

Notwendigkeit und Möglichkeiten der Speichertechnik für die Energieversorgung durch Erneuerbare Energien

8. Isnyer Energiegipfel
20./21.3.2015

Vortrag
Prof. Dr. Eckhard Berger

Probleme der Erneuerbaren Energien

Große EE-Stromerzeuger sind ungleichmäßig verteilt: Windstrom im Norden (Off-Shore), PV im Süden

→ Verteilung des Stromes, Netzausbau

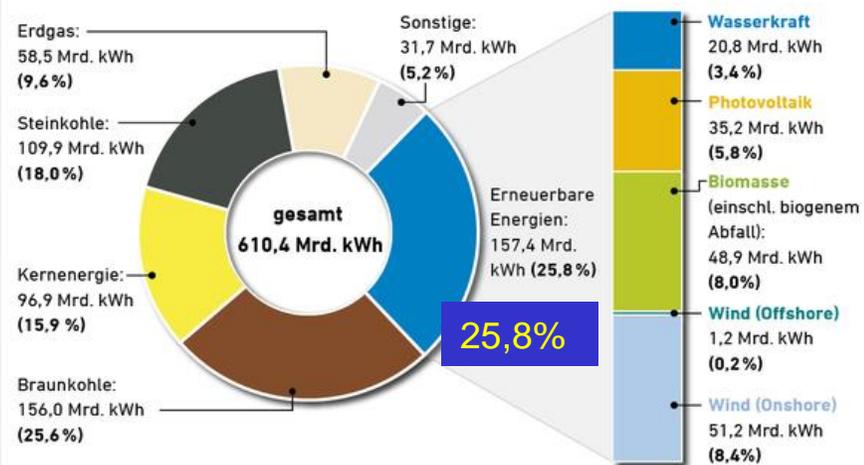
EE-Stromerzeugung fluktuiert zeitlich stark und stimmt mit der Stromnachfrage oft nicht überein.

→ Anpassung des Verbrauchs an die Erzeugung (Lastmanagement)

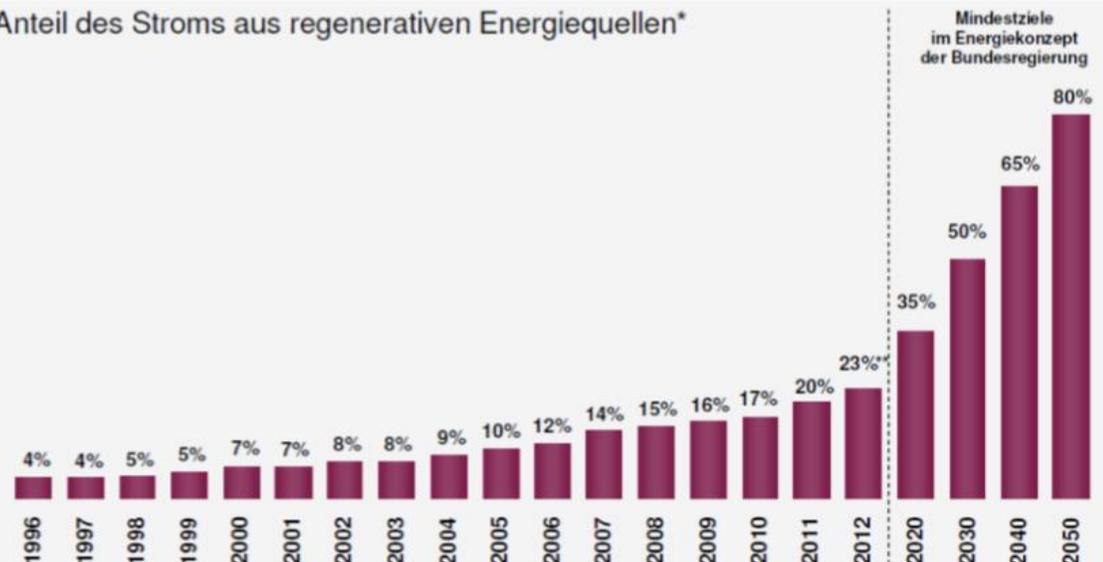
→ Speicherung des Stromes

Der Strommix in Deutschland im Jahr 2014

Mit 157 Milliarden Kilowattstunden lieferten Erneuerbare Energien mehr als ein Viertel der deutschen Bruttostromerzeugung. Zusammen hatten sie damit erstmals den größten Anteil im Vergleich zu den einzelnen anderen Energieträgern. Ihr Anteil am Bruttostromverbrauch betrug 27,3%.



Anteil des Stroms aus regenerativen Energiequellen*



Geplanter Netzausbau in Deutschland

hauptsächlich Nord-Süd-Verbindungen mit HGÜ (Hochspannungs-Gleichstrom Übertragung)



Leistung eines AKW
Typisch 1 GW

Netzhöchstlast in D
Ca. 70 GW

Jahresverbrauch in D
Ca. 600 Mrd. kWh
= 600 000 GWh
= 600 TWh



NEUE STROM-AUTOBAHNEN BIS 2022

- Gleichstrom-Neubauten
 - Wechselstrom-Neubauten
 - bereits im Bau, genehmigt oder im Genehmigungsverfahren
- Übertragungsbedarf in Gigawatt GW (keine konkreten Trassen)

Netzausbau in neuen Trassen

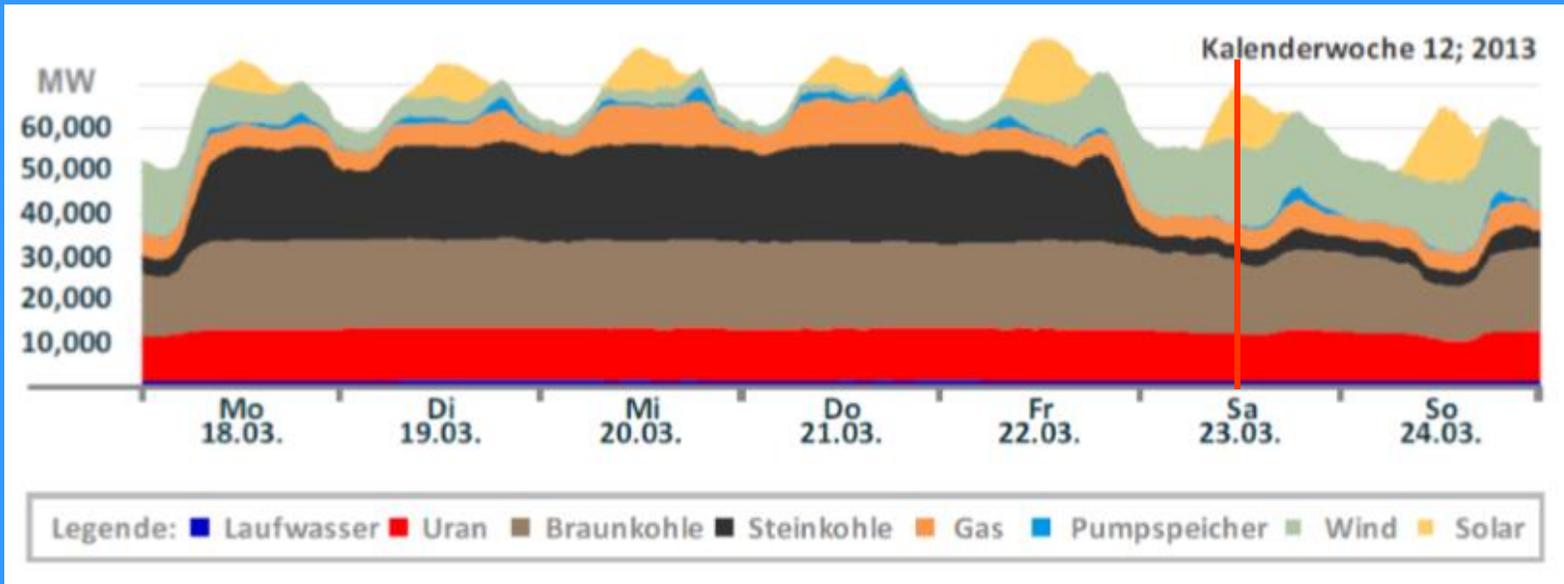
- Wechselstrom-Trassenneubau: 1700 km
- 4 Gleichstrom-Korridore:
Gleichstrom-Trassenneubau: 2100 km
Übertragungsleistung: 10 GW
- **Abgeschätzte Investition: 20 Mrd.**

QUELLE: ÜBERTRAGUNGSNETZBETREIBER



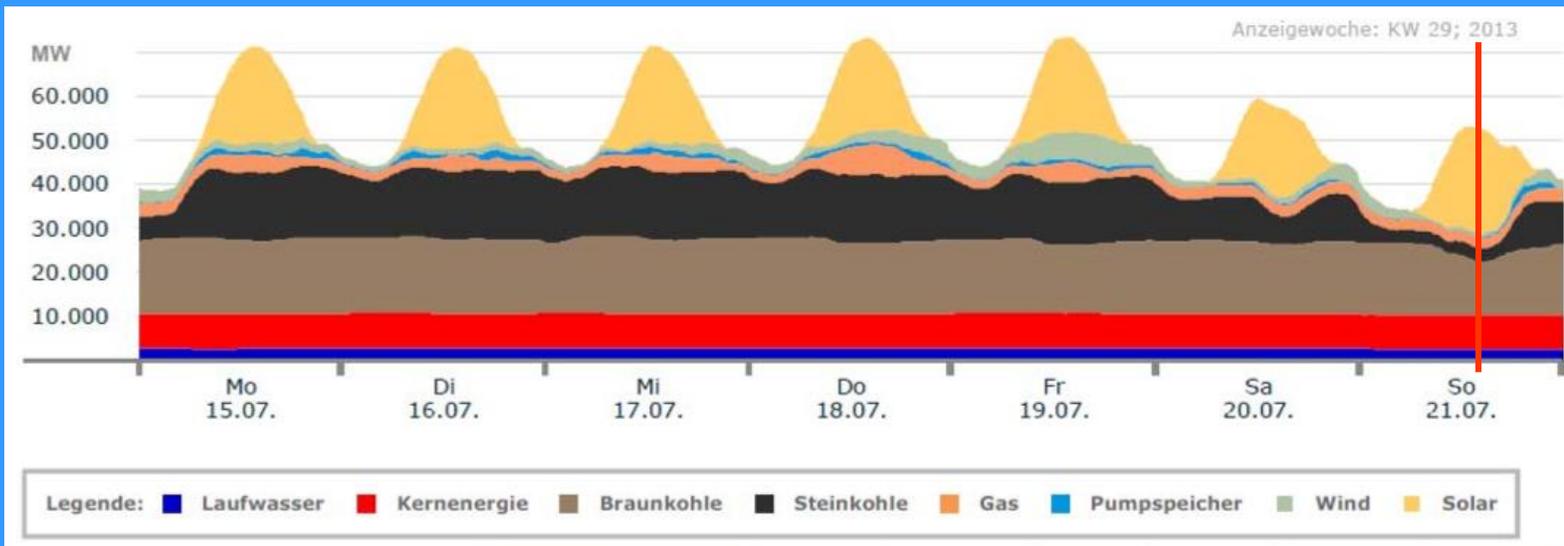
Badische Zeitung 25.2.2015
Streit um neue Stromtrassen hält weiter an
Die Netzbetreiber halten weiter an dem Plan fest, drei neue Stromtrassen in den Süden zu bauen. Doch in Bayern gibt es Widerstand – auch gegen neue Korrekturen.

PV und Wind liefern zeitweise einen erheblichen Anteil der Gesamtleistung



Fluktuierende Stromerzeugung von Wind und PV .

PV und Wind können schon heute jeweils über 25 GW liefern.



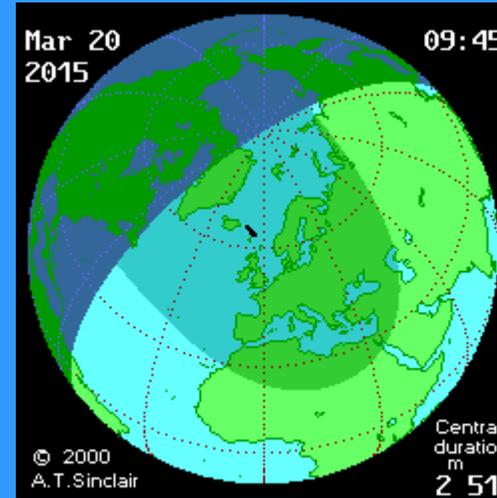
Max. Netzlast ca. 70 GW

Jahreshöchstlast ca. 80 GW

Aktuell !!!!!

Heute 20.3.2015 Sonnenfinsternis

Wenn keine Wolken sinkt der PV-Ertrag
In kurzer Zeit von 17,5 GW auf 6,2 GW (um 10.45)
und steigt dann bis 12 Uhr wieder auf 25 GW .



Bei bewölktem Himmel: Leistungsabfall maximal 52 MW/min .

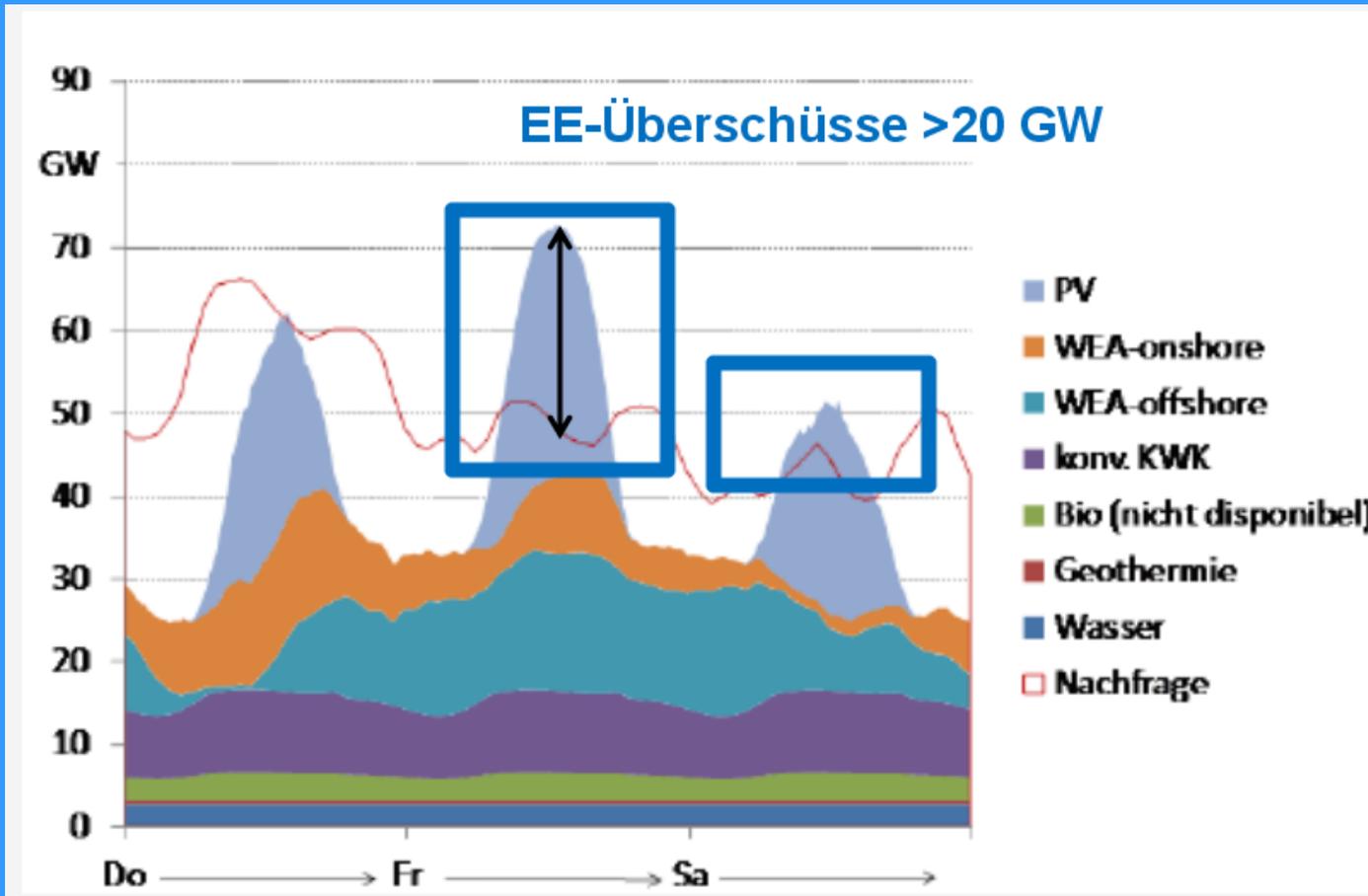
Bei klarem Himmel Leistungsgradient von **348 MW/min** möglich, entspricht dem 3,5-fachen der üblichen Leistungsgradienten aller Photovoltaik-Anlagen in Deutschland.

Dieser Anstieg der residualen Last kann in Deutschland alleine durch die **Pumpspeicherkraftwerke** aufgefangen werden.

Zusätzlich könnten flexible Kraftwerke, wie beispielsweise schnell regelbare **Gaskraftwerke**, zum Ausgleich beitragen.

Weiterhin wären auch Ausgleichsmaßnahmen auf der **Nachfrageseite** möglich.

Ab ca. 50% EE -Anteil ist der Einsatz von Energiespeichern unumgänglich trotz Netzausbau



Quelle: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.

Gutachten: „Bewertung der Flexibilitäten von Stromerzeugungs- und KWK-Anlagen“, 2011.

Beispielhafter Verlauf von nicht disponibler Erzeugung und Nachfrage für eine Aprilwoche im Jahr 2030.

Das virtuelle Kraftwerk

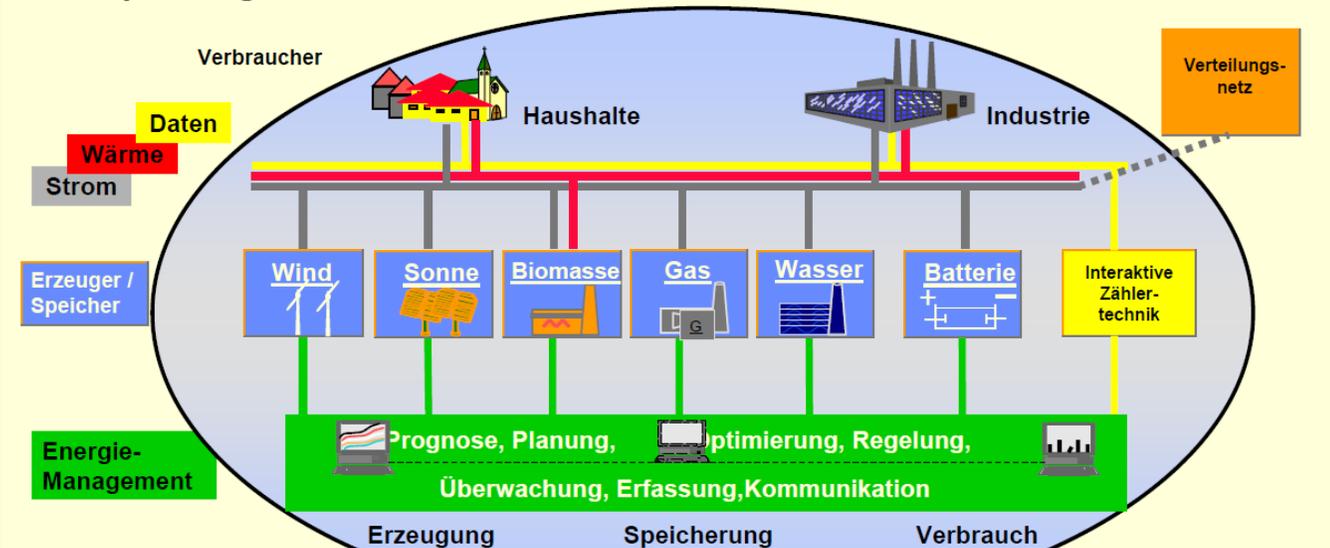
Anpassung Erzeugung und Verbrauch

Stichworte

- Smart Grid,
- Smart Meetereing
- Last Steuerung
- intelligente Stromzähler

- ... wird als interaktives, zentral steuerbares Netzwerk von dezentralen Erzeugern und Verbrauchern,
- ... als (kommerzielle) Bilanzgruppe eingebettet in die Strom-Marktordnung definiert.
- ... stimmt nach einer wirtschaftlichen Optimierung den Einsatz mit dem Verbrauch wechselseitig ab
- ... erleichtert die effiziente, ökonomisch vorteilhafte Integration fluktuierende Stromeinspeisung

Voraussetzung dafür ist eine leistungsfähige Kommunikation zwischen Erzeugung, Speicher, Verbraucher und Leitstelle sowie ein innovatives dezentrales Energiemanagementsystem mit Prognose, Einsatzplanung und Online-Optimierung einschließlich Kraft-Wärme-Kopplung sowie evtl. Rückspeisung !



Stromspeicherung

Um die Schwankungen des EE-Strom-Angebotes auszugleichen ist eine Stromspeicherung nötig.

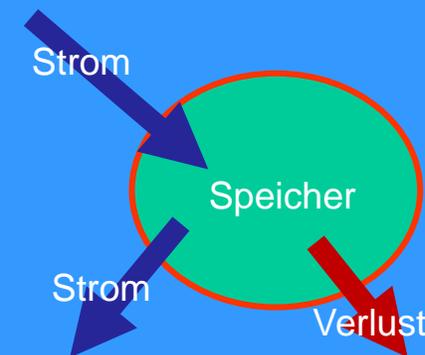
→ Energiespeicher (Strom und Wärme) sind eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende

Dabei sind unterschiedliche Speicherzeiträume erforderlich.

- Für wenige Minuten (Einspeisefluktuationen)
- Bis zu einem Tag (Tagesmuster PV);
- Bis zu drei Tagen (Zufallsschwankungen PV)
- Ein bis zwei Wochen (anhaltende Stark- oder Schwachwindperioden)
- Saisonale Zeiträume.

Kriterien

- Kapazität (Energieinhalt) kWh, MWh, GWh
- Leistung kW, MW
- Lade-Entlade-Wirkungsgrad
- max. Zyklenzahl
- Kosten
- Einsatzbereiche



Bis auf weiteres werden nur Speicher im Minuten- und Stundenbereich benötigt.

Saisonspeicher sind erst bei weiterem Ausbau der EE erforderlich.

Die wichtigsten Strom-Speicher sind:

Mechanische Speicher

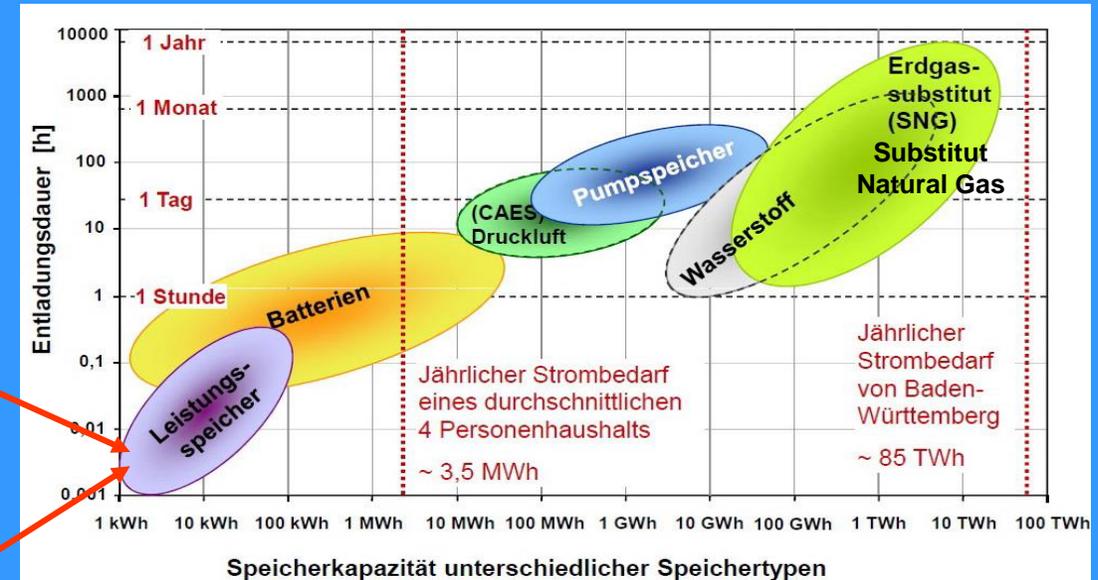
- Pumpspeicher (Wasser)
- Druckluftspeicher
- Schwungrad-Speicher

Chemische Speicher

- Akkumulatoren
- Wasserstoff
- Methan
- Power to Gas**

Elektrochemische und magnetische Speicher

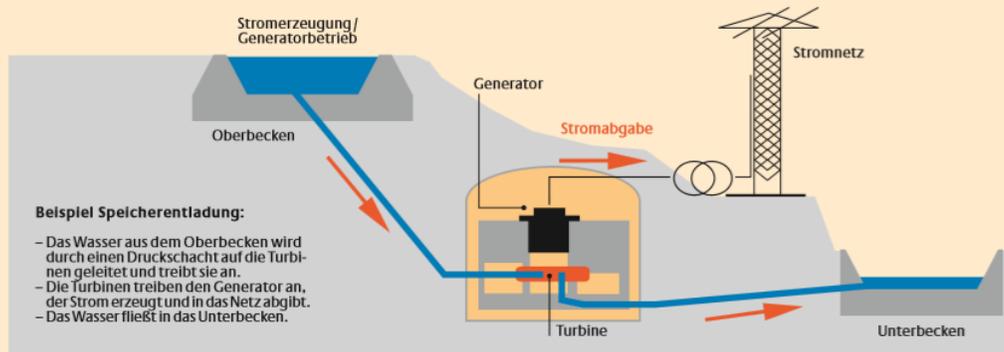
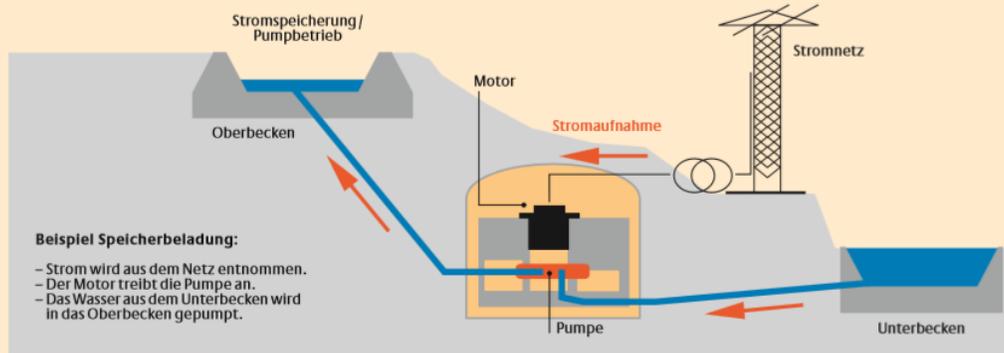
- Doppelschichtkondensatoren
- Ultrakondensatoren
- Supraleitende Magnete



Benjamin Schott, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW)

Die Speicher haben unterschiedliche Kapazitäten und Speicherdauern (und Leistungen)

Wärmespeicher werden in Zukunft große Bedeutung bekommen. Überschüssiger Strom kann verwendet werden um direkt mit Elektroheizung Wärme für Wärmenetze zu erzeugen oder Wärmepumpen zu betreiben, kann aber auch z.B. in großen Kühlhäusern Kälte auf Vorrat erzeugen. (**Power to heat**)



Quelle: Jerin, TU München

Pumpspeicherkraftwerke sind Energiespeicher

- mit dem größten Wirkungsgrad, im Schnitt ca. 70%
- mit der größten Speicherkapazität
- machen derzeit 95% der Speicherkapazität in D aus.

In Deutschland:

Leistung 6,3 GW, Vergleich mit gesamter Netzlast von ca. 70 GW
 Energie 40 GWh, wird in ca. 30 Min in Deutschland verbraucht

Möglich bis 2040 : 14,6 GW mit 87 GWh, also etwa eine Verdoppelung



Das größte deutsche Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal wurde 2003 in Betrieb genommen und hat eine Gesamtnennleistung von **1060 Megawatt**. Das Kraftwerk kann **8 Stunden** volle Leistung liefern.

Von RWE und ENBW geplantes Pumpspeicherwerk Atdorf im Südschwarzwald

Leistung 1,4 GW, Kosten 1,6 Mrd. €



Die Computersimulation zeigt, wie eines der neuen Becken (im Hintergrund) aussehen könnte.

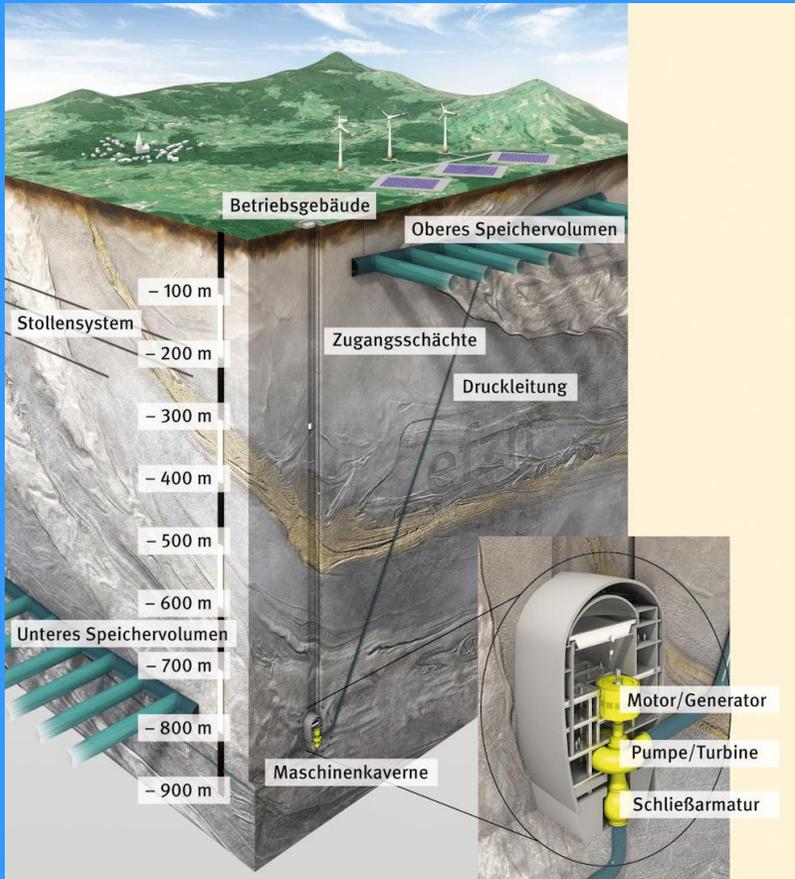
FAZ-Meldung April 2014:

RWE steigt aus.

Umweltschützer lehnen die geplante Anlage von zwei insgesamt 110 Hektar großen Seen sowie einer 75 Meter hohe Staumauer aus Beton wegen der Eingriffe in die Natur ohnehin vehement ab.

Pumpspeicherkraftwerke stellen Eingriffe in die Natur dar → Widerstand

Projektideen



Pumpspeicherkraftwerke in Bergwerken

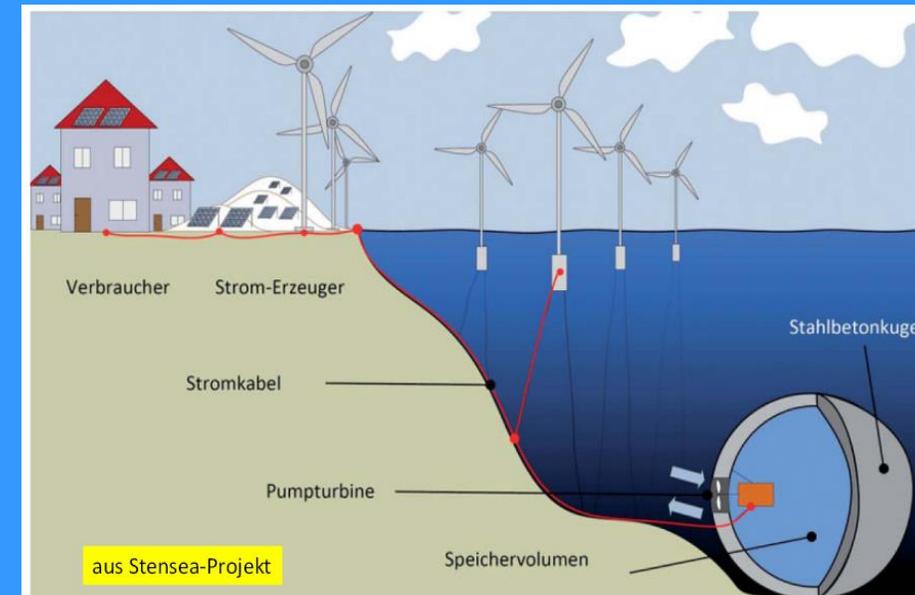
Abschätzung des Gesamtpotenzials
 Leistung eines Kraftwerkes 100 MW
 Kapazität eines Kraftwerkes 400MWh

Gesamtleistung von rund 10 GW
 Speicherkapazität von 40 GWh.

Dies entspräche einer Verdoppelung der heute
 installierten Pumpspeicherkapazität und -leistung
 in Deutschland. -

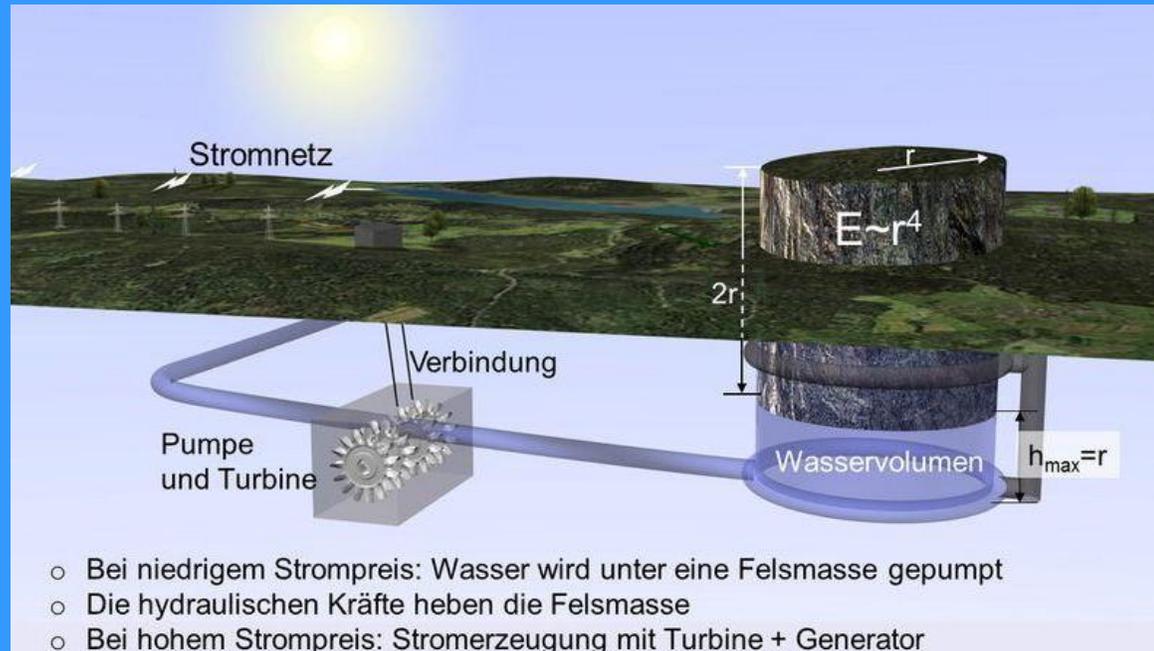
<http://www.bine.info/themen/erneuerbare-energien/publikation/windenergie-unter-tage-speichern/>

Pumpspeicherkraftwerke im Meer



Meerestiefe/m	250	500	1000	2000	4000	10000
Druck/bar	25	50	100	200	400	1000
Speicherdichte/kWh/m ³	0,7	1,4	2,8	5,6	11,1	27,8

Lageenergie: Ein Riesen-Felsklotz als idealer Stromspeicher Projektidee von Prof. Eduard Heindl

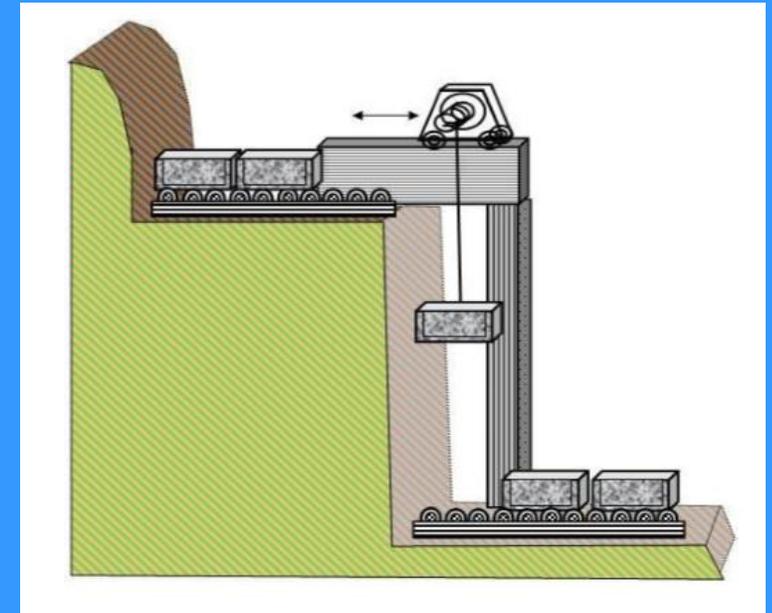


Vorteile dieser Speichertechnologie laut Heindl:

- Die Kosten pro Kilowattstunde Speicherkapazität bei einem Radius des Felszylinders von 500 Meter liegen um den Faktor 50 unterhalb vergleichbarer Pumpspeicherkraftwerke.
- Der Wasserbedarf nur etwa ein Viertel gegenüber dem eines Pumpspeicherkraftwerks, da das Wasser beim Lage-Energiespeicher nur als Hydraulikmedium dient. Wichtig in südlichen Ländern.

Lageenergie: Projektideen

: Eisenbahn als Stromspeicher



Advanced Rail Energy Storage (ARES) heißt das System, welches das gleichnamige Unternehmen aus Kalifornien entwickelt hat

Mit überschüssigem Strom bewegt man eine Lokomotive einen Berg hinauf.

Benötigt man Strom, rollt man die Lok den Berg wieder hinunter und über einen integrierten Generator wird beim Bremsen Energie erzeugt.

**Windenhub-Kraftwerk an
Steilwand (z.B.: Steinbruch)**

6 MWh

40 Gewichte a 400 t, Hubhöhe 150 m

Druckluftspeicher (Compressed Air Energy Storage, CAES)

Kompression von Luft auf 40 bis 120 Bar, Speicherung in gasdichten Kavernen (Salz) in 700 - 900 m Tiefe.

Diabatisch: (D-CAES) aktuelle Technik

Die bei der Kompression entstehende Wärme (bis 600°C) wird weggekühlt. Beim Entspannen würde Abkühlung und Vereisung stattfinden.

Deswegen wird zusätzlich Erdgas verbrannt
 ==> geringer Wirkungsgrad η

Es gibt weltweit zwei Anlagen

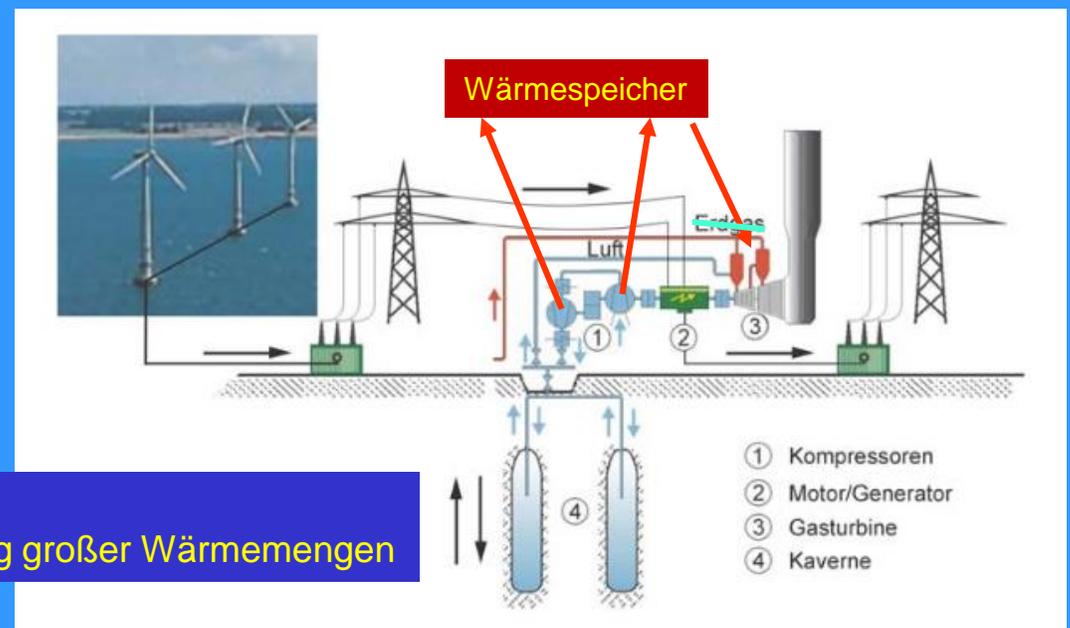
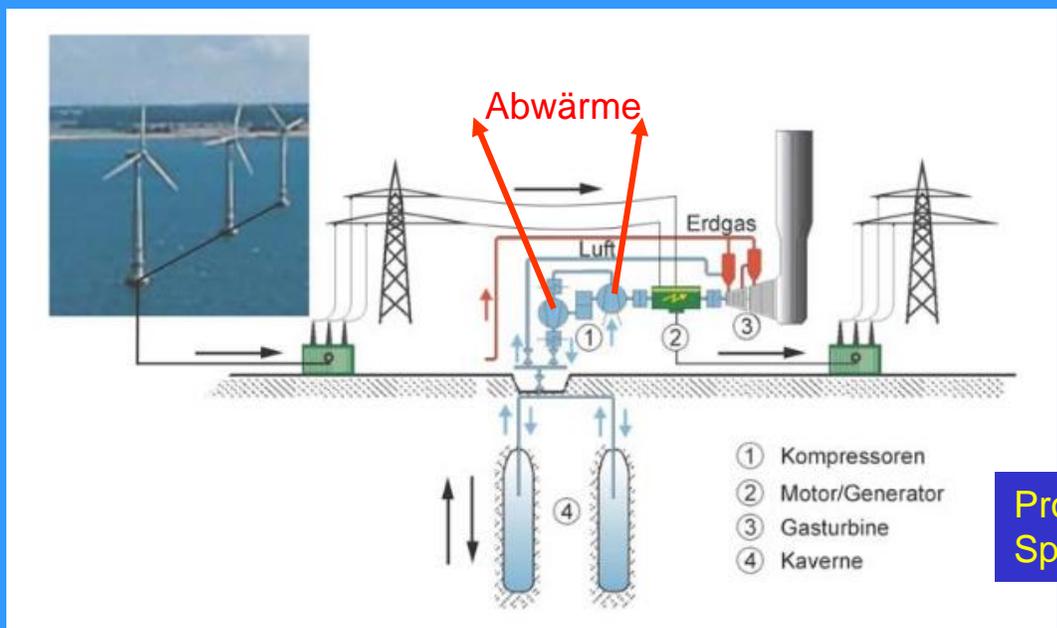
Huntorf D 320 MW, 580 MWh, $\eta = 42\%$

Mcintosh USA 110 MW, 2860 MWh, $\eta = 54\%$

Adiabatische Speicher AA-CAES (Advanced-Adiabatik):

Die bei der Kompression entstehende Wärme wird gespeichert und beim Entspannen wieder zugeführt ==> Wirkungsgrad 70%

Projekt ADELE von RWE in D 90 MW / 360 MWh



Problem:
 Speicherung großer Wärmemengen

Druckluftspeicher haben ähnliche Speichereigenschaften wie Pumpspeicher

- hohe Zyklenfestigkeit
- schwarzstartfähig (unabhängig vom Stromnetz)
- können innerhalb weniger Minuten hochgefahren werden
- Ausgleich von Erzeugungsschwankungen im Tagesverlauf
- Bereitstellung von Regelleistung

Das Speicherpotenzial in der norddeutschen Tiefebene mit vielen Salzkavernen

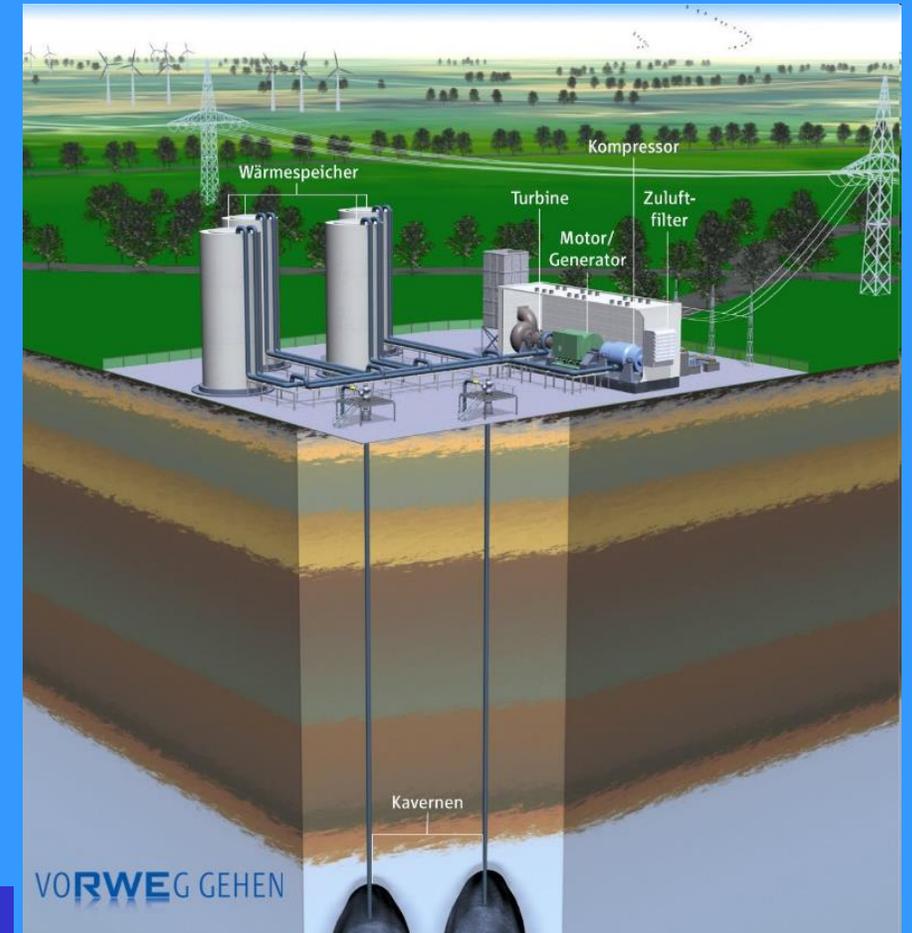
2,5 bis 3,7 TWh (geschätzt)

Elektrischer Tagesverbrauch in D ca. 1,6 TWh.
Speicherung des zweifachen Tagesverbrauches

Vergleich Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland:
Energie 0,040 TWh, möglich 0,087 TWh

Druckluftspeicher haben ein deutlich höheres Potenzial als Pumpspeicherkraftwerke

Nutzungskonkurrenz um geeignete Gesteinsformationen für die CCS-Technologie (Carbon Capture and Storage), Wasserstoff- und Methanspeicherung.



Schwungradspeicher

Die Rotoren aus Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffen
 20.000 bis über 50.000 Umdrehungen pro Minute
 Für 10 kWh wird nur ca. 160 kg Schwungradmasse benötigt.

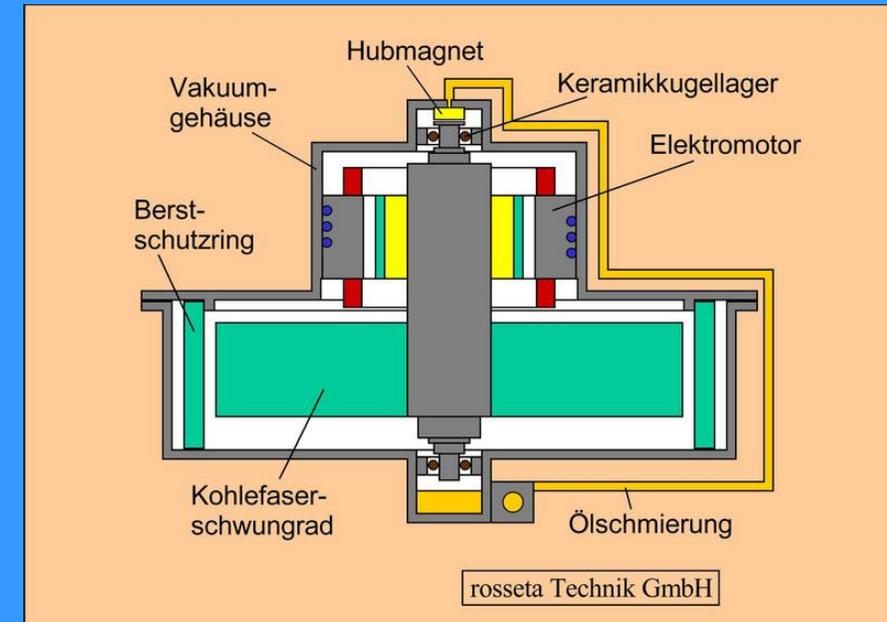
Vorteile

- ultrakurzen Zugriffszeiten
- Tiefentladung möglich
- hoher Wirkungsgrad als Kurzzeitspeicher (95 %)
- hohe Leistung (Stromspitzen)

Nachteil

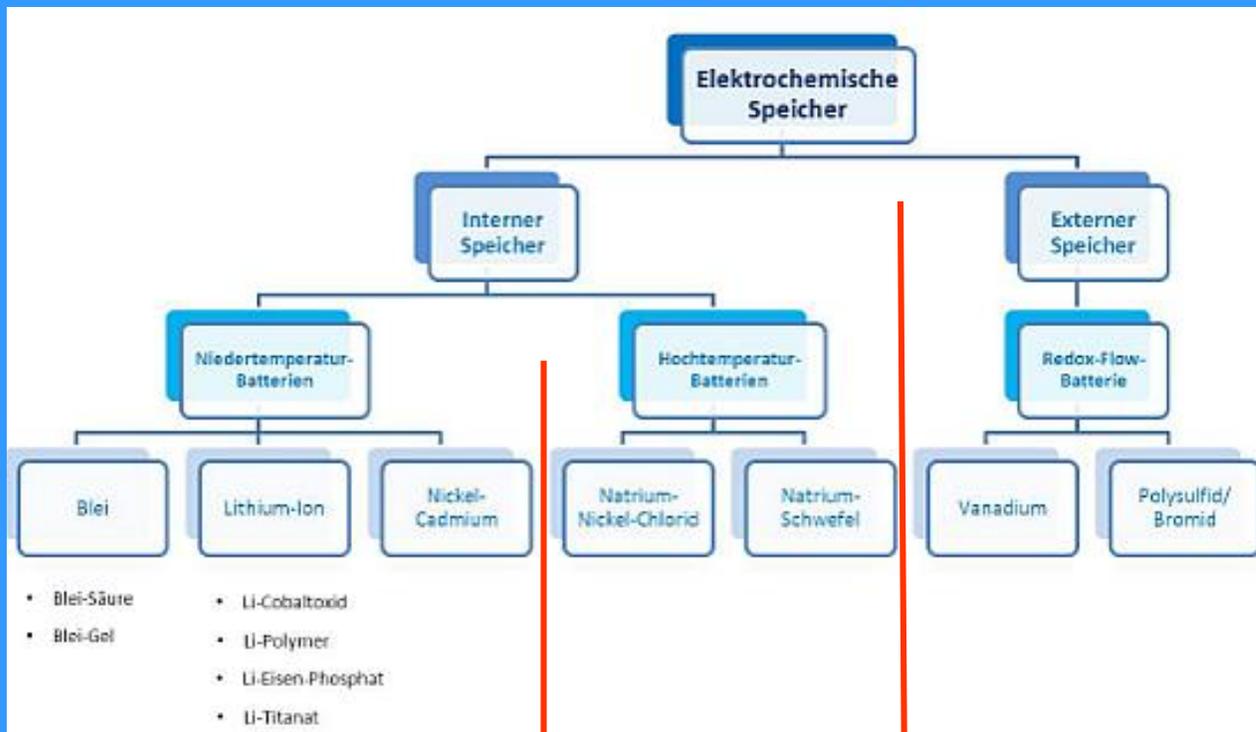
- Der große Nachteil ist die **hohe Selbstentladung** (50 % in ca. 1 Stunde). Also nur Kurzzeitspeicher

Schwungräder werden auch für UPS (Unterbrechungsfreie Stromversorgung) und im KFZ-Bereich verwendet

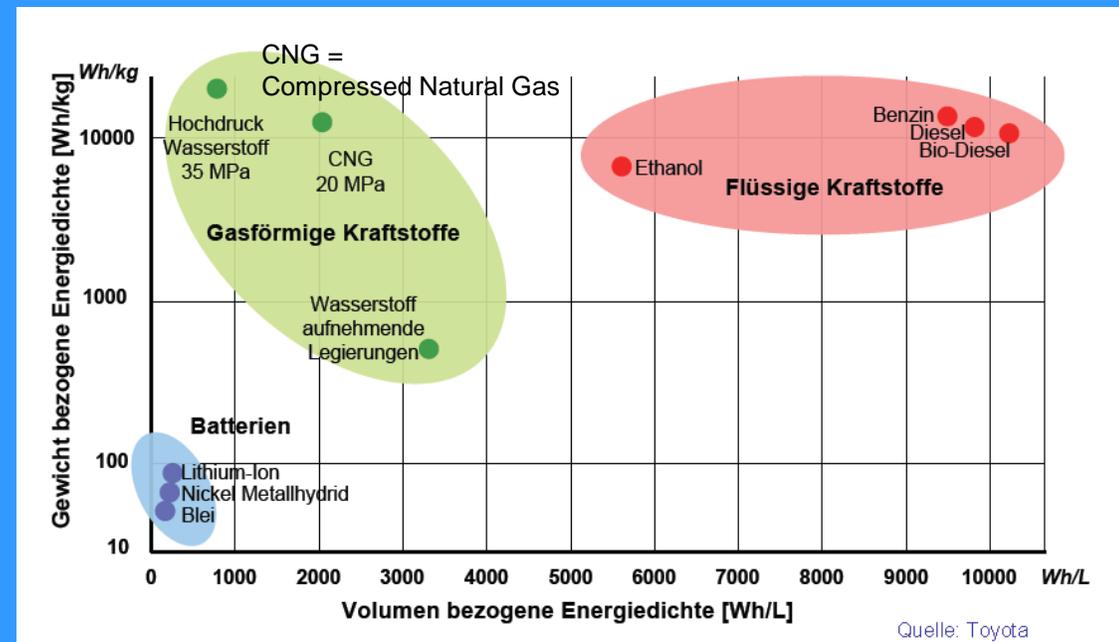


20 Megawatt Schwungradspeicher in Stephentown USA besteht aus 200 Schwungrädern. Das Schwungrad der Smart Energy Matrix dreht sich reibungsfrei mit bis zu 16.000 Umdrehungen pro Minute in einer senkrecht stehenden luftleeren, zwei Meter hohen Hülle. Die Oberfläche des Rades erreicht doppelte Schallgeschwindigkeit.

Batterien, Akkumulatoren als Stromspeicher



- große Bedeutung für Elektromobilität
- Relativ geringe Kapazität,
- teuer (noch !!)
- Problem Zyklenfestigkeit, Lebensdauer
- Entwicklungspotenzial ist groß



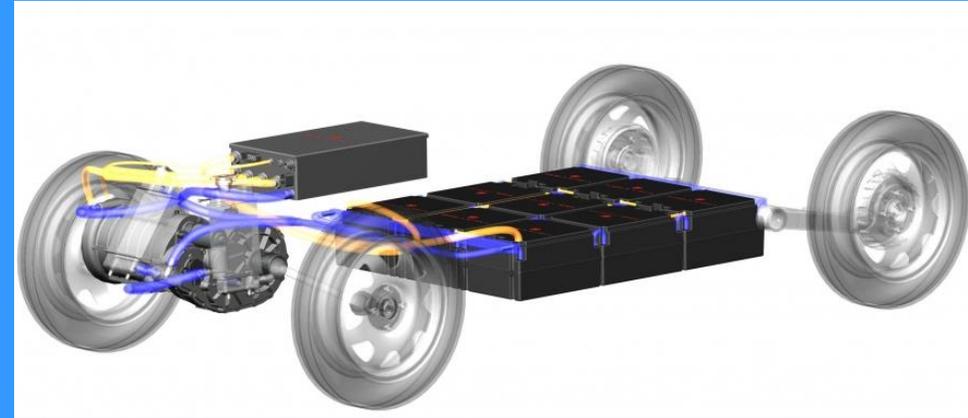
Akkutyp	Energiedichte Wh/kg	(Nenn) Zellspannung	Ladewirkungsgrad	Lebensdauer bzw. Ladezyklen	Selbstentladung im Monat in %
Bleiakku	30-40	2,0V	60-70%	4-8 Jahre 300-600 Z	5-10%
NiCd Akku	40-50	1,2V	70%	15 Jahre 800-1500 Z	10-15%
NiMH Akku	60-80	1,2V	70%	7-10 Jahre 350-500 Z	15-20%
NiMH LSD	60-80	1,2V	70%	7-10 Jahre 350-500 Z	1-2%
Lilon Akku	120-180	3,6V	90%	10-15 Jahre 500-800 Z	1-2%
LiPo Akku	130-150	3,7V	90%	7-10 Jahre 300-500 Z	1-2%

Benzin: 12 800



Bleibatterie

- Gewicht 17 kg
- Energieinhalt 0,86 kWh
- 50 Wh/kg



Li-Ion Akku des Tesla Roadster

- Gewicht 408 kg
- Energieinhalt 56 kWh
- 140 Wh/kg



Benzin 12 800 Wh/kg

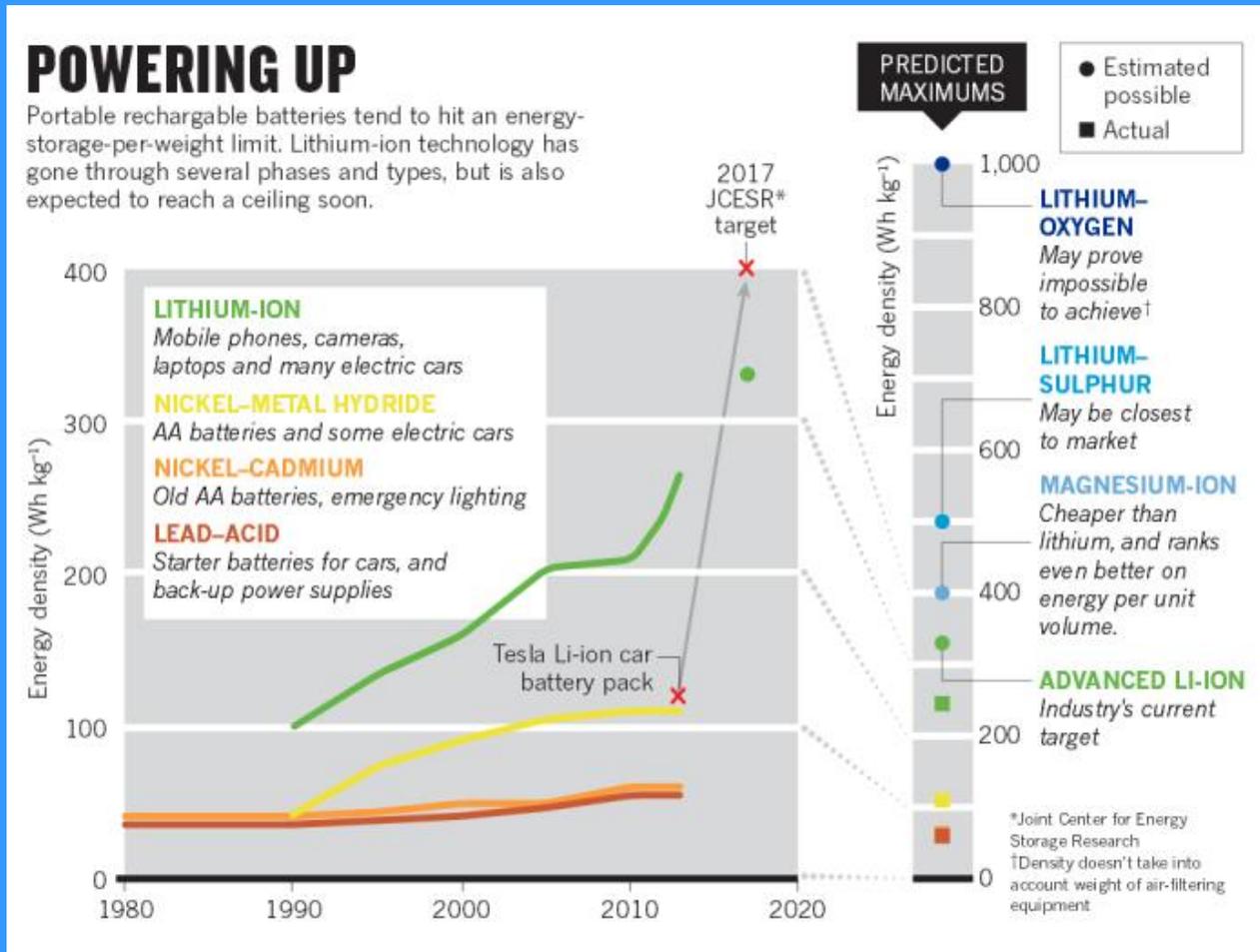
400 Wh/kg

Zukunft mit Li ???

600 Wh/kg

1000 Wh/kg

Kapazitätsentwicklung Wh/kg



Einige aktuelle Meldungen

Lithium-Schwefel-Batterien: Power-Schub für E-Autos
 Reichweite verdreifacht - Kostensenkung für Massenmarkt interessant...
 Die theoretisch errechnete Energiedichte beträgt 2600 Wh/kg.
 Bisher erreicht 350 Wh/kg

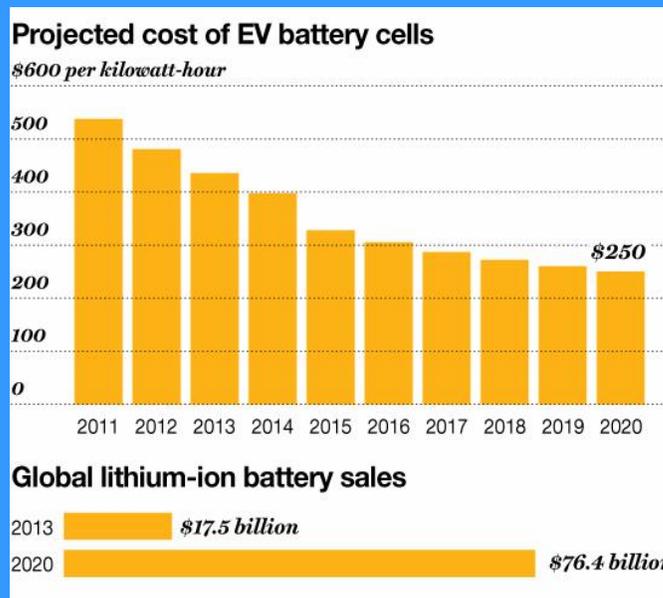
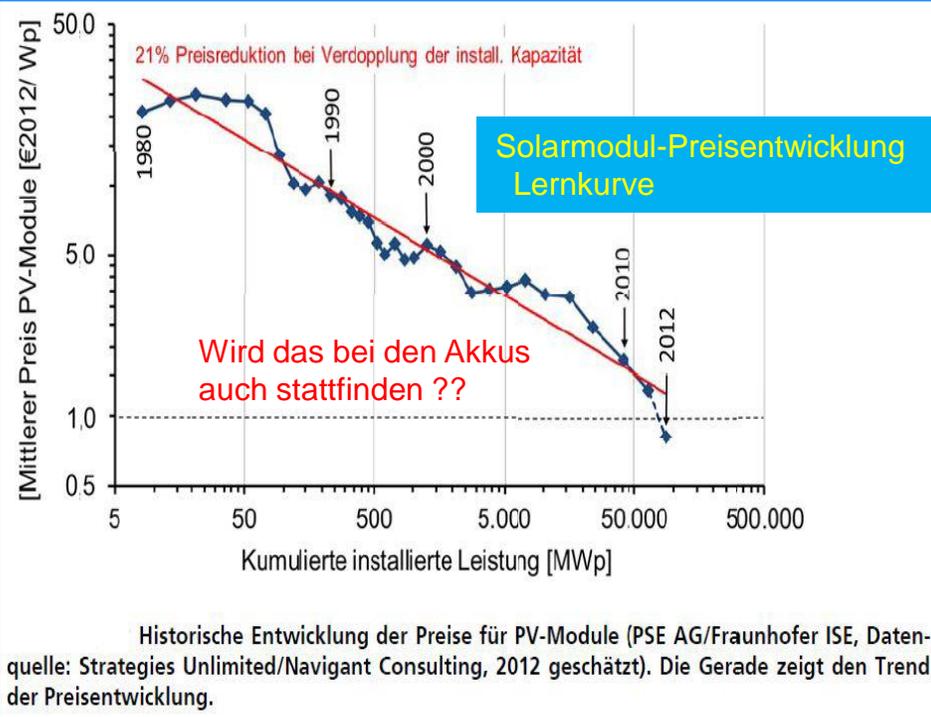
Lithium für Batterien aus Geothermalkraftwerk,
 wertvolles Abfallprodukt aus heißer Quelle

US-Elektroautobauer: Tesla plant gigantische Batteriefabrik.
 Die Massenproduktion soll die Kosten für Akkus um mehr als 30 Prozent drücken.

Wenn es nach der Robert Bosch GmbH geht, so kostet eine Elektroauto-Batterie im Jahr 2020 nur noch die Hälfte und kommt mit doppelter Energiedichte daher.

Preisverfall von Batteriesystemen für PV-Anlagen zuletzt
 1% pro Monat

Preisentwicklung Akkus



Technologische Entwicklung und starke Kostendegression wird insbesondere bei Batterietechnologien erwartet

Erwartete Kostenentwicklung stationärer Li-Ionen-Systeme* in EUR/kWh (Annahmen Stand Ende 2013)

UBS Studie Sep. 2014 Zellpreise E-Fahrzeuge

*hier spezifische Kapazitätskosten

Beispiel Li-Ionen:

- Technologische Entwicklung aktuell primär getrieben durch Elektromobilität
- Erhebliche Potentiale zur Kostensenkung bereits heute absehbar

Generell:

- Starke Kostendegression wird bei allen neuen Speichertechnologien erwartet
- Ggf. ist auch eine schnellere Reduktion möglich („Speicher-Breakthrough“)

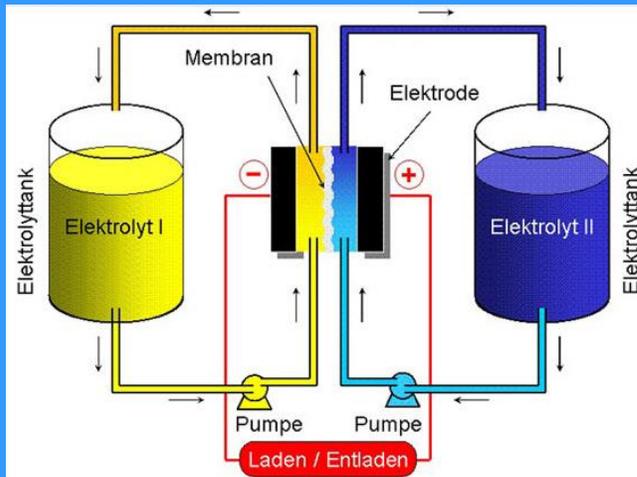
17

Hochvolt-Batterien für Elektrofahrzeuge kosten aktuell noch mehr als so mancher Kleinwagen. Laut einer aktuellen Studie der Strategieberatung McKinsey & Company dürfte sich das schneller ändern als vermutet. Schon für 2020 prognostiziert sie Batteriepreise um 200 \$/kWh und bis 2025 sogar unter 163 \$/kWh.

Redox Flow Batterie Für stationären und mobilen Einsatz

Die Energie in chemischer Form in Elektrolytlösungen gespeichert, die sich in zwei separaten Speichertanks befinden.

Energie kann schnell „nachgetankt“ oder elektrisch aufgeladen werden.



Elektrolyt z.B. Vanadium und Vanadiumoxid

In Deutschland ist der Bau einer Batterieanlage mit **20 MWh** Kapazität geplant.

+ Energieinhalt und Leistung kann unabhängig voneinander konfiguriert werden.

Die gespeicherte Energie hängt von der Größe der Tanks ab.
Die Leistung von der Größe des Zellen Stacks.

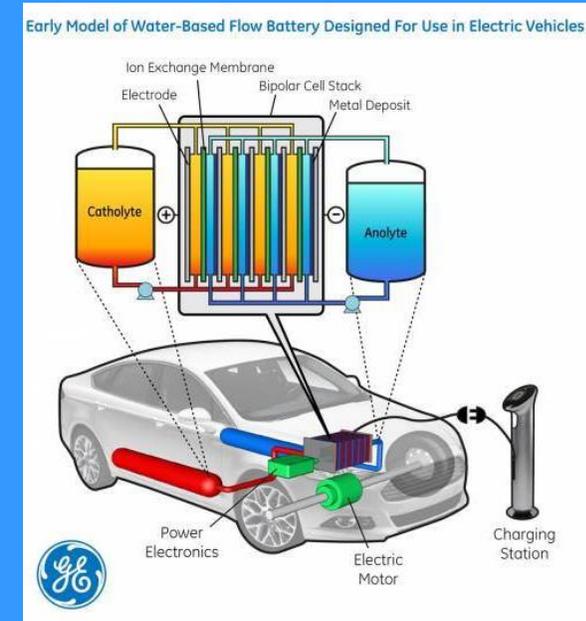
+ Diese Akkus sind sehr sicher

- + Wirkungsgrad ca 80%
- + Hohe Zyklenzahl 10 000 ?
- + Geringe Selbstentladung

- aber nur 70 Wh/Liter
- (noch) teuer

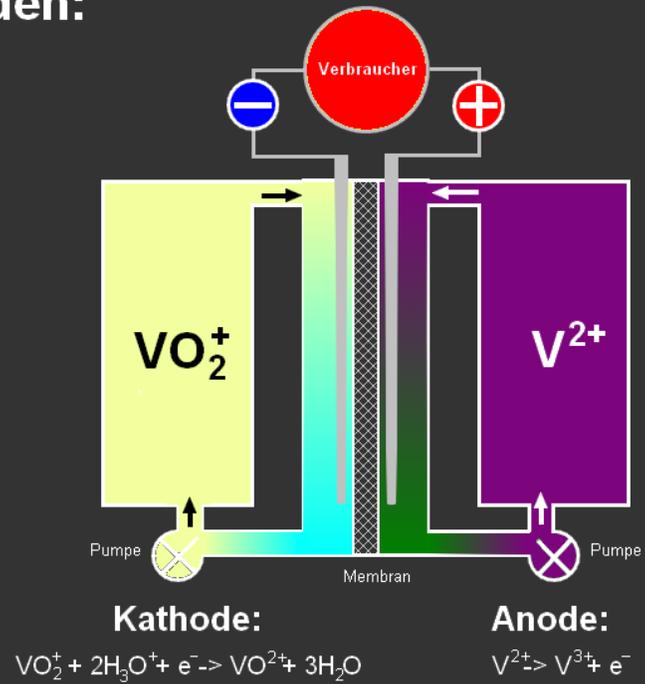
Elektrolyt kann schnell nachgetankt oder elektrisch wieder aufgeladen werden.

Kann auch mobil verwendet werden.

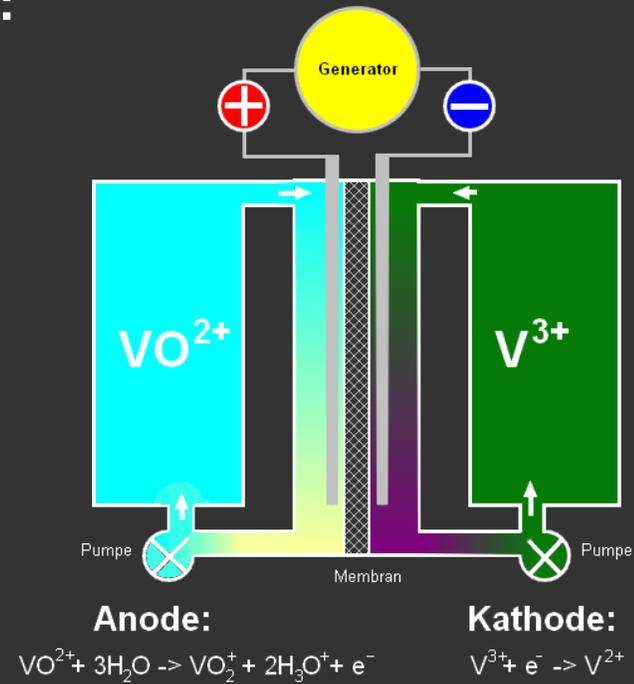


Der Niedervolt-Elektroflitzer Quantino mit Redox-Flow-Akku: 2 * 175 l Tank
100 kW Leistung reichen für 200 km/h
Reichweite soll bei 1000 km liegen.
(Bild: nanoFlowcell)

Entladen:



Laden:



Natrium Schwefel-Akku

Hochtemperatur (300°C)

für stationäre (es gibt eine 6 MW-Anlage)
und mobile Anwendungen (E-Auto).



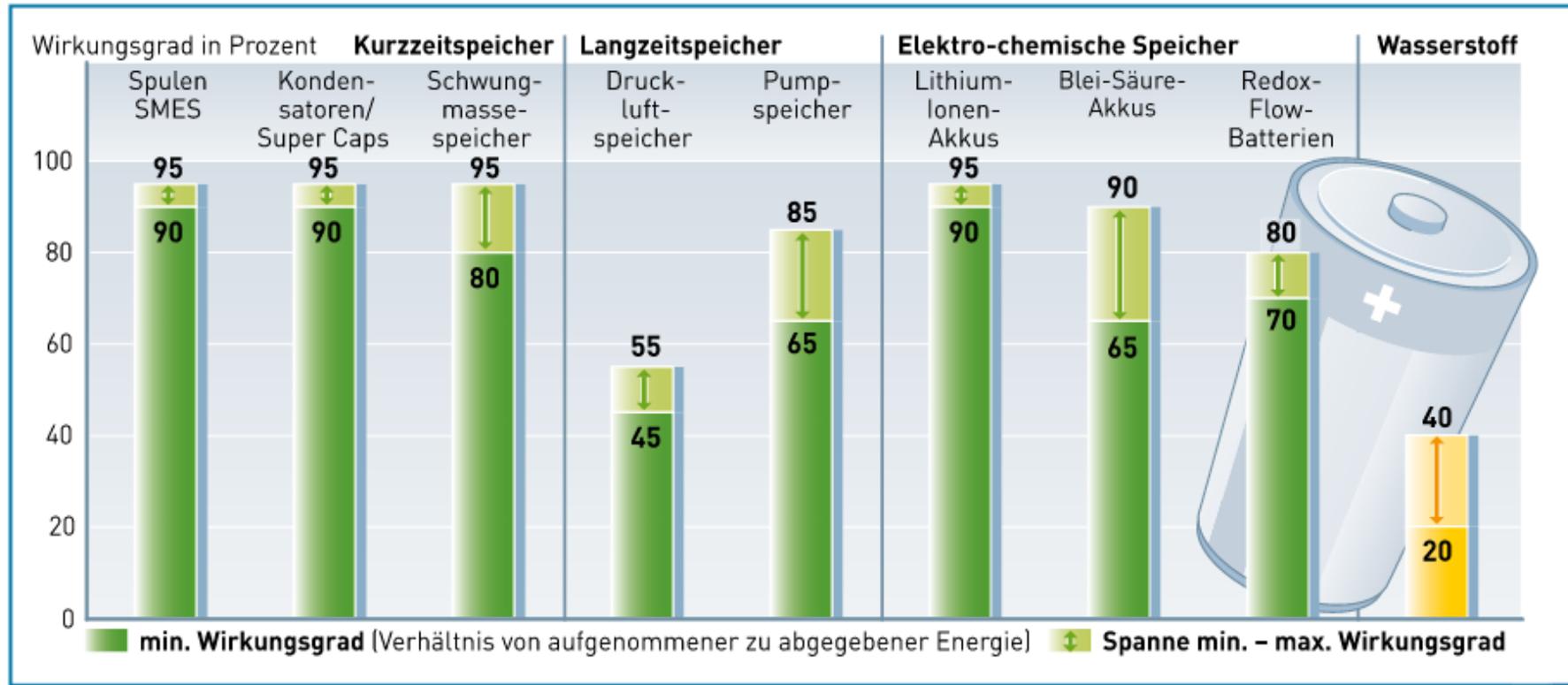
- + 200Wh/kg (auch für Elektroautos geeignet)
- + Wirkungsgrad 70-85%
- + Geringe Selbstentladung
- + Hohe Zyklenzahl
- Thermische Isolierung (Zusatzheizung)

Herzstück bildet eine flüssige Natrium-Anode zusammen mit einer flüssigen Schwefel-Kathode. Getrennt durch einen Feststoffelektrolyt.

Um Strom zu speichern und abzugeben, benötigt die Natrium-Schwefel-Batterie eine **Betriebstemperatur zwischen 270 und 350 Grad**.

Feb. 2013: Das Bundesumweltministerium hat 4,8 Millionen Euro für die Entwicklung von großen Natrium-Schwefel-Batterien herausgerückt.

Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher



Beispiele für Stromspeicher für kleine PV-Anlage und Großspeicher



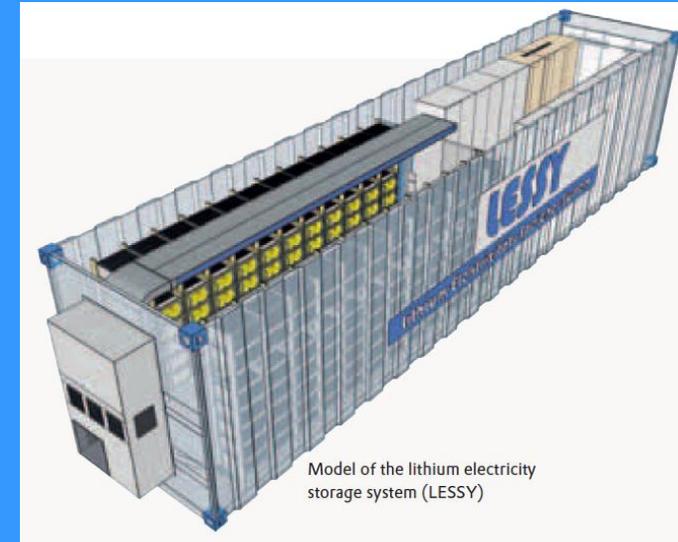
Lithium-Ionen-Polymer Technologie für stationäre Innenanwendungen
Wirkungsgrad > 95%
Entladetiefe von 90%
5000 Vollzyklen möglich
leicht und platzsparend durch kompakte Bauweise

17.02.2014: Ein Konsortium von Forschungseinrichtungen und Unternehmen will in diesem Jahr in Aachen einen modularen, also aus verschiedenen Batterien unterschiedlicher Technologien aufgebauten Stromspeicher mit **5 Megawatt** Leistung errichten.

2015: **Größter Batteriespeicher Europas:**
Das **6-MW/10-MWh**-Smarter- Network-Storage (SNS)-Batteriekraftwerk wurde in Großbritannien in Betrieb genommen.



Stromspeichermodule aus gebrauchten E-Bike Akkus die noch 80% Kapazität haben
Module bis 5kWh

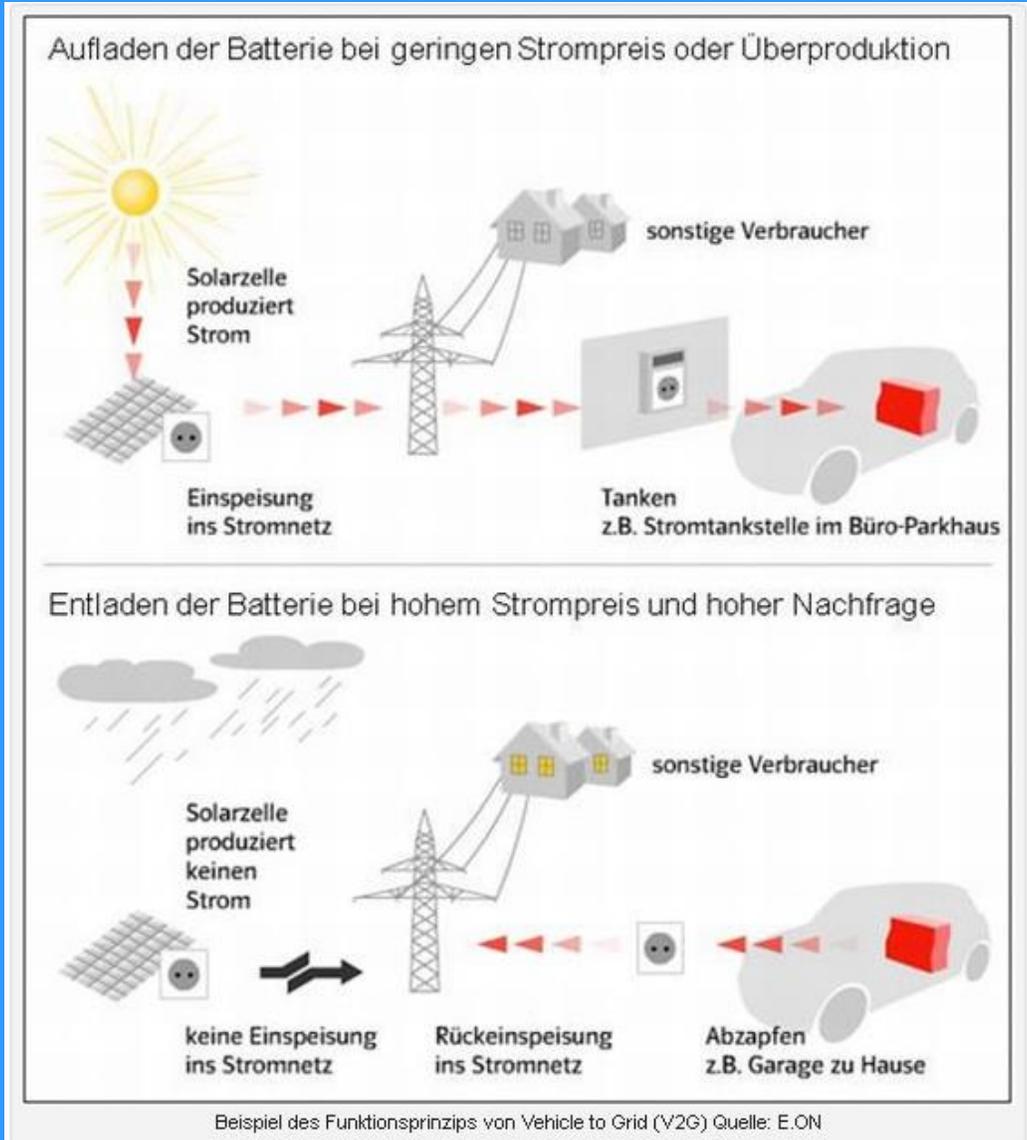


LESSY Lithium Electricity Storage
Firma Evonik
4.700 Lithium-Ionen-Batteriezellen
Speicherkapazität rund **700 kWh**,
Leistung ca. **1 MW**.
Aufbau in einem Seecontainer
Er soll später zur Netzstabilisierung beitragen. Der jetzt anlaufende Testbetrieb wird zeigen, ob Lithium-Ionen-Speicher-Systeme diese Funktionen zuverlässig erfüllen können.

Zukunftsprojekt Vehicle to Grid V2G

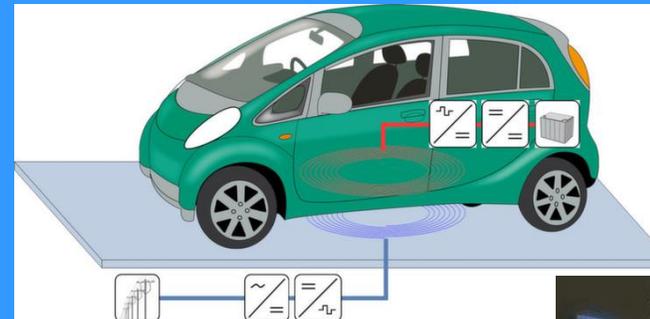


Elektrofahrzeugpark als Stromspeicher

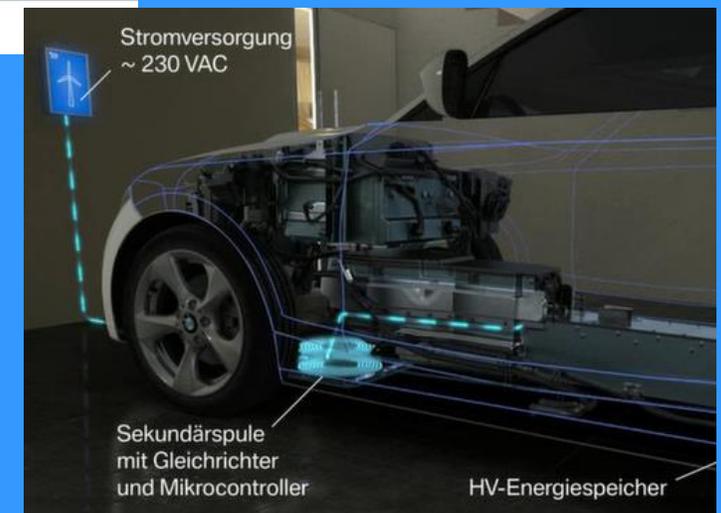


Der Akku des E-Autos wird mit dem Stromnetz verbunden und kann sowohl Strom aufnehmen, wenn er billig ist, aber auch wieder Strom ins Netz zurückspeisen, wenn er teuer ist .

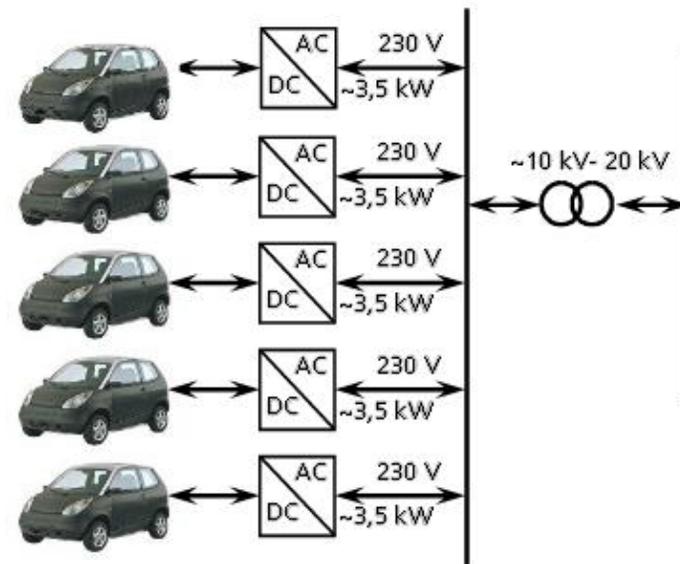
Aufnahme und Abgabe muss natürlich entsprechend dem Bedarf programmiert werden.



Berührungslose Ladestation mit Induktionsspulen



BMW und Daimler treiben Induktives Laden voran. In Zukunft 7kW möglich.



**Alle installierten
Pumpspeicherwerke in Deutschland:**

Speicherleistung: > 7 GW*
Kapazität: > 40 GWh*

**Speicherpotenzial 4,5 Mio. EV
(10 % in D):**

Speicherleistung: 13,4 GW
Kapazität: 38,3 GWh

3,5 kW pro Auto
8,5 kWh pro Auto

► **Bereits 10% Durchdringung mit E-Fahrzeugen kann allen deutschen Pumpspeicherwerken in Leistung und Kapazität entsprechen. Nicht in Speicherdauer + Vollaststunden**

Rechteck

Autoakkus haben
15 bis 20 kWh
Kapazität

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk>; 12.5.2012

Die Erneuerbaren Energien erfordern Spezialisten genau in den Fachbereichen, die an der nta ausgebildet werden.

- Physik
- Chemie
- Informatik

Danke für Ihre Aufmerksamkeit



Alle Vorträge werden auf der Homepage von REFI zugänglich sein.
www.energieforum-isny.de