



Technische  
Universität  
Braunschweig



# SEMINAR

## STUDIENSEMINAR FÜR ELEKTRISCHE ENERGIESYSTEME

Ergebnisberichte Teil 2

Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

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

Sommersemester 2016

**Braunschweig, 13.07.2016**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zeitplan</b>	<b>2</b>
Kuang - HGÜ-Kabel –Einschränkungen der Technologie . . . . .	4
Bericht . . . . .	4
Präsentation . . . . .	8
Moos - Neue Fertigungsmöglichkeiten durch 3D-Drucker für Prototyping . . . . .	17
Bericht . . . . .	17
Präsentation . . . . .	21
Gundelach - Blitzschäden in Deutschland . . . . .	36
Bericht . . . . .	36
Präsentation . . . . .	39
Quadhani - Superconductivity Applications in Power Systems: Recent Advances . . . . .	49
Bericht . . . . .	49
Präsentation . . . . .	53
Huang - Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen . . . . .	63
Bericht . . . . .	63
Präsentation . . . . .	68
Xufeng - Isoliersysteme für HGÜ Anwendungen – Herausforderungen und Konzepte . . . . .	83
Bericht . . . . .	83
Präsentation . . . . .	87
Schlling - Arbeitsbereich und Schalteigenschaften moderner Leistungshalbleiter . . . . .	98
Bericht . . . . .	98
Präsentation . . . . .	102

## Zeitplan am 13.07.2016 im Seminarraum (elenia)

Zeit	Typ	Referent	Thema
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	Pause		
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	Mittag		
13:00-14:00	Vortrag	Xufeng Li	Isoliersysteme für HGÜ Anwendungen – Herausforderungen und Konzepte
	Vortrag	Dennis Schilling	Arbeitsbereich und Schalteigenschaften moderner Leistungshalbleiter



# HGÜ-Kabel - Einschränkungen der Technologie

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

## Kurzfassung

Der Beitrag umfasst zwei Technologien für HGÜ-Kabel (MI-Kabel, VPE-Kabel). Er beschäftigt sich mit dem Aufbau, der Isolierung und der Montage 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 installation 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 Übertragungsverluste, keine Blindleistung und günstige Kabel- bzw. Freileitungskosten [1]. Bei Hochspannungsgleichstromübertragung spielen Kabel eine wichtige Rolle. Kabel können die Betriebsspannung und eventuelle auftretende Überspannung isolieren, aufgrund der Anwendung der unterschiedlichen Kunststoffe, welche die als Leiter genutzten Adern umgeben und gegeneinander isolieren. Elektrische Leiter des Kabels bestehen meist aus Kupfer, seltener auch aus Aluminium. MI-Kabel werden als Sicherheitskabel in vielen Bereich eingesetzt. Neuerdings steht das extrudierte 525 kV-VPE-Kabelsystem erfolgreich zur Verfügung.

## 2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die zum Verständnis der HGÜ-Kabel notwendigen Grundlagen erarbeitet und zusammengefasst. Kabel werden mit unterschiedlichen Isoliersystemen aufgebaut [2]. MI-Kabel wurden seit 1954 in der höchsten Gleichspannungsebene für Stromübertragung verwendet. MI-kabel haben eine lange Historie, hohe Sicherheit und hohe Zuverlässigkeit. Heutzutage werden MI-Kabel bis zu Spannung 525 kV eingesetzt, z.B. bei Offshore-Anlagen. Innovative Systeme nutzen neuerdings ein neues vernetztes Polyethylen DC Isoliermaterial. VPE isolierte Kabel haben ökonomische und ökologische Vorteile. Es tritt keine Umweltgefährdung durch austretendes Isolieröl auf. Zusätzlich sind die Dielektrizitätszahl und der Verlustfaktor geringer und dadurch sind dielektrischen Verluste wesentlich geringer [3]. Im Gegensatz zu klassischen Kabelsystemen ergeben sich erhebliche Ressourcen, Kosten- und Zeitsparungen. Aufgrund der einfacheren Garnituren und des geringen Gewichts sind das Kabel einfacher zu transportieren, zu verlegen und zu handhaben [3]. Diese VPE-Technologie

eignet sich für sehr große Entfernungen. Raumladung und niedrige Dauer-temperaturbeständigkeit sind zwei Einschränkungen für VPE-Kabel. Durch die Ergänzung der anorganischen Metalloxide und Nanokomposite Materialien können die Durchschlagsfeldstärke erhöht werden, die Raumladung wird verringert. Die niedrige Dauertemperaturbeständigkeit können mit Hilfe von bessere Vernetzung der VPE-Isolierung gesteigert werden.

## 3 Hauptteil

### 3.1 MI-Kabel

Früher wurden klassische MI-Kabel eingesetzt. Es steht bei MI-Kabeln keine modernen kunststoff-isolierten Kabel zur Verfügung, die für Hochspannungsebene einsetzbar sind. Im Ölkabel wird das Papier mit dünnflüssigem Mineralöl imprägniert, dadurch ergibt sich eine stabilere Isolierung, die für den Hochspannungsbereich geeignet ist. Das klassische Höchstspannungskabel ist das auch heute noch eingesetzte Niederdruck-Ölkabel. Im folgenden Bild wird der Aufbau eines Niederdruck-Ölkabels dargestellt.



Bild 1 Niederdruck-Ölkabel [4]

### 3.1.1 Aufbau

Der Leiter besteht aus Kupfer oder Aluminium. Über dem Leiter werden einige Lagen Rußpapier aufgebracht. Diese leitfähigen Rußpapier werden zur Leiterglättung benötigt. Die Isolierung besteht aus vielen Lagen Höchstspannungskabelpapier. Über die Isolierung wird eine Feldbegrenzung aus Rußpapier und metallisiertem Kabelpapier aufgebracht. Die Aderabschirmung besteht aus Rußpapier und H-Folie. Durch Heizen und Evakuieren wird die Feuchtigkeit entzogen, danach wird die Isolierung unter Vakuum mit dünnflüssigem Kabelöl getränkt. Die getränkte Ader erhält einen Bleimantel, unterhalb des Bleimantels wird die Ader durch einen Nachtränkungsprozess vollständig getränkt, damit die Ader keine Vakuolen enthält. Wegen der geringen mechanischen Festigkeit von Blei braucht eine Druckschutzbandage aus unmagnetischen Stahlbändern. Über einem Korrosionsschutz für den Metallmantel wird eine äußere Umhüllung aus Polyvinylchlorid extrudiert. Die druckfesten Metallmäntel reduziert das Eindringen von Feuchtigkeit in die Isolierung [4].

### 3.1.2 Garnituren

Niederdruck-Ölkabel können mit allen heute üblichen Endverschlüssen angeschlossen werden. Als Beispiel wird die SF<sub>6</sub>-isolierten Schaltanlage dargestellt.

Das Kabel wird in dem öldruckhydraulischen System in jedem Betriebszustand vollständig mit Öl gefüllt. Die ölgetränkten Wickel steuert das elektrische Feld. Die sich im Endverschlußkörper aus Porzellan oder Gießharz befindet. Die Feldsteuerung im Endverschluß erfolgt entweder durch die Form des Wickels selbst oder durch metallische Einlagen in einer zylinderförmigen Wickelkeule [4].

### 3.1.3 Montage

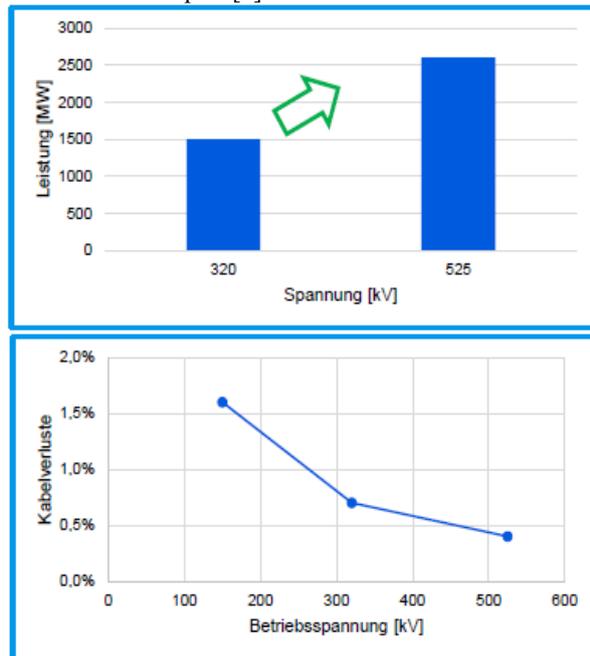
Alle Montagearbeiten werden quasi unter Öl durchgeführt, d.h. während der Montage an einer Muffe oder einem Endverschluß werden jeweils von anderen Ende der Kabelverbindung her Öl nachgedrückt [4], damit das Eindringen von der Luft oder Feuchtigkeit vermieden wird. Eine Hohe Reinheit ist auch notwendig.

An den Garnituren gehören Vakuumpumpen zu den Montagegeräten, zum Evakuieren der Papierwickel. Mit den Ölaufbereitungsanlagen wird das fließende Öl in Wannen aufgefangen, zur erneuten Verwendung gereinigt und entgast.

## 3.2 VPE-Kabel

Früher werden Kunststoff-isolierte Gleichstromkabel nur bis 320 kV eingesetzt. Heutzutage werden neue Kunststoffisolierte Gleichstromkabel bis 525 kV erprobt. Wegen der steigenden Spannung, steigt die Übertragungsleistung und verringern sich auch die Kabelverluste. Bei der maximale Betriebsspannung 320 kV ist die maximale Übertragungsleistung bis 1000 MW bei Aluminium und 1500 MW bei Kupfer. Bei der maximale Betriebsspannung 525 kV ist die maximale

Übertragungsleistung bis 2000 MW bei Aluminium und 2600 MW bei Kupfer [5].



**Bild 2** Leistungs- und Kabelverluständerung bei Betriebsspannung 320 kV und 525 kV. [5]

Im Bild ist der Aufbau von VPE-Höchstspannungskabel dargestellt.



**Bild 3** Aufbau eines VPE-Höchstspannungskabels [1]

1. Kupferleiter
2. Innere Leiterschicht
3. VPE-Isolierung
4. Äußere Leiterschicht
5. Kupferschirm
6. Leitfähige Bänder
7. Aluminium Schichtenmantel
8. PE-Mantel

Bei VPE-isolierten Hochspannungskabeln werden runde, verdichtete, mehrdrätige Leiter aus Kupfer oder Aluminium aufgebaut.

### 3.2.1 Isolierung

Vernetzte Polyethylen wird als ein extrudierter thermoplastischer Werkstoff für die Isolierung des Kabels eingesetzt. Im Vergleich zu anderen Isolierstoffen hat Polyethylen eine niedrige Dielektrizitätszahl. Aufgrund des festen Dielektrikums sind keine Öl- oder Druckgassysteme nötig, und es entsteht keine Öl- oder Druckverlust. Weiterhin hat VPE eine gute elektrische Festigkeit und eine ausgezeichnete thermische Stabilität. Bei dünnen Schichten ( $d < 1$  mm) ergeben sich sehr hohe Durchschlagsfeldstärken ( $E_d > 100$  kV/mm). Bei vernetztem Polyethylen werden die Durchschlags-

feldstärken von 40-50 kV/mm angegeben. Nachteil bei VPE ist die niedrige Dauertemperaturbeständigkeit, die nur 90°C beträgt.

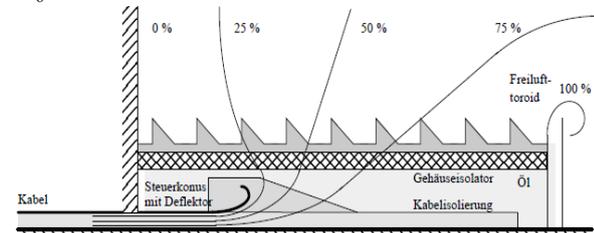
### 3.2.2 Die Schirmung und der Außenmantel

Über der extrudierten äußeren Leitschicht wird eine Lage aus leitfähigen Bändern aufgebracht. Der Kupferdrahtschirm selbst besteht aus spiralförmig angeordneten Schirmdrähten. Der Schirmbereich wird längswasserdicht ausgeführt. Dies geschieht durch das Einbringen von Textil- oder Vliesbändern mit einem quellfähigen Substrat, z.B. bei der Berührung mit Wasser, danach beginnt das quellfähige Substrat stark aufzuquellen und bildet auf diese Weise eine Wassersperre in Längsrichtung [6].

VPE-Kabel erhalten einen Außenmantel aus Polyethylen mit hoher Dichte als einen zuverlässigen Schutz gegen mechanische äußere Einwirkung. Bei querwasserdichtem Kabelaufbau schützt ein Schichtenmantel, welcher mit dem darüber extrudierten Polyethylenmantel fest verschweißt ist. Damit verringert das Kabel die Feuchtigkeit, verhindert eine radiale Wasserdampf-Diffusion. Optional können zusätzliche leitfähige Schichten zusammen mit dem PE-Außenmantel extrudiert werden [6].

### 3.2.3 Garnituren

Für die Garnituren des VPE-Kabels sind Kabelendverschlüsse und Kabelmuffen verfügbar. Bei Kabelendverschlüssen gibt es drei Typen: Freiluftendverschluss, Transformatorendverschluss und SF<sub>6</sub>-Endverschluss.



**Bild 4** Kabelendverschlüsse mit Steuerkonus und Gehäuseisolator [2]

Als Beispiel wird ein Freiluft-Endverschluss kurz vorgestellt. Auf die freigelegte Kabelisolierung wird ein Steuerkonus aus Äthylen-Propyläen-Elastomer oder Silikonelastomer mit integriertem leitfähigem Deflektor geschoben und mit der äußeren Leitschicht des Kabels kontaktiert. Durch die Kontur des Deflektors werden die Potentiallinien erweitert, dass sich im Außenraum beherrschbare tangentielle Feldstärke ergeben [2]. Der Steuerkonus befindet sich in einem Gehäuseisolator, in denen wird isoliertes Medium ausgefüllt. Der Steuerkonus wird in diesem Raum erfüllt, um einen groß Feldstärke für das umgebende Isoliermedium zu geben. Die Transformator-Einbauendverschlüsse besitzen einem Isolator aus Epoxidharz mit einer integrierten Isolierstrecke. Die Einbauendverlüsse für SF<sub>6</sub>-gasisolierte Schaltanlagen werden mit einem Epoxidharz-Isolator ausgeführt.

Bei Kabelmuffen dienen der Verbindung zwei Kabelstücke. Neuerdings können bei VPE-Kabel Aufschiebemuffen aus EPR oder Silikonelastomer eingesetzt.

### 3.2.4 Prüfung von Kabelsystemen

Bevor der Inbetriebnahme werden VPE-Kabel geprüft. Durch die Prüfung wird die Qualität der Isolation garantiert, keine Beschädigung und Fehlerrisiko. Es gibt zwei Prüfungsarten, Stückprüfung für Einzel-Komponente und Vor-Ort-Prüfung an Kabelsystemen.

Durch die Stückprüfung wird die Hohlraumfreiheit des Kabels durch Teilentladungsmessung nachgewiesen. Aufgrund eines empfindlichen Dielektrikums müssen VPE-Kabel praktische teilentladungsfrei sein. Dabei gibt es ein Problem. Es muss sehr hohe Spannungen angelegt werden, was spezielle Prüfendverschlüsse erfordert. Sehr hohe Gleichspannungspegel können darüber hinaus Vorschädigung des Dielektrikums hervorrufen.

Bei der Vor-Ort-Prüfung werden die montierten Kabelanlagen geprüft. Die Schwachstellen von Kabelsystemen sind Muffen und Endverschlüssen mit ihrer Fuge, deshalb ist die Vor-Ort-Prüfung der montierten Kabelanlage zum Nachweis der Einschaltbereitschaft erforderlich. VPE-Kabel haben eine sehr schlechte Sensitivität, wenn z.B. Beschädigung entsteht, werden in den Versuchen nicht erkannt. Mit einer Teilentladungsmessung können die Schwachstellen aufgedeckt werden. Die Schwachstellen stammen von kleinen Hohlräumen in Dielektrikum, wo unter Einfluss einer ausreichend hohen Spannung Entladung entstehen, die in diesem Hohlraum die Isolierung teilweise überbrücken. Mit geeigneten Messverfahren können die dort entstehenden Teilentladung detektiert und nach ihrer Größe und ihrem Entstehungsort längs des Kabelstretks zugeordnet werden. Sehr hohe Gleichspannungsprüfpegel können darüber hinaus Vorschädigungen des Dielektrikums hervorrufen. Gleichspannungsprüfungen werden deshalb nur noch genutzt, um die Unversehrtheit der äußeren Kabelumhüllung zu überprüfen [2].

### 3.2.5 Einschränkungen und Lösung

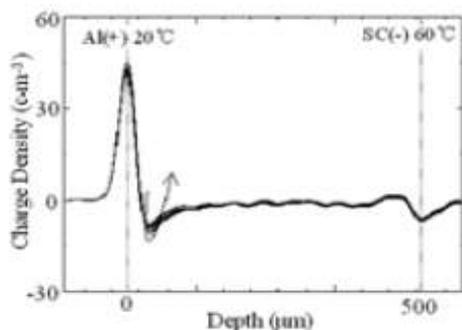
In der Vergangenheit neigen VPE-Kabel bei Gleichspannungsbeanspruchung zur Bildung von Raumladung. Diese Raumladung führen bei einer Polaritätsumkehr zu einer Spannungsüberhöhung im Dielektrikum und damit zur Zerstörung des Kabels. Jetzt durch den Einsatz von IGBT-Schaltstationen lässt sich eine Leistungsflussumkehr auch ohne Polaritätsumkehr erreichen, so dass auch eine Gleichstromübertragung mit VPE-Kabeln für VSC-Technologie möglich ist.

Raumladung ist eine große Einschränkung für VPE-Kabel. Wenn Raumladung entsteht, führt diese zu einer elektrischen oder thermischen Alterung. Danach tritt eine Schädigung bzw. eine Verschlechterung der elektrischen Festigkeit auf, die Isoliermaterialien werden physikalisch abgebaut und chemisch zerstört. Die andere Einschränkung ist die niedrige Dauertemperatur-beständigkeit. Eine niedrige Dauertemperaturbeständigkeit beeinflusst die

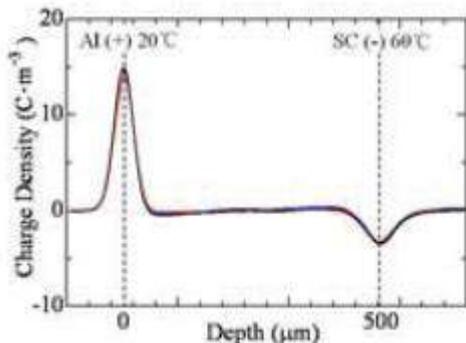
elektrische Leitfähigkeit, die Durchschlagfeldstärke wird verringert.

Um die Einschränkungen zu vermeiden, verwendet man zurzeit drei Methoden. Früher wurde anorganische Metalloxide z.B. MgO ergänzt, damit Durchschlagfeldstärke erhöht wird. MgO wird nur für 250kV klassische Kabel eingesetzt. Einige Versuche beweisen, dass die Nano-Stufige Dispersion wichtig für die Isolierung ist. Dann addiert man die Nanokomposite Magnesiumoxid. Die Nanokomposite Materialien haben eine große Attraktion zu dem Ladungsträger. Die Bewegung von dem Ladungsträger wird verhindert, es können die Raumladungen vermieden werden, und dadurch die Eigenschaft von Dielektrikum verbessern. Für die Vernetzung der VPE-Isolierung wird Aromatisch Hydrocarbon addiert, es verhindert die Sammlung der Raumladung, und damit wird die Durchschlagfeldstärken erhöht und Raumladung reduziert [7].

Als Beispiel wird einen Versuch kurz vorgestellt. Niedrige Dichte Polyethylen und nanokomposite niedrige Dichte Polyethylen werden als zwei Proben für die Raumladungsmessung unter 30 kV/mm durchgeführt [8].



**Bild 5** Raumladungsdichte des Niedrigen Dichte Polyethylen [8]



**Bild 6** Raumladungsdichte des nanokomposite niedrigen Dichte Polyethylen [8]

Dieser Zwei Bilder beweisen, dass nanokomposite Polyethylen die Raumladung besser vermeidet.

## 4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die heute gebräuchlichsten Hoch- und Höchstspannungskabelarten vorgestellt. Ihr Kabelaufbau wird beschrieben, die unterschiedliche Isolierung und die Montage wird erläutert. MI-Kabel

werden als Sicherheitskabel im vielen Bereiche eingesetzt. Es steht bei MI-Kabel kein Kunstisolierstoff zur Verfügung. Die klassische Isolierung besteht aus Papierbändern. Im Gegensatz zur MI-Kable haben VPE-Kabel viele ökonomische und ökologische Vorteile, z.B. ohne Isolieröl trete keine Umweltgefährdung, niedrigerer Werte für die Dielektrizitätszahl führen zu geringere dielektrischen Verlusten. Diese VPE-Technologie eignet sich für sehr große Entfernungen. Raumladung und niedrige Dauertemperaturbeständigkeit sind zwei Einschränkungen für VPE-Kabel. Durch die Ergänzung der anorganischen Metalloxide und Nanokomposite-Materialien können die Durchschlagfeldstärken erhöht werden, und die Raumladung verringert. Die niedrige Dauertemperaturbeständigkeit kann mit Hilfe besserer Vernetzung der VPE-Isolierung gesteigert werden.

## 5 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.
- [4] Speck Dieter, Energiekabel im EVU Entwicklung, Technik, Anwendung, Prüfung und Betriebserfahrung der Energiekabel vom Niederspannungs- bis zum Höchstspannungsnetz, Renningen-Malmsheim, 1994.
- [5] [https://www.energie-innovativ.de/fileadmin/user\\_upload/energie\\_innovativ/Energiedialog/Dokumente/2015-01-17-Erdverkabelung-HGUE-Habild.pdf](https://www.energie-innovativ.de/fileadmin/user_upload/energie_innovativ/Energiedialog/Dokumente/2015-01-17-Erdverkabelung-HGUE-Habild.pdf) [Zugriff am 17.01.2015].
- [6] [http://www.suedkabel.de/cms/upload/Accessori-es\\_High\\_Voltage/XLPE\\_insulated\\_power\\_cables\\_and\\_systems.pdf](http://www.suedkabel.de/cms/upload/Accessori-es_High_Voltage/XLPE_insulated_power_cables_and_systems.pdf) [Zugriff am 2010].
- [7] Yoshinao Murata and Mamoru Kanaoka, Development History of HVDC Extruded Cable with Nanocomposite Material
- [8] Kai Wu, Xi Chen, Xia Wang, Yonghong Cheng and L.A.Dissado, Study of the space charge behavior in polyethylene nano-composites under temperature gradient



## HGÜ-Kabel - Einschränkungen der Technologie

Haozhe Kuang, 12.07.2016

### Agenda

Einleitung

MI-Kabel

VPE-Kabel

Zusammenfassung



## Einleitung

### Vorteile einer HGÜ

- Erhöhung der Effizienz der Stromübertragung
- Keine sichtbare Leitungsführung (Erhöhung der Akzeptanz)
- Energieübertragung von Offshore Plattformen

### Notwendige Kabeleigenschaften

- Isolierung der Betriebsspannung und Überspannungen
- Vermeidung von Umweltgefährdungen



Quelle: <http://www.abb.de>; Stand: 08,07,2016

# Agenda

MI-Kabel

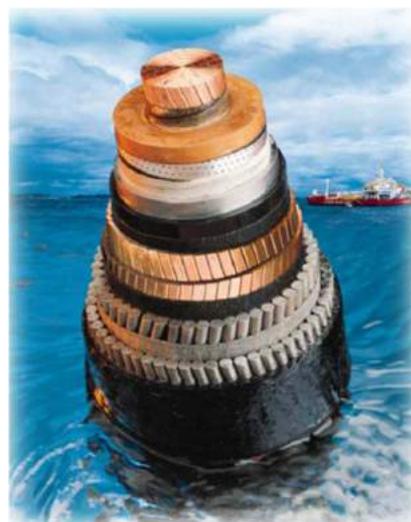
Aufbau und Funktionsweise

Garnituren und Montage

## MI-Kabel

### Aufbau und Funktionsweise

- Leiter aus Kupfer oder Aluminium
- Höchstspannungskabelpapier als Isolierung
- Trocknungs und Tränkungsprozesses
- Bleimantel
- Druckschutzbandge
- Korrosionsschutz

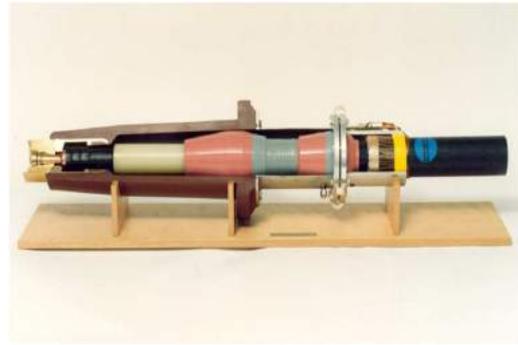


Quelle: www.Nexans.com; Stand: 08,07,2016

# MI-Kabel

## Ganituren und Montage

- Befüllung in dem Ölhydraulischen System
- Feldsteuerung
- Trockenheit und Reinheit notwendig
- Vakumpumpen als Montagegeräte



Quelle: hsu-hh.de

## Agenda

VPE-Kabel

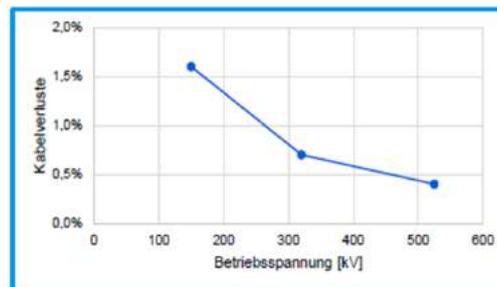
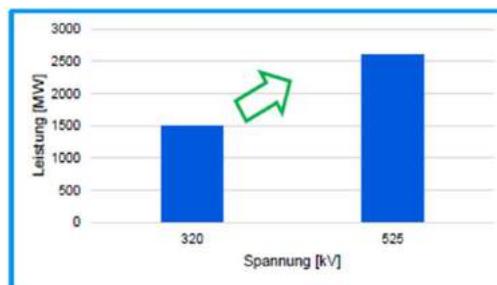
Aufbau und Funktionsweise

Prüfung von Kabelsystemen

Einschränkungen und Lösungen

## VPE-Kabel

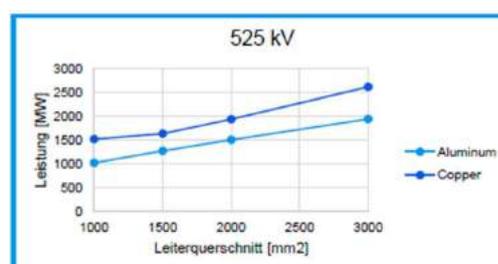
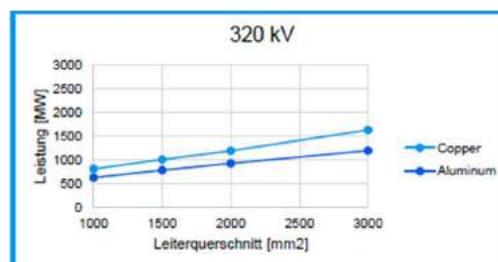
- Erhöhung der Spannung von 320kV bis 525kV
- Erhöhung der Übertragungsleistung von 1500MW bis 2500MW
- Verringerung des Kabelverlustes



Quelle: Erdverkabelung im Bereich der HGÜ-Leitung, ABB AG, 17,01,2015

## VPE-Kabel

- Max. Betriebsspannung: 320kV
- Max. Übertragungsleistung
  - Aluminium: 1000MW
  - Kupfer: 1500MW
- Max. Betriebsspannung: 525kV
- Max. Übertragungsleistung
  - Aluminium: 2000MW
  - Kupfer: 2600MW

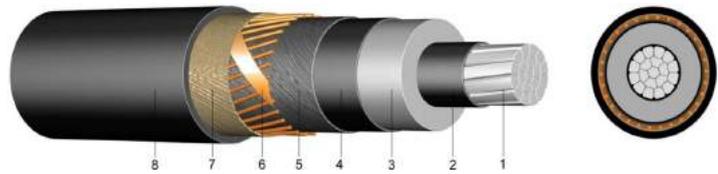


Quelle: Erdverkabelung im Bereich der HGÜ-Leitung, ABB AG, 17,01,2015

## VPE-Kabel

### Aufbau und Funktionsweise

- Leiter aus Kupfer oder Aluminium
- VPE Isolierung
  - Niedrige Dielektrizitätszahl
  - Gute Festigkeit und Stabilität
  - Niedrige Dauertemperaturbeständigkeit
- Kupferdrahtschrim
- Außenmantel aus beschichtetem Aluminiumband



1. Kupferleiter
2. Innere Leiterschicht
3. VPE-Isolierung
4. Äußere Leiterschicht
5. Kupferschirm
6. Leitfähige Bänder
7. Aluminium-Schichtenmantel
8. PE-Mantel

Quelle: <http://www.allkabel.eu>; Stand: 08,07,2016

## VPE-Kabel

### Prüfung von Kabelsystemen

- Stückprüfung für Einzelkomponent
  - Hohlraumfreiheit durch Teilentladungsmessung
- Vor-Ort-Prüfung für Kabelsystemen
  - Keine Betriebsgefährdungen
  - Verlässliche Einschaltbereitschaft



Quelle: Erdverkabelung im Bereich der HGÜ-Leitung, ABB AG, 17,01,2015

## VPE-Kabel

### Einschränkungen

- Entstehung von Raumladung
  - Schädigung der elektrischen Festigkeit
  - Zerstörung der Isoliermaterialien
  - Alterung der Isolation
- Niedrige Dauertemperaturbeständigkeit
  - Verringerung der Durchschlagfeldstärke



Quelle: www.Südkabel.de; Stand: 08,07,2016

## VPE-Kabel

### Lösung

- Ergänzung durch anorganische Metalloxide ( $MgO$ ,  $SiO_2$ )
  - Erhöhung der Durchschlagfeldstärke
- Ergänzung durch Nanokomposite Materialien
  - Große Attraktion zu dem Ladungsträger
  - Verhinderung der Bewegung von dem Ladungsträger
- Verbesserung der Vernetzung der VPE-Isolierung (Aromatic Hydrocarbon)
  - Verhinderung der Sammlung von Raumladung

## Zusammenfassung

- Aufbau und Wirkungsweise des HGÜ-Kabels
- Ganituren und Montage des HGÜ-Kabels
- Prüfung von Kabelsystemen
- Einschränkungen und Lösungen



Quelle: <http://www.abb.de>; Stand: 08,07,2016

## Fragen

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit**



Quelle: <http://de.slideshare.net>; Stand: 26.06.2016

## Quelle

1. Quelle: <http://www.abb.de>
2. Quelle: [www.Nexans.com](http://www.Nexans.com)
3. Quelle: [hsu-hh.de](http://hsu-hh.de)
4. Quelle: Erdverkabelung im Bereich der HGÜ-Leitung, ABB AG, 17,01,2015
5. Quelle: <http://www.allkabel.eu>
6. Quelle: [www.Südkabel.de](http://www.Südkabel.de)
7. Quelle: <http://de.slideshare.net>

# 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 Einzelteilverfertigungen 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. Die Aushärtung der Kontur erfolgt in der x-y-Ebene, die Bewegung der Bauplattform in z-Richtung. 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 Hauptteil

Zunächst werden einige 3D-Druckverfahren beschrieben. Im Anschluss werden einige Eigenschaften der einzelnen Verfahren erläutert.

### 3.1 AM Verfahren

#### 3.1.1 3D-Printing

Ein pulverförmiges Ausgangsmaterial wird Schichtweise mit einer Walze in den Bauraum eingebracht. Die Kontur

wird durch ein punktförmig über Druckköpfe eingebrachtes Bindemittel ausgehärtet. Durch die Verwendung von farbigen Bindemitteln können farbige Bauteile hergestellt werden. Als Stützmaterial dient das überschüssige Pulver, welches das den fertiggestellten Bereich vollständig umgibt. Um eine höhere Stabilität zu erreichen können die meist spröden Bauteile mit beispielsweise mit Epoxidharz infiltriert werden. [1]

### 3.1.2 Laminierverfahren

Papier- oder Kunststofffolien mit thermisch aktivierbaren Oberflächen

Durch heiße Walzen wird die Folie auf die vorherige Schicht aufgebracht. Die Kontur wird mit einem Messer Laser- oder Wasserstrahl so ausgeschnitten, dass das überschüssige Material anschließend leicht entfernt werden kann. Ausschneiden der Kontur mit Messer, Laser- oder Wasserstrahl

Es können Folien mit gebundenem Pulver (Green Tape) verwendet werden, welche im Anschluss gesintert werden müssen. [1]

### 3.1.3 Lasersintern und Laserschmelzen

Verwendung finden pulverförmige Kunststoff-, Metall-, oder Keramikwerkstoffe.

Das pulverförmige Material wird schichtweise mit einer Walze auf die Arbeitsplattform aufgetragen. Die gewünschte Kontur wird in jeder Schicht durch einen Laser oder Elektronenstrahl aufgeschmolzen. Nach jeder Schicht wird die Arbeitsplattform um eine Schichtdicke abgesenkt. Als Stützstruktur kann das nicht aufgeschmolzene Material dienen. Zur Vermeidung von Bauteilverzug ist bei metallischen Werkstoffen eine Stützstruktur aus aufgeschmolzenem Material vorzusehen, die eine gleichmäßige Wärmeabfuhr zur Arbeitsplattform gewährleistet.

Beim Lasersintern werden die Pulverteilchen an ihrer Oberfläche aufgeschmolzen und versintert, beim Laserschmelzen wird das Pulverteilchen komplett aufgeschmolzen und so mit der vorherigen Schicht verbunden.

Metallische Laserschmelz-Werkstücke haben ähnliches Festigkeitsverhalten wie Schmiedeteile, die Oberflächen müssen allerdings nachbearbeitet werden, was die Möglichkeit komplexe Strukturen zu erzeugen einschränkt.

Um eine Reaktion mit dem Luftsauerstoff zu verhindern wird dieses Verfahren unter Schutzgas durchgeführt.

Eine spezielle Form des Lasersinterns ist das Maskensintern. Es werden, wie beim Lasersintern pulverförmige Ausgangswerkstoffe verwendet. Zum Aufschmelzen der Kontur wird flächig Infrarot-Licht über eine Maske eingebracht. [1]

### 3.1.4 Stereolithographie

Ausgangsmaterial bei der Stereolithographie (SL) ist ein photoreaktiver flüssiger Kunststoff (Resin) der sich in einem Behälter mit einer absenkenden Bauplattform befindet. Die Bauplattform wird jeweils um eine Schichtdicke abgesenkt und das flüssige Material wird

gleichmäßig über der vorherigen Schicht verteilt. Die Kontur einer Schicht wird durch UV-Licht ausgehärtet, das UV-Licht wird punktförmig durch einen UV-Laser eingebracht. Für die Fertigung sind ausgehärtete Stützstrukturen erforderlich, die bestehen durch das Verfahren bedingt aus dem gleichen Material wie das Bauteil und müssen nach der Fertigstellung mechanisch entfernt werden. Mittlerweile sind auch kompakte Drucker erhältlich bei denen die Bauplattform nach oben aus dem Behälter fährt. So kann ein kleinerer Behälter verwendet werden und die Menge an Resin, die vorgehalten werden muss ist geringer. [1]

### 3.1.5 Poly-Jet Modeling

Wie bei der Stereolithographie wird ein photoreaktiver flüssiger Kunststoff verwendet. Das Material wird schichtweise, mit einem Druckkopf im Bereich der jeweiligen Kontur eingebracht und durch UV-Licht ausgehärtet. Da Material nur im Bereich der Kontur eingebracht wird müssen für die Fertigung Stützstrukturen vorgesehen werden.

Um die Stützstrukturen nach der Fertigung leichter entfernen zu können andere Materialien als für das Bauteil verwendet werden. So kann beispielsweise wasserlösliches Stützmaterial verwendet werden. Dies erfordert einen Drucker mit mehreren Druckköpfen für die unterschiedlichen Materialien. Durch den Kontakt des Baumaterials mit dem Stützstrukturmaterial kann die Oberflächenqualität beeinflusst werden. Als Material werden Acrylate oder Epoxidharze verwendet. Es können elastische Bauteile hergestellt werden. Bei Verwendung eines wasserlöslichen Stützmaterials ist eine mechanische Nachbearbeitung nur erforderlich, wenn Oberflächen verbessert werden sollen. Es gibt Lösungen, die festes Ausgangsmaterial wie beim FDM verwenden. Hierbei wird ein thermoplastischer photoreaktiver Kunststoff im Druckkopf aufgeschmolzen und in den Bauraum eingebracht. Die Aushärtung erfolgt dann durch die Einwirkung von UV-Licht. [1], [4]

### 3.1.6 Fused Deposition Modeling

Ein strangförmiges thermoplastisches Material wird einem Druckkopf zugeführt. Im Druckkopf wird das Material aufgeschmolzen. Das flüssige Material wird im Bereich der jeweiligen Schicht auf die Bauplattform aufgebracht. Durch das Abkühlen des Materials wird die Schicht ausgehärtet.

Für den Aufbau eines Bauteils sind Stützstrukturen erforderlich. Durch die Verwendung mehrerer Druckköpfe können unterschiedliche Materialien für das Bauteil und die Stützstrukturen verwendet werden.

Verfahren die statt dem strangförmigen ein granuliertes Ausgangsmaterial verwenden werden Multi Jet Modeling genannt. Für das Fused Deposition Modeling (FDM) wird meist aufgespultes fadenförmiges Material verwendet, welches als Filament bezeichnet wird. Oft verwendete Materialien sind Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polylactide (PLA) oder Polycarbonate. [1], [4]

### 3.2 Oberflächen

Durch den schichtweisen Aufbau entstehen keine glatten Schrägen oder Radien sondern gestufte Strukturen. Oberflächen die auf Stützmaterial aufgebaut werden können durch den Kontakt mit diesem beeinflusst werden. Wird als Stützmaterial ein anderes Material als das Baumaterial verwendet können sich Bau- und Stützmaterial an der Grenzschicht vermischen, wenn das Stützmaterial beim Aufdrucken des Baumaterials noch nicht vollständig ausgehärtet ist. Müssen nicht alle Oberflächen eines Bauteils eine gute Oberfläche aufweisen, ordnet man die Bauteile im Bauraum so an, dass diese Oberfläche nicht in Kontakt mit dem Stützmaterial kommt. [4]

### 3.3 Genauigkeit

Die mögliche Genauigkeit hängt von der minimalen Schichtstärke, dem Durchmesser des Material- bzw. Lichtstrahls und der Positioniergenauigkeit des Druckkopfs ab. Für die Genauigkeit in z-Richtung wird die Schichtdicke angegeben, die Auflösung in der x-y-Ebene wird wie bei 2D-Druckern als Punktdichte, meist in dots per inch (dpi) angegeben. Zusätzlich werden Werte für minimale Wandstärken angegeben. Bei Verfahren bei denen das Baumaterial aufgeschmolzen wird kommt es zu Schrumpfungen und Temperaturdifferenzen im Bauteil. Durch diese Temperaturdifferenzen kann es zum Verzug des Bauteils kommen, teilweise lösen sich die Bauteile von den Bauplatten.

Beim FDM ist die erzielbare Genauigkeit zusätzlich abhängig von der Qualität des Filaments.

### 3.4 Material

Bei strangförmigem Filament ist ein gleichmäßiger Materialdurchmesser und Vorschub wichtig um einen gleichmäßigen Materialfluss zu erzeugen. Eine besonders gleichmäßige Materialdichte lässt sich im Spritzgussverfahren herstellen. Es entstehen Materialblöcke. Um einen schlupffreien Vorschub zu gewährleisten, werden die Blöcke an mindestens einer Seite gezahnt und über ein Zahnrad dem Druckkopf zugeführt.

Für das Poly-Jet Verfahren werden wie bei der Stereolithographie meist flüssige photoreaktive Kunststoffe eingesetzt. Diese Kunststoffe weisen oft nur eine begrenzte Lagerfähigkeit auf. Viele dieser Resins weisen die Gesundheitsgefahr, Reizwirkung auf die Haut auf. Aus diesem Grund und um Verschmutzungen des Materials zu vermeiden werden die Materialien oft in geschlossenen Behältern geliefert, die direkt in das Gerät eingesetzt werden können. [3], [5]

### 3.5 Geschwindigkeit

Die Fertigungsgeschwindigkeit hängt hauptsächlich von der Anzahl der zu erstellenden Schichten ab, weitere Faktoren sind die Aushärtezeit des Materials und die Geschwindigkeit des Druckkopfes in x-y-Richtung. Die Geschwindigkeit des Druckkopfes wird durch die Positioniergenauigkeit beschränkt. Um die

Fertigungsdauern niedrig zu halten bietet es sich an mehrere Bauteile gleichzeitig auszudrucken. Die Anordnung der Bauteile im Bauraum sollte so erfolgen, dass eine möglichst geringe Fertigungshöhe entsteht. [4]

### 3.6 Kosten

Einfache 3D-Drucker die das FDM Verfahren nutzen und mit einem Druckkopf ausgestattet sind sind ab einigen Hundert Euro erhältlich. ABS und PLA Filament sind für unter 50 Euro/kg erhältlich. Preise für Drucker für das Poly-Jet Modeling oder die Stereolithographie beginnen bei einigen tausend Euro. Photoreaktive Kunststoffe sind ab 200 Euro/l erhältlich. [6], [7]

3D Modelle können auch von Dienstleistern ausgedruckt werden. Dies bietet Vorteile wenn nur gelegentlich Modelle erforderlich sind. Neben der Anschaffung der Drucktechnik entfällt auch die Einarbeitung. In Tabelle 1 sind einige Beispiele für Kaufpreise von 3D-Druckern gegeben.

Typ	Verfahren	Schicht	Preis
XYZprinting da Vinci 1.0A	FDM	100µm	599,00€
MakerBot Replicator Desktop	FDM	100µm	2296,95€
formlabs FORM 2	LS	25µm	3959,00€
Stratasys Objet 24	Poly-Jet	28µm	17777,00€

**Tabelle 1** Verwendetes Fertigungsverfahren, minimale Schichtdicke und Kaufpreis für verschiedene 3D-Drucker [8], [9]

## 4 Zusammenfassung/Fazit

Bei FDM und Poly-Jet Maschinen werden keine besonderen Anforderungen an den Aufstellungsort gestellt, lediglich eine Versorgung mit elektrischer Energie ist erforderlich. Die Druckdaten werden entweder über ein Netzwerk übertragen oder von einem Datenträger eingelesen. Nach der Fertigung ist das gesamte Bauteil inklusive der Stützstrukturen fest und kann so sauber aus dem Drucker entnommen werden. Bei FDM Druckern und Poly-Jet Druckern, die ein festes Stützmaterial verwenden, müssen Einrichtungen für die mechanische Nachbearbeitung vorhanden sein, um die Stützmaterialien zu entfernen. Werden bei einem Poly-Jet System wasserlösliche Stützmaterialien verwendet, muss eine Möglichkeit vorhanden sein diese abzuwaschen. Die günstigste Möglichkeit Prototypen zu fertigen bieten FDM Geräte, allerdings mit einer eingeschränkten Oberflächenqualität und Fertigungsgenauigkeit. Sollen höhere Oberflächenqualitäten und Detailauflösungen erreicht werden, sind Stereolithographie oder Poly-Jet Geräte geeignet. Um auch bei seltenem Bedarf an 3D-Drucken, gute Ergebnisse zu erzielen, bietet die Nutzung eines Druckdienstleisters eine Alternative.

## 5 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.
- [4] P. Fastermann, 3D-Druck/Rapid Prototyping Eine Zukunftstechnologie-kompakt erklärt, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.
- [5] „reichelt/documents,“ [Online]. Available: [http://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/E400/FORMLABS\\_RESIN\\_WHITE\\_SDB.pdf](http://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/E400/FORMLABS_RESIN_WHITE_SDB.pdf). [Zugriff am 11 07 2016].
- [6] „reichelt/Filamente fuer 3D-Drucker,“ [Online]. Available: <https://www.reichelt.de/Filamente-fuer-3D-Drucker-1-75-mm-2/index.html?&ACTION=2&LA=2&GROUPID=7365>. [Zugriff am 11 07 2016].
- [7] „reichelt.de/Kunstharze fuer 3D-Drucker,“ [Online]. Available: <https://www.reichelt.de/Kunstharze-fuer-3D-Drucker/2/index.html?&ACTION=2&LA=2&GROUPID=7367>. [Zugriff am 11 07 2016].
- [8] „reichelt/3D-Drucker,“ [Online]. Available: <https://www.reichelt.de/3D-Drucker/2/index.html?&ACTION=2&LA=2&GROUPID=7362>. [Zugriff am 11 07 2016].
- [9] „3D-Drucker,“ [Online]. Available: <https://3ddrucker.de/serie/desktop/>. [Zugriff am 11 07 2016].
- [10] I. Gibson, Additive Manufacturing Technologies, New York: Springer, 2015.



## Neue Fertigungsmöglichkeiten durch 3D-Drucker für Prototyping

Dirk Willem Moos, 13.07.2016

### Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Fertigungsverfahren
- Eigenschaften
- Zusammenfassung



# Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Fertigungsverfahren
- Eigenschaften
- Zusammenfassung

## Einleitung

- Prototypen
- Eigenschaften, Vorteile
- Entwicklung 3D-Druck
- Erstes Verfahren Stereolithographie



[1]



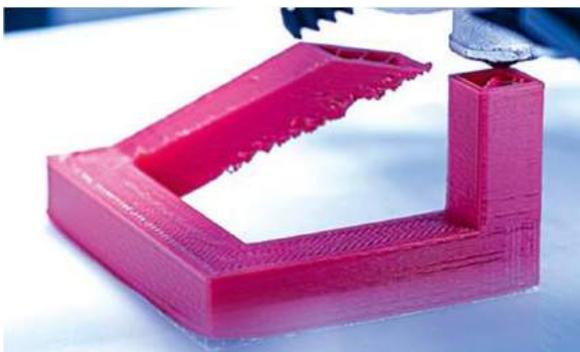
[2]

# Agenda

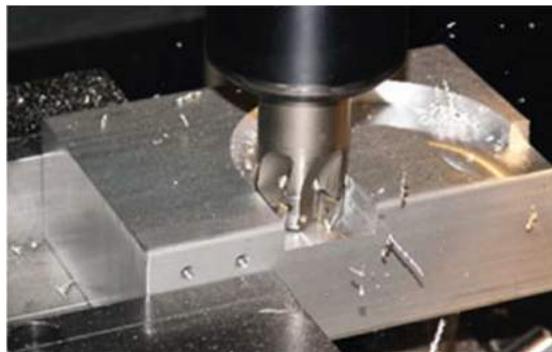
- Einleitung
- Grundlagen
- Fertigungsverfahren
- Eigenschaften
- Zusammenfassung

## Grundlagen

- Additives Fertigungsverfahren
- Schichtweiser Aufbau



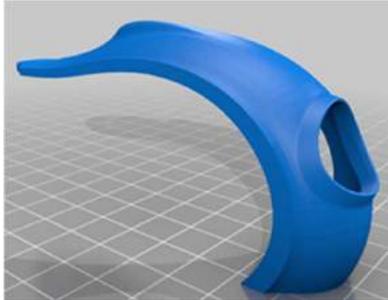
[3]



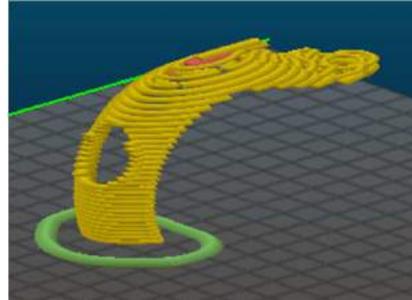
[4]

## Grundlagen

- Digitales CAD-Modell, STL Format
- CAD-Modell als Volumenmodell
- Slice-Programm erzeugt Daten für einzelne Schichten

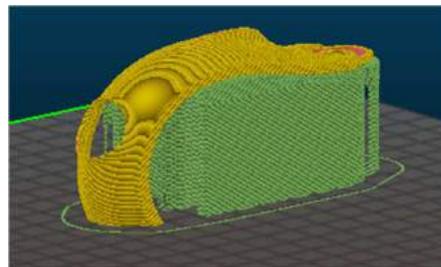
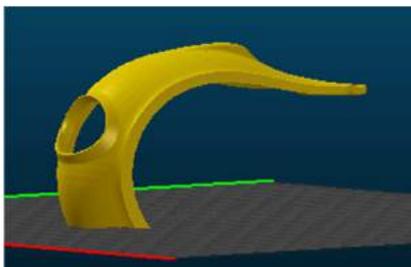


[5]



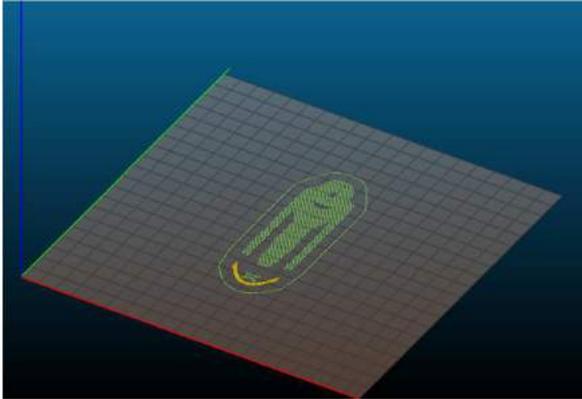
## Grundlagen

- Stützstrukturen



## Grundlagen

- Kontur der einzelnen Schichten wird erzeugt
- Nachbearbeitung



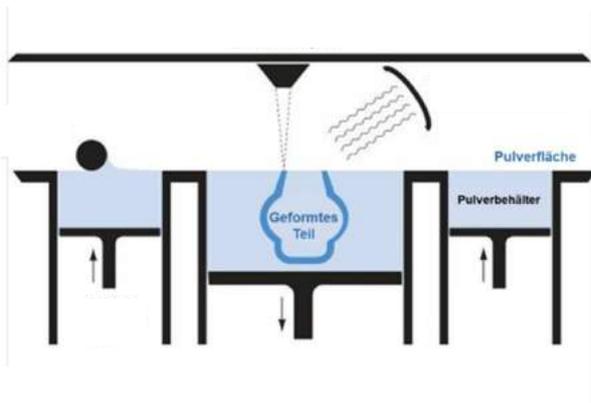
[6]

## Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Fertigungsverfahren
- Eigenschaften
- Zusammenfassung

## Lasersintern und Laserschmelzen

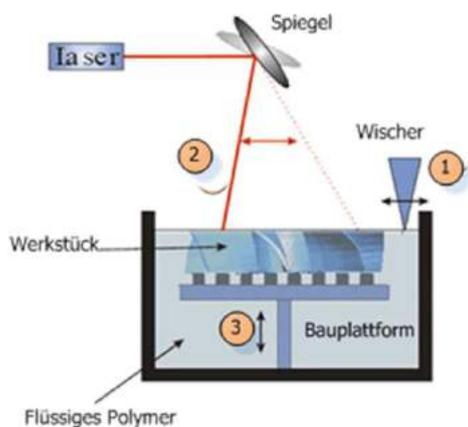
- Pulverförmige Ausgangsmaterialien
- Kunststoffe, Metalle, Keramiken
- Laserstrahl schmilzt Material auf
- Schutzgas
- Pulverbett dient als Stützmaterial
- Ausgehärtete Stützstrukturen für Wärmeabfuhr



[8]

## Stereolithographie

- Flüssiger photoreaktiver Kunststoff
- Bauplattform in gefülltem Behälter
- UV-Licht zur Aushärtung
- Ein Material für Bauteil und Stützstrukturen
- Aufbau in den gefüllten Behälter hinein oder heraus



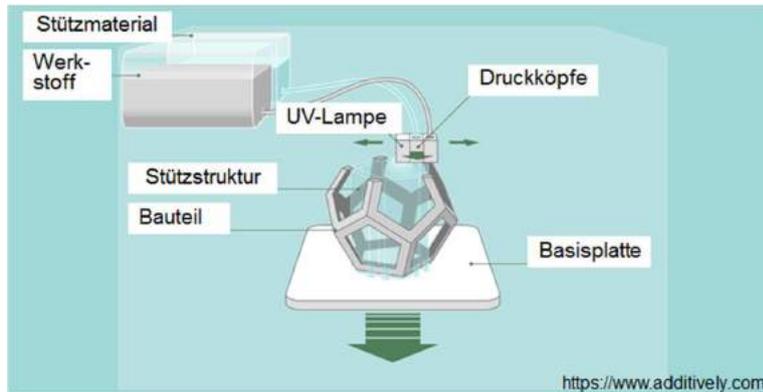
[9]



[10]

## Poly-Jet Modeling

- Photoreaktiver Kunststoff wird über Druckkopf eingebracht
- Aushärtung durch UV-Licht
- Stützstrukturen sind vorzusehen
- Mehrere Druckköpfe für unterschiedliche Materialien
- Elastische Bauteile möglich



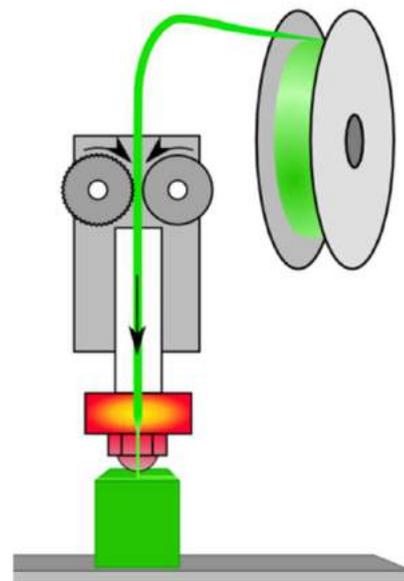
[11]

## Fused Deposition Modeling

- Strangförmige thermoplastische Ausgangsmaterialien
- Material wird im Druckkopf aufgeschmolzen
- Aushärtung durch Abkühlung
- Stützstrukturen sind vorzusehen
- Mehrere Druckköpfe für unterschiedliche Materialien



[12]



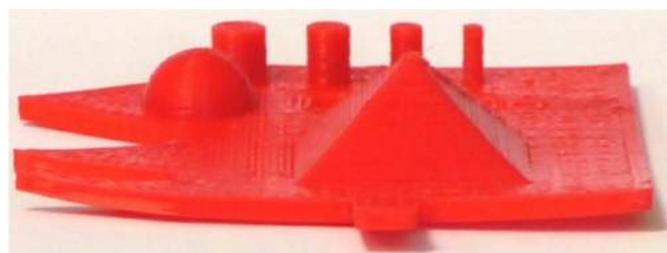
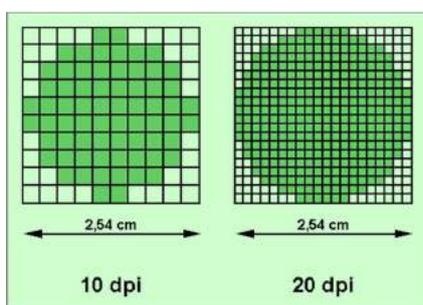
[13]

# Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
- Fertigungsverfahren
- Eigenschaften
- Zusammenfassung

# Auflösung

- Positioniergenauigkeit des Druckkopfes
- Schichtdicke
- Minimale Wandstärke
- Punktdichte
- Verzug und Warping



## Oberflächen

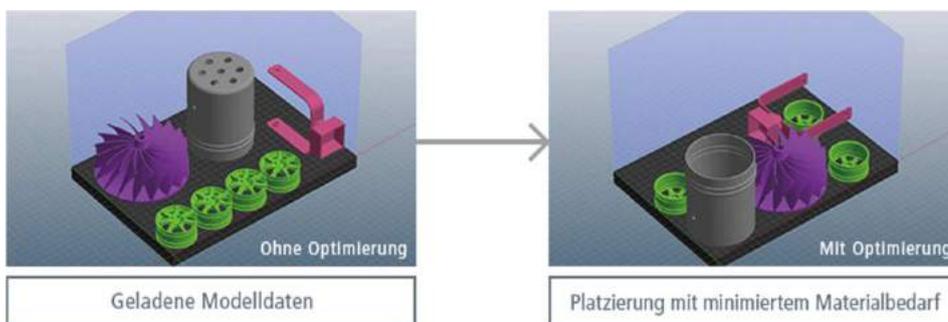
- Schichtstruktur
- Grenzschicht zu Stützmaterial



[16]

## Geschwindigkeit

- Geschwindigkeit abhängig von Anzahl der Schichten
- Möglichst geringe Bauhöhe
- Mehrere Bauteile gleichzeitig fertigen



[17]

## Material

- Eignung für Druckverfahren
- Durchmesser Filament
- Gezahnte Blöcke
- Lagerfähigkeit Photopolymere
- Verschmutzung des Materials
- Photopolymere in geschlossenen Behältern



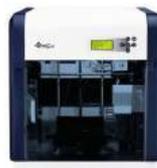
[18]



[19]

## Kosten

- XYZprinting da Vinci 1.0A
  - FDM Verfahren
  - Schichtdicke 0,1mm, Düse 0,4mm
  - 599,00€ [20]
- MakerBot Replicator Desktop 3D Printer 5. Gen.
  - FDM Verfahren
  - Schichtdicke 0,1mm, Düse 0,4mm
  - 2296,95€ [21]
- formlabs FORM 2
  - Stereolithographie
  - Schichtdicke 0,025mm, Laser 0,14mm
  - 3959,00€ [22]
- Stratasys Objet 24
  - Poly-Jet-Verfahren
  - Schichtdicke 0,028mm, 600dpi
  - 17730,00€ [23]



## Kosten

- ABS-Filament 1,75mm, 1kg
  - 29,95€ [24]



- Kunstharz, Kartusche, 1l
  - 169,00€ [19]



## Kosten

- Kein Werkzeugbau
- Vermeidung Maschinenkosten
  - Rüstzeiten
  - Fertigung
- Keine Werkstattumgebung



[27]



[25]



[26]

# Agenda

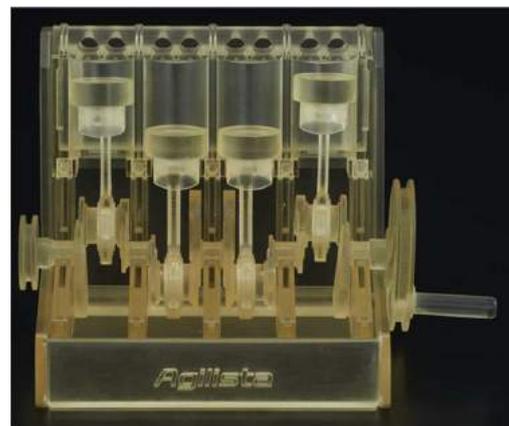
- Einleitung
- Grundlagen
- Fertigungsverfahren
- Eigenschaften
- Zusammenfassung

## Zusammenfassung

- 3D-Druck für Prototyping
- FDM Verfahren – belastbare Bauteile
- Poly-Jet-Verfahren – gute Detailauflösung
- Bei seltener Anwendung – Druck-Dienstleister



[29]



[28]



## Literaturverzeichnis

- [1] A. H. Fritz und G. Schulze, Fertigungstechnik, Berlin: SpringerVieweg, 2015.
- [2] „3Druck,“ [Online]. Available: <https://3druck.com/featured/charles-chuck-hull-wie-alles-begann-3621576/>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [3] „it-zoom,“ [Online]. Available: <http://www.it-zoom.de/it-mittelstand/e/sind-3d-drucker-reif-fuer-den-mittelstand-13631/>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [4] „Schumacher-Verfahrenstechnik,“ [Online]. Available: <http://schumacher-verfahrenstechnik.de/Fraesbearbeitung.19.0.html>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [5] „Thingiverse,“ [Online]. Available: <http://www.thingiverse.com/explore/newest/hobby/page:8>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [6] „printing3dtoday,“ [Online]. Available: <http://www.printing3dtoday.com/news/2015/01/08/006600/formlabs-upgrades-software-allow-faster-prints-its-form-1-3d-printer>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [7] „materialise,“ [Online]. Available: <http://www.materialise.de/3d-druck/lasersintern-prototyping>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [8] „getarticle,“ [Online]. Available: <http://www.getarticle.ch/artikelarchiv/fachartikel/detail/artikel/schicht-fuer-schicht-zum-neuen-bauteil/3d%20druck/16/>. [Zugriff am 06 07 2016].

## Literaturverzeichnis

- [9] „tedata,“ [Online]. Available: <http://www.tedata.com/3252.0.html>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [10] „solidator,“ [Online]. Available: <http://solidator.blob.core.windows.net/images/SixTowers.jpg>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [11] „VDMA,“ [Online]. Available: <http://am.vdma.org/article/-/articleview/3786648>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [12] „3dgeni,“ [Online]. Available: <http://www.3dgeni.us/we-need-to-keep-printer-manufacturers-away-from-filament/>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [13] „reprep,“ [Online]. Available: [http://reprep.org/wiki/Fused\\_filament\\_fabrication](http://reprep.org/wiki/Fused_filament_fabrication). [Zugriff am 06 07 2016].
- [14] „Infokurs,“ [Online]. Available: <http://infokurs.de/wiki/index.php?title=Computergrafik>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [15] „Magazin-3D-Druck,“ [Online]. Available: <http://www.magazin-3d-druck.de/fdm-3d-druck-abs-oder-pla/>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [16] „Form3D,“ [Online]. Available: <http://www.form3d.com/3d-druck-teile-aus-abs-mit-aceton-dampf-glatten/>. [Zugriff am 10 07 2016].

## Literaturverzeichnis

- [17] „Keyence,“ [Online]. Available: <http://www.keyence.de/products/3d-printers/3d-printers/agilista-3100/software/index.jsp>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [18] „Fabbster,“ [Online]. Available: <http://www.fabbster.com/material.php>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [19] „Reichelt,“ [Online]. Available: <https://www.reichelt.de/Kunsthharze-fuer-3D-Drucker/FORM-KH-SW-1L-F2/3/index.html?&ACTION=3&LA=2&ARTICLE=160675&GROUPID=7359&artnr=FORM+KH+SW+1L+F2>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [20] „Reichelt,“ [Online]. Available: [https://www.reichelt.de/?ARTICLE=163803&PROVID=2788&wt\\_mc=amc141526782519998&gclid=CLmov96T480CFQoTGwodAxMFhA](https://www.reichelt.de/?ARTICLE=163803&PROVID=2788&wt_mc=amc141526782519998&gclid=CLmov96T480CFQoTGwodAxMFhA). [Zugriff am 06 07 2016].
- [21] „Reichelt,“ [Online]. Available: <https://www.reichelt.de/REPLICATOR-5G/3/index.html?&ACTION=3&LA=446&ARTICLE=145151&artnr=REPLICATOR+5G&SEARCH=Replicator+Desktop+3D+Printer>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [22] „Reichelt,“ [Online]. Available: <https://www.reichelt.de/FORM-2/3/index.html?&ACTION=3&LA=446&ARTICLE=160425&artnr=FORM+2&SEARCH=formlabs+FORM+2>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [23] „Proto3000,“ [Online]. Available: <http://proto3000.com/objet24.php>. [Zugriff am 06 07 2016].

## Literaturverzeichnis

- [24] „Reichelt,“ [Online]. Available: <https://www.reichelt.de/Filamente-fuer-3D-Drucker-1-75-mm-VERBATIM-55014/3/index.html?&ACTION=3&LA=2&ARTICLE=169767&GROUPID=7357&artnr=VERBATIM+55014>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [25] „Borghammer-Industries,“ [Online]. Available: <http://www.borghammer-industries.com/produkte/>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [26] „Hofbauer,“ [Online]. Available: <http://www.hofbauer.de/spritzgussmaschine/>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [27] „Physik-TU-Berlin,“ [Online]. Available: <http://www.physik.fu-berlin.de/service/fwt/einrichtung/werkstaetten/>. [Zugriff am 06 07 2016].
- [28] „directindustry,“ [Online]. Available: <http://www.directindustry.de/prod/keyence-deutschland/product-64178-1573578.html>. [Zugriff am 10 07 2016].
- [29] „Festo,“ [Online]. Available: <https://www.festo.com/group/de/cms/10241.htm>. [Zugriff am 10 07 2016].



# 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 (GDV) belegen.<sup>[1]</sup>

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 100 kA welche ein starkes Magnetfeld um den Blitzkanal zufolge hat. Dabei kann abhängig vom Widerstand eine Spannung von über 1 MV zwischen Wolke und Erde hervorrufen werden. Diese hohe Energie richtet auf unterschiedlichste Weise Schäden in Deutschland an.<sup>[2]</sup>

Zum einen kann ein Blitz direkt in ein Objekt einschlagen. Durch die Zündung der Energie direkt am Objekt wird eine hohe Temperatur erzeugt, 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 Gebäude eindringen und dort verschiedenste Schäden anrichten.<sup>[3]</sup>

Um Blitzschäden zu vermeiden wird Blitzschutz betrieben. Hierbei unterscheidet man in den äußeren und inneren Blitzschutz.

Der äußere Blitzschutz verhindert das Eindringen der Blitzschläge in das Gebäude. Er "fängt" den Blitzstrom ein und leitet ihn vom Einschlagspunkt in die Erde ab. Dieser wird realisiert durch eine Fangeinrichtung auf dem Dach, einer Erdungsanlage und Ableitungen dazwischen.<sup>[4]</sup>

Zur Vermeidung gefährlicher Spannungen auf den Gebäudeleitungen, wird innerer Blitzschutz betrieben. Hierbei werden alle metallenen Leitungen beim Eintrittspunkt in das Gebäude mit einer Haupterdungsschiene verbunden. Dazu zählen die Gasleitungen, Heizungsrohrleitungen, Warm- und Kaltwasserrohrleitungen, der Schutzleiter der Stromversorgung, sowie die Schirme und Erdungsleiter der informations- und kommunikationstechnischen Leitungen und Anlagen.<sup>[5]</sup>

## 3 Hauptteil

In Deutschland werden viele Sachschäden und auch Personenschäden durch Blitzschläge verursacht. Im Jahr 2006 wurden 550.000 Blitz- und Überspannungsschäden gemeldet. Im Jahr 2014 fallen sie mit 410.000 Schäden zwar um 30% geringer aus (siehe Abbildung 1), jedoch sind die Leistungen in der Hausrat und Wohngebäudeversicherung konstant bei 340 Mio. € geblieben. Somit sind die durchschnittlichen gemeldeten Einzelschäden um 30% gestiegen. Diese betragen im Jahr 2006 noch 620€ pro Schaden, sind jedoch im Jahr 2014 auf 830€ pro Schaden angestiegen. Dieser Anstieg der Einzelschäden ist zurückzuführen auf die Vielfalt der Elektrogeräte in deutschen Haushalten, zudem sind die Elektrogeräte heutzutage hochwertiger und somit auch teurer. Die Überspannung richtet durch die heute mehr genutzte Halbleitertechnik schneller Schäden an den Elektrogeräten an, als im Vergleich zu den älteren und robusteren Geräte.



Abbildung 1<sup>[1]</sup>

### 3.1 Die Entstehung eines Blitzes

Grundvoraussetzung für Blitze sind hohe Spannungsdifferenzen in den Wolken, welche durch Aufsteigende warme Luft und abfallende kalte Luft erzeugt werden.<sup>[2]</sup>

#### Blitzentstehung

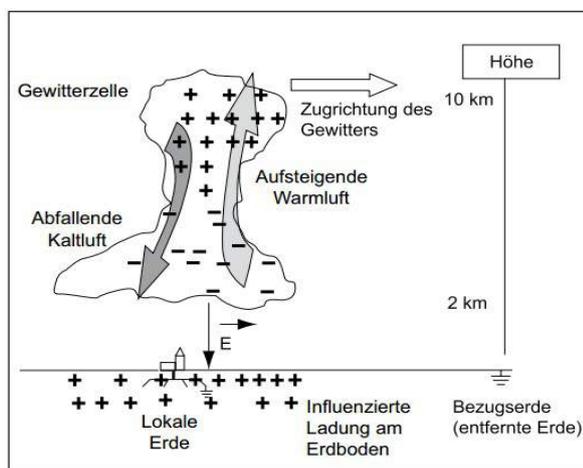


Abbildung 2<sup>[2]</sup>

Sobald das Isolationsvermögen der Luft zwischen den Wolken und der Erde überschritten wird, bildet sich ein Blitz, welcher optisch für uns wahrnehmbar ist. Dieser Blitz kann Kenndaten von bis zu 100 kA und 1 MV erreichen.<sup>[2]</sup>

### 3.2 Gebäude

Gebäude sind durch direkte oder indirekte Blitzeinschläge in benachbarte Objekte sowie Leitungen gefährdet. Um diese Schäden zu vermeiden werden der äußere und der innere Blitzschutz betrieben.

#### 3.2.1 Direkter Blitzeinschlag

Bei dem direkten Blitzeinschlag in ein Gebäude ohne Blitzschutzanlage entsteht durch die hohe Stromstärke bzw. hohe Energie am Gebäude ein Brand, welcher oft einen großen Sachschaden zuzufolge hat.

Dieses Szenario wird mit dem äußeren Blitzschutz vermieden. Dieser beginnt mit einer Fangeinrichtung auf dem Dach, welche nach dem Blitzkugelfverfahren ausgelegt wird.

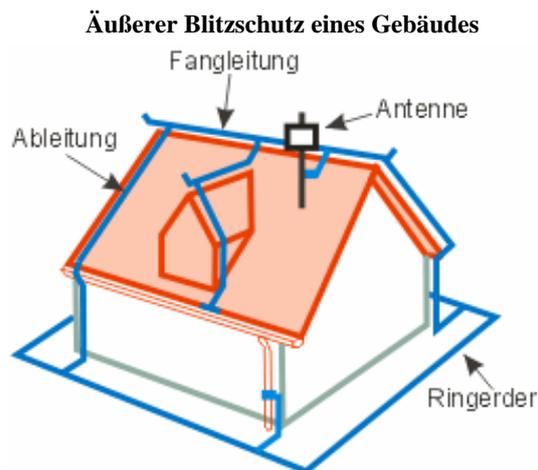


Abbildung 3<sup>[6]</sup>

Diese sorgt dafür, dass der Blitz eingefangen wird, sodass die Energie nicht am Dach zündet. Anschließend sorgen Ableitungen für den Transport der Energie bis zum Erdungssystem wie z.B. dem Ringerder (siehe Abbildung 3). Er sorgt dafür, dass die Energie in den Boden abgeleitet wird.

Der Bereich in den der Blitz direkt einschlagen kann, wird mit der Blitzschutzzone (BSZ) 0A definiert. Es gibt noch weitere Blitzschutzzone, welche sich von BSZ 0B, „dort wo der Blitz nicht direkt einschlagen kann, aber das volle Feld vorliegen könnte (z.B. im Inneren eines Hauses)“ bis hin zur BZS 3, „die als geschützter Bereich innerhalb eines Endgerätes definiert ist“ reichen.<sup>[7]</sup>

Ein Nachteil des äußeren Blitzschutzes ist die induktive Kopplung der Ableitung mit den Leitungen in dem Gebäude. Die Ableitung, welche in der Regel direkt an der Hauswand liegt, führt einen hohen Strom. Dieser bringt ein starkes magnetisches Feld mit sich, welches eine Überspannung in parallelen Kabeln im Inneren des Hauses erzeugen kann.<sup>[2]</sup>

#### 3.2.2 Indirekter Blitzeinschlag

Beim indirekten Blitzeinschlag koppelt der Blitzstrom in die unterirdischen Leitungen ein, welche ins Gebäudeinnere führen. Hierbei schlägt der Blitz z.B. in den Boden ein. Von dort aus sucht sich der Blitz den Weg des geringsten Widerstandes, welcher in der Regel metallene Leitungen sind. Die Überspannung auf den verschiedenen Leitungen für Gas, Wasser, Strom usw. richtet auf verschiedene Art und Weise Schäden an.

Um diese Schäden zu vermeiden wird der Innere Blitzschutz betrieben, welcher sich aus einer Potentialausgleichsschiene und Überspannungsableitern zusammensetzt.

Bei der Potentialausgleichsschiene werden alle metallischen Leitungen, die in das Gebäude führen, zusammengeführt und auf ein gemeinsames Erdpotential gelegt.

In der Regel gibt es drei Überspannungsableiter. Der erste SPD1 zündet bei einer hohen Überspannung auf der Leitung und erzeugt einen Kurzschluss, der über die Erde abgeleitet wird. Parallel dazu liegt auch der SPD2 für die

Unterverteilung. Er besteht aus einem Varistor, welchen eine verbliebene Überspannung von um die 1,5 kV erreicht und von diesem weiter reduziert wird. Abschließend liegt dazu parallel der SPD3 vor dem Endgerät, welcher den Rest der Überspannung ableitet.<sup>[3]</sup>

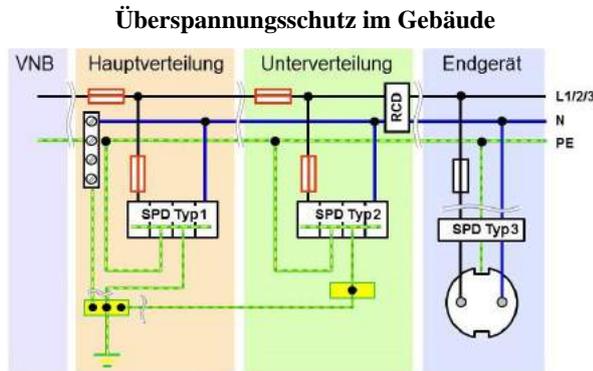


Abbildung 4<sup>[3]</sup>

### 3.3 Menschen

Wenn sich Menschen bei Gewitter im Freien aufhalten, kann es dazu kommen, dass sie direkt vom Blitz getroffen werden. Die Überlebenswahrscheinlichkeit liegt hier bei ca. 50%, da der Strom nur auf der Körperoberfläche fließt und nicht durch die inneren Organe. Dennoch sind oft Verletzungen wie Verbrennungen, Verbrühungen und Nervenschädigungen die Folge.<sup>[8]</sup>

Auch der indirekte Blitzschlag kann im Freien Schäden am Menschen anrichten. Um den Einschlagspunkt befindet sich auf der Bodenoberfläche ein Spannungskegel, welcher einen Radius von mehr als 10 Metern besitzt. In diesem Bereich sollte man die Schrittspannung klein halten, da sonst der Körper einen geringen Widerstand bildet als der Boden und somit ein Stromfluss durch den Körper stattfindet.<sup>[9]</sup>



Abbildung 5<sup>[9]</sup>

Der beste Schutz für den Menschen ist neben hohen Objekten, wie z.B. Bäumen und Straßenlaternen, möglichst klein in der Hocke zu verharren, da der Blitz bevorzugt in hohe Objekte einschlägt (siehe Blitzkugelverfahren).<sup>[9]</sup>

## 4 Fazit

Obwohl das Naturphänomen Blitz bereits gut erforscht ist, richtet es heutzutage immer noch erhebliche Schäden an Gebäuden und Menschen an. Viele dieser Schäden lassen sich mit den in dieser Seminararbeit genannten Gegenmaßnahmen vermeiden. Deswegen bedarf es in Zukunft noch erheblich an Verbesserungen, denn die Sicherheit der Menschen ist eines der wichtigsten Themen unserer Gesellschaft.

## 5 Literatur

- [1] GDV, „Blitz-Bilanz 2014“, <http://www.gdv.de/2015/07/versicherer-leisten-340-millionen-euro-fuerschaeden-durch-blitze/>, 07.06.2016
- [2] GDV, „Blitz- und Überspannungsschutz in elektrischen Anlagen“, [https://vds.de/fileadmin/vds\\_publicationen/vds\\_2031\\_web.pdf](https://vds.de/fileadmin/vds_publicationen/vds_2031_web.pdf), 07.06.2016
- [3] VDE, „Was versteht man unter Überspannungsschutz“, <https://www.vde.com/de/Ausschuesse/Blitzschutz/FAQ/bs/oeffentlich/Seiten/Uber-spannungsschutz.aspx>, 07.06.2016
- [4] GDV, „Äußerer Blitzschutz“, <https://www.vde.com/de/Ausschuesse/Blitzschutz/vorblitzenschuetzen/Seite/n/aeussererBlitzschutz.aspx>, 07.06.2016
- [5] GDV, „Innerer Blitzschutz“, <https://www.vde.com/de/Ausschuesse/Blitzschutz/vorblitzenschuetzen/Seite/n/innererBlitzschutz.aspx>, 07.06.2016
- [6] Skynet, „Blitzschutz“, [http://www.wlan-skynet.de/pictures/blitzschutz\\_250x200.gif](http://www.wlan-skynet.de/pictures/blitzschutz_250x200.gif), 11.07.2016
- [7] Deutsche Gesellschaft für EMV-Technologie e.V., „Blitzschutzkonzept“, [http://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectID=ba99ea42\\_e081\\_515d\\_74c8af7d643026b9](http://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectID=ba99ea42_e081_515d_74c8af7d643026b9)
- [8] Focus Online, „Wettermythen“, [http://www.focus.de/wissen/natur/tid-14808/wettermythen-mythos-2-wervom-blitz-getroffen-wird-faellt-tot-um\\_aid\\_415382.html](http://www.focus.de/wissen/natur/tid-14808/wettermythen-mythos-2-wervom-blitz-getroffen-wird-faellt-tot-um_aid_415382.html)
- [9] VDE, „Blitzschutz“, <https://www.vde.com/de/Ausschuesse/Blitzschutz/FAQ/bs/oeffentlich/Seiten/Schrittspannung.aspx>
- [10] VDE, „Donnerwetter“, <http://www.vde.com/de/ausschuesse/blitzschutz/kids/documents/donnerwetter-download.pdf>, 11.07.2016



Quelle: [www.gdv.de](http://www.gdv.de) | Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft (GDV)

## Blitzschäden in Deutschland

Hendrik Gundelach, 13.07.16

### Agenda

#### .Einleitung – Aktuelle Zahlen

.Phänomen Blitz

.Arten der Schäden und Gegenmaßnahmen

•Gebäude

.Direkt Einschlag

.Indirekter Einschlag

•Menschen

.Zusammenfassung



Quelle: [www.t3n.de](http://www.t3n.de)



# Einleitung – Aktuelle Zahlen

## Blitz-Bilanz 2014

Anzahl der Blitz- und Überspannungsschäden und die Leistungen in der Hausrat- und Wohngebäudeversicherung<sup>1</sup>



1) GDV-Hochrechnung 2) vorläufig

Quelle: www.gdv.de | Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV)



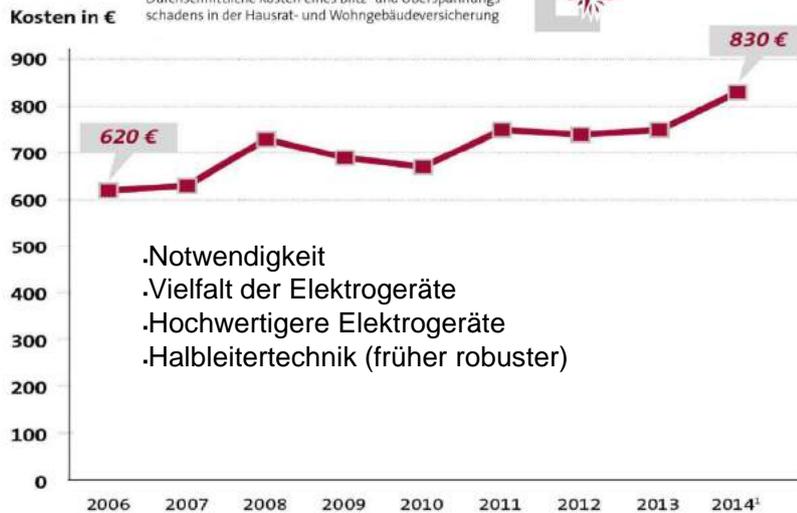
Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 3



# Einleitung – Aktuelle Zahlen

## Blitz-Schäden werden teurer

Durchschnittliche Kosten eines Blitz- und Überspannungsschadens in der Hausrat- und Wohngebäudeversicherung



- Notwendigkeit
- Vielfalt der Elektrogeräte
- Hochwertigere Elektrogeräte
- Halbleitertechnik (früher robuster)

1) vorläufig

Quelle: www.gdv.de | Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV)



Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 4



# Agenda

.Einleitung – Aktuelle Zahlen

## .Phänomen Blitz

.Arten der Schäden und Gegenmaßnahmen

▪Gebäude

    .Direkt Einschlag

    .Indirekter Einschlag

▪Menschen

.Zusammenfassung



Quelle: www.welt.de



Technische  
Universität  
Braunschweig

Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 5



# Phänomen Blitz

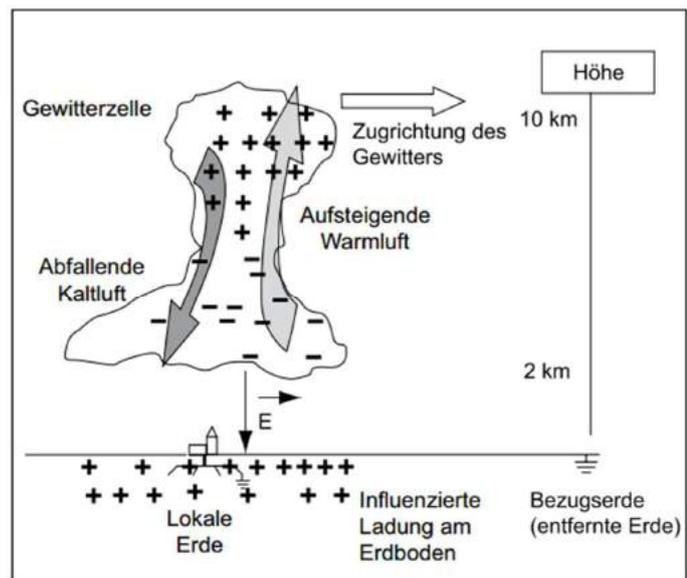
.Funkenentladung Wolke-Erde

- Ladungstrennung
- .Isolationsschicht

- Entladevorgang
- .Blitz

.Durchschnittliche Stromstärke 100kA

.Spannung bis zu 1MV (abh. Vom Widerstand)



Quelle: www.vde.de | Verband deutscher Sachversicherer



Technische  
Universität  
Braunschweig

Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 6



# Agenda

.Einleitung – Aktuelle Zahlen

.Phänomen Blitz

## .Arten der Schäden und Gegenmaßnahmen

### •Gebäude

#### .Direkt Einschlag

.Indirekter Einschlag

### •Menschen

.Zusammenfassung



Quelle: [www.schon-dach.de](http://www.schon-dach.de)



Technische  
Universität  
Braunschweig

Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 7



## Gebäude – Direkter Einschlag

.In das Gebäude

•Brandauslösung

.Hohe Stromstärke/Energie



Quelle: [www.florian-zusa.de](http://www.florian-zusa.de) | Das Feuerwehrmagazin



Technische  
Universität  
Braunschweig

Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 8



# Gebäude – Äußerer Blitzschutz

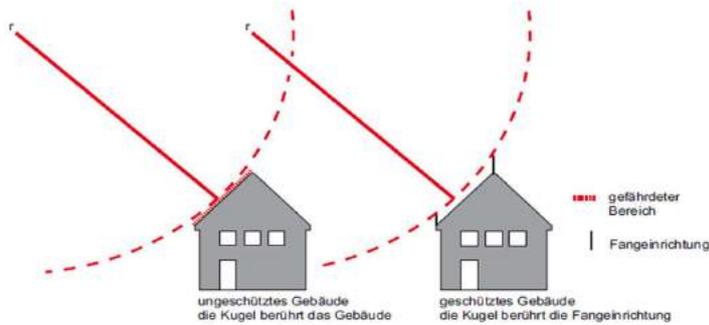
## Aufgabe

- Hauptenergie abzuleiten in die Erde

## Blitzschutzzonen

- BSZ 0A
- BSZ 1
- BSZ 3

## •Fangeinrichtung



Quelle: [www.vds.de](http://www.vds.de) | Verband deutscher Sachversicherer

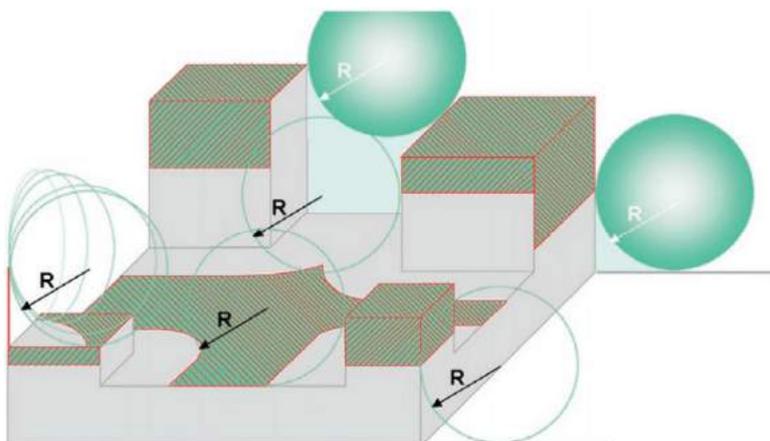


Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 9



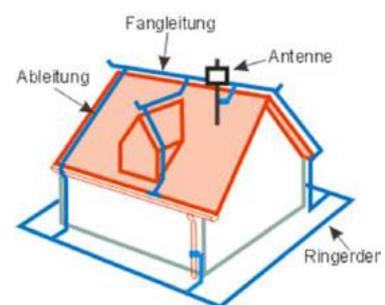
# Gebäude – Äußerer Blitzschutz

## Auslegung der Fangeinrichtung



Quelle: [www.vde.de](http://www.vde.de) | Verbund der Elektrotechnik

## Aufbau



Quelle: [www.wlan-sky.net.de](http://www.wlan-sky.net.de) | Richtfunk

## Erdertypen

- Einzelerder
- Vermaschte Erder

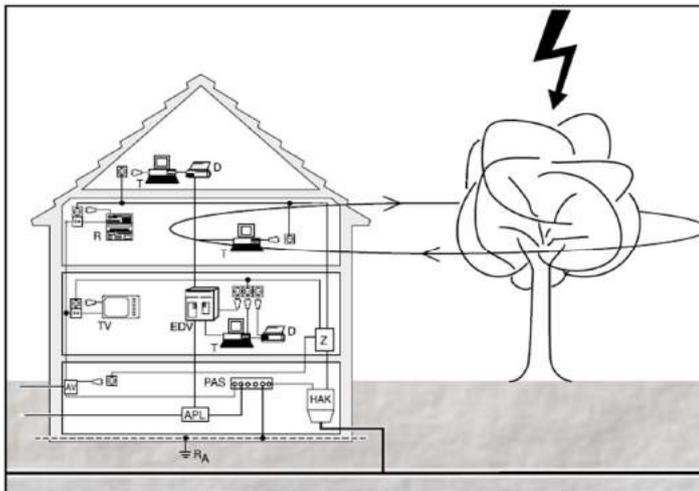


Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 10



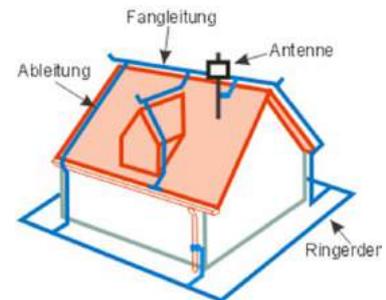
# Gebäude – Äußerer Blitzschutz

## Nachteil Induktive Kopplung



Quelle: www.vde.com | Verband der Elektrotechnik

## Aufbau



Quelle: www.wlan-skynet.de | Richtfunk

## Agenda

- .Einleitung – Aktuelle Zahlen
- .Phänomen Blitz
- .Arten der Schäden und Gegenmaßnahmen**
  - .Gebäude**
    - .Direkt Einschlag
    - .Indirekter Einschlag**
  - .Menschen
- .Zusammenfassung



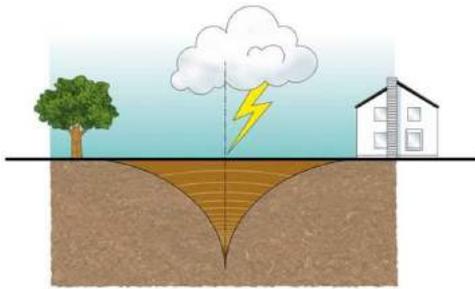
Quelle: www.schon-dach.de

# Gebäude – Indirekter Einschlag / Innerer Blitzschutz

## Aufgabe

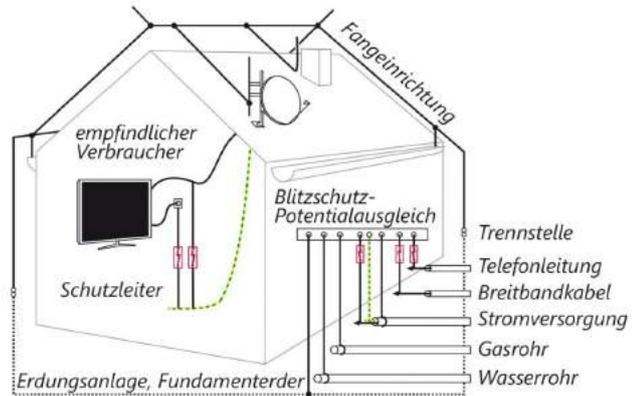
– Verhindert das Einkoppeln der Überspannung auf metallischen Leitungen, die in das Gebäude innere führen

### Blitzeinschlag in den Boden



Quelle: www.ba-online.com | building & automation

### Aufbau



Quelle: www.vde.com | Verband der Elektrotechnik



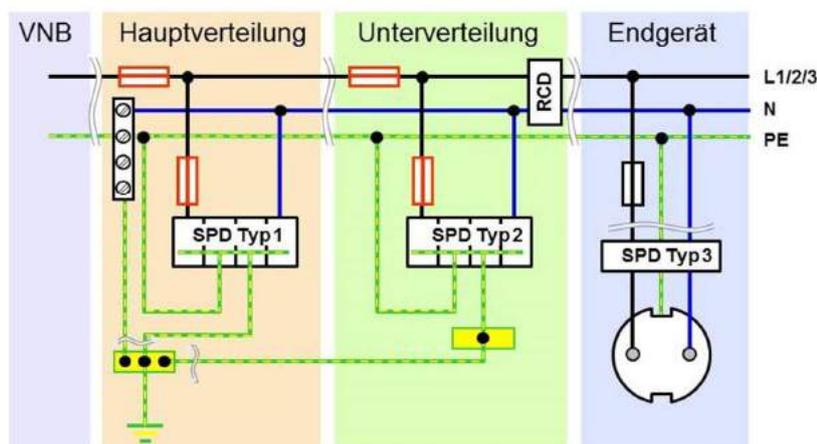
Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 13



# Gebäude – Innerer Blitzschutz

## Blitzschutz in der Hausstromversorgung

### Koordinierter Überspannungsschutz im TN-C-S-System mit RCD („FI-Schalter“)



Quelle: www.vde.com | Verband der Elektrotechnik



Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 14



# Agenda

.Einleitung – Aktuelle Zahlen

.Phänomen Blitz

## .Arten der Schäden und Gegenmaßnahmen

▪Gebäude

    .Direkt Einschlag

    .Indirekter Einschlag

▪Menschen

.Zusammenfassung



Quelle: www.vde.com | Verband der Elektrotechnik



Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 15



## Arten der Schäden und Gegenmaßnahmen - Menschen

.Rock am Ring



Bilderquelle: www.swr.de | Südwestrundfunk

.Wie hoch sind die Überlebenschancen?

▪Direkt Einschlag wird oft überlebt

    .Strom fließt auf Körper Oberfläche

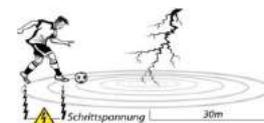
    .Mögliche Schäden sind dennoch

        ▪Verbrennungen, Verbrühungen, Nervenschädigungen

▪Indirekter Einschlag einige Meter entfernt

    .Schrittspannung klein halten

    ▪Sonst Stromfluss durch Körper



Quelle: www.vde.com | Verband der Elektrotechnik



Datum | Referent | Kurztitel der Präsentation | Seite 16



# Arten der Schäden und Gegenmaßnahmen - Menschen

.Verhalten bei Gewitter

- Faradayschen Käfig (Auto) aufsuchen, oder ein Gebäude
- Im Freien, hohe Objekte meiden (Bäume, Laternen)

.In einigen Metern entfernt von hohen Objekten auf dem Boden hocken



Quelle: www.vde.com | Verband der Elektrotechnik

## Agenda

- .Einleitung – Aktuelle Zahlen
- .Phänomen Blitz
- .Arten der Schäden und Gegenmaßnahmen
  - Gebäude
    - .Direkt Einschlag
    - .Indirekter Einschlag
  - Menschen
- .Zusammenfassung**



# Zusammenfassung

•Blitze richten auf verschiedene Weise Schäden an

•An Gebäuden

•Dazu Äußerer Blitzschutz I Fangstangen

•Dazu Innerer Blitzschutz I PAS und Überspannungsableiter

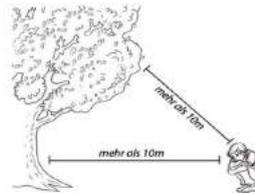
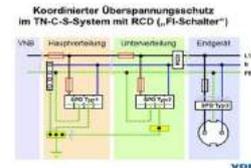
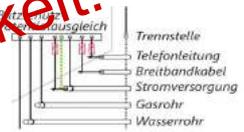
•Menschen I Faradayscher Käfig I Hocken

•Zukunftsaussichten

•Einzelschäden wachsen

•Blitzschutz wird immer relevanter

•Wichtig: Sicherheitsaspekt



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

=> Der Schutz ist so noch nicht ausreichend, Verbesserungsbedarf!

# Superconductivity Applications 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 Superconducting Cables

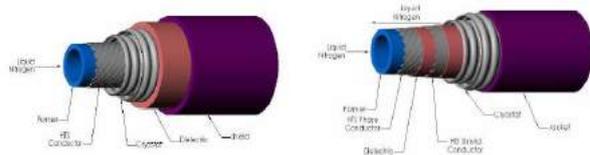
Superconductors have zero electrical resistance below a critical temperature. Until 1986, the highest known critical temperature was a frigid 23 K (-250°C). But in 1986, a new class of copper-oxide-based compounds, called High Temperature Superconductor (HTS), was discovered, with much higher critical temperatures reaching 135 K (-138°C) which is above 77 K (-196°C) the temperature of boiling liquid nitrogen [1]. This discovery sparked interest in HTS power cables.

Compared to conventional cables, HTS cables are more efficient. These can carry more power as they allow delivering 3-5 times the power for AC systems and up to 10 the power for DC systems at equivalent voltage [1], with a quite low energy loss. That offers a solution for power transmission in high power density areas such as metropolitan cities. In the future these transmission systems will also need to transfer from 2 to 20 GW of power over distances of a few hundreds of km from for example wind farms to the final distribution. Long superconducting cables could carry very high currents, from 5–10 kA, without resistive losses, achieving very high power levels in combination with high voltages up to 400 kV. [2]

Moreover HTS permits a smaller overall diameter because of the absence of a need for heat exchange to the air or ground which, beside the elimination of EMF pollution, make them also environmentally interesting. However, HTS cables have significantly lower refrigeration needs, and the lower cost of the refrigerator partially offsets the higher cable cost.

### 2.1 HTS Cables Design

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 [3].



**Fig 1:** Comparison of Cables with Warm (left) and Cold (right) Dielectrics.

Several industrial and research activities in Europe, North

America and Japan are aiming to develop different designs for AC HTS cables. Three of these represented in figure 2 are:

- (a) The 3-phase coaxial cable, which consists of three magnetically completely shielded phases.
- (b). The 3-phase concentric cable, in which all three phases are concentric tubes.
- (c) The triad cable, in which the phases are not magnetically shielded separately, but with only one common metallic sheath for all three phases.

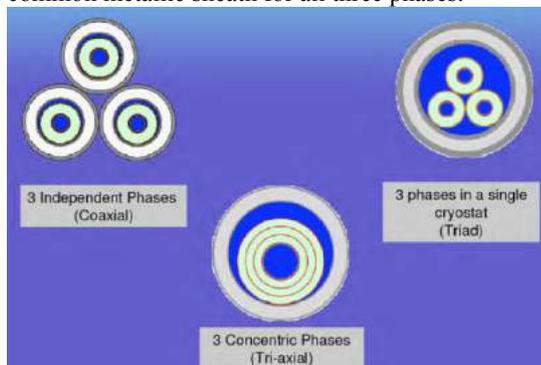


Fig 2: Proposed Configurations for AC HTS Cable

The advantages and disadvantages of the three designs are listed in the following table: [4]

Design	Advantages	Disadvantages
(a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Low HTS loss (magnetic flux perpendicular).</li> <li>- No metallic shield required.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Double amount of HTS compared to triad design.</li> <li>- Dielectric loss at HTS temp.</li> </ul>
(b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Same as 3-coaxial</li> <li>- Less space than 3-coaxial required.</li> <li>- Less HTS than 3-coaxial required (more than triad)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- All phases replaced in case of defect.</li> <li>- Dielectric loss at HTS temp.</li> <li>- Phases exchanged in joints in order to establish symmetry.</li> </ul>
(c)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dielectric loss at room temperature.</li> <li>- Less HTS than 3-coaxial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perpendicular magnetic field component from other phases imply suppressed critical current and large HTS loss</li> <li>- Loss in metallic sheath</li> <li>- Large reactive power</li> </ul>

The DC HTS cable represents a very attractive alternative to AC HTS cables for several reasons. Apart from refrigeration, losses can be almost totally eliminated as they are mainly ohmic (estimated 1%-2% compared to 3%-4% for AC HTS cables) [5] This makes the design and optimisation of DC HTS cables much less complex than in the AC case. The dielectric strength of the insulation is better as well. However, generation and end usage are almost exclusively AC and the costs of inversion and rectification can be high.

General conceptual diagram of HTS cable system is shown as below. The main components of HTS cable system are HTS cable, cooling facility, terminal and monitoring system. [6]

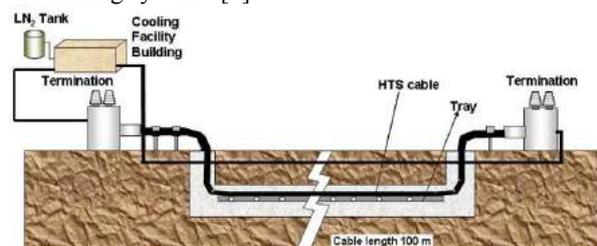


Fig 3: General conceptual diagram of HTS cable system

## 2.2 HTS Cable Projects

Several HTS power cable projects in recent years have shown technical feasibility.

Like the German city Essen, where on April 2014, the world's longest superconductive cable and the first to have been integrated into an urban electricity grid known as AmpaCity project has been installed, many other cities knew similar projects as well. This 1km-long 10kV high-temperature ceramic-based superconductive cable is made of three layers of bismuth strontium calcium copper oxide, is cooled down to minus 207°C to achieve the superconductive state, which completely eliminates electrical resistance allowing for 100 per cent efficient energy transmission without losses. The 15cm diameter cable, developed by Nexans, includes an inner and outer channel through which liquid nitrogen flows providing efficient cooling. The structure is insulated from its outer shell by a layer of vacuum to prevent thermal energy transfer to the surrounding environment.

In the following table is a closer look at some of the projects [7]

Year	Company	Country	Location	Type	Power / MVA	Voltage / kV	Current per phase / kA	Length / m	Phases	HTS
2014	NKT	USA	New York	3PC	75	13	4	200	3	BSCCO
2014	Nexans	Germany	Essen	3PC	40	10	1	1000	3	BSCCO
2013	Sumitomo	Japan	Yokohama	CD	200	66	2	200	3	BSCCO
2011	LS Cable	Korea	Gochang	CD	150	22.9	1.26	100	3	ReBCO
2011	Nexans	USA	Long Island	CD	331	138	2.4	600	1	ReBCO
2010	Ultera	USA	New York	3PC	96	13.8	4	300	3	ReBCO
2009	Sumitomo	Japan	Yokohama	CD	200	66	1.7	30	3	BSCCO
2008	Nexans	USA	Long Island	CD	574	138	2.4	600	3	BSCCO
2007	Sumitomo	USA	Albany	CD	48	34.5	0.8	30	3	ReBCO
2007	LS Cable	Korea	Gochang	CD	50	22.9	1.26	100	3	BSCCO
2006	Ultera	USA	Columbus	3PC	69	13.2	3	200	3	BSCCO
2006	Sumitomo	USA	Albany	CD	48	34.5	0.8	350	3	BSCCO
2006	Sumitomo	Korea	Gochang	CD	48	22.9	1.25	100	3	BSCCO
2004	Innopower	China	Puji	WD	121	35	2	33.5	3	BSCCO
2003	Furukawa	Japan	Yokosuka	CD	77	77	1	500	1	BSCCO
2002	Pirelli	USA	Detroit	WD	100	24	2.4	120	3	BSCCO
2001	LS Cable	Korea	Gochang	CD	47	22.9	1.26	30	1	BSCCO
2001	NKT	Denmark	Brøndby	CD	104	30	2	30	1	BSCCO
2001	Sumitomo	Japan	Yokosuka	CD	114	66	1	100	3	BSCCO
2001	Sumitomo	Japan	TEPCO	CD	274	66	2.4	30	3	BSCCO
2000	Ultera	USA	Carrollton	CD	27	12.4	1.25	30	3x1	BSCCO
1995	Sumitomo	Japan	Yokosuka	CD	114	67	1	7	3	BSCCO

### 3 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. Because of the zero electrical resistance of superconductors, energy can be stored in a persistent mode, virtually indefinitely until required then discharged within seconds.

#### 3.1 SMES System Components

In general, an SMES system is composed of four parts: [1]

*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.

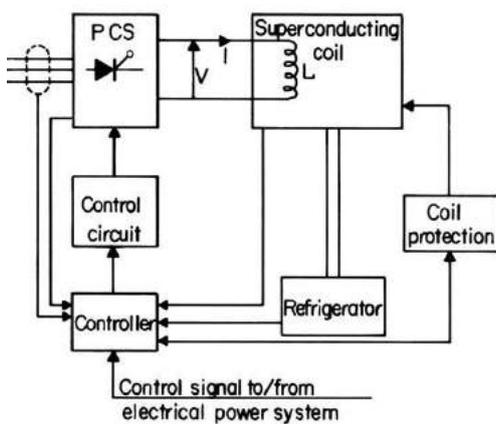


Fig 4: Schematic of an SMES system

Since energy is not converted to other forms (e.g., mechanical or chemical), round-trip efficiency can be very high.

#### 3.2 SMES Applications

*Diurnal energy storage:* Demands for electric power vary both randomly and with predictable variations. Perhaps the most significant variation of power demand is the diurnal change associated with the functioning of an industrial society. Both commercial and residential demands are greater during the day than at night. On the other hand, coal and nuclear power plants operate most efficiently and have longer lives if they operate continuously near their maximum power output [9] In order to accommodate method users' power demands and

the characteristics of these plants, it is possible to install an energy storage system accepting energy during the night and delivering it back to the grid during the day. The difference in marginal cost of off-peak power and the price paid for power during the peak determine the value of this type of storage.

*System Stability and damping:* system stabilization, as provided by the distributed form of SMES, provides benefits primarily through the avoidance or deferral of new transmission requirements. In other words, the higher reliability of the system removes the need to construct additional transmission lines. As such, SMES is a technology that supports the deployment of renewable energy technologies.

*Power quality* SMES can provide uninterrupted power to the customer and /or compensate for persistent low frequency active oscillations (flicker).

#### 3.3 Current Status

The initial proposal of an SMES was brought up by Ferrierin 1969 in France. In 1971 research began in the US by the University of Wisconsin, which led to construction of the first SMES device. At the early stage of SMES research, HTS were not discovered yet, making really expensive and difficult the operation of an SMES. Once commercial HTS appeared in the late 90s, more and more SMES were developed and constructed [10], [11]

An important and recent project that aims to prove that SMES can work at the grid level is under the sponsoring of the U.S. Department of Energy Advanced Research Projects Agency for Energy (ARPA-E). Via a US\$4.2 million grant, the Swiss-based engineering firm ABB outlined plans for a 3.3 kilowatt-hour proof-of-concept SMES prototype. ABB is collaborating with superconducting wire manufacturer SuperPower, Brookhaven National Laboratory, and the University of Houston. The group's ultimate goal is to develop a 1-to-2-megawatt-hour commercial-scale device that is cost-competitive with lead-acid batteries [12] Some other SMES projects have also been proposed. In High Energy Accelerator Research Organization in Japan

### 4 Conclusion

With the change of power industry such as energy crisis and many other factors, superconducting technologies represent a very promising alternative not only to increase efficiency of electricity but also to upgrade security of power system. The most used ones among those technologies is the HTS cable which ensure the promoting of the transmission capability of the network. They have less environmental impact, larger transmission capability and lower energy loss. Superconducting cables are very suitable for transferring large amount of power flows over long distances. If their reliability can be

improved and costs can be further reduced in the future, they can replace conventional underground cables in certain circumstances to be used efficiently, economically, and environment friendly. Other superconducting facilities like SMES has been demonstrated as a viable solution for energy storage problems at high power levels (rapid charge/discharge). Furthermore, due to the important introduction of distributed generation with alternative energy sources such as wind, SMES can be implemented to stabilize the system.

## 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] <http://www.bestpathsproject.eu/en/demonstration/demo-5>
- [3] Migliavacca, Gianluigi, 2013, Advanced Technologies for Future Transmission Grids, Springer Verlag, London.
- [4] W.V. Hassenzahl, D.W. Hazelton, B.K. Johnson, P. Komarek, M. Noe and C.T. Reis: Electric power applications of superconductivity, Proceedings of the IEEE VOL. 92, NO. 10, OCTOBER 2004.
- [5] D. Politano, M. Sjöström, G. Schnyder, J. Rhyner: Technical and Economical Assessment of HTS Cables, Applied Superconductivity Conference, Virginia Beach, USA, 17-22 Sept. 2000
- [6] Y. H. Masuda T, Watanabe M, Takigawa H, Ashibe Y, Suzawa C, Kato T, Okura K, Isojima S, (R&d Unit) Hightemperature Superconducting Cable Technology and Development Trends, SEI Tech Rev, vol. NO.59, pp. 8-13, 2005
- [7] Geun-Joon Lee (2011). Superconductivity Application in Power System, Applications of High-Tc Superconductivity, Dr. Adir Luiz (Ed.), ISBN: 978-953-307-308-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/applications-of-high-tc-superconductivity/superconductivity-application-in-power-system>
- [8] [https://www.itep.kit.edu/img/cable\\_table.png](https://www.itep.kit.edu/img/cable_table.png)
- [9] 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.
- [10] Weijia Yuan. Second Generation High Temperature Superconducting Coils and Their Applications for Energy Storage. Springer Theses, Doctoral Thesis accepted by the University of Cambridge, Cambridge, UK. 2011
- [11] H. Chen et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review/ Progress in Natural Science 19 (2009) 291–312
- [12] Phil McKenna. Superconducting Magnets for Grid-Scale Storage. Technology Review, Energy. March. 2011.



## Superconductivity Applications in Power Systems: Recent Advances

Samar Ouadhani, 13.07.2016

### Agenda

- Motivation
- Superconducting Cables
- Superconducting Magnetic Energy Storage
- Conclusion

# Agenda

- Motivation
- Superconducting Cables
- Superconducting Magnetic Energy Storage
- Conclusion

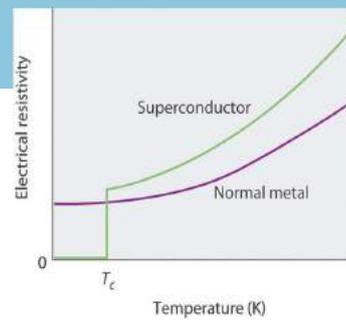
## Motivation



Heike Kamerlingh  
(1853-1926)



Discovery of  
Superconductivity in  
1911



<http://chemwiki.ucdavis.edu>



Slidesharecdn.com

# Agenda

- Motivation
- Superconducting Cables
- Superconducting Magnetic Energy Storage
- Conclusion



Technische  
Universität  
Braunschweig

13.07.2016 | Samar Ouadhani | Superconductivity Applications in Power System



## Superconducting Cables

### Background to superconducting power transmission

- High-temperature superconductors make the technology more tractable.
- Oil prices are rising rapidly.
- Worries are increasing about security of energy supplies.
- More general environmental concerns are also becoming a preoccupation.



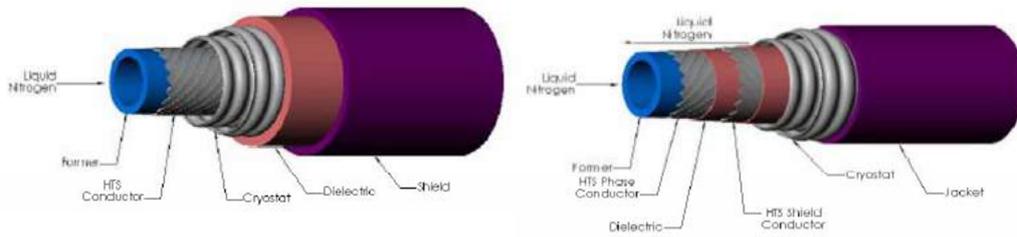
Technische  
Universität  
Braunschweig

13.07.2016 | Samar Ouadhani | Superconductivity Applications in Power System



# Superconducting Cables

## Cable Designs

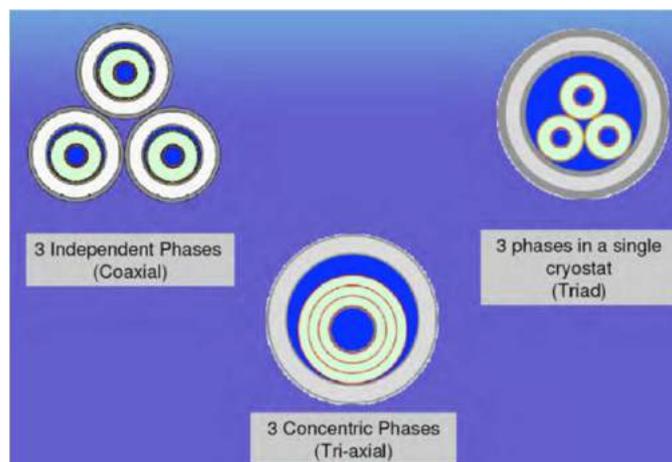


Harry Jones, SUPERCONDUCTORS IN THE TRANSMISSION OF ELECTRICITY AND NETWORKS

Warm and Cold dielectric design

# Superconducting cables

## Configurations for AC High Temperatur Superconducting Cables



wikipedia.com

# Superconducting Cables

## AC vs DC

- Superconductivity lends itself best to DC as, apart from refrigeration, losses can be almost totally eliminated as they are mainly ohmic.
- Generation and end usage are almost exclusively AC and the costs of inversion and rectification can be high.

# Superconducting Cables

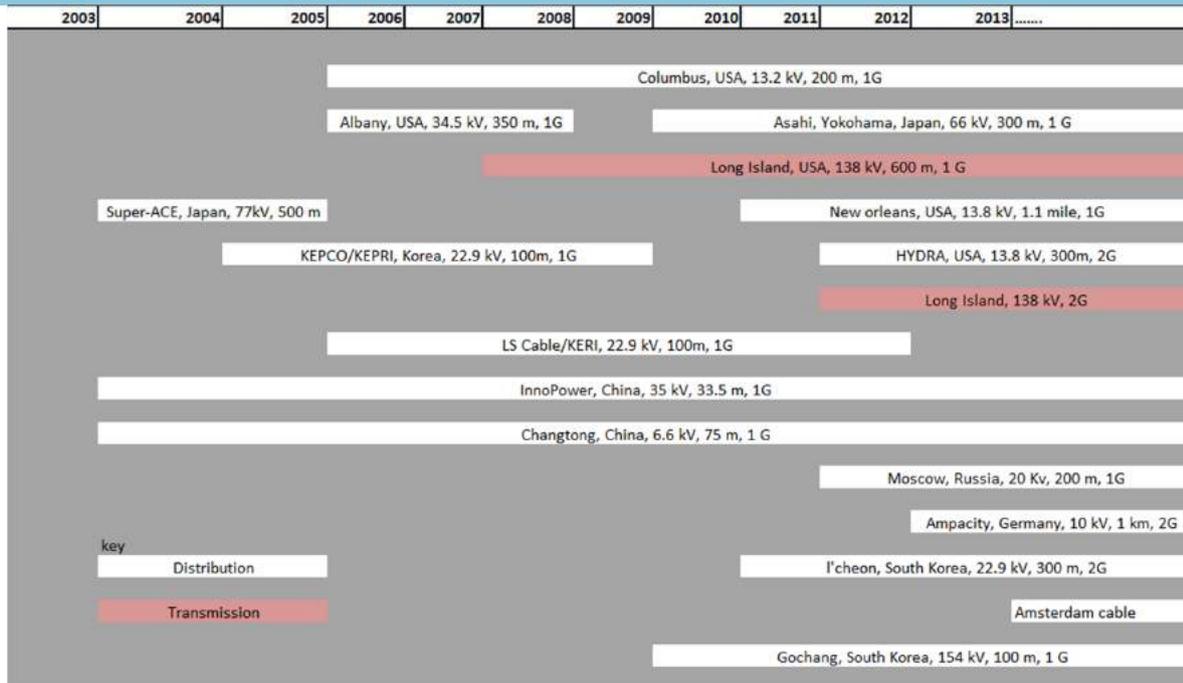
## Projects

- Essen, Germany, April 2014 the world's longest superconductive cable and the first to have been integrated into an urban electricity grid.
- Many other projects



[www.presseportal.de](http://www.presseportal.de)

# Superconducting Cables



Time plan for different Cable project worldwide



13.07.2016 | Samar Ouadhani | Superconductivity Applications in Power System



## Agenda

- Motivation
- Superconducting Cables
- Superconducting Magnetic Energy Storage
- Conclusion

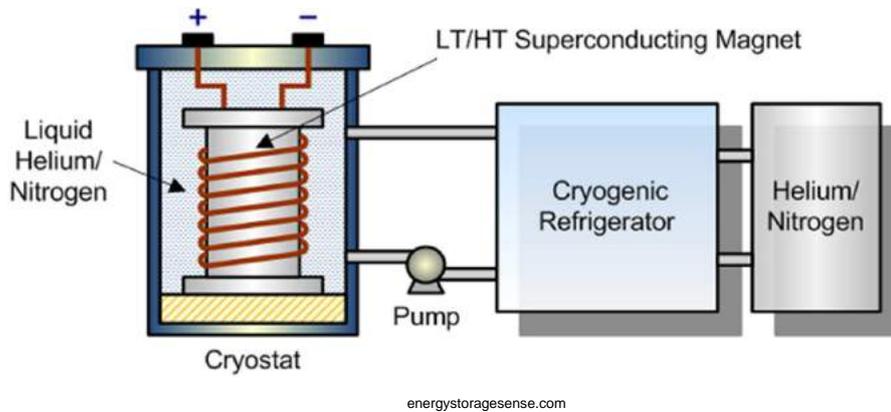


13.07.2016 | Samar Ouadhani | Superconductivity Applications in Power System



# Superconducting Magnetic Energy Storage

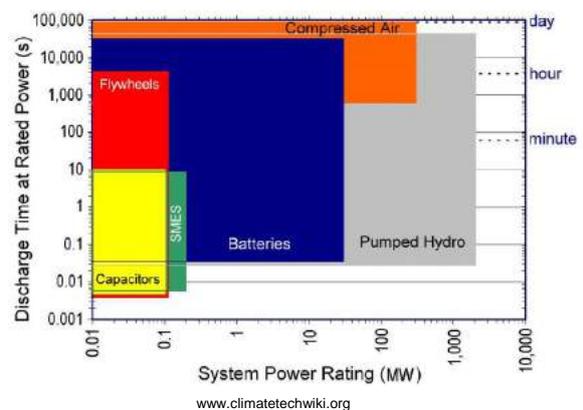
Components:



# Superconducting Magnetic Energy Storage

Characterics

- Energy storage with greater than 97% efficiency.
- Provides rapid response for either charge or discharge amount of energy available is independent of discharge rating charge and discharge sequence can repeat infinitely without degradation.



# Superconducting Magnetic Energy Storage

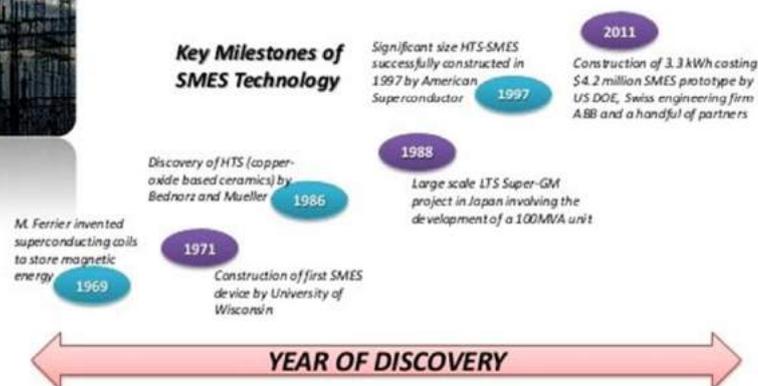
## Benefits

- Improves power quality for critical loads and provides carryover energy during momentary voltage sags and power outages.
- Improves load leveling between renewable energy sources (wind, solar) and the transmission and distribution network.
- Environmentally beneficial as compared to batteries; superconductivity does not rely on a chemical reaction and no toxins are produced in the process.
- Enhances transmission line capacity and performance – SMES features a high dynamic range, an almost infinite cycling capability, and an energy recovery rate close to 100%.
- Ultra-high field operation enables long-term storage SMES systems in a compact device with cost advantages in material and system costs.

# Superconducting Magnetic Energy Storage



## SUPERCONDUCTING MAGNETIC STORAGE SYSTEM (SMES)



slideshare.net

# Agenda

- Motivation
- Superconducting Cables
- Superconducting Magnetic Energy Storage
- Conclusion

# Conclusion

- With the change of power industry , superconducting technologies represent a very promising alternative not only to increase efficiency of electricity, but also to upgrade security of power system.
- Both Superconducting Cables and Superconducting Magnetic Energy Storage offer a very attractive way to face the economical, environmental and technical challenges of the future power system.

# Questions? 😊



Technische  
Universität  
Braunschweig

13.07.2016 | Samar Ouadhani | Superconductivity Applications in Power System



# 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 applications of second life batteries, and also the process of second life batteries are considered, which is the most important part in this research. As we know, batteries that are used for electric vehicles 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 technique is still not so perfect, so there's still a long term to work.

## 1 Introduction

Nowadays the renewable energy sources are becoming more important energy source to human beings. In the future, Germany will mostly use the renewable energy sources, which is the goal for Germany's tomorrow. After that, neither Transport nor industrial Processes will directly produce the emissions from the electric cars or factories. With this situation brought up, the government is discussing the potentials of the second life batteries. It's been expected that till 2050, there will be 80% electricity from renewable energy sources and by 2020, there will be at least 1 million electric vehicles driven on the German roads, which is a huge number and we're looking forward to it.

There are some reasons why the second life concepts of lithium-ion batteries are researched and being brought into the market. First of all, it can generate the additional revenue and reduce costs, while the costs of electric Vehicles are so high, first of all, and also the left value of the used batteries can be used again in some other ways, like recycling. Secondly, it's very good for the environment and the ecological balance, because there will be less pollution from more new batteries and other energy. When the life of lithium-ion batteries goes to an end, 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.

Right now there are already a lot of projects that are working on the second life concepts of lithium-ion batteries, some universities are working on the research while some are doing the market investigations. Even in pilot projects they are still in research, like they are testing these concepts. However, there are still some significant uncertainties regarding the economic reasons and the influence on the environment and also the cost of batteries electric vehicles.

## 2 Theoretic Basics

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. 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.

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 Main Technology and Research

#### 3.1 Applications

There are mainly two different kinds of second life applications to be classified, namely stationary and mobile applications. The stationary applications are mainly for the energy storage, which are classified with two different kinds, on-grid solutions and off-grid solutions. For on-grid solutions, there are energy time shifting, renewable firming and service reliability or quality. For different applications the operators are also different, such as industrial plant operators or charging infrastructure operators. For off-grid solutions there are backup power and remote installations [1]. For some small private households, it can be applied on the storage systems for optimizing the own consumption of electric energy from photovoltaics, or on the storage systems for uninterruptible power supply of private households. Another one is the mobile applications. The second life batteries can be also used in some electric machines. For industrial operators, it can be reused in the industrial trucks, such as forklifts, tractors, trolleys, and also in some industrial sweepers. What's more, it can be reused in driverless transport vehicles for the internal transport. For private and commercial operators, it can be reused in e-bikes, e-scooters, golf carts etc., and the same use in driverless transport vehicles.

#### 3.2 Process

As we already know, the five parts of lithium-ion batteries are repairing, remanufacturing, refurbishing, repurposing and recycling, the last part recycling is the most important to the second life batteries. The development of second life applications with used lithium-ion traction batteries is still in its very early days, so there is still a big question on people's mind. There is a major challenge in trying to mix and match the different battery modules and chemistries, because they are different and individual, they couldn't just be combined with each other, and they must be selected and chosen into the matched batteries.

And the supply of the used lithium-ion batteries on the market is very small, since there are not too many people using electric vehicles, and the batteries haven't achieved the end of the life for the second life applications. Therefore there will be probably another five years or even more before these batteries reach their end of the life and are ready for the second life in a new application.

As we all know, the manufacturer design the end of life to be achieved, when the batteries reach 80% of the original capacity or the original power. However for lithium-ion batteries the remaining storage capacity could still be useful in other applications [2].

The process and the value chain of second life batteries starts with the batteries achieving 80% of its original power or capacity, shown in followed figure, and then the battery can be removed from the electric vehicle by a certified service center, after that these batteries can be collected and be sent together to a reuse or recycling company. When they reach there and they could be

evaluated if they can be used for another time and these batteries can undergo initial testing to determine their voltage, capacity or operating performance level. At this point the batteries have a chance to begin to be recycled by being disassembled, after that the different components can be separated into different useful recycling streams, like metals, plastics etc. And then these recycling streams will be tested if they can be mixed with each other for a new component. The Modules, which are built with cells, that haven been mechanically installed with bolts, have a chance to be disassembled, otherwise they cannot be. And after that the cells which are separated can start with the characterization testing to know if they are available to be use. Any cells or modules that do not meet a minimum criteria will be sent to be recycled, which will finish their life, while those that do meet the criteria, will be chosen to be grouped within different capacity ranges and then they are ready for reinstallation and the second life in a new application [10].

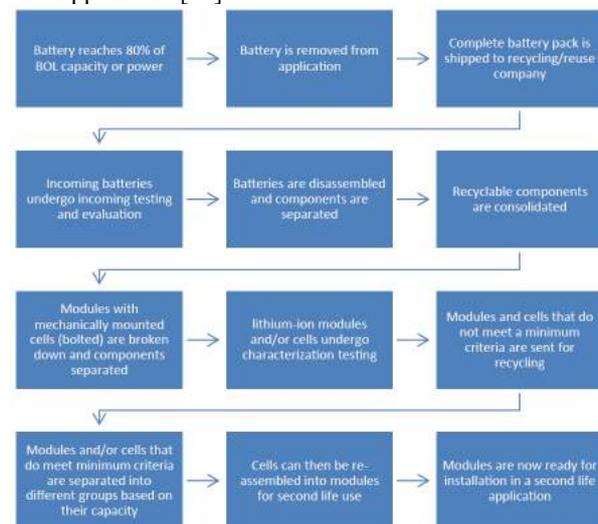


Figure 1 the process of second life batteries

#### 3.3 Ageing

Talking about the ageing of lithium-ion batteries, which is unpredictable and inevitable for the batteries. That leaves the prediction of lithium-ion batteries' lifetime becoming a hot potato and a big challenge, which is caused by some physical and electrochemical processes and non-linear interactions, and these all can result in the cell degradation. And the cell temperature, potentials, cycle depths and current rates are also resulting in the ageing of the batteries, and all of them can cause the huge complexity of lifetime testing and modelling [9].

Generally there are two different kinds of the ageing to be classified, that means cycle lifetime and calendar lifetime. Cycle lifetime is concerned with effects, which are directly related to system operation, such as volume changes inside the active materials during the charging and discharging yielding mechanical stress. What's more, the voltage, capacity and discharge depth must be all concerned. Another one, calendar lifetime, is related

indirectly to thermodynamically instability of system's materials and components [12].

In most cases the ageing process can bring up a decrease of actual capacity and power capability of batteries, and also it can result in a rise of cell impedance, and a reduction of functionality. Therefore for safety, it's critical to know the effective remaining capacity, current charge efficiency, and if there are any failed cells within the pack, which can be whenever tested to see if these batteries can be ready for the second life applications [3].

### 3.4 Availability

Now talking about the availability of second life batteries, a lot of studies show that it comes to a barrier. The goal of Germany is that in 2020 there will be 1 million electric cars on the road, but it seems not so good, there is still a big difference at least now.

As we know, when we establish the electric vehicles, the returning figures will be set as the normal cars, and after that the used lithium-ion batteries will be available, which will be sent to a reprocessing or reuse company to support another applications. So if we will open the second life batteries' market, we must have enough returning batteries, therefore the high returning quantity of electric vehicles with lithium-ion batteries for the growing second life battery market is tremendously important [11].

In Germany, the electric cars that are not allowed to be on the roads are currently twice more than newly registered cars, at least in 2014 [13]. Despite this, in 2014 there were 3443 electric vehicles out of service, which are 40% of newly registered cars in total, and in 2015 there were at least more than 6000 out of service, which were available for the second life batteries. Since the electric vehicles are still very new to this market, and the expected life has not been achieved in the next few years, the number of used lithium-ion batteries still rises depending on the market [4].

Honestly the availability of second life batteries on the one hand still depends on the manufacturer and all models, which will be responsible by these manufacturer, but we still have a conclusion to this. There are no standards for construction, interconnection, voltage, etc. in lithium-ion batteries at least now [13]. On the other hand the availability depends on the useful life in the vehicles and the state of the batteries at the end of life.

### 3.5 Foreground

Perhaps the two biggest challenges that the second life batteries still face today are the supply of lithium-ion batteries on the market for refurbishment and the expenses of refurbishing these batteries. Since there are not too many electric vehicles on the road, which is a huge problem. And we don't know when the electric vehicles will eventually reach the end of life, there's still a long term to observe and research. The second thing is the cost. The end cost of refurbished batteries needs to take into account the transportation, testing, remanufacturing and reinstallation into the new

application as well as the operating overhead, warranty, and of course a profit margin [5]. Today with so few batteries on this market, the overhead costs are tremendously high, till the market is full of this kind of batteries.

There are some university researching these concepts, like the university of Münster, whose project is named EOL-IS, namely End-Of-Life Solutions for e-Car batteries. They are working on some market research to support some factories and companies more market investigations and more chances. In addition to this, there are also some companies working together to get a partnership for the second life batteries at the same time. For example, in 2012, General Motors and ABB announced a partnership to repackage Chevrolet Volt batteries into a new modular unit that would be capable of offering about 2h of power, this creates an initial second life path for the used Chevy Volt batteries [6]. Another company, Nissan, the 4R Energy Corporation, intends to demonstrate the use of large scale grid energy storage solutions to perform power smoothing and renewable solar power integration into the grid [7].

## 4 SWOT-Analysis and ecological potentials



Figure 2 SWOT-Analysis of second life batteries

There are a lot of studies working on analyzing these concepts of second life batteries. As shown on this picture, there are four parts that the batteries are facing. First of all, it shows us the strengths of second life batteries. It's possible for second life batteries in stationary and mobile applications, and of course it can make additional profit or cost savings. And it's also good for the environment, that's because it's replacement of polluting batteries, which can reduce emissions of greenhouse gases and resource requirements. As its weakness, there are still some uncertainties regarding the state after the first life, and it's also uncertain how long it will be used in the second life. Moreover, the safety concerns and reprocessing costs can be ignored. This figure also shows us the chances for second life batteries. The electric vehicles' market is growing, which causes a growing demand for stable energy storage. And the

awareness of environment and resources is also increasing. What's more, the incurred recycling costs are delaying and the efficiency increases by the incentive measures. At last it's the threats, like anything's got a bad stage. The low availability of used lithium-ion batteries is concerned. As a new concept, we don't know the battery price before in the history. And it's missing the preparation of payment through low acceptance of used products. And we also see the economic recycling processes and unclear legal situation as a risk in the future.



Figure 3 Factors affecting the ecological savings potential of Second-Life concepts

In this field, the savings of emissions and the conservation of resources may represent a conflict, a huge example here is e-mobility, which can reduce emissions and can be connected with some other critical materials. In order to resolve this conflict, the process of recycling must be improved, the raw materials must be better and the lifetime of batteries must be extended.

These are some ranking, which must be obeyed, prevention, preparation for reuse, recycling, other recovery and elimination.

In figure 3 it's shown the factors affecting the ecological savings potential of second life concepts. A new battery product will be avoided by the second life batteries, which is good. And the recycling rate will be increased by extending the recycling process. However, there are also some negative factors. The first thing is the expense for the prepared process. And the useful life will be shorter, which is uncertain for the second life batteries. And the last thing is the increase of the need for additional memory components due to the larger volume of second life batteries.

## 5 Summary

So at the end of paper, let's look back to see what we've talked about. At first we took a view of the applications of second life batteries, and we've known some areas where the second life batteries can be reused. And then it's shown the whole process of second life batteries, especially the 5R. And we've known that most battery

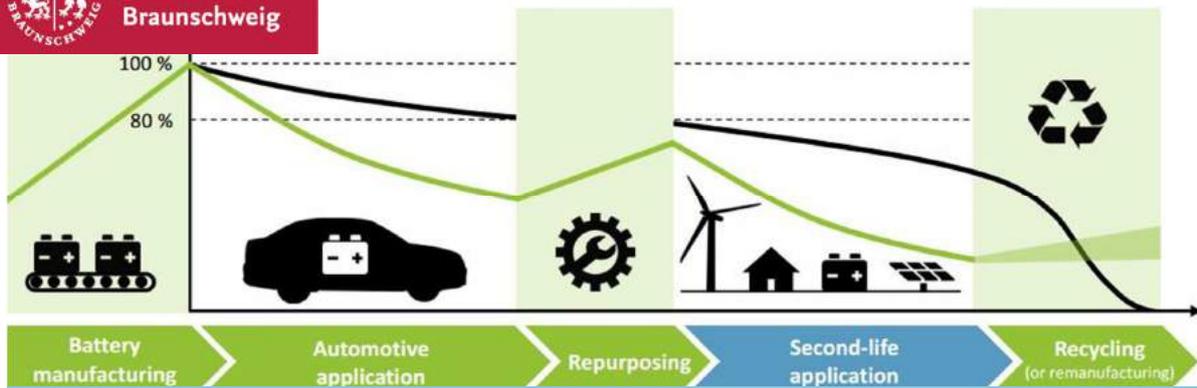
pack manufacturing applications design their end of life to be achieved when they reach 80% of the original capacity or 80% of the original power [8], that's the main thought of it. And then how the batteries will be used into a second life and plus a recycling process of lithium-ion batteries were detailed mentioned. After that, we analyzed the second life batteries through a SWOT diagram, which was from strengths, weaknesses, opportunities and threats analyzed. We can see exactly some advantages and disadvantages, which can directly influence these applications. After that we've known the availability of the second life batteries in the market in the recent days and in the future. And next is the very important part of batteries, ageing, we also discussed about it from two typical classifications of ageing and their effects. And then the ecological analysis was also discussed in this topic. At the end it's briefly introduced some projects which were researched by some big companies and universities. They are doing the great thing for humans. We are hoping in ten years the second life of lithium-ion batteries can be worldwide used and let's make it happen.

## 6 References

- [1] Chad Davis, Second Life Hybrid Vehicle Batteries Used In Solar Backup, 2012.
- [2] Fintan McLoughlin, Secondary Re-Use of Batteries From Electric Vehicles for Building Integrated Photo-Voltaic (BIPV) applications, 2015.
- [3] Leila Ahmadi, A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems, 2015
- [4] Tam Hunt, Is There Enough Lithium to Maintain the Growth of the Lithium-Ion Battery Market?, 2015.
- [5] John Warner, The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design, 2015.
- [6] John Warner, The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design, 2015.
- [7] John Warner, The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design, 2015.
- [8] <http://batteryuniversity.com>.
- [9] Feng Leng, Cher Ming Tan & Michael Pecht, Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature, 2015
- [10] John Warner, The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design, 2015.
- [11] Anupama. Keeli, Optimal Use of Second Life Battery for Peak Load Management and Improving the Life of the Battery.
- [12] Ahmadi L, Fowler M, Young SB, Fraser RA, Gaffney B, Walker SB, Energy efficiency of Li-ion battery packs re-used in stationary power applications, 2014.
- [13] Ahmadi L, Yip A, Fowler M, Young SB, Fraser RA, Environmental feasibility of re-use of

[14] electric vehicle batteries, 2014.  
Cicconi P, Landi D, Feasibility analysis of  
second life applications for Li-ion cells used in

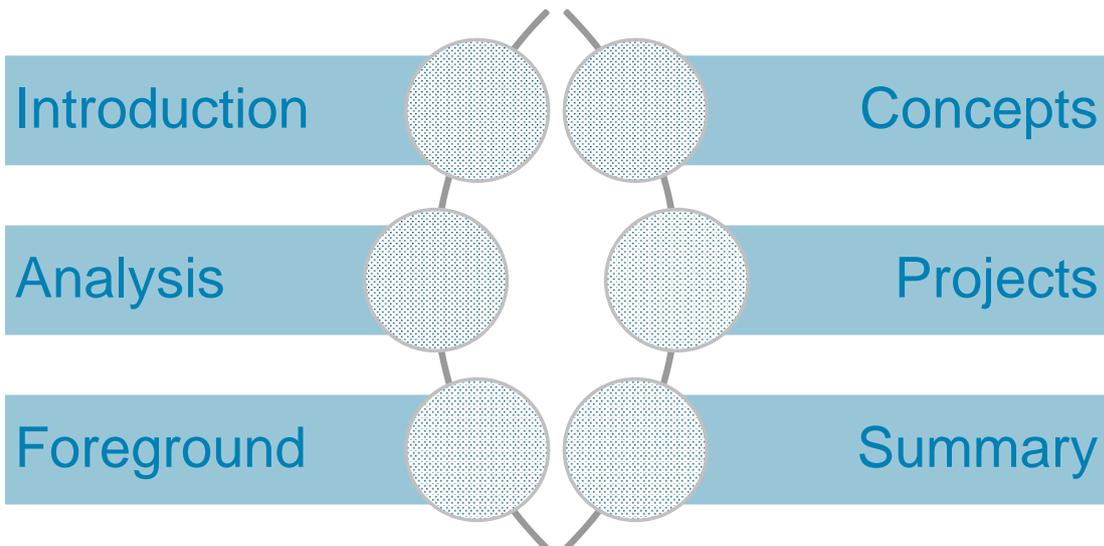
electric powertrain using environmental  
indicators, 2012



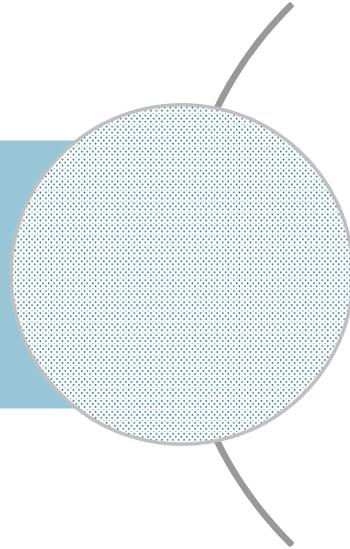
## Second-Life-Concepts for Lithium-Ion-Batteries in Electric Vehicles

Miao Huang, 4602602, SoSe 2016

### Content



## 1. Introduction



## 1. Introduction



Source: [www.digitaltrends.com](http://www.digitaltrends.com)

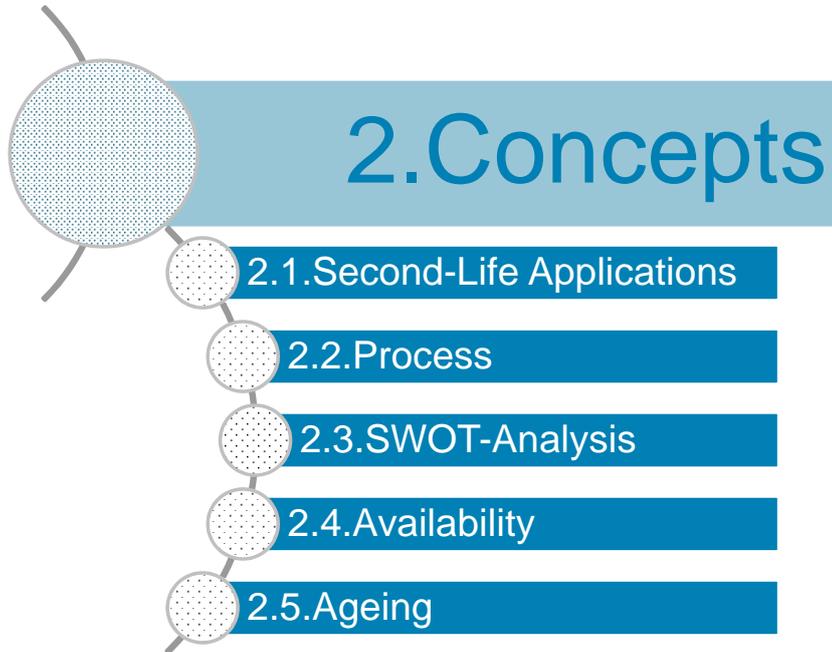
### Motivation

- To generate additional revenue and reduce costs
- Environment and ecological balance improved

- Till 2050, 80% electricity from renewable energy sources
- By 2020, 1 million EVs in Germany
- Second-life Batteries important

### Uncertainties

- Economic reasons
- Influence on the environment
- Cost of BEV



## 2.1. Second-Life Applications



### On-Grid Stationary

- Energy Time Shifting
- Renewable Firming
- Service Reliability / Quality



### Off-Grid Stationary

- Backup Power
- Remote Installations

Source: [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)

## 2.1. Second-Life Applications



Source: [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)

### Mobile (Industrial operators)

- Re-use in industrial trucks (e.g. forklifts, tractors, trolleys), sweepers etc.
- Re-use in driverless transport vehicles for the internal transport



Source: [www.ktm-bikes.at](http://www.ktm-bikes.at)

### Mobile (Private & commercial)

- Re-use in e-bikes, e-scooters, golf carts etc.
- Battery swapping systems for e-bikes, e-scooters
- Re-use in driverless transport vehicles

## 2.1. Second-Life Applications

### House storage



Source: [wandel-wird-standard.de](http://wandel-wird-standard.de)

### Electric Forklift



Source: [logismarket](http://logismarket)

## 2.1. Second-Life Applications

### Charging station



Source: autohaus.de

### Network storage



Source: chip.de

## 2.2. Process

repairing

remanufacturing

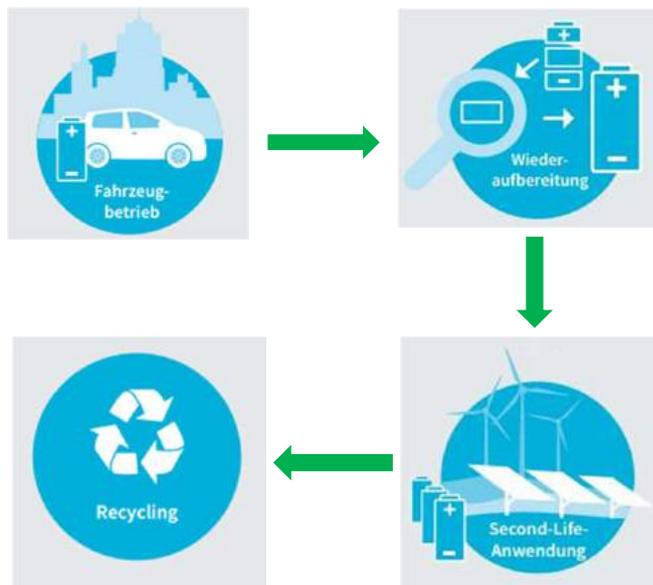
refurbishing

repurposing

recycling

- Development of SL-applications is still in its very early days. Because each battery pack is unique, there is a major challenge
- Supply of used LIB on the market is still small, in the early phase of their life
- Another five years or more before these batteries reach their end of life to be ready for second life applications

## 2.2. Process

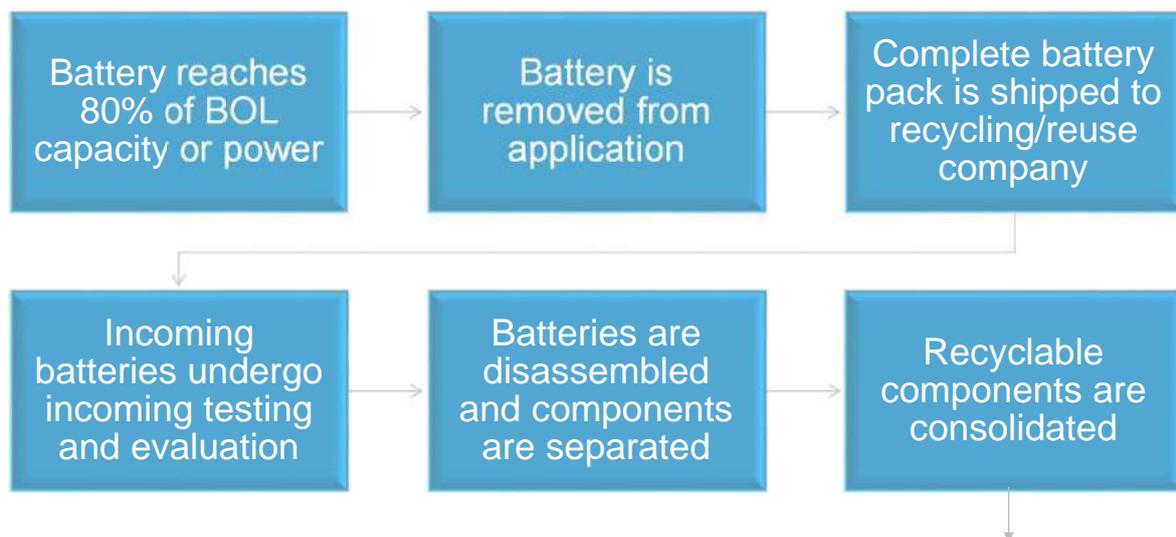


Most battery pack manufacturing applications design their end of life to be achieved, when they reach 80% of the original capacity or 80% of the original power

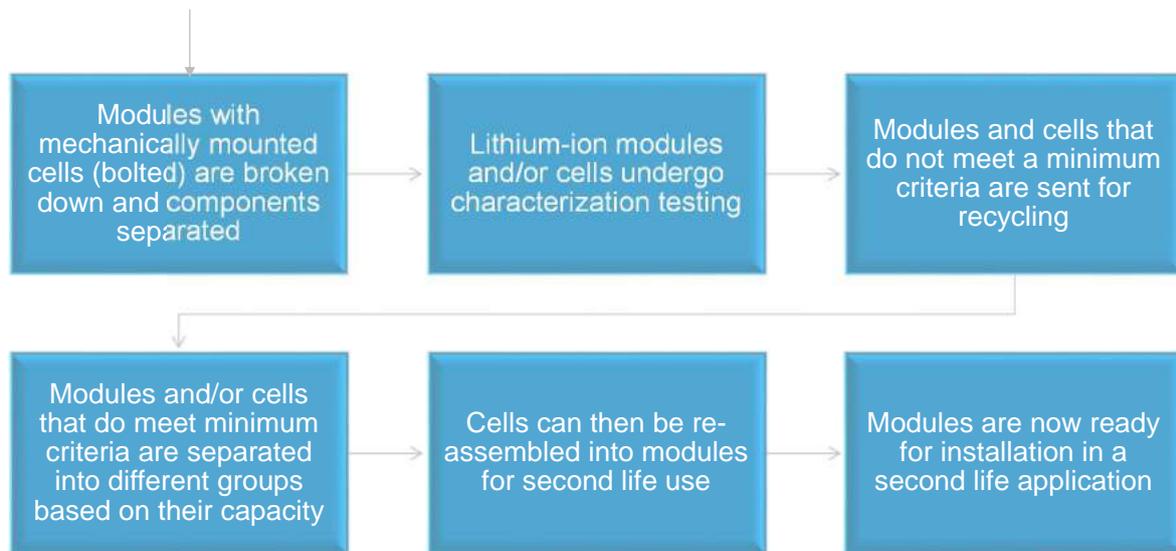
Source: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen, 2016

## 2.2. Process

### Battery second use life cycle. BOL, begin of life



## 2.2. Process



## 2.3. SWOT analysis

### Strengths

- second life in stationary and mobile use possible
- additional profit or cost savings
- replacement of polluting batteries
- reducing emissions of greenhouse gases and resource requirements

### Weaknesses

- uncertainty regarding the state after first life
- uncertainty of lifetime in second life
- safety concerns
- reprocessing costs

### Opportunities

- growing market in electric vehicle network
- growing demand for stable energy storage
- Increasing environmental and resource awareness
- delay of incurred recycling costs

### Threats

- low availability of used batteries
- uncertainty of battery price history
- missing prepare of payment through low acceptance of used products
- economic recycling processes
- unclear legal situation

## 2.3. SWOT analysis

### Strengths

- second life in stationary and mobile use possible
- additional profit or cost savings
- replacement of polluting batteries
- reducing emissions of greenhouse gases and resource requirements

### Weaknesses

- uncertainty regarding the state after first life
- uncertainty of lifetime in second life
- safety concerns
- reprocessing costs

### Opportunities

- growing market in electric vehicle network
- growing demand for stable energy storage
- Increasing environmental and resource awareness
- delay of incurred recycling costs

### Threats

- low availability of used batteries
- uncertainty of battery price history
- missing prepare of payment through low acceptance of used products
- economic recycling processes
- unclear legal situation

## 2.3. SWOT analysis

### Strengths

- second life in stationary and mobile use possible
- additional profit or cost savings
- replacement of polluting batteries
- reducing emissions of greenhouse gases and resource requirements

### Weaknesses

- uncertainty regarding the state after first life
- uncertainty of lifetime in second life
- safety concerns
- reprocessing costs

### Opportunities

- growing market in electric vehicle network
- growing demand for stable energy storage
- Increasing environmental and resource awareness
- delay of incurred recycling costs

### Threats

- low availability of used batteries
- uncertainty of battery price history
- missing prepare of payment through low acceptance of used products
- economic recycling processes
- unclear legal situation

## 2.3. SWOT analysis

### Strengths

- second life in stationary and mobile use possible
- additional profit or cost savings
- replacement of polluting batteries
- reducing emissions of greenhouse gases and resource requirements

### Weaknesses

- uncertainty regarding the state after first life
- uncertainty of lifetime in second life
- safety concerns
- reprocessing costs

### Opportunities

- growing market in electric vehicle network
- growing demand for stable energy storage
- Increasing environmental and resource awareness
- delay of incurred recycling costs

### Threats

- low availability of used batteries
- uncertainty of battery price history
- missing prepare of payment through low acceptance of used products
- economic recycling processes
- unclear legal situation

## 2.4. Availability

- When we establish EVs, the returning figures will be set as the normal cars, and therefore the LIB will be available
- A high returning quantity of EVs for the growing SLB market is important
- In 2014, more than 3000 EVs out of service, which are 40% of newly registered cars
- The number of used LIB still rises depending on the market
- The availability depends on the manufacturers and all models, and also depends on the useful life in the vehicles and the state of battery at the EOL

## 2.5. Ageing



Source: greencarreports.com

### How do Lithium-ion Batteries age?

two different kinds of ageing:  
Cycle lifetime  
Calendar lifetime

Cycle lifetime mainly considers effects, which are directly related to system operation, e.g. volume changes inside the active materials during charging and discharging yielding mechanical stress

Cycle lifetime

Calendar lifetime is related to thermodynamically instability of system's materials and components.

Calendar lifetime



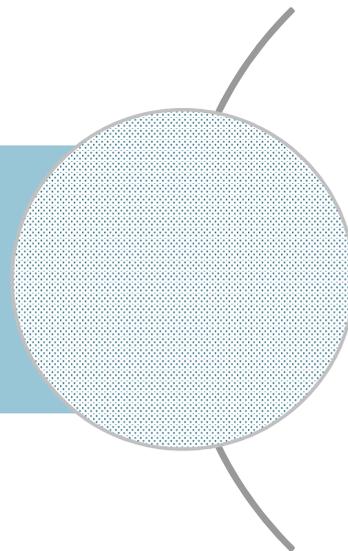
Technische Universität Braunschweig

13.07 | Miao Huang | Second-Life-Concepts for Batteries | Seite 19



## Content

### 3. Analysis

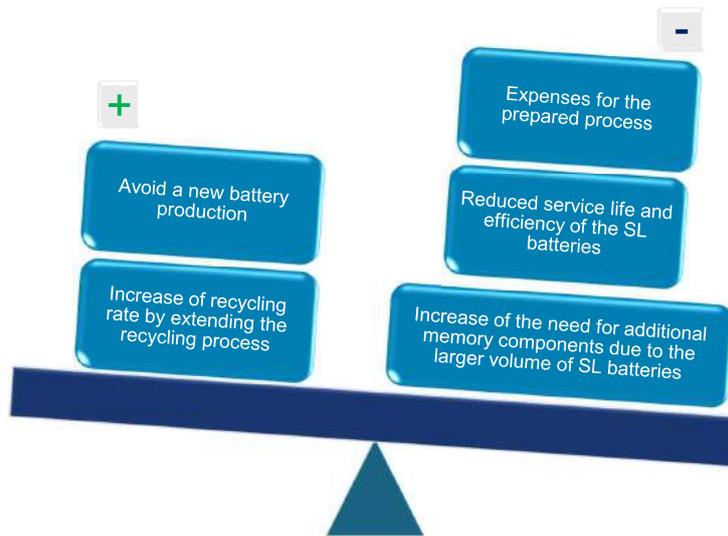


Technische Universität Braunschweig

13.07 | Miao Huang | Second-Life-Concepts for Batteries | Seite 20

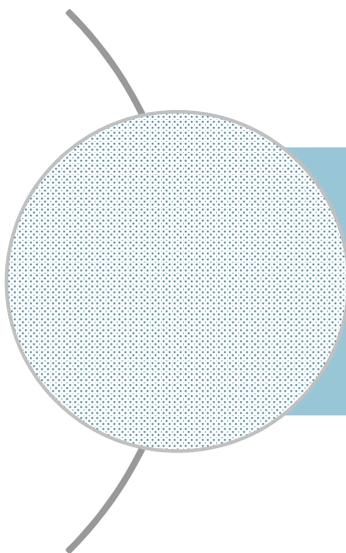


### 3. Economic and ecological potentials



Factors affecting the ecological savings potential of Second-Life concepts

### Content

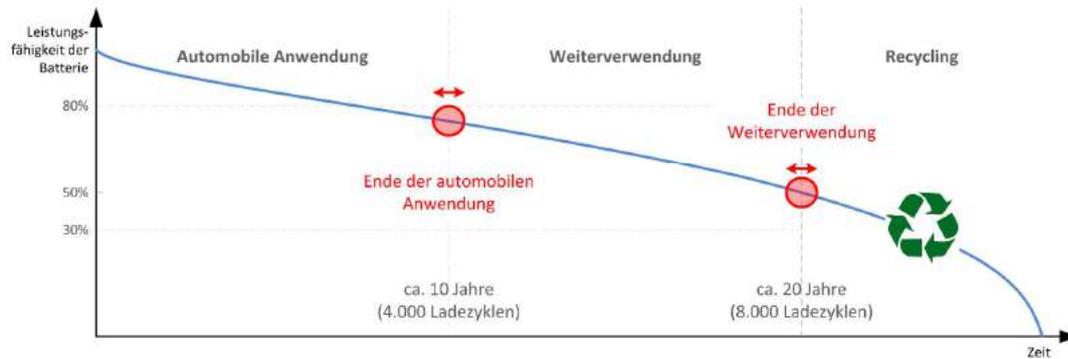


## 4. Projects

## 4. Current Second-life Projects

### EOL-IS End-Of-Life Solutions for eCar batteries - Development-Service Systems and Information Decision Support Systems

Batterie-Lebensdauer-Modell



Source: eol-is.de



13.07 | Miao Huang | Second-Life-Concepts for Batteries | Seite 23



## 4. Current Second-life Projects



Source: en.wikipedia.org

In 2012, General Motors and ABB announced a partnership to repackage Chevrolet Volt batteries into a new modular unit that would be capable of offering about 2h of power, this creates an initial second life "path" for the used Chevy Volt batteries (General Motors, 2012)



Source: en.wikipedia.org

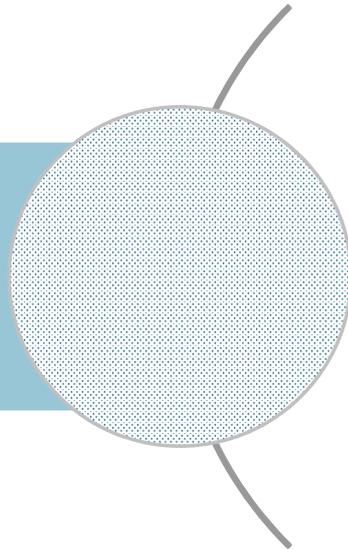
Nissan, the 4R Energy Corporation, intends to demonstrate the use of large scale grid energy storage solutions to perform power smoothing and renewable solar power integration into the grid (Nissan, 2014)



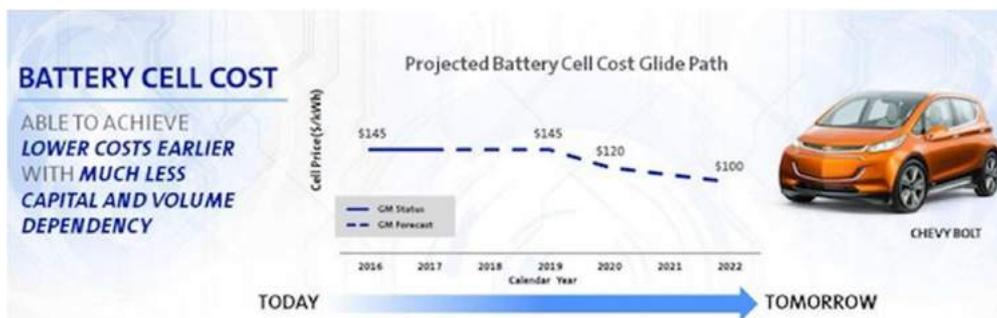
13.07 | Miao Huang | Second-Life-Concepts for Batteries | Seite 24



## 5. Foreground



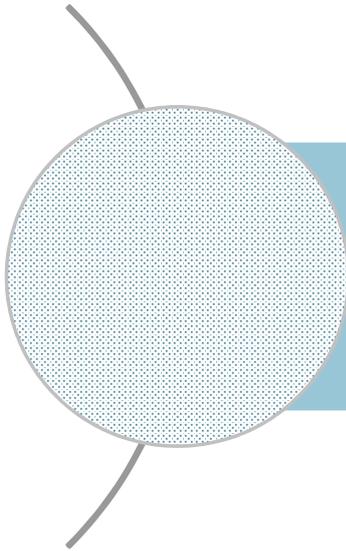
## 5. Foreground (Plan and Future)



Source: thinkprogress.org

### Two biggest challenges

- Supply of batteries on market
- The cost of refurbishing batteries



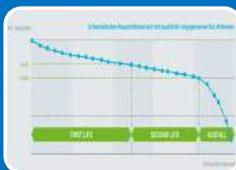
# 6. Summary

## 6. Summary



### Applications and Process

- Stationary and mobile applications
- Second life cycle and recycle process



### Age and Analysis

- Two kinds of Ageing
- SWOT-Analysis and ecological analysis



### Projects and Foreground

- Recent projects
- Challenges

THANK YOU.

Miao Huang 2016



Technische  
Universität  
Braunschweig

13.07 | Miao Huang | Second-Life-Concepts for Batteries | Seite 29



Technische  
Universität  
Braunschweig

13.07 | Miao Huang | Second-Life-Concepts for Batteries | Seite 30



# 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 den 1890er Jahren. 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 gesteigerten Netzanforderungen 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-Einsatzspannung. Wird die Einsatzspannung 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 Gleichspannungsbeanspruchung und Isoliermaterialien

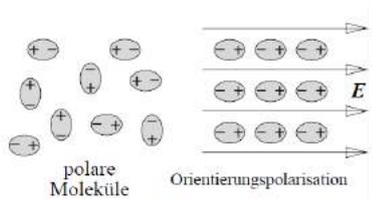
Im Hauptteil werden die Grundlagen für die Beanspruchung von Gleichspannung und die Auswahl des Isolierstoffs von HGÜ ausführlich erklärt.

#### 3.1 Gleichspannungsbeanspruchung

Die Isolierstoffe für HGÜ-Anwendungen werden durch reinen Gleichspannung beansprucht. Z.b. das DC-Kabel, die Moleküle des Isolierstoffs von Kabeln wird durch äußere elektrische Felder gerichtet. Das Umpolen der Gleichspannung ist erforderlich, wenn die Leistungsflussrichtung der HGÜ-Anlage umgekehrt werden soll. Im Vergleich zur Wechselspannungsbeanspruchung treten andere Effekte (Polarisationseffekte und Oberflächenentladungen) auf, die zur Schädigung des Isolierstoffs führen. In diesem Kapitel werden zwei Effekte angesprochen.

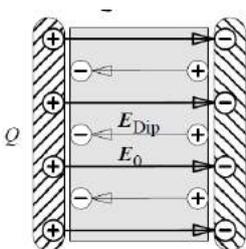
##### 3.1.1 Polarisationseffekt

Ortsfest gebundene positive und negative Ladungsträger können unter der Kraftwirkung eines elektrischen Feldes gegeneinander verschoben werden, es entsteht eine Polarisation des Isolierstoffs. Die Moleküle werden durch das externe elektrische Feld gerichtet (**Bild 1**), es wird auch als Orientierungspolarisation bezeichnet. (vgl. [1], S.76).



**Bild 1** Orientierungspolarisation (vgl. [1], S.76)

Durch die polaren Moleküle kann ein zusätzliches elektrisches Feld, aus der Überlagerung vieler Dipolfelder, entstehen. Das elektrische Feld ist entgegengerichtet zum externen elektrischen Felds (**Bild 2**).



**Bild 2** Zusatzfeld durch Polarisation (vgl. [1], S.77)

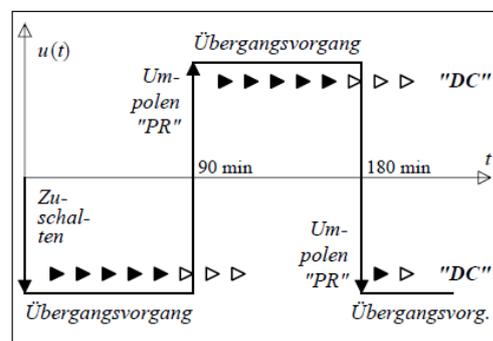
$E_{dip}$  im oberen Bild 2 ist das elektrische Feld, dass durch die gerichteten Moleküle erzeugt wird. Das elektrische Feld zwischen zwei Platten  $E_0$  wird durch das entgegengerichtete elektrische Feld reduziert.

Der Wert der relativen Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  des Isolierstoffs hängt stark von den Polarisationsmechanismen ab. Die Gleichung ist:

$$P = E \cdot (\epsilon_r - 1) \cdot \epsilon_0 \quad (1)$$

$P$  ist ein Vektor und bezeichnet die Stärke der Polarisation. Die relative Dielektrizitätszahl des Isolierstoffs ( $\epsilon_r$ ) wird durch  $P$  (1) entschieden. (vgl. [1], S.77)

Eine Umkehrung der Leistungsflussrichtung durch Umkehrung der Stromflussrichtung bei konstanter Polarität der Spannung wird in HGÜ-Anlage verwendet. Beim Umpolen wird der Isolierstoff in einer kurzen Zeit mit einer sehr starken elektrischen Feldstärke beansprucht.

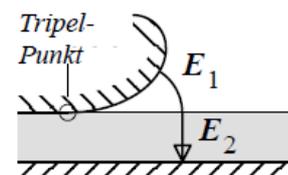


**Bild 3** Umpolen und Zuschaltung von Gleichspannung (vgl. [1], S.534)

Das **Bild 3** zeigt einen Polaritätswechsel und eine Zuschaltung einer Gleichspannung. Verändert sich die Gleichspannung sofort vom positiven Pegel zum negative Pegel, dann entsteht eine sehr starke Spannungsdifferenz in einer sehr kurzen Zeit. Der Polaritätswechsel führt auch zur Schädigung, z.B. die materialzerstörende Teilentladung des Isolierstoffs.

##### 3.1.2 Oberflächenladung

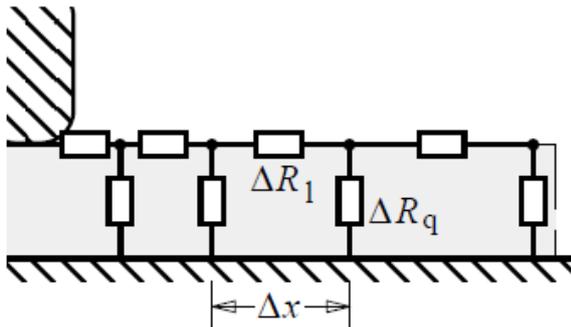
Die zentralen Probleme von HGÜ-Anlagen sind die Überlagerungen der Ladungen an den Oberflächen von Isolatoren, Durchführungen, Kabelendverschlüssen, Stützern und Isoliergehäusen. Die Überlagerungen entstehen häufig im Tripelpunkt (vgl. [1] S.192)



**Bild 4** Tripel Punkt (vgl. [1], S.194)

Der Punkt, der zwischen Elektrode, Isolierstoff und Gas ist, wird als „Triple Punkt“ bezeichnet. Beim einer

tangentialen Feldstärke (**Bild 4**) tritt eine starke Feldkonzentration im Triple Punkt an der Elektrodenkante auf. Es führt zur Überlagerung der Ladungen an dem Triple Punkt, die als Oberflächenladungen bezeichnet werden. Dadurch können bei niedrigen Spannungen Teilentladungen entstehen. Die überlagerten Oberflächenladungen führt beim Überschreiten der Teilentladungs-Einsatzspannung zu einer Gleitentladung. Die Gleitentladung wird im längs geschichteten Dielektrikum (entlang der Oberfläche) entwickelt, deshalb werden diese Gleitentladung auch als Oberflächenentladung bezeichnet.



**Bild 5** Gleitentladung bei Gleichspannungsbeanspruchung (vgl. [1], S.193)

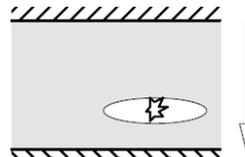
Ein geschichtetes Dielektrikum (unter Beteiligung eines gasförmigen Isolierstoffes) bildet Grenzflächen (**Bild 5**), die als Oberflächen bezeichnet werden. Das Ersatzschaltbild ist ein rein ohmscher Kettenleiter aus Längs- und Querwiderständen. Die Längswiderstände bedeuten die überlagerten Fremdschichten und der Isolierschichtwiderstand wird als Querschwäche bezeichnet. Das Gas ist vergleichsweise hochohmig. (vgl. [1] S.194) Die Oberflächenentladung entwickelt sich entlang der Oberfläche und kann die Gegenelektrode erreichen, wenn die Spannung über der elektrischen Festigkeit des Gases liegt. Es führt zu einem kompletten Durchschlag des Isoliermediums.

Die Fremdschicht (Längswiderstände in **Bild 5**) wird durch die Koronaentladung beeinflusst. Koronaentladungen entstehen im stark inhomogenen Feld einer gasisolierten Elektrodenanordnung, wenn beim Steigern der Spannung die Zündspannung überschritten wird. Die zusätzlichen, durch Stoßionisation erzeugten Ladungsträger führen zu einem Ansteigen des Stroms bei nahezu konstanter Spannung, diese Spannung wird als Zündspannung bezeichnet (vgl. [1], S.155). Bei Gleichspannung ergibt sich nach Überschreiten der Zündspannung eine andauernde Koronaentladung aus einer ununterbrochenen Folge von Stromimpulsen. (vgl. [1], S.243,244) Koronaentladung kann zur Überlagerung der Fremdschichten führen. Die Fremdschicht kann durch Schmutzablagerungen, welche durch Befeuchtung, Regen, Niederschlag von Nebel entstehen.

Die Feldverteilung ist durch die Fremdschichten (Längswiderstände in **Bild 5**) bestimmt. (vgl. [1], S.197) und kann zum Überschlag des Isolierstoffs führen. Um den Überschlag zu verhindern, bzw. die

Schmutzablagerungen zu minimieren kann man Silikonmaterialien verwenden.

Die für Hochspannungsanlage und Komponenten hergestellten elektrischen Isolierung sind durch die Fertigung bedingt weder homogen noch ideal. Durch Inhomogenitäten im Isolierstoff können die gasgefüllten Hohlräume entstehen. Die inneren Teilentladungen treten auch in Isolierstoffen von HGÜ Anlagen auf.



**Bild 6** Teilentladung in einem Hohlraum (vgl. [1] S.245)

In quer geschichtetem Dielektrikum ist das elektrische Feld, und damit auch die Richtung elektrischer Gasentladung, senkrecht zur Oberfläche gerichtet. Die innere Teilentladung tritt durch Risse, Fehlerstellen von Isolierstoff (**Bild 6**) auf. TE führen auch zur langfristigen Schädigung z.B. die Alterung des Isolierstoffes. Es kann zum Erosionsdurchschlag kommen. (vgl. [1] S.192)

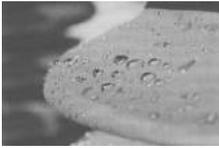
### 3.2 Isoliermaterialien für HGÜ

Um die Oberflächenentladungen von HGÜ zu minimieren soll man gütige Isoliermaterial für HGÜ auswählen. In dieser Kapitel werden zwei Materialien, die Silikonmaterialien und vernetztes Polyäthylen erklärt.

#### 3.2.1 Silikonmaterialien

Für Freiluftisolatoren wird meistens Porzellan als Isolierstoff verwendet. Porzellanoberflächen sind hydrophil, Wasser verläuft zu einem großflächigen feuchten Film. Feuchte Filme können große Strecken des Isolators überbrücken und einen Fremdschichtüberschlag einleiten. Silikonschirme sind hydrophob und kann die Freiluftisolatoren vor einer Fremdschicht schützen. Silikone sind nicht brennbar und können über einen weiten Temperaturbereich eingesetzt werden, ohne dass sich die Eigenschaften wesentlich ändern. Silikone sind sehr beständig gegen Chemikalien, Witterungseinflüsse und Alterung. Die Dielektrizitätszahl von ungefüllten Silikon (Silikon ohne mineralischen Füllstoffen) beträgt 2,8 bis 3 und mit Füllstoffen zwischen 3 und 6. Für die Hochspannisolierung werden Materialien mit einem möglich niedrigen Verlustfaktor eingesetzt, um thermische Instabilitäten und Wärmedurchschläge zu vermeiden. Hohe Verlustfaktor führt zur erhöhte Betriebstemperaturen in Geräten. Die erhöhte Betriebstemperaturen kann zu deutlich erhöhten Verlust führen. (vgl. [1], S.272) Der Verlustfaktor von Silikone beträgt etwa zwischen 0.5 bis 1 % und kann die Anforderung von Hochspannisolierung erfüllen. Silikone sind kriechstromfest und besitzen eine hohe, mit Polymeren vergleichbare Durchschlagsfestigkeit. (vgl. [1], S. 310)

**Bild 7** zeigt eine Freiluftisolierung unter den Bedingungen starker Verschmutzung durch Wassertropfen.



**Bild 7** Wassertropfen auf einem Freiluftisolator (vgl. [1] S.311)

Wenn die Oberfläche nicht hydrophob ist, können die Wassertropfen einen feuchten Film auf der Isolatoroberfläche erzeugen, der große Strecken des Isolators überbrücken und einen Fremdschichtenüberschlag einleiten kann. Hydrophobie bedeutet die wasserabweisende Eigenschaft von Oberfläche. Die Hydrophobie bestimmt, dass ablaufende Tropfen (wie Wassertropfen in **Bild 7**) kleine feuchten Film hinterlässt. Silikonschirme haben die Fähigkeit, die Bildung zusammenhängender Filme zu verhindern und das Abrollen isolierter Tropfen zu ermöglichen, deshalb sind Silikone die ideale Material für Freiluftisolierungen, um die Schädigung der Verschmutzung und Fremdschichtung zu minimieren. (vgl. [1] S.311)

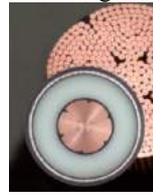
Versuche haben gezeigt, dass bereits eine mehrwöchige Verschmutzung unter Freiluftbedingungen auf Porzellanoberflächen zum Zusammenbruch bei nicht viel kleineren Regenintensitäten führt. Im Vergleich mit Porzellanoberflächen, die Porzellanoberflächen mit Silikonbeschichtung können die Verschmutzung effektiv vermindern. Die Hydrophobie von Silikonbeschichtung kann durch die Überschlüge, Koronaentladung vermindert werden. Ausdiffundierende niedermolekulare Bestandteile führen jedoch zu einer selbsttätigen Regenerierung. Mit Hilfe von Silikonflüssigkeit (Silikonöl) kann die Hydrophobie auch unmittelbar wiederhergestellt werden. Bei Gleichspannungsdurchführungen über 500 kV wird die Verwendung von Silikonschrimdurchführung häufig als sicherer Weg zur Vermeidung von Überschlagen. (vgl. [1], S.312)

### 3.2.2 Vernetztes Polyäthylen (VPE)

Im Bereich von HGÜ-Kabel wird vernetztes Polyäthylen (VPE) als Isolierstoff eingesetzt.

Bei der Polymerisation verbinden sich gleichartige Monomere unter Auflösung von Doppelbindungen zu einem hochpolymeren Kettenmolekül. (vgl. [1], S .294) Polyäthylen entsteht durch Polymerisation aus Äthylen-Molekülen. Wegen der unpolaren, symmetrischen Moleküle ergeben sich eine niedrige Dielektrizitätszahl und sehr niedrige Verluste. (vgl. [1], S.296). Wegen der niedrigen Dauertemperaturbeständigkeit und dem Kriechen des Materials unter mechanischer und thermischer Beanspruchung wird in Kabel ein räumlich vernetztes Polyäthylen (VPE) eingesetzt. Die Vernetzung erfolgt nach der Pressverfahren der thermoplastischen Isolierung. Dadurch ergibt sich bei Umgebungstemperatur

ein duroplastischer und bei höheren Temperaturen ein elastomerer Zustand mit einer gewissen mechanischen Restfestigkeit. (vgl. [1], S .297)



**Bild 8** VPE-Kabel (vgl. [5])

Obige **Bild 8** ist das VPE-Kabel mit der VPE- Isolierstoff. Innere Leiter werden durch äußere VPE- Materialien isoliert. VPE- Kabel kann im Bereich von Hochspannung und Höchstspannung verwendet werden.

## 4 Zusammenfassung

HGÜ ist eine sehr wichtige und effiziente Übertragungsform und wird in Zukunft mit der Zunahme der erneuerbare Energie weiter entwickelt. Die Herausforderungen von HGÜ sind Oberflächenladungen und die auftretenden Polarisierungseffekte. Die Oberflächenladung kann zu einem kompletten Durchschlag des Isolierstoffs führen. Durch die Polaritätswechsel werden Isolierstoffe mit sehr starken Spannungen und elektrischen Feldstärken beansprucht. Diese zwei Effekte sind die zentralen Probleme von HGÜ-Anwendung. Als Isoliermaterialien für HGÜ kann man Silikone- und VPE- Materialien einsetzen. Eine Silikonbeschichtung kann den Porzellanfreiluftisolator besser gegen Überlagerung von Fremdschichten schützen, weil Silikone eine Hydrophobeeigenschaft aufweisen. VPE kann als Isolierstoff für Kabel eingesetzt werden, weil VPE bessere elektrische Eigenschaften besitzt, z.B wegen der hohen Durchschlagfestigkeit, der Dauertemperaturbeständigkeit, der geringe Verlust und der geringe Dielektrizität.

## 5 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\\_10000](http://www.energie.de/lexika/lexikon-der-anlagentechnik/begriff/69/spannungsebenen_10000)
- [4] M.Meyer W.Boeck K.Möller W Zeangl, Hochspannungstechnik, Springer-Verlag
- [5] [http://www.suedkabel.de/cms/upload/Accessories\\_High\\_Voltage/XLPE\\_insulated\\_power\\_cables\\_and\\_systems.pdf](http://www.suedkabel.de/cms/upload/Accessories_High_Voltage/XLPE_insulated_power_cables_and_systems.pdf); Stand 10.06.2016



## Isoliersysteme für HGÜ Anwendungen - Herausforderungen und Konzepte

Xufeng, Li, 19.07.2016

### Gliederung

- Einleitung
- Energiewende von HGÜ
- Beanspruchung von Isolierstoff
- Isoliermaterialien von HGÜ
- Zusammenfassung

# Agenda

- Einleitung
- Energiewende von HGÜ
- Beanspruchung von Isolierstoff
- Isoliermaterialien von HGÜ
- Zusammenfassung

## Einleitung

### Motivation

- Erfüllung von Zunahme der erneuerbare Energie und steigender Netanforderung
- Verlustarme und hocheffiziente Übertragungsform



Quelle: [7]

### Isolation von HGÜ notwendig

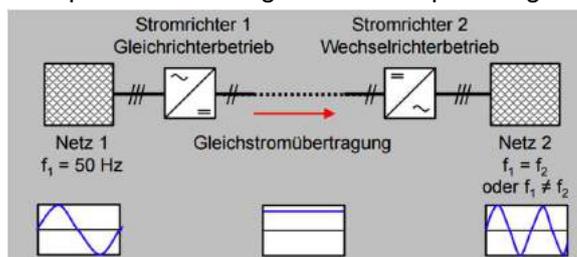
- Zur Erhöhung die Sicherheit und Stabilität von HGÜ-System
- Gleichspannungsbeanspruchung

# Agenda

- Einleitung
- Energiewende von HGÜ
- Beanspruchung von Isolierstoff
- Isoliermaterialien von HGÜ
- Zusammenfassung

## Energiewende von HGÜ

HGÜ transportiert die Energie mit Hochspannungsebene.



Quelle: [2]

Im Vergleich zum Drehstromsystem gibt es viele Vorteile von HGÜ.

- Wenige Verlust während der Übertragung wegen Hochspannungsebene
- Keine Stabilitätsproblem
- Kabel über große Entfernung einsetzbar

# Energiewende von HGÜ

## Prognose :

Strom in Deutschland aus erneuerbare Energie (BMWI)

- Bis zum 2025 : 40% bis 45%
- Bis 2035 : 55% bis 60%



Quelle:[3]

## Entwicklung der HGÜ von Amprion:

- Planung der Stromleitung Ultranet
- Verbindung der HGÜ mit Übertragungsleistung von zwei Gigawatt zwischen Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg



Quelle: [4]



19.07.2016 | Li,Xufeng | Isoliersysteme für HGÜ Anwendungen-Herausforderungen und Konzepte | Seite 7



# Agenda

- Einleitung
- Energiewende von HGÜ
- Beanspruchung von Isolierstoff
- Isoliermaterialien von HGÜ
- Zusammenfassung



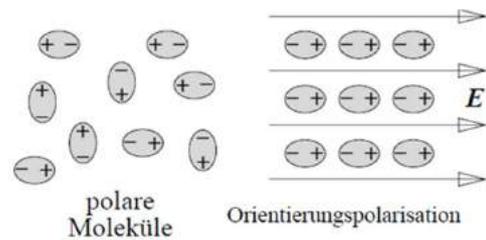
19.07.2016 | Li,Xufeng | Isoliersysteme für HGÜ Anwendungen-Herausforderungen und Konzepte | Seite 8



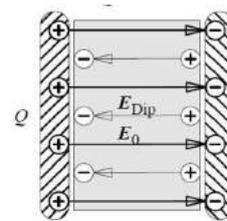
# Beanspruchung von Isolierstoff

## Polarisation

- Polarisation von Atome in Isolierstoff
- Entsteht polare Moleküle
- Erzeugung zusätzliche elektrische Feld durch die Überlagerung vieler Dipolfelder
- Entscheidung von Dielektrizitätszahl durch Polarisation



Quelle: Vgl [1], S.76

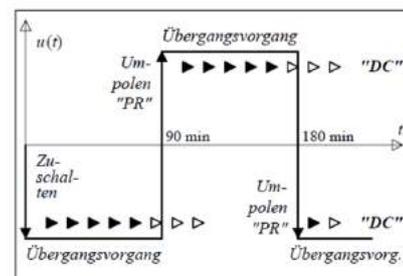


Quelle: Vgl [1], S.76

# Beanspruchung von Isolierstoff

## Polarisationseffekt

- Lastflusssteuerung von HGÜ
- Umpolen und Zuschaltung
- Höhe Beanspruchung von Spannung und Feldstärke in einer kurzer Zeit
- Schädigung zur Isolierstoff

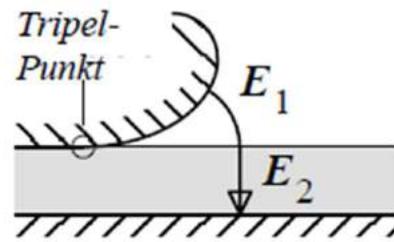


Quelle: Vgl [1], S.534

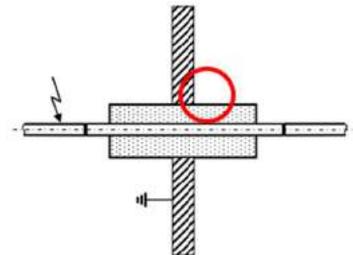
## Beanspruchung von Isolierstoff

### Oberflächenladung

- Tripel Punkt (Elektrode, Isolierstoff, Luft)
- Feldkonzentration von Tripelpunkt
- Überlagerung von Ladung beim niedrige Spannung



Quelle: Vgl [1], S.194

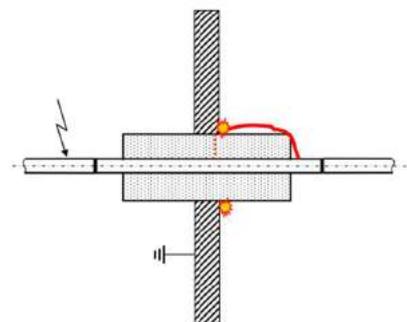


Quelle: [8]

## Beanspruchung von Isolierstoff

### Oberflächenentladung

- Erzeugung Gleitentladung, wenn genug Einsetzspannung erreicht
- Entwicklung entlang der Oberfläche zur Gegenelektrode
- Kompletter Durchschlag, wenn TE Gegenelektrode erreicht



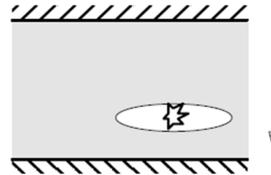
Quelle: [8]

# Beanspruchung von Isolierstoff

## Innere Teilentladung und Koronaentladung

### Innere Teilentladung

- Auftritt durch Fehlerstelle
- Ionisation von gefüllte Gas
- Erzeugung des Zusatzfeldes
- Erosiondurchschlag



Quelle: Vgl [1], S.245

### Koronaentladung

- Auftritt in starke inhomogene Feld
- Auftritt beim Überschreiten der Zündspannung
- Überlagerung von Fremdschichten
- Bestimmung der Feldverteilung durch Fremdschichtung

## Agenda

- Einleitung
- Energiewende von HGÜ
- Beanspruchung von Isolierstoff
- Isoliermaterialen von HGÜ
- Zusammenfassung

## Isolierstoff von HGÜ

### Silikon

- Nicht brennbar
- Weitere Einsatzbereich von Temperatur
- Beständigkeit gegen Chemikalien, Witterungseinflüsse und Alterung
- Höhere vergleichbare Durchschlagsfestigkeit
- Hydrophobie



Quelle: Vgl [1].. S.311

## Isolierstoff von HGÜ

### Einsatz von Silikonbeschichtung

- Hydrophobische Oberfläche. Vergleichbare Porzellanoberflächen sind hydrophil
- Beschichtung von Oberflächen mit Silikonpaste („Silikonfett“)
- Gegen starke Verschmutzung
- Wiederherstellung von Hydrophobie durch Silikonflüssigkeit („Silikonöl“)



Quelle: [6] Stand: 20.06.2016

# Isolierstoff von HGÜ

## Vernetztes Polyäthylen(VPE)

- Kriechstromfest
- Hohe Durchschlag Festigkeit
- Höhere Dauertemperaturbeständigkeit von VPE als PE Material
- Geringe Dielektrizitätszahl und niedrige Verlust
- Einsatz von Kabel



Quelle: [5]

# Agenda

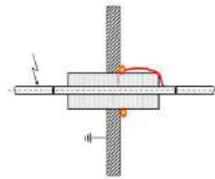
- Einleitung
- Energiewende von HGÜ
- Beanspruchung von Isolierstoff
- Isoliermaterialen von HGÜ
- Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- Vorteile und Entwicklung von HGÜ
- Beanspruchung des Isolierstoffs von HGÜ
  - Polarisierungseffekt
  - Oberflächenladungen
- Auswahl von Isoliermaterialien
  - Silikonbeschichtung
  - Vernetzte Polyäthylen(VPE)



Quelle: [7]



Quelle: [8]



Quelle: [6] Stand: 20.06.2016



**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

## Quelle

1. Quelle: Andreas Küchler, Hochspannungstechnik, Heidelberg: Springer 2009
2. Quelle: Vorlesung Gleichstrom- und Speichersystem, Prof. Kurrat, SoSe 2015
3. Quelle: <http://www.bmwi.de/>
4. Quelle: <http://www.amprion.net/>
5. Quelle: [http://www.suedkabel.de/cms/upload/Accessories\\_High\\_Voltage/XLPE\\_insulated\\_power\\_cables\\_and\\_systems.pdf](http://www.suedkabel.de/cms/upload/Accessories_High_Voltage/XLPE_insulated_power_cables_and_systems.pdf) ; Stand : 20.06.2016
6. Quelle: <http://www.lapp-like.com/loesungen-fertigen/rtv-beschichtungen/>;  
Stand: 20.06.2016
7. Quelle: <http://www.elektroniknet.de/power/erneuerbare-energien/artikel/115250/>;  
Stand: 26.06.2016
8. Quelle: [http://www.hst.tu-darmstadt.de/fileadmin/lehre/hauptstudium/HST\\_II\\_SS10/Folien/hst2\\_v\\_10.pdf](http://www.hst.tu-darmstadt.de/fileadmin/lehre/hauptstudium/HST_II_SS10/Folien/hst2_v_10.pdf); Stand: 03.07.2016
9. Bild von Titel  
Quelle: <https://www.vde.com/de/fg/ETG/Arbeitsgebiete/V2/Aktuelles/Oeffenlich/Seiten/HGUe-Trafo800kV.aspx>; Stand 05,07,2016



# Arbeitsbereich und Schalteigenschaften moderner Leistungshalbleiter

## Operating area and switching characteristics of modern power semiconductors

B.Eng. Dennis Schilling

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

### Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist moderne Leistungshalbleiter miteinander zu vergleichen. Dazu wurden Informationen aus den unterschiedlichsten Quellen zusammengetragen, um den Arbeitsbereich und die Schalteigenschaften näher zu betrachten. Ergebnis dieser Arbeit ist, dass IGBTs und MOSFETs die Thyristoren nahezu vollständig verdrängt haben. 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.

### Abstract

The goals of this study are to compare modern power semiconductors. Using various sources, this study was designed to investigate the operating area and switching characteristics. The results show that IGBTs and MOSFETs have displaced thyristors almost completely. Only in the very high voltage segment thyristors are still used. In the future, the thyristors will be completely displaced from the market by the further development of MOSFETs and IGBTs

## 1 Einleitung

Seit der Entdeckung des Transistors im Jahre 1947, hat die Halbleitertechnologie einen unvergleichlichen Aufschwung erlebt. Sie ist aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Bedingt durch die erneuerbaren Energien, wie Photovoltaik und Windkraft steigt der Bedarf an verlustarmen Leistungshalbleitern. Der Trend geht hierbei zu immer größeren Leistungen, welche die Halbleiter beherrschen müssen. [1][4]

## 2 Funktionsweise moderner Halbleiterleistungsbaulemente

Als Halbleiter werden Elemente bzw. Verbindungen bezeichnet deren elektrische Leitfähigkeit zwischen der von elektrischen Leitern ( $>10^4$  S/m) und der von Nichtleitern ( $<10^{-9}$  S/m) liegt. Die Elemente die heutzutage typischerweise für Halbleiterbaulemente 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]

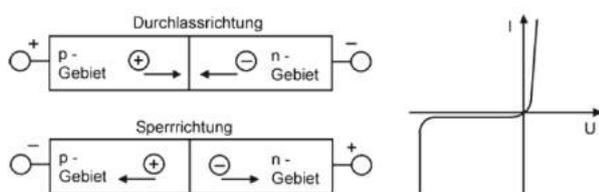


Abb. 1: pn-Übergang in Durchlass- und Sperrrichtung [1]

Die Gebiete weisen auf Grund ihrer Dotierung bereits eine Art Polung auf. Durch das Anlegen einer äußeren Spannung in der das p-Gebiet positiv gepolt und das n-Gebiet negativ gepolt wird, 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]

Neben der zulässigen Sperrspannung und dem zulässigen Durchlassstrom ist die Wärmeentwicklung ein weiterer begrenzender Faktor für den Einsatz von Halbleiterbaulementen. Die Wärmeentwicklung kommt durch Verluste im Halbleiter zustande, die während des Betriebes entstehen. Für Siliziumelemente wird in der Literatur eine Temperatur von 150 °C genannt. Über dieser Temperatur kommt es zu einer irreparablen Schädigung des Halbleiterbaulementes. Die Temperatur bei der es zu ersten Schädigungen des Halbleitermaterials kommt variiert je nach Zusammensetzung des Halbleiters. Die Verluste bei Halbleiterbaulementen setzen sich im Wesentlichen aus Durchlassverlusten und Schaltverlusten zusammen. In der **Abbildung 2** sind exemplarisch die Zeitverläufe von Strom und Spannung und die hieraus resultierenden Verluste in einem Diagramm dargestellt. [2]

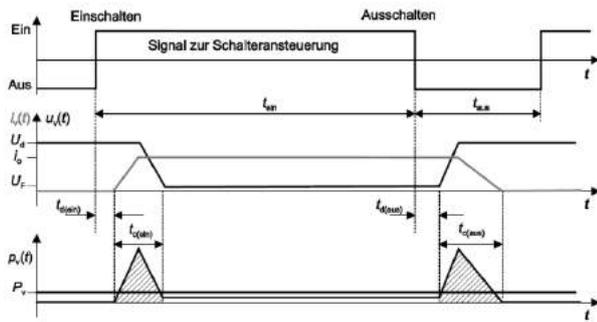


Abb. 2: Zeitverläufe für Schalterstrom, Schalterspannung und Verlustleistung beim Schalter; oben: Ein-Aus-Signal für den Schalter, Mitte: Schalterstrom  $i_v(t)$ , Schalterspannung  $u_v(t)$ , unten: Verlustleistung im Schalter [2]

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 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 der einzelnen Bauelemente unterscheiden, können je nach Bauelement unterschiedliche Schaltfrequenzen realisiert werden. Eine zusätzliche Steigerung der Schaltfrequenz kann auch durch zusätzliche Kühlung der Bauelemente erreicht werden. [3]

### 3 Hauptteil

Der Hauptteil wurde in zwei Teile untergliedert. Der erste Teil beschäftigt sich mit den heutigen Arbeitsbereich von modernen Leistungshalbleitern. Der zweite Teil beschäftigt sich hingegen mit den Schalteigenschaften der Leistungshalbleiter die heutzutage im Einsatz sind.

#### 3.1 Arbeitsbereich

Einer der größten Anwendungsbereiche, in denen Leistungshalbleiter eingesetzt werden, sind die Automatisierung und Motorensteuerung. Hier werden Schaltleistungen von kW bis einigen MW erreicht. In den Bereich der Energieübertragung durch Flexible-AC-Transmission-Systeme (FACTS) oder in der

Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) werden Schaltleistungen von mehreren hundert MW gefordert. In der **Abbildung 3** sind die Arbeitsbereiche von verschiedenen Leistungshalbleitern dargestellt.

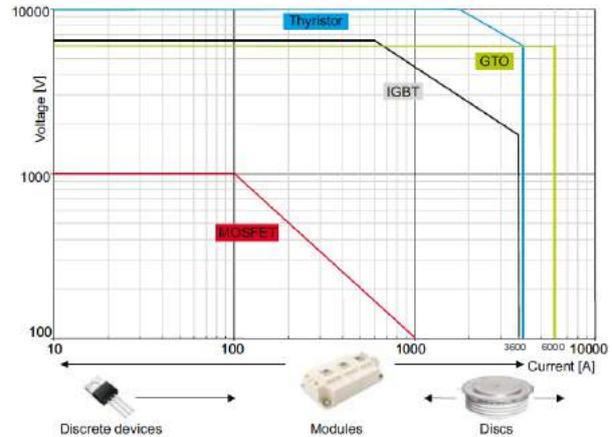


Abb. 3: Heutige Strom- und Spannungsgrenzen von schaltbaren Leistungshalbleitern [4]

Aus der Abbildung 3 kann man entnehmen, dass die Thyristoren die höchsten Spannungen schalten können. Heutzutage für den HGÜ-Einsatz sind Thyristoren mit 8 kV und 5,8 kA spezifiziert. Im Labor wurden schon Thyristoren mit 12 kV und 1,5 kA getestet. GTO's bewegen sich heutzutage in einem Bereich von 6 kV und einem Strom von 6 kA. IGBT's für HGÜ-Anwendungen bewegen sich bei 6,5 kV und einem Strom von 900 A. Es gibt aber auch Module die bei 1,2 kV für einen Dauergrenzstrom von 3,6 kA spezifiziert sind. Leistungs-MOSFET's sind heutzutage für Spannungen zwischen 600 bis 800 V üblich und schalten bis zu 100 A. [4][1]

Ausgehend von den oben genannten Werten ergeben sich die einzelnen Anwendungsbereiche der verschiedenen Halbleiterelemente. Thyristoren wurden aufgrund ihrer hohen Schaltleistung in dem Bereich der Energieübertragung und zur Steuerung von Antrieben sehr hoher Leistungen eingesetzt. Mit den immer leistungsfähiger werdenden IGBT's haben diese, die Thyristoren nahezu verdrängt. Hauptgründe sind die einfachere Ansteuerung der IGBT's ihre höhere Schaltfrequenz und dadurch deutlich reduzierter Bedarf an Filtertechnik. Näher wird dieses Thema in Kapitel 3.2 behandelt. MOSFET's werden für kleine Leistungsbereiche bis zu 100 kW eingesetzt. MOSFET's kommen besonders dort zum Tragen, wo hohe Schaltfrequenzen gefordert sind. In der **Abbildung 4** sind die Schaltfrequenzen von verschiedenen Bauelementen aufgetragen. [4][1]

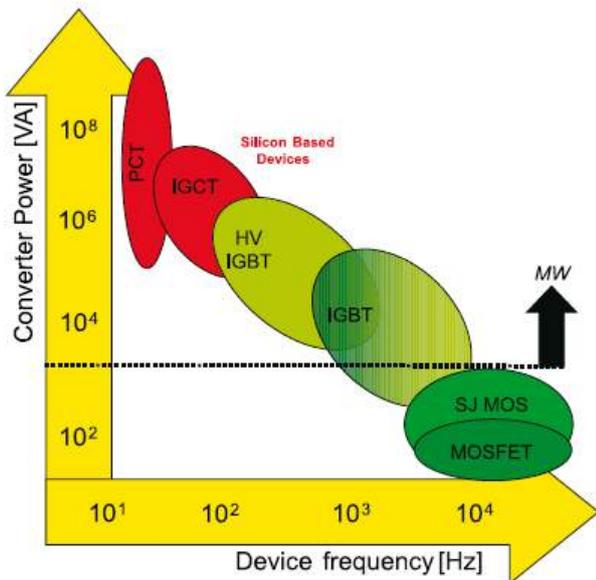


Abb. 4: Schaltungsbereiche verschiedener Leistungshalbleiter [4]

Aus der Abbildung 4 wird dargestellt in welchem Frequenzbereich die verschiedenen Halbleiterbauelemente eingesetzt werden. MOSFET's werden mit Schaltfrequenzen von einigen hundert Kilohertz betrieben. Allerdings können MOSFET's nur verhältnismäßig geringe Leistungen schalten. Für höhere Leistungen werden deshalb IGBT's verwendet. Mit IGBT's lassen sich hohe Leistungen und hohe Schaltfrequenzen erreichen. Thyristoren ermöglichen es die höchsten Schaltleistungen zu beherrschen, ihre Schaltfrequenz ist jedoch auf einige 100 Hz begrenzt. In der Abbildung 4 kann man deutlich den Trend erkennen, dass es bei steigender Frequenz zu einer geringeren Leistung kommt. Das kommt daher, dass beim Schalten die größten Verluste auftreten (siehe Abb. 2). Somit ist bei steigender Frequenz die schaltbare Leistung geringer, da es ansonsten zu einer thermischen Zerstörung der Halbleiterbauelemente kommen würde. [4][1]

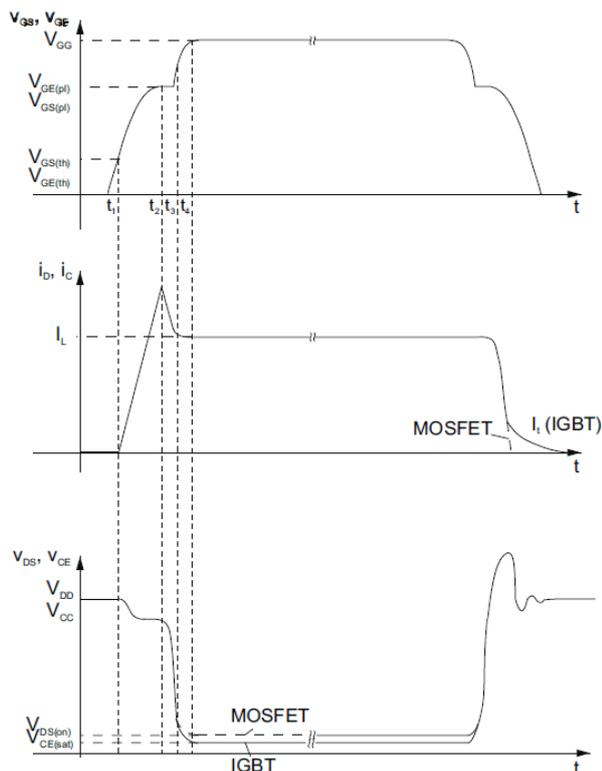
### 3.2 Schalteigenschaften

Thyristoren haben die Eigenschaft, dass sie nicht aktiv ausgeschaltet werden können, wenn sie einmal durchgeschaltet sind. Der Thyristor wird erst wieder nichtleitend, wenn der Strom des Lastkreises unter dem Wert des Haltestroms sinkt. Dieses passiert entweder beim Stromnulldurchgang oder bei Umpolung der Spannung des Laststromkreises. In den 80er Jahren kamen die GTO's (gate-turn-off thyristor) und die IGCT's (integrated gate-commutated thyristor) auf den Markt. GTO's und IGCT's zeichnen sich dadurch aus, dass sie aktiv abgeschaltet werden können. Zur gleichen Zeit wie die GTO's und IGCT's kamen aber auch die IGBT's auf den Markt, sodass sich die GTO's und IGCT's Technologien nicht wirklich etablieren konnten, da sie gegenüber IGBT's erhebliche Nachteile in ihren Schalteigenschaften besitzen. So ist die Ansteuerung von GTO's und IGCT's sehr aufwendig, weil zum

Ausschalten ein negativer Stromimpuls in das Gate geleitet werden muss. Dieser Stromimpuls kann bis zu einem Drittel des Laststroms betragen, um den Thyristor zum Erlöschen zu bringen. Die Steuerelektronik muss so ausgelegt sein das sie diesen Stromimpuls bereitstellen kann. Ein leistungsloses Ansteuern mit diesen Bauteilen ist nicht möglich. Aus diesem Grund haben sich auch sehr schnell die IGBT's und MOSFET's durchgesetzt, weil mit diesen eine nahezu leistungslose Ansteuerung möglich ist, was zu einer weniger aufwendigen und somit billigeren Steuerelektronik führte. [4][1]

Im Nachfolgenden werden die Schalteigenschaften der heutzutage meist verwendeten Halbleiterbauelemente näher betrachtet. Diese sind der IGBT und der MOSFET.

Für hohe Schaltfrequenzen werden hauptsächlich MOSFET's verwendet, weshalb sie die Standardbauelemente in der Prozessortechnik sind. Sie zeichnen sich durch die geringsten Schaltverluste aller Halbleiterbauelemente aus. Beschränkend für den Einsatz von MOSFET's ist jedoch, dass bei Auslegung für höhere Sperrspannungen der Durchlasswiderstand steigt. Darum werden MOSFET's momentan nur bis zu einer Spannung von 1 kV betrieben. Deshalb werden für Aufgaben mit höheren Schaltleistungen IGBT's verwendet. In der **Abbildung 5** sind die Strom und Spannungsverläufe von MOSFET und IGBT in einem Diagramm vergleichbar dargestellt. Deutlich ist der sogenannte Tailstrom des IGBTs zu sehen (mitte), dieser Tailstrom macht einen Großteil der Schaltverluste des IGBTs aus. Beim MOSFET tritt dieser Tailstrom nicht auf, weshalb die Schaltverluste geringer sind, als beim IGBT. In dem Diagramm, dass die Kollektor-Emitter-Spannung darstellt, kann man sehr schön erkennen das die Spannung im durchgeschalteten Zustand beim MOSFET höher ist als beim IGBT. Hierdurch ergeben sich höhere Durchlassverluste für den MOSFET gegenüber dem IGBT. [4][1]



**Abb. 5: Typisches Schaltverhalten von Leistungs-MOSFET und IGBT beim „harten Schalten“ ohmsch-induktiver Last mit Freilaufkreis (Strom- und Spannungsverläufe)**

## 4 Zusammenfassung/Fazit

Thyristoren werden auf längere Sicht vom Markt durch IGBT's und MOSFET's verdrängt werden. Schon heute werden Thyristoren nur noch für höchste Spannungen eingesetzt, in denen IGBT's zu hohe Verluste aufweisen. In Zukunft wird sich der Markt auf IGBT's und MOSFET's aufteilen. Wobei MOSFET's im Bereichen eingesetzt werden, wo hohe Schaltfrequenzen benötigt werden. Während IGBT's in Bereichen mit hoher Leistung Anwendung finden. [4][1]

## 5 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.



## Arbeitsbereich und Schalteigenschaften moderner Leistungshalbleiter

Dennis Schilling, 19.07.2016

### Agenda

- Motivation
- Unterteilung und Bauformen
- stromgesteuerte Halbleiter
  - Thyristor
  - GTO
  - IGCT
- spannungsgesteuerte Halbleiter
  - MOSFET
  - IGBT
- Zusammenfassung

# Agenda

- Motivation
- Unterteilung und Bauformen
- stromgesteuerte Halbleiter
  - Thyristor
  - GTO
  - IGCT
- spannungsgesteuerte Halbleiter
  - MOSFET
  - IGBT
- Zusammenfassung

## Motivation



# Agenda

- Motivation
- Unterteilung und Bauformen
- stromgesteuerte Halbleiter
  - Thyristor
  - GTO
  - IGCT
- spannungsgesteuerte Halbleiter
  - MOSFET
  - IGBT
- Zusammenfassung

## Unterteilung und Bauformen

stromgesteuert:

- Thyristoren
- GTO
- IGCT

spannungsgesteuert:

- MOSFET
- IGBT



Diskrete Bauelemente



Module



Scheibenzellen

Leistung →

# Agenda

- Motivation
- Unterteilung und Bauformen
- stromgesteuerte Halbleiter
  - Thyristor
  - GTO
  - IGCT
- spannungsgesteuerte Halbleiter
  - MOSFET
  - IGBT
- Zusammenfassung

## Thyristor

- bis zu 12 kV erhältlich, bei 1,5 kA
- Ausschalten durch Umpolen der Spannung
- Schaltfrequenzen von bis zu hundert Hertz

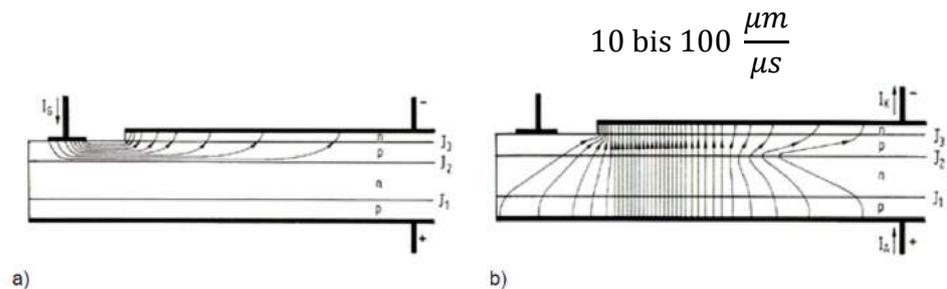
Parameter	Symbol	max	Unit
Repetitive peak off-state voltage	$V_{\text{DRM}}$	8000	V
Max. RMS on-state current	$I_{\text{T(RMS)}}$	3380	A
Max. peak non-repetitive surge current	$I_{\text{TSM}}$	$47.5 \times 10^3$	A



**ABB 5STP 20Q8500**

## Einschalten Thyristor

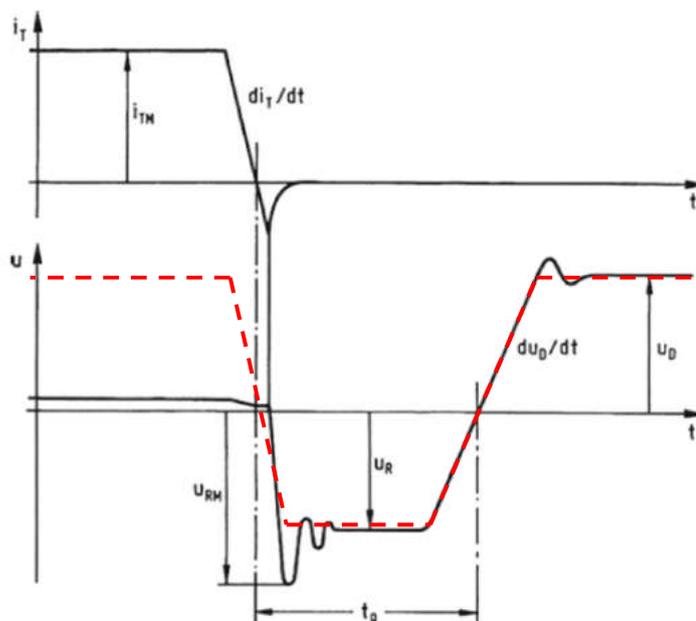
- externer Zündstrom vom Gate zur Kathode
- Sperrstrom durch Überschreiten der maximalen Blockierspannung (Kippspannung) („Über Kopf Zünden“, Kippen)
- durch Lichteinstrahlung in der Raumladungszone generierter Strom (Lichtzündung, angewandt bei HGÜ)
- kapazitiver Verschiebungsstrom durch steil ansteigende Anodenspannung ( $du/dt$ )



Stromverteilung im Thyristor nach dem Einschalten des Gatestroms (a) und unmittelbar nach der Zündung (b) [2]

## Ausschalten Thyristor

- bei 8 kV Thyristor  
Freiwerdezeit von ca. 550  $\mu s$



Freiwerdezeit eines Thyristors [1]

## Gate-Turn-Off-Thyristor (GTO)

- GTO bis zu 6 kV bei 6 kA angeboten
- Schaltfrequenzen von einigen hundert Hertz
- negativer Stromimpuls am Gate löscht GTO
- ein fünftel bis drittel des Hauptstromes zum Ausschalten notwendig
- RCD Schutzbeschaltung zwingend erforderlich

Parameter	Symbol	max	Unit
Repetitive peak off-state voltage	$V_{\text{DRM}}$	4500	V
Max. RMS on-state current	$I_{\text{T(RMS)}}$	1850	A
Max. peak non-repetitive surge current	$I_{\text{TSM}}$	$25 \times 10^3$	A

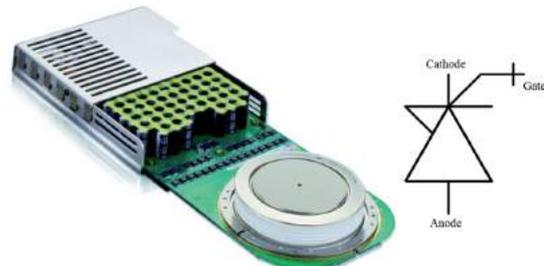


**ABB 5SGF 40L4502**

## Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT)

- Weiterentwicklung GTO
- negativer Stromimpuls in Höhe des Laststroms notwendig zum Abschalten
- kann ohne Schutzbeschaltung betrieben werden
- abgeführte Ladung geringer als beim GTO

Parameter	Symbol	max	Unit
Repetitive peak off-state voltage	$V_{\text{DRM}}$	6500	V
Max. RMS on-state current	$I_{\text{T(RMS)}}$	2030	A
Max. peak non-repetitive surge current	$I_{\text{TSM}}$	$26 \times 10^3$	A



**ABB 5SHY 42L6500**

# Agenda

- Motivation
- Unterteilung und Bauformen
- stromgesteuerte Halbleiter
  - Thyristor
  - GTO
  - IGCT
- spannungsgesteuerte Halbleiter
  - MOSFET
  - IGBT
- Zusammenfassung

## Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT)

- bis 6,5 kV bei 500 A
- Schaltfrequenzen von bis zu zehn Kilohertz realisierbar
- in allen Bauformen erhältlich

Parameter	Symbol	max	Unit
Collector-emitter voltage	$V_{CES}$	4500	V
DC collector current	$I_C$	2000	A
Max. peak non-repetitive surge current	$I_{TSM}$	$32 \times 10^3$	A

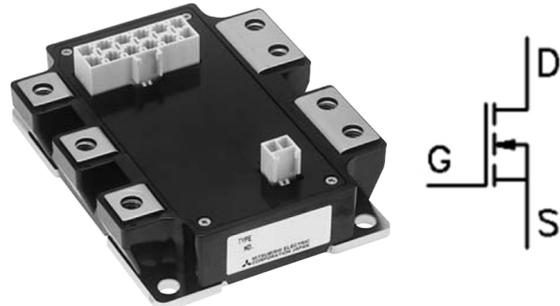


**ABB 5SNA 2000K450300**

# Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET)

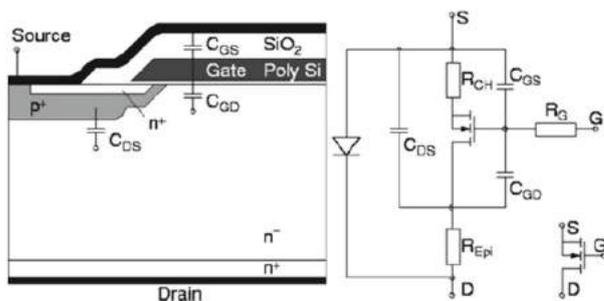
- bis 800 V bei 20 A
- Schaltfrequenzen von einigen hundert Kilohertz
- hauptsächlich bis Spannungen von 200 V eingesetzt

Parameter	Symbol	max	Unit
Drain-source voltage	$V_{DSS}$	150	V
Drain current	$I_{D(RMS)}$	300	A

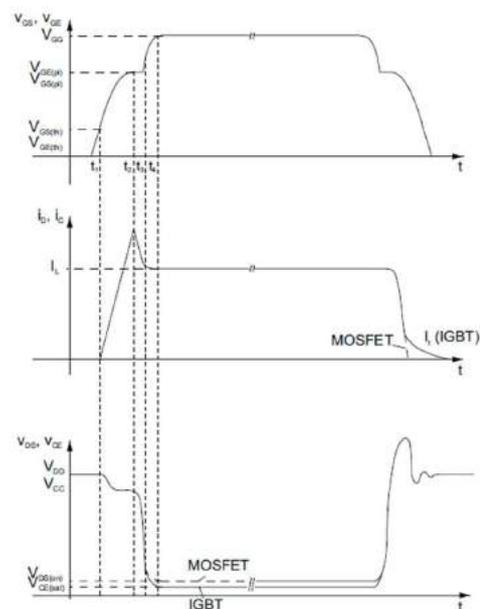


Mitsubishi FM600TU-3A

# Einschalten von MOSFET und IGBT

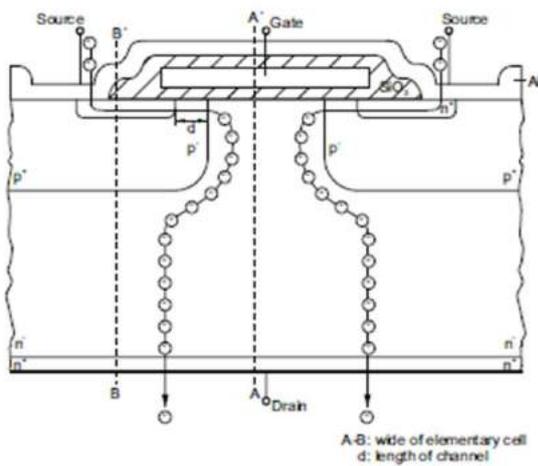


MOSFET mit parasitären Kapazitäten, Struktur und Ersatzschaltbild [1]

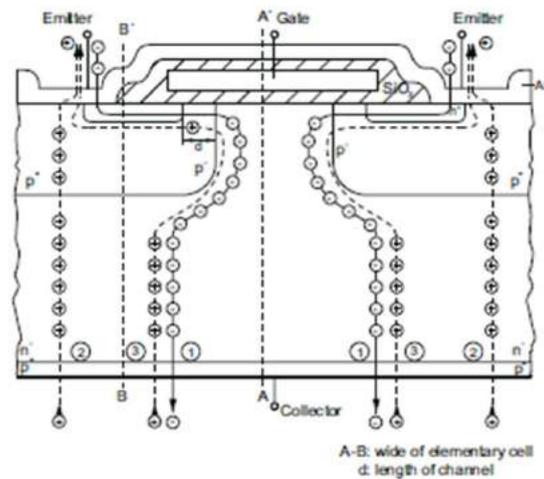


Einschaltendes MOSFET bei induktiver Last [2]

## Aufbau MOSFET und IGBT



Leistungs-MOSFET mit Vertikalstruktur und Planargate [2]

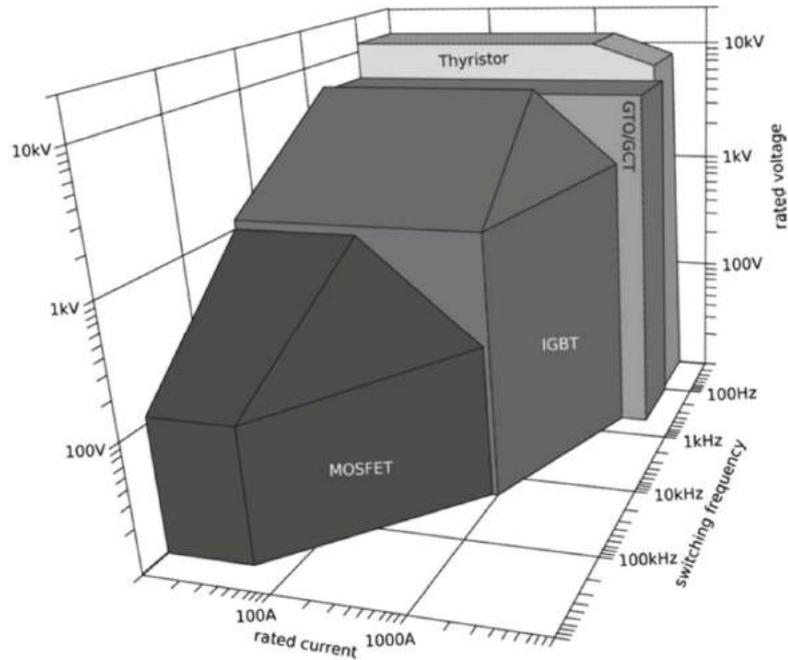


IGBT mit Vertikalstruktur und Planargate [2]

## Agenda

- Motivation
- Unterteilung und Bauformen
- stromgesteuerte Halbleiter
  - Thyristor
  - GTO
  - IGCT
- spannungsgesteuerte Halbleiter
  - MOSFET
  - IGBT
- Zusammenfassung

# Zusammenfassung



Arbeitsbereich von schaltenden Silizium-Bauelementen [1]

# Noch Fragen ?



## Quellen

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