



Weierstraß-Institut für
Angewandte Analysis und Stochastik



Wieviel Energie passt in Batterien und andere Speicher?

Version 19.6.2023: Bessere Verlinkung der Quellenangaben, [Link zu den Berechnungen](#).

Jürgen Fuhrmann

1 WIAS

2 Energie & Leistung

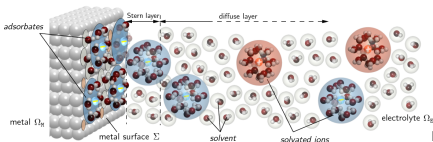
3 Batterien, Brennstoffzellen & Elektrolyseure

- 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



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

pdfborderstyle=/S/U/W 1

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

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°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°C auf 100°C
 - 5km Fahren mit E-Auto bei Verbrauch von 20kWh/100km

Leistung ist pro Zeiteinheit verausgabte Energie

- **Watt:** $1\text{W} = 1\text{Ws/s} = 1\text{J/s} = 1\text{V} \cdot 1\text{A}$
- 10LWasser von 15°C auf 100°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 220V ist typischerweise mit 10A abgesichert und kann daher eine Leistung von $220\text{V} \cdot 10\text{A} = 2.2\text{kW}$ abgeben. Um ein E-Auto mit 50kWh Batterie zu laden, werden (die Verluste nicht eingerechnet) $50\text{kWh}/2.2\text{kW} \approx 23\text{h}$ benötigt

1 WIAS

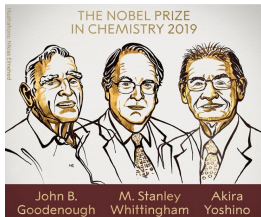
2 Energie & Leistung

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 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 Li^+ -Ionen wandern durch den Elektrolyten zur Kathode.

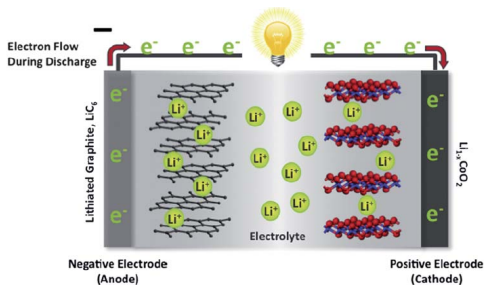


Illustration: Thackeray/Wolverton/Isaacs, Energy Environ. Sci., 2012, 5, 7854

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

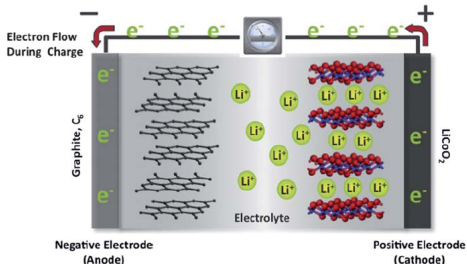


Illustration: Thackeray/Wolverton/Isaacs, Energy Environ. Sci., 2012, 5, 7854

- Ein Li-Ion speichert eine Elementarladung: $q = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{As}$. Bei einer Zellspannung von 3.5V 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 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

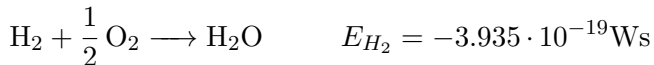
$$M_{Li} = m_{Li} + 6m_C + 2m_O + m_{Co} = 28.21 \cdot 10^{-23} \text{g}$$

- \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 ¹.

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery

- 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.

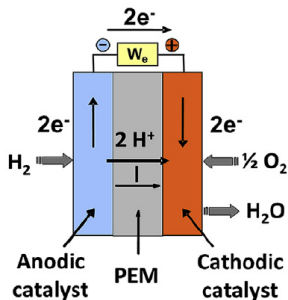
- Bei der Oxidation eines Wasserstoffmoleküls H_2 (“Knallgasreaktion”) wird Energie frei:



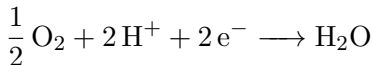
Ein Wasserstoffmolekül wiegt $m_{H_2} = 0.3348 \cdot 10^{-23} \text{g}$
⇒ spezifische Energiedichte von $\frac{E_{H_2}}{m_{H_2}} = 32.655 \text{kWh/kg}$

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

¹ https://www.dlr.de/vt/en/desktopdefault.aspx/tabid-9006/18909_read-15119/



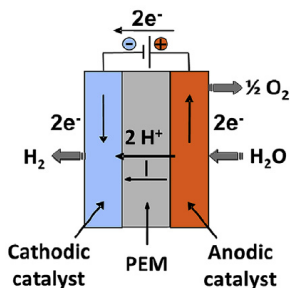
■ Aufspaltung der Oxidation in Halbreaktionen



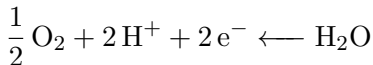
- Eine Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) separiert die Teilreaktionen, und transportiert nur Wasserstoffionen (Protonen, H^+)
- Elektronen laufen über einen äußeren Stromkreis und geben die Verbrennungsenergie als Arbeit ab - der elektrische Wirkungsgrad ist bei 35-45 %¹

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

¹ https://www.dlr.de/vt/en/desktopdefault.aspx/tabid-9006/18909_read-15119/



■ Umgekehrte Halbreaktionen



- Eine äußere Stromquelle forciert die Aufspaltung von Wasser und den Transport von Elektronen von der Anode zur Kathode (die jetzt ihre Position vertauscht haben), die dafür genutzte Energie wird für die Abspaltung von Wasser benutzt.
Wirkungsgrad: 60-70%¹

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

¹ <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°C .
- Wasserstoff diffundiert in Metalle: Problem für Druckspeicher, Grundlage für Metallhydridspeicher
- Speicherung in chemischen Verbindungen, z.B Ammoniak (NH_3), Methan (CH_4) kann sinnvoll sein
- H_2 wird auch in großen Mengen für CO_2 -freie Stahlproduktion benötigt
- Andere Quellen von 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

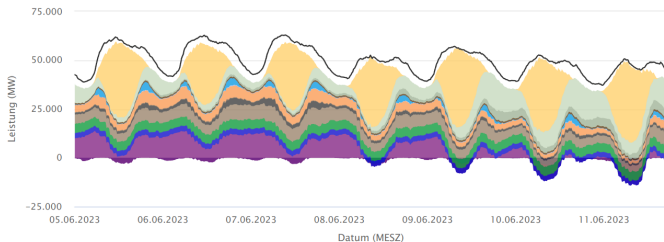
4 Wieviel Energie müssen wir eigentlich speichern ?

5 Große Energiespeicher

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

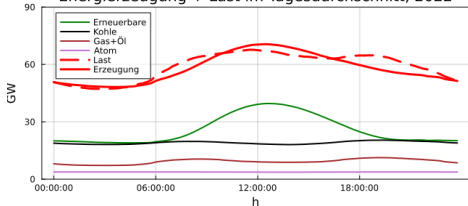
Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in Woche 23 2023

Energetisch korrigierte Werte



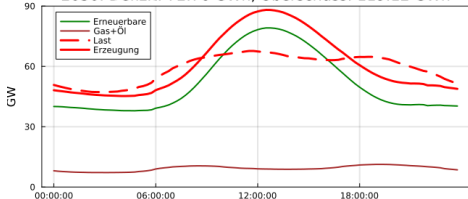
- | | | |
|--------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| ● Pumpspeicher Verbrauch | ● Import Saldo | ● Kernenergie |
| ● Laufwasser | ● Biomasse | ● Braunkohle |
| ● Steinkohle | ● Öl | ● Erdgas |
| ● Geothermie | ● Speicherwasser | ● Pumpspeicher |
| ●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

Energieerzeugung + Last im Tagesdurchschnitt, 2022



Projektion 2030: Kohleausstieg,
Erneuerbare verdoppeln, gleiche Last:

2030: Defizit: 72.76 GWh, Überschuss: 119.12 GWh



Defizite und Überschüsse müssen ausgeglichen werden:

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

Fraunhofer ISE 2022 - Kurzstudie
zu Batteriegroßspeichern:

- 100GWh in 2030



Energieziel 2050: Studie des Umweltbundesamts aus 2010

- Wetterverlauf 2006-2009
- Prognose für 2050 (Verbrauch, EE-Potenzial etc).
- H₂: 44GW Elektrolyseleistung, 30GW GuD Rückverstromung, 85TWh Speicher
- CH₄: 44GW Elektrolyseleistung, 38GW GuD Rückverstromung, 75TWh Speicher

Ruhnau & Qvist 2022

- Analyse von 35 Jahren Verlaufsdaten
- Kritische Phase kann 12 Wochen dauern
- 55TWh H₂-Speicher

Environ. Res. Lett. 17 (2022) 048001

<https://doi.org/10.1088/1748-9324/ab8484>

ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS

LETTER

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

Oliver Ruhnau¹ and Stefan Qvist²

¹ Hertz School, Berlin, Germany

² Cycle Consulting Limited, London, United Kingdom

* Author to whom any correspondence should be addressed.

E-mail: oruhnau@hertz-school.org

Keywords: renewable energy, inter-annual variability, low-wind events, Dunkelflaute, electricity system, storage design, backlogs

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°C), 800ml (700bar)
- Erdgas: 67g, 162ml (flüssig, -160°C), 400ml (250bar)
- Ammoniak: 193g, 313ml (flüssig, -34°C)

https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density



[renault.de](https://www.renault.de)

Renault Zoe

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



[vistracorp.com](https://www.vistracorp.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

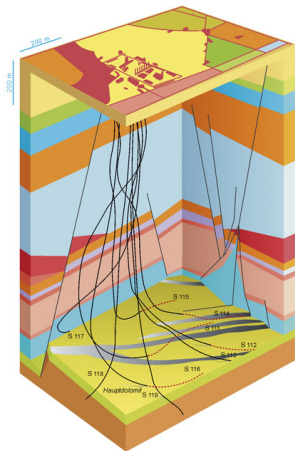
Bildquellen: https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk_Goldisthal,
<http://www1.clauss-ingenieure.de/pumpspeicherwerk-goldisthal/>



(c) Nakilat CC BY-SA 4.0

Mozah Nakilat Q-Max LNG Carrier

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



Erdgasspeicher Rehden

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

Dreidimensionaler Querschnitt mit Darstellung der Horizontalbohrungen

Bildquelle: <https://www.astora.de/presse/pressefotos/erdgasspeicher-rehden>

- LNG-Tanker und Porengasspeicher speichern Methan
- Methan (CH_4) aus Elektrolyse-Wasserstoff und CO_2 braucht dafür riesige Mengen CO_2
- \Rightarrow Wasserstoffspeicher benötigen ggf. andere Technologien
- Grüner Wasserstoff benötigt Elektrolyse. Laut IEA¹:
 - 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 installiert²

¹ <https://www.iea.org/reports/electrolysers>

² <https://press.siemens.com>



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

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

Suiso Frontier

- Erster LH2-Tanker
- 1250m³ Tankkapazität entspricht 3.5GWh

- Alternative: Transport von Wasserstoff in Form von Ammoniak (NH₃)

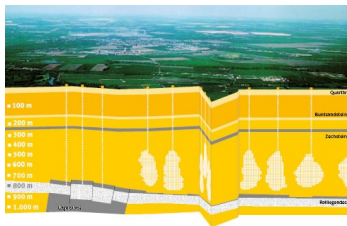
https://de.wikipedia.org/wiki/Suiso_Frontier



◆ STELLUNGNAHME

4. NOVEMBER 2022

Wasserstoffspeicher-Roadmap 2030 für Deutschland¹



www.vng-gasspeicher.de

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

Wasserstoffspeicher-Roadmap 2030 für Deutschland
<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](#)” (2010) von David MacCay (1967-2016). Siehe auch seinen [TED-Talk](#).