



Technische  
Universität  
Braunschweig



# SEMINAR

## STUDIENSEMINAR FÜR ELEKTRISCHE ENERGIESYSTEME

Ergebnisberichte Teil 1

Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

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

Sommersemester 2016

**Braunschweig, 30.06.2016**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zeitplan</b>	<b>2</b>
Li - Synchrongeneratoren und ihr Verhalten am Netz . . . . .	4
Bericht . . . . .	4
Präsentation . . . . .	8
Wagner - Stand und zukünftige Entwicklung der installierten elektrischen Speicherkapazität in Deutschland . . .	19
Bericht . . . . .	19
Präsentation . . . . .	22
Wolf - Bedeutung grenzübergreifenden Leistungsflusses . . . . .	33
Bericht . . . . .	33
Präsentation . . . . .	37
Reinhardt - Was bringt der Stromspeicher von Tesla? . . . . .	47
Bericht . . . . .	47
Präsentation . . . . .	50
Messmer - Lastprognoseverfahren im Bereich von Wohnquartieren . . . . .	59
Bericht . . . . .	59
Präsentation . . . . .	62
Lehmker - Netzleittechnik für Offshore-Windparks . . . . .	82
Bericht . . . . .	82
Präsentation . . . . .	85
Gitin - Vergleich von Antriebskonzepten für Hybridfahrzeuge . . . . .	96
Bericht . . . . .	96
Präsentation . . . . .	100
Claaßen - Sicherheitsmechanismen in einem Lithium-Ionen Batteriesystem . . . . .	115
Bericht . . . . .	115
Präsentation . . . . .	119

## Zeitplan am 30.06.2016 im Seminarraum (elenia)

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



# Synchrongeneratoren und ihr Verhalten am Netz

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

## Kurzfassung

Dieser Bericht wird auf die Erforschung im Bereich von Synchrongeneratoren und ihrem Verhalten am Netz eingegangen. Hierzu zählt der Aufbau eines Synchrongenerators, die Realisierung der Spannungs- und Frequenzregelung für den Transportbedarf ins Netz, das Betriebsverhalten von Synchrongeneratoren und die Steuerung der Stabilität von Elektroenergiesystemen. Der Bericht umfasst folgende Punkte: Blindleistungskompensation, Erregungsverfahren bei unterschiedlichem Betriebsverhalten sowie die Stabilisierung der Netzfrequenz. Ziel ist die Darstellung der Funktionsweise von Synchrongeneratoren und das Verhalten von Synchrongeneratoren am Netz.

## Abstract

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

## 1. Einleitung

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

## 2. Theoretische Grundlagen

**Wirkungsweise von Synchrongeneratoren:** Bei konstanter Drehzahl bleibt der magnetische Fluss zwischen Ständer und Läufer konstant und der gleichstromerregte Läufer erzeugt somit im Ständerwicklungssystem dreiphasige Spannungen. [1]

$$\underline{U}_S = \underline{U}_P - jX \cdot \underline{I}_S \quad (2.1)$$

Davon  $U_S$ : Netzspannung  $X$ : synchrone Reaktanz  
 $I_S$ : Ständerstrom  $U_P$ : Polradspannung

**Zeigerdiagramm:** Das Betriebsverhalten von Synchrongeneratoren, das sich durch übererregten kapazitiven Betrieb, untererregten induktiven Betrieb und rein ohmschen Belastung charakterisieren lässt, lässt sich anhand eines Zeigerdiagrammes für jeden Betriebspunkt beobachten. Durch den Lastwinkel  $\beta$  und den

Phasenwinkel  $\phi$  des Zeigerdiagramms können stationäre Betriebszustände bestimmt werden.

**Blindleistung:** Die meisten ans Netz angeschlossenen Verbraucher nutzen magnetische Felder zur Umsetzung der Energie. Durch diese Magnetfelder treten die von der Spannung erzeugten Ströme nicht gleichzeitig auf. Die Ströme eilen der Spannung nach und sind zeitlich verzögert. Dadurch entsteht ein Phasenverschiebungswinkel  $\phi$  zwischen Spannung und Strom. Die Blindleistung mit dem Formelzeichen  $Q$  wird durch die Phasenverschiebung erzeugt.

$$Q = \underline{U} \cdot \underline{I} \cdot \cos \phi \quad (2.2)$$

Die Blindleistung ist im Wechselstromnetz unerwünscht aber unvermeidbar.

**Stabilität des Synchrongenerators am starren Netz:** Im stationären Betriebszustand ist die erzeugte Energie des Synchrongenerators genauso groß wie die verbrauchte Belastungsenergie. Die Wirkleistungserzeugung wird als Funktion des Lastwinkels dargestellt, weil der Lastwinkel  $\beta$  durch das mechanische Antriebsmoment und die Laständerung beeinflusst wird.

## 3. Hauptteil

### 3.1 Aufbau von Synchrongeneratoren

Synchrongeneratoren gehören zur Drehstrommaschine, in der der Läufer immer synchron mit dem Stator drehfeld läuft. Für große Leistungen baut man Synchrongeneratoren stets als Innenpolgeneratoren. [1] Abbildung 1 zeigt den Querschnitt eines Innenpolgenerators. Dieser besteht aus Läufer, Ständer, Erregung und weiteren wesentlichen Anteilen. Der

Synchrongenerator für die Netzversorgung kann sehr groß aufgebaut werden.

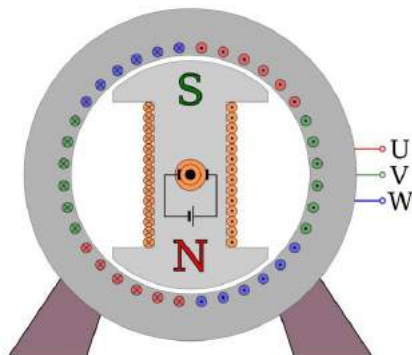


Bild 1: Querschnitt eines Innenpolgenerators[1]

### 3.2 Betriebsverhalten am Netz

Wenn ein Synchrongenerator mit dem Netz verknüpft wird, besitzt er verschiedene Betriebsmöglichkeiten. Dazu gehören der Leerlaufbetrieb, der übererregte Betrieb, untererregter Betrieb und der Betrieb mit ohmscher Belastung.

#### 3.2.1 Leerlaufbetrieb

Synchrongeneratoren werden zunächst unbelastet. Stimmen Frequenzen und zeitliche Spannungsverläufe von Netz und Generator überein kann der Synchrongenerator ohne weitere Auswirkungen auf das Netz geschaltet werden. Bild 2 stellt das Zeigerdiagramm im Leerlaufbetrieb dar. Zu diesem Zeitpunkt fließt im Generator kein Strom.[2] Netzspannung und Ständerspannung sollen identisch sein, während die Höhe der Ständerspannung von der Erregung abhängt. Der Lastwinkel beträgt im Leerlaufbetrieb null und der Phasenwinkel beträgt  $90^\circ$ , weil der Ständerstrom nur einen imaginären Teil besitzt.

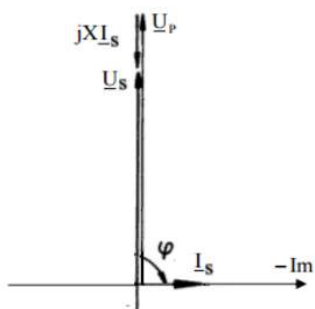


Bild 2: Zeigerdiagramm im Leerlaufbetrieb[2]

#### 3.2.2 Übererregter kapazitiver Betrieb

Führt man einen am Netz leerlaufenden Synchrongenerator an seiner Welle ein Antriebsmoment zu, gibt er Energie bzw. eine Wirkleistung ans Netz ab. Über den elektrischen Verbraucher im Netz bildet sich ein Gegenmoment durch die Belastung aus, das dem Moment des Antriebsgenerators entgegenwirkt. Die meisten ans Netz angeschlossenen Verbraucher nutzen magnetische Felder zur Umsetzung der Energie. Durch diese Magnetfelder treten die von der Spannung erzeugten

Ströme nicht gleichzeitig auf. Die Blindleistung wird durch die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom erzeugt. In diesem Fall eilen die Ströme der Spannung nach und sind zeitlich verzögert.[5] Die induktive Blindleistung wird vom Verbraucher benötigt. Die übererregte Synchrongeneratoren verhalten sich wie ein Kondensator, da sie induktive Blindleistung ans Netz abgeben können. Der zeitlich verzögerte Ständerstrom wird im übererregten Betrieb im Synchrongenerator erzeugt und zum Verbraucher transportiert.

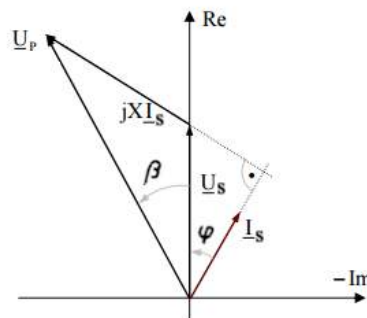


Bild 3: Zeigerdiagramm im übererregten Betrieb[2]

Bild 3 zeigt das Zeigerdiagramm im übererregten Betrieb. Die Ständerspannung soll mit der Netzspannung (beispielsweise 400 kv) übereinstimmen und liegt auf der reellen Achse. Bei bekannter Belastung des Generators ist auch der Ständerstromzeiger  $\underline{I}_s$  nach Betrag und Phase festgelegt. Der Ständerstrom verursacht einen Spannungsabfall der symmetrischen Reaktanz  $X$ . Addiert man zur Netzspannung den Spannungsabfall, erhält man die Polradspannung  $\underline{U}_p$ . [3]

Hinweis: Die Abgabe induktiver Blindleistung entspricht der Aufnahme einer kapazitiven Blindleistung und umgekehrt.[4]

#### 3.2.3 Untererregter induktiver Betrieb

Im untererregten induktiven Betrieb hingegen, soll die kapazitive Blindleistung im Netz kompensiert werden. In diesem Fall, eilt der Ständerstrom der Ständerspannung vor. Die untererregten Synchrongeneratoren verhalten sich wie Induktivitäten, sie können induktive Blindleistung aufnehmen und kapazitive Blindleistung abgeben.

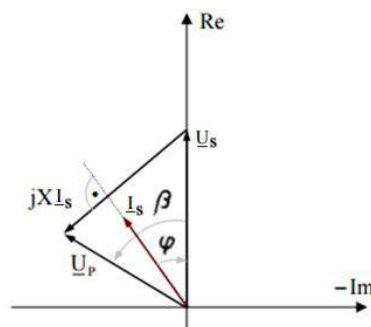


Bild 4: Zeigerdiagramm im untererregten Betrieb[2]

Bild 4 zeigt das Zeigerdiagramm im untererregten Betrieb. Mit Hilfe des Zeigerdiagramms lässt sich erkennen, dass die Polradspannung wegen des negativen Phasenwinkels kleiner als die Ständerspannung ist, während die Phase und der Betrag der Ständerspannung unverändert sind. In diesem Fall wird auch die Wirkleistung abgegeben.

### 3.2.4 Rein ohmsche Belastung

Im Betrieb mit rein ohmscher Belastung, sind Ständerstrom und Ständerspannung in gleichen Phasen. Es wird keine Blindleistung von Verbraucher benötigt. Bild 5 zeigt das Zeigerdiagramm bei rein ohmscher Belastung. Generatoren erzeugen in diesem Fall nur eine Wirkleistung.

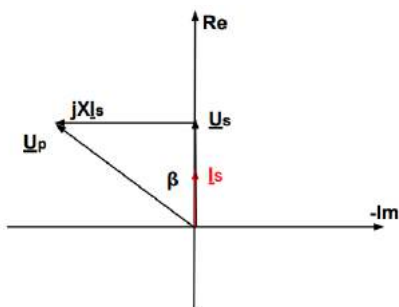


Bild 5: Zeigerdiagramm mit ohmscher Belastung[2]

### 3.3 Stabilisierung der Netzfrequenz

In stationärem Betrieb mit konstanter Belastung ergibt es sich ein Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch. Die Netzfrequenz und die Drehzahl der Generatoren bleiben konstant, während schwankende Belastungen im Netz dieses Gleichgewicht stören und die Netzfrequenz beeinflussen können. In Bild 6 wird die Beziehung zwischen Netzfrequenz und Leistungsbilanz mit Hilfe einer Waage erläutert. Wenn ein Generator mehr Leistung erzeugt, neigt sich die Waage nach rechts und die Netzfrequenz steigt. Wenn das Netz mehr Leistung verbraucht, neigt sich die Waage nach links und die Netzfrequenz nimmt ab. Wenn sich die Netzfrequenz verändert, erhalten die Kraftwerke neue Leistungswerte und die Generatoren drehen mit neuen Drehmomenten. Darüber hinaus wird auch eine dreistufige Regelleistung eingesetzt, damit unvorhergesehene Schwankungen zwischen Erzeugung und Verbrauch kurzfristig ausgeglichen werden können.[6] Dann wird die Netzfrequenz auf 50 Hz stabilisiert.



Bild 6: Netzfrequenz in Abhängigkeit von der Leistungsbilanz[7]

### 3.4 Belastungsbegrenzung

Das Grenzbelastungsdiagramm gibt der Betriebsführung Hilfestellung bei der Einhaltung der zulässigen Betriebszustände und bei der Parametrierung der Begrenzungsregelungen.[4] Der Nullpunkt wird durch den Leerläuferergerstrom bestimmt. Punkt N bezeichnet den Nennbetriebspunkt, der durch den Nennerergerstrom  $I_E$  und den Nennlastwinkel  $\beta$  bestimmt wird. Die praktische Stabilitätsgrenze liegt um 70 Grad, während die theoretische Stabilitätsgrenze um 90 Grad liegt. Aus Sicherheitsgründen endet die Grenze kurz vor dem Nullpunkt. Die maximale Scheinleistung, die Wirkleistung und die Blindleistung von Generator können durch diese Ortskurven bestimmt werden.

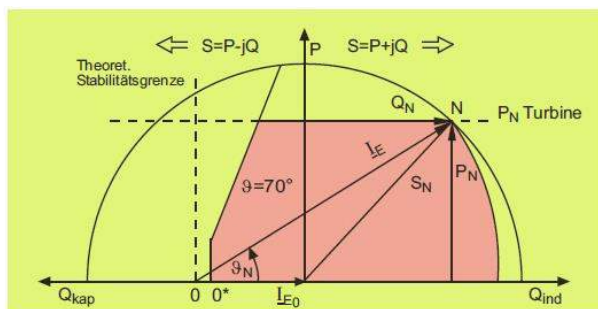


Bild 7: Grenzbelastungsdiagramm[4]

## 4. Zusammenfassung/Fazit

In diesem Bericht wurden die Grundprinzipien von Generatoren, die Blindleistungskompensation mit Hilfe der Zeigerdiagramme und die Stabilisierung der Netzfrequenz erläutert. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass man durch Verändern der Polradspannung über den Erregerstrom die Phasenwinkel und die Größe des Ständerstromes und damit das Blindleistungsverhalten und die Wirkleistungsabgabe beeinflussen kann.

In der Zukunft wird fast nur erneuerbare Energie verwendet. Die im Netz benötigte Wirkleistung und Blindleistung sollen mittels der Wechselrichter von beispielsweise Photovoltaik-Kraftwerken erzeugt und jederzeit am Netzanschlusspunkt dezentral ins Netz eingespeist werden. Eine Art der Wechselrichter soll daher das Betriebsverhalten von Synchrongeneratoren nachbilden um die Blindleistung im Netz zu kompensieren. Einige Produkte werden heutzutage für die Einspeisung von Blindleistung ausgelegt. In Bild 8 ist der Sunny mini Central Wechselrichter von SMA Solar Technology AG dargestellt. Die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom kann durch diesen Wechselrichter problemlos realisiert werden.



Bild 8: Sunny mini Central Wechselrichter[8]

## 5. Literatur

- [1] B. R. Oswald, Berechnung von Drehstromnetzen, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.

- [2] K. Fuest, P. Döring, Elektrische Maschinen und Antriebe  
[3] iee.uni-rostock,  
Media/Teil\_2\_Synchronmaschinen  
[4] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz,  
Elektrische Energieversorgung, Wiesbaden:  
Springer Vieweg, 2013.  
[5] LS-systemtechnik,  
<http://ls-systemtechnik.de/kraftwerk.pdf>  
[6] <http://www.amprion.net/regelenergie>  
[7] WEMAG AG  
[https://www.wemag.com/geschaeftskunden/eeg\\_direktvermarktung/](https://www.wemag.com/geschaeftskunden/eeg_direktvermarktung/)  
[8] SMA Solar Technology AG  
<http://www.sma-sunny.com/>





## Synchrongeneratoren und ihr Verhalten am Netz

Baiyun Li, 30.06.2016

### Übersicht

- Motivation
- Synchrongeneratoren
  - Aufbau der Synchrongeneratoren
  - Wirkungsweise von Synchrongeneratoren
  - Zeigerdiagramm
- Betriebsverhalten am Netz
  - Unterschiedliche Betriebsverhalten
  - Erregungsverfahren von Synchrongeneratoren
- Zusammenfassung



Quelle: <http://www.sinoergy.com/bianji1/18138/>

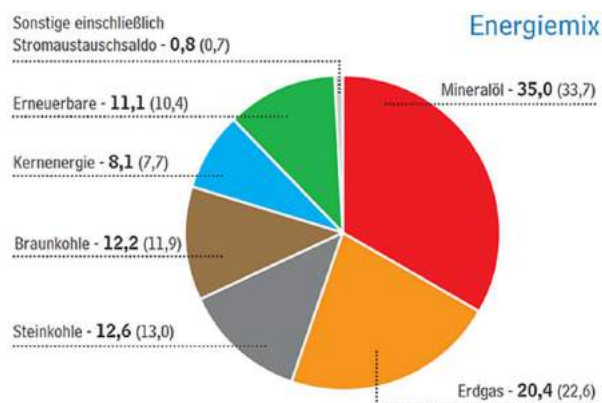


# Übersicht

- Motivation
- Synchrongeneratoren
  - Aufbau der Synchrongeneratoren
  - Wirkungsweise von Synchrongeneratoren
  - Zeigerdiagramm
- Betriebsverhalten am Netz
  - Unterschiedliche Betriebsverhalten
  - Erregungsverfahren von Synchrongeneratoren
- Zusammenfassung

# Motivation

- Synchrongeneratoren sind ein wesentlicher Anteil von Energieerzeugung.
- Zukünftig wird fast nur erneuerbare Energie für Energieversorgung eingesetzt.
- Es ist zu diskutieren, ob eine Art von Wechselrichter das Verhalten von Synchrongeneratoren nachbilden soll.



Energieträger 2015

Quelle: <http://www.baulinks.de/webplugin/2016/0348.php4>

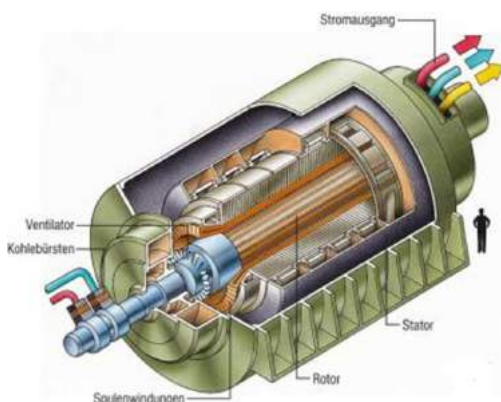
# Übersicht

- Motivation
- Synchrongeneratoren
  - Aufbau der Synchrongeneratoren
  - Wirkungsweise von Synchrongeneratoren
  - Zeigerdiagramm
- Betriebsverhalten am Netz
  - Unterschiedliche Betriebsverhalten
  - Erregungsverfahren von Synchrongeneratoren
- Zusammenfassung

## Aufbau von Synchrongeneratoren

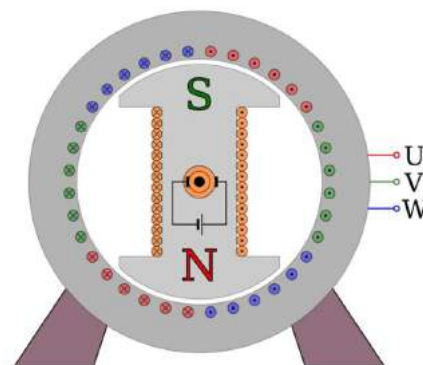
Allg. Aufbau von Synchrongeneratoren

- Läufer
- Ständer
- Erregung
- Etc.



Quelle: <http://www.wissen.de/lexikon/generator>

- Läufer mit Gleichstromerregung
- Ständer mit Wicklungssträngen
  - Läuferspannung  $U_p$
  - Ständerspannung  $U_s$
  - Ständerstrom  $I_s$



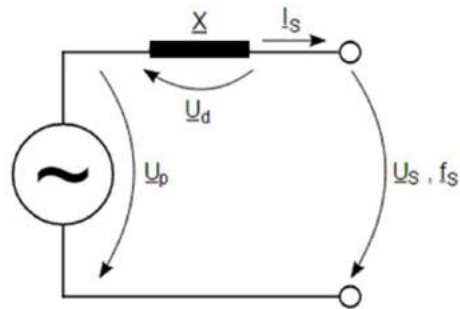
Quelle: Biezl, 19. Aug. 2010

Category: Synchronousmachines

# Einphasiges Ersatzschaltbild von Synchrongenerator

- Modellierung der Synchrongeneratoren
- Polradspannung einstellbar
- Leistungsgleichung von Synchrongeneratoren  

$$\underline{U}_{\text{NETZ}} = \underline{U}_s = \underline{U}_p - jX \cdot \underline{I}_s$$

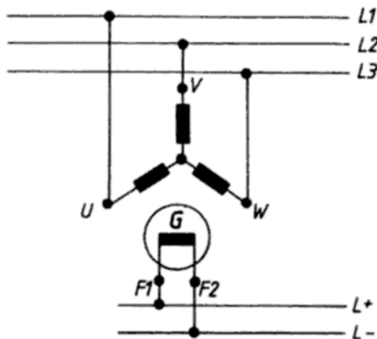


Quelle: K. Fuest, Elektrische Maschinen und Antriebe

- Sychrone Reaktanz  $X$
- Ständerstrom  $\underline{I}_s$
- Polradspannung (Läuferspg)  $\underline{U}_p$
- Ständerspannung  $\underline{U}_s$

# Wirkungsweise von Synchrongeneratoren

- Die Frequenz hängt von der Generatorzahl ab.  $f = n \cdot p / 60$   
 Bsp. 50 Hz-Netz in Europa:  
 Polpaarzahl  $p=10 \rightarrow$  Drehzahl  $n=3000 \text{ U/min}^{-1}$
- Sternschaltung und dreiphasige Ständerspannungen

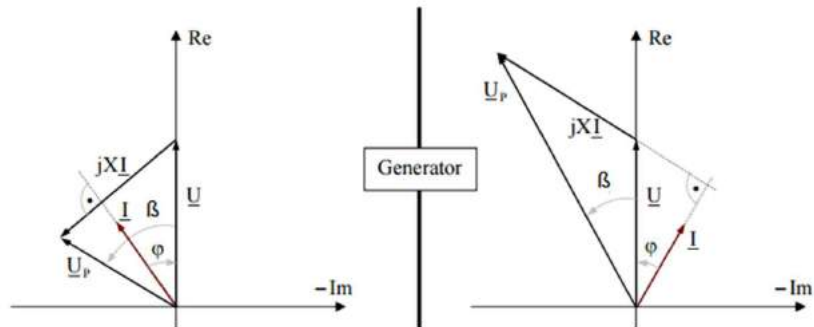


- Phasen L1:  $\underline{U}_1 = \underline{U}_s \cdot e^{j0^\circ}$
- Phasen L2:  $\underline{U}_2 = \underline{U}_s \cdot e^{-j120^\circ}$
- Phasen L3:  $\underline{U}_3 = \underline{U}_s \cdot e^{-j240^\circ}$

Quelle: K. Fuest, Elektrische Maschinen und Antriebe

## Zeigerdiagramm

- Zeigerdiagramme für unterschiedliche Betriebszuständen
- Lastwinkel  $\beta$
- Phasenwinkel  $\varphi$



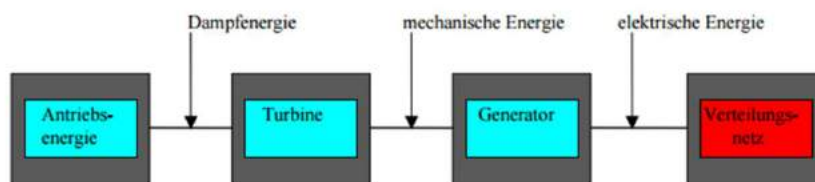
Quelle: K. Fuest, Elektrische Maschinen und Antriebe

## Übersicht

- Motivation
- Synchrongeneratoren
  - Aufbau der Synchrongeneratoren
  - Wirkungsweise von Synchrongeneratoren
  - Zeigerdiagramm
- Betriebsverhalten am Netz
  - Unterschiedliche Betriebsverhalten
  - Erregungsverfahren von Synchrongeneratoren
- Zusammenfassung

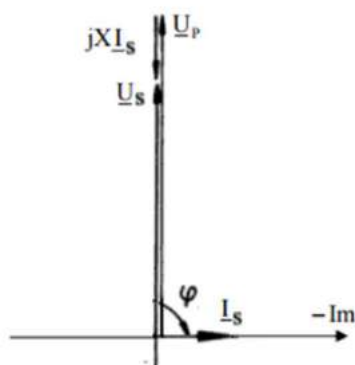
## Betriebsverhalten am Netz

- Unterschiedliche Betriebsverhalten
  - Leerlauf
  - Stationärer Betrieb: 1. Übererregter kapazitiver Betrieb  
2. Untererregter induktiver Betrieb  
3. Rein ohmsche Belastung
  - Schwankende Belastungen
  - Belastungsbegrenzung
- Erregungsverfahren: Polradspannung ändern und Ständerspannung konstant halten



Quelle: Is-systemtechnik.de/kraftwerk

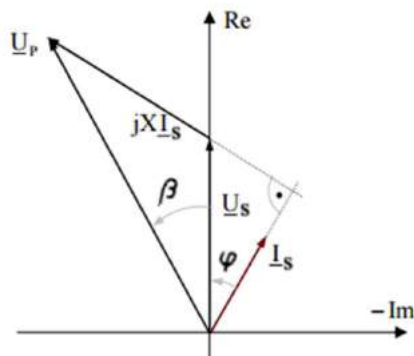
## Leerlaufbetrieb



Quelle: K. Fuest, Elektrische Maschinen und Antriebe

- Synchrongenerator beim Einschalten oder beim Phasenschiebbetrieb
- Frequenzen und Spannungsverläufe von Netz und Generator übereinstimmen
- Nur Blindleistung, Keine Wirkleistung
- Lastwinkel  $\beta = 0^\circ$
- Phasenwinkel  $\phi = \pm 90^\circ$

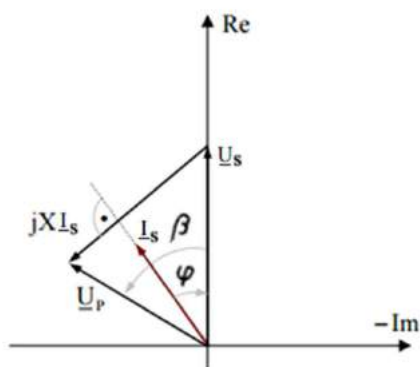
## Stationärer Betrieb: Übererregter kapazitiver Betrieb



Quelle: K. Fuest, Elektrische Maschinen und Antriebe

- $\underline{U}_{\text{NETZ}} = \underline{U}_s = \underline{U}_p - jX_l \cdot \underline{I}_s$
- Generator wie "Kapazität"
- Aufnahme von kapazitiver Blindleistung
- Abgabe von induktiver Blindleistung ans Netz
- $\underline{I}_s$  eilt  $\underline{U}_s$  nach
- $\underline{U}_s < \underline{U}_p$
- Phasenwinkel  $\phi > 0^\circ$

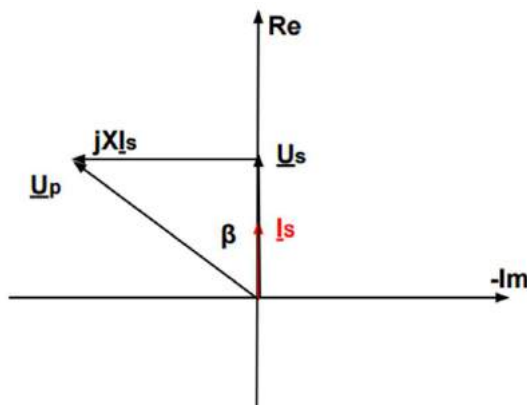
## Stationärer Betrieb: Untererregter induktiver Betrieb



Quelle: K. Fuest, Elektrische Maschinen und Antriebe

- Generator wie "Drosselspule"
- Aufnahme von induktiver Blindleistung
- Kompensation von kapazitiver Blindleistung im Netz
- $\underline{I}_s$  eilt  $\underline{U}_s$  vor
- $\underline{U}_s > \underline{U}_p$
- Phasenwinkel  $\phi < 0^\circ$

## Stationärer Betrieb: Rein ohmsche Belastung

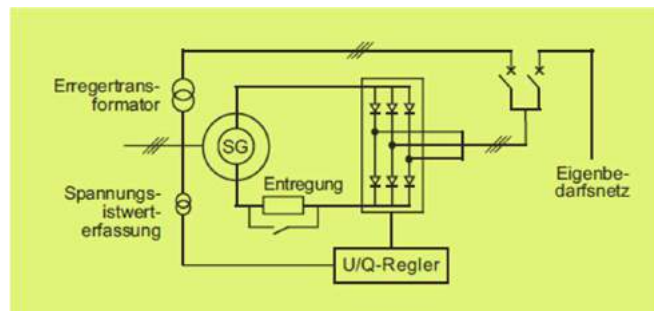


- Reeller Ständerstrom
- Phasenwinkel  $\phi = 0^\circ$
- Keine Blindleistung
- Rein Wirkleistungsabgabe

Quelle: K. Fuest, Elektrische Maschinen und Antriebe

## Erregungsverfahren für Synchrongeneratoren

- Regelung mit dem Erregerstrom → Ständerspannung konstant halten
  - Induktive Belastung: Starke Erhöhung des Erregerstroms
  - Rein ohmsche Belastung: Schwache Erhöhung
  - Kapazitive Belastung: Starke Senkung
- Andere wesentliche Aufgaben von Erregermaschinen
  - Spannungsregelung im stationären Betrieb
  - Gesteuerte Blindleistungsabgabe
  - Wahrung der Stabilität
  - Entregung im Fehlerfall

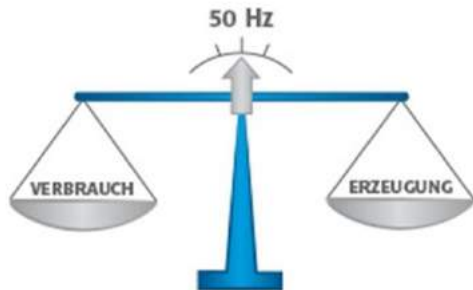


Quelle: K. Heuck, Elektrische Energieversorgung



## Stabilisierung der Netzfrequenz

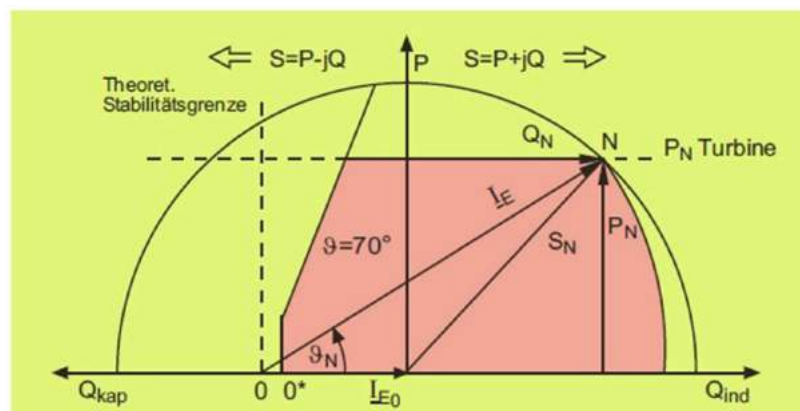
- Erzeugung und Verbrauch sind im Gleichgewicht bei stationärem Betrieb
- Mehr Leistung wird erzeugt: Netzfrequenz  $> 50$  Hz
- Mehr Leistung wird verbraucht: Netzfrequenz  $< 50$  Hz



Quelle: WEMAG AG  
[https://www.wemag.com/geschaeftskunden/eeg\\_direktvermarktung/](https://www.wemag.com/geschaeftskunden/eeg_direktvermarktung/)

- Synchrongeneratoren drehen mit neuen Drehmomenten, wenn sich die Frequenz verändert.
- Einsatz von dreistufiger Regelleistung: Unvorhergesehene Leistungsschwankungen können kurzfristig ausgeglichen werden.

## Belastungsbegrenzung



Quelle: K. Heuck, Elektrische Energieversorgung

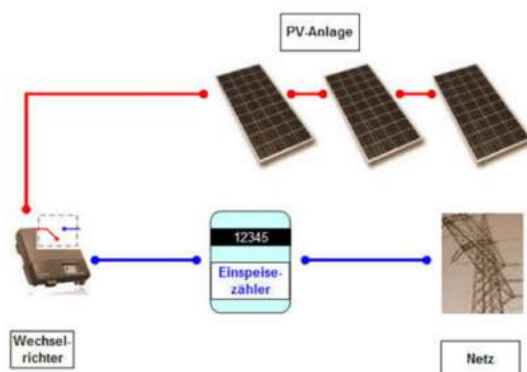
- Die zulässige Betriebszustände am Netz
- Praktische Stabilitätsgrenze bei  $\beta = 70^\circ$
- Maximale Leistungen von  $S_N$ ,  $P_N$  und  $Q_N$  bestimmen

# Übersicht

- Motivation
- Synchrongeneratoren
  - Aufbau der Synchrongeneratoren
  - Wirkungsweise von Synchrongeneratoren
  - Zeigerdiagramm
- Betriebsverhalten am Netz
  - Unterschiedliche Betriebsverhalten
  - Erregungsverfahren von Synchrongeneratoren
- Zusammenfassung

# Zusammenfassung

- Die Grundprinzipien von Synchrongeneratoren
- Beeinflussung des Blindleistungsverhaltens und der Wirkleistungsabgabe
- In der Zukunft: Wirk- und Blindleistungseinspeisung durch Wechselrichter



Quelle: <http://www.photovoltaike-web.de/photovoltaik/>

## Zusammenfassung

- Eine Art der Wechselrichter soll das Betriebsverhalten von Synchron-  
generatoren nachbilden
- Realisierung der Phasenverschiebung  
mit Wechselrichter
- Zwei Möglichkeiten:
  - Fixer  $\cos(\varphi)$
  - Variabler  $\cos(\varphi)$



Sunny Mini Central  
Wechselrichter  
Quelle: SMA Solar Technology  
AG



Sunny Tripower Wechselrichter  
Quelle: SMA Solar Technology  
AG

## Fragenstellung

**Danke für die Aufmerksamkeit!**

# Stand und zukünftige Entwicklung der installierten elektrischen Speicherkapazität in Deutschland

Simon Wagner

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, [simon.wagner@tu-bs.de](mailto:simon.wagner@tu-bs.de)

## Kurzfassung

Bei diesem Seminar werden die derzeit in Deutschland genutzten Technologien der elektrischen Energiespeicherung und deren jeweilige Kapazität aufgezeigt. Anschließend werden Technologien vorgestellt, die für die Zukunft aussichtsreich sein könnten.

## Abstract

In this seminar the technologies of electric energy storage that are installed in Germany are amplified and the actual state of the electric energy capacity is shown. Subsequently technologies that could be used in the future are displayed.

## 1 Einleitung

In Deutschland war das Jahr 2015 das Rekordjahr für Erneuerbare Energien, 32,5% der verbrauchten Energie stammten aus Wind-, Solar-, Wasser- und Bioenergiekraftwerken, damit lieferten sie mehr Strom als jeder andere Energieträger. Im Vorjahr waren es noch 27,3%. [1]

Durch den zunehmenden Einsatz regenerativer Energien kommt es zu einem schwankenden Energieangebot im Netz. Die Möglichkeit der Speicherung elektrischer Energie könnte dabei eine Lösung für die Zukunft sein.

Durch den Einsatz von Speichern wird die Energiewende eine zunehmende Verflechtung von Strom-, Wärme- und Mobilitätsnutzung mit sich bringen, die sogenannte Sektorkopplung. Mit Power-to-X werden hier zunehmend innovative Lösungen entwickelt, wobei das „X“ für den jeweiligen Sektor steht zu dem die Energie umgewandelt wird um Energie zu speichern. Beispiele dafür sind Power-to-Heat (Erzeugung von Wärme aus Strom), Power-to-Gas (Erzeugung von Gas aus Strom) oder auch Power-to-Chemicals (Erzeugung von Grundchemikalien aus Strom). [2]

Im Rahmen dieses Seminars wird der derzeitige Stand der elektrischen Energiespeicher in Deutschland dargelegt, innovative Technologien vorgestellt und ein Blick in die Zukunft geworfen

## 2 Theoretische Grundlagen

Energiespeicher sind eine energietechnische Einrichtung, die Energie aufnehmen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abgeben kann. Der Speicherprozess besteht prinzipiell aus drei Schritten: dem Laden, dem Speichern und dem Entladen. Nach dem Entladen kann ein Energiespeicher erneut geladen werden. [3]

Die Energieform, die ein Energiespeicher aufnimmt, wird häufig zur Speicherung in eine andere umgewandelt, etwa von elektrischer in potenzielle Energie durch ein Pumpspeicherkraftwerk. [2]

Im Folgenden werden die Leistungen, die ein Speicher einem Energiesystem erbringen kann, aufgezeigt.

In erster Linie die Speicherung, die eine zeitliche und räumliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch durch Abgabe von Energie bedeutet (von Kurzzeit- bis zu Saisonspeichern).

Außerdem eignen sich Speicher für große Leistungsänderungen in positiver und negativer Richtung durch die Möglichkeit des Ein- und Ausspeicherns.

Zusätzlich liefern Speicher Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserve und weitere systemdienliche Leistungen.

Zusätzlich können Speicher für „peak-shaving“ sorgen, wobei Strom zwischengespeichert wird um Einspeisespitzen zu vermeiden. [2]

## 3 Elektrische Energiespeicher

Bild 1 verdeutlicht, weshalb Energiespeicher im Hinblick auf die Energiewende so wichtig sind.

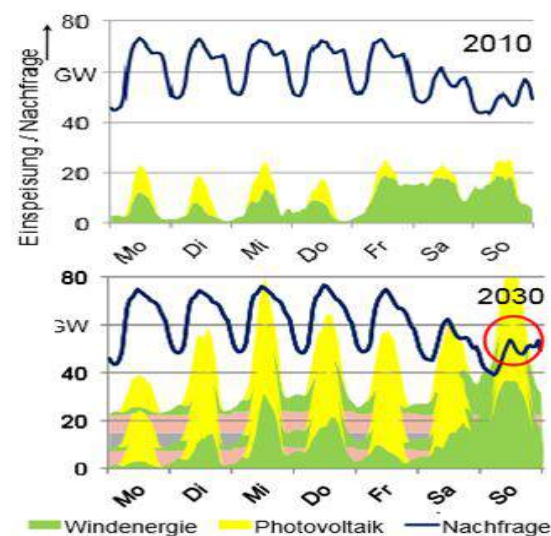


Bild 1: Einspeisung und Nachfrage 2010 und 2030.[3]

Man sieht beispielhaft als exemplarische Woche die Einspeisung von Windenergie und Photovoltaik im Jahr 2010 und 2030. Im Beispiel vom Jahr 2030 sieht man die sich noch weiter verschärfende Situation durch zusätzliche Must-Run-Erzeugung (z.B. Biomasse).

Sollte die Entwicklung so weitergehen wie es geplant ist, also die Ziele der Energiewende erreicht werden, wird im Jahr 2030 die Einspeisung die Nachfrage übertreffen. Die derzeit installierten Speicher reichen nicht aus um diese Unterschiede zu kompensieren. [3]

Im Folgenden wird der derzeitige Stand der elektrischen Energiespeicher in Deutschland dargelegt und es werden mögliche Lösungen für die Zukunft aufgezeigt.

### 3.1 Elektrische Energiespeicher in Deutschland

Die Speicherstudie der Agora Energiewende besagt, dass in Deutschland derzeit eine bidirektionale Speicherleistung von 32 GW vorliegt. Dies entspricht einer Gesamtkapazität von 800 GWh. [4]

Als Speicher hat sich in Deutschland das Pumpspeicherkraftwerk etabliert. Zurzeit ist eine Pumpspeicherleistung von etwa 7 GW installiert. Die Kraftwerke sind für eine Stromlieferung von täglich vier bis acht Stunden ausgelegt. Daraus ergibt sich eine Gesamtkapazität von etwa 40 GWh. [3]

Bisher gibt es allerdings wenige Alternativen für das Pumpspeicherkraftwerk, eine Möglichkeit wären Druckluftspeicherkraftwerke. Bisher gibt es aber nur ein Druckluftspeicherkraftwerk in Deutschland, dieses befindet sich in Huntorf bei Bremen. Es ist seit 1978 in Betrieb und kann für etwa drei Stunden eine Leistung von 320 MW erzeugen.

Aktuell ist ein weiteres moderneres Druckluftspeicherkraftwerk in Niedersachsen in der Planung, dessen Fertigstellung für 2011 geplant war, wegen technischer Probleme wurde dieser Termin aber nach hinten verschoben. [5]

Bei Druckluftspeicherkraftwerken wird Druckluft in Kavernen gespeichert, die dann gemeinsam mit Erdgas in einer Turbine verbrannt werden. Diese Turbine treibt wiederum einen Generator an. [5]

Außerdem wäre in Norddeutschland aufgrund des hohen Vorkommens von salinen Kavernen die Realisierung von Wasserstoffspeichern möglich. [5]

Zusätzlich zu den bereits genannten Speichern gibt es in Deutschland außerdem Hausspeicher und mobile Speicher. Im Folgenden werden die Hausspeicher vorgestellt.

### 3.2 Hausspeicher

In Deutschland gibt es zusätzlich zu den Netzspeichern noch die Hausspeicher. In den letzten 25 Jahren wurden über 1,5 Millionen Photovoltaik-Anlagen mit einer Gesamtkapazität von 40 GWp errichtet. Die Mehrheit davon befindet sich mit einer Leistung von weniger als 10kWp auf privaten Hausdächern. Etwa 35000 Haushalte und Betriebe haben sich bereits für einen PV-Batteriespeicher entschieden. [6]

Obwohl diese Anzahl stetig steigt, ist der Photovoltaik-Zubau im Jahr 2015 stark rückläufig. Dies wird in Bild 2 verdeutlicht. Experten erwarten trotzdem bis 2020 einen Anstieg auf 170000 PV-Batteriespeicher. [6]

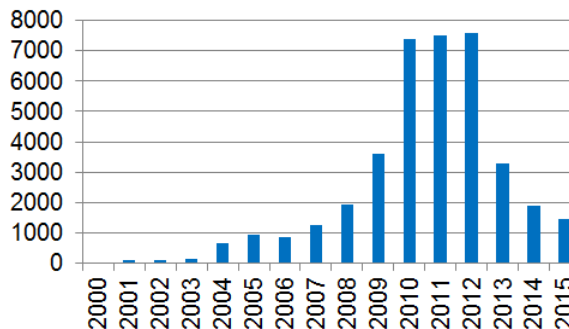


Bild 2: Jährlich installierte Hausspeicher.

Wenn man annimmt, dass ein durchschnittlicher Batteriespeicher, meistens werden Blei- oder Lithium-Ionen-Akkumulatoren verwendet, eine Kapazität von 5 kWh besitzt, ergibt das eine Gesamtkapazität von 175 MWh.

Wenn die Experteneinschätzung von 170000 Hausspeichern im Jahr 2020 stimmen sollte, würde das eine Gesamtkapazität von 850 MWh ergeben.

Nach den bisher genannten Speichern werden im Folgenden nun die mobilen Speicher vorgestellt.

### 3.3 Mobile Speicher

Zusätzlich zu den Netz – und Hausspeichern gibt es in Deutschland die mobilen Speicher, eingesetzt in Hybrid- oder reinen Elektrofahrzeugen. Für den Fahrzeugbetrieb werden zumeist Lithium-Ionen-Akkumulatoren, aber auch Doppelschichtkondensatoren eingesetzt. [5]

Elektro- oder Hybridfahrzeuge können mit einem bidirektionalen Speicher und einem Netzteil ausgestattet werden, sodass sie aus dem Netz geladen werden und ins Netz einspeisen können. Während der Ladezeiten können die im Fahrzeug eingebauten Speicher als stationäre Speicher im elektrischen Netz genutzt werden. [5]

In Deutschland wird dieses Verfahren bisher noch nicht sehr häufig praktiziert, es stellt jedoch eine Möglichkeit für die Zukunft dar. [5]

In Bild 3 ist die Entwicklung der Anzahl der Elektrofahrzeuge in Deutschland dargestellt.

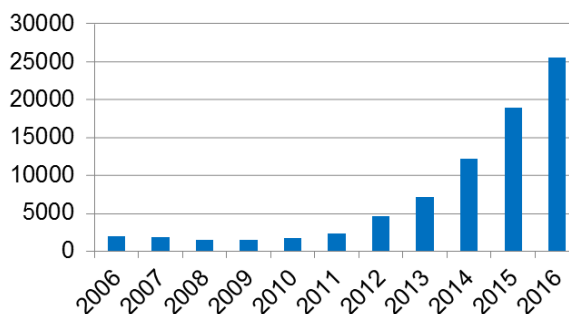


Bild 3: Anzahl der Elektroautos in Deutschland.

In der Grafik sieht man, dass nach 2006 zunächst ein Rückgang zu verzeichnen ist, seit 2010 aber ein stetiges Wachstum vorliegt. Trotzdem ist zu sagen, dass mit einer derzeitigen Anzahl von etwa 25000 Elektrofahrzeugen

die Elektromobilität trotz Wachstum weiterhin eine Nische darstellt.

Wenn man annimmt, dass eine durchschnittliche in Deutschland verwendete Autobatterie etwa eine Kapazität von 25 kWh (der e-Golf besitzt einen Lithium-Ionen-Akkumulator mit 24,2 kWh) besitzt, ergibt sich eine potenzielle Gesamtkapazität von 625 MWh.

Vom ursprünglichen Ziel bis 2020 eine Anzahl von einer Million Elektroautos auf Deutschlands Straßen zu haben, hat sich die Bundesregierung bereits verabschiedet.

Marktforscher erwarten aber bis 2020 immerhin einen Anstieg auf 500000 Elektroautos. [1]

Durch die Kaufprämie von 4000 Euro pro Kauf eines reinen Elektroautos und 3000 Euro für den Kauf eines Plug-In-Hybrid soll diese Entwicklung seitens der Regierung noch weiter verstärkt werden.

Wenn diese Einschätzung stimmen sollte, würde das eine Gesamtkapazität von 12,5 GWh ergeben.

### 3.4 Innovative Technologien

Eine Option zur Stabilisierung des Netzes ist das Einsetzen von Batteriespeichern zur Erbringung von Regelleistung. Mithilfe von Regelenergie werden unvorhergesehene Schwankungen zwischen Erzeugung und Verbrauch von Strom im Netz kurzfristig ausgeglichen, indem die Leistung von Kraftwerken je nach Bedarf entsprechend erhöht oder gesenkt wird, ein Beispiel dafür sind die Batterieparcs von Younicos.

Die Regelleistung wird dabei automatisch aktiviert, sobald die Frequenz des Stromnetzes außerhalb der Bandbreite von 49,99 bis 50,01 Hz liegt. [2]

Eine weitere Möglichkeit ist die Verknüpfung von Haus speichern mit Smart Grids. Diese Idee, die von der Firma Caterna stammt, sieht vor, dass Haushalte einen Teil ihres Batteriespeichers an die Stromnetzbetreiber vermieten. Die Netzbetreiber zahlen dafür, dass sie überschüssigen regenerativen Strom zwischenspeichern und auf diese Weise das Stromnetz stabilisieren können.

Mit zunehmender Verbreitung dezentraler Versorgungskonzepte und Stromerzeugung auf Basis fluktuierender erneuerbarer Energien wird erwartet, dass sich auch die kleinen Stromerzeuger an der Bereitstellung von Netzdienstleistungen beteiligen. Hierzu zählen sowohl die Anpassung der Erzeugung an den jeweiligen Bedarf, als auch die Bereitstellung von Spitzenlast und Regelleistung. Daher wird angestrebt eine Vielzahl dezentraler Erzeuger und Speicher zu Clustern zusammenzufassen und als sogenannte Virtuelle Kraftwerke zu betreiben. Für dieses

Virtuelle Kraftwerk gibt es sowohl ein Erzeugung- als auch ein Lastmanagement. [7]

## 4 Zusammenfassung

Das Pumpspeicherkraftwerk ist der in Deutschland etablierte Netzspeicher mit einer Gesamtkapazität von etwa 40 GWh, mittlerweile werden auch Druckluftspeicher gebaut. Die Hausspeicher in Deutschland besitzen eine Gesamtkapazität von etwa 175 MWh, bis 2020 erwarten Experten eine Steigerung auf 850 MWh.

Die mobilen Speicher in Deutschland besitzen ein Potenzial von 625 MWh Gesamtkapazität, bis 2020 könnte sie auf 12,5 GWh ansteigen.

In der Zukunft ist die Bereitstellung von Regelleistung eine gute Möglichkeit das Netz zu stabilisieren. Außerdem sind Smart Grids und Hausspeicher sowie der Zusammenschluss von dezentralen Erzeugern und Speichern zu Virtuellen Kraftwerken eine mögliche Lösung für die Zukunft.

## 5 Literatur

- [1] Christoph Podewils, Die Energiewende im Stromsektor, Stand der Dinge 2015, Agora Energiewende, 2016.
- [2] Sebastian Bolay, Faktenpapier Energiespeicher, Bundesverband Energiespeicher e.V. Berlin, 2016.
- [3] Michael Sterner, Energiespeicher in Deutschland, OTH Regensburg, 2014.
- [4] Daniel Fürstenwerth, Stromspeicher in der Energiewende, Agora Energiewende, Berlin, 2015.
- [5] Dagmar Oertel, Energiespeicher – Stand und Perspektiven, Büro der Technikfolgenabschätzung beim Bundestag, 2016.
- [6] Marco Tepper, Faktenblatt Photovoltaik, Bundesverband Solarwirtschaft e.V., März 2016.
- [7] Ulrich Büniger, Energiespeicherung mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger, Energietechnische Gesellschaft im VDE, Frankfurt, 2016.





## Stand und zukünftige Entwicklung der installierten elektrischen Speicherkapazität in Deutschland

Simon Wagner, 30.06.2016

### Agenda

- Einleitung
- Elektrische Energiespeicher
- Stand der elektrischen Speicherkapazität
- Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität
- Zusammenfassung





# Agenda

- **Einleitung**
- Elektrische Energiespeicher
- Stand der elektrischen Speicherkapazität
- Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität
- Zusammenfassung

## Einleitung

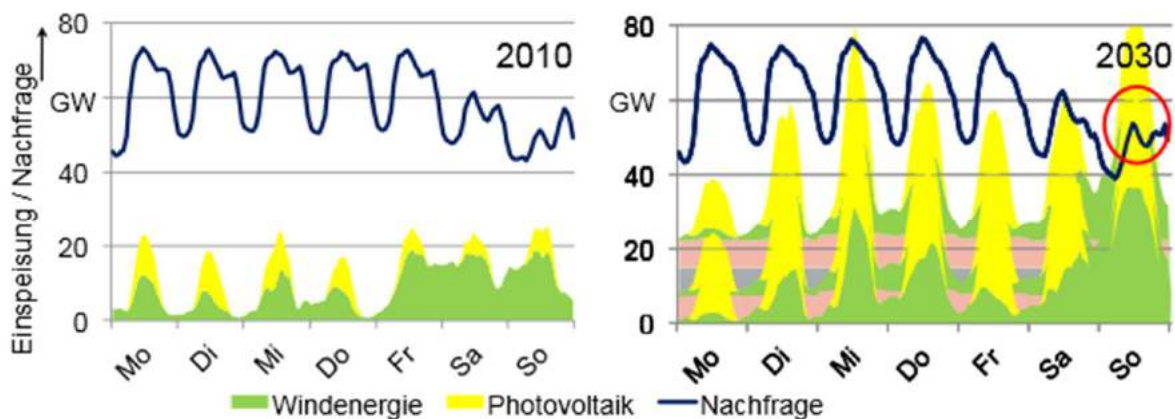
- 2015 Rekordjahr für erneuerbare Energien
- Schwankendes Energieangebot im Netz
- Verflechtung von Strom-, Wärme- und Mobilitätsnutzung
- Sektorkopplung → Power-to-X

## Agenda

- Einleitung
- **Elektrische Energiespeicher**
- Stand der elektrischen Speicherkapazität
- Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität
- Zusammenfassung

## Elektrische Energiespeicher

Vergleich der Einspeisesituation in Deutschland im Jahr 2010 und 2030



Quelle:[Stern]

# Elektrische Energiespeicher

- **Energiespeicher**
- **Leistungen für das Energiesystem**
- **Status quo in Deutschland**
  - 32 GW bidirektionale Speicherleistung
  - 800 GWh Speicherkapazität

## Agenda

- Einleitung
- Elektrische Energiespeicher
- **Stand der elektrischen Speicherkapazität**
- Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität
- Zusammenfassung

## Stand der elektrischen Speicherkapazität



[Quelle:Bund]

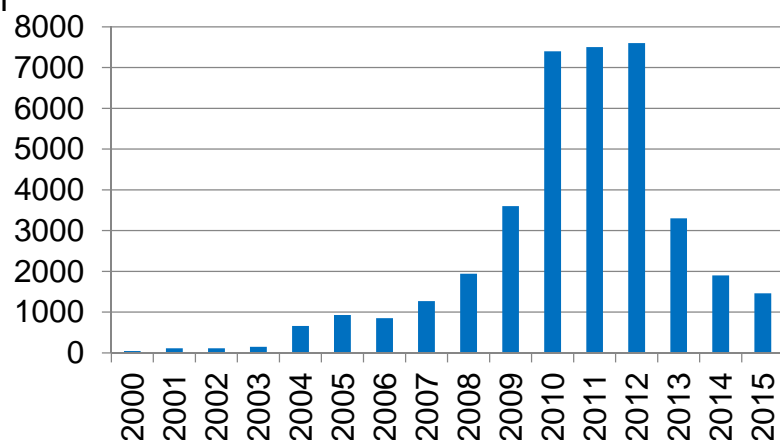
- 36 Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland mit einer Pumpspeicherleistung von etwa 7 GW
- Tägliche Stromlieferung von 4-8 Stunden, ergibt Gesamtkapazität von etwa 40 GWh

## Stand der elektrischen Speicherkapazität

### Hausspeicher

- etwa 35000 installierte Hausspeicher
- Marktforscher erwarten bis 2020 Anstieg auf 170000

### Jährlich Installierte Hausspeicher



## Stand der elektrischen Speicherkapazität

### Hausspeicher

- etwa 35000 Hausspeicher in Deutschland
- Akkumulatoren (meistens Blei- oder Lithium-Ionen-Akkumulatoren) mit 5kWh
- Kapazität von 175 MWh

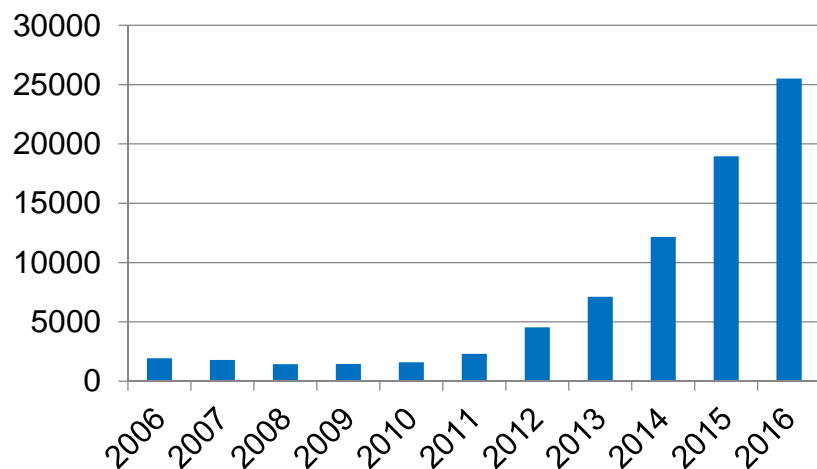


Quelle: [Sabo]

## Stand der elektrischen Speicherkapazität

### Anzahl Elektroautos in Deutschland

### Mobile Speicher



## Stand der elektrischen Speicherkapazität

### Mobile Speicher

- etwa 25000 Elektroautos
- Autobatterie mit 85 kWh (Tesla)
- Max. Speicherpotenzial von 2,125 GWh



Quelle: [Zeit]

## Agenda

- Einleitung
- Elektrische Energiespeicher
- Stand der elektrischen Speicherkapazität
- **Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität**
- Zusammenfassung

## Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität

- **Pumpspeicherkraftwerke**
- **Mögliche Alternativen für die Zukunft**
- Power-to-Gas
  - Druckluftspeicherkraftwerke
  - Wasserstoffspeicher



Quelle: [kbb]

## Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität

- **Hausspeicher**
  - Marktforscher erwarten Anstieg auf 170000 bis 2020
  - Kapazität von 850 MWh
- **Mobile Speicher**
  - Ursprüngliches Ziel der Bundesregierung: 1 Million Elektroautos bis 2020
  - Kaufprämie für Elektroautos
  - Marktforscher erwarten Anstieg auf 500000 bis 2020
  - Kapazität von 42,5 GWh



## Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität

### Innovative Lösungen



Quelle:Younicos

- Einsetzen von Batteriespeichern ins Netz zur Erbringung von Regelleistung



Technische  
Universität  
Braunschweig

30.06.2016 | Simon Wagner | Energiespeicher in Deutschland | Seite 17



## Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität

### Innovative Lösungen

- Smart Grids und Energiespeicher



Quelle: Caterva



Technische  
Universität  
Braunschweig

30.06.2016 | Simon Wagner | Energiespeicher in Deutschland | Seite 18



## Agenda

- Einleitung
- Elektrische Energiespeicher
- Stand der elektrischen Speicherkapazität
- Zukünftige Entwicklung der elektrischen Speicherkapazität
- **Zusammenfassung**

## Zusammenfassung

### Energiespeicher in Deutschland:

- Pumpspeicherkraftwerke
- Hausspeicher
- Mobile Speicher

### Ausblick:

- Power-to-Gas
- Batteriespeicher im Netz
- Smart-Grids und Energiespeicher

**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit**

# Quellenverzeichnis

## Quelle:

Michael Sterner, Energiespeicher in Deutschland, OTH Regensburg, 2014.

Kraftwerksliste Bundesnetzagentur, 2012.

<http://www.sabo-degen.de>

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

<http://www.kbbnet.de/referenzen/projekte/neuenhuntorf/>

<http://www.yunicos.com/de/home/>

<https://www.siemens.com/global/en/home.html>

## Abkürzung:

[Sterner]

[Bund]

[Sabo]

[Zeit]

[kbb]

[Yunicos]

[Caterva]



# Bedeutung grenzübergreifenden Leistungsflusses

## Importance of cross-border power flow

Bedeutung grenzübergreifenden Leistungsflusses, Sebastian Wolf

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

### Kurzfassung

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

### Abstract

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

## 1 Einleitung

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

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

## 2 Theoretische Grundlagen

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

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

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

n = Anzahl Kopplungsleitungen

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

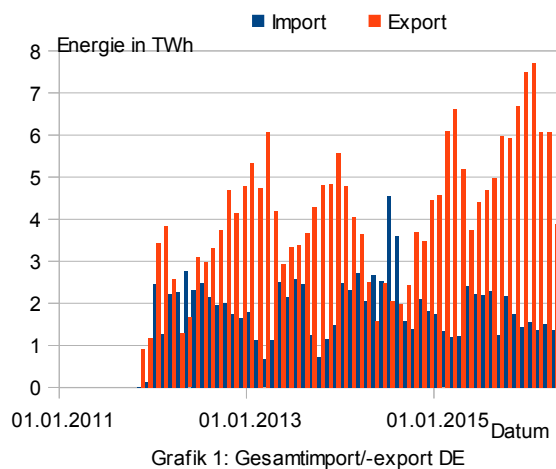
## 3 Hauptteil

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

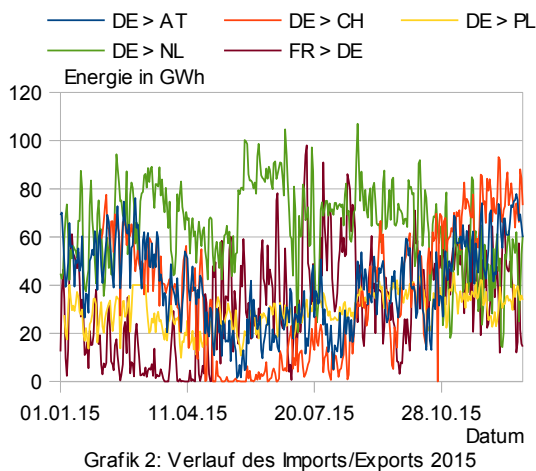
dieser nicht ermittelt werden konnte, wird stattdessen das Maximum der übertragenden Leistung des untersuchten Zeitraumes benutzt. Außerdem wird in Kapitel 3.3 speziell das Deutsche C und dessen Auslastung bei unterschiedlichen Erzeugungen durch Windkraftanlagen untersucht. In Kapitel 3.4 wird kurz auf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

### 3.1 Verlauf des Stromimports und -exports

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



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

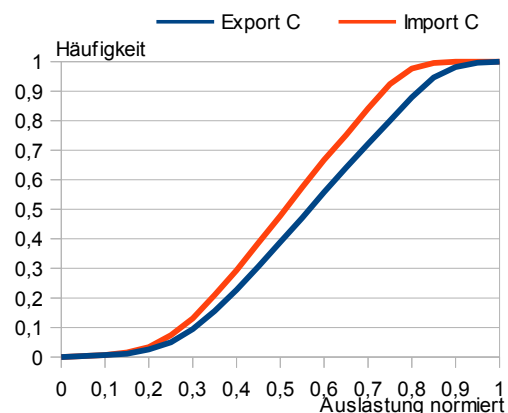


an der französisch-deutschen Grenze mit über 50%, aber auch dieser nahm von 2012 bis 2015 um 8% ab. In Grafik

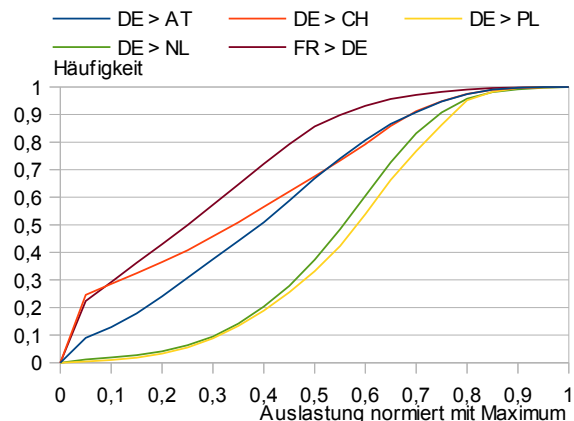
2 ist zu erkennen, dass aus Frankreich hauptsächlich im Sommer und Winter Strom exportiert wird. Polen und die Niederlande importieren das ganze Jahr über Strom, Polen etwas mehr im Winter, die Niederlande mehr im Sommer. Die Verläufe von Österreich und der Schweiz verlaufen ähnlich, mit einem erhöhten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

### 3.2 Auslastungen der Kopplungsstellen 2015

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



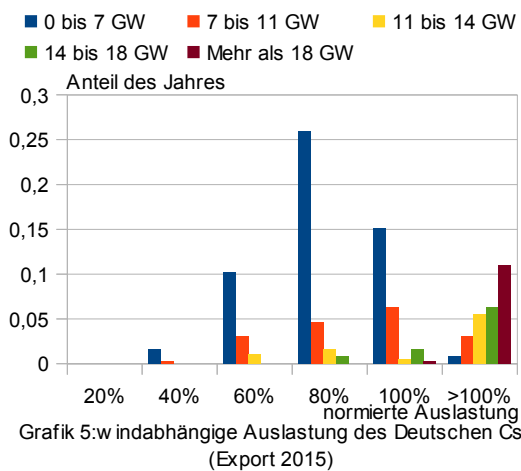
Man erkennt, dass der Import die Kopplungsstellen am Deutschen C noch nicht überlastet wird. 50% aller Messwerte liegen unter 50% der maximalen Leistung und es gibt keinen Messwert, die die NTC überschreiten. Beim Export liegen aber bereits 0,05% der Messwerte über der maximalen NTC. Folglich muss an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



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

### 3.3 Windabhängigkeit des Deutschen Cs

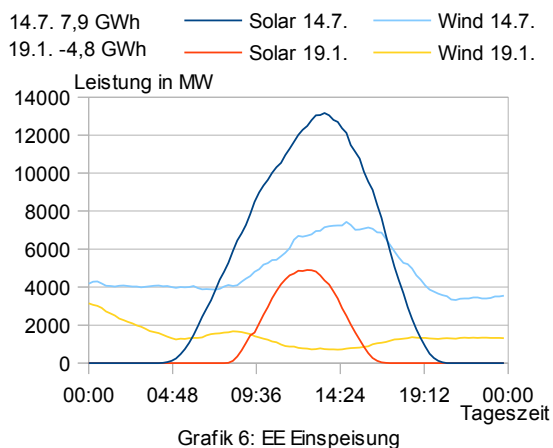
Für eine Auswertung in Abhängigkeit der Leistung aus Windkraftanlagen werden aus den NTC Tageswerte für die maximale Kapazität berechnet. Des Weiteren wird aus den Tageswerten der erzeugten Energie aus Windkraftanlagen eine mittlere Leistung über einen Tag errechnet um dieselbe Einteilung wie beim Deutschen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



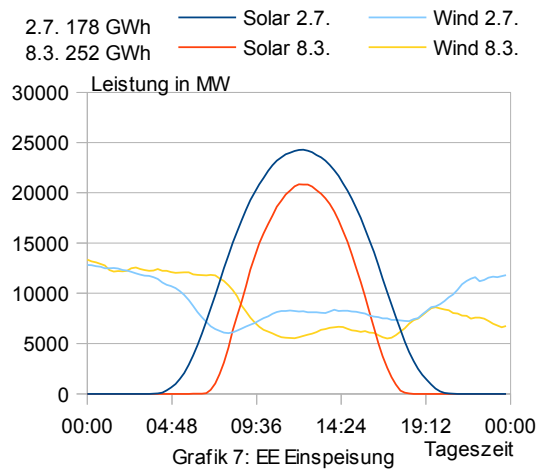
Leistungsbereiche die Auslastung dargestellt. Hierfür wird die Tagessumme der übertragenden Energie mit der maximalen Kapazität normiert. Es ist zu erkennen, dass je größer die Leistung der Windkraftanlagen ist an immer mehr Tagen die exportierte Energie diese Kapazität überschreitet.

### 3.4 Zusammenhänge EE und Import/Export

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



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



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

## 4 Zusammenfassung/Fazit

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

## 5 Literatur

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





## Bedeutung grenzübergreifenden Leistungsflusses

Sebastian, Wolf, 30.06.2016

### Agenda

- 1. Einleitung/Motivation
- 2. Überblick Stromerzeugung
- 3. Stromimport/-export 2011 bis heute
- 4. Auslastung der Kopplungsstellen 2015
- 5. Zusammenhänge zwischen Import/Export und EE
- 6. Zusammenfassung



# Agenda

- 1. Einleitung
- 2. Überblick Stromerzeugung
- 3. Stromimport/-export 2011 bis heute
- 4. Auslastung der Kopplungsstellen 2015
- 5. Zusammenhänge zwischen Import/Export und EE
- 6. Zusammenfassung

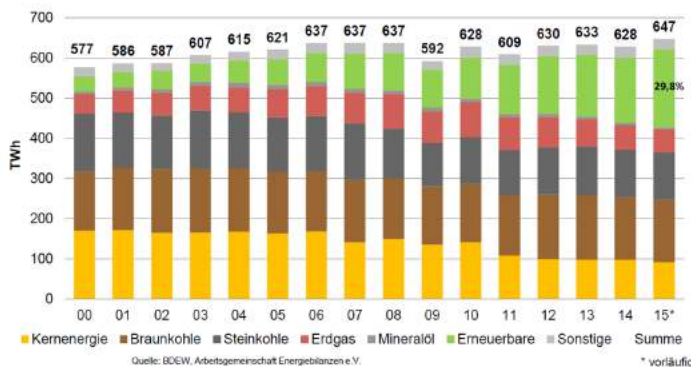
## 1. Einleitung

- Atomausstieg und CO<sub>2</sub> Ausstoßverminderung  
=> Größtenteils Grundlastkraftwerke
- immer höhere Einspeisung durch Erneuerbare Energien
- Energiespeicher (in den nächsten Jahren) nicht ausreichend
  - ➡ EE kaum steuerbar und nur wenige Speicher
  - ➡ Ausgleich von zu hoher oder zu geringer Leistungs- und Energiebereitstellung mit dem Ausland

# Agenda

- 1. Einleitung
- 2. Überblick Stromerzeugung
- 3. Stromimport/-export 2011 bis heute
- 4. Auslastung der Kopplungsstellen 2015
- 5. Zusammenhänge zwischen Import/Export und EE
- 6. Zusammenfassung

## 2. Überblick Stromerzeugung

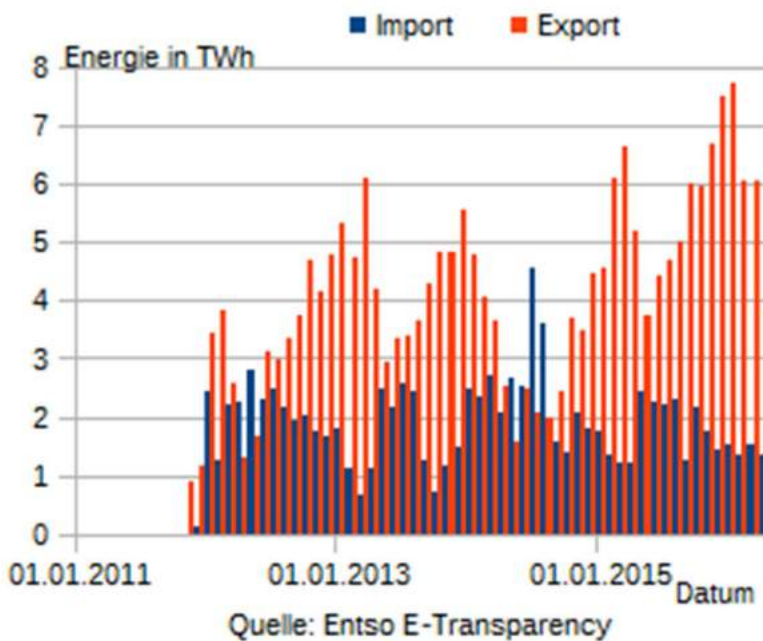


- Fast ein Drittel der Stromerzeugung EE (2015)
  - 14% der Erzeugung aus Kernkraft (Abschaltung bis 2022)
  - Geplante CO<sub>2</sub> Reduzierung bis 2020 um 60% (Bezugsjahr 1990)
- => Wegfall von insgesamt 20% der heutigen Stromerzeugung

# Agenda

- 1. Einleitung
- 2. Überblick Stromerzeugung
- 3. Stromimport/-export 2011 bis heute
- 4. Auslastung der Kopplungsstellen 2015
- 5. Zusammenhänge zwischen Import/Export und EE
- 6. Zusammenfassung

## 3.1 Stromimport/-export 2011 bis 26.4.2016

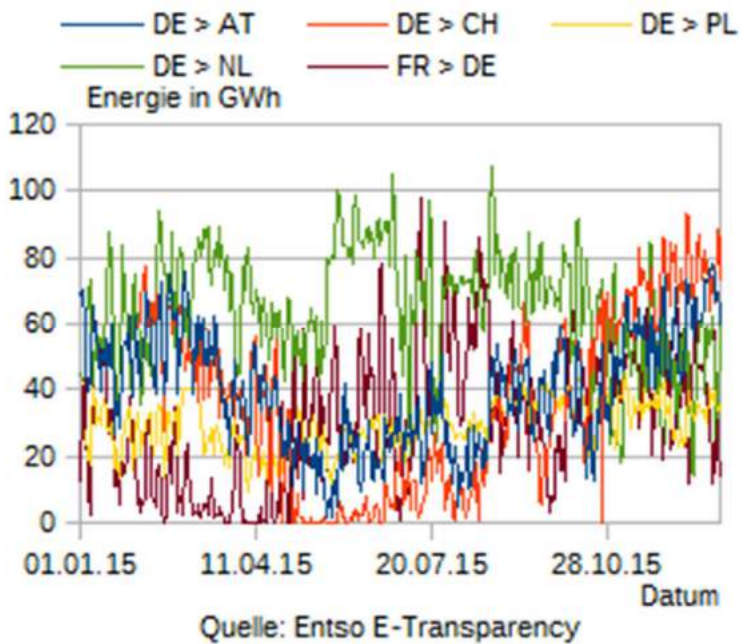


Einbruch 2014  
⇒ Keine Daten für NL  
(2015 23,7 TWh)

Export 2012: 39,6 TWh  
Export 2015: 66,4 TWh

Import 2012: 25,3 TWh  
Import 2015: 21,6 TWh

## 3.2 Stromimport/-export 2015



Export nach	Anteil [%]
Österreich	20
Schweiz	20
Polen	15
Niederlande	35,6

Import aus	Anteil [%]
Frankreich	>50

## Agenda

- 1. Einleitung/Motivation
- 2. Überblick Stromerzeugung
- 3. Stromimport/-export 2011 bis heute
- 4. Auslastung der Kopplungsstellen 2015
- 5. Zusammenhänge zwischen Import/Export und EE
- 6. Zusammenfassung

## 4.1 TTC/NTC/TRM

TTC = Total Transfer Capacity

Maximal übertragbare Leistung

NTC = Net Transfer Capacity

Maximal zulässige Übertragungsleistung

$NTC = TTC - TRM$

TRM = Transmission Reliability Margin

Reserve um Netzstabilität zu gewährleisten

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

Grenze DE-NL 250 MW

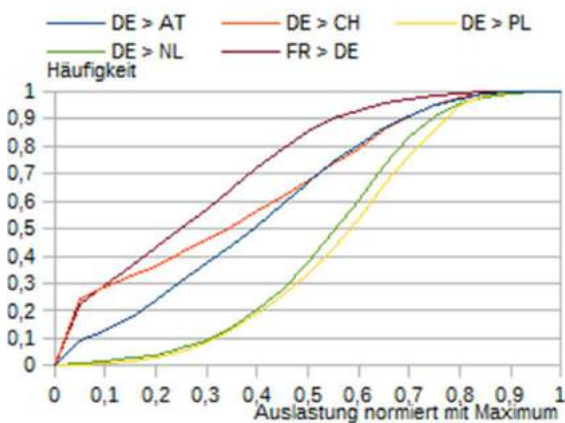
Grenze DE-CZ 100 MW

; n Anzahl der Kupplungsstellen

(Quelle: Tennet: Modell zur Kapazitätsberechnung)

; Reduziert auf Grund von Erfahrungswerten

## 4.2 Auslastung von einzelnen Grenzen



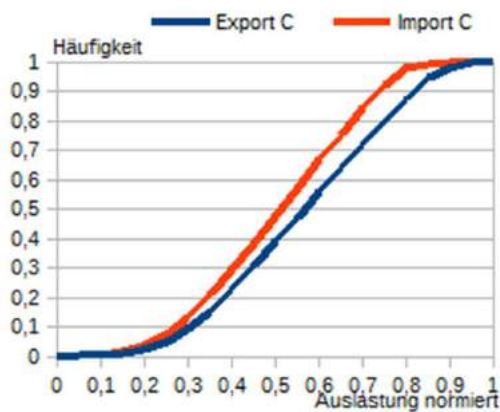
⇒ Keine Normierung mit NTC möglich

⇒ Export nach Niederlande und Polen  
ähnlicher Verlauf

⇒ Geringere Auslastung der anderen  
Grenzen

- Normierung mit Maximum 2011 bis 2015

## 4.3 Deutsches C 2015



- ⇒ Hälfte der Tage Auslastung bei 50% (Import) bzw. 60% (Export)
- ⇒ Maximaler NTC (Export) an 2 Tagen überschritten (0,5%)

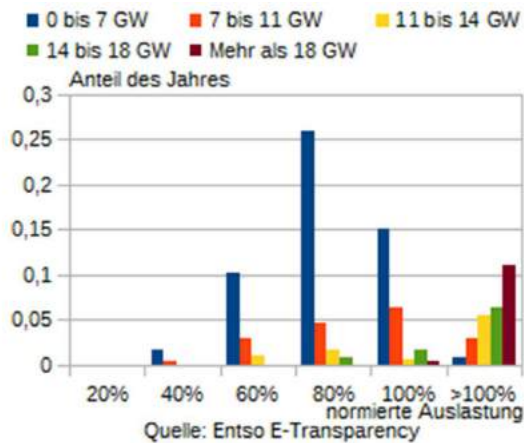
- Zusammengefasster NTC am Deutschen C (DE-NL-FR-CH)
- NTC abhängig von Einspeisung durch Windkraftanlagen (C-Funktion)
- Normierung Import/Export mit Maximum der C-Funktion

## Agenda

1. Einleitung/Motivation
2. Überblick Stromerzeugung
3. Stromimport/-export 2011 bis heute
4. Auslastung der Kopplungsstellen 2015
5. Zusammenhänge zwischen Import/Export und EE
6. Zusammenfassung



## 5.1 Windabhängigkeit des Deutschen Cs



➔ Mehr als zwei Drittel (72%) des Jahres der übertragenden Energie unterhalb oder gleich des NTC

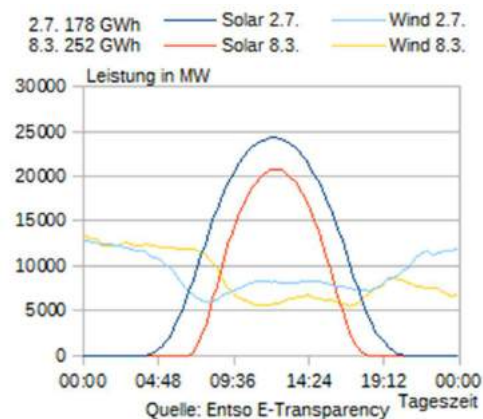
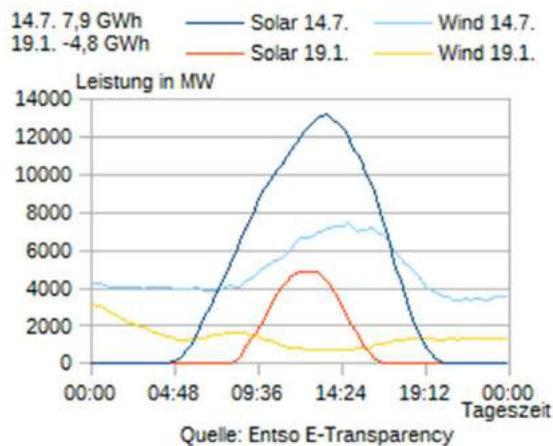
➔ 28% des Jahres Benutzung des TRM; Netzstabilität gefährdet

➔ Je größer die Einspeisung desto größer die Beanspruchung des TRM

➔ Bessere Ausnutzung der Windenergie erfordert Netzausbau (bzw. der Kupplungsstellen); besonders bei weiterem Zubau

- Tageswerte für maximale Kapazität aus NTC
- Mittlere Leistung der Windkraftanlagen über einen Tag
- Normierung übertragende Energie mit maximaler Kapazität
- Einteilung in die 5 Bereiche der C-Funktion

## 5.2 Zusammenhang Import/Export und EE



- Geringe Nettoexporte bzw. Importe bei schwacher EE Einspeisung
- Vermutlich hauptsächlich Export durch Einspeisung aus Windkraftanlagen

- Hohe Nettoexporte bei starker EE Einspeisung
- Geringere Exporte bei höherer Erzeugung => 08.03.2015 Sonntag

# Agenda

- 1. Einleitung/Motivation
- 2. Überblick Stromerzeugung
- 3. Stromimport/-export 2011 bis heute
- 4. Auslastung der Kopplungsstellen 2015
- 5. Zusammenhänge zwischen Import/Export und EE
- 6. Zusammenfassung

## 6. Zusammenfassung

- Wegfall von 20% der (heutigen) Stromerzeugung, wenn CO<sub>2</sub> Ausstoßverminderung erreicht werden soll  
=> Ersetzung durch Erneuerbare Energien
- Zunahme der Grenzübergreifenden Leistungsflüsse
- Deutsches C und angeschlossene Netze bereits heute durch Einspeisung aus Windkraftanlagen stark belastet  
=> Ausbau der Kopplungsstellen am Deutschen C bzw. der angeschlossenen Netze
- Speicher zur Verlagerung der nicht steuerbaren Erzeugung



**Ich danke für Ihre Aufmerksamkeit**

Fragen sind willkommen

# Was bringt der Stromspeicher von Tesla?

Tom Reinhardt

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

## Kurzfassung

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

## Abstract

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

## 1 Einleitung

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

## 2 Theoretische Grundlagen

Seit Anfang 2016 wird der Stromspeicher, der auf Basis der bekannten und verwendeten Lithium-Ionen-Batterie funktioniert, ausgeliefert. Teslas Powerwall soll die elektrische Energie, die Tagsüber von Photovoltaik Anlagen einspeist, z.B. nachts oder an Tagen mit wenig Sonnenstunden zur Verfügung stellen. Gefertigt wird der Speicher in Nevada, wo auch der Schlüssel des Stromspeichers liegt. Der Name Giga verrät schon, dass das Ziel ist, hier jährlich 35 GWh Zellen Gesamtkapazität herzustellen. Die Massenproduktion erlaubt es die Kosten pro kWh zu senken. Der Speicher kommt in zwei Varianten, einmal als Powerwall für eine Anwendung für 10-90 kWh, die andere Version Powerpack ab 100 kWh lässt sich beliebig oft aneinander Schalten. Somit kann je nach Anwendung eine kundenspezifische Anzahl an Powerpacks ermittelt werden. Die Powerwall, die sehr stark für private Anwender ausgelegt ist, kommt einmal als 7kWh oder 10 kWh daher. Jedoch wird der Speicher

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

## 3 Hauptteil / Erkenntnisse

Der Stromspeicher wird aus Lithium Ionen Speicherzellen zusammengesetzt. Diese Methode wird auch in den Fahrzeugen von Tesla verwendet. Die Speicherzellenherstellung soll in der Gigafactory 1 stattfinden. Das Format der Lithium Ionen Rundzellen 18650 wird künftig abgelöst vom 20700 Format. Dieses Format ist größer, Tesla verspricht sich für den gleichen Stückpreis größere Zellen und somit mehr Kapazität herstellen zu können. Allgemein will man mit der Gigafactory 1 den kWh Preis senken. In den folgenden Unterkapiteln wird die Funktionsweise der Lithium-Ionen-Akkus erklärt und wie diese in der Powerwall wieder zu finden sind. Es wird ebenfalls auf das Datenblatt der Powerwall eingegangen. Außerdem wird ein Ausblick auf den Markt der Stromspeicher gegeben

auch die Nachfrage gegeben ist und wie sich dieser Stromspeicher finanziell lohnen kann.

### 3.1 Lithium Ionen Akkumulatoren

Der Aufbau von Lithium Ionen Akkumulatoren lässt sich so beschreiben. An der Kathode ist die Lithium-Metall-Oxid Schicht. Hier werden die Lithium Ionen auf dem Weg gebracht zur Kathode. Hier durchlaufen sie einen Separator, dieser ist microporös damit ein hindurchtreten ermöglicht wird. Der Separator verhindert den direkten Kontakt zwischen Kathode und Anode. Erreichen die Lithium Ionen die Anodenseite beim Laden werden diese in eine Graphitschicht eingelagert. Die eingelagerten Lithium Ionen stehen nun beim Entladen der Zelle zur Verfügung.

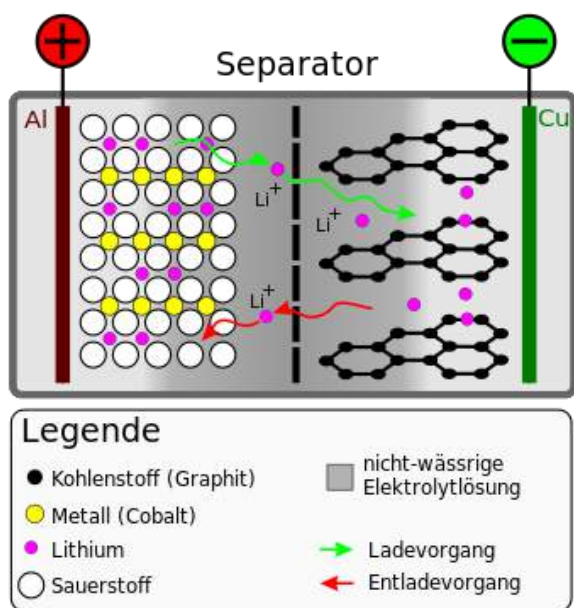


Bild 3.1 Schematischer Aufbau einer Li+ Zelle[6]

Lithium-Ionen-Akkus bieten den Vorteil dass diese eine hohe Energiedichte aufweisen. Das wichtige bei solchen Speichersystemen ist das BMS (Battery management system) was die Lithium-Ionen-Akkus erst so effizient macht. Li Ion Akkus sind sehr empfindlich was deren Lade und Entladeprozess angeht, Beim vollständigen Be- und Entladen kann der Akku dauerhafte Schäden davontragen und somit Kapazitätsverluste erleiden. Sie haben eine hohe Ladezyklenfestigkeit wenn der Akku zu 80% beladen wird und auf 20% entladen wird, das alles steuert dann das BMS. Ebenfalls muss bei Lithium-Ionen-Akkus auf die Lagerung geachtet werden. Diese sind nämlich besonders anfällig auf sehr hohe Temperaturen, daher ist eine effektive Kühlung äußerst wichtig. Teslas Powerwall wird zum Beispiel wassergekühlt. Teslas Powerwall und die Akkusysteme in deren Autos bestehen aus einer Vielzahl von Rundzellen. Tesla verwendet das 18650 Format als Rundzelle bereits für die Elektroautos, dieses Format wird durch das 20700 Format abgelöst und

wird zukünftig in der Gigafactory 1 gefertigt. Die neue Form der Rundzelle wird etwas Größer und bringt somit mehr Kapazität. Diese Rundzellen werden dann gestapelt und aneinandergereiht und kommen dann in ein Stahlgehäuse, das Stahlgehäuse dient zum mechanischen Schutz und zur Wärmeabfuhr, außerdem wird durch die Segmentierung der Speicherzellen eine effiziente Verwendung des Speichers statt.

### 3.2 Powerwall

Die Powerwall hat so viele Zellen das 6,4 kWh daraus abgerufen werden können. Sie soll problemlos für den Täglichen Gebrauch geeignet sein, bei einer Garantie von 10 Jahren. Die max. Entladeleistung von 3,3 KW können schnell erreicht werden, wenn man zum Beispiel eine Waschmaschine laufen hat dazu den Wasserkocher annacht und andere Geräte in betrieb sind. Das beudet das man auf jeden Fall vorausschauend sein soll beim Gebrauch der Energie der Powerwall. Bei der Powerwall handelt es sich um einen Hochvoltspeicher. Bei bereits installierten PV Anlagen muss geprüft werden ob der Wechselrichter kompatibel ist, zurzeit sind einige Wechselrichter nicht kompatibel.

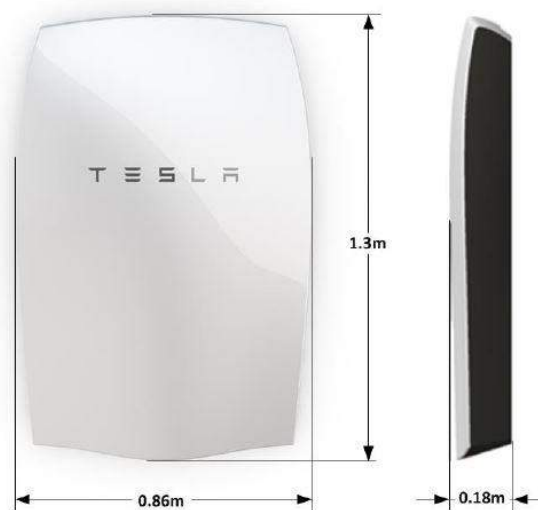


Bild 3.2 Powerwall mit Maßen[7]

Bei dem Model Powerpack sind Speichermengen ab 100 kWh verfügbar und hat mehrere Speicherzellenmodule. Der große Stromspeicher soll beliebig oft skalierbar sein und für Anwendungen problemlos in den Megawatt Bereichen gehen. Diese Module sind ebenfalls in der Powerwall verbaut. Das Powerpack besteht aus 16 solcher Module. Die Leistungselektronik ist jedoch bereits integriert. Die einzelnen Module sind separat austauschbar, falls es zum einzelnen Modul Ausfall kommen sollte. Angebliche Berichte das einige Hersteller alte Zellen, bessergesagt gebrauchte Zellen für Stromspeicher verbauen wollen hat sich bei der Powerwall nicht feststellen lassen, da Zellen mit dem neuen Format 20700 verbaut werden sollen. Eine Anfrage

bei Tesla ob dieses in Frage kommt, wurde leider ignoriert. Inhalt der Anfrage hat sich noch mit mehr Themen der Powerwall beschäftigt.

### 3.3 Nutzen und Markt

Bei Stromspeichern stellt sich die Frage welchen Vorteil der Kunde durch die Powerwall hat. Tesla gibt einen Preis von 3000 USD an für den Erwerb der Powerwall, jedoch ist es der Preis ohne Wechselrichter und Installation. Solarcity bietet die Powerwall mit rund 6000 USD mit Wechselrichter und Installation an. Einige Berichte sagen voraus das sich die Powerwall für den amerikanischen Markt nicht rentiert, denn dort liegt der durchschnittliche Strompreis bei 12,5 Ct/kWh, dennoch gibt es Kunden die Nutzung von Photovoltaik und Erwerb eines Stromspeichers aus Überzeugung tätigen. In Deutschland wo der Strompreis deutlich höher ist, kann sich jedoch die Powerwall rentieren vor allem durch die Förderung der KfW. Die KfW fördert neuerdings Strom Speicher. PV Anlagen mit Stromspeicher können eine Förderung erhalten die seit 31.12.2012 in betrieb gegangen sind und maximal innerhalb 6 Monaten an eine PV Anlage nachgerüstet wurden. Dies wurde bisher 357 Mal genutzt. Mittlerweile werden rund 90% der neuen PV Anlagen mit einem Stromspeicher verbaut. Insgesamt wurden in Deutschland ca. 40.000 Stromspeicher verbaut, Tendenz steigend. Die Situation mit den Konkurrenten sieht folgendermaßen aus. Daimler bringt jetzt auch ein Stromspeicher raus. Volkswagen erwägt eine eigene Fabrik wo nur Li Ion Akkus hergestellt werden sollen. Ob dort auch Stromspeicher hergestellt werden, weiß man noch nicht. Es gibt bereits Speicherhersteller wie Solarworld die ab 2 kWh einen Stromspeicher anbieten. Der Stromspeicher von Sonnen ist ab 4 kWh zuhaben jedoch für kanpp 3.600 €. Beispielsweise hat noch LG einen Stromspeicher der die gleiche Kapazität hat von 6,4 kWh und für 4.000 € zu haben ist. Tesla muss es schaffen einen günstigeren Preis anzubieten um ihren Kostenvorteil der Gigafactory unter Beweis zu stellen. Jedoch ist die Powerwall in den USA teilweise Ausverkauft und man muss auf neu gefertigte Einheiten warten.

## 4 Zusammenfassung/Fazit

Im Grunde genommen ist Teslas Powerwall ein gewöhnlicher Stromspeicher der sich gegen die Konkurrenz stellen muss. Der Speicher soll mit neuen Li Ionen Akkus mit einem neuen Format ausgestattet sein.

Die Powerwall hat jedoch eine hohe Nachfrage und Tesla versucht mit einem Kostenvorteil durch die Gigafactory 1 hervorstechen. Es gibt auch harsche Kritik an Tesla und der Powerwall, ob diese begründet ist, muss man explizit die Powerwall auf den Prüfstand stellen um zu zeigen wo die technischen Schwächen oder Stärken in diesem Produkt stecken. Doch revolutionäre Ausmaße nimmt die Powerwall nicht an, dennoch allein durch die große Ankündigung macht sie aufmerksam auf das Problem, dass man die Energienutzung auf altem Wege hinterfragen muss und bietet auch ein Teil der Lösung an.

## 5 Literatur

- [1] Tesla Motors 2016  
[https://www.teslamotors.com/de\\_DE/powerwall](https://www.teslamotors.com/de_DE/powerwall)  
[Zugriff 07.04.2016]
- [2] Benz Elektro  
[http://www.benz-elektro.eu/images/pdf/Powerwall-German\\_EU.pdf](http://www.benz-elektro.eu/images/pdf/Powerwall-German_EU.pdf)  
[Zugriff 05.05.2016]
- [3] Andreas Karius  
<http://www.automobilproduktion.de/hersteller/wirtschaft/studie-tesla-gigafactory-bedroht-andere-batteriehersteller-361.html>  
[Zugriff 11.05.2016]
- [4] KfW  
[https://www.kfw.de/PDF/Unternehmen/Zahlen-und-Fakten/KfW-auf-einen-Blick/F%C3%B6rderreport/KfW-F%C3%B6rderreport\\_03\\_2016.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Unternehmen/Zahlen-und-Fakten/KfW-auf-einen-Blick/F%C3%B6rderreport/KfW-F%C3%B6rderreport_03_2016.pdf)  
[Zugriff 04.06.2016]
- [5] <http://www.photovoltaike4all.de/pv4all-deal/3359/lg-chem-resu-6.4ex-lithium-ionen-speicher>  
[Zugriff 08.06.2016]
- [6] [https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator#/media/File:Li-Ion-Zelle\\_\(CoO2-Carbon\\_Schema\).svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator#/media/File:Li-Ion-Zelle_(CoO2-Carbon_Schema).svg)  
[Zugriff 11.05.2016]
- [7] <http://www.energymatters.com.au/wp-content/uploads/2015/12/tesla-powerwall.jpg>  
[Zugriff 11.05.2016]



## Was bringt der Stromspeicher von Tesla?

Tom Reinhardt, 30.06.2016

### Agenda

- Unternehmen Tesla
- Gigafactory 1
- Li-Lion
- 20700 Speicherzelle
- Powerwall
- Powerpack
- Wirtschaftlichkeit
- Vergleich
- Förderung/Nachfrage
- Konkurrenz
- Fazit





## Tesla als Unternehmen

- Bekannt durch die E-Autos
- Gegründet von Martin Eberhard und Marc Tarpenning und Elon Musk
- Noch keinen Gewinn
- Unternehmensphilosophie
  - Umweltfreundliche Energiegenerierung und Mobilität
  - Freigabe der Patente



## Gigafactory 1



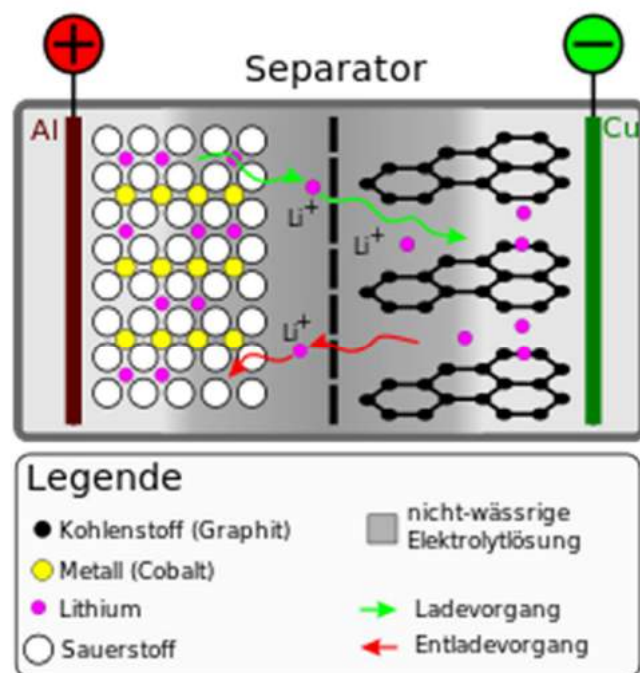
Courtesy: Tesla Motors

# Gigafactory 1

- Projektkosten 5 Mrd. Dollar
- Gemeinsam mit Panasonic
- Massenproduktion soll zukünftig den Preis der Speicherzellen senken
- Jährlich sollen Zellen mit 35 GWh produziert werden
- Größtes Gebäude der Welt

## Lithium Ionen Akkumulator

- Mit der richtigen Elektronik effizient
- Lagerbedingungen
- Ladezyklenzahl
- Sehr geringer Memory Effekt



## 20700 Zellen Format

- Tesla verwendet die sogenannten 18650 Rundzellen. Nur etwas größer als die bekannten AA Batterie. In der Gigafactory 1 werden ebenfalls zylinderförmige Zellen, allerdings mit dem Format 20700 hergestellt.
- Diese werden dann gestapelt und in ein Stahlgehäuse verbaut. Der Stahl sorgt für die Wärmeabfuhr und die segmentierten Akku Bereiche führen zu einer effizienten Entladung der Zellen.
- Powerwall besteht aus einer enormen Anzahl von den 20700 Rundzellen, die gleiche Methode wird in den Fahrzeugen von Tesla verwendet.

## 18650 Format

- Eine 18650 Zelle
- Tesla hat selbst jahrelang die 18650 Zelle verwendet
- Die neue 20700 Zelle ist größer somit mehr Kapazität



## Powerwall

- 6,4 kWh
- Versorgt eine Familie einen Abend lang mit Strom
- Tageszykleneinsatz
- Max. Entladeleistung sind 3,3 KW
- Garantie 10 Jahre
- Hochvoltpeicher
- Wenige Wechselrichter kompatibel



## Powerwall

- Skalierbar
- Wiegt ca. 100 Kg
- Flüssigkeit gekühlt
- Umgebungstemperatur -20 bis 50 grad
- Sehr stark nachgefragt



## Powerpack

Das Powerpack Modell ist für große Speichermengen ab 100 kWh gedacht.



## Powerpack

- Gleiches Prinzip wie bei der Powerwall
- 16 einzelne Module
- Sind austauschbar
- Leistungselektronik vorhanden
- Ebenfalls skalierbar



## Wirtschaftlichkeit

- Tesla gibt einen Preis von 3000,- USD an, was jedoch nicht bedacht wird das ein Wechselrichter und nur lizenzierte Unternehmen sie verbauen, Solarcity bietet den Verkauf mit Wechselrichter und Installation mit rund 6000,- USD an.
- Laut einigen Berichten ist die Tesla Powerwall für den US Markt nicht rentabel.

## Vergleich USA und Deutschland

- **USA**
  - Kaum Regulierung des Strommarktes
  - Vergleichsweise geringer Strompreis durchschnittlich 12,5 Ct/kWh

→Lohnt sich das?
- **Deutschland bzw. Europa**
  - Hoher Regulierungsgrad
  - Strompreis durchschnittlich 29 Ct/kWh

→Könnte sich lohnen



## Förderung und Nachfrage

- Der KfW 275 Kredit fördert Stromspeicher. PV-Anlagen, die seit 31.12.12 in Betrieb sind und einen PV Speicher eingebaut haben, können diese Förderung erhalten. Insgesamt wurde der Kredit 354 mal genutzt. Eine Förderung für neue PV Anlagen mit PV Speicher wurden 1544 mal vergeben. In einem Zeitraum von 3 Monate.
- Rund 90% aller PV Anlagen werden heutzutage mit direkt einem Stromspeicher verbaut
- In Deutschland wurden schon ca. 40.000 Stück verkauft. Der Markt ist also vorhanden.

## Konkurrenz

- Mittlerweile kündigt sich vermehrt Konkurrenz aus der Automobilbranche an. Volkswagen erwägt ebenfalls eine Akku Fabrik, Daimler bringt einen Stromspeicher raus, es gibt schon mehrere Anbieter unter anderem einige deutsche Hersteller wie zum Beispiel SolarWorld, Sonnen.
- Tesla dringt nicht in einen vollkommen neuen Markt ein, sondern es tummeln sich viele Hersteller in diesem Bereich, Tesla will mit der Leistung und dem Preis dagegen ankämpfen.



## Konkurrenz



## Fazit

- Zusammengefasst ist die Powerwall ein gewöhnlicher Stromspeicher der sich mit anderen Stromspeicher auf dem Markt messen muss.
- Es nichts revolutionäres wie von einigen behauptet, kann durchaus erfolgreich sein durch mit der Ambition die Tesla an den Tag legt.
- Macht auf jeden fall auf die Problematik aufmerksam.

# Lastprognoseverfahren im Bereich von Wohnquartieren

## Load forecasting methods in the area of residential districts

Jana Messmer, B.Eng

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

### Kurzfassung

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

### Abstract

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

## 1 Einleitung

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

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

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

## 2 Grundlagen

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

eine stochastische Methode und geht von den einzelnen elektrischen Verbrauchern im Haushalt aus und versucht mit einem realistischen Modell die Realität abzubilden, um den Lastverlauf zu prognostizieren. Dabei wird die Leistung der einzelnen Geräte mit dem Verbraucherverhalten und der Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins im Haushalt kombiniert und daraus ein Lastverlauf errechnet. Da diese Methode von einzelnen Geräten in Haushalten ausgeht, ist es möglich damit auch kleine Siedlungen oder auch nur einzelne Häuser zu berechnen. Ein beispielhafter Aufbau eines Bottom-up Modells ist in **Abbildung 1** zu sehen.

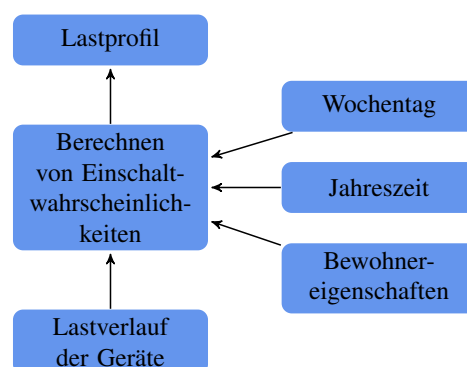
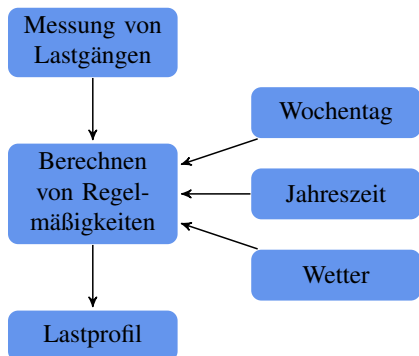


Abbildung 1 Aufbau des Bottom-up Modells

Die Top-down Methode ist eine statistische Methode bei der Lastverläufe der Haushalte gemessen und Regelmäßigkeiten mathematisch bestimmt werden. Auf Grund der Regelmäßigkeiten werden Vorhersagen für ähnliche Fälle ge-

troffen, wobei häufig die Wochentage, Jahreszeit und auch Wettergegebenheiten berücksichtigt werden. Der schematische Aufbau des Top-down Modells ist in **Abbildung 2** zu sehen.



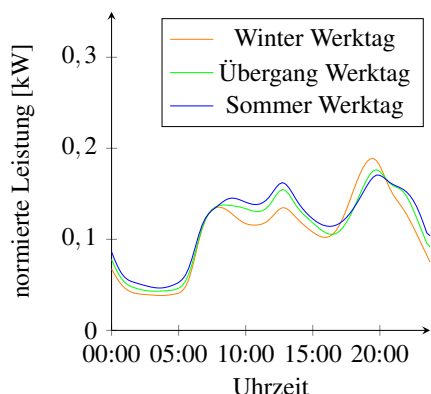
**Abbildung 2** Aufbau des Top-down Modells

### 3 Beispiele für Verfahren

In den folgenden Abschnitten werden einige Verfahren zur Erstellung von Lastprognosen vorgestellt sowie deren Vor- und Nachteile erläutert.

#### 3.1 Standardlastprofilverfahren

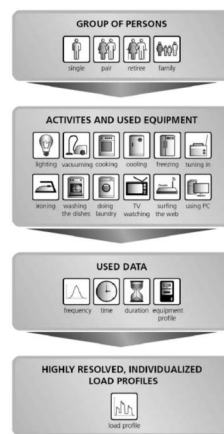
Das Standardlastprofilverfahren wurde 2000 von der TU Cottbus im Auftrag des VDEW entwickelt und besitzt eine Genauigkeit von 15 Minuten. Es wird auch heute noch von allen großen Energieversorgungsunternehmen und Netzbetreibern benutzt. Standardlastprofile lassen sich erst ab 300 Haushalten anwenden und eignen sich somit nicht für kleine Siedlungen oder einzelne Wohneinheiten. Des Weiteren wurde das Profil seit 2000 nicht erneuert, womit die Änderung des Verbraucherverhaltens in den letzten 16 Jahren nicht im Profil berücksichtigt wird. Vorteile des Standardlastprofilverfahrens sind die einfache Handhabung und die etablierte Nutzung. Der Profilverlauf der Werktag bei Haushalten ist in **Abbildung 3** zu erkennen.



**Abbildung 3** Standardlastprofil

#### 3.2 SynPRO

Das Modell entstand 2015 und besitzt eine Genauigkeit von 10 Sekunden. SynPRO wurde speziell für deutsche Haushalte entwickelt und unterscheidet sozialökonomische Aspekte, wie Arbeitsrhythmus, Alter und Familiensituation der Bewohner und die Art des Hauses. Des Weiteren werden auch hier 3 verschiedene Wochentage und Jahreszeiten unterschieden. Eine Besonderheit des Verfahrens ist die Aufteilung der Geräte in Benutzer-abhängig und -unabhängig. Als Benutzer-abhängig werden alle Geräte gezählt, welche aktiv vom Nutzer eingeschaltet werden, wie zum Beispiel Elektrogeräte und die Waschmaschine. Zu den Benutzer-unabhängigen Geräten gehören unter anderem der Kühlschrank und die Gefriertruhe. [3] Der Ablauf des Verfahrens ist in **Abbildung 4** zu sehen.



**Abbildung 4** Aufbau des Modells SynPRO [3]

#### 3.3 Modell der TU Wien

Das Modell wurde 2012 von der TU Wien entwickelt und besitzt eine Genauigkeit von einer Sekunde. Als Datengrundlage wurden Messungen genutzt, sowie eine großflächige Umfrage zum Verbraucherverhalten, welche in Österreich durchgeführt wurde. Aufgrund der Umfrageergebnisse werden bei diesem Verfahren 9 Haushaltsklassen unterschieden. Außerdem gibt es auch hier 3 verschiedene Wochentage, 3 verschiedene Jahreszeiten und insgesamt 41 verschiedene Gerätetypen. Um Unsymmetrien im Netz erkennen zu können werden in diesem Modell alle 3 Phasen getrennt dargestellt und betrachtet. Außerdem ist es möglich die Blindleistungsaufnahme zu ermitteln. Auch dezentrale Einspeisepprofile sind hinterlegt, wobei die Blindleistungseinspeisung nicht berücksichtigt wird. Durch die hohe Genauigkeit eignet sich das Modell auch zur Untersuchung und Validierung von Regelkonzepten. [4]

Wie von den Lastverläufen der einzelnen Geräte ein gesamtes Lastprofil entsteht, lässt sich in **Abbildung 5** erkennen.

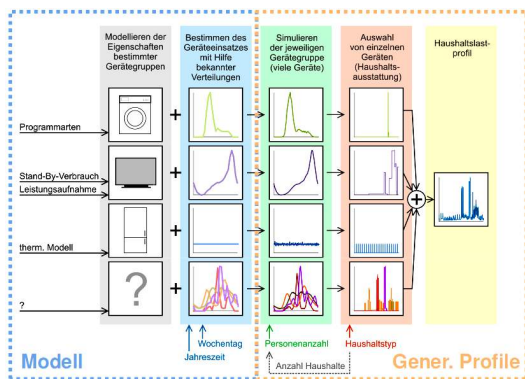


Abbildung 5 Aufbau des Modells der TU Wien [4]

### 3.4 Open-Source Modell

Das Open-Source Modell wurde 2011 von der Universität Loughborough erstellt und besitzt eine Genauigkeit von einer Minute. Das Modell wurde aus Messungen in Loughborough entwickelt. Als Besonderheit bezieht das Modell die Sonneneinstrahlung mit ein. Hierfür wurden Strahlungsmessungen ausgewertet. Sodass in der Simulation die Abschattung durch Wolken realistisch nachgebildet wird. Diese Abschattung wird in 2 Punkten berücksichtigt, zum einen steigt mit steigender Bewölkung auch der Bedarf an Licht und somit der Stromverbrauch, zum anderen sinkt bei steigender Bewölkung der erzeugte Strom durch PV-Anlagen. Diese beiden Phänomene werden in dem Modell berücksichtigt. Außerdem steht das Modell für alle zugänglich im Internet zur Verfügung. Es ist mit diesem Modell möglich mit der Einstellung weniger Parameter einen Beispiellastverlauf für einen Haushalt zu erzeugen. [5] Welche Komponenten bei diesem Modell eine Rolle spielen, ist in **Abbildung 6** zu sehen.

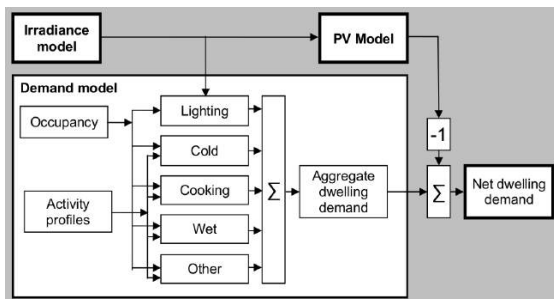


Abbildung 6 Aufbau des Open-Source Modells [5]

## 4 Zusammenfassung/Fazit

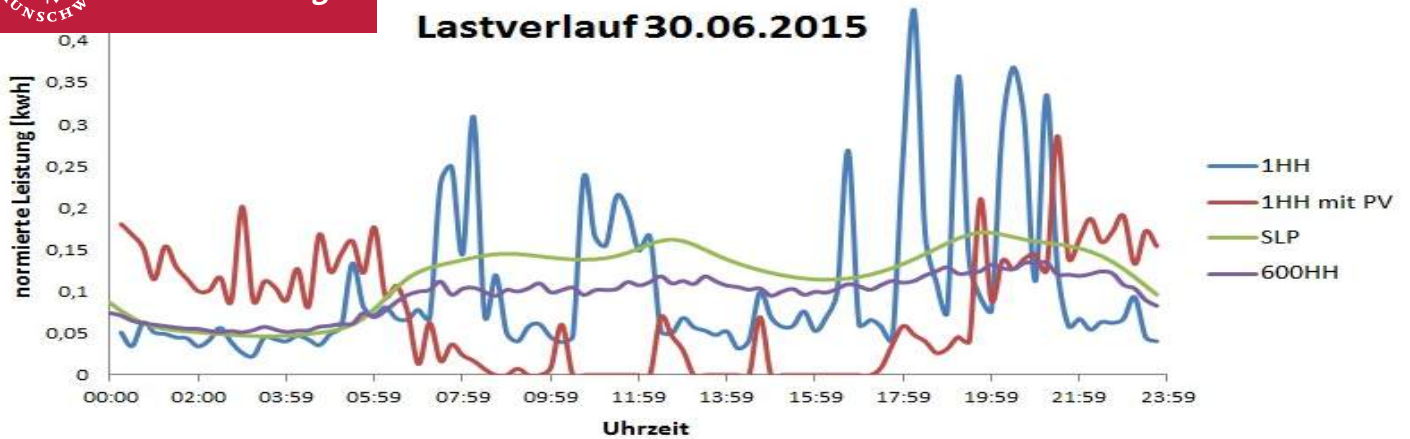
Jedes Modell wurde für einen bestimmten Aufgabenbereich entwickelt und hat somit seine Vor- und Nachteile.

## 5 Literatur

[1] T. Karner, Institut für Energiesysteme und elektrische Antriebe der TU Wien, „Synthetische Haus-

haltsprofile“, 05.11.2014. [http://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/lehre/bachelorarbeiten/BA\\_2014\\_Karner\\_Synthetische\\_Lastprofil.pdf](http://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/lehre/bachelorarbeiten/BA_2014_Karner_Synthetische_Lastprofil.pdf) [Zugriff am 22.05.2016].

- [2] R. Briegel, D. Filzek, P. Ritter, Regenerative Modellregion Harz, „Ergebnisbericht-Stromlastprognose“, 24.05.2012. [http://www.regmodharz.de/fileadmin/user\\_upload/bilder/Service/Arbeitspakete/AP-Bericht-Stromlastprognose\\_AP2.4\\_CUBE.pdf](http://www.regmodharz.de/fileadmin/user_upload/bilder/Service/Arbeitspakete/AP-Bericht-Stromlastprognose_AP2.4_CUBE.pdf) [Zugriff am 22.05.2016].
- [3] D. Fischer, A. Härtl, B. Wille-Haussmann, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems und KTH Institute of Technology (Schweden), „Model for electric load profiles with high time resolution for German households“, 19.12.2014. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778815000845> [Zugriff am 22.05.2016].
- [4] F. Zeilinger, A. Einfalt, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe der TU Wien und Siemens AG Österreich, „Modell für hochauflösende synthetische Haushaltlastprofile“, 17.02.2012. [http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_207001.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_207001.pdf) [Zugriff am 22.05.2016].
- [5] I. Richardson, M. Thomson, Department of Electronic and Electrical Engineering, Loughborough University, „Integrated simulation of photovoltaic micro-generation and domestic electricity demand: a one-minute resolution open source mode“, 2011. <https://dSPACE.lboro.ac.uk/2134/8774> [Zugriff am 23.06.2016].



## Lastprognoseverfahren im Bereich von Wohnquartieren

Jana Messmer, 30. Juni 2016

# Agenda

- **Einleitung**
- **Methoden zur Erstellung von Lastprognoseverfahren**
  - Top-down
  - Bottom-up
- **Beispiele für Verfahren**
  - Standardlastprofilverfahren
  - SynPRO
  - Modell der TU Wien
  - Open-Source Modell
- **Zusammenfassung**

# Agenda

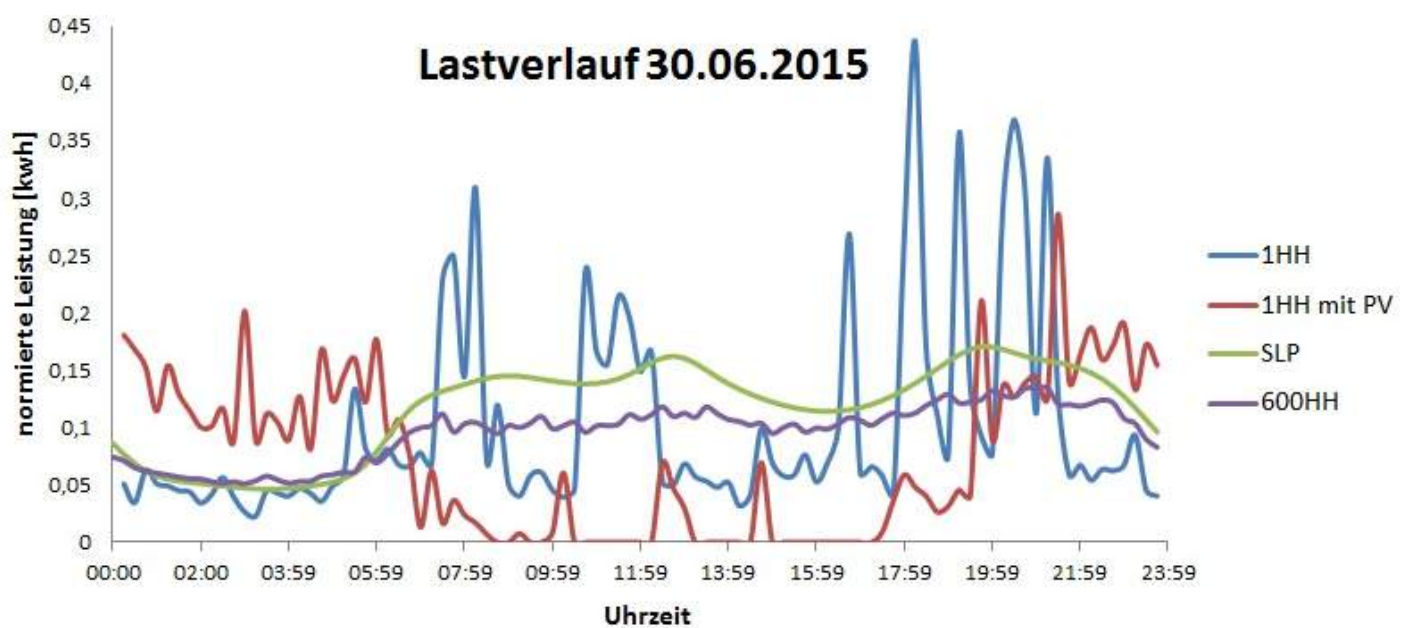
- **Einleitung**
- **Methoden zur Erstellung von Lastprognoseverfahren**
  - Top-down
  - Bottom-up
- **Beispiele für Verfahren**
  - Standardlastprofilverfahren
  - SynPRO
  - Modell der TU Wien
  - Open-Source Modell
- **Zusammenfassung**



# Einleitung 1

- Einschätzung der Lastverläufe
- Prognosen für:
  - Netzplanung
  - Stromhandel
  - Regelungen

## Einleitung 2



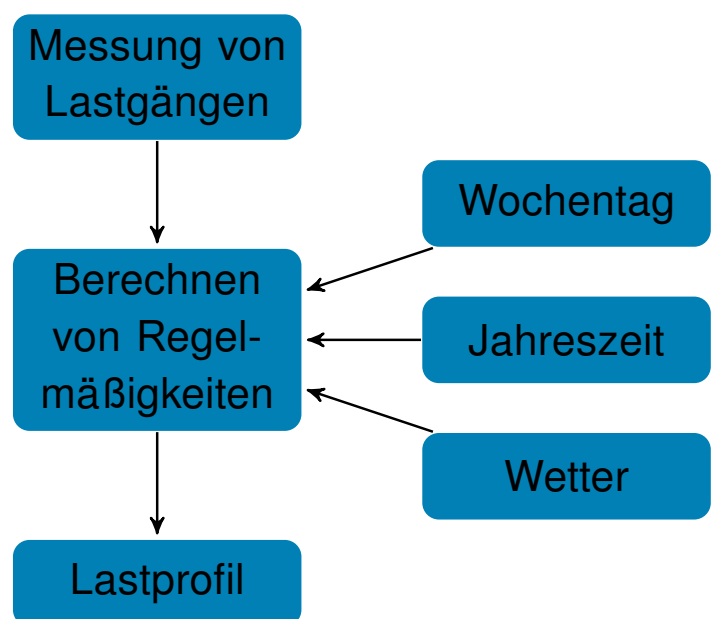
Quelle: selbst erstellte Grafik

# Agenda

- Einleitung
- **Methoden zur Erstellung von Lastprognoseverfahren**
  - Top-down
  - Bottom-up
- Beispiele für Verfahren
  - Standardlastprofilverfahren
  - SynPRO
  - Modell der TU Wien
  - Open-Source Modell
- Zusammenfassung

## Top-down

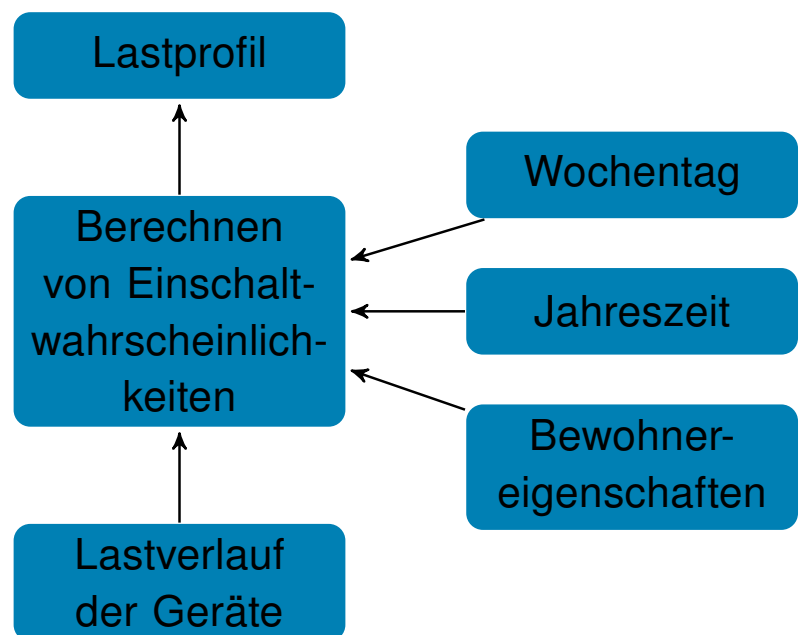
- stochastisches Verfahren
- Unterscheidungen:
  - Wochentag
  - Jahreszeit
  - ggf. Wettergegebenheiten
- Vorteil:
  - bewährtes Verfahren
- Nachteile:
  - ab ca. 300 Haushalten
  - viele, aufwendige Messungen



Quelle: selbst erstellte Grafik

# Bottom-up 1

- Modellbildung der elektrischen Geräte
- Wahrscheinlichkeiten:
  - Besitz des Gerätes
  - Benutzung des Gerätes
- Kombination aller Geräte  
→ Lastverlauf
- Vorteile:
  - für beliebig kleine Einheiten
  - individuell anpassbar
- Nachteile:
  - große Datenmenge



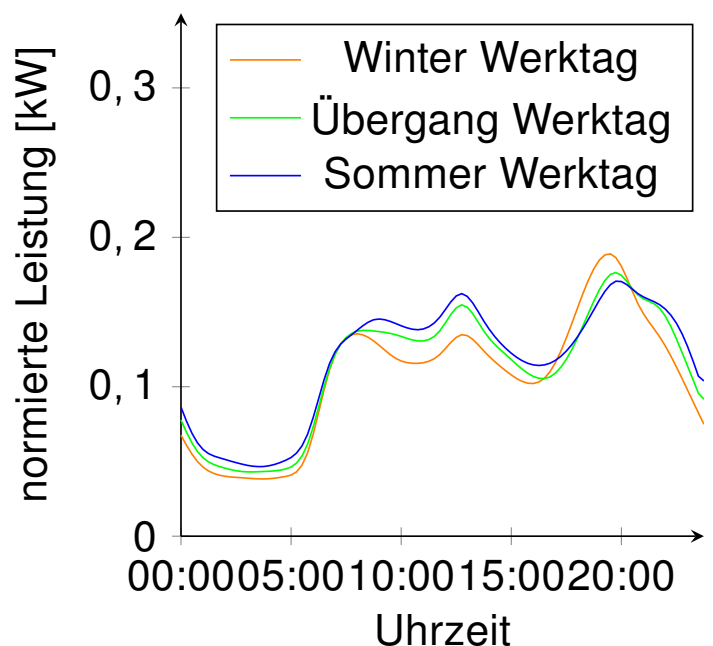
Quelle: selbst erstellte Grafik

# Agenda

- Einleitung
- Methoden zur Erstellung von Lastprognoseverfahren
  - Top-down
  - Bottom-up
- **Beispiele für Verfahren**
  - Standardlastprofilverfahren
  - SynPRO
  - Modell der TU Wien
  - Open-Source Modell
- Zusammenfassung

# Standardlastprofilverfahren 1

- Top-down Methode
- 2000 TU Cottbus entwickelt
- Genauigkeit: 15min
- ab 300 Haushalten einsetzbar
- Unterscheidungen:
  - Nutzung des Anschlusses
    - Gewerbe
    - Haushalt
    - Landwirtschaft
  - Jahreszeit (3 verschiedene)
  - Wochentage (3 verschiedene)



Quelle: selbst erstellte Grafik



## Standardlastprofilverfahren 2

- Anwendungen:
  - Verbrauchsprognosen in Niederspannungsnetzen
  - Netzplanung

### Vorteile:

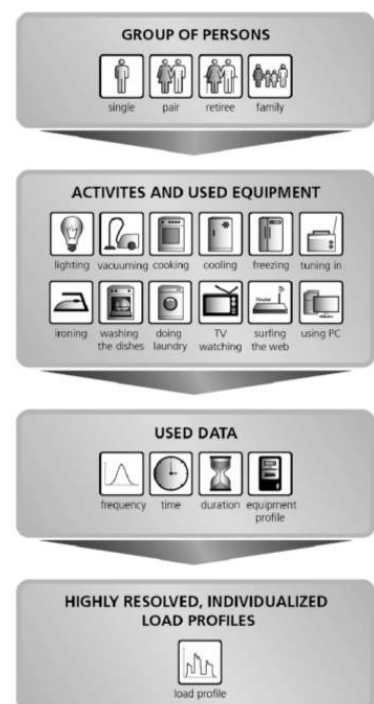
- einfache Handhabung
- etablierte Nutzung

### Nachteile:

- ab 300 Haushalten benutzbar
- Änderung der Verbraucherverhalten nicht berücksichtigt
- keine Änderungen seit 16 Jahren
- dezentrale Einspeisung wird nicht beachtet

# SynPRO 1

- Bottom-up Methode
- 2015
- Genauigkeit: 10s
- für deutsche Haushalte entwickelt
- Unterscheidungen:
  - sozialökonomische Aspekte:
    - Arbeitsrhythmus
    - Alter
    - Hausart
    - Familiensituation
  - Typ Tage (3 verschiedene)
  - Jahreszeit
  - Geräteaufteilung (Benutzer abhängig/unabhängig)



Quelle: [www.sciencedirect.com/](http://www.sciencedirect.com/)

[science/article/pii/S037877881500084](http://science/article/pii/S037877881500084)

30. Juni 2016 | Jana Messmer | Lastprognoseverfahren im Bereich von Wohnquartieren | Seite 12

S037877881500084

## SynPRO 2

- Anwendung: detaillierte Tageslastgänge

### Vorteile:

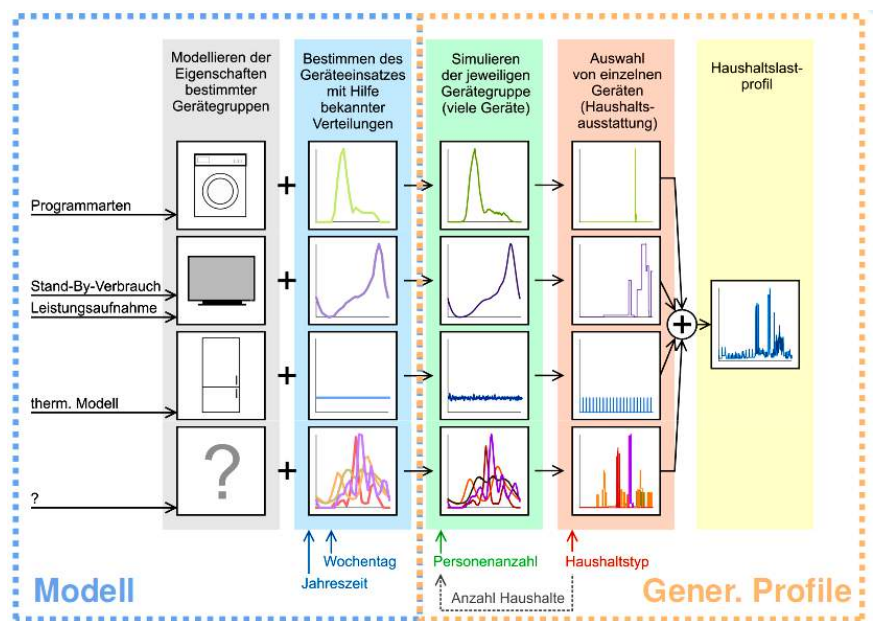
- Größere Genauigkeit als SLP-Verfahren
- einzelne Haushalte simulierbar

### Nachteile:

- viele Gerätedaten werden benötigt
- Angaben zu Bewohnern notwendig

# Modell der TU Wien 1

- Bottom-up Methode
- 2012 von der TU Wien
- Genauigkeit: 1s
- Daten aus Messungen und Umfrage
- Besonderheiten:
  - 3-phasig
  - Blindleistungsaufnahme
  - dezentrale Einspeiseprofile



Quelle: [http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_207001.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_207001.pdf)

## Modell der TU Wien 2

- Unterscheidungen:
  - Typ Tage (3 verschiedene)
  - Jahreszeiten (3 verschiedene)
  - Gerätetypen (41 verschiedene)
  - Haushaltsklassen (9 verschiedene)
- Anwendung: Untersuchung von Regelkonzepten

### Vorteile:

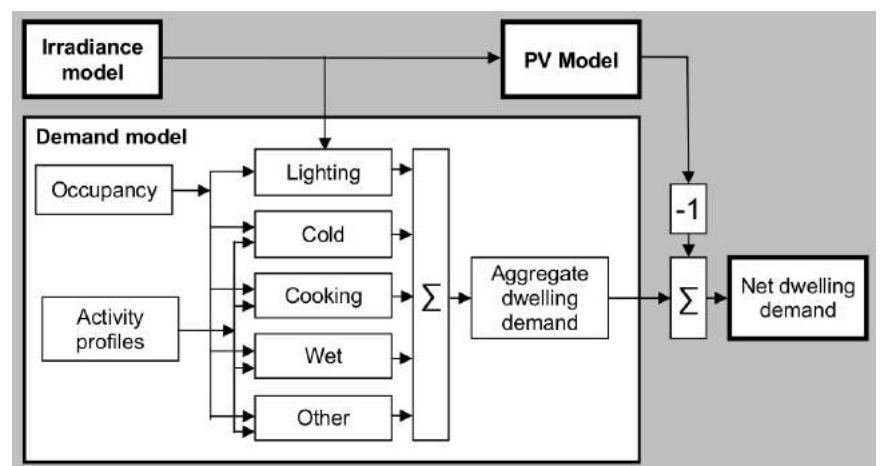
- Blindleistungsaufnahme
- 3-phasig

### Nachteil:

- Auf Haushalte in Österreich angepasst

# Open-Source Modell 1

- Bottom-up Methode
- 2011 von der Loughborough Universität
- Genauigkeit: 1 min
- Daten aus Messungen
- Besonderheiten:
  - frei zugängliches Modell
  - berücksichtigt Sonneneinstrahlung (PV und Licht)



Quelle: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/8774>

## Open-Source Modell 2

- Anwendung: Tageslastprofilerstellung für einen Haushalt

### Vorteile:

- frei verfügbar
- Berücksichtigung von Sonneneinstrahlung

### Nachteile:

- nur ein Haushalt simulierbar



# Agenda

- Einleitung
- Methoden zur Erstellung von Lastprognoseverfahren
  - Top-down
  - Bottom-up
- Beispiele für Verfahren
  - Standardlastprofilverfahren
  - SynPRO
  - Modell der TU Wien
  - Open-Source Modell
- Zusammenfassung

## Zusammenfassung

Verfahren	SLP	SynPRO	TU Wien	Open-Source
Genauigkeit	15 min	10s	1s	1 min

→ Jedes Verfahren wurde für einen bestimmten Anwendungsbereich optimiert.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

# Netzleittechnik für Offshore-Windparks

## Network control technology for offshore wind farms

Stefan Lehmker, B.Eng.

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

### Kurzfassung

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

### Abstract

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

## 1 Einleitung

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

## 2 Theoretische Grundlagen

Nach [1] ist die Netzleittechnik ein Hilfsmittel zum „Erfassen, Übertragen, Aufbereiten, Verknüpfen, Hinterlegen und Anzeigen von Zustandsinformationen aus dem Netz“ sowie für das „Entgegennehmen, Aufbereiten, Übertragen, Aufgeben und Überwachen von Befehlsinformationen vom betriebsführenden Menschen

zum Netz“. Das Überwachen und Steuern der Netze mittels Computer wird auch als Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) bezeichnet. Dazu befindet sich üblicherweise am Standort des Netzbetreibers eine zentrale Netzleitstelle. Diese ist rund um die Uhr besetzt. Die Mitarbeiter der Netzleitstelle steuern die Netze aktiv und werten alle Informationen des Netzleitsystems über ein Human Machine Interface (HMI) aus. Ohne Übertragungstechnik und einem im Leitsystem hinterlegten Datenmodell können jedoch keine Informationen in der Leitstelle verarbeitet werden. Am Beispiel eines Strommesswertes wird der Übertragungsweg deutlich (Bild 1). Über einen Wandler wird der Messwert eines Kabelabgangs z.B. einem Steuergerät per Draht zugeführt. Das Steuergerät wandelt diesen Messwert in ein digitales Signal um. Der Messwert wird dann über eine Schnittstelle und ein standardisiertes Protokoll zur lokalen Fernwirkanlage übertragen.

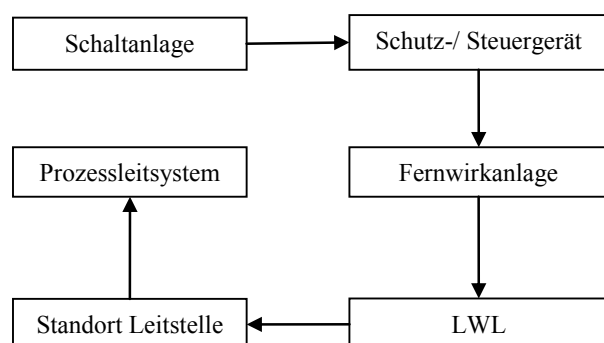


Abbildung 1 Informationsübertragung

Heutiger Standard ist dabei die Normreihe IEC 60870 als allgemeines Übertragungsprotokoll für Schutz- und Leittechnik in elektrischen Schaltanlagen der Mittel- und Hochspannungstechnik. Dort muss der Messwert korrekt verarbeitet werden damit er an der richtigen Stelle im Leitsystem angezeigt wird. Dazu ist ein Datenmodell notwendig, in dem alle Messwerte, Befehle und Meldungen hinterlegt sind. Dieses Datenmodell ist auf einem separaten Datenmodell-Server abgelegt. Es handelt sich dabei um sehr große Datenmengen, die das gesamte Netz bis ins kleinste Detail beschreiben. Ein einzelner Datenpunkt wird unter anderem durch eine Anlagenzuordnung, Bezeichnung, Messbereich und Fernwirkadresse genau definiert. Neben der Steuerung von Anlagen und der Meldungsanzeige bieten Leitsysteme noch viel komplexere Möglichkeiten, denen in Zukunft eine wichtige Bedeutung zukommen wird. Zu diesen höheren Entscheidungs- und optimierungsfunktionen (kurz HEOs) zählt z.B. eine automatische Lastflussberechnung vor einem Schaltvorgang.

### 3 Hauptteil / Erkenntnisse

Die Netzleittechnik ist in ständiger Entwicklung um sich an die neuen Anforderungen der Stromversorgung anzupassen. Bei dem Betrieb der Offshore-Anlagen stellt sich daher die Frage in wie weit spezielle Anforderungen an die Leitsysteme und den damit verbunden Aufgaben gestellt werden.

#### 3.1 Betrieb der Anlagen

Grundsätzlich muss man sich verdeutlichen, dass die detaillierte Steuerung und Überwachung der Offshore-Windkraftanlagen nicht über die Netzleitsysteme der Übertragungsnetzbetreiber erfolgt. Praktisch werden diese Anlagen wie eigenständige Kraftwerke behandelt und durch ein Leitsystem vor Ort überwacht. Der Netzbetreiber steuert und überwacht dann nur noch den Übergabepunkt am Festland (Bild 2 rechts). Des Weiteren stellt sich die Frage ob dafür spezielle Netzleitsysteme für Offshore-Windparks notwendig sind. Andernfalls müssen die Besonderheiten der Offshore-Technik in vorhandene Kraftwerks-Leitsysteme integriert werden. Die Leitsystem-Hersteller bieten spezielle Leitsysteme für Windkraftanlagen an. In wie weit sich diese System zu anderen Leitsystemen unterscheiden lässt ohne detaillierte Informationen der Hersteller nur schwer sagen.

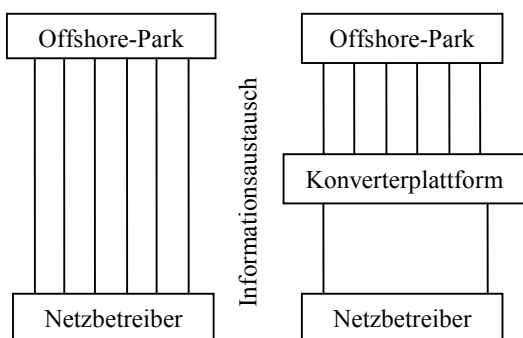


Abbildung 2 Steuerung Offshore-Windparks

Der wichtigste Controller im Windpark das Windpark SCADA oder Wind SCADA. Dort laufen alle Informationen aus den Windturbinen zusammen. Bild 3 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus dem Leitsystem für den Offshore-Park alpha ventus. Je nach Turbinentyp besitzt das Wind SCADA 3000 Datenpunkte zur exakten Steuerung, Regelung und Überwachung der Turbine. Die Daten werden direkt für eine Turbinendiagnose aufbereitet. Außerdem verfügt es über eine Kommunikationsschnittstelle zum Windpark-Energieleitsystem. Hier werden Informationen wie Regelleistung, Verfügbarkeit, Status und die wichtigsten Alarme empfangen und für die Turbinenansteuerung aufbereitet (vgl. [2]). In größeren Windparks gibt es neben dem Wind SCADA eine zusätzliche Anzahl von Signalen, z. B. von Anlagenteilen, die an das zentrale Leitsystem angeschlossen werden.

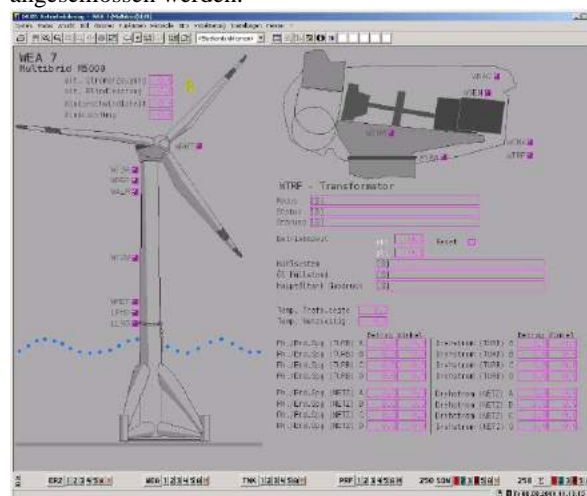
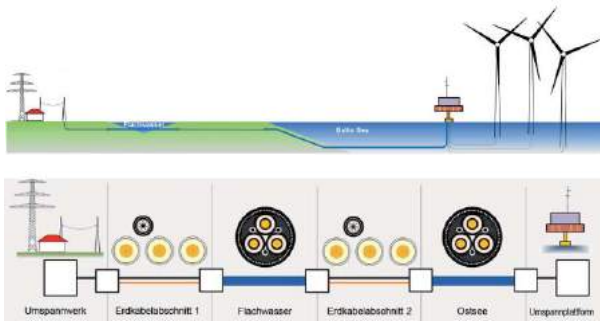


Abbildung 3 Detailbild Leitsystem [3]

Die Erzeugungsleistung von Windparks reicht heute schon an die Leistung von Kraftwerken heran. Die dauerhafte Besetzung der Windparks mit Personal ist jedoch mit deutlich höheren Kosten verbunden. Deswegen steht gerade der Aufbau von Remote Operation Centern immer stärker im Fokus

#### 3.2 Fernwirktechnik

Neben den Energieadern der Hoch- und Mittelspannungskabel verfügen Seekabel zusätzlich über Lichtwellenleiter (Bild 4). Über diese Fasern erfolgt die Kommunikation der Windkraftanlagen mit dem Festland. Eine Integration der LWL-Adern in die Seekabel führt zu einer neuen Herausforderung bei den Kabelübergängen. Es müssen spezielle Muffen entwickelt werden für den Übergang von Seekabeln auf Erdkabel und deren LWL-Verbindung.



**Abbildung 4 Offshore-Kabelverbindung**

Die Windkraftanlagen kommunizieren über die Norm IEC 61400-25. Diese Norm ist speziell für Offshore-Anlagen entwickelt und vermeidet Anpassungen der Protokollstruktur aufgrund unterschiedlicher Hersteller der Windkraftanlagen und beruht auf der IEC 61850. Noch aktueller Stand der Technik ist dagegen die IEC 60870 als allgemeiner, offener Kommunikationsstandard im Bereich der Schaltanlagentechnik, Fernwirktechnik und Netzleittechnik. Inhalt dieser Normen ist eine genaue Darstellung der Informationsübertragung auf den jeweiligen Schichten. In der Beschreibung der physikalischen Schicht sind z.B. genaue Details zur LWL Verbindung beschrieben.

### 3.3 Störungsdienst

Bei einer Netzstörung am Festland wird abhängig von der Schwere der Störung von der Netzleitstelle direkt ein oder mehrere Mitarbeiter zur Störungsbeseitigung gerufen. Der zuständige Techniker fährt dann zur Fehlerstelle und verschafft sich erst mal einen Überblick. Der Störungsdienst bei den Offshore-Windkraftanlagen unterscheidet sich dagegen deutlich. Nach einer Warnmeldung aus dem SCADA-Leittechnik-Modul wird das Personal eine Fehleranalyse durchführen und priorisieren. Dazu sollte die Informationsübertragung aus der gestörten Windkraftanlage sehr hoch sein. Anhand der erhaltenen Störungsdaten erfolgt eine Instandhaltungs- und Einsatzplanung. Je nach Leistungsprognose der Windkraft entsteht in Bezug auf die Einsatzkosten ein optimaler Einsatzzeitpunkt. Der Einsatz wird dann während seiner gesamten Dauer vom Leitstellenpersonal überwacht. Die Begehung des gestörten Anlagenteils muss bei Offshore-Anlagen gut überlegt werden, da diese mit hohen Kosten verbunden ist. Ein konventionelles Kraftwerk besitzt meistens ein oder mehrere große Turbinen. Die Offshore-Technologie hat dagegen den Vorteil, dass viele kleine Turbinen zum Einsatz kommen und einzelne, gestörte Windkraftanlagen abgeschaltet werden können ohne das ein großer Leistungseinbruch im Vergleich zur Gesamtleistung entsteht.

### 3.4 IT-Sicherheit

Die Offshore-Windenergie stellt mittlerweile einen erheblichen Anteil an der in Deutschland installierten Erzeugungsleistung. Die Sicherheit dieser Erzeugungs-

anlagen muss daher gewährleistet werden. Aufgrund des großen Informationsflusses bei Übertragungsnetzbetreibern besitzen diese deutlich mehr Schnittstellen zur Außenwelt als lokale Stadtwerke. Mit steigenden Schnittstellen erhöht sich auch die Gefahr vor Angriffen von außen. Netzleitsysteme sind müssen deshalb vor Hackern und Fremdzugriff geschützt werden. Dies geschieht z.B. auf einfache Weise durch eine Firewall oder komplex durch eine demilitarisierte Zone (DMZ). Die DMZ schließt die Server für den Datenverkehr zwischen zwei Routern ein. Grundsätzlich gibt es aufgrund der Offshore-Windkraft aber nur wenige Besonderheiten zu der üblichen Netzleittechnik bezogen auf die IT-Sicherheit der Netzbetreiber. Bei anderen Sicherheitsaspekten wie Unfällen, Schiffshavarien und Terrorgefahr gibt es bei der Offshore-Technologie aber besondere Aspekte zu beachten.

## 4 Zusammenfassung/Fazit

Zusammenfassend stellt die Offshore-Technologie einige neue Anforderungen an die herkömmliche Leittechnik. Da sich die Leitsysteme aber bereits seit Jahren immer weiter verändern und mittlerweile an die erneuerbaren Energien angepasst haben, sind diese speziellen Anforderungen nicht sehr groß. Die Entwicklung von einheitlichen Kommunikationsstandards in den letzten Jahren hat dafür den Grundstein gelegt. Großen Einfluss hat der Ausbau der Offshore-Anlagen hingegen auf den Stellenmarkt. Für den Betrieb und Ausbau der Leittechnik werden verstärkt Fachkräfte gesucht. Die Netzleittechnik ist jedoch ein sehr spezielles Thema bei dem häufig sehr viel Erfahrung gefragt ist. Dieses Wissen muss zudem mit den neuen Anforderungen der Offshore-Technologie verknüpft werden. Den HEO-Funktionen (höhere Entscheidungs- und optimierungsfunktionen) wie z.B. einer automatischen Lastflussberechnung der Leitsysteme wird zukünftig immer mehr Bedeutung zukommen um sich der schwankenden Erzeugung der Offshore-Anlagen anzupassen.

## 5 Literatur

- [1] E.- G. Tietze, Netzleittechnik Teil 1: Grundlagen, Frankfurt am Main: VWEW Energieverlag, 2006.
- [2] Siemens, „Rundum Effizient, Optimierte Lösungen für die Windpark Automation“ September 2014. [Online]. Available: [www.siemens.com/download?DLA01\\_823](http://www.siemens.com/download?DLA01_823) [Zugriff am 26.06.16]
- [3] BTC, Steuerung von Offshore-Windparks – Das integrierte Leitsystem für alpha ventus, 6. November 2008. [Online] Available: [http://www.forwind.de/forwind/files/ws\\_08\\_09\\_vortragsreihe\\_luhmann.pdf](http://www.forwind.de/forwind/files/ws_08_09_vortragsreihe_luhmann.pdf) [Zugriff am 26.06.16]



## Netzleittechnik für Offshore-Windparks

Stefan Lehmker, 30.06.2016

### Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Hauptteile / Erkenntnisse
  - Betrieb der Anlagen
  - Fernwirktechnik
  - Störungsdienst
  - IT-Sicherheit
- Zusammenfassung

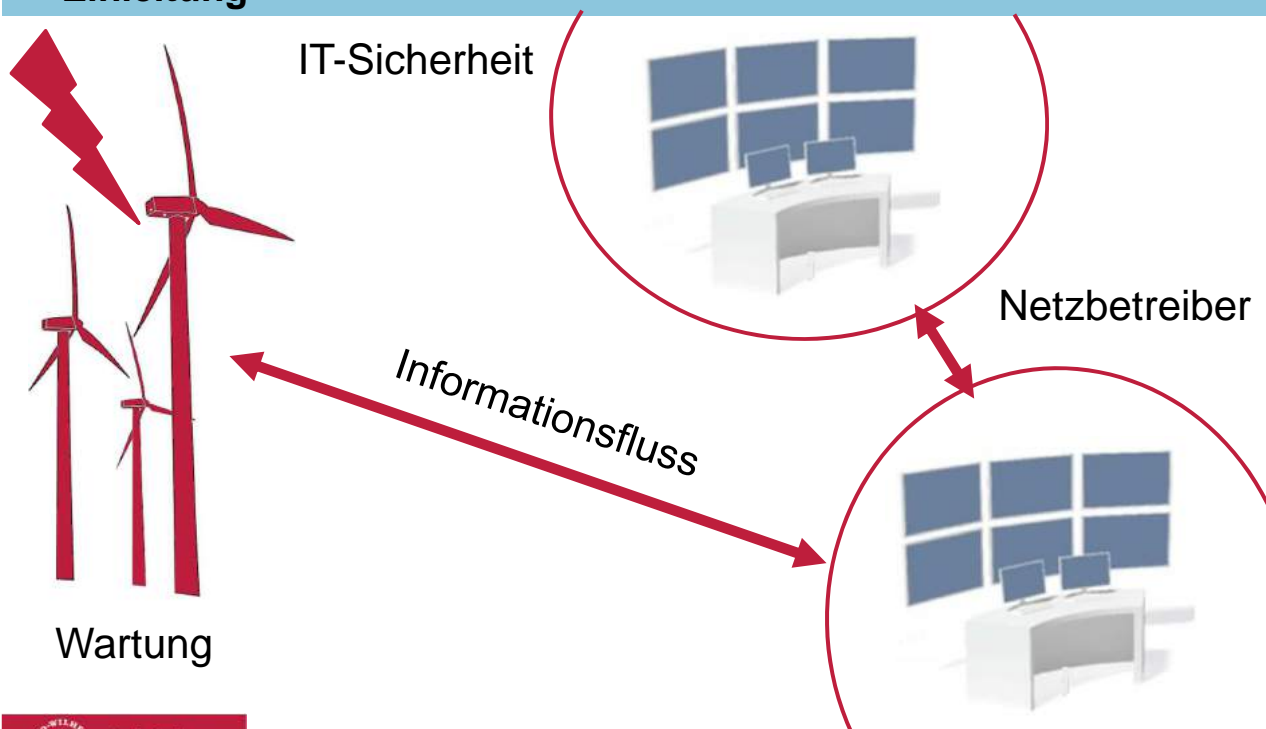




# Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Hauptteile / Erkenntnisse
  - Betrieb der Anlagen
  - Fernwirktechnik
  - Störungsdienst
  - IT-Sicherheit
- Zusammenfassung

## Einleitung



# Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Hauptteile / Erkenntnisse
  - Betrieb der Anlagen
  - Fernwirktechnik
  - Störungsdienst
  - IT-Sicherheit
- Zusammenfassung

## Theoretische Grundlagen

Netzleittechnik ist ein Hilfsmittel zum ...

- Erfassen
- Übertragen
- Aufbereiten
- Verknüpfen
- Hinterlegen
- Anzeigen

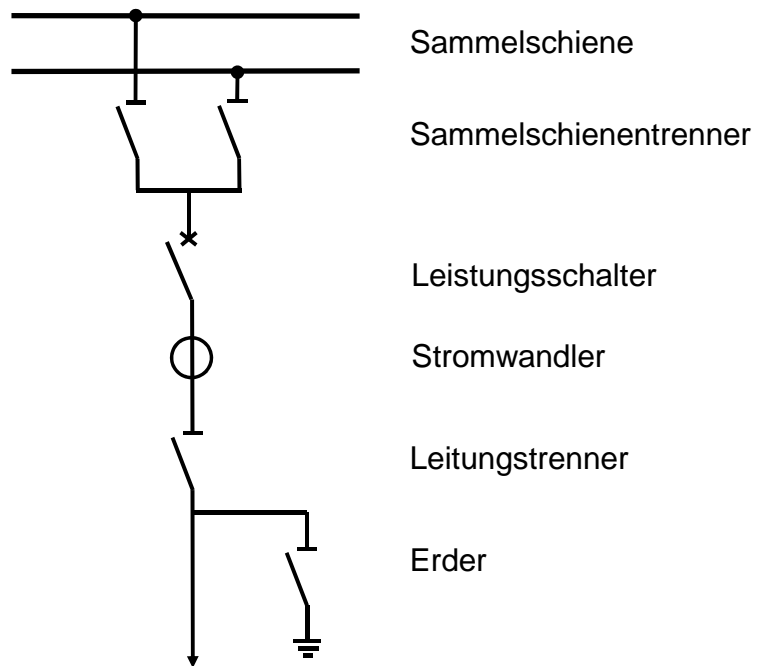
von Zustandsinformationen aus  
dem Netz“

- Entgegennehmen
- Aufbereiten
- Übertragen
- Aufgeben
- Überwachen

von Befehlsinformationen vom  
betriebsführenden Menschen zum  
Netz

SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)  
HMI (Human Machine Interface)

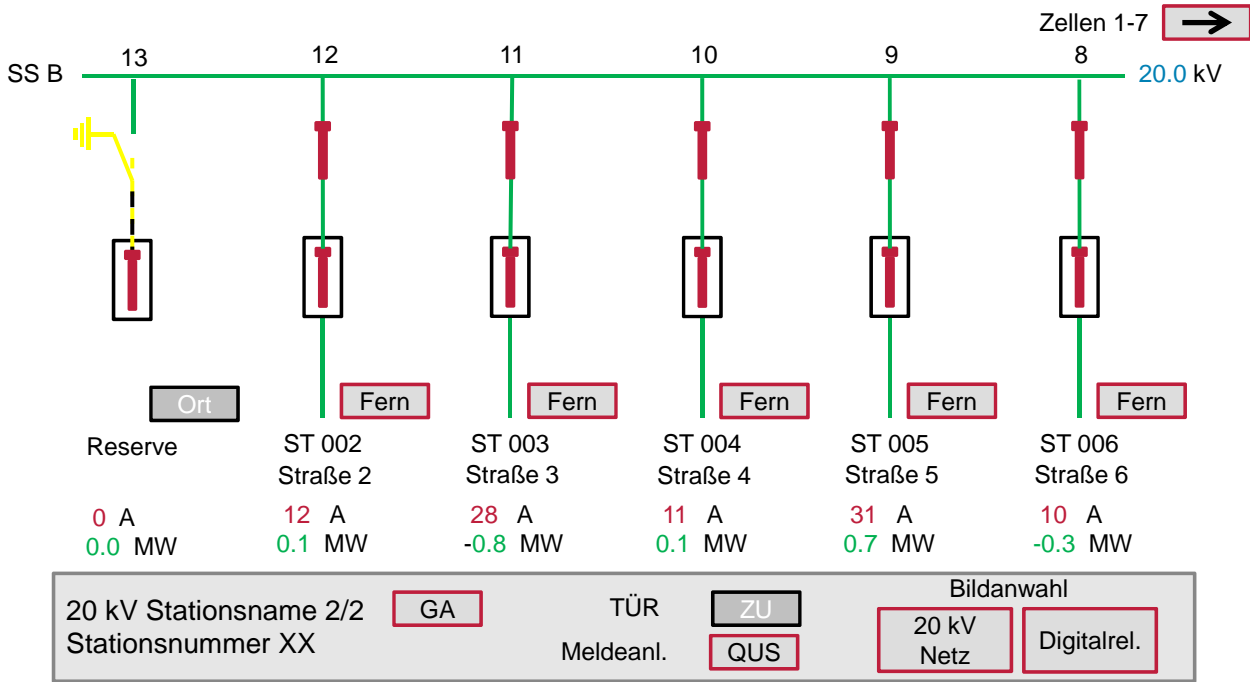
## Theoretische Grundlagen



## Theoretische Grundlagen



# Theoretische Grundlagen



20.06.16 | Stefan Lehmkner | Netzleittechnik für Offshore-Windparks | Seite 9



# Theoretische Grundlagen

## Datenpunktliste 20 kV Schaltanlage

Station	Schiene / Feld / Zelle	Gerät	Element	Zustandstext	Typ
Stationsname	Zelle 9	Leistungsschalter	Meldung	Ein / Aus	DMBM
Stationsname	Zelle 9	Leistungsschalter	Befehl	Ein / Aus	DBEF
Stationsname	Zelle 9	Sammelschienenentrenner 1	Meldung	Ein / Aus	DMBM
Stationsname	Zelle 9	Sammelschienenentrenner 1	Befehl	Ein / Aus	DBEF
Stationsname	Zelle 9	Leitungserder	Meldung	Ein / Aus	DMBM
Stationsname	Zelle 9	Leitungserder	Befehl	Ein / Aus	DBEF
Stationsname	Zelle 9	Erdschluss Richtung	Leitung	Ein / Aus	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	SF6	gestört	Meldung / Löschung	EMSK2
Stationsname	Zelle 9	Not UMZ	Ein	kommt / geht	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Melde/Messwertsperr	Ein	kommt / geht	EMSK3
Stationsname	Zelle 9	Steuergerät	gestört	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Steuergerät	Warnung	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Steuerung	Ort	Ein / Aus	EMSK3
Stationsname	Zelle 9	Fehler Verriegelung	Meldung	kommt / geht	EMSK3
Stationsname	Zelle 9	Abgang Spannung	U=0	kommt / geht	EMBM
Stationsname	Zelle 9	Automat	Sammelalarm	Meldung / Löschung	EMSK2
Stationsname	Zelle 9	Kommunikation	Meldung	i. O. / gestört	EKSK1
Stationsname	Zelle 9	Leistungsschalter	ausgelöst	Meldung / Löschung	EMSK1



20.06.16 | Stefan Lehmkner | Netzleittechnik für Offshore-Windparks | Seite 10



# Theoretische Grundlagen

## Datenpunktliste 20 kV Schaltanlage

Station	Schiene / Feld / Zelle	Gerät	Element	Zustandstext	Typ
Stationsname	Zelle 9	Schutz	Anregung L1	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Schutz	Anregung L2	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Schutz	Anregung L3	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Schutz	Generalanregung	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Schutz	Anregung N	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Schutz	Fehler Rückwärts	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Schutz	Fehler Vorwärts	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Schutz	Generalauslösung	Meldung / Löschung	EMSK1
Stationsname	Zelle 9	Schutz	Reaktanz primär		MW
Stationsname	Zelle 9	SD-Schutz	Reaktanz sekundär		MW
Stationsname	Zelle 9	SD-Schutz	Resistanz sekundär		MW
Stationsname	Zelle 9	Messung	Strom		MW
Stationsname	Zelle 9	Messung	Wirkleistung		MW

**Sparte, Kurzname, Teilanlage, Messbereich/Skalierung, Fernwirkbelegung, Warn- und Alarmgrenzen, ...**

# Theoretische Grundlagen

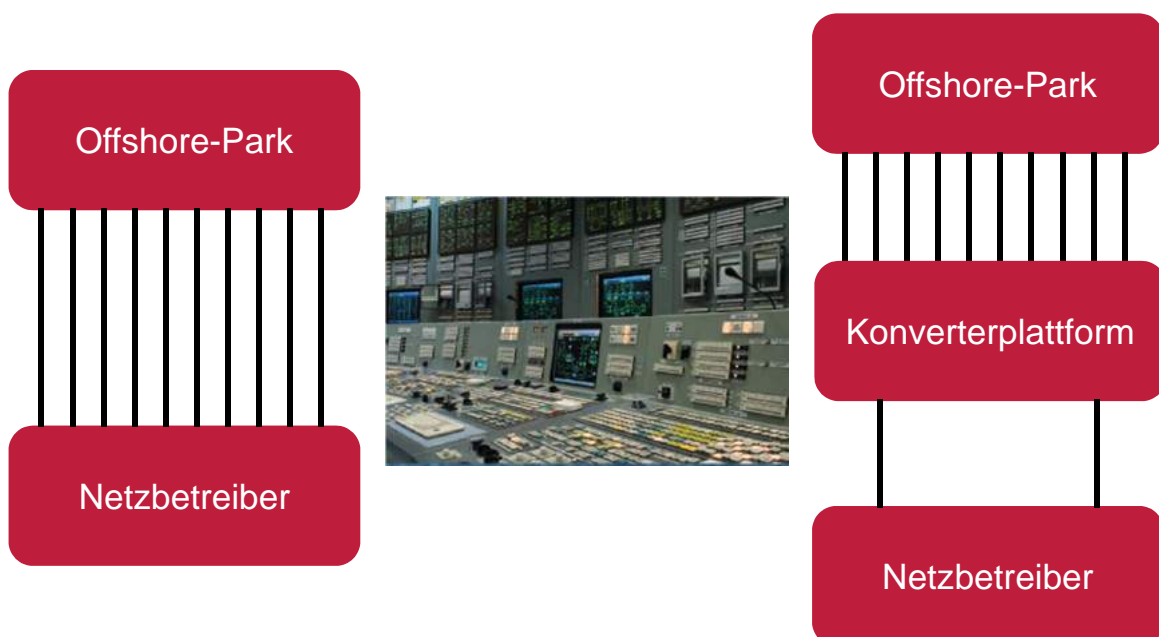
## Störungsliste

Bereich		Ereignisse							
28.06	06:58:22:460	BS	Strom	Stationsname1	ST0001	110 kV	Gebäude	Türkontakt	Meldung
29.06	12:12:11:259	BS	Strom	Stationsname2	ST0002	110 kV	Feld 2	Ltg.Diff-Schutz	Kommunikation
30.06	12:38:15:354	BS	Strom	Stationsname3	ST0003	20 kV	Feld 9	Automat	Sammelalarm
<input type="button" value="Quittieren"/>									

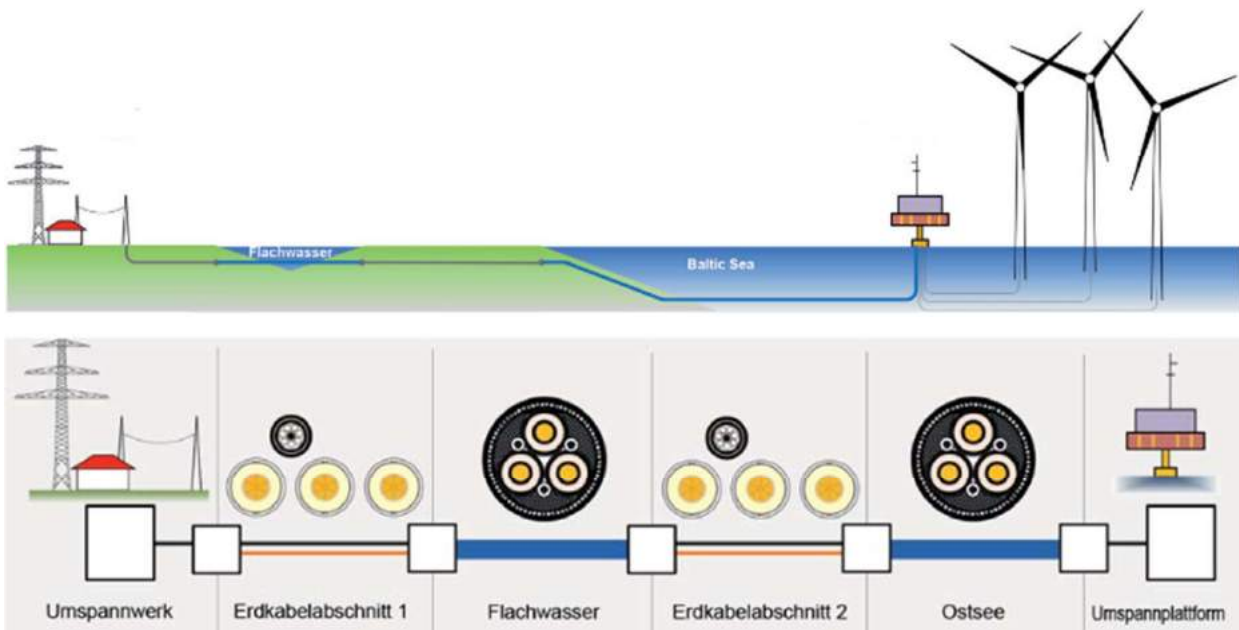
# Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Hauptteile / Erkenntnisse
  - Betrieb der Anlagen
  - Fernwirktechnik
  - Störungsdienst
  - IT-Sicherheit
- Zusammenfassung

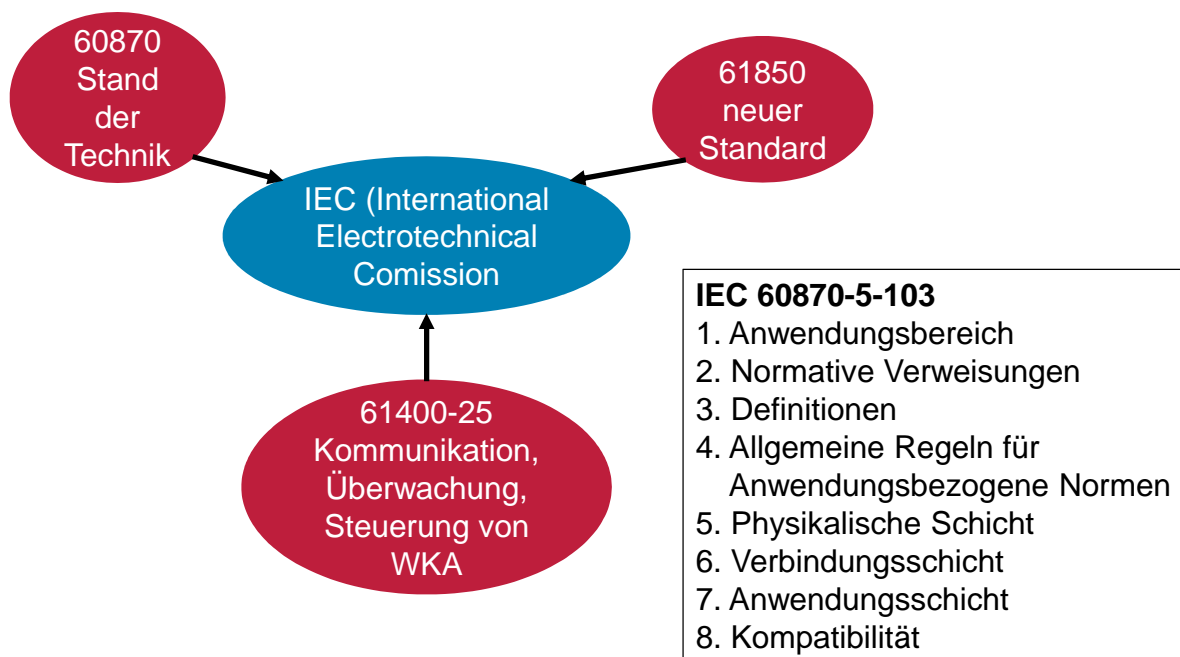
## Hauptteil / Erkenntnisse – Betrieb der Anlagen



## Hauptteil / Erkenntnisse - Fernwirktechnik



## Hauptteil / Erkenntnisse - Fernwirktechnik

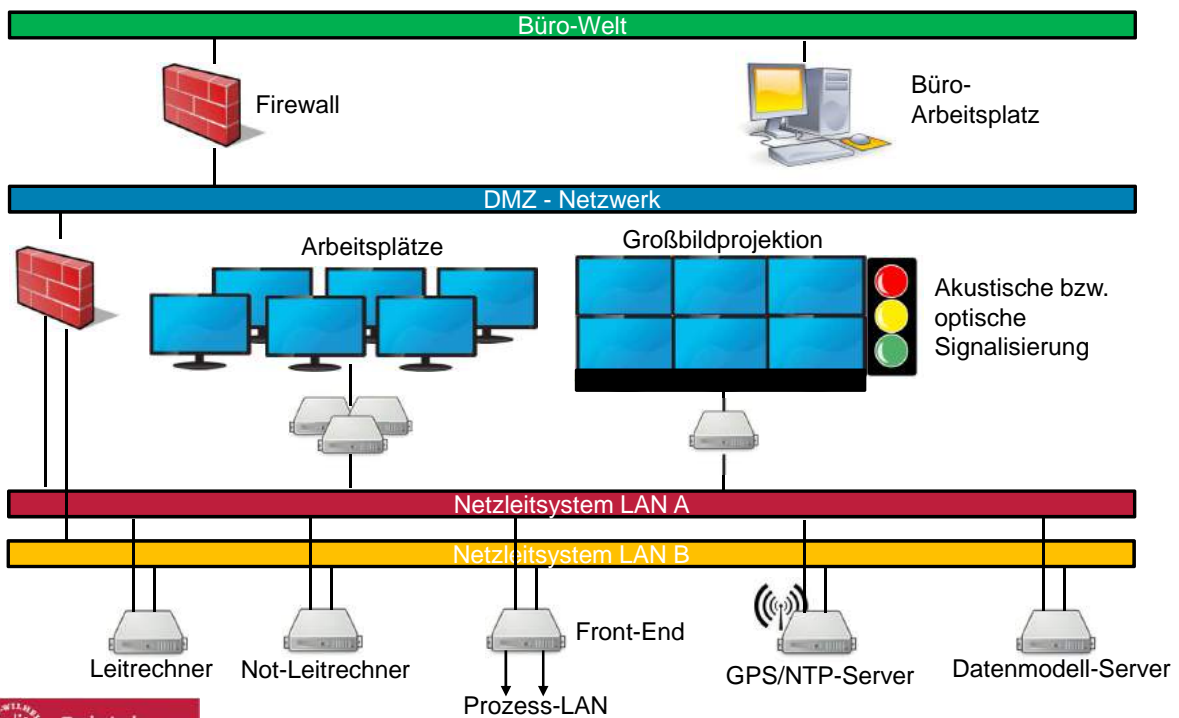




# Hauptteil / Erkenntnisse - Störungsdienst



## Theoretische Grundlagen

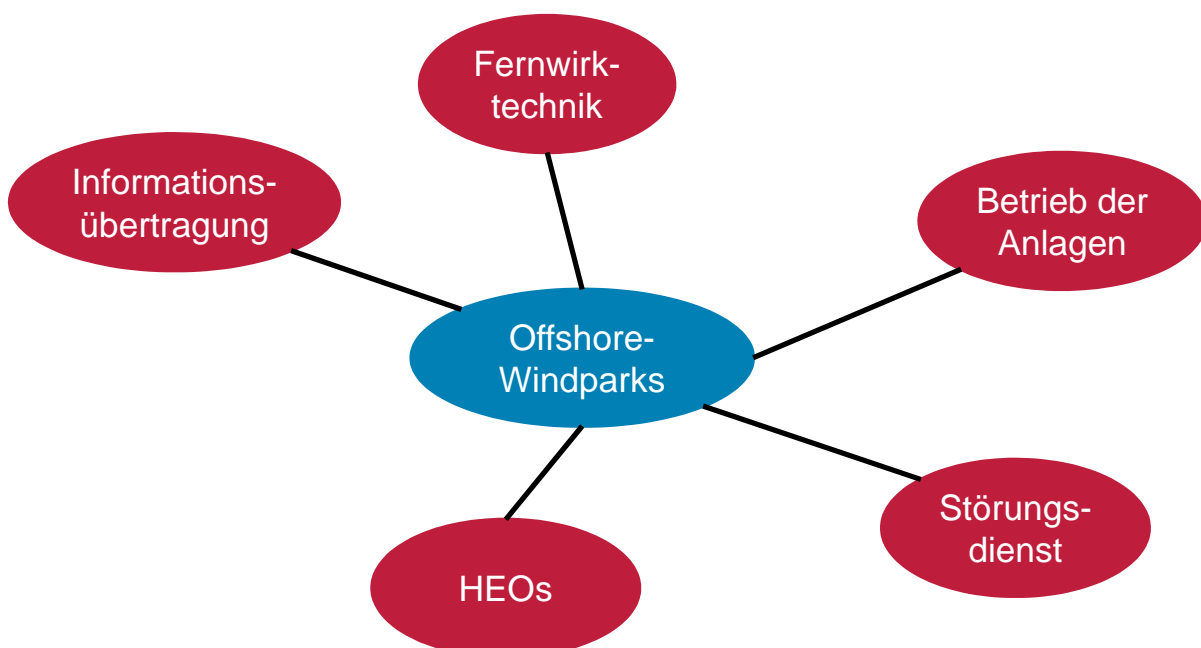




# Agenda

- Einleitung
- Theoretische Grundlagen
- Hauptteile / Erkenntnisse
  - Betrieb der Anlagen
  - Fernwirktechnik
  - Störungsdienst
  - IT-Sicherheit
- Zusammenfassung

## Zusammenfassung





**Danke für Ihre Aufmerksamkeit**

# Einsatz von Batterien im Explosionsschutz

## Usage of batteries in explosion protection

Ilja Gitin,

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

### Kurzfassung

Der stetig zunehmende Bedarf an Batteriespeichern insbesondere im Bereich der Elektromobilität erzeugt eine hohe Nachfrage nach neuen Batterietechnologien. Für die Verwendung von Batterien in explosionsgefährdeten Umgebungen müssen besondere Anforderungen erfüllt werden. Nachfolgend wurden verschiedene Batterietypen hinsichtlich ihrer Eignung zur Verwendung im Explosionsschutz unter Berücksichtigung der theoretischen Grundlagen und geltenden Normen vorgestellt. Aktuelle Anwendungsgebiete sowie zukünftige Entwicklungen wurden dargestellt.

### Abstract

The constantly increasing demand of electrical storage especially for electromobility creates a huge demand for new battery technologies. For the use of batteries in explosive areas certain requirements have to be fulfilled. In the following different battery types were introduced concerning their suitability for usage in explosive atmospheres. Regarding the theoretical basics and the prevailing standard specifications different types were presented. Current application areas and future developments were shown.

## 1 Einleitung

Aufgrund der hohen Energie- und Leistungsdichten nimmt die Verwendung von Lithium-Ionen-Batterien insbesondere im Bereich der Elektromobilität stark zu. Bauartbedingt bringen solche Batterien ein gewisses Entzündungsrisiko mit sich, was ihren Einsatz in explosionsgefährdeten Umgebungen bisher einschränkt. Während in herkömmlichen Anwendungen die Lithium-Ionen-Technologie andere Batteriesysteme immer weiter verdrängt, finden im Explosionsschutz weiterhin oft ältere Batterietypen Verwendung. Für verschiedene Anwendungsgebiete gelten diverse Anforderungen die von den verwendeten Batterien in Einklang mit den geltenden Normen erfüllt werden müssen. Bestehende und neu entwickelte Batteriekonzepte, die im Explosionsschutz eingesetzt werden sollen, müssen die ATEX Richtlinie erfüllen, die die Verwendbarkeit explosionsgeschützter Geräte in verschiedenen Abstufungen regelt.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Grundlagen Explosionsschutz

Das Entstehen einer Explosion hat drei Voraussetzungen: Ein brennbarer Stoff, Sauerstoff und eine Zündquelle müssen vorhanden sein. Der Explosionsschutz beschäftigt sich damit mindestens einen dieser Faktoren auszuschließen. Für explosionsgefährdete Bereiche regelt die Europäische Richtlinie 2014/34/EU die Einteilung von Bereichen und Geräten in verschiedene Schutzzonen und -Klassen. Die Richtlinie wird üblicherweise als ATEX-Richtlinie (**AT**mosphères **EX**plosibles) bezeichnet. Dabei soll in einer vorhandenen explosionsgefährdeten

Umgebung die Entstehung einer Zündquelle ausgeschlossen werden. [1]

Zone		Häufigkeit des Auftretens	Geräte-Kategorie
Gase	Stäube		
0	20	Ständig, häufig	1G / 1D
1	21	Gelegentlich	2G / 2D
2	22	selten	3G / 3D

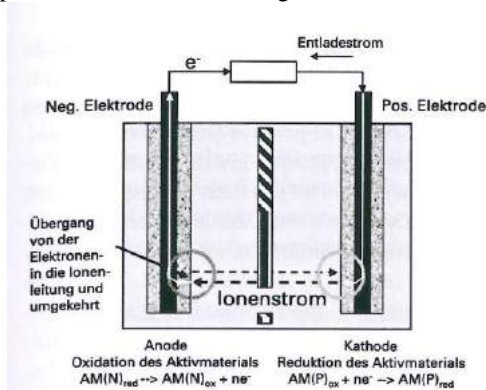
**Tabelle 1 Zoneneinteilung nach ATEX-Richtlinie**

Die verschiedenen Zonen werden eingeteilt nach der Dauer und Häufigkeit des Auftretens einer explosionsgefährdeten Atmosphäre. Sie sind in **Tabelle 1** für brennbare Gase und Stäube aufgelistet. Zone 0 beschreibt dabei eine Umgebung in der jederzeit mit einer explosionsfähigen Ansammlung von Gas oder Staub gerechnet werden muss, beispielsweise das Innere eines Tanks. Geräte die in diesem Bereich verwendet werden dürfen müssen mit der Geräteklasse 1G für Gas- und 1D für Staubatmosphären gekennzeichnet sein und somit entsprechende Normen erfüllen. Geräteklasse 1 setzt dabei sehr hohe Sicherheit voraus und darf auch in den darunterliegenden Zonen 1 und 2 verwendet werden, die entsprechend hohe bzw. normale Sicherheit erfordern. [1] Zusätzlich werden mit den Temperaturklassen T1 bis T6 die maximal erreichbaren Oberflächentemperaturen angegeben um abschätzen zu können welche Stoffe durch ein Gerät entzündet werden können. Geräte und

Komponenten der Klasse T4 haben beispielsweise eine maximale Oberflächentemperatur von 135 °C. [1]  
 Die Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Sicherheit ergriffen wurden werden durch die Zündschutzart gekennzeichnet. Hier seien exemplarisch die Zündschutzarten „Ex e“ erhöhte Sicherheit und „Ex i“ Eigensicherheit genannt. Geräte mit „Ex e“ Kennzeichnung können konstruktionsbedingt keine ausreichend hohen Temperaturen oder Zündfunken erzeugen während in eigensichernden Geräten die Energie im Stromkreis auch im Fehlerfall begrenzt wird. [1]

## 2.2 Grundlagen Batterien

Als Batterien werden elektrische Energiespeicher bezeichnet, die aus einer oder mehreren Zellen bestehen. Eine Zelle ist dabei eine elektrochemische Einheit bestehend aus einer Anode, einer Katode einem Elektrolyten und einem Separator. Es wird unterschieden zwischen nicht wieder aufladbaren Primärzellen und nicht wieder aufladbaren Sekundärzellen (Akkumulatoren). Unabhängig vom Batterietyp ist der Aufbau einer Zelle immer gleich: An den Elektroden, die von außen kontaktiert werden finden die chemischen Reaktionen beim Laden und Entladen der Zelle statt. Als Leiter für den einsetzenden Ionenstrom dient dabei der Elektrolyt. Der durchlässige Separator, in der Regel aus verschiedenen Kunststoffen, trennt die Elektroden voneinander und verhindert einen Kurzschluss. Die Komponenten sind in **Bild 1** dargestellt.



**Bild 1** Aufbau einer Batteriezelle [2]

Die wichtigsten Sekundärzellentypen sind die Blei-Säure-Batterie, die Alkalischen Batterien und die Lithium-Ionen-Batterien deren Funktionsprinzip nachfolgend beschrieben wird. [2]

### 2.2.1 Blei-Säure-Batterie

Der Elektroden einer Bleibatterie bestehen aus dem namensgebenden Blei. Im geladenen Zustand die negative Elektrode aus reinem Blei, während die positive Elektrode aus Bleidioxid besteht. Als Elektrolyt dient verdünnte Schwefelsäure. Beim Entladen lagert sich an den Elektroden Blei-sulfat unter Abgabe von Elektronen ab. Blei-Batterien sind günstig in der Herstellung und zeichnen sich durch eine hohe Sicherheit aus, da keine exothermen Reaktionen auftreten können. Außerdem ist mit ca. 2 V die Zellspannung relativ hoch, wobei diese

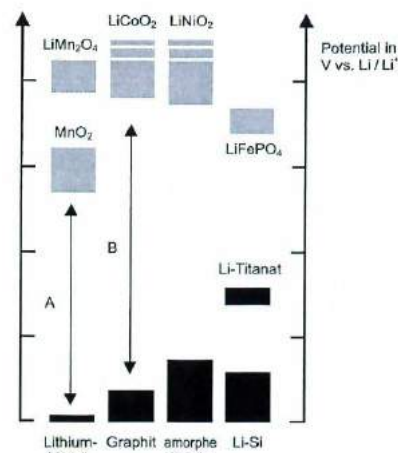
mit dem Ladezustand schwanken kann. Größter Nachteil dieses Batterietyps ist die geringe spezifische Energiedichte von ca. 35 Wh/kg, die für hohe Kapazitäten ein hohes Gewicht fordert. Des Weiteren benötigen Blei-Batterien eine Belüftung und müssen regelmäßig mit Wasser nachgefüllt werden. Dieser Missstand kann, unter bestimmten Voraussetzungen, durch Verwendung von Blei-Gel-Batterien ausgeglichen werden, bei denen die Säure als Gel gebunden ist und so eine geschlossene Bauform ermöglicht. [2]

### 2.2.2 Alkalische Batterien

Als Alkalische Batterien werden Nickel-Cadmium-(NiCd) und Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) bezeichnet. Da das Inverkehrbringen von cadmiumhaltigen Batterien europaweit verboten ist wird diese Technologie nicht weiter betrachtet. Die positive Elektrode von NiMH-Batterien besteht im geladenen Zustand aus Nickel-hydroxid, während die negative Elektrode aus verschiedenen Metall-hydriden bestehen kann. Den Elektrolyten bildet eine Kalilauge. Auch hier ermöglichen die verwendeten Komponenten keine exotherme Reaktion, was zu einer hohen Sicherheit führt. Außerdem zeichnen sie sich durch eine mögliche gasdichte und kompakte Bauart sowie eine hohe Lebensdauer aus. Die spezifische Energiedichte fällt mit 80 Wh/kg deutlich höher als bei Blei-Batterien aus. Nachteilig wirkt sich die geringe Zellspannung von 1,2 V aus. Zu einer relativ hohen Selbstentladung kommt noch die fehlende Möglichkeit einer Ladestandsbestimmung. [2]

### 2.2.3 Lithium-Ionen-Batterien

Für die Elektroden von Lithium-Ionen-Batterien werden verschiedene Kombinationen von Kathoden- und Anodenmaterial verwendet. Die gewählte Kombination (siehe **Bild 2**) wirkt sich dabei maßgeblich auf die Zellspannung und andere Eigenschaften aus. [2]



**Bild 2** Verschiedene Kombinationen von Elektrodenmaterialien [2]

Reines Lithiums wird dabei aufgrund der Instabilität nicht verwendet. Häufigstes Material der negativen Elektrode ist Graphit, das in Kombination mit Lithium-Cobalt-Oxid

die am weitesten verbreitete Bauform darstellt. Aufgrund der starken Reaktivität von Lithium mit Wasser kommen nur wasserfreie Elektrolyte in Frage, in der Regel Salze in aprotischen Lösungsmitteln. Lithium-Ionen-Batterien zeichnen sich vor allem durch eine exzellente Energiedichte von 90-190 Wh/kg und eine hohe Zellspannung von ca. 3,5 V aus. Nachteilig wirkt sich die hohe Empfindlichkeit aus. So dürfen Lithium-Ionen-Batterien weder über die Ladeschlussspannung geladen werden, noch unter die Entladeschlussspannung entladen werden. In beiden Fällen wird die Zelle irreversibel geschädigt und es besteht Brandgefahr. Selbiges gilt für Mechanische Beschädigungen von aus. Ein Batteriemanagementsystem (BMS), das die Batterie überwacht und ggf. abschaltet, ist zwingend notwendig. [2]

### 3 Anwendungsgebiete

Von den Anwendungsgebieten, in denen Batterien im Explosionsschutz eingesetzt werden seien hier exemplarisch mobile elektronische Geräte, Leuchtmittel und Fahrzeuge genannt. Mögliche andere Anwendungen lassen sich bezüglich der Anforderungen von diesen Gebieten ableiten.

#### 3.1 Mobile Elektronik

Im Bereich der Mobiltelefone, Notebooks und anderer Mobilgeräte hat sich wie im normalen Umfeld auch im Explosionsschutz der Lithium-Ionen-Akku durchgesetzt. Hauptargument ist dabei die hohe Kapazität bei wenig Raumbedarf. Die Schutzwirkung wird realisiert sowohl durch eine robuste Bauart des Geräts selbst, als auch eigengesicherte Batterien, die im Fehlerfall keine Zündung zulassen. Auf dem Markt erhältlich sind Geräte der Kategorie 2 und 3, wobei für eine höhere Schutzklasse die Kapazität der Batterie verringert ist bei sonst gleichem Gerät. [3]

#### 3.2 Leuchtmittel

Bei batteriebetriebenen Leuchtmitteln wird unterschieden zwischen stationären Lösungen und tragbaren Geräten. Bei stationären Leuchtmitteln liegt das Hauptaugenmerk auf hoher Betriebszeit bei großer Ausleuchtung. Eine hohe Beweglichkeit ist nicht relevant, was auch höheres Gewicht der Batterie zulässt. Angesichts dieser Anforderung wird der Blei-Batterie der Vorzug gegeben, da die hohe Sicherheit ausschlaggebend ist. Es sind Geräte bis Zone 0 verfügbar die oft mit einer wartungsfreien Blei-Gel-Batterie ausgestattet sind. [3]

Tragbare Leuchtmittel, deren Anforderungen auch auf andere Kleingeräte wie Messgeräte oder Kameras übertragen werden können, zeichnen sich durch ein geringes Gewicht, Handlichkeit, kurze Betriebszeiten und die Möglichkeit eines Batteriewechsels aus. Derzeitiger Standard für wieder aufladbare Batterien sind NiMH-Batterien, die kompakt, sicher und wartungsfrei ausgeführt sind. [3]

Mittlerweile sind auch für diese Geräte Lithium-Ionen-Systeme verfügbar, die allerdings ein hohes Preisniveau

haben. Grund hierfür sind die Schutzmaßnahmen, die zusätzlich in den Geräten verbaut werden müssen. [3]

#### 3.3 Fahrzeuge

Insbesondere Flurförderfahrzeuge (Gabelstapler, etc.) werden in explosionsgeschützten Ausführungen in der Industrie benötigt. Die Anforderungen an solche Fahrzeuge sehen in erster Linie eine hohe Sicherheit vor. Zusätzlich wird für Antriebsmotoren hohe Stromfähigkeit gefordert. Bisher sind dafür ausschließlich Blei-Batterien verfügbar, die in der Zündschutzart erhöhte Sicherheit ausgeführt sind. Das hohe Gewicht dieser Batterien ist zwar allgemein für Elektrofahrzeuge ungünstig, speziell bei Gabelstaplern wird es allerdings als Gegengewicht ausgenutzt. Die Umrüstung herkömmlicher Fahrzeuge für Explosionsschutzanwendungen führt aufgrund der zusätzlichen Sicherheitsvorkehrungen zu einem Kapazitätsverlust. [4]

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In den verschiedenen Anwendungsgebieten kommen je nach Anforderung verschiedene Batterietypen zum Einsatz. Während auf dem herkömmlichen Markt die Lithium-Ionen-Technologie immer mehr Anteil gewinnt, stagniert die Verbreitung im Explosionsschutz gerade im Bereich Hochenergieanwendungen. In Kleingeräten werden Lithium-Ionen-Batterien bereits vielfach verwendet und verdrängen langsam die „sicheren“ Batterietypen. Für elektrische Antriebe in Fahrzeugen, bei denen Lithium-Batterien außerhalb des Explosionsschutzes bereits alle anderen Systeme verdrängt haben, ist noch viel Entwicklungsarbeit notwendig.

Blei- und NiMH-Batterien sind bereits an der Entwicklungsgrenze angekommen, weswegen die Lithium-Ionen-Technologie als Zukunftsträger angesehen wird. Für die Verwendung im Explosionsschutz muss die Sicherheit dieser Zellen allerdings noch weiter erhöht werden. Auf diesem Gebiet gibt es Entwicklungen in der Verwendung „sicherer“ Kathodenmaterialien wie  $\text{LiFePO}_4$ , das zwar im Fehlerfall keine exotherme Reaktion erzeugt, aber eine geringe Energiedichte aufweist. 2012 wurden beispielsweise von der Firma Saft ATEX zertifizierte Lithium-Ionen-Batterien mit  $\text{LiMnO}_2$  als Kathodenmaterial vorgestellt. Weitere Entwicklungen beschäftigen sich mit der Nutzung neuer Schutzsysteme, wie die 2016 von der Firma Microvast vorgestellte Separator Technologie, die bis 300 °C beständig ist.

### 5 Literatur

- [1] Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014.
- [2] A. Jossen, W. Weydanz, Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Untermeitingen: Inge Reichardt Verlag, 2006.
- [3] Atex certified products, <http://www.atex-95.de/> [25.06.2016]

- [4] M. Scheffler, Fördermaschinen: Hebezeuge, Aufzüge, Flurförderzeuge: Springer-Verlag, 2013



## Einsatz von Batterien im Explosionsschutz

Ilja Gitin, 30.06.2016

### Agenda

- Einleitung
- Explosionsschutz
- Grundlagen Batterien
- Anwendungen
- Zusammenfassung und Ausblick



# Agenda

- Einleitung
- Explosionsschutz
- Grundlagen Batterien
- Anwendungen
- Zusammenfassung und Ausblick

## Einleitung

- Stetig zunehmender Bedarf an Energiespeichern
- Neue Batterietechnologien
- Besondere Anforderungen im Explosionsschutz
- Verschiedene Batterietypen kommen zum Einsatz



Quelle: [www.batteryuniversity.eu](http://www.batteryuniversity.eu)



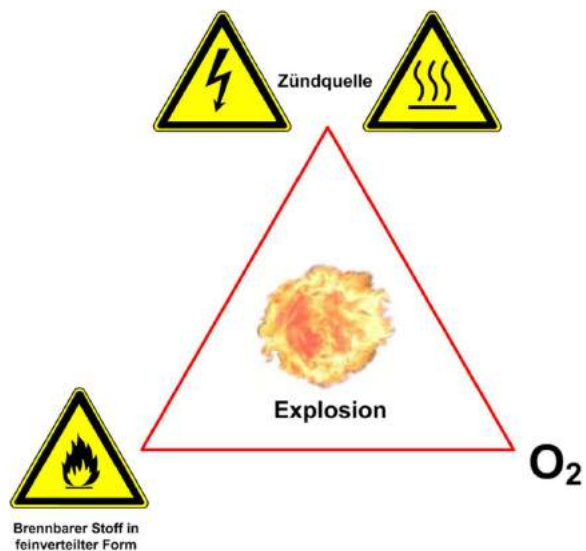
# Agenda

- Einleitung
- Explosionsschutz
- Grundlagen Batterien
- Anwendungen
- Zusammenfassung und Ausblick

## Prinzip des Explosionsschutz

### „Explosionsdreieck“

- Brennbare Stoff
  - Vermeidung brennbarer Stoffe in explosionsfähiger Form
- Sauerstoff
  - Inertisierung
- Zündquelle
  - Vermeidung oder Einschluss der Zündquelle



## Explosionsgefährdete Zonen

➔ **Zoneneinteilung nach Häufigkeit und Dauer des Auftretens einer explosionsfähigen Atmosphäre nach ATEX-Betriebsrichtlinie 2014/34/EU**

Zone		Häufigkeit des Auftretens	Beispiel
Gase	Stäube		
0	20	Ständig, häufig	Innere eines Tanks oder Silos
1	21	gelegentlich	Bereich um die Öffnung eines Behälters
2	22	selten	Ablagerungen, Lecks

## Gerätekatgorien

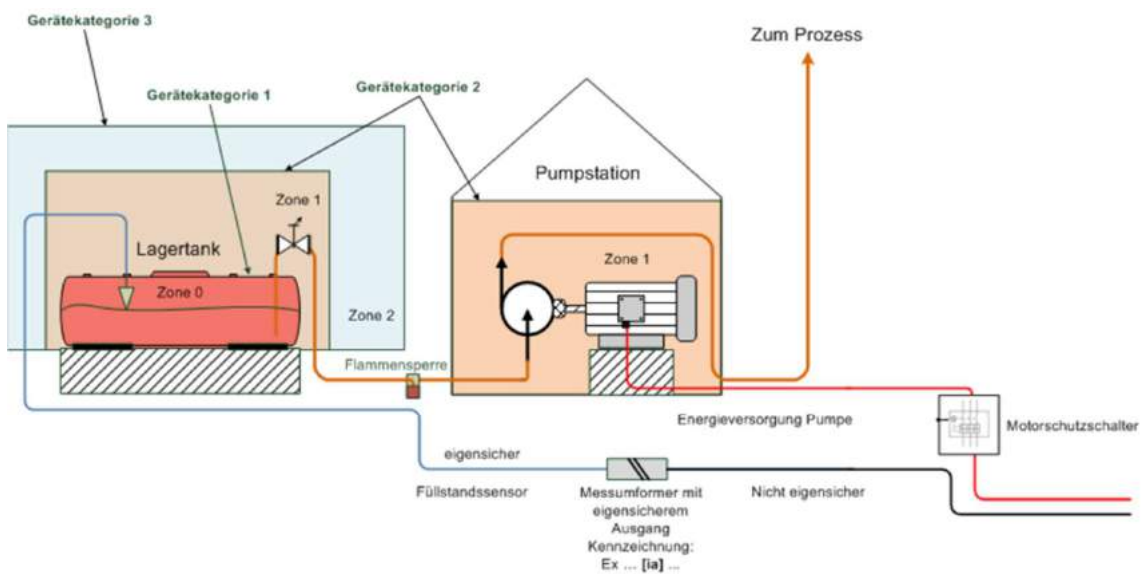
➔ **In explosionsgefährdeten Atmosphären zugelassene Geräte werden in Kategorien eingeteilt nach ATEX-Produktrichtlinie 2014/34/EU**

Kategorie	Zone	Anforderung
1G / 1D	0 / 20	Sehr hohe Sicherheit
2G / 2D	1 / 21	Hohe Sicherheit
3G / 3D	2 / 22	Normale Sicherheit

## Temperaturklassen

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

## Schutzzonen und Gerätekategorien



Quelle: PTB

# Zündschutzarten

➔ Kennzeichnung der Maßnahmen zum Explosionsschutz

Gängige Zündschutzarten:

- Druckfeste Kapselung „**Ex d**“
  - Übertragung einer Explosion nach Außen ausgeschlossen
- Erhöhte Sicherheit „**Ex e**“
  - Vermeidung von Funken und zu hohen Temperaturen
- Eigensicherheit „**Ex i (a,b,c)**“
  - Stromkreis erzeugt im Fehlerfall weder Funken noch Hitze

# Agenda

- Einleitung
- Explosionsschutz
- Grundlagen Batterien
- Anwendungen
- Zusammenfassung und Ausblick

# Grundlagen Batterien

## Batterie

➔ eine oder mehrere chemische Zellen, die elektrische Energie bereitstellen können

## Zelle

➔ elektrochemische Einheit bestehend aus **Kathode, Anode, Elektrolyt** und **Separator**

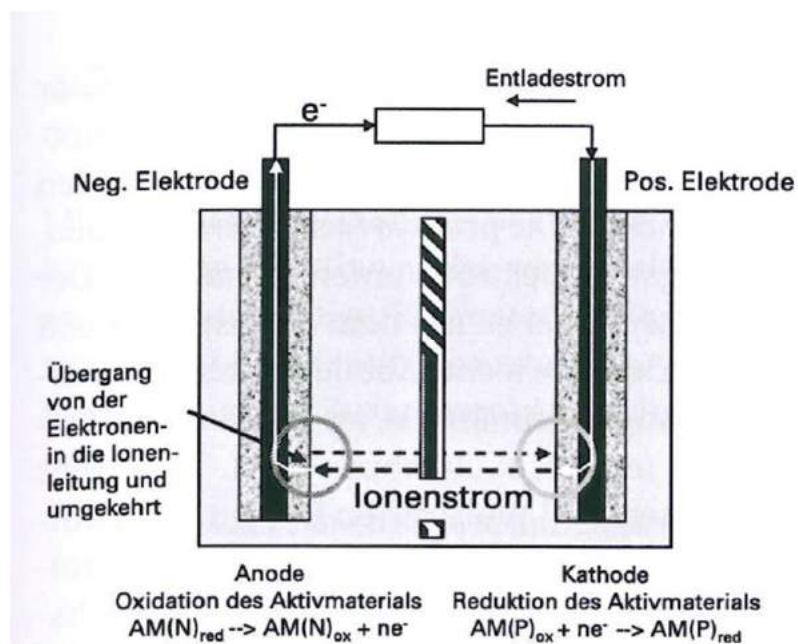
Primärzelle ➔ nicht wieder aufladbar

Sekundärzelle ➔ wieder aufladbar

Wichtige wieder aufladbare Batterietypen

- Bleibatterie
- Alkalische Batterie (NiCd und NiMH)
- Lithiumbatterie

# Aufbau einer Zelle



Quelle: Jossen, Weydanz; Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen

## Blei-Säure-Batterien

**Anode**  
Blei

**Kathode**  
Bleioxid

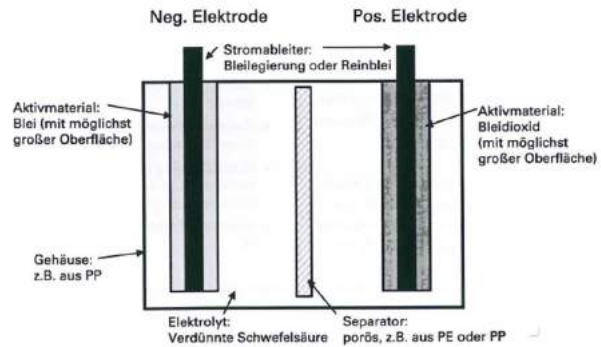
**Elektrolyt**  
Schwefelsäure

### Vorteile

- Niedriger Preis
- Hohe Sicherheit
- Hohe Zellspannung (ca. 2 V)

### Nachteile

- Geringe spezifische Energiedichte (35 Wh/kg)
- Belüftung notwendig



Quelle: Jossen, Weydanz; Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen



30.06.21016 | Ilja Gitin | Batterien im Explosionsschutz | Seite 15



## Alkalische Batterien (NiMH)

**Anode**  
Metallhydrid

**Kathode**  
Nickelhydroxid  
(NiOOH)

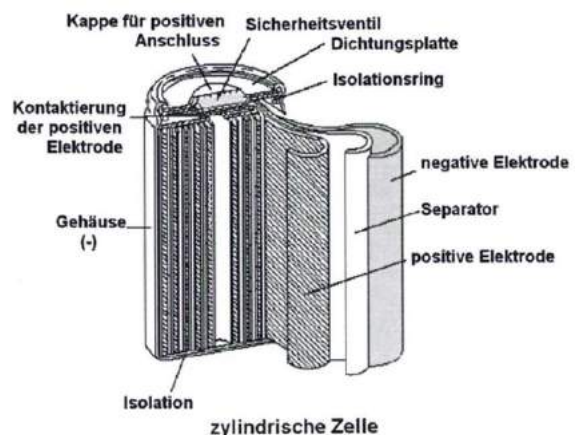
**Elektrolyt**  
Kalilauge

### Vorteile

- Hohe Sicherheit
- Hohe Lebensdauer
- Gasdichte Bauart
- Kompakte Bauart

### Nachteile

- Mittelmäßige Energiedichte (80 Wh/kg)
- Geringe Zellspannung (ca. 1,2 V)
- Hohe Selbstentladung
- Keine Ladestandsbestimmung



Quelle: Jossen, Weydanz; Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen



30.06.21016 | Ilja Gitin | Batterien im Explosionsschutz | Seite 16



# Lithium-Ionen-Batterien

**Anode**  
Graphit

**Kathode**  
Lithium-Metalloxid-  
Verbindungen

**Elektrolyt**  
Organisch, wasserfrei

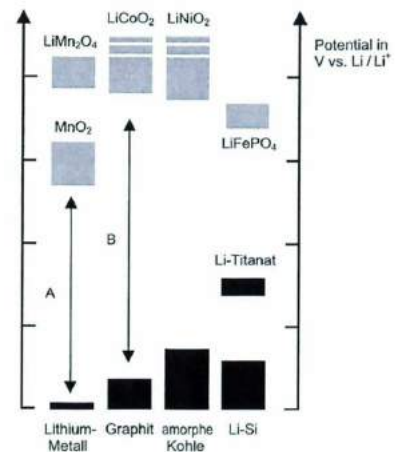
## Vorteile

- Hohe Energiedichte (90-190 Wh/kg)
- Geringe Selbstentladung
- Hohe Zellspannung (ca. 3,5 V)

## Nachteile

- Hohe Empfindlichkeit
- BMS notwendig
- Flammenbildung im Fehlerfall

➔ **Lithium-Polymer**



Quelle: Jossen, Weydanz; Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen



30.06.21016 | Ilja Gitin | Batterien im Explosionsschutz | Seite 17



# Agenda

- Einleitung
- Explosionsschutz
- Grundlagen Batterien
- Anwendungen
- Zusammenfassung und Ausblick



30.06.21016 | Ilja Gitin | Batterien im Explosionsschutz | Seite 18



# Anwendungsgebiete im Explosionsschutz

- Mobile Elektronik (Mobiltelefon, Notebook, ...)
- Leuchtmittel
- Fahrzeuge

## Mobile Elektronik

Ausschließlich Verwendung von **Lithium-Ionen-Akkus**

- robuste Bauweise
- Zündschutzart Eigensicherheit „Ex i“

Ecom Smart-Ex®

**01**

- Zone 1 / 21
- 3600 mAh Lithium-Ionen-Akku



II 2G Ex ib IIC T4 Gb  
II 2D Ex ib IIIC T135 °C Db

**201**

- Zone 2 / 22
- 4800 mAh Lithium Ionen Akku



II 3G Ex ic IIC T4 Gc IP64  
II 3D Ex ic IIIB T135 °C Dc IP64



Quelle: [www.ecom-ex.com](http://www.ecom-ex.com)



# Beleuchtung

## Stationäre Leuchtmittel

- Hohe Betriebszeiten bei großer Ausleuchtung
- Keine hohe Beweglichkeit
- Gewicht wenig relevant

➔ **Blei-Batterie**

### EXIN Light EX90I

- Zone 0 / 20
- 18 Ah Blei-Gel-Akku
- 12 h Leuchtdauer
- 8 kg Gewicht



Quelle: [www.exinlight.com](http://www.exinlight.com)



30.06.21016 | Ilja Gitin | Batterien im Explosionsschutz | Seite 21



# Leuchtmittel

## Tragbare Leuchtmittel

- Geringes Gewicht
- Kurze Leuchtdauer
- Wechselbare Batterie

➔ **NiMH** falls wiederaufladbar  
**Alkaline** falls nicht wieder aufladbar

### MICA IL-800

- Zone 0 / 21
- NiMH Batterie
- 6 h Leuchtdauer
- 1,1 kg Gewicht



II 1G Ex ia IIC T4 Ga  
II 2D Ex tb IIIC 100°C IP67 Db

Quelle: [www.setolite.com](http://www.setolite.com)



30.06.21016 | Ilja Gitin | Batterien im Explosionsschutz | Seite 22



## Leuchtmittel

### Tragbare Leuchtmittel mit Lithium-Ionen-Akku

#### CorDEX Genesis

- Neu entwickeltes System
- Akku innerhalb von Zone 1 wechselbar
- 1,2 kg Gewicht
- 3 h Leuchtdauer
- Umfangreiche Diagnosefunktionen für die Batterie (Onboard und Bluetooth übertragbar)



II 2G Ex ib IIC T4 Gb

## Fahrzeuge

### Insbesondere Flurförderfahrzeuge (Gabelstapler, Hubwagen, ...)

#### Bisher ausschließlich Blei-Batterien

- Hohe Stromfähigkeit
- Hohe Sicherheit
- Geringe Energiedichte
- Hohes Gewicht



Durch Umrüstung auf Ex-Schutz  
zusätzlicher Kapazitätsverlust



# Fahrzeuge

## Alkè ATX240E ATEX

- Zone 1
- Zündschutzart erhöhte Sicherheit „Ex e“
- Zusätzlich Bipolarer Batterietrennschalter
- 14,4 kWh Bleibatterie
  - ➔ 18 kWh ohne ATEX Umrüstung



Quelle: [www.alke.com](http://www.alke.com)

# Agenda

- Einleitung
- Explosionsschutz
- Grundlagen Batterien
- Anwendungen
- Zusammenfassung und Ausblick

## Zusammenfassung

- Verschiedene Batterietypen nach Anwendungsgebiet
- Steigender Anteil an Lithium-Ionen-Batterien
- In Kleingeräten bereits erfolgreich in Verwendung
- Für Fahrzeugantriebe ist noch weitere Entwicklungsarbeit notwendig

## Ausblick

Blei- und NiMH-Batterien sind an der Entwicklungsgrenze



### Zukunftsträger Lithium-Ionen-Batterie

#### Verwendung neuer Kathodenmaterialien

- Herkömmliche Kobalt-haltige Verbindungen ungeeignet
- $\text{LiFePO}_4$  hohe Sicherheit, geringe Energiedichte (90 Wh/kg)
- 2012 von Saft ATEX zertifizierte Batterien mit  $\text{LiMnO}_2$  vorgestellt

#### Verwendung geeigneter Schutzmechanismen

- 2016 neue Separatortechnologie der Firma Microvast vorgestellt (bis 300°C)

# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

## Fragen?

## Quellen

- [1] A. Jossen, W. Weydanz, Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Untermeitingen: Inge Reichardt Verlag, 2006.
- [2] <http://www.batteryuniversity.eu/>
- [3] <http://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt3/exschutz.html>
- [4] Richtlinie 2014/34/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014
- [6] H. Groh, Explosion Protection, Renningen: Expert Verlag GmbH, 2004.
- [7] <https://www.ecom-ex.com>
- [8] <http://www.cord-ex.com/>
- [9] <http://www.atex-95.de/>
- [10] <https://www.alke.com/explosion-proof-vehicles>
- [11] M. Scheffler, Fördermaschinen: Hebezeuge, Aufzüge, Flurförderzeuge: Springer-Verlag, 2013

# Sicherheitsmechanismen in einem Lithium-Ionen Batteriesystem

## Safety mechanisms in a lithium-ion battery system

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

### Kurzfassung

Diese Arbeit befasste sich mit den Sicherheitsmechanismen innerhalb der verschiedenen Ebenen eines Lithium-Ionen-Batteriesystems. Neben der Erläuterung der Wirkungsweise der Zellen, wurde auf die drei Ebenen des Batteriesystems eingegangen, sowie typische Ursachen für sicherheitskritische Zustände der Energiespeicher vorgestellt. Neben klassisch mechanischen und chemischen Sicherheitsmechanismen wurde auch die Möglichkeit der intelligenten und zumeist präventiven Überwachung durch Batteriemanagementsysteme betrachtet und deren Vorteile aufgezeigt.

### Abstract

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

## 1 Einleitung

Seit der Markteinführung Anfang der 1990er Jahre gewinnen Lithium-Ionen-Batterien immer stärker an Bedeutung in allen möglichen Anwendungsbereichen. Der Bedarf nach leistungsstarken Energiespeichern wächst stetig, auch im Zuge der Energiewende in Deutschland.

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

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

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

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

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

## 2 Theoretische Grundlagen

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten von Batterien unterscheiden. Zum einen, für den einmaligen Gebrauch

bestimmte, nicht wieder aufladbare Primärzellen und zum anderen die Sekundärzellen oder Akkumulatoren.

Lithium-Ionen-Batterien werden heutzutage meist als Sekundärzelle verwendet. Der Begriff „Lithium-Ionen-Batterie“ beschreibt jedoch nur den grundlegenden Typen der Zelle. Beim Design einer Li-Ionen-Zelle kann unter vielen verschiedenen Materialkombinationen gewählt werden, bspw. Lithium-Eisenphosphat ( $\text{LiFePO}_4$ ). Je nach Kombination weisen die Zellen unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf Kapazität, Betriebsspannung und Sicherheit auf. [2]

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

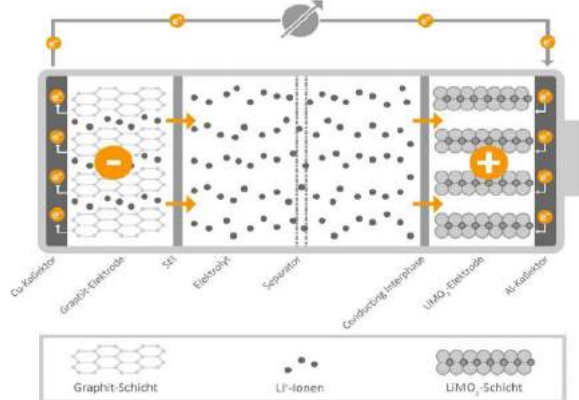
Aufgrund der Reaktionsfreudigkeit des Lithiums insbesondere mit Wasser, der Kombination energiereicher Materialien mit hochbrennbaren Elektrolyten und der Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Einwirkungen müssen jedoch weitere Vorkehrungen getroffen werden, um sicherheitskritische Zustände oder schlimmstenfalls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

### 3 Hauptteil

Die Nutzung von Lithium-Ionen Batteriesystemen erfolgt in einfachen Anwendungen oft durch einzelne Zellen oder auch durch die Kombination weniger Zellen zu kleinen Modulen, während es bei komplexeren Aufgaben oft notwendig ist, viele Batterien zu Modulen und diese untereinander wieder zu Batteriesystemen zu verschalten. Der Aufbau und die Funktionsweise der Zelle soll im Weiteren erläutert werden, gefolgt von einer Übersicht über die verschiedenen Ebenen des Systems und der zugehörigen Sicherheitsmechanismen.

#### 3.1 Die Lithium-Ionen-Zelle

Der Aufbau der Zelle ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Bild 3.1** Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle [1]

Die Hauptbestandteile der Zelle sind die beiden Elektroden, der Elektrolyt zwischen den Elektroden, in den der Separator eingebracht ist, sowie die beiden Kollektoren, welche meist als Folien auf die Elektroden aufgetragen sind. Außerdem spielt die sich bildende SEI-Schicht (Solid Electrolyte Interface) eine entscheidende Rolle für die Funktionstüchtigkeit der Zelle und deren Lebensdauer. Sie verhindert den direkten Kontakt des Lösungsmittels des Elektrolyten mit der negativen Elektrode. [3] Die negative Elektrode besteht aus einer Graphitschicht, die positive Elektrode aus Mischoxiden. Sie dient als Lithium-Quelle für die Reaktion in der Zelle. Der Elektrolyt dient der Reaktion als Vermittler zum Lithium-Ionen-Transport. Er besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten: dem Leitsalz, einem Lösungsmittel (organisch oder seltener Polymer) und Additiven. Der Separator trennt die beiden Elektroden sicher voneinander und erfüllt weitere Schutzfunktionen, auf die im Verlauf der Arbeit noch näher eingegangen wird. Oben dargestellt ist der Entladevorgang der Zelle, bei dem die in der Graphitschicht gespeicherten Lithium-Ionen jeweils ein Elektron an den Kupfer-Kollektor abgeben. Die Elektronen wandern über den äußeren Stromkreis zum Kathode und werden dort von dem ionisierten Metallkollektor aufgenommen, während im inneren des Bauteils die Lithium-Ionen von der Anode zur Kathode wandern und sich dort in Mischoxid einlagern. Der Ladevorgang läuft analog ab, durch eine außen anliegende Spannung findet dabei eine Interkalation der Lithium

Ionen in der Graphitanode statt. Das Volumen der Anode kann dabei um bis zu 10% wachsen. [4] Die Wahl der Aktivmaterialien bestimmt die Betriebsspannung der Zelle. In modernen Zellen liegt diese bei maximal 4,2 V.

#### 3.2 Gefahren im Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien

Grade bei Lithium-Ionen-Batterien ist die Sicherheit ein wichtiger Aspekt, da bei dieser Technologie Materialien mit hohen Energiedichten mit hochentzündlichen Elektrolyten verbunden werden und Lithium außerdem an sich schon sehr reaktionsfreudig ist, vor allem in Kontakt mit Wasser. Daraus leiten sich starke Anforderungen an das Lösungsmittel des Elektrolyten ab. Eine minimale Feuchte ist die Voraussetzung für den sicheren Betrieb in der Batterie. [2] Die typischen Ursachen für sicherheitskritische Zustände in einer Li-Ionen-Batterie sind zu hohe Betriebstemperaturen, mechanische Deformationen und Kurzschlüsse. Letztere treten vor allem durch die Tiefentladung der Zelle auf, d.h. die Zelle wird unter ein kritisches Minimum entladen. Bei Li-Ionen-Batterien treten unterhalb von 2,4V irreversible Schädigungen der Kapazität der Zelle auf, unterhalb 1,5V können sich Kupferbrücken bilden, die zu Kurzschlüssen führen. [5] Zu hohe Temperaturen innerhalb der Zelle durch z.B. Defekte der Leitungen, zu hohe Außentemperaturen, oder zu hohe Ladeströme (Rückspeisung bei Bremsvorgängen im Elektroauto), führen zu einer schnellen Alterung der Zelle und können im schlimmsten Fall zu exothermen Reaktionen zwischen Elektrode und Elektrolyt führen, was bei ungenügender Ableitung zu einem thermischen Durchgehen, dem Bersten der Zelle und Flammenbildung führen kann. [6] Die Deformation einer Zelle durch mechanische Einwirkung kann durch ein eventuelles Brechen des Separators zu einem Kurzschluss der Elektroden führen.

#### 3.3 Die Ebenen des Batteriesystems

Die Zellebene des Batteriesystems bezieht sich nur auf die oben beschriebene Zelle. Eine handelsübliche Lithium-Ionen-Batterie liefert eine Betriebsspannung von 2,2V-4,2V, je nach Wahl der Aktivmaterialien. Das reicht für viele Anwendungsgebiete (bspw. Elektromobilität) jedoch nicht aus, weshalb mehrere Zellen zu einer Einheit verschaltet werden. Ein Modul setzt sich aus mehreren einzelnen Zellen zusammen, die entweder parallel oder in Reihe zueinander angeordnet sind. Um die Betriebsspannung zu erhöhen, werden entweder einzelne Zellen im Modul in Reihe geschaltet oder aber es werden Zellen parallel im Modul angeordnet und anschließend mehrere Module in Reihe geschaltet. Das bietet den Vorteil, dass bei einem Ausfall einzelner Zellen nicht der komplette Stromkreis unterbrochen wird. Innerhalb der Module findet sich teilweise ein Zell-Kontrollsystem, das den Zustand der einzelnen Zellen überwacht. Von der Systemebene ist die Rede, wenn schlussendlich mehrere Module zusammengefasst werden. Oft besteht das Batteriesystem neben der Zusammenfassung der Module noch aus einer Kühleinheit und einer Vielzahl von



mechanischen und elektronischen Komponenten zur Überwachung und Steuerung der einzelnen Bauteile. [1] Die so gewonnenen Messwerte werden in einem Batteriemanagementsystem zusammengeführt und ausgewertet.

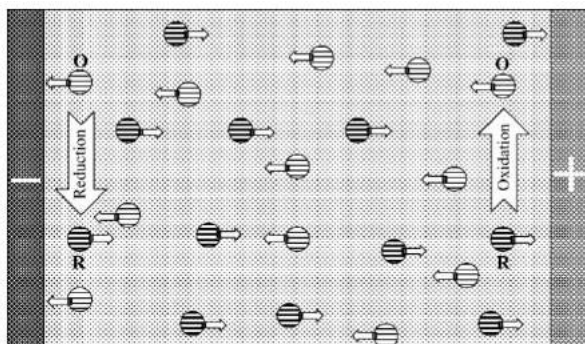
### 3.4 Sicherheitsmechanismen der verschiedenen Systemebenen

Die weitaus größte Vielfalt der Möglichkeiten, das System zu schützen findet man auf der Zellebene.

Die einfachste Art, das System möglichst Sicher auszulegen ist die vorzeitige Anpassung der Elektrodenmaterialien an den Prozess. So wird eine kontinuierliche Belastung der Zellen durch einen falschen Betrieb vermieden.

Auch der Elektrolyt birgt großes Sicherungspotenzial. Das Beifügen von flammenhemmenden Additiven in den Elektrolyten ist eine Möglichkeit, die Stabilität gegenüber der Temperatur zu erhöhen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Beigabe von Shutdown-Additiven, die unter Normalbedingungen inert bleiben, ab einer kritischen Spannung jedoch aktiv werden und zur Bildung einer isolierenden Schicht an der positiven Elektrode führen. Außerdem setzen sie Gas frei, was zum Auslösen von Überdruckventilen genutzt wird. Diese Methode zerstört jedoch irreversibel die Zelle, genau wie der Einsatz eines Shutdown-Separators, dessen Mikroporen sich bei zu großer Hitze schließen, um einen Lithium-Ionen-Transport zu unterbinden.

Als reversibler Schutz werden zum Beispiel sogenannte Redox-Shuttle eingesetzt. Ihre Funktionsweise ist in Bild 3.2 skizziert.



**Bild 3.2** Wirkungsweise eines Redox-Shuttles [6]

Sie nutzen elektrochemische Oxidation an der positiven Elektrode und Reduktion an der negativen Elektrode bei leichter Überspannung, um die überschüssig geladene Energie einer Zelle zu „verwerten“. [6] Oberhalb von 3V arbeiten sie jedoch noch nicht schnell genug für einen sicheren Einsatz in den modernen Zellen. Obwohl in dieser Hinsicht noch großer Entwicklungsbedarf der Shuttle besteht, stellen sie einen der vielversprechendsten Mechanismen für zukünftige Anwendungen dar.

Eine weitere Option besteht im Verbau von CID (Current Interrupt Devices). Sie trennen die Verbindung zwischen Elektrode und Kontakt, sobald ein Grenzdruck in der Zelle registriert wird.

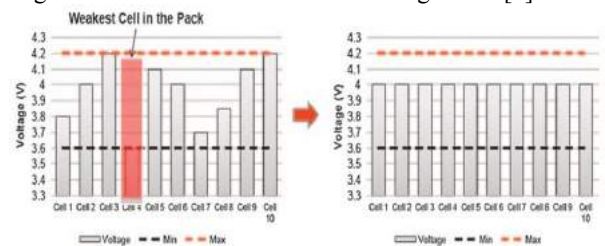
PTC (Positive Temperature Coefficient Devices), die ihren Widerstand bei hohen Temperaturen drastisch

erhöhen, um einen unkontrollierten Stromfluss zu verhindern, Schmelzsicherungen und Sollbruchstellen für den kontrollierten Ausfall der Zelle lassen sich ebenfalls auf Modulebene verbauen und stellen eine einfache Varianten zum Schutz des Systems dar, wobei die letzten beiden Optionen auch zum Austausch der Zelle führen.

Auf modularer Ebene ist zunächst eine crashsichere Unterbringung in einem korrosionssicheren Gehäuse zu empfehlen. Zudem bietet sich die Zugabe von feuerhemmendem Schaum um die Zellen an. Genau wie auf Zellebene können auch auf Modulebene Ventile zum Abblasen von Reaktionsgase verbaut werden.

Durch den Einbau eines Zell-Kontrollsystems können Sicherheitsschalter zwischen einzelnen Modulen intelligent angesteuert werden.

Zusätzlich zum Schutz durch ein Gehäuse wird auf der Systemebene vor allem durch das Batteriemanagementsystem (BMS) ein gewisses Maß an Sicherheit gewährleistet. Es überwacht den Batterieverbund durch die permanente Auswertung der Sensordaten für Strom, Spannung und Temperatur. Auf diese Weise kann bei einer Überschreitung vordefinierter Grenzwerte ein sicheres Abschalten gewährleistet werden. Neben der einfachen Schaltaufgabe und der Kommunikation mit übergeordneten Systemen erfüllt das BMS noch weitere wichtige Aufgaben. Grundsätzlich dient es der Betriebsoptimierung. Durch das Thermomanagement der Zellen gewährleistet es den Betrieb bei einer optimalen Temperatur, was für eine gleichmäßige und möglichst langsame Alterung der Zellen essentiell ist. Die gleichmäßige Belastung der einzelnen Zellen, sowie der Schutz vor Über- bzw. Tiefentladungen sind weitere Aufgaben des BMS. prinzipbedingte Streuungen und Restladungen der Zellen können zu ungleichmäßigen Ladeständen führen, welche aktiv oder passiv ausgeglichen werden müssen, um die volle Kapazität des Batteriesystems nutzbar zu machen. Passive Methoden schützen dabei nur vor einer Überladung des Systems, aktive Methoden können restliche Kapazitäten nutzbar machen. Durch den Einsatz von bspw. DC/DC-Wandlern kann ein Ausgleichsstrom zwischen den Zellen fließen der das Ladeniveau angleicht. In Bild 3.2 ist der Prozess dargestellt. [3]



**Bild 3.3** Spannungsunterschiede im Modul während des Ladens [3]

Zuletzt kann noch eine Erhöhung der Lebensdauer/Zykluszahl des Batteriesystems über das BMS gesteuert werden. Erreicht wird dies durch die Festlegung einer maximal zulässigen Ladekapazität im Vergleich zur theoretisch nutzbaren Kapazität der Zellen. (SOC – State of Charge). Bei einer Limitierung des SOC mit gleichzeitiger Reduzierung der Entladetiefe (DOD –



Depth of Discharge) kann eine drastische Steigerung der Lebensdauer erreicht werden. [1]

## 4 Zusammenfassung/Fazit

Im Zuge der Energiewende werden Lithium-Ionen-Batterien und -Batteriesysteme das Mittel der Wahl für Anwendungen sein, welche hohe Energiedichten erfordern. Hier sind vor allem die Elektromobilität und auch stationäre Speicher zur Überbrückung der Lücke zwischen Erzeugung und Verbrauch erneuerbarer Energien zu nennen. Aufgrund der besonderen starken Reaktion dieser Technologie auf Fehlerfälle, sind zuverlässige und wirksame Sicherheitsmechanismen für den Betrieb nötig.

Lithium-Ionen-Batteriesysteme lassen sich in drei Ebenen ordnen: Die Zell-, Modul-, und Systemebene. Auf jeder Ebene gibt es verschiedene Schutzmöglichkeiten. Dabei ist zwischen irreversiblen und reversiblen Maßnahmen zu unterscheiden.

Die Wahl der geeigneten Schutzeinrichtung muss auf Grundlage der spezifischen Anforderungen an das Gesamtsystem geschehen. Zu beachten sind neben der Wiederverwendbarkeit auch die eventuelle Notwendigkeit von sekundärer oder tertiärer Schutztechnik, sowie wirtschaftliche Aspekte.

## 5 Literatur

- [1] E. Rahimzei, K. Sann, M. Vogel / VDE Verband der Elektrotechnik / DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Kompendium: Li-Ionen-Batterien, Stand: Juli 2015, [http://www.ikt-em.de/\\_media/Kompendium\\_Li-Ionen-Batterien.pdf](http://www.ikt-em.de/_media/Kompendium_Li-Ionen-Batterien.pdf) [Zugriff am 03.05.2016]
- [2] A. Jossen, W. Weydanz, Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Untermeitingen: Reichardt Verlag, 2006.
- [3] R. Korthauer, Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Heidelberg: Springer-Vieweg, 2013
- [4] H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, I. Olschewski, Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges – Technologien, Märkte und Implikationen, 2. überarbeitete Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [5] F. Döring, B. Behrens, N. Rosenberger, Umgang mit Lithium-Akkumulatoren bei Zweirädern, Bonn: Bundesinnungsverband für das Deutsche Zweiradmechaniker-Handwerk, 2011.
- [6] P.G. Balakrishnan, R. Ramesh, T.P. Kumar, Safety mechanisms in lithium-ion batteries, Journal of Power Sources, S.401-411: Elsevier, 2006.



## Sicherheitsmechanismen in einem Lithium-Ionen-Batteriesystem

Lars Claaßen, 30.06.2016

### Agenda

- Einleitung/Motivation
- Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle
- Übersicht der Sicherheitsmechanismen in Lithium-Ionen Batteriesystemen
- Anwendungsgebiete der verschiedenen Mechanismen
- Zusammenfassung und Ausblick



# Agenda

- **Einleitung/Motivation**
- Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle
- Übersicht der Sicherheitsmechanismen in Lithium-Ionen Batteriesystemen
- Anwendungsgebiete der verschiedenen Mechanismen
- Zusammenfassung und Ausblick

## Einleitung/Motivation

- Bedarf moderner Speicher
- Energiewende
- Vielseitige Einsatzbereiche von Li-Ionen-Batterien dank anwendungsabhängiger Verwendung von Mischoxiden erfordern spezifische Sicherheitsmechanismen
- Entstehen sicherheitskritischer Situationen durch Fehlerfälle im Privatgebrauch, Verkehr, ...



Abbildung 1: Batteriedurchgehen [1]

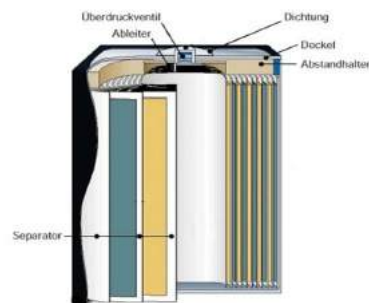


Abbildung 2: Li-Ionen-Sekundärzelle [2]

# Agenda

- Einleitung/Motivation
- **Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle**
- Übersicht der Sicherheitsmechanismen in Lithium-Ionen Batteriesystemen
- Anwendungsgebiete der verschiedenen Mechanismen
- Zusammenfassung und Ausblick

## Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle

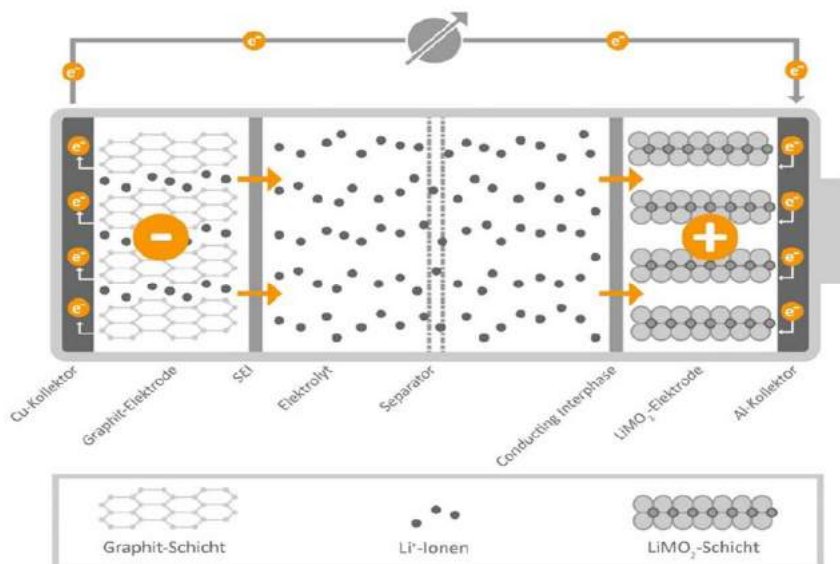


Abbildung 3: Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle beim Entladevorgang [3]

# Agenda

- Einleitung/Motivation
- Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle
- **Übersicht der Sicherheitsmechanismen in Lithium-Ionen Batteriesystemen**
- Anwendungsgebiete der verschiedenen Mechanismen
- Zusammenfassung und Ausblick

## Sicherheitsmechanismen in einem Li-Ionen-Batteriesystem

Grade bei Lithium-Ionen-Batterien ist Sicherheit ein wichtiger Aspekt!

Ursachen für sicherheitskritische Zustände:

- Kurzschluss
- Hohe Temperaturen
- Mechanische Deformation



Abbildung 4: Li-Ionen-Akku als Pouch-Zelle [4]

## Aufbau eines Batteriesystems

- Ein Batteriesystem lässt sich in drei Ebenen gliedern: Zell-, Modul-, Systemebene
- Zellebene
- Modulebene:

- Zusammenfassung einzelner Zellen zu Modulen
- enthält Zell-Kontrollsystem
- einfachere Anwendungen kommen schon mit einzelnen Zellen oder einem Modul aus



Abbildung 5.: Schema Modul [3]

## Aufbau eines Batteriesystems

- Systemebene

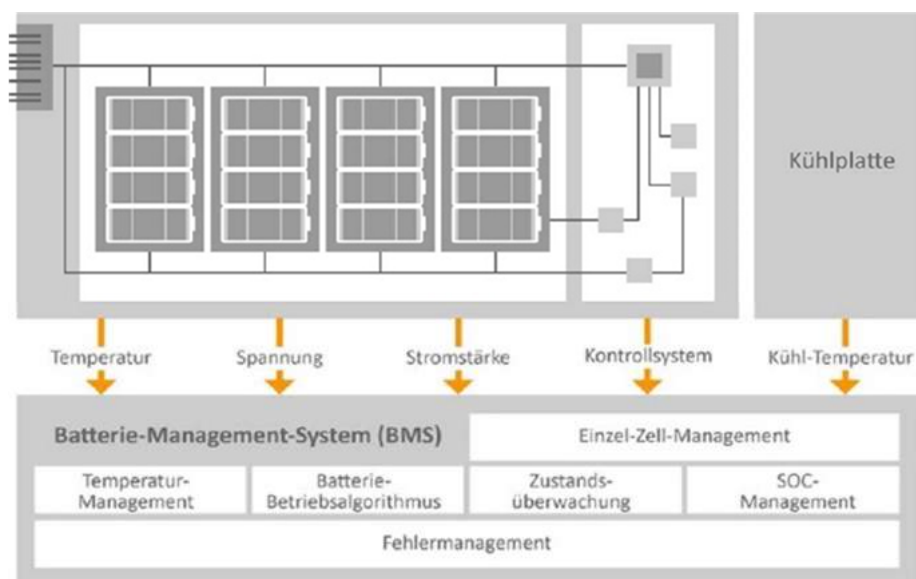


Abbildung 6: Übersicht Batteriesystem [3]

# Sicherheitsmechanismen in einem Li-Ionen-Batteriesystem

## Zellebene:

- Alternative Elektrodenmaterialien (Bspw.  $\text{LiFePO}_4$ )
- Beifügen von flammenhemmenden Additiven (Elektrolytadditive)
- Shutdown-Separatoren
- Redox-Shuttle
- Shutdown-Additive
- Sicherheitsventile
- CID
- Balancing der Elektroden
- Sollbruchstellen

# Sicherheitsmechanismen in einem Li-Ionen-Batteriesystem

## Zell- und Modulebene:

- PTC (Kaltleiter)
- Schmelzsicherung

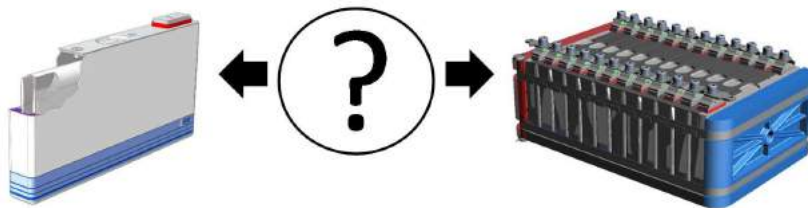


Abbildung 7: Li-Ionen-Akku, Zelle und Modul [vgl. 9]

## Modulebene:

- Crashesichere Unterbringung der Zellen in einem korrosionssicheren Gehäuse
- Feuerhemmender Schaum innerhalb des Gehäuses
- Ventile zur Abblasung der Reaktionsgase
- Sicherheitsschalter zwischen einzelnen Modulen
- Zell-Kontrollsystem



# Sicherheitsmechanismen in einem Li-Ionen-Batteriesystem

## Systemebene:

Batteriemanagementsystem (BMS):

- Vorrangige Aufgabe des BMS ist der Schutz der Einzelzellen im Systemverbund
- Mikrocontrollergesteuerte Zellüberwachung durch Sensorik
- Kontinuierliche Messdatenerfassung/Protokollierung
- selbstständiges Schalten bei Überschreiten bestimmter Grenzwerte
- Kommunikation mit Übergeordneten Systemen

## Agenda

- Einleitung/Motivation
- Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle
- Übersicht der Sicherheitsmechanismen in Lithium-Ionen Batteriesystemen
- **Anwendungsgebiete der verschiedenen Mechanismen**
- Zusammenfassung und Ausblick

## Anwendung des Batteriemanagementsystems

- Erfüllt neben der einfachen Schaltaufgabe auch noch weitere wichtige Aspekte
- Lässt sich in einzelne Bereiche unterteilen:
  1. Thermomanagement
  2. Einzel-Zell-Management
  3. Über- bzw. Tiefentladeschutz
  4. Erhöhung der Lebensdauer/Zykluszahl durch Festlegung eines maximalen SOC
  5. Zellladungsausgleich (aktiv oder passiv)

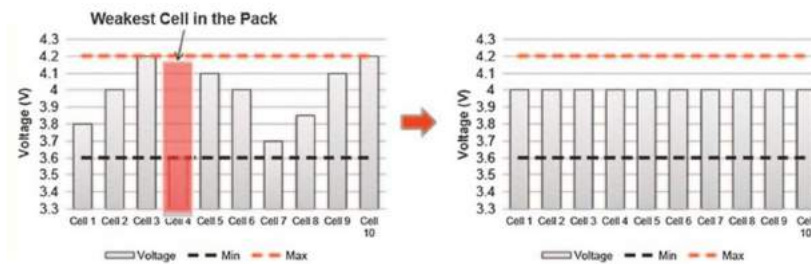


Abbildung 8: Spannungsunterschiede im Modul während des Ladens [8]

## Anwendungsgebiete der Mechanismen auf Zell-/Modulebene

### Was zu beachten ist bei der Entscheidung:

- Einsatzbereich der Zelle/des Moduls
- Geschätzte Lebensdauer einer Zelle
- Wirtschaftlichkeit eines komplexen Managementsystems für die gewünschte Anwendung
- Notwendigkeit einer Haupt- und sekundären bzw. tertiären Schutzebene
- Wie kompliziert Gestalten sich Wartungen oder ein Austausch des Systems nach einer Schutzauslösung?


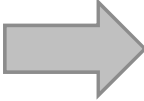
## Anwendungsgebiete der Mechanismen auf Zell-/Modulebene

<u>Reversibel</u>	<u>Irreversibel</u>
Variation der Kathodenmaterialien	Flammenhemmende Additive
BMS	Shutdown-Additive
Zell-Konrtollsystem	Sollbruchstellen
Sicherheitsventile	Schmelzsicherungen
CID	
PTC	
Balancing der Elektroden	
Redox-Shuttle	
Crashsichere Unterbringung	
Feuerhemmender Schaum in Gehäuse	
Ventile für Reaktionsgase	
Sicherheitsschalter zw. Zellen im Modul	

## Agenda

- Einleitung/Motivation
- Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle
- Übersicht der Sicherheitsmechanismen in Lithium-Ionen Batteriesystemen
- Anwendungsgebiete der verschiedenen Mechanismen
- **Zusammenfassung und Ausblick**

## Zusammenfassung und Ausblick

- Im Zuge der Energiewende werden Lithium-Ionen-Batterien das Mittel der Wahl für Anwendungen sein, die hohe Energiedichten erfordern (Bspw. Elektromobilität, stationäre Speicher)
- Es gibt drei Ebenen innerhalb eines Batteriesystems 
  1. Zellebene
  2. Modulebene
  3. Systemebene
- Auf jeder Ebene gibt es Möglichkeiten, das System zu Schützen 
  1. reversibel
  2. irreversibel
- Die Auslegung des Systems und Anwendung der Sicherheitsmechanismen muss auf der Grundlage der spezifischen Anforderungen an das System geschehen!

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

## Quellenverzeichnis

- [1] <http://www.aircraftinteriorsinternational.com/industry-blogs.php?BlogID=1467> [Zugriff: 31.05.2016].
- [2] <http://www.tecchannel.de/a/notebook-akkus-ein-debakel-und-seine-folgen,455661,3> [Zugriff: 31.05.2016].
- [3] Ehsan Rahimzei, Kerstin Sann, Moritz Vogel / VDE Verband der Elektrotechnik / DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Kompendium: Li-Ionen-Batterien, Stand: Juli 2015, [http://www.iktem.de/\\_media/Kompendium\\_Li-IonenBatterien.pdf](http://www.iktem.de/_media/Kompendium_Li-IonenBatterien.pdf) [Zugriff am 03.05.2016].
- [4] <http://www.n-droid.de/forschung-lithium-ionen-akku-werden-in-zukunft-deutlich-leistungstarker-und-kleiner.html> [Zugriff: 02.06.2016].
- [5] A. Jossen, W. Weydanz, Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, 1. Auflage, Untermeitingen: Inge Reichardt Verlag, 2006.

## Quellenverzeichnis

- [6] P.G. Balakrishnan, R. Ramesh, T.P. Kumar, Safety mechanisms in lithium-ion batteries, Journal of Power Sources, S.401-411: Elsevier, 2006.
- [7] H. Wallentowitz, A. Freialdenhoven, I. Olschewski, Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges – Technologien, Märkte und Implikationen, 2. überarbeitete Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011.
- [8] R. Korthauer, Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Heidelberg: Springer-Vieweg, 2013
- [9] <https://www.zsw-bw.de/forschung/batterien/themen/batteriesystemtechnik.html#c2830> [Zugriff: 16.06.2016]

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Batteriedurchgehen

Abbildung 2: Li-Ionen-Sekundärzelle

Abbildung 3: Aufbau und Funktionsweise einer Li-Ionen-Zelle beim Entladevorgang

Abbildung 4: Li-Ionen-Akku als Pouch Zelle

Abbildung 5: Schema Modul

Abbildung 6: Übersicht Batteriesystem

Abbildung 7: Li-Ionen-Akku, Zelle und Modul

Abbildung 8: Spannungsunterschiede im Modul während des Ladens