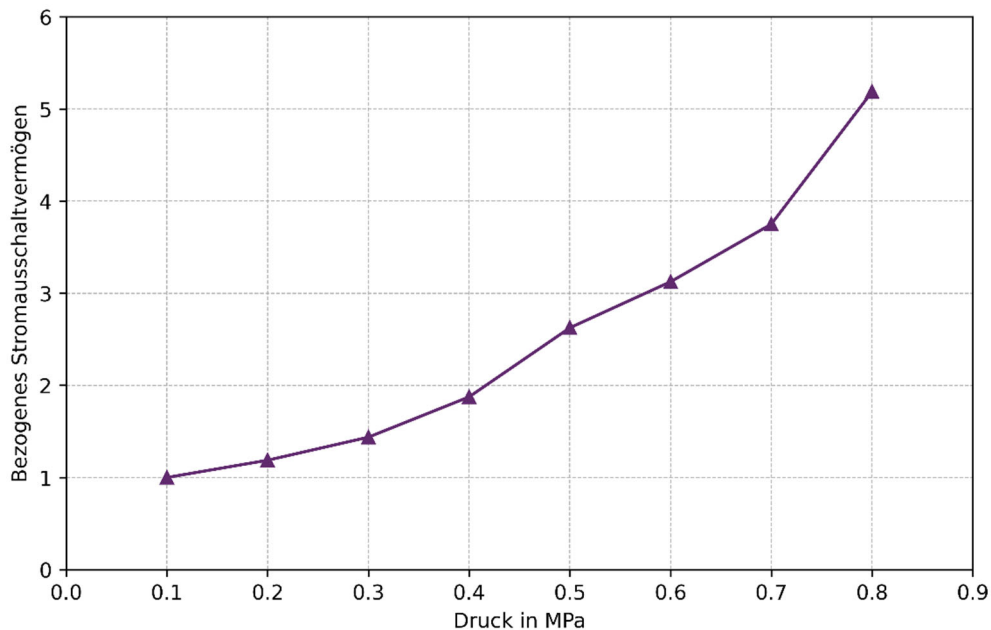


Abbildung 10: Stromausschaltvermögen über dem Druck bezogen auf 0.1 MPa bei 1 kV Systemspannung

Für höhere System- und Wiederkehrspannungen wurde ein unzureichendes Ausschaltvermögen beobachtet. Zur Verbesserung des Schaltverhaltens wurde der Ansatz einer forcierten Bebläsung des Schaltlichtbogens untersucht. Hierfür wurde ein Simulationsmodell erstellt, das die Untersuchung des Strömungsverhaltens an verschiedenen Kontaktgeometrien erlaubt.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Insgesamt wurden der TU München für die Bearbeitung der Teilarbeitsprojekte AP2.1, AP2.3 und AP4 ca. 961 T€ bewilligt. Die Mittel wurden für die Planung und Realisierung der erforderlichen Versuchsaufbauten sowie für die Durchführung und Betreuung der entsprechenden Versuche verwendet. Dazu zählten auch die Beschaffung der notwendigen Arbeitsgeräte und Materialien. Die einzelnen Positionen setzen sich zusammen aus Personalkosten (ca. 817 T€), Investitionen (ca. 50 T€) und sonstige Projektkosten (ca. 60 T€).

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ziel des Projekts war die Erforschung neuer alternativer Isoliergase für gasisolierte Hochspannungsschaltanlagen, die ein deutlich geringeres Treibhauspotenzial als das derzeit verwendete Isoliergas SF₆ aufweisen. Weltweit, insbesondere in Europa, zeichnet sich ein klarer Trend ab, SF₆ mittelfristig durch umweltfreundlichere Alternativen zu ersetzen. Europa hat sich das Ziel gesetzt, bis 2050 klimaneutral zu werden. Um die klimapolitischen Ziele der Bundesrepublik Deutschland im Bereich der Energieübertragung zu erreichen, sind die Entwicklung von SF₆-Alternativen und deren Anwendung unerlässlich.

Synthetische Luft wird derzeit als eines der vielversprechendsten fluorfreien Isoliergase für den Einsatz in GIS angesehen. Allerdings ist der technische Wissensstand im Vergleich zu SF₆ noch nicht so weit entwickelt. Das Ziel des Projekts bestand daher darin, die Grundlagenforschung zu synthetischer Luft voranzutreiben, um deren Einsatzmöglichkeiten und technische Leistungsfähigkeit umfassender zu verstehen. Aufgrund der Historie der Professur für Hochspannungs- und Anlagentechnik war die Aufgabenstellung als realistisch zu betrachten. Ziel der Grundlagenforschung war es, verschiedene technische und kommerzielle Risiken bei der Realisierung einer luftisolierten GIS zu minimieren und somit den Weg für den praktischen Einsatz dieser Technologie zu ebnet.

Um diese Risiken abzudecken, waren umfassende Untersuchungen zu verschiedenen Teilaspekten erforderlich, die erfolgreich durchgeführt werden konnten. Besonders hervorzuheben ist die gute Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern, die maßgeblich zur Zielerreichung beigetragen hat. Dennoch haben die erzielten Ergebnisse neue Fragestellungen aufgeworfen, die im Rahmen dieses Projekts nicht vollständig beantwortet werden konnten und weiterer Forschung bedürfen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Ziel dieses Vorhabens war die Erforschung und Untersuchung von Isolationskonzepten für das Einsatzgebiet im Bereich der Vakuumschalter-Mehrfachunterbrechung, sowie das Schaltvermögen von Trenn- und Erdungsschalter in synthetischer Luft. Die Ergebnisse liefern Verbesserungspotentiale und Lösungen als technische Grundlage zur Weiterentwicklung von gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen. Insbesondere in Hinsicht auf eine Feststoffisolierung konnte dieses Ziel erreicht werden, so dass die gewonnenen Erkenntnisse zum Fortschritt auf dem Gebiet der Gasisolierertechnik zur Verfügung stehen.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Rahmen der Durchführung des Forschungsvorhabens wurde intensiv darauf geachtet, themenrelevante Entwicklungen und Fortschritte bei anderen Institutionen und Forschungseinrichtungen zu verfolgen. Zu diesem Zweck wurden systematische Literatur- und Patentrecherchen durchgeführt, um sicherzustellen, dass das Forschungsvorhaben auf dem neuesten Stand der Technik basiert und mögliche Überschneidungen oder konkurrierende Ansätze frühzeitig identifiziert werden. Die Recherche umfasste eine umfassende Analyse wissenschaftlicher Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge, Fachartikel sowie internationaler Patentdatenbanken. Dabei lag der Fokus insbesondere auf dem Auffinden neuer theoretischer Ansätze, technischer Lösungen oder bereits bestehender Patente, die für die eigene Forschungsarbeit von Bedeutung sein könnten.

Zusätzlich zu den Recherchen wurde der Austausch mit der wissenschaftlichen Gemeinschaft aktiv gefördert. Dies erfolgte unter anderem durch den Besuch von Fachkonferenzen und Symposien, auf denen die neuesten Forschungsergebnisse und technologischen Entwicklungen im entsprechenden Fachgebiet präsentiert wurden. Diese Veranstaltungen boten die Gelegenheit, sich direkt mit anderen Forschenden auszutauschen und wertvolles Feedback von Experten einzuholen.

Trotz dieser umfassenden und systematischen Bemühungen konnte festgestellt werden, dass keine Veröffentlichungen, Patente oder sonstigen Forschungsergebnisse identifiziert wurden, die für die Durchführung des Gesamtvorhabens von unmittelbarer Relevanz gewesen wären.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

- [1] F. Kaiser and M. Koch, "Breaking Characteristic of a Gas-Insulated Fast-Acting Switch in Synthetic Air under Inductive Load," *2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)*, Berlin, Germany, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE61955.2024.10676222
- [2] - Geplant -
F. Kaiser, G. Böhmer, P. Gambeck und M. Koch, „Influence of the oxygen to nitrogen ratio on the breaking characteristic of a gas-insulated high-speed switch (working title)“, *2025 IEEE 24th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Karuizawa, Japan, 2025.
- [3] - Geplant -
F. Kaiser, „TBA“, Dissertation, Technische Universität München
- [4] P. Gambeck, J. Auer und M. Koch, „Insulating Capacity of a Sphere-Plane Electrode Arrangement with Thick Dielectric Coating under Negative Lightning Impulse Voltage Stress in Synthetic Air at High Pressures“, *2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD)*, Toulouse, Frankreich, pp. 1-5, 2024. DOI: 10.1109/ICD59037.2024.10613140
- [5] - Geplant -
P. Gambeck und M. Koch, „ Insulating Capacity of a Coaxial Electrode Arrangement with Thick Dielectric Coating under Lightning Impulse Voltage Stress in Synthetic Air at High Pressures“, *2025 IEEE 24th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, Karuizawa, Japan, 2025.
- [6] - Geplant -
P. Gambeck, „Hybrid insulation systems in gas-insulated switchgear with synthetic air at high pressures“, Dissertation, Technische Universität München, 2025.
- [7] M. Millisterfer, K. Wagner und M. Koch, „Average Streamer Channel Field Strength in Pressurized Synthetic Air at Lightning Impulse Voltage Stress“, *2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD)*, Toulouse, France, pp. 1-4, 2024. doi: 10.1109/ICD59037.2024.10613300
- [8] M. Millisterfer und M. Koch, „Influence of the Electrode Surface Roughness on the Breakdown Strength in Pressurized Synthetic Air at Negative Lightning Impulse Voltage Stress“, *VDE High Voltage Technology; 5. ETG-Symposium*, Berlin, Germany, pp. 1-6, 2024.
- [9] M. Millisterfer, D. Viebke und M. Koch, „ Influence of Start Electron Provision Parameters on the Breakdown Strength in Pressurized Synthetic Air at Lightning Impulse Voltage Stress“, in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2025.
- [10] - Geplant -
M. Millisterfer, „TBA“, Dissertation, Technische Universität München, 2025.

3. Literaturverzeichnis

- [BEN-80] D. Benenson, G. Frind, R. Kinsinger, H. Nagamatsu, H. Noeske, und J. Sheer, „Fundamental investigation of arc interruption in gas flows. Final report“, General Electric Co., Schenectady, NY (USA), 1980.
- [BER-86] S. Berger, „Onset or breakdown voltage reduction by electrode surface roughness in air and SF₆“, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 95, no. 4, pp. 1073–1079, 1976.
- [BOR-13a] D. van der Born, A. Girodet und P. H. F. Morshuis, „Evaluation of AC and LI breakdown strength of electrodes with thick dielectric coatings in SF₆ and dry air“, *XVIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Seoul, South-Korea, pp. 1466–1471, 2013.
- [BOR-13b] D. van der Born, P. H. F. Morshuis, J. J. Smit und A. Girodet, „The influence of thin dielectric coatings on LI and AC breakdown strength in SF₆ and dry air“, *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, Bologna, Italy, pp. 287–290, 2013.
- [BOR-14a] D. van der Born, P. H. F. Morshuis, J. J. Smit und A. Girodet, „Negative LI breakdown behavior of electrodes with thin dielectric coatings in dry air at high pressure“, *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Des Moines, IA, USA, pp. 82–85, 2014.
- [BOR-14b] D. van der Born, I. A. Tsekmes, P. H. F. Morshuis, J. J. Smit und A. Girodet, „Influence of thick epoxy nanocomposite coatings on lightning impulse breakdown behavior in air“, *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Des Moines, IA, USA, 2014, pp. 86–89, 2014.
- [BOR-17] D. Van der Born, „Dielectric Coatings for High Voltage Gas Insulated Switchgear“, Dissertation, TU Delft, 2017.
- [BUC-96] D. Buchner, „Der Energie-Durchschlagmechanismus in SF₆ bei steilen transienten Überspannungen“, Dissertation, TU München, 1996.
- [CIG-19] International Council on Large Electric Systems (CIGRE), H. Ito (Ed.), „Switching Equipment“, Study Committee A3: High Voltage Equipment, CIGRE Green Books, Springer, Paris, France, 2019.
- [DES-21] J. Deschler, „Elektrische Durchschlagsfestigkeit von C4-Fluornitril basierten Gasgemischen für gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen“, Dissertation, TU München, 2021.
- [FOR-15] M. Forschelen, P. G. Nikolic, M. Stoffels und A. Schnettler, „Validation of a Non-invasive Measuring Method to Determine the Arc Position of an Axially Blown Switching Arc“, *RWTH Publications*, vol. 2, pp. 13–16, 2015.

- [FRO-99] U. Fromm, Li Ming, L. Walfridsson und D. Windmar, „Temporal breakdown development of a covered rod/plane air-gap arrangement”, *1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, London, UK, 1999, pp. 277–279, 1999.
- [GLE-88a] A. Gleizes, A. M. Rahal, H. DeLacroix und P. Van Doan, „Study of a circuit-breaker arc with self-generated flow. I. Energy transfer in the high-current phase”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 16, no. 6, pp. 606–614, 1988.
- [GLE-88b] A. Gleizes, A. M. Rahal, S. Papadopoulos und S. Vacquie, „Study of a circuit-breaker arc with self-generated flow. II. The flow phase”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 16, no. 6, pp. 615–622, 1988.
- [GLE-91] A. Gleizes, M. Mitiche und P. van Doan, „Study of a circuit-breaker arc with self-generated flow. III. The post-arc phase”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 19, no. 1, pp. 12–19, 1991.
- [HAM-04] H. Hama, K. Inami, T. Ootsuka, Y. Shimizu, E. Nagao, K. Oosumi und M. Yoshimura, „Improvement of SF₆ Gas Insulation System by Applying Thick Dielectric-Layered Electrode and its Application to High Voltage Equipment”, *Gaseous Dielectrics X*, Springer, Boston, MA, USA, pp. 319–328, 2004.
- [HOF-18] I. M. Hofer-Maksymiwi, „Isoliervermögen einer schwach inhomogenen Elektrodenanordnung in trockener Luft”, Dissertation, TU München, 2018.
- [HON-87] M. Honda, H. Okubo, H. Aoyagi und A. Inui, „Impulse Breakdown Characteristics of Coated Electrodes in SF₆ Gas”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, no. 3, pp. 699–708, 1987.
- [HOF-15] A. Hopf, M. Rossner, F. Berger und U. Prucker, „Dielectric strength of alternative insulation gases at high pressure in the homogeneous electric field”, *2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Seattle, WA, USA, pp. 131–136, 2015.
- [IEC-18] IEC 62271-102:2018, „High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches”, IEC International Standard, Edition 2.0, publication date 2018-05-15.
- [INA-03] K. Inami, Y. Shimizu und M. Yoshimura, „Breakdown Properties of Thick Dielectric-Layered Electrode at Lightning Impulse Voltages in SF₆ Gas”, *13th International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands, 2003.
- [KIN-86] J. Kindersberger, „The statistical time-lag to discharge inception in SF₆”, Dissertation, TU München, 1986.
- [KOO-17] S. Kosse, P. G. Nikolic und G. Kachelriess, „Holistic evaluation of the performance of today’s SF₆ alternatives proposals”, *CIREN, Open Access Proc. J.*, Vol. 2017, Iss. 1, pp. 210–213, 2017.
- [KWO-15] J.-H. Kwon, C.-W. Seo, Y. Kim und K.-J. Lim, „Lightning Impulse Breakdown Characteristic of Dry-Air/Silicone Rubber Hybrid Insulation in Rod-Plane Electrode”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 1181–1187, 2015.

- [KUS-20] M. Kuschel, A. Albert, F. Ehrlich et al., „First 145 kV / 40 kA gas-insulated switchgear with climate-neutral insulating gas and vacuum interrupter as an alternative to SF₆ - Design, Manufacturing, Qualification and Operational Experience”, CIGRE Session Materials, B3–107, 2020.
- [LED-04] C. Lederle und J. Kindersberger, „The influence of surface roughness and coating on the impulse breakdown voltage in SF₆”, *The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004.*, Boulder, CO, USA, 2004, pp. 522–525, 2004.
- [LED-09] C. Lederle, „Isoliervermögen einer SF₆-isolierten Elektrodenanordnung mit dielektrischer Beschichtung”, Dissertation, TU München, 2009.
- [LIN-53] H. J. Lingal, A. P. Strom und T. E. Browne, „An Investigation of the Arc-Quenching Behavior of Sulfur Hexafluoride [includes discussion]”, *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 72, no. 2, pp. 242–246, 1953.
- [LUT-17] B. Lutz, K. Juhre, M. Kuschel und P. Glaubitz, „Behavior of gaseous dielectrics with low global warming potential considering partial discharges and electric arcing”, CIGRE, Winnipeg 2017 Colloquium, Study Committees A3, B4 & D1, Winnipeg, Canada, 2017.
- [MAR-07] J. Marold, J. Kinderberger und U. Krüsi, „Impulse Voltage Breakdown Properties of Electrodes with Thick Dielectric Coatings in SF₆”, *15th International Symposium on High Voltage Engineering*, Ljubljana, Slovenia, 2007.
- [MAV-09] P. N. Mavroidis und P. N. Mikropoulos, „Impulse Breakdown of Short Rod-Plane Gaps with Rod Covered with Different Dielectric Materials”, *16th International Symposium on High Voltage Engineering*, Cape Town, South Africa, 2009.
- [MIN-97] L. Ming, U. Fromm, M. Leijon, D. Windmar, L. Walfridsson und Vlastos, „Insulation Performance of Covered Rod-Plane-Air-Gap under Lightning Impulse Voltage”, *10th International Symposium on High Voltage Engineering*, Montreal, Quebec, Canada, 1997.
- [MIZ-02] T. Mizuno, K. Morita, Y. Kurata und H. Miyagawa, "The electrical performance of air or nitrogen gas with solid insulation and the application for switchgears," *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Yokohama, Japan, vol. 3, pp. 1797–1801, 2002.
- [MOS-79] W. Mosch und W. Hauschild, „Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid”, VEB Verlag Technik, Berlin, 1979.
- [PED-75] A. Pedersen, „The effect of surface roughness on breakdown in SF₆”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 5, pp. 1749–1754, 1975.
- [PEI-21] M. Peiß, T. Spies und M. Koch, „Discharge development in air during lightning impulse stress in uniform electric field with rodshaped protrusion”, *22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021)*, Hybrid Conference, Xi'an, China, pp. 1012–1017, 2021.

- [PHE-76] C.T. Phelps und R.F. Griffiths, „Dependence of positive corona streamer propagation on air pressure and water vapor content”, *Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 7, pp. 2929–2934, 1976.
- [PIE-98] M. Piemontesi, F. Koenig, L. Niemeyer und C. Heitz, „Some Aspects of Compressed Air and Nitrogen Insulation”, *Gaseous Dielectrics VIII*, Springer, Boston, MA, SA, pp. 369–375, 1998.
- [PSO-18] T. Psotta, V. Hinrichsen und B. Lutz, „Breaking Capacity of Disconnectors and Earthing Switches Operated in Alternative Gases”, *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Athens, Greece, pp. 1–4, 2018.
- [RAE-64] H. Raether, „Electron avalanches and breakdown in gases”, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd., London, 1964.
- [ROK-07] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori und F. Endo, „Development of SF₆-Free 72.5 kV GIS”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1869–1876, 2007.
- [SAL-00] G. Salge, M. Piemontesi, C. Heitz und F. Konig, „Impulse breakdown of gas-insulated gaps (10%SF₆/90%N₂) with thick coated electrodes”, *2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No. 00CH37132)*, Victoria, BC, Canada, vol. 1, pp. 409–412, 2000.
- [SAT-99] J. Sato, T. Shiori, M. Miyagawa, T. Yoshida und K. Yokokura, „Composite insulation technology for new compact 72/84 kV C-GIS”, *1999 IEEE Transmission and Distribution Conference (Cat. No. 99CH36333)*, New Orleans, LA, USA, vol. 2, pp. 489–494, 1999.
- [SMI-21] C. Smith et al., „7SM – The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity Supplementary Material”, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/>
- [SME-22] R. Smeets, A. Lathouwers und N. S. Støa-Aanensen, „Current Interruption in SF₆-free Switchgear”, *Cigre Technical Brochures*, WG A3.41, 2022.
- [SUZ-22] H. Suzuki et al., „Prediction of Impulse Breakdown Voltage in Dry Air at High Pressure Using Volume-Time Theory”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, no. 4, pp. 1251–1258, 2022.
- [TAN-10] M.-C. Tang, „Widerstandsverteilung in Schaltlichtbögen von Selbstblasleistungsschaltern während der Stromnulldurchgangsphase”, *Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik – Band 13*, Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010
- [WAL-98] L. Walfridsson et al., „Solid insulation covering of conductors improves air insulation systems”, *ICSD’98. Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics (Cat. No.98CH36132)*, Vasteras, Sweden, pp. 502-505, 1998.

- [YOK-02] Y. Yokomizu, T. Matsumura, A. Matsuda und H. Ohno, „Dependence of Arc Interrupting Capability on Spatial Distribution of Airflow Velocity in Air-Blast Flat-Type Quenching Chamber”, *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 12, pp. 63–63, 2002.
- [WOO-13] S.-Y. Woo, K.B. Seo und J.-H. Kim, „The insulation properties of dielectric coating in gases”, *2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*, Matsue, Japan, pp. 1–4, 2013.
- [YOO-59] K. H. Yoon und H. E. Spindle, „Dynamic response of arcs in various gases”, *Electrical Engineering*, vol. 78, no. 9, pp. 911–911, Sept. 1959.
- [YOS-91] T. Yoshida, M. Miyagawa, I. Ohshima, N. Masaki und S. Yanabu, „Increase of Breakdown Voltage Due to Composite Insulation in SF₆ Gas”, *Electrical Engineering in Japan*, vol. 111, no. 6, 1991.
- [ZAE-91] W. S. Zaengl, S. Yimvuthikul und G. Friedrich, „The temperature dependence of homogeneous field breakdown in synthetic air”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 3, pp. 380–390, 1991.