

# Konzept zur SF<sub>6</sub>-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie

## Abschlussbericht



# Konzept zur SF<sub>6</sub>-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie

## Abschlussbericht

Von

**Ecofys: Dr.-Ing. Karsten Burges, Michael Döring, Charlotte Hussy, Jan-Martin Rhiemeier**

**ETH: Prof. Dr. Christian Franck, Mohamed Rabie**

**Datum: 28. Februar 2018**

**Projekt-Nummer: ESMDE16264**

**BMU Kennzeichen: 03KE0017**

## Kontakt

Ecofys - A Navigant Company

Ecofys Germany GmbH  
Albrechtstraße 10 c, 10117 Berlin

Tel: +49 (0) 30 29773579-0

Fax: +49 (0) 30 29773579-99

[info@ecofys.com](mailto:info@ecofys.com)

[ecofys.com](http://ecofys.com)

# 1 Zusammenfassung

In der elektrischen Energietechnik hat das Gas Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) derzeit eine zentrale Bedeutung als Isolier- und Löschmedium, insbesondere in Schaltanlagen. Neben den vielfältigen Vorteilen hinsichtlich seiner technischen Eigenschaften hat  $\text{SF}_6$  den Nachteil eines sehr hohen Treibhauspotentials. Es ist das stärkste bekannte Treibhausgas.

Seit dem Kyoto Protokoll von 1997 werden Maßnahmen mit dem Ziel der Emissionsreduktion von  $\text{SF}_6$  diskutiert. Ein Beispiel ist die freiwillige Selbstverpflichtung der Industrie in Deutschland. Auf europäischer Ebene wurde 2014 ein Verbot für bestimmte Anwendungsfälle im Rahmen der F-Gase-Verordnung (EU, Nr. 517/2014) diskutiert, aber wieder verworfen. Für die Revision im Jahr 2020 ist die Überprüfung der Verfügbarkeit von Alternativen für  $\text{SF}_6$  in spezifischen Schaltanlagen in der Mittelspannung vorgesehen.

Vor dem Hintergrund dieser klimapolitisch motivierten Bestrebungen wurden Ecofys, Teil der Navigant Gruppe, und die ETH Zürich beauftragt, technologische Alternativen und konkrete Handlungsoptionen für den verminderten Einsatz oder den Ersatz von  $\text{SF}_6$  in neu errichteten elektrischen Betriebsmitteln aufzuzeigen und einzuordnen. Der Schwerpunkt des Berichts liegt auf Schaltanlagen, Messwandlern und Leitungen in der Mittel- (1 bis 52 kV) und Hochspannung (> 52 kV) in Deutschland.

Konkret haben wir die vorhandenen  $\text{SF}_6$ -Alternativen hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit, ihrer Vorteile und Einsatzgrenzen sowie Umweltauswirkungen geprüft. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen gleichzeitig der wissenschaftlichen Ermittlung des Klimaschutzpotentials durch den  $\text{SF}_6$  Ersatz in Mittel- und Hochspannungsanlagen. Für die ermittelten Potentiale zum Ersatz von  $\text{SF}_6$  sollten sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen für einen europäischen Ausstieg, die dafür notwendigen Zeithorizonte sowie Vorschläge für begleitende Maßnahmen erarbeitet werden. Abschließend haben wir Instrumente und Maßnahmen für den verminderten Einsatz von  $\text{SF}_6$  inventarisiert, systematisiert und vergleichend bewertet. Während der Untersuchungen wurden eigene Recherchen mit einem intensiven Dialog mit Herstellern und Anwendern in Form von mehreren Interviews und Fachgesprächen verknüpft.

## 1.1 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen – Status quo

***Die höchsten  $\text{SF}_6$ -Emissionen in der Verteilung und Übertragung elektrischer Energie sind Emissionen in der Herstellung „sonstiger Betriebsmittel“ sowie Betriebsemissionen von Hochspannungsschaltanlagen.***

Die Bestandsemissionen der *Hochspannung* (>52 kV) übersteigen die Emissionen der Mittelspannung um ein Vielfaches, obwohl in der Mittelspannung mehr  $\text{SF}_6$  installiert ist. Die Emissionen während der Herstellung sind ebenfalls hoch. Die hohen gemeldeten Emissionen in der Herstellung „sonstiger Betriebsmittel“ (z. B. Messwandler, Durchführungen und Kondensatoren) sind nicht bis ins Detail nachvollziehbar. Eine genaue Analyse und Validierung der gemeldeten Zahlen erfolgt derzeit durch die Verbände und den Arbeitskreis  $\text{SF}_6$ .

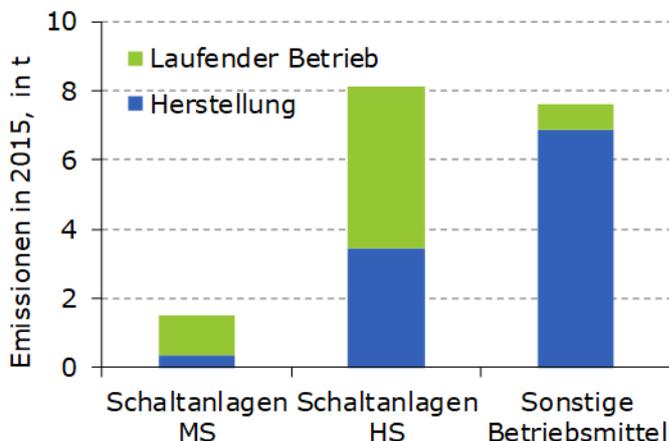


Abbildung Z1: SF<sub>6</sub>-Emissionen während der Herstellung und im laufenden Betrieb, Emissionen in der Entsorgung sind zu vernachlässigen (2015).

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von [SOLVAY et al., 2005; UBA, 2016].

***In der Mittelspannung sind alternative Lösungen auf dem Markt vorhanden, in der Hochspannung bedarf es noch weiterer Entwicklungen.***

In der Mittelspannung gibt es ausgereifte Alternativen zu SF<sub>6</sub>. Einzelne dieser Alternativen sind im europäischen Ausland seit Jahren erfolgreich im kommerziellen Einsatz. Es gibt allerdings keine Alternative, die in allen technischen Aspekten mit SF<sub>6</sub> gleichzusetzen oder gar überlegen ist. Je nach Einsatzgebiet kommen luftisolierte Schaltanlagen oder Schaltanlagen mit alternativen Isoliermedien, wie Feststoffe, Fluide oder alternative Gase, in Betracht. Als Schaltmedium in der Mittelspannung ist Vakuum Stand der Technik.

In der Hoch- und Höchstspannung ist die Auswahl technisch praktikabler Alternativen begrenzter, sowohl was Isolier- als auch Schaltmedien betrifft. Neben Vakuum als Schaltmedium kommen praktisch nur alternative Gase und Gasgemische als Isolier- oder Schaltmedium in Betracht.

Die Industrievertreter gehen davon aus, dass Alternativen auch in der Hochspannung ein mit SF<sub>6</sub>-Anlagen vergleichbares Leistungsniveau erreichen können, dafür aber noch einige Jahre Entwicklung erforderlich sind.

***Die F- Gase-Verordnung und die freiwillige Selbstverpflichtung haben bereits zu signifikanten SF<sub>6</sub>-Emissionsreduktionen geführt.***

Seit der ersten Implementierung der F-Gase-Verordnung arbeitet die Industrie daran, ihre SF<sub>6</sub>-Emissionen sowohl in den Produktionsprozessen als auch in der Nutzungsphase in Mittel- und Hochspannung zu reduzieren. In Deutschland mündete dies in einer freiwilligen Selbstverpflichtung der Industrie (erstmalig 1997, erneuert 2005) [SOLVAY et al., 2005]. Diese führte zu einer Reduktion der SF<sub>6</sub>-Emissionen im Zusammenhang mit elektrischen Betriebsmitteln von 50 t SF<sub>6</sub> im Jahr 1997 auf 17 t SF<sub>6</sub> im Jahr 2015.

## 1.2 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen – weitere Entwicklungen

### ***Weitere Reduktionspotentiale sind vorhanden – um sie auszuschöpfen, bedarf es weiterer Anstrengungen.***

Bei ambitionierten Anstrengungen ist auch künftig eine nennenswerte absolute Reduktion der SF<sub>6</sub>-Emissionen möglich, trotz steigender Zahl installierter Anlagen. Weitere Reduktionspotentiale sind allerdings schwerer zu erschließen als in der Vergangenheit und weiterhin stark abhängig von Spannung, Anwendung / Betriebsmittel und Einsatzbereich.

- *Schaltanlagen in der Hochspannung:* Neue Anlagen haben bereits ein sehr hohes Dichtheitsniveau. Die Produktionsprozesse wurden schon stark optimiert. Alle Möglichkeiten zur weiteren Reduktion durch Verbesserung der Betriebsprozesse müssen betrachtet werden. Eine substantielle Emissionsreduktion setzt die beherrzte Einführung bestehender und künftiger Alternativen voraus.
- *Schaltanlagen in der Mittelspannung:* Neu verbaute Mittelspannungsschaltanlagen haben bereits sehr niedrige Emissionsraten (<0,1% p.a.). Diese Leckraten sind als technische Machbarkeitsgrenze anzusehen. Daher sind weitere Reduktionspotentiale in Mittelspannungsanlagen lediglich erschließbar, wenn künftig zunehmend SF<sub>6</sub>-freie Lösungen für Mittelspannungsschaltanlagen eingesetzt werden. Das tatsächliche Reduktionspotential ist aufgrund des Modellansatzes im Rahmen des aktuellen Monitorings nicht verlässlich quantifizierbar.
- *„Sonstige elektrische Betriebsmittel“:* Der Ursprung der hohen absoluten Emissionen bei der Herstellung von „sonstigen elektrischen Betriebsmitteln“ ist nicht hinreichend geklärt. Die bestehende Berichterstattung erlaubt es nicht, die genauen Quellen dieser Emissionen zu identifizieren und lässt darüber hinaus keinen Rückschluss auf die Art des Betriebsmittels zu. Die technische Machbarkeit von Alternativen oder Emissionsreduktionen bleibt damit vorläufig unklar.
- *Außerbetriebnahme und Entsorgung:* Die ersten großen Chargen von SF<sub>6</sub>-haltigen Betriebsmitteln erreichen zeitnah das Ende der technischen Lebensdauer. Daher werden Stilllegung und Entsorgung in naher Zukunft für die Emissionskontrolle relevant werden. Es bestehen allgemeine Verpflichtungen für die ordnungsgemäße Rückgewinnung von Gasen am Ende der Lebensdauer. Diese sind auch Teil der freiwilligen Selbstverpflichtungen der Industrie. Angesichts der stark verstreuten Betriebsmittel und der nicht registrierten Zuordnung von Betriebsmitteln und Akteuren bleibt abzuwarten, ob die Prozesse von allen Beteiligten mit der erforderlichen Sorgfalt durchgeführt werden.

Für weitere substantielle Emissionsreduktionen wird der weitgehende Wechsel zu alternativen Technologien / Gasen letztlich eine wesentliche Voraussetzung sein. Für einen solchen Wechsel müssen die Herausforderungen für Zuverlässigkeit, Sicherheit und Umweltverträglichkeit der neuen Lösungen sorgfältig geprüft und umfassend bewertet werden.

### ***Industrie fordert regulatorische und technische Sicherheit***

Der Druck zu einer weiteren Reduktion des SF<sub>6</sub>-Einsatzes bringt für die Industrie Anpassungskosten und vielfältige Unsicherheiten mit sich. Ein verlässlicher regulatoriver Rahmen ist Voraussetzung für nachhaltige Anstrengungen.

Eine verbindliche Zielrichtung für die weitere Minimierung des SF<sub>6</sub>-Einsatzes ist für die Industrie ebenso wichtig wie eine konsistente Bewertung der Eigenschaften der Alternativen in ihrem Zusammenhang. Hier gibt es noch viele Unklarheiten. Darüber hat insbesondere die regulierte Netzwirtschaft einen klaren Bedarf an verlässlichen Aussagen, wie die Mehrkosten, die mit den Alternativen verbunden sind, in der Regulierung behandelt werden.

### ***Eine Weiterentwicklung der freiwilligen Selbstverpflichtung bietet Chancen für weitere Fortschritte***

Der politischen Ebene obliegt die Vorgabe der Zielstellungen. Die weitere Reduktion der Emissionen ist zunehmend schwieriger zu realisieren. Verpflichtende Reduktionsziele sollten von der Politik vorgeschrieben werden, die Umsetzung der Branchen-Zielstellungen hingegen kann grundsätzlich auch weiterhin der Industrie überlassen werden, z. B. im Rahmen einer fortgeschriebenen freiwilligen Selbstverpflichtung.

### ***Weiterentwicklung des SF<sub>6</sub>-Monitorings erforderlich***

Wenn effektive Maßnahmen durch die Politik oder die Industrie etabliert und durchgesetzt werden sollen, muss bekannt sein, wo die Emissionen tatsächlich auftreten. Aktuelle Methoden und Aggregationsebenen des SF<sub>6</sub>-Monitorings im Rahmen der Branchenverpflichtung unterstützen eine unabhängige Bewertung und einen Vergleich der erreichten Leistungsniveaus sowie die Identifikation konkreter Emissionsquellen nur unzureichend. Die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der weiteren Verbesserung des Monitorings sind jedoch vielfältig. Drei Bereiche des Monitorings verdienen Aufmerksamkeit:

- *Emissionsüberwachung und Berichterstattung* (bottom-up); Möglichkeit zur differenzierten Identifikation potentieller Hauptemissionsquellen (Branchenüberdurchschnittliche Emissionsraten).
- ein *SF<sub>6</sub>-Register* in Form einer Datenbank zur ständigen Überwachung der Anzahl, des Standorts, des Alters und möglicherweise der Emissionsrate individueller SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen;
- *Atmosphärische Emissionsmessung* (top-down).

### ***Abwägung des Austauschs von Altanlagen***

Gegenstand der Untersuchungen waren neue Betriebsmittel. Über den selektiven Austausch von Altanlagen kann vermutlich ein großer Anteil von Betriebsemissionen sowohl in der Mittelspannung als auch in der Hochspannung reduziert werden. Es existieren allerdings keine einfachen generischen und verlässlichen Indikatoren (z. B. Alter der Anlage), über die das Emissionsniveau einer bestimmten Schaltanlage abgeleitet werden kann. Gesamtpotential, Effizienz und Wirksamkeit dieser Maßnahmen sind deshalb ungewiss und aus einer ex ante-Perspektive schwer zu bewerten. Auch hier würde ein verbessertes Monitoring helfen.

## 1.3 Handlungsempfehlungen

### ***Politischer und regulatorischer Rahmen***

- Wir empfehlen die Festlegung klarer politischer Ziele für die weitere Reduktion des SF<sub>6</sub>-Einsatzes und der damit verbundenen Emissionen. Ohne klare politische Zielstellung werden weitere Reduktionen der SF<sub>6</sub>-Emissionen durch die Industrie hinter den Möglichkeiten zurückbleiben.
- Die Politik muss die Kriterien für eine konsistente Bewertung der nicht-technischen Eigenschaften der Alternativen definieren. Hierzu zählen die Bewertung von Klimarelevanz, Gesundheitsrisiken, Berücksichtigung von Mehrkosten in der Anreizregulierung und dergleichen mehr.
- Diese Klärungen sollten vorzugsweise einheitlich auf europäischer Ebene erfolgen. Nationale Regeln versprechen nur eine begrenzte Effizienz und Effektivität.
- Normative Vorgaben oder wirtschaftliche Anreize zugunsten bestimmter Alternativen in einzelnen Anwendungen sind wenig sinnvoll. Eine integrale Mengenvorgabe für die Branche als Ganzes (Einsatz, Emissionen) ist in unseren Augen effektiver. Eine weiter ausgestaltete freiwillige Selbstverpflichtung der Industrie kann dafür einen geeigneten Rahmen liefern.
- Sollte eine freiwillige Selbstverpflichtung die Ziele verfehlen, müssen tiefer wirkende politische Instrumente erwogen und frühzeitig erarbeitet werden. Wenn derartige Handlungsoptionen bekannt sind, erhöht dies die politische Glaubwürdigkeit und Schlagkraft. Sie ist Teil der Sicherheit, die die Industrie fordert.
- Ergänzend zu einer Selbstverpflichtung der Industrie können spezifische Instrumente implementiert werden. Mit ihnen lassen sich „low hanging fruits“ erschließen, die andernfalls erst mit Verzug erreicht werden können.
- Denkbar sind dezidierte Sanktionen für mangelhafte Gas-Rückgewinnung und Recycling. Wirksame Sanktionen müssen die Entsorgungskosten deutlich überschreiten.
- Darüber hinaus können für spezifische Bereiche auch Anreizsysteme sinnvoll sein. Diese müssen jedoch aufgrund der Gefahr der Marktverzerrung und Mitnahmeeffekte maßhaltig angewendet werden.  
A: Unterstützen des Austauschs von undichter Ausrüstung.  
B: Unterstützung der Markteinführung von Alternativen durch Abfederung zusätzlicher Kosten und Risiken.

### ***Weiterentwicklung der freiwilligen Selbstverpflichtung***

In diesem Zusammenhang kommt folgenden Aspekten besondere Aufmerksamkeit zu:

- *Die Anstrengung zur Erreichung ehrgeiziger Ziele muss fair verteilt werden:* Die erforderlichen Anstrengungen zur weiteren Emissionsminderung steigen naturgemäß mit sinkenden Emissionen. Andauernde Bemühungen einzelner Akteure, die SF<sub>6</sub>-freie/arme Technologien weiter voranbringen wollen, können vorläufig nicht mit einer kommerziellen Basis rechnen. Ein klarer Kodex und darauf aufbauender Mechanismus für die Lastenverteilung innerhalb der Branche kann die Sicherheit auch in einem wettbewerblichen Umfeld stärken.
- *„Sonstige Betriebsmittel“ müssen verstärkt adressiert werden:* Eine Vertiefung des Kenntnisstandes und die Erarbeitung einer beherzten Strategie durch die Branche sind unerlässlich. Dieser Aspekt betrifft in starkem Maße einen engen Kreis an Herstellern. Auch deshalb ist die brancheninterne Verteilung der Lasten wesentlich für die anstehenden Herausforderungen.

- *Emissionen, nicht Emissionsraten:* Die Entwicklung der Emissionen im Bereich der Mittelspannungsanlagen zeigt, dass aus klimapolitischer Sicht Erfolge bei der Senkung der Emissionsraten nicht ausreichen. Angesichts der immens gestiegenen Anzahl der Anlagen ergibt sich in jüngerer Vergangenheit trotz der auf das technische Minimum abgesenkten Emissionsraten wieder ein Anstieg der absoluten Emissionen. Vor diesem Hintergrund ist es ein rationales Erfordernis, die Zielstellungen an absoluten Emissionen auszurichten. Daraus wird sich ein Impuls für die Einführung von Alternativen ergeben.
- *Substitutionsfahrplan:* Idealerweise erarbeitet die Branche einen Fahrplan für die weitere Minderung des SF<sub>6</sub>-Einsatzes und der Emissionen sowie der Einführung von Alternativen und stimmt diesen aktiv mit den politischen Ebenen ab. Es wäre zweckmäßig, dass auch die Zwischenschritte auf dem Weg zur Zielerreichung quantifiziert werden. Auf diese Weise wird die Evaluierung des Fortschritts unterstützt und die Möglichkeit zur gezielten Nachsteuerung bei auftretenden Schwierigkeiten geschaffen, ohne dass die politische Ebene unmittelbar aktiv werden muss. Bei allen erforderlichen Vorbehalten würde ein derartiger Fahrplan den Beteiligten ein zusätzliches Maß an Sicherheit verschaffen.
- *(Selbst-) Verpflichtung der Anwender zu funktionalen, technologieneutralen Ausschreibung:* In der gegenwärtigen Praxis werden in Ausschreibungsunterlagen zu neuen Betriebsmitteln aus ‚Gewohnheit‘ regelmäßig SF<sub>6</sub>-Anlagen benannt. Eine Verpflichtung, diese Eingrenzung in Ausschreibungen grundsätzlich zu vermeiden und zukünftig nach Funktion auszuschreiben, verschafft Anbietern alternativer Lösungen zumindest eine gleichgestellte Wettbewerbsposition und erhöht die Variantenvielfalt.
- *Außerbetriebnahme und Entsorgung:* Die sachgerechte Rückführung, Wiederverwendung, Entsorgung und Vernichtung von SF<sub>6</sub> aus ausgedienten Betriebsmitteln ist grundsätzlich geregelt. Eine detailliertere Vereinbarung der Prozesse und ihrer Überwachung scheint angesichts der mittelfristig anstehenden Mengen angebracht. Der Umgang mit Betriebsmitteln, aus denen das Gas bislang nicht mit vertretbarem Aufwand zurückgewonnen werden kann (z. B. Messwandler), verdient an dieser Stelle besondere Aufmerksamkeit.
- *Europäische Abstimmung:* Eine Ausweitung von Selbstverpflichtungen auf ganz Europa würde die Wirksamkeit der Maßnahme nachdrücklich positiv beeinflussen. Dabei wäre es angebracht, einzelne Punkte auch inkrementell zu vereinheitlichen (ausgewählte konsensfähige Themen; einzelne Mitgliedsstaaten, die zu ausgewählten Punkten vorangehen). Andernfalls befürchten wir, dass diese Abstimmung nur sehr schleppend vorankommt.

### **Weiterentwicklung des SF<sub>6</sub>-Monitorings, Emissionsüberwachung und Berichterstattung**

Eine Anpassung des Monitoringsystems erachten wir in den folgenden Punkten als notwendig:

- *Disaggregierte Daten öffentlichen Stellen zugänglich machen:* weniger aggregierte Daten würden Behörden helfen, die größten Emittenten zu identifizieren und auf dieser Grundlage effektive und effiziente Maßnahmen zu implementieren sowie die Zielerreichung zu überprüfen.
- *Berichterstattungssysteme auf EU-Ebene zu relevanten Aspekten vereinheitlichen:* Die Einführung eines abgestimmten europäischen Monitoringsystems wäre sinnvoll für Vergleichbarkeit und notwendig bei zukünftig europaweit geltenden Maßnahmen. Branchenexperten erwarten, dass das Erarbeiten einer EU-weiten Methodik mindestens ein Jahrzehnt dauern wird. Das ist jedoch kein Argument, nicht anzufangen und eine ggf. inkrementelle Angleichung der Berichterstattung voranzutreiben.

- *Verantwortlichkeiten von Gasproduzenten und -lieferanten erweitern:* Gasproduzenten berichten derzeit nicht über SF<sub>6</sub>-Mengen. Sie in die Berichterstattung einzubeziehen, würde den gesamten Prozess vereinfachen. Die Geheimhaltung und Anonymisierung marktrelevanter Daten muss angesichts der begrenzten Anzahl von Akteuren zwar besonders berücksichtigt werden, dies ließe sich über einen begrenzten Zugang zu den Daten aber sicherstellen. Die verschiedenen Im- und Exportströme europäischer und außereuropäischer Lieferanten müssten dabei natürlich adäquat abgebildet werden. Das ist ein zusätzliches Argument für ein koordiniertes europäisches Vorgehen.
- *Klärungsbedarf zu „sonstigen Betriebsmitteln“ beseitigen:* Es bestehen Unsicherheiten bezüglich der Abgrenzung der Betriebsmittelkategorien, Spannungsebenen und der dem Monitoring zugrundeliegenden Definitionen. Diese sollten ausgeräumt werden, um mögliche Reduktionsmöglichkeiten zu identifizieren.
- *Atmosphärische Emissionsmessung:* Wir empfehlen, zusätzlich zur bestehenden Bottom-up-Bestandsaufnahme durch die Industrieverbände einen Prozess der Top-Down-Überwachung durch atmosphärische Messungen und Reverse-Modellierung. Top-down-Analysen können sehr konkrete Ergebnisse liefern, in welcher Region und wann Emissionen entstanden sind. Dies hilft möglicherweise dabei, erzielte Fortschritte bei der Emissionsminderung zu verifizieren, die Emissionsmodellierung für den Bottom-up-Bestand zu verfeinern und wichtige Quellen, die Aufmerksamkeit erfordern, zu identifizieren. Auch wenn einige relevante Emittenten fehlen oder in der Berichterstattung weniger vertrauenswürdig sind (z. B. Schallschutzfenster, Militär, Nicht-EU-Länder), wäre es sinnvoll, die nicht messbaren Mengen zu verstehen, um Top-down- und Bottom-up-Analysen näher zusammenzubringen.

#### **Entwicklung und Einführung eines SF<sub>6</sub>-Registers**

- Ein SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen-Register in Form einer Datenbank zur ständigen Überwachung der Anzahl, des Standorts, des Alters und möglicherweise der Emissionsrate auf Basis von Wartungsdaten würde die Emissionsberichterstattung unterstützen und Bottom-up- und Top-down-Ansätze zusammenbringen. Ein solches Register ist für die Hoch- und Höchstspannung mit vertretbarem Aufwand zu erstellen. In der Mittelspannung müssten Vor- und Nachteile abgewogen werden.
- Voraussetzung der Datenerfassung ist Einigkeit hinsichtlich der zu erfassenden Daten, der Datenformate und Prozesse. Diese Abstimmung der Akteure wird selbst auf nationaler Ebene eher Jahre als Monate beanspruchen. Einzelne Unternehmen haben im Rahmen des Assetmanagements bereits SF<sub>6</sub>-Register eingeführt und entsprechende Methoden getestet. Bei der Diskussion über ein deutschland- bzw. europaweites Register kann von diesen Unternehmen viel gelernt werden. Weiterhin kann auch auf die Erfahrungen der EU-Mitgliedsstaaten hinsichtlich des Kälteanlagenregisters zurückgegriffen werden.

#### **Abwägung des Austauschs von Altanlagen**

- Wenn durch den selektiven Austausch von Altanlagen ein nennenswerter Anteil von Betriebsemissionen reduziert werden kann, sind auch Anreize und Sozialisierung der Kosten gerechtfertigt.
- Eine dezidierte Inventarisierung des Anlagenbestandes und darauf aufbauend eine verlässliche Identifikation der lohnenden Anlagen ist Voraussetzung für die Implementierung derartiger Maßnahmen. Dies kann nur die Industrie selbst leisten. Ein verfeinertes Monitoring hilft.

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Zusammenfassung</b>   | <b>I</b>  |
| 1.1      | Erkenntnisse und Schlussfolgerungen – Status quo   | I         |
| 1.2      | Erkenntnisse und Schlussfolgerungen – weitere Entwicklungen  | III       |
| 1.3      | Handlungsempfehlungen  | V         |
| <b>2</b> | <b>Einleitung und Anliegen</b>   | <b>1</b>  |
| <b>3</b> | <b>Eigenschaften und Klimarelevanz von SF<sub>6</sub></b>  | <b>4</b>  |
| <b>4</b> | <b>Grundlagen zu elektrischen Betriebsmitteln und deren Eigenschaften</b>                                | <b>8</b>  |
| 4.1      | Aufgaben von Isolier- und Schaltmedien   | 8         |
| 4.2      | Allgemeine Eigenschaften von Isolations- und Schaltmedien  | 10        |
| 4.3      | Betriebsmittel nach Spannungsebenen  | 17        |
| 4.3.1    | Betriebsmittel der Mittelspannung  | 19        |
| 4.3.2    | Betriebsmittel der Hochspannung  | 25        |
| 4.3.3    | „Sonstige Betriebsmittel“  | 29        |
| 4.4      | Anwendungsspezifische Anforderungen an Schaltanlagen   | 31        |
| <b>5</b> | <b>Abschätzung der Anlagenpopulation, Trends und Entwicklungen</b>                                       | <b>35</b> |
| 5.1      | Abschätzung des Betriebsmittelbestands in der Mittel- und Hochspannung                                   | 35        |
| 5.2      | Abschätzung des anteiligen Einsatzes von SF <sub>6</sub> als Isolier- und Schaltmedium im Anlagenbestand | 39        |
| 5.3      | Abschätzung der installierten SF <sub>6</sub> -Mengen und Emissionen                                     | 41        |
| 5.4      | Einordnung der Anlagenpopulation und Emissionen in den internationalen Kontext                           | 45        |
| <b>6</b> | <b>Gegenüberstellung von SF<sub>6</sub> und SF<sub>6</sub>-freien Technologien</b>                       | <b>48</b> |
| 6.1      | Technologien der Mittelspannung  | 51        |
| 6.2      | Technologien der Hochspannung  | 56        |
| <b>7</b> | <b>Aktueller regulatorischer Rahmen zum Einsatz von SF<sub>6</sub> in elektrischen Betriebsmitteln</b>   | <b>62</b> |
| 7.1      | Internationale und europaweite Vorgaben  | 62        |
| 7.1.1    | Gesetze, Verordnungen und Richtlinien  | 62        |
| 7.1.2    | Technische Normen und Standards  | 63        |
| 7.1.3    | Marktprägende Rahmenbedingungen  | 64        |
| 7.2      | Länderspezifische regulatorische Rahmenbedingungen   | 65        |
| 7.2.1    | Freiwillige Vereinbarungen und Verpflichtungen   | 65        |
| 7.2.2    | Steuern und Abgaben  | 66        |
| 7.2.3    | Verbot von SF <sub>6</sub> -gefüllten Mittelspannungsanlagen in Niedersächsischen Landesgebäuden         | 66        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>8</b>  | <b>Stimmungsbild der Hersteller und Anwender</b>   | <b>68</b>  |
| 8.1       | Stimmungsbild aus den Experteninterviews   | 68         |
| 8.2       | Konsolidierte Standpunkte relevanter Branchenverbände  | 75         |
| 8.3       | Stimmungsbild aus dem Fachgespräch vom 06.03.2017  | 77         |
| 8.3.1     | Allgemeine Ergebnisse  | 77         |
| 8.3.2     | Block A: elektrische Betriebsmittel in der Mittelspannung  | 78         |
| 8.3.3     | Block B: elektrische Betriebsmittel in der Hoch- und Höchstspannung - Stand der Technik von SF <sub>6</sub> und Alternativen | 80         |
| 8.3.4     | Block C: Fragen der Marktakzeptanz, nicht-technische Barrieren für die Einführung von Alternativen                           | 82         |
| <b>9</b>  | <b>Instrumente und Maßnahmen zur SF<sub>6</sub>-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie</b>                   | <b>84</b>  |
| 9.1       | Systematisierung und Evaluation der betrachteten Instrumente und Maßnahmen   | 86         |
| 9.1.1     | Informative Maßnahmen  | 87         |
| 9.1.2     | Wirtschaftliche Maßnahmen  | 89         |
| 9.1.3     | Normative Maßnahmen  | 93         |
| 9.2       | Handlungsfelder zur Reduktion des Einsatzes und der Emissionen von SF <sub>6</sub>   | 96         |
| 9.2.1     | Ausschöpfen bestehender Reduktionspotentiale   | 97         |
| 9.2.2     | Schaffung eines verlässlichen Rahmens für die Industrie  | 99         |
| 9.2.3     | Weiterentwicklung der freiwilligen Selbstverpflichtung   | 100        |
| 9.2.4     | Weiterentwicklung des SF <sub>6</sub> -Monitorings   | 102        |
| 9.2.5     | Abwägung des Austauschs von Altanlagen   | 104        |
| 9.3       | Fazit und Ausblick   | 105        |
| <b>10</b> | <b>Anhang</b>  | <b>107</b> |
| 10.1      | Thesaurus zur Erläuterung der Fachbegriffe (Deutsch-Englisch)  | 107        |
| 10.1.1    | Allgemeine elektrische Bezeichnungen   | 107        |
| 10.1.2    | Technische Fachbegriffe für elektrische Betriebsmittel   | 107        |
| 10.1.3    | Elektrische Kenngrößen   | 114        |
| 10.1.4    | Umweltbegriffe   | 116        |
| 10.1.5    | Auswahl der derzeit diskutierten Gase und Gasgemische  | 117        |
| 10.1.6    | Organisationen   | 117        |
| 10.2      | Übersicht geführter explorativer Interviews  | 119        |
| 10.3      | Teilnehmer des Fachgesprächs am 6. März 2017   | 120        |
| 10.4      | Produktblätter   | 121        |
| 10.5      | Abbildungen von Komponenten  | 126        |
| 10.6      | LCA – Life Cycle Assessment von gasisolierten Schaltanlagen  | 127        |
|           | <b>Quellenverzeichnis</b>  | <b>130</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung Z1: SF <sub>6</sub> -Emissionen während der Herstellung und im laufenden Betrieb, Emissionen in der Entsorgung sind zu vernachlässigen (2015).  | II |
| Abbildung 2: Dampfdruckkurve von SF <sub>6</sub>  | 4  |
| Abbildung 3: Links: globaler Mittelwert von atmosphärischen SF <sub>6</sub> -Konzentration, Rechts: Auch dargestellt sind die berichteten SF <sub>6</sub> -Emissionen der Annex I-Parteien aus der UNFCCC-Datenbank. Aufgrund der Langlebigkeit von SF <sub>6</sub> ist der jährliche Anstieg der SF <sub>6</sub> -Konzentration ein direktes Maß für die jährlichen SF <sub>6</sub> -Emissionen. | 5  |
| Abbildung 4: Abnehmergruppen von SF <sub>6</sub> nach Verwendungsbereichen in % im Jahr 2015  | 6  |
| Abbildung 5: SF <sub>6</sub> -Emissionen in Tonnen je Verwendungsbereich über die Gesamtlebensdauer in Deutschland  | 7  |
| Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der drei Positionen eines Schalters und der Funktionen von Isolier- und Schaltmedien  | 9  |
| Abbildung 7: Qualitativer Vergleich von verschiedenen Isoliermedien: Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der typischen Dimensionen eines elektrischen Gerätes  | 12 |
| Abbildung 8: Schematischer Überblick über die konstruktive Unterteilung heutiger Schaltanlagen.   | 16 |
| Abbildung 9: Exemplarische Mittelspannungsschaltanlagen in Primärverteilung (links) und Sekundärverteilung (rechts) im Größenvergleich (Bemessungsspannung: 24 kV)  | 20 |
| Abbildung 10: Exemplarische Netztopologie für Primär- (orange) und Sekundärverteilung (grau)  | 21 |
| Abbildung 11: Exemplarische Mittelspannungsschaltanlagen (Betriebsspannung: 24 kV) ohne maßstabgetreue Größenverhältnisse.  | 22 |
| Abbildung 12 Stromwandler (links) und Spannungswandler (rechts) für die Mittelspannung  | 24 |
| Abbildung 13: Gasisolierter Generatorleistungsschalter (Alstom)   | 25 |
| Abbildung 14: Umspannwerk in der Hochspannung für ein Wasserkraftwerk   | 26 |
| Abbildung 15: Links: 10-feldrige 110 kV gasisolierte Schaltanlage (GIS). Rechts: Querschnitt einer 72,5 kV gasisolierten Schaltanlage (GIS) (GE)  | 26 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 16: Links: Hochspannung SF <sub>6</sub> Live-Tank Leistungsschalter (72,5-170 kV, ABB), Rechts: Hochspannung Dead-Tank SF <sub>6</sub> Leistungsschalter (145 kV, Siemens)                      | 28  |
| Abbildung 17: Hochspannungsmesswandler  | 28  |
| Abbildung 18: Querschnitt einer mit SF <sub>6</sub> gefüllten Durchführung (GE)   | 29  |
| Abbildung 19: Gasisolierte Leitungen  | 30  |
| Abbildung 20: Übersicht über Anwendungsorte für Schaltanlagen, in denen potentiell SF <sub>6</sub> zum Einsatz kommt.   | 32  |
| Abbildung 21: SF <sub>6</sub> -Emissionen während der Herstellung und im laufenden Betrieb, Emissionen in der Entsorgung sind zu vernachlässigen (2015).  | 44  |
| Abbildung 22: SF <sub>6</sub> -Produktions-, Betriebs- und Außerbetriebnahmeemissionen in Tonnen für Schaltanlagen in der Mittel- und Hochspannung sowie für „sonstige Betriebsmittel“                    | 45  |
| Abbildung 23: Entwicklung der SF <sub>6</sub> -Emissionen der Elektroindustrie (2.F.8) drei europäischer Herstellerländer sowie der Europäischen Union gesamt im Vergleich mit den Emissionen der Türkei. | 46  |
| Abbildung 24: Entwicklung der SF <sub>6</sub> -Emissionen der Elektroindustrie (2.F.8) in den Vereinigten Staaten im Vergleich zur Europäischen Union.  | 47  |
| Abbildung 25: Intensität wirtschaftlicher Maßnahmen nach Produktzyklus  | 90  |
| Abbildung 26: Leistungsschalter   | 126 |
| Abbildung 27: Lastschalter  | 126 |
| Abbildung 28: Trennschalter   | 126 |
| Abbildung 29: SF <sub>6</sub> Tank mit eingebautem Lasttrennschalter, Erdungsschalter und Antrieb   | 127 |
| Abbildung 30: Erdungsschalter   | 127 |

---

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Verwendete Einteilung der Spannungsbereiche für Betriebsmittel und Netzebenen   | 18 |
| Tabelle 2: Übersicht der Betriebsmittel und der betrachteten Komponenten   | 19 |
| Tabelle 3: Einsatz von Schaltgeräten in Schaltanlagen der Mittelspannung   | 23 |
| Tabelle 4: Komponenten in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) und luftisolierten Schaltanlagen (AIS), welche SF <sub>6</sub> als Lösch- oder Isoliergas enthalten können. SF <sub>6</sub> -Alternativen werden in Kapitel 6 angegeben. | 27 |
| Tabelle 5: Einsatzbereiche von Schaltanlagen in der Hoch- und Mittelspannung.  | 32 |
| Tabelle 6: Abschätzung der Verteilung des Anlagenbestands (Anzahl) von Schaltanlagen und Schaltfeldern der Mittel- und Hochspannung in Deutschland nach Anwendungsgruppen, Bestand Ende 2015   | 36 |
| Tabelle 7: Anteil der GIS (mit SF <sub>6</sub> als Isoliermedium) an der Anlagengrundgesamtheit in Deutschland   | 39 |
| Tabelle 8: Anteil der Komponenten, die SF <sub>6</sub> als Schalt- und Isoliermedium verwenden. Anlagenbestand in Deutschland  | 40 |
| Tabelle 9: Über die Spannungsebene gemittelte SF <sub>6</sub> -Menge je Betriebsmittel   | 42 |
| Tabelle 10: Von den Verbänden ZVEI und FNN gemeldete SF <sub>6</sub> -Mengen im Bestand  | 43 |
| Tabelle 11: Übersicht der Eigenschaften von SF <sub>6</sub> und ausgewählter Alternativgase  | 50 |
| Tabelle 12: Varianten von neuen metallgekapselten bzw. metallgeschotteten Schaltanlagen für die Primärverteilung und Sekundärverteilung  | 51 |
| Tabelle 13: Gegenüberstellung verschiedener MS-Schaltanlagen für die Primärverteilung (Leistungsschalterfeld) beispielhaft ausgewählter europäischer Hersteller (24 kV Varianten oder Vergleichbare)                                 | 53 |
| Tabelle 14: Gegenüberstellung verschiedener modularer MS-Schaltanlagen (Leistungsschalterfeld) für die Sekundärverteilung europäischer Hersteller (24 kV Varianten oder Vergleichbare)   | 54 |
| Tabelle 15: Gegenüberstellung verschiedener MS-Ringkabelschaltanlagen (bestehend aus 1 Leistungsschalterfeld und 2 Ringkabelfeldern) für die Sekundärverteilung europäischer Hersteller (24 kV Varianten oder Vergleichbare)         | 55 |

---

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 16: Übersicht von SF <sub>6</sub> -freien Betriebsmitteln für die Mittelspannung, in welchen Isolier- und Schaltmedien benötigt werden   | 56 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 17: Gegenüberstellung verschiedener SF <sub>6</sub> - und Alternativgas-gasisolierter Schaltanlagen (GIS) europäischer Hersteller für die Hochspannung (145 kV Varianten oder Vergleichbare).  | 58 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 18: Gegenüberstellung verschiedener SF <sub>6</sub> - und SF <sub>6</sub> -freier Live-Tank-Leistungsschalter europäischer Hersteller für Freiluft-Schaltanlagen in der Hochspannung (> 52 kV)   | 59 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 19: Gegenüberstellung verschiedener gasisolierter Leitungen (GIL) europäischer Hersteller  | 60 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 20: Übersicht von SF <sub>6</sub> -freien Betriebsmitteln für die Hochspannung (Spannungsebenen bis 110 kV), in welchen Isolier- und Schaltmedien benötigt werden  | 60 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 21: Übersicht von SF <sub>6</sub> -freien Betriebsmitteln für die Hochspannung (Spannungsebenen bis 110 kV), in welchen nur ein Isoliermedium benötigt wird  | 61 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 22: Relevante internationale Standards für elektrische Betriebsmittel mit SF <sub>6</sub> ,  | 64 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 23: Überblick freiwilliger Verpflichtungen zwischen der Industrie und den nationalen Regierungen   | 65 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 24: Übersicht der Bandbreite des Stimmungsbildes bzgl. ausgewählter Aspekte für Betriebsmittel in der Mittelspannung (Schwerpunkt lag auf Betriebsmittel mit bis zu 36 kV)   | 70 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 25: Übersicht der Bandbreite des Stimmungsbildes ausgewählter Aspekte für Betriebsmittel in der Hochspannung   | 73 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 26: Übersicht relevanter Standpunkte, Veröffentlichungen und Stellungnahmen der interviewten Gremien und Verbände  | 75 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 27: Zusammenfassung des Stimmungsbildes zu einzelnen Thesen (Ergebnisse der Befragung)   | 78 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 28: Zusammenfassung des Stimmungsbildes zu einzelnen Thesen (Ergebnisse der Befragung)   | 80 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 29: Zusammenfassung des Stimmungsbildes zu einzelnen Thesen (Ergebnisse der Befragung)   | 82 |
| <hr/>  |    |
| Tabelle 30: Bewertung der identifizierten Maßnahmen hinsichtlich Effektivität, Effizienz, Durchsetzbarkeit und Verteilungswirkung. Für einige Instrumentengruppen ist eine abschließende Bewertung nicht möglich, da Effektivität, Effizienz, Durchsetzbarkeit und Verteilungswirkung stark von der jeweiligen Ausgestaltung des Instruments abhängen. | 87 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 31: Mögliche Formen von Abgaben sowie deren Vor- und Nachteile  | 91  |
| Tabelle 32: Bewertung der Vor- und Nachteile der Ausgestaltung von Abgaben hinsichtlich ihrer Bemessungsgrundlage   | 92  |
| Tabelle 33: Bewertung der Vor- und Nachteile der Ausgestaltung von Abgaben nach Zahlungsverantwortlichem  | 93  |
| Tabelle 34: Vor- und Nachteile verschiedener Ausgestaltungsmöglichkeiten von Verboten und restriktiven Vorgaben   | 94  |
| Tabelle 35: Reduktionspotential der eingesetzten SF <sub>6</sub> -Menge sowie SF <sub>6</sub> -Emissionen je Gerätetyp, Spannungsniveau und Nutzungsphase   | 98  |
| Tabelle 36: Allgemeine elektrische Bezeichnungen für Netzebenen   | 107 |
| Tabelle 37: Technische Fachbegriffe für elektrische Betriebsmittel  | 107 |
| Tabelle 38: Elektrische Kenngrößen  | 114 |
| Tabelle 39: Umweltbegriffe  | 116 |
| Tabelle 40: Die wichtigsten Gase  | 117 |
| Tabelle 41: Organisationen  | 117 |
| Tabelle 42: Übersicht geführter Interviews  | 119 |
| Tabelle 43: Teilnehmende Organisationen des Fachgesprächs am 6. März 2017   | 120 |
| Tabelle 44: Produktblätter im Text ausgewerteter Betriebsmittel. Abgerufen im Oktober 2016  | 121 |
| Tabelle 45 Gegenüberstellung ausgewählter Annahmen- und Eingangsgrößen für LCAs verschiedener SF <sub>6</sub> - und Alternativgas-isolierter Schaltanlagen (GIS) europäischer Hersteller für die Hochspannung   | 129 |
| Tabelle 46: Einfluss von Gasemission, Wärmeverlust und Material auf das gesamte CO <sub>2</sub> -Äquivalent einer HS-Schaltanlage durch unterschiedliche, verwendete Methoden. GE und Siemens berücksichtigen Emissionen aus SF <sub>6</sub> Herstellung und Herstellerphase der Anlagen. | 129 |

---

## 2 Einleitung und Anliegen

### Hintergrund und Bedeutung von Schwefelhexafluorid

In der elektrischen Energietechnik hat das Gas Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) derzeit eine zentrale Bedeutung als Isolier- und Löschmedium, insbesondere in Schaltanlagen. Neben den vielfältigen Vorteilen hinsichtlich seiner technischen Eigenschaften hat  $\text{SF}_6$  den Nachteil eines sehr hohen Treibhauspotentials (Global Warming Potential, GWP) und giftiger Zersetzungsprodukte durch Schaltvorgänge. Mit einem  $\text{GWP}_{100}$  von 23.500<sup>1</sup> als Vergleichsmaß ist es das stärkste bekannte Treibhausgas. Zudem ist es mit einer atmosphärischen Lebensdauer von rund 3.200 Jahren<sup>2</sup> extrem langlebig [IPCC, 2013]. Die Kategorisierung von  $\text{SF}_6$  als eines der sechs Treibhausgase im Kyoto Protokoll von 1997 [UN, 2014b] war der Anlass, emissionsreduzierende Maßnahmen auch in der Anwendung als Isolier- und Löschgas in elektrischen Betriebsmitteln zu diskutieren. In Deutschland mündete dies in einer freiwilligen Selbstverpflichtung der Industrie (erstmalig 1997, erneuert 2005) [SOLVAY et al., 2005]. Diese verfolgt das Ziel,  $\text{SF}_6$ -Emissionen in der Energieversorgung u.a. durch geschlossene Kreisläufe, Technologieverbesserungen, Monitoringsysteme, höhere Wartungsintervalle, Forschung nach Alternativen und Mitarbeiterschulungen zu reduzieren.

Auf europäischer Ebene vollzog sich parallel dazu ein fortschreitender Prozess zur Regulierung des Einsatzes und der Nutzungsbedingungen klimarelevanter fluorierter Treibhausgase (F-Gase). Als Ergebnis veröffentlichte die Europäische Union im Jahr 2014 eine turnusgemäße Revision der Verordnung über fluorierte Treibhausgase Nr. 842/2008, um einen Beitrag zur weiteren Emissionsreduzierung von F-Gasen zu leisten. Im konkreten Fall von  $\text{SF}_6$  diskutierte das Parlament im Rahmen der Erstellung zuerst ein Verbot für bestimmte Anwendungsfälle in der Energieversorgung. In der finalen Verordnung wurde vom Verbot aber wieder Abstand genommen, darüber hinaus gibt es dort keinerlei Einschränkungen zur Verwendung von  $\text{SF}_6$  in elektrischen Betriebsmitteln [EU, 2014; Energy Networks Association Limited, 2013a, 2013b; T&D Europe, 2013a]. Schließlich sieht die aktuelle F-Gase-Verordnung (EU, Nr. 517/2014) für das Jahr 2020 die Überprüfung der Verfügbarkeit von technisch realisierbaren, zuverlässigen und kostenwirksamen Alternativen für  $\text{SF}_6$  in neuen sekundären Mittelspannungsschaltanlagen vor (Artikel 21, § 4). Des Weiteren sieht sie für das Jahr 2022 „eine Überprüfung der Verfügbarkeit von technisch realisierbaren und kostenwirksamen Alternativen zu Erzeugnissen und Einrichtungen, die fluorierte Treibhausgase enthalten“ vor (Artikel 21, § 2d), worunter alle weiteren Anwendungsfälle in der Energieversorgung fallen.

Verschiedene Untersuchungen und Veröffentlichungen, die die Möglichkeiten und Grenzen eines  $\text{SF}_6$ -Ersatzes untersuchten, begleiteten den teilweise kontroversen Diskussionsprozess der letzten Jahre [T&D Europe, 2015b; Smeets et al., 2014; Benner et al., 2012; T&D Europe, 2013b]. Mit der Präsentation alternativer Isoliergase und neuer  $\text{SF}_6$ -freier Betriebsmittel durch einzelne Hersteller in ausgewählten Anwendungen bekam die Diskussion um den zukünftigen Einsatz von  $\text{SF}_6$  in den zurückliegenden Jahren eine zusätzliche Dynamik.

---

<sup>1</sup> Wir beziehen uns auf den aktuellsten GWP Wert laut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Andere Studien verwenden auch frühere Werte z. B. von 22 800 bzw. 23 900.

<sup>2</sup> Eine aktuelle Studie berechnet eine atmosphärische Verweildauer von 850 Jahren [Ray et al., 2017]. Dies hat eine geringe Reduktion des  $\text{GWP}_{100}$  um ca. -4% (auf einen Wert von ca. 22.500), jedoch eine signifikante Reduktion für längere Zeithorizonte zur Folge (-18% für  $\text{GWP}_{500}$ ) und -32% für  $\text{GWP}_{1000}$ ). In diesem Bericht verwenden wir jedoch die vom UNFCCC und weitläufig verwendete Lebensdauer von 3.200 Jahren.

Vor diesem Hintergrund unterstützt dieser Bericht das Bundesumweltministerium (BMU) und das Umweltbundesamt (UBA) bei der Einordnung aktueller technischer Entwicklungen im Bereich SF<sub>6</sub>. Der Schwerpunkt liegt auf der detaillierten Erstellung eines aktuellen Überblicks zum Stand der Technik für Anlagen mit und ohne SF<sub>6</sub>-Nutzung. Weiterhin untersuchen wir, welche abgestimmten politischen, gesetzlichen, regulativen und wirtschaftlichen Maßnahmenpakete geeignet sind, eine wirksame Reduktion des SF<sub>6</sub>-Einsatzes in Neuanlagen sowie einer Reduktion von SF<sub>6</sub>-Emissionen in Herstellung, Einsatz und Entsorgung von Neuanlagen zu erzielen.

### **Untersuchungsschwerpunkt**

Den Betrachtungsschwerpunkt bilden elektrische Betriebsmittel in der Mittel- (MS) und Hochspannung (HS), in denen potentiell SF<sub>6</sub> zum Einsatz kommt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verwenden wir in Anlehnung an die IEC Norm IEC 62271-200 folgende Einteilung: Mittelspannung gilt für Anlagen größer 1 kV bis einschließlich 52 kV und Hochspannung bei mehr als 52 kV. Dabei ist zu beachten, dass in der europäischen Praxis in der Mittelspannung primär Betriebsmittel im Bereich 10 bis 36 kV zum Einsatz kommen. Weiterhin bezieht sich diese Einteilung auf die Bemessungsspannung. Im Gegensatz dazu erfolgt die Angabe der Spannung der Netzebene in der Regel in Form der Nennspannung, die rund 20 % unter der Bemessungsspannung liegt. Beispielsweise wird eine 24 kV Schaltanlage meist in einem Mittelspannungsnetz mit 20 kV betrieben.

### **Vorgehen**

Die Ziele des Berichts liegen in dem Aufzeigen des aktuellen Sachstandes zum Einsatz von SF<sub>6</sub> und SF<sub>6</sub>-freien Alternativen in elektrischen Betriebsmitteln und der vergleichenden Bewertung potentieller regulatorischer Mechanismen für den Ersatz von SF<sub>6</sub> in Neuanlagen und zur SF<sub>6</sub>-Emissionsreduzierung. Dabei liegt der Fokus auf der Einordnung und Bewertung der technischen Realisierbarkeit von Alternativen zu SF<sub>6</sub> in der Mittel- und Hochspannung.

Eine ausführliche Recherche bildet das Fundament des Berichts. Folgende Quellen haben wir einbezogen:

- aktuelle wissenschaftliche Veröffentlichungen von Universitäten, Forschungsinstituten, internationalen technisch-wissenschaftlichen Organisationen (Cigré, IEEE) und Fachberatungen (Ecofys, CE Delft, Ökorecherche) sowie öffentlich verfügbare Produktblätter der Hersteller (Anhang 10.4) für die Beschreibung und vergleichende Bewertung der technischen Eigenschaften aktueller Technologien;
- nationale und internationale Richtlinien und technische Normen, Verordnungen und Gesetzestexte für den regulatorischen Rahmen;
- 23 explorative Experteninterviews und weitere Telefoninterviews mit Herstellern und Anwendern sowie Stellungnahmen deutscher und europäischer Verbände für das Stimmungsbild.

Darüber hinaus führten wir im Jahr 2017 zwei Fachgespräche durch, in denen wir unsere Zwischenergebnisse zur Diskussion stellten und erste Schlussfolgerungen in Form von Thesen prüften. Das erste Fachgespräch fand im März 2017 statt. Die Diskussionsergebnisse sind in Kapitel 8 dargestellt. Im zweiten Fachgespräch im September 2017 in Brüssel wurden Instrumente und Konzepte zur Reduktion des Einsatzes und der Emissionen von SF<sub>6</sub> diskutiert. Die Ergebnisse flossen in die Erstellung des Konzepts (Kapitel 9).

## **Gliederung**

Die beiden folgenden Kapitel 2 und 3 dienen der allgemeinen Einordnung und Charakterisierung des Untersuchungsgegenstands. Kapitel 3 liefert eine Einordnung der Bedeutung von SF<sub>6</sub> für elektrische Betriebsmittel und das Klima. Kapitel 4 legt technische Grundlagen zum Verständnis des Nutzens und der Funktion elektrischer Betriebsmittel, die potentiell SF<sub>6</sub> nutzen. Weiterhin ordnen wir die Betriebsmittel Anwendungsfällen im Stromsystem zu.

Anschließend folgen zwei Kapitel, in denen wir spezifisch auf den Einsatz von SF<sub>6</sub> und alternativer Technologien eingehen. Dabei ordnet Kapitel 5 die betroffene Anlagenpopulation quantitativ ein. Kapitel 6 stellt den aktuellen Stand der Technik beim Einsatz von SF<sub>6</sub> und alternativer Technologien gegenüber.

Nach der rein technischen Betrachtung im ersten Teil des Berichtes inventarisieren und beschreiben wir in Kapitel 7 den regulatorischen Rahmen. Dieses Kapitel bietet einen Überblick zu aktuellen Rahmenbedingungen in Europa und zu dessen Erfahrungen.

In Kapitel 8 skizzieren wir das aktuelle Stimmungsbild der Hersteller und Anwender auf der Basis der geführten Gespräche. Hierzu stellen wir die unterschiedlichen Positionen zu SF<sub>6</sub> und alternativen Lösungen aus Interviews und Fachgesprächen vergleichend gegenüber.

In Kapitel 9 entwerfen wir mögliche Instrumente und Konzepte zur Reduktion des Einsatzes und der Emissionen von SF<sub>6</sub>. Zunächst werden Instrumente systematisiert und evaluiert. Auf dieser Grundlage wurden Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger sowie die Industrie erstellt und priorisiert.

### 3 Eigenschaften und Klimarelevanz von SF<sub>6</sub>

Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) ist eine anorganische Verbindung, welche aus elementarem Schwefel und Fluor synthetisiert wird. Unter Normalbedingungen ist SF<sub>6</sub> chemisch inert, nicht entflammbar, ungiftig und bei Temperaturen über -64 °C gasförmig [NIST, 2016]. Selbst bei Drücken, wie sie in elektrischen Betriebsmitteln verwendet werden (bis zu 7 bar = 0,7 MPa), liegt SF<sub>6</sub> auch bei tiefen Temperaturen gasförmig vor, wie die Dampfdruckkurve zeigt (siehe Abbildung 2). SF<sub>6</sub> ist fünfmal so schwer wie Luft, ist ein gutes Löschmedium, hat gute konvektive Kühleigenschaften, eine gute Schalldämpfung und ein hohes elektrisches Isolationsvermögen. Das kritische elektrische Feld (jene Feldstärke, ab der ein Gas seine Isolationsfähigkeit verliert) beträgt bei 1 bar ca. 88 kV/cm und ist somit mehr als dreimal so hoch wie jenes von Luft (24 kV/cm) [Küchler, 2009].

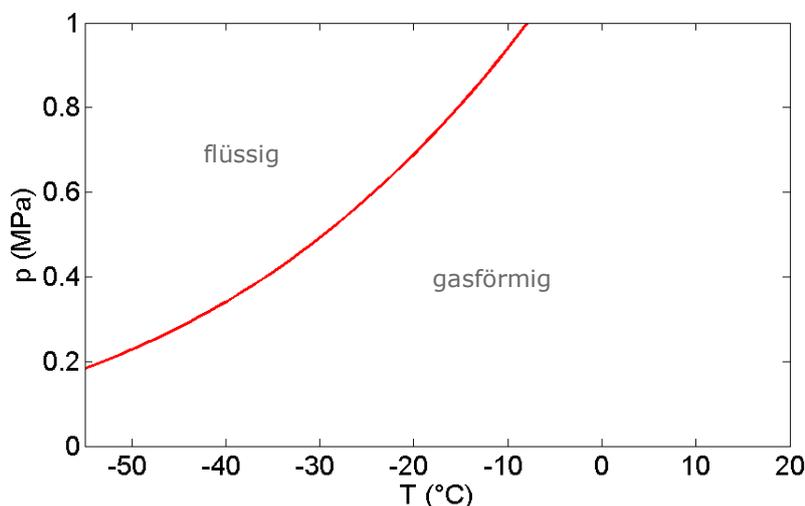


Abbildung 2: Dampfdruckkurve von SF<sub>6</sub>

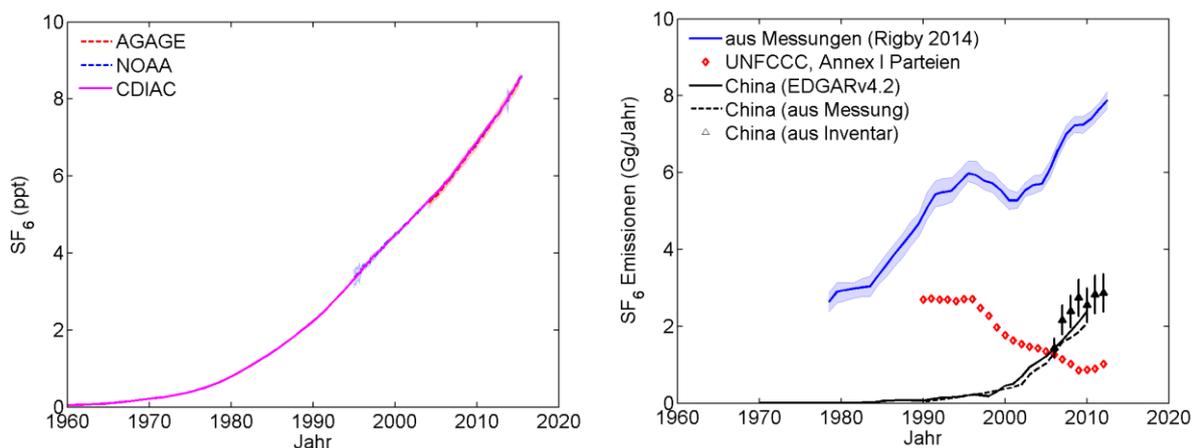
Quelle: [Guder und Wagner, 2009]

Das SF<sub>6</sub>-Molekül absorbiert die Infrarotrückstrahlung der Erde sehr effektiv in einem Frequenzbereich, in welchem die Atmosphäre relativ transparent ist. Damit trägt das Molekül zum Treibhauseffekt und der Erwärmung der Erde bei. Gleichzeitig ist SF<sub>6</sub> mit einer Lebensdauer von ca. 3.200 Jahren extrem langlebig<sup>3</sup>. Abbildung 3 (linkes Diagramm) zeigt den fortlaufenden globalen Konzentrationsanstieg von SF<sub>6</sub> durch globale SF<sub>6</sub>-Emissionen. Aufgrund seiner langen Verweildauer in der Atmosphäre akkumuliert sich SF<sub>6</sub> irreversibel auf einer Zeitskala von Jahrtausenden. Eisprobenmessungen belegen, dass im vorindustriellen Zeitalter SF<sub>6</sub>-Konzentrationen um drei Größenordnungen kleiner als heute waren. Seit den 1990er Jahren werden zusätzlich durch verschiedene Messprogramme [NOAA, 2014; Prinn et al., 2000] SF<sub>6</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre mittels Gaschromatographie an ca. 15 Messstationen global gemessen. Im ersten Quartal 2016 beliefen sich SF<sub>6</sub>-Konzentrationen auf ca. 9 ppt (*parts per trillion*). Im Vergleich dazu liegen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gegenwärtig bei ca. 400 ppm (*parts per million*). Der SF<sub>6</sub>-Anstieg in der Atmosphäre ist

<sup>3</sup> Eine aktuelle Studie berechnet eine atmosphärische Verweildauer von 850 Jahren [Ray et al., 2017]. Dies hat eine geringe Reduktion des GWP(100) um ca. -4% (auf einen Wert von ca. 22500), jedoch eine signifikante Reduktion für längere Zeithorizonte zur Folge (-18% für GWP(500) und -32% für GWP(1000)). In diesem Bericht verwenden wir jedoch die vom UNFCCC und weitläufig verwendete Lebensdauer von 3.200 Jahren. (Ray et al., 2017)

ein direktes Maß für die globalen SF<sub>6</sub>-Emissionen der letzten Jahre, welche in Abbildung 3 (rechts) dargestellt sind. Aus den präzisen atmosphärischen Messungen können außerdem mit Hilfe von atmosphärischen Transportmodellen regionale SF<sub>6</sub>-Emissionen bestimmt werden. Für China stimmen die so erhaltenen SF<sub>6</sub>-Emissionen [Fang et al., 2013b] relativ gut mit Inventarisierungsmethoden [Fang et al., 2013a] und [EDGAR project team, 2010] überein. Der Anstieg der globalen Emissionen seit 2000 kann jedoch nur teilweise durch steigende Emissionen aus China erklärt werden. Es ist wahrscheinlich, dass die Gesamtheit aller gemeldeten SF<sub>6</sub>-Emissionen in Annex I Staaten deutlich unter den tatsächlichen Emissionen liegen [IPCC, 2013; Rigby et al., 2010; Levin et al., 2010]. Zurzeit liegen jedoch keine Messwerte für SF<sub>6</sub>-Emissionen (Ausnahmen: Schweiz und Großbritannien) der einzelnen Annex I Staaten (insbesondere Deutschland) vor.

Im Jahr 2010 wurden ca. 38 Gt CO<sub>2</sub> [IPCC, 2013] und ca. 7.400 t SF<sub>6</sub> [Rigby et al., 2014] emittiert. Die SF<sub>6</sub>-Emissionen entsprechen 0,17 Gt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (kurz: CO<sub>2</sub>-e), also ca. 0,5 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen von 2010. In diesem Vergleich ist jedoch die lange Verweildauer von SF<sub>6</sub> im Vergleich zu CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre nicht vollständig berücksichtigt, da das GWP über einen Zeithorizont von 100 Jahren definiert ist. Der langfristige Beitrag zum Treibhauseffekt liegt daher aufgrund der geringen Abbaurate deutlich höher.



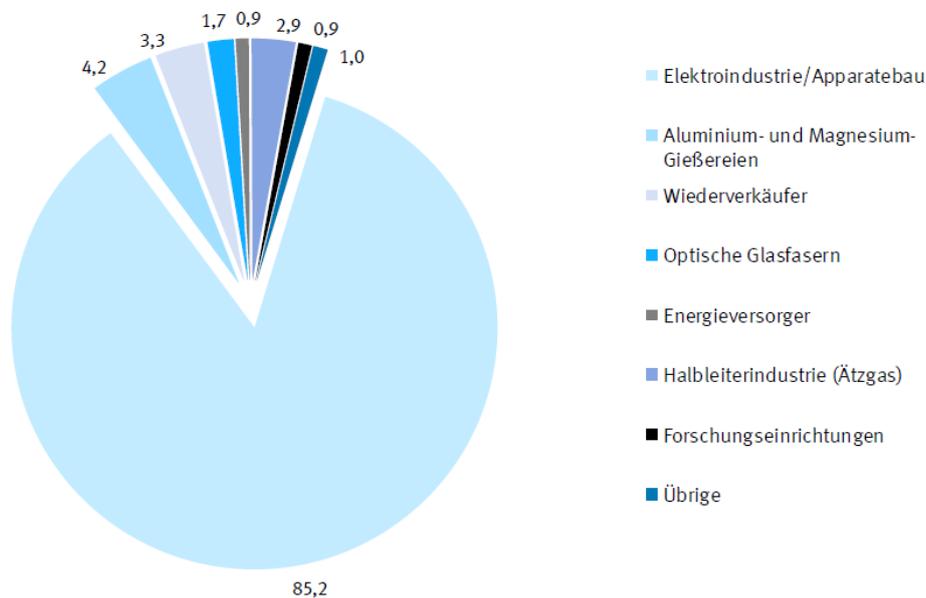
**Abbildung 3:** Links: globaler Mittelwert von atmosphärischen SF<sub>6</sub>-Konzentration, Rechts: Auch dargestellt sind die berichteten SF<sub>6</sub>-Emissionen der Annex I-Parteien aus der UNFCCC-Datenbank.

Aufgrund der Langlebigkeit von SF<sub>6</sub> ist der jährliche Anstieg der SF<sub>6</sub>-Konzentration ein direktes Maß für die jährlichen SF<sub>6</sub>-Emissionen.

Quelle: Bild links: AGAGE [Prinn et al., 2000], NOAA/ESRL [NOAA, 2014] und CDIAC [CDIAC, 2015]. Bild rechts: Für China sind Emissionsdaten aus der EDGARv4.2-Datenbank [EDGAR project team, 2010] dargestellt sowie Abschätzungen aus Messungen [Rigby et al., 2014; Fang et al., 2013b].

Die anfangs erwähnten physikalischen und chemischen Eigenschaften von SF<sub>6</sub> sind für zahlreiche technische Anwendungen vorteilhaft. SF<sub>6</sub> wird in verschiedenen Industriezweigen eingesetzt und global werden jährlich mehrere tausend Tonnen großindustriell produziert [Smythe, 2000]. Global betrachtet und auch in Deutschland ist gegenwärtig die Elektroindustrie mit Abstand der größte SF<sub>6</sub>-Abnehmer (etwa 85 %, vgl. Abbildung 4). Darüber hinaus ist SF<sub>6</sub> unter

anderem in der Magnesium- und Aluminiumindustrie sowie der Halbleiterindustrie in Verwendung. Die Abnehmermengen dieser Anwendungen entsprechen zusammen weniger als 10 % der insgesamt in Deutschland berichteter SF<sub>6</sub>-Verwendungsmengen (vgl. Abbildung 4). In der Vergangenheit diente SF<sub>6</sub> auch als Füllgas in Autoreifen, Sportschuhen und Schallschutzfenstern. Dieser Einsatz wurde in der EU verboten und auch in den meisten anderen Industriezweigen wird aktiv nach Ersatzstoffen geforscht. [Statistisches Bundesamt, 2015]. Auch in militärischen Systemen (z. B. Radar, Mark 50 Torpedo) sowie in der Medizin und der Industrie für Bestrahlungen sowie in Spannungstabilisatoren von Elektronenmikroskopen und Röntgengeräten findet SF<sub>6</sub> Verwendung. Diese Einsatzbereiche sind in Abbildung 4 nicht aufgeführt. Das Militär berichtet derzeit keine Einsatzmengen.



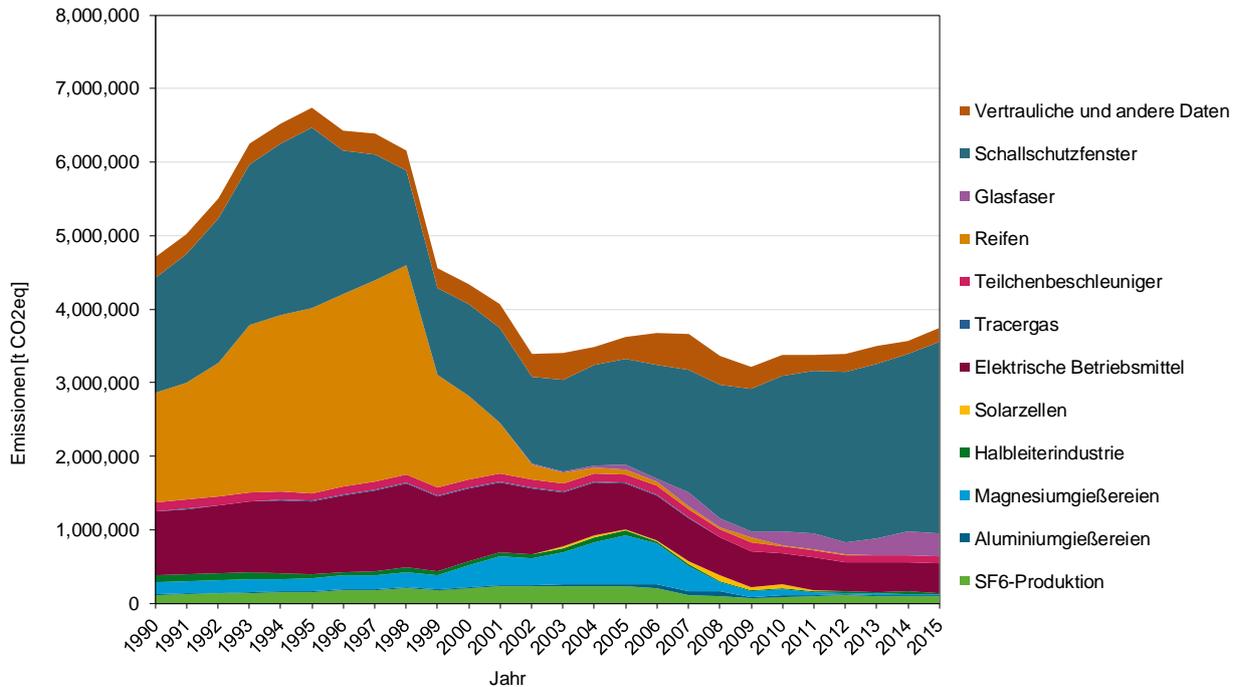
**Abbildung 4: Abnehmergruppen von SF<sub>6</sub> nach Verwendungsbereichen in % im Jahr 2015<sup>4</sup>**

Quelle: [DESTATIS, 2016]

Die Elektroindustrie ist der größte Verwender von SF<sub>6</sub>. Hinsichtlich der atmosphärischen Wirkung sind jedoch die Emissionen entscheidend. Abbildung 5 zeigt die SF<sub>6</sub>-Emissionen je Verwendungsbereich über die Gesamtlebensdauer der Produkte. Dabei sind Schallschutzfenster die mit Abstand größten Emittenten von SF<sub>6</sub>. Jedoch wurde der Einsatz von SF<sub>6</sub> in Schallschutzfenstern bereits in den 1990er Jahren stark reduziert und ist seit 2006 verboten. Die berichteten Emissionen basieren auf Modellannahmen, die davon ausgehen, dass das in den Fenstern gespeicherte SF<sub>6</sub> jährlich zu 1% emittiert und nach einer Lebenszeit der Fenster von 25 Jahren vollständig in die Atmosphäre tritt (Restbefüllung bei der Entsorgung entspricht 78% der Erstbefüllung). Die Emissionen von SF<sub>6</sub> aus Schallschutzfenstern (im Jahr 2015 kalkulatorisch 115 t; entspricht 2,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-e) werden somit bis 2030 fast vollständig aus der Bilanz verschwunden sein und etwa 2019 ihr Maximum erreichen. Derzeit zweitgrößter Emittent sind elektrische Betriebsmittel mit 17 t SF<sub>6</sub>/Jahr (entspricht 0,4 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-e). Die Zahl umfasst Emissionen aus der Herstellung, Nutzung und

<sup>4</sup> „Übrige“ umfasst die Verwendungsbereiche Herstellung von Schallschutzscheiben, Kfz-Werkstätten und Reifenhandel, Flugbetrieb (Radar), Solartechnik und Sonstige. DESTATIS, 2016

Entsorgung von elektrischen Betriebsmitteln wie Schaltanlagen der Hoch- und Mittelspannung sowie „sonstigen Betriebsmitteln“ wie Messtransformatoren und Kondensatoren. [UNFCCC, 2016]



**Abbildung 5: SF<sub>6</sub>-Emissionen in Tonnen je Verwendungsbereich über die Gesamtlebensdauer in Deutschland**  
Quelle: [UNFCCC, 2016]

Der größte Anteil der SF<sub>6</sub>-Emissionen entsteht bei der Produktion der elektrischen Betriebsmittel. Während des Einsatzes eines elektrischen Betriebsmittels wird SF<sub>6</sub> nur in geringen Mengen bzw. verzögert über Leckage, Handhabungsverluste und bei Störfällen emittiert. Die Leckraten hängen von der Produktionsweise der Gehäuse, Qualität der Dichtungen und dem Alter der Betriebsmittel ab. Emissionen während der Entsorgung nehmen noch einen sehr geringen Anteil der Gesamtemissionen ein, da erst wenige SF<sub>6</sub>-Betriebsmittel ihr technisches Lebensende von etwa 40 Jahren erreicht haben. Kapitel 5.3 betrachtet die Emissionen in Herstellung und Betrieb ausführlich.

## 4 Grundlagen zu elektrischen Betriebsmitteln und deren Eigenschaften

Für den sicheren und effizienten Systembetrieb des europäischen Stromsystems kommt eine Vielzahl an elektrischen Betriebsmitteln zum Einsatz. Im Rahmen dieser Studie liegt der Schwerpunkt auf Schaltanlagen, Messwandlern und Leitungen, für die SF<sub>6</sub> als Isolier- oder Schaltmedium potentiell zum Einsatz kommt. Gasisolierte Transformatoren liegen außerhalb des Betrachtungsschwerpunkts, da diese in Europa kaum Verwendung finden.

In den folgenden Abschnitten beschreiben wir zuerst technische Eigenschaften und Funktionen der dargestellten Betriebsmittel und verwendeten Komponenten. Da sich aus der gewählten Betriebsspannung der betrachteten elektrischen Betriebsmittel und deren Komponenten wesentliche technische Anforderungen sowie Designaspekte ableiten, verwenden wir ab Abschnitt 4.3 die Spannungsebenen als Unterscheidungskriterium. Spezielle Einsatzgebiete stellen spezifische Anforderungen an Schaltanlagen und weitere Betriebsmittel. Diese definieren wir in Abschnitt 4.4.

### **Allgemeine Anforderungen setzen den Rahmen für die Eigenschaften der Betriebsmittel**

Ein wesentliches Kriterium beim Entwurf elektrischer Betriebsmittel ist eine kompakte Ausführung. Oftmals wird die Installation von Betriebsmitteln in urbanen Räumen erst durch eine platzsparende Bauweise ermöglicht. Darüber hinaus ist der Kostendruck vor allem in den niedrigeren Spannungsebenen sehr hoch. Das gilt gleichermaßen für die Anlagenkosten und die bauseitigen Kosten, die nicht zuletzt durch die Abmessungen der Anlagen bestimmt werden. Schließlich leiten sich aus den erforderlichen Leistungsanforderungen im jeweiligen Anwendungsfall (Bemessungsspannung und -strom) wesentliche Spezifikationen für das Design der Betriebsmittel ab.

### 4.1 Aufgaben von Isolier- und Schaltmedien

Abbildung 6 zeigt schematisch und technisch vereinfacht anhand eines Schaltvorganges die drei wesentlichen Funktionen von Isolier- und Schaltmedien:

- Kühlen
- Löschen
- Isolieren

Die Unterscheidung der Funktionen ist wichtig, um in den nachfolgenden Kapiteln Einsatzbereiche etwaiger SF<sub>6</sub>-Alternativen für bestimmte Komponenten klar voneinander abzugrenzen.

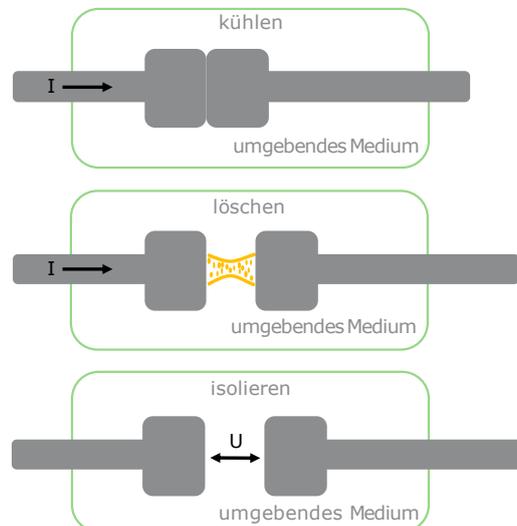


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der drei Positionen eines Schalters und der Funktionen von Isolier- und Schaltmedien

- 1) In geschlossener Stellung erzeugt der Betriebsstrom ( $I$ ) Wärme, welche durch das umgebende Medium abgeführt wird.
- 2) Beim Öffnen entsteht ein Lichtbogen, der gelöscht wird.
- 3) In offener Stellung wird die Betriebsspannung ( $U$ ) in der Isolierstrecke gehalten

Quelle: Eigene Darstellung

- **Kühlen unter Normlast:** Im geschlossenen Zustand muss die Verlustwärme des stromführenden Leiters effektiv nach außen hin abgegeben werden, um die thermische Belastung der Komponenten zu begrenzen. In Gasen erhöhen eine hohe Gasdichte, eine hohe Wärmetransportfähigkeit (Wärmeleitung, -strahlung, -konvektion) und eine geringe Viskosität die Kühlung durch Konvektion.
- **Löschen von Lichtbögen bei Schaltvorgängen:** Beim Öffnen des Schalters muss der entstehende Lichtbogen innerhalb von Sekundenbruchteilen gelöscht werden. Das Schalterdesign und die Eigenschaften des heißen Gases bzw. Plasmas bestimmen das Schaltverhalten. Beim Schalten in  $\text{SF}_6$  können allerdings auch giftige Nebenprodukte wie  $\text{SF}_4$ ,  $\text{SF}_5$ ,  $\text{SF}_2\text{H}_{10}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HF}$  entstehen.
- **Isolieren von hohen elektrischen Feldstärken:** Im offenen Zustand muss die Schaltstrecke bzw. der Leiter gegen die anliegende Betriebsspannung und transiente Überspannungen isoliert werden. Bei einem Gas ist dies umso besser möglich, je höher der Gasdruck und die Distanz zwischen spannungsführenden und geerdeten Teilen ist. Bei konstantem Druck und Abstand ist die sogenannte kritische Feldstärke jene Größe, welche das Isolationsvermögen eines bestimmten Gases quantifiziert. Zusätzlich zu einer hohen kritischen Feldstärke ist ein niedriger Siedepunkt des Gases ein notwendiges Kriterium, da die Kondensation bei tiefen Temperaturen den Gasdruck und somit das Isolationsvermögen herabsetzt.

Die Isolation spannungsführender Teile gegenüber geerdeten Teilen sowie die Wärmeabfuhr von stromführenden Teilen sind in allen betrachteten Betriebsmitteln erforderlich. Die Löscheigenschaften sind lediglich relevant, wenn die Komponenten eine Schaltfunktion erfüllen, wie z. B. Leistungsschalter und Lastschalter.

## 4.2 Allgemeine Eigenschaften von Isolations- und Schaltmedien

Aus den drei genannten Aufgaben leiten sich unterschiedliche physikalische Anforderungen an das umgebende Medium ab. Die aktuell zur Verfügung stehenden Lösch- und Isoliermedien lassen sich nach ihrem Phasenzustand im Normalbetrieb wie folgt unterteilen:

- Vakuum
- Gase oder Gasmischungen (z. B. SF<sub>6</sub>, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub>, Luft)
- Flüssigkeiten (z. B. Ester oder Öl)
- Festkörper (z. B. Polyethylen)

Das Isoliermedium Vakuum kann thermodynamisch als ein stark druckreduziertes Gas betrachtet werden. Als Dielektrikum unterscheidet sich Vakuum jedoch von einem Gas grundsätzlich und wird deshalb in der Literatur separat betrachtet. Die verschiedenen Isoliermedien werden nicht nur getrennt eingesetzt, sondern werden in vielen Betriebsmitteln miteinander kombiniert, wie etwa Pressspanbarrieren in Transformatoröl, Epoxidharz in gasisolierten Schaltanlagen, oder Stützisolatoren in einer gasisolierten Leitung (GIL). Historisch wurden in der MS und HS die verschiedensten Isolier- und Löschmedien verwendet. Die Wahl des besten Isolations- oder Schaltmediums unterliegt einigen Kriterien und hängt vom jeweiligen Anwendungsbereich ab. Es müssen immer gewisse Kompromisse in Bezug auf Gewicht, Größe, Wärmetransporteigenschaften, Lebensdauer, Flexibilität, Produktionsaufwand, Wartungsaufwand, Umwelteinflüsse, Gesundheitsrisiko und Personensicherheit eingegangen werden.

Bei geringen Feldstärken ist atmosphärische Luft das technisch einfachste und kostengünstigste Isoliermedium und kommt etwa in Freileitungen und luftisolierten Schaltanlagen (AIS) zum Einsatz. Die Erhöhung des Gasdrucks verbessert die Isolations- und Löscheigenschaften jedes Gases beträchtlich, was jedoch eine gasdichte und stabile Einhausung der spannungsführenden Teile erfordert. Dieses Konzept einer gasisolierten Schaltanlage (GIS) schafft zudem die Abschottung von ggf. schädlichen Umgebungseinflüssen. In den 1930er Jahren wurden erstmals statt Luft synthetische Verbindungen eingesetzt, die Atome elektronegativer Elemente wie Chlor und/oder Fluor enthielten. Die Isolations- und Schalteigenschaften konnten mit solchen Gasen – darunter SF<sub>6</sub> – wesentlich verbessert werden. Seit den 1970er Jahren wurde zunehmend SF<sub>6</sub> als Schaltgas eingesetzt. Um die Anwendung von Gasen bis hin zu sehr tiefen Temperaturen (z. B. -50 C) zu ermöglichen, werden auch Mischungen, wie etwa SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> oder SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub> verwendet. In Kanada sind seit dem Jahr 2000 und länger mehr als 100 AIS-Leistungsschalter mit einem SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub>-Gemisch in Betrieb [Middleton, 2000]. Als Löschgas in Leistungsschaltern wird seit einigen Jahren auch reines CO<sub>2</sub> verwendet. Seit kurzem werden ein perfluoriertes Keton (C5-PFK) und ein perfluoriertes Nitril (C4-PFN) als Beimischungen zu CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> oder O<sub>2</sub> in Isolations- und Schaltanwendungen genutzt. Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften sind sie als Isoliergas geeignet und haben zudem einen positiven Einfluss auf das Halten der transienten Wiederkehrspannung und auf die Wiederverfestigung der Schaltstreckenisolations, welches für einen erfolgreichen Schaltvorgang erforderlich ist. Da sich C5-PFK<sup>5</sup> und C4-PFN als reine Gase bereits bei relativ geringen Fülldrücken und hohen Temperaturen (im Vergleich zu SF<sub>6</sub>) verflüssigen, werden diese Stoffe in geringen Mengen zu Gasen wie CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> oder O<sub>2</sub> hinzugefügt. Das Hinzufügen von O<sub>2</sub> hat ferner den Vorteil, dass Rußbildungen und -ablagerungen vermindert werden können.

---

<sup>5</sup> C5-PFK ist bei Raumtemperatur und Normaldruck eine Flüssigkeit und kein Gas.

Die Verwendung von Vakuum zum Isolieren ist naheliegend, da es ideale Isoliereigenschaften (nicht elektrisch leitend) besitzt. Es dauerte jedoch bis in die 1960er Jahre, bis die Produktion vakuumdichter Teile möglich wurde und in Leistungsschaltern eingesetzt wurde. Heute sind Vakuum-Leistungsschalter in der MS dominierend. In der HS sind bereits seit einigen Jahren ebenfalls vereinzelt Vakuum-Leistungsschalter im Einsatz. Als reines Isoliermedium wird Vakuum hingegen nicht eingesetzt, da es technisch sehr aufwendig wäre, die Vakuumdichtheit größerer Betriebsmittel, wie etwa einer GIS, zu gewährleisten.

Feste Isolierstoffe sind unter anderem Epoxidharz, Polyethylen, Hartpapier, Silikon und Porzellan. Ein grundlegender Nachteil der Feststoffisolation gegenüber Vakuum, Gasen und Flüssigkeiten ist die irreversible Beschädigung der Isolation durch Teilentladungen. Feststoff-Leistungsschalter verwenden Halbleiterbauelemente, haben im Vergleich zu Vakuumschaltern relativ hohe Leitungsverluste und geringe Haltbarkeit und werden in AC-Schaltern bisher nicht eingesetzt. Feststoffisolation wird in den MS-Schaltanlagen verbreitet eingesetzt. Die „klassische“ Feststoffisolation ist meist die Kombination aus Feststoff und Luft, in welcher die relativ dünne Feststoffisolation das elektrische Feld in die angrenzende Luft verschiebt. Zusätzlich kann diese Grenzfläche der Feststoffisolation mit einem leitfähigen Material beschichtet und geerdet werden. Somit wird eine elektrische Beanspruchung der umgebenden Luft vermieden und nur der Feststoff ist der Spannung ausgesetzt. In diesem Fall spricht man von einer „abgeschirmten“ Feststoffisolation.

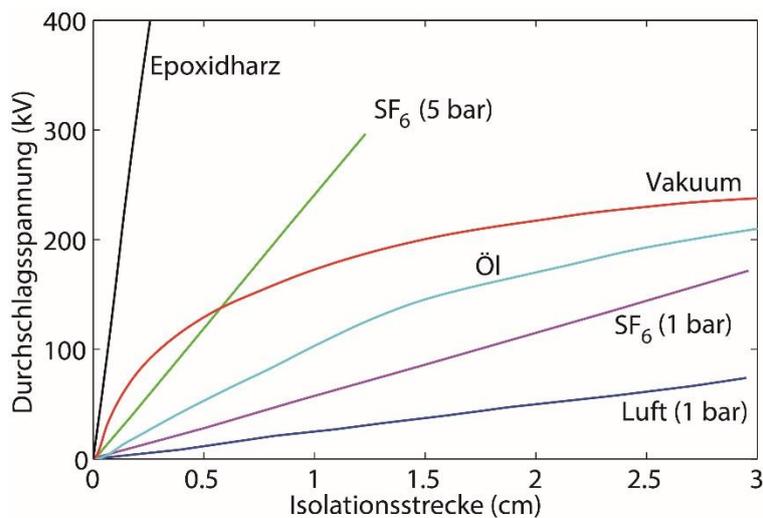
Gegenüber Gasen und Flüssigkeiten sind die Herstellungsprozesse von feststoffisolierten Komponenten aufwendiger und mit größerer Sorgfalt durchzuführen. Selbst kleinste Luftpfeinschlüsse müssen unbedingt vermieden werden, da diese die Alterung beschleunigen und zu einem Ausfall des Betriebsmittels nach einigen Monaten bis Jahren im Betrieb führt. Zudem muss die thermische Expansion der Komponenten berücksichtigt werden. In den Anfängen der Feststoffisolation hatten Kunden deshalb aufgrund von Fehlstellen teilweise schlechte Betriebserfahrungen gemacht. Die Produktionsprozesse haben sich bei den etablierten Herstellern stark verbessert. Dafür wurden z. B. Röntgenmessungen, Typentests mit Temperaturzyklen und das Vakuumvergussverfahren eingeführt. Die Feststoffverarbeitung ist aber im Vergleich zu gasförmigen und flüssigen Stoffen immer noch aufwendiger.

Flüssige Isolierstoffe sind vor allem Mineralöle, Silikonöle sowie natürliche und synthetische Ester. Vorteile sind die guten Imprägniereigenschaften und der effektive Wärmetransport durch Konvektion. Am Anfang des 20. Jahrhunderts wurde Wasser als Schaltmedium verwendet. Destilliertes Wasser hat zwar eine vergleichsweise hohe Impulsdurchschlagsfestigkeit, jedoch gleichzeitig eine relativ hohe Leitfähigkeit und wird deshalb in Betriebsmitteln nicht eingesetzt. Des Weiteren ist der Einsatz von Ölen bei geeigneter Wahl über einen viel weiteren Temperaturbereich möglich. Mineralöl wurde bis in die 1970er auch als Löschmedium in Leistungsschaltern eingesetzt und wurde durch SF<sub>6</sub>- und Vakuum-Schalter abgelöst. Heute werden Öle oder Ester vor allem in Transformatoren und vereinzelt in MS-Schaltanlagen eingesetzt. Nachteile von Mineralölen sind deren hohe Entflammbarkeit und die Umweltproblematik bei Ölverlusten. Synthetische Öle bzw. Ester können hingegen die Entflammbarkeit und die negativen Umwelteinflüsse stark reduzieren.

### **Isolation**

Alle Isoliermedien besitzen elektrische Festigkeiten, die mit zunehmenden Isolationsstrecken hohe Betriebsspannungen in Komponenten ermöglichen. Die elektrische Festigkeit reagiert empfindlich auf diverse Parameter wie die Zusammensetzung, Fertigungsbedingungen, Verunreinigung oder Alterung des Materials sowie die Homogenität des

elektrischen Feldes und die Spannungsbeanspruchung (DC, AC, Schaltstoß oder Blitzstoß). Für alle Isoliermedien gilt, dass mit der Isolationsstrecke auch die Durchschlagsspannung und somit die maximal mögliche Betriebsspannung zunimmt, wie in Abbildung 7 dargestellt. Dies ist der Grund dafür, dass die Anlagengröße von Betriebsmitteln mit der Betriebsspannung steigt. Gase folgen dabei über einen großen Bereich einem nahezu linearen Anstieg, während in Feststoffen, Flüssigkeiten und Vakuum die Durchschlagsspannung nicht direkt proportional zur Isolationsstrecke ansteigt, sondern mit zunehmender Isolationsstrecke sättigt.



**Abbildung 7: Qualitativer Vergleich von verschiedenen Isoliermedien: Durchschlagsspannung in Abhängigkeit der typischen Dimensionen eines elektrischen Gerätes**

Quelle: [Müller, 2009; Kahle, 1988]

Die elektrische Festigkeit eines Gases hängt stark von dessen Komponenten und Druck ab. So hat SF<sub>6</sub> eine mehr als drei Mal so hohe kritische Feldstärke wie Luft. Da die Durchschlagsspannung eines Gases über den technisch relevanten Druckbereich meistens linear mit der Isolationsstrecke und dem Druck zunimmt, sind ein höherer Gasdruck und größere Isolationsstrecken somit eine Möglichkeit, die Durchschlagsfestigkeit eines Systems zu erhöhen. Sowohl die Vergrößerung als auch Druckerhöhung (zunehmende Druckdifferenz zwischen dem eingekapselten Gasvolumen und der Umgebungsluft erfordern dickere Gefäßwände) führen zu einem höheren Materialverbrauch. Beim Design eines gasisolierten Betriebsmittels ist somit eine Abwägung von Abmessungen und Betriebsdruck zugunsten maximaler Durchschlagsfestigkeit und minimaler Materialkosten erforderlich. In elektrischen Betriebsmitteln der MS werden Drücke meistens knapp über 1 bar und in der HS Drücke bis zu ca. 8 bar eingesetzt. Für Gase wie N<sub>2</sub> oder O<sub>2</sub> wären prinzipiell auch weit höhere Drücke möglich. Für SF<sub>6</sub> und andere synthetische Gase bzw. Gasmischungen sind Limitationen vor allem durch die Verflüssigung des Gases hin zu hohen Drücken und tiefen Temperaturen gesetzt, was durch deren Dampfdruckkurve (siehe Abbildung 2 für SF<sub>6</sub>) bestimmt wird.

Der Durchschlag in Vakuum ist durch einen Oberflächeneffekt bestimmt, daher hängt die elektrische Festigkeit vor allem von der Form und dem Material der Elektroden ab. Im Gegensatz zu Gasen steigt in Vakuum die Durchschlagsspannung nicht linear mit der Isolationsstrecke (siehe Abbildung 7). In der Mittelspannung ( $\leq 52$  kV) sind geringe Isolationsstrecken ausreichend. Um hohe Durchschlagsspannungen zu erzielen, müssen allerdings entweder die Iso-

lationsstrecken überproportional vergrößert oder mehrere in Serie geschaltete Einheiten verwendet werden, einhergehend mit größeren Dimensionen und höheren Produktionskosten. Beides führt außerdem zu einem höheren Energiebedarf des Öffnungsmechanismus (meist Federspeicher) des Schalters. Die Gewährleistung einer gleichmäßigen Spannungsaufteilung zwischen in Serie geschalteten Einheiten ist hierbei schwierig, was vor allem bei hohen Kurzschlussströmen beachtet werden muss. Auf Grund dessen wird Vakuum heute in MS-Leistungsschaltern und in AIS der HS bis ca. 145 kV eingesetzt. HS-Leistungsschalter für Betriebsspannungen über 145 KV sind prinzipiell möglich und Gegenstand der Forschung und Entwicklung [Smeets et al., 2014].

In Flüssigkeiten und vor allem in Feststoffen nimmt die Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen im Isolationssystem/-material, welche einen Durchschlag initiieren, mit zunehmendem Isolationsvolumen zu und somit nimmt die kritische Feldstärke mit zunehmender Isolationsstrecke ab. Dies resultiert in dem „Abknicken“ der Durchschlagsspannung. In Feststoffen kann es zu Fehlstellen wie kleinen kugelförmigen Lufteinschlüssen, Spalten bei der Schichtung von Isolierstoffen und Rissen durch langjährige thermische und mechanische Beanspruchung kommen. Die elektrische Feldstärke in solchen Lufteinschlüssen wird durch den Effekt der „Feldverdrängung“ im Vergleich zur Feldstärke im Feststoff stark erhöht. Da die elektrische Festigkeit von Gasen in der Regel deutlich kleiner ist als jene von Feststoffen, kann dies zu Teilentladungen in den Lufteinschlüssen führen. Dies führt zwar nicht direkt zu einem Versagen der Gesamtisolation, jedoch zu einer stark beschleunigten Degradierung des Feststoffes. Teilentladungsmessungen sind eine wichtige Prüfmethode, um solche Fehlstellen, vor allem nach der Produktion und nach langjährigem Betrieb, zu erkennen. Ebenso existieren „Online Monitoring“ Methoden, welche es ermöglichen Teilentladungen im Betrieb zu messen. Trotz wesentlicher Verbesserungen in den Herstellungsprozessen über die letzten Jahre bleiben Teilentladungsmessungen eine wichtige Prüfmethode für Feststoffisolationen.

### **Wärmetransport**

Medien, die stromdurchflossene Leiter elektrisch isolieren, müssen nicht nur eine hohe elektrische Festigkeit aufweisen, sondern auch die Stromwärme des Leiters effektiv an die Umgebung abführen (siehe Abschnitt 4.1), um eine Schädigung des Betriebsmittels zu verhindern. Bei den Mechanismen des Wärmeabtransportes gibt es grundsätzliche Unterschiede zwischen den Isolierstoffen. Während die Kühlung durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung in gasförmigen, flüssigen und festen Medien auftritt, ist Konvektion in Feststoffen aufgrund ihrer Starrheit nicht möglich. Wärmetransport über Wärmeleitung ist in Gasen etwa eine Größenordnung kleiner als in Flüssigkeiten und zwei Größenordnungen kleiner als in Feststoffen. Jedoch ist der Wärmetransport über Konvektion in Gasen und Flüssigkeiten proportional zur charakteristischen Länge der Strömung und somit proportional zur Isolationsstrecke. Dies hat eine zunehmende Konvektionskühlung mit zunehmender Isolationsstrecke zur Folge. Daher stellt Konvektion für technisch relevante Abmessungen von Isolationsstrecken in der HS (SF<sub>6</sub> einer GIS/GIL, Öl im Transformator) den dominanten Kühlmechanismus dar. Dies ist die Basis für die hohen Übertragungsleistungen und die Überlastbarkeit von SF<sub>6</sub>- oder fluid-isolierten Sammelschienen. Im Gegensatz dazu nimmt bei einer Feststoffisolation die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmendem Isolationsvolumen ab und die Temperaturdifferenz zwischen Innenleiter und Außenseite zu, und somit die Gefahr von Überhitzung und Spannungsrissen in der Isolation. In Flüssigkeiten und in Feststoffen tritt zusätzlich zu der Erwärmung des stromführenden Leiters die sogenannte dielektrische Erwärmung auf, welche von der Leitfähigkeit (bei AC und DC) und der Polarisierung der Isolation (nur bei AC) herrührt. Eine anliegende AC-Spannung erzwingt eine sich periodisch ändernde Polarisierung des Materials, ein Prozess, der mit einem Energieverlust und damit der Erwärmung des Materials einhergeht. Die dielektrische Erwärmung steigt in der Regel zusätzlich mit der Tempe-

ratur. Vor allem im Feststoff kann – aufgrund der Abwesenheit von konvektiver Kühlung und der relativ hohen dielektrischen Verluste – diese zusätzliche Verstärkung der Erwärmung zum thermischen Durchgehen führen. Deshalb kommt die vollständige Feststoffisolation vor allem in der MS zur Anwendung. Für HS-Anwendungen gilt eine vollständige Feststoffisolation (z. B. einer HS-Sammelschiene) hingegen als technisch schwierig, wodurch Feststoffe lediglich als Teil einer Isolation (z. B. Stützer) zum Einsatz kommen.

## Schalten

Schaltmedien erfordern gleichzeitig hohes elektrisches Isolationsvermögen, effektiven Wärmetransport, schnelles Lichtbogenlöschen und Langzeit-Stabilität des Gases. Es wird in Lastschalten und Leistungsschalten unterschieden.

### *Leistungsschalten*

In Leistungsschaltern der Mittelspannung kommen aufgrund der hohen Zuverlässigkeit und der hohen Schaltleistungen heute überwiegend Vakuumschalter als Schaltmedium zum Einsatz (siehe Abschnitt 5.1). Beim Schaltvorgang entsteht in Vakuumschaltern ein Metaldampf-Lichtbogen, der aufgrund der starken Diffusion im Vakuum in sehr kurzer Zeit gelöscht wird und somit schnelles Schalten ermöglicht. Auch die Anzahl der möglichen Schalthandlungen (mehrere zehntausend) innerhalb der gesamten Lebenszeit von Vakuumschaltern ist höher als für SF<sub>6</sub>-Schalter aufgrund der höheren Stabilität der Schalterkontakte, der geringeren Lichtbogen Spannungen und der kürzeren Lichtbogenlöschung. Das Schalten hoher Ströme stellt für einen Vakuumschalter kein Problem dar, jedoch sind hohe Betriebsströme wegen der Wärmeentwicklung an den Kontaktflächen und des begrenzten Wärmetransports technisch herausfordernd. In SF<sub>6</sub>-Schaltern ist das Erreichen hoher Betriebsströme einfacher, da im Gegensatz zu Vakuumschaltern der Wärmetransport nicht nur entlang des Leiters, sondern in alle Richtungen und zusätzlich über Konvektion erfolgt.

### *Lastschalten*

In Lastschaltern und Lasttrennschaltern kommt größtenteils SF<sub>6</sub> zum Einsatz. Die für MS-Schaltanlagen größtenteils eingesetzten SF<sub>6</sub>-Lasttrennschalter (Messer-Schalter, Puffer-Schalter) sind technisch einfacher und deutlich kostengünstiger als Vakuumschalter.

## Spezifikationen

Die Isolations-, Wärmetransport- und Schalteigenschaften der einzelnen Medien bestimmen maßgeblich den Anwendungsbereich von elektrischen Betriebsmitteln. Dabei sind die maximalen Spannungen und Ströme unter Normalbetrieb und unter transienten Bedingungen von wesentlicher Bedeutung. Die wichtigsten Kenngrößen sind:

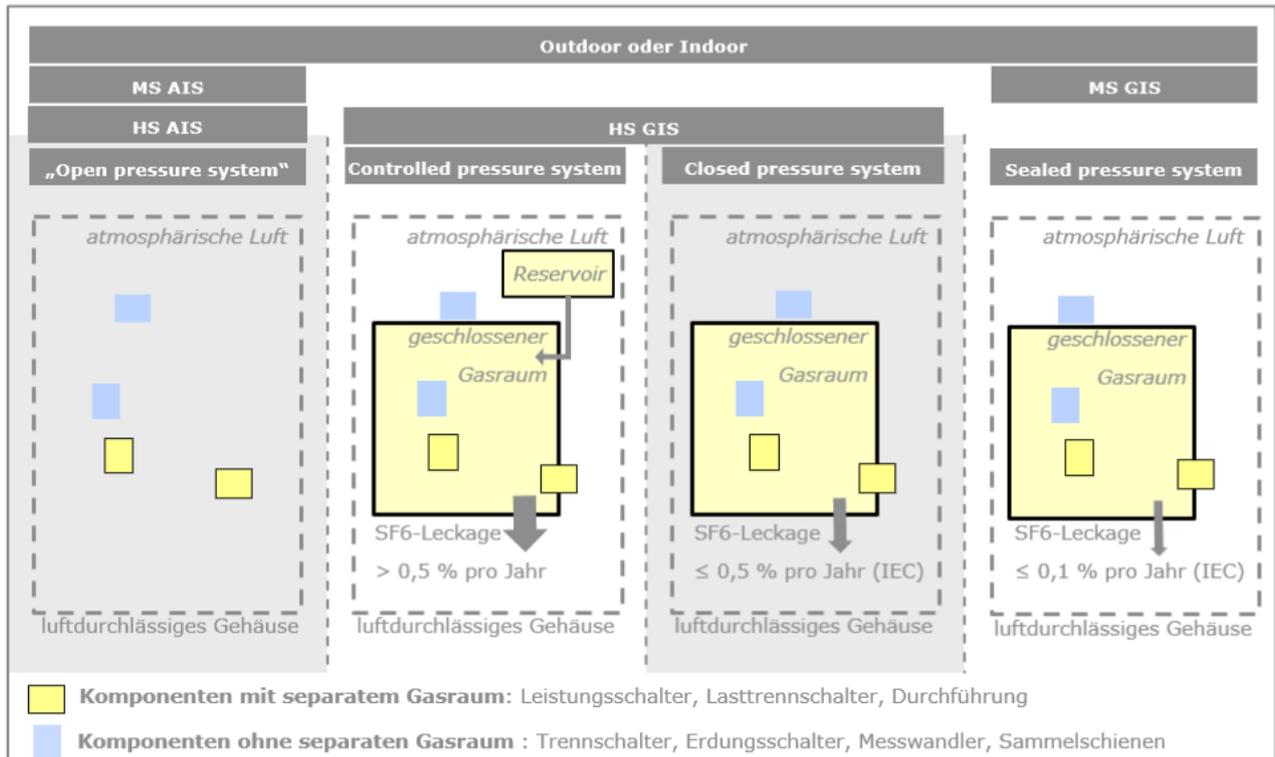
- Bemessungsspannung und -strom: maximale Betriebsspannung und -strom, bis zu welchem die Verwendung eines Gerätes vorgesehen ist;
- Ausschaltstrom (für Schalter): maximaler Strom, für den ein Schalter beim Abschalten des Stromes spezifiziert ist.

Andere Kenngrößen werden durch bestimmte Normen festgelegt, welche Produkte am Markt erfüllen müssen. Die Normen differenzieren deshalb zwischen verschiedenen Spannungsformen und häufig zwischen verschiedenen Komponenten. In Europa werden üblicherweise die IEC-Normen (in Nordamerika die ANSI-Normen) herangezogen. Für spezielle Anwendungsfälle, meistens wenn sehr hohe Zuverlässigkeit verlangt wird, fordern Anwender von Herstellern gelegentlich Anforderungen über diese Normen hinaus. Beispiele dafür sind niedrigere minimale Betriebstemperaturen, höhere Stromtragfähigkeit oder bessere Schalteigenschaften. Einige typische in den Normen festgelegte Größen sind:

- Bemessungs-Kurzzeit-Stehwechselfspannung: Effektivwert der AC-Spannung, dem die Isolation eines Gerätes während einer Zeitdauer von einer Minute standhalten muss.
- Bemessungs-Stehblitzstoßspannung: Scheitelwert einer normierten Stoßspannungswelle, dem die Isolation eines Gerätes standhalten muss. Ein hoher Wert dieser Größe ist wichtig, um die kurzzeitigen Überspannungen, die durch Blitzeinschläge in Betriebsmitteln verursacht werden können, ohne Schäden zu überstehen.
- Bemessungs-Schaltstoßspannung: Scheitelwert einer normierten Stoßspannungswelle, dem die Isolation eines Gerätes mit Bemessungsspannung standhalten muss. Ein hoher Wert dieser Größe ist wichtig, um die durch Schaltvorgänge im Netz ausgelösten impulsförmigen Überspannungen ohne Schäden zu überstehen.
- Bemessungs-Kurzzeitstrom: Strom, den ein Gerät während einer festgelegten kurzen Zeit führen kann.

#### **Unterteilung von Schaltanlagen und Begriffserklärung**

Die Unterteilung von Schaltanlagen erfolgt häufig in Innenraum- und Freiluftanwendung (Indoor / Outdoor), Mittel- und Hochspannung oder in die verschiedenen Bau- bzw. Ausführungsarten von Anlagen. Abbildung 8 illustriert diese Unterteilung und erklärt die wichtigsten Ausführungsarten von Schaltanlagen. Die detaillierten Begriffserklärungen finden sich auch im Thesaurus (Anhang 10.1) wieder.



**Abbildung 8: Schematischer Überblick über die konstruktive Unterteilung heutiger Schaltanlagen.**

Quelle: Eigene Darstellung.

Alle modernen MS Schaltanlagen (luft-, gas-, fluid- und feststoffisoliert) besitzen ein geerdetes Gehäuse (siehe z. B. Abbildung 9), welches die in Tabelle 4 gelisteten Komponenten umgibt. Diese Ausführung wird als metallgekapselt (im Englischen ‚metal-enclosed‘) bzw. metallgeschottet (im Englischen ‚metal-clad‘) bezeichnet. Das Gehäuse kann berührt werden und somit können MS-Schaltanlagen sicher in engen Räumen und unter hoher Personensicherheit betrieben werden. HS-AIS sind offene Freiluftanwendungen (siehe Abbildung 14, links) und haben in dem Sinn kein Gehäuse (zur Anschauung könnte der Zaun um die Freiluftanlage als „Gehäuse“ angesehen werden). Eine Anlage wird als AIS bezeichnet, wenn sich alle Komponenten in atmosphärischer Luft befinden und somit den Einflüssen aus der Umgebung direkt ausgesetzt sind. In einer GIS sind hingegen alle Schaltkomponenten separiert in einem geschlossenen und luftdichten Gasraum. Der absolute Gasdruck einer MS-GIS ist dabei leicht erhöht (ca. 1,3 – 1,8 bar) und der einer HS-GIS erheblich erhöht (bis zu ca. 8 bar). Somit unterscheiden sich der Gasdruck und folglich die Spannungsfestigkeit<sup>6</sup> einer in alpinen Lagen installierten AIS von jener einer auf Meereshöhe installierten AIS, während eine GIS unabhängig vom Luftdruck dieselbe Spannungsfestigkeit aufweist. Des Weiteren ist bei einer GIS der Schutz vor diversen Umwelteinflüssen (Staub, Baumwurzeln, Schlangen, etc.) gewährleistet. Sowohl in GIS, als auch in AIS können einzelne Komponenten wie Leistungsschalter einen separaten (z. B. mit SF<sub>6</sub> gefüllten) Gasraum besitzen.

<sup>6</sup>Zwischen Meereshöhe und einer hochalpinen (2000 m ü. M.) AIS Installation ergibt sich eine Druckdifferenz von ca. 20 % (abgeschätzt über die barometrische Höhenformel). Die Spannungsfestigkeit skaliert in der Regel linear mit dem Luftdruck und entsprechend nimmt diese ebenfalls um 20 % ab.

GIS unterteilen sich in drei unterschiedlich Konzepte: „controlled“, „closed“ und „sealed pressure systems“ (nach Norm IEC-62271-1). In controlled pressure systems entweicht Gas mit Leckraten (ein standardisierter Wert ist nicht definiert), welche ein regelmäßiges Nachfüllen der Anlage erfordern. Diese Systeme werden in Deutschland seit vielen Jahren nicht mehr in Betrieb genommen. Ein geringer Teil des GIS-Bestands in der Hochspannung ist noch als controlled pressure system ausgeführt, aufgrund ihres Alters steht diese Anlagengeneration aber zum Austausch an. Bei closed pressure systems ist ein Nachfüllen nur anlässlich einer Wartung nötig. HS-GIS folgen größtenteils diesem closed pressure system. Der standardisierte Wert nach IEC-62271-1 für SF<sub>6</sub> und SF<sub>6</sub>-Mischungen ist 0,5 % und 1 % pro Jahr. Dabei muss der Zeitraum zwischen zwei Nachfüllvorgängen mindestens 10 Jahre betragen. Closed pressure systems werden in der Regel nur nachgefüllt, wenn dies im Rahmen der Wartung (alle 10 Jahre oder mehr) erkannt wird oder aufgrund einer Warnmeldung der Gasraumüberwachung angezeigt wird. Die Mehrheit heutiger gas-, fluid- und feststoffisolierter MS-Schaltanlagen entsprechen sealed pressure systems. Diese erfordern keine weitere Gaszufuhr während der erwarteten Betriebslebensdauer. Eine Leckagerate von ca. 0,1% pro Jahr kann eine typische Betriebslebensdauer von bis 40 Jahren erfüllen. In diesem Bericht wird zur Unterscheidung der verschiedenen Technologien der Begriff MS-GIS nur für Schaltanlagen, welche SF<sub>6</sub> oder Alternativgase (vgl. Tabelle 11) enthalten, verwendet. Insbesondere werden Anlagen, welche trockene Luft bei erhöhtem Druck als Isoliermedium verwenden, auch als GIS bezeichnet. Die Bezeichnung Indoor und Outdoor für Schaltanlagen ist primär mit der minimalen Betriebstemperatur verknüpft, unter welcher ihr Betrieb noch möglich ist. Für Indoor-Anlagen wird nach IEC 62271 eine untere Betriebstemperatur von -5 °C und für Outdoor-Anlagen -25 °C vorgeschrieben, während Anwender häufig sogar eine untere Betriebstemperatur von bis zu -15 °C für Indoor-Anlagen fordern.

### 4.3 Betriebsmittel nach Spannungsebenen

Das Stromsystem gliedert sich sowohl in Deutschland als auch in Europa in zwei Systemebenen mit mehreren Spannungsebenen. Das Übertragungsnetz übernimmt die Rolle, große Leistungen in der Höchstspannung (HöS) über weite Strecken zu transportieren. Die Verteilnetze wiederum dienen zur Weiterleitung der Energie zu den Verbrauchern und zum ‚Einsammeln‘ der Energie aus dezentralen Erzeugungsanlagen. Die Verteilnetze selbst gliedern sich in Hochspannungsnetze zur überregionalen Stromverteilung, in Mittelspannungsnetze zur regionalen Stromverteilung sowie in Niederspannungsnetze zur lokalen Stromverteilung.

Der Untersuchungsschwerpunkt in diesem Bericht liegt auf der **Hoch- und Höchstspannung (≤ 52 kV) sowie Mittelspannung (> 52 kV)**. Wegen der geringen Feldstärken in der Niederspannung werden SF<sub>6</sub> oder andere Gase in elektrischen Betriebsmitteln hier grundsätzlich nicht eingesetzt. In diesem Bericht erübrigt sich deshalb die Betrachtung der Niederspannung.

Die Gepflogenheiten für die Zuordnung der Nennspannungen zu den jeweiligen Spannungsebenen unterscheiden sich in Europa historisch bedingt sehr stark. Dies gilt insbesondere für die Mittelspannung und die Abgrenzung zur Hochspannung. Einen weltweit gültigen Standard gibt es nicht. In dem vorliegenden Bericht beziehen wir uns in Anlehnung an die IEC Norm IEC 62271-200 auf eine Einteilung, die sich an der Bemessungsspannung der Betriebsmittel orientiert (vgl. Tabelle 1). Diese Einteilung entspricht auch dem Großteil der in Europa vorhandenen Stromsysteme [Eurelectric, 2013].

Die Einteilung der Betriebsmittel ist von der Einteilung der Netzebenen zu unterscheiden. In der Regel erfolgt im Sprachgebrauch die Einteilung der Netzebenen anhand der Nennspannung. Darüber hinaus wird zusätzlich in Hoch- und Höchstspannung unterteilt. Im Bericht wird jedoch die Einteilung nach Betriebsmittel gewählt. Hoch- und Höchstspannung wird demnach als Hochspannung (> 52 kV) zusammengefasst (Vgl. Tabelle 1).

Das folgende Beispiel veranschaulicht die differenzierte Einteilung hinsichtlich Nenn- und Bemessungsspannung: Eine 24 kV Schaltanlage (Bemessungsspannung) ist demnach in einem Mittelspannungsnetz mit 20 kV (Nennspannung) verbaut.

**Tabelle 1: Verwendete Einteilung der Spannungsbereiche für Betriebsmittel und Netzebenen**

Quelle: Eigene Darstellung

| Einteilung der Betriebsmittel |                    | Einteilung der Netzebene |                     |
|-------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|
| Spannungsebene                | Bemessungsspannung | Spannungsebene           | Nennspannung        |
| Mittelspannung                | > 1kV<br>≤ 52 kV   | Mittelspannung           | 10, 20, 30, 35 kV   |
| Hochspannung                  | > 52 kV            | Hochspannung             | > 52 kV<br>≤ 150 kV |
|                               |                    | Höchstspannung           | > 150 kV            |

Da sich aus der gewählten Betriebsspannung der Schaltanlagen und deren Komponenten wesentliche technische Anforderungen sowie Designaspekte ableiten, verwenden wir in diesem Bericht die Spannungsebene, definiert über die Bemessungsspannung elektrischer Betriebsmittel, als kapitelüberschreitendes Unterscheidungsmerkmal. Tabelle 2 bietet eine Übersicht der relevanten Betriebsmittel für die jeweiligen Spannungsebenen.

**Tabelle 2: Übersicht der Betriebsmittel und der betrachteten Komponenten**

Quelle: Eigene Darstellung

| Spannungsebene      | Betriebsmittel                                      | betrachtete Komponenten  |
|---------------------|---|--|
| Mittelspannung (MS) | Schaltanlagen in der Primär- und Sekundärverteilung | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsschalter</li> <li>• Trennschalter</li> <li>• Lastschalter</li> <li>• Lasttrennschalter</li> <li>• Messwandler</li> <li>• Durchführungen</li> </ul> |
|                     | Schaltanlagen für Generatoren                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generatorleistungsschalter</li> </ul>   |
| Hochspannung (HS)   | Schaltanlagen                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leistungsschalter</li> <li>• Trennschalter</li> <li>• Messwandler</li> <li>• Durchführungen</li> </ul>  |
|                     | Leitungen   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gasisolierte Leitung</li> </ul>   |

#### 4.3.1 Betriebsmittel der Mittelspannung

Im Folgenden beschreiben wir die betrachteten Betriebsmittel in der Mittelspannung (>1kV und ≤ 52 kV) hinsichtlich ihrer Funktion und Bauweise. Sie befinden sich überwiegend in Umspannwerken, Ortsnetzstationen oder werden zur Anbindung von Wind- und Solar(groß)anlagen eingesetzt. Eine Übersicht der Anwendungsfälle erfolgt in Abschnitt 4.4.

#### Schaltanlagen in der Primär- und Sekundärverteilung

Eine Schaltanlage umfasst generell Schaltgeräte zum Freischalten von Betriebsmitteln für Reparatur- und Servicearbeiten, die nicht unter Spannung stehen, und zum Ein- und Ausschalten im regulären Betrieb sowie bei Störungen. Die betrachteten Komponenten im Untersuchungsschwerpunkt sind in Tabelle 2 aufgelistet. Des Weiteren besteht eine Schaltanlage aus Kontroll-, Mess-, Schutz- und Regelgeräten.

In der Mittelspannung kommen zwei verschiedene Formen von Mittelspannungsschaltanlagen vor

- Schaltanlagen für die Primärverteilung (z. B. als Teil von Umspannwerken von Hoch- auf Mittelspannung sowie in Industrie- und Großinfrastrukturanwendungen) und
- Schaltanlagen für die Sekundärverteilung (Verteilung auf der Mittelspannung oder als Teil von Umspannwerken von Mittel- auf Niederspannung).

Primärverteilung

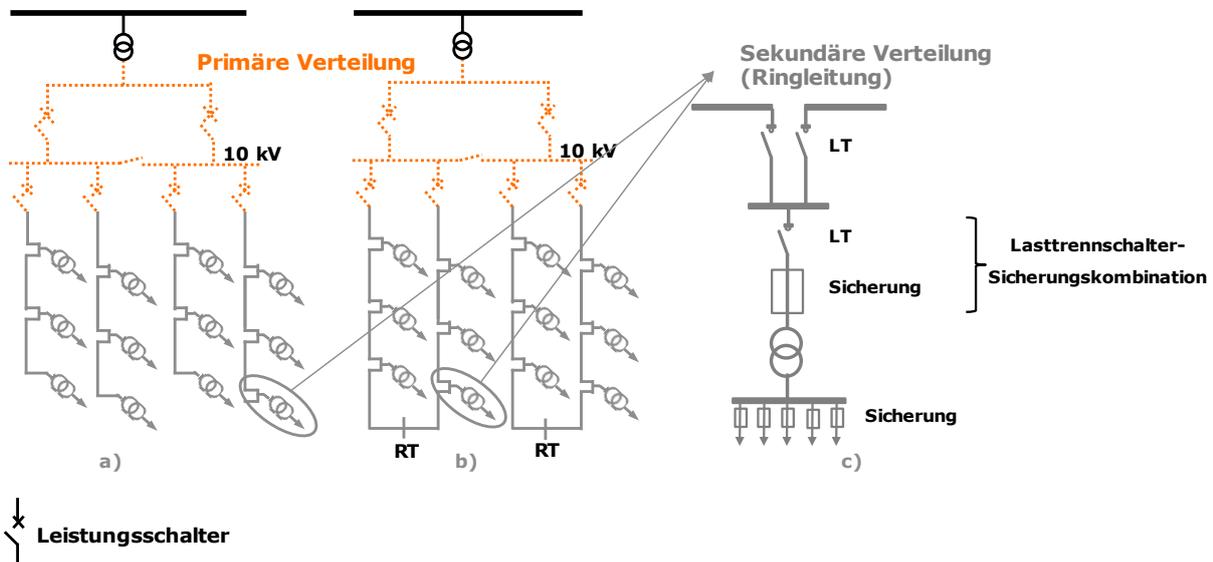
Sekundärverteilung



**Abbildung 9: Exemplarische Mittelspannungsschaltanlagen in Primärverteilung (links) und Sekundärverteilung (rechts) im Größenvergleich (Bemessungsspannung: 24 kV)**

**Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Herstellerabbildungen (siehe Produktblätter)**

**Schaltanlagen für die Primärverteilung** (vgl. Abbildung 10; orange) an den Mittelspannungsabgängen von Umspannwerken von Hoch- auf Mittelspannung, in Industrienetzen, in Kraftwerken oder Haupteinspeisungen großer Gebäudekomplexe bzw. Infrastruktureinrichtungen. Die Komponenten der Mittelspannungsanlagen für die Primärverteilung sind dafür ausgelegt, Betriebsströme von bis zu mehreren 1.000 Ampere zu führen und hohe Fehlerströme zu beherrschen und schalten. Abbildung 11 stellt eine solche gasisolierte Mittelspannungsschaltanlage (GIS) der primären Verteilung dar. Die auf den nächsten Seiten folgende Tabelle 3 zeigt die typischerweise eingesetzten Komponenten in Schaltanlagen.



⌘ Leistungsschalter

Abbildung 10: Exemplarische Netztopologie für Primär- (orange) und Sekundärverteilung (grau)

- Strahlennetz mit Sticleitungen
- Ringnetz mit Trennstelle
- Exemplarische Darstellung der Netztopologie für eine Schaltanlage der Sekundärverteilung

RT: Ringtrennstelle; LT: Lasttrennschalter

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [Schwab, 2009]

**Schaltanlagen für die Sekundärverteilung** (vgl. Abbildung 10; dunkelgrau) verteilen die elektrische Energie entweder auf einer Mittelspannungsebene oder befinden sich an der Schnittstelle zwischen Mittel- auf Niederspannung und sind vor allem in Ortsnetzstationen von Energieversorgungsunternehmen und Stadtwerken, aber auch in erheblichen Stückzahlen im Infrastrukturbereich und bei kleinen Firmen installiert (vgl. Kapitel 5). In der Sekundärverteilung befinden sich überwiegend reine Schaltanlagen mit Lastschaltern, ergänzt um kombinierte Lasttrenn-/ Leistungsschalterfelder bzw. Lastschalter-Sicherungskombinationen. Die sogenannte Ringkabelschaltanlage (im Englischen ‚ring main unit‘, RMU) stellt die häufigste Unterform von Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung dar. RMUs sind kompakte Schaltanlagen, die die Energieverteilung im Ortsnetzbereich ermöglichen. Sie bestehen meist aus drei Schaltfeldern: Kabeleingangs-, Kabelabgangs- und Transformatorabgangsfeld. Wenn sie dafür ausgelegt sind, können sie modular erweitert werden (siehe auch Anwendungsfall 1: Ortsnetzstationen). Das Kabeleingangs- und Kabelabgangsfeld erfordern lediglich Lasttrennschalter zum Schalten von Nennströmen, da in der Regel keine Kurzschlussströme geschaltet werden (diese werden meist an der Schaltanlage der Primärverteilung geschaltet). Im Transformatorabgangsfeld kommt eine Kombination aus Sicherung und Lastschalter (im Englischen meist ‚fused load-break‘ oder seltener ‚switch-fuse combination‘) oder alternativ ein Leistungsschalter zum Einsatz. Die Bemessungsbetriebsspannung von Mittelspannungsschaltanlagen der Sekundärverteilung ist typischerweise maximal 24 kV und der Bemessungs-Betriebsstrom ist maximal 630 A.



**Abbildung 11: Exemplarische Mittelspannungsschaltanlagen (Betriebsspannung: 24 kV) ohne maßstabgetreue Größenverhältnisse.**

Von links nach rechts: Luftisolierte Schaltanlage (AIS) für Primärverteilung, gasisolierte Schaltanlage (GIS) für Primärverteilung, gasisolierte Schaltanlage (GIS) für Sekundärverteilung (Ringkabel), Querschnitt einer gasisolierten Schaltanlage (GIS) für Primärverteilung (SF<sub>6</sub> Gasvolumen in Grün).

Quelle: Produktblätter (siehe Anhang)

#### Komponenten von Schaltanlagen (Schaltgeräte):

Schaltanlagen bestehen aus verschiedenen Schaltgeräten, wobei die konkrete Zusammenstellung vom Anwendungsfall und spezifischen Anforderungen seitens des Anwenders abhängig ist. Zur Veranschaulichung der Schaltgeräte befinden sich entsprechende Abbildungen im Anhang 10.5. Die gelisteten Schaltgeräte gelten ähnlich für die Hochspannung (vgl. Kapitel 4.3.2)

- **Leistungsschalter** sind nicht nur in der Lage, Betriebsströme zu schalten, sondern auch Stromkreise, die Fehlerströme tragen (z. B. im Fall von Kurzschlüssen), zu trennen und ggf. zu schließen. *Einsatzgebiet: Primär- als auch in der Sekundärverteilung.* In der Sekundärverteilung (z. B. in RMUs) wird teilweise auch eine Lasttrennschalter-Sicherungskombinationen alternativ zum Leistungsschalter verwendet. Eine solche Lasttrennschalter-Sicherungskombination kann ähnliche Funktionen übernehmen, allerdings einen Leistungsschalter nicht vollständig ersetzen, da eine Sicherung bei hohen Strömen irreversibel auslöst, während ein Leistungsschalter wieder eingeschaltet werden kann.
- **Lastschalter** dienen zum Ein- und Ausschalten von Betriebsmitteln und Anlageteilen unter normaler Last. Kurzschlussströme können im Gegensatz zum Leistungsschalter nicht unterbrochen werden.
- **Trennschalter** trennen nachgeschaltete Betriebsmittel, die nicht mehr unter Spannung stehen, von den spannungsführenden Teilen. So bilden sie eine sichtbare, verlässliche Trennstrecke zu den nachgeschalteten Betriebsmitteln. Dies dient vor allem der Sicherheit bei Service- und Reparaturarbeiten. Trennschalter werden ausschließlich im stromlosen Zustand betätigt. Bei einem Trennvorgang unter Last würde ein Trennschalter im Gegensatz zum Last- oder Leistungsschalter zerstört werden.
- Ein **Lasttrennschalter** ist ein Schalter, der sowohl die Anforderungen an einen Lastschalter als auch die Anforderungen an einen Trennschalter erfüllt. Einsatzgebiet: vor allem Sekundärverteilung, aber auch Primärverteilung.

- **Lasttrennschalter-Sicherungskombinationen** werde alternativ zu Leistungsschaltern in RMUs für den Trafoschutz verwendet. Im Normalbetrieb wird lediglich der Lasttrennschalter eingesetzt. Im Kurzschlussfall, erfolgt das Ausschalten infolge des Durchbrennens einer Sicherung. *Einsatzgebiet: Sekundärverteilung*, z. B. im Transformatorfeld einer RMU.
- Ein **Erdungsschalter** ist ein mechanisches Schaltgerät zum Erden von Betriebsmitteln eines Stromkreises (z. B. zum Schutz bei Wartungsarbeiten), das während einer bestimmten Dauer elektrischen Strömen unter anormalen Bedingungen, wie z. B. beim Kurzschluss, standhält, aber im üblichen Betrieb keinen elektrischen Strom führen muss.

Tabelle 3 zeigt die typischerweise eingesetzten Schaltgeräte in Schaltanlagen der Primär- und Sekundärverteilung.

**Tabelle 3: Einsatz von Schaltgeräten in Schaltanlagen der Mittelspannung**

Quelle: Eigene Darstellung

| Komponente                                | Primär | Sekundär (RMU)  |
|---|--------|---|
| Leistungsschalter                         | immer  | entweder  |
| Lasttrennschalter-Sicherungskombinationen | selten | oder<br>(oft Lasttrennschalter-Sicherungskombinationen, selten Leistungsschalter) |
| Lasttrennschalter                         | selten | meist   |
| Trennschalter                             | immer  | nur in Kombination mit Leistungsschalter  |
| Erdungsschalter                           | immer  | immer   |

### Weitere Komponenten von Schaltanlagen

Neben den eigentlichen Schaltgeräten bestehen Schaltanlagen aus weiteren Komponenten. Die Zusammenstellung ist vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Für die nachfolgenden vier Komponenten sind ausschließlich die Isolierfähigkeit und Wärmeabfuhr des verwendeten Isoliermediums von Bedeutung, da hier keine Schaltvorgänge stattfinden.

- **Sammelschienen** sind Anordnungen von Leitern, in Form von Schienen/Barren, an die Stromkreise angeschlossen werden können. Sammelschienen können gas- (inkl. luft-), feststoff- oder flüssig-isoliert sein.
- **Messwandler** wandeln Strom/Spannung insofern, dass Messgeräte angeschlossen werden können (Abbildung 12). Stromwandler wandeln Wechselströme, während Spannungswandler Wechselspannungen wandeln. Messwandler werden direkt in Schaltanlagen der Mittelspannung eingebaut, allerdings außerhalb des Gasraums (Primär- und Sekundärverteilung). In der Mittelspannung sind Messwandler vor allem feststoffisoliert (Gießharz, Epoxidharz). Seit einigen Jahren steht die Priorisierung von Härtern für die hier verwendeten

Epoxidharze (Anhydride MHPA und HHPA) im Rahmen des REACH-Zulassungsverfahrens im Raum. Die Bewertung kann unter anderem ein Beschränkungs- oder Zulassungsverfahren dieser Stoffe nach sich ziehen, mit Folgen für Hersteller von Messwandlern [ZVEI, 2016]. Der Verguss der Isolierung von Messwandlern erfolgt üblicherweise bei Unterdruck, um Lufteinschlüsse beziehungsweise Teilentladungen im Betrieb zu vermeiden (Teilentladungsproblematik, siehe Abschnitt 4.2). Spannungswandler sind im Vergleich zu Stromwandlern auf der Hochspannungsseite mit sehr dünnen Drähten gewickelt, wodurch das Isolationsmaterial um die Drähte höheren Feldbeanspruchungen ausgesetzt ist. Um Lufteinschlüsse in diesem kritischen Bereich zu vermeiden, erfolgt der Verguss von Spannungswandlern teilweise auch unter SF<sub>6</sub>-Atmosphäre.

- **Durchführungen** sind Bauteile, welche einen Leiter durch eine Wand (z. B. Gebäudewand, geerdetes Gehäuse eines Transformators) führen und diesen von ihr elektrisch isolieren. In der Mittelspannung werden fast 100 % der eingesetzten Durchführungen als Durchführungen innerhalb einer Schaltanlage eingesetzt. Es werden in der Regel Feststoffisolationen, z. B. Epoxidharze, verwendet.
- **Überspannungsableiter** kommen für den Schutz von elektrischen Geräten vor Überspannungen, hervorgerufen durch Blitzschlag oder externe Schaltvorgänge, zum Einsatz. In der Mittelspannung wird zumeist Zinkoxid als Aktivteil des Überspannungsableiters verwendet. Zur äußeren Isolation wird glasfaserverstärkter Kunststoff und Silikon eingesetzt.



**Abbildung 12 Stromwandler (links) und Spannungswandler (rechts) für die Mittelspannung**  
Quelle: [Pffifner Messtechnik]

### Schaltgeräte für Generatoren

Generatorleistungsschalter sind Schaltgeräte, die zwischen Generator und Transformator zu deren Schutz installiert sind (Abbildung 13). Die Funktionen des Generatorleistungsschalters sind das Zuschalten des Generators zum Netz (in Pumpspeicherkraftwerken auch umgekehrt das Zuschalten im Motorbetrieb) und das Unterbrechen von Betriebsströmen und Fehlerströmen. Die elektrischen Anforderungen an Generatorschalter sind aufgrund der sehr großen auftretenden Ströme nah am Generator weit höher als für Schalter im Netzeinsatz. Generatorleistungsschalter können als Gasschalter oder mit der Vakuumtechnologie ausgeführt sein. Bei sehr hohen Nennströmen (Leistungen über 450 MVA) sind allerdings nur SF<sub>6</sub>-Generatorschalter, keine Vakuumschalter, auf dem Markt erhältlich. Die Druckluft-Technologie wurde bei Generatorleistungsschaltern weitgehend durch SF<sub>6</sub> und später Vakuum abgelöst.



Abbildung 13: Gasisolierter Generatorleistungsschalter (Alstom)

Quelle: Produktblätter (siehe Anhang)

#### 4.3.2 Betriebsmittel der Hochspannung

Schaltanlagen der Hochspannung (Abbildung 14 und Abbildung 15) umfassen alle Schaltanlagen mit einer Bemessungsspannung von  $> 52$  kV. Sie befinden sich auf der Hochspannungsseite von Umspannwerken zwischen Mittelspannung und Hochspannung sowie zwischen Höchst- und Hochspannung. Außerdem befinden sie sich in Koppel-, Übergabe und Konverterstationen (siehe Abschnitt 4.4) in der Hoch- und Höchstspannung. Für Hochspannungsschaltanlagen unterscheiden sich die zwei Ausführungsarten AIS und GIS viel stärker in der Baugröße als im Mittelspannungsbereich (vgl. Abbildung 14, und Abbildung 15).

Eine GIS kann aufgrund ihres geringen Platzbedarfs eine Installation in Ballungszentren ermöglichen. Darüber hinaus ist die Ausführung einer Schaltanlage als sogenannte Hybrid-Schaltanlage (Abbildung 14, rechts) möglich. Dies ist eine Kombination aus GIS und AIS, in der die luftisolierten Sammelschienen mit gasisolierten Komponenten verbunden sind. Hybrid-Schaltanlagen werden vor allem bei der Erweiterung von AIS eingesetzt, da Hybrid-Anlagen kleiner sind und die Installierung wesentlich einfacher und schneller als bei AIS erfolgen kann, da die Komponenten (Leistungsschalter, Trennschalter, Erdungsschalter und Messwandler) bereits in der Fabrik zusammengebaut und getestet wurden. Eine luftisolierte Schaltanlage mit gasisoliertem Kesselleistungsschalter (siehe unten) ist eine Form einer Hybrid-Anlage und wird meistens als AIS bezeichnet.



Abbildung 14: Umspannwerk in der Hochspannung für ein Wasserkraftwerk

Links: vor Renovierung: Luftisolierte Schaltanlage (AIS). Rechts: nach Renovierung: Hybrid-Schaltanlage (ABB)

Quelle: Produktblätter (siehe Anhang)

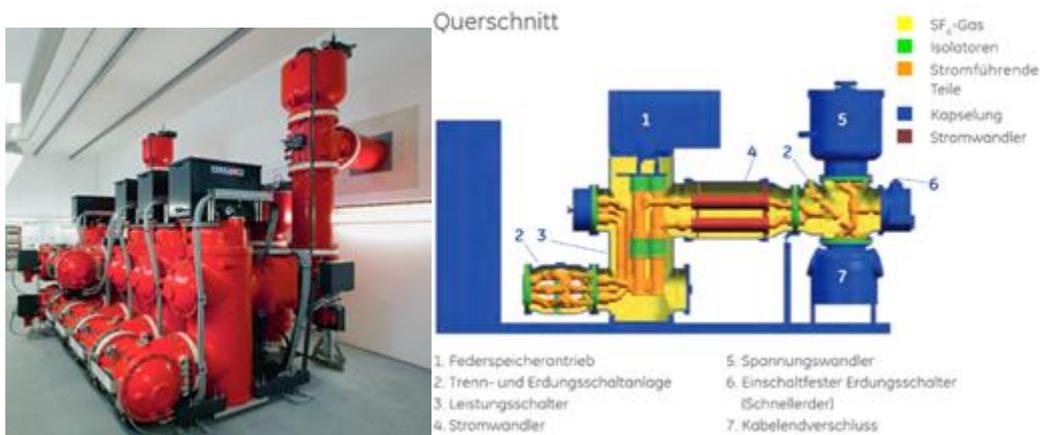


Abbildung 15: Links: 10-feldrige 110 kV gasisolierte Schaltanlage (GIS). Rechts: Querschnitt einer 72,5 kV gasisolierten Schaltanlage (GIS) (GE)

Quelle: Produktblätter (siehe Anhang)

### Komponenten von Schaltanlagen

Im Allgemeinen kommen die gleichen Grundkomponenten wie bei Schaltanlagen in der Mittelspannung zum Einsatz (Abschnitt 4.3.1), allerdings werden Lastschalter, Lasttrennschalter und Lasttrennschalter-Sicherungskombinationen in der Hochspannung überwiegend nicht verwendet. Aufgrund der höheren Spannungsebene unterscheidet sich die spezifische Ausführung der Komponente insbesondere hinsichtlich des verwendeten Schalt- und Isoliermediums. In GIS sind alle Komponenten gasisoliert (in einem geschlossenen Gasraum mit Überdruck), während in AIS einige Komponenten gas- und andere luftisoliert sein können (siehe Abbildung 8). Die nachfolgende Tabelle bietet eine Übersicht der möglichen gasisolierten Komponenten in Abhängigkeit der Ausführung der Schaltanlage.

**Tabelle 4: Komponenten in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) und luftisolierten Schaltanlagen (AIS), welche SF<sub>6</sub> als Löscher oder Isoliergas enthalten können. SF<sub>6</sub>-Alternativen werden in Kapitel 6 angegeben.**

Quelle: Eigene Darstellung

| Komponente                         | Ausführung der Schaltanlage |     |
|------------------------------------|-----------------------------|-----|
|                                    | GIS                         | AIS |
|                                    | Komponente ist gasisoliert  |     |
| Leistungsschalter und Durchführung | X                           | X   |
| Trennschalter, Erdungsschalter     | X                           |     |
| Messwandler                        | X                           | X   |
| Überspannungsableiter              | X                           |     |

**Leistungsschalter** übernehmen die Aufgabe, einen Betriebsstrom aber auch den auslegungsrelevanten Fehlerstrom (z. B. im Falle eines Kurzschlusses) schnell zu unterbrechen. Im Vergleich zur Mittelspannung muss die Trennstrecke des Leistungsschalters in der Hochspannung, nach unterbrechen des Stromflusses, naturgemäß höheren Spannungen sicher widerstehen, dies macht Vakuumausführungen in der Regel schwieriger. Derzeit sind vor allem SF<sub>6</sub>-Ausführungen im Einsatz. Vakuum-Ausführungen existieren im HS-Bereich und befinden sich für den HöS-Bereich in der Entwicklung [Smeets et al., 2014]. In luftisolierten Hochspannungsanlagen werden zwei verschiedene Bauformen verwendet (Abbildung 16):

- *Schaltkammerleistungsschalter* (im Englischen ‚live tank‘): ein Leistungsschalter, in dem die Unterbrechereinheit in einem Gehäuse ist, das gegenüber dem Erdpotential isoliert ist.
- *Kesselleistungsschalter* (im Englischen ‚dead tank‘): ein Leistungsschalter, in dem die Unterbrechereinheit sich in einem geerdeten metallischen Gehäuse befindet. Daher kann ein Stromwandler direkt an der Durchführung montiert werden, wohingegen bei Schaltkammerleistungsschaltern ein Stromwandler (siehe Abbildung 16) separat montiert werden müsste. Dadurch sind Kesselleistungsschalter platzsparender. Jedoch benötigen Kesselleistungsschalter zur Isolierung der spannungsführenden Komponenten vom metallischen Gehäuse wesentlich größere Mengen an Isolationsgas. Außerdem sind am Gehäuse Durchführungen für den Hochspannungsanschluss nötig, die ebenfalls oft mit SF<sub>6</sub> gefüllt sind.



Abbildung 16: Links: Hochspannung SF<sub>6</sub> Live-Tank Leistungsschalter (72,5-170 kV, ABB), Rechts: Hochspannung Dead-Tank SF<sub>6</sub> Leistungsschalter (145 kV, Siemens)

Quelle: Produktblätter (siehe Anhang)

**Messwandler** werden zur Strommessung (Stromwandler), Spannungsmessung (Spannungswandler) und Strom- und Spannungsmessung (Kombiwandler) eingesetzt. In AIS werden für die unteren Spannungsniveaus der HS vor allem Öl-Papier und hin zu höheren Spannungen vermehrt SF<sub>6</sub> als Isoliermedium verwendet (Abbildung 17). Für Messwandler ist ausschließlich die Isoliereigenschaft und Wärmeabfuhr (nicht die Schalteigenschaften) des verwendeten Isoliermediums relevant.



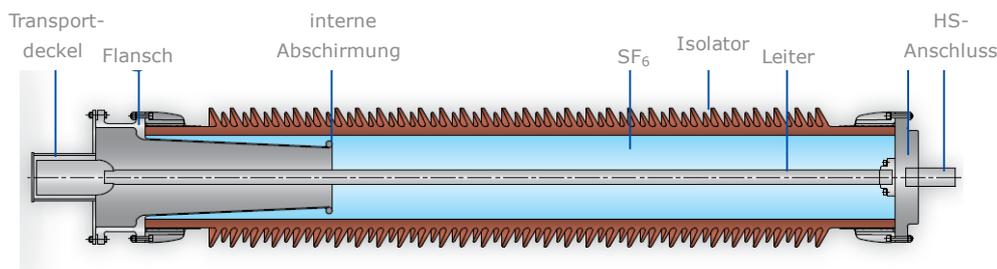
Abbildung 17: Hochspannungsmesswandler

Links: Hochspannungsstromwandler in einer Umspannstation. Rechts: Hochspannungsspannungswandler (rot umrahmt) in einer gasisolierten Schaltanlage (Piffner Messwandler AG)

Quelle: Produktblätter (siehe Anhang)

Auch **Durchführungen** werden in der Hochspannung teilweise gasisoliert ausgeführt, insbesondere ab einer bestimmten Baugröße. Bei Durchführungen die in gekapselten Betriebsmitteln / Schaltanlagen Verwendung finden, existieren zwei unterschiedliche Bauformen. Die erste Bauform stellen Durchführungen dar, die mit dem Gasraum des Betriebsmittels / der Schaltanlage verbunden sind (siehe Abbildung 18). Daneben existiert eine Bauform bei der die

Freiluftseite der Durchführung mittels einer Feststoffisolation gasdicht gegenüber dem Betriebsmittel / der Schaltanlage abgeschlossen ist. Bei dieser Bauform gibt es Varianten, bei denen der Raum zwischen Feststoff- und äußerem Isolator ausgeschäumt wird. Hierbei kann SF<sub>6</sub> als Treibmittel Verwendung finden. Ähnlich zu Messwandlern sind für Durchführungen lediglich Isoliereigenschaft und Wärmeabfuhr (nicht die Schalteigenschaften) des verwendeten Isoliermediums relevant (Abbildung 17).



**Abbildung 18: Querschnitt einer mit SF<sub>6</sub> gefüllten Durchführung (GE)**

Quelle: Produktblätter (siehe Anhang)

#### 4.3.3 „Sonstige Betriebsmittel“

In aktuellen Diskussionen hat die Relevanz der Betriebsmittelgruppe, die im SF<sub>6</sub> Reporting als „sonstige Betriebsmittel“ zusammengefasst wird, zugenommen. Dies liegt insbesondere an den vergleichsweise hohen Produktionsemissionen dieser Betriebsmittelgruppe (vgl. Abschnitt 5.3). Die Diskurse sind aber auch daher hitzig, da die Systemgrenzen und Begrifflichkeiten dieser Betriebsmittelgruppe nicht final definiert sind und unterschiedliche Auslegungen bzw. Sprachregelungen bestehen. Auch die Zuordnung von eingelagerten („banked“) Emissionen ist strittig.

Der Nationale Inventarbericht (NIR) [UBA, 2017] zählt die folgenden Betriebsmittel zu den „sonstigen Betriebsmitteln“:

- Messwandler:
  - Hochspannungs-Freiluftmesswandler (alle Emissionskategorien)
  - Mittelspannungs-Gießharzmesswandler (nur Herstellungsemissionen)
- Durchführungen:
  - Hochspannungsdurchführungen (nur Herstellungsemissionen)
- Gasisolierte Leitungen (GIL): (alle Emissionskategorien)
- Gasisolierte Transformatoren: marginaler Bestand im Netz; (keine Herstellungsemissionen)
- Kondensatoren 1.000 V (nur Herstellungsemissionen)
- Prüfung von Mittelspannungskomponenten (nur Herstelleremissionen)

Die Funktion und Relevanz von Messwandlern und Durchführungen wurde bereits in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 als Komponenten von Betriebsmitteln eingeführt. Die weiteren Betriebsmittel Gasisolierte Leitungen (GIL), Gasisolierte Transformatoren (GIT) und Kondensatoren werden in den folgenden Absätzen kurz erläutert.

## Gasisolierte Übertragungsleitungen (GIL)

Eine gasisolierte Leitung (GIL, Abbildung 19) ist eine elektrische Höchstspannungsleitung, die aus einem Leiterrohr besteht, das in einem Rohr zentriert ist, welches ein komprimiertes Isolationsgas (meist SF<sub>6</sub>- oder SF<sub>6</sub>/Stickstoff-Mischungen mit einem SF<sub>6</sub>-Anteil von ca. 20 %) enthält. Als GIL im engeren Sinne (nach IEC) ist eine gasisolierte Rohrleitung zur Übertragung von Energie über größere Entfernungen (> 500m) - statt Kabel oder Freileitung - gemeint.

Häufig werden umgangssprachlich auch gasisolierte Sammelschienen in Umspannwerken als GIL bezeichnet. Diese werden eingesetzt, um den Transformator direkt mit einer GIS zu verbinden. In der Summe kann die Länge aller gasisolierten Sammelschienen in einem Umspannwerk mehrere Kilometer betragen. Eine gasisolierte Sammelschiene hat verschraubte und abgedichtete Flansche. Während eine GIL aus miteinander gasdicht verschweißten Rohren besteht, mit dem Vorteil geringerer Leckagen und damit Emissionsraten.

Eine GIL hat gegenüber Kabeln oder Freileitungen gewisse Vorteile. Die Verlegung einer GIL kann sowohl oberirdisch auf Gerüsten als auch unterirdisch, direkt erdverlegt oder im Tunnel, erfolgen und benötigt im Vergleich zu Freileitungen weniger Platz. Dies macht den Einsatz etwa in Ballungszentren oder in unmittelbarer Flughafennähe sinnvoll. Eine GIL ermöglicht hohe Betriebsspannungen von typisch 400 und 500 kV und Übertragungsleistungen und erfordert geringe Blindleistungskompensation im Vergleich zu entsprechenden Höchstspannungskabeln. Die Kosten einer GIL sind um ein Vielfaches höher als jene einer gleichwertigen Freiluftleitung. Aufgrund der Akzeptanzproblematik von zusätzlichen Freileitungen erlangen GILs eine zunehmende Bedeutung als Alternative zu Übertragungsfreileitungen, in den Fällen in denen eine Freileitung nicht möglich ist. Gegenwärtig sind GILs auch für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung in der Entwicklung [Tenzer et al., 2015].



Abbildung 19: Gasisolierte Leitungen

Links: Aufbau einer gasisolierten Leitung (GIL). Rechts: Unterirdische Verlegung einer gasisolierten Leitung (GIL)

Quelle: Produktblätter (siehe Anhang)

## Gasisolierte Transformatoren

Ein Transformator überführt (wandelt) die elektrische Leistung einer Spannungsebene auf eine andere Spannungsebene, wobei die übertragene Leistung (Produkt aus Strom und Spannung) abgesehen von Verlusten gleich bleibt. Transformatoren kommen zwischen allen Spannungsebenen zum Einsatz (Nieder- bis Höchstspannung). In Europa sind vorwiegend ölisierte, sowie in unteren Leistungsleistungsbereichen und speziellen Applikationen feststoffisolierte,

Transformatoren im Einsatz. Gasisolierte Transformatoren werden praktisch nicht verwendet. Im Gegensatz zu ölisierten Transformatoren ist die Brandgefahr bei gasisolierten Transformatoren reduziert und Ölauffangbecken sind nicht erforderlich. Im asiatischen Raum sind gasisolierte Transformatoren teilweise verbreitet, vereinzelt existieren auch in den USA.

### Kondensatoren

SF<sub>6</sub>-gefüllte Kondensatoren (oft in Kombination mit Öl) kommen in der Leistungselektronik im unteren MS-Bereich (bis ca. 5 kV) zum Einsatz. Da ihr Einsatz vor allem Bahnwendungen betrifft, sind sie in diesem Sinne nicht Komponenten des Verteil- und Übertragungsnetzes. SF<sub>6</sub>-Emissionen treten dabei im allgemeinen nur bei der Produktion der Kondensatoren auf [Wartmann und Harnisch, 2005].

## 4.4 Anwendungsspezifische Anforderungen an Schaltanlagen

Nachfolgend fassen wir die genannten Anwendungsfälle für die eingeführten Schaltanlagen und deren Komponenten in einer Übersicht zusammen. Dabei gehen wir auf anwendungsspezifische Anforderungen ein.

Grundsätzlich sind Schaltanlagen an verschiedenen Orten im Netz verbaut. Dabei gliedern wir deren Einsatz in drei Anwendungsgruppen:

- *Erzeugung*: Schaltanlagen zur Anbindung und in nichtöffentlichen Netzen von Stromerzeugungsanlagen;
- *Öffentliches Netz*: Schaltanlagen an Netzknoten zur Verteilung innerhalb einer Netzebene oder der Umspannung zwischen zwei Netz-/Spannungsebenen;
- *Kundenanlagen*: Schaltanlagen zur Anbindung und in nichtöffentlichen Netzen von Stromverbrauchern.

Die Mehrheit der Anlagen ist im öffentlichen Netz verbaut, dort befinden sie sich an Netzknoten zur Verteilung innerhalb einer Netzebene oder der Umspannung zwischen zwei Netz-/Spannungsebenen. Je nach Spannungsebene variieren die Aufgaben der Schaltanlagen, abhängig von Art und Ort der angeschlossenen Erzeuger und Verbraucher. Abbildung 20 und Tabelle 5 veranschaulichen die grundsätzlichen Einsatzbereiche im Stromsystem.

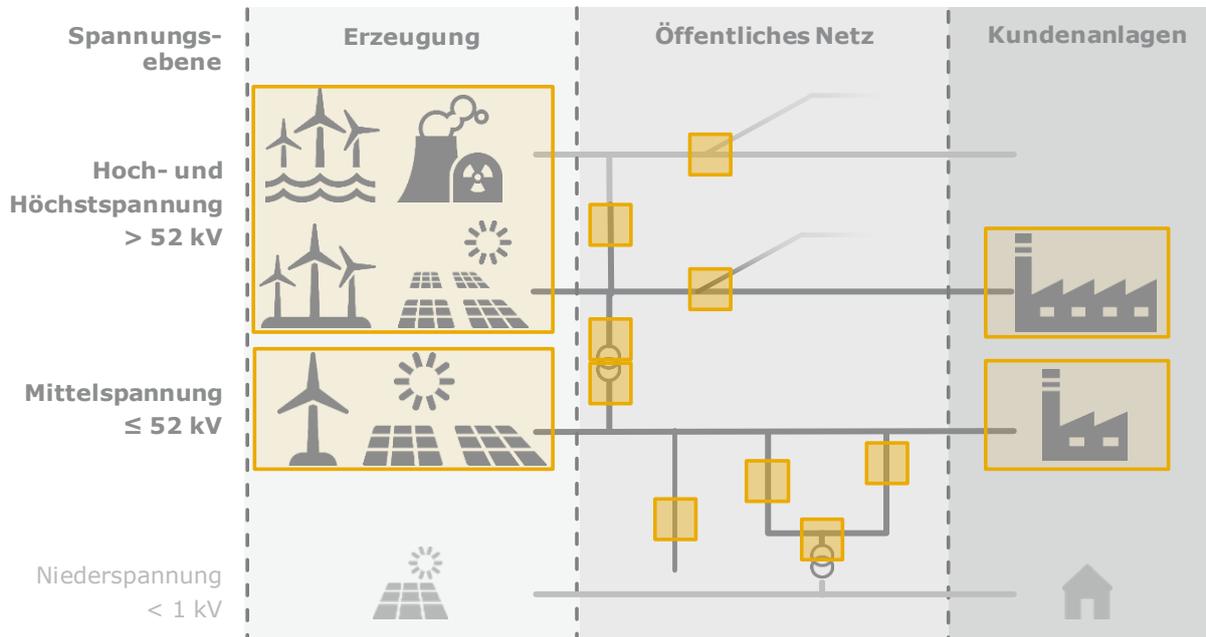


Abbildung 20: Übersicht über Anwendungsorte für Schaltanlagen, in denen potentiell SF<sub>6</sub> zum Einsatz kommt.

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 5: Einsatzbereiche von Schaltanlagen in der Hoch- und Mittelspannung.

Quelle: Eigene Darstellung.

| Spannungsebene           | Betriebsmittel                     | Einsatzbereich  |                   |                                       |
|--------------------------|------------------------------------|---|-------------------|---------------------------------------|
|                          |                                    | Erzeugung   | Öffentliches Netz | Kundenanlage                          |
| Hoch- und Höchstspannung | Schaltanlagen                      | Übergabestation Offshore Wind Kundenanlagen werden in (privaten) Industrienetzen verschaltet. | Umspannwerke      | Industrielle Großverbraucher          |
|                          |                                    | Übergabestation Wind / Solarpark  | Umspannwerke      | Industrienetze, Infrastrukturprojekte |
| Mittelspannung           | Schaltanlagen primäre Verteilung   | Turmfuß, innerhalb von Solarparks   | Ortsnetzstationen | Industrienetze, Infrastrukturprojekte |
|                          | Schaltanlagen sekundäre Verteilung | Kraftwerksanbindung   | -                 | -                                     |

Entsprechend der Auflistung ordnen wir die verschiedenen Einsatzbereiche und Spannungsebenen sechs wesentlichen Anwendungsfällen zu. Dies bildet nicht alle möglichen, vorhandenen Anwendungsfälle ab, lässt allerdings eine Priorisierung auf die wichtigsten zu.

1. **Ortsnetzstationen** (Schaltanlagen der sekundären Verteilung);
2. **Schaltanlagen im Turmfuß von Windkraftanlagen On- und Offshore** sowie zur Anbindung von sowie in **Solarparks** (Schaltanlagen der sekundären Verteilung);
3. **HS-MS Umspannwerke oder MS-Anbindung von Stromerzeugungsanlagen** (Schaltanlagen in der Primärverteilung);
4. **Anbindung industrieller und gewerblicher Verbraucher sowie Infrastrukturprojekte (z. B. Bahnnetz);**
5. **Anbindung von Generatoren in Kraftwerken** (Generatorleistungsschalter);
6. **Umspannwerke und Schaltanlagen in der Hoch- und Höchstspannung.**

Die grundsätzlichen Anforderungen an Schaltanlagen in Umspannwerken (primär Anwendungsfall 3 und 6) haben wir ausführlich in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben. Darüber hinaus ergeben sich für einige Anwendungsfälle spezifische Anforderungen an Schaltanlagen. Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

- **Anwendungsfall 1: Ortsnetzstationen (Schaltanlagen der sekundären Verteilung):** Ortsnetzstationen verteilen die elektrische Energie auf der Mittelspannungsebene oder transformieren die Spannung von der Mittel- in die Niederspannung. In der Regel bestehen Ortsnetzstationen aus Komponenten der MS-Primärtechnik (Transformator und Schaltanlage) und weiterer MS-Sekundärtechnik (Mess- und Steuerungstechnik) und einem Niederspannungsteil. Leistungsschalter sind in der Regel nicht verbaut, da Kurzschlussströme in Anlagen in der Primärverteilung geschaltet werden. Überlastung und Kurzschlüsse werden im Netz und am Transformatorabgang meist durch eine Lastschalter-Si-Kombination (meist, in DEU) oder einem Leistungsschalter (nur gelegentlich) beherrscht werden. Die häufigste Ausführung stellt die RMU dar. Aufgrund der hohen benötigten Anzahl an Ortsnetzstationen und ihrem Einsatz in Wohngebieten stellen Netzbetreiber, insbesondere in urbanen Regionen, hohe Anforderungen an kompakte Baugrößen, an geringe Kosten sowie an geringen Wartungsaufwand.
- **Anwendungsfall 2: Schaltanlagen im Turmfuß von Windkraftanlagen On- und Offshore:** In der Vergangenheit wurden die Maschinentransformatoren und Schaltanlagen von Windkraftanlagen an Land neben dem Turm errichtet. Gegenwärtig befinden sich die Komponenten fast ausschließlich im Turmfuß. Wegen des begrenzten Raums, auch in Bezug auf Einhaltung der Normen zur Dimensionierung von Flucht- und Rettungswegen, erfordert der Einbau im Turmfuß eine sehr kompakte Bauweise. Meist werden hierfür gasisolierte Schaltanlagen der sekundären Verteilung (sowohl Stickleitungen mit zwei-, als auch Ringkabel mit drei Schaltfeldern) verwendet. Bestimmte Turmkonfigurationen (Betonhybridtürme) werden heute und zukünftig breiter gebaut als noch vor einigen Jahren. Damit sind die Platzbegrenzungen in diesen Turmfüßen weniger relevant. Die Abmessungen von Stahlrohrtürmen sind durch den Transport durch Brücken begrenzt. Auch die Größe der Tür als Zugang zum Turmfuß ist ein relevantes Designkriterium, da große Türen die Statik des Turms schwächen. Hersteller von Windenergieanlagen kaufen und verbauen in der Regel Schaltanlagen, die serienmäßig für allgemeine Anwendungen gefertigt werden. Spezialanfertigungen gibt es praktisch nicht. Deshalb werden Produkte ausgewählt, die den Maximalanforderungen gerecht werden. Grundsätzlich besteht im Turmfuß die Möglichkeit, die Anlagenteile auf zwei Geschosse zu verteilen. Dies verursacht allerdings unvermeidlich zusätzliche Kosten. In Schaltanlagen, die in Offshore-Windenergieanlagen aber auch bei Onshore-Anlagen in Küstennähe verbaut werden, muss der Schutz gegen Umwelteinflüsse aufgrund der korrosiven und leitfähigen Umgebung sichergestellt werden. Auch starke Temperaturschwän-

kungen dürfen einen zuverlässigen Betrieb nicht einschränken. Darüber hinaus ist Wartungsarmut ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz in Offshore-Windenergieanlagen, da es nur wenig geschultes Wartungspersonal gibt und die Erreichbarkeit der Anlage einen kritischen Faktor darstellt.

- **Anwendungsfall 3: HS-MS Umspannwerke oder MS-Anbindung von Stromerzeugungsanlagen (Schaltanlagen in der Primärverteilung):** Die grundsätzlichen Anforderungen an Schaltanlagen in HS-MS Umspannwerken bzw. zur MS-Anbindung von Stromerzeugungsanlagen haben wir ausführlich in Abschnitt 4.3.1 beschrieben.
- **Anwendungsfall 4: Anbindung industrieller und gewerblicher Verbraucher:** Aus der Nähe der Schaltanlagen zu industriellen Prozessen und den daraus resultierenden Außenbedingungen (Verschmutzungsgrad, Temperaturen), der höheren Anzahl an Schalthandlungen und den gehobenen Sicherheitsanforderungen bezüglich Netzausfällen, ergeben sich verschärfte Anforderungen an die Langlebigkeit und Robustheit nicht nur aber insbesondere des Leistungsschalters und an die Verfügbarkeit und Betriebssicherheit der Anlage. Innerhalb von Industrienetzen finden insbesondere Schaltanlagen der primären Verteilung, aber auch viele sekundäre Schaltanlagen mit spezifischen Anforderungen an Bemessungsspannung und -strom Verwendung.
- **Anwendungsfall 5: Generatorleistungsschalter:** Für den Generator von Kraftwerken sind sogenannte Generatorleistungsschalter verbaut. Diese werden zwar in der Mittelspannung betrieben, zeichnen sich aber durch sehr hohe Betriebsströme, hohe Kurzschlussströme und das Beherrschen eines hohen Gleichspannungsanteils aus. Die Anforderung, sehr hohe Bemessungsbetriebsströme von über 40 kA zu führen und zu schalten, stellt eine besondere Herausforderung an die Schaltanlage dar.
- **Anwendungsfall 6: Umspannwerke und Schaltanlagen in der Hoch- und Höchstspannung:** Die grundsätzlichen Anforderungen an Schaltanlagen in Umspannwerken und Schaltanlagen in der Hoch- und Höchstspannung haben wir ausführlich in Abschnitt 4.3.2 beschrieben.

## 5 Abschätzung der Anlagenpopulation, Trends und Entwicklungen

Im folgenden Abschnitt ordnen wir den Einsatz und die Emissionen von SF<sub>6</sub> in der elektrischen Energieversorgung Deutschlands in den Kontext der weltweiten Klimarelevanz von SF<sub>6</sub> ein. Dabei stellen wir auch im Vergleich zu anderen Regionen dar, wieviel SF<sub>6</sub> in den verschiedenen Anwendungsfällen der elektrischen Energieversorgung eingesetzt und emittiert wird.

### 5.1 Abschätzung des Betriebsmittelbestands in der Mittel- und Hochspannung

Die Anlagenpopulation von Schaltanlagen in Deutschland gliedert sich in Schaltanlagen für das öffentliche Netz, Schaltanlagen zur Anbindung von Erzeugung sowie Schaltanlagen in Kundenanlagen, vornehmlich in der Industrie und Infrastruktur. Ein vollständiges Anlagenregister für Schaltanlagen, Schaltfelder und weitere Komponenten mit SF<sub>6</sub> in Deutschland gibt es derzeit nicht.<sup>7</sup> Zwar existieren Abschätzungen zur Anzahl der existierenden Netzbetriebsmittel, wie die Anzahl von Umspannwerken, aber die Anzahl der verbauten Schaltanlagen und Schaltfelder, beispielsweise pro Umspannwerk, variiert sehr stark. Für eine erste grobe Einordnung der Population haben wir deshalb existierende Abschätzungen zur Anzahl der Umspannwerke, Ortsnetzstationen und Erzeugungsanlagen der FNN-Störungsstatistik und Herstellerangaben einbezogen. Grundsätzlich sind die Abschätzungen der Anlagenpopulation für die höheren Spannungsebenen, Hoch- und Höchstspannung, verlässlicher. Die Verteilung des Betriebsmittelbestands in Erzeugung, Verkehr und Industrie wurde über Expertenbefragungen abgeschätzt. Eine verlässliche quantitative Abschätzung der Anzahl der eingesetzten weiteren Betriebsmittel, wie Messwandler oder Durchführungen, ist mit den derzeit öffentlich verfügbaren Informationen nicht möglich.

#### **Abschätzung der Population der Schaltanlagen<sup>8</sup> und Schaltfelder**

Tabelle 6 zeigt die Abschätzung der Verteilung der Anlagenpopulation in Deutschland über die verschiedenen Spannungsebenen sowie eine Zuordnung der Schaltanlagen zu den Anwendungsgruppen. Die Werte der Verteilung basieren auf Herstellerangaben und Marktstudien und geben gewichtete Mittelwerte wieder. Die Zahlen und getroffenen Annahmen haben wir im Rahmen der Interviews und Fachgespräche mit den Anwendern und Herstellern validiert. Diese können allerdings nur stichpunktartige Einschätzungen darstellen.

---

<sup>7</sup> Die Ermittlung des SF<sub>6</sub>-Bestandes erfolgt durch eine Bestandsfortschreibung auf Basis von Herstellerangaben. Die Bestimmung der Emissionen erfolgt durch eine Emissionsfaktor-Methode. Da die anfallenden Gasmengen pro Betriebsmittel stark von der Technologie, dem Hersteller oder dem Inbetriebnahmejahr abhängig sind, ist eine valide Abschätzung der Anlagenpopulation auf Basis der aggregierten Mengenangaben nicht möglich.

<sup>8</sup> Eine Schaltanlage besteht abhängig von der Zahl der Abzweige aus einem (Einfachstation) oder mehreren Schaltfeldern. Da die eingesetzte SF<sub>6</sub>-Menge proportional mit dem Anteil der Schaltfelder ansteigt, haben wir das Schaltfeld als Funktionseinheit für die Anlagenpopulation gewählt.

**Tabelle 6: Abschätzung der Verteilung des Anlagenbestands (Anzahl) von Schaltanlagen und Schaltfeldern der Mittel- und Hochspannung in Deutschland nach Anwendungsgruppen, Bestand Ende 2015**

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Experteninterviews und [ABB et al., 2003; E-Bridge et al., 2014; MarketsandMarkets, 2016; Neumann et al., 2004]

| Spannungsebene | Betriebsmittel                     | Abschätzung des Anteils der Schaltfelder im Bereich |                   |  |
|----------------|------------------------------------|---|-------------------|--|
|                |                                    | Erzeugung   | öffentliches Netz | Verbrauch / Industrienetze und Infrastruktur |
| Mittelspannung | Schaltanlagen primäre Verteilung   | 10 %  | 45 %              | 45 %   |
|                | Schaltanlagen sekundäre Verteilung | 5 %   | 65 %              | 30 %   |
|                | Generatorleistungsschalter         | 100 %   | -                 | -  |
| Hochspannung   | Schaltanlagen                      | 1-2 %   | > 90 %            | 5 %  |

In Deutschland sind derzeit etwa 5.000 Schaltanlagen mit rund 25.000 Schaltfeldern in der Hochspannung (110 kV-Ebene) und etwa 500 Schaltanlagen und 3.000 Schaltfelder in der Höchstspannung (> 110 kV-Ebene) des öffentlichen Netzes installiert [E-Bridge et al., 2014; FNN, 2014]. Nur wenige Verbraucher verfügen über eigene Schaltanlagen in der Hochspannung. Deren Anteil am Gesamtbestand in der Hochspannung liegt bei rund 5 %. On- und Offshore Windparkbetreiber sind über Umspannwerke inkl. Schaltanlagen (110 kV/20 kV) an das 110 kV-Netz angeschlossen. Diese werden teilweise auch von ihnen betrieben. Der Anteil der Erzeuger am Gesamtbestand ist jedoch gering und liegt derzeit bei etwa 1 - 2 %

Von einem Umspannwerk in der Hochspannung gehen über Sammelschienen Mittelspannungsringe ab. Diese Mittelspannungsabgänge verfügen in der Regel über je ein Mittelspannungsschaltfeld der primären Verteilung. Insgesamt schätzen wir die Anlagenanzahl in der primären Verteilung im öffentlichen Netz auf 7.500 Schaltanlagen. Hinzu kommen knapp 9.000 Schaltfelder zur Anbindung von Wind- und Solarparks [E-Bridge et al., 2014]. In Industrienetzen liegt die Anzahl der installierten Schaltanlagen der primären Verteilung nach Aussagen der Hersteller in der Größenordnung wie im Bereich der öffentlichen Netze, wobei die Anzahl der Schaltfelder geringer ist. Die Anzahl der Schaltfelder der primären Verteilung schätzen wir in der Summe auf mehr als 500.000 Stück.

Die Mittelspannungsnetze sind in den meisten Fällen als Ringnetze ausgeführt. An einem solchen Mittelspannungsring befinden sich durchschnittlich 14 Ortsnetztransformatoren. Diese Anzahl schwankt signifikant zwischen urbanen und ländlichen Regionen. Insgesamt sind in Deutschland im öffentlichen Netz etwa 500.000 Schaltanlagen der sekundären Verteilung verbaut. Ein Großteil dieser Schaltanlagen (mehr als 90 %) sind RMUs bestehend aus drei

Schaltfeldern. In öffentlichen Deutschen Netzen schätzen wir somit die Anzahl der Schaltfelder auf deutlich mehr als 1 Millionen Stück. Die Hauptabnehmer für Schaltanlagen der sekundären Verteilung sind Netzbetreiber [E-Bridge et al., 2014]. Nach Abschätzung der Hersteller stellen auch die Industrie und das Großgewerbe einen signifikanten Abnehmermarkt von Schaltanlagen in der sekundären Verteilung dar. Im Bereich der Erzeugung werden Schaltanlagen der sekundären Verteilung in oder neben Turmfüßen von Windenergieanlagen (Onshore: etwa 30.000 Stück, Offshore: 1.000 Stück) oder zur Anbindung von Solarparks (rund 40.000 Stück) verbaut [BWE, 2015].

Die Gesamtanzahl der Generatorleistungsschalter schätzen die Hersteller mit rund 2.000 Stück ab.

In der Summe schätzen wir die Größenordnung der Population der existierenden Schaltfelder wie folgt ab:

- mehr als **500.000 Schaltfelder (Größenordnung) in der primären Verteilung** der Mittelspannung,
- mehr als **2 Millionen Schaltfelder (Größenordnung) in der sekundären Verteilung** der Mittelspannung und
- mehr als **25.000 Schaltfelder in der Hoch-** und mehr als **3.000 Schaltfelder in der Höchstspannung**.

#### **Abschätzung der Population der Schaltgeräte**

Der Bestand an Schaltgeräten (Leistungsschalter und Lasttrennschalter) kann über die Anzahl der Schaltfelder und Schaltanlagen abgeschätzt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei Schaltgeräten jeweils um Drehstromsätze (jeweils eine Ausführung je Phase) handelt.

In der Hoch- und Höchstspannung wird in der Regel je Abgang ein Schaltfeld mit jeweils einem Leistungsschaltersatz eingesetzt. Somit sind in der Hochspannung etwa 25.000 Leistungsschaltersätze verbaut. In der Höchstspannung sind es etwa 3.000. Auch in der primären Verteilung der Mittelspannung kommt auf ein Schaltfeld jeweils ein Leistungsschaltersatz. In der sekundären Verteilung hingegen kommt in Deutschland ein Leistungsschalter nur aufgrund spezifischer Kundenwünsche zum Einsatz. Der Anteil der Felder mit Leistungsschalter in der sekundären Verteilung liegt bei etwa 5 %. Somit gibt es in Deutschland einen Bestand an Leistungsschaltern in der primären und sekundären Verteilung von etwa 300.000 Drehstromsätzen. Lasttrennschalter stellen die Hauptkomponente in der sekundären Verteilung dar. In der häufigsten Konfiguration als RMU wird je Ringkabelausgang bzw. -eingang ein Lasttrennschalter verwendet. Für das Schaltfeld zum Transformatorabgang wird in den meisten Fällen ein Lasttrennschalter mit Sicherung eingesetzt. Der Transformatorabgang kann in seltenen Fällen allerdings auch als Leistungsschalter ausgeführt sein. Weiterhin nehmen wir an, dass etwa 90 % der Felder in Schaltanlagen der sekundären Verteilung als Lasttrennfelder ausgeführt sind. Schließlich schätzen wir die Größenordnung der Anzahl der Lasttrennschalter auf rund 2 Millionen Stück.

#### **Abschätzung der Population „sonstiger Betriebsmittel“**

Neben den Schaltanlagen in Mittel- und Hochspannungsnetzen nehmen auch gasisolierte Leitungen eine relevante Position im Betriebsmittelbestand ein. Diese sind lediglich in der Höchstspannung verbaut. Nach einer Studie des VDE [Schöffner et al., 2006; Baer et al., 2002] wurden zwischen 1975 und 2002 50 km gasisolierte Leitungen in

Deutschland verbaut. Die Studie differenziert allerdings nicht zwischen gasisolierten Kraftwerksausleitungen und gasisolierten Leitungen im öffentlichen Netz. Seitdem sind einige wenige relevante Großprojekte hinzugekommen. Beispiele sind die 5.400 m<sup>9</sup> GIL am Frankfurter Flughafen und 2.610 m GIL durch die Stadtwerke München.

Eine belastbare quantitative Abschätzung der Anzahl der eingesetzten weiteren Betriebsmittel, wie Messwandler oder Durchführungen, ist mit den derzeit öffentlich verfügbaren Informationen nicht möglich.

### **Trends und Entwicklung des Betriebsmittelbestands**

Der beschriebene Betriebsmittelbestand stellt das Bild zum heutigen Zeitpunkt dar. Darüber hinaus wurden in Experteninterviews Trends identifiziert, welche die Entwicklung des Anlagenbestands in Zukunft prägen werden.

Im Allgemeinen wird der Netzausbau vor allem die Mittelspannung betreffen [Büchner et al., 2014; Agricola et al., 2012]. Die identifizierten Treiber umfassen:

- Smart Grids bzw. IKT-Penetration im Verteilnetz,
- Elektromobilität,
- Landstromversorgung von Schiffen,
- Zubau von Windenergie (On- und Offshore).

Nach Expertenmeinungen werden durch den Einsatz intelligenter Systeme wie Smart Meter kein Zuwachs im Bereich der Schaltanlagen erwartet. Jedoch werden Anpassungen der Schaltanlagen hin zu automatisierten, kontrollierbaren Einheiten notwendig werden.

Infolge der Entwicklung der Elektromobilität wird die Notwendigkeit von Netzverstärkungen erwartet. Auch der Trend der Landstromversorgung von Schiffen erfordert Netzverstärkung und damit teilweise Schaltanlagen mit höheren Bemessungsspannungen und -strömen.

Mit dem Ausbau der Windenergie in Deutschland durch sowohl Onshore- als auch Offshore-Windenergieanlagen wird der Einsatz von Schaltanlagen weiter steigen. Allerdings erwarten die Hersteller keine drastischen Steigerungen im Verhältnis zur Gesamtanzahl aller Schaltanlagen. In Schaltanlagen der sekundären Verteilung zum Einsatz im Turmfuß wird derzeit überwiegend SF<sub>6</sub> verwendet, da die Baugröße hier das ausschlaggebende Kriterium ist. Allerdings haben wartungsfreie Alternativen im Bereich Offshore-Windenergie einen großen Vorteil. Die Wartung auf See ist eine große Herausforderung, da sowohl Wartungspersonal als auch Wartungsschiffe u.U. nur mit längerer Wartezeit zu beschaffen sind. Entstehen Leckagen bei Schaltanlagen auf See, kann unter Umständen das SF<sub>6</sub>-Gas über einen längeren Zeitraum ungestört austreten. Bei umweltverträglicheren Gasen wäre dies kein Problem. Ein Risiko besteht nur dann, wenn die Spannungsfestigkeit durch hohe Leckagen zu stark absinkt.

---

<sup>9</sup> Zwei parallele Systeme mit jeweils drei Phasen à 900 m.

Der Ausbau von Windenergieanlagen auf Land und auf See hat auch für den Netzausbau der Hochspannung Folgen. Die Anbindung an das öffentliche Netz erfordert einige zusätzliche Schaltanlagen. Die Auswirkungen sind hier allerdings geringer.

## 5.2 Abschätzung des anteiligen Einsatzes von SF<sub>6</sub> als Isolier- und Schaltmedium im Anlagenbestand

Nicht alle Schaltanlagen und deren Komponenten im Betriebsmittelbestand verwenden SF<sub>6</sub> als Isolier- oder Schaltmedium. Die Angaben in Tabelle 7 hinsichtlich des Anteils von GIS am Anlagengesamtbestand je Einsatzbereich beruhen auf den Netzdaten der FNN Störungsstatistik [FNN, 2014]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in der FNN Störungsstatistik lediglich der Anlagenbestand öffentlicher Netze aufgeführt ist. Auch aktuelle Marktentwicklungen hin zu GIS können nicht abgeschätzt werden.

**Tabelle 7: Anteil der GIS (mit SF<sub>6</sub> als Isoliermedium) an der Anlagengrundgesamtheit in Deutschland**

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [FNN, 2014]

| Spannungsebene        | Schaltanlagen                     | Anteil GIS am installierten Gesamtbestand 2013 (SF <sub>6</sub> als Isoliermedium) |
|-----------------------|-----------------------------------|--|
| <b>Mittelspannung</b> | Schaltfelder primäre Verteilung   | 20 %   |
|                       | Schaltfelder sekundäre Verteilung | 35 %   |
|                       | Generatorleistungsschalteranlage  | 60 %   |
| <b>Hochspannung</b>   | Schaltfelder                      | 15 %   |
| <b>Höchstspannung</b> | Schaltfelder                      | 6 %  |

Für Mittelspannungsschaltanlagen der sekundären Verteilung ist der Anteil von GIS mit SF<sub>6</sub> als Isoliermedium aufgrund der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Vorteile (z. B. geringer Platzbedarf, Wartungsarmut durch sealed pressure systems, Schutz vor äußeren Einflüssen, Kosten) besonders hoch. Der Anteil wird darüber hinaus als steigend angenommen.

In der primären Verteilungsebene ist häufiger eine individuelle Anfertigung bezüglich des Bemessungsstroms und der Anzahl der Schaltfelder notwendig. Des Weiteren ist der Platzbedarf in Umspannwerken in ländlichen Regionen kein kritisches Entscheidungskriterium. Auch aus historischen Gründen sind Mittelspannungsschaltanlagen der primären Verteilung häufiger luftisoliert.

Der Anteil von Generatorleistungsschaltanlagen, die SF<sub>6</sub> als Schaltmedium verwenden, ist von der Größe der maximal auftretenden Betriebs- und Fehlerströme abhängig. Für Ströme bis zu 50 kA ist die Vakuumtechnologie Stand der Technik. Bei Schaltanlagen, die Fehlerströme bis zu 80 kA schalten können, ist das Verhältnis zwischen SF<sub>6</sub> und

Vakuumtechnologie in etwa ausgeglichen. Ab 80 kA wird fast ausschließlich SF<sub>6</sub> verwendet. Bisher bietet nur ein Hersteller Vakuumschaltröhren für Generatorleistungsschalter mit möglichen Ausschaltströmen von bis zu 100 kA an.

Schaltanlagen der Hoch- und Höchstspannung sind meist Freiluftschaltanlagen. Lediglich im innerstädtischen Bereich oder in Gebieten mit restriktiven Platzanforderungen haben sich gasisolierte Schaltanlagen durchgesetzt.

Leistungsschalter in der Mittelspannung werden sowohl als Vakuumschaltröhren als auch mit SF<sub>6</sub> als Schaltmedium ausgeführt, wobei der Trend hin zur Vakuumtechnologie geht. Öl-Leistungsschalter und ölarmer Leistungsschalter wurden in der Mittelspannung fast vollständig ersetzt [Leonhardt et al., 2000]. Lasttrennschalter sind in gasisolierten Schaltanlagen der Mittelspannung fast ausschließlich mit SF<sub>6</sub> als Schaltmedium ausgeführt und mit in dem hermetisch geschlossenen Gastank verbaut. In der Mittelspannung in Deutschland entspricht somit der Anteil der SF<sub>6</sub>-Lasttrennschalter mindestens dem Anteil der gasisolierten Schaltanlagen.

Auch in der Hochspannung sind die Schaltgeräte gasisolierter Schaltanlagen als SF<sub>6</sub>-Schalter ausgeführt. Bei Freiluftanlagen kommen größtenteils SF<sub>6</sub>-Live-Tank-Leistungsschalter zum Einsatz (vgl. Kapitel 4.3.2). Aus historischen Gründen sind allerdings auch weiterhin Ölleistungsschalter in Freiluftanlagen der Hochspannung verbaut [Balzer et al., 2004]. Vakuumleistungsschalter sind in Europa seit 2010 für die Hochspannung verfügbar<sup>10</sup>. Insgesamt gehen wir davon aus, dass 75 % der Leistungsschalter in Freiluftanlagen SF<sub>6</sub>-Live-Tank-Produkte sind. Die restlichen 25 % sind Ölleistungsschalter. Das ergibt für den Gesamtbestand von Hochspannungsleistungsschaltern in AIS und GIS für 85 % der Anlagen SF<sub>6</sub> als Schaltmedium.

Messwandler in GIS sind ebenfalls SF<sub>6</sub>-isoliert. In Freiluftanlagen wird in Deutschland meist Öl-Papier als Isoliermedium verwendet. Nur in seltenen Fällen kommt SF<sub>6</sub> in Messwandlern für das 110 kV-Netz zum Einsatz. Der Anteil an SF<sub>6</sub> isolierten Messwandlern nimmt bei höheren Spannungsebenen zu.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Anteile von Schaltgeräten, die SF<sub>6</sub> als Schaltmedium verwenden.

**Tabelle 8: Anteil der Komponenten, die SF<sub>6</sub> als Schalt- und Isoliermedium verwenden. Anlagenbestand in Deutschland**  
 Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Experteninterviews und [Balzer et al., 2004; MarketsandMarkets, 2016]

| Spannungsebene        | Komponenten von Schaltanlagen | Anteil Komponenten mit SF <sub>6</sub> Ausführung |
|-----------------------|-------------------------------|---|
| <b>Mittelspannung</b> | Leistungsschalter             | 30 %  |
|                       | Leistungsschalter             | 85 %  |
| <b>Hochspannung</b>   | Trennschalter                 | 30 %  |
|                       | Messwandler                   | 35 %  |

<sup>10</sup> In Japan bereits deutlich früher.

### 5.3 Abschätzung der installierten SF<sub>6</sub>-Mengen und Emissionen

#### Abschätzung der installierten SF<sub>6</sub>-Mengen in Deutschland

Über die zuvor erfasste Anlagenpopulation und die SF<sub>6</sub>-Menge je Betriebsmittel ist es möglich, Richtwerte für die insgesamt in Deutschland installierte SF<sub>6</sub>-Menge abzuleiten. Die gesamte SF<sub>6</sub>-Menge, die in Deutschland in Schaltanlagen installiert ist, wird über einen modellbasierten Ansatz vom Hersteller- und Betreibermonitoring erfasst. Die Ergebnisse dieser Abfrage sind in Tabelle 10 dargestellt.

#### Gewichtete SF<sub>6</sub>-Menge je Betriebsmittel

Tabelle 9 zeigt Richtwerte für in elektrischen Betriebsmitteln zum Einsatz kommende SF<sub>6</sub>-Mengen. Es wird deutlich, dass in der Mittelspannung geringe Mengen an SF<sub>6</sub> je Betriebsmittel zum Einsatz kommen. Aufgrund des hohen Gesamtbestands an Schaltanlagen, die SF<sub>6</sub> als Isoliermedium verwenden, ist die installierte SF<sub>6</sub>-Menge in der deutschen Mittelspannung jedoch sehr hoch. Die verwendete SF<sub>6</sub>-Menge hängt von dem Behälterdesign, der Isolierung der Sammelschienen (SF<sub>6</sub> oder Feststoff) und der Bemessungsspannung sowie dem Bemessungsstrom ab. Der für Schaltanlagen der Mittelspannung (primäre und sekundäre Verteilung) angegebene Wert bezieht sich auf ein Schaltfeld. Da in RMUs drei Felder zum Einsatz kommen, muss für die gesamte Schaltanlage der Einsatz von SF<sub>6</sub> verdreifacht werden. Die Schaltgeräte der Mittelspannung sind meist direkt im SF<sub>6</sub>-Tank verbaut und sind deshalb in der Tabelle nicht separat gelistet. Es gibt einige wenige Fälle, in denen der Leistungsschalter mit SF<sub>6</sub> als Schaltmedium ausgeführt ist, als Isoliermedium hingegen ein Feststoff oder Luft verwendet wird. In diesen Ausnahmen wird etwa 0,3 kg SF<sub>6</sub> je Leistungsschalter eingesetzt.

Die spezifischen SF<sub>6</sub>-Mengen, die in Betriebsmitteln der Hochspannung eingesetzt werden, übersteigen die Mengen gleichartiger Betriebsmittel der Mittelspannung um ein Vielfaches. Aufgrund des geringeren Anlagenbestands ist die Gesamtmenge an SF<sub>6</sub> in der Hochspannung jedoch etwas geringer als die Gesamtmenge in der Mittelspannung. In gasisolierten Schaltanlagen der Hochspannung wird je nach Konfiguration zwischen 90 und 170 kg SF<sub>6</sub> je Schaltfeld verwendet. Die verwendete SF<sub>6</sub>-Menge in Hochspannungsleistungsschaltern von Freiluftanlagen hängt von der verwendeten Technik ab. Dead-Tank-Leistungsschalter benötigen aufgrund der zusätzlichen Erdung ein Vielfaches an SF<sub>6</sub> im Vergleich zu Live-Tank-Leistungsschaltern. In Deutschland werden jedoch fast ausschließlich Live-Tank-Leistungsschalter eingesetzt, die etwa 7 bis 9 kg SF<sub>6</sub> verwenden.

Gasisolierte Leitungen in der Höchstspannung verwenden in der heute üblichen Ausführung von 20 % SF<sub>6</sub> und 80 % N<sub>2</sub> als Isoliergasgemisch zwischen 1,3 und 1,8 kg SF<sub>6</sub> je Meter und Phase. Wird reines SF<sub>6</sub> als Isoliermedium eingesetzt, sind bis zu 10 kg SF<sub>6</sub> je Meter und Phase installiert.

**Tabelle 9: Über die Spannungsebene gemittelte SF<sub>6</sub>-Menge je Betriebsmittel**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern, Experteninterviews und [Koch, 2003; FNN, 2016; Widger, 2014]

| Betriebsmittel und Komponenten                 | Schaltanlagen und Komponenten                     | SF <sub>6</sub> -Menge je Schaltfeld / Betriebsmittel (gemittelt) |
|--|---|---|
| Betriebsmittel der Mittelspannung              | Schaltanlage primäre Verteilung (je Schaltfeld)   | 2,5 – 3,5 kg  |
|  | Schaltanlage sekundäre Verteilung (je Schaltfeld) | 0,7 – 2,5 <sup>11</sup> kg  |
|  | Generatorleistungsschalteranlage (je Schaltfeld)  | 4 – 6 kg  |
| Betriebsmittel der Hoch- und Höchstspannung    | Schaltanlage Hochspannung (je Schaltfeld)         | 90 – 170 kg   |
|  | Schaltanlage Höchstspannung (je Schaltfeld)       | ~ 380 kg  |
| Komponenten von Schaltanlagen der Hochspannung | Leistungsschalter (je Phase)                      | Dead-tank: 25 – 40 kg<br>Live-tank: 7 – 9 kg                      |
|  | Messwandler (je Phase)                            | (72,5 kV) 5 kg<br>(245 kV – 550 kV): 35 - 50 kg                   |

### SF<sub>6</sub>-Mengen im Betriebsmittelbestand

Die Werte, die der ZVEI und FNN im Rahmen der freiwilligen Selbstverpflichtung der Industrie über einen modellbasierten Ansatz erheben, zeigen ein ähnliches Bild bezüglich der SF<sub>6</sub>-Gesamtmengen im Betriebsmittelbestand. Trotz der geringen spezifischen SF<sub>6</sub>-Mengen je Betriebsmittel in der Mittelspannung liegen hier die höchsten Gesamtmengen vor. Tabelle 10 zeigt die von den Verbänden ZVEI und FNN gemeldete SF<sub>6</sub>-Mengen im 2016 aufgenommenen Bestand.

<sup>11</sup> Diese Angabe gilt je Schaltfeld. In RMUs gibt es drei Schaltfelder. Dementsprechend kommen in RMUs durchschnittlich 3 x 0,7 kg SF<sub>6</sub> zum Einsatz.

**Tabelle 10: Von den Verbänden ZVEI und FNN gemeldete SF<sub>6</sub>-Mengen im Bestand**

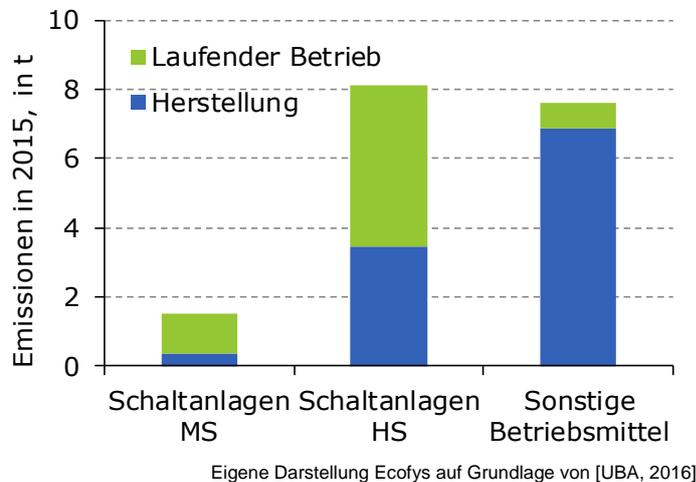
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von [Koch, 2003; FNN, 2016; Widger, 2014]

| Betriebsmittel und Komponenten  | Abschätzung der SF <sub>6</sub> -Mengen im Bestand (ZVEI/FNN/VIK) |
|---|---|
| Betriebsmittel der Mittelspannung   | 1 150 t   |
| Gasisolierte Schaltanlagen Hochspannung (>52 kV) (einschließlich darin enthaltener Leistungsschalter und Wandler) | 840 t   |
| Leistungsschalter Hochspannung (> 52 kV)  | 300 t   |
| Messwandler Hochspannung (> 52 kV)  | 240 t   |

Auf einen Vergleich der Abschätzung der SF<sub>6</sub>-Mengen und der Abschätzung der Anlagenpopulation wurde bewusst verzichtet, da beide Abschätzungen nur auf eine erste Einordnung der Größenordnung abzielen und mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Für eine valide Bewertung der Mengengerüste wären geeignete Anlagenregister erforderlich.

#### **Abschätzung der Emissionen in Deutschland**

Um die Klimarelevanz von elektrischen Betriebsmitteln in den Gesamtkontext einzuordnen, ist die reine Betrachtung der installierten SF<sub>6</sub>-Mengen nicht ausreichend. Entscheidend ist der Anteil des vorhandenen SF<sub>6</sub>, welches während der gesamten Produktlebensdauer (Herstellung, laufender Betrieb und Entsorgung) in die Atmosphäre freigesetzt wird. Abbildung 21 gibt einen Überblick der Emissionen in der Herstellung und im laufenden Betrieb für das Jahr 2015 [SOLVAY et al., 2005; UBA, 2016]. Die Emissionen aus der Entsorgung sind mit rund 0,2 t im Jahr 2015 zu vernachlässigen. Die in Abbildung 21 und Abbildung 22 sowie in den folgenden Absätzen dargestellten Emissionen nehmen eine Analyse der durch den ZVEI und den FNN an das Umweltbundesamt berichteten Werte vor.



**Abbildung 21: SF<sub>6</sub>-Emissionen während der Herstellung und im laufenden Betrieb, Emissionen in der Entsorgung sind zu vernachlässigen (2015).**

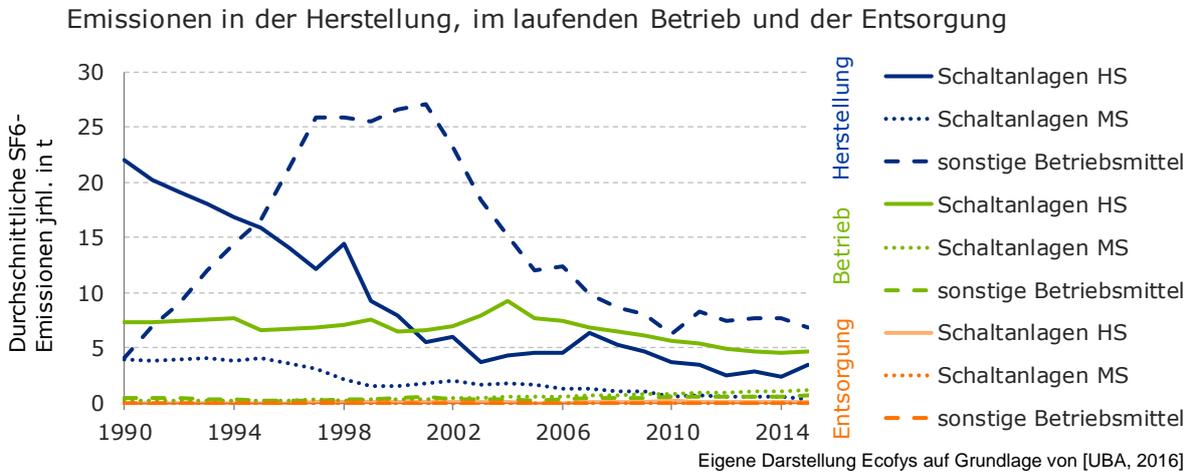
**Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von [SOLVAY et al., 2005; UBA, 2016].**

Die Abbildung zeigt deutlich, dass die Bestandsemissionen in der Hochspannung (> 52 kV) sowie die Emissionen während der Herstellung die höchsten Werte aufweisen. Die Emissionen während der Außerbetriebnahme sind bisher in allen Anwendungen trotz des hohen Emissionsfaktors sehr gering. Dies ist darauf zurück zu führen, dass bisher noch nicht viele gasisolierte Schaltanlagen ihr Lebensende erreicht haben. In Zukunft ist deshalb, trotz geringer pro-Stück Verluste<sup>12</sup>, ein Anstieg der Emissionen in dieser Kategorie zu erwarten.

Die hohen gemeldeten Emissionen in der Herstellung „sonstiger Betriebsmittel“ sind vermutlich insbesondere auf den Einsatz von SF<sub>6</sub> in der Produktion von Messwandlern, Durchführungen und Kondensatoren zurückzuführen. Teilweise wird das in den Betriebsmitteln gespeicherte SF<sub>6</sub>, welches teilweise über die Lebensdauer emittiert bzw. am Lebensende aufgrund der Kleinteiligkeit und technischer Herausforderungen (bei MS-Messwandlern sind beispielsweise kleine Mengen SF<sub>6</sub> (Blasen) ist vollständig von Gießharz umgeben) nicht zurückgewonnen werden kann, vollständig den Herstellungsemissionen zugeschrieben. Bei Export der Betriebsmittel in andere Länder, kann dies zu Bilanzverzerrungen führen. Eine genaue Analyse und Validierung der gemeldeten Zahlen erfolgt derzeit durch die Verbände und den Arbeitskreis SF<sub>6</sub>.

Die Bestandsemissionen der Hochspannung übersteigen die Emissionen der Mittelspannung um ein Vielfaches, obwohl in der Mittelspannung mehr SF<sub>6</sub> installiert ist. Der Emissionsfaktor ist höher, da in der Hochspannung höhere Drücke verwendet werden (6 bar anstatt 1,3 bar in der Mittelspannung), die Gesamtabmessungen größer sind und weil HS-GIS meist closed pressure systems während MS-GIS meist sealed pressure systems sind (siehe Abschnitte 4.2 und 5.3). In der Mittelspannung wird während der Betriebsdauer in der Regel kein Gas nachgefüllt [SOLVAY et al., 2005].

<sup>12</sup> Nach EU-Richtlinie wird die Entnahme von SF<sub>6</sub> bei Betriebsende von speziell geschultem Personal vorgenommen. SF<sub>6</sub> wird zurückgewonnen und nach Trocknung und Reinigung ggf. wiederverwendet. Die Verluste bei der Gashandhabung sind voraussichtlich gering.



**Abbildung 22: SF<sub>6</sub>-Produktions-, Betriebs- und Außerbetriebnahmeemissionen in Tonnen für Schaltanlagen in der Mittel- und Hochspannung sowie für „sonstige Betriebsmittel“**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von [SOLVAY et al., 2005; UBA, 2016]

In den letzten Jahren konnten Hersteller aufgrund von der technischen Weiterentwicklung der Herstellungsprozesse und des Anlagendesigns die Gesamtemissionen in der Energieversorgung stark verringern. Abbildung 22 zeigt, dass der Rückgang der Emissionen insbesondere auf die Verbesserungen in den Produktionsprozessen zurückzuführen ist. Verbesserungen im Hochspannungsbestand haben ebenfalls zu Reduktionen geführt. Die Bestandsemissionen der Schaltanlagen in der Mittelspannung sowie für „sonstige Betriebsmittel“ sind auf niedrigem Niveau steigend.

## 5.4 Einordnung der Anlagenpopulation und Emissionen in den internationalen Kontext

Die vorangegangenen Abschnitte betrachten den Betriebsmittelbestand, den Einsatz von SF<sub>6</sub> und die Emissionen in der elektrischen Energieversorgung in Deutschland. Im europäischen und weltweiten Vergleich gibt es erwähnenswerte Unterschiede, von denen exemplarisch einige hier aufgeführt werden.

### Betriebsmittelbestand und Isoliermedien

Im Bereich der Mittelspannung werden in Deutschland fast ausschließlich 12 kV- und 24 kV-Anlagen (Bemessungsspannung) eingesetzt. In Österreich, Spanien und Großbritannien sind viele 36 kV-Schaltanlagen (Bemessungsspannung) in der öffentlichen Primär- und Sekundärverteilung im Einsatz. Für Windkraftanlagen neuerer Generation und Windparks findet, getrieben durch die steigende Anlagenleistung, auch in Deutschland zunehmend ein Wechsel von 24 kV-Schaltanlagen auf 36 kV-Schaltanlagen statt. Während Feststoffisolation in Mittelspannungsschaltanlagen in Deutschland wenig verwendet wird, ist der Anteil in den Benelux-Ländern, Skandinavien, Polen und anderen osteuropäischen Ländern höher.

In der Hochspannung wird in Deutschland für Messwandler fast ausschließlich Öl-Papier als Isoliermedium für Messwandler in Freiluftanlagen verwendet. In Osteuropa ist in dieser Anwendung SF<sub>6</sub> weit verbreitet.

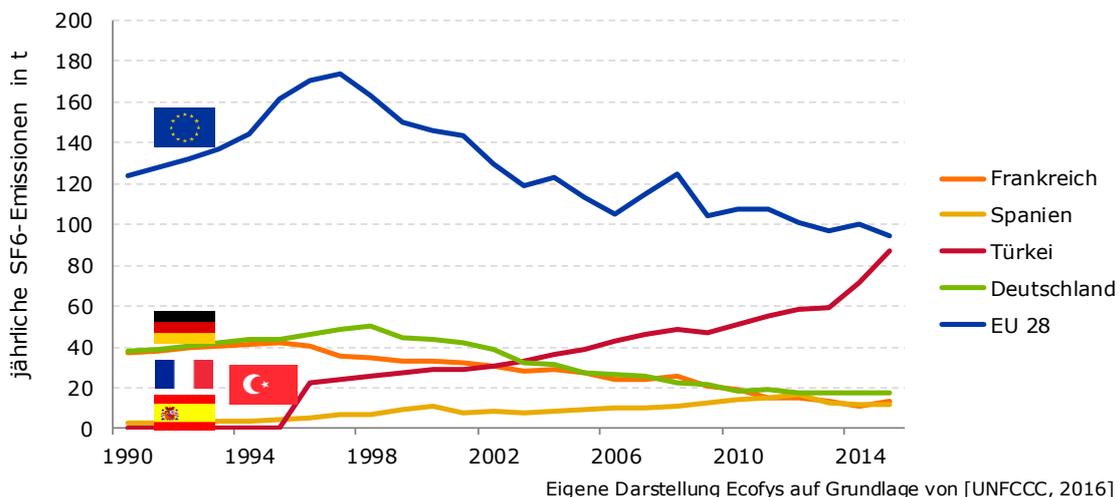
### Emissionsraten des Bestands

In der Literatur werden häufig Emissionsraten des Anlagenbestands als ländervergleichende Metrik verwendet. Diese werden üblicherweise als Prozent je Jahr der in den installierten Schaltanlagen vorhandenen SF<sub>6</sub>-Menge angegeben. Dabei ist nicht sicher, ob in den verschiedenen Studien dieselbe Bezugsbasis verwendet wird. Trotzdem können sie als Richtwerte aufgefasst werden. Dabei gelten Japan und die Schweiz weltweit als Benchmark bezüglich geringer Emissionswerte mit 0,07 % in der Schweiz [SwissMem, 2017a] und 0,14 % in Japan [Saida, 2014] für die gesamte Energieversorgung (Mittel über HS und MS). Der europaweite Durchschnitt wird von Herstellern auf 2,5 % in der HS sowie von 0,7 % in der MS geschätzt. Der IPCC rechnet im Jahr 2006 mit 2,6 % in der Hochspannung und 0,2 % in der Mittelspannung [IPCC, 2006].

### Emissionen während des Gesamtlebenszyklus von elektrischen Betriebsmitteln nach IPCC

Das IPCC veröffentlicht jährlich die von den nationalen Behörden gemeldeten Emissionsdaten über Herstellung, Bestand, Entsorgung und Wiedergewinnung. Diese werden in

Abbildung 23 im europäischen Kontext (sowie Türkei) verglichen. Es wird deutlich, dass die Emissionen in den Ländern Europas mit den höchsten Emissionen sowie in der gesamten EU zurückgehen. Dagegen steigen die Gesamtemissionen elektrischer Betriebsmittel in der Türkei, seitdem sie seit 1995 von der UNFCCC erfasst werden, stark an. Ein Grund könnte die Verlagerung von Produktionskapazitäten europäischer Hersteller in die Türkei sein. Weiterhin sind die Annahmen und die Methodik des Monitorings der einzelnen Länder schwer vergleichbar.

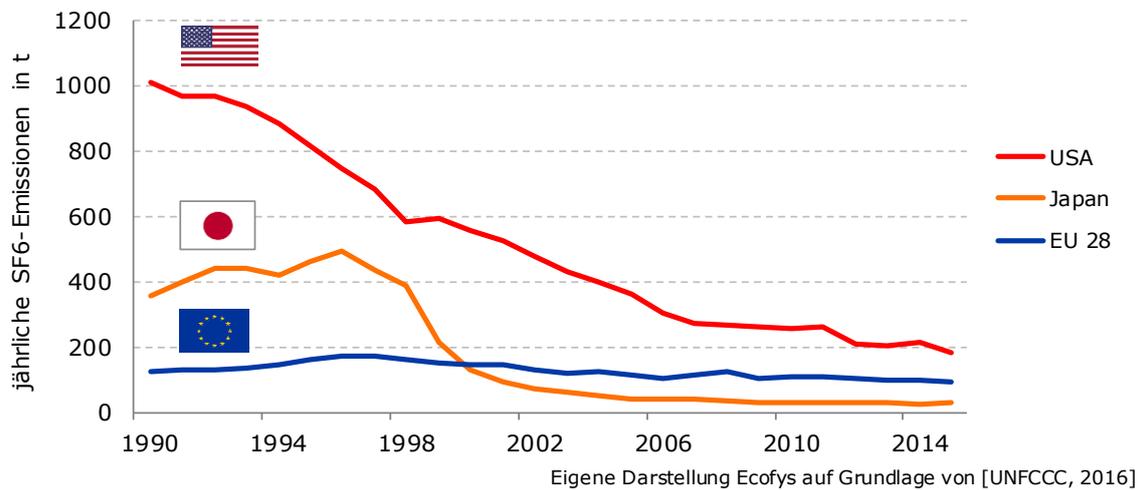


**Abbildung 23: Entwicklung der SF<sub>6</sub>-Emissionen der Elektroindustrie (2.F.8) drei europäischer Herstellerländer sowie der Europäischen Union gesamt im Vergleich mit den Emissionen der Türkei.**

Quelle: Eigene Darstellung nach [UNFCCC, 2016]

Abbildung 24 stellt den Rückgang der Emissionen in den USA, Japan und der EU dar. Trotz signifikanter Einsparungen, insbesondere im Betrieb der Anlagen, liegen die Emissionen in den USA noch über den Emissionen Europas.

Emissionsraten in den meisten asiatischen Ländern sind unbekannt. Nach Herstellermeinungen sind diese allerdings für etwa 40 % der weltweiten Emissionen verantwortlich (vgl. auch [Fang et al., 2013a; Fang et al., 2013b]).



**Abbildung 24: Entwicklung der SF<sub>6</sub>-Emissionen der Elektroindustrie (2.F.8) in den Vereinigten Staaten im Vergleich zur Europäischen Union.**

Quelle: Eigene Darstellung nach [UNFCCC, 2016]

## 6 Gegenüberstellung von SF<sub>6</sub> und SF<sub>6</sub>-freien Technologien

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Entwicklungen von SF<sub>6</sub> und SF<sub>6</sub>-freien Systemen beschrieben. Dabei wird zunächst eine allgemeine technische Einführung zu den verschiedenen Optionen (Feststoffe, Flüssigkeiten, Gase, Vakuum) gegeben. Erst im nächsten Schritt werden die auf dem Markt erhältlichen SF<sub>6</sub>-Produkte und SF<sub>6</sub>-freien Technologien beschrieben und verglichen. Das Ziel des Kapitels ist es zu zeigen, welche Anwendungen und Spannungsebenen heute mit SF<sub>6</sub> abgedeckt werden und inwieweit Alternativen diese Rolle übernehmen könnten. Dazu werden zusätzlich zu den in Abschnitt 4.2 angegebenen Kenngrößen weitere Kriterien zur Bewertung der in Abschnitt 4.3 aufgezählten Betriebsmittel angegeben. Hinsichtlich dieser Kriterien erfolgt die Gegenüberstellung kommerziell erhältlicher SF<sub>6</sub>-haltiger und SF<sub>6</sub>-freier Produkte großer und kleiner europäischer Hersteller.

SF<sub>6</sub>-Technologien haben gerade gegenüber neuen Alternativgasen einen Entwicklungsvorsprung von mehreren Jahrzehnten und SF<sub>6</sub>-Produkte haben daher einen sehr weiten Marktbereich. In diesem Bericht wird der Begriff „trockene Luft“ (Isoliermedium in GIS bei > 1bar) als Alternativgas verwendet, während atmosphärische Luft (Isoliermedium in AIS bei Atmosphärendruck) einfach als „Luft“ bezeichnet wird. Das GWP der Mischgase wurde auf Basis der Formel in der Verordnung (EU) 517/2014 (F-Gas Verordnung) berechnet und ist eine massenbezogene Größe (siehe Anhang 10.1.4). Beim Vergleich des GWPs verschiedener Isoliergase muss berücksichtigt werden, dass eine Anlage, welche mit einem leichten Gas befüllt ist, eine geringere Gasmasse beinhaltet als im Fall eines Gases mit höherer Molmasse (bei gleichem Fülldruck). So ist etwa das Mischgas g<sup>3</sup> um einen Faktor ~2,5-2,9 leichter als SF<sub>6</sub> und daher beinhaltet eine Anlage bei gleichem Fülldruck eine um denselben Faktor geringere Gasmenge und emittiert entsprechend weniger Treibhausgase.

SF<sub>6</sub>-freie Produkte haben gegenwärtig eine kleine Marktabdeckung (z. B. hin zu den höchsten Spannungslevels). Dies kann sich in naher Zukunft, abhängig von der Investitions- bzw. Marketing-Strategie von Herstellern als auch dem Kundenverhalten, verschieben.

### Zersetzungsprodukte

Unter Teilentladungs- und Lichtbogenbedingungen in Gasen tritt teilweise eine Zersetzung der synthetischen Gasmoleküle auf. Die Langzeit-Stabilität eines Gases ist nötig, um viele Schalthandlungen vollziehen zu können. SF<sub>6</sub> ist bekannt für seine fast vollständige Rekombination nach einem Schaltvorgang [Mosch et al., 1979]. In Gasmischungen von Alternativgasen (C5-PFK, C4-PFN) mit natürlichen Gasen (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) ist dieses Rekombinationsvermögen schlechter als in SF<sub>6</sub> [Preve et al., 2016; Pohlink et al., 2016]. In allen Gasen, auch in SF<sub>6</sub>, führt Schalten zu toxischen Zersetzungsprodukten, wobei die Quantität von der Gasart abhängt und mit der Anzahl der Schalthandlungen steigt [Chu, 1986; Dervos und Vassiliou, 2000; Powell, 2002; Preve et al., 2016; T&D Europe, 2015b]. Trockene Luft hat aufgrund der Abwesenheit von kohlenstoffhaltigen F-Gasen Vorteile in Bezug auf Langzeitstabilität und toxikologische Zersetzungsprodukte [Lutz et al., 2017]. In SF<sub>6</sub> kommt es vor allem in Zusammenhang mit Feuchtigkeit (Wasser) und festen Abbrandprodukten, Kupfer, Wolfram oder Teflon zu giftigen Stoffen. Bei einem Schalter handelt es sich um ein

geschlossenes System und es kommt nur im äußerst seltenen Störlichtbogenfall zum Austritt der Gase inklusive Zersetzungsprodukte. Hinzu kommt die relativ rasche Verdünnung des austretenden Gases durch Diffusion und Konvektion und die daraus resultierenden geringen Konzentrationen. Zwei Unfälle mit Personenschäden durch SF<sub>6</sub>-Zersetzungsprodukte wurden dokumentiert [Pilling und Jones, 1988; Kraut und Lillis, 1990]. HS-Schaltanlagen sind zumeist im Freien aufgebaut und für entsprechende Innenraum-Schaltanlagen kann eine geeignete Gasdetektion installiert werden. In der MS-Ebene ist dies schwieriger, da die Schaltanlagen sehr zahlreich und nahe an öffentlichen Räumen installiert sind, jedoch sind die Füllmengen viel geringer als in der HS. In Gebäuden kann diesem Risiko durch ausreichende Belüftung und allgemein durch entsprechende Sicherheitsstandards für das Fachpersonal entgegengewirkt werden.

Neueste Untersuchungen zu Zersetzungsprodukten in MS- und HS-Anlagen:

- AirPlus in MS Lasttrennschalter (Puffer-Schalter, ABB) [Hyrenbach et al., 2017]:
  - 100 erfolgreiche Unterbrechungen zeigten keine signifikante Verschlechterung des Gases und es wurden keine toxischen Nebenprodukte festgestellt.
  - Es wurde keine Änderung des Drucks beobachtet und Gasproben zeigten nur Spuren von Zersetzungsprodukten.
  - Das Zeolith-Trocknungsmittel (installiert in realen GIS-Anwendungen) absorbierte sogar einige der Zersetzungsprodukte.
- AirPlus in HS-Leistungsschalter (ABB) [Claessens, 2017]:
  - Status Pilotanlage bei ewz/Zürich Nord (Oktober 2017): Fehlerfreier Betrieb UW Oerlikon seit August 2015. Bisher keine messbare Zersetzung der Fluorketone.
  - Die Zersetzungsprodukte im Leistungsschalter sind weitgehend unkritisch.
  - Die existierenden Sicherheitsmaßnahmen beim Umgang mit gebrauchtem SF<sub>6</sub> sind völlig ausreichend.
  - Die «Alterung» des Isoliergases durch Zersetzung der C5-PFK ist für typische GIS – Kesselgrößen unproblematisch.
  - Bei korrekter Dimensionierung ist die Lebensdauer der Schaltkammer weiterhin von der Düsen- und Kontakterosion bestimmt
- g<sup>3</sup> in HS-Spannungswandler [Gautschi 2017]:
  - Keine Gaszersetzung oder Teilentladungsaktivität festgestellt
- Alterungsverhalten in Clean Air, C5-PFK und C4-PFN Mischungen [Lutz et al., 2017]:
  - Die Anwendung von Gasgemischen mit kohlenstoffhaltigen F-Gasen (C5-PFK, C4-PFN) kann die Lebensdauer von gasisolierten Anlagen beeinträchtigen: geringere Beeinträchtigung für reine Isolieranwendungen (z. B. erdverlegte GIL-Systeme), stärkere Beeinträchtigung für die Anwendung als Lichtbogenlöschmedium
  - Gasgemische mit C5-PFK zeigen thermische Alterung, Materialunverträglichkeiten
  - Clean Air ist ein Gasgemisch mit exzellenter Langzeitstabilität und keinen toxikologischen Einschränkungen

Die nachfolgende Tabelle 11 gibt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften von SF<sub>6</sub> im Vergleich zu Alternativgasen. Über die in der Tabelle dargestellten Alternativen hinaus werden noch weitere Alternativgase diskutiert, diese tauchen jedoch nicht als Optionen für Anlagen-Pilotierungen auf.

**Tabelle 11: Übersicht der Eigenschaften von SF<sub>6</sub> und ausgewählter Alternativgase**

Quellen: \*[NIST, 2016], \*\*[IPCC, 2013], \*\*\*[3M, 2015a]

|   | Schwefelhexafluorid<br>SF <sub>6</sub>   | Perfluoriertes Keton<br>C5-PFK  | Perfluoriertes Nitril<br>C4-PFN | Trockene Luft<br>N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> |
|---|--|---|---------------------------------|---|
| Handelsname                                   | SF <sub>6</sub>  | Novec 5110  | Novec 4710                      | Stickstoff/Sauerstoff                           |
| Summenformel                                  | SF <sub>6</sub>  | C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O  | C <sub>4</sub> F <sub>7</sub> N | N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>                 |
| Siedepunkt                                    | -64 °C*  | +27 °C [3M, 2015b]  | -4,7 °C***                      | -196 °C, -183 °C*                               |
| CAS-Nummer                                    | 2551-62-4  | 756-12-7  | 42532-60-5                      |   |
| Atmosphärische Lebensdauer                    | 3.200 Jahre**  | 16 Tage [3M, 2015b]   | 22 Jahre***                     |   |
| GWP   | 22.800   | <1 [3M, 2015b]  | 1490***                         | 0   |
| Eigenschaften der Mischungen                  |  |   |                                 |   |
| Handelsname/ Produktbezeichnung               |  | AirPlus (ABB)   | g <sup>3</sup> (GE)             | Dry Air oder Clean Air (Siemens)                |
| Gasmischungen in Anwendung                    | meistens pur (100 %)<br>für kalte Regionen Mischungen:<br>~60/40 % N <sub>2</sub> /SF <sub>6</sub><br>~50/50 % CF <sub>4</sub> /SF <sub>6</sub><br>GIL: 20 % SF <sub>6</sub> in N <sub>2</sub> | MS-GIS: ~7...14 % in Luft<br>HS-GIS: ~6 % in O <sub>2</sub> und CO <sub>2</sub> | ~4 %...10 % in CO <sub>2</sub>  | ~20 % O <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>          |
| Typische minimale Betriebstemperatur          | pur: <-30 °C<br>in N <sub>2</sub> oder CF <sub>4</sub> : <-50 °C   | MS: -15 °C...-25 °C<br>HS: +5 °C...-5 °C  | -30 °C...-10 °C                 | <-50 °C   |
| GWP der Mischung (berechnet gemäß [EU, 2014]) | 100 % SF <sub>6</sub> : 22.800<br>20 % SF <sub>6</sub> in N <sub>2</sub> : 12.900<br>50 % SF <sub>6</sub> in CF <sub>4</sub> : 16.720 (GWP CF <sub>4</sub> : 6.630)                            | Für alle Mischungen ≤ 1   | 230...490                       | 0   |
| Mittlere Molmasse (g/mol)                     | 100 % SF <sub>6</sub> : 146<br>20 % SF <sub>6</sub> in N <sub>2</sub> : 52<br>50 % SF <sub>6</sub> in CF <sub>4</sub> : 117  | MS-GIS: ~45...62<br>HS-GIS: ~57   | 50...59                         | 29  |

## 6.1 Technologien der Mittelspannung

### Schaltanlagen für die Primärverteilung und Sekundärverteilung

SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen für die Mittelspannung decken alle in Kapitel 4.4 beschriebenen Anwendungsfälle im europäischen Stromnetz ab. Tabelle 12 zeigt die wichtigsten Varianten von Isolations- und Schaltmedien am Markt verfügbarer Schaltanlagen bzw. Pilotprojekte für die Primär- und Sekundärverteilung. Tabelle 13, und Tabelle 15 zeigen beispielhaft Kennzahlen von Produkten europäischer Hersteller der markttechnisch wichtigen 24 kV-Kategorie.

**Tabelle 12: Varianten von neuen metallgekapselten bzw. metallgeschotteten Schaltanlagen für die Primärverteilung und Sekundärverteilung**

Quelle: Eigene Darstellung

| Bezeichnung               | Typ    | Isolation              | Lasttrennschalter | Leistungsschalter |
|---------------------------|--------|------------------------|-------------------|-------------------|
| GIS                       | sealed | SF <sub>6</sub>        | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   |
| GIS                       | sealed | SF <sub>6</sub>        | SF <sub>6</sub>   | Vakuum            |
| GIS                       | sealed | SF <sub>6</sub>        | Vakuum            | Vakuum            |
| GIS                       | sealed | ~7-14 % C5-PFK in Luft | Vakuum            | Vakuum            |
| GIS                       | sealed | Trockene Luft          | Trockene Luft     | Vakuum            |
| AIS                       | open   | Luft                   | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   |
| AIS                       | open   | Luft                   | SF <sub>6</sub>   | Vakuum            |
| AIS                       | open   | Luft                   | Luft              | SF <sub>6</sub>   |
| AIS                       | open   | Luft                   | Luft              | Vakuum            |
| Feststoffisolierte Anlage | sealed | Feststoff (+Luft)      | Vakuum            | Vakuum            |
| Fluidisolierte Anlage     | sealed | Fluid                  | Vakuum            | Vakuum            |

Im Gegensatz zur Primärverteilung bestehen Schaltanlagen der Sekundärverteilung (einschließlich RMUs) aus Abschnitten, in denen SF<sub>6</sub> in technisch relativ einfach aufgebauten Lasttrennschaltern lediglich zum Trennen, Erden und Schalten von Betriebsströmen eingesetzt wird, jedoch nicht zum Schalten von Kurzschlussströmen. Die Ausführung als Vakuum-Lasttrennschalter ist laut Angaben verschiedener Hersteller komplexer und 30-100 % teurer als ein SF<sub>6</sub>-Lasttrennschalter, welcher sehr einfach aufgebaut ist. Dieser Kostenanstieg ist durch die im Zuge der vermehrten Netz-Automation zunehmende Sekundärtechnik (Elektronik für Steuerung, Überwachung, Messen, usw.), welche bei höherwertigen Schaltanlagen bis zu 50 % der Gesamtkosten ausmachen kann, zu relativieren.

AIS für die Primärverteilung werden von den meisten Herstellern gebaut und sind eine gute Option, wenn minimale Platzanforderungen kein Hauptkriterium sind. Feststoffisolierte Schaltanlagen können gleich oder sogar kompakter als ihre SF<sub>6</sub>-Äquivalente sein. Zwei große Vertreter dieser Isolationstechnologie, Eaton und Schneider Electric, setzen

dabei auf die in Abschnitt 4.2 erwähnten Varianten von „klassischer“ (Eatons Xiria) bzw. „abgeschirmter“ (Schneiders Premset) Feststoffisolation. Beide Hersteller sehen den Markt für Schaltanlagen hin zu höheren Bemessungsspannungen (>24 kV) und Strömen als zu klein an, als dass sich die Investitionskosten für sie lohnen würden. Hingegen wäre laut denselben Herstellern die stärkere elektrische und thermische Beanspruchung bei höheren Spannungs- und Stromlevels mit Feststoffisolation technisch machbar. Zudem ist es häufig schwierig, mit den niedrigeren Herstellungskosten von in großen Stückzahlen produzierten SF<sub>6</sub>-Anlagen zu konkurrieren. Dies liegt teilweise auch an den hohen Anschaffungskosten für die verschiedenen Gussformen, welche für die Herstellung der Gießharzkomponenten nötig sind. Durch höhere Produktionszahlen könnten diese teilweise kompensiert werden und somit die Herstellungskosten gesamtheitlich reduzieren.

Cellpack setzt den synthetischen Ester „Midel 7131“ als Isolationsfluid ein und ermöglicht damit sehr kompakte Anlagen. MIDELE 7131 wurde vom Umweltbundesamt (UBA) als nicht wassergefährdend eingestuft. Als relativ kleiner Hersteller fokussiert sich Cellpack demnach auf den großen Markt der Sekundärverteilung bis hin zu 24 kV, obwohl Schaltanlagen für die Primärverteilung und mit höheren Spannungslevels laut Herstellerangaben technisch möglich wären.

Das Alternativgasgemisch AirPlus kommt sowohl als Primär- als auch als Sekundäranlage zum Einsatz. Airplus wird lediglich zur Isolation verwendet, während das Schalten (auch Lastschaltungen) in Vakuum geschieht. Der Netzbetreiber EWZ hat in Zürich den ersten Piloten einer ZX2 AirPlus von ABB installiert (50 Felder, 22 kV, 1.600 A für das Speisefeld und 2.000 A für die Sammelschiene). 2016 hat Netze BW in Baden-Württemberg den zweiten Piloten in Betrieb genommen. Die ZX2-Anlage wurde als Produkt Ende 2016 in den Markt eingeführt. Die Anlage ist eine reine Innenraumanlage, für die nach IEC 62271 eine untere Betriebstemperatur von -5 °C gilt, und kann laut Herstellerangaben bis -15 °C betrieben werden. Der Aufbau der Schaltanlage ZX2 AirPlus basiert auf dem der SF<sub>6</sub>-Schaltanlage ZX2, jedoch mussten Modifikationen aufgrund von abweichenden Parametern wie dielektrischem Verhalten, Wärmetransportfähigkeit, Reaktionseigenschaften und Materialkompatibilität durchgeführt werden. Aufgrund der Anwesenheit von Sauerstoff mussten etwa die Oberflächen des Primärkreises versilbert werden, was zu signifikanten Mehrkosten führt. Das aktuelle Portfolio von ZX2 Airplus reicht bis zu Bemessungsspannungen von 36 kV und Bemessungsströmen von 2.000 A (vgl. 40 kV und 3.000 A für ZX2 mit SF<sub>6</sub>). Ein Ausbau des Portfolios hin zu höheren Ratings über die nächsten ca. 3-4 Jahre wird laut Herstellerangaben angestrebt. Die 24 kV-RMU SafeRing Airplus basiert auf der SafeRing Air (mit Luft als Isoliergas), die auf 12 kV limitiert ist. Die minimale Betriebstemperatur dieser Anlage für die Sekundärverteilung ist -25 °C. Zu diesem Zeitpunkt können nicht alle Segmente durch AirPlus Produkte abgedeckt werden, wie etwa die höheren Bemessungs-Kurzzeit-Stehwechselfspannungen, gefordert in den USA für 36 kV Anlagen (80 kV ANSI versus 70 kV IEC) oder in China/ehemaliger GUS (80 kV).

**Tabelle 13: Gegenüberstellung verschiedener MS-Schaltanlagen für die Primärverteilung (Leistungsschalterfeld) beispielhaft ausgewählter europäischer Hersteller (24 kV Varianten oder Vergleichbare)**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern

| Name Schaltanlage              | Eaton Power Xpert UX  | Eaton Power Xpert FMX   | Siemens NXAIR   | Siemens 8DA10  | ABB ZX2   | ABB ZX2 Airplus   | ABB Unigear ZS1   | Schneider GMA   | Ormazabal Cpg.0   |
|--------------------------------|---|---|---|--|---|---|---|---|---|
| <b>Abbildung</b>               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| <b>Isolation</b>               | Trockene Luft +Feststoff  | Trockene Luft +Feststoff  | Luft  | SF <sub>6</sub>  | SF <sub>6</sub>   | AirPlus   | Luft  | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   |
| <b>Leistungsschalter</b>       | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum   | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum  |
| <b>Bemessungsspannung (kV)</b> | 24  | 24  | 24  | 24   | 24  | 24  | 24  | 24  | 24  |
| <b>Bemessungsstrom (A)</b>     | 2.500   | 2.000   | 2.500   | 2.500  | 2.500   | 1.600   | 2.500   | 2.500   | 2.500   |
| <b>Breite (mm)</b>             | 1.000   | 1.000   | 1.000   | 600  | 600 - 800   | 600 - 800   | 1.000   | 800   | 600   |
| <b>Tiefe (mm)</b>              | 1.570   | 1.450   | 1.350-1.650   | 1.625  | 1.860   | 1.860   | 1.700   | 1.280-1.400   | 1.364   |
| <b>Höhe (mm)</b>               | 2.320   | 2.100   | 2.300   | 2.350  | 2.300   | 2.300   | 2.325   | 2.200   | 2.420   |

Tabelle 14: Gegenüberstellung verschiedener modularer MS-Schaltanlagen (Leistungsschalterfeld) für die Sekundärverteilung europäischer Hersteller (24 kV Varianten oder Vergleichbare)

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern

| Name Schaltanlage       | Eaton Xiria E   | Schneider Premset   | Schneider SM6   | Ormazabal gae   | Siemens 8DJH  | ABB UniSec  |
|-------------------------|---|---|---|---|---|---|
| Abbildung               |  |  |  |  |  |  |
| Isolation               | Luft+ Feststoff   | Feststoff   | Luft  | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   | Luft  |
| Leistungsschalter       | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum oder SF <sub>6</sub>   | Vakuum  | Vakuum  | SF <sub>6</sub>   |
| Lasttrennschalter       | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum oder SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   |
| Bemessungsspannung (kV) | 24  | 17.5  | 24  | 24  | 24  | 24  |
| Bemessungsstrom (A)     | 630   | 1.250   | 630 - 1.250   | 630   | 630   | 630 – 1.250   |
| Breite (mm)             | 500   | 375   | 625 - 750   | 600   | 430   | 750   |
| Tiefe (mm)              | 600   | 910   | 400 - 830   | 730-851   | 775   | 1.070 - 1.300   |

Tabelle 15: Gegenüberstellung verschiedener MS-Ringkabelschaltanlagen (bestehend aus 1 Leistungsschalterfeld und 2 Ringkabelfeldern) für die Sekundärverteilung europäischer Hersteller (24 kV Varianten oder Vergleichbare)

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern

| Name Schaltanlage             | Eaton Xiria   | Cellpack ECOS-C (-25°C)   | ABB SafeRing AirPlus  | ABB SafeRing  | Ormazabal ga  | Siemens 8DJH  | Schneider RM6   |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|
| Abbildung                     |  |  |  |  |  |  |  |
| Isolation                     | Luft+Feststoff  | synth. Ester  | AirPlus   | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   |
| Leistungsschalter             | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum  | SF <sub>6</sub>   |
| Lasttrennschalter             | Vakuum  | Vakuum  | Vakuum  | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   | SF <sub>6</sub>   |
| Bemessungsspannung (kV)       | 24  | 24  | 24  | 24  | 24  | 24  | 24  |
| Bemessungsstrom (A)           | 630   | 630   | 630   | 630   | 630   | 630   | 630   |
| Gesamtbreite (3-feldrig) (mm) | 1.110   | 890   | 1.021   | 1.021   | 980   | 1.050   | 1.186   |
| Tiefe in (mm)                 | 600   | 1.040   | 765   | 765   | 730 - 851   | 775   | 670   |

Tabelle 16 gibt einen Überblick, in welchen Anwendungsfeldern bereits Alternativen vorhanden sind, inwieweit die technische Entwicklung fortgeschritten ist und für welche Bereiche keine Alternativen denkbar/umgesetzt sind. Technologien mit mehrheitlich anerkannten technischen Nachteilen bzw. Sicherheits- und Umweltbedenken (z. B. Öl- oder Druckluft-Leistungsschalter) werden hier nicht berücksichtigt.

**Tabelle 16: Übersicht von SF<sub>6</sub>-freien Betriebsmitteln für die Mittelspannung, in welchen Isolier- und Schaltmedien benötigt werden**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern

| Isoliermedium                              | Luft (AIS)                               | SF <sub>6</sub> -freie Gasmischung        | SF <sub>6</sub> -freie Gasmischung | Feststoff                                | Fluid                                    |
|--|--|---|------------------------------------|--|--|
| Schaltmedium                               | Vakuum                                   | Vakuum                                    | SF <sub>6</sub> -freie Gasmischung | Vakuum                                   | Vakuum                                   |
| <b>MS- Schaltanlage Primärverteilung</b>   | umgesetzt, >5 Jahre am Markt (bis 36 kV) | umgesetzt, < 5 Jahre am Markt (bis 24 kV) | nicht umgesetzt                    | umgesetzt, >5 Jahre am Markt (bis 36 kV) | nicht umgesetzt                          |
| <b>MS- Schaltanlage Sekundärverteilung</b> | umgesetzt, >5 Jahre am Markt (bis 12 kV) | umgesetzt, < 5 Jahre am Markt (bis 24 kV) | nicht umgesetzt                    | umgesetzt, >5 Jahre am Markt (bis 24 kV) | umgesetzt, >5 Jahre am Markt (bis 24 kV) |

### Generatorleistungsschalter

Heutige SF<sub>6</sub>-Generatorschalter reichen bis zu Betriebsspannungen von 31,5 kV und können Nennströme bis zu 28 kA und Kurzschlussströme bis zu 250 kA schalten [Cavaliere und Kreisel, 2013]. Wie bereits die Anlagenpopulation in Abschnitt 5.2 zeigt, existiert die SF<sub>6</sub>-freie Vakuumtechnologie bis zu 24 kV und 100 kA. Alternativgas-Produkte sind für Generatorleistungsschalter im Moment nicht verfügbar.

## 6.2 Technologien der Hochspannung

### Gasisolierte Schaltanlagen

HS-GIS werden seit den 1960er weltweit mit SF<sub>6</sub> betrieben. Heute reichen SF<sub>6</sub>-GIS bis hin zu Bemessungsspannungen von 1.100 kV und Strömen von 8.000 A (vor allem China). Der große Markt für HS-GIS liegt im Spannungsbereich hin zu 170 kV<sup>13</sup>. Seit kurzem sind in diesem Marktsektor SF<sub>6</sub>-freie GIS als Pilotanlagen (ABB GLK-14 mit AirPlus) und als Produkte (GE mit F35 g<sup>3</sup> und Siemens 8VN1 mit Clean Air) verfügbar. Tabelle 17 vergleicht wichtige Kenngrößen der am Markt verfügbaren SF<sub>6</sub>-freien GIS mit den entsprechenden SF<sub>6</sub>-Produkten.

<sup>13</sup> Betriebsmittel mit einer Bemessungsspannung von bis zu 170 kV werden in Deutschland typischerweise in der Hochspannungsebene mit einer Nennspannung von 110 kV betrieben. Die Nennspannung in deutschen Übertragungsnetzen (Höchstspannung) liegt bei 220 kV und 380 kV.

Erste Erfahrungen mit einer 170 kV-GIS (Modell GLK-14 von ABB), die AirPlus enthält, werden seit 2015 in einer Pilotanlage, bestehend aus 8 Feldern, in Zürich (EWZ) gesammelt. Die elektrische Festigkeit des verwendeten Gemisches ist bei gleichem Druck niedriger als jene von SF<sub>6</sub>. Deshalb basiert das Design der GLK-14 GIS auf dem Design der SF<sub>6</sub>-GIS ELK-14C (mit notwendigen Anpassungen), welches für höhere Spannungen (245 kV) und Ströme ausgelegt ist. Dementsprechend sind die Abmessungen der 170 kV Alternativgas-GIS signifikant größer als jene der 170 kV SF<sub>6</sub>-GIS ELK-04 C. Aufgrund des relativ hohen Siedepunktes (+27°C) des C5-PFK beginnt sich das Gasgemisch unter einer Umgebungstemperatur im Bereich von -5 °C bis +5 °C zu verflüssigen, was eine Outdoor-Anwendung des verwendeten Gemisches ohne zusätzliche Beheizung ausschließt.

Die 145 kV g<sup>3</sup>-GIS ist ein Produkt von GE, basierend auf dem SF<sub>6</sub>-Modell F35 und geht an zwei Orten in Betrieb (Unterwerk Etzel Axpo Schweiz und Berliner Umspannwerks Charlottenburg). Die g<sup>3</sup>-GIS wird mit einem Überdruck von ca. 2 bar gegenüber der SF<sub>6</sub>-GIS betrieben. Der im Gegensatz zum C5-PFK niedrigere Siedepunkt des C4-PFN ermöglicht auch Outdoor-Anwendungen.

Die 145 kV GIS von Siemens verwendet im Gegensatz zu den anderen SF<sub>6</sub>-freien Anlagen einen Vakuumleistungsschalter. Das Trenn- bzw. Erdungsschalten geschieht in Clean Air. Das Modell basiert auf der 170 kV SF<sub>6</sub>-GIS 8DN8-6. Die Clean Air Anlage hat zudem einen geringeren Bemessungsstrom als SF<sub>6</sub>-Anlage, was auf die bessere Wärmetransportfähigkeit von SF<sub>6</sub> zurückzuführen ist.

Tabelle 17: Gegenüberstellung verschiedener SF<sub>6</sub>- und Alternativgas-gasisolierter Schaltanlagen (GIS) europäischer Hersteller für die Hochspannung (145 kV Varianten oder Vergleichbare). Das Volumen ist definiert als Länge x Breite x Höhe eines standardisierten GIS Doppelsammelschienenfeldes

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern

| Name Schaltanlage          | ABB ELK-14C   | ABB GLK-14  | ABB ELK-04   | GE F35 g <sup>3</sup>   | GE F35  | Siemens 8VN1  | Siemens 8DN8-6  |
|----------------------------|---|---|--|---|---|---|---|
| Abbildung                  |  |  |  |  |  |  |  |
| Isolation                  | SF <sub>6</sub>   | AirPlus   | SF <sub>6</sub>  | g <sup>3</sup>  | SF <sub>6</sub>   | Clean Air   | SF <sub>6</sub>   |
| Leistungs-schalter         | SF <sub>6</sub>   | AirPlus   | SF <sub>6</sub>  | g <sup>3</sup>  | SF <sub>6</sub>   | Vakuum  | SF <sub>6</sub>   |
| Bemessungs-spannung (kV)   | 253   | 170   | 170  | 145   | 145   | 145   | 170   |
| Bemessungs-Strom (A)       | 3.150   | 1.250   | 4.000  | 3.150   | 3.150   | 3.150   | 4.000   |
| ~Volumen (m <sup>3</sup> ) | 21  | 21  | 17-19  | 7   | 7   | 18  | 18  |
| ~Gewicht (Tonnen)          | 6   | 6   | 2,4°-°3,8  | 2,5   | 2,5   | 5   | 5   |
| Minimale Temperatur (°C)   | -25   | -5 bis +5   | -30  | -25   | -30   | -50   | -30   |

## Hochspannungsleistungsschalter für luftisolierte Schaltanlagen

SF<sub>6</sub>-freie Leistungsschalter von europäischen Herstellern gibt es nur als Live-Tank-Variante (siehe Abschnitt 4.3.2) und nur für eine Bemessungsspannung bis 145 kV (vgl. Tabelle 18). Für höhere Spannungen gibt es zurzeit nur SF<sub>6</sub>-Schalter.

**Tabelle 18: Gegenüberstellung verschiedener SF<sub>6</sub>- und SF<sub>6</sub>-freier Live-Tank-Leistungsschalter europäischer Hersteller für Freiluft-Schaltanlagen in der Hochspannung (> 52 kV)**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern

|                                 | ABB LTA 72D1    | ABB LTB D1/B    | GE GL 309       | GE VL 109 (Pilotanlage) | Siemens 3AV1 |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|--------------|
| <b>Isolation</b>                | CO <sub>2</sub> | SF <sub>6</sub> | SF <sub>6</sub> | Trockene Luft           | Clean Air    |
| <b>Leistungsschalter</b>        | CO <sub>2</sub> | SF <sub>6</sub> | SF <sub>6</sub> | Vakuum                  | Vakuum       |
| <b>Bemessungsspannung (kV)</b>  | 72,5            | 72,5            | 72,5            | 72,5                    | 72,5         |
| <b>Bemessungsstrom (A)</b>      | 2.750           | 3.150           | 3.150           | 2.000                   | 2.500        |
| <b>Minimale Temperatur (°C)</b> | -50             | -30             | -40             | <-30                    | -30          |

## Hochspannungsmesswandler für luftisolierte Schaltanlagen

Traditionell sind HS-Messwandler SF<sub>6</sub>, Öl oder Öl/Papier isoliert und sind mit diesen Isoliermedien bis zu den höchsten Spannungslevels vertreten. Für Stromwandler existieren auch Produkte (FOCS-FS von ABB, COSI von GE), dessen Strommessung nicht auf dem elektrischen Transformator-Prinzip beruht, sondern auf einem optischen Verfahren über Glasfaserverbindungen. Sie benötigen daher keine Öl- oder SF<sub>6</sub>-Isolation und sind bis zu den höchsten Betriebsspannungen verfügbar. Das Gewicht von Öl oder Öl/Papier isolierten Messwandlern ist nicht unbedingt höher als jenes von SF<sub>6</sub>-isolierten Messwandlern. Seit kurzen ist auch ein 245 kV-Stromwandler mit dem C4-PFN/CO<sub>2</sub> (g<sup>3</sup> von GE, -30°C min. Temperatur) auf dem Markt, von welchem momentan sechs Stück in Deutschland in Betrieb sind (in Frankfurt Umgebung und Lehrte). Bei der Herstellung dieses g<sup>3</sup>-Stromwandlers, der ursprünglich mit SF<sub>6</sub>-Isolation konzipiert wurde, waren gemäß Herstellerangaben keine großen Modifikationen notwendig. Lediglich die Dichtungen wurden durch ein kompatibles Material ersetzt, welches in anderen Bereichen verbreitet für CO<sub>2</sub> verwendet wird. Laut Hersteller erscheinen höhere Betriebsspannungen mit dem C4-PFN/CO<sub>2</sub> Gemisch für die Zukunft möglich. Siemens wird Mitte 2018 Spannungs- und Stromwandler mit Clean Air-Isolierung in einem 110 kV-Umspannwerk (Nördlingen, Deutschland) in Betrieb nehmen.

## Gasisolierte Leitungen in der Hochspannung

Siemens, mit einer Mischung von 20 % SF<sub>6</sub> in N<sub>2</sub>, sowie GE mit derselben Mischung und seit kurzer Zeit auch mit der g<sup>3</sup> Alternative sind die einzigen europäischen Anbieter von GILs. GE bietet g<sup>3</sup>-GILs bis zu den höchsten Spannungsebenen an, siehe Tabelle 19. Es existieren zwei g<sup>3</sup>-GIL-Projekte (Sellindge UK, seit 2016 und Kilmarnock, Schottland

seit 2017). Um eine Minimaltemperatur von -25 °C zu gewährleisten, muss im Vergleich zu einer SF<sub>6</sub>-GIL ein geringer Überdruck verwendet werden. Dies hat einen Materialmehrverbrauch von 8 % zur Folge. In bereits installierten SF<sub>6</sub>-GILs kann SF<sub>6</sub> nicht direkt durch die g<sup>3</sup>-Mischung ersetzt werden, da technische Modifikationen von Dichtungen, Absorbieren, Füllventilen und Überwachungseinrichtungen notwendig sind. In GILs ist das Einsparungspotential durch SF<sub>6</sub>-freie Alternativen aufgrund der großen Mengen an eingesetzten SF<sub>6</sub> besonders groß. Für den 100 m langen GIL Abschnitt in Sellindge wäre beispielsweise eine Menge von 1,6 Tonnen SF<sub>6</sub> nötig.

**Tabelle 19: Gegenüberstellung verschiedener gasisolierter Leitungen (GIL) europäischer Hersteller**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern

|                                | Siemens GIL                     | GE GIL SF <sub>6</sub>          | GE GIL g <sup>3</sup> |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|
| <b>Isolation</b>               | SF <sub>6</sub> /N <sub>2</sub> | SF <sub>6</sub> /N <sub>2</sub> | g <sup>3</sup>        |
| <b>Bemessungsspannung (kV)</b> | bis 550                         | bis 800                         | bis 800               |
| <b>Bemessungsstrom (A)</b>     | bis 5.000 <sup>14</sup> *       | bis 6.300                       | bis 6.300             |
| <b>Minimale Temperatur</b>     | -30 °C                          | -30 °C                          | -25 °C                |

Tabelle 20 und Tabelle 21 geben einen Überblick, in welchen Anwendungsfeldern bereits Alternativen vorhanden sind, inwieweit die technische Entwicklung fortgeschritten ist und für welche Bereiche keine Alternativen denkbar/umgesetzt sind. Technologien mit mehrheitlich anerkannten technischen Nachteilen bzw. Sicherheits- und Umweltbedenken (z. B. Öl- oder Druckluft-Leistungsschalter) werden hier nicht berücksichtigt.

**Tabelle 20: Übersicht von SF<sub>6</sub>-freien Betriebsmitteln für die Hochspannung (Spannungsebenen bis 110 kV), in welchen Isolier- und Schaltmedien benötigt werden**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern

| Isoliermedium                    | SF <sub>6</sub> -freie Gasmischung                     | SF <sub>6</sub> -freie Gasmischung                      | Feststoff       | Fluid           |
|----------------------------------|--|---|-----------------|-----------------|
| Schaltmedium                     | Vakuum   | SF <sub>6</sub> -freie Gasmischung                      | Vakuum          | Vakuum          |
| HS-Schaltanlagen                 | umgesetzt, <5 Jahre am Markt <sup>15</sup>             | umgesetzt, <5 Jahre am Markt <sup>15</sup>              | nicht umgesetzt | nicht umgesetzt |
| HS-Leistungsschalter, Live- Tank | bis 145 kV umgesetzt, < 5 Jahre am Markt <sup>15</sup> | bis 72,5 kV umgesetzt, < 5 Jahre am Markt <sup>15</sup> | nicht umgesetzt | nicht umgesetzt |
| HS-Leistungsschalter, Dead Tank  | nicht umgesetzt  | nicht umgesetzt   | nicht umgesetzt | nicht umgesetzt |

<sup>14</sup> Max. realisierter Bemessungsstrom von 8000 A bei 550 kV.

<sup>15</sup> Die Bezeichnung „am Markt“ umfasst Schaltanlagen, die typgeprüft sind und zu denen Produktinformationen auf den Herstellerwebseiten verfügbar sind. Diese Bezeichnung kann sowohl Pilotanlagen, Prototypen als auch Produkte umfassen.

**Tabelle 21: Übersicht von SF<sub>6</sub>-freien Betriebsmitteln für die Hochspannung (Spannungsebenen bis 110 kV), in welchen nur ein Isoliermedium benötigt wird**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Produktblättern

| Isoliermedium       | Alternativgas                               | Feststoff                                  | Fluid/Öl                                   | Andere Technologie |
|---------------------|---|--|--|--------------------|
| HS-Spannungswandler | umgesetzt, < 5 Jahre am Markt <sup>15</sup> | umgesetzt, >5 Jahre am Markt <sup>15</sup> | umgesetzt, >5 Jahre am Markt <sup>15</sup> |                    |
| HS-Stromwandler     | umgesetzt, < 5 Jahre am Markt <sup>15</sup> | umgesetzt, >5 Jahre am Markt <sup>15</sup> | umgesetzt, >5 Jahre am Markt <sup>15</sup> | Optisch            |
| HS-Durchführungen   | nicht umgesetzt                             | umgesetzt, >5 Jahre am Markt <sup>15</sup> | umgesetzt, >5 Jahre am Markt <sup>15</sup> |                    |
| HS-GIL              | umgesetzt, < 5 Jahre am Markt <sup>15</sup> | nicht umgesetzt                            | nicht umgesetzt                            | Freileitung, Kabel |

## 7 Aktueller regulatorischer Rahmen zum Einsatz von SF<sub>6</sub> in elektrischen Betriebsmitteln

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Betriebsmittel und Technologien unterliegen vielfältigen Vorgaben durch technische Normen und regulatorischen Rahmenbedingungen. Neben der Einhaltung von Spezifikationen, Leistungsanforderungen und Sicherheitsmaßnahmen sollen Emissionen reduziert und Personal geschützt werden. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die heute geltende Regulierung in Europa. Dabei wird zwischen den für alle Mitgliedsländer geltenden Verpflichtungen (hierzu zählen EU-Verordnungen, international gültige Standards und das Europäische Emissionshandelssystem) sowie den Maßnahmen einzelner Mitgliedsländer differenziert. Die Verpflichtungen einzelner Länder unterscheiden sich stark bezüglich Ambitionen und Umfang. Anhand ausgewählter Länder werden die regulatorischen Besonderheiten und die Ergebnisse von freiwilligen Selbstverpflichtungen, Steuern und Verboten verglichen.

Der Überblick beschreibt den derzeitigen regulatorischen Kontext für Schaltanlagen und andere elektrische Betriebsmittel mit SF<sub>6</sub>. Mit der Einführung neuer Gasgemische ist auch eine Anpassung der technischen Normen und der Regulierung zu erwarten. Das Standardisierungsgremium IEC AHG5 hat als ersten Schritt eine Bestandsaufnahme der zu überarbeitenden Normen erstellt.

### 7.1 Internationale und europaweite Vorgaben

Im ersten Abschnitt betrachten wir Maßnahmen, die den regulatorischen Rahmen betreffen und für alle Mitgliedsländer der EU gleichermaßen gelten. Dabei werden EU-Verordnungen, international gültige Standards und das Europäische Emissionshandelssystem beschrieben und ausgewertet.

#### 7.1.1 Gesetze, Verordnungen und Richtlinien

Europäische Verordnungen bilden den Gestaltungsrahmen für Hersteller und Anwender von gasisolierten elektrischen Betriebsmitteln in der Europäischen Union. Eine Verordnung hat nach ihrer Verabschiedung in den Mitgliedsstaaten unmittelbar rechtlich verbindliche Geltung. Folgende drei Verordnungen sind von besonderer Relevanz für Hersteller und Anwender.

**EU-Verordnung Nr. 517/2014:** Seit dem 1. Januar 2015 gilt in der EU die revidierte Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (F-Gase-Verordnung), welche den Einsatz der fluorierten Treibhausgase HFKW, FKW und SF<sub>6</sub> reguliert. Diese löst die Verordnung (EG) Nr. 842/2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase ab. Die Anforderungen der Verordnung an den Einsatz von F-Gasen umfassen Dichtheitskontrollen, notwendige Vorkehrungen der Hersteller zur bestmöglichen Begrenzung der Emissionen (z. B. Verbesserung der Behälterdichtheit), Kennzeichnung elektrischer Schaltanlagen und Rückgewinnungsanforderungen. Darüber hinaus sind Regelungen zur Zertifizierung sowie Berichterstattung enthalten.

Verwendungs- und Inverkehrbringungsverbote werden erlassen, wenn technisch machbare, kostenwirksame und klimafreundlichere Alternativen vorhanden sind. Speziell für neue sekundäre Mittelspannungsschaltanlagen wird bis spätestens zum 1. Juli 2020 geprüft, ob es wirtschaftliche, kostenwirksame, technisch realisierbare, energieeffiziente und zuverlässige Alternativen gibt [EU, 2014]. Bis zum 31. Dezember 2022 sollen alle anderen Anwendungen hinsichtlich technisch realisierbarer und kostenwirksamer Alternativen überprüft werden.

**EU-Verordnung 1907/2006 REACH:** Diese Verordnung ist seit 2007 in Kraft und gilt für Hersteller oder Importeure, die Stoffe als Ganzes oder als Bestandteil eines Gemisches mit mehr als einer Tonne pro Jahr in der EU herstellen oder in die EU importieren [EU, 2012]. Jeder Hersteller oder Importeur benötigt für seine von REACH betroffenen Stoffe eine Registrierungsnummer sowie ein technisches Dossier [Umweltbundesamt, 2016]. Darüber hinaus sind die Hersteller des Gases verpflichtet, die physikalischen und chemischen Eigenschaften, Informationen zur Handhabung und mögliche Gefahren von SF<sub>6</sub> in einem Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EC (REACH), Annex II zusammenzufassen.

**EU-Verordnung (EG) Nr. 166/2006 EPRTR:** Diese Verordnung verpflichtet Betreiber bestimmter Industrieanlagen wie Produktionsstätten von Chemikalien und F-Gase-Vernichtungsanlagen zur Meldepflicht von Emissionen an die Europäische Kommission. Für SF<sub>6</sub> besteht die Meldepflicht ab einer Freisetzung von 50 kg pro Jahr.

**Umweltstatistikgesetz (UStatG):** Dieses Gesetz enthält im § 10 Abs. 2 Berichtspflichten zu SF<sub>6</sub> und auch NF<sub>3</sub>, die die Grundlage für die Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamts zu SF<sub>6</sub> sind. Die Erhebung erfasst die Menge sowie teilweise den vorgesehenen Verwendungszweck der Gase bei Unternehmen, die Schwefelhexafluorid oder Stickstofftrifluorid herstellen, einführen oder ausführen oder in Mengen von mehr als 200 Kilogramm pro Jahr im Inland abgeben. Die Erhebung nach § 10 Abs. 2 von SF<sub>6</sub> wurde erstmals 2006 durchgeführt. Die Erhebung von NF<sub>3</sub> begann mit dem Berichtsjahr 2015.

### 7.1.2 Technische Normen und Standards

Im Allgemeinen sind Normen und Standards der Selbstverwaltung der Wirtschaft zuzuordnen und haben keinen Gesetzescharakter. Dennoch fordern viele Regierungen und Industrieverbände mittelbar oder unmittelbar das Einhalten technischer Standards, wodurch Normkonformität faktisch ebenso wie durch Gesetze erzwungen wird.

Elektrische Betriebsmittel, die Schaltgase verwenden, unterliegen einer Vielzahl von internationalen, europäischen und nationalen Standards zu Spezifikationen, Leistungsanforderungen und Sicherheitsmaßnahmen. Die wichtigsten international gültigen Standards, die elektrische Betriebsmittel mit SF<sub>6</sub> betreffen, sind in Tabelle 22 aufgeführt.

**Tabelle 22: Relevante internationale Standards für elektrische Betriebsmittel mit SF<sub>6</sub>,**

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der betrachteten Standards

| Standard       | Beschreibung  |
|----------------|---|
| IEC 62271-1    | Hochspannungsschaltgeräte und -schaltanlagen; allgemeine Bestimmungen, u.a. Leckageraten  |
| IEC 62271-102  | Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen: Wechselstrom-Trennschalter und -Erdungsschalter  |
| IEC 62271-103  | Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen: Lastschalter für Bemessungsspannungen über 1 kV bis einschließlich 52 kV                       |
| IEC 62271-105  | Wechselstrom-Lastschalter-Sicherungs-Kombinationen für Bemessungsspannungen über 1 kV bis einschließlich 52 kV                                |
| IEC 62271-200  | Metallgekapselte Wechselstrom-Schaltanlagen für Bemessungsspannungen über 1 kV bis einschließlich 52 kV                                       |
| IEC 62271-203  | Metallgekapselte Hochspannungsschaltanlagen; allgemeine Bestimmungen, u.a. Leckageraten   |
| IEC TR 62271-4 | Hochspannungsschaltgeräte und -schaltanlagen; Handhabungsmethoden im Umgang mit SF <sub>6</sub> und seinen Mischgasen                         |
| IEC 61869-1    | Messwandler; allgemeine Bestimmungen, u.a. Leckageraten   |
| IEC 60376      | Spezifikationen zur technischen Qualität von SF <sub>6</sub> zur Nutzung in elektrischen Betriebsmitteln                                      |
| IEC 60480      | Leitfaden zur Prüfung und Behandlung von SF <sub>6</sub> aus elektrischen Betriebsmitteln und Spezifikationen zur Wiederverbenutzung (Re-Use) |

Mit der Einführung neuer Gasgemische wird auch eine Überprüfung der bestehenden Standards notwendig. Fraglich ist, inwieweit bestehende Standards auch auf alternative Gase erweiterbar sind oder ob ein neuer Standardisierungsprozess angestoßen werden muss. Die Arbeitsgruppe "AHG 5 - Alternative Gases" des IEC hat bereits die Einführung von neuen Gasen und deren Auswirkungen auf Standards für Schaltanlagen untersucht. Ein Endbericht liegt vor [IEC, 2016]. Auch die Arbeitsgruppe "Gases for Switchgear" des T&D Europe bereitete mit einem technischen Leitfaden zur Validierung alternativer Gase in elektrischen Betriebsmitteln den Standardisierungsprozess vor [T&D Europe, 2015b].

### 7.1.3 Marktprägende Rahmenbedingungen

In Europa existiert seit 2005 das Europäische Emissionshandelssystem (EU-ETS), das nach dem "cap and trade"-System funktioniert. Der Handel umfasst die Gase CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O sowie PFCs (perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe) aus der energieintensiven Industrie, bezieht den Luftverkehr aus 31 Ländern (EU28 sowie Island, Liechtenstein und Norwegen) ein und spiegelt damit 45 % der gesamten Treibhausgasemissionen in diesen Ländern wider. Bis 2020 werden im EU-ETS andere F-Gase als PFCs und damit auch SF<sub>6</sub> und sonstige Emissionsquellen nicht berücksichtigt [EC,

2016]. In Emissionshandelssystemen anderer Länder und Regionen ist SF<sub>6</sub> bereits enthalten. Beispiele dieser Emissionshandelssysteme sind in Korea, Kalifornien und Kanada (Ontario) umgesetzt [ICAP, 2016].

## 7.2 Länderspezifische regulatorische Rahmenbedingungen

Die übergeordneten europäischen Maßnahmen gelten für jeden EU-Mitgliedsstaat gleichermaßen. Die nationalen Ambitionen zur Emissionsreduzierung weichen allerdings voneinander ab. Infolgedessen gibt es innerhalb der EU durchaus diverse Rahmenbedingungen für den Einsatz von SF<sub>6</sub> in elektrischen Betriebsmitteln. Anhand einiger ausgewählter Länder sollen unterschiedliche Rahmenbedingungen verglichen und die Auswirkungen ausgewertet werden.

### 7.2.1 Freiwillige Vereinbarungen und Verpflichtungen

In Deutschland, Frankreich, Norwegen, Spanien und der Schweiz haben die Regierungen mit der Industrie freiwillige Vereinbarungen zur Minimierung der SF<sub>6</sub>-Emissionen getroffen. Dabei unterscheiden sich diese Vereinbarungen hinsichtlich des betrachteten Zeitraums und der gewählten Ambitionen. Tabelle 23 gibt einen Überblick der Ziele der freiwilligen Verpflichtungen sowie der Ergebnisse nach Angaben der Industrie. Teilweise ist der angegebene Zeitraum der Anwendung der Selbstverpflichtung bereits überschritten. Aktuelle Informationen zum Fortverbleib der Selbstverpflichtungen sind nicht verfügbar.

**Tabelle 23: Überblick freiwilliger Verpflichtungen zwischen der Industrie und den nationalen Regierungen**

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von [Benner et al., 2012; VDN et al., 2005; ABB et al., 2012; T&D Europe, 2011; SOLVAY et al., 2005, 2005]

| Land  | Deutschland  | Frankreich  | Spanien   | Norwegen  | Schweiz   |
|---|--|---|---|---|---|
| <b>Zeitpunkt der freiwilligen Selbstverpflichtung</b> | Mai 2005   | 2004  | März 2008   | März 2002   | April 2012  |
| <b>Zeitraum der Anwendung</b>                         | 2004 - 2020  | 1995 - 2012, keine Verlängerung nach 2012               | 2008 - 2012, Verlängert bis mindestens 2021   | 2008 - 2010, keine Verlängerung nach 2010         | -   |
| <b>Ziele</b>  | Begrenzung der Gesamtemissionen bis 2020 auf 17 t SF <sub>6</sub> /a           | Rein qualitative Angaben                                | Emissionsreduktion um insgesamt 330.000 t CO <sub>2</sub> -e zwischen 2006 und 2012 | Emissionsreduktion um 30 % zwischen 2000 und 2010 | Emissionen aus Herstellung und Betrieb von HS- und MS-Anlagen < 4 t SF <sub>6</sub> /Jahr |
| <b>Erfolge laut Industrie (T&amp;D Europe)</b>        | 46 % Gesamt-reduktion zwischen 2004 und 2014. 50 % Reduktion in der Produktion | 50 % Reduktion in der Produktion zwischen 1995 und 2009 | 30 % Gesamt-reduktion zwischen 2006 und 2009  | 50 % Gesamt-reduktion zwischen 2000 und 2010      | 75% Reduktion der Emissionsrate im Einsatz zwischen 2004 und 2016                         |

### 7.2.2 Steuern und Abgaben

In einigen Ländern gibt und gab es Steuern auf SF<sub>6</sub> in elektrischen Betriebsmitteln. Die Steuerhöhe liegt bei bis zu 100 €/kg SF<sub>6</sub>. Anhand der Länderbeispiele Dänemark, Slowenien, Spanien und Norwegen beschreiben und vergleichen wir die Pläne und Umsetzung von Steuern und die Auswirkungen.

In **Dänemark** ist eine Steuer auf den Import von fluorierenden Gasen seit 2001 in Kraft. Dabei haben Gase mit höchster Klimarelevanz auch den höchsten Steuersatz. Auf SF<sub>6</sub> fällt eine Steuer von 600 DKK/kg SF<sub>6</sub> (umgerechnet 80 €/kg SF<sub>6</sub>) an. Die Steuer umfasst eine Vielzahl von Anwendungen; u.a. auch Isoliergas in elektrischen Anlagen. Eine Ausnahme bilden SF<sub>6</sub>-isolierte Schaltanlagen ≤ 36 kV in der Energieverteilung [SKAT, 2016]. Augenscheinlich ist das Bewusstsein von Herstellern und Anwendern von elektrischen Betriebsmittel über die Folgen von SF<sub>6</sub> durch die Steuer gestiegen [Nordic Council of Ministers, 2007]. Außerdem wurde die Diskussion über Alternativgase ange-regt und das Recycling verbessert. Nach UNFCCC sind die Emissionen in den Jahren seit der Einführung allerdings absolut gestiegen [UN, 2014a].

In **Slowenien** wurde 2009 eine Steuer auf die Produktion und den Import von SF<sub>6</sub>- und „sonstigen Betriebsmitteln“ mit fluorierenden Gasen eingeführt. Die Höhe des Steuersatzes richtet sich nach der Klimarelevanz des Gases sowie der Anwendung. Von 2009 bis 2013 wurde der Preis pro t CO<sub>2</sub>-Äquivalent stetig erhöht. Im Jahr 2013 lag er bei 14 €/t CO<sub>2</sub>-e bzw. 330.000 €/t SF<sub>6</sub>. Dabei mussten bei Erstbefüllung der Anlagen mit SF<sub>6</sub> nur 5 % der Füllmenge besteuert werden. Bei Wartung und Nachbefüllung waren 100 % zu besteuern. Aufgrund von Beschwerden der Industrie wurde der Satz ab 2014 signifikant gesenkt. Im Jahr 2015 lag er lediglich bei 3,5 €/t CO<sub>2</sub>-e. Seit April 2016 ist die Zahlung der Steuer nicht mehr fällig [Republic of Slovenia Ministry of Finance, 2016; Duncan Brack, 2015; Schwarz et al., 2011].

Seit Januar 2014 gibt es in **Spanien** eine Steuer auf F-Gase mit einem GWP >150 inklusive SF<sub>6</sub>. Die Steuerhöhe beträgt 20 €/t CO<sub>2</sub>-e, ist allerdings auf 100 €/kg gedeckelt [Boletín oficial del estado, 2013]. Die Steuer betrifft das Nachfüllen von SF<sub>6</sub> in Schaltanlagen und somit nur die Betreiber der Anlagen. Die Erstbefüllung bzw. Produktion und der Import von Schaltanlagen sind von der Steuer ausgeschlossen [AFBEL, 2013].

In **Norwegen** wurde im Vorlauf des freiwilligen Abkommens zwischen Umweltministerium und norwegischer Immissi-onsschutzbehörde eine Steuer auf SF<sub>6</sub> diskutiert. Diese wurde aufgrund von Wettbewerbsnachteilen auf dem Weltmarkt und Gesprächen mit der Elektroindustrie verworfen. Man einigte sich auf das freiwillige Abkommen [Schwarz et al., 2011].

### 7.2.3 Verbot von SF<sub>6</sub>-gefüllten Mittelspannungsanlagen in Niedersächsischen Landesgebäuden

Seit März 2017 gilt in Niedersachsen ein Erlass sowie eine Verfügung, die den Einsatz und den Bezug von SF<sub>6</sub>-gefüllten Mittelspannungsanlagen bei zukünftigen Neubau- und Sanierungsvorhaben des Landes verbietet. Dieses Verbot stehe nach eigenen Angaben in Zusammenhang mit den Zielen des niedersächsischen Klimagesetzes (Nds. KlimaG), das eine Reduktion der Treibhausgasemissionen der Landesverwaltung um 70% (Basisjahr 1990) bis 2050

anstrebt. In begründeten Einzelfällen sei eine Ausnahmereglung möglich. Jedoch ist der Einsatz von luft- und feststoffisolierten Anlagen – nach Angaben der Oberfinanzdirektion Niedersachsen – auch unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit in den meisten Fällen möglich.

## 8 Stimmungsbild der Hersteller und Anwender

Im Verlauf des Vorhabens wurden eine Reihe von Interviews mit Herstellern und Anwendern geführt. Außerdem gab es Gespräche mit Vertretern von Branchenverbänden. Das nachfolgende Kapitel gibt eine Übersicht der Bandbreite an Positionen und ordnet diese in ein Stimmungsbild der Branche ein. Das Spektrum spannt einen Raum von sehr kritischen bis befürwortenden Stimmen gegenüber Alternativen auf. Der erste Abschnitt zielt bewusst nicht auf die Darstellung von möglichen Mehrheitsmeinungen oder einem Median ab.

Im zweiten Abschnitt werden konsolidierte Standpunkte relevanter Branchenverbände (AK SF<sub>6</sub>, ZVEI, FNN und T&D Europe) aufgeführt. Dabei geben wir eine Übersicht relevanter Veröffentlichungen und Stellungnahmen der Gremien und Verbände. Der dritte Abschnitt des Kapitels fasst wesentliche Teile der Diskussion und Ergebnisse des 1. Fachgesprächs im März 2017 aus Sicht des Projektteams zusammen. Ergebnisse des 2. Fachgesprächs im September in Brüssel zu möglichen Konzepten zur Reduktion der Emissionen und des Einsatzes von SF<sub>6</sub> flossen in die Erarbeitung des Kapitels 9. Darüber hinaus ist das Protokoll des 2. Fachgesprächs online auf der Projektwebsite des UBA zu finden (Link siehe Fußnote<sup>16</sup>).

Der Schwerpunkt der Interviews und des Fachgesprächs lag auf Betriebsmitteln der Mittel- und Hochspannung. Für die Mittelspannung konzentrierten sich die Gespräche auf Betriebsmittel mit einer Bemessungsspannung bis 24 kV bzw. 36 kV, da diese den Großteil der Population in dieser Spannungsebene stellen.

### 8.1 Stimmungsbild aus den Experteninterviews

Das nachfolgende Stimmungsbild setzt sich aus den verschiedenen Positionen einzelner Akteure zusammen. Für die Übersicht stellen wir kritische und befürwortende Stimmen zu alternativen Technologien zu SF<sub>6</sub> tabellarisch gegenüber. Dabei beziehen wir uns auf ausgewählte technische und ökonomische Aspekte, die ein sehr weites Spektrum an Positionen widerspiegeln. Tabelle 24 bietet einen Überblick zu Betriebsmitteln in der Mittelspannung und Tabelle 25 zu Betriebsmitteln in der Hochspannung.

Insbesondere zu Schaltanlagen in der Mittelspannung gab es seitens der Experten eine Vielzahl an konträren Positionen. Das Stimmungsbild für Betriebsmittel in der Hochspannung divergiert bei grundsätzlichen Aspekten weniger deutlich, obwohl die größeren Hersteller unterschiedliche Technologien einsetzen bzw. entwickeln.

Das Stimmungsbild stellt eine Inventarisierung der geäußerten Positionen dar. Eine Bewertung der Positionen durch die Gutachter ist an dieser Stelle ausdrücklich nicht beabsichtigt.

---

<sup>16</sup> Die [Projektseite des UBA](#) informiert über das Projekt und veröffentlicht Präsentationen und Protokolle der Fachgespräche sowie Zwischenberichte

Die tabellarische Gegenüberstellung führt an dieser Stelle unweigerlich zu einer verkürzten, teils plakativen Formulierung der Positionen und Argumente. Für die sachrichtige Einordnung ist die Berücksichtigung von Kapitel 3, Kapitel 4 und Kapitel 6 unerlässlich.

**Tabelle 24: Übersicht der Bandbreite des Stimmungsbildes bzgl. ausgewählter Aspekte für Betriebsmittel in der Mittelspannung (Schwerpunkt lag auf Betriebsmittel mit bis zu 36 kV)**

| Aspekt                             | Kritische Stimmen gegenüber Alternativen   | Befürwortende Stimmen gegenüber Alternativen  |
|------------------------------------|--|---|
| Bemessungsspannung und –strom      | Aktuelle SF <sub>6</sub> -Alternativen am Markt sind grundsätzlich nur im eingeschränkten Parameterbereich einsetzbar. Dies zeigt sich daran, dass Anlagen in der Regel nur bis 24 kV erhältlich sind.   | Sowohl Feststoff- als auch Fluid-Lösungen sind für den Großteil der Anwendungsbereiche (24 kV-Anlagen) einsetzbar. Hersteller sehen keine technischen Grenzen, die Anlagen für andere Spezifikationen weiterzuentwickeln, zumindest nicht bis 36 kV. Das heute noch begrenzte Portfolio ist ausschließlich auf die Hauptmärkte der Firmen zurückzuführen. |
|                                    | Vakuumschalter erfüllen nur teilweise die technischen Anforderungen, die Entwicklung steckt noch in den Anfängen.  | Vakuumschalter sind Stand der Technik.  |
|                                    | Feststoffisolierungen weisen schlechte Eigenschaften bei der Stromtragfähigkeit („Wärmeabfuhr“) auf.   | Feststoffisolierungen zeigen keine Probleme bei der Wärmeabfuhr und Stromtragfähigkeit.   |
| Baugröße und Gewicht               | Im Bereich Windenergie und in Gebäudeinstallationen sind erforderliche kompakte Dimensionen ohne SF <sub>6</sub> nicht realisierbar.   | Einzelne Alternativen mit Feststoff- oder Fluidisolierung sind genauso kompakt bzw. sogar kompakter als SF <sub>6</sub> -isolierte Anlagen und sie sind somit auch für Windenergieanlagen und Gebäudeinstallationen verwendbar.   |
| Lebensdauer und Langzeitstabilität | Der Effekt des „Verklebens“ (z. B. Kontaktprobleme durch Schaltvorgänge bei Kurzschlüssen) in Vakuumschaltern verringert die Anzahl möglicher Schaltvorgänge.  | Das Problem des „Verklebens“ konnte durch Anpassungen in der Antriebstechnik und Elektrodenwerkstoffe bereits vor vielen Jahren gelöst werden.  |
|                                    | Anwender haben schlechte Erfahrung mit Feststoffisolierungen und Fluiden (Öl) gesammelt. Für Betriebsmittel mit einer Lebensdauer von 20 bis 40 Jahren fehlen Erfahrungswerte in der Langzeitstabilität. | In der sekundären Verteilung gibt es Anwender mit langjähriger (30 bis 50 Jahre) und sehr positiver Erfahrung beim Einsatz von Alternativen, insbesondere Feststoffen und Fluiden (Estern). Dies betrifft insbesondere Akteure außerhalb von Deutschland.   |

| Aspekt          | Kritische Stimmen gegenüber Alternativen  | Befürwortende Stimmen gegenüber Alternativen  |
|-----------------|---|---|
|                 | Feststoffisolationen haben mit Teilentladungsproblemen zu kämpfen und sind nicht zuverlässig genug („Langzeitbeständigkeit“).   | Die Vorurteile gegenüber Feststoffisolationen stammen aus einer Zeit von vor 30 Jahren, in denen Feststoffisolationen nicht zuverlässig waren. Teilentladungen sind heute kein Problem mehr, insbesondere bei geschirmten Feststoffisolationssystemen.  |
| Umwelteinflüsse | Nur gasisierte Anlagen sind vor verschiedenen Umwelteinflüssen (Druck, Schmutz) geschützt.  | Alternativen verwenden spezifisches Design („enclosed“, „encapsulated“ und insbesondere „sealed“), um einen gleichwertigen Schutz zu gewährleisten. Geschirmte Feststoffisolationen und Fluid-Isoliersysteme sind ebenfalls vor Umwelteinflüssen geschützt.   |
|                 | SF <sub>6</sub> durch Fluide zu ersetzen verlagert das Problem zu anderen problematischen Isolierstoffen. Fluide sind nicht langzeitbeständig, wasserschädigend beim Austritt und haben Probleme wegen der Entzündbarkeit.  | Moderne Fluide (Ester) sind weder wasserschädigend noch besonders entzündlich. Zudem sind die verwendeten Mengen sehr gering.   |
|                 | Die gesamten SF <sub>6</sub> -Emissionen der elektrischen Energiebranche sind vernachlässigbar im Vergleich zu den totalen weltweiten Treibhausgasemissionen und sollten daher eigentlich gar nicht diskutiert werden.  | SF <sub>6</sub> -freie Lösungen können einen deutlichen Beitrag zum Umweltschutz leisten.   |
| Kosten          | Verschiedene Alternativen sind grundsätzlich teurer als SF <sub>6</sub> -Lösungen. Schaltanlagen in der sekundären Verteilung: 30 bis 50 % teurer. Primäre Verteilung: 10 bis 25 % teurer. Das weitere Kostenreduktionspotential ist aufgrund aufwendiger Produktionsverfahren eher gering. | Ein Großteil der Mehrkosten entsteht durch geringe Stückzahlen. Durch Skaleneffekte lassen sich die Mehrkosten auf unter 10 % drücken. Im Verhältnis zu den Gesamtinvestitionskosten (Primär- und Sekundärtechnik) einer Ortsnetzstation sind die Mehrkosten sehr gering. Sekundärtechnik macht über 50 % der Investitionskosten aus. |

| Aspekt         | Kritische Stimmen gegenüber Alternativen   | Befürwortende Stimmen gegenüber Alternativen   |
|----------------|--|--|
|                | <p>Operative Kosten über die gesamte Lebensdauer der Anlagen sind bei allen Technologien gleich. Investitionskosten von Alternativen in der Sekundärverteilung sind im Vergleich zu SF<sub>6</sub>-Lösungen höher.</p>               | <p>SF<sub>6</sub>-Anlagen haben im Vergleich zu Alternativen höhere operative Kosten über die Lebensdauer (Reporting, Gas-Handling). Bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung werden aber nur Investitionskosten herangezogen.</p>   |
|                | <p>Sobald ein komplexer Vakuumschalter anstelle eines einfachen SF<sub>6</sub>-Trenners / Erders eingesetzt werden muss, explodieren die Kosten. Darüber hinaus ist eine Trennstelle im Vakuum technisch fraglich.</p>               | <p>Vakuumschalter für die niedrigen Anforderungen eines Trenners können sehr kostengünstig hergestellt werden und sind dadurch kaum teurer. Zudem beträgt der Kostenanteil der Primärtechnik (Schaltanlage) an den Gesamtprojektkosten weniger als 50 %, so dass dieser Mehrpreis in Relation gering ausfällt.</p> |
| Marktakzeptanz | <p>Teilweise schreiben Anwender nur spezifische Gase (SF<sub>6</sub>) oder gasisolierte Anlagen aus. Teilweise werden für neue Projekte einfach die alten Ausschreibungsunterlagen verwendet. Dies verhindert neue Technologien.</p> | <p>Teilweise werden Umweltschutzaspekte in Ausschreibungen mit aufgenommen.</p>  |
|                | <p>Für Anwender sind die Investitionskosten das entscheidende Kriterium bei der Auswahl von Anlagen. Die betrifft insbesondere den Massenmarkt.</p>  | <p>Einzelne Anwendergruppen sind auch für Mehrkosten bereit bzw. für sie hat das Image eine vergleichbare Bedeutung wie die Kosten.</p>  |
|                | <p>Kunden kaufen keine Alternativen, solange nur wenige Produkte oder Anbieter existieren.</p>   | <p>Einzelne Anwender haben langjährige Erfahrung mit Alternativen, insbesondere im Bereich der sekundären Verteilung.</p>  |

**Tabelle 25: Übersicht der Bandbreite des Stimmungsbildes ausgewählter Aspekte für Betriebsmittel in der Hochspannung**

| Aspekt                        | Kritische Stimmen gegenüber Alternativen   | Befürwortende Stimmen gegenüber Alternativen  |
|-------------------------------|--|---|
| Bemessungsspannung und –strom | Eine spezifische Herausforderung in der HS ist, dass SF <sub>6</sub> auch zum Schalten ersetzt werden müsste. Hier gibt es bisher nur Prototypen oder Forschungsgeräte.  | Erste Produkte mit Vakuumschalter (Offshore-Wind, Umspannwerke) bis 110 kV (Normspannung) werden bereits angeboten.   |
|                               | Alle bekannten Alternativgase können immer nur jeweils einen Teil der geforderten Parameterbereiche abdecken.  | Mit einem Portfolio an Alternativtechniken ist mittelfristig eine Substitution denkbar.   |
| Baugröße und Gewicht          | Im Bereich Windenergie und in Gebäudeinstallationen sind erforderliche Dimensionen ohne SF <sub>6</sub> nicht realisierbar.  | In der HS bestehen mehr Freiheitsgrade bzgl. Baugröße, weshalb Alternativen mit größeren Dimensionen denkbar sind.  |
| Umwelteinflüsse               | Fluorierte Alternativgase sind keine „sauberen“ Lösungen. Das geringe GWP ist aufgrund der schnelleren Zersetzung in der Atmosphäre gegeben. Die Zersetzungsprodukte sind ebenfalls teilweise problematisch. <sup>17</sup> |   |
|                               | Das GWP einer Alternative sollte höchstens im Bereich von dem von CO <sub>2</sub> liegen. Es werden FKW bereits im Bereich von 150 verboten, auch in der Energietechnik ist dies früher oder später zu erwarten.           | Eine Reduktion von 98 % ist substantiell und ausreichend. Der Vergleich mit Kältemitteln hinkt, da hier die Vergleichsbasis aktuelle Kältemittel mit einem GWP von 230-490 sind, und nicht solche mit 23.500. |

<sup>17</sup> In der Diskussion wurde auf die aktuelle Publikation verwiesen [Pohlank et al., 2016].

| Aspekt                             | Kritische Stimmen gegenüber Alternativen   | Befürwortende Stimmen gegenüber Alternativen   |
|------------------------------------|--|--|
|                                    | Die Zersetzungsprodukte von einzelnen Alternativgasen sind teilweise hoch giftig und können die Gesundheit des Personals gefährden.  | Auch die Zersetzungsprodukte von SF <sub>6</sub> sind teilweise hoch giftig, durch die Kapselung hat das Personal aber keinen Kontakt dazu.  |
|                                    | Die gesamten SF <sub>6</sub> -Emissionen der elektrischen Energiebranche sind vernachlässigbar im Vergleich zu den totalen weltweiten Treibhausgasemissionen und sollten daher eigentlich gar nicht diskutiert werden. | SF <sub>6</sub> -freie Lösungen können einen deutlichen Beitrag zum Umweltschutz leisten.  |
| Lebensdauer und Langzeitstabilität | Die Alternativgase zersetzen sich im normalen Betrieb und damit ist die Lebensdauer einer Anlage geringer als die von SF <sub>6</sub> bzw. die Frequenz der Wartungszyklen müssen erhöht werden.                       | Bisherige Untersuchungen haben keine kritischen Alterungsprozesse der verwendeten Gase gezeigt. Die Wartungszyklen und Lebensdauer sind vergleichbar mit SF <sub>6</sub> -Anlagen.   |
| Kosten                             | Schaltanlagen mit alternativen Gasen werden trotz zu erwartender Skaleneffekte nicht zu vergleichbaren Preisen angeboten werden können, insbesondere aufgrund des Produktdesigns und hochwertiger Materialien.         | Kosten für Schaltanlagen mit alternativen Gasen sind zu vergleichbaren Preisen realisierbar. In SF <sub>6</sub> -Schaltanlagen in der HS werden aktuell schon teilweise hochwertige Materialien eingesetzt (versilberte Kontakte). |
| Marktakzeptanz                     | Die Netzbetreiber bevorzugen eine universelle und standardisierte Lösung.  | In der Praxis kommen aktuell verschiedene oder sogar Hybridlösungen vor. Hersteller können zeitweise auch verschiedene Technologietypen (Anlagen mit verschiedenen Befüllungen) parallel produzieren.                              |
|                                    | -  | Im HS-Bereich handelt es sich nicht um Massenware und der Kostendruck ist geringer als in der MS.  |

## 8.2 Konsolidierte Standpunkte relevanter Branchenverbände

Neben Einzelinterviews haben wir mit Interessenvertretern gesprochen und aktuelle Positionspapiere ausgewertet, um konsolidierte Standpunkte der Branche zu erfassen. Hervorzuheben sind folgende Gremien und Verbände:

- Arbeitskreis SF<sub>6</sub> (AK SF<sub>6</sub>), zentrales verbandsübergreifendes Gremium in Deutschland (ZVEI, FNN, BDEW, VIK), vertritt Hersteller und Anwender;
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI), vertritt Hersteller;
- Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), vertritt insbesondere die Netzbetreiber als Anwendergruppe;
- European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry (T&D Europe), vertritt europäische Nationalverbände, z. B. ZVEI.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick zu relevanten Standpunkten, Veröffentlichungen und Stellungnahmen dieser Gremien und Verbände. Im Allgemeinen zeigt sich in dem konsolidierten nationalen Branchenverbände bild eine starke Zurückhaltung gegenüber der Einsetzbarkeit alternativer Technologien. Dies zeigt sich insbesondere in der klaren Position, dass sich alternative Lösungen derzeit noch im Forschungsstadium befänden. Einzelne Experten in den individuell geführten Interviews (Hersteller und Anwender) und Vertreter von internationalen Organisationen wie T&D Europe oder Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE, Alternative Gases Task Force) äußerten sich teils deutlich weniger zurückhaltend. Beispielsweise verweisen sie in den individuellen Positionen konkret auf die Einsatzmöglichkeiten alternativer Technologien für spezifische Anwendungsfälle in der MS und HS.

**Tabelle 26: Übersicht relevanter Standpunkte, Veröffentlichungen und Stellungnahmen der interviewten Gremien und Verbände**

Quelle: Eigene Erstellung

| Gremium, Verband             | Zentrale Standpunkte  | Veröffentlichungen, Stellungnahmen  |
|------------------------------|---|---|
| Arbeitskreis SF <sub>6</sub> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• SF<sub>6</sub> hat zentrale Bedeutung für Versorgungssicherheit</li> <li>• Ökobilanz von SF<sub>6</sub> ist kritisch, Anteil an der Gesamtemission dennoch gering</li> <li>• Toxizität von Schalt- und Zersetzungsprodukten von SF<sub>6</sub> sind kritisch</li> <li>• alternative Lösungen derzeit im Forschungsstadium</li> <li>• umfangreiche Tests und Erfahrungswerte mit der Langzeitstabilität noch erforderlich</li> <li>• zentrale Kriterien zur Bewertung von Alternativen: Gesamtkostenbilanz und Ökobilanz</li> <li>• brancheneinheitliche Lösung erforderlich</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• freiwillige Selbstverpflichtung der Industrie (2005) [SOLVAY et al., 2005]</li> <li>• Erläuterungen zur F-Gase-Verordnung (EU) 517/2014 (2015) [EU, 2014]</li> <li>• Stellungnahme im Rahmen der Befragung durch das Projektkonsortium (2016)</li> </ul> |

| Gremium, Verband | Zentrale Standpunkte  | Veröffentlichungen, Stellungnahmen   |
|------------------|---|--|
| ZVEI             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Austausch von Schaltanlagen und -geräten der ersten und ggf. zweiten Generation gegen Schaltanlagen und -geräte der neuesten Generation stellt ein erhebliches SF<sub>6</sub>-Emissionsreduktionspotential dar</li> <li>• Zielgerichtete Anreizsysteme könnten die Einführung von SF<sub>6</sub>-freien Alternativen fördern und stärken.</li> <li>• Die Verwendung von SF<sub>6</sub> muss über das Jahr 2030 hinaus zulässig bleiben.</li> <li>• Die zulässigen Gesamtemissionen können gemäß der freiwilligen Selbstverpflichtung (17 t p.a. für 2020) im Hinblick auf 2030 halbiert werden.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Roadmap zur Reduktion der SF<sub>6</sub>-Emissionen aus Schaltanlagen und -geräten [ZVEI, 2017]</li> </ul>  |
| FNN              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• SF<sub>6</sub> ist bewährtes Isolier- und Löschgas, zeigt hohe Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit</li> <li>• <u>EIN</u> Gas oder eine Gasmischung, welches in allen Einsatzgebieten von SF<sub>6</sub> gleichwertig ist, liegt trotz wissenschaftlicher Forschung derzeit nicht vor. Für einzelne Anwendungen bspw. Isoliergas Mittelspannung liegen jedoch Alternativen vor.“</li> <li>• Alternativen müssen vergleichbare Anforderungen erfüllen: Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Umwelteigenschaften, Wirtschaftlichkeit</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Positionspapier der Anwender zu Alternativen für den Einsatz von SF<sub>6</sub> (2016) [Bohn, 2016]</li> </ul>  |
| T&D Europe       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• für spezifische Anwendungen existieren SF<sub>6</sub>-freie Technologien</li> <li>• Branche strebt nach stetiger Emissionsreduktion von SF<sub>6</sub> in SF<sub>6</sub>-Anlagen und Erforschung von alternativen Lösungen</li> <li>• für jede Alternativtechnologie ist vor dem Markteintritt eine umfassende Prüfung erforderlich</li> <li>• Entwicklung und Abstimmung einheitlicher Bewertungskriterien erforderlich</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• technisches Handbuch zur Bewertung von Alternativgasen (2016) [T&amp;D Europe, 2015b]</li> <li>• Positionspapier zu SF<sub>6</sub> und Alternativen (2016) [T&amp;D Europe, 2015a]</li> <li>• weitere Berichte zum technischen Stand von SF<sub>6</sub>-Alternativen und regulatorischen Rahmenbedingungen sind derzeit in der Bearbeitung, Veröffentlichung 2017/2018</li> </ul> |

### 8.3 Stimmungsbild aus dem Fachgespräch vom 06.03.2017

Das nachfolgende Stimmungsbild zum Fachgespräch vom 06.03.2017 fasst wesentliche Teile der Diskussion und Ergebnisse aus Sicht des Projektteams zusammen. Das Projektteam erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Wir berücksichtigen nicht die Marktanteile der vertretenden Hersteller, sondern beziehen uns auf Mehrheiten im Teilnehmerkreis.

Es werden zunächst allgemein diskutierte Punkte beschrieben und zusammengefasst. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der drei Diskussionsblöcke

- zu Mittelspannung,
- zu Hoch- und Höchstspannung sowie
- der nicht-technischen Barrieren und Marktakzeptanz

erläutert. Im ersten Schritt wird jeweils tabellarisch das Stimmungsbild zu vom Projektteam formulierten Thesen dargestellt. Darunter folgen im Gespräch gefallene Aussagen und Positionen.

#### 8.3.1 Allgemeine Ergebnisse

##### **Monitoring der Emissionen und Terminologie „Schaltanlage“**

- Es gibt keine gemeinsame Position, ob und welche Art von Schaltgeräten oder Messwandler grundsätzlich als Teil von Schaltanlagen oder als separate Betriebsmittel zu betrachten sind. Daraus lässt sich ein Bedarf für eine klare und einheitliche Terminologie / Definition ableiten. Der Arbeitskreis SF<sub>6</sub> will sich der Problematik annehmen.

##### **Spannungswert für Grenze zwischen Mittel- und Hochspannung**

- Es wird sich im Teilnehmerkreis auf die Verwendung der Grenze von 52 kV (Bemessungsgröße) in Anlehnung an die IEC Norm IEC 62271-200 geeinigt. Für die Einordnung / Diskussion von Lösungen in der Mittelspannung müssen aber die Spannungsbereiche < 36 kV sowie > 36 kV bis einschließlich 52 kV unterschieden werden. In Deutschland kommen fast ausschließlich Betriebsmittel im Bereich von bis zu 36 kV vor.

### 8.3.2 Block A: elektrische Betriebsmittel in der Mittelspannung

Tabelle 27: Zusammenfassung des Stimmungsbildes zu einzelnen Thesen (Ergebnisse der Befragung)

Quelle: Eigene Darstellung

| These  | ist korrekt  | ist korrekt mit Einschränkungen  | ist relevant  |
|--|--|--|---|
| Die Reduktionspotentiale bei SF <sub>6</sub> -isolierten Anlagen in der Mittelspannung sind sehr gering. | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mittlere Zustimmung,</li> <li>Keine Ablehnung</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe Zustimmung,</li> <li>Keine Ablehnung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mittlere Zustimmung,</li> <li>Keine Ablehnung</li> </ul> |
| Bis 24 kV sind technisch ausgereifte Alternativtechnologien verfügbar.                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe Zustimmung,</li> <li>Geringe Ablehnung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe Zustimmung,</li> <li>Keine Ablehnung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe Zustimmung,</li> <li>Keine Ablehnung</li> </ul>  |
| Der aktuelle Mangel an standardisierten Lösungen behindert die Einführung / von Alternativen.            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Zustimmung,</li> <li>Geringe Ablehnung</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe Zustimmung,</li> <li>Keine Ablehnung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Zustimmung,</li> <li>Keine Ablehnung</li> </ul>     |

#### Aktuelles Niveau und weitere Reduktion des SF<sub>6</sub>-Einsatzes in SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlagen

- Anmerkung Teilnehmer / Diskussion:* Für Schaltgeräte und Schaltanlagen im Allgemeinen gab es ein weitestgehend konsistentes Stimmungsbild hinsichtlich der Reduktionspotentiale. In den wesentlichen Bereichen der Herstellung und dem Betrieb aktueller Technologien wurden die Entwicklungspotentiale zur Reduktion der Emission in den letzten Jahren weitestgehend ausgeschöpft. Für moderne Schaltanlagen schätzen die Teilnehmer die jährlichen Emissionsraten mit deutlich unter 0,1 % der Füllmenge ab.
- Bei den „sonstigen Betriebsmitteln“ (gilt für Mittel- und Hochspannung), wie z. B. Durchführungen oder Messwandlern, gab es hinsichtlich der Reduktionspotentiale kein klares Stimmungsbild. Die Diskussion offenbarte einen Klärungsbedarf bezüglich der Abgrenzung der Betriebsmittelkategorien, Spannungsebenen und der dem Monitoring zugrundeliegenden Definitionen.
- Ergebnis:* Für moderne Schaltanlagen mit SF<sub>6</sub> sind die Emissionsraten gering. Das weitere Reduktionspotential bei weiterer Verwendung von SF<sub>6</sub> wird deshalb als unerheblich eingestuft und wäre mit sehr großem Aufwand verbunden. Eine weitere Reduktion wäre nur mit alternativen Technologien oder Gasen möglich.
- Ergebnis:* Bei den „sonstigen Betriebsmitteln“ (gilt für Mittel- und Hochspannung) gibt es weiteren Diskussionsbedarf zur Abgrenzung / Definition und zum möglichen Reduktionspotential. Im Arbeitskreis SF<sub>6</sub> soll die Diskussion fortgesetzt werden.

## Technische Verfügbarkeit von Alternativen für den Einsatz von SF<sub>6</sub> in Schaltanlagen

- *Anmerkung Teilnehmer / Diskussion:* Für Leistungsschalter ist Vakuum Stand der Technik. Hinsichtlich der Frage, ob Vakuum bei Lastschaltern Stand der Technik ist, zeigt sich kein einheitliches Stimmungsbild. Für die Mehrheit erfolgt die Wahl des Schaltmediums bei Lastschaltern nicht aufgrund technischer Aspekte, sondern aufgrund der Kosten.
- Als Isoliermedium stehen für den Großteil der Anwendungen ausreichend technisch vergleichbare Alternativtechnologien<sup>18</sup> zur Verfügung (u.a. Luftisolierung, Feststoffisolierung). Bei Alternativgasen<sup>19</sup> sind aber einzelne Fragen (z. B. Umweltverträglichkeit, Langzeitverhalten) noch nicht geklärt. Für spezifische Anwendungsfälle, die Spannungsbereiche  $\geq 36$  kV oder sehr hohe Nennströme erfordern, sind vorerst weitere technische Entwicklungen erforderlich.
- *Ergebnis:* Auch, wenn sich kein einheitliches Stimmungsbild hinsichtlich der technischen Verfügbarkeit von Alternativtechnologien zeigt, sieht die Mehrheit keine technischen Restriktionen für den Einsatz von Alternativen beim Großteil der Anwendungsfälle in der Mittelspannung.

## Kosten<sup>20</sup>

- *Anmerkung Teilnehmer / Diskussion:* Derzeit gehen die Teilnehmer von höheren, aber nicht prohibitiven Kosten für Alternativen aus.
- Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung bzw. einer möglichen Reduzierung der Kosten zeigt sich kein einheitliches Stimmungsbild. Die Mehrheit geht aber davon aus, dass der Grad der Standardisierung und die geforderten Spezifikationen maßgeblich die sich einstellenden Kosten beeinflussen. Im Ergebnis der Diskussion zeigt sich weiterer Diskussionsbedarf und die Erkenntnis, dass für ein klares Verständnis vom Begriff *Standardisierung* zwischen internationalen Normen und den von Anwendern geforderten spezifischen Standards zu differenzieren ist.
- *Ergebnis:* Derzeit sind die Kosten für Alternativen höher, werden aber nicht als prohibitiv eingeschätzt (siehe auch die allgemeine Ergänzung bei Block B).

---

<sup>18</sup> Alternativtechnologien umfassen alle auf dem Markt verfügbaren Technologien, die nicht SF<sub>6</sub> als Isolier- und oder Schaltmedium verwenden.

<sup>19</sup> Alternativgase umfassen alle gasförmigen Isolier- und Schaltmedien, die für den Einsatz in Schaltanlagen potentiell in Betracht kommen.

<sup>20</sup> Herstellern, die im AK SF<sub>6</sub> vertreten sind, haben sich nicht zum Themenkomplex „Kosten“ geäußert.

### 8.3.3 Block B: elektrische Betriebsmittel in der Hoch- und Höchstspannung - Stand der Technik von SF<sub>6</sub> und Alternativen

**Tabelle 28: Zusammenfassung des Stimmungsbildes zu einzelnen Thesen (Ergebnisse der Befragung)**

Quelle: Eigene Darstellung

| These  | ist korrekt   | ist korrekt mit Einschränkungen   | ist relevant  |
|--|---|---|---|
| Langfristig wird sich lediglich ein Alternativgas durchsetzen.   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mittlere Zustimmung,</li> <li>• Geringe Ablehnung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul> |
| Wir brauchen eine längere Pilotierungsphase, die mehrere Alternativen gleichwertig berücksichtigt. Diese Phase erfordert ein Engagement von Herstellern und Anwendern. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul> |

#### Monitoring der Emissionen und Reduktionspotentiale des SF<sub>6</sub>-Einsatzes

- *Anmerkung Teilnehmer / Diskussion:* Bei Anlagen in der Hochspannung zeigten sich in den letzten Jahren / Jahrzehnten hinsichtlich der Reduktion der Emissionsraten relevante Entwicklungen. Die Differenz der Leckrate zwischen Alt- und Neuanlagen in der Hochspannung ist deutlich höher als im Bereich der Mittelspannung. Dies liegt darin begründet, dass Mittelspannungsanlagen mit SF<sub>6</sub> zeitlich erst nach Hochspannungsanlagen eingeführt wurden und die Hersteller somit auf jahrelange Entwicklungserfahrung zurückgreifen konnten. Trotz dieser grundsätzlichen Einordnung hat sich im Rahmen der Diskussion gezeigt, dass es kein einheitliches Verständnis zur Definition von Altanlagen (Zeitbezug, Technologie, etc.) gibt. Weiterhin ermöglichen die aktuellen Monitoringprozesse nur wenige quantitative / belastbare Aussagen zu Leckageraten (insbesondere in der MS und bei „sonstigen Betriebsmitteln“) und zum Bestand der Altanlagen.
- In Anlehnung an die Diskussion in Block A wird weiterhin eine differenzierte Betrachtung weiterer Betriebsmittel, wie z. B. separate Schaltgeräte, Durchführungen oder Messwandler, als notwendig erachtet.
- *Ergebnis:* Reduktionspotentiale werden primär bei Altanlagen gesehen. Wobei es vorerst Klärungsbedarf hinsichtlich der Abgrenzung / Definition und dem validen Monitoring / der validen Erfassung des Anteils von Altanlagen gibt. Weiterhin zeigt sich weiterer Diskussionsbedarf hinsichtlich der „sonstigen Betriebsmittel“ (siehe Diskussion Block A).

### Technische Verfügbarkeit von Alternativen für den Einsatz von SF<sub>6</sub>

- *Anmerkung Teilnehmer / Diskussion:* Die Teilnehmer bringen zum Ausdruck, dass ein deutlicher Kenntnisgewinn erforderlich ist hinsichtlich einer Charakterisierung und einer vergleichenden Bewertung aller Alternativen (dies gilt *auch* für die Mittelspannung).
- Der Thematik Standardisierung kam in der Diskussion eine zentrale Bedeutung zu. Hier sehen die Teilnehmer weiteren Diskussionsbedarf. Wobei es verschiedene Positionen gab, in welchem Bereich eine Standardisierung erforderlich und was damit gemeint ist, z. B. vergleichbare technische Eigenschaften oder Anforderungen der Kunden oder ein einheitliches Gas.
- *Ergebnis:* Viele Teilnehmer zeigen keine klare / finale Positionierung hinsichtlich der verschiedenen alternativen Technologien / Gase. Hier zeigen sich divergierende Positionen zwischen Herstellern und Anwendern. Die Anwender haben den Wunsch nach direkt vergleichbaren Analysen und einer Lösung am Markt, die von allen Herstellern angeboten wird. Dementgegen sehen die Hersteller einen gewissen Wettbewerb als Vorteil, weil Alternativgase eben nicht 1:1 den ganzen Einsatzbereich von SF<sub>6</sub> ersetzen können.
- Weiterhin sollten Rahmenbedingungen für die Einführung verschiedener Optionen bestehen, da derzeit noch nicht absehbar ist, welche Alternative möglichst viele Anwendungsfelder komplett abdeckt.

### Kosten

- *Anmerkung Teilnehmer / Diskussion:* Grundsätzlich verfügen die Anwender über wenig Informationen zu möglichen Mehrkosten für Alternativen. Nach den Aussagen der Hersteller sind die Kosten für Anlagen mit Alternativen in der Hochspannung schwer abschätzbar.
- Einige Betreiber betonten, dass selbst moderate Mehrkosten nicht leichtfertig hingenommen werden können, selbst wenn sie im Bereich öffentlicher Versorgungsnetze durch die Regulierung anerkannt würden. Netzentgelte sind ein politisch sensibles Thema. Die Frage, welche Mehrkosten vertretbar sind, müsste deshalb gesondert und angemessen untersucht und diskutiert werden.
- *Ergebnis:* Die Frage, was vertretbare Kosten sind, ist für öffentliche Netze im Rahmen der Anreizregulierung und somit vom regulatorischen Rahmen zu klären (dies gilt *sowohl* für Mittel- *als auch* für Hochspannung).

### 8.3.4 Block C: Fragen der Marktakzeptanz, nicht-technische Barrieren für die Einführung von Alternativen

Tabelle 29: Zusammenfassung des Stimmungsbildes zu einzelnen Thesen (Ergebnisse der Befragung)

Quelle: Eigene Darstellung

| These  | ist korrekt   | ist korrekt mit Einschränkungen                       | ist relevant  |
|--|---|---|---|
| Es wird eine Vielfalt an möglichen Instrumenten gesehen. Es zeigt sich kein einheitliches Stimmungsbild bei Priorisierung der politischen Instrumente, aber eine Präferenz einzelner Teilnehmer für Förderinstrumente. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul> |
| Auch im regulierten Markt sind Mehrkosten bei der Investition und den Betriebskosten relevant.   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul> |
| Herausforderung ist nicht ein Alternativgas, sondern eine Vielzahl an Alternativgasen.   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Zustimmung,</li> <li>• Keine Ablehnung</li> </ul> |

#### Unsicherheit des künftigen regulativen und politischen Rahmens (Was für einen Ordnungsrahmen brauchen Sie als Hersteller / Anwender?)

- *Anmerkung Teilnehmer / Diskussion:* Grundsätzlich wurden verschiedene Gruppen von Instrumenten diskutiert. Marktanreizprogramme, unternehmensinterne Anreizprogramme oder Verbote / Steuern.
- Bei der Förderung von Alternativen zeigen sich Herausforderungen hinsichtlich der Finanzierung und der Frage, wo Fördermodelle ansetzen sollten. Zum Beispiel: Sollten nur neue Alternativen gefördert werden? Dies würde bereits bestehende Alternativen benachteiligen. Sollte der Fokus auf Forschungsprogramme (z. B. zur Umweltverträglichkeit) gelegt werden?
- Beispiele für unternehmensinterne Anreizprogramme bei Betreibern wurden für die Niederlande und die Schweiz angeführt (Kostenpönale für SF<sub>6</sub>, Umweltfonds). Diese basieren aber auf einer freiwilligen Einführung einzelner Unternehmen.
- Die Anreizwirkung einer Steuer auf SF<sub>6</sub> wird aufgrund des geringen Anteils an den Gesamtkosten der Anlagen kritisch gesehen.

- Bei der Diskussion um mögliche Verbote zeigten sich verschiedene Positionen. Einzelne Teilnehmer befürworteten Verbote, andere waren klar dagegen.
- *Ergebnis:* Einigkeit bestand darin, dass ein planungssicherer Ordnungsrahmen erforderlich ist. Hinsichtlich der konkreten Ausgestaltung des Rahmens zeigt sich keine klare Position oder Forderung seitens der Branchen. Ein Teil der Teilnehmer äußerte grundsätzlich eine Präferenz für Förderinstrumente.

#### **Investitionen und Betriebskosten (Anwenderseitig)**

- *Anmerkung Teilnehmer / Diskussion:* In der Diskussion hat sich eine differenzierte Betrachtung nach Spannungsebene und regulierter / nicht regulierter Markt gezeigt.
- In der Mittelspannung fallen gegenwärtig faktisch keine Betriebskosten an. In der Hochspannung fallen Betriebskosten an, wobei diese für die Alternativen von einem Teilnehmer als vergleichbar angenommen wurden.
- Im regulierten Bereich (Netze der öffentlichen Versorgung) sind vertretbare Mehrkosten bei der Investition vom regulatorischen Rahmen abhängig. Im nichtregulierten Bereich werden die Mehrkosten nicht unbedingt als prohibitiv erachtet. Allerdings werden in nichtregulierten Märkten preisrelevante Entscheidungen getroffen, die bei Preisunterschieden zum Ausschluss einer Alternative führen können.
- Im Laufe der Diskussion zeigte sich, dass die Anwender derzeit über wenige Informationen zu möglichen Mehrkosten für Alternativen verfügen.

#### **Komplexität der Prozesse und des Handlings von Alternativgasen**

- *Anmerkung Teilnehmer / Diskussion:* Heute setzen Anwender schon verschiedene Technologien von unterschiedlichen Herstellern ein. Damit einher gehen bereits aktuell Unterschiede beim Anlagenhandling (nicht beim Gashandling). Mehrere / verschiedene Gase würden aber die Vielfalt potenzieren.
- *Ergebnis:* Grundsätzlich wird der Einsatz einer begrenzten Anzahl verschiedener Gase als möglich erachtet, aber die Teilnehmer sehen Herausforderungen bei der Personalausbildung, Arbeitssicherheit sowie dem Vorhalten und der Lagerung von Gashandlinggeräten, Messinstrumenten und Ersatzteilen.

## 9 Instrumente und Maßnahmen zur SF<sub>6</sub>-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie

Ziel des Vorhabens ist es, Alternativen und konkrete Handlungsoptionen für den verminderten Einsatz oder den Ersatz von SF<sub>6</sub> in neu errichteten elektrischen Betriebsmitteln aufzuzeigen und einzuordnen. In den vorangegangenen Kapiteln haben wir technologische Möglichkeiten der Zielerreichung beschrieben. Um sich dem Ziel der Verminderung des Einsatzes weiter zu nähern, adressieren wir nachfolgend mögliche Instrumente und Maßnahmen der Akteure. Zwei Fragen stehen dabei im Fokus:

- Welche Instrumente<sup>21</sup> und Maßnahmen sind potentiell geeignet?
- Wie sind diese Handlungsoptionen vergleichend zu bewerten?

Die folgenden Abschnitte sollen einen systematischen Überblick über mögliche Handlungsoptionen<sup>22</sup> geben und sie bewerten.

Politische Instrumente sollen die Entscheidungen und Handlungen von gesellschaftlichen Akteuren beeinflussen und gegenüber der üblichen Praxis ändern. Voraussetzung für eine wirksame Gestaltung solcher Veränderungsprozesse ist, dass es gegenüber dem Status Quo Alternativen gibt und dass diese den Akteuren bekannt sind. Die vorangegangenen Kapitel widmen sich ausdrücklich diesem Aspekt: sie zeigen auf, für welche Betriebsmittel in welchen Einsatzbereichen und auf welchen Spannungsebenen technologische Alternativen zur Verwendung von SF<sub>6</sub> grundsätzlich existieren. Ebenso wird geklärt, für welche Anwendungsfälle derartige Alternativen gegenwärtig noch nicht verfügbar sind. In diesen Fällen ist der Einsatz politischer Instrumente, die auf einen Ersatz von SF<sub>6</sub> abzielen, kaum erfolgversprechend und damit wenig zweckmäßig.

Bei der folgenden Erörterung sehen wir die existierenden, allgemeinen Rahmenbedingungen als gegeben an. Bei der Diskussion werden wir herausstellen, welche Handlungsoptionen sich auf nationaler Ebene umsetzen lassen und welche ein europäisches oder internationales Vorgehen erfordern. Wichtig ist es auch, inwieweit Instrumente an bereits bestehende Regelungen anknüpfen. Umgekehrt ist es wichtig, bei neuen Handlungsoptionen eventuell widersprechende Regelungen zu identifizieren und deren Bedeutung abzuschätzen.

In der Forschung gibt es zahlreiche unterschiedliche Klassifikationen umweltpolitischer Instrumente. Gängig ist die Unterscheidung nach drei Klassen (vgl. z. B. [Jänicke et al., 2003; Jacob et al., 2016]): informative, wirtschaftliche und normative Instrumente. Diese Klassifikation wird im Folgenden auch in diesem Bericht angewendet:

---

<sup>21</sup> Politische Instrumente werden definiert als „konkrete Maßnahmen, die von den verschiedenen Trägern der Umweltpolitik [...] durchgeführt werden, um Abläufe entsprechend den umweltpolitischen Zielen zu beeinflussen.“ [Pollert et al., 2016] Im Schrifttum werden politische Maßnahmen und politische Instrumente häufig synonym verwendet. Diesem synonymen Gebrauch schließen wir uns in diesem Bericht an.

<sup>22</sup> In der Leistungsbeschreibung zum Projekt wurden diese Handlungsoptionen als Konzepte umschrieben.

- **Informative Instrumente** umfassen Informationskampagnen, Fachforen oder Konferenzen, die Vor- und Nachteile von SF<sub>6</sub> sowie Alternativen und die Grenzen des Einsatzes behandeln (z. B. Anwenderforum Darmstadt, CIGRE Arbeitsgruppen sowie Fachverbände).
- **Wirtschaftliche Instrumente** setzen wirtschaftliche Anreize, um Ziele zu erreichen. Dies können einerseits monetäre Belohnungen sein, die –z. B. in Form von Subventionen– SF<sub>6</sub>-Alternativen fördern. Andererseits können unerwünschte Verhaltensweisen aber auch mit Sanktionen belegt werden, um z. B. den Einsatz von SF<sub>6</sub> über Steuern oder Abgaben zu verteuern und damit Anreize zu setzen, Verhaltensweisen zu ändern.
- Bei **normativen Instrumenten** handelt es sich um Ge- oder Verbote, mit denen (umwelt-) politische Ziele erreicht werden sollen. Vereinfacht kann hier auch von Standards gesprochen werden. Die Grundzüge der derzeit geltenden freiwilligen Selbstverpflichtung können auch als normative Maßnahmen angesehen werden.

Parallel dazu ist es in diesem Sachverhalt wichtig, die Instrumente nach der **Zielgruppe**, auf die sie wirken, zu unterscheiden. Dies sind hierbei insbesondere:

- **Hersteller** elektrischer Betriebsmittel haben während des Produktdesigns und der Gestaltung des Produktportfolios entscheidenden Einfluss auf den künftigen Einsatz von SF<sub>6</sub>.
- **Anwender** beeinflussen die installierten Mengen maßgeblich durch die Kaufentscheidungen und die Wichtigkeit der dabei zugrundeliegenden Auswahlkriterien. Indirekt wirken sie durch ihr Einkaufsverhalten auf die Produktentwicklung und die Gestaltung der Fertigungsprozesse bei den Herstellern<sup>23</sup>. Im operativen Betrieb ist das Verhalten der Anwender entscheidend für die tatsächlich auftretenden Emissionen.

Die verschiedenen Instrumente müssen nicht zwangsweise von einem Träger der Umweltpolitik ergriffen und durchgesetzt werden. Auch freiwillige Maßnahmen (z. B. Branchenabkommen) der Hersteller und/oder Anwender haben wir nach der hier verwendeten Kategorisierung in die Analyse aufgenommen.

An dieser Stelle ist es angebracht, eine Einschränkung zu wiederholen, die für das gesamte Beratungsvorhaben gilt: Gegenstand der Untersuchungen sind ausschließlich Neuanlagen. Folgerichtig werden Instrumente, die geeignet sind, Emissionsminderungen im Bestand zu erwirken, nicht vertieft untersucht. Die Branchenvertreter haben in den verschiedenen Gesprächen allerdings hervorgehoben, dass es nennenswerte und leicht erschließbare Potentiale für die Reduktion von SF<sub>6</sub>-Emissionen im Bestand gibt, z. B. den Ersatz von Altanlagen. Bei der Erstellung und Bewertung der Konzepte wurden entsprechende Handlungsoptionen deshalb informativ mit aufgenommen (siehe Abschnitt 9.2.5). Vollständigkeit streben wir dabei nicht an.

---

<sup>23</sup> Hersteller beschreiben, dass Produkttests auf Kundenforderung noch mit SF<sub>6</sub> durchgeführt werden, obwohl aus Herstellersicht an dieser Stelle auch alternative Gase die Anforderungen erfüllen.

## 9.1 Systematisierung und Evaluation der betrachteten Instrumente und Maßnahmen

Hinsichtlich der oben genannten Kategorisierung wurden für den Kontext der SF<sub>6</sub>-Emissionen relevante Instrumente und Maßnahmen identifiziert. In der Diskussion wird folgenden Kriterien Aufmerksamkeit gewidmet:

- **Effektivität:** Ist die Maßnahme wirksam zur Minderung von SF<sub>6</sub>-Emissionen?
- **Effizienz:** Welche Maßnahme führt bei minimalen Kosten bzw. geringstem Aufwand zur höchsten SF<sub>6</sub>-Emissionsreduktion? (Eine Maßnahme, die nicht effektiv ist, kann demzufolge auch nicht effizient sein.)
- **Durchsetzbarkeit:** Können die Maßnahmen erfolgreich durchgesetzt und die Durchsetzung überprüft werden? Inwieweit werden Maßnahmen von den betroffenen Akteuren (Industrie) akzeptiert?
- **Verteilungswirkung:** Führt die Maßnahme zu einer sachgerechten Verteilung von Kosten und Nutzen unter den betroffenen Akteuren?

Tabelle 30 bietet eine Übersicht aller identifizierten Instrumente und Maßnahmen. Sie deutet auch eine grundsätzliche Einschätzung der Maßnahmen hinsichtlich der aufgeführten Kriterien an. Bei der Interpretation sind allerdings Sorgfalt und Vorsicht angebracht, da jede Bewertung sehr stark von der konkreten Ausgestaltung und dem erreichten Entwicklungsstand abhängig ist. Eine ausführlichere Beschreibung relevanter Maßnahmen einschließlich ihrer Vor- und Nachteile folgt in den anschließenden Abschnitten.

**Tabelle 30: Bewertung der identifizierten Maßnahmen hinsichtlich Effektivität, Effizienz, Durchsetzbarkeit und Verteilungswirkung. Für einige Instrumentengruppen ist eine abschließende Bewertung nicht möglich, da Effektivität, Effizienz, Durchsetzbarkeit und Verteilungswirkung stark von der jeweiligen Ausgestaltung des Instruments abhängen.**

Quelle: Eigene Darstellung

| Kategorie      | Maßnahme   | Bewertungskriterium |           |                  |                    |
|----------------|--|---------------------|-----------|------------------|--------------------|
|                |  | Effektivität        | Effizienz | Durchsetzbarkeit | Verteilungswirkung |
| Informativ     | Informationskampagnen, Fachforen, Konferenzen  | o                   | o         | +                | o                  |
|                | Produktlabel   | o                   | o         | +                | o                  |
|                | Monitoring   | +                   | o         | o                | +                  |
|                | Einführung eines SF <sub>6</sub> -Registers  | +                   | +         | o                | o                  |
| Wirtschaftlich | Subventionen und Förderung von Forschung und Pilotprojekten  | /                   |           | +                | +                  |
|                | Steuern, Umlagen, Pfand, Zölle   | /                   | +         | /                | +                  |
|                | Emissionshandel  | o ... +             | +         | +                | o ... +            |
| Normativ       | Gebote und Verbote (z. B. Reduktionsverpflichtung, Deckelung, Anreizregulierung, technologie-neutrale Ausschreibung)                                   | /                   |           |                  |                    |
|                | freiwillige Selbstverpflichtung  | o ... +             | o ... +   | +                | +                  |
| Legende        | - Negative Bewertung<br>o Neutrale Bewertung<br>+ Positive Bewertung<br>/ Abhängig von der jeweiligen Ausgestaltung; keine pauschale Bewertung möglich |                     |           |                  |                    |

Allen restriktiven Maßnahmen, die die Herstellung SF<sub>6</sub>-haltiger Anlagen betreffen, ist das Risiko eigen, dass Produktionskapazitäten abwandern. Die Wettbewerbsposition der Hersteller wird zumindest dann durch Restriktionen beeinträchtigt, wenn nur die Produktion in der EU und nicht auch Importe beschränkt würden. Dies betrifft sowohl wirtschaftliche als auch normative Maßnahmen. Derartige Ansätze wären natürlich weitgehend ineffektiv und von starken negativen Nebeneffekten gekennzeichnet. Bei restriktiven Maßnahmen ist also große Sorgfalt bei der Ausgestaltung der Instrumente und der Wahl der geografischen Reichweite angemessen

### 9.1.1 Informative Maßnahmen

Der Vorteil informativer Maßnahmen ist, dass sie eine sehr hohe Akzeptanz genießen. Durch den Austausch zu bewährten Praktiken zur SF<sub>6</sub>-Emissionsreduzierung in der Produktion und durch eine flächendeckende Aufklärung zu existierenden Möglichkeiten können weniger informierten Produzenten, Netzbetreibern und Stadtwerken Alternativen

erschlossen werden. Allerdings ist sowohl das Teilen als auch die Annahme und Verwendung der Information unverbindlich und kann nicht von den Akteuren vorausgesetzt werden. Schließlich erzielen informative Maßnahmen nur noch geringe Effekte in hoch entwickelten Märkten mit ohnehin gutem Informationsfluss. Da in Deutschland das Wissen hinsichtlich des aktuellen Stands zu Technologien und Prozessen zur Produktion und Einsatz von elektrischen Betriebsmitteln mit SF<sub>6</sub> sowie zu Alternativen gut verbreitet ist, müssen informative Maßnahmen als ergänzende Maßnahme gesehen werden. Sinnvolle Restpotentiale bestehen insbesondere unter folgenden Aspekten:

- **Weiterentwickeltes Monitoring im Rahmen der Selbstverpflichtung:** Im Zuge unserer Auswertung haben wir festgestellt, dass die Informationstiefe des Monitorings in einigen Punkten noch Verbesserungspotentiale birgt (Vgl. Abschnitt 9.2.4).
- **„Sonstige Betriebsmittel“:** Im Zuge der Auswertung wurde deutlich, dass das Thema der „sonstigen Betriebsmittel“ bisher in der Fachöffentlichkeit nicht im Verhältnis zur Relevanz der Emissionen diskutiert wurde. Dementsprechend ist es weder prominent auf der Forschungsagenda der Unternehmen noch in der politischen Debatte platziert. Darüber hinaus gibt es Differenzen und Überlappungen der Begrifflichkeiten und Definitionen im Monitoring sowohl im deutschen, vor allem aber auch im europäischen Kontext. In Deutschland umfasst die Gruppe im Herstellermonitoring (Herstellungsemissionen hier so genannter „anderer“ Betriebsmittel, erfasst von ZVEI) MS+HS-Wandler, GIL und Transformatoren. Im Anwendermonitoring (Bestandsemissionen, hier „sonstige“ Betriebsmittel genannt, erfasst von FNN) erfasst diese Gruppe hingegen nur HS-Wandler, GIL und Transformatoren. In anderen europäischen Ländern werden „sonstige Betriebsmittel“ nicht gesondert gemeldet. Hier empfehlen wir, die Definitionen sowohl auf deutscher als auch auf europäischer Ebene zu vereinheitlichen und die Diskussion zur Relevanz dieser Betriebsmittelgruppe auch nachhaltig öffentlich anzuregen. Dadurch können mögliche „Quick-Win“-Potentiale durch den Einsatz von Alternativen erzielt oder mittelfristig die Forschung zur emissionsärmeren Produktion „sonstiger Betriebsmittel“ intensiviert werden.
- **Weitere Begleitung und Monitoring neuer Produkte<sup>24</sup>:** Da das Feld von Alternativen zu SF<sub>6</sub> sich derzeit stetig weiterentwickelt und die Diskussion zu neuen Produkten nicht abgeschlossen ist, empfehlen wir eine weitere unabhängige Begleitung und öffentliche Einordnung der neuen Produkte (z. B. vergleichende life-cycle-assessments der Alternativen untereinander bzw. mit modernen SF<sub>6</sub> Schaltanlagen durch unabhängige Institutionen). Ein zielgerichteter Austausch insbesondere unter den Anwendern kann dazu führen, dass aktuelle Barrieren (z. B. technologiebeschränkende Ausschreibungen) reduziert werden und somit zumindest eine gleichgestellte Wettbewerbsposition für Anbieter alternativer Lösungen geschaffen wird. Regelmäßige Diskussionen in Fachkreisen und auf öffentlichen Workshops (z. B. Darmstadt) sind weiterhin förderlich, müssen aber nicht explizit unterstützt werden.
- **Produktlabel:** Auch eine Kennzeichnung der Umweltwirkung von Schaltanlagen und anderen elektrischen Betriebsmitteln über ein Produktlabel ist möglich. Umsetzungsmöglichkeiten sind einerseits das Hervorheben besonders umweltschonender Produkte durch Produktlabel (Beispiel: „*Blauer Engel*“), andererseits eine Warnung vor Produkten mit überdurchschnittlich hohen Emissionen (in Produktion und/oder Nutzung) und

---

<sup>24</sup> Dazu zählen chemische Ersatzstoffe für SF<sub>6</sub>, alternative nicht-chemische Lösungen und auch verbesserte SF<sub>6</sub>-Produkte die alle dem Ziele dienen, die SF<sub>6</sub>-Mengen zu reduzieren.

schließlich das Darstellen gradueller Unterschiede (Beispiel: „*Energieeffizienz von Gebäuden*“). Die Vergabe solcher Produktlabel müsste durch eine neutrale Instanz koordiniert werden.

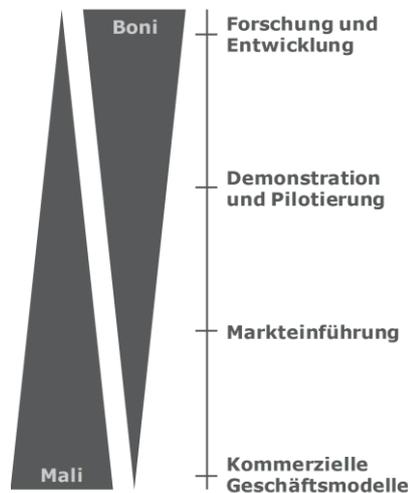
Wir sehen derzeit **keinen Handlungsbedarf von politischer Seite im Hinblick auf informative Maßnahmen**. Mögliche Potentiale können durch Branchenvertreter und Verbände aufgegriffen werden. Bei der Entscheidung zu einem Produktlabel müsste eine neutrale, autorisierte Stelle angewiesen werden.

### 9.1.2 Wirtschaftliche Maßnahmen

Wirtschaftliche Politikinstrumente setzen wirtschaftliche Anreize, um Ziele zu erreichen. Diese Anreize können darauf abzielen, externe, durch die Märkte nicht abgebildete gesellschaftliche Kosten angemessen widerzuspiegeln. Oft ist allerdings eine auch nur annähernde Bestimmung dieser Kosten schwierig. Die Festlegung der Anreize wird deshalb oft pragmatisch gewählt. Die erwartete Wirksamkeit ist dann das wesentliche Bemessungskriterium.

Die wirtschaftlichen Anreize können einerseits durch Belohnungen (Boni) erreicht werden, die – z. B. in Form von Subventionen – SF<sub>6</sub>-Alternativen fördern. Andererseits können unerwünschte Verhaltensweisen mit Sanktionen (Mali) belegt werden, um z. B. den Einsatz von SF<sub>6</sub> gegenüber bestehenden Alternativen zu verteuern.

Boni werden zweckmäßig in frühen Stadien der Produktentwicklung eingesetzt. Sie sind darauf ausgerichtet, gewünschte Entwicklungen zu stimulieren. Sie sind auch geeignet, die Phase der Markteinführung zu unterstützen und damit zu gewährleisten, dass verschiedene, konkurrierende Alternativen lang genug parallel getestet werden können. Nur so können die Akteure eine informierte, ausgewogene Entscheidung zu den favorisierten Entwicklungslinien treffen. Mali werden als Korrektiv in ausgereiften Märkten eingesetzt, um ungewünschte Gepflogenheiten zurückzudrängen. Sie richten sich auf die Auswirkungen von Produkten, die im Rahmen kommerzieller Geschäftsmodelle vertrieben werden (vgl. Abbildung 25).



**Abbildung 25: Intensität wirtschaftlicher Maßnahmen nach Produktzyklus**

Quelle: Eigene Darstellung

Boni genießen eine vergleichsweise hohe Akzeptanz. Sie verursachen allerdings in der Umsetzung allgemeines gesellschaftliche Kosten, bei denen der Ursache-Wirkung Zusammenhang weitgehend verloren geht. Dabei besteht – abhängig von der Ausgestaltung und der Marktnähe der unterstützten Produkte und Projekte – auch ein Risiko zur Marktverzerrung. In der Ausführung können einerseits Hersteller durch Forschungsförderung zu Alternativen, höheren Dichtigkeiten oder SF<sub>6</sub>-emissionsarmen Produktionsprozessen direkt unterstützt werden. Andererseits ist eine Ausschreibung und Förderung gemeinsamer Pilotprojekte und Demonstrationen als Unterstützung für Hersteller und Anwender denkbar. Für Netzbetreiber ist die Anerkennung von Mehrkosten für SF<sub>6</sub>-emissionsärmere Produkte bei der Markteinführung oder auch für kommerzielle Produkte in der Q-Komponente Netzentgeltregulierung denkbar. Hierbei sollte zuvor sicher definiert werden, welche Produkte diesen Status der Förderung erhalten und wie diese ausgeführt wird. Auch hier ist eine intensive Untersuchung der Umwelteffekte zur Auslegung der Förderung notwendig. Nicht die absolute Menge der Mehrkosten des Betriebsmittels, sondern das Umweltpotential sollten förderungsweisend sein.

Steuern, Umlagen, Pfand und Zölle sind mögliche Ausführungen von Abgaben bzw. Mali. Die folgende Auflistung beschreibt einige der möglichen Beispiele zur Ausgestaltung der Instrumente:

- **Steuern:** Beim Kauf von SF<sub>6</sub> oder SF<sub>6</sub>-haltigen Betriebsmitteln wird eine Steuer an den Bund abgeführt. Da die abgeführten Mittel in den Staatshaushalt einfließen, ist die Lenkungswirkung jenseits der Kostensteigerung für SF<sub>6</sub>-behaftete Produkte gering.
- **Umlagen:** Käufer von SF<sub>6</sub> und/oder SF<sub>6</sub>-Betriebsmitteln bezahlen eine Umlage, die direkt oder indirekt zur Förderung (z. B. Forschungsförderung, Marktanreizprogramm, Recyclinganlagen) von SF<sub>6</sub>-freien Anlagen oder emissionsreduzierenden Maßnahmen eingesetzt wird. Damit ergibt sich eine deutliche und vergleichsweise gut beeinflussbare Lenkungswirkung. Der Mittelfluss kommt nicht mit dem Staatshaushalt in Berührung.

- **Pfand:** Beim Kauf von SF<sub>6</sub> oder beim Kauf eines SF<sub>6</sub>-Betriebsmittels wird Pfand erhoben. Dieses wird anteilig auf das zurückgeführte SF<sub>6</sub> beim Produktlebensende zurückgezahlt. Damit wird keine unmittelbare Beeinflussung der SF<sub>6</sub> Anwendung vorgenommen. Es wird im Wesentlichen eine hohe Rückgewinnung- und ggf. Wiederverwendungsquote angereizt.
- **Zölle:** Abgaben auf die Einfuhr von SF<sub>6</sub>-Anlagen mit Emissionen über handelsüblicher Beschränkung. Damit wird die Konkurrenzposition von Produkten gegenüber Importen beeinflusst. Damit tragen Zölle nur in Kombination mit anderen Instrumenten zur Zielerreichung bei.

Wirtschaftliche Instrumente wirken aufgrund der Proportionalität zum SF<sub>6</sub>-Einsatz zumindest für diesen Aspekt diskriminierungsfrei. Nachteile liegen hingegen in der häufig mangelnden Akzeptanz der Zielgruppe und der komplizierten Umsetzung. Insbesondere die Kosten für die aufzusetzende Bürokratie, die notwendig ist, um die Abgaben zu verwalten und zu überprüfen, stellen ein Hemmnis dar. Darüber hinaus ist es komplex, die richtige Ausgestaltung in der optimalen Höhe zu finden. Ungünstig gewählte Abgabehöhen können unwirksam bleiben, weil sie gegenüber der Marktpreisentwicklung nichtig sind. Dies trifft insbesondere auf SF<sub>6</sub> zu, da die reinen Materialkosten für das Gas im Verhältnis zu den Gesamtkosten des Betriebsmittels sehr gering sind. Abgaben können auch marktverzerrend wirken und/oder negative gesamtwirtschaftliche Effekte erzielen. Tabelle 31 zeigt grundsätzliche Vor- und Nachteile verschiedener Abgaben.

**Tabelle 31: Mögliche Formen von Abgaben sowie deren Vor- und Nachteile**

Quelle: Eigene Darstellung

| Ausgestaltung des Instruments | Vorteile   | Nachteile  |
|-------------------------------|--|--|
| Steuern                       | Potentiell diskriminierungsfrei in Bezug auf SF <sub>6</sub> , vergleichsweise einfache Umsetzung  | Problem der Ausgestaltung und Festsetzung der Höhe, Bürokratie, begrenzte Lenkungswirkung  |
| Umlagen                       | Potentiell diskriminierungsfrei in Bezug auf SF <sub>6</sub> , Mittel können direkt für Verbesserungen genutzt werden, Verteilungswirkung kritisch | Problem der Ausgestaltung und Festsetzung der Höhe, Bürokratie, Schaffen neuer Institutionen notwendig   |
| Pfand                         | Verbesserungen und unerwartete Ereignisse während Gesamtlebensdauer können berücksichtigt werden   | Komplexe Bürokratie und langjährige Datenspeicherung aller in Deutschland verbauter Anlagen, lange Laufzeit birgt große Unsicherheiten (politischer Rahmen, Wertentwicklung des Pfandes) |
| Zölle                         | Schutz der europäischen Wirtschaft   | Ggf. wettbewerbsrechtliche Einschränkungen, kein Anreiz für europäische Unternehmen, Verfolgung kostenintensiv   |

Über die generellen Vor- und Nachteile verschiedener Abgaben hinaus, können bestimmte Entscheidungen hinsichtlich der Ausgestaltung Konsequenzen auf die Wirkung der Instrumente haben. Insbesondere die Wahl der Bemessungsgrundlage sowie die Wahl des Zahlungsverantwortlichen sind wichtig.

Die Berechnungsgrundlage kann jeweils die eingesetzte SF<sub>6</sub>-Menge, das verbaute GWP oder die Emissionen (SF<sub>6</sub> oder CO<sub>2</sub>-Äquivalente) über die Gesamtlebensdauer sein. Auch die Berechnung über einen Gewichtungsfaktor, in den verschiedene Kriterien einfließen, ist möglich. Eine Lösung über das GWP oder Gewichtungsfaktoren bietet den Vorteil, dass es der Industrie überlassen bleibt, geeignete Lösungen zu identifizieren und zu etablieren. Hingegen ist eine SF<sub>6</sub>-Metrik einfacher zu implementieren und zu überprüfen. Die Bewertungstabelle (Tabelle 32) zeigt Vor- und Nachteile verschiedener Bemessungsgrundlagen auf.

**Tabelle 32: Bewertung der Vor- und Nachteile der Ausgestaltung von Abgaben hinsichtlich ihrer Bemessungsgrundlage**  
**Quelle: Eigene Darstellung**

| Bemessungsgrundlage  | Vorteile   | Nachteile  |
|--|--|--|
| Absolutmenge SF <sub>6</sub>                                 | Vergleichsweise einfache/direkte Umsetzung möglich                   | Berücksichtigt nicht GWP von Alternativgasen, berücksichtigt keine weitere Umweltwirkung (z. B. Toxizität)   |
| GWP (CO <sub>2</sub> -e Fußabdruck der Anlage bzw. Gasmenge) | Auch andere Gase können berücksichtigt werden, Gestaltungsfreiheiten | Etwas komplexer in der Bewertung und Umsetzung, da Verhältnis SF <sub>6</sub> /GWP variiert  |
| Gewichtungsfaktor  | Kann auch andere Umweltwirkungen (z. B. Toxizität) berücksichtigen   | Einvernehmen zur Festlegung der Gewichtungsfaktoren schwer zu erreichen. Komplex in der Bewertung und Umsetzung, da viele Informationen notwendig und komplexe Berechnung; evtl. fehleranfällig (falsche Annahmen) |

An dieser Stelle lassen sich die Schwierigkeiten einer angemessenen Festsetzung des wirtschaftlichen Anreizes illustrieren. Nimmt man das GWP von SF<sub>6</sub> als Bemessungsgrundlage, liegt es nahe, den monetären Wert am CO<sub>2</sub> Preis zu orientieren. Damit ist zwar nicht gesagt, dass dieser die externen Kosten der Treibhausgasemissionen adäquat zum Ausdruck bringt. Er stellt aber ein offensichtlich breit anerkanntes Maß für die Klimaauswirkungen dar. Bei einer Schaltanlage für die Mittelspannung, die wenige kg SF<sub>6</sub> enthält, ergäben sich bei heutigen CO<sub>2</sub> Preisen auf das eingesetzte Schutzgas bezogene Mehrkosten für die Gesamtanlage von wenigen hundert Euro. Diese Kostensteigerung ist relevant. Ob sie für eine Veränderung der Marktanteile verschiedener Lösungen ausreichend ist, ist allerdings schwer vorherzusagen. Würde man die Emissionen als Maß anlegen, werden die Mehrkosten nichtig. Für eine gesicherte Lenkungswirkung müsste das GWP von SF<sub>6</sub> also deutlich höher bewertet werden, als das von CO<sub>2</sub>. Mit einem derartigen Ansatz kann man nicht mit einer breiten Akzeptanz der Industrie rechnen.

Hinsichtlich der Ausgestaltung nach Zahlungsverantwortlichem kann zwischen Herstellern und Anwendern gewählt werden. Einerseits kann der Hersteller belastet werden. Diese Verpflichtung müsste allerdings mindestens europaweit gelten. Die Abwanderung von Produktionskapazitäten ins Ausland ist allerdings naheliegend.

Die andere Option ist, den Anwender zu belasten. Angesichts des begrenzten Volumens der Ersatzmärkte in Deutschland wird eine solche Regelung eventuell jedoch keine Änderungen seitens der Hersteller bewirken und somit lediglich kostentreibend wirken. Diese Verpflichtung müsste somit auch mindestens europaweit gelten. Darüber hinaus ergibt

sich für die Hersteller daraus kein Anreiz, Emissionen im Produktionsprozess zu reduzieren. Eine Übersicht der Vor- und Nachteile der Ausgestaltung auf Grundlage der Zahlungsverantwortlichen zeigt Tabelle 33.

**Tabelle 33: Bewertung der Vor- und Nachteile der Ausgestaltung von Abgaben nach Zahlungsverantwortlichem**

Quelle: Eigene Darstellung

| Zahlungsverantwortlicher   | Vorteile   | Nachteile  |
|--|--|--|
| <b>Gashersteller bzw. -lieferant</b>   | Bisher kaum in der Pflicht   | Komplex in Umsetzung, geht unweigerlich weiter als elektrische Betriebsmittel  |
| <b>Hersteller</b><br>(Abgabe auf SF <sub>6</sub> -Menge von Einkauf bis Rückführung)                       | Berücksichtigt alle Emissionen über Gesamtlebensdauer, Freiheit der Ausgestaltung    | Komplex in Umsetzung, Abwanderung SF <sub>6</sub> -intensiver Produktion ins (nichteuropäische) Ausland möglich  |
| <b>Anwender</b><br>(Abgabe auf SF <sub>6</sub> -Menge gekaufter Produkte und/oder jährliche Emissionsrate) | Unterschiedliche Gewichtung von bestimmten Anwendungsfällen und Produkttypen möglich | Komplex in der Umsetzung, bei nationaler Umsetzung wahrscheinlich sehr ineffektiv; Kein Anreiz zur Reduktion von Emissionen im Produktionsprozess und Entsorgung |

### 9.1.3 Normative Maßnahmen

Bei normativen Instrumenten handelt es sich um Gebote (Verpflichtung zu einem Tun) oder Verbote (Verpflichtung zu einem Unterlassen). Vereinfacht kann hier auch von Verpflichtungen oder Standards gesprochen werden. Mit derartigen Standards soll ein (umwelt-) politisches Ziel erreicht werden. Die Regelungsadressaten (z. B. Hersteller und Anwender elektrischer Betriebsmittel) passen sich an diesen Standard an. Durch die Verhaltensanpassung ergibt sich eine Umweltwirkung im Sinne des Regulierungsziels. Zugleich entstehen den Herstellern und Anwendern aus ihrem veränderten Verhalten unter Umständen Anpassungskosten, die wiederum nach Akteur unterschiedlich sein können. Damit normative Instrumente wirken, müssen Abweichungen von der Norm oder das Nichterreichen der Ziele sanktioniert werden. Das wiederum setzt voraus, dass solche Abweichungen verlässlich zu erfassen sind.

Vorteile von normativen Maßnahmen sind ihre vergleichsweise einfache Implementierung. Es entstehen kaum direkte Kosten für den Staatshaushalt. Dabei versprechen sie bei erfolgreicher Umsetzung eine hohe Effektivität. Die Überwachung und Sanktionierung bringt allerdings unter Umständen einen hohen Organisations- und Verwaltungsaufwand mit entsprechenden Folgekosten mit sich. Dies gilt im betrachteten Fall insbesondere, weil Alternativen nur für bestimmte Spannungen und Anwendungen vorliegen, für andere wieder nicht. Infolgedessen müssen Ge- oder Verbote vielfältig spezifiziert und abgegrenzt sowie mit fortschreitender Entwicklung stetig angepasst werden. Schließlich führen strikte normative Maßnahmen aufgrund der hohen Anpassungskosten der Industrie zu Akzeptanzproblemen.

Verbote umfassen in Bezug auf SF<sub>6</sub> grundsätzliche Verbote zur Verwendung einerseits und restriktive Vorgaben zum Inverkehrbringen andererseits. Restriktive Vorgaben sind z. B. Reduktionsverpflichtungen (Deckelungen bzw. Phase-down) von SF<sub>6</sub> für ausgewählte Anwendungen. Tabelle 34 fasst wesentliche Vor- und Nachteile dieser Optionen zusammen.

Tabelle 34: Vor- und Nachteile verschiedener Ausgestaltungsmöglichkeiten von Verboten und restriktiven Vorgaben

Quelle: Eigene Darstellung

| Ausgestaltung des Instruments                       | Vorteile  | Nachteile  |
|---|---|--|
| <b>Inverkehrbringungsverbote von SF<sub>6</sub></b> | Starke direkte Umweltwirkung; Besonders effektiv in Kombination mit Nutzungsverboten  | Anpassungskosten der Wirtschaft sehr hoch;<br>Ggf. Alternativen noch nicht marktreif bzw. ausreichend getestet;<br>Möglichkeit der Abwanderung der Industrie |
| <b>Nutzungsverbote (Produktion)</b>                 | Starke direkte Umweltwirkung in emissionsintensiver Herstellungsphase; Besonders effektiv bei Kombination mit Inverkehrbringungsverboten  | Anpassungskosten der Wirtschaft sehr hoch;<br>Ggf. Alternativen noch nicht marktreif bzw. ausreichend getestet;<br>Möglichkeit der Abwanderung der Industrie |
| <b>Deckelung</b>                                    | Fokus auf Anpassungen, die schnell, effektiv und kosteneffizient durchzuführen sind   | Wahl des Deckels komplex/beliebig,<br>Potential der Reduktion nicht vollständig ausgeschöpft,<br>Komplex in der Umsetzung, Überprüfung, Sanktionierung       |
| <b>Phase-down</b>                                   | Anpassung der Industrie an sich wandelnde Anforderungen kontinuierlich möglich, bei geringer Akteursvielfalt ausreichend Zeit zum Testen von Alternativen, frühzeitige Signalgebung | Komplex in der Umsetzung, Überprüfung, Sanktionierung  |

Für die Ausgestaltung von Reduktionsverpflichtungen sind verschiedene Ansätze denkbar. Für eine Deckelung bzw. einen Phase-Down können Standards gesetzt werden hinsichtlich der erlaubten SF<sub>6</sub>-Menge, die während der Erzeugung bzw. der gesamten Lebensdauer bestimmter Betriebsmittelgruppen emittiert werden darf. Entsprechende Standards können einerseits statisch gesetzt werden. Hierbei wird ein Basisjahr definiert und festgelegt, um wieviel % die Emissionen bis zu einem bestimmten Zeitpunkt zu reduzieren sind. Möglich ist auch eine dynamisch gleitende Anpassung nach dem „top-runner“-Prinzip. Jüngstes Beispiel für ein Phase-down (schrittweise Reduktion) von fluorierten Treibhausgasen sind die EU-F-Gase-Verordnung von 2014 und die Beschlüsse von Kigali (2016) unter dem Montrealer Protokoll zu den HFKW. Nutzungsverbote sind insofern denkbar, dass auch die Produktion von elektrischen Betriebsmitteln, die SF<sub>6</sub> einsetzen, verboten oder gedeckelt wird.

Diese Regelungen betreffen aktiv lediglich die Hersteller. Anwender sind indirekt dennoch ebenso intensiv betroffen, da sie Alternativen testen und vergleichen müssen.

Bei der Ausgestaltung normativer Instrumente verdienen u. a. folgende Aspekte Aufmerksamkeit:

- **Bemessungsgrundlage: SF<sub>6</sub>-Menge, SF<sub>6</sub>-Emissionen, CO<sub>2</sub>-Äquivalente, Gewichtungsfaktor für verschiedene Kriterien.** Bei Deckelungen und Phase-downs kann für die jeweilig definierte Menge zur Reduktion bzw. Restmenge entweder die SF<sub>6</sub>-Menge oder CO<sub>2</sub>-Äquivalente als Bemessungsgrundlage gewählt werden. Jeweilige Vor- und Nachteile gelten wie oben (vgl. Tabelle 32). In vergleichbaren Prozessen (z. B. Phase-down von

HFKW) wurde oft aus systematischen Gründen der GWP als Bemessungsgrundlage gewählt. Eine Deckelung bzw. ein Phase-down auch im Zusammenhang mit SF<sub>6</sub> über GWP zu steuern, hätte den Vorteil der besseren Vergleichbarkeit und Analogiebildung mit anderen Reduktionsbemühungen.

- **Anwendungsbereiche: Spannungsebene und Ausnahme bestimmter Anwendungsfälle und Betriebsmittelkategorien.** Angesichts der unterschiedlichen Verfügbarkeit von Alternativen erfordern Verbote, Deckelungen und Phase-downs eine sorgfältige Abgrenzung der Anwendungsbereiche, in denen der Ersatz tatsächlich effizient möglich ist. In der Mittelspannung existieren verschiedene Technologien, die bereits mehrere Jahre auf dem Markt bestehen. In der Hoch- und Höchstspannung ist die Substitution schwieriger. Auch die Formulierung von Ausnahmen ist möglich: so erfordern bestimmte Anwendungsbereiche stark limitierte Abmessungen (z. B. Turmfuß einer offshore-Windkraftanlage, bereits bestehende Gebäude mit begrenzenden Platzansprüchen) und damit teilweise SF<sub>6</sub>-Lösungen. Mit fortschreitender Entwicklung müssen weitere Anwendungsbereiche sukzessive ergänzt werden.
- **Prozessebene: Produktion, Betrieb oder gesamter Lebenszyklus.** Emissionen während der Produktion haben teilweise fundamental andere Ursachen als die während des Betriebs. So werden – wegen der ausdrücklichen Forderung der Endkunden – im Herstellungsprozess Dichtigkeitsprüfungen mit SF<sub>6</sub> durchgeführt, obwohl ein Test mit alternativen Gasen (z. B. Helium) an dieser Stelle gleichwertige Ergebnisse liefert. Verbote derartiger Prozesse ermöglichen schnelle Reduktionen. Sie könnten auf eine Umkehrung der Beweislast gegründet werden. Beispiel: Ein Test mit SF<sub>6</sub> ist nur dann zulässig, wenn die Alternative nachweislich nicht die geforderte Zuverlässigkeit bietet.
- **Geografische Wirksamkeit: Europaweit oder Deutschland?** Nationale Initiativen sind in den globalisierten Märkten schwer durchsetzbar und zugleich wenig effektiv. Die Vereinbarung verbindlicher, internationaler Vereinbarungen hingegen beansprucht sehr lange Zeiträume, wenn sie überhaupt erreichbar ist. Ein koordiniertes europäisches Vorgehen erscheint vor diesem Hintergrund ein praktikabler Kompromiss. Als Vorteil kann gesehen werden, dass die Anbindung an den aktuellen regulatorischen Rahmen naheliegt: die F-Gase-Verordnung regelt auf europäischer Ebene das Inverkehrbringen und Nutzung von SF<sub>6</sub>. Neue normative Instrumente sollten idealerweise auch in dieser Regulierung verankert sein.

### Freiwillige Selbstverpflichtung

Freiwillige Selbstverpflichtungen können als eine spezielle Ausführung von Ge- oder Verboten betrachtet werden. In deren Rahmen setzen sich Branchen und Industriezweige selbst verbindliche Ziele. Geeignete Maßnahmen und Pfade zur Zielerreichung werden branchenintern vereinbart. Selbstverpflichtungen kommen häufig zustande, um angekündigten gesetzlichen Regelungen zuvor zu kommen oder diese überflüssig zu machen. Vor diesem Hintergrund ist die Interpretation als normative Maßnahme plausibel.

In Deutschland (aber auch in anderen europäischen Mitgliedsländern sowie der Schweiz) sind bereits freiwillige Selbstverpflichtungen in Kraft (vgl. Kapitel 7.2 des Berichtabschnitts zum technischen Sachstand). Sie umfassen einerseits Reduktionsverpflichtungen, andererseits institutionelle Instrumente wie z. B. das Monitoring der SF<sub>6</sub>-Emissionen zum Messen der Erfolge (siehe auch Abschnitt 7.2.1). Auch Verhaltenskodizes (z. B. die Pflicht zu technologie-neutralen, funktional ausgerichteten Ausschreibungen) können Eingang in freiwillige Selbstverpflichtungen finden.

Seit ihrer Einführung konnten auf nationaler Ebene erhebliche Reduktionen der SF<sub>6</sub>-Emissionen erreicht werden. Eine abgestimmte Ausweitung entsprechender Selbstverpflichtungen auf europäische Ebene versprache eine deutliche Steigerung der Effektivität und Effizienz. In den Diskussionen haben viele Industrievertreter die Ausweitung von Selbstverpflichtungen auf alle Mitgliedsstaaten ausdrücklich befürwortet.

Freiwilligen Selbstverpflichtungen liegt eine Konsensentscheidung zugrunde. Dies hat verschiedene Vorteile. Die Akzeptanz der vereinbarten Ziele unter den Industrievertretern ist sehr hoch. Maßnahmen innerhalb der Branchen können zielgerichtet und pragmatisch umgesetzt werden, wie dies mit rechtlichen Mitteln kaum leistbar wäre. Die Effektivität wurde durch erfolgreiche Emissionsreduktionen in Deutschland und der Schweiz nachgewiesen. Auch ist eine freiwillige Selbstverpflichtung im Vergleich zu Verpflichtungen, die durch den Staat durchgesetzt werden müssen, kostengünstig. Eine Begrenzung freiwilliger Selbstverpflichtungen ist, dass ihre Wirksamkeit ab einem bestimmten Niveau der Zielerreichung abnimmt. Mit zunehmenden Anforderungen vermindert sich die Bereitschaft der Beteiligten, freiwillig weiter zu gehen. Deshalb sollte regelmäßig überprüft werden, ob eine freiwillige Selbstverpflichtung noch zielführend ist oder ob durch die Politik zusätzliche Instrumente auferlegt werden müssen, wenn weitere Fortschritte erreicht werden sollen. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die Zugänglichkeit, Transparenz und Überprüfbarkeit der durch die Branchen bereitgestellten, aggregierten Informationen und Daten nicht in jedem Falle befriedigend ist. Weitergehende, unabhängige Analysen werden dadurch erschwert. Daran ist aber angesichts der bestehenden Unternehmensinteressen und der wirtschaftlich sensiblen Daten nur bedingt etwas zu ändern.

Angesichts der erreichten Fortschritte und der etablierten Prozesse messen wir der freiwilligen Selbstverpflichtung der Industrie in Deutschland eine hohe Bedeutung bei. Eine zielgerichtete Weiterentwicklung dieses Instruments verspricht noch nennenswerte Fortschritte. Entsprechende Maßnahmen werden in Abschnitt 9.2.3 dezidiert erläutert.

## 9.2 Handlungsfelder zur Reduktion des Einsatzes und der Emissionen von SF<sub>6</sub>

Die vergangenen Abschnitte zeigen ein breites Spektrum an möglichen Maßnahmen zur Reduktion des Einsatzes und der Emissionen von SF<sub>6</sub>. Zugleich zeigen sie die Spannweite möglicher Ausgestaltungen und wie entscheidend diese für die Effektivität, Effizienz und Umsetzbarkeit von Maßnahmen sind.

Aus der vergleichenden Betrachtung der Instrumente und Maßnahmen sowie aus Gesprächen mit Entscheidungsträgern aus Politik und Wirtschaft haben wir fünf Haupthandlungsfelder<sup>25</sup> abgeleitet. Diese erwiesen sich in den Gesprächen als besonders relevant. Hilfreich waren dafür insbesondere das politische Fachtreffen sowie das 2. Fachgespräch mit Herstellern und Anwendern im September 2017 in Brüssel.

- I. Ausschöpfen bestehender Reduktionspotentiale
- II. Schaffung eines verlässlichen Rahmens für die Industrie
- III. Weiterentwicklung der freiwilligen Selbstverpflichtung
- IV. Weiterentwicklung des SF<sub>6</sub>-Monitorings
- V. Abwägung des Austauschs von Altanlagen

---

<sup>25</sup> In der Terminologie der ursprünglichen Leistungsbeschreibung wurden sie als Konzepte umschrieben.

Die mit diesen Themen verbundenen Fragen müssen adressiert werden, um darauf aufbauende informierte Entscheidungen treffen zu können. Deutlich wurde, dass kein einzelner „richtiger“ Weg aufgezeigt werden kann. Vielmehr ist das Abwägen von Vor- und Nachteilen der Kern der politischen Entscheidungsfindung. Die Handlungsoptionen sollten nicht isoliert voneinander betrachtet werden. Sie sind miteinander verflochten und bauen aufeinander auf. Beispielsweise sehen wir ein verfeinertes Monitoring als Voraussetzung für weitergehende, effiziente Maßnahmen zur Emissionsreduktion.

### 9.2.1 Ausschöpfen bestehender Reduktionspotentiale

Seit der ersten Implementierung der F-Gase-Verordnung im Jahr 2006 arbeitet die Industrie daran, ihre SF<sub>6</sub>-Emissionen sowohl in den Produktionsprozessen als auch in der Nutzungsphase in Mittel- und Hochspannung zu reduzieren. Die Emissionsreduktion konnte insbesondere durch verbesserte Herstellungsverfahren und -technologien, steigendes Bewusstsein, Ausbildung von Arbeitskräften und Kreislaufwirtschaften erreicht werden. Weitere Reduktionspotentiale sind vorhanden. Sie sind allerdings schwerer zu erschließen als in der Vergangenheit und weiterhin stark abhängig von Spannung, Anwendung / Betriebsmittel und Einsatzbereich. Kapitel 5.3 zeigt, dass derzeit die größten Emissionsquellen in der Herstellung „sonstiger Betriebsmittel“ sowie in der Hochspannung (Einsatz und Herstellung) liegen. Auf dem Markt erhältliche SF<sub>6</sub>-freie Alternativen sind dagegen insbesondere in der Mittelspannung zu finden. Für „sonstige Betriebsmittel“ sind kaum SF<sub>6</sub>-freie Technologien etabliert. Die Reduktion über verbesserte Prozesse muss in Zukunft detaillierter untersucht werden.

Bei ambitionierten Bemühungen ist auch künftig eine nennenswerte absolute Reduktion der SF<sub>6</sub>-Emissionen trotz steigender Anzahl der installierten Anlagen möglich. Angesichts des erreichten Niveaus bei Schaltanlagen in der Mittelspannung liegen die verbleibenden Reduktionspotentiale allerdings vorrangig bei anderen Anwendungen und Spannungen. Die größten Emittenten sowie die am einfachsten zu implementierenden Lösungen müssen dazu genauer identifiziert werden. Tabelle 35 fasst die spezifischen Herausforderungen sowie Potentiale je Gerätetyp, Spannungsniveau und Nutzungsphase zusammen.

Tabelle 35: Reduktionspotential der eingesetzten SF<sub>6</sub>-Menge sowie SF<sub>6</sub>-Emissionen je Gerätetyp, Spannungsniveau und Nutzungsphase

Quelle: Eigene Darstellung

| Einsatzbereich    | Mögliche SF <sub>6</sub> -Einsparung nach Gerätetyp                       |   |   |
|-------------------|---|---|---|
|                   | Schaltanlagen in der Mittelspannung                                       | Schaltanlagen in der Hochspannung   | „Sonstige Betriebsmittel“                       |
| <b>Produktion</b> | Gering, nicht prioritär, wenn weiterhin SF <sub>6</sub> zum Einsatz kommt | Relevant, herausfordernd, wenn SF <sub>6</sub> weiterhin zum Einsatz kommt, wenige Alternativen   | Wichtig / detaillierte Untersuchungen notwendig |
| <b>Einsatz</b>    | Gering, nicht prioritär, wenn weiterhin SF <sub>6</sub> zum Einsatz kommt | Relevant, herausfordernd, wenn SF <sub>6</sub> weiterhin zum Einsatz kommt, wenige Alternativen   | Wichtig / detaillierte Untersuchungen notwendig |
| <b>Entsorgung</b> | Betrachtung notwendig   | Bemühungen, um Emissionen gering zu halten, sind bereits sehr hoch, bei Verwendung von SF <sub>6</sub> wenig Möglichkeiten für Verbesserungen | Wichtig / detaillierte Untersuchungen notwendig |

Für bestimmte Einsatzbereiche bestehen Besonderheiten, die bei der Inventarisierung von Reduktionsmöglichkeiten berücksichtigt werden sollten. Die wichtigsten Punkte werden folgend erläutert:

- **Hochspannung:** In der Hochspannung konnten die Emissionen im Betrieb in den letzten Jahren nur leicht reduziert werden. Neue Anlagen haben bereits ein sehr hohes Dichtheitsniveau. Die größten Potentiale zur Emissionsreduktion bestehen bei Altanlagen. Die erste und zweite Generation der verbauten Schaltanlagen enthalten wesentlich höhere Mengen an SF<sub>6</sub> und weisen im Vergleich zu den neuesten Technologien deutlich höhere Emissionsraten auf. Daher könnte der Austausch von Hochspannungsschaltanlagen der ersten und zweiten Generation zu erheblichen Reduzierungen führen (siehe auch Handlungsoption 5 in Abschnitt 9.2.5);
- **Mittelspannung:** Die neu verbauten MS-Schaltanlagen haben bereits sehr niedrige Emissionsraten (<0,1 % p.a.). Diese Leckraten sind als technische Grenzwerte anzusehen. Daher sind weitere Reduktionspotentiale beim weiteren Einsatz von SF<sub>6</sub> in MS-Anlagen gering. Sie sind lediglich erschließbar, wenn künftig SF<sub>6</sub>-freie Lösungen für MS-Schaltanlagen eingesetzt werden. Solche Lösungen sind seit Jahrzehnten für eine Reihe von Anwendungen verfügbar. Auch in der MS stellt darüber hinaus der Austausch alter Schaltgeräte eine Möglichkeit der Reduktion der absoluten SF<sub>6</sub>-Emissionen dar. Wie in der HS erhöhen sich die Emissionen, wenn intakte Anlagen über die spezifizierte Nutzungsdauer hinaus verwendet werden. Das Reduktionspotential ist aufgrund des Modellansatzes im Rahmen des aktuellen Monitorings nicht verlässlich quantifizierbar.
- **„Sonstige elektrische Betriebsmittel“:** Aufgrund der vergleichsweise sehr hohen absoluten Emissionen bei der Herstellung von „sonstigen elektrischen Betriebsmitteln“ (z. B. Kondensatoren, Messtransformatoren) sollten die Anstrengungen zur Verringerung der Emissionen verstärkt werden. Der Ursprung der Emissionen und die technische Machbarkeit zur Reduzierung der Emissionen müssen bewertet werden. Die bestehende

Berichterstattung erlaubt es nicht, die genauen Quellen dieser Emissionen zu identifizieren und lässt darüber hinaus keinen Rückschluss auf die Art des Betriebsmittels zu.

- **Produktionsprozesse Hochspannung:** Der Produktionsprozess von Hochspannungsschaltanlagen wurde bereits stark optimiert. Möglichkeiten zur weiteren Reduktion durch Verbesserung der Betriebsprozesse müssen bewertet werden. Als eine Möglichkeit bleibt der Einsatz alternativer Gase bei der Prüfung im Rahmen der Fertigung.
- **Außerbetriebnahme und Entsorgung:** Die ersten großen Chargen von SF<sub>6</sub>-haltigen Betriebsmitteln erreichen zeitnah das Ende der technischen Lebensdauer. Daher werden Stilllegung und Entsorgung in naher Zukunft für die Emissionskontrolle relevant werden. Es bestehen allgemeine Verpflichtungen für die ordnungsgemäße Rückgewinnung von Gasen am Ende der Lebensdauer. Diese sind auch Teil der freiwilligen Selbstverpflichtungen der Industrie. Angesichts der stark verstreuten Betriebsmittel und der nicht registrierten Zuordnung von Betriebsmitteln und Akteuren kann jedoch nicht garantiert werden, dass die Prozesse von allen Beteiligten mit der erforderlichen Sorgfalt durchgeführt werden. Hier könnte die Organisation eines freiwilligen Rücknahmesystems eine Option sein.

Für weitere substantielle Emissionsreduktionen wird der weitgehende Wechsel zu alternativen Technologien / Gasen letztlich eine wesentliche Voraussetzung sein. Für einen solchen Wechsel müssen die Herausforderungen für Zuverlässigkeit, Sicherheit und Umweltverträglichkeit der neuen Lösungen sorgfältig geprüft und umfassend bewertet werden. Diese andauernde Anstrengung der Hersteller und Anwender kann nur erwartet werden, wenn der Kurs klar vorgegeben ist (siehe Abschnitt 9.2.2 und 9.2.3).

### 9.2.2 Schaffung eines verlässlichen Rahmens für die Industrie

Die weitere Reduktion des SF<sub>6</sub>-Einsatzes bringt für die Industrie Anpassungskosten und vielfältige Unsicherheiten mit sich. In den Gesprächen haben die Vertreter der Hersteller und Anwender elektrischer Betriebsmittel betont, dass ein verlässlicher regulatorischer Rahmen Voraussetzung für nachhaltige Anstrengungen ist. Die Industrie braucht Sicherheit. Übereinstimmend damit haben die Erfahrungen mit der freiwilligen Selbstverpflichtung in Deutschland und anderen Ländern (z. B. Schweiz) gezeigt, dass ein für alle Beteiligten gültiger, langfristig ausgelegter Rahmen erhebliche Fortschritte ermöglicht.

In diesem Zusammenhang ist nicht nur eine verbindliche Zielrichtung für die weitere Minimierung des SF<sub>6</sub>-Einsatzes wichtig. Für die Industrie ist eine konsistente Bewertung der Eigenschaften der Alternativen in ihrem Zusammenhang mindestens ebenso wichtig. Hier gibt es noch viele Unklarheiten. Darüber hat insbesondere die regulierte Netzwirtschaft einen klaren Bedarf an verlässlichen Aussagen, wie die Mehrkosten, die mit den Alternativen verbunden sind, in der Anreizregulierung behandelt werden. Eine klare Aussage des Wirtschaftsministeriums und der BNetzA würde wesentliche Einwände mindern. Vorzugsweise erfolgen diese Klärungen einheitlich auf europäischer Ebene.

Auch die Wahl des Instrumentariums ist für die Industrie wichtig. Es macht für die Anstrengungen der Hersteller einen Unterschied, ob durch die Regierungen wirtschaftliche oder normative Instrumente eingesetzt werden, oder ob weiterhin die freiwillige Selbstverpflichtung der Industrie die entscheidende Grundlage für weitere Fortschritte bleibt (siehe nächsten Punkt).

### 9.2.3 Weiterentwicklung der freiwilligen Selbstverpflichtung

Aus den stark abweichenden Herausforderungen und Reduktionspotentialen je Anwendungsfall ergibt sich die Frage, wie diese Potentiale am besten zu erschließen sind und welche Instrumente am geeignetsten erscheinen. Zwei grundsätzliche Wege bestehen:

- **Selektiv:** Einerseits können selektive Maßnahmen spezifisch für bestimmte Anwendungen entwickelt werden. Es könnten je nach Verfügbarkeit von Alternativen geeignete Instrumente gewählt werden. So sind Verbote für verschiedene Anwendungen in der Mittelspannung durchaus umsetzbar. Ein Fokus auf die relevantesten Anwendungen wäre politisch steuerbar. Allerdings sind selbst in der Mittelspannung die Anwendungen vielfältig und einige erfordern zumindest vorläufig spezifische Ausnahmen. Dies kann zu einer komplexen, fragmentierten Regulierung führen, die häufig angepasst werden muss.
- **Integriert:** Die zweite Möglichkeit besteht darin, der Branche als Ganzes über politische Vorgaben weitere Ziele aufzuerlegen bzw. diese im Rahmen einer weiterentwickelten Selbstverpflichtung zu vereinbaren. Ein derartig integrierter Ansatz verspricht, die Vielfalt der Regelungen und deren Komplexitäten teils zu umgehen. Ausgewählte Anwendungen mit signifikantem und erschließbarem SF<sub>6</sub>-Reduktionspotential können durch die Industrie unverzüglich und effektiv angegangen werden, ohne dass spezielle regulative Maßnahmen getroffen werden müssen. Technisch schwierigere Anwendungen mit signifikantem SF<sub>6</sub>-Reduktionspotential (z. B. Hochspannungsausrüstung) werden über einen branchenübergreifend, integrierten Ansatz hingegen voraussichtlich verzögert angegangen werden.

Der selektive Ansatz bedarf intensiver Eingriffe durch den Gesetzgeber und ähnlicher Regelungsautoritäten. Für einen branchenübergreifend, integrierten Ansatz bieten sich verschiedene, ggf. auch gemischte Ausgestaltungsmöglichkeiten. Der politischen Ebene obliegt die Vorgabe der Zielstellungen. Dabei kann sie auch geeignete Instrumente nutzen. Denkbar sind normative Maßnahmen wie Reduktionsverpflichtungen und Phase-downs über Quotensysteme, z. B. Regelungen, ähnlich den HFKW-Quoten in der EU F-Gase-Verordnung. Aber auch wirtschaftliche Modelle wie der Emissionshandel sind möglich.

Die Umsetzung der Branchen-Zielstellungen kann anschließend der Industrie überlassen werden, z. B. im Rahmen einer fortgeschriebenen freiwilligen Selbstverpflichtung. Infolgedessen werden verschiedene Technologiebereiche unterschiedlich intensiv adressiert werden. Natürlich sind das Niveau und die Verbindlichkeit der vorgegebenen Ziele entscheidend für den Erfolg dieses Ansatzes. Aber auch neben den konkreten Emissionszielstellungen sehen wir Aspekte, die bei der Weiterentwicklung einer freiwilligen Selbstverpflichtung Aufmerksamkeit verdienen.

- **Die Anstrengung zur Erreichung ehrgeiziger Ziele muss fair verteilt werden:** Die erforderlichen Anstrengungen zur weiteren Emissionsminderung steigen naturgemäß mit sinkenden Emissionen. Kritiker der Selbstverpflichtung führen deshalb an, dass ab einem bestimmten Emissions-, d. h. Kostenniveau freiwillige Anstrengungen nicht für weitere Fortschritte ausreichen werden. Das torpediert insbesondere andauernde Bemühungen einzelner Spitzenreiter, die SF<sub>6</sub>-freie/arme Technologien weiter voran bringen wollen, ohne dass bereits eine kommerzielle Basis geschaffen wurde. Ein klarer Kodex und darauf aufbauender Mechanismus für die Lastenverteilung innerhalb der Branche kann die Sicherheit auch in einem wettbewerblichen Umfeld stärken.

- **„Sonstige Betriebsmittel“ müssen verstärkt adressiert werden:** Im Ergebnis der Analysen wurde klar, dass der Bereich „sonstige Betriebsmittel“ eine Schlüsselrolle bei der weiteren Minderung des Einsatzes und der Emissionen von SF<sub>6</sub> spielt. Hier sind eine Vertiefung des Kenntnisstandes und die Erarbeitung einer beherrschten Strategie durch die Branche gefragt. Dieser Aspekt betrifft in starkem Maße einen engen Kreis an Herstellern. Auch deshalb ist die brancheninterne Verteilung der Lasten wesentlich für die anstehenden Herausforderungen.
- **Emissionen, nicht Emissionsraten:** Die Entwicklung der Emissionen im Bereich der Mittelspannungsanlagen zeigt, dass aus klimapolitischer Sicht Erfolge bei der Senkung der Emissionsraten nicht ausreichen. Angesichts der immens gestiegenen Anzahl der Anlagen ergibt sich in jüngerer Vergangenheit trotz der auf das technische Minimum abgesenkten Emissionsraten wieder ein Anstieg der absoluten Emissionen. Vor diesem Hintergrund ist es ein rationales Erfordernis, die Zielstellungen an absoluten Emissionen auszurichten. Langfristig wird sich daraus ein Impuls für die Einführung von Alternativen ergeben.
- **Substitutionsfahrplan:** Idealerweise erarbeitet die Branche einen Fahrplan für die weitere Minderung des SF<sub>6</sub>-Einsatzes und der Emissionen sowie der Einführung von Alternativen. Dabei werden zweckmäßigerweise auch die Zwischenschritte auf dem Weg zur Zielerreichung quantifiziert. Auf diese Weise wird die Evaluierung des Fortschritts unterstützt und die Möglichkeit zur gezielten Nachsteuerung bei auftretenden Schwierigkeiten geschaffen, ohne dass die politische Ebene unmittelbar aktiv werden muss. Bei allen erforderlichen Vorbehalten würde ein derartiger Fahrplan den Beteiligten ein zusätzliches Maß an Sicherheit verschaffen.
- **(Selbst-) Verpflichtung der Anwender zu funktionalen, technologieneutralen Ausschreibungen:** In der gegenwärtigen Praxis werden in Ausschreibungsunterlagen zu neuen Betriebsmitteln aus „Gewohnheit“ regelmäßig auf SF<sub>6</sub>-Anlagen benannt. Eine Verpflichtung, diese Eingrenzung in Ausschreibungen grundsätzlich zu vermeiden und zukünftig nach Funktion auszuschreiben, verschafft Anbietern alternativer Lösungen zumindest eine gleichgestellte Wettbewerbsposition und erhöht die Variantenvielfalt. Ob bei der Zuschlagserteilung auch eine gleichberechtigte Wertung der Angebote erfolgt, lässt sich mit diesem Gebot natürlich nicht sicherstellen.
- **Außerbetriebnahme und Entsorgung:** Die sachgerechte Rückführung, Wiederverwendung, Entsorgung und Vernichtung von SF<sub>6</sub> aus ausgedienten Betriebsmitteln ist grundsätzlich geregelt. Eine detailliertere Vereinbarung der Prozesse und ihrer Überwachung scheint angesichts der mittelfristig anstehenden Mengen angebracht (siehe hierzu auch den folgenden Abschnitt 9.2.4). Der Umgang mit Betriebsmitteln, aus denen das Gas bislang nicht mit vertretbarem Aufwand zurückgewonnen werden kann (z. B. Messwandler), verdient an dieser Stelle besondere Aufmerksamkeit.
- **Europäische Abstimmung:** Eine Ausweitung von Selbstverpflichtungen auf ganz Europa würde die Wirksamkeit der Maßnahme nachdrücklich positiv beeinflussen. Auch verbindliche Zielvorgaben durch die Politik werden zweckmäßig auf europäischer Ebene verfolgt. Eine inkrementelle Vereinheitlichung zu konsensfähigen Themen ist angesichts der andernfalls drohenden Verschleppung zu empfehlen.
- **Ergänzende politische Maßnahmen:** Ergänzend zu einer Selbstverpflichtung der Industrie können auf politischer Ebene spezifische Instrumente implementiert werden. Mit ihnen lassen sich „low hanging fruits“ erschließen, die andernfalls erst mit Verzug erreicht werden können. Denkbar sind dezidierte Sanktionen für mangelhafte Gas-Rückgewinnung und Recycling. Diese können sicherstellen, dass das bereits obligatorische Recycling mit BVT (= beste verfügbare Technologien) effektiv durchgeführt wird. Wirksame Sanktionen müssen die Entsorgungskosten deutlich überschreiten.

Darüber hinaus können für spezifische Bereiche auch Anreizsysteme sinnvoll sein. Diese müssen jedoch aufgrund der Gefahr für Marktverzerrung und Mitnahmeeffekte maßhaltig angewendet werden.

- Unterstützen des Austauschs von undichter Ausrüstung.
- Unterstützung der Markteinführung von Alternativen durch Abfederung zusätzlicher Kosten und Risiken.

Sollte eine Selbstverpflichtung die Erwartungen nicht erfüllen, müssen tiefer wirkende politische Instrumente erwogen werden. Umriss eines Konzepts zur Gestaltung, geografischen Reichweite und Zielrichtung eines derartigen „*Rückfallszenarios*“ würden Sicherheit schaffen, selbst wenn dieses Szenario für keinen der Beteiligten wünschenswert ist. Die Verfügbarkeit eines derartigen Konzeptes erhöht zudem die politische Glaubwürdigkeit und Schlagkraft. Sie ist Teil der Sicherheit, die die Industrie fordert (Abschnitt 9.2.2).

#### 9.2.4 Weiterentwicklung des SF<sub>6</sub>-Monitorings

Ein funktionierendes SF<sub>6</sub>-Monitoring ist die Voraussetzung für effiziente und effektive Maßnahmen. Wenn effektive Maßnahmen durch die Politik oder die Industrie etabliert und durchgesetzt werden sollen, muss bekannt sein, wo die Emissionen tatsächlich auftreten. Aktuelle Methoden und Aggregationsebenen des SF<sub>6</sub>-Monitorings im Rahmen der Branchenverpflichtung unterstützen eine unabhängige Bewertung und einen Vergleich der erreichten Leistungsniveaus sowie die Identifikation konkreter Emissionsquellen nur unzureichend. Wichtige Indikatoren, um gute Entscheidungen zu treffen, bleiben in der kumulativen Berichterstattung verborgen. Die Notwendigkeit eines robusten, transparenten und detaillierten SF<sub>6</sub>- Monitorings wurde während der Gespräche mit Stakeholdern wiederholt betont. Die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der weiteren Verbesserung des Monitorings sind jedoch vielfältig. Zudem gibt es unterschiedliche Auffassungen zu den geeigneten Optionen. Im Folgenden diskutieren wir die Vor- und Nachteile bzw. Herausforderungen bei der Verbesserung von drei Bereichen des Monitorings:

- **Emissionsüberwachung und Berichterstattung** (bottom-up);
- ein **SF<sub>6</sub>-Register** in Form einer Datenbank zur ständigen Überwachung der Anzahl, des Standorts, des Alters und möglicherweise der Emissionsrate individueller SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen
- **Atmosphärische Emissionsmessung** (top-down).

##### **Emissionsüberwachung und Berichterstattung**

Die derzeitige Ermittlung des SF<sub>6</sub>-Bestandes in Deutschland erfolgt durch eine Bestandsfortschreibung auf Basis von Herstellermeldungen. Die Bestimmung der Emissionen erfolgt durch eine Emissionsfaktor-Methode. Das Monitoring der SF<sub>6</sub>-Mengen und Emissionen wird auf Basis von Hochrechnungen und aggregierten Herstellerangaben erstellt. Da die anfallenden Gasmengen pro Betriebsmittel stark von der Technologie, dem Hersteller, dem Inbetriebnahmejahr und den Betriebsbedingungen abhängig sind, ist eine valide Abschätzung der Hauptemittenten auf Basis der aggregierten Mengenangaben derzeit nicht möglich. Darüber hinaus sind die Monitoringsysteme der europäischen Mitgliedsländer sehr verschieden. Ein europäischer Vergleich der Emissionen ist deshalb kaum möglich.

Eine Anpassung des Monitoringsystems erachten wir in den folgenden Punkten als notwendig:

- Disaggregierte Daten öffentlichen Stellen zugänglich machen: weniger aggregierte Daten würden Behörden helfen, die größten Emittenten zu identifizieren und auf dieser Grundlage effektive und effiziente Maßnahmen zu implementieren sowie die Zielerreichung zu überprüfen.
- Berichterstattungssysteme auf EU-Ebene zu relevanten Aspekten vereinheitlichen: Die Einführung eines abgestimmten europäischen Monitoringsystems wäre sinnvoll für Vergleichbarkeit und notwendig bei zukünftig europaweit geltenden Maßnahmen. Allerdings gibt es zwischen den Ländern stark abweichende Visionen zum Monitoring. Dies hat bereits in den letzten Diskussionen zur Umsetzung eines SF<sub>6</sub>-Berichterstattungssystems auf EU-Ebene (im Zusammenhang mit der aktualisierten F-Gase-Verordnung im Jahr 2014) zu der Entscheidung geführt, sich nebst der Berichtspflichten im Zuge der F-Gas Verordnung 517/2014<sup>26</sup> zunächst auf eine nationale Berichterstattung zu konzentrieren. Branchenexperten erwarten, dass das Erarbeiten einer EU-weiten Methodik mindestens ein Jahrzehnt dauern wird. Das ist jedoch kein Argument, nicht anzufangen und eine ggf. inkrementelle Angleichung der Berichterstattung voranzutreiben.
- Verantwortlichkeiten von Gasproduzenten und -lieferanten erweitern: Gasproduzenten berichten derzeit nicht über SF<sub>6</sub>-Mengen. Sie in die Berichterstattung einzubeziehen, würde den gesamten Prozess vereinfachen. Die Geheimhaltung und Anonymisierung marktrelevanter Daten muss angesichts der begrenzten Anzahl von Akteuren zwar besonders berücksichtigt werden. Dies ließe sich über einen begrenzten Zugang zu den Daten aber sicherstellen. Die verschiedenen Im- und Exportströme europäischer und außereuropäischer Lieferanten müssten dabei natürlich adäquat abgebildet werden. Das ist ein zusätzliches Argument für ein koordiniertes europäisches Vorgehen.
- Klärungsbedarf zu „sonstigen Betriebsmitteln“ beseitigen: Es bestehen Unsicherheiten bezüglich der Abgrenzung der Betriebsmittelkategorien, Spannungsebenen und der dem Monitoring zugrundeliegenden Definitionen. Diese sollten ausgeräumt werden, um mögliche Reduktionsmöglichkeiten zu identifizieren.

Eine messtechnische Erfassung der realen Emissionen individueller Schaltanlagen und Betriebsmittel wurde in den Gesprächen mit den Industrievertretern angeregt, erscheint aber nicht zielführend. Quantitative Messungen von ausgetretenem Gas aus vorhandenen Betriebsmitteln stoßen angesichts der extrem niedrigen Konzentrationen an physikalische und messtechnische Grenzen (große Unterstationen, Schränke mit Zwangsbelüftung usw.). Aktuelle Forschungsergebnisse machen mit einer Kombination aus Infrarot- und elektrochemischer Detektion die Erfassung von SF<sub>6</sub>-Abbauprodukten deutlich unterhalb der 0,1% zumindest in Laborbedingungen möglich [Dong et al., 2017].

### SF<sub>6</sub>-Register

Ein SF<sub>6</sub>-Schaltanlagen-Register in Form einer Datenbank zur ständigen Überwachung der Anzahl, des Standorts, des Alters und möglicherweise der Emissionsrate auf Basis von Wartungsdaten unterstützt die Emissionsberichterstattung und bringt Bottom-up- und Top-down-Ansätze zusammen. Bisher besteht in Deutschland kein SF<sub>6</sub>-Register. Ein solches Register ist für die HS mit vertretbarem Aufwand zu erstellen. In der MS müssten Vor- und Nachteile abgewogen

---

<sup>26</sup> SF<sub>6</sub> wird von den Berichtspflichten zur F-Gasverordnung 517/2014 erfasst. Die Daten zu Herstellung/Import/Export und zu den Verwendungen werden allerdings nicht veröffentlicht, da es zu wenige Marktteilnehmer gibt.

werden: Wenn lediglich neue Betriebsmittel künftig in ein derartiges Register aufgenommen würden, bleibt die Daten- deckung angesichts der langen Lebensdauer der Anlagen über viele Jahre spärlich. Der Wert einer derartigen Daten- bank wäre sehr begrenzt. Die Anzahl bestehender MS-Schaltanlagen ist jedoch hoch. Sie sind extrem verstreut und bisher existieren kaum öffentliche oder standardisierte Aufzeichnungen über die Standortverteilung und den Eigentü- mer oder Betreiber. Das macht die Erfassung von Bestandsanlagen aufwendig.

Voraussetzung der Datenerfassung ist Einigkeit hinsichtlich der zu erfassenden Daten, der Datenformate und Pro- zesse. Diese Abstimmung der Akteure wird selbst auf nationaler Ebene eher Jahre als Monate beanspruchen. Ein- zeln Unternehmen haben im Rahmen des Assetmanagements bereits SF<sub>6</sub>-Register eingeführt und entsprechende Methoden getestet. Bei der Diskussion über ein deutschland- bzw. europaweites Register kann von diesen Unterneh- men viel gelernt werden. Weiterhin kann auch auf die Erfahrungen der EU-Mitgliedsstaaten hinsichtlich des Kältean- lagenregisters zurückgegriffen werden.

Der Mehrwert der Registrierung von Altersangaben, um daraus Schätzungen zu aktuellen Emissionen abzuleiten, ist im Übrigen strittig. Die Emissionen einer Schaltanlage können sich zwar über die Lebensdauer ändern. Das Alter ist jedoch nur ein Faktor unter vielen (Umgebungsbedingungen, Lastzyklen, verwendete Materialien für Dichtungen usw.), der den Zustand sowie die Alterung des elektrischen Betriebsmittels und seiner Komponenten beeinflusst.

### **Atmosphärische Emissionsmessung**

Wir empfehlen, zusätzlich zur bestehenden Bottom-up-Bestandsaufnahme durch die Industrieverbände einen Pro- zess der Top-Down-Überwachung durch atmosphärische Messungen und Reverse-Modellierung. Top-down-Analy- sen können sehr konkrete Ergebnisse liefern, in welcher Region und wann Emissionen entstanden sind. Dies hilft möglicherweise dabei, erzielte Fortschritte bei der Emissionsminderung zu verifizieren, die Emissionsmodellierung für den Bottom-up-Bestand zu verfeinern und wichtige Quellen, die Aufmerksamkeit erfordern, zu identifizieren. Auch wenn einige relevante Emittenten fehlen oder in der Berichterstattung weniger vertrauenswürdig sind (z. B. Schall- schutzfenster, Militär, Nicht-EU-Länder), wäre es sinnvoll, die nicht messbaren Mengen zu verstehen, um Top-down- und Bottom-up-Analysen näher zusammenzubringen.

Sehr wenige Studien existieren, die atmosphärische Emissionen mit berichteten Zahlen vergleichen. Studien aus der Schweiz und Irland zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Top-Down-Messungen und Berichterstattung, wäh- rend eine Studie aus den USA starke Abweichungen zwischen Berichterstattung und Emissionsmessungen zeigt. In China existieren nur atmosphärische Messungen, während Informationen über gemeldete Emissionen nicht verfügbar sind. In anderen Ländern wird erwartet, dass die überwachten SF<sub>6</sub>-Emissionen durch Messung der atmosphärischen Emissionen nicht mit den gemeldeten Zahlen übereinstimmen. Dies ist allerdings in der Regel nicht belegt.

### **9.2.5 Abwägung des Austauschs von Altanlagen**

Die Studie legt den Fokus auf neue Betriebsmittel. Dennoch verdienen Altanlagen aufgrund ihrer Relevanz im Bestand und die bei alten Anlagen vergleichsweise hohen Emissionsraten besondere Aufmerksamkeit. Branchenvertreter be- tonen in den Fachgesprächen wiederholt, dass über den selektiven Austausch von Altanlagen ein großer Anteil von Betriebsemissionen sowohl in der MS als auch in der HS reduziert werden kann. Dies zeigen auch aktuelle Studien

(z. B. [Blackman, 2017; SwissMem, 2017b]) aus anderen Ländern. Wenn das SF<sub>6</sub>-Volumen dadurch substantiell und nachhaltig reduziert wird, sind auch Anreize und Sozialisierung der Kosten gerechtfertigt.

Beim Entscheidungsprozess zum Austausch muss die mögliche Senkung der Emissionen im Betrieb gegenüber den Emissionen aus den Produktionsprozessen für die neuen Ersatzanlagen abgewogen werden. Es existieren jedoch keine einfachen generischen und verlässlichen Indikatoren (z. B. Alter der Anlage), über die das Emissionsniveau einer bestimmten Schaltanlage abgeleitet werden kann. Aufgrund fehlender zuverlässiger Messungen und nicht verfügbarer Abschätzungen des Gesamtpotentials ist die Effizienz und Wirksamkeit der Maßnahmen ungewiss und aus einer ex ante-Perspektive schwer zu bewerten. Eine dezidierte Inventarisierung des Anlagenbestandes und darauf aufbauend eine verlässliche Identifikation der lohnenden Anlagen ist Voraussetzung für die Implementierung derartiger Maßnahmen. Dies kann nur die Industrie selbst leisten. Ein verfeinertes Monitoring (Abschnitt 9.2.4) hilft.

### 9.3 Fazit und Ausblick

Die ambitionierten Bemühungen und Erfolge der deutschen Industrie haben eine substantielle Minderung der SF<sub>6</sub>-Emissionen aus elektrischen Betriebsmitteln in den letzten Jahren ermöglicht. Verfügbare technologische Alternativen zeigen aber grundsätzlich Möglichkeiten zur weiteren Verminderung des Einsatzes von SF<sub>6</sub> auf. Dabei sehen wir fünf Handlungsfelder, die mögliche Instrumente und Maßnahmen der Akteure beinhalten. Die mit diesen Themen verbundenen Fragen müssen adressiert werden, um darauf aufbauende informierte Entscheidungen treffen zu können. Deutlich wurde, dass kein einzelner „richtiger“ Weg aufgezeigt werden kann. Vielmehr ist das Abwägen von Vor- und Nachteilen der Kern der politischen Entscheidungsfindung. Die Handlungsoptionen sollten nicht isoliert voneinander betrachtet werden. Sie sind miteinander verflochten und bauen aufeinander auf. Die fünf identifizierten Handlungsfelder sind:

- **Nutzung bestehender Reduktionspotentiale**
- **Schaffung eines verlässlichen Rahmens für die Industrie**
- **Weiterentwicklung der freiwilligen Selbstverpflichtung**
- **Weiterentwicklung des SF<sub>6</sub>-Monitorings**
- **Abwägung des Austauschs von Altanlagen**

Ungeachtet der erreichten Minderung der SF<sub>6</sub>-Emissionen bestehen noch Potentiale für die Minderung des Einsatzes von SF<sub>6</sub> in neu errichteten elektrischen Betriebsmitteln. Die Auswahl der geeigneten Schritte ist nicht trivial. Anwendungen, in denen eine Substitution von SF<sub>6</sub> technisch und wirtschaftlich machbar ist (Schaltanlagen in der Mittelspannung), versprechen nur eine begrenzte Verminderung der Emissionen. Für die wesentlichen SF<sub>6</sub>-Emissionsquellen (Anlagen in der Hochspannung, „sonstige Betriebsmittel“), ist die Verfügbarkeit von anerkannten Alternativen noch begrenzt.

Eine Minderung des SF<sub>6</sub>-Einsatzes erfordert ein Engagement von sowohl Politik als auch den verantwortlichen Branchen. Verbindliche Zielstellungen müssen durch die Politik vorgegeben werden. Klare Rahmenbedingung für die weitere Verwendung von SF<sub>6</sub> aber auch den Vergleich mit Alternativen und der Alternativen untereinander sind unerlässlich. Auch diese müssen von der Politik vorgegeben werden. Für die Umsetzung bietet sich ein integrierter Ansatz, der die Branche als Ganzes abdeckt, an. Eine ehrgeizige Fortschreibung der Selbstverpflichtung der Industrie, die

dem aktuellen Kenntnisstand angepasst ist, erscheint ein geeignetes Instrument. Sie kann ergänzt werden durch spezifische, fokussierte Maßnahmen. Parallel können auf europäischer Ebene auch Quotensysteme ähnlich den HFKW-Quoten in der EU F-Gase-Verordnung eingeführt werden.

Schließlich ist ein funktionierendes Meldesystem die Basis für effektive und effiziente Umsetzung des (Rechts-) Rahmens. Hier gibt es vielfältige und für den weiteren Fortschritt wesentliche Möglichkeiten für Anpassungen und Verbesserungen.

Die politische Durchsetzbarkeit wie auch die Akzeptanz der entwickelten Handlungsoptionen ist stark an die europäische Regulierung gebunden. Nationale Initiativen sind weder aussichtsreich noch effektiv. Die weitere Ausgestaltung potentieller Maßnahmen auf europäischer Ebene muss vorangetrieben werden, übersteigt aber den Rahmen dieses Vorhabens.

Die nächsten Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der beschriebenen Instrumente sind die Auswahl vielversprechender Konzepte sowie die intensive Analyse dieser. Insbesondere die Auswirkungen der Instrumente auf Wirtschaft, Industrie und das Umweltsystem müssen über Indikatoren wie Wohlfahrtseffekte, Verteilungswirkung, Effektivität, Effizienz und Akzeptanz bewertet werden.

# 10 Anhang

## 10.1 Thesaurus zur Erläuterung der Fachbegriffe (Deutsch-Englisch)

### 10.1.1 Allgemeine elektrische Bezeichnungen

Tabelle 36: Allgemeine elektrische Bezeichnungen für Netzebenen

| Deutsch              | Englisch                 | Erläuterung   |
|----------------------|--------------------------|---|
| Gleichstrom          | Direct Current (DC)      | Strom, dessen Richtung zeitlich konstant ist.                                     |
| Hochspannung (HS)    | High Voltage             | 52 kV < Nennspannung ≤ 150 kV (AC) nach Netzebene;<br>> 52 kV nach Betriebsmittel |
| Höchstspannung (HöS) | Extra High Voltage       | > 150 kV nach Netzebene   |
| Mittelspannung (MS)  | Medium Voltage           | 1 kV < Spannung ≤ 52 kV (AC)  |
| Niederspannung       | Low Voltage              | Spannung < 1 kV (AC)  |
| Wechselstrom         | Alternating Current (AC) | Strom, der seine Richtung in regelmäßiger Wiederholung wechselt.                  |

### 10.1.2 Technische Fachbegriffe für elektrische Betriebsmittel

Tabelle 37: Technische Fachbegriffe für elektrische Betriebsmittel

| Deutsch        | Englisch         | Erläuterung  |
|----------------|------------------|--|
| Abgangsfeld    | outcoming feeder | Feld in einer Schaltanlage zum Anschluss von Leitungen   |
| Antriebssystem | actuating system | Ein Antriebssystem bewegt die Kontakte in Schaltgeräten zwischen offener und geschlossener Schaltstellung. Der Energiebedarf wird in der Regel von mechanischen Federkraftspeichern bereitgestellt. Diese sollen ein automatisches Öffnen, anschließendes Schließen und erneutes |

| Deutsch   | Englisch                             | Erläuterung   |
|---|--------------------------------------|---|
|   |                                      | Öffnen des Leistungsschalters ermöglichen.  |
| Doppel-Sammelschienen-Schaltanlage              | double busbar substation             | Eine Schaltanlage, in der die Leitungen an zwei Sammelschienen angeschlossen sind.  |
| Druckgasleistungsschalter oder Druckgasschalter | gas-blast circuit-breaker            | Leistungsschalter, bei dem der nach Trennung der Kontakte sich ausbildende Schaltlichtbogen durch Einblasen eines geeigneten "Löschgases" (z. B. SF <sub>6</sub> ) innerhalb weniger Millisekunden gelöscht wird.   |
| Durchführung                                    | bushing                              | Ein Bauteil, das einen Leiter durch eine Wand (z. B. Gebäudewand, Gehäuse eines Transformators) oder einen gasdichten Behälter führt und diesen von ihr elektrisch isoliert.  |
| Einfach-Sammelschienen-Schaltanlage             | single busbar substation             | Eine Schaltanlage, in der die Leitungen an einer einzigen Sammelschiene angeschlossen sind.   |
| Erdungsschalter                                 | earthing switch                      | Die Aufgabe eines Erdungsschalters besteht darin, abgeschaltete Anlagenteile zu erden und bei mehrpoligen Erdungsschaltern gleichzeitig kurzzuschließen.  |
| Freiluft-Schaltanlage                           | outdoor switchgear (and controlgear) | Schaltanlagen (vgl. gasisolierte Schaltanlagen) für den Gebrauch im Freien, welche für Bedingungen mit Wind, Sonneneinstrahlung, Regen, Schnee, Raureif, Vereisung und starken Schmutzablagerungen geeignet sind (vgl. Innenraum-Schaltanlage). In der Hochspannung wird im Sprachgebrauch oft „Freiluft-Schaltanlage“ mit AIS (vgl. luftisolierte Schaltanlage) gleichgesetzt. |
| Gasisolierte (Übertragungs-) Leitung (GIL)      | gas-insulated (transmission) line    | Eine elektrische Übertragungsleitung, welche aus einem Leiter besteht, der in einem Rohr zentriert ist. Das Rohr enthält  |

| Deutsch                                    | Englisch                            | Erläuterung  |
|--|-------------------------------------|--|
|  |                                     | ein komprimiertes Isoliergas (meist SF <sub>6</sub> oder SF <sub>6</sub> -Mischungen).   |
| Gasisolierte Schaltanlage (GIS)            | gas-insulated switchgear            | Eine metallgekapselte Schaltanlage, bei der die Isolation zumindest teilweise durch ein Gas, welches nicht Luft bei Atmosphärendruck ist, bereitgestellt wird. Sie besteht aus Komponenten wie Leistungs-, Last- und Trennschalter. Im Gegensatz zu luftisolierten Schaltanlagen (AIS) ist der Gasraum von der Umgebungsluft entkoppelt. |
| Gasisolierter Transformator (GIT)          | gas-insulated transformer           | Ein Transformator, der SF <sub>6</sub> als Isoliergas verwendet.   |
| Generator Leistungsschalter                | generator circuit-breaker           | Schaltgeräte in der Hochstromverbindung zwischen Generator und Maschinentransformator. Die elektrischen Anforderungen an Generatorschalter sind in wesentlichen Punkten weit höher als für Schalter im Netzeinsatz, siehe IEC/IEEE 60271-37-01.  |
| Geschlossenes Drucksystem                  | closed pressure system              | Volumen, das nur in regelmäßigen Zeitabständen durch Anschluss an eine externe Gasversorgung von Hand nachgefüllt wird z. B. HS-GIS (siehe IEC 62271-203 bzw. IEC 60694 5.15.2).   |
| Hermetisch abgeschlossenes Drucksystem     | sealed pressure system              | Volumen, für das während der erwarteten Betriebslebensdauer keine weitere Gaszufuhr oder Vakuumbehandlung erforderlich ist, z. B. Röhren von Vakuum-Leistungsschaltern, MS-GIS.  |
| Hilfsstromkreis                            | auxiliary circuit                   | Alle Stromkreise in einer Schaltanlage neben dem Hauptstromkreis (z. B. Steuerstromkreise).  |
| Innenraum-Schaltanlagen (und Schaltgeräte) | indoor switchgear (and controlgear) | Schaltanlagen für den Gebrauch in Innenräumen, in denen die Anlage geschützt ist vor Umwelteinflüssen wie Wind, Sonneneinstrahlung, Regen, Schnee, Raureif,  |

| Deutsch                                     | Englisch                          | Erläuterung   |
|---|-----------------------------------|---|
|   |                                   | Vereisung und starken Schmutzablagerungen (vgl. Freiluft-Schaltanlage).   |
| Kesselleistungsschalter oder Kesselschalter | dead tank circuit-breaker         | Ein Leistungsschalter, in dem die Unterbrechereinheit in einem geerdeten metallischen Gehäuse ist. Dieser wird ausschließlich in HS Freiluftanlagen eingesetzt.   |
| Kontrolliertes Drucksystem                  | controlled pressure system        | Volumen, das selbständig aus einer äußeren oder inneren Gasversorgung nachgefüllt wird, z. B. Druckluft-Leistungsschalter und Druckluftantriebe.  |
| Lastabwurf                                  | load shedding                     | Das bewusste Abtrennen einer Last in einem Stromversorgungssystem aufgrund einer abnormalen Bedingung, um die Unversehrtheit des restlichen Systems zu gewährleisten.   |
| Lastschalter                                | load break switch (= load switch) | Lastschalter dienen zum Einschalten und Ausschalten von Betriebsmitteln und Anlageteilen im ungestörten Zustand. Kurzschlussströme können im Gegensatz zum Leistungsschalter nicht unterbrochen werden.       |
| Lasttrennschalter                           | switch-disconnector               | Ein Schalter, der aus einer Kombination von einem Lastschalter und einem Trennschalter besteht. Er erfüllt sowohl die Anforderungen an einen Lastschalter, als auch die Anforderungen an einen Trennschalter. |
| Leckageerkennungssystem                     | Leak detection system             | Ein kalibriertes mechanisches, elektrisches oder elektronisches Gerät, das den Gasaustritt aus Lecks feststellt und bei einer solchen Feststellung den Betreiber warnt.                                       |
| Leistungsschalter                           | circuit-breaker                   | Mechanische Schalteinrichtungen, die Stromkreise (Arbeitsströme und Fehlerströme) schließen und öffnen und in eingeschaltetem Zustand den Nennstrom   |

| Deutsch                              | Englisch                                     | Erläuterung   |
|--------------------------------------|--|---|
|                                      |  | und zeitlich begrenzt den Kurzschlussstrom führen kann.   |
| Luftisolierte Schaltanlage (AIS)     | air-insulated switchgear                     | AIS sind Schaltanlagen, in denen spannungsführende Teile direkt der Umgebungsluft ausgesetzt sind. In der HS stehen AIS in Freiluft (meist outdoor). In der MS sind die Komponenten der AIS mit einem geerdeten Metallgehäuse umschlossen, welches jedoch nicht luftdicht ist, sondern lediglich dem Personenschutz und abhängig vom Schutzgrad auch dem Anlagenschutz dient (vgl. gasisolierte Schaltanlagen). |
| Messwandler                          | instrument transformers                      | Geräte zur Messung von Strom oder Spannung. Sie werden eingesetzt, um zu messende Ströme und Spannungen auf andere Strom- bzw. Spannungsniveaus abzubilden, um diese dann weiter zu verarbeiten.  |
| Metallgekapselte Schaltanlage        | metal-enclosed switchgear (and control gear) | Schaltanlage mit einem metallischen Gehäuse, welches vollständig geerdet ist.   |
| Metallgeschottete Schaltanlage       | metal-clad switchgear                        | Eine Kategorie von metallgekapselten Schaltanlagen, entsprechend des ANSI-Standards. Metallgeschottete Schaltanlagen implizieren eine herausziehbare Schalt- und Unterbrecher-Einheit. Im Gegensatz zu metallgekapselten Anlagen sind zusätzlich die einzelnen Funktionsbereiche durch Abschirmungen voneinander getrennt.  |
| MS Schaltanlage für Primärverteilung | MV switchgear for primary distribution       | Schaltanlage an der Mittelspannungsseite einer Umspannstation, welche von Hoch auf Mittelspannung transformiert. Die Primärverteilung umfasst Schaltanlagen mit Leistungsschaltern wie z. B. in Umspannwerken von Hoch auf Mittelspannung, wird aber auch in Kraftwerken oder Haupteinspeisungen großer Gebäudekomplexe   |

| Deutsch                                | Englisch                                 | Erläuterung  |
|--|--|--|
|  |  | bzw. Infrastruktureinrichtungen eingesetzt.  |
| MS Schaltanlage für Sekundärverteilung | MV switchgear for secondary distribution | Schaltanlage an der Mittelspannungsseite einer Station, welche von Mittel- auf Niederspannung transformiert. In der Sekundärverteilung befinden sich überwiegend Schaltanlagen mit Lasttrennschalter, ergänzt um kombinierte Lasttrenn-/Leistungsschalteranlagen in Netz-, Übergabe-, Unter- und Schaltstationen von Energieversorgungsunternehmen und Stadtwerken.  |
| Primärtechnik                          | primary technology                       | Betriebsmittel, die direkt in den Transport und Verteilung der elektrischen Energie eingebunden sind.  |
| Ringkabelschaltanlage (RMU)            | ring main unit                           | Eine RMU ist eine kompakte Schaltanlage. Die Bemessungs-Betriebsspannung ist typischerweise maximal 24 kV und der Bemessungs-Betriebsstrom ist maximal 630 A. Sie besteht meistens aus 3 Feldern: einem Kabeleingangs- und einem Kabelabgangsfeld mit jeweils einem Lasttrennschalter sowie einem Transformatorabgangsfeld mit einer Lasttrennschalter-Sicherungs-Kombination (oder alternativ einem Leistungsschalter). |
| Sammelschiene                          | busbar                                   | Anordnung von Leitern, die als zentraler Verteiler von elektrischer Energie dienen. Meistens ist die Sammelschiene einfach eine Schiene/Barren, an der an verschiedenen Punkten Stromkreise angeschlossen werden können.   |
| Schaltanlage                           | switchgear                               | Eine Schaltanlage besteht typischerweise aus mehreren Schaltfeldern. Generell sind damit Schaltgeräte in Verbindung mit Generation, Übertragung, Verteilung und Umwandlung elektrischer Energie gemeint, als auch die Kombination von Schaltgeräten mit Kontroll-, Mess-,  |

| Deutsch   | Englisch                         | Erläuterung  |
|---|----------------------------------|--|
|   |                                  | <p>Schutz- und Regel-Geräten, Verbindungen, Zubehör und Gehäuse.</p> <p>Anm.: „Switchgear“ im Englischen kann sowohl Schaltanlage als auch Schaltgerät sowie die Kombination aus Schaltanlage und -gerät bedeuten.</p> |
| Schaltfeld (Funktionseinheit einer Schaltanlage)        | functional unit (of an assembly) | Ein Schaltfeld ist eine Funktionseinheit einer Schaltanlage. Es umfasst alle Komponenten der Hauptstromkreise und Hilfsstromkreise und trägt zur Erfüllung einer einzigen Funktion bei.                                |
| Schaltkammerleistungsschalter oder Schaltkammerschalter | live tank circuit-breaker        | Ein Leistungsschalter, in dem die Unterbrechereinheit in einem Gehäuse ist, welches zur Erde isoliert ist. Dieser wird ausschließlich in HS Freiluftanlagen eingesetzt.  |
| Sekundärtechnik   | Control (or secondary) equipment | Sämtliche Hilfseinrichtungen, die für eine sichere Betriebsführung der Schaltanlage notwendig sind. Hierzu gehören die Funktionen Steuern, Verriegeln, Überwachen, Melden, Messen, Zählen, Registrieren und Schützen.  |
| Sicherung   | fuse                             | Schaltgeräte, die einen Stromkreis durch Schmelzen eines oder mehrerer dafür vorgesehener Teile unterbricht, falls Ströme einen vorgegebenen Wert überschreiten.   |
| Spannungswandler  | voltage transformer              | Messwandler zum Messen von Wechselspannung. Sie werden eingesetzt, um zu messende Spannungen auf andere Spannungsniveaus abzubilden, um diese dann weiter zu verarbeiten.  |
| Stromwandler  | current transformer              | Messwandler zum Messen von Wechselstrom. Sie werden eingesetzt, um zu messende Ströme auf andere Stromniveaus abzubilden, um diese dann weiter zu verarbeiten.   |

| Deutsch                                      | Englisch             | Erläuterung  |
|--|----------------------|--|
| Transformator                                | transformer          | Ein Gerät mit zwei oder mehr Windungen, welches mittels elektromagnetischer Induktion eine AC Spannung in eine AC Spannung mit höheren oder niedrigeren Wert transformiert. Die Frequenz bleibt dabei konstant.  |
| Trennschalter                                | disconnector         | Trennschalter sollen nachgeschaltete Betriebsmittel freischalten, d.h. Betriebsmittel, die nicht mehr unter Spannung stehen, von den angeschlossenen Stromkreisen trennen. So bilden sie eine Trennstrecke zu den nachgeschalteten Betriebsmitteln. Bei einem Trennvorgang unter Last würde ein Trennschalter im Gegensatz zum Leistungsschalter oder Lasttrennschalter zerstört werden. |
| Übertragungsnetz                             | transmission network | Das Übertragungsnetz überträgt elektrische Energie von Erzeugern (Kraftwerken) zu Umspannwerken, die näher an den Verbrauchern liegen.   |
| Umspannwerk, Umspannstation, Ortsnetzstation | substation           | Ein Teil des elektrischen Energiesystems an den Enden des Übertragungs- und Verteilnetzes, welcher in erster Linie aus Schaltanlagen und Transformatoren besteht.  |
| Verteilnetz                                  | distribution network | Das Verteilnetz verteilt die Energie des Übertragungsnetzes zu den Verbrauchern. Knotenpunkt zum Übertragungsnetz ist das Umspannwerk.   |

### 10.1.3 Elektrische Kenngrößen

Tabelle 38: Elektrische Kenngrößen

| Deutsch             | Englisch        | Erläuterung  |
|---------------------|-----------------|--|
| Anstehende Spannung | applied voltage | Spannung zwischen den Anschlüssen eines Betriebsmittels unmittelbar vor dem Einschalten des Stromes. |

| Deutsch                                    | Englisch   | Erläuterung   |
|--|--|---|
| Ausschaltstrom                             | breaking capacity                                      | Strom, für den ein Schaltgerät beim Abschalten des Stromes spezifiziert ist.  |
| Bemessungs-Betriebsstrom                   | rated normal current                                   | Der Strom, für den ein Betriebsmittel bemessen ist.   |
| Bemessungs-Isolationspegel                 | rated insulation level                                 | Genormte Kombination der Bemessungswerte für die Stehblitzstoßspannung, für die Stehschaltstoßspannung (soweit anwendbar) und für die Kurzzeit-Stehwechselfspannung, die einer Bemessungsspannung zugeordnet ist. |
| Bemessungs-Kurzzeit-Stehblitzstoßspannung  | rated lightning impulse withstand voltage              | Scheitelwert der Normstoßspannungswelle 1,2/50 $\mu$ s, dem die Isolation eines Gerätes standhalten muss.   |
| Bemessungs-Kurzzeit-Stehschaltstoßspannung | rated switching impulse withstand voltage              | Scheitelwert der unipolaren Normstoßspannungswelle 250/2500 $\mu$ s, dem die Isolation eines Gerätes mit Bemessungsspannung von 300 kV und höher standhalten muss.  |
| Bemessungs-Kurzzeit-Stehwechselfspannung   | rated short-duration power frequency withstand voltage | Effektivwert der sinusförmigen Wechselspannung bei Betriebsfrequenz, dem die Isolation eines Gerätes gemäß den festgelegten Prüfbedingungen während einer Zeitdauer von 1 Minute standhalten muss.                |
| Bemessungs-Kurzzeitstrom                   | rated short-time withstand current                     | Strom, den ein Betriebsmittel in geschlossener Stellung während einer festgelegten kurzen Zeit führen kann.   |
| Bemessungsspannung                         | rated voltage  | Spannungswert, angegeben vom Hersteller, bis zu welchem die Verwendung eines Betriebsmittels vorgesehen ist.  |
| Bemessungswert                             | rated value  | Wert, angegeben vom Hersteller, bis zu welchem die Verwendung eines Betriebsmittels vorgesehen ist.   |
| wiederkehrende Spannung                    | recovery voltage                                       | Spannung, die unmittelbar nach dem Unterbrechen des Stromes zwischen den  |

| Deutsch | Englisch | Erläuterung   |
|---------|----------|---|
|         |          | Kontakten eines geöffneten Schaltgerätes oder Sicherung eines auftritt. |

#### 10.1.4 Umweltbegriffe

Tabelle 39: Umweltbegriffe

| Deutsch                    | Englisch                 | Erläuterung  |
|----------------------------|--------------------------|--|
| Atmosphärische Lebensdauer | atmospheric lifetime     | Zeit für den Zerfall eines Gases in der Atmosphäre. Der Wert hängt von den Abbaumechanismen ab und ist daher gasspezifisch.  |
| Treibhauspotential         | global warming potential | Das Treibhauspotential eines Gases wird relativ zu 1 kg CO <sub>2</sub> angegeben. Die exakte Definition des GWPs ist im fünften IPCC Report angeführt.  |
| Strahlungsantrieb          | radiative efficiency     | „Radiative efficiency“ ist definiert als die Änderung der Nettostrahlungsbilanz in der Tropopause aufgrund einer Änderung der Gaskonzentration eines Treibhausgases. Sie hat die Einheit W/m <sup>2</sup> /ppb und bestimmt zusammen mit der atmosphärischen Lebensdauer das GWP einer Substanz. |

### 10.1.5 Auswahl der derzeit diskutierten Gase und Gasgemische

Tabelle 40: Die wichtigsten Gase

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

### 10.1.6 Organisationen

Tabelle 41: Organisationen

| Abkürzung | Deutsch  | Englisch  |
|-----------|--|---|
| ANSI      |  | American National Standards Institute             |
| CIGRE     | Internationales Forum für große elektrische Netze        | International Council on Large Electric Systems   |
| CIRED     | Internationales Forum für elektrischen Energieverteilung | International Council on Electricity Distribution |
| DIN       | Deutsches Institut für Normung                           | German Institute for Standardization              |
| IEC       | Internationale Elektrotechnische Kommission              | International Electrotechnical Commission         |

| Abkürzung   | Deutsch  | Englisch  |
|-------------|--|---|
| IEEE        | Verband von Ingenieuren aus den Bereichen Elektrotechnik und Informationstechnik                         | Institute of Electrical and Electronics Engineers   |
| NOAA        |  | National Oceanic and atmospheric administration   |
| VDE         | Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (in Deutschland)                               | Association for Electrical, Electronic and Information Technologies (in Germany)                      |
| FNN         | Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE   | Forum Network Technology / Network Operation in the VDE   |
| ZVEI        | Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (in Deutschland)                                  | German Electrical and Electronic Manufacturers' Association   |
| T&D Europe  | Zusammenschluss der Fachverbände der Hochspannungsschaltgeräte und Transformatorenhersteller (in Europa) | European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry |
| Eurelectric | Union der Elektrizitätswirtschaft (in Europa)  | The Union of the Electricity Industry (in Europe)   |

## 10.2 Übersicht geführter explorativer Interviews

Tabelle 42: Übersicht geführter Interviews

| Unternehmen                         | Art                                  |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>ABB</b>                          | Hersteller                           |
| <b>Cellpack</b>                     | Hersteller                           |
| <b>Driescher-Wegberg</b>            | Hersteller                           |
| <b>Eaton Electric</b>               | Hersteller                           |
| <b>ENERTRAG Energiebau</b>          | Anwender - Wind                      |
| <b>Evonik</b>                       | Anwender - Industrienetze            |
| <b>EWZürich</b>                     | Anwender                             |
| <b>GE Grid Solutions</b>            | Hersteller                           |
| <b>HSP Hochspannungsgeräte</b>      | Hersteller                           |
| <b>Ormazabal</b>                    | Hersteller                           |
| <b>Ormazabal</b>                    | Hersteller                           |
| <b>Pfiffner</b>                     | Hersteller                           |
| <b>RITZ Instrument Transformers</b> | Hersteller „sonstige Betriebsmittel“ |
| <b>RWE (Westnetz)</b>               | Anwender                             |
| <b>Schneider Electric</b>           | Hersteller                           |
| <b>Siemens</b>                      | Hersteller                           |
| <b>Solvay</b>                       | Gasproduzent                         |
| <b>Stromnetz Hamburg</b>            | Anwender                             |
| <b>Trench Germany GmbH</b>          | Hersteller                           |
| <b>Stromnetz Berlin</b>             | Anwender                             |
| <b>wpd europe GmbH</b>              | Anwender - Wind                      |

### 10.3 Teilnehmer des Fachgesprächs am 6. März 2017

**Tabelle 43: Teilnehmende Organisationen des Fachgesprächs am 6. März 2017**

| Organisation   |
|--|
| 3M   |
| 50Hertz  |
| ABB  |
| Arbeitskreis SF <sub>6</sub>                                       |
| Amprion  |
| Avacon / E.on  |
| BMU  |
| Cellpack   |
| Currenta   |
| DILO GmbH  |
| Driescher Moosburg   |
| Driescher Wegberg  |
| Eaton Electric   |
| Ecofys (3 Personen)  |
| ETH Zürich (2 Personen)  |
| Evonik   |
| EW Zürich  |
| GE Grid Solutions  |
| Innogy   |
| Netze BW   |
| Ökorecherche   |
| Ormazabal  |
| Pfiffner   |
| RITZ   |
| Schneider Electric   |
| Siemens  |
| Solvay   |
| Stromnetz Berlin   |
| Stromnetz Hamburg  |
| TenneT   |
| TRENCH Group   |
| Umweltbundesamt  |
| Uniper   |
| Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN)                         |
| wpd europe   |
| Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) |

## 10.4 Produktblätter

**Tabelle 44: Produktblätter im Text ausgewerteter Betriebsmittel. Abgerufen im Oktober 2016**

| Hersteller | Produkt                           | Link  |
|------------|-----------------------------------|---|
| ABB        | ELK-14C<br>170 kV                 | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/gis/pilot-eco-efficient-gas-insulated-switchgear">http://new.abb.com/high-voltage/gis/pilot-eco-efficient-gas-insulated-switchgear</a>   |
| ABB        | ELK-14C<br>245 kV                 | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-14-c-(up-to-245-kv)">http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-14-c-(up-to-245-kv)</a>   |
| ABB        | ELK-04 C<br>145 kV                | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-04">http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-04</a>   |
| ABB        | ELK-14<br>300 kV                  | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-14-(up-to-300-kv)">http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-14-(up-to-300-kv)</a>   |
| ABB        | ELK-3 C<br>420 kV                 | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-3-c-(up-to-420-kv)">http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-3-c-(up-to-420-kv)</a>   |
| ABB        | ELK-3<br>550 kV                   | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-3-(up-to-550-kv)">http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-3-(up-to-550-kv)</a>   |
| ABB        | ELK-4<br>800 kV                   | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk4-(up-to-800-kv)">http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk4-(up-to-800-kv)</a>   |
| ABB        | ELK-5<br>1200 kV                  | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-5-(up-to-1200-kv)">http://new.abb.com/high-voltage/gis/portfolio/elk-5-(up-to-1200-kv)</a>   |
| ABB        | LTA 72D1                          | <a href="http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/3b51d425f8c20402c1257a61004db108/\$file/High+vol-tage+CO2+circuit+breaker+type+LTA++Enhancing+eco-efficiency.pdf">http://www02.abb.com/global/gad/gad02181.nsf/0/3b51d425f8c20402c1257a61004db108/\$file/High+vol-tage+CO2+circuit+breaker+type+LTA++Enhancing+eco-efficiency.pdf</a> |
| ABB        | LTB D1/B                          | <a href="https://library.e.abb.com/public/9c1ec4b8ebf937f0c1257cc9004b0cda/B.G.%20HV%20LT%20Circuit%20Breakers%20Ed%206en%20LTB%20family.pdf">https://library.e.abb.com/public/9c1ec4b8ebf937f0c1257cc9004b0cda/B.G.%20HV%20LT%20Circuit%20Breakers%20Ed%206en%20LTB%20family.pdf</a>   |
| ABB        | LTB D 72.5<br>– 170 kV            | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/AIS/selector/ltb-d">http://new.abb.com/high-voltage/AIS/selector/ltb-d</a>   |
| ABB        | LTB E                             | <a href="https://library.e.abb.com/public/9c1ec4b8ebf937f0c1257cc9004b0cda/B.G.%20HV%20LT%20Circuit%20Breakers%20Ed%206en%20LTB%20family.pdf">https://library.e.abb.com/public/9c1ec4b8ebf937f0c1257cc9004b0cda/B.G.%20HV%20LT%20Circuit%20Breakers%20Ed%206en%20LTB%20family.pdf</a>   |
| ABB        | TG 72.5-<br>800 kV                | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/instrument-transformers/current/tg">http://new.abb.com/high-voltage/instrument-transformers/current/tg</a>   |
| ABB        | IMB 36-<br>800 kV                 | <a href="https://library.e.abb.com/public/1b61a98abcb38abec1257b130057b777/Buyers%20Guide%20Outdoor%20Instrument%20Transformers%20Ed%205%20en.pdf">https://library.e.abb.com/public/1b61a98abcb38abec1257b130057b777/Buyers%20Guide%20Outdoor%20Instrument%20Transformers%20Ed%205%20en.pdf</a>   |
| ABB        | FOCS-FS<br>245-<br>800 kV         | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/instrument-transformers/current/FOCS-FS">http://new.abb.com/high-voltage/instrument-transformers/current/FOCS-FS</a>   |
| ABB        | CPB<br>(capacitor)<br>72-800kV    | <a href="https://library.e.abb.com/public/1b61a98abcb38abec1257b130057b777/Buyers%20Guide%20Outdoor%20Instrument%20Transformers%20Ed%205%20en.pdf">https://library.e.abb.com/public/1b61a98abcb38abec1257b130057b777/Buyers%20Guide%20Outdoor%20Instrument%20Transformers%20Ed%205%20en.pdf</a>   |
| ABB        | EMF (in-<br>ductive)<br>52-170 kV | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/instrument-transformers/voltage/emf">http://new.abb.com/high-voltage/instrument-transformers/voltage/emf</a>   |
| ABB        | TVI 72.5-<br>420 kV               | <a href="http://new.abb.com/high-voltage/instrument-transformers/voltage/tvi">http://new.abb.com/high-voltage/instrument-transformers/voltage/tvi</a>   |
| ABB        | ZX2 Pilot,<br>Oerlikon            | <a href="http://new.abb.com/docs/librariesprovider27/default-document-library/uw_oerlikon_neu_1hc0114818aa_en.pdf?sfvrsn=2">http://new.abb.com/docs/librariesprovider27/default-document-library/uw_oerlikon_neu_1hc0114818aa_en.pdf?sfvrsn=2</a>   |
| ABB        | ZX2 up to<br>40kV                 | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/iec-gas-insulated-primary-switchgear-zx2">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/iec-gas-insulated-primary-switchgear-zx2</a>   |
| ABB        | ZX0.2 up<br>to 36kV               | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/iec-gas-insulated-primary-switchgear-zx0-2">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/iec-gas-insulated-primary-switchgear-zx0-2</a>                                       |

| Hersteller | Produkt                  | Link   |
|------------|--------------------------|--|
| ABB        | ZX1.2 up to 40kV         | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/iec-gas-insulated-primary-switchgear-zx0-2">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/iec-gas-insulated-primary-switchgear-zx0-2</a><br><a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/iec-gas-insulated-primary-switchgear-zx0-2">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-primar-distribution/iec-gas-insulated-primary-switchgear-zx0-2</a> |
| ABB        | ZX1.2: 24kV              | <a href="https://library.e.abb.com/public/38e230961a85299fc1257d8500327181/DS%202471%20ZX-Family%20en%20A4.pdf">https://library.e.abb.com/public/38e230961a85299fc1257d8500327181/DS%202471%20ZX-Family%20en%20A4.pdf</a>  |
| ABB        | ZX2: 36 kV               | <a href="http://www.abb.de/pro-duct/db0003db004279/c125739900636470c1256ec300510cf9.aspx?productLanguage=ge&amp;country=DE">http://www.abb.de/pro-duct/db0003db004279/c125739900636470c1256ec300510cf9.aspx?productLanguage=ge&amp;country=DE</a>  |
| ABB        | ZX2 Airplus: 36 kV       | <a href="https://library.e.abb.com/public/2c5af4103efd4d23a7bf75fa656c0506/DS%202561%20ZX2%20AirPlus%20en.pdf">https://library.e.abb.com/public/2c5af4103efd4d23a7bf75fa656c0506/DS%202561%20ZX2%20AirPlus%20en.pdf</a>  |
| ABB        | ZX2.2: 40kV              | <a href="https://library.e.abb.com/public/fc6aabb7a6583d64c1257730005c1ab5/ZX2.2%20Brochure%20Rev%20C.pdf">https://library.e.abb.com/public/fc6aabb7a6583d64c1257730005c1ab5/ZX2.2%20Brochure%20Rev%20C.pdf</a>  |
| ABB        | ZS1: 24kV                | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/air-insulated/iec-and-other-standards/iec-air-insulated-primary-switchgear-unigear-zs1">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/air-insulated/iec-and-other-standards/iec-air-insulated-primary-switchgear-unigear-zs1</a>  |
| ABB        | UniSec up to 24 kV       | <a href="https://library.e.abb.com/public/60c4ed7ff3104c66b15f0e731795ce8a/BR%20TEC_UNISEC(EN)L_1VFM200002-02%202016.pdf">https://library.e.abb.com/public/60c4ed7ff3104c66b15f0e731795ce8a/BR%20TEC_UNISEC(EN)L_1VFM200002-02%202016.pdf</a>  |
| ABB        | Saveplus up to 40kV      | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-indoor-gas-insulated-ring-main-units-and-compact-switchgear-type-safering-safeplus">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-indoor-gas-insulated-ring-main-units-and-compact-switchgear-type-safering-safeplus</a>  |
| ABB        | SaveWind 12-40.5 kV      | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/safewind">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/safewind</a>  |
| ABB        | SafeRing up to 40kV      | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-indoor-gas-insulated-ring-main-units-and-compact-switchgear-type-safering-safeplus">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-indoor-gas-insulated-ring-main-units-and-compact-switchgear-type-safering-safeplus</a>  |
| ABB        | SafeRing Air up to 12 kV | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-gas-insulated-ring-main-unit-safering-air">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-gas-insulated-ring-main-unit-safering-air</a>  |
| ABB        | SafeRing AirPlus 24 kV   | <a href="http://www.abb.ch/pro-duct/db0003db004279/c125739900636470c1256eae0048a62b.aspx">http://www.abb.ch/pro-duct/db0003db004279/c125739900636470c1256eae0048a62b.aspx</a>  |
| ABB        | SafeLink CB 12kV         | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-gas-insulated-ring-main-unit-safelink-cb">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-gas-insulated-ring-main-unit-safelink-cb</a>  |
| ABB        | SafeLink 12kV            | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-gas-insulated-ring-main-unit-safelink-cb">http://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/iec-gas-insulated-ring-main-unit-safelink-cb</a>  |
| ABB        | R-MAG 15-38 kV           | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/ansi-iec-outdoor-vacuum-circuit-breaker-r-mag">http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/ansi-iec-outdoor-vacuum-circuit-breaker-r-mag</a>  |
| ABB        | OVB-SDB 15 kV            | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/iec-outdoor-vacuum-circuit-breaker-ovb-sdb">http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/iec-outdoor-vacuum-circuit-breaker-ovb-sdb</a>  |
| ABB        | OVB-VBF Up to 40.5 kV    | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/iec-outdoor-vacuum-circuit-breaker-ovb-vbf">http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/iec-outdoor-vacuum-circuit-breaker-ovb-vbf</a>  |
| ABB        | OHB up to 40.5 kV        | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/iec-outdoor-gas-insulated-(SF6)-circuit-breaker-ohb">http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/iec-outdoor-gas-insulated-(SF6)-circuit-breaker-ohb</a>  |
| ABB        | PVB/PVP-S 12 kV          | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/iec-outdoor-vacuum-circuit-breaker-pvb-pvb-s">http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/circuit-breakers/outdoor/iec-outdoor-vacuum-circuit-breaker-pvb-pvb-s</a>  |
| ABB        | GSec 24 kV               | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/isolators-switches-disconnectors/indoor-switches/gas-insulated-switches/iec-secondary-gas-switch-disconnector-gsec">http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/isolators-switches-disconnectors/indoor-switches/gas-insulated-switches/iec-secondary-gas-switch-disconnector-gsec</a>  |
| ABB        | SFG 24 kV                | <a href="http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/isolators-switches-disconnectors/indoor-switches/gas-insulated-switches/iec-indoor-gas-switch-disconnectors-sfg">http://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/isolators-switches-disconnectors/indoor-switches/gas-insulated-switches/iec-indoor-gas-switch-disconnectors-sfg</a>  |

| Hersteller | Produkt                            | Link  |
|------------|------------------------------------|---|
| Eaton      | MMS 24 kV                          | <a href="http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/PrimarySwitchgear/MMS/index.htm">http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/PrimarySwitchgear/MMS/index.htm</a>   |
| Eaton      | Power Xpert FMX 24 kV              | <a href="http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/PrimarySwitchgear/PowerXpertFMX/index.htm">http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/PrimarySwitchgear/PowerXpertFMX/index.htm</a>   |
| Eaton      | Power Xpert UX 24 kV               | <a href="http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/PrimarySwitchgear/PowerXpertUX/index.htm">http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/PrimarySwitchgear/PowerXpertUX/index.htm</a>   |
| Eaton      | xGear 24 kV                        | <a href="http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/PrimarySwitchgear/xGear/index.htm">http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/PrimarySwitchgear/xGear/index.htm</a>   |
| Eaton      | Xiria E 24 kV                      | <a href="http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/SecondarySwitchgear/Xiria-E/index.htm">http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/SecondarySwitchgear/Xiria-E/index.htm</a>   |
| Eaton      | SVS 24 kV                          | <a href="http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/SecondarySwitchgear/SVS/index.htm">http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/SecondarySwitchgear/SVS/index.htm</a>   |
| Eaton      | Magnefix 15 kV                     | <a href="http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/RingMainUnits/Magnefix/index.htm">http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/RingMainUnits/Magnefix/index.htm</a>   |
| Eaton      | Xiria 24 kV                        | <a href="http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/RingMainUnits/Xiria/index.htm">http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/RingMainUnits/Xiria/index.htm</a>   |
| GE         | F35 (SF <sub>6</sub> )             | <a href="http://www.gegridsolutions.com/HVMV_Equipment/catalog/f35.htm">http://www.gegridsolutions.com/HVMV_Equipment/catalog/f35.htm</a>   |
| GE         | F35 (g <sup>3</sup> )              | <a href="http://www.gegridsolutions.com/HVMV_Equipment/catalog/f35.htm">http://www.gegridsolutions.com/HVMV_Equipment/catalog/f35.htm</a>   |
| GE         | Hams Hall in UK 420 kV             | <a href="http://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/Global/CleanGrid/Resources/Documents/Gas%20Insulated%20Lines%20-%20Think%20Grid%20n%C2%B07.pdf">http://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/Global/CleanGrid/Resources/Documents/Gas%20Insulated%20Lines%20-%20Think%20Grid%20n%C2%B07.pdf</a>   |
| GE         | g3 GIL up to 800 kV                | <a href="https://www.gegridsolutions.com/HVMV_Equipment/catalog/GIL.htm">https://www.gegridsolutions.com/HVMV_Equipment/catalog/GIL.htm</a>   |
| GE         | GL 309 72.5 kV                     | <a href="https://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/global/Resources/Documents/AIS/AIS/01_Live%20Tank%20CBR_ok/Grid-AIS-L3-GL_309-0097-2015_10-EN.pdf">https://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/global/Resources/Documents/AIS/AIS/01_Live%20Tank%20CBR_ok/Grid-AIS-L3-GL_309-0097-2015_10-EN.pdf</a>   |
| GE         | VL 109 72.5 kV                     | <a href="http://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/cleangrid/clean-products/products-and-solutions/eco-design/index.html">http://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/cleangrid/clean-products/products-and-solutions/eco-design/index.html</a>   |
| GE         | g3 current transformer 245 kV      | <a href="https://www.gegridsolutions.com/app/Resources.aspx?prod=SKF&amp;type=1">https://www.gegridsolutions.com/app/Resources.aspx?prod=SKF&amp;type=1</a>   |
| GE         | PABS Air-to-SF <sub>6</sub> 245 kV | <a href="http://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/products-services/product-catalogue/electrical-grid-new/electrical-substation-ais/power-transformers/bushings/index.html">http://www.gegridsolutions.com/alstomenergy/grid/products-services/product-catalogue/electrical-grid-new/electrical-substation-ais/power-transformers/bushings/index.html</a> |
| GE         | PWO 245 kV                         | <a href="https://www.gegridsolutions.com/AlstomEnergy/grid/Global/Grid/Resources/Documents/Products/Grid-PTR-L3-Bushings_expertise-0225-2015_10-EN.pdf">https://www.gegridsolutions.com/AlstomEnergy/grid/Global/Grid/Resources/Documents/Products/Grid-PTR-L3-Bushings_expertise-0225-2015_10-EN.pdf</a>   |
| GE         | SecoGear Metal Clad 17.5 kV        | <a href="https://www.gepowercontrols.com/ex/resources/literature_library/catalogs/medium_voltage/downloads/SecoGear-SecoVac_Catalogue_English_ed09-11_680878-u.pdf">https://www.gepowercontrols.com/ex/resources/literature_library/catalogs/medium_voltage/downloads/SecoGear-SecoVac_Catalogue_English_ed09-11_680878-u.pdf</a>                                 |
| GE         | Power/Vac ** Metal Clad 15 kV      | <a href="http://www.geindustrial.com/products/switchgear/powervac-metal-clad-switchgear">http://www.geindustrial.com/products/switchgear/powervac-metal-clad-switchgear</a>   |
| Ormazabal  | Cpg.1 24 kV                        | <a href="http://www.ormazabal.com/en/your-business/products/cpg1-24-kv-iec-2000-315-ka">http://www.ormazabal.com/en/your-business/products/cpg1-24-kv-iec-2000-315-ka</a>   |
| Ormazabal  | Cpg.0 24 kV                        | <a href="http://www.ormazabal.com/en/your-business/products/cpg0-24-kv-iec-2500-25-ka">http://www.ormazabal.com/en/your-business/products/cpg0-24-kv-iec-2500-25-ka</a>   |
| Ormazabal  | Gae1250k max 24 kV                 | <a href="http://www.ormazabal.com/de/ihr-gesch%C3%A4ft/produkte/gae1250kmax-24-kv-1250-25-ka">http://www.ormazabal.com/de/ihr-gesch%C3%A4ft/produkte/gae1250kmax-24-kv-1250-25-ka</a>   |

| Hersteller         | Produkt                       | Link  |
|--------------------|-------------------------------|---|
| Ormazabal          | Amc 17.5 kV                   | <a href="http://www2.ormazabal.com/sites/default/files/descargas/CA-505-EN-1303.pdf">http://www2.ormazabal.com/sites/default/files/descargas/CA-505-EN-1303.pdf</a>   |
| Ormazabal          | gae 24 kV                     | <a href="http://www.ormazabal.com/de/ihr-gesch%C3%A4ft/produkte/gae-24-kv-630-20-ka">http://www.ormazabal.com/de/ihr-gesch%C3%A4ft/produkte/gae-24-kv-630-20-ka</a>   |
| Ormazabal          | ea 24 kV                      | <a href="http://www2.ormazabal.com/en/nuestras-l%C3%ADneas-de-negocio/air-insulated-cubicles-secondary">http://www2.ormazabal.com/en/nuestras-l%C3%ADneas-de-negocio/air-insulated-cubicles-secondary</a>   |
| Pfiffner           | JGF 245 – 550 kV              | <a href="http://www.pfiffner-group.com/fileadmin/files/documents/20_products/JGF_EN.pdf">http://www.pfiffner-group.com/fileadmin/files/documents/20_products/JGF_EN.pdf</a>   |
| Schneider Electric | MCset 24 kV                   | <a href="http://www.schneider-electric.com/en/product-range/985-mcset-24-kv">http://www.schneider-electric.com/en/product-range/985-mcset-24-kv</a>   |
| Schneider Electric | PIX 24 kV                     | <a href="http://www.schneider-electric.com/en/product-range/60678-pix">http://www.schneider-electric.com/en/product-range/60678-pix</a>   |
| Schneider Electric | GMA 24 kV                     | <a href="http://www.schneider-electric.com/en/product-range/60686-gma">http://www.schneider-electric.com/en/product-range/60686-gma</a>   |
| Schneider Electric | SM6-24 (SF <sub>6</sub> )     | <a href="http://www.schneider-electric.com/en/product-range/970-sm6-24">http://www.schneider-electric.com/en/product-range/970-sm6-24</a>   |
| Schneider Electric | SM6-24                        | <a href="http://www.schneider-electric.com/en/product-range/970-sm6-24">http://www.schneider-electric.com/en/product-range/970-sm6-24</a>   |
| Schneider Electric | FBX-E                         | <a href="http://www.schneider-electric.com/id/en/download/results/0/0?au_i_3_4_0_1_170=FBX-E&amp;keywordForm=FBX-E">http://www.schneider-electric.com/id/en/download/results/0/0?au_i_3_4_0_1_170=FBX-E&amp;keywordForm=FBX-E</a>   |
| Schneider Electric | Evolis withdrawable           | <a href="http://www.schneider-electric.com/id/en/download/results/0/0?previousPage=&amp;H1PreviousPage=&amp;orderByCol=&amp;keyword=Evolis+withdrawable&amp;searchAttributeFilter=all&amp;+userAction=true&amp;languageId=0&amp;languageId=1555684&amp;docTypeGroupId=7357956&amp;keywordForm=Evolis+withdrawable&amp;notSearchWithDefaultLangauge=true">http://www.schneider-electric.com/id/en/download/results/0/0?previousPage=&amp;H1PreviousPage=&amp;orderByCol=&amp;keyword=Evolis+withdrawable&amp;searchAttributeFilter=all&amp;+userAction=true&amp;languageId=0&amp;languageId=1555684&amp;docTypeGroupId=7357956&amp;keywordForm=Evolis+withdrawable&amp;notSearchWithDefaultLangauge=true</a> |
| Schneider Electric | HVX withdrawable              | <a href="http://www.schneider-electric.com/id/en/download/results/0/0/Evolis+withdrawable/searchForm?p_auth=t5KfyEIC&amp;_downloadcenter_WAR_downloadcenterRFportlet_docTypeGroupId=7357956">http://www.schneider-electric.com/id/en/download/results/0/0/Evolis+withdrawable/searchForm?p_auth=t5KfyEIC&amp;_downloadcenter_WAR_downloadcenterRFportlet_docTypeGroupId=7357956</a>   |
| Schneider Electric | SF2 fixed                     | <a href="http://www.schneider-bgclub.com/catalog/2_Aparatura_SrN/3.Aparati_Sredno_naprejenje/Katalozi/SF_circuit%20breakers_EN.pdf">http://www.schneider-bgclub.com/catalog/2_Aparatura_SrN/3.Aparati_Sredno_naprejenje/Katalozi/SF_circuit%20breakers_EN.pdf</a>   |
| Schneider Electric | Rollarc 12 kV                 | <a href="http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=NRJED111211EN-V3&amp;p_EnDocType=Brochure&amp;p_File_Id=3498085192&amp;p_File_Name=NRJED111211EN-web.pdf">http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=NRJED111211EN-V3&amp;p_EnDocType=Brochure&amp;p_File_Id=3498085192&amp;p_File_Name=NRJED111211EN-web.pdf</a>   |
| Schneider Electric | CBX 12 kV                     | <a href="http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=NRJED111211EN-V3&amp;p_EnDocType=Brochure&amp;p_File_Id=3498085192&amp;p_File_Name=NRJED111211EN-web.pdf">http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=NRJED111211EN-V3&amp;p_EnDocType=Brochure&amp;p_File_Id=3498085192&amp;p_File_Name=NRJED111211EN-web.pdf</a>   |
| Schneider Electric | CVX 12 kV                     | <a href="http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=NRJED111211EN-V3&amp;p_EnDocType=Brochure&amp;p_File_Id=3498085192&amp;p_File_Name=NRJED111211EN-web.pdf">http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=NRJED111211EN-V3&amp;p_EnDocType=Brochure&amp;p_File_Id=3498085192&amp;p_File_Name=NRJED111211EN-web.pdf</a>   |
| Siemens            | High-Voltage Circuit Breakers | <a href="http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/circuit-breaker/Portfolio_en.pdf">http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/circuit-breaker/Portfolio_en.pdf</a>   |
| Siemens            | 8DM1                          | <a href="http://www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/gas-insulated/8dm1/8DM1_Flyer_en.pdf">http://www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/gas-insulated/8dm1/8DM1_Flyer_en.pdf</a>   |
| Siemens            | TAG 72.5 – 550 kV             | <a href="http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/high-voltage-products-reliable-products_EN.pdf">http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/high-voltage-products-reliable-products_EN.pdf</a>   |
| Siemens            | IOSK 40.5– 550 kV             | <a href="http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/high-voltage-products-reliable-products_EN.pdf">http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/high-voltage-products-reliable-products_EN.pdf</a>   |
| Siemens            | TVG 72.5-245 kV               | <a href="http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Induktive-Spannungswandler/SF6-isolierte-induktive-Spannungswandler">http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Induktive-Spannungswandler/SF6-isolierte-induktive-Spannungswandler</a>   |
| Siemens            | SVS 72.5-800 kV               | <a href="http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Induktive-Spannungswandler/SF6-isolierte-induktive-Spannungswandler">http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Induktive-Spannungswandler/SF6-isolierte-induktive-Spannungswandler</a>   |

| Hersteller | Produkt                                | Link  |
|------------|--|---|
| Siemens    | VEOT/S<br>72.5-<br>550 kV              | <a href="http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Induktive-Spannungswandler/Oel-isolierte-induktive-Spannungswandler">http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Induktive-Spannungswandler/Oel-isolierte-induktive-Spannungswandler</a>   |
| Siemens    | IVOKT and<br>TMC 72.5<br>– 300 kV      | <a href="http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/high-voltage-products-reliable-products_EN.pdf">http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/high-voltage-products-reliable-products_EN.pdf</a>   |
| Siemens    | SVAS 72.5<br>– 800 kV                  | <a href="http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Kombinierte-Strom-und-Spannungswandler/SF6-isolierte-Kombinationswandler">http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Kombinierte-Strom-und-Spannungswandler/SF6-isolierte-Kombinationswandler</a>   |
| Siemens    | AVG 72.5-<br>300 kV                    | <a href="http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Kombinierte-Strom-und-Spannungswandler/SF6-isolierte-Kombinationswandler">http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Kombinierte-Strom-und-Spannungswandler/SF6-isolierte-Kombinationswandler</a>   |
| Siemens    | SA/SAS<br>Current-T<br>72.5-<br>800 kV | <a href="http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Messwandler-fuer-gas-isolierte-Schaltanlagen/node_763">http://www.trenchgroup.com/Produkte-Loesungen/Messwandler/Messwandler-fuer-gas-isolierte-Schaltanlagen/node_763</a>   |
| Siemens    | SU/SUD<br>Voltage-T<br>72.5-<br>800 kV | <a href="http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/energy-topics/power%20engineering%20guide/71/06-Products-and-Devices.pdf">http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/energy-topics/power%20engineering%20guide/71/06-Products-and-Devices.pdf</a>   |
| Siemens    | NXAIR                                  | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/air-primary-distribution-systems/Pages/nxair-family.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/air-primary-distribution-systems/Pages/nxair-family.aspx</a>   |
| Siemens    | 8BT1<br>(≤24 kV)                       | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/air-primary-distribution-systems/Pages/8bt1.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/air-primary-distribution-systems/Pages/8bt1.aspx</a>   |
| Siemens    | 8BT2<br>(≥24 kV)                       | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/air-primary-distribution-systems/Pages/8bt2.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/air-primary-distribution-systems/Pages/8bt2.aspx</a>   |
| Siemens    | 8DA10                                  | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/gis-primary-distribution-systems/Pages/8da10.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/gis-primary-distribution-systems/Pages/8da10.aspx</a>   |
| Siemens    | NXPIUS C                               | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/mv/mittelspannungsschaltanlagen/gasisolierte-schaltanlagen-fuer-sekundaere-verteilungsnetze/Seiten/nxplus-c-einfach.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/mv/mittelspannungsschaltanlagen/gasisolierte-schaltanlagen-fuer-sekundaere-verteilungsnetze/Seiten/nxplus-c-einfach.aspx</a>                                       |
| Siemens    | NXPIUS<br>40.5 kV                      | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/gis-primary-distribution-systems/Pages/nxplus-single.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/gis-primary-distribution-systems/Pages/nxplus-single.aspx</a>   |
| Siemens    | NXPLUS C<br>WIND<br>36 kV              | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/gis-primary-distribution-systems/Pages/nxplus-c-wind.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-switch-gear/gis-primary-distribution-systems/Pages/nxplus-c-wind.aspx</a>   |
| Siemens    | 8DJH                                   | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/mv/mittelspannungsschaltanlagen/gasisolierte-schaltanlagen-fuer-sekundaere-verteilungsnetze/Seiten/8djh.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/mv/mittelspannungsschaltanlagen/gasisolierte-schaltanlagen-fuer-sekundaere-verteilungsnetze/Seiten/8djh.aspx</a>   |
| Siemens    | 8DJH com-<br>pact                      | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/mv/mittelspannungsschaltanlagen/gasisolierte-schaltanlagen-fuer-sekundaere-verteilungsnetze/Seiten/8djhcompact.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/mv/mittelspannungsschaltanlagen/gasisolierte-schaltanlagen-fuer-sekundaere-verteilungsnetze/Seiten/8djhcompact.aspx</a>   |
| Siemens    | SIMOSEC                                | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/mv/mittelspannungsschaltanlagen/luftisolierte-schaltanlagen-fuer-sekundaere-verteilungsnetze/Seiten/luftisolierte-schaltanlage-simosec.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/DE/mv/mittelspannungsschaltanlagen/luftisolierte-schaltanlagen-fuer-sekundaere-verteilungsnetze/Seiten/luftisolierte-schaltanlage-simosec.aspx</a> |
| Siemens    | 3AF0 12 -<br>40.5 kV                   | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-outdoor-devices/Pages/life-tank-outdoor-vacuum-circuit-breaker-3af0.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-outdoor-devices/Pages/life-tank-outdoor-vacuum-circuit-breaker-3af0.aspx</a>   |
| Siemens    | SDV6 15 –<br>38 kV                     | <a href="http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-outdoor-devices/Pages/dead-tank-outdoor-circuit-breaker-scv6.aspx">http://w3.siemens.com/powerdistribution/global/EN/mv/medium-voltage-outdoor-devices/Pages/dead-tank-outdoor-circuit-breaker-scv6.aspx</a>   |
| Siemens    | 3AF04<br>/3AF05<br>27.5 kV             | <a href="http://w3.siemens.nl/powerdistribution/nl/nl/mv/medium-voltage-outdoor-devices/Pages/life-tank-outdoor-vacuum-circuit-breakers-3af04-3af05.aspx#">http://w3.siemens.nl/powerdistribution/nl/nl/mv/medium-voltage-outdoor-devices/Pages/life-tank-outdoor-vacuum-circuit-breakers-3af04-3af05.aspx#</a>   |
| Siemens    | 8VN1 Blue<br>GIS<br>145 kV             | <a href="http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/high-voltage-products/gas-insulated-switchgear/8vn1.htm#content=Technical%20Data">http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/high-voltage-products/gas-insulated-switchgear/8vn1.htm#content=Technical%20Data</a>   |

| Hersteller | Produkt          | Link  |
|------------|------------------|---|
| Siemens    | 8DN8-6<br>170 kV | <a href="http://www.energy.siemens.com/hq/de/stromuebertragung/hochspannungsprodukte/gasisolierte-schaltanlagen/8dn8.htm">http://www.energy.siemens.com/hq/de/stromuebertragung/hochspannungsprodukte/gasisolierte-schaltanlagen/8dn8.htm</a> |

## 10.5 Abbildungen von Komponenten



Abbildung 26: Leistungsschalter  
Quelle: [ABB]



Abbildung 27: Lastschalter  
Quelle: [ABB]



Abbildung 28: Trennschalter  
Quelle: [ABB]



Abbildung 29: SF6 Tank mit eingebautem Lasttrennschalter, Erdungsschalter und Antrieb  
Quelle: [ABB]



Abbildung 30: Erdungsschalter  
Quelle: [ABB]

## 10.6 LCA – Life Cycle Assessment von gasisolierten Schaltanlagen

Neben dem Vergleich des GWP eines Isoliergases, können Life-Cycle-Assessments (LCAs) zur Bewertung der Umweltbilanz eines gasisolierten Betriebsmittels herangezogen werden. LCAs (im Englischen: life cycle assessment) [ISO 14040, 2006] dienen dazu, die gesamten Umweltwirkungen eines Betriebsmittels über seinen Lebenszyklus zu berechnen. Dazu müssen alle Prozesse, welche direkt oder indirekt Auswirkungen auf die Umwelt (z. B. Beitrag zum Treibhauseffekt, Ozonloch, saurer Regen, Smogbildung) verursachen, von der Produktion bis zur Entsorgung einer Anlage betrachtet werden. Die Einflussgrößen auf die Umweltwirkungen sind vielfältig und umfassen u.a.: Material, Strommix, Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, sowie des Endprodukts, Transport, Emissionen (Abfälle, Abwasser, Gase) sowie Wärmeverluste.

Für einige in Kapitel 6 betrachteten Schaltanlagen der Hoch- und Höchstspannung wurden LCAs durchgeführt. Tabelle 45 gibt eine Übersicht über die in diesen LCAs angenommenen Eingangsgrößen. Tabelle 46 zeigt die Ergebnisse der Studien. **Aufgrund der Vielzahl und Intransparenz der benötigten Eingangsgrößen bzw. Randbedingungen lassen sich die LCAs mit dem gegenwärtigen Erkenntnisstand nicht reproduzieren und ein direkter Vergleich zwischen verschiedenen Herstellern ist somit nicht möglich.** Insbesondere unterschiedlich angenommene Parameter wie Lebensdauer, Gasverlust, Zuordnung der Gasverluste zu Material, Herstellung, Transport lassen einen Pauschalvergleich der LCAs nicht zu.

Die verschiedenen Hersteller forcieren dabei jeweils einen Vergleich ihrer SF<sub>6</sub>-GIS mit ihrer SF<sub>6</sub>-freien Alternative. Die Gesamtumweltwirkungen werden jeweils über CO<sub>2</sub>-Äquivalente über die gesamte Lebensdauer definiert. Hierbei geben die Studien jedoch keine absoluten Werte für das CO<sub>2</sub>-Äquivalent, sondern lediglich prozentuale Verbesserungen gegenüber der SF<sub>6</sub>-Alternativen.

Das berechnete Umweltpotential einer Anlage ist äußerst sensitiv auf die angenommenen SF<sub>6</sub>-Emissionen während Produktion, Betrieb und Entsorgung. Die Hersteller nehmen SF<sub>6</sub>-Leckraten über den gesamten Lebenszyklus von ca. 0,1% pro Jahr an. Dieser Wert liegt sowohl unter der IEC-Norm (0,5 %), unter dem IPCC-Wert (2,6 % inklusive Handhabungsverluste und Störfälle) als auch unter dem Wert einer Studie für das französische Stromsystem (ca. 1%, [Dullni et al., 2015]) (siehe dazu auch Abschnitt 3). Selbst unter den von den Herstellern angenommenen (optimistischen) SF<sub>6</sub>-Leckraten von ca. 0,1 %, ist der Beitrag von SF<sub>6</sub>-Emissionen zum gesamten Umweltpotential ca. 45-77 %.

Zudem ist der Einfluss der Kategorie „Material/Herstellung/Transport“ auf die Umweltbilanz für SF<sub>6</sub>-freie Anlagen nur geringfügig höher (ABB) bzw. sogar niedriger (GE, Siemens) als für SF<sub>6</sub>-Anlagen. Die Kategorie „Material/Herstellung/Transport“ in Tabelle 45 berücksichtigt für die Produkte von Siemens und GE auch die SF<sub>6</sub>-Verluste bei der Herstellung von Gas und Schaltanlage. Im Falle von Siemens und GE, wird der Mehrbedarf an Stahl/Aluminium für SF<sub>6</sub>-freie Anlagen u a. durch das Wegfallen der SF<sub>6</sub>-Emissionen bei der Schaltanlagen- und SF<sub>6</sub>-Produktion hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Äquivalents überkompensiert.

Unter den getroffenen Annahmen ermöglichen die jeweiligen SF<sub>6</sub>-freien Produkte eine deutliche Reduktion des Umweltpotentials von HS-Schaltanlagen, laut Herstellerangaben zwischen 30-70 %.

**Tabelle 45 Gegenüberstellung ausgewählter Annahmen- und Eingangsgrößen für LCAs verschiedener SF<sub>6</sub>- und Alternativgas-isolierter Schaltanlagen (GIS) europäischer Hersteller für die Hochspannung**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von [Presser et al., 2016] und Interviews

| Annahmen und Eingangsgrößen | ABB SF <sub>6</sub>             | ABB AirPlus         | GE SF <sub>6</sub>   | GE g <sub>3</sub> | Siemens SF <sub>6</sub>                                | Siemens Clean Air  |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|--|-------------------|--|--------------------|
| Lebensdauer (in Jahren)     | 30                              | 30                  | 40   | 40                | 50   | 50                 |
| Strommix                    | Europäischer Strommix           |                     |  |                   |  |                    |
| Lastprofil                  | 100% der Zeit auf 50% Nennstrom |                     | 80% der Zeit auf 25% Nennstrom, 20% der Zeit auf 60% Nennstrom |                   | 100% der Zeit auf 50% Nennstrom [Presser et al., 2016] |                    |
| Gas Verluste (Leckrate)     | 0,1 % pro Jahr                  | 0,1 % pro Jahr      | 0,2 % pro Jahr   | 0,2 % pro Jahr    | ≤0,1 % pro Jahr  | ≤0,1 % pro Jahr    |
| Gas Verluste (Recycling)    | 1 %                             | 1 %                 |  |                   | 0,01 %   | 0,01 %             |
| Gas Verluste (Wartung)      | 1 % pro Lebensdauer             | 1 % pro Lebensdauer |  |                   | 0,01 % pro Service                                     | 0,01 % pro Service |
| Serviceintervalle (Jahre)   | nicht angegeben                 | nicht angegeben     | nicht angegeben  | nicht angegeben   | 25   | 25                 |

**Tabelle 46: Einfluss von Gasemission, Wärmeverlust und Material auf das gesamte CO<sub>2</sub>-Äquivalent einer HS-Schaltanlage durch unterschiedliche, verwendete Methoden. GE und Siemens berücksichtigen Emissionen aus SF<sub>6</sub> Herstellung und Herstellerphase der Anlagen.**

Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von [Presser et al., 2016] [Gautschi, 2016] und Interviews

| Einfluss von Umweltfaktoren auf das Umweltpotential [%] | ABB SF <sub>6</sub> | ABB AirPlus | GE SF <sub>6</sub> | GE g <sup>3</sup> | Siemens SF <sub>6</sub> | Siemens Clean Air |
|---|---------------------|-------------|--------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Gasemission   | 45 %                | 0 %         | 67 %               | <1 %              | 77 %                    | 51 %              |
| Wärmeverlust  | 46 %                | 38 %        | 6 %                | 6 %               |                         |                   |
| Material/ Herstellung/ Transport                        | 9 %                 | 12 %        | 27 %               | 23 %              | 23 %                    | 17 %              |

## Quellenverzeichnis

3M (2015a): *3M™ Novec™ 4710 Dielectric Fluid*.

3M (2015b): *3M™ Novec™ 5110 Dielectric Fluid*.

ABB; Alstom; Brugg Kabel; Cellpack Power Systems; Nexans Suisse; Pfiffner Messwandler et al. (2012): *Erklärung zu SF6 in elektrischen Schaltgeräten und -anlagen in der Schweiz. Daten zur SF6-Technologie bezüglich Ökologie und Sicherheit*.

ABB; Areva; EnBW; EON; RWE; Siemens; SOLVAY (2003): *SF6-GIS-Technology for Power Distribution – Medium Voltage – Life Cycle Assessment*.

AFBEL (2013): *Aplicacion Reglamento del Impuesto sobre Gases Fluorados (2013)*.

Agricola; Höflich; Richard; Völker; Rehtanz; Greve et al. (2012): *Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030. dena-Verteilnetzstudie*.

Baer, G.; Duerschner, R.; Koch, H. (2002): *25 Jahre Betriebserfahrung mit GIL – heutige Anwendungsmöglichkeiten*. In: etz (2002), Nr. 1-2.

Balzer, G.; Drescher, D.; Meister, R.; Kirchesch, P.; Neumann, C.; Heil, F. (2004): *Evaluation of failure data of HV circuit-breakers for condition based maintenance*. CIGRE.

Benner, Jos; van Lieshout, Marit; Croezen, Harry (2012): *Abatement cost of SF6 emissions from medium voltage switchgear. Validation of recent studies for the European Commission*. Delft.

Blackman, Jerome (2017): *SF6 Emission Reduction Partnership for Electric Power Systems: 2017 Program Update*. EPA.

Bohn, Toralf (2016): *FNN-Position. Alternativen für den Einsatz von SF6 in der Energietechnik*. Forum Netztechnik / Netzbetrieb (FNN) im VDE e.V.

Boletín oficial del estado (Hg.) (2013): *Disposición 11331 del BOE núm. 260 de 2013*.

Büchner, J.; Katzfey, J.; Flörcken, O.; Moser, A.; Schuster, H.; Dierkes et al. (2014): *„Moderne Verteilernetze für Deutschland“ (Verteilernetzstudie). Abschlussbericht*.

Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) (2015): *Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland*.

Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC) (2015): *Atmospheric Histories (1765-2015) for CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCl4, SF6 and N2O*. CDIAC.

Cavaliere, C.; Kreisel, R. (2013): *Pushing the limits of technology*. ABB.

Chu, F. Y. (1986): *SF6 Decomposition in Gas-Insulated Equipment*. In: IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-21. Jg., Nr. 5, S. 693–725.

Claessens, M. (2017): *Schalten in alternativen Isolationsgasen. GIS-Anwenderforum TU Darmstadt*.

Dervos, Constantine T.; Vassiliou, Panayota (2000): *Sulfur Hexafluoride (SF6): Global Environmental Effects and Toxic Byproduct Formation*. In: Journal of the Air & Waste Management Association, 50. Jg., Nr. 1, S. 137–141.

- Dong, Ming; Zhang, Chongxing; Ren, Ming; Albarracín, Ricardo; Ye, Rixin (2017): *Electrochemical and Infrared Absorption Spectroscopy Detection of SF<sub>6</sub> Decomposition Products*. In: Sensors (Basel, Switzerland), 17. Jg., Nr. 11.
- Dullni, Edgar; Endre, Thor; Kieffel, Yannick; Coccioni, Renzo (2015): *Reducing SF<sub>6</sub> emissions from electrical switchgear*. In: Carbon Management, 6. Jg., Nr. 3-4, S. 77–87.
- Duncan Brack (2015): *National Legislation on Hydrofluorocarbons*.
- E-Bridge; IAEW; OFFIS (2014): *Moderne Verteilernetze für Deutschland „Verteilernetzstudie“*. Berlin.
- EDGAR project team (2010): *Joint Research Centre. EDGAR - Emission Database for Global Atmospheric Research*. European Commission. Online verfügbar unter <http://edgar.jrc.ec.europa.eu/>, abgerufen am 12.10.2016.
- Energy Networks Association Limited (2013a): *Lobbying success on SF<sub>6</sub>*. Online verfügbar unter <http://www.energy-networks.org/blog/2013/07/01/lobbying-success-on-sf6/>, abgerufen am 27.10.2016.
- Energy Networks Association Limited (2013b): *Progress towards solution for SF<sub>6</sub> ban*. Online verfügbar unter <http://www.energynetworks.org/blog/2013/05/13/progress-towards-solution-for-sf6-ban/>, abgerufen am 27.10.2016.
- Europäische Union (EU) (2012): *Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission*.
- 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*.
- European Commission (EC) (2016): *Climate Action. The EU Emissions Trading System (EU ETS)*. Online verfügbar unter [http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm), abgerufen am 28.10.2016.
- Fang, X.; Thompson, R. L.; Saito, T.; Yokouchi, Y.; Kim, J.; Li, S. et al. (2013a): *Sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) emissions in East Asia determined by inverse modeling*. In: Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 13. Jg., Nr. 8, S. 21003–21040.
- Fang, Xuekun; Hu, Xia; Janssens-Maenhout, Greet; Wu, Jing; Han, Jiarui; Su, Shenshen et al. (2013b): *Sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) emission estimates for China: an inventory for 1990-2010 and a projection to 2020*. In: Environmental science & technology, 47. Jg., Nr. 8, S. 3848–3855.
- Forum Netztechnik / Netzbetrieb (FNN) im VDE e.V. (FNN) (2016): *Auswertung von SF<sub>6</sub>-Mengen im Bestand (Mittel-/Hoch-/Höchstspannung)*.
- Forum Netztechnik / Netzbetrieb im VDE e.V. (FNN) (Hg.) (2014): *Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik. Berichtsjahr 2013 (FNN-Hinweis)*.
- Gautschi, D. (2016): *Comparison of a 145 kV GIS using SF<sub>6</sub> and C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N / CO<sub>2</sub>*. Cigré SC B3 Discussion Group Meeting. Paris, 2016.

- Guder, C.; Wagner, W. (2009): *A Reference Equation of State for the Thermodynamic Properties of Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) for Temperatures from the Melting Line to 625 K and Pressures up to 150 MPa*. In: Journal of Physical and Chemical Reference Data, 38. Jg., Nr. 1, S. 33–94.
- Hyrenbach, M.; Saxegaard, M.; Attar, E.q (2017): *Stromunterbrechung in SF<sub>6</sub>-Alternativen für eine Mittelspannungsschaltanlage*. GIS-Anwender Forum TU Darmstadt.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006): *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3: Industrial Processes and Product Use*. Online verfügbar unter <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol3.html>, abgerufen am 28.10.2016.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- International Carbon Action Partnership (ICAP) (2016): *ETS MAP*. Online verfügbar unter <https://icapcarbonaction.com/en/ets-map?etsid=51>, abgerufen am 12.10.2016.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2016): *TC 17 High-voltage switchgear and controlgear. AHG 5 - Alternative gases*. Online verfügbar unter [http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_LANG\\_ID:13020,25](http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:0:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:13020,25), abgerufen am 28.10.2016.
- ISO 14040 (2006): *Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework*. 2006. Aufl., 2006.
- Jacob, Klaus; Guske, Anna-Lena; Pestel, Nico; Range, Claire; Sommer, Eric; Weiland, Sabine; Pohlmann, Jonas (2016): *Verteilungswirkungen umweltpolitischer Maßnahmen und Instrumente*. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Jänicke, Martin; Kunig, Philipp; Stitzel, Michael (2003): *Lern- und Arbeitsbuch Umweltpolitik. Politik, Recht und Management des Umweltschutzes in Staat und Unternehmen*. Bonn.
- Kahle, Manfred (1988): *Elektrische Isoliertechnik*. 1. Aufl. Berlin: Verl. Technik.
- Koch, D. (2003): *SF<sub>6</sub> properties and use in MV and HV switchgear*.
- Kraut, A.; Lilis, R. (1990): *Pulmonary effects of acute exposure to degradation products of sulphur hexafluoride during electrical cable repair work*. In: British journal of industrial medicine, 47. Jg., Nr. 12, S. 829–832.
- Küchler, Andreas (2009): *Hochspannungstechnik*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Leonhardt, Guenter; Marchi, Mauro; Rivetti, Giandomenico (2000): *SF<sub>6</sub> oder Vakuum? Welcher MS-Leistungsschalter ist der richtige?* In: ABB Technik, 4.
- Levin, I.; Naegler, T.; Heinz, R.; Osusko, D.; Cuevas, E.; Engel, A. et al. (2010): *The global SF<sub>6</sub> source inferred from long-term high precision atmospheric measurements and its comparison with emission inventories*. In: Atmospheric Chemistry and Physics, 10. Jg., Nr. 6, S. 2655–2662.
- Lutz, B.; Juhre, K.; Kessler, F.; Goll, F. (2017): *Untersuchung des Alterungsverhaltens von alternativen Isoliertgasen mit niedrigem Treibhauspotential*. GIS-Anwenderforum TU Darmstadt. Darmstadt.
- MarketsandMarkets (2016): *Ring Main Unit Market. Global Trends & Forecast to 2020*.

- Middleton, R. L. (2000): *Cold Weather Applications of Gas Mixture (SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> and SF<sub>6</sub>/CF<sub>4</sub>) Circuit Breakers: A utility user's perspective* (2000).
- Mosch, Wolfgang; Hauschild, Wolfgang; Kahle, Manfred (1979): *Hochspannungsisolierungen mit schwefelhexafluorid*. Hrsg: M. Kahle: Hüthig Verlag.
- Müller, A. (2009): *Mittelspannungstechnik, Schaltgeräte und Schaltanlagen*. Siemens AG.
- National Institute of Standards and Technology (NIST) (2016): *Chemistry WebBook. Standard Reference Database Number 69*. USA. Online verfügbar unter <http://webbook.nist.gov/chemistry/>, abgerufen am 12.10.2016.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (2014): *Combined Sulfur hexafluoride data from the NOAA/ESRL Global Monitoring Division, Calibration scale used*. Online verfügbar unter <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/hats/combined/SF6.html>, abgerufen am 12.10.2016.
- Neumann, C.; Baur, A.; Büscher, A.; Plöger, F.; Luxa, A.; Zahn, B. et al. (2004): *Electrical Power Supply using SF<sub>6</sub> Technology – an Ecological Life Cycle Assessment*.
- Nordic Council of Ministers (2007): *Potent greenhouse gases. Ways of reducing consumption and emission of HFCs, PFCs and SF<sub>6</sub>*. Copenhagen (In: TemaNord, Band Nr. 2007:556).
- Pilling, K. J.; Jones, H. W. (1988): *Inhalation of Degraded Sulphur Hexafluoride Resulting in Pulmonary Oedema*. In: *Occup Med*, 38. Jg., Nr. 3, S. 82–84.
- Pohlink, Karsten; Meyer, F.; Kieffel, Y.; Biquez, F.; Owens, J.; San, R. van (2016): *Characteristics of a Fluoronitrile/CO<sub>2</sub> Mixture - an Alternative to SF<sub>6</sub>*. D1-204. CIGRE.
- Pollert, Achim; Kirchner, Bernd; Morato, Javier (2016): *Duden Wirtschaft von A bis Z: Grundlagenwissen für Schule und Studium, Beruf und Alltag*. Lizenzausgabe Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung.
- Powell, A. H. (2002): *Environmental aspects of the use of Sulphur Hexafluoride*. ERA Technology Ltd.
- Presser, N.; Orth, C.; Lutz, B.; Kuschel, M.; Teichmann, J. (2016): *Advanced insulation and switching concepts for next generation High Voltage Substations*. In: CIGRE Paris B3-108 (2016).
- Preve, C.; Maladen, R.; Piccoz, D.; Biassé, J.-M. (2016): *Validation method and comparison of SF<sub>6</sub> alternative gases*. CIGRE. Paris.
- Prinn, R. G.; Weiss, R. F.; Fraser, P. J.; Simmonds, P. G.; Cunnold, D. M.; Alyea, F. N. et al. (2000): *A history of chemically and radiatively important gases in air deduced from ALE/GAGE/AGAGE*. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105. Jg., Nr. D14, S. 17751–17792.
- Ray, Eric A.; Moore, Fred L.; Elkins, James W.; Rosenlof, Karen H.; Laube, Johannes C.; Röckmann, Thomas et al. (2017): *Quantification of the SF<sub>6</sub> lifetime based on mesospheric loss measured in the stratospheric polar vortex*. In: *J. Geophys. Res.*, 122. Jg., Nr. 8, S. 4626–4638.
- Republic of Slovenia Ministry of Finance (2016): *Environmental Taxes. Detailed description*.
- Rigby, M.; Mühle, J.; Miller, B. R.; Prinn, R. G.; Krummel, P. B.; Steele, L. P. et al. (2010): *History of atmospheric SF<sub>6</sub> from 1973 to 2008*. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10. Jg., Nr. 21, S. 10305–10320.

- Rigby, M.; Prinn, R. G.; O'Doherty, S.; Miller, B. R.; Ivy, D.; Mühle, J. et al. (2014): *Recent and future trends in synthetic greenhouse gas radiative forcing*. In: Geophysical Research Letters, 41. Jg., Nr. 7, S. 2623–2630.
- Saida, Toshiyuki (2014): *SF<sub>6</sub>-application in the electric power industry. Managing low SF<sub>6</sub>-emission rates on electric power in Japan*. Cigré.
- Schöffner, G.; Kunze, D.; Smith, I. (2006): *Gas Insulated Transmission Lines – Successful Underground Bulk Power Transmission for more than 30 Years*.
- Schwab, Adolf J. (2009): *Elektroenergiesysteme. Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*: Springer.
- Schwarz, W.; Gschrey, B.; Leisewitz, A.; Herold, A.; Gores, S.; Papst, I. et al. (2011): *Preparatory study for a review of Regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases. Prepared for the European Commission in the context of Service Contract No 070307/2009/548866/SER/C4*.
- SKAT (2016): *E.A.7.12.5 Afgiftens størrelse og beregning*. Online verfügbar unter <http://www.skat.dk/SKAT.aspx?oID=1921422&chk=212649>, abgerufen am 31.10.2016.
- Smeets, R.; Falkingham, L.; Backman, M.; Betz, T.; Cotton, I.; Doche, R. (2014): *The Impact of the Application of Vacuum Switchgear at Transmission Voltages*. CIGRE.
- Smythe, Katie (2000): *Production and Distribution of SF<sub>6</sub> by End-Use Application*. In: RAND Environmental Science & Policy Center (2000).
- SOLVAY; VDN; VIK; ZVEI (2005): *Freiwillige Selbstverpflichtung. der SF<sub>6</sub>-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln > 1kV zur elektrischen Energieübertragung und -verteilung in der Bundesrepublik Deutschland zu SF<sub>6</sub> als Isolier- und Löschgas*.
- Statistisches Bundesamt (2015): *Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe "Schwefelhexafluorid" (SF<sub>6</sub>)*.
- Statistisches Bundesamt (DESTATIS) (2016): *Umwelt - Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe "Schwefelhexafluorid" (SF<sub>6</sub>) und "Stickstofftrifluorid" (NF<sub>3</sub>) (2016)*.
- SwissMem (2017a): *SF<sub>6</sub>-Bilanz 2016. Meldung der SF<sub>6</sub>-Branchenlösung an das BAFU*. Online verfügbar unter [https://www.swissmem.ch/fileadmin/user\\_upload/Swissmem/Industrie\\_\\_\\_Politik/Energie\\_Umwelt/2017-04-28\\_DE\\_SF6-Bilanz\\_2016\\_Meldung\\_an\\_das\\_BAFU.pdf](https://www.swissmem.ch/fileadmin/user_upload/Swissmem/Industrie___Politik/Energie_Umwelt/2017-04-28_DE_SF6-Bilanz_2016_Meldung_an_das_BAFU.pdf), abgerufen am 06.10.2017.
- SwissMem (2017b): *SF<sub>6</sub>-Bilanz 2016 - Meldung der SF<sub>6</sub>-Branchenlösung an das BAFU*.
- T&D Europe (2011): *SF<sub>6</sub> in electrical equipment of 1 kV to 52 kV (medium-voltage). Statement on the review of Regulation (EC) No 842/2006 of the European Parliament and of the Council according to Article 10 of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases*.
- T&D Europe (2013a): *Revision of Regulation on fluorinated greenhouse gases (F-Gas regulation) European Commission proposal COM(2012) 643 final of 7 November 2012. Amendments of the European Parliament's ENVI and TRAN Committees (Draft Eickhout and Pargneaux Reports)*.
- T&D Europe (2013b): *T&D Europe Statement to the EU Council on the Draft EU Regulation on F-Gases*.

- T&D Europe (2015a): *T&D Europe position paper on SF6 technology and SF6 alternative technologies. F-Gas Regulation, SF6 Technology and Alternatives for Electrical Switchgear.*
- T&D Europe (2015b): *Technical guide to validate alternative gas for SF6 in electrical equipment.* T&D Europe.
- Tenzer, Michael; Koch, Hermann; Imamovic, Denis (2015): *Compact Systems for High Voltage Direct Current Transmission.*
- Umweltbundesamt (2016): *Die Umsetzung von REACH.* Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-reach/die-umsetzung-von-reach>, abgerufen am 28.10.2016.
- Umweltbundesamt (UBA) (2016): *Daten zu elektrischen Betriebsmitteln in Deutschland.*
- Umweltbundesamt (UBA) (2017): *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2015.* Dessau-Roßlau (Climate Change, 13).
- Union of the Electricity Industry (Eurelectric) (2013): *Power Distribution in Europe. Facts & Figures.*
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2016): *National inventory submissions 2016.* Online verfügbar unter [http://unfccc.int/national\\_reports/annex\\_i\\_ghg\\_inventories/national\\_inventories\\_submissions/items/9492.php](http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/9492.php), abgerufen am 15.01.2018.
- United Nations (UN) (2014a): *Flexible GHG data queries.* Online verfügbar unter <http://unfccc.int/di/FlexibleQueries.do>, abgerufen am 31.10.2016.
- United Nations (UN) (2014b): *Kyoto Protocol.* Online verfügbar unter [http://unfccc.int/kyoto\\_protocol/items/3145.php](http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/3145.php), abgerufen am 27.10.2016.
- VDN; VIK; ZVEI; SOLVAY (2005): *Selbstverpflichtung der SF6-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln > 1kV zur elektrischen Energieübertragung und -verteilung in der Bundesrepublik Deutschland zu SF6 als Isolier- und Löschgas.*
- Wartmann, Sina; Harnisch, Jochen (2005): *Reductions of SF6 Emissions from High and Medium Voltage Electrical Equipment in Europe. Final Report to CAPIEL.* Ecofys. Nürnberg.
- Widger, Phillip (2014): *Investigation into CF3I-CO2 Gas mixtures for insulation of gas-insulated distribution equipment.* Online verfügbar unter <http://orca.cf.ac.uk/64853/>, abgerufen am 27.10.2016.
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI) (2016): *REACH – Priorisierung mit Augenmaß für essentielle Stoffe zur Herstellung elektrischer Betriebsmittel.*
- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI) (2017): *Roadmap zur Reduktion der SF6-Emissionen aus Schaltanlagen und -geräten.* Berlin.



Ecofys - A Navigant Company

Ecofys Germany GmbH

Albrechtstraße 10 c  
10117 Berlin

Tel: +49 (0) 30 29773579-0

Fax: +49 (0) 30 29773579-99

[info@ecofys.com](mailto:info@ecofys.com)

[ecofys.com](http://ecofys.com)