# Betriebserfahrung der ersten 170-kV- und 24-kV-GIS mit alternativem Isolationsmedium basierend auf Ketonen

#### Pascal Müller

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) pascal.mueller@ewz.ch Schweiz

# **Thomas Diggelmann**

ABB Schweiz AG thomas.diggelmann@ch.abb.com Schweiz

## Maik Hyrenbach

ABB Deutschland AG maik.hyrenbach@de.abb.com Deutschland

#### **Michael Mann**

ABB Deutschland AG michael.mann@de.abb.com Deutschland

#### **Denis Tehlar**

ABB Schweiz AG denis.tehlar@ch.abb.com Schweiz

# **Johannes Hengstler**

ABB Schweiz AG johannes.hengstler@ch.abb.com Schweiz

#### Sebastian Zache

ABB Deutschland AG sebastian.zache@de.abb.com Deutschland

#### Stefan Neuhold

Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) neuhold@fkh.ch Schweiz

## **KURZFASSUNG**

Umwelttechnische aber auch politische Gründe haben dazu geführt, dass ewz in Kooperation mit ABB nach Alternativen für die herkömmlichen Gasisolierten Schaltanlagen (GIS) gesucht hat. Mit Erfolg, zusammen lancierten sie als Pilotanlagen die weltweit ersten 170-kV- und 24-kV-GIS mit dem klimafreundlichen alternativem Gasgemisch aus Perfluor Ketonen gemischt mit CO<sub>2</sub> oder N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> im Unterwerk Oerlikon Neu in Zürich. Dem voraus ging eine sehr aufwändige ABB-interne Grundlagenforschung in deren Forschungszentren. Durch eine Lebenszyklusanalyse (ISO 14040) wurde nachgewiesen, dass sich eine Reduzierung von 50% des Treibhauspotentials (GWP) auf 30 Jahre einstellt.

Für das Pilotprojekt konnten bereits existierende Schaltanlagentypen mit geringen Modifikationen insbesondere in der Materialisierung, verwendet werden. Die Anlagen können sowohl mit dem alternativem Gas wie auch mit  $SF_6$  betrieben werden. Der funktionale Aufbau der Schaltanlagen

erfolgte unter der Berücksichtigung der notwendigen Verfügbarkeit. Die Schaltanlagen haben alle IEC-Typprüfungen bestanden.

Die Schaltanlagen wurden nach der Montage durch die Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) nach strengen Kriterien integral und erfolgreich geprüft. Es wurde die Prüfkombination Wechselspannungsprüfung mit empfindlicher TE-Messung angewandt.

Seit September 2015 ist das Unterwerk in Betrieb. Durch die regelmässigen Messungen der Gase durch ABB zeigt sich, dass die Stabilität der Gasmischung den erwarteten Werten entspricht und ein zuverlässiger Betrieb über viele Jahre dieser Pilotanlagen zu erwarten ist. Alle diese Erkenntnisse werden sich in den weiteren Entwicklungsprozessen niederschlagen um zukünftig noch weiter in den Eigenschaften forschen zu können um noch näher an den 1:1-Ersatz von  $SF_6$  und einer Standardisierung zu kommen.



Abb. 1 Unterwerk und Netzstützpunkt Oerlikon Neu, Zürich

#### 1 EINLEITUNG

In den letzten Jahren haben die Diskussionen über die Erderwärmung und damit der Treibhauseffekt enorm an Bedeutung gewonnen: die Auswirkungen auf die Bio-, Hydro- und die Atmosphäre werden immer deutlicher und gravierender.

Um den weltweit weiterhin steigenden Stromverbrauch zu decken, braucht es immer mehr Energiequellen. Nur hat man gemerkt, dass entweder die Ressourcen der bisherigen Techniken irgendwann erschöpft sind oder diese schlicht eine zu grosse Belastung für unsere Umwelt darstellen. Es wird daher fieberhaft nach Lösungen gesucht, Klimagipfel werden abgehalten, Vorschriften werden verschärft und Energiestrategien entwickelt und umgesetzt.

Dieser Wandel macht auch vor der elektrischen Energiebranche nicht halt. Dem vor 50 Jahren eingeführten  $SF_6$ -Gas stehen die Betreiber und auch die Industrie kritischer gegenüber. Obwohl der Anteil der  $SF_6$ -Emissionen aus den Hochspannungsanlagen, gemessen am globalen Ausstoss äusserst klein ist (< 0.1%), reduziert der Einsatz alternativer Substanzen die  $CO_2$ -Belastung durch das Stromnetz spürbar. Tatsache ist,  $SF_6$  hat ein hohes Treibhauspotential (GWP). 1 kg dieses Gases ist, auf einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet, genauso wirksam wie 22'800 kg Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ). Hinzu kommt, dass per 01.01.2015 eine neue EU-Verordnung in Kraft (Verordnung (EU) Nr. 517/2014) trat, welche die Verminderung der Emissionen von F-Gasen bis zum Jahr 2030 um 70% gegenüber 1990 zum Ziel hat.

Da "visionär" einer der Unternehmenswerte von ewz ist, überrascht es nicht, dass ewz als erstes Energieunternehmen weltweit den Schritt wagt, vom klimaschädlichen SF<sub>6</sub>-Gas weg und zu einer neuen, klimafreundlicheren Lösung zu kommen und somit die Bemühungen aus der Industrie unterstützt. Zusammen mit der Firma ABB wurde ein neuer Typ Schaltanlage lanciert: dabei bleibt das Konzept weitestgehend dasselbe, jedoch wird nun ein völlig neuartiges Isoliergasgemisch verwendet. Dieses neuartige Gasgemisch weist ein 22'800-mal tieferes Treibhauspotential wie das SF<sub>6</sub>-Gas aus.

## 2 ENTWICKLUNGSGESCHICHTE

Seit ca. 50 Jahren werden elektrische Betriebsmittel kompakt und effizient gebaut. Die verwendeten Isoliersysteme legen hierfür den Grundstein. Daher ist es notwendig, die konstruktive Ausgestaltung an die Parameter des Isoliersystems anzupassen.

Seit der Einführung von Schwefelhexaflourid (SF<sub>6</sub>) zur elektrischen Isolierung und zur Stromunterbrechung ab den 1970er Jahren wurde SF<sub>6</sub> gerade im Bereich der Gasisolierten Schaltanlagen im Hoch- und Mittelspannungsbereich zum zentralen Isoliersystem. Das beträchtliche Treibhauspotential (GWP) von SF<sub>6</sub> mit einem CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 22'800 führte seit etwa 30 Jahren zu einer Suche nach Alternativen, um den sogenannten CO<sub>2</sub>-Fussabdruck, d.h. die im Rahmen einer strukturierten Lebenszyklusanalyse (LCA) quantifizierte Umweltbelastung signifikant zu senken.

ewz und ABB (BBC) haben bereits in den 1960er Jahren die weltweit erste Hochspannungs-Schaltanlage auf der Spannungsebene 150 kV mit  $SF_6$  in einem gemeinsamen Projekt in Betrieb genommen. Die lange Historie vertrauensvoller Zusammenarbeit hat die Grundlage geschaffen, auch die nächste Generation Gasisolierter Schaltanlagen erstmalig weltweit in einem Pilotprojekt umzusetzen.



Abb. 2 Entwicklung der Gasisolierten Schaltanlagen

## 3 MOTIVATION

ewz zeichnet sich aus, bewusst und nachhaltig zu handeln und dies mit wegeweisenden Energie- und Kommunikationslösungen. Bei der Erstellung von technischen Einrichtungen wird daher nebst wirtschaftlichen Überlegungen besonders ein Augenmerk auf den Platzbedarf, Materialisierung, Lebenserwartung gelegt. ewz möchte mit dieser Neuigkeit nebst dem Umweltgedanken auch den Prozess für Alternativen zu SF<sub>6</sub> anstossen. Beim ewz entsteht im Schnitt jährlich, über alle Anlagen gemessen, ein Gasverlust von 0,1% auf 18'545 kg Gas. Die Verluste entstehen zum einen durch die Undichtigkeit und zum anderen beim Gashandling. Die Pläne, ein Unterwerk (170/24 kV) mit den neuesten technologischen Möglichkeiten hinsichtlich Umweltverträglichkeit auszurüsten, stiessen sehr früh auf das Interesse beim Lieferanten ABB für die Lieferung der Hochspannungs- und



Abb. 3 Strategische Ausrichtung ABB

Mittelspannungsschaltanlagen (HS/ MS-Schaltanlagen). Da zu diesem Zeitpunkt bereits erste Basisuntersuchungen mit den neuen Isoliergasen liefen, wurde diese Möglichkeit vorgestellt und offen diskutiert. Nachdem es sich abzeichnete. dass es sowohl technisch als auch zeitlich zwar herausfordernd aber machbar ist, entschieden die Fachspezialisten und das Management, diesen Weg gemeinsam mit dem Lieferanten einzugehen. Dies fand entsprechende Berücksichtigung sowohl in der Grundlagenforschung als auch in der Produktentwicklung. Letztere wurde sehr genau auf die Bedürfnisse und technischen

Randbedingungen des Pilotprojektes abgestimmt, um den Umfang der notwendigen Aktivitäten einzugrenzen und die Anforderungen zu erfüllen. Die Entwicklung umweltfreundlicher Produkte, die über ihren gesamten Lebenszyklus wenig Ressourcen verbrauchen und somit das Klima schützen, lässt sich in vier Quadranten darstellen (Abb. 2). Obwohl der Anteil der SF<sub>6</sub>-Emissionen aus den HS-Schaltanlagen, gemessen am globalen Ausstoss äusserst klein ist, reduziert der Einsatz alternativer Substanzen die CO<sub>2</sub>-Belastung durch das Stromnetz spürbar. Auch das Berichtswesen, die Überwachung und Nutzungsauflagen werden einfacher.

## 4 ALTERNATIVE GASMISCHUNG

Begonnen hat das Projekt in den ABB-Forschungszentren in der Schweiz und in Schweden. Nachdem das Gasgemisch aus Perfluor Ketonen (C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O, kurz C5 FK), gemischt mit CO<sub>2</sub> oder N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> extensiv untersucht wurde, haben sich die Business-Units *Hochspannung* und *Mittelspannung* von ABB daran gemacht, mit der gefundenen Alternative zu SF<sub>6</sub> einen Piloten zu entwickeln. Dies geschah über einen klar definierten Gate-Prozess, an dessen Ende sowohl eine GIS-Pilotanlage für die Hochspannung wie auch die Mittelspannung resultierte.

# 4.1 Kennwerte der Gasmischung

Die Kennwerte der Gasmischung erlauben Schlüsse für ihren Einsatz in der gasisolierten Schaltanlage zu ziehen. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Kennwerte dargestellt [1].

## 50%-Durchschlagsfeldstärke

Eine der kennzeichnenden dielektrischen Größen ist die Feldstärke, bei der mit 50% Wahrscheinlichkeit ein dielektrischer Durchschlag E<sub>bd,50</sub> auftritt. Zur Gewinnung zuverlässiger Werte sind umfangreiche Untersuchungen notwendig. Die Prüflinge hierfür sind so zu gestalten, dass die erzeugten Feldinhomogenitäten gut mit den Konturen der späteren Anwendung übereinstimmen, um die Anwendbarkeit beurteilen zu können. Grenzversuche zeigen das Verhalten im Versagensfall genauer auf. Die Versuche zeigten ähnliche Werte für die 50%-Durchschlagsfeldstärke, wenn der Gesamtdruck von ca. 450 kPa für SF<sub>6</sub> auf ca. 700 kPa für eine definierte Gasmischung C5-FK angehoben wurde. Dies zeigt beispielhaft, wie bestehende Geometrien für die Verwendung der dargestellten C5-FK-Gasmischung durch eine Druckerhöhung ertüchtigt werden können. Die andere Möglichkeit besteht in der Veränderung der Geometrien der hochspannungsführenden Teile, um zu signifikant niedrigeren Oberflächenfeldstärken zu gelangen.

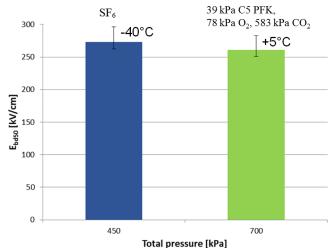


Abb. 5 Ergebnisse  $E_{bd,50}$ , negativer Blitzstoss

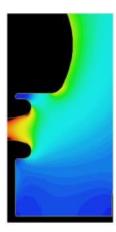


Abb. 4 Geometrie eines typischen Prüflings

#### Thermische Kennwerte

Zur Ermittlung der thermischen Kennwerte C5-FK-isolierter Schaltanlagen wurden umfangreiche Versuche an Prüfpolen durchgeführt, deren Verhalten bei SF<sub>6</sub>-Isolation bekannt war.

600 kPa SF <sub>6</sub>	700 kPa
	Gesamtdruck
	39 kPa C5-FK,
	$78 \text{ kPa O}_2$ ,
	583 kPa CO <sub>2</sub>
$\Delta \theta 1 = 1$	$\frac{\Delta\theta2}{\Delta\theta} = 1{,}15$

Abb. 6 Vergleich der Übertemperaturen

Um den Temperaturanstieg von + 15 % einzuordnen, empfiehlt sich eine Umrechnung auf die Stromerhöhung, die zu diesem Temperaturanstieg führt. Gemäß IEC TR 62271-306 [IEC12] ergibt sich:

$$\left(\frac{\Delta\theta 2}{\Delta\theta 1}\right)^{\frac{1}{1,8}} = 1.08$$

Die untersuchten Prüflinge sind demnach bezüglich ihrer Stromtragfähigkeit um ca. 8 % zu ertüchtigen, um bei der Verwendung von C5-FK die gleiche thermische Leistungsfähigkeit zu besitzen.

## Weitere Untersuchungen

Eine Prüfung auf internen Störlichtbogen gemäß IEC 62271-203:2011 konnte mit den Ratings der  $SF_6$ -GIS, d.h. 50 kA, 300 ms bestanden werden.

Aufwändige Untersuchungen waren im Bereich der Materialverträglichkeit durchzuführen. Nachdem die einzelnen Messkonzeptionen, Messaufbauten und Bewertungsschemata realisiert und verifiziert waren, konnten die typischerweise einige Monate dauernden Versuchsreihen gestartet werden. Als Resultat dieser Untersuchungen konnte die Materialverträglichkeit quantifiziert und im Fall einiger Polymere als unverträglich bewertet werden. Die Wiederholung der Testreihen mit Ersatzmaterialien erbrachte den Nachweis einer guten Materialverträglichkeit.

Darüber hinaus wurde in Versuchen die Stabilität der C5-FK-Gasmischung untersucht. In diesen Versuchen zeigte sich, dass die C5-FK-Gasmischung bei unterschiedlichsten physikalischen und chemischen Belastungen hinreichend stabil blieb. Die detaillierten Untersuchungen der Gasmischung lieferten ebenfalls wichtige Erkenntnisse, inwiefern sich die einzelnen Gase unterschiedlich verhalten.

# 4.2 Herstellung der Gasmischung

Um die Gasmischung in der funktional geforderten Genauigkeit herzustellen, wurde bereits in einer frühen Projektphase der Technologieentwicklung eines Gasmischers besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Um Gasmischungen über eine große Bandbreite an Fülldrücken, verwendeten Gasen und Partialdrücken zuverlässig bereitstellen zu können, wurde ein Portfolio an Gasmischgeräten entwickelt, geprüft und gebaut.

Das entwickelte Gerät ist in der Lage, die Gasvolumina der Gasisolierten Schaltanlage mit dem gemischten Gas zu befüllen und auf den gewünschten Fülldruck zu bringen. Die Genauigkeit der Gasmischung, d.h. die Reproduzierbarkeit der Partialdrücke ist hinreichend hoch, damit die Primärfunktion sichergestellt ist.

Eine weitere Funktionalität, die im Rahmen der Fabrikmontage, Routineprüfung und Baustellenmontage zu realisieren war, bestand im Entleeren C5-FK-befüllter Gasvolumina. Hierfür wurde eine auf die Parameter der verwendeten Gase angepasste Reclaimertechnik entwickelt, die auch die Evakuierung der Gasvolumina auf Absolutdrücke in der Größenordnung von 10 mbar übernehmen kann.



Abb. 7 Gasmischgerät und Reclaimer mit angebautem C5-FK-Speichervolumen

Durch die Realisierung beider Funktionen lässt sich das Gashandling der Pilotanlage ähnlich gestalten, wie dies bei  $SF_6$  bekannt und bewährt ist, d.h. die Sicherheit in der Handhabung ist z.B. für das Bedienpersonal hinreichend hoch.

# 5 PILOTANLAGEN FÜR 170 KV UND 24 KV

Die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen ermutigten zur Entwicklung einer gasisolierten HS-Schaltanlage für eine Bemessungsspannung von 170 kV basierend auf einer GIS vom Typ ELK-14 C. Für die Mittelspannung wurde eine Schaltanlage basierend auf dem Typ ZX2 für 24 kV Bemessungsspannung entwickelt. Der Nachhaltigkeit wegen und um praktische Betriebserfahrungen zu sammeln, wurde ewz in einer frühen Projektphase Kooperationspartner, um eine Pilotanlage im Energieversorgungsnetz zu errichten und zu betreiben. Während den Verhandlungen zur technischen Ausführung wurden auch Lösungen, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht auf dem Markt waren, diskutiert. Diese Pilotanlage wurde auf dem Grundstück eines im Zentrum des Zürcher Stadtteils Oerlikon gelegenen luftisolierten ewz-Unterwerkes errichtet. Das Ziel bestand darin, ca. 30 % der Fläche für das neue Unterwerk zu verwenden und die verbleibende Fläche für andere städtische Projekte zur Verfügung stellen zu können.

## 5.1 Bedingungen ewz

ewz legt vor allem bei den komplexen Beschaffungsgütern nebst den üblichen technischen Anforderungen grossen Wert auf die System- oder Kostenwirksamkeit [9],[10]. Bei dieser Betrachtung werden sowohl die deterministischen wie auch stochastischen Kosten über die Lebensdauer einer technischen Einrichtung gegenüber dem Nutzen bewertet. Da auch hier die Verfügbarkeit einer Schaltanlage eine zentrale Rolle spielte, wurde für die Ausschreibung entschieden, diese funktional zu erstellen, d. h. es wurde nicht fix der Aufbau der Anlage vorgegeben und keine Havarie Konzepte verlangt, sondern die notwendige Verfügbarkeit vorgegeben.

- a) Bei Umbau oder Ersatz der Anlage:
- 1 Trf. (50MVA) und 2 Ltg. in Betrieb für < 8 Std. zulässig
- sonst immer 2 Trf. (100MVA) und 2 Ltg. in Betrieb
- b) Bei Störung:
- nach 2 Std.: 1 Trf. (50MVA) und 2 Ltg. in Betrieb, Rest der Last über +M42
- nach 8 Std.: 2 Trf. (100MVA) und 2 Ltg. in Betrieb

Die Gasraumabschnitte und Trenn-/Erdmöglichkeiten sind für die Erfüllung von a) und b) entsprechend vorzusehen

Abb. 8 Geforderte Verfügbarkeit der 170-kV-Schaltanlage

Auf Grund dieser Aufstellung ergab sich ein Anlagekonzept wie auf Abb. 13.

Die weiteren Forderungen an die Pilotanlagen waren:

- die gängigen IEC-Vorschriften und für Innenraumaufstellung
- gleiche Schalt- und Auslösezeiten wie bei SF<sub>6</sub>
- Vorortprüfung nach ewz-Vorgaben, gemäss Kapitel 6
- ullet Befüllung der Anlagen sowohl mit dem alternativem Medium wie auch SF $_6$  ohne Modifikationen möglich
- gleiche Instandhaltung

Die Anlagen erfüllen alle geforderten Bedingungen und sind so ausgelegt, dass sie im normalen Rahmen betrieben und instandgehalten werden können. Im Gegensatz zu  $SF_6$  sind die geringen Verluste von Ketonen durch das Gashandling nicht klimaschädlich. Gebrauchtes Gas, welches Zersetzungsprodukte enthalten kann, wird gleich wie  $SF_6$  ebenfalls im geschlossenen Kreis gehandelt.

Bei der Abwicklung des Pilotvorhaben wurde ewz mit seinen Fachexperten und seinem Management eng mit einbezogen und regelmässig über den Stand informiert und konnte an den Tests teilnehmen.

# 5.2 Produktion und Prüfung

Die Produktion beider Schaltanlagen konnte trotz kleiner Modifikationen im Rahmen der Serienproduktion durchgeführt werden. Spezielle Aufmerksamkeit, wie üblich bei Pilotprojekten, wurde auf die Kernprozesse wie Bestellwesen, Lagerung, Montage, Prüfungen gelegt, um Verwechslungen zu verhindern. Eine verstärkte Einbindung der Entwicklung war notwendig, um den Ablauf der Prozesse zu begleiten. Durch eine hervorragende Zusammenarbeit der Teams konnte dies termingerecht bewerkstelligt werden.

Ausgelieferte Schaltanlagen, und das bezieht Pilotanlagen neuer Produkte oder Technologien mit ein, müssen die vorgeschriebenen IEC-Typprüfungen erfolgreich absolviert haben. Für eine Pilotanlage unterscheidet sich dies nur darin, dass keine produktbezogene Typprüfung erfolgt, die alle Varianten abdeckt, sondern dass der Umfang der im Projekt enthaltenen Feldvarianten berücksichtigt wird. Dies reduziert sowohl die Anzahl der Prüfungen bzgl. Varianten, kann aber auch gezielt verminderte Anforderungen (insbesondere Ratings) berücksichtigen. Dies verringert gesamthaft den technischen als auch zeitlichen Aufwand.



Abb. 10 HS-GIS, dielektrische Prüfung



Abb. 9 MS-GIS, Erwärmungsprüfung

# 5.3 170-kV-Hochspannungs-Schaltanlage

In Absprache wurde die Schaltanlage als Innenraumanlage mit einer minimalen Betriebstemperatur von +5 °C konzipiert.



Abb. 12 Bild eines GIS-Feldes, Typ ELK-14 C



Abb. 11 Die Schaltanlage ist aus 8 Feldern vom Typ ELK-14 C aufgebaut

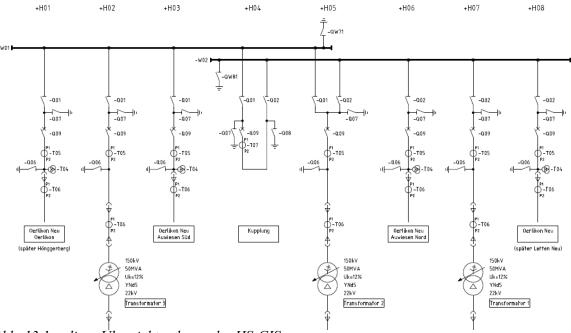


Abb. 13 1-poliges Übersichtsschema der HS-GIS

Die Anlage besteht aus drei Transformatorenfeldern, einem Kuppelfeld sowie 4 Abgangsfeldern und besitzt die folgenden Anlagenparameter:

Bemessungsspannung	Um	170	kV
Bemessungs-Dauerstrom	Ir	1250	A
Bemessungs- Kurzschlußstrom	I <sub>sc</sub>	40	kA
minimaler Funktions- druck, total	P <sub>min,tot</sub>	700	kPa abs
minimaler partieller Funktionsdruck, C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O	P <sub>min,C5</sub>	39	kPa abs

Abb. 14 Anlagenparamater der HS-Pilotanlage

Die Schaltanlage wurde in allen für die Pilotanlage relevanten Parametern erfolgreich typgeprüft. Da auch der Leistungsschalter mit dem neuen Isoliergas ausgestattet ist, wurden auch hier alle notwendigen Typprüfungen inklusive Leistungstests durchgeführt. Nach der erfolgreichen Typprüfung wurde die Anlage in der ersten Hälfte 2015 ausgeliefert

# 5.4 24-kV-Mittelspannungs-Schaltanlage

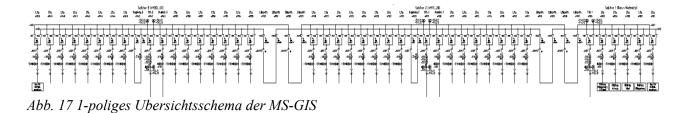
Die MS-Schaltanlage wird im Normalbetrieb von 2 Dreiphasen-Reguliertransformatoren mit einer Nennleistung von 50MVA gespeist. Die Schaltanlage ist als Innenraumanlage mit einer minimalen Betriebstemperatur von -5°C konzipiert.



Abb. 16 CAD-Bild eines Feldes Typ ZX2



Abb. 15 Die Schaltanlage ist aus 50 Feldern vom Typ ZX2 aufgebaut



Bemessungsspannung	U <sub>m</sub>	24	kV
Bemessungs-Dauerstrom	$I_{r,BB}$	2000	A
Bemessungs- Kurzschlußstrom	I <sub>sc</sub>	25	kA
minimaler Funktions- druck, total	Pmin,tot	130	kPa abs
minimaler partieller Funktionsdruck, C <sub>5</sub> F <sub>10</sub> O	P <sub>min,C5</sub>	16	kPa abs

Abb. 18 Anlagenparameter der Pilotanlage

Auf Grund der hohen Anzahl Felder wurde beim Bau der MS-Schaltanlage großen Wert auf Kompaktheit gelegt. Die Doppel-Abgangsfelder mit 630 A Bemessungsstrom sind pro Feld lediglich 400 mm breit.

Die Schaltanlage wurde in allen für die Pilotanlage relevanten Parametern erfolgreich typgeprüft. Nach der erfolgreichen Typprüfung wurde die Anlage in der ersten Hälfte 2015 ausgeliefert.

# **5.5** Transport Montage

Der Transport der neuartigen 170-kV-Schaltanlage unterscheidet sich nicht von der gängigen SF<sub>6</sub>-GIS. Der Transportweg jedoch war sehr kurz, da das Unterwerk auf der gegnüberliegenden Strassenseite des ABB GIS-Produktionswerks liegt. Die GIS-Felder konnten mit dem Baukran direkt in das Unterwerk gehievt werden. Auf Grund der neuartigen und innovativen Bay-Bauweise der HV-GIS, konnte der Montageaufwand auf der Baustelle auf ein Minimum beschränkt werden. Das Befüllen der Anlage auf der Baustelle wurde mit dem dafür entwickelten Gasmischgerät (Abb. 7 Gasmischgerät und Reclaimer mit angebautem C5-FK-Speichervolumen durchgeführt. Dieses ist in der Lage, die Gasvolumina der Gasisolierten Schaltanlage mit dem gemischten Gas zu befüllen und auf den gewünschten Fülldruck zu bringen. Die Genauigkeit der Gasmischung sowie die Reproduzierbarkeit der Partialdrücke sind sehr gut, und liegen in der Größenordnung der Messgenauigkeit der Kontrollmessung.



Abb. 20 Anlieferung der HS-GIS



Abb. 19 Ein HS-GIS-Feld wird per Transportschacht in das Unterwerk gehievt

Die Schaltfelder der 24-kV-Schaltanlage wurden bereits werkseitig mit Isoliergas gefüllt und stückgeprüft. Auf der Baustelle waren keine Gasarbeiten notwendig. Daher unterscheiden sich Montage und Aufbau nicht von den heutigen  $SF_6$ -GIS der gleichen Baureihe. Gleiches galt für den Transport. Lediglich die Transportdokumentation musste um das Sicherheitsdatenblatt für das neue Gas ergänzt werden.



Abb. 22 Abnahmetest in der Fabrik



Abb. 21 Abladen vom LKW

Da dies jedoch nicht als Gefahrgut eingestuft ist, gelten für den Transport keine gesonderten Regelungen. Für die Einfuhr des Gases ist in bestimmten Ländern eine Zulassung erforderlich. Für die EU und die Schweiz ist diese bereits verfügbar.

# 6 VOR-ORT-PRÜFUNG

# 6.1 170-kV-Schaltanlage

Aufgrund der Forderung nach höchstmöglicher Verfügbarkeit wurden für die abschliessenden Inbetriebnahme-Prüfungen vor Ort strenge Kriterien angewandt. Die GIS Anlage mit einer maximalen verketteten Betriebsspannung von 170 kV ( $U_m$ ) wurde mit 325 kV / 1 Minute geprüft (100% der IEC-Werksprüfspannung).

Mit der Wechselspannungsprüfung allein ist es nicht möglich alle kritischen Fehler zu detektieren. Zum Beispiel scharfe Spitzen an Hochspannung oder Partikel auf Isolierstoff werden nicht effektiv detektiert aufgrund von Korona Stabilisation [11][12]. Diese Defekte werden gut mit Blitzstoss Prüfungen detektiert. Partikellängen von ca. 1mm bei Spitze an Hochspannung und 2mm bei Partikel auf Isolierstoff gelten bereits als kritisch bei transienter Spannungsbeanspruchung [11][13].

Die reine Blitzstossprüfung hat jedoch den Nachteil, dass freie Partikel auf der Kapselung (häufigster Fehler) oder floatende Teile praktisch nicht detektiert werden können.

Zwei Prüf-Kombinationen werden für eine möglichst effektive Vor-Ort-Prüfung empfohlen: Eine Wechselspannungsprüfung kombiniert mit einer Blitzstossprüfung oder eine Wechselspannungsprüfung kombiniert mit einer empfindlichen TE-Messung bei ca. 36 % des BIL Levels [11].

Die TE Messung wurde in Anlehnung an die Empfehlungen der CIGRE [11] und etwas angepasst an die üblichen IEC-TE-Messpegel [14] für nicht starr geerdete GIS bei 204 kV (1.2 U<sub>m</sub>) durchgeführt. Die Dauer war 30 Minuten, um auch mögliche Defekte mit Zündverzug zu detektieren. Als TE-Messmethode wurde die UHF-Schmalband Methode mit visueller Selektion der Messfrequenz gewählt. Als Abnahmekriterium wurde gefordert, dass bei 204 kV während der Messdauer von mindestens 1 Minute keine phasenkorrelierten TE-Signale feststellbar sein sollen. Einzelpulse werden nicht bewertet.

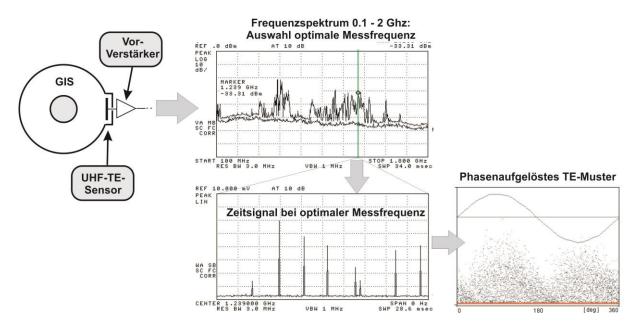


Abb. 23 Signalverarbeitung der UHF-Schmalband Methode am Beispiel eines hüpfenden Partikels

Dabei wird in einem ersten Schritt der gesamte Frequenzbereich betrachtet (typischerweise 0.1-2 GHz) und mit der Max-Hold-Funktion impulsartige Signale (wie z.B. Teilentladungen) aufsummiert. Anschliessend kann sehr schmalbandig (typisch 3 MHz) in Frequenzbereichen mit dem grössten Signal-Rauschabstand ein Zeitsignal ausgekoppelt werden und über die Verarbeitung zu einem TE-

Muster das TE-Signal beurteilt werden. Aufgrund der visuellen Selektion der optimalen Messfrequenz zusammen mit der sehr schmalbandigen Auskopplung des Signals lassen sich selbst in industriellen Umgebungen mit hohen Störsignalpegeln optimale Messempfindlichkeiten erreichen. Sie gilt als die empfindlichste UHF-TE-Messmethode. Um auch kritische Fehlertypen wie Spitzen an Hochspannung oder Partikel auf Isolierstoff detektieren zu können ist es zwingend notwendig, das schwache Signal im Mikrovolt-Bereich direkt am UHF-TE-Sensor mit einem Vorverstärker in den Millivolt-Bereich zu verstärken, da sonst in das Messkabel eingekoppelte Störsignale das Nutzsignal überdecken. Die FKH verwendet standardmässig Breitband-Vorverstärker mit 50-dB-Verstärkung in einem Frequenzbereich von 0.1-2 GHz. Da das verstärkte Zeitsignal bis zu einer Frequenzobergrenze von 2 GHz zur Verfügung steht, lassen sich bei auftretenden Fehlern diese direkt durch eine präzise Laufzeitmessung orten. Aufgrund der Verwendung von Standard-Hochfrequenz-Messgeräten und gut spezifizierten HF-Komponenten, lassen sich die Messungen auch zu einem späteren Zeitpunkt gut reproduzieren und vergleichen.

Eine integrale Hochspannungsprüfung von Systemen verfolgt das Ziel nach erfolgtem Test keine bereits geprüften Anlagenteile wieder zu öffnen. Eine nachträgliche Öffnung birgt immer das Risiko, dass wieder Partikel in die Anlage gelangen können welche das Isolationsniveau der GIS-Anlage senken [3].

Die gängige Praxis bei der Anlagenprüfung ist es, die mehrmalige Belastung von Anlagenteilen mit Prüfspannungen auf ein Minimum zu beschränken. Mit diesem Hintergrund wurde die Einspeisung der Prüfspannung mit einem Prüfkabel via die Buchsen der steckbaren Kabelabgänge der GIS vorgenommen. Durch einfaches Umlegen des Prüfkabels an einen anderen Kabelabgang konnte die gesamte GIS in 2 Prüfabschnitte geprüft werden, ohne dass Anlagenteile mehrmals geprüft wurden. Auch mussten nach der Hochspannungsprüfung der GIS keine Gasräume mehr geöffnet werden. Aufgrund der Verwendung eines Serie-Resonanz-Testsets mit angewandten Prüffrequenzen oberhalb 100 Hz (140.8 ... 141.8 Hz), konnten die Spannungswandler mitgeprüft werden. Das Prinzip der integralen Prüfung wurde übrigens auch bei der Prüfung der Transformatorkabel angewandt. Diese wurden im gesteckten Zustand (GIS) und offenem Link (Transformator) via Prüfkabel über die GIS geprüft.

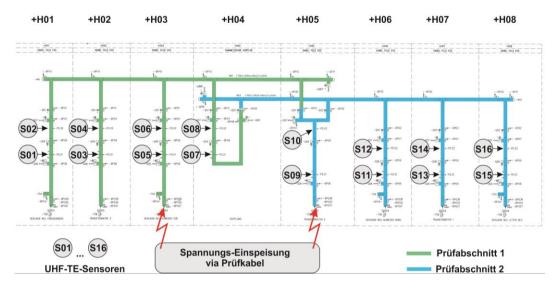


Abb. 24 170-kV-GIS UW Oerlikon: Aufteilung der GIS in die beiden Prüfabschnitte sowie die für die TE-Messung verwendeten UHF-TE-Sensoren (S01 ... S16)

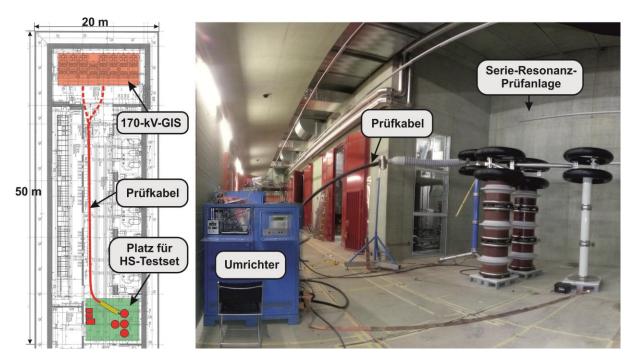


Abb. 25 Prüfkonfiguration von Hochspannungs-Serie-Resonanztest, Prüfkabel und GIS

Durch die Verwendung des Prüfkabels können auch bei Gebäuden mit beengten Platzverhältnissen Prüfungen durchgeführt werden, da die Spannungseinspeisung zu geeigneten Räumlichkeiten oder sogar ausserhalb des Gebäudes verlegt werden kann.



Abb. 26 Aufstellung der UHF-TE-TE-Messung in der 170-kV-GIS

Über einen Multiplexer können alle UHF-TE-Sensoren mit den Messgeräten verbunden werden, so dass zentral die volle Bandbreite bis 2 GHz für die Untersuchung mit Spektrum-Analyzer oder Oszilloskop zur Verfügung steht.

Die Prüfungen wurden ohne Durchschlag bestanden. Bei Abschluss der Prüfungen konnten in der gesamten GIS-Anlage bei 204 kV keine phasenkorrelierten TE-Signale festgestellt werden.

## 6.2 24-kV-Schaltanlage

Die Anforderungen der dielektrischen Prüfungen gemäss IEC an Mittelspannungsanlagen unterscheiden sich massiv von den Anforderungen an Hochspannungsanlagen [15][14]. So gilt für HS-GIS-Anlagen mit Bemessungsspannungen Um über 52 kV mit nicht starr geerdetem Sternpunkt sowie 3-phasig gekapseltem Design ein TE-Pegel < 5 pC bei einer TE-Messspannung von 1.2  $U_m$  bei Werksprüfungen. Im Gegensatz dazu wird in der IEC 62271-200 für Mittelspannungsanlagen eine TE-Messung als Option betrachtet welche zwischen Betreiber und Hersteller vereinbart werden kann. Dabei wird bei nicht starr geerdeten Systemen die TE bei einer Spannung von 1.1 Um gemessen und der tolerierbare TE-Pegel einer Abmachung zwischen Betreiber und Hersteller überlassen. Als Richtlinien werden 100 pC bei 1.1  $U_m$  für nicht starr geerdete Systeme angegeben.

In der IEC besteht für die HS-Anlage die Forderung, dass die gesamte Anlage vor Ort nochmals geprüft wird um mögliche Unregelmässigkeiten bei Transport und Montage zu detektieren. Bei MS-Anlagen beschränkt sich die IEC auf eine Überprüfung von Anlagenteilen die vor Ort zusammengebaut worden sind (wörtlich "... for gas-filled compartments which are filled on site") mit einer Wechselspannungsprüfung von 80% des Fabrik-Prüfwertes. So hat es sich eingebürgert, dass nur die Sammelschienen-Verbindungen der Felder geprüft werden – die Feld-Abgänge jedoch nicht.

Aufgrund der Betriebserfahrungen von ewz der letzten Jahre mit diversen Ausfällen von MS-Anlagen verschiedener Hersteller und deren weitreichenden Folgen und hohen Kosten wurde dazu übergegangen die Anlagen einer strengeren dielektrischen Prüfung bei der Inbetriebnahme vor Ort zu unterziehen. Auch wurden in Betrieb stehende Anlagen systematisch nachgeprüft. Diese Prüfungen umfassen die gesamte Anlage – also Sammelschienen und Abgangsfelder – und werden in Kombination mit einer Teilentladungsmessung durchgeführt.

Eine Erhöhung der 1 Minuten Prüfspannung vom üblichen 80% Wert der Werksprüfspannung gemäss IEC auf 100 % zeigte sich hier nicht als zielführend, da die Abstände bei den niederen Gasdrücken deutlich höher sind als bei Hochspannung und es deshalb sehr selten zu Prüfdurchschlägen kommt. Hingegen erwies sich die Teilentladungsmessung als sehr gutes Mittel um Fehlstellen zu ermitteln. Basierend auf den Erfahrungen aus Vor-Ort-Prüfungen mit Anlagen diverser Hersteller und der Nachprüfung bereits in Betrieb gestandener Anlagen sowie zahlreichen Einzelkomponenten wie Wandler und Durchführungen wird folgende Prüfspezifikation für die TE-Messsung als zielführend betrachtet:

TE-Messung bei 1.2  $U_m$  mit Kriterium < 20 pC bei 1.2  $U_m / \sqrt{3}$  sollen keine phasenkorrelierten TE mehr feststellbar sein (Aussetzspannung).

Die Praxis hat gezeigt, dass diese Kriterien von modernen MS- Anlagen ohne weiteres eingehalten werden können.

Die Prüfung der 24-kV-Mittelspannungsschaltanlage ( $U_m$ : 24 kV) mit dem neuen Isoliergas hat keine Besonderheiten gegenüber SF6-isolierten Schaltanlagen aufgezeigt. Die Sammelschienen wurden bis zum Kabelabgang einer Spannungsprüfung mit anschliessender TE-Messung unterzogen. Die Kabelabgänge wurden dabei mit spannungsfesten und TE-freien Isolierkappen versehen. Die Prüfspannung wurde mit einer Resonanzanlage erzeugt und über ein Prüfkabel in eine Zelle eingespeist. Die Prüfung erfolgte in 6 Prüfabschnitten.

Der Grundstörpegel lag bei den Messungen im Bereich von 3 ... 7 pC, wobei Messfrequenzen von einigen 100 kHz zur Anwendung kamen.

In kompakt gebauten Mittelspannungsanlagen zeigt sich generell, dass eine fehlerfreie Montage hohe Ansprüche stellt. Die Teilentladungsmessung hilft dabei Montagefehler aufzuzeigen und schliesslich zu beheben.

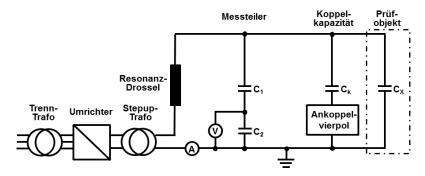


Abb. 27 Schema der Prüfschaltung



Abb. 28 Hochspannungsprüfkomponenten mit TE-Messsystem

## 7 BETRIEB

Das neue Unterwerk übernimmt seit September 2015 sukzessive die Last des bestehenden Unterwerks. In dieser Phase sind aufwändige Arbeiten für die Einschlaufung der rund 40 Mittelspannungskabel notwendig. Zusätzlich muss das Versorgungsgebiet entsprechend vorbereitet werden, da mit dem Umhängen der Kabel gleichzeitig die Spannungserhöhung von 12kV auf 24kV stattfindet. Diese Phase wird bis Mitte 2016 abgeschlossen sein.

## 7.1 Schaltungen

In Abb. 29 und Abb. 30 sind die Anzahl Schaltungen aufgeführt, welche seit das Leitsystem aktiv ist, aufgezeichnet wurden. Weitere Operationen im Werk oder direkt nach der Montage für die Einstellungen sind darin nicht enthalten.

Komponente	Operationen	Spg.	Last
LEISTUNGSSCHALTER	515	50	20
TRENNER	327	100	
ERDTRENNER	102		

Abb. 29 170-kV-Schaltanlage, Operationen ab Montage

Komponente	Operationen	Spg.	Last
LEISTUNGSSCHALTER	1753	170	30
TRENNER	2500	400	
ERDTRENNER	406		

Abb. 30 24-kV-Schaltanlage, Operationen ab Montage

Operationen: insgesamt

Spg.: Operation unter Spannung (ca.)
Last: Operation unter Last (ca.)

# 7.2 Gasüberwachung

Nachdem in den Entwicklungsversuchen die Stabilitätsparameter des Gases ausgemessen wurden, zeigte die Umrechnung auf die Pilotanlage, dass alle Bedingungen erfüllt werden.

Seit die Schaltanlagen im Sommer und Herbst 2015 schrittweise unter Spannung gesetzt wurde, traten keine Probleme auf. Regelmässig werden Gasproben entnommen, um die Stabilität der Gasmischung im täglichen Betrieb zu überprüfen. Die Gasproben werden analysiert und die Daten mit dem erwarteten Werten verglichen, um zu sicher zu gehen, dass sich die Gasmischung wie erwartet verhält.

Die Analyse erfolgte mittels Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung. Die Abbildungen Abb. 31 und Abb. 32 zeigen in der vertikalen Achse die relative Intensität. Diese ist ein Mass für die Anzahl ankommender Moleküle am Detektor. Die horizontale Achse bildet die Zeit ab, an welcher die entsprechende Intensität gemessen wurde. Da die Moleküle unterschiedliche Geschwindigkeiten haben, treffen sie zu jeweils anderen Zeiten am Detektor auf. So können die verschiedenen Stoffe unterschieden werden. In der Abb. 31 Relative Häufigkeit der Substanzen aus der Gasanalyse (170-kV-GIS)sind die Spitzen für die 170-kV-GIS für Sauerstoff, Kohlendioxid und das Fluorketon (C5F10O) eingezeichnet.

In der Abb. 32 sind die Spitzen für die 24-kV-GIS für Sauerstoff, Stickstoff und das Fluorketon (C5F10O) eingezeichnet.

Zusätzlich wird die Konzentration des C5 im Gasgemisch durch ein optisches Messverfahren hoher Genauigkeit (ein ABB-interne Entwicklung) gemessen.

Das entsprechende Gassample wurde 9 Monate nach dem Befüllen der GIS, und nachdem die Schaltanlage 3 Monate im Betrieb war, entnommen.

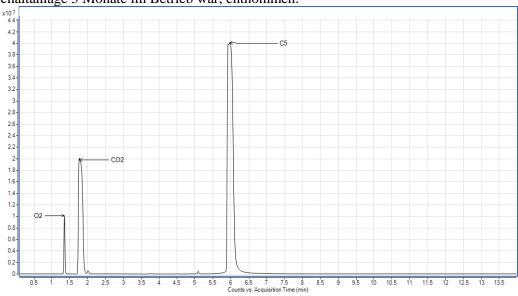


Abb. 31 Relative Häufigkeit der Substanzen aus der Gasanalyse (170-kV-GIS)

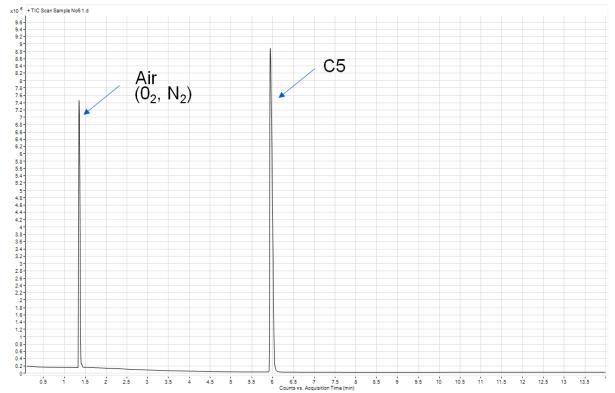


Abb. 32 Relative Häufigkeit der Substanzen aus der Gasanalyse (24-kV-GIS)

Bisher wurden keine Unregelmässigkeiten entdeckt. Die Beobachtungsperiode ist jedoch bis jetzt eher kurz. Zusätzlich zur Gasanalyse wurde ein Feld der Pilotanlage mit einem Monitoring-System ausgerüstet um Druck, Dichte und Temperatur zu überwachen. Mit diesen drei Messdaten kann man die Eigenschaften zur Zusammensetzung der Mischung auf eine Genauigkeit von +/- 5% bestimmen. Eine Analyse dieser Resultate ergab seither keine Änderung im Ketongehalt der Gasmischung. Die Messungen werden weiterhin erfolgen, die Intervalle der Gasprobenentnahme jedoch über die Zeit verlängert.

## 7.3 Umgang mit dem alternativen Isoliergas

Der Umgang mit dem alternativen Isoliergas für das Betriebspersonal unterscheidet sich nicht wesentlich von SF<sub>6</sub>. Um Unsicherheiten zu klären, wurden Workshops und Schulungen durchgeführt. Für die Untersuchung bzw. für den Vergleich zu SF<sub>6</sub> wurden die relevanten Gaskomponenten festgelegt und anhand von möglichen Szenarien die Toxizität erhoben und verglichen.

#### 7.4 Gashandling

Das Gashandling erfolgt wie im Kapitel 4.2 beschrieben mit dem eigens dafür entwickelten Gasmischer und -Reclaimer. Bei der Benutzung von Reingasflaschen von  $SF_6$  sowie C5-FK empfiehlt sich die Konzentration während des Handlings zu messen. Auch sollte eine Augendusche verfügbar sein.

# 8 LEBENSZYKLUSANALYSE

ABB hat unter Berücksichtigung ISO 14040 an einer ähnlichen HS-GIS die Analyse durchgeführt.

Die drei wichtigsten Faktoren sind dabei:

- Materialien
- Isoliergasverluste
- Stromverluste (bei 50% des Nennstroms)

Folgende Rahmenbedingungen wurden dafür zu Grunde gelegt:

- Nutzung der Ausrüstung 30 Jahre
- Angenommene Gas-Leck-Rate: 0,1% pro Jahr kumuliert über 30 Jahre und zusätzlich:
  - 1% Verlust während Handhabung
  - 1% Verlust bei Außerbetriebnahme

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich eine Reduzierung des Treibhauspotentials (GWP) von ca. 50% auf 30 Jahre, hervorgerufen durch das alternative Gas.

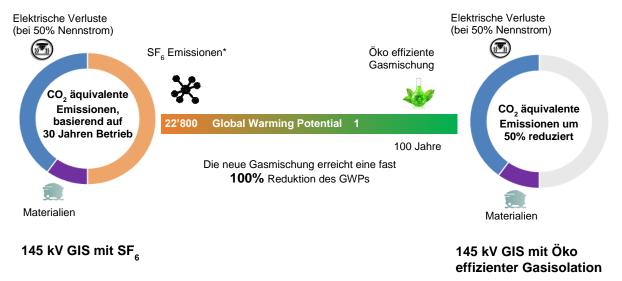


Abb. 33 Vergleich Lebenszyklus mit verschiedenen Isoliergasen

Auch für die MS-GIS, die einen deutlich geringeren Gasdruck bei kleineren Gehäusen und somit eine deutlich geringere Gasmenge aufweist, reduziert das neue Gas den CO<sub>2</sub>-Fußabbdruck der Anlage. Bei MS-Schaltanlagen ist allerdings der Einfluss der Stromwärmeverluste und des Materials deutlich größer.

#### 9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ergebnisse der umfangreichen Grundlagenuntersuchungen zur Einführung von C5-FK-basierten Isoliersystemen waren derart positiv, dass die Errichtung einer Pilotanlage ins Auge gefasst werden konnte. Die perflourierten Ketone wurden bezüglich der Anwendbarkeit in GIS positiv beurteilt, die Produktentwicklung der Pilotanlage wurde gestartet. Durch die Anwendung der Technologie im Unterwerk Oerlikon Neu können langfristige Betriebserfahrungen in der Anwendung des C5-FK-Isoliergases gesammelt werden. Die ersten Gasanalysen bestätigen die erwartete Stabilität des Gasgemisches, sodass ein verlässlicher Betrieb über viele Jahre zu erwarten ist.

Diese Erkenntnisse werden sich in zukünftigen Produktentwicklungen niederschlagen, die noch genauer auf die Eigenschaften der Isoliergasmischung angepasst sind, so dass die entstehende Produktfamilie die eingangs erwähnten Anforderungen an Isoliergassysteme und deren Applikationen noch besser erfüllen kann.

Für sämtliche Hochspannungsanwendungen gibt es zurzeit keine 1:1-Alternative zu  $SF_6$ . Alle derzeit bekannten Alternativen zu  $SF_6$  haben Limitierungen und erfordern Kompromisse. Gegenüber Regulatoren, Umweltverbänden und anderen Interessensgruppen bejaht ABB die heutige und zukünftige Verwendung von  $SF_6$  klar.  $SF_6$  bleibt das beste Isolations- und Schaltmedium in den

kommenden Jahren. ABB bezeichnet die Technologie deshalb bewusst als Alternative zu  $SF_6$  – nicht als Ersatz. Der Industriestandard für alternative Gase wird sich über die Jahre auf ein gemeinsames Isolations- und Schaltmedium hin entwickeln müssen. Erste gemeinsame Arbeiten zwischen der Industrie, Betreiber und Hochschulen wurde in Fachgremien bereits gestartet. ABB als ein Technologieführer wird den Standard mitprägen.

Da die Schaltanlagen der Hochspannung umfangreichere Anpassungen an das klimafreundliche Alternativgas erfordern, werden die Mittelspannungs-Schaltanlagenanlagen früher das Pilotstadium verlassen und regulär auf dem Markt verfügbar sein.

Die neue Technologie kann entsprechend dem Mehrwert einen Mehrpreis haben. Das ketonbasierte Gasgemisch:

- ist mit einem Treibhauspotential (GWP) von < 1 und keinem Ozonabbaupotenzial äusserst klimafreundlich
- kann zur Lichtbogenunterbrechung eingesetzt werden
- erfordert in Bezug auf Arbeitssicherheit keine zusätzlichen Massnahmen im Vergleich zu SF6. (MAK Wert\* 225ppm)
- fällt nicht unter aktuelle Regulierungsvorschriften

Nach jahrzehntelanger Suche ist nun eine leistungsfähige und klimafreundliche Alternative zu  $SF_6$  gefunden worden, die den Schaltanlagenmarkt nachhaltig prägen wird. ABB und ewz haben hier erneut Pionierarbeit geleistet und bereiten den Weg für eine bessere Zukunft.

## **LITERATUR**

- [1] Michael Mann: "Ein Beitrag zur Evaluierung von alternativen Isoliergasen in Gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen" GIS Anwenderforum Darmstadt, 2015
- [2] Denis Tehlar: Ketone based insulation médium in a 170kV pilot installation, Cigré joint colloquium Nagova 2015
- [3] Stefan Neuhold: "On site tests of GIS" High Volt Kolloquium 2011
- [4] [SIM15] P. Simka, N. Ranjan, Dielectric Strength of C5 Perflouroketone, The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015
- [5] [HYR15] M. Hyrenbach et al, Alternative Gas Insulation in Medium-Voltage Switchgear, CIRED 23rd Int. Conf. on El. Dist.,paper 0587, 2015
- [6] [EC14] Regulation (EU) No 517/2014 of the European parliament and the of council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing, Regulation (EC) No 842/2006, Brussels, 2014
- [7] [3M12] 3M USA, SDS, 3M<sup>TM</sup> Novec<sup>TM</sup> 5110 Dielectric Fluid, 31-6591-7, Version 2.0, 12-05-02
- [8] [IEC12] International Electrotechnical Commission, High-voltage switchgear and controlgear Part 306: Guide to IEC 62271-100, IEC 62271-1 and other IEC standards related to alternating current circuit-breakers, Geneva, 2012
- [9] J. Bader, H. Feld, P. Müller, M. Lutz: Kostenoptimierung im liberalisierten Energiemarkt I: Ein Modell zur Berechnung der Kostenwirksamkeit. Elektrizitätswirtschaft, Nr. 13, S. 66, 2001
- [10] Alessandro Birolini: "Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme", ISBN 3-540-54067-9, 3. Aufl.
- [11] CIGRE Joint Working Group 33/23.12 Insulation co-ordination of GIS; return of experience on site tests and diagnostic techniques; Electra No 176, Februar 1998
- [12] T. Hinterholzer; W. Boeck; Breakdown in SF6 influenced by corona-stabilization; conference on electrical insualtion and dielectric phenomena, Victoria, British Columbia, Oktober 15 18, 2000, Vol I, pp 413 416
- [13] R. Schurer; Der Einfluss von Störstellen auf Stützeroberflächen auf die elektrische Festigkeit von Isolieranordnungen in SF6-isolierten Anlagen; Dissertation; Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart; 1999
- [14] IEC 62271-203; High-voltage switchgear and controlgear Part 203: Gas-insulated metalenclosed switchgear for rated voltages above 52 kV; International Standard; First edition 2003-11
- [15] IEC 62271-200; High-voltage switchgear and controlgear Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV; First edition 2003-11