

# **SCHLUSSBERICHT**

## **Verbundvorhaben ECO-BREAK-420**

### **Umweltfreundliche Schalttechnologien für die Höchstspannungsebene**

#### **Teilprojekt Siemens Energy: Konzept, Design und Demonstration**

Förderkennzeichen: 03EI6052A

Beginn: 01.03.2021

Ende: 29.02.2024

Projektleitung: Dr. Paul Gregor Nikolic

Siemens Energy Global GmbH & Co. KG  
Siemens Energy  
Grid Technologies

Otto-Hahn-Ring 6  
81739 München, Deutschland

Autoren des Schlussberichts:  
(für die Siemens Energy Global GmbH & Co. KG)

Dr. Paul Gregor Nikolic, Tobias Goebels,  
Dr. Katrin Benkert, Peter Milewski, Karsten Juhre,  
Aramis Falk, Andreas Groß

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# 1 Inhaltsverzeichnis

|       |                                                                                                                                    |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Kurze Darstellung des Vorhabens.....                                                                                               | 3  |
| 1.1   | Aufgabenstellung .....                                                                                                             | 3  |
| 1.2   | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....                                                                  | 4  |
| 1.3   | Planung und Ablauf des Vorhabens.....                                                                                              | 4  |
| 1.4   | Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn .....                                                                   | 7  |
| 1.4.1 | Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden .....           | 9  |
| 1.4.2 | Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....                              | 10 |
| 1.5   | Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....                                                                                            | 10 |
| 2     | Eingehende Darstellung des Vorhabens sowie der im Vorhaben erzielten Ergebnisse .....                                              | 11 |
| 2.1   | Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....            | 11 |
| 2.1.1 | AP1 - Konzepte zur Mehrfachunterbrechung 420 kV+ .....                                                                             | 11 |
| 2.1.2 | AP2 - Isolations-Konzepte.....                                                                                                     | 17 |
| 2.1.3 | AP3 - Steuerung der Spannungsaufteilung .....                                                                                      | 18 |
| 2.1.4 | AP4 - Konzepte für Trenn- und Erdungsschalter .....                                                                                | 19 |
| 2.1.5 | AP5 - Kinematische Kette und Antrieb .....                                                                                         | 21 |
| 2.1.6 | AP6 - (Labor-) Muster & (Prüffeld-) Demonstration .....                                                                            | 23 |
| 2.1.7 | Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen .....                                                       | 25 |
| 2.2   | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....                                                                           | 25 |
| 2.3   | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....                                                                       | 25 |
| 2.4   | Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....     | 27 |
| 2.4.1 | Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten.....                                                                            | 27 |
| 2.4.2 | Wirtschaftliche Erfolgsaussichten.....                                                                                             | 28 |
| 2.5   | Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen..... | 29 |
| 2.6   | Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....                                                                    | 30 |
| 3     | Literaturverzeichnis.....                                                                                                          | 31 |

# 1 Kurze Darstellung des Vorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung

Die Erforschung der Grundlagen und die Entwicklung technologischer Lösungen für die Verwendung klimaneutraler Alternativen zu Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) als Isolier- und Löschmedium in Schaltgeräten und Schaltanlagen in Stromnetzen stellt, intensiviert durch die Revision der europäischen Verordnung über fluorierte Treibhausgase, einen zentralen Punkt aktueller Aktivitäten in Forschung und Entwicklung dar.

Die vorangegangenen Forschungsvorhaben „ $\text{SF}_6$ -freie gasisolierte Hochspannungsschaltanlage“ (Förderkennzeichen 03ET7556), „Untersuchungen an neuen, umweltfreundlichen Isoliergasen für kompakte, gasisolierte Übertragungsleitungen (GIL)“ (Förderkennzeichen 03ET7551) und „ $\text{SF}_6$ -freie gasisolierte Mittelspannungsschaltanlage“ (Förderkennzeichen 03ET7560) haben dabei im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung die ersten Grundlagen für  $\text{SF}_6$ -freie Technologien im Bereich der Verteilungs- und Übertragungsnetze gelegt. Im Fokus dieser vorhergehenden Untersuchungen standen dabei unter anderem die dielektrische Festigkeit, die Materialverträglichkeit und das Handling möglicher Alternativgaslösungen unter Verwendung von natürlichen Gasen (z.B. synthetische Luft) und fluorierten Gasmischungen als Isolier- und Löschmedium. Erste Felderfahrungen mit Schaltgeräten mit Vakuumschaltröhren als Leistungsschaltelementen in Kombination mit Clean Air (synthetische Luft) als Isoliermedium für Bemessungsspannungen bis zu  $U_r = 145 \text{ kV}$ , sowie eine gute Kundenakzeptanz zeigen darüber hinaus das Potential für vollständig fluor-freie Technologien in höheren Spannungsebenen. Ein wesentliches Ergebnis der vorhergehenden Vorhaben ist jedoch auch, dass zum Einsatz von natürlichen Gasen erhebliche Anpassungen des Designs der Schaltgeräte in Verbindung mit neuen, auf die Eigenschaften des jeweiligen Alternativgases angepassten, technologischen Ansätzen erforderlich sind.

Im Fokus dieses Vorhabens standen umweltfreundliche, klimaneutrale Grundlagentechnologien für das Übertragungsnetz ( $U_r \geq 420 \text{ kV}$ ). Als Basis diente dabei der Einsatz klimaneutraler Isoliergase (z.B. synthetische Luft) in Verbindung mit Vakuumschaltröhren als Leistungsschaltelemente. Im Rahmen des Vorhabens wurden in verschiedenen Arbeitssträngen technologische Grundlagen und Lösungsansätze für die verschiedenen funktionalen Bereiche der Schaltgeräte und Schaltanlagen (z.B. Isolation, Antrieb, Trenn- und Erdungsfunktion, Leistungsschaltfunktion) untersucht und bewertet (Technology Readiness Level (TRL) 3...4). Zur Erreichung der für das Übertragungsnetz erforderlichen Schaltleistungsperformance stand dabei die Serienschaltung von Vakuumschaltröhren als eine wesentliche Grundlagentechnologie im Fokus des Vorhabens. Neben den Systemaspekten der Schaltanlage wurden zusätzlich innovative Ansätze zur Integration von Steuerelementen in das Design der Schaltgeräte und Schaltanlagen untersucht und eingesetzt. Aufbauend auf den Ergebnissen der einzelnen Arbeitsstränge (TRL 3...4) erfolgte eine Demonstration der betrachteten Grundlagentechnologien anhand von Labormustern (TRL 5...6) und ermöglichte so eine ausführliche Bewertung des Einsatzpotentials der untersuchten Technologien für Übertragungsnetze der Hoch- und Höchstspannungsebene. Zentrales Ziel des Vorhabens bei Siemens Energy war dabei die Untersuchung von Konzepten für klimaneutrale

Schaltgeräte und Schaltanlagen ( $U_r \geq 420$  kV) und die Realisierung und Demonstration der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems.

## **1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Kenntnisse zu Entwicklung und Bau von gasisolierten Hochspannungs-Schaltanlagen waren eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens. Diese Kenntnisse waren bei Siemens Energy aufgrund jahrzehntelanger Aktivität auf diesem Gebiet gegeben. Des Weiteren hatten auch alle Projektpartner des Verbundvorhabens (Siemens Energy, Siemens AG und Technische Universität München) langjährige Erfahrungen auf den eingebrachten Gebieten. Diese zeichnen sich sowohl durch wissenschaftliche Arbeiten (beteiligte Hochschule) als auch durch die Anwendungen im Produktbereich (beteiligte Industriepartner) aus. Darüber hinaus bestanden und bestehen gute Kontakte und Verbindungen zu führenden Forschungsstellen, Einrichtungen und Firmenabteilungen, die auf diesen Gebieten arbeiten.

Die vorangegangenen Forschungsvorhaben „SF<sub>6</sub>-freie gasisierte Hochspannungsschaltanlage“ (Förderkennzeichen 03ET7556), „Untersuchungen an neuen, umweltfreundlichen Isoliergasen für kompakte, gasisierte Übertragungsleitungen (GIL)“ (Förderkennzeichen 03ET7551) und „SF<sub>6</sub>-freie gasisierte Mittelspannungsschaltanlage“ (Förderkennzeichen 03ET7560) haben dabei im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung die ersten Grundlagen für SF<sub>6</sub>-freie Technologien im Bereich der Verteilungs- und Übertragungsnetze gelegt.

Somit war bei den Partnern theoretisches und praktisches Wissen vorhanden, das im Rahmen dieses Projektes weiter vertieft wurde und nun der angewandten Forschung und technologischen Entwicklung zukünftiger Energietechnologien zur Verfügung steht.

## **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Forschungsvorhaben „Umweltfreundliche Schalttechnologien für die Höchstspannungsebene“ wurde in sechs Arbeitspakete gegliedert, die die verschiedenen funktionalen Bereiche der Schaltgeräte und Schaltanlagen abdecken.

### **AP1 - Konzepte zur Mehrfachunterbrechung 420 kV+**

Ziel des Arbeitspakets war die Erarbeitung von Lösungskonzepten zur Realisierung der Mehrfachunterbrechung. Zur grundlegenden Untersuchung möglicher Konzepte einer Vakuum-Mehrfachunterbrechung wurden zunächst theoretische Betrachtungen durchgeführt. Diese umfassten den Aufbau eines Simulationstools, mit dessen Hilfe die zu erwartende Spannungsaufteilung auf die einzelnen Schaltstrecken simuliert sowie die möglichen auftretenden elektrischen Feldstärken berechnet werden konnten. Weiterhin wurden die (stationären) parasitären Kapazitäten ermittelt, die die Spannungsaufteilung im geöffneten Zustand bestimmen und für die Auslegung von Steuerelementen von Bedeutung sind. Im Rahmen erster experimenteller Ansätze wurden Voruntersuchungen an einem Labormuster durchgeführt. Anhand dieses Labormusters konnte zunächst die unbeeinflusste Spannungsaufteilung auf die beiden Schaltstrecken (d.h. ohne

Parallelschaltung von Elementen zur Spannungssteuerung) bei verschiedenen Schaltfällen untersucht werden. Ebenso wurden die nach Unterbrechung des Ausschaltstroms auftretenden Nachströme erfasst und charakterisiert, da diese einen signifikanten Einfluss auf die Spannungsaufteilung nehmen können. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen wurden zur Präzisierung und Erweiterung der aufgebauten Simulationen genutzt.

## **AP2 - Isolations-Konzepte**

Gegenüber SF<sub>6</sub> bietet Clean Air bei gleichem Gasdruck nur rund 40 % der elektrischen Festigkeit. Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung der Baugröße von Geräten, was insbesondere bei höheren Bemessungsspannungen  $U_r \geq 420$  kV zum Tragen kommt. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden Konzepte zur Reduktion der Elektrodenabstände unter Einsatz von Clean Air als Isoliermedium erarbeitet und sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht.

Vakuumschaltröhren dienen als Leistungsschaltelemente in den hier betrachteten Schaltgeräten. Teile der Vakuumschaltröhre sowie die damit verbundenen Leiterbahnen auf Hochspannungspotential müssen gegenüber dem Erdpotential elektrisch isoliert werden. Neben einer reinen Gasisolierung mit Clean Air ist für einige Anwendungsfälle grundsätzlich auch eine Feststoffisolierung vorstellbar.

Es wurde untersucht, mit welchen Maßnahmen eine Teilkompensation der gegenüber SF<sub>6</sub> deutlich reduzierten elektrischen Festigkeit von Clean Air in typischen elektrischen Isoliersystemen möglich ist. Aufgrund theoretischer Betrachtungen wurden zunächst bevorzugte Isoliersysteme ausgewählt. Mit diesen Isoliersystemen wurden hochspannungstechnische Experimente durchgeführt, um die theoretischen Betrachtungen zu verifizieren.

Durch Schalthandlungen und elektrische Teilentladungs-Alterung können sich die Eigenschaften des Isoliergasgemischs über die Zeit verändern. Daher wurde der Einfluss dieser Zersetzungsprodukte auf die elektrische Festigkeit des Isoliergasgemischs untersucht.

## **AP3 - Steuerung der Spannungsaufteilung**

Im Rahmen des Arbeitspakets erfolgte die Umsetzung der Konzepte aus AP1 in erste Prüfanordnungen und Labormuster. Es wurde überprüft, in welcher Form Steuerelemente (Kondensatoren) in das Schaltgerät integriert werden können, so dass die dielektrische Festigkeit von natürlichen Gasen (z.B. synthetische Luft) als Isolationsmedium für einen sicheren Betrieb des Schaltgeräts ausreicht. Es wurde ein Versuchsstand zur Bewertung der Spannungsfestigkeit von Modellanordnungen mit Steuerelementen in synthetischer Luft aufgebaut und erprobt. Die dielektrischen Eigenschaften und Materialeigenschaften der Steuerelemente wurden u.a. in Hochspannungsprüfungen charakterisiert und kritische Parameter identifiziert. Zusätzlich erfolgte eine Vorprüfung des Verhaltens der Steuerelemente in Bezug auf das Gesamtsystem "Schaltanlage" in den realitätsnahen Labormustern aus AP6. Dazu wurden Steuerelemente zum Einbau in die Labormuster in AP6 ausgelegt und experimentell charakterisiert.

#### **AP4 - Konzepte für Trenn- und Erdungsschalter**

Das Schaltvermögen von Clean Air ist gegenüber  $\text{SF}_6$  deutlich reduziert. Auf Grund normativer Anforderungen an Trenn- und Erdungsschalter sind diese Unterschiede für Geräte bis  $U_r = 145 \text{ kV}$  noch ohne größere konstruktive Änderungen realisierbar, nicht aber für höhere Spannungsebenen.

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Untersuchung von Konzepten und Technologien zur Realisierung von Trenn- und Erdungsschaltern in Clean Air. Hierbei stand der Einsatz von verschiedenen neuen oder zusätzlichen Technologien, ggf. auch deren Kombination, im Vordergrund.

Es wurden Technologien identifiziert, welche für das Schalten und das Speichern notwendiger Schaltenergie im Trennschalter unter Clean Air Bedingungen prinzipiell geeignet sind. In einem Trenner-Versuchsmuster wurde die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der ausgewählten Technologien nachgewiesen.

Des Weiteren wurden Technologien identifiziert, welche für das Schalten und das Speichern notwendiger Schaltenergie im Erdungsschalter unter Clean Air Bedingungen prinzipiell geeignet sind. In einem Erder-Versuchsmuster wurde die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der ausgewählten Technologien nachgewiesen.

#### **AP5 - Kinematische Kette und Antrieb**

Ziel des Arbeitspakets war die Erstellung von Lösungskonzepten zur Realisierung einer kinematischen Kette sowie eines Antriebsanbaus für zweifach unterbrechende Vakuumleistungsschalter. Hierbei wurden, basierend auf den Ergebnissen der Arbeitspakete AP1 bis AP3, die Bauformen Freiluft-Leistungsschalter, Leistungsschalter für gasisolierte Schaltanlagen sowie Dead-Tank-Leistungsschalter (geerdete Metallkapselung) berücksichtigt. Es wurden Entwürfe und Simulationen der kinematischen Kette einschließlich Antrieb für einen zweifach unterbrechenden Dead-Tank-Vakuumleistungsschalter und einen zweifach unterbrechenden Vakuumleistungsschalter in Freiluft-Bauweise erstellt.

#### **AP6 - (Labor-) Muster & (Prüffeld-) Demonstration**

Unter Weiterverarbeitung der Ergebnisse der vorherigen Arbeitspakete erfolgte im letzten Schritt der Aufbau von Labormustern mit geerdeter Metallkapselung und in Freiluft-Bauweise zur Demonstration des Einsatzpotentials der vorher erarbeiteten Grundlagentechnologien. Die genaue Auslegung der Labormuster war dabei stark von den Ergebnissen aus AP2, AP3 und AP5 abhängig.

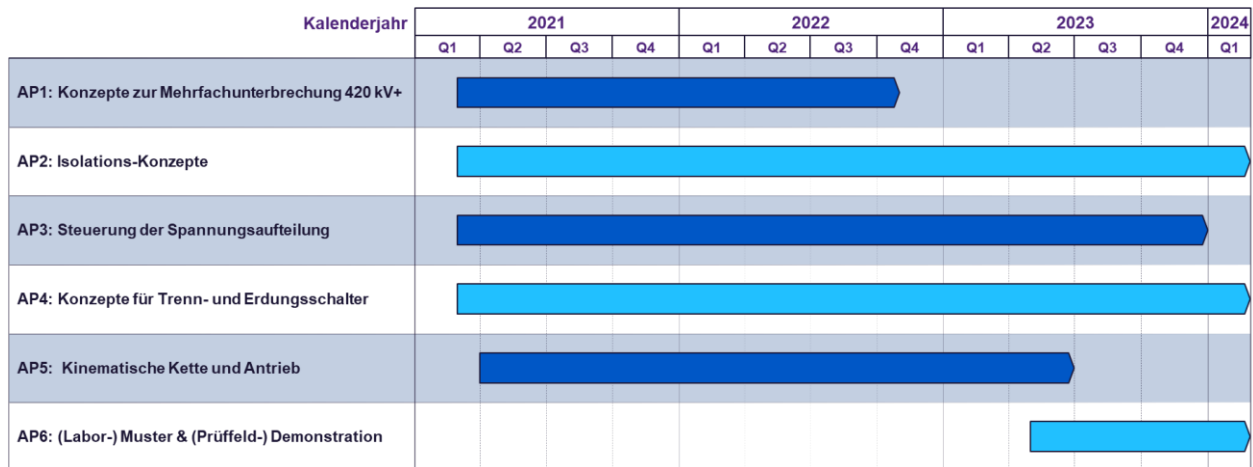


**Abbildung 1: Projektdurchführung und Laufzeiten der verschiedenen Arbeitspakete**  
 (Blau: Siemens Energy, hellblau: Zusammenarbeit der Siemens Energy mit den Projektpartnern Siemens AG und/oder TU München)

Im Forschungsprojekt wurde eine fruchtbare Zusammenarbeit durch eine klare Zuordnung von Verantwortlichkeiten und Aufgaben sowie durch ein kontinuierliches Projektmanagement realisiert. Es wurden u.a. realistische Projektmeilensteine abgestimmt, um den Projektfortschritt für alle Projektbeteiligten nachvollziehbar und messbar zu machen. Um der engen Verzahnung zwischen den Themen der verschiedenen Arbeitspakete Rechnung zu tragen, wurden regelmäßig Workshops und Präsentationen von aktuellen Projektergebnissen in Expertenkreisen durchgeführt, um den Wissenstransfer und Austausch zwischen den einzelnen Fachgebieten kontinuierlich zu ermöglichen.

#### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

Gase mit guten Lichtbogenlöscheigenschaften und hoher Durchschlagsfestigkeit stellen in modernen gasisolierten Schaltanlagen und Leistungsschaltern die wichtigsten Schalt- bzw. Isoliermedien dar. Insbesondere auf Grund der Überarbeitung der europäischen Verordnung über fluorierte Gase aus dem Jahr 2014 und eines möglichen Verbots des Einsatzes des aktuell im Hoch- und Höchstspannungsbereich größtenteils genutzten Gases Schwefelhexafluorid, stehen die Suche und Bewertung möglicher klimafreundlicherer Ersatzstoffe im Fokus von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.  $\text{SF}_6$  ist das stärkste bekannte Treibhaus mit einem Global Warming Potential (GWP) von 24300. Dies bedeutet, dass 1 kg  $\text{SF}_6$  dasselbe Treibhauspotential hat, wie 24300 kg  $\text{CO}_2$ . Zudem handelt es sich bei  $\text{SF}_6$  um ein sehr stabiles Molekül, das in der Atmosphäre eine Lebensdauer von etwa 1000 Jahren aufweist [1].

Um  $\text{SF}_6$  nun im Bereich der Energieversorgung durch klimafreundlichere Stoffe zu ersetzen, werden, je nach beteiligten Unternehmen und Forschungseinrichtungen, verschiedene Ansätze verfolgt. So gibt es beispielsweise Untersuchungen zu anderen fluorhaltigen Gasen bzw. Gasgemischen, die anstelle von  $\text{SF}_6$  eingesetzt werden sollen und ein zum Teil erheblich geringeres Treibhauspotential aufweisen. Eine andere umweltfreundliche und hoch leistungsfähige Alternative, die gänzlich auf fluorierte Gase verzichtet, stellt in diesem Zusammenhang die Vakuumschalttechnik in Kombination mit synthetischer Luft als Isolationsmedium dar.

## Vakuumschalttechnik und Clean Air-Isolation

Ansatz dabei ist die Weiterentwicklung der aus der Mittelspannungsebene bekannten, seit Jahrzehnten etablierten und flächendeckend eingesetzten Vakuumschalttechnik zum Einsatz in der Hoch- und Höchstspannungsebene. Durch die Nutzung von Clean Air (synthetische Luft, 80% N<sub>2</sub>, 20% O<sub>2</sub>, GWP = 0) können Schalter und Schaltanlagen realisiert werden, deren Füllung, verglichen mit den obengenannten SF<sub>6</sub>-Alternativen, nicht nur ein geringeres, sondern keinerlei Treibhauspotential mehr aufweist. Weiterhin kann bei Clean Air ausgeschlossen werden, dass sie in Zukunft von irgendeiner Form von Umweltregularien betroffen sein wird. In diesem Forschungsvorhaben stand die Weiterentwicklung der Vakuumschalttechnik für die Nutzung in der Höchstspannungsebene mit  $U_r \geq 420$  kV im Vordergrund.

Insbesondere bei den Schalteigenschaften ist das Vakuum bei nahezu allen betrachteten Punkten gegenüber den Gasen im Vorteil. Dies lässt sich unter anderem auf die geringere Lichtbogenbrennspannung im Vakuum zurückführen, die zu einem geringeren Energieumsatz im Schalter führt. Durch die weiterhin kürzere Lichtbogenbrenndauer wird der Kontaktabbrand zusätzlich reduziert, sodass eine höhere Anzahl von Nennstrom- und Kurzschlussstromabschaltungen erreicht werden kann [2, 3]. Durch die kürzere Schaltbewegung wird weniger Antriebsenergie benötigt und auf Grund der guten Schalteigenschaften kann auf einen kostenintensiveren Einzelpolantrieb verzichtet werden [4].

## Vakuumschalttechnik für die Hoch- und Höchstspannungsebene

Schaltgeräte basierend auf der Vakuumschalttechnik und einer Clean Air-Isolation für Spannungen von  $U_r = 145$  kV befinden sich bereits heute im kommerziellen Betrieb. Vakuumschaltröhren für eine Bemessungsspannung von  $U_r = 170$  kV befinden sich in der Phase der Typprüfung [5], für höhere Bemessungsspannungen bis  $U_r = 245$  kV sind sie aktuell in der Entwicklung [4]. Während bei Gasen wie SF<sub>6</sub> die Kennlinie der Durchschlagsfestigkeit annähernd linear ansteigt, weist sie für Vakuum einen stark degressiven Verlauf auf. Aus diesem Grund können Spannungsebenen oberhalb der oben genannten  $U_r = 245$  kV mit einfach unterbrechenden Vakuumschaltröhren nicht mit technisch und wirtschaftlich vertretbarem Aufwand adressiert werden. Deswegen wurden hierfür im Rahmen dieses Forschungsprojekts Konzepte mit einer Serienschaltung zweier Vakuumschaltröhren untersucht.

Von verschiedenen Autoren liegen bereits Veröffentlichungen vor, bei denen hauptsächlich Mittelspannungsvakuumschaltröhren in Serie verschaltet wurden [6-8]. Dabei konnte gezeigt werden, dass dieses Konzept prinzipiell geeignet ist, um entsprechend höhere Spannungsebenen erreichen zu können. Einen signifikanten Einfluss auf die mit einer solchen Anordnung maximal beherrschbaren Spannungen hat dabei die Spannungsaufteilung auf die einzelnen Schaltstrecken [6, 9, 10]. Auf Grund parasitärer Kapazitäten (Streu- und Erdkapazitäten) stellt sich keine gleichmäßige Spannungsaufteilung ein, so dass Maßnahmen zur Spannungssymmetrierung getroffen werden müssen. Dazu werden Kondensatoren zu den einzelnen Vakuumschaltstrecken parallelgeschaltet (vgl. Abbildung 2, C<sub>1</sub> und C<sub>2</sub> Streu- und C<sub>g</sub> Erdkapazität).

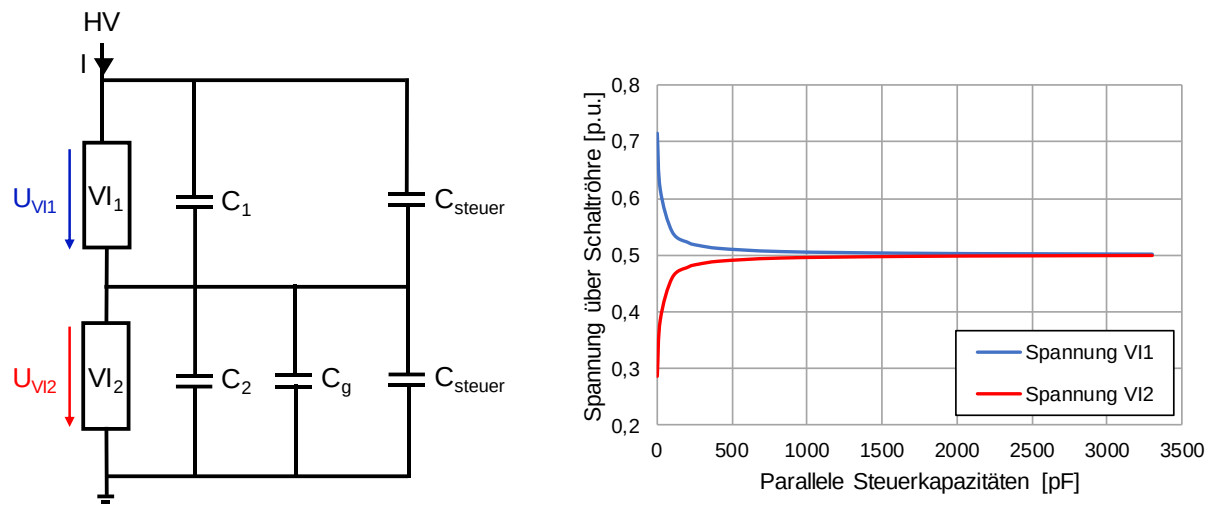


**Abbildung 2:** links: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Serienschaltung zweier Vakuum-schalt-röhren; rechts: Spannungsaufteilung auf beide Vakuum-schalt-röhren in Abhängigkeit von  $C_{\text{steuer}}$

Bei früheren Untersuchungen wurde ein Schaltgerät aufgebaut, das einer Bemessungsspannung von  $U_r = 363 \text{ kV}$  genügt, und somit dem Bereich der Höchstspannung zuzuordnen ist [11, 12]. Hierzu wurden jedoch insgesamt zwölf Vakuum-schalt-röhren miteinander verschaltet, so dass ein vergleichsweise umfangreicher und komplex zu handhabender Aufbau entstand. Insbesondere ist dieser nicht für den großflächigen kommerziellen Einsatz geeignet.

### Trenn- und Erdungsschalter

Neben Leistungsschaltern sind auch Trenn- und Erdungsschalter für den sicheren Betrieb einer Schaltanlage notwendig. Im Bereich der Mittelspannung sind bereits Ansätze zur Realisierung von Lasttrennschaltern unter Verwendung von natürlichen Gasen vorhanden. Eine Weiterentwicklung dieser Konzepte zum Einsatz in höheren Spannungsebenen ist bisher nicht erfolgt.

#### 1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Grundsätzlich wurde bei den Untersuchungen im Rahmen des Förderprojekts darauf geachtet, praxisnahe Versuchsaufbauten, -anordnungen und -konstruktionen zu verwenden, wie sie für kommerziell erhältliche und (in SF<sub>6</sub>-Technik) im Hochspannungsnetz betriebene Hochspannungs-Schaltanlagen eingesetzt werden, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Anlagen gewährleisten zu können. Es wurden dafür vorwiegend Anlagenkomponenten der Spannungsebenen 245 kV, 420 kV und 550 kV verwendet.

Für die Durchführung des Projekts wurden soweit möglich vorhandene Labore und Prüfeinrichtungen genutzt, sowohl bei Siemens Energy als auch bei den Kooperationspartnern. Dazu

gehörten beispielsweise verschiedene Hochspannungsprüfeinrichtungen in den Laboren bei Siemens Energy.

Für die Durchführung von Experimenten wurde weitestmöglich auf bekannte und bewährte Verfahren zurückgegriffen, wie die Durchführung von Prüfungen nach gängigen Hochspannungs-Standards (IEC 62271-1/-100/-102/-203).

#### **1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Fachliteratur wurde durch die Teilnahme an mehreren nationalen (z.B. VDE Fachtagung Hochspannungstechnik) und internationalen Fachkonferenzen (z.B. CIGRE Session Paris) und durch Nutzung des Siemens-Energy-internen Informationsrecherchesystems gefunden und analysiert. Einige verwendete Veröffentlichungen sind im Literaturverzeichnis des vorliegenden Berichts enthalten.

#### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die am Verbundvorhaben beteiligten Projektpartner sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Mit den Kooperationspartnern wurden in regelmäßigen Statusbesprechungen die Ergebnisse diskutiert. Weiter wurden Ganztagesbesprechungen mit allen Projektbeteiligten durchgeführt, um den Projektfortschritt und Wissensstand mit allen Beteiligten zu teilen und Abhängigkeiten zu identifizieren.

**Tabelle 1: Kurzbeschreibung der Projektpartner**

| <b>Projektpartner</b>                                                                | <b>Ansprechperson</b>            | <b>Aufgabenbereich im Projekt</b>               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| Siemens AG - Technology                                                              | Dr. Steffen Lang                 | Polymere Lacke zur Feldsteuerung                |
| Technische Universität München<br>Professur für Hochspannungs-<br>und Anlagentechnik | Prof. Dr.-Ing. Andreas<br>Jossen | Isolationskonzepte und Schalten in<br>Clean Air |

Die simulativen Arbeiten zur Nachbildung von Schaltlichtbögen im Rahmen des Vorhabens wurden durch Pierre Freton, Jean-Jacques Gonzalez, Yann Cressault und Philippe Teulet von der Universität Paul Sabatier in Toulouse unterstützt.

## 2 Eingehende Darstellung des Vorhabens sowie der im Vorhaben erzielten Ergebnisse

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Nachstehend werden die Ergebnisse der Arbeitspakete des Vorhabens dargestellt und zusammengefasst.

#### 2.1.1 AP1 - Konzepte zur Mehrfachunterbrechung 420 kV+

Im Rahmen von AP1 wurden umfangreiche Simulationen der Spannungsaufteilung von Leistungsschaltern mit zwei seriell verschalteten Vakuumschaltröhren durchgeführt. Hierzu wurde ein Simulationsmodell in Matlab/Simulink aufgebaut, in dem der Nachstrom der Vakuumschaltröhren, das Verhalten kapazitiver Steuerelemente sowie unterschiedliche Öffnungszeitpunkte der Vakuumschaltröhren berücksichtigt werden. Als wesentliches Ergebnis zeigte sich, dass Steuerkapazitäten im Bereich von  $C_s = 500 \text{ pF}$  zur Symmetrierung der Spannungsaufteilung auf die Vakuumschaltröhren notwendig sind. Eine Verzögerung des Öffnungszeitpunkts der Vakuumschaltröhren, d.h. eine Asynchronität beim Schalten, führt zu einer Differenz der Nachströme beider Vakuumschaltröhren und zu einer Versteuerung des Spannungsverhältnisses. Dieser Effekt ist insbesondere bei den Betrachtungen zur kinematischen Kette in AP5 zu berücksichtigen. Zusätzlich wurde eine Modellanordnung ausgelegt, die die experimentelle Validierung der Simulationsergebnisse ermöglicht.

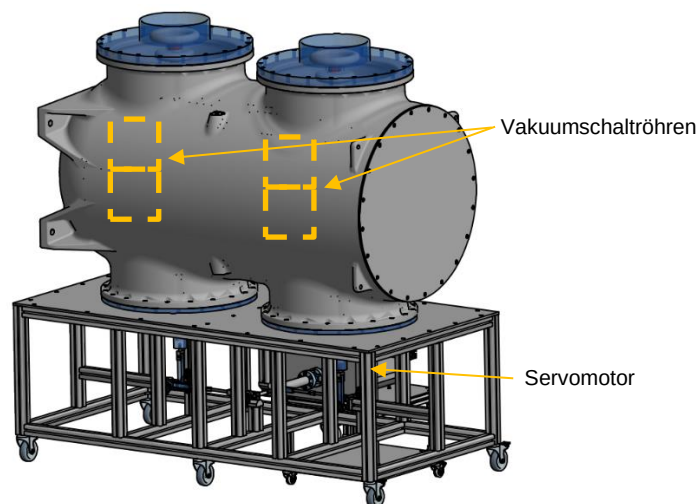


Abbildung 3: Modellanordnung zur experimentellen Charakterisierung der Spannungsaufteilung

Es konnte gezeigt werden, dass die Parallelschaltung von Steuerkondensatoren zu einer Vergleichmäßigung der Spannungsaufteilung führt. Diese Ergebnisse stimmen mit den Erwartungen aus den vorher durchgeführten Simulationen überein. Während sich im ungesteuerten Zustand eine Spannungsaufteilung von etwa 75% : 25% einstellt, wird bei Versuchen mit Steuerkondensatoren eine Aufteilung von ca. 53% : 47% erreicht. Abbildung 4 zeigt exemplarische Messergebnisse.

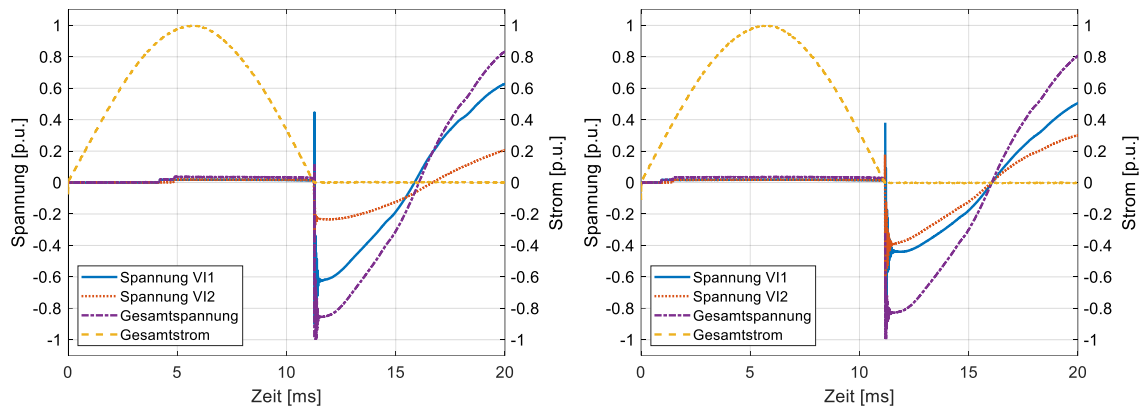


**Abbildung 4:** Links: ungesteuerter Versuchsaufbau → ungleichmäßige Spannungsaufteilung zwischen V<sub>11</sub> und V<sub>12</sub>; rechts: Versuchsaufbau mit Steuerkondensatoren → gleichmäßigere Spannungsaufteilung

Der nach Löschen des Lichtbogens in den Vakuumschaltröhren auftretende Nachstrom kann die Spannungsaufteilung zusätzlich erheblich beeinflussen. Dieser Effekt wurde in Ergänzung der Untersuchungen in AP1 und zwecks Vergleiches in einer realitätsnahen Anordnung experimentell untersucht. Hierzu wurde ein luftisolierter 145 kV Vakuumleistungsschalter zur Untersuchung seriell verschalteter Hochspannungs-Vakuumschaltröhren ertüchtigt.

Zur Nachbildung der Serienschaltung zweier Vakuumschaltröhren wurden zwei Pole des dreipoligen Leistungsschalters in Serie verschaltet und mit einer Nachstrommesstechnik ausgerüstet. Zur Symmetrierung der Spannungen über den beiden Polen wurden zusätzlich Steuerkondensatoren parallelgeschaltet (vgl. Abbildung 5).

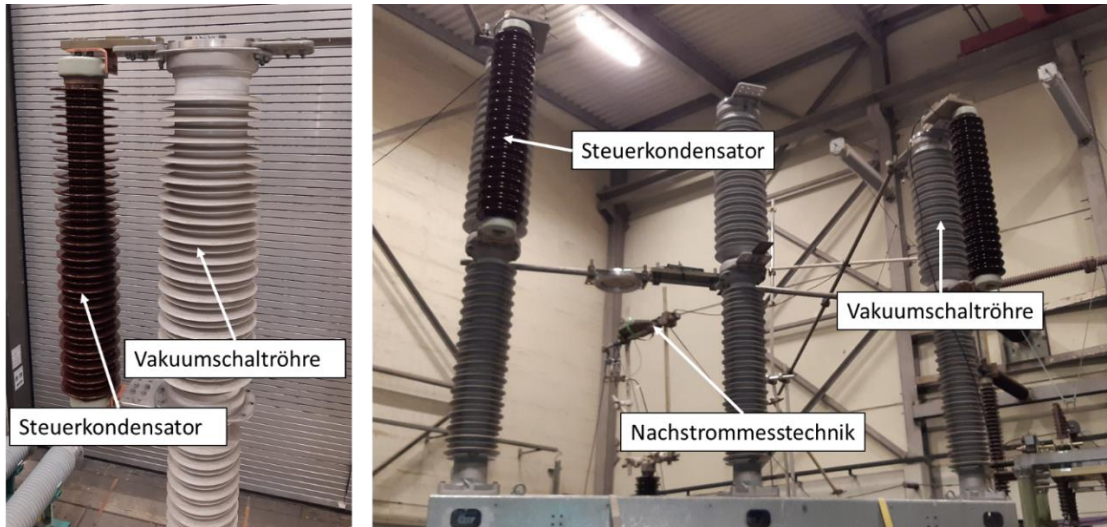


**Abbildung 5: Versuchsaufbau mit 145 kV Freiluft-Vakuumleistungsschalter und Nachstrommesstechnik**

Erste Untersuchungen mit diesem Versuchsaufbau konnten die Ergebnisse der in AP1 erfolgten Simulationen bestätigen. Der Nachstrom beeinflusst den Strom, mit dem die Steuerkondensatoren aufgeladen werden. Sind Nachstrom und damit die Ladeströme symmetrisch, stellt sich auch eine symmetrische Spannungsaufteilung ein. Wird der Versuchsaufbau so modifiziert, dass die zweite Vakuumschaltröhre erst verzögert öffnet, verschieben sich die Nachstromverhältnisse und damit die Spannungsaufteilung auf die beiden Kondensatoren. Das Resultat ist damit eine ungleichmäßige Spannungsaufteilung zwischen den beiden Vakuumschaltröhren. Exemplarische Ergebnisse sind in den Abbildungen 6 und 7 gezeigt.

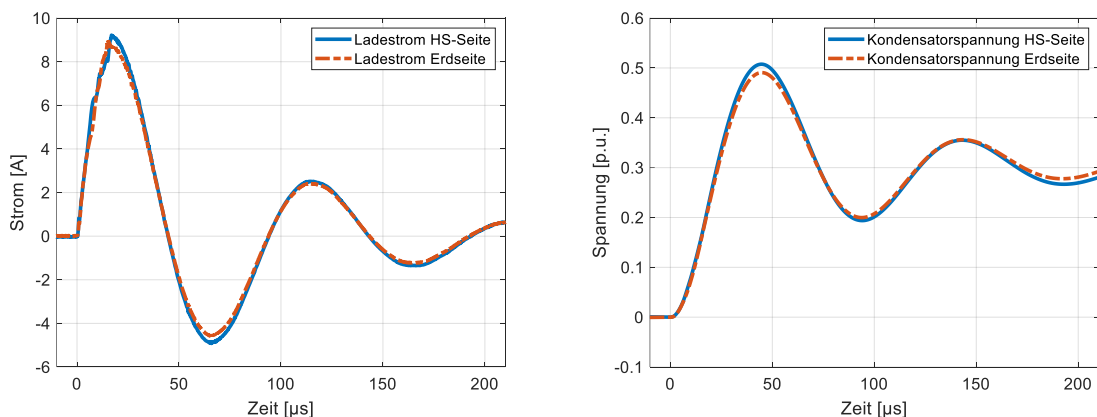


**Abbildung 6: Symmetrischer Nach- und damit Ladestrom → symmetrische Spannungsaufteilung**

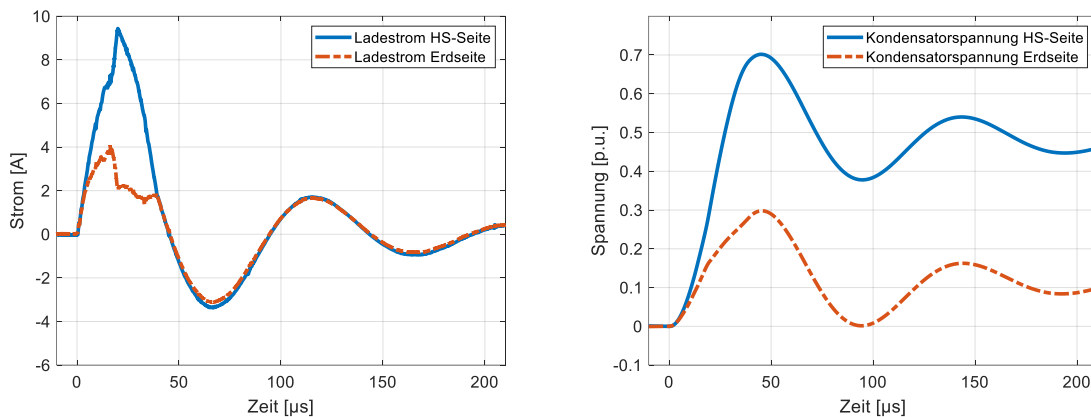


**Abbildung 7: Asymmetrischer Nach- und damit Ladestrom → asymmetrische Spannungsaufteilung**

Zusätzlich wurden in AP1 weitere Versuche mit der zuvor aufgebauten Modellanordnung durchgeführt. Dabei konnten auch an dieser Modellanordnung Nachströme nach Unterbrechung des Ausschaltstroms gemessen werden. Es konnte eine Abhängigkeit des Nachstroms vom Ausschaltstrom festgestellt werden, wie sie sich in ähnlicher Form auch bei dem Hochspannungs-Versuchsaufbau gezeigt hat. Somit liegt eine weitere Bestätigung vor, dass sich die mit Hilfe der Modellanordnung erzielten Ergebnisse und die gewonnenen Erkenntnisse auch auf Schaltgeräte höherer Spannungsebenen übertragen lassen.

Bei den Untersuchungen am Hochspannungs-Versuchsaufbau wurde zu den beiden seriell verschalteten Vakuumschaltröhren jeweils ein Kondensator parallelgeschaltet und dessen Anschlüsse direkt mit den äußeren Anschlüssen am Fest- und Bewegtkontakt der Vakuumschaltröhren verbunden. Vakuumschaltröhren weisen jedoch aufgrund der segmentierten Keramiken und der dazwischen angeordneten Metallschirme verschiedenste parasitäre Kapazitäten und Bauteile, auf denen sich ein schwebendes Potential einstellen kann, auf. Diese konstruktionsbedingte Eigenschaft kann zusätzlich zu einer Verschiebung der Spannungsaufteilung bei serieller Verschaltung der Vakuumschaltröhren beitragen. Um dies näher zu betrachten, wurden an der Modellanordnung weitere Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden in verschiedenen Versuchsvarianten an beiden Vakuumschaltröhren Kondensatoren angeordnet. Es wurden unterschiedliche Verschaltungen untersucht. Abbildung 8 zeigt eine Übersicht dieser Verschaltungsvarianten.

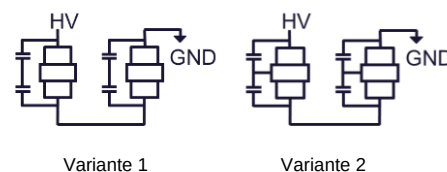


**Abbildung 8: Anordnungen zur Untersuchung des Einflusses der Verschaltung der Steuerkondensatoren auf die Spannungsaufteilung**

Es konnte gezeigt werden, dass die Verschaltungsvarianten einen erkennbaren Einfluss auf die Spannungsaufteilung haben, insbesondere jedoch auf die Streuung der Spannungsaufteilung. So konnte mit der Variante 2 die bestmögliche Symmetrie der Spannungsaufteilung bei gleichzeitiger Minimierung der Streuung erreicht werden. Bei der anderen Variante ließ sich eine teils erheblich größere Streuung beobachten. Diese Ergebnisse untermauern die technischen Ansätze, die im Rahmen von AP3 und AP5 weiterverfolgt wurden.

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, inwiefern die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen mit den erlangten Versuchsergebnissen übereinstimmen. Dabei wurden insbesondere folgende Fälle untersucht: einmal mit annähernd identischen und einmal mit deutlich unterschiedlichen Nachströmen. Wie das vereinfachte Ersatzschaltbild in Abbildung 9 zeigt, teilt sich der fließende Gesamtstrom  $I_{total}$  (unter Vernachlässigung parasitärer Effekte) in den Nachstrom  $I_{PA}$  und den Steuerkondensator-Ladestrom  $I_C$  auf. Somit kann anhand der Steuerkondensator-Ladeströme ein direkter Rückschluss auf die jeweiligen Nachströme gezogen werden.

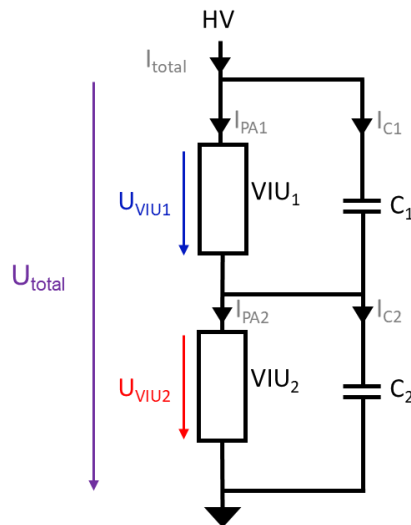


**Abbildung 9: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Serienschaltung zweier Vakuumschaltröhren mit parallelgeschalteten Steuerkondensatoren**

In den Abbildungen 10 und 11 sind die Ladeströme und daraus resultierenden Spannungsaufteilungen für die oben genannten Fälle dargestellt. Gezeigt sind jeweils die gemessenen und simulierten Werte. Es ist zu erkennen, dass in beiden betrachteten Fällen eine sehr gute Übereinstimmung vorliegt. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass die Simulation dazu geeignet ist, Zusammenhänge zwischen Nachstrom und Spannungsaufteilung zu bestimmen.

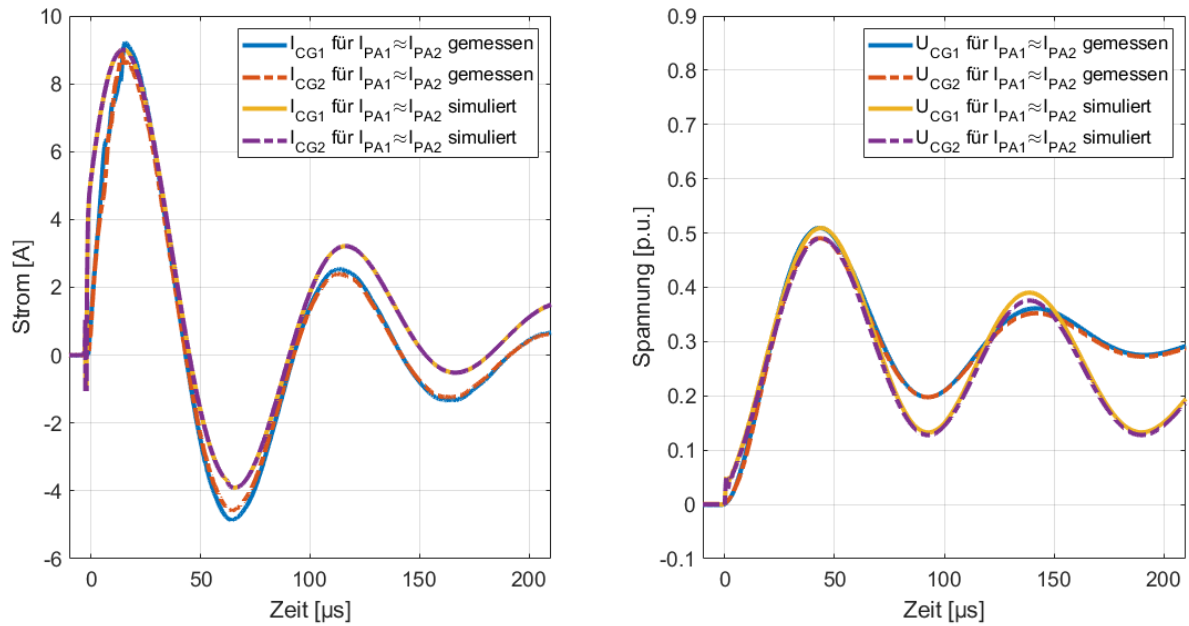


**Abbildung 10: Vergleich Messung und Simulation: Gleiche Nach- und damit Ladeströme  $\rightarrow$  symmetrische Spannungsaufteilung**

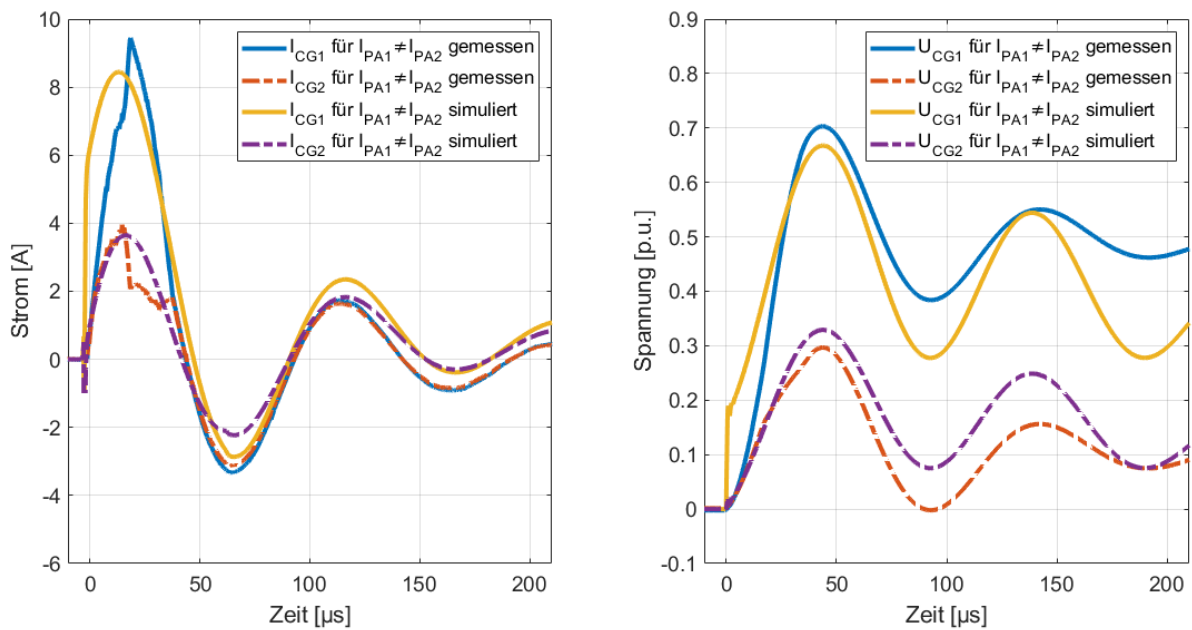


**Abbildung 11: Vergleich Messung und Simulation: Unterschiedliche Nach- und damit Ladeströme  $\rightarrow$  asymmetrische Spannungsaufteilung**

### 2.1.2 AP2 - Isolations-Konzepte

Als eine wesentliche Säule zur Erhöhung der Spannungsfestigkeit in Clean Air wurde in AP2 eine Erhöhung des Fülldrucks von Clean Air bis hin zu Fülldrücken von 1,4 MPa identifiziert. Zur Charakterisierung des Verhaltens von Clean Air in diesem Druckbereich wurden ein vorhandener Prüfaufbau ausgewählt (vgl. Abbildung 12) und die Ertüchtigung für Untersuchungen in den angestrebten Druckbereichen angestoßen.

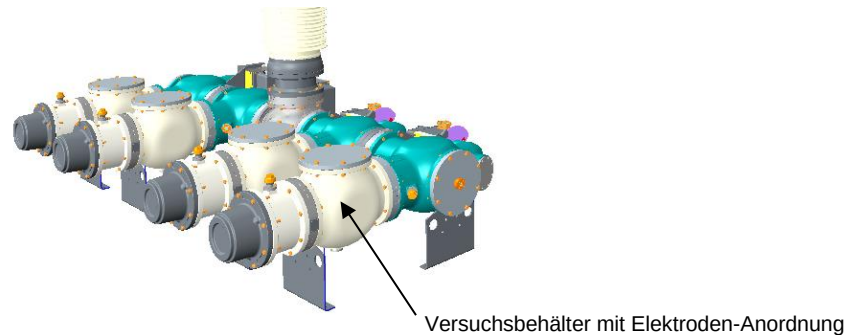


**Abbildung 12: Prüfaufbau zur Charakterisierung von CleanAir bei hohen Drücken**

Die Prüfungen zur Ermittlung der dielektrischen Festigkeit von Clean Air wurden unter Variation des Fülldrucks im Bereich 0,8 bis 1,4 MPa in der aufgebauten Versuchsanordnung (Abbildung 12) durchgeführt. Dabei wurden sowohl die Elektrodenanordnung, ausgeführt als Kugel-Platte- und als koaxiale Anordnung, als auch die Rauheit der Elektrodenoberfläche variiert. Die Prüfungen erfolgten mit Wechselspannung (AC) und Blitzstoßspannung (LI). Im gewählten Druckbereich konnte bei den meisten Versuchsreihen eine tendenziell steigende elektrische Festigkeit mit steigendem Druck festgestellt werden. Abbildung 13 zeigt exemplarische Versuchsergebnisse zum Vergleich verschiedener Elektrodenanordnungen.

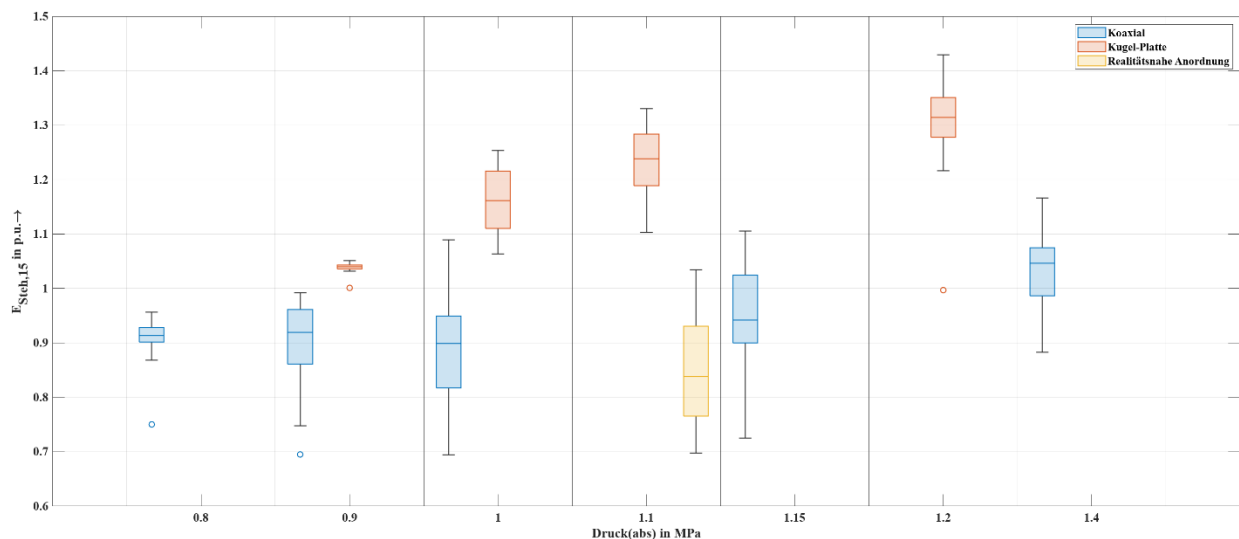


**Abbildung 13: Messungen der dielektrischen Festigkeit von Clean Air für positiven Blitzstoß**

Die Prüfungen in der Versuchsanordnung zeigten eine starke Streuung der Durchschlagsspannungen, insbesondere bei positiver Polarität der Spannungsbelastung. Der Einfluss der

Elektrodenrauigkeit auf die Spannungsfestigkeit ist eine mögliche Ursache für die beobachteten Effekte. Zusätzlich wurde beim Vergleich der ermittelten Durchschlagfeldstärken eine deutliche Abweichung der mit der Kugel-Platte-Anordnung erlangten Werte von den in den realitätsnahen Anordnungen im Rahmen von AP4 ermittelten Werten beobachtet. Für die Untersuchungen mit koaxialer Elektrodenanordnung ergab sich eine bessere Übereinstimmung. Mögliche Ursachen hierfür sind Oberflächeneffekte aufgrund der größeren Dimensionen der realitätsnahen Anordnungen. Eine direkte Übertragung der mit Modellanordnungen erlangten Durchschlagfeldstärken auf einen möglichen Anwendungsfall bedarf daher einer detaillierten Analyse von Fall zu Fall.

### **2.1.3 AP3 - Steuerung der Spannungsaufteilung**

In AP3 lag der Fokus der Betrachtungen auf einer verteilten Anordnung von Steuerkondensatoren am Umfang der Vakuumschaltröhren. Im Gegensatz zur bisherigen Bauweise mit einem Steuerkondensator in paralleler Anordnung zur Unterbrechereinheit können, durch die verteilte Anordnung, Feldstärken reduziert und Isolationsabstände in Clean Air verkleinert werden.

Zunächst wurde eine gasisolierte Modellanordnung zur experimentellen Charakterisierung der Spannungsfestigkeit von Einzelkondensatoren verschiedener Hersteller sowie von deren Serienschaltung aufgebaut, um eine systematische Bewertung der Spannungsfestigkeit vorzunehmen. Abbildung 14 zeigt die eingesetzte Anordnung.



**Abbildung 14: Modellanordnung zur experimentellen Charakterisierung der Spannungsfestigkeit von Einzelkondensatoren und deren Verschaltungen**

In Fortführung der Arbeiten wurde die experimentelle Charakterisierung der Spannungsfestigkeit von Einzelkondensatoren verschiedener Hersteller abgeschlossen. Als keramisches Dielektrikum

kamen dabei Materialien der Kategorie N4700 zum Einsatz. Die Kondensatoren werden dabei typischerweise mit einem Gleichspannungswert spezifiziert, der jedoch für die Anwendung in Hoch- und Höchstspannungsschaltgeräten mit Wechselspannungsbelastung keine Aussagekraft besitzt. Daher war eine genaue experimentelle Charakterisierung für die Wechsel- und Stoßspannungsbelastungen notwendig.

Die bei der experimentellen Charakterisierung der Spannungsfestigkeit von Einzelkondensatoren verschiedener Hersteller gewonnenen Erkenntnisse wurden für die Ausarbeitung der Labormuster in AP5 eingesetzt.

#### 2.1.4 AP4 - Konzepte für Trenn- und Erdungsschalter

Im Rahmen von AP4 wurden zur experimentellen Charakterisierung des Schaltverhaltens in Clean Air beim Schalten von Sammelschienenströmen Trennschalter einer bestehenden Baureihe eingesetzt. Die Prüfungen TD1 und TD3 (Sammelschienenladeströme) wurden entsprechend der Norm IEC 62271-102 durchgeführt (vgl. Abbildung 15). Dabei zeigte sich, dass die Prüfungen bei einem Fülldruck von ca. 0,7 MPa absolut zwar bestanden werden, die Vorüberschläge aber bei deutlich größeren Kontaktabständen als in SF<sub>6</sub> erfolgen. Zudem ist die Spannungsfestigkeit der Versuchsanordnungen in Clean Air limitiert. Zusätzlich wurden die Untersuchungen in AP4 durch simulative Untersuchungen des Lichtbogenverhaltens begleitet.

Trennschalter  
gefüllt mit Clean Air

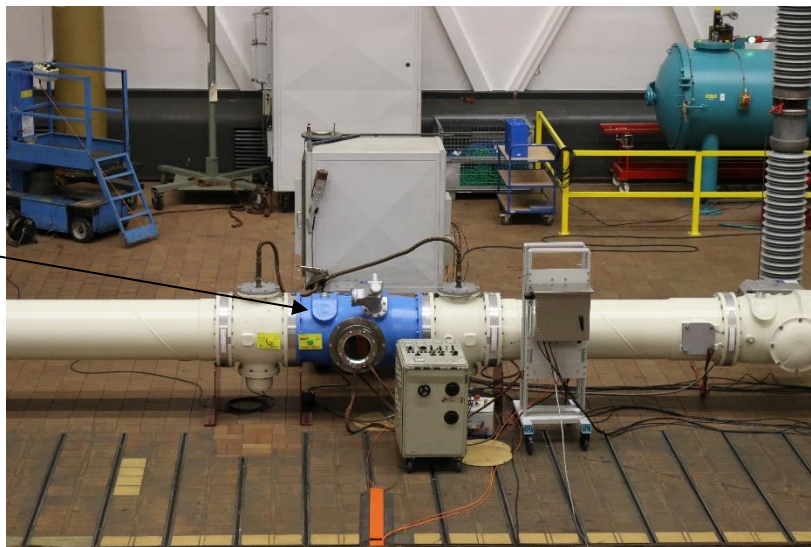


Abbildung 15: Prüfaufbau für TD1 und TD3

Die Ergebnisse weiterer Untersuchungen zeigten, dass eine Erhöhung des Fülldrucks auf 1,1 MPa absolut zu einer deutlichen Erhöhung der Spannungsfestigkeit führte. Limitierend war die Belastung der Prüfanordnungen mit Blitzstoßspannungen positiver Polarität. Zudem zeigten die Untersuchungen, dass die Qualität der Oberflächen, die beim Einsatz in SF<sub>6</sub>-gefüllten Geräten ausreicht, nicht für die Verwendung in Clean Air geeignet war. Abbildung 16 zeigt den Prüfaufbau

zur Ermittlung der dielektrischen Festigkeit. Zusammen mit den grundlegenden Betrachtungen der dielektrischen Festigkeit von Clean Air bei absoluten Drücken von 1,1 MPa und darüber hinaus erfolgte die Bewertung des Einsatzpotentials und die Evaluierung der kritischen Feldstärken bei der Übertragung der Grundlagenuntersuchungen auf die realitätsnahen Anordnungen.



**Abbildung 16: Prüfaufbau zur Ermittlung der dielektrischen Festigkeit von Clean Air beim Einsatz in Trennschaltern**

Zusätzliche Untersuchungen zum Schalten von Sammelschienenkommutierungsströmen durch den Trennschalter und von induzierten Strömen durch den Schnellerdungsschalter zeigten, dass eine Beherrschung des Schaltlichtbogens im Kontaktsystem ohne Einsatz zusätzlicher technischer Maßnahmen nur im Bereich geringer Kontaktabstände (einige Millimeter) möglich ist. In diesem Bereich sind die Kathoden- und Anodenfallspannungen der Schaltlichtbögen wirksam und die Löschgaseigenschaften treten in den Hintergrund. Die experimentellen Ergebnisse konnten durch simulative Untersuchungen nachgebildet und somit die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse identifiziert werden.

Abschließend konnte ein Funktionsmuster eines Clean-Air-isolierten Trennschalters aufgebaut und mit dem Abschluss der dielektrischen Messungen erfolgreich getestet werden. Dabei wurden zur Erhöhung der dielektrischen Festigkeit der Schirmelektroden geeignete Techniken zur Behandlung der Oberflächen eingesetzt. Damit konnten sowohl das Schaltvermögen für

Sammelschienenladeströme und Sammelschienenkommutierungsströme demonstriert als auch ein Beispiel für die dielektrische Auslegung gezeigt werden.

Des Weiteren wurde ein Labormuster eines (Schnell-)Erders zur Verwendung mit Clean Air als Isolations- und Löschmedium aufgebaut und experimentell untersucht. Die experimentellen Ergebnisse belegen die prinzipielle Funktionsfähigkeit des Schaltprinzips.

### 2.1.5 AP5 - Kinematische Kette und Antrieb

Im Rahmen von AP5 wurden verschiedene Konzepte zur Realisierung von Leistungsschaltern auf Basis zweier in Serie geschalteter Vakuumschaltröhren mit Clean Air-Isolation erarbeitet. Die Konzepte wurden zunächst skizziert und grundlegend bewertet. Anschließend wurden die bevorzugten Konzepte zur Bewertung der kinematischen Anforderungen konstruktiv ausgearbeitet und Simulationen der elektrischen Feldstärkeverteilung durchgeführt. Als bevorzugtes Konzept resultierte die liegende Anordnung zweier Vakuumschaltröhren mit mittig zwischen den Unterbrechereinheiten angeordneter Antriebsanbindung (vgl. Abbildung 17). Dieses Konzept ist für metallgekapelte sowie für Leistungsschalter in Freiluft-Bauweise anwendbar.

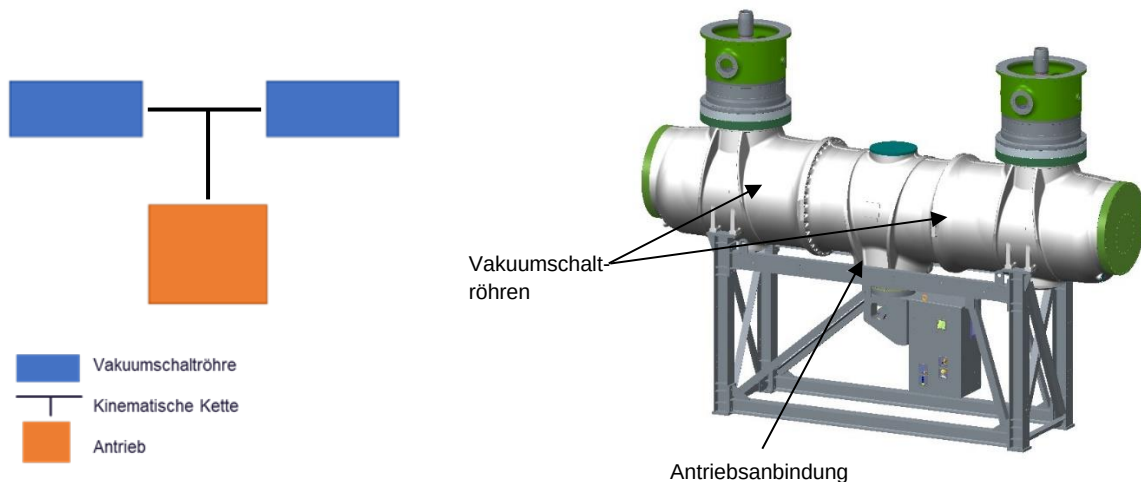


**Abbildung 17: Konzeptskizze (links) und ausgearbeitetes Konzept (rechts) der bevorzugten Anordnung**

Es wurde ein erstes Dielektrik-Labormuster eines gasisolierten Leistungsschalters zur experimentellen Überprüfung der Simulationsergebnisse zur elektrischen Feldstärkeverteilung für das erarbeitete bevorzugte Konzept aufgebaut und experimentell charakterisiert. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigten ebenfalls das limitierende Verhalten von Clean Air bei Blitzstoßspannungen positiver Polarität. Dies ist insbesondere bei Abschirmungen zur Feldsteuerung kritisch und bedurfte einer weiteren Analyse der zulässigen kritischen Feldstärken (vgl. AP2). Aufgrund der positiven Ergebnisse zur Spannungssteuerung in AP3 an Modellanordnungen wurde das Labormuster mit verteilten Steuerkondensatoren zur Steuerung der Spannungsaufteilung über den Vakuumschaltröhren ausgestattet. Die experimentellen Ergebnisse

zeigten die grundsätzliche Wirksamkeit des Prinzips zur Spannungssteuerung. In Abbildung 18 ist das Dielektrik-Labormuster dargestellt.

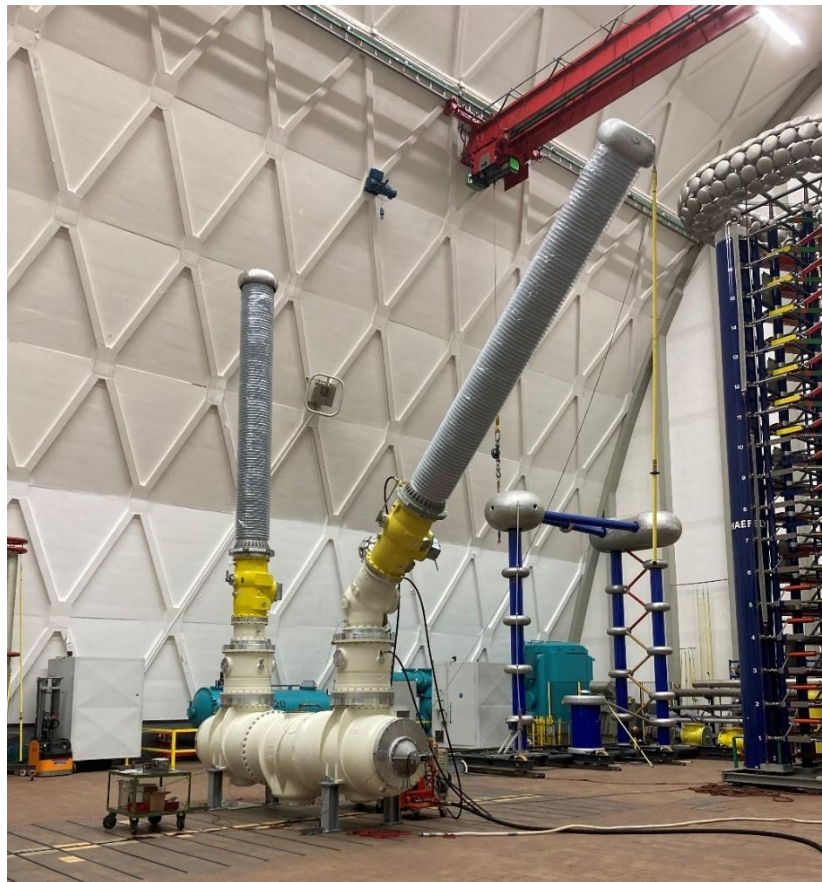


**Abbildung 18: Dielektrik-Labormuster eines Clean Air-isolierten Leistungsschalters**

Anschließend wurde ein Schalttechnik-Labormuster eines gasisolierten Leistungsschalters mit zwei Antrieben, einer pro Unterbrechereinheit, aufgebaut (vgl. Abbildung 19) und einer ersten Schaltleistungsprüfung (Prüfschaltfolgen T30 und T100 nach IEC 62271-100) unterzogen.

Die Ergebnisse der Schaltleistungsprüfung zeigten, dass bereits mit dem im Rahmen von AP5 aufgebauten Schaltleistungs-Labormuster die Erreichung der Normwerte für eine Bemessungsspannung von  $U_r = 245 \text{ kV}$  demonstriert werden konnte. Dafür wurden für einen Kurzschlussstrom von  $I_{sc} = 40 \text{ kA}$  die Prüfschaltfolgen

- T30 (30%  $I_{sc}$ ) und
- T100s (symmetrischer Stromverlauf (100%  $I_{sc}$ )) und
- T100a (asymmetrischer Stromverlauf (100%  $I_{sc}$ ) mit abklingender Gleichstromkomponente)

untersucht. Die Ergebnisse zeigten außerdem, dass der verfolgte Realisierungsansatz prinzipiell auch zur Erreichung höherer Spannungsebenen bis  $U_r = 420 \text{ kV}$  geeignet ist.

Anschließend wurden daher Labormuster eines Freiluft-Leistungsschalters und eines metallgekapselten Leistungsschalters auf Basis des oben beschriebenen Konzepts realisiert.



Abbildung 19: Schalteleistungs-Labormuster eines Clean Air-isolierten Leistungsschalters

### 2.1.6 AP6 - (Labor-) Muster & (Prüffeld-) Demonstration

Im Rahmen von AP6 erfolgte die Demonstration der Funktionalität von Labormustern für Leistungsschalter unter Verwendung von Clean Air als Isolationsmedium und einer Reihenschaltung von zwei Vakuumschaltröhren als Unterbrechereinheiten. Entsprechend der Vorarbeiten in AP5 wurden die beiden Vakuumschaltröhren über eine gemeinsame kinematische Kette durch einen Federspeicherantrieb angetrieben. In Anlehnung an das Vorgehen in AP5 wurden die Labormuster auf ihre Einsatzfähigkeit für eine Bemessungsspannung von  $U_r = 420 \text{ kV}$  überprüft und die Anwendbarkeit der in AP5 erarbeiteten Leistungsschalterkonzepte, insbesondere der ausgearbeiteten kinematischen Kette, für diese Spannungsebene bestätigt (vgl. Abbildungen 20 und 21).



**Abbildung 20: Labormuster eines Clean Air-isolierten Leistungsschalters in Freiluft-Bauweise**



**Abbildung 21: Labormuster eines Clean Air-isolierten Leistungsschalters in metallgekapselter Bauweise**

### **2.1.7 Gegenüberstellung der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen**

Das zentrale Ziel des Vorhabens bei Siemens Energy war die Untersuchung von Konzepten für klimaneutrale Schaltgeräte und Schaltanlagen ( $U_r \geq 420$  kV) und die Realisierung und Demonstration der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems. Dieses Ziel konnte erfolgreich erreicht werden (vgl. Beschreibung der Arbeitsergebnisse in Abschnitt 2.1.1 bis 2.1.6).

Im Fokus dieses Vorhabens standen umweltfreundliche, klimaneutrale Grundlagentechnologien für das Übertragungsnetz ( $U_r \geq 420$  kV). Als Basis diente dabei der Einsatz klimaneutraler Isoliergase (z.B. synthetische Luft) in Verbindung mit Vakuumschaltröhren als Leistungsschaltelementen.

Im Rahmen des Vorhabens wurden in verschiedenen Arbeitssträngen technologische Grundlagen und Lösungsansätze für die verschiedenen funktionalen Bereiche der Schaltgeräte und Schaltanlagen (z.B. Isolation, Antrieb, Trenn- und Erdungsfunktion, Leistungsschaltfunktion) erfolgreich untersucht und bewertet (Technology Readiness Level (TRL) 3...4).

Zur Erreichung der für das Übertragungsnetz erforderlichen Schaltleistungsperformance stand dabei die Serienschaltung von Vakuumschaltröhren als eine wesentliche Grundlagentechnologie im Fokus des Vorhabens. Neben den Systemaspekten der Schaltanlage wurden zusätzlich innovative Ansätze zur Integration von Steuerelementen in das Design der Schaltgeräte und Schaltanlagen untersucht und eingesetzt.

Aufbauend auf den Ergebnissen der einzelnen Arbeitsstränge (TRL 3...4) erfolgte eine Demonstration der betrachteten Grundlagentechnologien anhand von Labormustern (TRL 5...6) und ermöglichte so eine ausführliche Bewertung des Einsatzpotentials der untersuchten Technologien für Übertragungsnetze der Hoch- und Höchstspannungsebene.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden umfangreich in Fachgremien eingebracht sowie publiziert, um zur Fortschreibung des Stands der Technik beizutragen. Im Rahmen des Projekts wurden Patentanmeldungen vorgenommen.

## **2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Der Zeit- und Kostenrahmen ist eingehalten worden. Weitere Details können dem zahlenmäßigen Nachweis des Verwendungsnachweises entnommen werden.

## **2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Ziel des Vorhabens war die Untersuchung von Konzepten für klimaneutrale Schaltgeräte und Schaltanlagen ( $U_r \geq 420$  kV) und die Realisierung und Demonstration der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems.

Weltweit und insbesondere in Europa sind deutliche Tendenzen erkennbar, SF<sub>6</sub> mittelfristig durch klimafreundlichere Alternativen zu ersetzen. Europa hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2050 klimaneutral zu werden. Um die klimapolitischen Ziele der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Energieübertragung zu erreichen, sind die Erforschung von SF<sub>6</sub>-Alternativen und der Transfer in die Anwendung unbedingte Voraussetzungen.

Gegenüber dem umfangreich vorliegenden Wissensstand zu SF<sub>6</sub> bedeutete das Projektziel, eine technische Grundlage für die Entwicklung von SF<sub>6</sub>-freien Technologien für Bemessungsspannungen von 420 kV und darüber hinaus zu erarbeiten, das Betreten von Neuland. Erste Felderfahrungen mit Schaltgeräten mit Vakuumschaltröhren als Leistungsschaltelemente in Kombination mit Clean Air (synthetische Luft) als Isoliermedium für Bemessungsspannungen bis zu  $U_r = 145$  kV sowie eine gute Kundenakzeptanz zeigen das Potential für vollständig fluor-freie Technologien in höheren Spannungsebenen. Ein wesentliches Ergebnis der vorhergehenden Vorhaben war jedoch auch, dass zum Einsatz von natürlichen Gasen erhebliche Anpassungen des Designs der Schaltgeräte in Verbindung mit neuen, auf die Eigenschaften des jeweiligen Alternativgases angepassten, technologischen Ansätzen erforderlich sind.

Die Aufgabenstellung war auf Grund der Erfahrungen und Kompetenzen der Projektbeteiligten als realistisch zu bewerten, verbunden mit folgenden Herausforderungen:

- Bei dem Vorhaben handelte es sich um die Entwicklung einer neuen, hochinnovativen Technologie, die mit nennenswerten technischen und kommerziellen Risiken verbunden ist, z.B.:
  - Eignung der wesentlichen Gaseigenschaften (thermisch, dielektrisch, Schaltvermögen) für die Anwendung in Hochspannungsschaltanlagen mit  $U_r \geq 420$  kV
  - Übertragbarkeit der im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse auf die praktische Anwendung und Demonstration des Anwendungspotentials der erarbeiteten technologischen Lösungen.
- Ohne Förderung wäre das Projekt nicht in diesem Umfang und nicht mit diesem Terminplan durchführbar gewesen. Eine neue, innovative und klimaneutrale Technologie zur Umsetzung der klimapolitischen Ziele hätte unter Umständen nicht zur Verfügung gestanden.
- Im Gegensatz zur seit Jahrzehnten etablierten und erforschten SF<sub>6</sub>-basierten Technik für Hoch- und Höchstspannungsschaltanlagen war die Vakuumschaltechnik in Verbindung mit synthetischer Luft als Isolationsmedium vor Projektstart im Übertragungsnetz ( $U_r \geq 420$  kV) nicht eingesetzt worden. Es waren Technologien erforderlich, um ein kompaktes und wirtschaftliches Design der Anlagen zu ermöglichen. Diese waren beim Start des Vorhabens nicht bekannt.
- Die Projektreichweite erhöhte sich durch die Förderung hinsichtlich umfangreicherer Projektergebnisse, einer höheren Qualität der Projektergebnisse und einer Minimierung der Projektrisiken. Ohne Förderung wäre das Vorhaben nicht in diesem Umfang durchgeführt worden.

Um diese Risiken abzudecken, waren umfangreiche Untersuchungen zu den verschiedenen Teilthemen notwendig und konnten erfolgreich durchgeführt werden.

Zusätzlich beinhaltet die vorläufige politische Einigung zur Revision der europäischen F-Gas-Verordnung ein Ausphasen des Einsatzes von SF<sub>6</sub> und anderen F-Gasen in Hoch- und Mittelspannungsschaltanlagen. Für Mittelspannungsschaltanlagen ist ein vollständiges Ausphasen beginnend 2026 vorgesehen. Für Bemessungsspannungen  $U_r > 145$  kV sollen ab 2032 nur noch Schaltanlagen und Schaltgeräte mit einem Global Warming Potential (GWP)  $< 1$  zulässig sein. Dieses Vorhaben legte dazu eine wichtige Grundlage, da die Realisierbarkeit von Schaltanlagen und Schaltgeräten unter Einsatz von Clean Air (GWP = 0) auch für die Höchstspannungsebene untersucht und demonstriert wurde.

## **2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Ziel dieses Vorhabens war die Untersuchung von Konzepten für klimaneutrale Schaltgeräte und Schaltanlagen ( $U_r \geq 420$  kV) und die Realisierung und Demonstration der Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems als technologische Grundlage zur Weiterentwicklung von gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen. Insbesondere in technischer Hinsicht konnte dieses Ziel erreicht werden, so dass die Ergebnisse des Vorhabens in neue Produktdesigns und Fertigungsverfahren einfließen und damit die Grundlage für eine umweltfreundliche und kosteneffiziente neue Generation von Hochspannungsschaltanlagen bilden.

### **2.4.1 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten**

Das Projektergebnis bietet eine umfangreiche, wissenschaftlich basierte Grundlage zur Bewertung des Potentials einer Gasisolation mit Clean Air in Kombination mit der Vakuumschalttechnik für den Einsatz in klimaneutralen Schaltgeräten und Schaltanlagen ( $U_r \geq 420$  kV). Das Einsatzpotential dieser Technologien für die Höchstspannungsebene konnte durch die Ergebnisse des Vorhabens zum ersten Mal erfolgreich demonstriert werden und bildet damit die Grundlage für zukünftige Produktdesigns und Fertigungsverfahren.

An dem Projekt waren neben Siemens Energy eine renommierte deutsche Hochschule (Technische Universität München) sowie eine privatwirtschaftliche Forschungseinrichtung (Siemens AG - Technology) beteiligt. Vorhandenes Wissen zum Thema Gasisolation und Isolierstoffe konnte durch die Arbeiten im Projekt um Wissen zu Isolierstoffen und deren Kombination mit Clean Air als Isoliergas erweitert werden, so dass es nun der angewandten Forschung und technologischen Entwicklung zukünftiger Energietechnologien zur Verfügung steht. Die Arbeiten trugen zu Kompetenzerhaltung und -ausbau sowie zur weltweiten wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit der beteiligten deutschen Partner bei.

Die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt wurden in Form von nationalen und internationalen Publikationen im Rahmen des Projektverlaufs auf einschlägigen Fachtagungen, Konferenzen und in internationalen Wissenschaftsmagazinen veröffentlicht. Dadurch wurde neben der Stärkung

des Wirtschaftsstandorts Deutschland auch die Technologiebasis zum technischen Verhalten von Clean Air als Isolations- und Schaltmedium, sowie der Einsatz von Clean Air in Kombination mit der Vakuumschalttechnik für die Höchstspannungsebene wissenschaftlich platziert und dem internationalen Fachpublikum zugänglich gemacht.

Zudem sind die Projektergebnisse in die Diskussionen innerhalb von Normungsgremien und Fachgremien mit eingeflossen, wodurch zukünftige Normen zu Hochspannungsschaltanlagen mit Alternativgasen aktiv mitgestaltet werden konnten. Beispielhaft sei hier die CIGRE (WG D1.78) genannt.

Das von allen Beteiligten im Projekt gewonnene Wissen ist eine exzellente Ausgangsbasis, um mögliche themenverwandte Nachfolgeprojekte sofort nach Projektende starten zu können.

## **2.4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Durch das Vorhaben wurden die Grundlagen für den Einsatz klimaneutraler Schaltanlagentechnologien in den Übertragungsnetzen der Hoch- und Höchstspannungsebene gelegt. Die Ergebnisse des Förderprojektes fließen in neue Produktdesigns und Fertigungsverfahren ein und bilden damit die Grundlage für eine umweltfreundliche und kosteneffiziente neue Generation von Hochspannungsschaltanlagen.

Bei der Firma Siemens Energy wird eine neuartige und zukunftsweisende Technologie entwickelt, welche zu einer Reihe neuartiger Produkte führen soll. Die im Rahmen des Vorhabens erarbeiteten Technologien und Konzepte legen die Grundlage für eine später erfolgende Produktentwicklung von klimaneutralen Schaltgeräten und Schaltanlagen mit Bemessungsspannungen  $U_r \geq 420$  kV. Die Arbeitsergebnisse dieses Vorhabens liefern dabei die Grundlage für die Entwicklung vollständig fluorfreier Schaltgeräte und Schaltanlagen. Dieser Lösungsansatz zeichnet die Siemens Energy Global GmbH & Co. KG (Siemens Energy) gegenüber europäischen und internationalen Wettbewerbern aus.

Die vorläufige politische Einigung zur Revision der europäischen F-Gas-Verordnung beinhaltet ein Ausphasen des Einsatzes von  $\text{SF}_6$  und anderen F-Gasen in Hoch- und Mittelspannungsschaltanlagen. Für Mittelspannungsschaltanlagen ist ein vollständiges Ausphasen beginnend 2026 vorgesehen. Für Bemessungsspannungen  $U_r > 145$  kV sollen ab 2032 nur noch Schaltanlagen und Schaltgeräte mit einem Global Warming Potential (GWP)  $< 1$  zulässig sein. Die Förderung im Rahmen dieses Vorhabens ermöglicht es Siemens Energy auf diese Entwicklung zu reagieren und frühzeitig Schaltgeräte und Schaltanlagen mit Bemessungsspannungen von  $U_r = 420$  kV basierend auf Vakuumschalttechnik und Clean Air-Isolation anzubieten.

Durch die Förderung der Firma Siemens Energy im Rahmen dieses Vorhabens werden der deutsche Wirtschaftsstandort und damit die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie nachhaltig gestärkt.

## **2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Die Unternehmen Toshiba und Meidensha verfolgen laut Pressemitteilung vom Juni 2021 ebenfalls die Realisierung von klimaneutralen Schaltgeräten und Schaltanlagen (zunächst für die Spannungsebene 72 kV / 84 kV) basierend auf Vakuumschaltröhren und Isolation mit trockener synthetischer Luft. Dies belegt das Einsatzpotential des technologischen Ansatzes [13].

Während der Durchführung des Forschungsvorhabens wurden themenrelevante Aktivitäten bei anderen Stellen z.B. durch Literaturrecherche sowie durch Besuch von Fachkonferenzen verfolgt. Zu den zahlreichen bekannt gewordenen Publikationen bzgl. des Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen wird im Folgenden ein Überblick gegeben (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

Verschiedene Stellen verfolgen zur Entwicklung klimafreundlicherer Schaltgeräte den Ansatz, die bekannten Gasleistungsschalter weiter einzusetzen und lediglich das SF<sub>6</sub> durch ein klimafreundlicheres und technisch möglichst gleichwertiges Gas zu ersetzen [14-17]. Aus technischer Sicht sind die wichtigsten Eigenschaften eines solchen Gases u.a. sehr gute Lichtbogenlöscheinheiten und zugleich eine hohe dielektrische Festigkeit. Trotz umfangreicher Untersuchungen verschiedener Unternehmen und Forschungseinrichtungen konnte ein technisch gleichwertiges und zugleich umweltfreundlicheres Gas bisher nicht gefunden werden, so dass aktuell Gemische aus mehreren Gasen in Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten betrachtet werden [18, 19]. Diese Gemische setzen sich dabei zumeist aus Gasen zusammen, die jeweils eine der beiden technischen Anforderungen in ausreichendem Maße erfüllen. So weist Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>, GWP = 1) gute Lichtbogenlöscheinheiten auf, kann jedoch die dielektrischen Anforderungen nicht erfüllen [20]. Diese werden z.B. durch Hinzugabe von Fluornitrilen (C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N, auch bezeichnet als C4-FN) oder Fluorketonen (C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O, auch bezeichnet als C5-FK) erreicht. Das Treibhauspotential dieser Gase in Reinform wird mit GWP ≈ 2100 für C4-FN und GWP < 1 für C5-FK angegeben [21, 22]. Die genauen Mischungsverhältnisse werden je nach Anwendungsfall angepasst und weisen dabei ein GWP ≈ 380 für Fluornitril-Mischungen bzw. ein GWP < 1 für Fluorketon-Mischungen auf [21, 23].

Die dielektrischen Eigenschaften sowie das Lichtbogenlöschverhalten dieser Gasgemische wurden von verschiedenen Stellen ausgiebig untersucht, insbesondere im Hinblick auf eine Optimierung der Mischungsverhältnisse. Es konnte dabei gezeigt werden, dass diese Gasgemische grundsätzlich als Ersatz für SF<sub>6</sub> eingesetzt werden können, wobei in den meisten Fällen eine Erhöhung des Fülldrucks erforderlich ist.

Aufgrund der zum Ende des Jahres 2025 angekündigten Einstellung der Produktion von PFAS eines großen Gasherstellers ist jedoch die Verfügbarkeit von fluorhaltigen Alternativgasen über diesen Zeitpunkt hinaus aktuell ungewiss [24].

## 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Im Zusammenhang mit dem Forschungsvorhaben wurden einige Ergebnisse auf Fachkonferenzen sowie in Fachjournalen veröffentlicht bzw. sind geplant.

Unter dem Titel „Investigation of the Switching Behaviour, Voltage Distribution and Post-Arc Current of series-connected Vacuum Interrupter Units for Live Tank and Dead Tank Circuit Breakers  $\geq 420$  kV“ (Paper-ID 11068) wurde ein Beitrag zur CIGRE Session 2022 eingereicht und die Ergebnisse wurden vor Ort auf der Fachkonferenz vorgestellt.

Zusätzlich wurde unter dem Titel „Schaltgeräte zum Einsatz in klimaneutralen Schaltanlagen mit Bemessungsspannung  $\geq 420$  kV und Clean Air als Isolationsmedium“ ein Beitrag zur VDE Fachtagung Hochspannungstechnik 2022 eingereicht und auf der Fachtagung vorgestellt.

Unter dem Titel „Zero Emission F-gas-free 420 kV GIS for a Net Zero Carbon Future“ wurde ein Beitrag zum Joint CIGRE SC B3 & A3 Colloquium 2023 eingereicht und die Ergebnisse wurden vor Ort auf der Fachkonferenz vorgestellt. In dem Beitrag, der einen Ausblick auf die zukünftigen F-Gas-freien Schaltanlagen der Firma Siemens Energy gibt, wurden auch die in diesem Vorhaben erarbeiteten technologischen Grundlagen referenziert, die entsprechend des bei der Antragsstellung abgegebenen Verwertungsplans in die neuen Produktdesigns einfließen.

Zusätzlich wurde unter dem Titel „SIMULATION OF SWITCHING ARCS IN CLIMATE-NEUTRAL 420 KV EARTHING SWITCHES AND DISCONNECTORS FILLED WITH CLEAN AIR“ ein Beitrag zum 24<sup>th</sup> Symposium on Physics of Switching Arc (FSO) eingereicht und dem internationalen Fachpublikum vorgestellt.

Unter dem Titel „Natürlich an Zukunft gedacht - Entwicklungsstand F-gas-freie 420 kV GIS mit Vakuumschalttechnik und synthetischer Luft“ wurde auf der Fachtagung 2023 des GIS-Anwendungsforums in Darmstadt ein Beitrag dem Fachpublikum vorgestellt, der einen Ausblick auf die zukünftigen F-Gas-freien Schaltanlagen der Siemens Energy gibt und auch die in diesem Vorhaben erarbeiteten technologischen Grundlagen referenziert, die entsprechend des bei der Antragsstellung abgegebenen Verwertungsplans in die neuen Produktdesigns einfließen.

### 3 Literaturverzeichnis

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), AR6 WG1 report (“The physical science basis”), chapter 7, supplementary material, page 21, available from <https://www.ipcc.ch/>, published 2021
- [2] S. Kosse: “Development of CB with SF<sub>6</sub> alternatives”, Cigré SC A3 – SF<sub>6</sub> gas alternatives workshop, Paris, France, 2016.
- [3] S. Kosse, P. G. Nikolic, G. Kachelriess: “Holistic evaluation of the performance of today’s SF<sub>6</sub> alternatives proposals”, CIRED Int. Conference, paper 0819, Glasgow, Scotland, June 2017.
- [4] M. Kuschel, D. Helbig, K. Kunde, S. Kosse, K. Pohlink, U. Prucker, J. Teichmann: „Entwicklungsstand, Vor-Ort-Erfahrungen und Ausblick zu SF<sub>6</sub>-freien Hochspannungsschaltanlagen“, VDE-Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, November 2020.
- [5] S. Giere, D. Helbig, M. Koletzko, S. Kosse, T. Rettenmaier, C. Stiehler, N. Wenzel: “Vacuum interrupter unit for CO<sub>2</sub>-neutral 170 kV / 50 kA switchgear”, VDE-Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, November 2018.
- [6] T. Fugel, D. Koenig: “Influence of Grading Capacitors on the Breaking Performance of a 24-kV Vacuum Breaker Series Design”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 10, No. 4, August 2003, pp. 569-575.
- [7] S. Giere, H. Knobloch, J. Sedlacek: “Double and Single-Break Vacuum Interrupters for High Voltage Application – Experiences on Real High-Voltage Demonstration-Tubes”, 39<sup>th</sup> Cigré Session, 13-202, Paris, France, August 2002.
- [8] N. Ide, O. Tanaka, S. Yanabu, S. Kaneko, S. Okabe, Y. Matsui: “Interruption Characteristics of Double-Break Vacuum Circuit Breakers”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 4, August 2008, pp. 1065-1072.
- [9] S. Shu, J. Ruan, D. Huang, G. Wu, C. Liu: “Study on Transient Recovery Voltage Distribution Mechanism and Grading Capacitor of Double-Break Vacuum Circuit Breaker”, 25<sup>th</sup> International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Tomsk, Russia, September 2012, pp. 501-504.
- [10] D. Huang, G. Wu, J. Ruan: “Study on Static and Dynamic Voltage Distribution Characteristics and Voltage Sharing Design of a 126-kV Modular Triple-Break Vacuum Circuit Breaker”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 43, No. 8, August 2015, pp. 2694-2702.
- [11] S. Ai, X. Yu, Y. Huang, F. Yang, Y. Fan, X. Li: “Voltage Distribution Design of a Novel 363 kV Vacuum Circuit Breaker”, 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, September 2018, pp. 1-4.
- [12] X. Yu, F. Yang, X. Li, S. Ai, Y. Huang, Y. Fan, W. Du: “Static Voltage Sharing Design of a Sextuple-Break 363 kV Vacuum Circuit Breaker”, MDPI Energies 2019, 12, 2512, June 2019.
- [13] Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation, Meidensha Corporation: “Toshiba and Meidensha to develop GIS jointly using natural origin gases”, Press Release, Tokyo, Japan, 21<sup>st</sup> June 2021. <https://www.global.toshiba/ww/news/energy/2021/06/news-20210621-01.html>

- [14] L. Loizou, L. Chen, Q. Liu, M. Waldron, G. Wilson, J. Owens: "Application of SF<sub>6</sub> Alternatives for Retro-filling Existing Equipment", Cigré Session 2022, 10103, Paris, France, August 2022.
- [15] P. Stengard, P. C. Stoller, S. Buffoni-Scheel, B. Radisavljevic, A. Lago, M. Palazzo, N. Mahdizadeh: "SF<sub>6</sub>-alternative 145 kV live-tank circuit breaker", Cigré Session 2022, 10507, Paris, France, August 2022.
- [16] P. C. Stoller, T. Braun, J. Korbel, S. Buffoni-Scheel, B. Radisavljevic, M. Richter: "SF<sub>6</sub> alternative circuit breaker for 145 kV gas insulated switchgear", Cigré Session 2022, 10658, Paris, France, August 2022.
- [17] T. Uchii, D. Yoshida, S. Tsukao, K. Taketa, K. Tsuboi: "Recent Development of SF<sub>6</sub> Alternative Switchgear Using Natural-Origin Gases in Japan", Cigré Session 2022, 10643, Paris, France, August 2022.
- [18] 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", VDE Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin, Deutschland, November 2022.
- [19] M. Barnett, B. Portal, S. Souchal, Q. Rognard, A. Ficheux: "SF<sub>6</sub>-free Solutions for 420 kV Networks using Gas-Insulated Substations (GIS)", Cigré Session 2022, 10102, Paris, France, August 2022.
- [20] H. E. Jung, J. U. Yeun, H. S. Ahn, J. Choi, Y. G. Kim, M. Perret, K. Bousoltane, J. Ozil, G. Pernaumat: "The First Development of SF<sub>6</sub>-free 170 kV 50 kA 60 Hz GIS with Fluoronitrile (C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N) Mixtures", 48<sup>th</sup> Cigré Session, A3-114, Paris, France, August 2020.
- [21] A. Beroual, A. Haddad: "Recent Advances in the Quest for a New Insulation Gas with a Low Impact on the Environment to Replace Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) Gas in High-Voltage Power Network Applications", Energies 2017, Vol. 10, No. 8, 1216, August 2017.
- [22] J. G. Owens: "Greenhouse gas emission reductions through use of a sustainable alternative to SF<sub>6</sub>", IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Montreal, Canada, June 2016, pp. 535-538.
- [23] N. Presser, C. Orth, B. Lutz, M. Kuschel, J. Teichmann: "Advanced insulation and switching concepts for next generation High Voltage Substations", 46<sup>th</sup> Cigré Session, B3-108, Paris, France, August 2016.
- [24] 3M News Center: "3M to Exit PFAS Manufacturing by the End of 2025", Press Release, St. Paul, USA, 20<sup>th</sup> December 2022. <https://news.3m.com/2022-12-20-3M-to-Exit-PFAS-Manufacturing-by-the-End-of-2025>

## Berichtsblatt

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                |                                                      |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--|
| 1. ISBN oder ISSN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)<br><b>Schlussbericht</b> |                                                      |  |
| 3. Titel<br><b>Verbundvorhaben ECO-BREAK-420 - Umweltfreundliche Schalttechnologien für die Höchstspannungsebene - Teilprojekt: Konzept, Design und Demonstration</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                |                                                      |  |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]<br><b>Dr. Paul Gregor Nikolic</b><br><b>Tobias Goebels</b><br><b>Dr. Katrin Benkert</b><br><b>Peter Milewski</b><br><b>Karsten Juhre</b><br><b>Aramis Falk</b><br><b>Andreas Groß</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                | 5. Abschlussdatum des Vorhabens<br><b>29.02.2024</b> |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                | 6. Veröffentlichungsdatum                            |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                | 7. Form der Publikation<br><b>Schlussbericht</b>     |  |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br><br><b>Siemens Energy Global GmbH &amp; Co. KG</b><br><b>Otto-Hahn-Ring 6</b><br><b>81739 München, Deutschland</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution<br>---         |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                | 10. Förderkennzeichen<br><b>03EI6052A</b>            |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                | 11. Seitenzahl<br><b>32</b>                          |  |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br><br><b>Bundesministerium für</b><br><b>Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)</b><br><b>53107 Bonn</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                | 13. Literaturangaben<br><b>24</b>                    |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                | 14. Tabellen<br><b>1</b>                             |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                | 15. Abbildungen<br><b>21</b>                         |  |
| 16. Zusätzliche Angaben<br>---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                |                                                      |  |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                |                                                      |  |
| 18. Kurzfassung<br><br><p>Im Fokus dieses Vorhabens standen umweltfreundliche, klimaneutrale Grundlagentechnologien für das Übertragungsnetz, d.h. für Bemessungsspannungen der eingesetzten Schaltgeräte und Schaltanlagen ab 420 kV. Als Basis diente dabei die Verwendung klimaneutraler Isoliergase (z.B. synthetischer Luft) in Verbindung mit Vakuumschaltröhren als Leistungsschaltelementen. Erste Felderfahrungen mit Schaltgeräten mit Vakuumschaltröhren als Leistungsschaltelemente in Kombination mit Clean Air (synthetische Luft) als Isoliermedium für Bemessungsspannungen bis zu 145 kV, sowie eine gute Kundenakzeptanz zeigen das Potential für vollständig fluor-freie Technologien in höheren Spannungsebenen. Dies erfordert jedoch erhebliche Anpassungen des Designs der Schaltgeräte in Verbindung mit neuen, auf die Eigenschaften des jeweiligen Alternativgases angepassten, technologischen Ansätzen. Im Rahmen des Vorhabens wurden in verschiedenen Arbeitssträngen technologische Grundlagen und Lösungsansätze für die verschiedenen funktionalen Bereiche der Schaltgeräte und Schaltanlagen (z.B. Isolation, Antrieb, Trenn- und Erdungsfunktion, Leistungsschaltfunktion) untersucht und bewertet. Zur Erreichung der für das Übertragungsnetz erforderlichen Schaltleistungsperformance stand dabei die Serienschaltung von Vakuumschaltröhren als eine wesentliche Grundlagentechnologie im Fokus des Vorhabens. Neben diesen Systemaspekten der Schaltanlage, wurden zusätzlich innovative Ansätze zur Integration von Steuerelementen in das Design der Schaltgeräte und Schaltanlagen untersucht und eingesetzt. Aufbauend auf den Ergebnissen der einzelnen Arbeitsstränge, erfolgte eine Demonstration der betrachteten Grundlagentechnologien in Labormustern und ermöglichte so eine ausführliche Bewertung des Einsatzpotentials der untersuchten Technologien für Übertragungsnetze der Hoch- und Höchstspannungsebene.</p> |                                                                                |                                                      |  |
| 19. Schlagwörter<br>---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                |                                                      |  |
| 20. Verlag<br>---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                | 21. Preis<br>---                                     |  |

## Document Control Sheet

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                |                                        |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|--|
| 1. ISBN or ISSN                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 2. type of document (e.g. report, publication)<br>Final report |                                        |  |
| 3. title<br>Joint research project ECO-BREAK-420 - Climate neutral switching technologies for transmission grids - Sub-project: Concept, design and demonstration                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                |                                        |  |
| 4. author(s) (family name, first name(s))<br>Dr. Paul Gregor Nikolic<br>Tobias Goebels<br>Dr. Katrin Benkert<br>Peter Milewski<br>Karsten Juhre<br>Aramis Falk<br>Andreas Groiss                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                | 5. end of project<br>29.02.2024        |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                | 6. publication date                    |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                | 7. form of publication<br>Final report |  |
| 8. performing organization(s) (name, address)<br><br>Siemens Energy Global GmbH & Co. KG<br>Otto-Hahn-Ring 6<br>81739 Munich, Germany                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                | 9. originator's report no.<br>---      |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                | 10. reference no.<br>03EI6052A         |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                | 11. no. of pages<br>32                 |  |
| 12. sponsoring agency (name, address)<br><br>Bundesministerium für<br>Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)<br>53107 Bonn                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                | 13. no. of references<br>24            |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                | 14. no. of tables<br>1                 |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                | 15. no. of figures<br>21               |  |
| 16. supplementary notes<br>---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                |                                        |  |
| 17. presented at (title, place, date)<br>---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                |                                        |  |
| 18. abstract<br><br>This research project focused on environmentally benign and climate-neutral basic technologies for the transmission grid with rated voltages of the switchgear starting from 420 kV. The approach followed was based on the use of climate-neutral insulation gases (e.g. synthetic air) combined with vacuum interrupter units as circuit breaker. First field experience with switchgear, equipped with vacuum switching technology and Clean Air insulation (synthetic air) for rated voltages up to 145 kV as well as a positive customer acceptance of this technologies show the application potential of fluorine-free solutions for higher voltage levels. This requires nevertheless significant design changes of the switchgear applying technological approaches considering the specific properties of the used climate-neutral gases. This research project contained several work streams for laying the basics and for identifying concepts and solutions for the different functional sections of the switchgear (e.g. insulation, operating mechanism, disconnecter and earthing switch, circuit breaker). In order to achieve the switching performance needed for the transmission grid, the series connection of two vacuum interrupter units was a crucial basic technology in the focus of this research project. Besides the system aspects of the switchgear, also innovative approaches for the integration of voltage control elements into switchgear design were followed. Based on the results of the different work streams, the functionality of the different technologies was shown by means of several demonstrators, which allows the assessment of the applications potential of the investigated technologies for the transmission grid. |                                                                |                                        |  |
| 19. keywords<br>---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                |                                        |  |
| 20. publisher<br>---                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                | 21. price<br>---                       |  |