

INTERNAL

HITACHI
Inspire the Next

SF₆-freier 420 kV Leistungsschalter: Entwicklung, Anwendungsbeispiel und Umweltbilanz

Stuttgarter Hochspannungssymposium; Vortragender: Michael Gatzsche

2024-06-12

© 2024 Hitachi Energy. All rights reserved.



Inhalt

- SF₆ freie Technologie
- 420 kV Schalter: Konstruktion und Typenprüfungen
- Eindrücke vom Pilotprojekt
- Umweltbilanz



Schaltanlagen sind wichtig für ein zuverlässige Stromversorgung



Kerneigenschaften der heutigen Technologie basierend auf Gasleistungsschaltern und Schwefelhexafluorid (SF_6) → Zuverlässigkeit, Kompaktheit, Skalierbarkeit

Für breiten Einsatz müssen SF_6 Alternativen die gleichen positiven Eigenschaften aufweisen → $\text{CO}_2/\text{O}_2/\text{C}_4\text{-FN}$

Große Bedeutung des Übertragungsnetzes

Situation Global

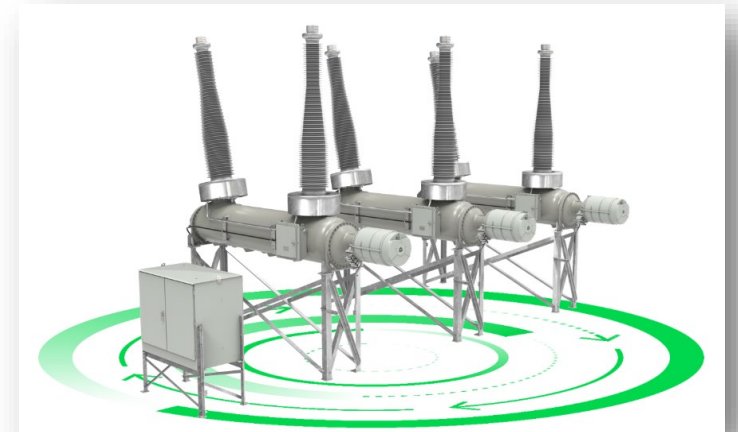
Übertragungsnetzbetreiber-Panel zu SF_6 Alternativen im Rahmen der CIGRE 2022 Session Paris

→ bei mehreren Anwendern wird eine Verdopplung der installierten SF_6 Menge bis 2030 erwartet, wenn keine SF_6 Alternativen implementiert werden

→ grosse Gasmengen insbesondere in 420 kV Anlagen

Fallbeispiel USA

Eversource hat sich zum Ziel gesetzt, eine sauberere Energiezukunft für seine Kunden aufzubauen und bis 2030 klimaneutral zu werden.



SF_6 freie Technologie für 420 kV ist entscheidend für starke und zuverlässige Netze sowie eine wirksame Dekarbonisierung

EconIQ

Gas-Leistungsschalter-Technologie

Zuverlässig
Über Jahrzehnte bewährt
Volle Skalierbarkeit bis 550 kV und darüber hinaus

Für metallgekapselte Anlagen: Gasgemisch mit fluoriertem Nitril (C4-FN)

Hohe Isolierfähigkeit, äquivalent zu SF₆
Unentbehrlich für kompakte metallgekapselte Geräte (GIS, DTB, PASS)
Geringer Materialverbrauch
Niedrigster Gesamt-CO₂-Fußabdruck (LCA)
"Retrofill" möglich und qualifiziert für einen Typ von 420 kV GIL

EconIQ high-voltage portfolio		Available now		2024	2025	2026	2027 and beyond
Live tank breaker (LTB)		72.5 kV	145 kV	420 kV			245 kV 170 kV
Dead tank breaker (DTB)			420 kV	550 kV	72.5 kV** 145 kV**	245 kV	
Plug and Switch System hybrid switchgear (PASS)					72.5 kV 145 kV		
Gas-insulated switchgear (GIS)		72.5 kV* 145 kV*	420 kV	550 kV		245 kV	170 kV
Gas-insulated line (GIL)			420 kV	550 kV		245 kV	
Retrofill for GIL (Service)			420 kV	550 kV			

Versorgung mit C4-FN

Ein in den USA ansässiger C4-FN-Hersteller wird die Produktion im Jahr 2025 einstellen

Patente des Herstellers für C4-FN Verwendung dieser Hochspannungsgeräte wird aufgegeben → Chance für neue Lieferanten

Es gibt mehrere alternative C4-FN-Lieferanten mit ausreichenden Produktionskapazitäten

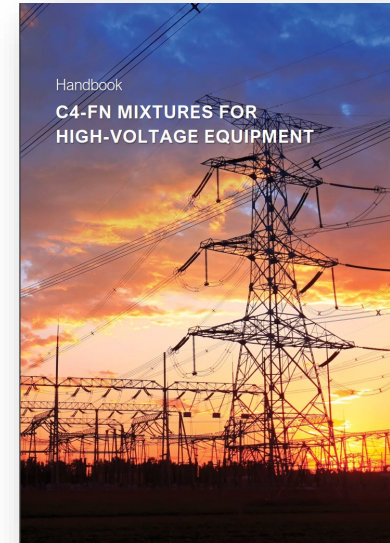
Spezifikation gemäß IEC-Vorschlag WG41 (kommende IEC 63360) wird von bestehendem und mehreren zusätzlichen Lieferanten erfüllt; bestätigt mit Gaschromatographie

Arbeit mit weiteren Lieferanten zur weiteren Diversifizierung

Handbuch

Technische Referenz für C4-FN-Gasmischungen in Hochspannungsprodukten, ~100 Seiten, öffentlich online verfügbar
Acht Autoren von zwei großen Herstellern

- Technische Eigenschaften
 - **Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltaspekte**
 - **Benutzerhandbuch / Gashandling**
- } Implementierung der IEC 62271-4 Ed. 2.0 für C4-FN Technologie



Maxime Perret, Michael Gatzsche,
Thomas Berteloot, Lukas Zehnder,
Yannick Kieffel, Moritz Böhm,
Arnaud Ficheux, Max Claessens

Sowohl C4-FN als auch Hochspannungsgeräte basierend auf C4-FN Gasmischungen sind von mehreren unabhängigen Lieferanten verfügbar

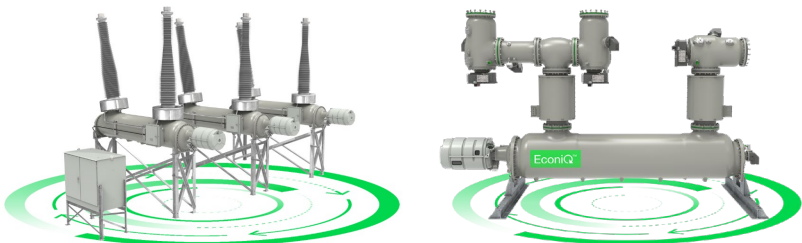


Einleitung

Der weltweit **erste SF₆-freie 420-kV-Leistungsschalter** wurde vollständig typgeprüft

Der Gasleistungsschalter arbeitet nach dem Pufferprinzip, zwei in Reihe geschaltete Löschkammern, **einem Antrieb** (Federspeicherantrieb Typ HM) und zwei Steuerkondensatoren (einer pro Kammer)

Die gleiche Löschkammer deckt 50- als auch 60-Hz-Anwendungen sowie gasisolierte Schaltanlagen (**GIS**) und Dead-Tank-Breaker (**DTB**) Anwendungen ab



Zusammenfassung Typenprüfungen

Die Typenprüfungskampagne wurde auf Effizienz und Geschwindigkeit optimiert und deckt **50 Hz und 60 Hz sowie IEEE- und IEC** ab → Kombination mehrerer Typprüfungen an einem einzelnen Prüfobjekt

Abstandskurzschluss: SLF75 hat eine größere Marge als SLF90

Klemmenkurzschluss: T100a gelöscht mit **75 ms DC-Zeitkonstante** (134 kA letzte Halbwellenspitzenwert)

Der Leistungsschalter hält die höheren IEEE-TRV-Spitzen in T10 und T30 (844 kV bzw. 813 kV)

Asymmetrisches Making mit Spitzenfaktor 3,1

Ausgezeichnetes und zuverlässiges Verhalten beim Schalten von Drosselpulen und **kapazitiven Lasten (C2)**

Extended electrical endurance (class E2)

Bemessungswerte

Rated voltage	U_r	420 kV
Rated frequency	f_r	50 Hz / 60 Hz
Rated lightning impulse withstand voltage	U_p	1425 kV
Rated switching impulse withstand voltage	U_s	1050 kV
Rated power frequency withstand voltage	U_d	650 kV
Rated continuous current	I_r	5000 A
Rated short-circuit breaking current	I_{sc}	63 kA
Rated short-time withstand current (3s)	I_k	63 kA
Rated peak withstand current	I_p	171 kA
Rated first-pole-to-clear factor	k_{pp}	1.3 / 1.5
Capacitive load switching	class	C2
Capacitive voltage factor	k_c	1.4
Rated capacitive currents	I_b, I_c	400 A
Shunt reactor current switching	Acc. to IEC 62271-110 and IEEE C37.015	
Rated out-of-phase voltage factor		2.5
Electrical endurance	class	E2
Mechanical endurance	class	M2
Rated operating sequence	O-0.3s-CO-3min-CO or CO-15s-CO	
Operating temperature		-30 ^{*)} °C ... +50 °C

*) Below -30°C with tank heaters

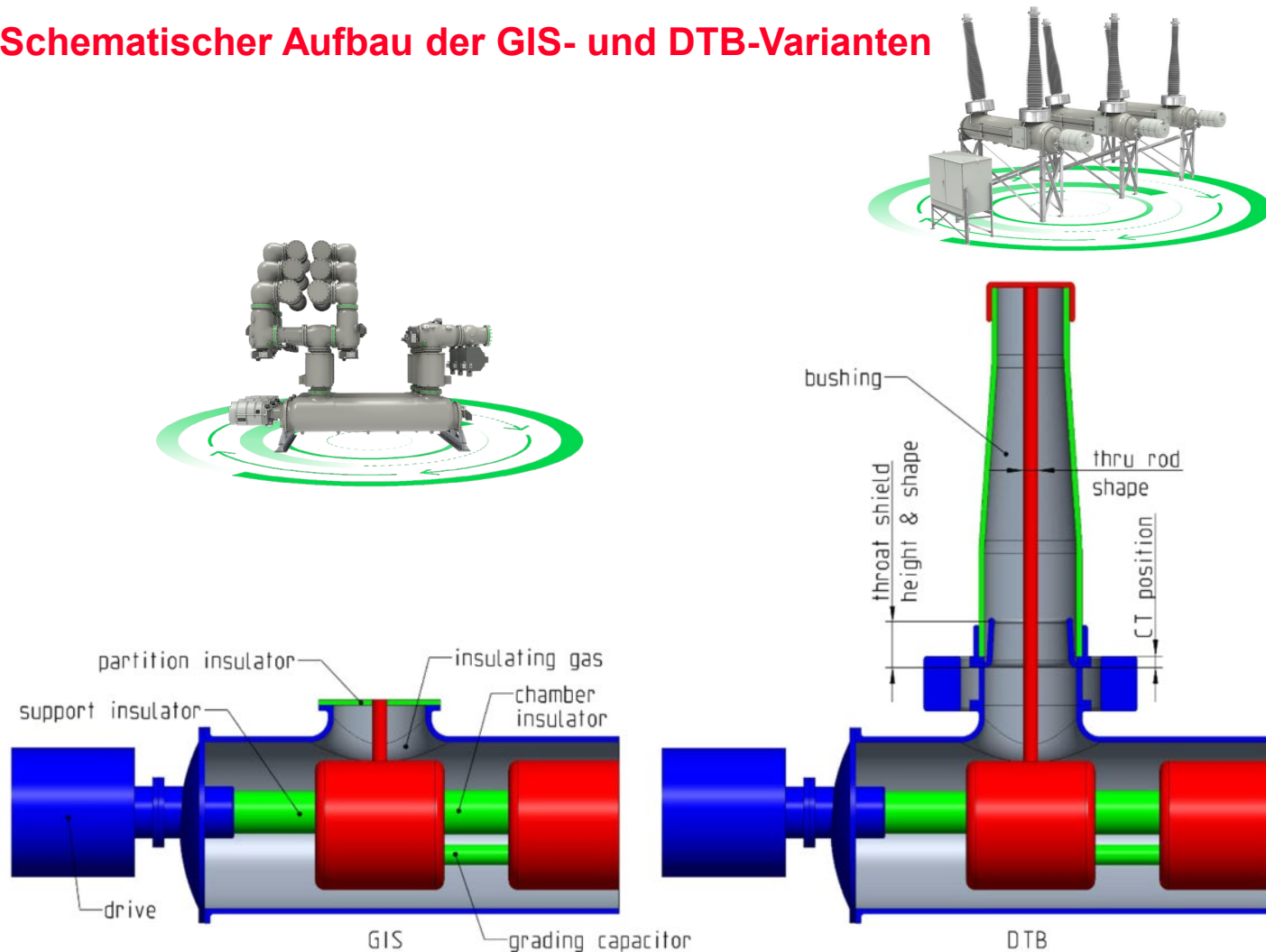
Mehr Lesen: [CIGRE B3/A3 Birmingham Colloquium, Paper 120](#), Drei Beiträge in der CIGRE Paris Session 2024

Designthema	entscheidende Bemessungswerte	wesentliche betroffene Bauteile
Dielektrisches Design	1. Rated voltage U_r 2. Chopped Wave (CW) requirements 3. Capacitive switching factor k_c , inductive switching requirement 4. Standard to be applied (IEC/IEEE)	Tank, unter Spannung stehende Schilde, Isolatoren, Abbrandkontakte, Hub
Löschleistung für Abstandskurzschluss	1. Rated short-circuit breaking current 2. Frequency 3. ITRV (Initial transient recovery voltage) requirement	Abbrandkontakte, Volumina zum Druckaufbau and Düsen
Löschleistung für Klemmenkurzschluss	1. Rated voltage 2. Rated first-pole-to-clear factor k_{pp} 3. Making peak current 4. Frequency 5. Time constant (T100a)	Abbrandkontakte, Nennstromkontakte and Schilde, Volumina zum Druckaufbau , Düsen, Hub
Design Auspuff (für 100% Fehlerstrom)	1. Rated short-circuit breaking current 2. Rated voltage and frequency 3. Time constant (T100a)	Elemente des Auspuffs, Tank, unter Spannung stehende Schilde, Isolatoren
Nennstrom Tragfähigkeit	Rated continuous current, operating temperature	Nennstromkontakte, (Tank), Anschlussmaterial und Durchführungen

Quelle und mehr Informationen: [R1] “A3-10719, Development and type testing of a 420 kV 63 kA 50 and 60 Hz SF6-free High Voltage Circuit Breaker” Valeria TEPPATI, Reto KARRER, Mahesh DHOTRE, Peter FREI, Patrick STOLLER, Markus BUJOTZEK; CIGRE Session Paris 2024

Strukturiertes Vorgehen auf der Basis von Jahrzehnten an Erfahrung mit Gasleistungsschaltern

Schematischer Aufbau der GIS- und DTB-Varianten



Erklärungen

Beide Varianten wurden vom Anfang an bei der Konstruktion berücksichtigt

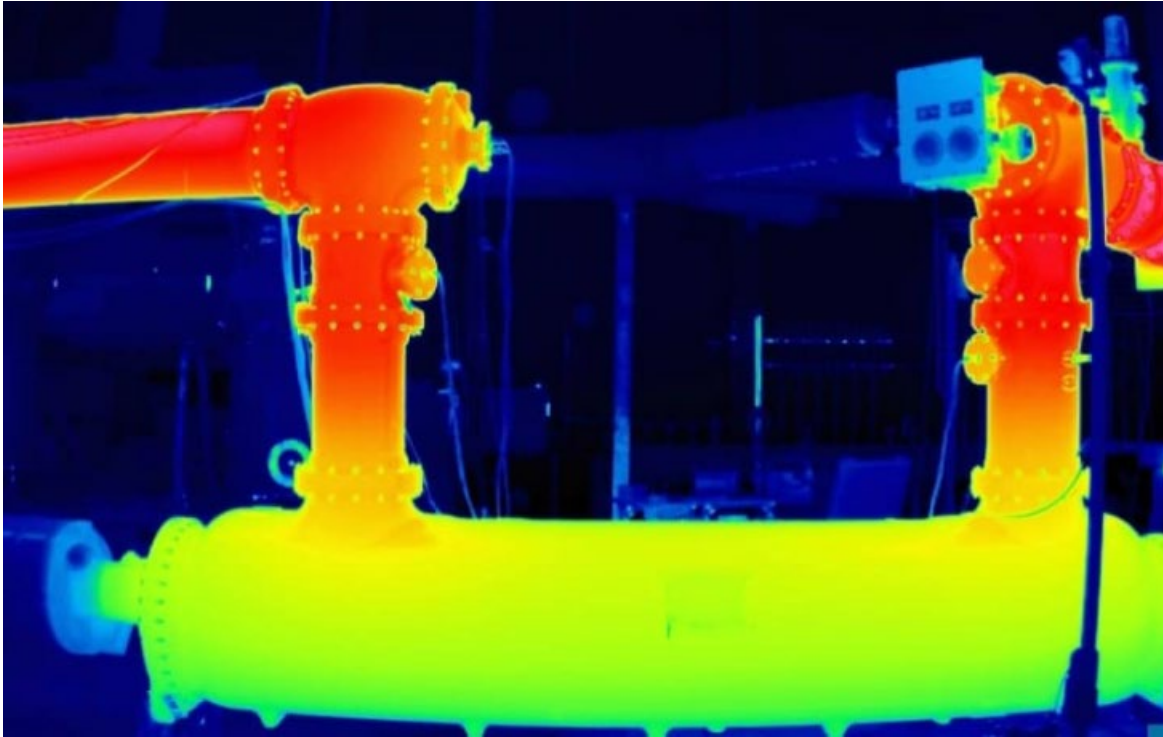
GIS: Schaltergasvolumen durch zwei geschlossene Epoxy-Isolatoren abgeschlossen

DTB:

- Zwei Eco-Gas-zu-Luft Durchführungen sind Teil des Gasraums
- Stromwandler sind an der Basis der Durchführungen befestigt
- Optimierung von Leiterstab und Schilden für höchste dielektrische Anforderungen (chopped wave bis 1680 kV)

Quelle und mehr Informationen: [R2] “**A3-10725, High voltage type testing of a 420 kV SF6-free High Voltage Circuit Breaker for Gas Insulated Switchgear and Dead Tank Breaker Applications**”
Peter FREI, Reto KARRER, Wilhelm THUNBERG, Valeria TEPPATI, Brian CHRISTOPHER, Matt CUPPETT, Carl R. KURINKO; CIGRE Session Paris 2024

Thermisch



- 5000 A, 60 Hz – Infrarotbild (blau → kalt, rot → warm)
- Schalter zeigt klare thermische Reserven zu GIS-Modulen mit gleichem Rating
- Niedrige und langzeitstabile Verbindungswiderstände durch getrenntes Nennstrom- und Abbrandkontaktsystem

Dielektrisch



- Komplette Typentests an GIS und DTB-Variante nach IEC 62271-203/-100/-1 und IEEE C37.09/.04
- Chopped wave lightning impulse 1680 kV (DTB)
- Full wave lightning impulse 1430(+240) kV (GIS)
- Impulse voltage condition check, part of acceptance tests of extended electrical endurance test (class E2): 840 kV

Quelle und mehr Informationen: [R1] und “A3-10725, High voltage type testing of a 420 kV SF6-free High Voltage Circuit Breaker for Gas Insulated Switchgear and Dead Tank Breaker Applications”

Peter Frei, Reto Karrer, Wilhelm Thunberg, Valeria Teppati, Brian Christopher, Matt Cuppett, Carl R. Kurinko; Cigre Session Paris 2024

Kapazitives Schaltvermögen (Leitungen und Kabel, Klasse C2)

→ kapazitiver Spannungsfaktor $k_c = 1,4$ (bestanden für 60 Hz, deckt 50/60 Hz, IEC- und IEEE ab)

Schalten von Drosselspulen: erweitertes Programm (78 + 55 Schüsse) → alle Schüsse gelöscht

Sehr großes wiederzündungsfreies Lichtbogenzeitfenster (größer als ein SF₆-Leistungsschalter bei gleichen Bemessungswerten)

Sehr geringe Wahrscheinlichkeit mehrfacher hochfrequenter Wiederzündungen während eines einzelnen netzfrequenten Stromnulldurchgangs (im Gegensatz zum Vakuum, siehe [1])

Bei mehrfacher hochfrequenter Wiederzündung: sehr begrenzte oder keine Spannungseskalation

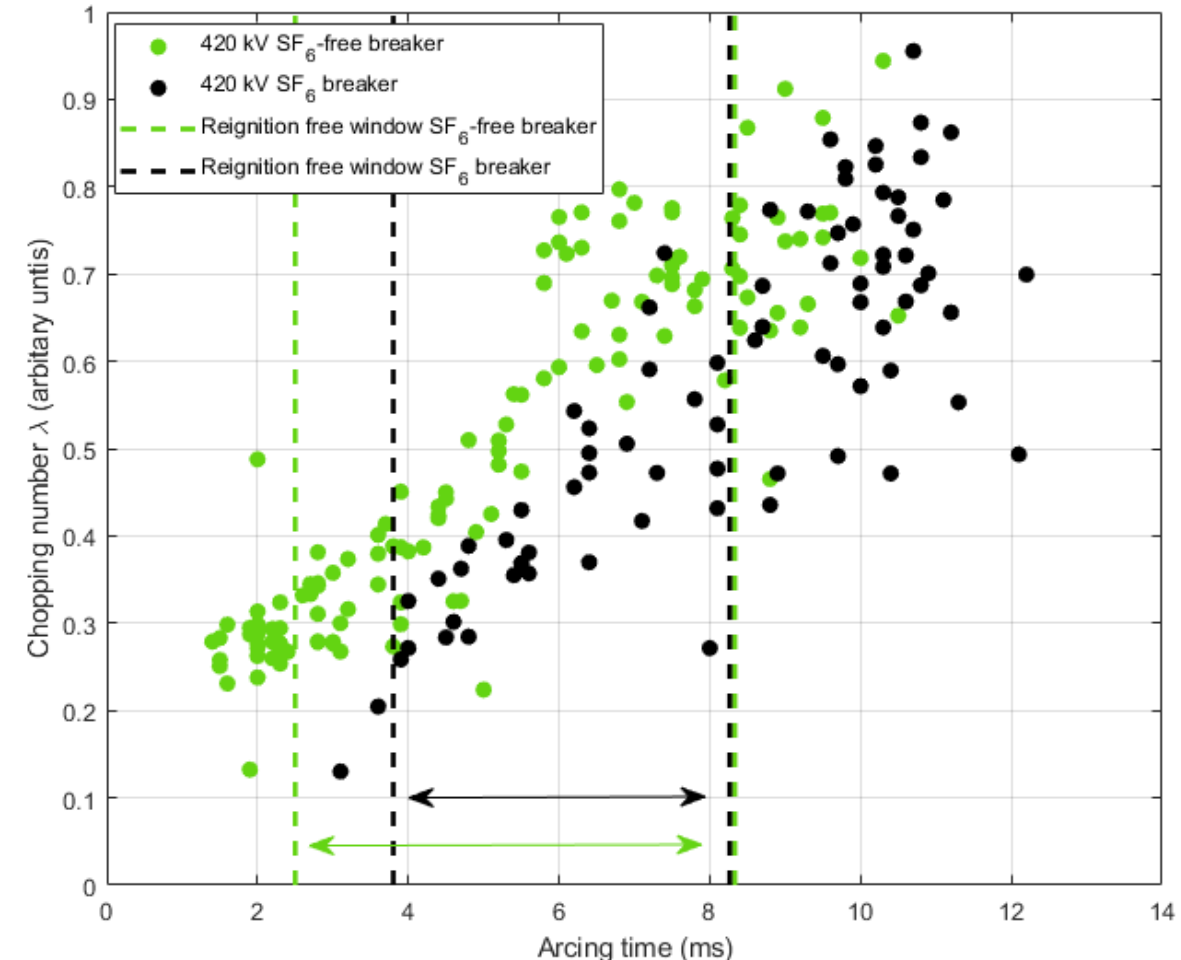
Extended electrical endurance (class E2) nach IEC TR 62271-310 → Repräsentative Belastung des Schalters basierend auf statistischen Daten aus dem Netzbetrieb

No-load tests // Wear stage // Acceptance tests

Bestanden ohne Restrike oder TRV-Reduzierungen

Gleiche Wartungsintervalle wie für SF₆-Geräte

Schalten von Drosseldrosseln – Vergleich SF₆- und SF₆-freier Leistungsschalter



[1] R. Smeets et al., CIGRE TB 871, "Current Interruption in SF₆-free Switchgear," 2022.



Motivation für moderne SF6-freie Dead-Tank-Leistungsschalter – eine Anwendersicht aus den USA

Alternde Flotte von 345-kV-Dead-Tank-Leistungsschaltern

345-kV-DTBs machen ca. 52 % des installierten SF6-Volumens des Anwenders aus

345kV DTB installierte Basis

327 Stk. – 345-kV-DT-Schalter installiert (Tendenz steigend)

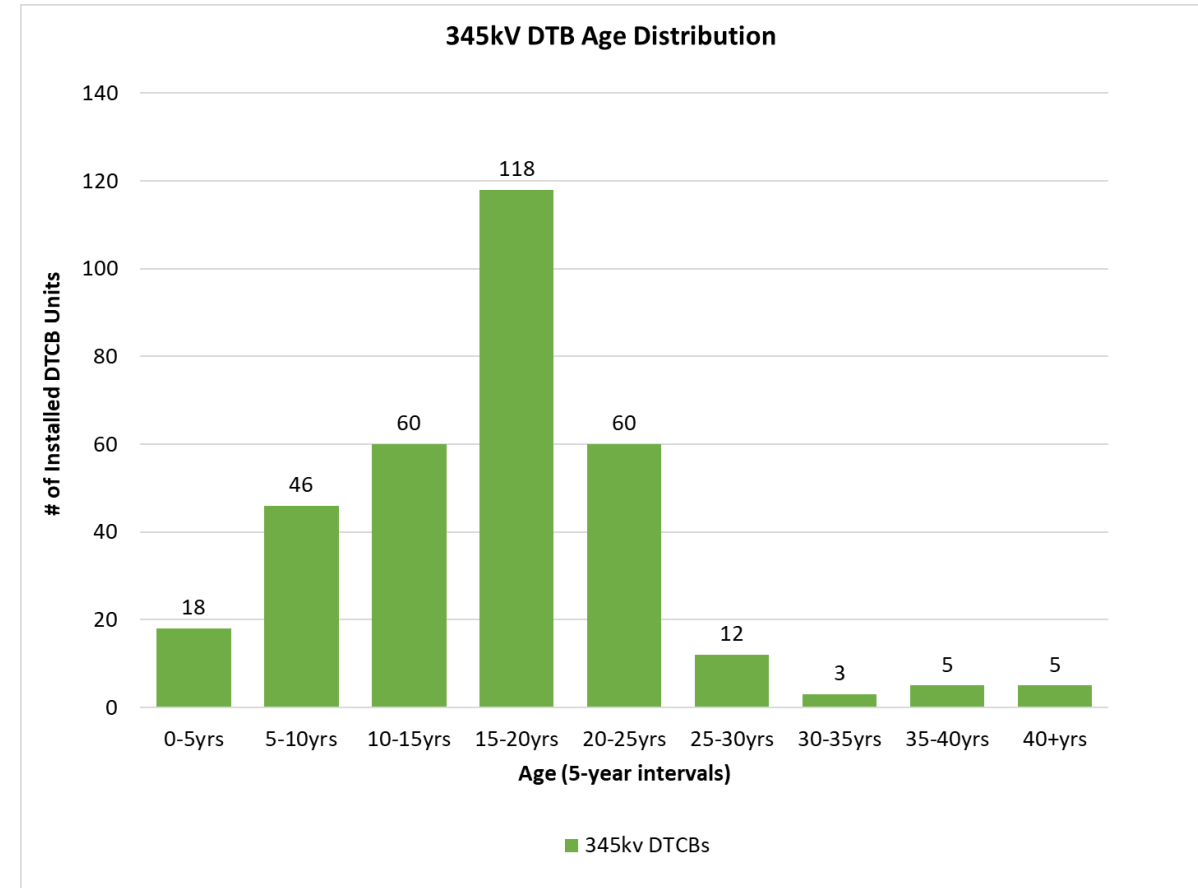
3000A, 63 kA

Durchschnittsalter = ~18 Jahre

Obsoleszenz/Ende der Lebensdauer für den Großteil der Flotte mindestens 15-20 Jahre in der Zukunft.

Studien zeigen, steigende Leckageraten im Laufe der Zeit

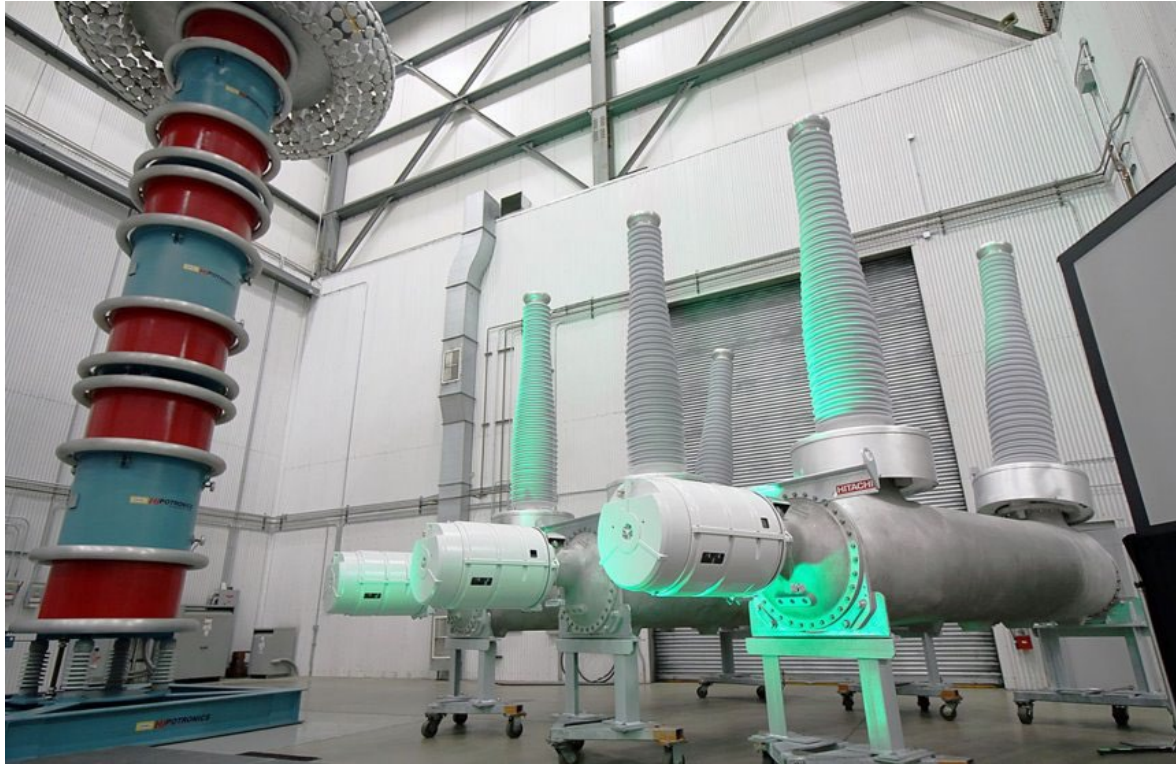
Die alternde Flotte stellt ein Risiko für das Erreichen der Nachhaltigkeitsziele dar



Bedarf: Ein echter SF6-freier 1-zu-1 Ersatz

SF₆ freier 420 kV Leistungsschalter

Erster EconiQ™ 420 kV DTB hat die Werksabnahme bestanden und wurde im Juni 2023 an den Anwender übergeben



Übergabe an den Anwender im Juni 2023

Vorhandener SF₆ Schalter



Neuer, SF₆ freier Schalter



1-zu-1 Ersatz des Leistungsschalters mit minimalem Einfluss aufs Gesamtsystem

Situation vor Ort



Arbeit am Schaltschrank



Erfahrungsbericht

Installation, Vor-Ort Prüfung und Inbetriebnahme sind sehr ähnlich zu unseren traditionellen SF₆-Leistungsschaltern

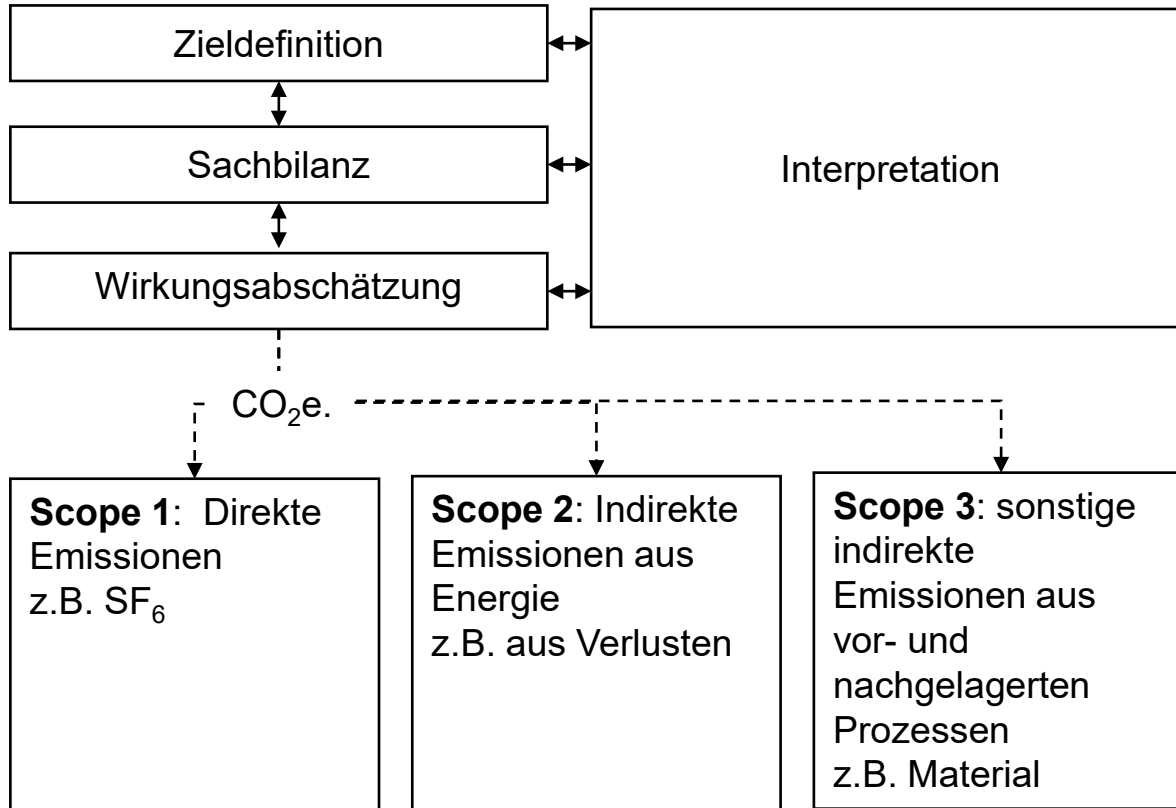
Es werden andere Geräte zur Vor-Ort Gasanalyse sowie zur Gasdichtigkeitsprüfung eingesetzt, ihre Anwendung ist aber sehr ähnlich zu den Geräten, die wir für SF₆ Schalter verwenden.

Für die Vor-Ort Gasdichtigkeitsprüfung wird, genau wie auch bei der Fabrikprüfung mit der finalen Gasmischung CO₂/O₂/C₄-FN gearbeitet, dabei wird das C₄-FN zur Detektion sowie Lokalisierung etwaiger Leckagen verwendet.

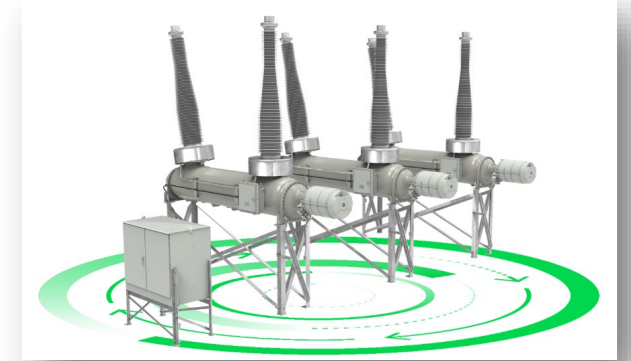
Nutzung der Erfahrung und Kompetenz von der SF₆ Technologie



Übersicht



Vorgehen



Zieldefinition

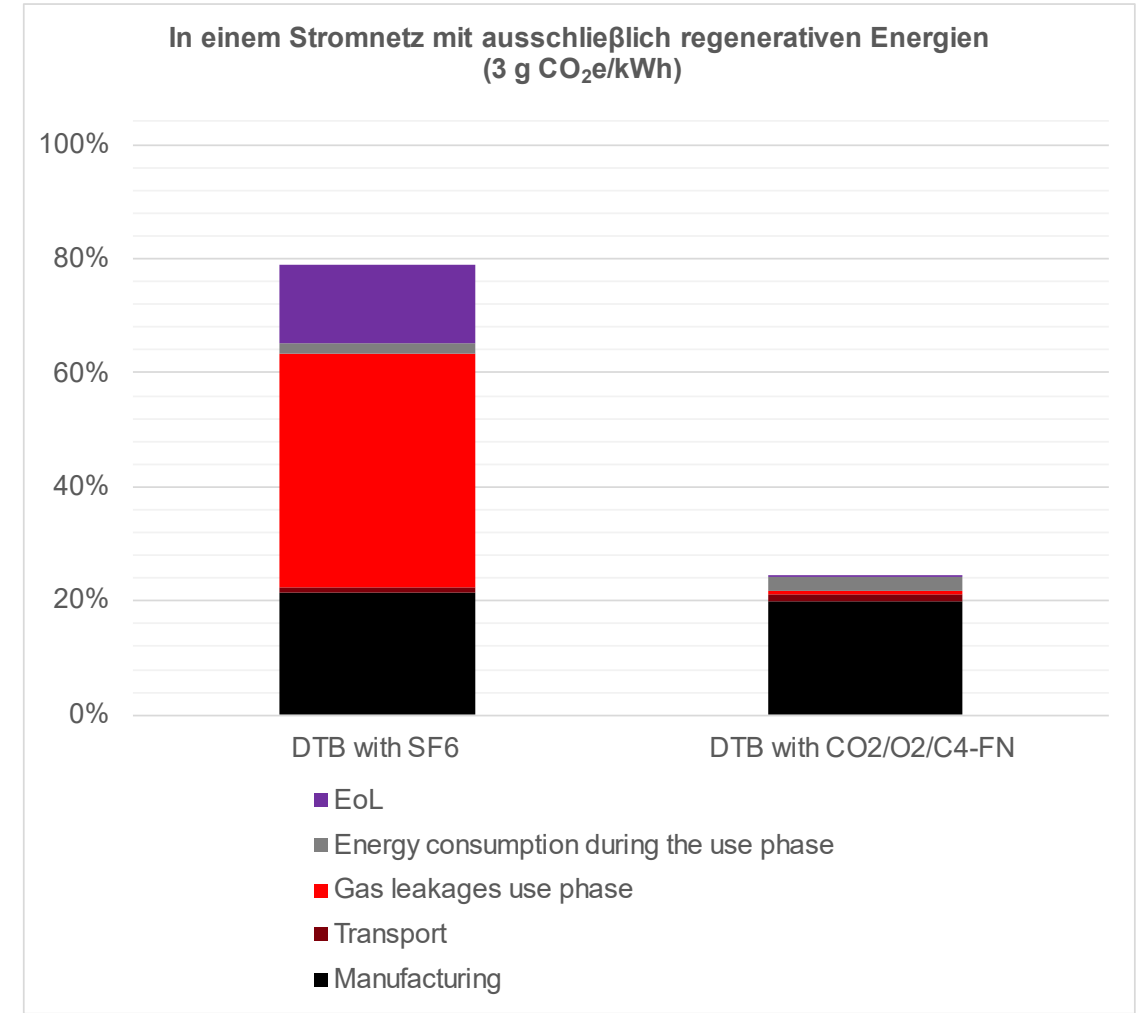
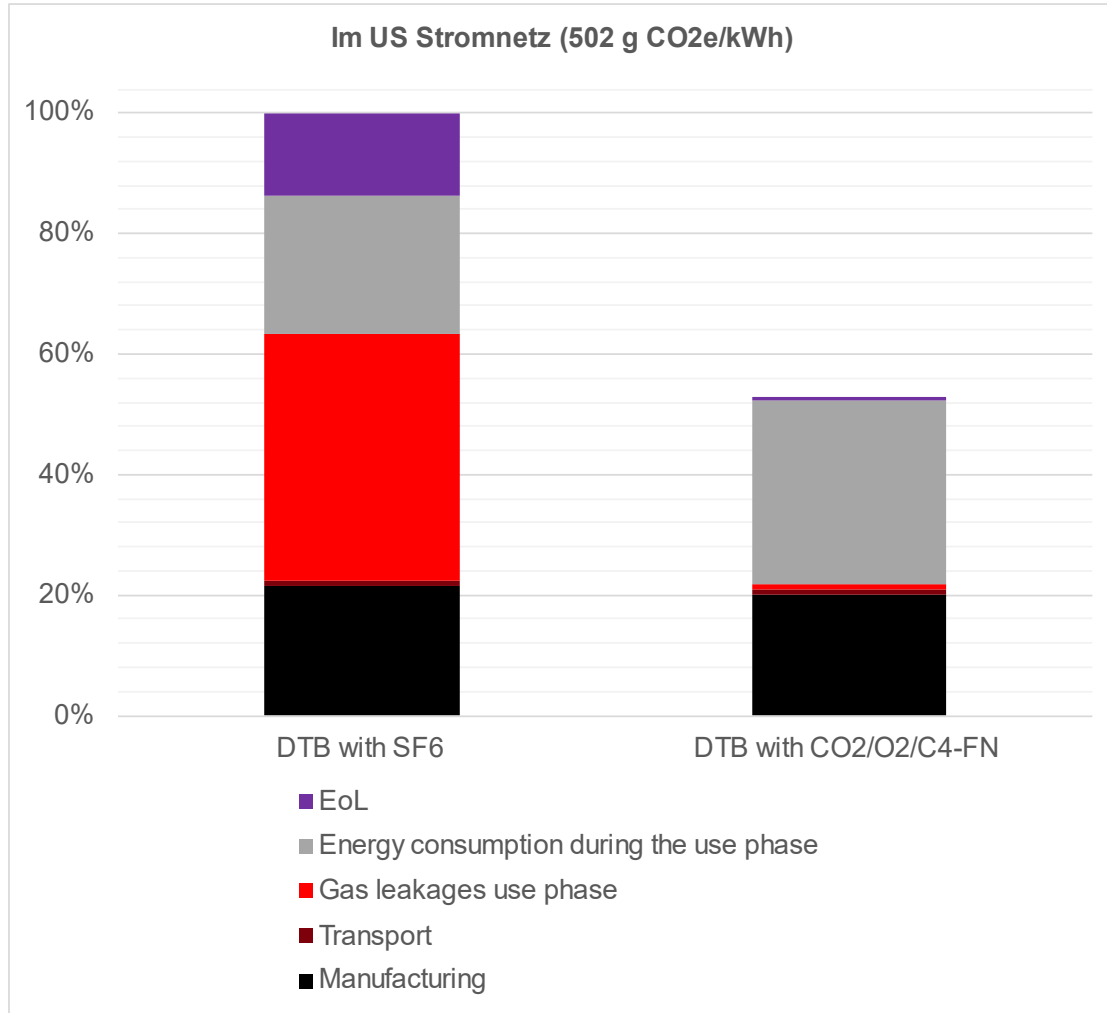
Vergleich Isolations- und Löschmedien für einen 420kV Dead-Tank Leistungsschalter.

Sachbilanz

- Ein Leistungsschalter (drei Pole).
- Einbezogen: Stahlgerüst, Schaltschrank, Stromwandler
- Berücksichtigung entsprechend Lebenszyklusphasen
 - Herstellung: Materialien, Komponentenfertigung, Montage, Gasverluste, Transport,
 - Betrieb: Gasverluste, elektrische Verluste
 - Lebensende: Gasverluste, Recycling

Die Lebenszyklusanalyse dient der ganzheitlichen Beurteilung eines Produkts oder einer Dienstleistung.

Wirkungsabschätzung – Treibhauseffekt 100 Jahre



Gasverluste spielen durch den Wechsel auf SF₆ freie Technologie praktisch keine Rolle mehr. Verbleibende Auswirkungen sind Stromwärmeverluste (abhängig von der regionalen Erzeugung) und die Herstellung des Schalters.



Technologie

Gas-Leistungsschalter-Technologie

Für metallgekapselte Anlagen: Gasgemisch mit fluoriertem Nitril (C4-FN)

Breites Produktportfolio inkl. Höchstspannung 420 kV verfügbar → große Gasvolumina, starker Zubau in den nächsten Jahren

Kompakte Bauform (wie SF₆ Anlagen) → auch für Anwendungen mit Platzbeschränkungen problemlos einsetzbar

Lösungen für den Teil der installierten Basis (SF₆) mit langer verbleibender Lebensdauer

Stetige Erweiterung des Portfolios, 2024 GIS/GIL, DTB und Retrofill in 550 kV geplant → SF₆-freie Lösungen für eine Spannungsebene, in der global große SF₆ Mengen eingesetzt werden

420 kV Schalter

Der weltweit **erste SF₆-freie 420-kV-Leistungsschalter** wurde vollständig typgeprüft.

Plattform Lösung: Die gleiche Löschkammer deckt 50- als auch 60-Hz-Anwendungen sowie gasisolierte Schaltanlagen (**GIS**) und Dead-Tank-Breaker (**DTB**) Anwendungen ab

DTB pilot:

- erfolgreiche Werksabnahme und Übergabe an den Anwender Juni 2023
- erfolgreiche Installation und Inbetriebnahme im Dezember 2023

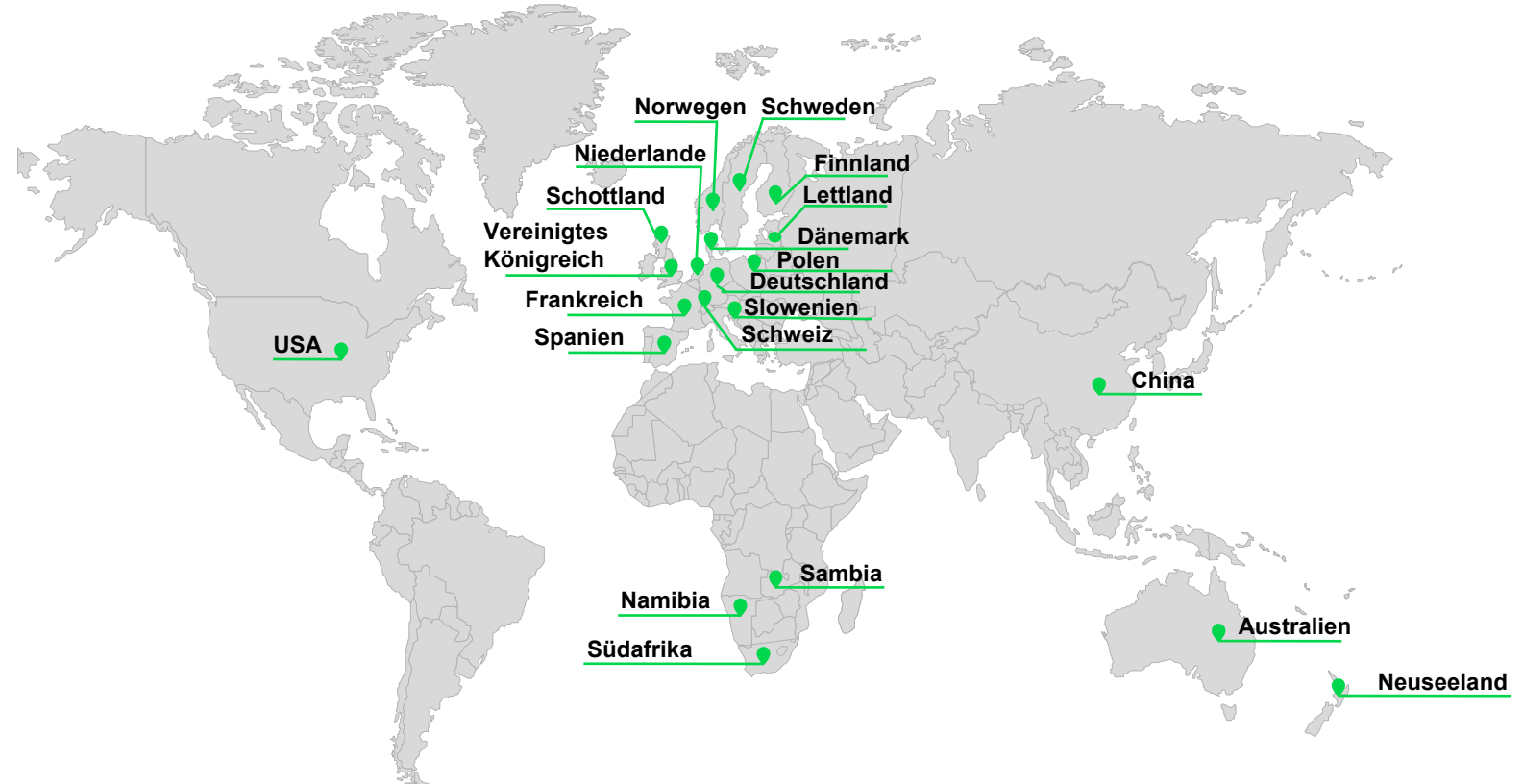
Mehrere komplett SF₆-freie GIS-Projekte stehen kurz vor der Übergabe an den Kunden.

SF₆-freie Schaltanlagen sind für das Übertragungsnetz mit den großen Gasvolumina verfügbar. Wir können jetzt die Lösung einsetzen, die den kleinsten CO₂-Fussabdruck über den gesamten Lebenszyklus hat.



At the Forefront of **Eco-efficient Innovation**

- Weltweit erster Austausch von SF6 in installierten Hochspannungsanlagen in Großbritannien (Retrofill)
- Vorstellung des weltweit ersten modernen SF6-freien 420-kV-Leistungsschalters
- Bereitstellung der weltweit ersten SF6-freien gasisolierten 420-kV-Schaltanlage in Deutschland
- Lieferung des weltweit ersten modernen SF6-freien 420 kV Dead-Tank-Leistungsschalters in den USA



900+ EconIQ Einheiten weltweit

MEHR ALS
15 km EconIQ gasisolierte Leitungen

>10
JAHRE Erfahrung in ökoeffizienter Hochspannungs-Technologie

21
LÄNDER haben die EconIQ-Hochspannungs-Technologie zur Erreichung der Klimaneutralitätsziele eingeführt



HITACHI
Inspire the Next 