

1. Einführung in die Problematik

In Anlagen der elektrischen Energietechnik¹ wird vermehrt SF₆-Gas als Isolier- und Schaltmedium eingesetzt. Dazu zählen im wesentlichen Gasisolierte Schaltanlagen (GIS), Gasisolierte Leitungen (GIL), Gasisolierte Transformatoren (GIT) und SF₆-Hochspannungsleistungsschalter. Ungeachtet dessen, dass das SF₆-Gas nur in geschlossenen Volumina verwendet wird, sind kleine Lecks nicht auszuschliessen. Diese treten insbesondere mit erhöhtem Alter der Anlage zunehmend auf [1]. Die 2003 erschienene Norm 62271-203 der IEC (International Electrotechnical Commission) [2] regelt neu die maximal zugelassene Leckrate in Hochspannungsanlagen. Diese beträgt unabhängig des Drucks 0.5% pro Jahr. Damit soll die Emission dieses Gases in die Atmosphäre zu reduziert werden. Die Erfassung solch kleiner Leckagen ist allerdings anspruchsvoll und bis heute nicht zufriedenstellend gelöst. Normalerweise wird die Gasdichte oder der Gasdruck mittels Sensoren überwacht, welche ein zur Messgrösse proportionales Signal ausgeben oder bei Unterschreiten eines vorher festgelegten Warnpegels alarmieren. Da sich ein Leck auf diese Messgrössen auswirkt, sollte es möglich sein, dieses frühzeitig zu erkennen. Die Messsignale von Dichte- oder Drucksensoren weisen aber Fluktuationen auf, die den von der IEC vorgeschriebenen Maximalwert der Leckage um mehr als das Zehnfache übersteigen können [3].

Abbildung 1.1 zeigt einen gemessenen Dichteverlauf des Gases in der Schaltkammer eines SF₆-Tank-Leistungsschalters (blaue Kurve) sowie die Dichteabnahme entsprechend einer angenommenen Leckrate von 1.2% pro Jahr (rot). Die Messung erstreckt sich über 365 Tage, wobei nur jeweils die Tagesmittelwerte aufgezeichnet wurden. Es ist sichtbar, dass der Verlauf erhebliche Fluktuationen aufweist, sowohl von Tag zu Tag, als auch im Mittelwert über mehrere Monate. Da diese natürlichen Fluktuationen in der gleichen Grössenordnung liegen wie die von einem Gasleck verursachte Dichtereduktion, wird die Erkennung eines solchen Lecks nahezu verunmöglicht. Die in Abbildung 1.1 gemessene Kurve täuscht beispiels-

¹Mit „elektrischer Energietechnik“ ist hauptsächlich die Energieübertragung gemeint. Auch in der Energieverteilung wird SF₆ eingesetzt, der Fokus dieser Arbeit liegt aber im Bereich der Hochspannungstechnik und damit auf der Energieübertragungsebene.

1. Einführung in die Problematik

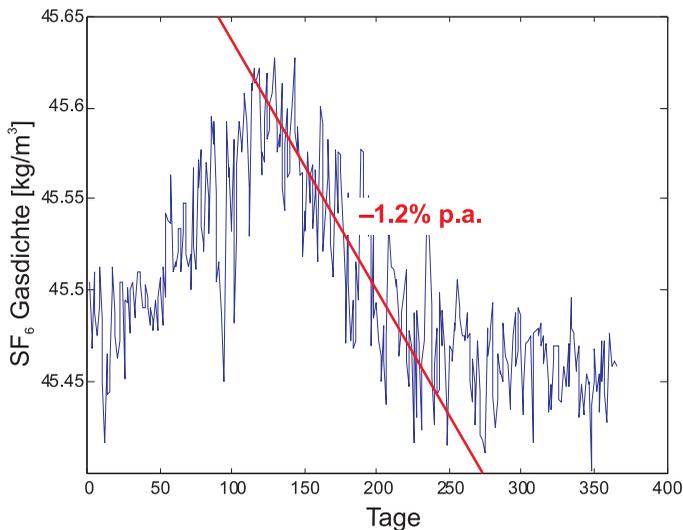


Abbildung 1.1.: Gasdichte in einem SF₆ -Leistungsschalter, gemessen über 365 Tage mit jeweils dem Tagesmittelwert (blau, [4]), sowie die Dichteänderung durch ein theoretisches Leck mit einer Leckrate von -1.2% pro Jahr (rot)

weise ein Leck von 1.2% pro Jahr im Bereich zwischen Tag 120 und 220 vor.

Um trotz dieser Fluktuationen kleine Lecks von 0.5% erkennen zu können, sind Algorithmen erforderlich, welche neben der Leckerkennung auch die genaue Bestimmung der jährlichen Leckrate ermöglichen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher zunächst die genaue Ursache für die beschriebenen Fluktuationen zu verstehen und mit ausreichender Genauigkeit zu quantifizieren. Des weitern ist eine Methode zu entwickeln, welche dem Betreiber solcher Apparate respektive Anlagen ermöglicht, aus dem stark verrauschten Messsignal (vergleiche Abbildung 1.1) auch geringste Leckraten (maximal 0.5%) zu interpretieren.

2. Stand des Wissens

Nach einer kurzen Einführung in Bedeutung und Einsatz des Isoliergases Schwefelhexafluorid SF₆ in der Hochspannungstechnik sowie in dessen physikalischen Eigenschaften, wird auf die Ursachen der Emissionen und die Limitierung der Leckrate eingegangen. Die heutigen Methoden zur Bestimmung der Leckrate werden kritisch auf deren Tauglichkeit untersucht und die Defizite benannt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit dem Wissensstand bezüglich verschiedener Methoden und Verfahren, welche der Quantifizierung von Druck- und Dichteveränderungen dienen.

2.1. SF₆ in der Hochspannungstechnik

2.1.1. Einsatzbereich von SF₆

Schwefelhexafluorid SF₆ wird in der Hochspannungstechnik hauptsächlich in Gasisolierten Schaltanlagen (GIS, Abbildung 2.1), Gasisolierten Leitungen (GIL), Gasisolierten Transformatoren (GIT), in gewissen Durchführungen als Isolationsmedium und in SF₆-Leistungsschaltern als Lichtbogenlöschmittel eingesetzt, wobei es je nach Anwendung leicht unterschiedliche Gründe für seinen Einsatz gibt.

Die älteste Anwendung von SF₆ in der Hochspannungstechnik stellen die Leistungsschalter dar. Das erste Patent, welches den Einsatz von SF₆ als Lichtbogenlöschmittel für elektrische Apparate vorschlägt, wurde 1938 von Vitaly Grosse (AEG) in Deutschland eingereicht [5]. 1956 entwickelte Westinghouse den ersten SF₆-Hochspannungs-Leistungsschalter, damals noch als Zweidruckschalter. Bereits ein Jahr später kam der SF₆-Eindruckschalter. Diese Eindruckschalter waren zunächst ausschliesslich als autopneumatische Schalter („Pufferschalter“) konstruiert, bis Mitte der achtziger-Jahre der Selbstblasschalter auf den Markt kam [6, 7, 8]. Diese stellen heute noch den Stand der Technik dar. Ältere Schaltertechnologien, bevor SF₆ als Lichtbogenlöschmittel eingesetzt wurde, das heisst Druckluftschalter, Ölschalter und ölarme Schalter, sind zwar noch immer im Einsatz, ihre Zahl nimmt aber kontinuierlich ab [8, 9].

Parallel zur Entwicklung der ersten SF₆-Leistungsschalter wurden auch GIS entwickelt. Diese stellen hinsichtlich erforderlichem Platzbedarf einen signifikanten Fortschritt gegenüber Luftisolierten Schaltanlagen (AIS, Air-Insulated Switchgear) dar. So reduziert sich der Flächenbedarf um einen Faktor 10. Dies wirkt sich positiv auf die Lebenszykluskosten aus, was insbesondere mit der laufenden Liberalisierung des Strommarkts an Bedeutung gewonnen hat [1]. In der Regel werden GIS in Europa in Gebäuden aufgestellt, was den zusätzlichen Nutzen höherer Akzeptanz in der Bevölkerung mit sich bringt.

Ein weiterer Vorteil von GIS ist die hohe Betriebssicherheit, insbesondere Erdbebensicherheit, die sich aus der vollständigen Kapselung der aktiven Komponenten und den kompakten Abmessungen ergibt. Des Weiteren sind das geringe Gewicht, die Umweltfreundlichkeit, der sichere Berührungsschutz, die Geräusch- und Wartungsarmut, das Wegfallen von Fremdschichtproblemen, die Ausführung der Geräte in Bausteintechnik und die Reduktion der Montagezeit durch weitgehende Vormontage und Prüfung [10] geschätzte Pluspunkte. Zusätzlich ergibt sich ein Vorteil aus der Platzersparnis: Soll eine luftisolierte Anlage erneuert werden, so kann

bei Aufrechterhaltung des Betriebs die neue GIS bereits aufgestellt und danach praktisch ohne Unterbruch direkt auf diese umgeschaltet werden. Dies ist bei Ersatz mit einer AIS aufgrund des grossen Flächenbedarfs oft nicht möglich [11].

Der Einsatzbereich von GIS in der Hochspannungstechnik erstreckt sich von 3-phasig gekapselten Anlagen ab 72 kV für Nennströme von 2000 A und Ausschaltströme von 40 kA bis zu 1-phasig gekapselten Anlagen für 1200 kV mit Nennströmen von 6000 A und Ausschaltströmen von 80 kA. Insbesondere in Asien besteht durch die grossen zu überbrückenden Distanzen und den permanent steigenden Bedarf an elektrischer Energie ein Trend zu immer höheren Spannungen bis aktuell 1200 kV.

Auch im Bereich der Energieübertragung erschliesst sich eine Anwendung für SF₆ als Isoliergas, wobei normalerweise eine Mischung mit Stickstoff gewählt wird. So werden heute Gasisolierte Leitungen (GIL) als Alternative zu Hochspannungskabeln oder Freileitungen diskutiert und auch bereits eingesetzt. Gerade in dicht bevölkerten Gegenden stossen Freileitungen auf Widerstand. Hier könnten kompakte und emissionsarme¹ GIL eine Lösung darstellen. Gegenüber Kabeln besteht der Vorteil, dass GIL

¹bezüglich Geräuschemission, elektrischer Feldstärke und Magnetfeldern



Abbildung 2.1.: 420 kV Gasisolierte Schaltanlage der EnBW Transportnetze AG in Metzingen, Deutschland (Mit freundlicher Genehmigung EnBW Transportnetze AG und ABB Schweiz AG)

mit der natürlichen Leistung betrieben werden können und folglich oft keine Blindleistungskompensation notwendig ist. Auch die thermische Grenze der Belastbarkeit liegt höher als bei Kabeln. Die elektrischen Verluste sind typischerweise kleiner als bei Kabeln oder Freileitungen [12, 13, 14]. Weltweit werden bereits einige Systeme eingesetzt. Auch in der Schweiz liegen die ersten Erfahrungen mit dieser Technologie vor: Auf dem Palexpo-Gelände in Genf ist seit 2001 eine 220-kV-GIL mit einer Länge von 420 m in Betrieb [15, 16].

Innerhalb der Energietechnik gibt es weitere Einsatzgebiete der gasisolierten Technik. So sind beispielsweise Durchführungen erhältlich, die intern SF_6 als Isolationsmedium enthalten. Gerade für Verbindungen von Freileitungen mit GIS kommen solche grob gesteuerten Gas-Freiluft-Durchführungen zum Einsatz. Eine in Europa eher ungewöhnliche Anwendung ist in der Transformatorentechnik zu beobachten: Wo aus Grundwasser- oder Personenschutzgründen Öltransformatoren nicht in Frage kommen, werden teilweise gasisierte Transformatoren eingesetzt. In Japan sind SF_6 -Transformatoren bereits weit verbreitet. Sie werden in dicht besiedelten Regionen direkt unter oder neben Geschäfts- und Wohngebäuden eingesetzt, wo aus Sicherheitsgründen keine Öltransformatoren eingesetzt werden können [17].

Auch in der Mittelspannungstechnik wird teilweise SF_6 eingesetzt. Die Mengen sind normalerweise deutlich geringer. Während ein Hochspannungsfeld über 100 kg SF_6 enthält, sind es bei Mittelspannungsfeldern in der Regel weniger als 10 kg SF_6 [18]. Zudem besteht das Bestreben, SF_6 -Mittelspannungsschalter zukünftig durch Vakuumschalter zu ersetzen [19]. Daher liegt der Fokus der vorliegenden Arbeit auf dem SF_6 -Einsatz in der Hochspannungstechnik.

2.1.2. Physikalische Eigenschaften von SF_6

SF_6 findet in der Hochspannungstechnik sowohl als Isoliergas als auch Lichtbogenlöschmedium Verwendung. Dazu ist dieses Gas vor allem aus zwei Gründen besonders gut geeignet: Erstens ist die Wärmeleitfähigkeit bei hohen Temperaturen ($T \gg 2000$ K) hoch², was eine rasche Abkühlung auf unter 3000 K ermöglicht. Und zweitens weisen SF_6 und die Zersetzungsprodukte eine hohe Elektronegativität auf, was die Rekombination der freien Elektronen beschleunigt [20]. Bei Normdruck und Schlagweiten im Bereich von einigen Zentimetern hat SF_6 eine theoretische Durchschlagsfestigkeit von ungefähr 88 kV/cm, verglichen mit 24 kV/cm bei

²Ganz im Gegensatz zur Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur, die nur ungefähr halb so gross ist im Vergleich zu jener von Luft.

Luft. Diese beiden Eigenschaften ermöglichen eine hohe Schaltleistung durch die schnelle Wiederverfestigung des Gases und damit die Fähigkeit, Wiederzündungen, bewirkt durch die Wiederkehrspannung (Transient Recovery Voltage, TRV), zu verhindern. Da SF_6 keinen Kohlenstoff beinhaltet, besteht auch keine Gefahr von elektrisch leitfähigen Ablagerungen auf Düsen und Isolatoren.

Um eine hohe Durchschlagsfestigkeit zu erreichen, wird SF_6 in der Regel bei einem Betriebsdruck von 300 kPa bis 700 kPa (absolut) eingesetzt. Die Beziehung zwischen Durchschlagspannung und dem Produkt aus Gasdruck mal Schlagweite ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Diese Beziehung ist als Paschen-Gesetz bekannt [21]. Mit Ausnahme von sehr geringen Druckwerten steigt die Durchschlagsfestigkeit mit zunehmendem Gasdruck. Zusätzlich steigt im Leistungsschalter die Fähigkeit, Lichtbögen ausreichend schnell zu löschen, da mit erhöhtem Druck auch die Gasdichte steigt. Aus diesen Gründen ist es unerlässlich, Gaslecks früh zu erkennen. Im einfachsten Fall handelt es sich um Druckwächter, die bei Unterschreiten eines bestimmten Gasdrucks den Antrieb des Leistungsschalters für den Einschaltvorgang sperren.

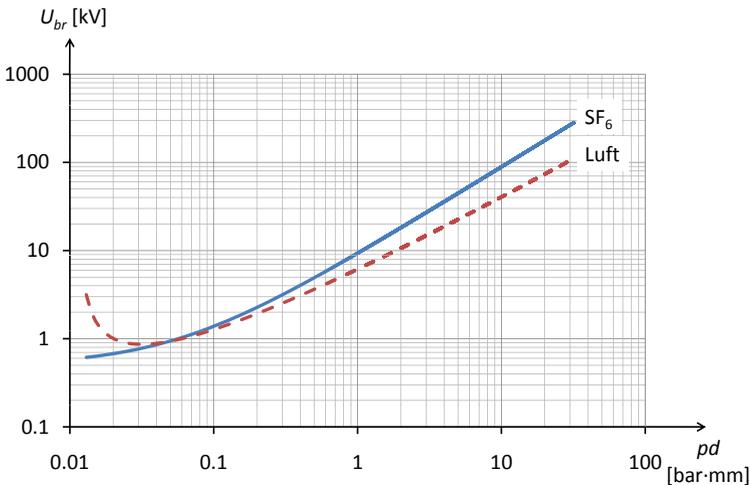


Abbildung 2.2.: Paschenkurve für SF_6 (blau, durchgezogene Linie) und Luft (rot, gestrichelt): Durchschlagspannung U_{br} in Abhängigkeit des Produkts aus Gasdruck p und Elektrodenabstand d [21]. Die Achsen sind typischerweise in [bar·mm] und [kV] skaliert, was hier übernommen wurde, auch wenn es streng genommen nicht gemäss SI-Einheitensystem ist.