

ONE VISION. ZERO EMISSIONS.



■ WHITE PAPER

„Alternative Gase“ und Gasmischungen Teil 1

Autoren

Dr. Sebastian Glomb

Martin Göppel

Peter Pilzecker



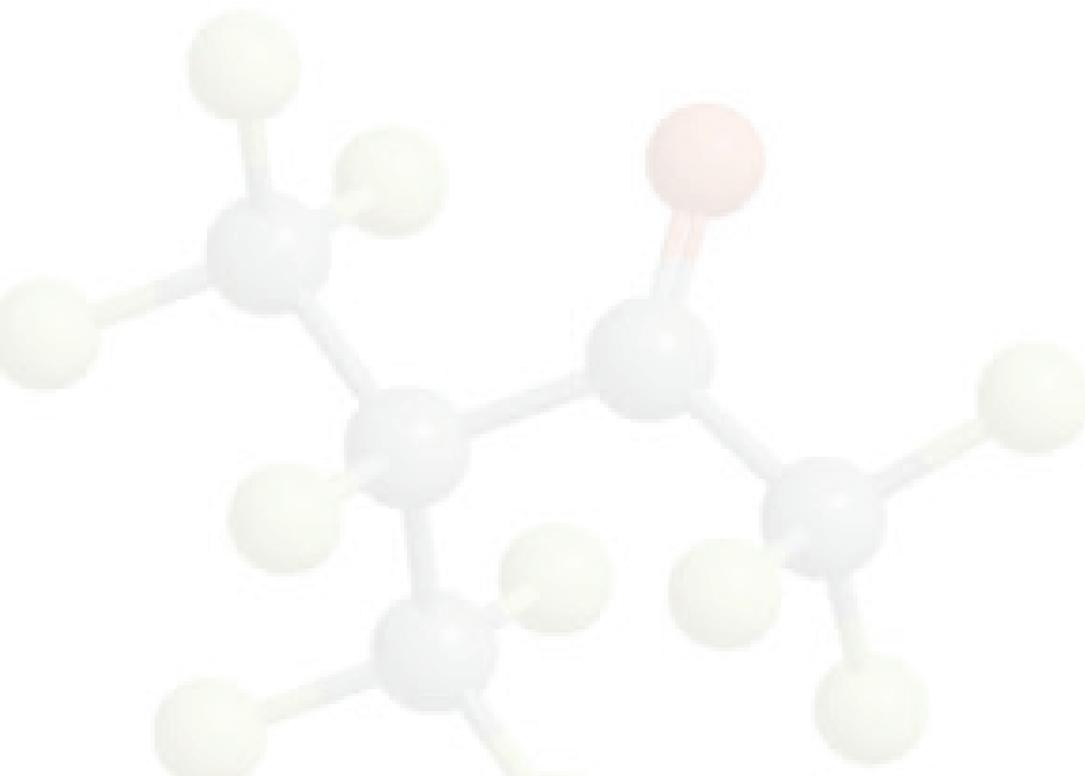
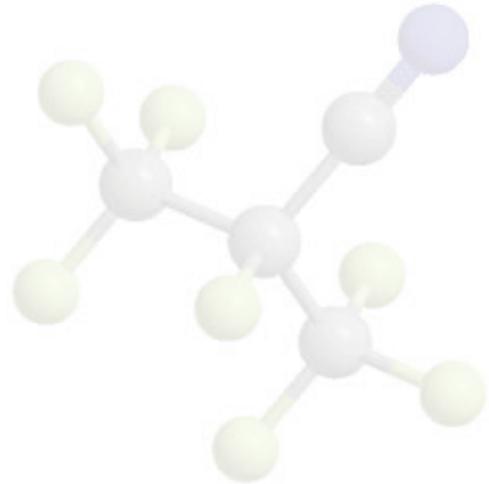
www.dilo.com



■ Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
1. Übersicht „Alternative Gase“ und Gasmischungen zu Schwefelhexafluorid SF ₆	4-7
Literaturverzeichnis.....	8

2



■ Vorwort:

Dieser Guide soll in mehreren Teilen speziell auf die Anwender und Benutzer von gasisolierten Betriebsmitteln mit Schwefelhexafluorid und deren Probleme und Unsicherheiten beim Umstieg zu neuen, alternativen Gasmischungen eingehen sowie den Umgang und den aktuellen, technischen Stand der Umsetzung des Gashandlings mit „Alternativen Gasen“ näher erläutern. In mehreren Teilen wird ein aktueller Gesamtüberblick über alternative Gasgemische und Gründe für den Umstieg gegeben. Es wird speziell auf das Mischen und die Verfügbarkeit der Gasgemische, das Handling, das Messen und die Aufbereitung mitsamt regulatorischer Vorschriften eingegangen sowie Einblicke gegeben, inwieweit der Lebenszyklus der Alternativen Gase vergleichbar zu dem von SF₆ ist und wie weit dieser heutzutage schon abgedeckt ist.



■ 1. Übersicht „Alternative Gase“ und Gasmischungen zu Schwefelhexafluorid SF₆

Trotz aller Bemühungen, Reglementierungen und Verboten im Bereich des Gases Schwefelhexafluorid (SF₆) (Verbot unter anderem in Autoreifen, Fensterscheiben und Turnschuhen; Zertifizierungspflicht für den Umgang mit SF₆ in Schaltanlagen) ist der Anteil von SF₆ in der Atmosphäre kontinuierlich auf über 10·10⁻¹² mol·mol⁻¹ weltweit angestiegen (Abbildung 1).¹

Obwohl die Menge an SF₆ im Vergleich zum gesamten Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Atmosphäre (~400·10⁻⁶ mol·mol⁻¹) gering erscheint, weist SF₆ aufgrund seiner Langlebigkeit (3200 Jahre) ein hohes Treibhauspotential (global warming potential; GWP) von 22800 über 100 Jahre im Vergleich zu CO₂ auf. Das bedeutet, dass jedes freigesetzte Kilogramm SF₆ über einen Zeitraum von 100 Jahren genauso schädlich für die Umwelt ist wie die Freisetzung von 22,8 Tonnen CO₂. In Deutschland beträgt der Anteil an SF₆-Emissionen in CO₂-Äquivalenten momentan ungefähr 0,5 % an den Gesamtemissionen.²

4

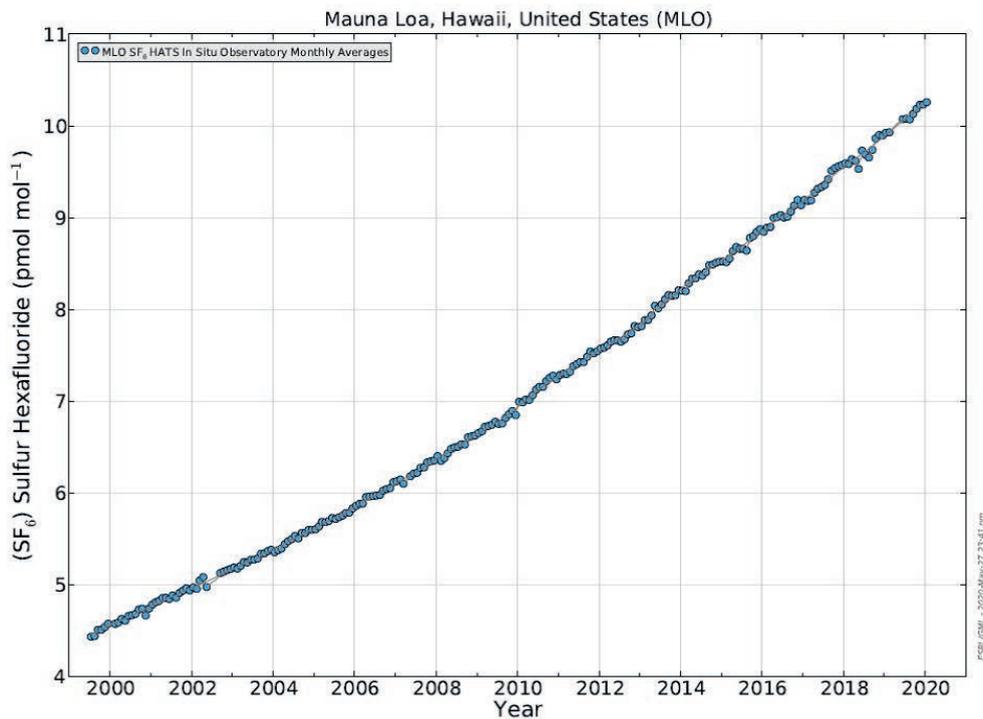


Abbildung 1: Messwerte des Anteils von SF₆ in der Atmosphäre der Messstation Mao Lao auf Hawaii (27.05.2020).¹

Aufgrund seiner hervorragenden Isolier- und Schalteigenschaften wird, trotz einer Reduzierung der Abgabemenge von SF₆ seit dem Jahr 2016, ein Großteil des heutzutage hergestellten SF₆ in Deutschland weiterhin in der Elektroindustrie und im Apparatebau verwendet (> 75 %).³

Obwohl der Anteil an Betriebsemissionen in den letzten Jahren immer weiter abnahm, nahm der globale Anteil an SF₆ in der Atmosphäre weiter zu. Die SF₆-Technologie als Verwendung in elektrischen Betriebsmittel ist, hinsichtlich der Emissionsraten, weitestgehend optimiert und eine weitere Reduzierung an dieser Stelle nur durch den Austausch bestehender Anlagen gegen Anlagen der neuesten Generation oder durch alternative Technologien möglich. Beim Austausch der Anlagen sollte der Fokus auf der nachhaltigen Nutzung des SF₆ durch Aufbereitung und Wiederverwendung liegen. Da der Großteil an SF₆ weiterhin in der Elektroindustrie verwendet wird, ist die Suche nach Alternativen zu SF₆ auf diesem Gebiet weit fortgeschritten. Ein Umstieg über alle Spannungsebenen auf alternative Gase oder Techniken wird auf lange Sicht als unumgänglich angesehen.⁴

Der Fokus der Guides wird regional auf den aktuellen technischen Stand der Umsetzung in Europa und Nordamerika gelegt. Im Fokus stehen das Gasgemisch „Synthetische Luft“ („CleanAir“, „DryAir“) sowie Gasmischungen mit den Isoliertgasen 2,3,3,3-Tetrafluoro-2-(trifluoromethyl)propannitril, kommerziell erhältlich unter den Namen 3M™ Novec™ 4710 (im weiteren Text als „C4“ bezeichnet) und 1,1,1,3,4,4,4-Heptafluoro-3-(trifluoromethyl)butan-2-on, erhältlich unter dem Namen 3M™ Novec™ 5110 („C5“, Abbildung 2). Alle alternativen Gase und Gasmischungen werden im weiteren Verlauf als „Alternative Gase“ bezeichnet.

Im Gegensatz zum Gashandling mit SF₆, bei der das SF₆ meistens als einzelne Komponente und nur in seltenen Fällen als Gasgemisch (mit N₂ oder CF₄) vorliegt und gehandhabt wird, bestehen Alternative Gase aus zwei oder mehreren Einzelgaskomponenten, die zusammen das Isoliertgasgemisch ergeben. Der theoretische Hintergrund und die chemischen und physikalischen Eigenschaften im Hinblick auf Isolier- und Löscheigenschaften der möglichen alternativen Gase und Gasgemische zu SF₆ sind bereits ausführlich in der bekannten Literatur diskutiert.⁵⁻⁸ Ebenfalls gibt es schon explizite Empfehlungen der CIGRE-Arbeitsgruppen zur Anwendung von SF₆-freien Gasen oder Gasmischungen in Mittel und Hochspannungsschaltanlagen.⁹

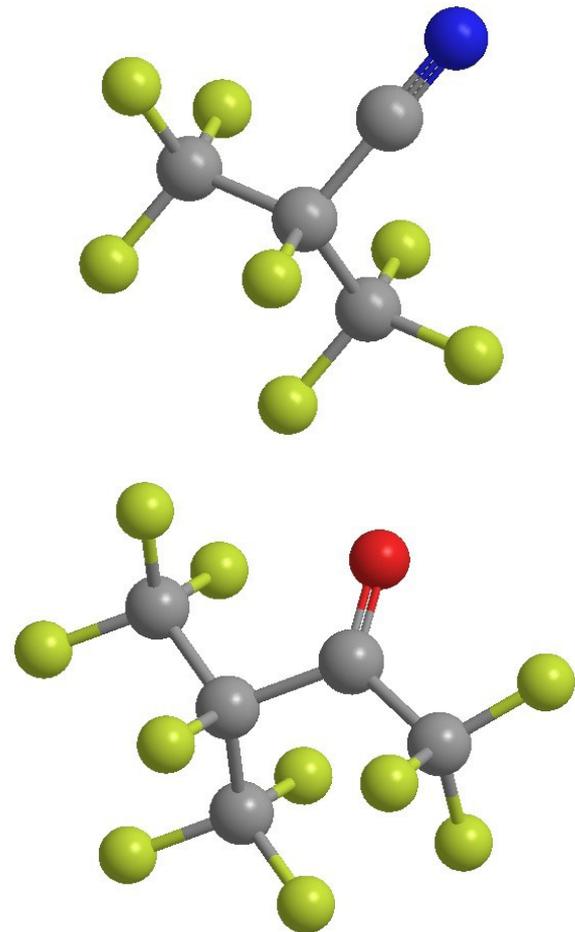


Abbildung 2: Darstellung der chemischen Struktur von C4 (oben) und C5 (unten). Grau: Kohlenstoffatome, oliv: Fluoratome, blau: Stickstoffatom, rot: Sauerstoffatom.

Für die verschiedenen Anwendungen in der Hochspannungstechnik werden dabei verschiedene Gase oder Mischungen mit unterschiedlichen Verhältnissen der einzelnen Komponenten eingesetzt:

Novec™ ist der registrierte Markenname für Spezialchemikalien und Gase der Firma 3M™. Die Synthese der Chemikalien C5 (Chemische Bezeichnung: 1,1,1,3,4,4,4-Heptafluoro-3-(trifluoromethyl)butan-2-on) und C4 (2,3,3,3-Tetrafluoro-2-(trifluoromethyl)propannitril) ist allerdings bereits seit den 1960ern bzw. 1970ern bekannt.^{10,11} Trotzdem ist für beide Gase momentan in Europa nur 3M™ als zugelassener Verkäufer in der europäischen Chemikaliendatenbank registriert.¹² C4 und C5 werden, im Gegensatz zu SF₆, aufgrund ihrer höheren Siedepunkte bei atmosphärischen Druck (Tabelle 1), in Mischungen mit zusätzlichen Trägergasen wie Kohlenstoffdioxid (CO₂) oder Stickstoff (N₂) verwendet. Trägergas bezeichnet in diesen Fällen die prozentual überwiegend vorhandene Komponente in der Mischung. Als weiterer Bestandteil wird häufig Sauerstoff (O₂) verwendet um die Bildung von Ruß bei Überschlägen bzw. Schaltvorgängen in Schaltanlagen zu reduzieren. Die Konzentrationen der

einzelnen Komponenten, mit Ausnahme des Trägergases, liegen grundsätzlich im Bereich von 0 – 15 %.

g³ umfasst die Lösung der Firma General Electric und inkludiert Mischungen mit C4. AirPlus ist das Äquivalent der Firma ABB und umfasst Mischungen mit C5 als Isoliergas. Abhängig von der geforderten Anwendung werden in beiden Fällen unterschiedliche Mischungsverhältnisse verwendet. Synthetische Luft (Syn. Luft) ist eine Mischung aus ca. 20 % Sauerstoff (Chemische Formel: O₂) und 80 % Stickstoff (N₂) und wird überwiegend in Schaltanlagen in Kombination mit der Vakuumschaltechnik bis 145 kV von beispielsweise Siemens verwendet.¹³ Syn. Luft kann erst bei Temperaturen unter –183 °C verflüssigt werden und wird auch bei Raumtemperatur im homogenen Zustand unter hohem Druck (> 200 bar) gespeichert (Tabelle 1). Aufgrund der teilweise toxischen Eigenschaften stehen weitere, als Alternativen gehandelte Gase wie Trifluoriodomethan (CF₃I)¹⁴ oder Hydrofluoroolefin (C₃H₂F₄) aktuell nicht mehr im breiten Fokus der Industrie. Ihre Handhabung ist allerdings ähnlich den Mischungen auf C4/C5 oder Synthetischer Luft- basierend.

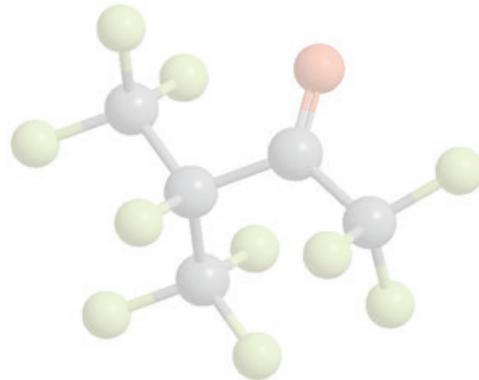
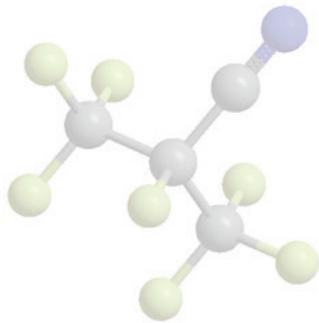
Tabelle 1: Übersicht Alternative Gase und deren Mischungen im Vergleich zu SF₆.

	Schwefelhexafluorid SF ₆	2,3,3,3-Tetrafluoro- 2-(trifluoromethyl)- propannitril C4	1,1,1,3,4,4,4-Hepta- fluoro-3-(trifluoro- methyl)butan-2-on C5	Synthetische Luft/ CleanAir/DryAir
Handelsname	SF ₆	3M™ Novec™ 4710	3M™ Novec™ 5110	
Chemische Formel	SF ₆	C ₄ F ₇ N	C ₅ F ₁₀ O	O ₂ /N ₂
CAS-Nummer	2551-62-4	42532-60-5	756-12-7	7782-44-7; 7727-37-9
Siedepunkt	-63,8 °C	-4,7 °C	+26,9 °C	-183 °C; -196 °C
Atmosphärische Verweilzeit	3200 y	30 y	0,04 y	-
Treibhauspotential	22800	2100	< 1	0
Eigenschaften der Gasmischungen				
Gebräuchliche Handelsnamen		g ³ (GE) ^a	AirPlus (ABB)	CleanAir (Siemens)
Gasmischungen in Benutzung	SF ₆ pur	C4: < 10 % mit CO ₂	C5: < 15 % in Syn. Luft	~ 20 % O ₂ in N ₂
	SF ₆ mit N ₂ oder CF ₄	C4: < 10 % mit O ₂ /CO ₂	C5: < 15 % in O ₂ /CO ₂	
Minimale Arbeitstemperatur	SF ₆ pur: < -30 °C	Abhängig von der genauen Mischung:		< -50 °C
	SF ₆ mit N ₂ /CF ₄ : < -50 °C	-30 °C - -5 °C		
Treibhauspotential	-	< 760	< 1	0

^{a)} Gebräuchliche Mischungen von g³ weisen einen C4-Stoffmengenanteil ≤ 6,3 % (GWP: ≤ 500) auf.

Obwohl heute noch kein Verbot für die Verwendung von SF_6 in bestehenden oder neuen gasgefüllten Betriebsmitteln der Energieübertragung besteht, haben sich einige konkrete Alternativen herauskristallisiert. In Projekten wurden verschiedene Ansätze in der Praxis bereits umgesetzt allerdings sind noch nicht Lösungen für die Umsetzung für alle Anwendungsbereiche vorhanden.

Der nächste Beitrag des Guides wird sich schwerpunktmäßig auf die Eigenschaften und die verschiedenen Arten zur Herstellung der Mischungen von Alternativen Gasen beziehen.



■ Literaturverzeichnis

- (1) Global Monitoring Laboratory [Online], 27.05.2020. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/>
- (2) Umweltbundesamt. Treibhausgas-Emissionen in Deutschland [Online], 14.01.2020. www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-1
- (3) Statistisches Bundesamt.
- (4) ZVEI. Szenario zur Reduktion der SF₆-Betriebsemissionen von elektrischen Betriebsmitteln durch den Einsatz alternativer Isoliergase, März 2020.
- (5) Ang Xiao; John G. Owens; Jason Bonk; Agnes Zhang. Environmentally Friendly Insulating Gases as SF₆ Alternatives for Power Utilities. 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment.
- (6) Philipp Simka; N. Ranjan. Dielectric Strength of C5 Perfluoroketone. The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Tschechien, 23 – 28 August, 2015.
- 8 (7) P.C. Stoller, C.B. Doiron, D. Tehlar, P. Simka, N. Ranjan. Mixtures of CO₂ and C5F10O Perfluoroketone for High Voltage Applications **2016**.
- (8) Kieffel, Y.; Biquez, F.; Vigouroux, D.; Ponchon, P.; Schlernitzauer, A.; Magous, R.; Cros, G.; Owens, J. G. Characteristics of g3 – an alternative to SF₆. CIREN - Open Access Proceedings Journal **2017**, 54–57.
- (9) Cigré WG B3.45 „Application of non SF₆ gases or gas mixtures in medium voltage and high voltage GIS“.
- (10) Frank S. Fawcett, Ronald D. Smith. Novel Polyfluoro-Substituted Ketones And Their Preparation From Polyfluoro Acid Fluorides.
- (11) Bryce C. Oxenrider, Florham Park, Cyril Woolf, Robert A. Dear, N. J. Morristown, Wilhelmus M. Beylevend. Process For Preparing Fluoroperhaloalkyl Nitriles.
- (12) [Online], 25.02.2020. <https://echa.europa.eu/de/registration-dossier/-/registered-dossier/6026>.
- (13) Siemens [Online], 09.03.2020. <https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/hochspannung/produkte-stromuebertragung/gasisolierte-schaltanlagen.html>.
- (14) Chen, L.; Widger, P.; Kamarudin, M. S.; Griffiths, H.; Haddad, A. CF3I Gas Mixtures: Breakdown Characteristics and Potential for Electrical Insulation. IEEE Trans. Power Delivery **2017**, 32, 1089–1097.

ONE VISION. ZERO EMISSIONS.



SF ₆ -GAS	ALTERNATIVE GASE	ANLAGEN FÜR INDUSTRIEGASE	HOCHDRUCK-PRODUKTE
DILO CERTIFIED GAS	PRODUKT-SERVICE	SCHULUNG & ZERTIFIZIERUNG	



QUALITY. MADE IN GERMANY.

DILO
Armaturen und Anlagen GmbH

Frundsbergstrasse 36
D-87727 Babenhausen

+49 (0) 83 33 3 02-302

+49 (0) 83 33 3 02-302

info@dilo-gmbh.com

www.dilo.com

