



Weierstraß-Institut für  
Angewandte Analysis und Stochastik



# Wieviel Energie passt in Batterien und andere Speicher?

J. Fuhrmann

## 1 WIAS

## 2 Energie & Leistung

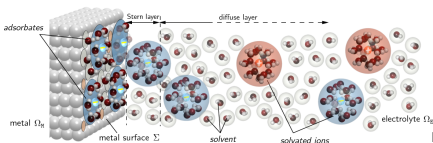
## 3 Batterien, Brennstoffzellen & Elektrolyseure

- Li-Ionen-Batterien
- Wasserstoff als Energiespeicher: Brennstoffzellen und Elektrolyseure

## 4 Wieviel Energie müssen wir eigentlich speichern ?

## 5 Große Energiespeicher

- Elektrochemische Systeme:
  - Ionentransport in Elektrolyten, Batterien, Brennstoffzellen
  - Elektrochemische Reaktionen
  - Ionenkanäle in Zellmembranen
- WIAS:
  - Entwicklung von detaillierten Modellgleichungen, die thermodynamischen Grundprinzipien genügen
  - Haben die Modellgleichungen Lösungen, und wenn ja, wieviele ?
  - Umsetzung in Computermodelle
  - Kooperationen mit anderen akademischen Einrichtungen, Firmen



M. Landstorfer, WIAS preprint 2337

## 1 WIAS

## 2 Energie & Leistung

## 3 Batterien, Brennstoffzellen & Elektrolyseure

- Li-Ionen-Batterien
- Wasserstoff als Energiespeicher: Brennstoffzellen und Elektrolyseure

## 4 Wieviel Energie müssen wir eigentlich speichern ?

## 5 Große Energiespeicher



XKCD PRESENTS:  
SOME NEW  
SCIENCE MNEMONICS



xkcd.com

kilo	<i>k</i>	$10^3$	1 000	Tausend	thousand
mega	<i>M</i>	$10^6$	1 000 000	Million	million
giga	<i>G</i>	$10^9$	1 000 000 000	Milliarde	billion
tera	<i>T</i>	$10^{12}$	1 000 000 000 000	Billion	trillion

- Einheitenvorsätze werden benutzt, um mit wenig Schreib- und Sprachaufwand sehr verschiedene Skalen darzustellen
- Achtung bei Milliarden (de), billions(en), Billionen (de), trillions(en)!

Energie ist das, was Bewegung, Beleuchtung, Erwärmung etc. möglich macht.

- **Joule (J):**  $1\text{J} = 1\text{Nm} \approx$  Energie für Heben von 102g um 1m
- **Wattsekunde:**  $1\text{Ws} = 1\text{J}$
- **Wattstunde:**  $1\text{Wh} = 3600\text{J}$
- **Kalorie:**  $1\text{cal} = 4.184\text{J}$ 
  - $1\text{cal} \approx$  Energie für Erwärmung von 1g Wasser um  $1^\circ\text{C}$
  - $1\text{kcal} \approx 1.16\text{Wh}$
- **Kilowattstunde:**  $1\text{kWh} = 1000\text{Wh} = 3.6\text{MJ}$  :
  - Energieverbrauch einer 100W-Glühlampe, die 10h brennt
  - Erwärmung von 10L Wasser von  $15^\circ\text{C}$  auf  $100^\circ\text{C}$
  - 5km Fahren mit E-Auto bei Verbrauch von 20kWh/100km

Leistung ist pro Zeiteinheit verausgabte Energie

- **Watt:**  $1\text{W} = 1\text{Ws/s} = 1\text{J/s} = 1\text{V} \cdot 1\text{A}$
- 10L Wasser von  $15^\circ\text{C}$  auf  $100^\circ\text{C}$  erwärmen benötigt 1kWh Energie.  
Eine Stunde  $\Rightarrow$  Leistung von  $1\text{kWh}/1\text{h} = 1000\text{W} = 1\text{kW}$   
6 Minuten  $\Rightarrow$  Leistung von  $1\text{kWh}/0.1\text{h} = 10000\text{W} = 10\text{kW}$
- Ein Steckdose mit  $220\text{V}$  ist typischerweise mit  $10\text{A}$  abgesichert und kann daher eine Leistung von  $220\text{V} \cdot 10\text{A} = 2.2\text{kW}$  abgeben. Um ein E-Auto mit  $50\text{kWh}$  Batterie zu laden, werden (die Verluste nicht eingerechnet)  $50\text{kWh}/2.2\text{kW} \approx 23\text{h}$  benötigt

## 1 WIAS

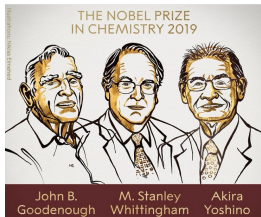
## 2 Energie & Leistung

## 3 Batterien, Brennstoffzellen & Elektrolyseure

- Li-Ionen-Batterien
- Wasserstoff als Energiespeicher: Brennstoffzellen und Elektrolyseure

## 4 Wieviel Energie müssen wir eigentlich speichern ?

## 5 Große Energiespeicher



- Mit am weitesten entwickelte Technologie für Speicherung elektrischer Energie
- Riesige Fortschritte in den letzten 20 Jahre: vom Handy-Akku zur 50kWh-Traktionsbatterie
- Weltweite Investitionen in Gigafabriken

- Anode aus Graphit mit eingelagerten Li-Atomen
- Elektrolyt, der  $\text{Li}^+$ -Ionen transportieren kann, aber keine Elektronen
- Kathode: Metalloxid (z.B. Kobalt) mit leeren Plätzen für Li-Atome

Äußerer Stromkreis erlaubt den Transport von Elektronen von der Anode zur Kathode, dabei können sie Arbeit als Produkt aus Zellspannung und Ladung verrichten. Die  $\text{Li}^+$ -Ionen wandern durch den Elektrolyten zur Kathode.

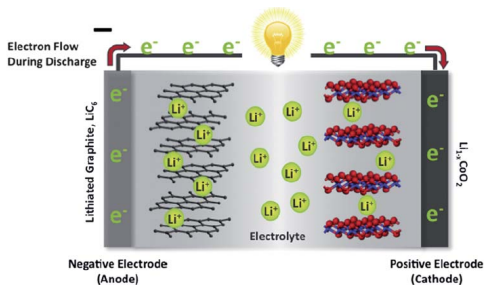


Illustration: Thackeray/Wolverton/Isaacs, Energy Environ. Sci., 2012, 5, 7854

Eine äußere Stromquelle forciert den Transport von Elektronen von der Katode zur Anode, die dafür genutzte Energie kann im Entladeprozess Arbeit verrichten.

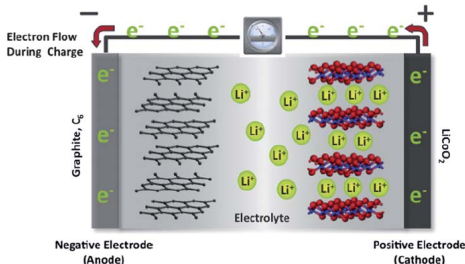


Illustration: Thackeray/Wolverton/Isaacs, Energy Environ. Sci., 2012, 5, 7854

- Ein Li-Ion speichert eine Elementarladung:  $q = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{As}$ . Bei einer Zellspannung von  $3.5 \text{V}$  entspricht das  $E_{Li} = 5.607 \cdot 10^{-19} \text{Ws}$
- Für ein Li-Atom brauchen wir in der Anode 6 Kohlenstoffatome, und in der Kathode z.B. einmal Kobalt-Dioxid  $\text{CoO}_2$ .
- Soviel wiegen die einzelnen Atome:

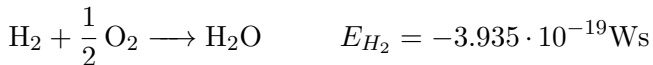
$$\begin{aligned} m_{Li} &= 1.1524 \cdot 10^{-23} \text{g}, & m_{Co} &= 9.7860 \cdot 10^{-23} \text{g}, \\ m_{O} &= 2.6567 \cdot 10^{-23} \text{g}, & m_{C} &= 1.9944 \cdot 10^{-23} \text{g} \end{aligned}$$

- Die Speicherstruktur für ein Li wiegt  
 $M_{Li} = m_{Li} + 6m_C + 2m_O + m_{Co} = 28.21 \cdot 10^{-23} \text{g}$
- $\Rightarrow$  spezifische Energiedichte  $\frac{E_{Li}}{M_{Li}} = 552 \text{Wh/kg}$   
Elektrolyt, Kontakte, Hüllen nicht mitgerechnet
- $\approx 200 \text{Wh/kg}$  in der Praxis.



- Sehr guter Wirkungsgrad  $> 90\%$
- Problem: Verfügbarkeit von Li - aus Salzseen in Lateinamerika, China
- Problem: Verfügbarkeit + Produktionsbedingungen für andere benötigte Materialien (Kobalt, Nickel für Kathoden)
- Diverse Ansätze, die Kapazität zu erhöhen (Metallanoden, Anoden mit Silizium, Kathoden mit Nickel, Mangan )
- Diverse Ansätze, kritische Materialien einzusparen, z.B. Katoden mit Lithiumeisenphosphat
- Na-Ionen-Batterien funktionieren nach demselben Prinzip, mit etwas geringerer Energiedichte, aber deutlich besserer Verfügbarkeit aller Materialien, können auf den für Li-Ionen-Batterien entwickelten Anlagen produziert werden.

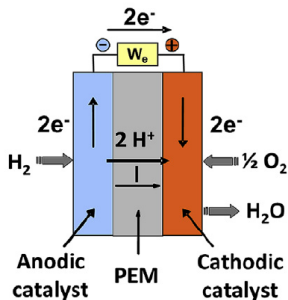
- Bei der Oxidation eines Wasserstoffmoleküls  $H_2$  (“Knallgasreaktion”) wird Energie frei:



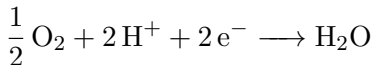
Ein Wasserstoffmolekül wiegt  $m_{H_2} = 0.3348 \cdot 10^{-23} \text{g}$   
⇒ spezifische Energiedichte von  $\frac{E_{H_2}}{m_{H_2}} = 32.655 \text{kWh/kg}$

- Diese Wärmeenergie kann als elektrische Energie nutzbar gemacht werden, z.B. über eine Gasturbine, mit einem Wirkungsgrad von 20-40%<sup>1</sup> einem kombinierten Gas-und-Dampfkraftwerk (GuD; Wirkungsgrad ca. 60%) einen Verbrennungsmotor, oder eine Brennstoffzelle

<sup>1</sup> [https://www.dlr.de/vt/en/desktopdefault.aspx/tabid-9006/18909\\_read-151197](https://www.dlr.de/vt/en/desktopdefault.aspx/tabid-9006/18909_read-151197)



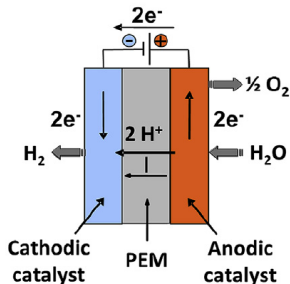
## ■ Aufspaltung der Oxidation in Halbreaktionen



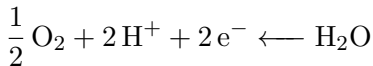
- Eine Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) separiert die Teilreaktionen, und transportiert nur Wasserstoffionen (Protonen,  $\text{H}^+$ )
- Elektronen laufen über einen äußeren Stromkreis und geben die Verbrennungsenergie als Arbeit ab - der elektrische Wirkungsgrad ist bei 35-45 % <sup>1</sup>

Illustration: C. Lamy, International Journal of Hydrogen Energy, 41(2016)34,15415-15425

<sup>1</sup> [https://www.dlr.de/vt/en/desktopdefault.aspx/tabid-9006/18909\\_read-151197](https://www.dlr.de/vt/en/desktopdefault.aspx/tabid-9006/18909_read-151197)



## ■ Umgekehrte Halbreaktionen



- Eine äußere Stromquelle forciert die Aufspaltung von Wasser und den Transport von Elektronen von der Katode zur Anode, die dafür genutzte Energie wird für die Abspaltung von Wasser benutzt.

Wirkungsgrad: 60-70%<sup>1</sup>

Illustration: C. Lamy, International Journal of Hydrogen Energy, 41(2016)34,15415-15425

<sup>1</sup> <https://www.bdew.de/energie/effizienzsteigerung-bei-der-wasserstoffherzeugung/>

- Gesamtwirkungsgrad Strom → Strom : 70% Elektrolyse und 45% Brennstoffzelle ⇒ 31%
- Andere Varianten – z.B. Hochtemperaturkeramik – haben höhere Wirkungsgrade, aber eigene Probleme
- Kritischer Rohstoff: Platin für den Katalysator
- Wasserstoff ist schwierig zu speichern: geringe volumetrische Energiedichte als Gas, flüssig bei  $-252^{\circ}\text{C}$ .
- Wasserstoff diffundiert in Metalle: Problem für Druckspeicher, Grundlage für Metallhydridspeicher
- Speicherung in chemischen Verbindungen, z.B Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) kann sinnvoll sein
- $\text{H}_2$  wird auch in großen Mengen für  $\text{CO}_2$ -freie Stahlproduktion benötigt
- Andere Quellen von  $\text{CO}_2$ -freiem Wasserstoff: türkis (Methanpyrolyse), gelb (nuklear)

## 1 WIAS

## 2 Energie & Leistung

## 3 Batterien, Brennstoffzellen & Elektrolyseure

- Li-Ionen-Batterien
- Wasserstoff als Energiespeicher: Brennstoffzellen und Elektrolyseure

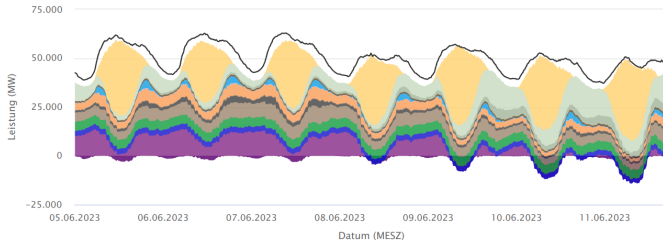
## 4 Wieviel Energie müssen wir eigentlich speichern ?

## 5 Große Energiespeicher

Auf <https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm> findet man den Verlauf der Energieerzeugung in D in 15min-Intervallen

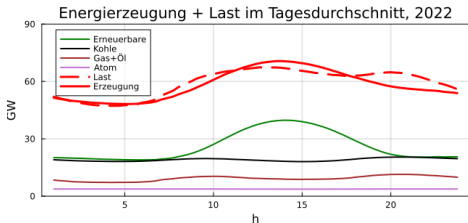
### Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in Woche 23 2023

Energetisch korrigierte Werte

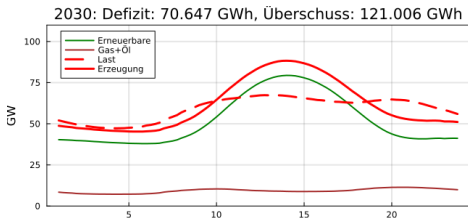


- |                              |                              |                         |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| ● Pumpspeicher Verbrauch     | ● Import Saldo               | ● Kernenergie           |
| ● Laufwasser                 | ● Biomasse                   | ● Braunkohle            |
| ● Steinkohle                 | ● Öl                         | ● Erdgas                |
| ● Geothermie                 | ● Speicherwasser             | ● Pumpspeicher          |
| ● Andere                     | ● Müll                       | ● Wind Offshore         |
| ● Wind Onshore               | ● Solar                      | — Last                  |
| — Residuallast               | — Anteil EE an der Erzeugung | — Anteil EE an der Last |
| — New Ahaard Auktion (DE-11) |                              |                         |





Projektion 2030: Kohleausstieg,  
Erneuerbare verdoppeln, gleiche Last:



Defizite und Überschüsse müssen ausgeglichen werden:

- Import ?
- Mehr Gas ?
- Speicher ? ca. 100GWh!

Fraunhofer ISE 2022 - Kurzstudie zu Batteriegroßspeichern:

- 100GWh in 2030

<https://t1p.de/3tdqy>





## Energieziel 2050: Studie des Umweltbundesamts aus 2010

<https://t1p.de/g10x>



- Wetterverlauf 2006-2009
- Prognose für 2050 (Verbrauch, EE-Potenzial etc).
- H<sub>2</sub>: 44GW Elektrolyseleistung, 30GW GuD Rückverstromung, 85TWh Speicher
- CH<sub>4</sub>: 44GW Elektrolyseleistung, 38GW GuD Rückverstromung, 75TWh Speicher

Ruhnau & Qvist 2022, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4dc8>

[//doi.org/10.1088/1748-9326/ac4dc8](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4dc8)

- Analyse von 35 Jahren Verlaufsdaten
- Kritische Phase kann 12 Wochen dauern
- 55TWh H<sub>2</sub>-Speicher

Environ. Res. Lett. 17 (2022) 048001

<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4dc8>

ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS

LETTER

Storage requirements in a 100% renewable electricity system: extreme events and inter-annual variability

Oliver Ruhnau<sup>1</sup> and Stefan Qvist<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Berlin School, Berlin, Germany

<sup>2</sup> Orica Consulting Limited, London, United Kingdom

\* Author to whom any correspondence should be addressed.

E-mail: [ruhnau@berlin-school.org](mailto:ruhnau@berlin-school.org)

**Keywords:** renewable energy, inter-annual variability, low wind events, Dispatchable electricity system, energy storage, hydrogen

### 1 WIAS

### 2 Energie & Leistung

### 3 Batterien, Brennstoffzellen & Elektrolyseure

- Li-Ionen-Batterien
- Wasserstoff als Energiespeicher: Brennstoffzellen und Elektrolyseure

### 4 Wieviel Energie müssen wir eigentlich speichern ?

### 5 Große Energiespeicher

- Potenzielle Energie einer angehobenen Masse:

$$E = m \cdot h \cdot g = \text{Masse} \cdot \text{Höhe} \cdot \text{Erdbeschleunigung } 9.82\text{m/s.}$$

1 kg    367 km

4 kg    100 km

10 kg   36.7 km

100 kg   3.67 km

1000 kg    367 m

- Li-Ionen-Akku mit ca. 4kg
- 250g Pasta (umgerechnet aus kcal)
- 100ml Dieselkraftstoff
- Wasserstoff: 30g, 400ml (flüssig  $-252^{\circ}\text{C}$ ), 800ml (700bar)
- Erdgas: 67g, 162ml (flüssig,  $-160^{\circ}\text{C}$ ), 400ml (250bar)
- Ammoniak: 193g, 313ml (flüssig,  $-34^{\circ}\text{C}$ )

[https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_density](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density)



renault.de

### Renault Zoe

- 50kWh Batterie
- 100GWh entspricht 2 Millionen dieser Fahrzeuge



visra.com

### Moss landing, Kalifornien

- aktuell größter Batteriespeicher der Welt mit 1600MWh Kapazität und 400MW Leistung
- 100GWh entspricht 62 dieser Installationen



### Pumpspeicherwerk Goldisthal (Thüringer Wald)

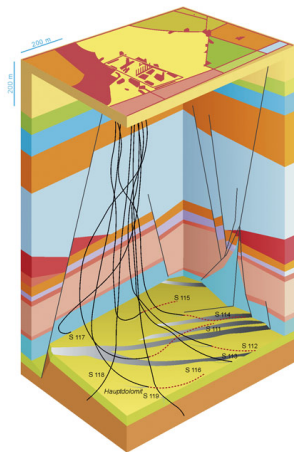
- Kapazität:  $\approx 8.5\text{GWh}$
- Leistung:  $\approx 1\text{GW}$
- Abtragung einer Bergkuppe für den Bau
- Erhebliche Diskussionen, Klage des BUND vor dem Bau
- $100\text{GWh} \Rightarrow 12$  dieser Installationen

Bildquellen: [https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk\\_Goldisthal](https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk_Goldisthal),  
<http://ww1.clauss-ingenieure.de/pumpspeicherwerk-goldisthal/>



### Mozah Nakilat Q-Max LNG Carrier

- Kapazität:  $266000 \cdot \text{m}^3$  LNG
- Energieinhalt: 1.640TWh
- ca. 800GWh elektrisch - das ist  $100\times$  Goldisthal!



## Erdgasspeicher Rheden

- Kapazität:  $3.9 \cdot \text{km}^3$  Gas
- Energieinhalt: 39TWh
- $\approx 20\text{TWh}$  elektrisch

Dreidimensionaler Querschnitt mit Darstellung der Horizontalbohrungen

- LNG-Tanker und Porengasspeicher speichern Methan
- Methan ( $\text{CH}_4$ ) aus Elektrolyse-Wasserstoff und  $\text{CO}_2$  braucht dafür riesige Mengen  $\text{CO}_2$
- $\Rightarrow$  Wasserstoffspeicher benötigen ggf. andere Technologien
- Grüner Wasserstoff benötigt Elektrolyse. Laut IEA:
  - 2022: 1.3GW Elektrolyse-Kapazität weltweit
  - für Net Zero 2050 werden 720GW benötigt
  - Energieziel 2050: 40GW in Deutschland
  - Elektrolyseprojekte in D sind im Moment im MW-Bereich: z.B. 8.75MW in Wunsiedel, 2022 von Siemens installiert

<https://www.iea.org/reports/electrolysers>  
<https://press.siemens.com/>





### Suiso Frontier

- Erster LH2-Tanker
- 1250m<sup>3</sup> Tankkapazität entspricht 3.5GWh

Von Hunini - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=98525624>

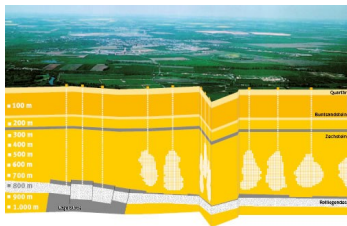
- Alternative: Transport von Wasserstoff in Form von Ammoniak (NH<sub>3</sub>)



◆ STELLUNGNAHME

4. NOVEMBER 2022

## Wasserstoffspeicher-Roadmap 2030 für Deutschland<sup>1</sup>



VNG GmbH

- Nationaler Wasserstoffrat: Speicherung in Salzkavernen
- 1.8 TWh 2030, 43-73 TWh 2050
- Pilotprojekte: z.B. Rüdersdorf, Bad Lauchstädt

<https://t1p.de/addee>  
<https://www.ruedersdorf.de/>

- Um die Herausforderungen der Dekarbonisierung von Wirtschaft und Gesellschaft zu erfassen, muss man die Größenordnungen zu verstehen
- Öffentlich verfügbare Quellen enthalten viele Informationen, die oft nur unzureichend aufbereitet werden
- Rechnen mit Energieeinheiten benötigt nur einfache Mathematik
- Viele Fragen nicht gelöst, Forschung und Ingenieurskunst ist gefordert – 2000 gab es keine Smartphones & keine allgemeine Videotelefonie . . .



Inspiriert durch “Sustainable Energy without the hot Air”  
<https://www.withouthotair.com/>(2010) von  
David MacCay (1967-2016).  
Siehe auch seinen TED-Talk  
[https://t1p.de/maccay\\_ted](https://t1p.de/maccay_ted)