

Windstrom und Elektrolyse

Eine Strategie zur Erreichung der energiepolitischen Vorgaben der Bundesregierung

Detlef Stolten

Institut für Energie- und Klimaforschung / IEK-3: Brennstoffzellen
Forschungszentrum Jülich GmbH

AKE - Jahrestreffen
20.10.2011
Bonn

Future Energy Solutions need to be Existing Game Changers



Drivers

- Climate change
- Energy security
- Competitiveness
- Local emissions

Grand Challenges

- Renewable energy
- Electro mobility
- Efficient central power plants
- Cogeneration

Goals

- Germany to reduce GHG emissions by 40% in 2020 (w/o nuclear)
 - 55% in 2030
 - 70% in 2040
 - 80-95% in 2050 with reference to 1990
- Danish distributed electricity and heat is to be fossil free by 2035 (no nuclear in DK)

http://www.bmu.de/english/energy_efficiency/doc/47609.php

http://www.stm.dk/publikationer/Et_Danmark_der_staar_sammen_11/Regeringsgrundlag_okt_2011.pdf

Verteilung der CO₂ Emissionen nach Sektoren in Deutschland

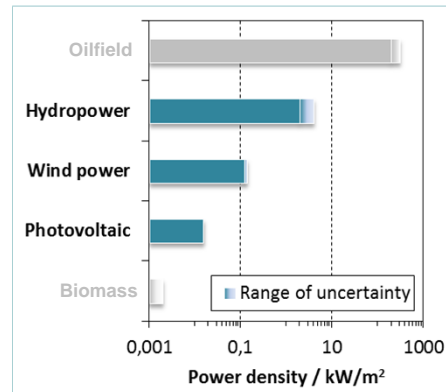
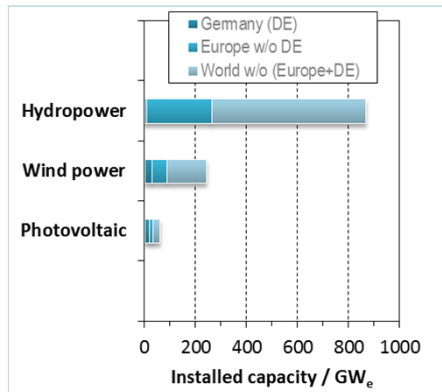
Stromerzeugung	48%
Verkehr	18%
	davon ca. 12% Personenverkehr
	davon ca. 6%
	90% des Verkehrs ölbasiert
Haushalte	18%
Gewerbe und Industrie	18%
	davon ca. 2/3 Gewerbe, 1/3 Industrie (ohne gehandelten Strom)
Sonstige	ca. 2%
Rundungsfehler	ca. 2%

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990 (Stand: 15. April 2011) <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm>

Technology Options deliberated on the German CO Targets

- **Only electromobility e.g. FCs & batteries can deliver on GHG goals for vehicles**
- **Only renewables (or nuclear) can deliver on GHG goals for electric power**
- **Renewables require dynamic mass storage: pumped hydro / geologic hydrogen storage**
- **Wind power / water electrolysis and electromobility are potential game changers**

Renewable Energies: Installed Capacities



Sources:

- IEA Key World Energy Statistics (2011), Report www.iea.org, 6.10.2011.
- World Wind Association, <http://www.windea.org/home/index.php>, 6.10.2011.
- European Wind Association (2011), Wind in Power – 2010 Statistics. Report, Brussels, February 2011.
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA (2010)), Global Market Outlook 2015, Report, Brussels, 2010.
- ESTELA (2010), Solar Thermal Electricity 2025. Report, prepared by A.T. Kearney, June 2010.
- GREENPEACE (2009), Concentrating Solar Power – Global Outlook 09. Report published by Greenpeace International, Amsterdam 2009.
- IHA (2010), 2010 Activity Report. International Hydropower Association, London 2010.

Speicherdichten im Vergleich

- **Batterien** 1-2 MJ/l (Blei – Li Ionen), davon ca. 30% nutzbar => 0,3-0,6 MJ/l effektiv
überproportional deutliche massebezogene Nachteile ca. 2400 kg @ 400 km bei 30 kW/30% ΔSOC
- **Wasserstoff techn.** 4MJ/l im Auto mit Tank 700 bar oder flüssig; Tank ca. 120kg @400km; H₂~ 4kg
- **Wasserstoff physikalisch** 4,7 MJ/l @700 bar; 8,46 MJ/l flüssig; Basis Heizwert
- **Benzin** 37 MJ/l; Tankgewicht für 400km Reichweite ca. 15kg; Benzin ca. 25kg

Die Energiedichte ist bei der Gewinnung erneuerbarer Energien und bei der Speicherung das dominante Argument

Daraus folgt für das Szenario:

- Wasserkraft wäre wünschenswert, ist aber in Deutschland ausgebaut
- Windkraft weist großes Potential auf, aufgrund technischer Fortschritte in der Leistung
- Flüssige Kraftstoffspeicher wären wünschenswert, sind aber alle CO₂ behaftet
- Wasserstoff weist die höchste Energiedichte CO₂-freier Speicher auf

Szenario: Stromerzeugung in Deutschland

- Windkraft *On-shore*: Anlagenzahl entsprechend 2010, *Re-powering* auf 7,5 MW, Jahresgang laut Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB);
- Windkraft *Off-shore*: Ausbau auf 35 GW ²⁾, Jahresgang laut ÜNB
- Zusätzliche Regelleistung: Nutzung einer Teilmenge des Erdgasverbrauchs in Haushalten (Stand 2009 ³⁾) zur Stromerzeugung bei einem Wirkungsgrad von 58%;
- Verwendung des Überschussstroms zur Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse. Einsatz in Brennstoffzellen-Pkw: 1 kg/100 km; 12000 km/a
- **Randbedingung:** Substitution von Kernkraft, Braun- und Steinkohle sowie Mineralöl. Unveränderte Stromerzeugung mit Erdgas und sonstigen erneuerbaren Energien¹⁾

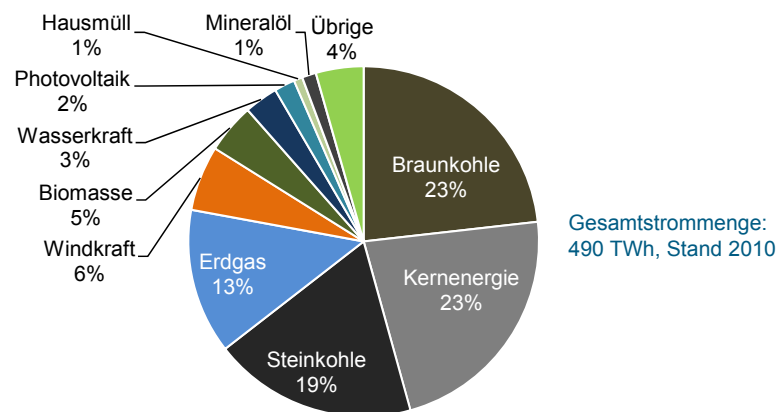
Quellen:

¹⁾ Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi: Energiedaten – ausgewählte Grafiken. Stand 22.06.2011, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2011

²⁾ Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Juni 2009

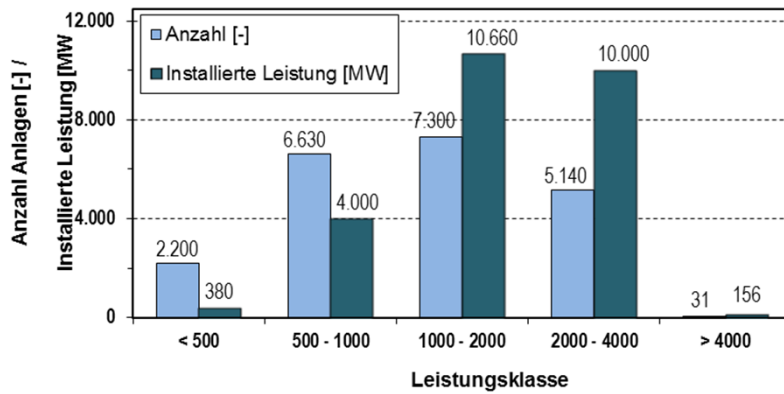
³⁾ Energieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen rückläufig. Pressemitteilung Nr.372 vom 18.10.2010, DESTATIS, Statistisches Bundesamt Deutschland, 2010.

Stromerzeugung in Deutschland



Quelle: Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi: Energiedaten – ausgewählte Grafiken. Stand 22.06.2011, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2011

Installierte Windanlagen in Deutschland



Stand 2010

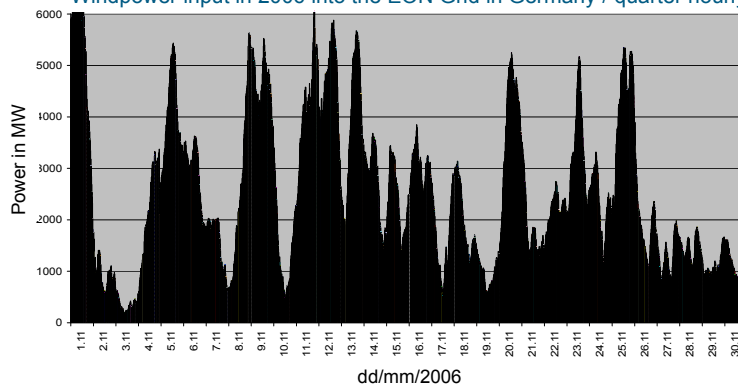
Quelle: Anteil der WEA-Leistungsklassen am Gesamtbestand in Deutschland.
<http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de>, zuletzt besucht am 01.08.2011

Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

9

Water Electrolysis as an Enabler for Renewables

Windpower input in 2006 into the EON Grid in Germany / quarter hourly resolution

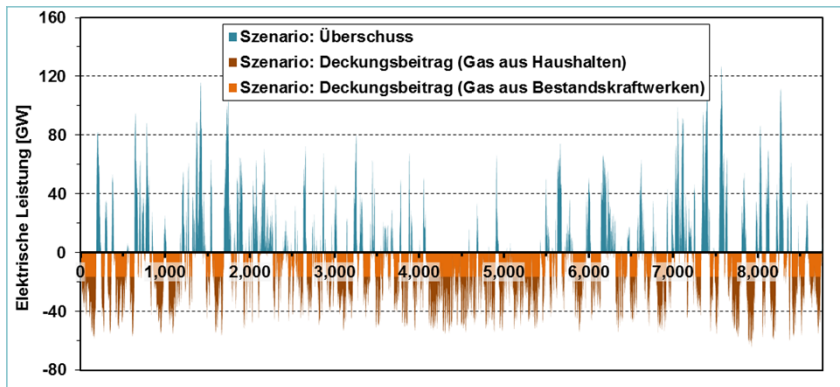


Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

10

Szenario: Jahrgang der Bilanz aus Stromangebot und -nachfrage

- Stromangebot: nur Wind und sonstige erneuerbare Energien gemäß Szenario;
Stromnachfrage: laut Übertragungsnetzbetreiber für 2010
- positive Flächenanteile: Stromüberschuss zur Herstellung von Wasserstoff (91 TWh)
- negative Flächenanteile: Bedarf an Regelleistung; dabei stärker schattiert: Produktion aus Erdgas 2010; Rest: Produktion mit 49% der 2009 in Haushalten verbrauchten Gasmenge ($\eta_{el} = 58\%$)

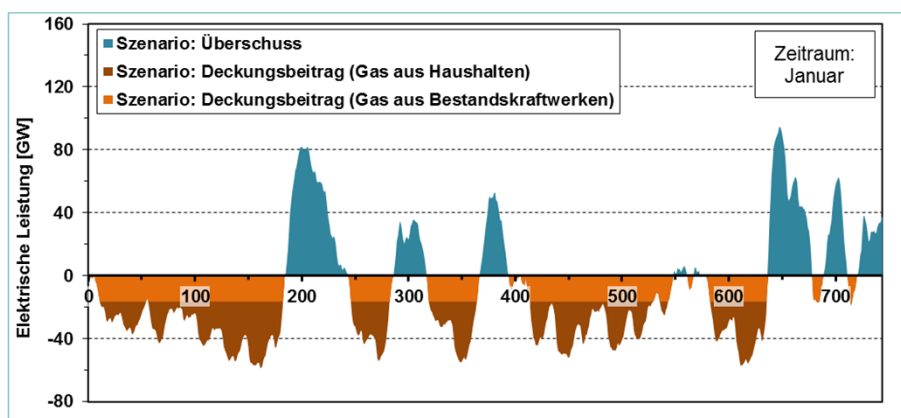


Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

11

Szenario: Januar-Bilanz aus Stromangebot und -nachfrage

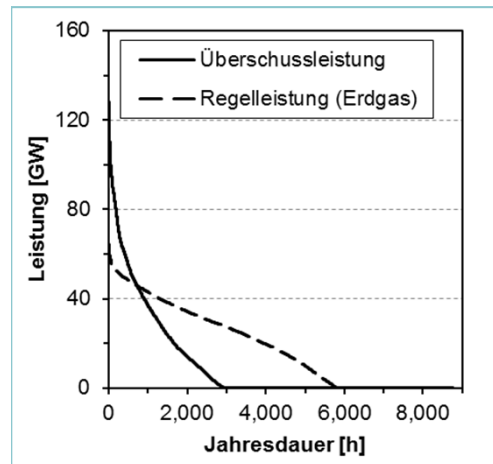
- Stromangebot: nur Wind und sonstige erneuerbare Energien gemäß Szenario;
- Stromnachfrage: laut Übertragungsnetzbetreiber für 2010



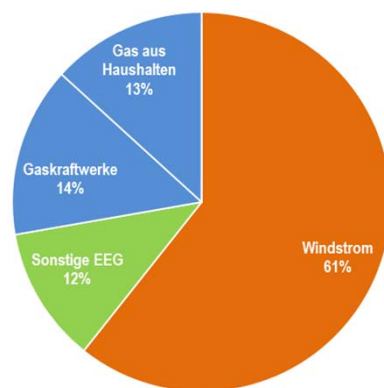
Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

12

Windstromüberschuss und -mangel



Szenario: Struktur der Stromerzeugung

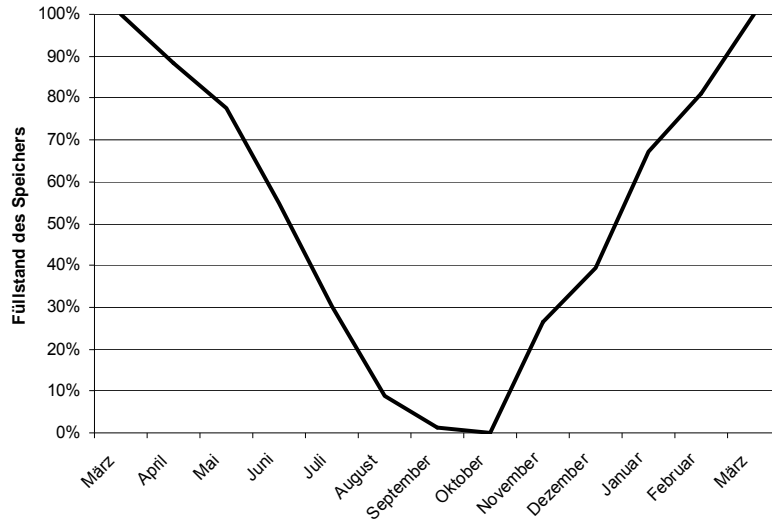


Gesamtstrommenge: ca. 490 TWh

- Basis: Bilanz der Jahrgänge von Stromangebot und Nachfrage gemäß Szenario
- Gaskraftwerke und sonstige EEG: Produktion des Jahres 2010
- Gas aus Haushalten: ca. 50% des Verbrauchs (2009)
- Windstrom aus erweiterten Kapazitäten:

<i>On-shore</i>	160 GW
<i>Off-shore</i>	35 GW

Füllstand des Wasserstoffspeichers

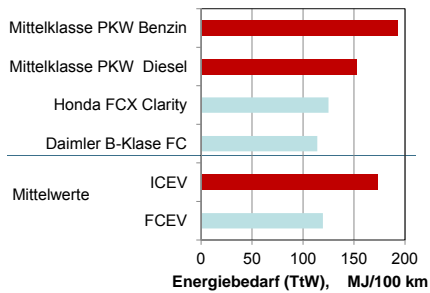


⇒ Im Winter wird mehr produziert als verbraucht. Im Sommer ist es umgekehrt.

Wasserstoffnutzungspfade

Rückverstromung: GuD nach Einspeisung ins Erdgasnetz, Wirkungsgrad \approx Erdgas-GuD

Straßenverkehr: Ersatz von weniger effizienten Antrieben + kohlenstoffreichen Treibstoffen



Energiebedarfsverhältnis ICEV / FCEV 1,44

CO₂-Emissionen der Energieträger / MJ
Erdölbasierte / Erdgas 1,25

CO₂-Vermeidung durch H₂-Nutzung
Verkehr / Rückverstromung 1,8

Verwendung im Verkehr ist Rückverstromung od. Erdgasnetz-Einspeisung vorzuziehen!

Efficient Production of Hydrogen via Electrolysis is Feasible

Electrolysis generally starts using liquid water,
hence the higher heating (HHV) value is relevant for calculating the efficiency

Hydrogen applications mostly do not use the condensing enthalpy,
hence for use the lower heating (LHV) value applies

In brief: the enthalpy of evaporation of water needs to be supplied (as power) and will be lost

Reference voltages:

HHV: $U_{H,HHV}^0 = 1.48V$

LHV: $U_{H,LHV}^0 = 1.25V$

	Cell Voltage (example)	Efficiency	Efficiency
HHV	1.8	1.48/1.8	82 %
LHV	1.8	1.25/1.8	69 %

DOE Target* Systems efficiency @ year	Assumed BoP efficiency	Resulting cell efficiency	Estimated Operating voltage
62 % @ 2006	95 %	65 %	1.9
69 % @ 2012	95 %	73 %	1.7
74 % @ 2017	95 %	78 %	1.6

* DOE target for hydrogen production from central wind electrolysis; Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: Planned Program Activities 2005-2015; 2007 Technical Plan – Hydrogen Production

How does Hydrogen Fit in?

Hydrogen adds a **storage capability**

Compensation of **fluctuations** through storage in times of excess energy supply

Reconversion to power in times of excess demand

Use of hydrogen in **transportation**

Hydrogen technology suits requirements of **decentralized and central structures**

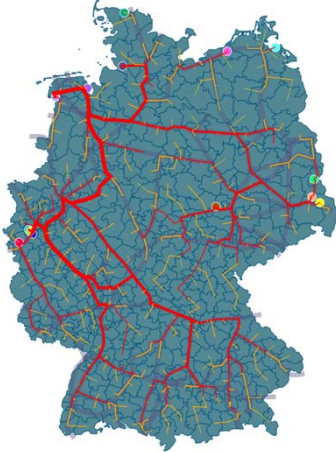
Central and decentralized production

Collection of decentralized hydrogen in pipeline systems

Hydrogen fueling stations keep semi-decentralized structure as it is now with fossil fuels



Ein Wasserstoffpipelinennetz



Wasserstoffmenge pro Jahr: 5,4 Mio. Tonnen *
Transmissionsnetz

- Länge: 12.000 km
- Kosten: 6 – 7,3 Mrd. €

Distributionsnetz

- Länge: 36.000 km
- Kosten: 10,3 – 11,8 Mrd. €

Zum Vergleich:

- EU-Stromnetzerweiterung bis 2020: 210 Mrd. € ¹⁾
- Bahnstrecke München-Nürnberg: 3,6 Mrd. € ²⁾

⇒ **Umfassende Wasserstoffinfrastruktur wird ca. 25 Mrd. € kosten**

* Marktanteile von Wasserstoff-Fahrzeugen 2050 nach GermanHy: 73 / 74 / 55% (Pkw / Bus / LNF)

Quellen: ¹⁾ Günther Öttinger; FAZ-Interview vom 02.02.2011.

²⁾ Weigelt, H. und Honerkamp, B.: Schnellbahnachse Nürnberg–Ingolstadt–München

Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

19

Speichervergleich von Wasserstoff und Erdgas



Benötigte Wasserstoffmenge pro Jahr: 5,4 Mio. Tonnen
100-Tage-Reserve: 1,5 Mio. Tonnen

- **16,5 Mrd. Nm³** d.h. 200 Mio. m³ (@ 100bar)

→ 50 durchschnittliche Salzkavernenspeicher erforderlich

Erdgaskavernenspeicher in Deutschland:

- 20,8 Mrd. Nm³ (Gesamtkapazität)

davon Salzkavernen:

- **8,1 Mrd. Nm³** (in Betrieb)
- 12,9 Mrd. Nm³ (in Planung/Bau)

- Verdoppelung der existierenden Salzkavernenspeicher
- Volumen von 70 Allianz-Arenen
- Kosten zwischen 7,2 und 12 Mrd. € (<3% des EFSF)

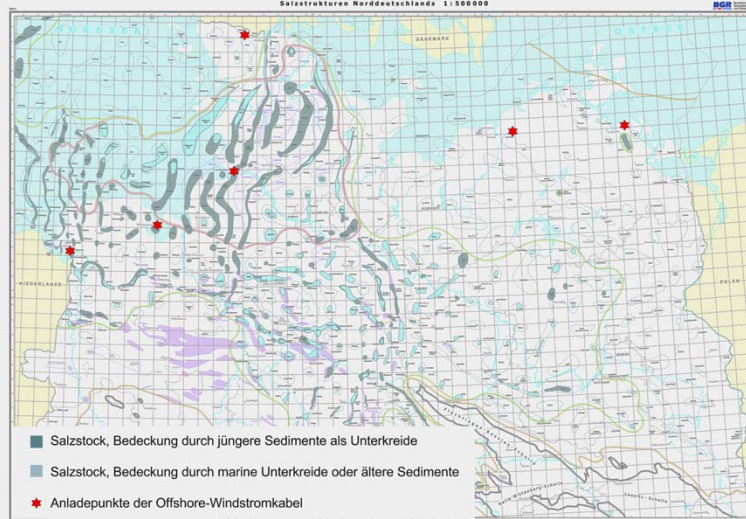
Quelle: Sedlacek, R: Unterlage-Gasspeicherung in Deutschland; Erdöl, Erdgas, Kohle 125, Nr.11, 2009, S.412-426.

⇒ **Anzahl der Speicher und Kosten sind überschaubar**

Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

20

Salzkavernen zur Speicherung von Wasserstoff



Quelle:
Bundesanstalt für
Geowissenschaften
und Rohstoffe

⇒ Salzkavernenspeicher liegen an den Offshore-Wind-Standorten

Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

21

Schlussfolgerungen

Vergleich der Jahrgänge von Netzlast und Stromangebot bei deutlichem Ausbau der Windkraft *On-shore* und *Off-shore* zeigt:

- Strombedarf könnte unter Verzicht auf Kernkraft, Kohle und Mineralöl und ohne Erhöhung der Erdgaseinfuhren gedeckt werden;
- Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung beträgt dann etwa 73%;
- Bedarf an Regelenergie könnte mittels freiwerdender Erdgasmengen aus dem Haushaltsverbrauch gedeckt werden;
- Überschüsse aus der Stromproduktion reichen zur Versorgung von 16 Mio. Brennstoffzellen-Pkw mit Wasserstoff.

Institut für Energie- und Klimaforschung – Brennstoffzellen (IEK-3)

22