

Konzepte, Herausforderungen und Chancen für e-Fuels und andere synthetische Kraftstoffe

Prof. Dr.-Ing. Jakob Burger

Technische Universität München

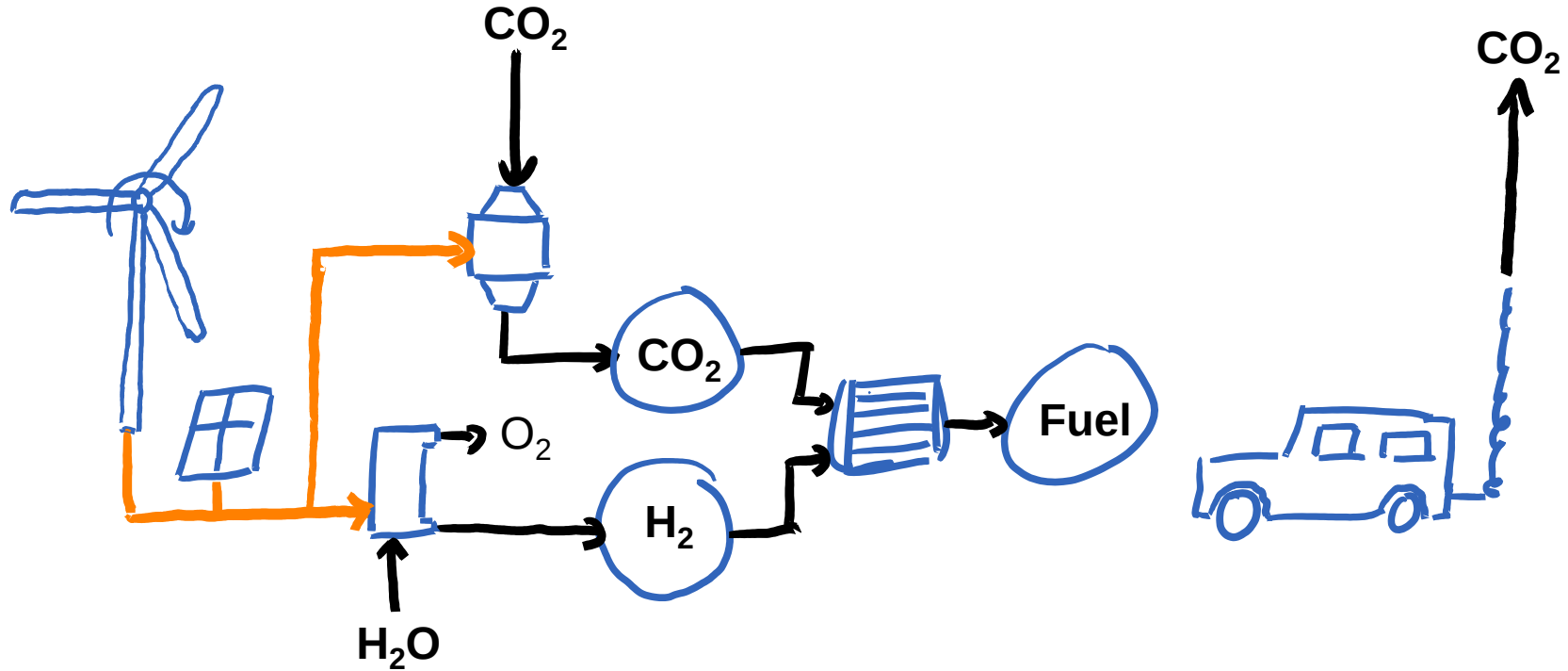
Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit

Chemische u. Thermische Verfahrenstechnik

Februar 2021



Utopie der E-Fuels



Diskussion **Realistischer, Fairer und Optimistischer** Szenario für Synthetische Kraftstoffe

- Diskutieren: **Randbedingungen, Vokabular, Mythen**
- Erklären: **Technologien der Kraftstoffsynthese**
- Aufzeigen: **Utopien für Realisten¹**

Welche Kraftstoffe diskutieren wir?

	Chemische Modifikation	Chemische Synthese aus Kleinmolekülen	Fermentation
Bioenergie			Biokraftstoffe
Reg. Elektr. Energie		E-Fuels	
Fossile Energie		Synthetische KS	

Warum überhaupt synthetische Kraftstoffe?

Geopolitische
Unabhängigkeit

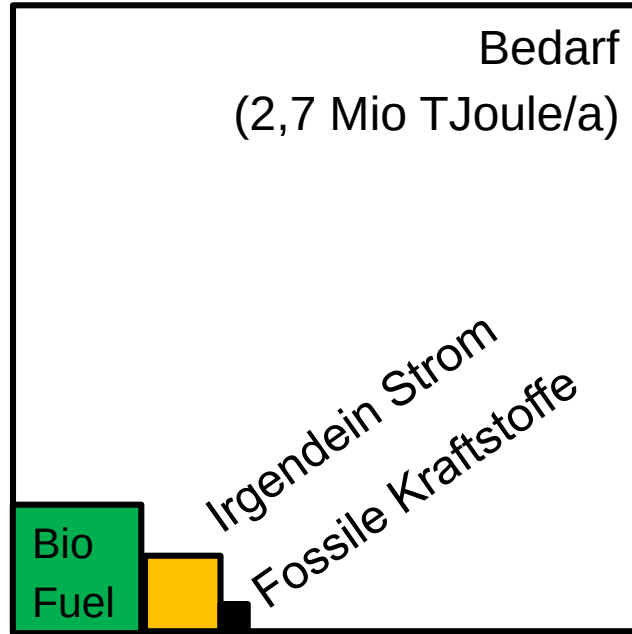
Klimaschutz

Ökonomische
Gründe

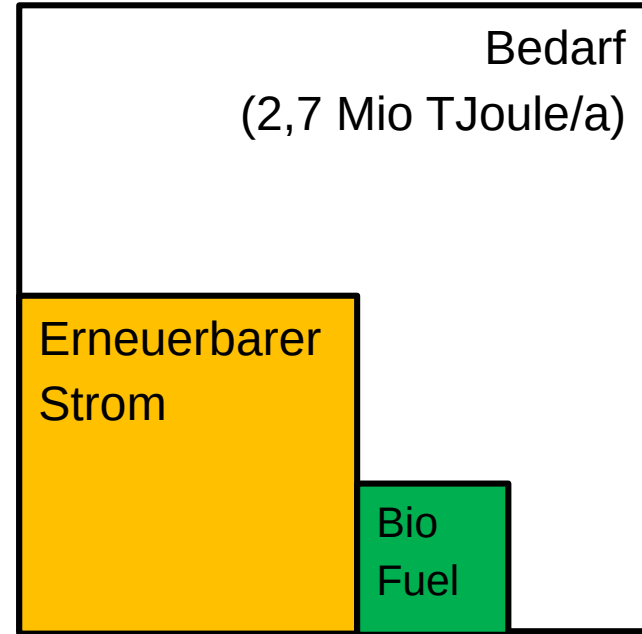
Energiespeicherung

Weniger
Schadstoffe

Heimische Primärenergie für den Verkehrssektor

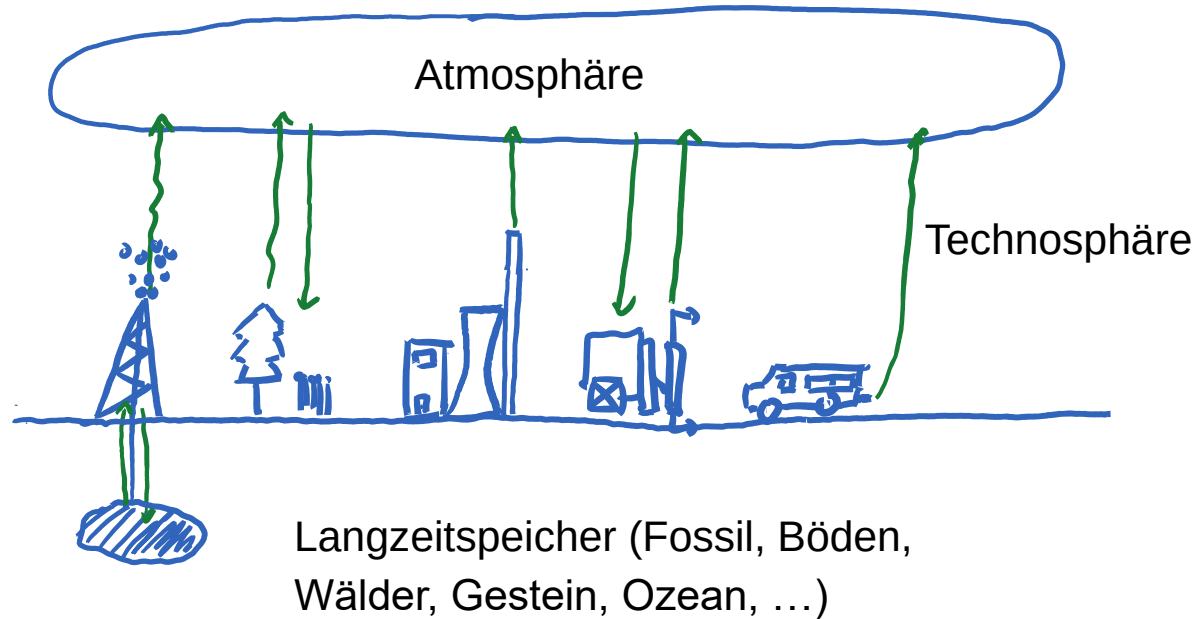


2018¹



2040 (von mir geschätzt)

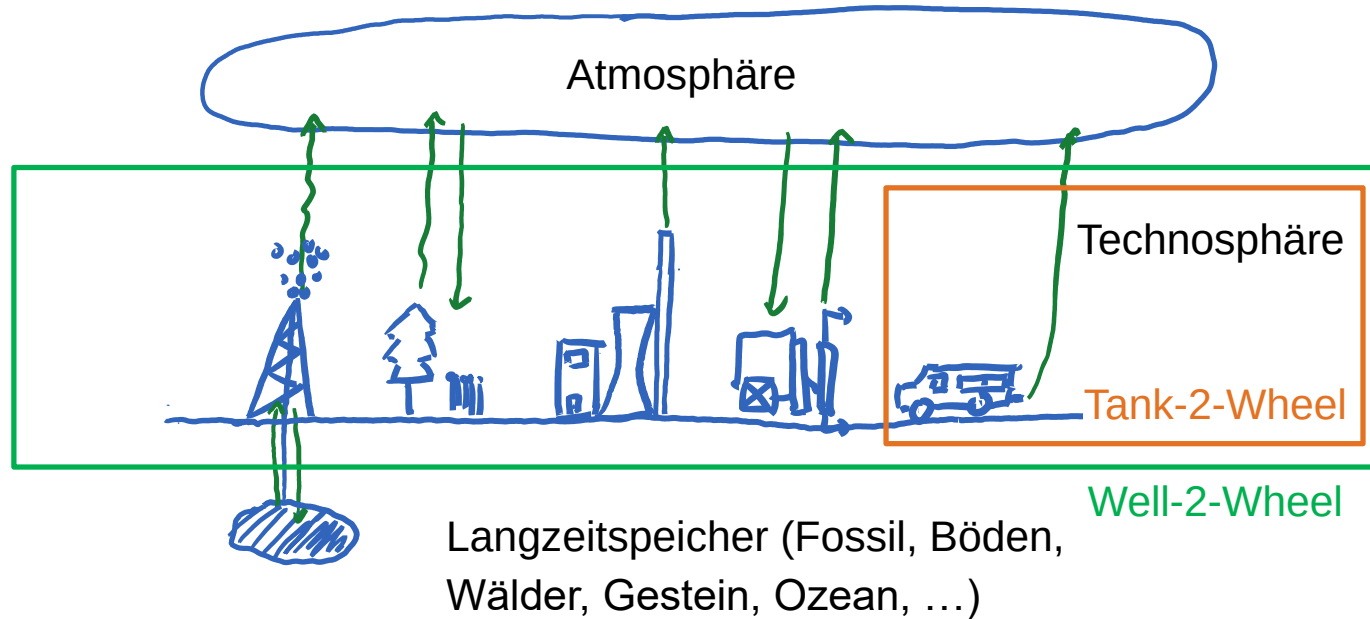
Systemgrenzen bei Bilanzierung von THG¹-Emissionen



Netto-Emissionen Atmosphäre $\approx$ Netto-Entnahme aus Langzeitspeicher

→ Reduziere Netto-Entnahme aus Langzeitspeicher
(Fossile Speicher, Böden, Gestein, Wälder, ...)

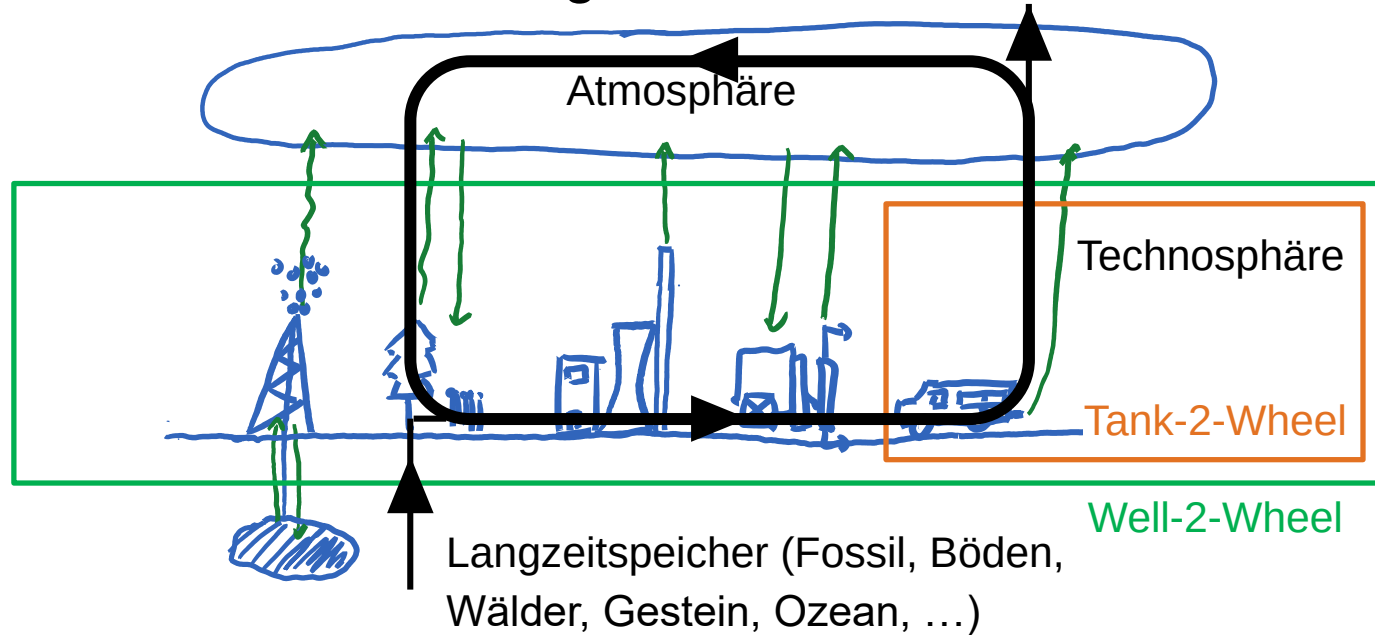
Systemgrenzen bei Bilanzierung von THG¹-Emissionen



Netto-Emissionen Atmosphäre $\approx$ Netto-Entnahme aus Langzeitspeicher

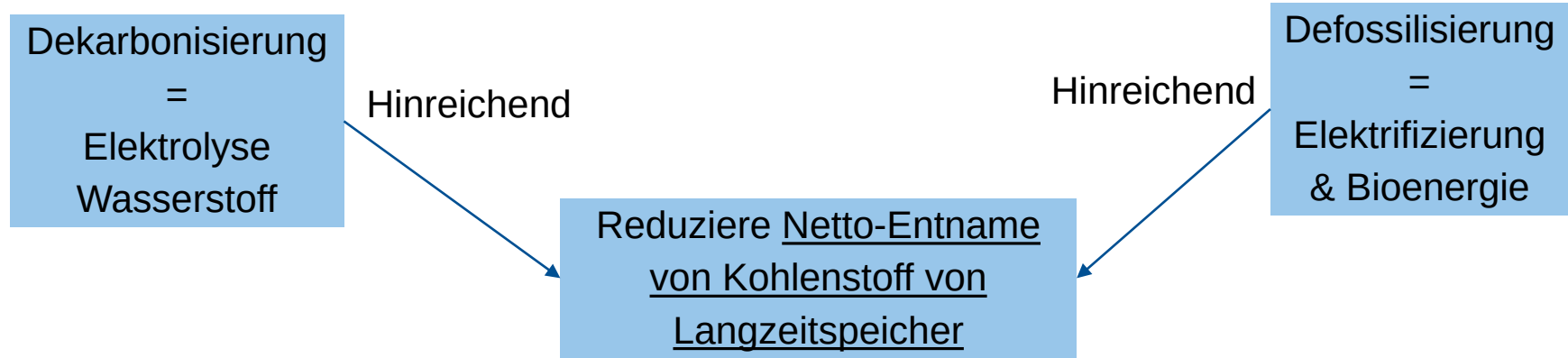
→ **Reduziere Netto-Entnahme aus Langzeitspeicher**
(Fossile Speicher, Böden, Gestein, Wälder, ...)

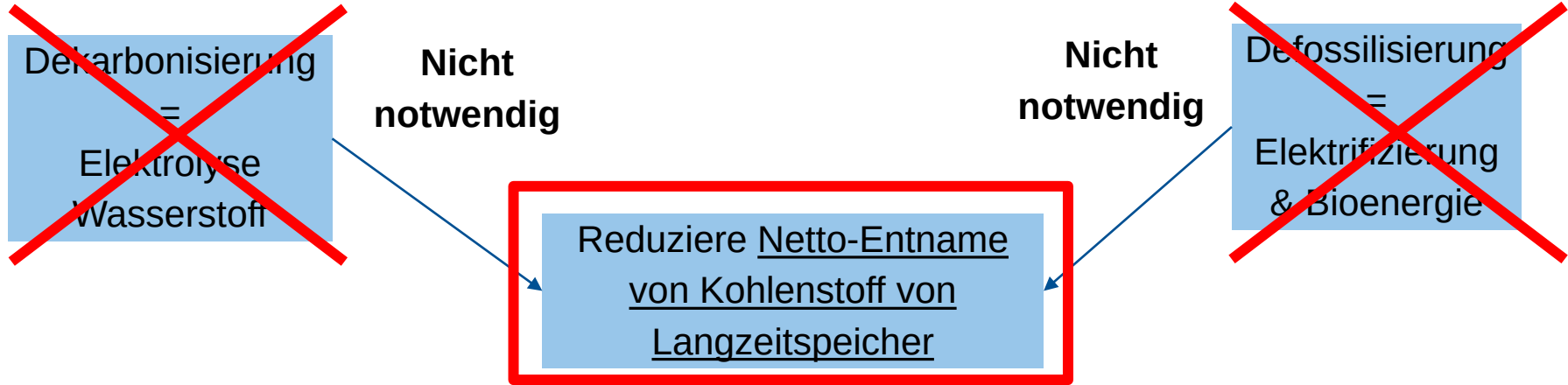
Systemgrenzen bei Bilanzierung von THG¹-Emissionen



Netto-Emissionen Atmosphäre $\approx$ Netto-Entnahme aus Langzeitspeicher

→ **Reduziere Netto-Entnahme aus Langzeitspeicher**
(Fossile Speicher, Böden, Gestein, Wälder, ...)





- **Fokus nicht verlieren!** Nicht unnötig einschränken!
- **Technologieoffen bleiben!** (Realistisch, Fair und Optimistisch)

CO₂-Vermeidungskosten (auch: THG-Vermeidungskosten)

Ersetze...

Kosten ↓
CO₂ ↑

Fossiler
Dieselbus

(1)

Durch...

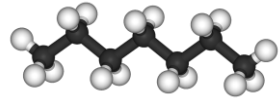
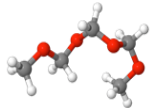
Kosten ↑
CO₂ ↓

Wasserstoffbus

(2)

→ Viele klimafreundliche Technologies kosten mehr als fossile Lösungen!

$$\text{CO}_2\text{-Vermeidungskosten} = \frac{\text{Mehrkosten}}{\text{Einsparung CO}_2\text{-Emissionen}} = \frac{\text{Cost}^{(2)} - \text{Cost}^{(1)}}{\text{CO}_2^{(1)} - \text{CO}_2^{(2)}}$$

Wasserstoff (H ₂)	H-H	Kohlenstofffrei & Zentraler Baustein
Ammoniak		Kohlenstofffrei & Massenproduktion
Methan (CH ₄ , SNG, LNG, CNG)		Identisch zu fossilem Erdgas
FT-Diesel (Fischer-Tropsch)		Identisch zu fossilem Diesel
Methanol		Sauberer Betrieb von Otto- Motor
OME (Oxymethylenether, OME35)		Sauberer Betrieb von Diesel-Motor

Eigenschaften

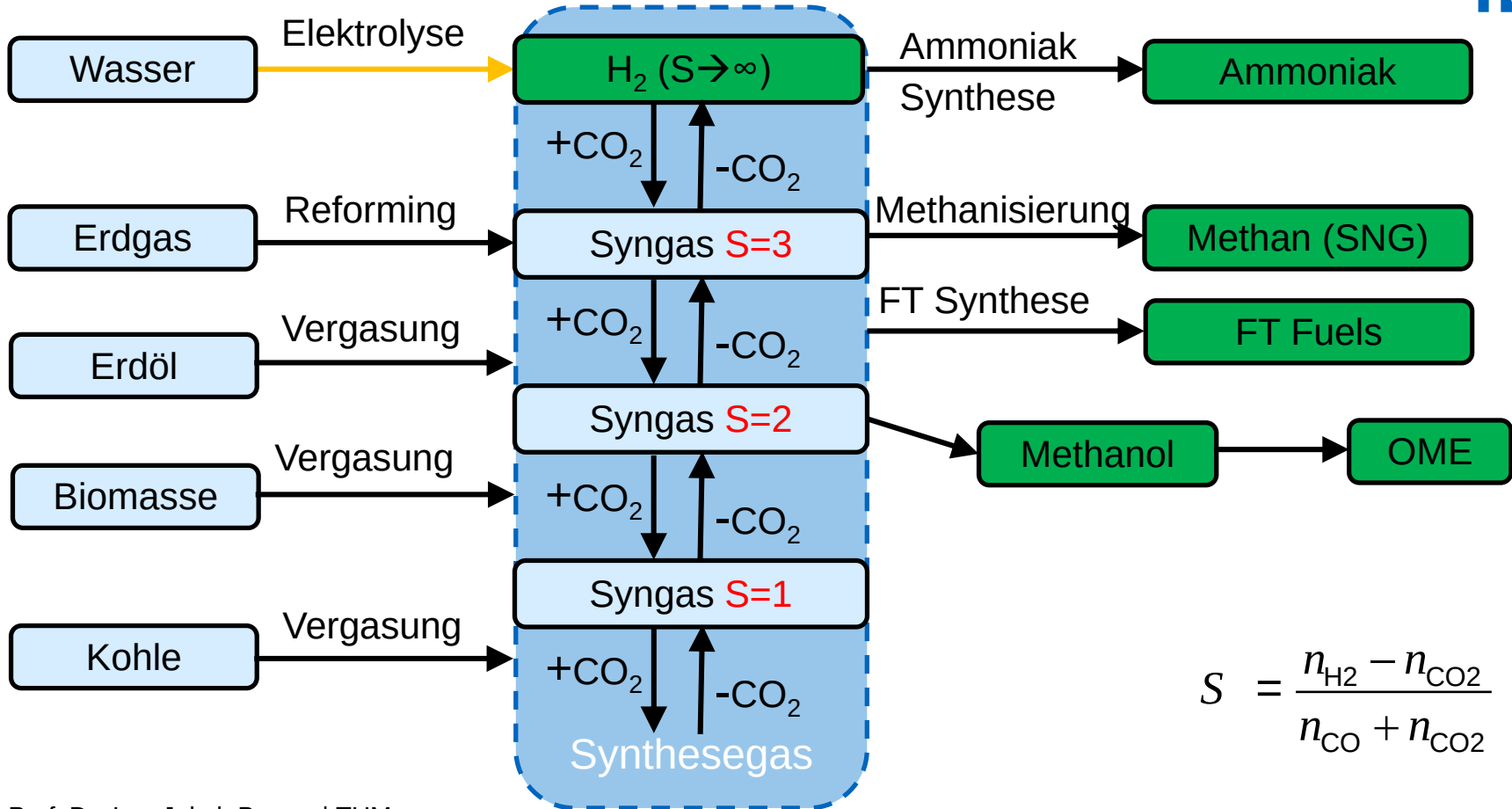
	Großindustrielle Realisierung nachhaltige Route seit ... Jahren	Flüssigkeit	Ungiftig, umweltfreundlich	PKW/LKW- Flottenkompatibel	Option für Flugkraftstoff	Biologische Rohstoffbasis	eFuel-Option (ggf. CO ₂ +Strom)	Kohlenstoff-frei
Wasserstoff	80	x	✓	x	(✓)	✓	✓	✓
Ammoniak	100	x	x	x	x	✓	✓	✓
Methan	110	x	✓	✓	(✓)	✓	✓	x
FT-Diesel	80	✓	x	✓	✓	✓	✓	x
Methanol	90	✓	x	x	x	✓	✓	x
OME	8	✓	✓	(✓)	X	✓	✓	x

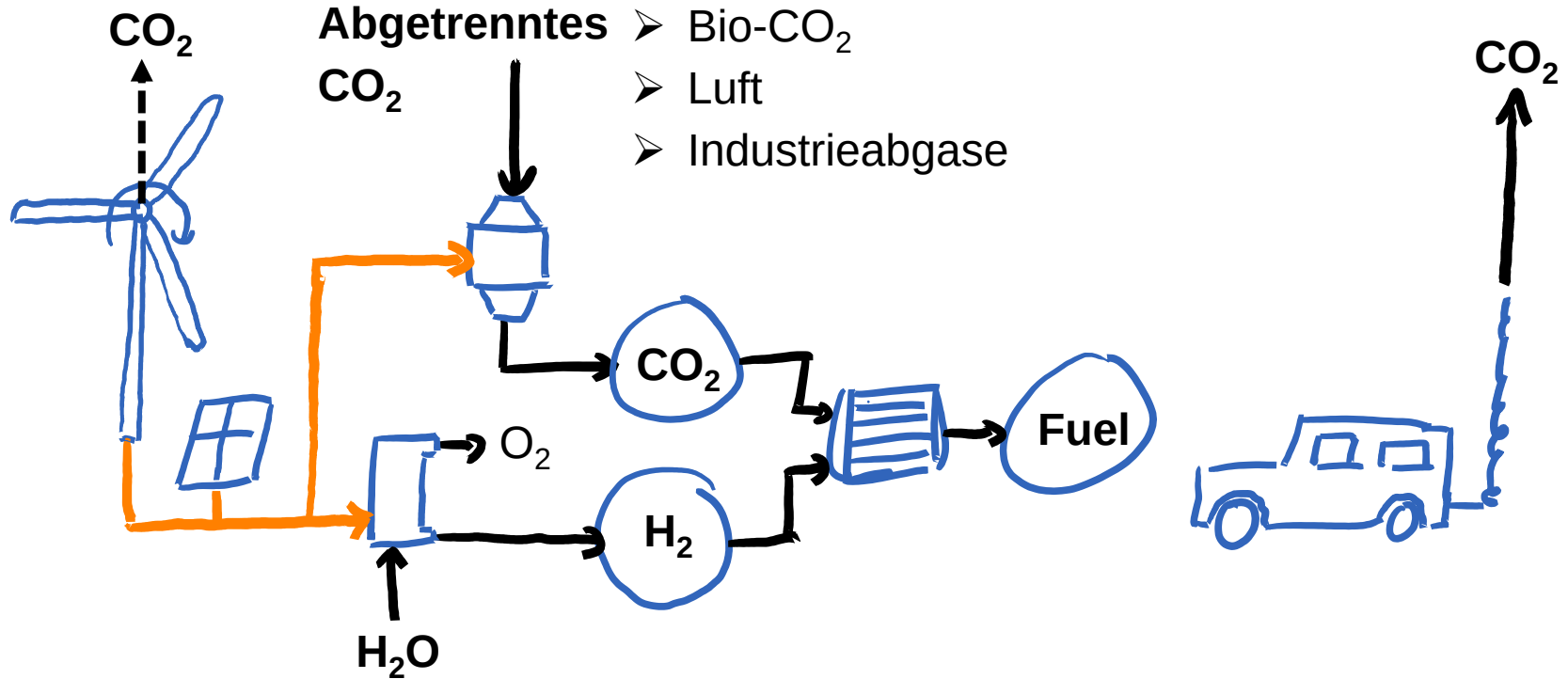
- **Basis für alle Synthetischen Kraftstoffe**
- Gasmischung aus **Wasserstoff (H₂)** und **Kohlenoxiden (CO & CO₂)**
- Wichtigste Kenngröße: **Stöchiometriezahl S:**

$$S = \frac{\text{H}_2\text{-Äquivalente}}{\text{CO-Äquivalente}} = \frac{n_{\text{H}_2} - n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{CO}} + n_{\text{CO}_2}}$$

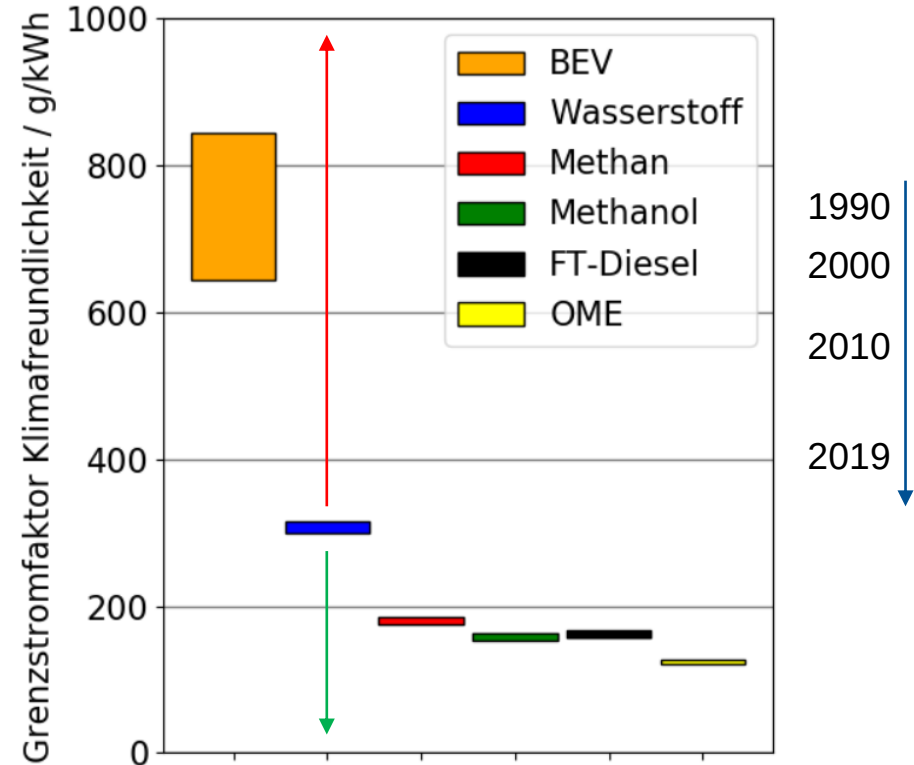
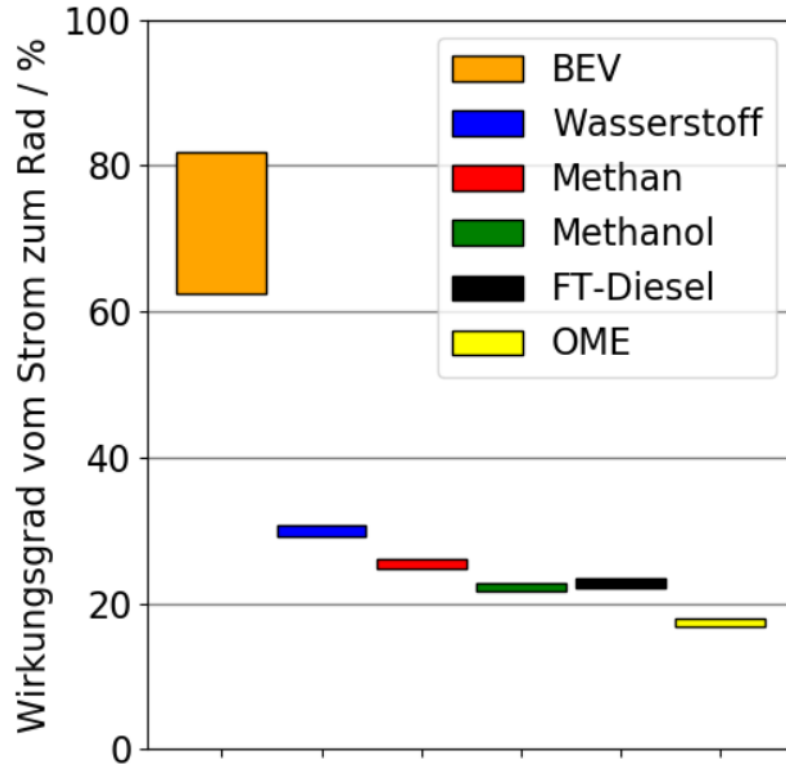
- S kann fast beliebig justiert werden:
(1) Zugabe H₂ ; (2) Zugabe/Abtrennung CO₂ ; (3) Mischen mehrere Ströme
- Synthesegas kann aus **jedem kohlenstoffhaltigen Material** produziert werden.
- Extrem **flexible Rohstoffbasis** (Öl & Gas, Biomasse, Abfall, CO₂,)

Synthetische Kraftstoffe über Synthesegas



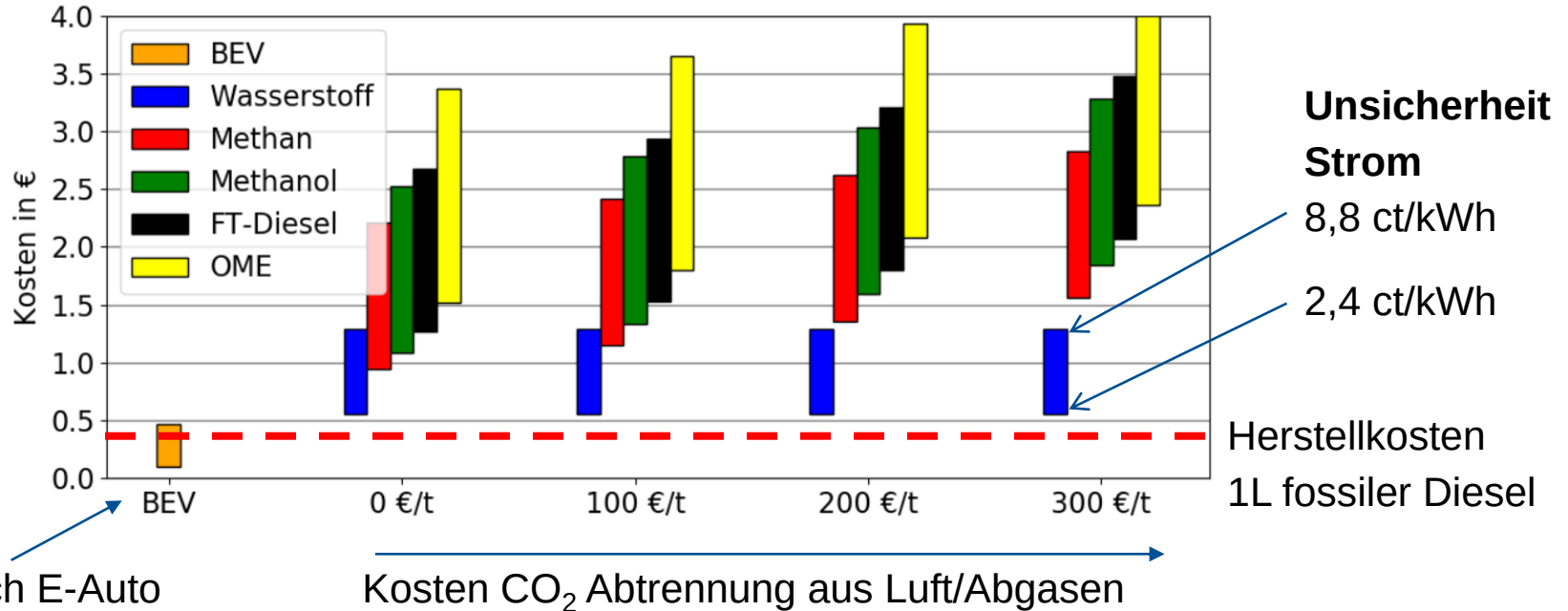


Bewertung E-Fuels (1) – Effizienz & Klimafreundlichkeit

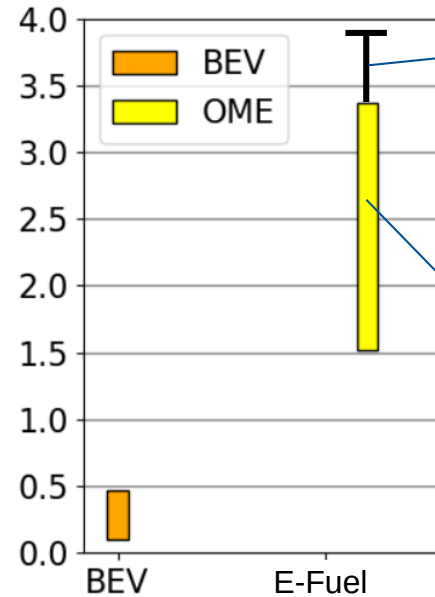
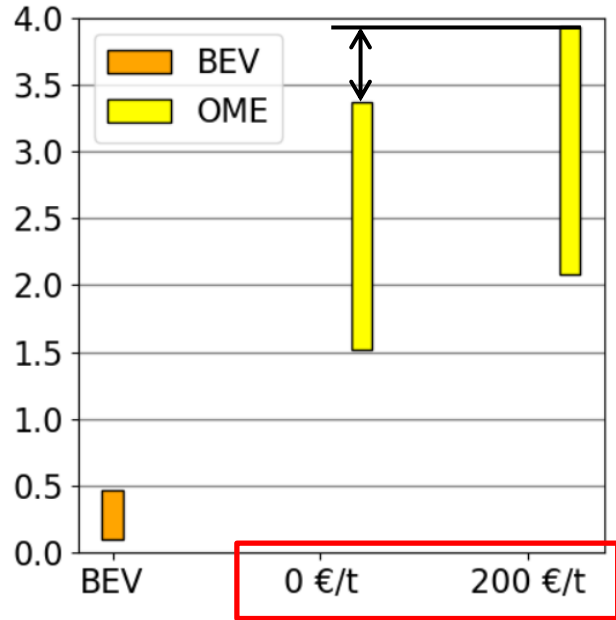


Bewertung E-Fuels (2) - Kosten

→ Kraftstoffkosten um Fahrleistung von 1L fossilem Diesel zu ersetzen.



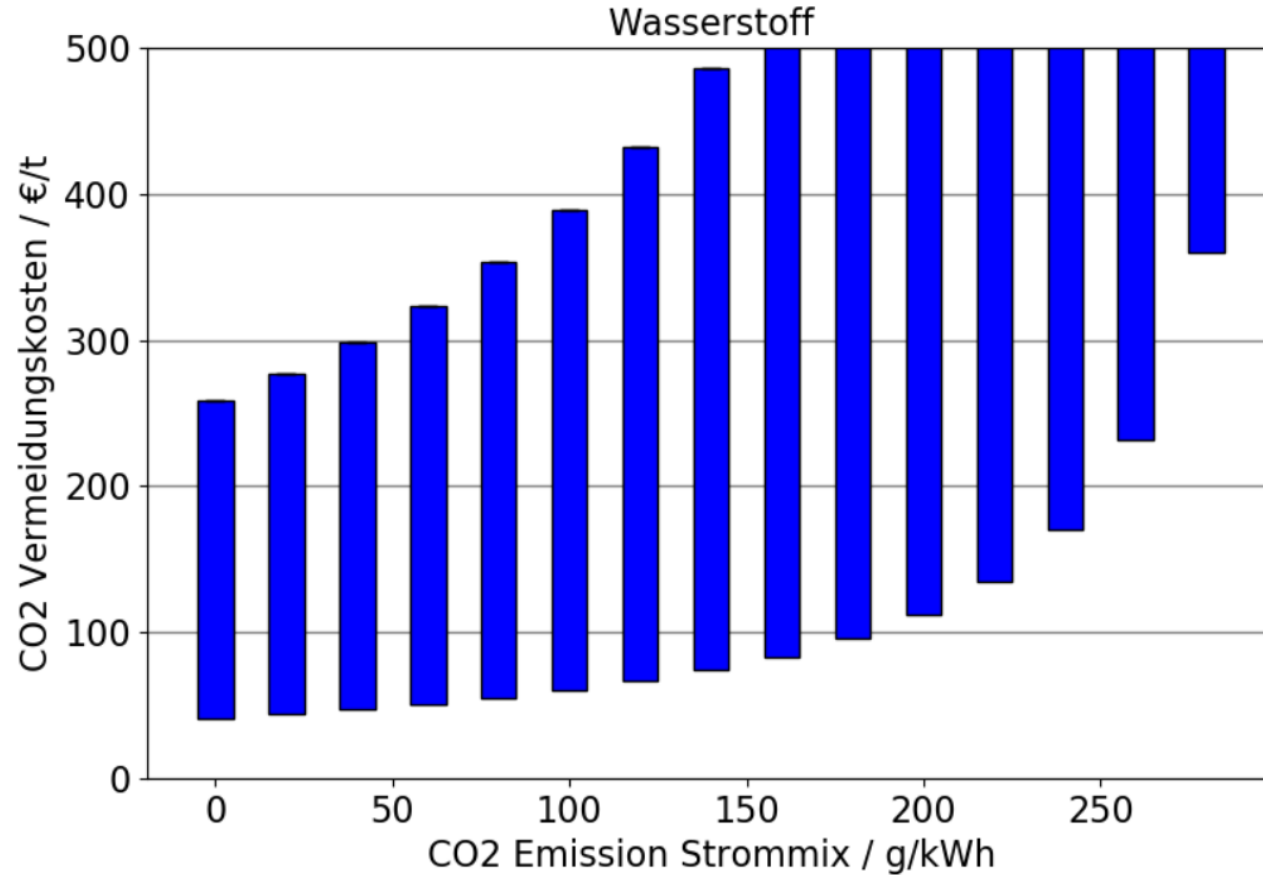
Kompakte Darstellung CO₂-Abtrennkosten



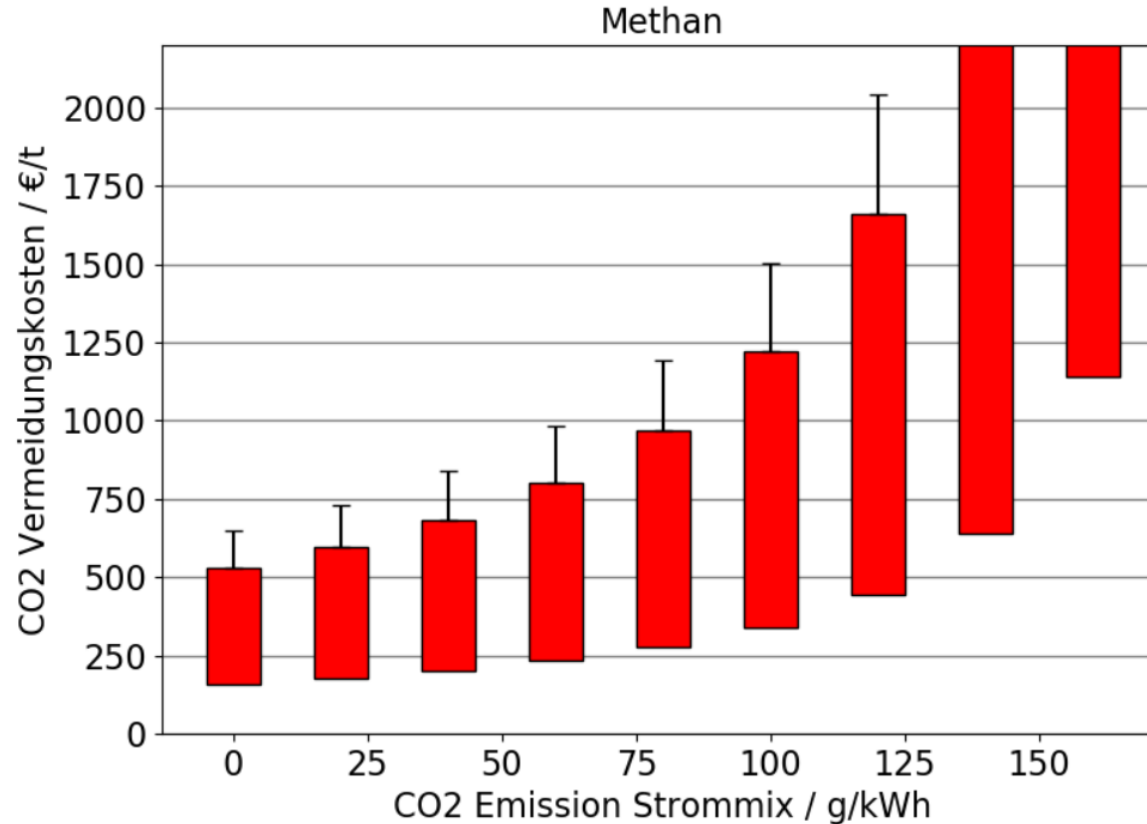
Fühler =
Mehrkosten im
Worst Case für
Abtrennkosten
200 €/t_{CO2}

Farbbalken =
Abtrennkosten
0 €/t_{CO2}

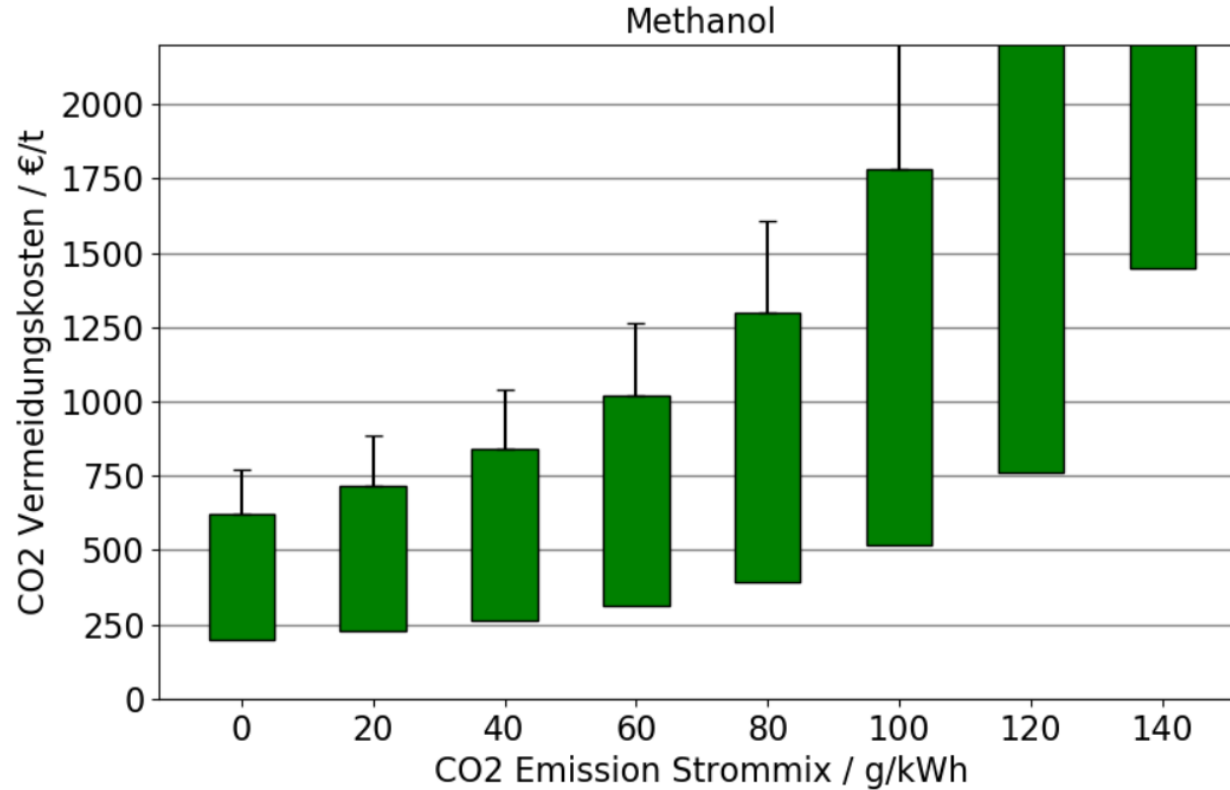
Bewertung E-Fuels (3) – CO₂-Vermeidungskosten



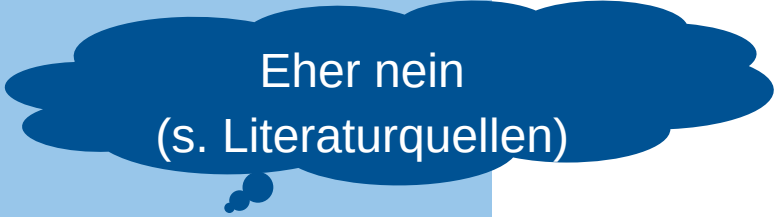
Bewertung E-Fuels (3) – CO₂-Vermeidungskosten



Bewertung E-Fuels (3) – CO₂-Vermeidungskosten



- Speichern in Zukunft **Überschussstrom**



Eher nein
(s. Literaturquellen)

- Bieten Möglichkeiten zum **Import von erneuerbarem Strom**



Ja!

e-Wasserstoff

H₂ aus Elektrolyse (oder
Biomassevergasung)

Pyrolyse H₂

Erdgas wird in H₂ und C
umgewandelt. C wird sequestriert.

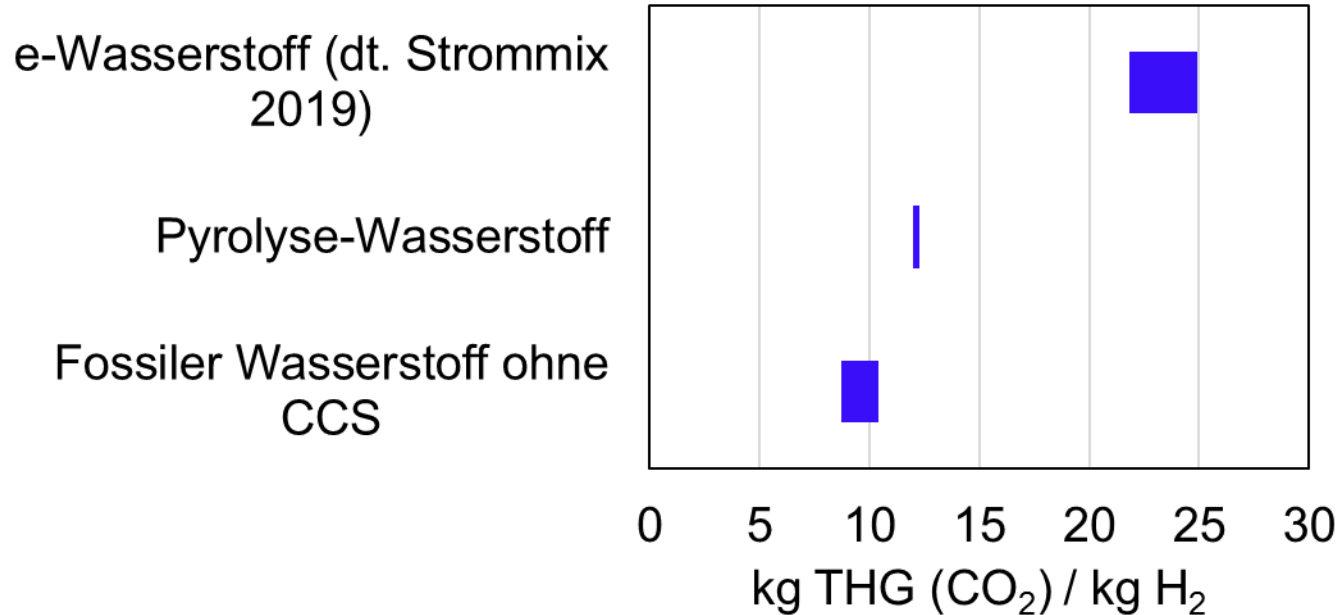
Fossiler H₂ mit CCS¹

Erdgas wird in H₂ und CO₂
umgewandelt. CO₂ sequestriert.

Fossiler H₂

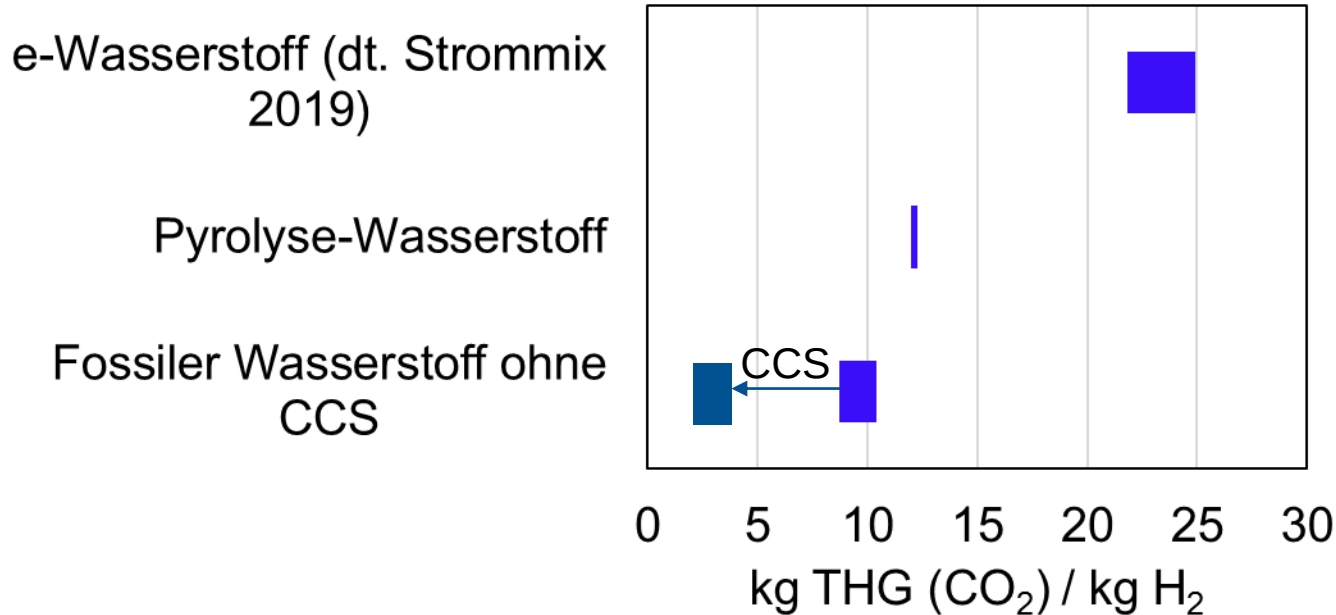
Erdgas wird in H₂ und CO₂
umgewandelt. CO₂ emittiert.

Klimaschäden durch Wasserstoff-Produktion (H₂)



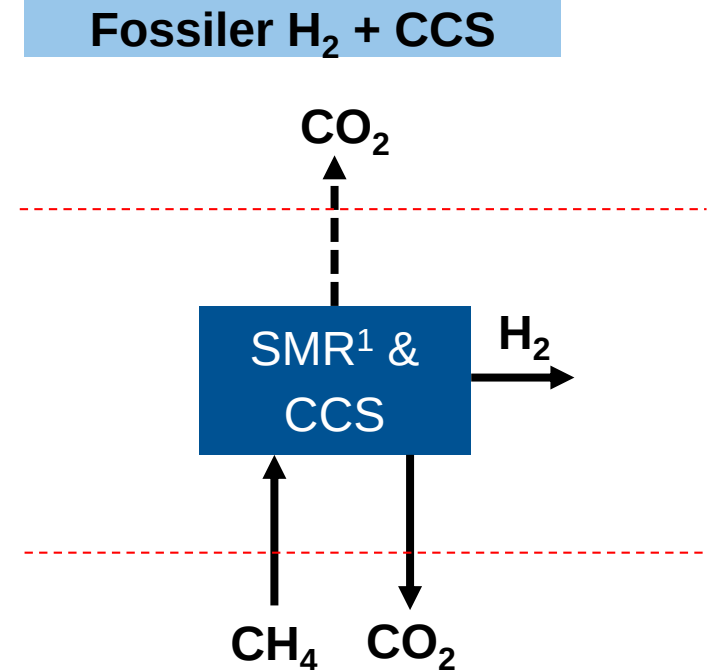
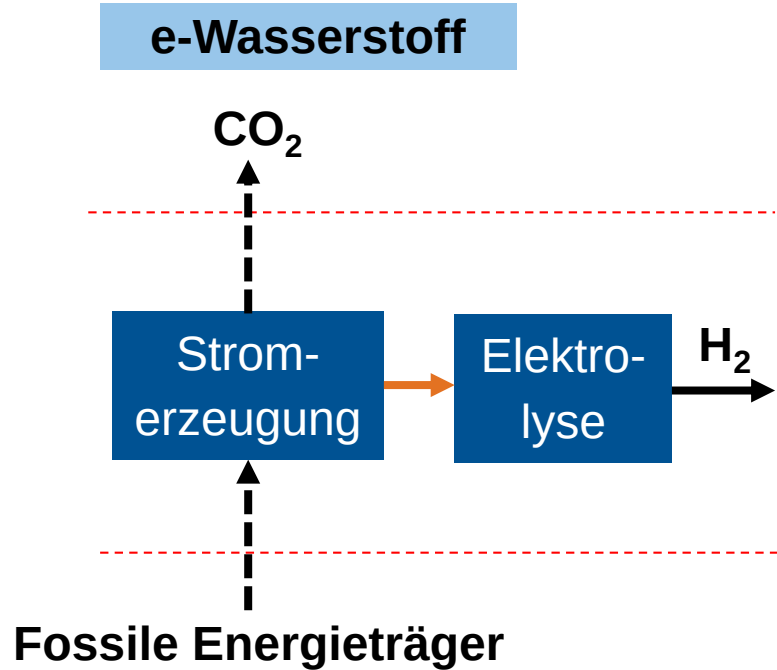
Muradov N, Int. J. Hydr. Energy (2017),
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.101>

Klimaschäden durch Wasserstoff-Produktion (H₂)



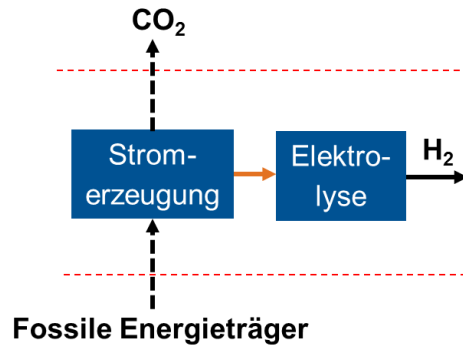
Muradov N, Int. J. Hydr. Energy (2017),
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.101>

Vergleich Wasserstoffherstellung



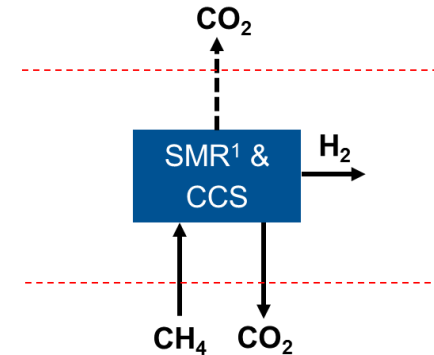
¹ Steam Methane Reformer

e-Wasserstoff



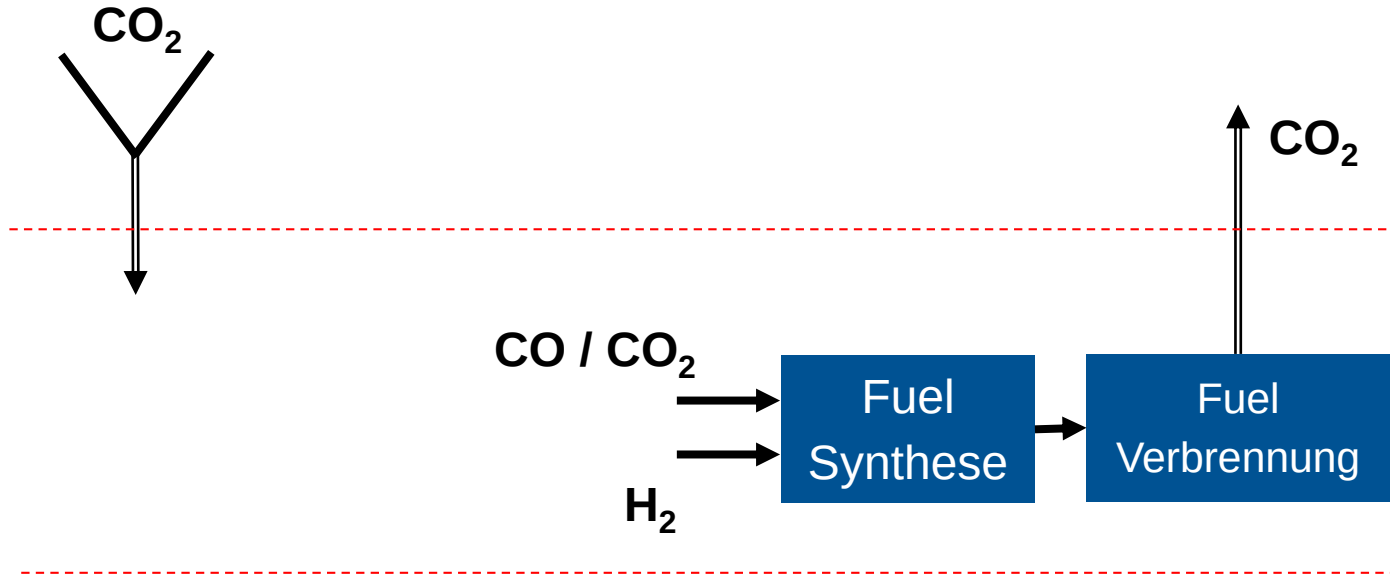
- Elektrische Energie
- Hohe Vermeidungskosten
- Keine CO₂ Speicherung notwendig

Fossiler H₂ + CCS

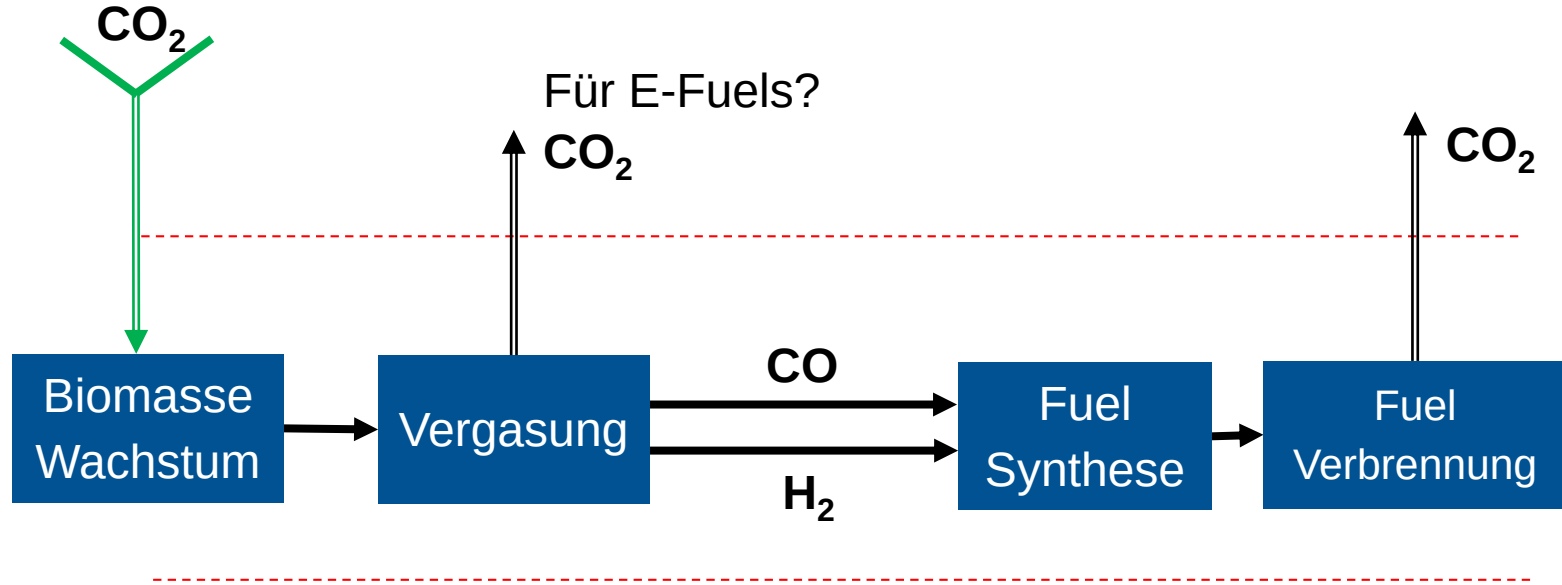


- Fossile Energie
- Geringe Vermeidungskosten
- CO₂ Speicherung erforderlich

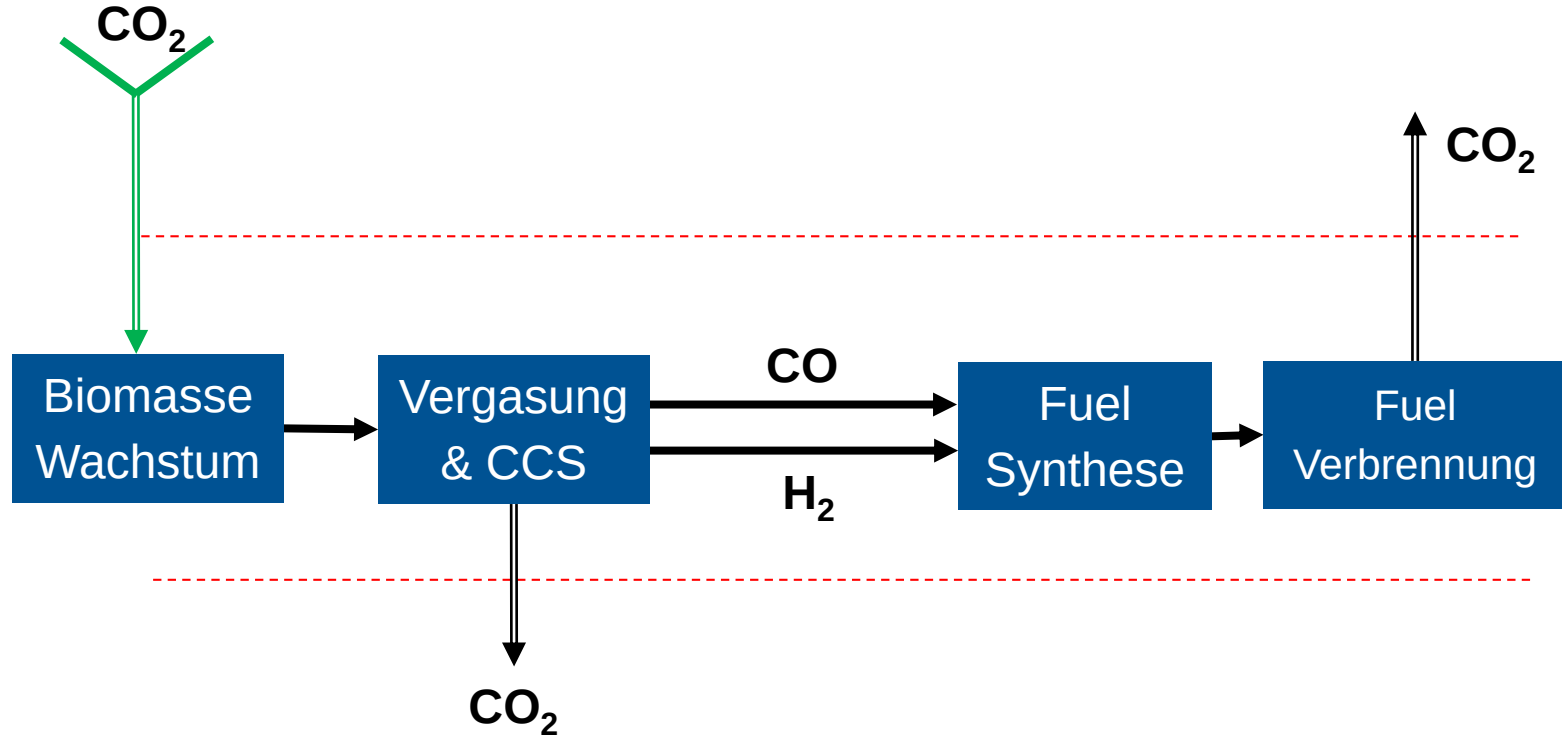
¹ Steam Methane Reformer



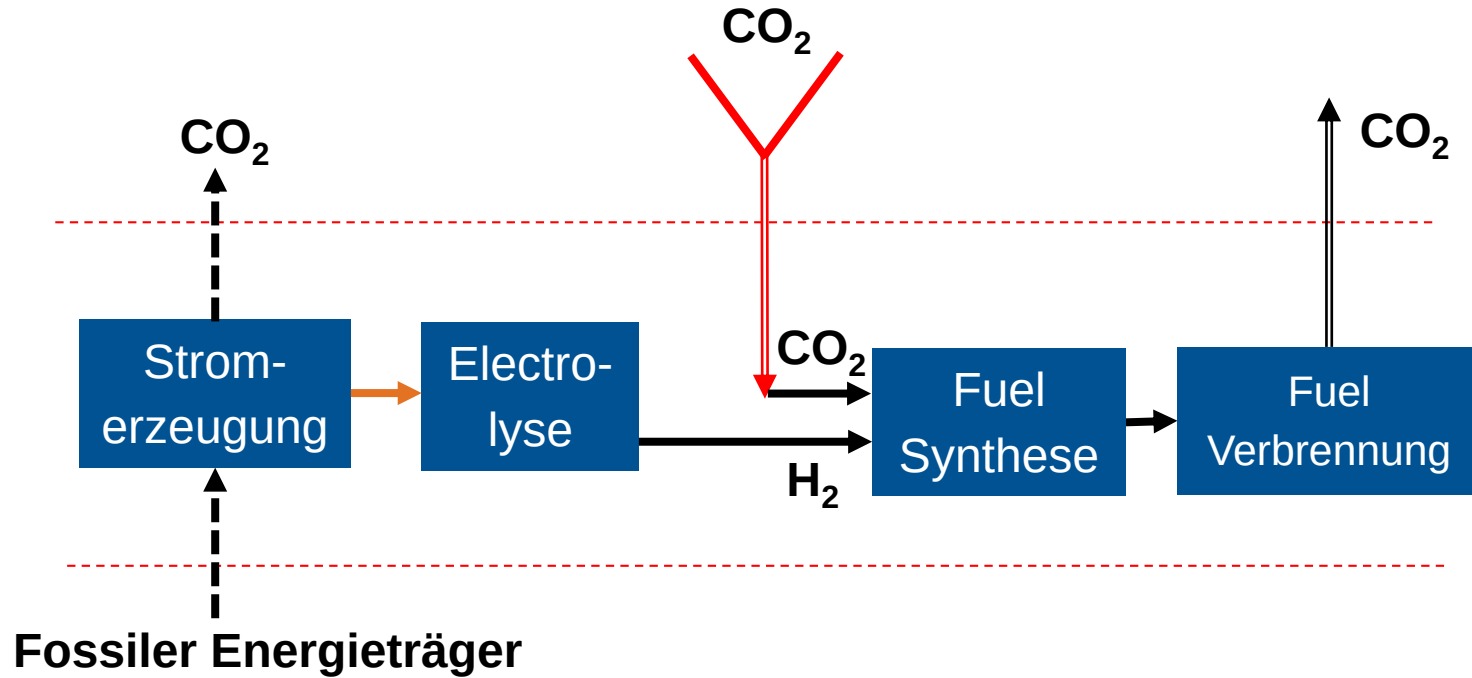
Option „Biofuel“: Synfuels aus Biomasse (2. Generation)



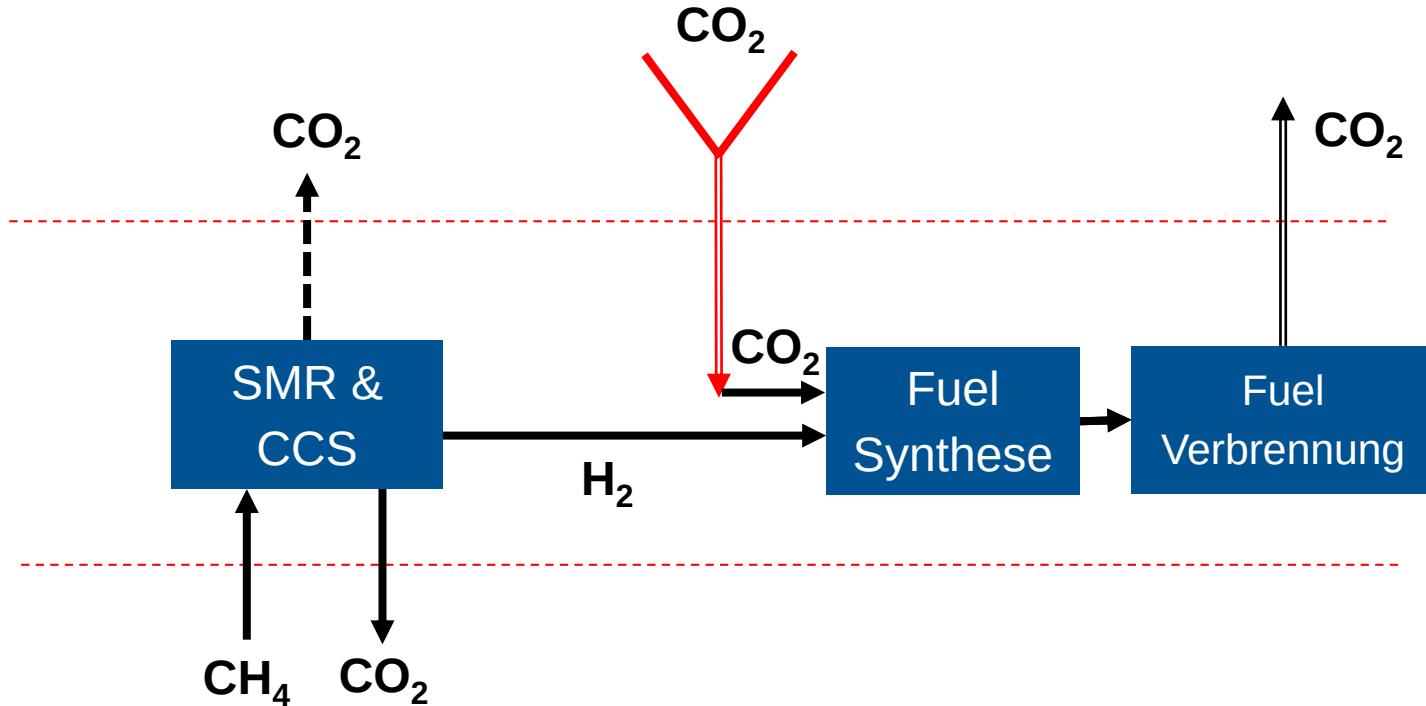
Option „Biofuel+CCS“: Synfuels aus Biomasse mit CCS



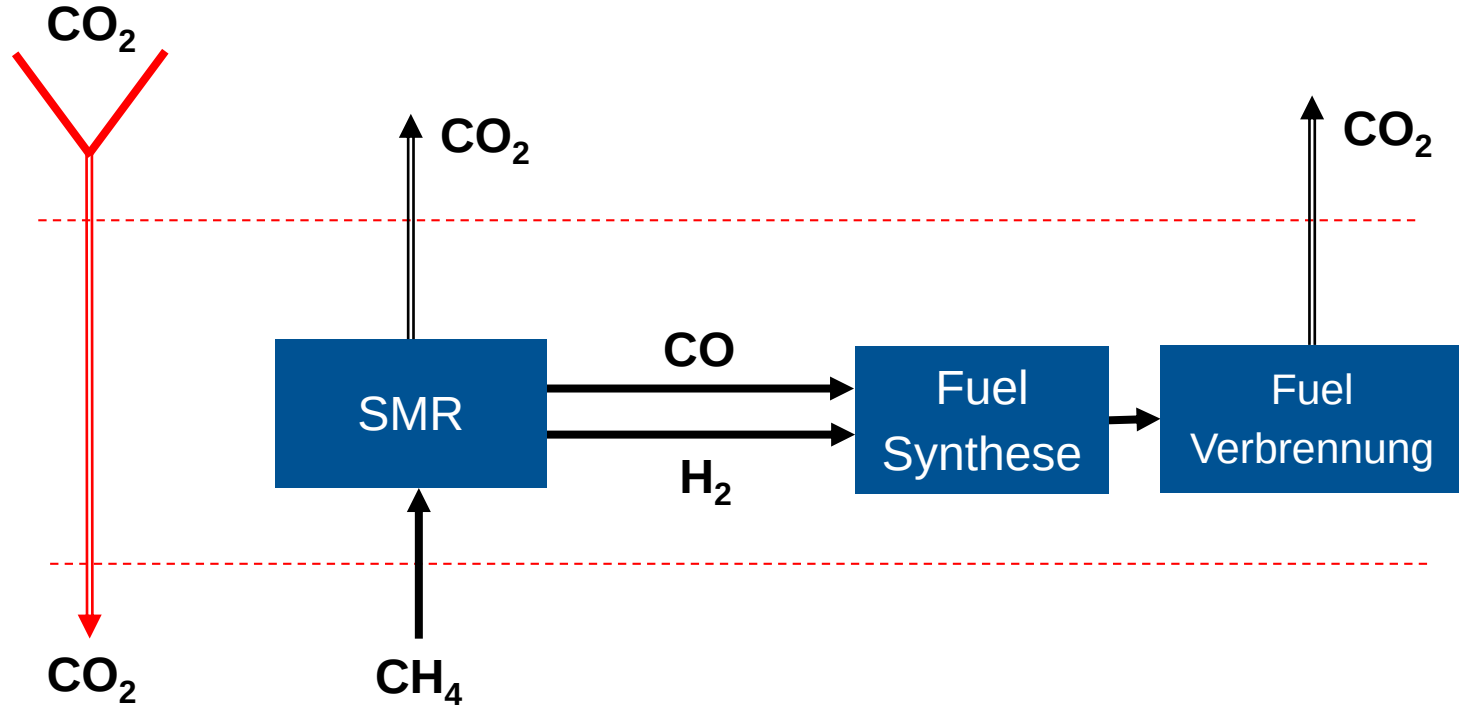
Option „E-Fuel“



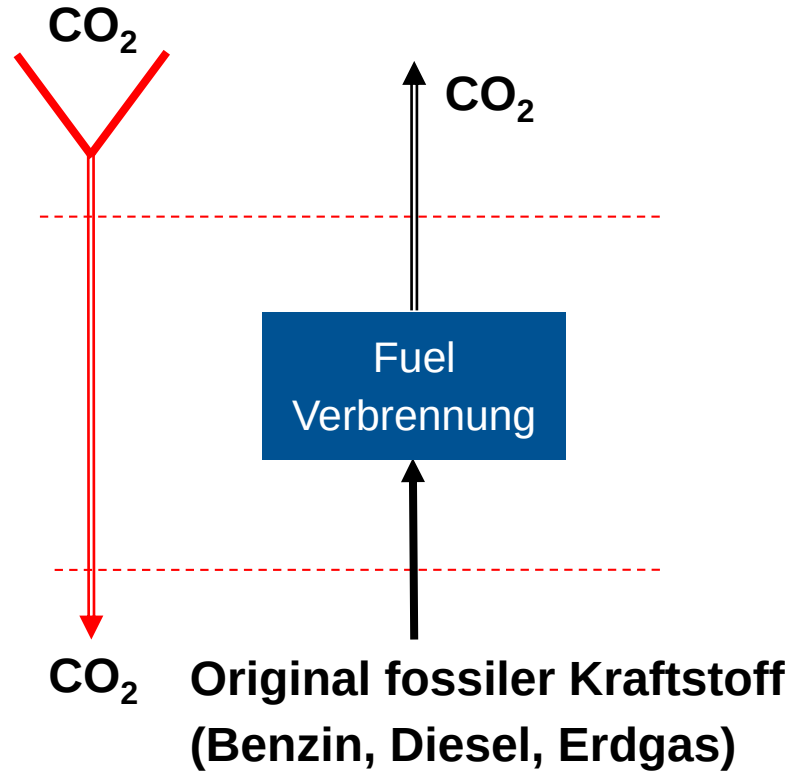
Option „H₂+CCS“: Fossiler Wasserstoff + CCS



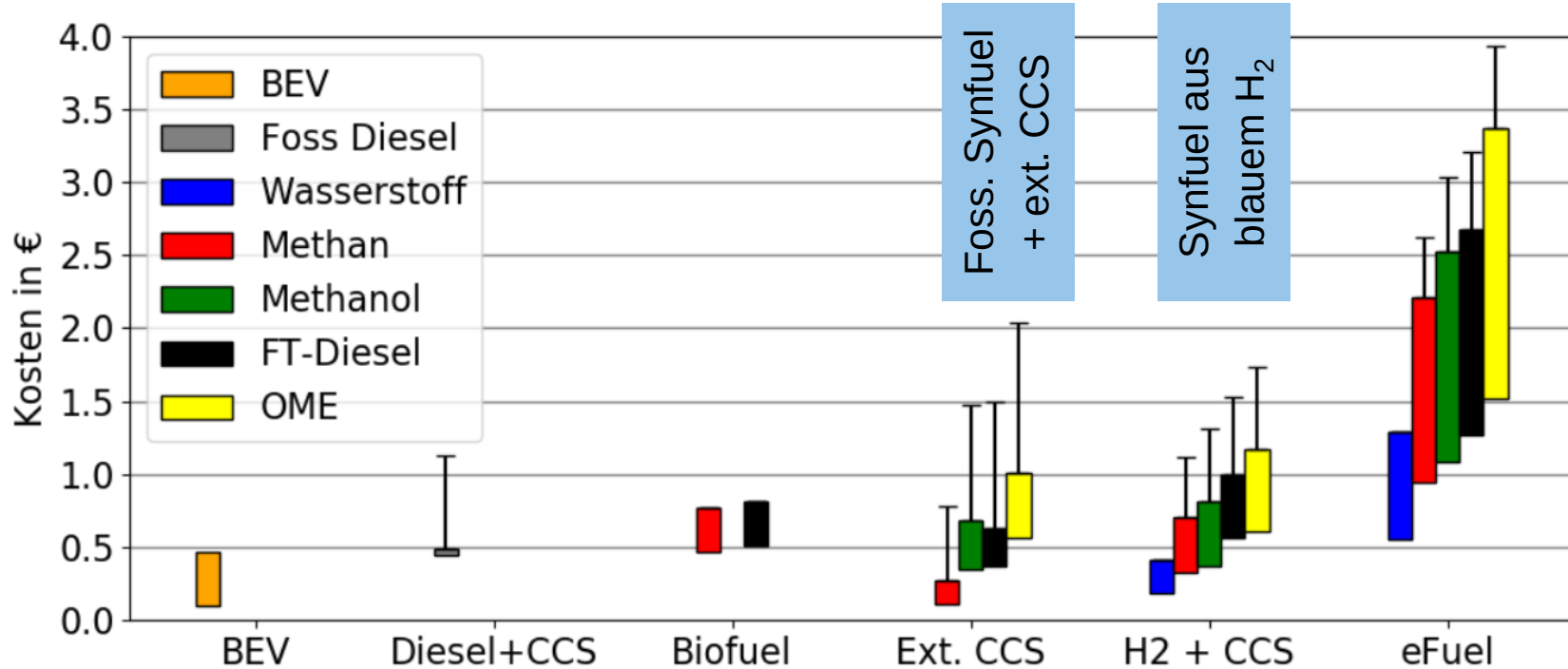
Option „Ext. CCS“: Fossile Synthese + unabhängiges CCS



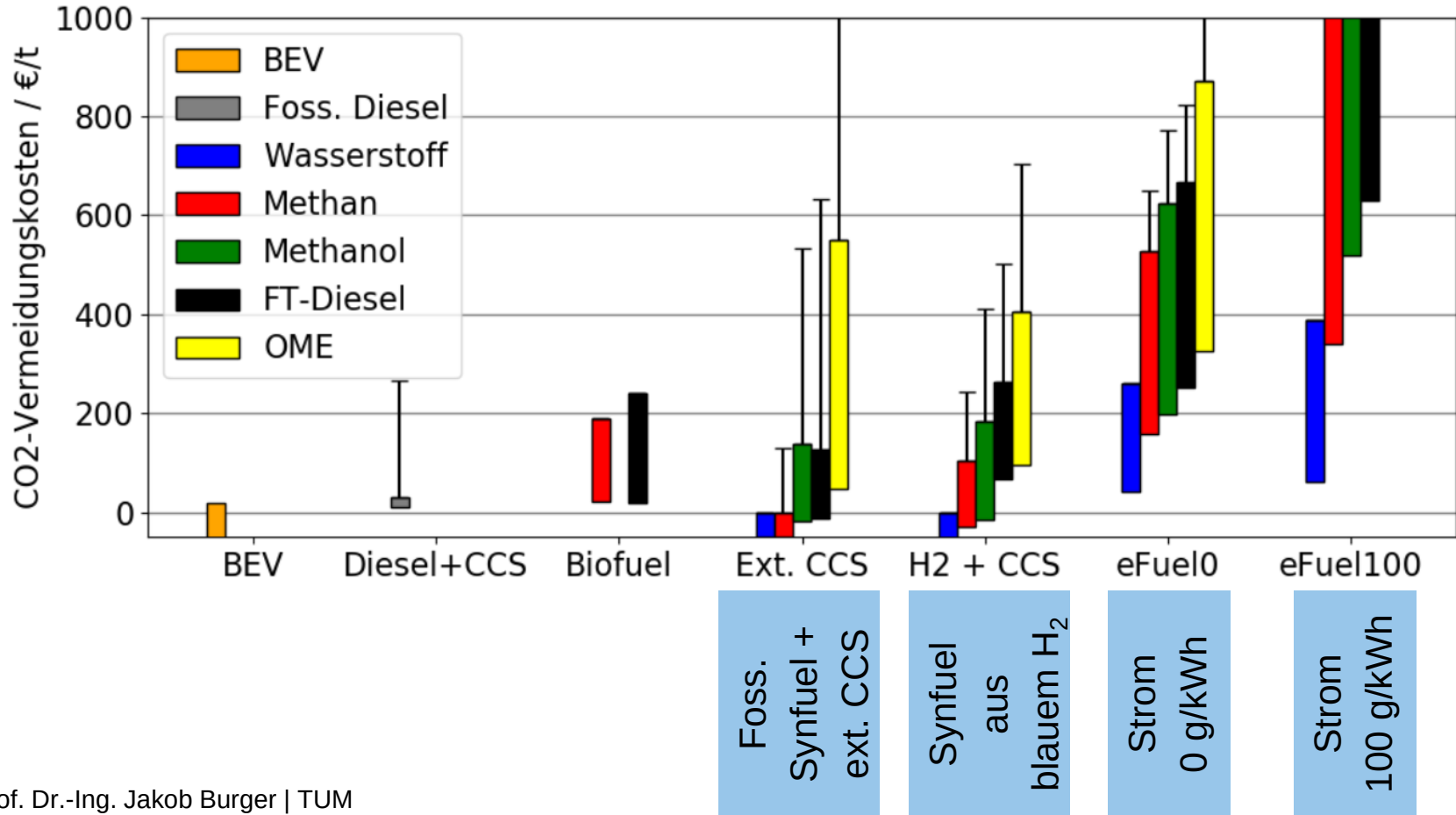
Option „Diesel+CCS“: Einfach weiter so & unabhängiges CCS



Herstellkosten Synfuels für Fahrleistung 1L Dieselkraftstoff



CO₂-Vermeidungskosten Synfuels



1. PKW, Züge: elektrifizieren wo möglich.

Grenzen: a) Erneuerbarer Strom nur bedingt importierbar
 b) Nicht jede Anwendung kann elektrifiziert werden

→ Es bleibt großer Bedarf an Verbrennern

2. Biofuels sind erste Option für Verbrenner: hier Priorität für Luftfahrt

Grenzen: a) Verfügbare Biomasse/Anbauflächen

→ Es bleibt großer Bedarf an non-bio Synfuels / fossilen Kraftstoffen

Art der synthetische Kraftstoffe hängen stark von **Akzeptanz von CCS** ab!
(Achtung: keine deutsche Entscheidung)

➤ **3A. mit CCS**

→ **konventionellen Kraftstoffen** und Kompensation durch CCS

➤ **3B. ohne CCS oder falls Speicherstätten voll / fossile verbraucht**

→ **Import von E-Fuels**. Primär Gase H_2 (Wirkungsgrad) oder CH_4
(Kompatibilität)

→ Verteuerung Kraftstoffe

Was ist mit den flüssigen synthetischen Kraftstoffen?

- **Fischer-Tropsch:** interessant als flottenkompatibles Biofuel
- **OME:** interessant als Premiumkraftstoff mit sehr sauberer Verbrennung (Spezialanwendungen), entweder als Biofuel oder fossil mit CCS
- **Methanol:** sauber verbrennender Ottokraftstoff für Anwendungen, die keinen Gas-Kraftstoff vertragen, entweder als Biofuel oder fossil mit CCS

➤ **Daten E-Fuels:**

FVV-Studie “Defossilisierung des Transportsektors” (2019), abrufbar unter:

https://www.fvv-net.de/fileadmin/user_upload/medien/materialien/FVV_Kraftstoffe_Studie_Defossilisierung_R586_final_v.3_2019-06-14_DE.pdf

➤ **e-Fuels als Option zur Speicherung von Überschussstrom:**

Sternberg & Bardow: Power-to-What? – Environmental assessment of energy storage systems, Energy Environ. Sci., 2015, 8, 389–400

➤ **Klimafreundlichkeit Biokraftstoffe:**

Jeswani HK, Chilvers A, Azapagic A. 2020 environmental sustainability of biofuels: a review. Proc. R. Soc. A 476:20200351.

➤ **Zukünftige Wasserstoffproduktion:**

Muradov N, Low to near-zero CO₂ production of hydrogen from fossil fuels: Status and perspectives, International Journal of Hydrogen Energy (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.101>