

SEMINAR

STUDIENSEMINAR FÜR ELEKTRISCHE ENERGIESYSTEME

Ergebnisberichte Teil 1

Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

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

Wintersemester 2016/2017

Braunschweig, 30.01.2017

Inhaltsverzeichnis

Zeitplan	2
Sinnigen - Aktueller Stand der Forschung an Fusionsreaktoren	4
Bericht	4
Präsentation	9
Landrath - Blitzschutzkoordination im Niederspannungsnetz	27
Bericht	27
Präsentation	32
Düren - Sicherheitskritische Betriebszustände und Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien	42
Bericht	42
Präsentation	47
Aramburu - Post-Mortem-Analyse von Lithium-Ionen-Batterien	63
Bericht	63
Präsentation	71
Hickisch - Zündgefahrenbeurteilung von Lithium-Ionen-Batterien für den Einsatz im Explosionsschutz	82
Bericht	82
Präsentation	87
Stichnoth - Wie gut sind deutsche Automobilhersteller auf den Gesetzesvorschlag, dass ab 2030 nur noch Elektroautos zugelassen werden dürfen vorbereitet?	99
Bericht	99
Präsentation	103
Ochs - Die Ladesäulenverordnung – Irrweg oder wichtiger Baustein für eine flächendeckende Elektromobilität? 118	
Bericht	118
Präsentation	122
Thiel - Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen	134
Bericht	134
Präsentation	138

Zeitplan am 25.01.2017 im Seminarraum (elenia)

Zeit	Typ	Referent	Thema
09:00 – 10:30	Vortrag	Markus Sinnigen	Wendelstein 7-X – Supraleitendes Magnetsystem, Plasmagefäß und Plasmaheizung des Stellarator-Fusionsexperiments
	Vortrag	Richard Düren	Sicherheitskritische Betriebszustände und Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien
	Vortrag	Oliver Landrath	Blitzschutzkoordination im Niederspannungsnetz
10:30 – 10:45	Gruppenbild		
10:45 – 11:45	Vortrag	Maite Selene Aramburu	Post-Mortem-Analyse von Lithium-Ionen-Batterien
	Vortrag	Timo Hickisch	Zündgefahrenbeurteilung von Lithium-Ionen-Batterien für den Einsatz im Explosionsschutz
11:45-12:45	Mittag		
12:45-14:15	Vortrag	Lukas Stichnoth	Wie gut sind deutsche Automobilhersteller auf den Gesetzesvorschlag, dass ab 2030 nur noch Elektroautos zugelassen werden vorbereitet?
	Vortrag	Michael Ochs	Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität in Deutschland - Irrweg oder sinnvolle Strategie für die Zukunft?
	Vortrag	Oliver Thiel	Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen



Wendelstein 7-X – Supraleitendes Magnetsystem, Plasmagefäß und Plasmaheizung des Stellarator-Fusionsexperiments

Wendelstein 7-X – Superconducting magnet system, plasma vessel and plasma heating of the stellarator fusion experiment

Markus Sinnigen,

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, markus.sinnigen@me.com

Kurzfassung

Der Wendelstein 7-X, das weltweit größte Stellarator-Fusionsexperiment, nimmt derzeit am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald seinen Betrieb auf. Eines der Ziele des Experimentes ist es die Machbarkeit eines Stellarators-Fusionsprinzips nachzuweisen sowie eventuelle Vergleichbarkeiten zum Betrieb eines Tokamak-Prinzips aufzuzeigen. Die Hauptkomponente des W7-X ist ein supraleitendes Magnetsystem, das aus 50 nicht-planaren und 20 planaren Spulen besteht. Der Einsatz von Supercomputern ermöglichte die computergestützte Berechnung einer „idealen“ Form des W7-X, in der das heiße Plasma eingeschlossen und stabil aufrecht gehalten werden kann. Da dieses Plasma unmittelbar der Geometrie des Magnetfeldes folgt, muss auch das annähernd ringförmige Plasmagefäß der Form des Magnetfeldes entsprechen. Eine Aufheizung des Plasmas auf 100 Millionen K wird durch drei Verfahren erreicht. Die Fusionskomponenten müssen eine hohe Betriebsstabilität unter extremen Belastungen gewährleisten. Dies stellt eine enorme Herausforderung für die Hersteller der Anlagensysteme dar. Sowohl die komplexe Konstruktion als auch der Aufbau, sollen nachfolgend erläutert werden.

Abstract

Wendelstein 7-X, the world's largest stellarator fusion experiment, is operating at the Max Planck Institute for Plasma physics in Greifswald currently. One of the objectives of the experiment is demonstrating the feasibility of a stellarator-fusion principle as well as to show possible comparability to the operation of a Tokamak principle. The main component of the W7-X is a superconducting magnet system consisting of 50 non-planar and 20 planar coils. The use of supercomputers allowed the computer-assisted calculation of an "ideal" form of W7-X, in which the hot plasma can be enclosed and stably maintained. Since this plasma follows directly the geometry of the magnetic field, the approximately annular plasma vessel must also correspond to the shape of the magnetic field. Heating the plasma to 100 million K is achieved using three methods. The fusion components must ensure high operating stability under extreme loads. This represents a tremendous challenge for the manufacturers of power plant systems. Both the complex construction and the structure will be explained below.

1 Einleitung

Das weltweit größte Fusionsexperiment vom Typ Stellarator, der Wendelstein 7-X (W7-X), wird derzeit am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Greifswald in Betrieb genommen. Neben Zielen wie der Erforschung der Plasma-Wand-Wechselwirkung und der Untersuchung grundlegender plasmaphysikalischer Phänomene dient das Experiment der Untersuchung einer Kraftwerkseignung des optimierten Stellarator-Prinzips. Das IPP betreibt in Garching eine Fusionsanlage (ASDEX Upgrade) vom Typ Tokamak, welches direkte Vergleiche beider Fusionskraftwerkstypen zulässt. [1,2,3,4]

Die Hauptkomponente des W7-X ist ein supraleitendes Magnetsystem, welches, heruntergekühlt auf 4 K, in der Lage ist im Inneren seines Magnetfeldes ein heißes Plasma mit einer Zündtemperatur von über 100 Millionen K einzuschließen und zu betreiben [5]. Neben den komplex gewundenen Magnetspulen wird das Plasmagefäß und die Plasmaheizung nachfolgend erläutert. Hierbei werden die drei Anlagenteile des Fusionsexperimentes hinsichtlich der Konstruktion und

des Aufbaus beschrieben, sowie einige wichtige Daten und Fakten des Experimentes genannt.

2 Theoretische Grundlagen

In einem Fusionskraftwerk wird die Bindungsenergie aus der Verschmelzung zweier leichter Atomkerne zu einem schweren Atomkern genutzt. Wie in konventionellen Kraftwerken kann diese abgegebene Energie in Form von Wärmeenergie mittels Turbinen zur Stromgewinnung genutzt werden. Für eine Fusionsreaktion werden die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium miteinander verschmolzen. Hierbei entstehen Helium, ein freiwerdendes Neutron zur Spaltung und 17,6 MeV (14,1 MeV Neutronenergie und 3,5 MeV Heliumfusionsenergie) nutzbarer Energie. Um die Abstoßung zu überwinden, die durch die elektrische Ladung der Kerne hervorgerufen wird, müssen sich die Kerne mit sehr großer Geschwindigkeit aufeinander zu bewegen.[6]

Da die Gas-Temperatur nach [7] ein Maß für die Teilchengeschwindigkeit im Gas ist, ist die Erhöhung der Temperatur äquivalent zur Erhöhung der Geschwindigkeit. Dieser Zusammenhang zwischen Teilchengeschwindigkeit und Temperatur wird mit (1) beschrieben [7]:

$$\overline{E}_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \overline{v^2} = \frac{m}{2} v_e^2 = \frac{3}{2} k_B T \quad (1)$$

Als Vorbild für einen Fusionsreaktor dient die Sonne. In ihrem Inneren finden unter extrem hohen Druck von 100 Milliarden bar bei ca. 16 Millionen K Fusionsreaktionen statt. Da dieser Druck auf der Erde nur schwer handhabbar ist, sind Temperaturen von über 100 Millionen K erforderlich um eine Fusionsreaktion stabil aufrechterhalten zu können. Bei einer Deuterium-Tritium (DT) Fusion zu Helium, wie sie in der Sonne abläuft, kann die Zündbedingung aus einem Produkt aus der Temperatur T der Protonen, der Teilchendichte n sowie der Energieeinschlusszeit τ_E gebildet werden. Dabei ist die Energieeinschlusszeit ein Maß für das Isoliervermögen des Plasmas und gibt somit an, wie gut das Plasma die Wärmeenergie einschließen kann. Mit Plasmateilchendichten des W7-X von $3 \cdot 10^{20}$ Teilchen pro Kubikmeter und einer Einschlusszeit von zwei Sekunden, ergibt sich für eine gewünschte stabile Fusionsreaktion eine Temperatur von 100 Millionen K. [4,5,8,9]

Unter diesen Bedingungen ist das Gas ionisiert, d.h. die Atome sind in Elektronen und Kerne zerlegt. Dieser Zustand wird Plasma genannt. Ein Plasma ist elektrisch leitend und lässt sich durch elektrische und magnetische Felder beeinflussen. Dieses wird in Fusionsanlagen ausgenutzt, indem das heiße Plasma in einem toroidalen Magnetfeld eingeschlossen wird. Hierbei wirkt die Lorentzkraft in Magnetfeldern auf die geladenen Teilchen (2):

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2)$$

Treten diese Ladungen mit einer Geschwindigkeit v ungleich einem Winkel von 0° oder 90° in das Magnetfeld ein, kommt es zu einer typischen Spiralbewegung der Ladungsträger. Diese schräge Geschwindigkeitskomponente kann in eine senkrechte und eine parallele Komponente zerlegt werden. Dabei ist die senkrechte Komponente für die Kreisbewegung (Radius) verantwortlich und die parallele Komponente sorgt für eine Kreisbewegung (Ganghöhe) entlang der Magnetfeldlinien. Diese Kreisbewegung wird Gyration genannt. [6,10]

Das Magnetfeld wird von supraleitenden Spulen erzeugt. Bei einer Sprungtemperatur von 4 K weist der Leiter keinen elektrischen Widerstand mehr auf.

Derzeit werden weltweit zwei Ausführungsarten für Fusionsexperimente untersucht. In einem Tokamak, dessen Aussehen einem einfachen Torus gleicht, schließen zwei überlagerte (toroidale und vertikale) Magnetfelder das Plasma ein. Ein drittes Feld wird durch den Stromfluss im Inneren des Plasmas erzeugt. Der Strom im Plasma wird benötigt um das einschließende

Magnetfeld zu erzeugen. Der Plasmastrom wird durch eine Transformatorspule induziert. Wegen des Transformators arbeitet ein Tokamak nicht kontinuierlich, sondern gepulst. [4,6]

Als zweite Ausführungsart wird in einem Stellarator der magnetische Käfig durch ein einziges, schraubenförmiges Spulensystem erzeugt. Stellaratoren können eine einfachere, technische Lösung für ein Fusionskraftwerk darstellen. Diese Frage lässt sich theoretisch jedoch nur schwer beantworten. Eines der Ziele des W7-X ist die experimentelle Überprüfung dieser Theorie. [4,6]

3 Hauptteil

Nachfolgend werden die drei Anlagenteile; das Magnetsystem, das Plasmagefäß und die Plasmaheizung des Fusionsexperimentes hinsichtlich der Konstruktion und des Aufbaus beschrieben. Des weiteren werden markante Daten und Fakten des Experimentes genannt.

3.1 Supraleitendes Magnetsystem

Aufbau

Das W7-X-Fusionsexperiment besitzt ein supraleitendes Magnetsystem, das aus 50 nicht planaren (NPC eng.: Non Planar Coil) und 20 planaren (PC engl. Planar Coil) Spulen besteht.

Um die supraleitenden Eigenschaften zu erreichen, bestehen die Spulen nicht aus Kupfer, sondern aus Niob-Titan. Ein NPC (Gewicht: ca. 6 t; Höhe 3,5 m) besteht aus 108 Windungen in sechs Doppelschichten und der PC hat 36 Windungen in drei Doppelschichten. Die Wickelpackungen sind in ein schweres Edelstahlgehäuse eingebettet. Während des Betriebes liegt der Strom für NPCs bei 12,8 kA und für die PCs bei 5 kA. Das Spulensystem ist in der Lage eine magnetische Feldstärke von 3 Tesla zu erzeugen. [1,2]

Die Abbildung 1 zeigt eine schematische Ansicht des supraleitenden Magnetsystems mit den angeordneten Spulen.

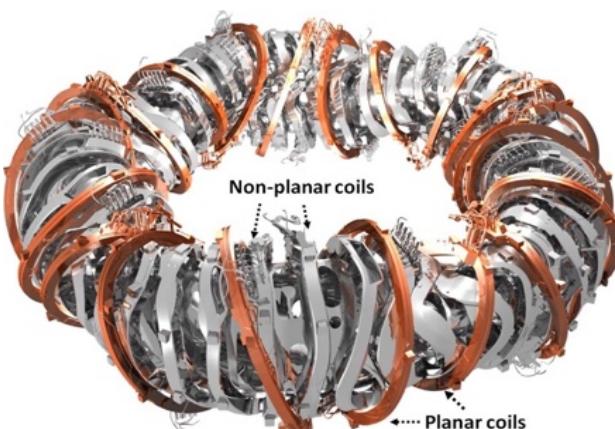


Abbildung 1: Schematische Ansicht des supraleitenden Magnetsystems mit 50 nichtplanaren und 20 planaren Spulen [1]

Dabei besteht das gesamte Experiment aus zehn identisch aufgebauten Modulen. Jedes Modul des Magnetsystems

besteht wiederum aus fünf unterschiedlichen NPCs und zwei unterschiedlichen PCs. Aus jedem der zehn Module wird eine Spule zu einem in Reihe geschalteten Schaltkreis verbunden. Es entstehen sieben Schaltkreise. Die nichtplanaren Spulen erzeugen mit ihren fünf Kreisen á 10 Spulen das Stellarator-Hauptfeld. Das Stellaratorfeld kann zusätzlich durch zwei verschiedene PC Typen, sogenannter Steuerspulen, mit je zehn Spulen modifiziert werden. Abbildung 2 zeigt eine Skizze des komplexen Aufbaus des Magnetsystems.

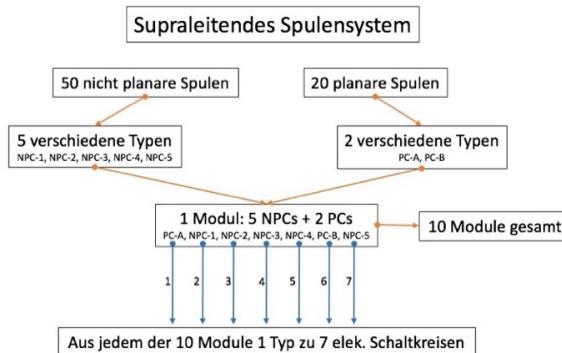


Abbildung 2: Skizze des Magnetsystem-Aufbaus

Die Spulen sind mit einem umfangreichen Satz von Sensoren, z.B. Temperaturmessungen an den Helium-Ein- und Ausgängen an der Wickelpackung sowie an der Gehäusekühlung, Dehnungsmessstreifen an hochbelasteten Positionen an der Tragstruktur und Abstandssensoren zur Messung von Abstandsänderungen zwischen den Spulen ausgestattet. [1]

Die Aufgabe der 70 zum Teil komplexe gewundene Spulen ist es, ein verdrilltes, in sich geschlossenes Magnetfeld zu erzeugen, welches in Lage ist, ein heißes Plasma in dem Feld zu betreiben. Eines der Ziele ist es dabei zu zeigen, dass ein stabiles Magnetfeld auch ohne die getrennten ebenen Spulen der drei Feldkomponenten (vertikal, toroidal, helikal) eines Tokamak-Experiments erzeugt werden kann

Konstruktion

Ein Jahrzehnt systematischer Berechnungen mit Hilfe von Supercomputern der späten 80er und 90er Jahre hat die komplexe wirkende Form der Spulen des Wendelstein 7-X ergeben. Da diese nach physikalischen Optimierungsprinzipien bestimmt wurden, können sie als „ideale“ Form angesehen werden. Die technische Realisierung dieser Spulenform war für das beauftragte Unternehmen eine große Herausforderung. Es wurden dazu ein Konsortium und ein Europäisches Netzwerk mit mehreren Unterauftragnehmern gegründet, die die Fertigung der verschiedenen Komponenten der Spulen übernommen haben. Auch dabei musste eine Vielzahl von technischen Problemen gelöst werden: Für die Fertigung der supraleitenden, räumlich komplexe geformten Wickelpakete der Spulen mussten die Konsortialpartner Methoden entwickeln, den Supraleiter in die erforderliche Form zu bringen. Dazu wurden entsprechende Wickelformen gebaut und erfolgreich eingesetzt.

Außerdem sammelte das Unternehmen (Babcock Noell GmbH) neue Erfahrungen bei der Konstruktion der Stahlgehäuse und deren Fertigung mit einem optimierten Gussverfahren, der Bettung der Wickelpakete in die Stahlgehäuse und deren hochgenauen mechanischen Bearbeitung. [4]

3.2 Plasmagefäß

Das, wie ein gewundener Stahlschlauch geformte, Plasmagefäß des W7-X wird ein heißes Wasserstoffplasma mit einer Temperatur von ca. 100 Millionen K beherbergen. Die annähernd ringförmige Plasmakammer hat einen Außendurchmesser von 12,8 m und eine Höhe von 2,5 Metern. Die Masse des eingeschlossenen Plasmas beträgt nur 5 – 30 mg, die sich bei einer Teilchendichte von $3 \cdot 10^{20}$ Teilchen/cm³ auf ein Volumen von etwa 30 m³ verteilen. [2,5]

Da das heiße Plasma unmittelbar der Geometrie des Magnetfeldes folgt, muss auch das Stahlgefäß exakt der Form des Magnetfeldes entsprechen. Die daraus erwachsenden Ansprüche an den Stahlgefäßbau sind für das beauftragte Unternehmen (MAN Diesel & Turbo) neu und eine beachtliche Herausforderung: Ein 30 Kubikmeter-Gefäß aus 17 mm dickem Edelstahl mit einer ungewöhnlich komplexen 3D-Form muss mit einer generellen Maßhaltigkeit von nur ± 2 mm gefertigt werden. Die Kammer besteht aus insgesamt 200 Ringen. Diese ist aus Stahlblechstreifen mit einer Breite von 15 Zentimetern zusammengesetzt, um die geforderten geschwungenen Konturen zu erreichen. In der Plasmagefäßwand befinden sich etwa 300 verschiedene große Öffnungen. Die Abbildung 3 zeigt eines der zehn Modulabschnitte des Plasmagefäßes, in der der Aufbau für die Montage unterteilt ist.



Abbildung 3: Teil des Plasmagefäßes vom W7-X während der Fertigung[5]

Die Öffnungen ermöglichen den Zugang für die technische Versorgung und wissenschaftliche Untersuchung des Plasmas. Eine Superisolierung, die mit

passgenau gefertigten glasfaserverstärkten Kunststoff-Paneelen, die wiederum mit mehreren Lagen Aluminiumbeschichteter Kapton-Folien und Glasseide gefüttert sind, trennt das warme Plasmagefäß von den auf 4 K mit Helium heruntergekühlten Magnetspulen. Der Abstand zwischen Plasmawand (100 Millionen K) und den supraleitenden Spulen (4 K) beträgt dabei nur ca. 30 cm. [4,5]

Das Gefäß muss zudem vakuumdicht verschweißt sein und auf einen Druck unter 10^{-8} mbar –Ultrahochvakuum– ausgpumpt werden können, da schon geringe Mengen eindringender Luft das brennende Plasma verunreinigen würde. Die Energie, die zur Aufrechterhaltung des Plasmazustandes nötig ist, geht durch Reaktion mit der Luft verloren. In Folge dessen kühlt das Plasma ab und es erlischt. [5].

3.3 Plasmaheizung

Bis zur Zündung des Plasmas der Fusionsreaktion auf Temperaturen von 100 Millionen K muss es von außen aufgeheizt werden. Dafür sind geeignete Heizungen nötig. Für das Aufheizen des Plasmas kommen drei verschiedene Heizungen zum Einsatz; die Mikrowellenheizung, die Injektion von Neutralteilchen und die Heizung mit Radiowellen. Nachfolgend sollen die Mikrowellen-Heizung und die Neutralteilchen-Heizung näher erläutert werden. Da die Radiowellen-Heizung ähnlich der Mikrowellen-Heizung arbeitet, wird Radiowellen-Heizung nicht näher erläutert.

Die Mikrowellen-Heizung

Bei der im Wendelstein 7-X angewendeten Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Heizung (ECRH, engl.: Electron-Cyclotron-Resonance-Heating) werden Mikrowellen mit einer Frequenz ins Plasma eingestrahlt, mit der die Elektronen auf Schraubenbahnen (durch die Lorentz-Kraft gezwungen) um die Magnetfeldlinien laufen. Hierbei werden die Mikrowellen von den Elektronen im Plasma absorbiert und dem Plasma Energie zugeführt und dadurch aufgeheizt. Ionen- oder Elektronen-Zyklotron-Resonanzheizung sind Resonanz-Phänomene, d. h. die Absorption findet nur bei einer fest vorgegebenen Frequenz statt. Eine Welle, die in das Plasma eindringt, wird daher nur dort lokal von Plasmateilchen absorbiert, wo das Magnetfeld obige Resonanzbedingung erfüllt. [11] Die ECRH ist das vorherrschende Heizsystem des Wendelstein 7-X und das einzige, das bereits jetzt in der Lage ist ein Plasma im Dauerbetrieb zu heizen. Im Endausbau sind zehn Hochleistungs-Mikrowellensender, sogenannte Gyrotrons, mit einer Gesamtleistung von etwa 10 MW vorgesehen, die mit ihren Versorgungseinrichtungen in einem Nebengebäude untergebracht sind. Die für das drei Tesla starke Magnetfeld des W7-X benötigte Mikrowellenfrequenz beträgt 140 GHz; das entspricht einer Wellenlänge von 2 mm. Während in der Messtechnik diese Wellenlängen meist über Hohlleiter transportiert werden, wurde für den Wendelstein 7-X eine quasi-optische Übertragungsleitung mit 140 Metallspiegeln entwickelt, die aufgrund der hohen Mikrowellenleistungen im Dauerbetrieb mit

Wasser gekühlt werden.[11]

Für die Möglichkeit das Plasma mittels Mikrowellen aufzuheizen, müssen sehr starke Mikrowellenröhren entwickelt und gebaut werden. Dies ist bereits vor einigen Jahren in Russland, den USA und in Japan gelungen, allerdings jeweils nur mit einer Heizdauer von wenigen Sekunden. Für Wendelstein 7-X mussten jedoch Mikrowellenröhren entwickelt werden, die für die ersten Plasmazündungen 30 Minuten ihre volle Leistung liefern. Das ist mehr als die hundertfache Dauer und bedeutet, dass man in vollkommen neuen Entwicklungsdimensionen vorstoßen muss. Dieser Prozess wurde in enger Kooperation zwischen der Fa. Thales Electron Devices (TED), dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik vorangetrieben.

Ein kritisches Bauteil eines Gyrotrons ist das Fenster zwischen der Mikrowellenröhre und der Umwelt. Um die Wärmeverluste im Fenster relativ niedrig zu halten, werden diese aus künstlichen Diamanten mit hoher Reinheit hergestellt. Die Fenster benötigen eine zuverlässige Kühlung. Die Kühlung mit Wasser birgt die Gefahr von Korrosion, daher wurde in dieser Entwicklung erstmals erfolgreich Silikonöl als Kühlmittel eingesetzt. Die Abbildung 4 zeigt eines dieser Diamant-Sichtfenster. [4]

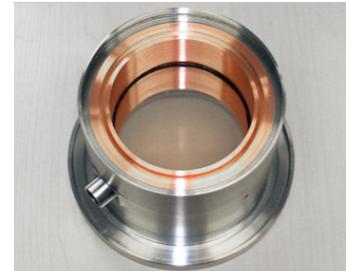


Abbildung 4: Diamantscheibe in einem Torus-Diamantfenster [4]

Die Neutralteilchen-Heizung

Mit der Neutralteilchen-Injektions-Heizung (NBI, eng.: Neutral-Beam-Injection) werden Wasserstoffteilchen beschleunigt und mit einer hohen Bewegungsenergie in das Plasma hineingeschossen, um über Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen abzugeben und diese aufzheizen zu können.

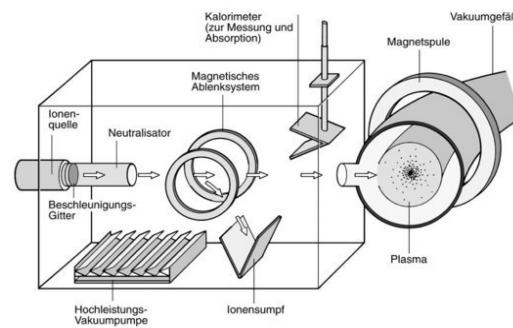


Abbildung 5: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise eines Neutralteilchen-Injektors [9]

In einem Neutralteilchen-Injektor werden, wie er im prinzipiellen Aufbau in Abbildung 5 dargestellt ist, Wasserstoffionen zunächst in einer Ionenquelle erzeugt

und dann, aufgrund ihrer elektrischen Ladung, durch ein durch Spannung angelegtes hohes elektrisches Feld beschleunigt. Die Höhe der elektrischen Spannung bestimmt die erreichte Geschwindigkeit und kinetische Energie. Damit die schnellen Ionen ungehindert durch den Magnetfeldkäfig des W7-X in das Plasma eindringen können, müssen sie zuvor wieder neutralisiert werden, da sie sonst durch das Magnetfeld der Spulen abgelenkt werden. Den Ionen werden hierfür im Neutralisator entsprechend ihrer Ladung Elektronen angelagert, um wieder in einen neutralen Zustand zurück zu gelangen. Danach durchlaufen die sie noch ein Ablenk-magnetfeld, welches die noch nicht neutralisierten Teilchen ableitet. Diese fliegen in einen Ionensumpf und gelangen nicht ins Plasma. Die Neutral-Teilchen schießen anschließend in das Plasma hinein und geben über Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen ab und tragen so zur Plasmaheizung bei. Gleichzeitig werden aber auch Wasserstoffionen zur weiteren Fusion im Inneren des Plasmas nachgefüllt. Für den W7-X werden zwei Neutralteilchen-Injektoren mit jeweils vier Ionenquellen eingesetzt. Das Injektions-Prinzip des W7-X basiert auf der gleichen Technologie, wie die bei dem in Garching durchgeföhrten Fusionsexperiment ASDEX Upgrade. Die Gesamtheizleistung beträgt bei der Verwendung von Deuterium 10 MW (Teilchenenergie 60 keV). [9,11]

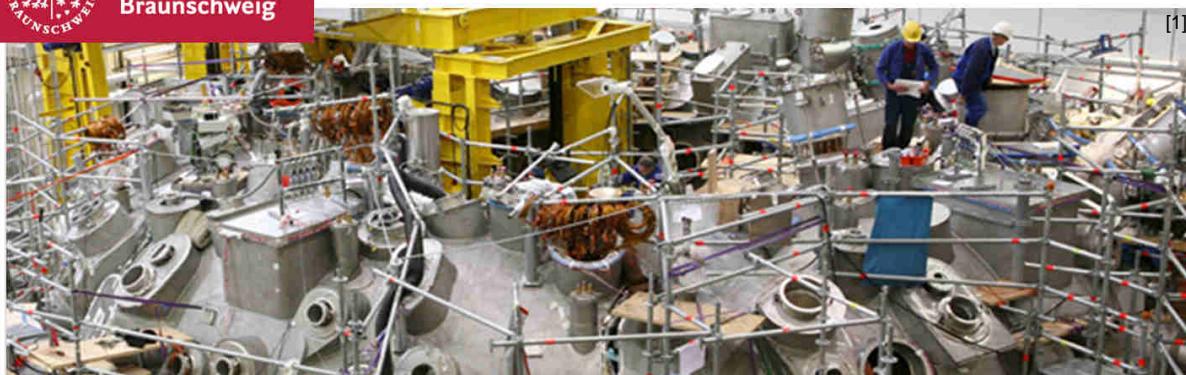
4 Zusammenfassung / Fazit

Mit der Kernfusionsforschung soll die Möglichkeit der kommerziellen Erzeugung von elektrischer Energie aus der Verschmelzung von Atomkernen erforscht werden. Weltweit wird mit Hochdruck an dieser Möglichkeit geforscht und immer neue Anlagen, die den Zündbedingungen einer Fusionsreaktion erfüllen, entwickelt. Dabei wird anhand des Fusionsexperimentes Wendelstein 7-X in seiner Komplexität deutlich, dass dieses Vorhaben eine Aufgabe für die nächsten Jahrzehnte darstellt. Um das Plasma und somit eine stabile Kernfusion aufrecht halten zu können, müssen hunderte Parameter aufeinander abgestimmt werden. Neben weltweit, engen Kooperationen zwischen Forschungsgruppen, Instituten, Unternehmen in der Industrie, entsteht ein hiesiges Netzwerk in der Kernfusionsforschung. Der Know-How-Gewinn ist dabei nicht unerheblich. Industrieunternehmen können nicht nur unmittelbar von den Aufträgen in der Fusionsforschung profitieren, sondern vielmehr mittelbar durch die Erweiterung ihrer Kompetenzen ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern. [4]

5 Literatur

- [1] K. Risse et al., Commissioning of the Superconducting Magnet System, IEEE Transaction on applied superconductivity, Vol.26, No. 4, 2016.
- [2] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) – Wendelstein 7-X
<http://www.ipp.mpg.de/wendelstein7x>
- [3] Forschungszentrum Jülich – IEK-4
http://www.fz-juelich.de/iek/iek-4/DE/Forschung/07_W7X/_node.html
- [4] Wendelstein 7-X und die Fusion – An der Grenze des technisch Machbaren
https://www.ipp.mpg.de/47661/w7x_s.pdf
- [5] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) – Stellarator
<https://www.ipp.mpg.de/9792/stellarator>
- [6] Lexikon zur Kernenergie – KIT
https://www.kit.edu/downloads/Lexikon_zur_Kernenergie_2011.pdf
- [7] G. Mierdel, Was ist Plasma?, Dresden: VEB Verlag, 1973.
- [8] D. Mende und G.Simon, Physik – Gleichungen und Tabellen, München, Hanser Verlag, 2013.
- [9] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) – Grundlagen
<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/fusion21>
- [10] LEIFI-PHYSIK - Bewegte Ladungen in Feldern -
<http://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/bewegte-ladungen-feldern>
- [11] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) – Wissenschaftliche Bereiche
<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/bereiche>

Webseiten zuletzt aufgerufen am: 19.01.2017



Wendelstein 7-X – Supraleitendes Magnetsystem, Plasmagefäß und Plasmaheizung des Stellarator- Fusionsexperiments

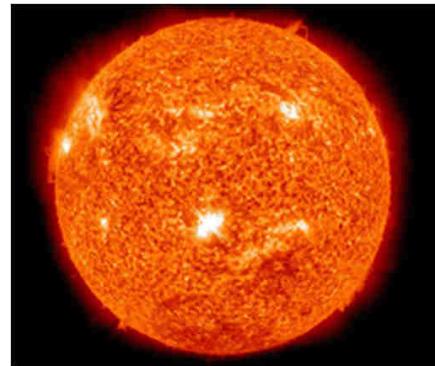
Markus Sinnigen, 13.02.2017

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
 - Daten & Fakten zum Experiment
 - Theoretische Grundlagen
- Supraleitendes Magnetsystem
- Plasmagefäß
- Plasmaheizung
- Bestandteile des Experiments (Animation)
- Zusammenfassung

Einleitung

- Weltweiter steigender Energiebedarf
- Kernfusion als Möglichkeit
- Umweltfreundliche Energieerzeugung
- Die Sonne als Vorbild
- Weltweite Testphasen verschiedener Prinzipien (Stellarator & Tokamak)



[2]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 3

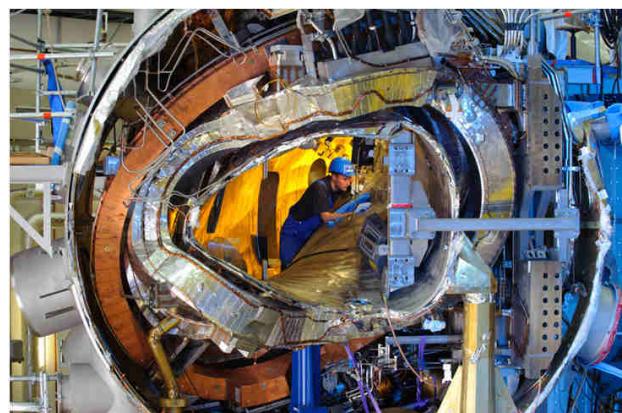
elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Einleitung

Wendelstein 7-X in Greifswald, weltweit größte Fusionsexperiment vom Typ „Stellarator“

Hauptkomponenten:

- Supraleitendes Magnetsystem
- Plasmagefäß
- Plasmaheizung



[1]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 4

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
 - Daten & Fakten zum Experiment
 - Theoretische Grundlagen
- Supraleitendes Magnetsystem
- Plasmagefäß
- Plasmaheizung
- Bestandteile des Experiments (Animation)
- Zusammenfassung



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 5



Daten und Fakten zum Experiment

Primärziele des Wendelstein 7-X

- Kraftwerkstauglichkeit von Fusionsanlagen des Typs "Stellarator"
- Plasmaeinschluss im Magnetfeldkäfig mit
 - bis 100 Millionen K
 - 30 Minuten langen Entladungen
- Im Einzelnen:
 - Teilcheneinschluss
 - Erzeugung und Heizung mit effektiven Heizmethoden
 - Demonstration eines Langzeit- bzw. quasi-stationären Betrieb
 - Untersuchung der Plasmanachfüllung und Plasma-Wand-Wechselwirkung unter Dauerbetriebsbedingungen



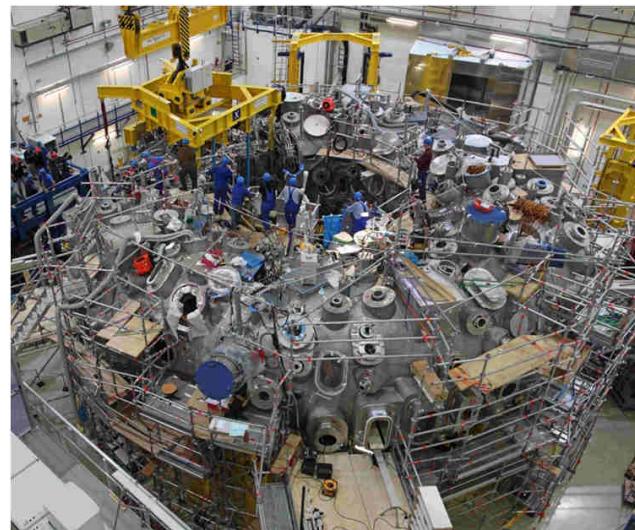
Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 6



Daten und Fakten zum Experiment

Plasmaradius	5,5 Meter
Magnetfeld	3 Tesla
Plasmavolumen	30 m ³
Plasmamenge	5 – 30 mg
Plasmatemperatur	100 Millionen K
Entladungsdauer	bis 30 Minuten



Theoretische Grundlagen – Kernfusion

Verschmelzung von 2 leichten Atomkernen

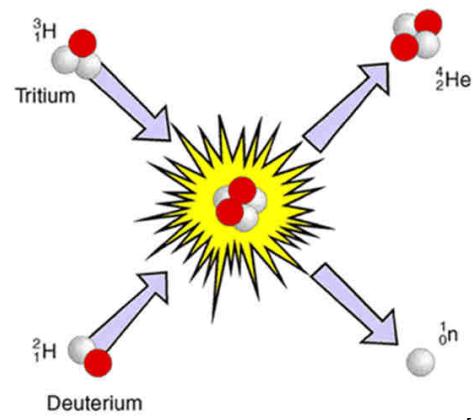
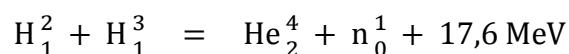
Eingangsprodukte:

- Wasserstoffisotope
 - Deuterium (D)
 - Tritium (T)

Ausgangsprodukte:

- Helium (He)
- freiwerdendes Neutron
- 17,6 MeV (2,82 pJ)

Fusionsgleichung:



[4]

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
 - Daten & Fakten zum Experiment
 - Theoretische Grundlagen
- Supraleitendes Magnetsystem
- Plasmagefäß
- Plasmaheizung
- Bestandteile des Experiments (Animation)
- Zusammenfassung

Wendelstein 7-X – Supraleitendes Magnetsystem

- Heißes Plasma in Magnetkäfig halten
- Auskühlen verhindern
- Spezielle Eigenschaften:
 - 50 nicht-planare & 20 planare Spulen
 - Supraleitende Eigenschaften mit Niob-Titan
 - 4 Kelvin Arbeitstemperatur
 - Spulenstrom 13 kA / 5 kA
 - Magnetische Feldstärke 3 Tesla



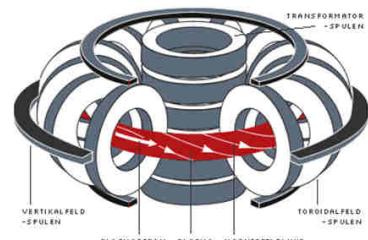
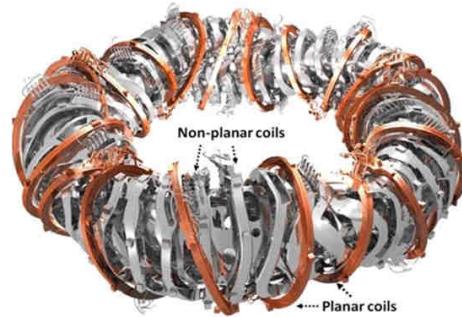
Nicht-planare Spule:
○ Gewicht: 6 t
○ Höhe: 3,5 m

[1]

Wendelstein 7-X – Supraleitendes Magnetsystem

Warum dieses komplexe Gebilde ?

- Berechnung der Geometrie mit Supercomputer
 - Nach physikalischen Optimierungsprinzipien „ideal“
- Komplexe Form:
 - Verdrilltes, dichtes, in sich geschlossenes H-Feld
 - Stabiler Plasmaeinschluss
- Stabiles Magnetfeld **auch ohne** getrennten, ebenen Spulen eines Tokamak-Experiments
- Demonstration eines Langzeit- bzw. quasi- stationären Betrieb



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 11

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
 - Daten & Fakten zum Experiment
 - Theoretische Grundlagen
- Supraleitendes Magnetsystem
- Plasmagefäß
- Plasmaheizung
- Bestandteile des Experiments (Animation)
- Zusammenfassung



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 12

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Wendelstein 7-X – Plasmagefäß

- Plasmagefäß innerhalb der Magnetspulen
- Gefäß verhindert
 - Eindringen von Luft
 - Austreten des Brennstoffes
- 30 cm Abstand zwischen Plasmawand (100 Mio. K) und supraleitenden Spulen (4 K)
- Aus 200 Ringen zusammengesetzt
- Vakuumdicht verschweißt → Ultrahochvakuum (10^{-8} mbar)
- 300 verschiedene Öffnungen zur Versorgung und Diagnose
- 5-30 mg Plasma mit $3 \cdot 10^{20}$ Teilchen/m³ auf 30 m³



[5]

Dimensionen:

- Außendurchmesser 12,8 m
- Höhe 2,5 m
- Volumen 30 m³



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 13



Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
 - Daten & Fakten zum Experiment
 - Theoretische Grundlagen
- Supraleitendes Magnetsystem
- Plasmagefäß
- Plasmaheizung
- Bestandteile des Experiments (Animation)
- Zusammenfassung



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 14

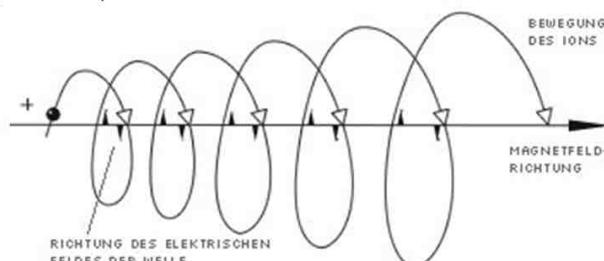


Wendelstein 7-X – Plasmaheizung

Mit welchen Arten wird das Plasma aufgeheizt ?

- **Mikrowellenheizung**

- Bestimmte Frequenz
- Elektronen auf Schraubenbahnen (Gyration)
- Absorption und Aufheizung des Plasmas
- W7-X: 10 Hochleistungssender mit insgesamt:
 - $P=10 \text{ MW}$ bei $f=140 \text{ GHz}$ ($\lambda=2 \text{ mm}$)



[1]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 15

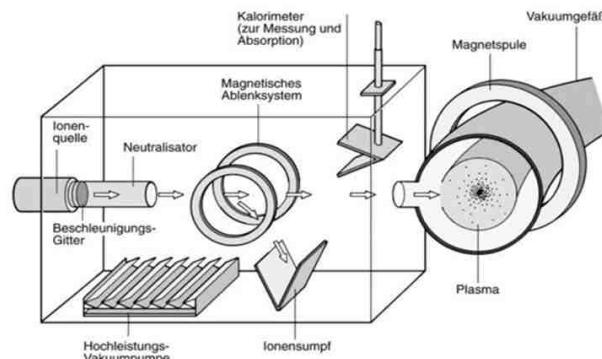
elenia
Institut für Hochspannungs-
technik
und Elektrische Energieanlagen

Wendelstein 7-X – Plasmaheizung

Mit welchen Arten wird das Plasma aufgeheizt ?

- **Neutralteilchenheizung**

- Wasserstoff-Ionen erzeugen & beschleunigen
- Elektronenanlagerung im Neutralisator
- Filterung durch Ablenk magnetfeld mit Ionensumpf
- Energieabgabe durch Stöße im Plasma
- W7-X: 2 Injektoren mit insgesamt:
 - $P=10 \text{ MW}$ (Deuterium)



[1]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 16

elenia
Institut für Hochspannungs-
technik
und Elektrische Energieanlagen

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
 - Daten & Fakten zum Experiment
 - Theoretische Grundlagen
- Supraleitendes Magnetsystem
- Plasmagefäß
- Plasmaheizung
- Bestandteile des Experiments (Animation)
- Zusammenfassung



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 17

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experimentes – Animation

Plasmagefäß

- 5 symmetrische Teile



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 18

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experimentes – Animation

Plasmagefäß

- 5 symmetrische Teile



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

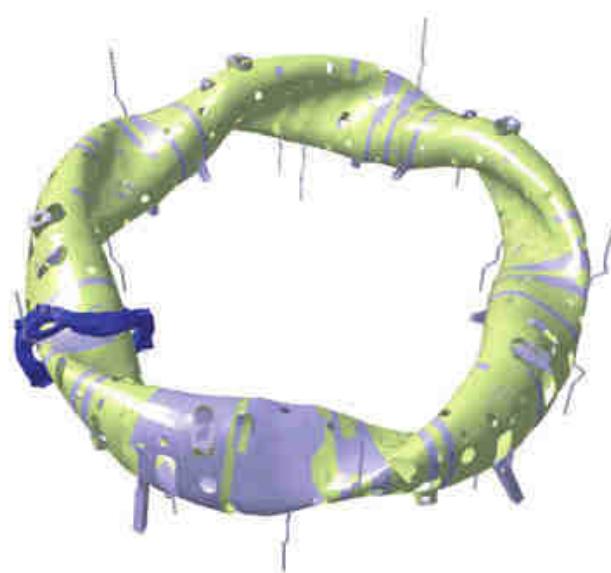
13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 19

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experimentes – Animation

Supraleitende Magnetspulen

- Blau: nicht planare Spulen



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 20

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experimentes – Animation

Supraleitende Magnetspulen

- Blau: nicht-planare Spulen
- Grün: planare Spulen



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

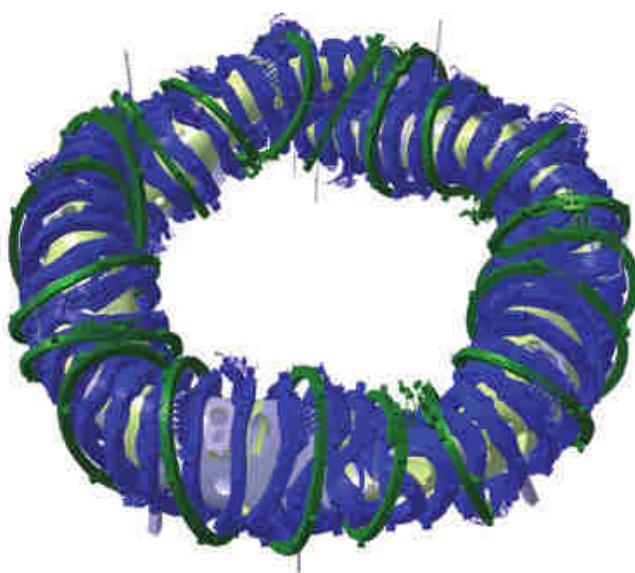
13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 21

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experimentes – Animation

Supraleitende Magnetspulen

- Blau: nicht-planare Spulen
- Grün: planare Spulen



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

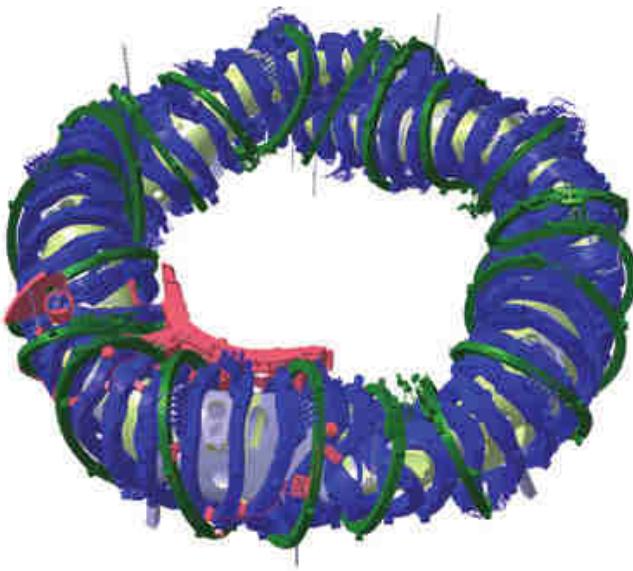
13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 22

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experimentes – Animation

Stützgerüst

- 5 symmetrische Teile



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

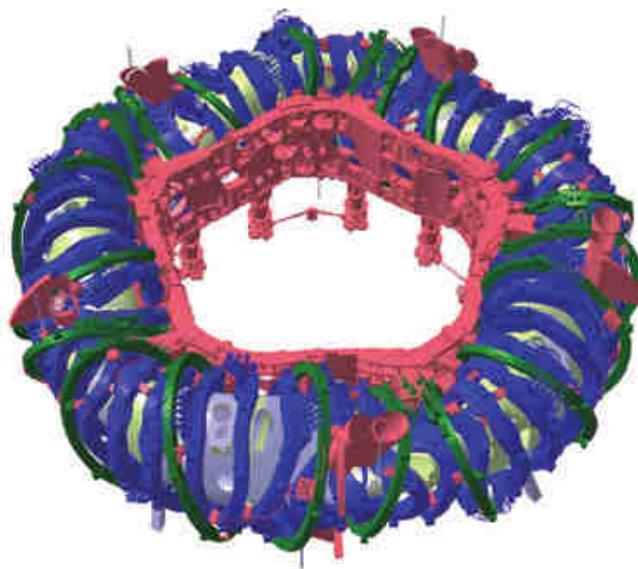
13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 23

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experimentes – Animation

Stützgerüst

- 5 symmetrische Teile



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 24

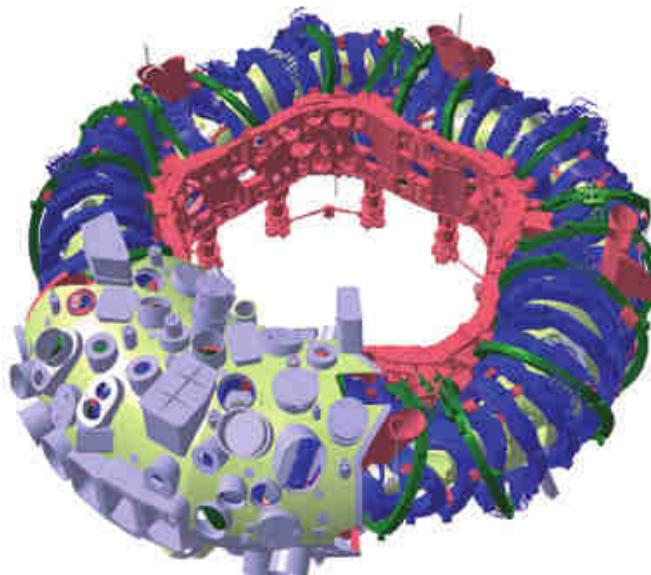
elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experimentes – Animation

Außenhülle mit Öffnungen

- 5 symmetrische Teile

- Zur Versorgung & Diagnose des Plasma



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 25

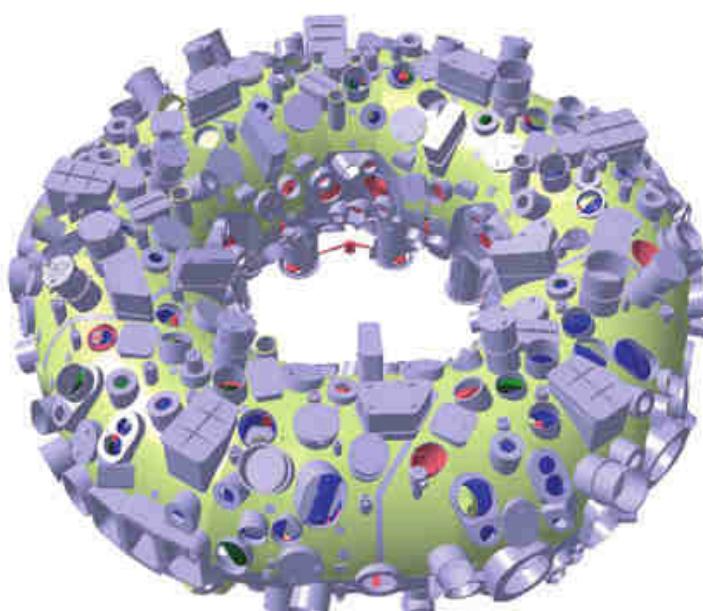
elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experimentes – Animation

Außenhülle mit Öffnungen

- 5 symmetrische Teile

- Öffnungen:
 - Versorgung
 - Diagnose



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

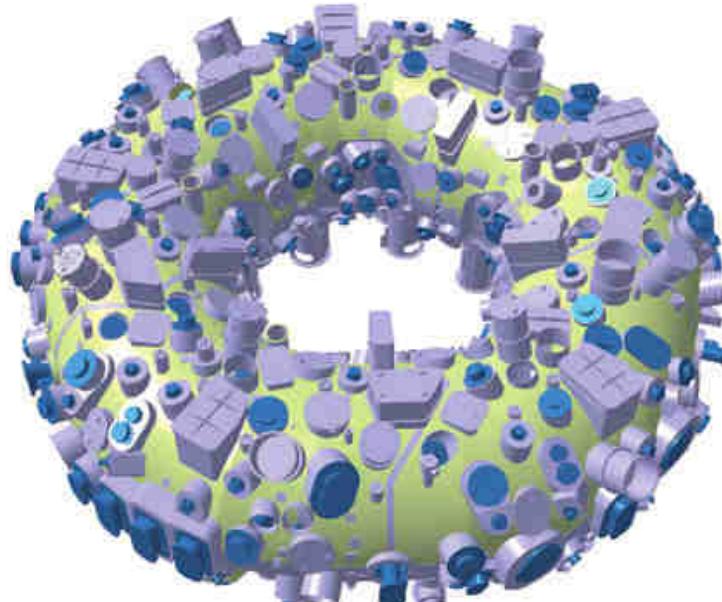
13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 26

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bestandteile des Experiments – Animation

Außenhülle mit Öffnungen

Inkl. Stutzen und Deckeln



[6]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 27

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Agenda

- Einleitung
- Grundlagen
 - Daten & Fakten zum Experiment
 - Theoretische Grundlagen
- Supraleitendes Magnetsystem
- Plasmagefäß
- Plasmaheizung
- Bestandteile des Experiments (Animation)
- Zusammenfassung



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 28

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Zusammenfassung

- Steigender Energiebedarf → Möglichkeiten der Kernfusion weiter erforschen
- IPP in Greifswald erforscht Kraftwerkstauglichkeit des Stellarator-Fusions-Prinzips
- **Wendelstein 7-X:**
 - Supraleitendes Magnetfeld
 - Komplexe Form für dichtes, stabiles Magnetfeld
 - Plasmagefäß
 - Schützt Plasma vor Eindringen der Luft und Austreten des Brennstoffes
 - Plasmaheizung
 - 2 Arten der Heizung: Mikrowellenheizung und Neutralteilchenheizung



13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 29



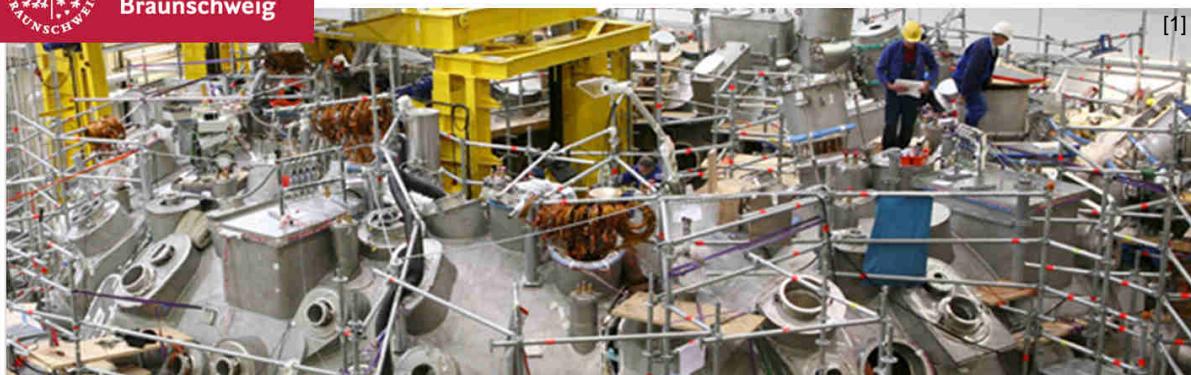
Literatur

- [1] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) – Homepage
<http://www.ipp.mpg.de>
- [2] Welt der Physik – Astrophysik
<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/sterne/sonne/>
- [3] International Business Times -
<http://www.ibtimes.com/nuclear-fusion-germany-s-wendelstein-7-x-stellarator-operating-expected-2456267>
- [4] Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – Lexikon zur Kernenergie
<http://www.ksp.kit.edu/9783731504191>
- [5] K. Risse et al., Commissioning of the Superconducting Magnet System, IEEE Transaction on applied superconductivity, Vol.26, No. 4, 2016.
- [6] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) – Multimedia – Kompliziert, aber vielversprechend!
https://www.ipp.mpg.de/892028/dk_aug_w7x



13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 30





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Markus Sinnigen, 13.02.2017

Theoretische Grundlagen – Kernfusion

Bedingung für Verschmelzung:

- Abstoßung der elektrischen Ladung der Kerne überwinden
- durch Zusammenprall mit hoher Geschwindigkeit

Gas-Temperatur ein Maß für die Teilchengeschwindigkeit im Gas

$$\bar{E}_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \bar{v}^2 = \frac{3}{2} k_B T \quad (2)$$

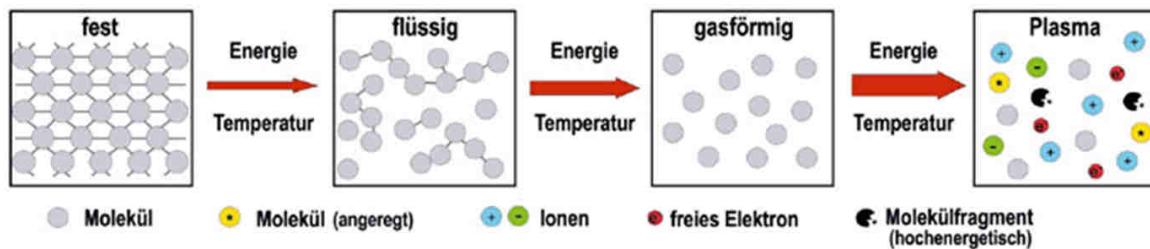
Zündbedingung für DT-Fusion:

- Produkt aus Protonentemperatur T, Teilchendichte n und Energieeinschlusszeit τ_E

Mit derzeitigen $n = 3 \cdot 10^{20} \text{ 1/m}^3$ und $\tau_E = 2 \text{ s}$:

- stabile Fusion mit einer **Temperatur von 100 Mio. K**

Theoretische Grundlagen – Plasma



Technische
Universität
Braunschweig

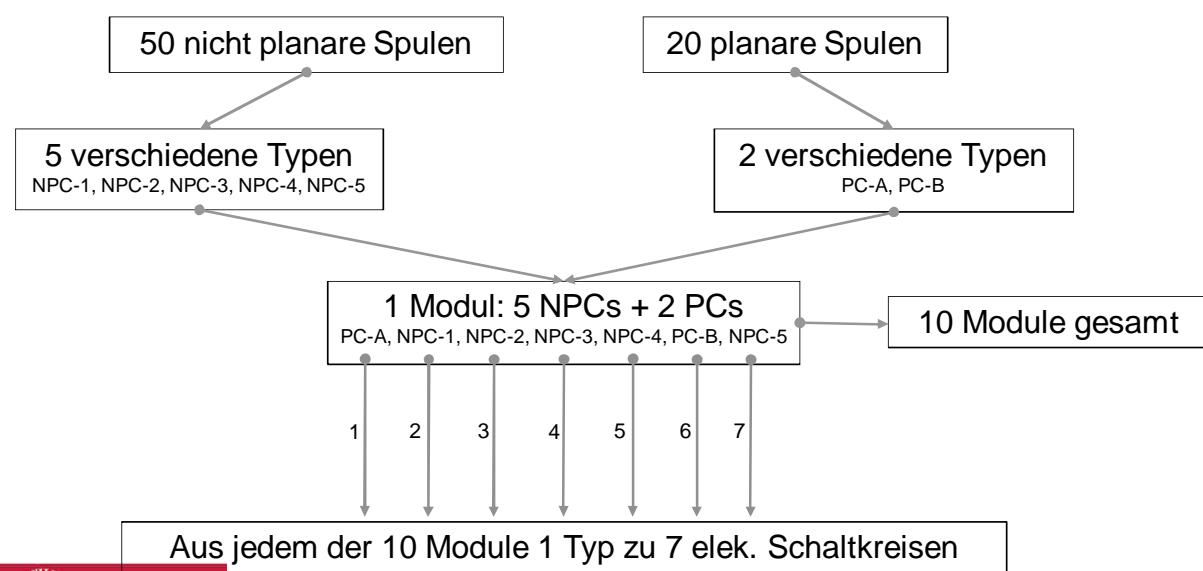
13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 33

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Wendelstein 7-X – Supraleitendes Magnetsystem

Aufbau

Supraleitendes Spulensystem

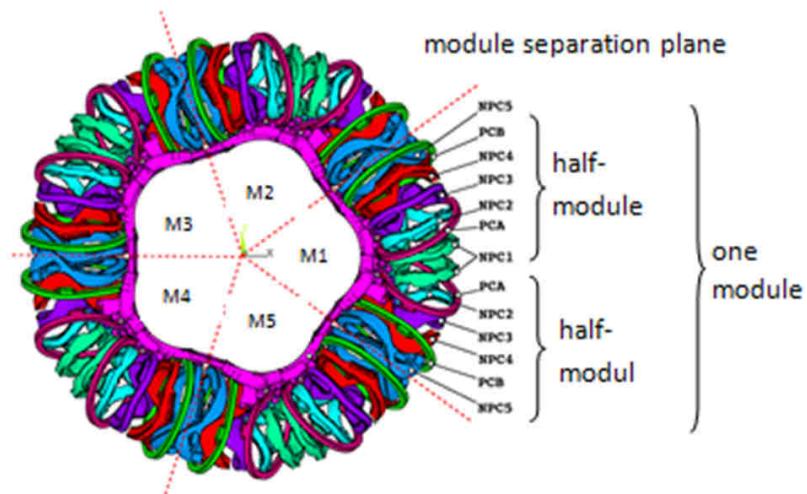


Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 34

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Wendelstein 7-X – Supraleitendes Magnetsystem



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | M. Sinnigen | Systemkomponenten des Stellarator-Fusionsexperiments Wendelstein 7-X | Seite 35

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Blitzschutzkoordination im Niederspannungsnetz

Coordination of lightning protection in the low voltage system

Oliver Landrath,

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

Kurzfassung

Der folgende Bericht befasst sich mit Schutzinstallationen und Schutzkonzepten, die elektrische Anlagen vor Beschädigungen durch Blitzschläge sichern. Darüber hinaus werden bauliche Anlagen vor Brand oder mechanischer Zerstörung geschützt und Personen in Gebäuden vor Verletzungen und dem Tod infolge von Blitzschlägen bewahrt. Dafür werden relevante Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik dargestellt, verschiedene Blitzschutzzonen einer baulichen Anlage aufgezeigt, sowie der innere und äußere Blitzschutz und deren Zusammenhang erläutert.

Abstract

The following article is about concepts and installations of protection measures in cases of lightning strikes to protect electrical constructions. Furthermore it is about the prevention of mechanical and fire caused destruction of physical constructions and to prevent injuries and death of people in buildings hit by lightning strikes. Relevant aspects of the technique of lightning protection are presented. In addition zones of lightning protection of physical constructions are illustrated. The inner and outer lightning protection and their connection are explicated.

1 Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland treten im Durchschnitt etwa 1,5 Millionen Blitze in einem Jahr auf, was auf die Landesfläche gerechnet 4,2 Blitzentladungen pro Quadratkilometer entspricht, wobei geographische Unterschiede in Bezug auf das Vorkommen von Blitzen vorliegen [1]. Von 2007 bis 2015 wurden beim Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft durchschnittlich 377.000 Blitzschäden pro Jahr registriert und 225 Millionen Euro Versicherungsleistungen pro Jahr gezahlt [2].

Blitze entstehen in Gewitterzellen, in denen es zu vertikalen Aufwindschlüchen kommt, woraus durch Reibung zwischen Wassertropfen und Eispartikeln eine elektrostatische Ladungstrennung resultiert. Falls nun die elektrische Feldstärke hinreichend groß ist, kommt es zu einer Blitzentladung. Man unterscheidet zwischen Abwärtsblitzen (Wolke-Erde-Blitze), Aufwärtsblitzen (Erde-Wolke-Blitze) und Wolke-Wolke-Blitzen, die alle für die Blitzschutztechnik relevant sind. Wolke-Wolke-Blitze spielen aufgrund der entstehenden elektromagnetischen Impulsfelder eine Rolle. [1]

2 Theoretische Grundlagen

Im Folgenden werden die verschiedenen Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik vorgestellt.

2.1 Scheitelwert des Blitzstromes

Der Scheitelwert des Blitzstromes I kann im einfachsten Fall mit dem Ohmschen Gesetz (1) berechnet werden, wobei R der Erdungswiderstand ist.

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

Der Blitzstrom bestimmt den Blitzkugelradius. [1]

2.2 Ladung des Blitzstromes

Die Ladung des Blitzstromes Q_{Blitz} besteht aus der Ladung des Stoßstromes $Q_{\text{Stoß}}$ und der Ladung des Langzeitstromes Q_{lang} .

$$Q = \int i dt \quad (2)$$

Vor allem Q_{lang} der Lichtbögen kann aufgrund der langen Wirkungszeit zum Abschmelzen und Verdampfen großer Materialvolumina führen, da sich die Ladung mit dem Integral des Stromes nach der Zeit berechnet (2).

$$W = Q * U_{AK} \quad (3)$$

U_{AK} : Anoden-/Kathodenfallspannung (einige 10V)

Die Ladung ist bestimend für den Energieumsatz (3) am Einschlagpunkt und an Stellen, wo sich Blitzströme in Form von Lichtbögen über Isolierstrecken fortsetzen. [1]

Innere Zone	
LPZ 1	Geringe Teilblitzenergien möglich [4]
LPZ 2	Geringe Überspannungen [4]
LPZ 3	Keine Störimpulse durch LEMP sowie Überspannungen [4]

2.3 Spezifische Energie des Blitzstromes

Die spezifische Energie W/R des Blitzstromes beschreibt die Energie, die bei einem Widerstand $R = 1 \Omega$ umgesetzt wird.

$$\frac{W}{R} = \int i^2 dt \quad (4)$$

Je höher die spezifische Energie, desto stärker die Erwärmung der durchflossenen Leiter. Die Erwärmung aber auch Kraftwirkungen zwischen Leitern untereinander können zu Verformungen von Komponenten oder Anordnungen führen. [1]

2.4 Steilheit des Blitzstromanstieges

Die Steilheit des Blitzstromanstieges $\Delta i/\Delta t$ bestimmt den Wert der elektromagnetisch induzierten Spannung in allen offenen und geschlossenen Leiterschleifen, die sich in Umgebung der blitzstromdurchflossenen Leitern befinden. [1]

$$U = M * \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (5)$$

M : Gegeninduktivität

Mit (5) lässt sich die Überspannung in der Installationsschleife abschätzen [3].

3 Blitzschutzzonenkonzept

Beim Blitzschutzzonenkonzept wird eine bauliche Anlage in innere und äußere Blitzschutzzonen eingeteilt auf Grundlage der unterschiedlichen elektromagnetischen Blitzimpuls (LEMP) – Bedrohungswerte. Aufgrund dieser Zonen können die Bereiche an die Festigkeit eines elektronischen Systems angepasst werden bzw. die Blitzschutzzone beim Einbau eines elektrischen Systems berücksichtigt werden. [1]

Äußere Zone	
LPZ 0 _A	Gefahr durch direkte Blitzeinschläge und ungedämpftes elektromagnetisches Feld des Blitzes [1]
LPZ 0 _B	Schutz vor direkten Blitzeinschlägen, aber Gefahr durch ungedämpftes elektromagnetisches Feld des Blitzes [1]

Tabelle 1 Blitzschutzzonenkonzept

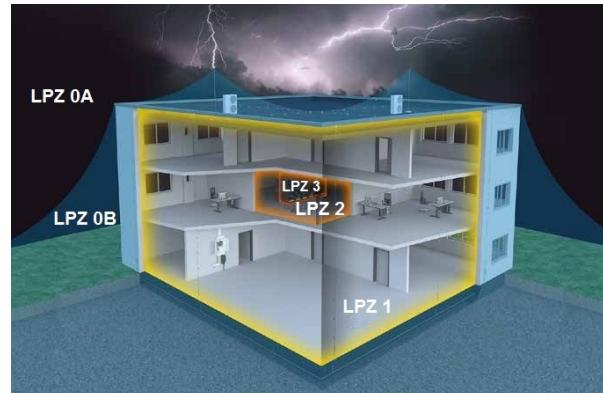


Bild 1 Innere und äußere Blitzschutzzonen [1]

4 Äußerer Blitzschutz

Der äußere Blitzschutz besteht aus Fangeinrichtungen, Ableitungen und der Erdungsanlage. Die Fangeinrichtungen bestehen aus massiven Rundleitern, massiven Flachleitern oder aus leitfähigen Seilen. Die Ableitungen sind die elektrisch leitende Verbindung zwischen Fangeinrichtungen und Erdungsanlage. Wichtig ist, dass der Blitzstrom ohne starke Erwärmung zur Erdungsanlage geleitet wird und dass mehrere Strompfade bestehen, die möglichst kurz gehalten sind. Außerdem müssen Verbindungen zu allen leitenden Teilen der baulichen Anlage vorhanden sein. In der Erdungsanlage wird der Strom in die Erde abgeleitet und verteilt. Das Überleiten des Blitzstromes in die Erde ist nicht punktförmig, sodass ein gewisser Bereich der Erde unter Strom steht. Berührungs- und Schrittspannung dürfen hierbei keine gefährlichen Werte annehmen. [1]

4.1 Blitzkugelverfahren

Das Blitzkugelverfahren ist eine universale Planungsmethode zur Auslegung von Fangeinrichtungen. Es basiert auf der Hypothese, dass sich der Leitblitzkopf unbeeinflusst auf der Erde den Objekten bis zur Enddurchschlagstrecke nähert. Folglich wird davon ausgegangen, dass die Einschlagstelle der Ort mit der

kürzesten Entfernung zum Leitblitzkopf ist. Um Fangeinrichtungen schützend dimensionieren bzw. positionieren zu können, muss ein Modell des zu schützenden Objektes mit Umgebung angefertigt werden. Darüber hinaus müssen dem Modell maßstabsgetreue Kugeln hergestellt werden, welche die Blitzkugeln simulieren sollen. Die Radien der Kugeln sind abhängig von der jeweiligen Schutzklasse des Objektes, welche von der Wahrscheinlichkeit der Größe des Blitzstromes abhängen.

Schutzklasse	I	II	III	IV
Blitzkugelradius	20 m	30 m	45 m	60 m

Tabelle 2 Blitzkugelradius abhängig von Schutzklasse

Rollt man nun die Kugel über das Modell ergeben sich Berührungsstellen zwischen Kugel und Modell, welche mögliche Blitzeinschlagstellen aufzeigen. Andere Bereiche, die nicht berührt werden, stellen natürliche Schutzzäume da. Die Fangeinrichtungen müssen nun so ausgelegt werden, dass keine Blitzeinschläge in das Gebäude, sondern nur in die Fangeinrichtungen möglich sind. [1]

Mit den Fangeinrichtungen kann folglich eine LPZ 0_A Schutzzone zu einer LPZ 0_B Schutzzone verbessert werden, in dem die Fangeinrichtungen in dem Bereich gegen direkte Blitzeinschläge vorbeugen.

5 Kopplungen

Im folgenden werden die verschiedenen Kopplungen zwischen äußerem Blitzschutz und elektrischen Installationen im Gebäude vorgestellt.

5.1 Galvanische Kopplung

Allgemein beschreibt die galvanische Kopplung, dass zwei oder mehrere Stromkreise über eine gemeinsame Impedanz fließen. Beim Blitzschutz ist die Kopplung relevant, da es beim Ableiten des Blitzstromes an den Erdungswiderständen zu einem Spannungsabfall kommt, der in die metallenen Installationen des Hauses eingekoppelt werden kann. Der eingeprägte Blitzstrom längs der Impedanz der Ableitung sowie der Parallelschaltung der Erdungsimpedanzen verursacht einen Spannungsabfall, sodass sich das Potential in Punkt A (**Bild 2**) kurzzeitig gegenüber der fernen Erde bis in den MV-Bereich anheben kann. Wird die

Durchschlagsspannung des kleinsten Abstands zur Elektroinstallation erreicht, kommt es zu einem Überschlag von der Ableitung oder dem PEN-Leiter zur Elektroinstallation, da diese gegenüber Punkt A quasi auf Erdpotential der fernen Erde in der Transformatorenstation liegt. [5]

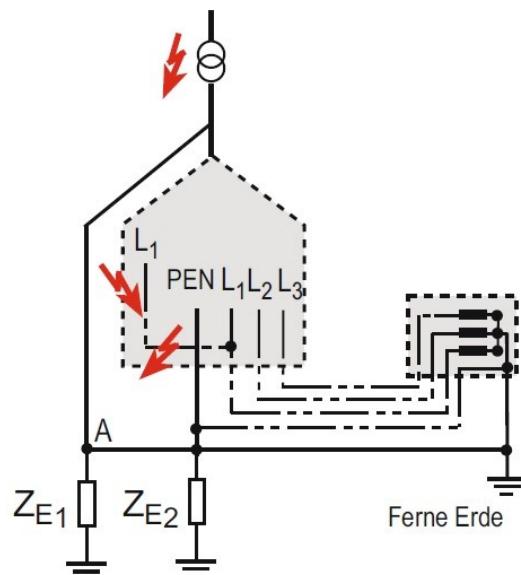


Bild 2 Galvanische Kopplung [5]

5.2 Kapazitive Kopplung

Kapazitive Kopplungen entstehen, wenn beim Blitzableiten durch den äußeren Blitzschutz elektrische Felder zwischen Leitungen auftreten, da sich diese auf unterschiedlichen Potentialen befinden. Dadurch kann es zu Überspannungen in den Elektroinstallationen kommen. [5]

5.3 Induktive Kopplung

Die aus den Blitzströmen resultierenden magnetischen Flüsse durchsetzen Leiterschleifen im Gebäude. Durch das sich schnell ändernde Blitzfeld können Störspannungen in den sich ergebenen Induktionsschleifen im Gebäude induziert werden. Wasser-, Klima oder Elektroleitungen können dabei beispielsweise Induktionsschleifen bilden. [5]

Einerseits kann der Strom im Falle einer induktiven Kopplung in die metallenen Installationen des Gebäudes von den Blitzableitern des äußeren Blitzschutzes geführt werden. Andererseits können auch Spannungen induziert werden, wenn der Blitz nicht direkt in den Blitzschutz des Gebäudes einschlägt. Bei einem Blitzeinschlag in einem Radius von etwa 1,5 km um das Gebäude herum, können

Spannungen induziert werden, die zu Schäden der elektrischen Installationen im Gebäude führen. [4]

6 Innerer Blitzschutz

Der innere Blitzschutz besteht aus Maßnahmen zum Schutz gegen Überspannungen infolge von Blitz einschlägen. Dafür wird ein Potentialausgleich für alle leitenden Teile durchgeführt, in dem eine Potentialausgleichsschiene mit der Erdungseinrichtung und den metallenen Installationen verbunden wird. Wichtig ist, dass alle metallenen Installationen in den Potentialausgleich einbezogen werden auch äußere leitende Teile der elektrischen Energie- und Informationstechnik, sowie Metallgerüste der baulichen Anlage und metallene Wasser-, Gas- und Heizungsrohrleitungen. Folglich werden gefährliche Berührungsspannungen z.B. zwischen Schutzleiter der Niederspannungsverbraucheranlage und metallen Wasser-, Gas- oder Heizungsrohrleitungen verhindert. Die Zuleitungen der Niederspannungsverbraucheranlage und alle leitfähigen Systeme werden über gestaffelte Überspannungsschutzgeräte in den Potentialausgleich mit einbezogen. Die Spannung zwischen Potentialausgleichsschiene und den Phasenleitern der Elektroinstallation wird nie größer als die Ansprechspannung der sogenannten Ventilableiter, sodass es zu einer Potentialanhebung der gesamten Elektroinstallation kommt. [5]

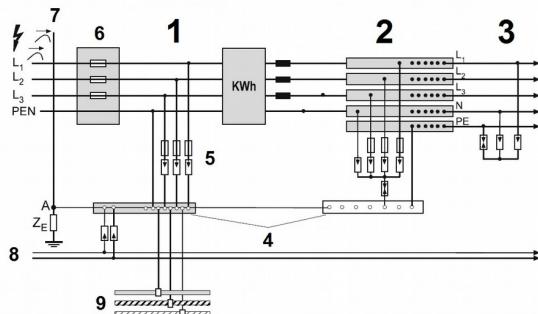


Bild 3 Potentialausgleich und gestaffelter Überspannungsschutz [5]

- 1 SPD Typ 1, 2 SPD Typ 2, 3 SPD Typ 3,
- 4 Potentialausgleichsschienen, 5 Ventilableiter,
- 6 Hausanschluss, 7 Blitzschutzableitung,
- 8 Telefon/Daten, 9 Wasser/Gas/Heizung

6.1 Überspannungsschutzgeräte

Die Überspannungsschutzgeräte bestehen aus Überspannungsableitern, welche nichtlineare Widerstände sind. Im Bereich der Betriebsspannung sind sie hochohmig und bei Überspannung sehr niederohmig. Der innere Blitzschutz besteht aus drei gestaffelten Überspannungsschutzgeräten.

Grobschutz in Gebäudeeinspeisung: SPD Typ 1: Blitzstromableiter	Begrenzung des Energieinhaltes des Blitzes und der verbleibenden Restspannung (Schutzpegel unter 4000 V [4])
Mittelschutz in Etagenverteiler: SPD Typ 2: Überspannungsableiter	weitere Begrenzung der verbleibenden Überspannungen (Schutzpegel unter 1500 V [4])
Feinschutz auf Steckdosenebene: SPD Typ 3: Überspannungsableiter	Reduzierung der verbleibenden Überspannungen auf das tolerierbare Maß der Endgeräte [5]

Tabelle 2 gestaffelter Überspannungsschutz

Beim Typ 1 handelt es sich um Funkenstrecken, die eine Ansprechzeit im mittleren Nanosekundenbereich aufweisen [6]. Nach Zünden des Ableiters verringert sich der Widerstand um 10 Zehnerpotenzen. Funkenstrecken zeichnen sich durch ihre gute Stromtragfähigkeit aus. Typ 2 und 3 basieren meistens auf Varistoren, welche nichtlineare Widerstände aus Metalloxid meist ZnO sind. Die Widerstandänderung bei Überspannung liegt im Nanosekundenbereich. [5]

7 Zusammenfassung

Aufgrund der verschiedenen Kopplungen ist der Schutz von elektronischen Installation innerhalb eines Gebäudes mit ausschließlich äußeren Blitzschutz nicht gewährleistet. Beim innerem Blitzschutz sind Mittel- und Feinschutz ohne Grobschutz wirkungslos, da die Varistoren für die theoretisch resultierenden Strom- und Spannungswerte ohne Grobschutz bei Blitz einschlag nicht ausgelegt sind. Insgesamt ist es sinnvoll, infolge der weiteren Verbreitung von Mikroelektronik in Haushalten, in ein Blitzschutzkonzept mit innerem und äußerem Blitzschutz zu investieren, um elektrische Anlagen zu schützen. Insgesamt ist ein innerer und äußerer Blitzschutz notwendig, um Blitzschäden zu vermeiden.

8 Literatur

- [1] DEHN + SÖHNE GmbH + Co.KG., Blitzplaner – 3. aktualisierte Auflage, Neumarkt: DEHN + SÖHNE, 2013.
- [2] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, „Blitzbilanz“, 2016. [Online]. Available:
http://www.gdv.de/wp-content/uploads/2016/08/GDV-Grafik_Blitzbilanz-2015.pdf. [Zugriff am 24.11.2016].
- [3] O. Beierl, Elektromagnetische Verträglichkeit beim Blitz einschlag in ein Gebäude- Reihe 21: Elektrotechnik Nr.93, Düsseldorf: VDI Verlag 1991.
- [4] Obo Bettermann GmbH & Co. KG, Blitzschutz- Leitfaden – Zur Unterstützung bei der Planung von Blitz- und Überspannungsschutz-Systemen, Menden: Obo Bettermann GmbH & Co. KG, 2015.
- [5] A. J. Schwab, W. Kürner, Elektromagnetische Verträglichkeit – 6., bearbeitete und aktualisierte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [6] Phoenix Contact GmbH & Co. KG, Trabtech- Basics – Grundlagenwissen zum Überspannungsschutz, Blomberg: Phoenix Contact GmbH & Co. KG, 2008.



ytimg.com

Sicherheitskritische Betriebszustände und Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien

Richard Düren, 13.02.2017

Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle
- Zusammenfassung

Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle
- Zusammenfassung



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 3

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Einleitung

- Weit verbreitete Technologie
- Hohe Energiedichte
- Hohes Gefährdungspotential



motor-talk.de



ecestaticos.com



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 4

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Einleitung

- Weit verbreitete Technologie
- Hohe Energiedichte
- Hohes Gefährdungspotential



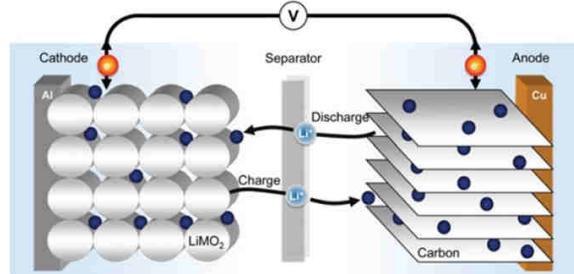
Quelle: rnz.de

Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle
- Zusammenfassung

Theoretische Grundlagen

- Chemischer Energiespeicher
- Separator ist nur für Li⁺-Ionen durchlässig und trennt Anode und Kathode galvanisch
- Elektrolyt (Lösungsmittel + Leitsalze)
- Entladevorgang: Li⁺ → Kathode
- Aktivmaterialien an Elektroden



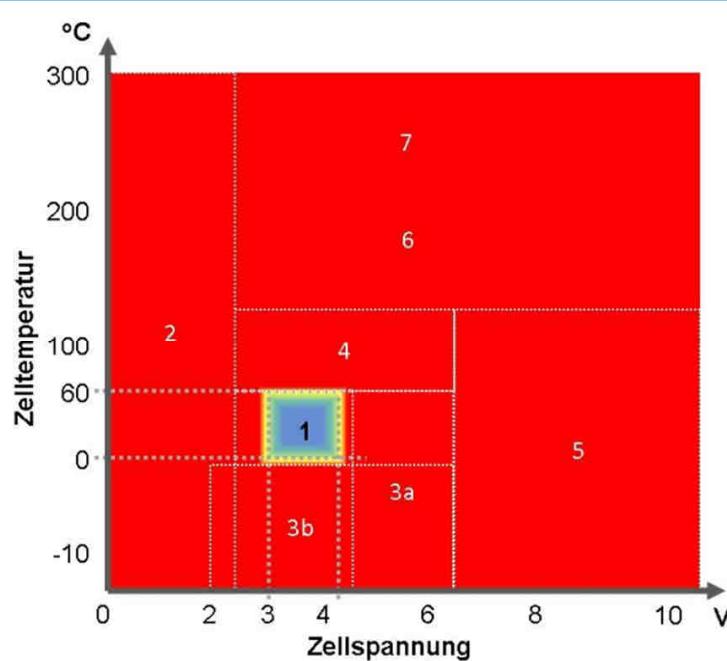
Quelle: azom.com

Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle
- Zusammenfassung

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

- Kritische Betriebszustände: Entstehen durch Umgebungsbedingungen
- Fehlerfälle: Entstehen durch mechanisches Einwirken



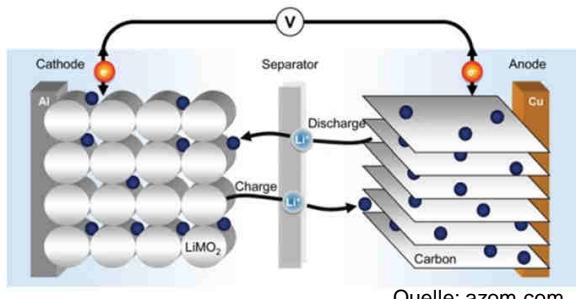
1. Betriebsfenster, sicherer Arbeitsbereich
2. Auflösung Anoden-Kupfer
3. a) Li-Plating beim Überladen
b) Li-Plating bei Tieftemperatur-Laden
4. Möglicher Defekt der SEI-Schicht bei Grafitanoden, Gasdruck steigt, evtl. langsamer Thermal Runaway.
5. Temperatur steigt, Ausgasen, Brand,...
6. Ausgasen, Separator schmilzt, Brand,...
7. Thermal Runaway, Brand, Sauerstoff aus Oxiden wird freigesetzt und fördert das Brandverhalten

Quelle: energieaktiv.at

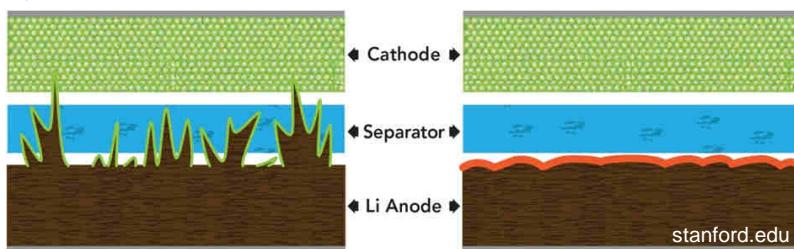
Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Kritische Betriebszustände

- **Über- und Untertemperatur**
 - Bildung von Li-Dendriten an der Anode beim Laden bei zu niedriger Temperatur ($<0^{\circ}\text{C}$)
 - Zersetzung von tiefssiedenden Materialien bei zu hohen Temperaturen ($>60^{\circ}\text{C}$)
- Überladung
- Tiefenentladung
- Überschreitung des maximalen Stroms



Quelle: azom.com



25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 11

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Kritische Betriebszustände

- Über- und Untertemperatur
- **Überladung ($>4,2\text{V}$)**
 - Zersetzung des Elektrolyts
 - Bildung von Li-Dendriten
 - Bei Einsatz von Kobaltoxid: Kristall kann zusammenbrechen
- Tiefenentladung
- Überschreitung des maximalen Stroms

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Kritische Betriebszustände

- Über- und Untertemperatur
- Überladung
- **Tiefenentladung (<2,5V)**
 - Bildung von Cu-Dendriten
 - Zersetzung des Elektrolyts
- Überschreitung des maximalen Stroms



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 13

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Kritische Betriebszustände

- Über- und Untertemperatur
- Überladung
- Tiefenentladung
- **Überschreitung des maximalen Stroms**
 - Erwärmung der Batterie → thermisches Durchgehen



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 14

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Fehlerfälle

- Laufen meist auf eine Verletzung des Separators hinaus
- Benötigte Intensität sehr von Bauform abhängig:

- Rundzellen
- Prismatische Zellen
- Pouch-Zellen



Quelle: akkuline.de



Quelle: akkuline.de



Quelle: A123



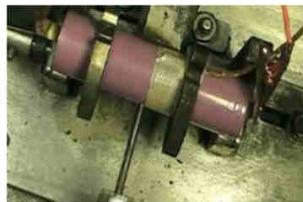
Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 15

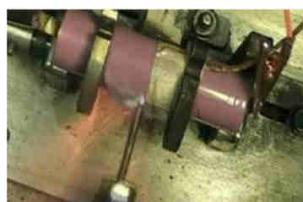
elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Nail Penetration Test



$t = 126 \text{ ms}$
after nail
penetrated
the can wall



$t = 158 \text{ ms}$
after nail
penetrated
the can wall



$t = 190 \text{ ms}$
after nail
penetrated
the can wall

Quelle: TIAX



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 16

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

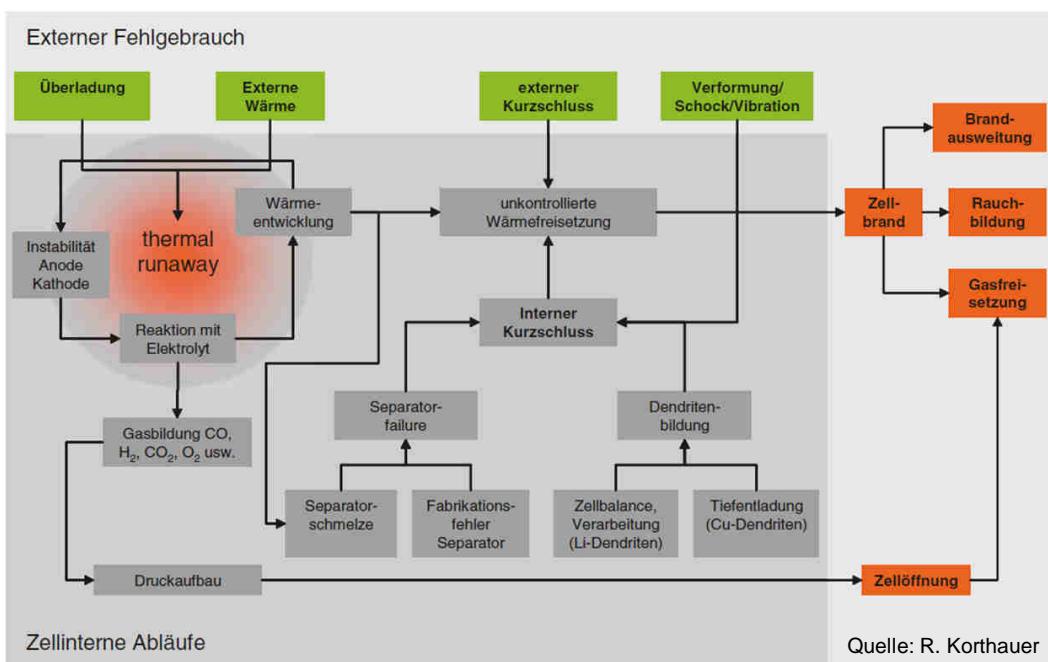
Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Nail Penetration Test



Quelle: TIAX

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle



Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Thermisches Durchgehen (engl.: thermal runaway)

- Sich selbst beschleunigende Erwärmung der Zelle
- Gefährdung durch Zellbrand und Ausstoß von Gasen und Materialien
- Vorgang des thermischen Durchgehens im Verlauf der Temperatur:
 - 80°C: Tiefsiedende Bestandteile beginnen zu verdampfen
 - 130°C: Separator schmilzt
 - 250°C: Kathodenmaterial reagiert mit Elektrolyt
 - 600°C: Kathodenmaterialien ändern Kristallstruktur
 - 660°C: Schmelzen des Aluminium Stromableiters



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 19

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- **Lithium-Metall:**
 - Hochreakтив
 - $T_s = 181^\circ\text{C}$
- Wasserstoff
- Graphit
- Schwermetalle
- Brennbare Komponenten
- Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)
- Phosphorsäure (H_3PO_4)
- Fluorwasserstoff (HF)
- Weitere giftige Verbindungen
- Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 20

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

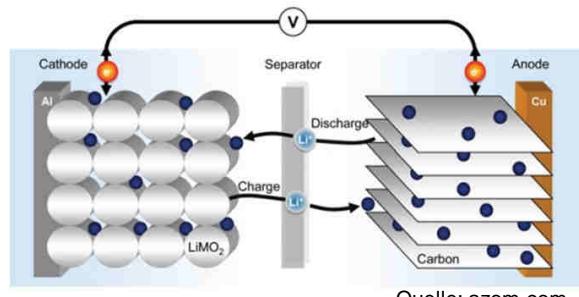
Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- Lithium-Metall
- **Wasserstoff**
 - hoher Zündbereich
- Graphit
- Schwermetalle
- Brennbare Komponenten
- Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)
- Phosphorsäure (H_3PO_4)
- Fluorwasserstoff (HF)
- Weitere giftige Verbindungen
- Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- Lithium-Metall
- Wasserstoff
- **Graphit**
 - Graphit-Staub-Explosion
- Schwermetalle
- Brennbare Komponenten
- Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)
- Phosphorsäure (H_3PO_4)
- Fluorwasserstoff (HF)
- Weitere giftige Verbindungen
- Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder

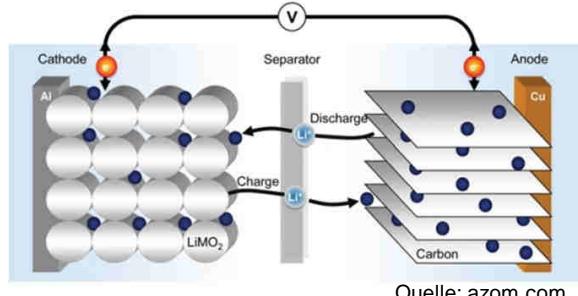


Quelle: azom.com

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- Lithium-Metall
- Wasserstoff
- Graphit
- **Schwermetalle**
 - Übergangsmetalle (Cobalt, Nickel, Mangan)
- Brennbare Komponenten
- Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)
- Phosphorsäure (H_3PO_4)
- Fluorwasserstoff (HF)
- Weitere giftige Verbindungen
- Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder



Quelle: azom.com



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 23

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- Lithium-Metall
- Wasserstoff
- Graphit
- Schwermetalle
- **Brennbare Komponenten**
 - Z.B. brennbare organische Lösungsmittel
- Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)
- Phosphorsäure (H_3PO_4)
- Fluorwasserstoff (HF)
- Weitere giftige Verbindungen
- Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 24

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- Lithium-Metall
- Wasserstoff
- Graphit
- Schwermetalle
- Brennbare Komponenten
- **Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)**
 - Freisetzung unspezifischer Stoffe
 - Stark hydroskopisch → Entstehung von H_3PO_4 und HF
- Phosphorsäure (H_3PO_4)
- Fluorwasserstoff (HF)
- Weitere giftige Verbindungen
- Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 25

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- Lithium-Metall
- Wasserstoff
- Graphit
- Schwermetalle
- Brennbare Komponenten
- Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)
- **Phosphorsäure (H_3PO_4)**
 - Reizend und ätzend
- Fluorwasserstoff (HF)
- Weitere giftige Verbindungen
- Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 26

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- Lithium-Metall
- Wasserstoff
- Graphit
- Schwermetalle
- Brennbare Komponenten
- Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)
- Phosphorsäure (H_3PO_4)
- **Fluorwasserstoff (HF)**
 - Farbloses Gas, stechender Geruch
 - Durch Reaktion mit Wasser: Flussäure
 - Starkes Kontaktgift!
- Weitere giftige Verbindungen
- Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder



Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- Lithium-Metall
- Wasserstoff
- Graphit
- Schwermetalle
- Brennbare Komponenten
- Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)
- Phosphorsäure (H_3PO_4)
- Fluorwasserstoff (HF)
- **Weitere giftige Verbindungen**
 - Phosphorwasserstoffverbindungen (z.B. Phosphin)
- Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder



Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle

Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

- Lithium-Metall
- Wasserstoff
- Graphit
- Schwermetalle
- Brennbare Komponenten
- Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6)
- Phosphorsäure (H_3PO_4)
- Fluorwasserstoff (HF)
- Weitere giftige Verbindungen
- **Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder**
 - Bei einem langsamen Versagen einer Batterie Freisetzung von Gasen, welche schwerer sind als Luft



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 29

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Kritische Betriebszustände und Fehlerfälle
- Zusammenfassung



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 30

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Zusammenfassung

- Technologie mit viel (Gefahren-)Potential
- Neben offensichtlichen Gefährdungen auch „Sekundärgefahren“
- Berücksichtigung von Sicherheitsmaßnahmen bereits bei der Planung von Batteriesystemen



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 31

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Richard Düren | Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 32

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Sicherheitskritische Betriebszustände und Fehlerfälle beim Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien

Richard Düren,

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

Abstract

Mit der zunehmenden Elektrifizierung im automobilen Bereich, dem von der Bundesregierung vorgegebenen Ziel bis 2022 aus der Atomkraft auszusteigen, sowie der steigenden Wichtigkeit von mobilen elektronischen Geräten rückt die Entwicklung von leistungsfähigen Speichermedien in den Vordergrund. In der Vergangenheit hat sich hier die Lithium-Ionen-Technologie als zukunftsweisend hervorgetan. Mit dem großen Potential gehen allerdings auch Risiken bei Herstellung und Betrieb der Zellen einher, welche einer besonderen Betrachtung bedürfen. Diese Arbeit befasst sich daher mit kritischen Betriebszuständen und Fehlerfällen, wie Überladung, Tiefentladung, Kurzschluss, dem thermischen Durchgehen, Penetration und Quetschung, sowie den Tests, die notwendig sind, um diese Fälle abzudecken.

1 Einleitung

Da die Vorteile der Lithium-Ionen-Technologie auch mit zahlreichen Risiken im Bereich der Betriebssicherheit einhergehen, ist bei der (Weiter-)Entwicklung auch besonderes Augenmerk auf kritische Betriebszustände und Fehlerfälle zu richten. Mit einer Energiedichte von bis zu 250Wh/kg kann es infolge von Fehlerfällen, wie beispielsweise dem Brand einer Fahrzeughbatterie, zu gefährlichen Situationen kommen[1]. Zudem kommt hinzu, dass bei Zellbränden giftige Verbindungen, gesundheitsgefährdende Stoffe, brennbare Gase und karzinogene Stäube entweichen, welche neben den Gefahren eines Brandes eine zusätzliche Gefahr bedeuten.

In der folgenden Abhandlung wird daher herausgearbeitet, bis zu welchen Grenzen Lithium-Ionen-Zellen betrieben werden können. Werden diese Grenzen überschritten, befindet sich die Zelle in einem kritischen Zustand. Weiterhin werden Fehlerfälle besprochen, welche mechanischen Ursprungs sind.

2 Theoretische Grundlagen

Batterien speichern ihre Energie in chemischen Verbindungen. Durch chemische Reaktionen sind sie in der Lage die gespeicherte Energie in Form von elektrischer Energie abzugeben. Im Laufe der Zeit wurden Batterien für unterschiedlichste Anwendungen entwickelt, welche sich im Material für Kathode, Anode, Elektrolyt und einigen anderen Spezifikationen voneinander unterscheiden.

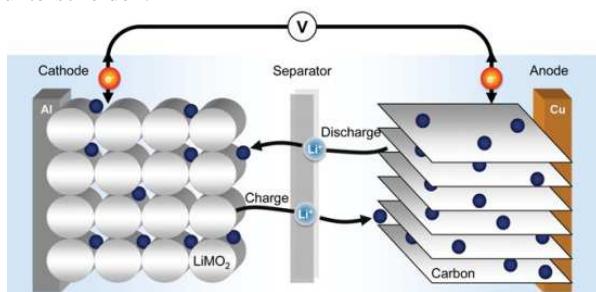


Abbildung 1: Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle [3]

Abb.1 zeigt den schematischen Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle, wobei die Trennung zwischen Anode und Kathode durch einen Separator zu erkennen ist. Der Separator ist mikroporös und lediglich für die Lithium-Ionen durchlässig, sodass die Reaktionen innerhalb der Zelle ablaufen können, gleichzeitig aber beide Seiten der Batterie voneinander galvanisch getrennt sind. Der Fall, dass die galvanische Trennung durch den Separator nicht mehr gegeben ist, wird im folgenden Kapitel betrachtet.

Eine der mittlerweile am weitesten verbreiteten Formen sind Zellen mit Anoden aus einem Graphit-Aktivmaterial, in das sich Lithium-Ionen einlagern. Im Vergleich mit allen anderen Metallen besitzt Lithium mit 3,04 Volt das größte Potential gegenüber der Standardwasserstoffelektrode. In Kombination mit anderen Kathodenmaterialien ergeben sich hiermit hohe Zellspannungen sowie eine hohe Kapazität. Mit diesen Eigenschaften eignen sich Lithiumzellen für viele Anwendungen. [4]

Da die "Lithium-Batterie" ein Sammelbegriff für unterschiedlichste Batterien ist, in denen Lithium in Reinform oder gebunden in Form von Aktivmaterial verwendet wird, wird grundsätzlich zwischen Primär- und Sekundärbatterien unterschieden. Während Primärbatterien nur für den einmaligen Gebrauch geeignet sind, da die Energie in Form einer irreversiblen Reaktion abgegeben wird, eignen sich Sekundärbatterien hingegen für den wiederholten Gebrauch, da sie wiederaufladbar sind. [4]

Bei Lithium-Primärzellen (Lithiummetall-Batterien) besteht das Problem, dass diese nicht wiederaufladbar sind, da bei der Entladung der Zelle das Lithium der Anode zur Kathode wandert. Dadurch löst sich die Anode im Verlauf des Entladevorganges auf. Dies führt dazu, dass beim Ladevorgang eine bestehende Struktur fehlt an der sich das Lithium wieder anlagern kann, sodass reine Lithiumanoden für Sekundärbatterien nicht geeignet sind. Anstelle des metallischen Lithiums an der Anode werden an Anode und Kathode Aktivmaterialien wie beispielsweise Graphit eingesetzt, welche in der Lage sind

das Lithium in Form von Ionen reversibel einzulagern und so Lithium-Sekundärzellen zu ermöglichen - die Lithium-Ionen-Batterie.

3 Kritische Betriebszustände, Fehlerfälle und ihre Folgen

Wie im vorherigen Kapitel erläutert wurde, ist die galvanische Trennung der Elektroden eine zentrale Aufgabe des Separators. Kann dies nicht mehr gewährleistet werden, entstehen interne Kurzschlüsse, welche zu einer Temperaturerhöhung führen. Wie in Abb.2 zu sehen ist, zieht dies eine Kettenreaktion nach sich, welche als thermisches Durchgehen (engl.: thermal runaway) schlussendlich in einem Zellbrand enden kann:

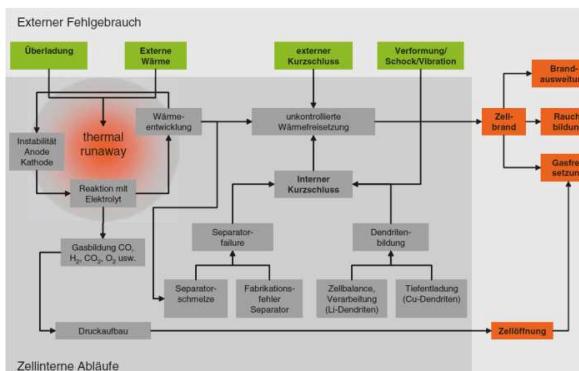


Abbildung 2: Auslöser und Ablauf der thermischen Zersetzung einer Lithium-Ionen-Batterie [1]

Bei den Auslösern werden zwei Typen unterschieden:

- Als **kritische Betriebszustände** werden hier Zustände der Batterie verstanden, welche sich außerhalb der Spezifikationen befinden. Hierzu gehört beispielsweise der Betrieb der Zelle außerhalb des erlaubten Temperaturbereichs, Über- und Unterladungen oder Überströme- und Spannungen.
- Als **Fehlerfälle** werden mechanische Beeinflussungen der Zelle bezeichnet, welche zu einer Penetration des Separators führen. Dies ist unter anderem durch das Durchstoßen der Zelle mit festen Gegenständen (z.B. einem Nagel), Schock/Vibration oder der Verformung durch Krafteinwirkungen von außen.

3.1 Kritische Betriebszustände

Im Folgenden werden die wichtigsten kritischen Betriebszustände und die Art ihres Einwirks auf die Batterie betrachtet.

3.1.1 Über- und Untertemperatur

"Bei Minustemperaturen treten spezielle Alterungsmechanismen auf, die zu einer irreversiblen

Schädigung der Zellen führen können. Der wichtigste dieser Art ist das sogenannte Lithium-Plating. Hierbei kommt es beim Ladevorgang der Zelle zum Abscheiden von reinem Lithium an der Anode. Dies führt zu einer Reduktion der Zellkapazität, im schlimmsten Fall kann es zu einem inneren Kurzschluss kommen, wenn das abgeschiedene Lithium Dendrite bildet, die sich von der Anode bis zur Kathode erstrecken. Da Lithium-Plating nur beim Laden der Zelle auftritt, lässt sich diese Art der Alterung natürlich vermeiden, indem die Betriebsstrategie bei negativen Batterietemperaturen die Energieaufnahme ausschließt." [1]

Übertemperaturen hingegen können zur Zersetzung von tiefstehenden Komponenten der Batterie führen und damit das thermische Durchgehen in Gang setzen (siehe 3.1.2). [4]

3.1.2 Überladung

Durch das Überladen einer Li-Ion-Batterie wird in einer irreversiblen Reaktion das Elektrolyt zerstört. Hierbei entsteht im Innern ein Gas, welches bei zu hohem Druck die Zelle bersten und nach außen expandieren kann. Zudem ist es möglich, dass sich an der Anode metallisches Lithium ablagern kann, was bei Durchstoßen des Separators zu einem Kurzschluss führt. [4]

Außerdem kann beim Einsatz von Kobaltoxid als Anodenmaterial bei starker Überladung der Kobaltoxid-Kristall zusammenbrechen, was wiederum in einem thermischen Durchgehen resultieren kann. [1]

3.1.3 Tiefentladung

Bei Tiefentladung zerstört sich irreversibel die Elektrolytflüssigkeit, wodurch die zugeführte Energie schlechter bis gar nicht mehr in chemische Energie gespeichert werden kann, sodass die Ladeenergie in Wärme umgesetzt wird. Weiterhin kann es bei der Tiefentladung zur Bildung von Kupfer-Dendriten kommen, welche bei Durchstoßen des Separators ebenfalls einen Kurzschluss erzeugen. [1][4]

3.1.4 Überschreitung des maximalen Stroms

Bei überschreiten des maximalen Stroms beispielsweise im Kurzschlussfall erwärmt sich die Batterie aufgrund ihres Innenwiderstandes, was wieder im thermischen Durchgehen enden kann.

3.2 Fehlerfälle

Unter Fehlerfällen wird hier die mechanische Penetration der Zelle verstanden. Da dies schlussendlich immer auf einen Kurzschluss der Anode und Kathode hinausläuft findet hier keine detaillierte Betrachtung statt. Es ist aber einfach zu erkennen, dass durch die mechanische Beanspruchung der Zelle ein Defekt im Separator erzeugt werden kann, der wieder einen internen Kurzschluss als Konsequenz hat. Dabei ist die Art und Intensität der benötigten Penetration sehr abhängig von der Bauform der Zellen, sowie dem verwendeten Separator.

Bei der Bauform seien zunächst einmal grundsätzlich die drei Hauptbauformen genannt:

- Rundzellen
- Prismatische Zellen
- Pouch-Zellen

Hierbei ist leicht ersichtlich dass beispielsweise bei der Pouchzelle deutlich weniger mechanischer Stress ausreichend ist um diese zu zerstören als bei einer Rundzelle.

3.2.1 Nail Penetration Test

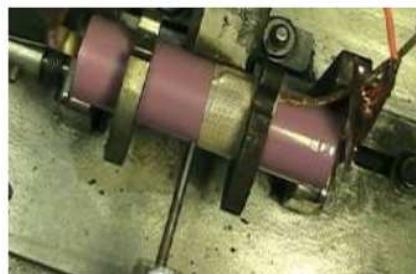
Zum Test des Verhaltens einer Zelle bei der Penetration mit mechanischen (leitenden) Gegenständen wurde der Nail Penetration Test eingeführt. Dafür wird eine Zelle genommen und ein metallischer Nagel so hindurchgetrieben, dass der Separator durchstoßen wird.



Abbildung 3: Nail Penetration Test bei verschiedenen SOC [2]

Bei der Durchführung des Nail Penetration Tests bei verschiedenen Ladeständen (SOC: State Of Charge/Ladezustand) der Batterie zeigt sich, dass die Reaktion auf die Penetration sehr abhängig vom SOC ist. In Abb3. ist zu erkennen, dass Batterien welche vollständig geladen sind mit einem thermischen Durchgehen auf den Test reagiert haben, während die halb geladene Zelle keine solche Anzeichen zeigt. Dies ist auf der einen Seite abhängig von der jeweiligen Zelle, offenbart aber die Wichtigkeit des SOC bei der Betrachtung des Verhaltens bei Penetration der Zelle.

Weiterhin gibt der Nail Penetration Test Auskunft über die Geschwindigkeit der Reaktion. Wie Abb.4 zeigt kann dies innerhalb kürzester Zeit geschehen, sodass ein solcher Test mit maschineller Hilfe durchgeführt werden sollte, um Verletzungen zu vermeiden.



$t = 126 \text{ ms}$
after nail
penetrated
the can wall



$t = 158 \text{ ms}$
after nail
penetrated
the can wall



$t = 190 \text{ ms}$
after nail
penetrated
the can wall

Abbildung 4: Dynamik einer Batterie bei der Penetration mit einem Nagel [2]

3.3 Thermisches Durchgehen (engl.: thermal runaway)

Im Verlauf des Versagens einer Zelle setzt in den meisten kritischen Fällen das thermische Durchgehen ein. Da durch den thermal runaway die größten Schäden angerichtet werden können, widmet sich dieses Unterkapitel diesem Vorgang.

Beim thermischen Durchgehen handelt es sich um eine sich selbst beschleunigende Erwärmung der Zelle. Ausgelöst wird dieser Vorgang indem der Separator nicht mehr in der Lage ist beide Elektroden voneinander galvanisch zu trennen. Dadurch entsteht ein Kurzschluss zwischen den beiden Elektroden innerhalb der Zelle. Der hohe Kurzschlussstrom führt nun zu einer Erwärmung der Zelle, welche nach und nach in exothermen Reaktionen Zellbestandteile zerfallen lässt und damit die Erwärmung weiter vorantreibt. Auf diese Art und Weise entsteht eine Kettenreaktion, welche neben dem thermischen Durchgehen noch zwei weitere Folgen hat. Durch die Erhöhung der Temperatur und die zellinternen Prozesse entsteht ein Überdruck, welcher zu einer Zelloffnung führen kann. Dabei werden Gase freigesetzt, welche toxisch, entzündlich, ätzend sowie karzinogen sind. Außerdem führt der Zellbrand zu Rauchentwicklung, wobei auch die Rauchpartikel stark gesundheitsgefährdend sind. [4][1]

3.3.1 Inhaltsstoffe und Zersetzungprodukte im Brandfall

3.3.1.1 Lithium-Metall

Lithium ist ein hochreaktives Metall, welches daher in Primärzellen das größte Gefahrenpotential darstellt. Durch seine verhältnismäßig geringe Schmelztemperatur bei 181°C kann Lithium im Brandfall schnell verflüssigen, wodurch unkontrollierbare Zustände im Innern der Batterie entstehen können. Da es im Falle eines thermischen Durchgehens auch bei Sekundärbatterien zu sehr hohen Temperaturen kommt, kann auch dabei eingelagertes Lithium in Brand geraten und ist daher auch in Sekundärzellen eine Gefahrenquelle.[4]

3.3.1.2 Wasserstoff

Durch die hohe Reaktionsfähigkeit von Lithium wird Wasser, welches beispielsweise durch Löscharbeiten mit dem Lithium in Kontakt kommt, in seine Bestandteile aufgelöst. Der ausströmende Wasserstoff ist in einem sehr breiten Bereich von 4-75 Vol.% Wasserstoff in der Luft zündfähig und kann bereits durch kleinste Funken zur Explosion gebracht werden. [4]

3.3.1.3 Graphit

Durch den Einsatz von Graphit als Aktivmaterial ist es zudem möglich, dass im Zuge der Ausgasung Graphit-Staub entsteht, welcher, fein verteilt in der Luft, zu Staubexplosionen führen kann.[4]

3.3.1.4 Schwermetalle

Durch den Einsatz von Oxiden aus der Reihe der Übergangsmetalle (Cobalt, Nickel, Mangan) ist es möglich, dass staubförmige Reaktionsprodukte sowie Rückstände dieser Stoffe durch Asche und Rauch ausgestoßen werden. Bei Cobalt führt dabei bereits die Aufnahme von lediglich 25 Milligramm beim Menschen zu Haut-, Lungen- und Magenerkrankungen und kann zu Leber-, Herz-, Nierenschäden sowie Krebsgeschwüren führen. Das Einatmen von Nickel-Verbindungen ist mit einem erhöhten Krebsrisiko für Karzinome der Lunge und der oberen Luftwege verbunden.[4]

3.3.1.5 Brennbare Komponenten

Weiterhin bestehen einige Komponenten der Zellen aus brennbaren und leicht entzündlichen Materialien. Aufgrund von Elektrolytmaterialien aus einer Mischung von brennbaren organischen Lösemitteln und einem Leitsalz können sich in der Luft explosive Luft-Lösemittel-Gemische bilden.[4]

3.3.1.6 Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆)

Durch den Einsatz von phosphor- und/oder fluorhaltigen Verbindungen, wie das sehr verbreitete Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆) können durch einen Brand undspezifische Stoffe freigesetzt werden, welche, durch den Rauch verteilt, ein erhebliches Risiko für Personen und Umwelt darstellen können.[4]

Da LiPF₆ außerdem stark hydrokatisch ist, kommt es bei Eintreten von Wasser, beispielsweise durch Löscharbeiten, zu einer chemischen Reaktion zu Fluorwasserstoff (HF) und Phosphorsäure (H₃PO₄).[4]

3.3.1.7 Phosphorsäure (H₃PO₄)

Phosphorsäure besitzt eine reizende und ätzende Wirkung auf den menschlichen Organismus, ist aber ansonsten ungiftig.[4]

3.3.1.8 Fluorwasserstoff (HF)

Fluorwasserstoff ist ein farbloses Gas und führt bereits bei geringsten Konzentrationen zu gesundheitlichen Beschwerden. Durch die Reaktion mit Wasser bildet sich Flusssäure, welche ein starkes Kontaktgift ist. Flusssäure wird vom Körper resorbiert, schädigt das Nervensystem und führt zu Organversagen ohne dass die Haut äußerlich sichtbar verletzt ist. Durch den gasförmigen Austritt kann sich die Flusssäure auch an Objekten in der Gegend bilden welche feucht sind sodass diese auch nach dem Brand noch kontaminiert sein können.[4]

3.3.1.9 Weitere giftige Verbindungen

Weiterhin können durch die phosphorhaltigen Bestandteile Phosphorwasserstoffverbindungen wie Phosphen entstehen, welche giftig und wassergefährdend sind.[4]

3.3.1.10 Besondere Personengefährdung trotz Brandmelder

Durch versagende Batterien, welche nicht direkt ein thermisches Durchgehen erfahren, können giftige Stoffe freigesetzt werden, welche schwerer als Luft sind und damit nicht von Brandmeldern erkannt werden, welche an der Decke montiert sind. Dazu gehören z.B. Elektrolyt- und Lösemitteldämpfe sowie Kohlenstoffdioxid.[4]

3.3.2 Vorgang des thermischen Durchgehens im Verlauf der Temperatur

- "70°C: Selbsterhitzung der Graphit-Anode und des Elektrolyten. Tiefsiedende Bestandteile im Elektrolyten beginnen ab 80°C zu verdampfen und führen zum Druckaufbau, der die Zelle bersten lassen kann.
- 130°C: Separator aus PE, PP oder PE/PP verschließt die Poren (Shut-down). Separator schmilzt, zusätzliche Erwärmung aufgrund von Kurzschluss. Autokatalytischer Anstieg der Temperatur.
- 250°C: Kathodenmaterial reagiert exotherm mit dem Elektrolyten (Zersetzung). Druckanstieg in der Zelle durch Verdampfung und Zersetzungsgase. Aufblähen des Zellengehäuses und evtl. Öffnung (austretende Zersetzungsgase sind zündfähig). Einige Kathodenmaterialien zerfallen bereits bei Temperaturen unter 200°C

spontan und geben in einer exothermen Reaktion Wärme und Sauerstoff ab, wodurch es zum Thermal Runaway kommen kann.

- 600°C: Kathodenmaterialien zersetzen sich und ändern ihre Kristallstruktur. Freisetzung von Sauerstoff. Zellenbrand innerhalb kurzer Zeit. Thermal Runaway.
- 660°C: Schmelzen des Aluminium Stromableiters (Kathode). Freisetzung von Graphit mit möglicher Gefährdung durch Staubexplosion. Weiterer Anstieg der Temperaturen, bei denen die Aluminiumfolie der positiven Elektrode zu brennen beginnt (Metallbrand)." [4]

4 Zusammenfassung/Fazit

Beim Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien gibt es zahlreiche Gefahren, welche berücksichtigt werden sollten - von offensichtlichen Gefährdungen wie dem Zellbrand bis hin zu "Sekundärgefahren" wie Rückständen von Flusssäure in der Umgebung nach einem Brand. Um die Batterien möglichst innerhalb der sicheren Grenzen zu halten, sollte daher auf die gründliche Auslegung der Umgebung geachtet werden, indem Battery Management Systeme (BMS) eingesetzt werden, welche überwachen, dass die Zellen nur im spezifizierten Bereich betrieben werden, und tragende Strukturen wie Akkucontainer so ausgelegt sind, dass sie

zu erwartenden Crash-Situationen so standhalten, dass auch hier keine übermäßige Beanspruchung der Zellen stattfindet. Auch wenn die Gefährdungen vielfältig sind, ist die Lithium-Ionen-Technologie eine sehr wichtige, welches auch die weite Verbreitung deutlich macht. Den meisten Gefahren ist mit guter Planung bereits im Vorhinein beizukommen, sodass sich das Risiko in einem tragbaren Rahmen hält. Im Falle eines Fehlerfalles sollte aber Vorsicht walten gelassen werden da die Reaktionsdynamiken schnell sehr intensiv werden können.

5 Literatur

- [1] Reiner Korthauer, Handbuch der Lithium-Ionen-Batterien, Frankfurt: Springer Vieweg, 2013.
- [2] TIAx, "The Relationship of the Nail Penetration Test to Safety of Li-Ion Cells" 01.Dezember 2016. [Online]. Available: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/es142_sriramulu_2013_p.pdf
- [3] [http://www.azom.com/images/Article_Images/ImageForArticle_8229\(1\).jpg](http://www.azom.com/images/Article_Images/ImageForArticle_8229(1).jpg)
- [4] Dr. Michael Buser, Lithium Batterien Brandgefahren und Sicherheitsrisiken Effektive Schadenverhütung und wirksame Brandbekämpfung [Online]. Available: <http://www.batteryuniversity.eu/?dFHASH=2ba8698b79439589fdd2b0f7218d8b07>



Blitzschutzkoordination im Niederspannungsnetz

Oliver Landrath, 25.01.2017

Agenda

- Notwendigkeit von Blitzschutzsystemen
- Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik
- Blitzschutzzonenkonzept
- Äußerer Blitzschutz
- Galvanische, kapazitive und induktive Kopplung
- Innerer Blitzschutz
- Zusammenfassung und Fazit



Bild 1: Blitzanimation, Quelle: http://www.dach.de/uploads/tx_pxteaser/csm_Blitzschutz_am_Dach_db858e5b9e.jpg

Notwendigkeit von Blitzschutzsystemen

- Schutz von baulichen und elektrischen Anlagen
- Schutz von Personen
- 377.000 Blitzschäden pro Jahr
- 225 M € Versicherungsleistungen pro Jahr

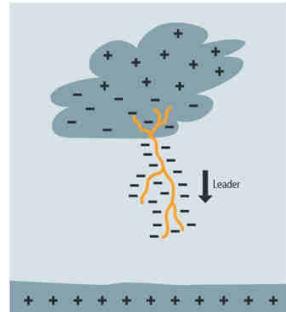


Bild 4: Negativer Abwärtsblitz,
Quelle: Dehn



Bild 2: Ausgebranntes Haus, Quelle:
<http://www.hapea.de/schaden.html>



Bild 3: Zerstörter Fernseher, Quelle:
<http://www.hapea.de/schaden.html>



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzausbildung im Niederspannungsnetz | Seite 3

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Agenda

- Notwendigkeit von Blitzschutzsystemen
- Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik
- Blitzschutzzonenkonzept
- Äußerer Blitzschutz
- Galvanische, kapazitive und induktive Kopplung
- Innerer Blitzschutz
- Zusammenfassung und Fazit



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzausbildung im Niederspannungsnetz | Seite 4

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik

Scheitelwert des Blitzstromes I $I = \frac{U}{R}$ (1)

→ bestimmt Blitzkugelradius

Ladung des Blitzstromes Q_{Blitz} $Q = \int i dt$ (2)

- Ladung des Stoßstromes $Q_{\text{Stoß}}$ und Ladung des Langzeitstromes Q_{lang}
- Abschmelzen großer Materialvolumina

Spezifische Energie des Blitzstromes $\frac{W}{R} = \int i^2 dt$ (3)

→ Belastungen, Verformungen von Komponenten

Steilheit des Blitzstromanstieges $U = M * \frac{\Delta i}{\Delta t}$ (4)

→ Überspannungen in Installationsschleifen

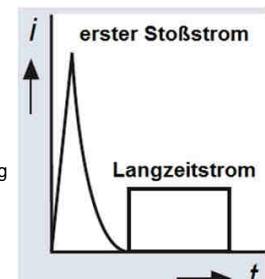


Bild 5: Stoß- Langzeitstrom, Quelle: Dehn

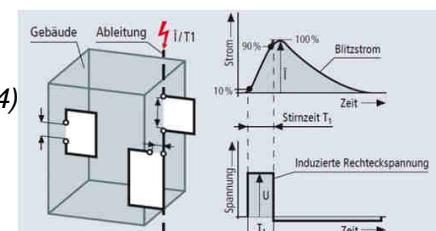


Bild 6: Induktionsschleifen, Quelle: Dehn



Agenda

- Notwendigkeit von Blitzschutzsystemen
- Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik
- Blitzschutzzonenkonzept
- Äußerer Blitzschutz
- Galvanische, kapazitive und induktive Kopplung
- Innerer Blitzschutz
- Zusammenfassung und Fazit



Blitzschutzzonenkonzept

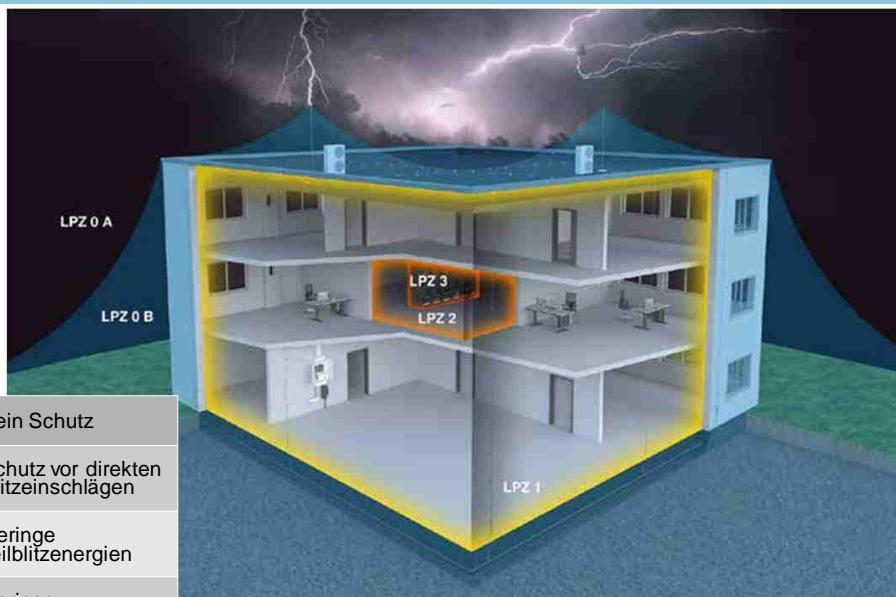


Bild 7: Blitzschutzzonen eines Gebäudes, Quelle: Dehn



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzkoordination im Niederspannungsnetz | Seite 7



Agenda

- Notwendigkeit von Blitzschutzsystemen
- Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik
- Blitzschutzzonenkonzept
- Äußerer Blitzschutz
- Galvanische, kapazitive und induktive Kopplung
- Innerer Blitzschutz
- Zusammenfassung und Fazit



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzkoordination im Niederspannungsnetz | Seite 8



Äußerer Blitzschutz

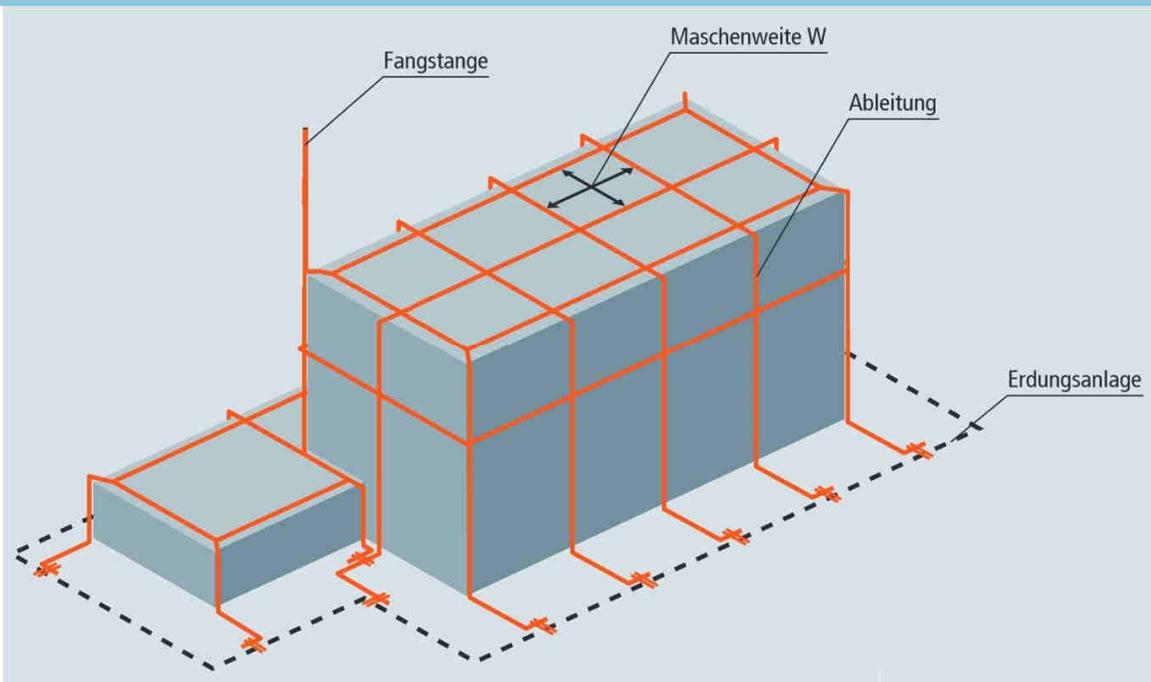


Bild 8: Auslegung von Fangeinrichtungen bei hohen Gebäude, Quelle: Dehn

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzausbildung im Niederspannungsnetz | Seite 9



Technische
Universität
Braunschweig



Äußerer Blitzschutz

Blitzkugelverfahren



Bild 9: Blitzkugelverfahren Verwaltungsgebäude, Quelle: Dehn

Schutzklasse	Radius der Blitzkugel
I	20 m
II	30 m
III	45 m
IV	60 m



Bild 11: Blitzkugelverfahren Aachener Dom 2, Quelle: Dehn

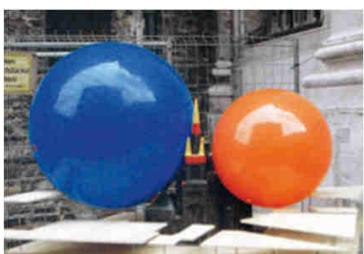


Bild 10: Blitzkugelverfahren Aachener Dom 1, Quelle: Dehn

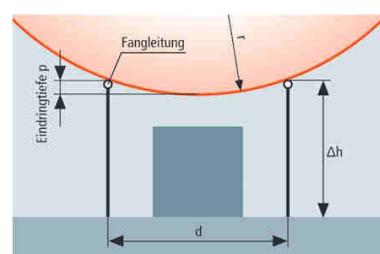


Bild 12: Eindringtiefe der Blitzkugel, Quelle: Dehn



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzausbildung im Niederspannungsnetz | Seite 10



Äußerer Blitzschutz

Schritt- und Berührungsspannung

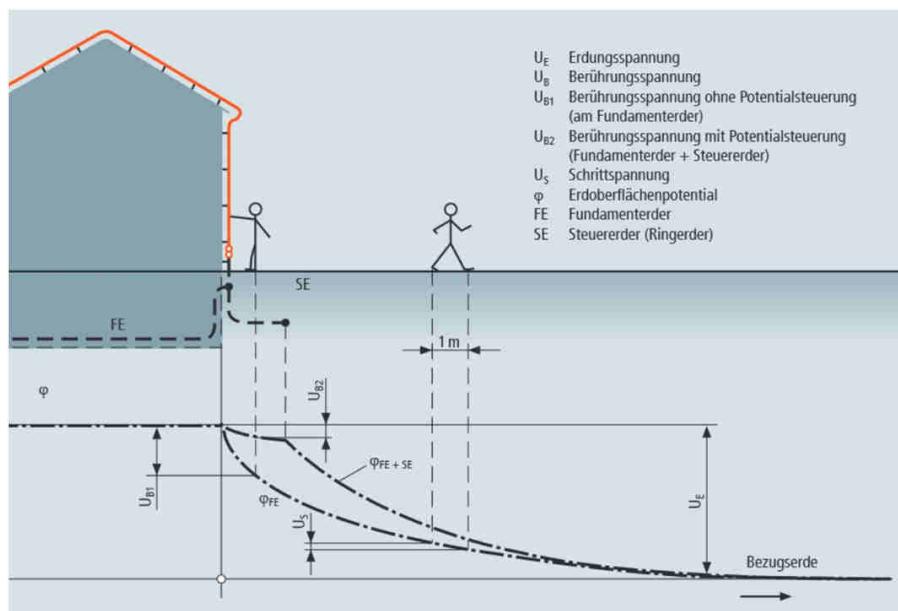


Bild 13: Schritt- und Berührungsspannung, Quelle: Dehn



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzkoordination im Niederspannungsnetz | Seite 11

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Agenda

- Notwendigkeit von Blitzschutzsystemen
- Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik
- Blitzschutzzonenkonzept
- Äußerer Blitzschutz
- Galvanische, kapazitive und induktive Kopplung
- Innerer Blitzschutz
- Zusammenfassung und Fazit



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzkoordination im Niederspannungsnetz | Seite 12

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Galvanische, kapazitive und induktive Kopplungen

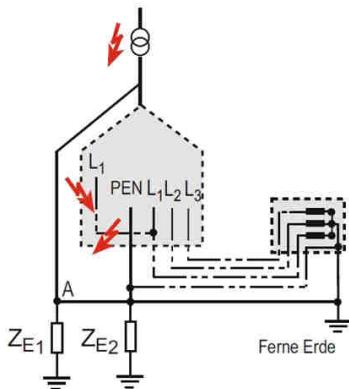


Bild 14: Galvanische Kopplung,
Quelle: Schwab

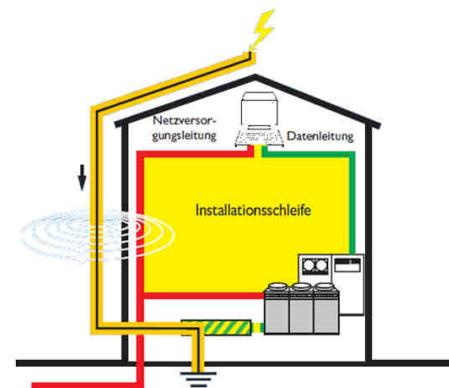


Bild 16: Induktive Kopplung,
Quelle: Phoenix Contact

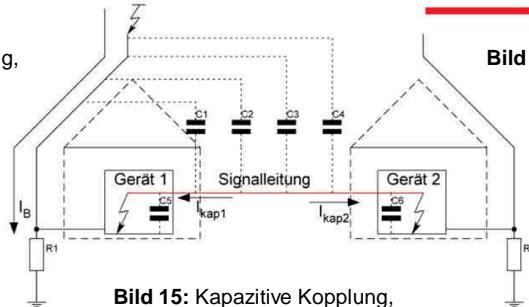


Bild 15: Kapazitive Kopplung,
Quelle: elenia interne Abbildung

Agenda

- Notwendigkeit von Blitzschutzsystemen
- Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik
- Blitzschutzzonenkonzept
- Äußerer Blitzschutz
- Galvanische, kapazitive und induktive Kopplung
- Innerer Blitzschutz
- Zusammenfassung und Fazit



Innerer Blitzschutz

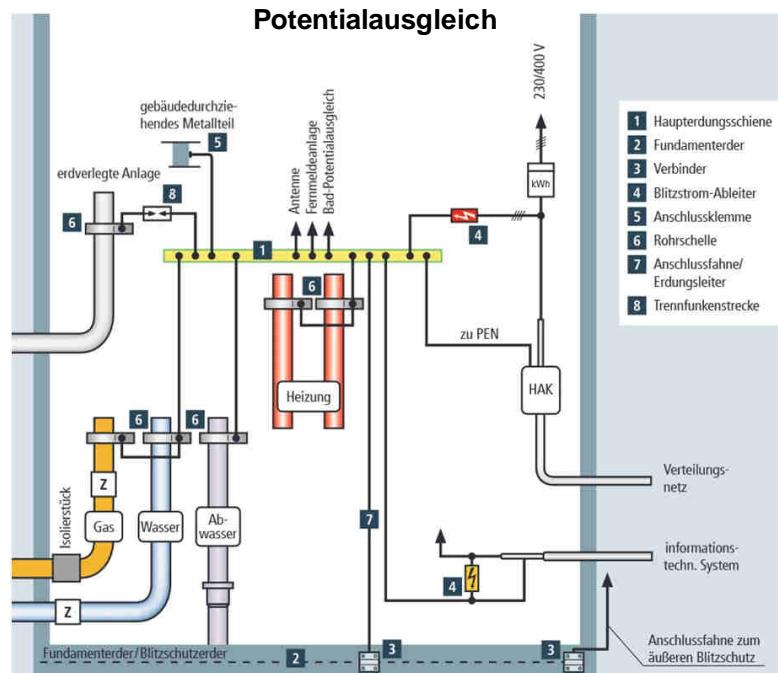


Bild 17: Potentialausgleich, Quelle: Dehn

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzausbildung im Niederspannungsnetz | Seite 15

Innerer Blitzschutz

Staffelschutz gegen Überspannungen

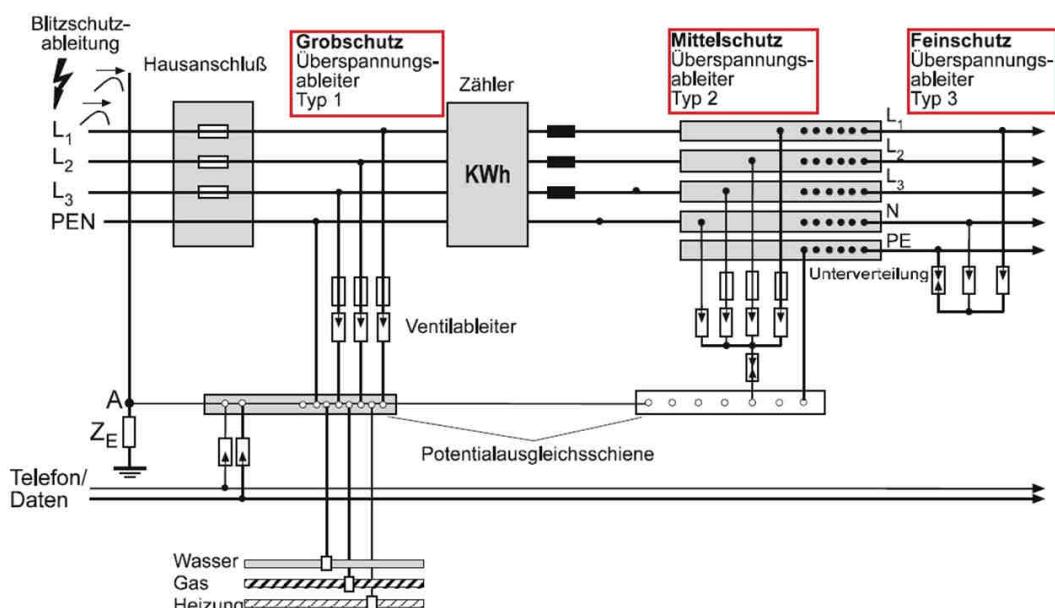


Bild 18: Potentialausgleich und Staffelschutz gegen Überspannungen, Quelle: Schwab

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzausbildung im Niederspannungsnetz | Seite 16

Innerer Blitzschutz

Staffelschutz gegen Überspannungen



Bild 19: SPD Typ 1,
Quelle: Dehn

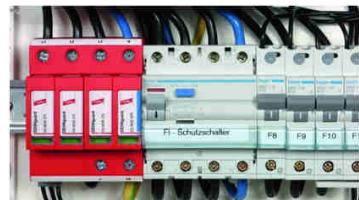


Bild 20: SPD Typ 2,
Quelle: Dehn



Bild 21: SPD Typ 3,
Quelle: Dehn

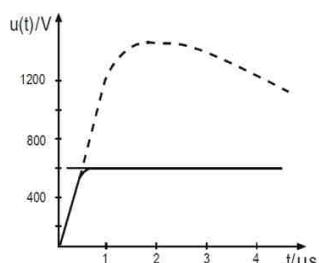


Bild 22 Vergleich Varistor/Funkenstrecke,
Quelle: Schwab

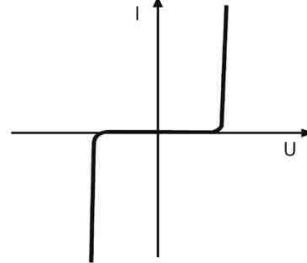


Bild 23 Kennlinie Varistor,
Quelle: Schwab

25.01.2017 | Oliver Landrath | Blitzschutzausbau im Niederspannungsnetz | Seite 17

Agenda

- Notwendigkeit von Blitzschutzsystemen
- Wirkungsparameter für die Blitzschutztechnik
- Blitzschutzzonenkonzept
- Äußerer Blitzschutz
- Galvanische, kapazitive und induktive Kopplung
- Innerer Blitzschutz
- Zusammenfassung und Fazit



Zusammenfassung und Fazit

- Schutz von elektrischen Installationen sowie Endgeräten durch ausschließlich äußerem Blitzschutz nicht gewährleistet



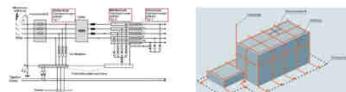
- Beim inneren Blitzschutz sind Mittel- und Feinschutz ohne Grobschutz wirkungslos



- Investition in äußerem und innerem Blitzschutz sinnvoll, um immer komplexere elektrische Anlagen zu schützen



- Verhinderung von Blitzschäden nur mit innerem und äußerem Blitzschutz



Post-Mortem-Analyse von Lithium-Ionen-Batteriezellen

Maite Selene Aramburu, m.aramburu@tu-braunschweig.de

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

Kurzfassung

Heutzutage ist die Verbesserung der Lebensdauer ein wichtiges Thema bei der Entwicklung von Li-Ionen-Batterien. Diese Studie untersucht den aktuellen Stand der Literatur über die Post-Mortem-Analyse von Lithium-Ionen-Batteriezellen, einschließlich Vorinspektion, sichere Umgebung für die Demontage und alter Materialienanalyse. Auf diese Weise werden die Batteriezellen, die im Battery LabFactory Braunschweig (BLB) hergestellt worden sind, nach ein paar Ladezyklen geöffnet und der Zustand der Elektroden untersucht.

1 Einleitung

Derzeit richtet die wissenschaftliche Gemeinschaft ihren Blick auf eine große Herausforderung in Bezug auf die Energiespeicherung. Diese Studie trägt zur Erweiterung des Wissens in sehr wichtigen Bereichen, wie dem Batterie-Recycling und dem Umweltschutz, bei.

Für den technologischen Beitrag ist die Energiespeicherung ein integraler Bestandteil eines jeden Programms von "rationeller und effizienter Nutzung von Energie", da eine integrale Analyse, eine Verringerung der Kosten ergibt.

Durch die Erforschung der Elektrodenmaterialien werden die Energiespeicherkapazität und die Leistung erhöht. Damit wird beabsichtigt, zu der Entwicklung von zunehmend einfachen, kostengünstigen und effektiven Energiespeichertechnologien beizutragen.

Als Ergebnis wird die Welt viele Innovationen in den kommenden Jahren genießen, nicht nur im Energiesektor, sondern auch in der Revolution der Branche der Elektro- und Hybridfahrzeuge, die in ständiger Verbesserung ist.

Abschließend sind die Energiespeichertechnologien sehr wichtige Technologien, die zum Erfolg der Energiewende, der Anpassung der erneuerbaren Energien an das Stromnetz und zur Entwicklung der Elektromobilität beitragen.

2 Theoretische Grundlagen

Das Altern von Li-Ionen-Batterien ist im Allgemeinen problematisch für die Hersteller, da sie eine langfristige Zuverlässigkeit ihrer Produkte garantieren müssen.

Degradationsmechanismen auf den Materialien führen zu Kapazitätsabnahme und Widerstandserhöhung auf der Zelle. Diese Leistungsabnahme der Zelle basiert hauptsächlich auf chemischen Abbaureaktionen an der Elektrode. In diesem Sinne ist ein gründliches Verständnis der Degradationsmechanismen, die innerhalb

der Zellen geschehen, entscheidend, um ihre Lebensdauer zu verbessern.

Um Informationen über Alterungsmechanismen zu erhalten, müssen die Zellen zerlegt und die relevanten Zellkomponenten analysiert werden.

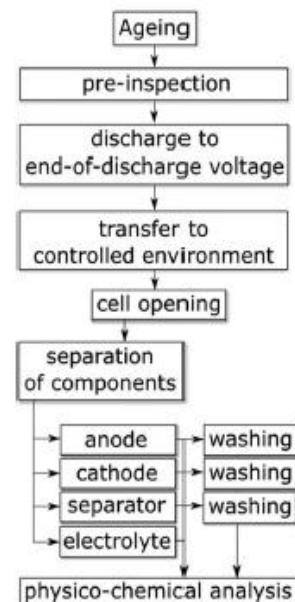


Abb. 1 Flussdiagramm für die Demontage von Li-Ionen-Zellen und Analyse der Komponenten. [1]

2.1. Vorprüfung und zerstörungsfreie Methoden vor dem Öffnen von Li-Ionen-Zellen

Vor der Zerstörung der Zellen sind zerstörungsfreie Charakterisierungsmethoden nützlich, um erste Einblicke in die Alterungsmechanismen zu gewinnen.

Diese Methoden, die das Innere von Batterien offenbaren, sind beispielsweise Röntgenanalyse, Röntgen-Computertomographie (CT), Kapazitätstests (SOH), Inkrementelle Kapazitätsanalyse (ICA), Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) und Neutronentomographie.

Darüber hinaus können diese Methoden erste Hinweise auf die beste Position für die Zellöffnung geben.

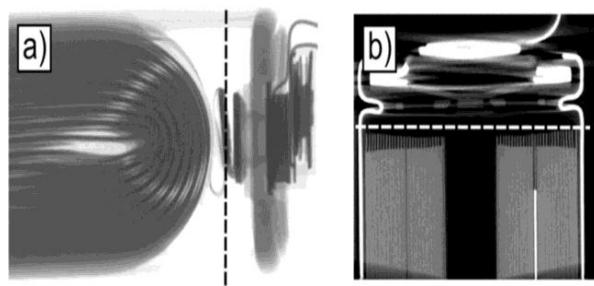


Abb. 2 Beispiele für die zerstörungsfreie Charakterisierung von Li-Ionen-Zellen. a) Röntgenübertragungsbild einer Zelle mit Wundgeleewalze. b) Frontaler CT-Scan. Gestrichelte Linien zeigen mögliche Schnittpositionen des Zellengehäuses ohne Eindringen der Elektroden an. [1]

2.2 Demontage von Li-Ionen-Zellen an festem SOC und in einer kontrollierten Umgebung

Um die Zellkomponenten in einem sehr ähnlichen Zustand wie während des Betriebs und für die Sicherheit des Forschers zu halten, müssen sowohl der Zustand der Zelle als auch die Zerlegungsumgebung gut definiert sein.

2.2.1 Gefahren durch Elektrizität

Vor der Zerlegung muss eine Zelle in einen definierten Ladungszustand (SOC) entweder geladen oder entladen werden. Andererseits darf die Zellenspannung nicht verändert werden, um unerwünschte Materialveränderungen zu vermeiden, die nicht durch Alterung bedingt sind.

In Abhängigkeit von der Batterienennspannung und der gewählten Anlagen-Netzform sind Schutzmassnahmen bei direktem und gegen indirektes Berühren erforderlich:

Spannung	<60V
Gefahrpotential	ungefährlich
Schutzmassnahmen	keine besonderen Schutzmassnahmen

Tabelle 1. DIN VDE 0510 Teil 2. [5]

2.2.2 Kontrollierte Umgebung

Da einige Komponenten von Li-Ionen-Zellen mit O₂ und H₂O reagieren, muss eine Handschuhbox mit hochreiner Ar-Atmosphäre mit H₂O und O₂ nur im unteren ppm-Bereich gefüllt werden. Die Verwendung von N₂ als Inertgas ist aufgrund seiner Reaktivität mit metallischem Li zu Li₃N nicht geeignet.

Besonders Li_xC₆, metallisches Li und LiPF₆ zeigen Reaktivität mit den Bestandteilen der Luft. LiPF₆ reagiert mit Wasser um HF-Gas herzustellen, das erhebliche Gesundheitsprobleme ohne geeignete Schutzausrüstung sowie Korrosion von Kathodenmaterialien verursachen kann.



Abb. 3 Handschuhbox-Inert Gas-Komplettsystem. [2]

2.3 Öffnungsverfahren und Trennung der Komponenten

Beutelzellen sind im Allgemeinen relativ leicht zu öffnen, da die Beutelfolie einfach mit einer Keramikschere oder einem Messer durchschnitten werden kann.

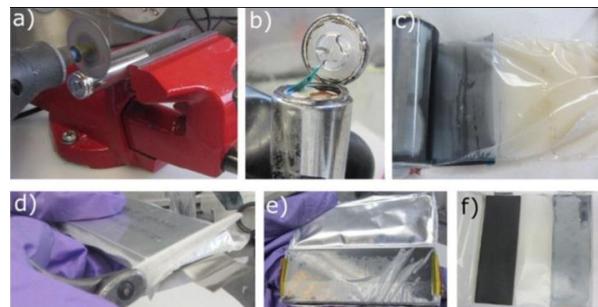


Abb. 4 Zellöffnungsverfahren. a) -c) Verwendung eines Dremel-Werkzeugs beim Öffnen einer zylindrischen Zelle. d) -f) Verwendung einer Keramikschere beim Öffnen einer Beutelzelle. [1]

In jedem Fall ist die Zellenöffnung sehr sorgfältig durchzuführen und übermäßige Kraft muss vermieden werden.

Die Bildung von Metallstaub oder Spänen hängt von der Schneidmethode ab. Staub kann in die Zelle gelangen und die Materialien verunreinigen, während Späne mehrere Millimeter lang sein und Kurzschlüsse verursachen können, die zu einer unerwünschten Entladung der Zelle und Erzeugung von Wärme führen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass auch beim Schneiden lokale Erwärmungen entstehen, die zu Veränderungen der

Zellmaterialien oder sogar zu Sicherheitsproblemen führen kann.

Die Zellkomponenten werden voneinander getrennt, um sie einzeln zu analysieren (Abb. 4). Bei gealterten Anoden kann es vorkommen, dass aktives Material an dem Separator haftet, was zu Problemen bei der Trennung von Komponenten führt. Dies könnte durch Eintauchen von Anode und Separator in DMC (Dimethylcarbonat) gelöst werden. Im Gegensatz dazu ist dies bei gealterten Kathoden oft weniger problematisch.

Besondere Vorsicht ist erforderlich, um eine Kreuzkontamination durch Kontakt zwischen Anode und Kathode zu vermeiden. Wenn Elektrolyt vorhanden ist, erzeugt ein direkter Kontakt von Anode und Kathode einen Kurzschluß.

Von Anbeginn des Öffnens können Elektrolyttropfen wiedergewonnen werden, wenn sie in ausreichendem Überschuss enthalten sind. Andernfalls sollte der Elektrolyt durch Waschen der Komponenten entfernt werden. Dieses letztgenannte Verfahren ermöglicht das Extrahieren von Elektrolyt sowie durch seine Zersetzung bei der Alterung an jeder Elektrode erzeugte Verbindungen. Da viele Lösungsmittel des Elektrolyten sehr flüchtig sind, wird eine schnelle Wiedergewinnung des Elektrolyten empfohlen, um die Zusammensetzung unverändert zu halten.

2.4 Nachbearbeitung von Proben aus zerlegten Li-Ionen-Zellen

Nach der Trennung der Zellkomponenten waschen die meisten Forscher diese Komponenten mit typischen Elektrolytlösungsmitteln wie DMC (Dimethylcarbonat), DEC (Diethylcarbonat) und EMC (Ethylmethylcarbonat), während nur einige Autoren das Waschen ihrer Proben nicht durchführen. Dies ist möglich, wenn nur Sichtprüfung oder die elektrochemische Prüfung erforderlich ist. Ungewaschene Elektroden sind wahrscheinlich restliche kristallisiertes LiPF₆ oder nicht flüchtige Lösungsmittel zu enthalten, die von den Elementen in SEI oder interkaliertem Li kaum unterschieden werden können. Darüber hinaus ist ein Waschschritt auch nützlich, um die Korrosion der Proben zu verringern, da LiPF₆ mit H₂O und O₂ reagiert und wie bereits erwähnt, um die empfindliche analytische Ausrüstung zu schützen, wenn Proben Luft ausgesetzt sind.

Jedoch zeigten Abraham et al., dass die DMC-Spülung isolierende Spezies entfernen sollte, die nach der Alterung auf der Graphitoberfläche abgeschieden wurden.

2.5 Physikalisch-chemische Analyse von gealterten Materialien nach der Demontage von Li-Ionen-Zellen

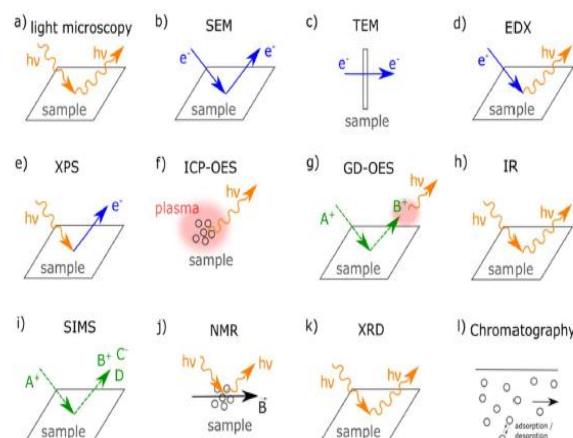


Abb. 5 Physikalisch-chemische Analyse nach Zerlegung.
[1]

2.5.1 Mikroskopie.

2.5.1.1 Lichtmikroskopie

Durch optische Mikroskopie ist es möglich, Alterungseffekte wie Veränderungen der Elektrodendicke oder Ablagerungen auf der Elektrodenoberflächen, die im μm -Größenbereich liegen, zu detektieren.

Aufgrund der begrenzten Auflösung dieses Verfahrens (Bereich von $0,2 \mu\text{m}$) ist die Detektion von Rissen oder sehr dünnen Filmen schwierig zu beobachten oder nicht möglich.

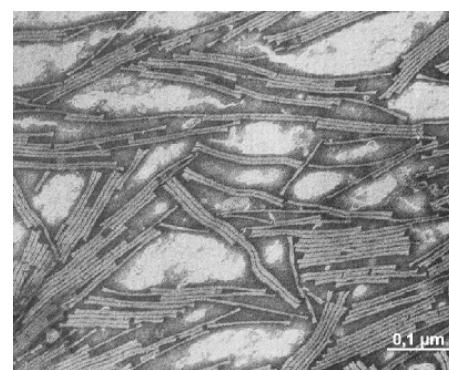


Abb 6. Lichtmikroskopie-Bildtyp [Wikipedia].

2.5.1.2 Rasterelektronenmikroskopie (SEM)

Dieses Verfahren bietet eine verbesserte Auflösung im Vergleich zur optischen Mikroskopie. Darüber hinaus sind SEM-Beobachtungen auf Vakuum beschränkt, was zum Verdampfen von flüchtigen Komponenten wie Carbonatlösungsmitteln führt.

Aufgrund der höheren Auflösung des SEM können die beobachteten Flächen im Vergleich zur optischen Mikroskopie viel kleiner sein. Verschiedene Zellkomponenten werden häufig durch SEM beobachtet, da sie grundlegende Informationen über die Mikrostruktur liefern, die mit Abbaumechanismen in Zusammenhang stehen können. Es wird empfohlen, Übersichtsbilder aufzunehmen und dann in verschiedene Teile der Probe zu zoomen.

SEM ist auf Beobachtungen der Probenoberfläche beschränkt. Das Wachstum der Festelektrolyt-Grenzfläche (SEI) auf der Oberfläche der Graphit-Teilchen während des Alterns wurde durch SEM beobachtet. Auch kann die Abscheidung von metallischem Li auf Graphitanoden beobachtet werden. Auf der Kathodenseite sind häufig keine Veränderungen durch SEM-Bildgebung sichtbar.

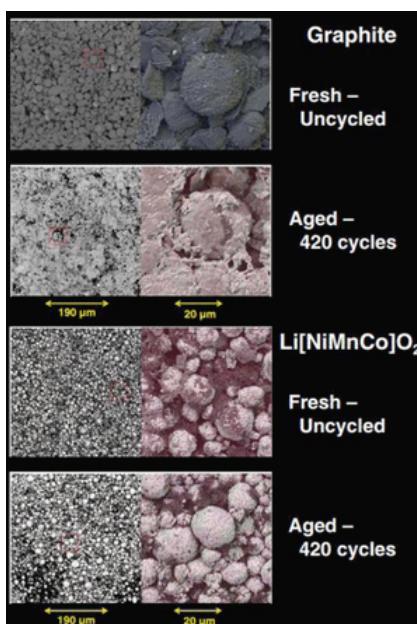


Abb. 7 SEM-Bilder von Graphitanoden und Kathoden vor und nach der Alterung. [1]

2.5.1.3 Transmisionselektronenmikroskopie (TEM)

TEM enthüllt Probencharakteristiken in Form von Partikelmorphologie, Kristallinität, Stress oder sogar magnetischen Domänen.

Allerdings sind Strahlenschäden bei Batterien berücksichtigt worden. Außerdem ist TEM auf lokale Bereiche der Probe beschränkt und daher ist es schwierig, eine große Stichprobe genau zu vermessen.

Die Probenvorbereitung und Probenüberwachung während der Datenerfassung sind für TEM entscheidend. Die Größe und Sauberkeit der Probe sind von großer Bedeutung. Dies macht TEM zu einer zeitaufwendigeren Methode im Vergleich zu SEM.

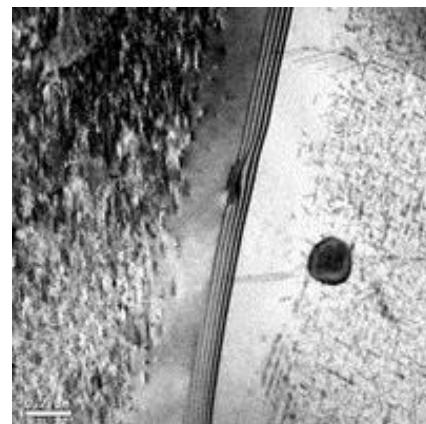


Abb. 8 TEM-Aufnahme einer Aluminium-Legierung. [7]

2.5.2 Chemische Methoden (Elektrodenoberflächen)

2.5.2.1 Energie-dispersive Röntgenspektroskopie (EDX)

Die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) wird oft mit SEM-Geräten kombiniert.

Daher ermöglicht EDX die Gewinnung von Informationen über die chemische Zusammensetzung der Probe. Jedoch stellt EDX einen Hauptnachteil dar, da es nicht in der Lage ist, Li zu detektieren. Deshalb sind komplementäre Methoden für deren Nachweis und Quantifizierung erforderlich.

2.5.2.2 Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS)

XPS ist in der Lage, chemische Veränderungen auf Partikeloberflächen zu charakterisieren, was es für die Post-Mortem-Analyse wertvoll macht.

Aufgrund des hohen Energiegehaltes von Röntgenstrahlen ist jedoch die Möglichkeit einer bestrahlten Probenschädigung zu berücksichtigen. Insbesondere SEI-Komponenten können ihre chemische Natur verändern. Weiterhin ist anzumerken, dass die XPS-Messungen stark lokalisiert sind und es erforderlich ist, eine größere Probe an verschiedenen Stellen zu untersuchen, um einen Überblick zu erhalten.

XPS ist ein vielseitiges Verfahren, um Informationen über die chemische Zusammensetzung der Oberflächenarten zu erhalten, die während des Alterns gebildet werden. Im Gegensatz zu EDX-, NMR-, XRD- und IR-Spektroskopie können nahezu alle Elemente durch XPS semiquantitativ quantifiziert werden.

2.5.2.3 Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie (FTIR)

FTIR erlaubt keine quantitative Quantifizierung. Daher sind die FTIR-Ergebnis-Interpretationen oft komplementär zur Post-Mortem-Analyse durch andere

Verfahren wie elektrochemisches Testen, XPS und SEM / EDX.

2.5.2.3 Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS)

SIMS erlaubt die Charakterisierung der elementaren und molekularen Zusammensetzung der Oberfläche. Obwohl es nicht häufig für Li-Ionen-Batterien verwendet wird. Die einzigartigen Stärken dieses Verfahrens sind die Empfindlichkeit, die Fähigkeit, um Isotope zu analysieren, und eine bessere Auflösung im Vergleich zu anderen Oberflächenanalyse-Spektroskopie wie XPS.

2.5.2.4 Glimmentladung Tiefenprofilierung optische Emissionsspektroskopie (GD-OES)

GD-OES kann Informationen sowohl auf der Elektrodenoberfläche als auch auf der Elektrodenmasse liefern.

GD-OES wurde kürzlich in der Post-Mortem-Analyse verwendet, um Li-Plattierung auf Graphitanoden zu detektieren, was durch andere Verfahren schwierig oder nicht möglich ist.

Aufgrund der vergleichsweise kurzen Messzeit, der kleinen Probengröße, der hohen Empfindlichkeit und der Möglichkeit, Li-Tiefenprofile durch die gesamten Elektroden zu detektieren, ist das GD-OES-Verfahren ein vielversprechendes Analysewerkzeug, um ein besseres Verständnis von Li-Ionen-Batteriealterungsmechanismen zu erhalten. Um ein vollständiges Bild der Alterungsmechanismen zu erhalten, muss GD-OES mit komplementären Methoden kombiniert werden.

2.5.3 Chemische Methoden (Elektrodenmassenanalyse).

2.5.3.1 Induktiv gekoppelte optische Emissionspektrometrie (ICP-OES)

In Post-Mortem-Analysen wird die induktive gekoppelte optische Emissionsspektrometrie (ICP-OES) verwendet, um die elementare Zusammensetzung der Elektroden zu bestimmen.

Ein Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass Elemente vom ppm-Bereich bis zu den Hauptelementen einer Probe erfasst werden können. Jedoch ist ein Nachteil, dass ICP-OES nicht die gesamte Probenzusammensetzung ergibt, was die Verwendung zusätzlicher Verfahren erforderlich macht. ICP-OES wird häufig mit EDX verglichen, jedoch hat ICP-OES den Vorteil, Li nachzuweisen.

In der Post-Mortem-Analyse sind ICP-OES-Messungen nützlich, um die Auflösung von Übergangsmetallen aus der Kathode durch Nachweis des migrierten Materials auf der Anode nachzuweisen.

2.5.3.2 Kernmagnetische Resonanzspektroskopie (NMR)

NMR liefert nicht nur chemische und strukturelle Informationen, sondern auch Informationen über Transporteigenschaften und Beweglichkeit von Ionen, elektronischen, magnetischen sowie thermodynamischen und kinetischen Eigenschaften.

2.5.3.3 Strukturcharakteristik durch Röntgendiffraktion (XRD)

In der Post-Mortem-Analyse wird die XRD üblicherweise für die Strukturanalyse der aktiven Materialien in den Elektroden angewendet.

Zusätzlich liefert XRD Informationen über Veränderungen in der Orientierung von Partikeln und Filmbildung auf der Elektrode –Elektrolyt Schnittstelle.

2.5.4 Elektrolyt- und Gasanalyse.

2.5.4.1 Gaschromatographie (GC)

Der Elektrolyt kann durch Waschen des Separators, der Anode und der Kathode in DMC rückgewonnen werden, und anschließend können die Lösungen durch Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS) analysiert werden.

Für eine gequollene Zelle wird die Gasrückgewinnung in einer Ar-gefüllten Handschuhbox durch Durchstechen des Zellbeutels mit einer luftdichten Spritze durchgeführt und dann werden sie durch GC-MS analysiert.

2.6 Zusammenfassung der Methoden

Method	detection of Li	depth profiling	sensitivity	Electrode / separator degradation				Material degradation			
				growth of films on electrodes	clogging of pores	delamination of electrode or separator coating	cracks in electrodes	deformation of electrodes	change/films on particle surfaces	particle cracks	oxidation
optical microscopy		surface									
SEM		surface									
TEM		surface									
EDX		surface									
XPS		surface									
ICP-OES		bulk									
GD-OES		surface/bulk									
FTIR		surface/bulk									
SIMS		surface/bulk									
NMR			bulk								
XRD			bulk								
GC-MS			electrolyte								

yes limited no

Abb. 9 Analysemethoden und Phänomene, die sie erkennen können. [1]

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Es liegt in besonderem Interesse, die Rauheit der Elektroden und der Dicke der Schicht, die auf ihnen abgelagert, zu analysieren. Sodass dies durch die Änderung der Materialien verringern und damit die Lebensdauer der Batterie erhöhen.

Das kann mit Hilfe von Oberflächenscans bestimmt werden, wie das CT-100 von Cyber Technologies.

3.1 Messsystem CT-100

Die maximale scanbare Fläche beträgt 150 mm x 150 mm bei einer lateralen Auflösung von 0,05 µm und einer Messgeschwindigkeit von bis zu 2 kHz. Die Oberfläche der Probe kann mittels eines konfokalen Weißlicht- oder Lasersensors abgetastet werden. Passend zu dem System wird eine Vielzahl von Sensoren angeboten.

Sensor	Auflösung in z-Richtung	Messbereich
CHR-600	0,02 mm	600 mm
CHR-3000	0,1 mm	3000 mm

Tabelle 2. Sensoren des Messsystems CT-100. [8]



Abb. 10 Oberflächenscanner CT-100. [9]

Bei der Ausführung der Oberflächenscans hilft die Software Scan Suite 8. Zusätzlich bietet sie die Möglichkeit, 2D- und 3D-Messungen nach Beendigung des Scans durchzuführen. Dazu gehören unter anderem Rauheits- und Volumenmessungen. Für die Manipulation der Daten steht des Weiteren eine Vielzahl von Filtern zur Verfügung. Beispielsweise kann über die Funktion Normalisieren mit Hilfe von Referenzflächen eine Nullebene eingezogen.

3.2 Scanablauf

Der zu verwendende Sensor wird unter Hardware ausgewählt. Für diese Arbeit wurde der CHR-3000 verwendet. Danach wird der Sensor mit Hilfe der Kamera

an einen Punkt der Probe verschoben. Nach Deaktivieren des Kamera-Offsets wird mit Hilfe der Stellschraube am CT-100 die Höhe des Sensors so verschoben, dass der rote Ball (Messwert), aus Abb. 11 dauerhaft in der Mitte der grünen Linie (Messbereich) liegt. Die abzutastende Oberfläche des Probes liegt nun im Messbereich.

Zudem hinaus ist aufgrund der geringeren Schrittweite auch eine bessere grafische Darstellung der Probesoberfläche möglich, aber es braucht mehr Zeit. Für diese Arbeit wurde der 20 μm Schrittweite verwendet.

Dies beendet die Einstellung des Sensors. Abschließend wird der Scan im Fenster Messdefinition über den Knopf "Messung starten" gestartet.

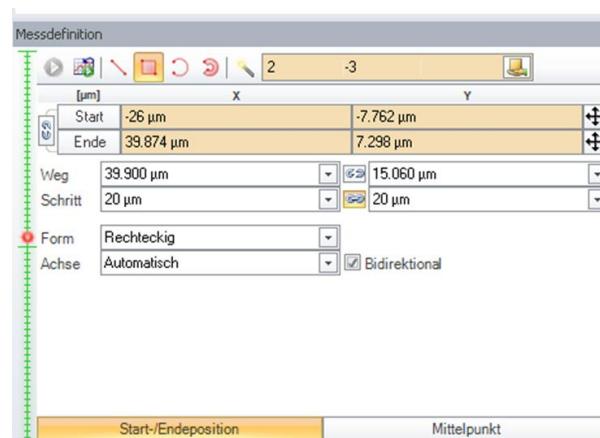


Abb. 11 Messdefinitionsfenster zur Kalibrierung einer Oberflächenmessung.

3.3 Analysis

Die Datenverarbeitung unter Normalisieren hat zur Folge, dass die Referenzflächen auf das Nullniveau verschoben werden. Somit zeigt das erzeugte Höhenprofil das Höhenverhältnis zur Referenzfläche an.

Im Fenster rechteckiges Raster wird anschließend ausgewählt, welche Berechnungen über den Bereich des Messfensters getätigten werden. Die Software ermittelt anschließend den entsprechenden Rauheitswert.

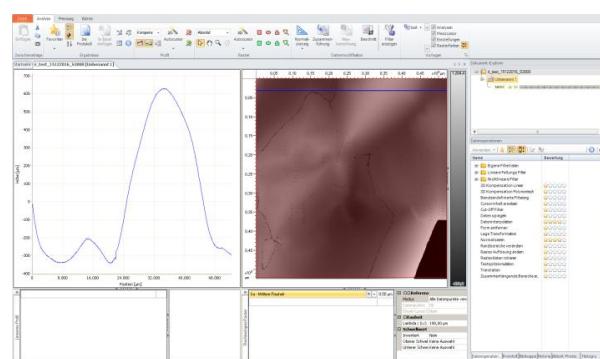


Abb. 12 Analysisfenster einer Messung

3.4 Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse der Messung:

Rauheit der Anode	100 µm
-------------------	--------

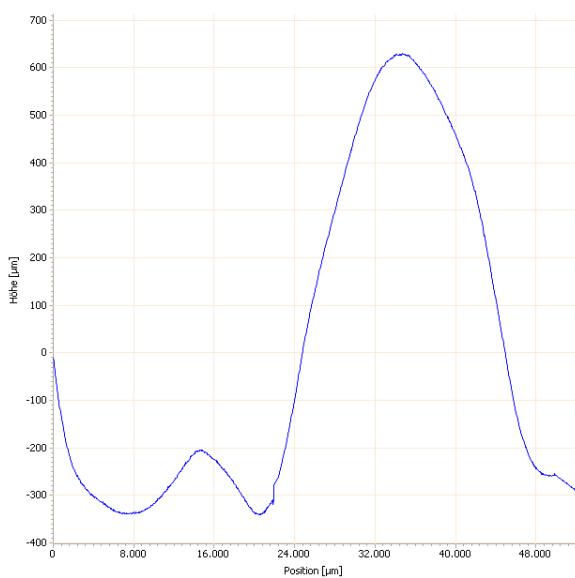


Abb. 13 Schaubild Höhe (µm) vs. Position (µm). Die Höhe, welche auf der vertikalen Achse aufgetragen ist, spiegelt den Abstand vom Sensor zur Probesoberfläche wider.

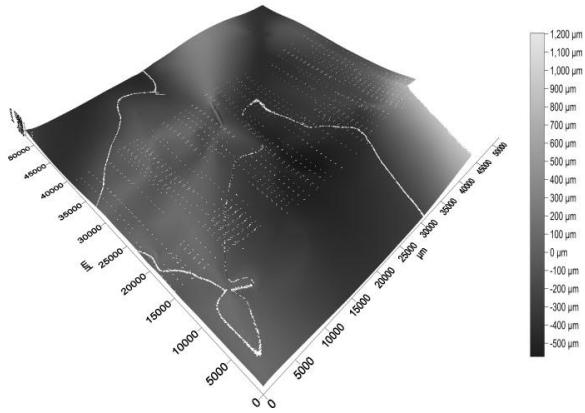


Abb.14 Elektrodenoberflächen

Die Abbildung 14 ist die Elektrodenoberfläche in 3D-Bild. Je dunkler das Bild ist, desto größer der Abstand zwischen dem Sensor und der Elektrodenoberfläche ist.

Hier kann eine weiße Linie beobachtet werden, was bedeutet, dass die Oberfläche näher an dem Sensor ist. Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Ebenen, die die Elektrode wegen möglichen mechanischen Deformation zeigt.

4 Zusammenfassung/Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Post-Mortem-Analyse in vier Hauptteile durchgeführt werden kann.

Für die Vorprüfung wird zerstörungsfreie Methoden benötigt, um das Innere der Batterien zu enthüllen.

Bedingungen und sichere Umgebung werden für die Zerlegung der Zellen mittels einer Handschuhbox vorgesehen.

Dann werden die Zellen mit keramische Werkzeuge geöffnet und es wird entschiedet, ob die Komponenten gewaschen werden sollen oder nicht. Zum Schutz vor anorganischen Gasen sind notwendig Butylkautschuk-Handschuhe und Gasmaske oder unter einem Abzug arbeiten.

Zum Schluss kommt die Wahl eines Analyseverfahrens. Das hängt von den Alterungsmechanismen ab, die untersucht werden sollen. Besonders interessant ist die Kombination dieser Methoden, um eine vollständige Analyse der Komponenten zu erlauben.

Die Ermittlung der Rauheit über Oberflächenscans ist ein relativ aufwendiger Vorgang. Die einzelnen Scans sind zwar sehr hochauflösend, aber mit 22 Minuten Dauer pro Scan zeitaufwendig. Der Sensor ist gleich geblieben.

Darüber hinaus muss zur exakten Bestimmung der Rauheit jeweils die gleiche Fläche abgetastet werden. Da die Einstellung der Start- und Endpunkte µm-genau erfolgen muss, ist die Einstellung der gleichen Fläche nahezu unmöglich. Eine der Fehlerquellen ergibt sich durch die Markierung der Punkte durch einen Kameraoffset.

Hilfreich bei der Ansteuerung der Punkte ist die Fixierung. Denn keine Struktur wurde zur Fixierung gegen Verrutschen des Proben während des Scavorgangs genutzt und die Elektrode hat verschiedene Ebenen, die gemessen wurden, sind die Messungen nicht genau aufgrund des Fehlens einer Aufbauanpassung.

Die Fixierung ist im Zuge dieser Arbeit weggelassen worden, aber es wird ihre Verwendung empfohlen, um eine genauere Messung zu erhalten.

Diese Arbeit versucht eine Zusammenfassung zu lassen, um in einem nächsten Schritt die Zellen zu öffnen und um ihre Komponenten zu analysieren. Auf diese Weise wird zur Verbesserung der Lithium-Ionen-Batterien beitragend und die Elektromobilität erweiternd.

5 Literatur

- [1] Journal of the Electrochemical Society, „Review – Post-Mortem Analysis of Aged Lithium-Ion Batteries: Disassembly Methodology and Physico-Chemical Analysis Techniques“ 03. August 2016. [Online]. Verfügbar: <http://jes.ecsdl.org/content/163/10/A2149.short?rss=1&ssource=mfr>
- [2] Glovebox Systemtechnik. 27. November 2016. [Online]. Verfügbar: <http://glovebox-systemtechnik.de/GS-Mega-Glovebox.php>
- [3] ZSW Baden-Württemberg, „Post Mortem Analyse Labor“ 27. November 2016. [Online]. Verfügbar: <https://www.zsw-bw.de/forschung/batterien/themen/post-mortem-analysen.html>
- [4] RWTH AACHEN University, „Post Mortem Analyse Labor“ 27. November 2016. [Online]. Verfügbar: www2.isea.rwth-aachen.de/de/content/post-mortem-analyse-labor
- [5] H. Kiehne und 11 Mitautoren , Batterien – Grundlagen und Theorie, aktueller technischer Stand und Entwicklungstendenzen.
- [6] R. Liu, L. Zhang, X. Sun, H. Liu und J. Zhang, Electrochemical technologies for energy storage and conversion – volume 1.
- [7] Technische Universität Wien, Universitäre Service-Einrichtung für Transmissions-elektronenmikroskopie (USTEM). [Online]. Verfügbar: <http://www.ustem.tuwien.ac.at/>
- [8] C. Thienemann, Untersuchung von Isolierstoffen anhand experimenteller Abbrandanalyse in einer Schaltkammeranordnung.
- [9] Cyber Technologies, Manual Scan Suite 8.
- [10] Interview mit Jan Diekmann (iPAT – TU BS), „Post Mortem Analyse“. Datum: 17.11.2016.



Post-Mortem-Analyse von Lithium-Ionen-Batteriezellen

Maite Selene Aramburu, 25.01.2017

Agenda

- **Einleitung**
- **Detailliertes Schema für die Post-Mortem-Analyse**
 - 1) Vorprüfung der Zellen
 - 2) Zerlegung der Zellen: Bedingungen und sichere Umgebung
 - 3) Öffnungsverfahren und Trennung der Komponenten
 - 4) Nachbearbeitung der Komponenten
- **Elektroden Analyse: CT-100 von Cyber Technologies**
 - 1) Messsystem
 - 2) Scanablauf und Analysis
 - 3) Ergebnisse
- **Zusammenfassung**

Agenda

▪ Einleitung

▪ Detailliertes Schema für die Post-Mortem-Analyse

- 1) Vorprüfung der Zellen
- 2) Zerlegung der Zellen: Bedingungen und sichere Umgebung
- 3) Öffnungsverfahren und Trennung der Komponenten
- 4) Nachbearbeitung der Komponenten

▪ Elektroden Analyse: CT-100 von Cyber Technologies

- 1) Messsystem
- 2) Scanablauf und Analysis
- 3) Ergebnisse

▪ Zusammenfassung

Einleitung

Warum ist es wichtig, die Batteriezellen zu analysieren?



Quelle: www.targray.com

Wissenschaftlicher Beitrag:

- Die Verbesserung der Energiespeicherung
- Die Erforschung der Elektrodenmaterialien
- Das Batterie-Recycling und der Umweltschutz



Quelle: www.maxsainnovations.com



Quelle: <http://de.123rf.com/>

Technologischer Beitrag:

- Programm: „rationelle und effiziente Nutzung von Energie“
- Die Erhöhung der Energiespeicherkapazität und Leistung
- Reduzierung der Kosten



Quelle: www.fleetize.com



Quelle: <http://bmwi.de/>

Sofortige Anwendung:

- Elektro- und Hybridfahrzeuge
- Entwicklung der Elektromobilität
- Energiewende: erneuerbaren Energie



Quelle: www.deutsche-handwerks-zeitung.de

Agenda

- Einleitung
- **Detailliertes Schema für die Post-Mortem-Analyse**
 - 1) Vorprüfung der Zellen
 - 2) Zerlegung der Zellen: Bedingungen und sichere Umgebung
 - 3) Öffnungsverfahren und Trennung der Komponenten
 - 4) Nachbearbeitung der Komponenten
- Elektroden Analyse: CT-100 von Cyber Technologies
 - 1) Messsystem
 - 2) Scanablauf und Analysis
 - 3) Ergebnisse
- Zusammenfassung

Detailliertes Schema für die Post-Mortem-Analyse

1) Vorprüfung der Zellen

2) Zerlegung der Zellen

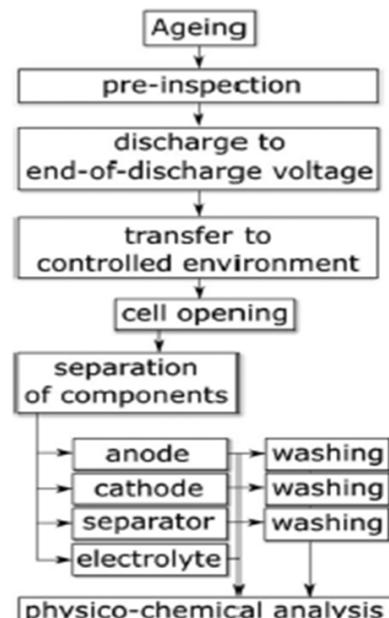
3) Öffnungsverfahren und Trennung der Komponenten

4) Nachbearbeitung der Komponenten

- a) Mikroskopie
- b) Chemische Methoden
- c) Elektrolytanalyse



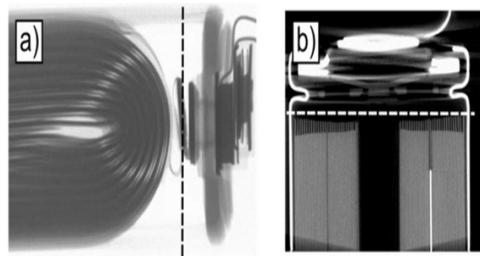
Wichtig: Vermeidung von Schäden, Kontamination und Veränderung der Zellkomponenten, um deutbare Daten zu liefern.



1) Vorprüfung der Zellen

Um Informationen über Alterungsmechanismen zu bekommen:

- Kapazitätstests (SOH)
- Inkrementelle Kapazitätsanalyse (ICA)
- Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS)
- Neutronen-Tomographie
- **Röntgen-Computertomographie (CT)**



Quelle:
<http://jes.ecsdl.org/content/163/10/A2149.short?rss=1&ssource=mfr>

- enthüllt das *Innere der Batterien, zerstörungsfreie Method*
- ist sehr *nützlich*, ohne Anwendung einer mechanischen Kraft
- *bestimmt Schneidpositionen* für die Zellenöffnung
- ist *teuer* und erfordert in der Regel *lange Messzeiten*
- Daten werden durch Drehen einer Zelle in kleinen *Winkelschritten* erfaßt

2) Zerlegung der Zellen: Bedingungen und sichere Umgebung

⚡ Einige Komponenten reagieren mit O₂ und H₂O. z.B. LiPF₆ + H₂O → HF_(g)
→ Hohe **Luftfeuchtigkeit** muss vermieden werden

⚡ Es wird eine **Handschuhbox** mit hochreiner Ar-Atmosphäre genutzt.

⚡ N₂ ist **kein geeignetes Inertgas**: N₂ + Li → Li₃N

⚡ **Ladungszustand (SOC)** : Laden / Entladen



Quelle: <http://glovebox-systemtechnik.de/GS-Mega-Glovebox.php>

⚡ Es ist empfehlenswert, die Elektroden am Tag der Zerlegung zu verwenden.
→ Wenn es nicht möglich ist → **Elektrodenlagerung**: luftdichte Zelle in der Handschuhbox.

Die Elektroden können mittels  erhöhter Temperatur  getrocknet werden.

 Unterdruck

3) Öffnungsverfahren und Trennung der Komponenten

⚡ Leitfähige Werkzeuge dürfen nicht benutzt werden! Alternative: → aus Keramik
→ nicht leitfähige Beschichtungen.

⚡ Eine starke **Kraft** muss auf den Elektrodenstapel vermieden werden.

⚡ **Mögliche Reaktionen beim aufschneiden:**

- Bildung von Staub / Späne
- Lokale Heizung
- Kreuzkontamination zwischen Anode und Kathode
- In Gegenwart von Elektrolyt erzeugt ein direkter Kontakt einen Kurzschluß

⚡ **Waschen** von Komponenten mit typischen Elektrolytlösungsmitteln:

- DMC (Dimethylcarbonat) – die nicht die SEI (Solid-electrolyte interphase) entfernt
- DEC (Diethylcarbonat)
- EMC (Ethylmethylcarbonate)

⚡ **Ungewaschene Komponenten**

- Könnten rekristallisiertes LiPF₆ (Elektrolyt) oder nicht flüchtige Lösungsmittel enthalten.
- Die Carbonate werden etwas beißend riechen, aber sind ungefährlich.
- Zum Schutz vor anorganischen Gasen müssen → Butylkautschuk-Handschuhe benutzt werden.
→ Gasmaske oder unter einem Abzug arbeiten



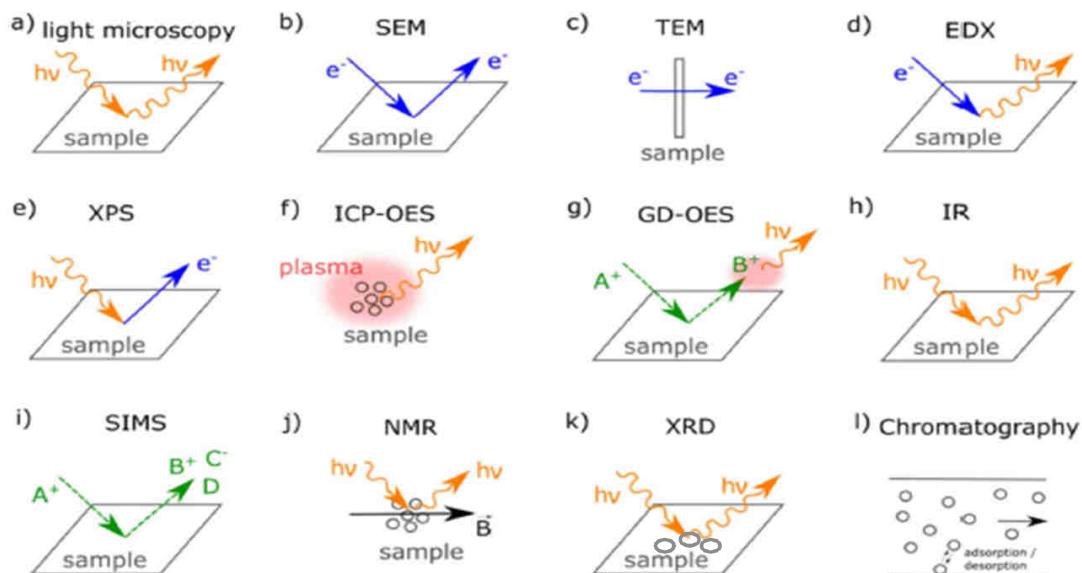
Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Maite S. Aramburu | Post-Mortem-Analyse | Seite 9

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

4) Nachbearbeitung der Komponenten

Physikalisch-Chemische Analyse



Quelle: <http://jes.ecsd.org/content/163/10/A2149.short?rss=1&source=mfr>

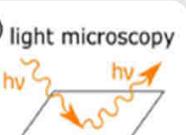
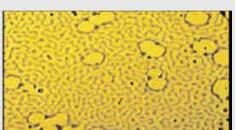
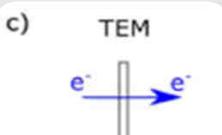
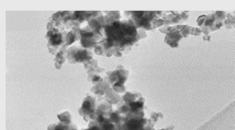


Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Maite S. Aramburu | Post-Mortem-Analyse | Seite 10

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

a) Mikroskopie

a) Optische Mikroskopie	c) Transmisionselektronenmikroskopie (TEM)
<p>a) light microscopy</p>   <p>100 μm</p> <p>http://jacobs.physik.uni-saarland.de</p>	<p>c) TEM</p>   <p>200 nm</p> <p>http://iam.kit.edu</p>
<p>b) Rasterelektronenmikroskopie (SEM)</p> <p>b) SEM</p>   <p>0.6 μm</p> <p>http://mst.kr.hsnr.de/~rem/Image25.gif</p>	<p>am häufigsten verwendet, Probenoberflächenanalyse</p> <p>Überblicksbilder aufzunehmen → zoomen</p> <p>Wachstum der SEI</p> <p>Abscheidung von metallischem Li auf Graphitanoden</p>

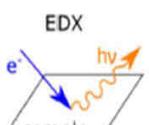
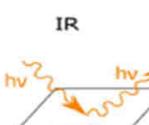
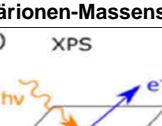
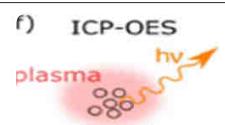
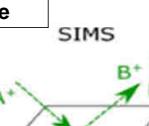
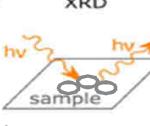
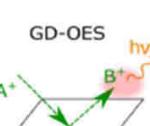
Quelle: <http://jes.ecsdl.org/content/163/10/A2149.short?rss=1&ssource=mfr>



25.01.2017 | Maite S. Aramburu | Post-Mortem-Analyse | Seite 11



b) Chemische Analyseverfahren

die empfindlich gegenüber Elektrodenoberflächen sind	die empfindlich gegenüber Elektrodenmassen sind
d) Energiedispersive Röntgenspektroskopie h) Fourier-Transformations-IR-Spektroskopie	f) Induktiv gekoppelte optische Emissionsspektrometrie i) Kernspinresonanzspektroskopie
	
e) Röntgenphotoelektronenspektroskopie i) Sekundärionen-Massenspektroskopie	f) ICP-OES j) NMR
	
e) XPS j) SIMS	k) Röntgendiffraktion l) XRD
	
g) Glimmentladung Tiefenprofilierung – optischer Emissionsspektroskopie	g) GD-OES
<ul style="list-style-type: none"> Informationen sowohl auf der Elektrodenoberfläche als auch auf der Elektrodenmasse liefern Li-Plattierung auf Graphitanoden detektiert Kurz Messzeit, klein Probengröße und hohe Empfindlichkeit 	

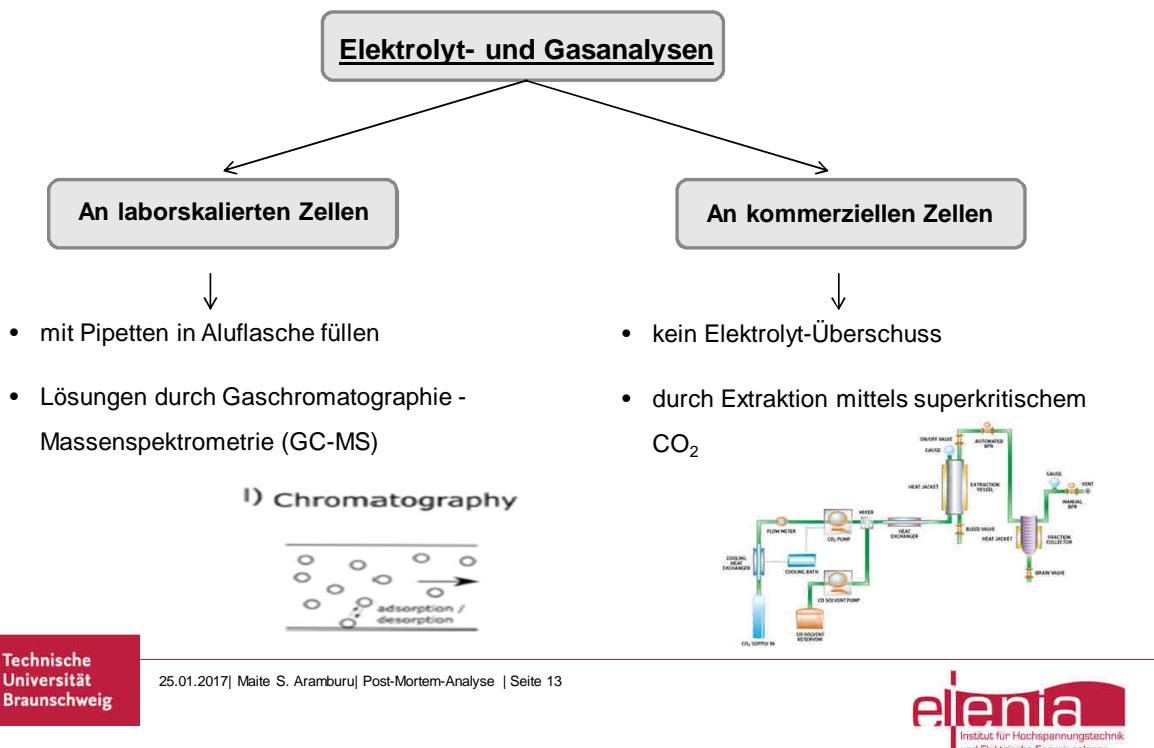
Quelle: <http://jes.ecsdl.org/content/163/10/A2149.short?rss=1&ssource=mfr>



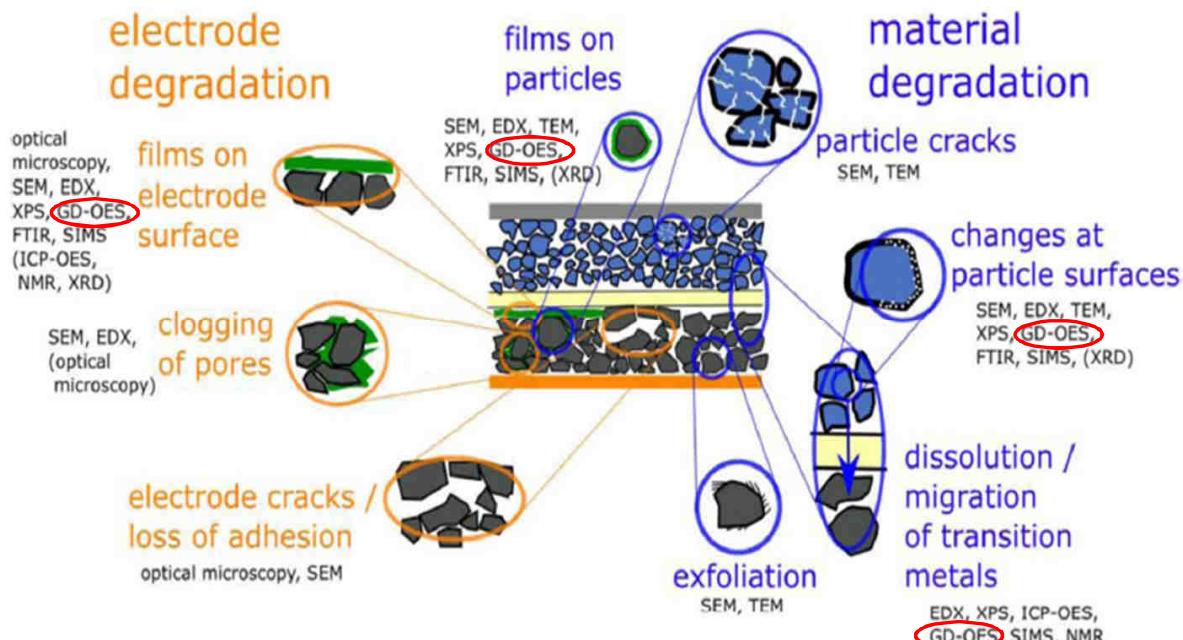
25.01.2017 | Maite S. Aramburu | Post-Mortem-Analyse | Seite 12



c) Elektrolytanalyse



Kombination von Methoden zur vollständigen Charakterisierung von Alterungsmechanismen



Agenda

- Einleitung
- Detailliertes Schema für die Post-Mortem-Analyse
 - 1) Vorprüfung der Zellen
 - 2) Zerlegung der Zellen: Bedingungen und sichere Umgebung
 - 3) Öffnungsverfahren und Trennung der Komponenten
 - 4) Nachbearbeitung der Komponenten
- Elektroden Analyse: CT-100 von Cyber Technologies
 - 1) Messsystem
 - 2) Scanablauf und Analysis
 - 3) Ergebnisse
- Zusammenfassung



1) Messsystem

CT-100 von Cyber Technologies

- Methode: Computer Tomographie
- Max. scanbare Fläche: 150 mm x 150 mm.
- Messgeschwindigkeit: bis zu 2 kHz.
- Sensoren:

Sensor	Auflösung in z-Richtung	Messbereich
CHR-600	0,02 µm	600 mm
CHR-3000	0,1 µm	3000 mm



Quelle: Cyber Technologies, Manual Scan Suite 8

Software

- Ausführung der Oberflächenscans: Software Scan Suite 8.
- 2D- und 3D-Messungen.
- Rauheits- und Volumenmessungen, usw.
- Korrektur der Daten: Vielzahl an Filtern stehen zur Verfügung.



2) Scanablauf und Analysis

Analysisfenster

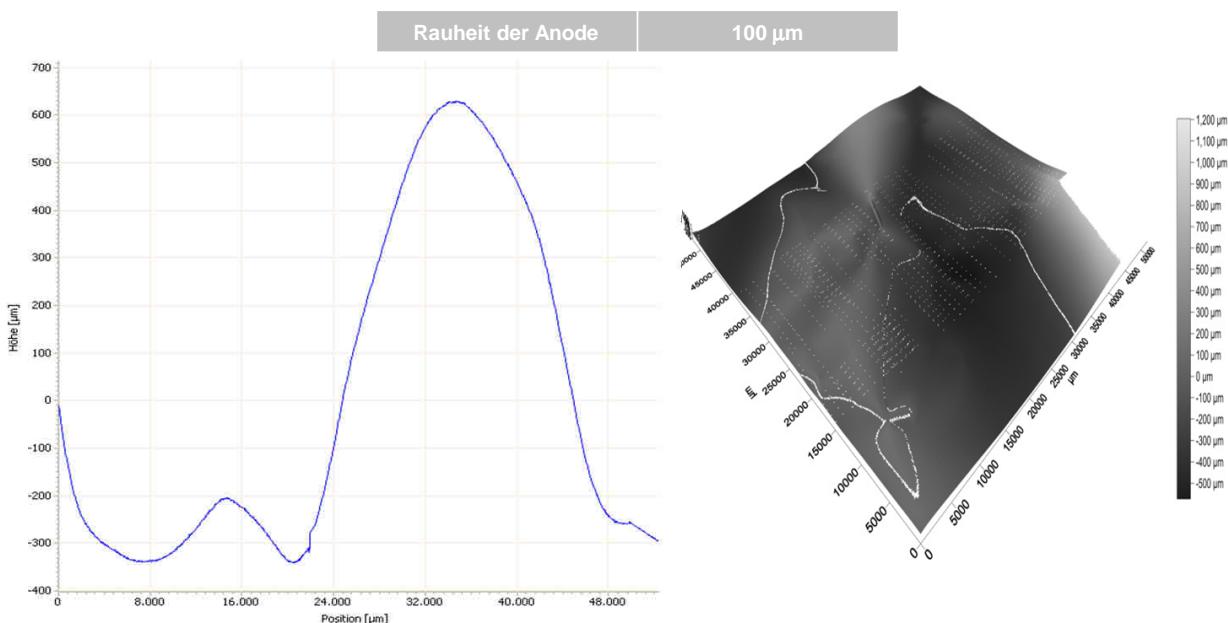
- Verwendung der CHR-3000 Sensor und 20 µm Schrittweite.
- Mit Hilfe der Kamera wird der Messbereich bestimmt.
- Kalibrierung des Sensors mit Hilfe der Stellschraube am CT-100.

25.01.2017 | Maite S. Aramburu | Post-Mortem-Analyse | Seite 17

Datenverarbeitung: Normalisieren

ellenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

3) Ergebnisse



Agenda

- Einleitung
- Detailliertes Schema für die Post-Mortem-Analyse
 - 1) Vorprüfung der Zellen
 - 2) Zerlegung der Zellen: Bedingungen und sichere Umgebung
 - 3) Öffnungsverfahren und Trennung der Komponenten
 - 4) Nachbearbeitung der Komponenten
- Elektroden Analyse: CT-100 von Cyber Technologies
 - 1) Messsystem
 - 2) Scanablauf und Analysis
 - 3) Ergebnisse
- Zusammenfassung

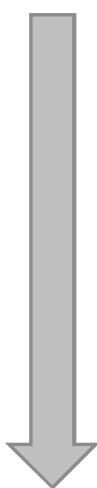


25.01.2017 | Maite S. Aramburu | Post-Mortem-Analyse | Seite 19



Zusammenfassung

Schema für die Post-Mortem Analyse



Vorprüfung

Zerlegung

Öffnungsverfahren und Trennung

Nachbearbeitung

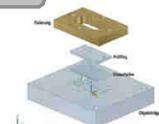


CT-100 Analyse

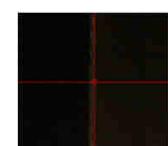
Lange Messzeit



Fixierung der Probe ist notwendig



Kalibrierung des Geräts und Aktualisierung der Software ist notwendig



25.01.2017 | Maite S. Aramburu | Post-Mortem-Analyse | Seite 20





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Maite Selene Aramburu

25.01.2017

Zündgefahrenbeurteilung von Lithium-Ionen-Batterien für den Einsatz im Explosionsschutz

Zündgefahrenbewertung von Lithium-Ionen-Batterien für den Einsatz im Explosionsschutz, Timo Hickisch.
Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, t.hickisch@tu-bs.de

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Methodik die bei der Beurteilung der Gefahr, die von Lithium-Ionen-Batterien als Zündquelle in explosionsgeschützten Bereichen ausgeht, angewendet wird. Dabei werden zunächst die Grundlagen und Bewertungskriterien explosionsgeschützter Geräte, die in kritischen Bereichen zum Einsatz kommen, erläutert. Anschließend wird die Einordnung der Lithium-Ionen-Batterie in das sogenannte „Explosionsdreieck“ vorgenommen und die besondere Rolle die diese dort einnimmt erklärt. Danach werden die genormten Anforderungen die an das Ergebnis der Zündgefahrenbeurteilung gestellt werden genannt. Abschließend werden Beispiele für die theoretische und praktische Zündgefahrenbeurteilung von Lithium-Ionen-Batterien im Explosionsschutz gegeben.

Abstract

Lithium-ion batteries (LIB) have great advantages over other battery technologies, but due to high fire risks are only used to a limited extent in explosion-protected areas. Since LIB with a large capacity are categorically excluded in explosion protection, there are neither test procedures nor standardized requirements for these. The combination of existing test procedures and battery-specific tests makes it possible to assess the risk of the use of LIB in explosion-protected areas. In addition to the development of a suitable test method, appropriate measures, which increase the safety of LIB, are also required.

1 Einleitung

Die Bereitstellung effizienter und leistungsstarker Speichertechnologien für elektrische Energie gewinnt immer weiter an Bedeutung. Die immer größer werdende Vielfalt an mobilen elektrischen Geräten und das Vorhaben die Reichweiten moderner Elektrofahrzeuge deutlich zu steigern, stellt die Batterieindustrie vor neue Herausforderungen. Hohe Energiedichte und Zyklenzahl, sowie die Fähigkeit zur Schnellladung machen Lithium-Ionen-Batterien zum optimalen Energiespeicher in diesen Einsatzgebieten. Ein Nachteil den diese Technologie bietet ist die hohe Entzündungs- und Explosionsgefahr die bei mangelnden Sicherheitsvorkehrungen im Fehlerfall auftreten kann. Diesem Umstand ist es zuzuschreiben, dass für den Einsatz in Explosionsgefährdeten Bereichen andere Speichertechnologien zum Einsatz kommen, welche allerdings den Nachteil höherer Betriebskosten und kürzerer Reichweite aufweisen. [6]

Die besondere Anforderung an explosionsgeschützte elektrische Geräte ist die Gewährleistung der notwendigen Sicherheit sowohl im Normalbetrieb, als auch im Fehlerfall.

Im Zuge der Gefahrenbewertung des Einsatzes einer Lithium-Ionen-Batterie im Explosionsschutz wird diese besonders auf das Wirken als Zündquelle untersucht.

Gase oder Stäube, Sauerstoff zur Oxidation des Brennstoffs und eine Zündquelle, wie einen Funken oder eine heiße Oberfläche, die diese schlagartige Oxidation initialisiert. Das Risiko einer Explosion wird durch die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens von Brennstoff, Sauerstoff und Zündquelle bestimmt. Zur Senkung des Risikos einer Explosion wird versucht mindestens eine dieser drei Komponenten, welche im sogenannten „Explosionsdreieck“ abgebildet werden, auszuschließen. [1]

2.1 Explosionsgeschützte Geräte

In Bereichen in denen brennbare Stoffe hergestellt, verarbeitet, transportiert oder gelagert werden, wie zum Beispiel in der chemischen Industrie, der Erdöl und Erdgasförderungen oder dem Bergbau, müssen zur Gewährleistung der Sicherheit besondere Kriterien an Geräte die dort zum Einsatz kommen gestellt werden.

Die Anforderung an Konstruktion, Prüfung und Kennzeichnung von elektrischen Geräte die in explosionsgefährdeten Bereichen verwendet werden sollen ist in der Norm IEC 60079-0 festgelegt. Bei Einhaltung der Richtlinien führt auch der Fehlerfall im Betrieb des Gerätes nicht zur Explosion. [4]

Bei der Klassifizierung der Geräte wird hauptsächlich die Wirkung als Zündquelle in einer explosionsfähigen Atmosphäre beurteilt.

2 Theoretische Grundlagen

Zur Entstehung einer Explosion benötigt es drei Komponenten. Einen Brennstoff, zum Beispiel brennbare

2.2 Lithium-Ionen-Batterien im Explosionsdreieck

Lithium-Ionen-Batterien können im Explosionsdreieck, welches in **Abbildung 1** dargestellt ist, zwei Komponenten abdecken. Zum einen kann sie im Fehlerfall sehr hohe Temperaturen entwickeln durch welche sich eine explosionsfähige Atmosphäre entzünden könnte. Die klassifiziert die Lithium-Ionen-Batterie als Zündquelle im Explosionsschutz. Außerdem ist die Batterie auch selbst hochentzündlich, wodurch sie ebenfalls als Brennstoff aufgeführt werden könnte. Fortführend beschäftigt sich diese Arbeit allerdings ausschließlich mit der Wirkung der Lithium-Ionen-Batterie als Zündquelle.

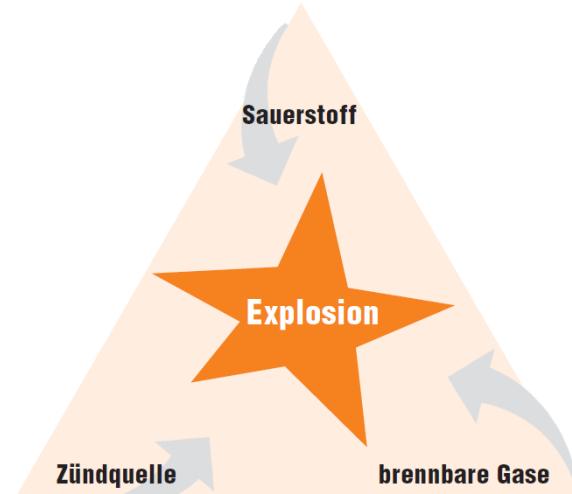


Abbildung 1: Das Explosionsdreieck zeigt die drei Komponenten die für die Entstehung einer Explosion nötig sind [1]

2.3 Batterien in explosionsgeschützten Bereichen

Batterien in explosionsgeschützten Bereichen müssen besonderen Anforderungen entsprechen. So dürfen diese ausschließlich in Reihe geschaltet werden und nur bestimmte Zelltypen beinhalten. Die erlaubten Elektroden-Elektrolyt-Kombinationen für Lithium-Ionen-Batterien sind in den folgenden Tabellen aufgezeigt, dabei werden sie nach Einsatz als Primär- (**Tabelle 1**) bzw. Sekundärbatterie (**Tabelle 2**) getrennt. [4]

Anode	Elektrolyt	Kathode	U _N	U _{LL,max}
(CF) _x	OE	Li	3	3,7
MnO ₂	OE	Li	3	3,7
SOCl ₂	Nwa	Li	3,6	3,9
FeS ₂	OE	Li	1,5	1,83
CuO	OE	Li	1,5	2,3
SO ₂	NwoS	Li	3,0	3,0

Tabelle 1: Lithium- Zelltypen für Primärbatterien für den Einsatz in Geräten im Explosionsschutz. Abkürzungen: OE: Organischer Elektrolyt,

Nwa: Nichtwässrig anorganisch, NwoS: Nichtwässriges organisches Salz. Spannungen sind in V angegeben [4]

Typ	Elektrolyt	U _L	U _N	U _{LL,S}
Li	NwoS	Bis zu 4,2	3,8	4,2

Tabelle 2: Lithium- Zelltypen für Sekundärbatterien für den Einsatz in Geräten im Explosionsschutz.. Abkürzungen: NwoS: Nichtwässriges organisches Salz, U_{LL,S}: Spitzen-Leerlaufspannung. Spannungen in V angegeben [4]

Obwohl die Zelltypen für den Einsatz in Batterien für den Einsatz im Explosionsschutz zugelassen sind, wird die Verwendung von Abgedichteten Zellen, welche auch in Lithium-Ionen-Batterien verbaut sind, mit einer Kapazität größer als 25 Ah im Allgemeinen ausgeschlossen. [5]

Neben der Art der Verschaltung und der Wahl des Zelltyps müssen Batterien die in explosionsgeschützten Bereichen eingesetzt werden sollen noch einige weitere Anforderungen erfüllen, diese sind in Abschnitt 23: „Geräte, die Zellen und Batterien enthalten“ aufgeführt, werden hier jedoch nicht weiter erläutert.

3 Hauptteil

Wie in 2.1 bereits erläutert müssen sich elektrische Geräte für den Einsatz im Explosionsschutz einer Typprüfung unterziehen, welche den Grad der Betriebssicherheit dieser Geräte bestimmt. In Abschnitt 26: „Typprüfungen“ der Norm IEC 60079-0 werden alle Prüfungen beschrieben die ein elektrisches Gerät bestehen muss um in die Gruppen I, II oder III, welche ferner in Abschnitt 4: „Einteilung der Geräte“ derselben Norm beschrieben werden, eingeordnet zu werden. [4]

3.1 Anforderungen an das Ergebnis der Zündgefahrenbeurteilung

Bisher existiert kein einheitliches Prüfverfahren mit dem die Zündgefahr von Lithium-Ionen-Batterien beurteilt werden könnte. Um dennoch einen Prüfmechanismus anzuwenden der den Normen entspricht, bzw. diesen nahe kommt, kann eine Kombination aus genormten Prüfverfahren für allgemeine Sicherheitsaspekte, die bei dieser Prüfung beachtet werden sollten, und speziellen Prüfverfahren die die besonderen Spezifikationen der Lithium-Ionen-Technologie bedienen erstellt werden.

Anzuwendende Prüfungen aus dem Bereich der bereits festgelegten Prüfverfahren sind die Prüfungen des Gehäuses und die thermischen Prüfungen. Neben diesen genormten Verfahren müssen aber auch Batteriespezifische Fehlerfälle beobachtet werden, aus denen ein Temperaturanstieg der Batterie bzw. ein Zündfunke resultieren kann der eine entflammbar Atmosphäre zur Explosion bringen kann. [4]

Anhand des Ergebnisses der Prüfung kann die Einteilung in eine der drei Gruppen erfolgen. Allgemein dürfen

Oberflächen elektrischer Geräte der Gruppe I, welche bestimmungsgemäß für den Einsatz in schlagwettergefährdeten Grubenbauern geeignet sind, eine Temperatur von 150°C nicht überschreiten. Eine Ausnahme bilden Oberflächen auf denen nicht mit dem Absetzen von Kohlestaub zu rechnen ist, z.B. in speziell abgedichteten Gehäusen. Diese Oberflächen dürfen während der Prüfung eine Temperatur von maximal 450° erreichen. [4]

Geräte in Gruppe II sind für den Einsatz in Bereichen geeignet in denen mit explosiven Atmosphären zu rechnen ist, ausgenommen schlagwettergefährdete Grubenbaue, und werden den Untergruppen IIA, IIB oder IIC zugeordnet, welche die Einsatztauglichkeit in Atmosphären mit verschiedenen brennbaren Gasen kennzeichnen (IIA: Propan, IIB: Ethylen, IIC: Wasserstoff). Geräte dieser Gruppe werden anhand der maximalen Oberflächentemperatur in verschiedene Temperaturklassen eingeteilt, die in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. dargestellt sind. [4]

Temperaturklasse	Max. Oberflächentemperatur
T1	450 °C
T2	300 °C
T3	200 °C
T4	135 °C
T5	100 °C
T6	85 °C

Tabelle 3: Einteilung der maximalen Oberflächentemperaturen in Klassen bei elektrischen Geräten der Gruppe II [4]

Wie in Gruppe II werden auch Geräte der Gruppe III, die für den Einsatz in Bereichen in denen mit einer explosiven Staub-Atmosphäre zu rechnen ist, einer Untergruppe zugeordnet. In diesem Fall bezeichnen die Untergruppen die Art des auftretenden Staubes in der Atmosphäre (IIIA: brennbare Flusen, IIB: nicht leitfähiger Staub, IIC: leitfähiger Staub). Die Oberflächen dieser Geräte dürfen bei der Prüfung eine vom Hersteller bestimmte maximale Oberflächentemperatur nicht übersteigen, wobei zusätzlich angegeben wird ob die Prüfung ohne Staubschicht oder mit einer definierten allseitig umgebenen Staubschicht der Schichtdicke T_L durchgeführt werden muss. [4]

Der Bereich in dem das Gerät eingesetzt werden soll muss bereits vor der Prüfung bekannt sein, damit das Prüfverfahren den besonderen Spezifikationen der jeweiligen Gerätegruppe entspricht. Das Ergebnis der Prüfung ist somit auch nur auf die geprüfte Umgebung zu beziehen und kann im Allgemeinen nicht auf andere Einsatzbereiche übertragen werden.

3.2 Theoretische Zündgefahrenbeurteilung

Der erste Schritt der Zündgefahrenbeurteilung ist die Identifikation und Auflistung aller möglichen

auftretenden Zündgefahren. Dazu werden auch Zündgefahren gezählt die durch vorhersehbare Fehlgebräuche verursacht werden können. Nach der Identifikation der Zündgefahren werden diese anhand der Wahrscheinlichkeit, mit der diese mit entsprechenden Folgen auftritt, bewertet. Bei der Bewertung der Auftrittswahrscheinlichkeit wird insbesondere die Differenzierung zwischen dem Auftreten von zu erwartenden und seltenen Zündquellen durchgeführt. Zu den zu erwartenden Zündquellen gehören diejenigen die durch Fehlerfälle, welche bereits bei dem betrachteten Gerät aufgetreten sind, ausgelöst werden. Zu den selten auftretenden Zündquellen zählen Zündquellen die das Auftreten eines noch nicht bekannten aber denkbaren Fehlerfalls oder zweier gleichzeitig auftretender zu erwartender Störfälle voraussetzen. Zündquellen die das gleichzeitige Auftreten eines zu erwartenden und einer seltenen Störquelle, bzw. noch unwahrscheinlichere Szenarien, können vernachlässigt werden. [2]

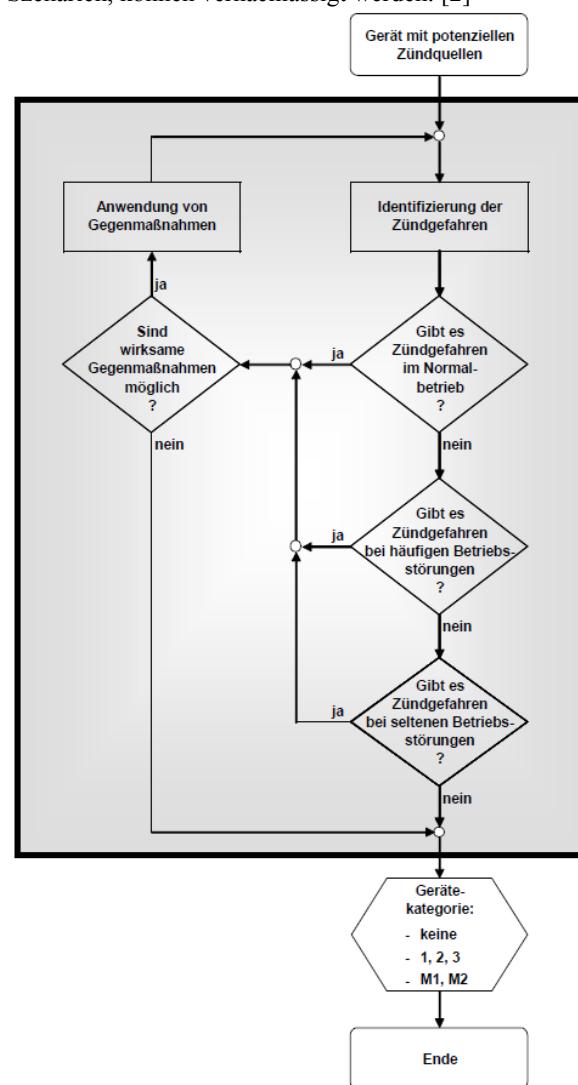


Abbildung 2: Ablauf der Zündgefahrenbewertung mit Festlegung von Gerätekategorien [3]

Im weiteren Verlauf der Beurteilung werden für identifizierte Zündgefahren entsprechende

Schutzmaßnahmen in Abhängigkeit von zu berücksichtigenden Fehlerzuständen angewendet. Zur einfacheren Beurteilung einer getesteten Batterie wird diese nun einer Kategorie zugeordnet. Batterien der Kategorie 3 dürfen im Normalbetrieb keine Zündgefahr darstellen, Batterien der Kategorie 2 dürfen zusätzlich auch bei zu erwartenden Störfällen keine Zündgefahr darstellen und Batterien der Kategorie 1 dürfen sowohl im Normalbetrieb, als auch bei zu erwartenden und bei seltenen Störfällen keine Zündgefahr darstellen. [2] In Abbildung 2 ist der Prozess der Einordnung in die Kategorien und die Anwendung von Maßnahmen zur Beseitigung von Zündquellen in einem Flussdiagramm dargestellt.

3.3 Praktische Zündgefahrenbeurteilung

Da die Prüfungen des Gehäuses und die Temperaturbeständigkeit bereits genormt sind, werden diese im Weiteren nicht weiter erläutert.

Als Fehler, aus denen kritische Oberflächentemperaturen resultieren, können Tiefenentladung, Überladung, überhöhte Betriebstemperatur und interne sowie externe Kurzschlüsse identifiziert werden.

Die Bestimmung der Auftrittswahrscheinlichkeit der Fehlerquellen muss anhand produktspezifischer Erfahrungswerte vorgenommen werden und ist auch vom Alterungs- und Abnutzungszustand der Zellen abhängig. Da diese Arbeit eine allgemeine Beurteilung behandelt wird darauf hier nicht weiter eingegangen.

Der nächste Schritt ist die Anwendung von Maßnahmen die das Auftreten von Fehlern, die zu einer erhöhten Zündgefahr führen, durchzuführen. Die beste Maßnahme um Überladung und Tiefenentladung in einzelnen Zellen der Batterie zu verhindern ist der Einsatz eines Batteriemanagementsystems (BMS). Dieses überwacht den Ladezustand sowie Betriebsparameter wie Temperatur, Spannung und Stromstärke. Mithilfe dieser Daten kann das BMS den Lade- und Entladeprozess regeln und unterschiedliche alterungsbedingte Kapazitätsverluste ausgleichen. Zusätzlich kann durch die Überwachung der Zelltemperatur eine differenzierte und effiziente Kühlung der Batterie erfolgen, die das Risiko einer überhöhten Betriebstemperatur senkt. Interne Kurzschlüsse in Zellen einer LIB werden hauptsächlich durch mechanische Zerstörung des Separators verursacht. Diese kann präventiv durch ein Verformungs- und Schockresistente Batteriegehäuse verhindert werden. Sollte es doch zu einem internen Kurzschluss kommen, kann die Ausbreitung des Schadens in Form eines „thermal runaway“ durch die Verwendung hitzebeständiger Keramik-Separatoren eingeschränkt werden. Um den Schaden den ein externer Kurzschluss einzudämmen können Schmelzsicherungen verbaut werden die den Stromkreis bei hohen Stromstärken abschalten.

Unter Zuhilfenahme eines innovativen BMS können in einzelne Zellen sowohl Überladung als auch Tiefenentladung simuliert werden. Zusätzlich kann das BMS eine erhöhte Last während der externe Kurzschluss durch eine einfache äußere Beschaltung herbeigeführt

werden kann, muss für einen internen Kurzschluss der Separator, welcher Anode und Kathode trennt zerstört werden. Dies kann z.B. durch das Eindringen einer spitzen Metallstange in die Batterie erreicht werden. Zusätzlich kann der Betrieb einer hohen Last, in einer Klimakammer unter erhöhten Temperaturen die überhöhte Betriebstemperatur herbeiführen. Während dieser Prüfung werden die Oberflächentemperaturen der Batterie gemessen und die maximalen Temperaturen erfasst.

Anhand der erfassten Messdaten und der Einschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeiten kann nun unter Zuhilfenahme von Abbildung 2 und Tabelle 3 eine Einordnung in die Gerätekategorien und Temperaturklassen vorgenommen werden.

4 Fazit

LIB bieten gegenüber anderen Batterietechnologien viele Vorteile. Aufgrund der hohen Brandgefahr werden diese allerdings nur eingeschränkt im Explosionsschutz eingesetzt. Gerade im Bereich der großformatigen Batterien gibt es dort noch großes Potenzial für den Einsatz von LIB. Damit die in Explosionsgeschützten Bereichen eingesetzt werden können ist es Notwendig das geeignete Maßnahmen entwickelt werden die das Wirksamwerden von LIB als Zündquelle verhindern.

Zunächst sollten alle Fehlerquellen die zu einer erhöhten Oberflächentemperatur identifiziert werden und wirksame Maßnahme dagegen entwickelt werden.

Dann kann auf der Basis der in dieser Arbeit aufgeführten Methoden ein Prüfverfahren entwickelt werden, dass den Ansprüchen der Normen zum Explosionsschutz gerecht wird. Als Ergebnis dieser Prüfung können dann Anforderungen, die an großformatige LIB, für den Einsatz im Explosionsschutz, gestellt werden sollen, aufgestellt und in Normen festgehalten werden.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Bartec. (29. 12 2016). Broschüre Grundlagen Explosionsschutz. Von <http://www.bartec.de/> abgerufen.
- [2] Beyer, M. (März 2004). Systematische Zündgefahrenbewertung an explosionsgeschützten mechanischen Geräten. Braunschweig.
- [3] Beyer, M. (2016). Explosionsgeschützte Geräte - Zündgefahrenbewertung.
- [4] DIN EN 60079-0:2014-06; VDE 0170-1:2014-06. (kein Datum). Explosionsgefährdete Bereiche - Teil 0: Betriebsmittel - Allgemeine Anforderungen (IEC 60079-0:2011, modifiziert + Cor.:2012 + Cor.:2013).
- [5] DIN EN 60079-7:2016-08; VDE 0170-6:2016-08. (kein Datum). Explosionsgefährdete Bereiche - Teil 7: Geräteschutz durch erhöhte Sicherheit "e" (IEC 60079-7:2015).

- [6] Hauck, D. (2016). Untersuchung großformatiger
Lithium-Ionen Batterien im Explosionsschutz.
Braunschweig.



Zündgefahrenbeurteilung von Lithium-Ionen-Batterien für den Einsatz im Explosionsschutz

Timo Hickisch, 25.01.2017

Agenda

- Einleitung/Motivation
- Grundlagen Explosionsschutz
- Theoretische Zündgefahrenbewertung
- Praktische Zündgefahrenbewertung
- Zusammenfassung
- Quellenverzeichnis

Agenda

- **Einleitung/Motivation**
- Grundlagen Explosionsschutz
- Theoretische Zündgefahrenbewertung
- Praktische Zündgefahrenbewertung
- Zusammenfassung
- Quellenverzeichnis

Einleitung/Motivation

- Lithium-Ionen-Batterien (LIB) haben gegenüber anderen Batterietechnologien viele Vorteile:
 - Hohe Energiedichte
 - Hohe Anzahl an Ladezyklen
 - Schnellladefähigkeit
- Aufgrund der Zündgefahr von LIB werden diese bisher kaum in explosionsgeschützten Bereichen eingesetzt
 - Limitiert auf max. Kapazität von 25 Ah



Quelle: <http://www.cord-ex.com>



Quelle: <http://www.jungheinrich.de>



Quelle: <http://www.induma-rent.com>

Agenda

- Einleitung/Motivation
- **Grundlagen Explosionsschutz**
 - Theoretische Zündgefahrenbewertung
 - Praktische Zündgefahrenbewertung
 - Zusammenfassung
 - Quellenverzeichnis

Grundlagen Explosionsschutz

- Gleichzeitiges Auftreten von Sauerstoff, brennbarer Atmosphäre und einer Zündquelle führen zu einer Explosion
- Im Explosionsschutz wird versucht mindestens eine Komponente auszuschließen
- Bereiche mit besonderem Anspruch an Explosionsschutz:
 - Gruppe I: Schlagwettergefährdete Grubenbaue
 - Gruppe II: Bereiche mit explosiven Atmosphären
 - Gruppe III: Bereiche mit explosiven Staubatmosphären



Quelle: <http://www.bartec.de>

Batterien im Explosionsschutz

- Lithium-Ionen-Batterien beschränkt auf maximale Kapazität von 25 Ah
- Generell dürfen Batterien nur in Reihe geschaltet werden
- Nur bestimmte Elektroden-Elektrolyt-Kombinationen zugelassen

Anode	Elektrolyt	Kathode	U_N [V]	$U_{LL,max}$ [V]
$(CF)_x$ MnO_2	Organische Elektrolyt	Lithium	3	3,7
	Organische Elektrolyt	Lithium	3	3,7
$SOCl_2$ FeS_2	Nichtwässrig anorganisch	Lithium	3,6	3,9
	Organische Elektrolyt	Lithium	1,5	1,83
CuO SO_2	Organische Elektrolyt	Lithium	1,5	2,3
	Nichtwässrig organisches Salz	Lithium	3,0	3,0

Erlaubte Zellen für Primärbatterien

Typ	Elektrolyt	U_L [V]	U_N [V]	$U_{LL,S}$ [V]
Lithium	Nichtwässrig organisches Salz	Bis zu 4,2	3,8	4,2

Erlaubte Zellen für Sekundärbatterien



25.01.2016 | Timo Hickisch | Zündgefahrenbewertung von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 7



Agenda

- Einleitung/Motivation
- Grundlagen Explosionsschutz
- **Theoretische Zündgefahrenbewertung**
- Praktische Zündgefahrenbewertung
- Zusammenfassung
- Quellenverzeichnis



25.01.2016 | Timo Hickisch | Zündgefahrenbewertung von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 8



Theoretische Zündgefahrenbewertung

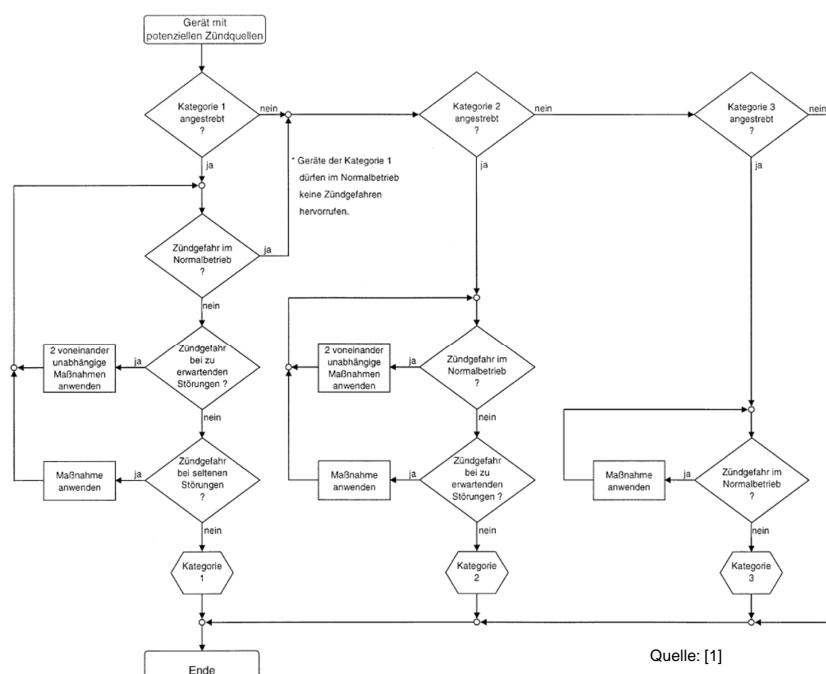
1. Identifikation aller denkbaren Zündquellen
2. Bewertung der Auftrittswahrscheinlichkeit
3. Anwenden von Maßnahmen zur Beseitigung der Zündquellen
4. Einteilung des Geräts in eine von drei Kategorien

Kategorie 3: Keine Zündgefahr im Normalbetrieb

Kategorie 2: Zusätzlich keine Zündgefahr bei zu erwartenden Störfällen

Kategorie 1: Zusätzlich keine Zündgefahr bei nicht zu erwartenden Störfällen

Theoretische Zündgefahrenbewertung



Quelle: [1]

Agenda

- Einleitung/Motivation
- Grundlagen Explosionsschutz
- Theoretische Zündgefahrenbewertung
- **Praktische Zündgefahrenbewertung**
- Zusammenfassung
- Quellenverzeichnis

1. Identifikation der potenziellen Zündquellen

Fall I
Überladung

Fall II
Tiefenentladung

Fall III
Interner
Kurzschluss

Fall IV
Externer
Kurzschluss

Fall V
Überhöhte
Betriebstemperatur

2. Bewertung der Auftrittswahrscheinlichkeit

Zu erwartende Störungen

Externer Kurzschluss

Überhöhte Betriebstemperatur

Seltene Störungen

Überladung

Tiefenentladung

Interner Kurzschluss



Technische Universität Braunschweig

25.01.2016 | Timo Hickisch | Zündgefahrenbewertung von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 13

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

3. Anwenden von Maßnahmen zur Beseitigung der Zündquellen

▪ Konventionelle Schutzmaßnahmen

➤ Vergusskapselung Ex m

➤ Ölkapselung Ex o

➤ Überdruckkapselung Ex p



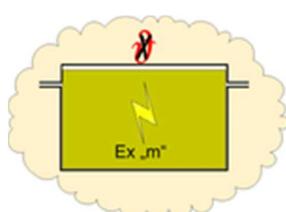
Verhindern das die Ex-Atmosphäre die Zündquelle erreicht

➤ Druckfeste Kapselung Ex d

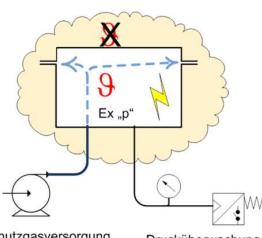
➤ Sandkapselung Ex q



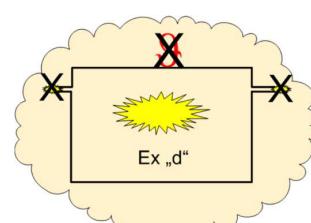
Verhindert die Flammenausbreitung



Quelle: <https://www.ptb.de>



Quelle: <https://www.ptb.de>



Quelle: <https://www.ptb.de>



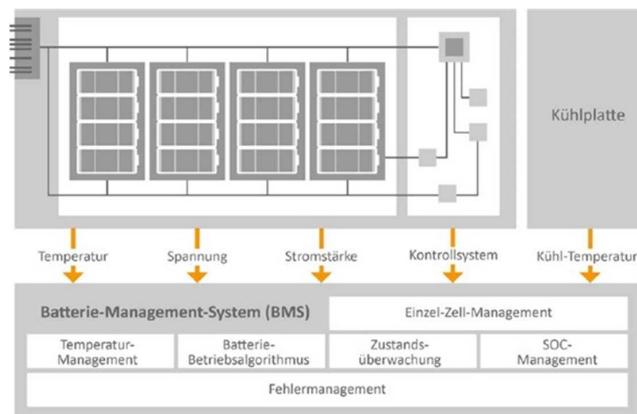
Technische Universität Braunschweig

25.01.2016 | Timo Hickisch | Zündgefahrenbewertung von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 14

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

3. Anwenden von Maßnahmen zur Beseitigung der Zündquellen

- Das BMS ermittelt mit Hilfe von Sensoren die Lade- und Betriebsparameter der Batterie
 - Fehlererkennung und Steuerung der Kühlung
 - Verhindern von Tiefenentladung und Überladung
 - Aber: BMS kann auch selbst als Fehlerquelle wirksam werden



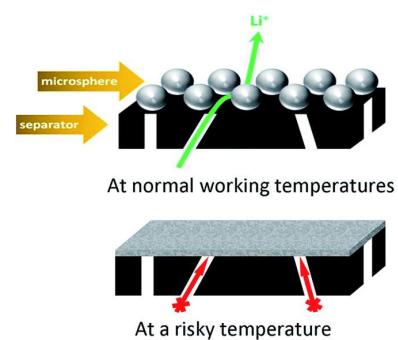
Quelle: [2]

3. Anwenden von Maßnahmen zur Beseitigung der Zündquellen

- Schock- und Verformungsbeständiges Gehäuse als Schutz vor internen Kurzschlägen
- Schmelzsicherungen zum Abriegeln externer Kurzschlüsse
- Sichere Elektrolyte mit niedrigem Sauerstoffpotenzial
- Shutdown-Separatoren
- Temperaturstabile Keramikseparatoren



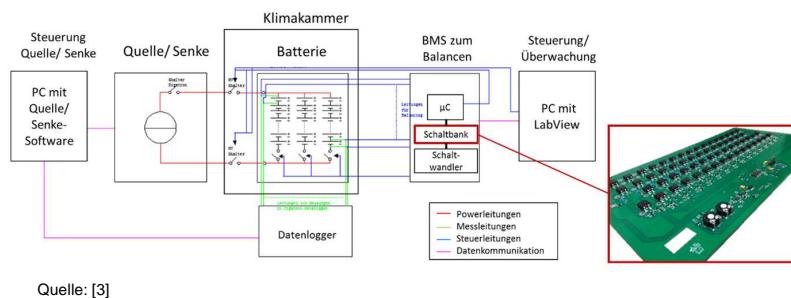
Quelle: <https://www.elringklinger.de>



Quelle: <http://pubs.rsc.org>

4.1 Durchführung der Prüfung

- Überwachung der Oberflächentemperatur im Normalbetrieb
- Herbeiführung der einzelnen Störfälle unter Zuhilfenahme eines Batteriemanagementsystems und Überwachung der Oberflächentemperatur
- Kombination zweier Störfälle bei Überwachung der Oberflächentemperatur

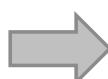


25.01.2016 | Timo Hickisch | Zündgefahrenbewertung von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 17

4.2 Analyse der Prüfergebnisse

- Beispiel: Gruppe II
- Prüfergebnisse:

➤ I. T_{max} : 130°C	➤ VI. T_{max} : 110°C
➤ II. T_{max} : 130°C	➤ V. T_{max} : 95°C
➤ III. T_{max} : 850°C	➤ IV. + V. T_{max} : 145°C



Klasse T4, Kategorie 2

Klasse	Temperatur	Zündtemperaturen
T1	450 °C	Propangas 510 °C, Erdgas 650 °C
T2	300 °C	Acetylen 305 °C
T3	200 °C	Benzin 260-450 °C, Diesel 220 °C
T4	135 °C	Diethylether 170 °C
T5	100 °C	
T6	85 °C	Schwefelkohlenstoff 95 °C

25.01.2016 | Timo Hickisch | Zündgefahrenbewertung von Lithium-Ionen-Batterien | Seite 18

Agenda

- Einleitung/Motivation
- Grundlagen Explosionsschutz
- Theoretische Zündgefahrenbeurteilung
- Praktische Zündgefahrenbeurteilung
- **Zusammenfassung**
- Quellenverzeichnis

Zusammenfassung

- Bisher existiert kein normiertes Prüfverfahren
- Aufgrund der großen Vorteile die LIB haben sollten belastbare Prüfverfahren entwickelt werden
 - Kombination aus konventionellen und batteriespezifischen Maßnahmen

Es besteht noch viel Forschungsbedarf!

Besonders in der Entwicklung sicherer LIB

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Agenda

- Einleitung/Motivation
- Grundlagen Explosionsschutz
- Theoretische Zündgefahrenbeurteilung
- Praktische Zündgefahrenbeurteilung
- Zusammenfassung
- **Quellenverzeichnis**

Quellenverzeichnis

- [1] Beyer, M. (März 2004). Systematische Zündgefahrenbewertung an explosionsgeschützten mechanischen Geräten. Braunschweig.
- [2] Ehsan Rahimzei, Kerstin Sann, Moritz Vogel / VDE Verband der Elektrotechnik / DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Kompendium: Li-Ionen-Batterien, Stand: Juli 2015.
- [3] Daniel Hauck, Untersuchung großformatiger Lithium-Ionen Batterien im Explosionsschutz, 2016, Braunschweig.

Wie gut sind die deutschen Automobilhersteller auf den Gesetzesvorschlag, dass ab 2030 nur noch Elektroautos zugelassen werden dürfen vorbereitet?

In which way are German automobile manufacturers prepared for a law that only allows the certification of electrically powered cars by 2030.

Lukas Stichnoth

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – elenia, Braunschweig, l.stichnoth@tu-bs.de

Kurzfassung

In Anbetracht des Gesetzesvorhaben zur Beschränkungen von Neuzulassungen innerhalb Deutschlands auf Elektroautos ab dem Jahr 2030, kann festgestellt werden, dass insbesondere die deutschen Automobilhersteller derzeit im Bereich der E-Mobilität schlecht aufgestellt sind. Ein wesentlich besseres Angebot an Elektroautos ist bei amerikanischen oder chinesischen Automobilherstellern, wie zum Beispiel Tesla oder BYD, aktuell schon vorhanden. Jedoch sind auch für diese Hersteller noch nicht alle Fragen bei den Kernschwierigkeiten der E-Mobilität beantwortet. Diese sind zum einen die geringen Akkukapazitäten von im großindustriellen Maßstab fertigbaren Akkumulatorzellen zum anderen das Verhältnis von Langlebigkeit zum Preis der Kraftfahrzeuge. Eine weitere Schwierigkeit stellt außerdem die noch nicht vorhandene Ladeinfrastruktur dar.

Abstract

The central question of my seminar lecture is in which way are German automobile manufacturers prepared for a law that only allows the certification of electrically powered cars by 2030. First I will delineate the wide deficite of German automobile manufacturers in the industry of electro mobility. Afterwards I will point out that research and technological development of electro mobility done by American and Chinese manufacturers for instance, like Tesla and BYD, is far in advance. Even though those companies also have to solve big problems such as the capacitance of the used accumulators, an economically reasonable operational lifetime of the cars and a comprehensive network of charging stations.

1 Einleitung

Im Oktober 2016 kam in der Politik die Frage auf, ob man im Zuge des Klimaschutzes ab 2030 nur noch Elektroautos zulassen sollte. Der Vize-Chef der Grünen-Bundestagsfraktion - Oliver Krischer - sagte: „Wenn wir das Pariser Klimaabkommen ernst nehmen, dürfen nach 2030 keine Verbrennungsmotoren mehr neu auf die Straße“. [7] Sollte ein derartiges Gesetz in den kommenden Jahren verabschiedet werden, müssen die deutschen Automobilhersteller reagieren, um ihre derzeitige Marktsituation aufrechterhalten zu können.

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit betrachtet, inwiefern die deutschen Automobilhersteller aktuell auf ein Verbot von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ab 2030 vorbereitet sind. Außerdem werden die aktuellen Probleme in Verbindung mit der E-Mobilität dargestellt.

2 Theoretische Grundlagen

Um den Stand der Vorbereitung beurteilen zu können, soll zunächst das derzeitige Angebot an reinen Elektroautos der deutschen Automobilhersteller betrachtet werden. Es werden lediglich von drei Herstellern im aktuellen

Lieferprogramm Elektroautos aufgeführt. Hierbei ist Volkswagen im Moment mit zwei [1] Fahrzeugmodellen besser aufgestellt als BMW [2] und Mercedes [3] mit jeweils nur einem rein elektrisch angetriebenen Fahrzeug.

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Diese Autos sind allerdings alle nicht besonders alltagstauglich, da sie alle eine geringe Reichweite ($R \leq 200\text{km}$) besitzen und verhältnismäßig teuer sind. Den Kleinwagen VW e-up gibt es derzeit ab 26.900,00 € zu kaufen, den VW e-Golf ab 34.000,00 €. Zum Vergleich gibt es den VW up als Benziner bereits ab 9.975,00 € [25] und den Golf ab 17.850,00 € [25] wobei der große Preisunterschied zu den rein elektrischen Varianten deutlich wird. Für diese und weitere in Deutschland verfügbaren Fahrzeuge sowie die Modelle einiger Mitbewerber sind untenstehend in Tabelle 1 die Kenndaten zum Vergleich aufgeführt.

Für die Beurteilung der Reichweite von Elektrofahrzeuge wird der sog. NEFZ-Zyklus verwendet. NEFZ steht für „Neuer Europäischer Fahrzyklus“ und stellt eine genormte theoretische Reichweitenmessung dar. Dieser Wert weicht

allerdings teilweise stark von der wirklichen Reichweite ab. Als Reichweitenangabe sind laut NEFZ-Zyklus beim e-Up 160 km und beim e-Golf 190 km angegeben. [4][6] Die Resultate der NEFZ Messungen sind jedoch nicht für alle Situationen aussagekräftig, da die weiteren Verbraucher im Fahrzeug nicht berücksichtigt werden. Beispielsweise kann die Reichweite des e-Up bei Minusgraden auf 80 km sinken, da die Heizung alleine schnell einige kW verbraucht [5]. Auch bei den anderen deutschen Automobilherstellern sind die Reichweiten vergleichbar gering und die Anschaffungskosten der Autos vergleichbar hoch. Der BMW i3 (94 kWh) besitzt laut NEFZ eine Reichweite von 300 km. BMW selbst gibt dazu die Info, dass dies im Alltagsbetrieb bis zu 200 Kilometern entspricht. [8]

Repräsentative internationale Elektro-Automobilhersteller für einen Vergleich stellen das amerikanische Unternehmen Tesla und der chinesischen Hersteller BYD dar. Diese sind weltweit die fortschrittlichsten Hersteller im Bereich der Elektromobilität. Tesla vertreibt aktuell die luxuriösen Elektroautos „MODEL S“ (ab ca. 78.000,00 €) und das „MODEL X“ (ab ca. 102.000,00 €), die lange Zeit mit ihren Batteriekapazitäten und somit auch mit den Reichweiten konkurrenzlos waren und aktuell im Vergleich zu deutschen Automobilherstellern auch noch sind. Aktuell können Kapazitäten von 60kWh (bis zu 408 km NEFZ Reichweite) bis 100kWh (bis zu 613 km Reichweite) mit entsprechenden Aufpreisen von bis zu ca. 67.000,00 € gewählt werden [21][22]. Ob deutsche Automobilhersteller in der Lage wären, in dem selben Preissegment vergleichbare Elektroautos herzustellen, lässt sich schwer abschätzen. Allerdings wäre dies auch nur mit entsprechender Zeit für Forschung und Entwicklung möglich. Tesla hat 2016 das „MODEL 3“ vorgestellt, welches Mitte 2017 produziert werden soll. Dieses liegt eindeutig mit 35.000 USD im mittleren Preissegment von Autos und bietet eine Reichweite von 345 Kilometern [12]. Preislich vergleichbare Elektroautos von deutschen Herstellern (VW e-Golf, BMW i3) bieten eine deutlich geringere Reichweite. (siehe Tabelle 1) Der weltweit größte Hersteller von Akkus „BYD“ bietet bereits für 59.900,00 € ein Elektroauto „BYD e6“ mit einer Batteriekapazität von 80 kWh und einer NEFZ Reichweite von 400km an. [13]

Für den Endkunden sind aktuell die Hauptprobleme bei der Elektromobilität zum einen die bereits erwähnten hohen Anschaffungskosten und die geringe Reichweite. Die Ursache für beide Probleme stellt die Batterie dar. Zum anderen stellen die Auflademöglichkeiten und Aufladedauern Probleme dar, die sich auf die Ladeinfrastruktur zurückführen lassen.

In aktuellen Elektroautos werden fast ausschließlich Lithium-Ionen-Akkus verwendet. Diese vertragen viele Ladezyklen, haben eine mit anderen Akkus vergleichbar hohe Energiedichte und besitzen so gut wie keinen Memory-Effekt. Die hohen Anschaffungskosten von Elektroautos lassen sich fast ausschließlich auf die teure Herstellung der Batterien zurückführen. Allerdings sinken

die Preise pro Kilowattstunde viel stärker als erwartet. [16] Ein weiteres Problem bei den Batterien ist, dass Lithium-Ionen-Akkus eine beschränkte Energiedichte von aktuell ca. 150 Wh/kg besitzen. Die Energiedichte gibt das Verhältnis von Energie pro Gewicht an und ist somit auch zusätzlich zum Preis pro kWh ein entscheidender Faktor in Bezug auf die Kapazität einer Batterie im Elektroauto. Durch weitere Forschungen soll die Energiedichte von Lithium-Ionen-Akkus bis 2020 weiter auf ca. 200 Wh/kg steigen. Als Vergleich besitzt Benzin zum Beispiel eine Energiedichte von 12.800 Wh/kg. [17] Bezüglich der Batterie gibt es einige weitere Faktoren wie zum Beispiel Sicherheit, Volumetrische Energie, Lebensdauer, maximale Leistung und weitere, die bei der Entwicklung dieser berücksichtigt werden müssen. Somit steckt noch sehr viel Potential in der Batterieentwicklung. Ein weiterer Punkt, der beachtet werden muss ist, dass eine Batterie nur eine begrenzte Lebensdauer besitzt und nach schätzungsweise acht Jahren nur noch 70%-80% der ursprünglichen Kapazität besitzt [19]. Aus Diesem und dem Grund, dass für eine Batterie sehr viele Rohstoffe benötigt werden, die teilweise nur mit Aufwand zu beschaffen sind (wie zum Beispiel Lithium), muss sich auch über das Recycling Gedanken gemacht werden. Da die Prognosen für produzierte Elektroautos in den kommenden Jahren sehr weit auseinander gehen, lässt sich die benötigte Menge an Batteriezellen nur sehr schwer abschätzen. Aktuell sind zwar Überkapazitäten in der Herstellung von Batterien für Elektroautos vorhanden (Produktionskapazität 2014: 27,2 GWh/a, Marktnachfrage 2014: 10,0 GWh/a, Prognose Marktnachfrage 2016: 18,0 GWh/a [23]). Allerdings könnte bis 2025 ein Zusatzbedarf von ca. 100 GWh/a bis 300 GWh/a entstehen. [23] Entsprechend werden viele Batterieproduktionen in den kommenden Jahren benötigt. Auch deutsche Hersteller müssen sich mit dem Thema der Produktion von Batteriezellen auseinandersetzen.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei Elektroautos ist die Ladeinfrastruktur. Der VW e-Golf benötigt zu Hause bei Wechselstrom 2,3 kW 13 Stunden bis er voll aufgeladen ist. [6] Für längere Strecken werden Schnelllademöglichkeiten benötigt. An einer CCS-Ladestationen kann der e-Golf innerhalb von 30 Minuten 80% seiner Batteriekapazität aufladen. Dies ist allerdings nur über Gleichstrom mit einer Leistung von 40 kW möglich. [6] Diese Ladegeschwindigkeit ist für die meisten Szenarien ausreichend, obwohl der e-Golf noch eine vergleichbar kleine Batteriekapazität besitzt. Allerdings ist die Anzahl von öffentlichen Lade- und Schnellladesäulen in Deutschland noch überschaubar (Juni 2015: 5571 Normalladepunkte [24]). Eine ausreichende Ladeinfrastruktur kann in Deutschland nur geschaffen werden, wenn sich auch die deutschen Automobilhersteller verantwortlich für diese zeigen.

Für das Jahr 2017 hat Opel den Verkaufsstart des Opel Ampera-E angekündigt. Dieser soll in Deutschland ca. 35.000,00 € kosten [15] und eine NEFZ Reichweite von 500 km besitzen [14]. Damit bietet erstmalig ein deutscher Automobilhersteller ein Elektrofahrzeug an, welches im

mittleren Preissegment liegt und eine akzeptable Reichweite besitzt. Auch andere deutsche Automobilhersteller haben bereits kurz- oder längerfristige Zukunftspläne vorgestellt. Die Daimler AG möchte mit Ihrer neuen Marke „EQ - Electric Intelligence“ bis 2025 mehr als 10 verschiedene Elektroautos anbieten. Dazu soll unter anderem eine Milliarde Euro in die Batterieproduktion gesteckt werden. [20]

3 Fazit

Aktuell sind die deutschen Automobilhersteller bezüglich der Elektromobilität schlecht aufgestellt. Lediglich Opel stellt mit dem Opel Amera-E ab 2017 ein Elektroauto im mittleren Preissegment mit akzeptabler Reichweite zur Verfügung. Bis 2030 sind es zwar noch 13 Jahre, allerdings müssen die deutschen Automobilhersteller viel Zeit und Geld in die Entwicklung günstigerer Batteriekapazitäten und verschiedener Elektroautos stecken. Daimler hat sich zumindest mit Ihrer neuen Marke „EQ – Electric Intelligence“ vielversprechende Ziele gesetzt. Außerdem muss der kommenden hohen Nachfrage an Elektroautos mit entsprechender Bereitstellung von hohen Stückzahlen an Batterien gedient werden. Ein weiteres entscheidendes Problem, welches gegen den ausschließlichen Vertrieb von Elektroautos ab 2030 spricht, ist die Ladeinfrastruktur. Auch mit diesem Thema müssen sich die deutschen Automobilhersteller in den kommenden Jahren viel beschäftigen, damit das Szenario als realistisch angesehen werden kann.

4 Literatur

- [1] Volkswagen AG, Volkswagen Modelle - alle VW Modelle auf einen Blick < Volkswagen Deutschland, <http://www.volkswagen.de/de/models.html> [Zugriff am 28.11.2016].
- [2] BMW AG, BMW i : Auf einem Blick <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/bmw-i-entdecken/auf-einen-blick.html> [Zugriff am 28.11.2016].
- [3] Daimler AG, Alle Modelle, http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passengercars/home/new_cars/model_overview.html [Zugriff am 28.11.2016].
- [4] Volkswagen AG, Der e-up, Technik und Preise, http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd/4/de/dialog/pdf/up-/e-up-preisliste/_jcr_content/renditions/rendition.download_attachment.file/e-up_preisliste.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [5] autobild.de, Stromer im Test: Wie gut ist der VW e-UP im Alltag? - [autobild.de, http://www.autobild.de/artikel/vw-e-up-test-4544079.html](http://www.autobild.de/artikel/vw-e-up-test-4544079.html) [Zugriff am 01.12.2016].
- [6] Volkswagen AG, Der e-Golf, Technik und Preise, http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd/4/de/dialog/pdf/golf-a7/egolf_preisliste/_jcr_content/renditions/rendition.download_attachment.file/e-golf_preisliste.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [7] Spiegel Online GmbH, Bundesländer wollen Benzin- und Dieselautos ab 2030 verbieten - SPIEGEL ONLINE, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/bundeslaender-wollen-benzin-und-dieselautos-ab-2030-verbieten-a-1115671.html> [Zugriff am 24.01.2017].
- [8] BMW AG, BMW i3 : Reichweite & Laden, <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/reichweite-laden.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [9] BMW AG, Konfigurieren, http://www.bmw.de/vc/ncc/xhtml/start/startWithConfigUrl.faces?country=DE&market=DE&productType=1&brand=BI&locale=de_DE&name=p8y6z5e7#MODEL_ENGINE [Zugriff am 24.01.2017]
- [10] FOCUS Online, BMW i3 im Alltagstest: Reichweite - Auf diesen Schalter kommt alles an - FOCUS Online, http://www.focus.de/auto/elektroauto/bmw-i3-im-alltagstest-freude-am-frieren-so-weit-kommt-man-mit-dem-elektro-bmw-i3-wirklich_id_3562885.html [Zugriff am 24.01.2017]
- [11] Daimler AG, Preisliste_B-Klasse_w246_170109.pdf, http://www.mercedes-benz.de/content/media_library/germany/mpc_germany/de/mercedes-benz_deutschland/pkw_emb_nextgen/neufahrzeuge/b-klasse/preislisten_pdf/pkw_b-klasse_preisliste0.object-Single-MEDIA.download.tmp/Preisliste_B-Klasse_w246_170109.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [12] Tesla Motors, Model 3 | Tesla Deutschland, https://www.tesla.com/de_DE/model3 [Zugriff am 24.01.2017]
- [13] Bernd Conrad, Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG, BYD e6 (2016): Wie fährt das Elektroauto aus China? - AUTO MOTOR UND SPORT, 04.05.2016, <http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/fahrbericht-neuer-byd-e6-china-elektroauto-11173901.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [14] Adam Opel AG, Opel Ampera-e | Das neue Elektroauto | Opel Deutschland, <http://www.opel.de/fahrzeuge/neuheiten-uebersicht/opel-ampera-e.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [15] Gerd Stegmaier, Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG, Opel Ampera-e (2017): Preis in Norwegen ab 33.416 Euro - AUTO MOTOR UND SPORT, 14.12.2016, <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/opel-ampera-e-elektroauto-2017-500-km-reichweite-765522.html> [Zugriff am 24.01.2017]

- [16] Christoph Mähler, freenet.de GmbH, Batterien in Elektroautos: Aktueller Stand und Perspektiven, 12.08.2016, http://www.stromschnell.de/technik/batterien-in-elektroautos-aktueller-stand-und-perspektiven_5123204_5093776.html [Zugriff am 24.01.2017]
- [17] Diplomphysiker Harald Herminghaus, Energiedichte von Benzin, Diesel und Akkus, <http://www.umweltbewusst-heizen.de/verkehr/Elektrofahrzeuge/Batterie/Energiedichte/Energiedichte-Akku.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [18] Volkswagen AG, e-Mobilität < Technologie < Volkswagen Deutschland, <http://emobility.volkswagen.de/de/de/private/Technologie/Akkutechnologie.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [19] Christoph Mähler, freenet.de GmbH, Wie schädlich ist die Produktion und Entsorgung von Batterien?, 26.11.2015, http://www.stromschnell.de/nachhaltigkeit/wieschaedlich-ist-die-produktion-und-entsorgung-von-batterien_5117634_5093816.htm, [Zugriff am 24.01.2017]
- [20] Daimler AG, Mehr als nur ein neuer Antrieb, Unser Kurs bei der E-Mobilität, 29.09.2016, <https://www.daimler.com/innovation/specials/elektromobilitaet/> [Zugriff am 24.01.2017]
- [21] Tesla Motors, Model S | Tesla Deutschland, https://www.tesla.com/de_DE/models [Zugriff am 24.01.2017]
- [22] Tesla Motors, Model X | Tesla Deutschland, https://www.tesla.com/de_DE/modelx [Zugriff am 24.01.2017]
- [23] Nationale Plattform Elektromobilität, Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland, Berlin, Januar 2016, http://nationale-plattform-elektronomobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG2_Roadmap_Zellfertigung_final_bf.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [24] Nationale Plattform Elektromobilität, Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland, Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015, November 2015, http://nationale-plattform-elektronomobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_bar_bf.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [25] Volkswagen AG, Volkswagen Konfigurator - jetzt Wunschmodell konfigurieren, <http://app.volksvagen.de/ihdcc/de/configurator.html#n> [Zugriff am 24.01.2017]

Tabelle 1 Vergleich Elektrofahrzeuge

	Preis	Reichweite (NEFZ)	Nennkapazität Akku
VW e-Up [4]	26.900,00 €	160 km	18,7 kWh
VW e.Golf [6]	34.900,00 €	190 km	24,2 kWh
BMW i3 (60Ah)	34.950,00 € [9]	190 km [8]	k.A. (22 kWh [10])
Mercedes-Benz B 250 e [11]	39.151,00 €	200 km	28 kWh
Tesla Model 3 [12]	35.000,00 USD	ca. 345 km	k.A.
BYD e6 [13]	ca. 59,500,00 €	ca. 400 km	80 kWh
Opel Ampera-e	ca. 35000€	ca. 500 km	



Quelle: [26]

Wie gut sind die Deutschen Automobilhersteller auf den Gesetzesvorschlag, dass ab 2030 nur noch Elektroautos zugelassen werden dürfen vorbereitet?

Lukas Stichnoth, 30.01.2017

Agenda

- Einleitung
- Aktuelle Lage bei deutschen Automobilherstellern
- Vergleich mit dem Ausland
- Hauptprobleme der Elektromobilität
- Zukunftspläne und Einschätzung
- Zusammenfassung

Agenda

- Einleitung
- Aktuelle Lage bei deutschen Automobilherstellern
- Vergleich mit dem Ausland
- Hauptprobleme der Elektromobilität
- Zukunftspläne und Einschätzung
- Zusammenfassung

Einleitung

„Wenn wir das Pariser Klimaabkommen ernst nehmen,
dürfen nach 2030 keine Verbrennungsmotoren mehr
neu auf die Straße“

Vize-Chef der Grünen Bundestagsfraktion - Oliver Krischer [7]

Agenda

- Einleitung
- Aktuelle Lage bei deutschen Automobilherstellern
- Vergleich mit dem Ausland
- Hauptprobleme der Elektromobilität
- Zukunftspläne und Einschätzung
- Zusammenfassung

Aktuelle Lage bei deutschen Automobilherstellern

Volkswagen AG

e-Up



Quelle: [27]

e-Golf



Quelle: [28]

Preis:	ab 26.900,00 €
Reichweite (NEFZ):	160 km
Nennkapazität:	18,7 kWh
Max. Geschwindigkeit:	130 km/h
[4]	

Preis:	ab 34.900,00 €
Reichweite (NEFZ):	190 km
Nennkapazität:	24,2 kWh
Max. Geschwindigkeit:	140 km/h
[6]	

Aktuelle Lage bei deutschen Automobilherstellern

BMW

i3



Quelle: [29]

	60Ah	94Ah
Preis:	[9]	ab 34.950,00 €
Reichweite (NEFZ):	[8]	190 km
Nennkapazität:	[10]	k.A. (22 kWh)

Mercedes

B-Klasse Sports Tourer B 250 e



Quelle: [30]

Preis:	ab 39.151,00 €
Reichweite (NEFZ):	200 km
Nennkapazität:	28 kWh
Max. Geschwindigkeit:	160 km/h

[11]



25.01.2017 | Lukas Stichnoth | Wie gut sind die Deutschen Automobilhersteller auf Elektroautos vorbereitet? | Seite 7



Agenda

- Einleitung
- Aktuelle Lage bei deutschen Automobilherstellern
- Vergleich mit dem Ausland
- Hauptprobleme der Elektromobilität
- Zukunftspläne und Einschätzung
- Zusammenfassung



25.01.2017 | Lukas Stichnoth | Wie gut sind die Deutschen Automobilhersteller auf Elektroautos vorbereitet? | Seite 8



Vergleich mit dem Ausland

Tesla (USA)

Modell 3 (Herstellung Mitte 2017)



Quelle: [26]

Preis: ca. 35.000,00 €
(ab 35.000,00 USD) [12]
Reichweite (NEFZ): ca. 345 km [12]
Nennkapazität: k.A.

BYD (China)

(Weltweit größte Hersteller von Akkus)
e6



Quelle:[31]

Preis (brutto): ca. 59.500,00 €
Reichweite (NEFZ): 400 km
Nennkapazität: 80 kWh
Max. Geschwindigkeit: ca. 140 km/h
[13]

Vergleich mit dem Ausland

	Preis	Reichweite (NEFZ)	Nennkapazität Akku
VW e-Up [4]	26.900,00 €	160 km	18,7 kWh
VW e-Golf [6]	34.900,00 €	190 km	24,2 kWh
BMW i3 (60 Ah)	34.950,00 € [9]	190 km [8]	k.A. (22 kWh) [10]
Mercedes-Benz B 250 e [11]	39.151,00 €	200 km	28 kWh
Tesla Model 3 [12]	35.000,00 USD	ca. 345 km	k.A.
BYD e6 [13]	ca. 59.500,00 €	ca. 400 km	80 kWh

Agenda

- Einleitung
- Aktuelle Lage bei deutschen Automobilherstellern
- Vergleich mit dem Ausland
- Hauptprobleme der Elektromobilität
- Zukunftspläne und Einschätzung
- Zusammenfassung

Hauptprobleme bei der E-Mobilität

Probleme für den Endkunden:

- Anschaffungskosten
- Reichweite
- Auflademöglichkeiten
- Aufladedauern

- 1. Batterie
- 2. Ladeinfrastruktur

Hauptprobleme bei der E-Mobilität

1. Batterien

Fast nur Lithium-Ionen-Akkus im Einsatz

Vorteile:

- Verträgt viele Ladezyklen (3000 Ladezyklen [18])
- hohe Energiedichte (ca. 150 Wh/kg)
- So gut wie keinen Memory-Effekt

Probleme:

1. Hoher Preis
2. Energiedichte (Energie pro Gewicht, Volumen) und Kapazität
3. Umweltbelastung
4. Fertigung

Hauptprobleme bei der E-Mobilität

1. Batterien

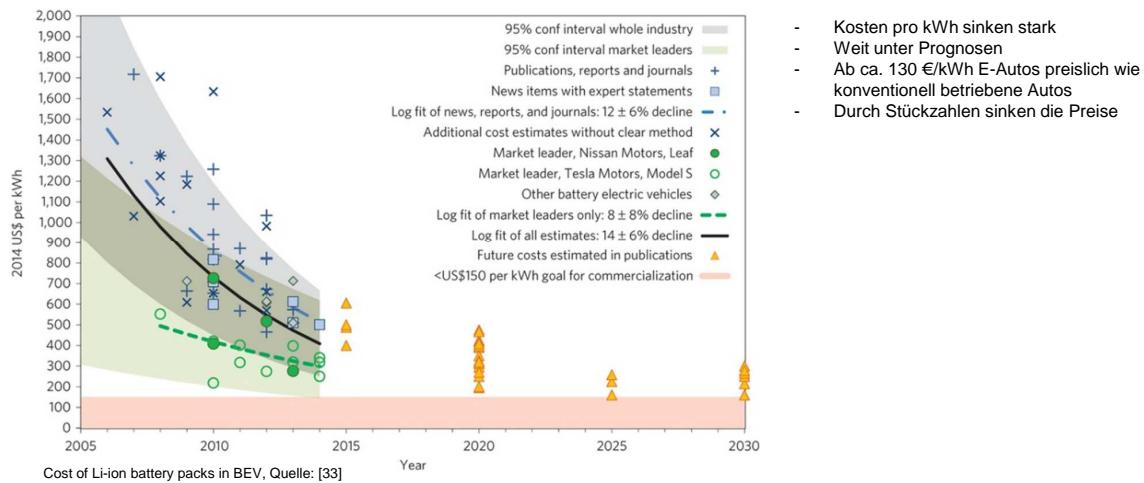
1. Hoher Preis

	Preis als Elektroauto	Preis als Benziner
VW Up	26.900,00 € [4]	ab 9.975,00 € [25]
VW Golf	34.900,00 € [6]	ab 17.850,00 € [25]
BMW i3 (60 Ah)	34.950,00 € [9]	-----
Mercedes-Benz B 250 e	39.151,00 € [11]	-----
Tesla Model 3	35.000,00 USD [12]	-----
BYD e6 [13]	ca. 59.500,00 € [13]	-----

Hauptprobleme bei der E-Mobilität

1. Batterien

1. Hoher Preis



Hauptprobleme bei der E-Mobilität

1. Batterien

2. Energiedichte und Kapazität

Entscheidend: **Energiedichte** = Energie/Gewicht

	Reichweite (NEFZ)	Nennkapazität Akku
VW e-Up [4]	160 km	18,7 kWh
VW e-Golf [6]	190 km	24,2 kWh
BMW i3 (60 Ah)	190 km [8]	k.A. (22 kWh [10])
Mercedes-Benz B 250 e [11]	200 km	28 kWh
Tesla Model 3 [12]	ca. 345 km	k.A.
BYD e6 [13]	ca. 400 km	80 kWh

Gründe beschränkte Kapazität

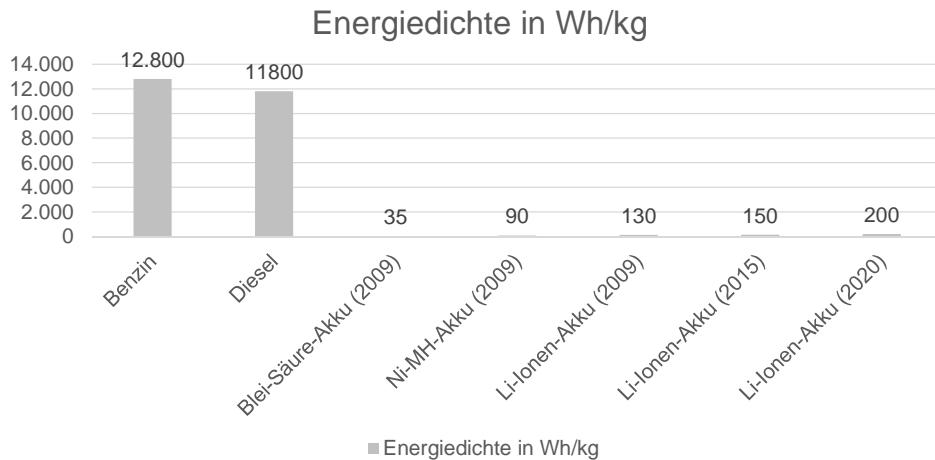
- Preis
- Gewicht
- Volumen

Hauptprobleme bei der E-Mobilität

1. Batterien

2. Energiedichte und Kapazität

Entscheidend: **Energiedichte** = Energie/Gewicht



Quelle: [17]



25.01.2017 | Lukas Stichnoth | Wie gut sind die Deutschen Automobilhersteller auf Elektroautos vorbereitet? | Seite 17



Hauptprobleme bei der E-Mobilität

1. Batterien

3. Umweltbelastung

- Tatsächliche Lebensdauer Autobatterie unbekannt
- Schätzungen: nach 8 Jahren 70%-80% der Kapazität [19]
- Nach ca. 10 Jahren wird eine neue Batterie benötigt
- viele Rohstoffe benötigt [19]
 - durchschnitt ca. 3kg Lithium
 - Andere Metalle als Elektrodenmaterialien
- Noch keine ausreichende Recycling-Möglichkeiten



25.01.2017 | Lukas Stichnoth | Wie gut sind die Deutschen Automobilhersteller auf Elektroautos vorbereitet? | Seite 18



Hauptprobleme bei der E-Mobilität

1. Batterien

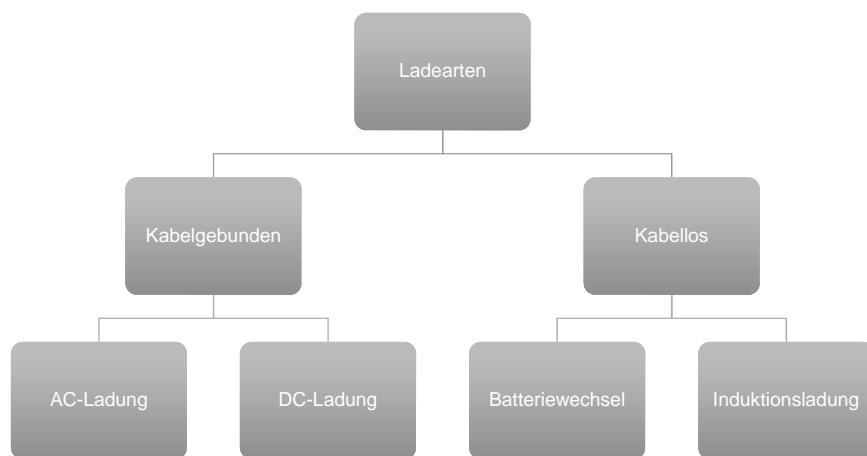
4. Fertigung

- Aktuell globale Überkapazitäten von großformatigen Zellen
- Großteil der Produktion in Japan (26%) und Korea (24%)
- Produktionskapazität von großformatige Lithium-Ionen-Batteriezellen:
 - 2014: 27,2 GWh/a
- Nachfrage:
 - 2014: 10,0 GWh/a
 - Prognosen 2016: 18,0 GWh/a
 - Prognose 2025: 100 GWh/a – 300 GWh/a

Quelle: [23]

Hauptprobleme bei der E-Mobilität

2. Ladeinfrastruktur



Hauptprobleme bei der E-Mobilität

2. Ladeinfrastruktur

Ladedauern

e-Golf [6]

- Zu Hause:
 - Haushaltssteckdose (AC 2,3 kW) 100%: 13:00h
 - AC-Wallbox (AC 3,6 kW) 100%: 08:00h
- Unterwegs:
 - CCS-Ladestation (DC 40 kW) 80%: 00:30h

BMW i3 (94 Ah) [8]

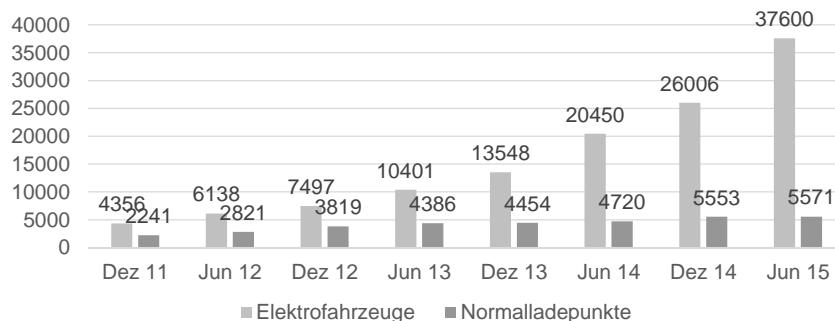
- Zu Hause
 - BMW i Wallbox Pro (AC, 4,6kW): 07:30h
 - BMW i Wallbox (AC, 11kW): 03:30h
 - Haushaltssteckdose (AC, 2,7kW): 12:15h
- Unterwegs
 - Gleichstrom (DC, 50kW) 01:15h
 - Wechselstrom (AC, 11kW) 03:30h

Hauptprobleme bei der E-Mobilität

2. Ladeinfrastruktur

Lademöglichkeiten

Vergleich des Markthochlaufs von Fahrzeugen und öffentlich zugänglicher Normalladeinfrastruktur



Quelle:[24]

→ Es werden immer mehr öffentliche Ladepunkte benötigt

Agenda

- Einleitung
- Aktuelle Lage bei deutschen Automobilherstellern
- Vergleich mit dem Ausland
- Hauptprobleme der Elektromobilität
- Zukunftspläne und Einschätzung
- Zusammenfassung

Zukunftspläne und Einschätzung

Serienproduktionen 2017

Opel Ampera-E



Quelle: [32]

- Batterie: 60 kWh aus 288 Lithium-Ionen-Zellen [14]
- NEFZ: 500 km [14]
- ca. 35.000,00 € [15]
- Verkaufsstart Deutschland 2017[14]

Weitere Autos für 2017:

- Smart Electric Drive
- Neuer VW e-Golf
- Diverse Hybrid-Autos

Zukunftspläne und Einschätzung

Volkswagen

Volkswagen AG:

„Mit Metall-Luft-Batterien könnten eines Tages Reichweiten von bis zu 600 Kilometern möglich werden“ [18]

„Die jetzige Energiedichte von etwa 140 Wattstunden pro Kilogramm dürfte sich in den nächsten Jahren auf 200, langfristig sogar auf 250 Wattstunden erhöhen“ [18]

„Volkswagen strebt einen ausgeglichenen Stoffkreislauf an: Alle Teile der Batterie sollen wiederverwertbar sein.“ [18]

Zukunftspläne und Einschätzung

Daimler AG

- Neue Marke EQ - Electric Intelligence
- In 3 Jahren: Concept EQ
- „bestehenden Produktionsnetzwerk“
- Plan für 2025: mehr als 10 Elektroautos
- 1 Milliarde Euro in eigene Batterieproduktion

Quelle: [20]

Agenda

- Einleitung
- Aktuelle Lage bei deutschen Automobilherstellern
- Vergleich mit dem Ausland
- Hauptprobleme der Elektromobilität
- Zukunftspläne und Einschätzung
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Bis 2030 sind es 13 Jahre
- Aktuell sind die deutschen Automobilhersteller schlecht aufgestellt
- 13 Jahre viel Zeit, allerdings folgende Probleme für Hersteller:
 - Entwicklung
 - Hauptproblem: Batteriekapazität im Verhältnis zum Preis und Gewicht
 - Batteriepreise sind schon stark gesunken und sinken weiter
 - Durch Massenproduktionen weiter günstiger
 - Opel Ampera-E guter Anfang
 - Elektrische Antriebe
 - Fertigung
 - Massenproduktion der Batterien
 - Ladeinfrastruktur
 - Auch ein Problem der Automobilhersteller

Quellen

- [4] Volkswagen AG, Der e-up, Technik und Preise, http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/dialog/pdf/up-/e-up-preisliste/_jcr_content/renditions/rendition.download_attachment.file/e-up_preisliste.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [6] Volkswagen AG, Der e-Golf, Technik und Preise, http://www.volkswagen.de/content/medialib/vwd4/de/dialog/pdf/golf-a7/egolf_preisliste/_jcr_content/renditions/rendition.download_attachment.file/e-golf_preisliste.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [7] Spiegel Online GmbH, Bundesländer wollen Benzin- und Dieselautos ab 2030 verbieten - SPIEGEL ONLINE, <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/bundeslaender-wollen-benzin-und-dieselautos-ab-2030-verbieten-a-1115671.html> [Zugriff am 24.01.2017].
- [8] BMW AG, BMW i3 : Reichweite & Laden, <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/reichweite-laden.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [9] BMW AG, Konfigurieren, http://www.bmw.de/vc/nc/xhtml/start/startWithConfigUrl.faces?country=DE&market=DE&productType=1&brand=BI&locale=de_DE&name=p8y6z5e7#MODEL_ENGINE [Zugriff am 24.01.2017]
- [10] FOCUS Online, BMW i3 im Alltagstest: Reichweite - Auf diesen Schalter kommt alles an - FOCUS Online, http://www.focus.de/auto/elektroauto/bmw-i3-im-alltagstest-freude-am-frieren-so-weit-kommt-man-mit-dem-elektro-bmw-i3-wirklich_id_3562885.html [Zugriff am 24.01.2017]
- [11] Daimler AG, Preisliste_B-Klasse_w246_170109.pdf, http://www.mercedes-benz.de/content/media_library/germany/mpc_germany/de/mercedes-benz_deutschland/pkw_emb_nextgen/neufahrzeuge/b-klasse/preislisten_pdf/pkw_b-klasse_preisliste0.object-Single-MEDIA.download.tmp/Preisliste_B-Klasse_w246_170109.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [12] Tesla Motors, Model 3 | Tesla Deutschland, https://www.tesla.com/de_DE/model3 [Zugriff am 24.01.2017]
- [13] Bernd Conrad, Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG, BYD e6 (2016): Wie fährt das Elektroauto aus China? - AUTO MOTOR UND SPORT, 04.05.2016, <http://www.auto-motor-und-sport.de/fahrberichte/fahrbericht-neuer-byd-e6-china-elektroauto-11173901.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [14] Adam Opel AG, Opel Ampera-e | Das neue Elektroauto | Opel Deutschland, <http://www.opel.de/fahrzeuge/neuheiten-uebersicht/opel-ampera-e.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [15] Gerd Stegmaier, Motor Presse Stuttgart GmbH & Co. KG, Opel Ampera-e (2017): Preis in Norwegen ab 33.416 Euro - AUTO MOTOR UND SPORT, 14.12.2016, <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/opel-ampera-e-elektroauto-2017-500-km-reichweite-765522.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [17] Diplomphysiker Harald Herminghaus, Energiedichte von Benzin, Diesel und Akkus, <http://www.umweltbewusst-heizen.de/verkehr/Elektrofahrzeuge/Batterie/Energiedichte/Akku.html> [Zugriff am 24.01.2017]
- [18] Volkswagen AG, e-Mobilität < Technologie < Volkswagen Deutschland, <http://emobility.volkswagen.de/de/de/private/Technologie/Akkutechnologie.html> [Zugriff am 24.01.2017]



25.01.2017 | Lukas Stichnoth | Wie gut sind die Deutschen Automobilhersteller auf Elektroautos vorbereitet? | Seite 29



Quellen

- [19] Christoph Mähler, freenet.de GmbH, Wie schädlich ist die Produktion und Entsorgung von Batterien?, 26.11.2015, http://www.stromschnell.de/nachhaltigkeit/wie-schaeidlich-ist-die-produktion-und-entsorgung-von-batterien_5117634_5093816.htm [Zugriff am 24.01.2017]
- [20] Daimler AG, Mehr als nur ein neuer Antrieb, Unser Kurs bei der E-Mobilität, 29.09.2016, <https://www.daimler.com/innovation/specials/elektromobilitaet/> [Zugriff am 24.01.2017]
- [23] Nationale Plattform Elektromobilität, Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland, Berlin, Januar 2016, http://nationale-plattform-elektronomobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG2_Roadmap_Zellfertigung_final_rf.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [24] Nationale Plattform Elektromobilität, Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland, Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015, November 2015, http://nationale-plattform-elektronomobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_bar_rf.pdf [Zugriff am 24.01.2017]
- [25] Volkswagen AG, Volkswagen Konfigurator - jetzt Wunschmodell konfigurieren, <http://app.volkswagen.de/ihdc/de/configurator.html#n> [Zugriff am 24.01.2017]
- [26] Tesla Motors, <https://www.tesla.com/sites/default/files/support/model-3-reservations-faq/m3-faq.jpg> [Zugriff am 24.01.2017]
- [27] Volkswagen AG, <http://emobility.volkswagen.de/int/en/private/cars/e-up/components/05/components/0/slides/0/w960d/image.jpg> [Zugriff am 24.01.2017]
- [28] Volkswagen AG, <http://emobility.volkswagen.ch/de/de/private/Autos/eGolf/components/015/w1200d/image.jpg> [Zugriff am 24.01.2017]
- [29] BMW AG, http://www.bmw.de/dam/brandBM/common/newvehicles/i-series/i3/2016/flash/i3_calculator_assets/calculator/img/i3_animate.png [Zugriff am 24.01.2017]
- [30] Daimler AG, http://www.mercedes-benz.de/content/media_library/hq/hq_mpc_reference_site/passenger_cars_ng/new_cars/models/b-class/w242_ev/startpage/mercedes-benz-b-class-electric-drive_w242_start_1000x470_09-2014_jpg.object-Single-MEDIA.download.tmp/mercedes-benz-b-class-electric-drive_w242_start_1000x470_09-2014.jpg [Zugriff am 24.01.2017]
- [31] BYD Company Limited, http://www.byd.com/la/auto/images/e6/preview_video.png [Zugriff am 24.01.2017]
- [32] Adam Opel AG, http://www.opel.de/content/dam/Opel/Europe/master/hq/en/01_Vehicles/Upcoming_Models/Ampera_e/pre-SOS/Opel_Ampera-e_Performance_1024x440_am175_e01_006_mrm.jpg [Zugriff am 24.01.2017]
- [33] Björn Nykvist und Måns Nilsson, 2015: Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles: Figure 1: Cost of Li-ion battery packs in BEV. Springer Nature, <http://www.nature.com/nclimate/journal/v5/n4/full/nclimate2564.html> [Zugriff am 24.01.2017]



25.01.2017 | Lukas Stichnoth | Wie gut sind die Deutschen Automobilhersteller auf Elektroautos vorbereitet? | Seite 30



Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität in Deutschland

– Irrweg oder sinnvolle Strategie für die Zukunft?

Michael Ochs,

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – elenia, Braunschweig, m.ochs@tu-bs.de

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Berichtes wird über die bestehende Elektromobilität in Deutschland und die Maßnahmen der deutschen Bundesregierung zur Förderung dieser informiert. Darauffolgend werden die Schritte ausländischer Staaten beschrieben und mit denen der Deutschen verglichen. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse ausgewertet und mögliche Verbesserungen aufgezeigt.

Abstract

This report informs about the existing electromobility in Germany and the actions taken by the Federal Government in order to boost it. Further the actions of foreign governments are described, compared to the German ones and evaluated. In conclusion possible improvements are shown.

1 Einleitung

Mobilität und Klimaschutz sind Themen, die die Gesellschaft in den nächsten Jahrzehnten immer mehr beschäftigen werden. Durch die zunehmende Elektromobilität und das Bestreben der Bundesregierung, die gesamte Stromerzeugung durch regenerative Energiequellen zu decken, rückt das Ziel der klimafreundlichen Mobilität jedoch immer näher. Um die bisher nur langsam zunehmende Elektromobilität zu fördern, sehen sich Staaten weltweit in der Pflicht spezielle Privilegien und Anreize zu ermöglichen, die im Folgenden beschrieben und ausgewertet werden.

2 Überblick über die Elektromobilität in Deutschland

Seit Mitte 2016 sind in Deutschland etwa 2.900 öffentliche Ladestationen mit 6.500 Ladepunkten installiert, denen circa 60.000 Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb gegenüberstehen. Davon sind etwa 35.000 Fahrzeuge mit reinem Elektromotor und 25.000 Plug-In-Hybride, die über einen Verbrennungs- und Elektromotor verfügen und extern geladen werden können. [1]

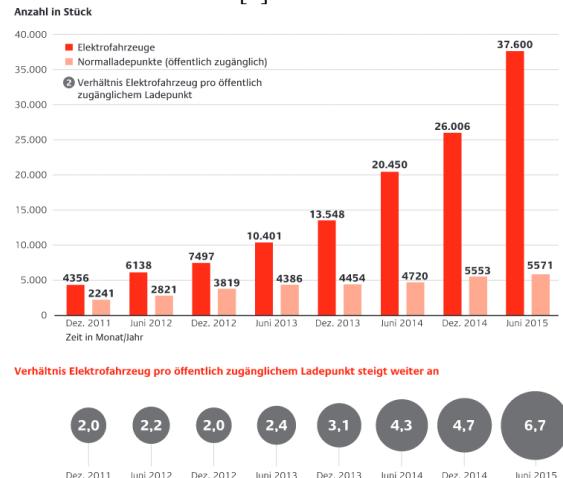


Bild 1 Vergleich der Anzahl an E-Autos mit der Anzahl der verfügbaren Ladepunkte [2]

Wie in Bild 1 zu erkennen ist, nimmt die Zahl der Elektrofahrzeuge im Vergleich zur Anzahl an Ladepunkten sehr viel schneller zu. Die Folge ist ein hohes Verhältnis von Elektrofahrzeug pro Ladepunkt. Mittlerweile liegt dieses bei 9,2 [1]. Nach Einschätzungen der „Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE)“, einem Beratungsgremium der Bundesregierung, sind jedoch ein geringeres Verhältnis von E-Autos pro Ladepunkt anzustreben und damit der Ausbau der Ladeinfrastruktur, um eine konsistente Ladeversorgung innerhalb des Landes sicherzustellen und die Attraktivität für den Verkauf von E-Autos zu erhöhen. Damit einhergehend ist der verstärkte Ausbau von Schnellladepunkten erstrebenswert, um auch bei zukünftig steigenden Reichweiten eine verhältnismäßig kurze Ladezeit zu ermöglichen. [2]

3 Hauptteil

Im Folgenden wird beschrieben, inwiefern die deutsche Bundesregierung und ausländische Staaten die Elektromobilität fördern. Darauffolgend werden die Maßnahmen verglichen, ausgewertet, kritisch hinterfragt und Verbesserungsmöglichkeiten dargelegt.

3.1 Maßnahmen der deutschen Bundesregierung

Die Förderung durch den deutschen Staat besteht aus folgenden Punkten, die im Anschluss genauer erläutert werden:

- Finanzielle Unterstützung der Forschung und Entwicklung
- Auszahlung des *Umweltbonus*
- Kfz-Steuerbefreiung
- Bevorzugung von E-Autos durch das *Elektromobilitätsgesetz*
- Vereinheitlichung der Ladestecker durch die *Ladesäulenverordnung* und Ausbau der Ladestatio-nen

Die Bundesregierung fördert die Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität mit 2,2 Mrd. Euro bis zum Jahr 2017.

Der zu gleichen Teilen von Bundesregierung und deutscher Autoindustrie finanzierte *Umweltbonus* fördert den Kauf von reinen E-Autos mit 4.000€ und den Kauf von Plug-In-Hybriden mit 3.000€. Die Gesamtfördersumme beträgt 1,2 Milliarden Euro und ist begrenzt auf 300.000 Fahrzeuge bis spätestens Mitte 2019. Dabei ist es von den Herstellern abhängig, ob sie teilnehmen und auch der Bund eine Prämie auszahlt.

Eine weitere Maßnahme besteht darin, dass alle E-Autos, die bis Ende 2020 zugelassen werden, für einen Zeitraum von zehn Jahren von der Kfz-Steuer befreit sind. [3]

Das im Juni 2015 in Kraft getretene *Elektromobilitätsgesetz* ermöglicht Kommunen die Bevorrechtigung elektrisch angetriebener PKWs. So dürfen E-Autos hinsichtlich des Parkens, der Nutzung von Busspuren und des Befahrens von gesperrten Zu- und Durchfahrten spezielle Privilegien ermöglicht werden. Die Kennzeichnung etwaiger Fahrzeuge erfolgt über ein „E“ hinter den Zahlen des Nummernschildes. [4]

Die *Ladesäulenverordnung* (LSV) setzt den durch die Europäische Union in Richtlinie 2014/94/EU festgelegten Standard für Ladestecker in deutsches Recht um und trat im März 2016 in Kraft. Sie soll den weiteren Ausbau von Ladesäulen durch genormte Stecker beschleunigen. Durch die Verordnung werden mindestens Stecker des Typs 2 für AC-Laden und Stecker des Typs Combo 2 nach DIN EN 62196 für DC-Laden vorausgesetzt.



Bild 2 links: Typ 2, rechts: Combo 2 [6]

Die Verordnung unterscheidet zwischen Normal- und Schnellladepunkten. Letztere haben eine Ladeleistung von mehr als 22 kW, erstgenannte von höchstens 22 kW. Betreiber von Ladepunkten haben die Pflicht, die Bundesnetzagentur sowohl über die Errichtung als auch, im Falle von Schnellladepunkten, über die Einhaltung der technischen Mindeststandards zu informieren. Es herrscht jedoch keine Nachrüstpflicht, sodass bestehende Ladesäulen unverändert betrieben werden können. [5]

Der Bund stellt im Rahmen des „Regierungsprogramm Elektromobilität“ die oben erwähnten 600 Millionen Euro für den Umweltbonus sowie 300 Millionen Euro für den Ausbau der Ladeinfrastruktur zur Verfügung. Davon werden 200 Millionen in Schnelllade- und 100 Millionen in Normalladestationen investiert. [3]

3.2 Maßnahmen in ausländischen Staaten

Im Ausland wurden folgende Ansätze zur Förderung der Elektromobilität gewählt:

In Frankreich gibt es eine Prämie in Höhe von bis zu 10.000€ für Käufer eines E-Autos, wenn sie dafür ihr altes Dieselfahrzeug eintauschen. Zudem werden private Ladestationen durch Steuergutschriften gefördert. Bisher existieren 12.000 öffentliche Ladestationen, deren Anzahl bis 2018 verdoppelt werden soll. Der Verkauf von Elektroautos stieg im Jahr 2015 um über 60% im Vergleich zum Vorjahr auf 17.200 Fahrzeuge.

Die britische Regierung subventionierte bis März letzten Jahres Elektroautos mit bis zu 11.000€. Seitdem beträgt der Zuschuss maximal 6.000€. Zudem fahren E-Autos in Großbritannien steuerfrei und sind von der Londoner Innenstadtmaut befreit. Aufgeladen werden können sie an insgesamt 4.000 öffentlichen Ladesäulen. Wie in Frankreich wird der Einbau einer hauseigenen Ladesteckdose durch den Staat gefördert.

In den USA ist die Förderung staatenabhängig. So gibt es in Kalifornien Steuergutschriften in Höhe von 2.500€. In Texas hingegen gibt es bisher keine Förderung. Der Verkauf von E-Autos ging in den vergangenen Jahren zurück. Als Hauptgrund dafür wird der sich in den letzten Jahren halbierte Treibstoffpreis gesehen. Der Anteil an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen beträgt weniger als 1%. [7]

Die chinesische Regierung fördert den Kauf von E-Autos mit bis zu 6.000€. Zudem wird der Bau von privaten Ladesäulen vollständig durch den Staat übernommen. E-Autos sind vom, in vielen Großstädten verordnete, einmal wöchentlichen Fahrverbot ausgenommen und werden ausnahmslos von der Zulassungsbehörde genehmigt, im Gegensatz zu Benzin- und Dieselfahrzeugen, deren Kennzeichen in einigen Städten nur durch ein Losverfahren zu erhalten sind. Die Chance dafür liegt bei unter 5%. [8]

Den bisher größten Anteil an neuzugelassenen E-Autos hat Norwegen. 22% haben einen elektrischen Antrieb. Erreicht wurde dies durch ein 2012 gestartetes Förderprogramm der norwegischen Regierung. Dieses ermöglicht den Fahrern von E-Autos die Nutzung der Busspuren, kostenlose Parken, kostenlose Akkuladung, kostenlose Zulassung und MwSt.-Befreiung. 50.000 E-Autos sollten bis 2018 auf den norwegischen Straßen fahren, was schon Anfang 2016 mit mehr als 70.000 weit übertroffen wurde. Aufgrund der enormen Zunahme wird die Steuerbefreiung eingeschränkt, so dass ab 2018 wieder die MwSt. und die halbe Zulassungsgebühr und ab 2020 die volle Zulassungsgebühr gezahlt werden muss. Durch die Steuervorteile sind E-Autos dort günstiger als vergleichbare Modelle mit Verbrennungsmotor. [7]

3.3 Vergleich der Maßnahmen

Die beschriebenen Länder gehen insgesamt einen sehr ähnlichen Weg, jedoch mit unterschiedlichen Ergebnissen. Sie versuchen durch Subventionierung in Form von direkten Prämien oder Steuervorteilen E-Autos für Käufer attraktiver zu machen. Vor allem Norwegen setzt zudem auf die massive Bevorrechtigung von Elektrofahrzeugen, die nach Vorstellung der Regierung mehr als geglückt ist. Natürlich spielen neben den Förderungen der Regierung weitere Faktoren eine Rolle, wie der Wohlstand der Bevölkerung und die Fläche des Landes. In Norwegen sind dafür sehr gute Voraussetzungen gegeben. Die USA hingegen sind ein flächenmäßig großes Land, das eine flächendeckende Elektromobilität außerhalb von Städten erschwert. Der dort günstige Treibstoffpreis trägt seinen Teil zum weiterhin beliebten Verbrennungsmotor bei.

Zur besseren Übersichtlichkeit und in Angesicht des begrenzten Umfangs dieses Berichts werden im Folgenden die Maßnahmen in Deutschland anhand der Maßnahmen der norwegischen Regierung ausgewertet.

3.4 Auswertung und Verbesserungsmöglichkeiten

Der im Juli 2016 gestartete *Umweltbonus* ist bisher nur wenig gefragt. Von den insgesamt 300.000 Fahrzeugen sind bis Anfang Dezember nur etwa 7.400 beantragt worden, was etwa 2,5% der gesamten Förderkapazität entspricht [9]. Das von der Bundesregierung angestrebte Ziel, Deutschland bis 2020 als Leitmarkt mit mehr als einer Million E-Fahrzeugen zu etablieren, scheint bei einer bisherigen Anzahl von etwa 60.000 Fahrzeugen nicht erreichbar. Die Kfz-Steuerbefreiung ist als eher geringer Anreiz zu beurteilen. So ist nach Ablauf der zehn Jahre aufgrund der direkten Emissionsfreiheit der Fahrzeuge ohnehin nur eine geringe Kfz-Steuer zu zahlen [10]. Sowohl der Umweltbonus als auch die Steuerbefreiung wiegen bislang den Aufpreis eines E-Autos, inklusive heimischer Ladestation, im Vergleich zum Verbrenner nicht auf. An dieser Stelle muss definitiv nachgebessert werden. Denkbar wäre eine MwSt.-Befreiung wie in Norwegen.

Die Bevorrechtigungen von E-Autos gemäß *Elektromobilitätsgesetz* sind zu gering und zu unbedeutend als dass sie eine Auswirkung auf die Verkaufszahlen haben, zumal sich viele Kommunen, verständlicherweise, sträuben die Busspuren für E-Autos freizugeben, da dies bei steigender Anzahl eine Behinderung des öffentlichen Nahverkehrs zur Folge hätte [11]. Viel entscheidender sind der Kaufpreis des Fahrzeugs und die Verfügbarkeit von Lademöglichkeiten. Letztere soll durch die *Ladesäulenverordnung* deutlich verbessert werden. Die Standardisierung der Ladestecker birgt jedoch Probleme. So zum Beispiel die Diskriminierung des Automobilherstellers Tesla, der neue, firmeneigene Ladestationen mit dem Steckersystem *Supercharger* nun auch mit den in der LSV geforderten Steckern ausstatten muss. Von der in der EU-Richtlinie gesprochenen Technologieneutralität kann in diesem Fall nicht gesprochen werden. Trotz alledem ist die Standardisierung eine notwendige Maßnahme um einen weiteren Ausbau von Ladesäulen zu beschleunigen, welcher durch

die Bereitstellung der insgesamt 300 Millionen Euro durch den Bund ebenfalls gefördert wird.

Die Maßnahmen der Bundesregierung sind, vor allem in Hinblick auf die der norwegischen Regierung, als bisher unzureichend zu bewerten. Weitere Förderungen wie eine MwSt.-Befreiung, der kostenlose Einbau einer heimischen Ladestation und kostenloses Laden an öffentlichen Ladestationen sind denkbare Optionen.

4 Fazit

Das Beispiel Norwegen zeigt, dass durch Steuervorteile und die massive Bevorrechtigung von E-Fahrzeugen ein enormer Zuwachs dieser möglich ist. Die ersten Schritte für eine Bevorzugung von E-Autos im deutschen Straßenverkehr sind durch das *Elektromobilitätsgesetz* gegeben, wenn auch nur von marginalem Ausmaß. Sowohl die *Ladesäulenverordnung* als auch der *Umweltbonus* sind ein Schritt in die richtige Richtung. Das Vorhaben der Bundesregierung, die *Ladesäulenverordnung II* zu verabschieden, welche das Laden an allen öffentlichen Ladestationen ermöglichen soll, ohne dass ein Vertragsverhältnis zwischen Betreiber und Kunde bestehen muss, dürfte die Attraktivität der Elektromobilität weiter zum Positiven wenden. Mit zunehmender Zahl der Ladesäulen, einem sinkenden Preis und zunehmender Reichweite der Fahrzeuge ist eine flächendeckende Elektromobilität nur eine Frage der Zeit, wobei die beiden zuletzt genannten Voraussetzungen nur bedingt durch den Staat beeinflusst werden können.

5 Literatur

- [1] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserversirtschaft e.V., „Ausbau der öffentlich zugänglichen Ladepunkte“, 30. Juni 2016, [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/BEDA725360A19745C1258022002E7E8E/\\$file/160902_Ausbaustand%20Ladeinfrastruktur.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/BEDA725360A19745C1258022002E7E8E/$file/160902_Ausbaustand%20Ladeinfrastruktur.pdf). [Zugriff am 12.11.2016].
- [2] Nationale Plattform Elektromobilität, „Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland – Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015“, November 2015, http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_barr_bf.pdf. [Zugriff am 12.11.2016].
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Rahmenbedingungen und Anreize für Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastruktur“, 3. Quartal 2016, <https://www.bmwi.de/DE/Themen/Industrie/Elektromobilitaet/rahmenbedingungen-und-anreize-fuer-elektrofahrzeuge.html>. [Zugriff am 14.11.2016].
- [4] Gesetz zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge (Elektromobilitätsgesetz EmoG), 05. Juni 2016, § 3.

- [5] Verordnung über technische Mindestanforderungen an den sicheren und interoperablen Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Elektromobile (Ladesäulenverordnung LSV), 09. März 2016, § 3 Abs. 1 bis 3, § 4 Abs. 1 bis 3, §6.
- [6] Bild zusammengefügt aus: http://www.europarking.de/Cache/GENTNER/10020/stecker-typ-2-menckes_NjY0MDQ2Wg.JPG und http://www.7-forum.com/news/2011/combo2connector_p90085148-b.jpg. [Zugriff am 14.11.2016].
- [7] tagesschau.de, „Wie andere Staaten Elektroautos fördern“, 26. April 2016, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/elektroautos-international-101.html>. [Zugriff am 13.11.16].
- [8] manager magazin, „Elektromobilität: China steigt zum größten Markt für Elektroautos auf“, 26. April 2016, <http://www.manager-magazin.de>
- [9] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, „Elektromobilität (Umweltbonus) – Zwischenbilanz zum Antragstand vom 1. Dezember 2016“, http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/emob_zwischenbilanz.pdf?__blob=publicationFile&v=4. [Zugriff am 1.1.17].
- [10] Deutsches Dialog Institut GmbH, „Überblick über den rechtlichen Rahmen der Elektromobilität – Begleit- und Wirkungsforschung zum Schaufensterprogramm Elektromobilität“, 2. Entwurf, November 2016.
- [11] Zeit Online, „Wenn der Tesla weniger kostet als ein BMW“, 9. Mai 2015, <http://www.zeit.de/mobile/2015-05/elektroauto-norwegen-foerderung>. [Zugriff am 2.1.17].



Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität in Deutschland – Irrweg oder sinnvolle Strategie?

Michael Ochs, 25.01.2017

Agenda

- Einleitung
- Überblick über die Elektromobilität in Deutschland
- Maßnahmen der deutschen Bundesregierung
- Maßnahmen ausländischer Staaten
- Auswertung
- Fazit und Ausblick

Agenda

- Einleitung
- Überblick über die Elektromobilität in Deutschland
- Maßnahmen der deutschen Bundesregierung
- Maßnahmen ausländischer Staaten
- Auswertung
- Fazit und Ausblick

Einleitung



Quelle: nationalgeographic.de

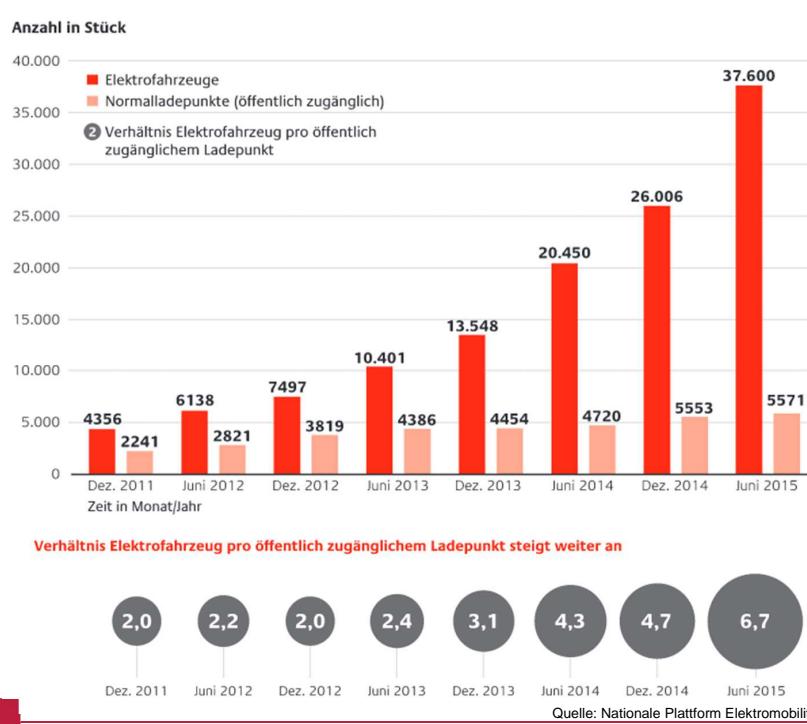


Quelle: kompass.de

Agenda

- Einleitung
- Überblick über die Elektromobilität in Deutschland
- Maßnahmen der deutschen Bundesregierung
- Maßnahmen ausländischer Staaten
- Auswertung
- Fazit und Ausblick

Überblick über die Elektromobilität in Deutschland



Agenda

- Einleitung
- Überblick über die Elektromobilität in Deutschland
- Maßnahmen der deutschen Bundesregierung
- Maßnahmen ausländischer Staaten
- Auswertung
- Fazit und Ausblick



25.01.2017 | Michael Ochs | Förderung der Elektromobilität in Deutschland | Seite 7



Maßnahmen der deutschen Bundesregierung

Steuerliche Vorteile

Elektromobilitätsgesetz

Ladesäulenverordnung

Ausbau der
Ladeinfrastruktur

Umweltbonus



25.01.2017 | Michael Ochs | Förderung der Elektromobilität in Deutschland | Seite 8



Steuerliche Vorteile

- Kfz-Steuer:
 - 2011 bis 2015: zehnjährige Befreiung
 - Seit 2016: fünfjährige Befreiung (nachträgliche Verlängerung auf zehn Jahre)
- Einkommensteuer:
 - Steuerbefreiung für vom Arbeitsgeber gewährte Vorteile für das Laden von privat genutzten E-Fahrzeugen
 - Steuerfreies Aufladen beim Arbeitgeber

Elektromobilitätsgesetz

- Gilt für elektrisch betriebene Fahrzeuge mit Einschränkungen
- Ermöglichung folgender Privilegierungen:
 - (1) Einrichtung von Sonderparkplätzen
 - (2) Befreiung von Parkgebühren
 - (3) Ausnahme von Zu- und Durchfahrtbeschränkungen
 - (4) Freigabe von Busspuren
- Bis Ende 2026 wirksam

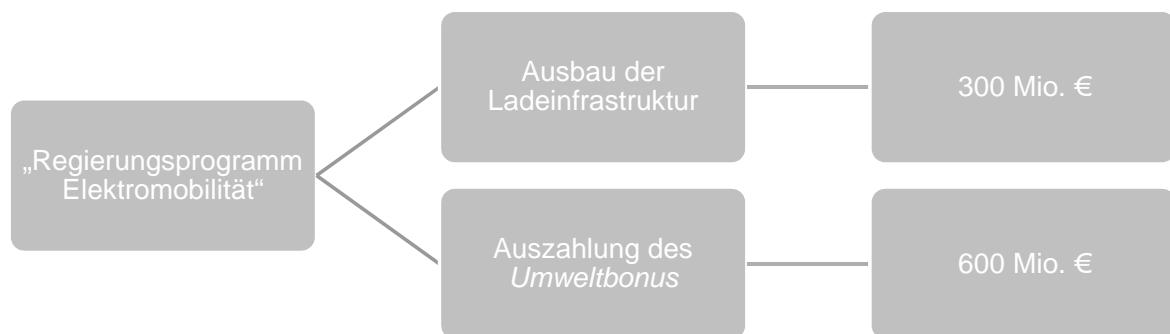
Ladesäulenverordnung

- Normung der Ladestecker: Typ 2 (AC) und Combo 2 (DC)
- Ziel: Beschleunigung des Ausbaus einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur



Quelle: europarking.de, 7-forum.com

Ausbau der Ladeinfrastruktur und *Umweltbonus*



Umweltbonus

Gesamtfördersumme von 1,2 Mrd. Euro

Zu gleichen Teilen finanziert von Bund und Autoindustrie

Begrenzt auf 300.000 Fahrzeuge und maximale Laufzeit bis 2019

4.000€ für reine E-Autos

3.000€ für Plug-In-Hybride



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Michael Ochs | Förderung der Elektromobilität in Deutschland | Seite 13



Agenda

- Einleitung
- Überblick über die Elektromobilität in Deutschland
- Maßnahmen der deutschen Bundesregierung
- Maßnahmen ausländischer Staaten
- Auswertung
- Fazit und Ausblick



Technische
Universität
Braunschweig

25.01.2017 | Michael Ochs | Förderung der Elektromobilität in Deutschland | Seite 14



Maßnahmen ausländischer Staaten

Frankreich

- Prämie bis 10.000€
- Förderung von privaten Ladestationen

Großbritannien

- Prämie bis 6.000€
- Förderung von privaten Ladestationen
- Kfz-Steuerbefreiung

China

- Prämie bis 6.000€
- Kostenloser Bau von privaten Ladestationen
- Gesetzesentwurf: E-Auto-Quote

Maßnahmen ausländischer Staaten

Norwegen

- 22% neuzugelassene E-Autos
- Nutzung von Busspuren, kostenloses Parken, kostenlose Akkuladung
- Kostenlose Zulassung und MwSt.-Befreiung
- 2016: 70.000 E-Autos
- Einschränkungen der Steuerbefreiungen ab 2018

Agenda

- Einleitung
- Überblick über die Elektromobilität in Deutschland
- Maßnahmen der deutschen Bundesregierung
- Maßnahmen ausländischer Staaten
- Auswertung
- Fazit und Ausblick



25.01.2017 | Michael Ochs | Förderung der Elektromobilität in Deutschland | Seite 17



Auswertung

- Geringes Interesse am *Umweltbonus*
 - Nur 3% der bisherigen Fördermenge beantragt
- Kfz-Steuerbefreiung hat nur marginalen Effekt
 - Aufpreis eines E-Autos nicht ausgeglichen
- Elektromobilitätsgesetz von geringer Bedeutung
- Ladesäulenverordnung
 - Diskriminierung der *Supercharger*- und *CHAdeMO*-Anschlüsse
 - „Veröffentlichung“ der Ladesäulen
 - Zukunftsfähigkeit der geforderten Stecker fraglich



25.01.2017 | Michael Ochs | Förderung der Elektromobilität in Deutschland | Seite 18



Agenda

- Einleitung
- Überblick über die Elektromobilität in Deutschland
- Maßnahmen der deutschen Bundesregierung
- Maßnahmen ausländischer Staaten
- Auswertung
- Fazit und Ausblick

Fazit und Ausblick

- Bisherige Förderungsmaßnahmen haben nicht gewünschten Effekt
- Massivere Bevorrechtigungen und finanzielle Anreize sind notwendig
 - Beispiel: Norwegen
- Zukunft:
 - Ladesäulenverordnung II
 - Ladesäulen-Netz der Autohersteller

Vielen Dank!

Quellenverzeichnis

- [Folie 1]: <https://ecomento.tv/wp-content/uploads/2014/03/Elektroauto-Ladestationen.jpg>. [Zugriff am 16.1.2017].
- [Folie 4]: <http://www.nationalgeographic.de/thumbnails/mainpicture/31/27/02/die-zukunft-der-mobilitaet-22731.jpg> und http://www.kompass.de/wp-content/uploads/2016/01/Artikel_News_10-Gr%C3%BCnde-regelm%C3%A4%9Fig-in-die-Natur-zu-gehen_01.jpg. [Zugriff am 19.1.2017]
- [Folie 6]: Nationale Plattform Elektromobilität, „Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland – Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015“, November 2015, http://nationale-plattform-elektronomobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG3_Statusbericht_LIS_2015_barr_bf.pdf. [Zugriff am 12.11.2016].
- [Folie 9]: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Infodienst/2016/05/2016-05-18-elektronomobilitaet/2016-05-18-elektronomobilitaet.html>. [Zugriff am 16.1.2017].
- [Folie 10]: Gesetz zur Bevorrechtigung der Verwendung elektrisch betriebener Fahrzeuge (Elektromobilitätsgesetz EmoG), 05. Juni 2016, § 3.
- [Folie 11]: Verordnung über technische Mindestanforderungen an den sicheren und interoperablen Aufbau und Betrieb von öffentlich zugänglichen Ladepunkten für Elektromobile (Ladesäulenverordnung LSV), 09. März 2016, § 3 Abs. 1 bis 3, § 4 Abs. 1 bis 3, § 6.; http://www.europarking.de/Cache/GENTNER/10020/stecker-typ-2-mennekes_NjY0MDQ2Wg.JPG und http://www.7-forum.com/news/2011/combo2connector_p90085148-b.jpg. [Zugriff am 14.11.2016].

Quellenverzeichnis

- [Folie 12/13]: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Rahmenbedingungen und Anreize für Elektrofahrzeuge und Ladeinfrastruktur“, 3. Quartal 2016, <https://www.bmwi.de/DE/Themen/Industrie/Elektromobilitaet/rahmenbedingungen-und-anreize-fuer-elektrofahrzeuge.html>. [Zugriff am 14.11.2016].
- [Folie 15/16]: tagesschau.de, „Wie andere Staaten Elektroautos fördern“, 26. April 2016, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/elektroautos-international-101.html>. [Zugriff am 13.11.16]; manager magazin, „Elektromobilität: China steigt zum größten Markt für Elektroautos auf“, 26. April 2016, <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/elektromobilitaets-prognosen-chinesen-werden-zu-elektroauto-fans-a-1088850.html>. [Zugriff am 13.11.2016].
- [Folie 18]: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, „Elektromobilität (Umweltbonus) – Zwischenbilanz zum Antragstand vom 1. Januar 2017“, http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/emob_zwischenbilanz.pdf?__blob=publicationFile&v=4. [Zugriff am 23.1.2017].

Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen

Protection concepts and fault detection of medium-voltage grids

Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen, Oliver Thiel,
Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – elenia, Braunschweig, o.thiel@tu-bs.de

Kurzfassung

In dieser Seminararbeit werden Schutzkonzepte und die Fehlersuche im Störungsfall für Mittelspannungsnetze vorgestellt. Dabei liegt der Focus nicht nur auf Wechselstromnetze, sondern ebenfalls auf Gleichstromnetze, welche vermehrt das Interesse der Forschung wecken.

Abstract

This seminar work deals with protection concepts and troubleshooting in case of breakdowns in medium-voltage grids. The work is not only focusing ac grids but dc grids which has increased the interest of research.

1 Einleitung

Unter „Mittelspannung“ wird der Spannungsbereich zwischen 10kV und 20kV Betriebsspannung verstanden, allerdings wird in der elektrischen Energietechnik eine Hochspannung von 1kV bis zu 52kV ebenfalls unter dem Begriff Mittelspannung geführt. Mittelspannungsnetze stellen überwiegend Verteilernetze dar, welche ihr jeweils untergelagtes Niederspannungsnetz durch Verteilerstationen versorgen.

Die Energiewende führt dazu, dass das Mittelspannungsnetz für die Energieversorgung in Städten immer mehr an Bedeutung gewinnt. Aufgrund der wachsenden Zahl an Solaranlagen, Windkraftanlagen und kleinen Biokraftwerke steigt die Zahl der Energieerzeuger, welche direkt in das Mittelspannungsnetz einspeisen. Hinsichtlich der dezentralen Einspeisung ändert sich der klassische Leistungsfluss vom Hochspannungsnetz zum Verbraucher [1].

Gerade das Einbringen von Strömen regenerativer Energiequellen ist mit diversen Schwierigkeiten verbunden, da letztere durch äußere Faktoren beeinflusst werden können. So können kurzzeitige Spannungseinbrüche in den untergelagerten Netzen zur Abschaltung von Schaltanlagen führen. Steigt die Anzahl der abgeschalteten Erzeugungsanlagen, kann dadurch die Systemstabilität gefährdet werden [1]. Hinzu kommt die Deregulierung des Strommarktes, welche eine der Ursachen für die zunehmende Zusammenschaltung von Netzteilen ist.

Weiterhin rücken Gleichstromnetze immer mehr in den Fokus. Diese haben viele Vorteile gegenüber Wechselspannungsnetzen. Mittelspannungen im DC Bereich finden in Straßenbahnen, Zügen und Bordnetzen von Schiffen, aber auch vermehrt im „klassischen“ Energienetzen, Anwendung [2]. So können beispielsweise Netz- und Serveranbindungen in Industriekomplexen und IT- Gebäuden energieeffizienter genutzt werden. Denn viele Verbraucher benötigen Gleichstrom und müssen diesen erst durch Leistungselektronik umwandeln [3]. Jedoch erfordern Gleichstromnetze besondere

Schutzmaßnamen, gerade was die Trennung von Lasten betrifft [4].

Sollte es dennoch zu einem Fehlerfall kommen und Teile des Netzes ausfallen, muss die Reaktivierung so schnell wie möglich vorgenommen werden. Hierfür müssen Fehler schnell und gezielt lokalisiert werden, denn Kurzschlüsse verursachen im Bereich der Mittelspannung hohe Temperaturen. Durch den entstehenden Lichtbogen sind die Komponenten eines Netzes im Fehlerfall hohen mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt [5].

In dieser Seminararbeit werden verschiedene Schutzkonzepte und Methoden der Fehlerortung vorgestellt, sowohl für Wechsel- als auch für Gleichspannung.

2 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen für diese Seminararbeit basieren auf elementaren Kenntnissen der Elektrotechnik. Im folgenden Absatz wird auf die Unterschiede von Trennschaltern eingegangen, da diese für Schutzsysteme eine wichtige Rolle spielen. Weiterhin wird auf die Definition eines Fehlerzustands eingegangen.

Nach DIN EN 50160 wird als Spannungseinbruch und einem daraus resultierenden Fehler ein Rückgang der Spannung auf einen Wert zwischen 1 % und 90 % der Versorgungsspannung verstanden. Bei einem Wert unter 1 % der Versorgungsspannung wird von einer Spannungsunterbrechung gesprochen [6].

Das Unterbrechen eines Gleichstromnetzes ist komplexer als das eines Wechselstromnetzes, da es keinen, auf der Frequenz beruhenden, Nulldurchgang gibt. Deshalb wird das Prinzip der Kurzschlussstrombegrenzung angewandt. Bei einem Netz mit der Induktivität L , einem Widerstand R und einer Quelle U_n entsteht beim Trennen ein Lichtbogen mit der Bogenspannung $u_B(t)$ [7].

$$L \frac{di(t)}{dt} + R_i(t) + u_B(t) = U_N$$

DC-Schaltgeräte müssen einen Stromnulldurchgang selbst auslösen. Sie verlängern oder kühlen den Lichtbogen z.B. durch Löschebleche bis der Spannungsbedarf $u_B(t)$ zu groß wird und erlischt. Dabei beträgt die Lichtbogendauer

$$t_B \approx \sqrt{\frac{2 U_n L}{E v R}}$$

Mit $u_B = E * l$ und $l = v * t$ [7].

Wechselstromschalter verfügen aufgrund der Frequenz über einen Nulldurchgang. So werden aufwendige Schaltungen vermieden. Jedoch ist die Schaltzeit an die Frequenz gebunden. Sie beträgt bei einer Frequenz von 50 Hz, mit $\frac{1}{2}T = 0,01\text{s}$ (mit $f = \frac{1}{T}$). Für schnellere Schaltvorgänge muss auch hier auf die Kurzschlussstrombegrenzung zurückgegriffen werden.

3 Schutzkonzepte und Fehlerortung

3.1 Struktur des Mittelspannungsnetzes

Mittelspannungsnetze sind Verteilernetze mit einer Ring- oder Strahlnetzstruktur. Letztere ist in Abb. 1 links dargestellt. Hierbei verlaufen die Leitungen von der Einspeisung in das Netz bis zum letzten Verbraucher, ähnlich wie die Zweige eines Baumes. Der Nachteil solcher Netze ist ihr hoher Grad an Verzweigung, was die Lokalisierung von Fehlern erschweren kann. Tritt ein Fehler auf kann ein Teil des Netzes weiter versorgt werden. Die Ringnetzstruktur, rechts in Abb. 1 gezeigt, ist entsprechend ringförmig aufgebaut. Dies bietet den Vorteil, dass jeder Verbraucher über eine eigene Übergabestation versorgt wird und so weniger Verzweigungen notwendig sind. Der Nachteil dieser Struktur ist, dass im Falle eines Fehlers auf dem Ring, dieser getrennt werden muss. Somit ist eine Teilversorgung der restlichen Verbraucher nicht gesichert. In der Praxis wird stellenweise eine Kombination aus beiden Netzstrukturen angewandt.

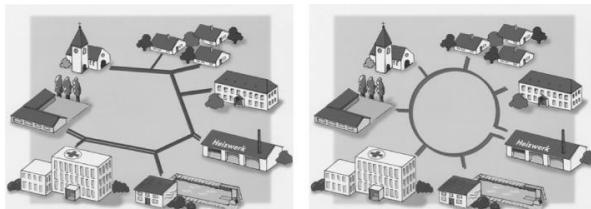


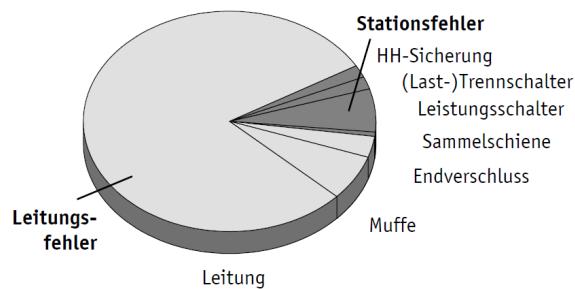
Abb. 1: Links: Strahlnetz

Rechts: Ringnetz [6]

3.2 Schutzkonzepte

Um das Netz besser schützen zu können, ist es wichtig die Arten möglicher auftretender Fehler und deren Wahrscheinlichkeit zu kennen. Dazu wurden in der Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik vom VDN (Verband der Netzbetreiber) Daten auf Verbandsebene

gesammelt, welche exemplarisch für diese Arbeit ausgewertet werden. Abb. 2 zeigt die Wahrscheinlichkeiten einzelner Fehlerarten, wobei diese in Leitungsfehler und Stationsfehler farblich unterteilt werden.



Anteil der Betriebsmittel an Fehlern in Mittelspannungsnetzen

Abb. 2: Fehlerwahrscheinlichkeit unterteilt in Leitungs- und Stationsfehler[6]

Wie in Abb. 2 dargestellt, sind die am häufigsten auftretende Fehlerarten Leitungsfehler, welche sich in Kurz- und Erdschlüsse aufteilen. Leitungen lassen sich nur mühevoll durch neue Innovationen sicherer gestalten. Es besteht die Möglichkeit, die Isolation zu verdicken und damit die Robustheit gegenüber Kurz- und Erdschlüssen zu erhöhen. Dies ist in der Praxis, aufgrund des nachteiligen Kostennutzenverhältnisses, nicht praktikabel. An Freileitungen können die Umwelteinflüsse nicht gänzlich unterdrückt werden, weshalb auch hier weiterhin mit einer erhöhten Fehlerwahrscheinlichkeit zu rechnen ist. Leitungsfehler lassen sich hier nur mit regelmäßigen Wartungen und Kontrollen zuverlässig minimieren.

Soll geprüft werden, ob eine Leitung durch Umwelteinflüsse beschädigt worden ist, kommt dafür in der Praxis ein Distanzschutzgerät zum Einsatz. Es kontrolliert im laufenden Betrieb die Netzspannung als auch den Strom und berechnet daraus die resultierende Leitungsimpedanz. Letzte ist zusätzlich im fehlerfreien Fall ebenso wie die Erdungsimpedanz im Gerät gespeichert. Je nach Bodenbeschaffenheit und Leiterquerschnitt variieren diese beiden Werte. Im Fall einer Beschädigung der Leiter ändert sich die Impedanz. Durch die Einteilung in verschiedene Impedanzzonen kann eine grobe Fehlerortung erfolgen. Wird ein Fehler detektiert, wird mittels Fernwirktechnik der Netzabschnitt getrennt. Weiterhin existierten weitere, im Folgenden aufgelistete Methoden das Netz im laufenden Betrieb zu überwachen:

- Unabhängiger Maximalstromzeitschutz (UMZ): Der UMZ überwacht den Strom und löst bei überschreiten eines eingestellten maximalen Stromes aus
- UMZ-R Schutz: Der UMZ-R Schutz überwacht zusätzlich die Spannung und kann so die Richtung des Fehlerortes bestimmen
- Abhängiger Maximalstromzeitschutz (AMZ): Der AMZ hat eine, vom Kurzschlussstrom abhängige, Auslösekennlinie.

- Frequenzschutz: Der Frequenzschutz überwacht die Netzfrequenz.

Treten Kurz- oder Erdschlüsse auf muss das Netz vor dem Kurzschlussstrom geschützt werden. Dieser kann ein Vielfaches des Nennstromes erreichen und durch thermische und mechanische Auswirkungen schwere Schäden verursachen. Durch den hohen Kurzschlussstrom entsteht am Schalter ein Lichtbogen der trotz geöffneter Schalterstellung bestehen bleibt. Hierfür werden Leistungsschalter benötigt, die den Stromfluss abschalten können. Gewöhnliche Lasttrennschalter verfügen nicht über die nötige Isolation, um den hohen Strom lange zu halten. Zusätzlich werden Schmelzsicherungen, so genannte Hochspannungs- Hochleistungssicherungen (HH-Sicherungen) eingesetzt, um besonders die Trafostationen zu schützen.

3.3 Fehlerortung

Um Netzabschnitte schnellstmöglich wieder versorgen zu können, ist eine effektive Fehlerlokalisierung notwendig. Im vorherigen Kapitel wurde speziell das Distanzschutzgerät vorgestellt, um eine grobe Fehlerortung zu realisieren. In der Abb. 3 sind Beispielhaft die Impedanzen für ein Niederspannungsnetz aufgetragen. Hierbei ist zu erkennen, wie die einzelnen Impedanzzonen aufgeteilt und jeweils mit einem Trennschalter gesichert sind.

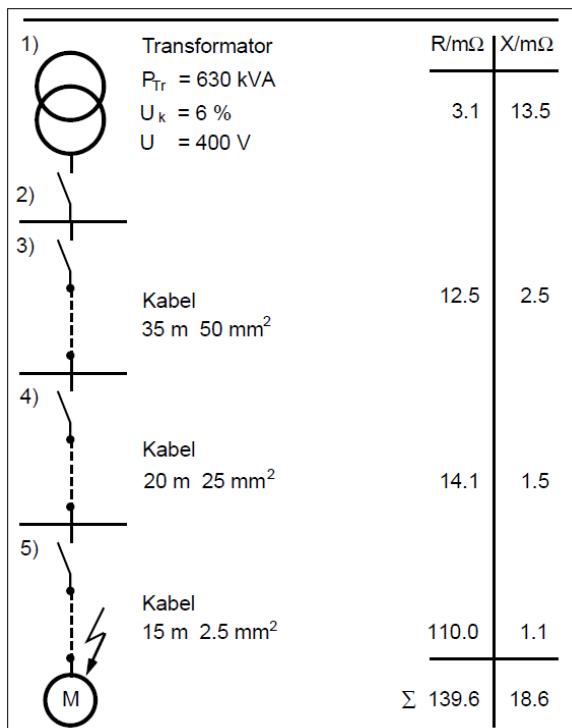


Abb. 3: Beispiel für Leitungsimpedanzen im Niederspannungsbereich [8].

So eine Ortung ist auf den durch Schutzschalter abgetrennten Bereich begrenzt. Um den Fehler weiter eingrenzen zu können, werden Kurzschlussanzeiger

eingesetzt. Diese müssen, sofern sie nicht mit Fernmeldetechnik ausgestattet sind, durch Personal kontrolliert werden. Um möglichst schnell Fehler zu finden, werden Rechnergestützt die effektivsten Routen den Technikern vorgeschlagen. Falls Fernmeldetechnik verbaut ist, werden die Informationen in der Netzteilstelle zusammen getragen und gezielt ein Team zum Fehlerort ausgesendet.

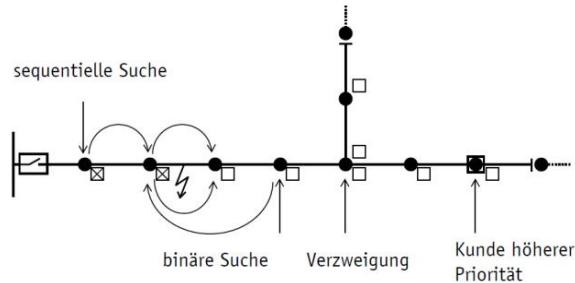


Abb. 4: Auswahl der Anfahrtorte mit Kurzschlussanzeigern [6].

Sind keine Kurzschlussanzeiger verbaut oder zeigen diese ein falsches Ergebnis an, muss eine neue Ortung erfolgen. Diese wird mit einer Impedanzmessung, ähnlich wie beim Distanzschutzgerät, durchgeführt. Hierbei wird nicht das ganze Netz, sondern nur das betroffene Teilstück betrachtet. Deshalb ist bei einer erneuten Messung die Ortung präziser. Eine solche Messung wird mit einem Kurbelinduktor oder einem digitalen Gerät durchgeführt. Bei Überlandleitungen wird zusätzlich eine Sichtkontrolle durchgeführt.

4 Zusammenfassung und Fazit

Mittelspannungsnetze sind Verteilernetze, deren Bedeutung vermehrt in den Vordergrund rückt. Sie weisen eine Ring- oder Strahlnetzstruktur auf und sind meist sehr verzweigt. Diese Netze gänzlich zu schützen, ist eine bislang unmögliche Aufgabe. Die meisten Fehler entstehen auf den Leitungen selbst, weshalb eine ständige Überwachung mittels Distanzschutzgerät wichtig ist. Ebenso wichtig sind ausreichende Kontrollen der Kabel und Übergabestationen. Um das Netz vor Kurzschlägen zu schützen, werden Leistungsschalter verwendet. Diese isolieren den fehlerhaften Netzabschnitt vom Netz. Um Trafostationen vor den thermischen und mechanischen Auswirkungen zu schützen werden, Hochspannungs-Hochleistungssicherungen eingesetzt.

Aufgrund der oftmals verzweigen Struktur von Mittelspannungsnetzen wird eine Fehlerortung erschwert. Über ein Distanzschutzgerät kann eine grobe Ortung erfolgen. Die genaue Lokalisierung erfolgt entweder über ferngemeldete Kurzschlussanzeiger oder durch entsprechendes Personal. Für die personelle Ortung wird der optimal kürzeste Weg durch die Netzteilstelle vorgegeben.

5 Literatur

- [1] FNN-Studie Verhalten im Fehlerfall (www.vde.com/de/fnn/themen/sicherer-betrieb-dez/studien/studie-verhalten-im-fehlerfall, 14.10.2014)
- [2] Neues aus der Welt der Gleichspannung und des Gleichstromes, (www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/ees_ega/Dateien_fuer_Download/Vortrag_Dakks_Professor_Berger_06032014.pdf, 03.04.2014)
- [3] Die Zukunft gehört dem Gleichstrom, (www.welt.de/wissenschaft/article111446330/Die-Zukunft-gehoert-dem-Gleichstrom.html, 24.11.2012)
- [4] Gleichstromschalter trennen Lasten. (www.forschungs-stromnetze.info/projekte/gleichstromschalter-trennen-lasten/, 09/2014)
- [5] Ein hybrides Schaltsystem für Mittelspannung zur strombegrenzenden Kurzschlussunterbrechung (Prof. Dr. K. Fröhlich, Prof. Dr. J. Hügel, 2001)
- [6] Technischer Bericht 302, AiF-Forschungsvorhaben Nr.14446N, Januar 2008
- [7] https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/ees_ega/Dateien_fuer_Download/Vortrag_Dakks_Professor_Berger_06032014.pdf
- [8] Grundlagen Leistungsschalter, Allen-Bradley-Rockwell Automation



[1]

Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen

Oliver Thiel, 13.02.2017

Agenda

- Einleitung
- Das Mittelspannungsnetz
- Schutzkonzepte
- Fehlerdetektion
- Zusammenfassung



Agenda

- Einleitung
- Das Mittelspannungsnetz
- Schutzkonzepte
- Fehlerdetektion
- Zusammenfassung

Einleitung

Energienetze gewinnen immer mehr an Bedeutung!
Aber warum?



Energiewende

- Dezentrale Einspeisung in das Netz
- Ausbau der Netze
- Umstellung auf Gleichstrom in Hoch- und Niederspannungsnetzwerken

Neue Technologien

- Effizienz
- Sicherheit
- Geschwindigkeit
- Vernetzung

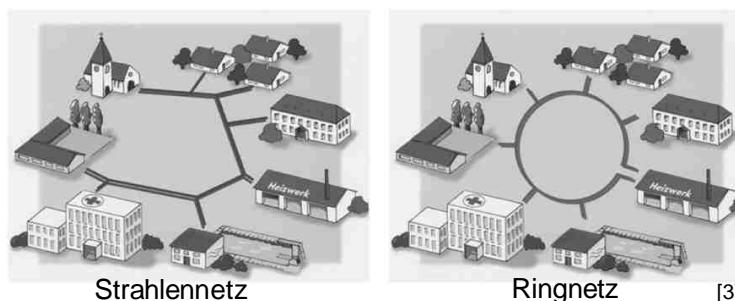
[2]

Agenda

- Einleitung
- Das Mittelspannungsnetz
- Schutzkonzepte
- Fehlerdetektion
- Zusammenfassung

Was sind Mittelspannungsnetze?

- Mittelspannungsnetze sind Verteilernetze mit einer Ringnetz- oder Strahlennetzstruktur
- Übergang von Hochspannungsnetzen zu Niederspannungsnetzen
- Spannungen von 10kV und 20kV in den „klassischen“ Netzen
- Allgemeiner Spannungsbereich von 1kV bis 52kV



AC Netze

- Wechselstromnetze (AC-Netze) werden mit 10kV, manchmal auch mit 20kV und 50Hz betrieben
- AC Netze haben eine Länge von 1km bis 100km
- Verteilernetze für Städte und Kommunen
- Industriegebiete haben oft eigene Mittelspannungsnetze
- Viele Trafostationen mit Übergängen zum Niederspannungsnetz
- Sehr verzweigt
- Einspeisung von Windkraftanlagen, Biokraftwerke, BHKWs, PV-Anlagen etc

DC Netze

- Spannungsbereich meist unter 10kV
- Gleichstromnetze in der Mittelspannungsebene werden in den kommenden Jahren erforscht (RWTH Aachen und Industriepartner)
- Gleichstromnetze werden zunächst in der Hochspannungs- und Niederspannungsebene eingesetzt → Mittelspannungsebene auf längere Sicht keine Umstellung
- Bahnstromsysteme mit Spannungen von 1kV bis 6kV (Oberleitungen und Stromschiene)
- Gleichstromsysteme mit ~9kV auf elektrisch betriebenen Schiffen teil der aktuellen Forschung

Agenda

- Einleitung
- Das Mittelspannungsnetz
- Schutzkonzepte
- Fehlerdetektion
- Zusammenfassung



Schutzkonzepte

Fehlerprävention! (Wartung und Kontrollen, Impedanzmessung im Normalbetrieb)



1. Kurzschluss [4]

Welche Fehler können auftreten?

Kurzschluss

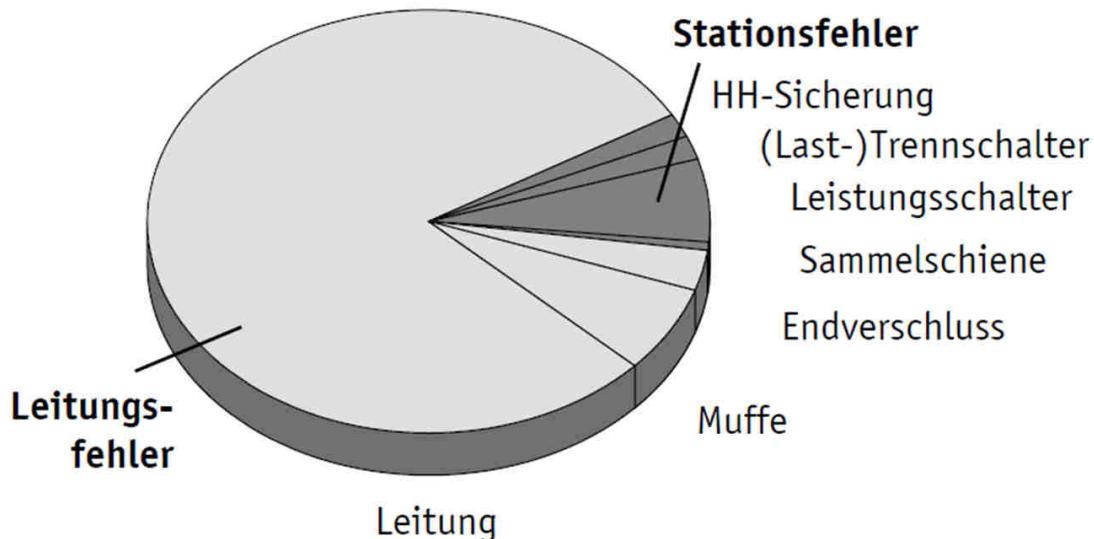
Erdschluss



2. Erdschluss [5]



Fehlerwahrscheinlichkeit



Anteil der Betriebsmittel an Fehlern in Mittelspannungsnetzen

[6]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 11



Schutzkonzepte

Distanzschutzgerät

- Ermittlung der Impedanz, $Z = \frac{U}{I}$
- Fehlerrichtung kann bestimmt werden durch Einteilung in Impedanzzonen
- gestaffelte Auslösezeiten

Unabhängige Maximalstromzeitschutz (UMZ-Schutzgerät)

- Löst beim Überschreiten eines Maximalstromes aus
- Fehler nahe des Einspeiseortes haben die längste Schaltzeit

UMZ-R Schutz

- Spannungs- und Stromüberwachung
- Fehlerrichtung kann bestimmt werden

Abhängige Maximalstromzeitschutz (AMZ-Schutz)

- Auslösezeit ist eine Funktion des Fehlerstromes



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 12



Hochspannungs-Hochleistungs-(HH)Sicherung



[7]

- Schmelzsicherung
- Schützen Verteileranlagen von den Auswirkungen von Kurzschlägen
- Spannungsbereich von 6kV bis 38,5kV

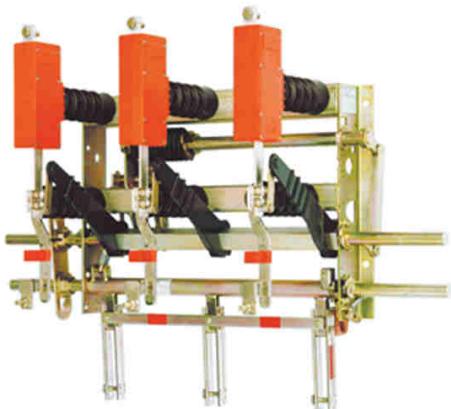


Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 13

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Lasttrennschalter



- Zu- und abschalten von Netzabschnitten
- 3 Phasen Schalter
- 630A bis 1250A
- Spannungsbereich von 12kV bis 38,5kV

[7]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 14

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Leistungsschalter

- Zum Schalten von Netzabschnitten im Fehlerfall
- 3 Phasen Schalter
- Lichtbogenlöschung durch
 - Nullpunktłösung (Nicht für DC)
 - Kurzschlussstrombegrenzung
- Spannungsbereich von 12kV bis 38,5kV
- 630A bis 40kA



[7]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 15

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Agenda

- Einleitung
- Das Mittelspannungsnetz
- Schutzkonzepte
- Fehlerdetektion
- Zusammenfassung



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 16

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Fehlerdetektion

Impedanzmessung während Schutzzanregung

- Impedanz im Normalzustand wird mit aktueller Impedanz verglichen
- Fehlerbestimmung: Kurzschluss, Erdschluss etc
- Fehlerimpedanz wird mit Auslösekennlinien des Distanzschutzrelais verglichen

→ Zeitstaffelung zur groben Ortung aufgrund inhomogener Leitungstypen

- Elektromagnetische Kurzschlussanzeiger einphasig auf jedem Leiter
- Durch Fernmeldetechnik kann der Netzabschnitt genauer lokalisiert werden

→ Hoher Grundaufwand und hohe Betriebsmittelzahl, daher nicht flächendeckend

Fernsteuer- Fernmeldetechnik

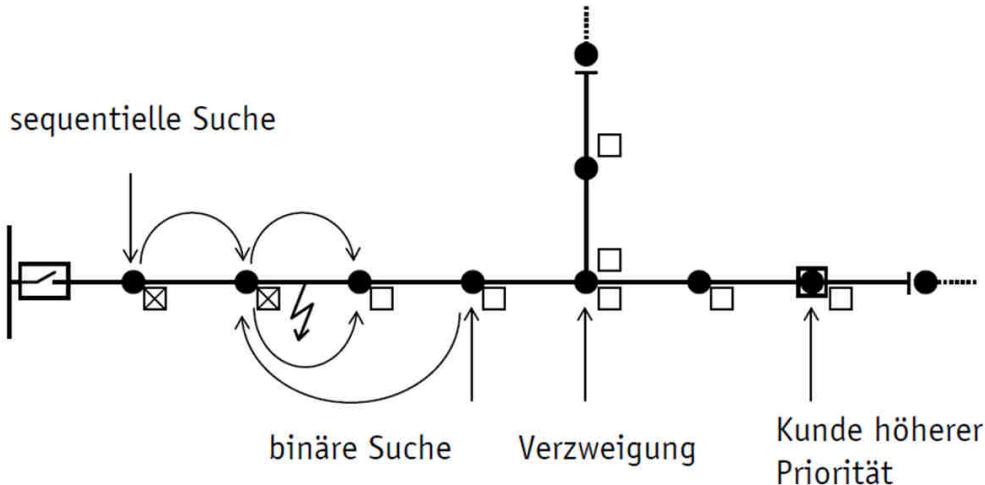
- Informationen werden in der Station ausgewertet und an die Netzeitstelle übermittelt
- Motor- oder federgetriebene Leistungsschalter können durch Fernwirktechnik geschaltet werden
- HS/MS-Umspannstationen sind i.d.R. mit Fernwirktechnik ausgestattet, sodass im Fehlerfall die Auslösung ferngemeldet wird
- Sogn. Ortungsschaltungen zur Einschränkung des Suchbereichs



[8]

Personelle Ortung

- Überprüfen der Kurzschlussanzeiger durch Techniker
- Sichtkontrollen an Überlandleitungen



Auswahl der Anfahrorste

[6]



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 19

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Mögliche Fehler

- Falschmessung, Fehlmessung → erhebliche Abweichungen möglich
- Fehlverhalten der Kurzschlussanzeiger
 - Nichtauslösen eines Anzeigers
 - Falschauslösen eines Anzeigers
- Bei fehlender Kurzschlussanzeiger erneute Prüfung der Fehlerrichtung (z.B. Kurbelinduktor)



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 20

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Agenda

- Einleitung
- Das Mittelspannungsnetz
- Schutzkonzepte
- Fehlerdetektion
- Zusammenfassung



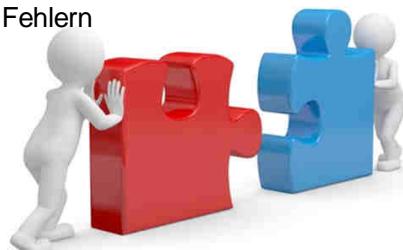
Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 21

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Zusammenfassung

- AC-Mittelspannungsnetze sind Verteilernetze mit 10kV bis 20kV Betriebsspannung
- DC-Netze gewinnen vermehrt an Bedeutung
- Ausbau der Netze durch vermehrt dezentrale Einspeisung
- UMZ, AMZ und Distanzschutzgeräte zeigen Erd- und Kurzschlüsse an
- Leistungs- und Lastenschalter
- Fernmelde und Fernwirktechnik zur Lokalisierung von Fehlern



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 22

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Fragen?



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 23

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Vielen Dank



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 24

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen

Bildverzeichnis

- [1]: <https://www.ewe-netz.de/ueber-uns/service/portraet-stromnetz>
- [2]: <https://www.ekson.ch/nachrichten-detail/energiewende-fuer-viele-noch-ein-fremdwort.html>
- [3]: <http://www.energy-mag.com/nahwaermenete-fuer-kommunen-nutzen/>
- [4]: http://www.rnz.de/nachrichten/mosbach_artikel,-Mosbach-Ein-Kurzschluss-in-der-Trafostation-war-schuld-am-Stromausfall-_arid,73715.html
- [5]: <http://www.augsburger-allgemeine.de/landsberg/Stromausfall-am-spaeten-Abend-id30941787.html>
- [6]: Technischer Bericht 302, Ein Werkzeug zur Optimierung der Störungsbeseitigung für Planung und Betrieb von Mittelspannungsnetzen
- [7]: <http://www.driescher.de>
- [8]: <http://www.minck-elekrotechnik.de/elektrotechnik/elektro-u-schaltanlagen.html>



Technische
Universität
Braunschweig

13.02.2017 | Oliver Thiel | Schutzkonzepte und Fehlersuche in Mittelspannungsnetzen | Seite 25

