



Jedes Windrad besitzt eine Mittelspannungsschaltanlage. Diese enthalten oft SF₆ als Isoliergas.

Foto: Adobe Stock/zentilia

Klimaschutz

Das perfekte Treibhausgas ersetzen

Die meisten kennen SF₆ vor allem von Experimenten aus Vorlesung und Internet: Da das Gas eine fünfmal so hohe Dichte wie Luft hat, lässt es sich wie eine unsichtbare Flüssigkeit in einen Behälter gießen – Papierboote und andere leichte Objekte schwimmen auf dem SF₆-Spiegel. Eingeatmet verleiht das Gas eine tiefe Stimme, wie ein Gegenmittel zum Helium, aber potenziell schädlicher für die Gesundheit. Denn durch die hohe Dichte sammelt sich das Gas im unteren Teil der Lunge, und bereits wenige Atemzüge können bewusstlos machen, irreversibel das Zentralnervensystem schädigen und sogar zum Erstickten führen.

Was chemische Reaktionen angeht, ist SF₆ hingegen ziemlich langweilig: Es ist praktisch inert, nahezu unlöslich in Wasser, nicht brennbar, ungiftig. Es reagiert nur unter drastischen Bedingungen, etwa mit Alkalimetallen in flüssigem

Schwefelhexafluorid ist schwer, inert und langlebig, es trägt über 23 000mal so viel zum Treibhaus-effekt bei wie Kohlendioxid. In Turnschuhen, Schallschutzscheiben und Autoreifen ist SF₆ EU-weit inzwischen verboten. Für elektrische Schaltanlagen fehlten bisher die Alternativen. Das ändert sich jetzt.

Ammoniak zu Natriumsulfid und Fluorid.

Diese Reaktionsträgheit macht Schwefelhexafluorid so wertvoll. Früher diente es als Dämmgas in Schallschutzscheiben, Tennisbällen und Schuhsohlen, auch Autoreifen wurden damit gefüllt. Seine größte Anwendung findet es aber noch immer als Isoliergas in Mittel- und Hochspannungsschaltanlagen.

Gasisolierte Schaltanlagen

Elektrische Schaltanlagen befinden sich an wichtigen Knotenpunkten im Stromnetz. Sie verteilen elektrische Energie oder ändern die Spannungsebene während des Stromtransports, etwa in einem Umspannwerk (Foto oben links). Die Anlagen garantieren einen sicheren und kontrollierten Netzbetrieb und unterbrechen im Notfall hohe Kurzschlussströme. Von Hochspan-



Umspannwerke transformieren die elektrische Energie von einem Spannungswert in einen anderen. Oft sind sie luftisoliert, so wie dieses Umspannwerk im Oman. Steht hingegen nur wenig Platz zur Verfügung, sind sie meist gasisoliert. Foto: Nic Arnold Photography / ABB



Gasisolierte Schaltanlage in Katar. Foto: Nic Arnold Photography / ABB

nungsschaltanlagen spricht man bei Spannungen größer als 35 kV; zwischen 35 kV und 1 kV hat man es mit Mittelspannung zu tun, darunter mit Niederspannung. Mittelspannungsschaltanlagen finden sich beispielsweise als grauweiße, etwa anderthalb bis zwei Meter hohe Kästen in und an Wohnanlagen, aber auch jedes Windrad besitzt eine (Foto S. 34).

In gasisolierten Anlagen vermeidet Schwefelhexafluorid gefährliche Überschläge. Seine Durchschlagsfestigkeit – die elektrische Feldstärke, die herrschen darf, ohne dass es zu einem Lichtbogen oder Funkenschlag kommt – ist bei Normaldruck fast dreimal so hoch wie die von Luft. Die spannungsführenden Teile sind daher in geschlossene Gastanks integriert, gefüllt mit SF₆ (Foto oben rechts). Zusätzlich steht das Gas unter einem Druck von 3 bis 10 bar. Dadurch lassen sich Elektronen nicht so stark beschleunigen wie bei Normaldruck: Sie stoßen früher mit den SF₆-Molekülen zusammen. Gasisolierte Schaltanlagen lassen sich gegenüber Freiluftanlagen daher kleiner und kompakter bauen, was gerade bei Mittelspannungsschaltanlagen in Gebäuden ein großer Vorteil ist.

Klimakiller

Laut Fünftem Sachstandsbericht des Weltklimarats IPCC ist Schwefelhexafluorid das stärkste bekannte Treibhausgas: Sein Treibhauspotenzial ist, auf einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet, 23 500mal so hoch wie das von CO₂.¹⁾ Außerdem ist SF₆ sehr langlebig, fügt Cornelia Elsner, Chemikerin beim Umweltbundesamt, hinzu und sagt: „Was in den Schaltanlagen von Vorteil ist, macht in der Umwelt Probleme: SF₆ ist sehr stabil und quasi nicht zerstörbar.“ Seine Lebensdauer in der Atmosphäre beträgt dem IPCC-Bericht zufolge 3200 Jahre. Andere Studien schätzen sie geringer ein, aber immer noch mindestens im hohen dreistelligen Bereich. Eine natürliche Senke wie für CO₂ existiert für SF₆ nicht. Im letzten Jahr berichtete die BBC, dass in der EU durch kleine Lecks in Schaltanlagen angeblich regelmäßig große Mengen SF₆ entweichen.²⁾

Verglichen mit Kohlendioxid sind die weltweiten SF₆-Emissionen relativ gering – aber sie steigen: Zwischen den Jahren 1973 und 2008 nahmen die jährlichen Emissionen auf das Zehnfache zu, und um den gleichen Wert stieg

auch die SF₆-Konzentration in der Atmosphäre.³⁾ Eine im Juni erschienene Studie schätzte den weltweiten Ausstoß im Jahr 2018 auf über 9000 Tonnen.⁴⁾ Wie ein Forscherteam um die Umweltphysikerin Ingeborg Levin von der Universität Heidelberg im Jahr 2010 schrieb, würden etwa 70 bis 80 Prozent der weltweiten SF₆-Emissionen gar nicht erfasst. Unter anderem, weil viele Länder ihre Daten nicht an die Vereinten Nationen melden.⁵⁾

Aufbruchstimmung

Trotz vermutlich bedenklichem Schaden fürs Klima fuhr die Industrie lange sehr gut mit SF₆ als Isoliergas, sagt Nicholas Ottersbach. Er ist Business Developer beim Start-up Nuventura in Berlin, das eine gasisolierte Schaltanlage ohne SF₆ entwickelt hat. „Sobald die Energieunternehmen etwas gefunden haben, was funktioniert, haben sie wenig Anreiz, nach Alternativen zu suchen.“ Schließlich lägen ihre Prioritäten verständlicherweise auf Sicherheit und einer gut funktionierenden Versorgung. „Mit SF₆ isolierte Schaltanlagen



Das Umspannwerk Daxlanden bei Karlsruhe bekommt neue Schaltanlagen. Statt mit SF₆ sind sie mit aufbereiteter komprimierter Luft isoliert. Foto: Siemens

verkaufen sich zudem sehr gut, sie sind für die Hersteller quasi Goldesel.“ Seiner Einschätzung nach brachte in erster Linie erst eine sich anbahnende Gesetzesänderung die Suche nach Alternativen in Gang.

Seit dem Jahr 2007 ist in der EU die Verwendung von Schwefelhexafluorid in Fahrzeugreifen, Schuhsohlen und Schallschutzscheiben verboten.⁶⁾ Die neue F-Gase-Verordnung von 2014 ersetzte die EG-Verordnung von 2006 und beschränkte die Menge der am Markt verfügbaren fluorierten Kohlenwasserstoffe weiter.⁷⁾ SF₆ blieb in elektrischen Schaltanlagen zwar erlaubt, da Alternativen zu der Zeit fehlten. Aber laut Ottersbach hätten sich schon damals neue gesetzliche Verordnungen abgezeichnet.

Tatsächlich stellt die EU-Kommission jetzt auch SF₆-gefüllte Schaltanlagen auf den Prüfstand. In ihrem Auftrag haben die Beratungsbüros RE-xpertise und Öko-Recherche ein Themenpapier angefertigt.⁸⁾ Demnach sind SF₆-freie Schaltanlagen für Mittelspannungen innerhalb der nächsten zwei bis vier Jahre technisch realisierbar. Für Hochspannungsanlagen über 145 kV dauere es bis zur Kommerzialisierung noch mindestens fünf Jahre.

„Die Industrie befindet sich in einer Aufbruchstimmung“, sagt

Physiker Christian Franck, Professor für Hochspannungstechnik an der ETH Zürich. „Es gibt gute Alternativen, die sich etablieren werden. Welche Alternative am besten ist, lässt sich derzeit allerdings noch nicht sagen.“ Er vermutet aber, dass sich der Markt – anders als damals bei SF₆ – nicht auf eine einzige Lösung einschießen werde.

Nichts als trockene Luft

Einfach ist der Ersatz indes nicht. Gerade in Schaltanlagen könnte ein Misserfolg böse Konsequenzen haben. „Wenn was schiefeht, wird es dunkel“, sagt Cornelia Elsner und meint damit einen Stromnetzausfall.

Schwefelhexafluorid lässt sich nicht einfach durch ein anderes Gas ersetzen: Die Hersteller müssen auch das Design und die Technik selbst ändern – möglichst ohne, dass dabei die Schaltanlagen größer werden.

An der Entwicklung und Markteinführung SF₆-freier Mittelspannungsschaltanlagen arbeiten inzwischen viele Unternehmen. Der Trend geht in Richtung trockene Luft als Isoliermittel. Sauerstoff und Stickstoff haben kein Treibhauspotenzial, bilden keine Nebenprodukte und sind leicht zu handhaben.

Das Start-up Nuventura hat eine Schaltanlage mit trockener, auf 1,8 bar komprimierter Luft für Spannungen bis zu 36 kV entwickelt. „Wir haben alle kritischen Punkte berechnet, wo es in der Anlage zu einem Lichtbogen kommen kann“, erzählt Pressesprecherin Ira Garbuz. „Dann haben wir die Materialien und das Design so geändert, dass Sicherheit und Leistung auch mit trockener Luft nicht beeinträchtigt sind.“ Das Unternehmen verkauft nun Lizenzen für diese Anlage und will mit Herstellern zusammenarbeiten. Eine erste Pilotinstallation beim deutschen Verteilnetzbetreiber Westnetz lief für ein Jahr, und das Unternehmen bereitet einen zweiten Piloten mit einer Tochterfirma von Eon für Oktober vor.

Auch Siemens setzt auf eine Mischung aus 20 Prozent Sauerstoff und 80 Prozent Stickstoff und nutzt sie unter dem Markennamen Clean Air beispielsweise in einer Pilotanlage im Umspannwerk Daxlanden bei Karlsruhe (Foto diese Seite). Pilotanlagen sind bereits ins Stromnetz integriert, aber stärker überwacht und haben mehr Messeinrichtungen. Zudem gibt es die Möglichkeit, Gasproben zu ziehen.

Trockene Luft als Isoliermittel ist auch laut Umweltbundesamt die beste Wahl. „Wir sollten ohne halogenhaltige Stoffe auskommen“, sagt Cornelia Elsner. „Nur dort, wo das aufgrund von Raumproblemen nicht geht, brauchen wir Alternativen.“ Fluorierte Alternativen sind vor allem für eine kompakte Bauweise nötig. Anlagen mit trockener Luft sind schlichtweg größer. Laut Christian Franck benötigen Anlagen mit trockener Luft mehr Material – und das ist meist Aluminium, welches in seiner Herstellung viel Energie benötigt. „Dadurch haben diese Anlagen auch einen Fußabdruck aufs Klima, auch wenn er indirekt ist.“

Fluoriert, aber weniger klimaschädlich

Eine mögliche fluorhaltige Alternative hat der Schweizer Energie- und Automatisierungstechnikkonzern ABB entwickelt. Die Mittelspannungsschaltanlage Airplus verwendet statt SF₆ ein Luft-Fluoroketon-Gemisch. Das Keton mit der Formel CF₃C(O)CF(CF₃)₂ stammt vom US-amerikanischen Unternehmen 3M, hat ein Treibhauspotenzial von unter 1 und verbleibt nur 16 Tage in der Atmosphäre. Die Airplus-Anlage läuft seit August 2015 beim Elektrizitätswerk der Stadt Zürich.

Laut Ottersbach hat sich diese Alternative allerdings bisher nicht ganz durchgesetzt, da es bei einigen Energiekonzernen noch Bedenken gebe, ob man SF₆ durch ein anderes, wenn auch weniger klimaschädliches Treibhausgas ersetzen sollte.

Der Konzern General Electric wirbt mit einer SF₆-freien Alternative für Hochspannungsanlagen unter dem Markennamen g3 (Green Gas for Grid), einer Mischung aus CO₂, O₂ und dem perfluorierten Nitril (CF₃)₂CFCN, ebenfalls von 3M. Laut Hersteller hat das Fluoronitril ein Treibhauspotenzial von 2100 – beträchtlich, wenn auch geringer als das von SF₆. Seine atmosphärische Lebensdauer beträgt 22 Jahre. Die Mischung g3 ist laut General Electric bereits in Pilotanlagen in mehreren europäischen Ländern im Einsatz, darunter beim deutschen Übertragungsnetzbetreiber Tennet.

Ein Gas alleine reicht nicht

Schwefelhexafluorid habe sich nicht nur wegen seiner Durchschlagsfestigkeit durchgesetzt, sondern auch wegen seines niedrigen Siedepunkts, sagt Christian Franck. Das erlaube den Betrieb der Anlagen bei Minustemperaturen. Franck hat vor über zehn Jahren begonnen, an Alternativen zu for-

schen, und weiß inzwischen, dass kein einzelnes Gas SF₆ ersetzen kann: „Es kommen nur Mischungen infrage.“

Mischt man zwei Gase miteinander, kann die Durchschlagsfestigkeit der Mischung höher sein als die der einzelnen Bestandteile. Ein Mischungspartner bremst dann beispielsweise die Elektronen, bis sie langsam genug sind, um sich an der zweiten Komponente anlagern zu können und dort ein Ion zu bilden.

Auch isolierende Feststoffe sind auf dem Markt. Die spannungsführenden Elemente sind in Epoxidharze eingegossen, umgeben von Luft; das bewegte Schaltteil befindet sich im Vakuum. Schneider Electric bietet eine solche Schaltanlage an. Das Unternehmen Driescher wiederum nutzt zur Isolierung einen flüssigen synthetischen Ester des englischen Unternehmens M&I Materials.

Abseits von Schaltanlagen

Was ist mit den übrigen Anwendungen von SF₆? Das Gas wird beispielsweise auch als Schutzgas in Teilchenbeschleunigern und Röntgenanlagen eingesetzt sowie als Kontrastmittel für Ultraschalluntersuchungen. In Gießereien von Aluminium und Magnesium soll es dem Kontakt der heißen Metallschmelze mit der Luft vorbeugen. Die Halbleiterindustrie nutzt es als Ätzgas, um feinste Strukturen auf der Oberfläche von Si-Wafern zu erzeugen.

Oberstes Gebot bei all solchen Anwendungen muss es sein, den Umgang mit SF₆ zu verbessern, sagt Cornelia Elsner: „Das Gas darf nicht in die Atmosphäre gelangen, sondern muss rückgeführt werden.“ Auch eine gute Abgasreinigung sei essenziell.

Ein Problem ist aber die Entsorgung alter Schallschutzfenster. Schon allein dabei wird SF₆ frei. Und nicht zu vergessen: Selbst ein

mögliches Verbot von Schwefelhexafluorid in Schaltanlagen wird nur für neue Anlagen gelten. Da die Schaltanlagen eine durchschnittliche Betriebslebensdauer von 40 Jahren haben, wird SF₆ uns noch lange durch den Klimawandel begleiten. <<

Die promovierte Chemikerin **Brigitte Osterath** ist neben ihrer Arbeit am Paul-Scherrer-Institut als freie Wissenschaftsjournalistin tätig. www.writingscience.de

- 1) G. Myhre, D. Shindell, F.-M. Bréon et al, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/anthropogenic-and-natural-radiative-forcing/
- 2) M. Mc Grath, Climate Change: Electrical industry's 'dirty secret' boosts warming, 13.09.2019 <https://www.bbc.com/news/science-environment-49567197>
- 3) M. Rigby, J. Muhle, B.R. Miller et al., Atmos. Chem. Phys. 2010, 10, 10305. doi: 10.5194/acp-10-10305-2010
- 4) P. G. Simmonds, M. Rigby, A.J. Manning et al., Atmos. Chem. Phys. 2020, 20, 7271. doi: 10.5194/acp-20-7271-2020
- 5) I. Levin, T. Naegler, R. Heinz et al., Atmos. Chem. Phys. 2010, 10, 2655. doi: 10.5194/acp-10-2655-2010
- 6) Verordnung (EG) Nr. 842/2006
- 7) Verordnung (EU) Nr. 517/2014
- 8) K. Burges, K. Warncke, B. Gschrey, Briefing paper: SF6 and alternatives in electrical switchgear and related equipment, 2020. www.oekorecherche.de/sites/default/files/publikationen/briefing_papier_sf6_and_alternatives_en.pdf

AUF EINEN BLICK

SF₆ bleibt zwischen 800 und 3200 Jahre in der Atmosphäre. Dorthin gelangen jährlich weltweit mindestens 9000 Tonnen; möglicherweise werden 75 Prozent der Emissionen nicht erfasst.

Mit SF₆ isolierte Schaltanlagen funktionieren auch bei Minustemperaturen. Das lässt sich sonst nur mit Gasgemischen erreichen, etwa aus trockener Luft oder mit zusätzlichen perfluorierten Substanzen.

Schaltanlagen mit trockener Luft als Isolierung sind größer als die mit SF₆ betriebenen. Daher ist dafür mehr Material und Platz nötig.