

**Power-to-Gas  
Baustein oder Stolperstein der  
deutschen Energiewende?**

**Alfried Krupp Wissenschaftskolleg  
Greifswald, 18.11.14**

Hermann Pütter  
Gesellschaft Deutscher Chemiker

# Gliederung

- **Warum Power-to-Gas?**
- **Wasserstoffwirtschaft: Visionen und Kritik**
- **Power-to-Gas im Effizienzvergleich**
- **Wirkungsgrade genauer betrachtet**
- **Stromversorgung in Flautezeiten**
- **Kosten von Power-to-Gas**
- **Fazit**

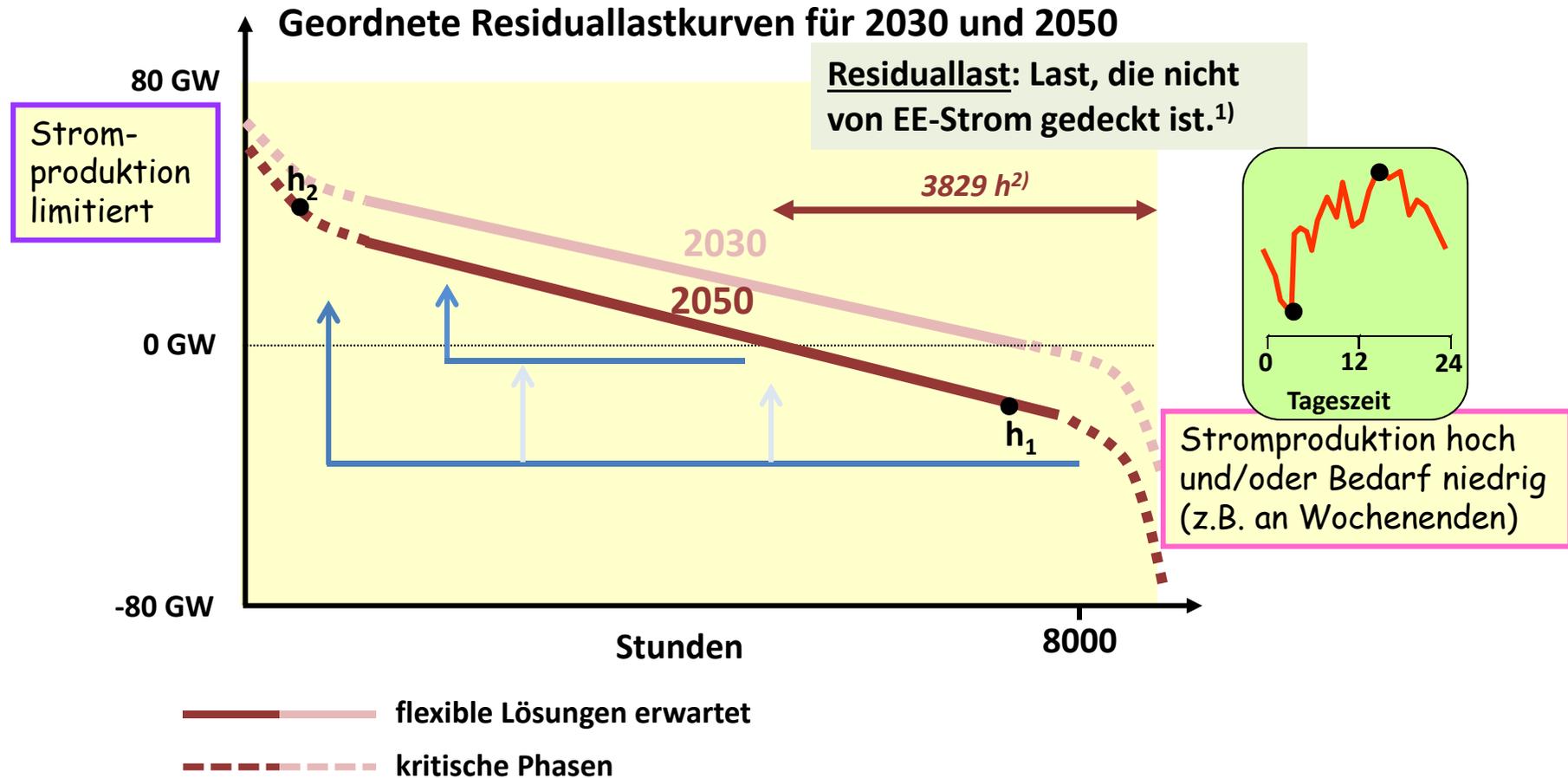
*Perspektivenwechsel: Our Carbon Cycle*

# Gliederung

- **Warum Power-to-Gas?**
- **Wasserstoffwirtschaft: Visionen und Kritik**
- **Power-to-Gas im Effizienzvergleich**
- **Wirkungsgrade genauer betrachtet**
- **Stromversorgung in Flautezeiten**
- **Kosten von Power-to-Gas**
- **Fazit**

*Perspektivenwechsel: Our Carbon Cycle*

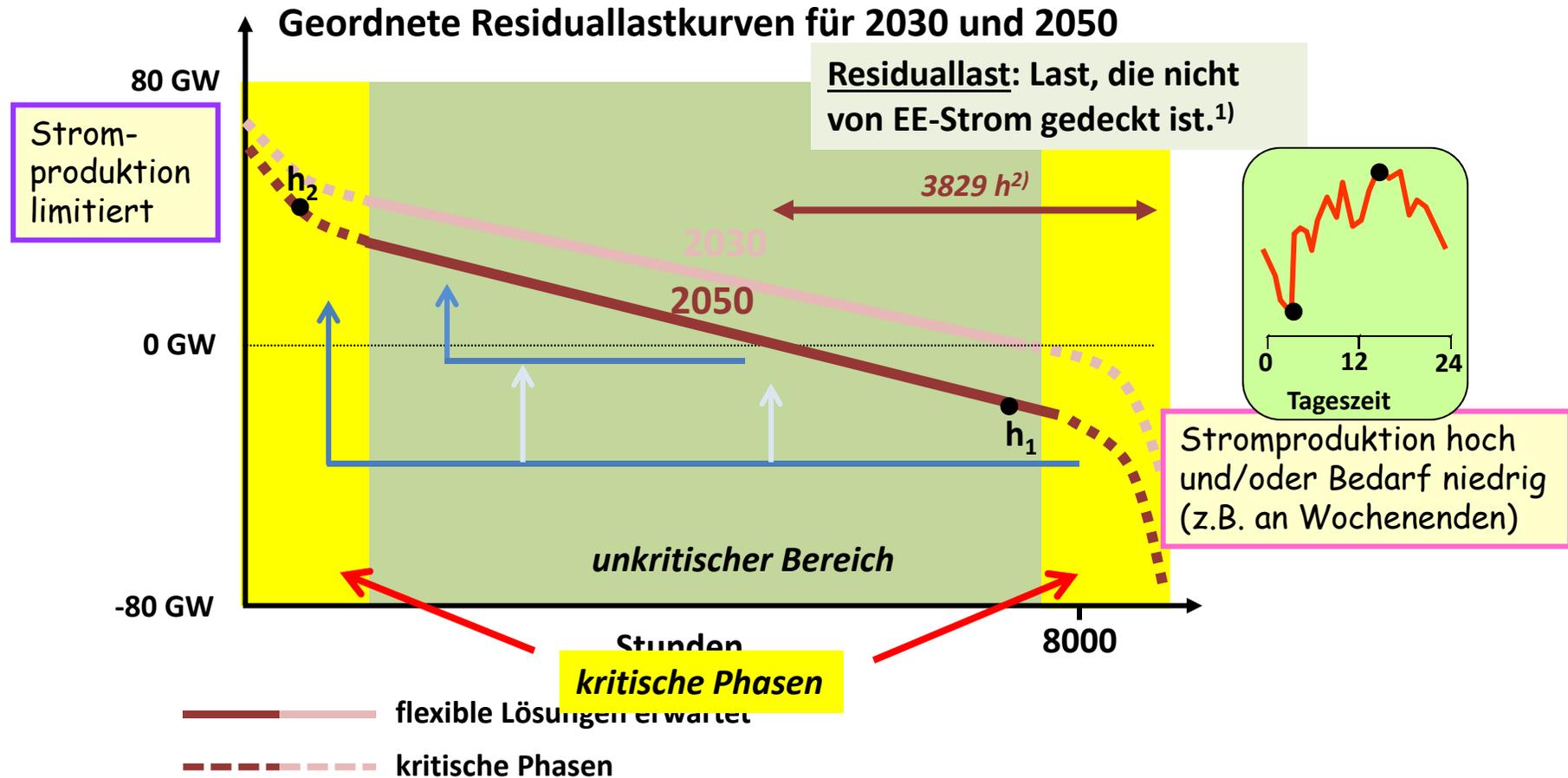
# Das Problem: Fluktuation der Stromerzeugung



1) dena: einschließlich BHKW-Strom

2) Siehe: dena, Endbericht: Integration der erneuerbaren Energien in den deutsch-europäischen Strommarkt (2012), S. 112

# Das Problem: Fluktuation der Stromerzeugung



1) dena: einschließlich BHKW-Strom CHP

2) Siehe: dena, Endbericht: Integration der erneuerbaren Energien in den deutsch-europäischen Strommarkt (2012), S. 112

# Power-to-Gas: Definition

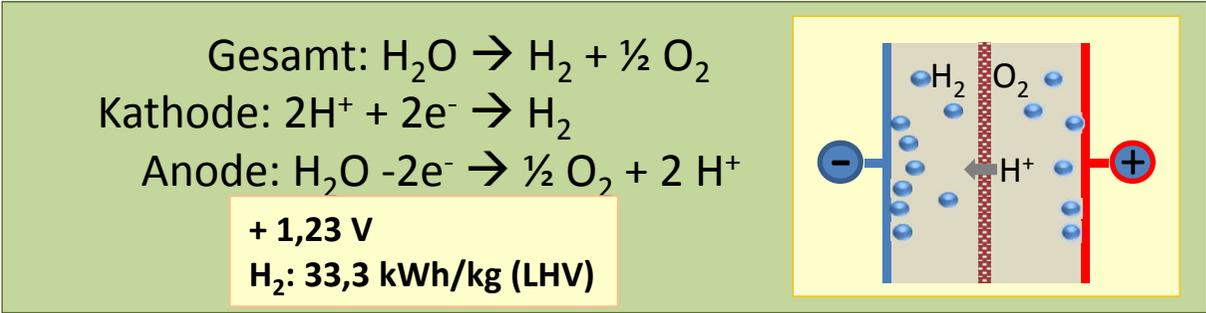
*Ziel: regenerativen Strom speicher- und damit jederzeit nutzbar machen*

Power-to-Gas bedeutet:  
Schritt 1: Erzeugung von Wasserstoff unter Nutzung von Überschussstrom in einer Wasserelektrolyse  
Schritt 2: Speicherung und Transport von Wasserstoff  
Schritt 3: Umsetzung von Wasserstoff mit Luft/Sauerstoff zur Erzeugung von Strom (z.B. in Brennstoffzellen)

**Residuallast stark negativ**

*Service für's Stromnetz*

**Residuallast stark positiv**



LHV: „Lower heating value (Heizwert), „Wird der erzeugte Wasserstoff in einer nachgelagerten Anwendung energetisch verwertet, wird nur der Heizwert benutzt“, NOW-Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“ 05.07.11; S. 8

# Power-to-Gas: Vorläufer

*Ziel: regenerativen Strom speicher- und damit jederzeit nutzbar machen*

Power-to-Gas bedeutet:

Schritt 1: Erzeugung von Wasserstoff unter Nutzung von Überschussstrom in einer Wasserelektrolyse

Schritt 2: Speicherung und Transport von Wasserstoff

Schritt 3: Umsetzung von Wasserstoff mit Luft/Sauerstoff zur Erzeugung von Strom (z.B. in Brennstoffzellen)

**Residuallast  
stark negativ**

*Service für's  
Stromnetz*

**Residuallast  
stark positiv**

## **Vorläufer: Hydrogen Economy**

**Pro**: Jeremy Rifkin: Die H<sub>2</sub>-Revolution – Mit neuer Energie für eine gerechte Weltwirtschaft , Campus-Verlag, Frankfurt 2002

**Kritisch**: Joseph J. Romm, Der Wasserstoff-Boom, Wunsch und Wirklichkeit beim Wettlauf um den Klimaschutz, Wiley-VCH, Weinheim 2006

**Contra**: Ulf Bosselt et al., The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? Version vom 15.04.2003, Streitschrift verteilt auf dem 2003 Fuel Cell Seminar, Luzern, 3. -7.11.2003

# Power-to-Gas: Wohin mit dem Wasserstoff?

*Ziel: regenerativen Strom speicher- und damit jederzeit nutzbar machen*

Power-to-Gas bedeutet:

Schritt 1: Erzeugung von Wasserstoff unter Nutzung von Überschussstrom in einer Wasserelektrolyse

Schritt 2: Speicherung und Transport von Wasserstoff **im Erdgasnetz**

Schritt 3: Umsetzung von Wasserstoff mit Luft/Sauerstoff zur Erzeugung von Strom (z.B. in Brennstoffzellen)

**z.B. in GuD-Kraftwerken**

## **Vorläufer: Hydrogen Economy**

**Pro:** Jeremy Rifkin: Die H<sub>2</sub>-Revolution – Mit neuer Energie für eine gerechte Weltwirtschaft, Campus-Verlag, Frankfurt 2002

**Kritisch:** Joseph J. Romm, Der Wasserstoff-Boom, Wunsch und Wirklichkeit beim Wettlauf um den Klimaschutz, Wiley-VCH, Weinheim 2006

**Contra:** Ulf Bosselt et al., The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? Version vom 15.04.2003, Streitschrift verteilt auf dem 2003 Fuel Cell Seminar, Luzern, 3. -7.11.2003

# Power-to-Gas: Methan

*Ziel: regenerativen Strom speicher- und damit jederzeit nutzbar machen*

Power-to-Gas bedeutet:

Schritt 1: Erzeugung von Wasserstoff unter Nutzung von Überschussstrom in einer Wasserelektrolyse

Schritt 2: Umsetzung von  $H_2$  mit  $CO_2$  zu  $CH_4$

Schritt 3: Speicherung und Transport von ~~Was~~  $CH_4$  ~~ff~~ im Erdgasnetz

Schritt 4: Umsetzung von ~~Wa~~  $CH_4$  ~~eff~~ mit Luft/Sauerstoff zur Erzeugung von Strom (z.B. in Brennstoffzellen)

z.B. in GuD-Kraftwerken

## Vorläufer: Hydrogen Economy

Pro: Jeremy Rifkin: Die H<sub>2</sub>-Revolution – Mit neuer Energie für eine gerechte Weltwirtschaft, Campus-Verlag, Frankfurt 2002

Kritisch: Joseph J. Romm, Der Wasserstoff-Boom, Wunsch und Wirklichkeit beim Wettlauf um den Klimaschutz, Wiley-VCH, Weinheim 2006

Contra: Ulf Bosselt et al., The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? Version vom 15.04.2003, Streitschrift verteilt auf dem 2003 Fuel Cell Seminar, Luzern, 3. -7.11.2003

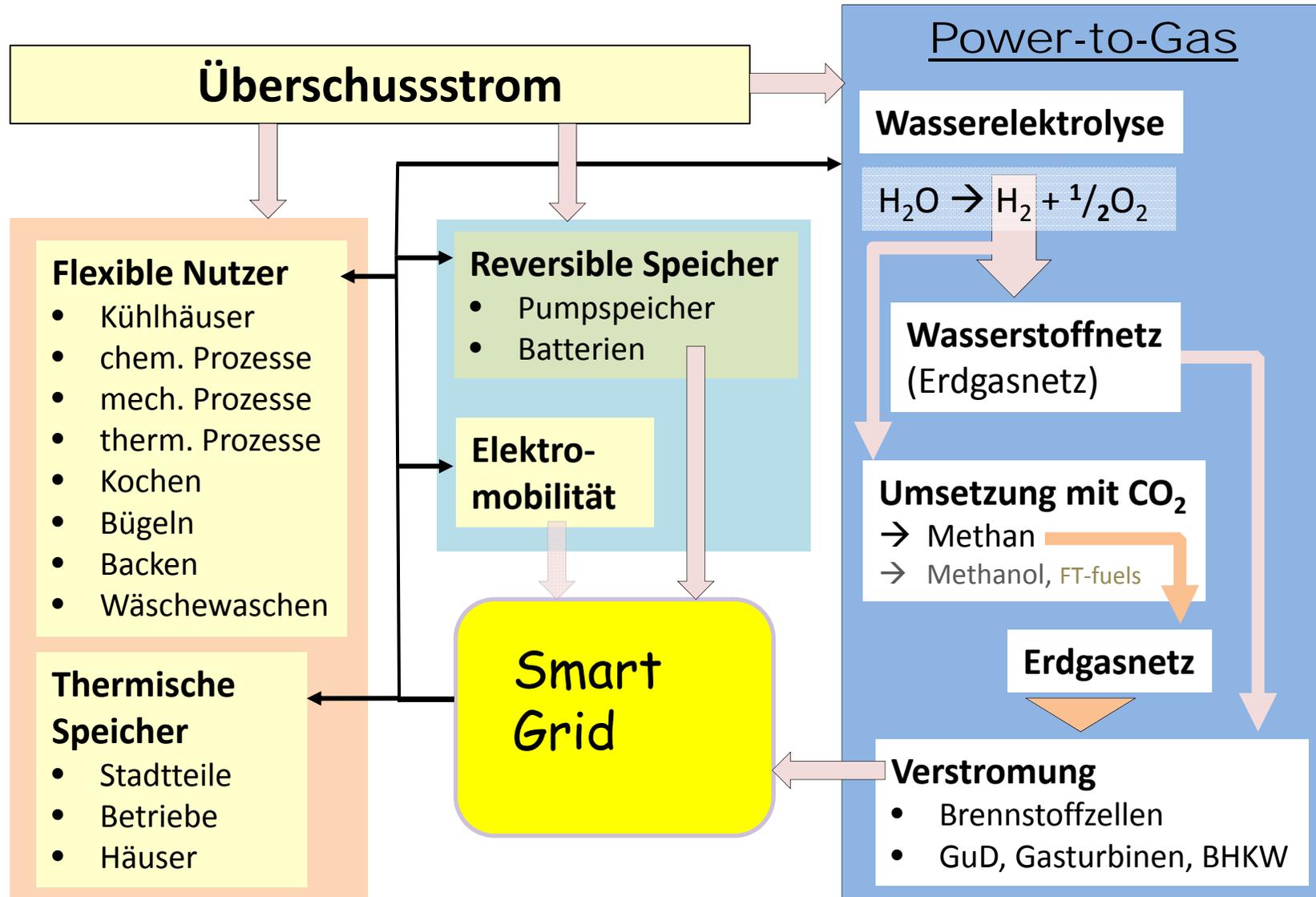
# Power-to-Gas: ~~Gas~~ X

Ziel: regenerativen Strom speicher- und damit jederzeit nutzbar machen

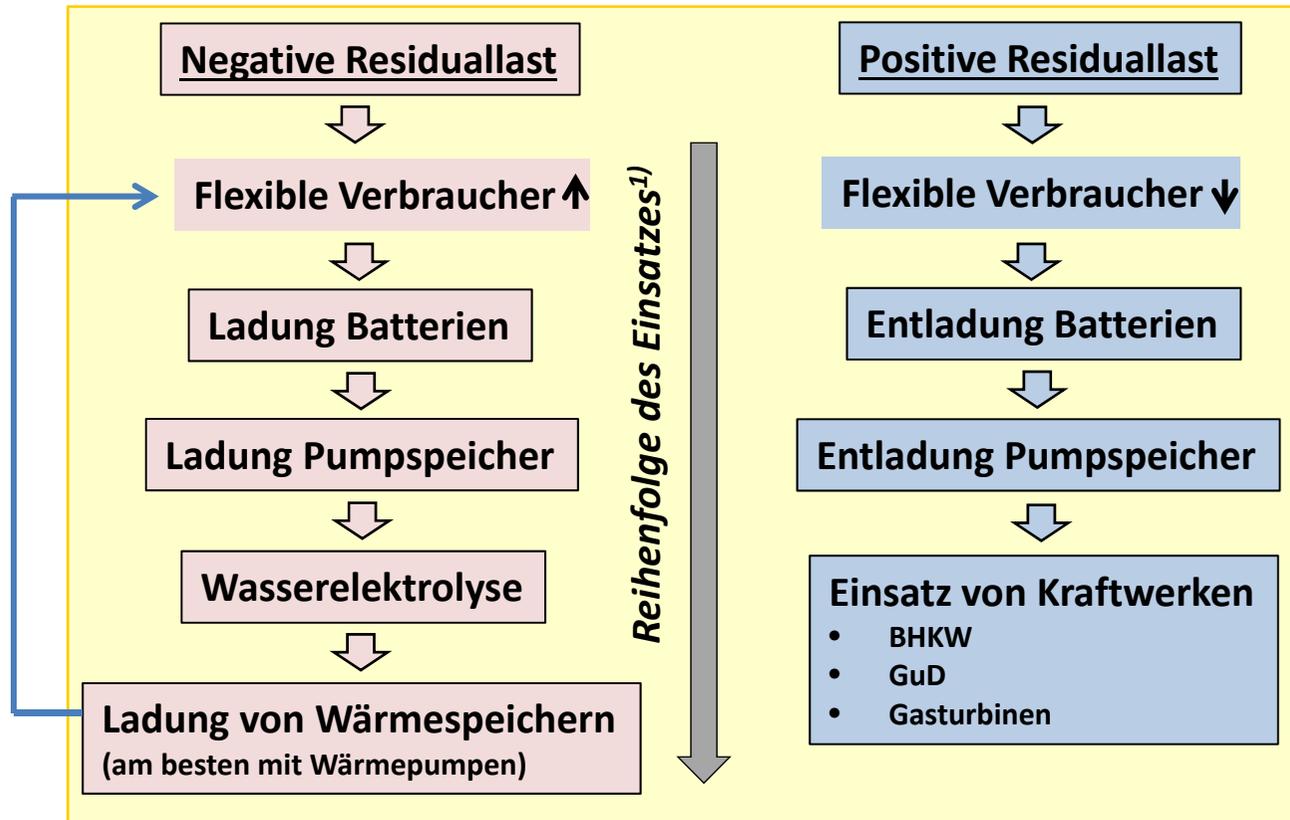
Power-to-Gas bedeutet:  
Schritt 1: Erzeugung von Wasserstoff unter Nutzung von  
Überschussstrom in einer Wasserelektrolyse  
Schritt 2: Umsetzung von H<sub>2</sub> mit CO<sub>2</sub> zu CH<sub>4</sub>  
Speicherung und Transport von ~~Was~~ CH<sub>4</sub> # im Erdgasnetz  
ft/Sauerstoff

- Schritt 2:  
oder
- Verbrennung von Wasserstoff zur Wärmeerzeugung
  - Erzeugung von Methanol
  - Erzeugung von Kraftstoffen....

# Power-to-Gas: Die Rolle im Smart Grid

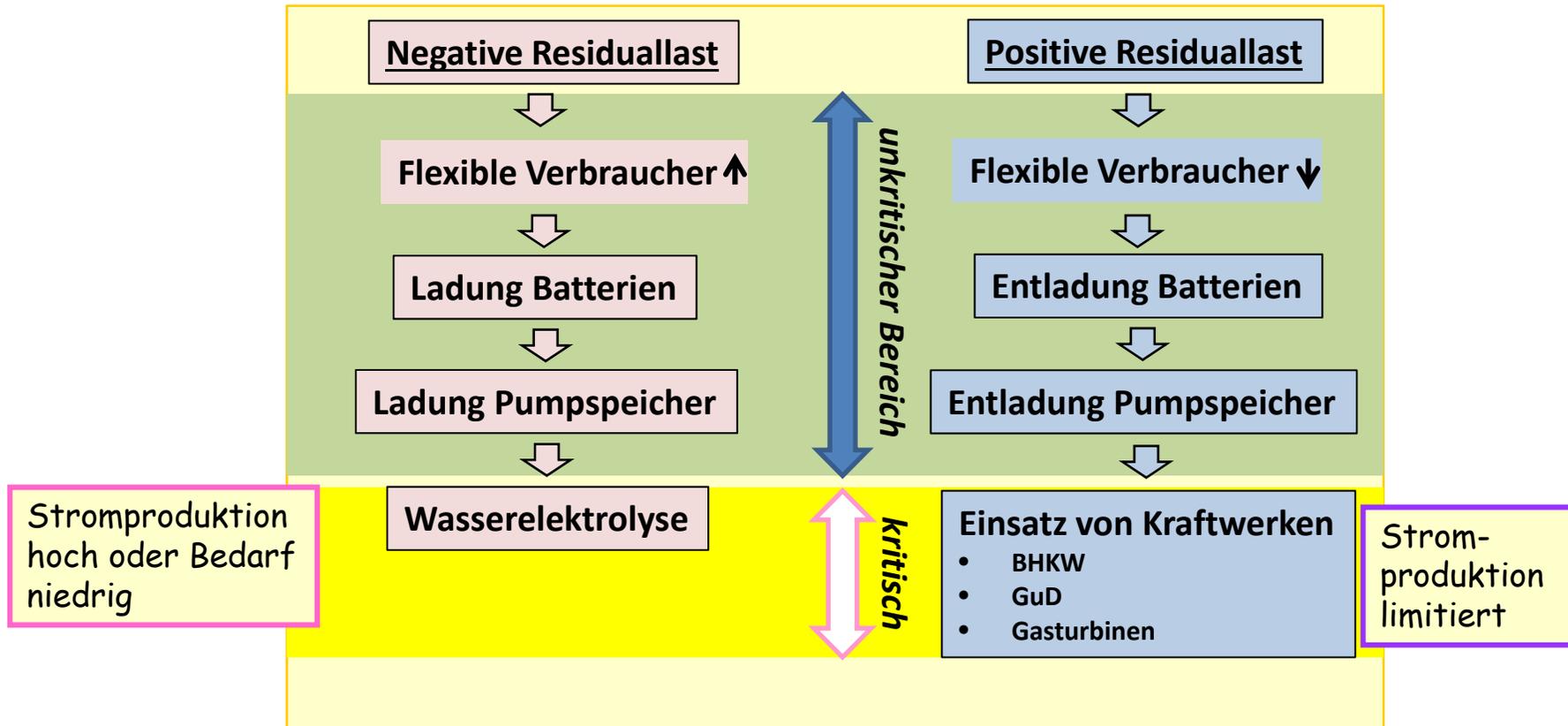


# Hierarchie der Speichermöglichkeiten



1) nach: H.-M. Henning, A. Palzer, Fraunhofer ISE, Energiesystem Deutschland 2050, Nov. 2013, S. 20

# Hierarchie der Speichermöglichkeiten



1) nach: H.-M. Henning, A. Palzer, Fraunhofer ISE, Energiesystem Deutschland 2050, Nov. 2013, S. 20

# Idee und Wirklichkeit

- Warum Power-to-Gas?
- **Wasserstoffwirtschaft: Visionen und Kritik**
- Power-to-Gas im Effizienzvergleich
- Wirkungsgrade genauer betrachtet
- Stromversorgung in Flautezeiten
- Kosten von Power-to-Gas
- Fazit

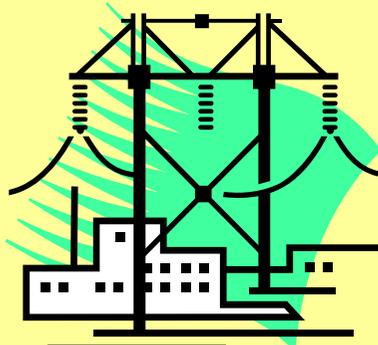
# Die Vision einer Wasserstoffwirtschaft



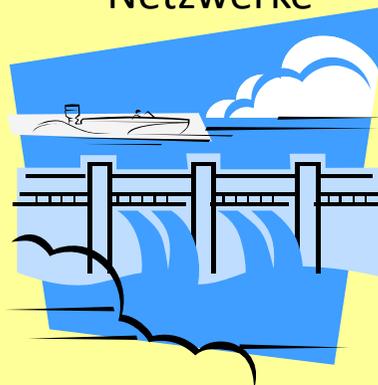
Strom in Bürgerhand



Wüstenstrom



dezentrale  
Netzwerke



Stromspeicher  
insbesondere  
**Elektrolyse für  
Wasserstoff**

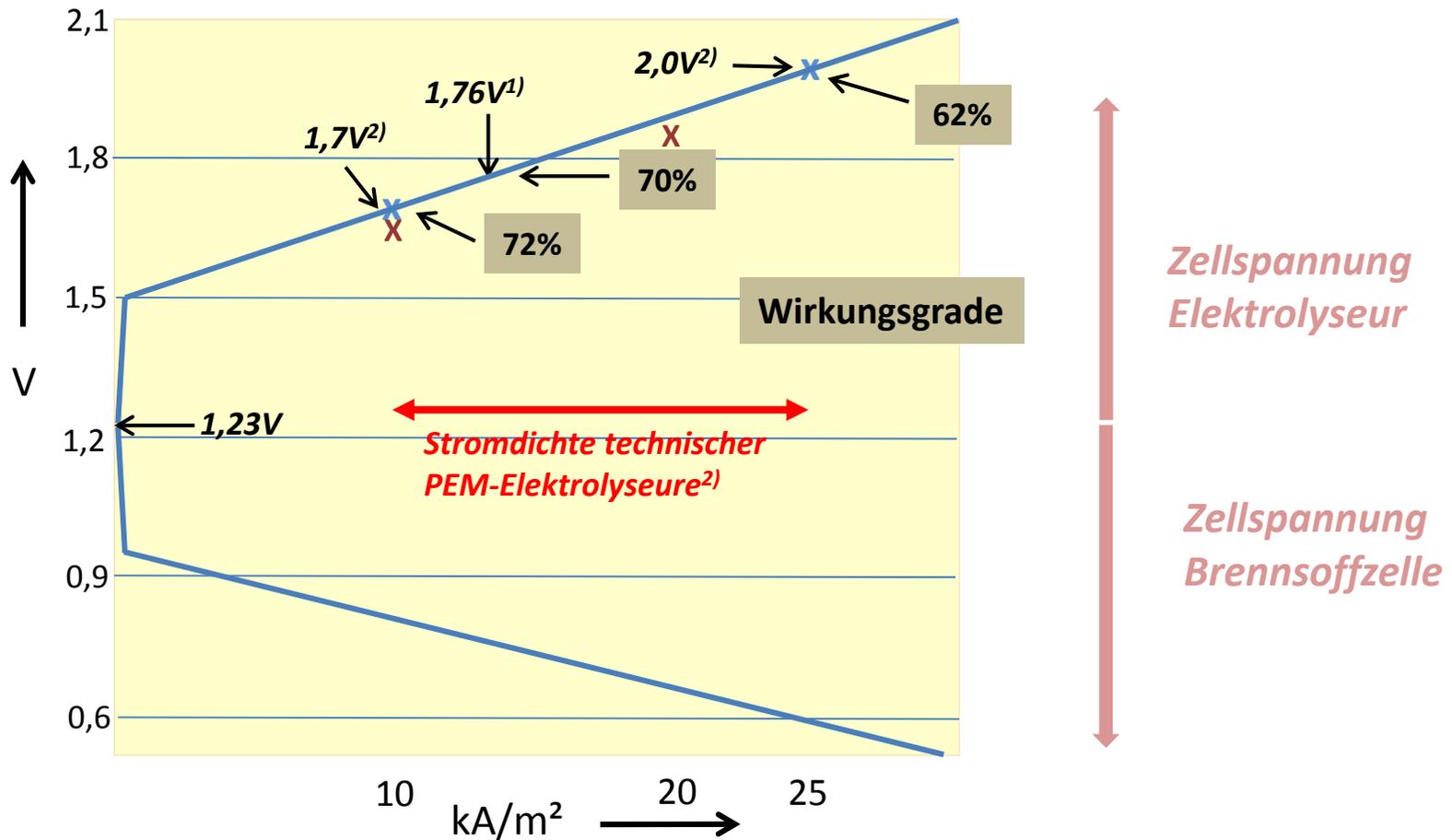


**Green Economy**

- Brennstoffzellen**
- Kraftwerke dezentral**
- ...statt großer fossiler Kraftwerke



# Stromdichte und Zellspannung



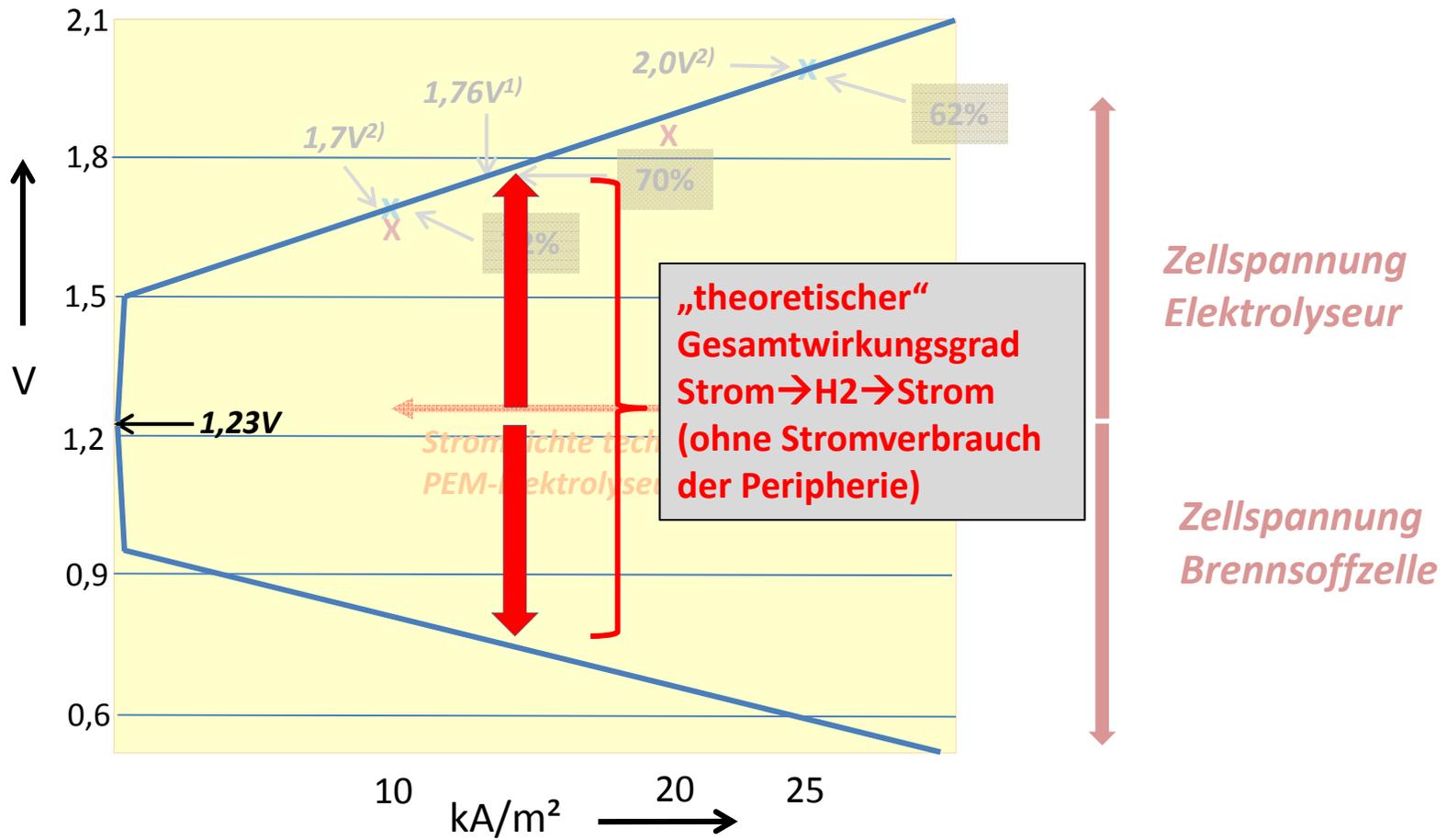
1) Schema nach: The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? S. 11 Fig. 3; Zellspannung: S. 12 Fig 4,,

2) efzn-Studie Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.2013, S.60

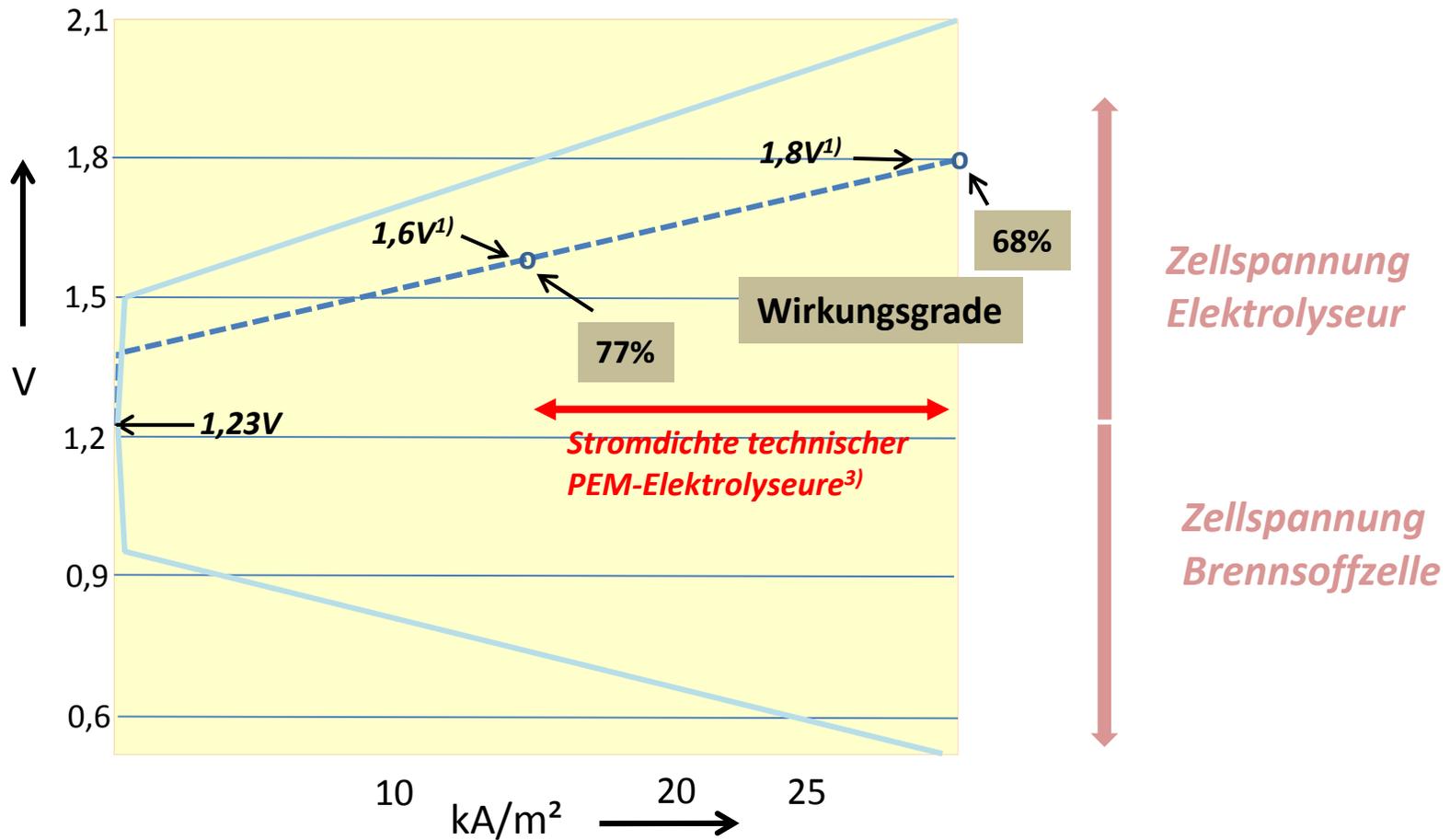
3) T. Smolinka, J. Garcke, NOW-Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, Folie 18, x: mittelfristiges Potenzial der Technik ; [http://www.now-gmbh.de/uploads/media/4\\_Smolinka\\_FHG\\_Ergebnis\\_Studie\\_Wasserelektrolyse\\_Teil\\_2.pdf](http://www.now-gmbh.de/uploads/media/4_Smolinka_FHG_Ergebnis_Studie_Wasserelektrolyse_Teil_2.pdf)

4) DOE 2011 Hydrogen and Fuel Cell Programme, FY 2011 Annual Progress Report, p. 79-82 M.Hamdan, Giner Electrochemical Systems, May 2011, PEM Electrolyser, incorporating an Advanced Low Cost Membrane

# Gesamtwirkungsgrad – „theoretisch“



# Optimierungspotenzial der Elektrolyse

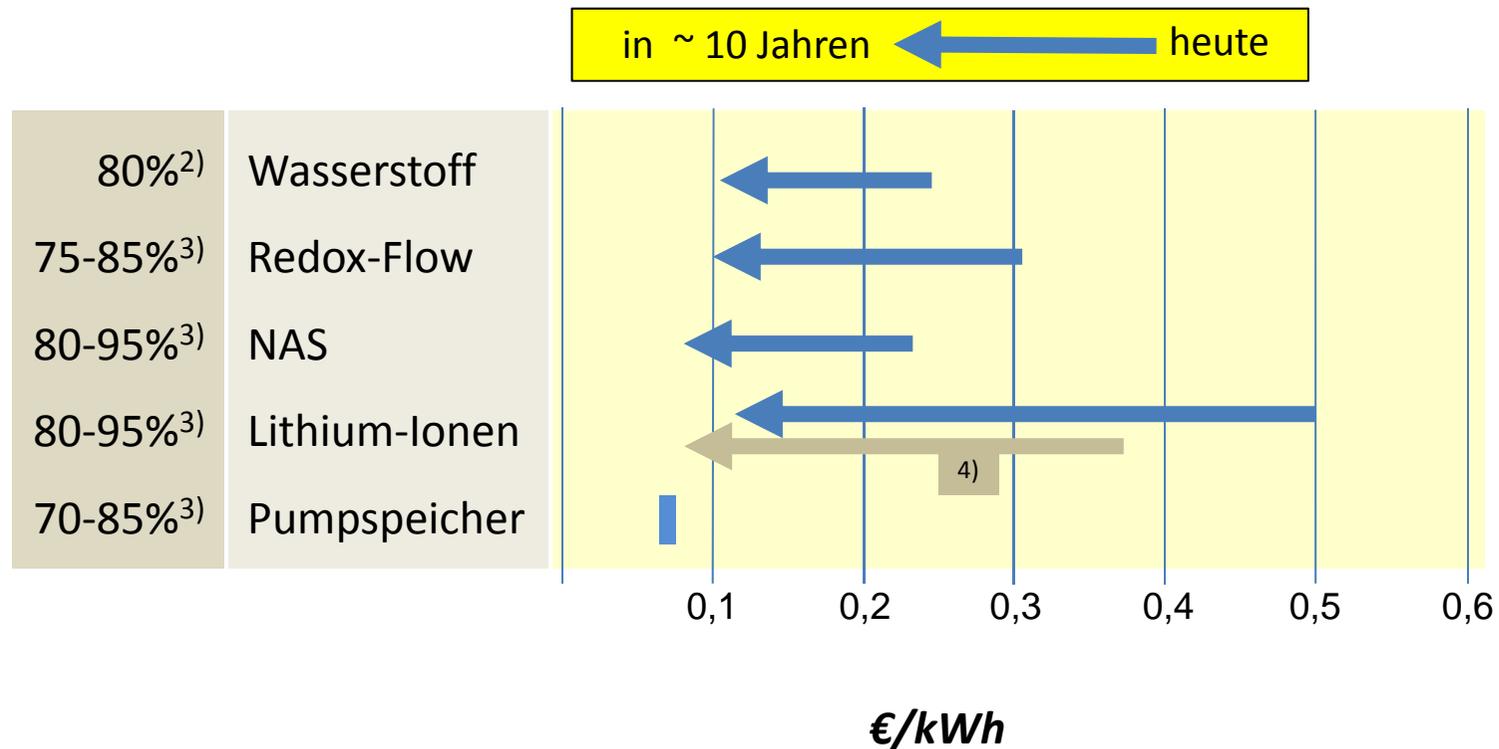


1) T. Smolinka, J. Garche, NOW-Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, Folie 18, o: langfristiges Potenzial; [http://www.now-gmbh.de/uploads/media/4\\_Smolinka\\_FHG\\_Ergebnis\\_Studie\\_Wasserelektrolyse\\_Teil\\_2.pdf](http://www.now-gmbh.de/uploads/media/4_Smolinka_FHG_Ergebnis_Studie_Wasserelektrolyse_Teil_2.pdf)

# Wunsch und Realität

- Warum Power-to-Gas?
- Wasserstoffwirtschaft: Visionen und Kritik
- **Power-to-Gas im Effizienzvergleich**
- Wirkungsgrade genauer betrachtet
- Stromversorgung in Flautezeiten
- Kosten von Power-to-Gas
- Fazit

# Wirkungsgrade und Kosten einiger Stromspeicher<sup>1)</sup>



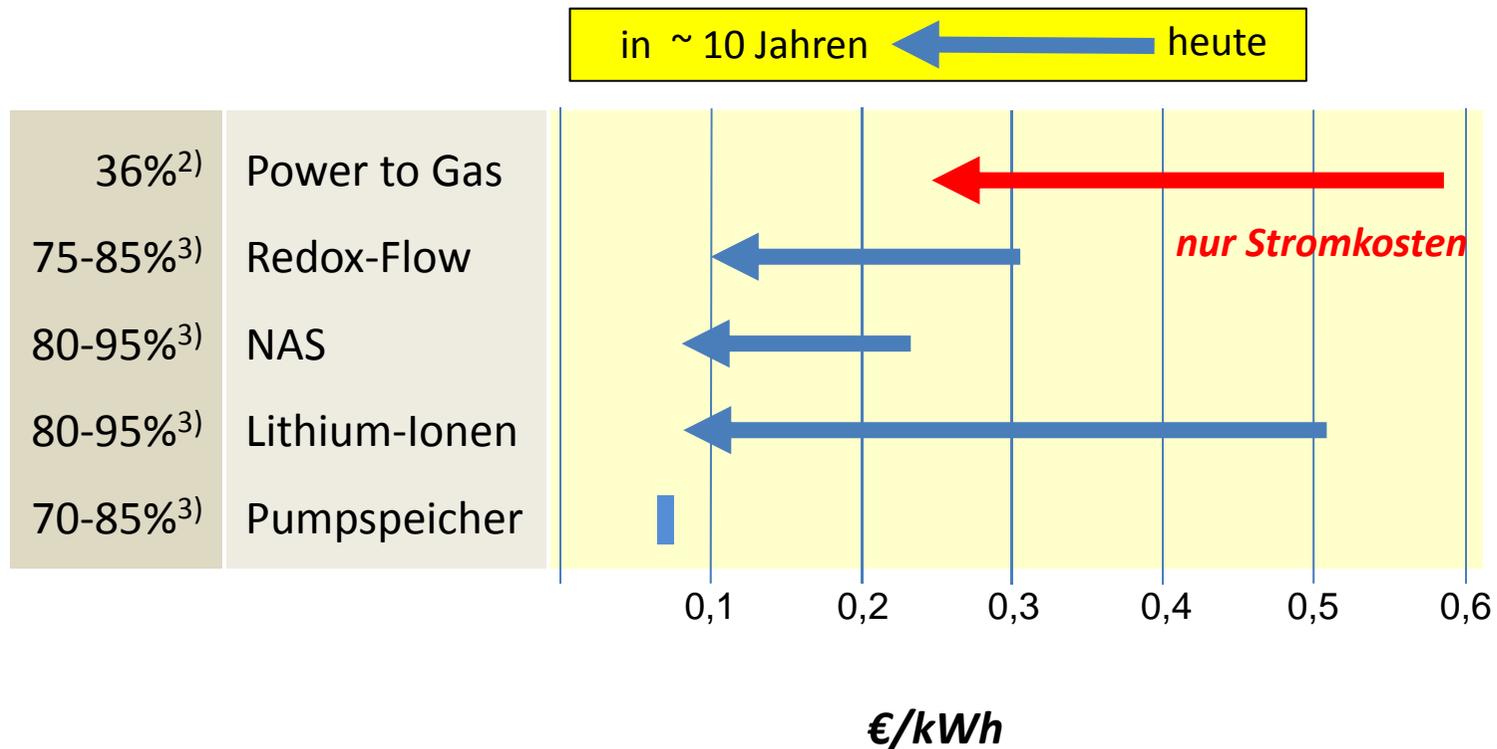
1) Daten nach Energieforschungszentrum Niedersachsen, Studie: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.13, S. 204, Vollkosten für Load-Levelling-Aufgaben im Hochspannungsnetz

2) ibid. S. 100 „im optimalen Betriebspunkt“

3) Ibid. S. 99

4) Lithium-Ionen-Batterie im Niederspannungsnetz; S. 205

# Wirkungsgrade und Kosten einiger Stromspeicher<sup>1)</sup>

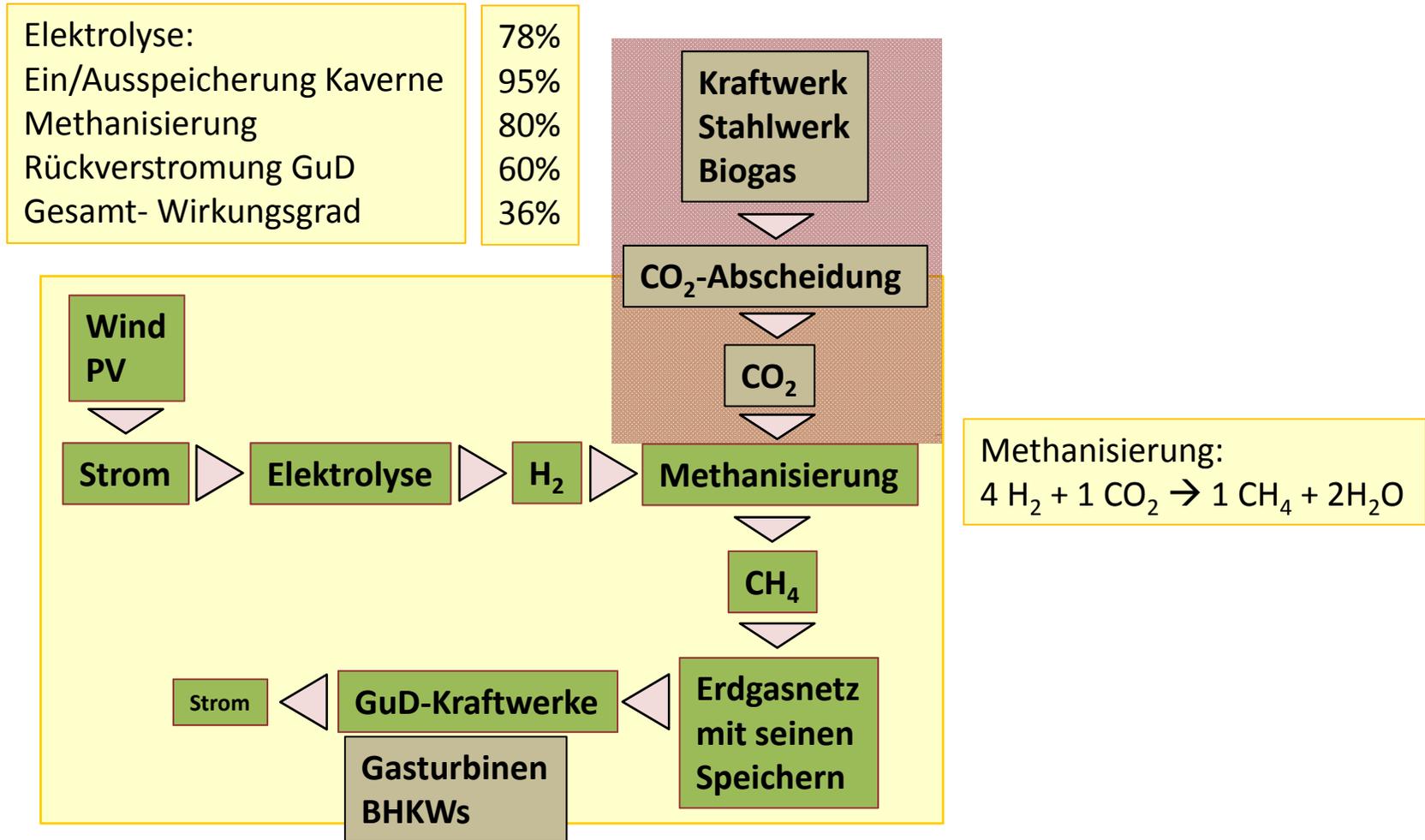


1) Daten nach Energieforschungszentrum Niedersachsen, Studie: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.13, S. 204, 205 Vollkosten für Load-Levelling-Aufgaben

2) **ibid. S. 75, Gesamtwirkungsgrad Power-to-Gas**

3) **ibid. S. 100**

# Power-to-Gas: Die Verfahrenskette



1) Wirkungsgrade: nach Energieforschungszentrum Niedersachsen, Studie: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.13, S. 204, S. 75 Tabelle 3-3

# Diskussion der Daten: Methanisierung

Elektrolyse:	78%
Ein/Ausspeicherung Kaverne	95%
<b>Methanisierung</b>	<b>80%</b>
Rückverstromung GuD	60%
Gesamt- Wirkungsgrad	36%

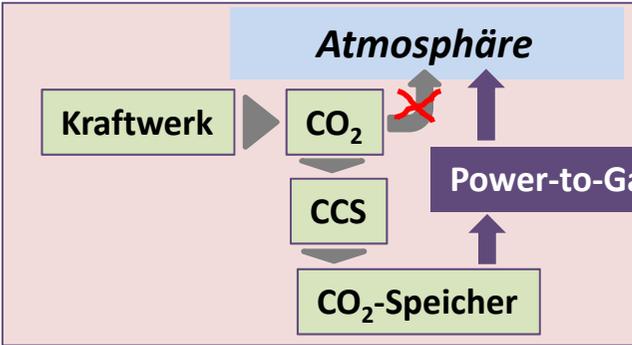
*Der Kosten- und Energieeinsatz wird dem Kraftwerk zugerechnet, das damit „klimaneutral“ wird.*

**Aber...**

Methanisierung:	
$4 \text{ H}_2 + 1 \text{ CO}_2 \rightarrow 1 \text{ CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$	
Einsatz:	
8 kg H <sub>2</sub> :	267 kWh
↓	↓
16 kg CH <sub>4</sub> :	222 kWh
Ertrag:	83%

44 kg CO<sub>2</sub>  
 Herkunft z.B.:  
 Kohlekraftwerk: CCS  
 Stahlwerk: CCS  
 Biogasanlage: Bioerdgas  
 CCS: Carbon Capture & Storage

Energieeinsatz für  
 - Abscheidung  
 - Reinigung  
 - Transport  
 „vergessen“?



*...dann ist dieser Beitrag von Power-to-Gas zum Klimaschutz gleich Null!*

1) Wirkungsgrade: nach Energieforschungszentrum Niedersachsen, Studie: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.13, S. 204, S. 75 Tabelle 3-3



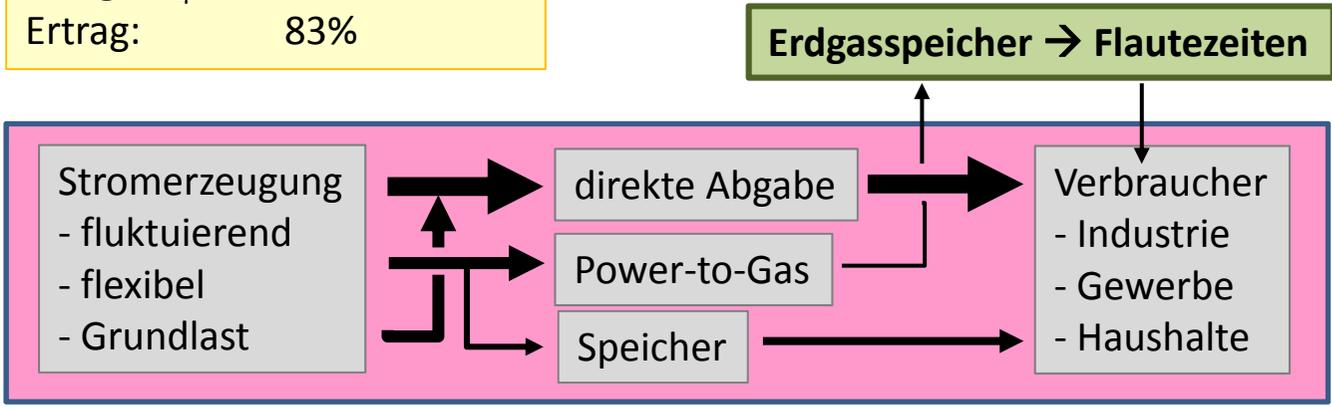
# Das Eichhörnchen-Argument

Elektrolyse:	78%	<p>Die Wirkungsgrade mögen ja niedriger sein, aber wir nutzen doch billigen Überschussstrom, um in Flautezeiten nicht ohne Strom im Dunkeln zu sitzen.</p>
Ein/Ausspeicherung Kaverne	95%	
Methanisierung	80%	
Rückverstromung GuD	60%	
Gesamt- Wirkungsgrad	36%	

Methanisierung:  
 $4 \text{ H}_2 + 1 \text{ CO}_2 \rightarrow 1 \text{ CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$   
 Einsatz:  
 8 kg  $\text{H}_2$  : 267 kWh  
 ↓  
 16 kg  $\text{CH}_4$  : 222 kWh  
 Ertrag: 83%

Rückverstromung:  
 $\text{CH}_4 \rightarrow \text{Erdgasnetz} \rightarrow \text{GuD (60\%)} \rightarrow \text{BHKW (\sim 30\%)} \rightarrow \text{Gasturbinen (33\%)}$

**Gesamtwirkungsgrad???**

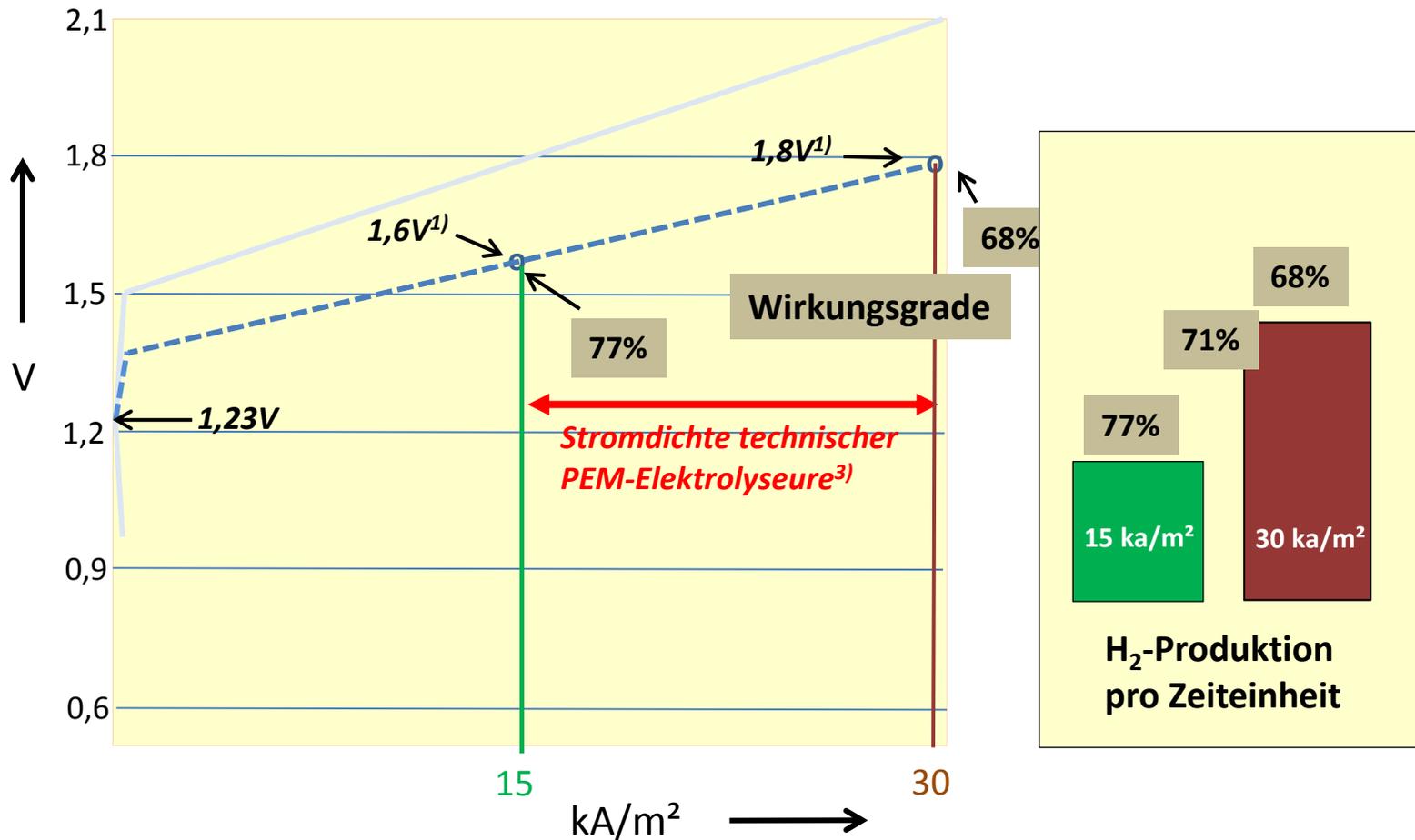


1) Wirkungsgrade: nach Energieforschungszentrum Niedersachsen, Studie: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.13, S. 204, S. 75 Tabelle 3-3

# Aufbau und Funktion einer Wasserelektrolyse

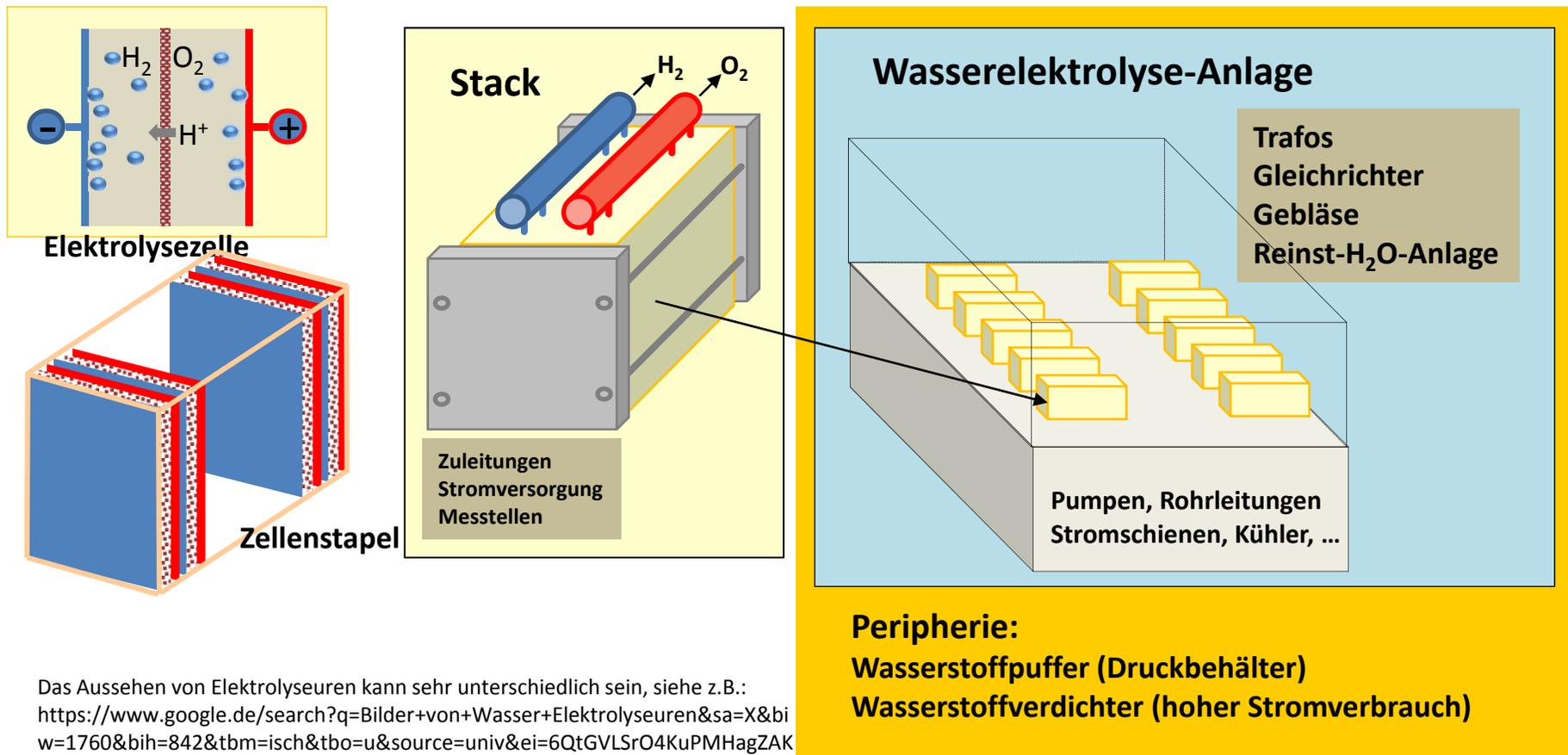
- Warum Power-to-Gas?
- Wasserstoffwirtschaft: Visionen und Kritik
- Power-to-Gas im Effizienzvergleich
- **Wirkungsgrade genauer betrachtet**
- Stromversorgung in Flautezeiten
- Kosten von Power-to-Gas
- Fazit

# H<sub>2</sub>-Produktion bei fluktuierender Fahrweise



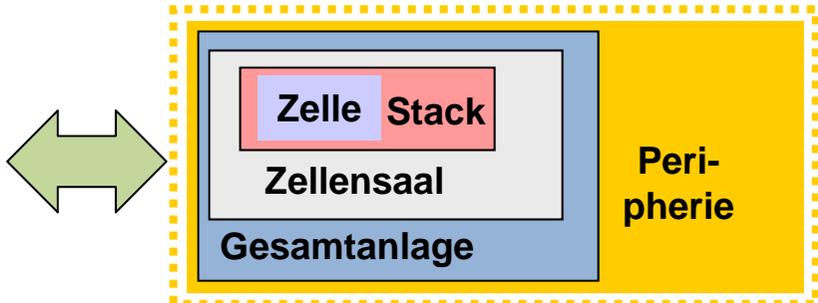
1) T. Smolinka, J. Garche, NOW-Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, Folie 18, o: langfristiges Potenzial ; [http://www.now-gmbh.de/uploads/media/4\\_Smolinka\\_FHG\\_Ergebnis\\_Studie\\_Wasserelektrolyse\\_Teil\\_2.pdf](http://www.now-gmbh.de/uploads/media/4_Smolinka_FHG_Ergebnis_Studie_Wasserelektrolyse_Teil_2.pdf)

# Aufbau einer Wasserelektrolyse-Anlage



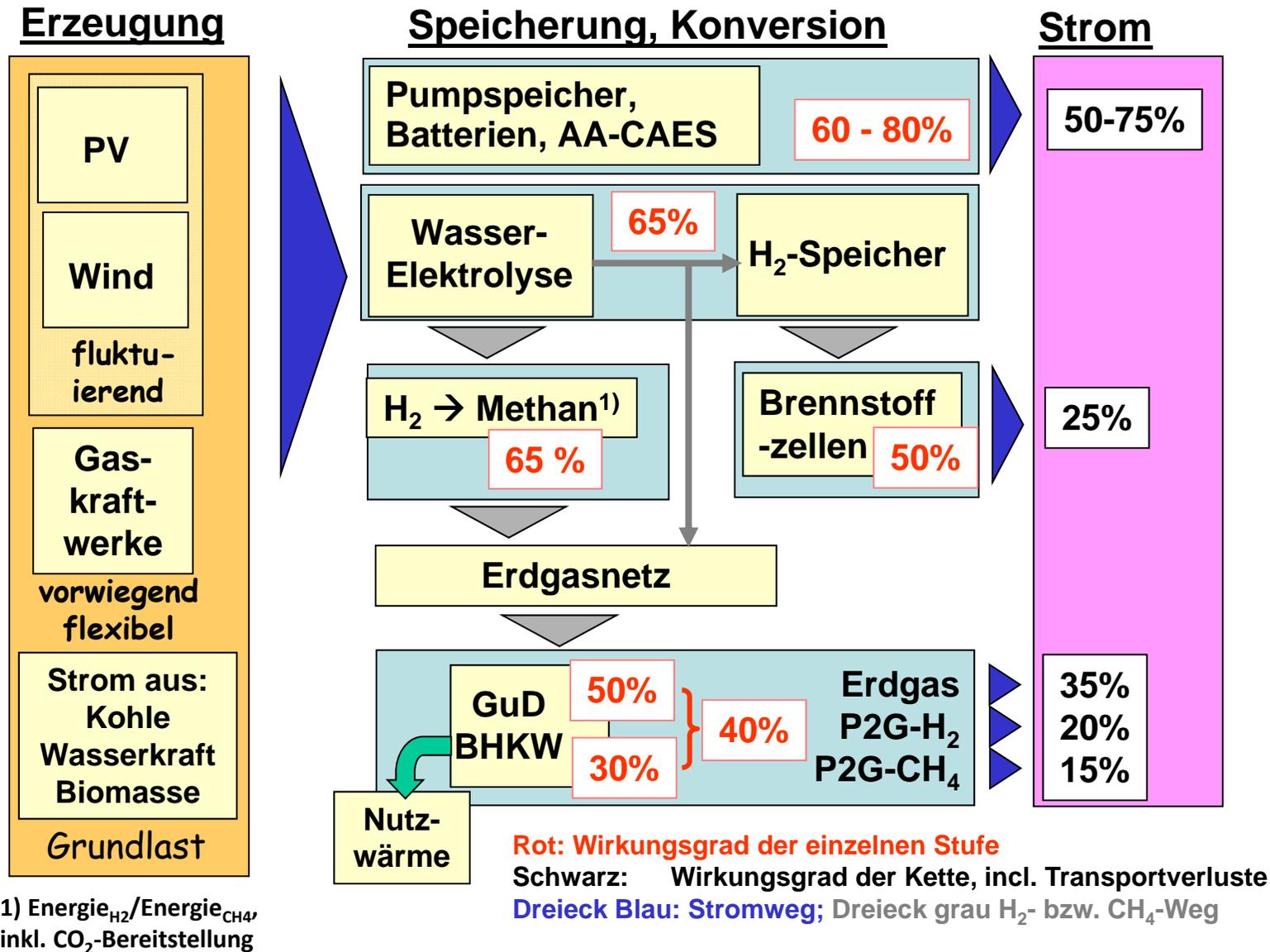
Das Aussehen von Elektrolyseuren kann sehr unterschiedlich sein, siehe z.B.: <https://www.google.de/search?q=Bilder+von+Wasser+Elektrolyseuren&sa=X&biw=1760&bih=842&tbm=isch&tbo=u&source=univ&ei=6QtGVLsR04KuPMHagZAK&ved=0CEYQ7AK>

**Zur Bewertung des Wirkungsgrades der Wasserstoffherzeugung müssen die Energieeinsätze des Gesamtsystems betrachtet werden.**





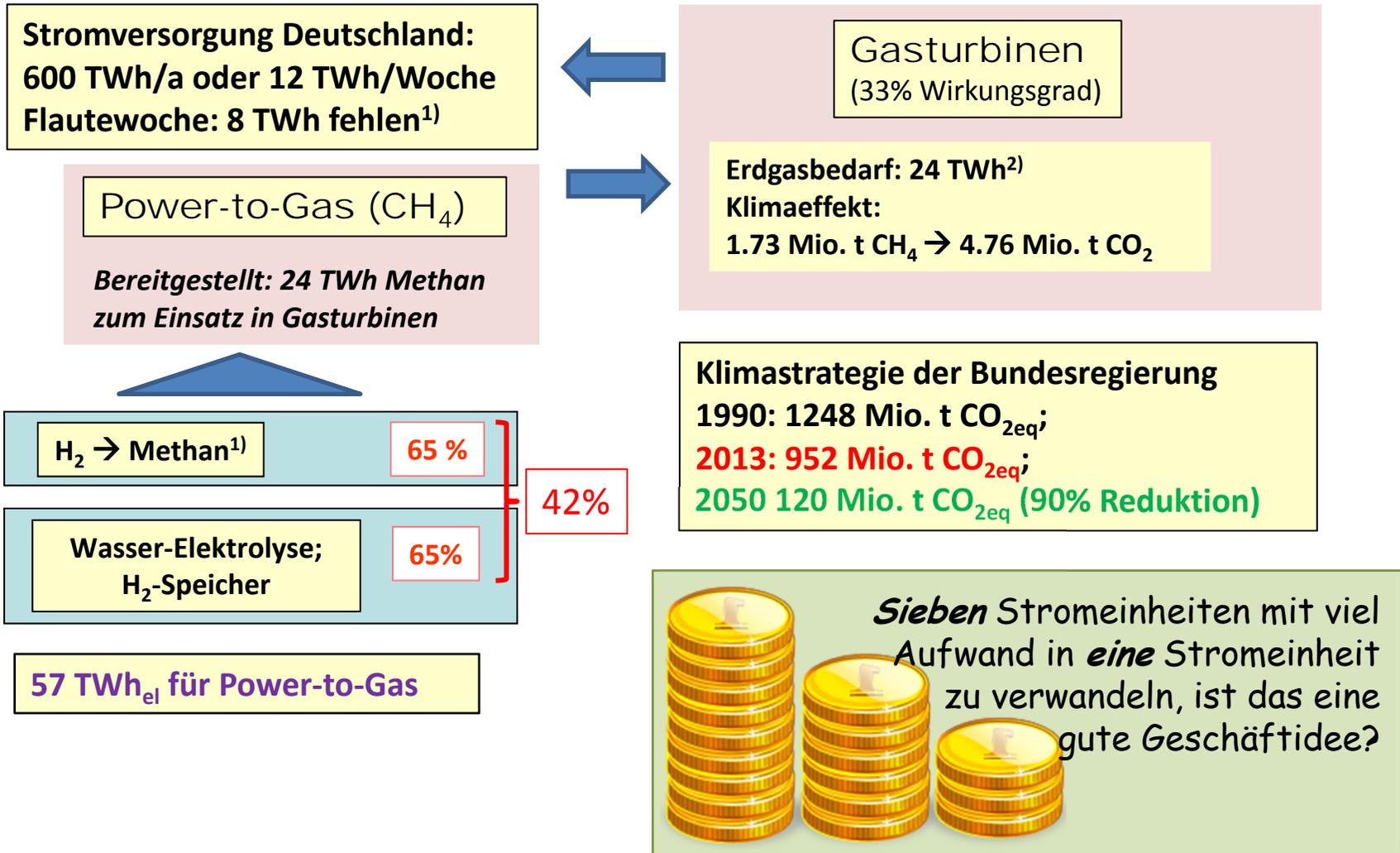
# Strom gespeichert: Die Wirkungsgradkette



# Treibhausgase möglichst niedrig halten

- Warum Power-to-Gas?
- Wasserstoffwirtschaft: Visionen und Kritik
- Power-to-Gas im Effizienzvergleich
- Wirkungsgrade genauer betrachtet
- **Stromversorgung in Flautezeiten**
- Kosten von Power-to-Gas
- Fazit

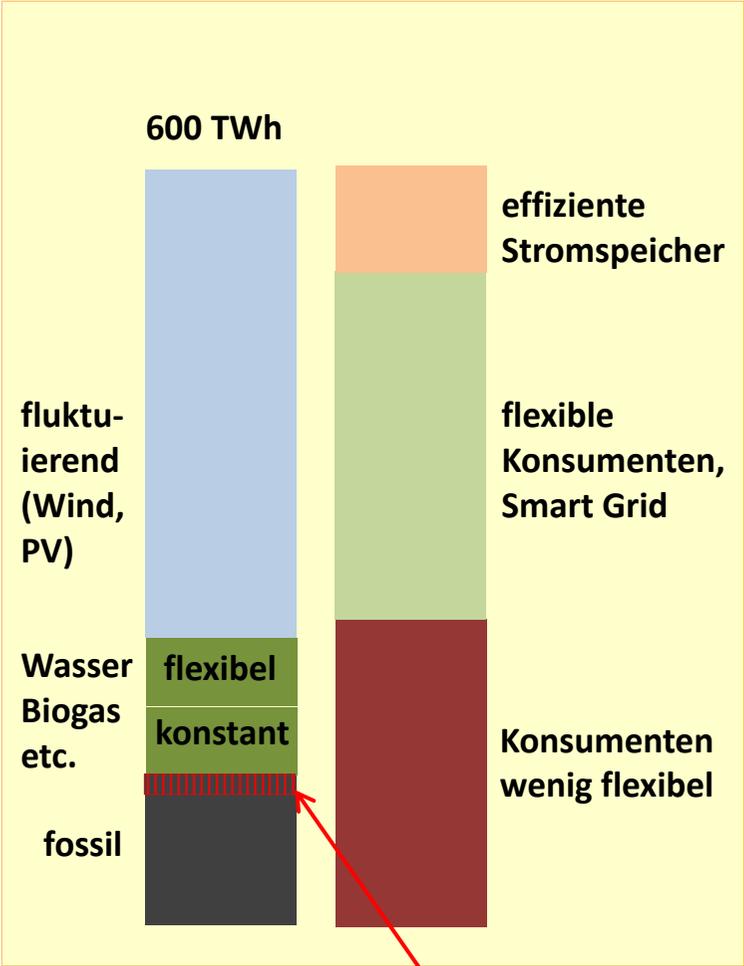
# 2050: Kein Wind in einer nebligen Novemberwoche: Was tun?



1) dena news No. 3, 2012: secured capacity from renewables 24% in 2050

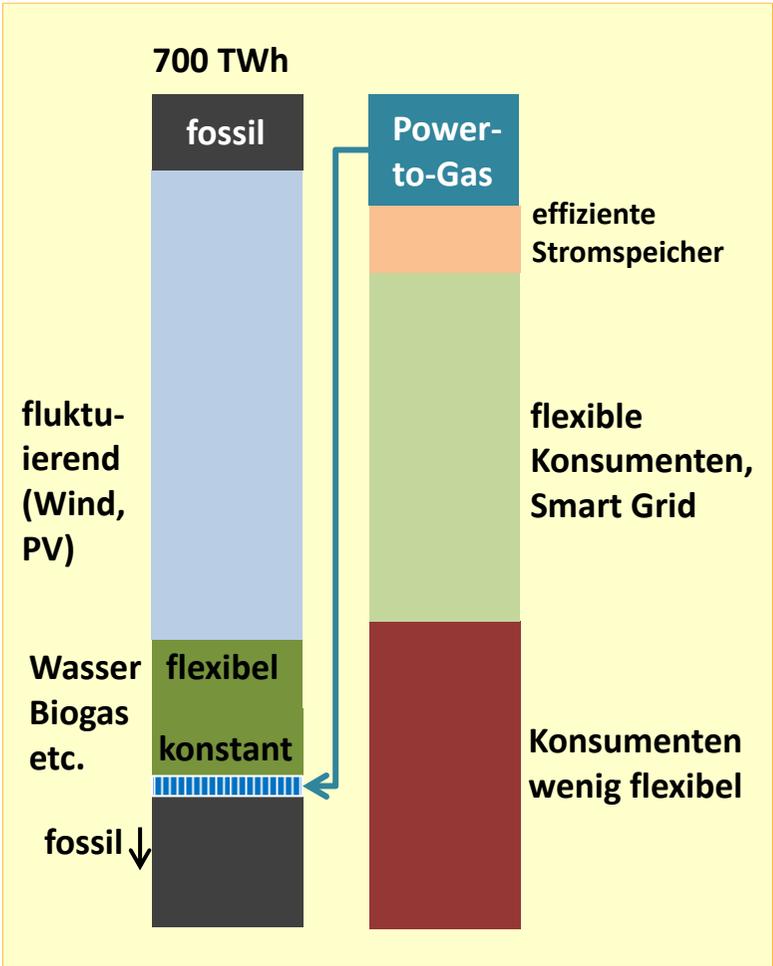
2) 10% der deutschen Erdgasspeicher

# Die Zukunft unseres Stromsystems



ohne Power-to-Gas

Gasturbinen  
in Flautezeiten

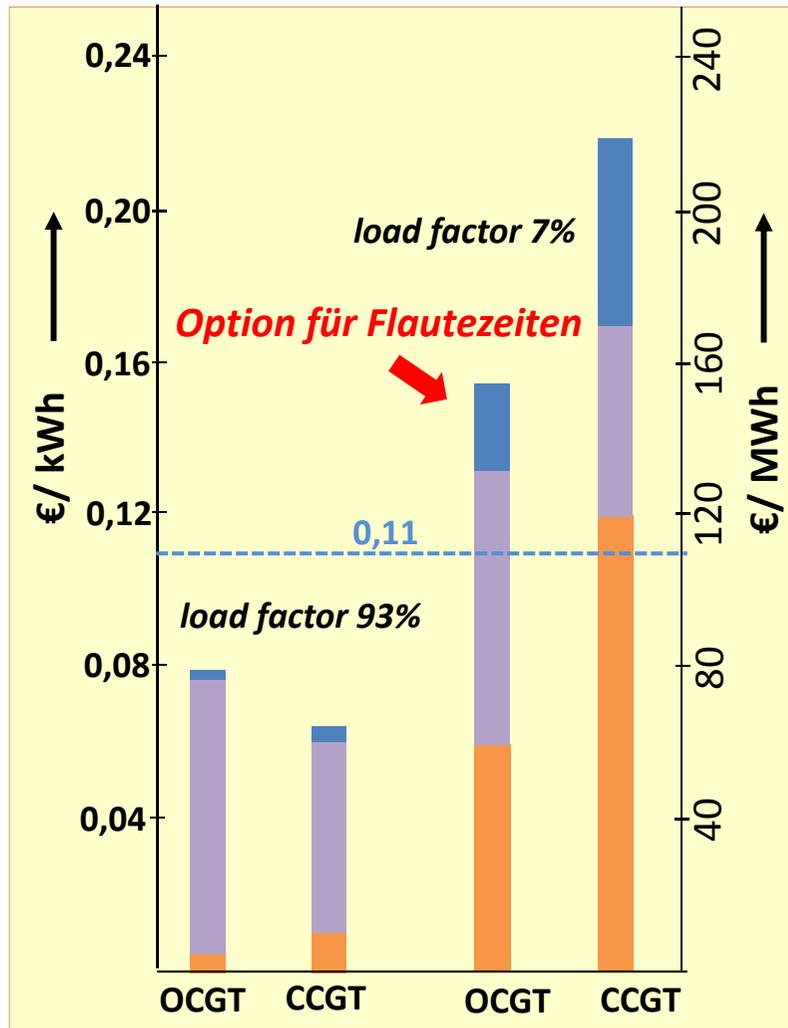


mit Power-to-Gas

# Ein leidiges Thema

- Warum Power-to-Gas?
- Wasserstoffwirtschaft: Visionen und Kritik
- Power-to-Gas im Effizienzvergleich
- Wirkungsgrade genauer betrachtet
- Stromversorgung in Flautezeiten
- **Kosten von Power-to-Gas**
- ... und Fazit

# Kostenvergleich GuD-Kraftwerk - Gasturbine



## GuD (Gas-und-Dampfturbinenkraftwerk)

CCGT: Closed Cycle Gas Turbine (efficiency: 50%)

## Gasturbine

OCGT: Open Cycle Gas Turbine (efficiency: 33%)

- capital costs
- fuel costs
- O&M-costs

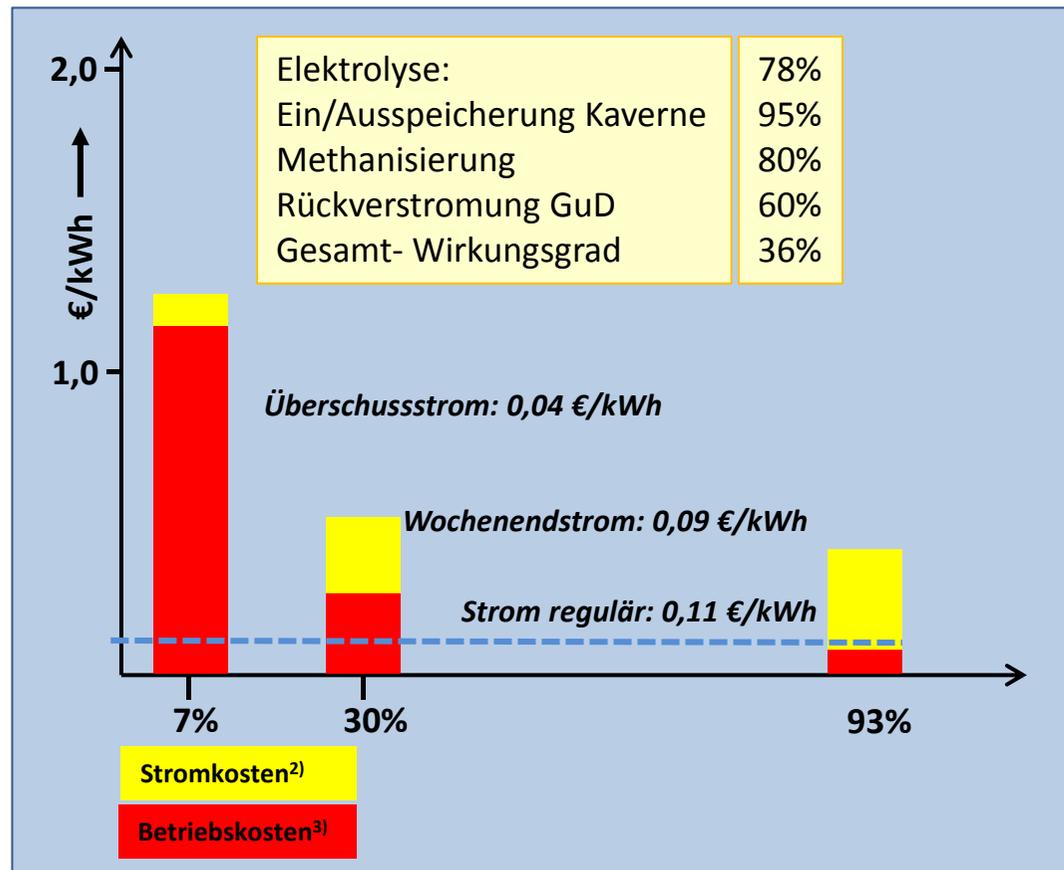
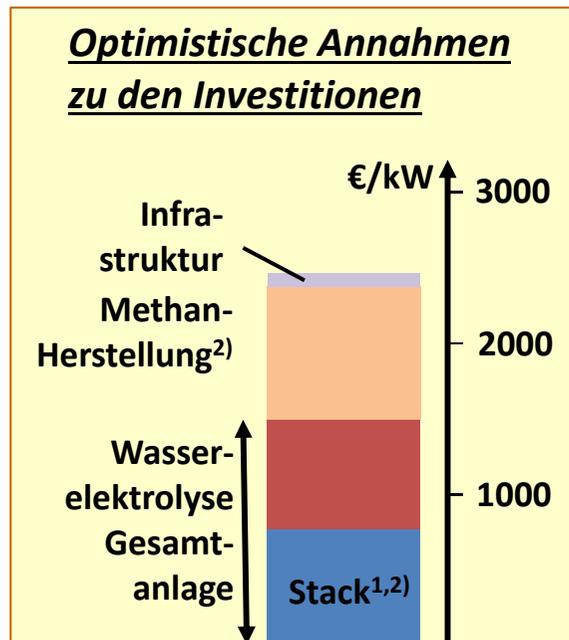
*11 Cent/kWh will Großbritannien den neuen AKWs zubilligen*

Nach: DECC: Electricity Generation Costs, July 2013;  
 CCGT: baseload (93% load factor); OCGT 7% load factor;  
 Werte ohne carbon costs

Siehe auch: Agentur für Erneuerbare Energien, Spezifische Investitionskosten: Erdgas GuD: 700-1000 €/kWh; Gasturbine: 400 €/kWh; Studienvergleich: Entwicklung der Investitionskosten neuer Kraftwerke, Nov. 2012

Erdgaspreis UK 2012/13: 30 €/MWh, Stat. Bundesamt: Preise – Daten zur Energiepreisentwicklung 2013

# Stromkosten auf Basis Power-to-Gas

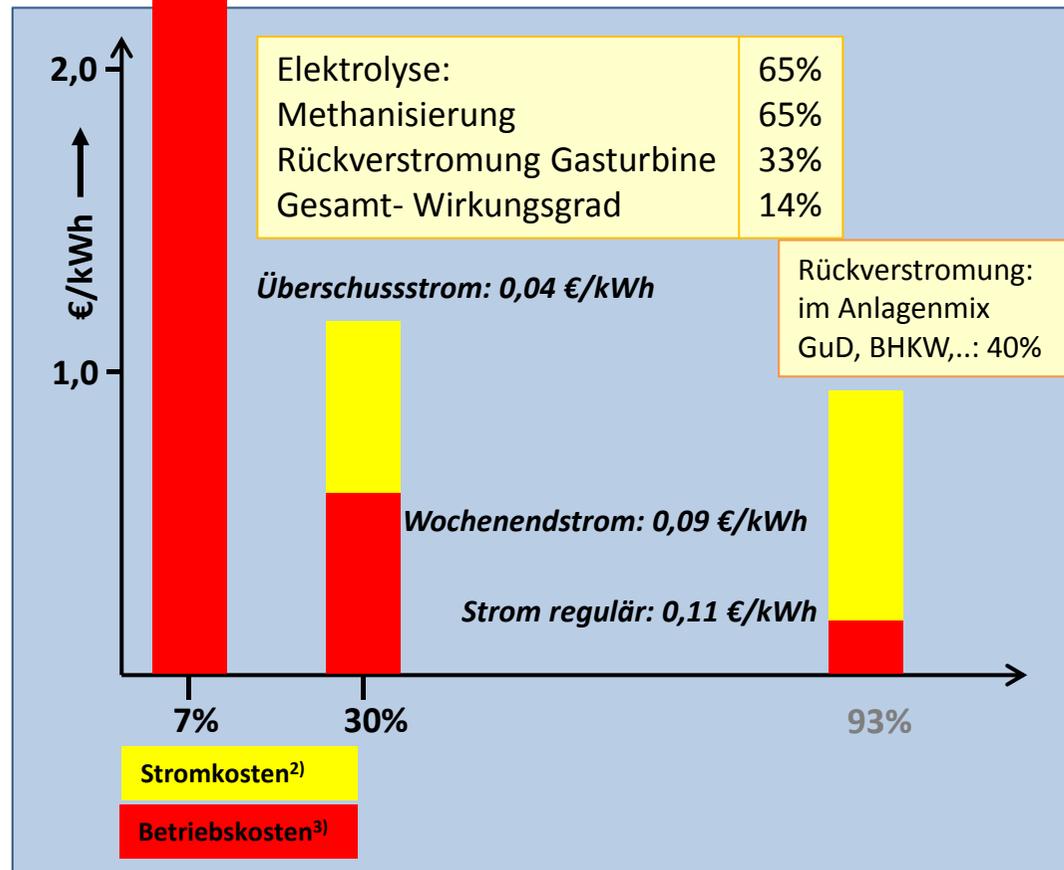
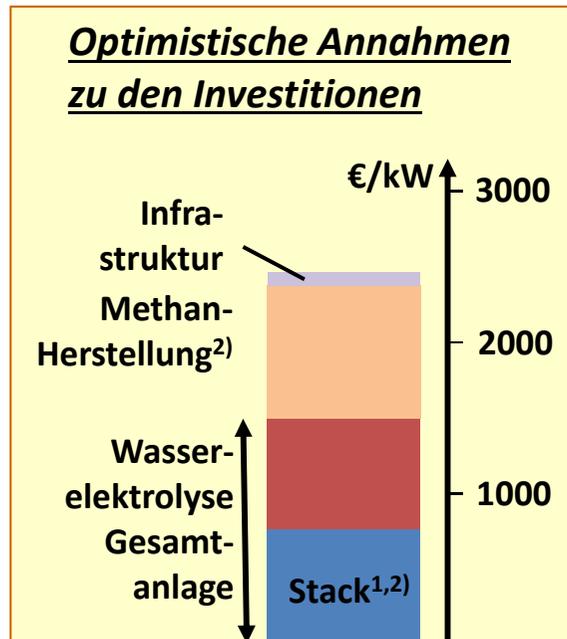


1) efzn-Studie Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.2013, S.56 PEM-Elektrolyseure: heute: 2000 – 6000 €/kW; Literaturstelle 3.62: → M. Wenske, Firma Enertrag, Stand und neue Entwicklungen bei der Elektrolyse, DBI Fachforum Berlin 14.09.11, Entwicklungspotenzial PEM-Elektrolyseur (Einzelstack) > 500 kW: < 1000 €/kW

2) H-M. Henning, A. Palzer, Energiesystem Deutschland 2050, Nov. 2013, S.42, „Elektrolyse“ = Stack (?) 750 €/kW

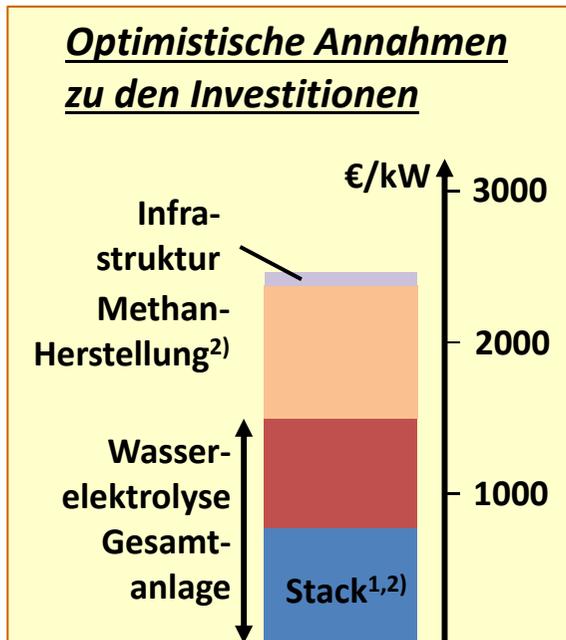
3) Abschreibung: 6%; Betrieb und Instandhaltung: 4% des Invests/a

# Stromkosten auf Basis Power-to-Gas

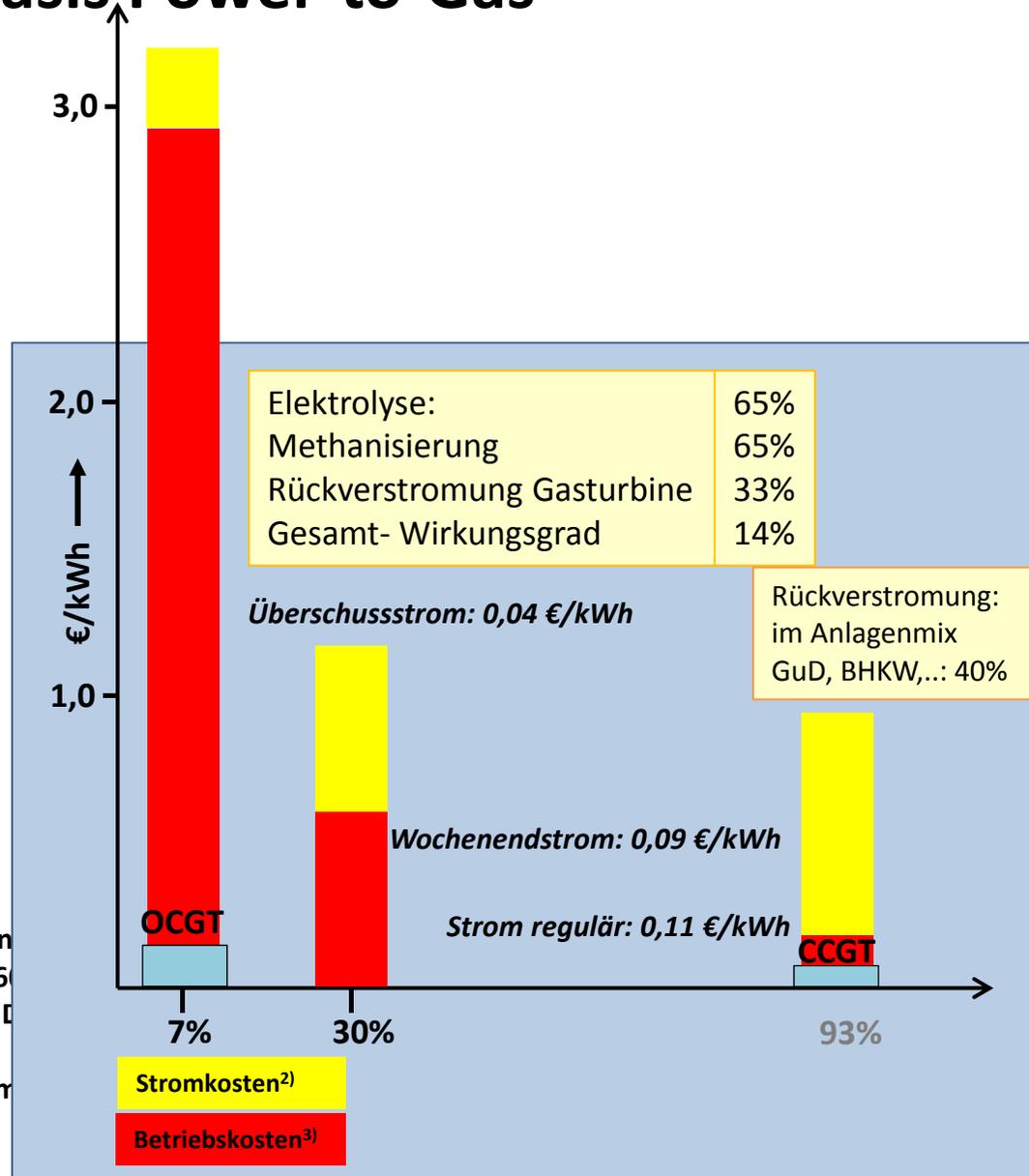


- 1) efzn-Studie Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.2013, S.56 PEM-Elektrolyseure: heute: 2000 – 6000 €/kW; Literaturstelle 3.62: → M. Wenske, Firma Enertrag, Stand und neue Entwicklungen bei der Elektrolyse, DBI Fachforum Berlin 14.09.11, Entwicklungspotenzial PEM-Elektrolyse (Einzelstack) > 500 kW: < 1000 €/kW
- 2) H-M. Henning, A. Palzer, Energiesystem Deutschland 2050, Nov. 2013, S.42, „Elektrolyse“ = Stack (?) 750 €/kW

# Stromkosten auf Basis Power-to-Gas



1) efn-Studie Eignung von Speichertechn  
S.56 PEM-Elektrolyseure: heute: 2000 – 6  
neue Entwicklungen bei der Elektrolyse, D  
(Einzelstack) > 500 kW: < 1000 €/kW  
2) H-M. Henning, A. Palzer, Energiesystem



# Fazit

- **Power-to-Gas speichert über den Umweg Wasserstoff/Methan regenerativen Strom.**
- **Der gespeicherte chemische Energieträger kann z.B. in Flautezeiten - wieder „verstromt“ werden.**
- **Der Wirkungsgrad dieser Technologiekette ist niedrig.**
- **Der Anspruch, einen Beitrag zur Senkung der deutschen Treibhausgasemissionen zu leisten, steht auf tönernen Füßen.**
- **Die Verdrängung effizienterer Alternativen führte sogar zur Steigerung der Treibhausgasemissionen.**
- **Der kontinuierliche Betrieb wird durch hohe Stromkosten belastet.**
- **Der diskontinuierliche Betrieb unter Nutzung von preisgünstigem „Überschussstrom“ wird durch hohe Betriebskosten stark belastet.**
- **Power-to-Gas ist eine aufwendige und teure Technologie, um große Strommengen in kleine umzuwandeln.**
- **Da derzeit etliche Pilotanlagen eine große Zahl junger engagierter Fachleute binden, besteht die Gefahr, bei chancenreichen Themen aus Personalmangel den Anschluss zu verlieren.**
- **Power-to-Gas ist deshalb ein Stolperstein der deutschen Energiewende.**