



Brüssel, den 30.9.2020
C(2020) 6635 final

BERICHT DER KOMMISSION

**zur Bewertung der Verfügbarkeit von Alternativen zu fluorierten Treibhausgasen in
Schaltanlagen und damit zusammenhängenden Geräten, einschließlich sekundärer
Mittelspannungsschaltanlagen**

1. Einleitung

Gemäß Artikel 21 Absatz 4 der Verordnung (EU) Nr. 517/2014¹ über fluorierte Treibhausgase (im Folgenden die „Verordnung“) muss die Kommission bewerten, ob es kostenwirksame, technisch realisierbare, energieeffiziente und zuverlässige Alternativen gibt, mit denen fluorierte Treibhausgase (F-Gase) in neuen sekundären Mittelspannungsschaltanlagen ersetzt werden können.

Dieser Anforderung aus der Verordnung wird mit dem vorliegenden Bericht entsprochen. Zusätzlich werden darin neue primäre Mittelspannungsschaltanlagen und Schaltanlagen mit höheren Spannungen sowie Generator-Leistungsschalter und andere Geräte im Zusammenhang mit Schaltanlagen berücksichtigt. Die Nachrüstung bestehender Schaltanlagen ist nicht Gegenstand des Berichts.

Das in diesem Bericht behandelte F-Gas ist Schwefelhexafluorid (SF₆), das in Schaltanlagen seit Jahrzehnten als Isoliermedium und Stromunterbrechungsmittel verwendet wird. Mit einem Treibhausgaspotenzial (global warming potential, GWP) von 22 800² ist SF₆ das stärkste bekannte Treibhausgas.

Der Bericht stützt sich auf technische Arbeiten, die im Auftrag der Kommission durchgeführt wurden, einschließlich umfassender Konsultationen mit Interessenträgern sowie Beratungen im Rahmen des Konsultationsforums³, das nach Artikel 23 der Verordnung eingerichtet wurde. Insbesondere ist darauf hinzuweisen, dass Informationen über Kosten und Marktentwicklungen auf Herstellerangaben beruhen.

2. Aktueller Stand bei den Alternativen zu SF₆ in verschiedenen Gerätearten

2.1. Verschiedene Arten von Geräten für Schaltanlagen

Schaltanlagen bestehen aus einer Kombination von Schaltern, Sicherungen oder Leistungsschaltern, die verschiedene Arten elektrischer Geräte steuern, schützen und isolieren, z. B. durch Vermeidung einer Stromüberlastung, die die Geräte zerstören würde. Es gibt viele verschiedene Arten von Schaltanlagen. In diesem Bericht werden verschiedene Arten anhand der folgenden Kriterien unterschieden:

- Spannungsebene,
- Stromnetzebene,
- Isoliermedium,
- Schaltgerätemechanismus.

¹ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.150.01.0195.01.DEU

² Die GWP-Werte sind den Anhängen I und II der Verordnung entnommen.

³ Zusammenkünfte des Konsultationsforums zu F-Gasen, das in Übereinstimmung mit Artikel 23 der F-Gas-Verordnung eingerichtet wurde: https://ec.europa.eu/clima/events/articles/0106_en. Der Link führt zu einem Informationspapier, in dem auf weitere Quellen verwiesen wird, die zur Feststellung der aktuellen Erkenntnisse herangezogen wurden.

Die Spannungsebenen: Nieder-, Mittel-, Hoch- und Höchstspannung

Bei den Spannungsebenen wird im Bericht den Normen der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC, 2003) gefolgt und zwischen den folgenden Spannungsebenen unterschieden:

Niederspannung (NS)	< 1 kV
Mittelspannung (MS)	1 kV – 52 kV
Hochspannung (HS)	> 52 kV und < 150 kV
Höchstspannung (HöS)	> 150 kV

Die Stromnetzebenen: Übertragung und Primär- und Sekundärverteilung

Geräte werden auch nach der Art des Stromnetzes klassifiziert, in dem sie verwendet werden, d. h. entweder in Stromübertragungsleitungen oder in Stromverteilungsleitungen.

Übertragung bezieht sich auf den Transport großer Mengen elektrischer Energie über weite Entfernungen von Kraftwerken zu Umspannwerken, während bei der Verteilung elektrische Energie von den Umspannwerken zum Verbraucher geliefert wird. Auf Verteilungsebene wird weiter zwischen Primär- und Sekundärverteilung unterschieden.

Bei der Primärverteilung befinden sich die Schaltanlagen an der Schnittstelle zum Übertragungsnetz. Im Allgemeinen liegen diese Schnittstellen im Innenbereich spezieller Umspannwerke, in denen Umgebungsbedingungen wie die Temperatur und die Exposition gegenüber Witterungsbedingungen wie Regen oder Schnee kontrolliert werden können.

Bei der Sekundärverteilung befinden sich die Schaltanlagen an der Schnittstelle zu niederen Spannungen und den Endabnehmern. Diese Verteiltransformatoren für Mittel-/Niederspannung sind in Verteilerschränken in der Nähe der Räumlichkeiten der Nutzer untergebracht. Der vorherrschende Typ von Schaltanlagen in öffentlichen Stromnetzen sind Ringkabelanlagen (ring main units, RMU), die als modulare, kompakte und abgedichtete Baugruppen der benötigten Schaltgeräte ausgeführt sind. Im Vergleich zur Primärverteilung bestehen mehrere zusätzliche Beschränkungen: Der für den Einbau verfügbare Raum ist in der Regel sehr begrenzt, Umgebungsbedingungen wie Temperatur oder Feuchte werden oftmals nicht reguliert und die Geräte sind unter Umständen im öffentlichen Raum installiert.

Es besteht eine Korrelation zwischen Netzebene und relevanten Spannungsebenen. Die Übertragung von Strom zu Umspannwerken (in der Regel über große Entfernungen) erfordert eine höhere Spannung als die Verteilung von Strom vom Umspannwerk an den Verbraucher. In Europa werden für die Verteilung in der Regel niedere und mittlere Spannungen verwendet, während für die Übertragung in der Regel Höchstspannung verwendet wird. Hochspannungsnetze können je nach Land sowohl für die Übertragung als auch für die Verteilung genutzt werden.

Spannungsebene	Verteilungsebene
Niederspannung (NS)	Sekundärverteilung
Mittelspannung (MS)	Sekundärverteilung Primärverteilung
Hochspannung (HS)	Primärverteilung Übertragung
Höchstspannung (HöS)	Übertragung

Das Isoliermedium: Luft, Gas, Feststoff oder Flüssigkeit

Das Isoliermedium in einer Schaltanlage kann Luft, Gas, ein Feststoff oder eine Flüssigkeit sein.

In gasisolierten Schaltanlagen (GIS) kommt in der Regel SF₆ zum Einsatz. Alternativ sind SF₆-freie GIS verfügbar, für die Gasgemische aus natürlichen Gasen wie technische Luft (Stickstoff und Sauerstoff) oder CO₂ verwendet werden. Um die Isolierfestigkeit zu erhöhen, werden dem Gas mitunter geringe Mengen synthetischer, fluorierter Stoffe (hauptsächlich Fluornitrile und Fluorketone) zugesetzt. Diese Gemische weisen eine deutlich geringere Klimawirksamkeit als SF₆ auf⁴.

In luftisolierten Schaltanlagen (air-insulated switchgear, AIS) wird Umgebungsluft als Isoliermedium eingesetzt. Bei Einsatz von Luft hat die Schaltanlage in der Regel relativ große Abmessungen, und die potenzielle Exposition elektrischer Teile gegenüber Umgebungsfaktoren wie Feuchte, Staub usw. kann problematischer sein. Diese Geräte werden daher hauptsächlich bei der Primärverteilung eingesetzt, bei der Umgebungsfaktoren leichter reguliert werden können und im Vergleich zur Sekundärverteilung weniger Platzbeschränkungen bestehen.

Seit einigen Jahren sind feststoffisolierte (solid insulated switchgear, SIS) und flüssigkeitsisolierte (liquid insulated switchgear, LIS) Lösungen für die Sekundärverteilung auf dem Markt erhältlich. Ihr Marktanteil in Europa liegt aber noch im unteren einstelligen Prozentbereich, was teilweise auf die etwas höheren Investitionskosten im Vergleich zu SF₆-Produkten zurückzuführen ist. In bestimmten Regionen einiger Mitgliedstaaten ist der Marktanteil allerdings relativ hoch. Der Grund dafür ist die Zusammenarbeit mit den Endnutzern, die diese Technologie eingeführt haben. SIS-Lösungen neuester Bauart kombinieren in einem hermetisch verschlossenen Tank eine Feststoffisolierung mit Luft bei Umgebungsdruck und können daher gleichzeitig als GIS-Anlagen betrachtet werden. Anders

⁴ Bei Fluorketonen wird ein GWP unter 1 und bei Fluornitrilen ein GWP von 2 100 CO₂-Äquivalenten angenommen. Die gewählte Zusammensetzung der Gemische hängt von dem System ab, in dem sie verwendet werden. In Fällen beispielsweise, in denen das Gemisch mit Fluornitril zu 96 % oder 80 % aus CO₂ und zu 4 % oder 20 % aus Fluornitrilen besteht, beträgt das GWP der Gemische 180 bzw. 500 CO₂-Äquivalente. Im Vergleich liegt die Klimawirksamkeit dieser Gemische damit bei 1 bis 2 % des GWP von SF₆.

als bei AIS wirken sich Umgebungsfaktoren wie Staub, Schmutz, Salz und Feuchte hier nicht auf die Leistung der Geräte aus.

Das Schaltmedium: Vakuum oder SF₆

Schaltgeräte schützen die Anlage vor Beschädigung, indem sie den Stromfluss nach Erkennung eines Fehlers unterbrechen. Es gibt zwei Hauptarten: Leistungsschalter und Kombinationen aus Lasttrennschalter und Sicherung.

Bei Leistungsschaltern werden nach Erkennung eines Fehlers die Kontakte getrennt, sodass der Stromkreis unterbrochen wird; der erzeugte Lichtbogen wird im verwendeten Medium gelöscht. Bei Leistungsschaltern ist die Herstellung eines Vakuums die meistverwendete Lösung.

Bei Kombinationen aus Lasttrennschalter und Sicherung wird der Stromkreis durch den Lasttrennschalter unterbrochen, während die Sicherung vor Kurzschluss und Lichtbögen schützt. Bei Lasttrennschaltern kommt meist SF₆ zum Einsatz.

2.2. Alternativen zu SF₆ in Mittelspannungsschaltanlagen

Ob für isolierende oder stromunterbrechende Funktionen SF₆-freie Lösungen realisierbar sind, hängt insbesondere von der Spannungsebene und der Netzebene ab.

2.2.1 Mittelspannungsschaltanlagen in der Primärverteilung

Für Mittelspannungsschaltanlagen in der Primärverteilung sind SF₆-freie Alternativen bereits verfügbar. Als Isolierungslösung hat AIS einen erheblichen Marktanteil (je nach Hersteller zwischen 40 % und 80 %) bei Anwendungen, in denen platz- und umgebungsbezogene Faktoren keine Rolle spielen, d. h. in Räumen mit Klimaregelung und ausreichend Platz. Auch bei GIS sind SF₆-freie Alternativen verfügbar, in denen eine Kombination aus technischer Luft und Feststoffisolierung oder Gasgemische mit isolierenden synthetischen Stoffen zum Einsatz kommen. Bei Erdgasen wird die erforderliche Isolierfestigkeit erreicht, indem im Vergleich zu SF₆ ein etwas höherer Gasdruck angelegt wird. Lösungen für Spannungen bis 36 kV sind im Handel erhältlich oder befinden sich in der Phase der Baumusterprüfung und Demonstration am Standort des Kunden.

Enthält das Gasgemisch synthetische Stoffe, kann eine regelmäßige Überwachung der Gasqualität erforderlich sein, wodurch höhere Unterhaltungskosten für zusätzliches Personal, die Durchführung von Verfahren und Betriebskosten anfallen. Die diesbezüglichen Überwachungs- und Überprüfungsmaßnahmen können jedoch leicht in bestehende Betriebs- und Instandhaltungspläne integriert werden. Die Stromunterbrechung wird durch Leistungsschalter mit Vakuum erreicht, die sowohl in AIS- als auch in GIS-Systemen SF₆-frei sind.

Der Aufbau der Umspannwerke für die Primärverteilung wird individuell geplant und umgesetzt. Es gibt keine Standardkombinationen von Modulen, die in großen Mengen angeboten und verkauft werden. Dementsprechend gibt es keine große Anzahl von Varianten, die bei der Konzeption, Erprobung und Vermarktung neuer Produkte zu berücksichtigen sind:

die Geräte werden direkt in die Netze der Endnutzer integriert, sodass der Schritt der Systemintegration in einen Verteilerschrank entfällt.

Die Umstellung auf SF₆-freie Lösungen könnte daher relativ schnell erfolgen: für typgeprüfte Lösungen dürfte ein Zeitraum von zwei bis drei Jahren ausreichen. Viele SF₆-freie Lösungen befinden sich derzeit in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, sodass mittelfristig eine größere Auswahl an verfügbaren Optionen zu erwarten ist.

Die Kosten für künftige SF₆-freie Lösungen dürften im Vergleich zu SF₆-haltigen Geräten zumindest für einige im Handel erhältliche Produkte genauso hoch oder nur geringfügig höher sein.

2.2.2. Mittelspannungsschaltanlagen in der Sekundärverteilung

In der Sekundärverteilung sind SF₆-haltige GIS-Lösungen aufgrund der vielen bestehenden Einschränkungen (z. B. Platzverhältnisse, Feuchte- und Temperaturregulierung) und der technischen Vorteile, die SF₆ als isolierendes und stromunterbrechendes Medium unter solchen Bedingungen bietet, die vorherrschende Variante. AIS spielen bei RMU in der Sekundärverteilung aufgrund der räumlichen und umgebungsbedingten Einschränkungen in diesem Segment keine wichtige Rolle. Darüber hinaus werden als Standardtechnologie zur Stromunterbrechung Kombinationen aus Lasttrennschalter und Sicherung verwendet, die ebenfalls SF₆ enthalten.

Technische Realisierbarkeit und Leistungsvermögen der SF₆-freien Isolierung

In den letzten Jahren wurden sekundäre Schaltanlagen auf den Markt gebracht, in denen kein SF₆ als Isoliermedium verwendet wird und die die gleichen Abmessungen und elektrischen Kennwerte wie vergleichbare SF₆-Systeme desselben Herstellers aufweisen. Insbesondere für Nennspannungen bis 24 kV sind inzwischen verschiedene Arten von SF₆-freien Schaltanlagen verfügbar.

In vielen Fällen wird als alternatives Medium ein Gasgemisch verwendet, das entweder Fluornitrile oder Fluorketone enthält. In einigen dieser Lösungen wird ein etwas höherer Gasdruck angelegt, um die erforderliche Isolierfestigkeit zu erreichen, die mit frühen SF₆-haltigen Modellen vergleichbar ist. Die geänderten Druckverhältnisse finden bei der strukturellen Gestaltung dieser Lösungen Berücksichtigung, um potenzielle Druckverluste zu vermeiden, die die Funktionsfähigkeit gefährden würden. Umfassende Überwachungen in den Phasen der Erprobung und Demonstration haben gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit der Gasgemische während des Betriebs nicht nachlässt. Allerdings liegen der Siedepunkt und die Mindestbetriebstemperatur bei den alternativen Gemischen höher als bei SF₆. Das bedeutet, dass SF₆-Schaltanlagen bei gleichem Druckniveau bei niedrigeren Temperaturen betrieben werden können. Darüber hinaus ist für fluorketonhaltige Gemische üblicherweise eine höhere Betriebstemperatur erforderlich als bei Gemischen mit Fluornitrilen. Eine solche Einschränkung ist von praktischer Bedeutung bei Anwendungen in Bereichen, in denen sehr niedrige Temperaturen auftreten können und die Temperatur nicht reguliert werden kann.

Für Spannungen bis 12 kV bieten einige Hersteller auch Lösungen mit technischer Luft an; in jüngerer Zeit hat ein Hersteller eine mit technischer Luft arbeitende Schaltanlage für eine Spannung bis 24 kV vorgestellt. Diese Lösungen sind nicht temperaturempfindlich.

Technische Realisierbarkeit und Leistungsvermögen der SF₆-freien Stromunterbrechung

Zur Stromunterbrechung kommen in der Sekundärverteilung häufig SF₆-haltige Trennschalter zum Einsatz. Bei der Sekundärverteilung ist es schwierig, kostenwirksame, zuverlässige und sichere SF₆-freie Alternativen zu Lasttrennschaltern zu finden, da Lasttrennschalter im Vergleich zu Vakuum-Leistungsschaltern in der Regel einfacher aufgebaut, billiger und wartungsfrei sind. Der Einsatz von Leistungsschaltern wird vor allem deshalb kostenintensiver und aufwendiger sein, weil die Selektivität des Schutzsystems sichergestellt werden muss, damit nur der fehlerhafte Teil des Systems und nicht das gesamte System abgeschaltet wird.⁵ Dies kann eine komplexe und kostspielige Koordinierung des Schutzes zwischen Primär- und Sekundärverteilung und unter Umständen auch zwischen den verschiedenen Netzbetreibern erfordern. Darüber hinaus ist bei Leistungsschaltern in der Regel eine Wartung erforderlich, während Lasttrennschalter wartungsfrei sind. Diese systemischen Probleme können jedoch überwunden werden. Des Weiteren wurden vor Kurzem SF₆-freie Kombinationen aus Lasttrennschalter und Sicherung eingeführt.

Kosten und Marktpotenzial

Angesichts der begrenzten Auswahl an Produkten, die derzeit auf dem Markt erhältlich sind, ihrer noch nicht lang zurückliegenden Einführung sowie der zahlreichen Randbedingungen und externen Faktoren, die den Endpreis beeinflussen, ist es schwierig, den Investitionsmehraufwand genau abzuschätzen, der dem Endnutzer beim Kauf einer Schaltanlage mit SF₆-freier Isolierung im Vergleich zu einer SF₆-haltigen Anlage entsteht.

Die angegebenen Mehrinvestitionen pro Einheit liegen zwischen 5 % und 20 %, mit einigen bedingten Ausnahmen, die nach unten bis 0 % und nach oben bis 30 % reichen. Darüber hinaus können bei SF₆-freien Alternativen im Vergleich zu SF₆-Produkten zusätzliche Wartungskosten anfallen.

Auf der anderen Seite können SF₆-freie Alternativen abgesehen von ihrem Umweltnutzen die folgenden Vorteile bieten:

- der Ausbau intelligenter Stromnetze kann eine häufige Umgestaltung der Netztopologien erforderlich machen, z. B. für das Aufladen von Elektrofahrzeugen, und Vakuumschalter sind für diesen Zweck besser geeignet,
- am Ende der Nutzungsdauer können für die Rückgewinnung, Wiederverwertung und Entsorgung von SF₆ erhebliche Kosten entstehen.

Die Hersteller von Schaltanlagen müssen normalerweise eine bestimmte Marktperspektive einnehmen, damit sie die nötigen Investitionen in Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationstätigkeiten tätigen, die erforderlich sind, um ein vollständiges Portfolio mit SF₆-freien Alternativen anbieten zu können.

Darüber hinaus erfolgt die Einführung neuer Alternativen im Falle der Sekundärverteilung in mehreren Schritten und ist komplexer als bei der Primärverteilung. Je nach

⁵ Die Schwierigkeit besteht in den unterschiedlichen Auslösezeiten bei Kurzschluss, die bei Leistungsschaltern länger sind als bei Kombinationen aus Lasttrennschalter und Sicherung und in einigen Fällen sogar länger als bei den Leistungsschaltern der Umspannwerke.

Kundenspezifikation kann die Konfiguration von RMU variieren. Jede Konfiguration muss einer Baumusterprüfung unterzogen werden. Einerseits ist das Verteilungsvolumen bei der Sekundärverteilung groß, andererseits gibt es eine große Bandbreite an Produkten. In einigen speziellen Fällen kann der Einsatz von SF₆-freien Schaltanlagen weiterhin sehr schwierig sein, z. B. unter extremen Umgebungsbedingungen oder wenn eine RMU zu einem bestehenden Sekundärverteilungsnetz hinzugefügt wird.

Bei typgeprüften Lösungen wird es wahrscheinlich zwei weitere Jahre bis zur breiteren Kommerzialisierung dauern. Typgeprüfte Lösungen bilden jedoch nur einen Teil der gesamten Produktpalette. Daher wird wahrscheinlich mehr Zeit (vier bis fünf Jahre) benötigt, um den vielfältigen Kundenbedürfnissen gerecht zu werden, d. h. das im Handel angebotene Portfolio muss schrittweise wachsen. Für im Handel erhältliche Lösungen wird es eine gewisse Zeit dauern, bis die Herstellungskapazitäten ausgebaut sind.

2.2.3. Generator-Leistungsschalter

In Kraftwerken befinden sich Generator-Leistungsschalter an der Schnittstelle des Generators zum Netz, genauer gesagt zum Mittel- zu Hochspannungstransformator, und schützen sowohl den Generator als auch den Transformator. Aufgrund ihrer Anwendung sind sie für außerordentlich hohe Nenn- und Kurzschlussströme ausgelegt. Da die Anzahl der Kraftwerke (im Bau) begrenzt ist, stellen Generator-Leistungsschalter eine Nische dar, und es gibt nur sehr wenige Hersteller. Ein Hersteller bietet ein SF₆-freies Modell an, das jedoch nur für einen begrenzten Anwendungsbereich geeignet ist. Andere Hersteller beschäftigen sich nicht mit der Entwicklung von Alternativen. Das ist jedoch kein Zeichen für grundlegende technische Hindernisse, sondern nur dafür, dass die Marktaussichten bisher zu gering waren, um die Entwicklungskosten zu rechtfertigen.

2.3. Alternativen zu SF₆ in Hochspannungsschaltanlagen

Technische Realisierbarkeit und Leistungsvermögen der SF₆-freien Isolierung

Bei Hochspannungsumspannwerken wird bei der Isolierung mit Luft deutlich mehr Platz benötigt als bei gasisolierten Bauformen. In einem der gebräuchlichsten AIS-Systeme sind luftisolierte Sammelschienen mit gasisolierten Schaltgeräten kombiniert. Bei Hybrid-Schaltanlagen sind luftisolierte Sammelschienen mit vorgefertigten Modulen kombiniert, in die Leistungsschalter, Trennschalter, Erdungsschalter und Messwandler in einem einzigen gasisolierten Gehäuse integriert sind. Bei Hybridkonfigurationen wird im Vergleich zu AIS weniger Platz benötigt, aber die Umspannanlage⁶ ist größer als bei GIS. Feststoff- oder Flüssigmedien werden in Hochspannungsschaltanlagen nicht als Isoliermedium verwendet.

Aufgrund ihrer Kompaktheit sind vollständig gasisolierte Schaltanlagen die Standardlösung für Umspannwerke in platzkritischen Anwendungen, z. B. in städtischen und anderen dicht besiedelten Gebieten oder auf Hochspannungsplattformen, wo die Energie von Offshore-Windparks gesammelt wird.

Als Alternativen zu SF₆ sind nur Gasgemische geeignet. Dabei gab es in der letzten Zeit folgende Entwicklungen:

⁶ Die Bezeichnung „Umspannanlage“ bezieht sich auf den Standort der Schaltanlage und ihre Stellfläche.

- Für Spannungen bis einschließlich 145 kV wurden verschiedene SF₆-freie GIS-Modelle demonstriert und erprobt, und Herstellerangaben zufolge liegen für die nächsten zwei Jahre bereits weltweite Aufträge für mehr als 1 000 Schaltfelder vor. Je nach Gasgemisch und dem entsprechenden Temperaturbereich kann die Anwendung auf Innenräume beschränkt sein. Ferner sind bereits über mehrere Jahre hinweg verschiedene GIS-Pilotanlagen mit unterschiedlichen Gasgemischen demonstriert worden.
- Bei Offshore-Windkraftanlagen mit GIS-Systemen für 72,5 kV sind GIS-Modelle verfügbar, in denen Erdgasgemische oder Gemische mit Fluornitrilen zum Einsatz kommen und die im industriellen Maßstab hergestellt werden. Offshore-Anwendungen sind mit besonderen logistischen und arbeitsschutztechnischen Herausforderungen verbunden, und die Vermeidung der Handhabung von SF₆ ist bei dieser Anwendung von Vorteil.
- Für das Marktsegment mit Spannungen über 145 kV wurde im Jahr 2015 in Zürich (Schweiz) ein GIS-System für 170 kV mit einem fluorketonhaltigen Gasgemisch in Betrieb genommen. Der Anlage liegt ein Entwurf für eine SF₆-Anlage mit 245 kV zugrunde. Eine weitere, für 170 kV/50 kA ausgelegte GIS-Pilotanlage, bei der Fluornitrile verwendet werden, geht im Jahr 2020 an das Stromnetz. In diesem Fall sind die Abmessungen die gleichen wie bei SF₆-Ausführungen. Eine für Erdgase ausgelegte GIS-Anlage für eine Spannung von 170 kV/50 kA hat alle Leistungsprüfungen erfolgreich bestanden.
- Derzeit laufen Konzeptstudien zu SF₆-freien Schaltanlagen für bis zu 245 kV und deren Bauteilen. Erste Lösungen werden innerhalb von fünf Jahren erwartet.
- Für höhere Spannungen (> 245 kV) ist noch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich. Erste marktfähige Lösungen, die auf Gasgemischen mit synthetischen Stoffen beruhen, werden innerhalb von fünf Jahren erwartet. Bis jede der vielfältigen technischen Anforderungen und Anwendungen abgedeckt werden können, wird noch mehr Zeit vergehen.

Gasgemische auf Fluornitrilbasis und SF₆-haltige Lösungen sind hinsichtlich der Abmessungen der Anlagen und ihrer elektrischen Kennwerte gleichwertig. Hingegen weisen Modelle mit Gasgemischen auf der Basis von Fluorketonen und Erdgasen im Vergleich zu SF₆-Modellen mit derselben Nennleistung größere Abmessungen auf. Anstatt jedoch die Nennleistung beizubehalten und dafür die Schaltanlage zu vergrößern, ist in einigen Fällen eine geringere Nennleistung immer noch ausreichend, d. h. es könnte ein SF₆-freies, für niedrigere Spannungen ausgelegtes System gleicher Größe verwendet werden.

An bestimmten Standorten, an denen der Spannungsbereich beibehalten werden muss und der Platz begrenzt ist, wie in Umspannwerken von Kraftwerken oder in städtischen Gebieten, sind derzeit fluornitrilbasierte Bauformen unter Umständen die einzige realisierbare Alternative zu SF₆-basierten Schaltanlagen.

Bei Freiluftschaltanlagen ist der Platzbedarf weniger kritisch, da Bauteile, die in den 1970er- und 1980er-Jahren eingebaut wurden, wesentlich größere Abmessungen haben als moderne SF₆-basierte Ausführungen. In vielen Fällen wird es möglich sein, sie durch SF₆-freie Alternativen für den gleichen Spannungsbereich zu ersetzen.

Technische Realisierbarkeit und Leistungsvermögen der SF₆-freien Umschaltung:

Für die Umschaltung werden als Alternativen zu SF₆ bereits Gasgemische und Vakuum verwendet:

- Für Spannungen bis 145 kV sind Vakuum-Schaltröhren im Handel erhältlich.
- Für Spannungen bis 170 kV sind Fluornitril-Gemische im Handel erhältlich.
- Für Spannungen bis 245 kV laufen Konzeptstudien, die sich vorrangig mit Vakuum-Schaltröhren befassen.
- Für höhere Spannungen von bis zu 420 kV wird die Reihenschaltung von zwei Schaltröhren untersucht.
- Für Spannungen von 420 kV wird im Rahmen des LIFE-Programms der EU der Einsatz eines Fluornitril-Gemischs in einem GIS-Leistungsschalter gefördert.

Kosten und Marktpotenzial

Die größeren Abmessungen von fluorketon- und erdgasbasierten GIS haben höhere Kosten zur Folge. Die Hersteller gaben für alternative GIS in einem Pilotprojekt einen Kostenfaktor von bis zu 200 % im Vergleich zu handelsüblichen SF₆-basierten Varianten an. Gleichzeitig wiesen sie darauf hin, dass aufgrund von Lerneffekten eine Verringerung der Abmessungen und damit der Kosten möglich sei.

Der Prozess der Marktdurchdringung alternativer Lösungen ist für Schaltanlagen mit Hoch- und Höchstspannung einfacher als im Mittelspannungsbereich. Hochspannungsumspannwerke werden anhand von Kundenspezifikationen konzipiert und gebaut. Die individuelle Konfiguration wird aus typgeprüften Bauteilen zusammengestellt.

Für Kunden müssen vor der Anwendung die spezifischen umwelt- und arbeitsschutztechnischen Verfahren für alternative Gasgemische in der gesamten Organisation umgesetzt werden. Bei Verwendung synthetischer Stoffe dürften diese Verfahren denen für SF₆ recht ähnlich sein. Dennoch müssen spezielle Leitlinien festgelegt und Schulungen organisiert werden. Bei Alternativen, für die ausschließlich Erdgas verwendet wird, sind die Handhabung und die umwelt- und arbeitsschutztechnischen Verfahren einfacher.

Wie viel Zeit für den Übergang zu SF₆-freien Produkten benötigt wird, hängt hauptsächlich von der Spannung ab:

- Für Spannungen bis 145 kV wurden GIS mit verschiedenen SF₆-freien Gasgemischen demonstriert; angesichts ihres fortgeschrittenen Entwicklungsstands ist damit zu rechnen, dass sie innerhalb von zwei Jahren auf den Markt gebracht werden. Innerhalb von fünf Jahren könnte ein ausgereiftes Portfolio für alle Lösungen zur Verfügung stehen.
- Es wird erwartet, dass Lösungen für bis zu 245 kV in den nächsten zwei Jahren erprobt und innerhalb von fünf Jahren im Handel erhältlich sein werden, wobei die vollständige Kommerzialisierung später erfolgt.
- Für höhere Spannungen wird die Entwicklung von Alternativen mindestens fünf Jahre dauern. Die Überwachung der Fortschritte ist eine Voraussetzung für Aussagen darüber, wann Übergänge stattfinden.

2.4. SF₆-freie Alternativen für Geräte im Zusammenhang mit Schaltanlagen

In Schaltanlagen wird eine Vielzahl von Bauteilen und Geräten verwendet, in denen derzeit SF₆ eingesetzt wird. Ihnen ist gemeinsam, dass keine Umspannung erforderlich ist. In einigen Fällen wird das Gas nur als Prozessgas bei der Herstellung oder als Isoliermedium verwendet. Einige Bauteile sind nur für den Bereich der Mittelspannung relevant (Kondensatoren), und bestimmte Anwendungen kommen im Mittel- und Hochspannungsbereich vor.

Messwandler zur Messung von Strom und/oder Spannung werden für Mittel- und Hochspannung eingesetzt. Die Bauart unterscheidet sich abhängig von Funktion und Spannungsebene:

- Bei Mittelspannung wird Gussharz/Epoxy als Isoliermedium verwendet. Für einen Teil der Produktpalette wird SF₆ bei der Herstellung als Prozessgas verwendet. Das Gas kann wiedergewonnen und in den Herstellungsprozess zurückgeführt werden, und einem Hersteller zufolge hat sich der SF₆-Verbrauch im Vergleich zur Situation vor 20 Jahren, als noch keine Rückführung möglich war, um 70 % verringert. Des Weiteren könnten die bisherigen Emissionswerte in gewissem Umfang verringert werden. Allerdings werden die damit verbundenen Kosten unverhältnismäßig hoch sein. In das Produkt gelangen nur vernachlässigbare Mengen des Gases. Andere Gase und Gasgemische wurden ohne zufriedenstellende Ergebnisse untersucht. Bei dieser Anwendung gibt es derzeit keine realistischen Perspektiven für einen vollständigen Ersatz von SF₆.
- Im Hochspannungsbereich wurde SF₆ auch zur Isolierung in den Transformatoren verwendet. Bei einigen Anwendungen kommt Öl als Isoliermedium zum Einsatz. Alternative Gase, die aus natürlichen Stoffen bestehen, sowie Gemische mit synthetischen Stoffen (Fluorketon, Fluornitril) werden ebenfalls verwendet. Stromtransformatoren, in denen alternative Gase verwendet werden, wurden für Spannungen bis 245 kV demonstriert. Einzelne Ausführungen von Spannungswandlern für Spannungen bis 420 kV wurden vorgestellt oder sollen in den nächsten zwei Jahren demonstriert werden. Gasgemische ohne Fluornitrile erfordern einen höheren Gasdruck als SF₆. Aus diesem Grund haben diese Alternativen auch größere und schwerere Gehäuse. Wenn vorhandene Messwandler an Standorten mit Platzbeschränkungen ersetzt werden sollen, kann die Auswahl an einsetzbaren alternativen Bauformen eingeschränkt sein. Doch zumindest bei Freiluftschaltanlagen sind die Abmessungen in der Regel weniger kritisch. Die Entwicklung ausgereifter Produktportfolios, die Industrialisierung der Fertigung und die Annahme durch die Endnutzer werden noch mehrere Jahre in Anspruch nehmen, d. h. die Auswahl an verfügbaren Alternativen dürfte auf mittlere Sicht schrittweise zunehmen.

Für **Kondensatoren** in Mittelspannungsanwendungen im unteren kV-Bereich, bei denen die Spannungsfestigkeit von SF₆ von Vorteil ist, wurden bisher keine Alternativen entwickelt. Wie bei Mittelspannungstransformatoren wird das Gas im Herstellungsprozess verwendet. Vernachlässigbare Mengen an SF₆ werden in das Bauteil eingekapselt. Diese können bisher praktisch nicht zurückgewonnen werden, sondern werden bei der Entsorgung am Ende der Nutzungsdauer freigesetzt.

Isolierbuchsen werden zur Isolierung von Leitern verwendet, die vom Gehäuse in ein Gerät eintreten. Bei Isolierbuchsen stehen neben Bauformen auf SF₆-Basis Ausführungen mit ölsoliertem Papier (oil insulated paper, OIP), harzisolierendem Papier (resin insulated paper, RIP) und harzisolierten Kunststoffen (resin insulated synthetics, RIS) zur Verfügung. Für Spannungen unter 145 kV sind Bauformen auf der Grundlage alternativer Gasgemische verfügbar. Herstellerangaben zufolge ist eine schrittweise Ausweitung der Spannungsbereiche auf bis zu 245 kV in den nächsten Jahren realistisch. Dafür sind jedoch erhebliche FuE-Investitionen erforderlich. Lebensdauerprüfungen von angemessener Länge sind eine Voraussetzung für die Markteinführung. Am Ende der Nutzungsdauer kann das Gas zurückgewonnen und aufbereitet werden. Bei einigen Auslegungen wird das Isoliermedium allerdings in Kombination mit Schäumen verwendet. In diesem Fall ist die Rückgewinnung des Gases kompliziert und es gibt keine entsprechenden Verfahren. In der Praxis wird das Gas derzeit nach der Entsorgung am Ende der Nutzungsdauer freigesetzt.⁷

Gasisolierte Leitungen und gasisolierte Sammelschienen und Stromschienen werden für die kompakte Hochleistungsübertragung über begrenzte Entfernungen in der Nähe von Kraftwerken und Umspannwerken eingesetzt. Seit 2017 werden für Spannungen bis 420 kV SF₆-freie Bauformen auf der Basis von Gasgemischen mit Fluornitrilen erfolgreich demonstriert. Ein auf Fluorketonen basierendes System wird im Jahr 2020 ausgeliefert und 2021 in Betrieb genommen. Außerdem wird im selben Zeitraum ein 420-kV-Pilotprojekt mit Einsatz von Druckluft durchgeführt. Synthetische Gase und Zersetzungsprodukte können am Ende der Nutzungsdauer zurückgewonnen und aufgearbeitet werden. Bei Erdgasen kann das Gas in die Atmosphäre freigesetzt werden, was die Transportvorgänge und Rückgewinnungsverfahren insgesamt verringern würde.

3. Schlussfolgerungen

Auf der Grundlage der vorstehenden Ausführungen lässt sich hinsichtlich **neuer Mittelspannungsschaltanlagen, die in der Sekundärverteilung eingesetzt werden**, Folgendes feststellen:

In diesem Segment ist SF₆ derzeit sowohl bei der Isolierung als auch bei der Stromunterbrechung die vorherrschende Technologie. Alternativen für die Isolierung sind für bestimmte Anwendungen im Spannungsbereich bis 24 kV seit Kurzem auf dem Markt verfügbar. Ihre technischen Merkmale, wie Abmessungen, technische Lebensdauer und Zuverlässigkeit, sind gegenüber SF₆-haltigen Lösungen derselben Hersteller offenbar gleichwertig. Es wird jedoch noch Zeit brauchen, bis die Hersteller die gesamte Produktpalette entwickelt und die erforderliche Fertigungskapazität aufgebaut haben, um den gesamten Markt bedienen zu können. Die verschiedenen Arten von Schaltanlagen in der Produktpalette könnten in etwa zwei bis fünf Jahren verfügbar sein, je nachdem, wie weit die Entwicklung und Prüfung für jeden Typ fortgeschritten ist. In einigen besonderen Fällen kann die Ersetzung von SF₆ jedoch weiterhin schwierig bleiben, z. B. aufgrund von besonderen platz- oder umgebungsbezogenen Anforderungen. Die Stückkosten werden wahrscheinlich auch nach der Industrialisierung und dem Upscaling der Produktion um 5 % bis 30 % höher sein.

⁷ In Deutschland wird eingekapseltes SF₆ daher als Produktionsemission angerechnet.

Zur Stromunterbrechung sind Vakuum-Leistungsschalter die gängigste Alternative zu SF₆-haltigen Lasttrennschaltern. Der Einsatz von Vakuum-Leistungsschaltern ist technisch realisierbar, aber die wesentlichen Hemmnisse für ihre breitere Durchsetzung in der Sekundärverteilung sind der Wartungsbedarf und die komplexen und kostenaufwendigen Änderungen, die durchgeführt werden müssten, damit die Selektivität des Schutzsystems, das im Störfall für die Abschaltung des betreffenden Teils sorgt, nicht beeinträchtigt wird. Vor Kurzem wurden SF₆-freie Freiluft-Lasttrennschalter vorgestellt, bei denen diese systemischen Hindernisse nicht bestehen.

Sicherlich wird es einfacher sein, SF₆-freie Geräte völlig neu aufzustellen („Greenfield“) oder als vollständigen Ersatz zu verwenden (Austausch eines vorhandenen Verteilerschranks am Ende seiner Nutzungsdauer), als sie für teilweise Nachrüstungen oder Erweiterungen nutzen, bei denen eine Kombination von Geräten mit und ohne SF₆ in einem Umspannwerk nebeneinander betrieben wird.

Im vorliegenden Bericht wurde auch bewertet, ob SF₆ bei **neuen Mittelspannungslösungen in der Primärverteilung** ersetzt werden kann. In diesem Segment gab es schon immer SF₆-freie Alternativen, und eine zunehmende Palette an SF₆-freien Schaltgerätelösungen wird von den Herstellern entwickelt und angeboten. Merkmale wie Abmessungen, technische Lebensdauer und Zuverlässigkeit stimmen offenbar mit denen gleichwertiger, SF₆-haltiger Lösungen derselben Hersteller überein. Nach der vollständigen Markteinführung sind nur unerhebliche Zusatzkosten zu erwarten, da die alternativen Ausführungen den Produkten mit SF₆ sehr ähnlich sind. Die vollständige Kommerzialisierung alternativer Lösungen nach einer Übergangszeit von zwei oder drei Jahren erscheint realistisch. Die Stromunterbrechung stellt bei der Primärverteilung keine Schwierigkeit dar, da Vakuum-Leistungsschalter bereits verbreitet sind.

Für **höhere Spannungen** wurden GIS bis 145 kV mit verschiedenen SF₆-freien Gasmischungen demonstriert. Die Kommerzialisierung dieser Systeme ist innerhalb von zwei Jahren zu erwarten, und ein ausgereiftes Portfolio, das alle Systeme abdeckt, kann innerhalb von fünf Jahren verfügbar werden. Lösungen für bis zu 245 kV werden in den nächsten zwei Jahren erprobt, handelsübliche Lösungen werden voraussichtlich innerhalb von fünf Jahren eingeführt und zu einem späteren Zeitpunkt vollständig kommerzialisieren werden. Die Entwicklung von Alternativen für noch höhere Spannungen könnte noch mindestens fünf Jahre in Anspruch nehmen. In Umgebungen mit Platzbeschränkungen sind fluornitrilbasierte GIS-Systeme gegebenenfalls die einzige Alternative zu SF₆, da für andere Lösungen mehr Platz benötigt wird. Für die meisten Anwendungen ist dies jedoch kein einschränkender Faktor.

SF₆ wird als Prozessgas bei der Herstellung von **Messwandlern und Kondensatoren für den Mittelspannungsbereich** verwendet. Bisher haben potenzielle Alternativen keine zufriedenstellenden Ergebnisse erbracht. Zur Emissionsbeschränkung bei der Herstellung sind eine gute Betriebsführung und eine wirksame Wiederverwendung des Gases unerlässlich. Die Produktemissionen während des Betriebs und der Entsorgung sind vernachlässigbar. Für **Isolierbuchsen** sowie **gasisolierte Leitungen** und **gasisolierte Sammel- und Stromschienen** könnten die Alternativen für bestimmte Spannungsbereiche den Markt innerhalb von fünf Jahren recht gut durchdrungen haben.

Allgemein gesehen ist für die Einleitung des Übergangs in Fällen, in denen SF₆-freie Alternativen teurer sind als SF₆-haltige Schaltanlagen, wahrscheinlich ein politisches Eingreifen erforderlich. Im Rahmen des europäischen Grünen Deals hat die Kommission vor Kurzem eine Überprüfung der EU-Vorschriften für fluorierte Gase eingeleitet, einschließlich einer Evaluierung der F-Gas-Verordnung und eines Vorschlags zu ihrer Überarbeitung im 4. Quartal 2021.⁸ Die Ergebnisse des vorliegenden Berichts werden als technischer Beitrag in diese Überprüfung einfließen.

⁸ <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12479-Review-of-EU-rules-on-fluorinated-greenhouse-gases>