
Dielektrische Untersuchung alternativer Isoliergasgemische für den Einsatz in gasisolierten Leitungen

Dielectric investigation of alternative insulating gas mixtures for gas insulated lines

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Johannes Wiener, M. Eng. aus Großseibstadt

Tag der Einreichung: 18. März 2023, Tag der Prüfung: 06. Dezember 2023

D17 – Darmstadt 2023

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen
 2. Gutachten: Prof. Dr. sc. Myriam Koch
-

Wiener, Johannes: Dielektrische Untersuchung alternativer Isoliergasgemische für den Einsatz in gasisolierten Leitungen

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2024

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-267103

Tag der mündlichen Prüfung: 06.12.2023



Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Mein außerordentlicher Dank gilt allen voran Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen, der mir durch meine Anstellung an seinem Fachgebiet die vorliegende Arbeit erst ermöglichte. Weiterhin bin ich Ihm für die fortwährende Unterstützung, die Förderung und das stets entgegengebrachte Vertrauen sowie dem damit verbundenen Gestaltungsspielraum sehr dankbar.

Bei Frau Prof. Dr. sc. Myriam Koch bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferates, die gewissenhafte Durchsicht meiner Dissertation und ihre wertvollen Anmerkungen.

Meinen Projektpartnern der Firma Siemens AG möchte ich für die finanzielle Absicherung des Projektes danken. Gleichmaßen dankbar bin ich für die beständige Unterstützung sowohl durch die Bereitstellung von Komponenten für Versuchsaufbauten als auch durch eine Vielzahl ergiebiger Diskussionsrunden. Namentlich sei hierbei besonders Herrn Karsten Juhre und Herrn Dr.-Ing. Felix Goll für die langjährige sehr gute Zusammenarbeit herzlich gedankt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Holger Maune vom Institut für Informations- und Kommunikationstechnik (IIKT) möchte ich an dieser Stelle für die großzügige Bereitstellung von Messhardware danken. Ebenfalls für die großzügige Bereitstellung von Messhardware möchte ich der Firma Rohde & Schwarz, insbesondere Herrn Volker Klose und Herrn Lothar Kruck, danken.

Die vorliegende Arbeit wäre ohne den Aufbau mehrerer Laboraufbauten sowie regelmäßig anfallende mechanische Arbeiten nicht möglich gewesen. Daher möchte ich an dieser Stelle dem Team der Werkstatt des Fachgebiets meinen Dank aussprechen.

Weiterhin gilt mein Dank dem Laborleiter des Fachgebiets, Herrn Dr.-Ing. Thomas Wietoska, der durch den Aufbau mehrerer Spannungsquellen und das Einbringen seiner Expertise bezüglich des Aufbaus von Versuchskreisen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Mein Dank gilt zudem den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des Fachgebiets Hochspannungstechnik. Insbesondere durch Ihre Hilfsbereitschaft und Diskussionsfreudigkeit ausgezeichnet haben sich Herr Rashid Hussain, Herr Benjamin Surges und Herr Tobias Trautmann, wofür Ihnen gedankt sei.

Darüber hinaus wurde diese Arbeit möglich durch den Einsatz mehrerer Studierender, die im Zuge einer Seminararbeit, einer Abschlussarbeit oder einer Anstellung als wissenschaftliche Hilfskraft mit großem Interesse und Eifer Ihren Beitrag zur vorliegenden Arbeit geleistet haben. Mein besonderer Dank gilt hierfür Herrn Michael Kempf, Herrn Manuel Philipp und Herrn Daniel Wacker.

Abschließend danke ich meiner Familie und meiner Verlobten Kaman für Ihren andauernden Beistand und Ihre Geduld.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	vii
Kurzfassung	xv
Abstract	xvi
1 Einleitung	1
2 Alternative Isoliergase in gasisolierten Leitern – Grundlagen	5
2.1 Isoliergase.....	5
2.1.1 Schwefelhexafluorid	5
2.1.2 Gasdurchschlag	10
2.1.3 Homogenität der Elektrodenanordnung.....	13
2.1.4 Funkenentladung beim Durchschlag einer Isoliergasstrecke	16
2.1.5 Wesentliche Eigenschaften eines Isoliergases	18
2.1.6 Überblick alternativer Isoliergaskandidaten	24
2.2 Dielektrische Eigenschaften alternativer Isoliergase.....	28
2.2.1 3M™ Novec™ 4710.....	29
2.2.2 3M™ Novec™ 5110.....	33
2.2.3 HFO-1336mzz(E)	36
2.2.4 Empfohlene Untersuchungen.....	37
2.3 Gasisolierte Leitungen.....	39
2.3.1 Aufbau.....	39
2.3.2 Einsatz.....	41
2.3.3 Technische Daten und Betriebserfahrung.....	41
2.3.4 Gasdichtigkeit.....	41
2.4 Partikelphysik elektrisch leitfähiger Partikel	42
2.4.1 Übersicht typischer Partikelgeometrien.....	43

2.4.2	Kräfte beim Abheben des Partikels	44
2.4.3	Kräfte während der Partikelbewegung	49
2.4.4	Maßnahmen gegen die Partikelbewegung.....	51
2.5	Teilentladungsmessung	53
3	Motivation und Ziele der Arbeit.....	56
4	Elektrische Durchschlagsuntersuchungen	58
4.1	Prüfaufbauten	58
4.2	Versuchsdurchführung	61
4.3	Ergebnisse.....	65
4.3.1	Prüfgefäß 1 – Kugel-Platte Anordnung	65
4.3.2	Prüfgefäß 2 – Anaxiale Zylinderanordnung	70
4.3.3	Gegenüberstellung Prüfgefäß 1 und Prüfgefäß 2	72
4.3.4	Variation der Kondensationstemperaturen –10 °C, –15 °C und –20 °C....	73
4.3.5	Rußbildung im Zuge der Durchschlagsuntersuchungen.....	75
4.3.6	420 kV-AC-GIL-Aufbau.....	78
4.4	Zusammenfassung und Fazit	80
5	Abhängigkeitsstudie in Folgeversuchen mit fluorierten Isoliertgasen.....	82
5.1	Prüfaufbau und Versuchsdurchführung	82
5.2	Ergebnisse.....	85
5.2.1	Einfluss von Materialoberflächen	85
5.2.2	Einfluss der Expositionszeit.....	87
5.2.3	Einfluss unterschiedlicher fluoriertem Isoliertgasgemische.....	89
5.2.4	Einfluss Werkstoff der Materialproben	90
5.2.5	Untersuchung möglicher Maßnahmen zur Vermeidung der Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen.....	91
5.3	Zusammenfassung und Fazit	95
6	Emittiertes Frequenzspektrum in Folge des Gasdurchschlages.....	97
6.1	Prüfaufbau und Versuchsdurchführung	98
6.2	Ergebnisse.....	102

6.2.1	Einfluss der Antennenposition relativ zum Prüfgefäß	102
6.2.2	Einfluss der Schlagweite und der Durchschlagspannung	104
6.2.3	Untersuchung der gemeinsamen maximalen Signalamplitude.....	105
6.2.4	Untersuchung höherer emittierter Frequenzen durch Verwendung eines Hochpasses.....	105
6.2.5	Einfluss des Isoliergasgemisches	106
6.2.6	Einfluss der Elektrodenanordnung	108
6.3	Zusammenfassung und Fazit	109
7	Partikelbewegungsverhalten.....	110
7.1	Prüfaufbau und Versuchsdurchführung	111
7.1.1	Prüfgefäß und optische Aufzeichnung der Partikelbewegung	111
7.1.2	Partikelauswahl	112
7.1.3	Partikelpositionierung in der GIL	113
7.1.4	UHF-TE-Messung	116
7.1.5	Versuchsparameter	119
7.2	Ergebnisse.....	120
7.2.1	Auswertung der Partikelbewegung.....	120
7.2.2	Betrachtung möglicher Einflussfaktoren auf das Bewegungsverhalten.....	126
7.2.3	Berechnung der Abhebefeldstärke quaderförmiger Partikel.....	131
7.2.4	Zusammenfassung und Fazit.....	141
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	142
A	Anhang	147
A.1	Versuchskreise Elektrische Durchschlagsuntersuchungen	147
A.2	Versuchskreis Abhängigkeitsstudie in Folgeuntersuchungen mit fluorierten Isoliergasen.....	149
A.3	Versuchskreis Emittiertes Frequenzspektrum in Folge des Gasdurchschlages	150
A.4	Versuchskreis Partikelbewegungsverhalten.....	150
	Literaturverzeichnis	152
	Betreute studentische Arbeiten	163

Lebenslauf.....	164
Erklärungen laut Promotionsordnung	165

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Liste der Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
AC	Engl. <i>alternating current</i> für Wechselstrom
CFCs	Engl. <i>Chlorofluorocarbons</i> für Fluorchlorkohlenwasserstoffe
CFC-11	Trichlorfluormethan
DC	Engl. <i>direct current</i> für Gleichstrom
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EOS	Engl. <i>equation of state</i> für Zustandsgleichung
FPS	Engl. <i>frames per second</i> für Bilder pro Sekunde
GIL	Gasisolierte Leitung
GIS	Gasisolierte Schaltanlage
GWP	Engl. <i>global warming potential</i> für auf CO ₂ -Äquivalente bezogenes Treibhauspotential
GWP ₁₀₀	Auf CO ₂ -Äquivalente bezogenes Treibhauspotential über einen Zeithorizont von 100 Jahren
GWP ₂₀	Auf CO ₂ -Äquivalente bezogenes Treibhauspotential über einen Zeithorizont von 20 Jahren
GWP ₅₀₀	Auf CO ₂ -Äquivalente bezogenes Treibhauspotential über einen Zeithorizont von 500 Jahren
GWP _{TH}	Auf CO ₂ -Äquivalente bezogenes Treibhauspotential über einen Zeithorizont von <i>TH</i> Jahren
HCFC	Engl. <i>Hydrochlorofluorocarbons</i> für teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
IPCC	Engl. <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> für Weltklimarat
LI	Blitzstoßspannung
LI-	Negative Blitzstoßspannung
LI+	Positive Blitzstoßspannung
ODP	Ozonabbaupotential
PFAS	Per- und Polyfluoralkylsubstanzen

ppt	Engl. <i>parts per trillion</i> für Teile pro Billionen
ppmV	Engl. <i>parts per million volume</i> für Teile pro Millionen auf das Volumen bezogen
PRPD	Engl. <i>phase-resolved partial discharge</i> für Phasendiagramme der Teilentladung
PR-EOS	Peng-Robinson Zustandsgleichung
PRSV1-EOS	Peng-Robinson-Stryjek-Vera Zustandsgleichung
REACH	Registration, Evaluation, Authorisaion and restriction of Chemicals
SI	Schaltstoßspannung
TE	Teilentladung
TH	Engl. <i>time horizon</i> für Zeithorizont
UHF	Engl. <i>ultra-high frequency</i> für Ultrahochfrequenz (0,1 GHz bis 3 GHz)
UNFCCC	Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen
VFT	Engl. <i>very fast transients</i> für sehr schnelle transiente Spannungen

Chemische Strukturformeln und Kurzbezeichnungen

Abkürzung	Bezeichnung	CAS-Nummer
CF ₃ I	Trifluoriodmethan	2314-97-8
C4N	3M™ Novec™ 4710	42532-60-5
CH ₄	Methan	74-82-8
C5K	3M™ Novec™ 5110	756-12-7
CO	Kohlenstoffmonoxid	630-08-0
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	124-38-9
HFO	Hydrofluorolefin (E)-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene	66711-86-2
HFO1234ze(E)	Hydrofluorolefin1234ze(E)	29118-24-9
N ₂	Stickstoff	7727-37-9
O ₂	Sauerstoff	7782-44-7
SF ₆	Schwefelhexafluorid	2551-62-4

Liste der Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Oberfläche
A_b	m^2	Querschnittsfläche des Partikels in Bewegungsrichtung
A_G	$m^{-1} Pa^{-1}$	Experimentell ermittelte Gaskonstante
$a_{E,min}$	m	Minimaler Abstand der Partikel vom Ende der Partikelfalle
a_F	m	Abstand der Partikel von der Partikelfalle
$a_{p,min}$	m	Minimaler Abstand zwischen den Partikeln
B_G	$kV mm^{-1} Pa^{-1}$	Experimentell ermittelte Gaskonstante
b_p	m	Partikelbreite
C_{CO_2}	-	Atmosphärische Konzentration von CO_2 üblicherweise in ppm (Engl. <i>parts per million</i> für Teile von Millionen oder ppb (Engl. <i>parts per billion</i> für Teile von Milliarden)
C_F	F	Konzentrierte Kapazität des Prüflings
\bar{C}_{SF_6}	-	Globaler Mittelwert der SF_6 -Konentration in der Luft in ppt (Engl. <i>parts per trillion</i> für Teile von Billionen)
c_w	-	Strömungswiderstandskoeffizient
C_{x0}	-	Atmosphärische Konzentration des Treibhausgases x zum Startzeitpunkt üblicherweise in ppm (Engl. <i>parts per million</i> für Teile von Millionen oder ppb (Engl. <i>parts per billion</i> für Teile von Milliarden)
\vec{D}	$A s m^{-2}$	Betrag der lokalen elektrischen Flussdichte
D_1	m	Durchmesser des Innenleiters der GIL
D_2	m	Innendurchmesser des Gehäuses der GIL
D_3	m	Durchmesser der Kugelelektrode
D_p	m	Partikeldurchmesser
D_{Sp}	m	Spiraldurchmesser
d_p	m	Partikeldicke

E	$V\ m^{-1}$	Betrag der elektrischen Feldstärke
E_0	$V\ m^{-1}$	Betrag der mittleren elektrischen Feldstärke
E_{ab}	$V\ m^{-1}$	Betrag der Abhebefeldstärke des Partikels
$E_{ab,ber}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der berechneten Abhebefeldstärke des Partikels
$E_{ab,gem}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der gemessenen Abhebefeldstärke des Partikels
$E_{ab,qua,korr}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der korrigierten Abhebefeldstärke eines elektrisch leitfähigen quaderförmigen Partikels im elektrischen Feld
$E_{ab,qua,p+f}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der korrigierten Abhebefeldstärke des am Faden befestigten elektrisch leitfähigen quaderförmigen Partikels im elektrischen Feld
E_d	$V\ m^{-1}$	Betrag der elektrischen Durchschlagsfeldstärke
$E_{Kugel-Platte,5mm,120kV}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der maximal auftretenden elektrischen Feldstärke in der Kugel-Platte Anordnung mit 5 mm Schlagweite bei 120 kV
$E_{Kugel-Platte,10mm,80kV}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der maximal auftretenden elektrischen Feldstärke in der Kugel-Platte Anordnung mit 10 mm Schlagweite bei 80 kV
E_{max}	$V\ m^{-1}$	Betrag der maximal auftretenden elektrischen Feldstärke
$E_{Rogowski,5mm,80kV}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der maximal auftretenden elektrischen Feldstärke in der Rogowski-Anordnung mit 5 mm Schlagweite bei 80 kV
$E_{Rogowski,5mm,120kV}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der maximal auftretenden elektrischen Feldstärke in der Rogowski-Anordnung mit 5 mm Schlagweite bei 120 kV
$E_{Rogowski,10mm,80kV}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der maximal auftretenden elektrischen Feldstärke in der Rogowski-Anordnung mit 10 mm Schlagweite bei 80 kV
$E_{Rogowski,10mm,120kV}$	$V\ m^{-1}$	Betrag der maximal auftretenden elektrischen Feldstärke in der

Rogowski-Anordnung mit 10 mm
Schlagweite bei 120 kV

\vec{e}_v	-	Einheitsvektor in Bewegungsrichtung
\vec{F}_A	N	Adhäsionskraft
\vec{F}_{di}	N	Dipolkraft
$\vec{F}_{di,x}$	N	Dipolkraft in x-Richtung
$\vec{F}_{di,y}$	N	Dipolkraft in y-Richtung
\vec{F}_e	N	Elektrostatische Kraft
$\vec{F}_{e,p+f}$	N	Erforderliche elektrostatische Kraft zum Abheben des am Faden befestigten Partikels
$\vec{F}_{e,x}$	N	Elektrostatische Kraft in x-Richtung
$\vec{F}_{e,y}$	N	Elektrostatische Kraft in y-Richtung
\vec{F}_G	N	Gewichtskraft
$\vec{F}_{G,x}$	N	Gewichtskraft in x-Richtung
$\vec{F}_{G,y}$	N	Gewichtskraft in y-Richtung
\vec{F}_R	N	Reibungskraft
\vec{F}_W	N	Strömungswiderstandskraft
$\vec{F}_{W,x}$	N	Strömungswiderstandskraft in x- Richtung
$\vec{F}_{W,y}$	N	Strömungswiderstandskraft in y- Richtung
f	Hz	Frequenz
g	m s^{-2}	Erdbeschleunigung, $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$
h_A	m	Höhe der Antenne über dem Boden
$i_F(t)$	A	Entladestrom
k	-	Stoßzahl
k_b	-	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung unterschiedlicher Breiten-Dicken- Verhältnisse der Partikel
$k_{f,a}$	-	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Reibungs- und Adhäsionskräfte der Partikel
k_T	V s m^{-1}	Toepler-Konstante
l_1	m	Länge der Partikelfalle

l_2	m	Abstand zwischen Kugelelektrode und GIL-Deckel
l_A	m	Horizontaler Abstand zwischen Prüfgefäß und Antenne
LC_{50}	-	Engl. <i>lethal concentration</i> für mittlere tödliche Konzentration einer Substanz in der Luft, deren Inhalation über einen definierten Zeitraum (meist 4 h) zu einer 50 %igen Sterblichkeit der untersuchten Lebewesen führt
l_F	m	Funkenlänge
l_p	m	Partikellänge
m	kg	Masse
m_f	kg	Masse des Fadens
m_p	kg	Masse des Partikels
N_e	-	Anzahl der neuen Startelektronen durch Rückwirkung auf die Kathode
p	Pa	Druck
p_0	Pa	Atmosphärischer Normaldruck $p_0 = 1013 \text{ hPa}$
p_{korr}	Pa	Auf Basis von Temperaturabweichungen korrigierter Druck
p_{soll}	Pa	Einzufüllender Solldruck bei Labornormaltemperatur
$Q_F(t)$	C	Bis zum Zeitpunkt t im Funken geflossene Ladung
q	C	Elektrische Ladung
R	Ω	Elektrischer Widerstand
$R_{\text{Dämpfung}}$	Ω	Elektrischer Dämpfungswiderstand
RF	W m^{-2}	Engl. <i>radiative forcing</i> für Strahlungsantrieb
RF_x	W m^{-2}	Engl. <i>radiative forcing</i> für Strahlungsantrieb einer Substanz x
RF_{CO_2}	W m^{-2}	Strahlungsantrieb von CO_2
$R_F(t)$	Ω	Elektrischer Funkenwiderstand
R_{Lade}	Ω	Elektrischer Ladewiderstand
R_t	m	Rautiefe

r	m	Radius
s	m	Schlagweite
s_1	m	Kleinste Schlagweite der anaxialen Zylinderanordnung
s_2	m	Größte Schlagweite der anaxialen Zylinderanordnung
s_p	m	Ganghöhe des spiralförmigen Partikels
T	K	Absolutwert der Temperatur
t	s	Zeit
t_F	s	Funkenaufbauzeit
T_{ist}	K	Absolutwert der Ist-Temperatur
T_m	s	Bewegungsdauer der Partikelbewegungen
$T_{m,ges}$	s	Gesamte Aufnahmezeit
T_{norm}	K	Absolutwert der Labornormaltemperatur: 293 K
U	V	Spannung
$U_{ab,ber,eff}$	V	Berechnete minimale Abhebespannung
$U_{ab,gem,eff}$	V	Gemessene minimale Abhebespannung
U_{AC}	V	Spannungswert der Wechselspannung
$U_{AC,eff}$	V	Effektivwert der Wechselspannung
$U_{AC,peak}$	V	Scheitelwert der Wechselspannung
U_d	V	Durchschlagspannung
U_{d50}	V	50 %ige Durchschlagspannung
U_{d50ac}	V	50 %ige Durchschlagspannung unter Wechselspannungsbeanspruchung
U_{d50li}	V	50 %ige Durchschlagspannung unter Blitzspannungsbeanspruchung
$U_{d50-Ref}$	V	Referenzwert der 50 %igen Durchschlagspannung
U_{dmin}	V	Minimale Durchschlagspannung
U_e	V	Teilentladungseinsetzspannung
U_{eff}	V	Effektivwert der Spannung
$U_{F,0}$	V	Effektivwert der Spannung des Prüflings zum Zeitpunkt $t = 0$
U_{LI}	V	Spannungswert der Blitzstoßspannung

U_{SI}	V	Spannungswert der Schaltstoßspannung
U_{UHF}	V	Spannung der UHF-Teilentladungsimpulse
$U_{UHF,max}$	V	Maximale Spannung der UHF-Teilentladungsimpulse
$u_{F(t)}$	V	Effektivwert der Spannung des Prüflings zum Zeitpunkt t
V	m^3	Volumen
v	$m s^{-1}$	Geschwindigkeit
v'	$m s^{-1}$	Geschwindigkeit nach dem Stoß
\vec{v}_x	$m s^{-1}$	Geschwindigkeitsvektor in x-Richtung
\vec{v}_y	$m s^{-1}$	Geschwindigkeitsvektor in y-Richtung
α	m^{-1}	Erster Townsendscher Ionisierungskoeffizient
α_{eff}	m^{-1}	Effektiver Ionisierungskoeffizient
α_G	-	Faktor des Gasgemisches
α_P	-	Winkel am Partikel zwischen vertikaler Achse und Partikelbewegungsrichtung
β_P	-	Winkel am Partikel zwischen vertikaler Achse und elektrischer Feldlinie
γ	m^{-1}	Zweiter Townsendscher Ionisierungskoeffizient (Rückwirkungskoeffizient)
ε	$A s V^{-1} m^{-1}$	Permittivität
ε_0	$A s V^{-1} m^{-1}$	Permittivität des Vakuums, $\varepsilon_0 \approx 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$
ε_r	-	Relative Permittivität
η	-	Homogenitätsgrad beziehungsweise Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger
η_{an}	m^{-1}	Anlagerungskoeffizient
ρ_g	$kg m^{-3}$	Dichte Isoliergas
ρ_p	$kg m^{-3}$	Dichte Partikel
τ	s	Atmosphärische Lebensdauer
τ_x	s	Atmosphärische Lebensdauer des Treibhausgases x

Kurzfassung

Das seit Jahrzehnten in der Energietechnik etablierte Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) besitzt aus rein technischer Sicht zwar nahezu ideale Eigenschaften, ist jedoch gleichzeitig auch das stärkste bekannte Treibhausgas. Aus diesem Grund wurde SF_6 im Zuge der Weltklimakonvention 1997 im als Kyoto-Protokoll bekannt gewordenen Zusatzprotokoll als eines von sechs Treibhausgasen deklariert, deren Emission in den teilnehmenden Industrieländern reduziert werden muss. Zur kurz- und mittelfristigen Erfüllung dieser Bestrebung wurden zunächst ein gewissenhafterer Umgang über den gesamten Lebenszyklus von SF_6 gefordert und zusätzlich Einsparungen von SF_6 beispielsweise durch die Mischung von SF_6 mit dem Trägergas Stickstoff (N_2) durchgeführt. Das langfristige Ziel besteht darin, ein umweltfreundlicheres Isoliergas oder Isoliergasgemisch zu ermitteln, welches zudem idealerweise technische Eigenschaften ähnlich wie oder gar besser als die von SF_6 aufweist. Bei der Ermittlung geeigneter Isoliergasgemische ist eine Vielzahl an Aspekten zu berücksichtigen, was eine große Anzahl unterschiedlicher Untersuchungen bedingt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die drei alternativen Isoliergase 3M™ Novec™ 4710, 3M™ Novec™ 5110 und HFO-1336mzz(E) dielektrischen Untersuchungen unterzogen, um ihren Einsatz primär in gasisolierten Leitungen zu evaluieren. Um die Durchschlagfestigkeit der alternativen Isoliergaskandidaten im Vergleich zum herkömmlichen SF_6 zu ermitteln, wurden elektrische Durchschlagsuntersuchungen an realitätsnahen und realen Anordnungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass einige der alternativen Isoliergasgemische vergleichbare Durchschlagfestigkeiten wie SF_6 aufweisen. Im Zuge dieser Untersuchungen konnten Abhängigkeiten in Folgeuntersuchungen durch die Anlagerungen fluoriierter Gase an Oberflächen beobachtet werden, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit analysiert und Abhilfemaßnahmen herausgearbeitet werden. Aus der Literatur und auch aus Beobachtungen während der elektrischen Durchschlagsuntersuchungen ist bekannt, dass Durchschläge in SF_6 aufgrund der großen auftretenden Stromsteilheiten zu elektromagnetischen Beeinflussungen benachbarter Betriebsmittel führen können. Eine Betrachtung der emittierten elektromagnetischen Frequenzen infolge des Gasdurchschlags zeigte, dass keine prinzipielle Gasabhängigkeit des Spektrums besteht, sondern vielmehr eine Abhängigkeit von den im Moment des Durchschlags vorherrschenden elektrischen Feldstärken. Die abschließende im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Studie beschäftigt sich mit dem Partikelverhalten im Hinblick auf die UHF-TE-Messung und die Wirksamkeit der Partikelfalle in mit alternativen Isoliergasen gefüllten gasisolierten Leitungen. Beide untersuchten Aspekte weisen eine Gasabhängigkeit auf, wobei jedoch keine Überarbeitung der Partikelfalle für den Einsatz der untersuchten alternativen Isoliergase erforderlich ist.

Abstract

The established insulation gas sulfur hexafluoride (SF₆) in energy technology possesses nearly ideal properties from a purely technical standpoint, yet it is also the most potent known greenhouse gas. Consequently, SF₆ was designated as one of six greenhouse gases requiring emission reduction in participating industrialized countries under the Kyoto Protocol of 1997. To achieve short- and medium-term reduction goals, a more conscientious approach throughout SF₆'s lifecycle was initially advocated, along with measures such as SF₆-Nitrogen (N₂) gas mixtures to curtail its usage. The long-term objective is to identify a more environmentally friendly insulation gas or mixture ideally possessing technical properties akin to or surpassing those of SF₆. The pursuit of suitable insulation gas mixtures necessitates consideration of numerous aspects, prompting a multitude of varied investigations.

This study subjects three alternative insulation gases, namely 3M™ Novec™ 4710, 3M™ Novec™ 5110, and HFO-1336mzz(E), to dielectric assessments primarily for evaluating their application in gas-insulated lines. Electrical breakdown tests were conducted on realistic and actual configurations to ascertain the breakdown strength of alternative insulation candidates relative to conventional SF₆. Results indicate that some alternative insulation gas mixtures exhibit comparable breakdown strengths to SF₆. Dependencies observed in subsequent investigations due to the deposition of fluorinated gases on surfaces were analyzed and addressed further. Literature and observations during electrical breakdown tests indicate that SF₆ breakdowns, due to high current steepness, can lead to electromagnetic influences on neighboring equipment. Examination of emitted electromagnetic frequencies post gas breakdown revealed no inherent gas dependency in the spectrum, but rather dependence on prevailing electric field strengths during breakdown moments. The final study within this work focuses on particle behavior concerning UHF-TE measurements and the effectiveness of particle traps in gas-insulated lines filled with alternative insulation gases. Both investigated aspects demonstrate gas dependencies, albeit no revision of the particle trap is required for the application of the examined alternative insulation gases.

1 Einleitung

Bei der elektrischen Energieübertragung über weite Strecken werden hohe Spannungen verwendet, um unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit möglichst geringe elektrische Verluste zu erzielen. Die dadurch resultierenden elektrischen Feldstärken können entweder durch das Einhalten vergleichsweise großer Abstände in Luft oder durch die Verwendung spezieller fester, flüssiger oder gasförmiger Isolierstoffe mit erhöhter elektrischer Durchschlagfestigkeit isoliert werden. Die Art des Isolierstoffes wird hierbei in erster Linie durch die Anwendung bestimmt. Isoliergase finden dabei insbesondere bei gasisolierten Schaltanlagen (GIS) in der Mittel- und Hochspannung sowie bei gasisolierten Leitungen (GIL) Einsatz. Im Gegensatz zu freiluftisolierten Systemen, wie beispielsweise Freiluftschaltanlagen oder Freileitungen, ist durch den Einsatz eines elektrischen Isoliergases eine deutliche Reduktion des benötigten Bauraums möglich, was vor allem in urbanen Regionen von Vorteil ist. Freiluftisolierte Systeme benötigen vergleichsweise große Trassenbreiten und Bauhöhen. Diesem Umstand geschuldet, gibt es eine immer geringere Akzeptanz der Bevölkerung derartiger Systeme in Deutschland. Für aktuellere Bauvorhaben, wie beispielsweise die Nord-Süd-Trassen in Deutschland, wurde daher die Verwendung von erdverlegten Kabeln gewählt. Eine weitere Ergänzung zu Kabeln und Freileitungen stellen gasisolierte Leitungen dar, die abschnittsweise in Übertragungsstrecken zum Einsatz kommen können. Neben einer hohen Übertragungsleistung, geringen Energieübertragungsverlusten, einer hohen Zuverlässigkeit und sehr geringem Wartungsaufwand zeichnen sie sich insbesondere durch eine verglichen mit den beiden anderen Technologien noch kleinere Trassenbreite sowie die Möglichkeit für sehr kleine Biegeradien durch rechtwinklige Elemente aus. Das typische Isoliermedium in gasisolierten Leitungen ist das Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) als Reingas oder als Isoliergasgemisch mit Stickstoff (N_2).

Das elektrische Isoliergas SF_6 hat sich weltweit als das meistverwendete Isoliergas in der Mittel- und Hochspannungstechnik etabliert. Aus technischer Sicht besitzt es durch die sehr hohe elektrische Durchschlagfestigkeit im Vergleich zu Luft, die niedrige Kondensationstemperatur, die hohe Wärmekapazität, die Langzeitstabilität und das gute Rekombinationsvermögen die idealen Eigenschaften für ein elektrisches Isoliergas. Weiterhin ist SF_6 nicht brennbar, nicht korrosiv und ungiftig. Gleichzeitig stellt SF_6 jedoch auch das stärkste bekannte Treibhausgas mit einem Treibhauspotential über 100 Jahre (GWP_{100}) von 22200 [Alb 2001] bis 31298 [Zha 2011] CO_2 -Äquivalenten dar, was unter anderem auf eine sehr lange atmosphärische Lebensdauer zurückzuführen ist. Im aktuell sechsten Bericht des Weltklimarats (IPCC) wird für SF_6 ein GWP_{100} von 24300 angegeben [For 2021]. Wegen des hohen Treibhauspotentials wurde SF_6 im Zuge der

Klimarahmenkonvention 1997 der Vereinten Nationen (UNFCCC) im als Kyoto-Protokoll bekannten Zusatzbeschluss als eines von sechs Treibhausgasen deklariert, deren Emissionen in den teilnehmenden Industrienationen aus ökologischen Gründen reduziert werden sollen [Kyo 1998]. In einem ersten Schritt wurden hierfür ein gewissenhafterer Umgang des mittlerweile überwachungspflichtigen SF₆ über dessen gesamten Lebenszyklus praktiziert und reines SF₆ in Anwendungen, die dies zuließen, durch ein Isoliergasgemisch aus SF₆ und N₂ ersetzt, um SF₆ einzusparen. In Deutschland erfolgten mit der freiwilligen Selbstverpflichtung 2005 und den als F-Gas-Verordnung bekannten EU-Verordnungen über fluorierte Treibhausgase 2006 und 2014 weitere Schritte seitens der Politik und der Industrie, um die Emissionen zusätzlich einzuschränken [Eur 2006, Eur 2014].

Um die Emission von SF₆ aus Anlagen der elektrischen Energietechnik jedoch langfristig möglichst komplett zu vermeiden, entstand die Bestrebung, ein alternatives elektrisches Isoliergas zu finden. Dieses muss sowohl den technischen Anforderungen gerecht werden, als auch eine möglichst große Umweltfreundlichkeit besitzen. Die meisten der in Voruntersuchungen ermittelten alternativen Isoliergaskandidaten besitzen eine deutlich höhere Kondensationstemperatur als SF₆. Dies hat zur Folge, dass viele dieser Isoliergase die Anforderungen für typische Anwendungen in der Energietechnik im Hinblick auf die Umgebungstemperaturen und Isoliergasdrücke als Reingas nicht erfüllen. Aus diesem Grund kommen sie für die meisten Anwendungen nur in geringen Mengen in einem Isoliergasgemisch mit einem Trägergas in Frage, da hierdurch, wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, die Kondensationstemperatur herabgesetzt werden kann.

Neben der elektrischen Durchschlagfestigkeit sind zahlreiche weitere technische Aspekte und Gesundheitsschutzaspekte von Bedeutung, die folglich bei der Ermittlung eines geeigneten alternativen Isoliergases berücksichtigt werden müssen. Unterschiedliche Anwendungen stellen verschiedene Anforderungen an das Isoliergas. In gasisolierten Leitungen ist aus elektrischer Sicht insbesondere die elektrische Festigkeit relevant, während in gasisolierten Schaltanlagen, in denen Schalthandlungen im Isoliergas stattfinden, zudem die Schaltgaseigenschaften bedeutend sind, wie Abschnitt 2.1.6 zeigt. Aus diesem Grund steht weiterhin zur Diskussion, inwiefern für all diese Anwendungen das gleiche alternative Isoliergas beziehungsweise Isoliergasgemisch zum Einsatz kommen wird. Während sich, wie aus Abschnitt 2.1.6 hervorgeht, viele der Gesichtspunkte hinsichtlich der Einsetzbarkeit eines alternativen Isoliergaskandidaten für die unterschiedlichen Anwendungen decken, fokussiert die vorliegende Arbeit ihre Untersuchungen auf den Einsatz in gasisolierten Leitungen.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung unterschiedlicher dielektrischer Eigenschaften alternativer Isoliergaskandidaten im Vergleich zum etablierten SF₆ für den Einsatz in GIL in technisch relevanten, praxisnahen Anordnungen. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei neben der elektrischen Durchschlagfestigkeit auf einer Abhängigkeitsstudie der Durchschlagspannung in Folgeuntersuchungen im gleichen Prüfgefäß, auf durch den Gasdurchschlag emittierten hochfrequenten Emissionsspektren und auf dem Partikelbewegungsverhalten sowie der Wirksamkeit der Partikelfallen in GIL.

Struktur der Arbeit

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit werden zunächst die Grundlagen erarbeitet, die für ein Verständnis der hier durchgeführten Untersuchungen erforderlich sind. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels liegt der Fokus auf elektrischen Isoliergasen. Hierbei wird zunächst der Weg des Isoliergases SF_6 von seiner Entdeckung bis hin zum heute noch etablierten elektrischen Isoliergas vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Entwicklungen zum Bestreben, ein alternatives, umweltfreundliches elektrisches Isoliergas zu ermitteln, präsentiert. Hieran anschließend werden die essentiellen Eigenschaften erarbeitet, nach denen alternative elektrische Isoliergase bewertet werden können. Weiterhin werden für diese Arbeit relevante Grundlagen des Gasdurchschlags vorgestellt. Am Ende dieses Abschnitts wird eine Gegenüberstellung der wichtigsten Eigenschaften der alternativen Isoliergase und des etablierten SF_6 herausgearbeitet. Im zweiten Abschnitt werden gasisolierte Leitungen vorgestellt, für deren Anwendungsfall im Zuge dieser Arbeit alternative Isoliergase untersucht werden sollen. Im dritten Abschnitt wird der Stand des Wissens bezüglich der Partikelbewegung frei beweglicher elektrisch leitfähiger Partikel im elektrischen Feld wiedergegeben, da diese eine der Hauptursachen für Störungen in GIL darstellen. Im abschließenden Abschnitt wird der Stand des Wissens der hier untersuchten alternativen Isoliergase aus der Literatur erarbeitet.

Basierend auf dem aktuellen Stand des Wissens, werden in Kapitel 3 die Motivation und Ziele der vorliegenden Dissertation herausgearbeitet. Hieraus resultierend werden in den nachfolgenden Kapiteln die im Zuge dieser Arbeit praktisch durchgeführten Untersuchungen dargestellt.

Einen essentiellen Aspekt stellt zunächst die elektrische Durchschlagfestigkeit der alternativen Isoliergaskandidaten im Vergleich zu SF_6 an praxisnahen Elektrodenanordnungen dar. Im 4. Kapitel werden die unterschiedlichen Versuchsaufbauten und das Prüfprogramm der in dieser Arbeit durchgeführten Durchschlagsuntersuchungen mit alternativen Isoliergasen und mit SF_6 vorgestellt. Hierfür wurden technisch relevante Isoliergasgemische mit identischer Kondensationstemperatur zunächst in Modellanordnungen mit geringen Gasvolumina untersucht, um eine Vielzahl unterschiedlicher Isoliergasgemische betrachten zu können. Darauf aufbauend wurden stufenweise größere und praxisnähere Versuchsaufbauten bis hin zur realen GIL mit eingeschränkterer Auswahl an Isoliergasgemischen untersucht und die Ergebnisse diskutiert.

In Voruntersuchungen zu den in Kapitel 4 dargestellten Messreihen wurde festgestellt, dass in Folgeuntersuchungen im gleichen Prüfgefäß eine Abhängigkeit der Durchschlagfestigkeit von vorangegangenen Messreihen mit fluorierten Isoliergasen auftritt. Im 5. Kapitel der vorliegenden Arbeit werden dieses Phänomen experimentell analysiert, mögliche Lösungsansätze untersucht und evaluiert sowie Empfehlungen ausgesprochen.

Weiterhin sind Gasdurchschläge in SF₆ bekannt für ihre hohe Stromsteilheit und die daraus resultierenden starken elektromagnetischen Impulse, die benachbarte elektrische Betriebsmittel stören oder gar zerstören können. Für SF₆ sind empirisch ermittelte Erfahrungswerte vorhanden, welche Anforderungen dies an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) stellt. Folglich soll weiterer Gegenstand dieser Arbeit sein, zu ermitteln, wie sich alternative Isoliergaskandidaten hinsichtlich der im Gasdurchschlag emittierten elektromagnetischen Impulse im Vergleich zu SF₆ verhalten, was Gegenstand des 6. Kapitels ist.

In Kapitel 7 wird das Partikelbewegungsverhalten elektrisch leitfähiger Partikel im elektrischen Feld in einer mit alternativen Isoliergasen gefüllten gasisolierten Leitung behandelt. Frei bewegliche elektrisch leitfähige Partikel stellen eine der häufigsten Fehlerursachen in GIL dar. Aufgrund ihrer Praxisrelevanz werden quaderförmige Partikel mit einem großen Länge-Dicke- und Breite-Dicke-Verhältnis betrachtet. Aufgrund der Komplexität der Vorgänge beim Abheben des Partikels existiert in der Literatur keine Gleichung zur Berechnung der Abhebefeldstärke quaderförmiger Partikel, die keinen quadratischen Querschnitt aufweisen. Auch zur Berechnung von quaderförmigen Partikeln mit quadratischem Querschnitt existiert lediglich eine Näherungsgleichung. Diese Näherungsgleichung für quaderförmige Partikel mit quadratischem Querschnitt wird im Zuge der hier durchgeführten Untersuchungen um Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung bislang vernachlässigter Effekte und unterschiedlicher Breite-Dicke-Verhältnisse erweitert und die Gültigkeit der erweiterten Formel bestätigt.

Im abschließenden Kapitel 8 erfolgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

2 Alternative Isoliergase in gasisolier- ten Leitern – Grundlagen

In Kapitel 2 werden die Grundlagen aufbereitet, welche zum Verständnis der vorliegenden Arbeit benötigt werden.

Hierfür wird zunächst das Thema Isoliergase behandelt. In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf den Gasparametern, die bei der Auswahl möglicher alternativer Isoliergaskandidaten berücksichtigt werden müssen, und auf den Mechanismen des elektrischen Durchschlags in Gasen. Darauf aufbauend wird eine Übersicht dieser Gaseigenschaften von etablierten Isoliergasen und in der Diskussion befindlichen alternativen Isoliergaskandidaten aufgezeigt und erörtert. Im anschließenden Abschnitt wird eine Übersicht der dielektrischen Eigenschaften alternativer Isoliergase aus der Literatur vorgestellt. Anschließend werden die Grundlagen zum Thema gasisolierte Leitungen behandelt. Im abschließenden Abschnitt des Grundlagenkapitels wird die Physik der Partikelbewegung elektrisch leitfähiger Partikel im elektrischen Feld erarbeitet.

2.1 Isoliergase

2.1.1 Schwefelhexafluorid

Historie

Bei dem seit Jahrzehnten in der Hochspannungstechnik etablierten elektrischen Isoliergas Schwefelhexafluorid handelt es sich um ein synthetisches, industriell hergestelltes Gas, für das keine natürlichen Quellen auf der Erde bekannt sind [Der 2000]. SF_6 wurde ursprünglich im Jahre 1901 entdeckt und erstmals im Jahre 1928 aufgrund seiner luftverdrängenden Eigenschaft in Verbindung mit seiner hohen Wärmekapazität und Ungiftigkeit als Feuerlöschgas patentiert [Kom 1928]. Die Patentierung von SF_6 als elektrisches Isoliermedium folgte 10 Jahre später im Jahr 1938 [Coo 1938]. Schon in den 1940er Jahren wurde SF_6 in zahlreichen wissenschaftlichen Studien dielektrisch untersucht und bereits die These aufgestellt, dass die hohe Durchschlagfestigkeit von SF_6 primär auf dessen hohe Elektronenaffinität und hohe Molekülmasse zurückzuführen ist. Beide Faktoren bedingen einen kleineren ersten Townsendschen Ionisationskoeffizient α , dessen Bedeutung in Abschnitt 2.1.2 erläutert wird, wodurch der Durchschlag erst bei höheren Spannungen einsetzt [Pen 1938]. Neben der hieraus resultierenden hohen Durchschlagspannung besitzt SF_6 jedoch zahlreiche

weitere Eigenschaften, die es aus technischer Sicht zum nahezu idealen elektrischen Isoliergas machen. Es ist nicht brennbar, nicht korrosiv, ungiftig, besitzt sowohl eine ausreichend niedrige Kondensationstemperatur als auch eine hohe Wärmekapazität, ist thermisch und chemisch langzeitbeständig, hat ein gutes Rekombinationsvermögen und besitzt gute Lichtbogenlöscheigenschaften. Weiterhin gilt SF₆ bei korrektem Umgang für den Menschen als ungefährlich [DIN 2012].

Der erste kommerzielle Einsatz von SF₆ in der Energietechnik und somit auch seine industrielle Produktion begann 1953 als elektrisches Isolier- und Löschgas in Leistungsschaltern in den USA [Mai 1998]. Mit der ersten Verwendung von SF₆ in GIS im Jahre 1972 gab es eine deutliche Steigerung der industriellen Produktion von SF₆ [Mai 1998]. Seitdem und auch noch bis heute ist die elektrische Energietechnik der Hauptkonsument von SF₆. Etwa 80 % des erzeugten SF₆ wird an Energieerzeuger und Hersteller elektrischer Anlagen geliefert [Sim 2007].

Neben seiner Anwendung als elektrisches Isolier- und Lichtbogenlöschgas in gasisolierten Anlagen (GIS und GIL) wurde SF₆ auch bei der Verarbeitung von Aluminium und Magnesium sowie in der Halbleiterproduktion, bei Teilchenbeschleunigern, bei Schallschutzfenstern, in LKW-Reifen und in der Militärtechnik eingesetzt [Mai 1998]. Einige der Anwendungen wurden jedoch bereits von der EU-Kommission verboten [Eur 2014]. Da neben der Energietechnik auch bei den weiteren SF₆-Anwendern eine Reduktion der Emissionen stattgefunden hat, ist die elektrische Energietechnik nach wie vor für den größten Teil der offiziell bekannten Emissionen verantwortlich [Mai 1998, Rig 2010, Lev 2010]. Eine ausführlichere Übersicht der Historie von SF₆ kann beispielsweise [Rab 2017] entnommen werden.

Regularien

Neben seinen herausragenden elektrischen Eigenschaften besitzt SF₆ aufgrund seiner Langzeitstabilität, seines symmetrischen Aufbaus und seiner Reaktionsträgheit mit einem GWP₁₀₀ von 22200 [Alb 2001] bis 31298 [Zha 2011] das stärkste bekannte Treibhausgaspotential und mit 3200 Jahren [For 2021] eine sehr lange atmosphärische Lebensdauer. Im aktuell sechsten Bericht des Weltklimarats (IPCC) wird für SF₆ ein GWP₁₀₀ von 24300 angegeben [For 2021]. Wegen des hohen GWP₁₀₀ wurde SF₆ beim Weltklimagipfel 1997 in dem als Kyoto-Protokoll bekannten Zusatzprotokoll der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) als eines von sechs Treibhausgasen festgehalten, deren Emission in den teilnehmenden Industrieländern verringert werden soll [Kyo 1998, See 2017]. Hierdurch politisch motiviert, begann die Suche nach einem alternativen elektrischen Isoliergas, welches idealerweise die technischen Eigenschaften von SF₆ erreicht oder gar übertrifft und zusätzlich umweltfreundlich ist. Weitere verschärfende politische Maßnahmen wurden 2006 vom EU-Parlament und Council mit der EU-Regulation Nr. 842/2006 [Eur 2006] getroffen, die 2014 von der noch heute wirksamen EU-Regulation Nr. 517/2014 [Eur 2014] ersetzt wurden. SF₆ wurde in gasisolierten Systemen der Energietechnik im Zuge der als F-Gas-Verordnung bekannt gewordenen EU-Verordnungen über fluorierte Treibhausgase im

Jahr 2006 und 2014 bislang noch nicht verboten. Grund dafür ist, dass zu diesem Zeitpunkt noch keine kostengünstige und umweltfreundliche Alternative zur Verfügung stand [Deu 2020]. Die Verordnungen haben jedoch zum Ziel, dass eine umweltfreundliche Alternative für SF₆ in der Mittelspannungstechnik bis 2020 und in der Hochspannungstechnik bis 2022 gefunden wird. Im Artikel 21 dieser EU-Verordnung wurde bis zum 01.07.2020 eine Bewertung von alternativen Isoliergasen im Hinblick auf sekundäre Mittelspannungsschaltanlagen gefordert. In einem Bericht der Generaldirektion Klimapolitik [Gen 2020] der Europäischen Kommission wurde beschrieben, dass vonseiten der Anlagenhersteller bereits umweltfreundliche alternative Lösungen für die Spannungsebene bis 24 kV zur Verfügung stehen. Um die verschiedenen Arten der Schaltanlagen in der Produktpalette abdecken zu können, wird es noch etwa zwei bis fünf Jahre dauern. Für höhere Spannungen bis 145 kV ist die Kommerzialisierung der vorgestellten alternativen Lösungen innerhalb von ungefähr zwei Jahren zu erwarten. Umweltfreundliche alternative Lösungen für die Spannungsebene von 245 kV werden innerhalb von etwa fünf Jahren vermutet. Die Verfügbarkeit alternativer Lösungen für noch höhere Spannungsebenen wird auf in frühestens fünf Jahren abgeschätzt. In dem Bericht wurde ebenfalls beschrieben, dass derzeit eine Überprüfung der EU-Vorschriften für fluorierte Gase und eine Evaluierung der F-Gas-Verordnung stattfindet und ein Vorschlag zu ihrer Überarbeitung im 4. Quartal 2021 erwartet werden kann [Gen 2020]. Am 5. April 2022 wurde seitens der Europäischen Kommission ein Vorschlag zur Überarbeitung der EU-Regulation Nr. 517/2014 übermittelt, der zum aktuellen Zeitpunkt jedoch noch nicht in Kraft getreten ist [Eur 2022a]. Am 29.01.2024 hat der Rat der EU dem Entwurf der neuen F-Gas-Verordnung zugestimmt, womit das Annahmeverfahren abgeschlossen ist. Ausstehend ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch die Unterzeichnung sowie die Veröffentlichung [Umw 2024]. In Kraft treten wird die neue F-Gas-Verordnung 20 Tage nach der Veröffentlichung [Umw 2024]. Ein generelles Verbot für SF₆ für gasisolierte Anlagen in der Mittelspannungstechnik wurde folglich bislang noch nicht ausgesprochen. Weiterhin werden zwei prominente Alternativgaskandidaten, NovecTM 4710TM und NovecTM 5110TM, der Gruppe der Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS), auch „Ewigkeitschemikalien“ genannt, zugeordnet. Eine Regulierung nach REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of Chemicals) Artikel 67-73 ist aktuell noch nicht wirksam und Entscheidungen noch ausstehend, ein Inkrafttreten genereller Beschränkungen wird ab 2026/2027 erwartet [Els 2023].

Alle zuvor erwähnten Maßnahmen haben das langfristige Ziel, die SF₆-Emissionen und somit den Anstieg der atmosphärischen SF₆-Konzentration zu reduzieren. Um bereits kurzfristig in einem ersten Schritt die Menge an SF₆ in neuen Anlagen zu reduzieren, wurde je nach Anwendung ein SF₆/N₂ Isoliergasgemisch mit nur 20 oder 40 Volumenprozent SF₆ verwendet. Im Vergleich zu reinem SF₆ besitzt dieses Isoliergasgemisch mit 20 Volumenprozent SF₆ ein um 80 % reduziertes GWP₁₀₀ von 4700 und eine relative elektrische Festigkeit von etwa 0,7, wie auch aus Abbildung 2.5 in Abschnitt 2.1.5 hervorgeht [Car 1982]. Auch eine Optimierung des inneren Aufbaus von GIS und GIL ermöglicht bereits eine Reduktion des notwendigen Isoliergasvolumens und

somit des in der Anlage befindlichen SF₆ [Cig 2010]. Der Anteil von SF₆ isolierten Anlagen am gesamten Anlagenbestand beträgt bereits 35% im deutschen Netz und es wird angenommen, dass dieser Anteil in der nahen Zukunft weiter steigen wird [Bur 2018]. Auch weltweit wurden über die letzten 40 Jahre hinweg mehr als 2500 GIS-Anlagen installiert [Kie 2015]. Obwohl sich weltweit mehr SF₆ in Mittelspannungsanlagen befindet, übersteigt die Bestandsemission der Hochspannungsanlagen die der Mittelspannungsanlagen um ein Vielfaches [Bur 2018]. Grund hierfür ist, dass mit SF₆ gefüllte Mittelspannungsschaltanlagen nur eine Leckrate von weniger als 0,1 % des Gesamtvolumens pro Jahr besitzen [Hyr 2016], während die Leckrate von Hochspannungsanlagen wegen der größeren Dimensionen und des höheren Drucks üblicherweise bis zu 0,5 % betragen kann [IEC 2011].

Atmosphärische Entwicklung

Da sich 96 bis 99 % des emittierten SF₆ in der Atmosphäre sammelt und aufgrund der sehr langen atmosphärischen Lebensdauer von SF₆ von 3200 Jahren, ist auch bei sehr geringen Leckraten eine Erhöhung der atmosphärischen SF₆-Konzentration zu erwarten [Lev 2010]. Aus demselben Grund lässt sich auch direkt aus der Änderung der atmosphärischen SF₆-Konzentration auf die SF₆-Emissionen zurückschließen [Lev 2010].

Zum Nachweis von SF₆ in der Atmosphäre können beispielsweise Gaschromatographen mit Elektroneneinfangdetektoren eingesetzt werden [Hin 2021]. Durch die hohe Elektronenaffinität von SF₆ sind extrem geringe Nachweisgrenzen von weniger als 0,01 Billionstel (ppt) möglich [Mai 1998]. Wenngleich keine natürliche Quelle von SF₆ auf der Erde bekannt ist, ließen Messungen von in der Antarktis eingeschlossener Luft auf eine präindustrielle Obergrenze der natürlichen troposphärischen SF₆-Konzentration von 0,0063 ppt unbekanntem Ursprungs schließen [Vol 2002]. Die ältesten in die Evaluierung der atmosphärischen SF₆-Konzentration einfließenden aufbewahrten Luftproben während der Industrialisierung stammen aus den Jahren 1973 (nördliche Hemisphäre) und 1978 (südliche Hemisphäre) [Rig 2010]. Die Luftprobe von 1973 wies eine atmosphärische SF₆-Konzentration von etwa 0,4 ppt auf, und die von 1978 betrug mit 0,6 ppt bereits etwa das Hundertfache der natürlichen SF₆-Konzentration. Die atmosphärische SF₆-Konzentration lässt somit bereits wenige Jahre nach der industriellen Produktion auf einen nahezu ausschließlich anthropogenen Anteil zurückschließen [Mai 1998]. Seit 1995 finden kontinuierliche Messungen der atmosphärischen SF₆-Konzentration statt, die einen überlinearen Anstieg der SF₆-Konzentration von 3,3 ppt (1995) auf 10,2 ppt (2020) zeigen, wie Abbildung 2.1 veranschaulicht. Wie die Abbildung zeigt, fand mit dem Kyoto-Protokoll im Jahr 1996 zunächst ein Rückgang des jährlichen Zuwachses der atmosphärischen SF₆-Konzentration und im Rückschluss ein Rückgang der globalen SF₆-Emission statt. Wenngleich die politischen Bestrebungen zur Reduzierung der SF₆-Emissionen in den teilnehmenden Industrienationen fortbestanden und mitunter durch weitere nationale Regularien und Gesetze ergänzt wurden, fand jedoch etwa ab 2001 erneut eine Zunahme des Anstiegs der atmosphärischen SF₆-Konzentration statt.

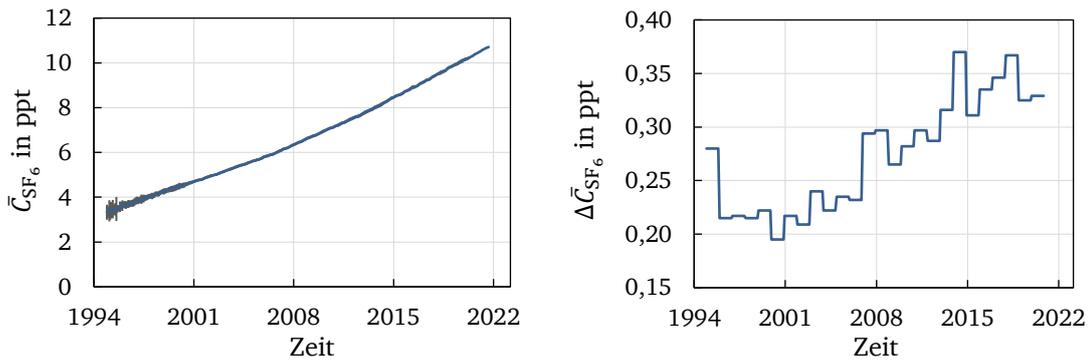


Abbildung 2.1: Globaler Mittelwert der SF₆-Konzentration in der Luft in ppt (links) und jährlicher Anstieg des globalen Mittelwertes der SF₆-Konzentration (rechts) (Werte von [Elk 2020])

Durch die im Zuge des Kyoto-Protokolls eingeführte verpflichtende Überwachung der SF₆-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von mit SF₆-gefüllten Anlagen sind die emittierten SF₆-Mengen der teilnehmenden Industrieländer offiziell bekannt. Es wird jedoch vermutet, dass die tatsächlichen SF₆-Emissionen der teilnehmenden Industrieländer höher liegen als offiziell mitgeteilt [Rig 2010, Lev 2010].

Zum aktuellen Zeitpunkt ist die SF₆-Konzentration in der Atmosphäre noch vergleichsweise sehr gering, wodurch SF₆ aktuell für nur etwa 0,2 % des globalen Strahlungsantriebs RF verantwortlich ist [Rig 2010]. Eine graphische Veranschaulichung des Beitrags der unterschiedlichen Treibhausgase am Treibhauseffekt ist in Abbildung 2.2 zu sehen.

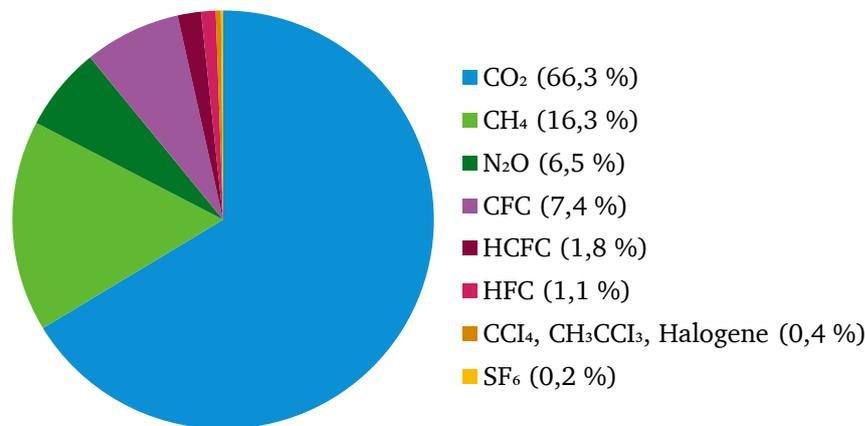


Abbildung 2.2: Beitrag unterschiedlicher Treibhausgase am Treibhauseffekt (Werte von [But 2021])

Jedoch kann aufgrund der sehr langen atmosphärischen Lebensdauer von 3200 Jahren auch in den kommenden Jahrzehnten nur ein Anstieg der atmosphärischen SF₆-Konzentration und auch langfristig – auf die Lebensspanne der menschlichen Zivilisation bezogen – im besten Fall eine konstant bleibende atmosphärische SF₆-Konzentration erwartet werden [Rav 1993]. Aus diesem Grund ist es essentiell, die Emission von SF₆ nach Möglichkeit komplett zu vermeiden beziehungsweise auf ein Höchstmaß zu reduzieren. Für die Verwendung von SF₆ als elektrisches Isolier- und Lichtbogenlöschgas bedeutet dies, dass ein alternatives, umweltfreundlicheres Gas gefunden werden muss.

2.1.2 Gasdurchschlag

In der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen des elektrischen Gasdurchschlags nicht im Detail vorgestellt. Bei Bedarf kann eine detaillierte Beschreibung der Grundlagen des elektrischen Gasdurchschlags beispielsweise [Küc 2017] und [Bey 1992] entnommen werden.

Der elektrische Gasdurchschlag findet grundsätzlich durch die Beschleunigung freier Elektronen im elektrischen Feld und die durch Stoßionisation mit Gasmolekülen exponentielle Vermehrung freier Ladungsträger statt, wodurch ein leitfähiger Entladungskanal entsteht. Freie Startelektronen liegen im Gas durch Ionisationsprozesse, aber auch durch Emissionsprozesse vor. Der Zusammenstoß eines Elektrons mit einem Gasmolekül kann zu einer Anlagerung des Elektrons an das Gasmolekül, zu einem elastischen Stoß oder zu einer Ionisation des Gasmoleküls führen. Zur analytischen Betrachtung der Ladungsträgervermehrung wird der erste Townsendsche Ionisierungskoeffizient α genutzt, auch Ionisierungszahl genannt, der die Anzahl der von einem Elektron je Längeneinheit durchgeführten Ionisationsvorgänge und somit der neu erzeugten Elektronen beschreibt. Dem entgegen wirkt der Anlagerungskoeffizient η_{an} , der analog zu α die Anzahl der pro Längeneinheit durch die Anlagerung an Gasmoleküle eingefangenen freien Elektronen angibt. Um ein Maß für den effektiven Ionisierungskoeffizienten α_{eff} zu erhalten, eignet sich folglich die Differenz aus dem ersten Townsendschen Ionisierungskoeffizienten α und dem Anlagerungskoeffizienten η_{an} . Sowohl der erste Townsendsche Ionisierungskoeffizient α als auch der Anlagerungskoeffizient η_{an} sind proportional zum Druck und lassen sich als Funktion in Abhängigkeit von der elektrischen Feldstärke E und dem Druck p ausdrücken, wie Gleichung 2.1 zeigt [Sch 1974, Küc 2017].

$$\alpha_{eff} = \alpha - \eta_{an} = p \cdot f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.1)$$

Voraussetzung für einen Gasdurchschlag ist ein positiver effektiver Ionisierungskoeffizient α_{eff} . Dieser wiederum ist gasabhängig und wird über die Grenzfeldstärke $(E/p)_0$, unterhalb derer die Anlagerungsrate höher ist als die Ionisierungsrate und somit kein Durchschlag zustande kommen kann, definiert. Der Townsendsche Ionisierungskoeffizient α von SF_6 ist etwa gleich groß wie der von Luft [Hop 2020]. Dennoch besitzt Luft eine Grenzfeldstärke von 24,4 kV/(MPa mm), während sie für SF_6 87,7 kV/(MPa mm) beträgt [Küc 2017, Bey 1992]. Grund für die deutlich höhere Grenzfeldstärke von SF_6 ist der deutlich höhere Anlagerungskoeffizient η_{an} , der auf die sehr hohe Elektronenaffinität von SF_6 zurückzuführen ist. Chemische Elemente, die nur noch wenige Elektronen vor dem Schalenabschluss stehen, wie im Falle von SF_6 Fluor, besitzen generell eine hohe Elektronenaffinität [Küc 2017]. Daher weisen insbesondere Moleküle mit solchen chemischen Elementen eine vergleichsweise hohe elektrische Festigkeit auf.

Bei der analytischen Betrachtung muss weiterhin die Rückwirkung der positiv geladenen Ionen auf die Kathode und die damit verbundene Entstehung neuer Startelektronen bedacht werden. Diese Rückwirkung wird mit dem zweiten Townsendschen Ionisierungskoeffizienten γ , auch Rückwirkungskoeffizient oder Oberflächenionisierungszahl genannt, beschrieben, welcher neben unterschiedlichen weiteren Effekten primär die Anzahl der neu erzeugten Ladungsträger bezogen auf die Zahl erzeugter positiver Ionen ausdrückt [Sch 1974]. Der zweite Townsendsche Ionisierungskoeffizient γ ist abhängig vom Elektrodenmaterial, der Gasart, der elektrischen Feldstärke und dem Gasdruck. Meist wird er bei konstantem Gas oder Elektrodenmaterial in Abhängigkeit vom Verhältnis aus elektrischer Feldstärke und Druck angegeben, wie Gleichung 2.2 zeigt [Sch 1974].

$$\gamma = f\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.2)$$

Da der zweite Townsendsche Ionisierungskoeffizient γ jedoch einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Höhe der Durchschlagspannung ausübt, wird in der Praxis meist ein konstanter Wert für γ gewählt [Bey 1992, Küc 2017].

Ob der Gasdurchschlag nach dem Generationenmechanismus nach Townsend, einer raumladungsfreien Entladung, oder nach dem Streamer-Mechanismus nach Raether, einer raumladungsbeschwerter Entladung, abläuft, hängt von der Anzahl der von dem Startelektron ausgelösten Elektronen in der Elektronenlawine ab. Überschreitet die Lawine etwa 10^6 bis 10^8 Elektronen, findet der Überschlag nach dem Streamer-Mechanismus nach Raether statt [Küc 2017].

Streamer-Mechanismus nach Raether

Im Gegensatz zum Generationenmechanismus nach Townsend spielen Raumladungen beim Streamer-Mechanismus eine tragende Rolle, weshalb der Streamer-Mechanismus auch als raumladungsbeschwerter Mechanismus bezeichnet wird [Küc 2017]. In der Lawine nehmen die schnelleren Elektronen den Lawinenkopf ein und die deutlich langsameren, durch die Ionisierung der Gasmoleküle entstandenen, positiven Ionen den Lawinenschwanz. In Lawinenkopf und Lawinenschwanz befindet sich die betragsgleiche Ladung. Da sich die Ladung im Lawinenkopf jedoch auf einen kleineren Bereich als im Lawinenschwanz verteilt, besitzt der Lawinenkopf eine wesentlich größere Ladungsdichte [Bey 1992]. Durch die sich somit einstellende Ladungsverteilung der Lawine wird die elektrische Feldstärke zwischen Lawinenkopf und Anode sowie zwischen Lawinenschwanz und Kathode verstärkt, wobei die größte Feldanhebung am Lawinenkopf stattfindet. Die resultierende elektrische Feldstärke über der Schlagweite weicht somit von der elektrischen Grundfeldstärke, die ohne den Einfluss der Raumladungen vorliegen würde, ab. Diese starke Feldanhebung am Lawinenkopf und auch die Feldanhebung am Lawinenschwanz führen dort zu einer verstärkten Ionisation und zu einer höheren Vorwachsengeschwindigkeit der Lawine in Richtung beider Elektroden. Zudem findet dadurch eine erhöhte Strahlungsemission statt, die durch ihre

ionisierende Wirkung im Gasraum durch Photoionisation neue freie Elektronen erzeugt, die ihrerseits als Startelektronen für neue Lawinen dienen [Bey 1992].

Der somit in Richtung beider Elektroden wandernde Entladungskanal wird als Streamer bezeichnet. Sobald sich der Streamer in beide Richtungen zu den Elektroden ausgebreitet hat, wird der Entladungskanal thermoionisiert und somit elektrisch hochleitfähig. Dies führt zu einem elektrischen Durchschlag der Gasstrecke zwischen Kathode und Anode. Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, ist die Voraussetzung für dieses Wachstum des Entladungskanals, dass die Zahl der Elektronen im Lawinenkopf 10^6 bis 10^8 beträgt. Falls die Lawine die Anode mit einer geringeren Anzahl an Elektronen im Lawinenkopf erreicht, ist ein Durchschlag nach dem Streamer-Mechanismus nicht möglich und die Elektronen werden lediglich von der Anode aufgenommen.

Weiterhin muss der in Gleichung 2.1 beschriebene effektive Ionisationskoeffizient, der die Bildung neuer Elektronen durch Stoßionisation α gegenüber der Anlagerung freier Elektronen an Gasmoleküle η_{an} beschreibt, größer als Null sein.

Generationenmechanismus nach Townsend

Bei einer geringeren Anzahl an Elektronen in der Lawine ist der Überschlag von Folgelawinen abhängig und läuft somit nach dem Generationenmechanismus nach Townsend an. Die Anzahl der von einem Startelektron durch die Rückwirkung auf die Kathode nach dem Durchlauf der ersten Elektronenlawine über die gesamte Schlagweite s der Elektrodenanordnung erzeugten neuen Startelektronen N_e kann nach Gleichung 2.3 berechnet werden [Küc 2017].

$$N_e = \gamma(e^{\alpha_{eff}s} - 1) \quad (2.3)$$

Die Zündbedingung nach dem Generationenmechanismus ist folglich dann gegeben, wenn die vom ursprünglichen Startelektron ausgelöste Lawine mindestens ein weiteres Startelektron erzeugt und auch jede weitere Lawine mindestens ein neues Startelektron hervorbringt, wie Gleichung 2.4 zum Ausdruck bringt.

$$N_e \geq 1 \quad (2.4)$$

Durch die ständig größer werdenden Lawinen entsteht ein leitfähiger Entladungskanal und die Spannung bricht zusammen. Ist diese Bedingung nicht gegeben, stoppt der Entladungsvorgang.

Der Gasdurchschlag nach dem Generationenmechanismus findet in Luft bis zu einem Produkt aus Gasdruck und Schlagweite $ps < 1,3 \text{ MPa mm}$ und in SF_6 $ps < 1 \text{ MPa mm}$ statt [Hop 2020]. Für reale Anwendungen in der Hochspannungstechnik liegt das Produkt aus Gasdruck und Schlagweite $ps \gg 1,3 \text{ MPa mm}$, weshalb in realen Anwendungen der Durchschlag nach dem Streamer-Mechanismus dominiert.

Für Durchschläge, die nach dem Generationenmechanismus nach Townsend stattfinden, gilt folgende Näherungsgleichung 2.5 für die Durchschlagspannung [Küc 2017, Bey 1992].

$$U_d = \frac{B_G \cdot p s}{\ln \frac{A_G \cdot p s}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (2.5)$$

Diese besagt, dass die Durchschlagspannung U_d eines Gases im homogenen Feld bei konstanter Temperatur und unter der Annahme eines konstanten zweiten Townsendschen Ionisationskoeffizienten γ nur vom Produkt aus Schlagweite und Gasdruck abhängt. Die beiden Konstanten A_G und B_G sind experimentell ermittelte Gaskonstanten, die primär von der Gasart, aber auch von der Temperatur, dem Gasdruck p und der elektrischen Feldstärke E abhängig sind. Sie werden meist als Konstanten für einen Gültigkeitsbereich von E/p und für eine Labornormaltemperatur T_{norm} von 293 K angegeben.

Temperaturabhängige Korrektur des Drucks

Bei Abweichungen von der Labornormaltemperatur T_{norm} lässt sich der auf Basis der Temperaturabweichung korrigierte Druck p_{korr} über das in Gleichung 2.6 dargestellte Gesetz von Amontons aus der tatsächlich vorherrschenden Temperatur T_{ist} , dem im Falle der Labornormaltemperatur einzufüllenden Solldruck p_{soll} und der Labornormaltemperatur T_{norm} berechnen.

$$p_{\text{korr}} = \frac{T_{\text{ist}} \cdot p_{\text{soll}}}{T_{\text{norm}}} \quad (2.6)$$

Diese Gleichung basiert jedoch auf der vereinfachenden Annahme, dass sich das betrachtete Gas wie ein ideales Gas verhält. Der Unterschied zwischen einem idealen und einem realen Gas sowie der maximale Fehler bei der Annahme der hier betrachteten Isoliergasgemische als ideales Gas wird am Ende des Abschnitts 2.1.5 in Tabelle 4 angegeben. Für die Berechnung der Durchschlagspannung im inhomogenen elektrischen Feld sei auf Gleichung 2.8 im folgenden Abschnitt 2.1.3 verwiesen.

2.1.3 Homogenität der Elektrodenanordnung

Der Homogenitätsgrad η einer Elektrodenanordnung, auch Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger genannt, bezeichnet das Verhältnis aus mittlerer elektrischer Feldstärke E_0 und maximaler elektrischer Feldstärke E_{max} zwischen den Elektroden, wie Gleichung 2.7 beschreibt [Sch 1925]. Die mittlere elektrische Feldstärke E_0 entspricht hierbei der elektrischen Feldstärke, die bei einer perfekt homogenen Elektrodenanordnung mit identischer Schlagweite vorherrscht. Im homogenen elektrischen Feld zeigen alle Feldstärkevektoren an jedem Punkt im Raum zwischen den Elektroden in die gleiche

Richtung und besitzen den gleichen Betrag. Somit lässt sich die mittlere elektrische Feldstärke durch den Quotienten aus der Spannungsdifferenz der Elektroden U und der Schlagweite s berechnen.

$$\eta = \frac{E_0}{E_{\max}} = \frac{U}{s \cdot E_{\max}} \quad (2.7)$$

Die im vorangegangenen Abschnitt 2.1.2 beschriebene Gleichung 2.5 zur Berechnung der Durchschlagfestigkeit im homogenen Feld besitzt näherungsweise Gültigkeit bis zu einem Homogenitätsgrad $\eta > 0,93$, was auch als quasi-homogenes Feld bezeichnet wird [Hop 2020].

Bei der Betrachtung der Homogenität müssen sowohl die makroskopische Homogenität durch die Elektrodenanordnung als auch die mikroskopische Homogenität durch Oberflächenrauigkeiten berücksichtigt werden. Der makroskopische Homogenitätsgrad wird in erster Linie von der Elektrodenanordnung, jedoch auch durch von außen wirkenden Einflüssen, wie beispielsweise vom Abstand der Elektrodenanordnung zur Erde und zu benachbarten Komponenten mit einer Potentialdifferenz, beeinflusst. Zur Berechnung der maximal auftretenden Feldstärken und somit des Homogenitätsgrades dient heutzutage die numerische Berechnung in Simulationsmodellen. Eine Abschätzung des Homogenitätsgrades in typischen Elektrodenanordnungen der Hochspannungstechnik ist jedoch auch mittels Diagrammen über die Art der Elektrodenanordnung sowie ihrer Geometrie möglich [Sch 1925].

Abbildung 2.3 zeigt einen typischen Verlauf der Durchschlagspannung U_d und der Teilentladungseinsetzspannung U_e über dem Homogenitätsgrad η der Elektrodenanordnung.

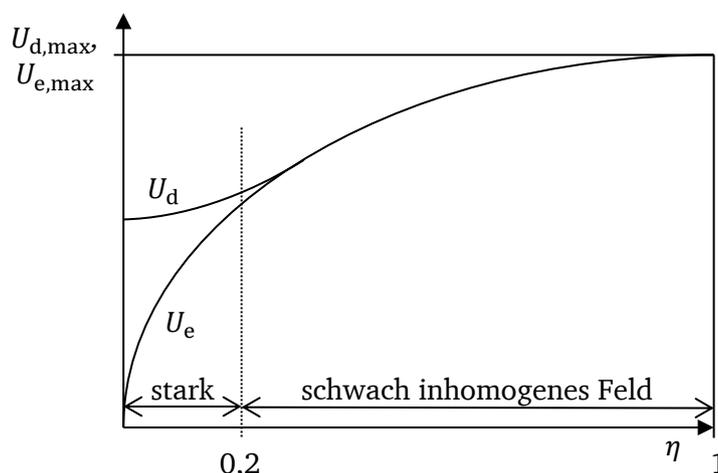


Abbildung 2.3: Zusammenhang der Teilentladungseinsetzspannung U_e und der Durchschlagspannung U_d in Abhängigkeit des Homogenitätsgrades η nach [Bey 1992]

Bei homogenen und schwach inhomogenen Elektrodenanordnungen, die bei einem Homogenitätsgrad η von 1 bis etwa 0,2 vorliegen, lässt sich mit Hilfe des Homogenitätsgrads auch die Durchschlagspannung einer Elektrodenanordnung abschätzen [Küc 2017].

Eine Reduktion des Homogenitätsgrades führt zu einer lokalen Überhöhung der elektrischen Feldstärke und somit in diesem Bereich zu einer Erhöhung des effektiven Ionisierungskoeffizienten α_{eff} . Die Durchschlagspannung U_d wird bei diesen Homogenitätsgraden typischerweise erreicht, sobald die maximale elektrische Feldstärke E_{max} die Durchschlagfeldstärke E_d erreicht [Bey 1992] (siehe Gleichung 2.8). Die Durchschlagfeldstärke wiederum ist geometrieabhängig und eine Funktion der Schlagweite und des Krümmungsradius der Elektroden. Sie kann für herkömmliche Elektrodengeometrien aus Diagrammen, wie zum Beispiel in [Sch 1923] aufgeführt, abgelesen werden.

$$U_d = \eta \cdot s \cdot E_d \quad (2.8)$$

Für niedrige Homogenitätsgrade, die $\eta < 0,2$ betragen, konnte bislang kein geschlossener Ausdruck zur Berechnung der Durchschlagspannung gefunden werden [Hop 2020]. Hier kommt es üblicherweise nicht direkt zum Durchschlag, sobald die maximale elektrische Feldstärke E_{max} die Zündfeldstärke erreicht. Stattdessen treten dort stabile Vorentladungen vor dem Durchschlag auf, die auch als Teilentladungen (TE) bezeichnet werden. Auch Oberflächenrauigkeiten können eine starke lokale Erhöhung der elektrischen Feldstärke verursachen.

Oberflächenrauigkeiten werden in der Mittel- und Hochspannungstechnik üblicherweise mit der maximalen Rautiefe R_t angegeben [Cig 2021]. Die maximale Rautiefe R_t beschreibt die Distanz zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt einer Oberfläche [DIN 2022]. Für Hochspannungsanwendungen liegt R_t der unbeschädigten Elektroden typischerweise im Bereich von 15 μm bis 50 μm , wie auch aus Tabelle 21 in Abschnitt 2.2 hervorgeht [Cig 2021]. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit der Elektroden auf die Durchschlagspannung von SF_6 kann [Led 2004] entnommen werden. Bei SF_6 steigt der effektive Ionisationskoeffizient α_{eff} stark mit der Feldstärke an und nimmt mit steigendem Druck zu, weshalb der Einfluss der Oberflächenrauigkeit insbesondere bei SF_6 zum Tragen kommt, wie beispielsweise in [Ber 1976] ersichtlich wird.

Oberflächenrauigkeiten entstehen jedoch nicht ausschließlich durch das Fertigungsverfahren der Elektroden. Diese können sich auch aus mechanischen Beschädigungen der Elektroden oder aus elektrischen Entladungen und den damit verbundenen Aufschmelzungen an den Lichtbogenfußpunkten ergeben. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, um in der Praxis bei Durchschlagsversuchen Elektrodenoberflächen mit möglichst konstanten Eigenschaften zu erhalten. Eine Möglichkeit besteht darin, eine Durchschlagserkennung mit Abschaltautomatik zu nutzen, die den Energieinhalt der elektrischen Entladung und somit die Auswirkung auf die Elektroden begrenzt. Weiterhin kann ein regelmäßiger Wechsel der Elektroden oder eine regelmäßige Nachbearbeitung der Elektroden zum Einsatz kommen. In der vorliegenden Arbeit wurden die Elektroden regelmäßig nachbearbeitet und zusätzlich kam bei den AC-Untersuchungen in Kapitel 4 und Kapitel 7 eine Abschaltautomatik mit einer Auslösezeit von 5 ms zum Einsatz.

2.1.4 Funkenentladung beim Durchschlag einer Isoliergasstrecke

Beim Durchschlag einer Gasstrecke wird diese ionisiert und der Funkenwiderstand fällt von einem sehr hohen Anfangs- auf einen sehr niedrigen Endwert. Die hieraus resultierende Funkenaufbauzeit t_F ist ein Maß dafür, wie schnell dieser Vorgang vonstattengeht.

Die Funkenaufbauzeit t_F ist hierbei als die Zeit definiert, in der die anliegende Spannung beim Durchschlag von 90 % auf 10 % zusammenbricht [Bog 1982, Sin 2003, Küc 2017]. Während dieses Zusammenbruchs bildet sich ein leitfähiger Plasmakanal, der die Strecke zwischen den beiden Elektroden überbrückt [Sin 2003]. Durch diesen leitfähigen Plasmakanal ändert sich der Funkenwiderstand $R_F(t)$ von einem sehr hohen Wert von mehr als $10^6 \Omega$ auf einen vergleichsweise geringen Wert von etwa 5Ω [Bog 1982]. Der Funkenwiderstand wiederum besitzt eine umgekehrt proportionale Abhängigkeit vom im Durchschlag fließenden Strom [Eng 1989].

Für den Gültigkeitsbereich des Generationenmechanismus nach Townsend und des Streamer-Mechanismus ergibt sich mit dem Toeplerschen Funkenwiderstandsgesetz die in Gleichung 2.9 beschriebene Abhängigkeit des Funkenwiderstands $R_F(t)$ von der Funkenlänge l_F , der Toepler-Konstante k_T und der bis zum Zeitpunkt t im Funken geflossene Ladung $Q_F(t)$ [Küc 2017].

$$R_F(t) = \frac{k_T \cdot l_F}{Q_F(t)} \quad (2.9)$$

Zur Berechnung der Funkenaufbauzeit t_F wird vereinfachend angenommen, dass eine konzentrierte Kapazität C_F des Prüflings bei der Entladung vorliegt und ohmsche Widerstände vernachlässigt werden können [Bey 1992]. Die Kapazität C_F ist zu Beginn auf die Spannung $U_{F,0}$ aufgeladen. Durch die Vereinfachung ergeben sich die dargestellten Beziehungen zur Berechnung der Funkenspannung $u_F(t)$ in Gleichung 2.10, der geflossenen Ladung $Q_F(t)$ in Gleichung 2.11 und des Entladestroms $i_F(t)$ in Gleichung 2.12 [Bey 1992, Küc 2017].

$$u_F(t) = R_F(t) \cdot i_F(t) = \frac{k_T \cdot l_F}{Q_F(t)} \cdot i_F(t) \quad (2.10)$$

$$Q_F(t) = -C_F \cdot [U_{F,0} - u_F(t)] \quad (2.11)$$

$$i_F(t) = -C_F \frac{du_F}{dt} \quad (2.12)$$

Durch Einsetzen von Gleichungen 2.11 und 2.12 in Gleichung 2.10 ergibt sich die in Gleichung 2.13 dargestellte Differentialgleichung, deren zeitliche Integration auf Gleichung 2.14 führt [Bey 1992, Küc 2017].

$$u_F(t) = \frac{k_T \cdot l_F}{C_F \cdot [U_{F,0} - u_F(t)]} \cdot \left(-C_F \frac{du_F}{dt} \right) \quad (2.13)$$

$$u_F(t) = \frac{U_{F,0}}{1 + e^{\frac{U_{F,0}}{k_T \cdot l_F} t}} \quad (2.14)$$

Die Funkenaufbauzeit t_F entspricht – wie eingangs definiert – der Zeit, in der die anliegende Spannung beim Durchschlag von 90 %, also $u_F = 0,9 U_{F,0}$, auf 10 %, also $u_F = 0,1 U_{F,0}$, zusammenbricht. Aus dieser Definition ergibt sich durch Gleichung 2.14 die in Gleichung 2.15 gezeigte Formel zur Berechnung der Funkenaufbauzeit t_F in Abhängigkeit von der Toepler-Konstanten k_T und der elektrischen Feldstärke E_d beim Durchschlag [Bey 1992, Küc 2017].

$$t_F = 4,4 \frac{k_T}{E_d} \quad (2.15)$$

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht empirisch ermittelter Toepler-Konstanten k_T für unterschiedliche Gase.

Tabelle 1: Übersicht empirisch ermittelter Toepler-Konstanten k_T (Werte von [Bey 1992])

Gas	Toepler-Konstante k_T in Vs/cm
N ₂	$0,4 \cdot 10^{-4}$
Luft	$(0,5 \dots 0,6) \cdot 10^{-4}$
SF ₆	$(0,4 \dots 0,8) \cdot 10^{-4}$

In Untersuchungen der Funkenaufbauzeiten t_F in SF₆, SF₆/N₂ und N₂ konnte für Elektrodenschlagweiten s von weniger als 1 mm gezeigt werden, dass sich die Toepler-Konstante k_T mit dem Gasdruck p und mit der SF₆-Konzentration im Isoliergasgemisch SF₆/N₂ verändert [Sin 2003]. In weiteren Untersuchungen wurde ermittelt, dass die Toepler-Konstante k_T von der Gasart, dem Isoliergasdruck und dem Homogenitätsgrad abhängt, nicht jedoch vom Elektrodenmaterial und der Elektrodenrauigkeit [Osm 1992]. Eine kleinere Funkenaufbauzeit t_F führt zu einem schnelleren Zusammenbruch der anliegenden Spannung und somit zu einer höheren Stromsteilheit des im Durchschlag fließenden Stromes. Hohe Stromsteilheiten wiederum führen in einer GIS oder GIL zu Wanderwellenvorgängen. Es ist bekannt, dass bei Gasdurchschlägen in SF₆ mit sehr kurzen Funkenaufbauzeiten zu rechnen ist, wodurch Wanderwellen mit Anstiegszeiten im ns-Bereich auftreten können [Küc 2017].

2.1.5 Wesentliche Eigenschaften eines Isoliergases

Auf ausgewählte Gaseigenschaften, die einer genaueren Definition bedürfen, wird im Folgenden einzeln eingegangen.

Relative elektrische Festigkeit

Die auf reines SF₆ bei einem Labornormaldruck ($p = 0,1$ MPa) [IEC 2010] und Labornormaltemperatur ($T_{\text{norm}} = 20$ °C) [IEC 2010] bezogene relative elektrische Festigkeit alternativer Isoliergase stellt eine der wichtigsten Kenngrößen bei der Auswahl geeigneter Alternativen dar. Eine geringere elektrische Festigkeit als SF₆ bedingt für gasisolierte Systeme entweder eine Druckerhöhung des Isoliergases oder eine Vergrößerung der Schlagweiten und somit der gesamten Bauteilabmessungen. Da die elektrische Festigkeit des Isoliergases jedoch mitunter unterschiedliche Abhängigkeit vom Gasdruck p aufweist, ist eine Gegenüberstellung der elektrischen Festigkeiten bei einem Gasdruck p von 0,1 MPa nicht immer ausreichend und praktische Untersuchungen der tatsächlichen Festigkeiten sind erforderlich. So besitzt SF₆ etwa die dreifache elektrische Festigkeit von Luft bei einem Druck p von 0,1 MPa. Während der Anstieg der elektrischen Festigkeit von Luft eine nahezu lineare Abhängigkeit vom Druck zeigt, verringert sich der Anstieg der elektrischen Festigkeit von SF₆ mit steigendem Druck. Bei einem Druck p von 1,1 MPa besitzt SF₆ nur noch etwa die doppelte elektrische Festigkeit von Luft bei gleichem Druck [Hop 2020]. Die Ursache liegt darin, dass SF₆ aufgrund von Elektronenablösungen zuvor angelagerter Elektronen oberhalb von 0,6 MPa ein schwach degressives Verhalten mit steigendem Druck aufweist, während Luft bei vergleichbaren Feldstärken weiterhin einen linearen Anstieg der elektrischen Festigkeit mit steigendem Druck besitzt [Hop 2020].

Treibhauspotential GWP₁₀₀ und atmosphärische Lebensdauer

Die wichtigste Kennziffer zur Quantifizierung des Umwelteinflusses von Treibhausgasen ist das Treibhauspotential (GWP, engl.: *global warming potential*) [Sto 2014]. Das vom Weltklimarat (IPCC) definierte GWP beschreibt das Treibhauspotential der in die Atmosphäre gelangten Masse eines Treibhausgases x über den Zeithorizont TH bezogen auf das Treibhauspotential derselben Masse Kohlenstoffdioxid und wird über die in Gleichung 2.16 beschriebene Formel berechnet [Owe 2016].

$$\text{GWP}_{TH} = \frac{\int_0^{TH} RF_x C_{x_0} \exp(-t/\tau_x) dt}{\int_0^{TH} RF_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2}(t) dt} \quad (2.16)$$

Der gängigste gewählte Zeithorizont TH bei der Betrachtung von Treibhausgasen beträgt 100 Jahre (GWP₁₀₀), wobei das IPCC für kürzere Zeithorizonte auch 20 Jahre (GWP₂₀) und für längere Zeithorizonte 500 Jahre (GWP₅₀₀) angibt. Die vom IPCC definierte Variable RF_x steht für den Strahlungsantrieb (englisch: *radiative forcing*) in W/m² einer Substanz x in Höhe der Tropopause. Der Strahlungsantrieb beschreibt den Einfluss eines Faktors auf die Balance der in die Erdatmosphäre ein- und austretenden

Energie. Der Strahlungsantrieb wird in erster Linie von der Infrarotabsorption des Treibhausgases beeinflusst. Die atmosphärische Konzentration der Substanz x zum Startzeitpunkt wird über die Variable C_{x_0} in ppm ausgedrückt, τ_x beschreibt die atmosphärische Lebensdauer τ der Substanz x und t die Zeit. Die atmosphärische Lebensdauer ist so definiert, dass innerhalb dieser Zeit die als konstant betrachtete Menge der Substanz x die gleiche Belastung darstellt wie die in der Realität im Laufe der Zeit bis auf null abnehmende Menge der Substanz x [Ehh 2001]. Die Einführung dieser Größe ist daher notwendig, weil die Zersetzung der meisten Substanzen in der Atmosphäre nicht konstant abläuft, sondern sich zum Beispiel zwischen unterer und oberer Troposphäre unterscheiden [Ehh 2001].

Wenngleich die atmosphärische Lebensdauer des Treibhausgases bereits einen Einfluss auf die Berechnung des GWPs ausübt, sollte sie trotzdem auch separat betrachtet werden, da die Lebensdauer den betrachteten Zeithorizont mitunter deutlich übersteigt. Das etablierte Isoliergas SF₆ beispielsweise besitzt mit 3200 Jahren eine sehr hohe atmosphärische Lebensdauer, während Methan (CH₄) mit 10,8 ... 12,4 Jahren eine deutlich kürzere Lebensdauer aufweist [Sto 2014]. Für CO₂ wiederum kann keine einzelne Lebensdauer definiert werden, da diese stark von unterschiedlichen Abbauprozessen abhängt. Aus diesem Grund wird für CO₂ in der Literatur für die Lebensdauer eine Zeitspanne von 5 bis 200 Jahren angegeben [Alb 2001, Sto 2014].

Wie Tabelle 2 zeigt, ergeben sich folglich bei der Berechnung der GWPs für unterschiedliche Zeithorizonte unterschiedliche Treibhauspotentiale. Dadurch, dass die atmosphärische Lebensdauer von SF₆ deutlich länger als der im GWP betrachtete Zeithorizont ist, besitzt SF₆ eine weitaus langfristige Wirkung in der Atmosphäre.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Treibhauspotentiale von SF₆ und CH₄ für unterschiedliche Zeithorizonte in CO₂-Äquivalenten ¹[Alb 2001] ²[For 2007] ³[Myh 2013] ⁴[For 2021]

Treibhausgas	Lebensdauer in Jahren	GWP ₂₀	GWP ₁₀₀	GWP ₅₀₀
CO ₂	5 bis 200 ¹ keine Angabe möglich ^{2,3,4}	1 ^{1,2,3,4}	1 ^{1,2,3,4}	1 ^{1,2,3,4}
SF ₆	3200 ^{1,2,3,4}	15100 ¹ ; 16300 ² ; 17500 ³ ; 18300 ⁴	22200 ¹ ; 22800 ² ; 23500 ³ ; 25200 ⁴	32400 ¹ ; 32600 ² ; 34100 ⁴
CH ₄	10,8 ² ; 11,8 ⁴ ; 12 ¹ ; 12,4 ³	62 ¹ ; 67 ² ; 81,2 ⁴ ; 84 ³	23 ^{1,2} ; 27,9 ⁴ ; 28 ³	6,9 ² ; 7 ¹ ; 7,95 ⁴

Aufgrund des zugrunde liegenden Abbauprozesses der Treibhausgase in der Atmosphäre besitzen insbesondere reaktionsträge Gase eine lange atmosphärische Lebensdauer. Reaktionsträgheit ist jedoch aufgrund der Langzeitstabilität auch eine Voraussetzung für gut geeignete Isoliergase. Bei der Suche nach alternativen Isoliergasen stellte sich deshalb die Kombination aus guter elektrischer Festigkeit und Langzeitstabilität und dennoch geringerem GWP als besonders schwierig dar [Owe 2016].

Ozonabbaupotential

Eine weitere zu beachtende Kennziffer zur Beurteilung des Umwelteinflusses eines Gases ist das Ozonabbaupotential (ODP, engl.: *ozone depletion potential*), welches den Einfluss eines Gases auf die stratosphärische Zusammensetzung der Erde widerspiegelt. Nach dem Montreal-Protokoll ist die Kennziffer ODP auf Trichlorfluormethan (CFC-11) normiert und beschreibt folglich die durch eine bestimmte Masse eines Stoffes ausgelöste Veränderung der Ozonsäule bezogen auf die Veränderung der Ozonsäule, die von derselben Menge von CFC-11 verursacht wird. Als Ozonsäule wird hierbei das vertikale Integral der Ozonkonzentration durch die gesamte Atmosphäre bezeichnet, also die Ozonmenge zwischen der Erdoberfläche und dem Weltraum. Um als umweltfreundliches Isoliergas in Frage zu kommen, ist ein ODP von null erforderlich – ein Kriterium, welches auch von SF₆ erfüllt wird.

Toxizität

Die Toxizität von Gasen wird üblicherweise als mittlere letale Konzentration (LC_{50}) angegeben. Der LC_{50} -Wert beschreibt die volumetrische Konzentration des Gases in der Umgebungsluft in Teilen pro Millionen (ppmV), bei der über einen zuvor definierten Zeitraum eine fünfzigprozentige Sterblichkeit der untersuchten Lebewesen, meist Mäuse, Ratten oder Schweine, eintritt. Bei den in dieser Arbeit genannten LC_{50} -Werten liegt die fünfzigprozentige Sterbewahrscheinlichkeit von Ratten bei einer Expositionsdauer von vier Stunden zu Grunde. Die Toxizität wird nach dem LC_{50} -Wert in vier Kategorien untergliedert, wie Tabelle 3 zeigt.

Tabelle 3: Toxizitätskategorien für Gase bei Inhalation nach [Ver 2011]

Art der Exposition	LC_{50} in ppmV	Kategorie	Gefahrenhinweis	Symbol
Inhalation Gas	0 bis 100	1	Fatal	 Danger
	100 bis 500	2	Fatal	 Danger
	500 bis 2500	3	Giftig	 Danger
	2500 bis 20000	4	Schädlich	 Warning
	Mehr als 20000	5	Möglicherweise schädlich	-

Gase, die der Kategorie 5 zugeordnet werden können, da sie eine LC_{50} von mehr als 20000 ppmV besitzen, gelten allgemein hin als ungefährlich, auch wenn als Gefahrenhinweis „möglicherweise schädlich“ angegeben wird [Ver 2011].

Wenngleich einer der Vorteile von gasisolierten Systemen (GIS und GIL) im geringen Wartungsaufwand besteht und somit die Anwesenheit von Personen in unmittelbarer Nähe dieser Anlagen größtenteils entfällt, sind dennoch im Zuge von Versagensstudien beziehungsweise Worst-Case-Szenarien die Arbeitsplatzgrenzwerte einzuhalten. Aus diesem Grund sollten sowohl die alternativen Isoliergaskandidaten als auch mögliche Zersetzungsprodukte möglichst nicht-toxisch sein. Als alternative Isoliergaskandidaten kommen die Gase in Frage, die einen LC_{50} -Wert von mehr als 10000 ppmV aufweisen [Cig 2021].

Kondensationstemperatur

Die in gasisolierten Anlagen eingesetzten Isoliergase müssen so ausgelegt sein, dass unter Betriebsdruck und bei den minimal erwarteten Umgebungstemperaturen, also den minimalen Betriebstemperaturen, keine Kondensation des Isoliergases beziehungsweise Isoliergasgemisches stattfindet. Die Kondensationstemperatur ist eine vom Gasdruck und von der Gaszusammensetzung abhängige Größe, die den Übergang zwischen flüssiger und gasförmiger Phase beschreibt. Die Kondensationstemperatur von Isoliergasen wird üblicherweise für einen Druck p von 0,1 MPa angegeben. Bei diesem Druck besitzt reines SF_6 eine Kondensationstemperatur von -63 °C . Bei einem erhöhten Druck von 0,5 MPa beträgt die Kondensationstemperatur von SF_6 bereits -30 °C [Küc 2017].

Isoliergase, die bei dem gewünschten Betriebsdruck eine Siedetemperatur oberhalb der minimal zu erwartenden Umgebungstemperaturen aufweisen, müssen mit einem Trägergas gemischt werden, die für gewöhnlich eine deutlich niedrigere Siedetemperatur besitzen. Durch den hieraus resultierenden niedrigeren Partialdruck der Isoliergaskomponente mit der höheren Kondensationstemperatur verringert sich auch die Kondensationstemperatur des Isoliergasgemisches. Übliche Trägergase sind Stickstoff (N_2), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Sauerstoff (O_2). Bei CO_2 handelt es sich um ein Trägergas, welches die Lichtbogenlöscheigenschaften des Isoliergasgemisches verbessert und O_2 dient der Reduktion von staubförmigem Kohlenstoff sowie von Kohlenstoffmonoxid (CO), die durch eine Zersetzung des Isoliergasgemisches auftreten können [Cig 2021].

Gasgemische

Ein elektrisches Isoliergas kann entweder aus nur einer Gaskomponente als Reingas, beispielsweise reines SF_6 , oder aus mehreren Gaskomponenten als Isoliergasgemisch, wie beispielsweise 20 % SF_6 / 80 % N_2 , bestehen. Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, können durch die Mischung mit weiteren Gasen Schwachstellen, wie beispielsweise eine für die geforderte Anwendung zu geringe Kondensationstemperatur oder ein zu hohes GWP_{100} , relativiert werden. Die Isoliergase werden hierfür üblicherweise mit den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen natürlichen Trägergasen gemischt. Da diese Trägergase meist eine geringere elektrische Festigkeit als das Isoliergas aufweisen, resultiert diese Mischung auch in einer geringeren elektrischen Festigkeit des Isoliergasgemisches im Vergleich zum reinen Isoliergas.

Weiterhin können durch gezielte beigemischte Gase auch unerwünschte Zersetzungsprodukte vermieden werden, wie beispielsweise Ruß, der zum Großteil aus elementarem Kohlenstoff besteht, durch die Beimischung von O_2 . Der Einfluss der Mischung zweier Gase mit unterschiedlichen Kondensationstemperaturen auf die Kondensationstemperatur des Isoliergasgemisches wird im Folgenden am Beispiel von SF_6/N_2 erläutert.

Abbildung 2.4 zeigt die Verflüssigungskennlinien des Isoliergasgemisches SF_6/N_2 in einem Diagramm, in dem für unterschiedliche Mischungsverhältnisse der Isoliergasdruck über der Gastemperatur aufgetragen ist. Wie die Abbildung zeigt, verschiebt sich die Kondensationskennlinie mit sinkendem SF_6 -Anteil im Gasgemisch zu höheren Drücken beziehungsweise kleineren Temperaturen.

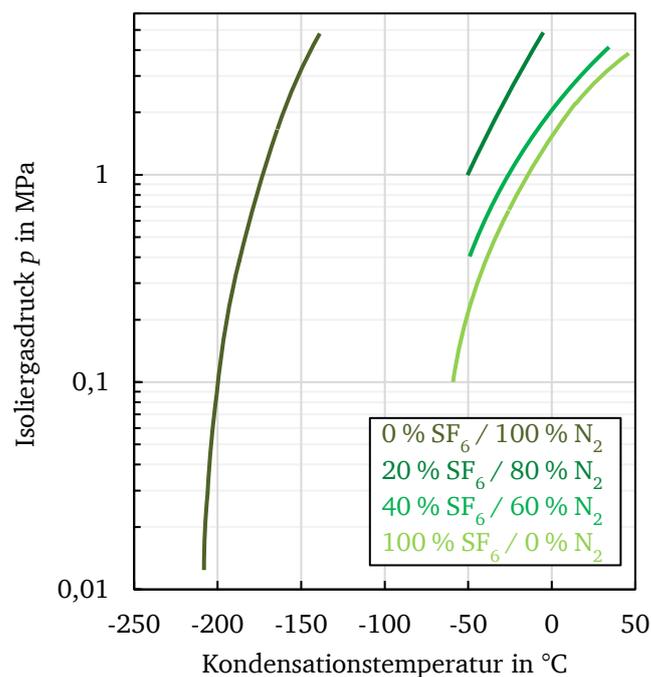


Abbildung 2.4: Druckabhängige Kondensationskennlinien des Isoliergasgemisches SF_6/N_2 für unterschiedliche Mischungsverhältnisse nach [Mos 1979]

Der Einfluss des Mischungsverhältnisses auf die elektrische Festigkeit von SF_6/N_2 ist in Abbildung 2.5 gezeigt.

Die beiden zuvor angesprochenen Mischungsverhältnisse 20 % SF_6 beziehungsweise 40 % SF_6 in SF_6/N_2 entsprechen einer auf reines SF_6 bezogenen relativen elektrischen Festigkeit von etwa 70 % respektive 82 %.

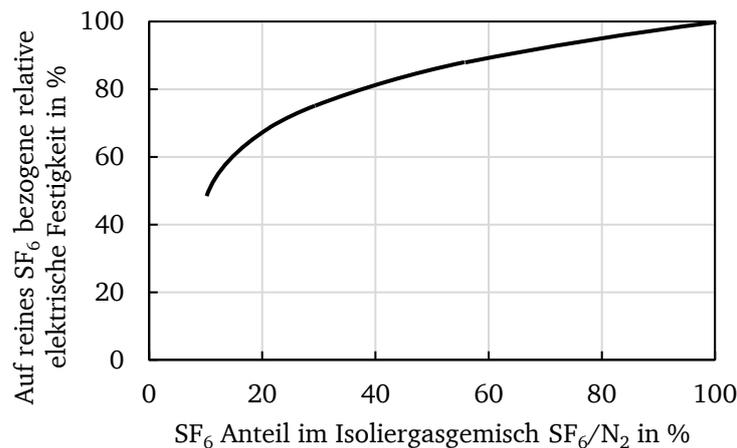


Abbildung 2.5: Auf reines SF₆ bezogene relative elektrische Festigkeit des Isoliergasgemisches SF₆/N₂ für unterschiedliche Mischungsverhältnisse nach [Küc 2017]

Ein weiterer Aspekt, der insbesondere bei der Mischung eines stark elektronenaffinen mit einem anderen Gas beachtet werden muss, ist ein möglicher Synergieeffekt. YUA 19 HUS 19 CHA 18 RAB 18 NEC 17 HUN 85. In einem Gasgemisch tritt ein Synergieeffekt auf, wenn die kritische Feldstärke des Gasgemisches größer ist als die gewichtete Summe der kritischen Feldstärken der Einzelkomponenten, wobei die Gewichtung nach den Stoffmengenanteilen erfolgt [Hun 1985, Des 2022]. Es werden grundsätzlich drei unterschiedliche Synergien unterschieden [Hun 1985]. Typ C zeichnet sich dadurch aus, dass kein Synergieeffekt vorliegt, während sowohl für Typ B als auch Typ A ein Synergieeffekt beobachtet werden kann. Typ A unterscheidet sich von Typ B dadurch, dass bei Typ A ein lokales Maximum der elektrischen Feldstärke im Hinblick auf den prozentualen Anteil des stark elektronenaffinen Gases vorliegt [Hun 1985].

Bei der Mischung mehrerer Isoliergaskomponenten wird üblicherweise mit der Gaskomponente begonnen, die den geringsten Prozentsatz am Isoliergasgemisch besitzt. Einzig O₂ bildet aus Sicherheitsgründen eine Ausnahme und wird zum Schluss eingefüllt. Das Isoliergasgemisch kann entweder direkt im gasisolierten System angemischt oder vorgemischt eingefüllt werden. Die in dieser Arbeit untersuchten Isoliergasgemische wurden direkt im Prüfgefäß angemischt. Bei den in Kapitel 4 durchgeführten Durchschlagsuntersuchungen zeigen Prozentsatzmessgeräte von WIKA und DILO, dass eine homogene Mischung bei aktiver Durchmischung mit einem Lüfter in Prüfgefäßen mit Volumen von 50 l und 100 l nach etwa 1 h vorliegt. Bei der passiven Durchmischung in einem Prüfgefäß mit einem Volumen von 650 l ist eine homogene Mischung nach 72 h gegeben. Ähnliche Zeitangaben in der Gegenüberstellung der aktiven und passiven Durchmischung sind auch in [Des 2020b] für einen GIS-Aufbau mit 57,9 l gegeben. Die Angabe des Mischungsverhältnisses eines Gasgemisches kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Üblich ist der Bezug der einzelnen Isoliergaskomponenten auf die molare Masse, das Volumen, die Masse oder den Partialdruck.

In der vorliegenden Arbeit wurde aufgrund der zum Zeitpunkt der Erstellung noch fehlenden Datengrundlage zu den neuen Isoliertgaskandidaten von einem idealen Gasverhalten, wie er beispielsweise auch in [Cig 2021] angenommen wurde, ausgegangen. Dies bedeutet, dass die Komprimierbarkeit der einzelnen Gaskomponenten vernachlässigt wird. Die in der Arbeit angegebenen Mischungsverhältnisse werden daher bezogen auf den Partialdruck der einzelnen Gaskomponenten im Isoliertgasgemisch angegeben. Eine Gegenüberstellung des realen und des idealen Gasverhaltens ist im nachfolgenden Abschnitt aufgeführt.

Verhalten als ideales vs. reales Gas

Statt der Zustandsgleichungen (EOS, engl.: *equation of state*) eines idealen Gases wäre es zur Beschreibung des Druck-Temperatur Verhaltens eines realen Gases präziser, eine kubische Zustandsgleichung, wie beispielsweise die Peng-Robinson Zustandsgleichung (PR-EOS), oder eine Modifikation davon, zum Beispiel die Peng-Robinson-Stryjek-Vera Zustandsgleichung (PRSV1-EOS), zu nutzen [Cig 2021]. Um die PR-EOS auf ein Gas anwenden zu können, müssen zunächst die kritische Temperatur, der kritische Druck und der azentrische Faktor des Gases bekannt sein. Bei der Anwendung auf ein Isoliertgasgemisch müssen weiterhin der Kohäsionsdruck, das Co-Volumen und der Faktor α_G des Gasgemisches bekannt sein, die idealerweise aus Messungen ermittelt werden, aber auch aus den Eigenschaften der einzelnen Reingase abgeschätzt werden können [Cig 2021]. In [Cig 2021] wurde die Kompressibilität unterschiedlicher Gase mittels PRSV1-EOS und PR-EOS wie in Tabelle 4 aufgeführt abgeschätzt. Die Kompressibilität besagt, dass bei der Herstellung eines Isoliertgasgemisches durch die sequentielle Füllung der einzelnen Gaskomponenten die Druckdifferenz nach dem Füllen der einzelnen Gaskomponente nicht dem molekularen Anteil dieser Gaskomponente multipliziert mit dem Gesamtdruck entspricht [Cig 2021].

Tabelle 4: Abgeschätzte Kompressibilität unterschiedlicher Gase bei 30 °C und 0,1013 MPa mittels PRSV1-EOS für C4N und PR-EOS für die anderen Gase (Werte aus [Cig 2021])

Gas	C4N	C5K	O ₂	N ₂	CO ₂
Kompressibilität	0,967	0,948	0,999	1,000	0,995

Wie aus der Tabelle hervorgeht, beläuft sich der maximale relative Fehler bei der Annahme idealer Gasgemische somit auf etwa 5,2 %.

2.1.6 Überblick alternativer Isoliertgaskandidaten

Wie aus den vorangegangenen Abschnitten hervorgeht, muss ein alternatives Isoliertgas zur vollständigen Substitution des etablierten Isoliertgases SF₆ eine Vielzahl an Eigenschaften besitzen, die sich in die drei Kategorien elektrische, chemische und ökologische Eigenschaften untergliedern lassen. Zusammengefasst werden die folgenden Anforderungen an ein mögliches SF₆-Substitut gestellt [Nie 1998, Cig 2021, Kaz 2012]:

GIL/GIS-Anforderungen

- Hohe elektrische Festigkeit
- Umweltfreundlichkeit
 - Geringes GWP₁₀₀
 - Geringe atmosphärische Lebensdauer
 - ODP = 0
- Kondensationstemperatur unterhalb der minimalen Betriebstemperatur
- $LC_{50} > 10000$ ppmV
- Nicht kanzerogen / mutagen
- Chemische Stabilität
- Keine elektrisch leitfähigen oder chemisch aggressiven Zersetzungsprodukte durch Teilentladung

GIS-Anforderungen

- Gute Schaltgaseigenschaften
 - Hohe Lichtbogenbeständigkeit
 - Hohes Lichtbogenlöschvermögen
 - Keine elektrisch leitfähigen Zersetzungsprodukte durch Lichtbogeneinwirkung
 - Geringe Schallgeschwindigkeit
(besseres Strömungsverhalten bei der Lichtbogenbeblasung)

Eine essentielle Eigenschaft ist die elektrische Festigkeit des Isoliergases. Ebenso zentraler Bestandteil bei der Evaluierung möglicher Isoliergase ist GWP, was aus technischer Sicht den wohl einzigen Nachteil des etablierten Isoliergases SF₆ und den ausschlaggebenden Grund für die Suche nach alternativen Isoliergasen darstellt. Ein weiterer ökologischer Aspekt, der eng mit dem GWP verknüpft ist, ist die atmosphärische Lebensdauer des Isoliergases. Ebenso zentraler ökologischer Bestandteil ist das ODP. Da gasisolierte Anlagen in der Hochspannungstechnik üblicherweise für Drücke bis zu 1 MPa und – je nach Einsatz – für Umgebungstemperaturen bis zu –30 °C ausgelegt sind, stellt die Kondensationstemperatur eines Isoliergases ebenfalls eine wesentliche Eigenschaft dar. Nicht zuletzt müssen aus Gründen der Arbeitssicherheit auch die Toxizität, die kanzerogene Wirkung und die mutagene Wirkung der Gase sowie ihrer Zersetzungsprodukte berücksichtigt werden. Eine weitere wichtige Eigenschaft des Gases besteht darin, dass es nicht brennbar sein darf. Auch die Materialverträglichkeit muss eingehend untersucht werden, da eine Unverträglichkeit zum einen zu einer Zersetzung des Isoliergases und zum anderen zu einer Alterung verwendeter Betriebsmittel führen kann.

Eine weitere Gaseigenschaft, die für den Anwendungsfall in einer GIL eine untergeordnete Rolle spielt, jedoch für den Anwendungsfall in GIS betrachtet werden muss, ist das Lichtbogenlöschverhalten des Isoliergases.

Isoliergase, die sich aufgrund ihrer Eigenschaften zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit als die geeignetsten alternativen Isoliergaskandidaten herausgestellt haben, sind die drei in Tabelle 5 aufgeführten fluorierten Isoliergase 3MTM NovecTM 4710

(C4N), 3M™ Novec™ 5110 (C5K) und HFO-1336mzz(E) (HFO). Ebenfalls in der Tabelle gelistet sind SF₆ und die beiden Trägergase N₂ und CO₂.

Tabelle 5: Übersicht der drei alternativen Isoliergaskandidaten, der Trägergase und SF₆

Abkürzung	Summenformel	Handelsname	CAS-Nummer
C4N	C ₄ F ₇ N	3M™ Novec™ 4710	42532-60-5
C5K	C ₅ F ₁₀ O	3M™ Novec™ 5110	756-12-7
HFO	C ₄ H ₂ F ₆	HFO-1336mzz(E)	66711-86-2
SF ₆	SF ₆	Schwefelhexafluorid	2551-62-4
N ₂	N ₂	Stickstoff	7727-37-9
CO ₂	CO ₂	Kohlenstoffdioxid	124-38-9

Eine grafische Darstellung der Molekülstrukturen von SF₆ sowie der drei alternativen Isoliergaskandidaten ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

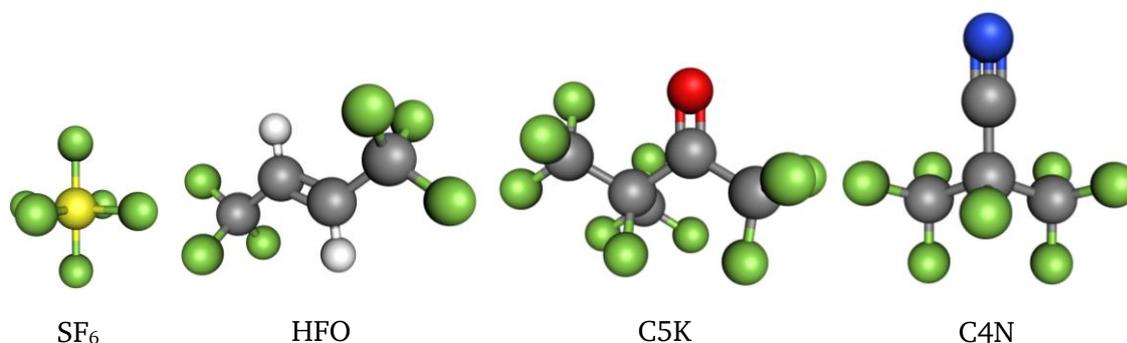


Abbildung 2.6: Darstellung der Molekülstrukturen von links nach rechts: SF₆, HFO, C5K und C4N. Graue Kugeln stehen stellvertretend für Kohlenstoff, gelbe Kugeln für Schwefel, grüne Kugeln für Fluor, rote Kugeln für Sauerstoff, blaue Kugeln für Stickstoff und weiße Kugeln für Wasserstoff (eigene Darstellung).

Die auf Basis der vorangegangenen Abschnitte gewählten relevantesten Eigenschaften dieser Isoliergase sind in der Übersicht in Tabelle 6 aufgeführt.

Alle gelisteten Isoliergase erfüllen die Grundvoraussetzung, dass diese nicht brennbar, kanzerogen oder mutagen sind. Weiterhin besitzen alle Isoliergase ein ODP von null.

Beim ersten abgebildeten Parameter handelt es sich um die auf SF₆ bezogene relative elektrische Festigkeit für einen Druck p von 0,1 MPa der unterschiedlichen Isoliergase. Da die Werte in der Literatur mitunter je nach Spannungsform variieren, wurde für einige Isoliergase ein Wertebereich angegeben. Beim zweiten abgebildeten Parameter handelt es sich um die Kondensationstemperatur der Isoliergase bei einem Druck p von 0,1 MPa. Wie aus der Tabelle hervorgeht, besitzen alle drei untersuchten alternativen fluorierten Isoliergase eine zu hohe Kondensationstemperatur, um als Reingase bei den für gasisolierte Systeme typischen Temperaturanforderungen eingesetzt zu werden. Weiterhin wurden die beiden ökologischen Aspekte Treibhauspotential GWP₁₀₀ und atmosphärische Lebensdauer τ betrachtet.

Tabelle 6: Eigenschaften ausgewählter Isoliertgase ¹[Alb 2001] ²[For 2007] ³[Myh 2013] ⁴[For 2021] ⁵[Cig 2018b] ⁶[Juh 2017] ⁷[Li 2018] ⁸[Man 2014] ⁹[Pre 2016] ¹⁰[Rab 2016] ¹¹[See 2017] ¹²[Syn 2016] ¹³[Tox 2019] ¹⁴[Uch 2007] ¹⁵[Wad 2016] ¹⁶[Sim 2015] ¹⁷[Cig 2021] ¹⁸[Tan 2017] ¹⁹[Li 2021] ²⁰[Idd 2021] ²¹[Zha 2011] ²²[Rom 2017] ²³[Rab 2015]

Gas	Elektrische Festigkeit relativ zu SF ₆	Kondensations-temperatur für 0,1 MPa in °C	GWP ₁₀₀	Atmosphärische Lebensdauer τ	LC ₅₀ 4h in ppmV
SF ₆	1	-51 ¹⁴ -64 ^{7,9,11,16}	22200 ¹ 22800 ^{2,8,9,15} 23500 ^{3,7,10,11,16} 23900 ¹⁴ 25200 ⁴ 31298 ²¹	3200 Jahre ^{1,2,3,4,10,15}	ungiftig ^{5,11,14,16}
C4N	2 ^{11,22} 2,2 ⁷ 2,4 ¹⁷	-4,7 ^{7,9,11,17,22}	2100 ^{9,11,17} 2100...2210 ¹⁰ 2210 ⁷ 2750 ⁴	32 Jahre ¹⁰ 34,5 Jahre ⁴	>10000 ²⁰ 10000...15000 ¹⁷ 12000...15000 ¹¹ 12500 ²² <15000 ⁹
C5K	1,4...1,7 ²² 2 ^{7,8,11,17}	24 ⁷ 26,5 ^{9,11} 26,9 ⁷ 27 ^{16,22}	<1 ^{10,11,17} 1 ^{7,8,9,16}	16 Tage ¹⁰	13956...20086 ¹⁷ 20000 ¹¹ >20000 ⁹ ungiftig ²²
HFO	1,8 ²³	7,43 ¹⁸ 7,5 ^{6,19} 8,5 ¹²	17,9 ⁴ 18 ^{6,19}	22 Tage ¹⁹ 122 Tage ⁴	>17000 ¹³
N ₂	0,25 ¹⁴ 0,3 ⁷ 0,34...0,37 ^{15,19} 0,29...0,4 ⁵	-198 ¹⁴ -196 ^{7,9,19} -195,8 ¹⁵	0 ^{7,10,14,15,19}	keine Angabe möglich ^{15,19}	ungiftig ^{5,14}
CO ₂	0,3 ^{7,11} 0,34 ¹⁴ 0,32...0,37 ^{15,19} 0,34...0,45 ⁵	-78 ¹⁴ -78,5 ^{7,11,15} -79 ¹⁹	1	5 bis 200 Jahre ¹ keine Angabe möglich ^{2,3,4,15,19}	ungiftig ^{5,14} >300000 ¹¹ 470000 ²⁰

Wie aus der Tabelle hervorgeht, übersteigen die elektrischen Festigkeiten der fluorinierten alternativen Isoliertgaskandidaten in der Verwendung als Reingase die elektrische Festigkeit von SF₆. Aufgrund ihrer hohen Kondensationstemperaturen können sie in typischen Anwendungen jedoch nicht als Reingase verwendet werden und müssen für ihre Anwendung als Isoliertgasgemisch mit einem Trägergas, beispielsweise N₂ oder CO₂, vermischt werden. Da die elektrische Festigkeit dieser atmosphärischen Trägergase unterhalb der der fluorinierten Isoliertgase und auch der von SF₆ liegt, verringert eine Mischung der fluorinierten Isoliertgaskandidaten mit den atmosphärischen Trägergasen deren elektrische Festigkeit je nach Mischungsverhältnis, wie am Beispiel von SF₆/N₂ im vorangegangenen Abschnitt 2.1.5 in Abbildung 2.5 ersichtlich wird. Bei der ausschließlichen Verwendung der beiden atmosphärischen Isoliertgase N₂ oder CO₂ als alternatives Isoliertgas in gasisolierten Anlagen muss aufgrund der deutlich geringeren elektrischen

Festigkeit im Vergleich zu SF₆ eine Kombination aus höherem Isoliergasdruck, größeren Schlagweiten – beispielsweise durch Vergrößerung der Baugröße – und Optimierungen der elektrischen Feldverteilung in der Anlage durchgeführt werden. Nichtsdestotrotz werden aktuell auch Ansätze mit Verwendung reiner technischer Luft verfolgt [Hof 2019, Cig 2018b].

Da es sich beim Treibhauspotential GWP₁₀₀ in Verbindung mit der atmosphärischen Lebensdauer um denjenigen Gasparameter handelt, der der Auslöser für die gewünschte Substitution von SF₆ in der Energietechnik ist, wurden ausschließlich alternative Isoliergaskandidaten mit einem deutlich kleineren GWP₁₀₀ als SF₆ in Betracht gezogen. Wie die Tabelle zeigt, besitzt lediglich C4N als Reingas mit einem GWP₁₀₀ von 2100 bis 2750 ein vergleichsweise hohes Treibhauspotential, was jedoch durch die deutlich kürzere atmosphärische Lebensdauer im Vergleich zu SF₆ und den aufgrund der Kondensationstemperatur geringeren prozentualen Anteil von C4N im Isoliergasgemisch relativiert wird. Typische Isoliergasgemische mit C4N besitzen Anteile von 2 % ... 20 % C4N [Loi 2020a, Kie 2017].

Beim letzten in der Tabelle aufgeführten Parameter handelt es sich um die Toxizität LC₅₀ über eine Expositionsdauer von 4 h. Wie im vorangegangenen Abschnitt 2.1.5 beschrieben, gelten Werte oberhalb von 20000 als ungiftig. Von den aufgeführten Isoliergasen unterschreitet lediglich C4N diesen Wert geringfügig und wird somit als Reingas in die Kategorie 4 eingeordnet. Wie bereits im Abschnitt Toxizität beschrieben, kommen laut [Cig 2021] alle Isoliergase mit einem LC₅₀ > 10000 generell als alternative Isoliergaskandidaten in Frage.

2.2 Dielektrische Eigenschaften alternativer Isoliergase

In der Literatur gibt es bereits einige Untersuchungen alternativer Isoliergaskandidaten, von denen eine Auswahl in diesem Abschnitt vorgestellt und diskutiert wird.

In [Cig 2021] wird bereits eine Übersicht bestehender Untersuchungen der in Tabelle 7 aufgeführten alternativen Isoliergaskandidaten C4N, C5K, Trifluoriodmethan (CF₃I) und Hydrofluorolefin1234ze(E) (HFO1234ze(E)) geboten, die als Basis für die im Folgenden aufgeführte Zusammenfassung genutzt und durch weitere Literaturquellen ergänzt wird.

Tabelle 7: In [Cig 2021] untersuchte alternative Isoliergaskandidaten

Isoliergaskandidat	Abkürzung	CAS-Nummer
3M™ Novec™ 4710	C4N	42532-60-5
3M™ Novec™ 5110	C5K	756-12-7
Trifluoriodmethan	CF ₃ I	2314-97-8
Hydrofluorolefin1234ze(E)	HFO1234ze(E)	29118-24-9

Bei C4N und C5K handelt es sich um die beiden Isoliergase, die auch in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Ein weiteres elektrisches Isoliergas, welches sich als Alternative für SF₆ in der Diskussion befindet und beispielsweise in [Tat 2021] auch für einen Einsatz in GIS untersucht wurde, ist CF₃I. CF₃I wurde jedoch in der vorliegenden Arbeit aufgrund des Hinweises in der ECHA-Datenbank auf mutagene Wirkung nicht betrachtet [Eur 2022b]. Ebenfalls nicht betrachtet wird HFO1234ze(E). Hierbei handelt es sich zwar ebenfalls um ein Isoliergas aus der gleichen Familie, jedoch um ein anderes als das in der vorliegenden Arbeit untersuchte HFO. Aus diesem Grund wird im Folgenden nicht im Detail auf diese beiden Isoliergase eingegangen.

2.2.1 3M™ Novec™ 4710

Thermische Stabilität und Lebensdauerabschätzung

Basierend auf [Owe 2016] wird in [Cig 2021] beschrieben, dass C4N auch in Langzeituntersuchungen über 6 Monate bei 120 °C thermische Stabilität aufweist und keine Änderung in der Gaszusammensetzung beobachtet werden kann. Eine thermisch bedingte Gaszersetzung von C4N kann erst ab 700 °C beobachtet werden [Owe 2016]. Durch den Einfluss von Teilentladungen konnten in C4N-Isoliergasgemischen jedoch bereits bei nicht erhöhten Temperaturen fluorierte Zersetzungsprodukte und ein Anstieg der Konzentration an Kohlenstoffmonoxid (CO) nachgewiesen werden [Sim 2017, Lut 2017]. Bei einer konstanten Teilentladung von 1 pC und einem Limit des zersetzten Gases von 5 % liegt die geschätzte Lebensdauer einer GIS bei 196 Jahren [Sim 2017]. Eine Übersicht kann Tabelle 8 entnommen werden.

Tabelle 8: Thermische Stabilität sowie Lebensdauerabschätzung in GIS von C4N

Eigenschaft	Wert
Thermische Stabilität	Stabil über 6 Monate bei 120 °C [Owe 2016] Gaszersetzung ab 700 °C [Owe 2016]
Lebensdauer in GIS bei 1 pC, Anteil zersetztes Gas ≤ 5 %	196 Jahre [Sim 2017]

Elektrische Festigkeit

Wie aus Tabelle 6 in Abschnitt 2.1.6 hervorgeht, beträgt die elektrische Festigkeit von C4N als Reingas mehr als das doppelte der von reinem SF₆ bei 0,1 MPa. Im homogenen elektrischen Feld beträgt die elektrische Festigkeit eines 5 % C4N / 5 % O₂ / 90 % CO₂ Isoliergasgemisches bei 0,1 MPa etwa 65 % der elektrischen Festigkeit wie von reinem SF₆ bei 0,1 MPa [Cig 2021]. Im homogenen und schwach inhomogenen elektrischen Feld besitzt das Isoliergasgemisch 20 % C4N / 80 % CO₂ etwa die gleiche elektrische Festigkeit wie reines SF₆ [Kie 2017, Loi 2020a].

Für stark inhomogene elektrische Felder ist ein höherer Anteil an C4N im Isoliergasgemisch oder ein höherer Druck erforderlich, um die gleiche elektrische Festigkeit wie reines SF₆ zu erzielen [Zha 2018]. In [Des 2020b] werden die Amplituden

der AC-Durchschlagspannungen von C4N/CO₂, SF₆ und synthetischer Luft an einer schwach inhomogenen Elektrodenanordnung untersucht. Um im Druckbereich von 0,1 MPa bis 0,6 MPa in etwa die gleiche elektrische Festigkeit wie SF₆ zu erzielen, sind für 0,1 MPa 37,7 % C4N / 62,3 % CO₂, für 0,3 MPa 24,7 % C4N / 75,3 % CO₂, für 0,5 MPa 22 % C4N / 78 % CO₂ und für 0,6 MPa 18,3 % C4N / 81,7 % CO₂ erforderlich. Für den Druckbereich von 0,1 MPa bis 0,6 MPa konnte beobachtet werden, dass mit steigendem Druck ein niedrigerer prozentualer Anteil an C4N im Isoliergasgemisch C4N/CO₂ erforderlich ist, um die gleiche elektrische Festigkeit von SF₆ zu erreichen [Des 2020b].

Im Zuge von in [Cig 2021] durchgeführten Ringversuchen in unterschiedlichen Laboren mit 5 % C4N / 5 % O₂ / 90 % CO₂ bei 0,6 MPa konnte im Vergleich zu SF₆ bei schwach inhomogener Elektrodenanordnung durchschnittlich 77 % der Durchschlagspannung unter AC, 71 % unter LI– und 79 % unter LI+ erzielt werden. Im Falle einer stark inhomogenen Elektrodenanordnung erzielte das C4N-Isoliergasgemisch 86 % der Durchschlagspannung von SF₆ unter LI– und 98 % unter LI+. Die elektrischen Festigkeiten relativ zu SF₆ sind in nachfolgender Tabelle 9 gelistet.

Tabelle 9: Elektrische Festigkeit von C4N-Isoliergasgemischen relativ zu SF₆

Eigenschaft	Wert
Elektrische Festigkeit relativ zu SF ₆	0,1 MPa [Li 2018, See 2017, Cig 2021]: $E_d(\text{C4N}) \geq 200 \% E_d(\text{SF}_6)$
	Homogenes Feld, 0,1 MPa [Cig 2021]: $E_d(5 \% \text{C4N} / 5 \% \text{O}_2 / 90 \% \text{CO}_2) = 65 \% E_d(\text{SF}_6)$
	Homogenes und schwach inhomogenes Feld [Kie 2017, Loi 2020a]: $E_d(20 \% \text{C4N} / 80 \% \text{CO}_2) \approx 100 \% E_d(\text{SF}_6)$
	Schwach inhomogenes Feld, 0,6 MPa [Cig 2021]: $U_{\text{AC,peak}}(5 \% \text{C4N} / 5 \% \text{O}_2 / 90 \% \text{CO}_2) = 77 \% U_{\text{AC,peak}}(\text{SF}_6)$ $U_{\text{LI-}}(5 \% \text{C4N} / 5 \% \text{O}_2 / 90 \% \text{CO}_2) = 71 \% U_{\text{LI-}}(\text{SF}_6)$ $U_{\text{LI+}}(5 \% \text{C4N} / 5 \% \text{O}_2 / 90 \% \text{CO}_2) = 79 \% U_{\text{LI+}}(\text{SF}_6)$
	Schwach inhomogenes Feld, $U_{\text{AC,peak}}(\text{C4N/CO}_2) = U_{\text{AC,peak}}(\text{SF}_6)$ [Des 2020b]: 0,1 MPa: 37,7 % C4N / 62,3 % CO ₂ $\approx 100 \% E_d(\text{SF}_6)$ 0,3 MPa: 24,7 % C4N / 75,3 % CO ₂ $\approx 100 \% E_d(\text{SF}_6)$ 0,5 MPa: 22 % C4N / 78 % CO ₂ $\approx 100 \% E_d(\text{SF}_6)$ 0,6 MPa: 18,3 % C4N / 81,7 % CO ₂ $\approx 100 \% E_d(\text{SF}_6)$
	Stark inhomogenes Feld [Zha 2018]: $E_d(20 \% \text{C4N} / 80 \% \text{CO}_2) < 100 \% E_d(\text{SF}_6)$
	Stark inhomogenes Feld, 0,6 MPa [Cig 2021]: $U_{\text{LI-}}(5 \% \text{C4N} / 5 \% \text{O}_2 / 90 \% \text{CO}_2) = 86 \% U_{\text{LI-}}(\text{SF}_6)$ $U_{\text{LI+}}(5 \% \text{C4N} / 5 \% \text{O}_2 / 90 \% \text{CO}_2) = 98 \% U_{\text{LI+}}(\text{SF}_6)$

Für das Isoliergasgemisch 3,7 % C4N / 96,3 % CO₂ liegt das Verhältnis $U_{LI}/U_{AC,peak}$ bei 1,33 und ist somit ähnlich dem Wert von 1,13 bis 1,34, welcher für reines SF₆ in unterschiedlichen coaxialen Anordnungen erzielt wurde [Nec 2016, Cha 2018]. Für 12,4 % C4N / 87,6 % CO₂ beträgt $U_{LI-}/U_{AC,peak}$ 1,23 und $U_{LI+}/U_{AC,peak}$ 1,47, während die Verhältnisse für 15 % C4N / 85 % N₂ mit $U_{LI-}/U_{AC,peak}$ 1,22 und mit $U_{LI+}/U_{AC,peak}$ 1,42 sehr ähnlich ausfallen. Das durchschnittliche Verhältnis $U_{LI-}/U_{AC,peak}$ lag für das C4N-Isoliergasgemisch bei 10,5 und für SF₆ etwas niedriger bei 1,15 [Cig 2021]. Das Verhältnis $U_{LI+}/U_{AC,peak}$ wiederum lag sowohl für das C4N-Isoliergasgemisch als auch für SF₆ bei 1,41 [Cig 2021]. In Tabelle 10 befinden sich die Verhältnisse $U_{LI}/U_{AC,peak}$ der Durchschlagspannungen.

Tabelle 10: Verhältnis $U_{LI}/U_{AC,peak}$ von C4N-Isoliergasgemischen und SF₆

Eigenschaft	Wert
Verhältnis $U_{LI}/U_{AC,peak}$	$U_{LI}/U_{AC,peak}$ (3,7 % C4N / 96,3 % CO ₂) = 1,33 [Nec 2016]
	$U_{LI}/U_{AC,peak}$ (SF ₆) = 1,13 ... 1,34 [Cha 2018]
	Unbekannte Homogenität, 0,6 MPa [Koc 2018]:
	$U_{LI-}/U_{AC,peak}$ (12,4 % C4N / 87,6 % CO ₂) = 1,23
	$U_{LI+}/U_{AC,peak}$ (12,4 % C4N / 87,6 % CO ₂) = 1,47
	$U_{LI-}/U_{AC,peak}$ (15 % C4N / 85 % N ₂) = 1,22
	$U_{LI+}/U_{AC,peak}$ (15 % C4N / 85 % N ₂) = 1,42
	Schwach inhomogenes Feld, 0,6 MPa [Cig 2021]:
	$U_{LI-}/U_{AC,peak}$ (5 % C4N / 5 % O ₂ / 90 % CO ₂) = 1,05
	$U_{LI-}/U_{AC,peak}$ (SF ₆) = 1,15
$U_{LI+}/U_{AC,peak}$ (5 % C4N / 5 % O ₂ / 90 % CO ₂) = 1,41	
$U_{LI+}/U_{AC,peak}$ (SF ₆) = 1,41	

Bei homogenen und schwach inhomogenen elektrischen Feldern ist, wie in Tabelle 11 dargestellt, die negative Polarität kritischer, während bei stark inhomogenen Feldern und hohen Drücken, im dargestellten Fall ab 0,95 MPa bei Ausnutzungsfaktor von 0,33, die positive Polarität kritischer ist [Cig 2021, Nec 2016, Tu 2018].

Tabelle 11: Kritischere Polarität C4N-Isoliergasgemische

Eigenschaft	Wert
Kritischere Polarität	Homogenes und schwach inhomogenes Feld: Negative Polarität [Cig 2021, Nec 2016, Tu 2018]
	Stark inhomogenes Feld und hoher Druck: Positive Polarität [Cig 2021, Nec 2016, Tu 2018]

Der Einfluss von Feuchtigkeit unter anderem auf die elektrische Festigkeit von C4N/CO₂ wird in [Des 2020a] in einer schwach inhomogenen Elektrodenanordnung unter AC-Beanspruchung betrachtet und in Tabelle 12 zusammengefasst. Das Einbringen einer Feuchtigkeit von 35 g/m³ in das Isoliergasgemisch führte zu einer Reduktion der

elektrischen Festigkeit um etwa 5 % für 3 % C4N / 97 % CO₂ und 5 % C4N / 95 % CO₂ bei 0,5 MPa. Der Autor verweist darauf, dass in der Norm [DIN 2018] die maximal zulässige Feuchtigkeit in AC-GIS umgerechnet 2,96 g/m³ beträgt, im wiederverwendbarem SF₆ und SF₆/N₂ sogar 200 g/m³ [DIN 2020a].

Tabelle 12: Einfluss der Feuchtigkeit auf die elektrische Festigkeit von C4N-Isoliergasgemischen

Eigenschaft	Wert
Einfluss Feuchtigkeit	Schwach inhomogenes Feld, 0,5 MPa, 35 g/m ³ Feuchtigkeitseintrag, [Des 2020a]:
	Reduktion $U_{AC,peak}$ (3 % C4N / 97 % CO ₂) um 5 %, Reduktion $U_{AC,peak}$ (5 % C4N / 95 % CO ₂) um 5 %

Praktische Verwendung

Zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit werden C4N-Isoliergasgemische vorwiegend in der Hochspannungsebene eingesetzt. Aufgrund der Anforderungen an die Kondensationstemperatur des Isoliergasgemisches und zur Reduktion des GWP₁₀₀ wird in neuen Anlagen und bei Anwendungen mit Schalthandlungen üblicherweise ein anwendungsabhängiges Isoliergasgemisch aus 3,5 % bis 10 % C4N / 10 % bis 13 % O₂ / Rest CO₂ verwendet, wie Tabelle 13 zeigt [Cig 2021]. Der Anteil von O₂ im Isoliergasgemisch dient der Vermeidung von Zersetzungsprodukten. Um dennoch eine elektrische Festigkeit ähnlich wie SF₆ zu erzielen wird meist der Isoliergasdruck erhöht. Bei Refill-Anwendungen wird zur Sicherstellung der Materialverträglichkeit, insbesondere mit Dichtungen und Fetten, auch ein Isoliergasgemisch von 10 % C4N, 85 % N₂ und 5 % O₂ eingesetzt [Gat 2022]. Dieses besitzt jedoch schlechtere Schalteigenschaften als das Isoliergasgemisch mit CO₂ und somit nur als Isoliergas Einsatz findet [Gat 2022].

Tabelle 13: Typische C4N-Isoliergasgemische

Eigenschaft	Wert
Typische Zusammensetzung	<u>Neuanlage</u> [Cig 2021]: 3,5 bis 10 % C4N/CO ₂ oder C4N/CO ₂ /O ₂ (Anteil O ₂ etwa 10 bis 13 %)
	<u>Refill-Anwendung</u> [Gat 2022]: 10 % C4N, 85 % N ₂ und 5 % O ₂

Aus dem ähnlichen Trend der Durchschlagsspannungen im C4N-Isoliergasgemisch zu denen in SF₆ schließt [Cig 2021], dass bestehende Designvorgaben sowie Vorgaben bezüglich der Typ- und Stückprüfung für C4N-Isoliergasgemische beibehalten werden können.

2.2.2 3M™ Novec™ 5110

Thermische Stabilität und Lebensdauerabschätzung

Isoliergasgemische mit C5K weisen analog zu Isoliergasgemischen mit C4N eine Langzeitstabilität auf, was insbesondere aus praktischen Erfahrungen in der Anwendung sowohl in der Mittel- als auch in der Hochspannung hervorgeht [Hyr 2017, Cig 2021]. Auch bei Schalthandlungen im Isoliergas im Hochspannungsleistungsschalter zeigen über mehr als zwei Jahre konstante C5K-Konzentrationen im Isoliergasgemisch [Sto 2018]. Wie bei Isoliergasgemischen mit C4N findet auch bei Isoliergasgemischen mit C5K eine Zersetzung des C5K unter Teilentladungen statt, die bei gewöhnlichen Teilentladungspegeln jedoch in einem Maße vorliegen, dass sie für den realen Anwendungsfall im Hinblick auf die elektrische Festigkeit des Isoliergasgemisches vernachlässigbar ist [Sim 2017]. Eine Übersicht kann Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Thermische Stabilität sowie Lebensdauerabschätzung in GIS von C5K

Eigenschaft	Wert
Thermische Stabilität	Langzeitstabil (Erfahrung aus MV- und HV-Anwendung) [Hyr 2017, Cig 2021] >2 Jahre konstante C5K-Konzentration bei Schalthandlungen im HV-Leistungsschalter [Sto 2018]
Lebensdauer GIS	Zersetzung C5K durch TE für realen Anwendungsfall vernachlässigbar [Sim 2017]

Elektrische Festigkeit

Das Isoliergas C5K besitzt als Reingas, wie auch aus Tabelle 6 in Abschnitt 2.1.6 ersichtlich wird, die etwa zweifache elektrische Festigkeit wie reines SF₆ bei 0,1 MPa [Li 2018, Man 2014, See 2017, Cig 2021]. Im Isoliergasgemisch mit Luft kann bei unterschiedlichen Drücken im quasi-homogenen elektrischen Feld eine etwa 10 % höhere elektrische Festigkeit als mit CO₂ bei gleichen Anteilen C5K im Isoliergasgemisch beobachtet werden [Cig 2021, Man 2014]. Ein 5 % C5K / 95 % Luft Isoliergasgemisch auf 0,7 MPa besitzt in etwa die gleiche elektrische Festigkeit wie reines SF₆ auf 0,4 MPa [Man 2014].

Bei einem konstanten Isoliergasdruck von 0,6 MPa erzielten 3,8 % C5K / 96,2 % N₂ und 3 % C5K / 97 % CO₂ in etwa die gleiche elektrische Festigkeit wie 20 % SF₆ / 80 % N₂ [Koc 2018]. 8 % C5K / 92 % N₂ entspricht der elektrischen Festigkeit von 82 % SF₆ / 18 % N₂ [Cig 2021].

Für Anwendungen in der Mittelspannung für 0,13 MPa und –15 °C besitzt das C5K / trockene Luft Isoliergasgemische mehr als 75 % der elektrischen Festigkeit von SF₆ bei gleichem Druck und somit mehr als die doppelte elektrische Festigkeit von trockener Luft bei gleichem Druck [Cig 2021]. Bei Anwendungen im Leistungsschalter in der Hochspannung wird ein C5K / CO₂ / O₂ Isoliergasgemisch bevorzugt. Bis –5 °C erzielt dieses Gemisch etwa die gleiche elektrische Festigkeit wie SF₆, jedoch nur bei einem leicht

erhöhtem Druck, der in der Literatur nicht genauer definiert wird [Cig 2021]. Auch für C5K-Isoliergasgemische wurden in [Cig 2021] Ringversuche in unterschiedlichen Laboren durchgeführt. Hierbei wurden zwei unterschiedliche Isoliergasgemische verwendet: 13,6 % C5K / 86,5 % trockene Luft bei 0,13 MPa für Mittelspannungsanwendungen und 5,5 % C5K / 11 % O₂ / 83,5 % CO₂ bei 0,6 MPa für Hochspannungsanwendungen.

Das C5K-Isoliergasgemisch für die Mittelspannungsanwendung erzielte in einer schwach inhomogenen Elektrodenanordnung 71 % der elektrischen Festigkeit von SF₆ gleichen Drucks unter AC, 76 % unter LI– und 76 % unter LI+.

Das C5K-Isoliergasgemisch für die Hochspannungsanwendung erreichte in einer schwach inhomogenen Elektrodenanordnung 62 % der AC-, 61 % der LI– und 62 % der LI+-Festigkeit von reinem SF₆ gleichen Druckes. Im Falle einer stark inhomogenen Elektrodenanordnung erzielte das C5K-Isoliergasgemisch 85 % der elektrischen Festigkeit von SF₆ unter LI– und 99 % unter LI+. Eine Zusammenfassung der elektrischen Festigkeit von C5K-Isoliergasgemischen gegenüber SF₆ ist in Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 15: Elektrische Festigkeit von C5K-Isoliergasgemischen relativ zu SF₆

Eigenschaft	Wert
	E_d (C5K) \approx 200 % E_d (SF ₆) bei 0,1 MPa [Li 2018, Man 2014, See 2017, Cig 2021]
	Quasi-homogenes Feld: E_d (C5K/Luft) = 110% E_d (C5K/CO ₂) [Cig 2021, Man 2014] E_d (5%C5K/95% Luft, 0,7 MPa) = E_d (SF ₆ , 0,4 MPa) [Man 2014] E_d (3,8%C5K/96,2%N ₂ , 0,6 MPa) = E_d (3%C5K/97%CO ₂ , 0,6 MPa) = E_d (20%SF ₆ /80%N ₂ , 0,6 MPa) [Koc 2018] E_d (8%C5K/92%N ₂ , 0,5 MPa) = E_d (82%SF ₆ /18%N ₂ , 0,5 MPa)[Cig 2021]
	MV-Anwendung [Cig 2021]: E_d (C5K/Luft) > 75 % E_d (SF ₆) E_d (C5K/Luft) > 200 % E_d (Luft)
Elektrische Festigkeit, relativ zu SF ₆ und zu unterschiedlichen Trägern	MV-Anwendung (0,13 MPa), schwach inhomogenes Feld [Cig 2021]: $E_{d,AC}$ (13,6 % C5K/86,5 % Luft) = 71 % $E_{d,AC}$ (SF ₆) $E_{d,LI-}$ (13,6 % C5K/86,5 % Luft) = 76 % $E_{d,LI-}$ (SF ₆) $E_{d,LI+}$ (13,6 % C5K/86,5 % Luft) = 76 % $E_{d,LI+}$ (SF ₆)
	HV-Anwendung (Leistungsschalter) bis –5 °C [Cig 2021]: E_d (C5K/CO ₂ /O ₂ , erhöhter Druck) = E_d (SF ₆ , Normaldruck)
	HV-Anwendung (0,6 MPa), schwach inhomogenes Feld [Cig 2021]: $E_{d,AC}$ (5,5 % C5K/11 % O ₂ /83,5 % Luft) = 62 % $E_{d,AC}$ (SF ₆) $E_{d,LI-}$ (5,5 % C5K/11 % O ₂ /83,5 % Luft) = 61 % $E_{d,LI-}$ (SF ₆) $E_{d,LI+}$ (5,5 % C5K/11 % O ₂ /83,5 % Luft) = 62 % $E_{d,LI+}$ (SF ₆)
	HV-Anwendung (0,6 MPa), stark inhomogenes Feld [Cig 2021]: $E_{d,LI-}$ (5,5 % C5K/11 % O ₂ /83,5 % Luft) = 85 % $E_{d,LI-}$ (SF ₆) $E_{d,LI+}$ (5,5 % C5K/11 % O ₂ /83,5 % Luft) = 99 % $E_{d,LI+}$ (SF ₆)

In [Koc 2018] betragen die Verhältnisse $U_{LI-}/U_{AC,peak}$ 1,32 und $U_{LI+}/U_{AC,peak}$ 1,44 für 3,8 % C5K / 96,2 % CO₂, während die Verhältnisse für 3,2 % C5K / 96,8 % N₂ mit $U_{LI-}/U_{AC,peak}$ 1,21 und $U_{LI+}/U_{AC,peak}$ 1,32 etwas geringer ausfielen. Das Verhältnis von $U_{LI-}/U_{AC,peak}$ für die Mittelspannungsanwendung des C5K-Isoliergasgemisch in den in [Cig 2021] durchgeführten Ringversuchen betrug 1,67 und für SF₆ etwas niedriger bei 1,56. Auch das Verhältnis von $U_{LI+}/U_{AC,peak}$ lag für das C5K-Isoliergasgemisch bei 1,67 und für SF₆ etwas niedriger bei 1,59. Für die Hochspannungsanwendung war das Verhältnis von $U_{LI-}/U_{AC,peak}$ im schwach inhomogenen elektrischen Feld 1,11 für das C5K-Isoliergasgemisch und 1,14 für SF₆. Das Verhältnis von $U_{LI+}/U_{AC,peak}$ wiederum betrug 1,43 für das C5K-Isoliergasgemisch und 1,45 für SF₆. Die Gegenüberstellung der Verhältnisse der $U_{LI}/U_{AC,peak}$ von C5K-Isoliergasgemischen ist in Tabelle 16 gelistet.

Tabelle 16: Verhältnis $U_{LI}/U_{AC,peak}$ von C5K-Isoliergasgemischen und SF₆

Eigenschaft	Wert
Verhältnis $U_{LI}/U_{AC,peak}$	Unbekannte Homogenität, 0,6 MPa [Koc 2018]:
	$U_{LI-}/U_{AC,peak}$ (3,8 % C5K / 96,2 % CO ₂) = 1,32
	$U_{LI+}/U_{AC,peak}$ (3,8 % C5K / 96,2 % CO ₂) = 1,44
	$U_{LI-}/U_{AC,peak}$ (3,2 % C5K / 96,8 % N ₂) = 1,21
	$U_{LI+}/U_{AC,peak}$ (3,2 % C5K / 96,8 % N ₂) = 1,32
	MV-Anwendung (0,13 MPa), schwach inhomogenes Feld [Cig 2021]:
	$E_{d,LI-}/E_{d,AC,peak}$ (13,6 % C5K/86,5 % Luft) = 1,67
	$E_{d,LI-}/E_{d,AC,peak}$ (SF ₆) = 1,56
	$E_{d,LI+}/E_{d,AC,peak}$ (13,6 % C5K/86,5 % Luft) = 1,67
	$E_{d,LI+}/E_{d,AC,peak}$ (SF ₆) = 1,59
	HV-Anwendung (0,6 MPa), schwach inhomogenes Feld [Cig 2021]:
	$E_{d,LI-}/E_{d,AC,peak}$ (5,5 % C5K/11 % O ₂ /83,5 % Luft) = 1,11
	$E_{d,LI-}/E_{d,AC,peak}$ (SF ₆) = 1,14
	$E_{d,LI+}/E_{d,AC,peak}$ (5,5 % C5K/11 % O ₂ /83,5 % Luft) = 1,43
	$E_{d,LI+}/E_{d,AC,peak}$ (SF ₆) = 1,45

Analog zu C4N-Isoliergasgemischen zeigt sich auch für das Isoliergasgemisch 6 % C5K / 82 CO₂ / 12 % O₂, dass im schwach inhomogenen elektrischen Feld ($\eta = 0,74$) von 0,1 MPa bis 1,1 MPa die negative Polarität kritischer ist als die positive Polarität, jedoch mit der Ausnahme, dass für 0,1 MPa die positive Polarität kritischer ist [Shi 2018]. Bei stark inhomogenen elektrischen Feldern ist auch für C5K-Isoliergasgemische die positive Polarität kritischer [Shi 2018]. Dies ist auch in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Kritischere Polarität C5K-Isoliergasgemische

Eigenschaft	Wert
Kritischere Polarität	6 % C5K / 82 CO ₂ / 12 % O ₂ , 0,1 MPa ... 1,1 MPa [Shi 2018]:
	Schwach inhomogenes Feld ($\eta = 0,74$): Negative Polarität
	Stark inhomogenes Feld: Positive Polarität

Praktische Verwendung

C5K wird für einen Einsatz in der Mittelspannung üblicherweise als Isoliergasgemisch gemischt mit trockener Luft und in der Hochspannung mit CO₂ und O₂ oder auch mit N₂ und trockener Luft verwendet [Cig 2021]. Für eine Anwendung bis –15 °C wird ein Isoliergasgemisch von 2 % C5K / 98 % N₂ mit 0,5 MPa als Optimum genannt [Cig 2021]. Tabelle 18 zeigt eine Übersicht dieser Isoliergasgemische.

Tabelle 18: Typische C5K-Isoliergasgemische

Eigenschaft	Wert
Typische Zusammensetzung	C5K/trockene Luft (MV), C5K/CO ₂ /O ₂ (HV, Leistungsschalter), C5K/N ₂ /trockene Luft (HV) [Cig 2021] Anwendung bis –15 °C: Optimum: 2 % C5K / 98 % N ₂ , 0,5 MPa [Cig 2021]

Analog zum C4N-Isoliergasgemisch zeigen auch die Durchschlagsfestigkeiten der C5K-Isoliergasgemische für die Mittelspannungs- und für die Hochspannungsanwendung einen ähnlichen Trend wie SF₆. Somit ist auch hier die gleiche Schlussfolgerung möglich, dass bestehende Designvorgaben sowie Vorgaben bezüglich der Typ- und Stückprüfung für C5K-Isoliergasgemische beibehalten werden können. Zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit finden C5K-Isoliergasgemische überwiegend Anwendung in der Mittelspannungsebene [Trö 2022].

2.2.3 HFO-1336mzz(E)

Es gibt mehrere Isoliergase der Familie der Hydrofluoroolefine, die sich im Fokus der Untersuchung als alternative Isoliergase befinden. Um Verwechslungen auszuschließen, ist auf die dem HFO angefügten detaillierten Beschreibung der Molekülstruktur beziehungsweise ihrer eindeutig zuzuordnenden CAS-Nummer zu achten.

Thermische Stabilität und Lebensdauerabschätzung

Bei der Untersuchung der thermischen Stabilität des in der vorliegenden Arbeit betrachteten HFO-1336mzz(E) wurde unterhalb von 500 °C nahezu keine Gaszersetzung festgestellt [Zha 2020]. Weiterhin zeigte sich nach AC-Durchschlägen ein schwarzer Niederschlag eines Feststoffes auf den Elektroden, der bei dem Isoliergasgemisch mit N₂ stärker ausgeprägt ist als mit CO₂ [Li 2021]. Bei 100 aufeinanderfolgenden AC-Durchschlägen in 20 % HFO / 80 % CO₂ und 20 % HFO / 80 % N₂ trat ein dekonditionierender Effekt – sprich eine Abnahme der elektrischen Durchschlagsfestigkeit – bei beiden Gasen auf, der jedoch bei dem Isoliergasgemisch mit N₂ stärker ausgeprägt ist [Li 2021]. Aus diesen Gründen schließt [Li 2021], dass das Isoliergasgemisch mit dem Trägergas CO₂ besser für den Einsatz als elektrisches Isoliergas geeignet ist als das mit N₂. Hinsichtlich der Materialkompatibilität konnte für HFO-1336mzz(E) eine gute Kompatibilität mit den herkömmlichen metallischen und nicht-metallischen Materialien

nachgewiesen werden [Juh 2017]. Eine Übersicht dieser Eigenschaften ist in Tabelle 19 gelistet.

Tabelle 19: Thermische Stabilität sowie Lebensdauerabschätzung in GIS von HFO

Eigenschaft	Wert
Thermische Stabilität	Bis 500 °C nahezu keine Gaszersetzung [Zha 2020]
Lebensdauer GIS	Schwarzer Feststoffniederschlag nach AC-Durchschlägen in HFO/N ₂ (stärker) und HFO/CO ₂ (schwächer) [Li 2021]
	Dekonditionierender Effekt über 100 AC-Durchschläge in 20 % HFO/N ₂ (stärker) und 20 % HFO/CO ₂ (schwächer) [Li 2021]
	Gute Kompatibilität mit herkömmlichen GIS-Materialien [Juh 2017]

Elektrische Festigkeit

Als Reingas besitzt das in der vorliegenden Arbeit untersuchte HFO etwa die 1,8-fache elektrische Festigkeit von reinem SF₆, wie auch aus Tabelle 6 in Abschnitt 2.1.6 ersichtlich wird [Rab 2015]. Für dieses HFO wurden in [Li 2021] Versuche im quasi-homogenen elektrischen Feld durchgeführt. Dabei konnte ein linearer Anstieg der elektrischen Festigkeit unterschiedlicher HFO-Isoliergasgemische aus 10 % bis 30 % HFO/CO₂ sowohl mit steigendem Druck von 0,1 MPa bis 0,3 MPa als auch mit steigendem Anteil an HFO unter AC-Beanspruchung festgestellt werden. Das Isoliergasgemisch 20 % HFO/CO₂ erzielt bei einem Isoliergasdruck von 0,25 MPa und 0,3 MPa etwa 80 % respektive 95,2 % der elektrischen Festigkeit von reinem SF₆ bei 0,1 MPa. Tabelle 20 bietet eine Übersicht der elektrischen Festigkeit von HFO-Isoliergasgemischen relativ zu SF₆.

Tabelle 20: Elektrische Festigkeit von HFO-Isoliergasgemischen relativ zu SF₆

Eigenschaft	Wert
Elektrische Festigkeit relativ zu SF ₆ sowie abhängig vom Partial-/Isoliergasdruck	$E_d(\text{HFO}) \approx 180 \% E_d(\text{SF}_6)$ bei 0,1 MPa [Rab 2015]
	Linearer Anstieg $E_{d,AC}(\text{HFO}/\text{CO}_2)$ mit p zwischen 0,1 MPa und 0,3 MPa [Li 2021]
	Linearer Anstieg $E_{d,AC}(\text{HFO}/\text{CO}_2)$ mit Anteil HFO zwischen 10 % HFO und 30 % HFO [Li 2021]
	$E_{d,AC}(20\% \text{HFO}/80\% \text{CO}_2, 0,25 \text{MPa}) = 0,8 E_{d,AC}(\text{SF}_6, 0,1 \text{MPa})$ [Li 2021]
	$E_{d,AC}(20\% \text{HFO}/80\% \text{CO}_2, 0,3 \text{MPa}) = 0,952 E_{d,AC}(\text{SF}_6, 0,1 \text{MPa})$ [Li 2021]

2.2.4 Empfohlene Untersuchungen

In [Cig 2021] werden Empfehlungen für weitere Untersuchungen an alternativen Isoliergasen ausgesprochen, die in Tabelle 21 zusammengefasst und mit den in dieser Arbeit gewählten Parametern gegenübergestellt sind. Wie aus der Gegenüberstellung hervorgeht, stehen die vorgeschlagenen Parameter in guter Übereinstimmung mit den in der vorliegenden Arbeit gewählten Parametern.

Tabelle 21: Gegenüberstellung der in [Cig 2021] empfohlenen und in der vorliegenden Arbeit verwendeten Parameter zur Untersuchung alternativer Isoliergase

	Typische Parameter für HV-Anwendung [Cig 2021]	In den Kapiteln bzw. Abschnitten der vorliegenden Arbeit gewählter Parameter
Elektrodenanordnung	Kugel-Platte-Anordnung Koaxiale Anordnung	Abschnitt 4.3.1: Kugel-Platte-Anordnung Abschnitt 4.3.2: Anaxiale Zylinderanordnung Abschnitt 4.4: Koaxiale Zylinderanordnung Kapitel 5: Kugel-Platte-Anordnung Kapitel 6: Rogowski-Profil und Kugel-Platte-Anordnung Kapitel 7: Koaxiale Zylinderanordnung
Schlagweite	30 mm bis 100 mm	Abschnitt 4.3.1: 10 mm Abschnitt 4.3.2: 25 mm Abschnitt 4.4: 160 mm Kapitel 5: 19 mm Kapitel 6: 5 mm und 10 mm Kapitel 7: 160 mm
Homogenität	Schwach inhomogen (0,45 bis 0,8)	Abschnitt 4.3.1: 0,64 Abschnitt 4.3.2: 0,78 Abschnitt 4.4: 0,57 Kapitel 5: 0,38 Kapitel 6: 0,73, 0,85 und ≈ 1 Kapitel 7: 0,57
Elektrodenoberfläche (R_t)	15 μm bis 50 μm	Abschnitt 4.3.1: $\approx 10 \mu\text{m}$ Abschnitt 4.3.2: $\approx 30 \mu\text{m}$ Abschnitt 4.4: $\approx 20 \mu\text{m}$ Kapitel 5: $\approx 20 \mu\text{m}$ Kapitel 6: $\approx 1 \mu\text{m}$ bis $\approx 2 \mu\text{m}$ Kapitel 7: $\approx 20 \mu\text{m}$
Isoliergasdruck	0,5 MPa bis 0,8 MPa	Abschnitte 4.3.1, 4.3.2 und 4.3.6: 0,5 MPa und 0,7 MPa Kapitel 5: 0,3 MPa Kapitel 6: 0,075 MPa bis 0,5 MPa Kapitel 7: 0,5 MPa
Trärgase	CO ₂ , N ₂ und O ₂	Abschnitte 4.3.1, 4.3.2 und 4.3.6: CO ₂ und N ₂ Kapitel 5: CO ₂ und N ₂ Kapitel 6: CO ₂ und N ₂ Kapitel 7: CO ₂
Spannungsbeanspruchung	AC, LI, SI und VFT	Abschnitte 4.3.1, 4.3.2 und 4.3.6: AC und LI Kapitel 5: AC Kapitel 6: DC Kapitel 7: AC

Für Hochspannungsanwendungen werden insbesondere Untersuchungen mit Kugel-Platte-Anordnung und – wegen der hohen Praxisrelevanz – mit koaxialer Elektrodenanordnungen empfohlen. Als relevante Schlagweiten wird ein Bereich zwischen 30 mm bis

100 mm angegeben. Im Hinblick auf die Homogenitätsgrade η sind insbesondere schwach inhomogene Elektrodenanordnungen mit Homogenitätsgraden von 0,45 bis 0,8 von Interesse. Bezüglich der Elektrodenoberfläche wird eine Elektrodenrauheit R_t von 15 μm bis 50 μm genannt. Weiterhin wird in [Cig 2021] aufgeführt, dass es sich bei den üblichen Materialien der Elektroden zwar meist um Kupfer und Aluminium handelt, das Elektrodenmaterial jedoch nahezu keinen Einfluss auf die elektrische Festigkeit der Gasstrecke ausübt. Um eine größere Beständigkeit der Elektroden gegenüber Oberflächenerosion im Falle einer hohen Anzahl an Durchschlägen zu gewährleisten, wird die Verwendung von Stahl-Elektroden empfohlen. Hinsichtlich der Isoliergase wird ein Isoliergasdruck von 0,5 MPa bis 0,8 MPa als relevant für Hochspannungsanwendungen betrachtet. Als Trägergase werden CO_2 , N_2 und O_2 genannt. CO_2 wird in Isoliergasgemischen zur Lichtbogenunterbrechung verwendet und O_2 wird genutzt, um den Anteil von Zersetzungsprodukten infolge von Lichtbogeneinwirkungen zu reduzieren. Bezüglich der Anforderungen an die Kondensationstemperaturen in HV-GIL ist die in [IEC 2011] normativ festgelegte minimale Temperatur von $-10\text{ }^\circ\text{C}$ geführt. Als relevante Spannungsbeanspruchungen werden AC, LI, SI und schnelle transiente Spannungen (VFT) genannt.

2.3 Gasisolierte Leitungen

In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf gasisolierten Leitungen (GIL). Diese stellen eine Technologie zur elektrischen Energieübertragung dar und werden im Energieübertragungsnetz ergänzend zu Kabeln und Freileitungen eingesetzt.

2.3.1 Aufbau

Der grundsätzliche Aufbau einer GIL ähnelt dem einer GIS: sie besteht aus einem Leiter auf Hochspannungspotential, der von festen Stützisolatoren innerhalb eines geerdeten Gehäuses zentriert wird. Der Raum zwischen Leiter und Gehäuse ist mit einem elektrischen Isoliergas mit erhöhtem Druck gefüllt. Einer der Hauptunterschiede von GIL und GIS besteht darin, dass in GIL – wie auch in den relevanten Normen beschrieben – keine Schaltheilungen durchgeführt werden [IEC 2011, IEE 2017].

Generell kann die GIL einphasig mit nur einem Innenleiter im Gehäuse oder dreiphasig mit drei Innenleitern im Gehäuse ausgeführt sein. Der dreiphasige Aufbau unterbindet jedoch weder Leiter-Leiter Fehler noch die signifikanten zwischen den Leitern wirkende Kräfte, weshalb er in realen Anwendungen in der Regel nicht verwendet wird [Cig 2015]. Der Innenleiter besteht aus einem hochleitfähigen Aluminium oder einer Aluminiumlegierung und wird in einer rohrförmigen Bauweise ausgeführt, was nicht nur der Materialeinsparung und der Vergrößerung des Radius des Innenleiters zur Verringerung der Feldstärke am Innenleiter dient, sondern auch auf den Stromverdrängungseffekt unter AC-Beanspruchung zurückzuführen ist [Cig 2015].

Neben der in regelmäßigen Abständen stattfindenden Zentrierung des Innenleiters durch Stützisolatoren werden zusätzlich auch Scheibenisolatoren verwendet, die sowohl gasdurchlässig als auch gasdicht ausgeführt sein können. Stützisolatoren können in Anordnungen entweder mit je einem, zwei oder drei – die insbesondere bei vertikaler Verlegung der GIL Anwendung finden – einzelnen Isolatoren ausgeführt werden und liegen entweder beweglich auf der Außenhülle auf oder sind fest mit dieser verbunden [Koc 2012]. Durch die gasdichte Ausführung der Scheibenisolatoren lassen sich GIL in ihrer Länge in mehrere Gasräume unterteilen, was bei Wartungsarbeiten und im Falle eines Hüllenbruchs von Nutzen ist. Üblicherweise bestehen diese Isolatoren aus Epoxidharz mit Silizium oder Aluminiumoxid als Füllmaterial [Koc 2012].

Die Kompensation von thermischer Ausdehnung erfolgt am Innenleiter meist durch Gleitkontakte und bei freibeweglichem Gehäuse durch Bälge [Cig 2003]. Die Abmessungen der GIL, also der Leiter- und Gehäusedurchmesser sowie die Gehäusedicke, und auch die Isoliergaszusammensetzung und der -druck werden durch die dielektrischen, thermischen und mechanischen Anforderungen vorgegeben [Cig 2003]. Entlang der tiefsten Stelle des Außenleiters befindet sich die in Abschnitt 2.4 beschriebene Partikelfalle. Ein beispielhafter Aufbau einer GIL kann der in Abbildung 2.7 dargestellten Grafik entnommen werden.

Generell werden zwei Generationen von GIL unterschieden: in der ersten Generation wurden GIL aus Standard-GIS-Komponenten hergestellt, die keine Biegeradien ermöglichen und reines SF₆ als Isoliergas genutzt. In der aktuellen zweiten Generation werden zur Reduktion des GWP₁₀₀ und zur Einsparung von Kosten häufig Isoliergasgemische aus 20 % SF₆/ 80 % N₂ respektive 60 % SF₆/ 40 % N₂ verwendet, und Biegeradien von typischerweise 400 m sind möglich [Koc 2012, Cig 2015].

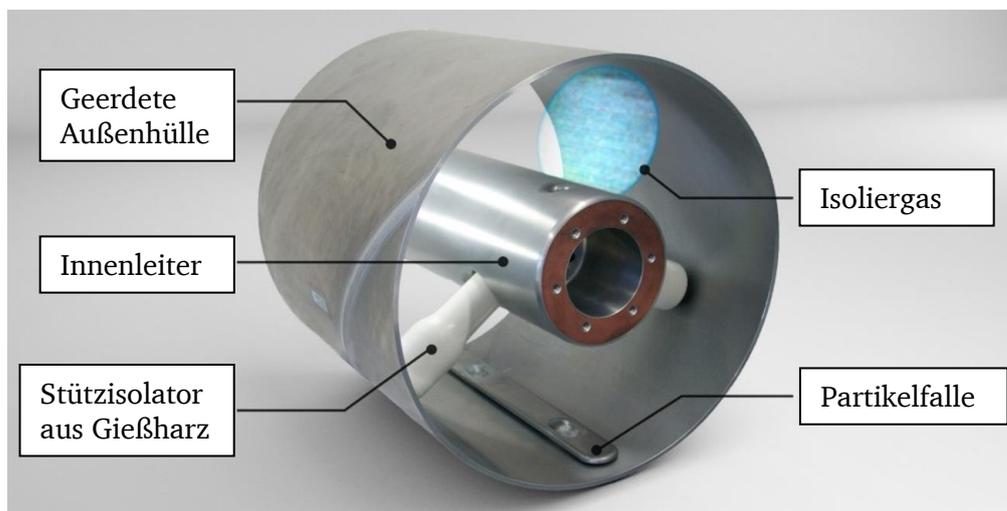


Abbildung 2.7: Beispielhafter Aufbau einer gasisolierten Leitung mit zylinderförmigen Stützisolatoren nach [Sie 2019]

2.3.2 Einsatz

GIL können auf Stahlkonstruktionen oberirdisch, direkt in der Erde oder im Tunnel, Kanal oder Schacht verlegt werden. Die Anforderung an die Mindesttemperatur einer GIL liegt bei -10 °C bis -30 °C , wobei für eine direkt in der Erde befindlichen GIL und einer GIL in Tunnel-, Kanal- oder Schachtanwendung die Annahme einer Mindesttemperatur von -10 °C besteht [Koc 2018]. Typische Anwendungsfälle von GIL sind die Verbindungen innerhalb von Kraftwerken vom Hochspannungstransformator zur Hochspannungsschaltanlage oder zur Freileitung, die Verbindung von GIS und Freileitungen und der Einsatz als Sammelschiene innerhalb gasisolierter Umspannwerke [Koc 2012]. Die oberirdische Verlegung findet hierbei meist in elektrischen Schaltfeldern zur Verbindung von GIS und anderen Komponenten, wie Transformatoren, Freileitungen oder anderen Abschnitten eines bestehenden Umspannwerks Verwendung [IEE 2017, Cig 2015]. Weiterhin eignen sich GIL insbesondere für den Einsatz in Anwendungen mit strengen Regularien bezüglich des elektromagnetischen Einflusses, was zum Beispiel bei Flughäfen und Umweltschutzgebieten zutrifft [Jia 2017]. Ein weiteres potentiell Einsatzgebiet von GIL sind Offshore-Windparks [Koc 2013].

2.3.3 Technische Daten und Betriebserfahrung

Zu Beginn der Entwicklung von GIL wurden Untersuchungen sowohl an AC-GIL als auch an DC-GIL durchgeführt, wobei Probleme bezüglich der dielektrischen Stabilität des Isoliersystems unter DC-Beanspruchung auftraten und daher zunächst die AC-GIL Entwicklung weiter verfolgt wurde [Koc 2012]. Aus diesem Grund handelt es sich bei den meisten in Betrieb befindlichen GIL um AC-Anwendungen. Mittlerweile gibt es weltweit verteilte Anwendungen von GIL mit Spannungen von 145 kV bis zu 800 kV, Strömen bis zu 8000 A und Kurzschlussleistungen bis zu 100 kA mit einer gesamten verbauten GIL-Länge von mehr als 300 km [Koc 2012]. In den mittlerweile mehr als 40 Jahren Betriebserfahrung mit GIL kam es bislang zu keinem größeren Schadensfall [Koc 2018]. Eine Untersuchung der Alterungsmechanismen in gasisolierten Systemen zeigte, dass keine Alterungsmechanismen festzustellen sind, falls sich die Teile des Isoliersystems im einwandfreien Zustand gemäß den Qualitätsanforderungen befinden [Tas 2002, Cig 2015]. Auch nach 30 Jahren wurde keine Alterung festgestellt, die die Langzeitleistung erkennbar beeinträchtigen würde, weshalb die Lebensdauer auf weit über 30 Jahre geschätzt wurde [Tas 2002].

2.3.4 Gasdichtigkeit

Da es sich bei gasisolierten Leitungen um gekapselte Gasräume auf Überdruck handelt, gelangt ein geringer Teil des Isoliergases über die Zeit nach außen. Diese Leckrate wird in Prozent pro Jahr angegeben und wird von der Internationalen Elektrotechnischen Kommission in der Norm 62271-203 für gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen für

Bemessungsspannungen über 52 kV auf 0,5 % beschränkt [IEC 2011]. Die meisten gasisolierten Systeme (GIS und GIL) weisen jährliche Leckraten von weniger als 0,1 % auf [Kaw 2008, Dul 2015]. GIL können geschraubt oder geschweißt ausgeführt sein. Gasverluste treten im Betrieb nahezu ausschließlich an den O-Ringen der Flansche auf und liegen im Falle von geschweißten GIL mit einer Länge von etwa 1 km aufgrund des großen Verhältnisses von Gasvolumen zu O-Ringe im Bereich von ppm [Mag 2018]. Durch die Alterung der O-Ringe nimmt über die Jahre hinweg jedoch die Wahrscheinlichkeit zu, dass Gaslecks entstehen. Nach etwa 28 Jahren beträgt die Wahrscheinlichkeit von Gaslecks bereits 2 % [Kaw 2008]. Es gibt jedoch auch Veröffentlichungen, die für geschweißte GIL von keinen merkbaren Gasverlusten über 40 Jahren Betrieb berichten [Koc 2018]. Aufgrund des vergleichsweise sehr großen Gasvolumens einer GIL wird jedoch im Fall einer Leckage eine große Menge des Isoliergases freigesetzt.

2.4 Partikelphysik elektrisch leitfähiger Partikel

Seit fast 50 Jahren haben sich die meist mit SF₆ gefüllten gasisolierten Systeme bereits als sehr zuverlässig erwiesen. Bei der Betrachtung der über die Jahre auftretenden Fehler stellten sich frei bewegliche, elektrisch leitfähige Partikel als eine der häufigsten Fehlerursachen heraus [Cig 1992b, Cig 1992a, Tas 1999, Wan 2021, Cig 2021]. Partikel gelangen insbesondere bei der Herstellung und der Montage in GIL und GIS [Pir 2020, Cig 2013, Ber 2014]. Dies geschieht beispielsweise durch unzureichende Reinigung von Spänen während der Fertigung, Abrieb während der Montage oder Metallstaub bei Lichtbogeneinflüssen im Betrieb [Wan 2021].

Durch die Bewegung elektrisch leitfähiger Partikel innerhalb der gasisolierten Systeme kommt es zu lokalen elektrischen Feldüberhöhungen, was die elektrische Festigkeit herabgesetzt und somit einen Durchschlag der Isoliergasstrecke begünstigt. Die elektrische Feldüberhöhung ist hierbei abhängig von der Position des Partikels, seiner Ausrichtung und seiner Geometrie. Größere Partikel und geringere Distanzen zu den Elektroden führen zu höheren elektrischen Feldüberhöhungen. Weiterhin wird die Isoliergasstrecke gekürzt und freie Ladungsträger werden durch Teilentladung am Partikel freigesetzt [Wan 2021]. Zudem können Partikel, die im Zuge ihrer Bewegung auf eine Isolatoroberfläche gelangen, dort verbleiben und die Oberfläche langfristig durch Teilentladungen beschädigen und einen Isolatorüberschlag begünstigen [Mou 2001, Ber 2014, Wan 2021]. Durch diese Effekte können frei bewegliche, elektrisch leitfähige Partikel die Isolationsfestigkeit einer GIL sowohl kurz- als auch langfristig verringern.

Abschnitt 2.4.1 bietet eine Übersicht und Eingruppierung typischer untersuchter Partikelgeometrien. In Abschnitt 2.4.2 und Abschnitt 2.4.3 werden die Kräfte, die auf frei bewegliche, elektrisch leitfähige Partikel im elektrischen Feld wirken, erarbeitet, da diese das Bewegungsverhalten der Partikel steuern. Weiterhin werden die Formeln zur Berechnung der Abhebefeldstärken unterschiedlicher Partikelgeometrien aus der

Literatur vorgestellt. Je nach Anwendung haben sich unterschiedliche Gegenmaßnahmen, wie Partikelfallen, Oberflächenbehandlungen der Isolatoren und dielektrische Beschichtungen der Elektroden, etabliert, auf die in Abschnitt 2.4.4 näher eingegangen wird.

2.4.1 Übersicht typischer Partikelgeometrien

Die in der Praxis vorkommenden Partikel können in beliebigen Formen und Größen auftreten. In gasisolierten elektrischen Anlagen sind die elektrisch leitfähigen Partikel aufgrund der dort verwendeten Materialien üblicherweise aus Aluminium oder aus Stahl, in wenigen Fällen aus Kupfer.

Die physikalisch am leichtesten zu betrachtende Partikelform stellt das kugelförmige Partikel dar. Kugelförmige Partikel können sich nicht aufrichten, und auch die Zusammenstöße mit den Elektroden sind unabhängig von der Ausrichtung des Partikels [Ber 2013]. Gleichzeitig besitzen kugelförmige Partikel jedoch auch die geringste praktische Relevanz, da diese in realen Anlagen kaum vorkommen [Ber 2014].

Da real auftretende Partikel ihre Ursache meist in der zerspannenden Fertigung oder der Montage der gasisolierten Anlage haben, sind typische Vertreter für in der Praxis auftretende Partikel spanförmige Partikel [Lei 1987, Ber 2014, Wen 2018]. Diese können quaderförmig oder auch spiralförmig sein, wobei sich typische Vertreter quaderförmiger Partikel durch ihre großen Länge-Dicke- und Breite-Dicke-Verhältnisse auszeichnen [Woh 1996]. Für Grundlagenversuche im Labor besitzen spiralförmige Partikel zwei wesentliche Nachteile. Zum einen gestaltet sich eine reproduzierbare Herstellung der Partikel aufgrund der komplexen Geometrie als schwierig. Zum anderen können sich diese durch Zusammenstöße mit den Elektroden im Zuge ihrer Bewegung verformen, wodurch sie keine konstante Form über die Versuche hinweg aufweisen. Der negative Einfluss des Partikels auf die elektrische Festigkeit der SF₆-Isoliergasstrecke ist unabhängig von der Partikelgeometrie erst ab einem Produkt aus Isoliergasdruck p und Partikellänge l_p von 0,007 MPa mm feststellbar [Mos 1979]. Studien haben gezeigt, dass insbesondere Partikel ab einer Länge von 3 mm als besonders kritisch angesehen werden müssen [Her 2016].

Da quaderförmige Partikel sowohl den in der Realität auftretenden Partikeln ähneln als auch eine reproduzierbare Herstellung möglich ist, eignen sich diese besonders gut für Laborversuche. Abbildung 2.8 gibt einen Überblick über die Zuordnung der im Folgenden verwendeten Nomenklaturen bezüglich der Längenangaben der Partikel.

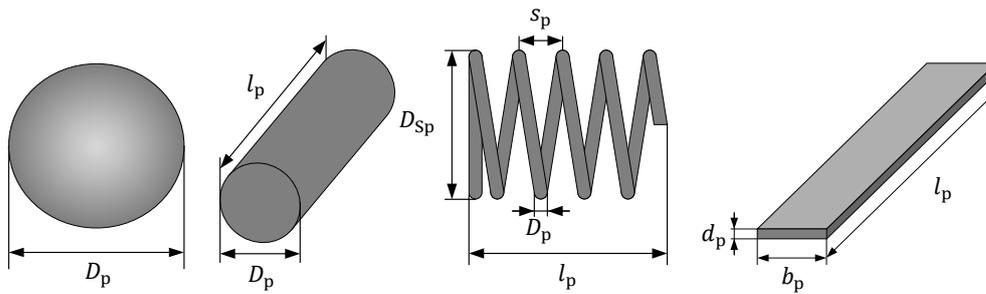


Abbildung 2.8: Bezeichnungen der Partikelabmessungen

Am links in Abbildung 2.8 dargestellten kugelförmigen Partikel wird die Partikelgeometrie über den Durchmesser D_p beschrieben. Das daneben abgebildete zylinderförmige Partikel wird über den Durchmesser D_p und die Länge l_p definiert. Die dritte abgebildete Partikelform, das spiralförmige Partikel, wird über den Spiraldurchmesser D_{Sp} , die Länge l_p , die Ganghöhe s_p und den Drahtdurchmesser D_p festgelegt. Am quaderförmigen Partikel bezeichnet die Länge l_p die größte Abmessung, die Breite b_p die zweitgrößte Abmessung und die Höhe d_p die kleinste Abmessung.

2.4.2 Kräfte beim Abheben des Partikels

Abbildung 2.9 zeigt schematisch und zweidimensional eine koaxiale zylindrische Elektrodenanordnung, wie sie grundsätzlich auch in einer GIL vorliegt, und ein auf der unteren Elektrode ruhendes, elektrisch leitfähiges, quaderförmiges Partikel.

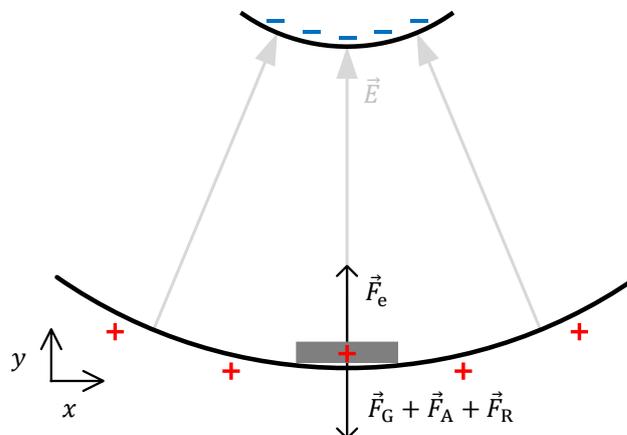


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der auf ein ruhendes Partikel im elektrischen Feld wirkenden Kräfte

Sobald an zwischen den Elektroden eine Spannung anliegt, befindet sich das Partikel im elektrischen Feld mit der elektrischen Feldstärke \vec{E} . Zur vereinfachten Darstellung wird das Partikel überdimensioniert und quer zur Rohrachse dargestellt. Durch Influenzwirkung nimmt die äußere Elektrode eine Oberflächenladung entgegengesetzter Polarität der inneren Elektrode an. Ein elektrisch leitfähiges Partikel, welches elektrischen Kontakt zur unteren Elektrode besitzt, nimmt Ladungsträger von der unteren Elektrode auf und

akkumuliert somit die elektrische Ladung q mit derselben Polarität wie die Oberflächenladung der unteren Elektrode [Sch 1997]. Hierbei gibt es drei Hauptquellen der elektrischen Ladung auf dem Partikel: Ladungsträger durch Kontakt mit der Elektrode oder durch die dielektrische Beschichtung, Mikro-Entladungen zwischen Partikel und Elektrode oder Teilentladungen an den Ecken des Partikels [Ani 1981, Wan 2021].

Diese aufgenommene elektrische Ladung q lässt sich mit dem in Gleichung 2.17 beschriebenen Gaußschen Gesetz berechnen.

$$q = \oiint_A \vec{D} d\vec{A} = \varepsilon \oiint_A \vec{E} d\vec{A} = \varepsilon_0 \oiint_A \vec{E} d\vec{A} \quad (2.17)$$

Dabei bezeichnet \vec{D} die lokale elektrische Flussdichte und \vec{A} die Oberfläche des Partikels. Durch Einsetzen der Beziehung zwischen der elektrischen Flussdichte \vec{D} und der elektrischen Feldstärke \vec{E} ergibt sich die beschriebene Abhängigkeit der aufgenommenen Ladung q , die neben der elektrischen Feldstärke von der Permittivität ε abhängt [Coo 1977]. Die Permittivität ε bildet sich durch das Produkt der Permittivität des Vakuums ε_0 , die den konstanten Wert $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm besitzt, und der relativen Permittivität ε_r des Isoliergases, die für Gase den konstanten Wert $\varepsilon_r \approx 1$ besitzt.

Dadurch, dass das Partikel eine Ladung q gleicher Polarität wie die Oberflächenladung der unteren Elektrode und entgegengesetzter Polarität zur oberen Elektrode besitzt, wird es von der unteren Elektrode abgestoßen und von der oberen angezogen. Folglich erfährt das Partikel durch die unipolare Ladung und das anliegende elektrische Feld die in Gleichung 2.18 beschriebene elektrostatische Kraft \vec{F}_e längs der Feldlinien des elektrischen Feldes weg von der unteren hin zur oberen Elektrode.

$$\vec{F}_e = \int_q \vec{E} \cdot dq \quad (2.18)$$

Diese elektrostatische Kraft ist von der Form, der Lage und der Größe des Partikels abhängig [Sch 1997]. Bei Wechselspannung (AC) muss beachtet werden, dass die elektrostatische Kraft aufgrund des zeitlich variierenden elektrischen Feldes nicht konstant ist. Im ruhenden Zustand wirken der elektrostatischen Kraft insbesondere die in Gleichung 2.19 dargestellte Gewichtskraft des Partikels \vec{F}_G , die aus der Erdbeschleunigung g und der Masse des Partikels m_p berechnet wird, jedoch auch weitere Kräfte wie die Adhäsionskraft \vec{F}_A und die Reibungskraft \vec{F}_R , in negativer y -Richtung entgegen [Sch 1997].

$$\vec{F}_G = -m_p g \vec{e}_y \quad (2.19)$$

Grund für die Reibungskraft sind Rauigkeiten zwischen der Oberfläche des Partikels und der unteren Elektrode, wie Abbildung 2.10 schematisch zeigt.

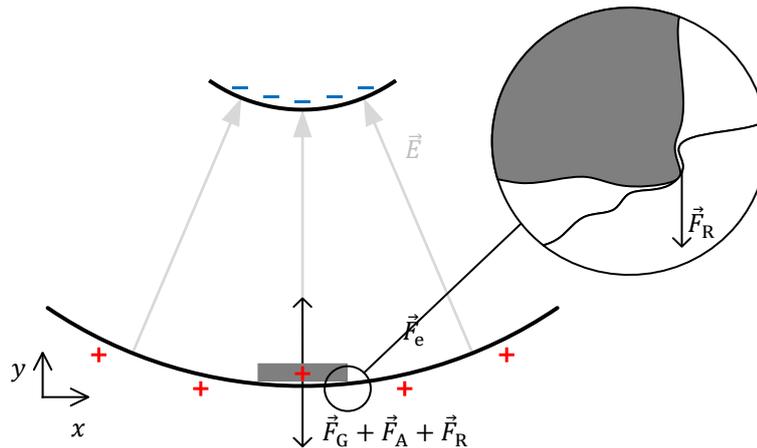


Abbildung 2.10: Schematische Erläuterung der Reibungskraft \vec{F}_R

Der Einfluss der magnetischen Kraft auf das Partikel kann – auch wenn es sich um ein Partikel aus ferromagnetischem Material handelt – vernachlässigt werden, da die magnetische Kraft mehrere Größenordnungen kleiner als die zuvor beschriebenen Kräfte ist [Woh 1996]. Übersteigt die elektrostatische Kraft die Summe der entgegenwirkenden Kräfte, kommt es zum Abheben des Partikels. Die elektrische Feldstärke, bei der das Partikel abhebt, wird als Abhebefeldstärke E_{ab} bezeichnet. In der Realität kommt es meist aufgrund einer nicht exakt ebenen Lage des Partikels zuerst zu einem Aufrichten des Partikels. Hierbei ist wichtig zu beachten, dass die auf ein stehendes Partikel wirkende elektrostatische Kraft \vec{F}_e bei gleicher elektrischer Grundfeldstärke größer ist als die auf ein liegendes längliches Partikel. Der Grund hierfür ist, dass sich die Ladungsverteilung im stehenden länglichen Partikel aufgrund der im Mittel höheren elektrischen Feldstärke ändert und hierdurch der Betrag der Ladung und somit die auf das Partikel wirkende elektrostatische Kraft zunimmt. Dies hat zur Folge, dass quaderförmige Partikel mit einem großen Länge-zu-Dicke-Verhältnis meist direkt nach dem Aufrichten abheben, weshalb in der Literatur die Aufrichtfeldstärke auch meist mit der Abhebefeldstärke gleichgesetzt wird [Coo 1977].

Aktuelle Studien, wie zum Beispiel [Cig 2012], [Ber 2014] und [Pir 2020], greifen bei der Untersuchung von Partikeln auf die in Tabelle 22 dargestellten Gleichungen zur Berechnung der Abhebefeldstärken unterschiedlicher Partikelformen zurück.

Die exakte Berechnung der Abhebefeldstärke E_{ab} gestaltet sich aufgrund der komplexen Überhöhungen der elektrischen Feldstärke an der Partikeloberfläche, den Raumladungsverhältnissen um das Partikel und der Auflagefläche des Partikels als schwierig, weshalb es sich bei den Gleichungen in der Literatur um empirisch ermittelte Zusammenhänge handelt. Bezüglich der Berechnung der Abhebefeldstärke von Kugeln stimmen die Gleichungen 2.17 und 2.18 mit einer Abweichung von weniger als 1% nahezu überein.

Tabelle 22: Übersicht in der Literatur bestehender Gleichungen zur Berechnung der Abhebefeldstärke typischer Partikelformen. E_{ab} beschreibt die Abhebefeldstärke (Scheitelwert) des Partikels in V/m, ρ_p die Partikeldichte in kg/m^3 , ρ_g Isoliergasdichte in kg/m^3 , D_p Partikel-/Drahtdurchmesser in m, l_p Partikellänge in m, s_p Ganghöhe der Spirale in m, D_{Sp} Spiraldurchmesser in m, b_p Partikelbreite in m, d_p Partikeldicke in m, g die Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$, ϵ_0 die Permittivität des Vakuums $8,8542 \text{ As/Vm}$. Bei den beiden mit einem Stern am Ende der Wurzel markierten Zahlenwertgleichungen sind ebenfalls die hier beschriebenen SI-Einheiten einzusetzen, wobei die resultierende Abhebefeldstärke die Einheit „kV/m“ besitzt.

Partikelform	Formel zur Berechnung der Abhebefeldstärke		
Kugel	$E_{ab} = 0,49 \sqrt{\frac{0,5\rho_p g D_p}{\epsilon_0}}$	(2.20)	[Cig 2012, Har 1975]
	$E_{ab} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1,2(\rho_p - \rho_g) g D_p}{\epsilon_0}}$	(2.21)	[Lei 1987, Riz 1979]
Zylinder horizontal liegend	$E_{ab} = \sqrt{\frac{\rho_p g D_p}{2,86\epsilon_0}}$	(2.22)	[Cig 2012, Cig 1976]
	$E_{ab} = \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_g) g D_p}{2,86\epsilon_0}}$	(2.23)	[Lei 1987, Fel 1966]
	$E_{ab} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3\pi\rho_p g D_p}{2\epsilon_0}}$	(2.24)	[Lei 1987, Kuw 1974]
	$E_{ab} = 810 \sqrt{0,5\rho_p D_p}^*$	(2.25)	[Lei 1987, Gän 1976]
Zylinder vertikal stehend	$E_{ab} = \left[\ln\left(\frac{4l_p}{D_p}\right) - 1 \right] \sqrt{\frac{\rho_p D_p^2 g}{6\epsilon_0 l_p \left[\ln\left(\frac{2l_p}{D_p}\right) - 0,5 \right]}}$	(2.26)	[Cig 2012, Cig 1976]
	$E_{ab} = \left[\ln\left(\frac{4l_p}{D_p}\right) - 1 \right] \sqrt{\frac{\rho_p D_p^2 g}{4\epsilon_0 l_p \left[\ln\left(\frac{2l_p}{D_p}\right) - 0,5 \right]}}$	(2.27)	[Lei 1987, Fel 1966]
Spirale horizontal liegend	Runder Drahtquerschnitt:		
	$E_{ab} = D_p \sqrt{\frac{\rho_p g}{2,86\epsilon_0} \sqrt{\left(\frac{\pi}{s_p}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_{Sp}}\right)^2}}$	(2.28)	[Cig 2012, Lei 1988]
	$E_{ab} = D_p \sqrt{\frac{\rho_p g}{2,86\epsilon_0} \sqrt{\left(\frac{\pi}{s_p}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_{Sp}}\right)^2}}$	(2.29)	[Lei 1987]
Quaderförmiger Drahtquerschnitt:			
$E_{ab} = D_{Sp} \sqrt{\frac{b_p d_p \rho_p g \sqrt{\left(\frac{1}{\pi D_{Sp}}\right)^2 + \left(\frac{1}{b_p + s_p}\right)^2}}{2,86\epsilon_0}}$	(2.30)	[Lei 1987]	
Quaderförmig	$E_{ab} = 1500 \sqrt{d_p \rho_p}^*$	(2.31)	[Lei 1987, Gän 1976]
	$E_{ab} = \sqrt{\frac{d_p \rho_p g}{2,86\epsilon_0}}$	(2.32)	[Lei 1987]

Hinsichtlich der Abhebefeldstärke des zylinderförmigen Partikels handelt es sich bei Gleichung 2.22 und Gleichung 2.23 grundsätzlich um die gleiche zugrundeliegende Formel, da in Gleichung 2.22 lediglich die Dichte des Isoliergases gegenüber der des Partikels vernachlässigt wurde. Die Gleichungen 2.22 und 2.23 weisen jedoch deutliche Abweichungen von Gleichungen 2.24 und 2.25 von bis zu etwa 40 % auf. Bei einem von [Lei 1987] durchgeführten Vergleich der berechneten und der gemessenen Abhebefeldstärken von zylinderförmigen Partikeln aus Aluminium und Kupfer in zwei unterschiedlichen GIL-ähnlichen Prüfaufbauten zeigten Gleichung 2.24 und Gleichungen 2.22 respektive 2.23 abhängig vom Partikeldurchmesser und dem Prüfaufbau die besten Übereinstimmungen. Gleichungen 2.22 respektive 2.23 besaß hierbei für Kupferpartikel mit Längen von 6,9 mm und 15 mm und Drücken von 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 und 0,6 MPa für Durchmessern von 0,5 mm, 0,75 mm und 1 mm die besten Übereinstimmungen, während Gleichung 2.24 für einen Durchmesser von 0,2 mm bei ansonsten identischen Bedingungen bessere Ergebnisse lieferte [Lei 1987]. Weiterhin wies Gleichung 2.24 bei Aluminiumpartikeln mit Längen von 6,9 mm und 15 mm und einem Druck von 0,2 MPa für Durchmesser von 0,3 mm, 0,5 mm und 0,8 mm die besten Ergebnisse auf, während Gleichungen 2.22 respektive 2.23 für einen Durchmesser von 1 mm besser war [Lei 1987].

Auch die Gleichungen zur Berechnung der Abhebefeldstärke der vertikal stehenden Zylinder weichen etwa 20 % voneinander ab. Dem Autor dieser Arbeit liegen jedoch keine experimentellen Daten zum Vergleich der theoretisch berechneten mit gemessenen Abhebefeldstärken vor, wodurch keine Aussage möglich ist, welche Gleichung die tatsächliche Abhebefeldstärke besser widerspiegelt.

Hinsichtlich der Berechnung der Abhebefeldstärke einer liegenden Spirale mit rundem Drahtquerschnitt verweist [Cig 2012] auf [Lei 1988], führt mit Gleichung 2.28 jedoch eine andere Formel auf als Leijon mit Gleichung 2.29 in [Lei 1987]. [Lei 1988] konnte vom Autor der vorliegenden Arbeit zwar nicht eingesehen werden, aber in [Lei 1987] befindet sich die Herleitung von Gleichung 2.29. Dies legt somit entweder eine falsche Gleichung in [Lei 1988], wahrscheinlicher jedoch einen Übertragungsfehler von [Cig 2012] nahe. Aufgrund der zuvor erwähnten guten Reproduzierbarkeit und Praxisrelevanz quaderförmiger Partikel liegt der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf dieser Partikelgeometrie. Bei Gleichung 2.31 handelt es sich um eine Näherungsgleichung, die jedoch zudem nur eine Zahlenwertgleichung ohne Kompensation der Einheiten darstellt. Zur Berechnung der Abhebefeldstärke des quaderförmigen Partikels entspricht Gleichung 2.32 den beiden Gleichungen 2.22 und 2.23 des liegenden zylinderförmigen Partikels unter den Annahmen, dass die Dichte des Gases gegenüber der des Partikels vernachlässigt werden kann und die Breite des quaderförmigen Partikels dem Durchmesser des zylinderförmigen Partikels entspricht.

Experimentelle Ermittlungen der Abhebespannungen von quaderförmigen Partikeln mit quadratischem Querschnitt, also mit gleicher Partikelbreite wie Partikeldicke, und von zylinderförmigen Partikeln mit gleichem Durchmesser ($D_p = b_p = d_p$) in [Lei 1987]

zeigen, dass die Abhebespannungen und somit die Abhebefeldstärken zum einen für beide Partikelgeometrien identisch und zum anderen von den Partikellängen unabhängig sind. Dies zeigen die in [Lei 1987] gemessenen Abhebespannungen von quaderförmigen Partikeln aus Aluminium mit einer Breite und Dicke von je 1 mm sowie von zylinderförmigen Partikeln aus Aluminium mit einem Durchmesser von 1 mm und variabler Länge. Für diese untersuchten quaderförmigen Partikel mit quadratischem respektive rundem Querschnitt besitzt Gleichung 2.32 eine gute Übereinstimmung der berechneten mit der experimentell ermittelten Abhebefeldstärke, liegt jedoch für alle betrachteten Partikel unterhalb der Abhebespannung. Es ist anzunehmen, dass es sich bei der Abweichung um den in der Gleichung vernachlässigten Anteil der Reibungs- und Adhäsionskräfte handelt.

In [Lei 1987] wurden auch die experimentellen Abhebespannungen quaderförmiger Partikel mit unterschiedlichen Breite-Dicke-Verhältnissen analysiert mit dem Ergebnis, dass die Partikelbreite, anders als Gleichungen 2.31 oder 2.32 implizieren, einen Einfluss auf die Abhebefeldstärke des quaderförmigen Partikels ausübt. Mit steigender Partikelbreite nahm auch die Abhebespannung und somit die Abhebefeldstärke zu, wobei der Grund für die beobachtete Abhängigkeit von der Partikelbreite unbekannt ist. Der Druck des Isoliergases übt keinen Einfluss auf die Abhebefeldstärke der Partikel aus. In keiner dem Autor der vorliegenden Arbeit bekannten Literatur wird eine Gleichung zur Berechnung von quaderförmigen Partikeln mit unterschiedlichen Breite-Dicke-Verhältnissen angegeben, weshalb dies in Abschnitt 7.2.3 näher betrachtet wird.

2.4.3 Kräfte während der Partikelbewegung

Nach dem Abheben des Partikels bildet sich im Partikel aufgrund der elektrischen Feldstärke eine Umverteilung der Ladungsträger aus, wodurch das Partikel polarisiert wird und es nun zusätzlich zur unipolaren Ladung einen Dipol bildet. Die somit entstandene Dipolkraft \vec{F}_{di} , die die Kraftwirkung auf einen Dipol im inhomogenen elektrischen Feld in Richtung der höheren Feldstärke beschreibt, wirkt ebenfalls entlang der elektrischen Feldlinien in Richtung der oberen Elektrode. Entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung des Partikels entsteht durch den Strömungswiderstand im Isoliergas die Strömungswiderstandskraft \vec{F}_W . Wie Gleichung 2.33 zeigt, hängt diese vom Strömungswiderstandskoeffizienten c_w , der Querschnittsfläche A_b des Partikels in Bewegungsrichtung und der Partikelgeschwindigkeit v ab.

$$\vec{F}_W = -c_w A_b \frac{1}{2} \rho_g v^2 \vec{e}_v = -c_w A_b \frac{1}{2} \rho_g \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \vec{e}_v \quad (2.33)$$

Die somit am beweglichen Partikel angreifenden Kräfte sind am Beispiel von zwei unterschiedlichen Bewegungsabläufen in Abbildung 2.11 schematisch dargestellt.

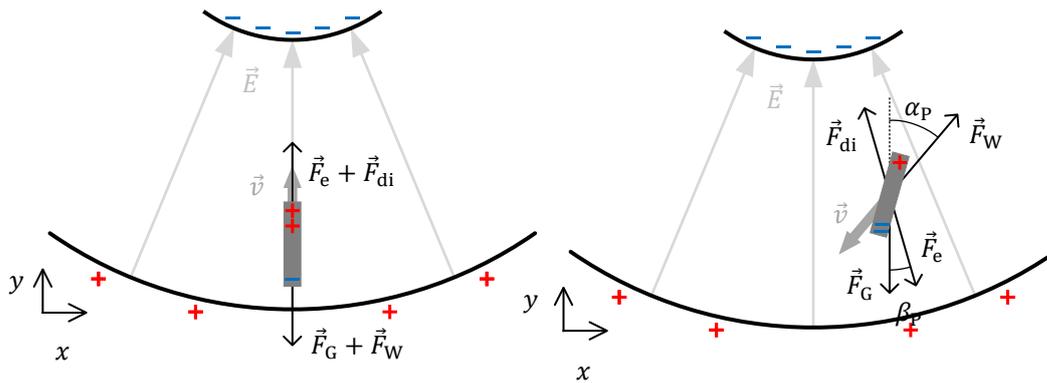


Abbildung 2.11: Schematische Darstellungen der auf ein sich im elektrischen Feld bewegendes Partikel wirkenden Kräfte

In dem links in Abbildung 2.11 gezeigten Bild wird eine vereinfachte lineare Bewegung des Partikels in y -Richtung dargestellt, wie sie beispielsweise direkt nach dem Abheben eines kugelförmigen oder eines vertikal stehenden quaderförmigen Partikels vorliegt. Im rechten Bild ist eine mögliche Momentaufnahme während der Partikelbewegung abgebildet. Anhand der beiden Winkel α_p und β_p lassen sich die x - und y -Komponenten der an das Partikel angreifenden Kräfte berechnen. Die resultierenden eindimensionalen Bewegungsgleichungen in x - und in y -Richtung, die auf das sich bewegendes Partikel wirken, ergeben sich entsprechend aus der in Gleichung 2.34 und Gleichung 2.35 gezeigten Addition der unterschiedlichen in x - respektive y -Richtung auf das Partikel wirkenden Kraftkomponenten.

$$m_p \frac{d\vec{v}_x}{dt} = \vec{F}_{e,x} + \vec{F}_{di,x} + \vec{F}_{G,x} + \vec{F}_{W,x} \quad (2.34)$$

$$m_p \frac{d\vec{v}_y}{dt} = \vec{F}_{e,y} + \vec{F}_{di,y} + \vec{F}_{G,y} + \vec{F}_{W,y} \quad (2.35)$$

Nicht berücksichtigt in der Gleichung sind Stoßprozesse, die das Partikel mit den Elektroden durchführt. Durch teilelastische Stöße des Partikels mit den Elektroden, bei denen ein Teil der Bewegungsenergie in Wärme- und Verformungsenergie umgewandelt wird, nimmt die ursprüngliche Geschwindigkeit des Partikels v auf eine Geschwindigkeit v' nach dem Stoß ab. Dies gilt unter der Vernachlässigung weiterer Effekte wie beispielsweise einer Rotation des Partikels. Da das Partikel aufgrund der bipolaren Ladungsträgerverteilung einen Dipol darstellt, wirkt auf das Partikel ein Drehmoment zur Längsausrichtung des Partikels in Feldlinienrichtung. Die Abnahme der Bewegungsgeschwindigkeit des Partikels durch den Stoßvorgang wird, wie in Gleichung 2.36 aufgeführt, mit der Stoßzahl k beschrieben [Woh 1996].

$$v' = -kv \quad \text{mit} \quad (0 < k < 1) \quad (2.36)$$

Da die Stoßzahl unter anderem vom Aufprallwinkel des Partikels und von der Lage des Partikels beim Aufprall abhängt, variiert die Stoßzahl bei jedem Stoß [Woh 1996]. Unter

Berücksichtigung einer möglichen Partikelrotation kann sich durch den Stoß ein Teil der Rotationsenergie in translatorische Energie und somit in eine Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit des Partikels umwandeln. Aus diesen Gründen handelt es sich bei dem Bewegungsablauf von zylinder- und quaderförmigen Partikeln üblicherweise um ein unregelmäßiges Schema, während bei kugelförmigen Partikeln regelmäßige Bewegungsabläufe beobachtet werden können [Pir 2020]. In GIS und GIL werden die sowohl radial zur als auch längs der Rohrachse stattfindenden Bewegungsvorgänge der Partikel als komplex und zufällig beschrieben [Wan 2021].

In gasisolierten Anlagen, in denen meist eine schwach inhomogene Feldverteilung vorliegt, wirkt aufgrund der bipolaren Ladung eine zusätzliche elektrostatische Kraft in Richtung der größeren elektrischen Feldstärke und somit in Richtung Innenleiter. Aufgrund dieses Effektes und aufgrund der größeren elektrischen Feldüberhöhung an dem sich frei bewegenden Partikel ist die zur Aufrechterhaltung der Partikelbewegung erforderliche elektrische Feldstärke meist deutlich geringer als die Abhebefeldstärke. Im homogenen Feld wiederum resultiert nur die unipolare Ladung des Partikels in einer Kraft in Richtung der Elektrode mit zum Partikel entgegengesetzter elektrischer Ladung [Jon 1995].

Die starken Überhöhungen der elektrischen Feldstärke am sich frei bewegenden quaderförmigen Partikel führen primär an dessen spitzen Ecken zu Teilentladungen. Da der negative Teilentladungsstrom den positiven Teilentladungsstrom deutlich überwiegt, verändert sich während seiner Bewegung der Betrag der Ladung des Partikels, und das Partikel wird zunehmend positiv geladen. Wie Gleichung 2.18 zeigt, führt diese Veränderung des Betrags der Ladung des Partikels zu einer Änderung der Kraft \vec{F}_e . Sollte das Partikel beim Abheben eine negative unipolare Ladung besitzen, kann sich durch den negativen Teilentladungsstrom bei ausreichender Teilentladungsintensität und Bewegungsdauer des Partikels das Vorzeichen der unipolaren Ladung umkehren [Asa 1997]. Die von den Teilentladungen erzeugten freien Ladungsträger wandern Richtung Elektroden ab. Da dies jedoch nicht beliebig schnell geschieht, kann es hierdurch zur Bildung von Raumladungswolken im Isoliergas kommen, die die elektrische Feldstärke und somit auch das Partikelbewegungsverhalten beeinflussen können [Ber 2014].

Die Detektion von Partikeln in gasisolierten Anlagen kann optisch, chemisch oder elektrisch erfolgen [Wan 2021]. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der elektrischen Methode mittels ultrahochfrequenter (UHF) TE-Messung.

2.4.4 Maßnahmen gegen die Partikelbewegung

Übliche Maßnahmen in der Praxis, um Partikelbewegungen und somit eine Herabsetzung der elektrischen Festigkeit in gasisolierten Anlagen zu verhindern, sind das Einbringen einer Partikelfalle oder die Beschichtung der Elektrode. In GIS besteht eine Maßnahme darin, die Partikel durch eine geeignete Gestaltung der Geometrie und der

Feldverteilung in unkritische Bereiche wandern zu lassen, in denen sie dann verbleiben. Dieses Vorgehen ist in GIL ohne die Einbringung einer Partikelfalle aufgrund der Geometrie nicht möglich. Partikelfallen dienen dazu, Bereiche mit deutlich reduzierter elektrischer Feldstärke innerhalb des gasisolierten Systems zu schaffen, in die Partikel während ihrer Bewegung gelangen und dort aufgrund der geringen elektrischen Feldstärke verbleiben. Partikelfallen sind vorwiegend in gasisolierten Leitungen zu finden und werden bei AC-GIL entlang der tiefsten Stelle des Außenleiters angebracht. Eine schematische Darstellung der Partikelfalle sowie der elektrischen Feldverteilung in einer AC-GIL ist in Abbildung 2.12 gezeigt.

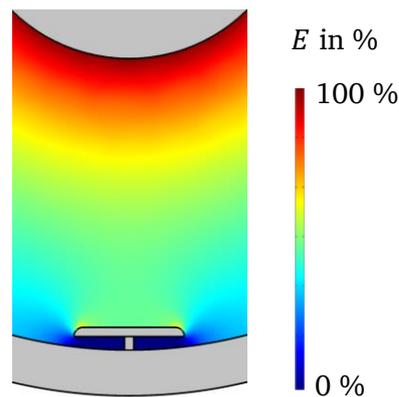


Abbildung 2.12: Schematische Prinzipdarstellung der Partikelfalle und der elektrischen Feldverteilung in einer AC-GIL

Die in der elektrischen Feldsimulation rot dargestellten Bereiche stehen für Bereiche mit hoher elektrischer Feldstärke, blau für Bereiche mit geringer bis gar keiner elektrischen Feldstärke.

Durch die wechselnde elektrische Feldrichtung bei Wechselspannung führt das Partikel in der AC-GIL üblicherweise eine Auf-und-ab-Bewegung zwischen Innenleiter und Gehäuse durch. Durch dieses Bewegungsmuster gelangt das Partikel typischerweise nach wenigen Sekunden in den Bereich der Partikelfalle mit geringer elektrischer Feldstärke, wodurch die Bewegung des Partikels meist zum Erliegen kommt und das Partikel somit keinen Einfluss mehr im weiteren Betrieb der GIL ausübt.

Bei DC-GIL besitzen elektrisch leitfähige Partikel aufgrund der gleichbleibenden elektrischen Feldrichtung ein anderes Bewegungsmuster. Da Partikel bei negativer Polarität des Innenleiters durch den negativen Teilentladungsstrom am Partikel mitunter stehende Bewegungen entlang des Innenleiters ausführen können, werden Partikelfallen typischerweise sowohl am Außenleiter, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, als auch an der Unterseite des Innenleiters ausgeführt [Ber 2020].

Da die Ladungsaufnahme des ruhenden Partikels, wie zuvor beschrieben, primär durch den elektrischen Kontakt des Partikels zur Elektrode erfolgt, führt eine Beschichtung dieser Elektrode mit einer dielektrischen Schicht mit geringer elektrischer Leitfähigkeit zu einer stark verringerten Ladungsträgerakkumulation des Partikels. Eine solche

Beschichtung wird vorzugsweise bei GIS verwendet, bei der die Innenseite des Gehäuses beispielsweise mit Epoxidharzlack versehen wird [Zha 2002]. Statt Ladungsträger direkt von der Elektrode aufzunehmen, akkumuliert das Partikel Ladung durch den von der elektrischen Leitfähigkeit und der Schichtdicke abhängigen Ladungsträgertransfer durch die dielektrische Schicht, durch Teilentladungen zwischen dem Partikel und der Schicht, durch Influenz oder durch bereits auf der dielektrischen Schicht befindliche Ladungsträger [Hor 2006]. Nach Gleichung 2.18 resultiert diese geringere Ladungsträgerakkumulation in einer deutlich geringeren elektrostatischen Kraft bei gleicher elektrischer Feldstärke, wodurch die Abhebefeldstärke deutlich erhöht wird. Weiterhin kann durch die Beschichtung die maximale Höhe der Partikelbewegung stark verringert werden, da das Partikel beim erneuten Auftreffen auf die untere Elektrode deutlich weniger neue Ladungsträger aufnimmt [Mor 2000, Zha 2002]. Diese verringerte Höhe der Partikelbewegung resultiert in einer Erhöhung der Durchschlagfestigkeit, da die Wahrscheinlichkeit des Kontakts des Partikels mit dem Innenleiter reduziert wird und sich das Partikel während seiner Bewegung eher in den Bereichen mit geringer elektrischer Feldstärke als in denen mit hoher elektrischer Feldstärke aufhält [Zha 2002].

Auch ohne die Anwesenheit von frei beweglichen, elektrisch leitfähigen Partikeln kann die Beschichtung mit einer dielektrischen Schicht die Durchschlagfestigkeit gasisolierter Anlagen verbessern. Zum einen verringert die dielektrische Beschichtung die für den Durchschlagsprozess in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Elektrodenemissionen aus der Kathode [Zha 2002, Cig 2012]. Zum anderen werden feldstärkeüberhöhende Effekte von Oberflächenrauigkeiten der zumeist aus Aluminiumussteilen bestehenden Außenhülle gasisolierter Anlagen durch die dielektrische Beschichtung verringert, was ebenfalls eine Verbesserung der elektrischen Festigkeit zur Folge hat [Küc 2017]. Im inhomogenen elektrischen Feld ist die Ladung, die das Partikel beim Kontakt mit der stärker gekrümmten Elektrode aufnimmt, aufgrund der höheren elektrischen Feldstärke größer als beim Kontakt mit der schwächer gekrümmten Elektrode [Mos 1979]. Eine größere aufgenommene Ladung führt wiederum zu einer stärkeren Veränderung des elektrischen Feldes.

2.5 Teilentladungsmessung

Teilentladungsmessungen dienen der zerstörungsfreien Hochspannungsprüfung an elektrischen Betriebsmitteln mit unterschiedlichen Isolationssystemen zur Fehlererkennung und -ortung [Kön 1993]. In der Norm werden Teilentladungen als örtlich eingegrenzte elektrische Entladungen, die die Isolierstrecke zwischen Leitern nur teilweise überbrücken und angrenzend an Leitern auftreten können, dies aber nicht müssen, beschrieben [DIN 2016]. Die Ursache von Teilentladungen liegt in einer lokalen elektrischen Feldstärkeüberhöhung und einem zur Verfügung stehenden Startelektron, wodurch die lokale elektrische Feldstärke groß genug ist, um den Durchschlagsprozess in Gang zu bringen, jedoch die absolute Feldstärke entlang der Durchschlagsstrecke zu

gering ist, um das Durchschlagskriterium zu erfüllen. Mögliche Gründe für die lokale Erhöhung der elektrischen Feldstärke sind Spitzen, Feldverdrängungen oder Hohlräume [Küc 2017]. Wie in Kapitel 0 in Abbildung 2.3 beschrieben, ist dies im Gasraum ab einem Homogenitätsgrad η von weniger als 0,2 der Fall.

Prinzipiell werden zwei unterschiedliche Arten von Teilentladungen unterschieden: innere Teilentladungen und äußere Teilentladungen. Innere Teilentladungen treten üblicherweise innerhalb eines Feststoff- oder Flüssigdielektrikums aufgrund von Lunkern oder Blasenbildung auf, während äußere Teilentladung an Elektrodenoberflächen oder auf Feststoffisolierflächen auftreten [Kön 1993]. Äußere Teilentladungen wiederum können in Gleitentladungen, die aufgrund überhöhter tangentialer Feldstärken entlang einer Isolierstoffoberfläche auftreten, und Koronaentladungen, die in gasisolierten Elektrodenanordnungen auftreten, unterteilt werden. Prinzipiell können in GIL sowohl innere Teilentladungen als auch Gleitentladungen als auch Koronaentladungen auftreten. Innere Teilentladungen können in den Isolatoren aufgrund von Lunkern auftreten, Gleitentladungen entlang der Isolatoroberflächen aufgrund von überbeanspruchten Grenzflächen durch überhöhte tangentielle Feldstärke. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Bewegungen elektrisch leitfähiger Partikel in der GIL liegen jedoch die Koronaentladungen im Fokus.

Anders als beim vollkommenen Durchschlag, bei dem die Isolierung nahezu vollständig zusammenbricht, handelt es sich bei den Teilentladungen um einen unvollständigen Durchschlag, bei dem nur ein Teil der Isolierung zusammenbricht [Kön 1993].

Zur Messung von Teilentladungen gibt es unterschiedliche Messmethoden, die sich zum einen in die konventionelle Messmethode und zum anderen in mehrere Arten unkonventioneller Messmethoden aufgliedern lassen [DIN 2016]. Die unkonventionellen Messmethoden wiederum lassen sich in vier unterschiedliche Messmethoden unterteilen: elektrische Messung bei hohen Frequenzen, akustische Messung, chemische Messung und optische Messung. Bei der konventionellen Messmethode wird der Verschiebestrom, der von einem Koppelkondensator zum über eine Entkopplungsimpedanz von der Spannungsversorgung getrennten Prüfling fließt, über eine Messimpedanz erfasst und über ein Messinstrument ausgewertet. Externe Störsignale treten jedoch meist ebenfalls in dem niederfrequenten Bereich auf, in dem die konventionelle TE-Messung arbeitet [Hoe 2014a, Her 2016]. Da die in dieser Arbeit untersuchten Teilentladungen an frei beweglichen elektrisch leitfähigen Partikeln im elektrischen Feld breitbandige Teilentladungen von etwa 200 MHz bis über 2 GHz erzeugen, handelt es sich bei der ultrahochfrequenten (UHF) TE-Messung um die für gasisolierte Systeme relevanteste Messmethode [Tas 1999]. Ein weiterer Vorteil der UHF-TE-Messung besteht darin, dass sie die sensibelste Messmethode darstellt und sich einfach bei GIL umsetzen lässt, da die GIL ein ausgezeichneter Leiter für die durch die TE emittierten hochfrequenten Wellen ist [Koc 2012]. Durch die UHF-TE-Messung ist es möglich, Teilentladungen in einer Distanz von bis zu 500 m in der GIL zu detektieren [Koc 2012]. Bei der UHF-TE-Messung werden

die durch die Teilentladung emittierten elektromagnetischen Wellen im UHF-Bereich erfasst und hinsichtlich ihrer Amplitude und Phasenlage ausgewertet. Zur Erfassung der elektromagnetischen Wellen kommen meist tellerförmige, kapazitive UHF-Feldsonden zum Einsatz, die in regelmäßigen Abständen zur Überwachung der TE-Aktivitäten in die Außenhülle von GIS/GILs eingebaut werden können. Diese Tellersonden schließen näherungsweise bündig mit der Innenseite der Außenhülle ab, um keine kritischen elektrischen Feldstärkeüberhöhungen hervorzurufen [Küc 2017]. Die Auswertung der von der UHF-Sonde empfangenen elektromagnetischen Signale kann sowohl im Frequenz- als auch Zeitbereich mit Hilfe von Teilentladungsmessgeräten, wie sie von mehreren Herstellern angeboten werden, erfolgen.

Die von der zuvor erwähnten UHF-Feldsonde empfangenen Teilentladungssignale werden an einen UHF-Bandbreitenkonverter weitergeleitet, der die Messbandbreite des konventionellen Messsystems auf einen maximalen Frequenzbereich von 0,1 GHz bis 2 GHz erweitert. Die zur Verfügung stehenden Messbandbreiten sind Schmalband (1,5 MHz), Mediumband (70 MHz) und Breitband (1,9 GHz). Die Breitbandmessung ermöglicht die Auswertung eines Großteils des vom Teilentladungsimpuls abgegebenen Frequenzspektrums inklusive der Resonanzspitzen [Hoe 2014b]. Schmalbandige Störsignale, wie beispielsweise Funk, werden jedoch ebenfalls erfasst, was zu einem geringeren Signal-Rausch-Verhältnis führt. Bei der schmalbandigen Messung können – bei bekannten Nutz- und Störsignalfrequenzen – gezielt die Störfrequenzen umgangen werden und somit ein großes Signal-Rausch-Verhältnis erzielt werden. Die schmalbandige Messbandbreite hat jedoch den Nachteil, dass nur ein sehr geringer Teil des Frequenzbereichs abgebildet wird und von daher die Frequenzbereiche der Stör- und Nutzsignale bekannt sein sollten. Die Mediumbandmessung stellt einen Mittelweg der Schmal- und Breitbandmessung dar und ermöglicht – je nach Frequenzanteilen von Störsignalen – ebenfalls das Umgehen von Störfrequenzen, wodurch auch mit der Mediumbandmessung ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis erzielt werden kann. Der UHF-Bandbreitenkonverter besitzt weiterhin einen umschaltbaren Vorverstärker und steigert somit die Empfindlichkeit der Teilentladungsmessung [Hoe 2014b]. Die Messergebnisse werden analog zur konventionellen TE-Messung in Phasendiagramme der Teilentladung (PRPD-Histogrammen) am Messrechner angezeigt und ausgewertet.

3 Motivation und Ziele der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Auswahl in der Diskussion befindlicher alternativer Isoliergaskandidaten, 3M™ Novec™ 4710, 3M™ Novec™ 5110 und HFO-1336mzz(E), hinsichtlich ihrer Eignung für einen Einsatz in gasisolierten Leitungen dielektrisch zu untersuchen. Wie aus dem vorangegangenen Kapitel 2 hervorgeht, gibt es zahlreiche Aspekte, die hierbei zu berücksichtigen sind. Bei der Durchführung der dielektrischen Untersuchungen werden die Cigré-Empfehlungen [Cig 2021] zur Untersuchung alternativer Isoliergasgemisch berücksichtigt. Um die Eignung der alternativen Isoliergase für den Einsatz in gasisolierten Leitungen zu untersuchen und zu beurteilen, welche bestehenden Konzepte beibehalten und welche verändert werden müssen, werden folgende Aspekte für eine Auswahl alternativer Isoliergase und als Referenz für das etablierte Isoliergas SF₆ in der vorliegenden Arbeit analysiert:

- Die wesentliche Aufgabe des elektrischen Isoliergases in gasisolierten Leitungen besteht in der Isolation der Spannungsdifferenz zwischen Innenleiter und Gehäuse. Somit spielt die elektrische Durchschlagfestigkeit eine zentrale Rolle bei der Auswahl geeigneter alternativer Isoliergase. Eine geringere Durchschlagfestigkeit bedingt größere Schlagweiten und/oder höhere Drücke, was konstruktive Änderungen der gasisolierten Leitung zur Folge hat. Aus diesem Grund ist die elektrische Festigkeit alternativer Isoliergaskandidaten im Vergleich zu SF₆ in realitätsnahen Prüfgefäßen zu ermitteln.
- Im Zuge von Voruntersuchungen der elektrischen Durchschlagsuntersuchungen konnte eine Abhängigkeit der Durchschlagspannung im selben Prüfgefäß von vorangegangenen Messreihen beobachtet werden. Um identische Versuchsbedingungen für die in dieser Arbeit durchgeführten dielektrischen Untersuchungen sicherzustellen, wird diese Abhängigkeit, die basierend auf den durchgeführten Untersuchungen auf die Anlagerung fluorierter Moleküle an Oberflächen innerhalb des Prüfgefäßes zurückgeführt werden konnte, analysiert und geeignete Abhilfemaßnahmen untersucht und bewertet.
- Gasdurchschläge in mit SF₆ gefüllten gasisolierten Systemen sind für ihre hohe Stromsteilheit und die dadurch emittierten elektromagnetischen Wellen, die zu einer Beeinträchtigung oder gar Zerstörung in der Nähe befindlicher Elektronik führen können, bekannt. In [Cig 2018b] zeigt sich bei identischen Umgebungsbedingungen und Isoliergasdrücken ein Unterschied der zeitlich aufgelösten Teilentladungsströme zwischen SF₆, N₂ und trockener Luft, während der von SF₆ die größte Amplitude und größte Stromsteilheit aufweist. Eine genaue Betrachtung der Einflussparameter wurde bislang jedoch noch nicht durchgeführt,

und dem Autor der vorliegenden Arbeit sind auch keine Studien hinsichtlich des Vergleichs der elektromagnetischen Beeinflussung durch Durchschläge in alternativen Isoliergasen und in SF₆ bekannt. Aus diesem Grund wird ein Vergleich der emittierten Frequenzspektren mit Betrachtung verschiedener Einflussparameter in der vorliegenden Arbeit durchgeführt.

- Frei bewegliche elektrisch leitfähige Partikel stellen die Hauptursache für ein Isolationsversagen in gasisolierten Leitungen dar. Diese Partikel reduzieren durch lokale Feldstärkeüberhöhungen die Durchschlagfestigkeit und können durch Teilentladungen Schäden an Isolatoroberflächen erzeugen. Um den Einfluss solcher frei beweglicher, elektrisch leitfähiger Partikel im Betrieb zu minimieren, werden unter anderem Partikelfallen eingesetzt und UHF-Sonden verbaut, was eine kontinuierliche TE-Messung ermöglicht und somit Auskunft über Teilentladungsvorgänge innerhalb der gasisolierten Leitung gibt. Für SF₆ ist die Wirksamkeit der Partikelfalle bereits erprobt, und die von frei beweglichen elektrisch leitfähigen Partikeln erzeugten typischen Teilentladungsmuster sind bekannt. Inwiefern die Füllung gasisolierter Leitungen mit alternativen Isoliergasen die Wirksamkeit der Partikelfalle und die Teilentladungsmuster der sich bewegenden Partikel beeinflussen, wird in der vorliegenden Arbeit untersucht.

4 Elektrische Durchschlagsuntersuchungen

Die in diesem Kapitel gezeigten Ergebnisse wurden erstmals in [Wie 2017] vom Autor dieser Arbeit veröffentlicht.

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Durchschlagsuntersuchungen vorgestellt. Ziel der Untersuchungen ist die Ermittlung der Durchschlagfestigkeiten unterschiedlicher ausgewählter alternativer Isoliergasgemische mit geringem GWP_{100} in GIL-ähnlichen Versuchsanordnungen und in realen GIL. Als Referenz dient das bereits in Abschnitt 2.1.1 beschriebene Isoliergasgemisch SF_6/N_2 aus 20 % SF_6 und 80 % N_2 , welches sich, wie in Abschnitt 0 erwähnt, für den Einsatz in GIL etabliert hat. Der Anwendungsfall GIL beschreibt hierbei, dass im Gegensatz zu GIS die Schalteigenschaften des Isoliergases, wie zum Beispiel Wärmeleitfähigkeit oder Rekombinationsvermögen, eine untergeordnete Rolle spielen. Für die Gasräume einer GIS, in denen keine Schalthandlungen durchgeführt werden, können die hier erzielten Ergebnisse aufgrund der ähnlichen Verhältnisse ebenso herangezogen werden. Zunächst werden die verwendeten Prüfaufbauten sowie die Versuchsdurchführung vorgestellt. Anschließend werden die erzielten Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

4.1 Prüfaufbauten

Die Durchführung aller Durchschlagsuntersuchungen in maßstabsgetreuen GIL würde aufgrund der großen Abmessungen des Gasraums eine große Menge der zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch größtenteils im Labormaßstab hergestellten alternativen Isoliergase sowie zeitaufwändige Gaswartungsarbeiten erfordern. Daher wurden die ersten Versuchsreihen der ausgewählten alternativen Isoliergasgemische zunächst in den in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 dargestellten Prüfgefäßen durchgeführt.

Das erste Prüfgefäß besteht aus drei separaten Gasräumen: einer Hochspannungsdurchführung, einem Prüfgasraum und einem zwischen Hochspannungsdurchführung und Prüfgasraum befindlichen Zwischengasraum. Die Hochspannungsdurchführung und der Zwischengasraum sind jeweils mit 0,65 MPa SF_6 gefüllt, da hier keine elektrischen Untersuchungen des Isoliergases stattfinden. Der Zwischengasraum erfüllt einen reinen Sicherheitszweck. Beim Öffnen des Prüfgasraums wird auch der Zwischengasraum auf Umgebungsdruck abgesenkt, um Personenschäden aufgrund eines möglichen Berstens des Gasschotts zwischen Zwischengasraum und Prüfgasraum zu verhindern. Der Zwischengasraum ermöglicht somit, dass die Hochspannungsdurchführung, die aufgrund

ihres großen Gasvolumens zeitaufwändigere Gasarbeiten erfordern würde, auf Nenndruck gefüllt bleiben kann. Die Durchschlagsuntersuchungen der zu untersuchenden Isoliergasgemische finden im Prüfgasraum statt, der ein Gasvolumen von etwa 50 l besitzt und in dessen Inneren sich eine Kugel-Platte-Elektrodenanordnung aus Stahl mit geringer Oberflächenrauigkeit mit einer maximalen Rautiefe R_t von etwa 10 μm und einer Schlagweite s von 10 mm befindet. Der Homogenitätsgrad der Elektrodenanordnung η von etwa 0,64 wurde mittels einer rotationsymmetrischen Berechnung der elektrischen Feldstärke mit COMSOL Multiphysics® bestimmt. Der Homogenitätsgrad liegt in der Mitte des in Tabelle 21 in Abschnitt 2.2.4 genannten Bereichs für Hochspannungsanwendungen, die Schlagweite wiederum ist etwas kürzer als in typischen realen Hochspannungsanordnungen und entspricht somit einer Modellanordnung. Gründe für die Verwendung dieser beiden Prüfgefäße 1 und 2 bestehen unter anderem darin, dass es sich bei beiden um typische in der Hochspannungstechnik zu findende Elektrodenanordnungen handelt, wie auch aus Tabelle 21 in Abschnitt 2.2.4 hervorgeht.

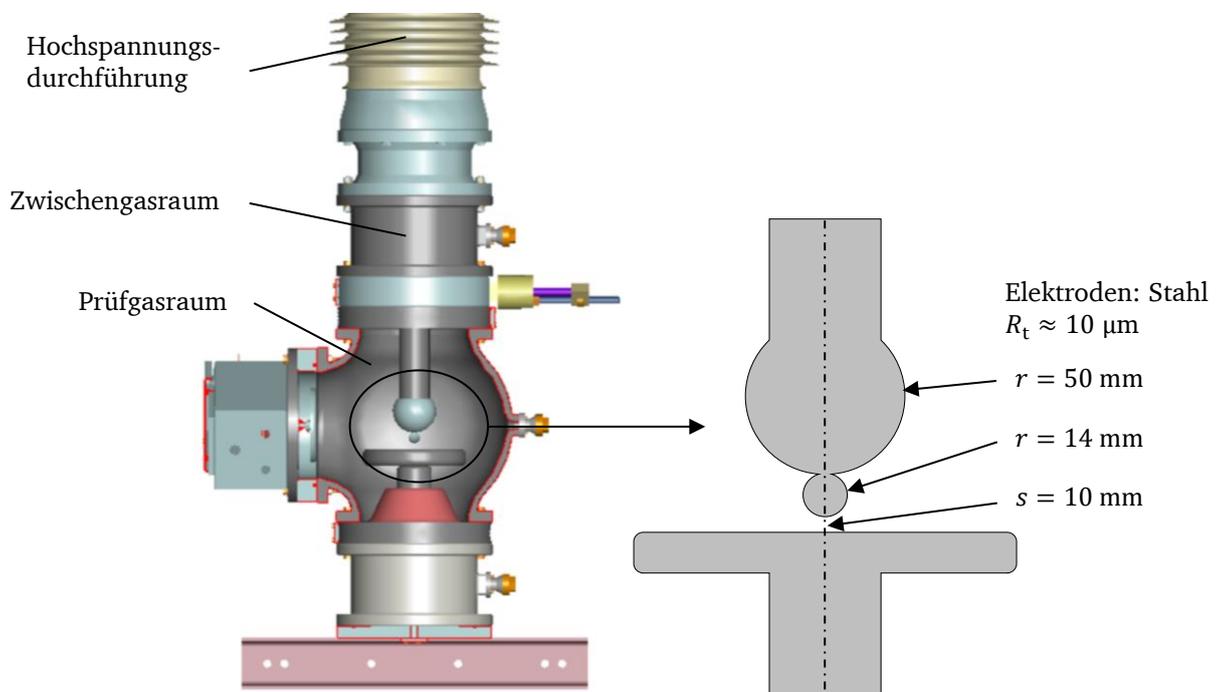


Abbildung 4.1: Prüfgefäß 1 mit Kugel-Platten-Elektrodenanordnung mit Schlagweite $s = 10 \text{ mm}$, Gasvolumen $V \approx 50 \text{ l}$ und Homogenitätsgrad $\eta \approx 0,64$

Das zweite Prüfgefäß ist in Abbildung 4.2 dargestellt und besteht aus fünf separaten Gasräumen. Der rechts im Bild dargestellte Prüfgasraum besitzt mit etwa 100 l das doppelte Gasvolumen des Prüfgasraums des ersten Prüfgefäßes. Im zweiten Prüfgefäß befindet sich eine anaxiale Zylinderanordnung aus Aluminium mit höherer Elektrodenrauigkeit als beim ersten Prüfgefäß mit einer maximalen Rautiefe R_t von etwa 30 μm , die an der Stelle mit dem kleinsten Elektrodenabstand eine Schlagweite s von 25 mm besitzt. Die zweidimensionale elektrische Feldberechnung mit COMSOL Multiphysics® ergibt einen Homogenitätsgrad der Elektrodenanordnung η von etwa 0,78 an der Stelle mit der

geringsten Schlagweite. Prüfgefäß 2 entspricht mit der zylinderähnlichen Verteilung des elektrischen Feldes, den größeren Elektrodenoberflächen und der größeren Oberflächenrauigkeit der Elektroden besser dem Vorbild einer realen GIL- und GIS-Anordnung als Prüfgefäß 1 mit seiner sphärischen Verteilung des elektrischen Feldes, der geringeren Elektrodenoberfläche und der geringeren Oberflächenrauigkeit der Elektroden.

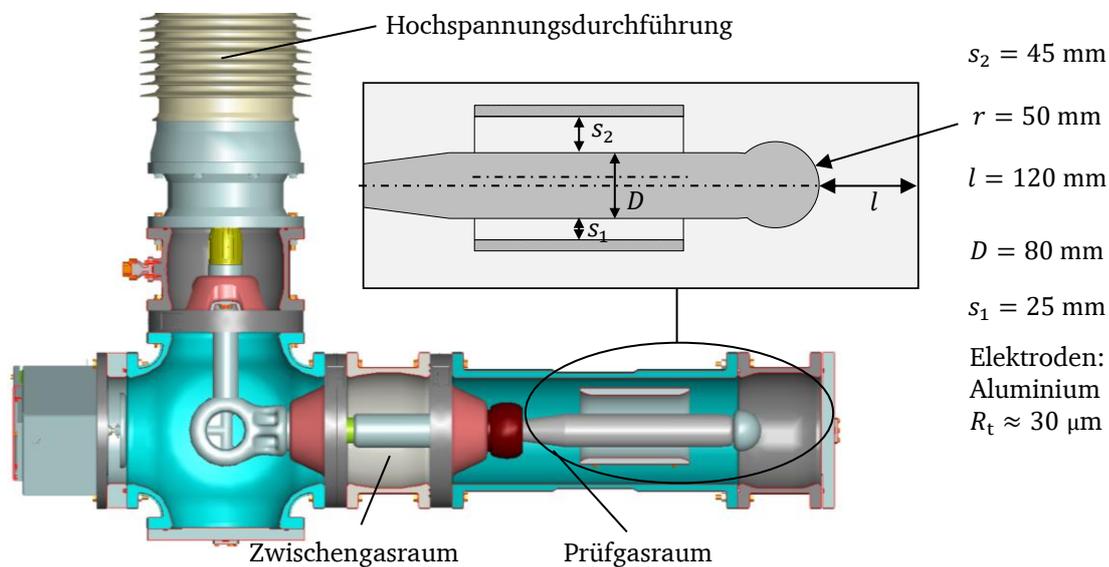


Abbildung 4.2: Prüfgefäß 2 mit anaxialer Zylinder-Elektrodenanordnung mit Schlagweite $s = 25 \text{ mm}$, Gasvolumen $V \approx 100 \text{ l}$ und Homogenitätsgrad $\eta \approx 0,78$

Das alternative Isoliergasgemisch, welches sich in den elektrischen Durchschlagsuntersuchungen in diesen beiden Prüfgefäßen 1 und 2 als am geeignetsten herausstellt, wird abschließend in dem in Abbildung 4.3 dargestellten Prüfgefäß 3, einer realen 420 kV GIL, erneut hinsichtlich der elektrischen Durchschlagfestigkeit untersucht.

Das Prüfgefäß 3 besteht aus drei separaten Gasräumen, wobei der rechts im Bild dargestellte Prüfgasraum ein Gasvolumen von 650 l aufweist. Im Prüfgasraum befindet sich eine reale GIL-Anordnung sowie die in Abschnitt 0 beschriebenen Elemente einer realen GIL: eine entlang des Bodens des Gehäuses befindliche Partikelfalle, zwei Stützisolatoren und ein Scheibenisolator. Die Partikelfalle ist 1 m lang und befindet sich im Bereich des Stützisolators. Der gasdurchlässige Scheibenisolator befindet sich in der Modelldarstellung in Abbildung 4.3 auf der linken Seite des Prüfgasraums. Somit ermöglicht der gezeigte Prüfaufbau 3 auch die Berücksichtigung von Durchschlägen entlang der Isolatoroberflächen sowie die Untersuchung der Wirksamkeit der Partikelfalle, die in Kapitel 7 beschrieben wird.

In diesen drei schrittweise größeren und GIL-ähnlicheren Versuchsaufbauten wird zudem die Skalierbarkeit der gemessenen Durchschlagspannungen ermittelt.

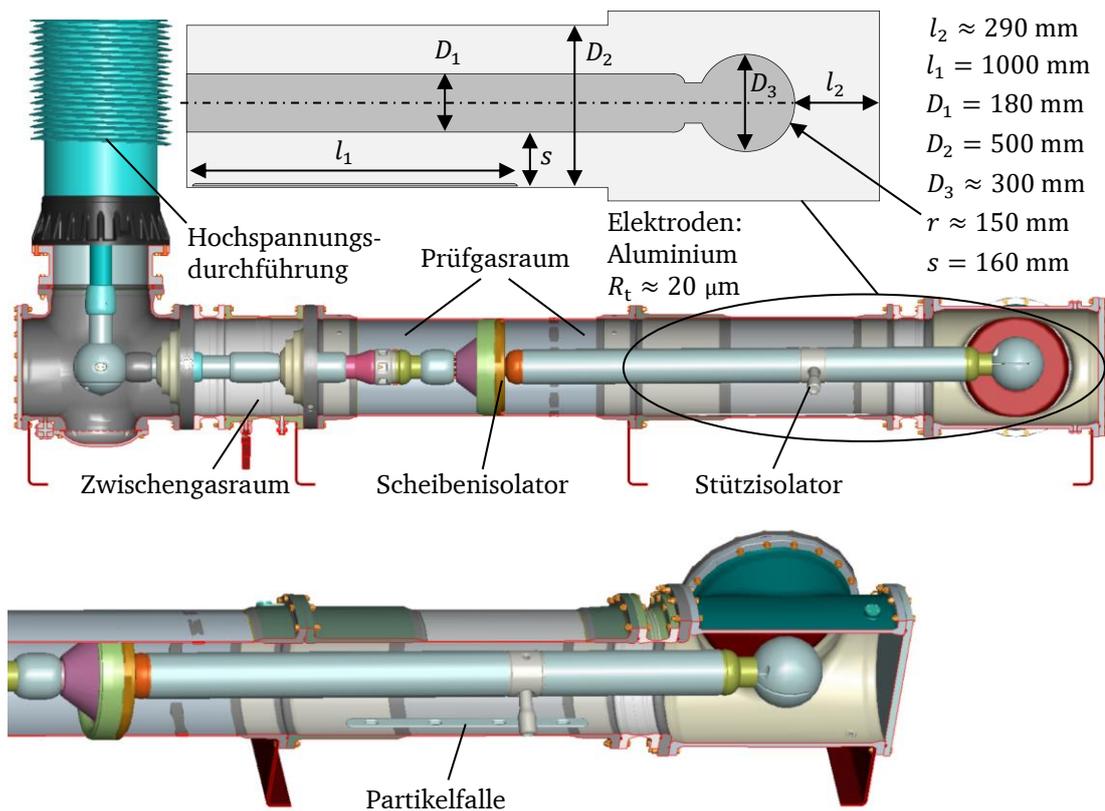


Abbildung 4.3: Prüfgefäß 3 mit realer GIL-Elektrodenanordnung mit Schlagweite $s = 160$ mm, Gasvolumen $V \approx 650$ l und Homogenitätsgrad $\eta \approx 0,57$ des untersuchten coaxialen Teils

Als Spannungsquelle im Zuge der AC-Versuche wurde eine Wechselspannungskaskade verwendet, die primärseitig von einem Ward-Leonard-Umformer gespeist wurde. Weitere Details zur Wechselspannungskaskade, zum Stoßspannungsgenerator und zu den zugehörigen Messsystemen können Anhang A.1 entnommen werden.

4.2 Versuchsdurchführung

Ersatzschaltbilder der verwendeten Versuchskreise sind in Anhang A.1 abgebildet. Bei der Versuchsdurchführung der elektrischen Durchschlagsuntersuchungen sind konstante Versuchsbedingungen unerlässlich. Um den möglichen Einfluss von Feuchtigkeit im Prüfgasraum auf die Ergebnisse der Durchschlagsuntersuchungen, wie sie beispielsweise in Tabelle 12 in Abschnitt 2.2 ersichtlich ist, zu vermeiden, wurden die Prüfgasräume der drei Prüfgefäße vor den ersten Versuchsreihen und auch bei längeren Standzeiten zwischen den Versuchsreihen mit Stickstoff auf einen Druck geringfügig oberhalb von 0,1 MPa gefüllt und Trockenmittelbeutel in die Prüfgasräume gegeben. Zum Ausgleich von Temperaturschwankungen von mehr als 2 °C um die Labornormaltemperatur von 20 °C wurde eine temperaturbedingte Druckkompensation nach Gleichung 2.6 in Abschnitt 2.1.2 durchgeführt, um so den Einfluss der Isoliergastemperatur auf die Durchschlagfestigkeit herauszurechnen.

Die in Prüfgefäß 1 und 2 untersuchten alternativen Isoliergasgemische bestehen aus der Mischung eines der in Tabelle 6 in Abschnitt 2.1.6 gelisteten alternativen Isoliergaskandidaten C4N, C5K und HFO mit jeweils einem der in derselben Tabelle gelisteten Trägergase N₂ und CO₂. Bei den in der Tabelle 6 aufgeführten Gasen handelt es sich, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, um Isoliergase, die als potentielle umweltfreundlichere Alternativen für SF₆ in der Mittel- und Hochspannung in Betracht gezogen werden und zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit in der Diskussion stehen. Wie bereits in Abschnitt 2.1.5 beschrieben und wie aus Tabelle 6 in Abschnitt 2.1.6 hervorgeht, besitzen die hier untersuchten alternativen Isoliergaskandidaten eine zu hohe Kondensationstemperatur für die Verwendung als Reingas in einer typischen Hochspannungsanwendung. Daher ist die Mischung mit einem der beiden Trägergase N₂ oder CO₂ erforderlich. Das zu untersuchende Isoliergasgemisch wurde in allen durchgeführten Untersuchungen direkt im Prüfgasraum nach Partialdruck über ein digitales Manometer mit einer Anzeigegenauigkeit von 0,0001 MPa angemischt. Die beiden Gase der Isoliergasgemische werden nacheinander ins Prüfgefäß gefüllt, wobei wegen des geringeren Dampfdruckes mit dem fluorierten Testgas begonnen wird.

Aufgrund des zum Teil sehr geringen Anteils des Testgases im Isoliergasgemisch ist es essentiell, vor den Durchschlagsversuchen eine homogene Durchmischung der beiden Isoliergaskomponenten sicherzustellen. Da bei den Durchschlagsversuchen in Prüfgefäß 1 und 2 noch eine Vielzahl unterschiedlicher Isoliergasgemische untersucht und somit das eingefüllte Isoliergasgemisch häufig gewechselt wurde, wurde in den Prüfgasräumen dieser beiden Prüfgefäße ein Lüfter zur aktiven Durchmischung der beiden Isoliergaskomponenten eingebaut. Messungen mit einem WIKA Analysegerät Typ GA11 und einem DILO SF₆-Volumen-Prozentsatz-Messgerät 3-035R-R, die den Prozentsatz von SF₆ und C4N im Isoliergasgemisch angeben, zeigten eine homogene Durchmischung des eingefüllten Isoliergasgemisches in den Prüfgasräumen von Prüfgefäß 1 und 2 durch die aktive Durchmischung innerhalb von 1 h. Diese Zeit deckt sich gut mit der in [Des 2020b] angegebenen Zeit der Durchmischung eines Prüfgefäßes mit 44 l mittels Lüfter nach 0,5 h. Ein Nachteil der aktiven Durchmischung mittels Lüfter stellt jedoch dessen Anfälligkeit gegenüber der elektromagnetischen Einwirkung infolge des Gasdurchschlags und die damit verbundenen Wartungsarbeiten dar. Daher und aufgrund der dort eingegrenzten Auswahl an Isoliergasgemischen wurde für den Prüfgasraum von Prüfgefäß 3 die passive Gasdurchmischung auf Basis der natürlichen Diffusion gewählt. Prozentsatzmessungen zeigten hier eine homogene Durchmischung innerhalb von 72 h.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.5 beschrieben wurde, ist ein maßgeblicher Faktor bei der Festlegung der Partialdrücke der einzelnen Gaskomponenten im Isoliergasgemisch der Kondensationspunkt. Wie aus dem Abschnitt hervorgeht, wird dieser von den zu erwartenden Umgebungstemperaturen und dem Isoliergasdruck bestimmt. Bei den in Prüfgefäß 1 und 2 durchgeführten Durchschlagsuntersuchungen wurde entsprechend der normativ in [IEC 2011] festgelegten minimalen Betriebstemperatur von GIL, wie auch in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, eine einheitliche Kondensationstemperatur von –10 °C für

alle Isoliergasgemische gewählt, um eine praxisbezogene Vergleichbarkeit sicherzustellen. Um zudem die Druckabhängigkeit der Isoliergasgemische untersuchen zu können, wurden alle Gasgemische bei den beiden Drücken von 0,5 MPa und 0,7 MPa untersucht.

Auf Basis der Durchschlagsuntersuchungen für eine Kondensationstemperatur von -10 °C in Prüfgefäß 1 und 2 wurden weiterhin die geeignetsten zwei alternativen Isoliergasgemische ermittelt, deren Durchschlagspannung anschließend im Zuge einer Partialdruckvariation in Prüfgefäß 2 auch für Kondensationstemperaturen von -15 °C und -20 °C untersucht wurden. Die Partialdrücke der untersuchten Isoliergasgemische sind für einen Druck des Isoliergasgemisches von 0,5 MPa in Tabelle 23 und von 0,7 MPa in Tabelle 24 abgebildet. Aufgrund der Isoliergaszusammensetzung für identische Kondensationstemperaturen variieren die Prozentsätze an fluoriertem Testgas im Isoliergasgemisch.

Tabelle 23: Partialdrücke der untersuchten alternativen Isoliergasgemische für eine Kondensationstemperatur von -10 °C und einen Isoliergasdruck von 0,5 MPa – als Referenz 20 % SF₆ / 80 % N₂

Isoliergasgemisch	Partialdruck des fluorierten Testgases in hPa	Partialdruck des Trägergases in hPa	Prozentsatz an fluoriertem Testgas in %
C4N/N ₂	901	4099	18
C4N/CO ₂	772	4228	15,4
C5K/N ₂	226	4774	4,5
C5K/CO ₂	189	4811	3,8
HFO/N ₂	517	4483	10,3
HFO/CO ₂	438	4562	8,8
SF ₆ /N ₂	1000	4000	20

Tabelle 24: Partialdrücke der untersuchten alternativen Isoliergasgemische für eine Kondensationstemperatur von -10 °C und einen Isoliergasdruck von 0,7 MPa – als Referenz 20 % SF₆ / 80 % N₂

Isoliergasgemisch	Partialdruck des fluorierten Testgases in hPa	Partialdruck des Trägergases in hPa	Prozentsatz an fluoriertem Testgas in %
C4N/N ₂	901	6099	12,9
C4N/CO ₂	709	6291	10,1
C5K/N ₂	226	6774	3,2
C5K/CO ₂	174	6826	2,5
HFO/N ₂	517	6483	7,4
HFO/CO ₂	402	6598	5,7
SF ₆ /N ₂	1400	5600	20

Die Durchschlagspannungen wurden sowohl für den Scheitelwert der Wechsellspannung mit einer Frequenz von 50 Hz als auch für Normblitzstoßspannung (LI) mit einer Stirnzeit von 1,2 μs und einer Rückenhalbwertzeit von 50 μs mit positiver (LI+) sowie negativer (LI-) Polarität in Anlehnung an die Norm 62271-204:2011 bestimmt

[IEC 2011]. Zur Ermittlung der 50 %igen Durchschlagspannung U_{d50ac} der AC-Versuche wurde das Spannungssteigerungsverfahren mit einer Spannungssteigerung von etwa 3 kV/s verwendet. Für die 50 %ige Blitzstoßdurchschlagswahrscheinlichkeit U_{d50li} wurde das Auf-und-Ab-Verfahren genutzt, beginnend bei 80 % der zu erwartenden Durchschlagspannung und mit einer Steigerung von 3 % bis 5 % [Hau 1984]. Insgesamt wurden jeweils 10 Gasdurchschläge pro Spannungsform und Isoliergasgemisch durchgeführt. Nach jedem Gasdurchschlag wurde eine Wartezeit von mindestens 30 Sekunden eingehalten, um die Rückbildung des ionisierten Ladungskanal und somit die Unabhängigkeit der einzelnen Durchschläge sicherzustellen. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die hier abzubildende umfangreiche Prüfmatrix bestehend aus unterschiedlichen alternativen Isoliergaskandidaten, Trägergasen, Druckstufen, Partialdruckverhältnissen und Spannungsformen zeitlich umgesetzt werden konnte. Um jedoch auch neben der 50 %igen Durchschlagspannung U_{d50} auch die 10 %ige Durchschlagspannung U_{d10} richtig auswerten zu können, wären pro Spannungsstufe 15 Stoßspannungsbeanspruchungen erforderlich [Hau 1984].

Um für alle Durchschlagsuntersuchungen konstante Bedingungen sicherzustellen und einer möglichen Veränderung der Oberflächengüte der Elektroden entgegenzuwirken, wurden die Lichtbogenfußpunkte auf den Elektroden nach jeder Versuchsreihe mit Stahlwolle geglättet und die Elektroden anschließend mit in Ethanol getränkten fusselfreien Tüchern gereinigt. Durch die Analyse des Trends der 10 durchgeführten Gasdurchschläge wird weiterhin eine mögliche Konditionierung oder Dekonditionierung erfasst. Sollte ein Konditionierungseffekt auftreten, werden die konditionierenden beziehungsweise dekonditionierenden Durchschläge nicht berücksichtigt. In Voruntersuchungen zu den hier betrachteten Durchschlagsuntersuchungen konnten Abhängigkeiten der Durchschlagspannungen in aufeinanderfolgenden Messreihen im gleichen Prüfgefäß vom zuvor eingefüllten fluorierten Isoliergasgemisch beobachtet werden. Diese Abhängigkeiten werden in Kapitel 5 detaillierter untersucht. Da in Kapitel 5 die erzielten Ergebnisse jedoch zeitlich erst nach den hier in Kapitel 4 durchgeführten Untersuchungen vorlagen, konnte das in Kapitel 5 vorgeschlagene Vorgehen hier nicht berücksichtigt werden. Im Zuge von Abschnitt 5.3 wurde die Abhängigkeit der hier in Kapitel 4 gemessenen Durchschlagspannungen aufgrund von fluorierten Rückständen und der somit vorhandene relative Fehler auf $< 1\%$ abgeschätzt. Zur statistischen Kontrolle wurde der Trend der 10 durchgeführten Durchschläge ausgewertet. Zudem wurden zu Beginn der Untersuchungen durchgeführte Messreihen gegen Ende der Untersuchung erneut durchgeführt, was zu vergleichbaren Ergebnissen führte.

4.3 Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der durchgeführten Durchschlagsuntersuchungen vorgestellt und diskutiert. Zunächst werden die in Prüfgefäß 1 und Prüfgefäß 2 ermittelten Durchschlagsspannungen präsentiert und anschließend gegenübergestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Partialdruckvariation für Kondensationstemperaturen von -15 °C und -20 °C der auf Basis der Durchschlagsuntersuchungen geeignetsten zwei alternativen Isoliergasgemische präsentiert. Abschließend werden die erzielten Durchschlagsspannungen des ermittelten geeignetsten alternativen Isoliergases in Prüfgefäß 3 beschrieben.

4.3.1 Prüfgefäß 1 – Kugel-Platte Anordnung

Die Diagramme in Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 zeigen eine Übersicht der Durchschlagsspannungen U_{d50} der untersuchten Isoliergasgemische für eine Kondensationstemperatur von -10 °C in der Kugel-Platte-Anordnung mit einer Schlagweite von 10 mm in Prüfgefäß 1. Die in den Diagrammen eingezeichneten Durchschlagsspannungen repräsentieren den Mittelwert aus 10 gemessenen Durchschlägen jeweils für die Spannungsformen LI+, LI- und AC für die alternativen Isoliergasgemische mit einer Kondensationstemperatur von -10 °C aus Tabelle 23 für einen Druck von 0,5 MPa und aus Tabelle 24 für einen Druck von 0,7 MPa. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an.

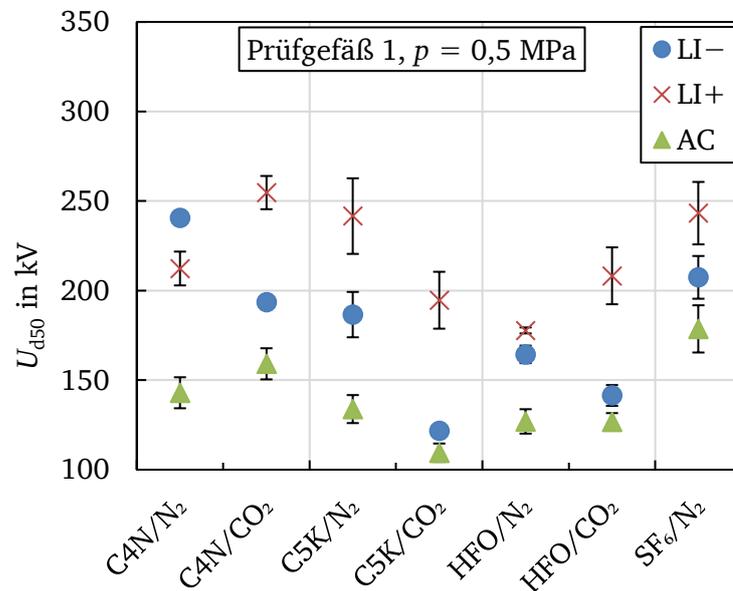


Abbildung 4.4: Durchschlagsspannung U_{d50} der alternativen Isoliergasgemische in Prüfgefäß 1 mit Kugel-Platte-Anordnung, Schlagweite $s = 10\text{ mm}$ und Kondensationstemperatur -10 °C für einen Druck $p = 0,5\text{ MPa}$ und als Referenz 20 % SF₆ / 80 % N₂

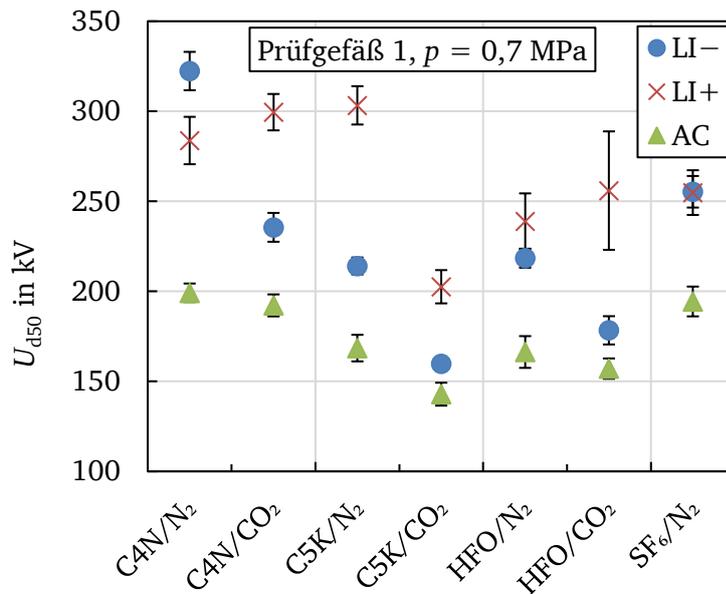


Abbildung 4.5: Durchschlagspannung U_{d50} der alternativen Isoliergasgemische in Prüfgefäß 1 mit Kugel-Platte-Anordnung, Schlagweite $s = 10$ mm und Kondensationstemperatur -10 °C für einen Druck $p = 0,7$ MPa und als Referenz 20 % SF₆ / 80 % N₂

Die Durchschlagspannungen für Beanspruchung LI+ zeigen für beide Drücke wie erwartet die größte Streuung der Messwerte, was auf Polaritätseffekte beim Durchschlagsprozess und somit auf eine größere Standardabweichung zurückzuführen ist. Bei 0,5 MPa wies LI+ C5K/N₂ die größte Streuung auf, bei 0,7 MPa HFO/N₂. Es lässt sich jedoch kein eindeutiger Trend der Streuung bezüglich Testgas oder Trägergas feststellen. Eine weitere Auffälligkeit besteht darin, dass einzig für C4N/N₂ LI+ für beide untersuchten Drücke die kritischere Polarität darstellt. Beim Blick auf die im kommenden Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Ergebnisse von Prüfgefäß 2 zeigt sich in Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7, dass dort für C4N/N₂ LI- die konditionierende Polarität darstellt.

Zur besseren Quantifizierung zeigt Tabelle 25 die auf das Referenzgas SF₆/N₂ bezogene relative elektrische Festigkeit der alternativen Isoliergasgemische für die drei unterschiedlichen Beanspruchungsarten LI+, LI- und AC.

Tabelle 25: Auf SF₆/N₂ bezogene relative Durchschlagspannung U_{d50} der alternativen Isoliergasgemische in Prüfgefäß 1 mit Kugel-Platte-Anordnung mit Schlagweite von 10 mm und Kondensationstemperatur -10 °C für einen Druck von 0,5 MPa und 0,7 MPa

		C4N/N ₂	C4N/CO ₂	C5K/N ₂	C5K/CO ₂	HFO/N ₂	HFO/CO ₂	SF ₆ /N ₂
0,5 MPa	LI-	1,16	0,93	0,90	0,59	0,79	0,68	1
	LI+	0,87	1,05	0,99	0,80	0,73	0,86	1
	AC	0,80	0,89	0,75	0,61	0,71	0,71	1
0,7 MPa	LI-	1,26	0,92	0,84	0,63	0,86	0,70	1
	LI+	1,11	1,18	1,19	0,79	0,94	1,00	1
	AC	1,02	0,99	0,87	0,74	0,86	0,81	1

Im Durchschnitt der drei Spannungsbeanspruchungen zeigt sich, dass alle untersuchten alternativen Isoliertgasgemische stärker vom Druckanstieg von 0,5 MPa auf 0,7 MPa profitieren als SF₆/N₂. Eine mögliche Erklärung liegt in dem bei SF₆ in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen schwach degressiven Verhaltens mit steigendem Druck [Hop 2020].

Für einen Gasdruck von 0,5 MPa und unter AC-Beanspruchung liegt die Durchschlagfestigkeit aller untersuchten alternativen Isoliertgasgemische unterhalb der des Referenzgases SF₆/N₂, wobei die beiden Isoliertgasgemische C4N/N₂ und C4N/CO₂ die höchste Durchschlagfestigkeit der alternativen Isoliertgasgemische aufweisen. Hinsichtlich der Durchschlagfestigkeit unter LI-Beanspruchung bei 0,5 MPa liegen die drei Isoliertgasgemische C4N/N₂, C4N/CO₂ und C5K/N₂ auf ähnlichem Niveau wie SF₆/N₂. C5K/CO₂ und die beiden HFO-Isoliertgasgemische liegen deutlich unterhalb der Durchschlagfestigkeit des Referenzgasgemisches.

Für einen Gasdruck von 0,7 MPa unter AC-Beanspruchung sind die Durchschlagfestigkeiten der beiden C4N-Isoliertgasgemische in etwa ebenbürtig zu denen von SF₆/N₂. Unter LI-Beanspruchung liegen ihre Durchschlagfestigkeiten höher als die von SF₆/N₂ mit der einzigen Ausnahme LI+ von C4N/CO₂, welche etwas niedriger liegen.

Das Isoliertgasgemisch C5K/N₂ besitzt eine höhere Durchschlagfestigkeit unter LI+-Beanspruchung als das Referenzgas, liegt jedoch hinsichtlich der Durchschlagfestigkeit unter AC- und LI--Beanspruchung unterhalb von SF₆/N₂. Bis auf die Durchschlagfestigkeit von HFO/CO₂ unter LI+-Beanspruchung, die auf ähnlichem Niveau wie die von SF₆/N₂ liegt, erzielen die Isoliertgasgemische C5K/CO₂, HFO/N₂ und HFO/CO₂ für alle drei Beanspruchungsarten niedrigere Durchschlagfestigkeiten als das Referenzgas.

Der Vergleich mit der in Tabelle 10 in Abschnitt 2.2.1 gezeigten Literatur, in der zum Erreichen der Spannungsfestigkeit von reinem SF₆ bei einem Isoliertgasdruck von 0,5 MPa ein prozentualer Anteil von 22 % C4N in C4N/CO₂ erforderlich ist, stimmt in etwa mit dem hier ermittelten Verhältnis zwischen 15,4 % C4N in C4N/CO₂ und 20 % SF₆ in SF₆/N₂, welches wie Abbildung 2.5 zeigt etwa 70 % der elektrischen Festigkeit von reinem SF₆ aufweist, überein.

Die in Tabelle 15 in Abschnitt 2.2.2 aufgezeigte Literatur [Koc 2018] gibt an, dass zum Erreichen der elektrischen Festigkeit von 20 % SF₆ / 80 % N₂ 3,8 % C5K in C5K/CO₂ beziehungsweise 3 % C5K in C5K/CO₂ bei 0,6 MPa erforderlich wären statt der hier untersuchten 3,2 % C5K in C5K/N₂ und 2,5 % C5K in C5K/CO₂ bei jeweils 0,7 MPa. Die folglich unterhalb der elektrischen Festigkeit von SF₆ liegenden Durchschlagfestigkeiten der C5K-Isoliertgasgemische decken sich somit mit der Literatur.

Resümierend besitzen von den alternativen Isoliertgasgemischen mit einer Kondensationstemperatur von –10 °C die drei Isoliertgasgemische C4N/N₂, C4N/CO₂ und C5K/N₂ die höchsten Durchschlagfestigkeiten.

Der Einfluss der Drucksteigerung der Isoliergasgemische von 0,5 MPa auf 0,7 MPa auf die Durchschlagfestigkeit ist in Tabelle 26 veranschaulicht.

Tabelle 26: Verhältnisse der Durchschlagspannungen U_{d50} der alternativen Isoliergasgemische für eine Kondensationstemperatur von -10 °C für einen Druck von 0,7 MPa und 0,5 MPa in Prüfgefäß 1

	C4N/N ₂	C4N/CO ₂	C5K/N ₂	C5K/CO ₂	HFO/N ₂	HFO/CO ₂	SF ₆ /N ₂
LI-	1,34	1,22	1,15	1,31	1,33	1,26	1,23
LI+	1,34	1,18	1,26	1,04	1,34	1,23	1,05
AC	1,39	1,21	1,26	1,3	1,31	1,24	1,09

Wie die Tabelle zeigt, führt die Druckerhöhung von 0,5 MPa auf 0,7 MPa für alle untersuchten Isoliergasgemische zu einer Steigerung der elektrischen Festigkeit auf das 1,04- bis 1,39-fache. Auffällig ist das vergleichsweise geringe Verhältnis von 1,04 von C5K/CO₂ unter LI+, während unter LI- und AC die Verhältnisse deutlich höher liegen. Auch das vergleichsweise hohe Verhältnis von 1,23 von SF₆/N₂ unter LI- ist auffällig. Zur detaillierten Bewertung dieser beiden Auffälligkeiten wären weitere Messreihen erforderlich. Für die anderen Isoliergasgemische liegen die Verhältnisse der drei Belastungsarten in ähnlicher Größenordnung.

Tabelle 27 und Tabelle 28 zeigen die Verhältnisse der Durchschlagspannungen unter LI-- und LI+-Beanspruchung zu den Scheitelwerten der 50 %igen AC-Durchschlagspannungen für die 0,5 MPa- respektive 0,7 MPa-Isoliergasgemische.

Tabelle 27: Verhältnisse von LI- und LI+ zu AC der 0,5 MPa-Isoliergasgemische

	C4N/N ₂	C4N/CO ₂	C5K/N ₂	C5K/CO ₂	HFO/N ₂	HFO/CO ₂	SF ₆ /N ₂
LI-/AC	1,68	1,22	1,39	1,11	1,29	1,12	1,16
LI+/AC	1,49	1,60	1,81	1,78	1,40	1,64	1,36

Tabelle 28: Verhältnisse von LI- und LI+ zu AC der 0,7 MPa-Isoliergasgemische

	C4N/N ₂	C4N/CO ₂	C5K/N ₂	C5K/CO ₂	HFO/N ₂	HFO/CO ₂	SF ₆ /N ₂
LI-/AC	1,62	1,23	1,27	1,12	1,31	1,14	1,31
LI+/AC	1,42	1,56	1,80	1,42	1,44	1,63	1,31

Die Verhältnisse LI-/AC und LI+/AC zeigen eine Abhängigkeit vom Testgas und auch vom Trägergas. Für alle untersuchten Isoliergasgemische liegen die Verhältnisse der Durchschlagswerte unter LI- zu AC-Beanspruchung für beide Isoliergasdrücke auf sehr ähnlichem Niveau. Auffällig ist, dass C5K/CO₂ bei 0,5 MPa ein deutlich höheres LI+/AC Verhältnis aufweist als bei 0,7 MPa. Ebenfalls auffällig ist, dass SF₆/N₂ bei 0,7 MPa identische Verhältnisse von LI-/AC und LI+/AC aufweist, während bei 0,5 MPa das Verhältnis von LI-/AC niedriger als LI+/AC liegt. Bei allen sonstigen in der Tabelle

geführten Verhältnisse kann keine Druckabhängigkeit für die Drücke 0,5 MPa und 0,7 MPa beobachtet werden.

In den nachfolgenden Tabellen Tabelle 29 bis Tabelle 33 ist eine Gegenüberstellung der in Tabelle 27 und Tabelle 28 geführten Verhältnisse LI-/AC und LI+/AC mit den aus der Literatur in Abschnitt 2.2 entnommenen Verhältnissen aufgeführt.

Für C4N/CO₂ in Tabelle 29 zeigt sich, dass die hier ermittelten Verhältnisse bei ähnlicher Gaszusammensetzung in guter Übereinstimmung mit den Werten aus [Koc 2018] stehen. Beim Vergleich mit den Werten aus [Cig 2021] fallen die Verhältnisse relativ betrachtet etwa 10 % bis 15 % größer aus, jedoch mit einem sehr ähnlichen Trend zwischen den beiden Verhältnissen. Eine mögliche Erklärung ist der hier verwendete deutlich höhere Prozentsatz an C4N im Isoliergasgemisch von 15,4 % für das 0,5 MPa-Isoliergasgemisch und 10,1 % für das 0,7 MPa-Isoliergasgemisch im Vergleich zum 5 % für das 0,6 MPa-Isoliergasgemisch aus der Literatur.

Tabelle 29: Verhältnisse von LI- und LI+ zu AC von C4N/CO₂

	0,5 MPa C4N/CO ₂ (15,4 %/84,6 %)	0,7 MPa C4N/CO ₂ (10,1 %/89,9 %)	0,6 MPa C4N/CO ₂ (12,4 %/87,6 %) [Koc 2018]	0,6 MPa C4N/O ₂ /CO ₂ (5 %/5 %/90 %) [Cig 2021]
LI-/AC	1,22	1,23	1,23	1,05
LI+/AC	1,60	1,56	1,47	1,41

In Tabelle 30 sind die Verhältnisse für C4N/N₂ gelistet. Für LI+/AC stimmen die Verhältnisse sehr gut mit dem Verhältnis aus der Literatur überein, für LI-/AC sind die Verhältnisse deutlich größer als in der Literatur. Dies bestärkt die zuvor erwähnte Auffälligkeit, dass LI+ einzig bei C4N/N₂ die kritische Polarität darstellt. Da hier jedoch nur eine Literaturquelle vorliegt, ist eine eindeutige Aussage nicht möglich.

Tabelle 30: Verhältnisse von LI- und LI+ zu AC von C4N/N₂

	0,5 MPa C4N/N ₂ (18 %/82 %)	0,7 MPa C4N/N ₂ (12,9 %/87,1 %)	0,6 MPa C4N/N ₂ (15 %/85 %) [Koc 2018]
LI-/AC	1,68	1,62	1,22
LI+/AC	1,49	1,42	1,42

Tabelle 31 zeigt die Verhältnisse für C5K/CO₂. Die LI-/AC Verhältnisse liegen in guter Übereinstimmung miteinander und mit der Literatur [Cig 2021], während [Koc 2018] ein deutlich höheres Verhältnis aufweist. Hinsichtlich LI+/AC stellt das 0,5 MPa Isoliergasgemisch eine Auffälligkeit dar und liegt deutlich oberhalb der anderen Verhältnisse, die nahezu identisch ausfallen.

Tabelle 31: Verhältnisse von LI– und LI+ zu AC von C5K/CO₂

	0,5 MPa C5K/CO ₂ (3,8 %/96,2 %)	0,7 MPa C5K/CO ₂ (2,5 %/97,5 %)	0,6 MPa C5K/CO ₂ (3,8 %/96,2 %) [Koc 2018]	0,6 MPa C5K/O ₂ /CO ₂ (5,5 %/11 %/83,5 %) [Cig 2021]
LI–/AC	1,11	1,12	1,32	1,11
LI+/AC	1,78	1,42	1,44	1,43

Für C5K/N₂ sind die Verhältnisse in Tabelle 32 gelistet. Aus den Werten geht hervor, dass die Werte für LI–/AC leicht oberhalb der Literatur, die für LI+/AC sogar deutlich oberhalb der Literatur liegen. Da hier jedoch nur eine Literaturquelle vorliegt, kann keine eindeutige Aussage getroffen werden.

Tabelle 32: Verhältnisse von LI– und LI+ zu AC von C5K/N₂

	0,5 MPa C5K/N ₂ (4,5 %/95,5 %)	0,7 MPa C5K/N ₂ (3,2 %/96,8 %)	0,6 MPa C5K/N ₂ (3 %/97 %) [Koc 2018]
LI–/AC	1,39	1,27	1,21
LI+/AC	1,81	1,8	1,32

Für SF₆/N₂ sind die Verhältnisse in Tabelle 33 aufgeführt. Hier zeigt sich, dass die 0,5 MPa-Verhältnisse in guter Übereinstimmung mit [Cig 2021] stehen, während die 0,7 MPa-Verhältnisse besser mit [Koc 2018] übereinstimmen.

Tabelle 33: Verhältnisse von LI– und LI+ zu AC von SF₆/N₂

	0,5 MPa SF ₆ /N ₂ (20 %/80 %)	0,7 MPa SF ₆ /N ₂ (20 %/80 %)	0,6 MPa SF ₆ /N ₂ (20 %/80 %) [Koc 2018]	0,6 MPa SF ₆ [Cig 2021]
LI–/AC	1,16	1,31	1,44	1,15
LI+/AC	1,36	1,31	1,48	1,41

4.3.2 Prüfgefäß 2 – Anaxiale Zylinderanordnung

Analog zu den in Abschnitt 4.3.1 präsentierten Durchschlagfestigkeiten an der Kugel-Platte-Anordnung in Prüfgefäß 1, sind in Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 die Ergebnisse der Durchschlagsuntersuchungen der alternativen Isoliergasgemische mit einer Kondensationstemperatur von –10 °C an der anaxialen Zylinderanordnung in Prüfgefäß 2 dargestellt. Der Isoliergasdruck beträgt 0,5 MPa und 0,7 MPa und als Referenz dient das Isoliergasgemisch 20 % SF₆ / 80 % N₂.

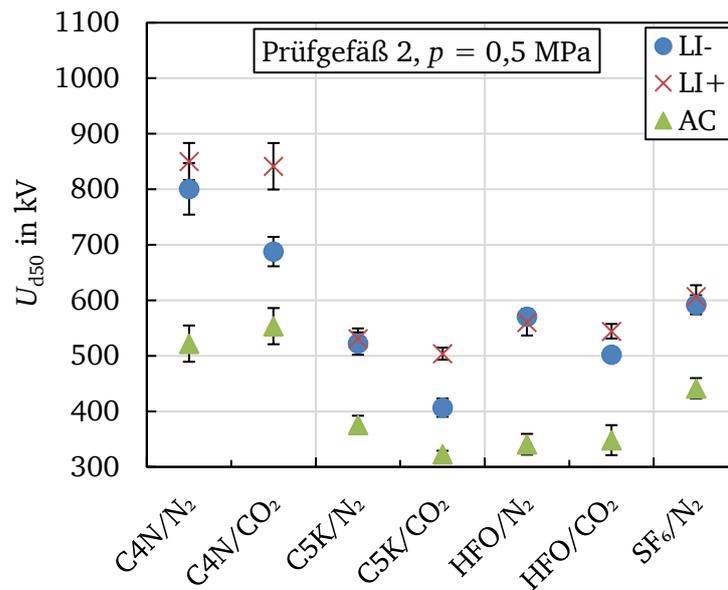


Abbildung 4.6: Durchschlagspannung U_{d50} der alternativen Isoliergasgemische in Prüfgefäß 2 mit anaxialer Zylinderanordnung, Schlagweite $s = 25$ mm und Kondensationstemperatur -10 °C für einen Druck $p = 0,5$ MPa und als Referenz 20 % SF₆ / 80 % N₂

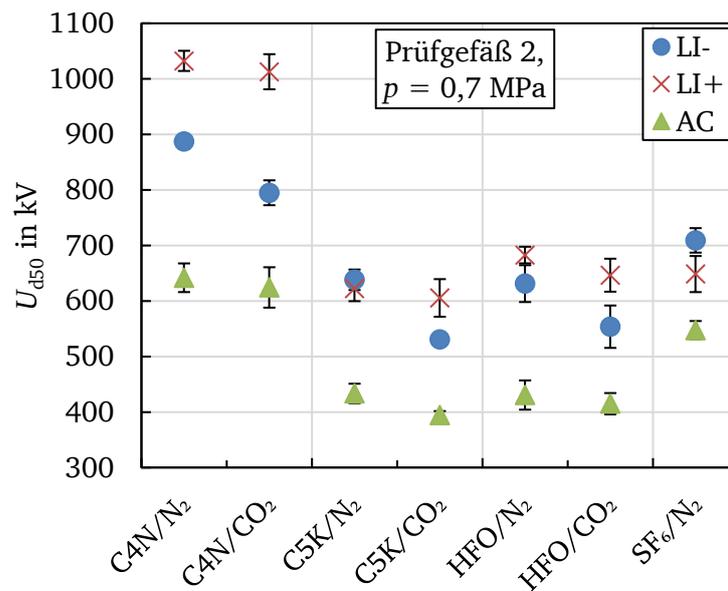


Abbildung 4.7: Durchschlagspannung U_{d50} der alternativen Isoliergasgemische in Prüfgefäß 2 mit anaxialer Zylinderanordnung, Schlagweite $s = 25$ mm und Kondensationstemperatur -10 °C für einen Druck $p = 0,7$ MPa und als Referenz 20 % SF₆ / 80 % N₂

In Tabelle 34 sind, wie bereits im vorangegangenen Kapitel, die auf das Referenzgas SF₆/N₂ bezogenen relativen elektrischen Festigkeiten der alternativen Isoliergasgemische für die drei unterschiedlichen Beanspruchungsarten dargestellt.

Tabelle 34: Auf SF₆/N₂ bezogene relative Durchschlagspannung U_{d50} der alternativen Isoliergasgemische in Prüfgefäß 2 mit anaxialer Zylinderanordnung mit Schlagweite von 25 mm und Kondensationstemperatur –10 °C für einen Isoliergasdruck von 0,5 MPa und 0,7 MPa

		C4N/N ₂	C4N/CO ₂	C5K/N ₂	C5K/CO ₂	HFO/N ₂	HFO/CO ₂	SF ₆ /N ₂
0,5 MPa	LI–	1,35	1,16	0,88	0,69	0,96	0,85	1
	LI+	1,40	1,39	0,87	0,83	0,92	0,90	1
	AC	1,18	1,25	0,85	0,73	0,77	0,79	1
0,7 MPa	LI–	1,25	1,12	0,90	0,75	0,89	0,78	1
	LI+	1,59	1,56	0,96	0,93	1,05	1,00	1
	AC	1,17	1,14	0,79	0,72	0,79	0,76	1

Verglichen mit dem Referenzgasgemisch SF₆/N₂ erzielen die beiden Isoliergasgemische C4N/N₂ und C4N/CO₂ unter LI-Beanspruchung bei beiden Druckstufen deutlich höhere Durchschlagfestigkeiten. Unter AC-Beanspruchung ist ihre Durchschlagfestigkeit auf beiden Druckstufen etwas höher als die von SF₆/N₂. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich die Oberflächen- und Volumeneffekte stärker auf SF₆/N₂ auswirken als auf die beiden alternativen Isoliergasgemische. Die vier Isoliergasgemische mit C5K und HFO liegen meist unterhalb der Durchschlagfestigkeit des Referenzgasgemisches, wobei die Isoliergasgemische mit N₂ als Trägergas leicht höhere Durchschlagfestigkeiten aufweisen als die mit CO₂.

Tabelle 35 zeigt analog zum vorangegangenen Abschnitt den Einfluss der Drucksteigerung von 0,5 MPa auf 0,7 MPa.

Tabelle 35: Verhältnisse der Durchschlagspannungen U_{d50} der alternativen Isoliergasgemische für eine Kondensationstemperatur von –10 °C für einen Isoliergasdruck von 0,7 MPa und 0,5 MPa in Prüfgefäß 2

	C4N/N ₂	C4N/CO ₂	C5K/N ₂	C5K/CO ₂	HFO/N ₂	HFO/CO ₂	SF ₆ /N ₂
LI–	1,11	1,16	1,22	1,31	1,11	1,10	1,20
LI+	1,21	1,20	1,17	1,20	1,22	1,19	1,07
AC	1,23	1,13	1,15	1,22	1,26	1,19	1,24

Wie die Tabelle zeigt, steigt die Durchschlagfestigkeit aller untersuchten Isoliergasgemische durch die Druckerhöhung und variiert zwischen dem 1,07- bis 1,31-fachen.

4.3.3 Gegenüberstellung Prüfgefäß 1 und Prüfgefäß 2

Um die Skalierbarkeit der durchgeführten Durchschlagsuntersuchungen zu analysieren, sind in Tabelle 36 die Verhältnisse der maximalen elektrischen Feldstärken im Moment des Durchschlags von Prüfgefäß 2 zu Prüfgefäß 1 aufgelistet. Diese wurden über COMSOL Multiphysics® berechnet. Verwendet wurden die Mittelwerte der Durchschlagsuntersuchungen.

Tabelle 36: Verhältnisse der elektrischen Durchschlagsfeldstärken in Prüfgefäß 2 zu Prüfgefäß 1

		C4N/N ₂	C4N/CO ₂	C5K/N ₂	C5K/CO ₂	HFO/N ₂	HFO/CO ₂	SF ₆ /N ₂
0,5 MPa	LI-	1,09	1,17	0,92	1,10	1,14	1,17	0,94
	LI+	1,31	1,08	0,72	0,85	1,03	0,86	0,82
	AC	1,20	1,14	0,92	0,97	0,88	0,90	0,81
0,7 MPa	LI-	0,9	1,11	0,98	1,09	0,95	1,02	0,91
	LI+	1,19	1,11	0,67	0,98	0,94	0,83	0,84
	AC	1,06	1,07	0,84	0,91	0,85	0,87	0,92

Wie aus der Tabelle ersichtlich wird, reichen die Verhältnisse der aus den beiden Prüfgefäßen ermittelten Durchschlagsfeldstärken von 0,67 bis 1,31 mit einem Mittelwert von 0,98. Es zeigt sich, dass insbesondere C5K/N₂ und SF₆/N₂ geringere Durchschlagsfeldstärken in Prüfgefäß 2 aufwiesen als in Prüfgefäß 1. Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass diese beiden Gase stärker von Oberflächen- und Volumeneffekte betroffen sind als die anderen Isoliergasgemische.

In beiden Prüfgefäßen erzielten die beiden Isoliergasgemische C4N/N₂ und C4N/CO₂ die höchste elektrische Durchschlagfestigkeit, während die beiden Isoliergasgemische C5K/CO₂ und HFO/CO₂ im Schnitt die geringste Durchschlagfestigkeit aufwiesen.

4.3.4 Variation der Kondensationstemperaturen –10 °C, –15 °C und –20 °C

Die bislang in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Durchschlagsuntersuchungen wurden stets an alternativen Isoliergasgemischen mit einer Kondensationstemperatur von etwa –10 °C durchgeführt. Da manche Anwendungen jedoch auch niedrigere Kondensationstemperaturen voraussetzen, werden im Folgenden die beiden Isoliergasgemische C4N/CO₂ und C4N/N₂, die wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben bislang die höchste Durchschlagfestigkeiten aufwiesen, Partialdruckvariationen unterzogen, um auch die Durchschlagfestigkeit für Kondensationstemperaturen von etwa –15 °C und etwa –20 °C zu untersuchen. Diese Partialdruckvariation wird erneut in Prüfgefäß 2 mit der anaxialen Zylinderanordnung mit einer geringsten Schlagweite von 25 mm durchgeführt. Die Partialdrücke der untersuchten Isoliergasgemische sind für einen Isoliergasdruck von 0,5 MPa in Tabelle 37 und für einen Isoliergasdruck von 0,7 MPa in Tabelle 38 aufgelistet.

Tabelle 37: Partialdrücke der untersuchten Isoliertgasgemische für eine Kondensationstemperatur von -10 °C , -15 °C und -20 °C und einen Isoliertgasdruck von 0,5 MPa – als Referenz 20 % SF_6 / 80 % N_2

Isoliertgasgemisch (Kondensationstemperatur)	Partialdruck des fluorierten Testgases in hPa	Partialdruck des Träertgases in hPa	Prozentsatz an fluoriertem Testgas in %
$\text{C}_4\text{N}/\text{N}_2$ (-10 °C)	901	4099	18
$\text{C}_4\text{N}/\text{N}_2$ (-15 °C)	736	4264	14,7
$\text{C}_4\text{N}/\text{N}_2$ (-20 °C)	595	4405	11,9
$\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$ (-10 °C)	772	4228	15,4
$\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$ (-15 °C)	631	4369	12,6
$\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$ (-20 °C)	510	4490	10,2
SF_6/N_2 (-10 °C)	1000	4000	20

Tabelle 38: Partialdrücke der untersuchten Isoliertgasgemische für eine Kondensationstemperatur von -10 °C , -15 °C und -20 °C und einen Isoliertgasdruck von 0,7 MPa – als Referenz 20 % SF_6 / 80 % N_2

Isoliertgasgemisch (Kondensationstemperatur)	Partialdruck des fluorierten Testgases in hPa	Partialdruck des Träertgases in hPa	Prozentsatz an fluoriertem Testgas in %
$\text{C}_4\text{N}/\text{N}_2$ (-10 °C)	901	6099	12,9
$\text{C}_4\text{N}/\text{N}_2$ (-15 °C)	736	6264	10,5
$\text{C}_4\text{N}/\text{N}_2$ (-20 °C)	595	6405	8,5
$\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$ (-10 °C)	709	6291	10,1
$\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$ (-15 °C)	580	6420	8,3
$\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$ (-20 °C)	424	6576	6,1
SF_6/N_2 (-10 °C)	1400	5600	20

Abbildung 4.8 oben zeigt die Durchschlagsspannungen über dem Partialdruck des Testgases im Isoliertgasgemisch $\text{C}_4\text{N}/\text{N}_2$ für einen Isoliertgasdruck von 0,5 MPa links und von 0,7 MPa rechts. In der unteren Hälfte derselben Abbildung sind analog die Durchschlagsspannungen der Partialdruckvariation für $\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$ dargestellt. Die Durchschlagsspannungen der Isoliertgasgemische mit dem geringsten Partialdruck des fluorierten Testgases stehen hierbei für Kondensationstemperaturen von etwa -20 °C und die mit dem höchsten Partialdruck des fluorierten Gases für Kondensationstemperaturen von etwa -10 °C . Das Referenzisoliertgasgemisch SF_6/N_2 besteht, wie bereits in den beiden vorangegangenen Kapiteln, unabhängig von der Kondensationstemperatur aus 20 % SF_6 und 80 % N_2 .

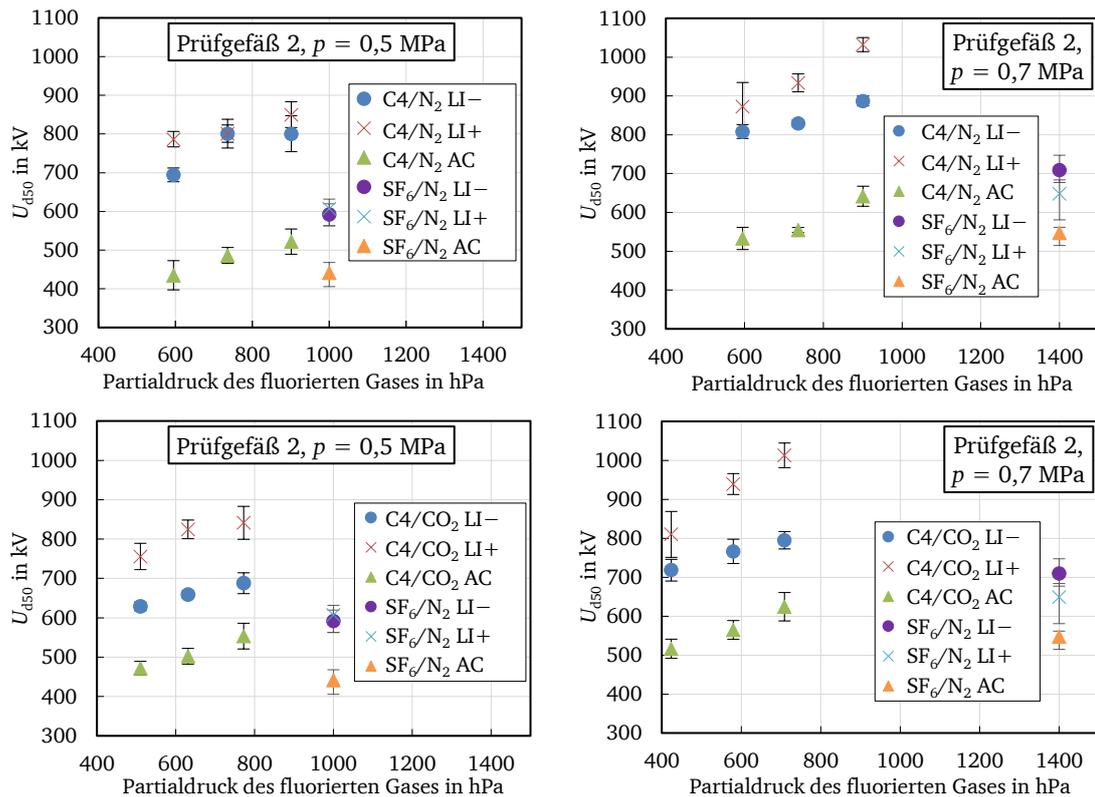


Abbildung 4.8: Durchschlagspannungen U_{d50} der alternativen Isoliergasgemische C4N/N₂ (oben) und C4N/CO₂ (unten) für Kondensationstemperaturen von etwa $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Partialdrücke des fluorierten Gases von niedrig nach hoch) und des Isoliergasgemisches 20 % SF₆ / 80 % N₂ an der anaxialen Zylinderanordnung in Prüfgefäß 2

4.3.5 Rußbildung im Zuge der Durchschlagsuntersuchungen

Infolge der durchgeführten Durchschlagsuntersuchungen kam es bei einigen Isoliergasgemischen zu einer sichtbaren teilweisen Zersetzung des Isoliergasgemisches und zum Niederschlag von Ruß an den Elektroden und an den Oberflächen im Prüfgefäß. Diese Zersetzung resultiert aus einer chemischen Reaktion, ausgelöst durch die Lichtbogenenergie. Da bei den hier durchgeführten Untersuchungen ein Prüftransformator mit Durchschlagserkennung mit automatischer Abschaltung innerhalb von etwa 5 ms eingesetzt wurde, ist die Lichtbogenenergie vergleichsweise gering. Bei Schalthandlungen oder Störlichtbögen im Isoliergas, bei denen eine wesentlich höhere Lichtbogenenergie umgesetzt wird, wird aus diesem Grund eine deutlich stärkere Zersetzung des Isoliergasgemisches erwartet. Wie die Untersuchung der Partialdruckvariation in Abschnitt 4.3.4 nahelegt, resultiert eine teilweise Zersetzung des Isoliergases auch in einer geringeren elektrischen Durchschlagfestigkeit des verbliebenen Isoliergasgemisches. In [Cig 2021] zeigt sich, dass im Zuge von elektrischen Durchschlagsuntersuchungen mit HFO 1234ze(E) zwar eine Rußbildung zu beobachten war, die Durchschlagfestigkeit davon in den meisten Fällen nicht beeinträchtigt wurde. Bei den in Abschnitt 2.2.3 beschriebenen Untersuchungen konnte im Zuge von 100 aufeinanderfolgenden AC-Durchschlägen in 20 % HFO / 80 % CO₂ und 20 % HFO / 80 % N₂ eine Abnahme der

elektrischen Durchschlagsfestigkeit beobachtet werden, die bei 20 % HFO / 80 % N₂ stärker ausgeprägt war als bei 20 % HFO / 80 % CO₂.

Untersuchungen des Rußes ergaben zudem, dass es sich hierbei unter anderem um den Niederschlag von elementarem Kohlenstoff handelt, welcher elektrisch leitfähig ist und im Falle eines Niederschlags auf Isolatoroberflächen zu einer zusätzlichen Senkung der elektrischen Festigkeit führen kann. Die Abbildung 4.9 bis Abbildung 4.12 zeigen Fotos, die die Bildung von Ruß an der inneren und äußeren Elektrode nach den Durchschlagsuntersuchungen darstellen.

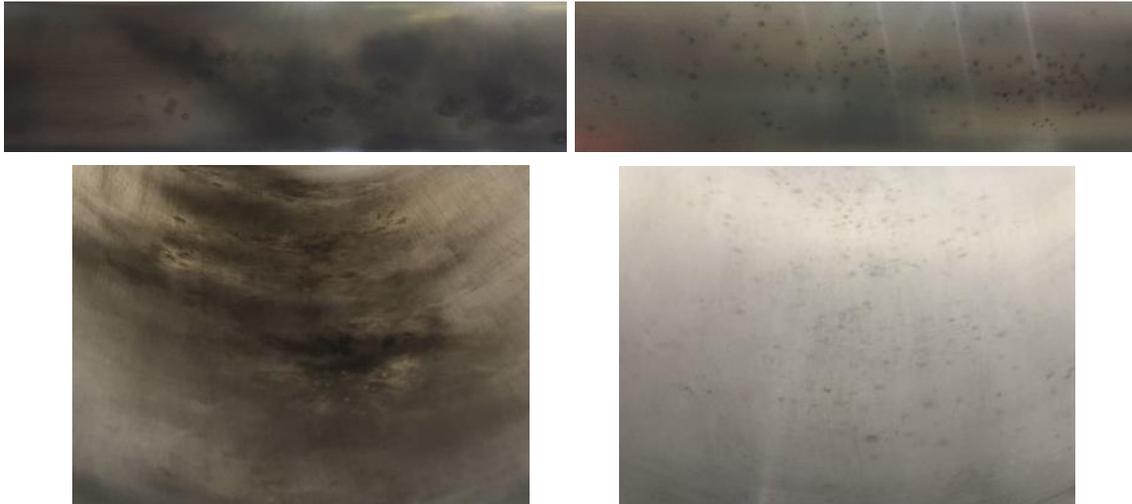


Abbildung 4.9: Fotografische Darstellung der Innenelektrode (oben) und der anaxialen Außenelektrode (unten) nach Durchschlägen in C4N/N₂ (links) und C4N/CO₂ (rechts)

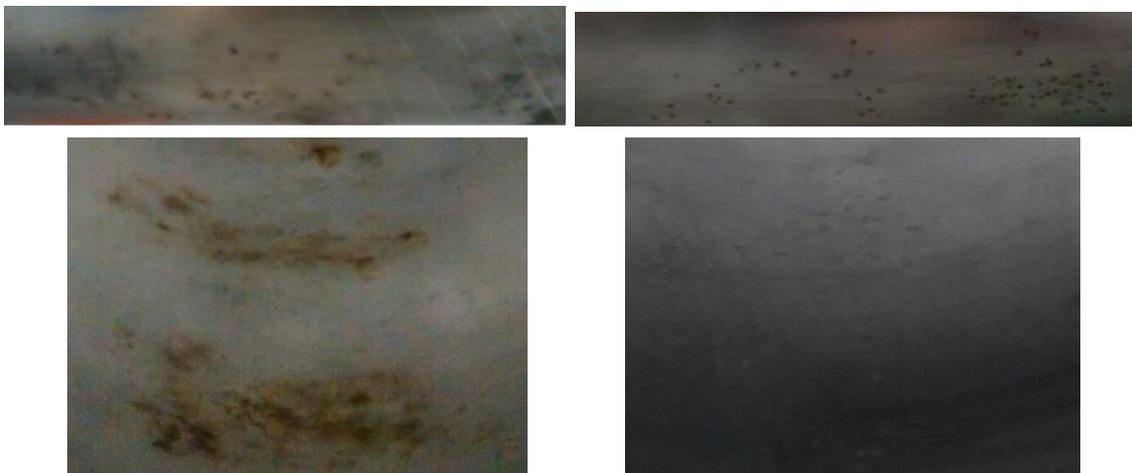


Abbildung 4.10: Fotografische Darstellung der Innenelektrode (oben) und der anaxialen Außenelektrode (unten) nach Durchschlägen in C5K/N₂ (links) und C5K/CO₂ (rechts)

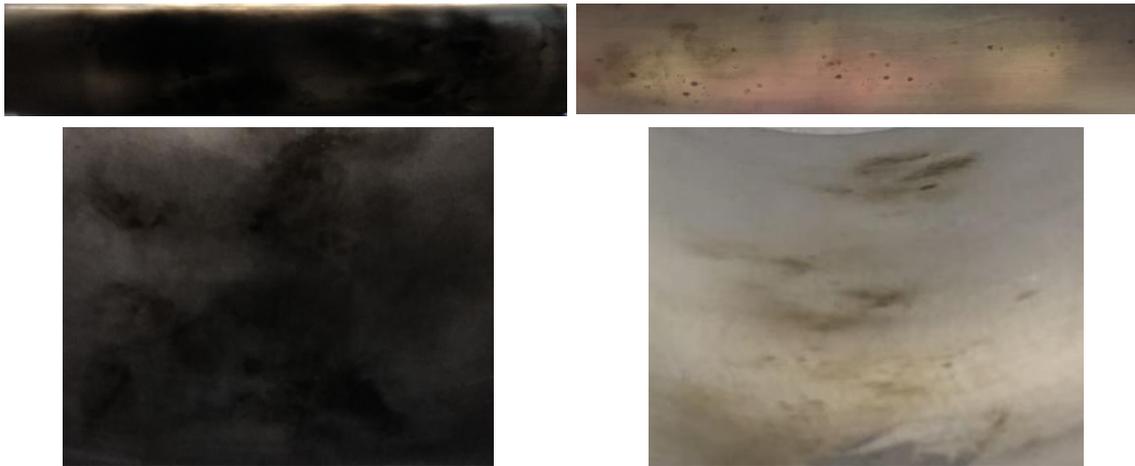


Abbildung 4.11: Fotografische Darstellung der Innenelektrode (oben) und der anaxialen Außenelektrode (unten) nach Durchschlägen in HFO/N₂ (links) und HFO/CO₂ (rechts)

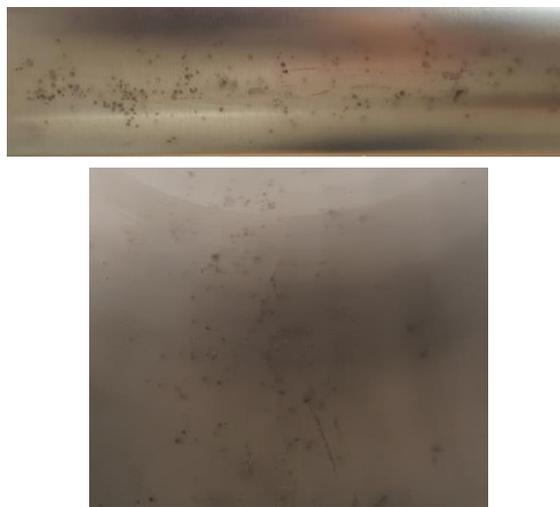


Abbildung 4.12: Fotografische Darstellung der Innenelektrode (oben) und der anaxialen Außenelektrode (unten) nach Durchschlägen in SF₆/N₂

Diese Untersuchungen wurden für verschiedene alternative Isoliertgasgemische und für SF₆/N₂ in Prüfgefäß 2 durchgeführt, wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Bei den schwarzen Punkten handelt es sich um Lichtbogenfußpunkte, die kein Anzeichen für Rußbildung sind. Wie aus den Abbildungen hervorgeht, konnte die Rußbildung insbesondere infolge des Gasdurchschlags bei Isoliertgasgemischen mit N₂ als Trägergas beobachtet werden. Tabelle 39 gibt eine qualitative Eingruppierung des Grads der Rußbildung der unterschiedlichen untersuchten Isoliertgasgemische nach vergleichbarem Energieeintrag durch Gasdurchschläge.

Tabelle 39: Grad der Rußbildung der untersuchten Isoliertgasgemische

	C4N/N ₂	C4N/CO ₂	C5K/N ₂	C5K/CO ₂	HFO/N ₂	HFO/CO ₂	SF ₆ /N ₂
Grad der Rußbildung	mittel	nichts	wenig bis mittel	nichts	viel	mittel	nichts

Die stärkste Rußbildung trat bei dem Isoliergasgemisch HFO/N₂ auf, wobei auch HFO/CO₂ stärkere Rußbildungen aufwies als andere Isoliergasgemische mit CO₂ als Trägergas. C4N/CO₂ und C5K/CO₂ führten zu keiner sichtbaren Rußbildung. Eine Rußbildung, insbesondere bei Isoliergasgemischen der Gruppe der Hydrofluoroolefine, jedoch auch bei C4N/N₂, wurde auch in den Veröffentlichungen [Pso 2018], [Li 2021], [Koc 2018] und [Cig 2021] genannt. Die Rußbildung kann, wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, durch die Beimischung von O₂ reduziert beziehungsweise verhindert werden, da O₂ den freiwerdenden Kohlenstoff bindet, was zur Bildung von CO₂ führt [Man 2016].

4.3.6 420 kV-AC-GIL-Aufbau

C4N/CO₂ und C4N/N₂ zeigten sich in den vorangegangenen Durchschlagsuntersuchungen in Prüfgefäß 1 und 2 in Abschnitt 4.3.1 bis Abschnitt 4.3.4 als die Isoliergasgemische mit der höchsten elektrischen Festigkeit. Allerdings wurde in Abschnitt 4.3.5 festgestellt, dass C4N/N₂ im Vergleich zu C4N/CO₂ eine stärkere Rußbildung aufweist. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde das Isoliergasgemisch C4N/CO₂ als das geeignetste unter den untersuchten alternativen Isoliergasgemischen identifiziert. Daher wird es in diesem Abschnitt in einem realen 420 kV-AC-GIL-Aufbau gemäß einer dielektrischen Prüfung, die der Typprüfung gemäß [IEC 2011] ähnelt, untersucht. Das Prüfprogramm umfasst AC-, LI- und SI-Prüfungen beider Polaritäten und ist in Tabelle 40 aufgeführt.

Tabelle 40: Spannungspegel des Prüfprogramms von C4N/CO₂ im realen 420 kV-AC-GIL-Aufbau in Anlehnung an [IEC 2011]

	U_{AC}	U_{LI}	U_{SI}
$U_m = 420 \text{ kV}$	520 kV	±1425 kV	±1050 kV
$U_m = 550 \text{ kV}$	650 kV	±1550 kV	±1175 kV

Die niedrigeren untersuchten Spannungspegel von $U_{AC} = 520 \text{ kV}$, $U_{LI} = 1425 \text{ kV}$ und $U_{SI} = 1050 \text{ kV}$ entsprechen den Werten einer Typprüfung einer 420 kV-Anlage, die höheren Spannungspegel $U_{AC} = 650 \text{ kV}$, $U_{LI} = 1550 \text{ kV}$ und $U_{SI} = 1175 \text{ kV}$ den Werten einer Typprüfung einer 550 kV-Anlage nach Norm [IEC 2011].

Diese Prüfungen werden für das alternative Isoliergasgemisch C4N/CO₂ mit einem Isoliergasdruck von 0,6 MPa für die in Tabelle 41 beschriebenen Partialdrücke für Kondensationstemperaturen von etwa $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ und $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt.

Tabelle 41: Partialdrücke der im realen GIL-Aufbau untersuchten Isoliergasgemische. C4N/CO₂ (–20 °C)* entspricht einem 0,7 MPa C4N/CO₂ (–20 °C) Isoliergasgemisch, das durch Druckverlust auf 0,6 MPa gefallen ist.

Isoliergasgemisch (Kondensations- temperatur)	Partialdruck des Testgases in hPa	Partialdruck des Trägergases in hPa	Prozentsatz an fluoriertem Testgas in %
C4N/CO ₂ (–10 °C)	741	5259	12,4
C4N/CO ₂ (–20 °C)	450	5550	7,5
C4N/CO ₂ (–20 °C)*	363	5637	6,1

Wie in Abschnitt 0 beschrieben, wird in GIL üblicherweise ein Isoliergasdruck von 0,7 MPa verwendet. Wie in Abschnitt 2.3.4 erläutert, unterliegen gasisolierte Anlagen einer Leckrate, durch die der Gasdruck im Laufe der Zeit sinkt und zu gegebener Zeit nachgefüllt werden muss. Bei den in Tabelle 41 geführten Isoliergasgemischen mit einem Isoliergasdruck von 0,6 MPa soll ein solcher Druckverlust betrachtet werden.

Beim ersten Isoliergasgemisch handelt es sich um das elektrisch festere C4N/CO₂ mit einer Kondensationstemperatur von –10 °C und einem Isoliergasdruck von 0,6 MPa. Beim zweiten Isoliergasgemisch wurde die Kondensationstemperatur auf –20 °C reduziert. Beim dritten Isoliergasgemisch wurde das Isoliergasgemisch so gewählt, dass dieses eine Kondensationstemperatur von –20 °C bei 0,7 MPa besitzt, der Isoliergasdruck jedoch auf 0,6 MPa gefallen ist. Hintergrund der Betrachtungen ist, dass beim Druckverlust vorwiegend die kleineren CO₂-Moleküle aus der Anlage diffundieren, die deutlich größeren C4N-Moleküle in der Regel in der Anlage verbleiben. Bei den ersten beiden Isoliergasgemischen werden somit realitätsnähere Szenarien betrachtet, während das dritte Isoliergasgemisch eine worst-case-Betrachtung beschreibt. Dadurch, dass das Isoliergasgemisch für eine Kondensationstemperatur von –20 °C und einen Isoliergasdruck von 0,7 MPa ausgelegt ist, besitzt das Isoliergasgemisch einen geringeren Partialdruck des fluorierten Testgases als ein für einen Isoliergasdruck von 0,6 MPa und einer Kondensationstemperatur von –20 °C ausgelegtes Isoliergasgemisch, wie das mit einem Stern markierte Isoliergasgemisch in Tabelle 41 zeigt.

Beim ersten Isoliergasgemisch traten zunächst vorwiegend bei der konditionierenden Belastungsart LI– Konditionierungsdurchschläge auf. Nach diesen Konditionierungsdurchschlägen konnte die volle Prüfspannung aller Belastungsarten gehalten werden.

Auch das zweite elektrisch schwächere Isoliergasgemisch C4N/CO₂ mit einer Kondensationstemperatur von –20 °C mit einem Isoliergasdruck von 0,6 MPa isolierte erfolgreich die volle Prüfspannung aller Belastungsarten. Um die Schwelle zu finden, bei der die Prüfung nicht mehr bestanden wird, wurde das für eine Kondensationstemperatur von –20 °C mit einem Isoliergasdruck von 0,6 MPa eingefüllte Isoliergas C4N/CO₂ schrittweise im Druck gesenkt. Erst bei einem Druck von 0,52 MPa traten wiederholt Durchschläge auf.

Auch das dritte Isoliergasgemisch konnte die Prüfung bestehen und wurde anschließend weiter stufenweise im Druck reduziert. Bis zu einer Druckabsenkung auf 0,57 MPa konnte das Isoliergasgemisch die Prüfung erfolgreich absolvieren, ab 0,55 MPa traten wiederholt Durchschläge bei der Belastungsart LI– auf. Dies liegt in guter Übereinstimmung zum zuvor betrachteten zweiten Isoliergasgemisch.

Die insgesamt 15 der im Zuge der hier beschriebenen Untersuchungen aufgetretenen Durchschläge traten alle innerhalb des Prüfgasraums auf. Lichtbogenfußpunkte konnten an den in Abbildung 4.13 markierten vier verschiedenen Stellen im Prüfgasraum ermittelt werden; diese Punkte stellen auch die elektrisch höchstbelasteten Bereiche des Prüfaufbaus dar. Die Untersuchung zeigt weiterhin, dass das für einen Isoliergasdruck von 0,7 MPa eingefüllte alternative Isoliergasgemisch C4N/CO₂ für eine Kondensations-temperatur von –20 °C bis auf einen Isoliergasdruck von 0,57 MPa und somit deutlich unterhalb des Nenndrucks von 0,7 MPa fallen darf und immer noch die 550 kV-Prüfung besteht.

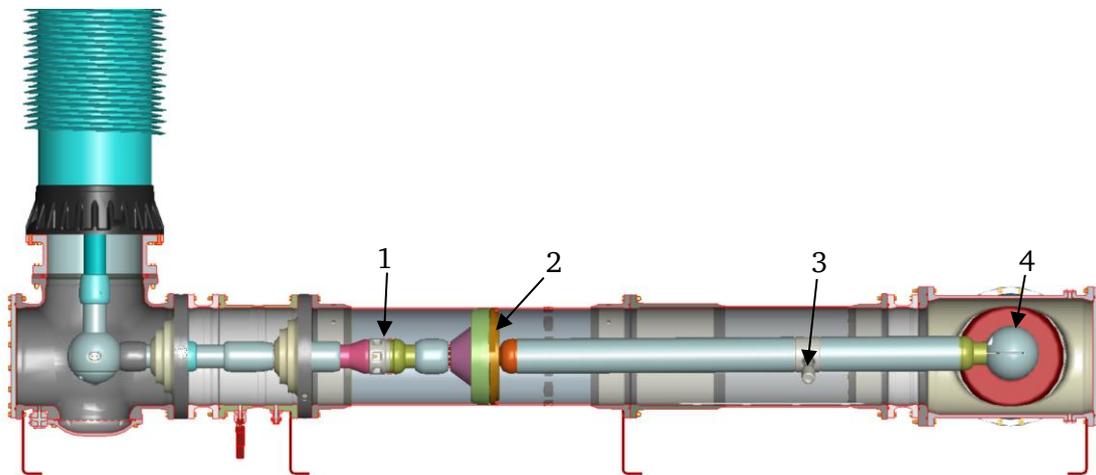


Abbildung 4.13: Markierungen der Bereiche mit Lichtbogenfußpunkten infolge von Durchschlägen im Prüfgasraum

Aus elektrischer Sicht zeigt sich somit, dass sich das alternative Isoliergas C4N/CO₂ als alternatives Isoliergas in GIL eignet und keine Überarbeitung des GIL-Designs erforderlich ist.

4.4 Zusammenfassung und Fazit

Im Zuge des Abschnittes 4 wurden die elektrischen Durchschlagsuntersuchungen der Isoliergasgemische C4N/N₂, C4N/CO₂, C5K/N₂, C5K/CO₂, HFO/N₂, HFO/CO₂ und als Referenz SF₆/N₂ in den schrittweise GIL-ähnlicheren Prüfgefäßen 1, 2 und 3 vorgestellt, wobei die gewählten Prüfparameter – wie Tabelle 23 in Abschnitt 2.2.4. zeigt – zum größten Teil mit den in [Cig 2021] empfohlenen Untersuchungsparametern übereinstimmen.

Für eine insbesondere für GIL-Anwendungen interessante Kondensationstemperatur von -10 °C besaßen die Isoliertgasgemische C4N/N_2 und C4N/CO_2 die höchsten Durchschlagfestigkeiten und lagen auf ähnlichem Niveau wie das Referenzgas SF_6/N_2 . In Prüfgefäß 2 wiesen C4N/N_2 , C4N/CO_2 zudem eine deutlich höhere elektrische Festigkeit unter LI-Beanspruchung und eine leicht höhere Festigkeit unter AC-Beanspruchung auf als SF_6/N_2 . Bezüglich ihrer elektrischen Festigkeiten stimmen die Isoliertgasgemische C4N/CO_2 , C5K/N_2 und C5K/CO_2 mit den in Abschnitt 2.2 gezeigten Literaturwerten in erster Näherung gut überein. Für die anderen Isoliertgasgemische liegen keine Vergleichswerte aus der Literatur vor. Auch die Verhältnisse der Durchschlagfestigkeiten nach Beanspruchungsarten LI-/AC und LI+/AC sind zum Großteil im Einklang mit der in Abschnitt 2.2 dargestellten Literatur.

Die Durchführung der dielektrischen Durchschlagsuntersuchungen in den Prüfgefäßen 1 und 2 zeigte, dass von den Ergebnissen der Kugel-Platte-Modellanordnung in Prüfgefäß 1 nicht zwingend auf die der anaxialen Anordnung in Prüfgefäß 2 geschlossen werden kann. Insbesondere C5K/N_2 , aber auch SF_6/N_2 besaßen in Prüfgefäß 2 geringere elektrische Festigkeiten als in Prüfgefäß 1, während die von C4N -Isoliertgasgemischen im Mittel höhere elektrische Festigkeiten aufwiesen. Eine mögliche Erklärung liegt im unterschiedlichen Verhalten der Isoliertgasfestigkeiten auf die in Prüfgefäß 2 stärker ausgeprägten Volumen- und Oberflächeneffekte. Als Konsequenz lässt sich festhalten, dass Prüfungen in Modellanordnungen zwar in erster Näherung gute Ergebnisse zur Gegenüberstellung der elektrischen Festigkeiten liefern können, diese eine Prüfung in einer realitätsnahen Anordnung jedoch nicht gänzlich ersetzen können.

Die Rußbildung war besonders stark bei Isoliertgasgemischen mit N_2 als Trägergas (außer SF_6) und mit HFO als Testgas ausgeprägt. In diesem Zusammenhang erwies sich C4N/CO_2 als der am besten geeignete Isoliertgaskandidat für GIL, obwohl es elektrisch gesehen etwa gleichwertig mit C4N/N_2 war. Bei der elektrischen Untersuchung von C4N/CO_2 in einem realen 420 kV-AC-GIL-Aufbau unter LI-, SI- und AC-Beanspruchung in Anlehnung an eine Typprüfung [IEC 2011] hat das Isoliertgasgemisch mit einer Kondensationstemperatur von -10 °C und auch von -20 °C den normativen Prüfpegeln der 550 kV-Prüfung standgehalten.

5 Abhängigkeitsstudie in Folgeversuchen mit fluorierten Isoliergasen

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse wurden erstmals in [Wie 2020b] vom Autor dieser Arbeit veröffentlicht.

Bei der Suche nach alternativen Isoliergasgemischen als Ersatz für SF₆ oder SF₆/N₂ ist die Ermittlung der elektrischen Durchschlagfestigkeit der einzelnen Isoliergasgemische, die im vorangegangenen Kapitel 4 vorgestellt wurde, essentiell. Die Durchschlagversuche unterschiedlicher Isoliergasgemische werden hierfür meist nacheinander im selben Prüfgefäß mit derselben Elektrodenanordnung durchgeführt, um zusätzlich zu einem geringeren Aufwand eine bessere Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse sicherzustellen. Zur Vermeidung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Messreihen werden das Prüfgefäß typischerweise nach jeder Messreihe evakuiert und die Elektroden mit Stahlwolle, Ethanol und fusselfreien Tüchern gereinigt, um auf deren Oberfläche zum Beispiel Spuren von Lichtbogenfußpunkten oder Ruß zu entfernen. Im Zuge von Voruntersuchungen zu den in Kapitel 4 beschriebenen Durchschlaguntersuchungen wurde trotz dieses Vorgehens eine Abhängigkeit der Durchschlagspannungen in aufeinanderfolgenden Messreihen im selben Prüfgefäß beobachtet. Die größte Auswirkung konnte bezüglich der Durchschlagfestigkeit von N₂ und CO₂ nach der Untersuchung fluorierter Gasgemische festgestellt werden. Bereits kleine Prozentsätze C₄N führen zu einer merkbaren Erhöhung der elektrischen Festigkeit von CO₂ [Kie 2017]. Dies ist auf den in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen Synergieeffekt zurückzuführen. Sowohl für C₄N/CO₂ als auch für C₄N/N₂ kann ein starker Synergieeffekt beobachtet werden, welcher ein Maximum für einen C₄N-Anteil von etwa 3 % bis 5 % erreicht [Des 2022]. Daher wird eine Anlagerung der fluorierten Gasmoleküle an die Oberflächen im Gasraum und eine Freisetzung im Laufe der Zeit in nachfolgenden Untersuchungen vermutet. In diesem Kapitel liegt der Schwerpunkt auf einem besseren Verständnis dieser Abhängigkeit und der beeinflussenden Parameter sowie der Erforschung möglicher Methoden zur Minimierung dieser Abhängigkeit. Dieses Wissen ist essentiell, um die Unabhängigkeit aufeinanderfolgender Experimente sicherzustellen.

5.1 Prüfaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung und Quantifizierung der oben beschriebenen Abhängigkeit wurden im selben Prüfgefäß in aufeinander folgenden Messreihen Durchschlaguntersuchungen

von fluorierten Isoliergasgemischen und von natürlichen Gasen unter AC-Beanspruchung durchgeführt.

Als Prüfgefäß wurde das links in Abbildung 5.1 gezeigte Hochspannungsprüfgefäß DG 100 von HIGHVOLT mit einem Gasvolumen V von 4 l, einem maximal zulässigen Fülldruck p von 0,5 MPa und einer maximal zulässigen AC-Beanspruchung von U_{eff} von 100 kV verwendet. Die Gefäßwand ist durchsichtig und besteht aus PVC-U. Im Prüfgefäß befindet sich die rechts in der Abbildung dargestellte Kugel-Platte Anordnung aus poliertem Aluminium mit einer Schlagweite s von 19 mm und einem durch elektrische Feldsimulationen ermittelten Homogenitätsgrad η von 0,38. Um die Schlagweite möglichst genau einstellen zu können und eine unbeabsichtigte Änderung des Abstandes aufgrund unterschiedlicher Drücke im Gasgefäß zu vermeiden, wurden die Elektroden auf einer eigens konstruierten über eine Mikrometerschraube einstellbaren Elektrodenhalterung montiert, die mittig in der Abbildung zu sehen ist.



Abbildung 5.1: Prüfgefäß und Kugel-Platte Elektrodenanordnung auf einstellbarer Elektrodenhalterung

Als Prüfkreis wurde der in Anhang A.2 dargestellte Wechselspannungsprüfkreis mit einer Frequenz f von 50 Hz und einer maximalen Effektivspannung U_{eff} von 100 kV verwendet. Die Durchschlagspannung wurde über einen gedämpft kapazitiven Teiler und ein Oszilloskop ausgewertet. Vor den ersten Versuchsreihen auch bei längeren Standzeiten zwischen den Versuchsreihen wurden Trockenmittelbeutel in das Prüfgefäß gegeben und das Prüfgefäß mit Stickstoff auf einem Druck leicht oberhalb von 0,1 MPa gefüllt, um einen möglichen Einfluss von Feuchtigkeit zu vermeiden.

Da die größte Abhängigkeit bei natürlichen Gasen beobachtet wurde, nachdem das Prüfgefäß zuvor mit einem fluorierten Isoliergasgemisch befüllt war, wurden die beiden natürlichen Isoliergase N_2 und CO_2 als Referenzgase verwendet. Im ersten Schritt wurde

als Referenz die Durchschlagspannung $U_{d50-Ref}$ für beide Isoliergase N_2 und CO_2 für einen Gasdruck von 0,3 MPa mit dem Spannungssteigerungsverfahren mit einer Spannungssteigerung von etwa 2 kV/s unter AC-Beanspruchung ermittelt. Hierfür wurden in dem in Abbildung 5.1 dargestellten neu angeschafften Prüfgefäß abwechselnd insgesamt drei Messreihen für jedes Isoliergas N_2 und CO_2 mit je zehn Durchschlägen durchgeführt.

Im zweiten Schritt wurde der Einfluss von fluorierten Gasgemischen durch einfaches Befüllen des Gefäßes mit einem fluorierten Gasgemisch für eine bestimmte Dauer ohne Spannungsanwendung untersucht, um einen Konditionierungseffekt der Elektroden zu vermeiden. Als fluoriertes Isoliergasgemisch wurden unterschiedliche Isoliergasgemische aus einem fluorierten Testgas (C4N, C5K und HFO), gemischt mit einem Trägergas natürlichen Ursprungs (N_2 und CO_2), untersucht. Bei diesen fluorierten Isoliergasen handelt es sich um die bereits in Abschnitt 2.1.6 beschriebenen alternativen Isoliergaskandidaten, die auch bei der Ermittlung der elektrischen Festigkeit in Kapitel 4 untersucht wurden. Nach Ablauf der zuvor festgelegten Expositionszeit des Gasraums gegenüber dem fluorierten Isoliergasgemisch wurde das fluorierte Isoliergasgemisch aus dem Prüfgefäß auf einen Restdruck <1 hPa abgesaugt und verblieb für weitere fünf Minuten an der Vakuumpumpe angeschlossen, um gasförmige Reststoffe zuverlässig und einheitlich über alle Versuche hinweg zu entfernen.

Direkt im Anschluss wurden im dritten Schritt abwechselnd Messreihen zur Ermittlung der Durchschlagfestigkeit der beiden natürlichen Isoliergase N_2 und CO_2 mit jeweils 10 Gasdurchschlägen erneut mit dem Spannungssteigerungsverfahren mit einer Spannungssteigerung von etwa 2 kV/s durchgeführt, um den Einfluss der Exposition des Gasraums gegenüber dem fluorierten Isoliergasgemisch zu ermitteln. Vor jeder Messreihe wurde nach der Befüllung des natürlichen Isoliergases eine Wartezeit von 10 Minuten eingehalten, um die Zeit, in der sich angelagerte fluorierte Moleküle freisetzen können, konstant zu halten. Die Messreihen beider Gase wurden hierbei so lange abwechselnd durchgeführt, bis in aufeinanderfolgenden Messreihen keine weitere Änderung der Durchschlagspannung messbar und somit der stationäre Zustand erreicht war. Zusätzlich wurde eine Analyse der Reihung der jeweils 10 ermittelten Gasdurchschläge durchgeführt, um ein mögliches konditionierendes oder dekonditionierendes Verhalten der Elektroden zu erkennen. Sollte ein solches Verhalten beobachtet werden, gelten die konditionierenden beziehungsweise dekonditionierenden Durchschlagswerte als ungültig.

Da die in diesem Kapitel gezeigte Abhängigkeitsuntersuchung durch die wiederholte meist mehrtägige Expositionszeiten des Prüfgefäßes mit den fluorierten Isoliergasgemischen insgesamt mehrere Monate in Anspruch nahm, schwankte die Umgebungstemperatur zwischen $20\text{ }^\circ\text{C}$ und $27\text{ }^\circ\text{C}$. Aus diesem Grund wurde auch bei den hier durchgeführten Untersuchungen eine temperaturbedingte Druckkompensation, wie sie in Gleichung 2.6 in Abschnitt 2.1.2 beschrieben wird, durchgeführt.

Vor jeder Referenzmessreihe und nach jeder abgeschlossenen Messreihe der hier durchgeführten Untersuchungen wurde das Prüfgefäß mit Ethanol und fusselfreien Tüchern gereinigt. Um auch angelagerte fluorierte Rückstände an den Gefäßoberflächen zu minimieren, wurde das Prüfgefäß zudem vor jeder Referenzmessreihe und nach jeder Messreihe nach Exposition des Gasraums gegenüber dem fluorierten Isoliergasgemisch mindestens sechsmal mit N_2 gespült und anschließend über mindestens 48 h evakuiert. Untersucht wurden Parameter wie die zur Anlagerung fluorierte Gasmoleküle zur Verfügung stehenden Oberflächen im Prüfgefäß, die Expositionszeit des Prüfgefäßes gegenüber dem fluorierten Isoliergasgemisch und die Art des fluorierten Isoliergasgemisches. Abschließend wird zudem die Wirksamkeit unterschiedlicher Methoden, wie zum Beispiel Evakuierungsdauer oder Gasspülungen, zur Vermeidung der Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen von zuvor durchgeführten Messreihen mit fluorierten Isoliergasgemischen analysiert und eine Empfehlung ausgesprochen.

5.2 Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der durchgeführten Abhängigkeitsstudien vorgestellt und anschließend diskutiert. Die in den dargestellten Diagrammen mit einem Dreieck markierten Durchschlagspannungen beschreiben jeweils die Durchschlagspannungen U_{d50} der Messreihen nach Exposition des Gasraums gegenüber dem fluorierten Isoliergasgemisch. Diese sind aufgetragen über der Nummer der Messreihe, wobei jede Messreihe aus jeweils 10 Einzeldurchschlägen besteht. In den Diagrammen befinden sich zusätzlich mit einem Kreuz gekennzeichnet die ReferenzDurchschlagspannungen $U_{d50-Ref}$ und die mit einer gepunkteten Linie markierten Mittelwerte der Referenzmessung. Bei den in den Diagrammen eingezeichneten Fehlerbalken handelt es sich um die Standardabweichung der 10 Einzelmessungen.

5.2.1 Einfluss von Materialoberflächen

In einer ersten Untersuchung wurde zur Analyse der zu Beginn dieses Kapitels beschriebenen Hypothese ein Vergleich des Einflusses ohne und mit zusätzlichen Materialproben im Prüfgefäß durchgeführt. Die Hypothese besagt, dass es sich bei der beobachteten Abhängigkeit um die Anlagerung fluorierte Moleküle an die im Prüfgefäß befindlichen Oberflächen und eine anschließende Freisetzung im Laufe der Zeit handelt.

Hierfür wurde eine Auswahl aller links in Abbildung 5.2 dargestellten typischen Materialproben aus gasisolierten Systemen in das Gasgefäß gegeben, um zusätzliche Oberflächen zur Anlagerung der fluororganischen Gasmoleküle bereitzustellen. Wie das Foto des Prüfgefäßes mit zusätzlich eingebrachten Materialien rechts im Bild zeigt, üben die eingebrachten Materialien keinen Einfluss auf die elektrischen Feldverhältnisse im Bereich der Elektrodenanordnung aus. Bei den Materialien handelt es sich um

kupferbeschichtetes Aluminium, silberbeschichtetes Aluminium, O-Ringe aus EPDM, Epoxidharz und Aluminium. Eine gesonderte Betrachtung der einzelnen Materialien ist in Abschnitt 5.2.4 zu finden.



Abbildung 5.2: Materialproben typischer Materialien gasisolierter Systeme (links), die als zusätzliche Anlagerungsfläche ins Prüfgefäß eingebracht wurden (rechts)

Da die im Rahmen der Voruntersuchungen zu den Durchschlagsuntersuchungen in Kapitel 4 beobachteten Abhängigkeiten insbesondere nach der Untersuchung von Isoliergasgemischen mit C4N bemerkbar waren, wurde hier zunächst das Isoliergasgemisch aus 500 hPa C4N gemischt mit 4500 hPa CO₂ zur Exposition des Gasraums gegenüber dem fluorierten Isoliergasgemisch genutzt. Abbildung 5.3 zeigt den Einfluss der Exposition des Gasraums gegenüber diesem Isoliergasgemisch mit einer Expositionszeit von 60 h auf die elektrische Durchschlagfestigkeit der natürlichen Gase N₂ und CO₂ in Folgeuntersuchungen links ohne und rechts mit zusätzlichen unterschiedlichen Materialproben im Prüfgefäß.

Da jede der Messreihen durch den Wechsel des eingefüllten natürlichen Isoliergases automatisch auch eine Gasspülung bedeutet, nimmt der Einfluss der Exposition mit jeder weiteren Messreihe nach der Exposition ab. Die Abbildung zeigt für die Untersuchung ohne zusätzliche unterschiedliche Materialproben eine Steigerung der Durchschlagfestigkeit der ersten Messreihe mit N₂ nach der Exposition um 3 % und die der zweiten Messreihe mit CO₂ um 3,7 %. Wie bereits in Abschnitt 5.1 beschrieben, wurde hierfür das Verhältnis aus der Durchschlagspannung U_{d50} der ersten Messreihe nach der Exposition und der Messreihe, sobald ein stationärer Wert erreicht wurde, genutzt. Bereits ab der dritten Messreihe ist nahezu kein Einfluss der Exposition messbar und der stationäre Zustand erreicht.

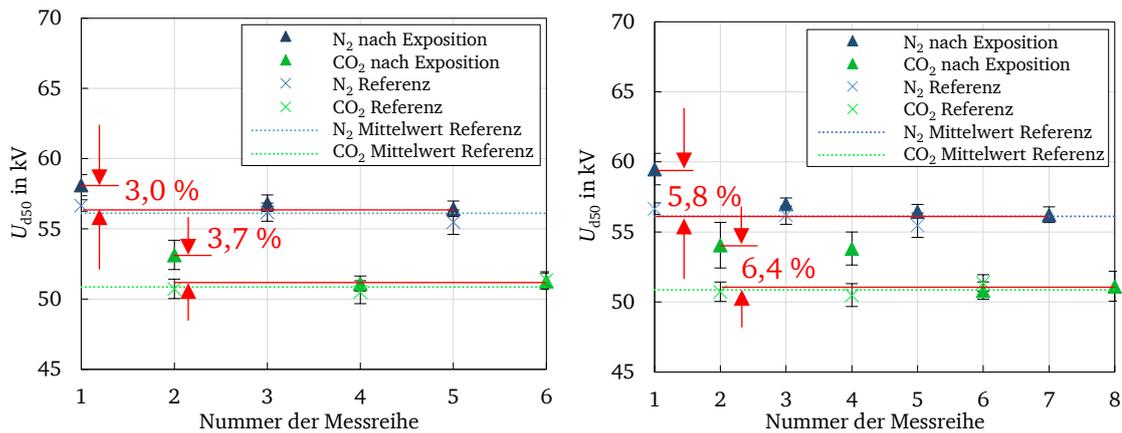


Abbildung 5.3: Vergleich des Einflusses auf die Durchschlagspannung in Folgeuntersuchungen nach einer Exposition des Gasraums gegenüber 500 hPa C4N / 4500 hPa CO₂ mit einer Expositionszeit von 60 h links ohne und rechts mit weiteren Materialproben im Prüfgefäß

Die Untersuchung mit zusätzlichen unterschiedlichen Materialproben auf der rechten Seite der Abbildung weist einen deutlich höheren Einfluss der Exposition auf die Folgeuntersuchungen auf. So ist die elektrische Durchschlagfestigkeit gegenüber dem stationären Wert der ersten Messreihe mit N₂ um 5,8 % erhöht und die der zweiten Messreihe mit CO₂ um 6,4 %. Auch Messreihen 3 und 4 weisen noch eine Erhöhung der Durchschlagfestigkeiten gegenüber dem stationären Wert auf, weshalb insgesamt 8 Messreihen durchgeführt wurden. Obwohl jede weitere Messreihe eine Spülung des Prüfgefäßes bedeutet, zeigt sich prozentual betrachtet ein größerer Einfluss der Exposition auf die zweite Messreihe mit CO₂ als auf die erste Messreihe mit N₂. Hinsichtlich der absoluten Erhöhung der Durchschlagfestigkeit liegen die erste und die zweite Messreihe etwa gleichauf.

Diese erste Untersuchung mit zusätzlichen unterschiedlichen Materialproben im Gefäß bestätigt also die Hypothese der Anlagerung fluorierter Gasmoleküle an die Oberflächen im Prüfgefäß und die anschließende Freisetzung im Laufe der Zeit. Um in weiteren Untersuchungen die Auswirkungen der Exposition deutlicher sichtbar zu gestalten, werden auch die weiteren Untersuchungen mit zusätzlichen Materialproben im Prüfgefäß durchgeführt. Hierfür wurde stets die gleiche Auswahl an Materialproben verwendet, um eine Einheitlichkeit sicherzustellen.

5.2.2 Einfluss der Expositionszeit

Im nächsten Schritt wurde der Parameter der Expositionszeit näher untersucht. Die Arbeitshypothese dieser Untersuchung besteht darin, dass eine längere Expositionszeit einer größeren Anzahl fluorierter Moleküle die Anlagerung an die Oberflächen im Prüfgefäß ermöglicht und sich somit eine größere Anzahl fluorierter Moleküle in weiteren Untersuchungen freisetzen kann. Es ist zu erwarten, dass es sich bei der Anlagerung um eine Art Ausgleichsvorgang handelt, bei der die Anlagerung fluorierter Gasmoleküle so

lange erfolgt, bis ein Gleichgewicht zwischen den an Oberflächen angelagerten Molekülen und denen im Gasraum vorliegt.

Hierfür wurde erneut das bereits in der ersten Untersuchung verwendete Isoliergasgemisch 500 hPa C4N gemischt mit 4500 hPa CO₂ zur Exposition des Gasraums verwendet. Insgesamt wurden sieben verschiedene Expositionsdauern des Prüfgefäßes mit dem fluorierten Isoliergasgemisch untersucht und deren Einfluss analog zur ersten Untersuchung bestimmt. Tabelle 42 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse und ordnet den sieben unterschiedlichen Expositionenzeiten jeweils die Erhöhung der elektrischen Festigkeit in der ersten Messreihe mit N₂ und in der zweiten Messreihe mit CO₂ zu.

Da sich in der ersten Untersuchung insbesondere die Erhöhung der Durchschlagfestigkeit in der ersten Messreihe in N₂ und in der zweiten Messreihe in CO₂ als charakteristische Größe für den Grad der Abhängigkeit herausgestellt hat, wurde diese im Folgenden als Maßstab verwendet.

Tabelle 42: Prozentuale Steigerung der Durchschlagspannung U_{d50} in der ersten Messreihe nach Exposition gegenüber 500 hPa C4N / 4500 hPa CO₂ mit unterschiedlichen Expositionenzeiten

Expositionszeit in h	Steigerung von U_{d50} in der ersten Messreihe nach Exposition	
	N ₂	CO ₂
20	2,1%	6,2%
48	3,6%	7,4%
60	5,8%	6,4%
72	7,7%	10,4%
96	6,4%	10,5%
170	6,3%	12,9%
264	6,3%	12,9%

Wie bereits bei den beiden Diagrammen in Abbildung 5.3 zeigt sich auch in Tabelle 42 für alle Messreihen, dass der Einfluss auf die zweite Messreihe mit CO₂ deutlich größer ist als die auf die erste Messreihe mit N₂. Da auch die absolute Erhöhung der Durchschlagfestigkeit für alle betrachteten Expositionenzeiten in der zweiten Messreihe deutlich größer ausfällt, legt dies die Vermutung nahe, dass entweder eine schnellere Freisetzung der fluorierten Moleküle in CO₂ als in N₂ stattfindet oder dass die Durchschlagfestigkeit von CO₂ stärker von einer geringeren Beimischung an C4N profitiert als N₂.

Für das gemessene Maximum des Einflusses von 7,7 % für eine Expositionszeit von 72 h bei N₂ und auch für den etwas geringeren Einfluss von 6,4 % für eine Expositionszeit von 60 h bei CO₂ gibt es keine physikalische Erklärung. In beiden Fällen handelt es sich wahrscheinlich um eine statistische Streuung. Ansonsten zeigen jedoch alle untersuchten Expositionenzeiten, dass deren Erhöhung auch zu einer Erhöhung des Einflusses führt. Im

Bereich von 72 h bis 170 h tritt jedoch eine Sättigung des Einflusses der Expositionszeit auf die Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen ein.

5.2.3 Einfluss unterschiedlicher fluorierter Isoliertgasgemische

In einer dritten Untersuchung wurde der Einfluss unterschiedlicher fluorierter Isoliertgasgemische als Exposition des Gasraums gegenüber dem fluorierten Isoliertgasgemisch betrachtet. Neben dem in Abschnitt 5.2.1 und in Abschnitt 5.2.2 verwendeten fluorierten Isoliertgasgemisch aus 500 hPa C4N / 4500 hPa CO₂ wurde sowohl das etablierte Isoliertgasgemisch 1000 hPa SF₆ / 4000 hPa N₂ als auch die alternativen Isoliertgasgemische 500 hPa HFO / 4500 hPa CO₂, 200 hPa C5K / 4800 hPa CO₂ und 500 hPa C5K / 4500 hPa CO₂ untersucht.

Eine Übersicht der erzielten Ergebnisse sowie der Expositionszeiten der unterschiedlichen untersuchten Isoliertgasgemische ist in Tabelle 43 aufgeführt.

Tabelle 43: Prozentuale Steigerung der Durchschlagspannung U_{d50} in der ersten Messreihe nach der Exposition gegenüber unterschiedlicher fluorierter Isoliertgasgemische

Isoliertgasgemisch in hPa	Expositionszeit in h	Steigerung von U_{d50} in der ersten Messreihe nach Exposition	
		N ₂	CO ₂
SF ₆ /N ₂ 1000/4000	48	1,7%	0,8%
	120	0,7%	2,9%
HFO/CO ₂ 500/4500	72	0%	0%
C5K/CO ₂ 200/4800	48	3,0%	3,0%
	60	2,6%	4,7%
C5K/CO ₂ 500/4500	60	2,1%	6,0%
C4N/CO ₂ 500/4500	60	5,8%	6,4%

Für das etablierte SF₆/N₂ konnte trotz des im Vergleich zu den alternativen Isoliertgasen doppelten Partialdruckes von SF₆ von 1000 hPa nur ein sehr geringer Einfluss auf Folgeuntersuchungen gemessen werden, der auch bei einer deutlich längeren Expositionszeit von 120 h deutlich niedriger ausfällt als der von 500 hPa C4N gemischt mit 4500 hPa CO₂. Der Einfluss auf die zweite Messreihe mit CO₂ nimmt mit steigender Expositionszeit deutlich zu, während der Einfluss auf die erste Messreihe in N₂ sinkt und nahezu keine Abhängigkeit mehr aufweist. Da die Verringerung der Abhängigkeit bei der vorangegangenen Untersuchung der unterschiedlichen Expositionszeiten nicht zu beobachten war, ist hier von einer statistischen Streuung auszugehen.

Für das Isoliertgasgemisch 500 hPa HFO / 4500 hPa CO₂ wiederum war auch nach einer Expositionszeit von 72 h keinerlei Einfluss auf Folgeuntersuchungen messbar. Das alternative Isoliertgasgemisch C5K/CO₂ wurde mit zwei unterschiedlichen Partialdrücken des fluorierten Testgases C5K von 200 hPa und 500 hPa untersucht. Hintergrund hierzu

ist, dass C5K in praktischen Anwendungen aufgrund der höheren Kondensations-temperatur im Vergleich zu C4N und HFO, wie aus Tabelle 6 in Abschnitt 2.1.6 hervorgeht, nur in geringeren Partialdrücken im Isoliertgasgemisch verwendet werden kann als die beiden anderen fluorierten Testgase, wie auch Tabelle 23 in Abschnitt 4.2 zeigt. Um jedoch sowohl einheitliche Isoliertgasgemische untersuchen zu können als auch den Einfluss des Partialdruckes des fluorierten Testgases im Isoliertgasgemisch abschätzen zu können, wurden die beiden unterschiedlichen Partialdrücke des Isoliertgasgemisches C5K/CO₂ gewählt.

Für beide C5K/CO₂ Isoliertgasgemische konnte ein etwas geringerer Einfluss der Exposition als für C4N/CO₂ beobachtet werden. Ein Vergleich der beiden unterschiedlichen Partialdrücke zeigt eine deutliche Steigerung des Einflusses auf die zweite Messreihe in CO₂, während der Einfluss auf die erste Messreihe in N₂ leicht sinkt. Im Falle des geringeren Partialdruckes wurden zwei unterschiedliche Expositionszeiten untersucht. Wie bereits in vorangegangenen Untersuchungen führt auch hier eine Steigerung der Expositionszeit zu einer Steigerung des Einflusses auf die zweite Messreihe in CO₂, während der Einfluss auf die erste Messreihe in N₂ leicht sinkt. Dies ist jedoch, wie vorangehende Untersuchungen nahelegen, wahrscheinlich auf eine statistische Streuung zurückzuführen. Zur systematischen Untersuchung dieser Beobachtung können weitere Messreihen mit gesonderter Betrachtung unterschiedlicher Partialdrücke mit der ersten Messreihe sowohl in N₂ als auch in CO₂ durchgeführt werden.

5.2.4 Einfluss Werkstoff der Materialproben

Anders als in den vorangegangenen Untersuchungen, in denen stets dieselbe Auswahl an unterschiedlichen Materialproben ins Prüfgefäß eingebracht wurde, wird in der hier folgenden vierten Untersuchung der Parameter der zusätzlichen Materialproben individuell betrachtet und der Einfluss auf Folgeuntersuchungen mit je nur einer Art von Materialprobe im Prüfgefäß analysiert. Da für das Isoliertgasgemisch aus 500 hPa C4N / 4500 hPa CO₂ bislang die größte Abhängigkeit messbar war, wurde dieses Isoliertgasgemisch zur Exposition des Gasraums gegenüber dem fluorierten Isoliertgasgemisch verwendet. Bei jeder in das Prüfgefäß eingebrachten Materialprobenart wurde die maximal mögliche Anzahl verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Beschaffenheit der Materialproben resultierte dies in einer unterschiedlichen Summe der eingebrachten Materialoberflächen. Aus diesem Grund wurden die Materialoberflächen berechnet und getrennt betrachtet.

In Tabelle 44 ist die gemessene Steigerung der Durchschlagfestigkeit der ersten Messreihe in N₂ und der zweiten Messreihe in CO₂ für eine Expositionszeit von 48 h beziehungsweise 72 h unter gesonderter Betrachtung unterschiedlicher Materialproben dargestellt. Der auf die ins Prüfgefäß eingebrachte Oberfläche bezogene Einfluss der Exposition des Gasraums gegenüber dem fluorierten Isoliertgasgemisch befindet sich rechts in der Tabelle. Von den fünf unterschiedlichen untersuchten Materialproben

wiesen insbesondere kupferbeschichtetes Aluminium und O-Ringe die größte Abhängigkeit durch die Exposition auf. Reines Aluminium führte nur zu einer leicht gesteigerten Abhängigkeit, während Epoxidharz und silberbeschichtetes Aluminium trotz der zum Teil höheren Expositionszeit die geringste Abhängigkeit besaßen. Bei der Betrachtung der auf die gesamte eingebrachte Oberfläche normierten Steigerung der Durchschlagspannung verstärkt sich die beobachtete Tendenz, dass die stärkste Abhängigkeit bei O-Ringen und kupferbeschichtetem Aluminium vorliegt.

Tabelle 44: Prozentuale Steigerung der Durchschlagspannung U_{d50} in der ersten Messreihe nach der Exposition gegenüber 500 hPa C4N / 4500 hPa CO₂ in Abhängigkeit der ins Prüfgefäß zusätzlich eingebrachten Materialproben

Materialprobe	Gesamte eingebrachte Oberfläche in cm ²	Expositionszeit in h	U_{d50} -Steigerung der ersten Messreihe nach Exposition in %		Normierte U_{d50} -Steigerung der ersten Messreihe nach Exposition in 10 ⁻³ %/cm ²	
			CO ₂	N ₂	CO ₂	N ₂
Aluminium	500	48	2,9	1,8	5,8	3,6
		48	4,1	3,1	8,2	6,2
Epoxidharz	140	48	1,7	2,5	12,1	17,9
Kupferbeschichtetes Aluminium	110 Kupfer 200 Aluminium	48	7,1	4,5	64,5	40,9
Silberbeschichtetes Aluminium	400	72	3,3	0,8	8,3	2,0
O-Ring	90	48	6,2	2,0	68,9	22,2

In [Loi 2020b] wird die Materialverträglichkeit eines 27 % C4N-Isoliergasgemisches in Luft bei der Auslagerung unter einer erhöhten Temperatur von 105 °C mit EPDM über 112 Tage untersucht. Bei den regelmäßigen Gasanalysen wurde bereits bei der ersten Gasanalyse nach 15 Tagen eine Reduktion des C4N-Prozentsatzes um relative 0,2 % festgestellt, die auch nach 112 Tagen nicht größer ausfiel. Als Resultat gab der Autor an, dass keine Materialunverträglichkeit mit EPDM vorliegt. Diese Reduktion des C4N-Prozentsatzes nach 15 Tagen kann gut mit der diesem Kapitel zugrundeliegenden Theorie der Anlagerung fluorierter Moleküle an die EPDM-Oberfläche liegen. Dies bestätigt sich auch darin, dass analog zu Abschnitt 5.2.2 keine weitere Absenkung des C4N-Prozentsatzes im Zuge der weiteren 97 Tage stattgefunden hat, was durch den abgeschlossenen Ausgleichsprozess erklärt werden kann.

5.2.5 Untersuchung möglicher Maßnahmen zur Vermeidung der Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen

In einer fünften und abschließenden Untersuchung der hier behandelten Abhängigkeitsstudie wurden unterschiedliche Methoden analysiert, um den Einfluss auf

Folgeuntersuchungen, der durch die Exposition des Gasraums gegenüber einem fluorierten Isoliergasgemisch entsteht, zu vermeiden. Da in den bislang durchgeführten Untersuchungen die Exposition gegenüber 500 hPa C4N / 4500 hPa CO₂ mit Materialproben aus O-Ringen und kupferbeschichteten Aluminium die höchste Abhängigkeit aufwies, wurde diese Konstellation bei der Suche nach einer Abhilfe gegen den Einfluss auf Folgeuntersuchungen verwendet.

In einem ersten Schritt wird das sechsmalige Spülen des Prüfgefäßes untersucht. Das Spülen eines Prüfgefäßes wird in der Praxis häufig verwendet, um gasförmige Rückstände daraus zu entfernen. Beim Spülen wird das Prüfgefäß evakuiert, mit einem natürlichen Gas, wie beispielsweise N₂ oder CO₂, befüllt und anschließend erneut evakuiert. Da das Absaugen nach der in Abschnitt 2.1.1 erwähnten F-Gasverordnung auf einen Restgasdruck von 20 hPa durchgeführt wird und deutlich niedrigere Drücke bei größeren Prüfgefäßen, wie GIS oder GIL, schwer zu erreichen sind, wird die Restgaskonzentration somit mit jeder Spülung deutlich reduziert.

Das Prüfgefäß wurde bei jeder der sechs Spülungen mit 0,5 MPa N₂ gefüllt, verblieb für je eine Minute auf diesem Druck und wurde anschließend wieder auf einen Restdruck < 1 hPa abgesaugt. Die Messung nach der Exposition wurde direkt nach der sechsten Spülung durchgeführt, wobei hier wie in allen vorherigen Untersuchungen das natürliche Gas für je 5 Minuten eingefüllt war, bevor die Durchschlagsuntersuchungen durchgeführt wurden. Abbildung 5.4 links zeigt die ermittelte Abhängigkeit nach sechsmaligem Spülen durch N₂ nach einer Exposition gegenüber 500 hPa C4N / 4500 hPa CO₂ mit einer Expositionszeit von 96 h.

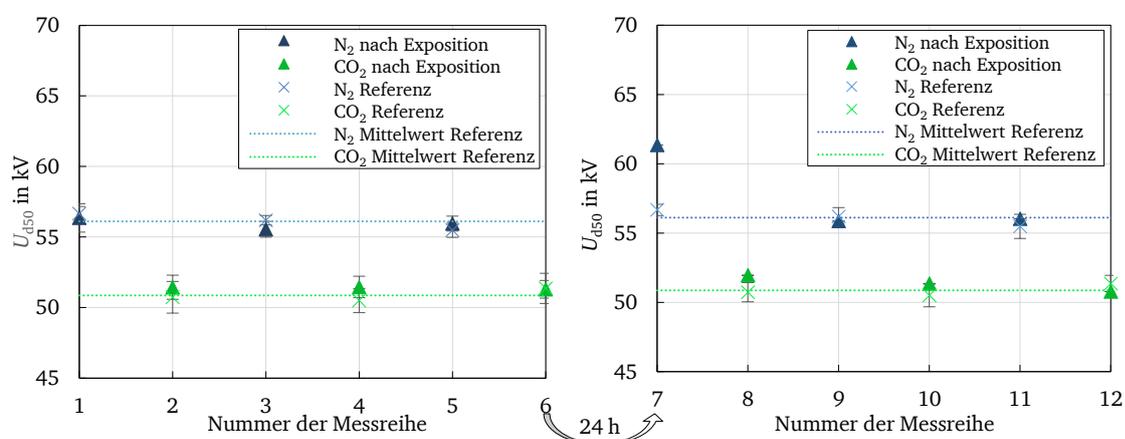


Abbildung 5.4: Einfluss der Exposition gegenüber 500 hPa C4N / 4500 hPa CO₂ mit einer Expositionszeit von 96 h mit den Materialproben O-Ring und kupferbeschichtetem Aluminium im Prüfgefäß. Messreihen linkes Diagramm nach sechsmaligem Spülen des Prüfgefäßes mit 0,5 MPa N₂ mit je 1 Minute Standzeit zwischen den Spülungen. Rechts mit anschließender Standzeit von 0,5 MPa N₂ für 24 h.

Wie Abbildung 5.4 zeigt, ist für keine der Messreihen nach der Exposition und sechsmaligem Spülen eine Abhängigkeit feststellbar. Zur Überprüfung, ob sich nach den Spülungen keine angelagerten fluorierten Moleküle mehr im Prüfgefäß befinden, wurde das Prüfgefäß im Anschluss an die links in Abbildung 5.4 gezeigte sechste Messreihe mit

N₂ gefüllt und nach einer Standzeit von 24 h erneut untersucht. Die Durchschlagfestigkeit dieser siebten Messreihe mit N₂ sowie weitere abwechselnde Messreihen in N₂ und CO₂ sind rechts in Abbildung 5.4 dargestellt.

Obwohl in Messreihe 6 links in Abbildung 5.4 bereits kein Einfluss mehr messbar war, zeigte Messreihe 7 nach einer Wartezeit von 24 h eine um 9,8 % gesteigerte Durchschlagfestigkeit. Dies zeigt zum einen, dass die Methode der Spülung des Prüfgefäßes nicht zur langfristigen Vermeidung der Abhängigkeit geeignet ist, und zum anderen, dass die Freisetzung der angehafteten fluorierten Moleküle über den Zeitraum mehrerer Stunden hinweg erfolgt. Die je 1-minütige Standzeit jeder der sechs Spülungen mit N₂ reichte somit für keinen vollständigen Ausgleichsprozess der an den Oberflächen befindlichen fluorierten Moleküle und den im Gasraum befindlichen fluorierten Molekülen.

Infolge des zuvor beobachteten Verhaltens einer längeren Freisetzungszeit von fluorierten Gasmolekülen wurde der Einfluss der Evakuierungsdauer nach der Exposition untersucht. Für diese Untersuchung wurde das Prüfgefäß nach einer erneuten 48-stündigen Exposition gegenüber 500 hPa C₄N / 4500 hPa CO₂ für 24 h evakuiert. Wie bereits nach der zuvor betrachteten sechsmaligen Spülung war auch nach dieser 24-stündigen Evakuierung kein Einfluss auf Folgeuntersuchungen mehr messbar. Das Prüfgefäß wurde auch hier erneut mit N₂ befüllt und verblieb für 24 h gefüllt. Anders als bei der vorherigen Untersuchung wurde auch nach diesen 24 h Wartezeit kein Einfluss auf die Durchschlagfestigkeit des N₂ gemessen. Die Evakuierung des Prüfgefäßes für 24 Stunden entfernte also zuverlässig angehaftete fluorierte Moleküle, und somit auch die Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen. Grund hierfür ist wahrscheinlich das Konzentrationsgefälle zwischen Oberflächen im Prüfgefäß und Gasraum. Da die durchgeführten Untersuchungen einen Ausgleichsprozess der Konzentration nahelegen, führt das konstante Absaugen frei gewordener fluorierter Isoliergasmoleküle dazu, dass weiterhin angelagerte Moleküle in den Gasraum diffundieren und ebenfalls abgesaugt werden.

Da alle bislang durchgeführten Untersuchungen die Anlagerung fluorierter Gasmoleküle an den Oberflächen im Prüfgefäß bestätigen, wurde als dritte Methode die Reinigung sämtlicher im Gefäß befindlicher Oberflächen mit fussselfreien Tüchern und Ethanol betrachtet. Nach der Exposition gegenüber 500 hPa C₄N / 4500 hPa CO₂ für eine Expositionszeit von 48 h und anschließender Reinigung konnte ein Einfluss von nur 1,3 % in der ersten Messreihe mit N₂ und von 0,3 % in der zweiten Messreihe mit CO₂ beobachtet werden, die jedoch beide innerhalb der Streuung der vorherigen Ergebnisse liegen. Wie bereits bei den beiden zuvor untersuchten Methoden wurde das Prüfgefäß direkt im Anschluss an die letzte Messreihe mit 0,5 MPa N₂ befüllt und verblieb so für 24 h. Die Durchschlagsuntersuchung wies im Anschluss an die Wartezeit eine um 4 % gesteigerte Durchschlagfestigkeit auf. Somit werden auch durch die Reinigung sämtlicher Oberflächen mit Ethanol und fussselfreien Tüchern nicht alle angehafteten fluorierten

Moleküle entfernt und auch diese Methode der Reinigung eignet sich somit nicht zur vollständigen Vermeidung der Abhängigkeit.

Als vierte Methode wird die Lagerung mit einem Trockenmittelbeutel im Prüfgefäß nach der Exposition untersucht. Da der Trockenmittelbeutel durch das darin befindliche kugelförmige Granulat, in diesem Fall mit einem Porendurchmesser von 10 \AA , eine sehr große Oberfläche zur Anlagerung bereitstellt, könnte in einem Ausgleichsvorgang eine teilweise Umlagerung der an den Oberflächen des Prüfgefäßes angelagerten fluorierten Moleküle auf das Granulat stattfinden. Durch die Entnahme des Trockenmittelbeutels nach der Lagerung könnte somit ein Großteil der fluorierten Moleküle und somit des Einflusses entfernt werden. Zur Exposition des Prüfgefäßes wurde $500 \text{ hPa C}_4\text{N} / 4500 \text{ hPa CO}_2$ mit einer Expositionszeit von 72 h verwendet. Anschließend wurde der Trockenmittelbeutel mit Porendurchmessern von 10 \AA in das mit $0,3 \text{ MPa N}_2$ gefüllte Prüfgefäß gegeben und verblieb dort für 48 h . Die Molekülgrößen von C_4N liegen in einer ähnlichen Größenordnung. Nach der Entfernung des Trockenmittelbeutels wurden abwechselnd Durchschlagsuntersuchungen von N_2 und CO_2 durchgeführt, bei denen kein Einfluss feststellbar war. Wie bereits in vorangegangenen Untersuchungen wurde auch hier das Prüfgefäß erneut mit N_2 für 48 h gelagert und im Anschluss hinsichtlich des Einflusses getestet. Hierbei wurde festgestellt, dass ein Einfluss von etwa 2% vorhanden war, was zwar deutlich niedriger als nach erfolgter Reinigung oder Spülen ist, aber wohl auf durch den Ausgleichsvorgang im Prüfgefäß verbliebene Moleküle hinweist. Somit eignet sich die Lagerung mit Trockenmittel nicht zur kompletten Vermeidung der Abhängigkeit, stellt jedoch eine leicht durchführbare Methode dar, um den Einfluss stark zu verringern. Tabelle 45 zeigt eine Übersicht der vier untersuchten Methoden zur Vermeidung der Abhängigkeit.

Tabelle 45: Übersicht der untersuchten Methoden zur Vermeidung des Einflusses in Folgeuntersuchungen direkt nach der durchgeführten Methode und nach einer Standzeit von 24 h

Methode zur Vermeidung des Einflusses auf Folgeuntersuchungen	Einfluss direkt nach Anwendung der Methode	Einfluss nach weiteren 24 h Standzeit mit $0,5 \text{ MPa N}_2$
Sechsmaliges Spülen mit $0,5 \text{ MPa N}_2$ und 1 Minute Standzeit	0%	$9,8 \%$
Evakuierung für 24 h	0%	0%
Reinigung aller Oberflächen mit Ethanol und Tüchern	$1,3 \%$	4%
Lagerung mit eingebrachtem Trockenmittelbeutel (10 \AA) für 48 h	0%	2%

Eine Empfehlung für die Praxis wäre somit, falls möglich unterschiedliche Prüfgefäße zur Untersuchung fluorierter und nicht fluorierter Isoliergase zu verwenden. Bei Untersuchungen im gleichen Prüfgefäß wird die Evakuierung über 24 h hinweg empfohlen. Zur Ermittlung der Untergrenze der Evakuierungsdauer wären weitere Messreihen

erforderlich. Diese ist voraussichtlich vom Volumen des Prüfgefäßes und der Oberfläche im Prüfgefäß abhängig, was bei der Ermittlung der Untergrenze miteinfließen sollte.

5.3 Zusammenfassung und Fazit

Die zu Beginn der in diesem Kapitel durchgeführten Abhängigkeitsstudie in Folgeuntersuchungen mit fluorierten Isoliergasen aufgestellte Arbeitshypothese lautete, dass eine Anlagerung der fluorierten Gasmoleküle an die Oberflächen im Gasraum und deren anschließende Freisetzung im Laufe der Zeit in nachfolgenden Untersuchungen erfolgt. Die Ergebnisse aller hier durchgeführten Untersuchungen sind im Einklang mit dieser Arbeitshypothese.

Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass der Anlagerungsprozess der fluorierten Moleküle an die Oberflächen im Gasraum über einen Zeitraum von etwa 72 h bis 170 h erfolgt, bevor der Ausgleichsvorgang abgeschlossen ist und ein stationärer Zustand vorliegt.

Bei der Betrachtung unterschiedlicher fluorierte Isoliergasgemische zeigte sich zudem, dass sich deren Einfluss auf Folgeuntersuchung unterscheidet. Die stärkste Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen konnte nach einer Exposition mit C₄N/CO₂ und ein etwas geringerer nach einer Exposition mit C₅K/CO₂ festgestellt werden. SF₆/N₂ führte nur zu einer sehr geringen Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen, während für HFO/CO₂ keinerlei Abhängigkeit feststellbar war.

Eine weitere Erkenntnis der Untersuchungen bestand darin, dass die Anlagerung nicht an allen Arten von Materialoberflächen im Prüfgefäß gleichermaßen stattfindet. Die größte Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen konnte bei Einbringung zusätzlicher Materialoberflächen in den Gasraum von kupferbeschichtetem Aluminium und O-Ringen beobachtet werden. Die Anlagerung an Epoxidharz, reines Aluminium und silberbeschichtetes Aluminium lag deutlich darunter.

Bei der Betrachtung möglicher Maßnahmen zur Vermeidung der Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen zeigte sich, dass es sich auch bei der Freisetzung angelagerter fluorierte Moleküle um eine Art Ausgleichsvorgang handelt, der über mehrere Stunden hinweg erfolgt. Daher stellte sich die Evakuierung des Gasraums über 24 h als einzige zuverlässige Methode dar, da durch das konstante Absaugen gasförmiger Moleküle ein durchgehendes Konzentrationsgefälle zwischen an den Oberflächen angelagerten und im Gasraum befindlichen fluorierten Molekülen vorliegt und somit eine gründliche Entfernung der angelagerten fluorierten Moleküle erfolgt. Sollte eine 24 h Evakuierung des Gasraums nicht umsetzbar sein, zeigt auch die Einbringung von Trockenmittelbeuteln mit einem Porendurchmesser von 10 Å, die eine starke Vergrößerung der zur Anlagerung zur Verfügung stehender Oberflächen bedeutet, und deren Entfernung nach erfolgter Lagerung eine deutliche Reduktion des Einflusses auf Folgeuntersuchungen.

Als Fazit lässt sich somit festhalten, dass bei der elektrischen Durchschlagsuntersuchung von fluorierten und natürlichen Isoliergasen im gleichen Prüfgefäß durch an die Oberfläche angelagerte fluorierte Moleküle eine Steigerung der elektrischen Durchschlagfestigkeit des natürlichen Gases von bis zu etwa 13 % vorliegen kann. Grund hierfür ist, dass bereits kleine Mengen des fluorierten Isoliergases im Isoliergasgemisch die elektrische Festigkeit steigern.

Es wird daher empfohlen, getrennte Prüfgefäße für die elektrische Untersuchung natürlicher und fluoriertes Isoliergasgemische zu verwenden. Sollte das gleiche Prüfgefäß für beide Untersuchungen verwendet werden, wird eine Evakuierung des Prüfgefäßes über mindestens 24 h vor der Untersuchung natürlicher Isoliergase empfohlen.

Rückblickend auf die in Kapitel 4 durchgeführten elektrischen Durchschlagsuntersuchungen, bei denen die in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnisse noch nicht bekannt waren, ist von einer Abhängigkeit der ermittelten Durchschlagspannungen $< 1\%$ auszugehen. Grund hierfür ist, dass ausschließlich fluorierte Isoliergasgemische betrachtet wurden, deren elektrische Durchschlagfestigkeit durch eine mögliche Freisetzung angelagerter fluoriertes Moleküle nur eine kaum messbare Steigerung erfährt. Zudem handelt es sich um Prüfgefäße, die im Gegensatz zum in Kapitel 5 betrachteten Prüfgefäß wesentlich größere Gasvolumen-Oberflächen-Verhältnisse und auch nur einen sehr geringen Oberflächenanteil an O-Ring und kupferbeschichtetem Aluminium besitzen.

6 Emittiertes Frequenzspektrum in Folge des Gasdurchschlages

Ein Teil der in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse wurde erstmals in [Wie 2020a] vom Autor dieser Arbeit veröffentlicht.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.4 erläutert, führt ein Gasdurchschlag in SF₆ zu einer deutlich höheren Stromsteilheit als beispielweise ein Durchschlag in Luft unter Normaldruck. Wie weiterhin beschrieben, resultieren diese schnellen Änderungen des Stroms in der Ausbildung elektromagnetischer Wellen, wodurch bei Durchschlagsuntersuchungen im Labor in der Nähe befindliche elektronische Geräte gestört oder gar zerstört werden können. Je höher hierbei die Amplituden und die Frequenzen der emittierten elektromagnetischen Wellen sind, umso höher sind die in benachbarte Geräte induzierten Ströme und auch die Anforderungen an die Maßnahmen zur Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV).

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, wurden in [Cig 2018b] Untersuchungen der Teilentladungsstromwellenformen einer stark inhomogenen Elektrodenanordnung in SF₆, N₂, CO₂ und trockener Luft durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine Abhängigkeit der im Zuge der TE emittierten elektromagnetischen Wellen von der Art des Isoliergases bei konstantem Isoliergasdruck und konstanter Elektrodenanordnung [Cig 2018b]. Zudem wurde eine Korrelation der Amplituden der emittierten Wellen und der Stromsteilheit des TE-Stroms für eine Antenne, die für ähnliche Frequenzen wie die in dieser Untersuchung verwendete ausgelegt ist, beobachtet. SF₆ wies die größte Stromsteilheit auf, gefolgt von CO₂, trockener Luft und N₂. Eine Erklärung dieser gemessenen Abhängigkeiten vom Isoliergas wurde in [Cig 2018b] nicht gegeben, und es erfolgte auch keine weitere Untersuchung möglicher Einflussparameter. In [Sin 2003] wurde bei der Untersuchung der Funkenaufbauzeiten t_F von Gasdurchschlägen in SF₆/N₂ und in reinem N₂ eine Abhängigkeit von t_F von der SF₆-Konzentration und der Schlagweite s beobachtet.

Somit zeigt sich aus den in der Literatur beschriebenen Erfahrungen, dass generell eine Abhängigkeit der Stromsteilheit von der Art des Isoliergases und von dessen prozentualer Zusammensetzung sowie eine Abhängigkeit von der Schlagweite der Elektrodenanordnung vorliegt. Eine getrennte Betrachtung weiterer möglicher Einflussfaktoren wurde nach Kenntnis des Autors der vorliegenden Arbeit noch nicht durchgeführt.

Da insbesondere für alternative Isoliergasgemische bislang nur wenig Erfahrung mit den im Durchschlag emittierten elektromagnetischen Wellen vorliegt, werden in diesem Kapitel die emittierten Frequenzspektren infolge von Gasdurchschlägen in SF₆ und in

alternativen Isoliergasen mit einer Antenne und einem Spektrumanalysator gemessen und der Einfluss unterschiedlicher Parameter, wie zum Beispiel Gasdruck, Durchschlagspannung, Schlagweite, Homogenität der Elektrodenanordnung und der Abstand zwischen Antenne und Prüfgefäß, untersucht und diskutiert.

6.1 Prüfaufbau und Versuchsdurchführung

Da ein konventioneller Spektrumanalysator den eingestellten Frequenzbereich mit einer vordefinierten Bandbreite durchläuft und somit nur Frequenzen aufzeichnet, die innerhalb dieser Bandbreite liegen, ist eine große Anzahl von Einzeldurchschlägen erforderlich, um ausreichende Daten für den gesamten betrachteten Frequenzbereich zu erhalten. Um eine Vielzahl von Einzeldurchschlägen in einer angemessenen Zeit zu realisieren, wurde der in Abbildung 6.1 und auch in Anhang A.3 schematisch dargestellte Gleichspannungskreis verwendet.

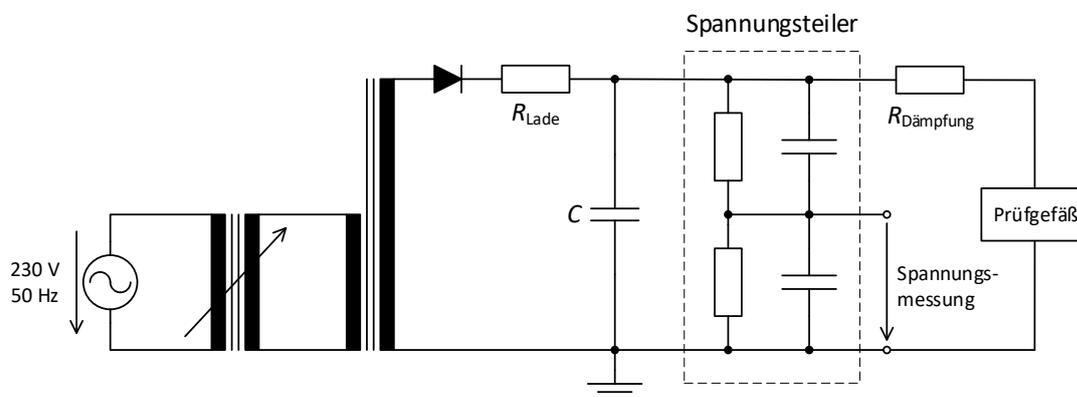


Abbildung 6.1: Ersatzschaltbild des verwendeten Prüfkreis zur Erzeugung und Messung hoher Gleichspannung bis 135 kV

Die Position der Antenne relativ zum Boden und der Elektrodenanordnung ist schematisch in Abbildung 6.2 gezeigt. Eine fotografische Darstellung des Prüfaufbaus befindet sich in Abbildung 6.3.

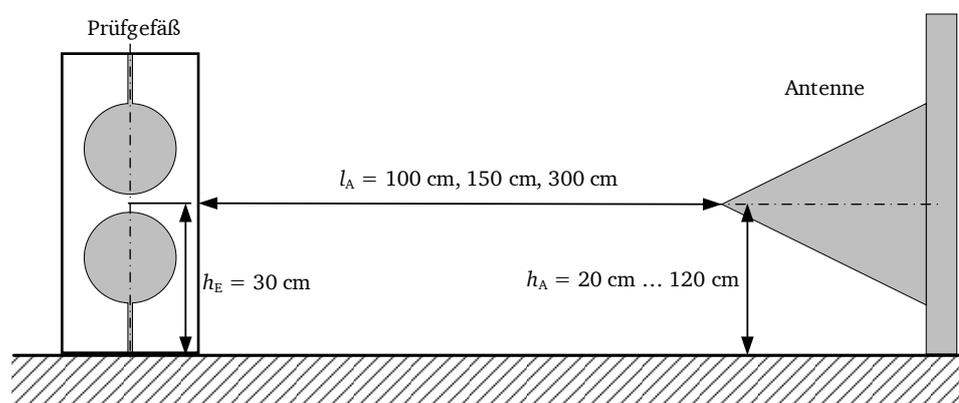


Abbildung 6.2: Schematische Darstellung der Antennenposition über die Höhe der Antenne h_A zum Boden und über den Abstand l_A zur Elektrodenanordnung

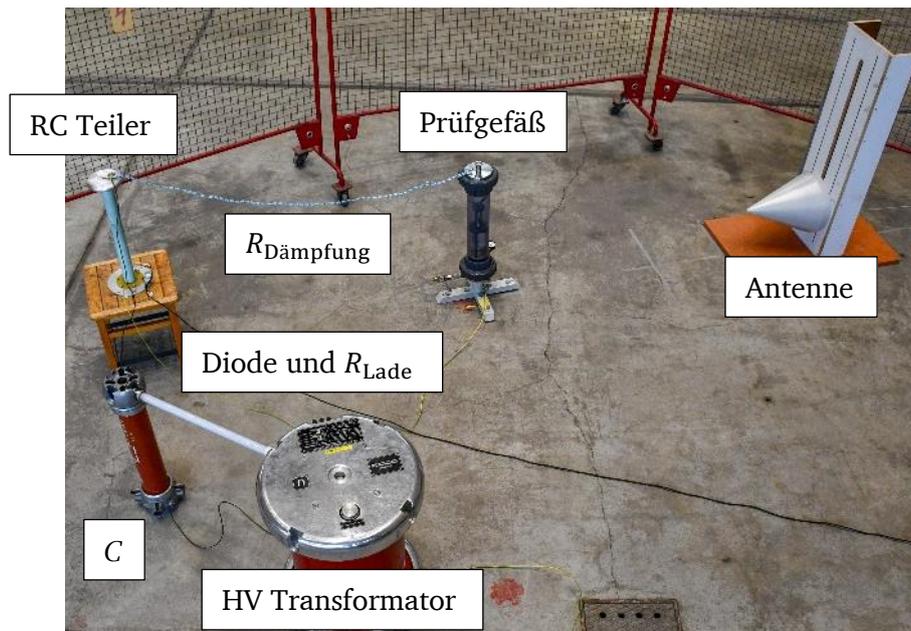


Abbildung 6.3: Fotografische Darstellung des verwendeten Prüfkreis zur Erzeugung und Messung einer hoher Gleichspannung bis 135 kV

Mit dem in der Abbildung gezeigten Prüfkreis kann über den Transformator vom Typ TEO 100/10 der Firma WSTS eine maximale Gleichspannung (DC) von 135 kV erzeugt werden. Um eine Konditionierung der Elektroden durch die Vielzahl an Durchschlägen zu verhindern, wurde der maximale Strom durch einen Dämpfungswiderstand $R_{\text{Dämpfung}}$ von 144 M Ω begrenzt. Der Ladewiderstand R_{Lade} beträgt 4 k Ω und erhöht die Ladezeit der Kapazitäten im Prüfkreis, wodurch die Spannung nach einem Durchschlag langsamer ansteigt und somit Einzeldurchschläge ermöglicht werden. Die Wiederholrate der Durchschläge lässt sich über den Stelltransformator einstellen. Eine höhere Spannung führt zu einem schnelleren Laden der Kapazität, was wiederum zu einer höheren Wiederholrate der Durchschläge führt. Die Durchschläge selbst fanden in dem in der Abbildung gezeigten gasgefüllten Prüfgefäß statt, welches baugleich mit dem in Kapitel 5 beschriebenen Prüfgefäß ist und ebenfalls eine über eine Mikrometerschraube einstellbare Elektrodenhalterung besitzt. Zur Messung der Durchschlagspannung wurde der gedämpft kapazitive Spannungsteiler North Star High Voltage VD-180B verwendet. Details zum Spannungsteiler können dem Anhang A.3 entnommen werden. Die im Durchschlag emittierten Frequenzen wurden mit der rechts in Abbildung 6.2 befindlichen Watkins-Johnson Dual Pol L.P. Antenne vom Typ WJ-48205, welche insbesondere für Frequenzen von 500 MHz bis 3 GHz ausgelegt ist, erfasst und mit einem R&S Signal- und Spektrumanalysator vom Typ FSW8 aufgezeichnet. Der Spektrumanalysator besitzt einen Frequenzbereich von 2 Hz bis 8 GHz und eine maximale Analysebandbreite von 512 MHz. Die Antenne befindet sich auf einer höhenverstellbaren Halterung. Tabelle 46 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen untersuchten Parameter.

Tabelle 46: Übersicht der untersuchten Parameter

Parameter	Variation
Isoliergasgemisch	N ₂ CO ₂ SF ₆ 20 % SF ₆ / 80 % N ₂ 20 % C4N / 80 % CO ₂ 20 % C5K / 80 % CO ₂ 20 % HFO / 80 % CO ₂
Isoliergasdruck p	Minimal: 0,075 MPa Maximal: 0,5 MPa
Schlagweite s	5 mm 10 mm
Elektrodenanordnung	<u>Rogowski Profil</u> Homogenitätsgrad: $\eta \approx 1$ <u>Kugel-Platte</u> Homogenitätsgrad: $\eta = 0,85$ für $s = 5$ mm, $\eta = 0,73$ für $s = 10$ mm
Durchschlagsspannung U_d	80 kV 120 kV
Maximale elektrische Feldstärke E bei Durchschlagspannung	$E_{\text{Rogowski},5\text{mm},80\text{kV}} = 160$ kV/cm $E_{\text{Rogowski},5\text{mm},120\text{kV}} = 240$ kV/cm $E_{\text{Rogowski},10\text{mm},80\text{kV}} = 80$ kV/cm $E_{\text{Rogowski},10\text{mm},120\text{kV}} = 120$ kV/cm $E_{\text{Kugel-Platte},5\text{mm},120\text{kV}} = 282$ kV/cm $E_{\text{Kugel-Platte},10\text{mm},80\text{kV}} = 110$ kV/cm
Abstand Antenne - Prüfgefäß l_A	100 cm 150 cm 300 cm
Höhe Antennenspitze über Boden h_A	20 cm 30 cm 40 cm 60 cm 80 cm 100 cm 120 cm

In [Cig 2018b] und [Sin 2003] zeigt sich eine Abhängigkeit vom Isoliergas und von der Isoliergaszusammensetzung. Um diese Ergebnisse bei ansonsten gleichen Bedingungen nachvollziehen zu können, wurde SF₆ als Reingas und auch als Isoliergasgemisch 20 % SF₆ / 80 % N₂ untersucht. Hinsichtlich der Abhängigkeit vom Isoliergas wurden auch die Reingase N₂ und CO₂ sowie die drei alternativen Isoliergasgemische 20 % C4N / 80 % CO₂, 20 % C5K / 80 % CO₂ und 20 % HFO / 80 % CO₂ verwendet. Um trotz ihrer unterschiedlichen Durchschlagfestigkeiten eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Isoliergase sowie Isoliergasgemische zu ermöglichen,

wurden mit 20 % fluoriertem Testgas und 80 % Trägergas die gleichen Verhältnisse im Isoliergasgemisch genutzt und der Gasdruck jeweils für eine Durchschlagspannung von 80 kV respektive 120 kV angepasst. Falls die wiederholten Einzeldurchschläge eine höhere Durchschlagspannung als für die Messung gewünscht aufwiesen, wurde der Gasdruck in Schritten von etwa 100 hPa abgesenkt, bis die gewünschte Durchschlagspannung erreicht wurde.

Zur homogenen Durchmischung der eingefüllten Isoliergaskomponenten wurde das Prüfgefäß mehrfach für mehrere Minuten gedreht und eine anschließende Wartezeit von 10 Minuten eingehalten. Referenzmessungen mit einem WIKA Analysegerät vom Typ GA11, welches den prozentualen Anteil des fluorierten Isoliergases im Isoliergasgemisch detektiert, zeigten eine homogene Durchmischung durch dieses Vorgehen.

Zur Bestimmung des bislang unbekanntenen Einflusses der Homogenität des elektrischen Feldes wurden zwei unterschiedliche Elektrodenanordnungen mit je zwei unterschiedlichen Elektrodenabständen untersucht. Abbildung 6.4 zeigt links die Kugel-Platte-Anordnung aus poliertem Aluminium mit einem Homogenitätsgrad η von 0,85 für eine Schlagweite s von 5 mm beziehungsweise einem Homogenitätsgrad η von 0,73 für eine Schlagweite s von 10 mm und rechts die Rogowski-Profil-Anordnung aus poliertem Stahl mit einem Homogenitätsgrad η von etwa 1 für eine Schlagweite s von 5 mm und von η etwa 0,97 für eine Schlagweite s von 10 mm. Die Homogenitätsgrade wurden jeweils mittels COMSOL Multiphysics[®] bestimmt.

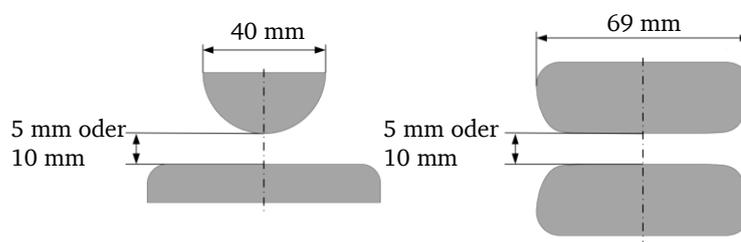


Abbildung 6.4: Untersuchte Elektrodenanordnungen aus poliertem Aluminium; links mit Homogenitätsgrad $\eta = 0,85$ für eine Schlagweite $s = 5$ mm und $\eta = 0,73$ für eine Schlagweite $s = 10$ mm, rechts mit Homogenitätsgrad $\eta \approx 1$ für eine Schlagweite $s = 5$ mm und $\eta = 0,97$ für eine Schlagweite $s = 10$ mm

Der Frequenzbereich des Spektrumanalysators wurde in die drei überlappenden Frequenzbereiche 2 Hz bis 3 GHz, 2,5 GHz bis 5,5 GHz und 5 GHz bis 8 GHz unterteilt. Der jeweils nächsthöhere Frequenzbereich wurde folglich nur dann analysiert, wenn am oberen Ende des zuvor betrachteten Frequenzbereichs messbare Amplituden der emittierten Wellen auftraten. Um sowohl die Durchlaufzeit des Frequenzbereichs zu verringern, als auch den Signal-zu-Rausch-Abstand zu verbessern, wurde die Bandbreite auf 10 MHz eingestellt und die Haltefunktion der maximal gemessenen Amplitude jeder Frequenz aktiviert. Zum Schutz des Spektrumanalysators wurden zudem zwei Dämpfungsglieder mit einer Dämpfung von jeweils 30 dB verwendet. Die Durchschläge wurden so lange durchgeführt, bis keine sichtbare Änderung des Frequenzspektrums mehr beobachtet

werden konnte, was im Durchschnitt nach etwa 5 bis 10 Minuten der Fall war. Aufgezeichnet wurden die im Durchschlag emittierten Frequenzspektren.

6.2 Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der durchgeführten Analyse der Frequenzspektren infolge von Gasdurchschlägen vorgestellt und diskutiert.

6.2.1 Einfluss der Antennenposition relativ zum Prüfgefäß

Durch das rotationssymmetrische Prüfgefäß mit Plexiglaswand kann von einer kugelförmigen Ausbreitung der im Durchschlag erzeugten elektromagnetischen Welle ausgegangen werden, was unter reflexionsfreien Bedingungen eine umgekehrt quadratische Proportionalität der Amplitude der elektromagnetischen Welle mit dem Abstand vom Entstehungsort bedeutet.

Da in der Realität jedoch keine Reflexionsfreiheit vorliegt, wurde in einem ersten Schritt und zur Ermittlung einer geeigneten Antennenposition der Einfluss der Antennenhöhe in Anlehnung an die Norm EN 55016-2-3:2004 ermittelt [DIN 2020b]. Hierzu wurde das Prüfgefäß zunächst mit dem Isoliergasgemisch 20 % C4N gemischt mit 80 % CO₂ mit einem Gesamtdruck von 0,5 MPa gefüllt und der Isoliergasdruck, wie bereits zuvor beschrieben, abgesenkt, um eine Durchschlagsspannung von 120 kV bei einer Schlagweite der Rogowski-Profil-Anordnung von 5 mm zu erreichen. Die emittierten Frequenzspektren wurden hierbei für mehrere Antennenhöhen h_A , beginnend bei 20 cm über dem Boden bis zu einer Antennenhöhe h_A von 120 cm, aufgezeichnet.

Abbildung 6.5 zeigt die gemessenen Frequenzspektren bei den unterschiedlichen Antennenhöhen, wobei eine Antennenhöhe von 30 cm derselben Höhe entspricht, auf der sich auch die Elektrodenanordnung im Prüfgefäß befindet. Folglich stellt eine Antennenhöhe von 30 cm auch die kürzeste Distanz zwischen Antenne und Elektrodenanordnung dar. Wie die Abbildung zeigt, entsteht bei allen untersuchten Antennenhöhen ein ähnlicher Frequenzverlauf. Insbesondere im höheren Frequenzbereich ab 1,3 GHz zeigt sich jedoch, dass vorwiegend für die niedrigeren Antennenhöhen weiterhin Frequenzamplituden oberhalb des Rauschbandes vorhanden sind. Die höchsten Amplituden im Frequenzbereich ab 1,3 GHz konnten insbesondere für Antennenhöhen von 20 cm, 30 cm und 40 cm gemessen werden. Um einen maximalen Signal-zu-Rausch-Abstand insbesondere bei höheren Frequenzen zu erzielen, wurde die Antenne in weiteren Untersuchungen auf den Mittelwert dieser drei ermittelten Antennenhöhen und somit auf 30 cm eingestellt.

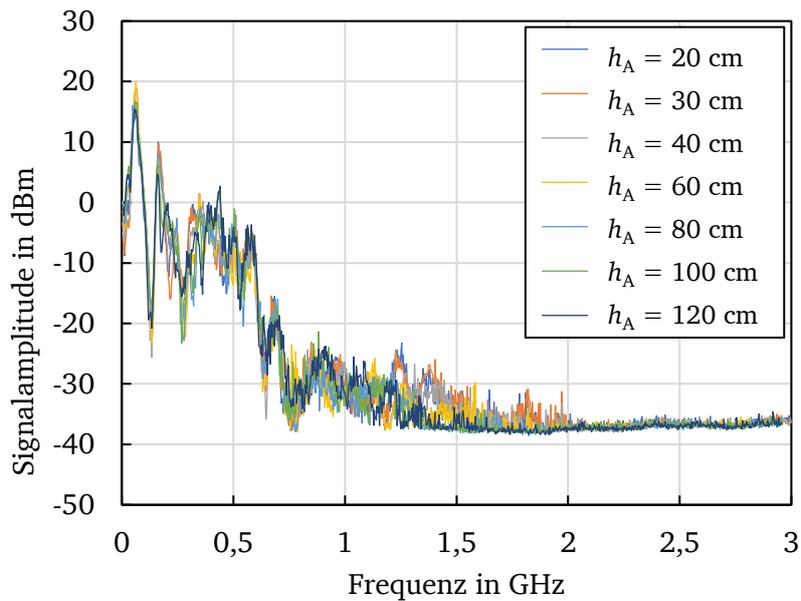


Abbildung 6.5: Emittierte Frequenzspektren von 20 % C4N / 80 % CO₂ mit Rogowski-Profil-Elektrodenanordnung mit Schlagweite $s = 5$ mm, Durchschlagspannung $U_d = 120$ kV und variabler Antennenhöhe h_A mit einem horizontalen Abstand $l_A = 150$ cm zwischen Prüfgefäß und Antenne

In einer weiteren Untersuchung zur Antennenposition wurde der Abstand zwischen Prüfgefäß und Antenne variiert. Abbildung 6.6 zeigt die Frequenzspektren für Abstände zwischen Prüfgefäß und Antenne l_A von 100 cm, 150 cm und 300 cm für eine Durchschlagspannung in C4N/CO₂ von 120 kV mit einer Schlagweite s der Rogowski-Profil-Anordnung links von 5 mm und rechts von 10 mm.

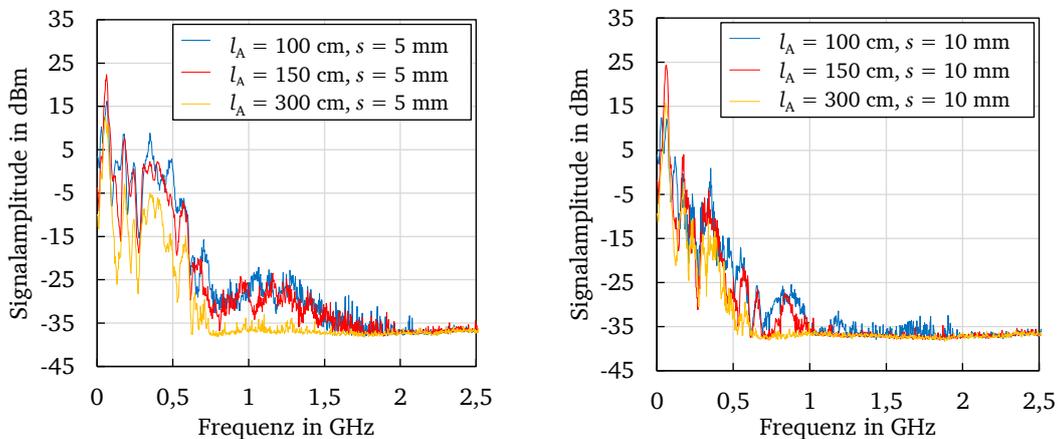


Abbildung 6.6: Emittierte Frequenzspektren von 20 % C4N / 80 % CO₂ mit Rogowski-Profil-Elektrodenanordnung mit Schlagweiten $s = 5$ mm (links) und $s = 10$ mm (rechts), Durchschlagspannung $U_d = 120$ kV, Homogenitätsgrad $\eta \approx 1$ und Antennenhöhe $h_A = 30$ cm für einen variablen horizontalen Abstand l_A zwischen Prüfgefäß und Antenne

Wie bereits bei der Variation der Antennenhöhe besitzen auch die sechs hier gezeigten Frequenzspektren einen grundsätzlich ähnlichen Frequenzverlauf. Für beide Elektrodenabstände führt eine Verringerung des Abstandes zwischen Prüfgefäß und Antenne zu einer höheren Signalamplitude und somit auch bei höheren Frequenzen zu messbaren

Signalen oberhalb des Rauschpegels. Bei einer Durchschlagspannung von 120 kV sind für eine Schlagweite von 5 mm insbesondere ab 1 GHz noch deutlich höhere Signalamplituden messbar als für eine Schlagweite von 10 mm.

6.2.2 Einfluss der Schlagweite und der Durchschlagspannung

Um einen besseren Überblick über den Einfluss der Elektrodenabstände und auch der Durchschlagspannung zu erhalten, wurden für einen Abstand zwischen Prüfgefäß und Antenne von 150 cm zudem noch die Frequenzspektren für eine Durchschlagspannung von 80 kV für die Rogowski-Profil-Anordnung mit Schlagweite von 5 mm und 10 mm für C4N/CO₂ aufgezeichnet und mit den Frequenzspektren der 120 kV Durchschlagspannungen zusammen in Abbildung 6.7 dargestellt.

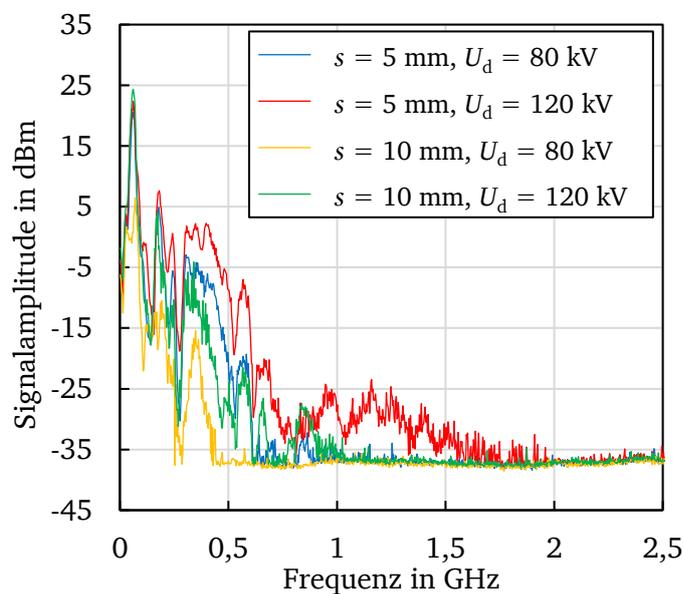


Abbildung 6.7: Emittierte Frequenzspektren von 20 % C4N / 80 % CO₂ mit Rogowski-Profil-Elektrodenanordnung mit Schlagweite $s = 5$ mm und $s = 10$ mm, Durchschlagspannung $U_d = 80$ kV und $U_d = 120$ kV, Homogenitätsgrad $\eta \approx 1$, Antennenhöhe $h_A = 30$ cm und horizontalem Abstand zwischen Prüfgefäß und Antenne $l_A = 150$ cm

Wie die Abbildung zeigt, sind die vier Frequenzspektren zwar in ihrer Form ähnlich, besitzen jedoch deutliche Unterschiede bezüglich der Signalamplituden ab einer Frequenz von etwa 200 MHz. Für eine Schlagweite von 10 mm und eine Durchschlagspannung von 80 kV, was wie in Tabelle 46 beschrieben in der kleinsten elektrischen Feldstärke von ungefähr 80 kV/cm resultiert, sind bereits ab etwa 435 MHz keine Frequenzamplituden oberhalb des Rauschbandes mehr messbar. Im Gegensatz hierzu treten für eine Schlagweite von 5 mm und eine Durchschlagspannung von 120 kV, was mit einer elektrischen Feldstärke von ungefähr 240 kV/cm zur höchsten der vier in der Abbildung untersuchten Feldstärken führt, noch messbare Frequenzen bis knapp unterhalb von 2 GHz auf. Die Frequenzspektren für eine Schlagweite von 5 mm und eine Durchschlagspannung von 80 kV, also für eine elektrische Feldstärke von 160 kV/cm, sowie für eine Schlagweite von

10 mm und eine Durchschlagspannung von 120 kV, also 120 kV/cm, liegen dazwischen. Im Allgemeinen führten eine geringere Schlagweite sowie eine höhere Durchschlagspannung, also höhere elektrische Feldstärken, zu höheren Signalamplituden, was vor allem ab etwa 200 MHz ersichtlich wird.

6.2.3 Untersuchung der gemeinsamen maximalen Signalamplitude

In allen bislang gemessenen Frequenzspektren in Abbildung 6.5 bis Abbildung 6.7 trat die höchste Signalamplitude bei einer Frequenz von etwa 60 MHz auf. Es konnte keine Abhängigkeit dieser höchsten Signalamplitude von den bislang variierten Parametern Gasdruck, Durchschlagspannung, Schlagweite, Antennenhöhe und Abstand zwischen Antenne und Prüfgefäß beobachtet werden. Weitere Versuche zeigten zudem, dass auch keine Abhängigkeit vom untersuchten Isoliergasgemisch besteht. Aus diesem Grund ist als Ursache eine angeregte Resonanzschwingung im Versuchsaufbau naheliegend. Eine Frequenz von 60 MHz entspricht einer Wellenlänge von 5 m, welche durch die Resonanz einer Antenne mit einer Länge von 2,5 m entsteht. Bei der Betrachtung von Dipolstrahlern muss zwischen der elektrischen und mechanischen Länge unterschieden werden. Der Ursprung der Resonanz lässt sich jedoch hochspannungsseitig in der mit Hochspannungslitze und Widerstandskette verbundenen 2,5 m langen Strecke zwischen Kondensator, RC-Teiler und Prüfgefäß finden. Eine Änderung der Länge dieser Widerstandskette führte auch zu einem Peak bei einer anderen Frequenz. Somit wird deutlich, dass der Peak nicht auf den Durchschlag im Gasraum zurückzuführen ist und insofern für die Betrachtung der im Durchschlag emittierten Frequenzen nicht von Bedeutung ist.

6.2.4 Untersuchung höherer emittierter Frequenzen durch Verwendung eines Hochpasses

Bei den bisher untersuchten Frequenzspektren wurde bedingt durch die Resonanz bei 60 MHz stets eine Dämpfung von 60 dB zum Schutz des Spektrumanalysators verwendet. Um auch Frequenzanteile oberhalb von 2 GHz untersuchen zu können, die aufgrund der hohen Dämpfung im Grundrauschen verschwinden, wurde ein Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 500 MHz verwendet, wodurch eine Reduzierung der Dämpfung auf 30 dB möglich war. Der Einfluss der geringeren Dämpfung sowie des Hochpassfilters ist anhand der in Abbildung 6.8 gezeigten Frequenzspektren veranschaulicht. Dort ist das ohne Hochpass und mit 60 dB Dämpfung aufgezeichnete Frequenzspektrum aus Abbildung 6.7 von C₄N/CO₂ mit einer Schlagweite von 5 mm und einer Durchschlagspannung von 120 kV im Vergleich zum Frequenzspektrum derselben Anordnung mit Hochpass und 30 dB Dämpfung dargestellt. Die gestrichelte blaue Linie repräsentiert das um 30 dB nach oben verschobene Frequenzspektrum der Messung mit einer Dämpfung von 60 dB.

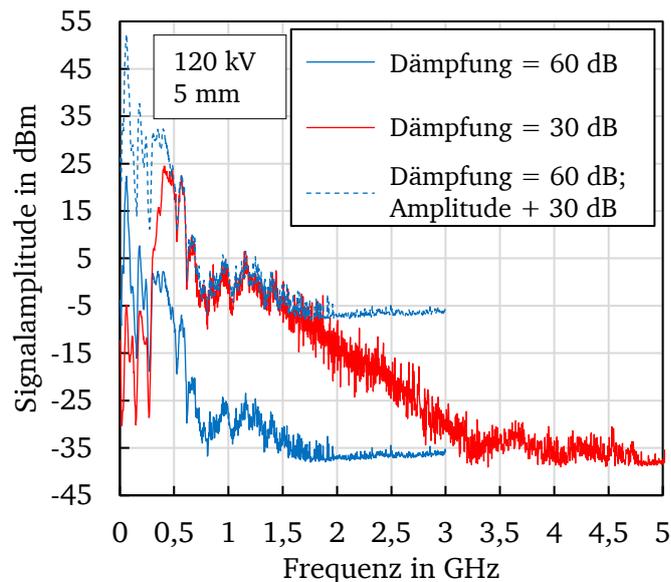


Abbildung 6.8: Emittierte Frequenzspektren von 20 % C4N / 80 % CO₂ mit Rogowski-Profil-Elektrodenanordnung mit Schlagweite $s = 5 \text{ mm}$, Durchschlagspannung $U_d = 120 \text{ kV}$, Homogenitätsgrad $\eta \approx 1$, Antennenhöhe $h_A = 30 \text{ cm}$ und horizontalem Abstand zwischen Prüfgefäß und Antenne $l_A = 150 \text{ cm}$ für 60 dB Dämpfung, für 30 dB Dämpfung mit Hochpassfilter mit Grenzfrequenz 500 MHz und für das um +30 dB verschobene Frequenzspektrum der 30 dB Dämpfung mit Hochpassfilter mit Grenzfrequenz 500 MHz

Aus der Abbildung geht hervor, dass ab 500 MHz, was der Grenzfrequenz des Hochpasses entspricht, eine sehr gute Übereinstimmung des um 30 dB verschobenen ursprünglichen Frequenzspektrums mit 60 dB Dämpfung und des neu aufgezeichneten Frequenzspektrums mit Hochpass und 30 dB Dämpfung besteht. Hieraus werden zum einen die Wiederholungsgenauigkeit der Messung und zum anderen der funktionsgetreue Einfluss der verwendeten Dämpfungsglieder und des Hochpasses ersichtlich. Im Gegensatz zum 60 dB-Frequenzspektrum, bei dem die maximal detektierbare Frequenz knapp unterhalb von 2 GHz lag, wurden für eine Dämpfung von 30 dB Frequenzanteile bis oberhalb von 4,5 GHz aufgezeichnet, wobei ab etwa 3,2 GHz bereits das Rauschspektrum erreicht wird.

6.2.5 Einfluss des Isoliergasgemisches

Zur Untersuchung des Einflusses des Isoliergasgemisches im Prüfgefäß wurden die in Tabelle 46 genannten Isoliergase und Isoliergasgemische sowohl für die Konstellation der geringsten elektrischen Feldstärke von 80 kV/cm bei einer Schlagweite der Rogowski-Profil-Elektrodenanordnung von 10 mm und einer Durchschlagspannung von 80 kV, als auch für die der höchsten elektrischen Feldstärke von 240 kV/cm bei einer Schlagweite von 5 mm und einer Durchschlagspannung von 120 kV untersucht. Um erneut auch die höheren Frequenzanteile besser analysieren zu können, wurde die zuvor betrachtete Kombination aus 30 dB Dämpfung und Hochpass mit 500 MHz Grenzfrequenz verwendet. Die beiden natürlichen Isoliergase N₂ und CO₂ konnten aufgrund ihrer geringeren Durchschlagfestigkeit und des zulässigen Maximaldrucks des Prüfgefäßes von 0,5 MPa

jedoch nur für die geringere elektrische Feldstärke untersucht werden. Abbildung 6.9 zeigt die emittierten Frequenzspektren der untersuchten Isoliergase für die Konstellation der elektrischen Feldstärke von 80 kV/cm links und von 240 kV/cm rechts.

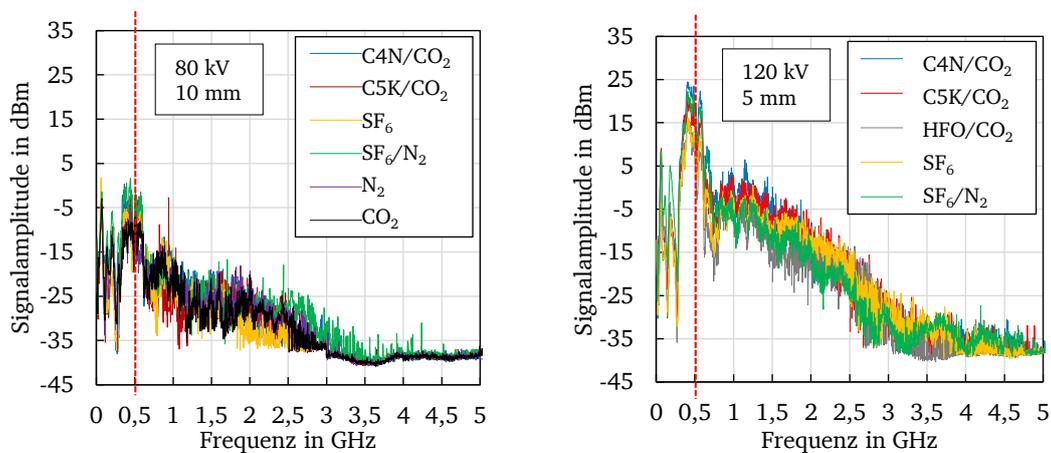


Abbildung 6.9: Emittierte Frequenzspektren unterschiedlicher Isoliergase und Isoliergasgemische aus 20 % fluoriertem Testgas und 80 % Trägergas mit Rogowski-Profil-Elektrodenanordnung, Schlagweite $s = 10$ mm (links) und $s = 5$ mm (rechts), Durchschlagspannung $U_d = 80$ kV (links) und $U_d = 120$ kV (rechts), Antennenhöhe $h_A = 30$ cm, Homogenitätsgrad $\eta \approx 1$ und horizontalem Abstand zwischen Prüfgefäß und Antenne $l_A = 150$ cm für 30 dB Dämpfung mit Hochpassfilter mit Grenzfrequenz 500 MHz

In beiden Diagrammen in Abbildung 6.9 sind die Frequenzspektren hinsichtlich ihrer Form und Signalamplituden prinzipiell ähnlich. Für eine elektrische Feldstärke von 80 kV/cm betrug die höchste aufgezeichnete Frequenz für die meisten Gasgemische etwa 3 GHz, wobei für SF_6/N_2 nur wenige Peaks oberhalb von 3 GHz lagen. Die höchsten aufgezeichneten Amplituden im Frequenzbereich oberhalb der Grenzfrequenz des Hochpasses von 500 MHz lagen bei -3 dBm bei einer Dämpfung durch das eine verbliebene externe Dämpfungsglied von 30 dB. Für eine elektrische Feldstärke von 240 kV/cm betrug die höchste aufgezeichnete Frequenz etwa 4,75 GHz. Eine Betrachtung des Frequenzbereichs von 5 GHz bis 8 GHz zeigte keine Amplituden oberhalb des Rauschbandes.

Obwohl die Signalamplituden bei diesen hohen Frequenzen kaum über dem Rauschpegel liegen, muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine Dämpfung von 30 dB vorliegt. Ohne diese Dämpfung wären voraussichtlich analog zur Betrachtung in Abbildung 6.8 auch noch Amplituden in höheren Frequenzbereichen messbar.

Auch hinsichtlich der aufgezeichneten Signalamplituden konnten für die elektrische Feldstärke im Durchschlag von 240 kV/cm mit bis zu 24 dBm bei einer Dämpfung von 30 dB deutlich höhere Werte aufgezeichnet werden als für eine elektrische Feldstärke von 80 kV/cm. Es zeigt sich somit, dass kein signifikanter Einfluss des Isoliergasgemisches auf die emittierten Frequenzspektren zu beobachten ist, sondern vielmehr ein Einfluss der im Durchschlag vorherrschenden elektrischen Feldstärke.

6.2.6 Einfluss der Elektrodenanordnung

In den vorangegangenen Untersuchungen konnten insbesondere für geringere Schlagweiten s und für höhere Durchschlagspannungen U_d höhere Signalamplituden der emittierten Frequenzspektren und messbare Amplituden in höheren Frequenzbereichen gemessen werden. Da sowohl die kleinere Schlagweite als auch die höhere Durchschlagspannung zu einer höheren maximalen elektrischen Feldstärke führen, werden in diesem Abschnitt weitere Untersuchungen mit der schwach inhomogenen Kugel-Platte-Elektrodenanordnung durchgeführt. Abbildung 6.10 zeigt einen Vergleich der Frequenzspektren der homogenen und der schwach inhomogenen Elektrodenanordnung für SF_6/N_2 mit einer Schlagweite von 5 mm und einer Durchschlagspannung von 120 kV sowie mit einer Schlagweite von 10 mm und einer Durchschlagspannung von 80 kV.

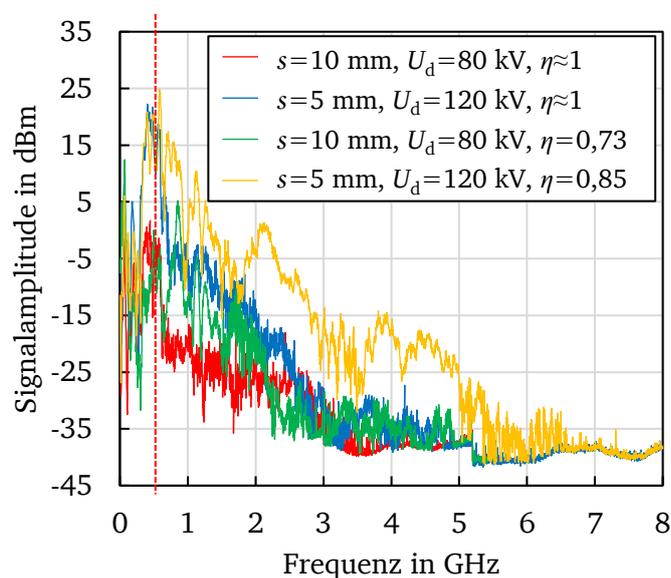


Abbildung 6.10: Emittierte Frequenzspektren von 20 % SF_6 / 80 % N_2 mit Rogowski-Profil-Elektrodenanordnung und Kugel-Platte-Anordnung, Schlagweite $s = 5$ mm und $s = 10$ mm und Durchschlagspannung $U_d = 120$ kV und $U_d = 80$ kV, Antennenhöhe $h_A = 30$ cm und horizontalem Abstand zwischen Prüfgefäß und Antenne $l_A = 150$ cm für 30 dB Dämpfung mit Hochpassfilter mit Grenzfrequenz 500 MHz

Eine Übersicht der maximalen elektrischen Feldstärken der homogenen und inhomogenen Elektrodenanordnung ist in Tabelle 46 in Abschnitt 6.1 aufgeführt. Im Vergleich zu ihrem homogenen Gegenstück zeigt die inhomogene Elektrodenanordnung einen signifikanten Anstieg der messbaren Signale über dem Rauschpegel bei höheren Frequenzen. Für die schwach inhomogene Elektrodenanordnung mit einer maximalen elektrischen Feldstärke $E_{\text{Kugel-Platte,5mm,120kV}}$ von 282 kV/cm wurden Frequenzen bis zu 6,5 GHz aufgezeichnet, mit einigen wenigen noch höheren Signalamplituden. Es zeigt sich erneut, wie auch bereits in den vorangegangenen Abschnitten, dass die Amplitude und auch die maximale Frequenz des emittierten Frequenzspektrum primär von der maximalen Höhe der elektrischen Feldstärke im Moment des Durchschlags abhängig ist.

6.3 Zusammenfassung und Fazit

Abbildung 6.10 und die zuvor durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Amplitude und die maximale Frequenz des emittierten Frequenzspektrums hauptsächlich vom Maximum der elektrischen Feldstärke und nicht von der durchschnittlichen elektrischen Feldstärke im Durchschlag abhängen. Auch ein Einfluss des untersuchten Isoliergasgemisches oder der Isoliergaszusammensetzung ist nicht klar erkennbar. Dies lässt sich durch das in Gleichung 2.9 in Abschnitt 2.1.4 beschriebene Toeplersche Funkengesetz erklären. Eine geringere Funkenaufbauzeit t_F führt zu einer höheren Stromsteilheit und damit zu einer höheren Amplitude des emittierten Frequenzspektrums [Bey 1992]. Basierend auf Gleichung 2.15 hängt t_F von der im Durchschlag auftretenden elektrischen Feldstärke und der Toepler-Konstanten k_T des Isoliergases ab. Da die Durchschlagsspannung und die Schlagweite für alle untersuchten Gasgemische konstant waren, wird t_F nur durch die unterschiedlichen Toepler-Konstanten k_T der Gasgemische beeinflusst. Die Toepler-Konstanten sind jedoch für die in Tabelle 1 in Abschnitt 2.1.4 aufgeführten Gase ähnlich und für die meisten der hier untersuchten Gasgemische noch nicht bestimmt. Da kein Einfluss der Gasmischungen auf die emittierten Frequenzspektren beobachtet werden konnte, scheinen die Toepler-Konstanten der anderen Gasgemische in derselben Größenordnung zu liegen wie die in Tabelle 1 aufgeführten Konstanten für N_2 , Luft und SF_6 , die ihrerseits bereits nahe beieinander liegen. Hieraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass zumindest für die hier untersuchten Isoliergasgemische keine zusätzlichen Maßnahmen zur Verbesserung der elektromagnetischen Verträglichkeit im Vergleich zum bislang etablierten SF_6 oder SF_6/N_2 erforderlich sind, solange keine wesentlich größeren maximalen elektrischen Durchschlagfeldstärken in den Anordnungen erzielt werden.

Die im Zuge dieser Untersuchung ermittelte Unabhängigkeit der im Durchschlag emittierten Frequenzspektren von der Art des verwendeten Isoliergases stehen auf den ersten Blick im Widerspruch zu der zu Beginn von Kapitel 6 erwähnten Untersuchung in [Cig 2018b], die eine Abhängigkeit der Frequenzspektren vom Isoliergas aufwies. Eine naheliegende Erklärung besteht darin, dass der Isoliergasdruck der unterschiedlichen untersuchten Isoliergase bei den Messungen in [Cig 2018b] in jeder Messung konstant war, während in den hier durchgeführten Messungen der Isoliergasdruck so angepasst wurde, dass eine konstante Durchschlagsspannung der unterschiedlichen Isoliergase erzielt wurde. In den in [Cig 2018b] beschriebenen Untersuchungen führte das bei Isoliergasen mit einer höheren TE-Einsatzspannung zu einer höheren Stromsteilheit und damit zu höheren Amplituden der emittierten elektromagnetischen Wellen. Um diese Abhängigkeit weiter zu untersuchen, könnten weitere Messreihen mit unterschiedlichen Isoliergasen bei angepassten Isoliergasdrücken durchgeführt werden, die eine konstante TE-Einsatzspannung ermöglichen.

7 Partikelbewegungsverhalten

Ein Teil der in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse wurde erstmals in [Wie 2021] vom Autor dieser Arbeit veröffentlicht.

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, stellen frei bewegliche, elektrisch leitfähige Partikel in GIL die häufigste Ursache für ein Versagen der Isoliergasstrecke dar, da diese zu einer lokalen Erhöhung der maximalen elektrischen Feldstärke führen und somit die elektrische Festigkeit gasisolierter Systeme erheblich verschlechtern können. Saubere Montagebedingungen und ein angemessenes technisches Design sind für den Umgang mit kleinen, frei beweglichen Partikeln daher Voraussetzungen für eine hohe Zuverlässigkeit von GIS und GIL während des Betriebs.

Das auf Erdpotential liegende Gehäuse einer GIS wird, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, auf der Innenseite häufig mit einer elektrisch nicht-leitfähigen Lackierung beschichtet, wodurch Unebenheiten geebnet werden und nachträglich eingebrachte Partikel aufgrund ihrer Farbdifferenz zur Lackierung optisch leichter detektiert werden können. Des Weiteren erhöht die elektrisch nicht-leitfähige Lackierung, wie die Betrachtung der am Partikel wirkenden Kräfte in Abschnitt 2.4 veranschaulicht, die Abhebefeldstärke des Partikels erheblich. Aufgrund der größeren Abmessungen einer GIL im Vergleich zur GIS ist die Zuverlässigkeit der optischen Detektion von Partikeln nicht mehr gegeben, weshalb eine GIL typischerweise mit einer Partikelfalle statt der Lackierung ausgestattet wird. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben wurde, stellen diese Bereiche innerhalb der GIL mit niedriger elektrischer Feldstärke bereit, in der die Bewegung der frei beweglichen Partikel zum Erliegen kommt.

Während sich, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, aufgrund der unterschiedlichen auf das Partikel wirkenden Kräfte und der daraus resultierenden unterschiedlichen Partikelbewegung unter Gleichspannung Partikelfallen sowohl an der Unterseite des Innenleiters als auch am Boden der Außenhülle einer GIL befinden, kommt im Anwendungsfall Wechselspannung nur die Partikelfalle am Boden der Außenhülle zum Einsatz. Hinsichtlich der Verwendung des Isoliergases SF_6 beziehungsweise des Isoliergasgemisches SF_6/N_2 in der GIL liegen bereits umfassende Kenntnisse über die Partikelbewegung und die Wirksamkeit der Partikelfalle vor [Ber 2014, Mos 1979, Tas 1999, Wen 2018]. Über die Partikelbewegung und die Wirksamkeit der Partikelfalle bei der Verwendung alternativer Isoliergase in GIL hingegen existiert bislang nur wenig Erfahrung. Um zu untersuchen, ob alternative Isoliergasgemische eine Neukonstruktion der Partikelfallen erfordern, und um ein besseres Verständnis des Partikelverhaltens zu erreichen, wurden zahlreiche Partikelbewegungsversuche in der bereits in Abschnitt 4.3.6

beschrieben AC-GIL aus realen GIL/GIS-Komponenten durchgeführt, mit Hilfe eines Kamerasystems beobachtet und mittels UHF-TE-Messungen ausgewertet.

7.1 Prüfaufbau und Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau besteht aus der in Anhang A.1 dargestellten vierstufigen Wechselspannungskaskade, die Wechselspannungen bis zu einer maximalen Effektivspannung von 800 kV ermöglicht, einem Dämpfungswiderstand mit einem Widerstandswert von 10 k Ω , einem kapazitiven Spannungsteiler und einer 420 kV-AC-GIL aus realen GIL/GIS-Komponenten.

7.1.1 Prüfgefäß und optische Aufzeichnung der Partikelbewegung

Bei der AC-GIL handelt es sich um denselben Prüfaufbau, der bereits in Abschnitt 4.3.6 bei den Durchschlagsuntersuchungen alternativer Isoliergasgemische zum Einsatz kam. Für die im Rahmen der Partikelbewegungsuntersuchungen durchgeführten Messungen wurde die 420 kV-AC-GIL stirnseitig um die beiden in Abbildung 7.1 im unteren Bildbereich erkennbaren Sichtfenster und um die in Abbildung 7.7 dargestellte UHF-Sonde erweitert.



Abbildung 7.1: LEDs am stirnseitigen Deckel mit zwei Sichtfenstern zur Beleuchtung des Innenraums der GIL

Zur optischen Untersuchung der Partikelbewegung wurde auf der Innenseite des stirnseitigen Deckels der 420 kV-AC-GIL LEDs angebracht, wie Abbildung 7.1 zeigt, um

den Innenraum der GIL auszuleuchten. Die LEDs wurden über eine gasdichte Durchführung mit einem DC-Labornetzteil mit Spannung versorgt. Die Sichtfenster sind so positioniert, dass sie von außen einen Einblick links und rechts der Partikelfalle ermöglichen. Die Partikelbewegungen wurden optisch mit einer digitalen Spiegelreflexkamera vom Typ Sony Alpha 7 mit einem Teleobjektiv mit 60 Bildern pro Sekunde (FPS) durch eines der beiden Sichtfenster aufgezeichnet und in Echtzeit auf einen am Steuerpult der AC-Kaskade befindlichen Monitor übertragen.

Um den realen Anwendungsfall möglichst genau untersuchen zu können, befinden sich im Inneren der GIL die in Abbildung 4.3 und auch in Abbildung 7.4 und Abbildung 7.5 dargestellte 1 m lange Partikelfalle und die in Abschnitt 4.1 erwähnten Stütz- sowie Scheibenisolatoren aus Epoxidharz, die zur Zentrierung des Innenleiters verwendet werden. Da es sich bei dem Gehäuse um ein GIS-Bauteil handelt, welches von innen mit einer nicht-leitfähigen Beschichtung lackiert wurde, wurde diese Beschichtung, wie in Abbildung 7.4 ersichtlich wird, in der unteren Hälfte des Gehäuses entfernt, da nur die untere Hälfte den für die Partikelbewegung relevanten Bereich darstellt. Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, hemmt die Beschichtung des Gehäuses mit einer nicht-leitfähigen Schicht die Ladungsträgerakkumulation des Partikels und beeinflusst somit die Abhebefeldstärke und den Ladungsträgerübergang zwischen Partikel und Gehäuse beim Aufprallen des Partikels auf das Gehäuse. Da das Partikel im Zuge seiner Bewegung jedoch keinen Kontakt zur oberen Hälfte des Gehäuses hat, übt die Beschichtung dort keinen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Partikels aus.

7.1.2 Partikelauswahl

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, treten in der Praxis in GIL und GIS üblicherweise spiral- oder quaderförmige Partikel aus Aluminium oder Stahl auf. Bei diesen Partikeln handelt es sich meist um spanförmige Partikel, die sich durch ein großes Länge-Dicke-Verhältnis sowie ein großes Breite-Dicke-Verhältnis auszeichnen. Als besonders kritisch für den zuverlässigen Betrieb von gasisolierten Anlagen zeichneten sich hier Partikel ab einer Länge l_p von 3 mm aus [Her 2016].

Bei der Wahl einer geeigneten Partikelgeometrie für die hier durchgeführten Untersuchungen wurden sowohl die Reproduzierbarkeit als auch die Praxisrelevanz bedacht. Spiralförmige Partikel besitzen, wie in Abschnitt 2.4 erläutert, den Nachteil, dass deren einheitliche Herstellung anspruchsvoll ist und dass eine Verformung durch die Partikelbewegung nicht ausgeschlossen werden kann. Um eine sowohl realistische als auch reproduzierbare Partikelgeometrie sicherzustellen, wurden quaderförmige Partikel verwendet. Die relevanten Maße des quaderförmigen Partikels wurden in Abbildung 2.8 in Abschnitt 2.4.1 vorgestellt und sind in Abbildung 7.2 dargestellt.

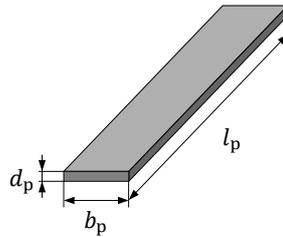


Abbildung 7.2: Relevante Maße des quaderförmigen Partikels

Bei der Betrachtung der Bewegung quaderförmiger Partikel im elektrischen Feld wurde in der Literatur der Einfluss der Breite b_p des Partikels auf die in Gleichung 2.32 berechnete Abhebefeldstärke bislang noch nicht berücksichtigt. Um die vorhandenen Formeln diesbezüglich zu erweitern, wird in dieser Arbeit ein Breitenkorrekturfaktor für die gegebene Formel empirisch bestimmt. Basierend hierauf wurden quaderförmige Partikel mit einer Länge l_p von 6 mm, einer Dicke d_p von 0,1 mm und einer Breite b_p von 2,01 mm aus Aluminium und aus Stahl gefertigt. Um zusätzlich den Einfluss der Partikelbreite experimentell untersuchen zu können, wurden weitere Partikel gleicher Länge und Dicke, jedoch mit einer Breite von 1,23 mm aus Stahl gefertigt. Tabelle 47 zeigt eine Übersicht der gewählten Partikelabmessungen.

Tabelle 47: Gewählte Partikelabmessungen der quaderförmigen Partikel

Material	Breite b_p	Länge l_p	Dicke d_p
Stahl	1,23 mm	6 mm	0,1 mm
Aluminium	2,01 mm		

7.1.3 Partikelpositionierung in der GIL

Um einheitliche Bedingungen bei der Untersuchung der frei beweglichen Partikel in der GIL sicherzustellen, wurden die Mindestabstände zwischen den Partikeln $a_{p,min}$, die Abstände zum Rand der Partikelfalle $a_{E,min}$ und die Abstände zwischen den Partikeln und der Partikelfalle a_F in Voruntersuchungen empirisch ermittelt und festgelegt. Die ermittelten Werte sowie eine Erläuterung der Abstände befinden sich im weiteren Verlauf dieses Abschnitts. Abbildung 7.3 zeigt eine schematische Übersicht der beschriebenen relevanten Abstände der Partikel von der Partikelfalle und untereinander.



Abbildung 7.3: Relevante Abstände der in der GIL platzierten Partikel von der Partikelfalle und untereinander (Draufsicht)

Vor jeder Messung wurden mehrere Partikel im selben Abstand neben der Partikelfalle positioniert, wie Abbildung 7.4 fotografisch zeigt.



Abbildung 7.4: Platzierung der Aluminiumpartikel auf der rechts der Partikelfalle eingezeichneten schwarzen Linie, um einen konstanten Abstand zur Partikelfalle sicherzustellen

Hierfür wurde auf der Innenseite des Gehäuses eine Linie mit schwarzem Filzstift parallel zur Partikelfalle mit einem empirisch ermittelten Abstand a_F von 40 mm zur Partikelfalle eingezeichnet, auf der die Partikel vor jedem Versuch positioniert wurden. Ein kleinerer Abstand zur Partikelfalle würde aufgrund der geringeren elektrischen Feldstärke in der Nähe der Partikelfalle zu einer schwächeren elektrostatischen Kraft auf das Partikel führen. Ein größerer Abstand wiederum würde aufgrund der erhöhten tangentialen Komponente der Gravitationskraft die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass das Partikel bei der ersten Bewegung in die Partikelfalle gleitet.

Neben dem festen Abstand a_F von der Partikelfalle wurde auch ein ebenfalls empirisch ermittelter minimaler Abstand $a_{E,min}$ der Partikel von den Enden der Partikelfalle von 75 mm eingehalten. Dieser Abstand soll verhindern, dass sich die Partikel während ihrer Bewegung in Bereiche der GIL ohne Partikelfalle begeben, was aufgrund des dort fehlenden Einflusses der Partikelfalle diese Partikelbewegung für die Untersuchung ungünstig macht.

Um eine Wechselwirkung der Partikel untereinander zu vermeiden, wurde zwischen den Partikeln ein empirisch ermittelter Mindestabstand $a_{p,min}$ eingehalten. Bei einer zu geringen Distanz zwischen den Partikeln wurde in Voruntersuchungen wiederholt die in Abbildung 7.5 gezeigte Aneinanderreihung der einzelnen Partikel beobachtet, sobald die

Aufrichtfeldstärke erreicht wurde. Da es sich bei diesem Phänomen, welches mehrere nahe beieinander befindliche elektrisch leitfähige Partikel in der GIL bedingt, um einen für die Praxis nicht relevanten Fall handelt, fand im Rahmen der vorliegenden Arbeit hierzu keine weitere Untersuchung statt.

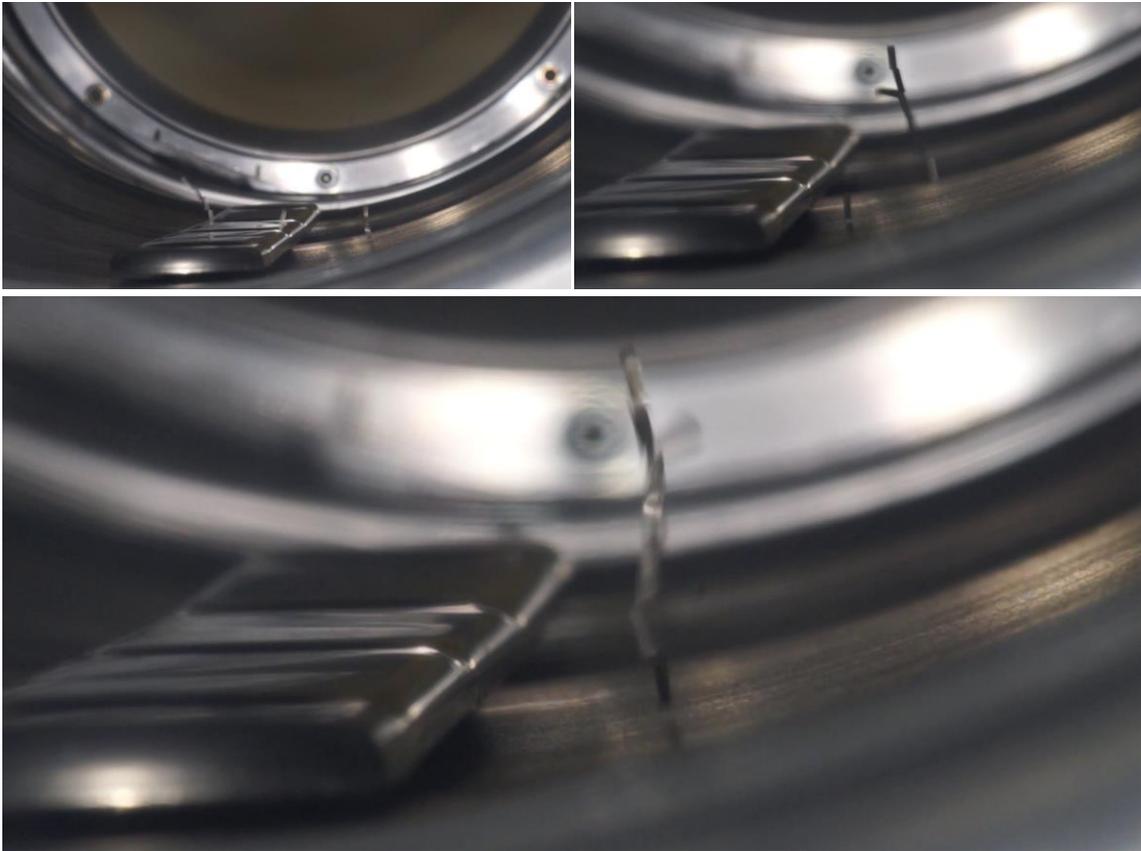


Abbildung 7.5: Aneinanderreihung mehrerer Partikel beim Erreichen der Aufrichtfeldstärke durch zu geringen Abstand zwischen den platzierten Partikeln

Für Aluminiumpartikel wurde der Mindestabstand $a_{p,min}$ zwischen den Partikeln von 50 mm bestimmt. Aufgrund der ferromagnetischen Eigenschaften der Stahlpartikel musste für diese der empirisch ermittelte Mindestabstand $a_{p,min}$ auf 65 mm erhöht werden. Um die Gasarbeiten und das Öffnen der GIL zur Neupositionierung der Partikel nach jeder Messreihe zu vermeiden, wurde die ferromagnetische Eigenschaft der Stahlpartikel genutzt. Dank dieser war es möglich, die in der Partikelfalle befindlichen Stahlpartikel mit Hilfe eines Magneten aus der Partikelfalle zu entfernen und erneut in den in Abbildung 7.3 dargestellten Mindestabständen auf der schwarzen Linie zu positionieren. Hierzu wurde die optische Echtzeit-Übertragung des verwendeten Kamerasystems genutzt, um die Bewegung des Stahlpartikels in der GIL nachvollziehen zu können. Bei einem zu geringen Abstand der Stahlpartikel zueinander führt die Nutzung eines Magneten jedoch zu einer Anhäufung der Stahlpartikel, welche, wie in Abbildung 7.5 gezeigt, das Partikelbewegungsverhalten der Stahlpartikel beeinflusst und somit vermieden werden sollte.

Die ferromagnetische Eigenschaft der Stahlpartikel wurde jedoch auch für die Untersuchungen der Aluminiumpartikel genutzt. Hierzu wurden mehrere Stahlpartikel mit den beiden Längen von 10 mm und 35 mm, einer Dicke von 0,1 mm und einer Breite von 2,01 mm zur Reduktion ihrer Gleitreibung mit einer einlagigen Schicht aus Baumwollstoff umwickelt, wie Abbildung 7.6 zeigt, und während der Untersuchung der Aluminiumpartikel an zuvor festgelegten Orten in der Partikelfalle positioniert.

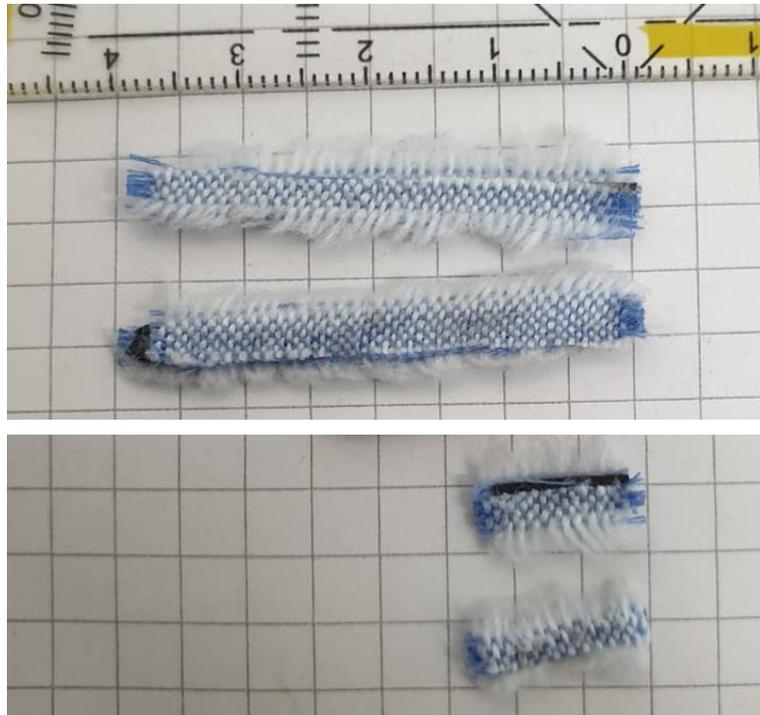


Abbildung 7.6: Mit Baumwollstoff zur Verringerung der Haft- und Gleitreibung umwickelte Stahlpartikel zur Neupositionierung von Aluminiumpartikeln zwischen den Versuchsreihen mit Hilfe eines Magneten

Die 35 mm langen Stahlpartikel wurden zur Entnahme der Aluminiumpartikel aus der Partikelfalle genutzt, während die 10 mm langen Stahlpartikel aufgrund der genaueren Handhabbarkeit zur Trennung angehäufter Aluminiumpartikel genutzt wurden.

Somit war es auch bei der Untersuchung der Aluminiumpartikel möglich, mehrere Versuchsreihen hintereinander ohne die Öffnung der GIL durchzuführen, was aufgrund des sehr großen Volumens von 650 l mit zeitaufwändigen Wartungsarbeiten verbunden wäre. Um Partikel in Folgeuntersuchungen ersetzen zu können, die auf der von der schwarzen Linie entgegengesetzten Seite der Partikelfalle gefangen wurden und somit einen größeren Aufwand bei der Neupositionierung bedürften, wurden zusätzliche Partikel vor Versuchsstart in zuvor definierten Bereichen in der Partikelfalle positioniert.

7.1.4 UHF-TE-Messung

Neben der zuvor beschriebenen optischen Aufzeichnung der Partikelbewegungen durch ein Kamerasystem werden die Bewegungen zusätzlich mit einer UHF-TE-Messung

analysiert. Grundlagen zur Teilentladungsmessung können Abschnitt 2.5 entnommen werden. Zur UHF-TE-Messung wurde die in Abbildung 7.7 gezeigte UHF-Feldsonde vom Typ 1.1 von Siemens im Gehäuse der GIL installiert, deren Position in Abbildung 7.4 durch die Einbuchtung im hinteren linken Teil der Außenhülle sichtbar ist.



Abbildung 7.7: UHF-Feldsonde vom Typ 1.1 von Siemens

Im Allgemeinen kann die UHF-TE-Messung nicht in Bezug auf die Ladung (pC) kalibriert werden, da das Signal von der Geometrie des Testaufbaus und dem Abstand zwischen Partikel und Sensor abhängt. Da jedoch die Geometrie während der Messreihen konstant ist und der Abstand zwischen den sich bewegenden Partikeln und der UHF-Feldsonde sehr gering ist, wird die relative empfangene Amplitude der TE-Signale mit einem konstanten Kalibrierungsfaktor für jede Messung aufgezeichnet. Dies ermöglicht den Vergleich jedes Datenpunkts innerhalb eines PRPD-Musters sowie den Vergleich der verschiedenen PRPD-Muster untereinander.

Zur Messung der UHF-TE wurde der akkubetriebene Bandbreitenkonverter UHF 620 von OMICRON, welcher den Messbereich konventioneller TE-Messsysteme auf einen Frequenzbereich von 100 MHz bis 2000 MHz erweitert, mit der UHF-Feldsonde verbunden. An den UHF-Bandbreitenkonverter wiederum wird das konventionelle TE-Messsystem, bestehend aus der Messeinheit MPD 600 von OMICRON, der Kontrolleinheit MCU 502 von OMICRON und dem Messrechner, angeschlossen. Die gemessenen PRPD-Muster werden somit analog zum aufgezeichneten Video ebenfalls in Echtzeit auf den Bildschirm am Steuerpult der AC-Kaskade übermittelt.

Da Erfahrungen aus [Tas 1999] zeigen, dass Partikelbewegungen in mit SF₆ gefüllten GIL breitbandig Amplituden im gesamten UHF-Frequenzbereich von etwa 200 MHz bis über 2 GHz erzeugen, hängt die Wahl des geeigneten Frequenzbereichs und der geeigneten Messbandbreite folglich primär von den Frequenzen des Nutzsignals sowie der Störsignale ab, weshalb diese in einem ersten Schritt ermittelt werden.

In Vorabuntersuchungen stellte sich eine anliegende Prüfspannung von 360 kV aufgrund der noch geringen Durchschlagwahrscheinlichkeit bei gleichzeitig ausgeprägter Partikelbewegung als geeignete maximale Spannung zur Untersuchung der Bewegung von Aluminiumpartikeln heraus. Daher wurde das UHF-Frequenzspektrum bei 360 kV in einer Breitbandmessung zwischen 100 MHz und 1 GHz ohne Partikelbewegungen aufgezeichnet, um den Rauschpegel und somit mögliche Störfrequenzen zu bestimmen. Dieses in Abbildung 7.8 dargestellte Frequenzspektrum zeigt, dass zwischen 100 MHz und 1 GHz signifikante Störsignale über die meisten Frequenzen im Rauschband vorhanden sind, welche wahrscheinlich auf interne Isolationsfehler der schadhafte Wechselstrom-Hochspannungskaskade zurückzuführen sind. Der niedrigste Rauschbereich konnte für den Frequenzbereich zwischen 570 MHz und 795 MHz ermittelt werden.

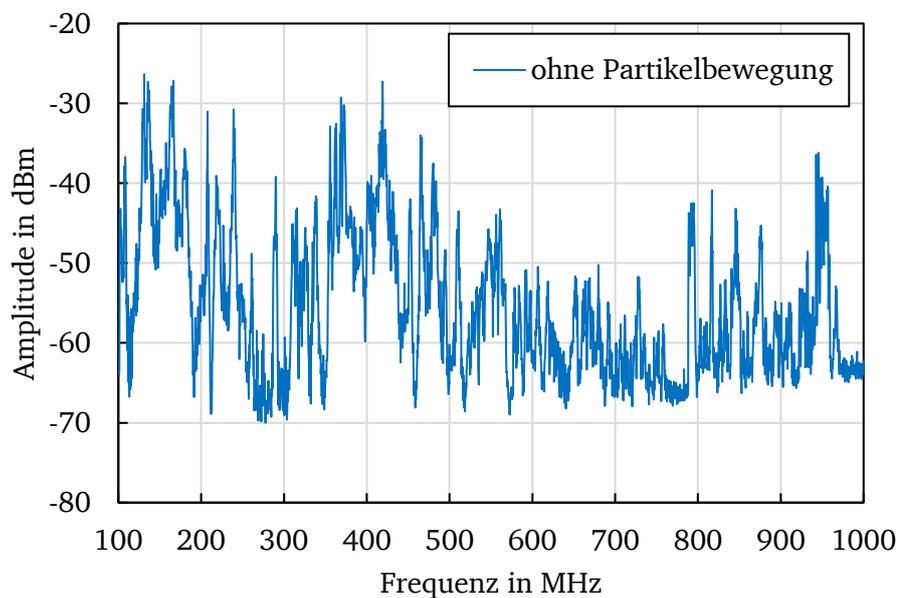


Abbildung 7.8: Frequenzspektrum der UHF-TE-Messung im Frequenzbereich von 100 MHz bis 1 GHz ohne Partikelbewegungen

Da die Durchlaufzeit des in Abbildung 7.8 gezeigten breitbandigen Frequenzdurchlaufs über den dargestellten Frequenzbereich etwa 30 Sekunden beträgt, Partikelbewegungen aufgrund der Partikelfalle jedoch meist nur für einige Sekunden andauern, wurde ein detaillierterer Frequenzdurchlauf mit einer Mediumbandmessung in dem ermittelten rauscharmen Frequenzbereich von 700 MHz bis 780 MHz sowohl ohne als auch mit Partikelbewegungen bei einer Effektivspannung von 360 kV durchgeführt. Eine Gegenüberstellung dieser beiden Frequenzspektren ist in Abbildung 7.9 dargestellt.

Um stochastisch auftretende Störfrequenzanteile zu berücksichtigen, wurden die Frequenzdurchläufe der Frequenzbereiche ohne Partikelbewegung in Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9 jeweils mindestens fünfmal mit aktivierter Funktion, die maximal gemessene Amplitude zu halten, durchgeführt. Auch der Frequenzbereich des Frequenzspektrums mit Partikelbewegung wurde mit der Funktion, die maximal gemessene Amplitude jeder Frequenz zu halten, wiederholt und besteht in Summe aus

68 Partikelbewegungen mit einer gesamten Aufnahmezeit von 206 Sekunden. Als Partikelbewegung wird das Abheben eines Partikels bis zum erneuten Landen mit anschließendem Stillstand gezählt, was durch die Auswertung der Kameraaufnahmen bestimmt wird.

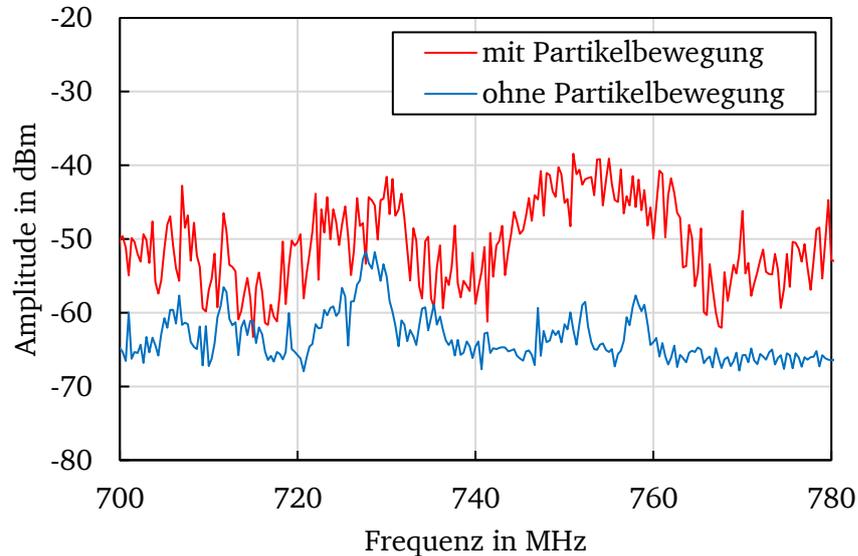


Abbildung 7.9: Frequenzspektrum der UHF-TE-Messung im Frequenzbereich von 700 MHz bis 780 MHz ohne Partikelbewegungen (blau) und mit Partikelbewegungen (rot)

Ein Vergleich der Frequenzspektren zeigt, dass die Amplituden, die durch die Partikelbewegung verursacht wurden, in dem gewählten Frequenzbereich signifikant oberhalb des Rauschpegels liegen. Daher wird die Mittenfrequenz der UHF-TE-Messung auf 740 MHz mit einer Bandbreite von 70 MHz eingestellt, um ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu erzielen. Da jeder Impuls eine Totzeit des TE-Messsystems verursacht, wird ein Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 600 MHz verwendet, um die Anzahl der Totzeiten durch die hohen Amplituden der Rauschimpulse unterhalb von 600 MHz zu verringern.

7.1.5 Versuchsparameter

Die in den Versuchsreihen untersuchten Parameter sind in Tabelle 48 aufgelistet. Neben den zuvor erwähnten unterschiedlichen Partikelabmessungen und Materialien wurden insgesamt vier verschiedene Isoliergasgemische mit einem Druck von 0,5 MPa untersucht: das etablierte Isoliergasgemisch aus 20 % SF₆ / 80 % N₂ (SF₆/N₂), 10 % C4N / 90 % CO₂ (C4N/CO₂), 10 % C5K / 90 % CO₂ (C5K/CO₂) und – um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen SF₆/N₂ und den beiden alternativen Isoliergasgemischen zu ermöglichen – 10 % SF₆ / 90 % CO₂ (SF₆/CO₂).

Für jede der in Tabelle 48 beschriebenen Messreihen wird das Messverfahren wiederholt, bis mindestens 50 Partikelbewegungen für Stahlpartikel und – aufgrund der

höheren Praxisrelevanz – 200 für Aluminiumpartikel beobachtet wurden. Da die meisten Komponenten von GIS/GIL aus Aluminium bestehen, ist es wahrscheinlicher, dass in der Realität Aluminiumpartikel auftreten.

Tabelle 48: Variierte Parameter bei der Untersuchung des Partikelbewegungsverhaltens

Isoliergasgemisch	Akronym	Partikelbreite in mm	Partikelmaterial	Anzahl der Partikelbewegungen
20 % SF ₆ / 80 % N ₂	SF ₆ /N ₂	2,01	Aluminium	231
		1,23	Stahl	92
		2,01		62
10 % C ₄ N / 90 % CO ₂	C ₄ N/CO ₂	2,01	Aluminium	219
		1,23	Stahl	75
		2,01		58
10 % C ₅ K / 90 % CO ₂	C ₅ K/CO ₂	2,01	Aluminium	212
10 % SF ₆ / 90 % CO ₂	SF ₆ /CO ₂	2,01	Aluminium	210

Die Untersuchung in Kapitel 6 zeigt, dass ein Gasdurchschlag elektromagnetische Wellen erzeugt, die elektrische Betriebsmittel in der Nähe stören oder sogar beschädigen können. Beispiele hierfür sind das Kamerasystem und die LED-Beleuchtung. Deshalb ist es wichtig, Gasdurchschläge während der Untersuchung zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde die maximale Effektivspannung bei der Untersuchung von Stahlpartikeln auf die in Vorversuchen empirisch ermittelte maximale Spannung von 400 kV und bei der Untersuchung von Aluminiumpartikeln auf die empirisch ermittelte maximale Spannung von 360 kV limitiert. Die anliegende Spannung wird manuell mit einer Spannungssteigerung von etwa 2,5 kV/s erhöht und konstant gehalten, während eine Partikelbewegung auftritt. Jede Partikelbewegung wurde in einer Bild-für-Bild-Auswertung des Videomaterials hinsichtlich ihrer Abhebespannung, ihrer Bewegungsdauer und der Anzahl an Innenleiterkontakten ausgewertet. Weiterhin werden die aufgezeichneten UHF-TE-Muster der unterschiedlichen untersuchten Isoliergasgemische und Partikel gegenübergestellt und diskutiert.

7.2 Ergebnisse

7.2.1 Auswertung der Partikelbewegung

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse vorgestellt. Im folgenden Abschnitt 7.2.2 findet eine Interpretation und Diskussion der Einflussfaktoren auf das Bewegungsverhalten statt.

Die auf der manuellen Auswertung der aufgezeichneten Videos der Partikelbewegungen basierenden Ergebnisse sind in Tabelle 49 dargestellt. Sie bestehen für alle durchgeführten Messreihen der unterschiedlichen Isoliergasgemische und Partikel aus

der Anzahl der Innenleiterkontakte der Partikel, dem prozentualen Anteil der abgehobenen Partikel und der gemessenen effektiven Abhebespannung $U_{ab,gem,eff}$.

Tabelle 49: Zusammenfassung der Ergebnisse der Partikelbewegungsuntersuchungen

Isoliergas-gemisch	Partikel-breite b_p in mm	Partikel-material	Anzahl der Innenleiter-kontakte	Prozentualer Anteil der Partikel-abhebungen*	Gemessene minimale Abhebespannung $U_{ab,gem,eff}$ in kV
SF ₆ /N ₂	2,01	Aluminium	88	113 %	136
	1,23	Stahl	0	69 %	219
	2,01		0	46 %	232
C4N/CO ₂	2,01	Aluminium	33	93 %	136
	1,23	Stahl	0	78 %	207
	2,01		2	41 %	234
C5K/CO ₂	2,01	Aluminium	29	102 %	131
SF ₆ /CO ₂	2,01	Aluminium	72	95 %	128

*Bezogen auf Anzahl der platzierten Partikel – somit Werte > 100 % durch mehrfaches Abheben möglich

Bei jedem der vier untersuchten Isoliergasgemische wurden in Summe über mehrere Versuche hinweg etwa 210 Aluminiumpartikel neben der Partikelfalle platziert. Die Summe der pro Isoliergas platzierten Stahlpartikel hingegen betrug etwa 120 für jedes Isoliergasgemisch, was auf die in Abschnitt 7.1.3 genannten Gründe der geringeren praktischen Relevanz der Stahlpartikel und der Magnetisierbarkeit und des daraus resultierenden größeren Abstands zwischen den Stahlpartikeln zurückzuführen ist.

Anzahl der Innenleiterkontakte

Der Innenleiterkontakt eines leitfähigen Partikels in einer GIL führt zu einer starken lokalen Überhöhung der elektrischen Feldstärke und stellt, wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, somit den kritischsten Zustand der Partikelbewegung für die elektrische Festigkeit der Isoliergasstrecke dar. Wie aus Tabelle 49 hervorgeht, wurde die maximal anliegende Spannung bei der Untersuchung von Stahlpartikeln so gewählt, dass nur einzelne Stahlpartikel den Innenleiter erreichten. Dies resultiert aus ihrer im Vergleich zu Aluminiumpartikeln etwa 2,9-mal so hohen Dichte des Stahlpartikels. Folglich ergibt sich gemäß Gleichung 2.35 aus Abschnitt 2.4 aufgrund der höheren Gewichtskraft eine höhere erforderliche elektrostatische Kraft, um die Stahlpartikel in Richtung der oberen Elektrode zu beschleunigen. Bei den Messreihen der Aluminiumpartikel in SF₆/N₂ und SF₆/CO₂ waren signifikant mehr Innenleiterkontakte zu beobachten als bei den Aluminiumpartikeln in den alternativen Isoliergasgemischen. Da der Kontakt des Partikels mit dem Innenleiter einen Durchschlag der Isoliergasstrecke begünstigt, resultiert hieraus ein prinzipiell zuverlässigerer Betrieb der mit einem der beiden alternativen Isoliergasgemischen gefüllten GIL in Anwesenheit von Partikeln. Eine Betrachtung möglicher Einflussgrößen, die für dieses unterschiedliche Partikelverhalten verantwortlich sein können, befindet sich in Abschnitt 7.2.2.

Prozentualer Anteil der Partikelabhebungen

Der prozentuale Anteil der Partikelabhebungen ist auf die Anzahl der platzierten Partikel bezogen. Da Partikel, welche in der Nähe der Partikelfalle und somit bereits im Bereich mit geringerer elektrischer Feldstärke gelandet sind, mitunter bei höheren Spannungen erneut abhoben, sind Werte des prozentualen Anteils der Partikelabhebungen von mehr als 100 % möglich. Falls ein abgehobenes Partikel während seiner Bewegung in den Bereich der GIL ohne Partikelfalle wandert, ist dessen Bewegung aufgrund des fehlenden Einflusses der Partikelfalle ungültig. Es wurde beobachtet, dass das erneute Abheben bereits gelandeter Partikel in den meisten Fällen in dem Moment ausgelöst wurde, in dem diese von einem sich bewegenden Partikel berührt wurden oder in dem ein sich bewegendes Partikel den Innenleiter erreichte. Die zuvor festgestellt höhere erforderliche elektrostatische Kraft zum Abheben der Stahlpartikel erklärt ebenfalls den geringeren prozentualen Anteil der abgehobenen Stahlpartikel im Vergleich zu den Aluminiumpartikeln. Im Umkehrschluss ergibt sich für die Aluminiumpartikel eine vergleichsweise niedrigere Abhebespannung und eine deutlich höhere Anzahl an Innenleiterkontakten, die jedoch aufgrund der geringeren maximal anliegenden Spannung zu keinem Durchschlag der Isolierstrecke führten.

In Bezug auf den Anteil der Partikelabhebungen konnte erwartungsgemäß kein signifikanter Unterschied zwischen den Gasgemischen festgestellt werden. In Tabelle 59 in Abschnitt 7.2.3 wird eine Gegenüberstellung der gemessenen minimalen Abhebespannungen mit den mit Hilfe der in Abschnitt 7.2.3 hergeleiteten Formel berechneten Abhebespannungen durchgeführt.

Gemessene minimale Abhebespannung

Bezüglich der gemessenen minimalen Abhebespannungen kann kein Unterschied zwischen den Isoliergasgemischen ausgemacht werden. Stahlpartikel zeigen eine signifikant höhere minimale Abhebespannung als Aluminiumpartikel, was an der bereits in vorangegangenen Abschnitten erklärten höheren Dichte der Stahlpartikel liegt. Weiterhin zeigen Stahlpartikel mit geringerer Partikelbreite auch eine geringere minimale Abhebespannung als die mit größerer Partikelbreite. Nach Gleichung 2.32 sollten beide Partikelbreiten die gleichen minimalen Abhebespannungen aufweisen. Bei diesem Unterschied handelt es sich um den in Gleichung 2.32 nicht berücksichtigten Einfluss der Partikelbreite, der in Abschnitt 7.2.3 genauer untersucht wird.

Bei der Steigerung der anliegenden Spannung gleitet ein Teil der auf der Ausgangsposition platzierten Partikel vor dem Abheben aufgrund der Krümmung des Gehäuses in Richtung Partikelfalle. Da diese sich somit in einem Bereich mit geringerer elektrischer Feldstärke befinden, ergibt sich für die durchschnittliche Abhebespannung ein deutlich höherer Wert als für die minimale Abhebespannung.

Partikelbewegungsdauern und durchschnittliche Abhebespannungen

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden SF₆-Isoliergasgemischen und den beiden alternativen Isoliergasgemischen zeigt sich bei der Betrachtung der Partikelbewegungsdauern. Hierzu sind in Abbildung 7.10 die Bewegungsdauern jeder einzelnen Partikelbewegung der Aluminiumpartikel mit einer Breite von b_p von 2,01 mm über ihrer entsprechenden effektiven Abhebespannung $U_{ab,gem,eff}$ sowie die mittlere Bewegungsdauer und die mittlere effektive Abhebespannung für jedes der vier untersuchten Isoliergasgemische aufgetragen.

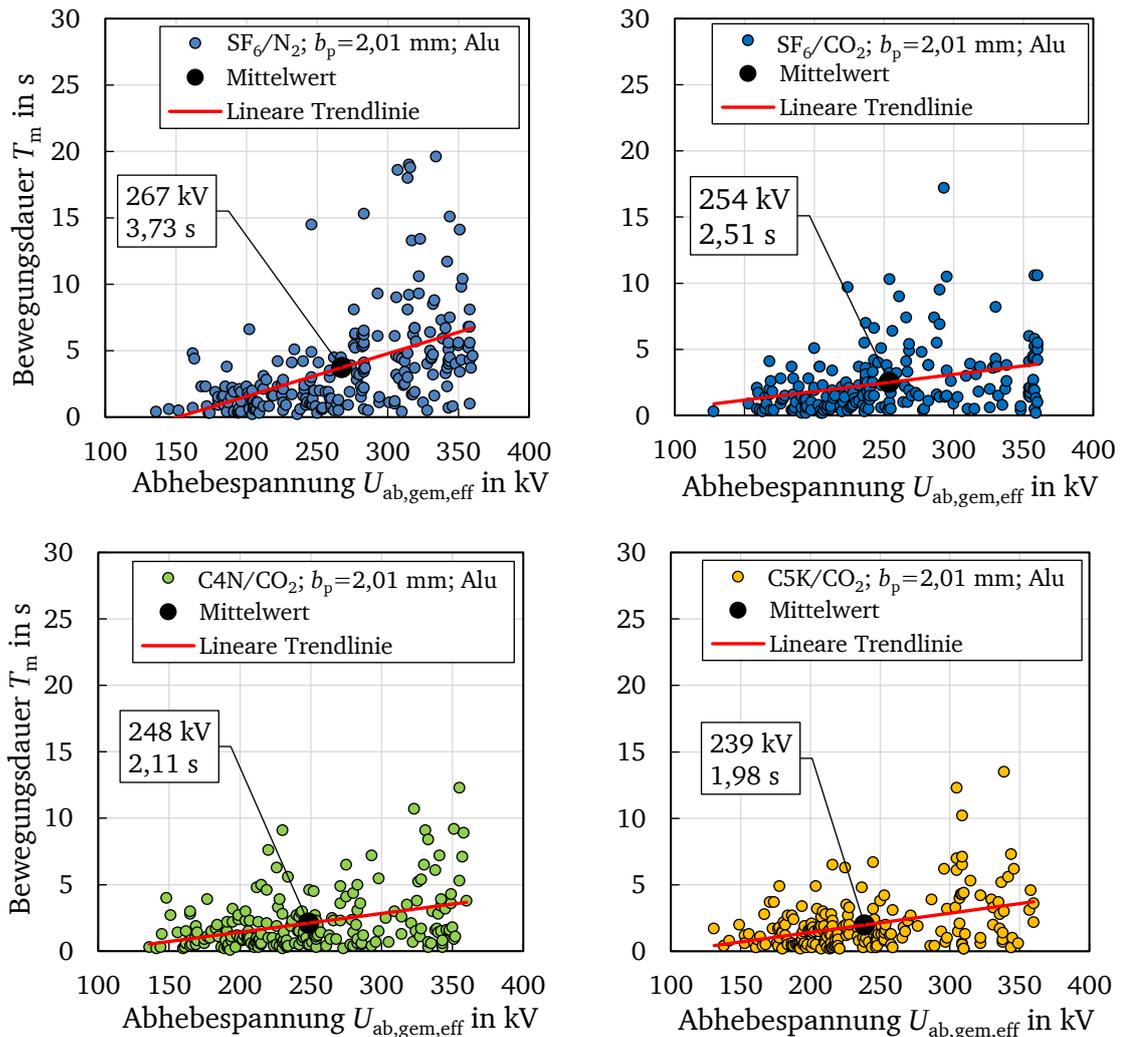


Abbildung 7.10: Gegenüberstellung der Bewegungsdauern T_m jeder einzelnen Partikelbewegung der Aluminiumpartikel mit einer Breite $b_p = 2,01$ mm über der Abhebespannung $U_{ab,gem,eff}$ sowie die mittlere Abhebespannung und mittlere Partikelbewegungsdauer der Isoliergasgemische SF₆/N₂, SF₆/CO₂, C4N/CO₂ und C5K/CO₂

In allen vier Diagrammen sind zudem die linearen Trendlinien mit einer roten Linie eingetragen, die jedoch nicht als Indikator für eine tatsächliche lineare Abhängigkeit stehen, sondern den Trend der steigenden durchschnittlichen Bewegungsdauer jedes Partikels mit zunehmender Abhebespannung veranschaulichen sollen. In Bezug auf die

verschiedenen Isoliergasgemische zeigen die Diagramme eine um etwa 50 % kürzere durchschnittliche Partikelbewegungsdauer der Aluminiumpartikel für die beiden alternativen Isoliergasgemische C4N/CO₂ und C5K/CO₂ im Vergleich zu SF₆/N₂. In Abschnitt 7.2.2 werden mögliche Gründe betrachtet und bewertet.

In Bezug auf die Abhebespannung liegt der Durchschnittswert für SF₆/N₂ etwa 10 % höher als für C4N/CO₂ und C5K/CO₂. Sowohl die Abhebespannung als auch die durchschnittliche Partikelbewegungsdauer für das SF₆/CO₂-Isoliergasgemisch liegen zwischen SF₆/N₂ und den beiden alternativen Isoliergasgemischen C4N/CO₂ und C5K/CO₂. Da das Isoliergasgemisch SF₆/CO₂ mit 10 % SF₆ / 90 % CO₂ die gleichen Partialdrücke wie die alternativen Isoliergasgemische und auch das gleiche Trägergas besitzt, scheint SF₆ der Grund für die höhere Abhebespannung und die längere durchschnittliche Bewegungsdauer der Partikel zu sein. Folglich wird die noch höhere Abhebespannung und längere durchschnittliche Bewegungsdauer für Partikel im SF₆/N₂-Isoliergasgemisch vermutlich durch den prozentual doppelt so hohen Anteil an SF₆ im Isoliergasgemisch verursacht. Eine Untersuchung möglicher Einflussfaktoren ist in Abschnitt 7.2.2 aufgeführt. Um einen Einfluss der Trägergase N₂ und CO₂ untersuchen zu können, wären weitere Versuchsreihen erforderlich.

Analog zu Abbildung 7.10 zeigen die oberen Diagramme in Abbildung 7.11 die Bewegungsdauern jeder einzelnen Partikelbewegung der Stahlpartikel mit einer Breite b_p von 2,01 mm über ihrer entsprechenden effektiven Abhebespannung für die beiden untersuchten Isoliergasgemische SF₆/N₂ und C4N/CO₂.

Für beide Gasgemische ist die durchschnittliche Abhebespannung höher als für Aluminiumpartikel, was durch die eingangs genannte höhere Dichte von Stahl und daher höhere Gravitationskraft des Partikels verursacht wird, wie auch anhand von Gleichung 2.32 in Abschnitt 2.4 ersichtlich wird. In Bezug auf die Bewegungsdauern kann kein Einfluss des Partikelmaterials auf die durchschnittliche Bewegungsdauer in C4N/CO₂ und nur eine geringfügig kürzere Bewegungsdauer für Stahlpartikel in SF₆/N₂ beobachtet werden. Wie bereits bei den Aluminiumpartikeln zeigt sich auch für die Stahlpartikel eine signifikant längere Partikelbewegungsdauer in SF₆/N₂ als in C4N/CO₂, die in Abschnitt 7.2.2 eingehender untersucht wird.

Zur praktischen Untersuchung des Parameters der Partikelbreite sind in den unteren Diagrammen in Abbildung 7.11 die Bewegungsdauern von Stahlpartikeln mit einer Breite b_p von 1,23 mm über ihrer entsprechenden effektiven Abhebespannung für die beiden Isoliergasgemische SF₆/N₂ und C4N/CO₂ dargestellt. Eine Betrachtung und Interpretation der Ergebnisse können im folgenden Abschnitt 7.2.2 gefunden werden.

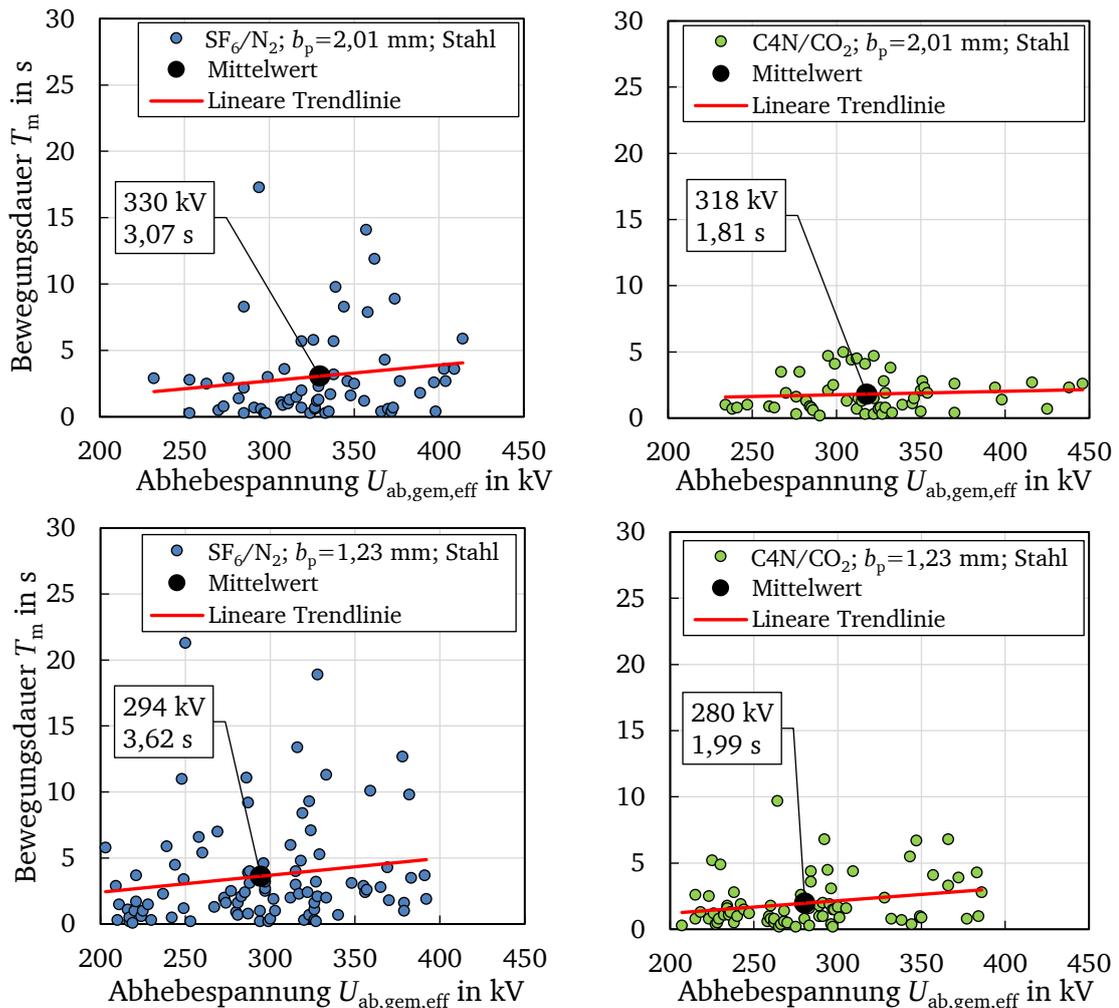


Abbildung 7.11: Gegenüberstellung der Bewegungsdauern T_m jeder einzelnen Partikelbewegung der Stahlpartikel mit einer Breite $b_p = 2,01$ mm (oben) und $b_p = 1,23$ mm (unten) über der Abhebespannung $U_{ab,gem,eff}$ sowie die mittlere Abhebespannung und mittlere Partikelbewegungsdauer der Isoliergasgemische SF_6/N_2 (links) und C_4N/CO_2 (rechts)

Die untersuchten alternativen Isoliergasgemische C_4N/CO_2 und C_5K/CO_2 verursachen kürzere Partikelbewegungsdauern und eine leicht verringerte durchschnittliche Abhebespannung im Vergleich zum etablierten SF_6/N_2 sowohl für die beiden unterschiedlichen untersuchten Partikelmaterialien als auch für die beiden unterschiedlichen untersuchten Partikelbreiten. Eine kürzere Partikelbewegungsdauer weist auch auf eine verbesserte Wirksamkeit der Partikelfalle hin, da sich das Partikel für eine kürzere Zeit frei im Gasraum bewegt und durch elektrische Feldüberhöhungen Durchschläge herbeiführen kann. Weiterhin verbessern sowohl eine kürzere Bewegungsdauer als auch eine niedrigere Abhebespannung die Wirksamkeit des Spannungskonditionierungsverfahrens während der Inbetriebnahme. Dies führt folglich auch zu einem zuverlässigeren Betrieb der GIL. Somit besitzt die hier verwendete GIL-Partikelfalle für die beiden alternativen Isoliergasgemische C_4N/CO_2 und C_5K/CO_2 eine vergleichbare und zum Teil bessere Wirksamkeit als für das etablierte Isoliergas SF_6/N_2 .

7.2.2 Betrachtung möglicher Einflussfaktoren auf das Bewegungsverhalten

Partikelbreite

Ein Vergleich der beiden unterschiedlichen Partikelbreiten der Stahlpartikel von 2,01 mm in Abbildung 7.11 und 1,23 mm in Abbildung 7.11 zeigt, dass die durchschnittliche Bewegungsdauer der Partikel mit einer Breite von 1,23 mm für beide Isoliergasgemische geringfügig höher ist als die der Partikel mit einer Breite von 2,01 mm. Mögliche Erklärungen für die unterschiedlichen Bewegungsdauern sind der geringere Strömungswiderstand der schmaleren Partikel, eventuell höhere TE-Aktivitäten oder der noch unbekannt Einfluss der Partikelbreite, der in Abschnitt 7.2.3 näher untersucht wird. Der Hauptunterschied zwischen den beiden Partikelbreiten zeigt sich jedoch in der niedrigeren Abhebespannung der schmaleren Partikel, was, wie bereits in Abschnitt 2.4 erläutert, auf das geringere Gewicht der Partikel zurückzuführen ist.

Isoliergasdichte

Eine mögliche Erklärung für das unterschiedliche Partikelverhalten zwischen SF₆/N₂ und den beiden alternativen Isoliergasen besteht in den unterschiedlichen Gasdichten der Isoliergasgemische, da die Gasdichte die Strömungswiderstandskraft \vec{F}_W auf die sich bewegenden Partikel beeinflusst, wie Gleichung 2.33 zeigt. Zur Analyse dieses Einflussfaktors sind die berechneten Dichten der vier untersuchten Isoliergasgemische, die zugehörigen durchschnittlichen Partikelbewegungsdauern, die durchschnittliche effektive Abhebespannung und die Anzahl der Innenleiterkontakte am Beispiel der Aluminiumpartikel mit einer Breite von 2,01 mm in absteigender Isoliergasdichte in Tabelle 50 aufgeführt.

Tabelle 50: Gegenüberstellung der Gasdichten, der durchschnittlichen Partikelbewegungsdauern, der durchschnittlichen effektiven Abhebespannung und der Anzahl der Innenleiterkontakte der Aluminiumpartikel mit 2,01 mm Partikelbreite der vier untersuchten Isoliergasgemische

Isoliergasgemisch	Gasdichte für $p = 0,5 \text{ MPa}$ $T = 20 \text{ °C}$	Durchschnittliche Partikelbewegungs- dauer	Durchschnittliche effektive Abhebespannung	Anzahl der Innenleiter- kontakte
C5K/CO ₂	13,75 kg/m ³	1,98 s	239 kV	29
C4N/CO ₂	12,28 kg/m ³	2,11 s	248 kV	33
SF ₆ /CO ₂	11,33 kg/m ³	2,51 s	254 kV	72
SF ₆ /N ₂	10,73 kg/m ³	3,73 s	267 kV	88

Wie aus Tabelle 50 hervorgeht, ergibt sich eine Korrelation der vier untersuchten Parameter Gasdichte, durchschnittliche Partikelbewegungsdauer, durchschnittliche effektive Abhebespannung und Anzahl der Innenleiterkontakte für alle vier untersuchten Isoliergasgemische. Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass durch die höhere Strömungswiderstandskraft die Sprunghöhe des Partikels und somit die Partikelbewegungsdauer reduziert wird. Sie reduziert somit auch die Anzahl der Innenleiterkontakte. Es zeigte sich, dass beim Kontakt von Partikeln mit dem Innenleiter

mitunter das Abheben weiterer Partikel getriggert wurde, was den Zusammenhang zwischen erhöhter Anzahl an Innenleiterkontakten und erhöhter durchschnittlicher Abhebespannung erklärt.

Teilentladungsverhalten des Partikels

Ein weiterer Effekt, der das Partikelbewegungsverhalten beeinflusst, ist die am Partikel während seiner Bewegung auftretende Teilentladung. Durch diese ändert sich die Ladung des sich bewegenden Partikels mit der Zeit nach dem Abheben und somit gemäß Gleichung 2.18 auch die auf das Partikel wirkende elektrostatische Kraft. Somit besteht ein weiterer möglicher Erklärungsansatz für das vom Isoliertgas abhängige unterschiedliche Bewegungsverhalten der Partikel in der Teilentladungsintensität, welche ebenfalls eine Abhängigkeit vom verwendeten Isoliertgasgemisch aufweist. Aufgrund des stochastischen Bewegungsmusters jedes einzelnen Partikels ist eine genaue Bestimmung der zeitlichen Entwicklung der TE-Intensität zur Berechnung der zu jedem Zeitpunkt während der Bewegung resultierenden Kräfte auf das Partikel nicht möglich. Die aufgezeichneten UHF-TE-Muster können jedoch Aufschluss darüber geben, ob sich das Teilentladungsverhalten während der Partikelbewegung zwischen den untersuchten Isoliertgasgemischen unterscheidet.

Eine Gegenüberstellung der PRPD-Muster der Bewegungen der Aluminiumpartikel mit einer Breite b_p von 2,01 mm der vier untersuchten Isoliertgasgemische ist in Abbildung 7.12 dargestellt.

Eine Kalibrierung der auf der Ordinate aufgetragenen TE-Intensität U_{UHF} ist, wie zuvor erwähnt, nicht möglich, da sich nur eine UHF-Sonde im Prüfaufbau befindet. Wie beschrieben, dient die TE-Intensität somit nur zum Vergleich der Diagramme untereinander. Die dargestellten PRPD-Muster entstanden durch die wiederholte Durchführung mehrerer Messreihen je Isoliertgasgemisch und somit durch die Aufzeichnung einer Vielzahl an einzelnen Partikelbewegungen.

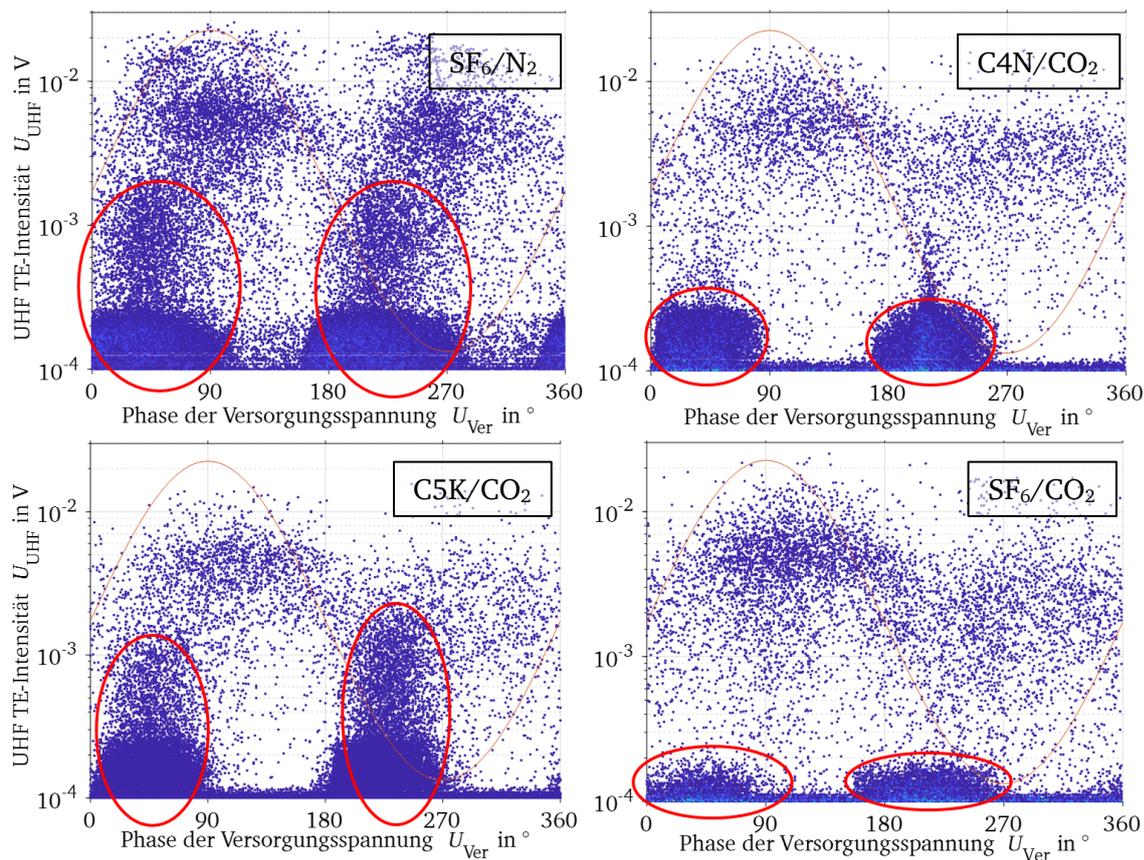


Abbildung 7.12: Gegenüberstellung der PRPD-Muster der Bewegungen der Aluminiumpartikel mit einer Breite $b_p = 2,01$ mm in SF_6/N_2 (oben links), $\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$ (oben rechts), $\text{C}_5\text{K}/\text{CO}_2$ (unten links) und SF_6/CO_2 (unten rechts). Bei den rot markierten Signalen handelt es sich um Störungen, die wahrscheinlich auf die schadhafte AC-Kaskade zurückgeführt werden können.

Tabelle 51 zeigt eine Übersicht der gesamten Aufzeichnungsdauer der in die PRPD-Muster einfließenden TE-Messung. Da jedoch nicht während der gesamten Aufzeichnungsdauer Partikelbewegungen stattfanden, wurde die Summe der aufgezeichneten einzelnen Partikelbewegungen im Zuge der Auswertung der Kameraaufzeichnungen separat ermittelt. Die sich ergebende Gesamtdauer der den PRPD-Mustern zu Grunde liegenden Partikelbewegungen $T_{m,ges}$ ist ebenfalls in Tabelle 51 gelistet.

Tabelle 51: Übersicht der gesamten Aufzeichnungsdauer und der Summe der Partikelbewegungsdauern der Aluminiumpartikel in den vier untersuchten Isoliergasgemischen

Isoliergasgemisch	Gesamte Aufzeichnungsdauer in Minuten	Summe der Partikelbewegungsdauern $T_{m,ges}$ in Sekunden
SF_6/N_2	8	42
$\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$	15	72
$\text{C}_5\text{K}/\text{CO}_2$	22	181
SF_6/CO_2	26	214

In allen vier PRPD-Mustern sind die UHF-TE-Impulsintensitäten der Partikelbewegungen meist um mehrere Größenordnungen größer als der Grundstörpegel.

Die in den PRPD-Mustern rot markierten Störsignale heben sich zwar vom Grundstörpegel ab, sind jedoch eindeutig nicht auf die Partikelbewegungen zurückzuführen, da sie auch ohne Partikel in der GIL beobachtet werden können. Sie resultieren höchstwahrscheinlich aus Defekten der internen Isolierung der AC-Hochspannungskaskade und treten zufällig und mit unterschiedlicher Intensität auf. Wie aus der in Abbildung 7.8 dargestellten Voruntersuchung hervorgeht, treten diese Störfrequenzen über den gesamten Frequenzbereich auf, was ein Herausfiltern der Störfrequenzen unmöglich macht. Bei der Auswertung der PRPD-Muster wurden die Störfrequenzen entsprechend nicht berücksichtigt.

Die vier PRPD-Muster der Isoliergasgemische bestehen jeweils aus einer weit verteilten Punktwolke im positiven und negativen Peak der Versorgungsspannung. Beide Punktwolken überlappen sich leicht und erzeugen eine charakteristische Form, wie sie bereits für Partikelbewegungen in SF₆/N₂ bekannt ist [Gau 2016]. Für SF₆/N₂ haben beide Punktwolken die gleiche durchschnittliche Amplitude. Für die drei Gemische mit CO₂ als Trägergas ist die durchschnittliche Amplitude der Punktwolke im Maximum der positiven Versorgungsspannung geringfügig höher als im Maximum der negativen Versorgungsspannung. Aufgrund der konstanten Versuchsparameter könnte diese verringerte durchschnittliche Amplitude im Maximum der negativen Versorgungsspannung durch die Verringerung des Testgasvolumenanteils von 20 % auf 10 %, die Änderung des Trägergastyps von N₂ zu CO₂ oder eine Kombination aus beiden Änderungen verursacht werden.

Um den Einfluss des Trägergases besser zu verstehen, könnten weitere Testreihen mit 20 % SF₆ / 80 % CO₂ oder 10 % SF₆ / 90 % N₂ durchgeführt werden.

Hinsichtlich der maximal auftretenden Impulsintensitäten ergaben sich für die vier untersuchten Isoliergasgemische folgende Werte:

- SF₆/N₂: $U_{\text{UHF,max}} = 0,026 \text{ V}$
- SF₆/CO₂: $U_{\text{UHF,max}} = 0,025 \text{ V}$
- C4N/CO₂: $U_{\text{UHF,max}} = 0,017 \text{ V}$
- C5K/CO₂: $U_{\text{UHF,max}} = 0,015 \text{ V}$

Aufgrund der Störsignale konnte keine automatisierte mathematische Auswertung der durchschnittlichen Impulsintensitäten durchgeführt werden. Die visuelle Ermittlung der durchschnittlichen Impulsintensitäten ergab jedoch folgende Reihenfolge: Die höchsten Werte traten für das Isoliergasgemisch SF₆/N₂ auf, die zweithöchsten für SF₆/CO₂, die dritthöchsten für C4N/CO₂ und die geringsten für C5K/CO₂. Diese Reihenfolge deckt sich mit der der maximalen Impulsintensitäten und zudem mit den in Tabelle 50 ermittelten Parametern. Eine mögliche Erklärung besteht in der verstärkten Bildung von Raumladungen bei höherer Teilchenladungsintensität, die ihrerseits die vorherrschenden elektrischen Feldstärkeverhältnisse beeinflusst und sich somit auch auf das

Partikelbewegungsverhalten auswirkt. Somit ist auch die unterschiedliche Teilentladungsintensität der sich bewegenden Partikel in den unterschiedlichen Isoliergasgemischen eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen durchschnittlichen Partikelbewegungsdauern, durchschnittlichen effektiven Abhebespannungen und Anzahl an Innenleiterkontakten. Ebenfalls möglich ist eine Korrelation der beiden zu Grunde liegenden Parameter untereinander, der Gasdichte und der TE-Intensität.

Für die in Abbildung 7.13 dargestellten PRPD-Muster der Stahlpartikel mit einer Breite b_p von 1,23 mm in SF₆/N₂ und C4N/CO₂ konnten aufgrund der geringeren Anzahl an Partikelbewegungen weniger Datenpunkte in den PRPD-Mustern ermittelt werden.

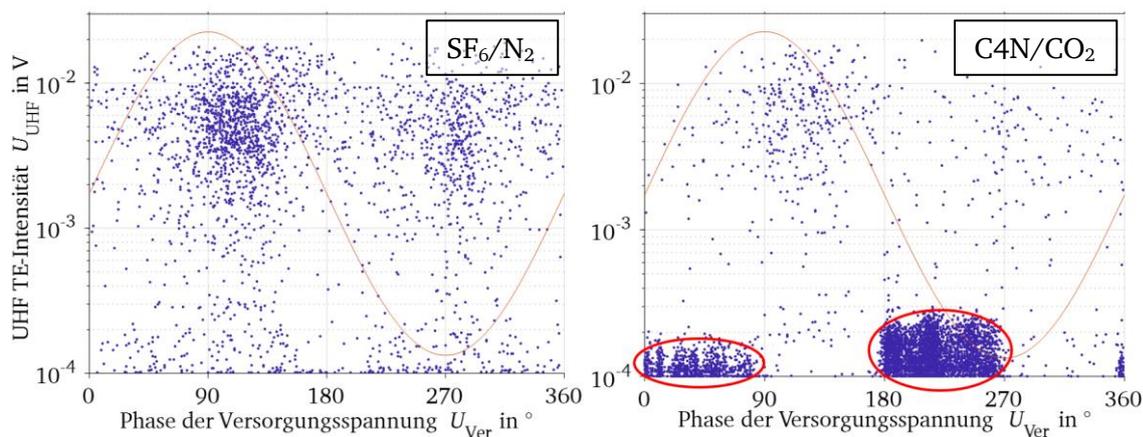


Abbildung 7.13: Gegenüberstellung der PRPD-Muster der Bewegungen der Stahlpartikel mit einer Breite $b_p = 1,23$ mm in SF₆/N₂ (links) und C4N/CO₂ (rechts). Bei den rot markierten Signalen handelt es sich um Störungen, die wahrscheinlich auf die schadhafte AC-Kaskade zurückgeführt werden können.

Es konnte hier ebenfalls beobachtet werden, dass die durchschnittliche Impulsintensität für C4N/CO₂ im Peak der positiven Halbwelle höher liegt als im Peak der negativen Halbwelle, während die durchschnittliche Impulsintensität für SF₆/N₂ in beiden Peaks auf gleicher Höhe liegt. Die gesamte Aufnahmezeit und die Summe der einzelnen Partikelbewegungsdauern $T_{m,ges}$ ist in Tabelle 52 geführt.

Tabelle 52: Übersicht der gesamten Aufzeichnungsdauer und der Summe der Partikelbewegungsdauern der Stahlpartikel in den vier untersuchten Isoliergasgemischen

Isoliergasgemisch	Gesamte Aufzeichnungsdauer in Minuten	Summe der Partikelbewegungsdauern $T_{m,ges}$ in Sekunden
SF ₆ /N ₂	3	33
C4N/CO ₂	2	11

In [Gau 2016] wurden Messreihen zur Bestimmung der Nachweisbarkeit von Partikelbewegungen durch UHF-TE-Messung für reines SF₆ und für eine Mischung aus 4 % C4N und 96 % CO₂ durchgeführt. In diesen Versuchsreihen zeigten die PRPD-Muster beider Isoliergasgemische ebenfalls je eine Punktwolke in den Spannungsspitzen, wie sie

bereits in Abbildung 7.12 und Abbildung 7.13 beobachtet werden konnten, jedoch mit identischer durchschnittlicher Amplitude in der positiven und der negativen Versorgungsspannungsspitze. Eine mögliche Erklärung für die sich unterschiedlich ausbildenden Punktwolken liegt im Versuchsaufbau. In [Gau 2016] wurde das Partikel an einer Seite eines Haars fixiert, welches mittels Klebestreifen an seiner anderen Seite am geerdeten Gehäuse fixiert wurde. Somit war die Partikelbewegung eingeschränkt, was höchstwahrscheinlich auch zu PRPD-Mustern führt, die sich von denen eines frei beweglichen Partikels unterscheiden. Zur besseren Vergleichbarkeit könnten weitere PRPD-Muster mit einem nur eingeschränkt beweglichen Partikel durchgeführt werden, um ein besseres Verständnis der verschiedenen Amplituden bei den positiven und negativen Versorgungsspannungsspitzen zu erreichen.

Zusammenfassend könnte die höhere UHF-TE-Aktivität bei der positiven Versorgungsspannungsspitze während der Partikelbewegung in SF₆/N₂ einer der Gründe für die höhere durchschnittliche Abhebespannung der untersuchten Partikel sowie für ihre längere durchschnittliche Bewegungsdauer sein. In Bezug auf das UHF-TE-Monitoring ist der Nachweis von Partikeln in GIS/GIL für alternative Isoliergasgemische aufgrund der sehr ähnlichen Muster und der gleichen Amplituden des UHF-TE-Signals weiterhin möglich.

7.2.3 Berechnung der Abhebefeldstärke quaderförmiger Partikel

Wie bereits in Abschnitt 2.4 beschrieben, beruht die bislang in der Literatur vorhandene Gleichung 2.32 zur Berechnung der Abhebefeldstärke eines leitfähigen quaderförmigen Partikels im elektrischen Feld auf der vereinfachenden Annahme, dass die Breite b_p und Dicke d_p des quaderförmigen leitfähigen Partikels gleich sind, das Partikel also einen quadratischen Querschnitt besitzt [Lei 1987]. Zusätzlich wurden in den in Tabelle 22 angeführten Gleichungen, so auch in Gleichung 2.32, Reibungs- und Adhäsionskräfte nicht berücksichtigt [Ber 2014, Sch 1997]. Um die reale Abhebefeldstärke $E_{ab,qua,korr}$ der in Abschnitt 7.1 untersuchten quaderförmigen Aluminium- und Stahlpartikel korrekt berechnen zu können, wird die bestehende Gleichung 2.32 um die beiden Korrekturfaktoren $k_{f,a}$ zur Berücksichtigung der bislang vernachlässigten Reibungs- und Adhäsionskräfte und k_b zur Berücksichtigung unterschiedlicher Breiten-Dicken-Verhältnisse der Partikel erweitert, wie Gleichung 7.1 zeigt.

$$E_{ab,qua,korr} = \sqrt{\frac{d_p \rho_p g}{2,86 \varepsilon}} \cdot k_{f,a} \cdot k_b \quad (7.1)$$

Die beiden Korrekturfaktoren müssen zunächst jedoch noch bestimmt werden. Hierzu wird Gleichung 7.1 zur Berechnung von $k_b \cdot k_{f,a}$ umgestellt, was zu Gleichung 7.2 führt.

$$k_b \cdot k_{f,a} = E_{ab,qua,korr} \cdot \sqrt{\frac{2,86\varepsilon}{d_p \rho_p g}} \quad (7.2)$$

Der Faktor $k_b \cdot k_{f,a}$ wiederum ergibt sich, wie in Gleichung 7.3 dargestellt, aus dem Quotienten der gemessenen Abhebespannung zur berechneten Abhebespannung respektive Abhebefeldstärke.

$$k_b \cdot k_{f,a} = \frac{E_{ab,gem}}{E_{ab,ber}} = \frac{U_{ab,gem}}{U_{ab,ber}} \quad (7.3)$$

Korrekturfaktor $k_{f,a}$ zur Berücksichtigung der Reibungs- und Adhäsionskräfte

Zur Ermittlung des Korrekturfaktors $k_{f,a}$ wurden die in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen, in [Lei 1987] experimentell ermittelten Abhebefeldstärken von Partikeln mit quadratischem und rundem Querschnitt mit den aus Gleichung 2.32 berechneten Abhebefeldstärken ohne Berücksichtigung der Reibungs- und Adhäsionskräfte verglichen.

Dadurch, dass nur quaderförmige Partikel mit quadratischem und rundem Querschnitt betrachtet wurden, kann der Korrekturfaktor k_b auf 1 gesetzt werden. Der Quotient der experimentell bestimmten und der berechneten Abhebefeldstärken nach Gleichung 7.3 führt bei der Betrachtung der in Tabelle 53 gelisteten Partikel zu einem Mittelwert des Korrekturfaktors $k_{f,a}$ von 1,1.

Tabelle 53: Nach Gleichung 7.3 erforderlicher Faktor $k_b \cdot k_{f,a}$ für in [Lei 1987] gemessene und berechnete effektive Abhebespannungen quaderförmiger ($b_p = 1 \text{ mm}$, $d_p = 1 \text{ mm}$) und zylinderförmiger Aluminiumartikel ($D_p = 1 \text{ mm}$) mit variabler Partikellänge l_p in einer mit SF₆ auf 0,1 MPa gefüllten konzentrischen Zylinderanordnung (Innenelektrode aus Aluminium, Außenelektrode aus Stahl) (Werte entnommen aus [Lei 1987])

Gas	Partikelgeometrie	l_p in mm	Breite/Dicke in mm	$k_b \cdot k_{f,a}$
SF ₆ (0,1 MPa)	zylinderförmig	3	1	1,05
	quaderförmig			1,06
	zylinderförmig	6		1,07
	quaderförmig			1,13
	zylinderförmig	9		1,12
	quaderförmig			1,12
	zylinderförmig	12		1,12
	quaderförmig			1,17
	zylinderförmig	15		1,06
	quaderförmig			1,1

Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 erwähnt, übt die Partikellänge keinen Einfluss auf die Abhebefeldstärke des Partikels aus.

Korrekturfaktor k_b zur Berücksichtigung unterschiedlicher Partikelbreiten quaderförmiger Partikel

Um den Korrekturfaktor k_b und somit den Einfluss der Partikelbreite b_p auf die Abhebefeldstärke quaderförmiger Partikel empirisch zu bestimmen, wurden im Gegensatz zum zuvor betrachteten Korrekturfaktor $k_{f,a}$ experimentell ermittelte Abhebefeldstärken von Partikeln mit unterschiedlichen Breiten-Dicken-Verhältnissen verwendet. Insgesamt wurden die Messergebnisse aus vier unterschiedlichen Prüfaufbauten verwendet:

1. Messwerte aus der Literatur: die in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Abhebespannungen aus [Lei 1987].
2. Messwerte im Bereich ohne Partikelfalle im 420 kV-AC-GIL-Aufbau.
3. Messwerte im Bereich mit Partikelfalle im 420 kV-AC-GIL-Aufbau im Zuge der Untersuchung des Partikelbewegungsverhaltens in Abschnitt 7.1.
4. Messwerte im in Abbildung 7.14 gezeigten Prüfgefäß mit Platte-Platte-Elektrodenanordnung aus Aluminium.

Um eine Vergleichbarkeit dieser in unterschiedlichen Untersuchungen experimentell bestimmten Abhebefeldstärken sicherzustellen, müssen weitere Einflussfaktoren, die in Gleichung 7.1 nicht berücksichtigt sind, zunächst herausgerechnet werden. Bei allen Messergebnissen, inklusive den Werten aus [Lei 1987], handelt es sich um Abhebespannungen, die mit Hilfe einer elektrischen Feldberechnung des entsprechenden Prüfgefäßes mittels COMSOL Multiphysics® in Abhebefeldstärken umgerechnet wurden.

Messwerte aus der Literatur

Tabelle 54 zeigt eine Übersicht der nach Gleichung 7.3 erforderlichen Korrekturfaktoren $k_b \cdot k_{f,a}$ für die bereits in Abschnitt 2.4.2 erwähnten Messwerte von quaderförmigen Aluminiumpartikeln mit einer Länge $l_p = 9$ mm, einer Dicke $d_p = 1$ mm und variabler Partikelbreite b_p in einer mit SF₆ auf 0,1 MPa und 0,2 MPa gefüllten konzentrischen Zylinderanordnung aus Aluminium (Innenelektrode) und Stahl (Außen-elektrode) aus [Lei 1987].

Wie aus der Tabelle hervorgeht, steigt der erforderliche Korrekturfaktor $k_b \cdot k_{f,a}$ mit steigender Partikelbreite. Weiterhin ist ersichtlich, dass der Isoliergasdruck keinen erkennbaren Einfluss auf die Abhebefeldstärke ausübt.

Tabelle 54: Nach Gleichung 7.3 erforderlicher Faktor $k_b \cdot k_{f,a}$ für in [Lei 1987] gemessene und berechnete effektive Abhebespannung quaderförmiger Aluminiumpartikel mit $l_p = 9$ mm, $d_p = 1$ mm und variabler Partikelbreite b_p in einer mit SF₆ auf 0,1 MPa respektive 0,2 MPa gefüllten konzentrischen Zylinderanordnung (Innenelektrode aus Aluminium, Außenelektrode aus Stahl) (Werte aus [Lei 1987])

Gas	Druck in MPa	b_p in mm	b_p/d_p	$k_b \cdot k_{f,a}$	k_b für $k_{f,a} = 1,1$
SF ₆	0,1	0,67	0,67	1,07	0,97
SF ₆	0,2			1	0,91
SF ₆	0,1	1	1	1,1	1
SF ₆	0,2			1,1	1
SF ₆	0,1	2	2	1,3	1,18
SF ₆	0,2			1,3	1,18
SF ₆	0,1	3	3	1,5	1,36
SF ₆	0,2			1,5	1,36

Messwerte im Bereich ohne Partikelfalle im 420 kV-AC-GIL-Aufbau

In diesem Teilabschnitt werden die Abhebefeldstärken quaderförmiger Partikel aus Stahl mit einer Länge $l_p = 6$ mm, Dicke $d_p = 1$ mm und Breite $b_p = 2,01$ mm in einem Bereich des 420 kV-AC-GIL-Aufbau ohne Partikelfalle in den Isoliergasen 20 % SF₆ / 80 % N₂ und 10 % C₄N / 90 % CO₂ bei einem Druck von 0,5 MPa betrachtet. Tabelle 55 zeigt eine Übersicht der Mittelwerte der Abhebespannungen $U_{ab,gem}$ und die über Feldsimulationen umgerechneten gemessenen Abhebefeldstärken $E_{ab,gem}$ sowie die mittels Gleichung 7.3 berechneten Abhebefeldstärke $E_{ab,ber}$. Weiterhin findet sich in der Tabelle der somit erforderliche Faktor $k_b \cdot k_{f,a}$.

Tabelle 55: Nach Gleichung 7.3 erforderlicher Faktor $k_b \cdot k_{f,a}$ für an einer Stelle im 420 kV-AC-GIL-Aufbau ohne Partikelfalle gemessene und berechnete Mittelwerte der Abhebespannungen sowie Abhebefeldstärken in 0,5 MPa SF₆/N₂ und C₄N/CO₂ für quaderförmige Partikel mit $d_p = 1$ mm und $l_p = 6$ mm aus Stahl

Gas	b_p in mm	b_p/d_p	$U_{ab,gem}$ in kV	$E_{ab,gem}$ in kV/cm	$E_{ab,ber}$ in kV/cm	$k_b \cdot k_{f,a}$
20%SF ₆ /80%N ₂	2,01	20,1	226,9	12,57	5,55	2,26
10%C ₄ N/90%CO ₂	2,01	20,1	239,4	13,26	5,55	2,39

Messwerte im Bereich mit Partikelfalle im 420 kV-AC-GIL-Aufbau

Durch die elektrische Feldberechnung mittels COMSOL Multiphysics[®] konnte zusätzlich für die in Abschnitt 7.1 im Zuge der Untersuchung des Partikelbewegungsverhaltens gemessenen Werte im 420 kV-AC-GIL-Aufbau der feldstärkeabschwächende Effekt der Partikelfalle berücksichtigt werden, da für diese Messreihen nur die Partikelabhebungen berücksichtigt wurden, die von der Ausgangsposition der Partikel ausgingen. In Tabelle 56 sind die Ergebnisse für Stahlpartikel mit einer Länge $l_p = 6$ mm, Dicke $d_p = 1$ mm und Breite $b_p = 1,23$ mm und $2,01$ mm in 0,5 MPa SF₆/N₂ und C₄N/CO₂ abgebildet.

Tabelle 56: Nach Gleichung 7.3 erforderlicher Faktor $k_b \cdot k_{f,a}$ für im Bereich mit Partikelfalle im 420 kV-AC-GIL-Aufbau gemessene und berechnete Mittelwerte der Abhebespannungen sowie Abhebefeldstärken in 0,5 MPa SF₆/N₂ und C4N/CO₂ für quaderförmige Partikel mit $d_p = 1$ mm und $l_p = 6$ mm aus Stahl

Gas	b_p in mm	b_p/d_p	$U_{ab,gem}$ in kV	$E_{ab,gem}$ in kV/cm	$E_{ab,ber}$ in kV/cm	$k_b \cdot k_{f,a}$
20%SF ₆ /80%N ₂	1,23	12,3	277,6	11,54	5,55	2,08
10%C4N/90%CO ₂	1,23	12,3	275,2	11,44	5,55	2,06
20%SF ₆ /80%N ₂	2,01	20,1	308,2	12,81	5,55	2,31
10%C4N/90%CO ₂	2,01	20,1	310,9	12,92	5,55	2,33

Tabelle 57 zeigt analog die Ergebnisse für Aluminiumpartikel mit einer Länge $l_p = 6$ mm, Dicke $d_p = 1$ mm und Breite $b_p = 2,01$ mm in 0,5 MPa SF₆/N₂, C4N/CO₂, C5K/CO₂ und SF₆/CO₂.

Tabelle 57: Nach Gleichung 7.3 erforderlicher Faktor $k_b \cdot k_{f,a}$ für im Bereich mit Partikelfalle im 420 kV-AC-GIL-Aufbau gemessene und berechnete Mittelwerte der Abhebespannungen sowie Abhebefeldstärken in 0,5 MPa SF₆/N₂, C4N/CO₂, C5K/CO₂ und SF₆/CO₂ für quaderförmige Partikel mit $d_p = 1$ mm und $l_p = 6$ mm aus Aluminium

Gas	b_p in mm	b_p/d_p	$U_{ab,gem}$ in kV	$E_{ab,gem}$ in kV/cm	$E_{ab,ber}$ in kV/cm	$k_b \cdot k_{f,a}$
20%SF ₆ /80%N ₂	2,01	20,1	181,2	7,52	3,23	2,33
10%C4N/90%CO ₂	2,01	20,1	181,0	7,52	3,23	2,33
10%C5K/90%CO ₂	2,01	20,1	174,3	7,24	3,23	2,24
10%SF ₆ /90%CO ₂	2,01	20,1	170,3	7,08	3,23	2,19

Messwerte im Prüfgefäß mit Platte-Platte-Elektrodenanordnung aus Aluminium

Im Gegensatz zum GIL-Aufbau bietet das Prüfgefäß, welches bereits bei den Untersuchungen in Kapitel 5 und 6 zum Einsatz kam, den Vorteil, dass die Messreihen aufgrund des deutlich geringeren Volumens in kürzerer Zeit durchgeführt werden können. In den Messungen in [Lei 1987] wurden ausschließlich Partikel mit einem Breite-Dicke-Verhältnis b_p/d_p von 0,67, 1, 2 und 3 und bei den in der GIL durchgeführten Untersuchungen Partikel mit einem Breite-Dicke-Verhältnis von 12,3 und 20,1 genutzt. Daher wurden in der Platte-Platte-Anordnung, wie aus Tabelle 58 hervorgeht, die beiden Breite-Dicke-Verhältnisse von 6 und 6,74 untersucht, um zusätzliche Messwerte für Breite-Dicke-Verhältnisse zwischen den Werten aus der Literatur und denen aus der GIL-Untersuchung zu erhalten. Weiterhin wurden in der Platte-Platte-Anordnung Aluminiumpartikel mit einem Breite-Dicke-Verhältnis $b_p/d_p = 21$ untersucht, um einen Vergleich der Messwerte aus der Platte-Platte-Anordnung und denen aus dem GIL-Aufbau zu ermöglichen.

Wie Abbildung 7.14 zeigt, wurde das Partikel bei der Untersuchung im Prüfgefäß an einen Textilfaden gebunden, welcher zentral auf der unteren Plattenelektrode mit einem Kupferklebeband fixiert wurde. Dadurch wurde die Bewegungsfreiheit des Partikels

eingeschränkt, wodurch das Partikel den Bereich zwischen den Elektroden nicht verlassen konnte, was mehrere Abhebeversuche in Folge ermöglichte. Zur Ermittlung der Abhebefeldstärke wurde die Spannung mit einer Spannungssteigerung von etwa 2 kV/s solange erhöht, bis das Partikel abhob. Das Abheben des Partikels wiederum wurde optisch mittels Kamera und Echtzeitübertragung auf einen am Steuerpult befindlichen Bildschirm bestimmt.



Abbildung 7.14: Prüfgefäß zur Untersuchung des Breitenkorrekturfaktors k_b mit Aluminiumpartikeln mit Breiten 1,4 mm, 1,5 mm, 1,55 mm, 2 mm und 2,1 mm, Länge 4 mm und 6 mm und Dicke 0,1 mm, 0,23 mm und 0,25 mm, welche mit Hilfe eines Stofffadens an der unteren Elektrode einer Platte-Platte-Elektrodenanordnung aus Aluminium mit einer Schlagweite $s = 20$ mm befestigt wurden

Um den Einfluss des Fadens zu untersuchen, wurden zusätzlich Versuche zur Ermittlung der Abhebefeldstärke frei beweglicher Aluminiumpartikel gleicher Abmessungen auf der unteren Elektrode durchgeführt. Diese Versuche mit und ohne Faden zeigen, dass der Faden die Abhebefeldstärke nur durch seine zusätzliche Masse beeinflusst, was das Abheben des Partikels bei höheren Spannungen als ohne Faden bedingt. Um die hier ermittelten Abhebefeldstärken mit den Abhebefeldstärken aus der Literatur und aus den GIL-Versuchen vergleichen zu können, ist folglich eine Erweiterung von Gleichung 7.1 um die Masse des Fadens erforderlich.

Nach Gleichung 2.19 berechnet sich die Gewichtskraft des Partikels ohne Faden wie in Gleichung 7.4 beschrieben.

$$|\vec{F}_G| = m_p g = d_p b_p l_p \rho_p g \quad (7.4)$$

Gleichung 7.5 zeigt die umgeformte Gleichung 7.4, um diese in Gleichung 7.1 einsetzen zu können und somit den Bezug zwischen Abhebefeldstärke und Gewichtskraft herzustellen, was in Gleichung 7.6 dargestellt ist.

$$d_p \rho_p g = \frac{|\vec{F}_G|}{b_p l_p} \quad (7.5)$$

$$E_{ab,qua,korr} = \sqrt{\frac{d_p \rho_p g}{2,86 \varepsilon}} \cdot k_{f,a} \cdot k_b = \sqrt{\frac{|\vec{F}_G|}{2,86 \varepsilon b_p l_p}} \cdot k_{f,a} \cdot k_b \quad (7.6)$$

Die Gewichtskraft des Partikels inklusive Faden berechnet sich wie in Gleichung 7.7 beschrieben aus den Massen m_f des Fadens und m_p des Partikels.

$$|\vec{F}_G| = (m_p + m_f)g \quad (7.7)$$

Aus der in Gleichung 7.6 eingesetzten Gleichung 7.7 ergibt sich folglich die in Gleichung 7.8 gezeigte Formel zur Berechnung der Abhebefeldstärke unter Berücksichtigung der Masse des Fadens $E_{ab,qua,p+f}$.

$$E_{ab,qua,korr,p+f} = \sqrt{\frac{(m_p + m_f)g}{2,86 \varepsilon b_p l_p}} \cdot k_{f,a} \cdot k_b \quad (7.8)$$

Wie aus Gleichung 7.8 hervorgeht, hängt die Abhebefeldstärke des Partikels mit Faden $E_{ab,qua,p+f}$ im Gegensatz zu den frei beweglichen Partikeln nun auch von der Länge l_p des Partikels ab, da es sich nicht mehr mit der in der Masse des Partikels befindlichen Länge kürzt. Mit Hilfe der Gleichung 7.8 können nun die Korrekturfaktoren $k_b \cdot k_{f,a}$ durch Umstellung der Gleichung 7.1 und der im Gasprüfgefäß und im GIL-Aufbau experimentell ermittelten Abhebefeldstärken berechnet werden, wie Tabelle 58 zeigt.

Tabelle 58: Nach Gleichung 7.3 erforderlicher Faktor $k_b \cdot k_{f,a}$ für in der Platte-Platte-Anordnung gemessene und berechnete Mittelwerte der Abhebespannungen sowie Abhebefeldstärken in 0,5 MPa SF₆ für quaderförmige Partikel aus Aluminium und Stahl

Gas	Partikelmaterial	l_p in mm	b_p in mm	d_p in mm	b_p/d_p	$U_{ab,gem}$ in kV	$E_{ab,gem}$ in kV/cm	$E_{ab,ber}$ in kV/cm	$k_b \cdot k_{f,a}$
SF ₆	Alu	4	1,5	0,25	6	17,59	8,80	5,11	1,72
SF ₆	Stahl	4	1,4	0,23	6,09	29,48	14,74	8,42	1,75
SF ₆	Stahl	4	1,55	0,23	6,74	30,82	15,41	8,42	1,83
SF ₆	Alu	6	2,1	0,1	21,0	15,46	7,72	3,23	2,39
SF ₆	Alu	6	2,1	0,1	21,0	15,33	7,66	3,23	2,37

Eine graphische Zusammenfassung der in den vorangegangenen Abschnitten berechneten erforderlichen Faktoren $k_b \cdot k_{f,a}$ ist in Abbildung 7.15 dargestellt.

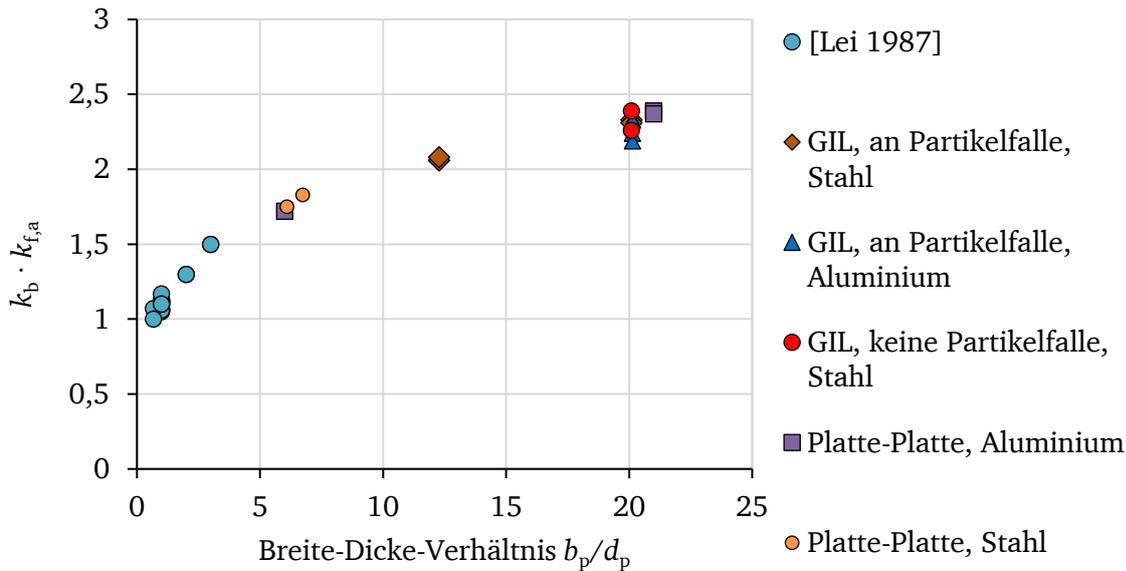


Abbildung 7.15: Berechnete Faktoren $k_b \cdot k_{f,a}$ über unterschiedliche Breite-Dicke-Verhältnisse von Aluminium und Stahlpartikel aus [Lei 1987], aus Versuchen in der GIL mit und ohne Partikelfalle und aus Versuchen mit angebundenen und frei beweglichen Partikeln in der Platte-Platte-Elektrodenanordnung

Wie aus der Abbildung hervorgeht, steigt der erforderliche Faktor $k_b \cdot k_{f,a}$ mit steigendem Breite-Dicke-Verhältnis b_p/d_p .

Ein Vergleich des erforderlichen Faktors $k_b \cdot k_{f,a}$ für die Platte-Platte-Elektrodenanordnung aus Stahl mit einem Breite-Dicke-Verhältnis b_p/d_p von 21 in Tabelle 58 mit denen der zylindrischen Elektrodenanordnung aus Aluminium mit einem Breite-Dicke-Verhältnis b_p/d_p von 20,1 in Tabelle 55, Tabelle 56 und Tabelle 57 zeigt ähnliche Ergebnisse. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass der im vorangegangenen Abschnitt ermittelte Korrekturfaktor $k_{f,a}$ von 1,1 zur Berücksichtigung der Reibungs- und Adhäsionskräfte neben der zylindrischen Elektrodenanordnung aus Aluminium auch für die Platte-Platte-Elektrodenanordnung aus Stahl sowie für beide Partikelmaterialien Stahl und Aluminium Gültigkeit besitzt.

Somit lässt sich für alle ermittelten Faktoren $k_b \cdot k_{f,a}$ der Breitenkorrekturfaktor k_b berechnen. Wie Abbildung 7.16 zeigt, lassen sich die Datenpunkte in guter Übereinstimmung in einer Regressionsanalyse über Gleichung 7.9 annähern.

$$k_b = \sqrt[4]{\frac{b_p}{d_p}} \quad (7.9)$$

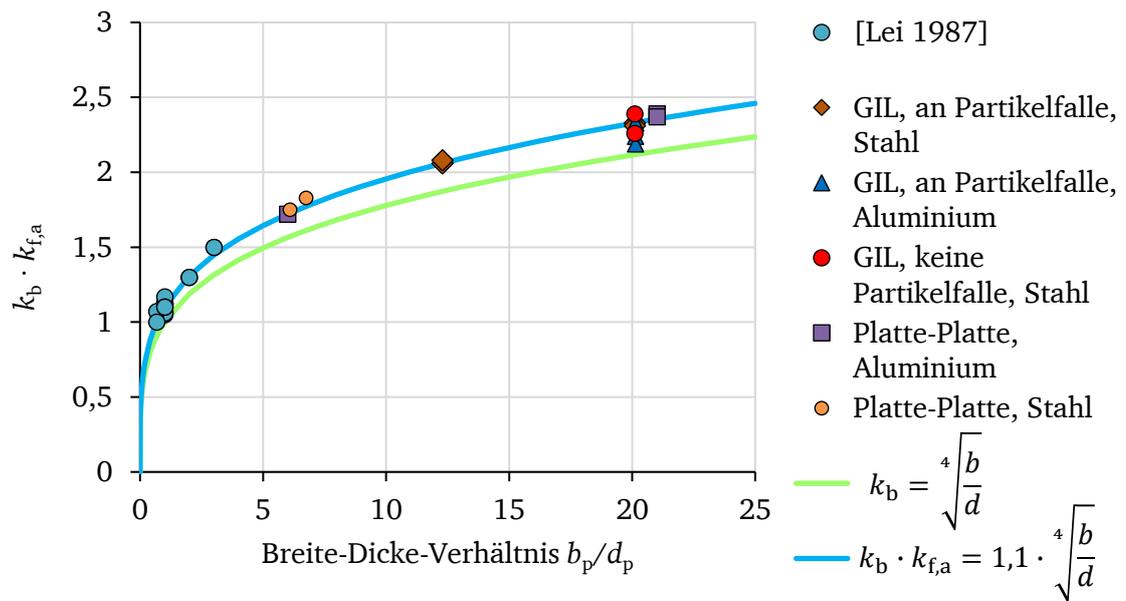


Abbildung 7.16: Breitenkorrekturfaktor über unterschiedlichen Breite-Dicke-Verhältnissen von Aluminium und Stahlpartikeln aus [Lei 1987], aus Versuchen in der GIL mit und ohne Partikelfalle und aus Versuchen mit angebundenen und frei beweglichen Partikeln in der Platte-Platte-Elektrodenanordnung

Bei der Herleitung des Korrekturfaktors k_b wurden zwar die relevanten Partikelmaterialien, Abmessungen und Elektrodenanordnungen sowie -materialien betrachtet – da jedoch keine physikalische Erklärung für diese in Gleichung 7.9 beschriebene Abhängigkeit gefunden werden konnte, ist die Gültigkeit für Breite-Dicke-Verhältnisse außerhalb des betrachteten Bereichs sowie für andere Elektrodenanordnungen und Materialien nicht zwingend gegeben.

Aus Abbildung 7.16 wird zudem ersichtlich, dass die auf Gleichung 2.32 basierende Berechnung der Abhebefeldstärke quaderförmiger Partikel mit einem Breite-Dicke-Verhältnis größer als 17 zu Abhebefeldstärken führen können, die sich um den Faktor 2 oder mehr von der tatsächlichen Abhebefeldstärken unterscheiden. Aus diesem Grund ist die Berücksichtigung eines Breitenkorrekturfaktors zur korrekten Berechnung der Abhebefeldstärke der in Kapitel 7 verwendeten quaderförmigen Partikel essentiell. Beim Vergleich der blauen mit der grünen Kurve im in Abbildung 7.16 gezeigten Diagramm bestätigt sich ebenfalls, dass der berechnete Korrekturfaktor $k_{f,a}$ von 1,1 eine gute Annäherung der vereinfachten Gleichung 2.32 an die real vorherrschenden Bedingungen darstellt, da ohne dessen Berücksichtigung alle Datenpunkte im Diagramm um einen Faktor von 1,1 verschoben wären. Die ermittelten Datenpunkte im Diagramm lassen jedoch nicht eindeutig darauf zurückschließen, ob der Korrekturfaktor $k_{f,a}$ einzig aufgrund der nicht berücksichtigten Reibungs- und Adhäsionskräfte verursacht wird, oder ob dieser auch teilweise auf Ungenauigkeiten in der Herleitung von Gleichung 2.32 basiert.

Durch Einfügen von Gleichung 7.9 und des Korrekturfaktors $k_{f,a}$ von 1,1 in Gleichung 7.1 ergibt sich die in Gleichung 7.10 wiedergegebene Formel zur Berechnung

der Abhebefeldstärke frei beweglicher quaderförmiger Partikel mit variablen Breite-Dicke-Verhältnissen.

$$E_{ab,qua,korr} = \sqrt{\frac{\sqrt{b_p d_p} \rho_p g}{2,86 \varepsilon}} \cdot 1,1 \quad (7.10)$$

Es ist zu beachten, dass mit Gleichung 7.10 nur der ungefähre Mittelwert der Abhebefeldstärke unter Berücksichtigung der hier betrachteten Elektrodenanordnungen und Materialien bestimmt werden kann. Zur Berechnung der Abhebespannung muss weiterhin die genaue Geometrie der Elektrodenkonfiguration bekannt sein.

Analog hierzu beschreibt Gleichung 7.11, durch Einsetzen beider Korrekturfaktoren k_b und $k_{f,a}$ in Gleichung 7.8, die Abhebefeldstärke quaderförmiger Partikel mit variablen Breite-Dicke-Verhältnissen unter Berücksichtigung einer zusätzlichen elektrisch nicht leitfähigen Masse, wie beispielsweise die eines Fadens. Falls die zusätzliche Masse jedoch elektrisch leitfähig ist oder diese die Ausrichtung des Partikels signifikant ändert, würde die resultierende Änderung der Ladungsmenge und der Verteilung des elektrischen Feldes an der Partikeloberfläche weitere Anpassungen von Gleichung 7.11 erfordern.

$$E_{ab,qua,p+f} = \sqrt{\frac{g}{2,86 \varepsilon} \cdot \frac{m_p + m_f}{\sqrt{b_p d_p} \cdot l}} \cdot 1,1 \quad (7.11)$$

Mit Hilfe der in diesem Abschnitt hergeleiteten korrigierten Gleichung 7.10 zur Berechnung der Abhebefeldstärke elektrisch leitfähiger quaderförmiger Partikel im elektrischen Feld sowie mittels elektrischer Feldberechnung mit COMSOL Multiphysics® wurden für die in Abschnitt 7.2 in Tabelle 49 beschriebenen Ergebnisse die minimalen Abhebespannungen berechnet. Hierfür wurde der Einfluss der Partikelfalle auf die Partikel über das zuvor beschriebene experimentell festgestellte Verhältnis aus der Abhebespannung der Stahlpartikel im Bereich der GIL ohne Partikelfalle mit der Abhebespannung von auf der schwarzen Linie neben der Partikelfalle platzierten Stahlpartikel genutzt. Die Gegenüberstellung der in den vier Isoliergasgemischen für die unterschiedlichen Partikel gemessenen minimalen Abhebespannungen mit den berechneten minimalen Abhebespannungen ist in Tabelle 59 aufgeführt.

Wie aus dem Vergleich hervorgeht, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten minimalen Abhebespannungen mit den gemessenen minimalen Abhebespannungen. Dies zeigt, dass die korrigierte Formel zur Berechnung der Abhebefeldstärke elektrisch leitfähiger quaderförmiger Partikel im elektrischen Feld für die untersuchten praxisrelevanten Partikeln, Elektrodenanordnungen und Materialien gültig ist und die in der Praxis auftretenden Phänomene berücksichtigt.

Tabelle 59: Gegenüberstellung der an der GIL gemessenen minimalen Abhebespannung $U_{ab,gem,eff}$ und der mit Gleichung 7.10 berechneten minimalen Abhebespannung $U_{ab,ber,eff}$

Gas	Partikelmaterial	b_p in mm	$U_{ab,gem,eff}$ in kV	$U_{ab,ber,eff}$ in kV
SF ₆ /N ₂	Aluminium	2,01	136	136
	Stahl	1,23	219	207
		2,01	232	233
C4N/CO ₂	Aluminium	2,01	136	136
	Stahl	1,23	207	207
		2,01	234	233
C5K/CO ₂	Aluminium	2,01	131	136
SF ₆ /CO ₂	Aluminium	2,01	128	136

7.2.4 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurde das Partikelbewegungsverhalten quaderförmiger Partikel aus Aluminium und Stahl in unterschiedlichen Isoliergasen und Elektrodenanordnungen betrachtet.

Wie aus Tabelle 49 hervorgeht, übt die Art des Isoliergases keinen signifikanten Einfluss auf die minimale Abhebespannung oder den prozentualen Anteil der Partikelabhebungen aus. Es konnte jedoch eine erhöhte Anzahl an Innenleiterkontakten in SF₆/N₂ und SF₆/CO₂ beobachtet werden. Tabelle 50 zeigt, dass diese Anzahl an Innenleiterkontakten mit sinkender Gasdichte, steigender durchschnittlicher Partikelbewegungsdauer und steigender durchschnittlicher Abhebespannungen korrelieren. Es liegt ebenfalls eine Korrelation mit steigender maximaler Teilentladungsintensität vor.

Da in der GIL befindliche elektrisch leitfähige Partikel bei Verwendung der hier untersuchten alternativen Isoliergasgemische niedrigere durchschnittliche Abhebespannungen, eine geringere Anzahl an Innenleiterkontakten und eine kürzere durchschnittliche Partikelbewegungsdauer aufweisen, bevor sie im Feldschatten der Partikelfalle liegen geblieben sind, als in SF₆/N₂, ist folglich die Wirksamkeit der bisherigen SF₆/N₂ Partikelfalle für die hier untersuchten alternativen Isoliergase gegeben und mitunter sogar besser.

Hinsichtlich des PRPD-Musters zeigen sich vergleichbare Ergebnisse der Partikelbewegungen in den unterschiedlichen Isoliergasen, weshalb ein UHF-TE-Monitoring und eine Auswertung der gemessenen Impulse auch für die alternativen Isoliergase möglich ist.

Weiterhin wurde der Einfluss der Partikelbreite auf die Abhebefeldstärke betrachtet und die vorhandene Gleichung zur Berechnung der Abhebefeldstärke quaderförmiger Partikel um den Korrekturfaktor k_b zur Berücksichtigung der Partikelbreite sowie um den Korrekturfaktor $k_{f,a}$ zur Berücksichtigung der Adhäsions- und Reibungskräfte erweitert.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die im Zuge der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnisse zusammengefasst und basierend auf diesen ein Ausblick gegeben.

Das in der elektrischen Energietechnik etablierte elektrische Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6) stellt mit einem Treibhauspotential über 100 Jahre (GWP_{100}) von 23500 CO_2 -Äquivalenten das stärkste bekannte Treibhausgas dar. Zum aktuellen Zeitpunkt ist SF_6 mit etwa 0,2 % noch nur für einen sehr geringen Anteil des globalen Treibhauseffekts verantwortlich. Durch die sehr lange atmosphärische Lebensdauer von 3200 Jahren kann dennoch auch bei sehr gewissenhaftem Umgang mit SF_6 nur von einem weiteren Anstieg des in der Atmosphäre befindlichen Anteils an SF_6 ausgegangen werden. Um neue Emissionen von SF_6 in die Atmosphäre zu vermeiden, ist folglich ein Wechsel in der elektrischen Energietechnik weg vom etablierten elektrischen Isoliergas SF_6 hin zu einem klimafreundlicheren Isoliergas unvermeidlich. Bei der Auswahl eines geeigneten alternativen Isoliergases gilt es eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren zu beachten, wie aus Abschnitt 2.1.5 ersichtlich wird. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Isoliergasen handelt es sich um in der Diskussion befindliche potentielle alternative Isoliergase. Diese sind Hydrofluorolefin (E)-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (HFO), Fluornitril 3M™ Novec™ 4710 (C4N) und Fluorketon 3M™ Novec™ 5110 (C5K). Diese Isoliergase besitzen jedoch eine für die praktische Anwendung zu hohe Kondensationstemperatur, weshalb sie nur als Isoliergasgemisch mit einem Trägergas eingesetzt werden können. In der vorliegenden Arbeit wurden die beiden typischen Trägergase Stickstoff (N_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) verwendet. Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, die dielektrischen Eigenschaften alternativer Isoliergasgemische im Hinblick auf den Einsatz in gasisolierten Leitungen zu untersuchen. Bei der Betrachtung der dielektrischen Eigenschaften sind unterschiedliche Aspekte zu beurteilen.

In einer ersten Untersuchung wurde die elektrische Durchschlagfestigkeit der alternativen Isoliergasgemische und zum Vergleich das in GIL etablierte Isoliergasgemisch 20 % SF_6 gemischt mit 80 % N_2 untersucht. Hierzu wurden Durchschlagsuntersuchungen unter Wechselfspannungs- (AC), Blitzstoßspannungs- (LI) und Schaltstoßspannungs- (SI)-beanspruchung in Modellanordnungen und in schrittweise größeren und GIL-ähnlicheren Versuchsaufbauten durchgeführt. Die elektrische Durchschlagfestigkeit der alternativen Isoliergasgemische wurde für die beiden Isoliergasdrücke 0,5 MPa und 0,7 MPa bestimmt. Hinsichtlich ihrer prozentualen Zusammensetzung wurden die alternativen Isoliergasgemische so ausgelegt, dass diese bei den beiden Isoliergasdrücken von 0,5 MPa und 0,7 MPa jeweils eine Kondensationstemperatur von -10 °C erreichen. Zusammengefasst erzielten die vier Isoliergasgemische HFO/ N_2 , HFO/ CO_2 , C5K/ N_2 und

C5K/CO₂ im Durchschnitt eine geringere elektrische Durchschlagfestigkeit als SF₆/N₂. Im Durchschnitt lag C5K/CO₂ bei etwa 69 %, HFO/CO₂ bei etwa 79 %, HFO/N₂ bei etwa 82 % und C5K/N₂ bei etwa 92 % von SF₆/N₂. Die beiden Isoliergasgemische C4N/N₂ und C4N/CO₂ erreichten im Durchschnitt mit etwa 104 % respektive 99 % ähnliche und zum Teil höhere elektrische Durchschlagfestigkeiten als SF₆/N₂. Während der Durchschlagsuntersuchungen konnte beobachtet werden, dass insbesondere bei Isoliergasgemischen mit N₂ als Trägergas infolge der Isoliergasdurchschläge eine Rußbildung an den Elektroden auftrat. Auf Basis dieser Untersuchungen stellte sich das Isoliergasgemisch C4N/CO₂ zunächst als das geeignetste alternative Isoliergasgemisch für den Einsatz in der gasisolierten Leitung dar und wurde anschließend in einer realen 420 kV-AC-GIL mehreren Prüfungen ähnlich einer Typprüfung für unterschiedliche Drücke und Kondensationstemperaturen für die beiden Spannungsebenen 420 kV und 550 kV unterzogen. Das Isoliergasgemisch C4N/CO₂ bestand die Prüfung für die Spannungsebene 550 kV für einen Isoliergasdruck von 0,6 MPa und eine Kondensationstemperatur von –20 °C.

In Voruntersuchungen zu den zuvor beschriebenen Durchschlagsuntersuchungen konnte eine Abhängigkeit der Durchschlagspannung in aufeinanderfolgenden Messreihen im selben Prüfgefäß beobachtet werden. Durch die Einzelbetrachtung mehrerer unterschiedlicher Einflussparameter konnte festgestellt werden, dass im mit einem Isoliergasgemisch gefüllten Prüfgefäß mit Wänden aus PVC-U und eingebrachten GIS/GIL-Materialien eine Anlagerung der fluorierten Isoliergaskomponente an die im Prüfgefäß vorhandenen Oberflächen stattfand. In dieser Untersuchung wurden die mit dem Trägergas CO₂ gemischten Isoliergase C4N, C5K und HFO und das Isoliergasgemisch SF₆/N₂ betrachtet. Bei der Untersuchung unterschiedlicher Expositionszeiten des Isoliergasgemisches im Prüfgefäß konnte ermittelt werden, dass der Prozess der Anlagerung an die Oberflächen im Prüfgefäß über mehrere Stunden hinweg erfolgt, wobei ein Gleichgewichtszustand nach etwa 72 h erreicht wurde. Auch die Art des eingefüllten Isoliergasgemisches übte einen Einfluss auf die gemessene Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen aus. Die stärkste Abhängigkeit konnte für das Isoliergasgemisch C4N/CO₂ ermittelt werden, eine schwächere Abhängigkeit für C5K/CO₂. Das Isoliergasgemisch SF₆/N₂ besaß nur einen sehr geringen Einfluss auf Folgeuntersuchungen. Für HFO/CO₂ konnte keinerlei Einfluss gemessen werden. Die Anlagerung wurde zudem an mehreren unterschiedlichen Materialproben typischer Materialien gasisolierter Anlagen im Prüfgefäß analysiert. Je nach Material findet eine unterschiedlich ausgeprägte Anlagerung an dessen Oberfläche statt. Die größte Abhängigkeit in Folgeuntersuchungen, und somit die stärkste Anlagerung an die Oberfläche konnte für kupferbeschichtetes Aluminium und für O-Ringe beobachtet werden. Epoxidharz und silberbeschichtetes Aluminium wiesen die geringste Anlagerung auf. Abschließend wurden unterschiedliche Methoden untersucht, um die beobachtete Abhängigkeit zu vermeiden. Alle vier untersuchten Maßnahmen, sowohl das sechsmalige Spülen des Prüfgefäßes mit N₂, die Evakuierung des Prüfgefäßes über einen Zeitraum von 24 h hinweg, die Reinigung aller Oberflächen mit Ethanol und Tüchern als auch die Lagerung mit im Prüfgefäß eingebrachtem Trockenmittelbeutel für 48 h schien die Abhängigkeit von vorangegangenen Messreihen zunächst zu beseitigen. Nach einer

weiteren Standzeit des Prüfgefäßes von 24 h und somit einer weiteren Zeitspanne, in der an der Oberfläche angelagerte fluoridierte Moleküle in das Gasvolumen des Prüfgefäßes diffundieren konnten, wies jedoch nur die Evakuierung über 24 h eine restlose Vermeidung der Abhängigkeit auf. Für den Einsatz der fluoridierten Gase in gasisolierten Leitungen hat die Anlagerung fluoridierter Moleküle an die Oberflächen nur einen vernachlässigbaren Einfluss. Berücksichtigt werden muss dieser Effekt jedoch bei der Durchführung dielektrischer Untersuchungen unterschiedlicher Gase im selben Prüfgefäß.

In der dritten durchgeführten Untersuchung wurde das in Folge des Gasdurchschlages emittierte Frequenzspektrum analysiert. Durch die hohe Stromsteilheit im Durchschlag sind insbesondere Gasdurchschläge in SF₆ für ihre emittierten elektromagnetischen Wellen bekannt, die in der Nähe befindliche Elektronik stören oder gar zerstören können. In dieser Untersuchung wurden erneut die mit dem Trägergas CO₂ gemischten Isoliertgasen C4N, C5K und HFO und SF₆/N₂ betrachtet. Die im Durchschlag gemessenen Frequenzspektren wiesen bei gleicher Durchschlagspannung der untersuchten Isoliertgasgemische keine eindeutige Abhängigkeit vom Isoliertgasgemisch auf. Die Signalamplitude und auch die höchsten gemessenen Frequenzen zeigten eine starke Abhängigkeit von der Höhe der elektrischen Feldstärke im Durchschlag. Die Erfahrung, dass insbesondere bei Durchschlägen in SF₆ starke elektromagnetische Wellen emittiert werden, liegt also vorwiegend an der hohen Durchschlagfestigkeit und der daraus resultierenden hohen elektrischen Durchschlagfeldstärke von SF₆.

Die vierte und abschließende durchgeführte Untersuchung behandelte das Partikelbewegungsverhalten frei beweglicher elektrisch leitfähiger Partikel in GIL, die eine der häufigsten Fehlerursachen in GIL darstellen, sowie die Wirksamkeit der bereits bestehenden Partikelfalle in GIL. Hierzu wurde das Bewegungsverhalten von quaderförmigen Aluminium- und Stahlpartikeln in der 420 kV-AC-GIL für die Isoliertgasgemische C4N/CO₂, C5K/CO₂, SF₆/CO₂ und SF₆/N₂ sowohl optisch durch die Aufnahme mit einer Kamera als auch elektrisch durch eine ultrahochfrequente Teilentladungsmessung (UHF-TE-Messung) analysiert. Durch die Untersuchung konnte ermittelt werden, dass in den Isoliertgasgemischen SF₆/CO₂ und SF₆/N₂ signifikant mehr Innenleiterkontakte bei der Partikelbewegung auftraten als in den Isoliertgasgemischen C4N/CO₂ und C5K/CO₂. Weiterhin betrug die durchschnittliche Partikelbewegungsdauer in C4N/CO₂ und C5K/CO₂ nur etwa die Hälfte der Bewegungsdauer in SF₆/N₂, während die Bewegungsdauer in SF₆/CO₂ dazwischen lag. Auch die durchschnittliche Partikelabhebespannung war in den Isoliertgasgemischen C4/CO₂ und C5K/CO₂ geringer als in SF₆/CO₂, was wiederum eine geringere durchschnittliche Partikelabhebespannung als SF₆/N₂ aufwies. Bei der Betrachtung möglicher Gründe für das unterschiedliche Bewegungsverhalten der Partikel in den Isoliertgasgemischen stellten sich sowohl die Dichte der Isoliertgasgemische als auch die TE-Intensität während der Partikelbewegung als mögliche Gründe heraus. Sowohl die Isoliertgasdichte als auch die TE-Intensität korrelieren mit der Anzahl der

Innenleiterkontakte, der durchschnittlichen Partikelbewegungsdauer und der durchschnittlichen Partikelabhebespannung in allen vier Isoliertgasgemischen. Auf Basis der beobachteten geringeren Anzahl an Innenleiterkontakten, kürzeren Partikelbewegungsdauer und geringeren Abhebespannungen stellte sich die Eignung der Partikelfalle für die untersuchten alternativen Isoliertgasgemische heraus. Bezüglich der TE-Messung konnte zudem ermittelt werden, dass die Partikelbewegungen in den untersuchten alternativen Isoliertgasgemischen ähnliche Muster wie in SF_6/N_2 erzeugten, wodurch die Partikelbewegung durch die UHF-TE-Messung auch in den alternativen Isoliertgasgemischen detektiert und durch die Betrachtung des für die Partikelbewegung charakteristischen Musters erkannt werden kann. Abschließend wurde die in der Literatur bestehende Gleichung zur Berechnung der Abhebefeldstärke quaderförmiger Partikel, die jedoch nur für Partikel mit gleicher Breite wie Dicke und unter Vernachlässigung von Adhäsions- und Reibungskräften Gültigkeit besitzt, um den Einfluss der Partikelbreite und der Adhäsions- und Reibungskräfte erweitert. Wie aus der Gegenüberstellung der gemessenen und der mit der erweiterten Gleichung berechneten Partikelabhebespannungen hervorgeht, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung für die Abhebespannungen in allen vier Isoliertgasgemischen SF_6/N_2 , SF_6/CO_2 , $\text{C}_4\text{N}/\text{CO}_2$ und $\text{C}_5\text{K}/\text{CO}_2$ sowohl für Aluminiumpartikel als auch für Stahlpartikel für die untersuchten Breite-Dicke-Verhältnisse sowie praxisrelevanten Elektrodenanordnungen.

Der aktuelle Stand der Politik und der Industrie lässt keine Zweifel daran, dass der vollständige Umstieg weg von SF_6 hin zu umweltfreundlicheren elektrischen Isoliertgasen in der elektrischen Energietechnik kommen wird. Dieser Umstieg wird jedoch je nach Anwendung noch mehrere Jahre Übergangszeit benötigen. Auch die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass aus elektrischer Sicht geeignete umweltfreundliche alternative Isoliertgasgemische für den Einsatz in gasisolierten Leitungen vorliegen. Je nach minimaler Betriebstemperatur und Art des Isoliertgases ist jedoch aufgrund der vergleichsweise hohen Kondensationstemperatur nur ein geringer Anteil des Isoliertgases im Isoliertgasgemisch möglich. Dies kann dazu führen, dass eine Druckerhöhung oder eine Vergrößerung der Schlagweiten in gasisolierten Anlagen erforderlich wird. Zum aktuellen Zeitpunkt zeichnet sich noch nicht ab, ob sich ein bestimmtes alternatives Isoliertgasgemisch herausstellen wird, welches das bestehende SF_6 in allen Anwendungen in der elektrischen Energietechnik ersetzen wird, oder ob es mehrere unterschiedliche alternative Isoliertgasgemische für unterschiedliche Anwendungen geben wird. Dies wird noch abhängig sein von längerfristigen technischen Erfahrungen, Rückmeldungen seitens der Anlagenbetreiber und auch von zusätzlichen Entschlüssen seitens der Politik.

A Anhang

A.1 Versuchskreise Elektrische Durchschlagsuntersuchungen

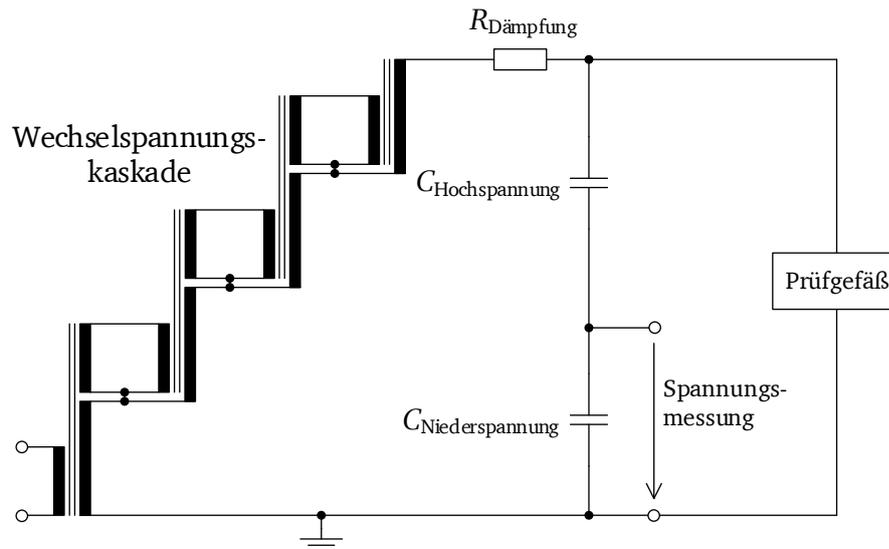


Abbildung A.1: Ersatzschaltbild des Wechselspannungsversuchskreises zur Durchführung der elektrischen Durchschlagsuntersuchungen und der Untersuchung des Partikelbewegungsverhaltens

Tabelle 60: Technische Daten des Wechselspannungsversuchskreises

Wechselspannungskaskade	Wert
Hersteller	AEG
Nennspannung	1,2 MV
Nennstrom	1 A
Bezogene Kurzschlussspannung	16 %
$R_{\text{Dämpfung}}$	10 k Ω
Durchschlagserkennung Abschaltautomatik	5 ms
Messsystemhersteller	HAEFELY
Typ	CW 1200-380
$C_{\text{Hochspannung}}$	380 pF
$C_{\text{Niederspannung}}$	2,92 μ F
Übersetzungsverhältnis (mit Messkabel)	8000
Messunsicherheit (Anzeigeeinheit)	$\pm 0,5$ %, ± 1 digit

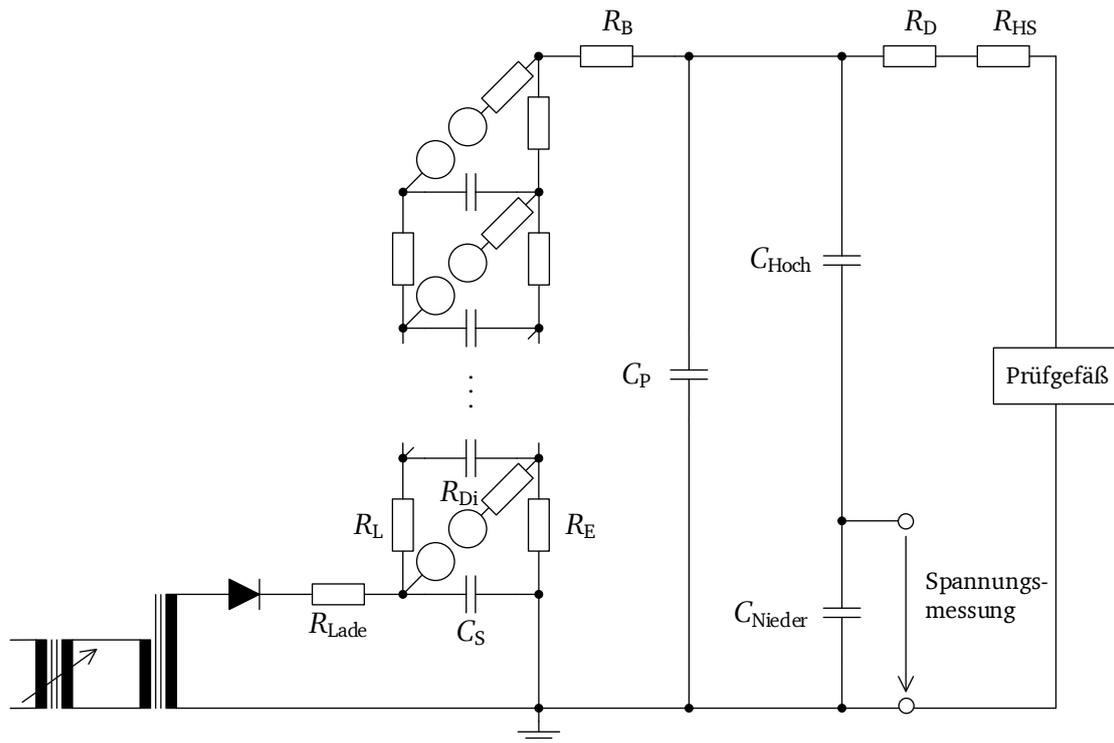


Abbildung A.2: Ersatzschaltbild des Stoßspannungsprüfkreises zur Durchführung der elektrischen Durchschlagsuntersuchungen

Tabelle 61: Technische Daten des Stoßspannungsprüfkreises

Marx-Generator	Wert
Hersteller	HAEFELY
Summenladespannung	3,2 MV
R_L	19,9 k Ω
R_{Di}	18,8 k Ω
R_E	22 k Ω
C_S	250 nF
Messsystemhersteller	HIGHVOLT
R_B	860 Ω ... 50 k Ω
C_P	0 ... 1,13 nF
C_{Hoch}	250 pF
C_{Nieder}	546 nF
R_D	900 Ω
R_{HS}	350 Ω

A.2 Versuchskreis Abhängigkeitsstudie in Folgeuntersuchungen mit fluorierten Isoliergasen

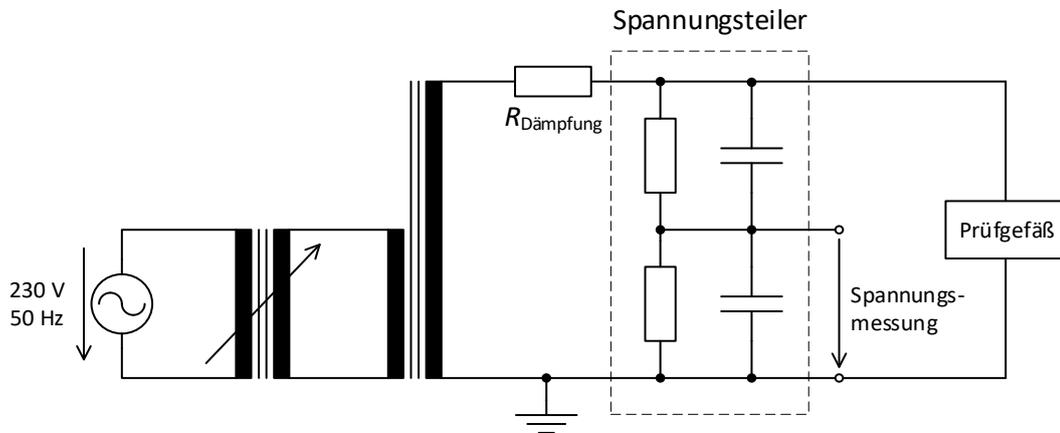


Abbildung A.3: Ersatzschaltbild des Wechselspannungsprüfkreis zur Durchführung der Abhängigkeitsuntersuchungen

Tabelle 62: Technische Daten des Wechselspannungsprüfkreis

Gleichspannungskreis	Wert
$R_{\text{Dämpfung}}$	10 k Ω
Messsystemhersteller	North Star High Voltage
Bezeichnung	VD-180B
Eingang R/C	2400 M Ω /13 pF
Kabelimpedanz	50 Ω
Teilverhältnis	10000:1
Maximale Spannung	180 kV

A.3 Versuchskreis Emittiertes Frequenzspektrum in Folge des Gasdurchschlages

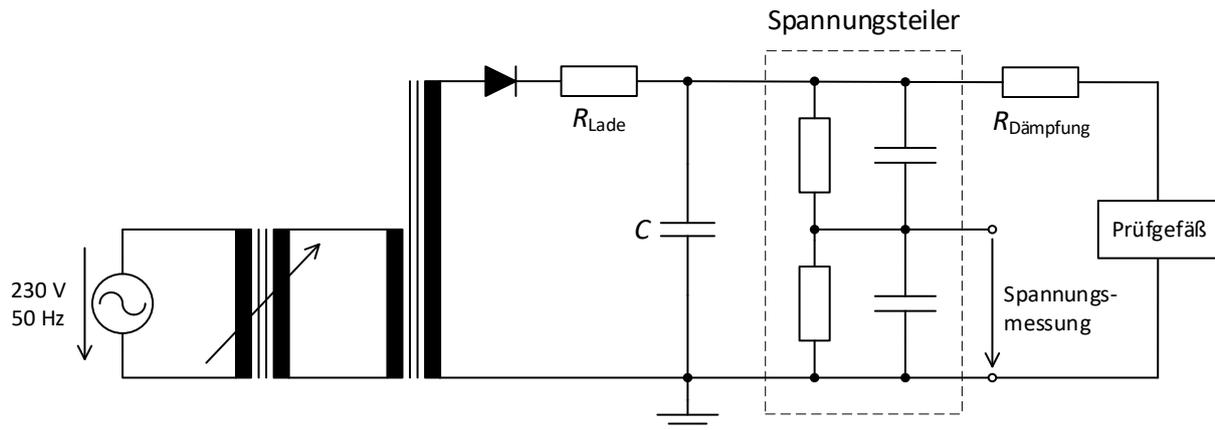


Abbildung A.4: Ersatzschaltbild des Gleichspannungsprüfkreises zur Untersuchung des in Folge des Gasdurchschlages emittierten Frequenzspektrums

Tabelle 63: Technische Daten des Gleichspannungsprüfkreises

Gleichspannungskreis	Wert
R_{Lade}	4 k Ω
C	1200 pF
$R_{Dämpfung}$	140 M Ω
Messsystemhersteller	North Star High Voltage
Bezeichnung	VD-180B
Eingang R/C	2400 M Ω /13 pF
Kabelimpedanz	50 Ω
Teilverhältnis	10000:1

A.4 Versuchskreis Partikelbewegungsverhalten

Siehe Abbildung A.1 in Abschnitt A.1

Literaturverzeichnis

Anmerkung: Bei den mit einem Asterisk markierten Quellen handelt es sich um studentische Abschlussarbeiten, die im Rahmen dieser Dissertation angefertigt wurden. Sie sind im Anschluss an das Literaturverzeichnis gesondert aufgeführt.

- [Alb 2001] Albritton, D. L. et al.: Technical Summary. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 21–85, 2001.
- [Ani 1981] Anis, H.; Srivastava, K.: Free Conducting Particles in Compressed Gas Insulation. IEEE Transactions on Electrical Insulation 4/EI-16, S. 327–338, 1981.
- [Asa 1997] Asano, K.; Anno, K.; Higashiyama, Y.: The behavior of charged conducting particles in electric fields. IEEE Transactions on Industry Applications 3/33, S. 679–686, 1997.
- [Ber 1976] Berger, S.: Onset or breakdown voltage reduction by electrode surface roughness in air and SF₆. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 4/95, S. 1073–1079, 1976.
- [Ber 2013] Berg, T. et al.: Influence of particles on DC dielectric performance of insulating gas (SF₆): 18th International Symposium on Highvoltage Engineering 2013, S. 1360–1365, 2013.
- [Ber 2014] Berg, T.: Leitfähige Partikel im koaxialen Rohrleiter unter hoher Gleichspannungsbeanspruchung. Dissertation, TU Graz, 2014.
- [Ber 2020] Berg, T.; Koch, H.; Juhre, K.: Free moving particles in gas-insulated lines under DC conditions – basic properties, specific effects and countermeasures. In (Németh, B. Hrsg.): Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering. Springer International Publishing, Cham, S. 1489–1499, 2020.
- [Bey 1992] Beyer, M. et al.: Hochspannungstechnik. Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung. Springer, Berlin, 1992.
- [Bog 1982] Boggs, S. A. et al.: Disconnect switch induced transients and trapped charge in gas-insulated substations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 10/PAS-101, S. 3593–3602, 1982.
- [Bur 2018] Burges, K. et al.: Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. Abschlussbericht, Berlin, 2018.
- [But 2021] Butler, J. H.; Montzka, S. A.: The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI). <https://gml.noaa.gov/aggi/aggi.html>, Stand: 04.02.2024.
- [Car 1982] Carl Hanser Verlag München Wien, VEB Verl. Berlin Hrsg.: Taschenbuch Elektrotechnik. Band 6: Systeme der Elektroenergietechnik, 1982.
- [Cha 2018] Chachereau, A.; Hösl, A.; Franck, C. M.: Electrical insulation properties of the perfluoronitrile C₄F₇N. Journal of Physics D: Applied Physics 49/51, S. 495201, 2018.
- [Cig 1976] Cigré Study Committee 15: Recent research in the United States on the effect of particle contamination reducing the breakdown voltage in compressed gas-insulated systems. Report 15-09, 1976.

- [Cig 1992a] Cigré Working Group 23.10: A Twenty-five year review of experience with SF₆ gas insulated substations (GIS). Technical Brochure 23-101, 1992.
- [Cig 1992b] Cigré Working Group 15.03: Diagnostic methods for GIS insulating systems. Technical Brochure 15/23-01, 1992.
- [Cig 2003] Cigré Joint Working Group 23/21/33.15: Gas insulated transmission lines (GIL). Technical Brochure 218, 2003.
- [Cig 2010] Cigré Working Group B3.18: SF₆ tightness guide. Working Group B3.18. Technical Brochure 430, 2010.
- [Cig 2012] Cigré Working Group D1.03: Gas Insulated System for HVDC: DC Stress at DC and AC Systems. Technical Brochure 506, 2012.
- [Cig 2013] Cigré Working Group D1.03: Risk assessment on defects in GIS based on PD diagnostics. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 6/20, S. 2165–2172, 2013.
- [Cig 2015] Cigré Joint Working Group B3/B1.27: Factors for investment decision GIL vs. cables for AC transmission. Technical Brochure 639, 2015.
- [Cig 2018b] Cigré Working Group D1.51: Dry air, N₂, CO₂ and N₂/SF₆ mixtures for gas-insulated systems. Technical Brochure 730, 2018.
- [Cig 2021] Cigré Working Group D1.67: Electric performance of new non-SF₆ gases and gas mixtures for gas-insulated systems. Technical Brochure 849, 2021.
- [Coo 1938] Cooper, F. S.: Gas dielectric media. United States Patent Office US2221671A, 1938.
- [Coo 1977] Cooke, C. M.; Wootton, R. E.; Cookson, A. H.: Influence of particles on AC and DC electrical performance of gas insulated systems at extra-high-voltage. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 3/96, S. 768–777, 1977.
- [Der 2000] Dervos, C. T.; Vassiliou, P.: Sulfur hexafluoride (SF₆): global environmental effects and toxic byproduct formation. Journal of the Air & Waste Management Association (1995) 1/50, S. 137–141, 2000.
- [Des 2020a] Deschler, J.; Kindersberger, J.: Influence of humidity on electric strength of CO₂ and C₄-FN/CO₂ gas mixtures: VDE High Voltage Technology 2020; ETG-Symposium, S. 219–224, 2020.
- [Des 2020b] Deschler, J.; Kindersberger, J.: A method to characterize the insulating capacity of new insulating gases: 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD). IEEE, S. 802–805, 2020.
- [Des 2022] Deschler, J.: Elektrische Durchschlagfestigkeit von C₄-Fluornitril basierten Gasgemischen für gasisolierte metallgekapselte Schaltanlagen. Dr. Hut, TU München, 2022.
- [Deu 2020] Deutscher Bundestag: Sachstand. Schwefelhexafluorid (SF₆) Alternative für elektrische Anlagen, 2020.
- [Dul 2015] Dullni, E. et al.: Reducing SF₆ emissions from electrical switchgear. Carbon Management 3-4/6, S. 77–87, 2015.
- [Ehh 2001] Ehhalt, D. et al.: Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases: TAR Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- [Elk 2020] Elkins, J. W. et al.: Combined sulfur hexafluoride data from the NOAA/ESRL global monitoring division. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/hats/combined/SF6.html>, Stand: 02.07.2020.

- [Els 2023] Elsner, C.: Die Revision der Verordnung (EU) 517/2014 - Ein Update: GIS-Anwenderforum 2023, TU Darmstadt, 2023.
- [Eng 1989] Engel, T. G.; Donaldson, A. L.; Kristiansen, M.: The pulsed discharge arc resistance and its functional behavior. *IEEE Transactions on Plasma Science* 2/17, S. 323–329, 1989.
- [Eur 2006] Regulation (EC) No 842/2006 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases, 2006.
- [Eur 2014] Europäische Union: Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 Text von Bedeutung für den EWR, 2014.
- [Eur 2022a] Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014, 2022a.
- [Eur 2022b] European Chemicals Agency: ECHA-Datenbank. Trifluoriodomethane. <https://echa.europa.eu/de/substance-information/-/substanceinfo/100.017.286>, Stand: 16.07.2022.
- [Fel 1966] Felici, N. J.: Forces et Charge de Petits Objets en Contact avec une Electrode d'un champ électrique. *Rev. Gen. de L'ettricité*, S. 1145–1160, 1966.
- [For 2007] Forster, P. et al.: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. 129–234, 2007.
- [For 2021] Forster, P. et al.: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. In (IPCC Hrsg.): *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, S. 923–1054, 2021.
- [Gän 1976] Gänger, E. B.; Leibold, A. A.: The Influence of Foreign Particles on the Dielectric Strength in SF₆ Installations. *IEEE PES Winter Meeting, New York, Paper No. A76 152-9*, 1976.
- [Gat 2022] Gatzsche, M.; MahdiZadeh, N.: Ökoeffiziente Hochspannungsprodukte: Ein Beitrag auf dem Weg zur klimaneutralen Energiezukunft: *Stuttgarter Hochspannungssymposium 2022*, Stuttgart, 2022.
- [Gau 2016] Gautschi, D. et al.: Application of a fluoronitrile gas in GIS and GIL as an environmental friendly alternative to SF₆. *Cigre Paper B3-106*, Paris: CIGRE Session 2016, B3-106, Paris, 2016.
- [Gen 2020] Generaldirektion Klimapolitik: Bericht der Kommission zur Bewertung der Verfügbarkeit von Alternativen zu fluorierten Treibhausgasen in Schaltanlagen und damit zusammenhängenden Geräten, einschließlich sekundärer Mittelspannungsschaltanlagen, 2020.
- [Har 1975] Hara, M. et al.: Calculation of Field Strength and Force Acting on Conducting Sphere in Gaps and its Application for Prediction of Gaseous Breakdown Voltage. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials* 12/95, S. 525–532, 1975.
- [Hau 1984] Hauschild, W.; Mosch, W.: *Statistik für Elektrotechniker. Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik*. VEB Verlag Technik, Berlin, 1984.
- [Her 2016] Hering, M.: *Überschlagsverhalten von Gas-Feststoff-Isoliersystemen unter Gleichspannungsbelastung*. Dissertation, TU Dresden, 2016.

- [Hin 2021] Hintsä, E. J. et al.: UAS Chromatograph for Atmospheric Trace Species (UCATS) – a versatile instrument for trace gas measurements on airborne platforms. *Atmospheric Measurement Techniques* 10/14, S. 6795–6819, 2021.
- [Hoe 2014a] Hoek, S.: Ortung von Teilentladung in gasisolierten Schaltanlagen mittels elektromagnetischer Wellen im UHF-Bereich. Dissertation, Stuttgart, 2014.
- [Hoe 2014b] Hoeck, S.: UHF PD Measurements with the MPD 600 with help of UHF 620 or UHF 608 and the pulse generator UPG 620. Application note, Klaus, Österreich, 2014.
- [Hof 2019] Hofer-Maksymiw, I. M.: Isoliervermögen einer schwach inhomogenen Elektrodenanordnung in trockener Luft. Dissertation, TU München, 2019.
- [Hop 2020] Hopf, A.: Elektrische Festigkeit von SF₆ und alternativen Isoliertgasen (Luft, CO₂, N₂, O₂ und C₃F₇CN-Gemisch) bis 2,6 MPa. Dissertation, TU Ilmenau, 2020.
- [Hor 2006] Hornfeldt, S. P.: Lifting force on metallic particles in gis systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 4/13, S. 838–841, 2006.
- [Hun 1985] Hunter, S. R.; Christophorou, L. G.: Pressure-dependent electron attachment and breakdown strengths of unitary gases, and synergism of binary gas mixtures: A relationship: *J. Appl. Phys.*, Vol. 57, Nr. 9, S. 4377-4385, 1985.
- [Hyr 2016] Hyrenbach, M.; Zache, S.: Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear: 2016 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe). 14-16 June 2016. IEEE, Piscataway, NJ, S. 1–9, 2016.
- [Hyr 2017] Hyrenbach, M.; Paul, T. A.; Owens, J.: Environmental and safety aspects of AirPlus insulated GIS. *CIGRE - Open Access Proceedings Journal* 1/2017, S. 132–135, 2017.
- [Idd 2021] Iddrissu, I. et al.: Gas decomposition and electrode degradation characteristics of a 20% C₃F₇CN and 80% CO₂ gas mixture for high voltage accelerators. *High Voltage* 5/6, S. 750–759, 2021.
- [IEC 2010] IEC 60060-1:2010:2010, High-voltage test techniques.
- [IEE 2017] IEEE Std C37.122.4-2016: IEEE Guide for Application and User Guide for Gas-Insulated Transmission Lines, Rated 72.5 kV and Above. IEEE, S.l., 2017.
- [Jia 2017] Jianying, Z. et al.: Research on the key technology of 1100 kV SF₆ gas-insulated metal-enclosed transmission line: 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST). IEEE, S. 30–33, 2017.
- [Jon 1995] Jones, T. B.: Electromechanics of particles. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- [Juh 2017] Juhasz, J. R.: Novel working fluid, HFO-1336mzz(E), for use in waste heat recovery application. 12th IEA Heat Pump Conference, 2017.
- [Kaw 2008] Kawada, M. et al.: Advanced monitoring system for gas density of GIS: 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. IEEE, S. 363–368, 2008.
- [Kaz 2012] Kazakov, A.; McLinden, M. O.; Frenkel, M.: Computational Design of New Refrigerant Fluids Based on Environmental, Safety, and Thermodynamic Characteristics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 120917100332001, 2012.
- [Kie 2015] Kieffel, Y. et al.: SF₆ alternative development for high voltage Switchgears: 2015 IEEE Power & Energy Society general meeting. Denver, Colorado, USA, 26 - 30 July 2015. IEEE, Piscataway, NJ, S. 1–5, 2015.
- [Kie 2017] Kieffel, Y. et al.: Characteristics of g₃ – an alternative to SF₆. *CIGRE - Open Access Proceedings Journal* 1/2017, S. 54–57, 2017.
- [Koc 2012] Koch, H.: Gas-insulated transmission lines (GIL). Wiley, Chichester, 2012.

- [Koc 2013] Koch, H.: Grid connection of offshore wind farms: 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, S. 1–5, 2013.
- [Koc 2018] Koch, H. et al.: Technical aspects of gas insulated transmission lines and application of new insulating gases. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 4/25, S. 1448–1453, 2018.
- [Kom 1928] Komet-Kompagnie für Optik, Mechanik und Elektro-Technik GmbH: Gaseous extinguishing substances, e.g. liquefied gases, carbon dioxide snow. deutsches Patentamt DE547888C, 1928.
- [Kön 1993] König, D.; Rao, Y. N.: Teilentladungen in Betriebsmitteln der Energietechnik. VDE-Verl., Berlin, 1993.
- [Küc 2017] Küchler, A.: Hochspannungstechnik. Grundlagen - Technologie - Anwendungen. Springer Vieweg, Berlin, 2017.
- [Kuw 1974] Kuwahara, H. et al.: Effect of Solid Impurities on Breakdown in Compressed SF₆ Gas. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems 5/PAS-93, S. 1546–1555, 1974.
- [Kyo 1998] Kyoto Protocol: Report of the conference of the parties on its third session. Held at Kyoto from 1 to 11 December 1997, Kyoto, 1998.
- [Led 2004] Lederle, C.; Kindersberger, J.: The influence of surface roughness and coating on the impulse breakdown voltage in SF₆/sub 6: The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004. IEEE, S. 522–525, 2004.
- [Lei 1987] Leijon, M. A. S.: Diagnosis and classification of metallic particles in GIS – Laboratory work and on-site measurements. Dissertation, Göteborg, 1987.
- [Lei 1988] Leijon, M. A. S.; Vlastos, A. E.; Bartnicki, A.: Lifting fields on Metallic Particles in a SF₆ Gas Insulated System with Uncoated Electrodes. IX International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Venezia, Italy, S. 291–294, 1988.
- [Lev 2010] Levin, I. et al.: The global SF₆ source inferred from long-term high precision atmospheric measurements and its comparison with emission inventories. Atmospheric Chemistry and Physics 10, S. 2655–2662, 2010.
- [Li 2018] Li, X.; Zhao, H.; Murphy, A. B.: SF₆-alternative gases for application in gas-insulated switchgear. Journal of Physics D: Applied Physics 15/51, S. 153001, 2018.
- [Li 2021] Li, L. et al.: Research on the power frequency breakdown characteristics of a new eco-friendly gas insulating medium HFO-1336mzz(E): 22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021). Institution of Engineering and Technology, S. 1925–1928, 2021.
- [Loi 2020a] Loizou, L. et al.: Lightning impulse breakdown characteristics of SF₆ and 20% C₃F₇CN / 80% CO₂ mixture under weakly non-uniform electric fields. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 3/27, S. 848–856, 2020.
- [Loi 2020b] Loizou, L. et al.: Technical Viability of Retro-Filling C₃F₇CN/CO₂ Gas Mixtures in SF₆ -Designed Gas Insulated Lines and Busbars at Transmission Voltages. IEEE Transactions on Power Delivery 5/35, S. 2394–2402, 2020.
- [Lut 2017] Lutz, B. et al.: Behavior of gaseous dielectrics with low global warming potential considering partial discharges and electric arcing. Study Committees A3, B4 & D1 Winnipeg, Canada September 30 – October 6, 2017: CIGRÉ Winnipeg 2017 Colloquium, 2017.
- [Mag 2018] Magier, T.; Tenzer, M.; Koch, H.: Direct Current Gas-Insulated Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Delivery 1/33, S. 440–446, 2018.

- [Mai 1998] Maiss, M.; Brenninkmeijer, C. A. M.: Atmospheric SF₆: Trends, Sources, and Prospects. *Environmental Science & Technology* 20/32, S. 3077–3086, 1998.
- [Man 2014] Mantilla, J. D. et al.: Investigation of the insulation performance of a new gas mixture with extremely low GWP: 2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC 2014). 7 [i.e. 8] - 11 June 2014, Sheraton Philadelphia Downtown, Philadelphia, Pennsylvania, USA. IEEE, Piscataway, NJ, S. 469–473, 2014.
- [Man 2016] Mantilla, J.; Claessens, M.; Kriegel, M.: Environmentally friendly perfluoroketones-based mixture as switching medium in high voltage circuit breakers: Cigre Session 46, 2016.
- [Mor 2000] Morcos, M. M. et al.: Dynamics of metallic particle contaminants in GIS with dielectric-coated electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2/15, S. 455–460, 2000.
- [Mos 1979] Mosch, W.; Hauschild, W. Hrsg.: Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid. Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg, 1979.
- [Mou 2001] Moukengue Imano, A.: Beeinflussung der elektrischen Festigkeit von N₂/SF₆- und Luft/SF₆-Isolationen durch Metallpartikel auf der Stüttoberfläche. Dissertation Universität Stuttgart. Shaker, Aachen, 2001.
- [Myh 2013] Myhre, G. et al.: Anthropogenic and natural radiative forcing. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. 659–740, 2013.
- [Nec 2016] Nechmi, H. E. et al.: Fluoronitriles/CO₂ gas mixture as promising substitute to SF₆ for insulation in high voltage applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 5/23, S. 2587–2593, 2016.
- [Nie 1998] Niemeyer, L.: A systematic search for insulation gases and their environmental evaluation. In (Christophorou, L. G.; Olthoff, J. K. Hrsg.): *Gaseous Dielectrics VIII*. Springer US, Boston, MA, S. 459–464, 1998.
- [Osm 1992] Osmokrovic, P. et al.: Influence of GIS parameters on the Topley constant. *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 2/27, S. 214–220, 1992.
- [Owe 2016] Owens, J. G.: Greenhouse gas emission reductions through use of a sustainable alternative to SF₆: 2016 Electrical Insulation Conference (EIC), Montréal, Qc, Canada, 19-22 June 2016. IEEE, Piscataway, NJ, S. 535–538, 2016.
- [Pen 1938] Penning, F. M.: Elementary processes in breakdown of gases between flat parallel plates. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* 5 33/1938, 1938.
- [Pir 2020] Pirker, A.: Messung und Darstellung von Teilentladungen bei Gleichspannung zur Identifikation von Defekten gasisolierter Systeme. Dissertation, TU Graz, 2020.
- [Pre 2016] Preve, C.; Maladen, R.; Piccoz, D.: Method for validation of new eco-friendly insulating gases for medium voltage equipment: 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD). IEEE, S. 235–240, 2016.
- [Pso 2018] Psotta, T. et al.: Ausschaltvermögen von Trenn- und Erdungsschaltern in alternativen Isoliertgasen. Breaking capacity of disconnectors and earthing switches operated in the alternative insulating gases. In (VDE Verlag GmbH Berling Offenbach Hrsg.): *VDE-Hochspannungstechnik 2018*. VDE Verlag, Berlin, 2018.
- [Rab 2015] Rabie, M.; Franck, C.: Computational screening of new high voltage insulation gases with low global warming potential. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 1/22, S. 296–302, 2015.
- [Rab 2016] Rabie, M.; Hussy, C.: Einordnung von Alternativen zum Einsatz von SF₆ in der elektrischen Energieversorgung: Fachtagung Hochspannungs-Schaltanlagen, Darmstadt, Germany, 2016.

- [Rab 2017] Rabie, M.: A systematic approach to identify and quantify gases for electrical insulation. Dissertation, ETH Zürich, 2017.
- [Rav 1993] Ravishankara, A. R. et al.: Atmospheric lifetimes of long-lived halogenated species. *Science (New York, N.Y.)* 5092/259, S. 194–199, 1993.
- [Rig 2010] Rigby, M. et al.: History of atmospheric SF₆ from 1973 to 2008. *Atmospheric Chemistry and Physics* 21/10, S. 10305–10320, 2010.
- [Riz 1979] Rizk, F.; Masetti, C.; Comsa, R. P.: Particle-Initiated Breakdown in SF₆ Insulated Systems Under High Direct Voltage. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 3/PAS-98, S. 825–836, 1979.
- [Rom 2017] Romero, A. et al.: A review of sulfur-hexafluoride reduction by dielectric coatings and alternative gases: 2017 6th International Youth Conference on Energy (IYCE). *IEEE*, S. 1–5, 2017.
- [Sch 1923] Schumann, W. O.: Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. Theoretische Grundlagen und Anwendung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1923.
- [Sch 1925] Schwaiger, A.: Elektrische Festigkeitslehre. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 1925.
- [Sch 1974] Schulz, P.: Elektronische Vorgänge in Gasen und Festkörpern. G. Braun Karlsruhe, Karlsruhe, 1974.
- [Sch 1997] Schlemper, H.-D.: Akustische und elektrische Teilentladungsmessung zur Vor-Ort-Prüfung von SF₆-isolierten Schaltanlagen. Dissertation, Stuttgart, 1997.
- [See 2017] Seeger, M. et al.: Recent development of alternative gases to SF₆ for switching applications: *Electra* 291, 26, 2017.
- [Shi 2018] Shinkai, H. et al.: Study on basic insulation performance and decomposition product toxicity of 3MTM Novec™ insulation fluid as SF₆ alternative gas, Japan, 2018.
- [Sie 2019] Siemens AG: Gasisolierte Übertragungsleitungen. <https://www.siemens.com/GIL>, Stand: 10.10.2019.
- [Sim 2007] Sims, R. E. et al.: Energy supply. In *Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In (IPCC Hrsg.): *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. 251–322, 2007.
- [Sim 2015] Simka, P.; Ranjan, N.: Dielectric strength of C5 perfluoroketone: The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, 2015.
- [Sim 2017] Simka, P. et al.: Decomposition of alternative gaseous insulation under partial discharge. In (Institute of High Voltage and Power Transmission (IATTE), Faculty of Exact Sciences and Technology, National University of Tucuman, Argentina Hrsg.): *20th International Symposium on High Voltage Engineering*, 2017.
- [Sin 2003] Singha, S.; Thomas, M. J.: Toepler's spark law in a GIS with compressed SF₆-N₂ mixture. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 3/10, S. 498–505, 2003.
- [Sto 2014] Stocker, T. Hrsg.: *Climate change 2013. The physical science basis Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York, 2014.
- [Sto 2018] Stoller, P. C. et al.: Environmental aspects of high voltage gas insulated switchgear that uses alternatives to SF₆ and monitoring and long-term performance of a pilot installation: Cigré Session 2018, 2018.

- [Syn 2016] SynQuest Laboratories: (E)-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene. Safety Data Sheet 1300328, 2016.
- [Tan 2017] Tanaka, K.; Ishikawa, J.; Kontomaris, K. K.: Thermodynamic properties of HFO-1336mzz(E) (trans-1,1,1,4,4,4-hexafluoro-2-butene) at saturation conditions. *International Journal of Refrigeration* 82, S. 283–287, 2017.
- [Tas 1999] Task Force 15/33.03.05 of Working Group 15.03 (Insulating Gases): Partial discharge detection systems for GIS sensitivity verification for the UHF method and the acoustic method. *Électra* 183, S. 75–87, 1999.
- [Tas 2002] Task Force 15.03.07 of Working Group 15.03 On behalf of Study Committee 15: Long term performance of SF₆ insulated systems. CIGRE Electra Publication 15-301, 2002.
- [Tat 2021] Tateyama, C. et al.: Conceptual Design and Feasibility Study of Flexible Gas-Insulated Transmission Line Using CF₃I Gas Mixture. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 4/28, S. 1424–1430, 2021.
- [Tox 2019] Toxicology and Industrial Health: Trans-1,1,1,4,4,4-hexafluoro-2-butene (HFO-1336mzz-E) (2018). *Toxicology and industrial health* 3/35, S. 204–210, 2019.
- [Trö 2022] Tröger, A.: AirPlus - die SF₆-freie Alternative in der Mittelspannung: Dilo Workshop. *Alternatives Gas in MV/HV Betriebsmitteln*, 2022.
- [Tu 2018] Tu, Y. et al.: Insulation characteristics of fluoronitriles / CO₂ gas mixture under DC electric field. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 4/25, S. 1324–1331, 2018.
- [Uch 2007] Uchii, T. et al.: Fundamental research on SF₆-free gas insulated switchgear adopting CO₂ gas and its mixtures. *Proceedings of International Symposium on EcoTopia Science 2007*, S. 516–520, 2007.
- [Umw 2024] Umweltbundesamt: EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase#VO5172014>, Stand: 09.02.2024.
- [Ver 2011] Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals. (GHS). United Nations, New York, 2011.
- [Vol 2002] Vollmer, M. K.; Weiss, R. F.: Simultaneous determination of sulfur hexafluoride and three chlorofluorocarbons in water and air. *Marine Chemistry* 2-3/78, S. 137–148, 2002.
- [Wad 2016] Wada, J. et al.: Dielectric properties of gas mixtures with per-fluorocarbon gas and gas with low liquefaction temperature. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 2/23, S. 838–847, 2016.
- [Wan 2021] Wang, J. et al.: Metal particle contamination in gas-insulated switchgears/gas-insulated transmission lines: *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, S. 1011–1025, 2021.
- [Wen 2018] Wenger, P. et al.: TE-Charakterisierung frei beweglicher Partikel in HVDC-GIS mittels UHF-Messtechnik und Hochgeschwindigkeitskamera-Aufnahmen. In (VDE Verlag GmbH Berling Offenbach Hrsg.): *VDE-Hochspannungstechnik 2018*. VDE Verlag, Berlin, S. 10–15, 2018.
- [Woh 1996] Wohlmuth, M.: Einfluß beweglicher Partikel auf das Isolationsverhalten gasisolierter Schaltanlagen. München, Technische Universität, Dissertation. VDI-Verl., Düsseldorf, 1996.
- [Zha 2002] Zhang, S. et al.: The impact of electrode dielectric coating on the insulation integrity of GIS/GITL with metallic particle contaminants. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2/17, S. 318–325, 2002.

- [Zha 2011] Zhang, H.; Wu, J.; Shen, Z.: Radiative forcing and global warming potential of perfluorocarbons and sulfur hexafluoride. *Science China Earth Sciences* 5/54, S. 764–772, 2011.
- [Zha 2018] Zhang, B.; Uzelac, N.; Cao, Y.: Fluoronitrile/CO₂ mixture as an eco-friendly alternative to SF₆ for medium voltage switchgears. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 4/25, S. 1340–1350, 2018.
- [Zha 2020] Zhang, H. et al.: Thermal Decomposition Mechanism and Fire-Extinguishing Performance of trans-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene: A Potential Candidate for Halon Substitutes. *The journal of physical chemistry. A* 28/124, S. 5944–5953, 2020.

Normen

- [DIN 2012] DIN EN 62271-4 VDE 0671-4:2014-06:2012, Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen.
- [DIN 2016] DIN EN 60270 VDE 0434:2016-11, Hochspannungs-Prüftechnik.
- [DIN 2018] DIN EN 62271-1 VDE 0671-1:2018-05:2018, Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen.
- [DIN 2020a] DIN EN IEC 60480 VDE 0373-2:2020-06:2020, Spezifikationen für die Wiederverwendung von Schwefelhexafluorid (SF₆) und seinen Mischungen in elektrischen Betriebsmitteln.
- [DIN 2020b] DIN EN 55016-2-3 V:11.2020, Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit.
- [DIN 2022] DIN EN ISO 21920-2:2022, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile - Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit (ISO 21920-2:2021, korrigierte Fassung 2022-06); Deutsche Fassung EN ISO 21920-2:2022 Oberflächenbeschaffenheit: Profile.
- [IEC 2011] IEC 62271-204:2011:2011, High-voltage switchgear and controlgear - Part 204: Rigid gas-insulated transmission lines for rated voltage above 52 kV.

Eigene und gemeinsame Publikationen

- [Kem 2020] Kempf, M.; Wiener, J.: Investigation on the PD and breakdown behaviour of alternative insulating gas mixtures as a result of typical defects. In (TU Darmstadt Hrsg.): PESS 2020 – IEEE Power and Energy Student Summit. Conference Proceedings 5 – 7 October 2020: Online, Technical University of Darmstadt. VDE Verlag, Berlin, 2020.
- [Koc 2020] Koch, M.; Kothe, D. C.; Wiener, J.; Hoefler, L.; Hinrichsen, V.: Determination of streamer inception and flashover at curved insulation surfaces with embedded electrodes: VDE Hochspannungstechnik. VDE Fachtagung, 09.-11. November 2020, Online: VDE Fachtagung Hochspannungstechnik 2020. VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2020.
- [Kri 2015] Krieg, A.; Lala, G.; Schober, F.; Wiener, J.; Paulus, J.; Küchler, A.; Zink, M. H.; Liebschner, M.: FEM model for describing the dielectric behavior of oil-impregnated pressboard under DC stresses: 33. International Scientific Conference “Science in Practice”, Schweinfurt, 2015.
- [Pac 2021] Pachin, J.; Franck, C.; Doiron, C. B.; Simka, P.; Widger, P.; Haddad, A.; Psotta, T.; Wiener, J.; Hinrichsen, V.; Pirker, A.; Schichler, U.; Götz, T.; Deschler, J.; Kindersberger, J.: Design criteria for experiments to measure the breakdown voltage of insulating gases in uniform electric fields: Working Group Reports vol 319, Paris, 2021.

- [Wie 2017] Wiener, J.; Hinrichsen, V.; Goll, F.; Juhre, K.: Dielectric properties of fluorine containing insulating gases for gas insulated systems. In (Institute of High Voltage and Power Transmission (IATTE), Faculty of Exact Sciences and Technology, National University of Tucuman, Argentina. Hrsg.): 20th International Symposium on High Voltage Engineering, 2017.
- [Wie 2020a] Wiener, J.; Hinrichsen, V.; Goll, F.; Juhre, K.: Analysis of the emitted frequency spectra of breakdowns in SF₆ gas as well as in alternative insulating gases for gas insulated systems: Conference Proceedings of ISEIM 2020, S. 454–457, 2020.
- [Wie 2020b] Wiener, J.; Hinrichsen, V.; Goll, F.; Juhre, K.: Influence of residual fluoro-organic gas compounds on the electric performance of SF₆-free gas insulated systems in consecutive test series. In (Németh, B. Hrsg.): Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering. Springer International Publishing, Cham, S. 439–449, 2020.
- [Wie 2021] Wiener, J.; Hinrichsen, V.; Wacker, D. R.; Goll, F.; Juhre, K.: Investigation of free-moving particles under AC electric field in different insulating gas mixtures. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2/28, S. 672–680, 2021.

Betreute studentische Arbeiten

Die folgenden studentischen Arbeiten wurden im Rahmen dieser Dissertation am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt angefertigt und trugen zu den hier gezeigten Ergebnissen bei.

- [Pic 2019*] Felix Pichl, Bachelorarbeit Nr. 2006: Untersuchung des Einflusses der Elektrodenrauheit auf die Durchschlagspannung in alternativen Isoliergasen, Darmstadt, 2019.
- [Wac 2019*] Daniel Wacker, Bachelorarbeit Nr. 2012: Experimentelle Untersuchung der Partikelbewegung in mit alternativen Isoliergasen gefüllten gasisolierten Leitungen, Darmstadt, 2019.
- [Bru 2019*] Alexander Brust, Masterarbeit Nr. 2013: Experimentelle Untersuchung des Teilentladungsverhaltens infolge typischer Fehlstellen in mit alternativen Isoliergasen gefüllten gasisolierten Systemen, Darmstadt, 2019.

Lebenslauf

Johannes Wiener
geboren am 15. April 1990
in Schweinfurt



Werdegang

Seit 04/2021	Entwicklungsingenieur bei PFISTERER Kontaktsysteme GmbH in Winterbach
11/2015 bis 10/2020	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der TU Darmstadt
10/2014 bis 10/2015	Studium Elektro- und Informationstechnik (M. Eng.) an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt
10/2012 – 03/2013	Praxissemester bei der Shanghai Sachs Powertrain Components Systems Co., Ltd. Shanghai
10/2010 bis 09/2014	Studium Maschinenbau (Dipl.-Ing. (FH)) an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt
07/2009 bis 03/2010	Grundwehrdienst an der Infanterieschule Hammelburg
06/2009	Erlangung der allgemeinen Hochschulreife (Abitur) am Gymnasium Bad Königshofen

18. März 2023

Erklärungen laut Promotionsordnung

§ 8 Abs. 1 lit. C PromO

Ich versichere hiermit, dass die elektronische Version meiner Dissertation mit der schriftlichen Version übereinstimmt.

§ 8 Abs. 1 lit. D PromO

Ich versichere hiermit, dass zu einem vorherigen Zeitpunkt noch keine Promotion versucht wurde.

§ 9 Abs. 1 PromO

Ich versichere hiermit, dass die vorliegende Dissertation selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen verfasst wurde.

§ 9 Abs. 2 PromO

Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Darmstadt, den 18. März 2023

Johannes Wiener