

# ***FKH - Fachtagung***

## ***Umweltaspekte***



## ***als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

21. November 2023  
Trafo Baden



*Fachkommission für Hochspannungsfragen  
Commission d'étude des questions relatives à la haute tension*



*FKH - Fachtagung  
21. November 2023  
Trafo Baden*

# ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

*Veranstalter:*

*Fachkommission für Hochspannungsfragen  
Hagenholzstrasse 81  
8050 Zürich*





**FKH - Fachtagung  
21. November 2023  
Trafo Baden**

**Vorwort zur Tagung**

Hochspannungsbetriebsmittel stehen seit jeher in der Interaktion mit ihrer Umwelt. Netzbetreiber und Produzenten elektrischer Energie sind neu mit vielversprechenden «grünen» Technologien konfrontiert, welche über Anreize und Regulatorien gefördert werden, bei denen aber teilweise noch beschränkte Betriebserfahrung vorliegen.

Diese Tagung richtet sich an Ingenieurinnen und Ingenieure aus der Energiebranche, welche ihr theoretisches und praktisches Wissen auf dem Gebiet der «grünen» Hochspannungsbetriebsmittel vertiefen möchten oder einen Erfahrungsaustausch zum Einsatz dieser Technologien suchen.

**Prof. Dr. Christian Franck**  
ETH Zürich

**Dr. Michael Walter**  
Geschäftsleiter, FKH



## Programm für die FKH - Fachtagung 2023

Zeit	Beitrag	Referent
08 <sup>30</sup> -09 <sup>00</sup>	Willkommenskaffee	
09 <sup>00</sup> -09 <sup>05</sup>	Begrüßung durch den Präsidenten der FKH	Christian Lindner, Axpo Grid AG
09 <sup>05</sup> -09 <sup>10</sup>	Informationen zur Fachtagungsablauf	Prof. Dr. Christian Franck, ETH Zürich
09 <sup>10</sup> -9 <sup>35</sup>	Grüne Innovationstrends in gasförmiger, fester und flüssiger Isolation	Prof. Dr. Christian Franck, ETH Zürich
9 <sup>35</sup> -10 <sup>00</sup>	Ökobilanzen zur Abschätzung des Umweltfußabdrucks von Komponenten des Stromübertragungs- und Verteilnetzes	Rolf Frischknecht, treeze Ltd
10 <sup>00</sup> -10 <sup>25</sup>	Regulatorisch motivierter Technologiewandel im Hoch- und Höchstspannungsnetz - Herausforderungen für Betreiber	Philipp Wenger, TransnetBW GmbH
10 <sup>25</sup> -11 <sup>00</sup>	Kaffeepause	
11 <sup>00</sup> -11 <sup>25</sup>	Schaltanlagen mit alternativen Isoliergasen und deren Prüfung	Dr. Michael Walter, FKH
11 <sup>25</sup> -11 <sup>50</sup>	Entscheidende Aspekte für den Einsatz von alternativen Gasen in GIS-Spannungswandlern	Dr. Mostafa Refaey, Pfiffner Ltd
11 <sup>50</sup> -12 <sup>15</sup>	Ansätze und Lösungen zum Gas-Lebenszyklus für Anlagen mit alternativen Isoliergasen	Martin Göppel, DIL0 GmbH
12 <sup>15</sup> -13 <sup>30</sup>	Mittagessen	
13 <sup>30</sup> -13 <sup>55</sup>	Berücksichtigung von Umweltaspekten beim Bau von Hochspannungsleitungen	Dr. Sandro Dinser, Dinser Expertise GmbH
13 <sup>55</sup> -14 <sup>20</sup>	Koronaschallemissionen von Freileitungen in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit	Hannah Kirchner, ETH Zürich
14 <sup>20</sup> -14 <sup>45</sup>	Auswirkungen umweltfreundlicherer Technologien auf Netzzvorgänge	Gunnar Andrae, FKH
14 <sup>45</sup> -15 <sup>15</sup>	Kaffeepause	
15 <sup>15</sup> -15 <sup>40</sup>	Gesteigerte Nachhaltigkeit durch innovative feststoffisolierte Transformatoren	Bogdan Cranganu-Cretu, Hitachi Energy AG
15 <sup>40</sup> -16 <sup>05</sup>	Druckluftkabel für Mittel- und Hochspannungsanwendungen: Kapselungsdesign und Betriebserfahrung für 145kV, 2000 A	Dr. Walter Holaus, Hivoduct AG
16 <sup>05</sup> -16 <sup>30</sup>	Öl-isolierte Transformatoren: Erkenntnisse und Innovationen im Bereich Isolierungen für eine verbesserte Lebenszyklusbilanz	Dr. Ghazi Kablouti, Hitachi Energy AG
16 <sup>30</sup> -16 <sup>40</sup>	Schlussdiskussion und Abschluss	Prof. Dr. Christian Franck, ETH Zürich
ab 16 <sup>40</sup>	Apéro	



## Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
<b>Grüne Innovationstrends in gasförmiger, fester und flüssiger Isolation</b> Prof. Dr. Christian Franck, ETH Zürich	<b>1</b>
<b>Ökobilanzen zur Abschätzung des Umweltfußabdrucks von Komponenten des Stromübertragungs- und Verteilnetzes</b> Rolf Frischknecht, treeze Ltd	<b>5</b>
<b>Regulatorisch motivierter Technologiewandel im Hoch- und Höchstspannungsnetz - Herausforderungen für Betreiber</b> Philipp Wenger, TransnetBW GmbH	<b>9</b>
<b>Schaltanlagen mit alternativen Isoliertgasen und deren Prüfung</b> Dr. Michael Walter, FKH	<b>21</b>
<b>Entscheidende Aspekte für den Einsatz von alternativen Gasen in GIS-Spannungswandlern</b> Dr. Mostafa Refaey, Pfiffner Ltd	<b>37</b>
<b>Ansätze und Lösungen zum Gas-Lebenszyklus für Anlagen mit alternativen Isoliertgasen</b> Martin Göppel, DILO GmbH	<b>45</b>
<b>Berücksichtigung von Umweltaspekten beim Bau von Hochspannungsleitungen</b> Dr. Sandro Dinser, Dinser Expertise GmbH	<b>67</b>
<b>Koronaschallemissionen von Freileitungen in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit</b> Hannah Kirchner, ETH Zürich	<b>79</b>
<b>Auswirkungen umweltfreundlicherer Technologien auf Netzzvorgänge</b> Gunnar Andrae, FKH	<b>89</b>
<b>Druckluftkabel für Mittel- und Hochspannungs-anwendungen: Kapselungsdesign und Betriebserfahrung für 145kV, 2000 A</b> Dr. Walter Holaus, Hivoduct AG	<b>103</b>
<b>Gesteigerte Nachhaltigkeit durch innovative feststoffisolierte Transformatoren</b> Bogdan Cranganu-Cretu, Hitachi Energy AG	<b>115</b>
<b>Increased sustainability through innovative Dry-type rail-transformers</b> Dr. Ghazi Kablouti, Hitachi Energy AG	<b>121</b>
<b>Referentenadressen</b>	<b>131</b>
<b>QR-Code zu den Präsentationen</b>	<b>133</b>
<b>Notizen</b>	<b>135</b>



## ***FKH - Fachtagung***

***21. November 2023***

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Grüne Innovationstrends in gasförmiger, fester und flüssiger Isolation**

**Prof. Dr. Christian Franck**  
ETH Zürich

#### **Funktion und beruflicher Werdegang**

- Professor für Hochspannungstechnik an der ETH Zürich seit Januar 2010
- Von 2003 bis 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter am ABB Corporate Research Centre in Baden-Dättwil, Schweiz.
- Von 1999 bis 2003 Doktorand an der Universität Greifswald und am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald.
- Studium der Physik an der Universität Bonn, der University Edinburgh und der Universität Kiel.



# Grüne Innovationstrends in gasförmiger, fester und flüssiger Isolation

Christian Franck  
ETH Zürich

## 1 Kurzfassung

Hochspannungsbetriebsmittel bilden das Rückgrat unserer elektrifizierten Versorgungsinfrastruktur. Gleichzeitig stehen sie seit jeher in der Interaktion mit ihrer Umwelt. Negative Umweltaspekte betreffen den effektiven Landverbrauch der Produktionsanlagen, Verteilknoten und Trassen, die graue Energie der verbauten Komponenten, den Einsatz von Treibhausgasen und Öl als Isoliermedium, sowie elektromagnetische Felder, Verlustabwärme und Schallemissionen im direkten Umfeld.

Durch die wissenschaftlichen Erkenntnisse in Bezug auf den Klimawandel ist das Bewusstsein der Bevölkerung und der Regulierungsbehörden für eine emissionsminimierende Kreislaufwirtschaft gestiegen und es werden sowohl Anreize als auch Vorschriften geschaffen zur Förderung «grüner» Technologien. Dies löst bei den Herstellern von Hochspannungsbetriebsmitteln einen Innovationsschub aus und konfrontiert die Netzbetreiber und Produzenten elektrischer Energie mit neuen vielversprechenden Technologien. Der Aufbau von Betriebserfahrung bei den Netzbetreibern ist hierbei zentral. Durch die Umstellung des Technologiemix dürfen keine Zugeständnisse bei der gewohnt hohen Betriebssicherheit der Übertragungsnetze gemacht werden und die Auswahl der alternativen Technologien muss auf Basis aller Umweltfaktoren getroffen werden, um ökologisch und wirtschaftlich die passendste Technologie für ein Projekt auszuwählen.

Der Beitrag stellt gasförmige, feste und flüssige Isolierstoffe sowie deren potenzielle Umweltproblematik vor, und ist somit eine Einleitung für die nachfolgenden Beiträge der Tagung.



## ***FKH - Fachtagung***

*21. November 2023*

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Ökobilanzen zur Abschätzung des Umweltfußabdrucks von Komponenten des Stromübertragungs- und Verteilnetzes**

**Dr. sc. techn. ETH Rolf Frischknecht**  
treeze Ltd., Uster, Schweiz

#### **Inhaber und leitender Berater**

Rolf Frischknecht ist diplomierter Bauingenieur, hat an der ETH auf dem Gebiet der Ökobilanzierung doktriert und prägt seit über 30 Jahren die Entwicklung der Ökobilanzierung in Europa und weltweit. Seine Tätigkeiten reichen von der umfassenden elektronisch und online verfügbaren Ökobilanzdatenbank ecoinvent bis zur Weiterentwicklung von Umweltindikatoren und Bewertungsmethoden, etwa der Methode der ökologischen Knappheit. Er leitet das auf Ökobilanz-Beratung und -Forschung spezialisierte Unternehmen treeze und unterrichtet Ökobilanzen an der ETH Zürich. 2020 wurde er für sein Lebenswerk mit dem SETAC Europe Preis der Ökobilanzierung ausgezeichnet.



# Ökobilanzen zur Abschätzung des Umweltfussabdrucks von Komponenten des Stromübertragungs- und Verteilnetzes

Dr. sc. techn. ETH Rolf Frischknecht  
treeze Ltd., Uster, Schweiz

## 1 Kurzfassung

Die Ökobilanz ist eine umfassende, international normierte Methode zur Abschätzung der Umweltauswirkungen von Produkten, Infrastrukturen und Firmen. Während in ihren Anfängen in den 70er und 80er Jahren Verpackungen im Zentrum des Interesses standen, weitete sich ihr Anwendungsfeld in den letzten Jahrzehnten stetig aus. Zur Beurteilung der Umweltauswirkungen, der Emissionen von Schadstoffen und der Inanspruchnahme von Ressourcen hat das Bundesamt für Umwelt vor über 30 Jahren die Methode der ökologischen Knappheit entwickelt und regelmässig aktualisieren und erweitern lassen. Die Bewertungsfaktoren, Ökofaktoren genannt, orientieren sich an der ökologischen Knappheit. Die Knappheit definiert sich im Wesentlichen über das Verhältnis der aktuellen Emissionen zu den in Umweltzielen festgelegten umweltverträglichen Emissionen. Im Jahr 2021 wurde die 5. Generation von Ökofaktoren für die Schweiz publiziert.

Bei innovativen Energieversorgungsunternehmen ist das Kriterium „Umweltauswirkungen“ seit über 20 Jahren Teil des Beschaffungsprozesses von Komponenten des Stromübertragungs- und Verteilnetzes. Zu diesem Zweck lassen sie Ökobilanzen erarbeiten, mit denen die lebenswegbasierten Umweltauswirkungen quantifiziert werden können.

Ökobilanzen werden vermehrt auch zur Quantifizierung des Umweltfussabdrucks von Unternehmen verwendet. Die Ergebnisse dieser Analysen dienen dazu, die Umwelthotspots des Unternehmens zu identifizieren, Umweltziele zu formulieren, den Grad der Zielerreichung zu überprüfen. Zudem bilden die Ergebnisse einer Firmen-Ökobilanz eine solide Basis für ein umweltorientiertes Lieferkettenmanagement.

## 2 Quellen

Frischknecht R. (2020), [Lehrbuch der Ökobilanzierung](#), Springer Spektrum, Berlin Heidelberg, Softcover ISBN 978-3-662-54762-5, e-book ISBN 978-3-662-54763-2

BAFU (Hrsg.) (2021) [Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit](#). Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Alig M., Frischknecht R., Nathani C., Hellmüller P., Stolz P. (2020), [Umweltatlas Lieferketten Schweiz](#), treeze Ltd. / Rütter Soceco AG, Uster / Rüsclikon



## ***FKH - Fachtagung***

*21. November 2023*

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

**Regulatory-motivated technology change in the high  
and extra-high voltage grid – challenges for operators**

**Regulatorisch motivierter Technologiewandel im  
Hoch- und Höchstspannungsnetz –  
Herausforderungen für Betreiber**

**M. Sc. Philipp Wenger**  
TransnetBW GmbH

#### **Funktion und beruflicher Werdegang**

Ingenieur GIS-Technologie

Philipp Wenger schloss das Studium der Elektro- und Informationstechnik an der Universität Stuttgart im Jahr 2017 ab. Anschließend arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Stuttgart. Sein Forschungsschwerpunkt lag auf der Diagnose von Teilentladungen metallischer Defekte in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) bei Hochspannungs-Gleichstrom-Beanspruchung. Seit Mai 2022 ist er Mitarbeiter im Team Primärtechnik der TransnetBW. Er beschäftigt sich mit der Technologieentwicklung von GIS-Anlagen und ist Ansprechpartner bei technischen Fragen in der Projektphase und während des Betriebs. Er ist Mitglied im VDE.



# Regulatory-motivated technology change in the high and extra-high voltage grid – challenges for operators

Philipp Wenger, Viorel Badicu, Galina Kuznetsova, Christian Suttner  
TransnetBW GmbH

## 1 Summary

Worldwide Transmission System Operators (TSO) drafted and published strategies on how to reduce their Green House Gas emissions (GHG) in order to support the achievement of the ambitious targets of local and international climate agreements. At European level, the TSOs' efforts have been significantly intensified after the announcement of the *Green Deal* and *Fit for55* programs. Besides great opportunities at system level, driven by electrification and integration of renewable energy from different sources, the own carbon footprint is also being addressed. An important domain to be touched with respect to the latter point is the use of SF<sub>6</sub> as arc quenching and insulating gas in transmission and distribution equipment, due to its high global warming potential (GWP).

In addition to the GHG emissions Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) have caught the attention of regulatory agencies worldwide. The European Chemicals Agency (ECHA) published a consultation, which seeks a ban of manufacturing, placing on the market and usage of PFASs. The use of PFAS in solid, liquid, and gaseous components of grid equipment is determined by manufacturers to ensure the highest requirements for its performance and reliability.

Being aware of these facts, DSOs and TSOs have to define a strategy regarding the selection, testing and introduction of alternative technologies. TransnetBW has defined a strategy based on important drivers such as, own experience from pilot projects, market analysis and requirements coming from the policy makers. It is a “must-have” tool, which allows TransnetBW to plan and execute pilot projects with sustainable equipment in a structured manner, without delaying the grid expansion projects required by the energy transition.

## 2 Upcoming regulations affecting the energy sector

### 2.1. Regulation on fluorinated greenhouse gases

Today SF<sub>6</sub> is most widely used as arc quenching and insulating gas in transmission and distribution (T&D) equipment. Its properties have been proven in high voltage applications for more than 50 years. However, SF<sub>6</sub> is about 25,200 times more harmful than the greenhouse gas (GHG) CO<sub>2</sub> and has a lifetime of 3,200 years in the earth's atmosphere [1]. Through continuous design improvements, the SF<sub>6</sub> leakage rate dropped from about 3%/year in case of the first-generation equipment to less than 0,1 %/year in case of state-of-the-art design. However, due to the extremely high global warming potential (GWP) and long atmospheric lifetime of the SF<sub>6</sub>, any emissions have a significant impact on the climate. However, due to the grid expansion required by the energy transition, it is

expected that the amount of SF<sub>6</sub> in operation and the absolute quantity of leaked gas will increase. Under these circumstances, the only solution to sustainably reduce the SF<sub>6</sub> emissions is to reduce the amount of SF<sub>6</sub>, which comes in operation with the new equipment. In this context, the regulation on fluorinated gases is again going to be revised, to support the achievement of the above-mentioned targets. Together with an SF<sub>6</sub> ban for the electrical industry, the listing and control through this regulation of other fluorinated gases used as SF<sub>6</sub> alternatives have been announced as well.

Consequently, its replacement is essential to mitigate climate change and move towards climate-neutrality. In this regard, SF<sub>6</sub> has been the subject of intense discussions world-wide at the regulatory level starting 1997:

- **1960's**: Introduction of SF<sub>6</sub> as insulation medium of electrical equipment
- **1997**: Kyoto Protocol - SF<sub>6</sub> gets listed as GHG
- **2005**: Germany introduces a voluntary agreement to limit the SF<sub>6</sub> emissions
- **2006**: Introduction of a regulation on fluorinated gases (F-gas regulation)
- **2014**: First revision of the F-gas-Regulation
  - o Introduction of an SF<sub>6</sub> ban in all industries (exceptions: military and electrical industry)
  - o Introduction of global warming potential threshold limits for applications relying on F-gases
  - o Introduction of an F-Gas-ban for those applications wherefor alternatives are available
- **5 October 2023**: Provisional agreement on finalised negotiations on fluorinated greenhouse gases
  - o Introduction of an SF<sub>6</sub> ban in the electrical industry with transition times
  - o Reduction of the GWP-limits for applications relying on F-gases without alternatives
  - o Introduction of a ban for further F-gases

The most important instrument in this respect is the regulation on fluorinated greenhouse gases, with the main objectives to discourage the use of F-gases with high GWP, to prevent leakage from equipment and proper end of life treatment of F-gases in all applications, and to enhance sustainable growth, stimulate innovation, and develop green technologies by improving market opportunities for alternative technologies. It can be noticed, that after the introduction of this regulation, the requirements regarding the use of all F-gases were progressively sharpened. The use of SF<sub>6</sub> has also been continuously restricted and it is going to be banned in the electrical industry as well. According to the latest draft of the F-gas regulation SF<sub>6</sub> can only exceptionally be used for military applications in the future [2]. In this context the policy makers need also to make it possible, that the existing SF<sub>6</sub> substation equipment can be operated till the end of their technical lifetime. Their replacement before this point is not sustainable, slows down the grid expansion and does not support the energy transition. Hence, usage of spare parts has to be permitted for repair and maintenance purposes.

## 2.2. Restriction proposal on PFAS

PFASs are a group of synthetic carbon-fluorine compounds that have multiple fluorine atoms attached to an alkyl chain [3]. The combination of their useful properties, such as water, oil and dirt repellency and high durability under extreme temperatures and pressures enable their use in a wide range of technical applications. Currently, thousands of PFAS chemicals are known and found in many different consumer, commercial, and

industrial products. The sophisticated high and extra high voltage equipment used in power grids is built to last 40+ years. It is designed to operate and withstand extraordinary and harsh conditions, such as high pressure, extreme voltage levels and temperatures, and to guarantee the functioning and resilience of the grid at any time. The use of PFAS in solid, liquid, and gaseous components of grid equipment is determined by manufacturers to ensure the highest requirements for its performance and reliability. Due to the lack of data, DSOs and TSOs do currently not yet have a comprehensive overview of the use of PFAS in components of their electrical equipment and cannot determine the amount of PFAS contained in their equipment, as well as the PFAS used to manufacture this equipment. The following overview shows typical use cases according to material classification for PFAS for which information is available for the TSOs:

- **Solid**
  - Electrical insulation (wire of coils, contact systems)
  - Electronics (printed circuit boards, electronic components)
  - Gaskets
  - Mechanical components (drives, insulated nozzles)
- **Liquide**
  - Electrical insulation (additives in oil)
  - Lubricants
  - Corrosion protection painting and thermally stable painting
- **Gaseous**
  - Electrical insulation (fluorinated gases, e.g., C4-FN)

The adverse effects on environment and human health in combination with their very high persistence and potential for bioaccumulation generate an uncontrolled risk from use of PFASs. On 22 March 2023, the ECHA published a consultation, which seeks input on the draft restriction of PFAS proposed by Denmark, Germany, the Netherlands, Sweden and Norway [4]. The restriction proposal implements a ban of manufacturing, placing on the market and usage of PFASs as such, and as constituent in other substances or in mixtures, as well as in articles above a set concentration limit. A full ban is aimed for 18 months after entry into force with time limited derogations (up to 12 years), based on analysis of alternative and socio-eco assessment. The restriction on PFAS is considered to become effective in 2026/2027.

A restriction that does not take into account network-specific use cases could lead to the unavailability of critical assets and, thus, to unpredictable effects with regard to system security. Furthermore, it is necessary that the supply of spare parts is secured throughout the asset lifetime. The operation, maintenance, repair and extension of existing equipment containing PFAS must be ensured until the end of its lifetime, as PFAS-free spare parts may not work in the originally designed equipment. Otherwise, they would need to be decommissioned prematurely, entailing additional environmental and climate-related burdens, without consideration of circular economy or reparability principles.

### 3. Strategy development

The entry into force of the restriction on PFAS is not expected before 2025. Since the consultation phase ended on 22 September 2023, grid operators cannot refer to an advanced draft to adapt their strategy. Hence, the strategy to develop an eco friendly power grid is primarily based on the outcome of the regulation on fluorinated gases.

### 3.1. Potential technologies

The only solution to sustainably reduce the SF<sub>6</sub> emissions is to reduce the amount of SF<sub>6</sub>, which comes in operation with the new equipment. To do so, the grid operators can choose between two alternative concepts. The first one is F-gas free, based exclusively on natural origin gases (NOG), and is based on mixtures of O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> or CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. The second alternative concept is based on F-gases, such as fluoronitril (C4-FN) and fluoroketone (C5-FK). From these two products, only the fluoronitril (GWP = 2750) is presently still being used by two equipment manufacturers above 52 kV. However, the two gas mixtures have different compositions and are not interchangeable.

### 3.2. Life Cycle Analysis

Intensive discussions have taken place around the true CO<sub>2</sub>-footprint of equipment based on different SF<sub>6</sub> alternatives, as well. Indeed, not only the gas leakage during erection, operation and scrapping leads to CO<sub>2</sub> emissions. There are plenty of other contributors, which needs to be considered, to elaborate a trustful life cycle analysis (LCA). An important contributor is the production of the aluminium from bauxite, which is a very energy-consuming process. This factor is especially important for the NOG-based equipment, as it is larger by design, due to the limited dielectric strength of the natural origin gases. This fact needs to be compensated by larger dimensions of equipment and by an increased gas pressure. Figure 1 presents the LCA results of two important GIS manufacturers, whose equipment relies on NOG and vacuum interrupter (Manufacturer A – left) and a gas mixture based on C4-FN, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> (Manufacturer B – right). The results refer to a 145 kV GIS and an equipment lifetime of 40 years. Both manufacturers assessed not only its own product, but the competitor solution as well. Especially interesting from TransnetBW's perspective is the evolution of the LCA in the future. If today the use of more aluminium leads to considerable emissions due to its production, this CO<sub>2</sub>-source will significantly decrease by 2050, when the power used by industry is supposed to be 100 % climate neutral. Based on this fact, the LCA proposed by the Manufacturer B shows similar CO<sub>2</sub> footprint results for both technologies. This study clearly indicates, that despite of deployment of more material, the NOG-based equipment has a sustainable future.

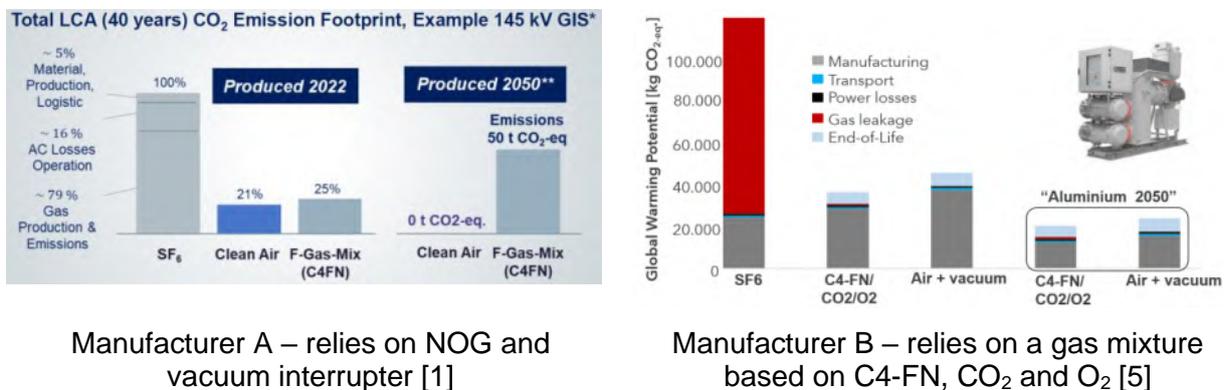


Figure 1: Life cycle analysis of 145 GIS of two European manufacturers

### 3.3. Experience based on own projects

As presented in [1] TransnetBW decided from the very beginning to consider only gas mixtures with a GWP  $\leq 1$  as SF<sub>6</sub> alternative gases and decided to start pilot projects at all voltage levels up to 420 kV [9]. Obviously, due to the missing request of SF<sub>6</sub>-free equipment on 420 kV level, there were no such products available on the market in 2016 (Chicken-Egg-Problem). Consequently, the next major step was to identify those manufacturers, willing to start the development based on climate neutral gas mixtures.

#### 3.3.1. Experience with F-gas-based gas mixture

The first project aiming to support the development of an SF<sub>6</sub>-free, double busbar, 420 kV GIS was awarded by TransnetBW in 2018 and taken into operation, as scheduled, in 2021. It has all passive components (indoor and outdoor) filled with a climate neutral gas mixture based on C5-FK, N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>. The project is comprehensively described in [10].

Despite of a highly sophisticated GIS design from service continuity and accessibility perspective, the handling of such gas mixtures in this substation remains an extremely challenging task. As the SF<sub>6</sub>-handling devices are not compatible to the C5-FK-gas mixtures, two sets of service carts, gas analysers, leakage detectors etc. were required. Additionally, the C5-FK-gas mixtures were prepared on-site before pumping them in the gas compartments. This is a complex task, which requires not only adequate mixing-devices, but a high level of expertise, as well.

Another challenge of this configuration is the difficulty to decide on how much gas mixture needs to be stored on site for repair or refilling. It needs to be considered that, in gas form a high number of cylinders are required in order to store a relatively small amount of gas. The number of gas bottles can be strongly reduced by gas compression, which in turn leads to the liquefaction of the gas mixture. Therefore, its homogenisation before topping up a gas compartment is mandatory. This step requires the use of an additional service devices and special expertise.

#### 3.3.2. Experience with NOG gas mixture

TransnetBW awarded within a major grid infrastructure project the construction of probably the largest 420 kV GIS in Germany with 33 bays (including extension bays). Alone the gas insulated busducts (GIB) of this switchgear account for more than 4000 m. Considering that the failure risk of the GIB is relatively low [10] in comparison to other switchgear elements (circuit breaker, disconnecting and earthing switches, instrument transformers), TransnetBW decided to test another SF<sub>6</sub> alternative with GWP $<1$ , but this time, based on NOG exclusively. Considering a gas mass of 4 kg/m of GIB at the operating pressure, it results that this measure least to an SF<sub>6</sub> saving potential of about 16 t, which represents 7-8 % of the total amount of SF<sub>6</sub> in the grid of TransnetBW.

Similarly, to the project presented above, the development of the NOG-based GIB was started after the project has been awarded. To mitigate the risks associated with the development of new products, several measures were agreed on together with the manufacturers. TransnetBW was allowed to witness the development progress and the quality tests in the factory. Additionally, TransnetBW, as end user, had had the chance to step out of the contract and to choose the SF<sub>6</sub>-GIB, if challenges during the development had been faced. A time span of 36 months was set between the project award and the point of no return. After this milestone, the NOG-based GIB had to be accepted. On the other hand, to avoid delay of the civil works, TransnetBW committed to pay for the larger fundamentals right at the beginning of the project. The larger fundamentals are required by

the NOG-based GIB which are larger (diameter of 60 cm) and heavier than the SF<sub>6</sub> GIBs (diameter of 40 cm). A detailed project description is available in [1].

Gas handling aspects were discussed during the product development and the reduced complexity in comparison with the handling of F-gas-based blends was confirmed. The GIS modules can be topped up directly from commercially available gas cylinders. As this NOG-based gas mixture is a standard commodity, there is no need for its homogenisation before the filling process, which implies only the connection of the cylinders to the gas compartment over a universal pressure regulator. The same cylinder can be used for all pieces of equipment relying on N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> gas mixtures (GIS, GIB, instrument transformers, AIS circuit breakers). From TSO perspective the simple and safe handling provides significant advantages, such as, less gas handling equipment, no need for additional mixing, shorter lead times, simplified procurement, logistic and storage, less resources and knowledge etc. This gas mixture can be released into the atmosphere, speeding up the gas works. Special safety equipment and procedures are only required, if heavily arced gas needs to be handled, i.e. only after internal arc faults or making of short circuit currents with make-proof earthing switches [1].

An open point is represented by the possibility to detect leakages on site. After installation the tightness of the GIS will be tested by filling the bays with helium following a well-known factory procedure. However, the detection of leakages during service remains a challenge. There are still no devices, which basically can detect air leakages in air. However, the manufacturer presents in [1] some practical methods meant to overcome this challenge.

### 3.4. Market analysis

As a next step, the substation equipment has been split in three distinct categories relevant to the grid of TransnetBW: GIS, AIS circuit breaker (CB) and AIS instrument transformers (IT) – Table 1. After a careful market analysis relevant for TransnetBW grid, it has been found out, that currently there are at least two suppliers, who have AIS equipment (CB and IT) based on SF<sub>6</sub>-alternatives with NOG already on the market or under development. This is a satisfactory situation, even though their portfolios still do not cover all grid applications, and even some standard products are still in the development phase. A more challenging situation has been noticed looking at the development of the SF<sub>6</sub>-free GIS with NOG. In this case, there is presently a single European manufacturer going this way. Looking at the international level, there are at least two other manufacturers using the same technology, but they are at an earlier development stage of the product. However, having three manufacturers following the NOG-strategy gives enough confidence in the future.

All above mentioned drivers (political context, technical aspects and market) were put together and led to a strategy, which supports TransnetBW to move progressively away from SF<sub>6</sub> keeping in the same time the risks on a low level.

Alternative solution to SF <sub>6</sub> <sup>1)</sup>	GIS		AIS-Circuit breakers		AIS-Instrument transformers	
	Technology	Number of suppliers	Technology	Number of suppliers	Technology	Number of suppliers
F-gas-based blends	C4 + CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	GE HITACHI Energy LS Cable	C4 + CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	GE	C4+CO <sub>2</sub> <sup>2)</sup>	GE
Natural origin gases	CO <sub>2</sub>	SIEMENS Energy MITSUBISHI TOSHIBA	CO <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	SIEMENS Energy HITACHI Energy PFIFFNER	N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	TRENCH PFIFFNER
	N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> and vacuum interrupter		N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> and vacuum interrupter			

**Table 1. Market analysis of substation equipment with SF<sub>6</sub>-alternative gases (Um ≥123 kV)**

#### 4. Strategy to replace SF<sub>6</sub>

The derived strategy proposes a differentiated approach based on voltage level and equipment category and includes two phases: a trial phase to test products (Table 2, light green), and a standard implementation phase, which implies the deployment of NOG-based equipment as “first option” before SF<sub>6</sub> apparatus (Table 2, dark green). A product will remain in the “light green” phase, if a specific product can be delivered by a single manufacturer only. In this case the SF<sub>6</sub>-equipment remains the first preferred option. This way a monopoly situation and dependency of one manufacturer are avoided. Further, it has been decided, that only type tested products are accepted.

According to this strategy, TransnetBW will focus on the AIS equipment of the 110 kV grid firstly and will move towards higher voltage levels, depending on how fast the NOG-equipment is developed and made available to the market with reasonable lead times. On one hand this approach limits the technical risks related to the product development itself (design, field distribution etc.). On the other hand, it allows TransnetBW to faster replace a faulty NOG-based piece of equipment in case of teething problems, as an AIS CB or IT can be easily exchange one-to-one on the existing fundamentals.

Based on the favorable market situation with NOG-based equipment from at least two manufacturers, TransnetBW decided to install 123 kV IT and 145 kV CB for AIS as first option starting 2023, excluding the SF<sub>6</sub> equipment. In parallel all projects are assessed, to identify the possibility of further trials with 145 kV GIS, 420 kV IT and GIB, respectively.

The 420 kV GIS and CB for AIS will be handled separately. Presently there is a 420 kV NOG based CB under development. According to the manufacturer roadmap, this is a CO<sub>2</sub> CB and will be released towards the end of 2023 [12]. In this respect, TransnetBW searches already for locations to adequately test this new, innovative product.

		2023 - 2026	2027-2030	Starting 2031
110 kV Grid	Instrument transformers and circuit breakers for AIS			
	GIS			
380 kV Grid	GIB and instrument transformers for AIS			
	GIS and circuit breakers for AIS	Market analysis and technology assessment		

Projects in execution and existing assets are not considered in this strategy.  
 Projects will be executed as contracted.  
 Existing assets will be operated „as is“ till the end of their technical life. SF<sub>6</sub> and spare parts are required for their repair and maintenance.

Installation of NOG-Equipment as standard products On-site testing of NOG-Equipment within trial projects

**Table 2. Strategy to stepwise replace SF<sub>6</sub> against natural origin gases (NOG)**

### 3 Conclusion

TransnetBW started already in 2016 a journey meant the replace the SF<sub>6</sub> against more sustainable solutions. The climate neutral gases or gas mixtures with a GWP ≤ 1 have been preferred from the beginning. At the second step, besides the GWP requirement, a NOG-based structure of the SF<sub>6</sub> alternative was included in all product specifications.

Based on own experience, market analysis and considering the latest requirements of the policy makers, TransnetBW issued an own strategy on how to replace the SF<sub>6</sub>, in an era, when all TSO are planning and executing a high number of grid expansion projects, to make the energy transition possible. In this case, the need to replacement of SF<sub>6</sub> has to be carefully planned and separately integrated in all projects without delaying them. Having this strategy, TransnetBW can stepwise integrate SF<sub>6</sub>-free equipment within the grid expansion projects, necessary for a successful energy transition, without delaying it. Due to the very positive experience acquired with gas insulated ITs of the previous generation, their replacement against NOG-based ITs is preferred by the TransnetBW (instead of the oil insulated ITs). They match to the existing configuration of the substation (bay width) and only the fundamentals may need in some cases to be reinforced. There are about 120 oil-IT in the grid of TransnetBW which are approaching their technical end of life and are planned to be progressively replaced within the coming years. Both IT manufacturers prequalified at TransnetBW use the same gas mixture N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, with the same concentrations. Therefore, the selection of the NOG as insulation system, enables some synergy effects regarding the grid operation and maintenance. Thus, same gas handling devices can be used for gas quality checks, refilling can be performed from the same cylinder, no additional expertise is needed etc.

Same way will be adapted to replace the AIS CB. Here products are available up to 145 kV, many applications are covered, but a point-on-wave switching of a shunt reactor is still not possible with an SF<sub>6</sub>-free circuit breaker (CB with dedicated drives for each phase are required). Therefore, based on the above shown strategy, TransnetBW started already to assess all relevant projects in order to identify where and how many NOG-based CB are required to avoid project delays due to the very long lead times of these products. The first products were delivered by the end of Q3, 2023.

As far as 420 kV GIS is concerned, the development may take some more years, especially, in the area of switching equipment. Here, a case-by-case analysis of the GIS-projects may be needed, which includes a feasibility study regarding the installation of SF<sub>6</sub>-free GIB. The target could be, that the SF<sub>6</sub>-free GIBs are specified in case of those projects, where at least 50 % of the SF<sub>6</sub> quantity is contained in these components.

An important role is played by the equipment manufacturers. They need to intensify their developments efforts to timely release NOG-based products, allowing the TSO to test them within trial projects before the SF<sub>6</sub>-ban gets into force. Additionally, the manufacturers have the task to ensure the product availability for the entire market, keeping the lead times within reasonable margins. Any delays possibly caused by the product unavailability leads to more CO<sub>2</sub> emissions, as the green power cannot be integrated.

In addition to the GHG emissions Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) have caught the attention of regulatory agencies worldwide. The restriction proposal on manufacturing, placing on the market and usage of PFASs will have a significant impact on solid, liquid, and gaseous components of grid equipment. Grid operators and manufacturers need to keep a close look on the development to ensure that PFAS-free solutions for all voltage levels will be commercially available in time, also in sufficient quantity for all ranges of DSOs and TSOs application. It must be ensured that already ordered and installed equipment supposed to operate with PFAS may be put into operation, maintained, and extended after the ban date to avoid that existing equipment would have to be put out of order and become a stranded asset. Otherwise, they would need to be decommissioned prematurely, entailing additional environmental and climate-related burdens, without consideration of circular economy or reparability principles.

## 4 References

- [1] M. Kuschel, L.V. Badicu, J. Christian, M. Kieper, K. Kunde, U. Prucker, J. Riedel: First F-gas-free and climate neutral installed 420 kV GIS busducts installation at TransnetBW, CIGRE B3, PS2, Paper ID 1082, Paris Session 2022.
- [2] Regulation of the European Parliament and of the Council on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014 EUR-Lex - 52022PC0150 - EN - EUR-Lex (europa.eu).
- [3] [Per- and polyfluoroalkyl substances - Wikipedia](#)
- [4] [All news - ECHA \(europa.eu\)https://ec.europa.eu/environment/chemicals/pfas/index\\_en.htm](#)
- [5] M. Gatzsche, N. Mahdizadeh, H. Lohrberg, S. Pai: Carbon Footprint of SF<sub>6</sub> Alternatives for HV GIS“ Paris Session – Group
- [6] L.V. Badicu, P. Wenger, G. Kuznetsova, C. Suttner, J. Christian: Introduction and field experience with SF<sub>6</sub>-free equipment in the transmission grid of TransnetBW, IEEE Xplore, VDE High Voltage Technology, 4-ETG Symposium, November 8-10, 2022, Berlin.
- [7] L.V. Badicu et al.: Specification, project planning and design of the World's first 420 kV SF<sub>6</sub>-free GIS, Cigre Session, B3-118, Paris 2020.
- [8] EconiQ™ high-voltage technology and roadmap: <https://library.e.abb.com/public/203fae0d07264ba696eda8eec1c9f5eb/03%20EconIQ%20high-voltage%20technology%20and%20roadmap.pdf?x-sign=3To5ktVDjM0er32wsjw1Ggvij/HNS+BjVqo7nZutbMA3E3Rh4Y/WoFPVnFsEfcfF>



## ***FKH - Fachtagung***

*21. November 2023*

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Schaltanlagen mit alternativen Isoliergasen und deren Prüfung**

**Dr. sc. ETH Michael Walter**

Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH), Zürich

#### **Funktion und beruflicher Werdegang**

Herr Walter studierte Elektrotechnik und Informationstechnologie an der ETH Zürich, wo er anschliessend als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie auf dem Gebiet der HVDC-Leistungsschalter promovierte. Anschliessend arbeitete er für GE (ehemals ALSTOM) als Abteilungsleiter Technische Dienste und Prüfungen. Er leitete die akkreditierten Prüflabore am Standort Oberentfelden und war an der Entwicklung von C4F7N-basierten Schaltanlagen und den dazu notwendigen Handlings- und Messgeräten beteiligt. Seit 2018 war Herr Walter Vorstandsmitglied der FKH und wechselte 2022 in die Funktion des FKH-Geschäftsleiters. Herr Walter ist Mitglied im TK42 und TK99. Zudem leitet er als Convenor die CIGRÉ-Arbeitsgruppe D1.78 zum Thema „Teilentladungsverhalten in alternativen Isoliergasen“.



# Schaltanlagen mit alternativen Isoliergasen und deren Prüfung

Michael Walter

Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH), Zürich

## 1 Kurzfassung

Als Folge von politischen und regulatorischen Prozessen in Europa, den USA und Asien, sowie der gestiegenen Verbreitung von Betriebsmitteln mit alternativen Isoliergasen, ist es voraussichtlich nur noch eine Frage der Zeit, bis das klimaschädliche Isoliergas SF<sub>6</sub> für neu zu installierende gasisolierte Schaltanlagen (GIS), gasisolierte Leitungen (GIL) und AIS-Schaltanlagen durch umweltfreundlichere Alternativen grossflächig und auf allen Spannungsebenen abgelöst wird. Die Hersteller dieser Betriebsmittel haben die letzten 10 Jahre grosse Anstrengungen unternommen, um Produkte mit vergleichbaren Kenngrössen und teilweise auch mit vergleichbaren Baugrössen zu entwickeln und Netzbetreiber können unterdessen auch schon einige Jahre Erfahrung mit Anlagen im Betrieb vorweisen.

Der Beitrag beleuchtet die Technologien der SF<sub>6</sub>-freien Schaltanlagen aus der Optik der Prüfungen entlang des Lebenszyklus dieser Anlagen. Es wird aufgezeigt, welche Aspekte bei Typen- und Vor-Ort-Prüfungen zu beachten sind. Weiter wird aufgezeigt, wie sich Fehlstellen in entsprechenden Anlagen auswirken können und wie diese zuverlässig detektiert werden können.

## 2 Aktuelle Trends im Bereich der alternativen Isoliergase

Es ist zu beobachten, dass im Bereich der Mittelspannung bereits ein breites Portfolio an Anlagen mit alternativen Isoliergasen angeboten wird. Im Bereich der Hochspannung weitet sich die Technologie, ausgehend von der 145-kV-Ebene schrittweise hin zu Anwendungen bis 420 kV aus. Während vor einigen Jahren noch zahlreiche Kandidaten für Alternativgase konkurrierten, zeichnet sich langsam eine Konsolidierung der Technologien ab. Eine erste Technologieströmung dreht sich um luftisolierte Mischungen. Diese werden in Kombination mit Vakuumschaltkammern eingesetzt. Die Technologie ermöglicht mit <1 das tiefste GWP (Global Warming Potential), erreicht allerdings nicht zwangsläufig auch den kleinsten ökologischen Fussabdruck. Dies, weil aufgrund der tieferen dielektrischen Festigkeit von Luftmischungen grössere Schlagweiten resultieren bzw. höhere Gasdrücke notwendig werden, welche zu grösseren Baugrössen und höherem Materialeinsatz führen als vergleichbare SF<sub>6</sub> Anlagen. Die zweite Technologieströmung dreht sich um Mischungen aus C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N als dielektrisch dominierende Komponente in Kombination mit den Hintergrundgasen CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> oder N<sub>2</sub>. Im Gegensatz zur Luftisolation eignet sich die C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Mischung auch für die Lichtbogenlöschung bei Schalthandlungen, so dass kein Vakuumschalter notwendig ist, der einer Skalierbarkeit der Technologie auf höhere Spannungsebenen im Wege stehen könnte. Die C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-Technologie hat den Nachteil, dass das GWP zwar um den Faktor 50 bis 100 reduziert wird, jedoch ein Rest-GWP von einigen Hundert verbleibt. Aufgrund der vergleichbaren

Baugrößen zu SF<sub>6</sub> kann mit der Technologie häufig jedoch ein gleicher oder sogar geringerer ökologischer Gesamt Fussabdruck erreicht werden als mit Anlagen, welche Luftmischungen verwenden. Die kleinere Baugröße ist eine direkte Konsequenz der höheren dielektrischen Festigkeit der C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-basierten Mischungen bzw. kleineren Schlagweiten im Vergleich zu Luftmischungen. Ein weiterer Nachteil der C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-basierten Mischungen besteht für Tieftemperaturanwendungen bei Drücken, wie sie in der Hochspannung üblich sind. Für Anwendungen weit unter -30°C könnten nur noch homöopathische Anteile C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N in der Gasmischung verwendet werden, welche die dielektrische Festigkeit nur noch marginal erhöhen, da andernfalls eine Verflüssigung der C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-Komponente auftreten kann. Für Mittelspannungsanwendungen besteht dieses Problem nicht. Luftmischungen oder reine CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Mischungen wären für Tieftemperaturanwendungen im Vorteil. Es sind auch Forschungsaktivitäten zur Entwicklung von Schaltern basierend auf einer reinen CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Mischung zu beobachten. Dies hätte den Vorteil, dass ein GWP <1 für einen Gas-Schalter (ohne den Einsatz von Vakuumschaltkammern) erreicht werden könnte. Die Marktreife dieser Technologie ist bisher durch die Hersteller aber noch nicht vollständig nachgewiesen worden.

Aus ökologischen Gesichtspunkten ist es wichtig, dass der Transfer weg von SF<sub>6</sub> zeitnah realisiert werden kann. Die Fragestellung, welche der Technologieströmungen sich durchsetzen wird, ist eher nebensächlich. Alle genannten Technologien sind geeignet, den ökologischen Fussabdruck der Betriebsmittel deutlich zu reduzieren und deren paralleles Bestehen, bzw. der dadurch ausgelöste Wettbewerb zwischen den Technologien ist (aus Sicht des Autors), für einen möglichst schnellen Transfer weg von SF<sub>6</sub> sogar eher förderlich.

### 3 Prüfungen im Lebenszyklus von gasisolierten Schaltanlagen

Für Netzbetreiber ist der ökologische Fussabdruck nur eines von vielen Entscheidungskriterien für die Technologiewahl. Das wohl wichtigste Kriterium ist die Zuverlässigkeit und das Langzeitalterungsverhalten der Anlagen, da diese meist über 40 Jahre möglichst wartungsarm betrieben werden sollen. Die relativ grosse Anzahl an neu entwickelten „grünen“ Produkten birgt aber das Risiko, dass in einer Anfangsphase aufgrund von Lernkurven der Hersteller höhere Ausfallraten denkbar wären. Entsprechend wichtig sind lückenlose Typen- und Routineprüfungen durch die Hersteller sowie ergänzend unabhängige Prüfungen, begleitend über den Lebenszyklus der Anlagen.

Abbildung 1 gibt eine Übersicht zu verschiedenen Prüfungsarten, welche im Lebenszyklus gasisolierter Betriebsmittel zur Sicherstellung der Qualität eingesetzt werden. Der Prüfungszweck ist je nach Lebenszyklusphase die Designoptimierung, der Konformitätsnachweis, die Qualitätssicherung oder die frühzeitige Erkennung von Alterungsprozessen.

Prüfungsart	Ziel	Beschreibung	Prüfling	Bemerkung
<b>Entwicklungsprüfung</b>	<b>Optimierung</b> des Produkts	<b>Iteratives</b> variieren der Designparameter, zur Erfüllung der Anforderungen bei möglichst kostengünstigem Design	Häufig an <b>Prototypen</b> oder repräsentativer Unterbaugruppe	<b>Häufig als Zerstörungstests</b> zur Quantifizierung der Reserven
<b>Typentest</b>	Nachweis der <b>Konformität</b> mit Normen	Definierte Reihe von Tests zum <b>Nachweis</b> der <b>Bemessungs-</b> und <b>Kenngrossen</b> des Geräts bzw. dessen Hilfseinrichtungen Qualifiziert wird das <b>Design</b> in Kombination mit den verbauten <b>Teilen</b> und dem <b>Herstellungsverfahren</b> Bauteilzeichnungen werden hinterlegt und kontrolliert (-> Design wird eingefroren) Sehr aufwändige und teure Tests. (Kann bis >50% des Entwicklungsbudgets ausmachen)	Ganzes Feld oder <b>funktionale Komponenten</b> bei Minimaldruck (z.B. Trenner-Erder mit Gehäuse) Nur an einen (oder wenigen) Prüflingen pro Typ Repräsentativer Aufbau der alle Designvarianten abdeckt	Typenprüfungen sind stark normiert und werden normalerweise in <b>akkreditierten Laboren</b> durchgeführt Beim <b>Wechsel</b> des <b>Lieferanten</b> von kritischen Bauteilen ist zu überprüfen, welche Typenprüfungen zu wiederholen sind. (Oder es ist nachzuweisen, dass die Änderung keinen Einfluss auf die entsprechende Prüfung haben kann.) Da auch das Herstellungsverfahren mit qualifiziert wird, ist bei <b>Produktionsverlagerung</b> oder einer grossen Umstellung der Produktionsart zu überprüfen, ob Typenprüfungen zu wiederholen sind.
<b>Routine Test</b>	Systematische <b>Qualitäts-</b> sicherung	Definierte Auswahl normierter Prüfungen zur Sicherstellung der <b>Montagequalität</b> und Identifikation von Fehlern Qualitätssicherung in der Herstellung	<b>Ganzes Feld</b> bei Minimaldruck	Häufig im Beisein des Kunden Prüfungen, welche die üblichen Fehlerquellen abdecken und mit vertretbarem Aufwand an jedem Feld durchgeführt werden können (z.B. <b>kein Blitzstoss</b> aber AC mit TE-Messung)
<b>Vor-Ort Abnahmeprüfung</b>	<b>Letzte Chance</b> zur Qualitäts-sicherung	Teilweise in Absprache zwischen Hersteller und Betreiber Häufig mit auf 80% reduzierter Spannung (z.B. in der Schweiz zum Teil mit 100%)	<b>Ganze Anlage</b> bei Nenndruck	Wenn Anlagen erst vor Ort aufgebaut werden, ist es die einzige Möglichkeit zur Qualitätssicherung Anfällig für Störungen aus Umgebungsbedingungen Üblich <b>1-min Haltespannung</b> , abschliessend <b>UHF TE-Messung</b>
<b>Monitoring</b>	<b>Veränderungen</b> frühzeitig erkennen	<b>Fix installierte</b> technische Überwachungseinrichtungen	Ganze Anlage oder einzelne kritische Komponenten	Ermöglicht gegebenenfalls <b>Optimierung der Wartung</b> (Deckt Defekte nicht ab mit Aussetzspannung oberhalb der Betriebsspannung. Kritische Defekte sensitiv auf transiente Überspannungen sind zum Teil nicht messbar.)

Abbildung 1: Prüfungsarten im Lebenszyklus von Schaltanlagen

Erforderliche Typenprüfungen für Hochspannungsschaltgeräte sind in EN 62271-203 aufgelistet. Ein kommentierter Auszug wird in Abbildung 2 gezeigt. Rot hinterlegt sind Prüfungen, bei denen ein grosser Einfluss der alternativen Isoliergastechnologien erwartet wird, so dass stellenweise Designanpassungen notwendig sein können. Grün hinterlegt sind Prüfungen, bei welchen die Gasart sich nur minimal auf die Fähigkeit auswirkt, die Prüfung zu bestehen. Kritisch ist sicherlich der Nachweis der dielektrischen Festigkeit der Anlage, das Schaltvermögen des Leistungsschalters und der weiteren Schaltgeräte, die Dichtigkeit der Anlagen, das Verhalten bei tiefen Temperaturen für C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-Mischungen, sowie allfällige Röntgenstrahl-Emissionen bei der Verwendung von Vakuumschaltern. Letzteres ist vor allem relevant für die Möglichkeit Vor-Ort-Prüfungen überhaupt in der Stellung mit offenem Leistungsschalter durchzuführen.

Auszug aus EN 62271-203:2012 mit Ergänzungen

**Tabelle 5 – Beispiel für die Gruppierung von Typprüfungen**

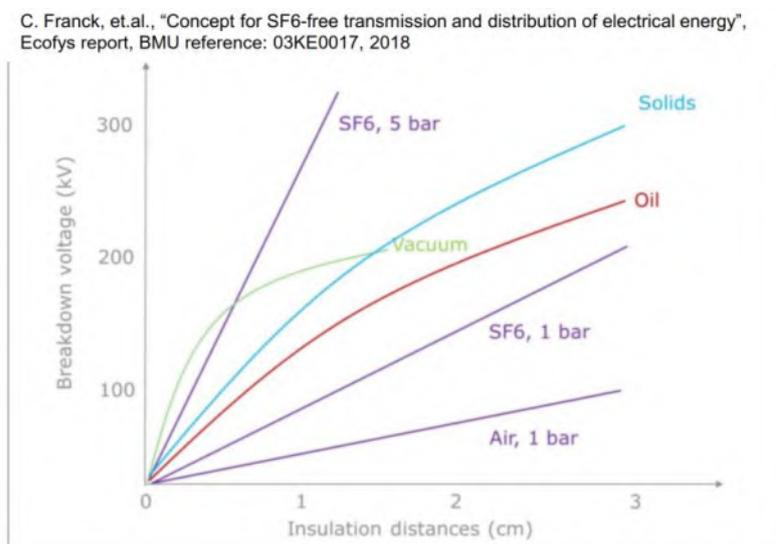
Vorgeschriebene Typprüfungen		
Gruppe		Abschnitt
1	a) Prüfungen zum Nachweis des <u>Isolationspegels</u> der Anlage und dielektrische Prüfungen an Hilfsstromkreisen	6.2
–	b) Prüfungen zum Nachweis des Funkstörspannungspegels (sofern zutreffend)	6.3
2	c) Prüfungen zum Nachweis der <u>Übertemperatur</u> an jedem Teil der Anlage und Messung des Widerstands der Hauptstrombahn	6.4 und 6.5
3	d) Prüfungen zum Nachweis des Bemessungs-Stoßstroms und des Bemessungs-Kurzzeitstroms	6.6
3	e) Prüfungen zum Nachweis des <u>Ein- und Ausschaltvermögens</u> der enthaltenen Schaltgeräte	6.101
4	f) Prüfungen zum Nachweis der einwandfreien mechanischen Funktion der enthaltenen Schaltgeräte	6.102.1
*	g) Prüfungen zum Nachweis der Festigkeit der Kapselungen	6.103
4	h) Nachweis des Schutzgrades der Kapselung	6.7
4	i) <u>Gasdichtheitsprüfungen</u>	6.8
*	j) Prüfungen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)	6.9
4	k) Zusätzliche Prüfungen an Hilfs- und Steuerstromkreisen	6.10
*	l) Prüfungen an Zwischenwänden	6.104
4	m) Prüfungen zum Nachweis der einwandfreien <u>mechanischen Funktion</u> bei Grenzwerten der Temperatur	6.102.2
*	n) Prüfungen zum Nachweis des Betriebsverhaltens bei thermischer Wechselbeanspruchung und Gasdichtheitsprüfungen an Isolatoren	6.106
*	o) Korrosionsprüfung an Erdungsanschlüssen (sofern zutreffend)	6.107
*	p) Prüfverfahren der <u>Röntgenstrahlungs-Emission</u> von Vakuum-Schaltröhren (sofern zutreffend)	6.11
ANMERKUNG Alle Typprüfungen sollten mit der in IEC 62271-1:2007, 6.1.1, und den entsprechenden Gerätenormen festgelegten Anzahl von Prüfungen durchgeführt werden. Wo die Prüfung mit einem * markiert ist, ist ein zusätzlicher Prüfling für die markierte Prüfung zulässig.		
Typprüfungen, wenn vom Betreiber gefordert (es dürfen zusätzliche Prüflinge verwendet werden)		
Gruppe		Abschnitt
*	q) Prüfungen zur Bestimmung der <u>Lichtbogenwirkungen</u> bei einem inneren Fehler	6.105
*	r) Korrosionsprüfung an Kapselungen (sofern zutreffend)	6.108

- Grosser Einfluss der Isoliergasmischung
- Mittlerer Einfluss der Isoliergasmischung
- Geringer oder kein Einfluss der Isoliergasmischung

**Abbildung 2: Einschätzung zum möglichen Einfluss alternativer Isoliergasmischungen auf die Typenprüfungen bzw. die Notwendigkeit für Designanpassungen**

#### 4 Berücksichtigung von allfälligen Veränderungen der Gasgemische über die Anlagenlebensdauer

Abbildung 3 zeigt auf, dass die Durchschlagsspannung in Gasen in erster Näherung proportional mit dem Abstand der Isolationsstrecke ansteigt. Eine Druckerhöhung wirkt sich positiv auf die Steigung der Durchschlagskennlinie aus. Stark elektronegative Gase oder Gasgemische werden mit Geraden grösserer Steigung abgebildet. Vakuum, Feststoff und Öl-Isolation weist eine stärkere Krümmung der Durchschlagskennlinie im Vergleich zur Gasisolation auf. Mit Gasisolation kann somit bei entsprechend hohen Drücken und typischen Isolationsabständen eine höhere dielektrische Festigkeit erreicht werden, solange die Drücke über die Lebensdauer aufrechterhalten werden können und Fehlerstellen (deren Einfluss ebenfalls mit steigendem Druck zunimmt) nicht zum Tragen kommen.



**Abbildung 3: Qualitativer Vergleich der Durchschlagsspannung verschiedener Isolierstoffe bei typischen Dimensionen elektrischer Geräte**

Der Betriebsdruck von gasisolierten Anlagen und die Gaszusammensetzung können sich über die Lebenszeit der Schaltanlage aufgrund von verschiedenen Mechanismen ändern. Prüfungen – insbesondere dielektrische Typen- und Routineprüfungen – müssen für den ungünstigsten Zustand der Schaltanlagen repräsentativ sein und werden daher bei Minimaldruck durchgeführt. Typenprüfungen für SF<sub>6</sub>-isolierte Anlagen werden mit >97% reinem SF<sub>6</sub> durchgeführt, da sich der SF<sub>6</sub>-Gehalt solcher Anlagen (mit Ausnahme von allfälligen Fehlern beim Füllvorgängen) über die Lebensdauer nicht wesentlich verändert.

Alternative Mischgase können zwei wesentliche Unterschiede zu SF<sub>6</sub> aufweisen. Einerseits kann eine Komponente der Mischung das dielektrische Verhalten dominieren und andererseits ist nicht a priori sichergestellt, dass sich Mechanismen, die zu Veränderungen im Gas führen auf alle Komponenten der Mischung gleich auswirken. Am Beispiel einer C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-Mischung wird aufgezeigt, welchen Einfluss Gasveränderungen haben können, welche Mechanismen die Gaszusammensetzung verändern und welche Gasgemische für Prüfungen eingesetzt werden müssen.

In Abbildung 4 ist die Synergiekurve der dielektrischen Festigkeit von C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N mit dem Hintergrundgas CO<sub>2</sub> dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Mischungen mit C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N im einstelligen Prozentgehalt die dielektrische Festigkeit der Mischung überproportional zu dem

Anteil  $C_4F_7N$  in der Mischung ansteigt. In Produkten, welche nur 3-6 %  $C_4F_7N$  in der Mischung aufweisen, wirkt sich im Gegenzug eine Reduktion des  $C_4F_7N$ -Gehalts überproportional stark auf die dielektrische Festigkeit aus. Es ist daher erforderlich, die Gasqualität vor der Inbetriebnahme zu überprüfen, die maximale Veränderung der Gaszusammensetzung im Laufe der Lebensdauer abzuschätzen und für Typenprüfungen eine bewusst ungünstige Gasmischung einzusetzen.

Electric performance of new non-SF<sub>6</sub> gases and gas mixtures for gas-insulated systems, CIGRE Brochure 849, 2021

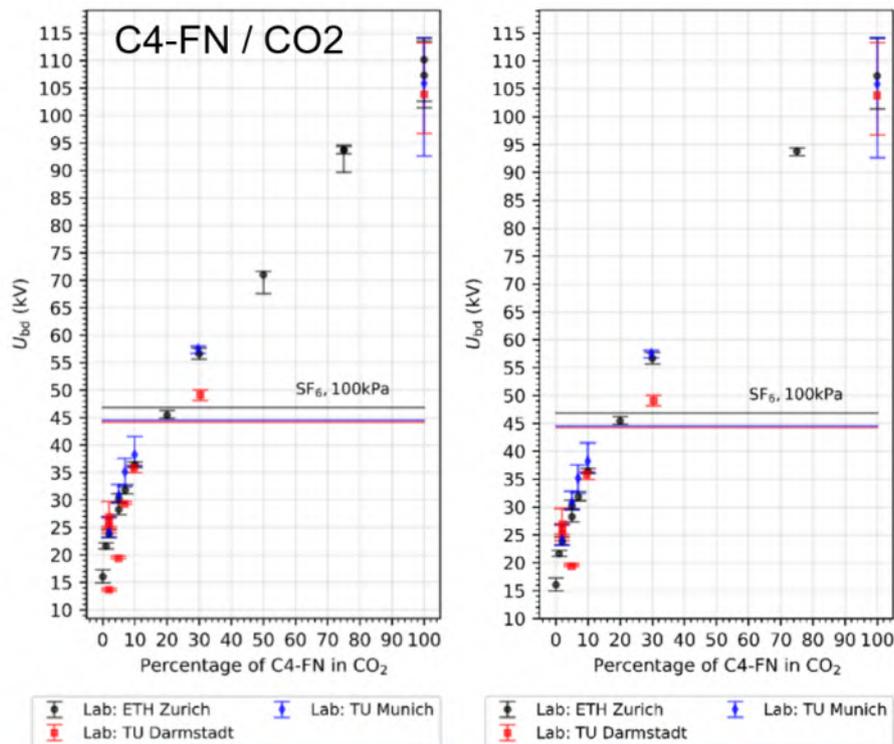


Figure 8-15: Synergy scan of a mixture of C4-FN in CO<sub>2</sub> at 100 kPa compared with SF<sub>6</sub> at 100 kPa (horizontal lines) for AC breakdowns in a uniform arrangement (left: all data, right: reassessed)

Abbildung 4: Synergiekurve der dielektrischen Festigkeit zwischen  $C_4F_7N$  und  $CO_2$

Die quantitativ auftretende Gasveränderung über die Lebensdauer hängt vom zu Grunde liegenden Mechanismus ab, der die Gasveränderung bewirkt. Es können sich auch parallel mehrere Mechanismen überlagern, sodass eine zuverlässige Voraussage der Gasveränderung im Einzelfall unmöglich ist, sondern lediglich eine Worst-Case-Abschätzung ermittelt werden kann:

- Grosse Leckagen (interface leakage) verändern die Gaszusammensetzung nur unwesentlich.
- Kleine Leckagen (permeation leakage) weisen bei fluorierten Mischgasen aufgrund der unterschiedlichen Molekülgrößen häufig eine stärkere Leckage des Hintergrundgases auf. Wenn die fluorierte Komponente die dielektrischen Eigenschaften dominiert, resultiert ein prozentualer Anstieg der dielektrisch dominierenden Komponente und nach dem Nachfüllvorgang sogar eine höhere dielektrische Festigkeit. Auf der anderen Seite muss eine allfällige Erhöhung der Verflüssigungstemperatur der Gasmischung durch diesen Effekt abgeklärt werden, der beim Einsatz bei sehr tiefen Temperaturen eine Rolle spielen könnte.

- Schalthandlungen reduzieren meist die dielektrisch relevante Komponente stärker als die des Hintergrundgases.
- Über mehrere Nachfüllvorgänge mit einer Nachfüllflasche mit Nennmischverhältnis kann sich eine Veränderung der Gaszusammensetzung über die Lebensdauer der Anlage akkumulieren, wie im Beispiel in Abbildung 5 dargestellt ist.

Der ungünstigste Fall dieser Veränderung muss durch den Hersteller für das vorliegende Produkt ermittelt werden und er muss in Fällen, in denen ein Einfluss auf das Prüfergebn existieren kann, in seinen Typenprüfungen die entsprechend schlechteren Gasmischungen verwenden.

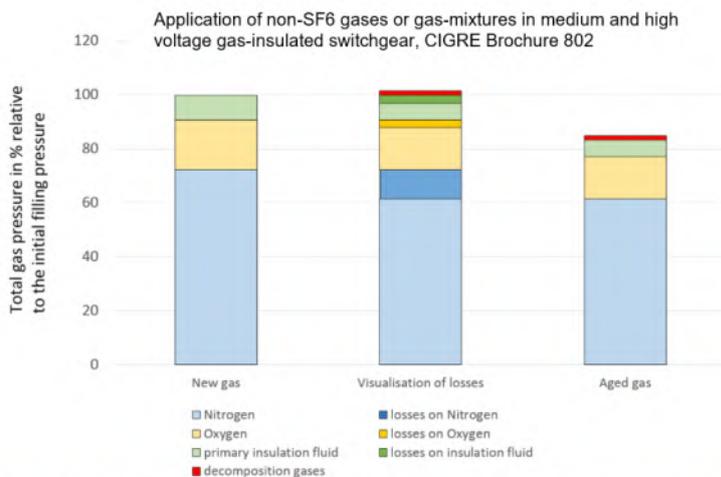


Figure 2.12: Aging of insulation gas mixture (impact multiplied by factor 5 for better visualisation)

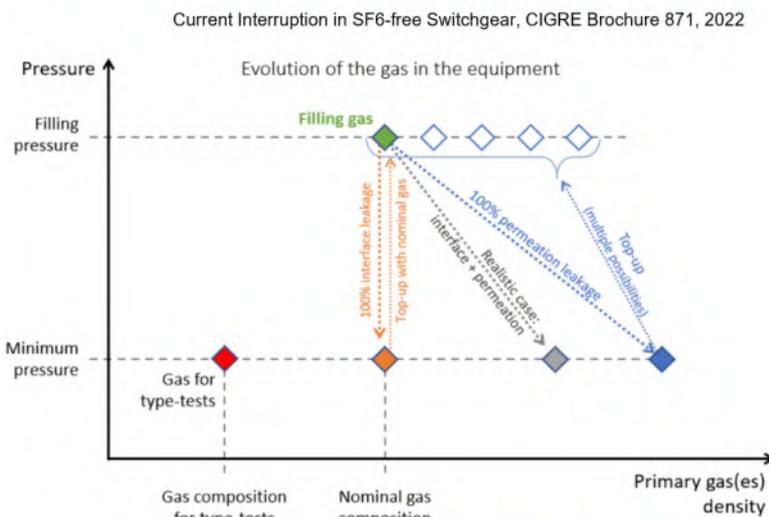


Figure 3.7 - Primary gas density variation as a result of the two leakage mechanisms

Abbildung 5: Gasveränderung über den Lebenszyklus von Schaltanlagen mit alternativen Iso-lierungen

In der CIGRE Broschüre 871 wird zwischen einer Nennmischung für die Befüllung der Schaltanlage und einer bewusst schlechteren Mischung zur Verwendung in Typentests unterschieden. Der Einfluss von Schalthandlungen auf die Gaszusammensetzung ist hierbei bereits intrinsisch Teil des Typentests, da im Anschluss an Schaltprüfungen ein sogenannter „Voltage Condition Check (VCC)“ am selben Prüfling durchgeführt wird, ohne das durch den Test gealterte Gas auszutauschen. Die zu verwendenden Mischun-

- Bei Mischgasen kann eine **unterschiedliche Durchlässigkeit der Dichtungsmaterialien** für einzelne **Gaskomponenten** zu einer **Veränderung der Gasmischungen über die Zeit** führen.
- Bei Mischungen, bei denen bei einer Komponente (z.B. C4-FN) die dielektrische Festigkeit dominiert (**«primary insulation fluid»**), müssen allfällige Veränderungen der Mischung über die Lebensdauer mittels **Margen im Design** berücksichtigt werden.
- Faustregel:
  - **Grosse Leckagen** (**«interface leakage»**) verändern die Zusammensetzung nicht.
  - Bei **kleinen Leckagen** durch Dichtungen (**«permeation leakage»**) leckt das Hintergrundgas meist stärker als die dielektrisch relevante Komponente. Bei anschließendem Top-up mit fixer Mischung ergibt sich eine leicht veränderte Gesamt Mischung.
  - **Schalthandlungen** reduzieren meist die dielektrisch relevante Komponente stärker.

gen für verschiedene Prüfungen sind in Abbildung 6 dargestellt. Bei Vor-Ort Prüfungen wird generell mit der Nennmischung bei Nenndruck zur Qualitätssicherung geprüft, wie es auch für SF<sub>6</sub> üblich ist.

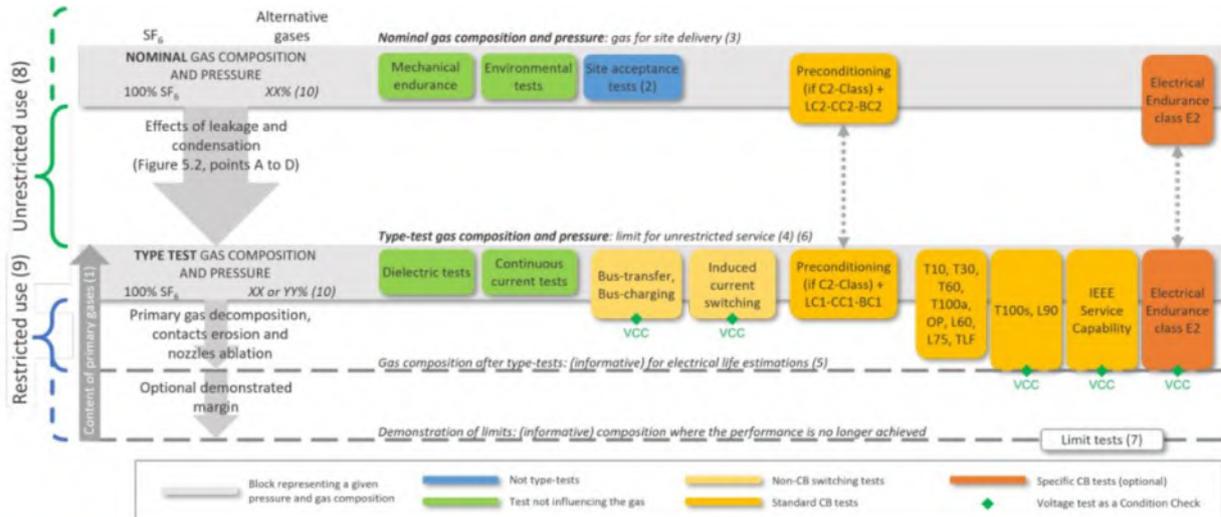


Figure 5.3 - SF<sub>6</sub> and alternative gas composition and pressure [108] [109] [110]. The numbers in brackets refer to the notes below

Current Interruption in SF<sub>6</sub>-free Switchgear, CIGRE Brochure 871, 2022

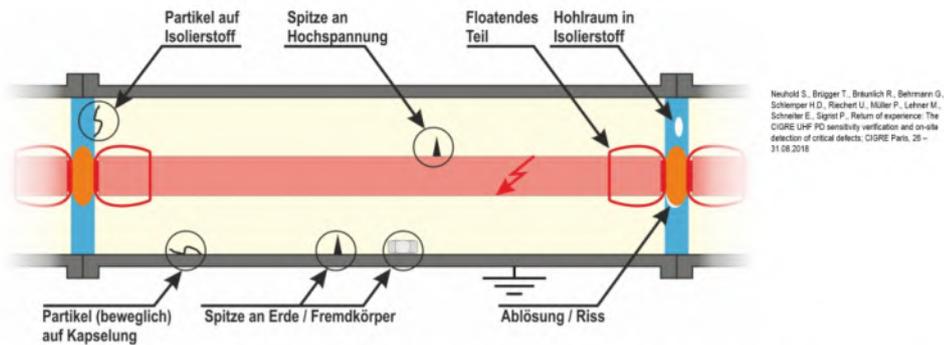
Abbildung 6: Zu verwendende Gasmischungen für verschiedene Prüfungen

## 5 Fehlstellen in gasisolierten Anlagen und deren Auswirkung

Abbildung 7 gibt einen Überblick über mögliche Fehler, welche in gasisolierten Schaltanlagen auftreten können. Bei Vor-Ort-Prüfungen kommen Partikel sehr häufig aus verschiedenen Gründen vor:

- Anlagen werden feldweise (oder auf grösseren Spannungsebenen komponentenweise) geliefert und erst vor Ort gekoppelt. Bei dem unvermeidbaren Öffnen von Gasräumen vor Ort besteht ein erhöhtes Risiko, dass neue Partikel in die Gasräume eindringen können.
- Selbst in der Fabrik geprüfte Montageeinheiten, welche vor Ort nicht mehr geöffnet werden, schlagen nicht selten vor Ort durch oder weisen Teilentladungen auf. Dies aufgrund von Verschiebungen von Metallpartikeln von nicht feldkritischen Orten (Werksprüfung) zu feldkritischen Orten (wie z.B. auf einen Isolator) im geschlossenen Gasraum während des Transportes, bei der Montage oder durch Gasströmungen beim Befüllen der Anlage vor Ort.
- Es können sich durch Schalthandlungen im Zusammenhang mit Prüfungen an den Schaltgeräten neue Partikel durch Abrieb gebildet haben.

Deshalb muss das Isolations-Niveau bei der letzten, abschliessenden Prüfung vor Ort (vor der Übergabe an den Betrieb) mit geeigneten Prüfmethoden sichergestellt werden.

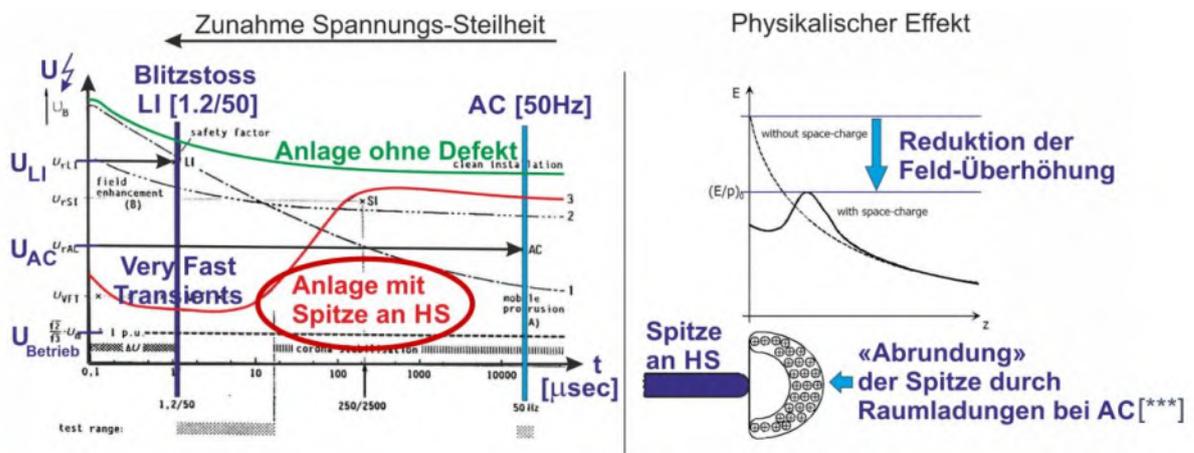


Neuhoff S., Brügger T., Bräunlich R., Behrmann G., Schlemper H.D., Reichert U., Müller P., Lehner M., Schwaner E., Sigrist P. Return of experience: The CIGRE UHF PD sensitivity verification and on-site detection of critical defects. CIGRE Paris, 28 - 31.08.2018

- Fehlstellen können in der Routineprüfung übersehen werden bzw. entstehen häufig erst vor Ort beim Zusammenbau der Anlage
- Eine Vorortprüfung mit sensibler TE-Messung ist die zuverlässigste Methode zum Nachweis der Integrität einer GIS
- Aufgrund der höheren Drücke sind Fehlstellen bei Alternativgasen noch kritischer als bei SF<sub>6</sub>.

Abbildung 7: Übersicht üblicher Fehler in gasisolierten Betriebsmitteln

Abbildung 8 zeigt am Beispiel von einer Spitze auf Hochspannung und von Partikel auf einem Isolierstoff, dass die Reduktion der Spannungsfestigkeit aufgrund der Fehler sich unterschiedlich auswirkt, abhängig von der Art der Spannungsbelastung. In beiden Fällen kann nahezu die volle AC-Spannung gehalten werden, während die Spannungsfestigkeit bei schnellen Belastungen wie einem Blitzstoss massiv reduziert wird.



**Spitze:** 100% AC gehalten; Durchschlag ab 30% LI [\*]  
**2mm Partikel auf Isolierstoff:** Reduktion LI-Festigkeit um bis zu 50% ! [\*\*]

[\*] CIGRE Brochure 525; Risk assessment on defects in GIS based on PD diagnostics; Working Group D1.03; February 2013

[\*\*] Schärer R.; Der Einfluss von Störstellen auf Stützeroberflächen auf die elektrische Festigkeit von Isolieranordnungen in SF<sub>6</sub>-isolierten Anlagen; Dissertation; Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart; 1999

[\*\*\*] Hinterholzer T., Boeck W.; Breakdown in SF<sub>6</sub> influenced by corona-stabilization; Conference on electric insulation and dielectric phenomena, 413 - 416; Victoria, British Columbia, Oct. 15-18, 2000

Abbildung 8: Einfluss der Spannungsform bei Vorhandensein von Fehlerstellen auf die Durchschlagspannung in SF<sub>6</sub>

Dies stellt bei Routine- und Vor-Ort-Prüfungen Herausforderungen an die Detektierbarkeit entsprechender Fehler. Wird eine vergleichbare Detektierbarkeit wie bei Blitzstoss bei Verzicht auf eine Blitzstossprüfung als Routineprüfung angestrebt, muss ergänzend zur AC-Spannung eine sehr sensitive Teilentladungsmessung bei hoher Spannungsamplitude erfolgen, wie in Abbildung 9 dargelegt. Andernfalls kann es vorkommen, dass

die vorhandenen Fehler kein messbares Signal erzeugen oder, dass der tiefe Signalpegel von nicht selten nur 0.5-2 pC nicht vom Hintergrundrauschen unterschieden werden kann. Der tiefe TE-Pegel korreliert hierbei nicht mit der Kritikalität der Fehlstelle.

TABLE 3. Relative effectiveness of on-site tests on GIS defects (● : effective; Δ : less effective).

Defect	High AC	Low AC with PD	High AC with PD	LI	SI
Sharp protrusions fixed on live parts			Δ	●	
Round protrusions fixed on live parts (assembly faults)	Δ		●	●	●
Particles on spacers			Δ	●	Δ
Cracks in spacers	Δ	Δ	●	Δ	Δ
Free particles	●	●	●		Δ
Parts floating	Δ	●	●		
Left foreign bodies	●	Δ	●	●	Δ

CIGRE Joint Working Group 33/23.12; Insulation co-ordination of GIS; return of experience on site and diagnostic techniques; Electra No 176; February 1998

Abbildung 9: Detektierbarkeit von verschiedenen Defekten während Vor-Ort-Prüfungen

## 6 Teilentladungsverhalten in Alternativgasen im Vergleich zu SF<sub>6</sub>

Die systematische Untersuchung des Teilentladungsverhaltens bei alternativen Isoliergasen für alle möglichen Fehlertypen und üblichen Gasmischungen ist Ziel der CIGRE D1.78-Arbeitsgruppe. Die Gruppe plant eine systematische Literaturstudie sowie auch eigene Experimente durchzuführen. Da zum jetzigen Zeitpunkt noch keine systematische Analyse der Literatur vorliegt, werden hier nur exemplarisch zwei Beispiele von Artikeln genannt, welche sich mit diesem Thema beschäftigt haben. Die Beispiele sollen auf mögliche Einflussparameter hinweisen und aufzeigen, wie komplex das Verhalten von Gasisolation bei Fehlstellen sein kann.

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich zwischen dem Teilentladungsverhalten und dem Durchschlagsverhalten einer C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>-Mischung und für SF<sub>6</sub> in derselben Anordnung. Die Resultate zeigen exemplarisch, dass:

- für den vorliegenden Fehlerfall ausreichend Abstand zwischen der Teilentladungseinsatzspannung und der Durchschlagsspannung bei Drücken unterhalb ca. 7 bar<sub>abs</sub> vorhanden ist, um eine Fehlstelle zuverlässig zu detektieren.
- der Einfluss der Fehler sowohl in SF<sub>6</sub> als auch in der C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-Mischung stark abhängig vom Druck der Anlage ist. Da in Alternativgasanlagen aber tendenziell höhere Nenndrücke verwendet werden als in SF<sub>6</sub>-Anlagen, können sich Fehler möglicherweise stärker auswirken als in SF<sub>6</sub> Anlagen. Es muss daher noch mehr Wert auf eine sensitive Routine- und Vor-Ort-Prüfung der Anlagen vor der Inbetriebnahme gelegt werden.

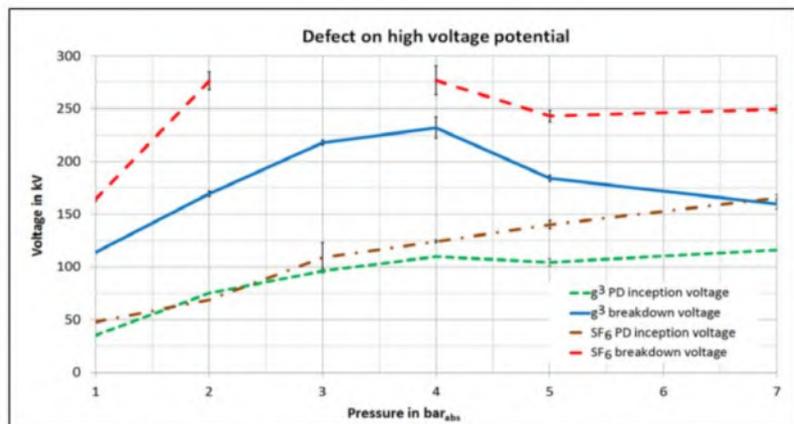
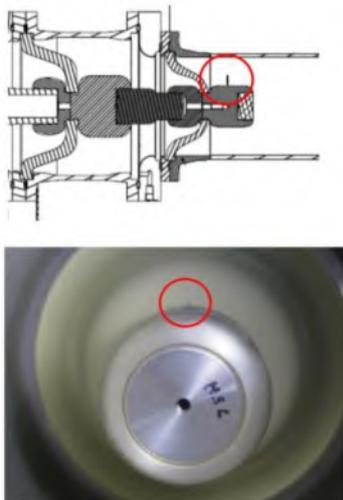


Fig 10: PD inception voltage and AC breakdown voltage for the gases SF<sub>6</sub> and g<sup>3</sup> 6% versus pressure. Standard deviations  $\pm 1\sigma$  are shown in black

D. Gautschi, et al. "Application of a fluoronitrile gas in GIS and GIL, as an environmental friendly alternative to SF<sub>6</sub>", B1-106, CIGRE Paris 2016

- Die Zustandsbeurteilung durch Teilentladungsmessung ist auch bei Alternativgasen wichtig.
- Ein Abstand zwischen Teilentladungseinsatzspannung und Durchschlagsspannung ist Voraussetzung für das risikofreie Detektion von Fehlstellen mittels TE-Messung.

Abbildung 10: Beispiel des Teilentladungsverhaltens und Durchschlagsverhalten einer C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N / CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> Mischung für eine Spitze auf Hochspannung

Abbildung 11 zeigt einen Vergleich zwischen dem Teilentladungsverhalten in Dry Air, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und SF<sub>6</sub> für die Fälle Protrusion, Floating Electrode und Bouncing Particle bei einem Druck von 0.5 MPa. Im Falle von Partikeln ist nur ein geringer Einfluss der Gasart auf die TE-Einsatzspannung und das Teilentladungsmuster zu beobachten. Bei floatender Elektrode variiert vor allem die Einsatzspannung der Teilentladung mit der Gasart. Bei Spitzen auf Hochspannung scheint sowohl die Einsatzspannung als auch die Teilentladungsamplitude, durch die die Art des Gases beeinflusst zu werden. Bei Partikeln hingegen variieren Einsatzspannungen und Teilentladungsamplituden weniger stark. Die groben Züge der Muster, weisen in unterschiedlichen Isoliergasen generell aber starke Ähnlichkeiten zueinander auf, so dass die Art des Fehlers unabhängig von der Gasart identifizierbar bleibt.

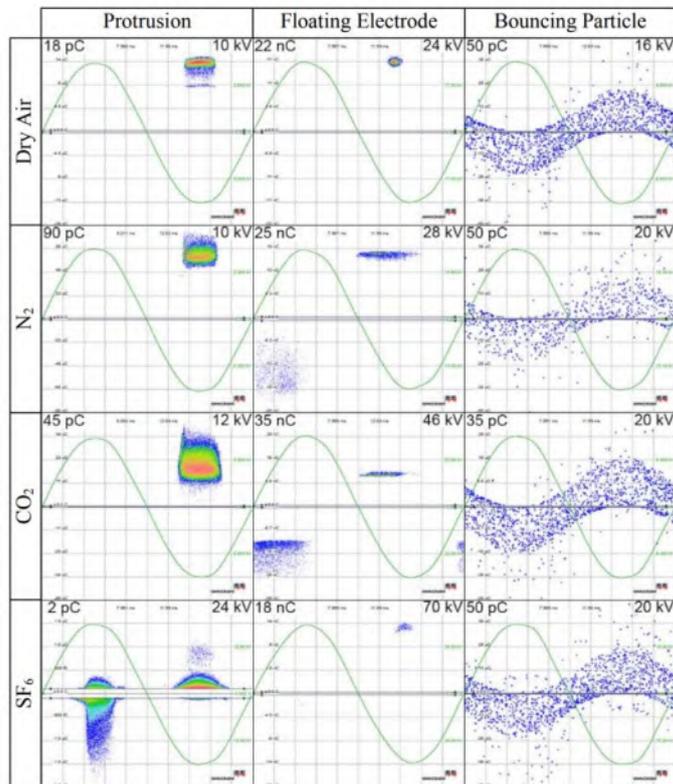


Fig. 9. Typical PRPD pattern of different defects and gas types  
(1.1 PDIV, p = 0.5 MPa)

A. Pirker, U. Schichler, Partial Discharges of Defects in Different Insulating Gases: N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, Dry Air and SF<sub>6</sub>, 12th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials - Xi'an - China, 2018

**Abbildung 11: Beispiel des Teilentladungsverhaltens von Partikeln in N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> und trockener Luft im Vergleich zu SF<sub>6</sub>**

## 7 Erfahrungen aus Prüfungen an Schaltanlagen mit alternativen Isoliertgasen in der Schweiz

Die FKH hat Abnahmeprüfungen an allen in der Schweiz installierten Typen von Schaltanlagen mit alternativen Isoliertgasen durchgeführt. Die Prüfungen haben insbesondere gezeigt, dass:

- die üblicherweise durch die FKH verwendete Einspeiseart über die Steckbuchse des Kabelendverschlusses es erlaubt, mit demselben Prüfequipment Anlagen mit unterschiedlichen Isoliertgasen zu prüfen, da für das Anschliessen der Prüfquelle vor und nach der Prüfung keine Gasräume geöffnet werden müssen
- Fehlstellen in Alternativgasanlagen in den beobachteten Fällen (in Übereinstimmung mit Abbildung 11) vergleichbare Teilentladungsmuster erzeugen wie in SF<sub>6</sub>.
- die Anlagen in der Lage sind, die FKH-Prüfempfehlung sowie die IEC-Normen zu erfüllen und die Vor-Ort-Prüfungen erfolgreich zu bestehen.
- an gewissen Stellen noch Lernkurven vorhanden sind und insbesondere bei AIS-Mittelspannungsanlagen (teilweise aufgrund von weniger strikten IEC-Normvorgaben) noch Schwierigkeiten bestehen, tiefe Teilentladungspegel zu erreichen.

## 8 Zusammenfassung

Schaltanlagen mit C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N-Mischungen und Luftisolation bieten bereits heute einen gleichwertigen Ersatz für SF<sub>6</sub>-Anlagen, auf denjenigen Spannungsebenen, für welche sie verfügbar sind.

Es ist für Betriebsmittel mit alternativen Isoliertgasen aber generell noch mehr Fokus auf eine zuverlässige Routine- und Vor-Ort-Prüfung zu legen, um der Auswirkung von Fehlern vorzubeugen, um dieselbe hohe Zuverlässigkeit zu erreichen wie bei heutigen SF<sub>6</sub>-Anlagen. Insbesondere der möglicherweise höheren Sensitivität auf Fehler aufgrund höherer Betriebsdrücke und der noch zu durchlaufenden Lernkurven bei neuen Produkten muss mit einer sensitiven Vor-Ort-Prüfung vor Inbetriebnahme Rechnung getragen werden.

Bis zum jetzigen Zeitpunkt sind in der Vor-Ort-AC- und Teilentladungsprüfung von Anlagen mit verschiedenen Isoliertgasen durch die FKH keine grundlegend neuen Effekte aufgetreten, welche das Nachweisen oder die Interpretation von Fehlstellen erschwert hätte. Für statistisch breit abgestützte Aussagen muss aber noch eine grössere Anzahl Alternativgasanlagen geprüft werden. Anhand der bisherigen Erkenntnisse empfehlen wir, die bewährten FKH-Prüfempfehlungen für GIS-Anlagen, auch für Alternativgasanlagen anzuwenden.



## ***FKH - Fachtagung***

***21. November 2023***

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Entscheidende Aspekte für den Einsatz von alternativen Gasen in GIS-Spannungswandlern**

**Dr.-Ing. Mostafa Refaey**  
PFIFFNER Messwandler AG, Hirschthal

#### **Funktion und beruflicher Werdegang**

2011 – 2015	Promotionsstudium in Hochspannungstechnik Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik – TU München,
2015 – 2018	Professor in Elektrotechnik – Universität Alexandria, Ägypten
2018 – 2020	Postdoktorand – HVL / ETH Zürich
2020 – heute	Produktverantwortlicher GIS-Messwandler, Pfiffner Messwandler AG Zuständig für die Entwicklung einer neuen Generation von Messwandlern für nachhaltige SF6-Alternativen für umweltfreundlichere Netze



# Entscheidende Aspekte für den Einsatz von alternativen Gasen in GIS-Spannungswandlern

Mostafa Refaey

PIFFNER Messwandler AG, Hirschthal

## 1. Kurzfassung

GIS-Spannungswandler sind für Schutz- und Messzwecke unverzichtbare Komponenten von Hochspannungsschaltanlagen. Der Anwender muss neben der Wirtschaftlichkeit eine hohe Betriebssicherheit, langfristig stabile Mess- und Schutzeigenschaften sowie eine weitestgehende Wartungsfreiheit fordern.

Heute befinden sich für diese Aufgaben im Spannungsbereich von 72,5 kV bis 550 kV zuverlässige Spannungswandler mit SF<sub>6</sub>-Gasisolation seit über 30 Jahren im Einsatz. Die positiven Eigenschaften von SF<sub>6</sub> hinsichtlich dieses Anwendungsbereichs sind bekannt. Ihnen gegenüber steht das hohe relative Treibhauspotential. SF<sub>6</sub> weist gemäß des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimawandel AR6/2021 ein hohes Treibhauspotential (GWP) von 25'200 auf [1]. Obwohl Hersteller die benötigte SF<sub>6</sub>-Masse und die SF<sub>6</sub>-Leckraten ihrer Anlagen in den letzten Jahrzehnten stark senken konnten, besteht aus Umweltschutzgründen ein Bestreben über einen längeren Zeit SF<sub>6</sub> zu ersetzen.

Jede Alternative muss mit SF<sub>6</sub> und seinen Eigenschaften verglichen werden, insbesondere hinsichtlich der elektrischen, physikalischen und Umwelt-, Gesundheits- und Sicherheitseigenschaften. Der gesamte ökologische Fußabdruck jeder Alternative muss unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus bewertet werden. Auf der Suche nach SF<sub>6</sub>-freien Lösungen gibt es bereits einige alternative Technologien, die für bestimmte Anwendungen verfügbar sind.

Eine entscheidende Frage ist, bieten diese Alternativen einen identischen Ersatz ohne Änderungen an der Konstruktion des GIS-Spannungswandlers. Oder erfordert die Verwendung alternativer Gase als Isoliermedium Anpassungen der Designaspekte/Kriterien, um die gleiche Leistung wie mit SF<sub>6</sub> zu erzielen.

In dieser Präsentation sollen die dielektrischen und mechanischen Auslegungskriterien und Wandlerkonstruktionsmerkmale beschrieben werden. Die Unterschiede der neuen Technologien im Vergleich zu SF<sub>6</sub> werden durch entscheidende Aspekte angesprochen.

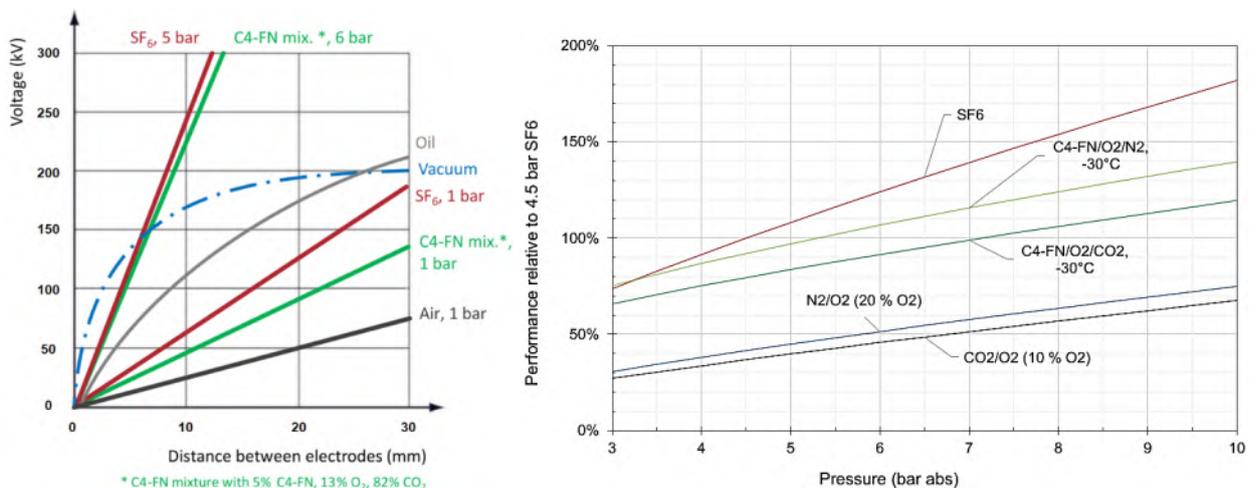
## 2. Dielektrische Auslegungsaspekten

In der Regel werden für die Auslegung der Isolationsschichtdicken, der Schlagweiten und der Elektrodenradien bei Wandlern die Stehblitzstoßspannung und die Stehwechselfspannung bezogen auf die jeweilige höchste Spannung für Betriebsmittel herangezogen. Wegen des sehr flachen Verlaufes der Stoßkurve (Durchschlagspannung in Abhängigkeit vom Spannungsanstieg) müssen die SF<sub>6</sub>-Gasstrecken nach der Nennsteh-Blitzstoßspannung dimensioniert werden. Danach kann bei üblichen **6 bar** mit einer Feldstärke von über **29 kV/mm** gerechnet werden. Für die Dimensionierung der Kriechwege auf Isolierstoffoberflächen muss insbesondere wegen möglicher Verunreinigungen mit Partikeln die

Stehwechselspannungs-Prüfspannung herangezogen werden. Die Feldstärken sollten hier deutlich unter **8.5 kV/mm** liegen.

Die technische Durchschlagsfestigkeit von  $C_4F_7N/O_2/CO_2$  sind im Vergleich zum  $SF_6$  isolierten Wandler um circa 5-10% reduziert, deswegen wird der Aktivteil geringfügig größere Schlagweite haben. Die neu dimensionierte Schlagweite kann durch eine Optimierung der Elektrodengeometrie erledigt werden.

Wenn synthetische Luft als Isoliermedium eingesetzt ist, sind entweder sehr hohe Betriebsdrücke (circa 10 bar) notwendig oder die Gehäuse aufgrund der deutlich grösseren Schlagweiten werden grösser. Der Grund dafür ist die niedrigere dielektrische Festigkeit der synthetischen Luft im Verhältnis zu  $SF_6$ .



**Abbildung 1: Comparison of the dielectric performance of various insulating media. [2,3]**

Die dielektrische Festigkeit eines Spannungswandlers ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig, z.B. Gasgemisch hinsichtlich Mischverhältnis und Synergieeffekt, Gasdruck, Isolationsabstand, Oberflächenrauheit, Homogenitätsgrad, elektrische Übergänge und Materialauswahl, [4,5]. Weitere Einflüsse der dielektrischen Festigkeit werden hervorgerufen durch Verunreinigung (Partikel, Zersetzungsprodukte, Feuchtigkeit) und Produktionstoleranzen.

## 2.1. Oberflächenrauheit

Die Rauheit der Elektrodenoberfläche hat Einfluss auf die mikroskopische Feldverteilung in der Nähe der Elektroden, was die dielektrische Festigkeit erheblich beeinflussen kann. Die mikroskopische Felderhöhung vor den Spitzen in Verbindung mit einem hohen Gasdruck kann direkt zu einem Durchschlag führen, bevor die makroskopische kritische Feldstärke erreicht ist. Demzufolge können die makroskopische Durchschlagsfeldstärke und das Gasverhalten unterschätzt werden.

Die Spitze kann mit einer zylindrischen Geometrie mit Gesamthöhe  $R_{tmax}$  und kugelförmigem Ende (ebenfalls mit Radius =  $R_{tmax}$ ) modelliert werden. Die Ergebnisse können als Relative Durchschlagsfestigkeit in einem homogenen Feld mit halbkugelförmigen Partikeln auf der Elektrodenoberfläche in Abhängigkeit von der maximalen Rautiefe  $R_{tmax}$  und vom Gasdruck  $p$ , wie in Abbildung 2 gezeigt.

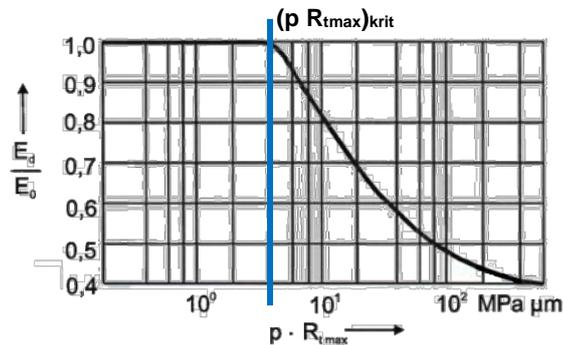


Abbildung 2: Einfluss der Elektrodenrauheit und des Drucks auf die relative Durchschlagsfestigkeit in SF<sub>6</sub>. [5, 6]

Der Wert von  $(p \cdot R_{tmax})_{krit}$ , bei dem die Durchschlagfeldstärke unter die kritische Feldstärke fällt, gilt als "Kennzahl" für die Empfindlichkeit dieses Gases gegenüber der Rauheit dienen. Für SF<sub>6</sub> liegt  $(p \cdot R_{tmax})_{krit}$  bei 4 MPa  $\mu\text{m}$  und für Luft bei 100 MPa  $\mu\text{m}$  [3, 4], die damit wesentlich unempfindlicher gegenüber Oberflächenrauigkeiten ist. C4-FN/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Gasgemisch ist laut Erfahrungen kritischer im Vergleich zu SF<sub>6</sub>.

## 2.2. Elektrodenbeschichtung

Um die Durchschlagsfestigkeit von GIS-Spannungswandler zu verbessern, sollte eine dielektrische Beschichtung auf den Elektroden, an denen das elektrische Feld auftritt, aufgebracht werden. Die Beschichtung führt zur reduzierten kapazitiven elektrischen Feldstärke im Gas [7]. Bei Blitzstoßspannung hilft die Beschichtung in der Ladungsakkumulation auf der lackierten Elektrodenoberfläche, was zu einer Homogenisierung des elektrischen Feldes führt [8]. Darüber hinaus weist das Lackieren eine Verringerung der Elektronenfeldemission und der Ionisierung auf.

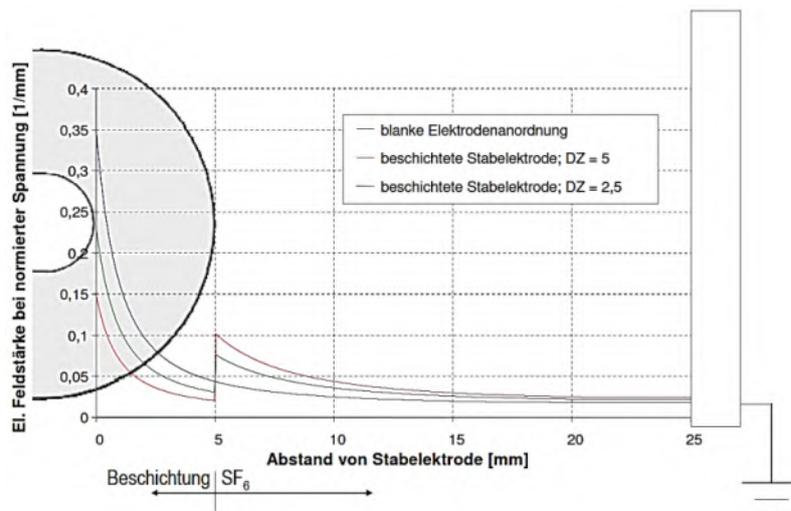


Abbildung 3: Einfluss der Elektrodenbeschichtung auf die Feldstärke bei inhomogener Elektrodenanordnung. [7]

### 3. Thermische Auslegung

Die Alternative Gase/Gasgemische müssen auch ein geeignetes thermisches Energieabgabevermögen haben. Die Verlustleistung muss bei Nennspannung und thermische Grenzleistung vom Aktivteil auf das Gehäuse abgegeben werden können. Dies geschieht einerseits über Konvektion und andererseits über Strahlung. Der Strahlungsanteil wird nicht von der Art des Gases, sondern nur von den Oberflächen, dem Farbaufbau, den Abständen und Temperaturen der Teile beeinflusst.

Das Gas selber beeinflusst aber den konvektiven Anteil der Wärmeabgabe. Die Effizienz der Wärmeabgabe durch Konvektion kann durch den Konvektionskoeffizienten berechnet werden. Die thermische Wärmeabgabe nimmt bei Erhöhen des Druckes zu, da die Dichte bei gleichbleibendem Volumen und Erhöhen des Fülldruckes ebenfalls zunimmt. Das bedeutet, bei der Verwendung von alternativen Gasen/Gasgemische können dieselben stationären Endtemperaturen der Primär-/Sekundärspule und Gehäuse erreicht werden, wie bei SF<sub>6</sub>, sofern ein Gasgemisch mit höherem Druck eingefüllt wird.

Schaltanlagen werden meist für Temperaturen von 40°C bis -30°C ausgelegt. (Teil-)Verflüssigung des Isoliermediums reduziert deren dielektrische Festigkeit, deswegen sie sollte vermieden werden. Das kann durch die Auswahl vom richtigen Mischverhältnis sowie des Druckkonzepts unbedingt erreicht werden.

### 4. Dichtungskonzept

Der GIS-Anwender ist dazu übergegangen, eine Leckrate von kleiner 0,1% p.a. für jeden Gasraum zu spezifizieren. Auch die IEC wird bald die zulässige Leckrate für die Typenprüfung auf kleiner 0,1% p.a. und Gasraum festlegen. Obwohl die Gasdichtheitsprüfungen durchgeführt wurden und die Leckraten kleiner 0,1% p.a. betragen, ist bekannt, dass keine Dichtung vollständig gasdicht ist.

Das Gas konzentriert sich an der unter Druck stehenden Seite des Dichtungsmaterials, adsorbiert an dessen Oberfläche, diffundiert dann durch die Gummidichtung und desorbiert schließlich an der Oberfläche auf der Atmosphärenseite der Dichtung. Dieser Vorgang wird als Permeation bezeichnet. Dieser Effekt nimmt über einen Zeitraum von Wochen oder Monaten zu, bis er einen Gleichgewichtszustand erreicht.

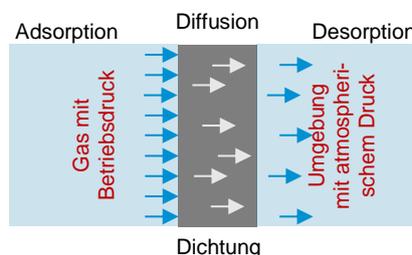


Abbildung 4: Dichtungskonzept

Die Qualität von Dichtungssystem ist abhängig von Dichtungsmaterial (Permeabilitätskoeffizient), Dichtungsprofil (Durchmesser / Querschnitt), Gasgemisch, Gasdruck (rel.), Bearbeitungsqualität der Dichtfläche und Verunreinigung; z.B. Partikeln, Haare.

Derzeit werden in gasisolierten Schaltanlagen (GIS) für alle O-Ringe Ethylene-Propylene-Diene-Monomer (EPDM) verwendet. Die Permeationseigenschaften dieses Dichtungsmaterials sind so beschaffen, dass 0,5 % pro Jahr gewährleistet werden können. Aber eine Leckrate von 0,1 % pro Jahr kann nicht gewährleistet werden.

Ein alternatives Material, isobutylene-isoprene (IIR, Butyl), ist als Ersatz verfügbar. Diese Butylgummimischung wird für C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>-Anwendungen verwendet. Sie hat auch vielversprechende SF<sub>6</sub>-Permeationseigenschaften, was die Gasdichtigkeit verbessert und die Gesamtpermeations- und Leckrate reduziert.

Der Permeationskoeffizient von SF<sub>6</sub> ist durch IIR im Betriebstemperaturbereich der GIS um einen Faktor von etwa 25-100 besser [9].

Temp [°C]	Permeation rate coefficient [cm <sup>2</sup> .bar <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]			
	CO <sub>2</sub> - Fluoronitrile		SF <sub>6</sub>	
	EPDM	CIIR-BIIR	EPDM	CIIR-BIIR
20	2*10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	4*10 <sup>-9</sup>	7*10 <sup>-11</sup>

Tabelle 1: Permeation coefficient of EPDM and CIIR – BIIR to SF<sub>6</sub> and Fluoronitrile / CO<sub>2</sub> mixture [9]

## 5. Gashandling und -messgeräte

Das Dichtigkeitsprüfsystem muss je nach Gas/Gasgemisch modifiziert werden. Die für die Identifizierung der Gasleckage verwendete Messsensoren sind unterschiedlich.

Beim Gashandling von alternativen Gasen können nur speziell an das Gas angepasste Geräte verwendet werden. Gashandling bei der Imprägnierung und Routineprüfung muss gasabhängig sein. Das heißt, separate Gasschläuche und -ventile für jede Gas /Gasgemisch. Um die Verwechslung zu vermeiden ist für jedes Alternativgas eine eigene Gewindegröße des Gasanschlusses zugeordnet [10], z.B. M45 → SF<sub>6</sub>, M48 → C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> und M50 → synthetische Luft

Der Feuchtegehalt wird durch speziell auf das Gas kalibrierte elektronische Sensoren bestimmt. SF<sub>6</sub>-Feuchtemessgeräte können nicht verwendet werden.

## 6. Materialverträglichkeit

Die technische Funktionalität der GIS-Spannungswandler hängt von stabilen, mechanischen und dielektrischen Eigenschaften der verwendeten Materialien während der gesamten Lebensdauer ab. Grundsätzlich kann es Alterungsprozesse geben, die durch die Kombination der verwendeten Materialien und einer oder mehrerer Komponenten des Isoliergasgemisches ausgelöst werden. Die Auswirkung kann zu veränderten Eigenschaften des Materials selbst führen, aber auch die Qualität des Isoliergases beeinflussen. Beide Effekte müssen für alle verwendeten Materialien untersucht werden [11]. Es muss entschieden werden, ob die Auswirkungen auf das Material und das Gas auf einem akzeptablen Niveau liegen oder ob sie zu stark sind und das Material durch ein alternatives Material ersetzt werden muss, das eine bessere Gasverträglichkeit und ähnliche physikalische Eigenschaften zeigt. Das betrifft folgende Bauelemente; Metalle, Legierungen und metallische Beschichtungen, Kunststoffmaterial, Oberflächenbehandlungen, Schmiermittel und Trocknungsmittel.

## 7. Literatur

- [1] IPCC, "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Cambridge University Press, 2021.
- [2] Handbook: "C4-FN Mixtures for High-voltage Equipment", Mai 2023
- [3] A. Chachereau, A. Hösl and C. M. Franck, "Electrical insulation properties of the perfluoronitrile C4F7N", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 51, no. 49, 2018.
- [4] CIGRE TB 849, "Electric performance of new non-SF<sub>6</sub> gases and gas mixtures for gas-insulated systems", CIGRE WG D1.67, October 2021
- [5] CIGRE WGR 319, "Design criteria for experiments to measure the breakdown voltage of insulating gases in uniform electric Fields", CIGRE WG D1.67, December 2021
- [6] J. Kindersberger, Gasisolierte Hochspannungs-Schaltanlagen, Seminar, Technische Akademie Esslingen.
- [7] J. Kessler, "Isoliervermögen hybrider Isoliersysteme in gasisolierten metallgekapselten Schaltanlagen (GIS)", Diss., TU München, 2011
- [8] D. V.D. BORN, "Dielectric Coatings for High Voltage Gas Insulated Switchgear", Diss., TU Delft, 2017
- [9] Y. Kieffel, "Characteristics of g<sup>3</sup> - an alternative to SF<sub>6</sub>", 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Montpellier, France, 2016, pp. 880-884.
- [10] P. Pilzecker, "Technische Unterschiede zwischen Handling von SF<sub>6</sub> und Alternativen Gasen", DILO-Anwenderkonferenz, April, 2023
- [11] CIGRE TB 802, "Application of non-SF<sub>6</sub> gases or gas-mixtures in medium and high voltage gas-insulated Switchgear", CIGRE WG B3.45, 2020

## ***FKH - Fachtagung***

***21. November 2023***

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Ansätze und Lösungen zum Gas-Lebenszyklus für Anlagen mit alternativen Isoliergasen**

**Martin Göppel**

DILO Armaturen und Anlagen GmbH, Babenhausen

#### **Funktion und beruflicher Werdegang**

- Seit 2015 Produktmanager für den Bereich Alternative Isoliergase, DILO
- 2014 Projektmanager Niederlassung DILO Asia-Pacific, Singapur
- Von 2011 bis 2014 Technischer Vertrieb, DILO
- 2009 bis 2011 Technikerstudium in der Fachr. Maschinenbau
- 2004 bis 2009 SF<sub>6</sub> Service Engineer, DILO



# Ansätze und Lösungen zum Gas-Lebenszyklus für Anlagen mit alternativen Isoliergasen

Martin Göppel

DILO Armaturen und Anlagen GmbH, Babenhausen

## 1 Kurzfassung

SF<sub>6</sub> ist ein hervorragendes Lösch- und Isoliergas, das seit mehr als 50 Jahren weltweit in der Energiebranche im Einsatz ist. Die energietechnische Entwicklung im Hoch- und Höchstspannungsbereich wäre ohne die Verwendung von SF<sub>6</sub> mit seiner hervorragenden dielektrischen Festigkeit und guten Lichtbogen-Löschfähigkeit unmöglich gewesen.

Aufgrund seines hohen Treibhauspotenzials mit einem GWP-Index von ca. 25.200 CO<sub>2</sub>e ist SF<sub>6</sub> das potenteste bekannte Treibhausgas mit einer atmosphärischen Verweildauer von rund 3.200 Jahren. Abkommen und Vorschriften wie das Kyoto-Protokoll, die EU F-Gase-Verordnung und das Pariser Klimaschutzabkommen von 2015 haben ein gemeinsames globales Ziel: die Reduzierung von F-Gas-Emissionen. Aus diesen Gründen wurden in den letzten Jahren Alternativen zu SF<sub>6</sub> Gas entwickelt.

Die Industrie hat diese Anforderungen umgesetzt, und mehrere Schaltanlagenhersteller bieten nach mehrjähriger Entwicklung nun ökoeffiziente Lösungen mit Alternativen Isoliergasen an.

Der Fokus im Vortrag bezieht sich auf die Lösungen zum Handling und Analyse der momentan verfügbaren Alternativen Isoliergase. Die gesammelten Erfahrungen aus über 50 Jahren SF<sub>6</sub> -Gashandling sind dabei in die technische Entwicklung eingeflossen und so konnte das Portfolio an Servicegeräten, Messgeräten und Dienstleistungen auch um Alternative Isoliergase erweitert werden. Der Umgang mit Alternativen Isoliergasen scheint an einigen Stellen komplexer und vielfältiger, aber ähnlich wie die Handhabung von SF<sub>6</sub>, die sich über 50 Jahre entwickelt hat und in der es auch heutzutage noch immer weitere technische Neuigkeiten und Verbesserungen gibt.

## Sammlung Präsentationsseiten

ONE VISION. ZERO EMISSIONS.



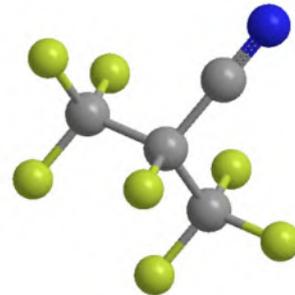
© DILo 21.11.2023

www.dilo.eu

## Agenda



- Definition und Überblick über Alternative Isoliergase
- Mischen von Gasen
- Handling von Alternativen Isoliergasen
- Ventile und Kupplungen, Filtern von Gas
- Analyse von Alternativen Gasen
- Gasaufbereitung



© DILo 21.11.2023

2



## Alternative Gase

Eigenschaften der Gasgemische			
<b>Beispiele für Handelsnamen</b>	SF <sub>6</sub>	g <sup>3</sup> (GE Vernova) EconIQ (HITACHI Energy) 	CleanAir (Siemens Energy)
<b>DILo Bezeichnung</b>	SF <sub>6</sub>	C4	CA (Compressed Air)
<b>Am häufigsten verwendete Gasgemische</b>	Reines SF <sub>6</sub> SF <sub>6</sub> mit N <sub>2</sub> oder CF <sub>4</sub>	C4: < 15 % mit CO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> oder N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> C4: < 10 % mit CO <sub>2</sub> oder N <sub>2</sub>	~ 20 % O <sub>2</sub> in N <sub>2</sub>
<b>Minimale Betriebstemperaturen</b>	Reines SF <sub>6</sub> : < -30 °C SF <sub>6</sub> mit N <sub>2</sub> /CF <sub>4</sub> : < -50 °C	Abhängig vom Mischungsverhältnis: -30 °C – -5 °C	< -50 °C
<b>Erderwärmungspotenzial CO<sub>2</sub>e 100</b>	25.200	< 760* (* Abhängig vom Mischungsverhältnis)	0

© DILo 21.11.2023

3



## Alternative Gase

Warum werden Mischungen benötigt?

SF<sub>6</sub> hat einzigartige dielektrische und lichtbogenlöschende Eigenschaften, die von anderen Gasen nicht erreicht werden können.  
 Die Gasmischung kann auf die individuellen Anforderungen der Anwendung abgestimmt werden.

**Gasgemisch anstelle von Einzelparametergasen:**

- Synthetische Luft / Clean Air:
  - Nur für Isolationszwecke → Schalten mittels Vakuumschalter
- C4-FN Gas Mischungen:
  - C4-FN: Zur Isolierung
  - CO<sub>2</sub>: Lichtbogenlöschung, Einhaltung einer minimalen Betriebstemperatur und Sicherstellung des nötigen Gesamtdruckes
  - O<sub>2</sub>: Vermeidung von schädlichen Zersetzungsprozessen nach dem Schalten/Entladen von Strom
  - N<sub>2</sub>: Einhaltung einer minimalen Betriebstemperatur und Sicherstellung des nötigen Gesamtdruckes

© DILo 21.11.2023

4



© DILO 21.11.2023

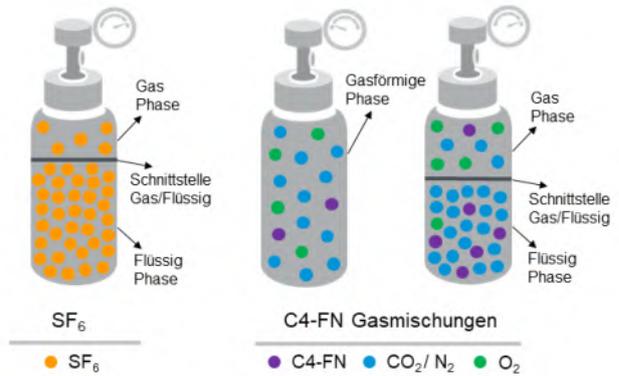
## Alternative Gase

C4-FN



### Was bei Gasmischungen zu beachten ist:

- Das chemische und physikalische Verhalten des Gemischs ändert sich in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis
- Abhängig von Druck und Temperatur kann es zu einer Teilverflüssigung kommen.
- Die Konzentration der verschiedenen Bestandteile kann in der Flasche variieren
- Der Fülldruck ist abhängig vom Mischungsverhältnis
- Der (partielle) Verflüssigungspunkt ist abhängig von:
  - Mischungsverhältnis
  - Druck
  - Temperatur



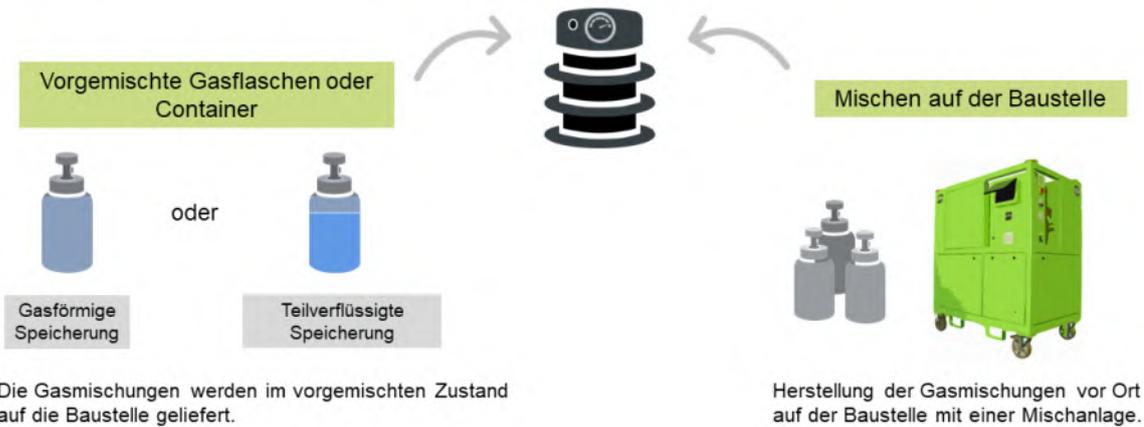
© DILO 21.11.2023

6



## Produktion von C4-FN Gasmischungen

C4-FN



© DILO 21.11.2023

7



## Herstellung von C4-FN Gasmischungen

C4-FN

### Gasförmige Speicherung

Vorteile	Nachteile
Zertifiziertes Gas	Verhältnismäßig geringe Menge speicherbar
Kleine Gasräume befüllbar	Teilverflüssigung bei Abkühlung möglich
Kein Servicegerät notwendig (nur Gasnachfüllvorrichtung)	Mischungsverhältnis vor Ort nicht veränderbar

### Teilverflüssigte Speicherung

Vorteile	Nachteile
Große Speichermenge	Keine direkte Entnahme ohne Servicegerät möglich
Exakt vordefiniertes Gasgemisch	Erwärmen durch Servicegerät zeitaufwendig
Unabhängig von Außentemperatur	Mischungsverhältnis vor Ort nicht veränderbar

© DILO 21.11.2023

8



# Verfahren zur Herstellung von Mischgasen

C4-FN



- Sehr genaue Mischungen möglich
- Nur für den stationären Gebrauch bestimmt (nicht für den Transport)

© DILo 21.11.2023



- Mischungsverhältnis variabel einstellbar
- Trägergase können vor Ort bezogen werden
- Große und kleine Gasräume können befüllt werden

9

## Handling von Alternativen Isoliergasen

© DILo 21.11.2023



10



## Handhabung - Unterschiede im Vergleich zu SF<sub>6</sub>



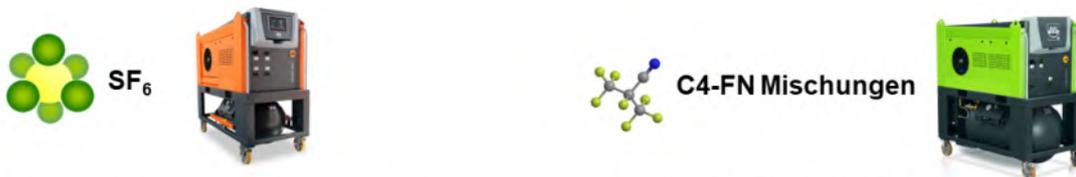
**SF<sub>6</sub>-Geräte können nicht für das Handling von Alternativen Gasen verwendet werden!**

© DILLO 21.11.2023

11



## Unterschiede zwischen SF<sub>6</sub> und C4-FN Servicegeräten



- Kompressor für Flüssigspeicherung von SF<sub>6</sub> (max. 50 bar)
  - Füllen von SF<sub>6</sub> über Verdampfer (flüssig → gasförmig)
  - SF<sub>6</sub> besteht aus einem Medium
  - DN20 Kupplung für SF<sub>6</sub> (Gewinde M45x2)
  - Bewährtes Filtermaterial zum Trocknen und Absorbieren von Partikeln aus SF<sub>6</sub>
- Kompressor zur Speicherung bis zu 100 bar
  - Temperaturgesteuertes Füllen über Induktionsheizung von Flasche in den Puffertank
  - Gasgemische bestehen aus bis zu drei Stoffen : z.B. C4-FN / CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> oder C4-FN / N<sub>2</sub> / O<sub>2</sub>
  - DILLO DN20 Kupplung mit angepasstem Gewinde (Gewinde M48x2)
  - Filtermaterial in seinen Eigenschaften angepasst
  - Dichtungsmaterial beständig gegen C4-FN und CO<sub>2</sub>
- Standardfunktionen bleiben gleich (Absaugen / Füllen / Evakuieren)

© DILLO 21.11.2023

12



## Unterschiede zwischen SF<sub>6</sub> und CA Servicegeräten



SF<sub>6</sub>



- Kompressor für Flüssigspeicherung von SF<sub>6</sub> (max. 50 bar)
- Füllen von SF<sub>6</sub> über Verdampfer (flüssig → gasförmig)
- SF<sub>6</sub> besteht aus einem Medium
- DN20 Kupplung für SF<sub>6</sub> (Gewinde M45x2)
- Bewährtes Filtermaterial zum Trocknen und Absorbieren von Partikeln aus SF<sub>6</sub>

Synthetische Luft /  
Compressed Air

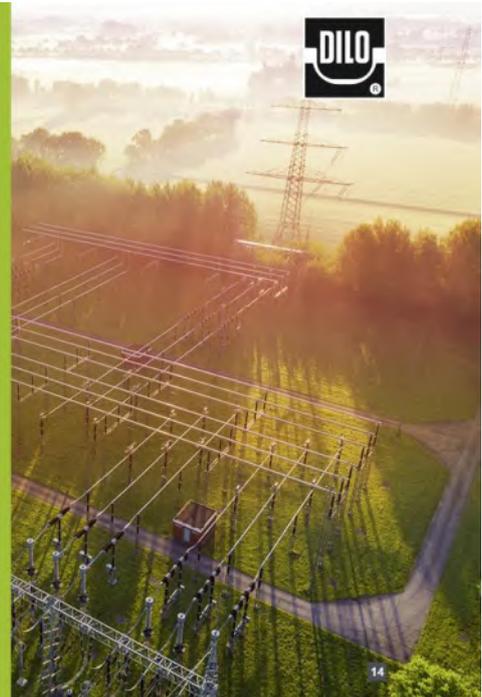


- Kompressor zur Speicherung bis zu 200 bar
- Gasförmiges Füllen aus vorgemischten Flaschen oder Flaschenbündel. Kein Verdampfer notwendig.
- Gasmischung besteht aus zwei Stoffen: N<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub>
- DILo Kupplungen mit angepasstem Gewinde DN8 (M24x1.5) / DN20 (M50x2) / DN40 (M80x2)
- Filtermaterial in seinen Eigenschaften angepasst

- Standardfunktionen bleiben gleich (Absaugen / Füllen / Evakuieren)

## C4-FN

Handling processes

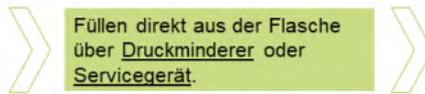




## Füllen von C4-FN Gasmischungen

C4-FN

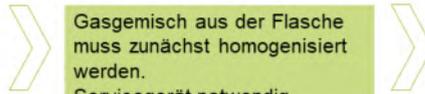
Füllen von vorgemischten Gasmischungen. Mischung ist im homogenen Zustand. Nur begrenztes Füllen mit Überdruck möglich.



Füllen direkt aus der Flasche über Druckminderer oder Servicegerät.



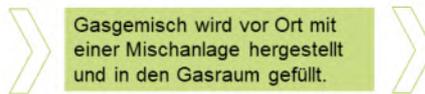
Füllen von vorgemischten teilverflüssigten Gemischen. Das Gemisch in der Flasche ist nicht homogen. Durch die Speicherung im teilverflüssigten Zustand kann eine größere Menge effizient in Flaschen gespeichert werden.



Gasmischung aus der Flasche muss zunächst homogenisiert werden. Servicegerät notwendig.



Füllen von vor Ort hergestellten gasförmigen Mischungen. Mischung ist homogen. Sehr große Gasmengen können vor Ort gemischt und direkt in den Gasraum gefüllt werden.



Gasmischung wird vor Ort mit einer Mischanlage hergestellt und in den Gasraum gefüllt.



© DILo 21.11.2023

15

## Füllen von vorgemischten teilverflüssigten C4-FN-Gemischen

C4-FN

- Das Gasmischung wird in einem vorgemischten und teilweise verflüssigten Zustand bereitgestellt.
- Beheizung der Flasche durch elektrische Kontaktheizung oder induktive Erwärmung.
- Die Erwärmung des Speicherzylinders dient dazu, die Entnahmegeschwindigkeit des Gasmischunges zu erhöhen.
- Vollständige Entnahme des Gasmischunges aus der Speicherflasche in den Puffertank.
- Nach dem Umpumpen in den Puffertank wird das Gasmischung eine gewisse Zeit lang umgewälzt, um die Homogenität zu gewährleisten.
- Homogene Speicherung des Gasmischunges im eingebauten Pufferspeicher des Servicegerätes.
- Wird das Gasmischung gasförmig homogenisiert, kann es jederzeit, auch ohne zusätzliche Erwärmung, zum Befüllen von gasgefüllten Geräten unterschiedlichen Volumens und Drucks verwendet werden.



© DILo 21.11.2023

16



## Absaugen von C4-FN Mischungen

C4-FN

- Die Rückgewinnung des Gasgemisches aus einem Gasraum mit einem Fülldruck von bis zu 12 bar erfolgt über einen Servicewagen für C4-FN (Kompressor und Saugpumpe).
- Absaugprozess ähnlich zu SF<sub>6</sub>.
- Speicherung entweder flüssig/gasförmig in der Flasche oder gasförmig im untergebauten Puffertank des Servicegerätes.



© DILLO 21.11.2023

17



## Wichtig beim Umgang mit C4-FN-Gasgemischen

- Entscheidend für den Aggregatzustand in der Flasche sind immer Mischungsverhältnis, Druck und Temperatur.
- Vor dem Füllen von C4-FN-Gasgemischen muss sichergestellt werden, ob sich das Gemisch gasförmig oder flüssig in der Flasche befindet. Je nachdem kann die Befüllung bei gasförmiger Speicherung direkt aus der Flasche oder bei flüssiger Speicherung über ein Servicegerät erfolgen.
- Bei gasförmigen Gemischen ist darauf zu achten, dass die zulässige Mindesttemperatur nicht unterschritten wird da es zu einer teilweisen Verflüssigung in der Flasche kommen kann. Dies kann bei Lagerung im freien z.B. im Winter oder bei sehr niedrigen Temperaturen möglich sein.



© DILLO 21.11.2023

18



## Füllen von Compressed Air

CA



Füllen von vorgemischten gasförmigen Gemischen. Das Gemisch ist homogen.



Füllen direkt aus der Flasche oder Flaschenbündel über einen Druckminderer oder Servicegerät in den Gasraum.





## Absaugen von Compressed Air (CA)

CA

- Zwei mögliche Methoden zur Entleerung des Gasraums:

**Option 1:** Absaugen des Gasraums über ein CA-Servicegerät. Speicherung des Gases in gasförmiger Form bis zu 200 bar in Flaschen oder Flaschenbündel.

**Option 2:** Entlüften\* des Gasraums über eine Kupplung mit integriertem Filter. Es muss mindestens sichergestellt sein, dass keine Stickoxide im Gas vorhanden sind.



\* Vorausgesetzt es sind keine NO<sub>x</sub>-Komponenten vorhanden. Die genannten Optionen sind Empfehlungen. Die korrekte Vorgehensweise hängt von der Vorgabe des OEMs ab.

© DILO 21.11.2023

21

## Wichtig beim Umgang mit Compressed Air (CA) Gasmischungen



- Das in Flaschen vorgemischte Gasmisch, welches in der Regel zu 80 % aus N<sub>2</sub> und zu 20 % aus O<sub>2</sub> besteht, befindet sich in der Flasche immer in gasförmigem Zustand.
- Das Füllen kann wahlweise direkt aus der Flasche über einen Druckminderer oder alternativ über ein Servicegerät erfolgen.
- Gasräume können über einen Servicewagen auf < 1 mbar abgesaugt werden. Speicherung des Gases in gasförmigem Zustand bis zu 200 bar möglich.
- Alternativ kann eine Entlüftungskupplung\* mit integriertem Partikelfilter an die Gasraumkupplung angeschlossen werden. In diesem Fall wird der Überdruck des Gasraums auf Atmosphärendruck reduziert. Der integrierte Filter hat die Aufgabe, dass keine Partikel in den Gasraum eindringen und keine Stäube oder Partikel aus dem Gasraum entweichen.



\* Vorausgesetzt es sind keine NO<sub>x</sub>-Komponenten vorhanden. Die genannten Optionen sind Empfehlungen. Die korrekte Vorgehensweise hängt von der Vorgabe des OEMs ab.

© DILO 21.11.2023

22

## Ventile und Kupplungen Filtern von Gas

© DILO 21.11.2023

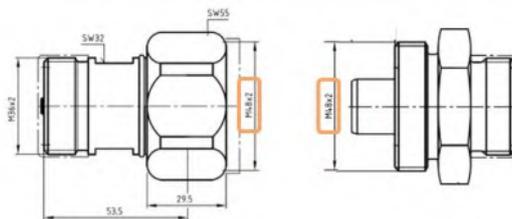
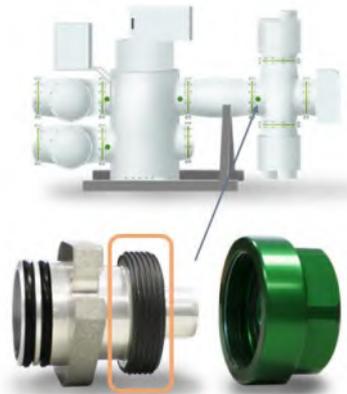


23

## Kupplungen Alternative Gase



Gewindegröße	DN20	DN8
SF <sub>6</sub>	M45x2	M26x1.5
C4-FN Gasmischungen	M48x2	M28x1.5
CO <sub>2</sub> Gasmischungen	M43x2	M30x1.5
Compressed Air Gasmischungen (CA)	M50x2	M24x1.5



© DILO 21.11.2023

24

## Filter

C4-FN / CA

- Vorfiltereinheiten bestehen aus einem Partikelfilter und einem Trockenfilter.
- Der Trockenfilter wird verwendet, um Feuchtigkeit aus dem Gasgemisch zu entfernen.
- Partikelfilter werden verwendet, um feste Partikel und Stäube aus dem Gasgemisch zu adsorbieren.
- C4-FN: Zersetzungsprodukte wie CO können mit Vorfiltereinheiten nicht entfernt werden. Das Mischungsverhältnis beim Filtern von Zersetzungsprodukten kann beeinflusst werden.
- CA: Zersetzungsprodukte wie NOX können mit Vorfiltereinheiten entfernt werden.



© DILLO 21.11.2023

25

## Analyse von Alternativen Isolations Gasen

© DILLO 21.11.2023



26



## Unterschiede zu SF<sub>6</sub>

Gasmischungen anstelle von Einzelgasen

- Messungen nur im homogenen Zustand (nicht bei teilverflüssigten Gasmischungen)
- Zersetzungsprodukte:
  - **C4-FN:** Die Konzentration von CO (Kohlenmonoxid) wird als Indikator für die Gesamtmenge der Zersetzungsprodukte verwendet.
  - **Synthetische Luft / Clean Air:** Die Konzentration von NO<sub>x</sub> (NO und NO<sub>2</sub>) wird als Indikator für die Gesamtmenge der Zersetzungsprodukte verwendet..
- Leckage Erkennung:
  - **Synthetische Luft / Clean Air:** Schwierig kleinere Lecks aufzuspüren (Messung synthetischer Luft in der Umgebungsluft). Es können nur physikalische Methoden (akustische Messungen, Seifenblasen) verwendet werden oder es kann die Leckage Erkennung durch Zugabe eines Tracer-Gases erfolgen.
  - **C4-FN:** Die Nachweisgrenze ist mehr als 10-mal höher als bei SF<sub>6</sub>, da normalerweise Gasgemische mit einer Konzentration <= 10 % verwendet werden.

© DILo 21.11.2023

27



## Geräte zur Bestimmung der Gasqualität

Übersicht

Messgeräte				
MultiAnalyser C <sub>4</sub>	MultiAnalyser C <sub>5</sub>	MirrorAnalyser CA	MultiAnalyser CA	MultiAnalyser CO <sub>2</sub>
<b>C4-3-039R-R</b>	<b>C5-3-039R-R</b>	<b>CA-3-035R-R</b>	<b>CA-3-039R-R</b>	<b>CO2-3-039R-R</b>
<b>C4-FN Mischungen</b>	<b>C5-FK Mischungen</b>	<b>Compressed Air</b>	<b>Compressed Air</b>	<b>CO<sub>2</sub> Mischungen</b>
- Mol-% C4-FN (in CO <sub>2</sub> / O <sub>2</sub> or N <sub>2</sub> / O <sub>2</sub> ) - Moisture - Mol-% Oxygen (O <sub>2</sub> ) - Mol-% carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) - Concentration carbon monoxide (CO)	- Mol-% C5-FK (in CO <sub>2</sub> / O <sub>2</sub> or N <sub>2</sub> / O <sub>2</sub> ) - Moisture - Mol-% Oxygen (O <sub>2</sub> ) - Mol-% carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) - Concentration carbon monoxide (CO)	- Moisture (Frost- / Dewpoint) - Mol-% Oxygen (O <sub>2</sub> ) - Concentration nitrogen oxides (NO <sub>x</sub> )	- Moisture - Mol-% Oxygen (O <sub>2</sub> ) - Concentration nitrogen oxides (NO <sub>x</sub> )	- Mol-% carbon dioxide (CO <sub>2</sub> ) - Moisture - Mol-% Oxygen (O <sub>2</sub> ) - Concentration carbon monoxide (CO)

© DILo 21.11.2023

28



## Devices for Measuring the gas quality

Overview

Messgeräte			
MultiAnalyser <sup>HE</sup>	LeakSpy <sup>C4</sup>	LeakSpy <sup>C5</sup>	GasSafetySensor / Monitor
HE-3-039R-R	C4-3-033-R400	C5-3-033-R500	3-026-R200 3-026-R...
<b>Helium</b>	<b>C4-FN</b>	<b>C5-FK</b>	<b>CO2, O2, C4-FN, C5-FK, CO</b>
- Vol-% HE (in N <sub>2</sub> ) - Moisture	- C4-FN detection	- C5-FK detection	- Sensors: CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , C4-FN, C5-FK, CO

© DILo 21.11.2023

29



## Geräte zur Messung der Gasqualität

EcoAnalyser

- Einfaches Messgerät ohne Rückpumpfunktion (wenn eine gasdichte Handhabung erforderlich ist, muss ein Aufbewahrungsbeutel an den Auslass angeschlossen werden)
- Messung von synthetischer Luft: Gas kann in die Atmosphäre freigesetzt werden
- Bei der Messung von zersetztem Gas ist keine aufwendige Reinigung des Gerätes erforderlich
- Verschiedene Typen/Sensoren stehen zur Verfügung



© DILo 21.11.2023

30



© DILO 21.11.2023

31

## Aufbereitung von C4-FN Gemischen

Alternative Gase



### C4-FN Aufbereitung\*:

- Trotz des niedrigen GWP sollten Gasgemische nicht absichtlich in die Atmosphäre abgegeben werden.
- C4-FN kann in speziell konzipierten stationären Trennanlagen zurückgewonnen werden.
- Rückführung und Rückgewinnung von gebrauchten C4-FN-Gemischen zur anschließenden Wiederverwendung für neue Gemische.
- Reinheit > 99%
- Rückgewinnungsgrad > 95%



Gastrennanlage zur Rückgewinnung gebrauchter C4-FN-Gemische

\* Wiederaufbereitung eines rückgewonnenen fluorierten Treibhausgases, um unter Berücksichtigung des Verwendungszwecks die gleiche Leistung wie bei einem neuen Stoff zu erzielen.

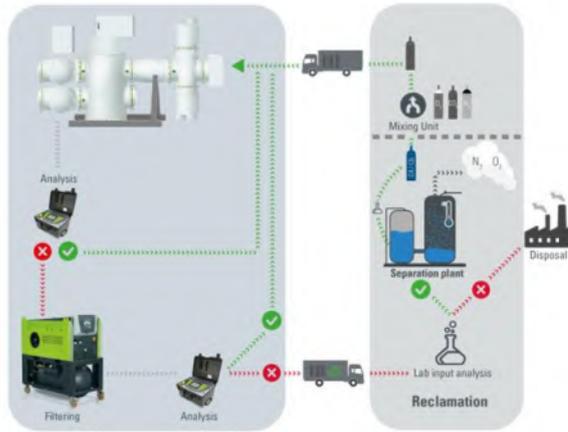
\*S. Glomb, P. Pilzecker, M. Göppel, J. Owens, R. Kurz, End-of-life procedures and gas reclamation of SF6 alternative gas mixtures, CIGRE 2022.

© DILO 21.11.2023

32



## Gas Aufbereitung C4-FN



### Gasaufbereitung von C4-FN-Mischungen.

- Ziel ist die Trennung von C4-FN-Gas vom Trägergas CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub>.
- Kosteneffiziente Wiederverwendung des aufbereiteten Gases für neue Gasgemische und Reduzierung des gesamten CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks.
- Geschlossener Kreislauf zur Wiederverwendung und Aufbereitung von bereits verwendetem Gas.

© DILO 21.11.2023

33



## Gas life cycle



© DILO 21.11.2023

34



ONE VISION. ZERO EMISSIONS.



Kontakt: [martin.goeppel@dilo-gmbh.com](mailto:martin.goeppel@dilo-gmbh.com)

**DILO**  
**Armaturen und Anlagen GmbH**  
Frundsbergstrasse 36  
D-87727 Babenhausen

☎ +49 (0) 83 33 3 02-0  
☎ +49 (0) 83 33 3 02-302  
✉ [info@dilo-gmbh.com](mailto:info@dilo-gmbh.com)



[www.dilo.com](http://www.dilo.com)



## ***FKH - Fachtagung***

***21. November 2023***

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Berücksichtigung von Umweltaspekten beim Bau von Hochspannungsleitungen**

**Dr. Sandro Dinser**  
Dinser Expertise GmbH, Zürich

### **Funktion und beruflicher Werdegang**

Geschäftsleiter und Inhaber, Dinser Expertise GmbH

### **Beruflicher Werdegang**

- Studium Maschineningenieurwissenschaften ETH Zürich, Zürich
- Promotion in der experimentellen Mechanik, ETH Zürich, Zürich
- Leiter tech. und wissenschaft. Netzprojekte, Axpo AG, Baden
- Principle Engineer Kabelleitungen, Swissgrid, Laufenburg
- Leiter Engineering Leitungen, Swissgrid, Aarau
- Leiter Requirements and Quality, Swissgrid, Aarau



# Berücksichtigung von Umweltaspekten beim Bau von Hochspannungsleitungen

Sandro Dinser

Dinser Expertise GmbH, Zürich

## 1 Kurzfassung

Dieser Beitrag befasst sich mit den Umwelteinwirkungen von Hochspannungsleitungen. Er zeigt verschiedene Ausführungsarten von Leitungen und wie unterschiedlich sie sich auf die Umwelt auswirken.

Beim Bau von Hochspannungsleitungen ist zu beachten, dass dies möglichst umweltschonend erfolgt. Entscheidend dabei ist die Wahl der Ausführungsart und die Linienführung. Für Plangenehmigungen muss der Antragsteller aufzeigen, wie die Umwelteinwirkungen sind. Ein neues Bundesgerichtsurteil hat dazu ein wegweisendes Urteil gefällt. Für umweltrelevante Grossvorhaben gibt es eine Pflicht zu einer hinreichenden Variantenprüfung, auch wenn dies nicht explizit in einer Verordnung steht.

Für eine erfolgreiche Plangenehmigung empfiehlt es sich, frühzeitig die Umwelteinwirkung verschiedener Varianten zu prüfen und dies in den Gesuchsunterlagen zu dokumentieren.

## 2 Einleitung

Dieser Beitrag hat zum Ziel, ein eher technisches Publikum auf die Bedeutung der Umwelt zu sensibilisieren. Er stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit: weder bei den verschiedenen Umwelteinwirkungen noch bei den Genehmigungsvorgaben, die sich auf Umweltaspekte beziehen.

Das Umweltschutzgesetz schreibt vor, dass Hochspannungsleitungen wie alle Baumasnahmen umweltverträglich zu gestalten sind.

Bei grösseren Baumasnahmen braucht es für eine Plangenehmigung eine Umweltverträglichkeitsprüfung (für 220 kV und 380 kV) oder eine Umweltnotiz. Diese zeigt unter anderem auf, welche Umweltbereiche wie stark betroffen sind und welche Massnahmen ergriffen werden, um die Umwelteinflüsse möglichst gering zu halten.

Die Wahl der Art und Weise, wie der Strom transportiert wird, bestimmt zu einem grossen Teil, wie stark die Umwelt betroffen ist: oberirdisch als Freileitung oder unterirdisch als Kabelleitung? Falls unterirdisch: welches ist die beste Ausführungsart? Weiter ist eine umweltverträgliche Linienführung zu bestimmen, die hinsichtlich Umwelteinwirkung zu optimieren ist.

Für das Übertragungsnetz und das überregionale Verteilnetz gibt es neben der Freileitung eine Vielzahl an Möglichkeiten für unterirdische Leitungen. Kapitel 3 zeigt diese auf. Danach zeigt das Kapitel 4, welche Umwelteinflüsse durch Leitungen entstehen.

Für Vorhaben mit einer Spannung von 220 kV oder höher und mit erheblichen Auswirkungen auf Raum und Umwelt regelt der Sachplan Übertragungsleitungen (SÜL), wie die

bestgeeignete Variante zu wählen ist. Eine umfassende Interessenabwägung mit den vier Bereichen Umweltschonung, Raumentwicklung, Technik und Wirtschaftlichkeit liefert die Entscheidungsgrundlagen. Im Verteilnetz entscheidet der sogenannte Mehrkostenfaktor, ob eine Leitung als Frei- oder Kabelleitung zu bauen ist. Doch inwiefern braucht es eine Variantenuntersuchung für verschiedene Kabelleitungen, um eine Plangenehmigung zu erhalten? Hierzu gibt es ein aktuelles Bundesgerichtsurteil vom 1. Mai 2023. Dieses wird im Kapitel 5 diskutiert.

Wie sieht eine umfassende Interessenabwägung aus? Was braucht es für eine Plangenehmigung? Darauf geht Kapitel 6 ein. Im abschliessenden Fazit wird die Berücksichtigung der Umweltaspekte beim Bau von Hochspannungsleitungen gewürdigt.

### 3 Ausführungsarten der Hochspannungsleitungen

#### 3.1 Freileitung

Die seit über 100 Jahren eingesetzte und bewährte Freileitung prägt das Hochspannungsnetz. Ihr wesentliches Merkmal ist, dass sie das Landschaftsbild beeinflusst. Abbildung 1 zeigt eine Winterstimmung mit einer Freileitung im Engadin. Die Umweltbereiche Boden und Wasser sind bei den Maststandorten betroffen. Durch geschickte Wahl der Maststandorte lassen sich in der Regel Eingriffe in sensible Gebiete vermeiden. Weiter zu berücksichtigen sind die Lärmemissionen und Bodenbelastung durch die Erneuerung des Korrosionsschutzes.

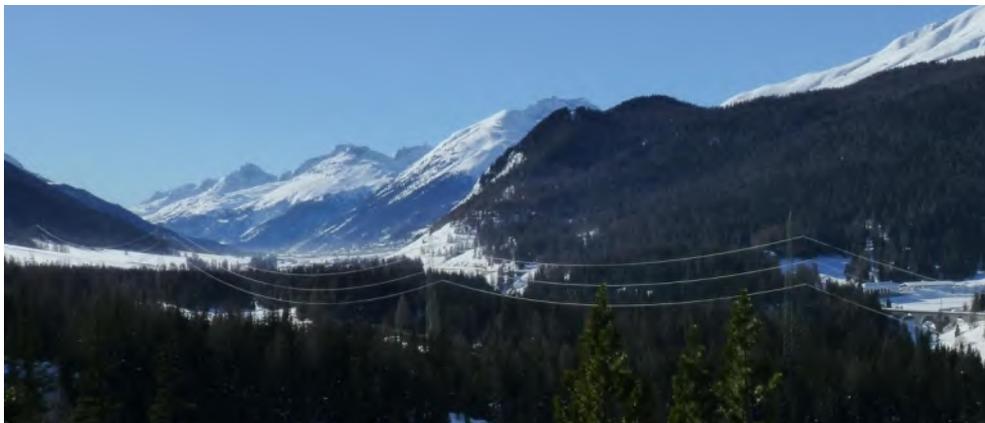


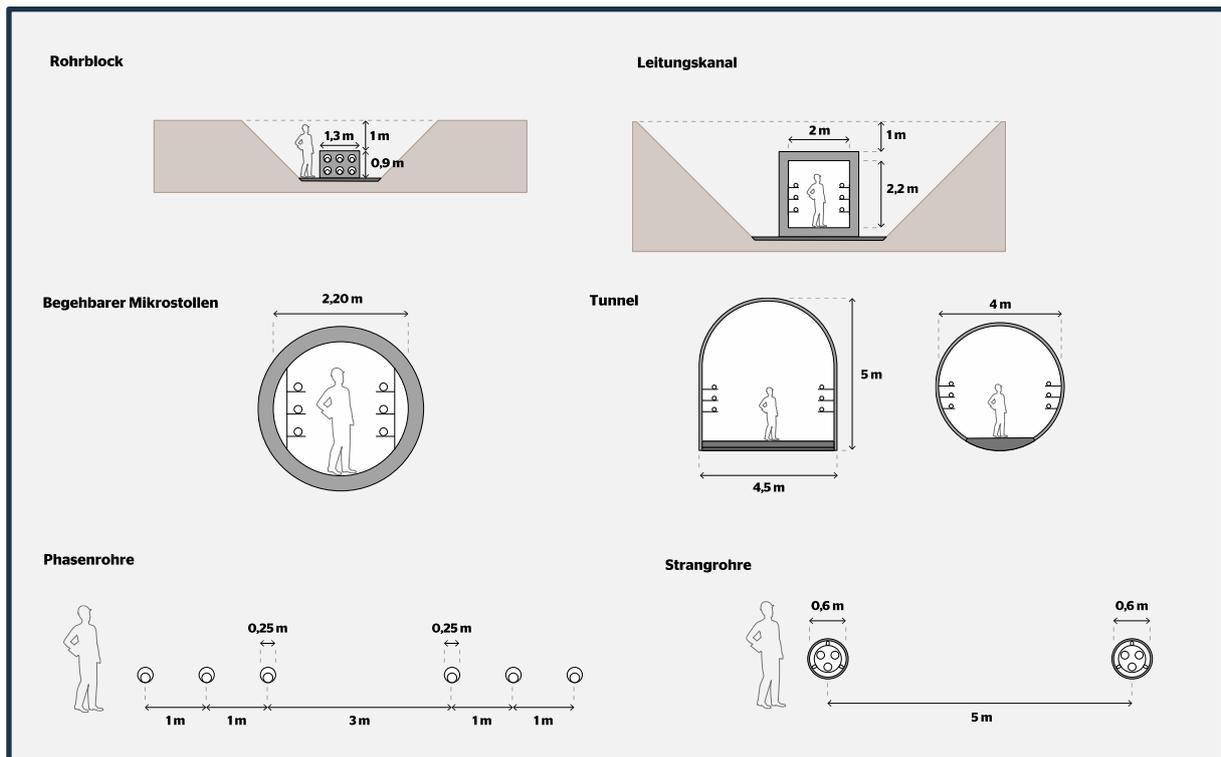
Abbildung 1: Stimmungsbild einer Freileitung im Engadin

#### 3.2 Unterirdische Leitungen

Schweizer Netzbetreiber verwenden für unterirdische Leitungen kunststoffisoliert Kabel (vernetztes Polyethylen, kurz: XLPE), mit Aluminium oder Kupfer als Leitermaterial. Die früher verwendeten ölsolierten Kabel haben bei einer Ölleckage erhebliche negative Auswirkungen auf Boden und Wasser. Deshalb werden sie nicht mehr verbaut.

In der Regel befinden sich die Kabel in Kabelschutzrohren und innerhalb eines schützenden Betonrohrblocks. Für den Bau braucht es dazu einen Graben, der einen direkten Zugang von oben erfordert. Eine alternative Grabenbauweise ist ein Leitungskanal. Er ist begehrbar und erfordert deshalb einen deutlich grösseren Graben. Abbildung 2 zeigt in der obersten Zeile beide Grabenbauweisen.

Weitere Ausführungsarten sind bergmännischer Natur. Das heisst, sie brauchen keinen Zugang von oben auf dem Leitungstrasseee. Damit ist es möglich, Hindernisse zu unterqueren und dabei sind Abschnitte bis zu 1.5 km oder mehr erreichbar. In Abbildung 2 sind die begehbaren Varianten – begehbare Mikrostellten und Tunnel (gesprengt oder gebohrt) sowie die nicht begehbaren Varianten Phasenrohre (ein Phasenkabel pro Rohr) und Strangrohre (ein ganzer Kabelstrang pro Rohr) ebenfalls dargestellt.



**Abbildung 2:** Darstellung von Ausführungsarten für Hochspannungsleitungen mit kunststoffisolierten Kabeln, Quelle: VSE Bulletin, Nr. 9, 2021, Dinser/Biasiutti, Kabelleitungen im Übertragungsnetz, geänderte Anordnung der Varianten

Besonderheiten stellen unterirdische Leitungen dar, die mit einer Eisenbahn (siehe Abbildung 3) oder Strasse (siehe Abbildung 4) gebündelt werden. Hinsichtlich Umweltbilanz schneiden diese beiden Möglichkeiten sehr gut ab, führen sie doch nur zu unwesentlich grösseren Umwelteinflüssen als die Strassen- beziehungsweise Schieneninfrastruktur allein. Zu beachten sind grössere Deponien für das Ausbruchmaterial, wenn ein grösserer Tunnelquerschnitt erforderlich ist.

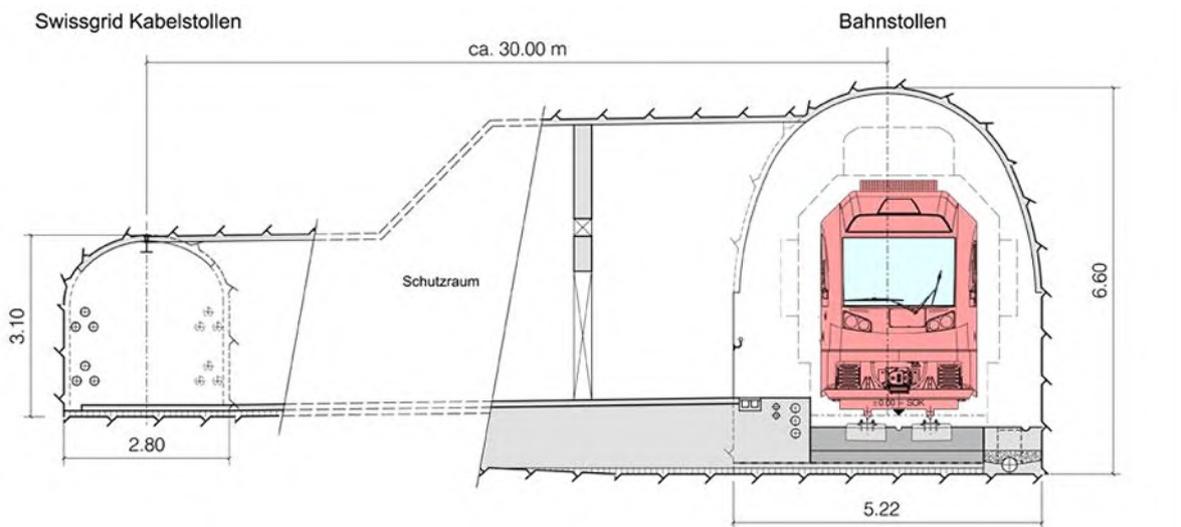


Abbildung 3: Hochspannungsleitung in einem Stollen parallel zu einem Eisenbahntunnel, Quelle: [www.grimseltunnel.ch](http://www.grimseltunnel.ch)

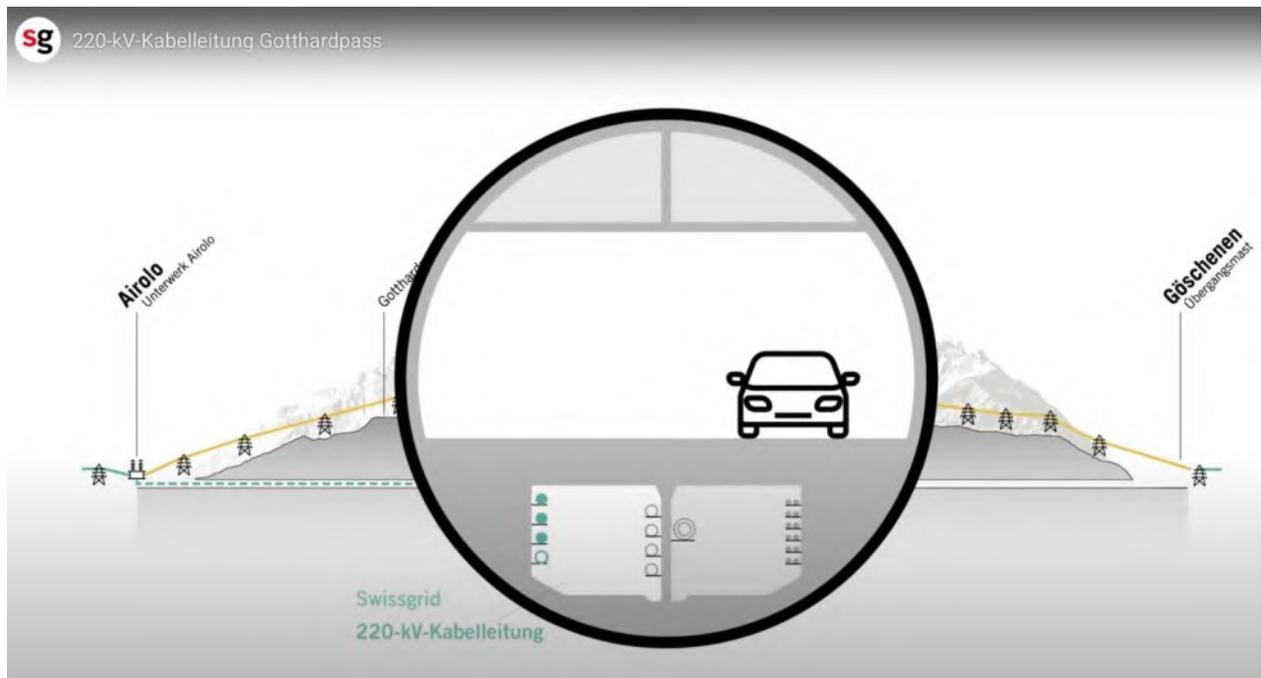


Abbildung 4: Screenshot, Video zur Verkabelung der Gotthardleitung, Quelle: <https://www.swissgrid.ch/de/home/projects/project-overview/gotthard.html>

### 3.3 Luftdruckkabel

Anstelle der kunststoffisolierten Kabel gibt es neu die sogenannten Luftdruckkabel. Diese sind eine Innovation der Schweizer Firma Hivoduct. Eine genauere Beschreibung dieser Technologie findet sich im Tagungsbeitrag von Hivoduct.

Hinsichtlich Umwelteinflüsse ist zu beachten, dass Luftdruckrohre deutlich grösser als die kunststoffisolierten Kabel sind. Damit ist eine grössere Querschnittsfläche bei den Bauverfahren notwendig. Bei einem Vergleich der beiden Technologien braucht es deshalb zwingend die Berücksichtigung des notwendigen Tiefbaus.

Ein grosser Vorteil der Luftdruckkabel sind die geringen Transportverluste. Einerseits sind die ohmschen Verluste gering und andererseits verursacht die Kompensation der Blindleistung deutlich weniger Verluste als bei den kunststoffisolierten Kabeln, da die elektrische Kapazität gering ist.

Beim Recycling der Luftdruckrohre fällt praktisch nur Aluminium an und dieses kann ohne grossen Aufwand von den anderen Materialien getrennt werden.

## 4 Umwelteinflüsse

### 4.1 Übersicht

Stromtransport beeinflusst unsere Umwelt in vielerlei Hinsicht. Abbildung 5 zeigt schematisch, welche Bereiche betroffen sind. Beim Bau von Hochspannungsleitungen gibt es eine Vielzahl von Vorschriften, die zu beachten sind. Diese betreffen hauptsächlich den in der Mitte dargestellten Kreis mit den Themen Biodiversität, Gewässer, Böden, Landschaften und Wälder.

Schutzgebiete von nationaler Bedeutung müssen soweit möglich gemieden werden. Beispiele sind das Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BLN), das Bundesinventar der schützenswerten Ortsbilder der Schweiz (ISOS), die historischen Verkehrswege der Schweiz (IVS) und die Moorlandschaften.

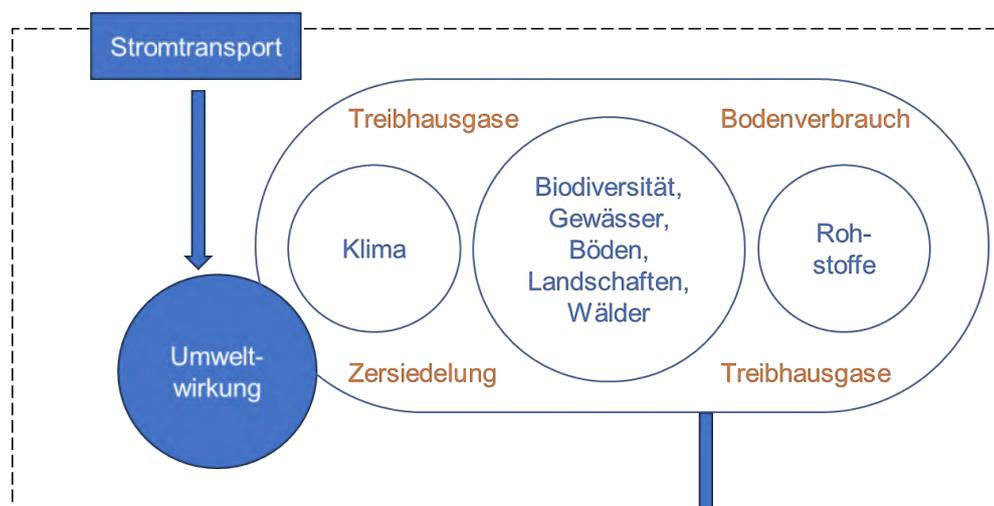


Abbildung 5: Systembetrachtung für die Umweltwirkung des Stromtransports, angelehnt an die BAFU-Darstellung zu den Umweltwirkungen des Wohnens, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/ernaehrung-wohnen-mobilitaet/wohnen/wohnen-auswirkungen.html>

Nur wenn keine besseren Alternativen möglich sind, kann ausnahmsweise ein Schutzgebiet von nationalem Interesse beansprucht werden. Dies ist zulässig, da die Stromversorgung ebenfalls von nationalem Interesse ist.

Weiter zu vermeiden sind unter anderem Waldgebiete, Gewässerraum, Gewässerschutzbereiche, Trockenwiesen und -weiden (TWW) und Mooregebiete. Daneben gibt es Schutzgebiete, die eine Beanspruchung strikt verbieten. Dies sind zum Beispiel Grundwasserschutzzonen der Klassen S1 und S2.

Wie bei allen elektrischen Anlagen sind die elektro-magnetischen Emissionen eine bedeutende Umwelteinwirkung. Die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung regelt die notwendigen Abstände von Hochspannungsleitungen zu den empfindlichen Gebieten. Ausschlaggebend ist primär die Magnetfeldstärke.

Hinsichtlich Emissionen wird hier noch auf den Coronaschall hingewiesen. Dies sind akustische Emissionen, die aufgrund hoher elektrischer Spannung entstehen. Hierzu gibt es ebenfalls einen Beitrag in dieser FKH-Tagung.

Für eine komplette Übersicht zu den Einflüssen auf Raum und Umwelt ist hier auf das Bewertungsschema für Übertragungsleitungen des BFE hingewiesen.

#### 4.2 Umwelteinflüsse durch den Bau

Die Bautätigkeiten für unterirdische Leitungen sind beachtlich. Hier wird zur Veranschaulichung an den zwei Ausführungsarten Mikrotunnel und Horizontalspühlbohrung gezeigt, wie unterschiedlich die Auswirkungen der notwendigen Baumasnahmen sind. Abbildung 6 zeigt die Grösse der Baufläche und die massiven Baumaschinen für einen Mikrotunnel. Und Abbildung 7 zeigt eine kompakte Bohrmaschine für eine Horizontalspühlbohrung mit relativ geringem Platzbedarf.



Abbildung 6: Bauarbeiten für die Startgrube des Mikrotunnels Le Verney - La Batiatz, Quelle: <https://www.swissgrid.ch/de/home/projects/project-overview/nant-de-drance.html>



**Abbildung 7: Bohrmachine und Flüssigkeitsaufbereitungsanlage, Quelle:**  
<https://www.schenkag.com/gesteuerte-horizontale-bohrtechnik/>

Hinsichtlich Umwelteinflüsse schneidet eine Horizontalspühlbohrung deutlich besser ab als ein Mikrotunnel. Denn der Aushub ist wesentlich geringer und in der Betriebsphase wird ein allfällig vorhandener Grundwasserfluss weniger eingeschränkt.

### 4.3 Lebenszyklusbetrachtung

Eine vollständige Analyse der Umwelteinflüsse erfolgt über den gesamten Lebenszyklus. Eingeschlossen sind damit Bau, Betrieb und Rückbau. Dies nennt man Lebenszyklusanalyse und es gibt verschiedene Werkzeuge, die eine solche Analyse vereinfachen.

Eine bewährte Methode ist die Methode der ökologischen Knappheit. Als Messeinheit werden dabei die sogenannten Umweltbelastungspunkte (UBP) verwendet. Eine gute Erklärung dazu findet sich zum Beispiel auf Wikipedia.

Sinn und Zweck dieser Methode ist es, den Grossteil der Umwelteinwirkungen zu berücksichtigen, diese zu bewerten und auf eine einzige skalare Grösse abzubilden. Damit resultiert eine Kennzahl, die auch für Ungeübte verständlich und nutzbar ist.

Für Hochspannungsleitungen ist es entscheidend, welche Materialien für die Leitung verwendet werden. Bei Freileitungen sind dies hauptsächlich Stahl, Beton und Aluminium. Bei den unterirdischen Leitungen ist es hauptsächlich der verbaute Beton sowie die Komponenten der Kabel:

- Kunststoffisolierte Kabel: hauptsächlich Polyethylen, Kupfer oder Aluminium
- Luftdruckkabel: hauptsächlich Aluminium

Bei grösseren Mengen an Aushub oder langen Strecken zu den Deponien können die notwendigen Transportfahrten ins Gewicht fallen.

In der Regel wird angenommen, dass die Lebensdauer einer Freileitung 80 Jahre beträgt. Mit einer solch grossen Zeitspanne ergeben sich aus der Betriebsphase grosse Einflüsse. Der Hauptfaktor der Betriebsphase sind die Transportverluste.

#### 4.4 Ökobilanz der Transportverluste

Hauptfaktoren der Transportverluste sind:

1. Verlustkomponenten: ohmsche Verluste, spannungsabhängige Verluste und die Verluste durch die Kompensation der Blindleistung
2. Durchschnittliche Stromlast
3. Umweltbilanz des eingekauften Stroms zur Deckung der Verluste

Der erste Faktor lässt sich gut berechnen. Für die Faktoren 2 und 3 müssen Annahmen über eine Spannweite von 80 Jahren getroffen werden. Dies ist mit einer grossen Unsicherheit verbunden. Bei der Umweltbilanz des eingekauften Stroms stellt sich die Herausforderung, dass das gesamte europäische Energiesystem sich im Wandel befindet. Die Umweltbilanz des Stroms wird sich deutlich verringern. Unsicher ist noch, wie schnell dies geht.

Es empfiehlt sich deshalb, verschiedene Szenarien für die Bilanzierung der Transportverluste zu berücksichtigen.

Wenn die Ökobilanz der Stromverluste gross ist im Vergleich zur Bilanz des Materialaufwands, so könnte ein grösserer Materialaufwand – also eine Leitung mit grösserer Transportkapazität – zu einer gesamthaft besseren Ökobilanz der Leitung führen.

Solche Überlegungen ermöglichen es, eine Hochspannungsleitung ökologisch und in Bezug zum Lebenszyklus zu optimieren. Dabei darf nicht vergessen werden, dass die Kosten sich auch verändern. Die gleichzeitige Berücksichtigung der Ökobilanz und den Lebenszykluskosten einer Leitung macht es schwierig, ein Optimum zu finden.

### 5 Genehmigungsfähigkeit von Hochspannungsleitungen

Die Verordnung über das Plangenehmigungsverfahren für elektrische Anlagen (VPeA) regelt unter anderem das Plangenehmigungsverfahren für Hochspannungsleitungen.

Für die Leitungen im Übertragungsnetz regelt diese Verordnung, unter welchen Voraussetzungen eine Sachplanung für ein Vorhaben notwendig ist. Die entscheidende Formulierung lautet: «erhebliche Auswirkungen auf Raum und Umwelt». Trifft dies zu, besteht eine Sachplanpflicht. Trifft dies nicht zu, unterliegt das Vorhaben nicht der Sachplanpflicht.

Mit der Durchführung eines Sachplans findet eine umfassende Interessenabwägung statt. Das heisst, dass alle öffentlichen und nicht öffentlichen Interessen berücksichtigt werden und alle Varianten auf diese Interessen hin analysiert werden. Eine Begleitgruppe erarbeitet die beste Variante und unterbreitet sie dem Bundesrat, der sie genehmigt. Damit ist die Standortgebundenheit dieser Variante gegeben.

Für Leitungen, die Auswirkungen auf die Umwelt und die Landschaft haben, diese jedoch nicht als erheblich eingestuft werden, gibt es für den Gesuchsteller keine Pflicht für eine umfassende und gesamthafte Interessenabwägung. Die VPeA schreibt lediglich vor, dass die Auswirkungen auf die Umwelt und die Landschaft anzugeben sind. Wenn eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich ist, ist der entsprechende Bericht beizulegen, wenn nicht, gibt es keine formale Anforderung an die Angaben zu den Auswirkungen auf die Umwelt und die Landschaft.

Das Bundesgericht hat mit seinem Urteil vom 1. Mai 2023 (1C\_567/2020, 1C\_568/2020) entschieden, dass es bei einem umweltrelevanten Grossvorhaben eine Pflicht zur hinreichenden Variantenprüfung gibt. Streitgegenstand war der Ersatzneubau der Kabinenbau von St. Moritz Bad nach Signal. Zwei wesentliche Formulierungen lauten, dass «ernsthaft in Betracht fallende Varianten» näher zu prüfen sind. Und «andere Varianten können bereits aufgrund einer summarischen Prüfung ausgeschieden werden».

Es stellt sich nun die Frage, inwiefern dieser Entscheid Auswirkungen auf die Genehmigung von Hochspannungsleitungen hat. Wenn dieser Grundsatz auch für elektrische Anlagen und somit auch Hochspannungsleitungen gilt, besteht eine Pflicht zur hinreichenden Variantenprüfung bei umweltrelevanten Grossvorhaben.

In diesem Fall braucht es eine Herleitung und summarische Prüfung mehrerer Varianten mit dem Ziel, ernsthaft in Betracht ziehende Varianten zu bestimmen und die verbleibenden Varianten aufgrund einer summarischen Prüfung auszuschneiden. Für erstere muss eine umfassende und gesamthafte Interessenabwägung durchgeführt werden, um eine Variante zu ermitteln, für die eine Plangenehmigung beantragt werden kann.

Es stellen sich folgende Fragen:

- Wie gross sind die Umwelteinwirkungen von einem «umweltrelevanten Grossvorhaben»? Wie kann ermittelt werden, ob ein Vorhaben «umweltrelevant» ist?
- Wie sieht eine summarische Prüfung aus?
- Wie detailliert und umfangreich ist eine umfassende Interessenabwägung?

Zur letzten Frage schreibt das Bundesgericht: «es dürfen nicht einzelne Schutzinteressen isoliert den Nutzungsinteressen gegenübergestellt werden (oder umgekehrt), sondern sämtliche Interessen sind möglichst gleichzeitig zu berücksichtigen, mit dem Ziel, ein gesamthafte sinnvolles Ergebnis zu erzielen.» (BGE 117 Ib 28 E. 2; Urteil 1C\_528/2018 vom 17. Oktober 2019 E. 4.1)

In den nächsten Jahren wird sich zeigen, wie die Behörden Variantenanalysen und umfassende und gesamthafte Interessenabwägungen für die Plangenehmigung einer Hochspannungsleitung verlangen.

Auf jeden Fall ist es hilfreich, wenn die Gesuchsunterlagen mindestens eine summarische Prüfung verschiedener Varianten enthalten.

## 6 Schlussfolgerung

Umwelteinwirkungen von Hochspannungsleitungen sind vielfältig und hängen stark von der gewählten Ausführungsart und Leitungsführung ab. Das Resultat einer Lebenszyklusanalyse zeigt eine grosse Abhängigkeit von den Annahmen zu den Transportverlusten und dem Strommix an, die beide mit einer hohen Unsicherheit verbunden sind.

Klar ist, dass die Umwelteinwirkungen von Hochspannungsleitungen möglichst gering zu halten sind. Und für eine Plangenehmigung ist dies aufzuzeigen.

Das heisst, dass in Vorstudien und Vorprojekten die Varianten auf ihre Umwelteinwirkung zu untersuchen sind. Bei Varianten mit geringen Umwelteinwirkungen, genügt eine summarische Prüfung, bei Varianten mit grösseren Umwelteinwirkungen braucht es eine umfassende und gesamthafte Interessenabwägung.

## ***FKH - Fachtagung***

***21. November 2023***

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Zusammenhang zwischen akustischer Geräuschemission von Hochspannungsfreileitungen und deren Oberflächenbeschaffenheit**

**Dipl.-Ing. Hannah Kirchner**  
High Voltage Laboratory, ETH Zürich

- Seit 2020 Doktorandin bei Professor Franck im High Voltage Laboratory an der ETH Zürich zum Thema Geräuschemissionen von Freileitungen
- 2019 – 2020 Prüflingenieurin in Hochspannungslabor bei Pfiffner Messwandler AG
- 2014 – 2019 Ingenieursstudium im Studiengang «Regenerative Energiesysteme» an der Technischen Universität Dresden, Deutschland



# Zusammenhang zwischen akustischer Geräuschemission von Hochspannungsfreileitungen und deren Oberflächenbeschaffenheit

Hannah Kirchner  
HVL, ETH Zürich

## 1 Einleitung

Hochspannungsfreileitungen sind einer der wichtigsten Bestandteile des Energieversorgungssystems. Anders als bei anderen Komponenten der Energietechnik spielen hier klimafokussierte Umweltaspekte wie GWP, toxische Materialien oder Recycling eine untergeordnete Rolle. Die Umweltaspekte der Hochspannungsfreileitungssysteme beziehen sich eher auf den visuellen und akustischen Beitrag. In diesem Fall soll nur auf den akustischen Umwelteinfluss von Hochspannungsfreileitungen eingegangen werden.

Geräuschemissionen treten bei Freileitungen bei schlechtem Wetter wie Regen oder Nebel auf. Dies erschwert aufgrund von Regularien und der Akzeptanz den Neu- und Umbau von Freileitungssystemen [1, 2]. Bei den Energieversorgern steht daher die Reduktion von Geräuschemission stark im Vordergrund und wird durch viele Untersuchungen in Form von Vergleichsmessungen von unterschiedlichen Leiterseiltypen vorangetrieben [3-5].

Eine mögliche Variante, um die Geräuschemissionen zu verringern ist die Reduktion der elektrischen Feldstärke an der Leiterseiloberfläche. Dafür kann der Leiterseildurchmesser vergrößert werden. Dies führt jedoch zum Teil zu höherem Gewicht und ist somit nicht nutzbar für eine Neubeseilung von bereits vorhanden Masten. Dafür eignen sich vor allem Reduktionsmassnahmen, die die mechanischen Eigenschaften des gesamten Systems nicht verändern. Eine Möglichkeit dafür ist die Oberflächenbehandlung von Leiterseilen.

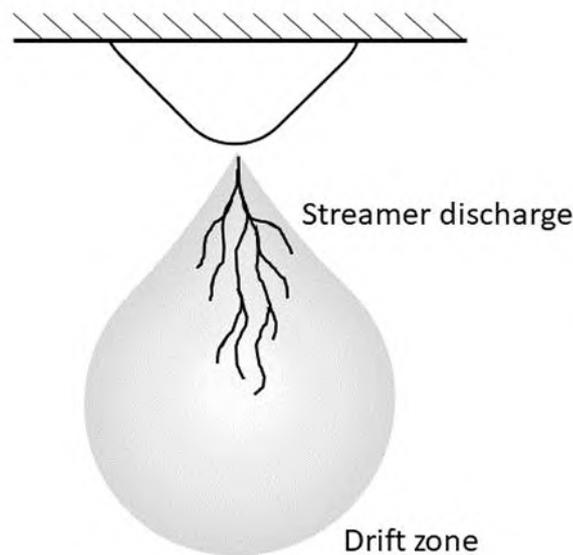
Bisherige Messungen zeigen häufig eine geringere Geräuschemission bei natürlich gealterten Leiterseilen. Diese entwickeln über mehrere Jahre eine stark hydrophile Oberfläche. Mit Oberflächenbehandlungen wird zurzeit versucht diese hydrophilen Oberflächeneigenschaften des gealterten Leiterseils nachzuahmen. Diese Oberflächenbehandlungen sind jedoch teilweise nicht ausreichend für eine zufriedenstellende Geräuschreduktion.

Im Vortrag soll ein Überblick über den Zusammenhang von Oberflächenbeschaffenheit der Leiterseile, das Verhalten von Wasser auf der Oberfläche, den auftretenden Koronaentladungen und davon ausgehenden Geräuschemissionen gegeben werden.

## 2 Geräuschemissionen an Freileitungsseilen

Die Geräuschemissionen von Hochspannungsfreileitungen entstehen aufgrund von Koronaentladungen an Wassertropfen an der Oberfläche des Leiterseils, hervorgerufen durch lokale Feldstärkeerhöhungen (**Abbildung 1**) [6].

Durch das schnelle Aufheizen des Entladungskanals entsteht eine Druckwelle in der umgebenden Luft. Diese Druckwelle nehmen wir als akustischen Impuls wahr. Da viele Tropfen über das gesamte Leiterseil verteilt sind und die Teilentladungen statistisch verteilt an den einzelnen Wassertropfen auftreten, ergibt sich ein breitbandiges Geräusch. Durch die auftretenden Koronaentladungen entsteht eine Raumladung um das Leiterseil. Diese kann aufgrund des sich mit Netzfrequenz ändernden elektrischen Feldes anfangen zu oszillieren und somit durch Reibung von Molekülen wieder Druckwellen in umgebender Luft anregen. Dadurch entsteht zusätzlich eine  $2f$ -Geräuschkomponente ( $f$  = Netzfrequenz). [3]



**Abbildung 1: Koronaentladungen an Wassertropfen [3]**

Die Oberflächeneigenschaften des Leiterseils können die Tropfenform, die mittlere Tropfengröße und die Anzahl der Tropfen auf der Oberfläche beeinflussen. Ziel ist es, die lokalen elektrischen Feldstärkeerhöhungen so gering wie möglich zu halten.

### 3 Oberflächeneigenschaften von Freileitungsseilen

Bisherige Untersuchungen ergeben, dass stark hydrophile Eigenschaften von Freileitungsleiterseilen zu geringeren Geräuschemissionen führen können. Dabei muss jedoch der Grad der Hydrophilie beachtet werden. Die Hydrophilie wird anhand des statischen Kontaktwinkels ermittelt. Der statische Kontaktwinkel ist der Winkel zwischen Wassertropfen und Oberfläche. Hat der Tropfen einen geringeren statischen Kontaktwinkel als  $90^\circ$  dann wird die Oberfläche als hydrophil angenommen (**Abbildung 2**). [7]

Der Kontaktwinkel ändert sich jedoch mit der Zeit. Nach welcher Zeit der statische Kontaktwinkel gemessen werden soll, ist jedoch nicht genau definiert (**Abbildung 3**) [7].

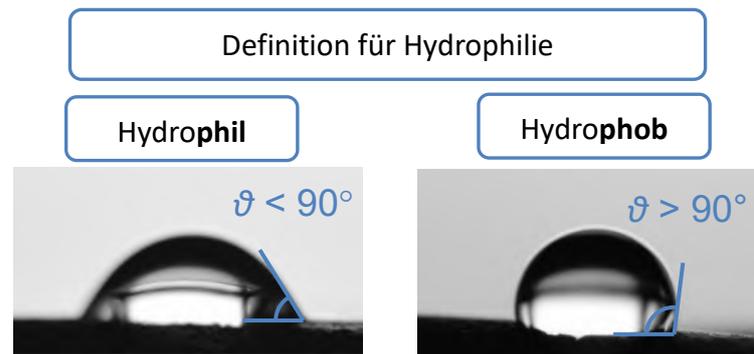


Abbildung 2: Definition der Hydrophilie

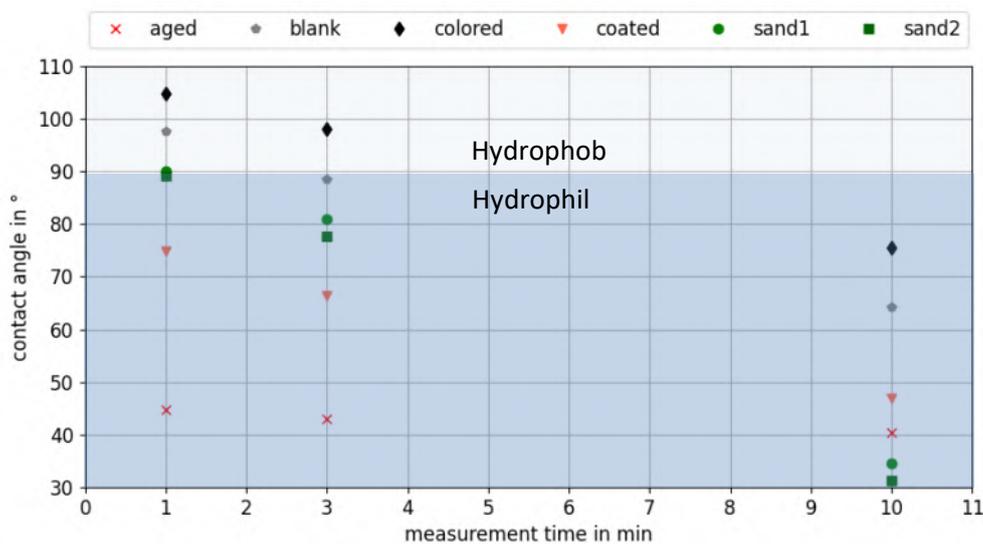


Abbildung 3: Beispielmessungen des statischen Kontaktwinkels für unterschiedliche Oberflächenbehandlungen und unterschiedliche Messzeitpunkte

Mögliche Behandlungsmethoden sind Aufräumen der Oberfläche durch Bestrahlung, Aufbringen von Farbe als hydrophile Schicht oder ein Coating. Letzteres ist jedoch noch keine marktreife Variante, da erhöhte Kosten, das zusätzliche Gewicht und die erschwerte mechanische und elektrische Verbindung zu weiteren Bauteilen ein Problem darstellt.

#### 4 Messung von Koronaaktivität und Geräuschemission

Die Untersuchungen der Koronaaktivität und der Geräuschemission von Freileitungen wird im Hochspannungslabor der ETH Zürich an einem Einzelleitersseil durchgeführt. Genutzt wird ein konventioneller Teilentladungsmesskreis nach IEC 60270 [8]. Der Regen kann mithilfe eines Regensystems zur Verfügung gestellt werden (Abbildung 4).

Die Geräuschemission wird mithilfe zweier Mikrophone mit einem Abstand von 3 m zum Leitersseil gemessen. Für die Koronaaktivität wird ein Omicron MPD 600 genutzt und zur optischen Detektion wird ein Coronascope verwendet und mit einer Kamera mit Langzeitbelichtung aufgenommen.

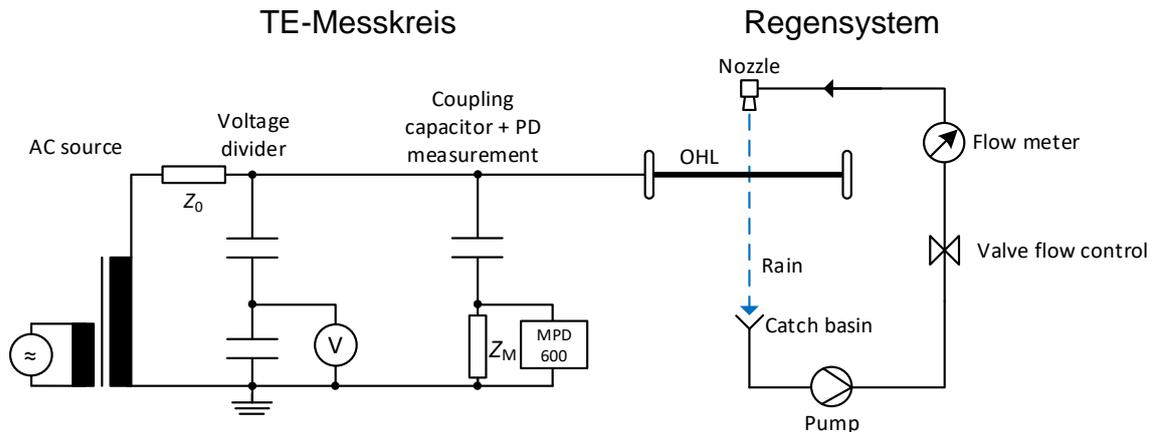


Abbildung 4: Genutzter Messkreis

## 5 Koronaaktivität und Geräuschemissionen von Freileitungen

Auf unterschiedliche Parameter, die einen Einfluss auf die Geräuschemission haben können, wird im Folgenden eingegangen. Dafür werden die exemplarischen Messungen genutzt, die für fünf unterschiedliche Oberflächenbehandlungen durchgeführt wurden (Abbildung 5).

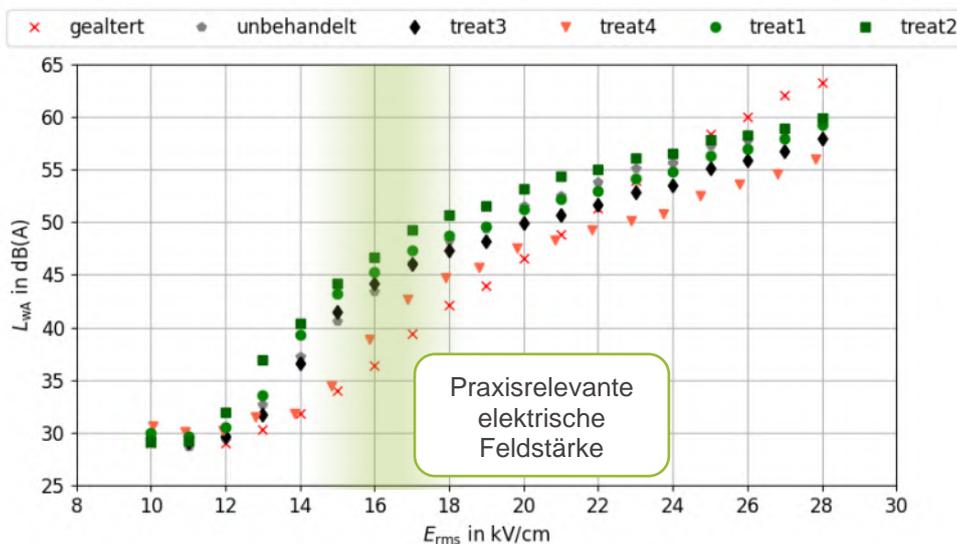
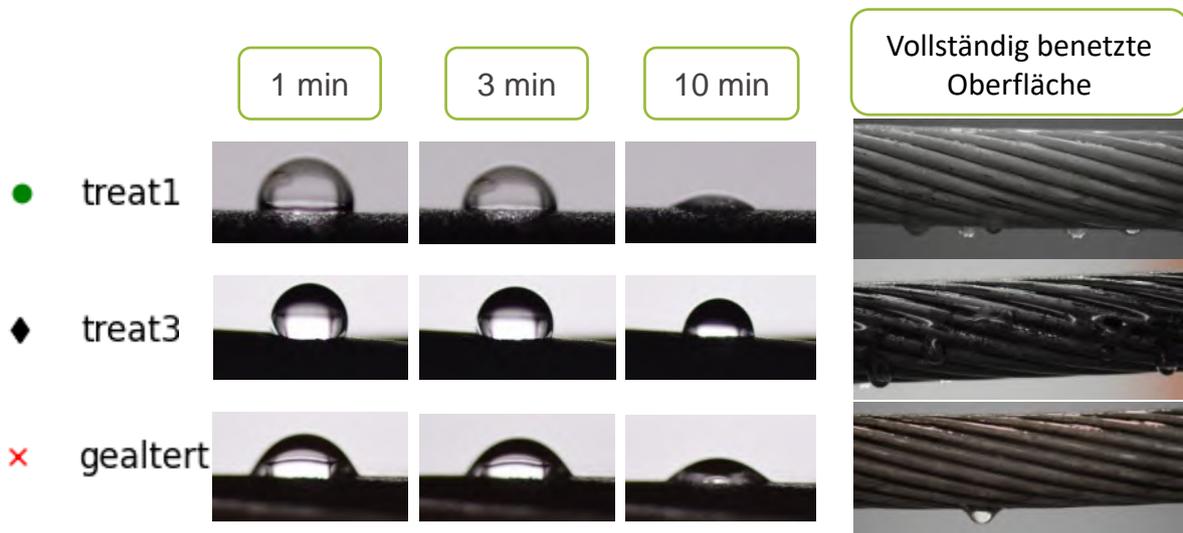


Abbildung 5: Geräuschemission in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke an der Leiterseiloberfläche nach [9]

Die Messungen der Geräuschemissionen werden in einem Feldstärkebereich von 10 – 28 kV/cm durchgeführt. Für die Praxis ist jedoch nur ein relativ kleiner Feldstärkebereich von 15 – 18 kV/cm an der Leiterseiloberfläche relevant. Der grössere Messbereich ermöglicht die Untersuchung der Vorgänge an der Leiterseiloberfläche, die sich bei hohen Feldstärken stark von geringen und mittleren Feldstärken unterscheidet und führt so zu einem besseren Gesamtverständnis der Koronaaktivität an Leiterseilen. Auf der Y-Achse werden die A-gewichteten Schallemissionen der Leiterseile dargestellt. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass mit steigender elektrischer Feldstärke die Geräuschemissionen aller Leiterseile ansteigen. Dabei ergibt sich eine maximale Differenz in der

Geräuschemission von mehr als 10 dB(A). Die geringste Geräuschemission hat, wie bereits in vorherigen Untersuchungen bestätigt, das natürlich gealterte Leiterseil. Zusätzlich zeigt sich, dass einige Oberflächenbehandlungen kaum Einfluss haben („treat3“ im Vergleich zu „unbehandelt“) und teilweise nicht zu einer Reduzierung der Geräuschemissionen führen, sondern diese sogar verstärken („treat1“ und „treat2“). Im Folgenden wird versucht diese Unterschiede in Korrelation zur Oberflächenbenetzbarkeit zu erklären.

In **Abbildung 6** werden für drei Beispielleiter die statischen Kontaktwinkel nach bestimmter Messdauer (aus **Abbildung 3**) und die vollständig benetzte Oberfläche dargestellt. Vergleicht man den Kontaktwinkel der Leiterseile „treat1“ und „treat3“ ist zu erkennen, dass der statische Kontaktwinkel des Leiterseils „treat1“ kleiner ist als der des Leiterseils „treat3“. In der Messung der Geräuschemission hat das Leiterseil „treat3“ eine wesentlich geringere Geräuschemission als das Leiterseil „treat1“. Hier zeigt sich also, dass keine direkte Korrelation zwischen statischem Kontaktwinkel (Grad der Hydrophilie) und der Geräuschemission besteht.



**Abbildung 6: Vergleich von statischem Kontaktwinkel und vollständig benetzter Oberfläche für unterschiedliche Leiterseiloberflächen**

Im nächsten Schritt soll das Verhalten der Wassertropfen auf dem vollständig benetzten Leiterseil (**Abbildung 6** auf der rechten Seite) mit der Geräuschemission verglichen werden. Auf dem Leiterseil „treat1“ treten sehr viele kleine Wassertropfen auf. Auf dem Leiterseil „treat3“ sind es wesentlich weniger, jedoch sammelt sich viel Wasser an den Seiten des Leiterseils. Das gealterte Leiterseil weist nur sehr wenige, allerdings dafür sehr grosse Wassertropfen auf. Es bildet sich ein vollständig geschlossener Wasserfilm auf der Oberfläche. Hier zeigt sich ein erster Zusammenhang zwischen der Anzahl an Wassertropfen an der Oberfläche und der Geräuschemission. Dieser soll folgend genauer untersucht werden.

Die Anzahl an Tropfen, die sich aufgrund der Benetzbarkeit der Oberflächen ausbilden hat einen Einfluss auf die Anzahl an möglichen koronierenden Tropfen sobald eine elektrische Feldstärke angelegt wird. Dies zeigt **Abbildung 7**.

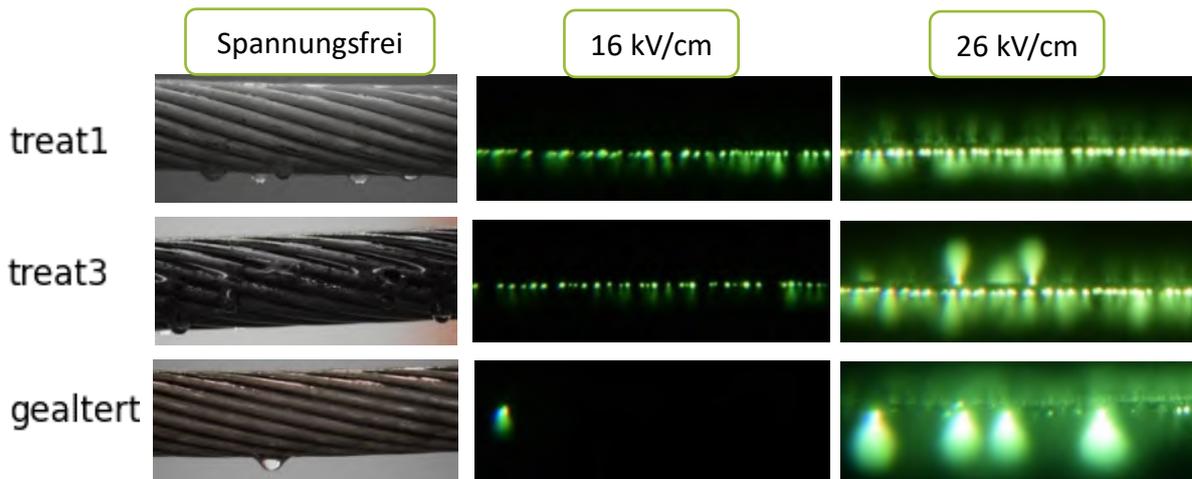


Abbildung 7: Koronierende Tropfen an Leiterseiloberfläche im Vergleich zur Oberflächenbenetzbarkeit

Auffällig sind die wenigen, jedoch sehr starken Entladungen am gealterten Leiterseil für hohe elektrische Feldstärken. Die Koronaentladungen bilden einen sehr viel helleren und grösseren Entladungsbereich für einen einzelnen Tropfen als die anderen Leiterseile.

Im folgenden Diagramm (Abbildung 8) ist der Zusammenhang der Geräuschemission und der Anzahl an koronierenden Tropfen dargestellt. Der untersuchte Bereich ist auf < 50 dB(A) begrenzt, da die koronierenden Wassertropfen mithilfe einer Langzeitbelichtung aufgenommen werden. So ist die Anzahl bei geringen elektrischen Feldstärken gut erkennbar, sorgt jedoch bei höheren elektrischen Feldstärken für einen Sättigungseffekt aufgrund der Überbelichtung, der zu einem messtechnisch verursachten Grenzwert führt. Die Untersuchung der koronierenden Wassertropfen ist somit für die gleichen Kameraeinstellungen jeweils nur für einen bestimmten Feldstärkebereich nutzbar (in diesem Fall 10 – 17 kV/cm).

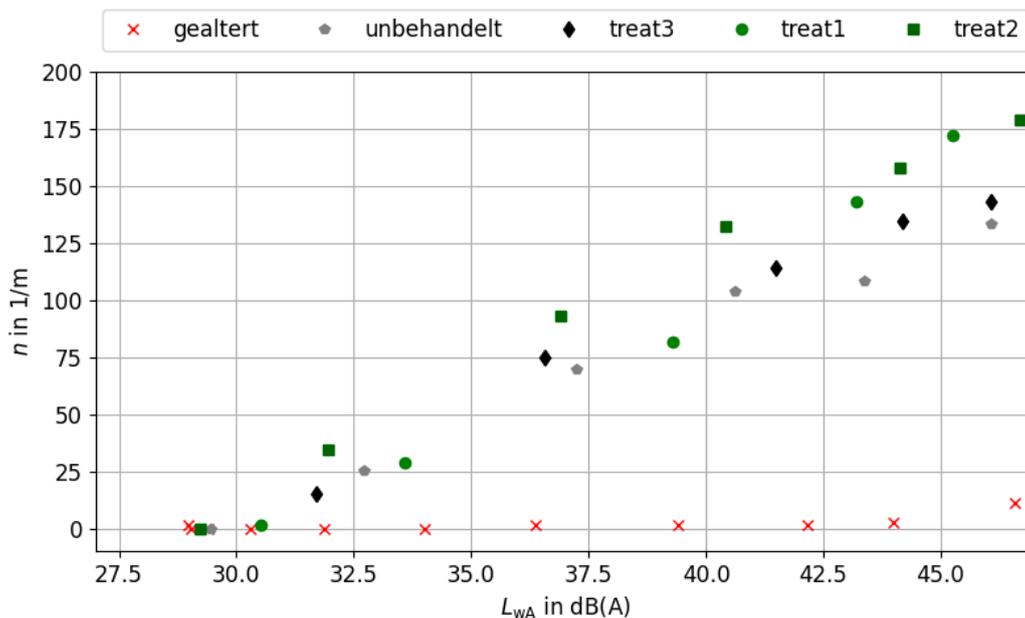


Abbildung 8: Zusammenhang von Anzahl an koronierenden Tropfen und Geräuschemission

Es zeigt sich ein linearer Zusammenhang. Dabei fällt jedoch das Verhalten des gealterten Leiterseils auf, da die Anzahl von koronierenden Tropfen für die gleiche Geräuschemission wesentlich geringer ausfällt als für die anderen Leiterseile. Das lässt vermuten, dass hier das Entladungsverhalten an den Einzeltropfen deutlich anders ist als bei den anderen Leiterseilen (siehe Vergleich von Entladungsverhalten bei 26 kV/cm in **Abbildung 7**). Die elektrische Feldstärke bei der für das gealterte Leiterseil die gleiche Geräuschemission auftritt ist jedoch um einiges höher als für die anderen Leiterseile.

## 6 Schlussfolgerung

Es kann keine direkte Korrelation zwischen dem statischen Kontaktwinkel (Grad der Hydrophilie) und der Geräuschemission festgestellt werden. Daher ist die Messung des statischen Kontaktwinkels kein guter Indikator für ein geräuscharmes Leiterseil.

Die Benetzbarkeit des vollständigen Leiterseils zeigt sehr gut, wie sich das Wasser auf der Leiterseiloberfläche verhält und gibt erste Anhaltspunkte auf das Geräuschverhalten des Leiterseils. Das Leiterseil emittiert weniger Geräusche, wenn sich möglichst wenig Tropfen auf der Leiterseiloberfläche sammeln. Dies kann vor allem erreicht werden, wenn sich ein vollständiger Wasserfilm auf der Oberfläche bildet und somit wenige einzelne Abtropfpunkte entstehen. Die Grösse der Wassertropfen spielt im Vergleich zur Anzahl der Wassertropfen keine messbare Rolle.

Die Benetzbarkeit des Leiterseils hat einen direkten Einfluss auf die Anzahl an Tropfen auf der Oberfläche und somit auch auf die spätere Anzahl an koronierenden Tropfen. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl an koronierenden Tropfen und des resultierenden Geräuschs ist linear. Das gleiche Geräusch kann jedoch sowohl mit grosser und kleiner Anzahl an koronierenden Tropfen verursacht werden. Allerdings kann dann durch die unterschiedliche elektrische Feldstärke von sehr viel stärkeren und häufigeren Entladungen pro Tropfen ausgegangen werden.

Für die zukünftige Entwicklung von geräuscharmen Leiterseilen darf nicht nur die Hydrophilie zur Reduzierung von Geräuschemissionen beachtet werden. Die Reduktion ergibt sich nur, wenn eine Oberfläche stark hydrophil ist und einen vollständigen Wasserfilm und keine Einzeltropfen auf der Oberfläche ausbildet. Ist die Oberfläche nur hydrophiler als unbehandelt (es bilden sich aber dennoch Einzeltropfen aus) so kann dies sogar zur Erhöhung der Geräuschemissionen führen. In dem relevanten elektrischen Feldstärkebereich ist zudem die Geräuschemission von der Anzahl der Tropfen linear abhängig und nicht vom Entladungsverhalten selbst. Es ist somit sinnvoll eine Oberfläche zu entwickeln, die so wenig Tropfen wie möglich aufweist.

## 7 Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Deutschland, «TA Lärm – Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetzes», GMBI 1998 Nr 26, S 503, [https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund\\_26081998\\_IG19980826.htm](https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26081998_IG19980826.htm).
- [2] BAFU, «Lärmschutz-Verordnung», 15.12.1986 (Stand Juli 2021), [https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1987/338\\_338\\_338/de#art\\_10](https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1987/338_338_338/de#art_10).
- [3] U. Straumann, «Berechnung und Reduktion der tonalen Geräuschemission von Hochspannungsfreileitungen», Doctoral Thesis No. 17408, ETH Zürich 2007.

- [4] O. Pischler, «Zum Geräuschemissionsverhalten von Leiterbündeln bei Wechselspannungsbeanspruchung in Drehstrom- und Hybridfreileitungen», Doctoral Thesis, TU Graz 2020
- [5] D. Bötsch et al., «Beurteilung witterungsbedingter Koronageräusche von Höchstspannungsfreileitungen im Zusammenhang mit der Änderung des EnWG 2022», Lärmbekämpfung 18 Nr 5, 2023.
- [6] G. Taylor, «Disintegration of water drops in an electric field», Proc. R. Soc. London, Ser. A, Mathematical Phys. Sci., vol. 280, no. 1382, pp. 383–397, 1964.
- [7] K. Y. Law, «Definitions for hydrophilicity, hydrophobicity, and super-hydrophobicity: Getting the basics right», Journal of Physical Chemistry Letters, 5, 2014.
- [8] IEC 60270:2000, «High-voltage test techniques – Partial discharge measurements», 2000.
- [9] H. Kirchner, C. M. Franck, «B2 PS3 11145 correlation of the surface wettability and the audible noise emission of overhead line conductors», 2022.

## ***FKH - Fachtagung***

*21. November 2023*

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Auswirkungen umweltfreundlicherer Technologien auf Netzvorgänge**

**M. Eng., Dipl.-Ing. (FH) Gunnar Andrae**  
Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH

### **Funktion und beruflicher Werdegang**

Herr Andrae hat Elektrotechnik/Energietechnik mit Schwerpunkt Hochspannungstechnik an der Berliner Hochschule für Technik studiert und hält zudem einen Master im Fachgebiet Computational-Engineering. Er war von 2009 bis 2018 bei der ABB Schweiz AG als Entwicklungsingenieur im Bereich der experimentellen Schaltkammerentwicklung für Hochspannungsleistungsschalter tätig. Im Jahr 2018 wechselte Herr Andrae in das Forschungszentrum für Energietechnik der Hyundai Electric Switzerland, wobei der Schwerpunkt auf der Entwicklung von Hochspannungsschaltgeräten unter Einsatz von SF6-alternativem Lösch- bzw. Isoliergas lag.

Seit 2021 arbeitet Herr Andrae bei der Fachkommission für Hochspannungsfragen im Bereich Studien, numerische Simulation transienter Netzvorgänge und Transienten-Messungen.

Er ist Mitglied in drei aktiven Arbeitsgruppen der International Electrotechnical Commission (IEC), welche sich mit direkten und synthetischen Prüfverfahren von Hochspannungsleistungsschaltern und gasisolierten Schaltanlagen beschäftigen. Zudem war er aktives Mitglied einer CIGRE Arbeitsgruppe (A3.35) zum Thema „Controlled switching“. Auf nationaler Ebene ist er im Schweizer Nationalkomitee für Hochspannungsschaltanlagen (TC 17AC) tätig.



# Auswirkungen umweltfreundlicherer Technologien auf Netzvorgänge

Gunnar Andrae

Fachkommission für Hochspannungsfragen FKH

## 1 Kurzfassung

Neben der Energieerzeugung aus umweltfreundlichen Quellen spielt mit Blick auf Umweltaspekte auch die Nachhaltigkeit von Hochspannungsbetriebsmitteln für die Übertragung dieser Energie eine wichtige Rolle. In Neubau- bzw. Umbauprojekten unserer elektrischen Netzinfrastruktur stehen somit Umweltfaktoren bei der Auswahl einer Technologie zunehmend im Fokus.

Auf der Verbraucherseite befeuert der Drang zu mehr Energieeffizienz zunehmend den Einsatz von Betriebsmitteln, die über Leistungselektronik mit nicht-linearer Strom-Spannungskennlinie an die Übertragungs- und Verteilnetze angeschlossen werden. Auf der Quellenseite sorgt der Einsatz erneuerbarer Energien aus Windkraft- und PV-Anlagen, die ihre Leistung über Wechselrichter einspeisen, für einen enormen Zuwachs an möglichen Oberschwingungsquellen im europäischen Verbundnetz. Folgen können zunehmende Funktionsstörungen bzw. Geräteausfälle sein, welche zu erheblichem volkswirtschaftlichen Schaden führen können.

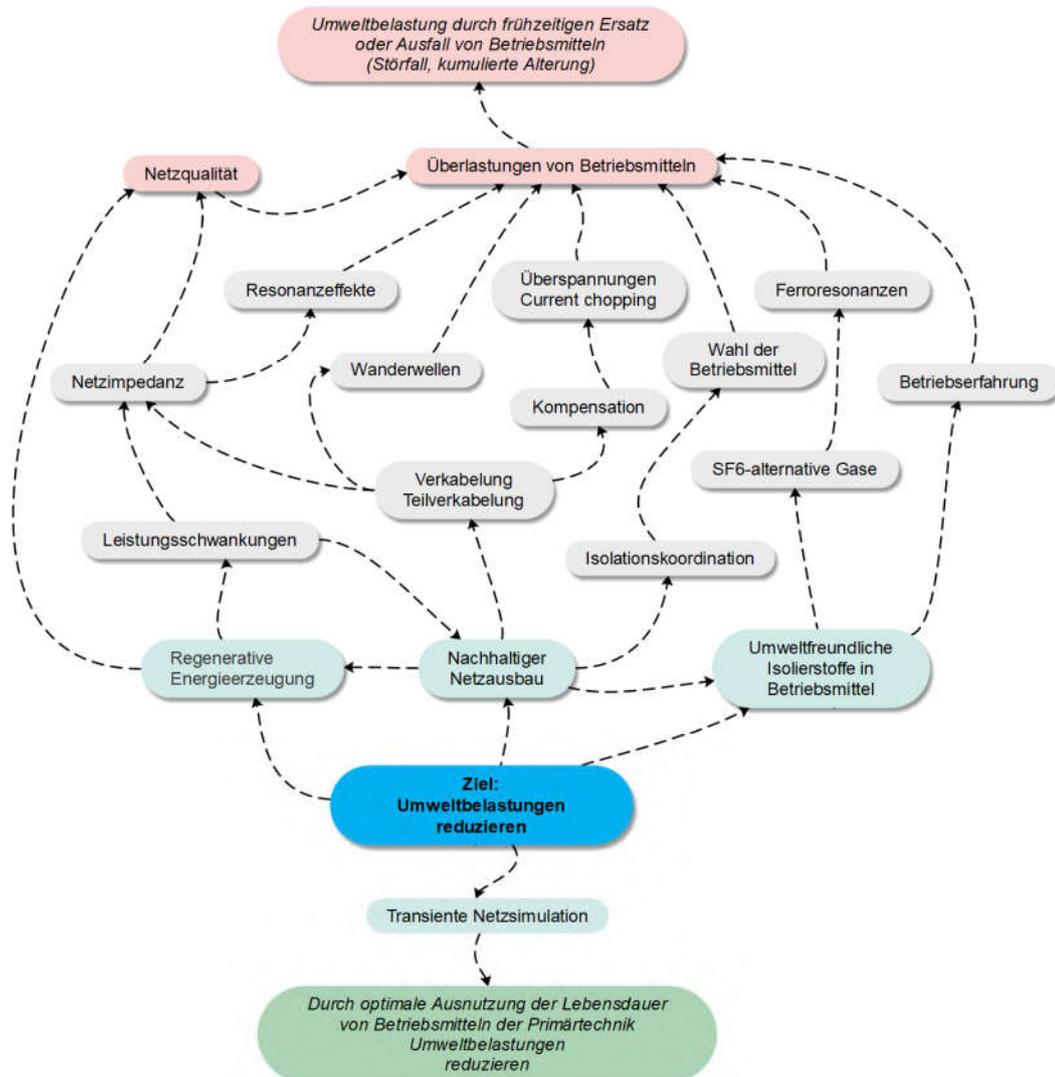
Durch statische Frequenzumrichter zur Netzkopplung oder Blindleistungskompensation, sowie den Rückbau von netzstabilisierender rotierender Masse in Form konventioneller Kraftwerke und den damit verbundenen Zubau von Kompensationsanlagen, dezentralen Erzeugern sowie zusätzlichen Leistungs- und Kabelstrecken verändert sich die Struktur und das Verhalten des Übertragungsnetzes. Dieser Umbau kann lokal z.B. zur Verschiebung der Resonanzstellen der frequenzabhängigen Netzimpedanz führen und Auswirkungen auf eine Vielzahl von quasi-statischen und transienten Netzvorgängen oder die Spannungsqualität haben.

Die Komplexität des Netzes führt bezüglich der Berechnung und Bewertung von möglichen Szenarien im Betriebs- oder Fehlerfall in der Planung von Aus- oder Umbauprojekten zu neuen herausfordernden Problemstellungen. Fragen zur Isolationskoordination und zu Netzurückwirkungen sind dabei bezüglich der Lebensdauer der eingesetzten Betriebsmittel projektspezifisch jeweils neu zu beurteilen und es sind Rückschlüsse auf den Betrieb des Netzes zu ziehen.

Abbildung 1 skizziert mögliche Abhängigkeiten zwischen Betriebsmitteln, dezentraler erneuerbarer Energieerzeugung sowie des Netzausbaus und deren Auswirkungen auf Netzvorgänge, welche Betriebsmittel wiederholt überlasten können und damit negative Auswirkungen auf deren Lebensdauer haben. Die Grafik stellt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und soll der Illustration der Komplexität eines umweltfreundlichen Netzausbaus dienen.

Der folgende Beitrag basiert auf Erkenntnissen verschiedener Netzstudien der FKH, welche sich mit den Auswirkungen einer veränderten Netzstruktur, aufgrund von dezentraler erneuerbarer Energieerzeugung und deren Übertragung befassen. Es wird sich mit der

Frage auseinandergesetzt, inwiefern Umweltaspekte Auswirkungen auf transiente Netzvorgänge oder den Netzbetrieb haben und ob durch transiente Netzsimulationen die Lebensdauer von Hochspannungs-Betriebsmitteln positiv beeinflusst werden kann.



**Abbildung 1** Zusammenhang zwischen möglichen lebensdauerverkürzenden Belastungen von Betriebsmitteln und dem Umweltbeitrag von transienter Netzsimulation

Dabei wird die Analyse eines Fehlerszenarios an einem konkreten Projekt auf Basis numerischer Netzsimulation vorgestellt. Das gewählte Beispiel soll den Netzplaner sensibilisieren in der Planungsphase von Ausbau- oder Umbauprojekten potenzielle Netzvorgänge zu identifizieren, zu beurteilen und gegebenenfalls in der Spezifikation von Betriebsmitteln oder des Betriebs des Netzes zu berücksichtigen.

Aufgrund solcher Studien kann das modifizierte Netz für alle Situationen ausgelegt und kontrolliert betrieben werden. Die Lebensdauer elektrischer Anlagen und Betriebsmittel kann nachhaltig verlängert und Havarien sowie Ausfallzeiten und die daraus resultierende Aufwände an grauer Energie minimiert werden. In diesem Sinne sind Umweltaspekte indirekt ein Treiber, Netzsimulationen vermehrt und gezielt einzusetzen und deren Modelle stetig weiterzuentwickeln.

## 2 Beispiel einer Studie zur Auswirkung der Verkabelung einer regenerativen Kraftwerkseinspeisung auf Netzvorgänge

### 2.1 Grundsätzliche Zusammenhänge

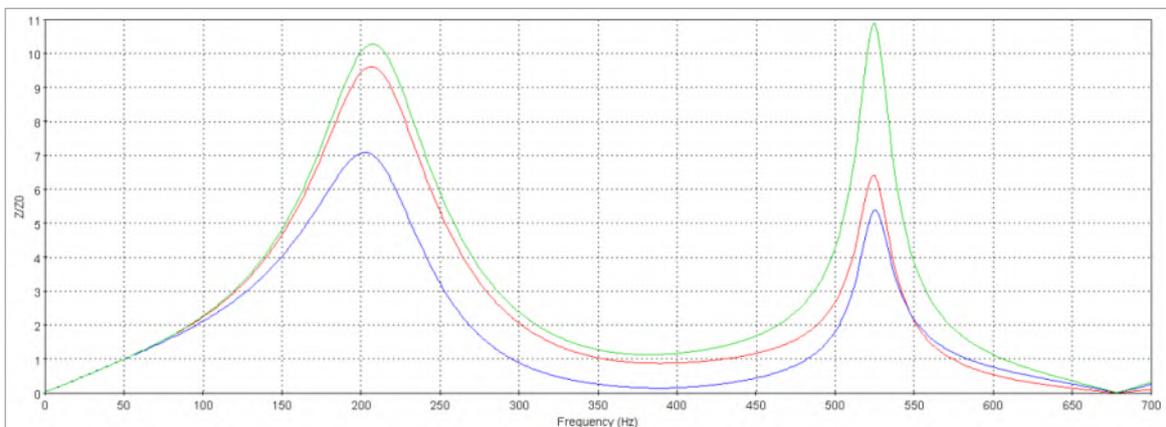
Die Einspeisung oft stark schwankender regenerativen Energie ist auch mit variierenden Kurzschlussleistungen verbunden. Dies kann lokal und global zu veränderten transienten elektromagnetischen Ausgleichsvorgängen wie z.B. beim Schalten von Leistungstransformatoren, Freileitungen/Kabeln oder Kompensationsdrosseln führen. Ein Grund dafür kann eine lokal veränderte frequenzabhängige Netzimpedanz sein, welche in ungünstigen Netzkonstellationen zu Resonanzvorgängen neigt.

Insbesondere in ausgedehnten Kabelnetzen aber auch durch Teilverkabelung kommt es lokal zu einer Verschiebung der Resonanzstellen der Netzimpedanz zu niedrigeren Frequenzen. Die Induktivitäten der Transformatoren bilden dabei mit den Kabelkapazitäten Schwingkreise, welche zu ausgeprägten Resonanzschwingungen angeregt werden können.

Resonanzfrequenz und Gütefaktor betroffener schwingfähiger Netzkonfigurationen sind dabei im starken Maße vom Aufbau des Netzes, dessen aktuellen Schaltzustands, von Typ und Betriebspunkt der angeschlossenen Verbraucher sowie von der Netzauslastung abhängig. Allgemein gelten in MS- und HS-Netzen folgende qualitative Zusammenhänge:

- Die Frequenz der ersten Parallelresonanzstelle in Freileitungsnetzen liegt bei vergleichbarer Netzgröße höher als jene in Kabelnetzen.
- Die Frequenz der ersten Parallelresonanzstelle nimmt mit zunehmender Netzgröße bei vergleichbarem Netzaufbau ab.
- Eine hohe Netzauslastung wirkt dämpfend auf die Überhöhung von Resonanzen.
- Schwachlastzeiten stellen im Sinne von Resonanzerscheinungen in der Regel den ungünstigsten Fall dar.

Die zuverlässige Bestimmung der Resonanzstellen ist komplex und praktisch nur durch detaillierte Netzstudien mit umfangreichen Simulationen möglich. Die Ergebnisse hängen außerdem in hohem Maße von der Verfügbarkeit und Qualität der Eingangsdaten sowie den verwendeten Modellen für die Netzelemente und Anlagen der Verbraucher ab. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für den Frequenzgang der Netz-Mitimpedanz an benachbarten Netzknoten in der Netzebene 2.



**Abbildung 2** Beispiel für den Frequenzgang der Netz-Mitimpedanz an benachbarten Netzknoten eines Netzabschnittes in der Schweiz [11]

## 2.2 Ausgangssituation, Problemstellung

In einer von der FKH durchgeführten Netzstudie wurde ein Störfall untersucht, bei dem es in der Netzebene 1 zu temporären Überspannungen kam, welche mehrere Überspannungsableiter an Transformatoren thermisch zerstörte. Dabei wurde eine umfangreiche Simulation mit dem Programm EMTP<sup>1</sup> durchgeführt und auf Grundlage von Messdaten validiert.

Auf dieser Basis wurden verschiedene Störungsszenarien evaluiert und Maßnahmen für den Netzbetrieb abgeleitet, welche eine erneute Schädigung von Betriebsmitteln verhindern. Abbildung 3 zeigt den untersuchten Netzabschnitt der Netzebene 1 bis 3 wobei die Modellierung von Transformatoren und Leitungen/Kabeln für die Nachbildung der Überspannung ausschlaggebend waren.

In diesem konkreten Fall befanden sich sechs Blocktransformatoren gleicher Bauart an einer Sammelschiene, um die Generatoren eines Wasserkraftwerks mit dem Hochspannungsnetz zu verbinden. Zum Zeitpunkt der Netzstörung wurde einer der sechs Transformatoren zugeschaltet, während bereits drei Transformatoren im Leerlauf auf der Hochspannungsseite mit dem Netz verbunden waren.

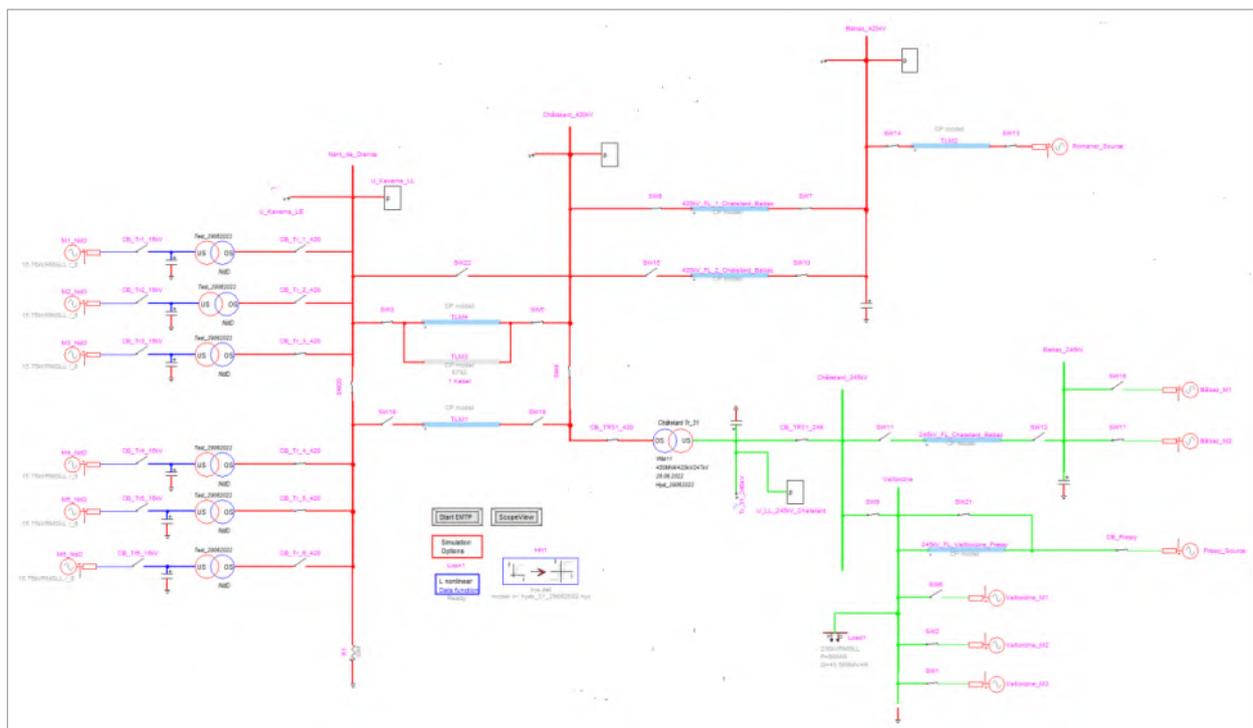


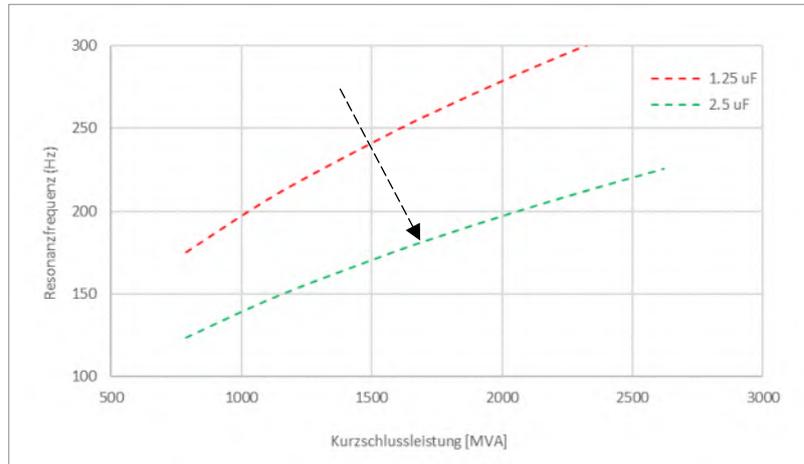
Abbildung 3 Modell des betrachteten Netzteils im Programm EMTP [10]

Bei diesem Anschluss regenerativer Kraftwerksleistung wurde die Energie teilweise über Hochspannungskabel übertragen. Aus Gründen der Redundanz wurden diese Kabel mehrfach parallel verlegt und können somit in unterschiedlichen Konfigurationen betrieben werden. Die somit durch Einzel- oder Parallelbetrieb in das Netz eingebrachte Kapazität von  $1.25 \mu\text{F}$  pro Kabel gegen Erde, verschiebt die lokale Resonanzstelle der Netzimpedanz zu tieferen Frequenzen. Abbildung 4 verdeutlicht den grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenz, äquivalenter Kurzschlussinduktivität und

<sup>1</sup> EMTP - Electromagnetic Transients Program

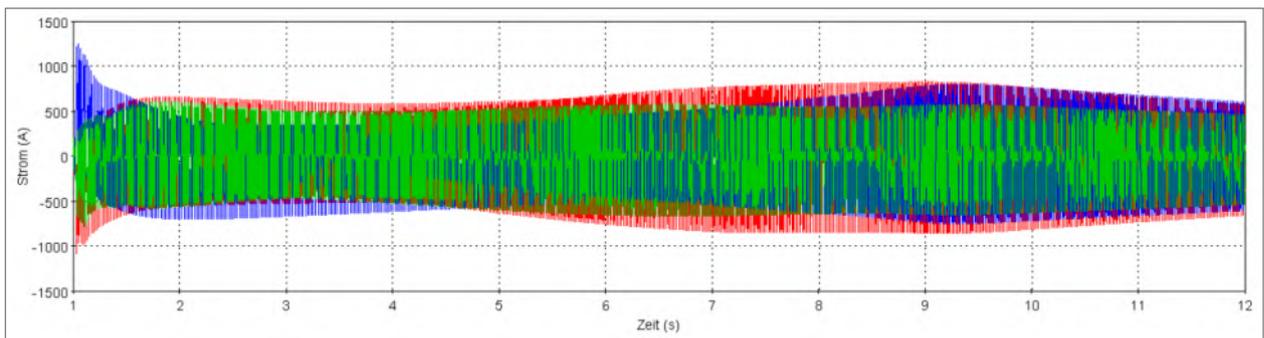
Kabelkapazität an diesem Netzknoten über die vereinfachte Beziehung  $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$  auf Basis eines idealen Parallelschwingkreises.

Es ist gut zu erkennen, dass die Frequenz der Resonanzstelle in dieser Konstellation durchaus im Bereich der 3-7 Harmonischen liegen kann.

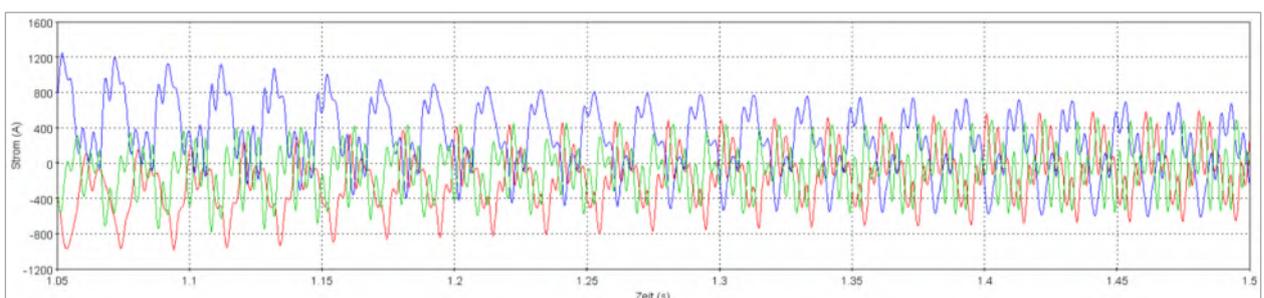


**Abbildung 4** Resonanzfrequenz in Funktion der Kurzschlussleistung bei verschiedenen Kapazitäten [10]

Wird ein Transformator Kern bei der Zuschaltung in die Sättigung getrieben, entstehen hohe, schwach gedämpfte Einschaltströme (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6), welche nebst einem hohen DC-Anteil nicht zu vernachlässigende harmonische Oberwellenanteile der zweiten bis fünften Harmonischen aufweisen. Das Oberwellenspektrum der auftretenden Einschaltströme ist dabei maßgeblich von der Magnetisierungskennlinie des bzw. der involvierten Transformatoren abhängig. Die Ausprägung der Amplitude wird dabei vom Remanenz-Zustand des Eisenkerns und dem Zuschaltmoment bestimmt.



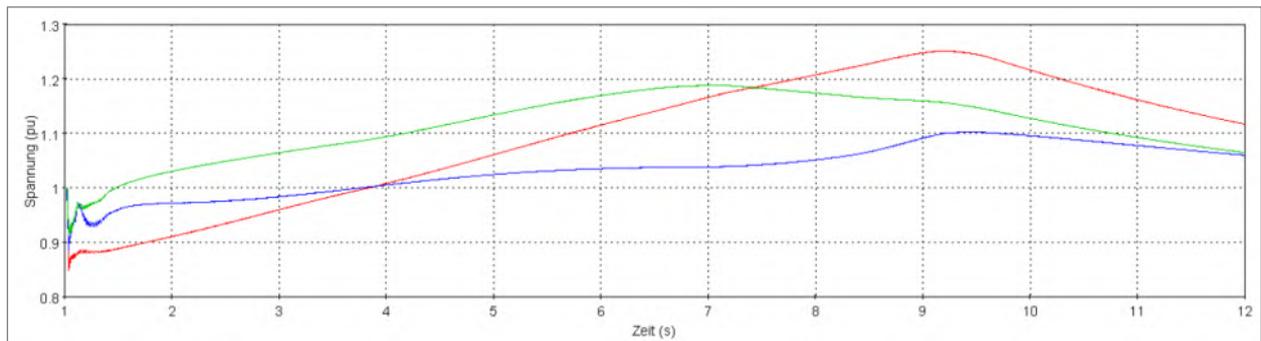
**Abbildung 5** Einschaltströme auf der Sammelschiene bei zuschalten des Maschinentransformators [10]



**Abbildung 6** Angangs-Einschaltstrom auf der Sammelschiene [10]

Sind dabei die Amplituden der harmonischen Stromanteile groß genug und kommt deren Frequenz einer Resonanzstelle des Netzes nahe, kann eine quasi-stationäre Schwingkreis- anregung durch die Oberellenanteile des Einschaltstroms auftreten. Die resultierenden Oszillationen sind der netzfrequenten Spannung überlagert und können zu temporären Überspannungen bis zu 2 pu führen. Das Maximum der Überspannung tritt nicht sofort nach dem Einschalten auf, da die Überspannung zuerst langsam ansteigt und anschließend gemeinsam mit dem Einschaltstrom abklingt.

Folglich handelt es sich um einen langanhaltenden Effekt, der typischerweise einige hundert Netzperioden andauert. Abbildung 7 zeigt der Verlauf des Effektivwertes der verketteten Spannungen aller drei Phasen an der Sammelschiene des zuschaltenden Transformators.



**Abbildung 7** Beispiel für einen RMS-Spannungsverlauf der verketteten Spannungen im betroffenen Unterwerk für einen möglichen Fall aus anregendem Einschaltstrom und Resonanzstelle des Netzes - ungünstigster Zuschaltmoment [10]

Auf der Hochspannungsebene sind von solchen Phänomenen Systeme mit kleiner Kurzschlussleistung und schwacher Dämpfung betroffen. Ferner tritt dies vorwiegend bei Unterwerken mit Kabelsystemen, sehr langen Leitungen oder mit Elementen zur Blindleistungskompensation aufgrund ihrer relativ großen Kapazität auf.

Aus der Literatur [13] ist bekannt, dass Einschaltströme von Transformatoren in Netzen kleiner Kurzschlussleistung bereits parallel angeschlossene leerlaufende Transformatoren in Sättigung treiben können. Bei diesem Phänomen handelt es sich um die sogenannte sympathetische Wechselwirkung zwischen Transformatoren, wobei der Magnetisierungsstrom benachbarter Transformatoren, der dabei auftritt, als mitschwingender Einschaltstrom<sup>1</sup> bezeichnet wird [4] [5]. In Abhängigkeit des Remanenz-Zustandes und des Zuschaltmoments des zuschaltenden Transformators nehmen benachbarte Transformatoren ebenfalls oberwellenbehaftete Ströme auf und verstärken deutlich die Resonanzanregung.

Die überlagerte Anregung führte zu einer temporären Überspannung, die mehrere Sekunden andauerte und eine Erhöhung der Amplitude des RMS-Spannungswertes um 30 % zur Folge hatte. Diese Überspannung führte zu einem Ansprechen von Überspannungsableitern in verschiedenen Unterwerken, deren thermischer Überlastung und somit zu deren Zerstörung und Ausfall. Aufgrund der hohen Amplitude des Einschaltstroms, der kleinen momentanen Kurzschlussleistung und einer strahlenförmigen Netztopologie kam es zudem zu einem massiven Spannungseinbruch auf 0,85 pu. Zur Frage, ob die temporären Überspannungsbeanspruchungen der Transformatorwicklungen durch weitere

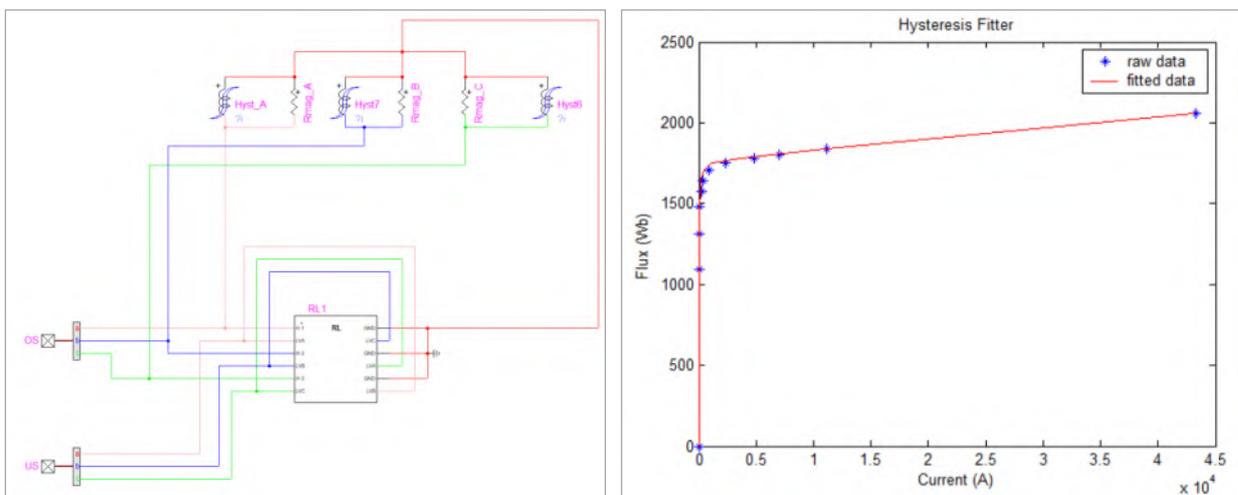
<sup>1</sup> Mitschwingende Einschaltströme – engl. Sympathetic Inrush Currents

Schalthandlungen eine Schwächung der Isolation zur Folge hatte, konnte keine Aussage gemacht werden.

### 2.3 Modellierung und numerische Simulation

Für die numerische Berechnung solcher Phänomene ist die Kenntnis des nichtlinearen Verhaltens der beteiligten Betriebsmittel wie z.B. Transformatoren oder Ableiter entscheidend. Die Modellierung der Magnetisierungskurve der Transformatoren ist ausschlaggebend für die Nachbildung des Frequenzspektrums und der Amplitude des Einschaltstroms.

Ohne die Berücksichtigung der magnetischen Kopplung der Phasen über den Eisenkern des modellierten Transformators ist es nicht möglich die gemessenen Überspannungen in der Simulation nachzubilden.

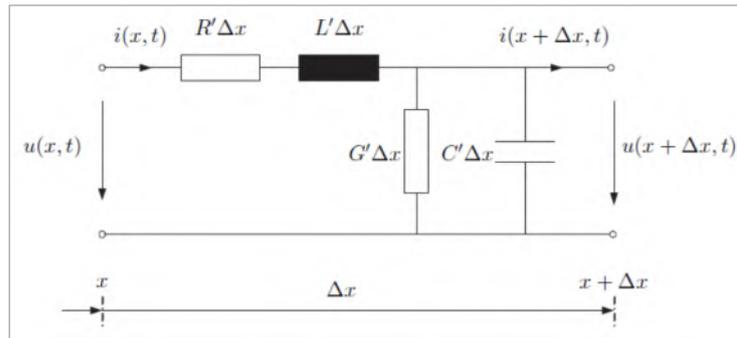


**Abbildung 8** Transformator-Modell in EMTP mit Admittanz-Matrix und nichtlinearen Induktivitäten (links) und typische Sättigungskennlinie (rechts) [10]

Die Modellierung von Leitungen/Kabeln zur Berechnung von Ausgleichsvorgängen kann durch konzentrierte oder verteilte Parameter erfolgen. Weisen die Vorgänge lediglich eine zeitliche Abhängigkeit auf, erfolgt die Modellierung mittels konzentrierter Elemente und man spricht von einer Modellierung mittels konzentrierter Parameter. Weisen die Vorgänge einer Leitung jedoch zeitlich und örtliche Abhängigkeiten auf muss die Modellierung mittels verteilter Parameter erfolgen. Das bedeutet, Strom und Spannungsamplitude und deren Phase hängen sowohl von der Zeit als auch vom Ort ab [12]. Die Leitung ist in solchen Fällen elektrisch lang, daher müssen Laufzeiteffekte im Modell berücksichtigt werden.

Der größte Vorteil konzentrierter Parameter-Modelle liegt in der Rechengeschwindigkeit. Diese Modellierung ist weniger präzise als frequenzabhängige Leitungs- und Kabelmodelle, kann aber erfolgreich bei der Analyse von Problemen mit begrenzter Frequenzstreuung eingesetzt werden. Die Leitungsparameter werden bei einer bestimmten Frequenz berechnet und daher als frequenzunabhängig bezeichnet.

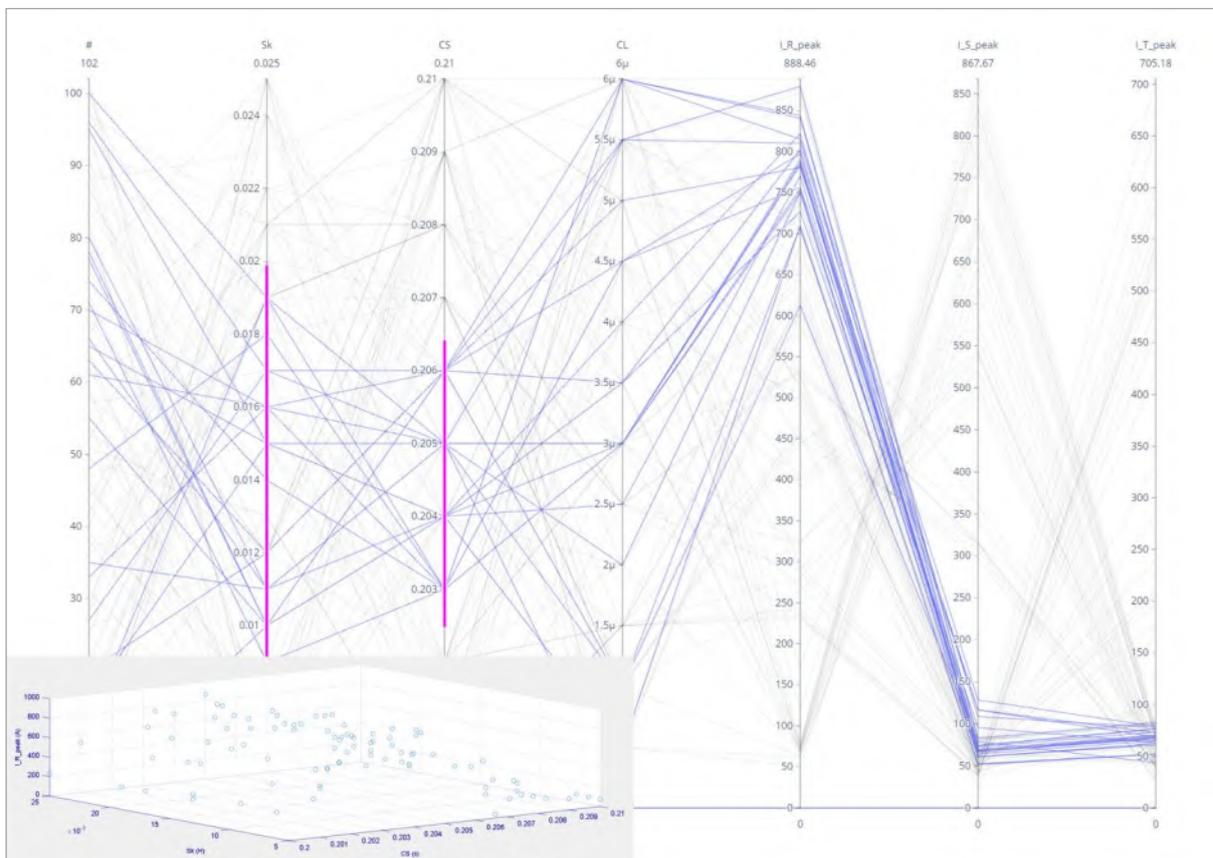
Im konkreten Fall wurde die Modellierung mittels verteilter Parameter vorgenommen. Abbildung 9 zeigt das einphasige Ersatzschaltbild.



**Abbildung 9 Einphasiges Ersatzschaltbild eines Längenelementes  $\Delta x$  mit verteilten Parametern [8]**

Um den Einfluss der verschiedenen Parameter wie: Anzahl parallel leerlaufenden Transformatoren, der Netzkurzschlussimpedanz, des Zuschaltwinkels des Leistungsschalters, der Remanenz des zuschaltenden Transformators, der Kapazität aus den sich im Betrieb befindlichen Kabeln und Leitungen und der Netztopologie (Vermaschungsgrad) zu analysieren wurden automatisiert verschiedene Sensitivitätsanalysen mit je einigen hundert dynamische Simulation durchgeführt.

Dabei wurde die relevanten Parameter in Grenzen unsystematisch variiert, um zum einen die Größe ihres Einflusses auf die Überspannung und zum anderen die Interaktion zwischen den Parametern zu analysieren. Abbildung 10 zeigt ein einfaches Beispiel wie komplexe Parameterabhängigkeiten visualisiert und beurteilt werden können.



**Abbildung 10 Beispiel für die Abhängigkeit des Einschaltstrom-Scheitelwertes von der Kurzschlussleistung, dem Einschaltmoment des Leistungsschalter gegenüber der treibenden Spannung und dem Kabelkapazitätsbelag**

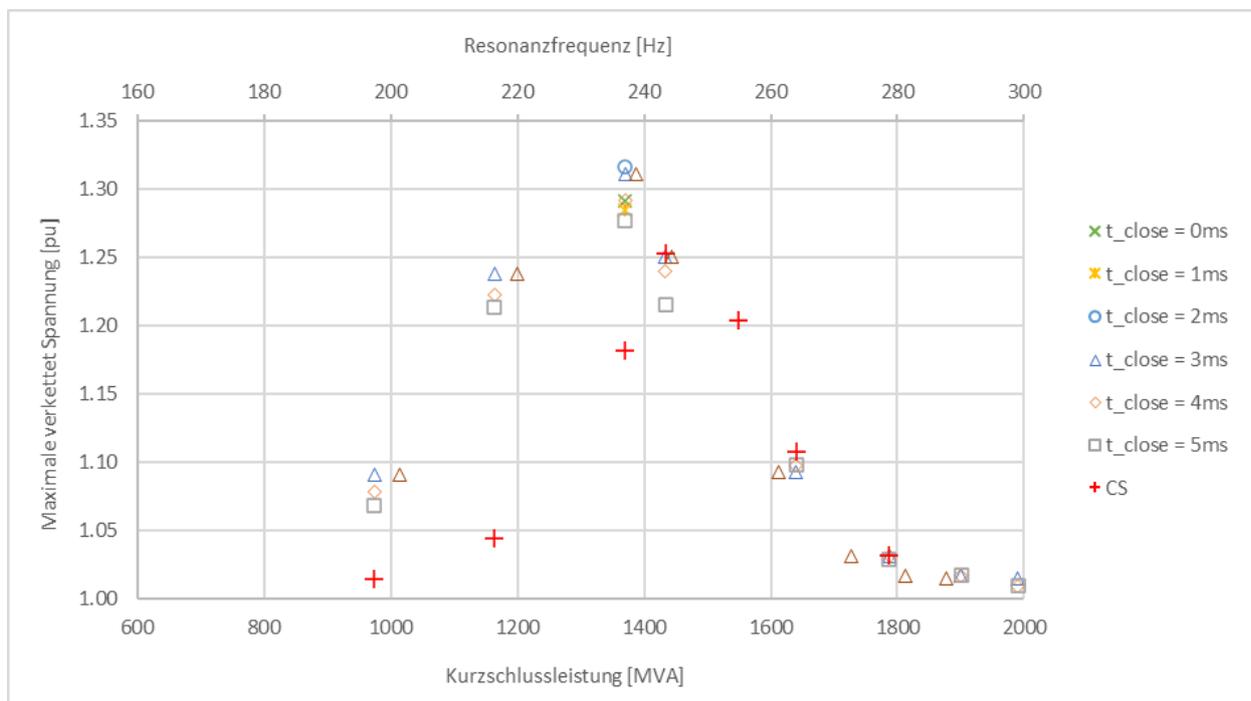
## 2.4 Ergebnisse

Die beschriebenen Überspannungen können immer dann angeregt werden, wenn die Netzresonanzfrequenz in das dominante Oberwellenspektrum des Einschaltstroms fällt. Je mehr Transformatoren vor dem Einschalten eines weiteren Leistungstransformators im Leerlauf parallel am gleichen Netzknoten am Netz sind, desto höher ist die maximal mögliche Überspannung aufgrund von mitschwingenden Einschaltströmen.

Es wurden die Einflussfaktoren der Anzahl parallel leerlaufenden Transformatoren, der Netzkurzschlussimpedanz, des Zuschaltwinkels, der Remanenz des zuschaltenden Transformators, der Kapazität aus den sich im Betrieb befindlichen Kabeln und Leitungen und der Netztopologie (Vermaschungsgrad) in den dynamischen Simulationen im Detail analysiert. Auf dieser Basis wurden Empfehlungen abgeleitet, welche aus der Matrix der oben genannten Einflussgrößen zu einem sicheren Netzbetrieb führen.

Dabei wurden u.a. Grenzkurzschlussleistungen definiert, welche in Abhängigkeit der Anzahl der Kabel und der sich im Leerlauf befindlichen Transformatoren vor dem Einschalten eines weiteren Transformators zur Verfügung stehen müssen.

Abbildung 11 zeigt den Maximalwert der verketteten RMS-Spannungen in Abhängigkeit der Netzkurzschlussleistung von 800 MVA bis 2000 MVA bei verschiedenen synchronen Einschaltzeitpunkten des HS-Leistungsschalters bezogen auf die anstehende Spannung – vom Spannungsscheitel (0 ms) bis Spannungsnulldurchgang (5 ms) und die dazu gehörige Frequenz der Resonanzstelle der Netzimpedanz.



**Abbildung 11** *Maximalwert der verketteten Spannung aller drei Phasen in Abhängigkeit der Kurzschlussleistung des Netzes bei verschiedenen synchronen Einschaltmomenten des Leistungsschalters (Angabe in Millisekunden) und bei gesteuerten Einschaltungen (CS) ohne Berücksichtigung der Remanenz-Situation (+) [10]*

Man kann erkennen, dass bei einem durch den Transformator definierten Oberwellenspektrum im Einschaltstrom eine Verschiebung der Frequenz der ersten Resonanzstelle des Netzes durch Variation der Kurzschlussleistung (Kurzschlussimpedanz) und Kabelkapazität große Auswirkungen auf die resultierende Überspannung hat.

Um zum einen die beschriebenen temporären Überspannungen und Spannungseinbrüche zu vermeiden aber auch die negativen Auswirkungen durch mechanische Stromkräfte in den Wicklungen der Transformatoren sowie die kumulierte Alterung der Isolation durch Schaltspannungstransienten zu reduzieren, wurde neben anderen Maßnahmen empfohlen, die Leistungsschalter kontrolliert zu schalten [1] [3].

Da es sich bei den relevanten Leistungsschaltern um Hochspannungsleistungsschalter in einer einphasig gekapselten gasisolierten Schaltanlage (GIS) handelt sind die Unterbrechereinheiten der Phasen einzeln angetrieben. Somit ist es möglich die drei Phasen eines Systems zeitlich versetzt zueinander zu zuschalten. So können gezielt Zuschaltmomente geringer Schwingungsanregung erreicht (point-on-wave) werden. Zusätzlich kann durch die Berücksichtigung des Remanenzflusses während der Ausschaltung des Transformators (Controlled Switching taking into Account the Residual Flux), die Sättigung des Eisenkerns bei Einschaltung und somit der Einschaltstrom minimiert werden.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass eine vermaschte Netztopologie zu bevorzugen ist, wenn Leistungstransformatoren mit zusätzlichen Transformatoren parallel im Leerlauf eingeschaltet werden. Lasten, insbesondere bei niedriger Kurzschlussleistung dämpfen die Überspannungseffekte. Gesteuertes Einschalten kann den Einschaltspitzenstrom und seine Gleichstromkomponente verringern, verhindert aber keine harmonischen Stromanteile im Einschaltstrom. Das synchron gesteuerte Einschalten aller drei Phasen hat nur geringen Einfluss auf die Amplitude der Überspannungen. Gestaffeltes gesteuertes Schalten hingegen erzielt eine klare Reduzierung der Überspannungen. Die Überwachung des Remanenz-Flusses beim Ausschalten des Transformators – öffnen des Leistungsschalters – kann die Wirkung der gesteuerten Einschaltung weiter optimieren.

### 3 Schlussfolgerungen

Elektrische Betriebsmittel für die Erzeugung erneuerbarer Energien und innovative umweltfreundlichere Betriebsmittel und Verbraucher werden als Komponenten des Übertragungsnetzes in ihrer Entwicklungsphase als auch in standardisierten Typenprüfungen ausgiebig geprüft. Die Prüfungen und Prüfpegel der zu Grunde liegenden internationalen Normung hat dabei nicht den Anspruch hundert Prozent aller auftretenden Belastungen oder Fehlerszenarios des Netzes abzudecken. Bei der Wahl des Betriebsmittels muss die zu erwartende Beanspruchung im Netz den Prüfpegeln aus Typen-Prüfungen gegenübergestellt und beurteilt werden.

Der vorgestellte Vorfall legt nahe, dass durchaus Überbeanspruchungen von Betriebsmitteln im Netzbetrieb auftreten, welche nicht direkt zu sichtbaren Überlastungen oder einem Ausfall führen. Eine durch wiederholte temporäre Überlastung forcierte Alterung von z.B. Isolierungen bzw. Isoliermedien, wiederkehrende thermische Überlastung von Ableitern, mechanische Überbeanspruchung von Transformatorwicklungen durch Einschaltströme oder Schädigung von Düsenmaterial von Leistungsschaltern durch Rückzündungen können äußerlich nicht direkt identifiziert oder quantifiziert werden. Aus diesem Grund ist bei der Untersuchung/Analyse von Havarien abschließend nicht eindeutig festzustellen, ob ein einzelnes Ereignis oder eine systematische Vorschädigung bzw. Alterung aufgrund von Netzvorgängen die Ursache war.

Die frühzeitige Identifizierung von möglichen Auffälligkeiten in der projektspezifischen Netzsituation kann helfen Überbeanspruchungen von Betriebsmitteln zu vermeiden und deren Lebensdauer zu maximieren sowie Havarien, Ausfallzeiten und frühzeitigen Ersatz zu vermeiden. Die durch eine Lebensdauererlängerung erzielten Einsparungen an

grauer Energie können einen wesentlichen Teil zu einem umweltfreundlichen und ressourcensparendem Netzbetrieb beitragen.

Wie sich geplante Neuinstallationen oder Umbauten auf ein bestehendes Netz auswirken, kann durch transiente Netzsimulation geprüft werden. Dadurch sind potenzielle Störungsmechanismen frühzeitig erkennbar und können noch in der Projektierungsphase berücksichtigt werden. Bei bereits festgestellten Netzproblemen können per Simulation geeignete Maßnahmen ermittelt und auf wirtschaftliche und technische Effektivität geprüft werden.

#### 4 Literatur

- [1] A. Mercier, G. Andrae et al., Guidelines and best practices for the commissioning and operation of controlled switching projects, CIGRE' Technical Brochure - 757, WG A3.35, 2019
- [2] G. Köppl, Analysis of the Incident of Oct. 19th, 2020, at Closing of Generator-Transformers, ST KPE 2020/09
- [3] A. Ebner, Remanenzflussbestimmung für das kontrollierte Einschalten von Leistungstransformatoren, Diss. ETH Nr. 18440, 2009
- [4] Xuanwei Qi et al., Sympathetic Inrush Current in a Transformer and a Method for its Identification, IEEJ Trans 2016; 11: 442–450
- [5] U. Rudez, R. Mihalic, Sympathetic Inrush Current Phenomenon with Loaded Transformers, IPST2015, 2015
- [6] Daniel Witschard, Überspannung auf SS 400kV Einschaltung der Maschinentrafos Resonanzprobleme, 10/2020
- [7] K. Hur, S. Santoso: Analysis and Modeling of Dynamic Overvoltage Phenomena due to Transformer Energizing; IEEE General Meeting 2005, Vol. 2
- [8] C. P. Habernig, Modellierung von Übertragungsleitungen in einer transienten Netzsimulation für Schutzprüfungen
- [9] EMTPWorks Helppage, Constant Parameter Transmission line, 2019
- [10] G. Andrae, Calculation and evaluation of possible adaptations of grid operation threshold values at by numerical network simulation, FKH-Bericht A22/070, 2022
- [11] G. Andrae, Studie zur Dimensionierung und Verortung einer aktiven Oberwellen-kompensation im Unterengadin, FKH-Bericht A22/110, 2022
- [12] A. M. Miri, Ausgleichvorgänge in Elektroenergiesystemen, Springer, 2000
- [13] CIGRE-Publication 810, September 2020: Protection and automation issues of islanded systems during system restoration/black start, paragraph 4.3



## ***FKH - Fachtagung***

*21. November 2023*

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

#### **Druckluftkabel für Mittel- und Hochspannungsanwendungen: Kapselungsdesign und Betriebserfahrung für 145 kV, 2000 A**

**Dr. Walter Halaus, CEO Hivoduct AG**

**Dr. Walter Halaus**  
Hivoduct AG, Kempthal

#### **Funktion und beruflicher Werdegang**

Walter Halaus hat Energietechnik an der TU Wien studiert und an der ETH Zürich zum Thema Hochspannungs-Schaltgeräte promoviert. Er war von 2002 bis 2017 bei ABB Schweiz in der GIS-Entwicklung, als Entwicklungsleiter und Technologiemanager. 2017 hat er mit Hyundai Electric Schweiz ein Forschungszentrum für Energietechnik gegründet. Seit 2020 ist er Gründer und CEO von Hivoduct, einem Schweizer Technologie-Startup welches Druckluftkabel entwickelt, produziert und installiert.



# Druckluftkabel für Mittel- und Hochspannungsanwendungen: Kapselungsdesign und Betriebserfahrung für 145 kV, 2000 A

Walter Holaus

Hivoduct AG, Kempththal

## 1 Kurzfassung

In diesem Vortrag werden Druckluftkabel als neue Technologie für die elektrische Energieübertragung für Mittel- und Hochspannung vorgestellt. Druckluftkabel sind mit Druckluft isolierte, koaxiale Rohrleitungen, welche Hochspannungs-Freileitungen, traditionelle VPE-Kabel und SF6 gefüllte gas-isolierte Leitungen ersetzen können.

Das kompakte, schraubenlose Flanschdesign, die grossen Leiterquerschnitte (> 2200 mm<sup>2</sup>) und der optimale Brandschutz sind zentrale Vorteile dieser neuen Technologie. Insbesondere für Druckluft als Ersatz für SF6 Gas oder andere PFAS-Gasgemische ist dieses neue Flanschdesign vorteilhaft, da es deutlich grössere Isolierspalte bei gleichem Flanschdurchmesser ermöglicht. Die Flansche sind dauerhaft dicht und berstfest - können aber trotzdem auch flexibel ausgeführt werden, was die Verlegung vereinfacht und bei Bodenabsenkungen und im Erdbebenfall vorteilhaft ist.

Generell sind Druckluftkabel einphasig gekapselt. Dreiphasige Kapselung, wie bei GIS-Anlagen typisch, sind bis 145 kV möglich und bieten Vorteile bezüglich Materialverbrauch und Kompaktheit. Nachteilig sind die höhere Komplexität der Komponenten und die insgesamt leicht geringere Stromtragfähigkeit.

Als Vorbereitung für einen 1-jährigen Dauerversuch eines 145 kV, 2000 A Druckluftkabels wurden Hochspannungstests (AC, BIL, TE-Messung) und Hochstromtests bis 2500 A auf dem Versuchsgelände der FKH in Däniken durchgeführt. Damit konnte die hohe Stromtragfähigkeit und die geringen Verluste im Betrieb bestätigt werden. Das dielektrische Design konnte nur bis 600 kV Blitzstoss bestätigt werden. Es zeigte sich, dass Feuchtigkeit im Druckluftkabel die Spannungsfestigkeit deutlich reduziert und deshalb ein Evakuieren vor dem Befüllen mit Druckluft nötig ist.

Mit Unterstützung der SBB und des BFE wurde eine 3-phasige Demonstrationsanlage für 145 kV, 2000 A in einem Schutzrohr verlegt und für 1 Jahr getestet. Dabei wurden Innendruck und Temperatur kontinuierlich überwacht. Die Dauerstrombelastung von 2000 A führte während der Hitzeperiode im Sommer 2023 zu einer maximalen Kapselungstemperatur von 57 °C – deutlich unter der zulässigen Temperatur von 65 °C. Die Betriebsspannung von  $U_{L-E} = 145\text{kV}/\sqrt{3} = 84\text{ kV}$  konnte auch bei reduziertem Innendruck von 4.5-7 bar während Monaten gehalten werden. Ein Druckablassversuch zeigte, dass nur > 0.8 bar Überdruck zum Halten der Betriebsspannung nötig sind.

Mit dieser Anlage konnte die Funktionalität bezüglich Montage, Betriebsspannung und Dauerstrombelastung bestätigt und Erkenntnisse für Designverbesserungen gesammelt werden. Weitere Pilotinstallationen für Mittel- und Hochspannung sind bereits geliefert.

## Sammlung Präsentationsseiten



# Druckluftkabel für Mittel- und Hochspannungsanwendungen

Kapselungsdesign und Betriebserfahrung für 145kV, 2000 A

Dr. Walter Holaus, CEO Hivoduct AG.

FKH Fachtagung 21.11.2023

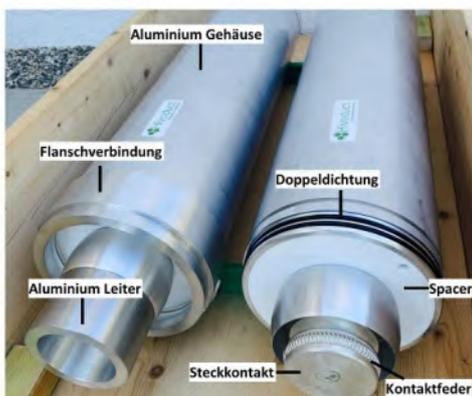
## Druckluftkabel Basisdesign



Beispiel: Mittelspannung 52 kV und Hochspannung 145 kV

Beispiel: 15-52 kV, 500-2000 A, nebeneinander

Beispiel: 72-145 kV, 500-2000 A, Triangular, in Rohr, Rollend

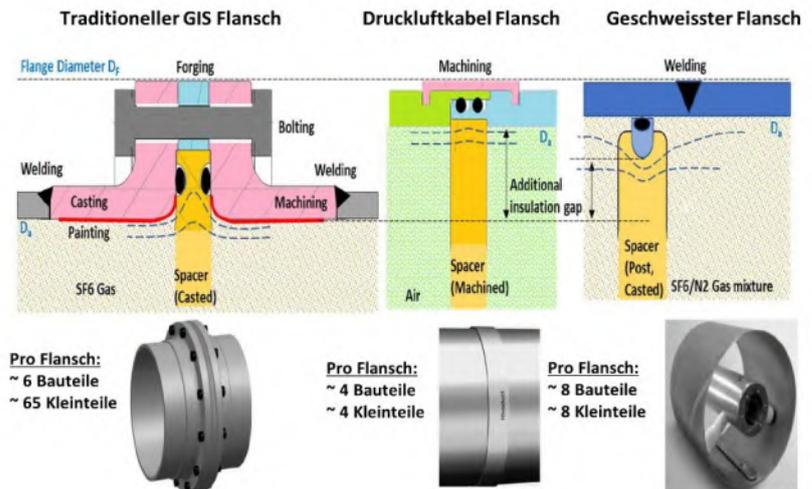


## Basis: Neue Flanschverbindung



Ringverbindung statt Flansch mit Schrauben

- Patentierte Ringverbindung für Druckbehältergehäuse
- Vorteile
  - Weniger Platz- und Materialverbrauch
  - Keine Schrauben: Montage mit «Click»
  - Anzahl Dichtstellen halbiert
  - Doppeldichtung an jeder Dichtstelle
  - Bessere dielektrische Feldgeometrie
  - Durchgehend leitfähig
  - Axiale Fixierung vom Spacer

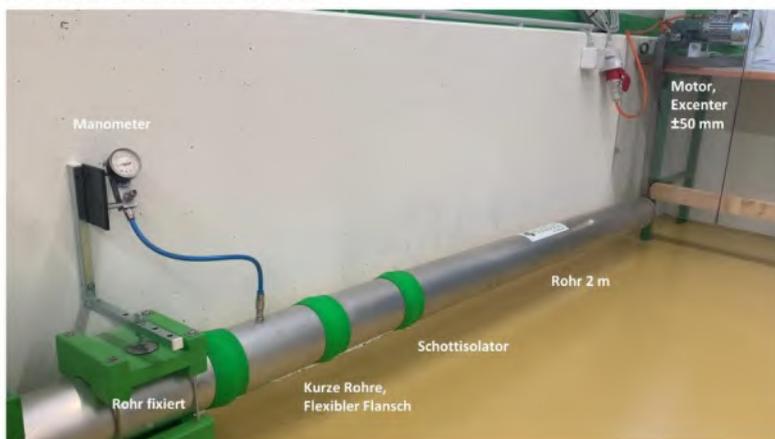


## Flexible Flanschverbindung



Dicht, stabil, demontierbar – und gleichzeitig flexibel wenn nötig ..!

Flansch-Test-Biegemaschine in der Fabrik



Flexibler Winkel



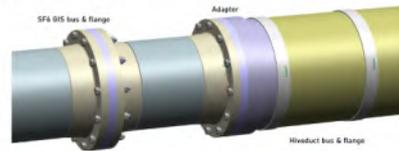
# Druckluftkabel vs. GIS vs. Kabel



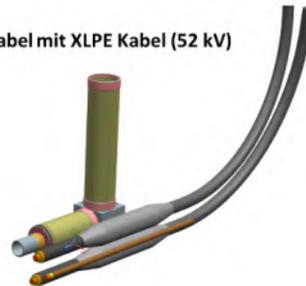
Gleicher Flanschdurchmesser wie SF6 GIS Flansch. Dicker als 1 XPLE Kabel

- Vergleich Druckluftkabel mit SF6 Ausleitung
  - Gleicher Aussendurchmesser wie SF6 GIS Flansch
  - Kein SF6, kein PFAS, schnellere Montage
  - Kleinerer Kapazitätsbelag
- Vergleich Druckluftkabel vs. MV und HV Kabel
  - Größerer Leiterquerschnitt
    - Gut für weniger Verluste, Erwärmung
    - Ein Druckluftkabel ersetzt mehrere Kabel
  - Aluminiumgehäuse als Schirm und als Rückstromleiter
    - Erdverbindung inkludiert. Reduzierte KS-Stromkräfte
  - Keine Muffen
  - Kein Biegeradius
  - Keine brennbare Hülle – nur Aluminium

**Vergleich: Hivoduct und SF6 GIS Rohr (245kV)**



**Vergleich: Druckluftkabel mit XLPE Kabel (52 kV)**

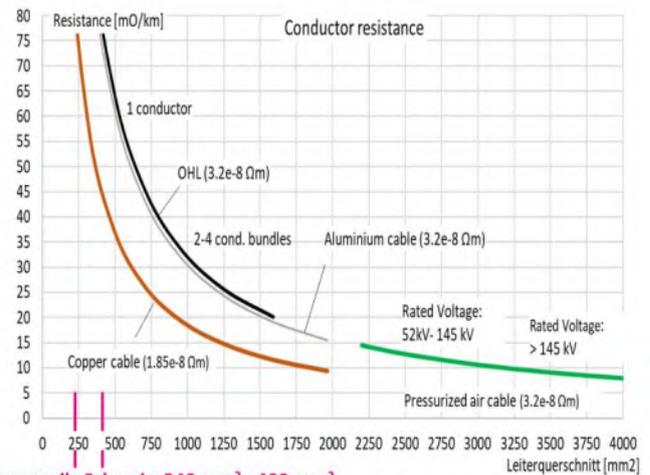
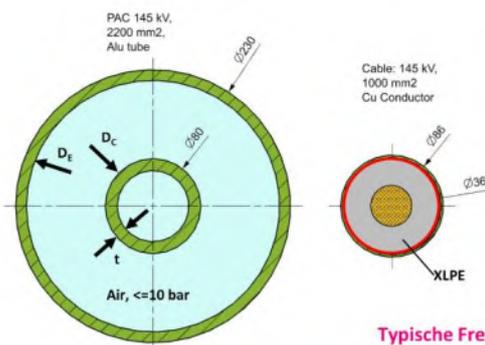


# Designeigenschaft: geringere Verluste



Größerer Durchmesser & Leiterquerschnitt -> Geringerer Widerstand

- Kabel: Bis max. 2500 mm<sup>2</sup>
- Freileitung: Bis max. 3\*400 mm<sup>2</sup> Drähte
- DLK: >2200 mm<sup>2</sup> bis 5000 mm<sup>2</sup>



Typische Freileitungsseile Schweiz: 240 mm<sup>2</sup> ; 400 mm<sup>2</sup>

## Vergleich: 3ph vs. 1ph Kapselung



3ph nur bis 145 kV mit Vor- und Nachteilen...

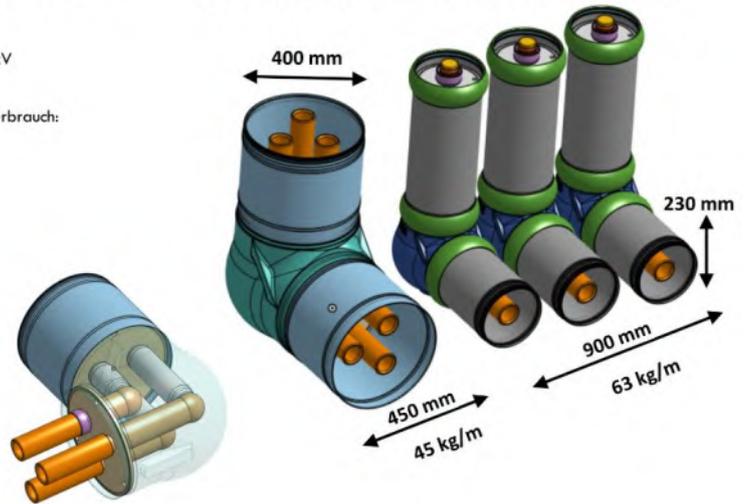
- Dreiphasige Kapselungsdesign wie in GIS möglich bis 145 kV
- Leiter- und Kontaktdesign unverändert
- 3ph: Insgesamt kompaktere Anordnung, weniger Materialverbrauch:
  - 145kV, 2000 A, 3ph: 45 t/km
  - 145kV, 2000 A, 3x1ph: 63 t/km
- Geringerer Montageaufwand Vor-Ort

**Nachteile:**

- Komplexere Spacergeometrie
- Weniger Flexibilität im Layout
- Komplexere Winkelstücke. Keine flexiblen Winkel möglich
- Geringere Stromtragfähigkeit durch geringere Gehäuseoberfläche: 2000 A statt 2500 A
- 3-ph Kurzschlüsse im DLK möglich
- Rohrdimensionen nur bis 145 kV verfügbar

3 ph Kapselung 145 kV

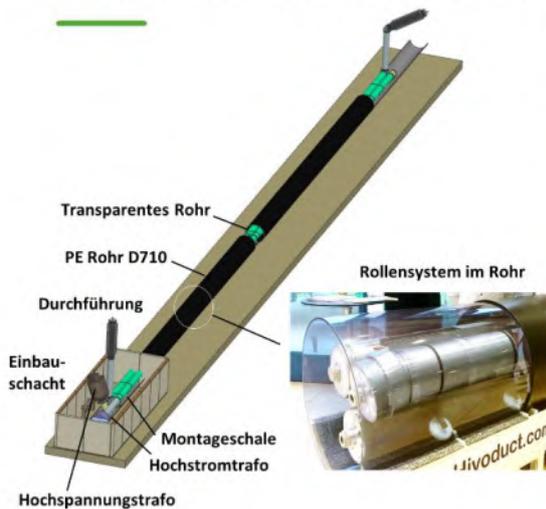
3 x 1 ph Kapselung 145 kV



## Pilotanlage 145 kV, 2000 A



Dreieckanordnung im Rohr mit Rollen. Montage in Schacht.



Installation während 1 Jahr Dauerbetrieb



## Montage: 3ph im Schutzrohr

### Einrollen mit Zugseil

- Montage im Schacht auf dem Rollensystem
- Rollensystem alle 2 m. Bleibt im Betrieb im Rohr.
- Einrollen via Zugseil in Schutzrohr D710 mm
- Zeitbedarf: ~20 min pro 5 m (3-ph)

Video:



Video: the better cable



## Dauerbetrieb mit Monitoring

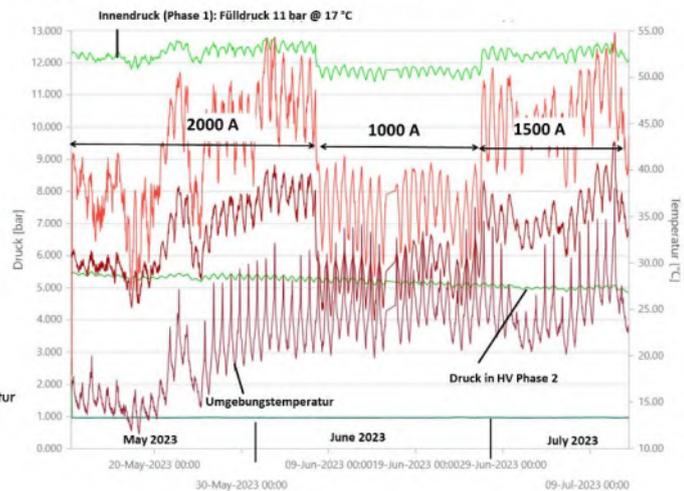
the better cable

### Verschiedene Dauerströme während der Hitzeperiode im Sommer

- Test: Verschiedene Dauerströme während der heissesten Umgebungstemperatur
- Dauerstrom hat deutlichen Einfluss auf Gehäusetemperatur und Innendruck
- Maximale Gehäusetemperatur bei 57° C: Immer noch unter Grenzwert von 65°C
- HV Phase 2 nur mit 7 bar gefüllt und mit gelockertem Füllanschluss für geringen Druckverlust
- HV Phase 2 trotzdem unter voller Spannung

**Erkenntnisse:**

- Auch bei 2000 A Dauerstrom < 57°C Gehäusetemperatur
- Dauerbetrieb bei halbem Fülldruck möglich.

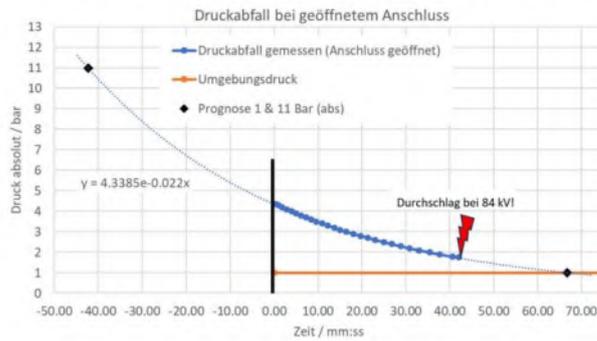


# Test: Druckablassen unter Spannung



Volle Spannung  $U_{L-E} = 145\text{kV}/\sqrt{3} = 84\text{ kV}$  bis zum Überschlag

- Druckanschluss gelöst: **lautes Zischen** bei konstant  $U_{L-E} = 145\text{kV}/\sqrt{3} = 84\text{ kV}$
- Überschlag bei  $1.76\text{ bar}_{\text{abs}}$  nach 42 min (siehe Grafik). Deutlich hörbares „Ping“
- Versuch zeigt, dass **nur > 0.8 bar Überdruck zum Halten der Betriebsspannung** nötig sind.
- So eine «Undichtigkeit» im Betrieb bei 11 bar Fülldruck würde etwa 85 min bis zum Durchschlag dauern



# Pilotanlage 36 kV, 3000 A



Mittelspannungs-Hochstromverbindung: 3ph, 36 kV, 3000 A

- Installiert nebeneinander in Fertigbeton-Kabelkanal
- Anschluss via Durchführungen im Anschlusskasten
- Kabelkanal im Betrieb mit begehbaren Deckeln abgedeckt



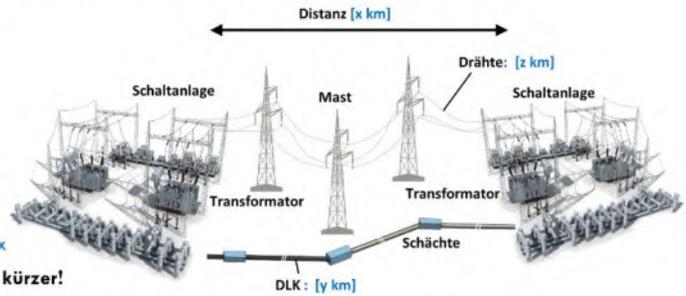
# Upgrade 220 kV auf 380 kV ?



Warum nicht bei 220 kV bleiben und Leitung durch Druckluftkabel ersetzen...?

**Gründe für Nennspannungserhöhung**

- Mehr Übertragungskapazität:  $P = \sqrt{3} * U * I$
- Weniger Verluste:  $P_v = R * I^2$
- **220 kV auf 380 kV braucht neue Primärtechnik**
  - Schaltanlage (2x), Transformatoren (2x), Freileitung
- **Neue 380 kV Freileitung wird länger**
  - Weil "gerade" Trassen nicht (mehr) möglich sind:  $z \gg x$



Freileitungsseil ist viel länger als Druckluftkabel

**Druckluftkabel (unterirdisch) sind "gerader" verlegt → kürzer!**

**Druckluftkabel haben VIEL geringeren Widerstand pro m Länge**

- Freileitung (z.B.)  $2 * 240 \text{ mm}^2 \rightarrow R \sim 66 \text{ m}\Omega/\text{km}$
- Druckluftkabel:  $4000 \text{ mm}^2 \rightarrow R \sim 8 \text{ m}\Omega/\text{km}$

→ **Weniger Länge UND viel geringerer Widerstand pro m Länge !**

→ **weniger Verluste (5-10x), unterirdisch, kürzere Projektlaufzeit, kleinere CO2 Bilanz, höhere Kapazität der Leitung**

13



# Umweltschonende Energieübertragung

**Unsere Vision:** Druckluftkabel sind der neue Standard für die elektrische Energieübertragung.

Web: [www.hivoduct.com](http://www.hivoduct.com)  
 Email: [info@hivoduct.com](mailto:info@hivoduct.com)



**Dr. Walter Holaus**

Position: President & CEO

**Background:** Walter Holaus is an electrical engineer from TU Wien and holds a PhD in high-voltage switchgear from ETH Zürich. He developed and invented gas-insulated switchgear, managed global R&D teams and started a research center in Zürich.

Email: [walterholaus@hivoduct.com](mailto:walterholaus@hivoduct.com)

# Druckluftkabel 145 kV

Transportstapel: 16 x 5 m





## ***FKH - Fachtagung***

***21. November 2023***

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Increased sustainability through innovative Dry-type rail-transformers**

**Dr. Bogdan Cranganu-Cretu**  
Hitachi Energy Ltd., Zürich-Altstetten

### **Funktion und beruflicher Werdegang**

Engineering Manager for Global Product Group Distribution and Traction Transformers, Hitachi Energy Ltd.

- 1999 – Awarded PhD in Electrotechnics at Politehnca University Bucharest, Romania
- 1999-2001 – Research stage Japan – Non-Destructive Testing
- 1992-2002 – Associated Professor Politehnca University Bucharest
- 2002-2010 – Principal Scientist with ABB Corporate Research, Power Device Simulation Group
- 2010-2017 – Design System Manager for Product Group Dry Transformers, ABB
- 2017 -Present – Engineering Manager for Global Product Group Distribution and Traction Transformers, Hitachi Energy Ltd.



# Increased sustainability through innovative Dry-type rail-transformers

Bogdan Cranganu-Cretu

Hitachi Energy Ltd., Zürich-Altstetten

## 1 Summary

Electrification is the key driver for a carbon-neutral future, especially with the rapid growth of urbanization. With that context, sustainable transportation in general and railways in particular, will have to swiftly transition to the electrified world.

According to IEA's "The Future of Rail" Technology report (January 2019) the global demand for transport is growing fast. Given present trends, passenger and freight activity will more than double by 2050.

Rail is among the most energy efficient modes of transport for freight and passengers: Rail transport accounts for only 2% of the global energy demand of the transport sector accounting respectively for about 8% of passenger and 7% freight global movements.

These efforts towards more sustainable transport are also backed by the evolution of on-board traction transformers towards more efficient solutions in terms of both energy consumption and total cost of ownership.

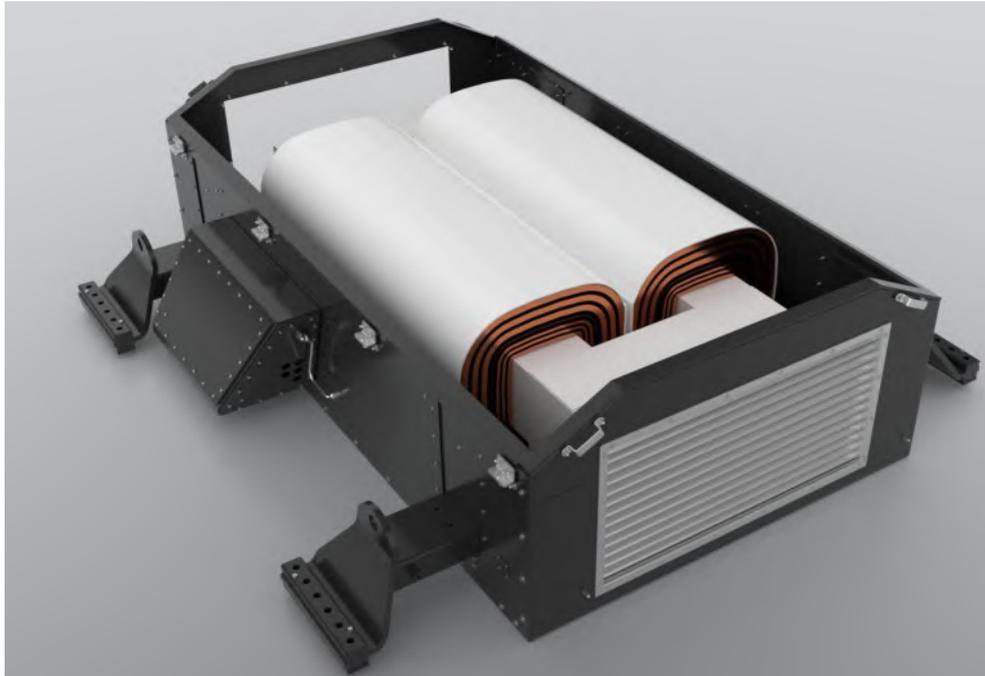
In the presentation we present a Hitachi Energy solution for the on-board traction transformer as a dry-transformer in RESIBLOC Rail technology for the 15 kV applied on the MGB Orion – documenting the optimization of the predecessor project for an improved total life cost – overall dimension and weight reduction for reduced total energy consumption.

## 2 Proposed RESIBLOC Rail Solution for the Traction Transformer

The function of the on-board traction transformers includes the conversion of power from the overhead catenary with high voltage levels ranging 15-25 kV to the voltage levels required by the power converter in the traction system.

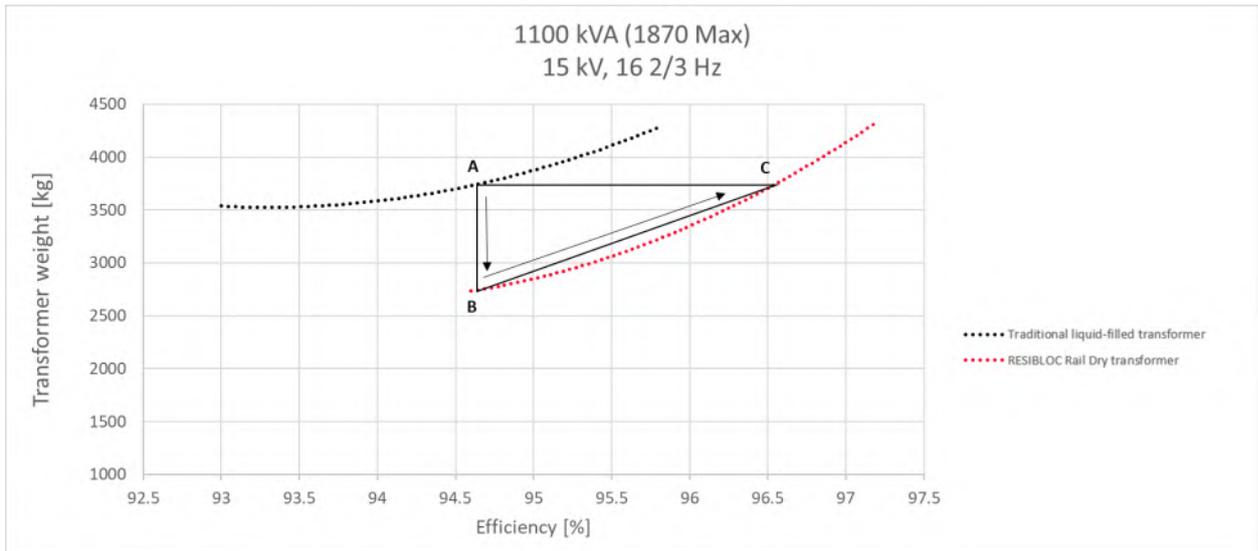
With the removal oil and oil-pumps dry-transformers are made with eco-efficient materials without usage of oil and fewer parts - which means, leakage free operations. They are significantly safer and more cost-effective to operate, maintain and recycle at the end of their lifespan.

The RESIBLOC Rail transformer can be as powerful as a liquid-filled one of the same weight, but it can achieve up to 45% lower winding losses compared to traditional systems. This leads to a high degree of efficiency which can go up to 99%. Such high efficiency can significantly reduce the total energy consumption of rail operations. This is a decisive advantage for rail operators since energy cost accounts for up to 40% of the total cost in this industry.



**Figure 1: 3D rendering of Resibloc RAIL traction transformer. Not having an oil tank gives more flexibility in dimensioning enclosure for better ventilation**

Overall, RESIBLOC Rail enables reduction of total operating cost by up to 10% as compared to traditional liquid-filled traction transformers. These transformers have also passed the vibration test according to IEC 61373 and comply with the requirements of EN 45545.



**Figure 2: High-level comparison between traditionally liquid-filled traction transformer and a dry-transformer in RESIBLOC® Rail technology for 15 kV with a typical example regional train in European market (as Switzerland and Germany)**

The graph shows the RESIBLOC® Rail dry traction transformer (marked as “B”) offers substantial weight reduction as it is an oil-free solution when compared to a traditional liquid-filled traction transformer (marked as “A”). If desired, the weight thus saved can

then be “reinvested” by increasing the active material quantities (copper, E steel, etc.) into a solution “C,” which will have higher efficiency.

### 3 Next generation – Resibloc Rail Traction Transformer

After successful implementation and test of 10 years on the rail, with good and challenging experiences a new generation was planned to improve the overall performance where four main projects were successfully completed. Work was done for: achieving an improved coil design, optimization for the AF (air forced) cooling, strengthened layer insulation and lastly optimization of mechanical structure and enclosure.

The new design was extensively tested and qualified for the operation: manufacturing optimization, PD testing was done up to a 2xUn level, limit BIL testing was performed (achieving arcing at 150 kV on terminal), as well as mechanical and complete type tests.

As a result of the optimization process a robust, efficient, and significant increased power density.

RESIBLOC® Rail 2017		RESIBLOC® Rail Improved 2021	
Rating 1000 kVA, Voltage 11 kV / 16,7 Hz		Rating 1000 kVA, Voltage 11 kV / 16,7 Hz	
Length:	2615mm	Length:	2112 mm (-19%)
Weight:	4150kg	Weight:	3150kg (-24%)
Losses @85°C:	33,8 kW	Losses @85°C:	48,9 kW (+44%*)
Power/kg Indicator:			
kVA per kg @ 2m <sup>3</sup> /s	0,25	kVA per kg @ 2m <sup>3</sup> /s	0,35 (+40%)
kVA per kg @ 4m <sup>3</sup> /s	0,33	kVA per kg @ 4m <sup>3</sup> /s	0,41 (+25%)

**Table 1 Comparison of initial and optimized solution for the MGB Orion trains**

The newly equipped trains are in operation since Sep 2022.



**Figure 3 MGB Orion Train In service**



## ***FKH - Fachtagung***

***21. November 2023***

### ***Umweltaspekte als Innovationstreiber der Hochspannungstechnologie***

## **Ölisierte Transformatoren: Erkenntnisse und Innovationen im Bereich Isolierungen für eine verbesserte Ökobilanz**

**Dr. oec. HSG, Dipl.-Ing. Ghazi Kablouti**  
Hitachi Energy (Schweiz), Transformatoren

#### **Funktion und beruflicher Werdegang**

Direktor, Portfolionachhaltigkeit, Hitachi Energy, Transformatoren (2022 – Heute)

Dozent, Wirtschaftsethik/Nachhaltigkeitsstrategien, ZHAW (Winterthur) & Business School Lausanne (2021 – Heute)

Selbständiger Berater, Nachhaltigkeitsmanagement (2020 – 2022)

Senior Manager, Globale Nachhaltigkeitsprogramme, General Electric Corporate (2015 – 2019)

Senior Manager, Produktnachhaltigkeit /Direktor, Corporate Social Responsibility, Alstom Power (2010 – 2015)

Product Manager, Klimatechnologien für thermale Kraftwerke, Alstom Power (2007 – 2010)

Post-Doc. Visiting Scholar, Systemische Nachhaltigkeit (MIT, USA)

Dr. Oec. HSG, Management (universität St. Gallen, CH)

Dipl.-Ing., Maschinenbau (Universität Stuttgart, D)

Dozent, Wirtschaft und Gesellschaft, ZHAW, Business School Lausanne (2021 – Heute)



# Ölisierte Transformatoren: Erkenntnisse und Innovationen im Bereich Isolierungen für eine verbesserte Ökobilanz

Dr. Ghazi Kablouti

Hitachi Energy (Schweiz), Transformatoren

## 1 Kurzfassung

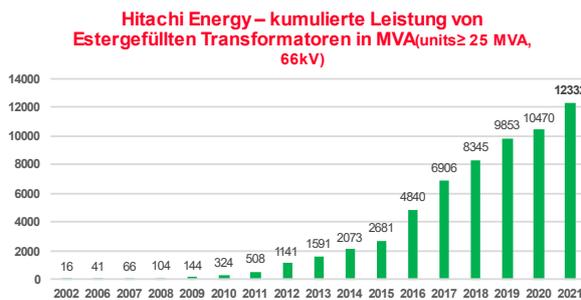
Mit einer verbreiteten Verwendung von ölisierten Transformatoren mit natürlichen und synthetischen Estern werden einige Umweltaspekte mit dem Betrieb solcher Transformatoren verbessert, gleichzeitig entstehen andere Herausforderungen (wie der gestiegene Material- und Ressourcenverbrauch), die einer verbesserten Nachhaltigkeitsbilanz über den Lebenszyklus solcher Transformatoren entgegenwirken.

In diesem Referat analysieren wir diesen Aspekt und gehen der Frage nach, ob und welchen Beitrag alternative, innovative Papierisierungen dazu leisten können, die Lebenszyklusbilanz von esterisierten Transformatoren positiv zu beeinflussen.

## 2 Die Problemstellung

Ester- vs. Mineralöl gefüllte Transformatoren: Treiber einer steigenden Nachfrage

**HITACHI**  
Inspire the Next



Mehr als  
**12,300 MVA**  
geliefert

Mit insgesamt  
**1000 years**  
in-service

Installiert in  
**21 Länder**

Tested bis  
**420 kV/BIL 1425 kV**

### Sicherheit

- Weniger entzündlich (Class K Fire point > 300°C)
- Sicherer Transport und Installation (including fire walls)
- Vorteile bei Versicherungs- und Installationskosten (Feuerwände)

### Umweltauswirkungen

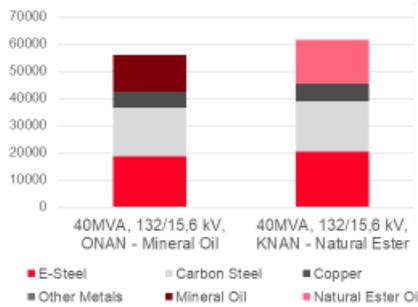
- Klassifiziert als leicht biologisch abbaubar (im Falle von Lecks)
- Nicht giftig
- Natürliche Ester nahezu carbon neutral (nach Aussagen von Herstellern)

### Ressourcenverbrauch

- Überladung bis ~10% erreichbar bei gleicher Lebenserwartung
- Die gleiche installierte Leistung benötigt möglicherweise weniger Platz, wenn sie für Überladungsbedingungen ausgelegt ist (z. B. CompactStar)
- Leichteres Feuerlöschsystem mit geringerem Platzbedarf

## Ester- vs. Mineralöl gefüllte Transformatoren: Herausforderungen

Gesamtgewicht:	+10 %
Stahl (E- und Kohlenstoffstahl):	+12 %
Kupfer	+11 %
Isolierflüssigkeit:	+19 %
<b>CO2 Fussabdruck (Materialien):</b>	<b>+8 %</b>



### Gründe für den höheren Materialverbrauch:

- Höhere Viskosität von NE im Vergleich zu MO: führt zu schwereren aktiven Teilen
- Erreichen der gleichen Temperaturanstiegsgrenzen (wie für MO):
  - Kühlkanäle in Wicklungen müssen geändert werden (schneller Durchfluss der Kühlflüssigkeit)
  - Zu ändernder Kupferquerschnitt (weinger Energieverluste)
  - Mehr externe Kühlung erforderlich

### Herausforderungen eines höheren Materialverbrauchs in Transformatoren:

**+35 %** Globale Nachfrage nach **Stahl** bis 2050 (vs. 2020, IEA)\*\*

**+51 %** Weltweiter Bedarf an **Kupfer** für saubere Energietechnologien bis 2050 (vs. 2020)\*



- Geografische Konzentration der Rohstoffproduktion
- Vorlaufzeiten und Kosten für den Bergbau
- Umwelt- und Sozialbelange
- Erhöhte Risiken wegen Klimawandel (eg. Wasserverfügbarkeit für den Kupferabbau)

4 Public © 2023 Hitachi Energy. All rights reserved.

\* SDS IEA-Szenario für nachhaltige Entwicklung  
Quelle: Metals for Clean Energy: Wege zur Lösung der Rohstoffherausforderungen Europas. Bericht der KULeuven, im Auftrag von Euro metals, dem europäischen Metallverband  
\*\* Die Rolle kritischer Mineralien bei der Umstellung auf saubere Energie, IEA

## 3 Die Zielsetzung

### Die Zielsetzung

Design	Festes Isolierungssystem	Flüssiges Isolierungssystem	Temperaturanstiegsgrenzen	Designziele
Design 1	Konventionell	Mineralöl	Standard	Niedrigster anfänglicher Transformatorpreis
Design 2	Konventionell	Natürlicher Ester	Standard	Niedrigster anfänglicher Transformatorpreis
Design 3	Semi-Hybrid	Natürlicher Ester	Hoch	Niedrigster anfänglicher Transformatorpreis

*Welchen Beitrag können semi-Hybride feste Isolierungen dazu leisten, dem angestiegenen **Materialverbrauch** von Ester gefüllten Transformatoren entgegenzuwirken?*

*Welchen Beitrag können semi-hybride feste Isolierungen dazu leisten, den **CO2 Fussabdruck (von Materialien)** von Ester gefüllten Transformatoren zu reduzieren?*

6 Public © 2023 Hitachi Energy. All rights reserved.

## 4 Überblick: Isolationstypen und -klassen für Transformatoren

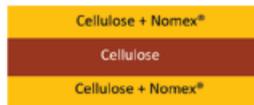
### Überblick: feste Isolationssysteme (nach IEC 60076-14)

Typen	Konventionell	Semi-Hybrid	Mixed-Hybrid	Voll-Hybrid
Isolierflüssigkeit	Konventionell oder Hoch Temperatur	Konventionell oder Hoch Temperatur	Konventionell oder Hoch Temperatur	Konventionell oder Hoch Temperatur
Leiterisolation	Konventionell	Hoch Temperatur	Kombination aus Konventionell und Hoch Temperatur	Hoch Temperatur
Abstandhalter und Streifen	Konventionell	Konventionell	Kombination aus Konventionell und Hoch Temperatur	Hoch Temperatur
Andere feste Isolierungen	Konventionell	Konventionell	Konventionell	Konventionell



- Konventionell: Kraft papier
- Hochtemperatur: Thermisch veredeltes Papier, oder in Kombination with Aramid (modifiziertes Nylon Polymer, e.g. Dupont Nomex)

Quelle:  
[https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/New\\_Options\\_for\\_Insulation\\_Systems\\_Article.pdf](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/New_Options_for_Insulation_Systems_Article.pdf)



Public  
© 2023 Hitachi Energy. All rights reserved.

### Überblick: Semi-hybride vs. Konventionelle solide Isolationssysteme für Transformatoren

Temperaturanstiegsgrenzen für Semi-Hybride Isolationen (Quelle: IEC 60076-14)

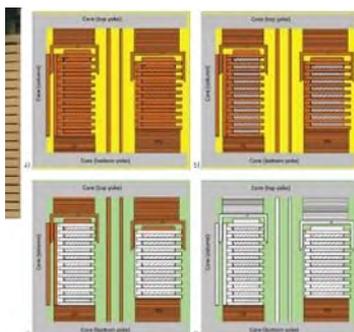


Figure 4 - Example illustration of various insulation systems for power transformers:  
a - Kraft with mineral oil (conventional), b - semi-hybrid with Nomex® 900 conductor insulation,  
c - hybrid system with ester fluid, d - high temperature system with ester fluid

Quelle:  
[https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/New\\_Options\\_for\\_Insulation\\_Systems\\_Article.pdf](https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/New_Options_for_Insulation_Systems_Article.pdf)

Public  
© 2023 Hitachi Energy. All rights reserved.

	Semi-Hybrides Isolationssystem		Konventionelles Isolationssystem
Isolierflüssigkeit	Mineralöl	Ester	Mineralöl oder Ester
Leiterisolation	Thermisch veredeltes Papier	Thermisch veredeltes Papier	Kraftpapier
Top-Öl Temperaturanstieg	60 K	90 K	60 K
Durchschnittlicher Temperaturanstieg in den Windungen	75 K	95 K	65 K
Hotspot Temperaturanstieg	90 K	110 K	78 K

Referenztemperatur für semi-hybrid: +20°C

Im Falle einer anderen Referenztemperatur (ambient): Anpassung max. Anstieg beim Transformerdiesigner erforderlich (Beispiel: 25°C Ambient entspricht max. 105 K Hotspot für Semi-Hybrid Isolationssysteme)

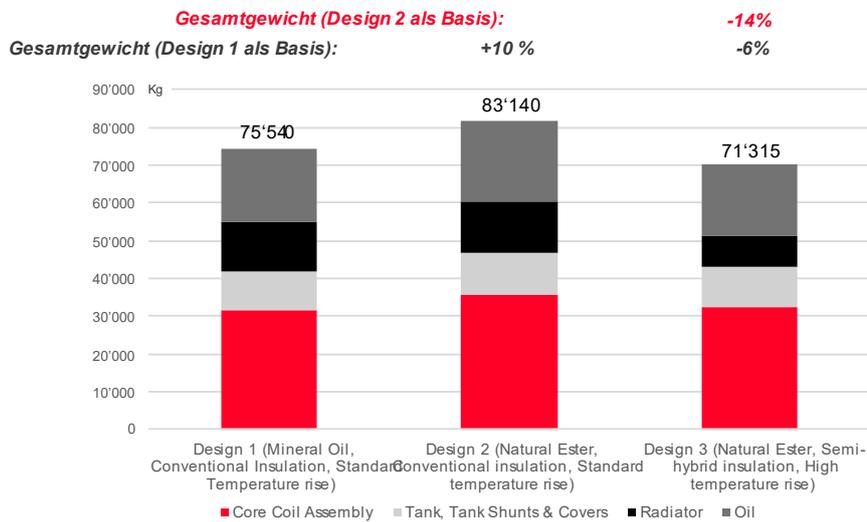
## 5 Analyse: Einfluss vom Isolationstyp auf die Energie-, Materialeffizienz und Klimabilanz

### Design Ergebnisse

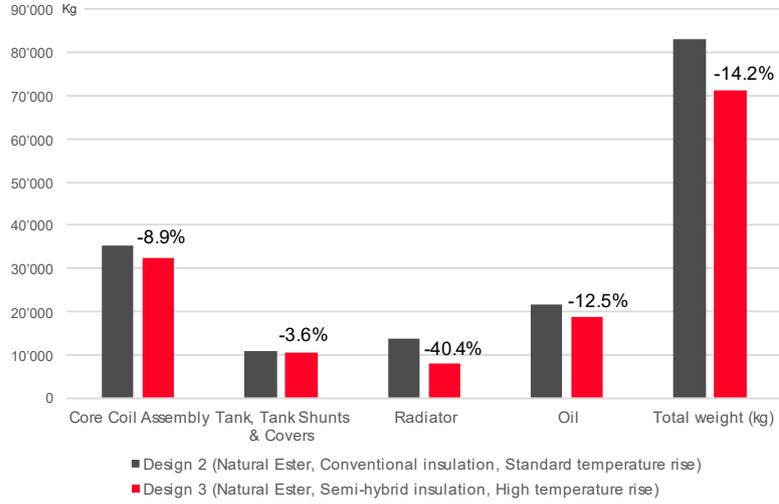
40/60 MVA, 132/33 kV, ONAN/ONAF, 14 % (Impedanz), 50 Hz

Parameter	Design 1 @75°C (Referenzanstieg Durchschnittstemperatur)	Design 2 @75°C (Referenzanstieg Durchschnittstemperatur)	Design 3 @115°C (Referenzanstieg Durchschnittstemperatur)
<b>Feste Isolierung</b>	Konventionell	Konventionell	SemiHybrid
<b>Flüssigkeit</b>	Mineralöl	Ester	Ester
<b>Leerlaufverlust (kW)</b>	22.9	25.8	23.8
<b>Lastverlust (kW)</b>	344.9	302.0	388.9
<b>Gesamtverlust</b>	367,8	327,8	412,7
<b>Lastfaktor <math>K_{PEI}</math></b>	0,258	0,292	0,247
<b>PEI (Max. Energy Effizienz)</b>	99,704 %	99,706 %	99,679 %

### Frage 1: Auswirkungen auf den Materialverbrauch (Gesamtgewicht)



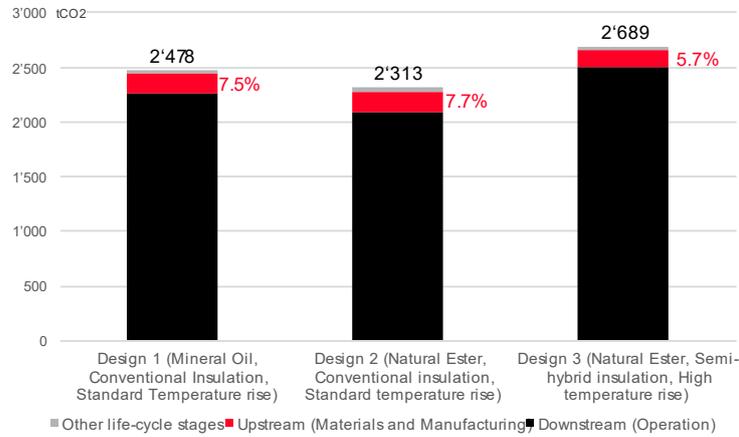
### Frage 1: Auswirkungen auf den Materialverbrauch (nach Komponenten)



13 Public © 2023 Hitachi Energy. All rights reserved.

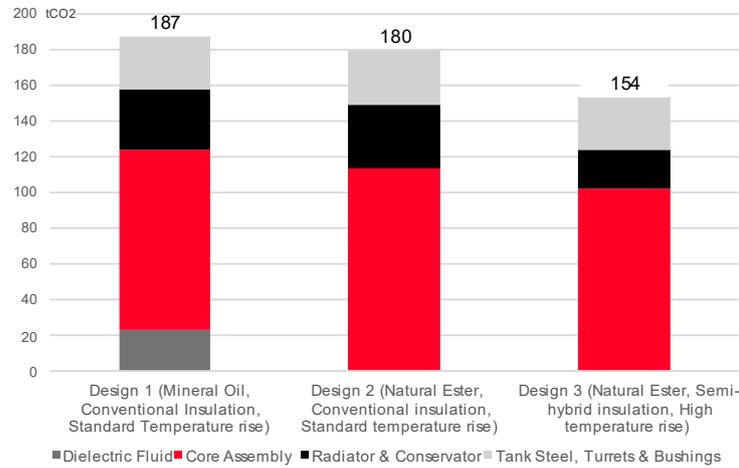
### Frage 2: Auswirkungen auf den CO<sub>2</sub> Fussabdruck (Lebenszyklus)

@ 59g/KWh Grid GHG Emissionsfaktor , 40 Jahre, 50% Durchschnittslastfaktor



14 Public © 2023 Hitachi Energy. All rights reserved.

## Frage 2: Auswirkungen auf den CO<sub>2</sub> Fussabdruck (Materialien)



15 Public  
© 2023 Hitachi Energy. All rights reserved.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung: Überblick über Auswirkungen von Semi-Hybrid Isolierungssystemen in Kombination mit Ester

Parameter	Design 1 @75°C	Design 2 @75°C	Design 2 @115°C
Typ	Konventionell Mineralöl	Konventionell Ester	Semi-Hybrid Ester
K <sub>PEI</sub>	25.8%	29.2%	24.7%
PEI (max. Energieeffizienz)	99,704 %	99,706 %	99,679 %
Materialeffizienz (Gesamtgewicht in kg)	75'540	83'140	71'315
CO <sub>2</sub> -Fußabdruck von Materialien (tCO <sub>2</sub> )	187	180	154
Gesamter CO <sub>2</sub> -Fußabdruck über den gesamten Lebenszyklus (tCO <sub>2</sub> ) (@50% Last, Netz-EF in der Mitte der Lebensdauer: 59 gCO <sub>2</sub> /KWh, 40 Jahre)	2'478	2'313	2'689

17 Public  
© 2023 Hitachi Energy. All rights reserved.

## Zusammenfassung und Empfehlungen



Der Einsatz von Estern und Hochtemperaturisolierungen kann ein wirksames Instrument zur **Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks** bei gleichzeitiger Verbesserung der **Materialeffizienz** sein. Besonders relevant für Länder mit niedrigen Netzwerkkemissionsfaktoren wie in der Schweiz



**Esterflüssigkeiten** (biologisch abbaubare Flüssigkeiten und Flüssigkeiten mit höherem Flammpunkt): Vorteile für den Brandschutz und Lösung zur Minderung von Umweltrisiken (biologische Abbaubarkeit) im Falle von Leckagen.



Um das Potenzial von Ester auszuschöpfen, sollten die **Referenzwerte** für den maximalen Temperaturanstieg in Spezifikationen angepasst werden.

Dadurch können die **wirtschaftlichen, ökologischen und sicherheitstechnischen Vorteile** von Transformatoren unter Berücksichtigung des Anwendungstyps, des (zukünftigen) Energiemixes und der umgebenden Ökosysteme maximiert werden.



Der Konzept einer **TCO-basierten\* Designoptimierung** (im Vergleich zu einer Optimierung des Transformerprieses) ist entscheidend für die Realisierung der erforderlichen Balance zwischen Energie- (GHG Scope 2 Emissionen) und Materialeffizienz (GHG Scope 3 Emissionen) hin zu einer Nettonull Energieversorgung, insbesondere im Hinblick auf die laufende Dekarbonisierung der Energieerzeugung.

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !!!**

Dr. Ghazi Kablouti  
Global Portfolio Sustainability Leader  
Transformers  
[ghazi.kablouti@hitachienergy.com](mailto:ghazi.kablouti@hitachienergy.com)

Für weitere Informationen zum Thema dieses Vortrages:  
Transformer Magazine,  
Special Edition  
„Sustainability“, June 2023





## Referentenadressen

Andrae	Gunnar	FKH Hagenholzstrasse 81 8050 Zürich	andrae@fkh.ch Tel. +41 44 253 62 67
Cranganu-Cretu	Bogdan	Hitachi Energy Ltd Brown-Boveri-Strasse 5 8050 Zürich	bogdan.cranganu-cretu@hitachienergy.com Tel.: +41 79 447 80 46
Dinser, Dr.	Sandro	Dinser Expertise GmbH Gehrenholz 3j 8055 Zürich	dinser@dinser-expertise.ch Tel.: +41 78 723 50 01
Franck, Prof. Dr.	Christian	Eidg. Technische Hochschule Zürich FG Hochspannungstechnologie Physikstrasse 3 8092 Zürich	cfranck@ethz.ch Tel.: +41 44 632 47 62
Frischknecht	Rolf	treeze Ltd Kanzleistrasse 4 8610 Uster	frischknecht@treeze.ch Tel.: +41 44 940 61 91
Göppel	Martin	DILO Armaturen und Anlagen GmbH Frundsbergstrasse 36 DE 87727 Babenhausen	Martin.Goeppel@dilo-gmbh.com Tel.: +49 8333 302 258
Holaus, Dr.	Walter	Hivoduct AG Pfäffikerstrasse 28 8310 Kempthal	walter.holaus@hivoduct.com Tel.: +41 79 458 62 45
Kablouti	Ghazi	Hitachi Energy Ltd Badenerstrasse 780 8048 Zürich	ghazi.kablouti@hitachienergy.com Tel.: +41 79 426 88 57
Kirchner	Hannah	Eidg. Technische Hochschule Zürich Physikstrasse 3 8092 Zürich	hkirchner@ethz.ch Tel.: +41 44 633 80 47
Refaey, Dr.	Mostafa	PIFFNER Messwandler AG Lindenplatz 17 5042 Hirschthal	mostafa.refaey@pmw.ch Tel. +41 62 739 28 64
Walter, Dr.	Michael	FKH Hagenholzstrasse 81 8050 Zürich	walter@fkh.ch Tel.: +41 44 253 62 61
Wenger	Philipp	TransnetBW GmbH Heilbronner Str. 51-55 Gebäude Look 21 DE 70191 Stuttgart	p.wenger@transnetbw.de Tel.: +49 151 724 630 28



## QR-Code zu den Präsentationen



Link: <https://fileserv.fkh.ch/s/FKH-FT-2023-Praesentationen>

Die Gross-/Kleinschreibung muss bei der Eingabe des Links berücksichtigt werden.

Der Link ist gültig bis 31. Januar 2024.









