

SF6-freier Betrieb von Schaltanlagen in der Windenergie

November

2023



Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1 Rechtliche und wirtschaftliche Grundlagen	5
1.1 EU-Taxonomie	5
1.2 Aktuelles und zukünftige Normen und Gesetze.....	6
2 Vor- und Nachteile von SF6-haltigen Schaltanlagen	8
2.1 Vorteile	8
2.2 Nachteile.....	8
2.3 Alternative Isolationsmedien	9
3 WEA-Neuprojekte – Was ist zu beachten?	10
3.1 Schaltanlage im Turm/Trafostation	10
3.2 Übergabestationen/Umspanwerke.....	10
4 Rückbau und Recycling von SF6-Schaltanlagen	12
4.1 Selbstverpflichtung der Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln zur Energieübertragung und - verteilung.....	12
4.2 Re-Use und Entsorgung	12
5 Fazit und Handlungsempfehlung	13
Anhang	15

Einleitung

Angesichts der Ausbaupläne und Klimaziele in Europa und Deutschland gewinnt das Potenzial CO₂ einzusparen immer mehr an Bedeutung und Notwendigkeit. Mit der Novellierung der EU-F-Gase-Verordnung und dem Beschluss des Europarats am 19. Oktober 2023¹ wird nun ein Pfad zum SF₆-freien Betrieb (SF₆=Schwefelhexafluorid) von elektrischen Betriebsmitteln aufgezeigt, der einen Wechsel bestehender Technologien mit sich ziehen soll. Jedoch reicht die vorgesehene schrittweise Abschaffung für Neuprojekte nicht aus, um die Emissionen nachhaltig zu reduzieren. Die Beschränkung des Inverkehrbringens, dem Einsatz und der Produktion von F-Gas-Produkten sind ein notwendiger Schritt, der jedoch die großen schon bestehenden Mengen an SF₆ nicht miteinbezieht. Daher ist bei Bestandsanlagen auf die hohe Wichtigkeit einer ordnungsgemäßen Entsorgung von SF₆ befüllten Anlagen hinzuweisen. Durch eine Entsorgung beim Anlagenhersteller oder durch Fachfirmen kann das SF₆ zum Großteil auch wiederverwendet werden, an der Stelle, wo es noch zwingend notwendig ist.

Dieses Informationspapier führt die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zum SF₆-freien Betrieb von Schaltanlagen in der Mittel- und Hochspannungsebene auf und liefert dabei eine Übersicht über die zurzeit verfügbaren Technologien. Darauf aufbauend formuliert es Handlungsempfehlungen für den Umstieg zu einem SF₆-freien Betrieb von Windenergieanlagen (WEA).

SF₆ ist eine anorganische, chemische Verbindung – weder giftig noch brennbar. SF₆ hat jedoch eine der stärksten uns bekannten Treibhausgaswirkungen und wirkt rund 23.500-mal stärker (global warming potential = GWP) als Kohlenstoffdioxid (CO₂) und hat in der Atmosphäre eine Lebensdauer von etwa 3.200 Jahren². In der Windenergie wird es als Isolations- und Lichtbogenlöschgas für Mittel- und Hochspannungsschaltanlagen verwendet. Die sehr guten Isoliereigenschaften ermöglichen es, kompakte und kostengünstige Schaltanlagen zu produzieren.

Auch in anderen technischen Anwendungsbereichen findet SF₆ aufgrund der guten Isoliereigenschaften Anwendung. Somit wird es z.B. als Kühlgas in der Kältetechnik verwendet. Des Weiteren wurde SF₆ auch in vielen Alltagsanwendungen (Autoreifen, Tennisbälle, Fensterscheiben) verwendet, wo es jedoch schon heute verboten ist.

Da SF₆ in der Elektrotechnik in geschlossenen Systemen eingesetzt wird, wird das Gas im Normalbetrieb kaum freigesetzt. Bei sachgerechter Wartung und Entsorgung liegen Leckagen mit weniger als 0,1 Prozent pro Jahr³ in einem überschaubaren Bereich. Eine freiwillige Selbstverpflichtung⁴ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) soll über den Betrieb hinaus, den Umgang mit SF₆ präzisieren. Hierbei werden Richtlinien für die Herstellung, Inbetriebnahme, Betrieb und Rückgewinnung aufgeführt. Die Selbstverpflichtung bleibt jedoch nur auf freiwilliger Basis, weshalb nicht vernachlässigbare Mengen SF₆ weltweit durch die Industrie weiterhin in die Atmosphäre emittiert werden (siehe Abbildung 1).

¹ Council of the European Union (2022): [LINK](#), zuletzt aufgerufen am 1.11.2023

² Umweltbundesamt (2019) - [LINK](#), zuletzt aufgerufen am 1.11.2023

³ Umweltbundesamt: Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie – Abschlussbericht - [LINK](#)

⁴ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Selbstverpflichtung der SF₆-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln - [LINK](#)

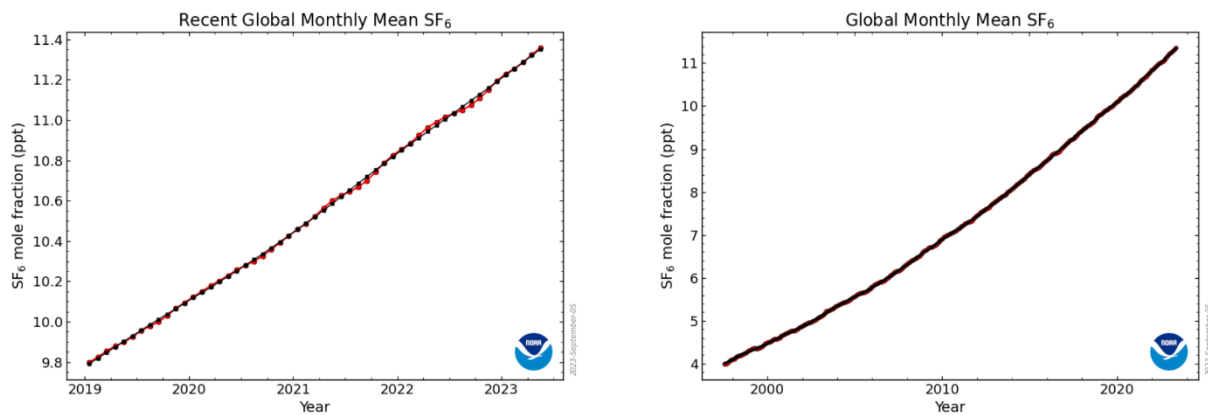


Abbildung 1: Weltweite monatlich-gemittelte SF₆-Häufigkeit in der Atmosphäre
(Quelle: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends_sf6)

Diesem Missstand kann nur durch einen Technologiewandel der gesamten Branche entgegengewirkt werden, der bereits in vollem Gange ist, wie anhand der Entwicklungen SF₆-freier Schaltanlagen aller gängiger Schaltanlagenhersteller zu sehen ist. Viele der gängigen Schaltanlagenhersteller erweitern ihre Produktpalette durch SF₆-freie klimafreundliche Alternativen, um der Nachfrage und des kommenden Verbots von SF₆ gerecht zu werden.

Aktuell werden bereits einige Projekte SF₆-frei umgesetzt, jedoch fehlt es an vielen Stellen an der Verfügbarkeit SF₆-freier Schaltanlagen, die sämtliche geforderten Anforderungen (u.a. Störlichtbogenprüfung) erfüllen. Die Möglichkeit zur Bestellung erster SF₆-freier kompakter Schaltanlagen wird spätestens Ende 2023 erwartet.

1 Rechtliche und wirtschaftliche Grundlagen

Während die jüngste F-Gase-Verordnung der Europäischen Union ein Verbot von SF6 erst sukzessive (nach Spannungsebene) bis 2032 vorsieht, werden aktuelle Entwicklungen in der Sustainable-Finance-Gesetzgebung die Verwendung von SF6 vermutlich bereits ab 2024 betriebswirtschaftlich nicht länger honorieren. Dabei geht es um Vorschläge der EU, die darauf abzielen, die Herstellung elektronischer Güter, die SF6-haltige Technologien verwenden, als nicht nachhaltig zu klassifizieren – selbst, wenn diese für den Einsatz in Windenergieanlagen bestimmt sind. Herstellern entsprechender Güter wird es somit schwerer fallen, attraktive Finanzierungsangebote zu erhalten, was sich entsprechend negativ auf ihre Wettbewerbsfähigkeit auswirken wird.

Hintergrund dessen ist die EU-Taxonomie, mit deren Hilfe der Gesetzgeber auf das wachsende Bewusstsein und die steigende Notwendigkeit für nachhaltige Finanzprodukte reagiert.

1.1 EU-Taxonomie

Die EU-Taxonomie ist im Grundsatz ein Klassifizierungsrahmen für nachhaltige Wirtschaftsaktivitäten, verbunden mit verschiedenen Pflichten für Kreditinstitute und Unternehmen, den Anteil ihrer nachhaltigen Positionen am Gesamtportfolio respektive am Gesamtumsatz zu benennen. Aufgrund des wachsenden Drucks seitens der Kunden und der Finanzaufsicht, Nachhaltigkeit stärker in Steuerungsprozesse zu integrieren, haben Banken ein hohes Interesse daran, sich bei ihren Investitionen an der EU-Taxonomie zu orientieren. Eine Finanzierung von Unternehmen oder Wirtschaftsaktivitäten, die nicht nachhaltig im Sinne der EU-Taxonomie sind, stellt vor dem Hintergrund des wachsenden Kundenbewusstseins für Nachhaltigkeitsbelange ein nicht zu verkennendes Reputationsrisiko dar, das Banken in ihren Investitionsentscheidungen und Kreditkonditionen berücksichtigen werden.

Gleichzeitig werden die erhobenen Angaben zur Nachhaltigkeitsausrichtung der finanzierten Unternehmen von Kreditinstituten und Aufsichtsbehörden dafür genutzt, um abzuschätzen, wie stark die jeweilige Exposition eines Investments gegenüber Nachhaltigkeitsrisiken ist. Ein niedriger Anteil nachhaltiger Investitionen im Sinne der EU-Taxonomie am Gesamtportfolio bzw. am Umsatz spricht tendenziell für eine hohe Exposition gegenüber transitorischen Risiken. Transitorische Risiken resultieren aus der durch regulatorische Vorgaben induzierten Transformation hin zu einer klimaneutralen Wirtschaft, wie etwa über die Einführung einer wirkungsvollen CO₂-Bepreisung. CO₂-intensive Geschäftsmodelle würden unwirtschaftlich, womit für Kreditinstitute die Gefahr von sog. Stranded Assets einhergeht. Banken müssten für das steigende Ausfallrisiko ausreichend Eigenkapital vorhalten. Je höher die Risiken eines Investments sind, desto mehr Eigenkapital muss vorgehalten werden, was sich ebenfalls in entsprechend schlechteren Finanzierungsbedingungen widerspiegelt.

Da SF6 als das klimawirksamste Treibhausgas gilt, führen die beschlossenen Offenlegungspflichten zu einer Präferenzverschiebung und einer höheren Risikowahrnehmung seitens der Investoren und Kreditinstitute – mit negativen Folgen für Hersteller von SF6-haltigen Produkten. Auf der anderen Seite werden progressive Unternehmen nicht nur von den schlechteren Finanzierungsmöglichkeiten ihrer Mitbewerber profitieren: Über sog. grüne Anleihen (engl. „green bonds“) können sich Unternehmen mit Taxonomie-konformen Wirtschaftsaktivitäten bald direkt am Finanzmarkt zu besseren Konditionen finanzieren, was ihren Wettbewerbsvorteil weiter ausbauen wird. Die Unternehmen, die frühzeitig auf

SF6-freie Produkte setzen und entsprechende Produktionen skalieren, haben nun die Möglichkeit, sich einen effektiven Wettbewerbsvorteil zu sichern.

Die Einführung einer nachhaltigen Finanzgesetzgebung und somit die Ausgabe von grünen Anleihen haben das Potenzial, SF6-freie Technologien, effektive Wettbewerbsvorteile und bessere Finanzierungsbedingungen zu schaffen. Worauf sollte geachtet werden:

- SF6-haltige Technologien werden als nicht nachhaltig deklariert
- Klassifizierungsrahmen für nachhaltige Wirtschaftsaktivitäten
- Berücksichtigung von Nachhaltigkeit der Kundenprojekte bei den Investitionsentscheidungen und Kreditkonditionen
- Ein niedriger Anteil nachhaltiger Investitionen im Sinne der EU-Taxonomie kann zu einer hohen Exposition gegenüber transitorischen Risiken⁵ führen
 - höheres Ausfallrisiko und damit höheres Eigenkapital notwendig

1.2 Aktuelles und zukünftige Normen und Gesetze

Elektrische Schaltanlagen unterliegen den Regelungen der F-Gas-Verordnung (EU) 517/2014⁶. Es bestehen Anforderungen zur Dichtheitskontrolle, Führung von Aufzeichnungen und Zertifizierung des Personals, welche durch die Durchführungsverordnung (EU) 2015/2066⁷ konkretisiert wird.

Die F-Gas-Verordnung, Absatz 5 (Stand 19. Oktober 2023), gibt folgende Daten zur kaskadierten Umsetzung an:

*Tabelle 1: Umsetzung der F-Gase-Verordnung nach Spannungsebene
 (Quelle: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CONSIL:ST_14409_2023_INIT)*

Vorschlag der Kommission, Absatz 5	Datum des Verbots
Die Inbetriebnahme von Mittelspannungsschaltanlagen für die Primär- und Sekundärverteilung mit einer Spannung bis zu 24 kV mit fluorierten Isolier- oder Schaltmedien ist verboten.	1. Januar 2026
Die Inbetriebnahme von Mittelspannungsschaltanlagen für die Primär- und Sekundärverteilung mit einer Spannung über 24 kV und bis zu 52 kV mit fluorierten Isolier- oder Schaltmedien ist verboten.	1. Januar 2030
Die Inbetriebnahme von Hochspannungsschaltanlagen für die Primär- und Sekundärverteilung mit einer Spannung ab 52 kV und bis zu 145 kV und einem Kurzschlussstrom bis zu 50 kA mit einem GWP > 1 mit fluorierten Isolier- oder Schaltmedien ist verboten.	1. Januar 2028

⁵ Risiken, die durch politische Veränderungen, Technologieschocks sowie Änderungen der Verbraucherpräferenzen entstehen

⁶ EU (2014): [LINK](#), zuletzt aufgerufen am 1.11.2023

⁷ EU (2015): [LINK](#), zuletzt aufgerufen am 1.11.2023

Die Inbetriebnahme von **Hochspannungsschaltanlagen** für die Primär- und Sekundärverteilung mit einer **Spannung von mehr als 145 kV** und einem **Kurzschlussstrom bis zu 50 kA mit einem GWP > 1** mit fluorierten Isolier- oder Schaltmedien ist verboten

1. Januar 2032

Hinweise zu Ausnahmeregeln, Absatz 5⁸

Zu Absatz 5a:

Für sich im Betrieb befindende Mittel- und Hochspannungsschaltanlagen, innerhalb Absatz 5 (a-d) in der Europäischen Union besteht ein Bestandsschutz; diese sind somit ausgenommen vom Absatz 5.

Zu Absatz 5b:

Die Verwendung von fluorierten Isolier- oder Schaltmedien mit einem GWP ≤ 1000 ist zulässig, sofern:

- i. nachgewiesen wird, dass in den vorstehend genannten GWP-Bereichen aus technischen Gründen keine geeignete Alternative zur Verfügung steht und in den ersten zwei Jahren kein Angebot, oder nur Angebote eines Herstellers bestehen
- ii. nach zwei Jahren keine Alternativen von mehreren Herstellern bestehen

Zu Absatz 5c:

Abweichend von Absatz 5b sind Schaltanlagen mit einem GWP ≥ 1000 zulässig, sofern nachgewiesen wird, dass in den vorstehend genannten GWP-Bereichen aus technischen Gründen keine Alternativen zur Verfügung stehen.

⁸ Europarat - F-Gase-Verordnung, Stand 19. Oktober 2023, [LINK](#)

2 Vor- und Nachteile von SF₆-haltigen Schaltanlagen

In der Elektrotechnik wird ein Isoliermedium benötigt, um Durch- bzw. Überschlägen zwischen Materialien (Polen) mit unterschiedlichem Potential (Spannung) zu verhindern. Im Normalfall wird dafür die überall verfügbare Luft verwendet. Da Luft nur eine begrenzte Isolierfähigkeit besitzt, würde in einem homogenen Feld ab etwa 31.000 Volt ein Durchschlag über eine Distanz von 1 cm erfolgen. Bei nicht-homogenen Feldern, wie sie in technischen Anlagen vorhanden sind, ist dieser Wert noch geringer. So kann sie die Durchschlagsspannung bei einem Stab gegenüber einer Fläche auf Werte unter 1.800 Volt/cm verringern.

2.1 Vorteile

Die Durchschlagsspannung erhöht sich nicht linear zum Abstand und ist auch vom Luftdruck und der Temperatur abhängig. Daraus folgt, dass bei hohen Spannungen, wie sie in der Energieverteilung benötigt werden, ein sehr hoher Abstand zwischen den Polen oder ein anderes Isoliermedium benötigt werden. Hier kommt nun das Isoliergas Schwefelhexafluorid SF₆ zum Einsatz, das eine zwei- bis dreifach höhere Isolierfestigkeit besitzt. Auch als Löschmittel von Lichtbögen in Schaltern wird SF₆ aufgrund seiner geringen Dissoziationsenergie und der damit verbundenen höheren Wärmeleitfähigkeit verwendet.

Aufgrund dieser guten Isolier- und Löschfähigkeit von SF₆ können sehr kompakte und kostengünstige Schaltanlagen gebaut werden. Diese Schaltanlagen sind mit Isoliergas gefüllt und hermetisch verschlossen. Speziell in Innenstädten mit begrenztem Bauraum (z.B. in unterirdischen Umspannwerken) kommen diese Anlagen zum Einsatz. Der durch die Kapselung nicht mehr erforderliche Wartungsbedarf ist ein großer Vorteil. In der Wind-/Solarbranche ergeben sich zusätzliche Vorteile:

- a. Kleinere Gebäude in Umspannwerken, bzw. kleinere Stationen im Mittelspannungsbereich und somit geringerer Flächenbedarf (Kostensparnis)
- b. ggf. keine Baugenehmigung erforderlich (Bundesland abhängig)
- c. Möglichkeit des Austauschs von defekten Schaltanlagen durch die Turmtür einer Windanlage nach deren Errichtung

Durch die hochautomatisierte Produktion und Verfügbarkeit von SF₆-Schaltanlagen sowie des geringeren Materialeinsatzes, aufgrund ihrer kompakten Bauweise, sind diese in der Anschaffung oft auch kostengünstiger als luftisolierte Anlagen.

2.2 Nachteile

Neben den bereits genannten gravierenden Nachteilen von SF₆ als Treibhausgas sind die wesentlichen Nachteile der SF₆-Schaltanlagen deren aufwendigere Entsorgung und deren Behandlung nach einem Defekt. Hier muss speziell ausgebildetes Personal mit zugelassener Ausrüstung eingesetzt werden, um z.B. das SF₆-Gas abzusaugen und zu analysieren.

Mit dem Ausbau erneuerbarer Energien steigt aktuell die Verwendung von SF₆, da kompakte Schaltanlagen in jeder Windturbine und in jeder Trafostation zum Einsatz kommen. Dies birgt potenziell neue Gefahren, da eine steigende Anzahl an Schaltanlagen auch zu häufigeren Defekten und damit häufigeren Ausströmungen des gesamten Gasraumes führen wird. Aufgrund der gravierenden Nachteile von SF₆ als Treibhausgas ist ein Umstieg zu SF₆-freien Alternativen daher unbedingt notwendig.

2.3 Alternative Isolationsmedien

Als alternatives Isoliermedium zu SF₆ für kompakte Schaltanlagen werden verschiedene Zusammensetzungen angeboten: Luft, Luftgemische, Feststoffe und Öle. Bei den Herstellern wird dabei hauptsächlich zwischen zwei Arten unterschieden. Zum einen gibt es substituierende Gasgemische, welche ohne tiefgreifende Umbaumaßnahmen der Schaltanlage, jedoch bei deutlich geringerem GWP von z.B. 1 anstatt 23.500, das SF₆ durch andere Fluorgase (z.B. C₅, AirPlus, siehe Tabelle im Anhang) ersetzen. Zum anderen gibt es Gasgemische mit einem GWP < 1, die sich auf die Bestandteile reiner Luft konzentrieren. In der Regel handelt es sich dabei um ein unter Druck stehendes Luftgemisch mit erhöhtem Stickstoff- und CO₂-Gehalt (Dry Air und Clean Air, siehe Tabelle im Anhang). Bei Leistungsschaltern, die dieses Gasgemisch verwenden, wird auf die lang bewährte Technik der Vakuum-Leistungsschalter gesetzt. Durch dieses Gasgemisch und die dickeren Wände, welche durch den erhöhten Druck benötigt werden, ist jedoch mit 20-30 Prozent erhöhten Kosten im Vergleich zu SF₆-haltigen Schaltanlagen zu rechnen.

Für einige Anwendungsfälle stehen heute bereits kompakte, umweltfreundliche Schaltanlagen zur Verfügung – speziell im Bereich bis 24 kV und für Nennströme bis 630 A (Sekundär-Schaltanlagen). Für die Spannungsebene mit 36 kV ist bisher keine nennenswerte Verfügbarkeit und Erfahrung von kompakten Schaltanlagen vorhanden. Anders verhält es sich im Bereich der Primär-Schaltanlagen höherer Spannungsebenen, die typischerweise in Umspannwerken eingesetzt werden und für einen sehr hohen Sammelschienenstrom und hohe Kurzschlussfestigkeit ausgelegt sind. Aus Platz- und Kostengründen können Primär-Schaltanlagen derzeit oft nicht als SF₆-freie Alternative angeboten werden: Jedoch zeigen sich auch in diesem Anwendungsbereich erste Entwicklungen, erste umweltfreundliche Alternativen wurden vorgestellt und sollen bald verfügbar sein.

Eine Übersicht zu den verfügbaren Anlagen der gängigen Schaltanlagenhersteller ist im *Anhang* (Stand November 2023) tabellarisch aufgeführt.

SF₆ wird als Isolations- und Schaltmedium für moderne Schaltanlagen verwendet. Aufgrund der hohen Leistungsdichte können Anlagen kompakt und kostengünstig gebaut werden. Deshalb hat sich diese Technologie bereits vor mehreren Jahrzehnten als Stand der Technik durchgesetzt. Jedoch...

- ...ist SF₆ bezüglich der Ausbauziele und der damit verbundenen Potenzierung von Schaltanlagen im Stromsystem hinsichtlich der Umweltaspekte nicht mehr tragbar.
- ...sind die Entsorgung und der direkte Umgang nur durch speziell ausgebildetes Personal möglich.
- ...sind bis 24 kV heute schon umweltfreundliche und leistungsstarke Alternativen auf dem Markt.

3 WEA-Neuprojekte – Was ist zu beachten?

3.1 Schaltanlage im Turm/Trafostation

Bei der Aufstellung im Turmfuß einer WEA ist die Personensicherheit von grundsätzlicher Bedeutung, daher müssen die Mittelspannungs-Schaltanlagen hier vollständig gekapselt und störlichtbogengeprüft sein. Zusätzlich gibt es spezielle Anforderungen an das Ableiten der Rauchgase aus der Schaltanlage im Falle eines Störlichtbogens, dies geschieht zum Teil über einen Druckabsorber. Im Rahmen der Typenprüfungen der WEA-Türme werden hierzu Störlichtbogenstudien durchgeführt.

In Stahlrohtürmen mit einem Turmfußdurchmesser von etwa vier Metern ist der Bauraum begrenzt, wodurch nicht alle auf dem Markt verfügbaren Schaltanlagen (z.B. luftisoliert) verwendet werden können. In solchen Fällen greift man auf Schaltanlagen mit SF6-Gas zurück, da sie sich auch bei erheblichen Schwankungen in Temperatur und Luftfeuchtigkeit bewährt haben. Diese Schaltanlagen werden dann aufgrund aufwendiger Typenprüfungen in allen WEA dieses Typs eingesetzt, selbst wenn der spezifisch verwendete Turm (z.B. Beton-Turm) größere Schaltanlagen ermöglichen würde.

Hier ist die Branche auf SF6-freie kompakte Schaltanlagen angewiesen, die die gleichen oder nahezu identischen Abmessungen wie die SF6-Schaltanlagen aufweisen müssen und alle elektrischen sowie Isolationseigenschaften erfüllen. Die ersten kompakten SF6-freien Schaltanlagen sollen bereits Ende 2023 verfügbar sein und können nach erfolgreicher Störlichtbogenstudie eingesetzt werden.

Die Installation dieser Schaltanlagen erfolgt durch die Hersteller der WEA und sie sind in die Steuerung und Leittechnik der Anlagen integriert, um unter anderem eine Wiederschaltung bei Netzausfall und Netzschutzfunktionen zu gewährleisten. Aus diesem Grund müssen diese Schaltanlagen, insbesondere das Schutzrelais, auch den Schnittstellenanforderungen der WEA-Hersteller entsprechen.

Die folgenden Normen/Regularien sind für neue WEA-Projekte zu beachten (IEC-Normen und deren nationale Umsetzungen):

- IEC-Typenprüfungen für WEA nach IEC 61400 für den internationalen Markt
- Technische Regeln des DIBt für WEA-Türme und -Fundamente für den deutschen Markt
- VDE 0670-811:2021-06 Norm
- IEC 62271-103, IEC 62271-1, 62271-100, 62271-102 sowie IEC 62271-200 und IEC 60964 Normenreihe

3.2 Übergabestationen/Umspannwerke

Über die WEA hinaus werden Schaltanlagen in jedem Windpark am Netzverknüpfungspunkt verwendet. In der Regel werden hierfür typengeprüfte Fertigbeton-Gebäude, welche eine Störlichtbogen-Zulassung mit einem oder mehreren Mittelspannungsschaltanlagen-Typen haben, verwendet. Handelt es sich um einen Hochspannungs-Netzanschluss, muss zusätzlich ein Transformator installiert werden, der die Mittelspannung auf Hoch- oder Höchstspannung anhebt. Dieser Transformator ist wiederum mit einer Hochspannungsschaltanlage, die in der Regel als Freiluftanlage aufgebaut ist, mit dem Stromnetz gekoppelt. Neben den Freiluft-Schaltanlagen kommt bei Hochspannungsanlagen SF6 zum Teil auch in anderen Bauteilen (z.B. Wandlern) zum Einsatz. Umspannwerke sind immer Einzelanfertigungen mit

erheblichem Planungsaufwand, auf die Erzeugungsanlage und die Netzanforderungen zugeschnitten werden. Die Gebäude für Mittelspannungsanschlüsse werden als Übergabestationen bezeichnet. Sie werden individuell für jede Erzeugungsanlage geplant, sind jedoch stärker standardisiert als Umspannwerke.

Fertigbeton-Gebäude, die in Umspannwerken und Übergabestationen eingesetzt werden, unterliegen den Vorschriften der jeweiligen LandesBauOrdnung: Jedes Bundesland hat unterschiedliche Regelungen dafür, ab welcher Fläche oder welchem Volumen eine Baugenehmigung für die Errichtung erforderlich ist. Die Gebäude bei einem Mittelspannungs-Netzanschluss können kompakt (nicht begehbar) oder begehbar sein und beinhalten typischerweise drei bis fünf Schaltfelder. In den meisten Bundesländern erfordert eine kompakte Station, wenn sie mit SF6-Schaltanlagen ausgestattet ist, in der Regel keine Baugenehmigung.

Kompakte SF6-freie Schaltanlagen bieten ebenfalls Vorteile. Aufgrund der obligatorischen Prüfung der Störlichtbogensicherheit der Schaltanlagen in Kombination mit dem Gebäude wird nach einmaliger Prüfung eines Gebäudetyps die Konformität der Störlichtbogenprüfung ohne echte Prüfung auf alle weiteren Gebäude desselben Typs mit derselben Schaltanlage übertragen. Hier besteht folglich Handlungsbedarf, SF6-freie kompakte Schaltanlagen für Gebäudetypen einmalig, unter Inkaufnahme der Kosten des Gebäudes, entsprechend der Störlichtbogensicherheit zu prüfen.

Wenn hingegen Luft als Isoliermedium verwendet und eine begehbare Station eingesetzt wird, ist in nahezu allen Fällen eine Baugenehmigung notwendig. Bei Windparks setzt man aufgrund der vom WEA-Hersteller bereitgestellten Windpark-Steuerungscomputer (SCADA) für gewöhnlich auf begehbare Stationen, in welchen der SCADA von Witterungen geschützt betrieben werden kann. Auch hier kann der Einsatz von kompakten Schaltanlagen jedoch ein kompaktes Gebäude ohne erforderliche Baugenehmigung ermöglichen. **Solange kompakte SF6-freie Schaltanlagen nicht zur Verfügung stehen, kann auf luftisolierte Schaltanlagen in Übergabestationen gesetzt werden, welche zudem Vorteile bei der Montage von Mittelspannungskabeln mit großem Querschnitt sowie der Wartung aufweisen.**

Gebäude für einen Hochspannungsanschluss, bzw. das so genannte Umspannwerk als solches, erfordern immer mindestens eine Baugenehmigung, abhängig von der Spannung des öffentlichen Netzes. Aufgrund dieser Tatsache ist bei Hochspannungsanschlüssen auch die Verwendung von größeren Gebäuden möglich, welche luftisolierte Schaltanlagen ermöglichen. Bei Spannungen bis zu 36 kV stehen etablierte luftisolierte Schaltanlagen bei vielen Herstellern, auch als Sekundärtechnik, zur Verfügung.

MERKE: bei Mittelspannungsanschlüssen kann eine Baugenehmigung notwendig werden, bei Hochspannungsanschlüssen ist diese immer notwendig.

Mit Inbetriebnahme im Jahr 2023 sind lediglich Luftisolierte Schaltanlagen als SF6 Alternative frei verfügbar mit Auswirkungen auf die Größe der Gebäude. Es werden wohl die ersten störlichtbogengeprüften Gebäude mit SF6-freien kompakten Schaltanlagen ab 2023 mit vollständiger Dokumentation von den bekannten Schaltanlagen- und Gebäudeherstellern für bis zu 24 kV zur Verfügung stehen. Für Spannungen größer 24 kV wird dies wohl noch mehrere Jahre dauern.

4 Rückbau und Recycling von SF6-Schaltanlagen

4.1 Selbstverpflichtung der Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln zur Energieübertragung und -verteilung

Ähnlich wie beim laufenden Betrieb von SF6-Schaltanlagen obliegt die Verantwortung für die Rückgewinnung, das Recycling (einschließlich Re-Use⁹), die Wiederverwendung oder die Entsorgung von SF6 der freiwilligen Selbstverpflichtung der Anwender. Somit wird angenommen, dass nach Ablauf der technischen Lebensdauer einer Schaltanlage das enthaltene SF6 durch den Hersteller oder einen zertifizierten Entsorgungsfachbetrieb zurückgewonnen wird. Hierbei soll eine Rückführung in einen geschlossenen Kreislauf und damit die Wiederverwendung oder fachgerechte Entsorgung sichergestellt werden.

Neben dem Umgang bei Betriebsende der Schaltanlage wird in der Selbstverpflichtung auch die Dokumentation der bestehenden Verfahren vorgeschrieben. Betreiber von SF6-Schaltanlagen müssen die Menge des vor Ort zurückgewonnenen SF6 sowie Art und Anzahl der Betriebsmittel, welche an die bestimmten Hersteller und Entsorgungsfachbetriebe zurückgegeben werden, melden. Die gleiche Dokumentationspflicht gilt auch für Hersteller des Betriebsmittels und SF6-Hersteller. Die Ergebnisse werden dokumentiert und jährlich zu einer SF6-Bilanz verarbeitet, welche zur Bewertung der Emissionen herangezogen wird.

Der Umgang und die Einhaltung der Selbstverpflichtung sowie die Reduktion von SF6 ist aufgrund der Freiwilligkeit und nicht registrierter Zuordnung von weiteren Betriebsmitteln nur schwer quantifizierbar. Wie schon in Kapitel 1 aufgezeigt, steigt die Konzentration von SF6 in der Atmosphäre weltweit an. In den letzten Jahren erreichten zudem die ersten großen Chargen von SF6-haltigen Betriebsmitteln das Ende der technischen Lebensdauer, was potenziell die Emissionen von SF6 erhöhen könnte, wenn der Umgang nicht fachgerecht erfolgt. Der Verband der Elektro- und Digitalindustrie hat hierzu einen *Leitfaden zur umweltgerechten Außerbetriebnahme von SF6-isolierten Betriebsmitteln*¹⁰ veröffentlicht.

4.2 Re-Use und Entsorgung

In Kapitel 3 wurde dargestellt, dass noch nicht für jede Anwendung und Spannungsebene eine treibhausgasneutrale bzw. umweltfreundliche Alternative besteht. Insbesondere in der Mittelspannung (> 24 kV) sind noch signifikante Lücken in der Verfügbarkeit vorhanden. Umso mehr ist ein geschlossener SF6-Kreislauf bei der Verwendung von SF6-Schaltanlagen, welche noch im Betrieb sind und in Betrieb genommen werden sollen, von größter Wichtigkeit. Hierbei kann die Verwendung von aufbereitetem SF6 (Re-Use) einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtemissionen haben. Allerdings ist aufbereitetes SF6 in vielen Fällen teurer für die Schaltanlagen-Hersteller als neues SF6. Aus diesem Grund wird dem Kreislauf weiterhin zusätzlich neues SF6 hinzugefügt. Gebrauchtes SF6 wird daher aufgrund des energieaufwendigen und kostenintensiven Reinigungsprozesses häufig thermisch entsorgt, was bedeutet, dass es verbrannt wird und große Mengen Energie erforderlich sind.

⁹ Aufbereitung von verwendetem SF6 durch Reinigung des Gases

¹⁰ ZVEI – Leitfaden zur umweltgerechten Außerbetriebnahme von SF6-isolierten Betriebsmitteln, [LINK](#)

5 Fazit und Handlungsempfehlung

Der benötigte Technologiewandel, weg von SF6 und hin zu einem nachhaltigen Energiesystem, untersteht politischen und wirtschaftlichen Einflüssen. Ohne die richtigen Anreize aus diesen Bereichen ist nur ein träger Wandel zu erwarten. Durch die Fristen der EU-F-Gase-Verordnung und dem sich sukzessive füllenden Markt an SF6-freien Alternativen sind wichtige Kernelemente gesetzt. Des Weiteren lassen sich auch schon heute nachhaltige Projekte unter verbesserten Konditionen finanzieren.

Lediglich bei der Entsorgung und Wiederverwertung von SF6 gibt es noch Nachbesserungsbedarf, um vorhandene Mengen besser erfassen und entsorgen zu können. Diese vorhandenen Mengen werden noch bis über 50 Jahre in unserem Energiesystem vorhanden sein und verbleiben mehrere tausend Jahre in der Atmosphäre, weshalb der fach- und umweltgerechte Umgang in der Branche Konsens sein sollte.

Für die Umsetzung SF6-freier Projekte oder der Entsorgung bestehender SF6-haltiger Komponenten möchten wir Ihnen folgende Punkte als Handlungsempfehlung mitgeben:

Wenn Sie SF6-freie Schaltanlagen in Ihren Projekten verwenden wollen, oder alte SF6-haltige Komponenten entsorgen möchten, können Ihnen folgende Punkte bei der Umsetzung und Finanzierung helfen:

- Fragen Sie Ihre Banken nach Sustainable-Finance-Konditionen für nachhaltige Projekte
- Kaufen Sie Übergabestationen und Umspannwerke nur noch mit luftisolierten oder anderen umweltfreundlichen SF6-freien Schaltanlagen
- Fordern Sie Ihren WEA-Lieferanten auf, dass dieser SF6-freie Schaltanlagen in Ihren Projekten einsetzt, 2023 sind erste kompakte Modelle ohne SF6 verfügbar. Verweisen Sie hierbei auch auf die Wichtigkeit aufgrund der EU-Taxonomie und der damit verbundenen Umsetzungsfristen
- Achten Sie auf die genannte freiwillige Selbstverpflichtungen beim Betrieb und der Entsorgung von SF6-haltigen Betriebsmitteln und geben Sie wichtige Informationen diesbezüglich auch beim Verkauf der Windparks an die neuen Eigentümer*innen weiter
- Achten Sie auf den sorgfältigen Umgang bei der Entsorgung und Wiederverwertung von SF6-haltigen Betriebsmitteln – vor allem im Bereich des Repowerings (siehe Leitfaden ZVEI zur umweltgerechten Außerbetriebnahme von SF6-isolierten Betriebsmitteln)

Impressum

Bundesverband WindEnergie e.V.
EUREF-Campus 16
10829 Berlin
030 21234121 0
info@wind-energie.de
www.wind-energie.de
V.i.S.d.P. Wolfram Axthelm

Foto

Pixabay (CCO)

Haftungsausschluss

Die in diesem Papier enthaltenen Angaben und Informationen sind nach bestem Wissen erhoben, geprüft und zusammengestellt. Eine Haftung für unvollständige oder unrichtige Angaben, Informationen und Empfehlungen ist ausgeschlossen, sofern diese nicht grob fahrlässig oder vorsätzlich verbreitet wurden.

Der Bundesverband WindEnergie e.V. ist als registrierter Interessenvertreter im Lobbyregister des Deutschen Bundestages unter der Registernummer R002154 eingetragen.

Den Eintrag des BWE finden Sie [hier](#).

Ansprechpartner*innen

Kevin Hamann

Fachreferent Netzintegration
Technik
k.hamann@wind-energie.de

Christina Hasse

Fachreferentin Planung und Projektierung
Finanzierung
c.hasse@wind-energie.de

Datum

6. November 2023

Anhang – Übersicht SF6-freier Mittelspannungsschaltanlagen

Nachfolgende Tabellen geben einen Überblick, der derzeit verfügbaren oder bald verfügbaren kompakten und luftisolierten Schaltanlagen für Sekundäre Verteilnetze sortiert nach Spannungsebene. Kompakte Schaltanlagen weisen im Gegensatz zu luftisolierten Schaltanlagen deutlich geringere Abmessungen auf. In Kompaktstationen (nicht begehbar) sind oft nur kompakte Schaltanlagen einsetzbar. Luftisolierte Schaltanlagen sind größer als kompakte Schaltanlagen, da als Isolationsmedium reine Luft (ohne Druckraum) verwendet wird. Die Leistungsschalter sind in der Regel als Vakuum-Leistungsschalter ausgeführt.

Maximale Spannung: 12 kV

Hersteller	Bezeichnung	Isolation	Bemessungsstrom In [A]	Kurzschlussstrom Ik [kA]	Verfügbarkeit
<u>Kompakte Schaltanlagen für sekundäre Verteilnetze</u>					
ABB	SafeRing/SafePlus Air	DryAir + Vakuum LS	630	20	Verfügbar
Siemens	8DJH 12 – blue GIS	Clean Air + Vakuum LS	630	21	Teilweise verfügbar
Schneider	RM AirSet	PureAir + Vakuum LS	630	20	Bald verfügbar
<u>Luftisolierte Schaltanlagen für sekundäre Verteilnetze</u>					
Driescher	D12	Luft + Vakuum LS	630	20	Verfügbar
Driescher	W12	Luft + Vakuum LS	630	31,5	Verfügbar
Siemens	SIMOSEC	Luft + Vakuum LS	630	20	Verfügbar
ABB	SafeRing/SafePlus Air	DryAir + Vakuum LS	630	20	Verfügbar
ABB	UniSec	Luft + Vakuum LS	630	20	Verfügbar

Maximale Spannung: 24kV

Hersteller	Bezeichnung	Isolation	Bemessungsstrom In [A]	Kurzschlussstrom Ik [kA]	Verfügbarkeit
<u>Kompakte Schaltanlagen für sekundäre Verteilnetze</u>					
ABB	SafeRing/SafePlus	AirPlus	630	16	Verfügbar
Schneider	RM AirSeT	PureAir + Vakuum LS	630	20	Bald verfügbar
Siemens	8DJH 24 – blue GIS	Clean Air + Vakuum LS	630	21	Bald verfügbar
Driescher	ECOS-C	MIDEL 7131 - Öl	630	20	In Zertifizierung
<u>Luftisolierte Schaltanlagen für sekundäre Verteilnetze</u>					
Schneider	SM AirSeT	Luft + Vakuum LS	1250	20	Verfügbar
Eaton	XIRIA	Luft + Vakuum LS	630	20	Verfügbar
Driescher	D24	Luft + Vakuum LS	630	20	Verfügbar
Driescher	W24	Luft + Vakuum LS	1600	31,5	Verfügbar
Siemens	SIMOSEC	Luft + Vakuum LS	1250	25	Verfügbar
ABB	UniSec	Luft + Vakuum LS	1250	25	Verfügbar

Maximale Spannung: 36kV

Hersteller	Bezeichnung	Isolation	Bemessungsstrom In [A]	Kurzschlussstrom Ik [kA]	Verfügbarkeit
<u>Kompakte Schaltanlagen für sekundäre Verteilnetze</u>					
Kompakte 36kV Schaltanlagen ohne SF6 befinden sich derzeit noch in der frühen Entwicklungsphase					
<u>Luftisolierte Schaltanlagen für sekundäre Verteilnetze</u>					
Driescher	Pro-AIR H	Luft + Vakuum LS	2000	31,5	Verfügbar
Driescher	W 38,5	Luft + Vakuum LS	1250	16	Verfügbar
Nuventura	Nu1	DryAir + Vakuum LS	2500	31,5	Verfügbar
ZPUE S.A.	RELF	Luft + Vakuum LS	1600	25	Verfügbar
Siemens	NXAIR H	Luft + Vakuum LS	2900	31,5	Verfügbar
ABB	UniGear ZS2	Luft + Vakuum LS	3150	31,5	Verfügbar

LS: Leistungsschalter

Isoliermedien im Vergleich

Hersteller	Bezeichnung	GWP	Zusammensetzung	Gasdruck
ABB	DryAir	0	Getrocknete unter Druck stehende Luft	12kV, ca. 0,4 bar 24kV, ca. 0,9 bar 36kV, ca. 1,8 bar
ABB	AirPlus	< 1	80% getrocknete Luft + 20% C5-perfluoroketone (GWP < 1)	1-2 bar
Siemens	Clean Air	< 1	Bestandteile reiner Luft in geändertem Mischverhältnis unter Druck stehend	12kV, ca. 1,6 bar 24kV, ca. 1,9 bar
Schneider	PureAir		Getrocknete unter Druck stehende Umgebungsluft	24kV, ca. 1,2 bar
Schneider	DryAir		Getrocknete unter Druck stehende Luft	12kV, ca. 0,4 bar 24kV, ca. 1,5 bar
Nuventura	Dry Air		Bestandteile reiner Luft 80% Stickstoff, 20% Sauerstoff	36kV, ca. 2,0 bar
Driescher	MIDEL 7131		Umweltfreundliches biologisch abbaubares Öl aus synthetischem Ester	

GWP: Global warming potential (GWP CO₂=1, GWP SF₆ ca. 23.500)