

# Elektrische Festigkeit von alternativen Isoliergasen bei hohem Druck

Electrical strength of alternative insulation gases at high pressure

Prof. Dr. Michael Rossner

Fakultät Elektrotechnik (Hochspannungstechnik)  
Hochschule Coburg  
Coburg, Deutschland  
michael.rossner@hs-coburg.de

Andreas Hopf

Fakultät Elektrotechnik (Hochspannungstechnik)  
Hochschule Coburg  
Coburg, Deutschland  
andreas.hopf@hs-coburg.de

**Kurzfassung** — Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) ist das meist verwendete Isoliergas der Hochspannungs- und Energietechnik. Neben den exzellenten Isoliereigenschaften besitzt SF<sub>6</sub> das höchste bekannte Treibhauspotential und weist eine lange Verweilzeit in der Atmosphäre auf. Allerdings besitzen alternative Isoliergase oft nur einen Bruchteil des Isoliervermögens von SF<sub>6</sub>. Die elektrische Festigkeit von Isoliergasen kann mit Druckerhöhung gesteigert werden, deshalb sind Durchschlagsmessungen an alternativen Gasen und Gasgemischen (N<sub>2</sub>, Luft, SF<sub>6</sub>) bis zu Gasdrücken von 1.1 MPa durchgeführt worden. Mit diesen Messungen wurde primär das Isoliervermögen der Alternativgase in quasihomogenen Anordnungen in Hinblick auf eine Anwendbarkeit der Paschen-Parameter auch im Hochdruckbereich untersucht. Vor dem Hintergrund der praktischen Umsetzbarkeit wurden aber auch Einflussfaktoren wie Oberflächenrauigkeiten, Startelektronenproblematik und inhomogene Feldanordnungen mit einbezogen.

**Stichwörter:** Elektrische Festigkeit, Paschengesetz, Streamer, Kanalentladung, Kugelfunkenstrecke, Mischgase, Oberflächenrauigkeit, Blitzstoßspannung, GIS, Schwefelhexafluorid

## NOMENKLATUR

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$\alpha$	Ionisierungskoeffizient	1/m
$\eta_{AN}$	Anlagerungskoeffizient	1/m
$\eta_{Geo}$	Ausnutzungsfaktor	
$C$	Kapazität/Kondensator	F → As/V
$d$	Schlagweite	1 m → 1 mm = 10 <sup>-3</sup> m
$E$	Elektrische Feldstärke	1 V/m → 1 kV/cm = 10 <sup>5</sup> V/m
$E/p$	druckbezogene (reduzierte) elektrische Feldstärke	1V/(Pa m) → 1kV/(bar mm) = 10V/(Pa m)
$F$	Weibull Häufigkeitsverteilung	
$N_{krit}$	Kritische Ladungsträgermenge	
$p$	Druck	1 Pa → 1 MPa = 10 <sup>6</sup> Pa = 10 bar
$Q$	radioaktive Aktivität	1/s = 1 Bq
$r$	Radius	1 m → 1 mm = 10 <sup>-3</sup> m
$R_a$	Mittlere Rauigkeit	1 m → 1 μm = 10 <sup>-6</sup> m
$R_{max}$	Maximale Rauigkeit	1 m → 1 μm = 10 <sup>-6</sup> m
$S$	Strahlendosis	1 eV = 1,602 10 <sup>-19</sup> J
$t, T$	Zeit	s → 1 μs = 10 <sup>-6</sup> s
$U$	Spannung	1 V → 1 kV = 10 <sup>3</sup> V
$x$	Wegstrecke	m
$x_{krit}$	kritische Wegstrecke	m
$A$	Paschen-Parameter	1/(bar mm) = 10 <sup>-2</sup> /(Pa m)
$B$	Paschen-Parameter	1 kV/(bar mm) = 10 V/(Pa m)
BIL	Blitzstoßspannung (basic insulation level)	
$k$	Ionisationsbeiwert	
MWB	Messwandlerbau Bamberg	
SIL	Schaltstoßspannung (switching insulation level)	
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid	
$X$	Anzahl der Gasdurchschläge	
$Z$	Anzahl der gehaltenen Spannungsimpulse (keine Durchschläge)	

## I. EINLEITUNG

Die Gasisolation der Hochspannungstechnik kann seit den 60er bis 70er Jahren als ausgereift angesehen werden. SF<sub>6</sub> ermöglicht eine kompakte Bauweise von Hochspannungsbetriebsmitteln. Im Vergleich zu atmosphärischer Luft besitzt SF<sub>6</sub> ein dreifach höheres Isoliervermögen ( $p = 0,1 \text{ MPa}$ ). SF<sub>6</sub> erreicht ab einem Gasdruck  $p > 5 \text{ bar}$  vergleichbare Isoliereigenschaften wie Isolieröle.

Neben den positiven Eigenschaften hat SF<sub>6</sub> das höchste Treibhauspotential aller bekannten Gase (1/22800 CO<sub>2</sub> Äquivalent [14]). SF<sub>6</sub> ist im Kyoto-Protokoll gelistet und seit 2005 in der europäischen F-Gasverordnung aufgenommen. In der Hochspannungstechnik wird SF<sub>6</sub> nur in geschlossenen Kreisläufen verwendet. Monitoring, Gasrückgewinnung und Dichtewächter gewährleisten eine minimale Emission in die Atmosphäre. Diese Verfahren sind allgemein bewehrt, anerkannt und legitimiert. Dennoch besteht aufgrund deren Kosten und einem Restrisiko von ungewolltem Entweichen von SF<sub>6</sub> ein Bedarf an alternativen Isoliergasen.

In der allgemeinen Modellvorstellung der Gasentladung sind schwächende Einflüsse auf die elektrische Festigkeit, wie z.B. Feldemission,  $\beta$ -Stoßprozesse, Sekundäreffekte, Rückwirkung der Oberflächenrauigkeiten bekannt. Aus der einschlägigen Literatur [1, 2, 3] sind die Angaben über der elektrischen Festigkeit von alternativen Isoliergasen im Druckbereich von 0,5...1,1 MPa für Dimensionierungsfragen nicht ausreichend detailliert. Aufgrund dessen wurden Untersuchungen der elektrischen Festigkeit von N<sub>2</sub>, Luft und SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-Gemischen mit definierten Randbedingungen bei hohem Gasdruck durchgeführt. Im Allgemeinen werden SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>-Gemische für Tieftemperaturanwendungen genutzt um den Partialdruck von SF<sub>6</sub> und somit den Taupunkt zu verringern. Bei unseren Untersuchungen bedienen wir uns der Elektroaffinität des SF<sub>6</sub>, um die elektrische Festigkeit von Stickstoff durch Beimischung von SF<sub>6</sub> zu steigern. Der Fokus lag auf den umweltfreundlichen Gasen Luft und Stickstoff.

Untersuchungen mit Fluor substituierten Kohlenwasserstoffverbindungen (PFC) wurden trotz ihrer derzeit diskutierten Substitutionseigenschaften nicht durchgeführt, da auch diese Gase Beschränkungen, ähnlich der F-Gas-Verordnung aufweisen. Die Untersuchungen der Durchschlagsfestigkeit dieser Gase wurden im Hochspannungslabor der HS Coburg durchgeführt. Neben Durchschlagsversuchen mit Wechselspannungen bis 200 kV<sub>AC</sub> lag der Fokus auf Impulsspannungsmessungen bis 320 kV<sub>BIL</sub> mit unterschiedlichen Rückenzeitkonstanten. Mit dem Prüfkessel konnten bei Gasdrücken bis  $p = 1,1 \text{ MPa}$  unterschiedliche Kugelelektroden (schwach und stark inhomogene Felder) untersucht werden.

## II. VERSUCHSANORDNUNG UND DURCHFÜHRUNG

### A. HOCHSPANNUNGS-AUFBAU

- 3-stufiger Marxgenerator (MWB)  $U_{\max} = 320 \text{ kV}$  (Abb.1 Ersatzschaltbild, Abb. 2 zugehöriger Kurvenverlauf)
- Impulsform BIL, SIL (positive und negative Polarität)
- Kapazitiver Spannungsteiler,  $T_{\text{rise}} = 12 \text{ ns}$ ,  $C \approx 33 \text{ pF}$
- Niederinduktiver Unterkondensator,  $C_N \approx 57 \text{ nF}$
- HF-Messleitung  $75 \Omega$
- Prüfgefäß  $p_{\max} = 1.1 \text{ MPa}$  und  $U_{\max} = 500 \text{ kV}_{AC}$

### B. MESSTECHNIK

- Transienten Rekorder 12 Bit  $T_{\text{Sample}} = 4 \text{ ns}$
- 300 MHz 1/10 Tastkopf
- Gesamtübersetzungsverhältnis  $\ddot{u}_{\text{ges}} = 1/18677$
- Potentialfreie Messung (Batteriebetrieb, Laptop)

### C. DATENAKQUISE (BEI IMPULSSPANNUNGSMESSUNGEN)

- Große Stichprobe  $n \geq 150$  Impulse (statistische Streuung der Durchschlagsspannung)
- 30 s Wartezeit nach jedem Gasdurchschlag
- geringster Durchschlagswert als Anfangsspannung
- höchster gehaltene Spannungsimpuls wird als 100% Durchschlagsspannung bewertet
- Annahme und Berechnung einer 3-parametrischen Weibull-Häufigkeitsverteilung der Durchschlagsspannung

$$F_{\text{Weibull}}(U) = 1 - e^{-\left(\frac{U-U_0}{U_{63}-U_0}\right)^\delta} \quad (1)$$

- Datenarchivierung in einer Datenbank

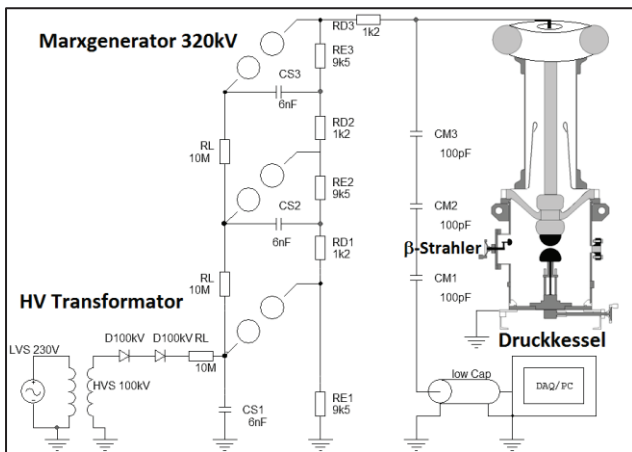


Abb. 1: 320 kV MWB Marxgenerator HS Coburg

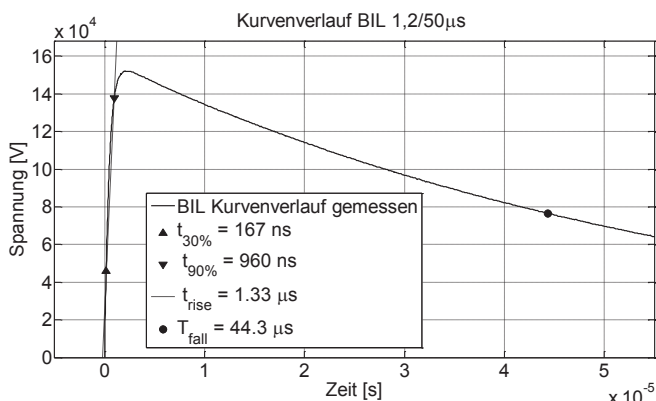


Abb. 2: BIL Kurvenverlauf 1,2/50  $\mu\text{s}$  (1,33  $\mu\text{s}$ /44,3  $\mu\text{s}$ )

Ein diskreter Wert für die Durchschlagsspannung existiert nicht, dieser unterliegt einer Häufigkeitsverteilung. Besonders bei Impulsbelastungen kann nur die Aussage über Durchschlag und kein Durchschlag getroffen werden. Hierbei spielt die Höhe der anliegenden Spannung und die Häufigkeit der Impulse eine Rolle (statistische Streuung). Mit einer großen Stichprobe von Spannungsimpulsen kann eine Verteilung zwischen der Halte- und der Durchschlagsspannung beobachtet werden.

### D. ERMITTLUNG DER DURCHSCHLAGSSPANNUNG

In der Hochspannungstechnik berücksichtigt man die Durchschlagsspannungsverteilung nach Weibull [4] Gl. (1). Zwischen der Haltespannung und der Durchschlagsspannung kann so ein kontinuierlicher Verlauf ermittelt werden.

Abbildung 3 stellt exemplarisch eine solche Spannungsverteilung dar (Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Spannung). Die Ermittlung der drei Weibullparameter erfolgte aus der Abschätzung der Halte- und Durchschlagsspannung und der 63%igen Durchschlagshäufigkeit. Für jeden Messpunkt ( $p$ - $d$ ) wurde eine solche Verteilung erstellt. D.h. bei einer gegebenen Elektrodengeometrie mit definiertem Gasdruck  $p$  und Schlagweite  $d$  (z.B.  $r_{\text{Kugel}} = 9,5 \text{ mm}$ ,  $p = 0,7 \text{ MPa}$ ,  $d = 10 \text{ mm}$ ) wurde die Höhe der Spannungsimpulse bis zum Einsetzen von Gasdurchschlägen gesteigert, danach wurde die Spannungshöhe verringert und erneut bis zu weiteren Gasdurchschlägen gesteigert. Nach einem Durchschlag wurde eine Wartezeit von 30s eingehalten. Diese Prozedur wurde mehrfach wiederholt, bis eine ausreichend große Stichprobe erzielt wurde. Jeder Einzelimpuls wurde oszilloskopiert, ausgewertet und gespeichert. So konnte eine zuverlässige Verteilung zwischen Halte- und Durchschlagsspannung ermittelt werden. Meistens wurden die Messung bei einer Anzahl von  $X > 150$  gehaltenen Spannungsimpulsen und einer Anzahl von  $Z < 50$  Gasdurchschlägen beendet.

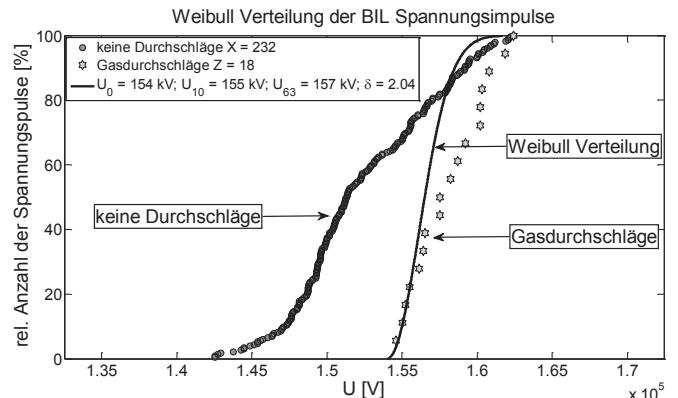


Abb. 3: Verteilung der Spannungswerte der Durchschläge, der gehaltenen Impulse und der daraus errechneten Weibullverteilung

## III. GASDURCHSCHLAG

Gase sind im Normalzustand Isolatoren. Unter Normalbedingungen befinden sich nur wenige freie Ladungsträger im Gas. Für eine selbstständige Ladungsträgervermehrung (Stoßionisation) im Gas muss die nötige kinetische Energie von einem freien Ladungsträger (vorwiegend Elektronen) aus dem äußeren elektrischen Feld für einen ionisierenden Stoß aufgenommen werden. Sobald die Zündbedingung nach Townsend bzw. Reather erfüllt ist, setzt ein Gasdurchschlag ein ( $e^k = e^{13,8 \dots 18} = 10^6 \dots 10^8$  freie

Ladungsträger, Ionisierungsbeiwert  $k$ , [1, 2]). Bei Hochdruckentladungen geht eine anfängliche Townsend-Generationslawine ausschließlich in die Kanalentladung (Streamer) über. Streamer verzerrten durch ihre hohe Raumladungsdichte das äußere elektrische Feld. Dieser felderschwache Bereich wirkt sich negativ auf das Isoliervermögen des Gases aus. Der Streamer ist im Hochdruckbereich und bei Blitzstoßspannungen hauptsächlich für den Gasdurchschlag verantwortlich ([1, 2]). Der Ionisierungskoeffizient  $\alpha$  gibt die Ionisierungen pro Weglänge an – die Gesamtanzahl der Ionisierungen pro Ladungsträger entspricht dem Ionisationsbeiwert  $k$ . Mit der Messung der Durchschlagspannung als globales Ereignis ist nur die Bestimmung des effektiven Ionisationskoeffizienten  $\bar{\alpha}$  (Differenz aus Ionisierungskoeffizient  $\alpha$  und Anlagerungskoeffizient  $\eta_{AN}$ ) möglich.

$$\int_0^{x_k} \alpha - \eta_{AN} dx = \int_0^{x_k} \bar{\alpha} dx = k \quad (2)$$

#### A. HOMOGENFELD

Nach Friedrich Paschen ist die Durchschlagspannung  $U_d$  nach Gl. (3) eine Funktion aus dem Produkt von Druck  $p$  und Schlagweite  $d$  mit den spezifischen Gasparametern ( $A, B$ ) im homogenen elektrischen Feld.

$$U_{homogen}(pd) = \frac{B \cdot pd}{\ln\left(\frac{A \cdot pd}{k}\right)} \quad (3)$$

Das Paschengesetz besitzt nur Gültigkeit für das raumladungsfreie, homogene elektrische Feld. Praktisch können homogene Felder nur schwer erzeugt werden. Mit großen Kugelradien und kleinen Schlagweiten erreicht man nahezu homogene Felder („quasihomogen“). Deshalb wurden die Messungen im quasihomogenen elektrischen Feld unternommen. Hierbei lag das Verhältnis von mittlerer zur maximalen elektrischen Feldstärke bei  $\eta_{Geo} > 93\%$  (Ausnutzungsfaktor nach Schwaiger Gl. (4),  $r_{Kugel} = 75$  mm,  $d = 1,5 \dots 15$  mm).

$$\eta_{Geo} = \frac{\bar{E}}{\hat{E}} = \frac{U}{d \cdot \hat{E}} \quad (4)$$

Die Berechnung des Ausnutzungsfaktors kann über Tabellenwerten für standardisierte Anordnungen ermittelt werden. Bei dem verwendeten Druckgefäß ist der Schutzbereich der Funkenstrecke nicht gewährleistet, deshalb wurden alle Feldverläufe simuliert (FEM). Aus der FEM-Simulation wurde der Ausnutzungsfaktor bestimmt (Abb.5).

#### B. INHOMOGENFELD

Für inhomogene Feldanordnungen kann kein geschlossener mathematischer Ausdruck, wie das Paschengesetz, formuliert werden. Nur die Integration entlang der elektrischen Feldstärke nach Gl. (2) ist hier korrekt. Die Berechnung der erzeugten Ladungsträger  $N_{krit}$  kann nach Gl. 5 und über den Ionisationsbeiwert  $k$  erfolgen. Mit der Näherung nach A. Schwaiger Gl. (6) schlägt eine Elektrodenanordnung durch, sobald die Anfangsfeldstärke  $E_a$  überschritten ist. Die Anfangsfeldstärke wird dabei wesentlich durch den Kugelradius  $r_K$  bestimmt. Mit kleinerem Radius steigt die Anfangsfeldstärke an. Veranschaulicht mit dem Volumen-Vergrößerungsgesetz, sinkt die Wahrscheinlichkeit einer

Gasentladung mit kleiner werdenden Volumen. Wenn eine Abhängigkeit zwischen Anfangsfeldstärke und Teilchenanzahl besteht, müsste eine Druckerhöhung (höhere Teilchenzahl) einen Einfluss auf die Anfangsfeldstärke haben. Deshalb wurde nach dieser These der Einfluss des Druckes auf die Anfangsfeldstärke untersucht.

$$e^{\int_0^{x_k} \bar{\alpha} dx} = e^{A \cdot p \int_0^{x_k} e^{-\left(\frac{B}{E} p\right)} dx} = e^k = N_{krit} \quad (5)$$

$$U_{inhomogen} = \eta_{Geo} \cdot E_a \cdot d \quad (6)$$

Für die Messungen im schwach inhomogenen elektrischen Feld ( $\eta > 0,2$ ; keine Vorentladungen,  $r_{Kugel} = 9,5$  mm) wurde eine asymmetrische Kugel-Platte-Anordnung verwendet. In Abbildung 4 ist anhand der hohen Äquipotentialliniendichte die hohe Feldstärke im Kugelbereich ersichtlich. Mit dieser Anordnung wurden auch Polaritätseffekte der Gasentladung untersucht. Abb. 5 zeigt sowohl den Ausnutzungsfaktor für die quasihomogene als auch für die schwach inhomogene Feldanordnung ( $r_{Kugel} = \{75; 9,5\}$  mm).

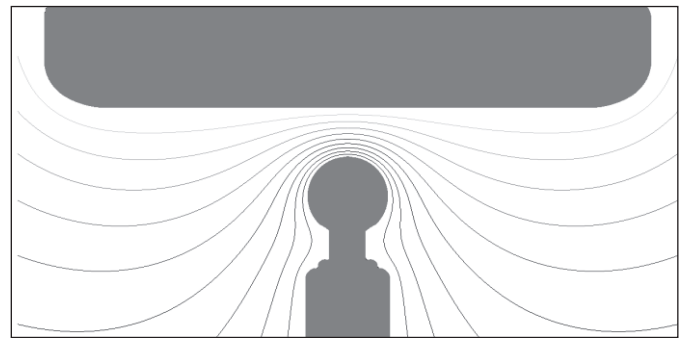


Abb. 4: Kugel-Platte-Anordnung im Prüfkessel  
 $r_{Kugel} = 9,5$  mm,  $r_{Platte} \approx 150$  mm,  $r_{Rand} = 40$  mm

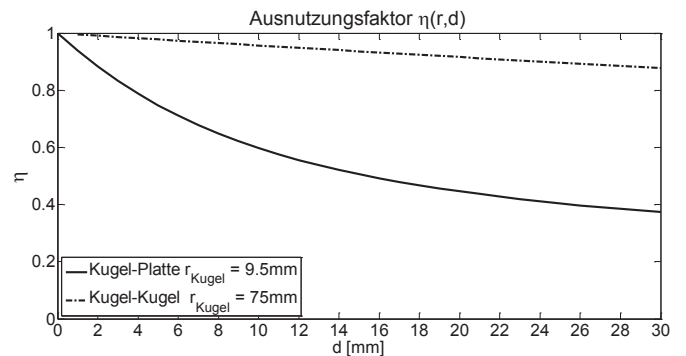


Abb. 5: Ausnutzungsfaktor Kugel-Kugel ( $r = 75$  mm) und Kugel-Platte-Anordnung ( $r = 9,5$  mm)

#### IV. EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ELEKTRISCHE FESTIGKEIT

##### A. MANGEL AN STARTELEKTRONEN

Die Erfüllung der Zündbedingung einer Gasentladung ist an die Ladungsträgervermehrung gebunden. Ohne ein freies Elektron (Startelektron) findet keine Stoßionisation und Ladungsträgervermehrung statt. Die Zeit bis zur Entladung  $t_d$  ist die Summe aus der Zeit bis zum Erreichen der Ansprechspannung  $t_0$ , statistischer Zündverzugszeit  $t_s$ , Kanalaufbauzeit  $t_A$  und Funkenaufbauzeit  $t_f$  (nach [1]). Deshalb kommt es bei Impulsspannungen mit kurzen Stirnzeiten vor, dass nicht immer eine Entladung einsetzt, obwohl die Zündbedingung erfüllt wäre.

Ohne Startelektron setzt ein wesentlich größerer statistischer Zündverzug ein (statistical time lag). Bei längeren Zeitkonstanten (SIL, AC oder DC) steigt die Auftretswahrscheinlichkeit eines Startelektrons und der Zündverzug verringert sich, oder ist praktisch nicht messbar (Spannungs-Zeit-Flächen-Gesetz [1]). Bei den hier durchgeführten Messungen im druckgeprüften Stahlgefäß zeigte sich besonders im Bereich der kurzzeitigen BIL-Impulse eine starke Streuung der Durchschlagsspannungen, die auf eine sehr geringe Anzahl von Startelektronen im Prüfgefäß schließen ließ. Dieses Phänomen der statistischen Verzugszeit ist in [15] beschrieben. Mit der direkten Bestrahlung eines im Prüfkessel befindlichen  $\beta$ -Strahlers war kaum eine Streuung der Durchschlagsspannungswerte feststellbar (siehe folgenden Abschnitt und Abb. 1 Position  $\beta$ -Strahler).

B. BESTRAHLUNG, VORIONISATION

Bei unseren Messungen war es notwendig die Anfangsspannung entsprechend der Weibullverteilung zu bestimmen. Ein Zündverzug durch Startelektronenmangel erschwert die Bestimmung der Anfangsspannung, somit werden ebenfalls die Paschen-Parameter fehlerbehaftet bestimmt. Die Anfangsspannung würde tendenziell zu hoch gemessen werden. Deshalb wurden Messungen bei  $\beta$ -Bestrahlung (Sr90 Q = 1,8 MBq, S = 546 keV) unternommen. Bei der 1,2/50  $\mu$ s Blitzstoßspannung stehen dann zum Zeitraum der Scheitelspannung (-3%,  $\Delta t_{3\%} = 3,8 \mu$ s) etwa 7 Startelektronen für die Stoßionisation bereit ( $V_{Gas} \approx 1,5 \text{ cm}^3$ ).

Die Bestrahlung der Funkenstrecke war im unteren Druckbereich  $p < 0.8 \text{ MPa}$  notwendig (Startelektronenmangel bei kleinen Abständen und niedrigen Spannungen). Bei Feldstärken größer 250 kV/cm und „technischer“ Oberfläche  $R_{max} = 10 \mu\text{m}$  setzt eine Feldemission ein, welche den Startelektronenmangel kompensiert. Der  $\beta$ -Strahler befand sich im Inneren des Prüfkessels mit einem Abstand von ca. 25cm zu den Elektroden. Die Bestrahlungsrichtung konnte über ein äußeres Getriebe eingestellt werden.

C. OBERFLÄCHENRAUIGKEIT

Mikroskopisch betrachtet stellen Rauigkeiten auf der Oberfläche Spitzen und Krater dar. An diesen Spitzen treten lokale Feldstärkeüberhöhungen und eine erhöhte Ionisierung auf. Des Weiteren können Elektronen leichter aus der rauen Oberfläche austreten (Flächeneffekt, evtl. anhaftende Partikel [2]). Dieser Emissionsstrom ist von der äußeren Feldstärke abhängig. Mit Erhöhung der Feldstärke steigt der Emissionsstrom exponentiell an. Teilweise bilden sich Raumladungen, welche das elektrische Feld verzerren. Generell wird die elektrische Festigkeit vermindert.

Die schwach inhomogene- und quasihomogene Elektrodenanordnung wurde mit unterschiedlichen Rauigkeiten ausgeführt um die Rückwirkung der Oberflächenrauigkeit auf die elektrische Festigkeit zu untersuchen (siehe Abb. 6 und 7).

Oberflächenrauigkeitsmessgerät der Klasse 1:

- Technische Oberfläche  
 $R_a = 0,2 \dots 0,5 \mu\text{m}$ ,  $R_{max} = 0,3 \dots 0,8 \mu\text{m}$
- Technische Oberfläche  
 $R_a = 1,8 \dots 2,8 \mu\text{m}$ ,  $R_{max} = 3,2 \dots 4,8 \mu\text{m}$
- Raue „gestörte“ Oberfläche  
 $R_a = 18 \dots 24 \mu\text{m}$ ,  $R_{max} = 30 \dots 40 \mu\text{m}$

A. Quasihomogenes Feld

Hinweise zu den Ergebnissen

- Messergebnisse aus der Blitzstoßspannungsmessung
- Positive Polarität (im Homogenfeld sind die Durchschlagsspannungen beider Polaritäten nahezu identisch)
- Ausnutzungsfaktor  $\eta_{Geo} > 93\%$
- Balken geben das 95% Konfidenzintervall der Durchschlagsspannungsverteilung nach Weibull an
- Güteklasse 5.0 (alle Gase)

Mit Hilfe der Paschen-Darstellung,  $U_d$  über  $pd$  ist es möglich, die Paschen-Parameter von Luft und  $N_2$  indirekt zu bestimmen. Abbildung 6 zeigt die Durchschlagsspannung von Luft,  $N_2$  und  $SF_6$  über dem Produkt von  $pd$ . Die Messpunkte der Durchschlagsspannungen wurden im Diagramm mit einer Paschen-Kurve ergänzt. Die Paschen-Parameter wurden zuvor abgeschätzt und iterativ an den Kurvenverlauf angepasst. Bei  $SF_6$  ist keine Berechnung der Paschen-Parameter und Angabe der Paschen-Kurve aufgrund der hohen Elektroaffinität (Elektronenanlagerung) möglich, deshalb ist der Kurvenverlauf von  $SF_6$  interpoliert.

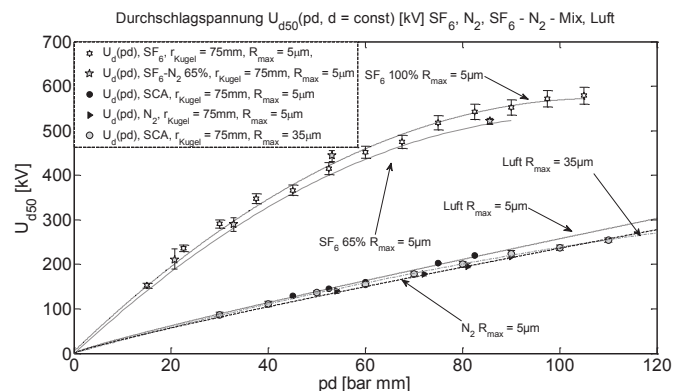


Abb. 6: Durchschlagsspannung  $U_{d50}$  von Luft ( $R_{max} = 5 \dots 35 \mu\text{m}$ ),  $N_2$ ,  $SF_6$ - $N_2$ -65%, und  $SF_6$ , in Abhängigkeit von  $pd$ , BIL Prüfung, im Quasihomogenfeld,  $\eta > 93\%$

Abbildung 7 zeigt die berechnete elektrische Durchschlagfeldstärke  $E_d(p)$  in Abhängigkeit des Drucks. Die elektrische Festigkeit, die mit dem Schwaiger-Faktor (Ausnutzungsfaktor Gl. 4) korrigiert und aus den Durchschlagsspannungen von Stickstoff,  $SF_6$  und synthetischer Luft (SCA, Synthetic Compressed Air) berechnet wurde.

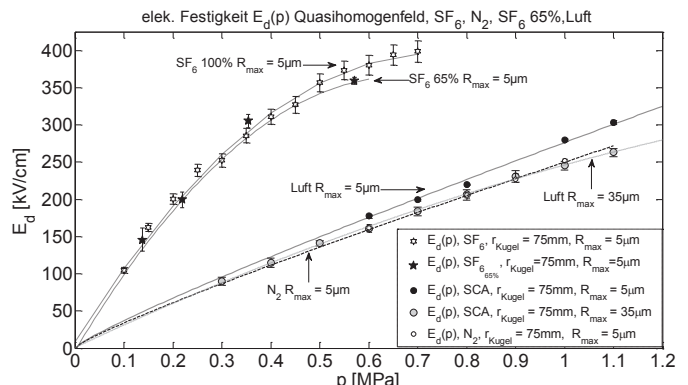


Abb. 7: Durchschlagfeldstärke  $E_d$  von Luft ( $R_{max} = 5 \dots 35 \mu\text{m}$ ),  $N_2$ ,  $SF_6$ - $N_2$ -65%, und  $SF_6$  in Abhängigkeit von  $p$ , BIL Prüfung, im Quasihomogenfeld,  $\eta > 93\%$

Die auf den Druck bezogene elektrische Einsatzfeldstärke ( $E/p$ ) ist in Abbildung 8 dargestellt (Normierung auf  $E/p$  von  $SF_6$ ). Es wird deutlich, dass sich die bezogene elektrische Festigkeit  $E/p$  mit steigendem Druck reduziert. D.h. das Isoliervermögen eines Gases steigt nicht linear mit dem Gasdruck an. Bemerkenswert ist, dass die Abnahme von  $E/p$  von  $SF_6$  stärker ist als die von Luft und Stickstoff. Dies liegt daran da der effektive Ionisierungskoeffizient  $\bar{\alpha}$  wesentlich stärker mit  $E/p$  zunimmt als beispielsweise bei Luft [1].

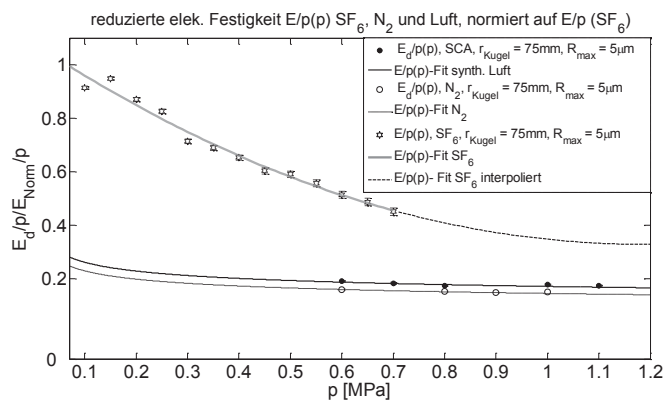


Abb. 8: reduzierte elektrische Festigkeit  $E/p$  von  $SF_6$ ,  $N_2$  und Luft, normiert auf  $E/p(SF_6)$

Abbildung 9 zeigt die elektrische Festigkeit der Gase Stickstoff und  $SF_6$  in Bezug auf die elektrische Festigkeit von synth. Luft (Quotient zwischen  $E_{SF_6}/E_{SCA}$  bzw.  $E_{N_2}/E_{SCA}$ ). Es zeigt sich, dass  $SF_6$  bei einem Druck von 0,1 MPa etwa das dreifache Isoliervermögen von Luft besitzt. Bei einem Druck von 0,7 MPa sinkt dieses Verhältnis auf etwa den Faktor 2. Weiterhin lässt sich aus diesem Diagramm entnehmen, dass Stickstoff nur etwa 90% des Luftisoliervermögens besitzt. Stickstoff hat keine Elektronenaffinität (keine Anlagerung freier Elektronen).

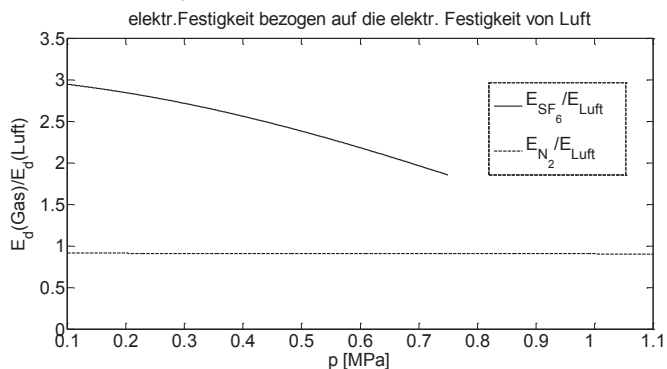


Abb. 9: elektrische Festigkeit von  $SF_6$  und  $N_2$  in Bezug zur elektrischen Festigkeit von Luft

## B. Schwach inhomogenes Feld

Hinweise zu den Ergebnissen:

- Messergebnisse aus Blitzstoßspannungsmessung
- negative Polarität (hier stets geringere Durchschlagsspannung)
- $\beta$ -Bestrahlung Sr90 ( $Q = 1,8$  MBq,  $S = 546$  keV)
- Kugelradius  $r_{Kugel} = 9,5$  mm,  $\eta_{Geo} = \{90...30\}\%$
- Balken geben das 95% Konfidenzintervall der Durchschlagsspannungsverteilung nach Weibull an
- **Nur synthetische Luft** (Synthetic Compressed Air)

Abbildung 10 zeigt die Durchschlagsspannung der schwach inhomogenen Kugel-Platte-Anordnung über der Schlagweite mit unterschiedlichen Gasdrücken als Kurvenschar an.

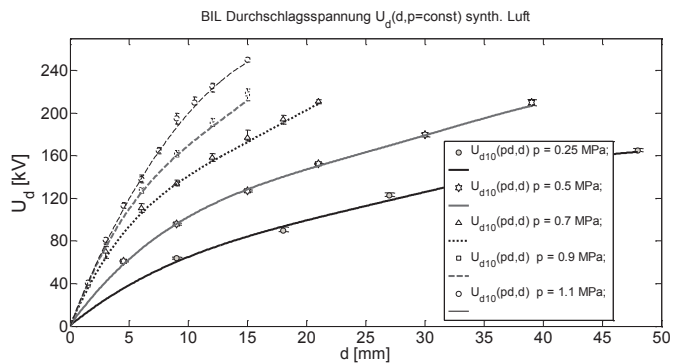


Abb. 10: Durchschlagsspannung  $U_{d50}(d, p=const.)$  der schwach inhomogenen Kugel-Platte-Anordnung

Abbildung 11 zeigt die um den Schwaiger-Faktor korrigierte (Ausnutzungsfaktor Gl. 4) elektrische „Anfangsfeldstärke“ in Abhängigkeit des Drucks. Gegeben sind zwei Kurven aus Abbildung 10 mit der Schlagweite  $d = 4,5$  mm und  $d = 15$  mm. Es zeigt sich, dass die Anfangsfeldstärke  $E_a$  praktisch unabhängig von der Schlagweite  $d$  ist. Die nichtlineare Abhängigkeit der Anfangsfeldstärke  $E_a$  vom Druck  $p$  ist aus den Messungen im quasihomogenen elektrischen Feld bekannt (siehe Abb. 7).

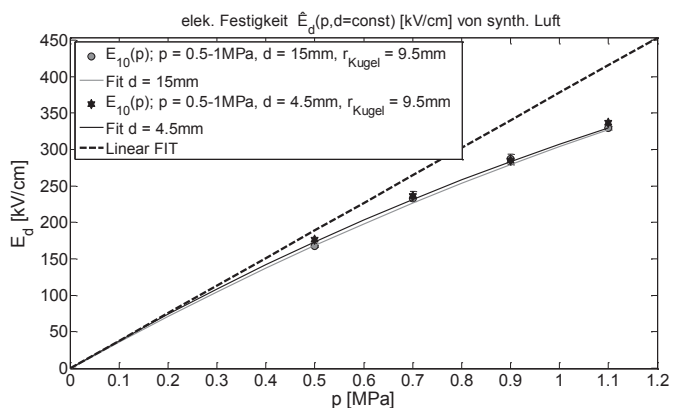


Abb. 11: Durchschlagsfeldstärke  $E_d$  der inhomogenen Anordnung  $E(p)$   $r=9,5$  mm,  $d = 4,5$  mm und 15 mm

Abbildung 12 zeigt die Kurvenschar der Durchschlagsfeldstärke  $E_d$  (mit Grenzbalken als 95% Konfidenzintervall) über der Schlagweite  $d$ . In dieser Darstellung wird auch sichtbar, dass die Anfangsfeldstärke  $E_a$  nur gering mit der Schlagweite  $d$  sinkt. Für das Absinken könnte das Volumen-Vergrößerungsgesetz verantwortlich sein.

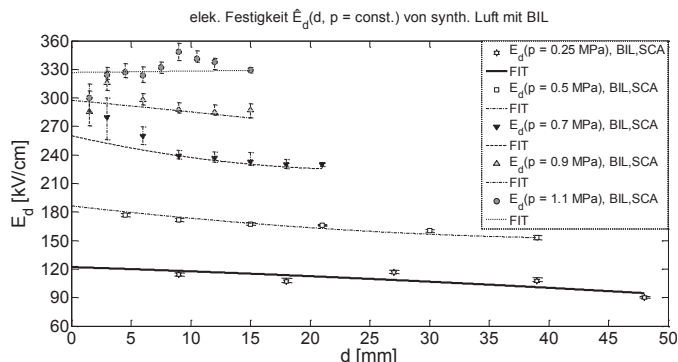


Abb. 12: elektrische Festigkeit von Luft  $E_d(d)$  der inhomogenen Anordnung  $r_{Kugel} 9,5$  mm

Mit den Messergebnissen im schwach inhomogenen elektrischen Feld konnte bestätigt werden, dass die Näherung nach A. Schwaiger siehe Gl. (6) eine gewisse Gültigkeit bis zu einem Gasdruck von  $p = 1,1$  MPa besitzt. Jedoch muss die Anfangsfeldstärke  $E_a$  der Feldgeometrie bekannt sein.

Ohne Kenntnis der Anfangsfeldstärke kann mit Hilfe von Gl. (5), der Auswertung des elektrischen Feldstärkeverlaufs (FEM Simulation) und der Paschen-Parameter die Zündbedingung numerisch berechnet werden. Eine Berechnung der Durchschlagsspannung der verwendeten Feldgeometrie war so im Voraus durch numerische Lösung der Zündbedingung möglich. Dies stützt eine Annahme, wonach die ermittelten Paschen-Parameter (aus den Durchschlagsmessungen im quasihomogenen elektrischen Feld) auch für schwach inhomogene elektrische Felder bis zu einem Gasdruck von  $p = 1,1$  MPa Gültigkeit besitzen.

## VI. DISKUSSION

Bei der Untersuchung der elektrischen Festigkeit von alternativen Isoliergasen war auffällig, dass  $SF_6$  stets eine höhere elektrische Festigkeit als Luft und Stickstoff im untersuchten Druckbereich besitzt. Jedoch verringert sich das Verhältnis der elektrischen Festigkeit von  $SF_6$  gegenüber der elektrischen Festigkeit von Luft bei höherem Druck. Bei atmosphärischem Druck isoliert  $SF_6$  dreimal besser als Luft. Bei einem Druck von 0,7 MPa isoliert  $SF_6$  etwa noch doppelt so gut wie Luft.

Ein Szenario zur  $SF_6$ -freien Isolation für schwach inhomogene Anordnungen wäre die Erhöhung des Gasdrucks auf 1,1 MPa und Vergrößerung der Schlagweite um 30%. Dies würde einer Isolierfähigkeit von 0,7 MPa  $SF_6$  entsprechen. Bei Luft oder Stickstoff ist dieser Druck von  $p = 1,1$  MPa problemlos möglich, da eine Verflüssigung bei den gewöhnlichen Temperaturen der Erde  $\vartheta > -65^\circ C$  nicht auftritt. Die Anwendung von reinem  $SF_6$  wird teilweise durch den Taupunkt eingeschränkt (Druck, Tieftemperaturen,  $N_2$ - $SF_6$ -Gemisch). Der benötigte höhere Druck muss bei der Konstruktion unter Beachtung der Druckbehältervorschrift mechanisch berücksichtigt werden.

Als weiteres positives Ergebnis dieser Arbeit lässt sich festhalten, dass sich bei Luft und Stickstoff ein nahezu lineares und berechenbares Verhalten der elektrischen Festigkeit (Paschen-Kurve) gezeigt hat. Die aus den Messergebnissen ermittelten Paschen-Parameter und Paschen-Kurven zeigen über einen weiten  $pd$ -Bereich Gültigkeit mit den Messpunkten. Mit der Extrapolation der Ergebnisse könnte Luft ( $p = 1,5$  MPa) eine gleichwertige elektrische Festigkeit wie  $SF_6$  bei  $p = 0,7$  MPa besitzen. Um diese These zu verifizieren, sind weitere Messungen in diesem höheren Druckbereich geplant (quasihomogen, schwach bis stark inhomogen Feld).

Aus den empirischen Messungen im schwach inhomogenen elektrischen Feld ist auffällig, dass die Anfangsfeldstärke  $E_a$  nahezu unabhängig von der Schlagweite ist. Die elektrische Festigkeit der untersuchten Gase im quasihomogenen und schwach inhomogenen elektrischen Feld ist miteinander vergleichbar. D.h. die Näherung nach Schwaiger (6) zur Berechnung der Durchschlagsspannung einer schwach inhomogenen elektrischen Anordnung ist für einfache Geometrien im untersuchten Bereich des Ausnutzungsfaktors ( $\eta = 0,9 \dots 0,4$ ) nach unseren Messergebnissen ebenso möglich, wie eine numerische Berechnung für beliebige Geometrien mit

Hilfe der Integration entlang (Gl. 2) des Feldstärkeverlaufs unter Zuhilfenahme der Paschen-Parameter.

Das Verhalten der elektrischen Festigkeit im Hochdruckbereich  $p = 0,5 \dots 1,5$  MPa mit stark inhomogenen elektrischen Feldern wurde in dieser vorliegenden Arbeit nicht behandelt. Weitere Messungen im stark inhomogenen Feld sind geplant und werden noch durchgeführt.

## VII. REFERENZEN

- [1] A. Kuchler, „Hochspannungstechnik Grundlagen-Technologie-Anwendung“ Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp. 137-259, 2009
- [2] M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl, „Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendungen,“, Springer Berlin Heidelberg New York, 1986
- [3] A. Schwaiger „Beitrag zur elektrischen Festigkeitslehre“ Springer Archiv für Elektrotechnik, XI. Band 1. Heft., 15.04.1922
- [4] W. Hauschild, W. Mosch, „Statistik für Elektrotechniker“ VEB Verlag Technik, Berlin 1984, Kap 2 – 3, S20-170,
- [5] D. Imamovic, M. Muhr, „Dielektrische Eigenschaften von Isoliergasen für HGÜ-Anwendungen“ Technische Universität Graz, 2011
- [6] D. Gautschi, F. Meyer, Y. Kieffel „Verwendung alternativer Gase für metallgekapselte Hochspannungsschaltanlagen“ Alstom GmbH, 2014
- [7] Yoshida Tadahiro „The Development and practical use of a new 24kV dry air insulated switchgear“, Mitsubishi, 1986
- [8] Y.Qiu, E. Kuffel „Dielectric strength of gas mixtures comprising“ IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol. PAS-102, No. 5, Mai 1983
- [9] A. M. Mahddy, H. I. Anis, S.A. Ward, “Electrode roughness effects on the breakdown of air-insulated apparatus”, IEEE Transactions on dielectric and electrical insulation, Vol. 5 No.4, Aug. 1998
- [10] N. Wiegart, L. Niemyer, F. Pinnekamp, W. Boeck, J. Kindesberger, R. Morrow, W. Zaengl, M. Zwicky, I. Gallimberti, S.A. Boggs, „Inhomogeneous field breakdown in GIS – the prediction of breakdown probabilities and voltages“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988
- [11] E. Finkelmann, „Der elektrische Durchschlag verschiedener Gase unter hohem Druck“, VDE Stuttgart Archiv für Elektrotechnik, S. 282-286, 1936
- [12] A. K. Vijh, „Electric strength and molecular properties of gaseous dielectrics“, IEEE, Transactions electric insulation, Vol. EI-12 No 4, August 1977
- [13] N. H. Malik, A. H. Qureshi, „A Review of electrical breakdown in mixtures of  $SF_6$  and other gases“, IEEE Transactions electrical insulation, Vol. EI-14 No 1, February 1979
- [14] P. Forster, V. Ramaswamy. ”Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.” Cambridge University Press, Cambridge und New York 2007, S. 212
- [15] B. Gänger, „Die elektrische Festigkeit verdichteter Gase I“ VDE Karlsruhe 34.Band Heft 2 S.633-652,1940