

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit verwenden dieser Text und das gesprochene Wort im Folgenden das generische Maskulinum, das Frauen, Männer und Diverse gleichermaßen einschließt.

Die Recherchen und Berechnungen sind mit großer Sorgfalt durchgeführt worden. Trotzdem können Fehler aufgetreten sein; es gibt keine Gewähr für die Richtigkeit. Daher haftet der Verfasser auch nicht für Maßnahmen und die Folgen von Maßnahmen, die aus den hier getroffenen Aussagen abgeleitet werden.

Es wird teilweise von Energieerzeugung und -generierung gesprochen, es handelt sich natürlich immer um Energieumwandlungen. Des Weiteren sind die Begriffe Strom und elektrische Energie aus Gründen der besseren Verständlichkeit – nicht ganz exakt – weitgehend synonym verwendet worden. Kohlendioxid und Kohlenstoffdioxid werden als Begriffe für die Verbindung CO_2 verwendet.

CO_2 -neutral bzw. CO_2 -frei bezieht sich in der Mehrzahl der Fälle auf Vorgänge und den Betrieb von Einrichtungen und Anlagen, eventuelle Emissionen bei deren Herstellung bzw. Verschrottung sind zumeist nicht berücksichtigt worden.

Fotos und Filmclips sind mir von **saVRee.com** zur Verfügung gestellt worden. Dafür mein ausdrücklicher Dank.

CO₂-neutrale Energiewirtschaft bis 2050 – ist das realistisch?

**Prof. Dr.-Ing. Martin Freitag
Livestream 10.11.2021**

Gliederung

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Einleitung - ein paar Fragen vorab

1 Analyse des Istzustandes

2 CO₂-Reduktionspotenziale

3 Fokus: Regenerative Energieträger

4 Vorschlag: Sanfter Übergang zu weniger CO₂-Emissionen

5 Zusammenfassung

Ein paar Fragen vorab

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Ist die globale Erwärmung (Klimawandel) Tatsache?

Ja, das merkt jeder selbst, Nachweis ist zudem durch Messungen erfolgt.

Ist die Klimaerwärmung durch Treibhausgase verursacht?

Ja. CO₂-Anteil wächst, kann man messen. Kausalzusammenhang erkenn- und erklärbar.

Wenn es so weitergeht...

ist zu erwarten:

- Neue Wetter-Phänomene (Starkregen, Tornados,...)
- Albedo geht zurück
- Meeresspiegel steigen an
- Luft- und Meeresströmungen ändern sich (El Nino, Golfstrom?)
- Permafrostböden tauen
- Polkappen und Gletscher schmelzen ab
- CO₂ wird in warmen Ozeanen weniger gelöst
- Methanhydroxid wird frei ...

→ viele nichtlineare, selbstverstärkende Effekte.

Ist die Klimaerwärmung durch den Menschen verursacht?

Sehr wahrscheinlich ja.

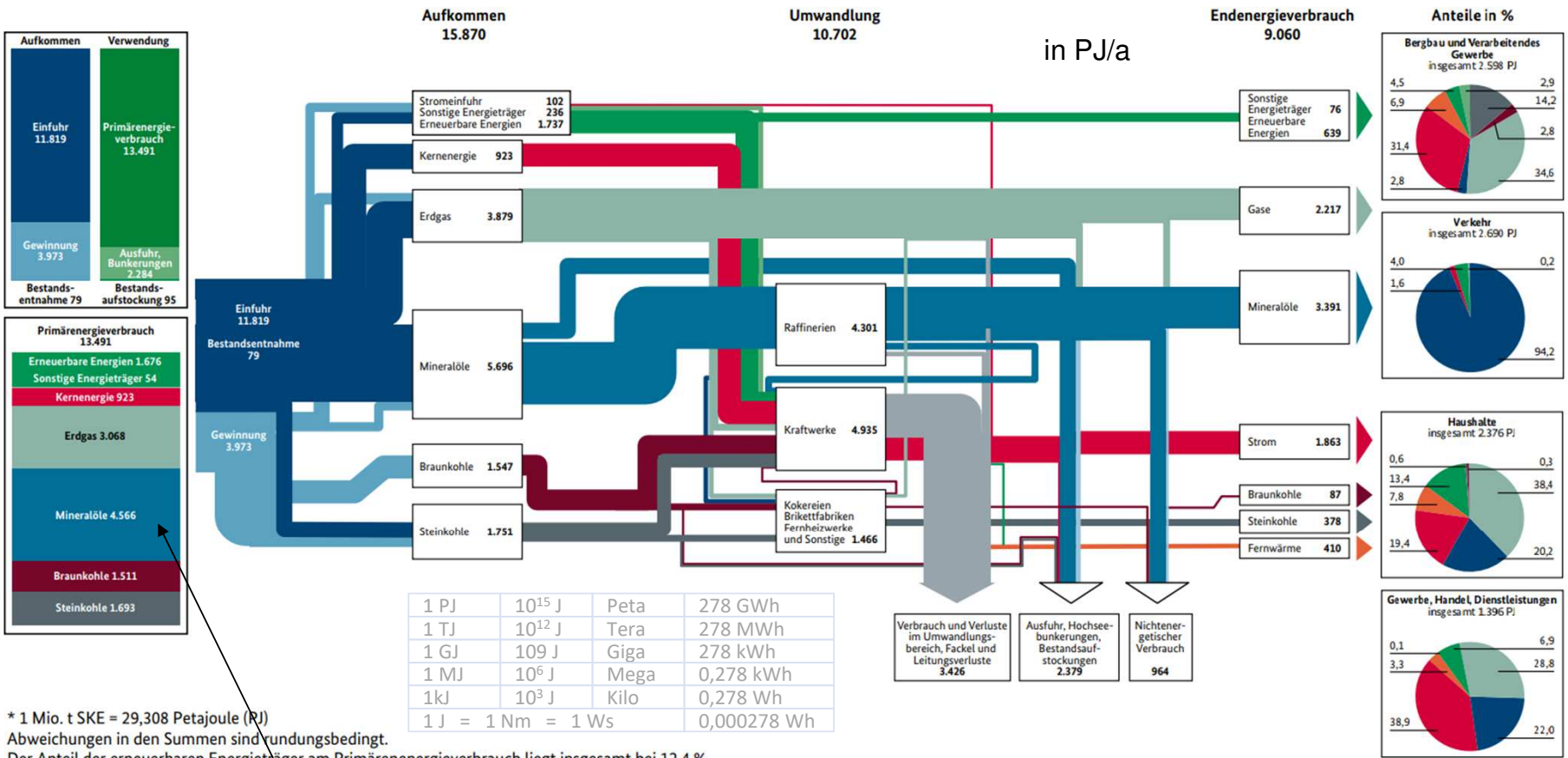
Sind die Zukunfts-Simulationen richtig?

Weiß ich nicht, aber es sind Aussagen von Fachleuten.

1 Analyse des Istzustandes

Energieflussbild Deutschland 2016

- 1 Istzustand
- 2 Reduktionspotenziale
- 3 Regenerative Energien
- 4 Technischer Fortschritt
- 5 Vorschlag



4-Personen-Haushalt in D,
Einfamilienhaus
Strom: 5000 kWh/a
Wärme: 2000...15000 kWh/a
 (Passivhaus ... Baujahr 1975)
Mobilität: 12000 kWh/a
 20000km/(50km/h)*30kW
Summe: 19000...32000 kWh/a
 (entspricht 68...115 GJ/a)

* 1 Mio. t SKE = 29,308 Petajoule (PJ)
 Abweichungen in den Summen sind Rundungsbedingt.
 Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch liegt insgesamt bei 12,4 %.

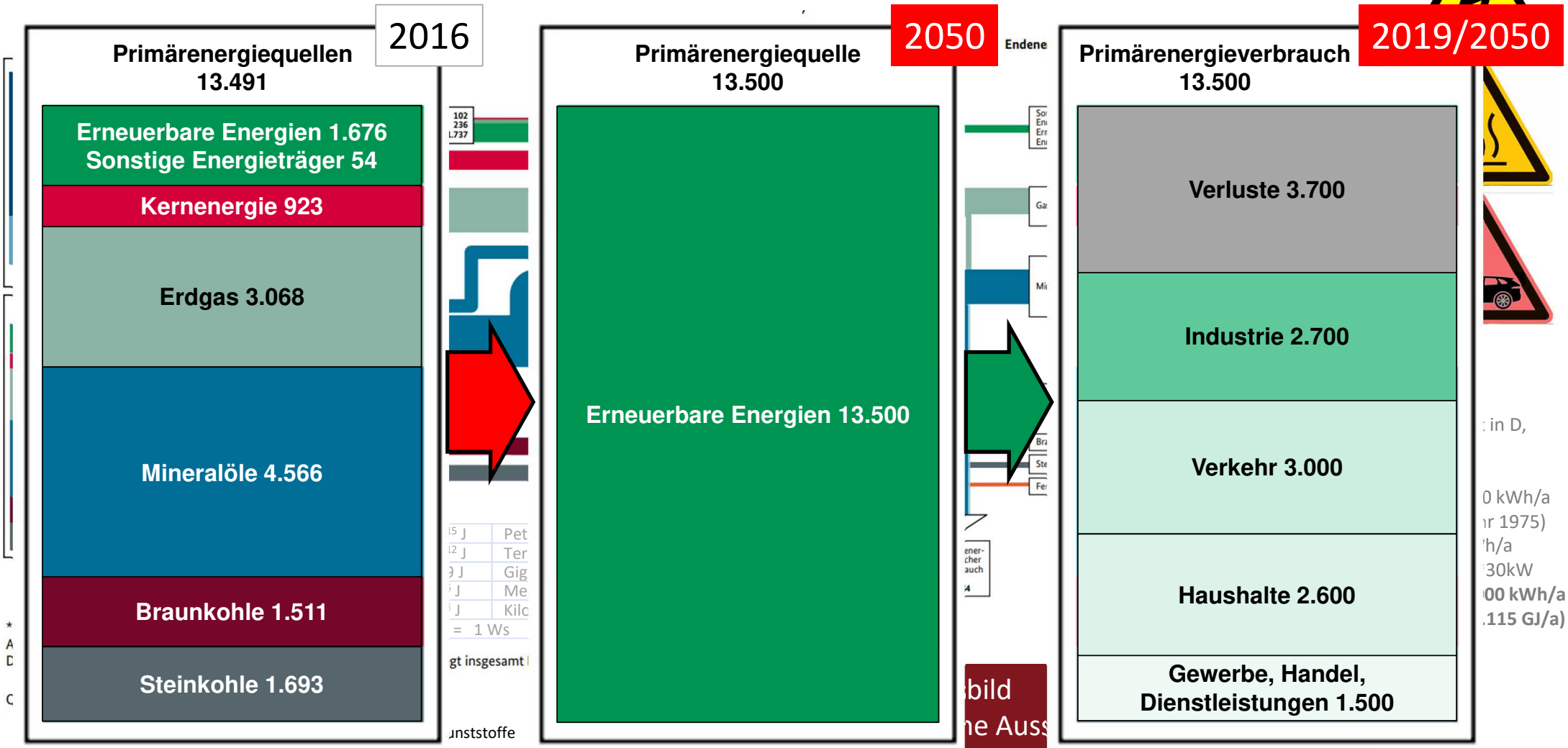
Quelle: AG Energiebilanzen e.V.

D: nur ca. 6% davon für Kunststoffe

Energieflussbild → wohin (Branchen)
 → noch keine Aussage zu CO₂-Emissionen!

Energieflussbild Deutschland 2016

- 1 Istzustand
- 2 Reduktionspotenziale
- 3 Regenerative Energien
- 4 Technischer Fortschritt
- 5 Vorschlag



Energieflussbild Deutschland 2017 Verbrauch nach Nutzung (Energieformen)

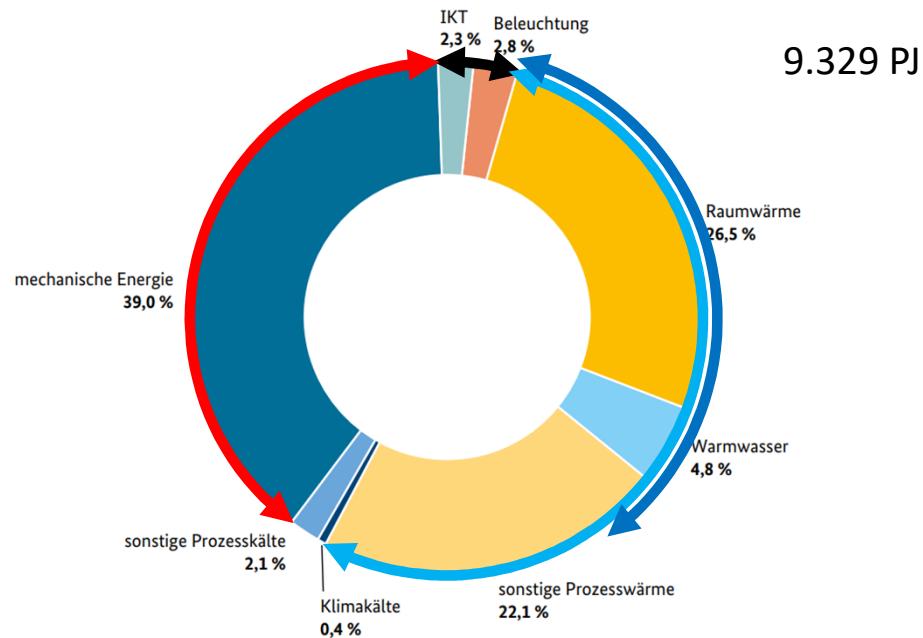
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



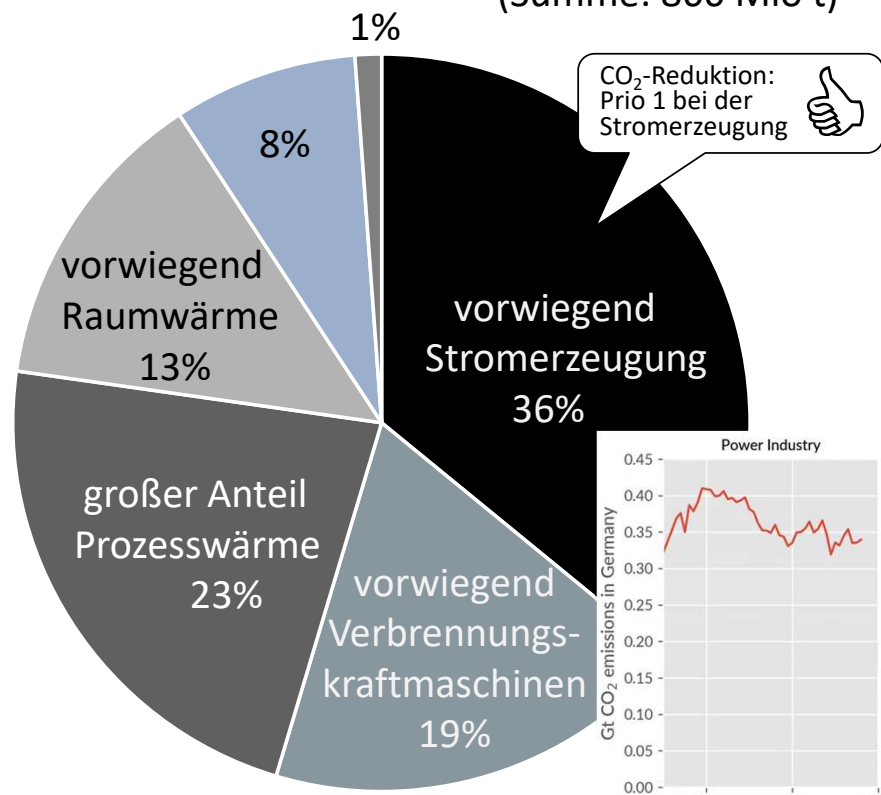
Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

Fast 60% der gesamten verbrauchten Energie werden als Wärme genutzt, davon mehr als die Hälfte als Wärme auf moderatem Niveau (bis 100°C) (also nicht Verhüttung, Wärmebehandlung, Zementherstellung, chem. Prozesse, Destillation usw.)

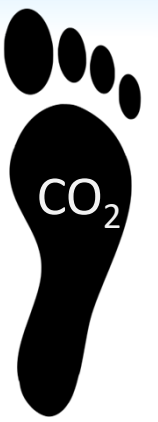


Treibhausgas-Emissionen in Deutschland 2018

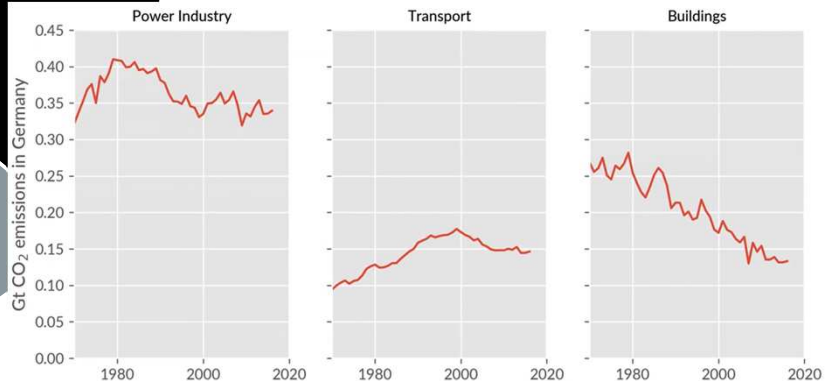
Treibhausgas-Emissionen(CO₂-Äquivalente) nach Verursacher (Summe: 866 Mio t)



4-Personen-Haushalt in D, **Einfamilienhaus**
Strom: 5,4 t/a (Braunkohle)
Wärme: 0,4...3 t/a (Passivhaus ... Baujahr 1975)
Mobilität: 3 t/a (20000 km mit 150 g/km)
Summe: 8,8...14,4 t/a



CO₂-Footprint



■ Energiewirtschaft ■ Verkehr ■ Industrie ■ Gebäude ■ Landwirtschaft ■ Sonstiges

nach Quelle: <https://www.bmu.de/pressemitteilung/klimabilanz-2018-45-prozent-weniger-treibhausgasemissionen>

Treibhausgas-Emissionen in Deutschland 2018 - Fokus Wärme

1 Istzustand

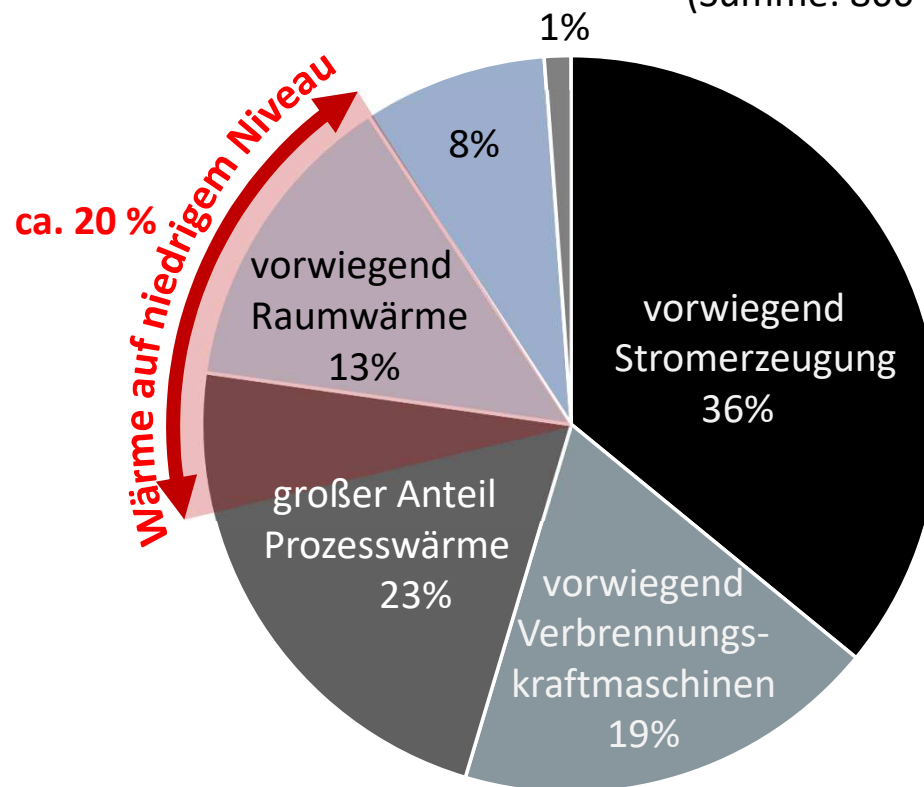
2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

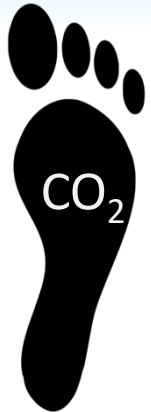
4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Treibhausgas-Emissionen(CO₂-Äquivalente) nach Verursacher
(Summe: 866 Mio t)



■ Energiewirtschaft ■ Verkehr ■ Industrie ■ Gebäude ■ Landwirtschaft ■ Sonstiges



Wo kommt die Energie her?

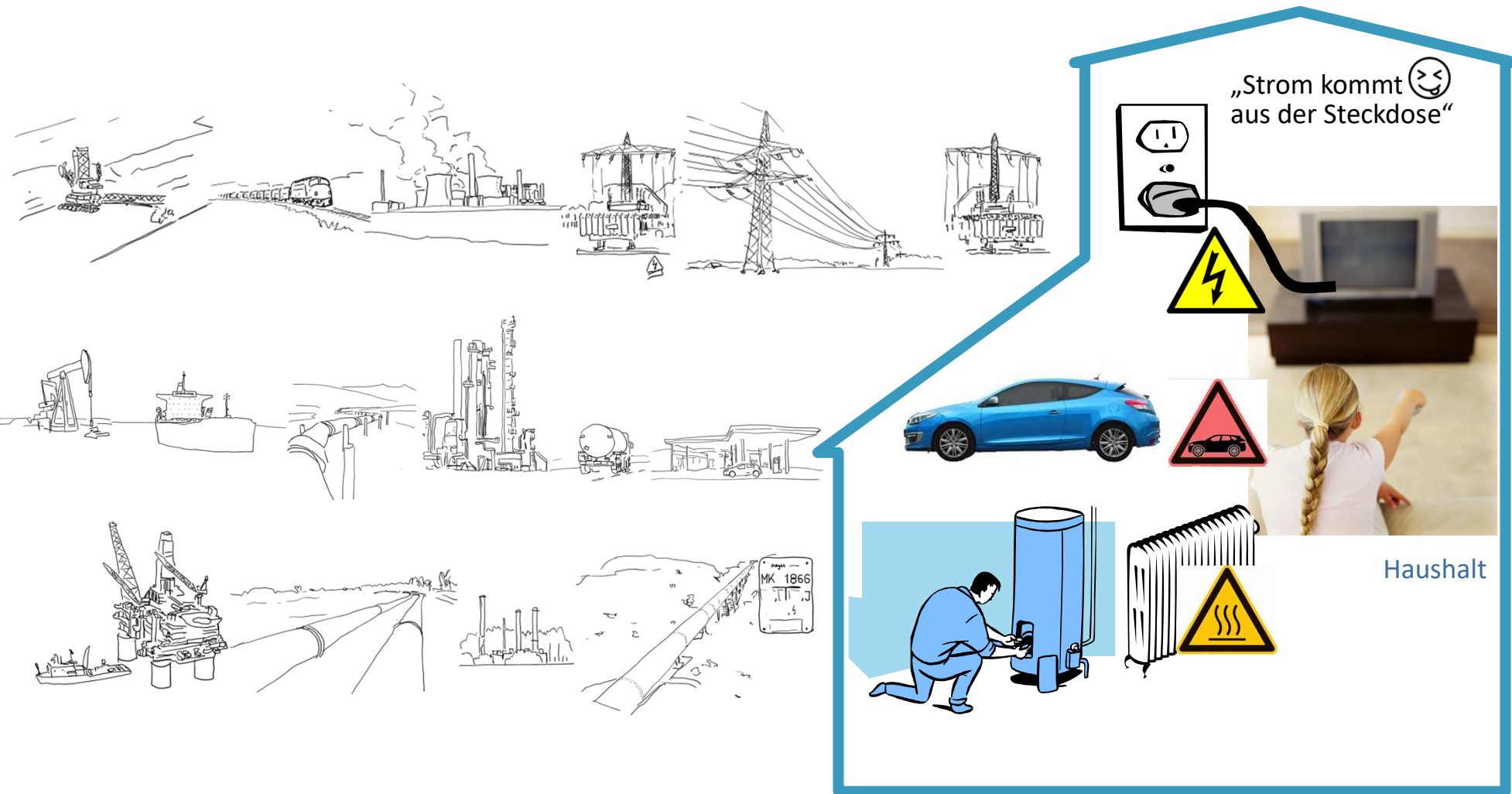
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



2 CO₂-Reduktionspotenziale

Wo zuerst ansetzen?

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

sparen!

Gesellschaft: immer mehr
spaß- und lustbetonte Egoisten

Wirtschaft: ausschließlich profitorientiert

Kultur: Verschwörungstheorien
und Ignoranz verbunden mit
unsachlicher und falscher Argumentation

→ sparen - das wird ein schwerer Weg...

mehr recyceln!

CO₂-Emissionen im Fokus

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien


4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Im Fokus der Öffentlichkeit und Medien ist

zuerst MOBILITÄT (real nur 20%) 
Erdöl; Schadstoffe ← → Elektroauto, Leistung, Reichweite, Biokraftstoffe...

dann STROM (real nur 30%) 
Atomstrom, Braunkohlekraftwerke ← → Windenergie, Photovoltaik...

und erst danach WÄRME (real 50%) 
Heizöl, Erdgaspipelines ← → Biogas, BHKW,...

25% der CO₂-Emissionen entstehen bei der Erzeugung von Wärme bei niedriger Temperatur (Hausheizungen, industrielle und gewerbliche Prozesse wie Waschen, Landwirtschaft u.ä.)

Energieversorgung heute und morgen

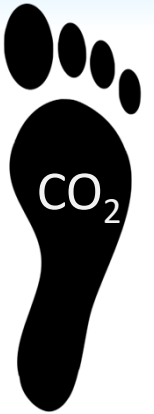
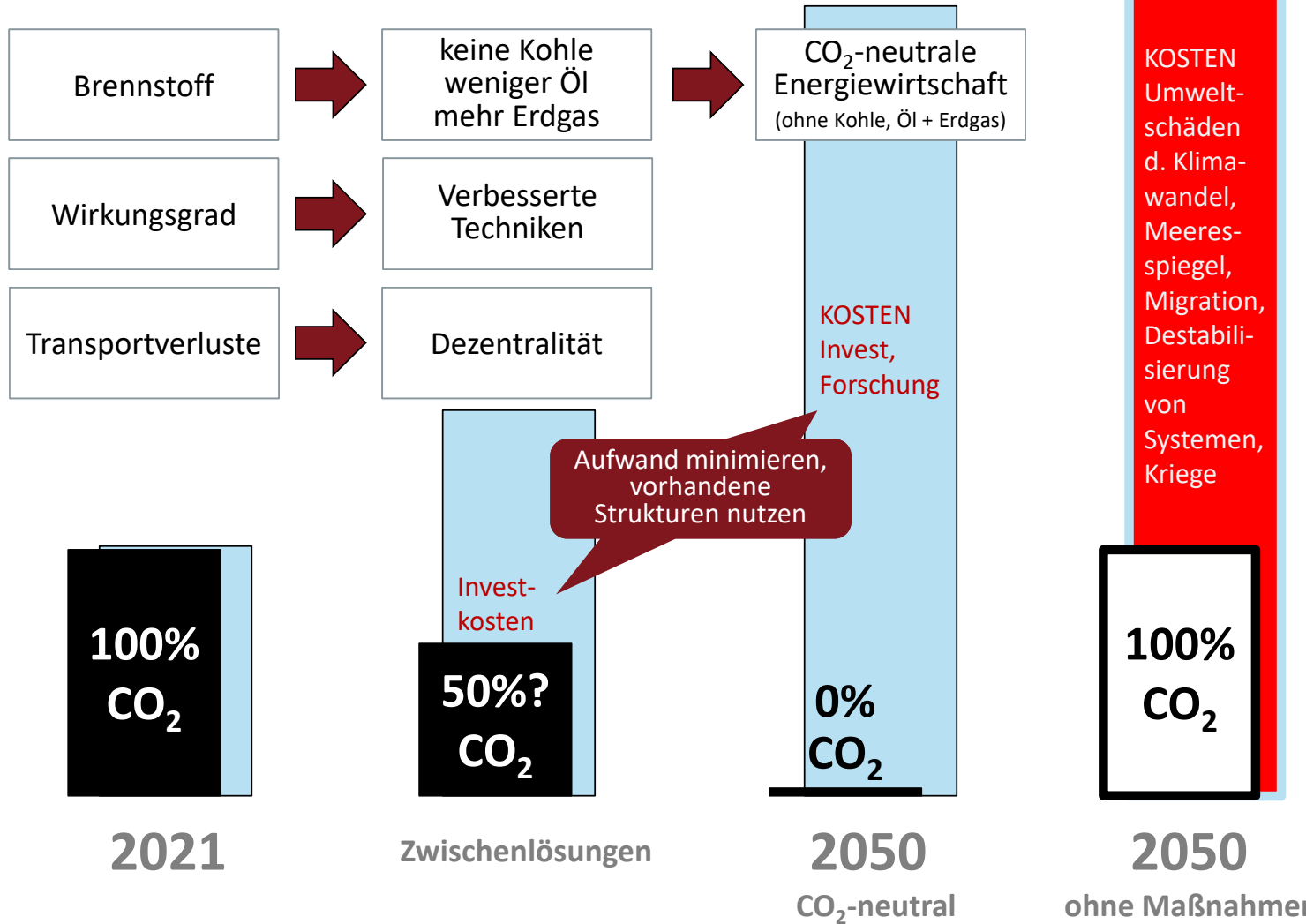
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



2.1 Energieträger und ihre CO₂-Emissionen

1 kWh → CO₂-Emissionen: Verschiedene Brennstoffe

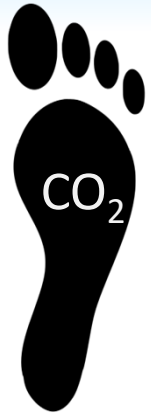
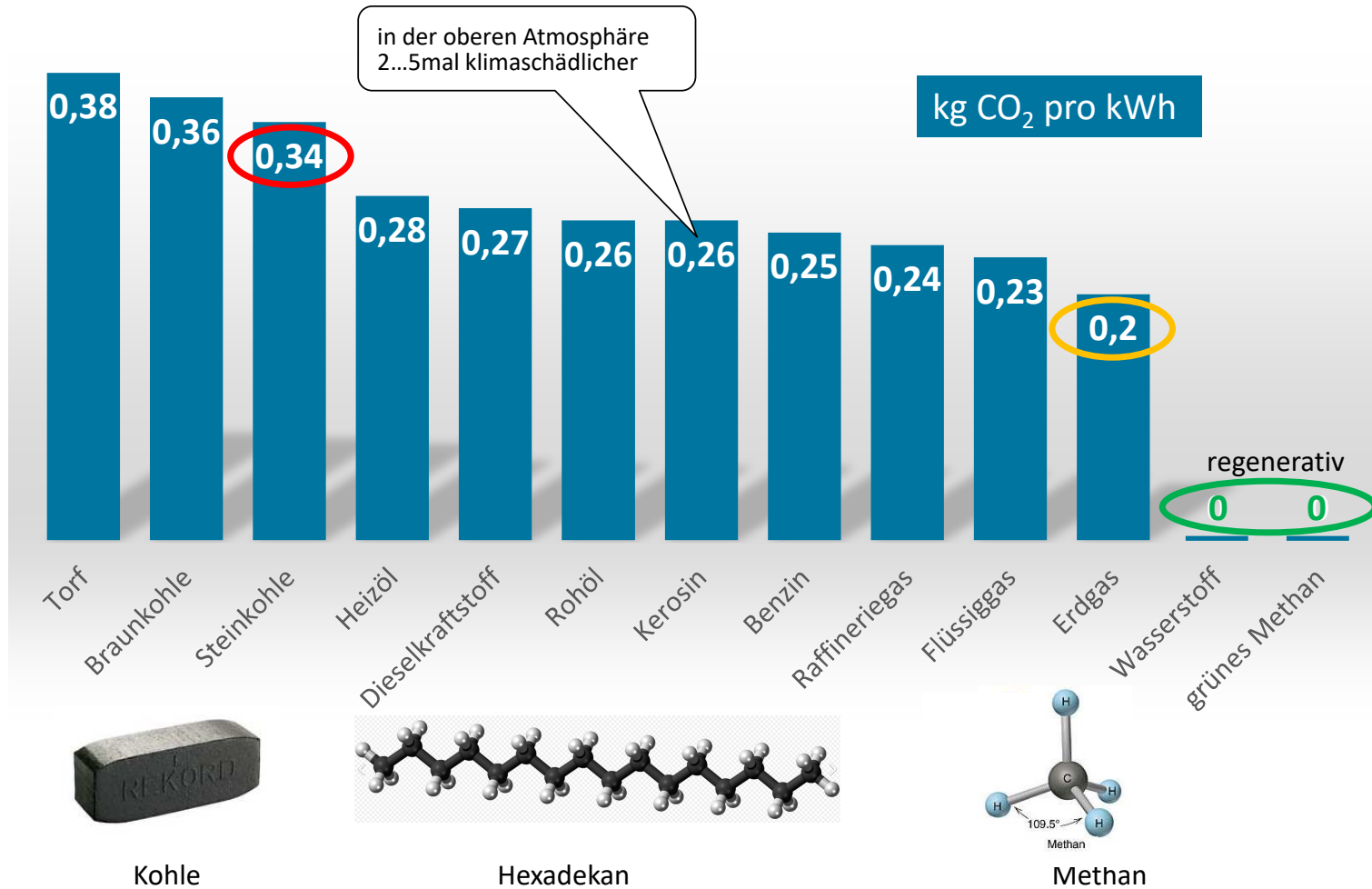
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Quelle: Quaschnig, V.: „Regenerative Energiesysteme: Technologie – Berechnung – Klimaschutz“; Carl Hanser Verlag München, 2019

2.2 Wirkungsgrade der Energiewandlungen

Zentrale Stromerzeugung mit Wärmekraftwerk, konventionell

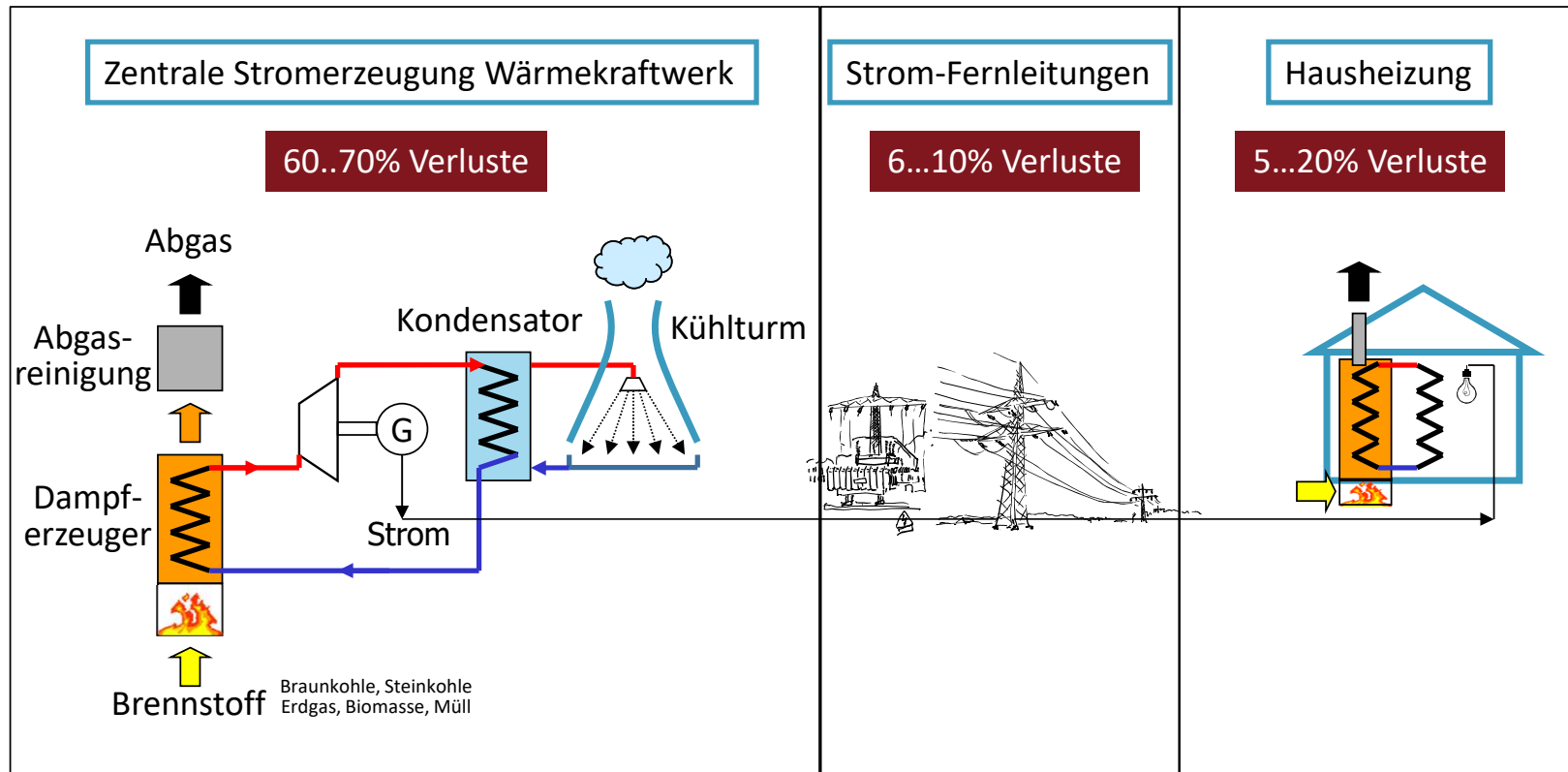
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Entwicklung der Kraftwerkstechnik

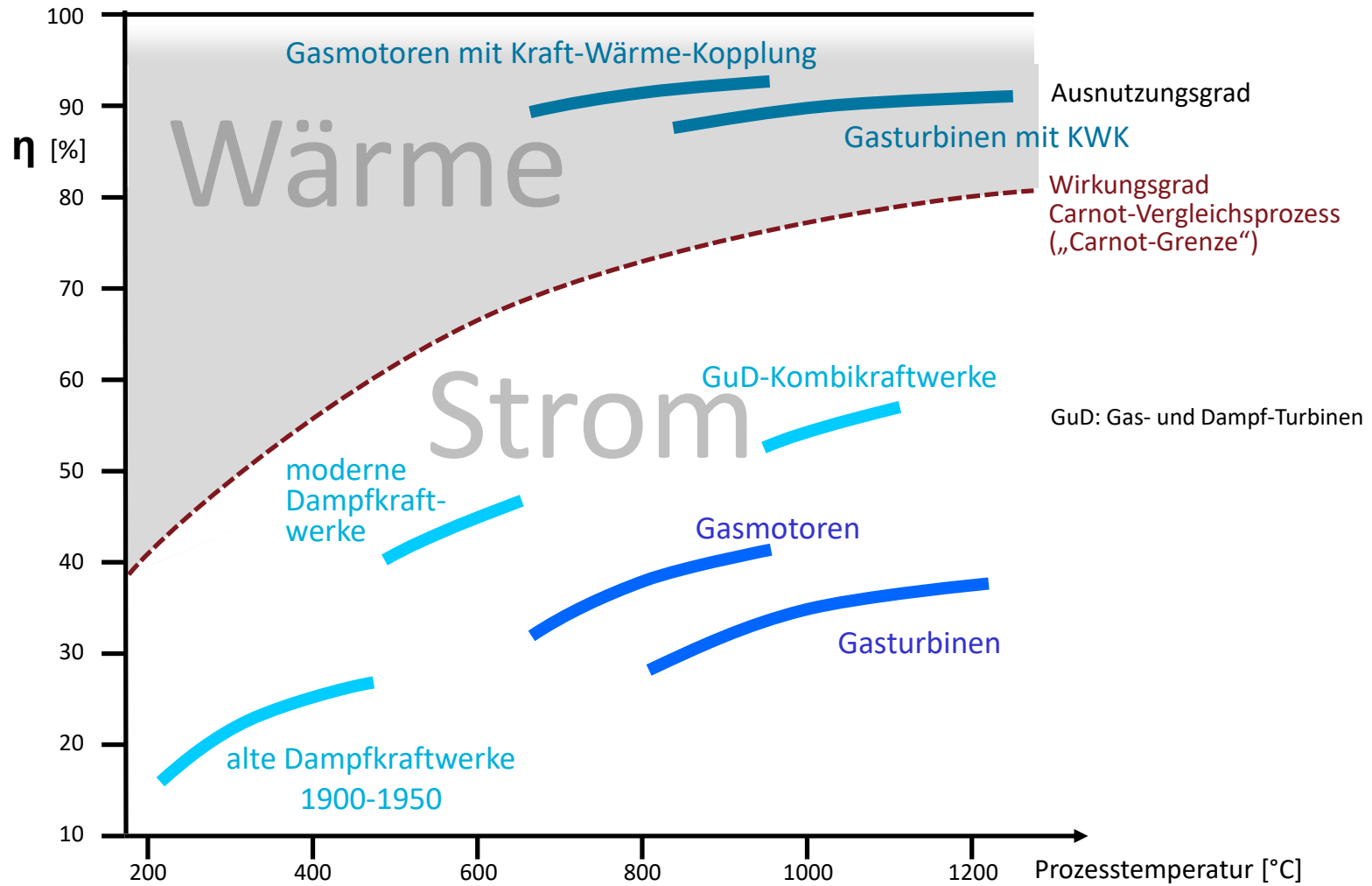
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



1 kWh → CO₂-Emissionen: Brennstoffe und Wirkungsgrade

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

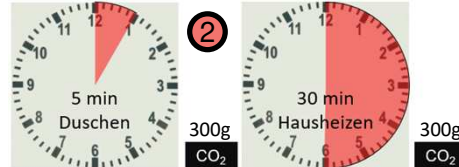
5 Zusammenfassung

1 kWh:

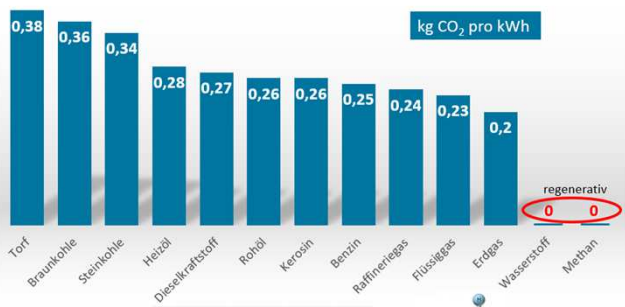
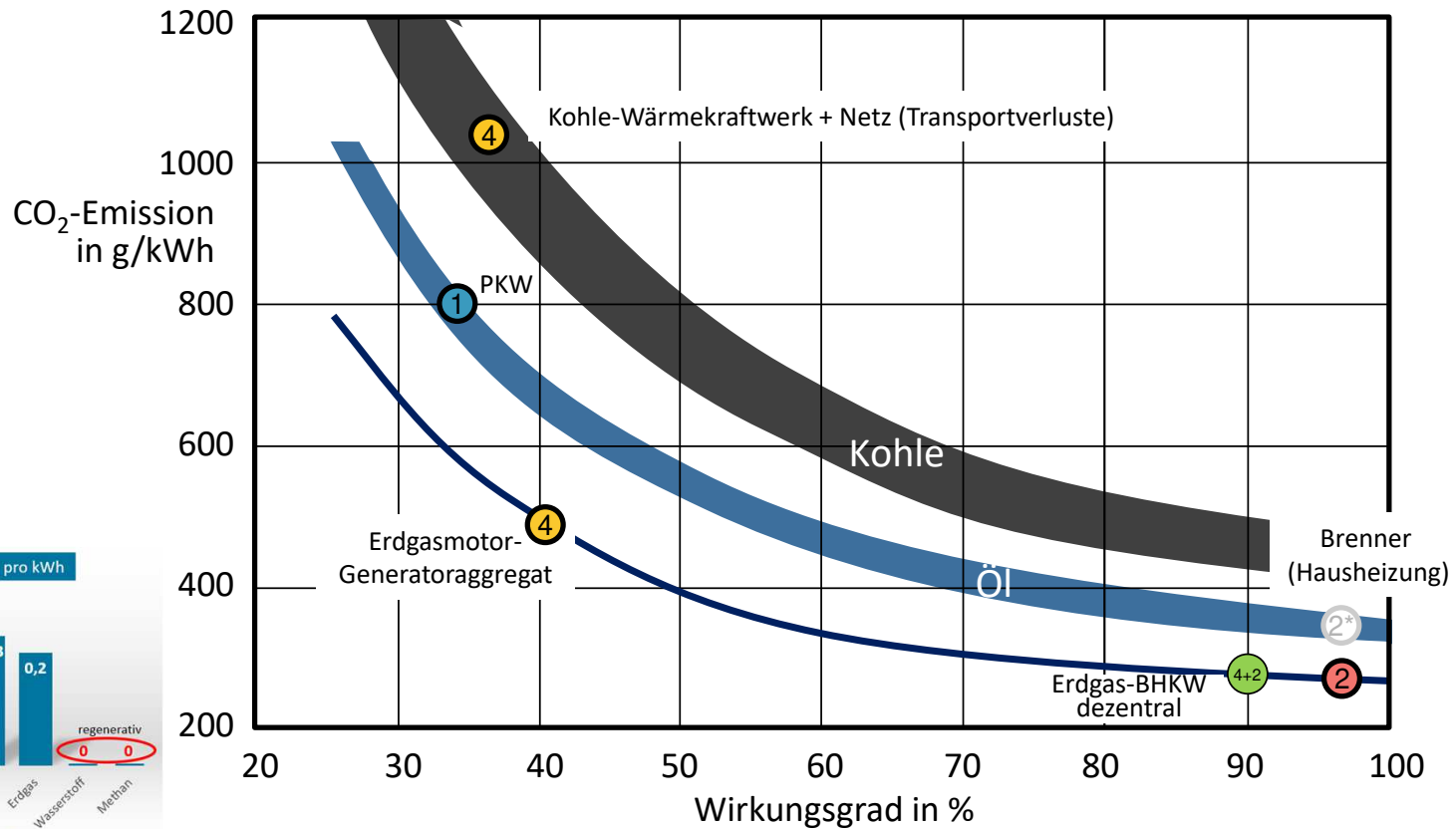
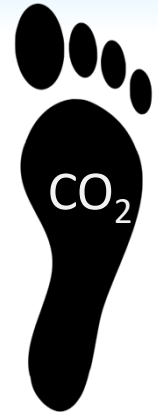
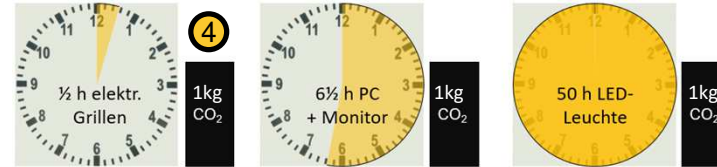
Mobilität



Wärme



Strom



nach: TUM, Lehrstuhl Energiesysteme, Prof. Spielhoff

Zentrale Stromerzeugung, ohne Kraft-Wärme-Kopplung

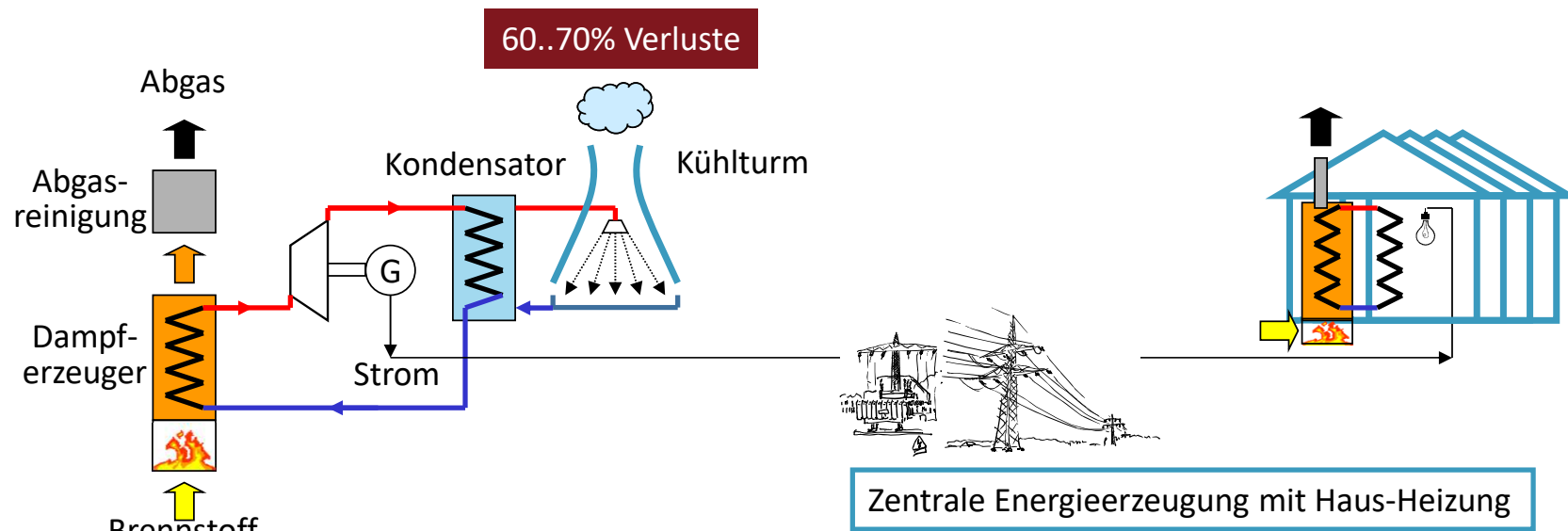
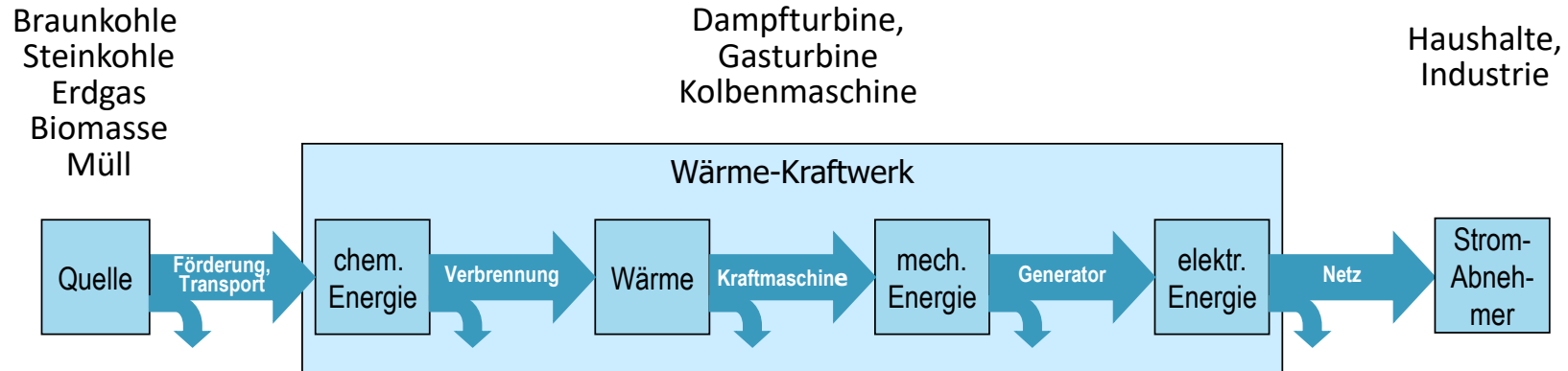
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Zentrale Stromerzeugung, mit Kraft-Wärme-Kopplung

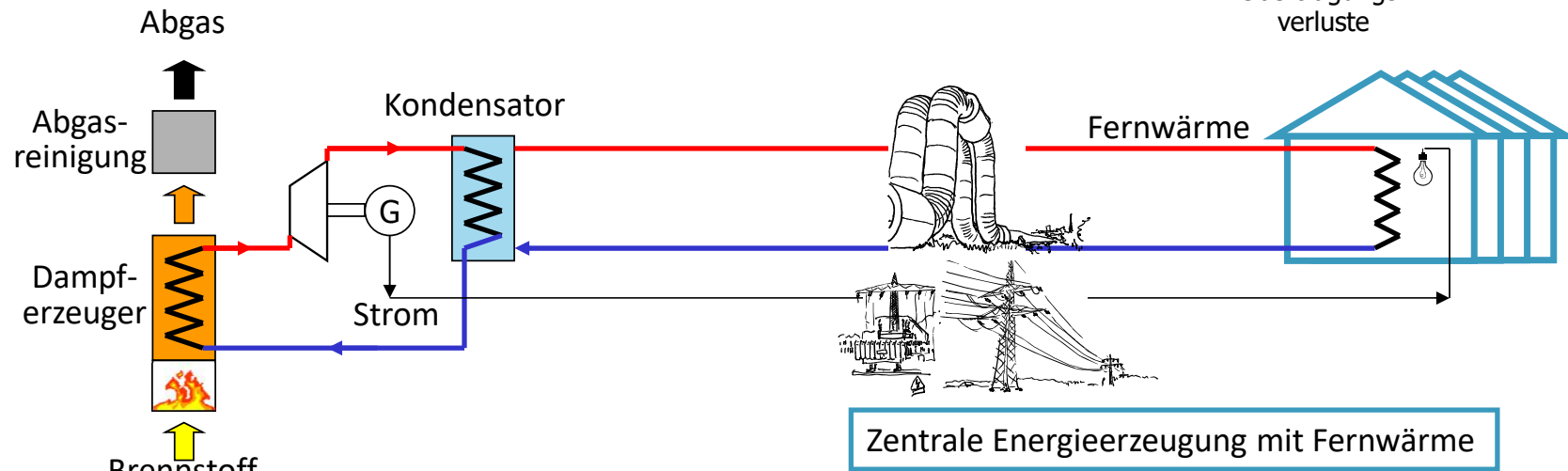
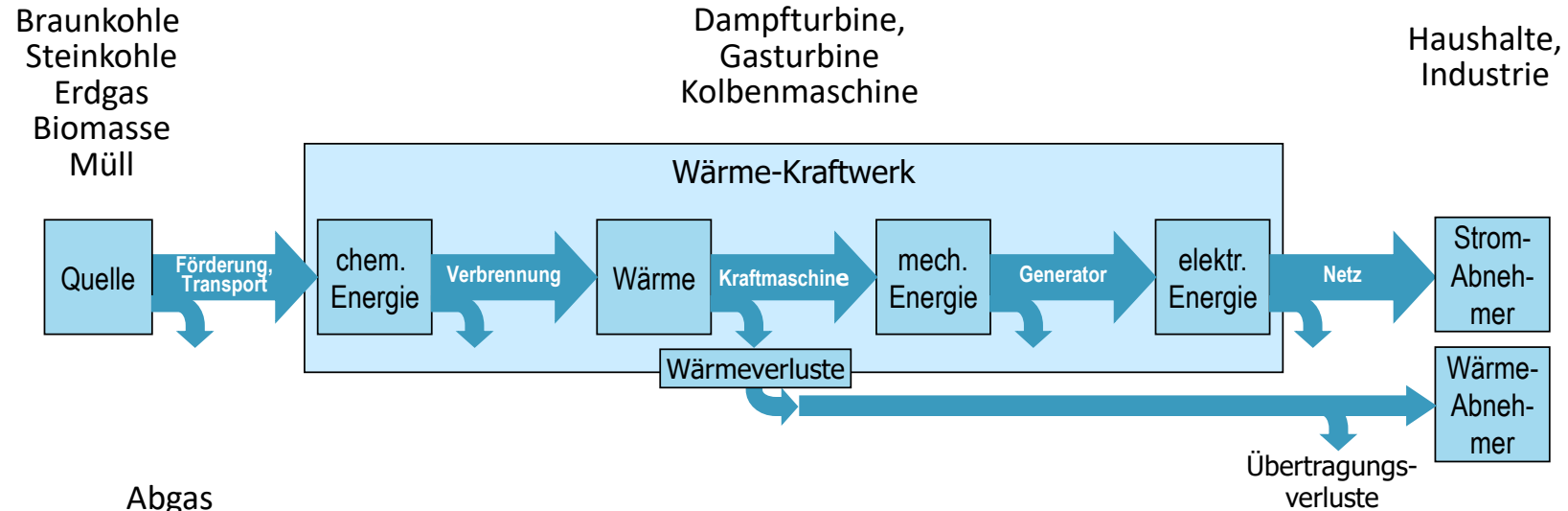
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Dezentrale Stromerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung (BHKW)

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

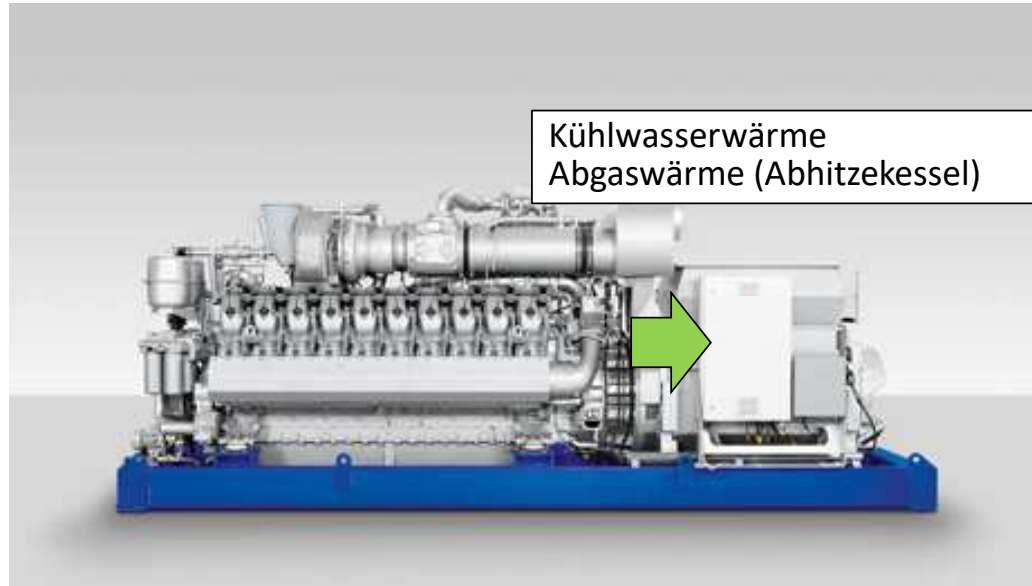
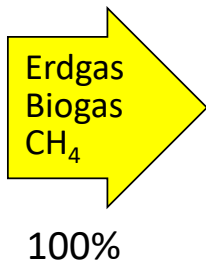
5 Zusammenfassung

Ausnutzungsgrad des BHKW (mit KWK) 95%

Brennwerttechnik



wichtig:
Methanzahl



Kühlwasserwärme
Abgaswärme (Abhitzekeessel)

Verluste
5%

Wärmeleistung
55%

elektrische
Leistung
40%

Wirkungsgrad der
Verbrennungskraftmaschine 42%

Wirkungsgrad des
Generators 95%

Wirkungsgrad des
Aggregats 40%

Dezentrale Anlagen anstreben!

2.3 Transportverluste

Transportverluste (Hochspannungsleitung)

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Standorte von PRTR*-berichtspflichtigen Kraftwerken** mit Luftemissionen im Jahr 2016

* Pollutant Release and Transfer Register

** Wärmekraftwerke und andere Verbrennungsanlagen



Deutschland:
35.000 km Freileitungen
Höchstspannungsnetz

Erdkabel 3...10 mal so teuer (Flüsse, Straßen, andere Trassen,...)
Wartung aufwändiger
„Stromautobahnen“???

Sinnvolle Übertragungslängen:
Überland-Freileitungen: **einige 100 km**
Seekabel: weniger als 100km

Dezentrale Anlagen anstreben!

Alternative: Gleichstromkabel → wenig Erfahrungen

aber: NordLink-Gleichstrom-Seekabel (1,4 GW) Norwegen → D seit April 2021 in Betrieb (2 Mrd €!)

Transportverluste (Erdgasleitung)

1 Istzustand

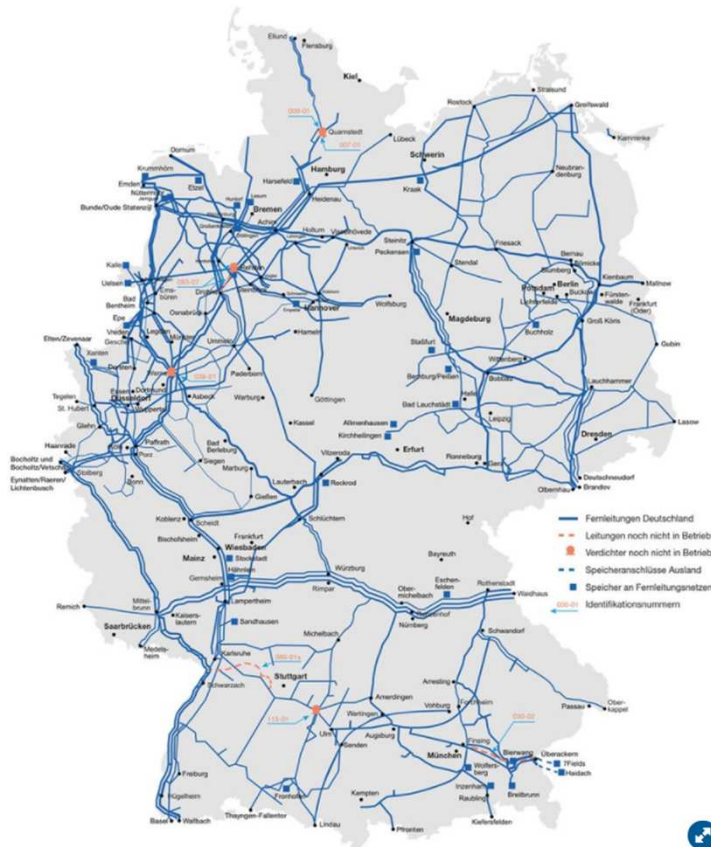
2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Erdgasnetz (Fernleitungen) Feb. 2017



Deutschland:
511.000 km
Erdgasleitungsnetz

Hochdruck (>1 bis 4 bar und 16 bis 100 bar Überdruck)
Mitteldruck (>100 mbar bis ≤ 1 bar Überdruck)
Niederdruck (≤ 100 mbar Überdruck) (Hausanschluss)

**Verdichterstationen (KWK) mit Gasmotoren
oder Gasturbinen etwa alle 100 km
verbrauchen bis zu 1% des geförderten Gases**

MEHR ALS 1.000 TWh werden jährlich im Gasnetz transportiert,
etwa 600 TWh im Stromnetz.

aus: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: „Erdgasversorgung in Deutschland“, 2021
<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/gas-erdgasversorgung-in-deutschland.html>

Transportverluste (Fernwärmeleitung)

1 Istzustand

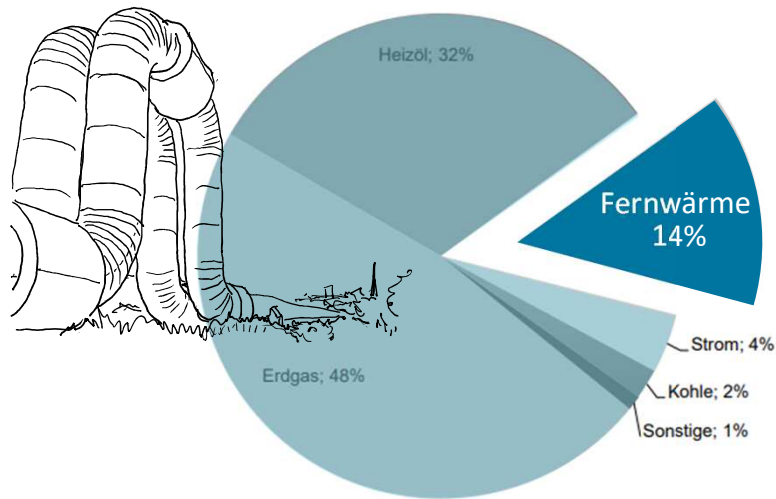
2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

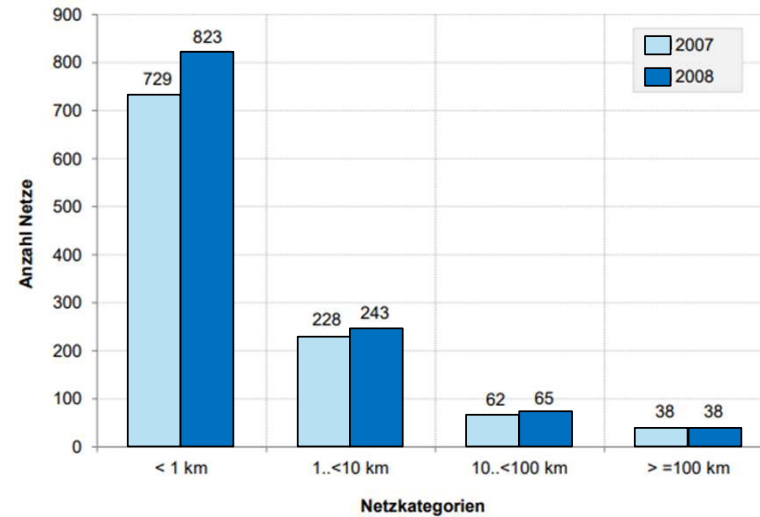
5 Zusammenfassung

Beheizung von Wohngebäuden in Deutschland (2010)



Quelle: Auskunft des AGFW

Häufigkeit von Fernwärmenetzen nach Entfernung



Sinnvolle Übertragungslängen:
nur wenige 100 m! (Wohn- oder Gewerbegebiet, Stadtteil)

Dezentrale Anlagen anstreben!

Transportverluste - Übersicht

1 Istzustand

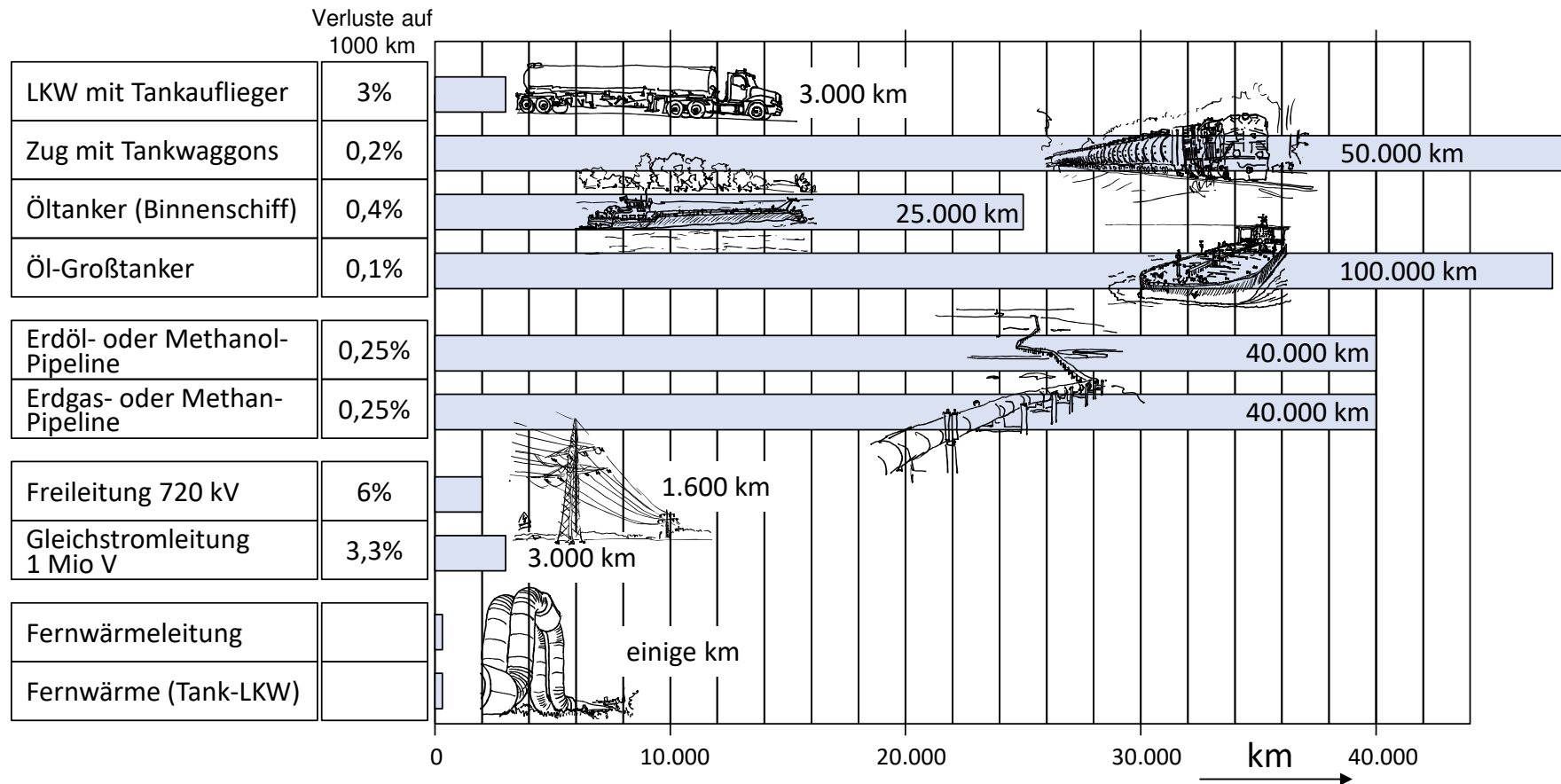
2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Reichweite bei 10% Verlust der transportierten Energie



Bockhorst, M.: „Mit Vollgas in die Energiekrise“, Books on Demand GmbH, Norderstedt 2006

3 Fokus: Regenerative Energieträger

Übersicht regenerative Energieträger

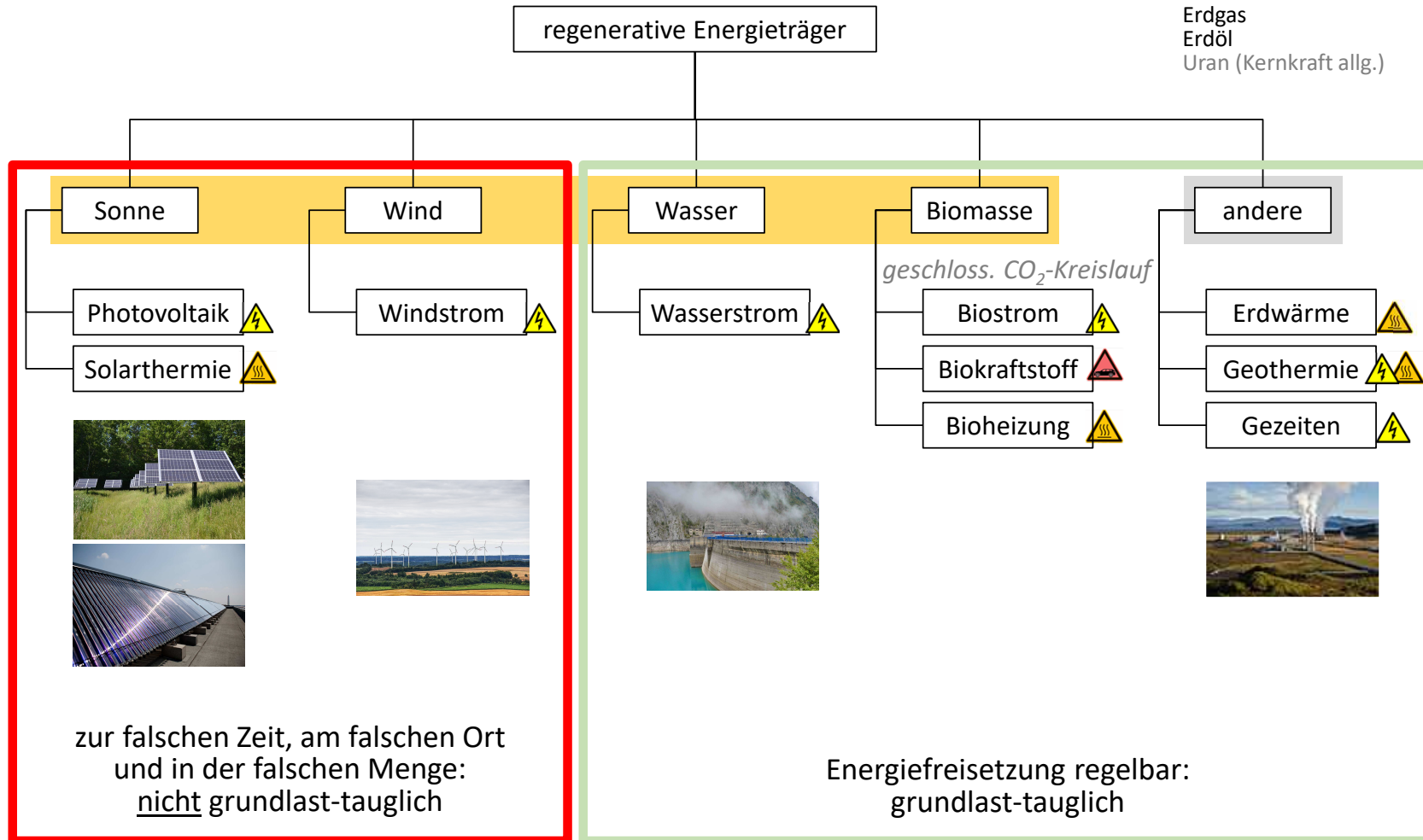
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



nicht regenerativ:
Kohle
Erdgas
Erdöl
Uran (Kernkraft allg.)



Nutzung der erneuerbaren Energien Deutschland 2020

1 Istzustand

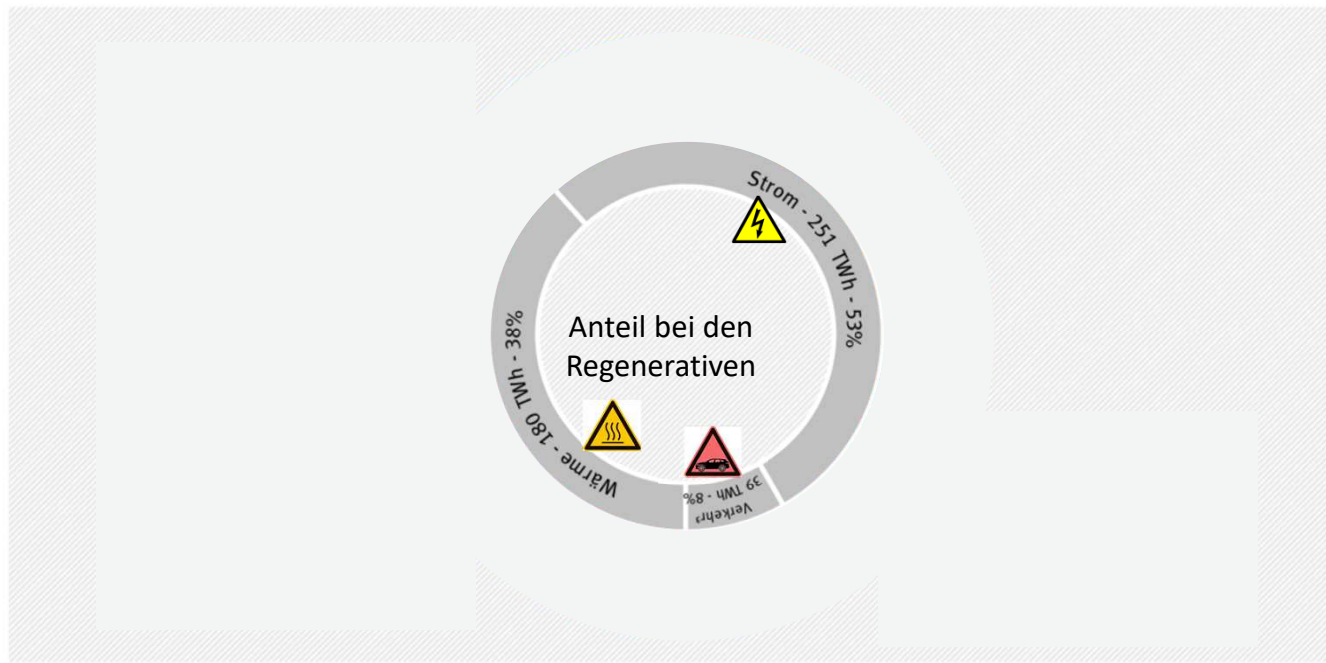
2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Summe: 470 TWh



¹ mit biogenem Anteil des Abfalls

² Stromerzeugung aus Geothermie etwa 0,2 TWh (nicht separat dargestellt)

³ Verbrauch von EE-Strom im Verkehr etwa 4,9 TWh

Abweichungen bedingt durch Rundungen, * vorläufige Werte

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) auf Basis AGEE-Stat
Stand 02/2021

Wind- und Solarstrom kann direkt ins Netz eingespeist werden.
→ Erneuerbare Energien bei Wärme und Kraftstoffen noch unterrepräsentiert



3.1 Wind- und Solarenergie

Verteilung Wind und Sonne in Deutschland

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

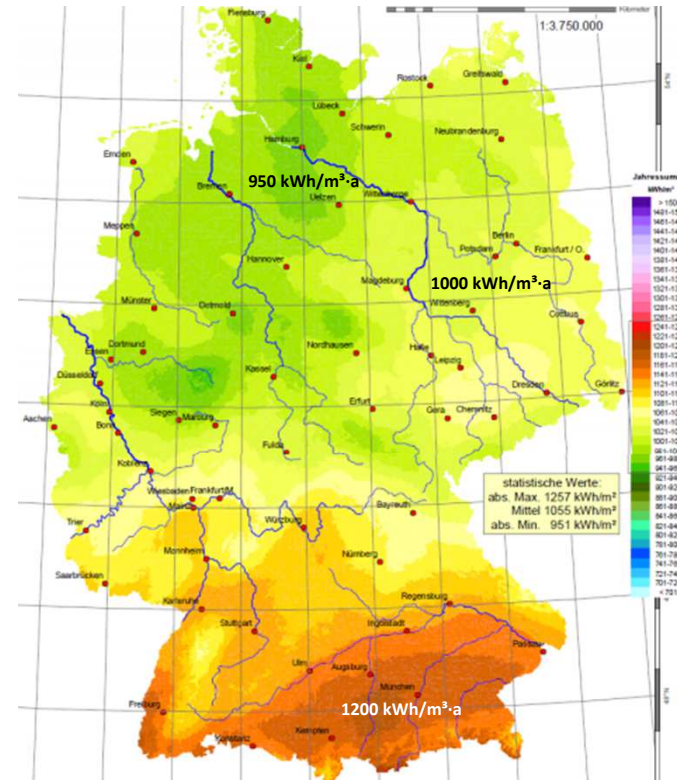
5 Zusammenfassung

Island: Geothermie

Norwegen, Schweiz: Wasserkraft

Nordafrika: Solarenergie

Deutschland: Solar- und Windenergie



nur im Norden effektiv, da Wind: $P \sim w^3$

im Süden 1200 kWh/m²·a (Durchschnitt 1055 kWh/m²·a)

Wind- und Solarstromerzeugung in TWh (2016 - 2018)

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

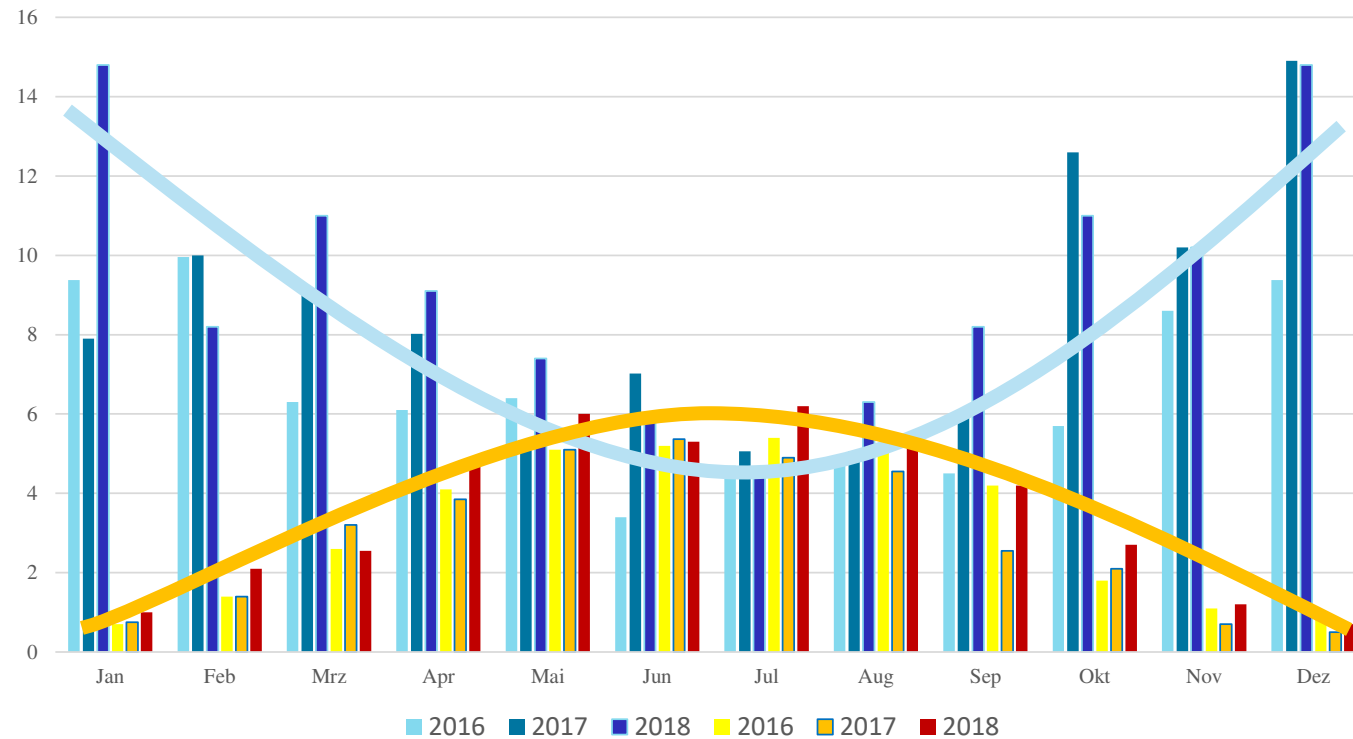
3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Wind- und Solarstromerzeugung (monatl.) Deutschland in TWh



Blautöne: Wind
Rottöne: Sonne

Volatilität: Wind- und Solarstrom → stündlicher „Zappelstrom“

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

2014



H.-W. Sinn/European Economic Review 99 (2017) 130–150

133

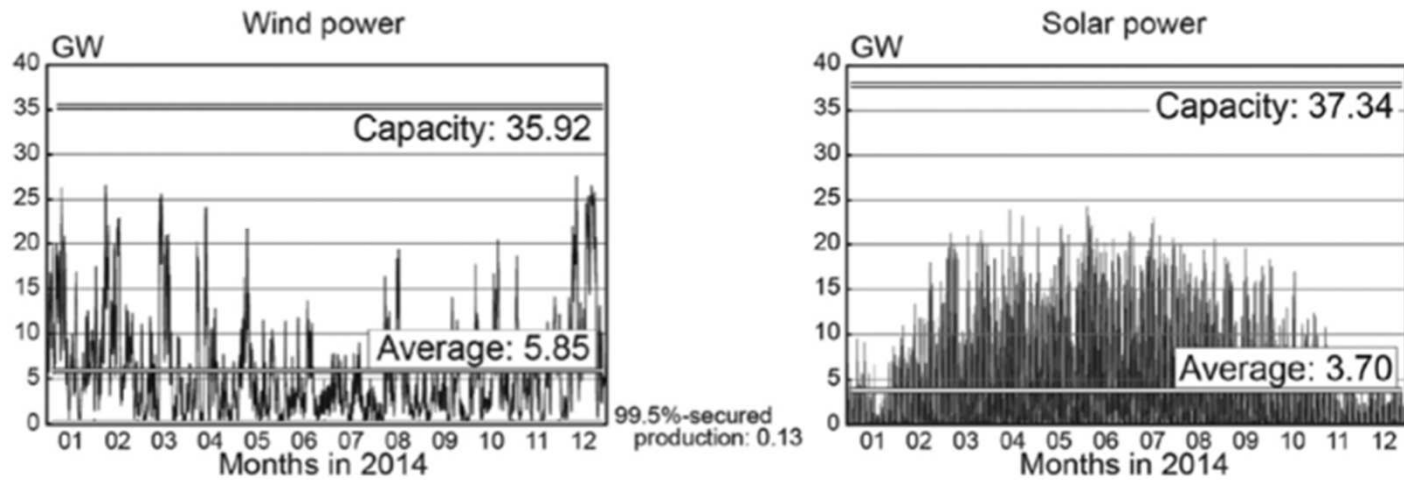


Fig. 2. Wind and solar power in Germany 2014 (hourly data).

Sinn, H.-W.: "Buffering volatility: A study on the limits of Germany's energy revolution"

Smart Grid - Lösungen

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



2014

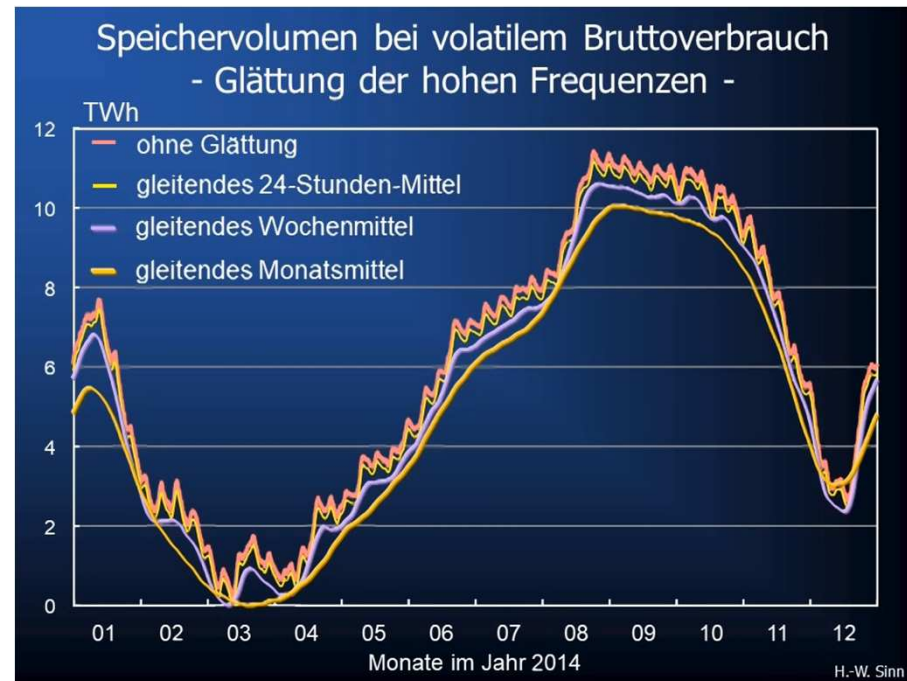
Intelligent den regenerativen Strom dann nutzen, wenn er anfällt

Klassisches Beispiel:

Waschmaschine nur dann laufen lassen, wenn regenerativer Strom verfügbar ist

Untersuchung des Ifo-Institutes München:

- Ausgleich Tagesschwankungen möglich,
- Ausgleich saisonaler (jahreszeitlicher) Schwankungen nicht möglich



Große saisonale Energiespeicher bleiben trotzdem unbedingt notwendig

Sinn, H-W.: "Buffering volatility: A study on the limits of Germany's energy revolution"

Zwischenspeicherung der Energie für saisonale Schwankungen

1 Istzustand

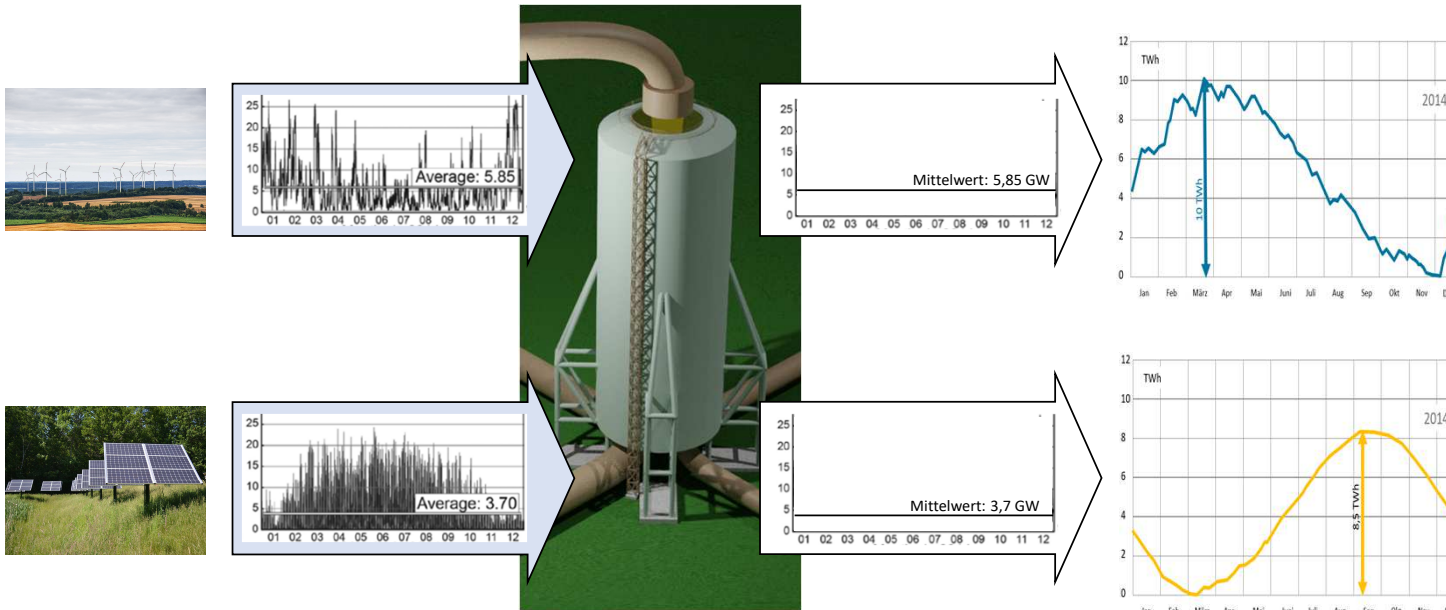
2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

2014



Speicherung:
Akku, Wasserstoff, Pumpspeicherkraftwerk,...

Quantifizierung des Zwischenspeicherungsbedarfs (1)

1 Istzustand

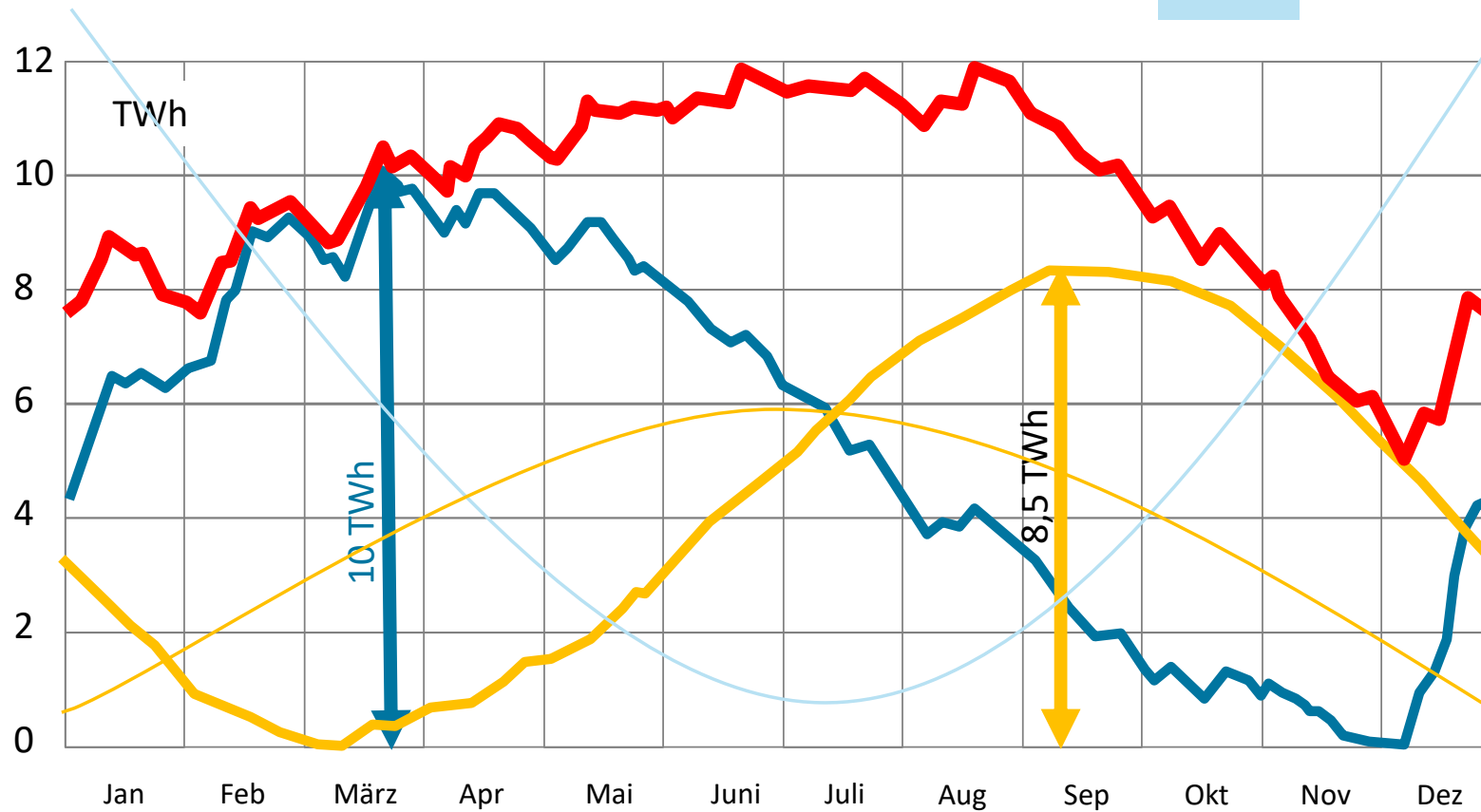
2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

2014



Sinn, h-W.: "Buffering volatility: A study on the limits of Germany's energy revolution"

Quantifizierung des Zwischenspeicherungsbedarfs (1)

1 Istzustand

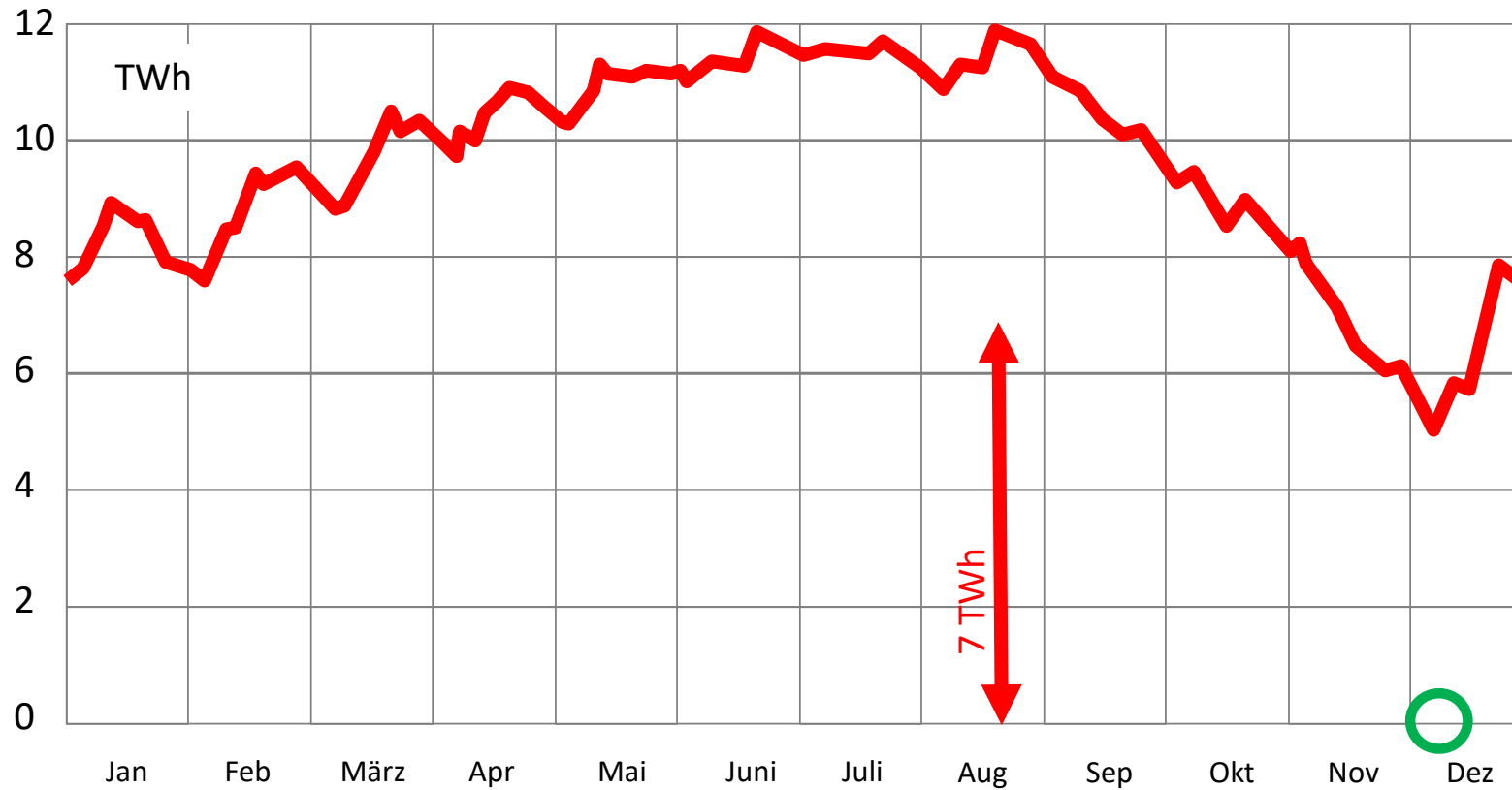
2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

2014



Sinn, h-W.: "Buffering volatility: A study on the limits of Germany's energy revolution"

Quantifizierung des Zwischenspeicherungsbedarfs (2)

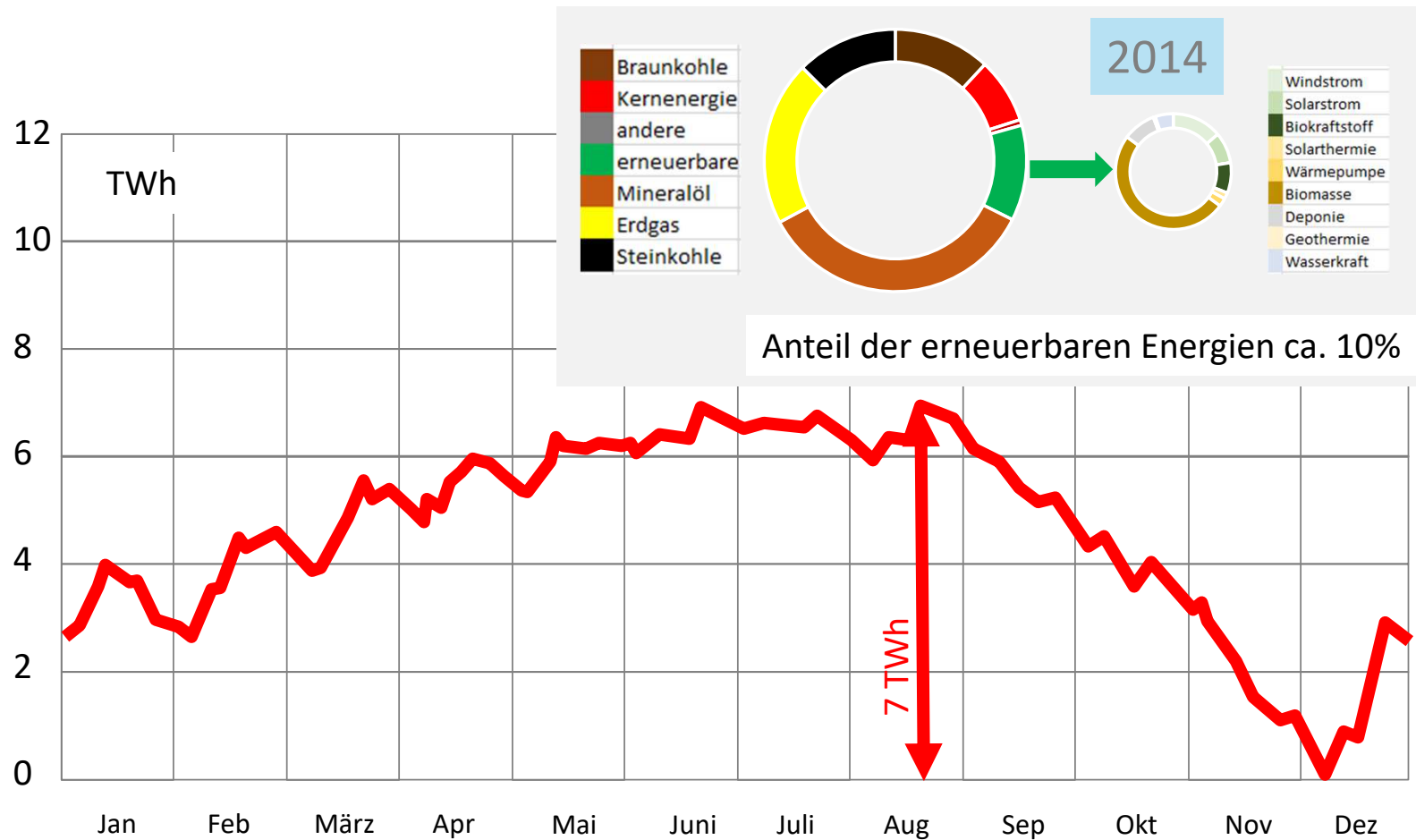
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



2014: Wir brauchen Speicherkapazität für ca. 7 TWh

Quantifizierung des Zwischenspeicherungsbedarfs [Faktor 10] (3)

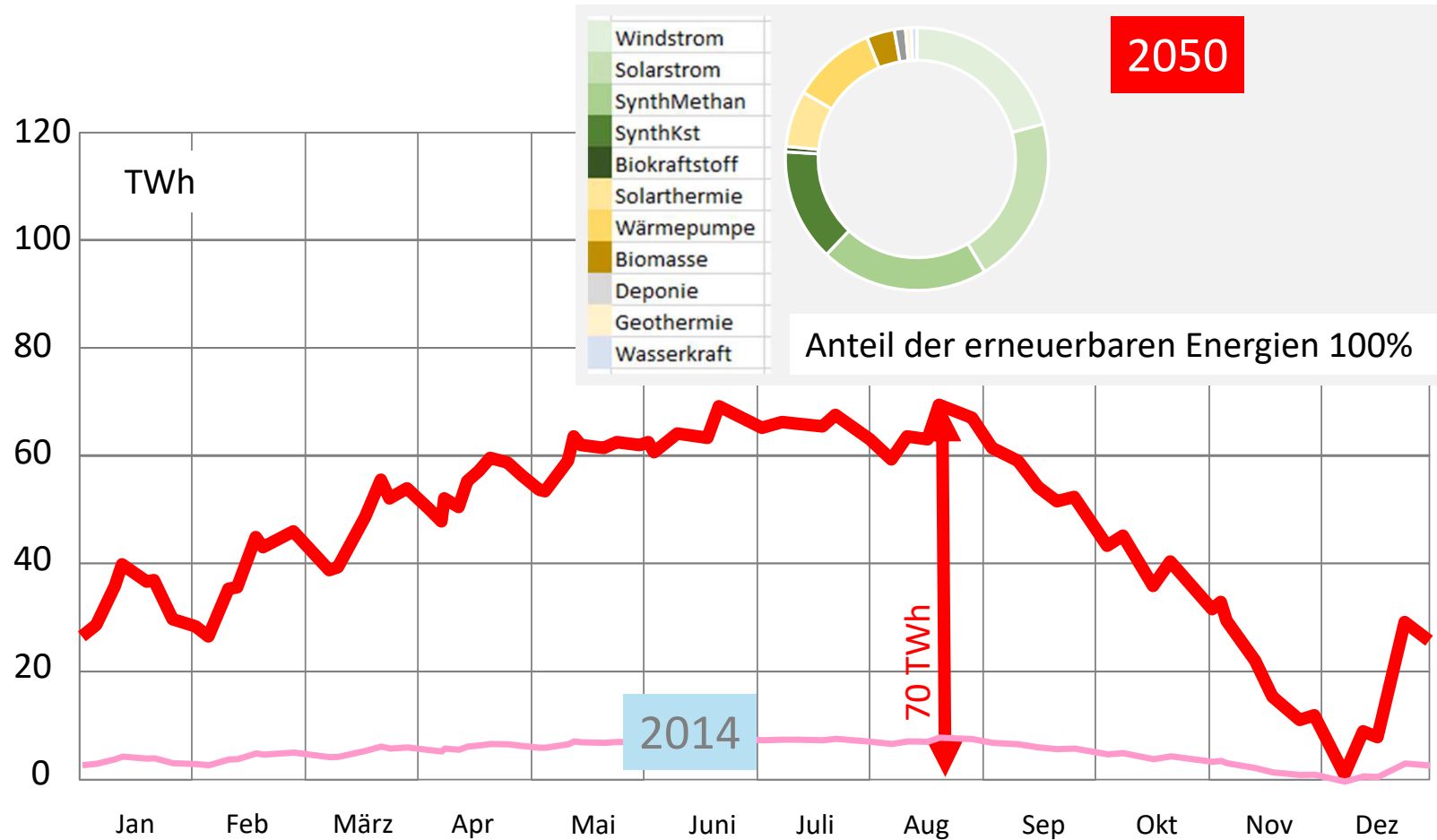
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



2050: Wir brauchen Speicherkapazität für ca. 70 TWh...100 TWh

3.2 Volatilität - Ausgleich durch Speicherung¹⁾

¹⁾Die Speicherung von Strom volatiler regenerativer Energieträger ist die Schlüsseltechnik für eine erfolgreiche Energiewende

Energiespeicherung - verschiedene Energieträger

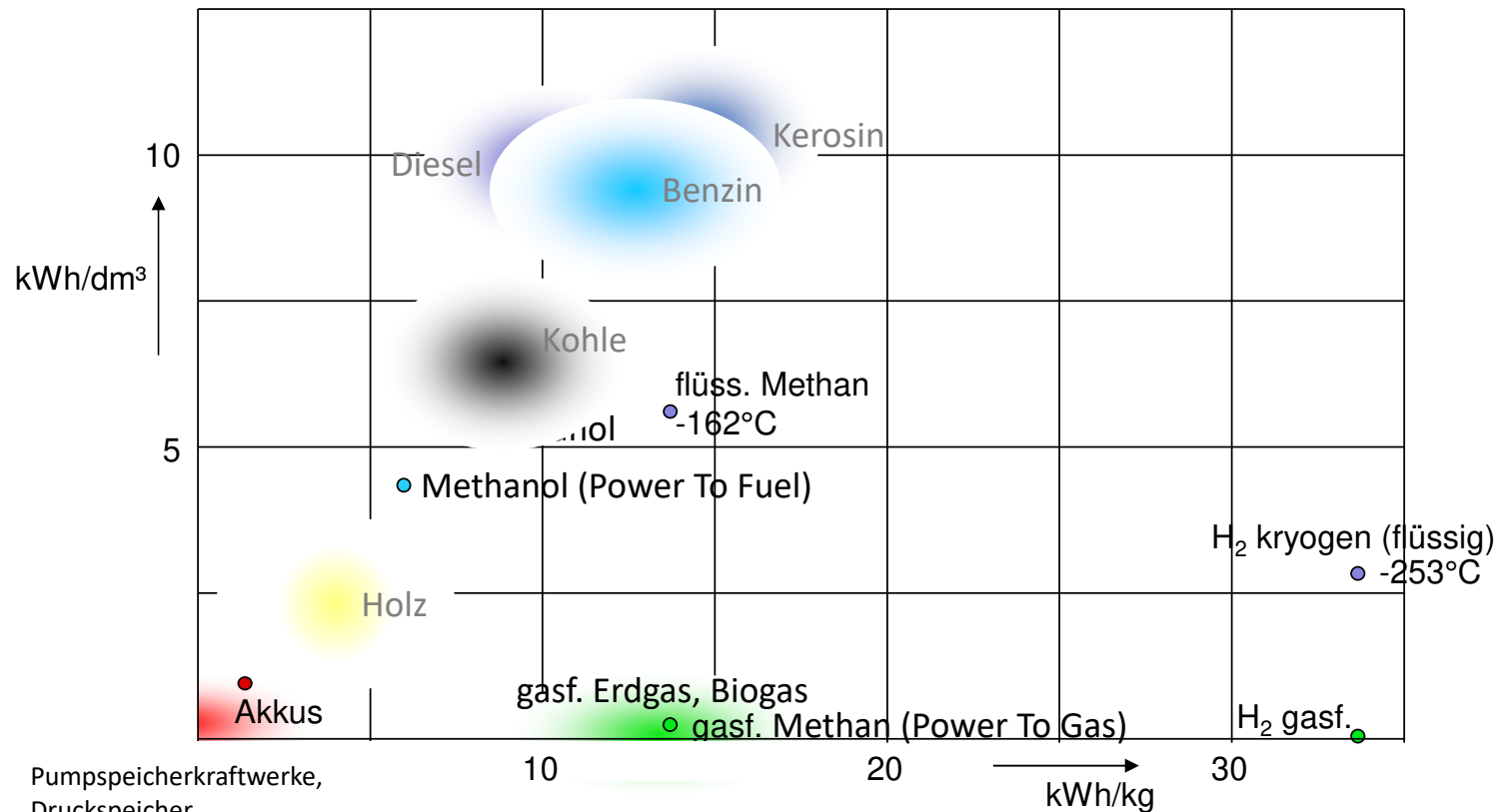
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Pumpspeicherkraftwerke,
Druckspeicher,
Schwungradspeicher,
Superkondensatoren
nicht möglich oder hier nicht sinnvoll

Wasserstoff 1

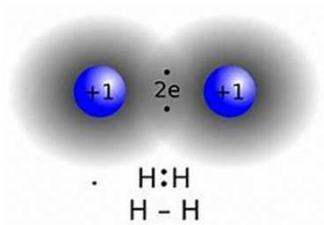
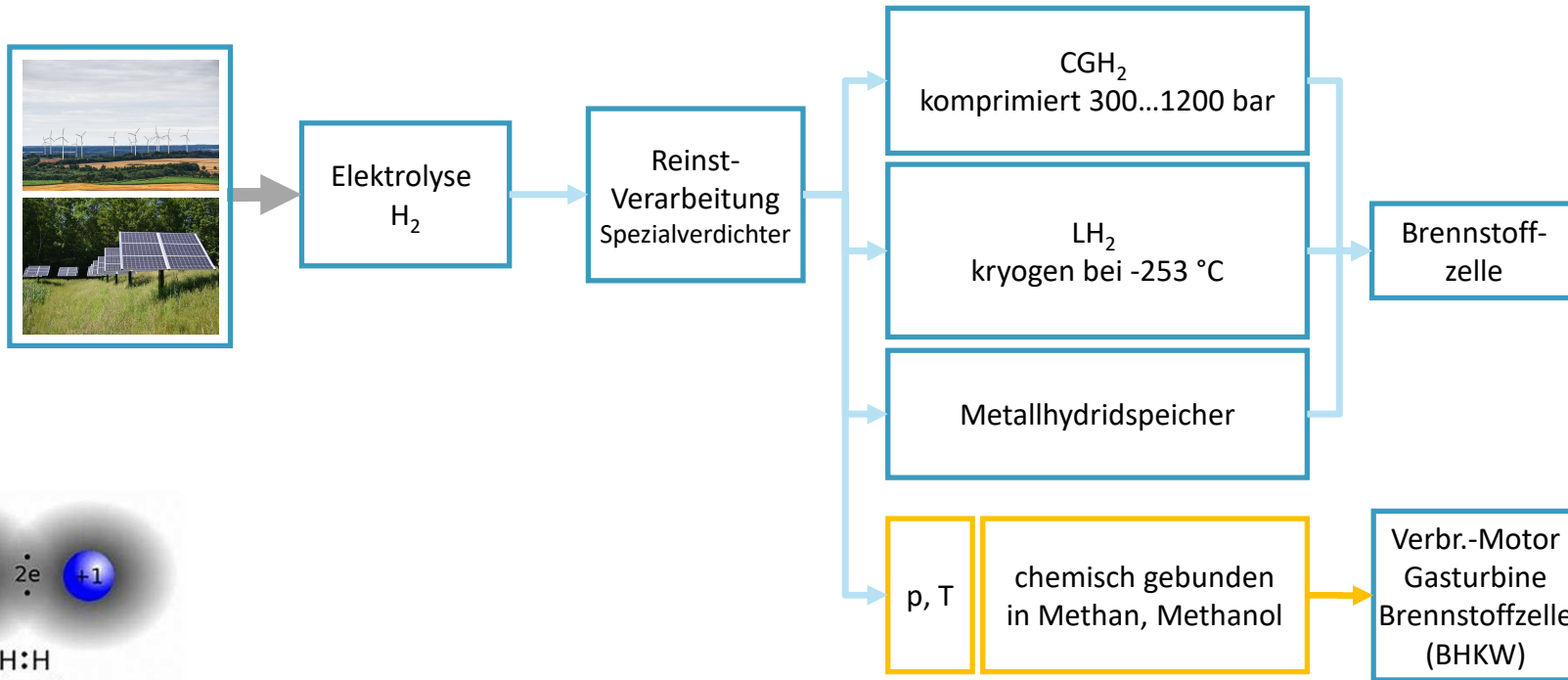
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Dichte: 0,089 kg/m³

Siedepunkt: -253 °C

Heizwert: 33,3 kWh/kg bzw. 3,00 kWh/m³

Explosionsgrenzen: 4 Vol% ...77 Vol%

Methanzahl 0

Treibhausgas vernachlässigbar,
nur bei Bildung v. H₂O i. d. oberen Atmosphäre

Wasserstoff 2

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



**Elektrolyse
H₂**

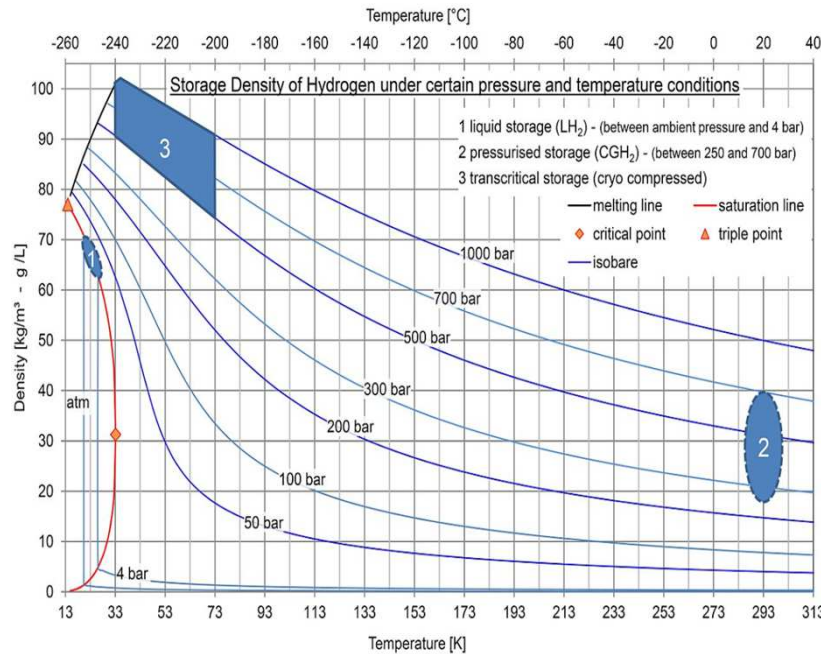
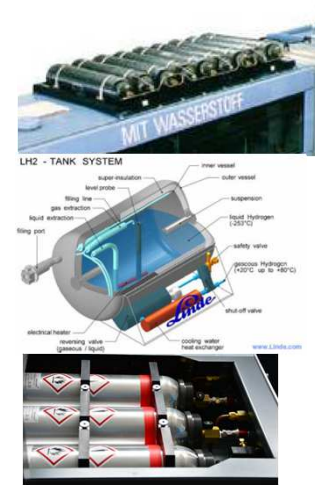
**Reinst-
Verarbeitung
Spezialverdichter**

CGH₂
komprimiert 300...1200 bar
hochfeste Tanks (Golf-Klasse: 125 kg)
Diffusion, Wasserstoffversprödung

LH₂
kryogen bei -253 °C (flüssig)
hochisolierte, komplexe Tanks,
Aufwand W_{verfl}=4kWh/kg hoch
hohe Abdampfverluste

Metallhydridspeicher
thermisches Management erforderlich
alternativ: flüssige organische Stoffe?

p, T
chemisch gebunden
in Methan, Methanol
Drucktank (CNG), LNG,
Plastiktank



Methan 1

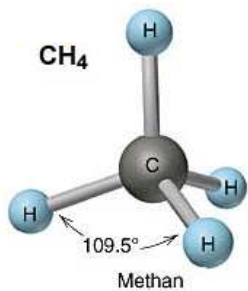
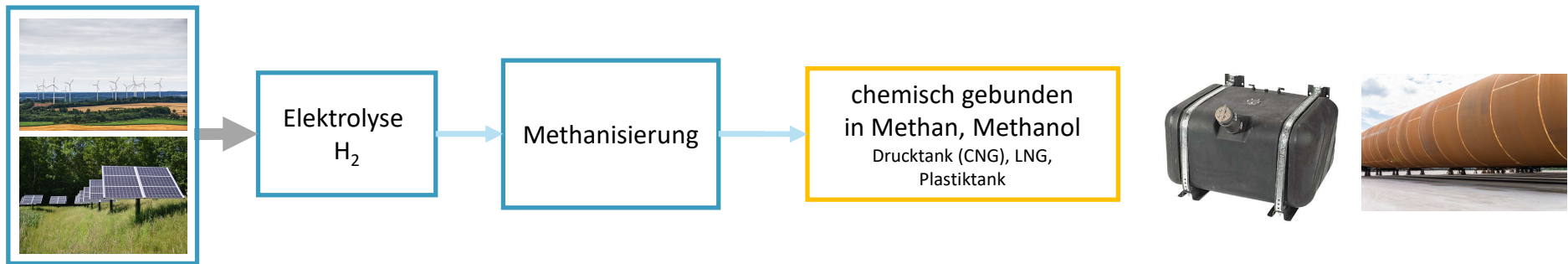
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



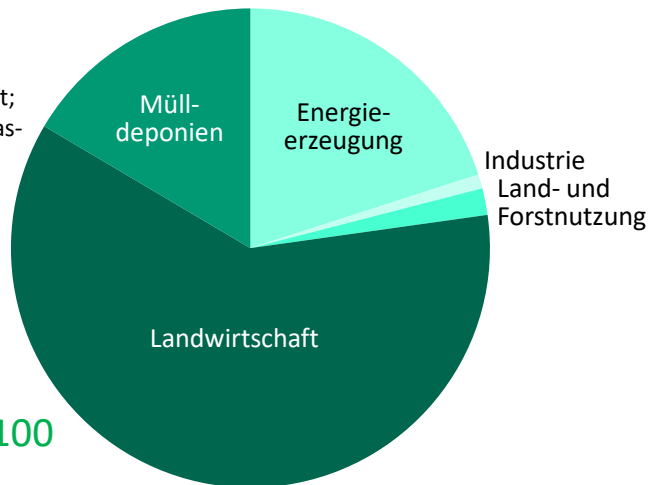
Dichte: 0,718 kg/m³
 Siedepunkt: -162 °C
 Heizwert: 13,9 kWh/kg bzw. 9,94 kWh/m³
 Explosionsgrenzen: 4,4 Vol% ... 17 Vol%

Methanzahl 100

Treibhausgas Faktor 25 ¹⁾ vergleichen mit CO₂ (CO₂ =1)
 mittl. Verweildauer in der Atmosphäre: 12 Jahre
 (CO₂: mehrere 1000 Jahre)
¹⁾ andere Quellen 20 bis 33

anthropogene Methan-Emissionen
 Deutschland 2018:
 2,1 Mio t

(51,4 Mio t CO₂-Äquivalent;
 Summe aller Treibhausgas-
 Emissionen 2018:
 866 Mio t,
 Methananteil 6%)



Methanwirtschaft (CO₂-Äquivalente) 2050:

- 6,16 Mio t durch Methanwirtschaft
 70 TWh → 5,04 Mio t CH₄
 Verluste 5% → 0,252 Mio t
 → 6,164 Mio t CO₂-Äquivalent
- 51,4 Mio t von 2018 fortgeschrieben

Methan 2

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



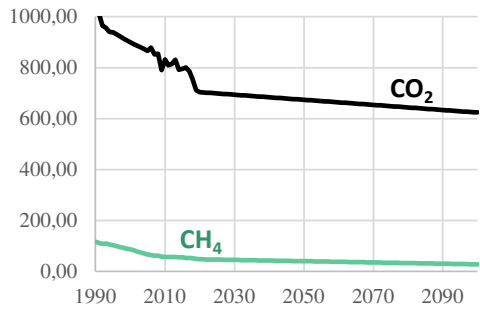
Elektrolyse
H₂

Methanisierung

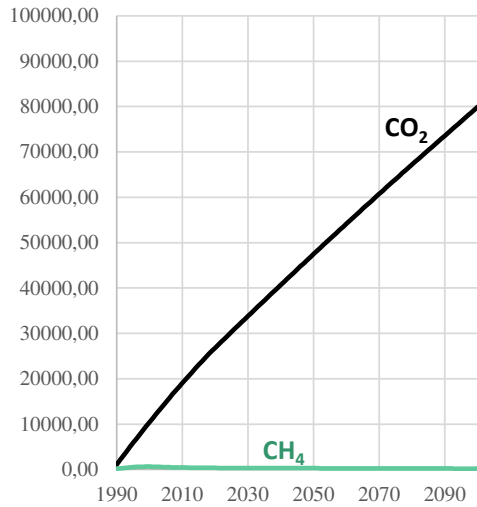
chemisch gebunden
in Methan, Methanol
Drucktank (CNG), LNG,
Plastiktank



„weiter so!“-Szenario



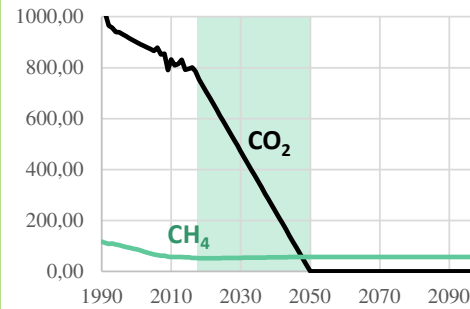
jährliche Treibhausgasemissionen (Mio t CO₂-Äquivalente) 1990-2100



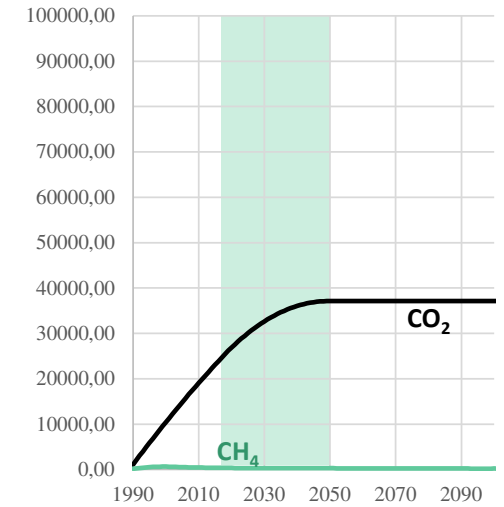
kumulierte Treibhausgasemissionen (Mio t CO₂-Äquivalente) 1990-2100

Methanwirtschaft bis 2050 – Szenario

Ausstieg 2018-2050



jährliche Treibhausgasemissionen (Mio t CO₂-Äquivalente) 1990-2100



kumulierte Treibhausgasemissionen (Mio t CO₂-Äquivalente) 1990-2100

Energiespeicherung – Check der technischen Lösungsmöglichkeiten

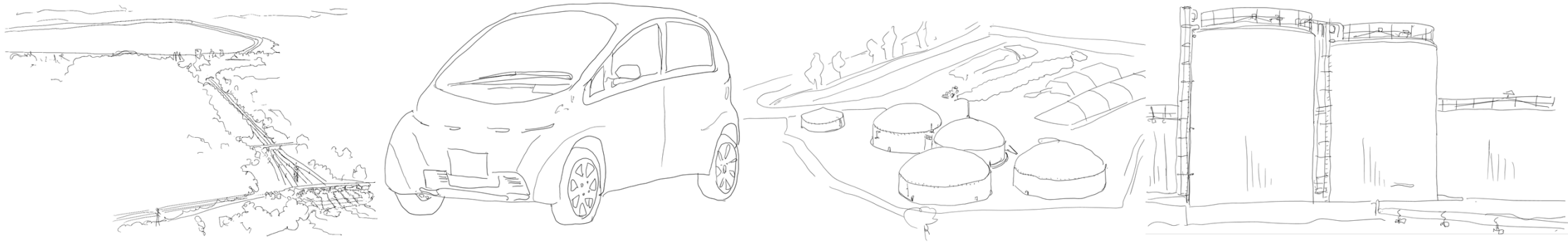
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Speicherung von „grünem Strom“ 70 TWh → 70.000 GWh → 70.000.000 MWh:

Pumpspeicherkraftwerk	0,0014 kWh/kg _{H₂O}	durchschn. 1 GWh / Oberbecken (größtes in D mit 8,4 GWh)	70000 Kraftwerke	Strom→Oberbecken: 80..90% Oberbecken→Strom: 80..90%
E-Autos mit Li-Akkus	0,3 kWh/kg	150 kWh (500kg-Akku pro Auto)	460 Mio E-Autos	Strom→Akku: 95% (?) Akku→Strom: 95% (?)
Zukunfts-Akku-Speicher	1 kWh/kg (≈150g Li, 150g Co) (very advanced)	Akkumulatoren in verschied. Größen (Haus, Großanlage)	ggf. 10 Mio t Lithium	Strom→Akku: 95% (?) Akku→Strom: 95% (?)
Wasserstoffspeicher	3 kWh/m ³ 210 kWh/m ³ (70 bar)	H ₂ -Netz u. Speicher nicht vorh. 10% H ₂ im Erdgasnetz möglich	1 Netz + Speicher	Strom→H ₂ : 60...80% H ₂ →Strom: 50..70% (PEM)
Erdgasnetz + Speicher	13,9 kWh/kg 700 kWh/m ³ (70 bar)	47 Speicher (250 bar), 230 TWh + Leitungen 130 TWh	1 Netz + Speicher	Power to Gas: 50..75% ^{*)} Gas→Strom: 40% mit Wärme 95%
Biogas-Speicher	13,9 kWh/kg 9,97 kWh/m ³ (30 mbar)	5 MWh pro Tank mit 500 m ³	14 Mio Speicher	Power to Gas: 50..75% ^{*)} Gas→Strom: 40% mit Wärme 95%
Methanol-Tanks	5,6 kWh/kg (12 MJ/kg)	13,3 GWh pro Tank mit 3000 m ³	5260 Tanks	Power to Fuel: 40..60% (?) „Fuel to Mobility“: 25..35%

^{*)} Die Angaben von „nur 20...30% Wirkungsgrad“ beziehen sich hier allein auf die „Rückgewinnung“ von E-Energie, die KWK wird meist vergessen

synthetisches Methan zur Energiespeicherung

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

im Vergleich mit Pumpspeicherkraftwerken, Akku-Anlagen und Wasserstoff-Wirtschaft:

- + hohe Energiedichte von Methan
 - + sehr geringe Transportverluste
 - + Infrastruktur vorhanden (Erdgasnetz und -speicher)
 - + Ausnutzung zu 95% mittels BHKW (grundlastfähig)
 - + BHKW dezentral → sinnvolle Nahwärmenutzung
 - + BHKW: flexible und schnelle Bedarfsanpassung
 - + BHKW-Grundlastnetz stabiler als Netz heute
 - + Autarkie: keine Erdgasimporte notwendig
 - + bessere elektr. Wirkungsgrade der BHKW möglich
- Methan-Synthese hat schlechten Wirkungsgrad
 - dementsprechend mehr Wind- und Solaranlagen
 - hoher Aufwand + Investitionen für Syntheseanlagen
 - Methanemissionen (→ Treibhauseffekt)
 - CO₂-Kreislauf organisieren

Erdgasnetz + Speicher	13,9 kWh/kg 700 kWh/m ³ (70 bar)	47 Speicher (250 bar), 230 TWh + Leitungen 130 TWh	1 Netz + Speicher	Power to Gas: 50..75% Gas→Strom: 40% mit Wärme 95% *)
-----------------------	--	---	-------------------	--

WIR HABEN NICHTS BESSERES UND DIE ZEIT DRÄNGT!

*) Die Angaben von „nur 20...30% Wirkungsgrad“ beziehen sich hier allein auf die „Rückgewinnung“ von E-Energie, die KWK wird meist vergessen

4 Vorschlag: Sanfter Übergang zu weniger CO₂-Emissionen

CO₂-neutrale Methan/Methanol-Wirtschaft

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

„Es wird vorgeschlagen, dass Methanol verwendet wird als

- ein bequemes Energiespeichermedium,
- ein leicht transportierter und vertriebener Treibstoff, inklusive Verwendungen bei Methanolbrennstoffzellen, und
- als Einsatzstoff für synthetische Kohlenwasserstoffe und ihre Produkte, einschließlich Polymere und Einzelzellproteine (zur Tiernahrung und/oder menschlichem Verzehr).

Die Kohlenstoffquelle wird letztendlich die Luft sein, die allen auf der Erde zur Verfügung steht, während die notwendige Energie aus alternativen Energiequellen, einschließlich Kernenergie, erhalten wird.“

George A. Olah^{*)}: *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*, 2005, S. 170

^{*)}Nobelpreis für Chemie 1994

CO₂-neutrale Energieerzeugung mit dezentralen BHKW

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



$\eta=0,8$

Elektrolyse
H₂

$\eta=0,5$

Synthese
Methan

Power to Gas

möglichst aus der
Atmosphäre

CO₂

Speicherfähigkeit des vorhandenen (!) Erdgasnetzes:
47 Speicher: 230 TWh + 500.000 km Leitung: 130 TWh*)

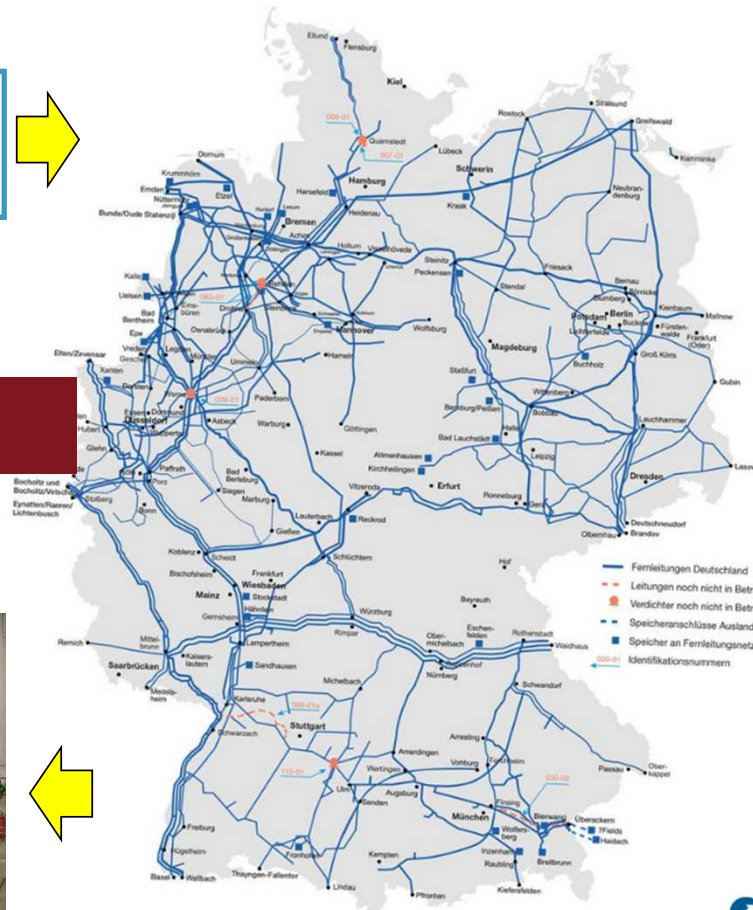
Vergleich: Pumpspeicherwerke: 0.04 TWh
<https://vng.de/de/erdgas-kann-mehr-wir-auch/gasinfrastruktur>

Gas-BHKW

E-Energie 40%

Wärme 55%

Verluste 5%



*) wir brauchen 70...100 TWh für den Volatilitätsausgleich!



Sinnvolle Übergangstechniken

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Windkraft

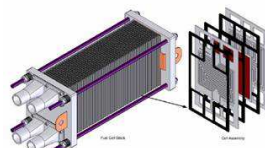


Photovoltaik

Elektrolyse
 H_2



Strom



nicht
zielführend



Sinnvolle Übergangstechniken

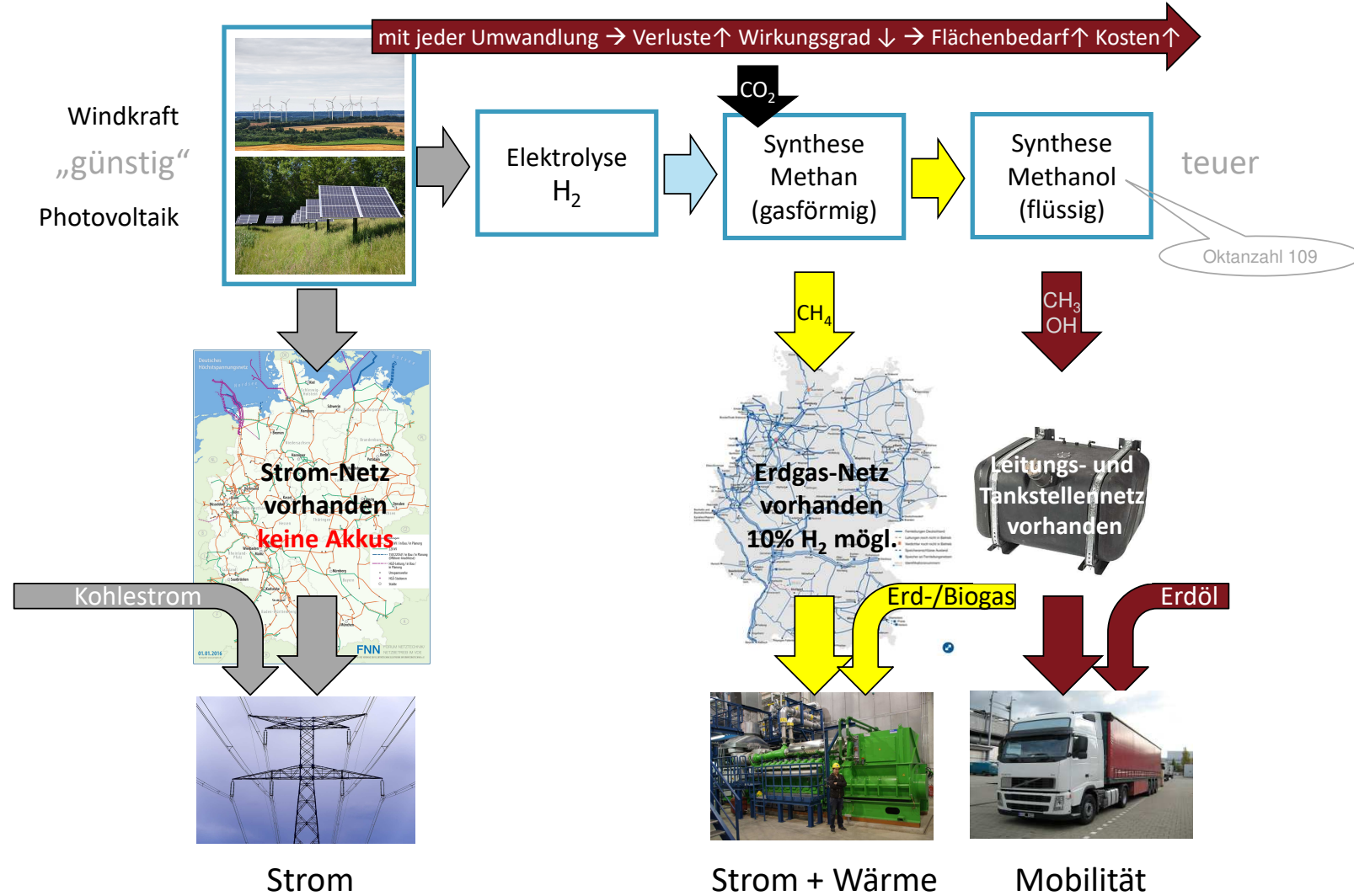
1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Menschheit → nutzt fossile Energieträger → Treibhausgase → Klimawandel

Ziel: CO₂-neutrale Wirtschaft

auch Deutschland allein!

zentrale Dampf-Großkraftwerke abschalten

ausschließlich regenerative Solar- und Windenergie nutzen → Problem: Volatilität

grünen Strom weitgehend unmittelbar nutzen, trotzdem

Energiespeicherung erforderlich → nur als chemische Energie sinnvoll

Solar- und Windstrom → Elektrolyse → Wasserstoff → Methan → Methanol

Speicherung und Verteilung über vorhandenes Erdgas- bzw. Tankstellennetz

dezentrale Stromerzeugung aus Methan in vielen kleinen BHKW (ggf. auch GuD-Kraftwerke)

immer mit Kraft-Wärme-Kopplung vor Ort

vorhandene Infrastruktur nutzen, trotzdem sind Investitionen nötig:

Enormer Ausbau von Windkraft und Solaranlagen

Elektrolyse- und Synthesewerke

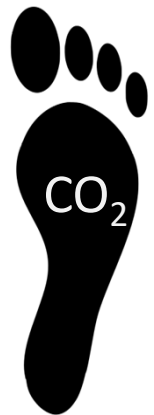
CO₂-Gewinnung aus der Atmosphäre

Blockheizkraftwerke und Nahwärmenetze

Hoher Aufwand an Forschung und Entwicklung

Wirkungsgradoptimierung der Teilprozesse

all das wird nicht reichen...



Ja, aber...

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

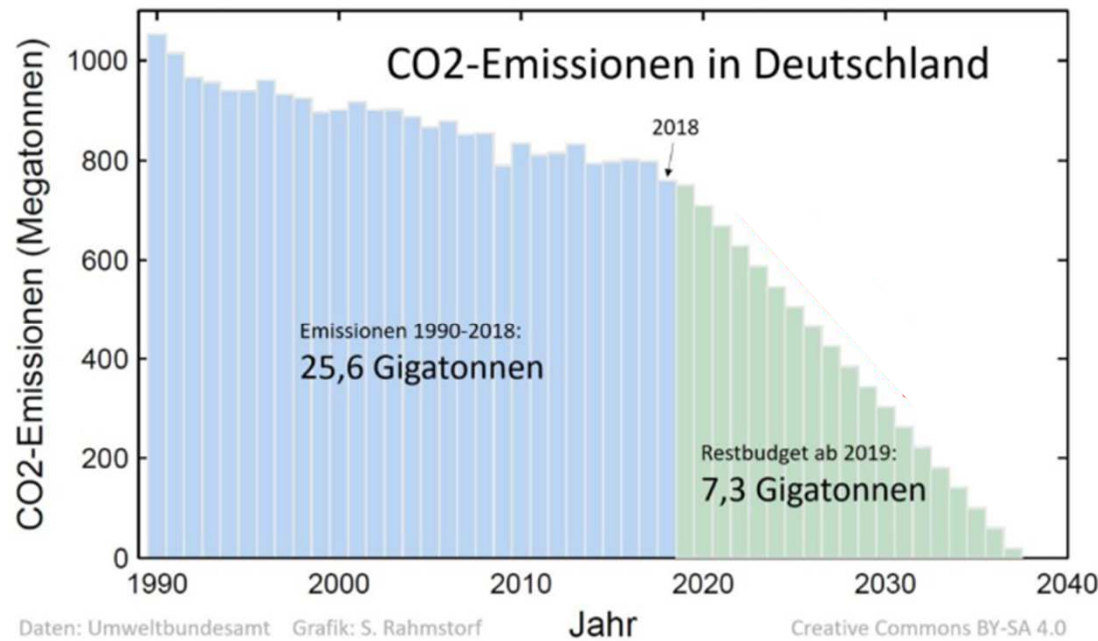
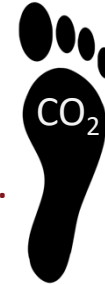
Titel des Vortrags:

„CO₂-neutrale Energiewirtschaft bis 2050 – ist das realistisch?“

Für Deutschland wahrscheinlich ja.

Aber die vereinbarten globalen Ziele (max. 1,5 ...2 K; Paris 2015) erreichen wir nicht.

Der globale Klimawandel verschärft sich weiter.



Veröffentlicht von Stefan Rahmstorf
www.pik-potsdam.de/~stefan/

Stefan Rahmstorf ist Klimatologe und Abteilungsleiter am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung und Professor für Physik der Ozeane an der Universität Potsdam. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf Klimaänderungen in der Erdgeschichte und der Rolle der Ozeane im Klimageschehen.

3 24 49



Bundesumweltministerium
@bmu

Follow

Replying to @parents4future @JochenFlasbarth and 9 others

Die Fakten von @rahmstorf sind korrekt. Die Annahmen zur fairen Verteilung der Restemissionen sind nachvollziehbar, entsprechen aber nicht den bisherigen Minderungen oder Zielen vieler Staaten. Die Bundesregierung wird  2019 auf den Pfad zur Treibhausgasneutralität bringen.

Translate Tweet

1:33 AM - 3 Apr 2019

Tweet vom BMU zu diesem Beitrag.

Klimaschutz, Globalisierung und Marktwirtschaft

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Die Globalisierung ist

- bei der gemeinsamen Schädigung unseres Planeten am weitesten vorangeschritten
- wirtschaftlich nur zum Nutzen der Reichen (bzw. der reichen Industriestaaten)
- umweltpolitisch am weitesten zurückgeblieben

Ernst zu nehmende Maßnahmen bleiben aus (Katowice) bzw. werden nicht umgesetzt, China macht nicht mit...

Die Politik und Wirtschaft haben versagt und werden weiter versagen. (W. Nordhaus: **Climate Clubs Solutions?**)

Langfristiges, vorausschauendes Denken haben wir uns systematisch abtrainiert (Börse, Rendite, Marshmallow-Test...).

Das Konzept des globalen freien Marktes steht der Lösung des Klima-Problems im Weg.

Klimakonferenzen

1989 Montreal

1992 Rio

1995 Berlin

1996 Genf

1997 Kyoto

2000 Den Haag/Bln.

2001 Marrakesch

2007 Bali

2009 Kopenhagen

2011 Durban

2012 Doha

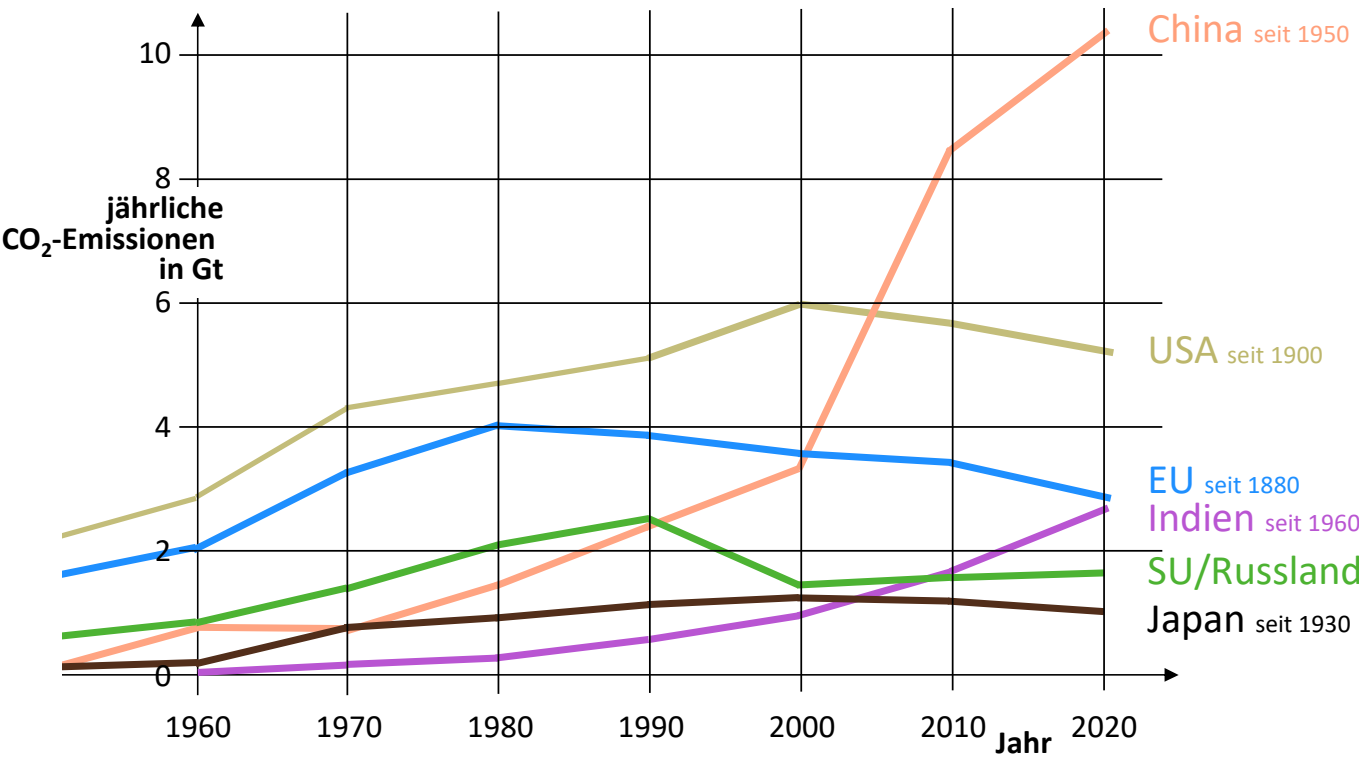
2015 Paris

2018 Katowice

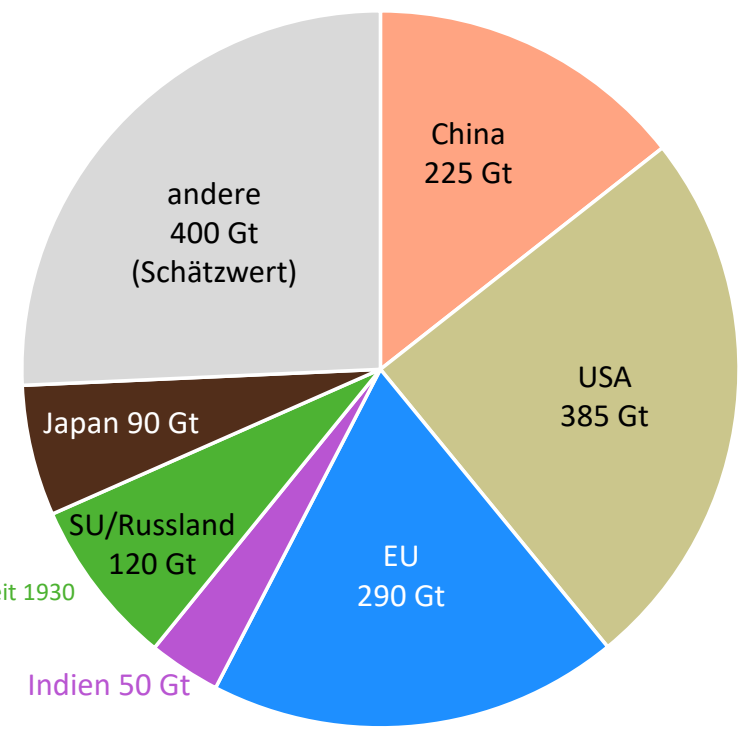
2019 Madrid

2021 Glasgow

Wer hat wieviel verursacht?



Beitrag der 6 größten Emittenten am CO₂-Gehalt der heutigen Atmosphäre (seit Beginn der Industrialisierung)



Verursacherprinzip: Pflicht zur CO₂-Rückgewinnung aus der Atmosphäre?

Danke für die Aufmerksamkeit!

Hinweis auf Videos, die die Vortragsinhalte vertiefen

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Link zur playlist: https://www.youtube.com/playlist?list=PLu2_KhOxTuVqOXsP4AGxH8-04fHess55x

Video 1

[00:04:05](#) Ein paar Fragen vorab

[00:06:09](#) **1 Treibhauseffekt**

[00:06:13](#) Energielieferant Sonne

[00:09:26](#) Erläuterung des Treibhauseffekts

[00:12:30](#) CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und globale Erwärmung

[00:14:19](#) **2 Analyse des Istzustandes**

[00:15:21](#) Energieflussbild Deutschland (2019)

[00:18:04](#) Primärenergiequellen

[00:19:40](#) Nutzungsbereiche für die Energie

[00:22:02](#) Treibhausgasemissionen nach Verursacher

[00:24:46](#) Fokus Wärme

[00:26:46](#) Wo kommt die Energie her? (Gewinnung-Transport-Wandlung)

[00:29:30](#) Wieviel ist eine kWh?

[00:32:10](#) Wieviel ist ein kg CO₂?

Video 2

[00:00:00](#) **3 CO₂-Reduktionspotenziale**

[00:00:20](#) Sparen!

[00:02:58](#) CO₂-Emission – falsch fokussiert

[00:05:11](#) Energieversorgung zukünftig- Szenarien

[00:08:48](#) **3.1 Rolle von Brennstoffen, Energie-Wandlungen und Transport**

[00:09:54](#) Energieträger und ihre spezifischen CO₂-Emissionen

[00:14:13](#) **3.2 Wirkungsgrade der Energiewandlungen**

[00:14:15](#) Funktion Wärmekraftwerk

[00:16:58](#) Wirkungsgrade von Kraftwerken und Carnot-Grenze

[00:19:21](#) Verknüpfung Energieträger und Energie-Wandlungsprozess

[00:23:17](#) Exergie und „kaskadierte“ Nutzung fossiler Energieträger

[00:25:25](#) Kraft-Wärme-Kopplung (bei Zentraler Stromerzeugung, Fernwärme)

[00:27:40](#) Kraft-Wärme-Kopplung dezentral (Blockheizkraftwerke)

[00:31:08](#) Effizienzvergleich zentral/dezentral

[00:32:30](#) **3.3 Transportverluste**

[00:32:40](#) Elektrische Energie

[00:36:40](#) Chemische Energie

[00:38:42](#) Wärme

[00:40:20](#) Vergleich der Transportverluste

Video 3

[00:00:00](#) **4 Fokus: Regenerative Energieträger**

[00:00:35](#) Übersicht

[00:04:53](#) Anteil Regenerative bei der Stromerzeugung

[00:06:40](#) Anteil Regenerative am gesamten Energieaufkommen

[00:08:42](#) Nutzung der Regenerativen heute (Anwendungsbereiche)

[00:11:36](#) **4.1 Wind- und Solarenergie**

[00:11:43](#) Regionale Verteilung

[00:12:26](#) Zeitliche Verteilung (Jahresgang)

[00:13:53](#) Volatilität – „Zappelstrom“

[00:16:16](#) Smart Grids – kurzfristiger Ausgleich

[00:18:35](#) Jahresausgleich - Notwendigkeit der Speicherung

[00:21:57](#) Vorstellung des Speichers, Füllung und Entleerung

[00:24:08](#) Ableitung der erforderlichen Größe des Speichers

[00:27:46](#) Umgang mit Volatilität

[00:29:00](#) **4.2 Volatilität – Ausgleich durch Speicherung**

[00:31:41](#) Energiespeicher – Energiedichte verschiedener Energiespeicher

[00:36:24](#) Wasserstoff als Energiespeicher – Vor- und Nachteile

[00:45:03](#) Methan als Energiespeicher – Vor- und Nachteile, Treibhauswirkung

[00:54:51](#) Speicherung von 1 kWh – anschaulicher Vergleich

[01:00:28](#) Speicherung von 70 TWh – Vergleich der Möglichkeiten

Video 4

[00:00:00](#) **5 Rettet uns der technische Fortschritt?**

[00:06:07](#) Parameterverbesserung bei Li-Akkumulatoren

[00:08:15](#) Lebenslauf technischer Entwicklungen am Beispiel der Dampfmaschine

[00:12:20](#) Wo stehen wir mit relevanten Technikentwicklungen heute?

[00:14:20](#) Wie weit dürfen wir gehen? (ethische Aspekte)

[00:16:44](#) **6 Vorschlag: Sanfter Übergang zu weniger CO₂-Emissionen**

[00:17:47](#) Wind- und Solarstrom chemisch Speichern (Power to Gas)

[00:20:48](#) Entwurf einer Methan-Energiewirtschaft

[00:25:55](#) Sanfter Übergang möglich

[00:26:48](#) **7 Zusammenfassung und Ausblick**

Quellen- und Literaturhinweise

1 Istzustand

2 Reduktionspotenziale

3 Regenerative Energien

4 Vorschlag

5 Zusammenfassung

Bildmaterial und Animationen von saVRee.com „Making engineering accessible and understandable for everyone“, Animationsstudio München

Bockhorst, M.: „Mit Vollgas in die Energiekrise“, Books on Demand GmbH, Norderstedt 2006

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: „Energiedaten: Gesamtausgabe Stand Oktober 2019“
<http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: „Gesamtausgabe Energiedaten“, wird ständig aktualisiert

Friedlingstein, P. et al.: „Global Carbon Budget 2020“; Earth System Science Data Vol. 12; S. 3269–3340, 2020; <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>

Jordan, T.: „Skript zur Vorlesung Wasserstofftechnologie“; Institut für Kern- und Energietechnik Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

Kobiela, G.; Samadi, S.; Kurwan, J.; Tönjes, A.; Fishedick, M.; Koska, T.; Lechtenböhmer, S.; März, S.; Schüwer, D.:
„CO₂-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5°-Grenze“

Quaschnig, V.: „Regenerative Energiesysteme: Technologie – Berechnung – Klimaschutz“; Carl Hanser Verlag München, 2019

Schmidt, T.: „Wasserstofftechnik – Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft“; Carl Hanser Verlag München, 2020

Schweikardt, S.; Didycz, M.; Engelsing, F.; Wacker, K.: „Bundeskartellamt: Sektoruntersuchung Fernwärme“: Abschlussbericht gemäß § 32 e GWB, Bonn, August 2012

Verband kommunaler Unternehmer: „Erdgasinfrastruktur der Zukunft: Darauf können wir aufbauen“; VKU Verlag GmbH; Januar 2017

Wissel, S.; Rath-Nagel, S.; Blesl, M.; Fahl, U.; Voß, A.: „Stromerzeugungskosten im Vergleich“; Arbeitsbericht Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung; Stuttgart 2008