



Technische  
Universität  
Braunschweig



# SEMINAR

## STUDIENSEMINAR FÜR INNOVATIVE ENERGIESYSTEME

Kurzberichte

**Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische  
Energieanlagen - elenia**

Sommersemester 2016

**Braunschweig, 27.05.2016**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zeitplan</b>	<b>2</b>
-----------------	----------

## **Gruppe 1 - 30.06.2016**

Li - Synchrongeneratoren und ihr Verhalten am Netz . . . . .	4
Wagner - Stand und zukünftige Entwicklung der installierten elektrischen Speicherkapazität in Deutschland . . . . .	5
Wolf - Bedeutung grenzübergreifenden Leistungsflusses . . . . .	7
Reinhardt - Was bringt der Stromspeicher von Tesla? . . . . .	11
Messmer - Lastprognoseverfahren im Bereich von Wohnquartieren . . . . .	12
Lehmker - Netzleittechnik für Offshore-Windparks . . . . .	13
Gitin - Vergleich von Antriebskonzepten für Hybridfahrzeuge . . . . .	14
Claaßen - Sicherheitsmechanismen in einem Lithium-Ionen Batteriesystem . . . . .	15

## **Gruppe 2 - 13.07.2016**

Kuang - HGÜ-Kabel - Einschränkungen der Technologie . . . . .	17
Moos - Neue Fertigungsmöglichkeiten durch 3D-Drucker für Prototyping . . . . .	19
Gundelach - Blitzschäden in Deutschland . . . . .	20
Ouadhani - Superconductivity Applications in Power Systems: Recent Advances . . . . .	21
Huang - Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen . . . . .	23
Li - Isoliersysteme für HGÜ Anwendungen – Herausforderungen und Konzepte . . . . .	24
Schilling - Arbeitsbereich und Schalteigenschaften moderner Leistungshalbleiter . . . . .	26
Hahne - Kernfusion – Energieerzeugung der Zukunft? . . . . .	28

### Zeitplan am 30.06.2016 im Seminarraum (elenia)

Zeit	Typ	Referent	Thema
09:00 – 10:30	Vortrag	Baiyun Li	Synchrongeneratoren und ihr Verhalten am Netz
	Vortrag	Simon Wagner	Stand und zukünftige Entwicklung der installierten elektrischen Speicherkapazität in Deutschland
	Vortrag	Sebastian Wolf	Bedeutung grenzübergreifenden Leistungsflusses
10:30 – 11:00	<b>Gruppenbild</b>		
11:00 – 12:00	Vortrag	Tom Reinhardt	Was bringt der Stromspeicher von Tesla?
	Vortrag	Jana Messmer	Lastprognoseverfahren im Bereich von Wohnquartieren
12:00-13:00	<b>Mittag</b>		
13:00-14:30	Vortrag	Stefan Lehmker	Netzleittechnik für Offshore-Windparks
	Vortrag	Ilja Gitin	Vergleich von Antriebskonzepten für Hybridfahrzeuge
	Vortrag	Lars Claaßen	Sicherheitsmechanismen in einem Lithium-Ionen Batteriesystem

### Zeitplan am 13.07.2016 im Seminarraum (elenia)

Zeit	Typ		
09:00 – 10:30	Vortrag	Haozhe Kuang	HGÜ-Kabel –Einschränkungen der Technologie
	Vortrag	Dirk Moos	Neue Fertigungsmöglichkeiten durch 3D-Drucker für Prototyping
	Vortrag	Hendrik Gundelach	Blitzschäden in Deutschland
10:30 – 11:00	<b>Pause</b>		
11:00 – 12:00	Vortrag	Samar Ouadhani	Superconductivity Applications in Power Systems: Recent Advances
	Vortrag	Miao Huang	Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen
12:00-13:00	<b>Mittag</b>		
13:00-14:30	Vortrag	Xufeng Li	Isoliersysteme für HGÜ Anwendungen – Herausforderungen und Konzepte
	Vortrag	Dennis Schilling	Arbeitsbereich und Schalteigenschaften moderner Leistungshalbleiter
	Vortrag	Julian Hahne	Kernfusion – Energieerzeugung der Zukunft?

# Synchrongeneratoren und ihr Verhalten am Netz

Baiyun LI, TU Braunschweig, Matrikel-Nr. 4562849, Email: baiyun.li@tu-braunschweig.de

## Kurzfassung

In diesem Bericht wird die Erforschung im Bereich von Synchrongeneratoren und ihrem Verhalten am Netz dargestellt, die auf Aufbau eines Synchrongenerators, Realisierung von Spannungs- und Frequenzregelung für Transportbedarf ins Netz, Betriebsverhalten von Synchrongenerator, Steuerung der Stabilität von Elektroenergiesystem bezogen sind. Ziel ist, dass die Funktionsweise von Synchrongeneratoren und die Verhalten von Synchrongeneratoren am Netz kennenzulernen sind.

## Abstract

This article is about synchronous generators and their behaviors in the power supply system. The structure of a synchronous generator, the achievement of the voltage and frequency regulation for electronic supply requirement, the behavior of synchronous generators during the operation modus and the method to ensure the stability of the Electric power system are described. A general understanding of how synchronous generators work and how they behave during work in the power grid is in this article introduced.

## 1 Einleitung

Elektrische Energie ist heutzutage die höchstwertige Energieform. Für die Erzeugung von elektrischer Energie über beispielsweise Gas-, Dampf- und Wasserturbinen werden überwiegend Synchrongeneratoren eingesetzt, welche fast 80% des Erzeugungsanteiles besitzen. In der Zukunft werden aber immer mehr erneuerbare Energie wie z.B. Photovoltaik und Windenergie als Energiequellen benutzt. Eine Photovoltaikanlage erzeugt Gleichstrom, welche durch Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt wird und so für den Eigenverbrauch oder Netzeinspeisung nutzbar ist. Zukünftig werden fast nur Wechselrichter also für Energieversorgung bestimmt. Es ist zu diskutieren, ob eine Art der Wechselrichter den Verhalten von Synchrongeneratoren nachbilden soll. Aus diesem Hintergrund wird das Thema „Synchrongeneratoren und ihr Verhalten am Netz“ als Vortrag vorzustellen.

## 2 Theoretische Grundlagen

**Wirkungsweise der Synchrongenerator:** Bei konstantem Drehzahl bleibt der magnetische Fluss zwischen Ständer und Läufer konstant und erzeugt der gleichstromerregte Läufer somit in dem Ständerwicklungssystem dreiphasig Spannungen

$$U_s = U_p - jX \cdot I_s \quad (2.1)$$

Davon  $U_s$ : Netzspannung     $X$ : synchrone Reaktanz  
 $I_s$ : Ständerstrom     $U_p$ : Polradspannung

**Zeigerdiagramm:** Das Betriebsverhalten von Synchrongeneratoren, das übererregter kapazitiver Betrieb, untererregter induktiver Betrieb und Rein ohmsche Belastung enthält, lässt sich anhand eines Zeigerdiagrammes für jeden Betriebspunkt beobachten. Durch die Lastwinkel  $\beta$  und Phasenwinkel  $\phi$  von Zeigerdiagramm können stationäre Betriebszustände bestimmt werden.

**Stabilität des Synchrongenerators am starren Netz:** Im stationären Betriebszustand sind die erzeugte Energie von Synchrongenerator so gleich wie die verbrauchte Energie von Belastung. Die Wirkleistungserzeugung wird als Funktion von Lastwinkel dargestellt, weil der Lastwinkel  $\beta$  durch das mechanische Antriebsmoment und Laständerung beeinflusst wird.

**50 Hz-Garantierung:** Um 50 Hz Frequenz im Netz exakt zu garantieren, soll die erzeugte Leistung immer rechtzeitig mit schwankendem Energieverbrauch übereinstimmen.

## 3 Literatur

- [1] B. R. Oswald, Berechnung von Drehstromnetzen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- [2] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz, Elektrische Energieversorgung, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.

# Stand und zukünftige Entwicklung der installierten elektrischen Speicherkapazität in Deutschland

Simon Wagner

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, simon.wagner@tu-bs.de

## Kurzfassung

Bei diesem Seminar wurden die Technologien der elektrischen Energiespeicherung erläutert, deren Vor- und Nachteile beleuchtet, und der derzeitige Stand der elektrischen Speicherkapazität in Deutschland aufgezeigt. Anschließend erfolgte ein Ausblick in die Zukunft, bei dem auf die jeweiligen Chancen der innovativen Technologien eingegangen wurde. Am Ende wurden die gewonnenen Erkenntnisse diskutiert.

## Abstract

In this seminar the technologies of electric energy storage were amplified and the actual state of the electric energy capacity was shown. Subsequently an outlook occurred, the chances of the innovative technologies in the future were displayed. Concluding the acquired knowledge was discussed.

## 1 Einleitung

Durch den zunehmenden Einsatz regenerativer Energien kommt es zu einem schwankenden Energieangebot im Netz. Um zu jeder Zeit einen Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage gewährleisten zu können gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit wäre es die Stromerzeugung zu steuern. Die Vorgaben des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) verbieten jedoch eine Steuerung der Erneuerbaren Energien. Die Anpassung der Stromerzeugung erfolgt dann allein durch das Regeln der fossilen Kraftwerke, wobei dies aufgrund der schwankenden Einspeisung der regenerativen Energien eine große Herausforderung darstellt. Eine zweite Möglichkeit wäre die Steuerung des Stromverbrauchs. Dies lässt sich durch Abschaltung großer Verbraucher realisieren. Da in unserer heutigen Gesellschaft Flexibilität jedoch zunehmend wichtiger wird, ist die Möglichkeit der Speicherung elektrischer Energie eine Lösung für die Zukunft. Im Rahmen dieser Arbeit werden die bereits vorhandenen elektrischen Energiespeicher in Deutschland vorgestellt und ein Blick in die Zukunft geworfen.

## 2 Grundlagen der elektrischen Energiespeicher

Elektrische Energiespeicher dienen der Speicherung elektrischer Energie zur späteren Nutzung. Es gibt mobile und stationäre Energiespeicher in Deutschland. Die stationären Energiespeicher sind in Form von Hausspeichern und Netzspeichern installiert. Im Folgenden werden Technologien vorgestellt, die sich bewährt haben und bereits ausgereift sind, aber auch

neue innovative Technologien, die möglicherweise aussichtsreich für die Zukunft sind.

### 2.1 Technologien der elektrischen Energiespeicherung

#### Pumpspeicherkraftwerk

Pumpspeicherkraftwerke sind eine der gebräuchlichsten mechanischen Speichermethoden im stationären Einsatz und werden zum Ausgleich von Schwankungen bei Stromangebot und -nachfrage verwendet. In Schwachlastzeiten, vorwiegend in den Nachtstunden, wird Strom aus dem Netz entnommen um Wasser auf ein höheres Niveau zu pumpen. Bei Bedarf wird diese Lageenergie wieder in elektrische Energie umgewandelt. [1] [2]

#### Akkumulatoren

Zurzeit sind vorwiegend drei Typen von Akkumulatoren im Einsatz, dies sind die Bleiakkumulatoren, Natrium-Schwefel-Akkumulatoren und Lithium-Ionen-Akkumulatoren.

Bleiakkumulatoren erreichen eine Lebensdauer von bis zu zwölf Jahren und zeichnen sich vor allem durch geringe Kosten, hohe Verfügbarkeit und die Einsatzmöglichkeit in einem hohen Temperaturbereich aus. Sie werden häufig als Energiespeicher für Photovoltaikanlagen eingesetzt. [1]

Der Vorteil bei Natrium-Schwefel-Akkumulatoren liegt in deren weitestgehend Wartungsfreiheit bei einer gleichzeitigen Lebensdauer von 15 Jahren. Sie werden als Energiespeicher für Photovoltaik- und Windkraftanlagen eingesetzt. [1]

Lithium-Ionen-Akkumulatoren besitzen im Vergleich zu anderen Akkumulatoren eine deutlich höhere Energiedichte. Zurzeit werden sie meistens im mobilen

Bereich eingesetzt, aber wegen ihres immer noch hohen Kostenreduktionspotenzials werden sie sich auf lange Sicht auch im stationären Bereich etablieren. [1]

#### **Redox-Flow-Batterie**

Die Redox-Flow-Batterie gehört zu den Technologien, die sich am Beginn ihres Innovationszyklus befinden. Bei ihr wird die elektrische Energie in Form gelöster Salze in zwei Elektrolytlösungen gespeichert. Der Stromfluss während des Lade- und Entladevorgangs kommt durch einen Ionenaustausch zustande, wobei die Elektrolytlösungen durch eine Konvertereinheit gepumpt werden.

Bei Redox-Flow-Batterien tritt kein Memory-Effekt auf und die Selbstentladungsrate ist vernachlässigbar gering. Außerdem verursacht eine Tiefentladung im Gegensatz zu den meisten anderen Akkumulatoren keine Schäden. [1] [2]

#### **Druckluftspeicher**

Das Druckluftspeicherwerk ist ein Kraftwerk mit einer Gasturbine, das die Energie komprimierter Luft als Speicher nutzt. Es wird dazu genutzt Spitzenlaststrom bereitzustellen. In Schwachlastzeiten wird die Luft verdichtet und in einem Druckluftspeicher, typischerweise einer Kaverne, zwischengespeichert. [2] [3]

#### **Wasserstoffspeicher**

Die Speicherung von Wasserstoff kann in flüssigem oder gasförmigem Aggregatzustand erfolgen, bei flüssigem muss der Wasserstoff jedoch auf -253 Grad Celsius abgekühlt werden. Als Speicher werden Druckbehälter genutzt.

Wasserstoffspeicher sind gut als Langzeitspeicher geeignet, werden jedoch aufgrund der hohen Kosten und des schlechten Wirkungsgrad bisher nur selten eingesetzt. [2] [3]

### **3 Literatur**

- [1] Prof. Dr.-Ing. W. Mauch, Dipl.-Ing. T. Metzger, Dipl.-Phys. T. Staudacher, Anforderungen an Energiespeicher, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., München, 2009.
- [2] Dr.-Ing. Peter Radgen, Zukunftsmarkt Elektrische Energiespeicherung, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, Dezember 2007.
- [3] Dr.-Ing. Martin Kleimaier, Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger – Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf, VDE-Studie, Dezember 2008.

# Bedeutung grenzübergreifenden Leistungsflusses

## Importance of cross-border power flow

Bedeutung grenzübergreifenden Leistungsflusses, Sebastian Wolf

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, sebastian.wolf@tu-bs.de

### Kurzfassung

In dieser Ausarbeitung wurde der grenzübergreifende Leistungsfluss von 2011 bis 2016 an den deutschen Grenzen untersucht. Es wurden Verläufe und Auslastungen der einzelnen Kopplungsstellen untersucht und mit einigen NTC Werten abgeglichen. Zusätzlich wurden noch Zusammenhänge zwischen dem Stromimport und -export und der Erneuerbaren Energieeinspeisung untersucht.

### Abstract

In this paper the increasing importance of Germany's cross-border power flows from 2011 until 2016 were investigated. The course and capacity of the individual couplings were analyzed and correlated with some NTC. Additionally the import and export was correlated with renewable energy production.

## 1 Einleitung

In Deutschland werden im Jahr 2015 über 30% [1] des erzeugten Stromes aus regenerativen Energiequellen, hauptsächlich PV- und Windkraftanlagen gewonnen. Zusätzlich sollen bis 2022 die restlichen Kernkraftwerke, 14% der gesamten Stromerzeugung 2015, abgeschaltet werden und der CO<sub>2</sub> Ausstoß auf 60% (Bezugsjahr 1990) vermindert werden. Wenn ausschließlich Braunkohlekraftwerke abgeschaltet werden um die Verminderung des CO<sub>2</sub> Ausstoßes zu erreichen, würden weitere 6% der Energieerzeugung wegfallen. Die Einspeisung durch PV Anlagen erfolgt hauptsächlich zur Mittagszeit, dann jedoch sehr stark. Die Einspeisung durch Windkraftanlagen ist meist besser über den Tag verteilt, jedoch lässt sich bei dieser schlechter abschätzen, wann genau diese nun einspeisen werden.

Im Moment gibt es nicht genug Energiespeicher in Deutschland, seien es nun Batterien, Pumpspeicherkraftwerken o.Ä., um diese Peakerzeugung der regenerativen Energieerzeugungsanlagen so über den Tag zu verteilen, dass dieser absehbare Wegfall der konventionellen Kraftwerke, die den größten Teil unser Grundlast abdecken, ausgeglichen werden könnte.

## 2 Theoretische Grundlagen

Deutschland besitzt im Moment acht Grenzen mit Kopplungsstellen. Die angebundenen Länder sind Dänemark, Niederlande, Frankreich, Schweiz, Österreich, Tschechien, Polen und Schweden. Um eine Aussage über die Auslastung dieser Kopplungsstellen treffen zu können, wird zur Auswertung der Daten die Net Transfer Capacity (NTC), also die maximal zulässige Übertragungsleistung, als Wert zur Normierung herangezogen. Ein weiterer wichtiger Wert ist die Total Transfer Capacity (TTC). Die NTC wird aus der Differenz der TTC und des Transmission Reliability Margin (TRM) gebildet. Der TRM ist eine Reserve um

die Stabilität der verbundenen Netze an Hand des n-1 Kriteriums zu gewährleisten. In erster Näherung kann nach einer Empfehlung der ehemaligen Deutschen Verbundgesellschaft der TRM über die Folgende „Wurzelformel“ bestimmt:

$$TRM = 100 MW * \sqrt{n}$$

n = Anzahl Kopplungsleitungen

Diese Reserve beläuft sich zum Beispiel auf 250 MW für die Grenze Niederlande-Deutschland [2]. Auf Grund von Erfahrungswerten wird an der Grenze Tschechien-Deutschland der TRM auf 100 MW reduziert. Sowohl an den Grenzen Deutschland-Polen-Tschechien als auch am „Deutschen C“, Übergang zwischen Deutschland, Niederlande, Frankreich und Schweiz, sind für diese gemeinsame Grenzen für Gesamtimport und -export festgelegt worden. Die maximal übertragbare Leistung am Deutschen C (C-Funktion) wird in Abhängigkeit der Höhe der Einspeisung durch Windkraftanlagen reduziert. Die Daten, auf die sich diese Ausarbeitung bezieht, werden von den Übertragungsnetzbetreibern, die für die Kopplungsstellen verantwortlich sind, auf ENTSO-E veröffentlicht [3]. Dieses Netzwerk wurde 2009 im Zuge des dritten legislativen Pakets für den internen Energiemarkt der EU gegründet.

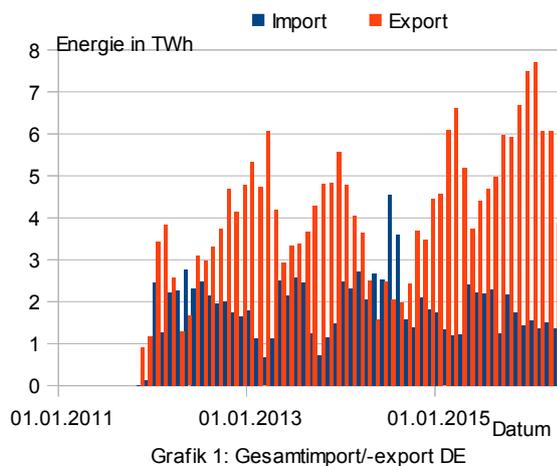
## 3 Hauptteil

Um eine grundlegende Aussage über den Verlauf der Leistungsflüsse an den Kopplungsstellen und deren Auslastung treffen zu können, werden die stündlichen Messwerte der Leistungen von je eines Tages bzw. Monats aufaddiert. In Kapitel 3.1 werden aus dieser verkleinerten Menge an Daten vom 01.01.2011 bis 01.04.2016 Graphen erstellt um besser eine Aussage über die grenzübergreifenden Leistungsflüsse ziehen zu können. Des weiteren werden in Kapitel 3.2 für das Jahr 2015 die Auslastungen der Kopplungsstellen bestimmt, indem der NTC zur Normierung benutzt wird. Wenn

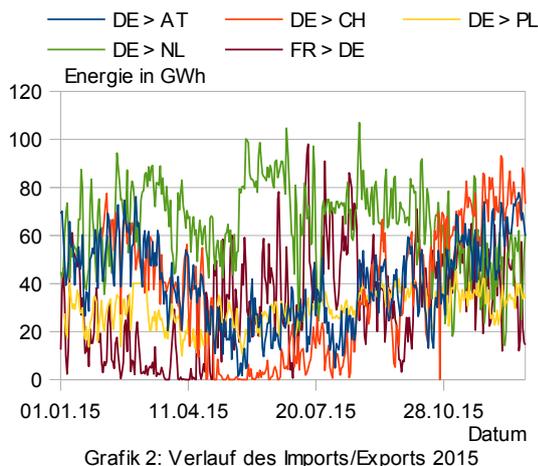
dieser nicht ermittelt werden konnte, wird stattdessen das Maximum der übertragenden Leistung des untersuchten Zeitraumes benutzt. Außerdem wird in Kapitel 3.3 speziell das Deutsche C und dessen Auslastung bei unterschiedlichen Erzeugungen durch Windkraftanlagen untersucht. In Kapitel 3.4 wird kurz auf mögliche Zusammenhänge zwischen der erzeugten Leistung aus PV und Windkraftanlagen und dem Stromimport bzw.-export eingegangen.

### 3.1 Verlauf des Stromimports und -exports

In Grafik 1 wird zunächst der Gesamtimport und -export Deutschlands dargestellt. 2012 betrug der Export 39,6 TWh., 2015 wuchs dieser auf 66,4 TWh an, was ein Anstieg von 67,7% entspricht. Der Stromimport dagegen fiel von 25,3 TWh auf 21,6 TWh., Verminderung um 14,6%. Der Einbruch 2014 im Export hängt damit



zusammen, dass dort keine Daten für die Kopplungsstelle Deutschland-Niederlande zur Verfügung stehen. 2013 exportierte Deutschland 22,5 TWh in die Niederlande. Dies entspricht 42% der gesamten exportierten Energie. 2015 stieg der Export auf 23,7 TWh, 35,6% des Gesamtexports. Der Export nach Österreich und Schweiz machen jeweils nochmal 20% und nach Polen weitere 10 bis 15% aus. Beim Import dominiert die Kopplungsstelle

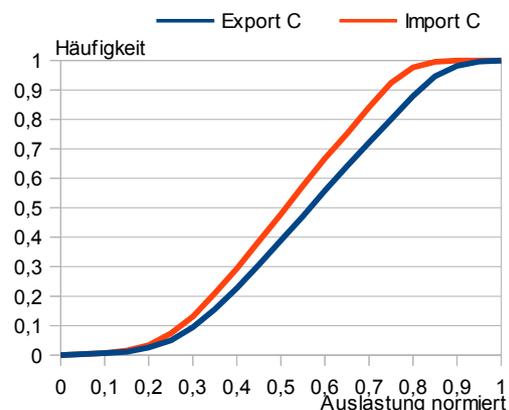


an der französisch-deutschen Grenze mit über 50%, aber auch dieser nahm von 2012 bis 2015 um 8% ab. In Grafik

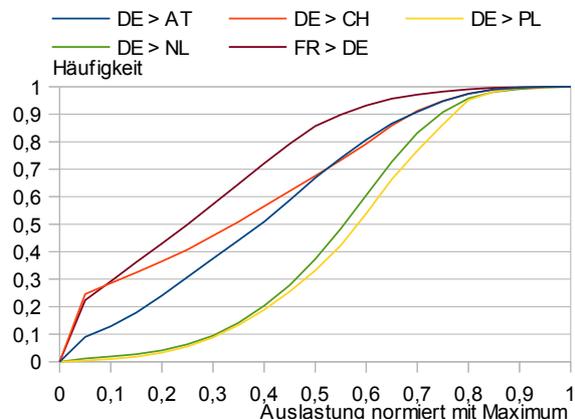
2 ist zu erkennen, dass aus Frankreich hauptsächlich im Sommer und Winter Strom exportiert wird. Polen und die Niederlande importieren das ganze Jahr über Strom, Polen etwas mehr im Winter, die Niederlande mehr im Sommer. Die Verläufe von Österreich und der Schweiz verlaufen ähnlich, mit einem erhöhten Import im Winter und einer deutlichen Senkung im Sommer.

### 3.2 Auslastungen der Kopplungsstellen 2015

Aufgrund der Zusammenfassung der NTC am Deutschen C und der Abhängigkeit dieser von der Einspeisung durch Windkraftanlagen ist eine Auswertung dieser nicht so einfach möglich. Der Maximalwert der C-Funktion für den Import liegt bei 8.249 MW, für den Export bei 7.449 MW. Um eine Aussage über die Auslastung des Deutschen Cs zu geben, werden der Import und Export der Länder Niederlande, Frankreich und Schweiz aufsummiert und mit dem Maximum der C-Funktion normiert (siehe Grafik 3).



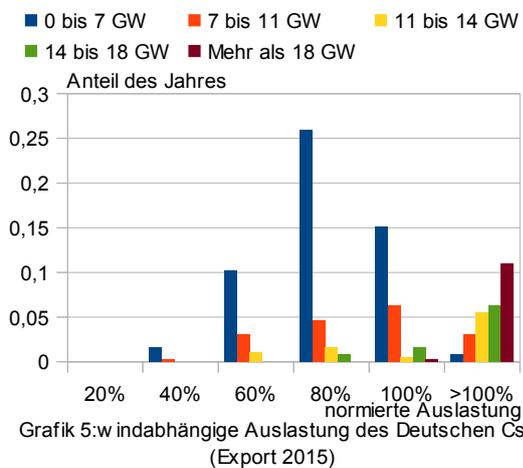
Man erkennt, dass der Import die Kopplungsstellen am Deutschen C noch nicht überlastet wird. 50% aller Messwerte liegen unter 50% der maximalen Leistung und es gibt keinen Messwert, die die NTC überschreiten. Beim Export liegen aber bereits 0,05% der Messwerte über der maximalen NTC. Folglich muss an manchen Tagen die Stabilität eines oder mehrerer der Länder am Deutschen C durch die Ausnutzung der TRM unterstützt werden. Grafik 4 gibt die Auslastungen der



Kopplungsstellen diesmal jedoch normiert mit dem maximalen Wert, der im Zeitraum von 2011 bis 2015 gemessen wird, wieder. Es ist zu erkennen, dass die Auslastungskurve des Exports in die Niederlande nahezu identisch ist mit der Auslastungskurve des Exports für das Deutsche C. Da Polen einen ähnlich großen Anteil an der gemeinsamen Kopplungsstelle mit Tschechien ausmacht wie die Niederlande am Deutschen C, kann man davon ausgehen, dass die Auslastung, zumindest im Export, normiert mit der NTC ähnlich verlaufen wird.

### 3.3 Windabhängigkeit des Deutschen Cs

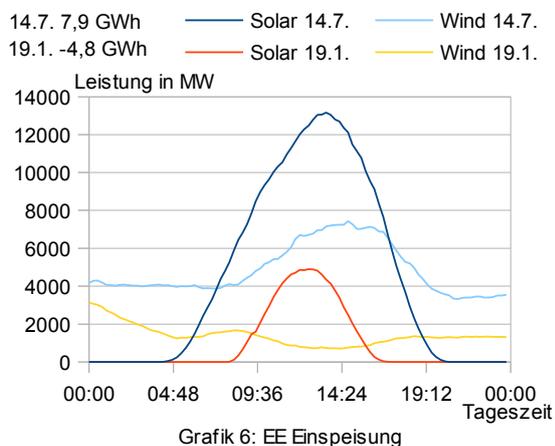
Für eine Auswertung in Abhängigkeit der Leistung aus Windkraftanlagen werden aus den NTC Tageswerte für die maximale Kapazität berechnet. Des Weiteren wird aus den Tageswerten der erzeugten Energie aus Windkraftanlagen eine mittlere Leistung über einen Tag errechnet um dieselbe Einteilung wie beim Deutschen C zu erhalten. In Grafik 5 werden nun für die fünf



Leistungsbereiche die Auslastung dargestellt. Hierfür wird die Tagessumme der übertragenden Energie mit der maximalen Kapazität normiert. Es ist zu erkennen, dass je größer die Leistung der Windkraftanlagen ist, umso mehr Tagen die exportierte Energie diese Kapazität überschreitet.

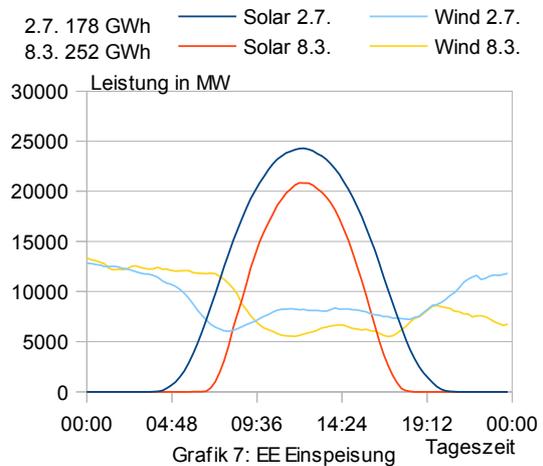
### 3.4 Zusammenhänge EE und Import/Export

Wie an der Abregelung der NTC des Deutschen Cs bei zu großer Einspeisung durch Windkraftanlagen zu erkennen



Grafik 6: EE Einspeisung

ist, werden bereits die erneuerbaren Energien bei der Regelung des Imports und Exports berücksichtigt. Wenn der Nettoexport (Zahlen bei dem Datum) von Deutschland über einen Tag sehr klein ist, oder Strom importiert wird, ist auch die Einspeisung durch die PV und Windkraftanlagen sehr klein (Grafik 6). Bei



besonders hohen Nettoexporten, ist auch die Einspeisung der Erneuerbaren Energien sehr groß (Grafik 7).

## 4 Zusammenfassung/Fazit

Bis 2022 werden etwa 20% der deutschen Energieerzeugung wegfallen, wenn sowohl der Atomenergieausstieg als auch die CO<sub>2</sub>-Ausstoß Verminderung erreicht werden sollen. Folglich muss diese wegfallende Erzeugung durch weitere regenerative Erzeugungsanlagen abgedeckt werden. Dadurch werden aber auch die grenzübergreifenden Leistungsflüsse weiter stark zunehmen, und wie am NTC des Deutschen Cs zu erkennen ist, sind weder die Kopplungsstellen noch die angeschlossenen Netze bis jetzt für eine derartige Belastung ausgelegt. Sehr deutlich ist dies am Beispiel des Deutschen Cs zu erkennen. Bei starker Windeinspeisung (>18 GW) sinkt der NTC um über 50%, damit die Netzstabilität gewährleistet werden kann. Der Wegfall von ungefähr 20% der gesamten, deutschen Energieerzeugung bis 2022, die hauptsächlich zur Grundlastabdeckung dient, wird voraussichtlich nur durch regenerative Energiequellen ersetzt werden. Um den erzeugten Strom aber sinnvoll nutzen zu können, muss zusätzlich zu diesem notwendigen Ausbau der Kopplungsstellen weitere Tagesenergiespeicher errichtet werden um die Peakerzeugung der PV Anlagen auf die Tageszeiten zu verteilen, in denen diese Energie benötigt wird. Außerdem muss nach einer praktikablen Lösung zur saisonalen Speicherung gefunden werden, um sonnen- bzw. windschwache Wochen ausgleichen zu können.

## 5 Literatur

- [1] BDEW, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanz e.V.
- [2] Tennet, Publikation vom 19.05.2015: Modell zur Kapazitätsberechnung
- [3] <https://transparency.entsoe.eu/>

# Was bringt der Stromspeicher von Tesla?

Tom Reinhardt

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig,  
tom.reinhardt18@googlemail.com

## Kurzfassung

Elon Musk vermittelt den Eindruck, dass der Tesla Stromspeicher etwas Revolutionäres auf dem Energiemarkt wäre, denn Tesla hat sich mit dem Stromspeicher hohe Ziele gesteckt. In dieser Arbeit wird untersucht, was genau und wie innovativ der Tesla Stromspeicher in Wirklichkeit ist und ob die gesetzten Ziele erfüllt worden sind. Eine bedeutende Rolle spielt dabei die Gigafabrik in Paolo Alto, die eigens dafür gebaut worden ist.

## Abstract

Elon Musk introduces the Tesla battery as something revolutionary on the energy market. Whether this is true or not will be closer examined in that paper. Tesla sets his sights high with the Lithium Ion battery, if those were fulfilled is still remains to be seen. An important part plays the Gigafactory 1 in Paolo Alto, which was specially built for that purpose.

## 1 Einleitung

Mit einer großen Präsentation und Medien Rummel hat Elon Musk, die Tesla Powerwall und das Powerpack vorgestellt. Dieser Solarspeicher soll zur Dezentralisierung der herkömmlichen Energieverteilung und zur Energieunabhängigkeit dienen. Außerdem sieht Tesla sich selbst als Impulsgeber für eine CO2 saubere Welt, dabei spielt der Stromspeicher eine wichtige Rolle. Das Technische Datenblatt verspricht viel und der Speicher soll in der privaten Version günstiger als vergleichbare Produkte von anderen Herstellern sein. Doch bei der ganzen Euphorie, wo bleibt da die Kritik und was bringt der Stromspeicher?

## 2 Theoretische Grundlagen

Seit Anfang 2016 wird der Stromspeicher, der auf Basis der bekannten und verwendeten Lithium-Ionen-Batterie funktioniert, ausgeliefert. Teslas Powerwall soll die elektrische Energie, die Tagsüber von Photovoltaik Anlagen einspeist, z.B. nachts oder an Tagen mit wenig Sonnenstunden zur Verfügung stellen. Gefertigt wird der Speicher in Paolo Alto, wo auch der Schlüssel des Stromspeichers liegt. Der Name Giga verrät schon, dass das Ziel ist, hier jährlich 35 GWh Zellen Gesamtkapazität herzustellen. Die Massenproduktion erlaubt es die Kosten pro kWh zu senken. Der Speicher kommt in zwei Varianten, einmal als Powerwall für eine Anwendung für 10-90 kWh, die andere Version Powerpack ab 100 kWh lässt sich beliebig oft aneinander Schalten. Somit kann je nach Anwendung eine kundenspezifische Anzahl an Powerpacks ermittelt werden. Die Powerwall, die sehr stark für private Anwender ausgelegt ist, kommt einmal

als 7kWh oder 10 kWh daher. Jedoch wird der Speicher ohne Wechselrichter ausgeliefert und ist nur mit bisher wenigen Wechselrichtern kompatibel, doch Tesla verspricht Besserung. Der Nutzen für den Kunden lässt sich unter anderem in der Wirtschaftlichkeit der Powerwall messen. Tesla gibt an, dass man mit der Powerwall, bei gewöhnlichem Nutzen elektrischer Geräte, einen ganzen Familienhaushalt, einen Abend lang versorgen kann. Die Powerwall lässt sich gut in der Garage im Haus oder sogar draußen an eine Wand montieren, zudem soll die Wall als integriertes Glied in einem Smart Home System verstanden werden. Zu dem praktischen Nutzen bringt der Speicher durch sein Auftreten und seiner Existenz noch die Aufmerksamkeit der Problematik und regt mehr Menschen für ein energiebewusstes Verhalten an. Im Großen und Ganzen gibt es einige Punkte, die definitiv zu hinterfragen sind. Auf dieses wird näher eingegangen.

## 3 Literatur

- [1] Tesla Motors 2016  
[https://www.teslamotors.com/de\\_DE/powerwall](https://www.teslamotors.com/de_DE/powerwall)  
[Zugriff 07.04.2016]
- [2] Benz Elektro  
[http://www.benz-elektro.eu/images/pdf/Powerwall-German\\_EU.pdf](http://www.benz-elektro.eu/images/pdf/Powerwall-German_EU.pdf)  
[Zugriff 05.05.2016]
- [3] Andreas Karius  
<http://www.automobilproduktion.de/hersteller/wirtschaft/studie-tesla-gigafactory-bedroht-andere-batteriehersteller-361.html>  
[Zugriff 11.05.2016]

# Lastprognoseverfahren im Bereich von Wohnquartieren

## Load forecasting methods in the area of residential districts

Jana Messmer, B.Eng

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen - **elenia**, Braunschweig, j.messmer@tu-braunschweig.de

### Kurzfassung

In dieser Arbeit geht es um verschiedene Verfahren zur Lastprognose im Niederspannungsnetz im Bereich von Haushalten. In der Einleitung wird kurz beschrieben, wofür Lastprognoseverfahren benötigt werden und weshalb neue Verfahren entwickelt werden. Darauf wird in den Grundlagen erklärt, welche Ansätze es für solche Prognoseverfahren gibt. Des Weiteren wird auf einige Verfahren eingegangen und deren Besonderheiten aufgezeigt, sowie ein Vergleich der Anwendungsbereiche.

### Abstract

Load forecasting methods are used to predict the load in a low voltage grid. This paper focuses in the area of households. At first it describes what load forecasting methods are used for and why there is the need to develop new methods. Furthermore it characterizes different approaches for developing a new method. At the end there will be a description of a few different methods and their special characteristics.

## 1 Einleitung

Lastprognoseverfahren spielen sowohl für Energieversorgungsunternehmen als auch für Verteilnetzbetreiber eine entscheidende Rolle, da diese die zu erwartende, abgenommene Leistung bereitstellen und einschätzen müssen. Bei Fehleinschätzungen muss Energie dazu- oder verkauft werden, was teurer für das Unternehmen ist als der Energiekauf am Vortag oder früher. Außerdem kann mit Hilfe einer Lastprognose die maximale Netzbelastung vorhergesagt werden, was zur Netzplanung benötigt wird. Das heute noch häufig eingesetzte Verfahren ist das Standardlastprofilverfahren, welches um das Jahr 2000 vom VDEW entwickelt lassen wurde.

Da sich das Verbrauchsverhalten mit der Zeit ändert und sich das Standardlastprofilverfahren nur ab 300 Haushalte anwenden lässt, sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von neuen Verfahren entwickelt worden, um eine genaue Lastprognose vorzunehmen, Regellösungen zu finden und Netzbelastungen besser vorhersagen zu können.

Darüber hinaus wird beim Standardlastprofilverfahren die Einspeisung von Wind- und PV-Anlagen nicht berücksichtigt, welche aber besonders in ländlichen Gegenden eine große Rolle bei der Netzbelastung spielt.

## 2 Grundlagen

Um ein Lastprognoseverfahren zu entwickeln gibt es zwei Ansätze: zum einen die Bottom-up Methode und zum anderen die Top-down Methode. Bei den meisten Ansätzen wird die Bottom-up Methode verfolgt. Diese Methode ist

eine stochastische Methode und geht von den einzelnen elektrischen Verbrauchern im Haushalt aus und versucht mit einem realistischen Modell die Realität abzubilden, um den Lastverlauf zu prognostizieren. Dabei wird die Leistung der einzelnen Geräte mit dem Verbraucherverhalten und der Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins im Haushalt kombiniert und daraus ein Lastverlauf errechnet. Da diese Methode von einzelnen Geräten in Haushalten ausgeht, ist es möglich damit auch kleine Siedlungen oder auch nur einzelne Häuser zu berechnen.

Die Top-down Methode ist eine statistische Methode bei der Lastverläufe der Haushalte gemessen und Regelmäßigkeiten mathematisch bestimmt werden. Auf Grund der Regelmäßigkeiten werden Vorhersagen für ähnliche Fälle getroffen, wobei häufig die Wochentage, Jahreszeit und auch Wettergegebenheiten berücksichtigt werden.

## 3 Literatur

- [1] T. Karner, Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe der TU Wien, „Synthetische Haushaltsprofile“, 05.11.2014. [http://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/lehre/bachelorarbeiten/BA\\_2014\\_Karner\\_Synthetische\\_Lastprofile.pdf](http://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/lehre/bachelorarbeiten/BA_2014_Karner_Synthetische_Lastprofile.pdf) [Zugriff am 22.05.2016].
- [2] R. Briegel, D. Filzek, P. Ritter, Regenerative Modellregion Harz, „Ergebnisbericht-Stromlastprognose“, 24.05.2012. [http://www.regmodharz.de/fileadmin/user\\_upload/bilder/Service/Arbeitspakete/AP-Bericht-Stromlastprognose\\_AP2.4\\_CUBE.pdf](http://www.regmodharz.de/fileadmin/user_upload/bilder/Service/Arbeitspakete/AP-Bericht-Stromlastprognose_AP2.4_CUBE.pdf) [Zugriff am 22.05.2016].

# Netzleittechnik für Offshore-Windparks

## Network control technology for offshore wind farms

Stefan Lehmker, B.Eng.,

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, s.lehmker@tu-bs.de

### Kurzfassung

Das Ziel der Arbeit ist es, die Elemente der Netzleittechnik aufzuzeigen und die besonderen Anforderungen an Offshore-Windparks herauszuarbeiten. Anhand einer kurzen Einleitung wird der steigende Informationsfluss im Stromnetz aufgrund der erneuerbaren Energien deutlich. Die theoretischen Grundlagen der Netzleittechnik sind dabei unabhängig von der Entwicklung der Offshore-Windparks. Vor allem aber die Kommunikationstechnik und Informationsverarbeitung muss in Zukunft der schwankenden Erzeugungsleistung angepasst werden. Dies wird im Hauptteil unter anderem näher beleuchtet.

### Abstract

The objective of this research is to identify the elements of the network control technology and the specific requirements for offshore wind farms. A brief introduction reveals the increasing flow of information because of the renewable energy. The theoretical basis of the network control technology is independent of the development of offshore wind farms. In Future the communication technology and information process must be adapted to the fluctuating power generation. This is described among other specifications in the main chapter.

## 1 Einleitung

Auch ohne die Entwicklung der erneuerbaren Energien war die Netzleittechnik in der Vergangenheit ein sehr komplexes Thema, da alle Informationen eines Netzbetreibers an einem zentralen Punkt zusammenlaufen. Durch die zunehmende Zahl der dezentralen Erzeugungsanlagen steigen die Anforderungen an heutige Netzleitsysteme. Mit zunehmender Abhängigkeit der Netze an die schwankende Erzeugungsleistung der dezentralen Anlagen steigt auch der Informationsfluss. Diese Abhängigkeit wird auch anhand der Offshore-Windparks deutlich. Die Offshore-Energie kennzeichnet eine große, zentrale aber schwankende Einspeiseleistung. Da die elektrische Energie bei dem großen Überangebot zudem schnellstmöglich in den Süden Deutschlands transportiert werden muss, ist z.B. der Informationsfluss zwischen mehreren Netzbetreibern von großer Bedeutung. Bei den Offshore-Anlagen spielen auch die Themen IT- und Versorgungssicherheit eine große Rolle. Netzleittechnik muss heutzutage vor Angriffen von außen geschützt werden. Zudem muss die Informationsübertragung den harten Umweltbedingungen standhalten und der Wartungsaufwand möglichst gering gehalten werden. Eine Zustandsbewertung aus der Ferne erfordert genaue Informationen über den Anlagenzustand. Diese und weitere Besonderheiten müssen bei der Netzleittechnik berücksichtigt werden.

## 2 Theoretische Grundlagen

Nach [1] ist die Netzleittechnik ein Hilfsmittel zum „Erfassen, Übertragen, Aufbereiten, Verknüpfen, Hinterlegen und Anzeigen von Zustandsinformationen

aus dem Netz“ sowie für das „Entgegennehmen, Aufbereiten, Übertragen, Aufgeben und Überwachen von Befehlsinformationen vom betriebsführenden Menschen zum Netz“. Dazu befindet sich üblicherweise am Standort des Netzbetreibers eine zentrale Leitstelle. Diese ist rund um die Uhr besetzt. Die Mitarbeiter der Netzleitstelle steuern die Netze aktiv und werten alle Informationen des Netzleitsystems aus. Ohne Übertragungstechnik und einem im Leitsystem hinterlegten Datenmodell können jedoch keine Informationen in der Leitstelle verarbeitet werden. Am Beispiel eines Strommesswertes wird der Übertragungsweg deutlich. Über einen Wandler wird der Messwert eines Kabelabgangs z.B. einem Steuergerät per Draht zugeführt. Das Steuergerät wandelt diesen Messwert in ein digitales Signal um. Der Messwert wird dann über eine Schnittstelle und ein standardisiertes Protokoll (Normreihe IEC) zur lokalen Fernwirkanlage übertragen. Die Fernwirkanlage überträgt die Information dann über Lichtwellenleiter zur Leitstelle. Dort muss der Messwert korrekt verarbeitet werden damit er an der richtigen Stelle im Leitsystem angezeigt wird. Dazu ist ein Datenmodell notwendig, in dem alle Messwerte, Befehle und Meldungen hinterlegt sind. Ein einzelner Datenpunkt wird unter anderem durch eine Anlagenzuordnung, Bezeichnung, Messbereich und Fernwirkadresse genau definiert. Neben der Steuerung von Anlagen und der Meldungsanzeige bieten Leitsysteme noch viel komplexere Möglichkeiten, denen in Zukunft eine wichtige Bedeutung zukommen wird.

## 3 Literatur

- [1] E.-G. Tietze, Netzleittechnik Teil 1: Grundlagen, Frankfurt am Main: VDEW Energieverlag, 2006..

# Einsatz von Batterien im Explosionsschutz

Ilja Gitin,

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, i.gitin@tu-bs.de

## Kurzfassung

Der stetig zunehmende Bedarf an Batteriespeichern insbesondere im Bereich der Elektromobilität erzeugt eine hohe Nachfrage nach neuen Batterietechnologien. Dabei wird die Lithium-Ionen-Batterie als zukunftsträchtigstes System angesehen. Für die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien in explosionsgefährdeten Umgebungen müssen besondere Anforderungen erfüllt werden. Nachfolgend wurden verschiedene Bauformen von Lithium-Ionen-Batterien hinsichtlich ihrer Eignung zur Verwendung im Explosionsschutz unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen und geltenden Normen vorgestellt, untersucht und bewertet.

## 1 Einleitung

Aufgrund der hohen Energie- und Leistungsdichten nimmt die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien insbesondere im Bereich der Elektromobilität stark zu. Bauartbedingt bringen solche Batterien ein gewisses Entzündungsrisiko mit sich, was sie bisher für den Einsatz in explosionsgefährdeten Umgebungen ausschließt. Um diesen Missstand zu beseitigen und um allgemein die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien zu erhöhen werden zum einen neue Technologien und Materialien eingesetzt, zum anderen werden zuverlässige Schutzmechanismen verwendet. Die Eignung der in Frage kommenden Konzepte hängt von verschiedenen Faktoren ab. Betrachtet werden müssen sowohl mögliche Fehlerquellen der Batterie selber als auch das Verhalten bei Einwirkungen aus der Umgebung. Bestehende und neu entwickelte Batteriekonzepte, die im Explosionsschutz eingesetzt werden sollen, müssen die geltenden Normen und insbesondere die ATEX Richtlinie erfüllen. Eine Risikobewertung der verschiedenen Bauarten beantwortet die Frage nach der Eignung eines Batteriesystems in einem bestimmten Umfeld. Die vorgestellten Batteriekonzepte werden hinsichtlich dieser Anforderungen untersucht und bewertet.

## 2 Theoretische Grundlagen

Batterien sind elektrochemische Energiespeicher, die in vielen Bereichen Verwendung finden. Prinzipiell sind sie aus Zellen aufgebaut, die folgende Bestandteile haben: Zwei Elektroden bilden den negativen (Anode) und positiven (Kathode) Pol, an denen die chemischen Reaktionen beim Laden und Entladen stattfinden. Sie bestehen aus Aktivmaterial, das den Typ der Batterie bestimmt. Ein nicht-leitender Separator ist zwischen den Elektroden angeordnet um eine Berührung zu verhindern und so einen Kurzschluss zu vermeiden. Er ist durchlässig für die Ladungsträger. Der Zwischenraum ist mit einem Elektrolyt gefüllt, das den Ladungsträgertransport zwischen den Elektroden ermöglicht. Charakteristische Eigenschaften verschiedener Batterietypen sind unter anderem ihr Energiedichte, Spannung und Zyklenzahl. Lithium ist dabei durch sein geringes Gewicht und das hohe elektrische Standardpotential ideal geeignet für

Batterieanwendungen. Es zeichnet sich durch eine hohe Energiedichte aus. Größter Nachteil bei der Verwendung von Lithium ist die starke Reaktivität mit Wasser, was ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen kann. Im Gegensatz zu anderen Batterietypen wird daher ein wasserfreier Elektrolyt verwendet. Die namensgebenden Lithium-Ionen fungieren in Lithium-Ionen-Zellen als Ladungsträger. Beim Laden der Zelle werden sie als Lithium-Atome in der Anode gespeichert. Während des Entladevorgangs wandern die Lithium-Ionen zur Kathode und werden im dortigen Aktivmaterial eingelagert.

Als Aktivmaterialien für die Elektroden kommen dabei verschiedene Stoffe und Verbindungen zum Einsatz. Die Kombinationen der Aktivmaterialien bestimmen dabei die Kapazität, Spannung, Hochstromfähigkeit, Temperaturfestigkeit und Sicherheit der Zellen. Um Schädigung der Batterie zu vermeiden müssen sie mit verschiedenen Schutz- und einem Batteriemanagementsystem ausgestattet werden.

Reines Lithium hat als Anodenmaterial zwar sehr gute Eigenschaften, wird aber aufgrund der Reaktivität nicht verwendet. Stattdessen kommt überwiegend Graphit zum Einsatz. Vielversprechende Neuentwicklungen finden sich im Bereich von Lithium- und Siliziumverbindungen. Als Kathodenmaterial werden üblicherweise verschiedene Lithiumverbindungen verwendet, deren Zusammensetzung maßgeblich die Eigenschaften bestimmt.

Anforderungen an den Explosionsschutz werden durch die europäische ATEX Richtlinie geregelt. Sie umfasst zwei Richtlinien, die Geräte und Umgebungen in verschiedene Gefahren- und Temperaturklassen einordnet und somit die an bestimmte Betriebsmittel besondere Anforderungen hinsichtlich der Sicherheit stellt.

## 3 Literatur

- [1] B. Jossen, W. Weydanz, Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Untermeitlingen: Inge Reichardt Verlag, 2006.
- [2] Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014
- [3] Richtlinie 1999/92/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1999

# Sicherheitsmechanismen in einem Lithium-Ionen Batteriesystem

Sicherheitsmechanismen in einem Lithium-Ionen Batteriesystem, Lars Claßen,  
Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, larsclaassen@gmx.de

## Kurzfassung

Ziel des Berichtes war es, einen Überblick über den bisherigen Stand der Recherche zu den Sicherheitsmechanismen in Lithium-Ionen-Batteriesystemen zu ermöglichen. Einleitend wurde dazu kurz auf die Historie und technischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Li-Ionen-Batterien eingegangen, worauf im zweiten Teil des Berichts durch einige grundlegende Informationen ein Übergang zum eigentlichen Thema, den Sicherheitsmechanismen auf den drei Konstruktionsebenen des Batteriesystems, geschlagen werden sollte.

## Abstract

Due to the growing demand of high energy/ high power -battery systems in portable devices, electro mobility etc., lithium ion battery systems have gained greatly in importance since the invention around 1970. While having some significant advantages compared with other battery types, lithium ion batteries also are much more sensitive to external and internal influences, requiring special protection mechanisms to prevent the battery and its environment from taking damage, for example due to thermal runaways. This report introduces the reader to the differences of li-ion-batteries and states reasons for protection mechanisms, used in its different construction levels.

## 1 Einleitung

Seit der Markteinführung Anfang der 1990er Jahre gewinnen Lithium-Ionen-Batterien immer stärker an Bedeutung in allen möglichen Anwendungsbereichen.

Aufgrund der vielfältigen Materialkombinationen ist eine einheitliche Aussage über Anwendungsgebiete der Lithium-Ionen-Batterie nicht ohne weiteres möglich, vielmehr müssen Spezifikationen je nach Anwendung erfolgen.

Verschiedenste Bauarten und Kombinationsmöglichkeiten im Bereich der Aktivmaterialien haben dazu geführt, dass sie sowohl als „high power“ als auch als „high energy“ – Komponenten genutzt werden können. [1]

Jedoch ist davon auszugehen, dass die Batterien in Art und Umgebungsort so genutzt werden, dass es bei einem Versagen zu sicherheitskritischen Situationen, bspw. durch einen Brand der Zelle oder eine Explosion, kommen kann.

Im Folgenden sollen Belastungen, mit denen Gefahren im Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien einhergehen, aufgezählt und dazu passende Schutzmechanismen auf Zell-, Modul-, und Systemebene vorgestellt werden.

Dabei wird die Eignung der verschiedenen Vorkehrungen für unterschiedliche Anwendungsgebiete geprüft.

## 2 Theoretische Grundlagen

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Batterien unterscheiden. Zum einen, für den einmaligen Gebrauch bestimmte, nicht wieder aufladbare Primärzellen und zum anderen die Sekundärzellen oder Akkumulatoren.

Lithium-Ionen-Batterien werden heutzutage meist als Sekundärzelle verwendet. Der Begriff „Lithium-Ionen-Batterie“ beschreibt jedoch nur den grundlegenden Typen der Zelle. Beim Design einer Li-Ionen-Zelle kann unter

vielen verschiedenen Materialkombinationen gewählt werden, bspw. Lithium-Eisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ). Je nach Kombination weisen die Zellen unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf Kapazität, Betriebsspannung und Sicherheit auf. [2]

Einzelne Zellen werden für anspruchsvollere Aufgaben oft zu Modulen zusammengefasst, welche wiederum zu einem kompletten System inklusive eines Managementsystems verbunden werden können. Das Managementsystem überwacht die Batterieverbunde durch Auswertung verschiedener Messdaten der einzelnen Zellen (typischerweise Temperatur, Spannung, Strom) und regelt den Lade- und Entladevorgang. Es stellt damit eine grundlegende Sicherheitstechnische Komponente dar. [1]

Aufgrund der Reaktionsfreudigkeit des Lithiums insbesondere mit Wasser und der Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Einwirkungen müssen jedoch weitere Vorkehrungen getroffen werden, um sicherheitskritische Zustände oder schlimmstenfalls ein thermisches Durchgehen der Zelle zu vermeiden. Auf Zell-, Modul- und Systemebene gibt es jeweils Möglichkeiten, einer Beschädigung durch kritische Systemzustände und dadurch ggf. einer Gefährdung entgegenzuwirken.

## 3 Literatur

- [1] Ehsan Rahimzei, Kerstin Sann, Moritz Vogel / VDE Verband der Elektrotechnik / DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Kompendium: Li-Ionen-Batterien, Stand: Juli 2015, [http://www.ikt-em.de/\\_media/Kompendium\\_Li-Ionen-Batterien.pdf](http://www.ikt-em.de/_media/Kompendium_Li-Ionen-Batterien.pdf) [Zugriff am 03.05.2016]

- [2] A. Jossen, W. Weydanz, Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Reichardt Verlag, 2006.

# HGÜ-Kabel-Einschränkungen der Technologie

Haozhe Kuang, Elenia, TU-Braunschweig, khzde@hotmail.com

## Kurzfassung

Der Beitrag umfasst zwei Technologie für HGÜ-Kabel (MI-Kabel, VPE-Kabel). Er beschäftigt sich mit dem Aufbau, der Isolierung und den Vor- und Nachteilen der verschiedenen HGÜ-Kabel. Es wird intensiv auf das moderne technologische VPE-Kabel eingegangen.

## Abstract

This paper investigates two technologies for HVDC cables (MI cable, XLPE cables). This report is mainly about the structure, the isolation and the advantages and disadvantages of the various HVDC cables. The report focus on the modern technologically XLPE cables.

## 1 Einleitung

Um die Effizienz der Stromübertragung über große Entfernungen zu erhöhen, kann die Hochspannungsgleichstromübertragung eingesetzt werden. Eine Gleichstromübertragung weist eine Reihe netztechnischer Vorteile gegenüber der Wechsel- bzw. Drehstromtechnik auf, z.B. geringer Übertragungsverlust neben dem kleinen Spannungsabfall, keine Blindleistung und günstige Kabels- bzw. Freileitungskosten [1]. Bei Hochspannungsgleichstromübertragung spielen Kabel eine wichtige Rolle. Kabel können die Betriebsspannung und eventuelle auftretenden Überspannung isolieren, aufgrund der Anwendung der unterschiedlichen Kunststoffe, welche die als Leiter genutzten Adern umgeben und gegeneinander isolieren. Zusätzlich widerstehen die Kabel Umwelteinflüssen. Elektrische Leiter bestehen meist aus Kupfer, seltener auch aus Aluminium oder geeigneten Metalllegierungen. Mineralisierte Kabel werden als ein Sicherheitskabel in vielen Bereiche eingesetzt. Neuerdings ist das extrudierte 525kV-VPE-Kabelsystem erfolgreich getestet.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis der HGÜ-Kabel notwendigen Grundlagen erarbeitet und zusammengefasst. Kabel werden als Ein- und Dreileiterkabel mit unterschiedlichen Isoliersystemen aufgebaut [2]. MI-Kabel wurden seit 1954 in der höchsten Gleichspannungsebene für Stromübertragung verwendet. MI-Kabel haben eine lange Historie, eine umfangreiche Erfolgsbilanz und hohe Zuverlässigkeit. Heutzutage werden MI-Kabel bis zu Spannung 525kV eingesetzt, z.B. bei Offshore-Anlagen. Innovative Systeme nutzen neuerdings ein neues vernetztes Polyethylenes DC Isoliermaterial. VPE isolierte Kabel haben die ökonomische und ökologische Vorteile und gute Betriebserfahrungen. Es tritt keine Umweltgefährdung durch austretendes Isolieröl auf, aufgrund niedrigerer Werte für die Dielektrizitätszahl und den Verlustfaktor sind die dielektrischen Verluste wesentlich geringer [3]. Im Gegensatz zur klassischen Kabelsystemen ergeben sich erhebliche Ressourcen,

Kosten- und Zeitsparungen. Aufgrund der einfacheren Garnituren und des geringen Gewichts einfacher zu transportieren, zu verlegen und zu handhaben [3]. Diese HGÜ-kabelsystem-technologie geeignet sich für große Menge an Strom über sehr große Entfernungen, z.B. See- oder Landkabel. VPE-Kabel werden heute im dreifachextrusionsverfahren gefertigt. Dieses Verfahren gewährleistet eine dauerhaft feste, glatte und homogene Bindungsebene zwischen Isolierung und Leitschichten. Eine meist horizontale Vernetzung unter hohem Druck und optimaler Temperaturführung bewirkt eine hohlraumfreie Struktur der Kabelisolierung [3].

## 3 Literatur

- [1] Klaus Heuck, Klaus-Dieter Dettmann, Detlef Schulz, Elektrische Energieversorgung, Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, 2010.
- [2] Andreas Küchler, Hochspannungstechnik, Grundlagen-Technologie-Anwendung, 2009.
- [3] Uwe Riechert, Eignung von Polyethylen für Gleichspannungs-Energiekabel, Aachen: Shaker, 2002.

# Neue Fertigungsmöglichkeiten durch 3D-Drucker für Prototyping

## New manufacturing options for prototyping by 3D Printing

B.Sc., Dirk Willem Moos,

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, d.moos@tu-bs.de

### Kurzfassung

3D-Druck Verfahren bieten die Möglichkeit, Prototypen Zeit- und Kosteneffizient zu erstellen. Der Begriff 3D-Druck wird unterschiedlich verwendet. In diesem Bericht werden Verfahren beschrieben und bewertet, die es ermöglichen Bauteile, direkt aus digitalen Konstruktionsdaten zu fertigen. Zunächst werden Verfahren für die Verarbeitung von Metall, Gips, Papier und Kunststoff beschrieben. Für die kunststoffverarbeitenden Verfahren wird abschließend ihre Eignung für die Herstellung von Prototypen bewertet.

### Abstract

3D-Printing can be used for rapid prototyping. The term 3D-Printing is used in different ways. This report deal with technologies, that facilitate a direct manufacturing from digital design data. First manufacturing technologies for different materials like metal, plaster, paper and plastic are described. In the following the suitability to prototyping is evaluated for the technologies, using plastic.

## 1 Einleitung

Prototypen sind Einzelteile für Erprobungszwecke. Je nach Erprobungszweck und Entwicklungsstadium, können gegenüber einem späteren Serienteil reduzierte Anforderungen an dessen Eigenschaften gestellt werden. Da Prototypen als Einzelteile oder in geringen Stückzahlen hergestellt werden, möchte man eine aufwendige Maschineinrichtung oder einen Werkzeugbau vermeiden. 3D-Druck Verfahren bieten die Möglichkeit Bauteile direkt aus digitalen Konstruktionsdaten zu drucken.

Begonnen hat die Entwicklung mit der Stereolithographie, die 1987 auf den Markt kam [1]. Je nach Verfahren gibt es unterschiedliche Beschränkungen bei der Materialauswahl, der erzielbaren Oberflächenbeschaffenheit und der Genauigkeit. Zunächst ließen sich mit 3D-Druckverfahren Form und Design Prototypen fertigen. Inzwischen werden diese Verfahren auch für Einzelteilerfertigungen im Werkzeugbau oder der Dentaltechnik eingesetzt. Mittlerweile sind einige Schlüsselpatente ausgelaufen, sodass Gerätepreise gesunken sind. [1] [2]

## 2 Grundlagen

Der 3D-Druck gehört zu den Additiven Fertigungsverfahren, hierbei wird Material schichtweise aufgetragen um ein Bauteil zu erzeugen. Zunächst muss ein CAD-Modell (Computer Aided Design) des zu fertigenden Bauteils erstellt und in einem, für den 3D-Druck geeigneten Format exportiert werden. Das gängigste Format ist das SLT-Format (Standard Transformation Language). STL approximiert die Flächen als Dreiecks-Facetten. Um eine Druckbarkeit zu gewährleisten ist das Modell als Volumenmodell auszuführen, welches bestimmte Anforderungen erfüllen

muss, beispielsweise müssen bei allen das Volumen begrenzenden Flächen Außen- und Innenseite definiert sein. Bei einigen Verfahren sind Stützstrukturen für die Fertigung erforderlich, diese müssen bereits bei der Erstellung des CAD-Modells berücksichtigt werden. Danach werden mit einem Slice-Programm die Daten für die einzelnen Schichten erzeugt. Das Bauteil wird auf einer Bauplattform schichtweise aufgebaut. Es wird eine Schicht des Ausgangsmaterials eingebracht und die gewünschte Kontur ausgehärtet oder es wird Material nur im Bereich der Kontur eingebracht und ausgehärtet. Ist eine Schicht fertig wird die Bauplattform um eine Schichtdicke abgesenkt und die Kontur der nächsten Schicht erstellt. Bei den Verfahren die Material nur im Bereich der Kontur einbringen sind Stützstrukturen vorzusehen, wenn höher liegende Schichten über die darunter liegenden ragen. Nach dem eigentlichen Aufbau des Bauteils sind die Stützstrukturen und überschüssiges Baumaterial zu entfernen. Je nach Verfahren und gewünschter Oberflächenbeschaffenheit ist eine Nachbearbeitung erforderlich. Um eine höhere Stabilität zu erzielen, können einige Bauteile beispielsweise mit Epoxidharz infiltriert werden. [1] [3]

## 3 Literaturverzeichnis

- [1] A. H. Fritz und G. Schulze, Fertigungstechnik, Berlin: SpringerVieweg, 2015.
- [2] P. Paul, „3D-Drucken.de“, 19 Januar 2015. [Online]. Available: <http://www.3d-drucken.de/2015/01/alles-ueber-fused-deposition-modeling/>. [Zugriff am 26 Mai 2016].
- [3] P. FASTERMANN, 3D-Drucken Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.

# Blitzschäden in Deutschland

## Lightning damages in Germany

Hendrik Gundelach, Student der TU Braunschweig

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, He.Gundelach@gmail.com

### Kurzfassung

Die Seminararbeit Blitzschäden in Deutschland lieferte einen Überblick über die Art und Weise wie Blitzschäden entstehen und wie diese minimiert werden können. Dabei wurde auf prägnante Eigenschaften von Blitzen eingegangen und erläutert wie diese Schäden am Menschen, an Gebäuden und an Endgeräten verursachen können. Außerdem wurde mithilfe aktueller Bilanzen aufgezeigt, dass die Kosten der jährlichen Einzelschäden zunehmen. Anschließend wurde die Wichtigkeit von Blitzschutzmaßnahmen, sowie ihre sinnvolle Anwendung dargestellt.

### Abstract

This paper 'Lightning damages in Germany' provided an overview about the emergence of lightning damage and how these can be minimized. For a more detailed explanation the paper had included the concise properties of lightnings and how these cause damages for humans, buildings and terminal devices. Current statistics, which show the rising of annual costs, were used for clarification. Afterwards the importance of lightning protection and the useful application was explained.

### 1 Einleitung

Aufgrund der Tatsache, dass die wachsende Anzahl der Elektrogeräte in deutschen Haushalten zu immer höheren Blitz- und Überspannungsschäden führen, steigen die durchschnittlichen Kosten für diese, was auch Statistiken der letzten 10 Jahre vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft belegen.

Dadurch gewinnt dieses Thema an Bedeutung und deshalb ist es notwendig sich mit diesem Thema auseinanderzusetzen.

### 2 Theoretische Grundlagen

Die für die Seminararbeit relevanten Blitze sind jene, die eine Funkenentladungen zwischen den Wolken und der Erde sind. Hierbei beträgt die durchschnittliche Stromstärke einer Hauptentladung bis zu 20.000 Ampere, welche ein starkes Magnetfeld um den Blitzkanal zufolge hat. Dabei kann abhängig vom Widerstand eine Spannung von über 1.000.000 Volt zwischen Wolke und Erde hervorrufen werden. Diese hohe Energie richtet auf unterschiedlichste Weise Schäden in Deutschland an.

Zum einen kann ein Blitz direkt in ein Objekt einschlagen. Durch die Zündung der Energie direkt am Objekt entsteht sehr viel Hitze, die häufig die Ursache für einen brennenden Dachstuhl oder einen Waldbrand ist. Zum anderen richtet der „indirekte“ Blitzeinschlag in Deutschland große Schäden an. Hierbei schlägt der Blitz in den Boden ein und von dort sucht er sich den Weg des geringsten Widerstandes, welches oft nahegelegene unterirdische Strom-, Telefon- und Wasserleitungen sind. Über diese Leitungen kann der Blitz in Haushalte eindringen und dort verschiedenste Schäden anrichten.

Um Blitzschäden zu vermeiden wird Blitzschutz betrieben. Zum einen werden Blitzableiter auf Gebäuden installiert, welche dafür sorgen, dass die Zündung der Energie erst im Boden stattfindet.

Eine weitere Blitzschutzmaßnahme ist die Erdung der metallischen Leitungen von Gebäuden, welche das Eindringen der Energie in das Bauwerk verhindert. Allerdings kann die Stromleitung nicht geerdet werden, da diese unter Spannung steht und über sie kann der Blitz in das Gebäude gelangen.

Abschließend sorgen Überspannungssteckdosen vor Endgeräten für eine Abschwächung des Energiehaltes der Überspannung.

### 3 Literatur

- [1] Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft, Blitz- und Überspannungsschutz in elektrischen Anlagen  
Abrufbar unter:  
[http://vds.de/fileadmin/vds\\_publicationen/vds\\_2031\\_web.pdf](http://vds.de/fileadmin/vds_publicationen/vds_2031_web.pdf) [Zugriff am 27.05.2016]
- [2] Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft, Blitzbilanz 2014  
Abrufbar unter:  
<http://www.gdv.de/2015/07/versicherer-leisten-340-millionen-euro-fuer-schaeden-durch-blitze/> [Zugriff am 27.02.2016]
- [3] Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Was versteht man unter Überspannungsschutz  
Abrufbar unter:  
<https://www.vde.com/de/Ausschuesse/Blitzschutz/FAQ/bs/oeffentlich/Seiten/Ueberspannungsschutz.aspx> [Zugriff am 27.05.2016]

# Superconductivity application in power systems: Recent advances

Samar Ouadhani

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen - **elenia**, Braunschweig, s.ouadhani@tu-bs.de

## Abstract

Driven by offering a better efficiency and a smaller size compared to the existing technologies, superconductors have been developing the last decades a big impact on the generation, transmission and use of electrical power. This work provides an overview of the latest development and projects in power system facilities based on superconductor application. In particular it focuses on power transmission using superconducting cables and superconducting magnetic energy storage (SMES).

## 1 Introduction

Similar to semiconductors impact on the development of society during the 20th century, superconductors should play the same role in the 21st century. One of the most important areas for our modern society is power grids. These have been facing some challenges such as steady demand growth, aging infrastructure and new uncertainties brought on by structural and regulatory reforms, which threaten their ability to provide reliable services. Advances in superconductivity over the last decades are offering a new set of technology tools to renew this infrastructure and to enhance the capacity and reliability of the power system. Superconducting magnetic energy storage (SMES) and superconducting cables are examples of those new technologies which can be used to improve the overall performance of the electric system.

## 2 Theoretical background

### *Cables:*

Superconductors have zero electrical resistance below a critical temperature. Until 1986, the highest known critical temperature was a frigid 23 K ( $-250^{\circ}\text{C}$ ). But in 1986, a new class of copper-oxide-based compounds, called high temperature superconductor (HTS), was discovered, with much higher critical temperatures reaching 135 K ( $-138^{\circ}\text{C}$ ) which is above 77 K ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) the temperature of boiling liquid nitrogen, enabling practical and economic cooling [1]. Mainly two types of superconducting cables have been developed and are distinguished by the used dielectric. The first design, commonly referred to as a 'warm dielectric' design, is based on a single conductor formed by HTS wires stranded around a flexible core in a channel filled with liquid nitrogen coolant. The outer dielectric insulation, the cable screen and the outer cable sheath are at room temperature. The second type of HTS cable design is the 'cold dielectric' where two concentric layers of HTS wires are separated by a cold dielectric. Both layers may be contacted by the liquid nitrogen coolant which provides cooling and insulation between the center conductor layer

and the outer shield layer. Compared to the warm dielectric design, it has a lower inductance, a higher current carrying capacity, reduced AC losses, and very little radiated electromagnetic fields [2]. The cold and warm dielectric designs can be implemented in three-phase systems. Moreover, a Triaxial cold dielectric cable design, where the three phase conductors are concentrically arranged on a single support element divided by wrapped dielectric, can be used at low to medium voltage level.

**Superconducting magnetic energy storage:** SMES is an energy storage device based on a relatively simple concept; it stores electric energy in the magnetic field generated by DC current flowing through a superconducting coiled wire. By cause of the zero electrical resistance of superconductors, energy can be stored in a persistent mode, virtually indefinitely until required. In general, an SMES system is composed of four parts: [3] **The superconducting coil with the magnet (SCM)**, stores the DC electrical energy. **The power conditioning system (PCS)**, represents the interface between the AC utility and the SCM. Through the PCS, the AC electrical energy can be converted into the DC electrical energy stored in the SCM. **Cryogenics system (CS)**, is required to cool the SCM and keep it at operating temperature. **Controller** allows the SMES systems to perform various functions. Since energy is not converted to other forms (e.g., mechanical or chemical), round-trip efficiency can be very high. Furthermore, due to its rapid discharge capabilities, this technology has been implemented on electric power systems for pulsed power and system stability applications.

## 3 References

- [1] A.P. Malozemoff: The New Generation of Superconductor Equipment for the Electric Power Grid, IEEE transactions on applied superconductivity, VOL.16, NO. 1, MARCH 2006.
- [2] W.V. Hassenzahl, D.W. Hazelton, B.K. Johnson, P. Komarek, M. Noe and C.T. Reis: Electric power appli-

cations of superconductivity, Proceedings of the IEEE  
VOL. 92, NO. 10, OCTOBER 2004.

- [3] P.Esteban, A.Bautista, J.L.Gutiérrez-Iglesias, J.M. Rodríguez, E. Urretavizcaya: SMES systems applications to improve quality service, ASINEL, Iberdrola, Red Electrica de Espana, Spain.

# Second-Life-Concepts for Lithium-ion batteries in electric Vehicles

Miao Huang

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, loculymiao@gmail.com

## Abstract

This article mainly tells the use of second life batteries, and also the process of second life batteries are considered. As we know, batteries that are used for vehicles purpose cannot be used once the energy capacity reaches 70% - 80%. The remaining capacity of energy can be used in some other ways in our life, but the technic is still not so perfect, so there's still a long term to work.

## 1 Introduction

Why is it important to research the second life of lithium-ion batteries in electric vehicles? First of all, when the life of lithium-ion batteries goes to an end, but it doesn't mean they're useless anymore. There are still a lot of ways to use them in other fields with their left life. In addition, recycling is an economic thought in every field, so that's the main idea why it's worth researching the second life batteries.

## 2 Research and Theory

As it's known, that the second life applications of used lithium-ion batteries develop very slowly, and it is also still in its very early days, since each battery pack is different and they also have different modules and chemistries into second life applications. Moreover, if the prices of first life lithium-ion batteries drop to levels such as the U.S. DOE and USABC are targeting, it may make second life batteries not competitive any more.

For lithium-ion batteries, the process is recycling, reuse, repair, remanufacturing, and the second life applications. One of the challenges in the industry field is in respect to the legal aspects of these processes. Who is responsible for the processes in this field is still a question.

Being able to repair and remanufacture battery packs is the most undervalued aspect of the used battery process. One of the challenges with repair and service parts is maintaining an inventory<sup>[1]</sup>. The lithium-ion batteries tend to lose capacity, so it's necessary to regularly charge them to avoid that capacity loss becoming permanent.

Second Life means that the lithium-ion batteries reach 80% of the original capacity, and it will reach its end of life. But the remaining capacity of the energy can be still used in other ways, for example, we can use the energy to heat the house. The challenge that we still face today is that there are no cell standards, every cell from the same factory is different. So it's very hard to combine them or change them into the same, or even mix them, into second use applications.

For recycling of the lithium-ion batteries, it's also a massive work for manufacturers. The challenge is that it is very energy intensive to get the metals out of the cells. The way to solve this problem is that they either use high temperatures or low temperatures to extract the precious materials. Except that there is still a third method, which is the physical separation process. The challenge of recycling is to differentiate the chemistries and the materials<sup>[2]</sup>.

Since the electric vehicles were manufactured by less than 10 years, therefore it's not the end for the batteries, we don't know when they are reaching 80% of the original capacity, so it's necessary to find the best way to make the second life applications into market.

## 3 Literatur

- [1] Paolo Cicconi, Feasibility Analysis of Second Life Applications for Li-ion Cells used in electric Powertrain using environmental Indications.
- [2] Gillian Lacey, The Use of Second Life Electric Vehicle Batteries for Grid Support.

# Isoliersysteme für HGÜ Anwendungen - Herausforderungen und Konzepte

## Insulation systems for HVDC applications - challenges and concepts

B. Sc. Xufeng Li

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig,

xufeng.li@tu-braunschweig.de

### Kurzfassung

Dieses Seminar befasst sich mit den Konzepten und Herausforderungen von Isolationssystemen für HGÜ-Anwendungen. Im Zuge der Energiewende erfährt die HGÜ größere Bedeutung. Durch den Einsatz von HGÜ entstehen Vorteile, welche hier kurz aufgeführt werden. Desweiteren wird auf die Beanspruchung von Isolierstoffen eingegangen. Hierbei werden die Unterschiede zwischen der AC und DC Belastungen beschrieben. Der Hauptteil des Seminars befasst sich mit dem zentralen Problem von HGÜ-Anwendungen und die Isolation von HGÜ-System. Hierbei wird die Auswahl von unterschiedlichen Isolierstoffen und Isolationsmethoden erklärt.

### Abstract

This seminar focuses on the concepts and challenges of insulation systems for HVDC applications. As part of the energy revolution HVDC experiences a greater importance. The use of HVDC has many advantages, which are listed here briefly. Furthermore, the stress of the insulation material is presented and the differences concerning AC and DC are described. The main part of the seminar deals with the central problem of HVDC system and its insulation. Hence, a selection of different insulating materials and insulation techniques will be explained.

## 1 Einleitung

Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) gibt es schon seit 1890er Jahre. Kommen jetzt durch den erhöhten Energiebedarfs aus erneuerbare Energie, wie z.B. Offshore Windparks und Photovoltaikanlage in den Fokus. (vgl. [4] S.3) Bis zum Jahr 2025 sollen 40 bis 45 % des in Deutschland verbrauchten Stroms aus erneuerbare Energie produziert werden, bis 2035 sollen es 55 bis 60 % sein. (vgl. [2]) In Zukunft wird mehr Energie transportiert und verteilt, desweiteren nehmen die erneuerbaren Energien in der Elektrizitätsversorgung zu. HGÜ kann diese gesteigerte Netzanforderung erfüllen. Im Vergleich zu Drehstromsystemen hat die HGÜ viele Vorteile. Ein Vorteil liegt z.B. in der Hochspannungsebene. Im Stromnetz unterscheidet man Nieder- (230 V/400 V), Mittel- (40 kV), Hoch- (110 kV) und Höchst- (380 kV) Spannungsebene. (vgl. [3]) HGÜ gehört zur Höchstspannungsebene und kann die Spannungshöhe von 800 kV erreichen, deshalb entstehen wenige Verluste während der Energieübertragung. Durch die Beanspruchung der HGÜ Systeme mittels Gleichspannung können Polarisierungseffekte und Oberflächenladungen entstehen. Auf Grund von Sicherheitsaspekten und der Stabilität von HGÜ muss die Auslegung der Isolierungssysteme bedacht werden. Die aufgeführten Punkte werden in diesem Studienseminar betrachtet. (vgl. [1] S. 529)

## 2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel soll die notwendigen Grundlagen zum Verständnis der Thematik vermitteln. Bei der

Gleichspannungsbeanspruchung treten andere Effekte auf, als im Vergleich zur Wechselspannungsbeanspruchung. Diese Effekte sind Polarisierungseffekte und Oberflächenladungen. Bei der Übertragung von Gleichspannung entsteht im Isolierstoff ein Polarisierungseffekt. Hierbei werden die Moleküle des Isolierstoffs durch ein externes Gleichspannungsfeld polarisiert. Durch die Polarisierungseffekte werden die Atome im Polymeren Isolierstoff polarisiert und polare Moleküle entstehen. Ein zusätzliches elektrisches Feld wird durch die Überlagerung vieler Dipolfelder erzeugt. Die Polarisierung bestimmt die Dielektrizitätszahl des Isolierstoffs. (vgl. [1] S.76) Des Weiteren führt die Gleichspannungsbeanspruchung zu Oberflächenladungen. Diese treten bei einer hohen Tangentialfeldstärke an Oberflächen auf. Die Überlagerung von Oberflächenladungen ist ein zentrales Problem von HGÜ-Anwendungen. Die Oberflächenladungen werden kritisch beim Überschreiten der Teilentladungs-Einsetzspannung. Wird die Einsetzspannung erreicht entsteht eine Oberflächenentladung (Gleitentladung) an der Isolierstoffoberfläche. Die auftretenden Gleitentladungen sind Teilentladungen (TE). Bei einer TE kommt es nur zu einer Entladung über eine Teilstrecke des Isoliermediums (gas, flüssig, fest). Wird die Spannung weiter erhöht, kann die Oberflächenentladung schließlich die Gegenelektrode erreichen (komplett Durchschlag des Isoliermediums). Durch die auftretenden TE kann es zur langfristigen Schädigung des Isolierstoffs (z.B. an Kabelendverschlüssen, Freileitungen) kommen. Eine Schädigung kann zum Erosionsdurchschlag des Isolierstoffs führen. (vgl. [1] S. 193) Um das Auftreten

von Oberflächenladung zu minieren, kann eine Silikonbeschichtung, Silikonpaste oder Silikonöl verwendet werden. (vgl. [1] S.297, S.310)

### **3 Literatur**

- [1] Andreas Küchler, Hochspannungstechnik, Heidelberg: Springer 2009.
- [2] BMWI ; BMWI.de;  
<http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/erneuerbare-energien-auf-einen-blick.html>; Stand 19.05.2016
- [3] Energie.de;  
[http://www.energie.de/lexika/lexikon-der-anlagentechnik/begriff/69/spannungsebenen\\_100004010](http://www.energie.de/lexika/lexikon-der-anlagentechnik/begriff/69/spannungsebenen_100004010); Stand:19.05.2016
- [4] M.Meyer W.Boeck K.Möller W Zeangl, Hochspannungstechnik, Springer-Verlag

# Arbeitsbereich und Schalteigenschaften moderner Leistungshalbleiter

## Operating capacity and switching properties of modern power semiconductors

B.Eng. Dennis Schilling

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, d.schilling@tu-bs.de

### Kurzfassung

In dieser Arbeit wurden moderne Leistungshalbleiter näher untersucht und miteinander verglichen. IGBTs und MOSFETs haben Thyristoren wegen ihrer Vorteile im Betrieb nahezu vollständig verdrängt. Nur im Höchstspannungssegment finden Thyristoren aufgrund ihrer hohen Spannungsfestigkeit noch vereinzelt Anwendungen. In Zukunft werden die Thyristoren durch die Weiterentwicklung von MOSFETs und IGBTs vollständig vom Markt verdrängt werden. Ein großes Potenzial weisen zudem Bauelemente aus sogenannten „wide gap materials“ auf. Durch diese neuen Halbleitermaterialien lassen sich in Zukunft noch höhere Spannungsfestigkeiten und geringere Verluste bei Leistungshalbleitern realisieren.

### Abstract

In this work, modern power semiconductors were examined and compared. IGBTs and MOSFETs have thyristors almost completely displaced because of their advantages in operation. Only in the very high voltage segment thyristors find due to their high dielectric strength sporadically applications. In the future, the thyristors will be displaced completely from the market by the further development of MOSFETs and IGBTs. A great potential include such elements of the so-called "wide gap materials". Through these new semiconductor materials could achieve higher withstand voltages and lower losses in power semiconductors in the future.

## 1 Einleitung

Seit der Entdeckung des Transistoreffektes im Jahre 1945, hat die Halbleitertechnologie einen unvergleichlichen Aufschwung erlebt und ist aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Bedingt durch die erneuerbaren Energien, wie Photovoltaik und Windkraft und dem Wunsch die Energie in chemischen Speichern nach Bedarf ein und wieder aus zu speichern nimmt der Wunsch nach verlustarmen Leistungshalbleitern immer weiter zu. Der Trend geht hierbei zu immer größeren Leistungen, welche die Halbleiter beherrschen müssen. [1]

## 2 Funktionsweise moderner Halbleiterleistungsbaulemente

Als Halbleiter werden Elemente bzw. Verbindungen bezeichnet deren elektrische Leitfähigkeit zwischen denen von Metallen und Isolatoren liegen. Die Elemente die heutzutage typischerweise für Halbleiterbauelemente eingesetzt werden sind Silizium und Germanium. Vor allem Bauteile aus Silizium dominieren den Markt. Die Grundlage nahezu aller Leistungshalbleiter bildet hierbei der pn-Übergang. In der **Abbildung 1** ist das Verhalten des pn-Übergangs sowohl in Durchlass- wie auch in Sperrrichtung dargestellt. [1]

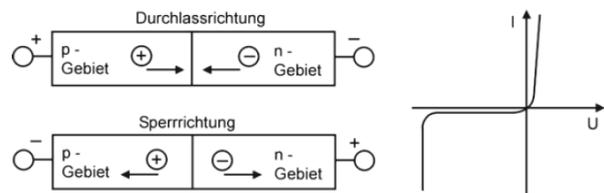


Abb. 1: pn-Übergang in Durchlass- und Sperrrichtung [1]

Ist das p-Gebiet positiv gepolt und das n-Gebiet negativ gepolt so werden, die Löcher im p-Gebiet und die Elektronen im n-Gebiet Richtung pn-Grenze getrieben. Die Leitfähigkeit erhöht sich und der pn-Übergang wird leitend. Ist das p-Gebiet negativ gepolt und das n-Gebiet positiv so werden in beiden Gebieten die Majoritätsträger abgezogen. An dem pn-Übergang entsteht eine sehr schlecht leitende Schicht. Der pn-Übergang sperrt. [1]

Hauptsächlich begrenzend für den Einsatz der Halbleiterbauelemente ist die Wärmeentwicklung, die während des Betriebes des Bauelementes durch Verluste entsteht. So werden Siliziumelemente bei Temperaturen über 150 °C irreparabel beschädigt. Die Verluste bei Halbleiterbauelementen setzen sich im Wesentlichen durch Durchlassverluste und Schaltverluste zusammen. Dargestellt in der **Abbildung 2**. [2]

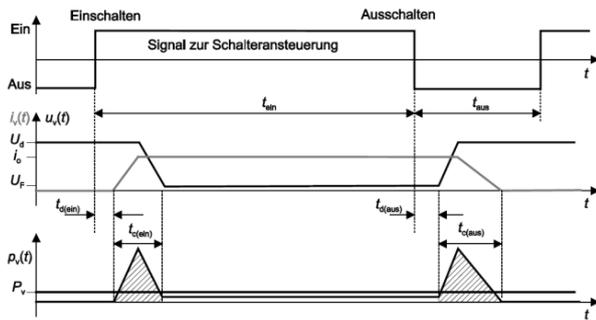


Abb. 2: Zeitverläufe für Schalterstrom, Schalterspannung und Verlustleistung beim Schalter; oben: Ein-Aus-Signal für den Schalter, Mitte: Schalterstrom  $i_s(t)$ , Schalterspannung  $u_s(t)$ , unten: Verlustleistung im Schalter [2]

Die Durchlassverluste  $P_D$  ergeben sich durch den Spannungsfall  $U_F$  der während des leitenden Zustandes besteht. Die Schaltverluste  $P_S$  kommen zustande, weil die Schaltvorgänge nicht unendlich schnell vonstattengehen. Durch die abfallenden und steigenden Flanken kommt es während des Schaltvorganges zu Zeitpunkten, wo hohe Verluste in den Bauelementen auftreten. Die Schaltverluste sind die stärkste Belastung für die Bauelemente. Die Gesamtverluste  $P_V$  ergeben sich aus den Schaltverlusten und den Durchlassverlusten. Die Gesamtverluste berechnen sich mit Gl. (1). [3]

$$P_V = P_D + P_S \quad (1)$$

Die Schaltverluste setzen sich hierbei aus der Einschaltenergie  $W_{on}$ , der Ausschaltenergie  $W_{off}$  und der Schaltfrequenz  $f_s$  zusammen. Die Schaltverluste  $P_S$  verhalten sich proportional zur Schaltfrequenz  $f_s$  und berechnen sich mit der Gl. (2). [3]

$$P_S = (W_{on} + W_{off}) * f_s \quad (2)$$

Da sich die Schaltenergien von unterschiedlichen Bauelementen unterscheiden, können je nach Bauelement unterschiedliche Schaltfrequenzen realisiert werden. Eine zusätzliche Steigerung der Schaltfrequenz kann auch durch zusätzliche Kühlung der Bauelemente erreicht werden. [3]

Durch komplexere Technologien, kleinere Halbleiterstrukturen und exakte Beherrschung der Prozesse nähern sich heute die Eigenschaften moderner Leistungshalbleiter unaufhaltsam den physikalischen Grenzen des Halbleitermaterials Silizium[4]. Deshalb rücken Materialien in den Vordergrund der Forschung

die einen deutlich größeren Abstand zwischen Valenz- und Leitungsband aufweisen. Sogenannte „wide gap materials“, wie z.B. Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). In der **Tabelle 1** sind ausgewählte Eigenschaften dieser Materialien im Vergleich mit Silizium dargestellt.

Tabelle 1: Eigenschaften von Halbleitermaterialien mit weitem Bandabstand im Vergleich zu Silizium [4]

Parameter			Si	SiC	GaN
Bandgap Energie	$E_g$	ev	1,12	3,26	3,39
Eigenleitungs-dichte	$n_i$	$\text{cm}^{-3}$	$1,4 * 10^{-10}$	$1,4 * 10^{-10}$	$1,4 * 10^{-10}$
Durchbruch-feldstärke	$E_c$	MV/cm	0,23	2,2	3,3
Driftgeschwin-digkeit	$v_{sat}$	cm/s	$1 * 10^7$	$2,7 * 10^7$	$2,5 * 10^7$
Wärmeleit-fähigkeit	$\lambda_g$	W/cmK	1,5	3,8	1,3

Aus der Tabelle 1 geht hervor, dass die Durchbruchfeldstärke dieser Materialien um ca. 20-30 mal höher ist, als die von Silizium. Es lassen sich höhere Sperrspannungen realisieren. Zudem kann durch die bessere Wärmeleitfähigkeit auch eine höhere Leistungsdichte erreicht werden. Durch die bessere Driftgeschwindigkeit lassen sich auch höhere Schaltfrequenzen realisieren, weil verbleibende Ladungsträger schneller „weggeräumt“ werden. [4]

### 3 Literatur

- [1] Lutz, Josef: Halbleiter-Leistungsbaulemente : Physik, Eigenschaften, Zuverlässigkeit. 2. Aufl.. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2012.
- [2] Probst, Uwe: Leistungselektronik für Bachelors : Grundlagen und praktische Anwendungen. 3. Aufl. München: Hanser Fachbuchverlag, 2015.
- [3] Specovius, Joachim: Grundkurs Leistungselektronik : Bauelemente, Schaltungen und Systeme. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2015.
- [4] Wintrich, Arendt ; Nicolai, Ulrich ; Tursky, Werner ; Reimann, Tobias ; GmbH, SEMIKRON International: Applikationshandbuch Leistungshalbleiter. 1. Aufl. Ilmenau: ISLE, 2010.

# Kernfusion - Energieerzeugung der Zukunft?

## Nuclear fusion - Energy source for the future?

Julian Hahne, B. Sc.

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, j.hahne@tu-bs.de

### Kurzfassung

Die Fusion von Atomkernen in Plasmen stellt die wichtigste Energiequelle im Weltall dar. Hierdurch wird indirekt die gesamte auf der Erde vorhandene Energie erzeugt. Angesichts des steigenden weltweiten Energiebedarfs, der begrenzten Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe und der fluktuierenden Erzeugung durch erneuerbare Energieträger bietet die Fusionsforschung eine Möglichkeit für eine zukünftige wirtschaftliche und effiziente Energieerzeugung. Dieser Vortrag beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen der Kernfusion, den verschiedenen Reaktortypen und der Frage ob eine Energieversorgung durch Fusionskraftwerke in Zukunft möglich und sinnvoll sein könnte.

### Abstract

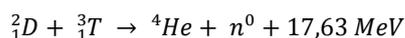
The fusion of atomic nuclei in plasmas represents the main source of energy in the universe. Thereby, the sun produces indirectly all of the energy on Earth. Given increasing global energy demand, the limited availability of fossil fuels and the fluctuating generation of renewable energy, fusion research offers a way for future economic and efficient energy. This paper deals with the theoretical basis of nuclear fusion, the different types of reactors, and the question whether a power supply by fusion power plants in the future could be possible and useful.

## 1 Einleitung

Die erste Beobachtung einer nuklearen Fusionsreaktion erfolgte 1919 durch Rutherford, als er Stickstoffatome mit  $\alpha$ -Teilchen beschoss. Während der Entwicklung der am 31.10.1952 gezündeten Wasserstoffbombe befasste man sich schon mit ersten Gedanken zur friedlichen Nutzung der Kernfusion. 1951 wurde daraufhin das erste Programm zur Fusionsforschung am Stellerator-Reaktortyp in den USA gestartet. Ein Jahr später begannen Forschungen am Reaktortyp Tokamak in der Sowjetunion. In Deutschland startete die Fusionsforschung 1960 mit der Gründung des Institutes für Plasmaphysik in Garching durch die Max-Planck-Gesellschaft. Hier begannen auch 1988 die Planungsarbeiten für das sich derzeit in Südfrankreich im Bau befindliche internationale Projekt ITER. [1]

## 2 Grundlagen der Kernfusion

Verschmelzen zwei Atomkerne miteinander, wird aufgrund des Massendefekts die Bindungsenergie der Kerne freigesetzt. Bei der Fusion leichter Atomkerne wird mehr Energie freigesetzt als bei der Fusion von schweren Kernen. Den größten Energieertrag mit 17,63 MeV liefert die Fusion der beiden Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium.



Die freiwerdende Energie liegt in Form von kinetischer Energie des Neutrons vor. Beide Isotope sind leicht verfügbar und nahezu unbegrenzt auf der Erde vorhanden. Deuterium ist zu 0,015 % in Wasser enthalten und kann

durch Elektrolyse gewonnen werden. Tritium hat kein natürliches Vorkommen und wird künstlich aus dem in Gestein enthaltenen Lithium hergestellt. Der jährliche Energiebedarf eines durchschnittlichen Haushalts ist durch 75 mg Deuterium, enthalten in 2 l Wasser, und 225 mg Lithium, enthalten in 250 g Gestein, zu decken. Dies entspricht dem Brennwert von 1000 l Erdöl. Um die Fusion von Atomkernen zu ermöglichen, ist es notwendig, dass zwei Atomkerne mit hoher kinetischer Energie aufeinandertreffen. Die Verschmelzung der Kerne erfolgt nur, wenn die Energie der Teilchen hoch genug ist, um die elektrostatische Abstoßung der positiv geladenen Atomkerne zu überwinden. Dies geschieht nur bei Bedingungen, wie sie im Inneren der Sonne herrschen. Diese entsprechen einer Temperatur von 10 Mio. °C und einem Druck von 2 Mrd. bar. Eine hohe Temperatur erfordert eine gute Wärmeisolation. Diese ist auf der Erde nur durch ein Vakuum, welches Konvektion und Wärmeleitung unterbindet, realisierbar. Da ein Vakuum aber keinen hohen Druck zulässt, sind dadurch höhere Temperaturen in der Größenordnung von 100 Mio. °C nötig. Bei solchen Bedingungen liegen die Teilchen im Plasmazustand vor, das heißt die Elektronen sind von den Atomrümpfen gelöst und beide sind frei beweglich. Der Einschluss des Plasmas erfolgt durch Magnetfelder. [2]

## 3 Literatur

- [1] U. Stroth, Plasmaphysik, Wiesbaden: Springer Vieweg+Teubner, 2011.
- [2] M. Borlein, Kerntechnik, Würzburg: Vogel Verlag, 2009