



Sachstand

Schwefelhexafluorid (SF₆) Alternativen für elektrische Anlagen

Schwefelhexafluorid (SF₆)

Alternativen für elektrische Anlagen

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 036/20
Abschluss der Arbeit: 2. Juli 2020
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten	7
3.	Quellenverzeichnis	12

1. Einleitung

Schwefelhexafluorid (SF₆) wird aufgrund seiner elektrischen Eigenschaften seit den 60er Jahren als Isolier- und Lichtbogenlöschgas in der elektrischen Energietechnik eingesetzt. Schwefelhexafluorid ist das stärkste bisher bekannte Treibhausgas. Die Emission eines Kilogramms SF₆ trägt genauso viel zur Klimaerhitzung bei wie 22.800 Kilogramm Kohlendioxid (CO₂).¹ Es gehört zu den sechs Treibhausgasen, die im Kyoto-Protokoll reglementiert sind. Im Rahmen einer Selbstverpflichtung der deutschen Wirtschaft konnten die Emissionen in den letzten 20 Jahren deutlich gesenkt werden.

In der Europäischen Union wurden mehrere Anwendungen von SF₆ verboten. Eine wichtige Ausnahme bilden gasisolierte elektrische Schaltanlagen (GIS), für die bei der letzten Überarbeitung der F-Gas-Verordnung im Jahr 2014 keine kostengünstigen und umweltverträglichen Alternativen zur Verfügung standen. Die EU-Kommission muss gemäß der Verordnung des Europäischen Parlaments (Nr. 517/2014) zum 1. Juli 2020 bewerten, ob es für Mittelspannungsanlagen, kostengünstige, technisch realisierbare, energieeffiziente und zuverlässige Alternativen gibt, um ein eventuelles Verbot aussprechen zu können.² Das ursprünglich für März geplante ‚Consultation Forum‘ zur Überprüfung der Regelungen nach Artikel 21(4) der Verordnung (EU) 517/2014 musste aufgrund der Corona-Krise ausfallen.³

1 Statistisches Bundesamt Destatis (2020). „Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe "Schwefelhexafluorid" (SF₆) und "Stickstofftrifluorid" (NF₃)“, https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Klimawirksame-Stoffe/Publikationen/Downloads-Klimawirksame-Stoffe/schwefelhexafluorid-5332401197004.pdf?__blob=publicationFile&v=6, Seite 10

Weiteres Zahlenbeispiel: „Das Treibhaus-Potenzial von SF₆ ist 23.500mal größer als von CO₂. Ein Kilogramm SF₆ in der Atmosphäre ist so wie 23,5 Tonnen CO₂ in der Atmosphäre.“: Grotelüsch, F., Deutschlandfunk (2019). „Treibhausgas SF₆ dringend gesucht“, https://www.deutschlandfunk.de/hochspannungstechnik-ersatz-fuer-treibhausgas-sf6-dringend.676.de.html?dram:article_id=463800

2 Europäische Union (EU) (2014): 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

taz (2020). „Saubere Luft statt SF₆“, <https://taz.de/Alternative-fuer-extremes-Treibhausgas/!5667743/>

Zum Sachstand aktueller regulatorischer Rahmen zum Einsatz von SF₆ in elektrischen Betriebsmitteln s.a.: Ecofys (2018). Abschlussbericht „Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/endbericht_sf6_de.pdf, Kapitel 7, Seite 62

3 Umweltbundesamt (UBA) (2016). „EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase#aktuelles>

Europäische Kommission (2020). „F-gas Consultation Forum“, https://ec.europa.eu/clima/events/articles/0106_en

Umweltbundesamt (UBA) (2019). „Schaltanlagen“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/schaltanlagen>

Der Anteil von SF₆ in Schaltanlagen in Europa ist nicht eindeutig bekannt. Wissenschaftler haben versucht, diesen Anteil abzuschätzen. Als Ausgangswert setzen die Autoren die SF₆-Menge im Jahr 2017 mit 10.800 bis 24.700 t an. Diese Annahme führt zu 68 bis 140 t jährlicher Emissionen aus betrieblichen Leckagen. Dies entspricht etwa 1,6 bis 3,3 Mt CO₂-Äq. Darüber hinaus berechneten die Wissenschaftler potenzielle Treibhausgaseinsparungen über den Lebenszyklus einer gasisolierten 145-kV-Schaltanlage. Dabei ersetzen die Experten SF₆ durch Decafluor-2-Methylbutan-3-on (C5-FK) und Heptafluor-2-Methylpropanitril (C4-FN)-Mischungen. Die Forscher berechneten, dass sich der europäische CO₂-Fussabdruck für ein Ausstiegsszenario ab 2020 über einen Zeitraum von 50 Jahren um einen Mittelwert von 14 Mt CO₂-Äq. reduzieren könnte. Eine Schätzung für Mittelspannungsanlagen könnte eine ähnliche Größenordnung als Ergebnis haben.⁴

Allein für Deutschland hat der größte Produktionszweig „Elektroindustrie und Apparatebau“ im Jahr 2018 etwa 609 Tonnen (77,5 %) SF₆ verwendet und damit 13.887.685 Tonnen CO₂-Äquivalente produziert. Im Vergleich zum Vorjahr hat es zwar eine Reduzierung um 24 % gegeben, aufgrund der großen Menge besteht aber weiterhin dringender Handlungsbedarf. Alternative Produkte für die Substitution von SF₆ wurden und werden für verschiedene Anwendungsfelder entwickelt. Die Forschungsaktivitäten der Industrie haben insbesondere technische Verbesserungen zur Minimierung des Einsatzes von SF₆ und die Entwicklung alternativer Austauschprodukte als Ziel. Lösungen für SF₆-freie Schaltanlagen gibt es bereits, aber trotzdem findet SF₆ weiterhin eine breite Anwendung.⁵

Eine Kleine Anfrage der Fraktion BÜNDNIS90/DIE GRÜNEN erörtert die aktuelle technische Situation des Treibhausgases und den Stand der politischen Aktivitäten:

„Schwefelhexafluorid wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Hauptsächlich wird SF₆ im Produktionsbereich der Elektroindustrie und im Apparatebau verwendet, beispielsweise für den Bau von Schaltanlagen. In der Summe wurden 2017 in diesem Industriezweig knapp 82 Prozent der in Deutschland abgegebenen Gesamtmenge von SF₆ verarbeitet, das entspricht rund 18,1 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente [6].

4 Billen, P. et al. (2020). „Replacing SF6 in Electrical Gas-Insulated Switchgear: Technological Alternatives and Potential Life Cycle Greenhouse Gas Savings in an EU-28 Perspective“, *Energies* 2020, 13, 1807; doi:10.3390/en13071807, <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/7/1807/s1>

5 Statistisches Bundesamt DESTATIS (2018). „Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe "Schwefelhexafluorid" (SF6) und "Stickstofftrifluorid" (NF3)“, www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Klimawirksame-Stoffe/Publikationen/Downloads-Klimawirksame-Stoffe/schwefel_hexafluorid-5332401177004.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Das Umweltbundesamt hat bereits im Jahr 2010 eine Übersicht über Einsatzfelder von Treibhausgasen und alternativen Ersatzstoffe zusammengestellt: Umweltbundesamt (UBA) (2010). „Fluorierte Treibhausgase vermeiden - Wege zum Ausstieg“, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/515/dokumente/3962.pdf> Kapitel 1.4, Seite 21

6 Statistisches Bundesamt DESTATIS (2018). „Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe "Schwefelhexafluorid" (SF6) und "Stickstofftrifluorid" (NF3)“, www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Klimawirksame-Stoffe/Publikationen/Downloads-Klimawirksame-Stoffe/schwefel_hexafluorid-5332401177004.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Zukünftig könnten sich diese Mengen, im Apparatebau und im Betrieb der Netztechnik nun weiter erhöhen. Die Energiewende erfordert in ihrer nächsten Phase den Ausbau und die intelligente Steuerung von Verteilnetzen. Somit werden bei zunehmendem Ausbau der Mittelspannungsnetze die Zahlen für den Einsatz von SF₆ weiter ansteigen. Im Markt sind bereits schon heute alternative Technologien für die Mittelspannungsebene vorhanden, fehlen jedoch gänzlich für die Hoch- und Höchstspannungsebene⁷. Eine im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit erstellte Studie von Ecofys mit dem Titel „Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“ aus dem Jahr 2018 schlussfolgert, dass ohne klare politische Zielsetzung die Reduktion der SF₆-Emissionen durch die Industrie hinter den Möglichkeiten zurückbleibt. Mit Blick auf den Ausbau der Netzinfrastruktur ist somit zu befürchten, dass die SF₆-Emissionen weiter ansteigen, wenn keine alternativen Isoliergase eingesetzt werden.“⁸

Die zitierte Studie des Beratungsunternehmens „Ecofys“ und der ETH Zürich sollte „technologische Alternativen und konkrete Handlungsoptionen für den verminderten Einsatz oder den Ersatz von SF₆ in neu errichteten elektrischen Betriebsmitteln aufzuzeigen und einzuordnen.“⁹ Der Schwerpunkt des umfangreichen Berichts liegt auf Schaltanlagen, Messwandlern und Leitungen in der Mittel- (1 bis 52 kV) und Hochspannung (> 52 kV) in Deutschland. Die Berater analysierten Potentiale und bewerteten Instrumente und Maßnahmen für den verminderten Einsatz von SF₆. Dabei sind „die höchsten SF₆-Emissionen in der Verteilung und Übertragung elektrischer Energie Emissionen in der Herstellung ‚sonstiger Betriebsmittel‘ sowie Betriebsemissionen von Hochspannungsschaltanlagen“. Die Analysten fanden heraus, dass in der Mittelspannung alternative Lösungen auf dem Markt vorhanden sind und in der Hochspannung noch weiterer Entwicklungsbedarf besteht. Um weitere vorhandene Reduktionspotentiale auszuschöpfen, wären zusätzliche Entwicklungen notwendig.¹⁰

Der Bericht enthält u.a. eine tabellarische Übersicht der relevanten Standpunkte, Veröffentlichungen und Stellungnahmen der von den Experten interviewten Gremien und Verbände. Die Experten kommen zu dem Schluss, dass es eine starke Zurückhaltung gegenüber der Einsetzbarkeit alternativer Technologien gibt. Lediglich international tätige Konzerne wie T&D Europe oder

7 Spannungsbereiche elektrischer Schaltanlagen: bis zu 1 kV low voltage (LV); 1 kV - 52 kV medium voltage (MV); 52 kV - 230kV high voltage (HV); über 230 kV extra-high voltage.

8 Vorbemerkung der Fragesteller, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion BÜNDNIS90/DIE GRÜNEN (2019). „Einsatz von Schwefelhexafluorid in der Energiewirtschaft“, <https://dipbt.bundes-tag.de/doc/btd/19/109/1910983.pdf>

Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion DIE LINKE (2016). „Neuer Emissionsanstieg bei Super-Klimagasen Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid“, <http://dipbt.bundes-tag.de/dip21/btd/18/092/1809227.pdf>

9 Ecofys (2018). Zusammenfassung „Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/endbericht_sf6_zusammenfassung_de.pdf

10 Ecofys (2018). Zusammenfassung „Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/endbericht_sf6_zusammenfassung_de.pdf

das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) verweisen auf Einsatzmöglichkeiten alternativer Technologien für spezifische Anwendungsfälle für Mittelspannungsanlagen bzw. Hochspannungsanlagen.¹¹

Die vorliegende Arbeit gibt einen Einblick in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zum Austausch von SF₆ in den entsprechenden Einsatzbereichen.

2. Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten

Der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE) schreibt zum Stand der Forschungsergebnisse in seinem Positionspapier: „Mit der F-Gase-Verordnung 517/EG/2014 wurde die bis dahin bestehende Verordnung novelliert. In Artikel 21 ist bis Mitte 2020 eine Überprüfung vorgesehen, ob es Alternativen gibt, mit denen SF₆ in ‚neuen Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung‘ ersetzt werden kann. Ein physikalisch-elektrisch gleichwertiges Gas, das einen direkten Ersatz von SF₆ ermöglicht, liegt trotz intensiver wissenschaftlicher Forschung bisher nicht vor.“¹²

Nach Aussage des Umweltbundesamtes forscht die Industrie eher an technischen Verbesserungen zur Minimierung des Einsatzes von SF₆ als an alternativen Austauschprodukten.¹³ In Abhängigkeit vom Anwendungs- bzw. Einsatzgebiet des SF₆ gibt es mittlerweile unterschiedliche Lösungsansätze:

Das Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik hat im letzten Jahr eine Initiative gestartet, die die ökologischen und sozio-ökonomischen Auswirkungen des Einsatzes von SF₆ in Stromnetzen und mögliche Alternativen untersuchte. Ziel der Studie war es, die Auswirkungen der Verwendung von SF₆ und F-Gas-freien Alternativen in Mittelspannungsanlagen (MV) in Stromnetzen der Europäischen Union zu analysieren. Die Experten fanden heraus, dass drei Hauptfaktoren die Entwicklung der SF₆-Emissionen bei Mittelspannungsanlagen zukünftig bestimmen: Netzerweiterungen, Betriebsemissionen, und die Verwertung am Ende der Lebensdauer der Schaltanlagen. Insbesondere die Leckraten, die bei längerer Betriebsdauer zunehmen können, stellten im Hinblick auf das Treibhauspotential ein ernst zu nehmendes Problem dar. Das Fraunhofer-Institut empfiehlt u.a. die kontrollierte Stilllegung von SF₆-Anlagen. Dabei ist der

11 Ecofys (2018). Abschlussbericht „Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/endbericht_sf6_de.pdf, Kapitel 8.2, Seite 75

12 Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE), Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE (FNN) (2010). Positionspapier „Alternativen für den Einsatz von SF₆ in der Energietechnik“, <https://www.vde.com/resource/blob/796250/1493d8941d606b71eb57e50f88a0f043/vde-fnn-positionspapier-sf6-data.pdf>

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE) (2016). „Alternativen für den Einsatz von SF₆ in der Energietechnik“, <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/umwelt-naturschutz/sf6>

13 Umweltbundesamt (UBA) (2019). „Schaltanlagen“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/schaltanlagen>

Austausch mit F-Gas freien Anlagen für die Reduzierung der Emissionen von zentraler Bedeutung. Eine Befragung des Markts hatte gezeigt, dass eine Reduzierung der SF₆-Technologie erwartet wird und ein Umweltbewusstsein besteht, aber derzeitige alternative Produkte aufgrund des erhöhten Platzbedarfs und höherer Kosten nicht vollends angenommen werden.¹⁴

Für die Bewertung durch die Europäische Kommission hat das Büro für Umweltforschung und -beratung „Öko-Recherche“ eine Stellungnahme zu SF₆ und möglichen Alternativen für elektrische Schaltanlagen und damit verbundenen Ausstattungen vorgelegt. Die Experten gehen davon aus, dass mit entsprechenden Investitionen SF₆-freie Schaltanlagen je nach Einsatzgebiet in 2 bis 4 Jahren eine breite Anwendung finden. Die geplanten Entwicklungszeiträume bis zur Marktreife für HV-Anlagen >145 kV können noch bis zu 5 Jahre in Anspruch nehmen. In tabellarischen Aufstellungen finden sich detaillierte qualitative Anforderungen und Bewertungen zur Funktionalität von alternativen Lösungen für Mittelspannungsanlagen und Anforderungen an zukünftige alternative Gase für weitere Einsatzgebiete. Alternative Gase nennen die Autoren nicht.¹⁵

Im Abschlussbericht der Ecofys-Studie findet sich dagegen eine tabellarische Zusammenfassung einer Auswahl der derzeit diskutierten alternativen Gase und Gasgemische:

14 Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) (2019). Projektseite „Wirkungsanalyse von F-Gas-freien Mittelspannungs-GIS-Anwendungen“, <https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/f-gas-free.html>

Guetelin, M.Ch., et al. Grenoble Ecole de Management (2020). Final Report „Empirical study investigating the environmental and socio-economic impact of SF₆ and its alternatives in medium voltage switchgear“, https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Projekte/f-gas-free/sf6_report_gem_final2.pdf

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) (2020). Summary „Impact assessment of F-gas free medium voltage switchgear“, <https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Projekte/f-gas-free/F-gas-free-study-summary-final.pdf>

15 Öko-Recherche, Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH (2020). „Briefing paper: SF₆ and alternatives in electrical switchgear and related equipment“, https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/0106/2020_03_25_sf6_and_alternatives_en.pdf

Tabelle 40: Die wichtigsten Gase

Deutsch	Englisch	Handelsüblicher Begriff	Erläuterung
Schwefelhexafluorid SF ₆	Sulphur hexafluoride SF ₆		GWP = 23.500
Fluorketon C5-PFK	Perfluoroketone C5-PFK	Reines C5-PFK: Novec 5110 Mischgas in Anwendung von ABB (AirPlus): CO ₂ und O ₂ mit C5-PFK;	GWP <= 1
Fluornitril C4-PFN	Perfluornitril C4-PFN	Reines C4-PFN: Novec 4710 Mischgas in Anwendung von GE (g ³): C4-PFN und CO ₂	GWP = 1.490
trockene Luft	dry Air/synthetic air	Mischgas in Anwendung von Siemens (Clean Air): 80 % Stickstoff /20 % Sauerstoff	GWP = 0

Die Autoren der Studie kommen nach Prüfung der vorhandenen SF₆-Alternativen hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit, ihrer Vorteile und Einsatzgrenzen sowie Umweltauswirkungen u.a. zu dem Schluss, dass „in der Mittelspannung alternative Lösungen auf dem Markt vorhanden sind, in der Hochspannung es noch weiterer Entwicklungen bedarf. Als weitere Handlungsoptionen empfehlen sie die Nutzung bestehender Reduktionspotentiale, die Schaffung eines verlässlichen Rahmens für die Industrie, die Weiterentwicklung der freiwilligen Selbstverpflichtung und des SF₆-Monitorings sowie die Abwägung des Austauschs von Altanlagen.“¹⁶

Der Branchenverband „T&D Europe“, ein Zusammenschluss der Fachverbände der Hochspannungsschaltgeräte und Transformatorenhersteller in Europa, hat zu dieser Analyse eine ausführliche Stellungnahme geschrieben. Der Verband lobt u.a. die Erarbeitung des Überblicks über relevante bestehende Alternativen und laufende F&E-Aktivitäten, äußert aber auch Kritik beispiels-

16 Ecofys (2018). Abschlussbericht „Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/endbericht_sf6_de.pdf, Anhang 10.1.5 Tabelle 40 „Auswahl der derzeit diskutierten Gase und Gasgemische“

weise an der Methodik zur Bewertung der SF₆-Emissionen und an der Abschätzung des Reduktionspotenzials von Schaltanlagen und zugehörigen elektrischen Geräten auf der Grundlage des Lebenszyklus-Ansatzes.¹⁷

Ein aktualisierter Bericht des Verbands aus dem Jahr 2020 beschreibt ausführlich die aktuelle technische Situation. Im Bericht enthalten ist eine Tabelle die die Hauptmerkmale von wichtigsten Isolierungsalternativen mit SF₆ für HV-Anwendungen vergleicht. Die alternativen Gase sind auch in der obigen Tabelle enthalten.¹⁸

Table 7 - Comparison of key characteristics for main insulating alternatives and SF₆ for HV applications

Gas or mixture (at 6 bar abs) (1)	Dielectric % (2)	Voltage available kV (3)	GWP of gas or gas mixture (4)	Minimum operating temperature °C (5)	Material compatibility (6)	Heat dissipation % (7)	EHS	Gas handling (8)	GIS foot print % (9)
SF ₆	100	1200	22800	-40°	Proven	100	Additional to all technical and operational information, EHS topics are mandatory characteristics to highlight: T&D Europe has published a "Technical guide to validate alternative gas for SF6 in electrical equipment" [16] that shall be considered for EHS topics. Please contact individual manufacturer	Proven, end of life close cycle	100
Synthetic air	40	145	0	-60°	Proven	80 to 90		Proven	120
CO ₂ & O ₂	40	145	< 1	-40	Proven (11)	80 to 90		Proven Gas mixture to manage	120
C ₅ -FK (5%) & CO ₂ & O ₂	75 (10)	170 (GIS)	< 1	0° (10)	Proven (11)	80 to 90		Proven on pilots, end of cycle under development	120
C ₄ -FN & CO ₂ & O ₂ (12)	85 (10)	170 (GIS) 420 (GIB)	Less than 500 (11)	-30° (10)	Proven (11)	80 to 90		Proven on pilots, end of cycle under development	100

17 T&D Europe, The European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry (2020). „T&D Europe comment on Öko-Recherche and RExpertise Briefing Paper on SF₆ and alternatives in electrical switchgear and related equipment.“, <https://www.tdeurope.eu/component/attachments/attachments.html?id=1482>

18 T&D Europe, The European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry (2020). „Technical report on alternative to SF₆ gas in medium voltage & high voltage electrical equipment“, <https://www.beama.org.uk/asset/35AC6550-E506-4417-8FDB33E7C3C854F6/>

s.a. die aktualisierten Fassungen von 2020: „T&D Europe position paper on SF₆ and SF₆ alternative technologies - F-Gas Regulation, SF₆ Technology and Alternatives for Transmission and Distribution (T&D) Electrical Switchgear“, <https://www.tdeurope.eu/component/attachments/attachments.html?id=1421>

Ausführlicher Bericht über die Einsatzfelder von 2020: „Technical report on alternative to SF₆ gas in medium voltage & high voltage electrical equipment“, <https://www.tdeurope.eu/component/attachments/attachments.html?id=1435>, Tabelle 7, Seite 58

Nach Aussage des Zentralverbands Elektrotechnik- und Elektronikindustrie werden in der Branche weiterhin Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von SF₆-Alternativen forciert. Alternativen gebe es bereits in einigen Anwendungsfeldern der Mittel- und Hochspannung, einige seien bereits im Einsatz, manche andere Alternativen werden derzeit in Pilotprojekten erprobt.¹⁹

Der „Arbeitskreis SF₆ und Alternative Gase“ hat zwei Zukunftsszenarien entwickelt wie die Einführung neuer Technologien zum Ersatz von SF₆ im Bereich der elektrischen Energieversorgung dazu beitragen kann, die ambitionierten Ziele der EU-Kommission, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen, zu erreichen. Neben der technischen Machbarkeit werden in den Szenarien auch die Herausforderungen berücksichtigt, entsprechende Produkte in ausreichendem Maße bereitzustellen und bei jederzeitiger Sicherstellung der Energieversorgung in das bestehende Stromnetz zu integrieren. Konkrete stoffliche Alternativen zum Austausch von SF₆ behandeln die Szenarien nicht. Es gibt jedoch eine Gegenüberstellung von SF₆ und alternativen Gasen wie Perfluoroketone C5-PFK (C₅F₁₀O), Perfluoronitril C4-PFN (C₄F₇N), Dry air N₂/O₂ und Gasmischen.²⁰ Die Autoren diskutieren die Einsatzfähigkeit dieser Gase für verschiedene Anwendungstechnologien.

Weltweit gibt eine Vielzahl von Aktivitäten zum Ersatz von SF₆. Das niederländische Unternehmen Tennet testet beispielsweise im Umspannwerk Ovenstädt in Ostwestfalen als weltweit erster Übertragungsnetzbetreiber auf Höchstspannungsebene eine Technik, die ohne das Klimagas auskommt²¹ und die Firma Siemens setzt auf fluoridierte Gasmische, die weniger Treibhausgaspotential als SF₆ haben und bewirbt in diesem Rahmen eine gasisolierte Schaltanlage mit einem Treibhauspotential von null.²²

19 Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e. V. (2020). „SF₆ in der Energietechnik“, <https://www.zvei.org/verband/fachverbaende/fachverband-energietechnik/sf6-in-der-energietechnik/>

20 Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e. V. (2020). „Szenario zur Reduktion der SF₆-Betriebsemissionen von elektrischen Betriebsmitteln durch den Einsatz alternativer Isoliergase“, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2020/April/SF_6_Reduktion/Szenario-zur-Reduktion-von-SF6-Betriebsemissionen-final.pdf Seite 48 und 111

21 taz (2020). „Saubere Luft statt SF₆“, <https://taz.de/Alternative-fuer-extremes-Treibhausgas/!5667743/>

22 Siemens AG (2020). „Alternativen für SF₆ dringend gesucht“, <https://new.siemens.com/global/de/unternehmen/stories/energie/alternativen-fuer-sf6.html>

Siemens AG (2020). „Der erste Auftrag für eine 8VN1 in Dänemark“, <https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/referenzen/erste-auftrag-fuer-8vn1-in-daenemark.html>

3. Quellenverzeichnis

Billen, P. et al. (2020). „Replacing SF6 in Electrical Gas-Insulated Switchgear: Technological Alternatives and Potential Life Cycle Greenhouse Gas Savings in an EU-28 Perspective“, *Energies* 2020, 13, 1807; doi:10.3390/en13071807, <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/7/1807/s1>

Deutscher Bundestag (2016). BT-Drs 19/9227, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion DIE LINKE „Neuer Emissionsanstieg bei Super-Klimagasen Schwefelhexafluorid und Stickstofftrifluorid“, <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/18/092/1809227.pdf>

Deutscher Bundestag (2019). BT-Drs 19/10983, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion BÜNDNIS90/DIE GRÜNEN „Einsatz von Schwefelhexafluorid in der Energiewirtschaft“, <https://dipbt.bundestag.de/doc/btd/19/109/1910983.pdf>

Ecofys (2018). Abschlussbericht „Konzept zur SF6-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/endbericht_sf6_de.pdf

Ecofys (2018). Zusammenfassung „Konzept zur SF6-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/endbericht_sf6_zusammenfassung_de.pdf

Europäische Kommission (2020). „F-gas Consultation Forum“, https://ec.europa.eu/clima/events/articles/0106_en

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) (2019). Projektseite „Wirkungsanalyse von F-Gas-freien Mittelspannungs-GIS-Anwendungen“, <https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/f-gas-free.html>

Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) (2020). Summary „Impact assessment of F-gas free medium voltage switchgear“, <https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Projekte/f-gas-free/F-gas-free-study-summary-final.pdf>

Grotelüschen, F., Deutschlandfunk (2019). „Treibhausgas SF6 dringend gesucht“, https://www.deutschlandfunk.de/hochspannungstechnik-ersatz-fuer-treibhausgas-sf6-dringend.676.de.html?dram:article_id=463800

Guetelin, M.Ch., et al. Grenoble Ecole de Management (2020). Final Report „Empirical study investigating the environmental and socio-economic impact of SF6 and its alternatives in medium voltage switchgear“, https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Projekte/f-gas-free/sf6_report_gem_final2.pdf

Öko-Recherche, Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH (2020). „Briefing paper: SF6 and alternatives in electrical switchgear und related equipment“, https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/0106/2020_03_25_sf6_and_alternatives_en.pdf

Siemens AG (2020). „Alternativen für SF6 dringend gesucht“, <https://new.siemens.com/global/de/unternehmen/stories/energie/alternativen-fuer-sf6.html>

Siemens AG (2020). „Der erste Auftrag für eine 8VN1 in Dänemark“, <https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/referenzen/erste-auftrag-fuer-8vn1-in-daenemark.html>

Statistisches Bundesamt DESTATIS (2018). „Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe "Schwefelhexafluorid" (SF6) und "Stickstofftrifluorid" (NF3)“, www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Klimawirk-same-Stoffe/Publikationen/Downloads-Klimawirksame-Stoffe/schwefelhexafluorid-5332401177004.pdf?__blob=publicationFile&v=5

T&D Europe, The European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry (2020). „T&D Europe comment on Öko-Recherche and RE-xpertise Briefing Paper on SF6 and alternatives in electrical switchgear and related equipment.“, <https://www.tdeurope.eu/component/attachments/attachments.html?id=1482>

T&D Europe, The European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry (2020). „Technical report on alternative to SF6 gas in medium voltage & high voltage electrical equipment“, <https://www.beama.org.uk/asset/35AC6550-E506-4417-8FDB33E7C3C854F6/>

T&D Europe, The European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry (2020). „T&D Europe position paper on SF6 and SF6 alternative technologies - F-Gas Regulation, SF6 Technology and Alternatives for Transmission and Distribution (T&D) Electrical Switch-gear“, <https://www.tdeurope.eu/component/attachments/attachments.html?id=1421>

T&D Europe, The European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry (2020). „Technical report on alternative to SF6 gas in medium voltage & high voltage electrical equipment“, <https://www.tdeurope.eu/component/attachments/attachments.html?id=1435>

taz (2020). „Saubere Luft statt SF6“, <https://taz.de/Alternative-fuer-extremes-Treibhausgas/!5667743/>

Umweltbundesamt (UBA) (2010). „Fluorierte Treibhausgase vermeiden - Wege zum Ausstieg“, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/515/dokumente/3962.pdf>

Umweltbundesamt (UBA) (2016). „EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase#aktuelles>

Umweltbundesamt (UBA) (2019). „Schaltanlagen“, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/schaltanlagen>

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE), Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE (FNN) (2010). Positionspapier „Alternativen für den Einsatz von SF6 in der

Energietechnik“, <https://www.vde.com/resource/blob/796250/1493d8941d606b71eb57e50f88a0f043/vde-fnn-positionspapier-sf6-data.pdf>

Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE) (2016). „Alternativen für den Einsatz von SF6 in der Energietechnik“, <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/umwelt-naturschutz/sf6>

Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e. V. (2020). „SF6 in der Energietechnik“, <https://www.zvei.org/verband/fachverbaende/fachverband-energietechnik/sf6-in-der-energietechnik/>

Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e. V. (2020). „Szenario zur Reduktion der SF6-Betriebsemissionen von elektrischen Betriebsmitteln durch den Einsatz alternativer Isoliergase“, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2020/April/SF_6_Reduktion/Szenario-zur-Reduktion-von-SF6-Betriebsemissionen-final.pdf