



Peter Zeller; Karl Heinz Pettinger; Christoph Diendorfer

# Forschung für zentrale, elektrische Großspeichersysteme

116 – Energy, Environment & Transportation

## Abstract

Fluktuierende Einspeiser wie Wind und Solarsysteme begünstigen Einerseits Netzinstabilitäten im elektrischen Netz und sind außerdem zeitweise überhaupt nicht verfügbar. Um dem entgegen zu wirken können zur kurzfristigen Anpassung des Verbrauches an die Verfügbarkeit der Primärenergie (und umgekehrt) Batteriespeicher eingesetzt werden. Langfristige Speicherung ist mittels Wasserstoff und Power to Gas Ansätzen möglich. Für eine hohe Marktdurchdringung mit Wind- und Solarenergie sind entsprechend große Speichersysteme mit ausreichender Engpassleistung die sich deutlich von Kleinlösungen wie Heimspeicher unterscheiden, notwendig. Derartige Hochleistungs- und Hochenergiespeicher erfordern bei einer Integration in Niederspannungssysteme sehr große Leiterquerschnitte und eine besonders sorgfältig ausgeführte Installation, um zum Beispiel Überhitzung der Kontakte zwischen den Leitern zu vermeiden. Der neuartige Ansatz, der im Kooperationsprojekt zwischen der Hochschule Landshut / Technologiezentrum Energie und der FH-OÖ / Studiengang Electrical Engineering aufgegriffen wird ist die Entwicklung einer Hochspannungsbatterietechnologie. Eine derartige Technologie hat den Vorteil, dass diese an Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme angebunden werden kann. Derartige Großanlagen wären wirtschaftlicher und auch besser gewartet wodurch eine längere Lebensdauer der Batterien zu erwarten ist, was die Wirtschaftlichkeit des Speichers verbessern würde (gegenüber von vielen verteilten Systemen). Zur Realisierung dieser Anlage müssten jedoch entsprechende Schaltverbinder entwickelt werden, die einen Hochspannungsbatterie Stapel bei Entfernen aus dem System in Teilbatterien mit ungefährlicher Spannung auftrennen. Weiters ist ein besonderes Augenmerk auf Gleichstrom Isoliertechnik zu richten, die sich von der klassischen Wechselstrom Isolier-technik dadurch unterscheidet, dass diese durch thermische und nicht durch kapazitive Effekte bestimmt wird. Ein weiterer Aspekt ist der Schutz von Hochspannungs-Hochleistungsbatterien: Für die Abschaltung hoher Kurzschlussströme sind entsprechende Schutzschaltgeräte mit ausreichend hoher Lichtbogenlöschfähigkeit zu entwickeln. Erste Machbarkeitsstudien zeigen, dass eine derartige Technologie mittels Li-Batterietechnologie durchaus umsetzbar wäre und eine vertikale Anordnung mit stromlos schaltenden Trennschaltern den Konstruktionskriterien von Hochspannungs- Gleichstrom Anlagen entsprechen.

## Keywords:

Li-Ionen, Redox Flow, Batterie, Hochspannung, Gleichspannung, Großspeicher

## Einleitung

Das Stromnetz kann Energie nur transportieren, nicht speichern. Zu jedem Zeitpunkt des Netzbetriebes muss die eingespeiste Energiemenge exakt der entnommenen Energiemenge entsprechen. Fluktuierende Einspeisung, wie z.B. durch Wind- und Solaranlagen können daher den Netzbetrieb destabilisie-

ren und müssen durch geeignete Maßnahmen ausgeglichen werden, um ein Abschalten von Windkraftanlagen oder Photovoltaikgeneratoren bei zu nicht angepasstem Stromangebot zu unterbinden und damit die Netzverfügbarkeit derartiger Anlagen möglichst hoch zu halten. Neben dem Ausbau der elektrischen Netze, mit dem die eingespeiste Energie besser und weiter transportiert und damit lokale Fehlanpassungen zwischen Einspeisung und Bedarf kompensiert werden können, ist eine weitere und notwendige Maßnahme elektrische Energie zu speichern. Entscheidend für die Wahl des Speichers sind die beabsichtigte Speicherzeit, die notwendige Engpassleistung (Maximalleistung) und die zu speichernde Energiemenge.

Die Speicherzeit der Energie wird durch Selbstentladungseffekte und den Eigenverbrauch des Speichers bestimmt. Die Maximalleistung eines Speichersystems ist durch den Speicher selbst (z.B. durch die maximal zulässige Elektrodenstromdichte an Elektroden), die Querschnitte der Leiter und die zur Einspeisung und Ladung notwendige Leistungselektronik limitiert. Die zu speichernde Energiemenge ergibt sich schlichtweg aus der Größe des Speichers.

Kurzzeitspeicher sollen Lastspitzen oder Netzausfälle für Sekundenbruchteile oder wenige Minuten puffern. Hierfür eignen sich Superkondensatoren und Schwungradspeicher. Sie besitzen zwar nur geringen Energieinhalt, können die gespeicherte Energie aber mit sehr hoher Leistung abgeben. Sie sind lediglich als Spitzenlastpuffer geeignet, da deren Energiedichte vergleichsweise gering und die Selbstentladungsrate hoch sind.

Speicherbatterien, wie Blei- oder Lithium-Ionen-Batterien sind geeignete Puffer zur Speicherung für wenige Stunden bis zu einigen Tagen [1]. Mit dieser Art von Speichern kann zum Beispiel am Tag eingespeicherter Photovoltaikstrom der Nutzung am Abend oder in der Nacht zur Verfügung gestellt werden. Längere Speicherzeiten sind aufgrund der immer noch hohen Selbstentladungsrate und dem Eigenverbrauch der Hilfselektronik derzeit nicht möglich. Die Amortisation dieser Speicher steigt mit der Häufigkeit der Nutzung. Je öfter ein solcher Batteriespeicher geladene und entladen wird, desto rentabler wird er arbeiten. Die Stromspeicherung mit Batterien ist derzeit für einen Zeitraum bis zu etwa drei Tagen sinnvoll. Vollkommene Autarkie vom Netzbetreiber ist möglich, wird aber mit teurer Überdimensionierung der Batterien und der PV Anlage erkauft. Neben der modernen, wartungsfreien Lithium-Ionen-Technologie werden in den nächsten Jahren Redox-Flow-Batterien als Heimspeicher auf den Markt kommen. Diese sind wie ein Baukasten in Ihrem Energieinhalt und ihrer Leistung unabhängig voneinander an die jeweiligen Bedürfnisse des Nutzers anpassbar. Die Technologien werden mittelfristig konkurrieren und hoffentlich zur Preisreduktion der Speicherbatterien führen.

Die Speicherung großer Energiemengen gestaltet sich schwierig. Als Kurzzeitspeicher für wenige Stunden stehen Pumpspeicherkraftwerke zur Verfügung. Jedoch ist das Gesamtpotential durch die geologischen Gegebenheiten in Europa begrenzt und den Ausbau ist nahezu ausgeschöpft.

Druckluftspeicherkraftwerke benötigen zur Steigerung ihres Wirkungsgrades zum Druckluftspeicher auch zusätzlich große Wärmespeicher.

Zur Langzeitspeicherung großer Energiemengen kann entweder auf Wasserstoffsysteme zurückgegriffen werden oder die aktuell erforschte Power-to-Gas-Technologie kann Anwendung finden. Hierbei wird überschüssiger Strom genutzt, um Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff zu spalten. Der Wasserstoff kann entweder direkt genutzt, oder als synthetisches Erdgas in das bestehende Gasnetz, mit all seinen Speichermöglichkeiten, eingespeist werden [1]. Seit vielen Jahrzehnten ist die chemische Umwandlung vom Treibhausgas Kohlendioxid mit Wasserstoff zu Methanol bekannt. Methanol ist ein Flüssigkraftstoff und besitzt hohe Energiedichte – etwa die Hälfte von Benzin. Lagerung und Transport können ähnlich wie bei petrochemischen Produkten erfolgen. Es kann in Fahrzeuge betankt, in Blockheizkraftwerken oder Brennstoffzellen verstromt werden. Die Schlüsseltechnologie für diese Arten der Speicherung ist jeweils die Wasserstoffherzeugung aus Strom im Überangebot.

Generell werden Energiespeicher dazu dienen die Nutzung der Energie am Ort der Erzeugung voranzutreiben. Derartige Ansätze können bei richtiger Auslegung und richtigem Einsatz Leitungs- und Umwandlungsverluste und damit möglicherweise die Gesamtverluste bei der elektrischen Energieversorgung verringern.

Wie bereits oben erwähnt kann neben der Energiespeicherung auch ein leistungsfähiges Transport- und Verteilsystem zur Netzstabilität beitragen. An entsprechenden Systemen wird im Moment intensiv geforscht, so stehen z.B. Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs- (HGÜ) „Energieautobahnen“ im Zentrum des Interesses.

Im Bereich der Speicher sind entsprechende Förderprogramme in der EU angelaufen, die einen Anreiz für Investitionen in private Heimspeicher schaffen, und damit die Industrie und Wirtschaft rund um Batteriespeicher in Schwung bringen soll. Moderne Batterien wie z.B. auf Lithium-Ionen Basis stellen wohl im Moment die am besten verfügbare Technologie für Kurzzeitspeicherung (Größenordnung Stunden bis wenige Tage) dar (im Vergleich zu Wasserstoff und Power to Gas Ansätzen, die mit Ihren „Chemiefabriken“ Langzeit-Shift großer Energiemengen ermöglichen sollen).

### **Lösungsansatz**

Nicht nur private, dezentrale Solareinspeiser, sondern auch große zentrale Generatoren wie z.B. Offshore Windfarmen benötigen adäquate Speicher. Ein Großspeicherkonzept muss entwickelt werden, das gegenüber einem klassischen Kleinspeichersystem (siehe Abbildung 1) gewisse Vorteile bringen kann. Zur Realisierung großer Speicherkapazitäten sind im Klein Spannungsbereich große Ströme und die Installation großer Leitungsquerschnitte notwendig. Diese Hochstromsysteme müssen ferner geeignet kontaktiert sein, um Zusatzverluste oder gar Heißkontaktbildung durch einen zu hohen elektrischen Kontaktwiderstand zu vermeiden. Unter Heißkontaktbildung versteht man ein thermisches Wegdriften des elektrischen Kontaktwiderstandes infolge Hautschichtwachstums was bis zum endgültigen Versagen des Kontaktes und einer damit verbundenen Brandgefahr führen kann. Mit dem Forschungsansatz von Hochspannungs-Großspeichern beschreiten die beiden Fachhochschulen neue Wege. Die Idee ist die notwendige Energie nicht durch hohen Strom, sondern durch hohe Spannungen bereitzustellen. Hierzu müssen aber wesentliche technologische Fragen im Vorfeld geklärt werden.

Hochspannungsgroßspeicher würden im ersten Ansatz einige Vorteile bringen: Großspeicher können zentral durch entsprechend geschultes Fachpersonal betrieben und gewartet werden. Dies bringt die Möglichkeit mit sich, ein effizientes Batteriemangement Gesamtkonzept umzusetzen und damit die Lebensdauer der eingesetzten Zellen zu optimieren. Ein großer Vorteil liegt auch in der Möglichkeit „Hochspannungsbatterien“ zu entwickeln, die direkt an HGÜ Systeme gekoppelt werden könnten (die dazu notwendige Leistungselektronik und Isoliertechnik ist in der Phase der großmaßstäblichen Markteinführung). Ein zentraler Großspeicher kann auch wesentliche Funktionen der Betriebsführung eines Netzes übernehmen, wie z.B. den Phasenschieberbetrieb zur Kompensation von Blindleistung oder die kontinuierliche Spannungshaltung.



Abbildung 1: Konventioneller Aufbau eines Großspeichers (5 MWh, Wemag, Schwerin) bestehend aus Niederspannungsmodulen.

Es sprechen daher einige Argumente für den Einsatz von Großspeichern, allerdings stellt sich aus wissenschaftlicher Sicht die Frage, wie derartige Systeme zu konstruieren und zu schützen sind, bzw. welche Belastungen im Betrieb bei einem derartigen System auftreten und welche Maßnahmen zu ergreifen sind, um entsprechende Systemverfügbarkeiten zu erreichen.

Diese Fragestellung, sowie die Frage nach geeigneten Zelltechnologien werden im Rahmen des Interreg Projektes Compstor (Projekt AB 43)<sup>1</sup> mit einem Gesamtprojektvolumen von 6.6 Mio. € aufgegriffen. Beteiligt am Projekt sind die beiden Forschungspartner das Technologiezentrum Energie (eine Forschungseinrichtung der Hochschule Landshut) als Leadpartner und die FH OÖ Forschungs- und Entwicklungs GmbH federführend vertreten durch den internationalen Studiengang Electrical Engineering. Zur Abklärung der systemrelevanten Fragestellungen entsteht im Rahmen des Projektes an der FH-OÖ ein Hochspannungs- / Hochstrom- Prüffeld mit einem Pulsgenerator bis zu 1 MV, einer AC Anlage bis zu 200 KV, einer DC Anlage bis zu 270 kV und einem Hochstromgenerator bis 100 kA (Scheitelwert, eine Halbwelle bei 50 Hz) inklusive entsprechender Messtechnik wie Hochgeschwindigkeitskamera, Teilentladungsmessung, Druckmessung im Umfeld von Störlichtbögen, oder auch Plasmaspektroskopie.

### **Technologische Aspekte von elektrischen Großspeichern:**

Geht man davon aus, dass ein derartiger Großspeicher z.B. in der Mittelspannungsebene platziert wird, so sind die grundlegenden Konstruktionsrichtlinien von Hochspannungssystemen zu beachten. Betrachtet man beispielsweise eine Systemspannung von 36 kV und eine typische Zellspannung von 3,6 V, so werden 12000 Einzelzellen benötigt. Eine Speichereinheit von 144 kWh (ca. 10 Haushalte, ausgehend von einer „Tesla Power Wall“), so bedeutet dies eine Nennkapazität von 4000 mAh. Diese liegt damit durchaus in der Größenordnung üblicher Li Kleinzellen.

Die Spannung an einer Batterie hängt im Wesentlichen vom Ladezustand, der Belastung sowie der Temperatur der Zellen ab<sup>[1,2]</sup>. Daher muss zwischen das Batterieelement und der DC-Anbindung im Mittelspannungssystem ein Spannungswandler vorgesehen werden.

---

<sup>1</sup> <http://www.interreg-bayaut.net/projekte/liste-der-vorhaben/projektzusammenfassung-ab43/>

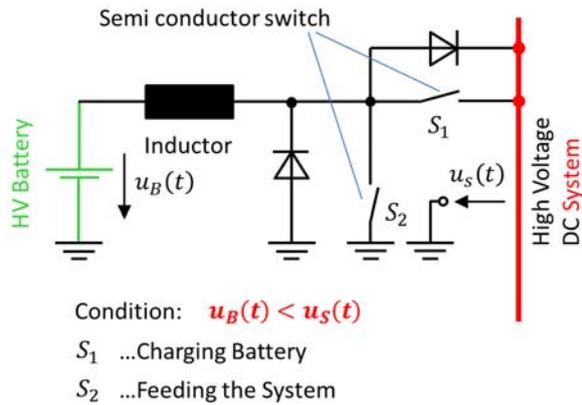


Abbildung 2: Mögliche Topologie für ein Hochspannungsbatteriesystem; Voraussetzung ist eine höhere Hochspannungs-Systemspannung als Batteriespannung.

Stellt man sicher (z.B. durch geeignete Wahl der Nennspannung der Hochspannungsbatterie), dass die Systemspannung im Hochspannungsnetz immer höher als die Spannung an der Hochspannungsbatterie ist, so kann ein Ansatz gemäß Abbildung 2 für eine Kopplung zwischen den Systemen gewählt werden. Im Falle einer beabsichtigten Ladung der Batterie ist Schalter  $S_2$  geöffnet und der Schalter  $S_1$  steuert den Ladestrom mittels Pulsweitenmodulation, die Schaltung befindet sich typischerweise im Buck Modus. Die Induktivität dient dabei der Glättung des Stromes.

Für eine Einspeisung in das Netz wird Schalter  $S_1$  geöffnet und mittels Schalter  $S_2$  in Form eines Boost Betriebs Energie aus der Batterie in das Netz gespeist.

Gegenüber einer Einspeisung in ein Hochspannungs- Wechselstrom Netz mit einer typischen Brückenschaltung spart man sich hier zehn Halbleiter-Leistungsschaltenelemente. Weiters ist auch die Filterung von Oberwellen auf Hochspannungsebene wesentlich unkritischer als bei Wechselspannung, da dies mit Hilfe einfacher induktionsarmen Kapazitäten erfolgen kann.

### Aspekte der Hochspannungstechnik:

Aus Sicht der Hochspannungstechnik gibt es beim vorgestellten Ansatz zwei wesentliche Problemstellungen:

1. Abschaltung und Hantieren an der Batterie: Die Batterie muss so aufgebaut sein, dass nach einer Entnahme aus dem System diese elektrisch in Teilzellen unterteilt werden kann, um ein Hantieren zu ermöglichen.
2. Es müssen Aspekte der Hochspannungs-Gleichstrom-Isoliertechnik sowie die Ausbreitung von Überspannungspulsen berücksichtigt werden.

Die Problematik der Unterteilung des Gesamten Batteriespeichers in Batterie Teilsysteme kann im ersten Ansatz mit Hilfe einer Topologie gemäß Abbildung 3 gelöst werden.

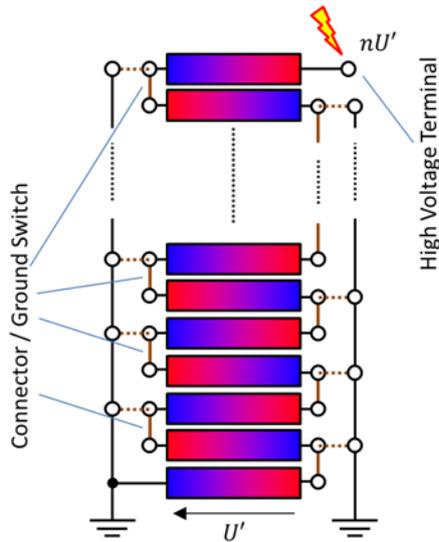


Abbildung 3: Aufbau eines Hochspannungsbatterie-segmentes mit entsprechenden Verbindern zum sicheren Hantieren an den Einzelelementen.

Die einzelnen Batterieelemente (siehe Abbildung 3 farbig markierte Rechtecke, einzelne Elemente mit der Teilspannung  $U'$ ) werden über Verbinder in Serie geschaltet um die geforderte Gesamtspannung ( $nU'$ ) zu erhalten. Zu Servicezwecken wird der Stapel durch Drehen der Verbinder (z.B. als Trennermesser ausgeführt) im stromlosen Zustand seriell unterbrochen und die Einzelelemente auf eine parallel geführte Erdungsschiene geschaltet. Damit können die Einzelelemente sicher aus dem Stapel entnommen und gewartet werden.

Hinsichtlich der Spannungsbelastung der Isolation muss berücksichtigt werden, dass sich das elektrische Feld an einem Gleichspannungsisolator entsprechend seiner Restleifähigkeit ausbildet.

Zu Beginn wird sich das elektrische Feld zwar entsprechend der kapazitiven Verhältnisse einstellen, mit einer Zeitkonstante von mehreren Minuten bis zu Stunden, jedoch eine Feldverteilung entsprechend der elektrischen Leitfähigkeit der Isolatoren einstellen. Die elektrische Leitfähigkeit in Isolatoren zeigt eine starke Temperaturabhängigkeit. Dies ist umso mehr von Bedeutung, als der Betrieb der Batterie zu einer Erwärmung der Konstruktion führt, die damit auch die elektrischen Isolatoren hinsichtlich Feldverteilung versteuert.

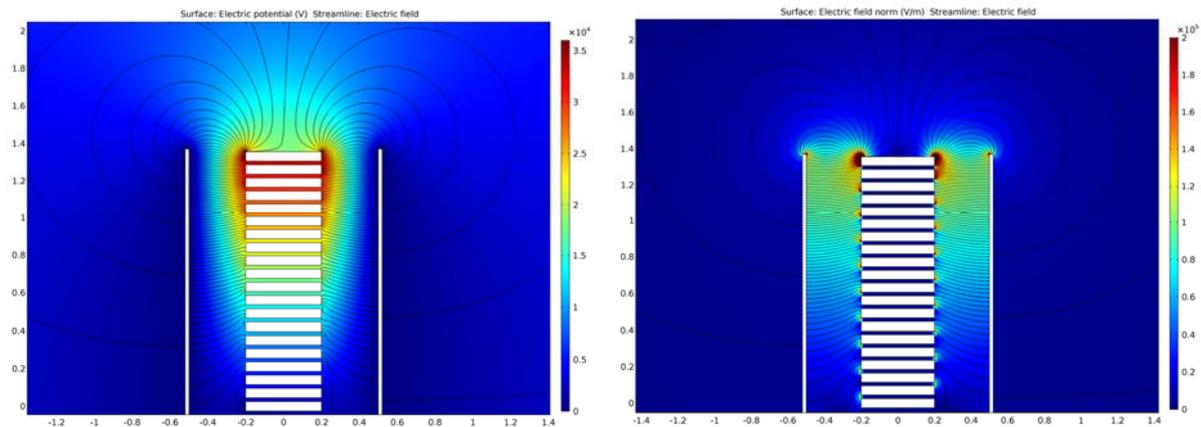


Abbildung 4: Feldsimulation eines 36 kV Batteriestapels mit 1800 V Einzelspannung; linke Abbildung gibt das Potential wider die rechte Abbildung die elektrische Feldstärke. Die maximale Feldstärke beträgt in etwa ein Zehntel der Durchschlagsfeldstärke in Luft (30 kV/cm).

Ein Ergebnis einer Feldsimulation ohne Berücksichtigung der Versteuerung durch Temperatur zeigt Abbildung 4. Es kann gezeigt werden, dass bei üblichen Dimensionen die maximale Feldstärke unter einem Zehntel der maximalen Feldstärke in Luft (ca. 30 kV/cm, bei Normalbedingungen) liegt. Die Anordnung ist korrespondierend zu dem Konzept aus Abbildung 3.

### Aspekte der Lichtbogenphysik:

Im Falle eines Isolatorüberschlages, oder auch eines unbeabsichtigten Kurzschlusses wird ein entsprechender Kurzschlussstrom zu fließen beginnen, der sich entsprechend der Differentialgleichung (1) zu der in Abbildung 5 korrespondierenden Schaltung entwickeln wird [6]. Dabei ist die Batterie sehr vereinfacht als Spannungsquelle mit einer ohmsch / induktiven Impedanz modelliert. Dies ist insofern zulässig, als der Kurzschlussstrom nur sehr kurzzeitig fließen darf (typisch einige ms) und daher eine elektrochemische / thermische Reaktion der Batterie im ersten Ansatz vernachlässigt werden kann.

$$U_0 - u_s - u_a = Ri + L \frac{di}{dt} (1)$$

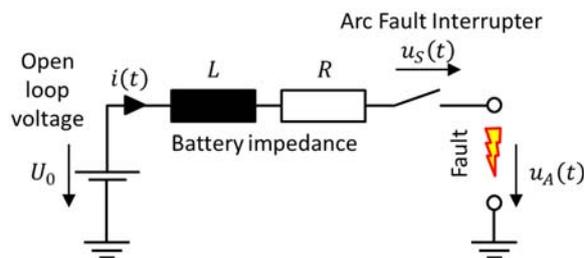


Abbildung 5: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Batteriesystems für Kurzschlussabschaltung.

Aus (1) ist ersichtlich, dass eine Abschaltung des Fehlerstromes nur dann erfolgen kann, wenn die Spannung über dem Schaltgerät größer als die treibende Batteriespannung abzüglich der Spannung am Störlichtbogen ist. Dies wird in der klassischen Schaltgerätetechnik durch sogenannte strombegrenzende Schaltkammern erreicht. Diese Technologien sind jedoch nur bis in die Mittelspannungstechnik anwendbar. Daher stellt sich die Frage einer geeigneten Schaltgerätetechnologie. Dazu kommen im Prinzip drei Technologien in Frage:

1. Sicherung
2. Elektromechanisches Schaltgerät mit massiver Lichtbogen Beblasung (z.B. Druckluft)
3. Hybrides Schalten

Sicherungen existieren bis zur Mittelspannungsebene. Ev. kann man ein rasches Ansteigen des Stromes auch durch die durch ABB erstmals eingeführte Sprengtrenner Technologie begrenzen. Nachteilig wirken sich ein notwendiger Wechsel der Sicherung und ein Hantieren mit explosivem Material aus.

Ein elektromechanisches Schaltgerät müsste ähnlich einer Generator Schalter Technik mit einer massiven externen Beblasung (Druckluft oder SF<sub>6</sub>) ausgestattet sein. Dies würde jedoch einen erheblichen Zusatzaufwand bedeuten.

Hybride Ansätze verfolgen ein Halbleiterelement als zentrales Konstruktionsdetail. Um sichere Trennung zu gewährleisten und die Verlustleistung zu minimieren sind beim hybriden Ansatz zwei zusätzliche elektromechanische Schaltgeräte vorzusehen. Dies ist sicher nachteilig hinsichtlich Aufwand und Baugröße, allerdings könnte man einen hybriden Ansatz in die Batterietopologie integrieren und so mit Hilfe multipler Hybridschalter eine Einzelabschaltung von einzelnen Batterieelementen realisieren. Damit würde sich die Beanspruchung am Einzelschalter erheblich reduzieren, was zu geringeren Halb-

leiterkosten führt. Ein weiterer Vorteil eines derartigen Konzeptes wäre eine raschere Abschaltung verglichen mit Sicherungen oder elektromechanischen Ansätzen. Dies würde allerdings eine Versagensfrüherkennung voraussetzen.

### Ausblick

Basierend auf diesen im Rahmen des Projektes COMPSTOR entwickelten Lösungsansätzen soll nach dem Aufbau und Inbetriebnahme der Forschungsinfrastruktur an den zur Umsetzung des Ansatzes notwendigen Schlüsseltechnologien geforscht werden. Dies umfasst insbesondere

- Entwicklung geeigneter Zelltechnologien
- Entwicklung einer Topologie unter dem speziellen Gesichtspunkt der Erfordernisse durch die Hochspannungstechnik
- Entwicklung von Lösungsansätzen zur Abschaltung von Fehlerströmen (kostengünstige Gleichstromunterbrechung mit hoher Leistungsdichte)
- Entwicklung von Methoden zum Monitoring von Gleichspannungsisolatoren zur Vermeidung von Überschlagen im Isoliersystem
- Entwicklung Methoden zur Früherkennung von hohen Fehlerströmen zur raschen Auslösung der zugeordneten Schutzelemente

### Danksagung

Das Projekt CompStor wird aus dem Interreg-Fond der Europäischen Union gefördert (Projektcode AB43).



## Literaturverzeichnis

- [1] Dena Studie Systemdienstleistungen, Sicherheit und Zuverlässigkeit von Stromversorgungen mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien, Deutsche Netzagentur GmbH (dena), Berlin 2014
- [2] G. Olah, A. Goepfert, G.K. Prakash, Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy, Wiley-VCH, Weinheim, 2009
- [3] A. Jossen, W. Weydanz, Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Reichart Verlag, 2006
- [4] W. Gellerich, Akkumulatoren – Grundlagen und Praxis, Shaker Media GmbH, Aachen 2011
- [5] J. Warner, The Handbook of Lithium Ion Battery Pack Design, Elsevier, Amsterdam, 2015
- [6] A. Erk, Elektrische Schaltgeräte, Vulkan-Verl. Classen, 1966