

TEILENTLADUNGSVERHALTEN VON SF₆ UND UMWELTFREUNDLICHEN ALTERNATIVGASEN

Bernhard Schober, Uwe Schichler

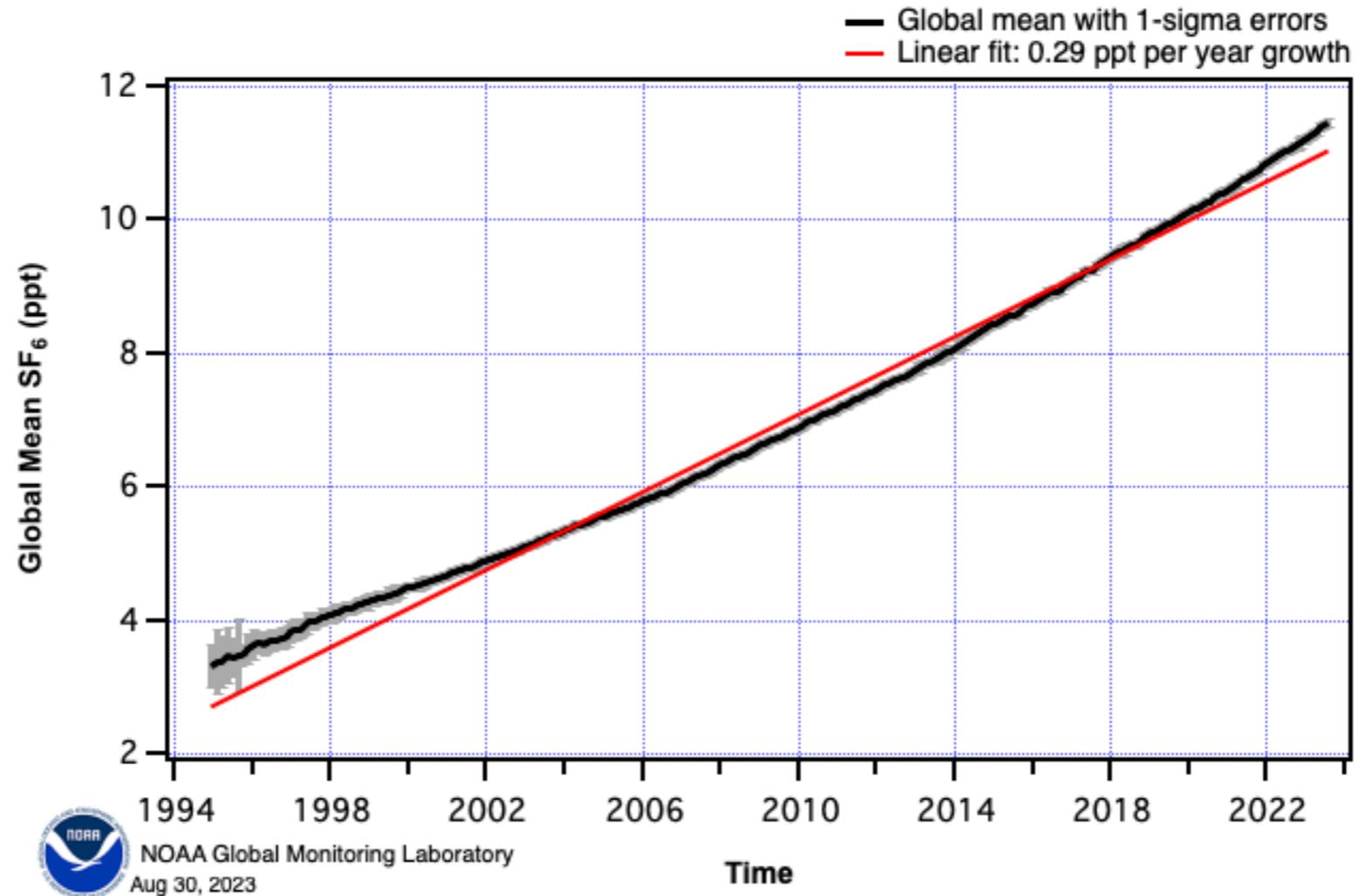
*Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement
Technische Universität Graz
Österreich*

EnInnov 2024, 16.02.24

EnInnov2024

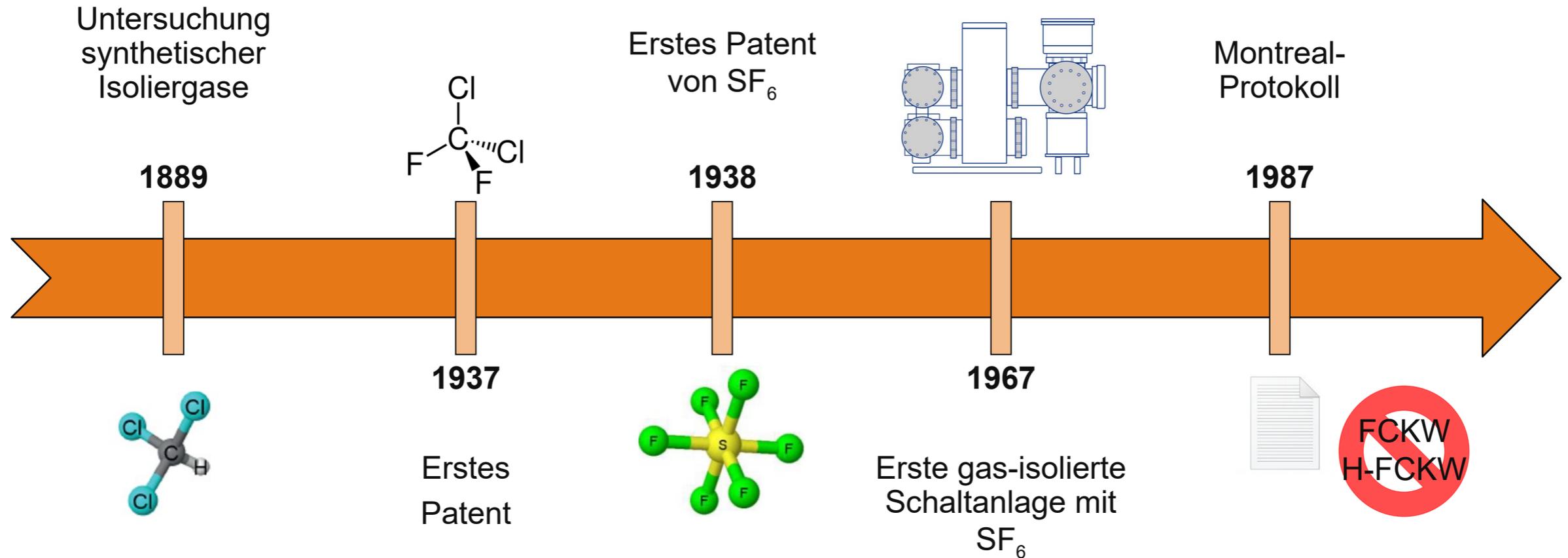
18. Symposium Energieinnovation | 14.02.-16.02.2024

Welche Maßnahmen wurden in der Vergangenheit getroffen?

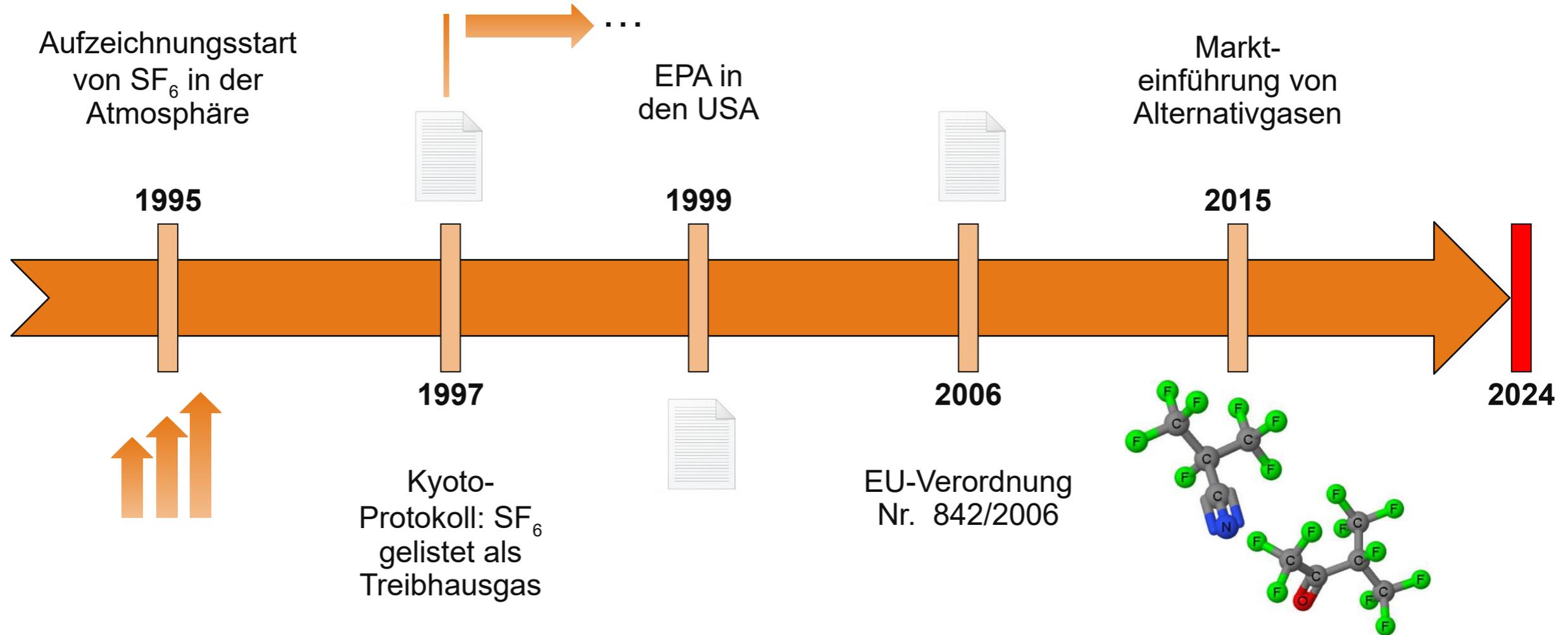


[1]

Schwefelhexafluorid (SF₆) – Historie in der Energietechnik (I)



Schwefelhexafluorid (SF₆) – Historie in der Energietechnik (II)



[2]

(Neue) F-Gas-Verordnung



29.01.2024

Zustimmung des EU-Rates zum Entwurf der neuen F-Gas-Verordnung

Art. 13 (9)

Die Inbetriebnahme der folgenden elektrischen Schaltanlagen (...) ist wie folgt verboten:

- c) elektrische Hochspannungsschaltanlagen mit einer Spannung ab 52 kV und bis einschließlich 145 kV und einem Kurzschlussstrom bis einschließlich 50 kA mit einem GWP von 1 oder mehr: ab dem **1. Januar 2028**;
- d) elektrische Hochspannungsschaltanlagen mit einer Spannung von mehr als 145 kV oder einem Kurzschlussstrom von mehr als 50 kA mit einem GWP von 1 oder mehr: ab dem **1. Januar 2032**.

Ausnahmen gelten!

[3]

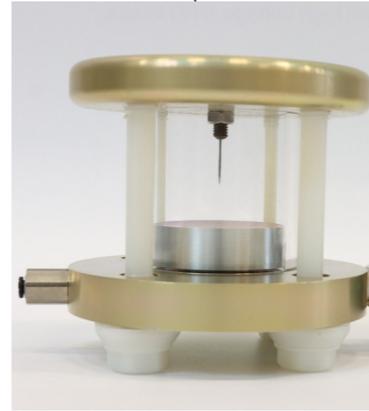
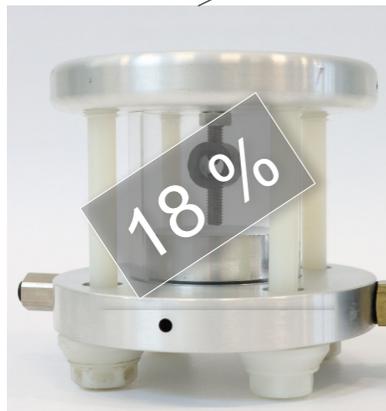
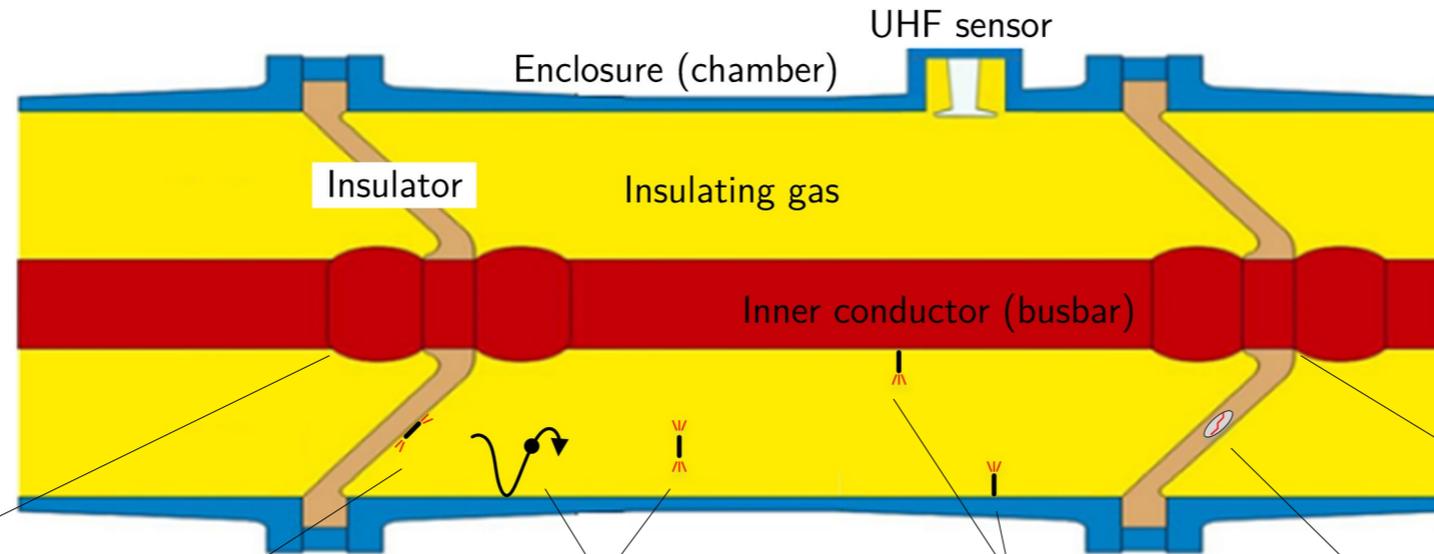
Eigenschaften von SF₆ und umweltfreundlichen Alternativgasen

	SF ₆	g ³	Clean Air
Chemische Formel	SF ₆	C ₄ F ₇ N und CO ₂	O ₂ /N ₂
Siedetemperatur	-63,8 °C	-4,7 °C	-196 °C
Anwendungsbereich	MS/HS	MS/HS	MS/HS
Dielektrische Eigenschaften	88 kV/cm	74 – 88 kV/cm	35 kV/cm
Atmosphärische Lebensdauer	3.200 Jahre	11 Jahre	0 Tage
GWP₁₀₀	23.500	< 760	0
Minimale Temperatur	-40 °C	-30 °C	-50 °C



Teilentladungsverhalten unzureichend erforscht!

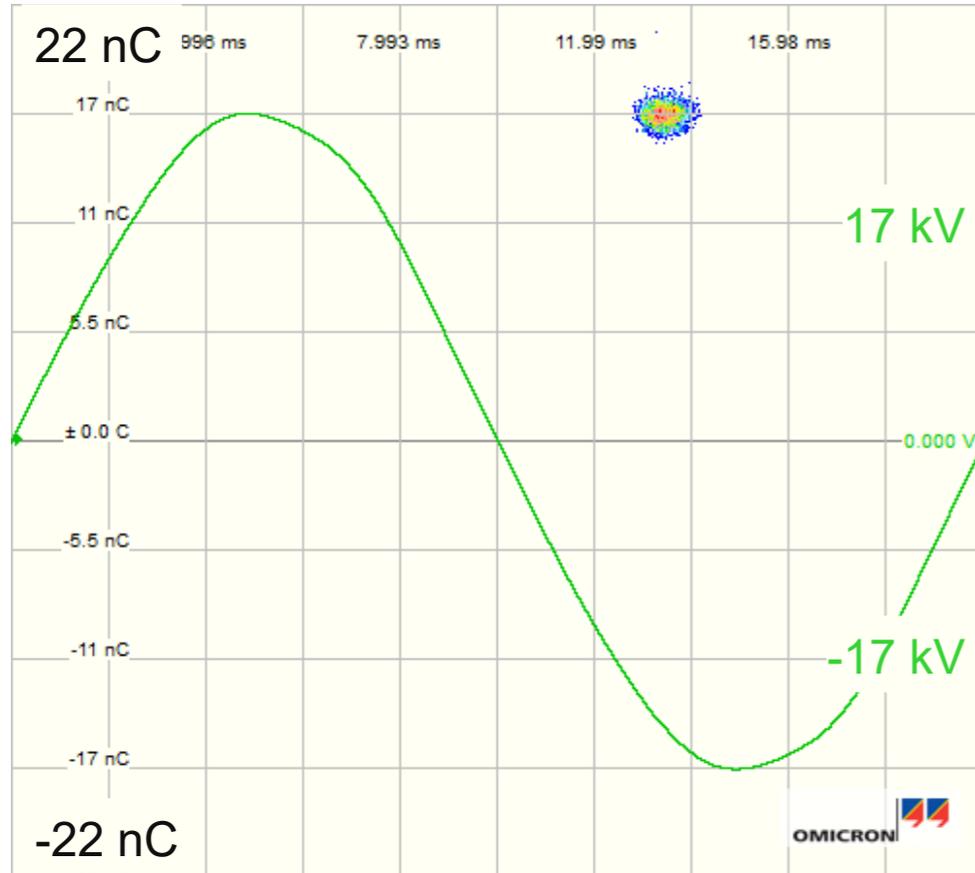
Teilentladungen (TE) in gas-isolierten Schaltanlagen



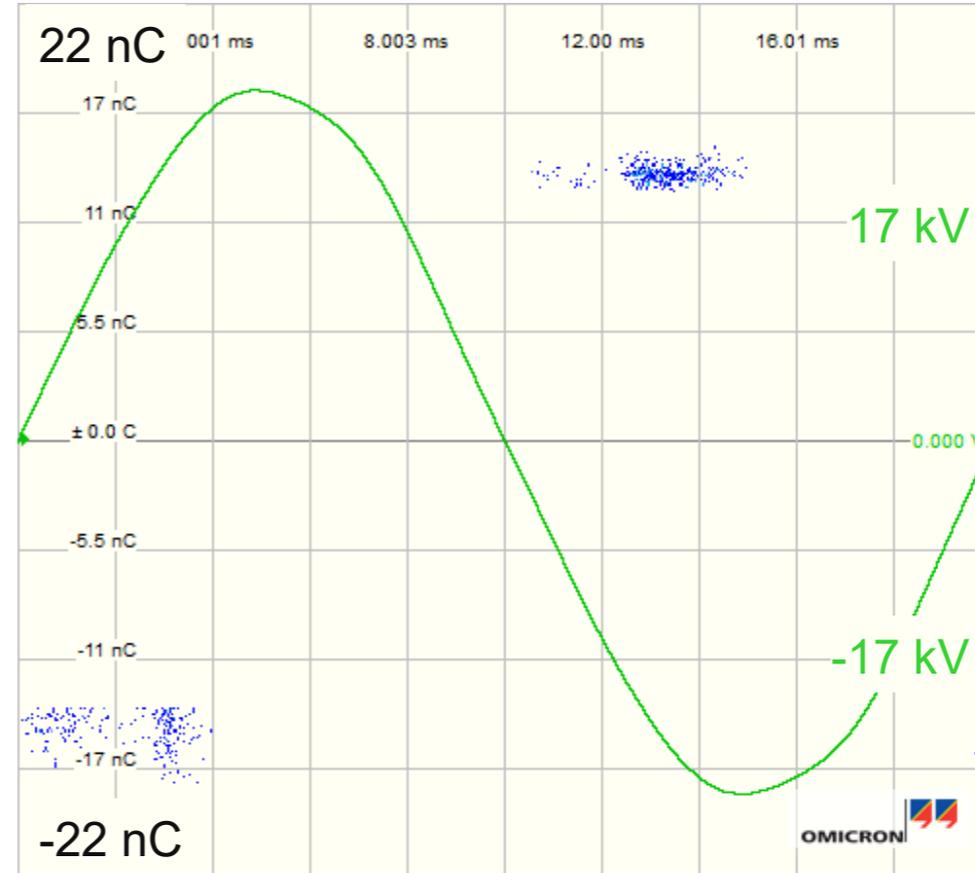
TE-Verhalten bei Wechselfspannung (I)



Freies Potential



O₂/N₂ bei 0,5 MPa
1,1-fache Einsatzspannung

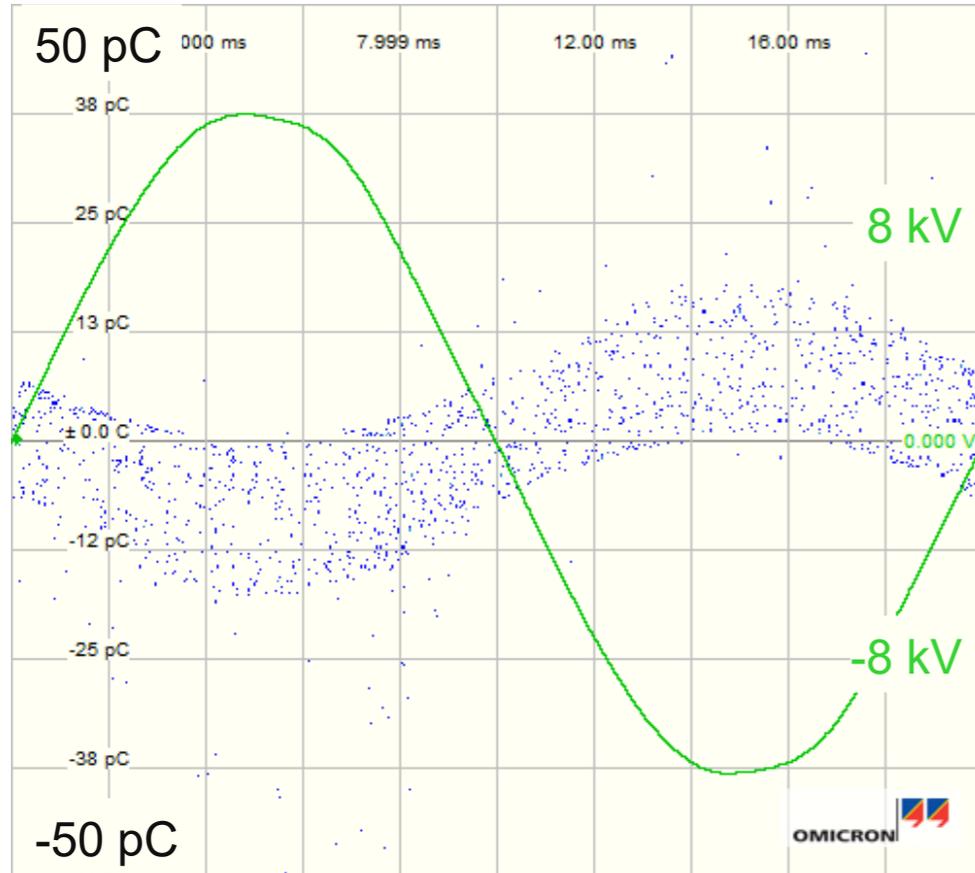


SF₆ bei 0,1 MPa
1,1-fache Einsatzspannung

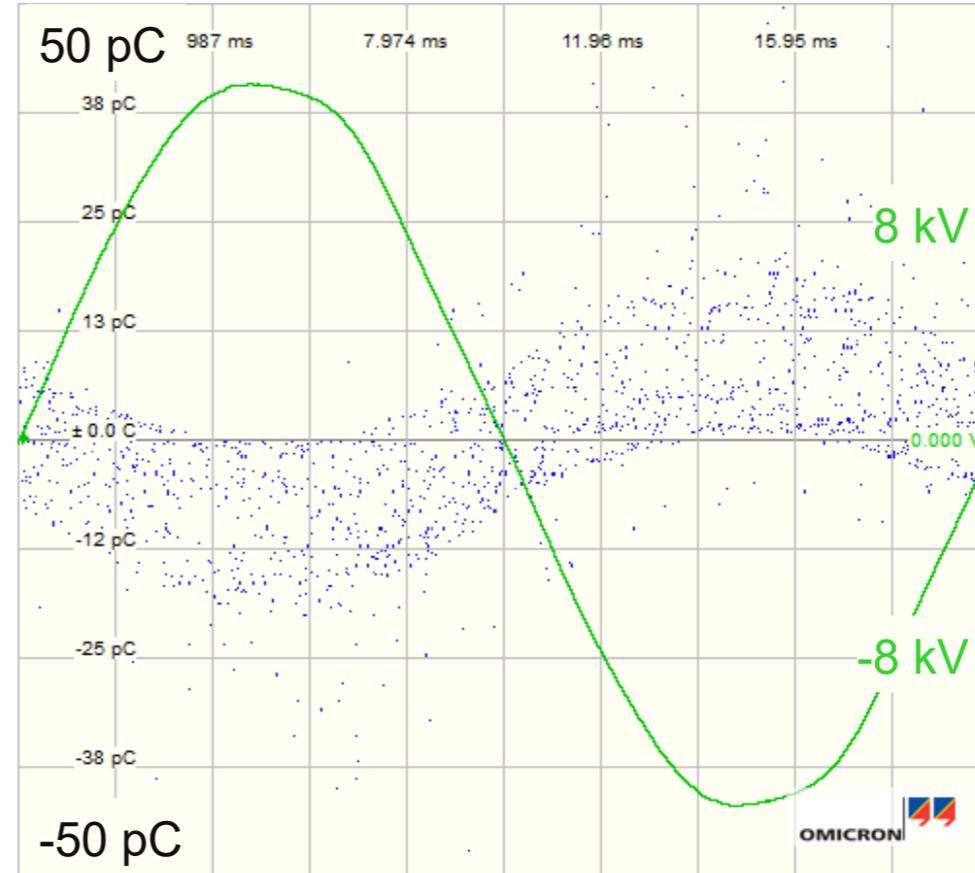
TE-Verhalten bei Wechselfspannung (II)



Springendes Partikel



O_2/N_2 bei 0,5 MPa
1,1-fache Einsatzspannung



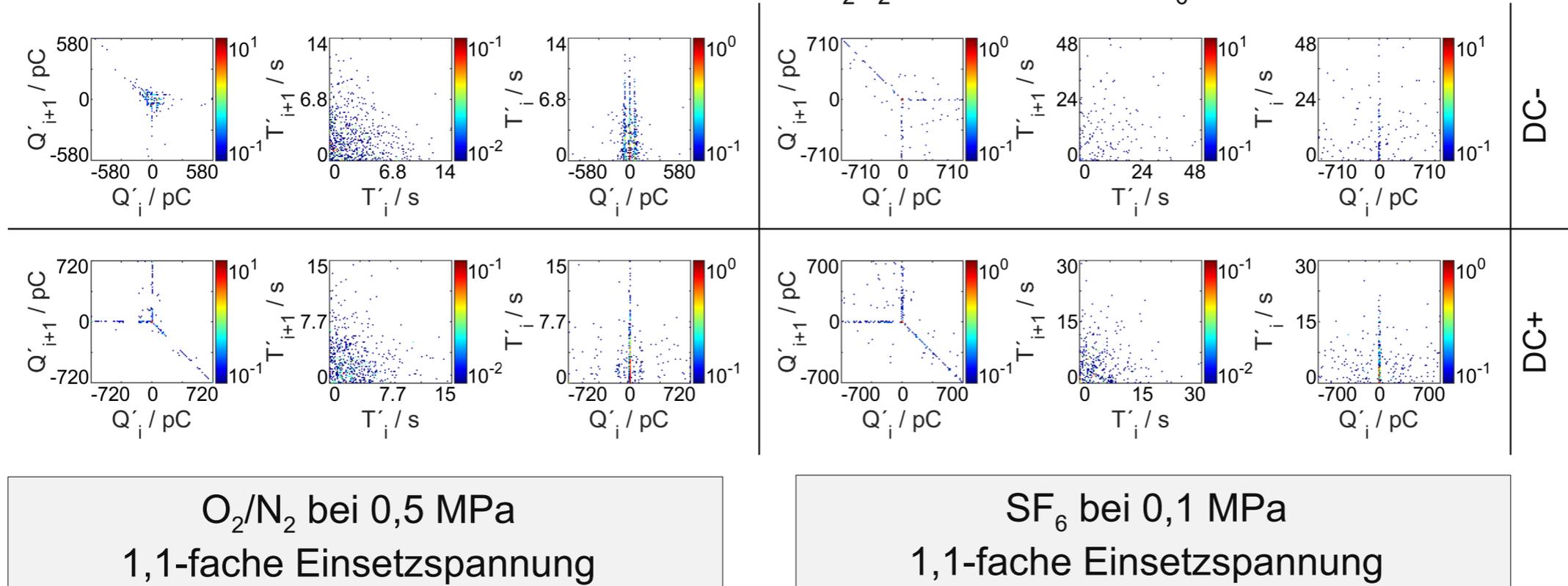
SF_6 bei 0,1 MPa
1,1-fache Einsatzspannung

TE-Verhalten bei Gleichspannung (I)

- NoDi*-Diagramme bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit
 - Gleichspannung mit negativer Polarität: $U_{E,O_2/N_2} = 29 \text{ kV} \leftrightarrow U_{E,SF_6} = 30 \text{ kV}$
 - Gleichspannung mit positiver Polarität: $U_{E,O_2/N_2} = 30 \text{ kV} \leftrightarrow U_{E,SF_6} = 30 \text{ kV}$



Freies Potential

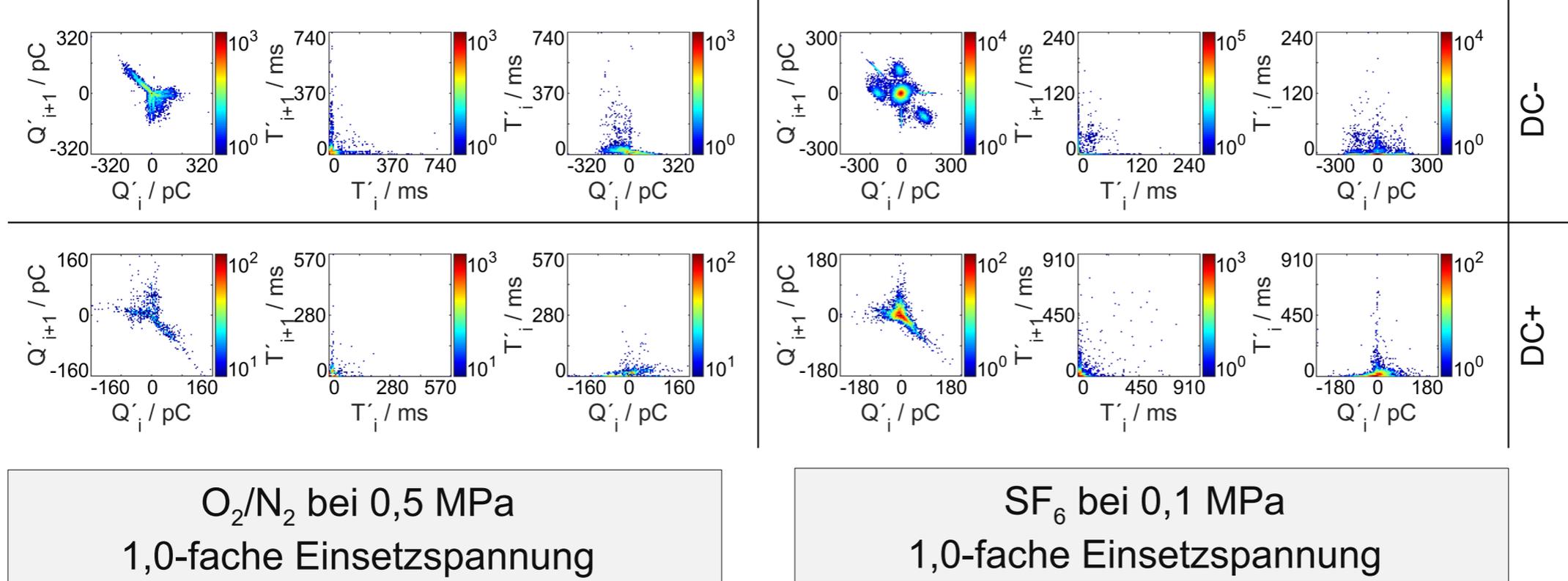


TE-Verhalten bei Gleichspannung (II)

- NoDi*-Diagramme bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit
 - Gleichspannung mit negativer Polarität: $U_{E,O_2/N_2} = 21 \text{ kV} \leftrightarrow U_{E,SF_6} = 21 \text{ kV}$
 - Gleichspannung mit positiver Polarität: $U_{E,O_2/N_2} = 21 \text{ kV} \leftrightarrow U_{E,SF_6} = 21 \text{ kV}$



Springendes Partikel



Zusammenfassung

- Neue F-Gas-Verordnung tritt 20 Tage nach Veröffentlichung in Kraft
- Alternativgase
 - TE-Verhalten bei Wechsel- und Gleichspannung unzureichend erforscht
 - Aktuelle CIGRE Working Group D1.78

Vergleich von O ₂ /N ₂ zu SF ₆	Gleiche elektrische Festigkeit
Impulswiederholrate	vergleichbar
TE-Pegel	höher
Streuung der TE-Pegel	größer
TE-Einsetzspannung	vergleichbar
TE-Muster	vergleichbar



8VN1 Blue GIS
Clean Air



F35 145 kV GIS
g³

Literatur

- [1] Global Monitoring Laboratory: „Sulfur hexafluoride (SF₆) - Combined Dataset“, 2023. [Online]. Available: <https://gml.noaa.gov/hats/combined/SF6.html>. [Zugriff am 12.02.2024]
- [2] M. Rabie, C. Franck: „Assessment of Eco-friendly Gases for Electrical Insulation to Replace the Most Potent Industrial Greenhouse Gas SF₆“, Environmental science & technology, 2018
- [3] Europäische Union: „Verordnung (EU) 2024/... des europäischen Parlaments und des Rates vom ... über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014“, 2024
- [4] K. Burges, M. Döring, C. Hussy, J.-M. Rhiemeier: „Concept for SF₆-free transmission and distribution of electrical energy“, Ecofys, Final report, 2018
- [5] S. Glomb, M. Göppel, P. Pilzecker: „Alternative Gase“ und Gasmischungen Teil 1“, White Paper, 2020
- [6] M. Rabie, C. Hussy: „Einordnung von Alternativen zum Einsatz von SF₆ in der elektrischen Energieversorgung, Überblick zum Stand einer Untersuchung im Auftrag des BMUB / UBA“, Ecofys, 2016
- [7] Y. Kieffel, F. Biquez: „SF₆ Alternative Development For High Voltage Switchgears“, 2015 Electrical Insulation Conference (EIC), Seattle, USA, 2025

TEILENTLADUNGSVERHALTEN VON SF₆ UND UMWELTFREUNDLICHEN ALTERNATIVGASEN

Bernhard Schober

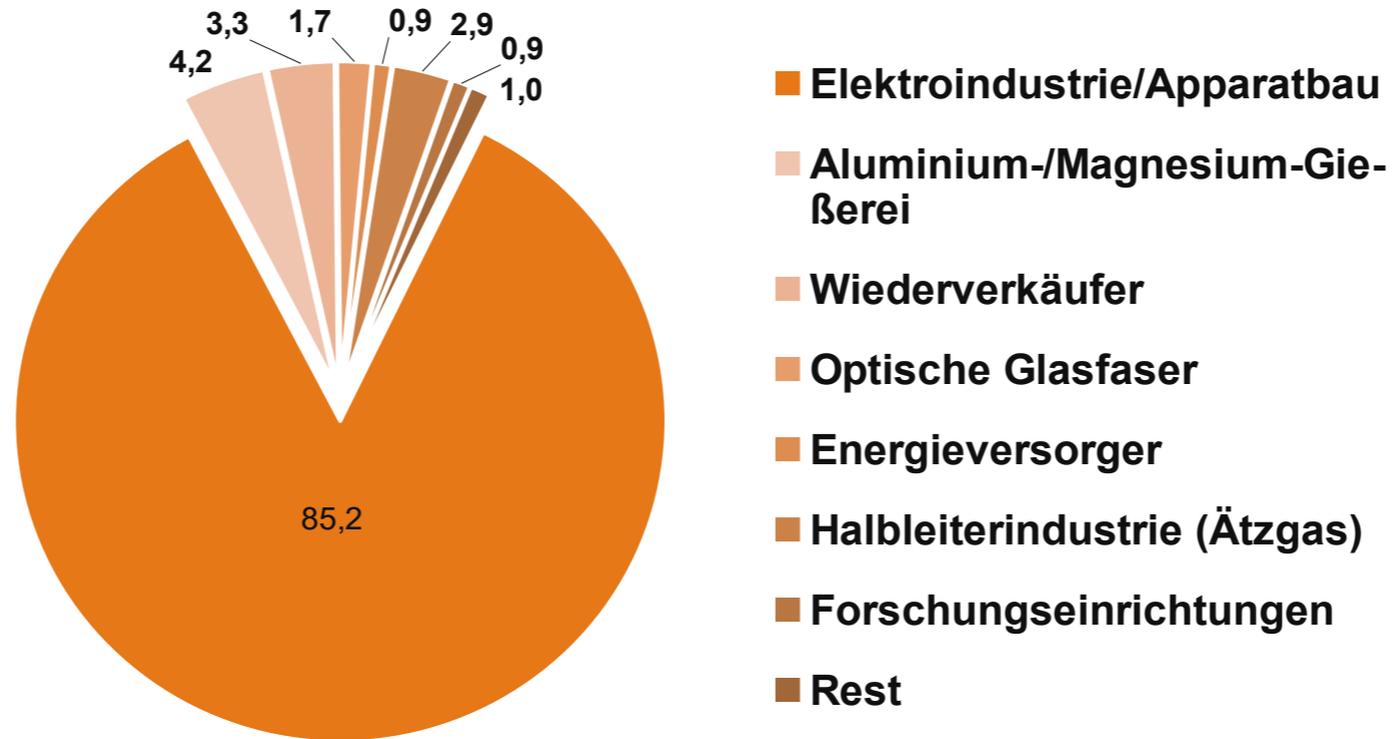
bernhard.schober@tugraz.at

EnInnov2024

18. Symposium Energieinnovation | 14.02.-16.02.2024

Backup

Schwefelhexafluorid (SF₆) – Klimarelevanz



SF6-Abnehmer (2015)

Schwefelhexafluorid (SF₆) – Klimarelevanz

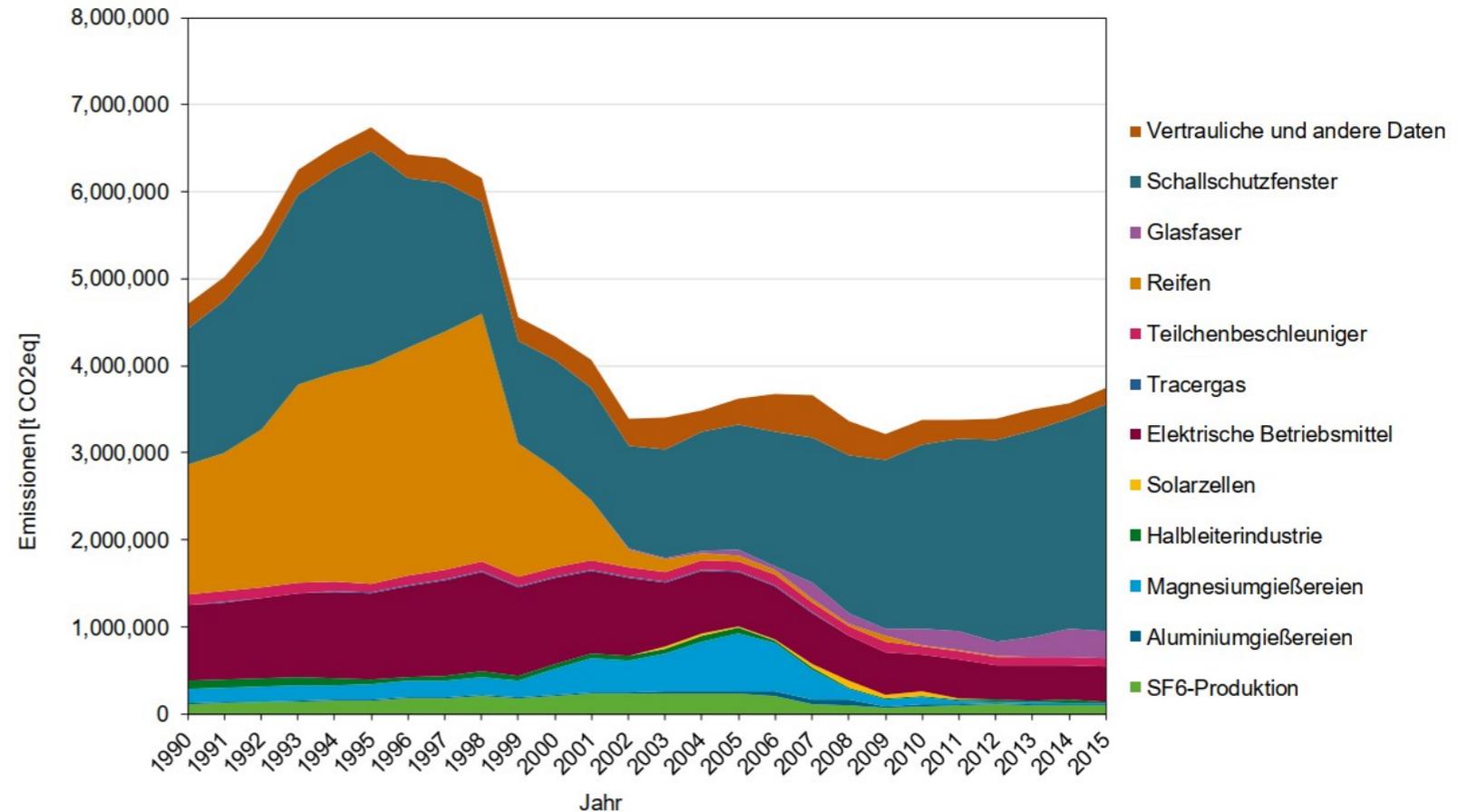
- Größter Verwender
 - Elektroindustrie 85,2%

↑
atmosphärischen Wirkung
↓

- Größter Emittent
 - Schallschutzfenster



- Zweitgrößter Emittent
 - elektrische Betriebsmittel
 - Größte SF₆-Emissionen während der Herstellung
 - Geringe SF₆-Emissionen im Betrieb



(Neue) F-Gas-Verordnung

Ausnahmen

Art. 13 (11)

Abweichend von Absatz 9 ist die Inbetriebnahme (...) mit einem **GWP von weniger als 1 000** (...) gestattet (...):

b) während der ersten zwei Jahre nach den in Absatz 9 Buchstaben c und d genannten Zeitpunkten sind keine Angebote oder nur Angebote eingegangen (...) eines Herstellers (...) mit einem GWP von weniger als Eins angeboten wurden;

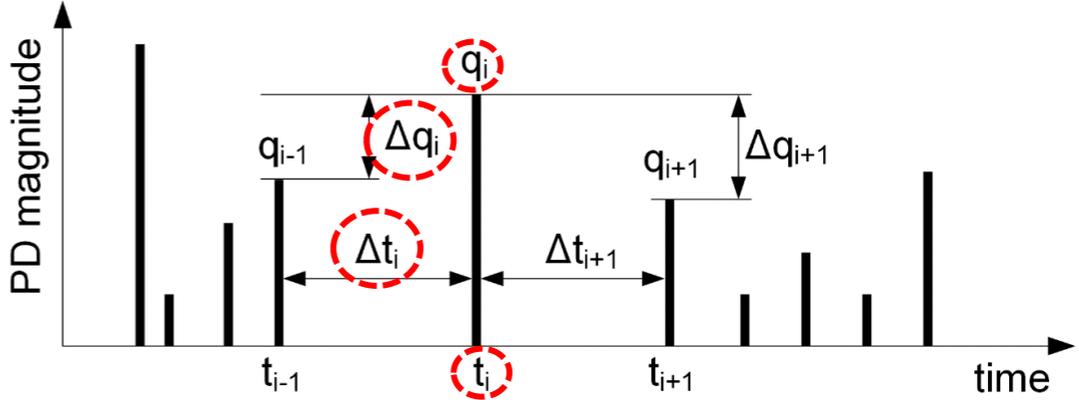
Art. 13 (12)

Abweichend von Absatz 11 sind elektrische Schaltanlagen mit Isolier- oder Schaltmedien mit einem **GWP von 1 000 oder mehr gestattet**, sofern im Anschluss an ein Vergabeverfahren (...) kein Angebot über elektrische Schaltanlagen mit Isolier- oder Schaltmedien mit einem GWP von weniger als 1 000 eingegangen ist.

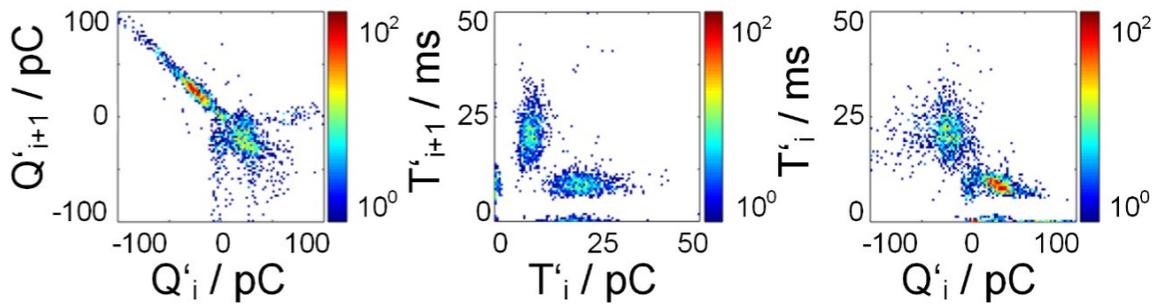
Interpretation von TE-Messungen bei Gleichspannung

- Fundamentale Größen von TE-Impulsen bei Gleichspannung
 - TE-Amplitude q_i
 - Zeitliches Auftreten t_i
 - Spannungslevel u_i

Pulssequenz

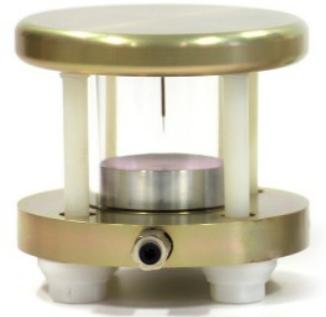


- Interpretation von Pulssequenzen mit Hilfe von NoD
 - Differenzierte Werte von q_i und t_i

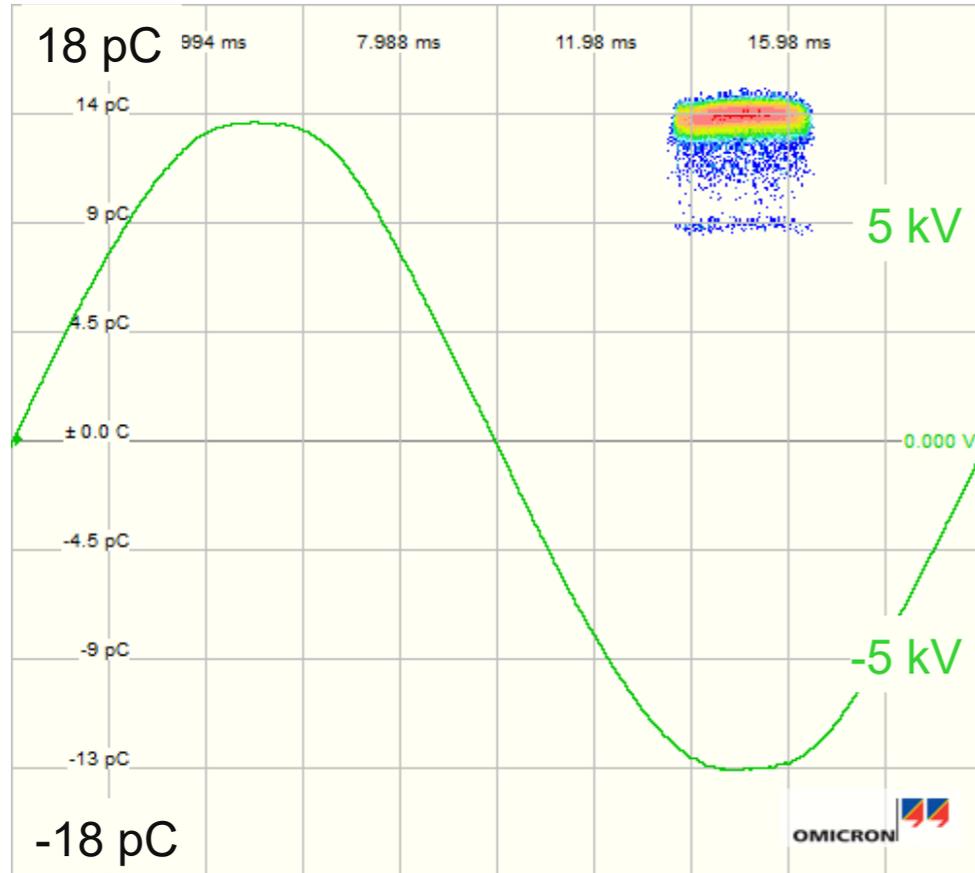


- Interpretation einiger TE Defekte ist möglich ...
- für einen menschlichen Experten

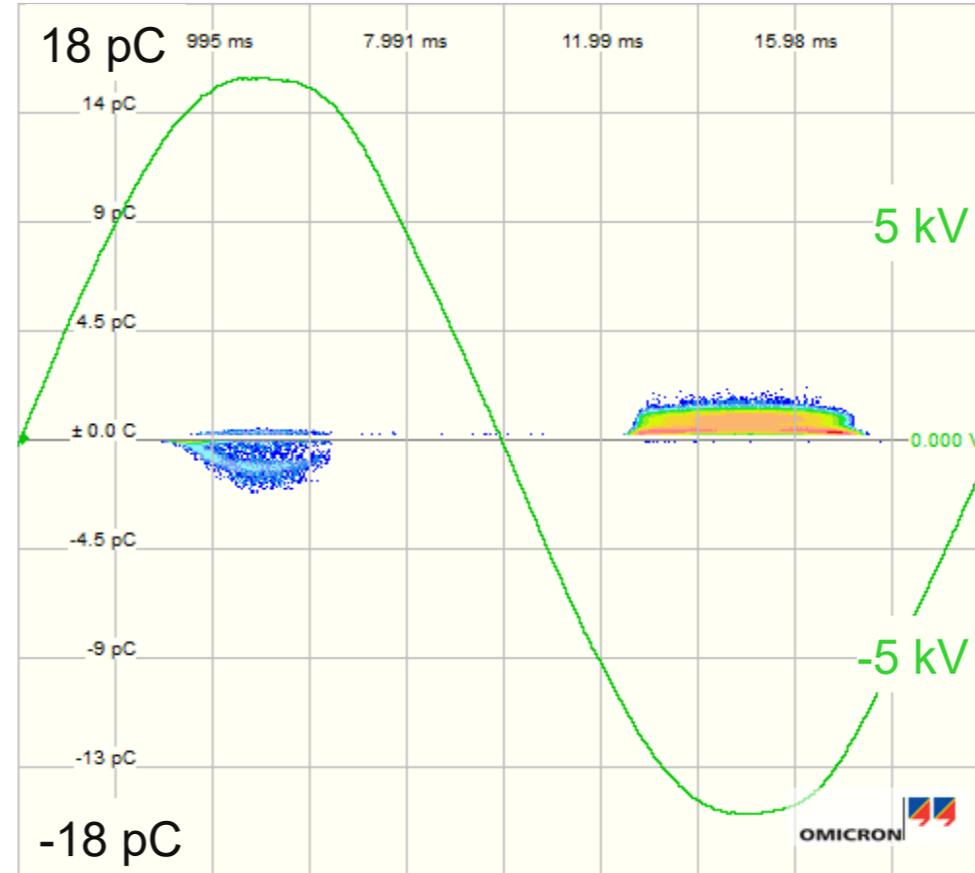
TE-Verhalten bei Wechselspannung



Korona-entladungen



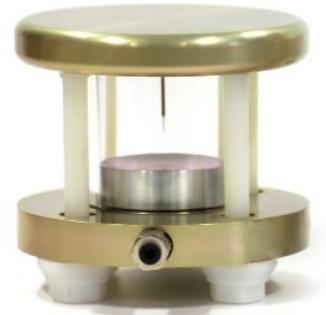
O₂/N₂ bei 0,5 MPa
1,1-fache Einsatzspannung



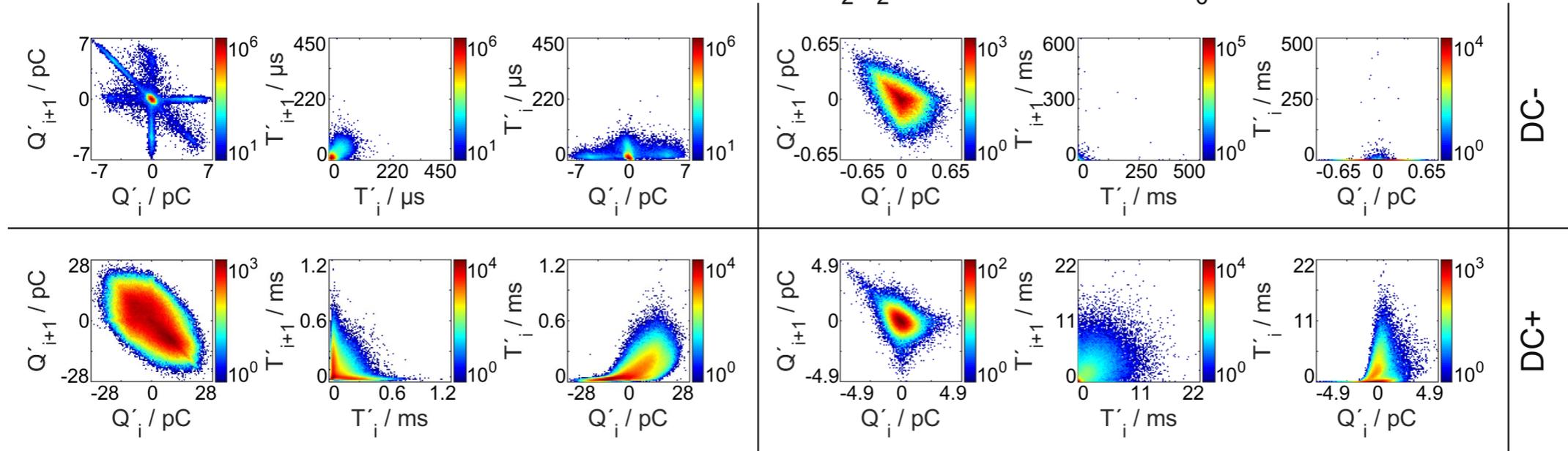
SF₆ bei 0,1 MPa
1,1-fache Einsatzspannung

TE-Verhalten bei Gleichspannung

- NoDi*-Diagramme bei annähernd gleicher elektrischer Festigkeit
 - Gleichspannung mit negativer Polarität: $U_{E,O_2/N_2} = -8,1 \text{ kV} \leftrightarrow U_{E,SF_6} = -6,9 \text{ kV}$
 - Gleichspannung mit positiver Polarität: $U_{E,O_2/N_2} = 10,1 \text{ kV} \leftrightarrow U_{E,SF_6} = 8,3 \text{ kV}$



Korona-entladungen



O₂/N₂ bei 0,5 MPa
1,1-fache Einsatzspannung

SF₆ bei 0,1 MPa
1,1-fache Einsatzspannung