

Dresden, 30.03.2026

**Verbundvorhaben: HyLeiT – Kostenoptimierte Systemtechnik und  
Netzintegration von Systemen für die Erzeugung von grünem  
Wasserstoff;  
Teilvorhaben: Kostenoptimierte Systemtechnik und Netzintegration  
von H<sub>2</sub>-Anlagen – Komponenten und Zuverlässigkeit**

**Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil II: Eingehende Darstellung**

---

Stand:	30.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	30.03.2026
Partnerin/Partner:	Technische Universität Dresden
Autorinnen/Autoren:	Simon Puteanus, Michael Sokolowski, Robert Adam, Markus Gödicke, Christian Hildmann, Moritz Ullrich, Michael Bruhns, Peter Schegner
Fördertitel:	Verbundvorhaben H2Giga_QT6.1_HyLeiT - Kostenoptimierte Systemtechnik und Netzintegration von Systemen für die Erzeugung von grünem Wasserstoff; Teilvorhaben Komponenten und Zuverlässigkeit
Laufzeit:	01.04.2021 bis 30.09.2025
Förderkennzeichen:	03HY117E
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

---

## Teil II. Eingehende Darstellung (wird veröffentlicht)

### 1. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

#### AP 0 – Projektmanagement (Alle)

##### AP 0.1 – Beitrag zur Vernetzung von Innovationspool und Scale-up

Die wesentlichen Anforderungen, sowie elektrische und mechanische Randbedingungen von Elektrolyseanlagen wurden herausgearbeitet.

#### AP 1 – Konzeptentwicklung und Spezifikation (HH)

Die Anforderungen an die Hochstrom-/Hochtemperaturleiter und die erforderliche Verbindungstechnik für das AP 3.2 wurden in Kooperation mit SMA definiert. Es wurde eine modulare Skid-Bauweise mit teils redundanten funktionellen Einheiten zzgl. Transformator in der Baugröße eines Containers gewählt. Die Leistungsklasse eines Moduls von ca. 5,5 MW ist mit hohen Nenn-Stromstärken von ca. 3,5 kA (AC) bzw. ca. 7 kA (DC) verbunden. Dabei müssen die Strombahnen die Grenztemperatur im Betrieb stets einhalten. Diese wurde mit 120 °C bei 50 °C Umgebungstemperatur (70 K Übertemperatur) bestimmt. Für stromführende Verbindungen wurden darüber hinaus Versuche bei Temperaturen von 140 °C bis 180 °C geplant. Das Leiterkonzept wurde so gewählt, dass strenge platzbedarfsgerechte Anforderungen erfüllt werden. Es werden 30 mm x 100 mm Aluminiumstromschienen eingesetzt, die hochkant nebeneinander (AC) oder übereinander (DC) angeordnet werden. Um die Möglichkeiten zur Erhöhung der Strombelastbarkeit zu untersuchen, wurden geeignete Kühlkonzepte definiert, deren Einsatz keine baulichen Änderungen in der Plattform erfordern würde.

#### AP 2 – Stromrichterkonzepte (LE)

##### AP 2.2.1 – Definitionen der Anforderungen und Randbedingungen (LE)

Für einen Musterelektrolyseur im industriellen Maßstab wurde angenommen, dass die Spannung der Stacks im Bereich 600V bis 900V bei einer Leistung von 5,5 MW liegt und die Gesamtleistung des Elektrolyseurs bei Parallelschaltung von vier Stacks ca. 22 MW beträgt. Die einzelnen Stacks eines Elektrolyseurs können altern, sodass sich die in Abbildung 1 gezeigten beispielhaften Strom-Spannungskennlinien einstellen. Man erkennt, dass gealterte Elektrolyseure bei gleichem Strom eine erhöhte Spannung haben. Aktuell verbleiben Elektrolyseure noch im Spannungsbereich unter 1500 V. Es wird jedoch erwartet, dass der Trend von Systemspannungen über 1500V, der sich aktuell in der Photovoltaik abzeichnet, bald auch bei Elektrolyseuren relevant werden wird, um bei hohen Leistungen den Strom in Grenzen zu halten.

Bezüglich der auftretenden Stromwelligkeit wurde zusammen mit dem Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer Technischer Systeme Magdeburg eine analytische Methode zur Bestimmung der Verluste in Elektrolysezellen unter einer Stromwelligkeit weiterentwickelt [6] und es konnte entgegen widersprüchlicher Literatur gezeigt werden, dass eine Stromwelligkeit immer den Wirkungsgrad der Zelle reduziert [3]. Da der Einfluss der Stromwelligkeit auf die Alterung von Elektrolyseuren noch nicht

ausreichend untersucht ist, wurde die maximale zulässige Stromwelligkeit auf 5 % Spitze-Spitze bezogen auf den Mittelwert des Stroms festgelegt.

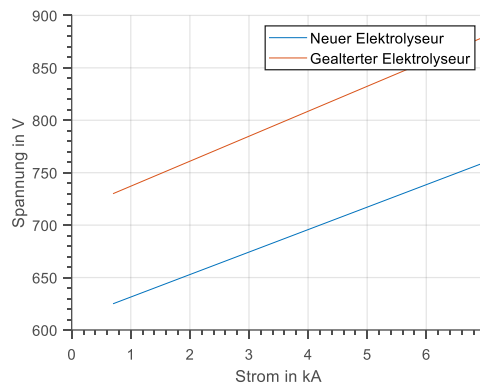


Abbildung 1: Strom-Spannungskennlinien für neue und gealterte Elektrolyseure

Netzseitig wurde aufgrund der Leistung von 22 MW von einem Anschluss ans Hochspannungsnetz ausgegangen. Dementsprechend findet die technische Anschlussregel Hochspannung ([VDE-AR-N 4120](#)) in Deutschland Anwendung und die entsprechenden Anschlussregeln in anderen Ländern. Üblich ist hier ein minimaler Leistungsfaktor von 0,95 induktiv und Grenzwerte für die unterschiedlichen Harmonischen. Während der Projektlaufzeit haben die deutschen Übertragungsnetzbetreiber ein Anforderungspapier ([Technische Anforderung für den Anschluss von Elektrolyseanlagen](#)) herausgebracht, in dem aufgrund des erwarteten Umfangs von zukünftig angeschlossener Elektrolyseurleistung die Anforderungen im Vergleich zu klassischen Lasten nochmal erhöht werden. Unter anderem sollen Elektrolyseure Netzfehler durchfahren können und die Blindleistung angepasst werden können. Für andere Länder werden ähnliche Entwicklungen erwartet, sodass im Projekt davon ausgegangen wurde, dass auch ein Leistungsfaktor von 1 in Zukunft von großen Elektrolyseuranlagen erwartet wird.

#### AP 2.2.2 – Konzeptentwicklung Elektrolysestromrichter (LE)

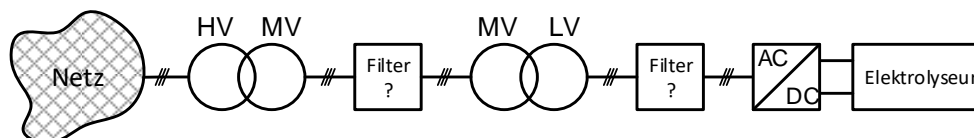


Abbildung 2: Grundprinzip Elektrolysegleichrichter am Hochspannungsnetz

Als Erstes wurde im Projekt ein Grundprinzip für den Elektrolysegleichrichter festgelegt, siehe Abbildung 2. Es gibt mehrere Stellen, an denen potenziell ein Filter eingesetzt werden könnte. Die wichtigsten werden in Abbildung 2 dargestellt. Ein Filter auf Niederspannungsseite und ein Filter auf Mittelspannungsseite.

#### AP 2.2.3 – Erforschung und Untersuchung hybrider Stromrichtertopologien für Elektrolyseanlagen (LE)

Die Erforschung hybrider Stromrichtertopologien erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurden Topologien untersucht, bei denen ein Großteil der Gleichrichtleistung mithilfe von Dioden und Thyristoren erbracht wird. Nach Literaturrecherche und einer Vorauswahl von Topologien wurden insbesondere zwei Topologien näher untersucht. Dabei handelt es sich um den in

Abbildung 3 dargestellten 24-pulsigen Thyristorgleichrichter mit Laststufenschalter und den in  
Abbildung 4 dargestellten 24-pulsigen Diodengleichrichter mit nachgelagerten DC-DC Konverter.

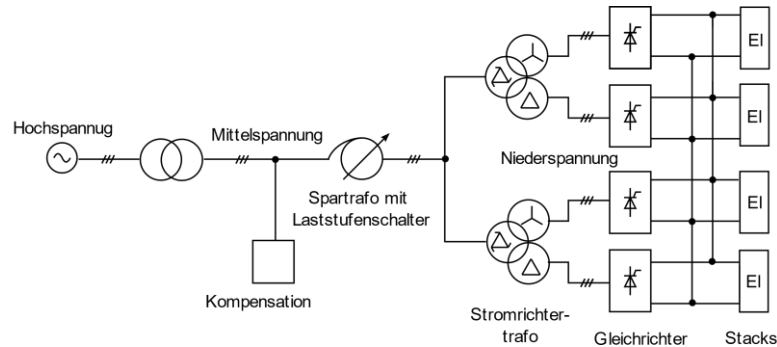


Abbildung 3: 24-pulsiger Thyristorgleichrichter mit Laststufenschalter und möglicher Kompensation auf Mittelspannungsebene.

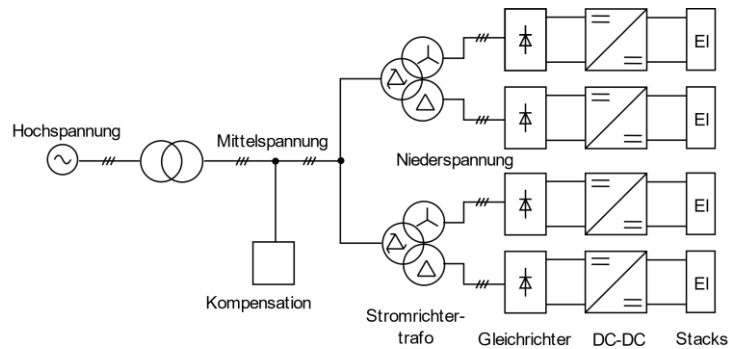


Abbildung 4: 24-pulsiger Diodengleichrichter mit nachgelagerten DC-DC Konverter und möglicher Kompensation auf Mittelspannungsebene.

Gemeinsam haben beide Topologien, dass sie auf vier gesteuerte bzw. ungesteuerte Sechspulsbrücken basieren, die mithilfe von Stromrichtertransformatoren zu einem 24-pulsigen System verschaltet werden. Bei der Thyristorlösung wird die Wirkleistung grob über den Laststufenschalter und fein über den Zündwinkel der Thyristoren gestellt. In der Diodenlösung übernimmt der DC-DC Konverter komplett die Wirkleistungseinstellung. Die Thyristorlösung stellt dabei den Stand der Technik dar, der insbesondere in der Chloralkalielektrolyse schon seit mehreren Jahrzehnten etabliert ist. In beiden Fällen war vornehmlich eine Kompensation von Blindleistung und Harmonischen in der Mittelspannung vorgesehen, wobei eine Kompensation in anderen Spannungsebenen nicht ausgeschlossen war. Eine genauere Beschreibung der Topologien findet sich in [1].

Zur Kompensation der induktiven Blindleistung und Harmonischen der Gleichrichter wurden verschiedene passive und aktive Lösungen in Betracht gezogen. Diese umfassten verdrosselte Kondensatoren, passive harmonische Filter und (Multilevel-) Stromrichter. Außerdem wurde in Rahmen einer Studienarbeit eine doppeltgespeiste Asynchronmaschine untersucht. Hier konnte gezeigt werden, dass zwar die Blindleistungskompensation mithilfe der doppeltgespeisten Asynchronmaschine wie bei einer Synchronmaschine sehr gut funktioniert, aber durch die hohe Streuinduktivität der Asynchronmaschine eine Kompensation der Harmonischen zwar technisch möglich ist, aber nur unter unverhältnismäßigem Aufwand [2].

Nachdem die extensiven Untersuchungen der Lösungen aus

Abbildung 3 und

Abbildung 4 in AP 2.2.4 und AP 2.2.6 gezeigt haben, dass beide Lösungen die gestiegenen Ansprüche vonseiten der Netzbetreiber nur mit einem übermäßigen Kompensationsaufwand erfüllen können, wurden rein selbstgeführte Topologien untersucht. Die hier analysierten Leistungshalbleiter bestanden aus der neusten Generation von MOSFETs aus Siliziumcarbid (SiC-MOSFETs), die vom Projektpartner Infineon während der Projektlaufzeit zur Marktreife weiterentwickelt worden sind. Im Fokus der Untersuchung standen 2,3 kV und 3,3 kV SiC-MOSFETs in einem XHP™ 2 Halbbrückenmodul von Infineon, dass in

Abbildung 5 dargestellt ist.

Abbildung 5: Infineon XHP™ 2 Halbbrückenmodul.

Als Topologien wurde wiederum der Stand der Technik, sprich klassische der 2-Level Stromrichter (Abbildung 6) mit parallelen Schaltern als auch der 3-Level ANPC Stromrichter (Abbildung 7) in Betracht gezogen.

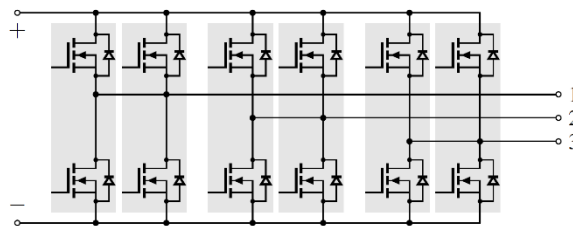


Abbildung 6: Klassischer 2-Level Stromrichter mit Spannungszwischenkreis und zwei parallelen Halbbrücken pro Phase (2L-VSC).

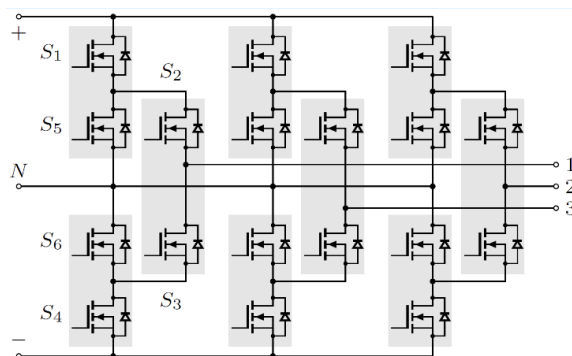


Abbildung 7: 3-Level ANPC Stromrichter mit geteilten Zwischenkreis und aktiven Neutralpunktschaltern (3L-ANPC-VSC).

Eine genauere Beschreibung der Topologien bei Einsatz von 2,3 kV SiC-MOSFETs findet sich in [5]. Dieser Veröffentlichung sind

Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 entnommen.

## AP 2.2.4 – Simulative Untersuchung und Vergleich hybrider Stromrichtertopologien für Elektrolyseanlagen (LE)

Die auf Dioden und Thyristoren basierenden Gleichrichter wurden zunächst mithilfe von einfachen Simulationsmodellen untersucht, um die prinzipielle Funktionalität sicherzustellen und die Verluste als auch den Kompensationsaufwand hinsichtlich von Blindleistung und Harmonischen abzuschätzen. Hierbei gingen die zwei in AP 2.2.3 dargestellte Topologien als Favoriten hervor und wurden in AP 2.2.6 vertieft untersucht.

Die später favorisierten selbstgeführten Topologien auf Basis von SiC-MOSFETs wurden auch in einer simplen Simulation untersucht. Im Fokus waren hier insbesondere die maximal mögliche Gleichrichterleistungen auf Basis des thermischen Modells der SiC-MOSFETs. Das thermische Modell der SiC-MOSFETs wurde zunächst mithilfe von vorläufigen Datenblättern des Projektpartners Infineon erstellt. Hierbei gingen die 2-Level Topologie mit 2,3 kV SiC-MOSFETs als auch in der Variante mit 3,3 kV SiC-MOSFETs und zudem die 3-Level ANPC Topologie mit 2,3 kV SiC-MOSFETs als Favoriten hervor und wurden in AP 2.2.6 und 2.2.7 vertieft untersucht.

**AP 2.2.5** – Detaillierte Umsetzung des Modulations-, Regelungs-, Betriebs- und Schutzkonzepts der bevorzugten Stromrichtertopologie (LE)

Die Modulation und Regelung der auf Dioden und Thyristoren basierten Gleichrichter ging nie über simple PI-Regelungen hinaus, da dies völlig ausreichend war, um die in AP 2.2.4 benannten Indikatoren zu bestimmen.

Die Modulation der selbstgeführten Topologien auf Basis von SiC-MOSFETs wurde deutlich intensiver vorangetrieben. Für die dreiphasige Modulation wurden die in Abbildung 8 dargestellten Modulationsverfahren getestet. Hier sei darauf hingewiesen, dass die 120° Flat Top DC-Modulation nicht im 3-Level ANPC Umrichter eingesetzt werden kann, da dann eine unsymmetrische Belastung der Zwischenkreise vorliegt.

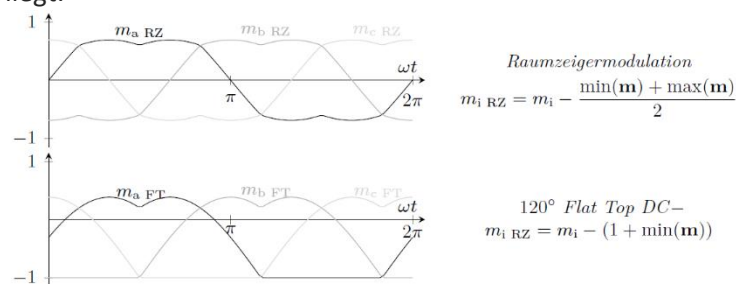


Abbildung 8: Implementierte dreiphasige Modulationen der 2- und 3-Level ANPC Stromrichter.

In der Modulation der einzelnen Phasen gibt es bei dem untersuchten 3-Level ANPC Stromrichter aufgrund der beiden verfügbaren Nullzustände einen Freiheitsgrad. Hier wurde neben den beiden klassischen Modulationsverfahren noch die Methode nach Brückner implementiert, bei der der jeweils heißeste Schalter entlastet wird. Näheres kann in [5] nachgelesen werden.

Bei der Regelung der selbstgeführten Stromrichter wurde auf die gängige Regelung mittels PI-Regler in dq-Koordinaten zurückgegriffen. Im Falle eines Kurzschlusses in einem Leistungshalbleiter im 2-Level wurde auf dem in AP 2.2.9 entwickelten Gatetreiber ein Soft Turn Off auf Basis einer Desat-Erkennung implementiert. Da diese Schutzmethode im 3-Level ANPC Aufbau nicht möglich ist, wurde hier stattdessen eine Abschaltreihenfolge nach der Desat-Erkennung festgelegt.

Für den in AP 2.2.10 aufgebauten Full-Scale-Experimentierdemonstrator wurden die gängigen Schutzmaßnahmen wie eine schnelle externe als auch langsame Selbstentladung geplant und eingebaut. Zudem wurde die Betriebsführung für einen Back-to-Back Betrieb implementiert.

#### **AP 2.2.6 – Untersuchung der Umrichtertopologie in der Simulation (LE)**

Für eine genauere Untersuchung der auf Dioden und Thyristoren basierenden Topologien aus  
Abbildung 3 und

Abbildung 4 wurde das Simulationsmodell aus modularen Blöcken komplett neu aufgesetzt und dabei die verwendeten Komponenten wie (Spar-)Transformatoren, Gleichrichter und Elektrolyseur tiefer modelliert. In der Simulation wurde insbesondere auf mögliche Asymmetrien, die im Betrieb aufgrund von Toleranzen in den 24-pulsigen Stromrichtertransformatoren und unterschiedlich gealterter Elektrolyseure auftreten können, Augenmerk gelegt. Diese Asymmetrien führen zu einem Verlust der idealen 24-Pulsigkeit und somit zu zusätzlichen Harmonischen. Die Ergebnisse der simulativen Studien sind in [1] publiziert. Schlussendlich wurden als Ergebnis dieser Studien die Topologien auf Basis von Dioden und Thyristoren verworfen, da insbesondere der Kompensationsaufwand für einen in Zukunft geforderten  $\cos(\varphi) = 1$  als unverträglich gewertet wurde.

Die Simulationsmodelle der dann favorisierten selbstgeführten Topologien auf Basis von SiC-MOSFETs wurden nach Abschluss der Untersuchungen des Phasenbausteins in AP 2.2.9 nochmals aktualisiert. Zum einen konnten die tatsächlichen gemessenen Schaltverluste und zum anderen Leitverluste und das thermische Ersatzschaltbild auf Basis von neueren Datenblättern des Projektpartners Infineon integriert werden. Als Ergebnis dieser Simulationen kann konstatiert werden, dass die 3-Level ANPC Lösung bei fast gleichem Bauraum die größte Leistungsdichte aufweist und gleichzeitig eine deutliche Erhöhung der Systemspannung ermöglicht, was in der Zukunft in der Elektrolyse erwartet wird. Weiteres kann in [5] nachgelesen werden.

#### **AP 2.2.7 – Entwurf und Aufbau des skalierten Teststands (LE)/**

#### **AP 2.2.8 – Untersuchung der Umrichtertopologie im skalierten Teststand (LE)**

Der skalierte Teststand war ursprünglich als sinnvoller Zwischenschritt konzipiert worden, um die Wirkungsweise und das Regelkonzept hybrider Lösungen abzusichern. Parallel zu dem Vergleich der Thyristor bzw. Dioden basierten Topologien wurde bereits der skalierte Teststand geplant und Komponenten und Messmittel beschafft. Als die Entscheidung gegen die oben genannten Topologien getroffen worden war, wurde die Arbeit an dem skalierten Teststand eingestellt, da er für rein selbstgeführte Topologien auf Basis von SiC-MOSFETs nicht nötig ist. Die dafür geplante Arbeitszeit wurde in den erweiterten Topologievergleich (AP 2.2.3 ... AP 2.2.6) und die damit verbundenen Testaufbauten (AP 2.2.9) investiert. Die beschaffte Messtechnik (z. B. Oszilloskope) konnte in diesen Untersuchungen Anwendung finden.

#### **AP 2.2.9 – Entwurf, Aufbau, Untersuchung und Optimierung eines Phasenbausteins (LE)**

Das Herzstück eines Stromrichters ist die Kommutierungszelle. Diese wurde im Rahmen eines Phasenbausteins implementiert. Hier wurde sowohl die 2-Level Topologie als auch die 3-Level ANPC Topologie aufgebaut, um sicherzustellen, dass beide Topologien mit den SiC-MOSFET Halbbrückenmodulen sicher schalten können. Die Phasenbausteine sind in [Abbildung 9](#) dargestellt.

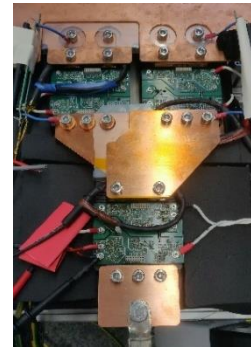
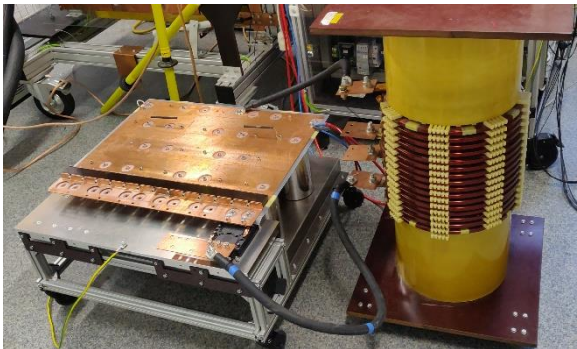


Abbildung 9: Aufgebaute Phasenbausteine in Form einer Kommutierungszelle. Auf der linken Seite die 2-Level Topologie und auf der rechten Seite die 3-Level ANPC Topologie.

Zur Ansteuerung der SiC-MOSFETs wurden passende Gatetreiber entwickelt. Diese bestehen aus einer Endstufe für das einzelne Modul und aus einer (gemeinsamen) Vorstufe für die Einzel- oder Parallelschaltung der Module. Dies zeigt Abbildung 10.



Abbildung 10: Gatetreiber für eine einzelne Halbbrücke (links) und zwei parallele Halbbrücken (rechts). Die oberen Leiterplatten tragen die Vorstufe und die unteren Leiterplatten die Endstufen der Treiber.

In der 2-Level Topologie wurden sowohl die 2,3 kV als auch die 3,3 kV SiC-MOSFETs jeweils als Einzelschalter als auch in der Parallelschaltung vermessen. Die MOSFETs konnten in allen vom Datenblatt vorgegebenen Arbeitspunkten sicher schalten und die gemessenen Schaltverluste stimmten weitestgehend mit den Datenblattwerten überein. Die Parallelschaltung zweier Schalter war weitestgehend unproblematisch möglich.

In der 3-Level ANPC Topologie konnte die für den Betrieb notwendige lange Kommutierung über die Schalter  $S_2$  und  $S_3$  zunächst nicht bei allen Strömen vermessen werden, da die Module für den Betrieb in der 2-Level Topologie optimiert sind und bei der langen Kommutierung ohne weitere Maßnahmen deutliche Überspannungen auftreten. Aus diesem Grund wurde das in Abbildung 11 dargestellte Überspannungsbegrenzungsnetzwerk entwickelt, das im Prinzip einem RC-Dämpfungsglied entspricht. Mit dem Überspannungsbegrenzungsnetzwerk konnten auch in der 3-Level ANPC Topologie alle im Datenblatt angegebenen Arbeitspunkte sicher geschaltet werden. Im Vergleich zum Datenblatt haben die Schalter  $S_2$  und  $S_3$  erhöhte Ausschalt- und verminderte Einschaltverluste. Die Gesamtschaltverluste in den Schaltern sind vergleichbar mit dem Datenblatt respektive dem 2-Level Aufbau. Durch die zusätzlichen Verluste im Überspannungsnetzwerk sind die Gesamtschaltverluste des Aufbaus in der 3-Level ANPC Topologie allerdings etwas erhöht.



Abbildung 11: Phasenbaustein der 3-Level ANPC Topologie mit zusätzlichem Überspannungsbegrenzungsnetzwerk.

### AP 2.2.10 – Entwurf, Aufbau und Untersuchung eines Full-Scale-Experimentierdemonstrators (LE)

Die anhand der Simulationen aus AP 2.2.6 ausgewählte Topologie, der 3-Level ANPC Stromrichter mit 2,3kV SiC-MOSFETs, wurde als Full-Scale Demonstrator aufgebaut. Tatsächlich wurde der Full-Scale Demonstrator gleich zweimal aufgebaut, um einen Back-to-Back Betrieb zu ermöglichen. Inklusive Lade- und Schutztechnik zeigt dies Abbildung 12.

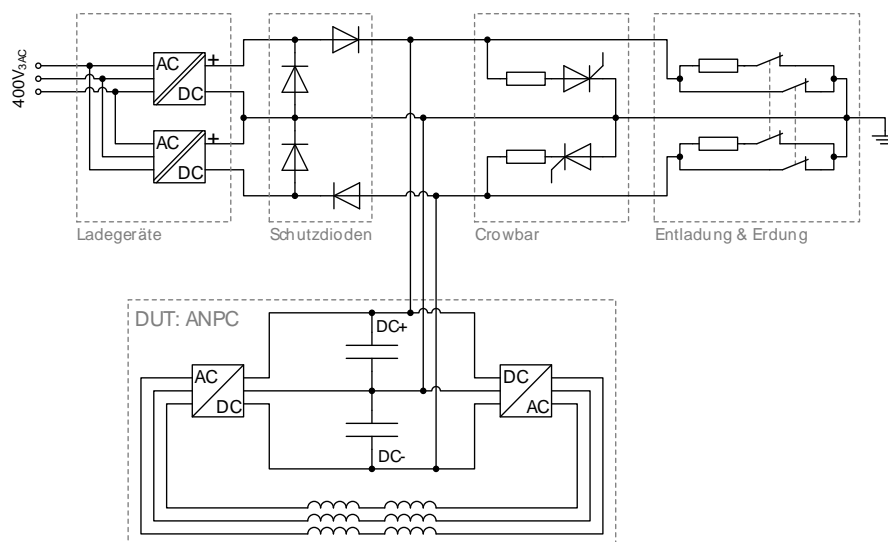
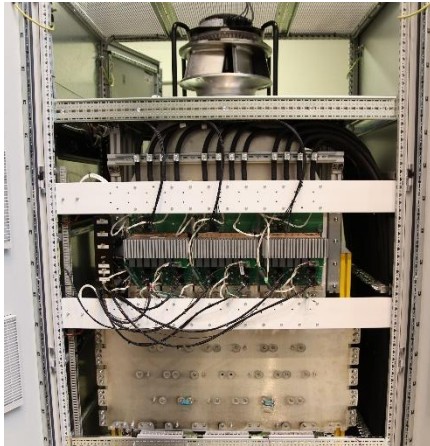


Abbildung 12: Grundlegender Aufbau des Full-Scale-Demonstrators mit 3-Level ANPCs (DUT), Ladetechnik (Ladegeräte + Schutzdioden) sowie Entladetechnik (Entladung & Erdung, Crowbar).

Die Betriebsführung, Regelung und Modulation des Full-Scale Demonstrators wurde auf der Regelungsplattform der Professur implementiert. Außerdem wurde eine Überarbeitung des Gatreibers vorgenommen, um das Schalten mit einem Gate-Clamping sicherer zu machen und dem externen Soft-

Turn-Off der 3-Level ANPC Topologie Rechnung tragen. Den Leistungsteil des Full-Scale Demonstrators



zeigt

Abbildung 13 .

Aktuell ist der Full-Scale Demonstrator fertiggestellt und wartet auf seine Sicherheitsabnahme. Sein Technologiereifegrad beträgt zu diesem Zeitpunkt drei. In zukünftigen Projekten soll er zu dem Technologiereifegrad sechs gebracht werden.

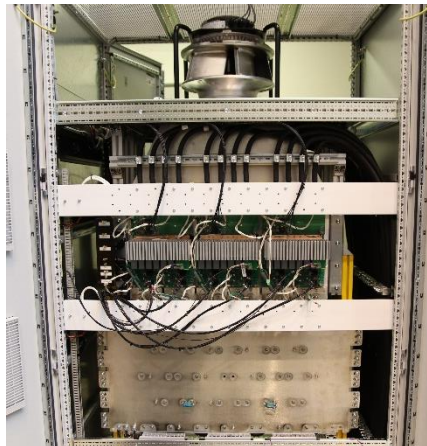


Abbildung 13: Leistungsteil des Full-Scale Demonstrator.

**AP 2.2.11** – Evaluierung der Lösung, Vergleich mit dem Stand der Technik sowie konkurrierenden Lösungen (LE)

Als Stand der Technik sind insbesondere zwei Lösungen zu betrachten. Die thyristorgesteuerte Lösung aus Abbildung 3, die schon seit langem in der Chloralkalielektrolyse etabliert ist und eine 2-Level Lösung des Projektpartners SMA, die eine starke Ähnlichkeit zu der Lösung aus Abbildung 6 aufweist.

Durch intensive simulative Untersuchungen von Topologien auf Basis von Dioden und Thyristoren konnte gezeigt werden, dass diese heute noch unter mäßigem Kompensationsaufwand den gängigen Netzanforderungen genügen können. Jedoch wird der Kompensationsaufwand unverträglich hoch, wenn die zukünftig erwarteten Netzanforderungen in Betracht gezogen werden.

Im Falle von selbstgeführten Stromrichtern auf Basis von SiC-MOSFETs konnte gezeigt werden, dass bereits durch Einsatz der neusten Generation von SiC-MOSFETs eine deutliche Leistungssteigerung im Vergleich zur Referenz möglich ist. Allerdings verbleiben in diesem Fall die Systemspannungen bei Werten, die nur knapp über 1500V liegen. Die 3-Level ANPC Lösung bietet hier mit einer Systemspannung von 2700V sowohl eine deutliche Erhöhung der Systemspannung als auch eine deutliche Leistungssteigerung bei ähnlichem Bauraum an. Sie wird damit hochgradig kompetitiv sein, wenn die erwartete Steigerung der Systemspannung von Elektrolyseuren eintritt.

#### **AP 2.2.12 – Wirtschaftlicher Vergleich der verschiedenen Systeme und Topologien (LE)**

Für eine Universität ist es immer schwer, eine genaue Kostenabschätzung durchzuführen, da marktrelevante Kosten schwer zu beschaffen sind.

Bezüglich der Topologien auf Basis von Dioden und Thyristoren sei auf den Projektpartner SMA verwiesen. Aufgrund der dortigen Expertise für die Preise von Kompensationsanlagen wurden diese Topologien mit Sicht auf den sich entwickelnden Netzanforderungen verworfen.

Die 3-Level ANPC Topologie lässt sich auf ähnlichem Bauraum wie die 2-Level Topologie konstruieren, passt in einen Container und kann in einer Montagestraße produziert werden. Insgesamt braucht sie drei Halbbrückenmodule extra, hat aber eine erhöhte Leistung und eine erhöhte Systemspannung. Auch hier wird wieder auf die Expertise des Projektpartners SMA verwiesen, der davon ausgeht, dass die Systemkosten einer solchen Topologie dem Stand der Technik (2-Level) überlegen sind. Es bleibt jedoch ein gewisses Risiko, weil sich für einen Erfolg der Topologie eine anvisierte Systemspannung der Elektrolyseure von deutlich über 1500V auch einstellen muss.

### **AP 3: Komponenten und Zuverlässigkeit**

#### **AP 3.2 – Komponenten und Zuverlässigkeit / Hochstrom- und Hochtemperaturleiter**

##### **AP 3.2.1 – Auslegung / Kontaktverhalten stromführender Verbindungen**

In diesem Arbeitspaket wurde das elektrische Kontaktverhalten von Flächenkontakten mit verschiedenen Kombinationen aus Leiter- und Beschichtungswerkstoffen für stromführende Verbindungen in Elektrolyseanlagen untersucht. In Abstimmung mit dem Projektpartner SMA Solar Technology AG und den Ergebnissen aus AP 1 wurden für die Untersuchung dreizehn Versuchsreihen mit jeweils sechs Verbindungen festgelegt. Das elektrische Kontaktverhalten wurde in Hystereseversuchen mit einer Zug-Druck Prüfmaschine<sup>1</sup> abhängig von der Kontaktkraft untersucht. Die experimentell ermittelten Kontaktkraft-Verbindungswiderstands-Kennlinien wurden als Eingangsgröße für die mechanisch-elektrisch-thermische Modellierung verwendet (AP 3.2.3). Für die Beurteilung des elektrischen Kontaktverhaltens wurde aus den gemessenen Verbindungswiderständen die Gütefaktoren bestimmt. Die ermittelten Gütefaktoren wurden dem temperaturäquivalenten Grenzgütefaktor gegenübergestellt (Abbildung 14).

---

<sup>1</sup> Hersteller: ZwickRoell GmbH & Co. KG; Typ: 50 kN Allround table top

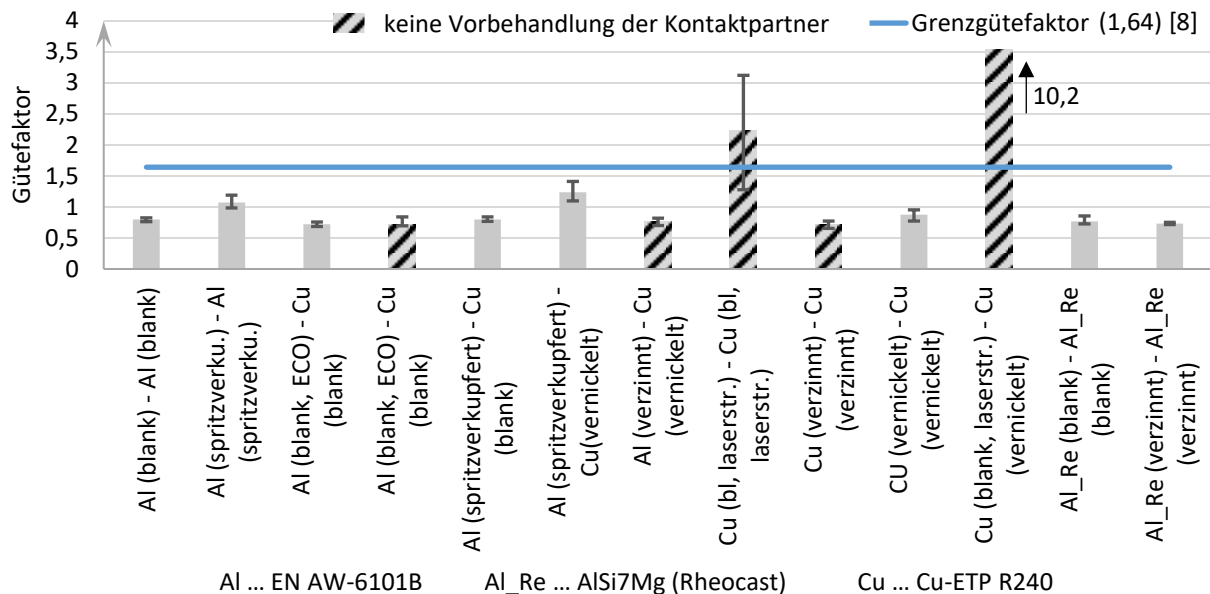


Abbildung 14: In den Hystereseversuchen ermittelte Gütefaktoren der abgegebenen Kontaktpaarungen bei einer Kontaktkraft von  $F = 48 \text{ kN}$

Durch die Hystereseversuche konnte gezeigt werden, dass bei der Verwendung eines ECOCONTACT<sup>2</sup> als Kontaktelement die abrasive Vorbehandlung der Kontaktpartner nicht notwendig ist. Der Mittelwert des Gütefaktors beider Versuchsreihen betrug 0,72. Da dieser Wert deutlich unterhalb des Grenzgütefaktors lag, war davon auszugehen, dass diese Verbindungen in stromdurchflossenen Versuchen Wärmesenken sind. Unterstützend zu den Hystereseversuchen wurde die Oberfläche ausgewählter Stromschienen im Kontaktbereich mit Hilfe eines 3D-Mikroskops<sup>3</sup> (Lfd. Nr. 1) charakterisiert. Für die Versuchsreihe Cu-ETP R240 (laserstrukturiert) gegen Cu-ETP R240 (laserstrukturiert) wurde ein mittlerer Gütefaktor von 2,23 festgestellt, welcher deutlich über dem Grenzgütefaktor lag. Mit Hilfe des 3D-Mikroskops konnte festgestellt werden, dass die Oberfläche der Kontaktpartner plastisch verformt wurde, die Eindrucktiefe der Struktur pro Schiene betrug im Mittel zwei bis drei  $\mu\text{m}$ . Weiterhin wurden die Flächen der Eindrücke an mehreren Positionen auf der Stromschiene vermessen. Aus den Daten aller sechs Verbindungen ging hervor, dass die Fläche der Eindrücke pro Stromschienen 9,5 % der gesamten scheinbaren Kontaktfläche betrug und somit das Design der Laserstruktur ein möglicher Grund für die erhöhten Gütefaktoren sein könnte. Die Ergebnisse der Hystereseversuche und der Untersuchungen mit dem 3D-Mikroskop bildeten die Grundlage für die nachgelagerten Untersuchungen zum Langzeitverhalten und der Alterung ausgewählter Verbindungen (AP 3.2.2).

### AP 3.2.2 – Alterung stromführender Verbindungen

In diesem Arbeitspaket wurde das Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen mit Stromschienen (40 mm x 10 mm) bei Temperaturen bis zu 180 °C über eine Belastungsdauer von 10.000 h untersucht. Es wurden unterschiedliche Grundwerkstoffe, Beschichtungen der Oberflächen und Verbindungs- und

<sup>2</sup> ECOCONTACT, Hersteller: Uniper SE

<sup>3</sup> Hersteller: Carl Zeiss Microscopy GmbH, Typ: Axioscope 7 KMAT

Fügeelemente betrachtet (Tabelle 1). Elektrische<sup>4</sup>, mechanische<sup>5</sup> und thermische Kenngrößen der Verbindungen wurden in regelmäßigen zeitlichen Abständen gemessen und ausgewertet. Anhand der ermittelten Größen lässt sich die Langzeitstabilität der Verbindungen bewerten. Die angewendete Methodik sowie detaillierte Messergebnisse sind in [8] dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Werkstoffpaarungen und der dauerhaften Verbindungstemperaturen in den stromdurchflossenen Langzeitversuchen sowie Beurteilung des Langzeitverhaltens nach 10.000 Betriebsstunden

	Oberfläche	EN AW-6101B-T7 (Al)			Cu-ETP R240			
		blank	verzinkt	Spritzver- kupfert	blank	Blank, laserstruk- turiert	verzinkt	vernickelt
EN AW-6101B-T7 (Al)	Blank	180 °C			140 °C (ECO <sup>Fehler!</sup> Textmarke nicht definiert.)		140 °C (ECO <sup>6</sup> )	
	Verzinkt							160 °C 140 °C
	Spritz- verkupfert			140 °C	140 °C			140 °C
Cu-ETP R240	Blank	140 °C (ECO <sup>6</sup> )		140 °C				
	Blank, laser- strukturiert					140 °C		140 °C
	Verzinkt	140 °C (ECO <sup>Fehler!</sup> Textmarke nicht definiert.)					140 °C	
	vernickelt		160 °C 140 °C	140 °C		140 °C		140 °C
Langzeitstabil		Nicht langzeitstabil			Bisher keine Aussage möglich			

<sup>4</sup> Mikroohmmeter LoRe, Wie GmbH

<sup>5</sup> MAX II Ultraschall-Bolzenspannungsmessgerät (Lfd. Nr. 2)

<sup>6</sup> ECOCONTACT, Hersteller: Uniper SE

Für die Anwendung haben sich insbesondere Verbindungen mit dem Grundwerkstoff Cu-ETP R240 und laserstrukturierter, verzinnter oder vernickelter Oberfläche qualifiziert. Für diese wurde eine dauerhaft zulässige Temperatur von 140 °C ermittelt. Bei einem Teil der Versuchsreihen lässt sich nach 10.000 Betriebsstunden noch keine Aussage über die Langzeitstabilität treffen, da der Gütefaktor der Verbindungen bisher teils streut, ohne dabei den Grenzgütefaktor (vgl. Abbildung 14) zu überschreiten.

### AP 3.2.3 – Mechanisch-elektrisch-thermische Modellierung

In diesem Arbeitspaket wurde die Zielstellung verfolgt, Kenngrößen und Zusammenhänge des mechanisch-elektrischen Kontaktverhalten zu beschreiben und zu verallgemeinern. Dazu wurden für die Anordnung der Versuche zum Ermitteln der Zusammenhänge zwischen Kontaktkraft und Verbindungswiderstand (AP 3.2.1) äquivalente FEM-Berechnungsmodelle aufgebaut. In diesen wurde das elektrische Strömungsfeld in beiden Kontaktpartner unter der Annahme eines auf der gesamten scheinbaren Kontaktfläche gleichverteilten elektrischen Kontaktverhaltens berechnet. Dies erfolgte über die gleichverteilte spezifische Flächenleitfähigkeit  $G'$ , die im Modell variiert wurde, um die gemessenen Verbindungswiderstände zu erhalten. Das Kontaktverhalten der Verbindungen mit den untersuchten Beschichtungswerkstoffen wurde gleichermaßen über den Modellparameter spezifische Flächenleitfähigkeit  $G'$  erfasst. Mit den FEM-Modellen wurde der Verbindungs-  $R_V$ , der Material-  $R_{Mat}$ , sowie der Kontaktwiderstand  $R_K$  für die in AP 3.2.1 untersuchten Kombinationen an Leiterwerkstoffen berechnet und empirische Ansatzfunktion für  $R_{Mat} = f(R_V)$  sowie  $R_K = f(G')$  erarbeitet. Mit diesen Funktionen war es möglich, aus den experimentell ermittelten Kontaktkraft-Verbindungswiderstands-Kennlinien (AP 3.2.1) den Zusammenhang zwischen spez. Flächenleitfähigkeit und mittlerer mech. Spannung über eine empirische Ansatzfunktion zu beschreiben (Gl. (1)).

$$G' = g_1 \sigma_m^{g_2 \sigma_m + g_3} \quad (1)$$

Mit einem weiteren FEM-Modell der Anordnung für die Untersuchungen zur Gasdichtheit (s. AP 3.2.2) konnte eine direkt gekoppelte mechanisch-elektrische Berechnung realisiert werden. Die Verteilung der mech. Spannung in der Kontaktebene wurde berechnet und über die implementierte Ansatzfunktion die spezifische Flächenleitfähigkeit jedes finiten Kontaktelements individuell parametrisiert. Die an diesen Verbindungen gemessenen Verbindungswiderstände konnten mit dem Modell gut abgebildet werden.

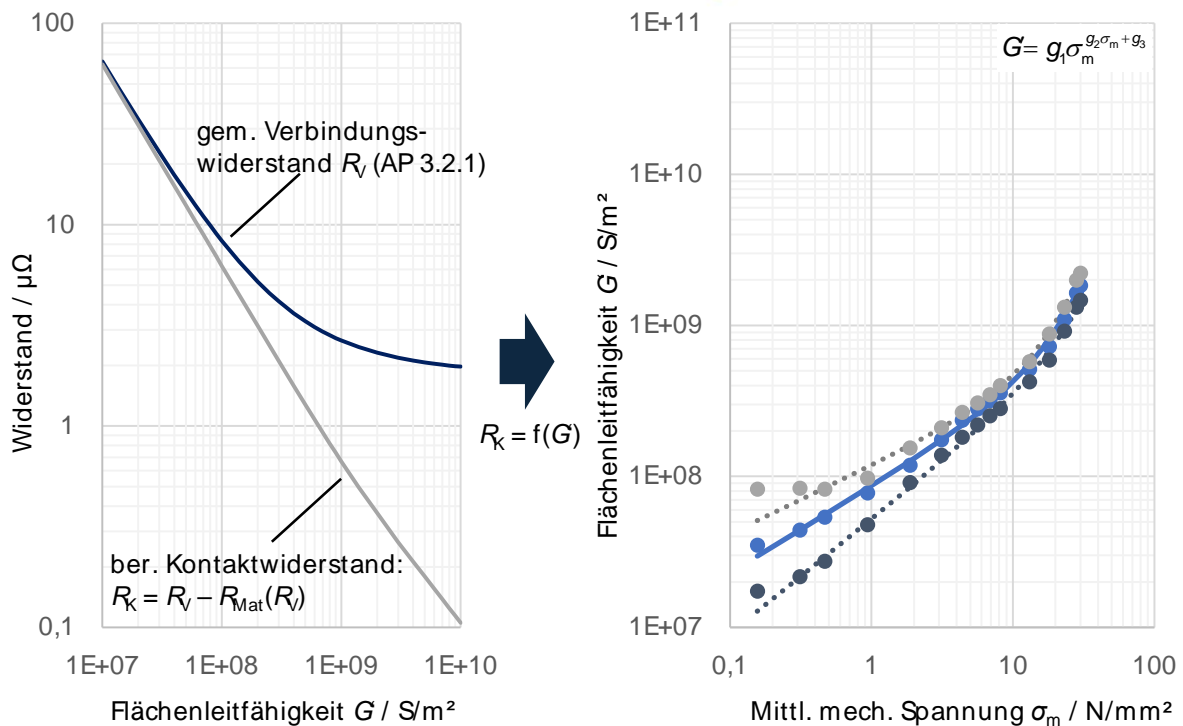


Abbildung 15: Ermittelte spezifische Flächenleitfähigkeit abhängig von der mittleren mech. Spannung für Verbindungen mit zwei Kontaktpartner aus EN AW-6101B

#### AP 3.2.4 – Lebensdauerabschätzung

Im Verlauf des Projekts wurden die allgemeingültigen Belastungsprofile für Elektrolyseanwendungen nicht abschließend definiert. Auf dieser Basis waren die Abschätzungen der Lebensdauer der Verbindungstechnik für die spezifische Anwendung entsprechend nicht möglich. Daher wurden die Daten aus den Langzeitversuchen in bestehende empirische Modelle überführt. Parameterschätzungen für die Lebensdauermodelle wurden durchgeführt, allerdings konnten nur für einige Versuchsreihen gute Anpassungen erreicht werden.

#### AP 3.2.5 – Kostenoptimierung

Der bedeutsamste Kostenfaktor für die Strombahnen war deren Integration in die Plattformlösung. Dementsprechend wurde das Kriterium definiert, dass die Anordnung und Querschnitt der Schienen wie in dem Ursprungskonzept vorgesehen erhalten bleiben sollen. Um dabei die angestrebte Leistungsklasse zu erreichen, muss die Erhöhung der Strombelastbarkeit anderweitig ermöglicht werden. Zu diesem Zweck wurden relevante Kühlkonzepte ausgewählt, die sich im existierenden Moduldesign wirtschaftlich und technisch realisieren lassen, ohne dass dafür große Änderungen notwendig sind. Hier wurden z. B. die Beschichtung mit Emissionslack, erzwungene Konvektion mit Hilfe eines Lüfters sowie oberflächenmontierte Kühlkörper für Luft- und Wasserkühlung betrachtet.

#### AP 3.2.6 – Kühlkonzepte für Leiter und Bauteile

Um eine einheitliche Vergleichsbasis für alle praktikablen Kühlkonzepte zu schaffen, kann entweder die maximal erreichbare Strombelastbarkeit unter Einsatz des jeweiligen Kühlkonzeptes oder der thermische

Gesamtwiderstand des Wärmeüberganges genutzt werden. Diese Größen sind über die thermische Leistungsbilanz gekoppelt. Die Erwärmung der Anordnung lässt sich z. B. mit einem basalen Modell nach der Wärmenetzmethode (WNM) beschreiben.

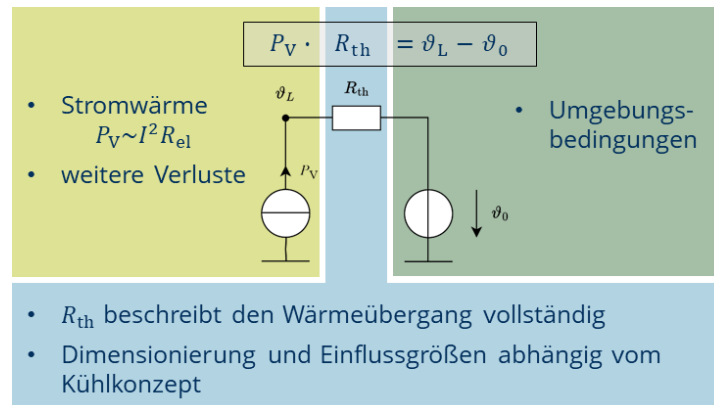


Abbildung 16: Basales Wärmenetz zum Beschreiben der Erwärmung, abhängig von den Strombelastbarkeiten bei den betrachteten Kühlkonzepten

Für typische Fälle und Randbedingungen sind i. d. R. die Konvektion und Strahlung als Parallelschaltung zum thermischen Ersatzwiderstand  $R_{th}$  zusammengefasst und die Strombelastbarkeit für ausgewählte Querschnitte standardisiert (DIN 43670/1, IEEE Std 605-2023). Für das hier analysierte Einsatzszenario in der Anlage musste jedoch der Widerstand und der Strombelastbarkeit individuell ermittelt werden. Dabei konnte auch die Effektivität der Kühlkonzepte speziell für das Einsatzszenario bewertet und mit zweckmäßig vergleichbaren Werten ausgedrückt werden.

### AP 3.2.7 – Dimensionierung der Hochstrom-/Hochtemperaturleiter auf der AC-Seite

Die Verbindung zwischen dem Transformator und dem Konverter der Anlage ist als Einleiter-Drehstromschienensystem (L1, L2 und L3) realisiert. Die drei Leiter sind als Schienen mit rechteckförmigem Querschnitt in einer Z-Form parallel geführt und teilweise im Gehäuse integriert. Anhand der Vorgaben des Projektpartners SMA wurden thermische Modelle aufgebaut und durch experimentelle Untersuchungen verifiziert. Mit den verifizierten Modellen konnten die Strombelastbarkeiten berechnet werden. Neben den Wärmeübertragungsprozessen selbst wurden bei den thermischen Untersuchungen auch die zusätzlichen Verluste durch den Skin- und Proximityeffekt in den Schienen berücksichtigt. Der Leistungsfaktor  $k$  für das eingesetzte Leitersystem wurde rechnerisch z. B. für den Leiter 2 zu  $k_{3\sim L2} = 1,39$  bestimmt. Damit ergibt sich bei Drehstrombelastung eine um 15 % geringere Strombelastbarkeit ( $I_{3\sim L2}(\Delta\vartheta = 70\text{ K}) = 2,85\text{ kA}$ ) im Vergleich zur Gleichstrombelastung ( $I_{DC\_L2}(\Delta\vartheta = 70\text{ K}) = 3,4\text{ kA}$ ). Die Wirkung der fallspezifischen Leiterführung und des Gehäuses wurde in einem Modellexperiment untersucht. Die maximal mögliche Strombelastbarkeit im existierenden Design unter Berücksichtigung des Einflusses der Wechselstromeffekte ohne zusätzlichen Kühlkonzepte liegt bei  $I_{3\sim AC} = 2,8\text{ kA}$  und stimmt mit dem berechneten Ergebnis gut überein. Damit sind die Leiter für die ausgewählte Leiteranordnung und Kühlkonzept auf der AC-Seite thermisch dimensioniert und der zulässige Strom für die Betriebsführung bestimmt.

### AP 3.2.8 – Dimensionierung der Hochstrom-/Hochtemperaturleiter auf der DC-Seite

Für die DC-Seite der Anlage ist plattformbedingt eine Parallelführung zweier übereinander angeordneten luftgekühlten Schienen mit rechteckförmigen Leiterquerschnitt als Gleichstromschienensystem (L+ und L-) erforderlich. Für diese Anordnung ist der Einfluss des für die Anlagen vorgesehenen geringen Rippelstromes auf die Erwärmung vernachlässigbar. Die Strombelastbarkeit für diesen Fall lässt sich insb. im Zusammenhang mit einer sehr inhomogenen Geschwindigkeitsverteilung im Modul nur begrenzt theoretisch ermitteln. Dementsprechend wurde eine Versuchsanordnung angelehnt an das reale Design konzipiert, mit welcher sich die Temperaturverteilung und damit die Strombelastbarkeit experimentell bestimmen ließ. Für die ausgewählten Kühlkonzepte wurden die maximalen Strombelastbarkeiten der DC-Schienen im Dauerbetrieb der Anlage ermittelt. Für die Ausgangssituation ohne zusätzliche Kühlung stimmen die mit dem Wärmenetzmodell berechneten Strombelastbarkeiten  $I_{DC\_L+/L-\_c} = 3,7$  kA des Schienensystems gut mit den experimentell ermittelten  $I_{DC\_L+L-\_m} = 3,5$  kA überein. Mit dem ausgewählten Kühlkonzept der erzwungenen Konvektion ist eine Strombelastbarkeit von  $I_{DC\_L+L-\_m} = 7$  kA realisierbar. Der Einsatz der Emissionslackierung bzw. der Kühlkörper ermöglicht weitere Steigerung der Strombelastbarkeit (Tabelle 2), ohne dass geometrische Änderungen im Design vorgenommen werden müssen.

Tabelle 2: Ermittelte maximal erreichbare Strombelastbarkeit und der thermische Gesamtwiderstand der gegebenen Stromschienenanordnung auf der DC-Seite bei 70 K Übertemperatur

Kühlkonzept	$R_{th}$ in K/W	Strombelastbarkeit in A	
<b>Luftkühlung</b>			
<b>Konvektion</b>	<b>Strahlung</b>		
quasi-frei	$\varepsilon \approx 0.2$	0.44	3 500
quasi-frei	$\varepsilon = 0.93$	0.31	4 250
quasi-frei; mit Kühlkörper A	$\varepsilon \approx 0.2$	0.33	4 100
quasi-frei; mit Kühlkörper B	$\varepsilon \approx 0.2$	0.22	4 600
erzwungen; $\dot{V} \approx 1000$ m <sup>3</sup> /h	$\varepsilon \approx 0.2$	0.18	5 200
erzwungen; $\dot{V} \approx 1000$ m <sup>3</sup> /h; mit Kühlkörper A	$\varepsilon \approx 0.2$	0.11	6 600
erzwungen; $\dot{V} \approx 1000$ m <sup>3</sup> /h; mit Kühlkörper B	$\varepsilon \approx 0.2$	0.09	6 900
erzwungen; $\dot{V} \approx 3000$ m <sup>3</sup> /h (Ausgangsvariante)	$\varepsilon \approx 0.2$	0.08	7 000
erzwungen; $\dot{V} \approx 3000$ m <sup>3</sup> /h; mit Kühlkörper A	$\varepsilon \approx 0.2$	0.05	8 900
erzwungen; $\dot{V} \approx 3000$ m <sup>3</sup> /h; mit Kühlkörper B	$\varepsilon \approx 0.2$	0.05	8 800
<b>Wasserkühlung</b>			
Wasserkühlkörper mit Wassertemperatur 40 °C, p = 3 bar, $\dot{V} = 10$ l/min	0.046		9 300
Wasserkühlkörper mit Wassertemperatur 30 °C, p = 3 bar, $\dot{V} = 10$ l/min	0.035		9 900
Wasserkühlkörper mit Wassertemperatur 20 °C, p = 3 bar, $\dot{V} = 10$ l/min	0.025		11 000

### AP 3.3 – Fehlerursachen und deren Wirkung

#### AP 3.3.1 – Analyse und Klassifizierung des Anlagendesigns stromstarker DC-Anlagen

Der Anlagenabschnitt von Netz bis Stromrichter des elektrischen Aufbaus der Elektroenergieversorgung einer Elektrolyseanlage (ELA) (s. Ergebnis von AP 2.2.3) stellt aus schutztechnischer Sicht keine Besonderheit dar. Für diesen Teil der ELA stehen Funktionen für ein Anlagenschutzsystem (zur Klärung von Fehlern innerhalb der Anlage) sowie Verfahren zur Berechnung der für die Auslegung des Anlagenschutzsystems benötigten Schutzparameter zur Verfügung [9, 12]. Weitere Untersuchungen zum Fehlerverhalten (Fehlerszenarien) konzentrieren sich daher auf Kurzschlüsse (mit und ohne Lichtbogen) im DC-Teil der ELA (s. Abbildung 17). Der Workshop [10] zum Anlagenschutz von ELA am 21.02.2022 (organisiert von TUD-EV) für Mitgliedern aus dem H2Giga-Konsortium ergab, dass für die Bestimmung der Schutzparameter und zur Auslegung eines Schutzsystems für ELA ein ausreichend genaues

Ersatzschaltbild des ELs für den Kurzschlussfall und die Erdungswiderstände des Systems fehlen. In Kooperation mit dem Konsortialpartner SMA und dem H2Giga-Partner Forschungszentrum Jülich (FZJ) wurde die Untersuchung des Kurzschlussstrombeitrags von Elektrolyseuren geplant. Die Auswertung geeigneter Berechnungsverfahren für die Fehlerströme bei Fehlern (Kurzschluss, Lichtbogen) im DC-Teil von ELA ist in [11] erfolgt. Dabei wurde auf den Bedarf an der Berücksichtigung von ELn bei der Kurzschlussstromberechnung in der DIN EN 61660-1 aufmerksam gemacht. Der Einfluss der Erdungswiderstände auf das Fehlerverhalten wurde daher im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (s. AP 3.3.3) untersucht.

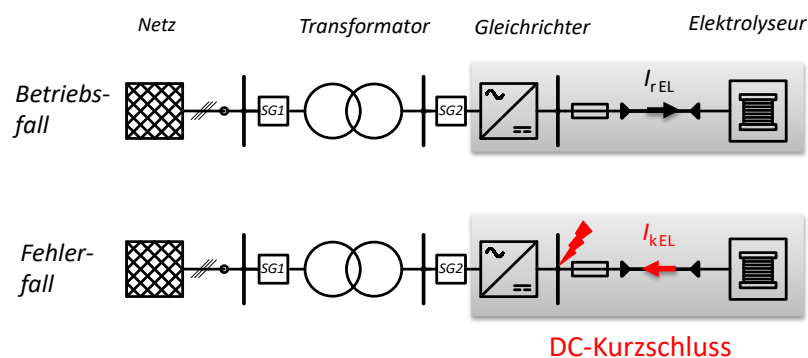


Abbildung 17: Aufbau einer ELA und Ströme im Betriebs- und Fehlerfall (Betriebsstrom  $I_{rEL}$  und DC-Kurzschlussstrombeitrag des EL  $I_{kEL}$ ) [12]

### AP 3.3.2 – Messtechnische Untersuchung typischer Fehlerzustände in Gleichstromanlagen

#### Untersuchung des Kurzschlussstrombeitrags von Elektrolyseuren

In ca. 150 Kurzschlussversuchen, die am FZJ durchgeführt wurden, wurde der Einfluss verschiedener Systemparameter auf den Kurzschlussbeitrag des EL bei einem externen Kurzschluss (Kurzschluss zwischen Stromrichter GR und EL) untersucht. Die Messdaten wurden von der TUD-EV ausgewertet. Sie bilden die Grundlage für die Entwicklung eines Fehlermodells von EL in AP 3.3.3.

Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Beitrag des EL zum Kurzschlussstrom. Damit geht eine deutlich gesteigerte thermische und mechanische Belastung sowie Alterung des ELs einher. Bei dem untersuchten 50-kW-PEM-Stack stieg die Stromdichte im Kurzschlussfall bis auf 8,3 A/cm<sup>2</sup> bei einer Nennbetriebsstromdichte von 2 A/cm<sup>2</sup> [12]. Der Zeitverlauf des Kurzschlussstrombeitrags entspricht qualitativ dem einer Kapazität (s. Abbildung 18). Ein signifikanter Dauerkurzschlussstrom konnte nicht festgestellt werden (= kein Brennstoffzellenbetrieb) [12]. Die Messdaten zeigen einen hohen Einfluss der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) auf die charakteristischen Merkmale des Kurzschlussstrombeitrags. Die Höhe des Kurzschlussstrombeitrags wird ebenfalls von Betriebskenngrößen beeinflusst [13, 17].

Für die Dimensionierung (Leitergeometrie, mechanische Kräfte, Schaltgeräte) der Elektroenergieversorgung der ELA, für die Beurteilung der Berührungsspannung und für die Auswahl und Einstellung von Anlagenschutzsystemen ist der Kurzschlussstrom ein wichtiges Auslegungskriterium. Aktuell existieren in der Fachwelt keine veröffentlichten Modelle oder Berechnungsvorschriften mit denen der Kurzschlussbeitrag von EL für ELA mit realen Anlagengrößen und -abmessungen zuverlässig und hinreichend präzise bestimmt werden kann. Die Abhängigkeit zwischen den wesentlichen Merkmalen

eines ELs (Technologie, MEA, Anzahl und aktive Fläche der Zellen) und den relevanten Kenngrößen des Kurzschlussstrombeitrags sollte weiter untersucht werden.

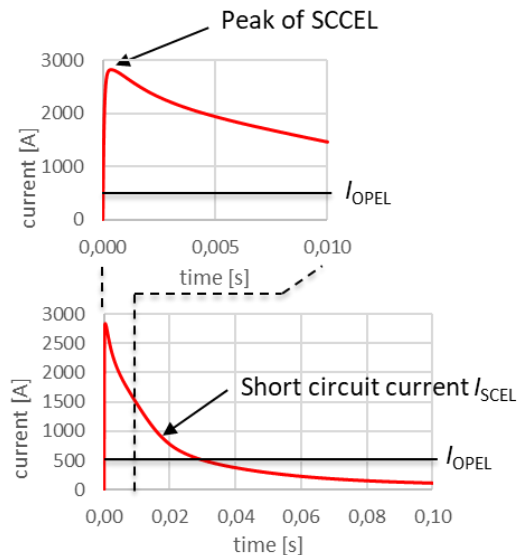


Abbildung 18: Zeitverlauf des Kurzschlussstrombeitrags eines Elektrolyseurs  $i_{SCEL}$  (rot) mit Maximalwert (Peak) bei externem Kurzschluss an einem 50-kW-PEMEL-Stacks und Betriebsstrom  $I_{OPEL}$  [12]

### Isolationsfehler (Kurzschluss, Störlichtbogen)

Die Grundlage für die Bestimmung von Gefährdungs- und Schutzparametern für die Auslegung von Störlichtbogenschutzsystemen bildet der Zusammenhang zwischen relevanten Lichtbogenkenngrößen und (nicht)elektrischen Systemparametern von Netz und Anlage. Zu deren Bestimmung wurde das elektrische Klemm-Verhaltens von stromstarken Störlichtbögen in DC-Systemen und die Druckentwicklung bei DC-Störlichtbögen in über 100 Störlichtbogenexperimenten im Hochleistungsversuchsfeld der TU Dresden durchgeführt und ausgewertet. Der untersuchte Spannungsbereich (230 ... 1400 V) und die Elektrodenabstände (5 ... 140 mm) liegen in einem typischen Wertebereich für ELA. Die ermittelten Zusammenhänge sind zur Bestimmung von Lichtbogenkenngrößen an Fehlerorten in ELA anwendbar. Größere Abweichung zwischen realen und ermittelten Lichtbogenkenngrößen sind vor allem im Bereich hoher Ströme  $>20$  kA zu erwarten. Da der Stromrichter erst am Ende des Projektes einsatzbereit war, wurden als Gleichspannungsquelle ein Batteriesystem zur Untersuchung von DC-Kurzschlüssen und DC-Lichtbögen genutzt. Die Ergebnisse sind nachweislich übertragbar.

Die experimentelle Untersuchung hat gezeigt, dass die für die Auslegung von Schutzsystemen relevanten indirekten Schutzparameter wesentlich von der Systemspannung abgängig sind (s. Abbildung 19). Weitere Systemparameter, wie der Kurzschlussstrom oder die Netzimpedanz haben nur einen geringen Einfluss. Die Bewertung des Berechnungsverfahrens nach DGUV 203-077 anhand der Messergebnisse hat ergeben, dass die mittlere Abweichung der berechneten zu den gemessenen Lichtbogenparametern im Bereich  $\pm 10$  % liegt. Für die Auslegung von Schutzsystemen in ELA ist das Berechnungsverfahren als geeignet anzusehen.

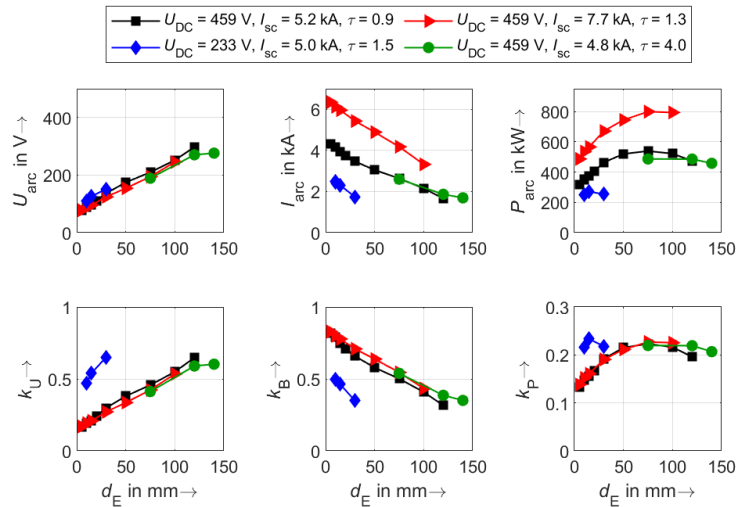


Abbildung 19: Abhängigkeit der Lichtbogenkenngrößen (Lichtbogen­spannung  $U_{arc}$ , Lichtbogen­strom  $I_{arc}$ , Lichtbogen­leistung  $P_{arc}$ , bezogene Lichtbogen­spannung  $k_U$ , Strombegrenzungsfaktor  $k_B$ , bezogene Lichtbogen­leistung  $k_P$ ) vom Elektrodenabstand  $d_E$  für verschiedene DC-Systemspannungen  $U_{DC}$  und prospektive Kurzschlussströme  $I_{sc}$

Das Ziel der Untersuchung der Druckentwicklung war es, den Einfluss der Spannungsform auf relevante Auslegungskriterien für den mechanischen Aufbau der Einhausung und Druckentlastung für ELA zu untersuchen. Ein wesentliches Kriterium bei der Auslegung ist der Maximalwert des transienten momentanen Überdrucks  $\Delta p_{max}$ , der während eines Störlichtbogens zu erwarten ist. Für die Berechnung des Überdrucks wird der thermische Transferkoeffizient  $k_p$  der Anlage benötigt. Die Untersuchung hat gezeigt, dass der thermische Transferkoeffizient  $k_p$  im Mittel bei Gleichspannung geringer ist als bei Wechselspannung (s. Abbildung 20) gleiches gilt für den Überdruck  $\Delta p_{max}$ . Die Ursache hierfür ist, dass sich bei Wechselspannung aufgrund der Spannungsform deutlich höhere maximale Momentanwerte beim Zeitverlauf des Kurzschlussstroms ergeben, als dies bei Gleichspannung trotz gleicher Kurzschlussleistung der Fall ist. Für Gleichspannungssysteme bei denen z. B. Zwischenkreiskapazitäten und Glättungskondensatoren das transiente Verhalten im Fehlerfall maßgeblich beeinflussen, sind Abweichungen zu den Ergebnissen der im Rahmen des Projektes durchgeführten experimentellen Untersuchung zu erwarten.

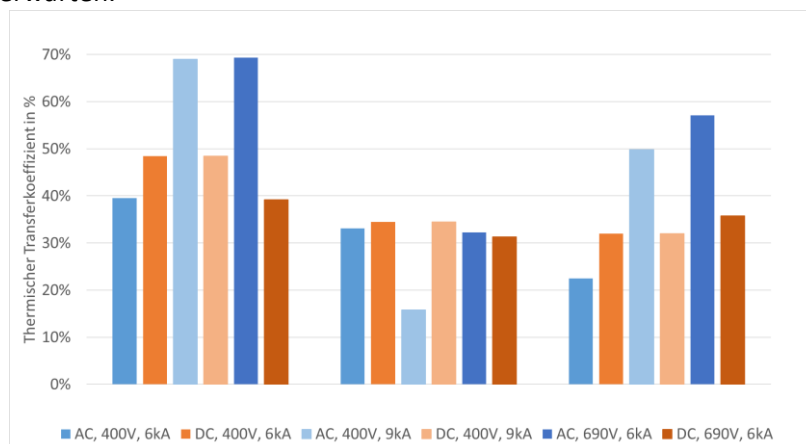


Abbildung 20: Thermischer Transferkoeffizient für jede Einstellung der elektrischen Parameter und gleichem mechanischen Aufbau der Einhausung und Druckentlastung

### AP 3.3.3 – Simulative Untersuchung von DC-Netzsystemen

Für die Schutzkonzeptentwicklung wurde die Anwendbarkeit verschiedener Schutzkriterien der ELA mit Hilfe von Simulationen überprüft. Die dafür entwickelten Simulationsmodelle enthalten verschiedene GR-Topologien: netzgeführter Stromrichter (B6C) [14], selbstgeführter Stromrichter (B6C + Tiefsetzsteller TS), sowie verschiedene EL-Technologien (AEL, PEM). Die Entwicklung eines skalierbaren, kombinierten Betriebs- und Fehlermodells für den EL erfolgte anhand der Messdaten, die am FZJ aufgenommen wurden. Die Modellanlage ist für eine Gesamtleistung von 18 MW bei einer System-Gleichspannung von 600 V und einem Betriebsstrom von 30 kA ausgelegt.

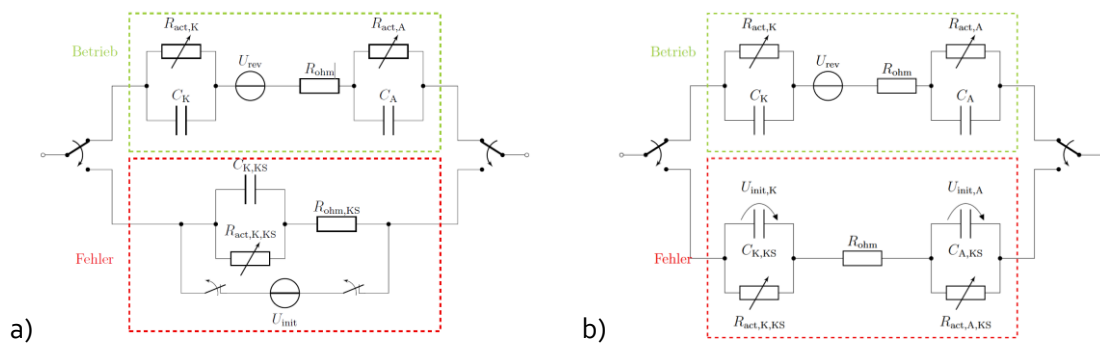


Abbildung 21: Kombiniertes Betriebs- und Fehlermodell von Elektrolyseur für a) PEMEL und b) AEL

Die Simulation ergab einen deutlichen Einfluss der EL-Technologie auf den Kurzschlussstrom (s. Abbildung 22). Bei der Parametrierung der EL-Stacks wurden übliche Größen für die Zellen und deren elektrische Parameter berücksichtigt (s. Tabelle 3). Demzufolge ergeben sich Unterschiede in den ohmschen Widerständen und den Doppelschichtkapazitäten der Fehlermodelle, die das transiente Fehlerverhalten innerhalb der ersten 50 ms nach Fehlereintritt beeinflussen. Dies wirkt sich besonders auf den Maximalwert des Gesamt-Kurzschlussstrom aus, der bei AEL um ca. 10 % größer ist. Der Einfluss auf den Dauer-Kurzschlussstrom ist jedoch in beiden hier betrachteten Fällen gering. Auch die Stromrichtertopologie beeinflusst das Fehlerverhalten signifikant. Die Regelung des Tiefsetzstellers führt dazu, dass der Fehlerstromanteil, der vom Netz kommt, deutlich geringer ausfällt (s. Abbildung 25), als bei einem netzgeführten Stromrichter. Demzufolge dominiert der Anteil des Fehlerstroms vom EL das Verhalten des Gesamt-Kurzschlussstroms.

Weiterhin wurden Simulationen zu Erdschlüssen an acht Fehlerorten durchgeführt. Dabei wurde auch der Erdübergangswiderstand variiert. Dieser hat einen signifikanten Einfluss auf die Stromhöhen im Fehlerfall. Für die vollständige Schutzauslegung einer ELA ist eine bessere Kenntnis über das Erdschlussverhalten nötig.

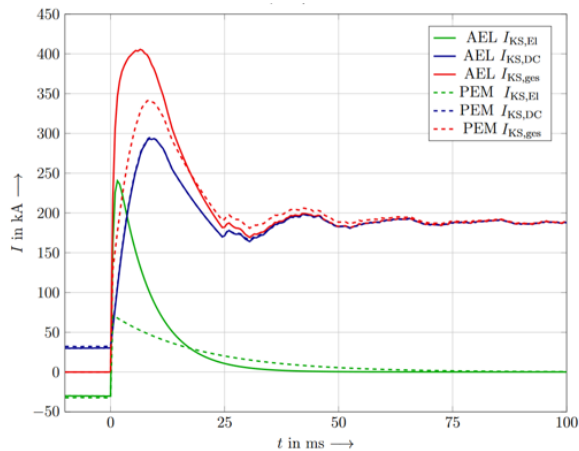


Abbildung 22: Einfluss der EL-Technologie (PEM, AEL) auf den Kurzschlussstrom (Fehlereintritt ab  $t = 0$ )

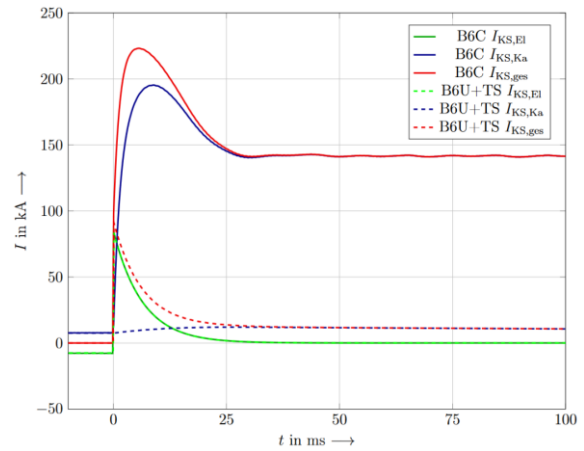


Abbildung 23: Einfluss der GR-Topologie (B6C, B6C + TS) auf den Kurzschlussstrom (Fehlereintritt ab  $t = 0$ )

Tabelle 3: Parameter von Elektrolyseur nach EL-Technologie für eine ELA mit 18 MW

Modellparameter	AEL	PEM
Stromdichte in A/cm <sup>2</sup>	0,8	3,0
Fläche je Zelle in m <sup>2</sup>	0,9	0,1
Anzahl der Stacks	4	10
Zellwiderstand in $\mu\Omega$	15,3	158,8
Zellspannung in V	2,0	2,4
Zellen je Stack	306	245

### AP 3.3.4 – Auslegung von Schutzsystemen für Elektrolyseanlagen

Das Selektivschutzkonzept für die elektrischen Komponenten einer ELA und des EL (System) ist in Abbildung 24 dargestellt. Es zeigt die Schutzzonen (SZ) der Schutzgeräte (SG). Eine Übersicht mit welchen Schutzfunktionen (SF) die Schutzzonen geschützt werden, enthält Tabelle 4.

Das Teilsystem von Netzverknüpfungspunkt (NVP) bis zum GR entspricht dem Stand der Technik. Für den Schutz dieses Teilsystems können verfügbare Schutzfunktionen eingesetzt werden. Die vorhergehende Untersuchung von DC-Kurzschlüssen im DC-Teil des Systems hat gezeigt, dass der Fehlerstrom höher ist als der Nennstrom. Demzufolge sind auch hier die Voraussetzungen für den Einsatz von Überstromzeitschutzfunktionen gegeben [15, 16]. Da der EL allerdings keinen signifikanten Dauerkurzschlussstrom liefert, wird als Backupfunktion für den DC-Teil des Systems der Einsatz eines Digitalschutzrelais empfohlen, um Unterfunktionen zu vermeiden. Im Lichtbogenfall ist von einer starken Reduktion des Fehlerstroms auszugehen. Daher wird für den DC-Teil des Systems zusätzlich ein Störlichtbogenschutz basierend auf einer optischen Detektion empfohlen, um den Anlagenfunktionsschutz und den Personenschutz zu gewährleisten. Mit der Erstellung eines Schutzkonzeptes unter Berücksichtigung eines Störlichtbogenschutzes für ELA wurde der *Meilenstein 4* erreicht.

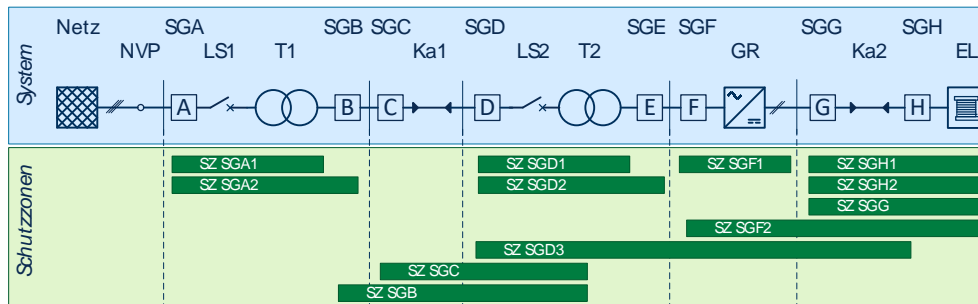


Abbildung 24: Schutzgeräte (SG) und Schutzzonen (SZ) für eine Elektrolyseanlage (System) bestehend aus Netz, Netzanschlusspunkt NAP, HS-Leistungsschalter LS<sub>1</sub>, Leistungstransformator T<sub>1</sub>, MS-Kabel Ka<sub>1</sub>, MS-Leistungsschalter LS<sub>2</sub>, Verteiltransformator T<sub>2</sub>, Gleichrichter GR, NS-Kabel Ka<sub>2</sub> und Elektrolyseur EL

Tabelle 4: Übersicht der Schutzfunktionen und Schutzgeräte für die Schutzzonen (SZ) aus

Schutzzone	Schutzfunktion	Schutzgerät
SZ SGA1	Übertemperatur	Buchholz-Relais
SZ SGA2	Differentialschutz	Digitalschutzrelais
SZ SGB	Überstromzeitschutz	Digitalschutzrelais
SZ SGC	Überstromzeitschutz	Digitalschutzrelais
SZ SGD1	Übertemperatur	Temperaturrelais
SZ SGD2	Differentialschutz	Digitalschutzrelais
SZ SGD3	Überstromzeitschutz	Digitalschutzrelais
SZ SGF1	Störlichtbogenschutz	Digitalschutzrelais
SZ SGF2	Überstromzeitschutz	Sicherung
SZ SGG	Überstromzeitschutz	Sicherung
SZ SGH1	Überstromzeitschutz	Sicherung
SZ SGH2	Störlichtbogenschutz	Digitalschutzrelais

Basierend auf den Messergebnissen aus AP 3.3.2 wurde ein einfaches Verfahren (Leitfaden) zur Bewertung der Wirksamkeit des Störlichtbogenschutzes erarbeitet. Für die Anwendung des Verfahrens können die Gefährdungsparameter Strombegrenzungsfaktor  $k_B$  und bezogene Lichtbogenleistung  $k_P$  für typische Systemparameterkonfigurationen in ELAn (Nennspannung des Systems  $U_n$ , Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  für verschiedene Leiterabstände  $d_E$ ) anhand von Abbildung 25 bestimmt werden. Die maximal zulässige Lichtbogenbrenndauer  $t_{pArc}$ , bei der eine Lichtbogenenergie  $E_{arc} = E_{pSFP} = 100$  kJ (Grenzwert für den Anlagenschutz bei AC) für den jeweiligen Punkt von  $U_n$ ,  $I_{sc}$  und  $d_E$  erreicht wird, ist ein wichtiges Kriterium für die Auslegung des Störlichtbogenschutzes und kann ebenfalls mit Hilfe des Diagramms in Abbildung 25 bestimmt werden. Die reale Abschaltdauer des auszulegenden Störlichtbogenschutzsystems muss immer niedriger als die maximal zulässige Lichtbogenbrenndauer  $t_{pArc}$  sein. Die Bewertung basiert auf der Annahme, dass die Werte für  $E_{pSFP}$  für DC ähnlich sind wie für AC. Die Verifizierung dieser Annahme ist Teil der aktuellen Forschungsaktivitäten an der TU Dresden.

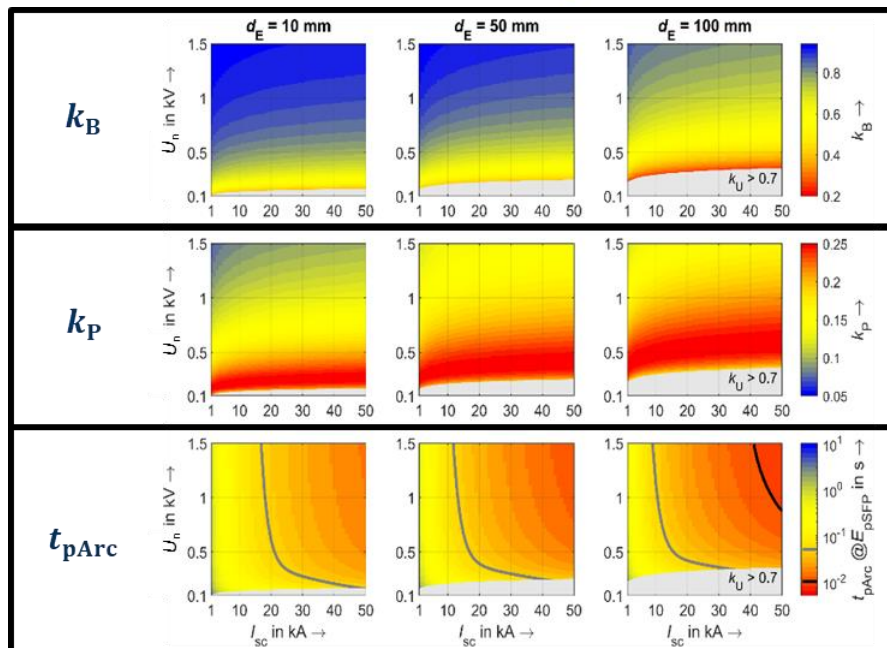


Abbildung 25 Abhängigkeit des Strombegrenzungsfaktors  $k_B$ , der bezogenen Lichtbogenleistung  $k_P$  und der maximal zulässigen Lichtbogenbrenndauer  $t_{pArc}$  (bei Erreichen der maximal zulässigen Lichtbogenenergie für den Anlagenfunktionsschutz  $E_{pSFP} = 100$  kJ) von Nennspannung  $U_n$  und Kurzschlussstrom  $I_{sc}$  für verschiedene Elektrodenabstände  $d_E = 10, 50$  und  $100$  mm = 10, 50 und 100 mm

## 2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen der Professur für Leistungselektronik liegen in der Beschaffung für den skalierten Teststand, den Phasenbaustein und den Full-Scale Demonstrator. Zusätzlich wurden moderne Messmittel (Oszilloskope, Strommesszange, Rogowski-Spulen, Differentialtastkopf) für die Untersuchungen angeschafft.

Die größeren Investitionen in den skalierten Teststand (24-Puls Transformator, DC-Last, Netznachbildung) wurden vorrausschauend ausgelöst, um langen Lieferzeiten zu begegnen. Final wurden die Komponenten jedoch nicht genutzt, weil der Ausschluss der Dioden- und Thyristor basierten Lösungen dazu geführt hat, dass dieser Zwischenschritt nicht mehr nötig war. DC-Last und Netznachbildung können in anderen Projekten der Professur Verwendung finden. Der 24-Puls Transformator hingegen als Spezialanfertigung ist nicht weiter nutzbar.

Der Phasenbaustein sowie der Full-Scale Demonstrator wurden größtenteils in Eigenleistung errichtet. Bestellt wurden insbesondere Komponenten wie Kupferplatten und weiteres Verbrauchsmaterial. Für den Full-Scale Demonstrator wurden zudem Labornetzgeräte, Filterdrosseln, Lichtwellenleiter und Schaltschränke bestellt und die Fertigung der Gatetreiber an externe Firmen ausgelagert.

Die Professur für Komponenten Intelligenter Energienetze hat im Rahmen des Projektes Mess- und Versuchstechnik angeschafft. Mit dem 3D-Mikroskop wurden Oberflächeneigenschaften der Kontaktpartner für die Versuche zum Kontakt- und Langzeitverhalten der Verbindungen qualitativ und

quantitativ ermittelt und mit den Versuchsergebnissen korreliert. Mit dem Ultraschall-Messgerät wurden die Verbindungskräfte in den Langzeitversuchen gemessen und die Kraftverläufe mit geeigneten Extrapolationsverfahren approximiert. Um experimentelle Untersuchungen an Hochstrom-/Hochtemperaturleitern durchführen zu können, mussten einerseits die Ströme im kA-Bereich genau gemessen werden. Dazu wurde ein präziser Stromumsetzer eingesetzt. Andererseits wurde ein Hochstromtransformator benötigt, um die hohen Stromstärken bereitstellen zu können. Um den Anschluss des Trafos an die Versuchsanordnung zu ermöglichen, wurden Flachlitzleiter aus Kupfer angeschafft. Gegenüber ursprünglicher Planung wurden darüber hinaus genehmigt: Neue Stromschienen mit einem neuartigen Gußverfahren für komplexe Strombahn-Designs und ein Kraftmessring als zweites Messprinzip zum Validieren der mit dem US-Messgerät gemessenen Kräfte.

Die wichtigsten Positionen der Professur für Elektroenergieversorgung liegt in der Beschaffung eines Nullflusswandlers für die Durchführung von DC-Störlichtbogenexperimenten. Dieser ist dazu geeignet hohe DC-Ströme bis max. 200 kA zu messen, wie sie in Elektrolyseanlagen zu erwarten sind. Für die computerbasierte Auswertung der Messdaten wurde außerdem ein Messdatenerfassungssystem beschafft, das sich durch eine hohe Abtastrate und zeitsynchrone Erfassung mehrerer Kanäle auszeichnet. Demzufolge können gleichzeitig elektrische und nicht elektrische Größen wie Lichtbogenstrom, Lichtbogenleistung, Lichtbogenleistung und die Druckentwicklung mit ausreichend hoher Bandbreite, wie sie bei einem hochdynamischen Vorgang wie einem Störlichtbogen erforderlich ist, aufgezeichnet werden.

### 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Eine Bearbeitung der genannten Thematik war nur mit der dargestellten Arbeitsteilung im Projektkonsortium und der beantragten Zuwendung durchführbar. Die zugrundeliegende Aufgabenstellung erforderte es, arbeitsteilig und interdisziplinär zu arbeiten, um durch die Kompetenzen der beteiligten Partner ein optimales Ergebnis zu erzielen. Dies war auf die Forschungsbreite und -tiefe des Gesamtprojekts zurückzuführen, wodurch alle relevanten Aspekte der Stromversorgungstechnik für Elektrolyseanlagen berücksichtigt werden mussten.

Die TU Dresden war, bedingt durch den nicht gewinnorientierten Geschäftszweck, nicht in der Lage, das Projekt aus Eigenmitteln zu bestreiten. Eine staatliche Förderung war deshalb notwendig. Der Projektantrag wurde im Rahmen des BMBF-Förderaufrufs „Ideenwettbewerb Wasserstoffrepublik Deutschland“ gestellt, da seitens der EU keine passende Ausschreibung zur Thematik vorlag. Das hier beantragende Konsortium deckt alle Aspekte mit Partnern aus Deutschland ab. Da es sich um ein nationales Konsortium handelt, schied eine Förderung durch die EU-Kommission aus. Die Ergebnisse des Projektes stärken insbesondere den deutschen Wirtschaftsstandort. Es werden neue Märkte für die Hersteller von Systemtechnik für die Wasserstofftechnologie und Stromrichtertechnik als Bindeglied zwischen dem Elektroenergieversorgungsnetz und dem Gassektor erschlossen.

#### 4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Professur für Leistungselektronik hat mit dem Full-Scale Demonstrator eine vielversprechende Lösung aufgebaut, die in jedem Fall mit den Projektpartnern weiterverfolgt werden soll und für die bereits auf Ebene der EU ein Folgeantrag eingereicht und bewilligt wurde, um die Lösung auf einen höheren Technologiereifegrad zu bringen. Die Erkenntnis, dass Elektrolyseure in Zukunft auch zunehmend Netzdienstleistungen erbringen müssen, hat bereits jetzt zu der Einwerbung des SAB-Projektes BiH<sup>2</sup> geführt in dem zusammen mit dem Fraunhofer IKTS ein möglichst dynamisch agierendes System aus Stromrichter und bidirektionalen Hochtemperaturelektrolyseur aufgebaut wird.

Während des Projekts hat die Professur sechs Veröffentlichungen erarbeitet, zwei davon in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für komplexe technische Systeme in Magdeburg. Es ist zudem eine finale Veröffentlichung vorgesehen. Es wurden fünf Studienarbeiten (Bachelorarbeiten) sowie eine Diplomarbeit zu HyLeiT spezifischen Themen betreut und aller Voraussicht nach wird eine Doktorarbeit aus dem Projekt hervorgehen. HyLeiT spezifische Themen wurden in die Lehre der Professur eingebaut und in der Öffentlichkeit im Rahmen des Projekts „Power2Change“ auf drei Veranstaltungen vorgetragen.

Die Professur für Komponenten Intelligenter Energienetze hat drei HyLeiT-relevante Konferenzpaper erarbeitet, eins davon in Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern SMA. Es wurde eine Studienarbeit (Bachelorarbeiten) sowie zwei Diplomarbeiten zu HyLeiT-spezifischen Themen betreut.

Im Rahmen des Projekts hat die Professur für Elektroenergieversorgung drei Konferenzpaper erarbeitet, die in Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern SMA (aus HyLeiT) und dem Forschungszentrum Jülich (aus H2Giga) publiziert sind. Darüber hinaus hat die TU Dresden einen Workshop zum Anlagenschutz von Elektrolyseanlagen veranstaltet und war an weiteren HyLeiT-Workshops durch Beiträge beteiligt. Außerdem wurden drei Studienarbeiten (Bachelorarbeiten) sowie drei Diplomarbeiten zu HyLeiT spezifischen Themen betreut. Die im Rahmen des Projektes aufgebauten Versuchsinfrastruktur ist für weitere experimentelle Untersuchungen zur Sicherheit bei DC-Störlichtbögen in drei weiteren Forschungsprojekt geplant (Anträge bzw. Skizzen sind eingereicht).

#### 5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während des Vorhabens gab es eine dynamische Entwicklung aufseiten der Elektrolysehersteller. Während einerseits die Produktion deutlich hochskaliert wurde, sind auch die Systemspannungen auf bis zu 1500V angestiegen. Diese Entwicklung betrifft insbesondere die PEM-Elektrolyse, da bei der alkalischen Elektrolyse die Streuströme aktuell noch die maximale Spannung begrenzen.

Auf Seiten der Netzbetreiber und Projektentwickler hat die Erkenntnis, dass Elektrolyseure bald einen signifikanten Anteil der elektrischen Last übernehmen werden, dazu geführt, aktuelle Netzanschlussbedingungen von Elektrolyseuren zu überdenken und zu verschärfen.

In der Halbleiterindustrie haben neben dem Projektpartner Infineon auch andere Hersteller die Produktion von 2,3 kV und 3,3 kV SiC-MOSFET Halbbrückenmodulen angekündigt, sodass hier auch bald Zweitlieferanten zur Verfügung stehen werden.

## 6. Liste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Siehe nachfolgende Seiten.

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren	Link
04.09.24 [1]	Konferenzpaper (ECCE Europe 2024)	Multipulse Rectifiers for Large Scale Water-Electrolysis - Reactive Power and Harmonics,	S. Puteanus, S. Wettengel, M. Meißner, S. Bernet	<a href="https://doi.org/10.1109/ECCEurope62508.2024.10751917">https://doi.org/10.1109/ECCEurope62508.2024.10751917</a>
22.10.24 [2]	Konferenzpaper (PESS 2024)	Using a Doubly Fed Induction Machine (DFIM) in an Active Filter for Grid Commutated Rectifiers - A Feasibility Study	L. Jostes, S. Puteanus	<a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/10927663">https://ieeexplore.ieee.org/document/10927663</a>
27.03.25 [3]	Journalpaper (International Journal of Hydrogen Energy)	Efficiency improvement by pulsed water electrolysis: An unjustified hope	S. Puteanus, T. Miličić, U. Feldmann, T. Vidaković-Koch	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.348">https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.348</a>
01.09.25 [4]	Konferenzpaper (ECCE Europe 2025)	Oscillation and Overvoltage Damping in an All-SiC Three-Level ANPC-VSC	A. Höhnel, S. Wettengel, S. Puteanus, S. Bernet	<a href="https://doi.org/10.1109/ECCE-Europe62795.2025.11238806">https://doi.org/10.1109/ECCE-Europe62795.2025.11238806</a>
01.09.25 [5]	Konferenzpaper (ECCE Europe 2025)	Performance Evaluation of Grid-Connected Active Front Ends using 2.3 kV SiC-MOSFET Half Bridges	S. Puteanus, S. Wettengel, S. Höhnel, S. Bernet	<a href="https://doi.org/10.1109/ECCE-Europe62795.2025.11238572">https://doi.org/10.1109/ECCE-Europe62795.2025.11238572</a>
15.10.25 [6]	Journalpaper (Applied Energy)	Predicting electrolyzer performance under forced periodic operation using nonlinear frequency response method	T. Miličić, S. Puteanus, X. Becker, S. Bernet, T. Vidaković-Koch	<a href="https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126312">https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126312</a>

2026	Journalpaper	Vorstellung des Full Scale Teststands	S. Puteanus, S. Wettengel, S. Bernet u.A.	<b>Noch zu schreiben und zu veröffentlichen</b>
22.10.24 [7]	Konferenzpaper (CIRED2025)	Experimental assessment of cooling concepts for extending the current carrying capacity for future MW-rectifier systems	M. Sokolowski, R. Adam, S. Schlegel, W. Tello	<a href="https://doi.org/10.1049/icp.2025.1948">https://doi.org/10.1049/icp.2025.1948</a>
24.09.25 [8]	Konferenzpaper (AKK 2025)	Langzeitverhalten von Schraubenverbindungen für Stromschienen für Elektrolyseanlagen	M. Gödicke, M. Ullrich, C. Hildmann, S. Schlegel, M. Kosse	<b>ISBN: 978-3-8007-6588-1</b>
2022 [9]	Posterbeitrag Konferenz (VDE FNN / ETG-Tutorial Schutz- und Leittechnik)	Herausforderungen an den Schutz von Elektrolyseanlagen	M. Bruhns, C. Liebermann, P. Schegner	<a href="https://fis.tu-dresden.de/portal/files/11524122/P_22_Bruhns_Herausforderung_Schutz_ELA_final.pdf">https://fis.tu-dresden.de/portal/files/11524122/P_22_Bruhns_Herausforderung_Schutz_ELA_final.pdf</a>
2022 [10]	HyLeit-TUD-Workshop	Verhalten von Elektrolyseuren im Fehlerfall	M. Bruhns, P. Schegner, S. Wettengel, H. Eisenlohr (Enapter)	
2023 [11]	Konferenzpaper (PESS)	Applicability of Methods for Short circuit current Calculation in Electrolysis systems	J. Ullmer, M. Bruhns, P. Schegner, M. Hehemann, R. Juchem	<a href="https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/566318012.html">https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/566318012.html</a>  (ISBN 978-3-8007-6318-4)
2023 [12]	Beitrag Workshop (DERlab HyLeit-Workshop #3)	Modelling the electrical energy supply of electrolysis plant under fault conditions	M. Bruhns, P. Schegner	<a href="https://der-lab.net/wp-content/uploads/2023/12/TU-Dresden-20231205_Workshop_FHIEE_ELS_SC_Model.pdf">https://der-lab.net/wp-content/uploads/2023/12/TU-Dresden-20231205_Workshop_FHIEE_ELS_SC_Model.pdf</a>

<b>2024</b> <b>[13]</b>	Posterbeitrag Workshop (VDE FNN / ETG -Tutorial Schutz- und Leittechnik)	Kurzschlussstrom- beitrag eines 50- kW-PEM Elektrolyseurs	M. Bruhns, C. Liebermann, P. Schegner,	<a href="https://fis.tu-dresden.de/portal/files/46312010/20240305_Poster_Bruhns_KS_ELA_v3.pdf">https://fis.tu- dresden.de/portal/files/46312 010/20240305 Poster Bruhns KS ELA v3.pdf</a>
<b>2024</b> <b>[14]</b>	Konferenzpaper (EnInnov 2024)	Modellierung einer PEM- Elektrolyseanlage zur Untersuchung des Verhaltens bei DC-Kurzschlüssen für die Bewertung von Schutzkriterien	J. Leide, M. Bruhns, P. Schegner	<a href="https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/f560810f-089d-42d8-ae6d-8e82a8454ca9/files/lf/Session_D3/435_LF_Leide.pdf">https://www.tugraz.at/fileadm in/user_upload/tugrazExternal /f560810f-089d-42d8-ae6d- 8e82a8454ca9/files/lf/Session D3/435 LF Leide.pdf</a>
<b>2025</b> <b>[15]</b>	Beitrag Workshop (DERlab HyLeiT- Workshop #8)	Aspects of Reliability of Electrolyser Systems: Fault Behaviour and Protection Systems	M. Bruhns, P. Schegner	<a href="https://der-lab.net/wp-content/uploads/2025/10/Aspects-of-Reliability-of-Electrolyser-Systems_Moritz-Ullrich_TUD.pdf">https://der-lab.net/wp- content/uploads/2025/10/Asp ects-of-Reliability-of- Electrolyser-Systems_Moritz- Ullrich_TUD.pdf</a>
<b>2025</b> <b>[16]</b>	Posterbeitrag Workshop (H2Giga Abschluss- konferenz)	Erhöhung der Verfügbarkeit von Elektrolyseanlagen durch selektive Fehlererkennung	M. Bruhns, P. Schegner	<a href="https://fis.tu-dresden.de/portal/files/75973271/QT6.1_HyLeiT_Poster_H2Giga_2025_TUD_PSP_ELS_V3.pdf">https://fis.tu- dresden.de/portal/files/75973 271/QT6.1 HyLeiT Poster H2G iga 2025 TUD PSP ELS V3.pdf</a>
<b>2025</b> <b>[17]</b>	Konferenzpaper (DPSP Europe)	Special Requirements on Protection Systems in Electrolysis plants	M. Bruhns, P. Schegner, M. Hehemann, R. Juchem, S. Wettengel	<a href="https://doi.org/10.1049/icp.2025.1060">https://doi.org/10.1049/icp.20 25.1060</a>
<b>2024</b> <b>[18]</b>	Konferenzpaper (Holm/ICEC 2024)	Investigation of Gas-Tightness of Bi-Metallic Busbar Joints by Utilizing Percolation Theory	M. Ullrich, C. Hildmann, S. Schlegel	<a href="https://doi.org/10.1109/HOLM56222.2024.10768601">https://doi.org/10.1109/HOLM 56222.2024.10768601</a>