

## ***Energie-Speichertechnologien – die Herausforderung der Zukunft***

Peter Albring

Vortrag anlässlich der Historikertagung 2015 – Gemeinschaftsveranstaltung des HKK und der DKV Senioren vom 18. Bis 21.06.2015 in Stuttgart

### **Einführung**

Die beiden wichtigsten erneuerbaren Energiequellen, die das Fundament der zukünftigen weltweiten Energieversorgung bilden, heißen Wind und Sonne. Windmühlen und Fotovoltaikanlagen liefern Strom. Aber nicht kontinuierlich, sondern mit kurzfristigen und längerfristigen Schwankungen. Das bedeutet, dass erneuerbare Energie in ausreichender Menge gespeichert werden muss, kurzfristig, besonders aber auch längerfristig, um sonnenscheinarme und windstille Zeiträume, die über Monate andauern können, überbrücken zu können.

Dabei wird ein Mix unterschiedlicher Speicherverfahren benötigt: dezentrale und zentrale, mit größerer und geringerer Speicherkapazität. Speicher leisten einen wichtigen Beitrag für die Umstellung der kohlenstoffbasierten Energieversorgung auf erneuerbare Energie. Neben vielen bekannten Speicherverfahren für Elektroenergie scheint die Herstellung von Wasserstoff und die folgende Umwandlung mit Hilfe von CO<sub>2</sub> in erneuerbares Methan (power to gas) oder in einen flüssigen Kraftstoff (power to fuel) aussichtsreich.

Ein weiteres wichtiges Merkmal der Energiewende ist die Reduzierung des Energiebedarfs durch die Steigerung der Effektivität der Energienutzung.

Wärmeenergiespeicher für Solarenergie haben eine Bedeutung für dezentrale Anwendungen. Die Kältetechnik vermag einen nicht unerheblichen Beitrag zu leisten. Einmal stehen viele kältetechnische Anwendungen als Senke für Überschussstrom aus erneuerbaren Energiequellen zur Verfügung, indem die Nutzttemperatur gesenkt wird. Für climatechnische Anwendungen erscheint die Eisspeicherung geeignet, den Strombedarf von der Strombereitstellung zu entkoppeln. Insbesondere weil mit einem neuartigen Verfahren zur Vakuumeisherstellung, mit Wasser als Kältemittel, der Energiebedarf für die Eisherstellung, verglichen mit konventionellen Verfahren, erheblich reduziert werden kann.

### **Inhalt**

- Bedeutung der Energiespeicher für eine Energiewende
- Elektroenergiespeicher
- Wärmeenergiespeicher
- Kältespeicher
- Zusammenfassung

## Energiewende heißt...

- ...dass wir im Jahr 2022 das letzte Kernkraftwerk in Deutschland vom Netz nehmen.
- ...dass wir immer mehr auf erneuerbare Energien umsteigen - auf 80 Prozent der Stromversorgung bis 2050.
- ...dass wir unabhängiger von Öl- und Gasimporten werden.
- ...dass wir den Ausstoß der klimaschädlichen Treibhausgase senken - um 80 bis 95 Prozent bis 2050.
- ...dass wir mehr aus Energie machen, indem wir sie effizienter einsetzen.
- ... seit Elmau: Entkarbonisierung - Zwei Grad Klimaziel in diesem Jahrhundert...

In den vergangenen 20 Jahren hat sich in Deutschland, auf dem Gebiet der erneuerbaren Energie, viel getan. Alle vorsichtigen Prognosen vom Anfang der Neunzigerjahre, über den Anteil erneuerbarer Energie an der Energieversorgung, sind von der Realität um Längen übertroffen worden. Zur damaligen Zeit war die Wasserkraft die einzige nennenswerte erneuerbare Energiequelle. Heute wissen wir, dass Wind und Sonne, sowie andere Quellen das Potenzial haben, die Energieversorgung Deutschlands in Zukunft weitgehend auf die Basis erneuerbarer Energien zu stellen. Die Herausforderung ist gewaltig. Ohne erneuerbare Energie kann es keinen Klimaschutz geben.

Bereits im Jahr 2008 wurde eine Zielstellung der Bundesregierung festgeschrieben, nämlich bis zum Jahr 2050, 80% des Stroms in Deutschland aus erneuerbarer Energie bereit zu stellen.

Inzwischen hat sich die weltweite CO<sub>2</sub> Emission ständig erhöht, die Staaten diskutieren noch über Klimaschutzziele, dabei sind die vereinbarten Maßnahmen keinesfalls ausreichend um die Erderwärmung nicht um mehr als 2 Grad zunehmen zu lassen. Darüber hinaus haben Finanz- und andere Krisen auf dieser Welt das Thema in den Hintergrund gedrückt.

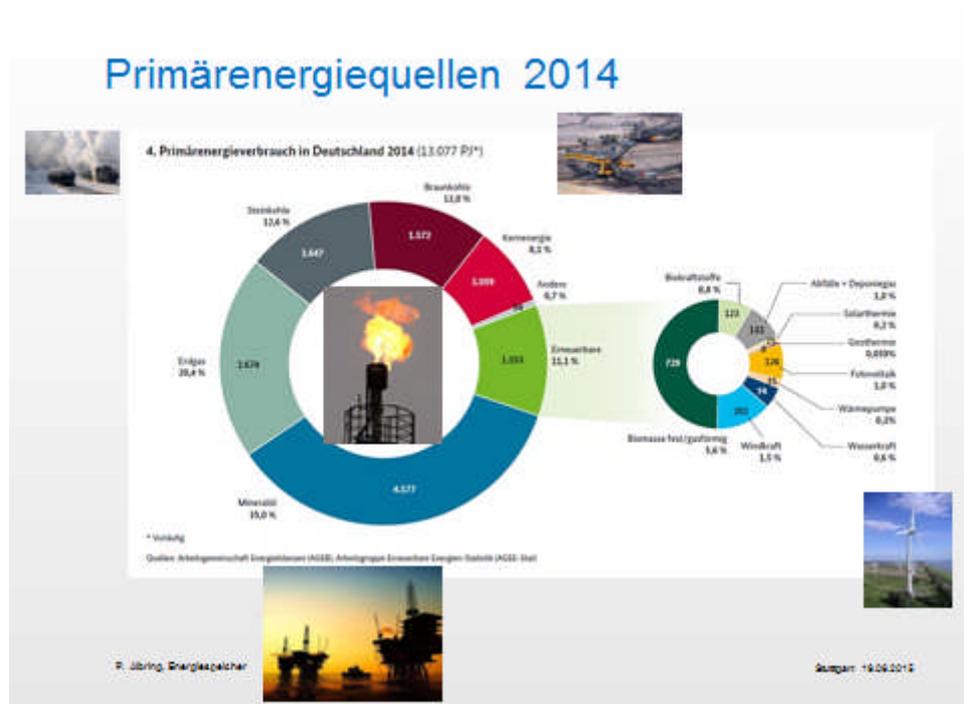
Wissenschaftler und Forschungseinrichtungen entwickeln inzwischen unterschiedliche Konzepte und Werkzeuge, die für eine zukünftige Energieversorgung mit geringer CO<sub>2</sub> Emission für das Erreichen der Klimaschutz-Zielstellung. Es herrscht Zuversicht, dass das Ziel realistisch ist, ja auch überboten werden kann. Auch einhundert Prozent Strom aus erneuerbarer Energie ist möglich.

Indessen muss der Energiebedarf für Wärme und Verkehr in den Fokus genommen werden. Auch dieser Teil muss und kann in Zukunft weitgehend erneuerbar gedeckt werden.

Voraussetzung für eine Energieversorgung auf der Basis erneuerbarer Energie sind Veränderungen bei Erzeugung, Speicherung und Verbrauch. Das Speichern von Energie wird eine Schlüsselkomponente.

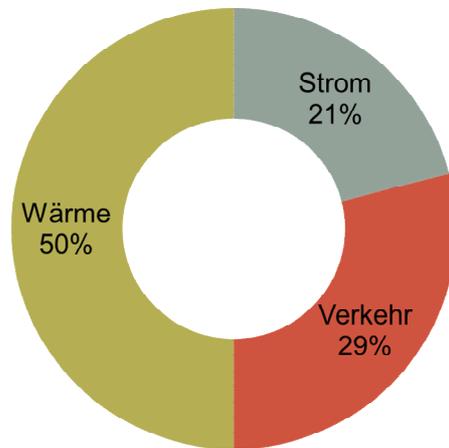
Die Bedeutung von Energiespeichern. Ein Blick zurück zeigt, die menschliche Energieversorgung erfolgte immer aus natürlichen gespeicherten Vorräten. Holz und Tran sind Beispiele für natürlich gespeicherte Bioenergie. Die industrielle Revolution begann, als der Mensch und die gespeicherten Kohlevorräte benutzen konnte. Erdöl und Erdgas sind ebenfalls das Produkt natürlicher Speichervorgänge die sich über ein Jahr Millionen erstreckten. Der auf wenige Jahrzehnte begrenzter Verbrauch dieser Vorräte reichert unsere Atmosphäre in einem vorher nie da gewesenen Maße mit CO<sub>2</sub> an.

In Deutschland, als einem Beispiel für einen entwickelten Industriestaat, erfolgt die Energieversorgung auch heute noch vor allem aus Kohlenstoff basierten Energiequellen: Kohle, Erdöl und Erdgas. Nur etwa 11 % Energie aus erneuerbaren Energiequellen trägt heute zur Deckung des Primärenergiebedarfs unseres Landes bei.



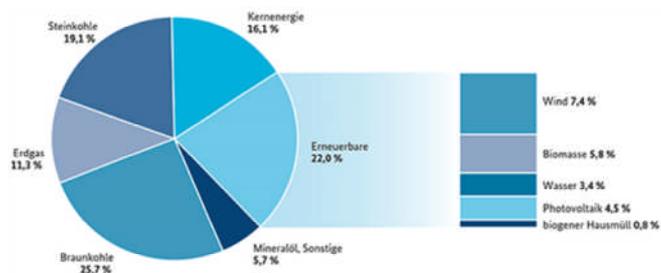
Aus Primärenergie entstehen drei Formen von Nutz Energie: Strom, Wärme und Energie für Transportaufgaben.

## Struktur des Energieverbrauchs in Deutschland 2012



Betrachtet man nur den Strom, so ergibt sich hinsichtlich der erneuerbaren Energien ein freundlicheres Bild. Zum deutschen Netto-Stromverbrauch im Jahr 2013 trugen erneuerbare Energien bereits 22 % bei.

## Energiequellen für Stromproduktion in Deutschland (2013)



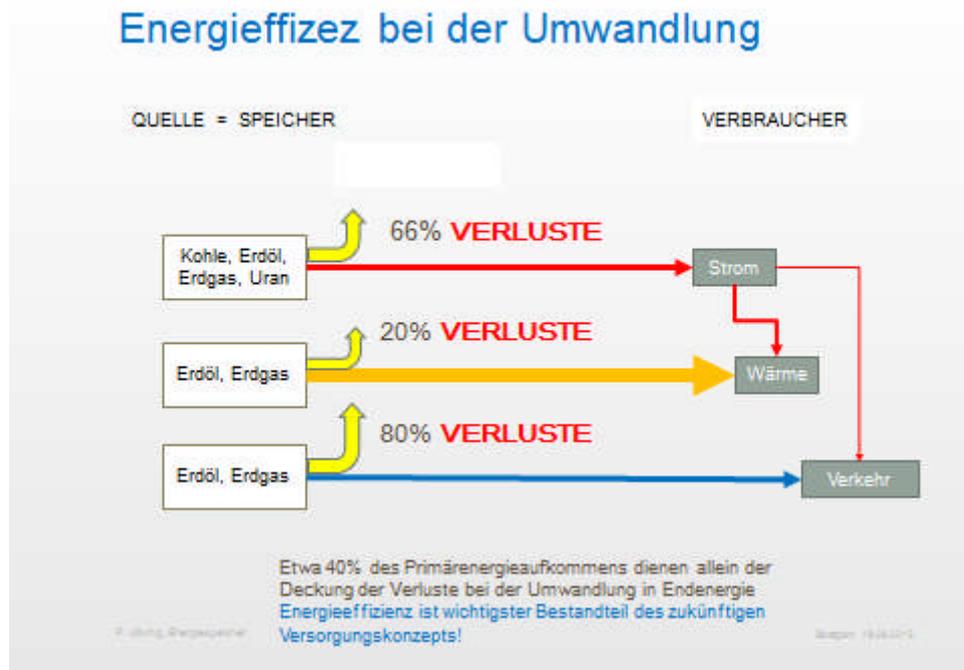
Netto-Stromverbrauch 527 TWh.  
 Industrie 242 TWh,  
 40 Millionen Haushalte 137 TWh,  
 Handel und Gewerbe 76 TWh und  
 Verkehr 16,5 TWh.  
 Exportüberschuss bei Strom 23,1 TWh

Auf Grund dieser Datenlage beschloss die Bundesregierung im Jahre 2008, dass bis zum Jahr 2035 die Stromversorgung zu 80 % aus erneuerbarer Energie erfolgen soll. Wissenschaftler und Experten sind jedoch der Meinung dass dieser Zielstellung zu kurz greift. Sie halten eine Stromversorgung mit annähernd 100 % aus erneuerbarer Energie für realistisch. Darüber hinaus soll und muss die erneuerbare Energie auch die anderen Komponenten des Energiebedarfs erreichen. Das langfristige Ziel muss sein nicht nur die Stromversorgung erneuerbar zu gestalten sondern auch den Energiebedarf für Wärme und Transportaufgaben. Der Weg dahin hat mehrere Komponenten.

## Komponenten einer zukünftigen Energieversorgung

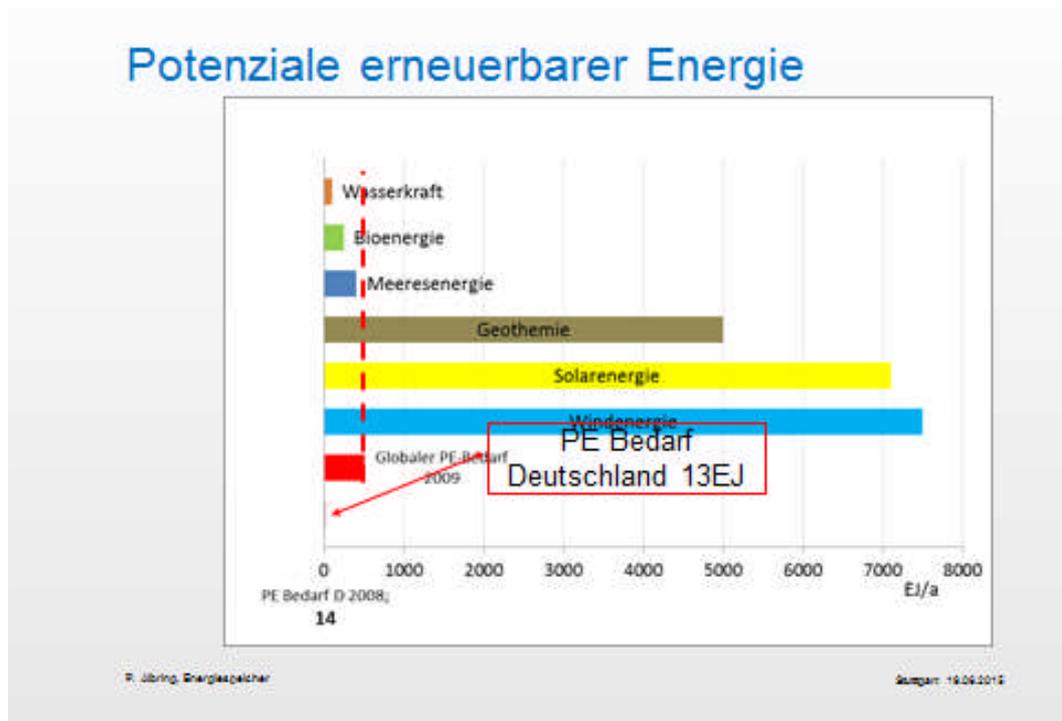
- Energieeffizienz
- Strom wird wichtigster Primärenergieträger
- Stromspeicher
- E-Mobilität
- Biomasse:  
Die energetische Nutzung der Biomasse wird als eine beschränkte Ressource behandelt
- Solare Wärme:  
Solarthermische Kollektoren liefern im Energiekonzept 2050 einen Beitrag zur Trinkwassererwärmung, Raumheizung, Prozesswärme- und Kälteversorgung in Gebäuden und für die Nah-/Fernwärme- und Nah/Fern-Kältesysteme.

Die weitaus wichtigste Komponente ist die Energieeffizienz. Der technische Fortschritt muss dafür benutzt werden, den Energiebedarf für notwendige Prozesse zu reduzieren. Die Bedeutung dieser Aufgabe wird sichtbar, wenn man die Größenordnung der Verluste bei der Energieumwandlung betrachtet. Wichtige Bestandteile zur Erhöhung der Energieeffizienz sind der Ausbau von dezentralen Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, die energetische Sanierung des Gebäudebestands sowie die Elektromobilität.



Strom wird in Zukunft der wichtigste Primärenergieträger sein.

Welche Potenziale bieten die erneuerbaren Energiequellen. Die im folgenden Bild dargestellten Potenziale beziehen sich mit den Ausnahmen Geothermie und Bioenergie nur auf die Stromerzeugung. Aus diesem Grund wird die Solarenergie etwas geringer veranschlagt als die Windenergie. Das Potenzial der Windenergie wurde in den letzten Jahren nach oben korrigiert. Dazu tragen größere Nabenhöhen, größere Rotordurchmesser und vor allem die steigende Offshore Installationen bei. Bei der Bioenergie ist zu beachten, dass die dafür benötigten Flächen mit den Flächen für die Nahrungsmittelproduktion konkurrieren.



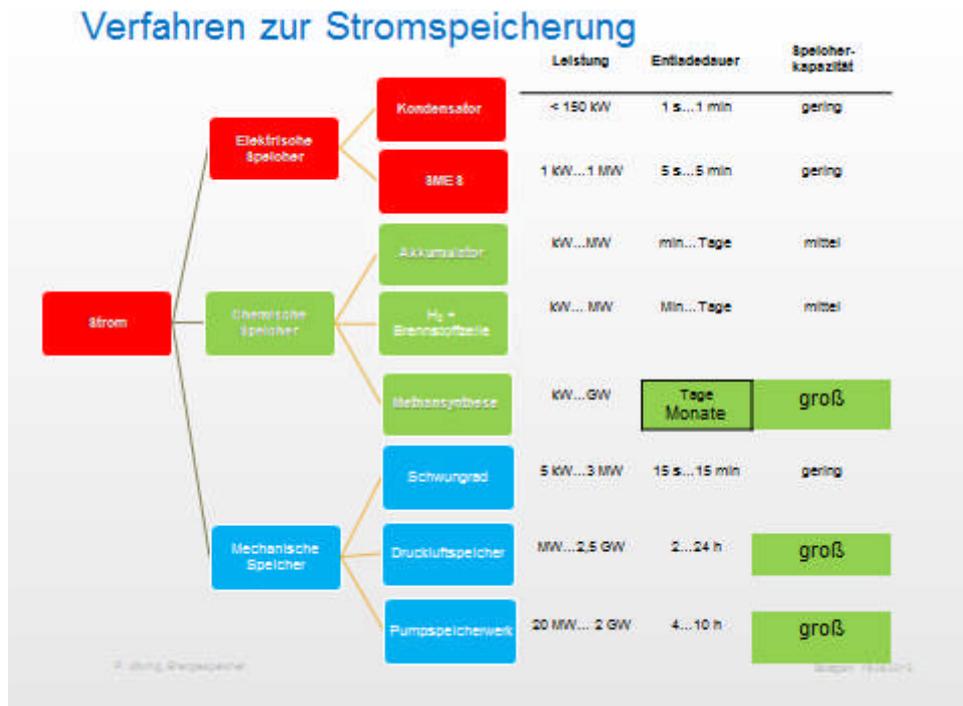
1 EJ  $\rightarrow$   $10^{18}$  J  $\rightarrow$  278 TWh

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland betrug im Jahr 2014 etwa 13 EJ  $\rightarrow$  3617 TWh

Allein das heute sichtbare Potenzial an Wind- und Solarenergie zur Stromerzeugung übersteigt den weltweiten Primärenergiebedarf um den Faktor 30.

## Schlussfolgerungen

- Die wesentlichen erneuerbaren Energiequellen liefern Strom
- Wind Sonne Wasserkraft sind fluktuierende Energiequellen
- Je höher ihr Anteil von fluktuierenden Energiequellen am Energiemix ist, um so wichtiger wird die Speicherung von Energie



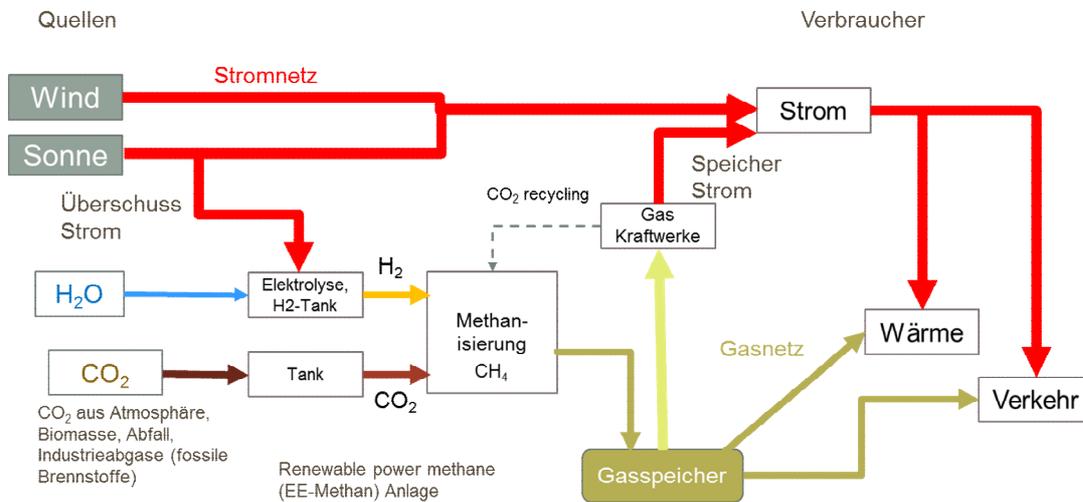
Die Energieversorgung auf der Basis erneuerbarer Energie in mitteleuropäischen Breiten, erfordert Energiespeicherung über Wochen und Monate, um längere Perioden von geringer Solarstrahlung, kombiniert mit Windstille, überbrücken zu können. Die Methode der direkten oder mechanischen Stromspeicherung reicht nicht aus um den Speicherbedarf eines Landes zu decken. Ausreichende Speicherkapazitäten und große Entladezeiträume erreicht man durch die Verfahren *power-to-Gas* und *power-to-fuel*. Mit Überschussstrom wird Wasserstoff erzeugt. Mit CO<sub>2</sub> als zweite Komponente wird in verfahrenstechnischen Prozessen gasförmiges Methan hergestellt. Dafür existieren bereits heute ausreichende Speicherkapazitäten, einmal im Erdgasnetz, zum anderen in zahlreichen unterirdischen Gasspeichern. Verfahren zur Herstellung von Treibstoff aus den gleichen Ausgangsstoffen, H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>, sind ebenfalls bekannt und werden von einzelnen Entwicklergruppen untersucht. Die heute in Deutschland vorhandenen Speicherkapazitäten für Strom und Gas sind im nächsten Bild gezeigt:

### Speicherkapazitäten für Strom und Gas in Deutschland

	Speicher-Kapazität	Speicher-Reichweite
Stromnetz	0,04 TWh	<1 h
Gasnetz	200 TWh	Monate

Für die erneuerbare Energieversorgung bedarf es den Bau von Gaskraftwerken, die einspringen, wenn die Stromversorgung aus Wind und Sonne nicht ausreicht. Das bestehende Gasnetz und vorhandene Gasspeicher können für die Speicherung von erneuerbarem Methan genutzt werden, das aus Überschussstrom hergestellt wird. Die Rückverstromung hat einen Wirkungsgrad von 35...50%. Das Verfahren erfordert den Aufbau einer neuen Infrastruktur.

## Von erneuerbarem Strom zu erneuerbarem, speicherbarem Brennstoff



Quelle: Fraunhofer IWES (Sterner) und ZSW (Specht)

Erste Anlagen in größerem Maßstab, zur Herstellung von Wasserstoff sind in Betrieb.

### P2G - Power to Gas Falkenhagen, Brandenburg



Die Anlage elektrolysiert mit der Energie von Windkraftanlagen Wasser in Wasserstoff. Der Wasserstoff wird in das Erdgasnetz eingespeist.

Leistung 2 MW, Wasserstoffproduktion 360 m<sup>3</sup>/h

Quelle: E.ON

## Erneuerbare Energieversorgung

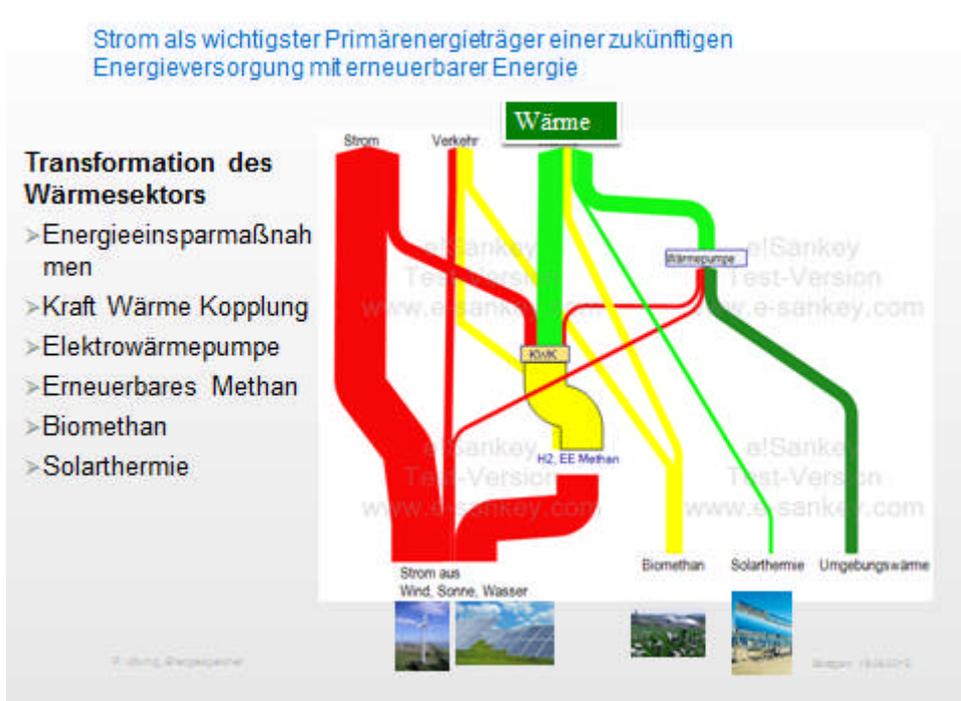
Erneuerbare Energiequellen liefern hauptsächlich Strom

Die erneuerbare Energie muss aber nicht nur den Strombedarf unserer Volkswirtschaft ersetzen, sondern auch den viel größeren Heiz- und Prozesswärmebedarf sowie den Treibstoffbedarf für den Verkehr.

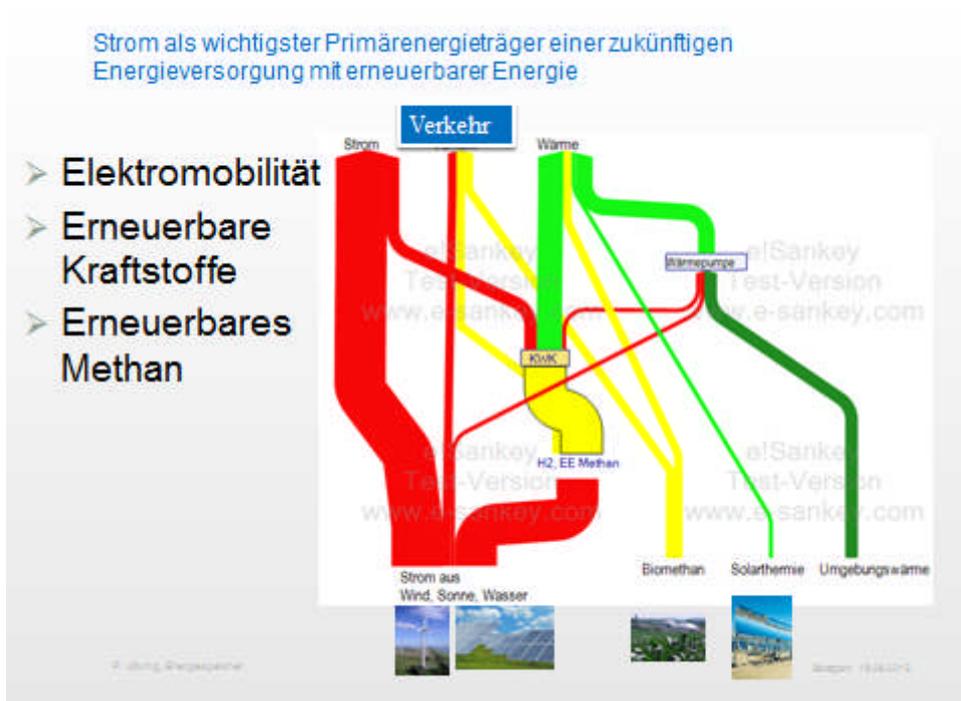
Bei der konventionellen Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern ohne Wärmeauskopplung wird im globalen Durchschnitt nur etwa ein Drittel der Primärenergie in Strom gewandelt, während knapp zwei Drittel als Abwärme ungenutzt bleiben. Bei Umstieg auf erneuerbare Energien aus Direkterzeugung sinken daher bei gleicher Stromerzeugung der Primärenergiebedarf sowie die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die Abwärme aus thermischer Stromerzeugung kann durch die KWK genutzt werden. Für die Stabilität der Stromversorgung sorgen die erneuerbaren Stromerzeuger (Wind, Sonne) im Verbund mit regenerativen Gaskraftwerken (für Wasserstoff oder erneuerbares Methan) mit einem durchdachten Energiemanagement (Lastregelung) und der Energieversorgung aus Gasspeichern und Backup Kapazitäten (u. a. Pumpspeicher, Batteriekraftwerke,...)



**Transformation des Wärmesektors:** durch den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, der Solarthermie und die verstärkte Nutzung von Elektrowärmepumpen, erneuerbarem Methan/Biomethan in Brennwärtekesseln und Prozesswärme kann in Zukunft der durch Energieeinsparmaßnahmen gesunkene Prozess- und Heizwärmebedarf vollständig erneuerbar gedeckt werden.



Der Verkehr der Zukunft wird neben dem reinen Elektroantrieb auch mit erneuerbarem Methan und erneuerbaren Kraftstoffen aus Überschussstrom bewältigt werden.



## Kann ein Land wie Deutschland sich selber mit erneuerbarer Energie versorgen?

### Flächenverbrauch fossiler Energieträger, Beispiel Braunkohle (25% Stromerzeugung)

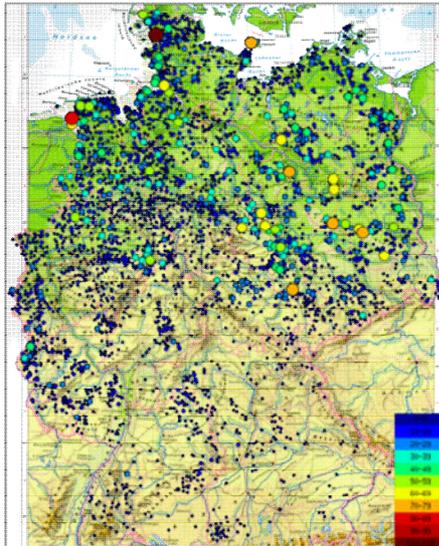
Der Flächenverbrauch der deutschen Braunkohletagebauten beträgt ca. 2400 km<sup>2</sup><sup>[1]</sup>, was der vierfachen Fläche des Bodensees bzw. nahezu der Fläche des Saarlandes entspricht.

Deutschlandweit waren 2013 ca. 16.410 Menschen im Braunkohlebergbau beschäftigt, etwa 1,5 % weniger als 2012.<sup>[2]</sup>

Bisher mussten insgesamt 308 Ortschaften für den Abbau von Braunkohle ganz oder teilweise umgesiedelt werden. Davon waren ca. 107.100 Menschen betroffen.

[1]Braunkohle im Visier der Umweltschützer. Goethe-Institut. Mai 2013. [2]Deutschland – Rohstoffsituation 2013. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Abgerufen am 6. Februar 2015.<sup>1</sup>

## Flächenverbrauch erneuerbarer Energie



Für eine GWh/a werden gebraucht:

Windenergie*)	5,8 ha
Photovoltaik	2,7 ha
Bioenergie	127,0 ha

Dem Deutschen Elektroenergiebedarf 2012 entsprechen:

**117.000** WEA, LK 2,5 MW (30.000 km<sup>2</sup> Landwirtschaft od. Wald)\*) oder

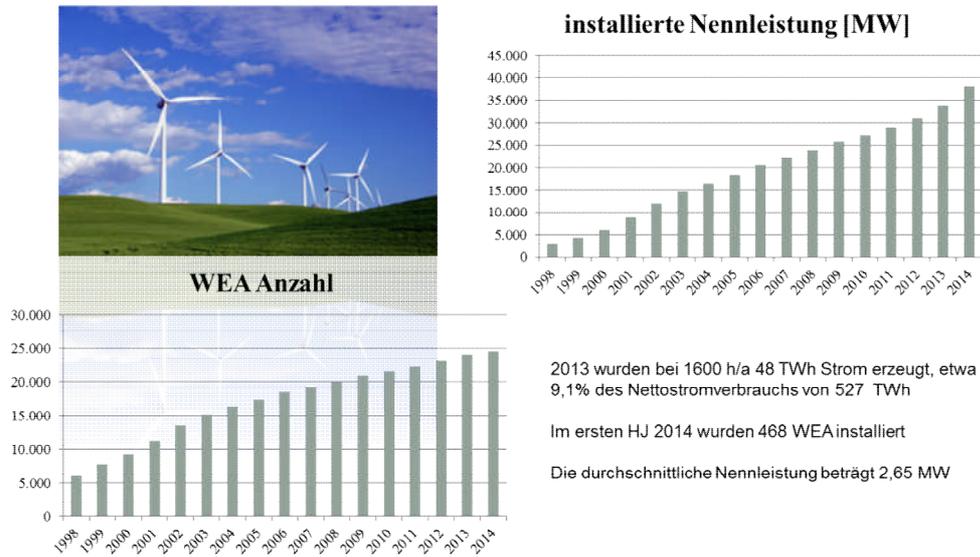
**49.000** WEA, LK 6 MW (12.500 km<sup>2</sup>) oder

200 m<sup>2</sup> PV Fläche pro Wohngebäude, insgesamt 3500 km<sup>2</sup>

\*) Abstandsfläche, die auch landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich nutzbar ist  
Die versiegelte Fläche ca. 500 m<sup>2</sup>/Windenergieanlage

## Wind Strom in Deutschland 2014

Data source:  
IWES, IWET –  
last update: 30 Jul 2014



## Wirtschaftliche Aspekte

- Windenergie schafft Arbeitsplätze: Ende 2012 waren 117.860 Beschäftigte in der Branche. Tendenz steigend.
- 24867 Windenergieanlagen stehen in Deutschland
- 4.750. MW Windleistung wurden im Jahr 2014 neu installiert. Die installierte Gesamtleistung aus Windenergie beträgt damit 38.115 MW.

Quelle: Deutsche Windguard GmbH  
Stand: 31. Dezember 2014

## PV Strom in Deutschland 2013



**PV:** Installierte Leistung 30.6.2013: **34.240 MW**

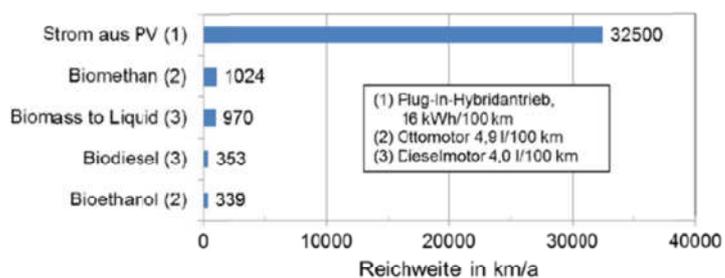
Solarer Ertrag = 5% Strombedarf D 2012  
8 m<sup>2</sup>/kWp, 100 kWh/m<sup>2</sup>/a

### Wirtschaftliche Aspekte

- Windenergie schafft Arbeitsplätze: Ende 2012 waren 117.860 Beschäftigte in der Branche. Tendenz steigend.
- 24867 Windenergieanlagen stehen in Deutschland
- 4.750. MW Windleistung wurden im Jahr 2014 neu installiert. Die installierte Gesamtleistung aus Windenergie beträgt damit 38.115 MW.

Quelle: Deutsche Windguard GmbH  
Stand: 31. Dezember 2014

### Flächenbedarf für erneuerbare Mobilität PV vs. Energiepflanzen



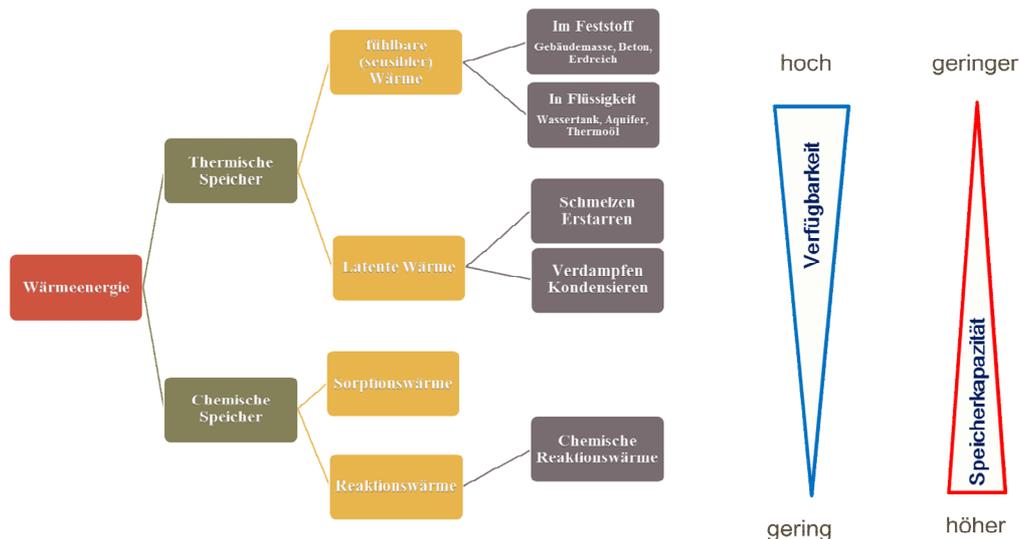
Jährliche Fahrzeugreichweiten mit dem Jahresertrag von einer Anbaufläche von 100m<sup>2</sup> für Energiepflanzen bzw. von 40m<sup>2</sup> PV-Modulen (150 kWh/m<sup>2</sup>/a)

Quelle: Fakten zur PV Fraunhofer ISE

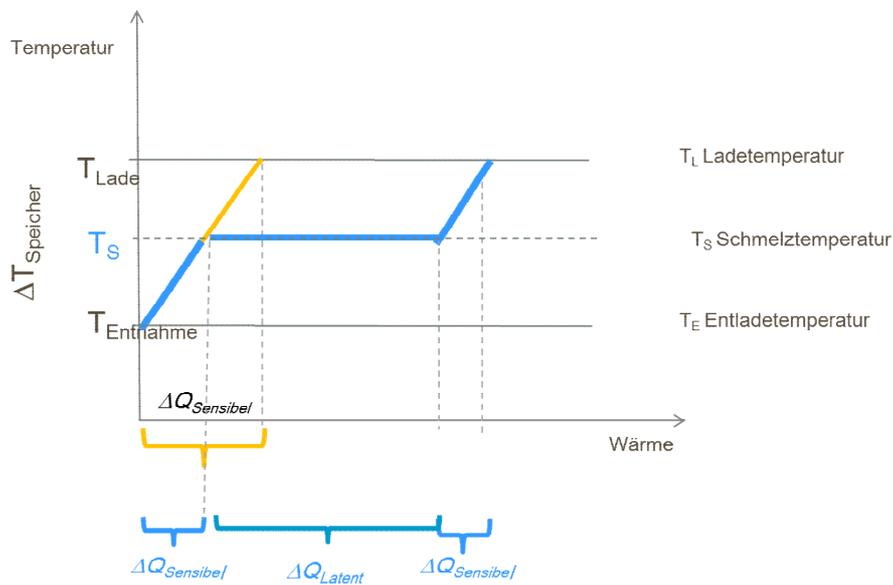
# Wärmespeicher

- Thermische Solarenergie muss gespeichert werden, da Anfall und Bedarf zeitlich getrennt sind.
- Es wird in Kurzzeitspeicher und saisonale Wärmespeicherung unterschieden
- Dezentraler Wärmespeicher:  
Für Heizung, Warmwasserbereitung und Kälteerzeugung wird dezentral geerntete Solarenergie in die dezentralen Versorgungssysteme eingespeist. Zur ökonomischen Nutzung gehört auf jeden Fall ein Speicher.
- Zentrale Wärmespeicher:  
Saisonalen Speicherung von thermischer Solarenergie in Großspeichern  
Hochtemperaturspeicher für solarthermische Elektrizitätserzeugung (Concentrated Solar Power).
- Speicherung von erneuerbaren Strom kann durch Umwandlung in Wärme oder in Kälte mit Hilfe von Wärmepumpen erfolgen

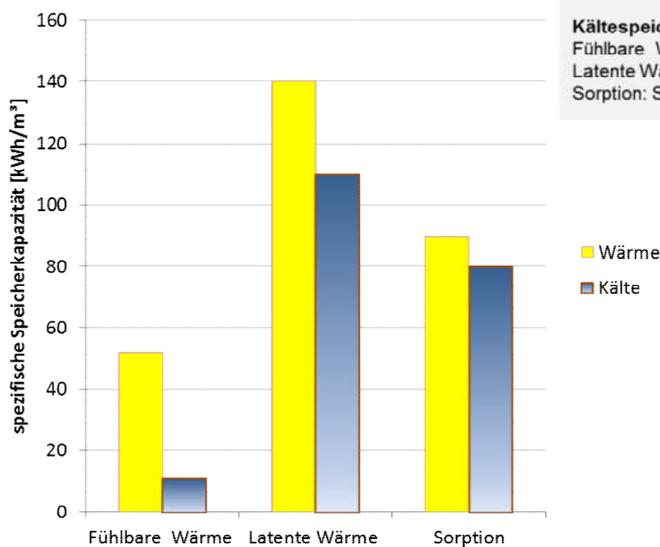
## Verfahren zur Wärmespeicherung



## Sensible und latente Wärme



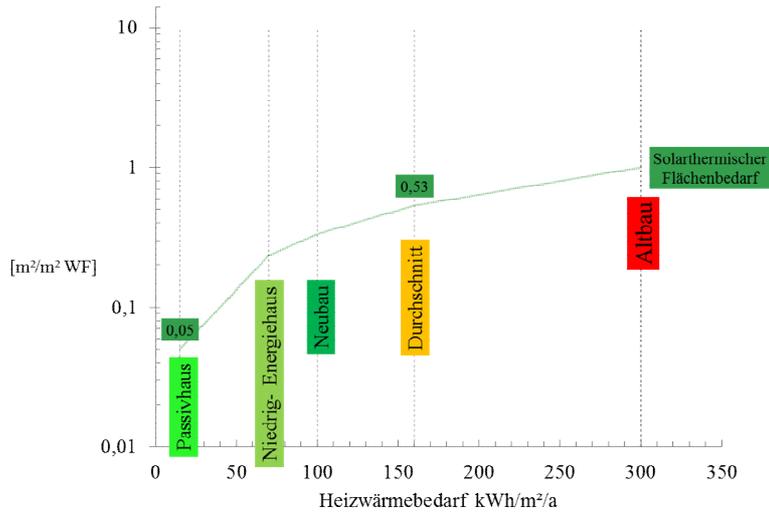
## Kapazität von Wärme- und Kältespeichern



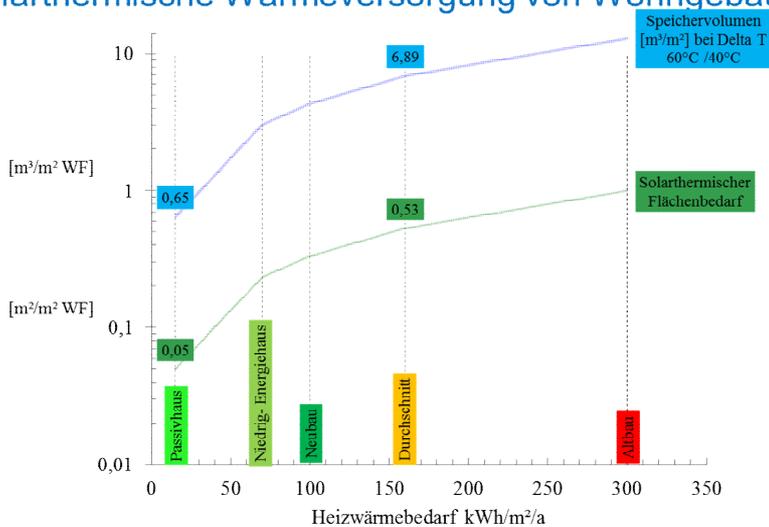
Wärmespeicher:	
Fühlbare Wärme; Wasser 50 .. 95 °C,	52 kWh/m³
Latente Wärme: Natriumacetat*3H2O Phasenwechsel 58 °C ,	140 kWh/m³
Sorption: Silicagel N + 10 % Bindungswärme ,	90 kWh/m³
Kältespeicher:	
Fühlbare Wärme: Wasser 5 .. 15 °C,	11 kWh/m³
Latente Wärme: Natriumacetat*3H2O , Phasenwechsel 0 °C,	110 kWh/m³
Sorption: Silicagel N,	80 kWh/m³

- Wie groß ist der Flächenbedarf einer solarthermischen Anlage, bezogen auf die Wohnfläche, wenn der Jahresheizwärmebedarf mit thermischer Solarenergie gedeckt werden soll.

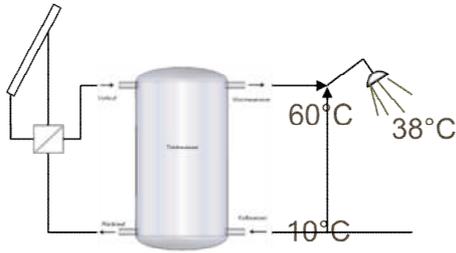
## Flächenbedarf zur Deckung des jährlichen Heizwärmebedarfs mit thermischer Solarenergie



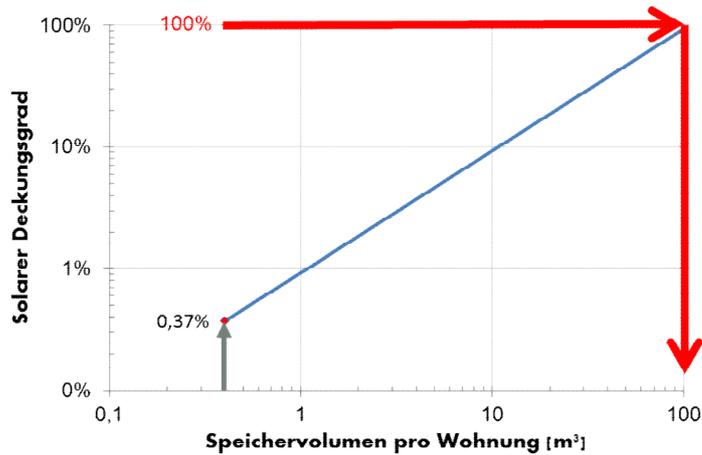
## Flächenbedarf und Speichervolumen für solarthermische Wärmeversorgung von Wohngebäuden



## Flächen und Speicherbedarf für die solare Warmwasserbereitung, 100% Deckungsgrad



Ladetemperatur	60°C
Nutztemperatur	40°C
Durchschnittliche Wohnungsgröße	92,1 m <sup>2</sup>
Solare Kollektorfläche pro Wohnung	8 m <sup>2</sup>



Erhöhung des solaren Deckungsgrades:  
Warmwassernutzung während der Ladezeit

Den statistischen Warmwasserbedarf zugrunde gelegt, ergibt sich das Bild der Funktion von solarem Deckungsgrad und Speichervolumen. Diese Überlegung unterstellt, dass der Speicher grundsätzlich nur entladen wird, wenn die Sonne nicht scheint. Beim duschen während der Sonnenscheinzeit wird der solare Deckungsgrad größer.

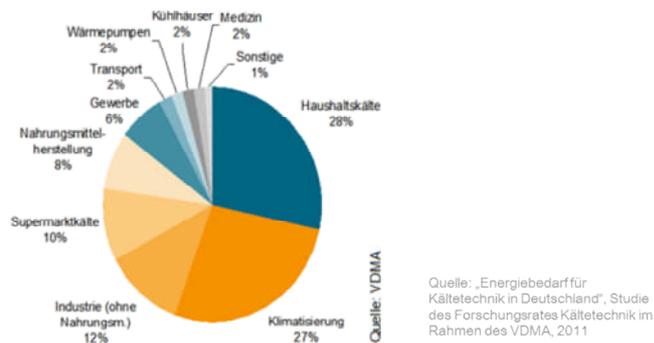
## Kältespeicher:

### Anteil der Kältetechnik am Energiebedarf

15 % des gesamten deutschen Stromverbrauchs für Kältetechnik.

Kältespeicher werden eingesetzt für:

- > für Reduzierung der Anlagengröße
- > für (Anpassung an günstige Energietarife)
- > für Energieeinsparung durch Anlagenbetrieb bei geringen Umgebungstemperaturen



## Kältespeicher

- Kältespeicherung mit Eis - saisonale Speicherung natürlicher Kälte



Potsdam, Eisspeicher im Neuen Garten

Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts beruhte die „Kältetechnik“ auf „natürlicher Kälte“ verbunden mit saisonaler Speicherung. Brauereien, Lebensmittellager, Schlachtbetriebe,...

Eines der kuriossten Bauwerke im Neuen Garten in Potsdam ist die Pyramide. Für Friedrich Wilhelm II. zwischen 1791 und 1792 nach Plänen von A.L. Krüger und Carl Gotthard Langhans erbaut, diente die Pyramide mit ihren hieroglyphischen Wandverzierungen als Kühlhaus. Im Winter wurde hier Eis vom Heiligen See eingelagert, damit der 2 Quadratmeter große Kühlraum die eingebrachten Speisen das ganze Jahr über kühlen konnte. Zum Ende eines jeden Winters wurde Eis vom Heiligen See in den Keller geschafft, welches, so will es die Legende, dort zu Herbstende immer noch nicht vollständig geschmolzen sein sollte.

## Kältespeicher

### Kaltwasserspeicher

- Temperaturdifferenz (typ. 6/12 C)
- Geringe Speicherkapazität, große Behälter
- Max. Speicherkapazität bei idealer Schichtung



© T.Urbaneck

### Eisspeicher

- Nutzt die Schmelzenthalpie von Wasser
- Hohe Speicherdichte

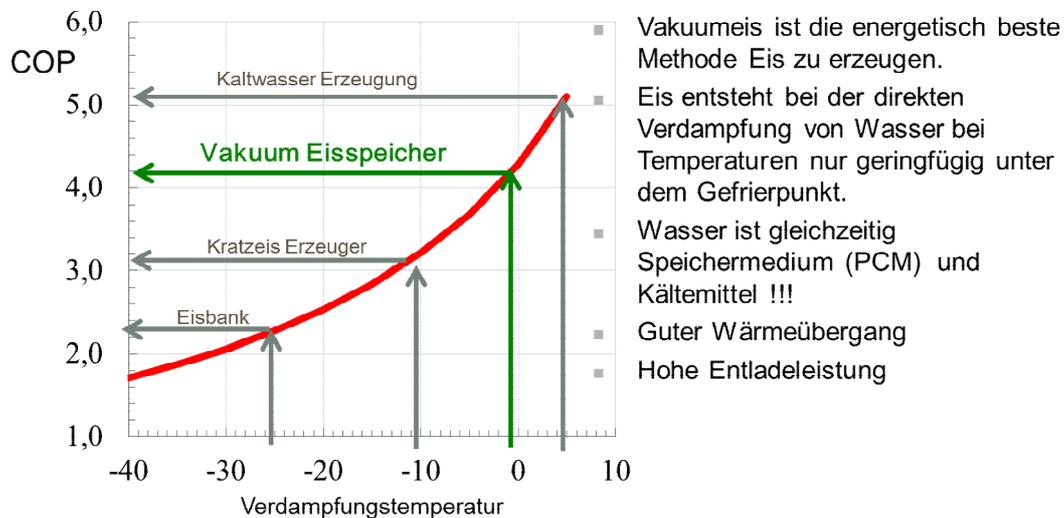


© Calmac

## Eisspeicher

- Häufigste Speichermedium in der Kältetechnik ist Eis.
- Technisch wird Eis durch das Gefrieren von Wasser an Kältemittel durchflossenen Wärmeübertragern erzeugt.
- Der Nachteil konventioneller Eisspeicher ist der wachsende Wärmewiderstand bei wachsender Eisschicht

## Effektivität von Kälte - Speicherverfahren



### Vakuüm-Eis-Technologie

Das Eis (bzw. das Eis-Wasser-Gemisch) entsteht durch Direktverdampfung des Kältemittels Wasser bei einer effektiven Verdampfungstemperatur von ca. -1 °C. Die Verdampfungstemperatur liegt damit deutlich über der von klassischen Eiserverzeugungsverfahren. Aufgrund der höheren Verdampfungstemperatur ist der energetische Aufwand der Eiserverzeugung nur noch geringfügig höher als der der reinen Kaltwassererzeugung. Bei Ausnutzung geringer nächtlicher Kondensationstemperaturen kann sogar eine höhere Systemeffizienz erzielt werden gegenüber der bedarfsgeführten Kaltwassererzeugung ohne Zwischenspeicherung. Bei hohem Kältebedarf wird die Schmelzwärme des gespeicherten Eis-Wasser-Gemisches zur Abkühlung des Kaltwassers genutzt werden. Dieser Speicherentladeprozess findet in einem externen Wärmeübertrager statt. Die erzielbare Entladeleistung kann an den Anwendungsfall angepasst werden.

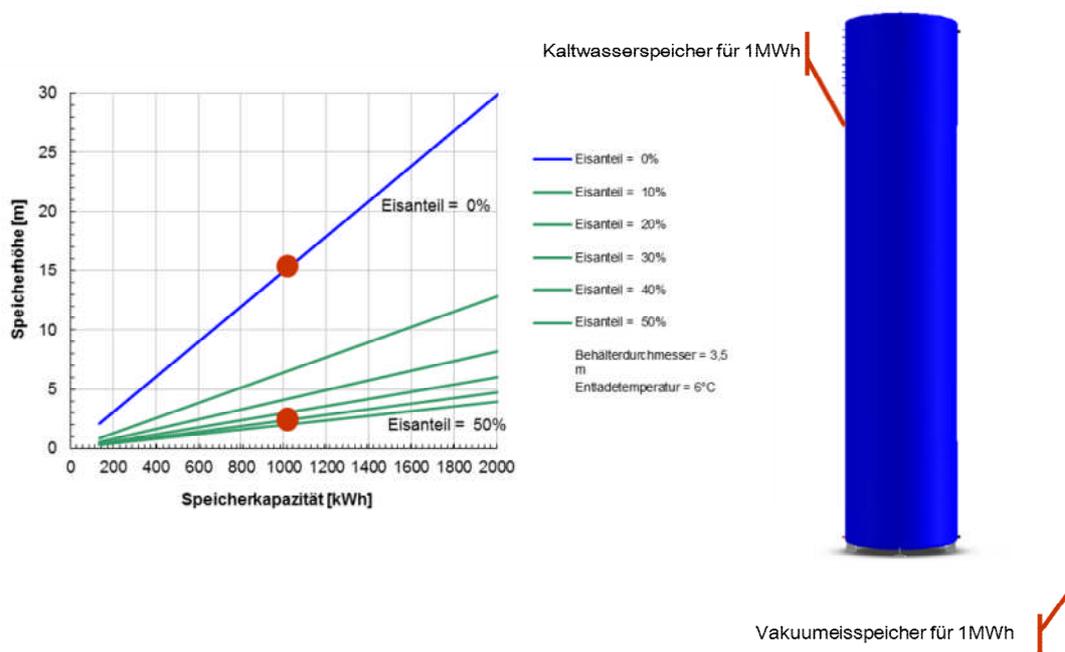
Das Vakuüm-Eisssystem hat folgende Eigenschaften:

- Das im Direktverdampfer entstehende Eis-Wasser-Gemisch ist pumpfähig. Es kann in einem einfachen Pufferspeicher ohne integrierten Wärmeübertrager gespeichert und zur Kältebereitstellung wieder entnommen werden.
- Im Vergleich zu konventionellen Blockeispeichern oder Kratzeis-Generatoren hat das Verfahren eine deutlich höhere Effizienz.
- Der Eisspeicher kann nachts bei niedriger Umgebungstemperatur mit höherer Effizienz geladen werden.
- Nutzung von Wasser als mit einer hoher Schmelzenthalpie (333.5 kJ/kg oder rund 93 kWh/m<sup>3</sup>)
- Nutzung des natürlichen Kältemittel Wasser (R718)
- Die Eisspeicherkapazität ist unabhängig von der Eiserverzeugerleistung.
- Kurzzeitlastspitzen können durch Nutzung des Eis-Wassergemisches als Kälte-träger oder sekundäres Kältemittel direkt ausgeglichen werden.

- Das System kann sehr ökonomisch in Regionen mit deutlichen Unterschieden zwischen Hoch- und Niedertarif eingesetzt werden.

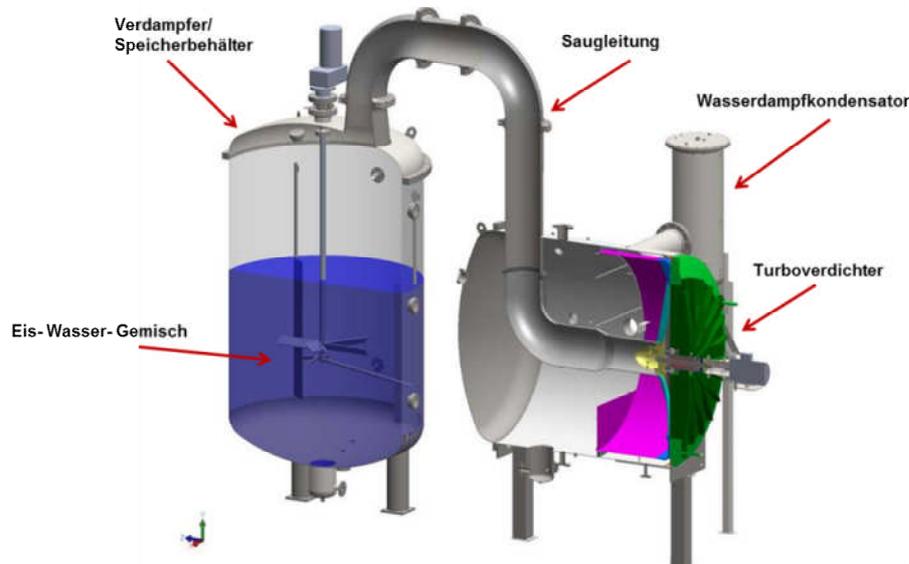
Das ILK Dresden betreibt eine Versuchsanlage zur Erzeugung und Speicherung von Vakuum-Eis mit einer Eiserzeugungsleistung von 50 kW und einer Speicherkapazität von 350 kWh bei einem Eisanteil von 50 % im Eis-Wassergemisch.

## Speichergröße und Speicherkapazität Wasserspeicher vs. Vakuumeisspeicher



Der verwendete Radialverdichter wurde im ILK entwickelt. Eine Prototypanlage entstand an der Westsächsischen Hochschule Zwickau (WHZ), mit einer Speicherkapazität von 350 kWh und einer Entladeleistung von 100 kW. Der Vakuum-Eisspeicher dient zur Abdeckung von Lastspitzen im zentralen Kaltwassernetz des Campus. Die Beladung erfolgt überwiegend nachts.

## Vakuumeiserzeugung und -speicherung



ILK Versuchsanlage zur Vakuumeisherstellung

## Versuchs- und Prototypanlagen Vakuumeischerzeuger und Eisspeicher

Anlageparameter	
Verdampfungstemperatur:	-2...0°C
Verdampfungsdruck:	600 Pa
Verdampfer Leistung:	ca. 50 kW
max. Speicherkapazität:	350 kWh
bei Eiskonzentration:	50 %
Speichervolumen:	6.6 m <sup>3</sup>



Speicher für erneuerbaren  
Strom in Form von Eis

Eisspeicher leisten einen Beitrag zur Energiewende entsprechen. Kältespeicher dienen zur Abdeckung von Kältebedarfsspitzen bei der Klimatisierung von Gebäuden oder der Prozesskühlung. Sie sind indirekte Stromspeicher, die eine elektrische Spitzenlast in Zeiten zu verlagern, in denen regenerativer Strom ausreichend oder im Überschuss zur Verfügung steht.

Eine weitere mögliche Anwendung von Flüssigeis sind Wärmepumpenprozesse, bei denen die Eiserzeugung durch Direktverdampfung als erste Stufe einer Wärmepumpenkaskade genutzt wird.

Dabei dienen natürliche Wasseransammlungen (Fluss, See, Meer) als Wärmequelle. Der geringere Erschließungsaufwand ist der wesentliche Vorteil gegenüber Wärmepumpen, die das Erdreich als Wärmequelle nutzen. Der Wärmepumpenprozess kann in Kombination mit einer saisonalen Speicherung zum Heizen und Kühlen genutzt werden. Im Speicher steigt während der Heizperiode der Eisanteil kontinuierlich an. Im Sommer wird das Eis genutzt, um ohne (maßgeblichen) zusätzlichen Energieaufwand Kaltwasser, z.B. für die Gebäudeklimatisierung oder Prozesskühlung bereit zu stellen.

## Zusammenfassung

- Speichertechnologien für Strom, Wärme und Kälte sind wesentlicher Bestandteil einer zukünftigen Energieversorgung
- Strom wird wichtigster primärer Energieträger
- Gasnetz und Gasspeicher sind geeignete Langzeitspeicher für überschüssigen erneuerbaren Strom.
- Notwendig ist der Aufbau einer industriellen Infrastruktur zur Umwandlung des Stromüberschuss in speicherbare gasförmige oder flüssige Kohlenwasserstoffverbindungen
- Wärmespeicher sind wichtiger Bestandteil der solarthermische Energienutzung
- Die Kältetechnik ist wichtiger Akteur bei der Energiewende
- Wärmespeicher glätten Stromspitzen in einem intelligenten Netzverbund, Wärmepumpen zur Ladung von Wärme- und Kältespeichern mit Überschussstrom
- Elektrisch angetriebene Wärmepumpe sowie Heizen mit Wärme aus der KWK sind die wesentlichen Heizungstechnologien im erneuerbaren Energiezeitalter.
- Jeder Fortschritt auf dem Weg zur Energiewende hängt ab von den politischen Rahmenbedingungen.

### Schlusswort

Die Fähigkeit zum Speichern erneuerbarer Energie ist untrennbare Voraussetzung der Nutzung erneuerbarer Energie. Erneuerbare Energie aus Sonne und Wind liefert Strom. Die Energiespeicher müssen in der Lage sein die natürlichen, kurz- und längerfristigen Schwankungen des erneuerbaren Energieangebots auszugleichen. Verfahren der Stromspeicherung durch Umwandlung in gasförmige und flüssige Brennstoffe können die zentrale und langfristige Speicherung übernehmen. Für dezentrale Energiespeicherung gibt es zahlreiche Möglichkeiten der Strom, Wärme- und Kältespeicherung. Für die Umsetzung der technischen Potenziale in die Praxis bedarf es großer Anstrengung von Wissenschaft und Technik, auch der Kältetechnik und nicht zuletzt der politisch Verantwortlichen für das Schaffen der entsprechenden Rahmenbedingungen.

## Literatur

- Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebots. Gutachten des Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) Kassel; Februar 2011
- BMWI Energie in Deutschland; Trends und Hintergründe zur Energieversorgung; Stand 2013
- Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf der Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien; Beitrag des Fraunhofer IBP, Fraunhofer ISE, Fraunhofer MWES, ISFH, IZES gGmbH, ZAE Bayern und ZSW für das Energiekonzept der Bundesregierung; Juni 2010
- Optionen zur Speicherung elektrischer Energie in Energieversorgungssystemen mit regenerativer Stromversorgung; Sauer, D.; Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe; RWTH Aachen,
- Energieversorgung der Zukunft; Jörg Müller, Dauerthal, 2005
- Aktuelle Fakten zur Fotovoltaik in Deutschland; H. Wirth; Fraunhofer ISE; Fassung vom 19.05. 2015; [www/pv-fakten.de](http://www/pv-fakten.de)
- Schmidt, Manfred; Regenerative Energien in der Praxis; Bibliothek Gebäudetechnik