

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.

Mit Kohlendioxid bzw. Kohlenmonoxid sind CO₂ (Kohlenstoffdioxid) bzw. CO (Kohlenstoffmonoxid) gemeint.

CO₂-neutral bzw. CO₂-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.

Quellenhinweise sind zumeist auf den Folien zu finden, aus denen die Quelle verwendet wurde.

Energiewende von unten - denn von oben klappt es nicht!

Prof. M. Freitag
Februar 2024

- 1 Einführung
- 2 Einige Aspekte der Energiewende
 - 2.1 Volatilität erfordert Speicherung
 - 2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität
 - 2.3 Importe als Lösung?
- 3 Warum klappt es „von oben“ nicht?
- 4 Beispiele für Energiewende „von unten“
- 5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral
 - 5.1 Abschätzung Istzustand
 - 5.2 Vergleich verschiedener Konzepte
 - 5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV
- 6 Zusammenfassung

Diskussion

1 Einführung

2 Einige Aspekte der Energiewende

2.1 Volatilität erfordert Speicherung

2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität

2.3 Importe als Lösung?

3 Warum klappt es „von oben“ nicht?

4 Beispiele für Energiewende „von unten“

5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral

5.1 Abschätzung Istzustand

5.2 Vergleich verschiedener Konzepte

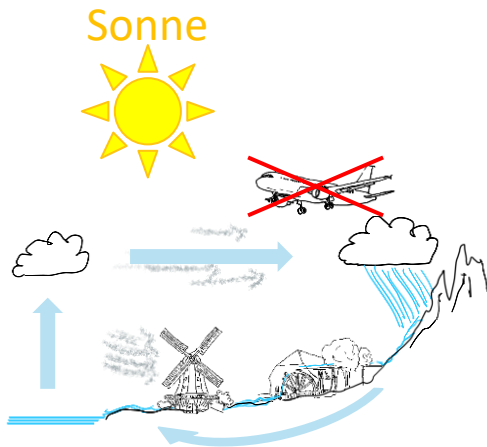
5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV

6 Zusammenfassung

Diskussion

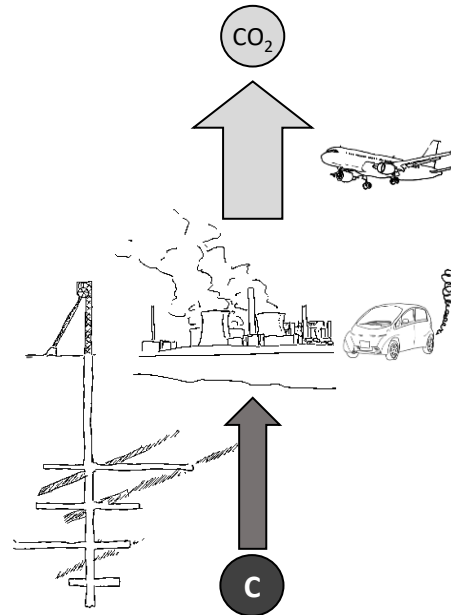
Energiewirtschaft im Wandel der Zeiten

vor der
Industrialisierung



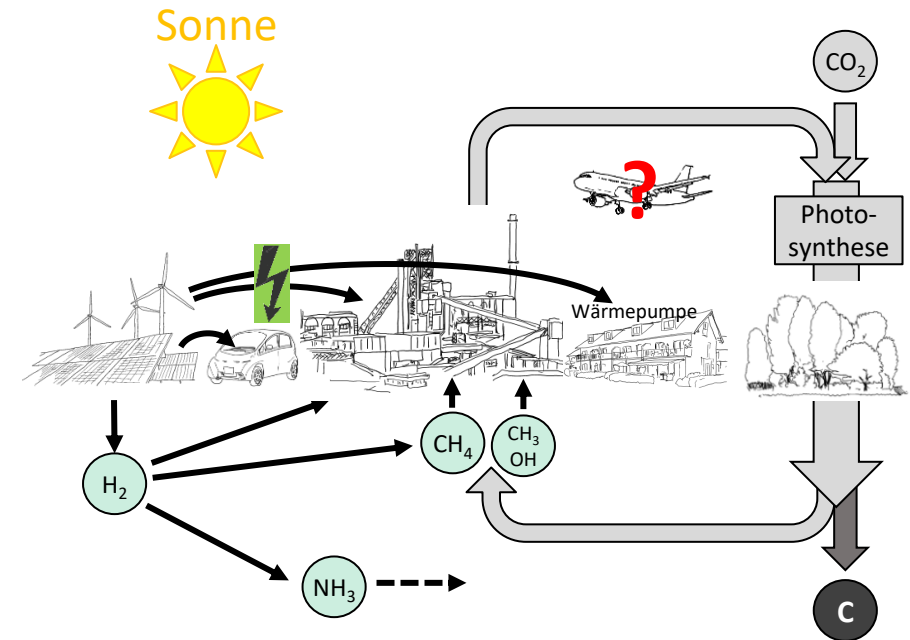
keine Speicherung,
im Einklang mit
der Umwelt
dezentral, privat

Beginn der
Industrialisierung
bis heute

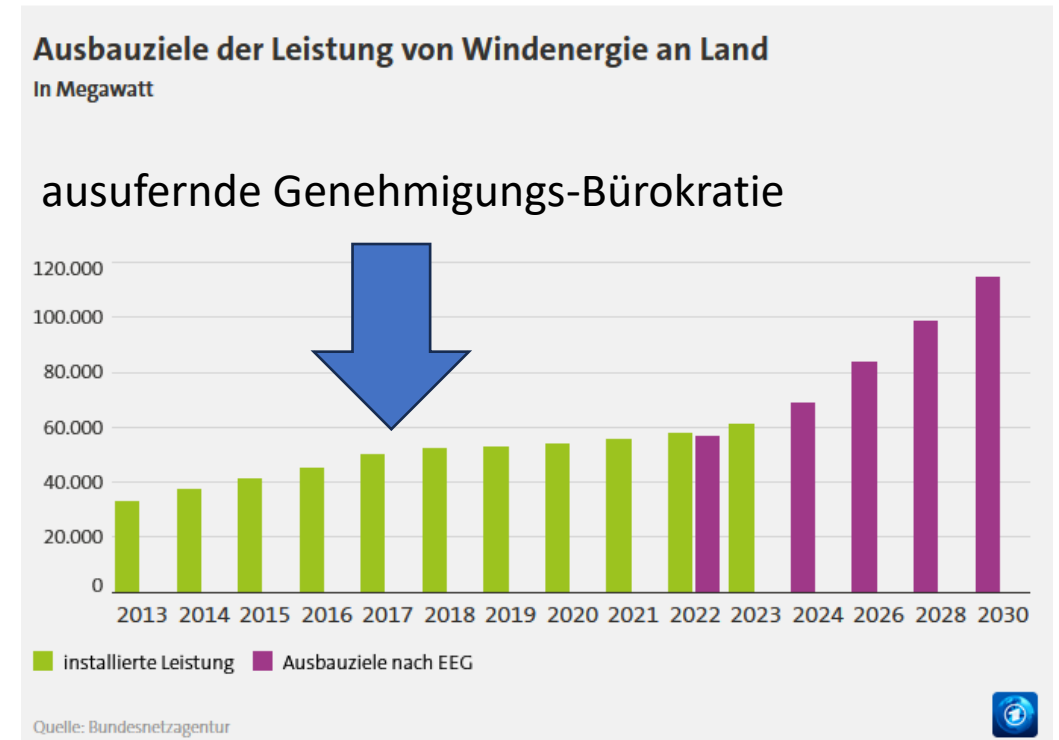
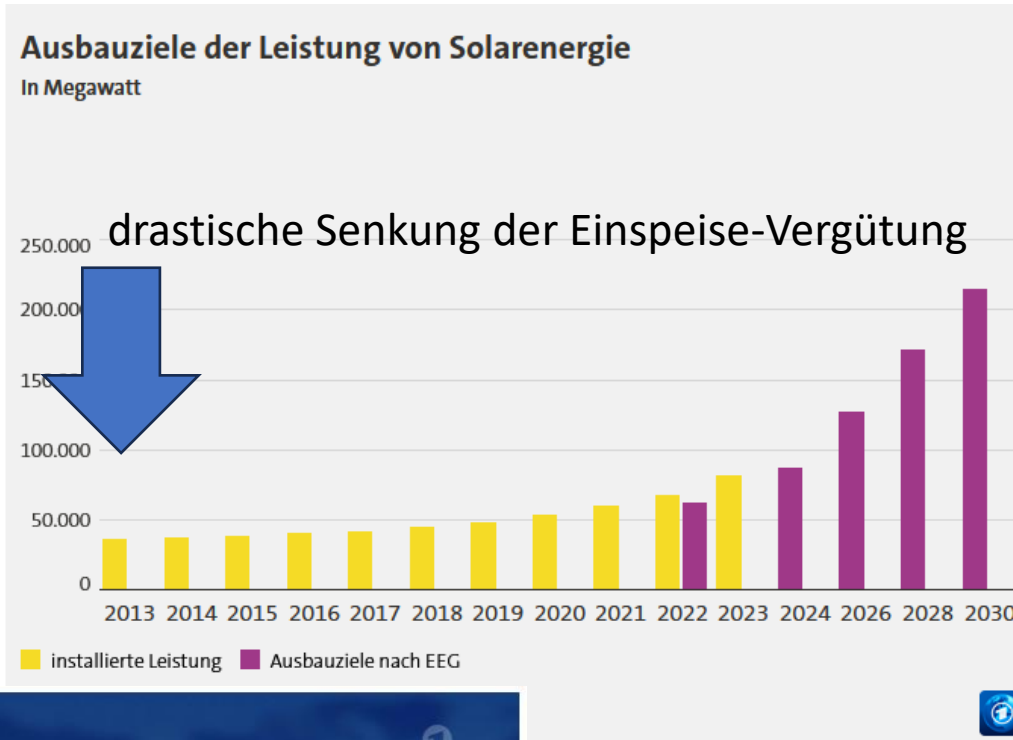


Ressourcenverbrauch
z.T. Speicherung (Gas)
umweltschädlich
zentral, Großkonzerne, staatlich

CO₂-neutrale Energiewirtschaft



Speicherung ist unabdingbar
im Einklang mit der Umwelt
dezentral, kommunal, privat?



Kraftwerksstrategie

- 10 Gigawatt Gas-Kraftwerksleistung
- Umbau des Strommarktes
- bis 2040 Umstellung auf Wasserstoff

Quelle: Bundesregierung

tagesthemen

Förderung für Gaskraftwerke

Ampel einigt sich auf Kraftwerksstrategie

5.2.24

Es war ein langes Ringen in der Ampelkoalition, nun steht ein Plan: Die Bundesregierung hat sich auf eine Strategie zum Bau neuer wasserstofffähiger Gaskraftwerke in Deutschland geeinigt. | [mehr](#)

- Versorgungsabsicherung bei Dunkelflaute
- 15..20 Mrd € vom Staat (da diese Kraftwerke unrentabel sind, weil sie nicht durchgängig laufen)
- **Wasserstoffbetrieb, -versorgung und -speicherung unklar**

1 Einführung

2 Einige Aspekte der Energiewende

2.1 Volatilität erfordert Speicherung

2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität

2.3 Importe als Lösung?

3 Warum klappt es „von oben“ nicht?

4 Beispiele für Energiewende „von unten“

5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral

5.1 Abschätzung Istzustand

5.2 Vergleich verschiedener Konzepte

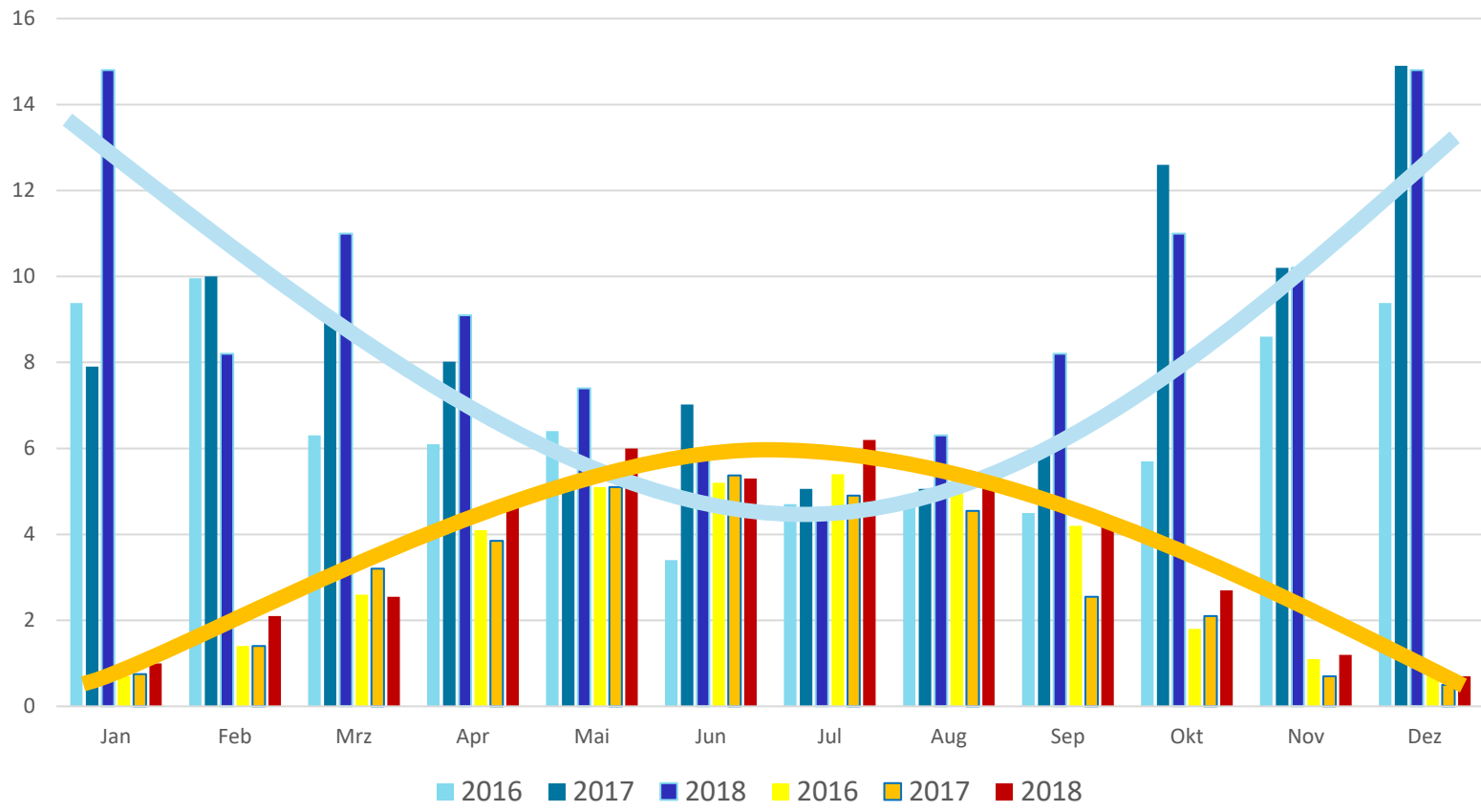
5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV

6 Zusammenfassung

Diskussion

Saisonale Verteilung von Wind- und Sonnenenergie

Wind- und Solarstromerzeugung (monatli.) Deutschland in TWh



gleicht sich leider nicht perfekt aus

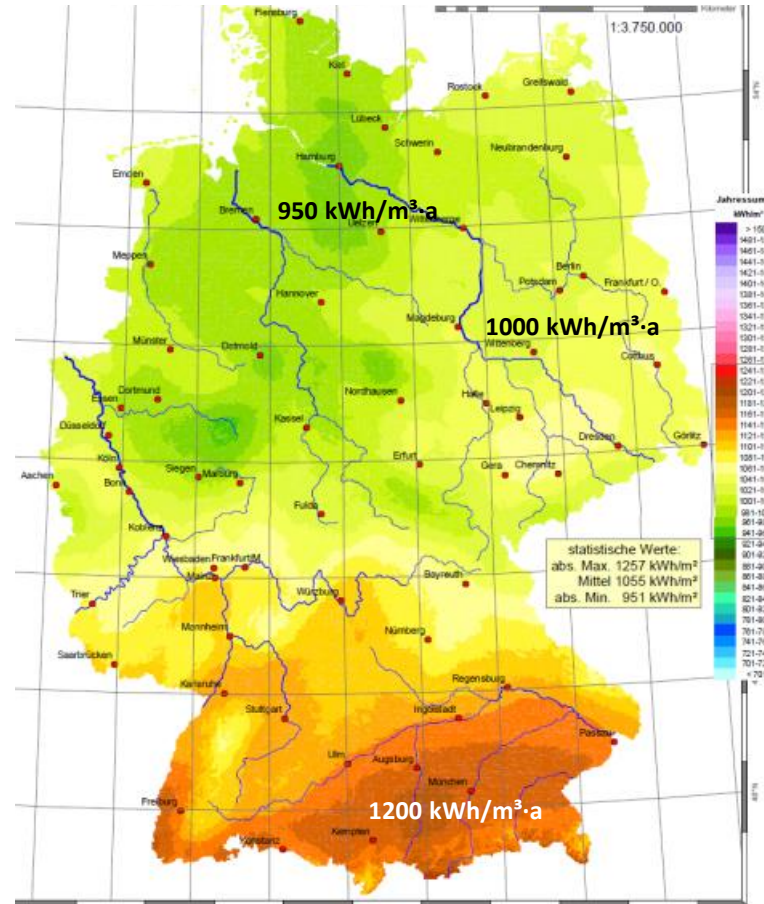
saisonale Speicherung: Überschuss für „magere“ Zeiten retten!

Blautöne: Wind
Rottöne: Sonne

Räumliche Verteilung von Wind- und Sonnenenergie



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



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

Island: Geothermie
Norwegen, Schweiz: Wasserkraft
Nordafrika: Solarenergie

Deutschland: Solar- und
Windenergie

Unterschiede ausgleichen:
Netzausbau forcieren!

1 Einführung

2 Einige Aspekte der Energiewende

2.1 Volatilität erfordert Speicherung

2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität

2.3 Importe als Lösung?

3 Warum klappt es „von oben“ nicht?

4 Beispiele für Energiewende „von unten“

5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral

5.1 Abschätzung Istzustand

5.2 Vergleich verschiedener Konzepte

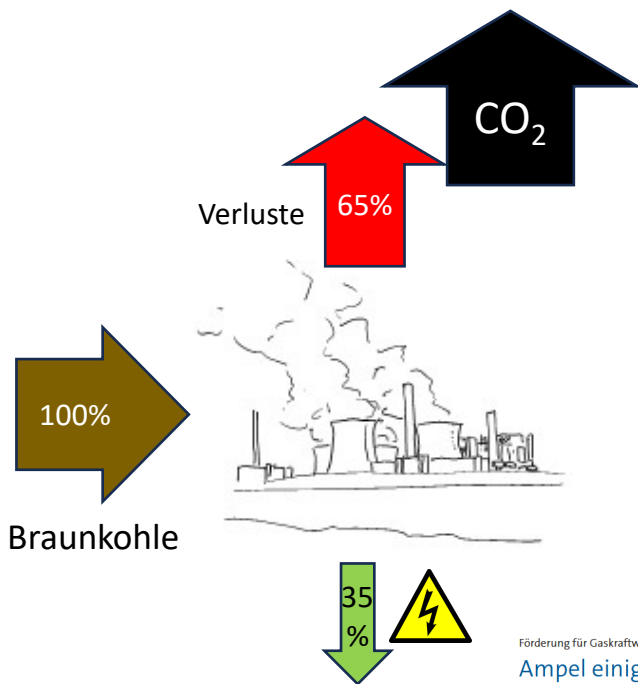
5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV

6 Zusammenfassung

Diskussion

Vergleich zentrale/dezentrale Kraftwerks-Varianten (gute Wirkungsgradwerte angenommen)

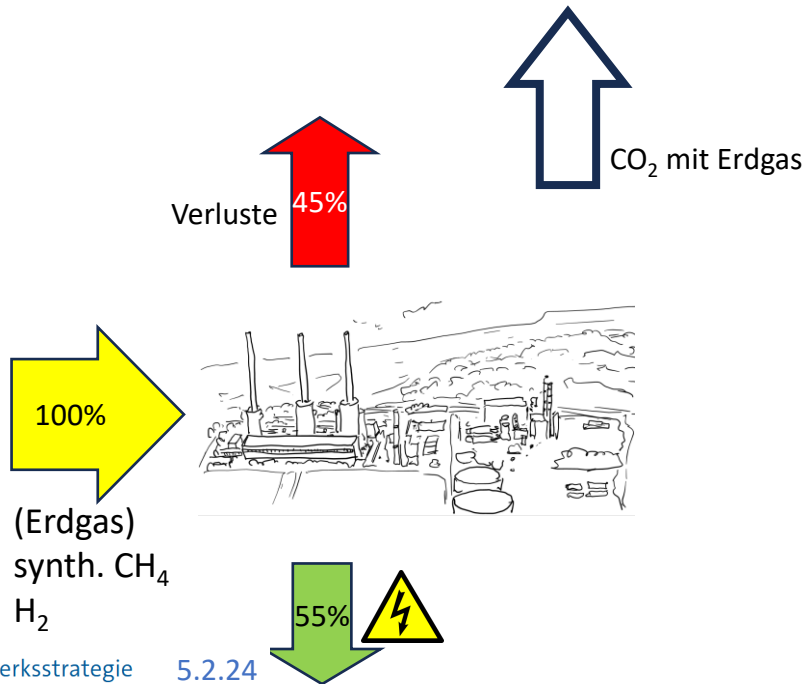
herkömml. Wärmekraftwerk



einige GW

so schnell wie möglich
abschalten

zentrales GuD-Kraftwerk

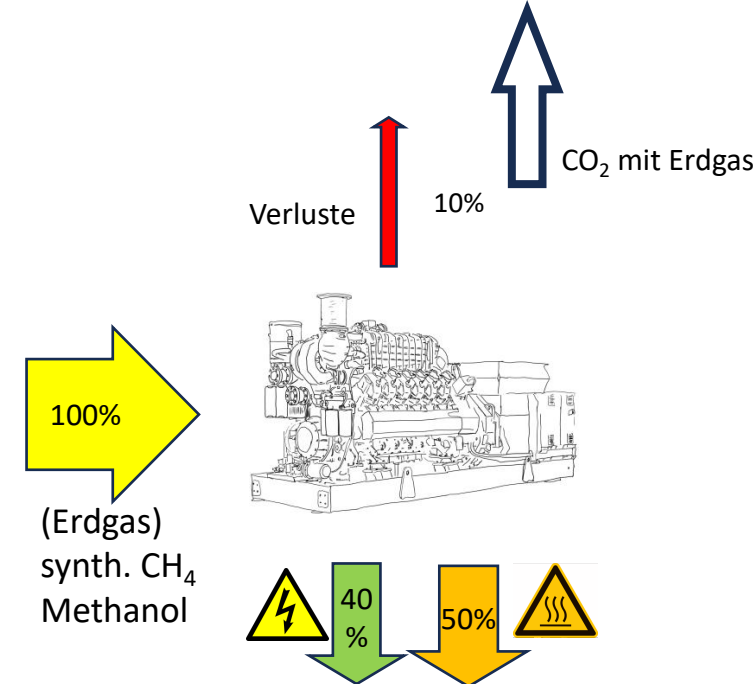


Wasserstofftransport?
-speicherung (saisonal)?

1...1,5 GW

schlechter Brennstoff-Ausnutzungsgrad
zu viel Wärme (nahe Großstadt?)
Fernwärmenetz ist möglich, aber sinnlos
weil zentral → zu große Entfernungen

dezentrales BHKW



0,1...1,5 MW

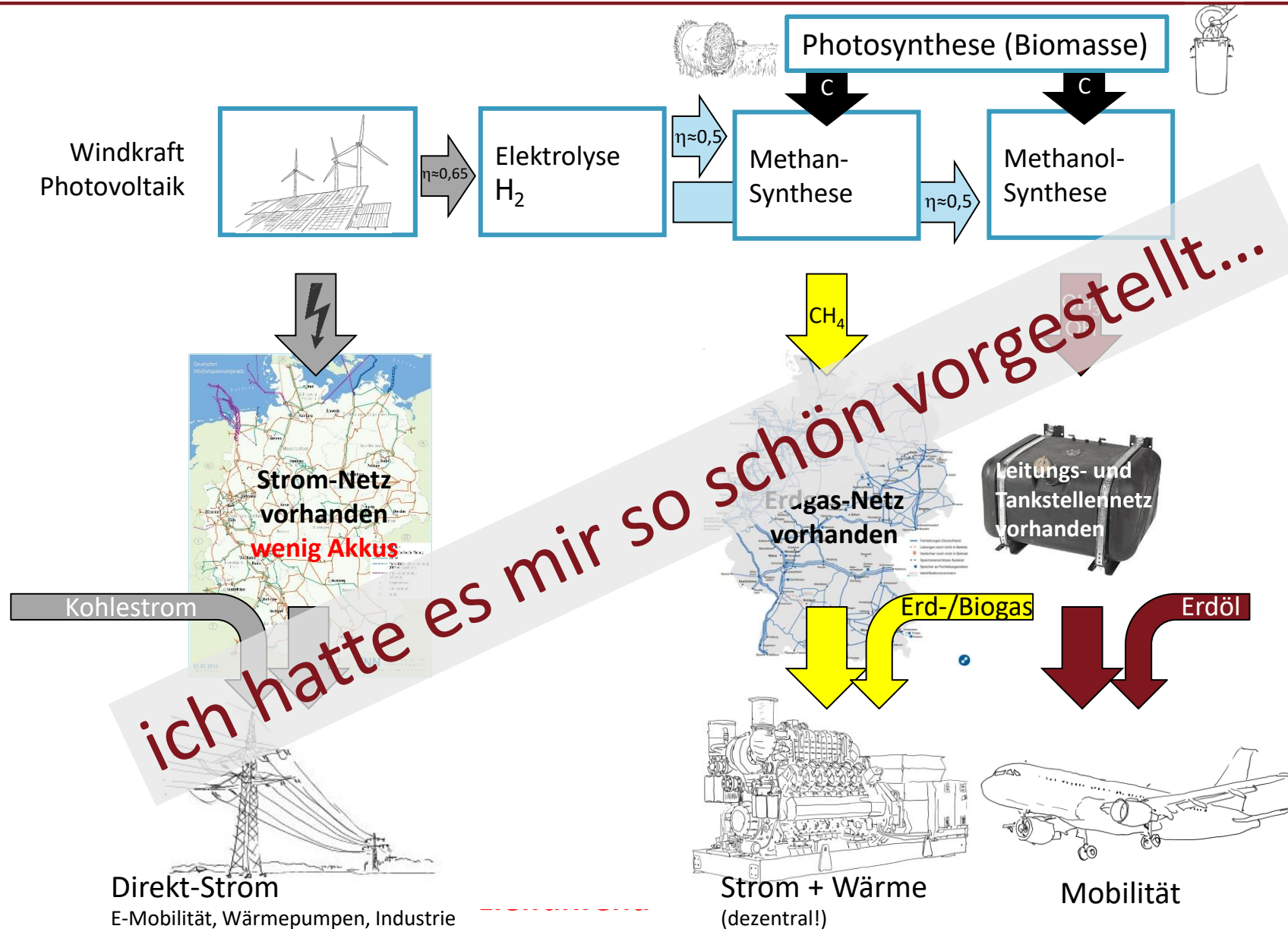
0,12...2 MW

90%ige Ausnutzung des Brennstoffes
grundlastfähiges Stromnetz
Wärmenutzung im Nahwärmenetz

Förderung für Gaskraftwerke

Ampel einigt sich auf Kraftwerksstrategie 5.2.24
Es war ein langes Ringen in der Ampelkoalition, nun steht ein Plan: Die Bundesregierung hat sich auf eine Strategie zum Bau neuer wasserstofffähiger Gaskraftwerke in Deutschland geeinigt. | mehr

Sanfter Übergang zu einer CO₂-neutralen Energiewirtschaft



1 Einführung

2 Einige Aspekte der Energiewende

2.1 Volatilität erfordert Speicherung

2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität

2.3 Importe als Lösung?

3 Warum klappt es „von oben“ nicht?

4 Beispiele für Energiewende „von unten“

5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral

5.1 Abschätzung Istzustand

5.2 Vergleich verschiedener Konzepte

5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV

6 Zusammenfassung

Diskussion

LH2 - Liquefied Hydrogen (H₂)

Herkunft, Transportwege und Infrastruktur

(Nord-)Afrika, Nahost
Veredelung aus grünem Strom vor Ort
Anlagen, Transport und Verteilungsstruktur nicht in
nennenswertem Umfang verfügbar, in Planung

Eigenschaften und Besonderheiten

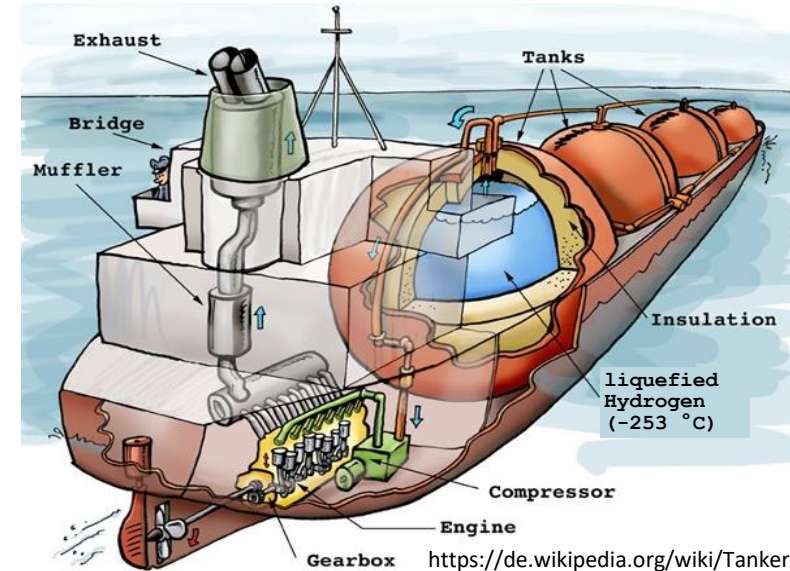
-253°C bei Normaldruck (1/800stel des Volumens)
Aufwand f. Verflüssigung 10..13 kWh/kg (E-Dichte H₂: 33kWh/kg)
Boil-off (recyclen oder kühlen [Energieaufwand])
Boil-off-Rate (25°C): 0,07 Vol% pro Tag *)
hohe Explosionsgefahr
Wasserstoffversprödung (Metalle)
Kälte: Materialversprödung, Verbrennungsgefahr

*) https://www.energy.gov/sites/default/files/2018/07/f53/fcto_webinarslides_boil_off_losses_062618.pdf

Bemerkungen

noch keine nennenswerte Produktion
nur CO₂-neutral, wenn aus grünem Strom (green washing)

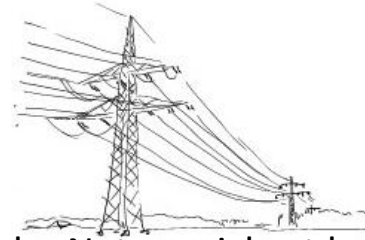
Abhängigkeit bleibt erhalten



- 1 Einführung
- 2 Einige Aspekte der Energiewende
 - 2.1 Volatilität erfordert Speicherung
 - 2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität
 - 2.3 Importe als Lösung?
- 3 Warum klappt es „von oben“ nicht?**
- 4 Beispiele für Energiewende „von unten“
- 5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral
 - 5.1 Abschätzung Istzustand
 - 5.2 Vergleich verschiedener Konzepte
 - 5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV
- 6 Zusammenfassung

Diskussion

Unwissenheit und Angst machen



Das elektrische Netz speichert keine Energie!

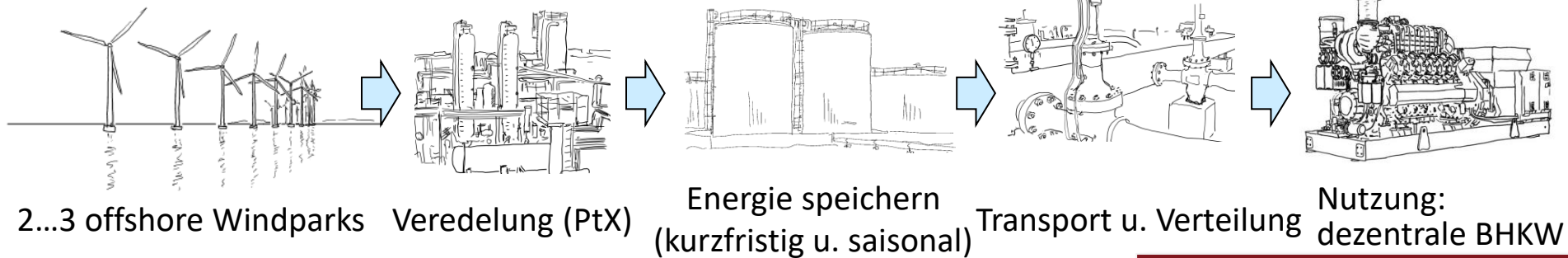


„Wenn 3 Windparks eingerichtet werden, muss (falls Flaute ist) ein Wärmekraftwerk vorgehalten werden“ → FALSCH!

Förderung für Gaskraftwerke
Ampel einigt sich auf Kraftwerksstrategie 5.2.24
Es war ein langes Ringen in der Ampelkoalition, nun steht ein Plan: Die Bundesregierung hat sich auf eine Strategie zum Bau neuer wasserstofffähiger Gaskraftwerke in Deutschland geeinigt. | mehr



Wirkungsgrad? Kühlung? Vulnerabilität? (Uran?)



Schlüssel für die Energiewende:
Energiespeicherung¹⁾ und Dezentralität

¹⁾ am besten lokal in der Nähe der dezentralen BHKW-Anlagen

Hemmende Faktoren

Interessen der Groß-Energieversorger
(Kapitalismus: Erhalten der Marktposition)

Politikbeeinflussung/Lobbyismus/falsche Beratung

Ideologie und Unwissen

Desinformation
(Beispiel Studie d. Ölkonzerne 80er Jahre)

Förderung für Gaskraftwerke
Ampel einigt sich auf Kraftwerksstrategie
Es war ein langes Ringen in der Ampelkoalition, nun steht ein Plan: Die Bundesregierung hat sich auf eine Strategie zum Bau neuer wasserstofffähiger Gaskraftwerke in Deutschland geeinigt. | mehr

Diskrepanz zwischen Reden und Tun
(Politiker UND Bevölkerung)

Kambodscha und Kreuzfahrten

falsche Entscheidungen,
falsche Ausrichtung

„Technologieoffenheit“
(anderes Wort für Abwarten,
betr. Politik und Wirtschaft
Beispiel Automobilindustrie → E-Autos)

Prof. Fichtner, Ulm

keine Verlässlichkeit
wachsendes Misstrauen in der Bevölkerung

Energiewende?

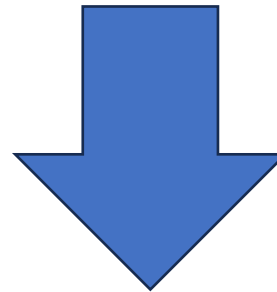
*Die Energiewende ist wichtiger als zum Mond zu fliegen,
aber hier funktioniert die Interessenbündelung nicht.*

Unfähigkeit und ausufernde Bürokratie
(Beispiele Mautsystem, BER, Stuttgart 21;
langjährige Genehmigungsverfahren, unzureichende Digitalisierung)

knappe Kassen,
andere Prioritäten

? ?
Diskussion im Anschluss

**Die Energiewende „von oben“ wird nichts
oder sie dauert zu lange**



Einzel-Initiativen sind gefragt, um

- Beiträge (wenn auch kleine) zu leisten
- die Forschung und Entwicklung voranzutreiben
- die Player unter Druck zu setzen

- 1 Einführung
- 2 Einige Aspekte der Energiewende
 - 2.1 Volatilität erfordert Speicherung
 - 2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität
 - 2.3 Importe als Lösung?
- 3 Warum klappt es „von oben“ nicht?
- 4 Beispiele für Energiewende „von unten“**
- 5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral
 - 5.1 Abschätzung Istzustand
 - 5.2 Vergleich verschiedener Konzepte
 - 5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV
- 6 Zusammenfassung

Diskussion

Energieautarke Regionen und Gemeinden in Deutschland



Brandenburg Feldheim: autarker Ortsteil

Biogasanlage, Hackschnitzelheizung, 2 Heißwasserspeicher, Power-to-heat-Anlage, Windpark, Photovoltaik
Feldheim Energie GmbH & Co. KG

„Teures Erdgas oder Heizöl spielen für Feldheim keine Rolle.“

Autarkie

Niedersachsen Bioenergiedorf Lathen: autark

Nahwärmenetz, Biogasanlage-BHKW, Holzhackschnitzelheizwerk,
Solarstromanlage; Windparks; Projekte in Form von Genossenschaften

„Der Preis für die Kilowattstunde Wärme liegt mit 4,5 Cent ... deutlich unter den 6,1 Cent pro Kilowattstunde für Erdgas...“

Kostensenkung

Niedersachsen Bioenergiedorf Lühnde:

BHKW; Biogasanlage, Hackschnitzelwerk, Nahwärmenetz

„... hat seine Mitbürger beknet, Genossen zu werden und 1500 Euro Einlage einzubringen. Am Ende investierten sie 5,2 Millionen, ein Großteil davon waren staatliche Zuschüsse.“

Förderung

Hessen Bioenergiedorf Oberrosophe:

Biogasanlage; Holzschnitzelanlage; BHKW; Nahwärmenetz; Photovoltaikanlage

„Mehr als 30 Männer und Frauen arbeiten für die Anlage. Allein zehn von ihnen haben einen Radlader-Führerschein, um die Hackschnitzel zum Heizkessel fahren zu können“

Arbeitsplätze

Engagement

Baden-Württemberg Bioenergiedorf Untermaßholderbach

Biogasanlage; Hackschnitzel-Kessel; Nahwärmenetz

„Die kommunale Entwicklung wird vorangebracht, die regionale Wertschöpfung steigt und die ganze Gemeinde identifiziert sich mit dem Projekt.“

Stärkung Region

Bayern Bioenergiedorf Effelter:

Biogasanlage mit BHKW; Holzhackschnitzelheizung; Photovoltaikanlage

„Die Bewohner von Effelter gehen heute viel bewusster mit Energie um...“

bewusst werden

Bayern Wildpoldsried:

Windkraft; Photovoltaik; Nahwärmenetz mit Bioabgaswärme

„Rund 400 Bürger sind an den neun Anlagen ... beteiligt und verdienen damit Geld.“

Gewinn

Beispiel Bioenergiedorf Schlöben (Thüringen)

922 Einwohner (2019)
Genossenschaft
„Bioenergiedorf Schlöben eG“
(gegründet 2009)
Bürgerbeteiligung

Wärme für 6,6 Cent/kWh



Heizhaus

550kW Holzhackschnitzkessel
15 m³ Warmwasser-Pufferspeicher
+ Spitzenlastkessel
Holz aus 15 km Umkreis
(Forst, Landschaftspflege,
Agrarunternehmen)

Biogasanlage

zwei 256 kW Blockheizkraftwerke



Nahwärmenetz

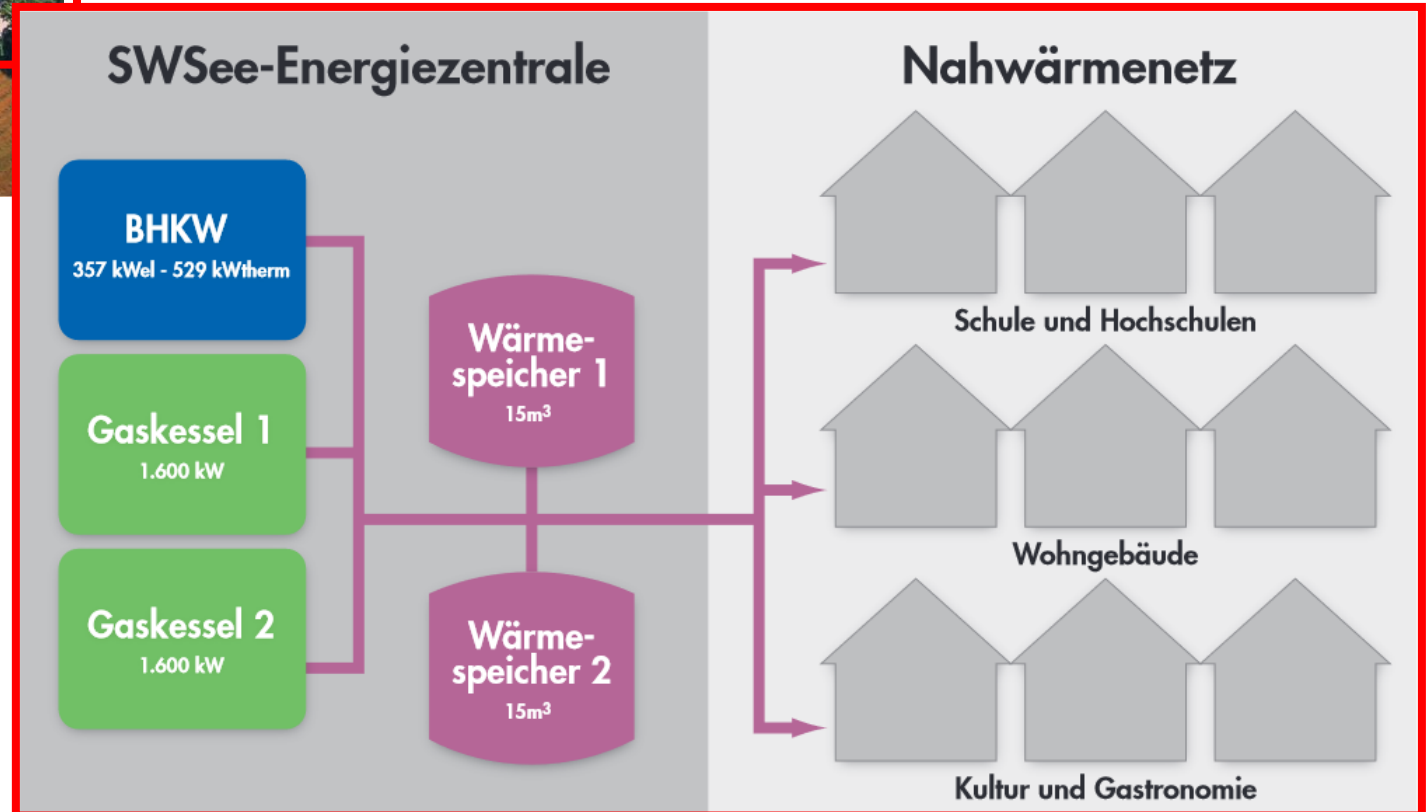
Mitverlegung von Leitungen für
Strom und Wasser sowie Glasfaserkabel



- 1 Einführung
- 2 Einige Aspekte der Energiewende
 - 2.1 Volatilität erfordert Speicherung
 - 2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität
 - 2.3 Importe als Lösung?
- 3 Warum klappt es „von oben“ nicht?
- 4 Beispiele für Energiewende „von unten“
- 5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral**
 - 5.1 Abschätzung Istzustand**
 - 5.2 Vergleich verschiedener Konzepte
 - 5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV
- 6 Zusammenfassung

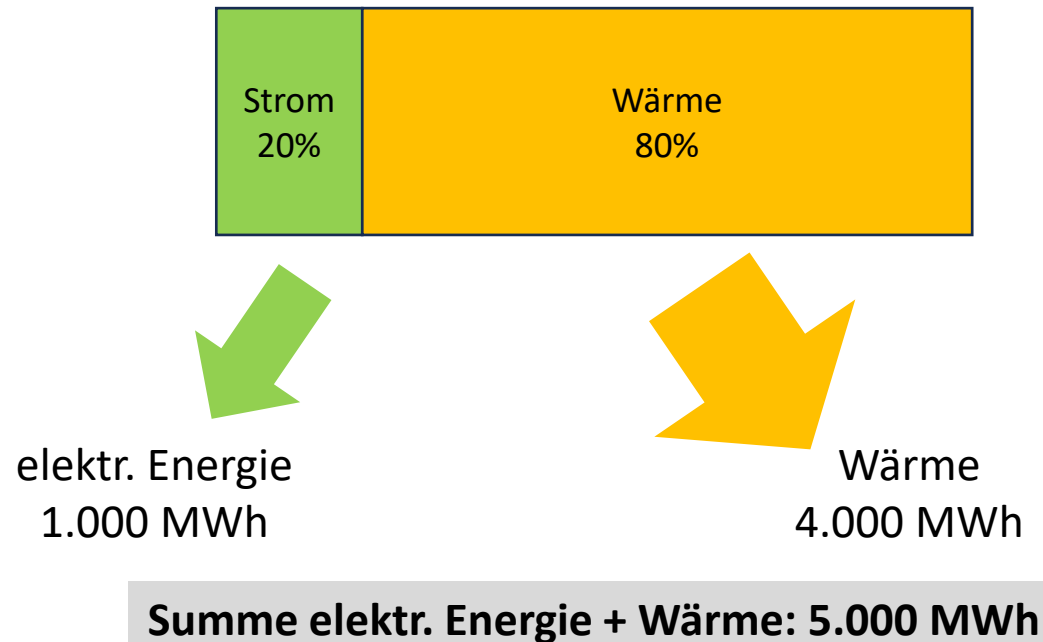
Diskussion

Energiezentrale für das Fallenbrunnen-Areal (seit Oktober 2014)



Quelle: Stadtwerke am See

Bedarf 5.000 MWh



Für die jährliche Bereitstellung von 5.000 MWh wäre ein Solarfeld von 158 x 158 m erforderlich.

Eine Reduzierung dieser Fläche ist durch

- Einsatz einer Wärmepumpe
 - Abwärmenutzung bzw. Wärmemanagement und
 - Sparen
- möglich.

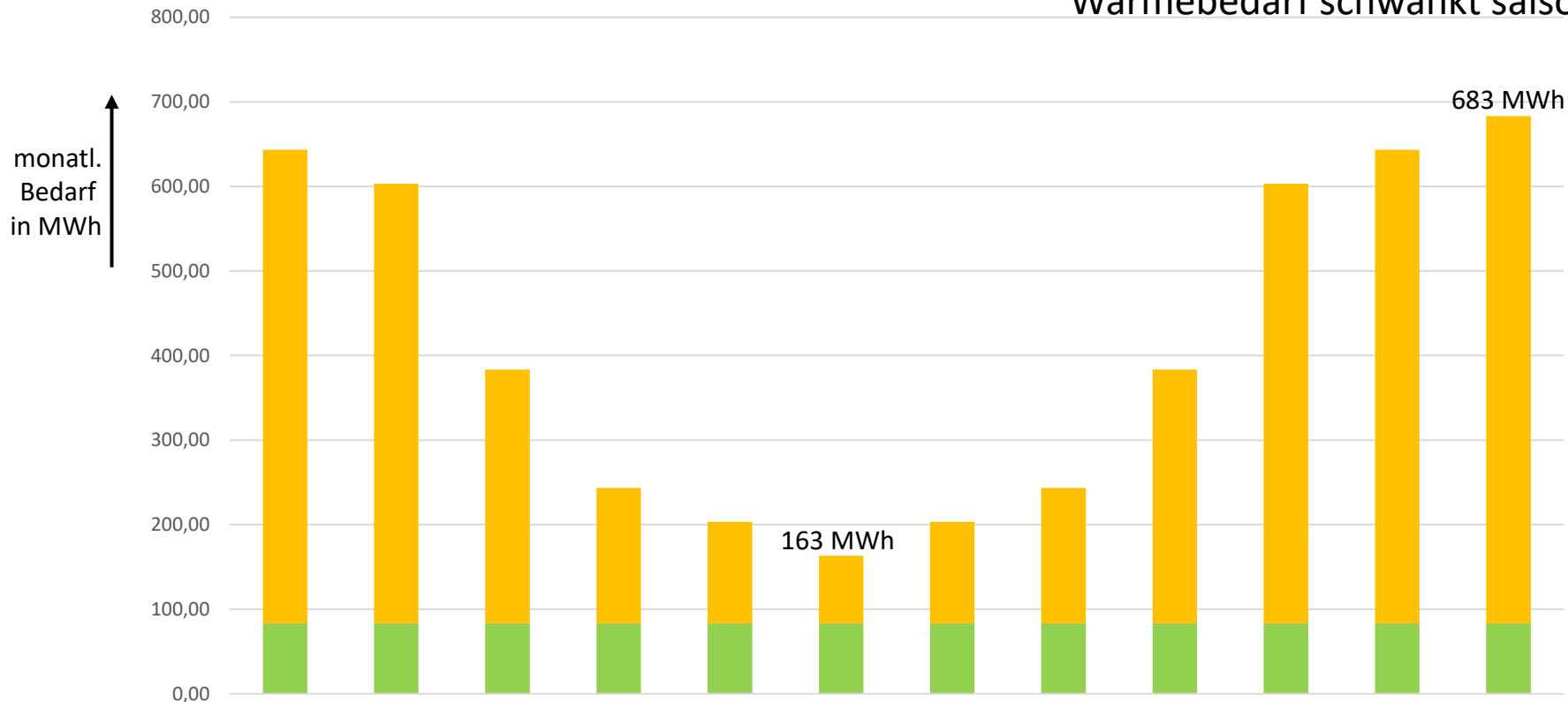
$$A_{erf} = \frac{5.000 \text{ MWh} \cdot m^2}{0,2 \text{ MWh}}$$

$$A_{erf} = 25.000 \text{ m}^2$$

gerechnet mit PV-Ertrag von $200 \frac{kWh}{a \cdot m^2}$

Energiebilanz Areal Fallenbrunnen (monatlicher Verbrauch, abgeschätzt)

Strombedarf als konstant über das Jahr angenommen
Wärmebedarf schwankt saisonal, im Sommer nur Warmwasser



Wärme 4.000 MWh
(Juni: 85 MWh, Dezember: 600 MWh)

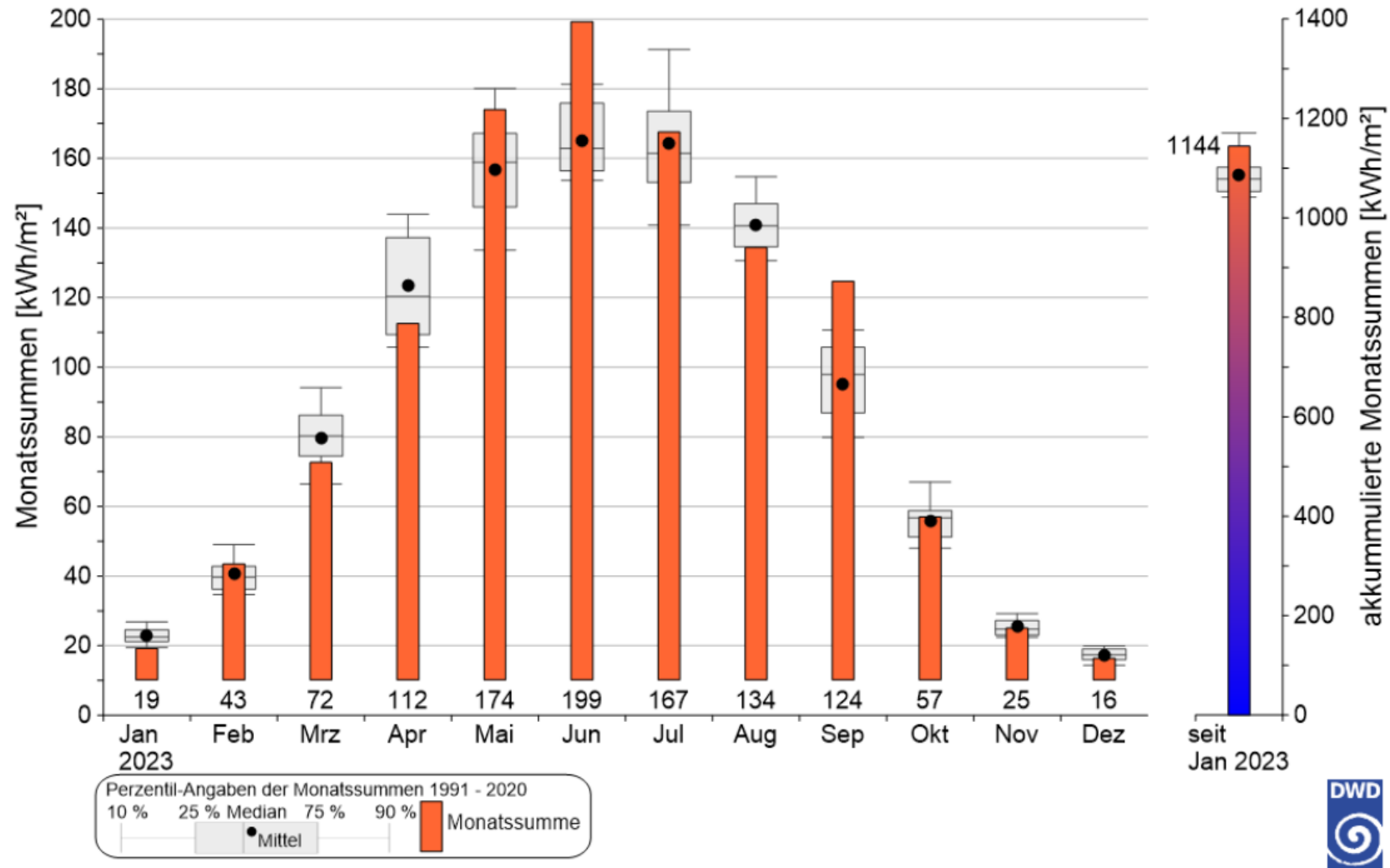
Strom 1.000 MWh (88,3 MWh/Monat)

	jan	feb	mrz	apr	mai	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dez	
Anteil	0,14	0,13	0,075	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,075	0,13	0,14	0,15	1
Bedarf Strom	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	83,33	1000
Bedarf Wärme	560,00	520,00	300,00	160,00	120,00	80,00	120,00	160,00	300,00	520,00	560,00	600,00	4000
gesamt	643,33	603,33	383,33	243,33	203,33	163,33	203,33	243,33	383,33	603,33	643,33	683,33	5000

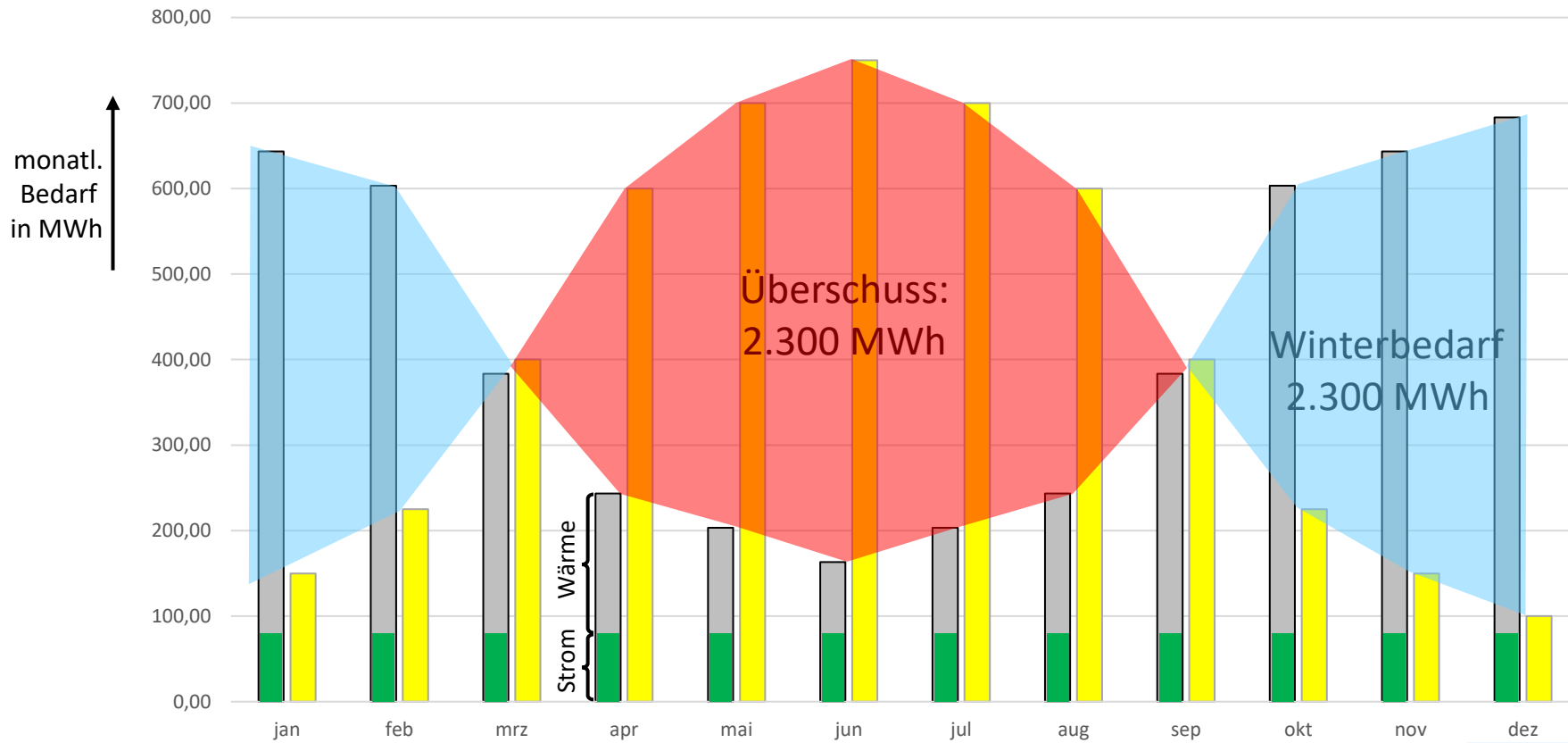
Solareinstrahlung in Deutschland

https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_sum.html?nn=16102

Monatssummen der Globalstrahlung für das Jahr 2023 in Deutschland
im Vergleich zu den mittleren Monatssummen der Jahre 1991 bis 2020



Energiebilanz Areal Fallenbrunnen (ideal, Wirkungsgrade 100%)

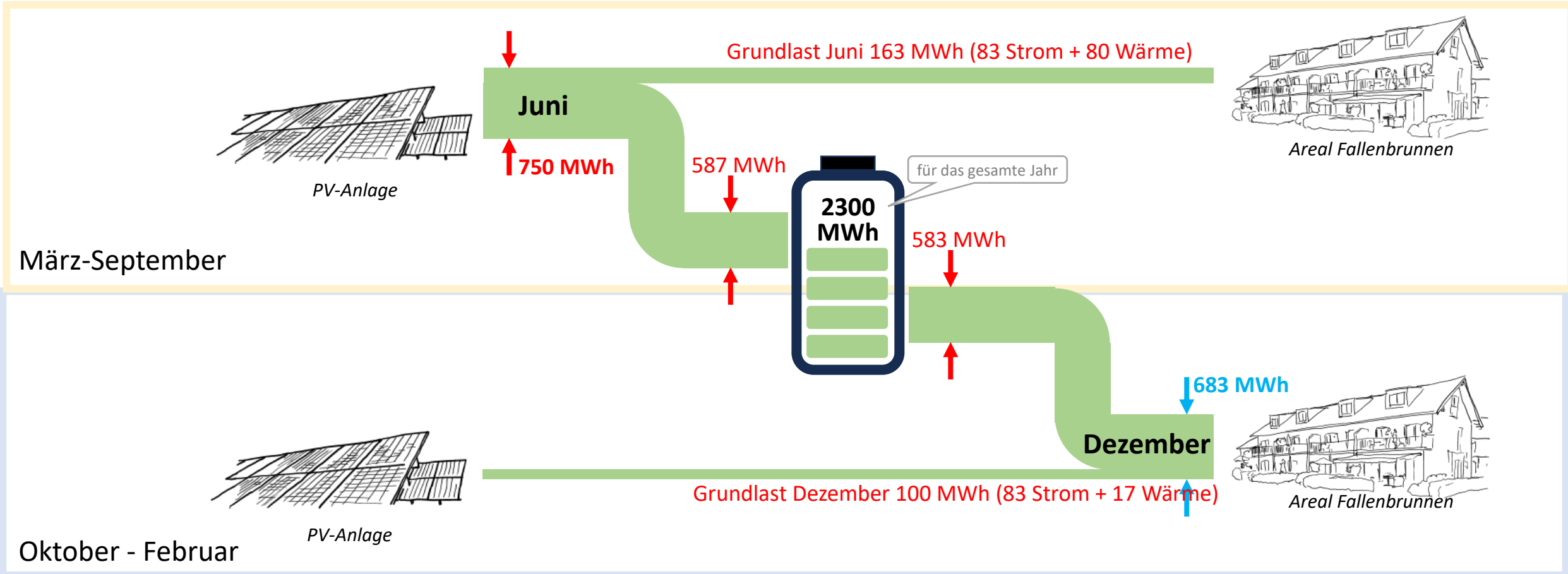


im Sommer speichern
im Winter verbrauchen

beide Flächen gleich groß
→ 2.300 MWh (aus den Monats-Daten)

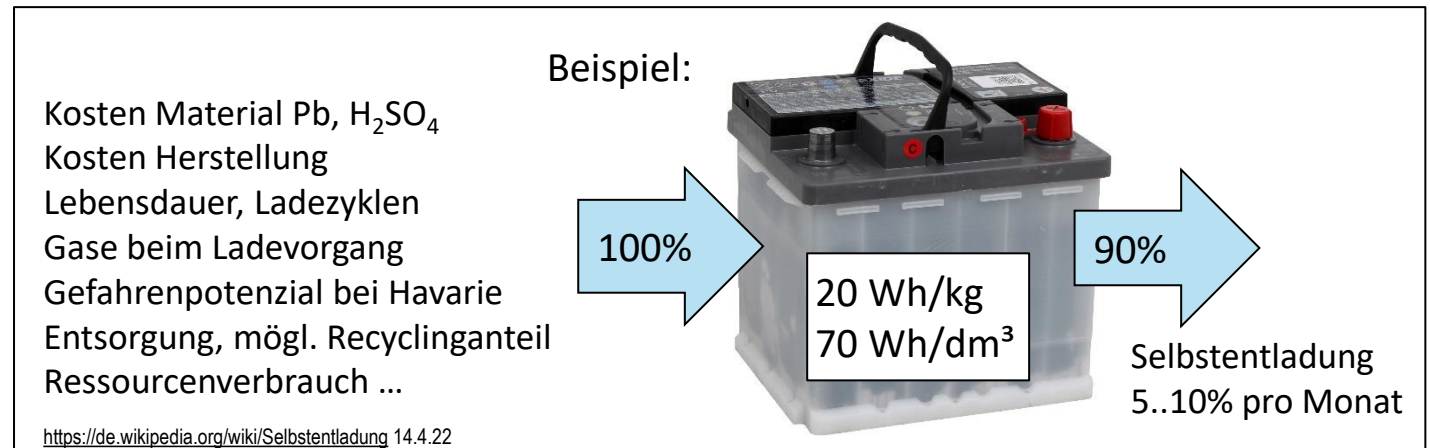
	jan	feb	mrz	apr	mai	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dez	
Gesamtbedarf	643,33	603,33	383,33	243,33	203,33	163,33	203,33	243,33	383,33	603,33	643,33	683,33	5000
PV-Gewinn	150,00	225,00	400,00	600,00	700,00	750,00	700,00	600,00	400,00	225,00	150,00	100,00	5000
Differenz	-493,33	-378,33	16,67	356,67	496,67	586,67	496,67	356,67	16,67	-378,33	-493,33	-583,33	0
Überschuss	0	0	16,67	356,67	496,67	586,67	496,67	356,67	16,67	0	0	0	2327
Manko	-493,33	-378,33	0	0	0	0	0	0	0	-378,33	-493,33	-583,33	-2327

Größenabschätzung für PV-Anlage und Speicher (ideal, Wirkungsgrade 100%)



Wichtige Parameter für Speicher-Systeme

- Energiedichte (volumetrisch/gravimetrisch)
- Wirkungsgrade der Energiewandlungsschritte
- Wirkungsgrad des Transports
- „Wirkungsgrad“ der Speicherung (Einspeichern und Ausspeichern) incl. Verteilung
- mögliche Dauer der Speicherung
- Geschwindigkeit der Energiespeicherung und -freisetzung (wichtig für Netzstabilität)
- Kosten (HK/Investitionen, Transport, Gebrauch, Recycling, Entsorgung)
- erforderliche Infrastruktur incl. Kosten für Einrichtung und Betrieb
- Folgen für Mensch und Umwelt



- 1 Einführung
- 2 Einige Aspekte der Energiewende
 - 2.1 Volatilität erfordert Speicherung
 - 2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität
 - 2.3 Importe als Lösung?
- 3 Warum klappt es „von oben“ nicht?
- 4 Beispiele für Energiewende „von unten“
- 5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral**
 - 5.1 Abschätzung Istzustand
 - 5.2 Vergleich verschiedener Konzepte**
 - 5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV
- 6 Zusammenfassung

Diskussion

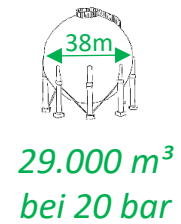
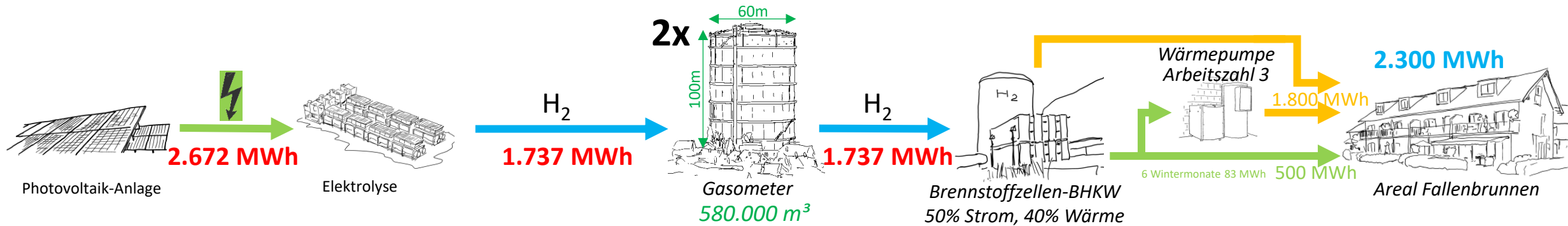
Li-Akkumulator zur saisonalen Energiespeicherung



Akkumulator und Wärmepumpe			
	Input [MWh]		Output [MWh]
	Strom	Strom	Wärme
	600	0	1800
	500	500	0
Summen	1100	500	1800

Li-Akku („fest“): 0,33 kWh/dm³; 0,3 MWh/t

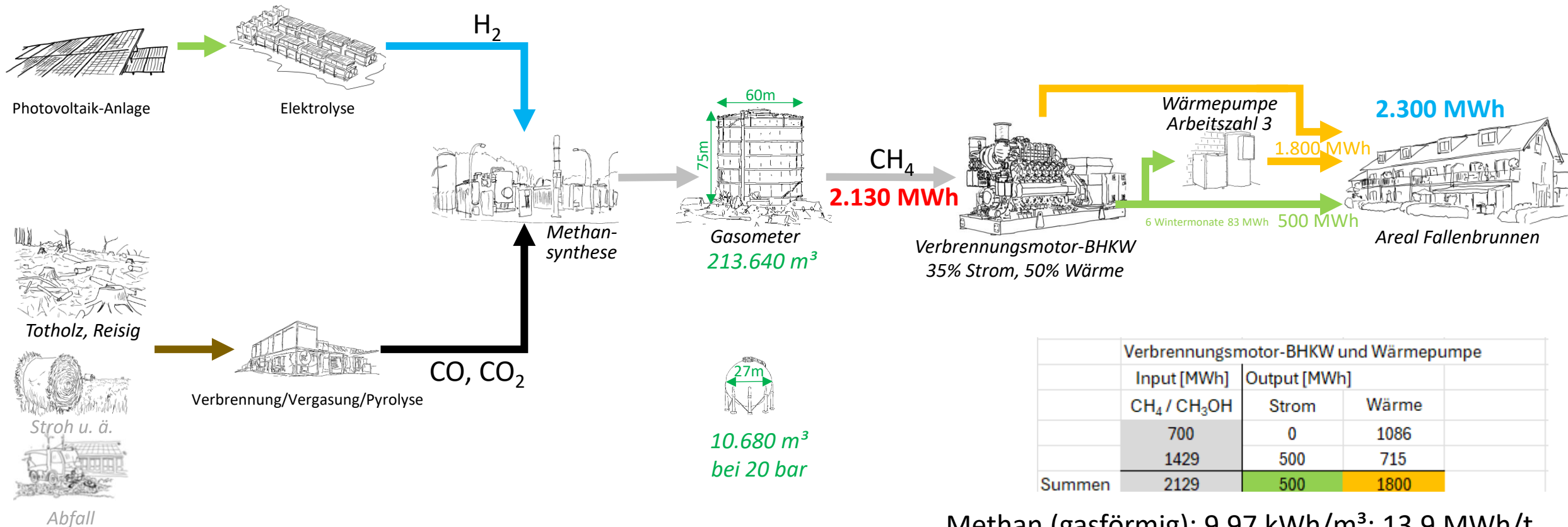
Wasserstoff zur saisonalen Energiespeicherung



Brennstoffzellen-BHKW und Wärmepumpe			
	Input [MWh]	Output [MWh]	
	H ₂	Strom	Wärme
	737	0	1400
	1000	500	400
Summen	1737	500	1800

Wasserstoff (gasförmig): 2,99 kWh/m³; 33,3 MWh/t

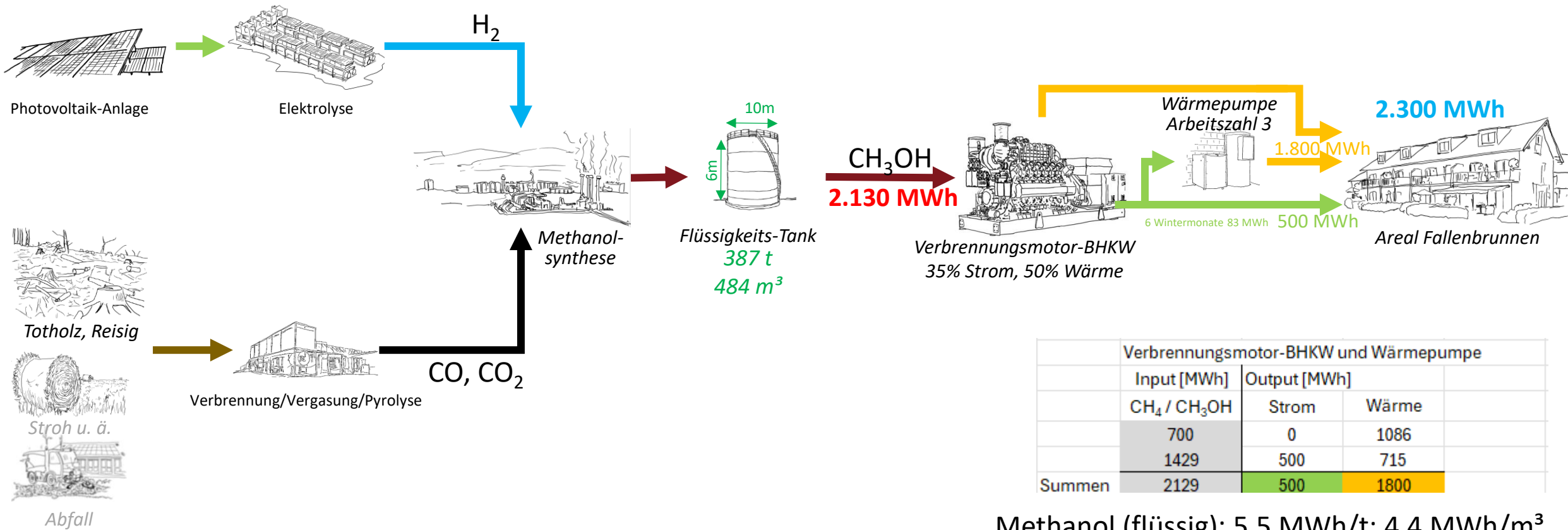
Methan zur saisonalen Energiespeicherung



Verbrennungsmotor-BHKW und Wärmepumpe			
	Input [MWh]	Output [MWh]	
	CH ₄ / CH ₃ OH	Strom	Wärme
	700	0	1086
	1429	500	715
Summen	2129	500	1800

Methan (gasförmig): 9,97 kWh/m³; 13,9 MWh/t

Methanol zur saisonalen Energiespeicherung



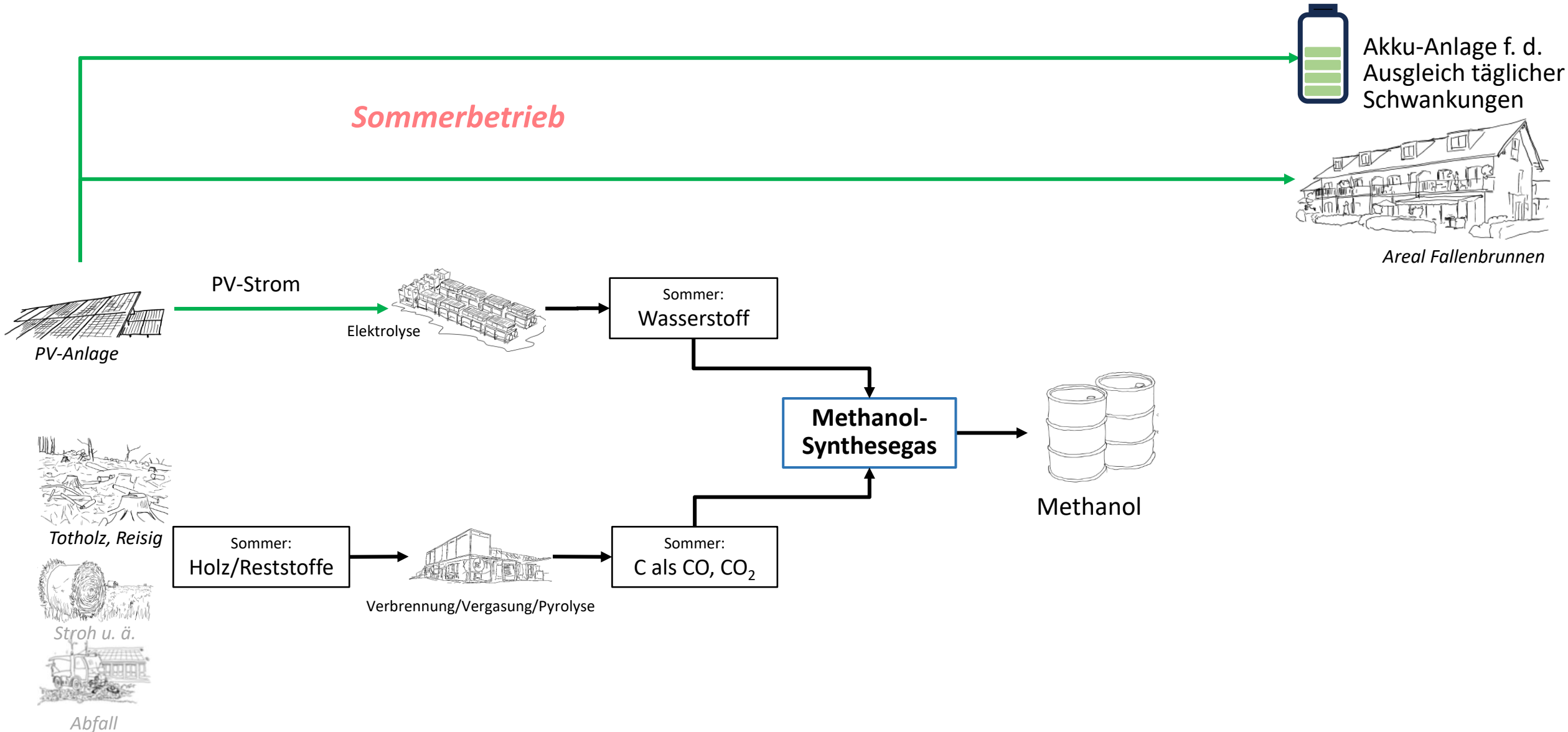
Verbrennungsmotor-BHKW und Wärmepumpe				
	Input [MWh]		Output [MWh]	
	CH_4 / CH_3OH	Strom	Wärme	
	700	0	1086	
	1429	500	715	
Summen	2129	500	1800	

Methanol (flüssig): 5,5 MWh/t; 4,4 MWh/m³

- 1 Einführung
- 2 Einige Aspekte der Energiewende
 - 2.1 Volatilität erfordert Speicherung
 - 2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität
 - 2.3 Importe als Lösung?
- 3 Warum klappt es „von oben“ nicht?
- 4 Beispiele für Energiewende „von unten“
- 5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral**
 - 5.1 Abschätzung Istzustand
 - 5.2 Vergleich verschiedener Konzepte
 - 5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV**
- 6 Zusammenfassung

Diskussion

Saisonale Speicherung von PV-Energie in Form von Methanol, Sommerbetrieb



Saisonale Speicherung von PV-Energie in Form von Methanol, Winterbetrieb

Winterbetrieb



Akku-Anlage f. d.
Ausgleich täglicher
Schwankungen



Areal Fallenbrunnen

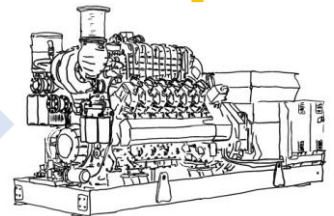
nur im Winter



Methanol

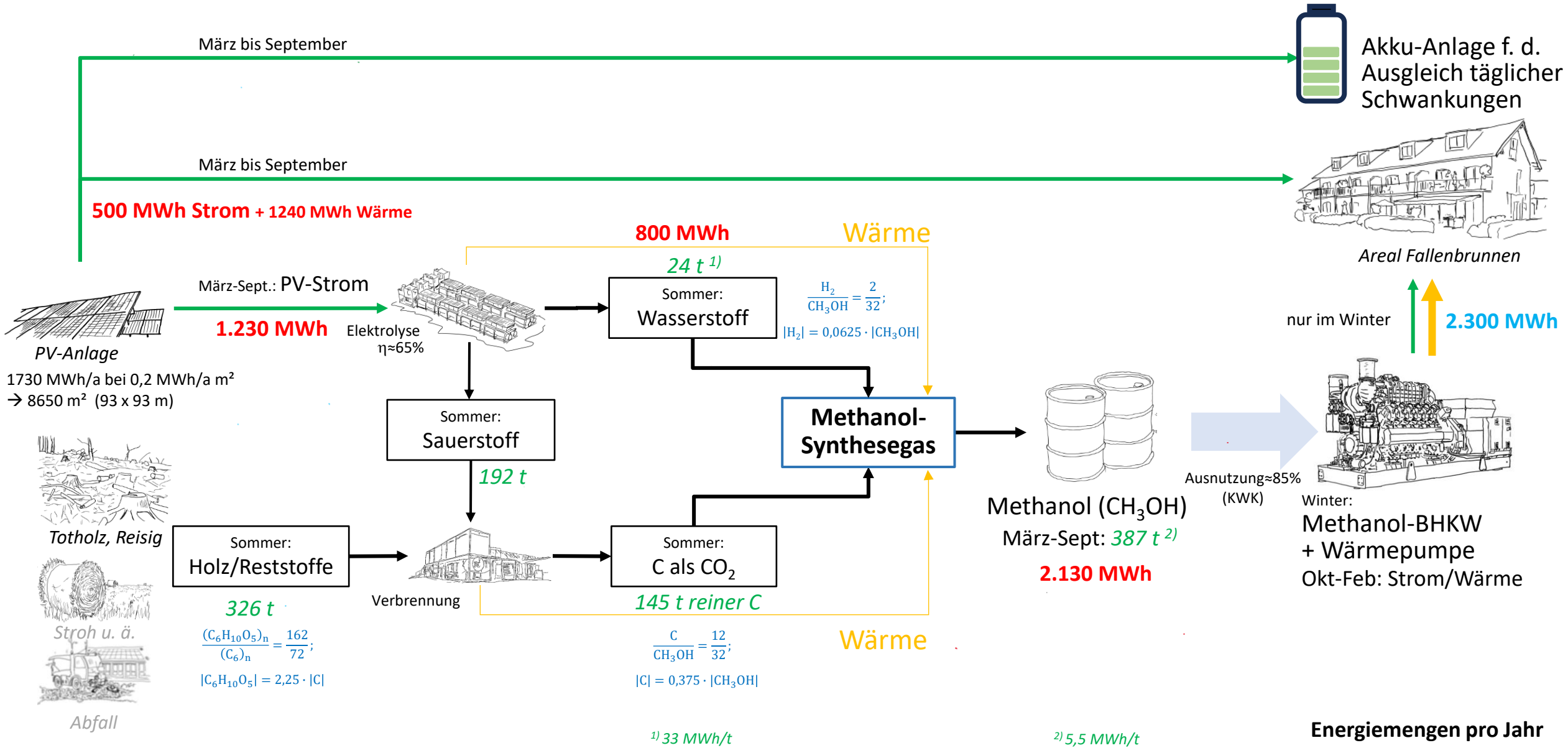


$\eta \approx 85\%$
KWK



Winter:
Methanol-BHKW
+ Wärmepumpe
Okt-Feb: Strom/Wärme

Saisonale Speicherung von PV-Energie in Methanol (Verbrennung von Biomaterial)



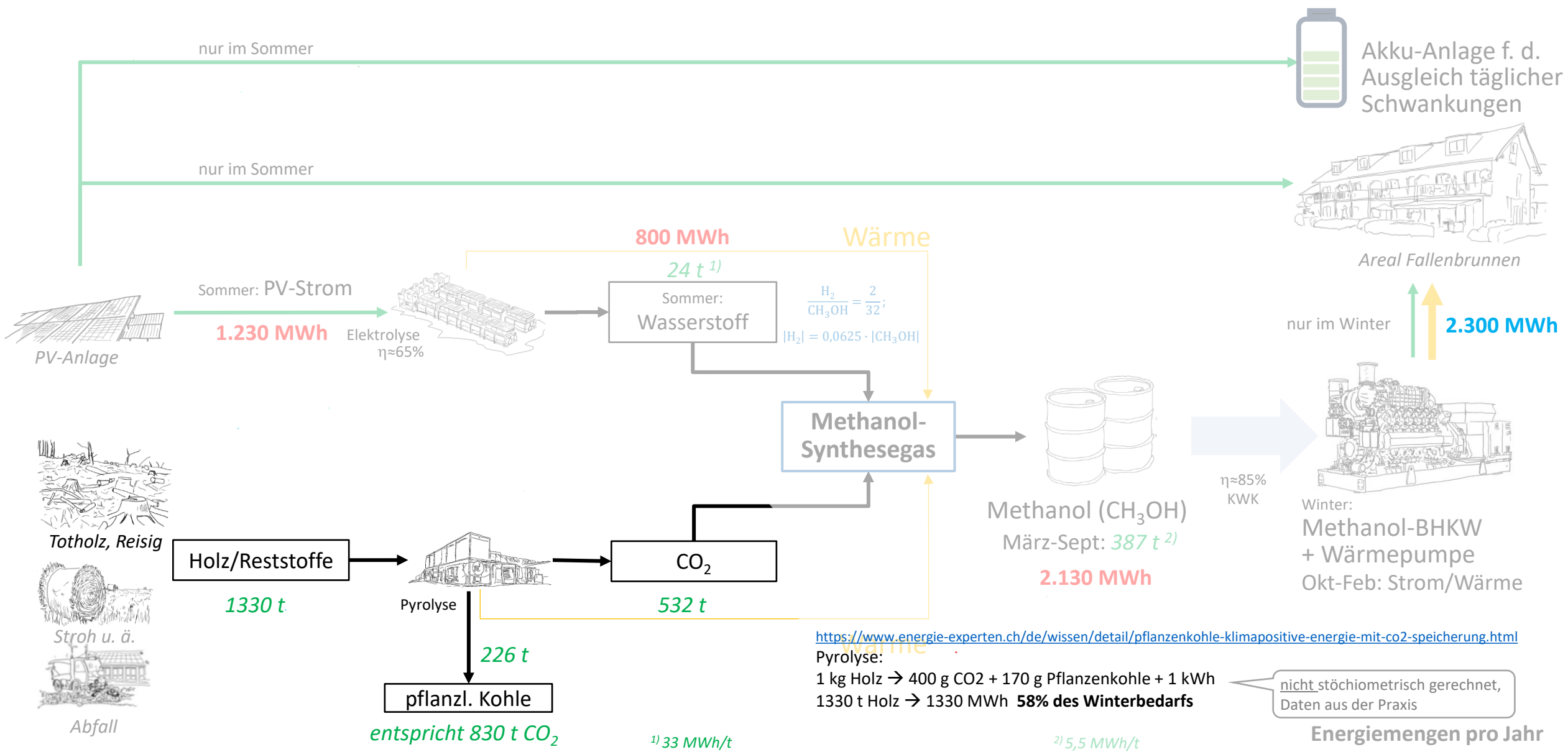
Konversionsverfahren für Biomasse (ursprüngl. Ziel: Energie)

Tab. 2.6: Charakterisierung der thermochemischen Konversionsverfahren für Biomassen (in Anlehnung an NUSSBAUMER 1999)

Konversionsverfahren	Oxidationsmittelverhältnis (λ)	Prozess-temperatur	Hauptprodukt	Anwendung	Anmerkungen (mf):
Verbrennung	$\lambda > 1$	800 – 1 300 °C	heißes Abgas	<ul style="list-style-type: none"> - Wärmeerzeugung allgemein - Dampfprozesse (Dampfmotor, Dampfturbine)¹ - Heißgasprozesse (indirekt befeuerte Gasturbine, Stirlingmotor)¹ 	<p>vollständige Umsetzung in CO₂ einfacher Prozess vielstofffähig, intermittierend, skalierbar Elektrolyse-Sauerstoff bietet sich an Gasreinigung aufwändig Stickoxidemissionen (SCR?)</p>
Vergasung	0,2 < λ < 0,5 (autotherm), $\lambda \approx 0$ (allotherm)	700 – 1 500 °C	heizwertreiches Produktgas	<p>ohne Produktgasreinigung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Direktverbrennung und Verwendung der heißen Abgase (siehe Verbrennung) <p>nach Produktgasreinigung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Heißgasprozesse (Verbrennungsmotor, direkt befeuerte Gasturbine)¹ - Brennstoffzelle¹ - Methanolsynthese 	<p>Ziel früher: energiereiches Heizgas heute: optimales Synthesegas (CO, H₂) H₂ eigentlich nicht erforderlich komplizierte Prozesssteuerung intermittierender Betrieb schwierig eher nicht „vielstofffähig“ aufwändige Gas-Reinigung Skalierung „nach unten“ hat Grenzen</p>
Pyrolyse	theoretisch $\lambda = 0$, praktisch $\lambda < 0,2$	400 – 700 °C	heizwertreiches Pyrolyseöl	<ul style="list-style-type: none"> - Direktverbrennung und Verwendung der heißen Abgase (siehe Verbrennung) - Heißgasprozesse (Verbrennungsmotor) nach Pyrolyseöltreinigung¹ - Chemierohstoff 	<p>Pflanzkohle → Carbon Capturing and Storage Destillationsprozess einfach komplizierte Prozesssteuerung intermittierender Betrieb schwierig eher nicht „vielstofffähig“</p>

¹ Die Kühl- bzw. Kondensationswärme dieser Anwendungen kann als Prozess- oder Heizwärme genutzt werden.

Saisonale Speicherung von PV-Energie in Methanol (Pyrolyse von Biomaterial)



Saisonale Speicherung mit Nutzung der Pyrolyse-Abwärme (Winterbetrieb)

Winterbetrieb



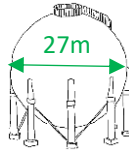
Holz/Reststoffe

975 t



Pyrolyse

CO₂



27m
390 t
196969 m³ bei 1 bar
9848 m³ bei 20 bar

pflanzl. Kohle

166 t

entspricht 608 t CO₂

1,98 kg/m³

Wärme



Methanol (CH₃OH)
März-Sept: 283 t²⁾
1.559 MWh

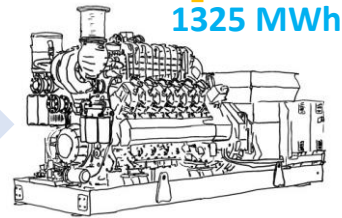
²⁾ 5,5 MWh/t

η≈85%
KWK



Areal Fallenbrunnen

nur im Winter



Winter:
Methanol-BHKW
+ Wärmepumpe
Okt-Feb: Strom/Wärme

1325 MWh

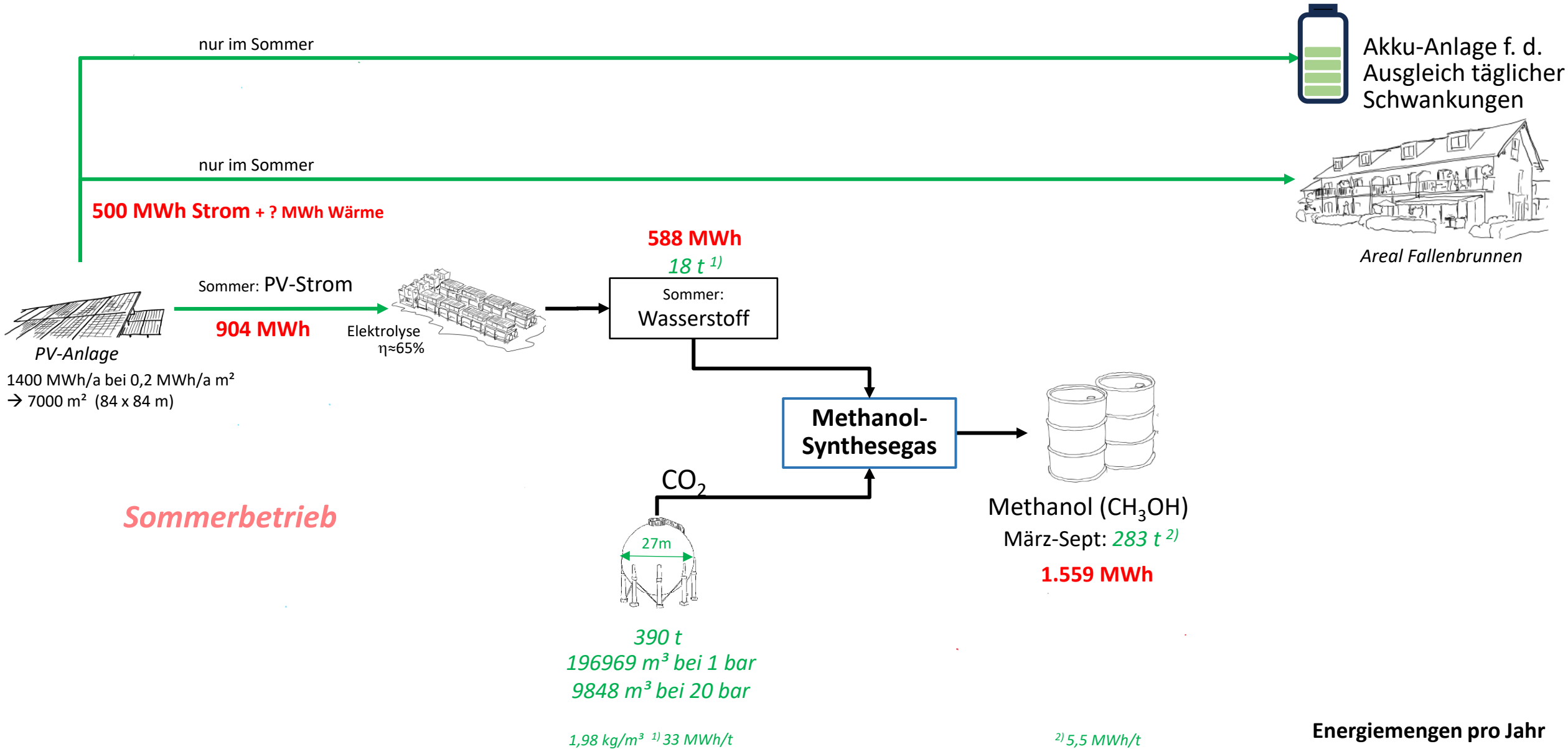
975 MWh



Akku-Anlage f. d.
Ausgleich täglicher
Schwankungen

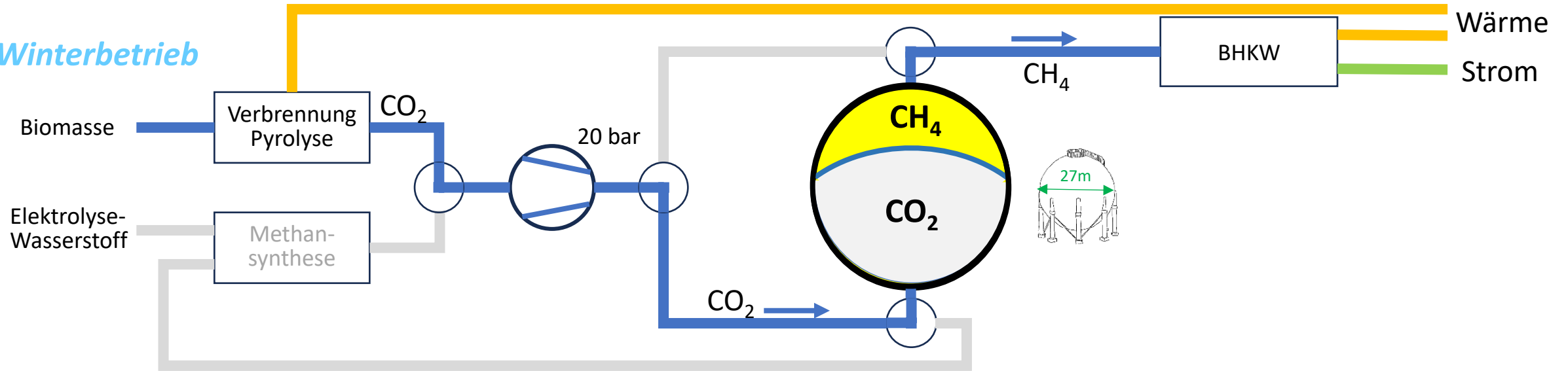
Energiemengen pro Jahr

Saisonale Speicherung mit Nutzung der Pyrolyse-Abwärme (Sommerbetrieb)

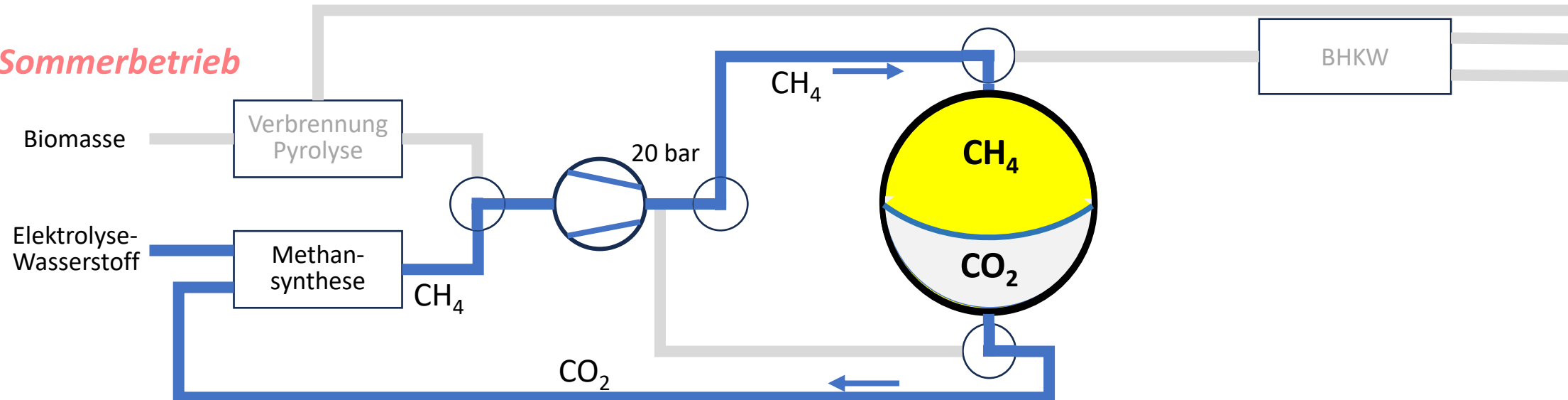


...die letzte Idee für heute

Winterbetrieb



Sommerbetrieb



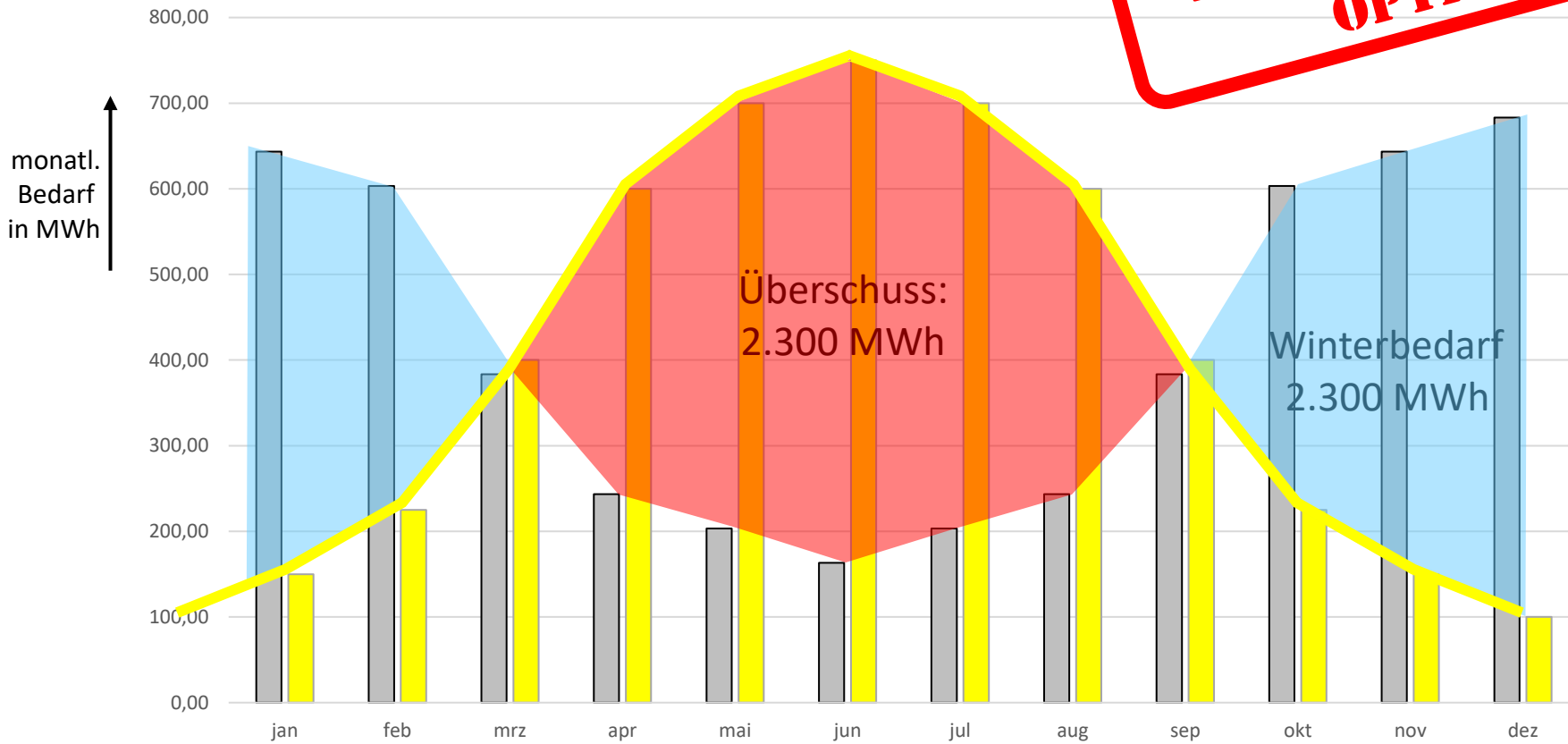
- 1 Einführung
- 2 Einige Aspekte der Energiewende
 - 2.1 Volatilität erfordert Speicherung
 - 2.2 Kraft/Wärme-Kopplung erfordert Dezentralität
 - 2.3 Importe als Lösung?
- 3 Warum klappt es „von oben“ nicht?
- 4 Beispiele für Energiewende „von unten“
- 5 Konzept Fallenbrunnen CO₂-neutral
 - 5.1 Abschätzung Istzustand
 - 5.2 Vergleich verschiedener Konzepte
 - 5.3 Methanol aus Abfällen und und Agro-PV
- 6 Zusammenfassung**

Diskussion

Energiebilanz Areal Fallenbrunnen - Einfluss der PV-Anlagengröße

**NÄHER UNTERSUCHEN,
OPTIMIEREN!**

jede Anlage ist speziell!



im Sommer speichern
im Winter verbrauchen

beide Flächen gleich groß
→ 2.300 MWh (aus den Monats-Daten)

offene Fragen:
mehr Strombedarf im Sommer durch Klimatisierung
weniger Wärmebedarf im Winter (Klimawandel)
zu hohe Investitionen für BHKW und Wärmepumpe
weitere, noch nicht bekannte Einflüsse

	jan	feb	mrz	apr	mai	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dez	
Gesamtbedarf	643,33	603,33	383,33	243,33	203,33	163,33	203,33	243,33	383,33	603,33	643,33	683,33	5000
PV-Gewinn	150,00	225,00	400,00	600,00	700,00	750,00	700,00	600,00	400,00	225,00	150,00	100,00	5000
Differenz	-493,33	-378,33	16,67	356,67	496,67	586,67	496,67	356,67	16,67	-378,33	-493,33	-583,33	0
Überschuss	0	0	16,67	356,67	496,67	586,67	496,67	356,67	16,67	0	0	0	2327
Manko	-493,33	-378,33	0	0	0	0	0	0	0	-378,33	-493,33	-583,33	-2327

$$A_{erf} = \frac{5.000.000 \text{ kWh} \cdot a \cdot m^2}{a \cdot 200 \text{ kWh}}$$

$$A_{erf} = 25.000 \text{ m}^2 \quad [158 \times 158 \text{ m}]$$

- Dezentralität (Nahwärmenetze) und die saisonale Speicherung „grüner“ Energie sind die Kernelemente der Energiewende
- Ein Netz aus vielen kleinen BHKW (Ausnutzungsgrade um 90%) ist grundlastfähig, dazu effizienter und sicherer als einzelne Großkraftwerke
- Die Interessen der großen Energieversorger, Lobbyismus, falsche Beratung hemmen bzw. verhindern Umstellung auf eine CO₂-neutrale Energiewirtschaft in Deutschland „von oben“
- Unklare und falsche Ausrichtungen, Fehlentscheidungen, auch Desinformation verunsichern und spalten die Gesellschaft
- Die exemplarische Umstellung von kleinen Einheiten in der Größe von Kommunen ist bereits erfolgreich erfolgt
- Das liegt nicht im Interesse der großen Energieversorger
- Deswegen funktioniert die Energiewende „von oben“ nicht

- Es wurden verschiedene Lösungsansätze vorgestellt, bei denen im Sommer (über eine Photovoltaik-Anlage) Energie gespeichert wird, die in den Wintermonaten genutzt wird
- Diese Lösungsansätze basieren auf verschiedenen Energieträgern, die jeweils unterschiedliche Anlagenkonzepte erfordern
- Die saisonale Speicherung mittels Li-Akkumulator bzw. in Form vom Wasserstoff stellte sich als nicht zielführend heraus
- Die Speicherung erfolgt zweckmäßig in Form von Methanol, das im (vorhandenen) Blockheizkraftwerk in den Wintermonaten zur Erzeugung von Wärme elektrischer Energie genutzt wird
- Mit geeigneten Anlagen (Elektrolyse, Verbrennung/Vergasung/Pyrolyse von Bio-Material und Methanolsynthese) müssen dazu ca. 300 t Methanol im Sommer hergestellt werden. Es besteht Entwicklungsbedarf für die Anlagen und Prozesse, insbesondere für die Verarbeitung des Biomaterials
- Es werden je nach Art der Verarbeitung 400 bis 1000 t Biomaterial benötigt
- Die vorhandene Infrastruktur (Strom- und Wärmenetz, Energiezentrale) kann weitgehend genutzt werden. Es werden Investitionen für die Photovoltaik, Elektrolyse, Verbrennung/Vergasung/Pyrolyse und Methanolsynthese sowie für die Zwischenspeicherung des Methanols erforderlich.
- Bei hohem Wärmebedarf ist die Nutzung einer Wärmepumpe sehr sinnvoll

- Ziel der Arbeit war die Einschätzung der Machbarkeit
- Die Versorgung des Fallenbrunnenareals mit Wärme und elektrischer Energie kann CO₂-neutral gestaltet werden
- Interesse bei den Stadtwerken geweckt? Zusammenarbeit wird angestrebt (DHBW)
- Anstoß zu genaueren Studien (Simulationen, Stichversuche, Pilotanlage)

Danke für die Aufmerksamkeit

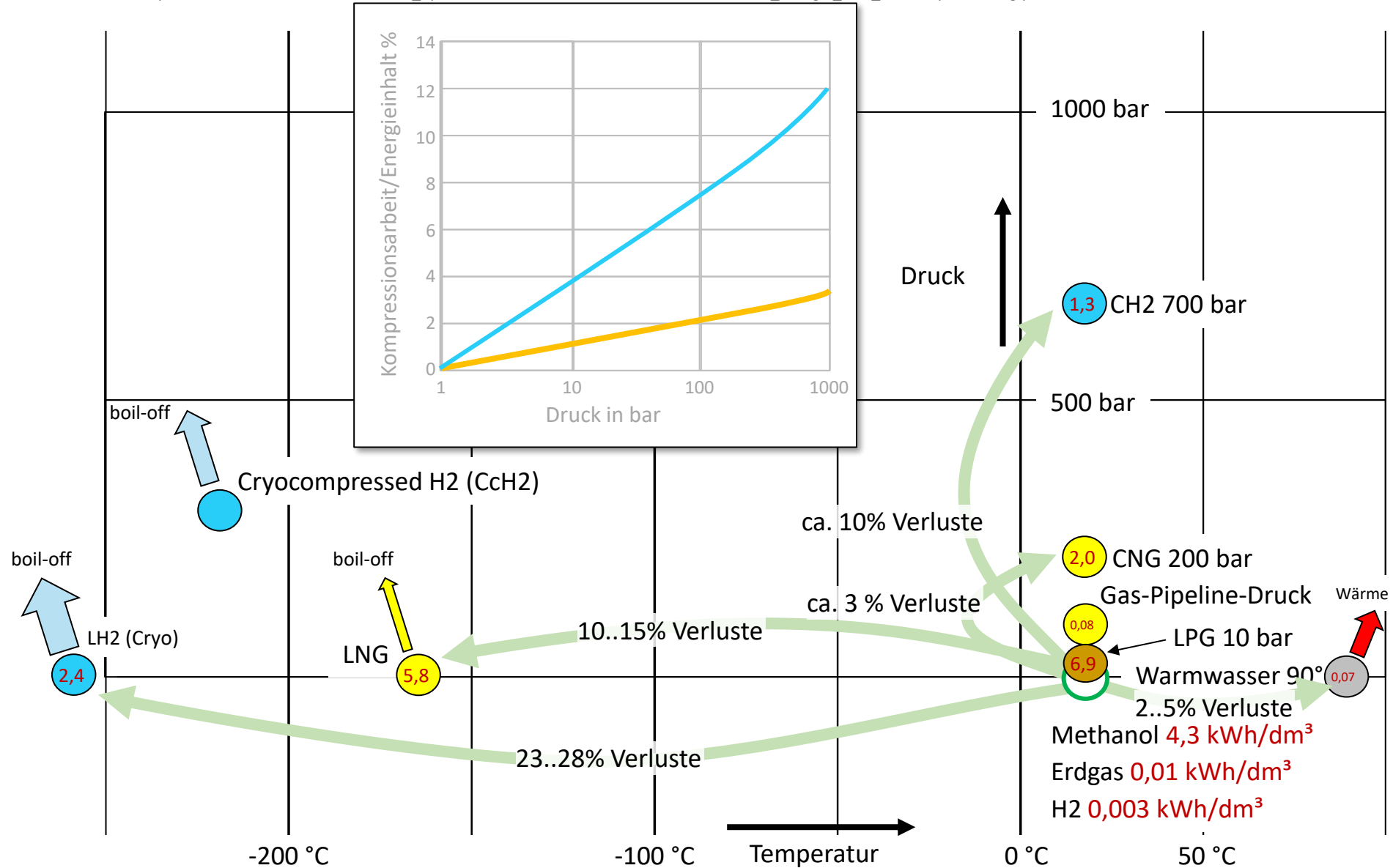
Dank an Heike Freitag und Werner Rimmels
für die Unterstützung bei der Erarbeitung
Dank an Frau Willamowski (IWT) für die
Ausrichtung der Veranstaltung

Diskussion

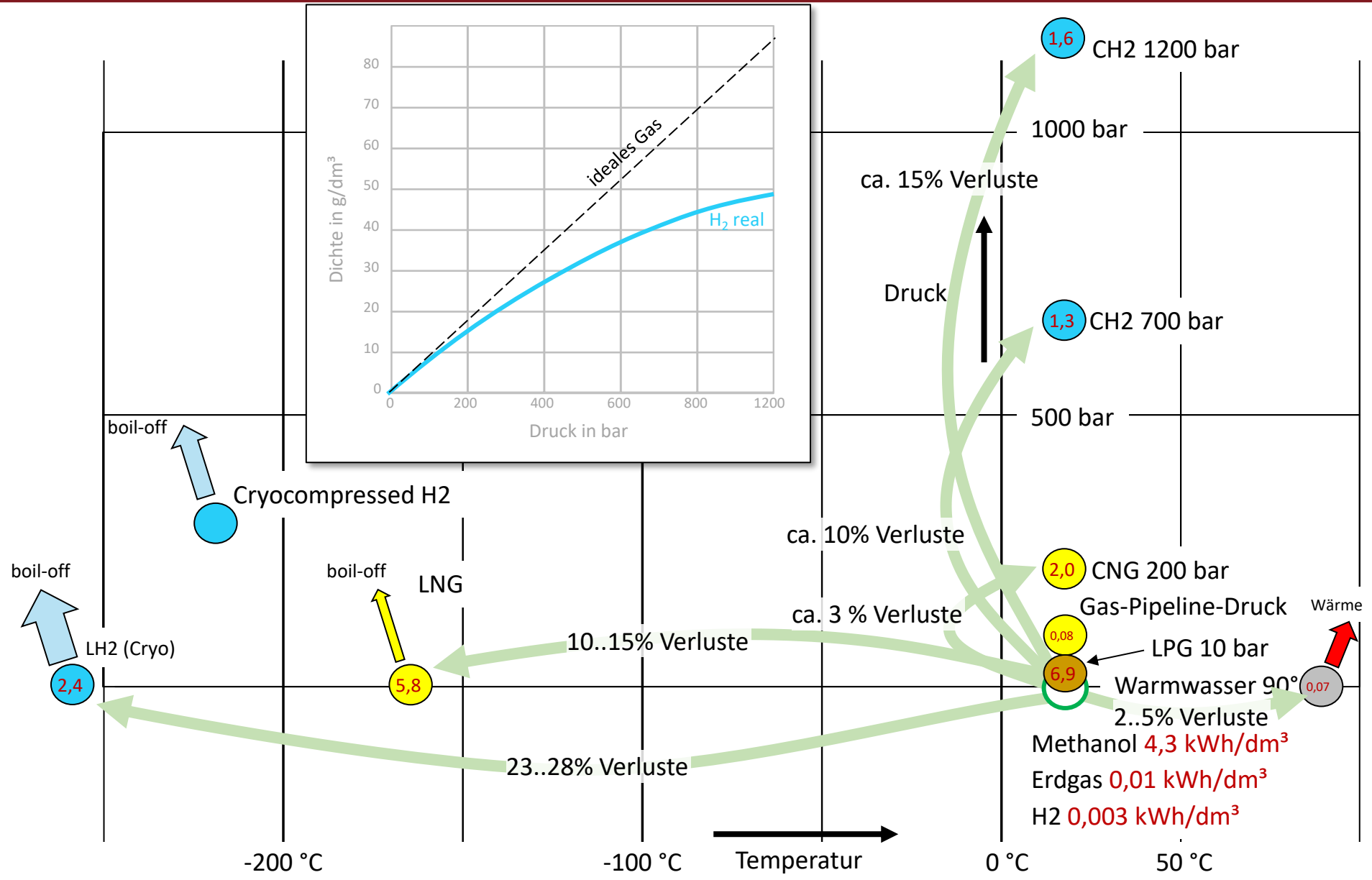
weitere gezeigte Folien

Parameter von Speichermedien

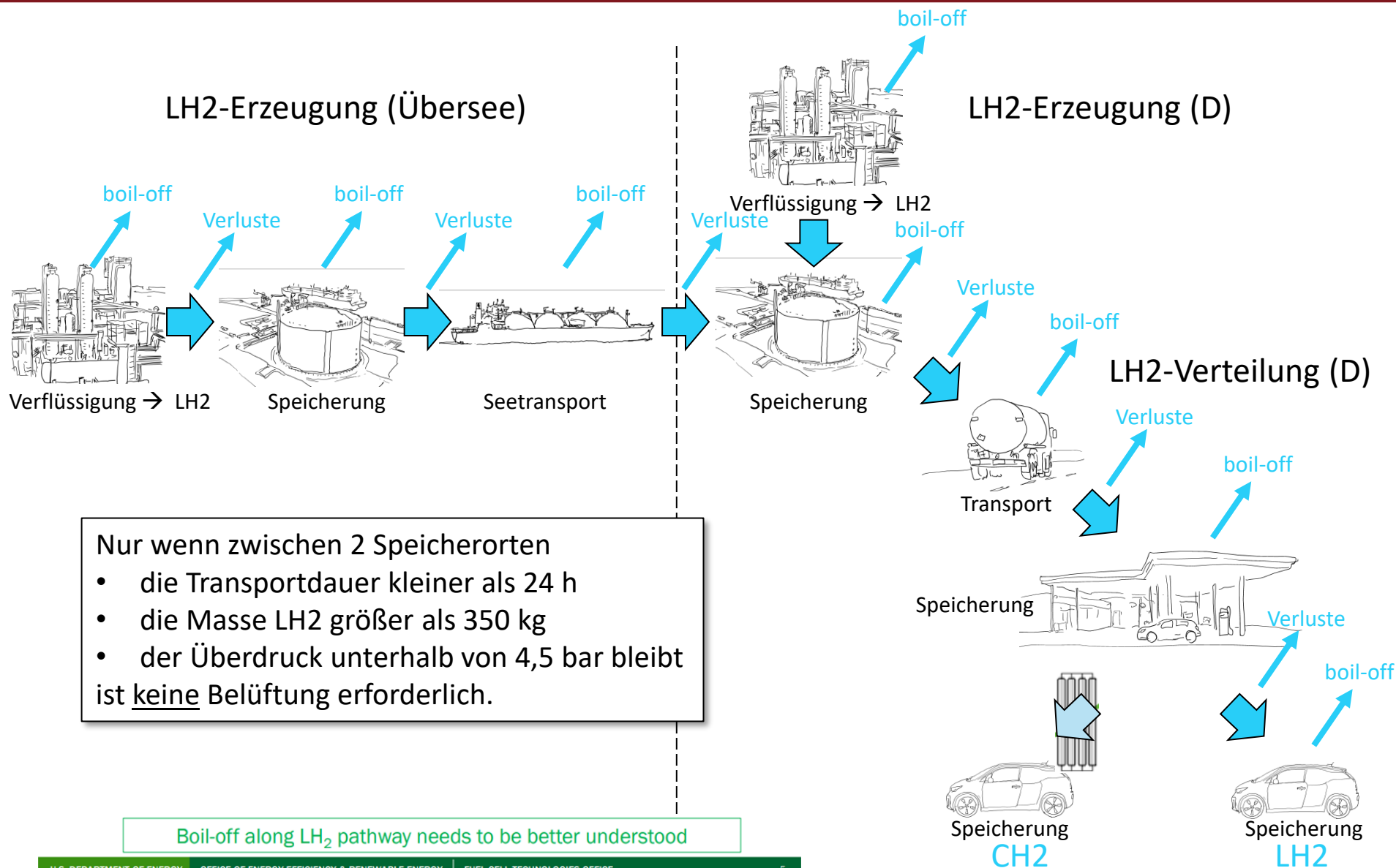
https://www.iet.hsr.ch/fileadmin/user_upload/iet.hsr.ch/Power-to-Gas/Kurzberichte/06_Energie_fuer_Gaskomprimierung.pdf



Parameter von Speichermedien



Boil-off-Verluste bei Speicherung und Transport (LH2)

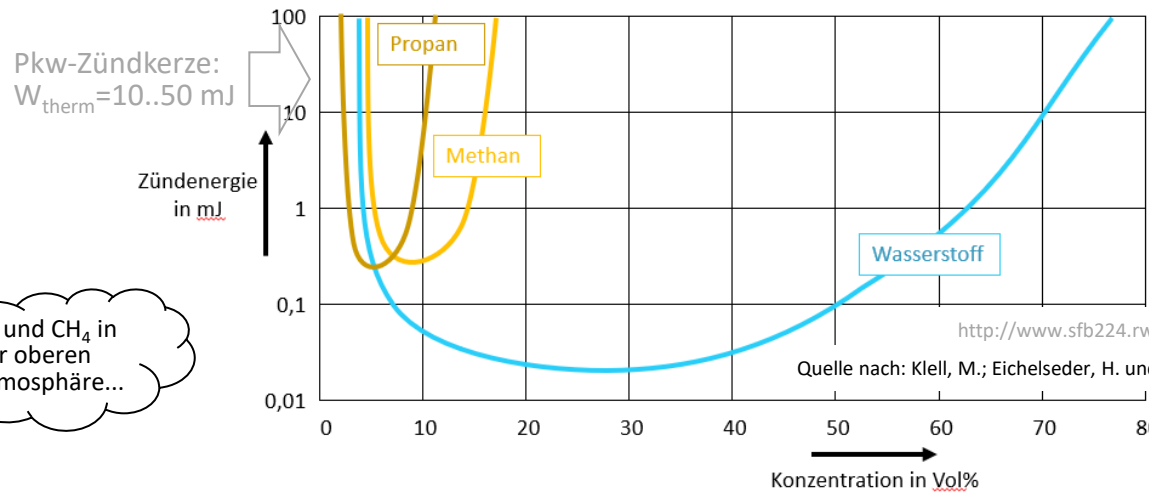
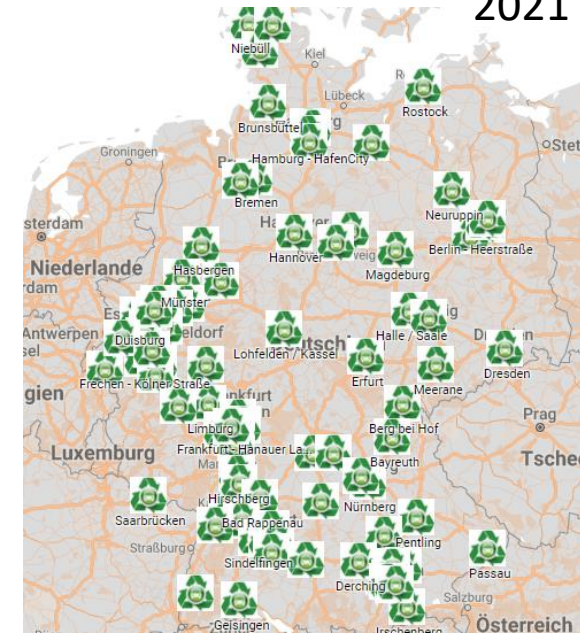


Warum Wasserstoff nicht?

- keine ausreichende Infrastruktur
- Kosten und Genehmigungsverfahren bei Infrastrukturaufbau
- wenig Langzeit-Erfahrungen mit LH₂ bzw. CH₂ (1200 bar)
- Verluste 23..28% bei Kühlung auf -253°C (20K)
- boil-off (hoher Aufwand boil-off-Recycling bzw. Kühlung)
- Verluste 15...15% bei Kompression auf z.B. 1200 bar
- ungeklärte Materialprobleme
- Sicherheitsaspekte

<https://www.glpautogas.info/data/hydrogen-stations-map-germany.html>

2021



H₂ und CH₄ in der oberen Atmosphäre...

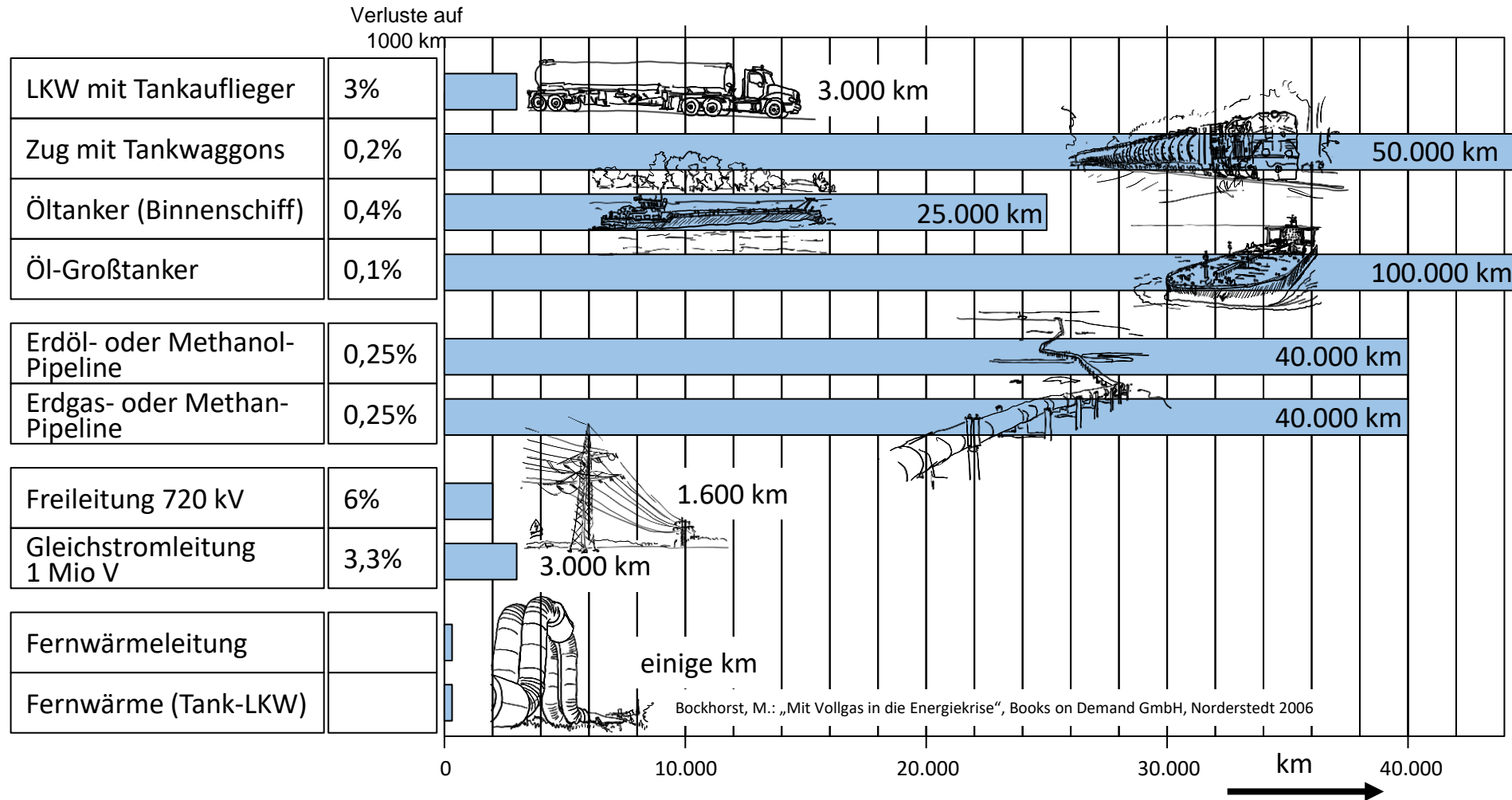
<https://www.iwm.fraunhofer.de/de/warum-fraunhofer-iwm/loesungen-fuer-produktlebenszyklus/wasserstoff/faq.html> Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, FAQ zu Wasserstoff

Welcher hochfeste Werkstoff ist für Wasserstoffanwendungen geeignet?

Generell können alle Stähle, unabhängig von ihrer Festigkeit, einer Schädigung in gasförmigem Wasserstoff unterliegen. Uns ist kein hochfester Werkstoff bekannt, der keine Schädigung durch gasförmigen Wasserstoff zeigt.

Vergleich von Transportverlusten

Reichweite bei 10% Verlust der transportierten Energie



besser (synthet.) Methan über das Erdgasnetz als Strom über „Stromautobahnen“

Quellen und Literaturhinweise (zusätzlich zu den auf den Folien angegebenen)

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

Forschungszentrum Jülich, diverse Autoren: „Methanol als Energieträger“, Jülich 2003, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik

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>

INES, DVGW und BVEG: „Wasserstoff speichern – soviel ist sicher“ Berlin 2022, Pressemitteilung

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

Stähler, M.: „Methanol aus Biomasse - Die Natur zum Vorbild?“ Aachen 2005, Promotionsvortrag RWTH

Strasser, Ch.: „Machbarkeitsuntersuchung Methan aus Biomasse“, Wieselburg-Land, Austria, Präsentation 2022

Umweltbundesamt: „Carbon Capture and Utilization (CCU)“
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/carbon-capture-utilization-ccu#Klimaschutz>

Eigene Veröffentlichungen 1

Zu diesem und angrenzenden Themen habe ich auf YouTube einige Videos erarbeitet und hochgeladen.

In einer Videoreihe geht es um das Thema „**CO₂-neutrale Energiewirtschaft bis 2050 - ist das realistisch?**“

Sie können sich zunächst eine zusammenfassende Darstellung anschauen: <https://youtu.be/XdfkYpxGjjs>

Das ist der Mitschnitt eines Vortrages vom 10.11.21 im Rahmen einer online-Alumni-Veranstaltung des DHBW-CAS Heilbronn, also der Vorläufer zu diesem Video.

Die ausführlicheren Videos zu diesem Thema gibt es in YouTube-Playlist: https://www.youtube.com/playlist?list=PLu2_KhOxTuVqOXsP4AGxH8-04fHess55x

Hier die einzelnen Links und die Inhalte dieser 4 Videos:

Video 1 <https://youtu.be/Rvs4qkFuY7A> (35 min)

- 1 Treibhauseffekt
- 2 Analyse des Istzustandes

Video 2 <https://youtu.be/jaJLnkybwLk> (44 min)

- 3 CO₂-Reduktionspotenziale
- 3.1 Rolle von Brennstoffen, Energie-Wandlungen und Transport
- 3.2 Wirkungsgrade der Energiewandlungen

Video 3 https://youtu.be/6u9yil_Cyfw (67 min)

- 4 Fokus: Regenerative Energieträger
- 4.1 Wind- und Solarenergie
- 4.2 Volatilität – Ausgleich durch Speicherung

Video 4 <https://youtu.be/ij2SXcLAWLc> (31min)

- 5 Rettet uns der technische Fortschritt?
- 6 Vorschlag: Sanfter Übergang zu weniger CO₂-Emissionen
- 7 Zusammenfassung und Ausblick

weitere YouTube-Videos:

„**CO₂-neutrale Energiewirtschaft bedeutet radikal umdenken**“ <https://youtu.be/LD1kRIzCGN0>

- 1 Umdenken mit der Energiewende
- 2 Eine kWh - wieviel ist das?
- 3 Wie kostbar ist 1 kWh in verschiedenen Formen?
- 4 Energie-"Veredelung" heute und morgen
- 5 Zusammenfassung

Zur Energiewende „von oben“ habe ich seit 2019 veröffentlicht und teilweise hier wiederverwendet:

„Weniger CO₂ und stabile Energieversorgung – geht das?“

12.11.19 FN und 13.2.20 RV

„Die globale Herausforderung – wie senken wir die CO₂-Emissionen?“

15.7.21 Fischbach

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

14.10.21 KMG FN und 10.11.23 CAS Heilbronn livestream

„Gashahn zu - was nun? Die Herausforderungen jenseits von Politik und Wirtschaft“

26.4.22 FN

„Energiekrise als Klimachance?“

3.3.23 CAS Heilbronn livestream