

**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**

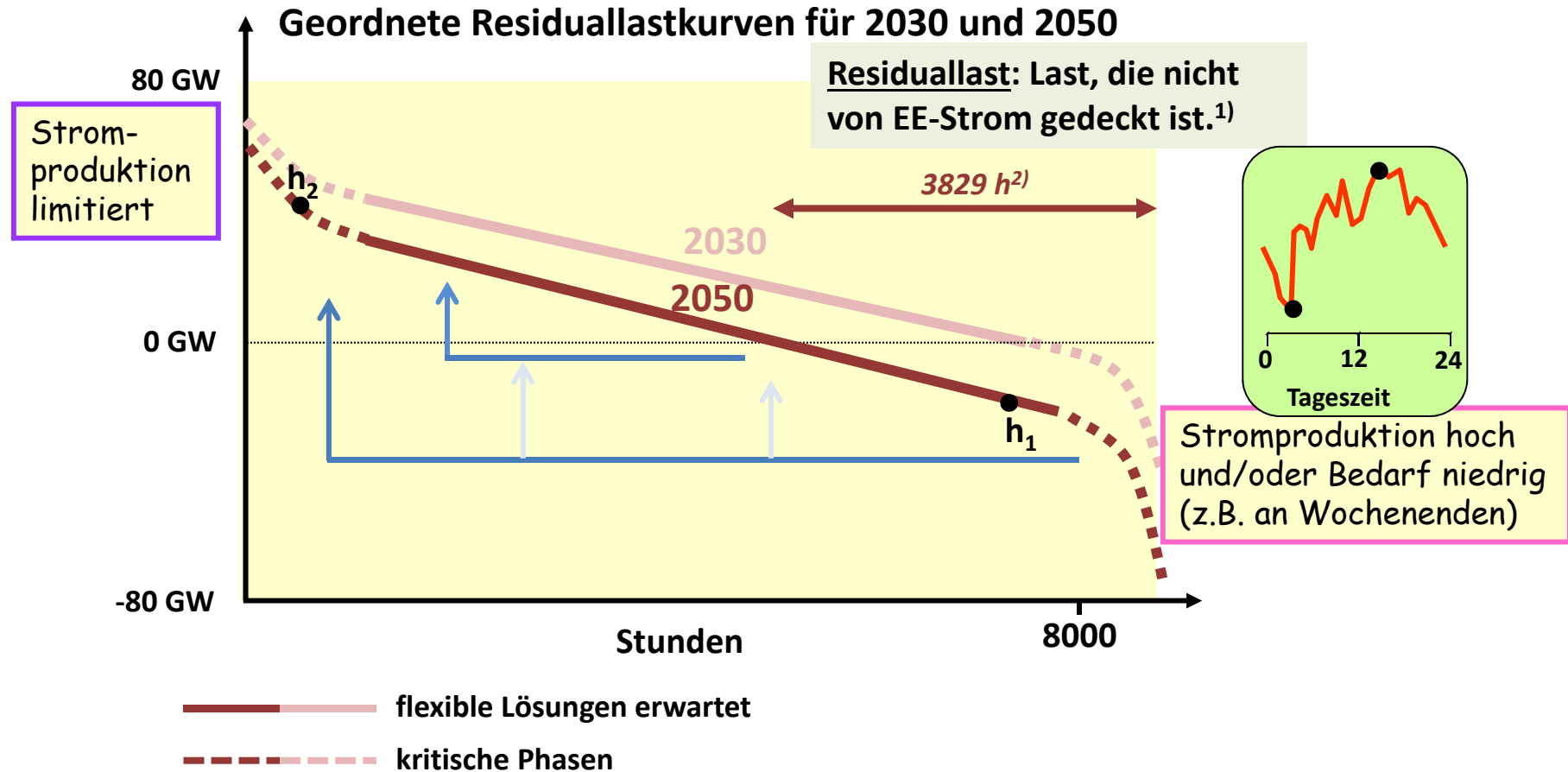
Perspektivenwechsel: Our Carbon Cycle

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

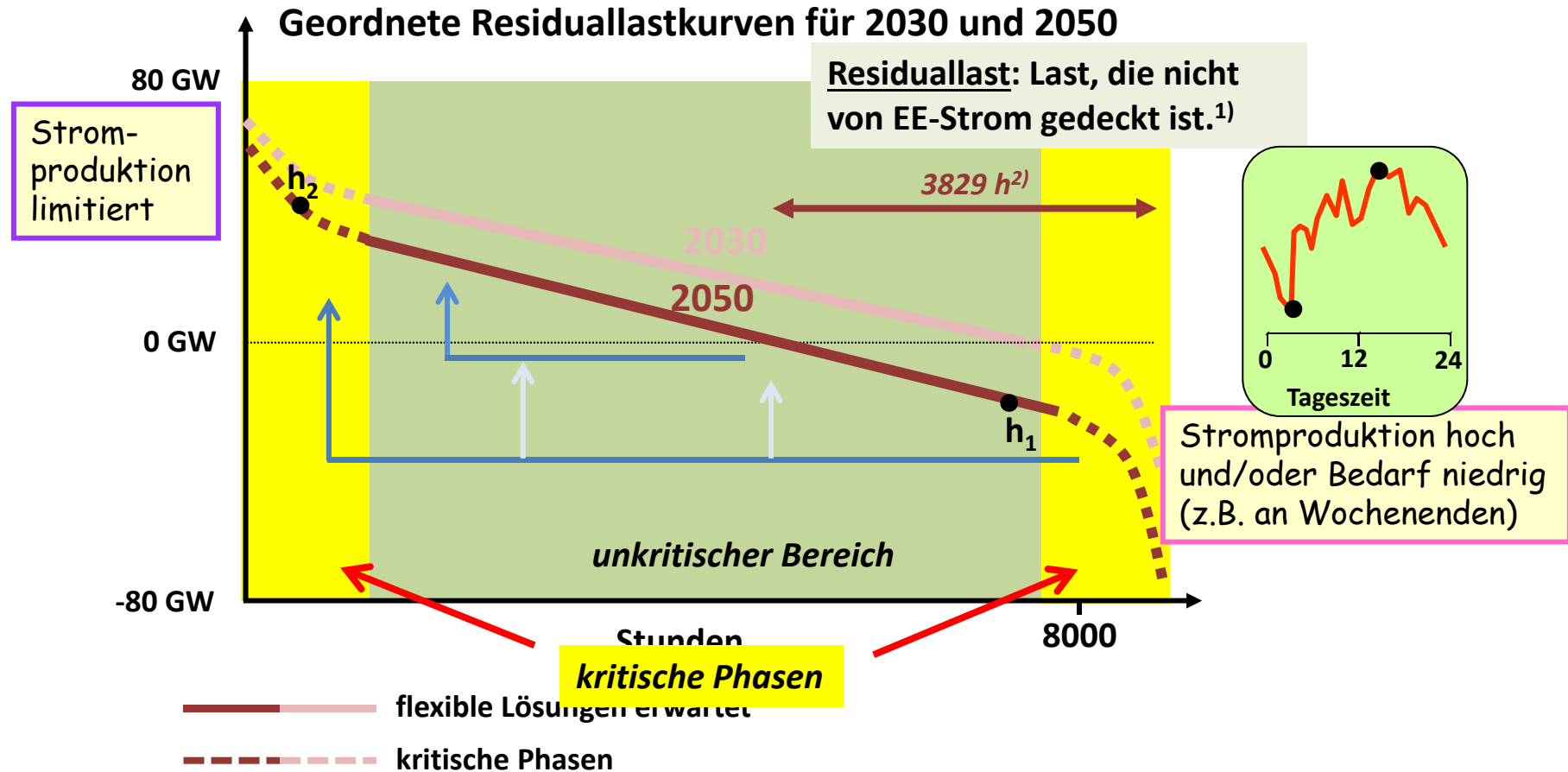
Das Problem: Fluktuation der Stromerzeugung



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)

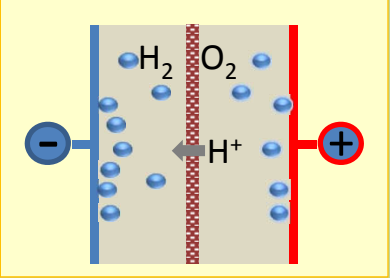
Residuallast stark negativ

Service für's Stromnetz

Residuallast stark positiv

Gesamt: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$
Kathode: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$
Anode: $\text{H}_2\text{O} - 2\text{e}^- \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{H}^+$

+ 1,23 V
H₂: 33,3 kWh/kg (LHV)



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 H₂-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 H₂-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 H₂-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

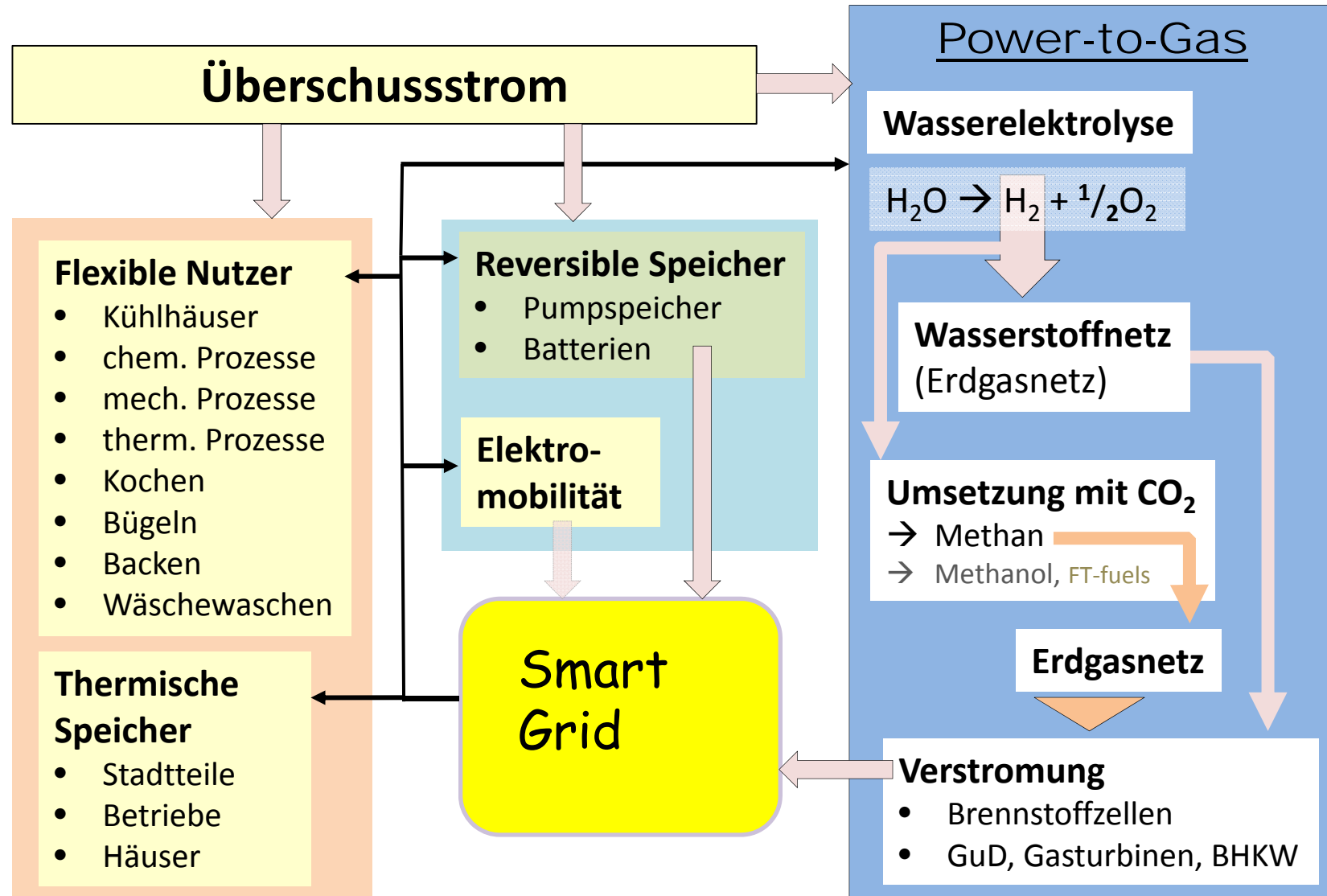
Power-to-Gas: ~~Gas~~ X

Ziel: regenerativen Strom speicher- und damit jederzeit nutzbar machen

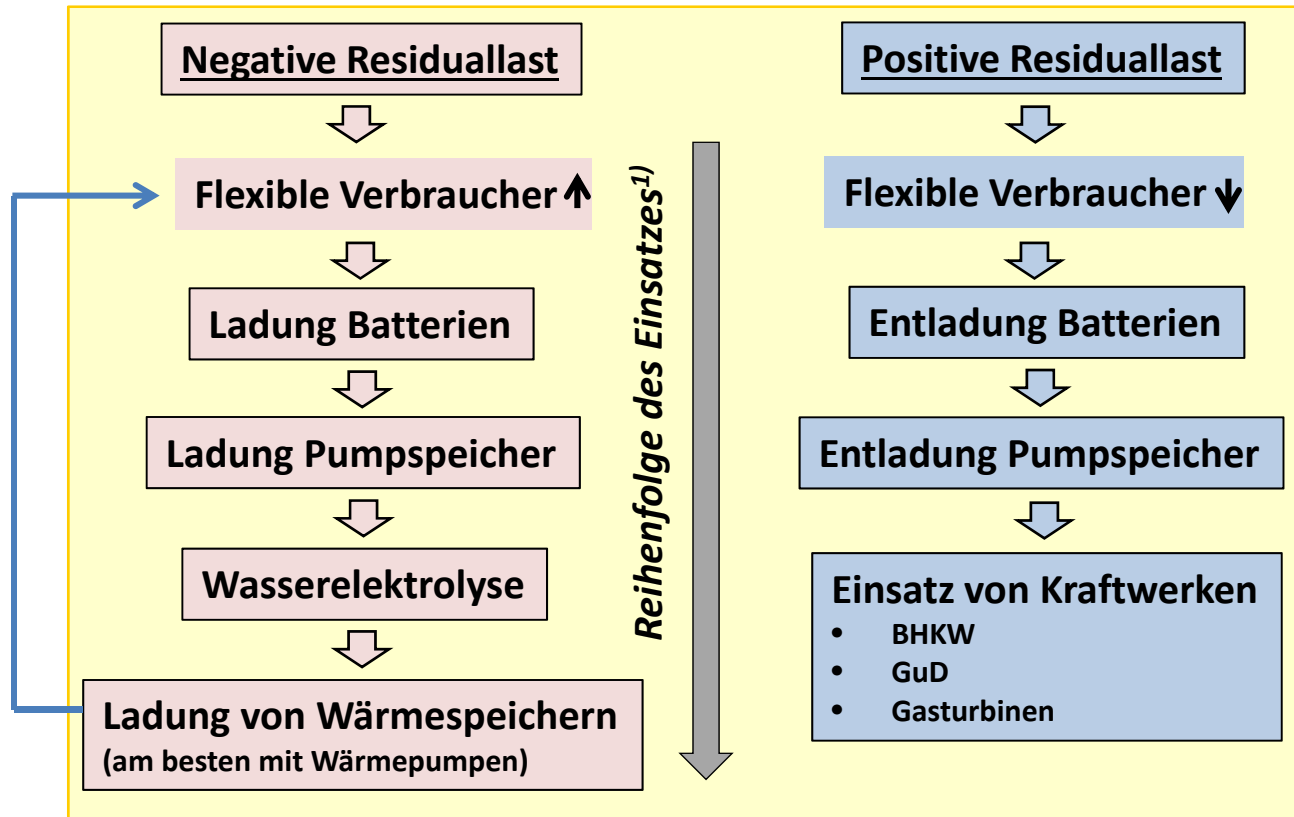
Power-to-Gas bedeutet:
Schritt 1: Erzeugung von Wasserstoff unter Nutzung von
Überschussstrom in einer Wasserelektrolyse
Schritt 2: Umsetzung von H_2 mit CO_2 zu CH_4
Speicherung und Transport von ~~Was~~ CH_4 ~~ff~~ im Erdgasnetz
Wasserstoff/Sauerstoff

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

Power-to-Gas: Die Rolle im Smart Grid

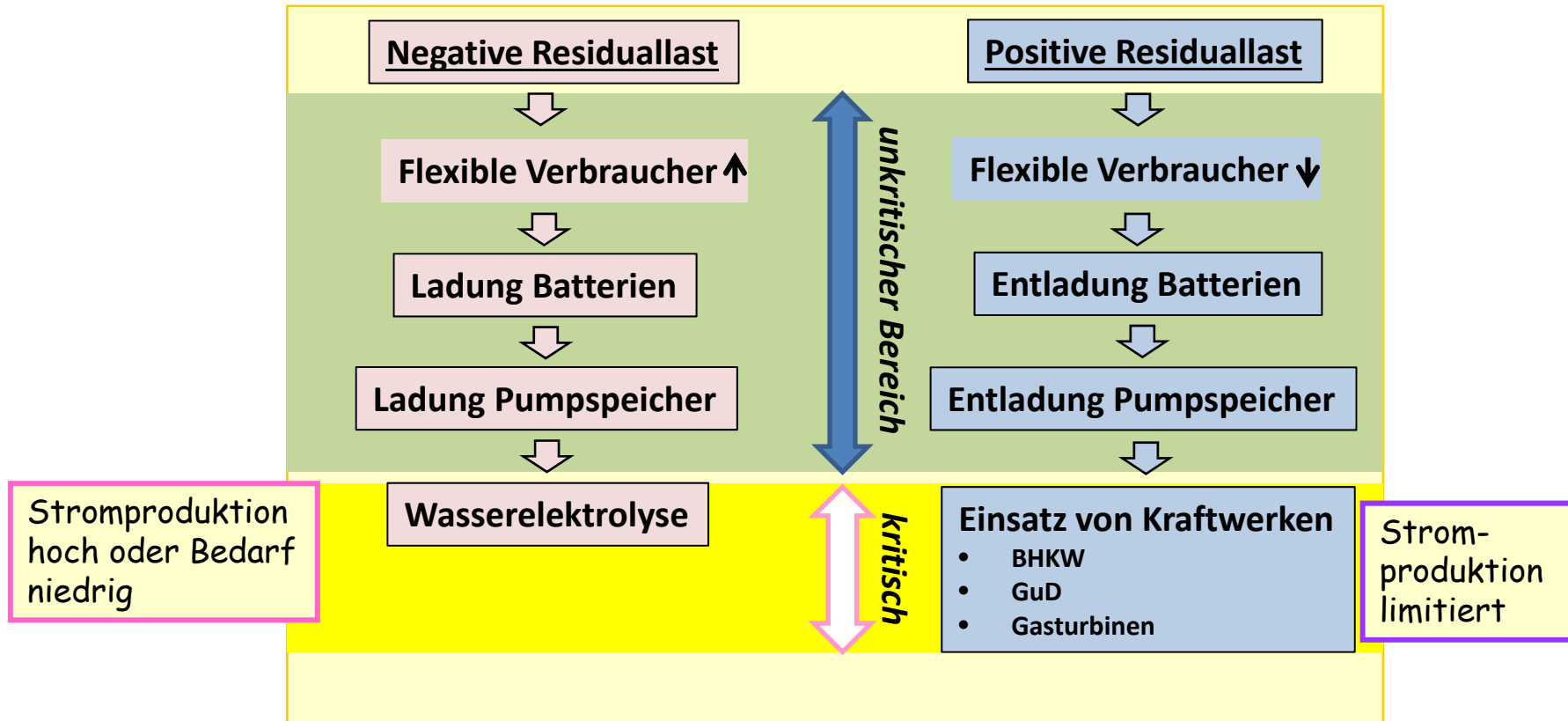


Hierarchie der Speichermöglichkeiten



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

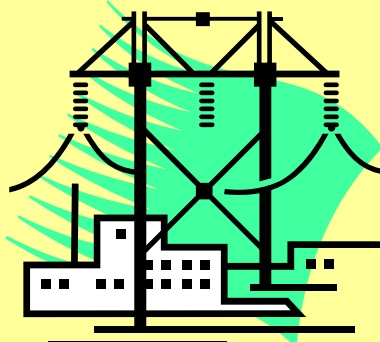
Die Vision einer Wasserstoffwirtschaft



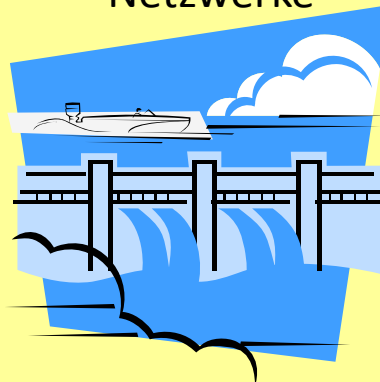
Strom in Bürgerhand



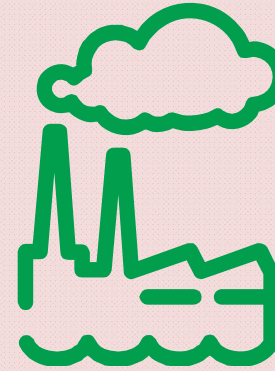
Wüstenstrom



dezentrale
Netzwerke



Stromspeicher
insbesondere
**Elektrolyse für
Wasserstoff**

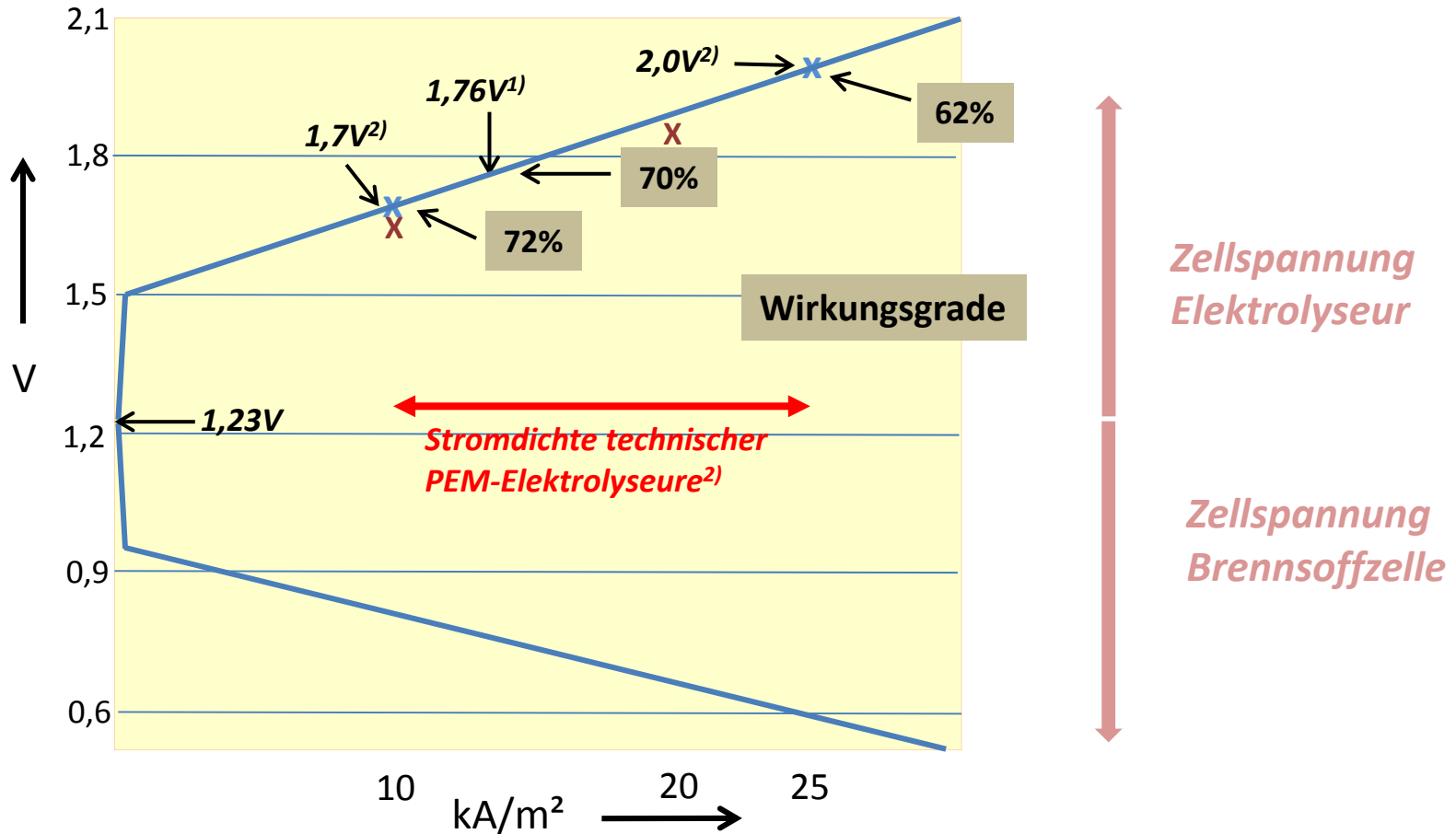


Green Economy

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



Stromdichte und Zellspannung



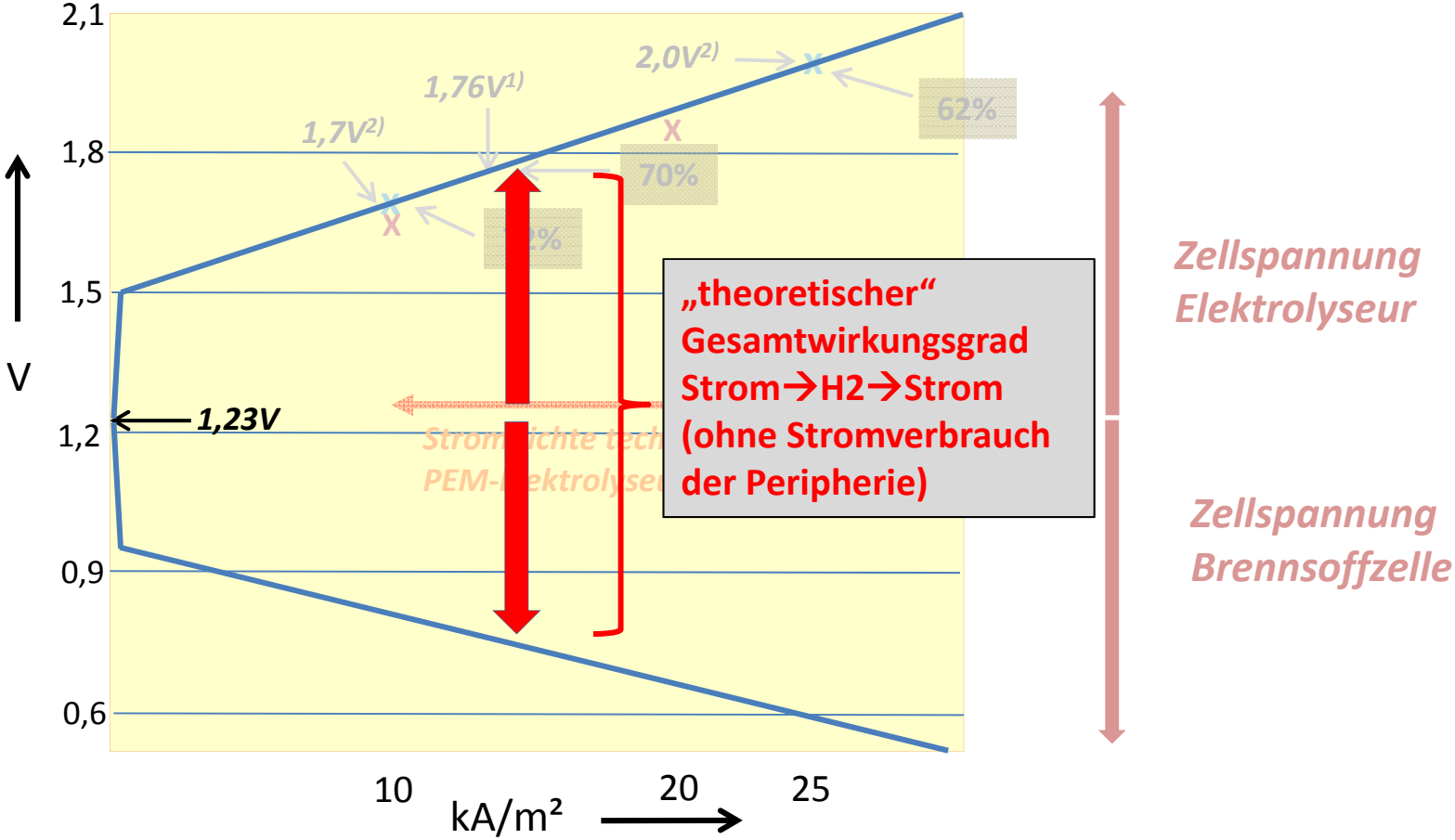
1) Schema nach: The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak? S. 11 Fig. 3; Zellspannung: S. 12 Fig 4,,

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

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“

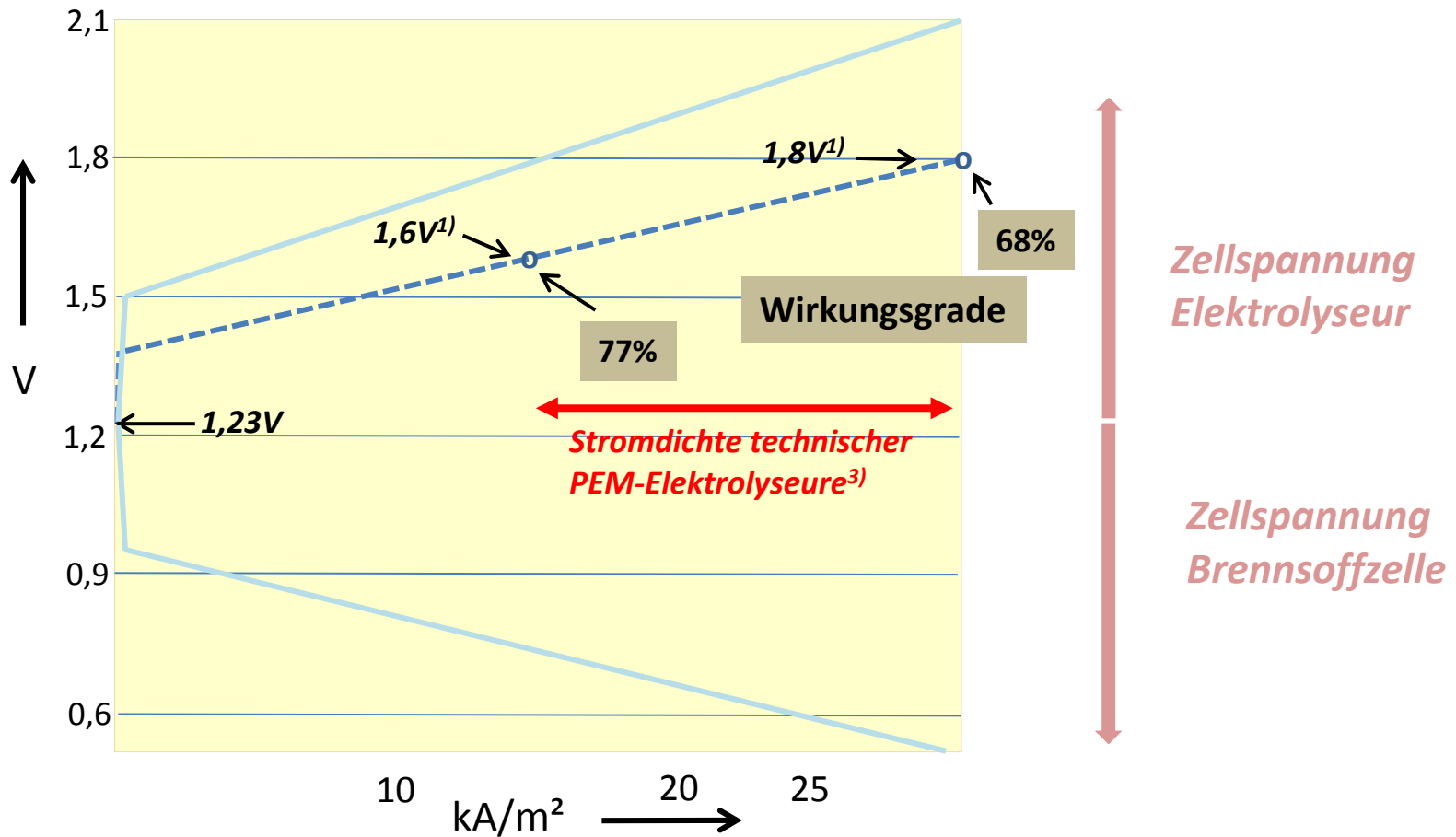


„theoretischer“
Gesamtwirkungsgrad
Strom → H₂ → Strom
(ohne Stromverbrauch
der Peripherie)

Zellspannung
Elektrolyseur

Zellspannung
Brennstoffzelle

Optimierungspotenzial der Elektrolyse

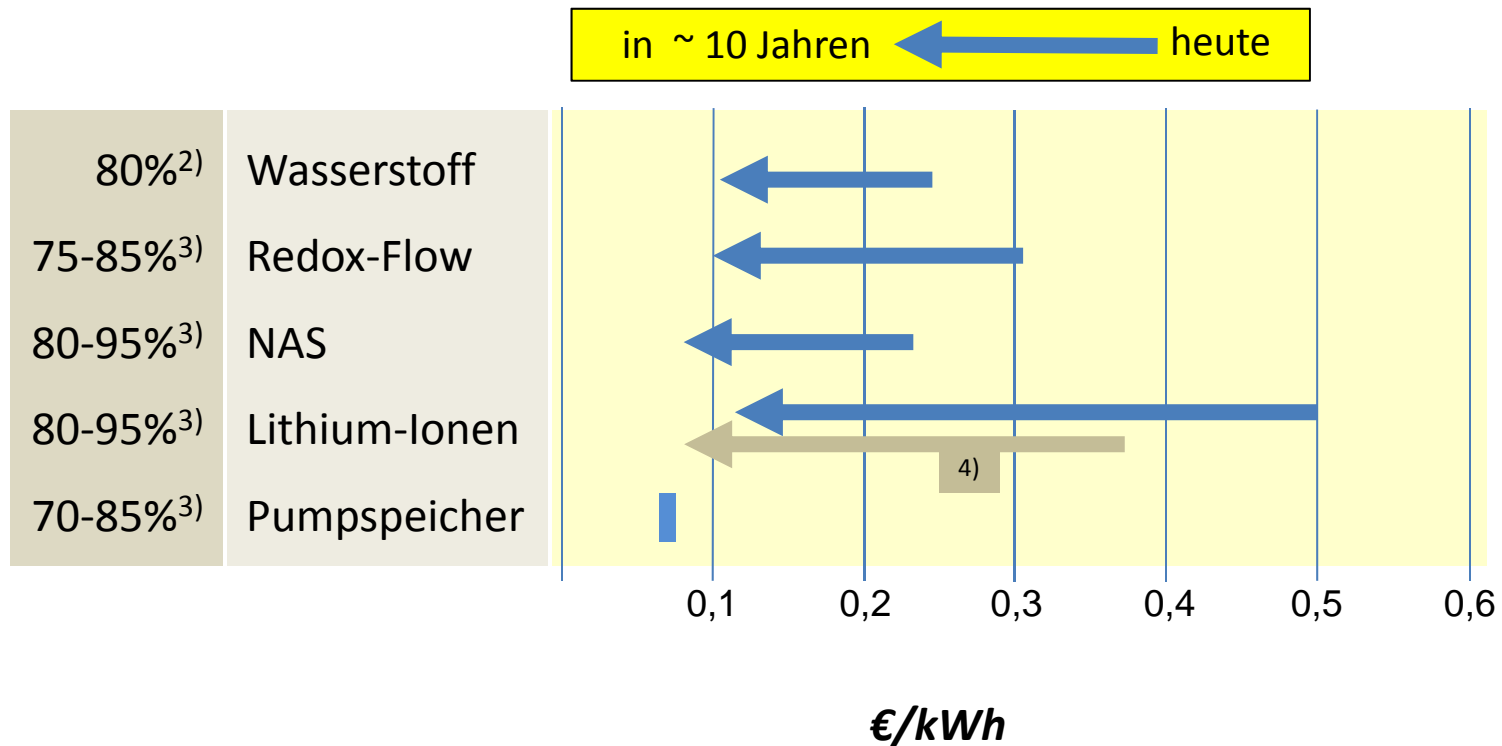


1) T. Smolinka, J. Garche, NOW-Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, Folie 18, o: langfristiges Potenzial ; http://www.now-gmbh.de/uploads/media/4_Smolinka_FHG_Ergebnis_Studie_Wasserelektrolyse_Teil_2.pdf

Wunsch und Realität

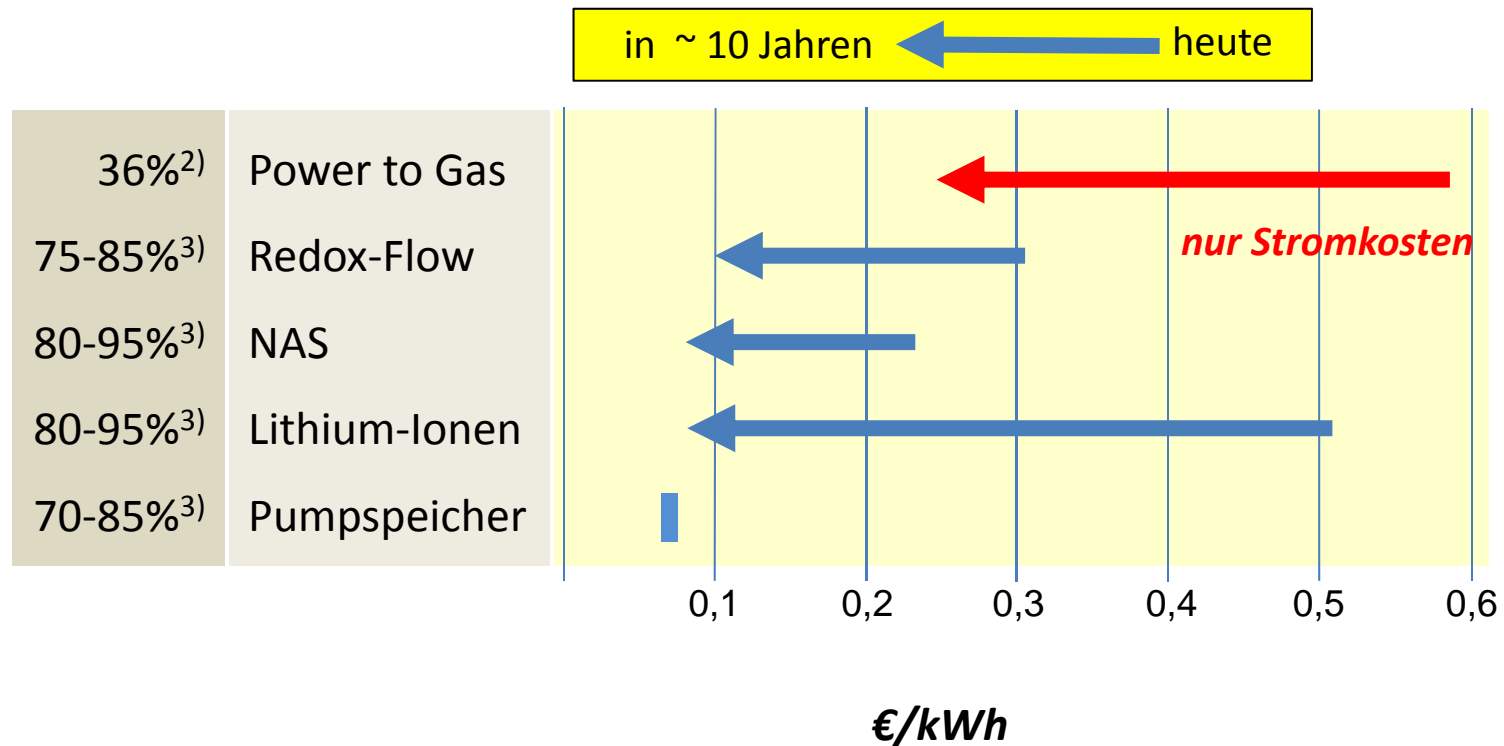
- Warum Power-to-Gas?
- Wasserstoffwirtschaft: Visionen und Kritik
- **Power-to-Gas im Effizienzvergleich**
- Wirkungsgrade genauer betrachtet
- Stromversorgung in Flautezeiten
- Kosten von Power-to-Gas
- Fazit

Wirkungsgrade und Kosten einiger Stromspeicher¹⁾



- 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 Stromspeicher¹⁾

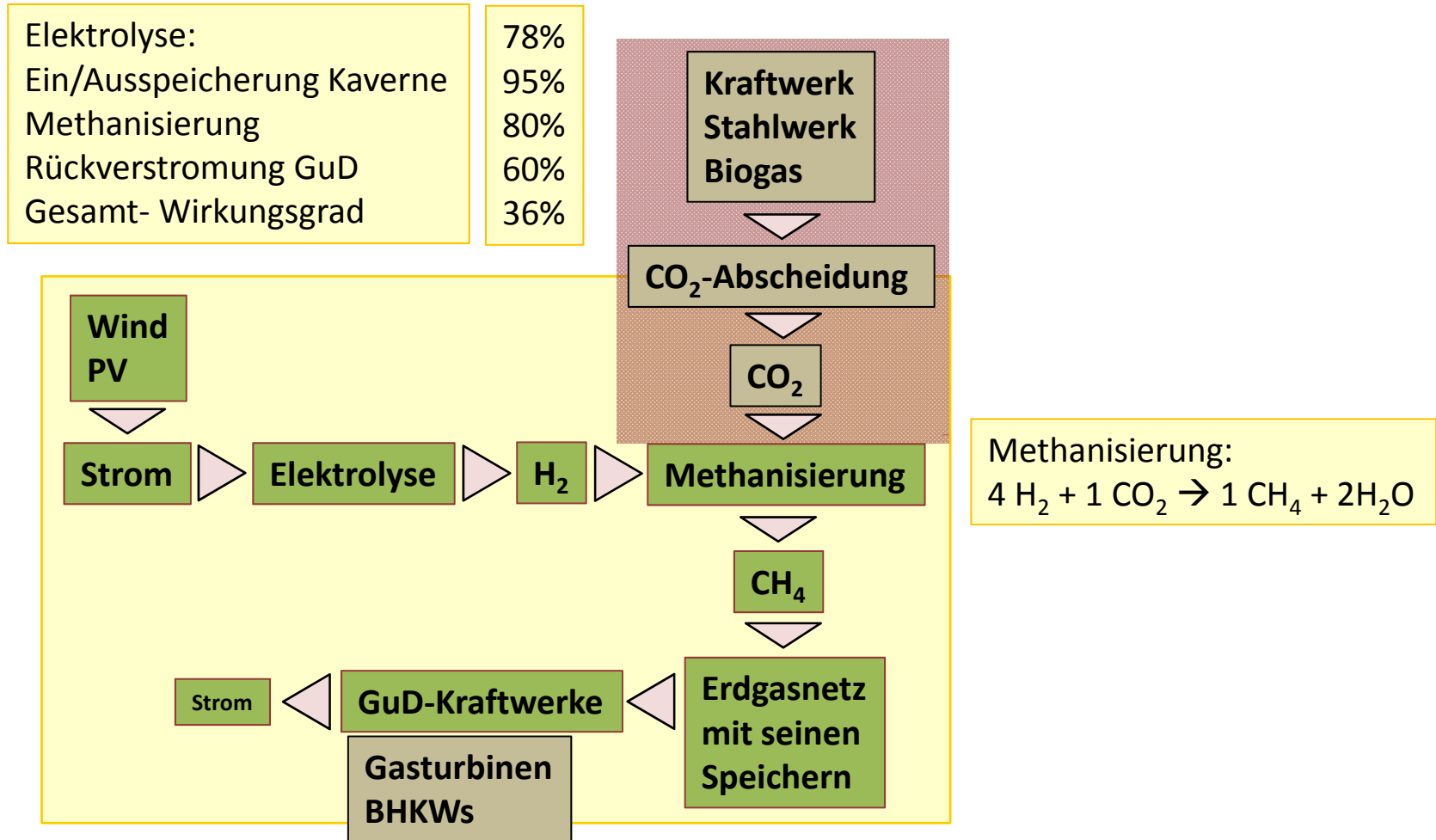


1) Daten nach Energieforschungszentrum Niedersachsen, Studie: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.13, S. 204, 205 Vollkosten für Load-Levelling-Aufgaben

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%
Methanisierung	80%
Rückverstromung GuD	60%
Gesamt- Wirkungsgrad	36%

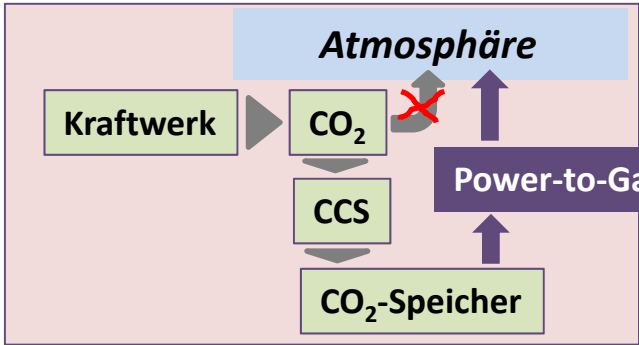
Der Kosten- und Energieeinsatz wird dem Kraftwerk zugerechnet, das damit „klimaneutral“ wird.

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 ₂ :	267 kWh
↓	↓
16 kg CH ₄ :	222 kWh
Ertrag:	83%

44 kg CO₂
 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

Diskussion der Daten: Nur GuD-Kraftwerke?

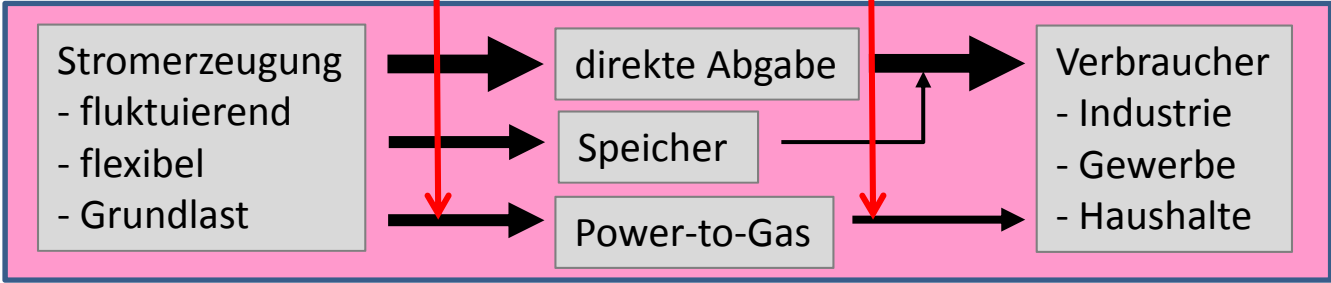
Elektrolyse:	78%	<i>Mit viel Optimismus: Große, zentrale, kontinuierlich bei konstanter Last übers ganze Jahr laufende Anlagen erreichen diese Werte vielleicht.</i>
Ein/Ausspeicherung Kaverne	95%	
Methanisierung	80%	
Rückverstromung GuD	60%	
Gesamt- Wirkungsgrad	36%	

Methanisierung:
 $4 H_2 + 1 CO_2 \rightarrow 1 CH_4 + 2H_2O$
 Einsatz:
 8 kg H₂ : 267 kWh
 ↓ ↓
 16 kg CH₄ : 222 kWh
 Ertrag: 83%

Rückverstromung:
 CH₄ → Erdgasnetz → GuD (60%)
 → BHKW (~30%)
 → Gasturbinen (33%)

Gesamtwirkungsgrad???

Aus drei Stromeinheiten entsteht kontinuierlich eine Stromeinheit.



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

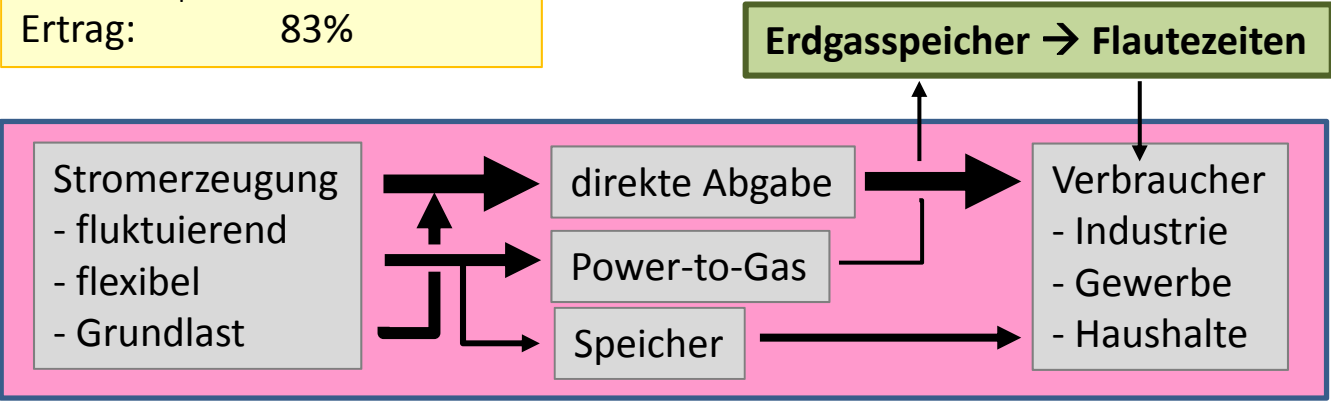
Das Eichhörnchen-Argument

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 H_2 : 267 kWh
 ↓
 16 kg 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???

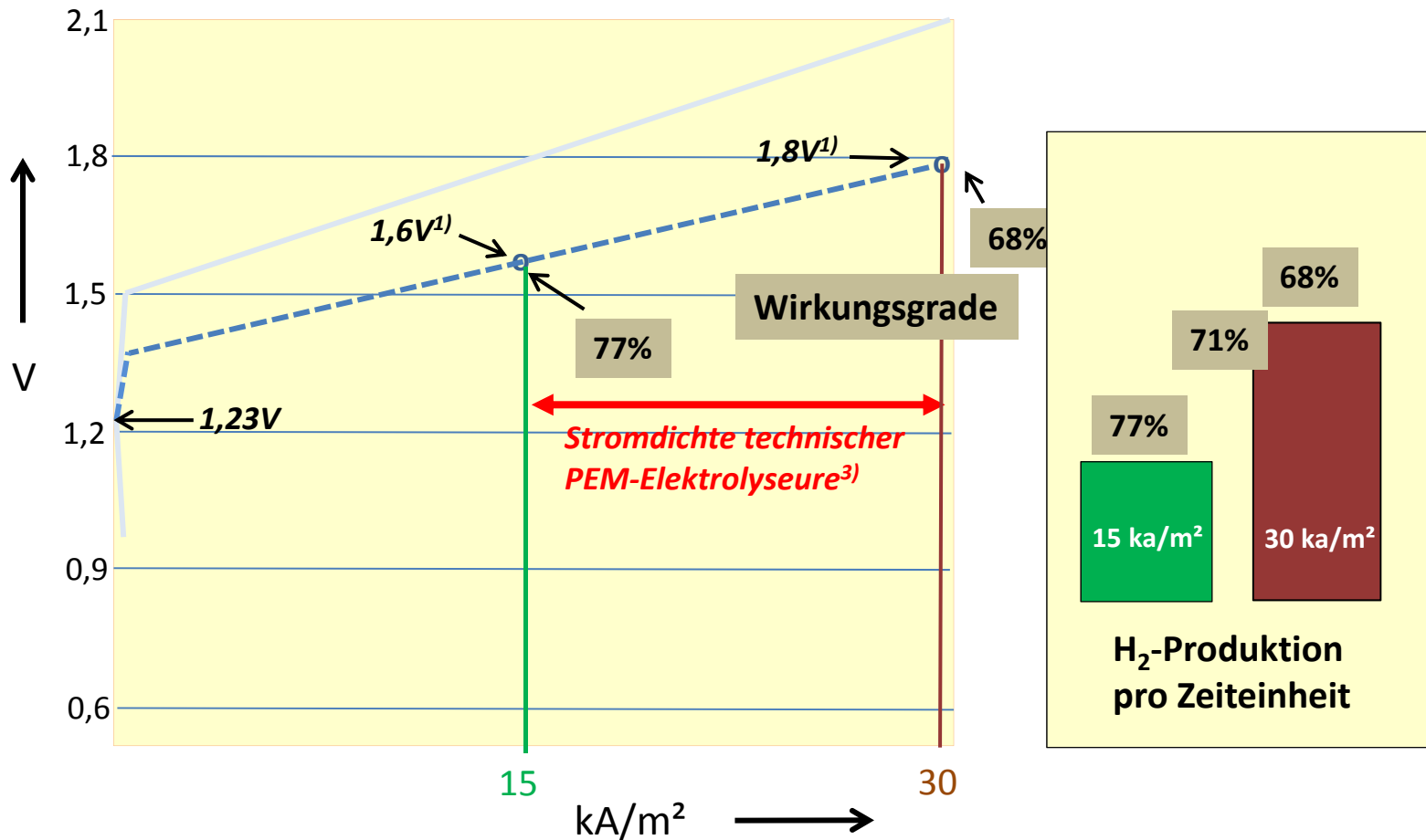


1) Wirkungsgrade: nach Energieforschungszentrum Niedersachsen, Studie: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.13, S. 204, S. 75 Tabelle 3-3

Aufbau und Funktion einer Wasserelektrolyse

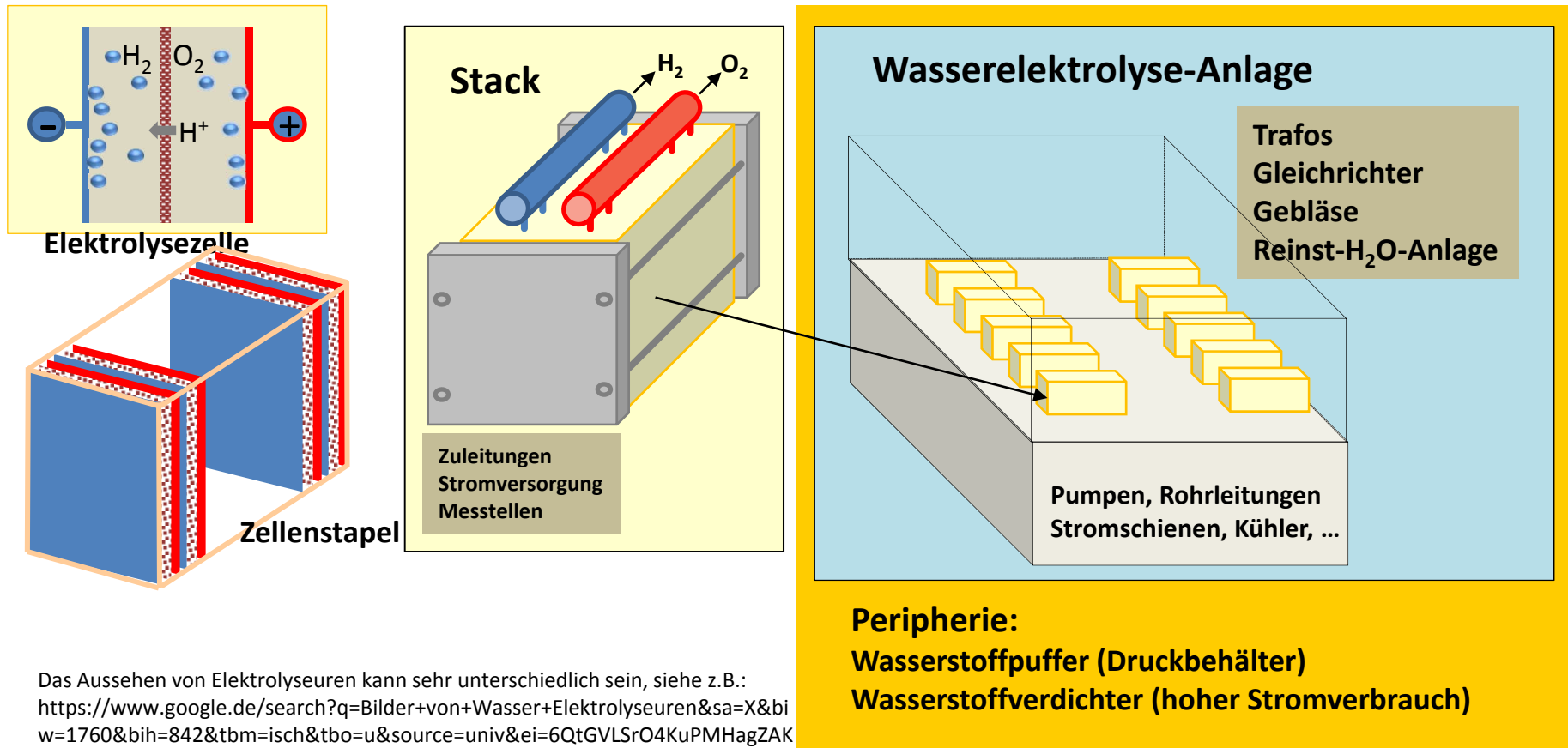
- Warum Power-to-Gas?
- Wasserstoffwirtschaft: Visionen und Kritik
- Power-to-Gas im Effizienzvergleich
- **Wirkungsgrade genauer betrachtet**
- Stromversorgung in Flautezeiten
- Kosten von Power-to-Gas
- Fazit

H₂-Produktion bei fluktuierender Fahrweise



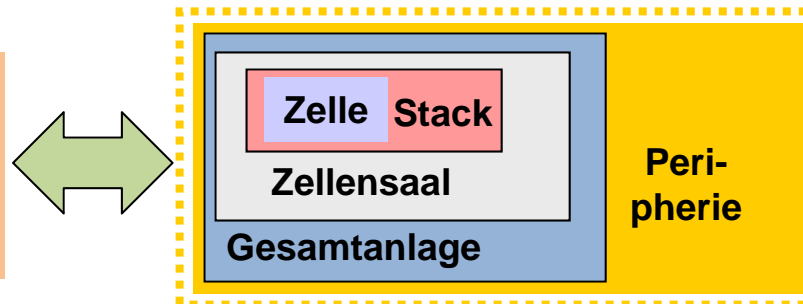
1) T. Smolinka, J. Garche, NOW-Studie „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, Folie 18, o: langfristiges Potenzial ; http://www.now-gmbh.de/uploads/media/4_Smolinka_FHG_Ergebnis_Studie_Wasserelektrolyse_Teil_2.pdf

Aufbau einer Wasserelektrolyse-Anlage

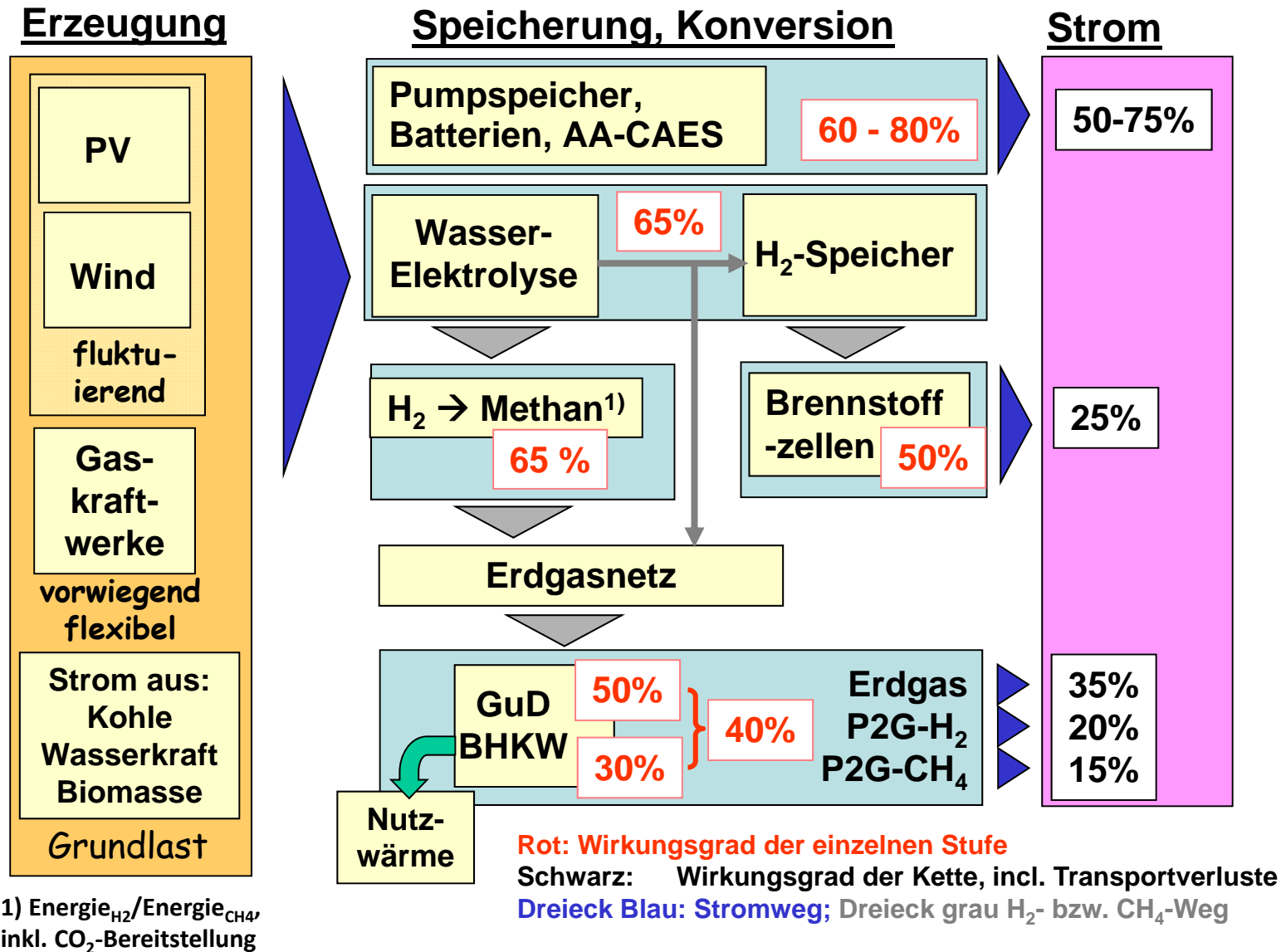


Das Aussehen von Elektrolyseuren kann sehr unterschiedlich sein, siehe z.B.:
<https://www.google.de/search?q=Bilder+von+Wasser+Elektrolyseuren&sa=X&biw=1760&bih=842&tbm=isch&tbo=u&source=univ&ei=6QtGVLsR04KuPMHagZAK&ved=0CEYQ7AK>

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



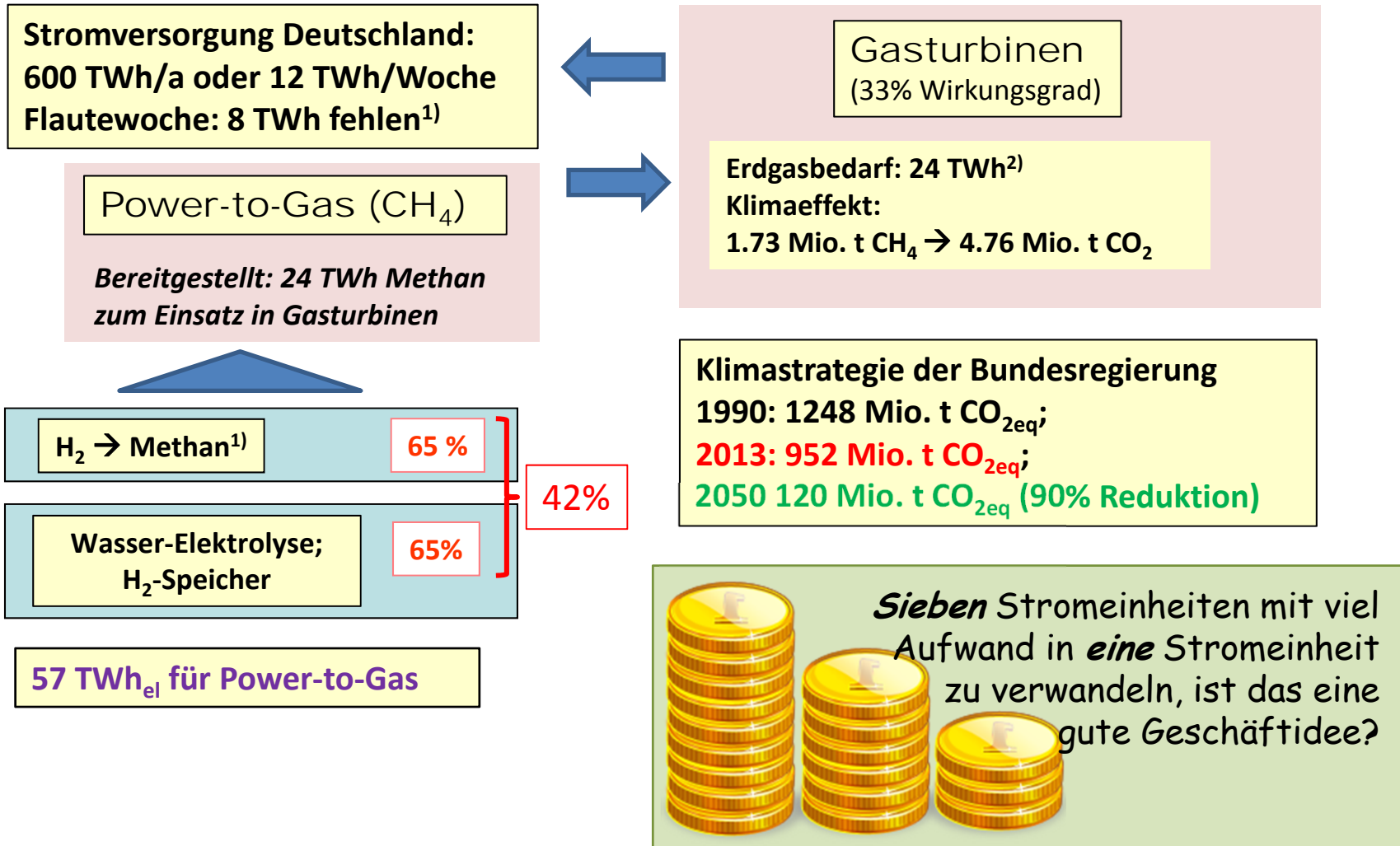
Strom gespeichert: Die Wirkungsgradkette



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

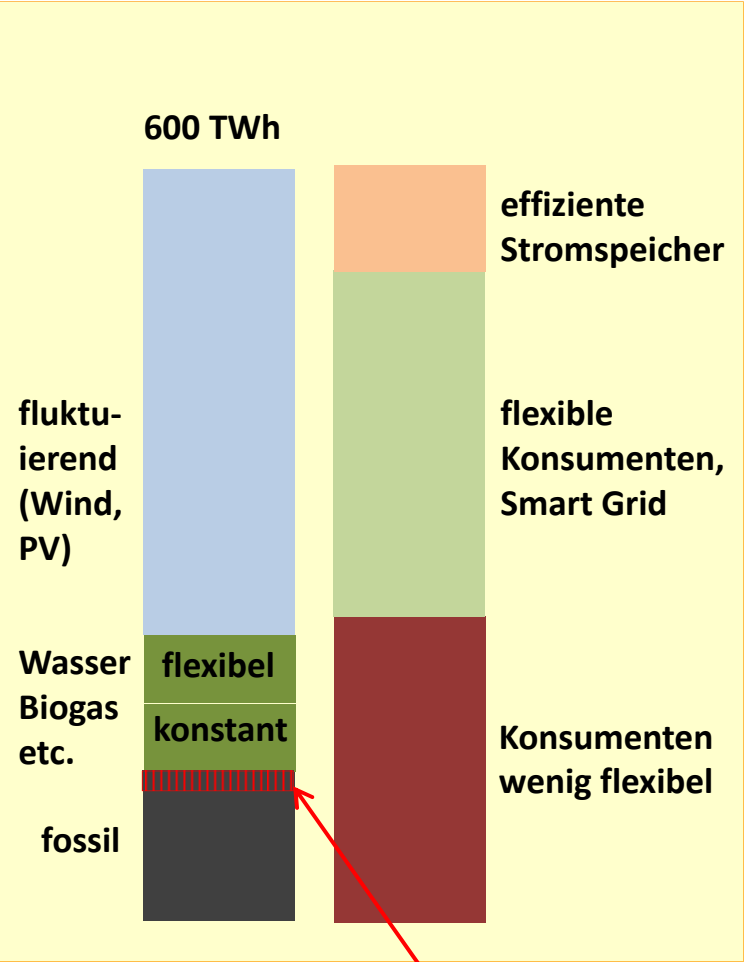
2050: Kein Wind in einer nebligen Novemberwoche: Was tun?



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

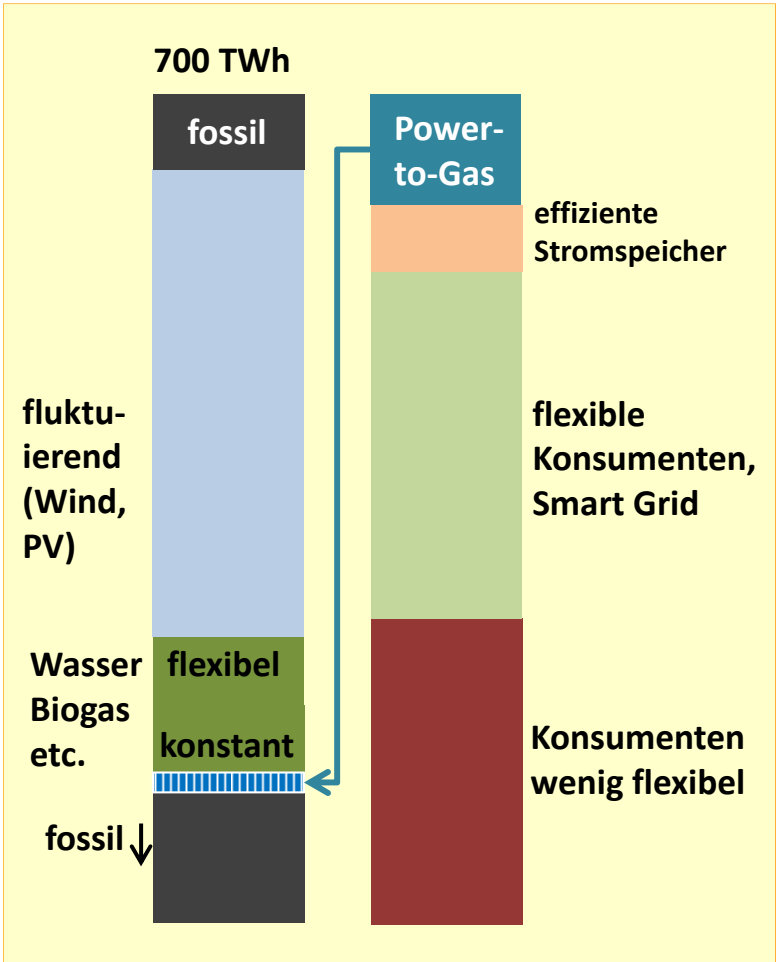
2) 10% der deutschen Erdgasspeicher

Die Zukunft unseres Stromsystems



ohne Power-to-Gas

Gasturbinen
in Flautezeiten

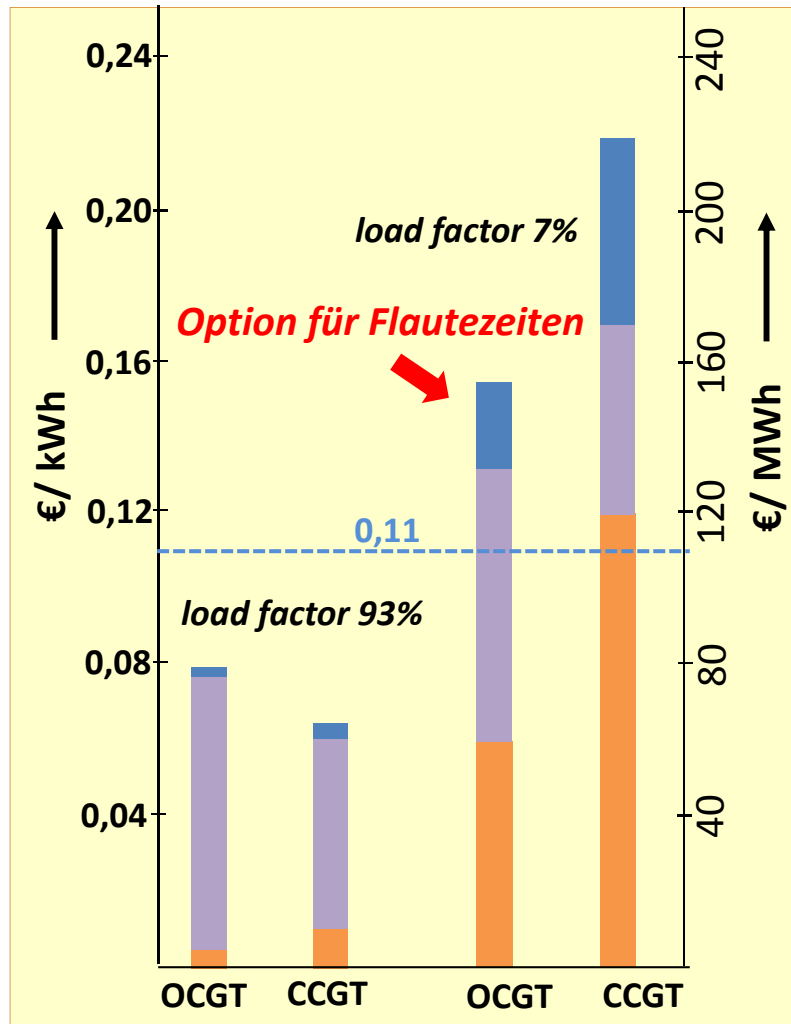


mit Power-to-Gas

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

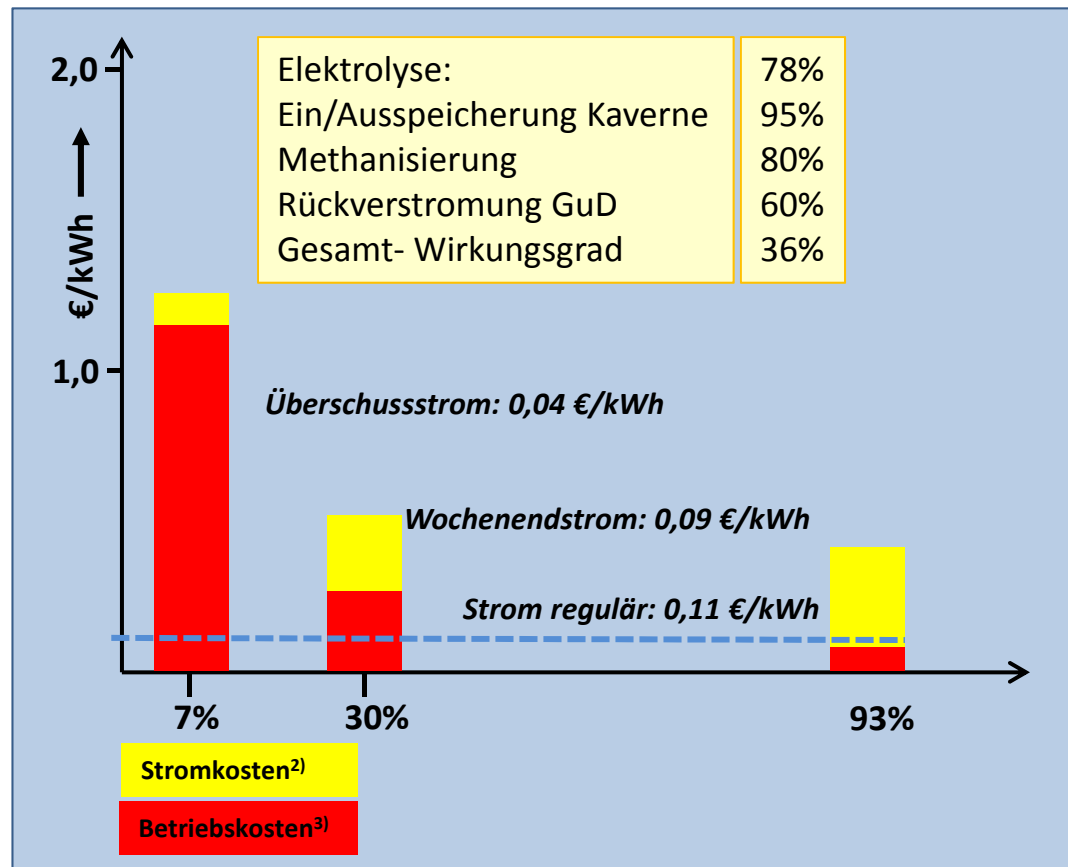
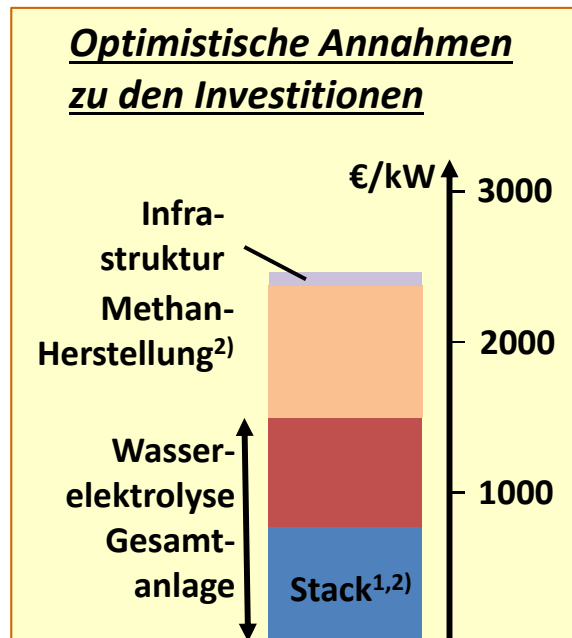
11 Cent/kWh will Großbritannien den neuen AKWs zubilligen

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

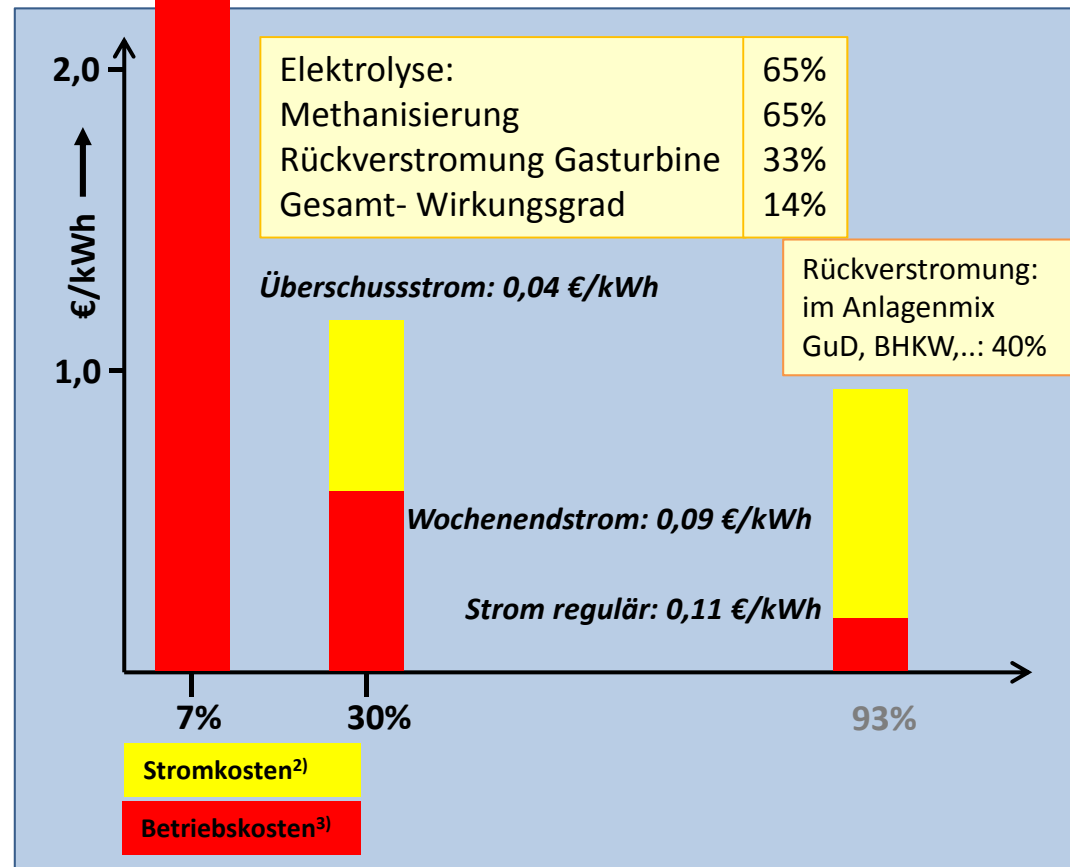
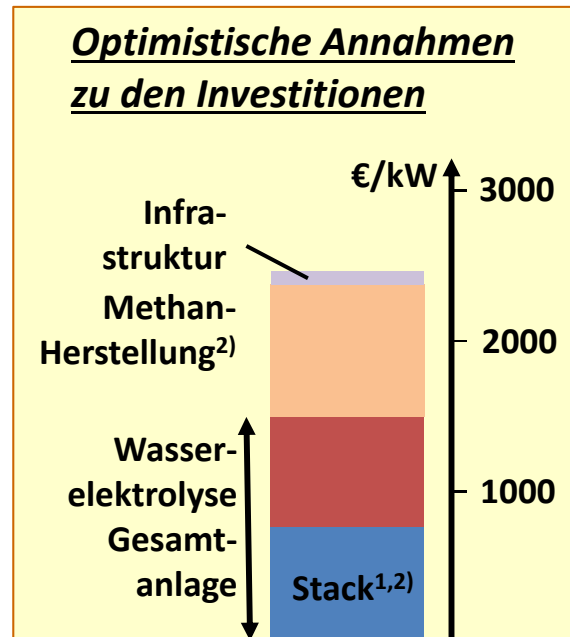


1) efzn-Studie Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, 08.03.2013, S.56 PEM-Elektrolyseure: heute: 2000 – 6000 €/kW; Literaturstelle 3.62: → M. Wenske, Firma Enertrag, Stand und neue Entwicklungen bei der Elektrolyse, DBI Fachforum Berlin 14.09.11, Entwicklungspotenzial PEM-Elektrolyseur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

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

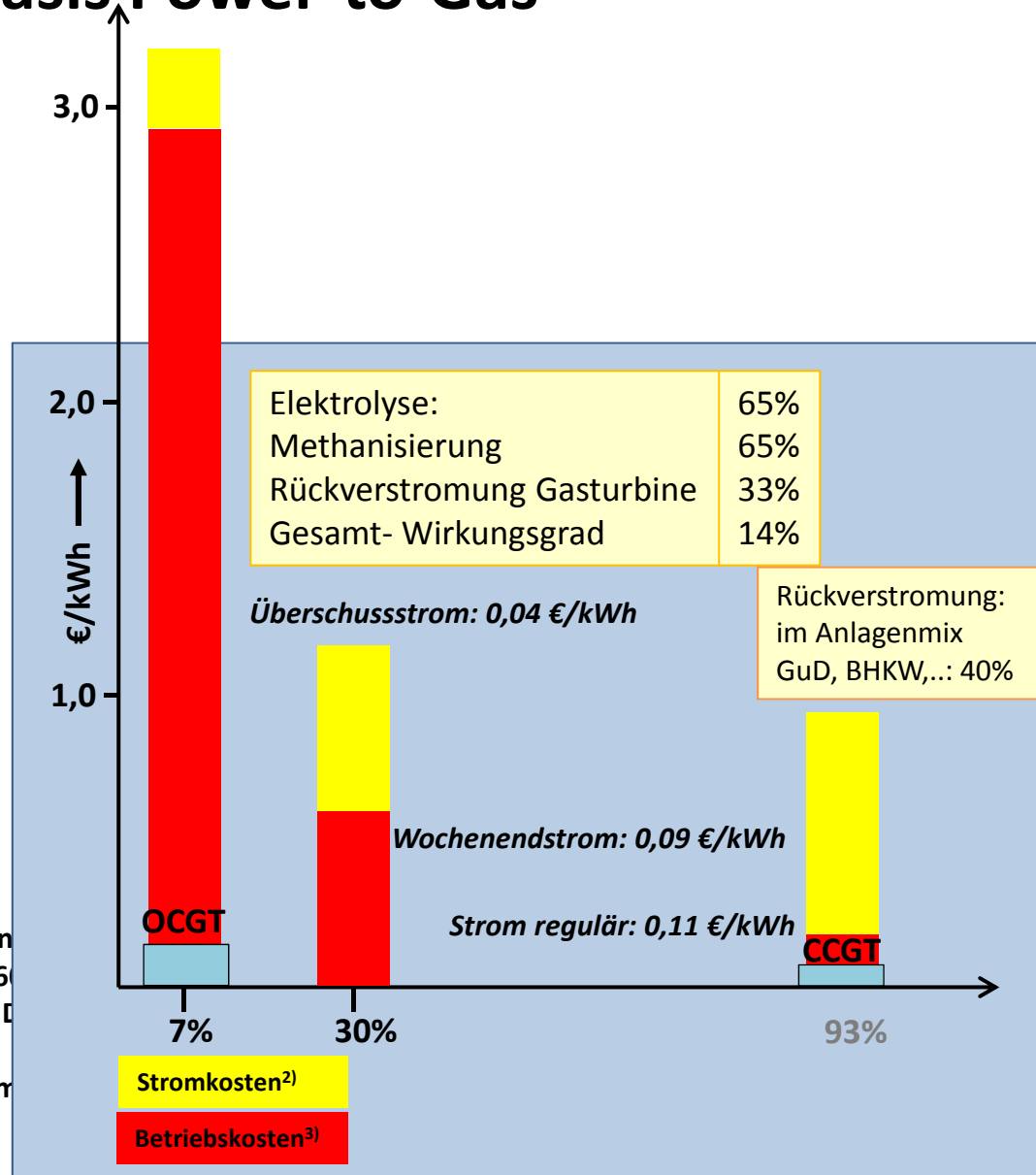
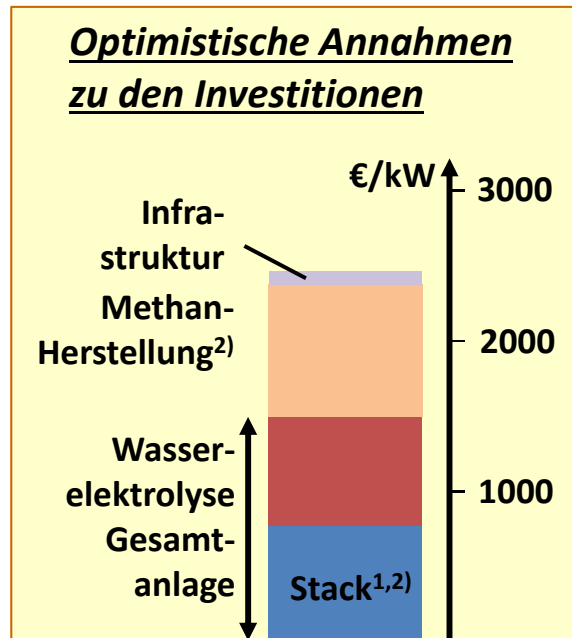
3) Abschreibung: 6%; Betrieb und Instandhaltung: 4% des Invests/a

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.**