

Mobilität mit zukünftigen Kraftstoffen

Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker
Institut für Technische Verbrennung (ITV)
Leibniz Universität Hannover

11. Niedersächsische Energietage, Hannover, 20.-21.11.2018

Inhalt

- Herausforderung
- Ansatz E-Fuel
- Beispiele für nachhaltige Energieträger
- Forschungsbeispiele
- Energiewirtschaftliche Bemerkungen (FVV Studie)
- Zusammenfassung

Mobilität mit Autos / Bussen / Nfz ...

Weltweit gibt es 1.276 Milliarden Autos mit Verbrennungsmotoren

(17.11.2018)



Produktion

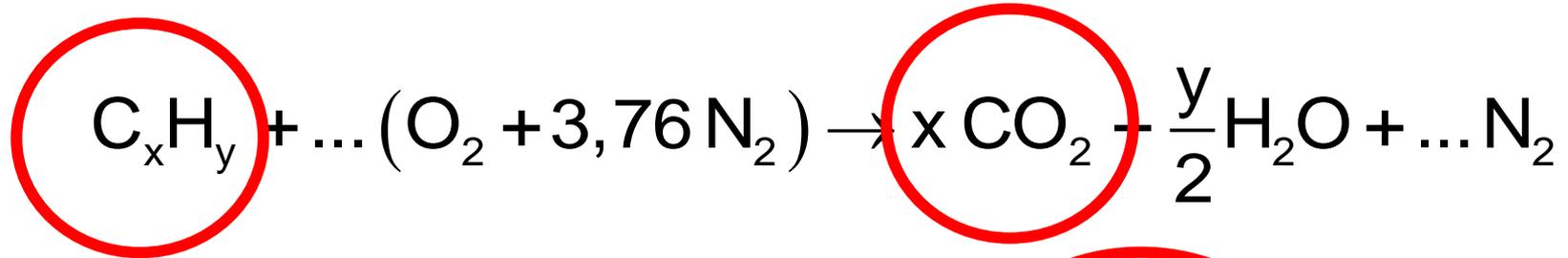
1970 30 Mio

2000 58 Mio

2017 85 Mio

Probleme der Verbrennungsmotoren

Treibhausgas



Fossile Energie
begrenzt

→

→

NO_x

Rußpartikel

Schadstoffe

Hoffnung auf Alternative ...

E-Fahrzeuge "CO2-frei"



Foto: Citroen



Foto: Daimler

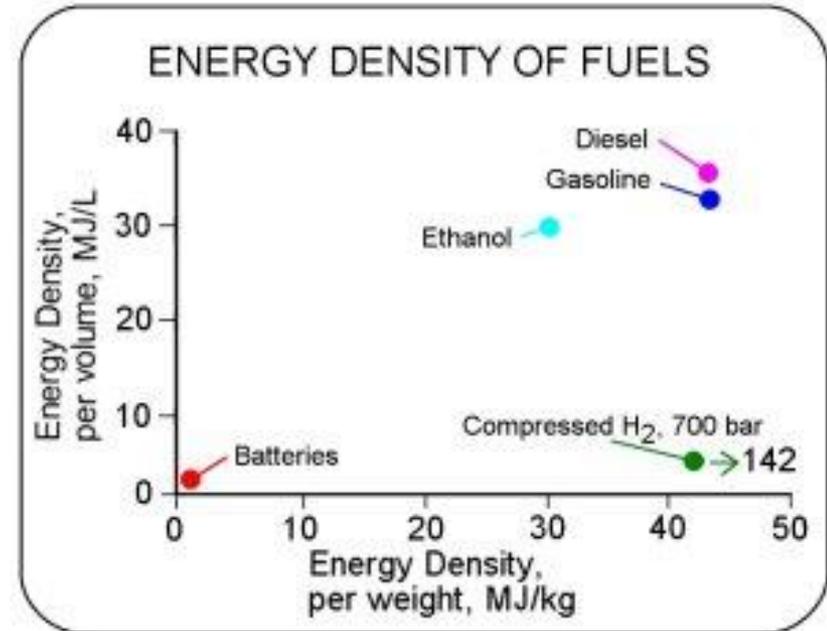
Batterie-elektrischer Antrieb

Vorteile:

- E-Motor sehr gut (max. Drehmoment ab Drehzahl Null)
- Keine Schadstoff-Emissionen, leise

Nachteil:

- Batterie ist super schlecht
- Flüssige Kraftstoffe haben 50-150x höhere Energiespeicherdichte
- Folge: Riesige Masse nötig oder Reichweite gering



<https://simanaitissays.com/2013/03/17/ev-good-news/>

Fragestellungen Energiewende

Mobilitäts-Sektor

- Gibt es "Energieträger" für nachhaltige Energie, die deutlich besser als Batterien sind ?

Stromsektor

- Produktion durch Wind/Solar stark schwankend - bald oft Überangebot.
Gibt es Energiespeicher in diesem Umfang ?

Fragestellungen Energiewende

Mobilitäts-Sektor

- Gibt es "Energieträger" für nachhaltige Energie, die deutlich besser als Batterien sind ?

Stromsektor

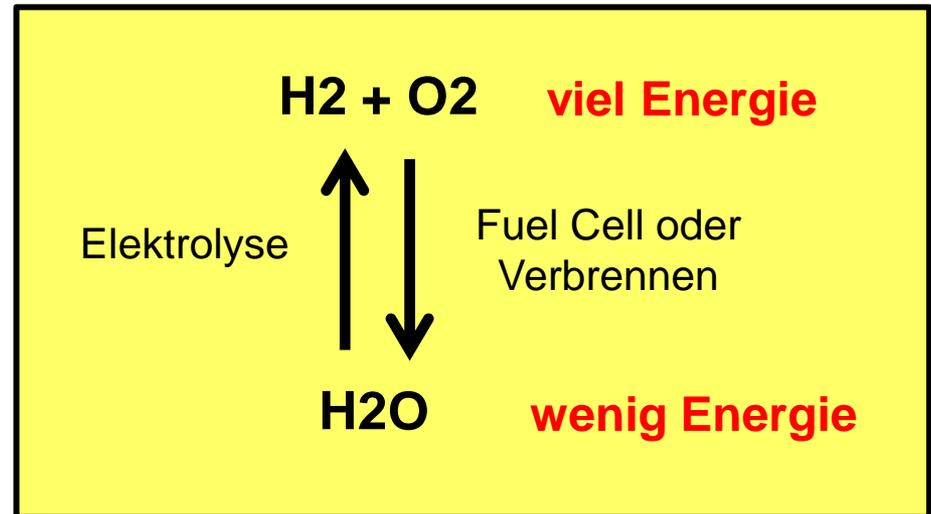
- Produktion durch Wind/Solar stark schwankend - bald oft Überangebot. Gibt es Energiespeicher in diesem Umfang ?

Lösungsvorschlag

- **"Electro-Fuels" (als "Chemischer Energiespeicher")**

Lösungsansatz: Electro-Fuels

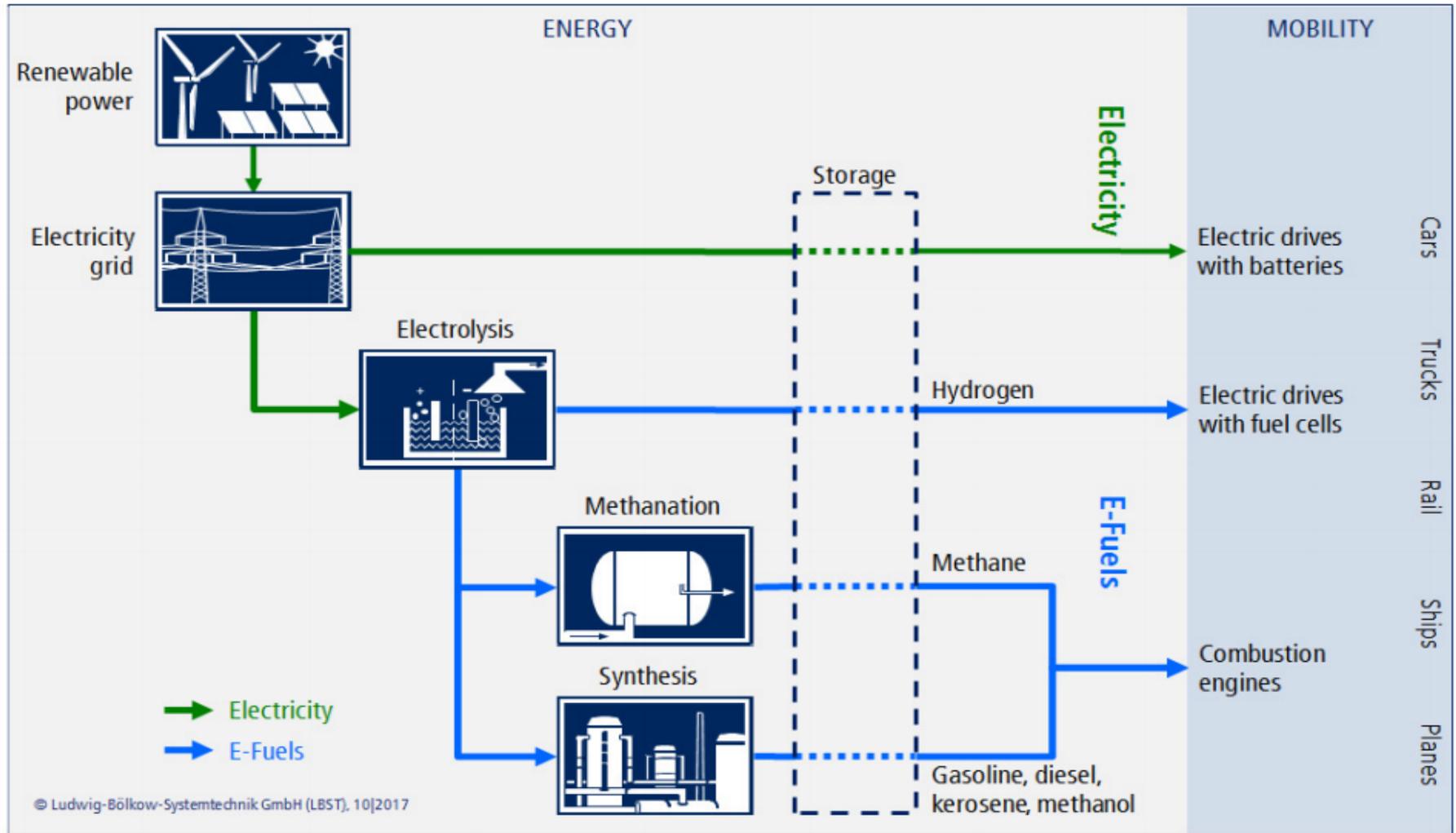
- Kraftstoffe können auch als "Energieträger" / "Energiespeicher" verstanden werden.
- Beispiel "H₂ als Energieträger"



- Herstellung aus überschüssigem "grünen" Strom, z.B. aus überschüssiger Windenergie / Solarenergie **"E-FUEL"**

Definition E-Fuels

E-Fuels sind auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte gasförmige und flüssige Kraftstoffe wie Wasserstoff, Methan sowie synthetische Otto- und Dieselkraftstoffe inklusive Kerosin.



Electro-Fuels

Vorteile:

- Flüssige / gasförmige Energieträger haben **viel mehr** Energie/Masse als Batterien
- "Energieträger" - wie die Batterien
- Regenerativ erzeugbar (fast vollständig) - CO₂-neutral
- Verbindet Vorteile der Elektromobilität mit Vorteilen flüssiger "Energieträger"
- Zudem: "Chemische Speicher" bei Windüberschuß. Energiespeicherpotential ist **viel** größer als von Pumpspeicherkraftwerken.
- "Sektoren-Kopplung"

Electro-Fuels

Nachteile:

- Deutliche Energieverluste bei der Herstellung
- Sehr hohe Investitionskosten / teuer
- Herstellungsverfahren müssen noch entwickelt / verbessert werden
 - "Power-to-Gas" (z.B. H_2 , CH_4) per Elektrolyse/Methanisierung
 - "Power-to-Liquid" (z.B. NH_3 , Oktan, OME, DME)
 - Forschung: "auch Herstellungsverfahren nachhaltig"
- **Verbrennung bleibt: Lokale Schadstoffemission möglich**
- **Ziel: Synthetische Kraftstoffe mit "gezielten" Eigenschaften - um Verbrennung zu verbessern (weniger Ruß, NO_x)**

Inhalt

- Herausforderung
- Ansatz E-Fuel
- **Beispiele für nachhaltige Energieträger**
- **Forschungsbeispiele**
- Energiewirtschaftliche Bemerkungen (FVV Studie)
- Zusammenfassung

Nachhaltige Energieträger

Nachhaltige Energieträger (sofern regenerativ erzeugt)

- **Wasserstoff H_2 ($H_u = 120$ MJ/kg)** **(vgl: Li-I-Batterie: 0,65 MJ/kg)**
Nutzung: Brennstoffzelle (teuer) oder Verbrennung, auch geeignet in Beifügungen
- **Methan CH_4 ($H_u = 49$ MJ/kg)**
Nutzung in Gasturbinen, Gasmotoren, flexibel als Beifügung zu fossilem Erdgas oder Biogas
- **Ethanol CH_3OH ($H_u = 20$ MJ/kg)** **(vgl: Benzin: 43 MJ/kg)**
Verbrennungsnutzung wie bei Bio-Ethanol, flexibel als Beifügung zu Benzin, etwas weniger Rußbildung

Nachhaltige Energieträger

Möglichst "Flüssige Energieträger" ("Power-to-Liquid")

Forschung erst begonnen, Vorschläge:

- **Ammoniak NH_3 ($H_u = 19 \text{ MJ/kg}$)**

Vorteil:

- Flüssig über 9 bar (gut speicherbar)
- Ohne Kohlenstoff -> CO_2 frei
- Herstellung mit Strom gut bekannt

Nachteile:

- Brennt nicht so gut
- giftig

- **Ammoniak/Wasserstoff-Mischung**

- Verbrennungseigenschaften gezielt einstellbar (aktuelle Forschung am ITV)

Forschungsbeispiel ITV (LUH)

- **Ammoniak/Wasserstoff-Mischung**

Reaktionskinetik für neuen Bereich (Mischung - Temperatur - Druck) entwickelt und mit exp. Daten verglichen

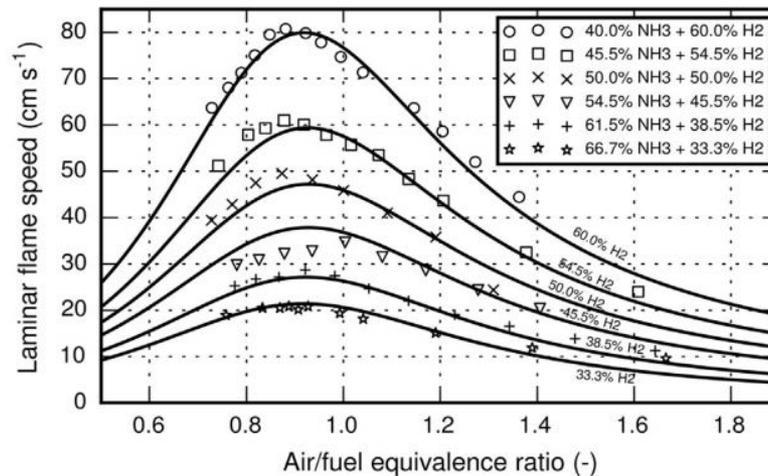


Fig. 11. Comparison of calculated and measured (Li et al. [36]) laminar flame speed data of NH₃/H₂/air at 1 atm and 293 K.

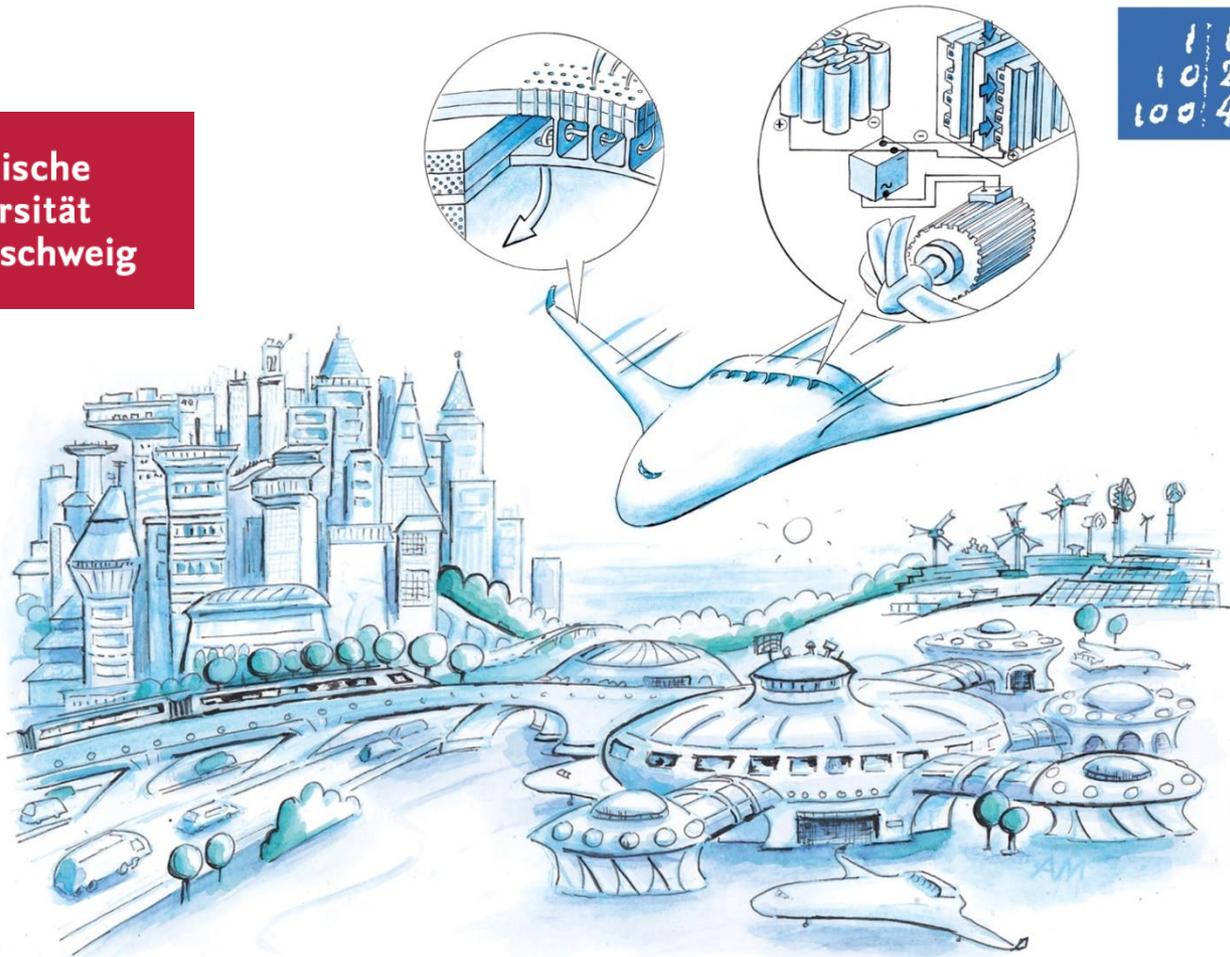
A. Goldmann, F. Dinkelacker, Fuel
224 (2018) 366–378



Technische
Universität
Braunschweig

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



SE²A – Sustainable and Energy-Efficient Aviation

Cluster of Excellence

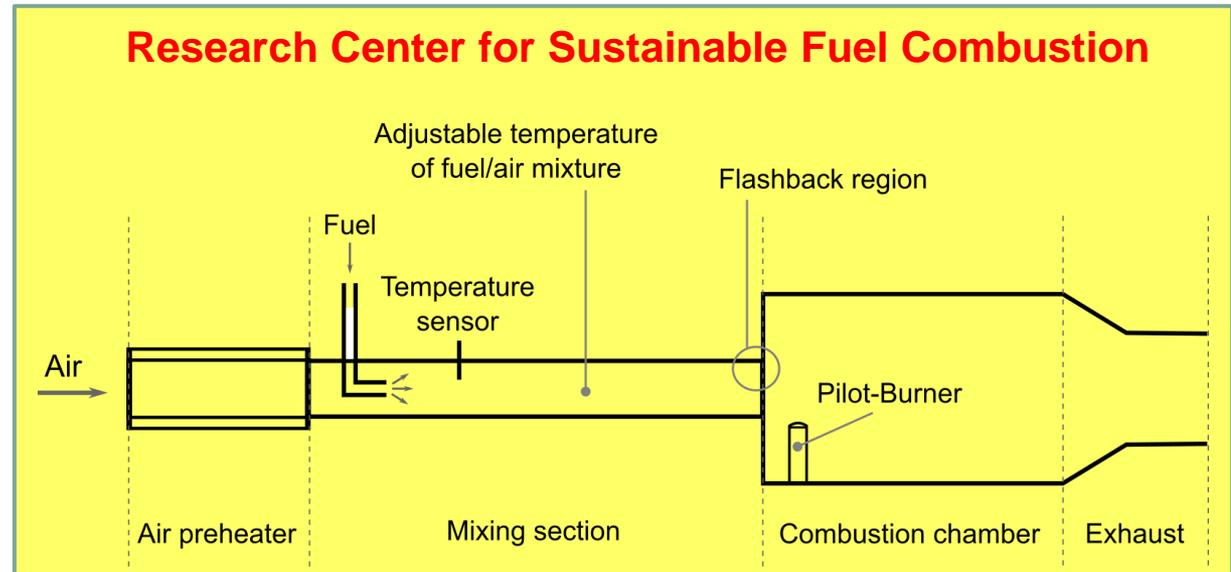
TU Braunschweig

bewilligt ab 1 / 2019

Excellence Cluster Sustainable Aviation (mit TU BS)

Scientific Goal - Groups Dinkelacker LUH + Fernandes PTB

- Fundamental data for new sustainable fuels → carbon neutral
- Designed for application as "Lean premixed prevaporised" → very low NO_x emission
- For detailed studies on flame stability, flash back, ignition delay for different new fuels



Evaluation Matrix Aviation Fuels

Goldmann , Sauter, Oettinger, Kluge,
Schröder, Seume, Friedrichs, Dinkelacker
A Study on Electrofuels in Aviation,
Energies 11, 392, 2018

Property	Jet A-1	nC ₈ H ₁₈	CH ₃ OH	CH ₄	H ₂	NH ₃	NH ₃ /H ₂
CO ₂ emission	1	4	4	4	5	5	5
Electro-synthesis	-	3	3	4	5	5	5
Specific energy	4	4	2	4	5	2	2
Energy density	5	5	2	3	1	2	2
Storage	5	5	4	2	1	3	3
Toxicity	3	3	2	4	5	1	1
Combustion properties	5	5	4	5	5	2	5
NO _x & soot emissions	2	2	4	4	4	3	4
Drop-in capability (combustion)	5	4	2	2	2	2	4
Turbine power output	4	4	4	4	5	5	5
Drop-in potential (turbine)	5	5	4	3	2	2	3
Structural considerations	4	4	3	3	2	2	3

5: excellent, 4: good, 3: satisfactory, 2: challenging, 1: problematic

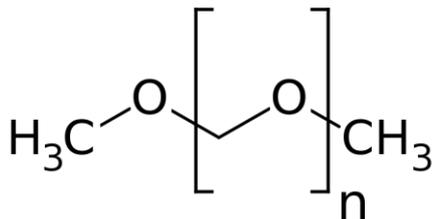
Nachhaltige Energieträger

"Flüssige Energieträger" ("Power-to-Liquid")

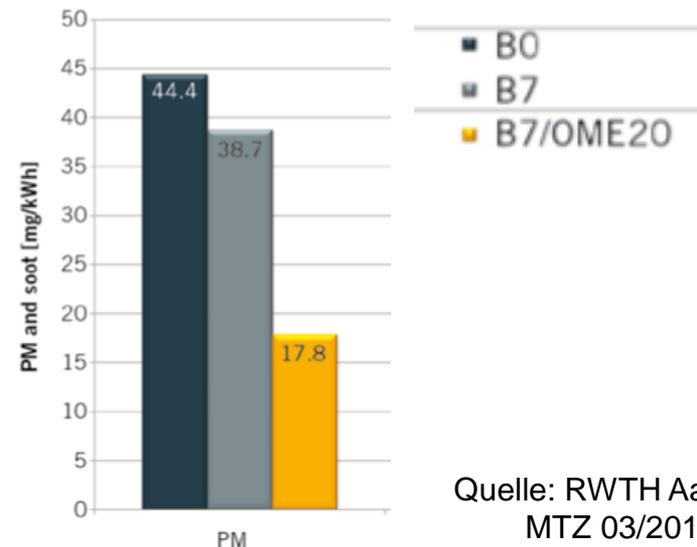
Forschung erst begonnen, Vorschläge:

- **Synthese-Kraftstoffe**

- Drop-In Fuels (als Ersatz für bisherige Fuels, z.B. Kerosin)
- Design-Fuels (z.B. OME statt Diesel: fast rußfreie Verbrennung)



Polyoxymethylen-dimethylether (OME)



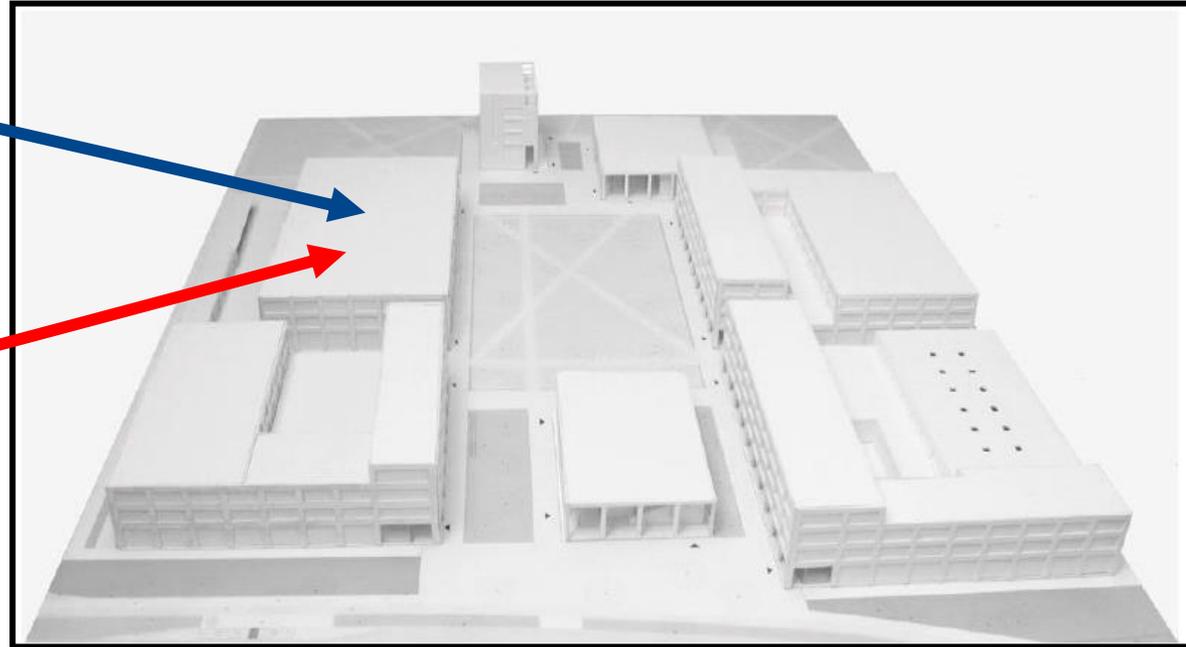
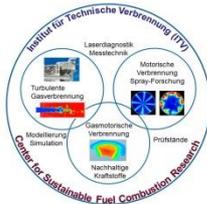
Quelle: RWTH Aachen,
MTZ 03/2011



Dynamik der Energiewandlung

Campus Maschinenbau Garbsen

Research Center for Sustainable Fuel Combustion



IV Institut für Technische Verbrennung



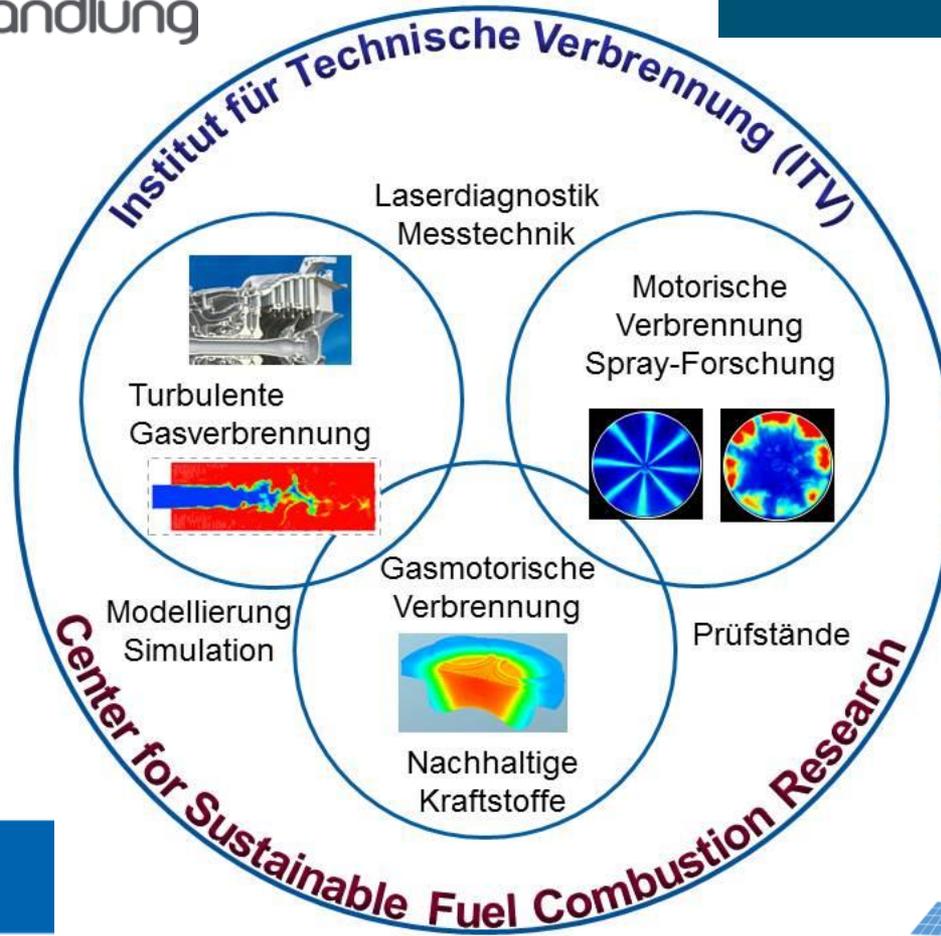
Dynamik der
Energiewandlung

efzn

Energie-Forschungszentrum
Niedersachsen

SE²A Sustainable Aviation

Cluster of Excellence



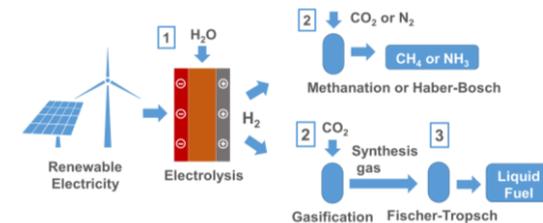
LIFE 2050
Leibniz
Forschungszentrum
Energie 2050

NFL
am Campus Forschungsflughafen

NFF
NIEDERSÄCHSISCHES
FORSCHUNGSZENTRUM
FAHRZEUGTECHNIK

FUELS JOINT
RESEARCH GROUP

Mobilise



Institut für
Technische
Verbrennung

Sustainable Fuel Combustion Research

22

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Inhalt

- Herausforderung
- Ansatz E-Fuel
- Beispiele für nachhaltige Energieträger
- Forschungsbeispiele
- **Energiewirtschaftliche Bemerkungen**
 - **Herstellungsort und Transport**
 - **Kosten (FVV-Studie)**
 - **Anforderungen zur Markteinführung**
- Zusammenfassung

Herstellungsort und Transport von E-Fuels

- Flüssige / gasförmige Energieträger sind "einfach" transportierbar, tw. mit existierender Infrastruktur (Schiffe, Eisenbahn, ...)
- Bsp.: 1 Tankwagen-Zug pro Tag (50 Waggons a 95 m³) transportiert soviel Energie wie eine der neuen geplanten Stromtrassen (2 GW) !!!
- Produktion von E-Fuel aus Solar-/Wind-Energie da, wo diese verfügbar ist, vermutlich überwiegend in Middle East / North Africa ("MENA").
- Handelsware.
- Transport des E-Fuels ist nur "geringes" Problem.

Kosten von E-Fuels

**E-Fuels sind (deutlich) teurer als Rohölprodukte (bisher jedenfalls).
Besonders hoch die Investitionskosten.
Hohe Umwandlungsverluste (Forschungsbedarf).**

Studie - Vergleich mit Kosten:

- FVV-Studie "Defossilisierung des Transportsektors - Optionen und Voraussetzungen in Deutschland", U. Kramer, 9/2018 (im Internet verfügbar):
 - Vergleich von BEV - H2-FCEV - PtX-Fuels.
 - Annahme, eine Technologie würde zu 100% eingesetzt.
 - Bezugsjahr 2050. Mittelklasse Pkw.

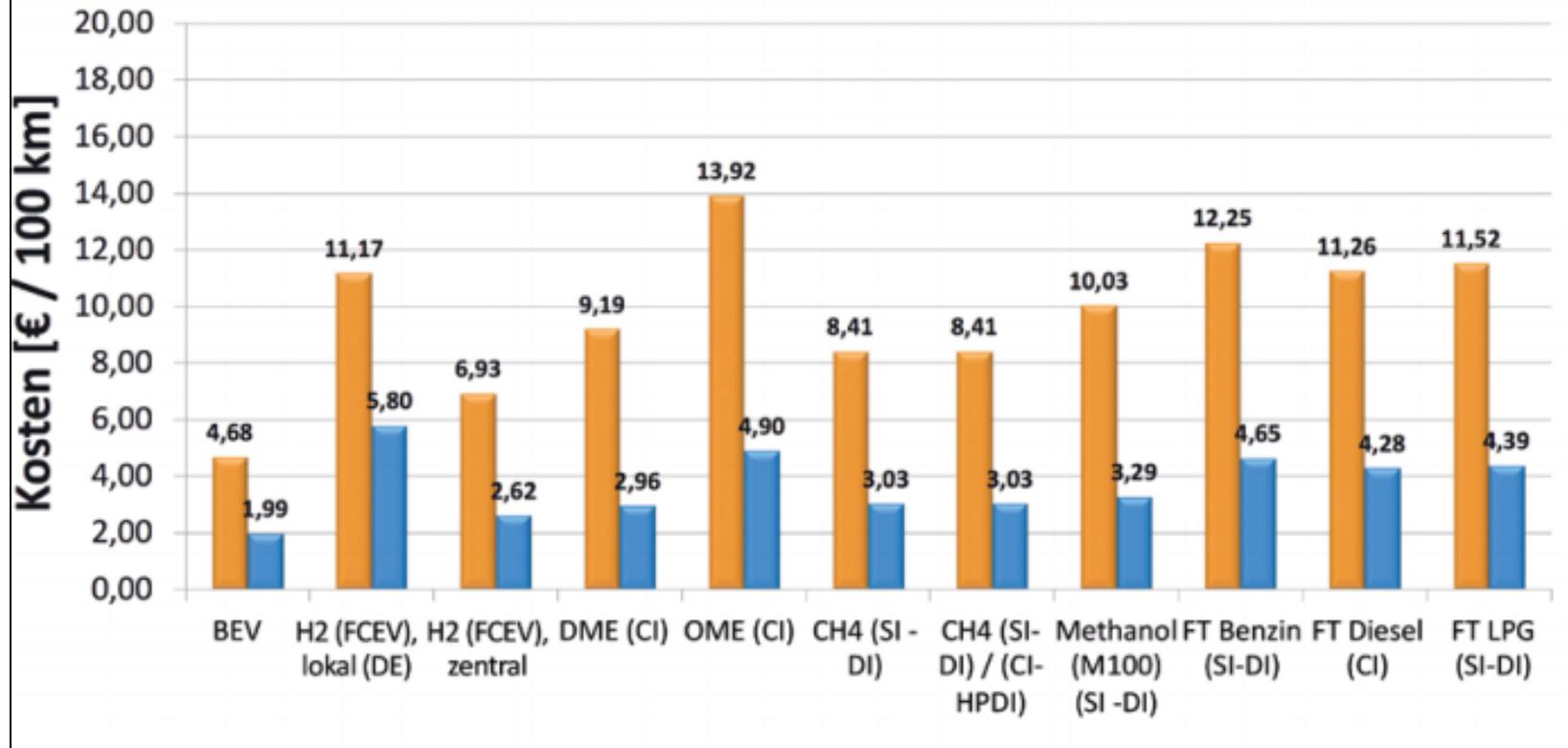
FVV-Studie "Defossilisierung des Transportsektors"

Ergebnisse (ausgewählt)

- Sehr viele neue Windräder nötig (à 5 MW, Offshore, Dtl.)
 - BEV: 11.000 - 15.000 (da bester Well-to-Wheel Wirkungsgrad)
 - FCEV: 23.000 - 26.000
 - E-Methan: 35.000 - 40.000
 - E-OME: bis 60.000

Energie- (Kraftstoff-) Kosten [€ / 100 km] PKW

(Min. & Max. Szenario; CO₂ aus vorhandenen Quellen)



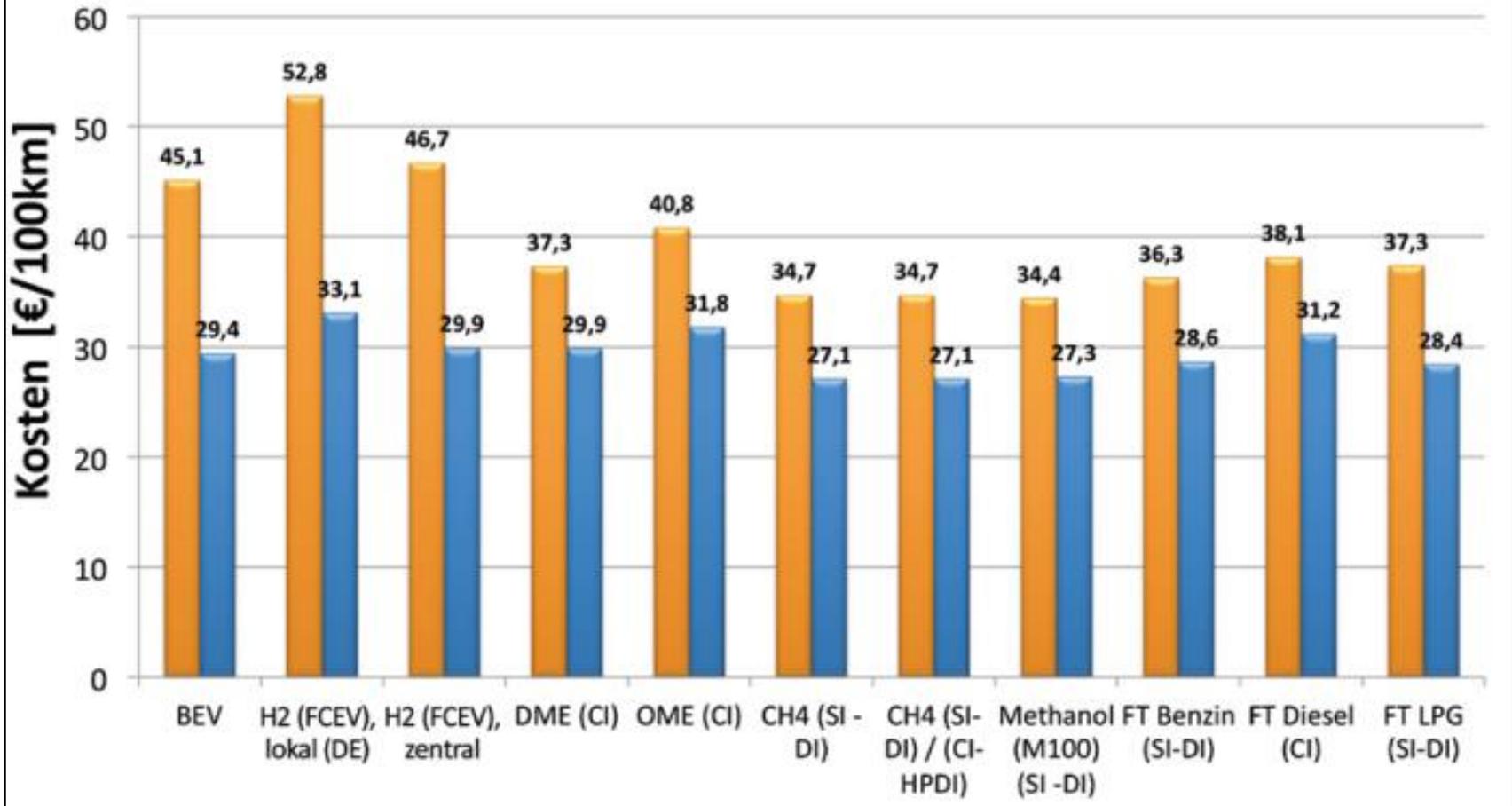
Minimal Szenario: u.a. Produktion E-Fuels in MENA Ländern

Maximal Szenario: u.a. Produktion E-Fuels in Dtl.

Quelle: FVV-Studie "Defossilisierung des Transportsektors" 9/2018

PKW Mobilitätskosten

(Kraftstoff, Infrastruktur, Wertverlust Fahrzeug) (CO₂ aus vorhandenen Quellen)



Quelle: FVV-Studie "Defossilisierung des Transportsektors" 9/2018

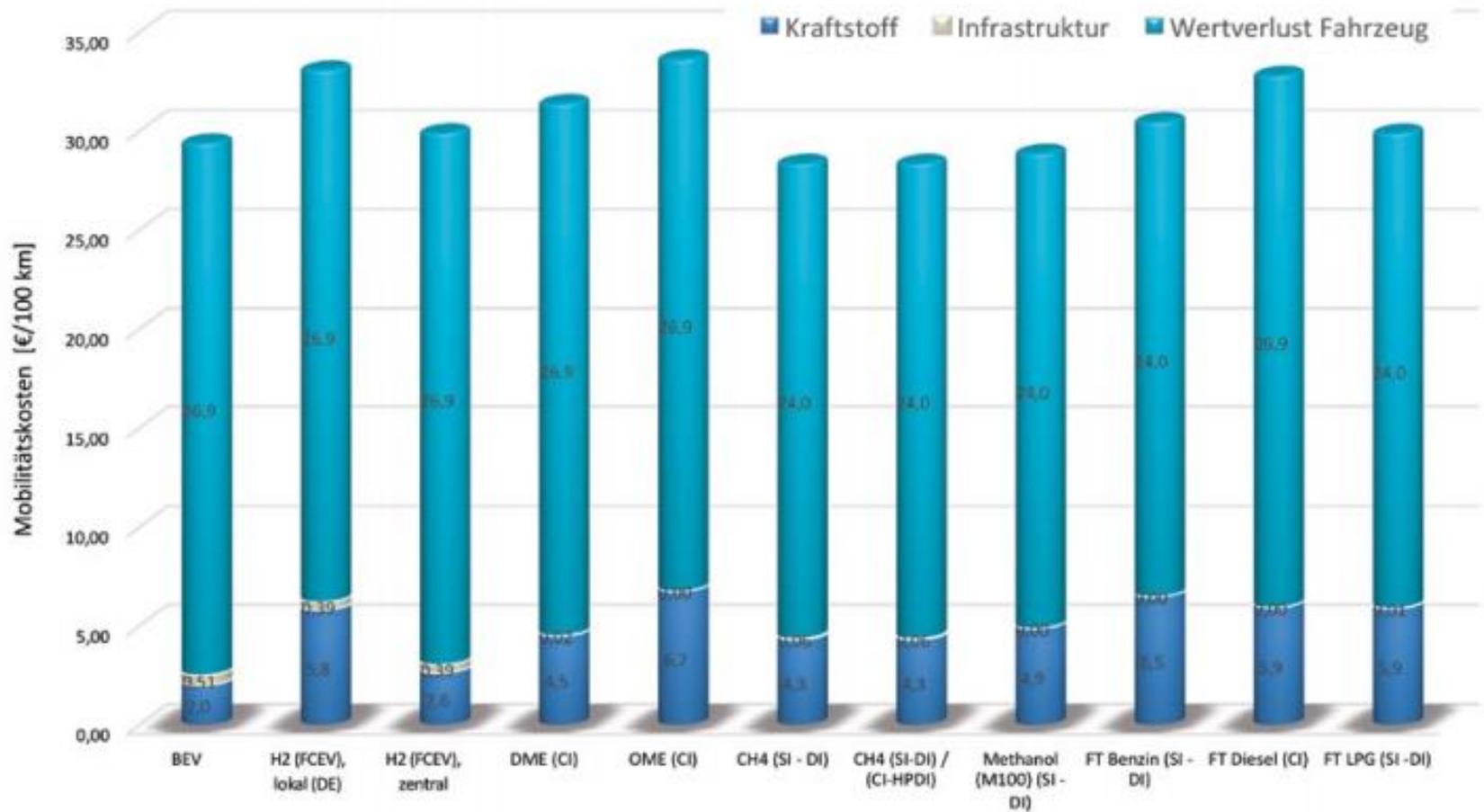


Abbildung 31: Kostensplit: Minimale Mobilitätskosten für Pkw

Quelle: FVV-Studie "Defossilisierung des Transportsektors" 9/2018

FVV-Studie "Defossilisierung des Transportsektors"

Ergebnisse (ausgewählt)

- Gesamtkosten sind ungefähr gleich für alle 100% Szenarien !!!
- Hauptkosten sind die Abschreibungskosten der Fahrzeuge. Bei BEV und FC höher. Investitionskosten bei PtX höher.

Anforderungen zur Markteinführung

- EU sollte Gesamt-Ökobilanzen als Richtschnur nutzen, nicht nur Tank/Battery-to-Wheel. Technologie-Unabhängigkeit.
- E-Fuel Nutzung sollte als CO₂-frei angerechnet werden (CO₂-Limits ab 2020 zentral wichtig)
- Für E-Fuel-Herstellung sollte keine EEG-Umlage gezahlt werden müssen.
- Forschungsschwerpunkte werden sich anpassen.

Zusammenfassung

- Flüssige Energieträger haben **viel** mehr Energie/Masse als Batterien
- E-Fuel: Trotzdem (fast) vollständig regenerativ erzeugt
- "Chemischen Speicher" bei Windüberschuß. Energiespeicherpotential ist **viel** größer als von Pumpspeicherkraftwerken ("Sektoren-Kopplung")
- Verbindet Vorteile der Elektromobilität (CO₂-neutral bei regenerativer Herstellung) mit Vorteilen flüssiger "Energieträger"
- Teuer. Aber Gesamtnutzungspreis vergleichbar mit E-Mobilität.
- Entweder "Drop-In Fuels" (Ersatz vorhandener Kraftstoffe)
- Oder: Forschungsziel Synthetische Kraftstoffe mit "gezielten" Eigenschaften - um Verbrennung zu verbessern (Rußfrei, wenig NOx)

Mobilität mit zukünftigen Kraftstoffen

Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker
Institut für Technische Verbrennung (ITV)
Leibniz Universität Hannover
dinkelacker@itv.uni-hannover.de

11. Niedersächsische Energietage, Hannover, 20.-21.11.2018