

# Es ist höchste Zeit! Energiewende im Verkehr neu gedacht

Langenthal, Schweiz

15. November 2023

Univ.-Prof. Dr. techn. Christian Beidl  
TU Darmstadt

**MASCHINENBAU**  
We engineer future



# Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe

## Unsere Positionierung



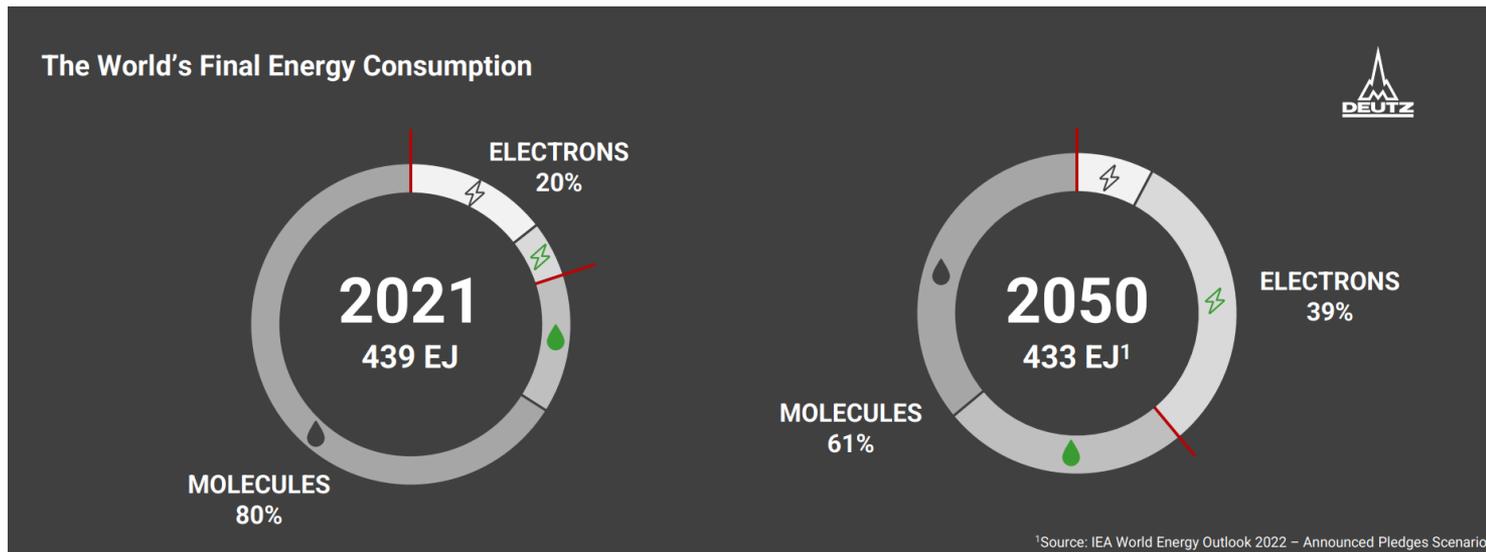
„Die Dinge falsch zu benennen,  
heißt das Unglück in der Welt zu vergrößern“

Albert Camus

# Wandel und Transformation zur Klimaneutralität

- Das **Energiesystem** ist **entscheidend für die Technologie zukünftiger Antriebssysteme** (Funktionalität, Ökologie, Ökonomie, Resilienz)
- Schlüssel zur Erreichung der Klimaziele: **Defossilisierung** und **Nachhaltigkeit (Circular Economy)**

# Das weltweite Energiesystem



THE WORLD'S ENERGY CONSUMPTION  
IS HIGHLY DEPENDENT ON  
**FOSSIL MOLECULES**

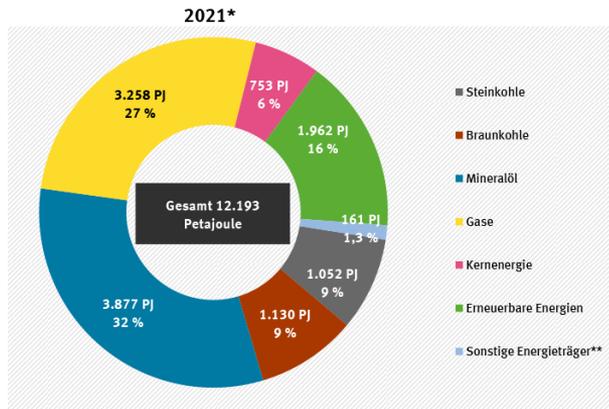
EVEN IN A PROGRESSIVE SCENARIO  
**GREEN MOLECULES**  
WILL CONTINUE TO PLAY A MAJOR ROLE

Quelle: Deutz

# Mix elektrischer/molekularer Energieträger

## Deutschland 2022

- 16% erneuerbare Energien im Primärenergiemix



Quelle: Jahr 1990: AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland, Stand 09/2021; Jahr 2021: AG Energiebilanzen, Primärenergieverbrauch Jahr 2021, 21. Dezember 2021

## Deutschland 2030+

- 80% erneuerbarer Strom
- Mind. 27% erneuerbare Energien im Primärenergiemix (EU-Ziel)
- Schlüsselfrage: Wie ist der Wandel resilient und volkswirtschaftlich verträglich gestaltbar?
- Strukturwandel wie schnell sinnvoll und realisierbar? Wie ist ein negativer Einfluss auf das CO<sub>2</sub> Budget vermeidbar?

**Im Zusammenhang mit der Elektrifizierung aller Sektoren ist die zumindest teilweise Unabhängigkeit des Verkehrssektors vom Stromsektor ein Stabilitätskriterium für die Energiewende. (100% E nicht sinnvoll)**

# Drei Wege zur strombasierten emissionsfreien Mobilität

## Anwendungsspezifische Vorteile



### Strom als direkte Energiequelle

- Direktes Laden
- Lokale Ladeinfrastruktur (Haushalt/Öffentlich)
- Für Anwendungen mit begrenzten Reichweiten und/oder regelmäßigen Lademöglichkeiten



### Wasserstoff

- Lokale Produktion aus EE
- Import aus „sweet-spot“-Ländern als essentieller Beitrag zur Energieversorgung
- Verteilung über adaptiertes Erdgasnetz und über neue Infrastruktur

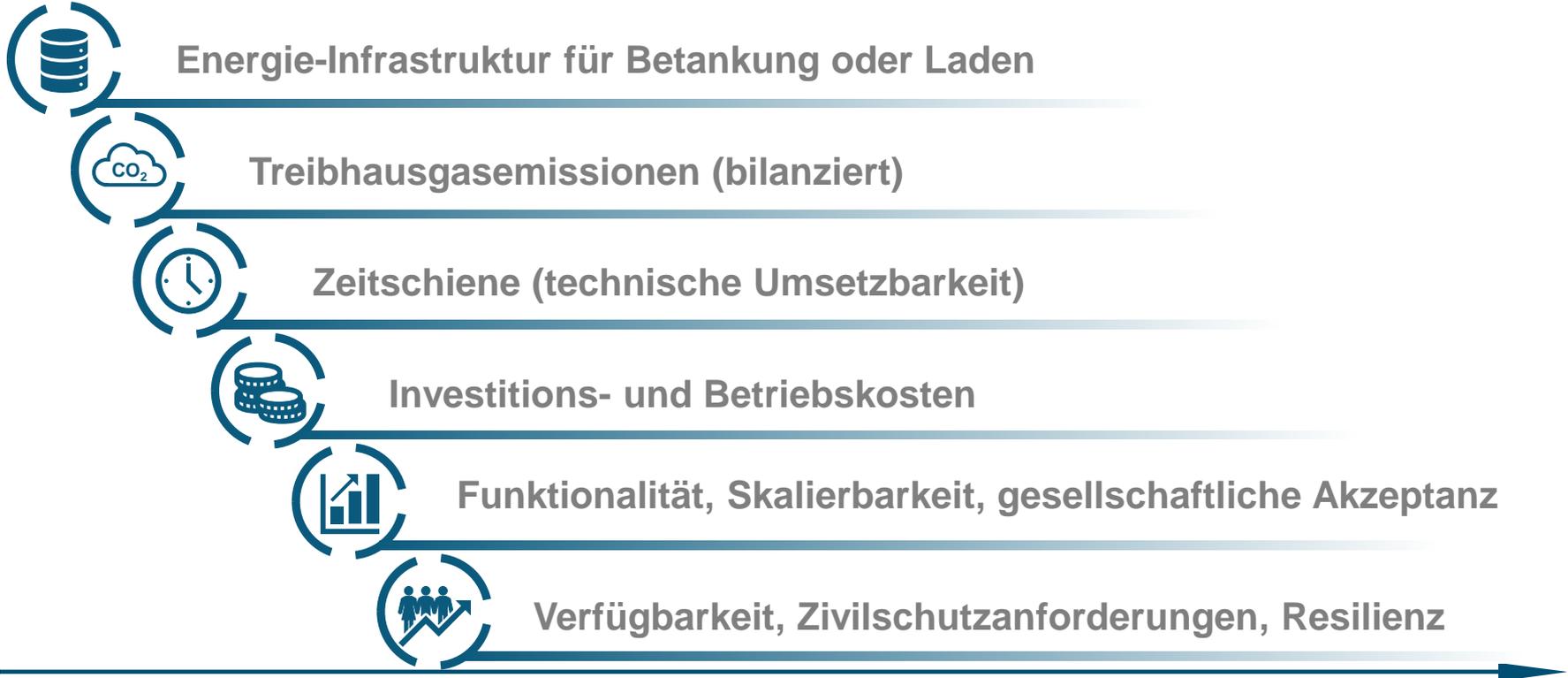


### E-Fuels + Biogene Kraftstoffe

- Effizienter, kostengünstiger Import aus sonnen- und windreichen Ländern
- Einfache Einbindung in vorhandene Infrastruktur
- CO<sub>2</sub> Neutralität für Teile der Bestandsflotte
- Langzeitspeicher für hohe Verfügbarkeit und Notfallversorgung

# Anforderungen an mobile Antriebe

## Vielschichtige Kriterien



Vorausgesetzt alle betrachteten Energieträger sind nachhaltig:

## Wo liegt der optimale Energiemix elektrischer/molekularer Energieträger?

Unter Berücksichtigung von:

- Akzeptanz im Markt
- Souveränität
- Versorgungssicherheit
- Infrastrukturaufbau
- Funktionalität
- Regionale Anforderungen
- Resilienz

“This indicates that an exclusively technical defossilisation with **one single energy / drivetrain pathway** and assumed vehicle characteristics **cannot meet the GHG reduction requirements** on Europe’s transport sector. “  
*FVV Future Fuels Study IV*

**muss es einen Mix aus elektrischen und molekularen erneuerbaren Energieträgern geben.**

# Der regulatorische Rahmen fordert „Emissionsfreiheit“ Tank to Wheel vs. Well to Wheel

## Well to Wheel

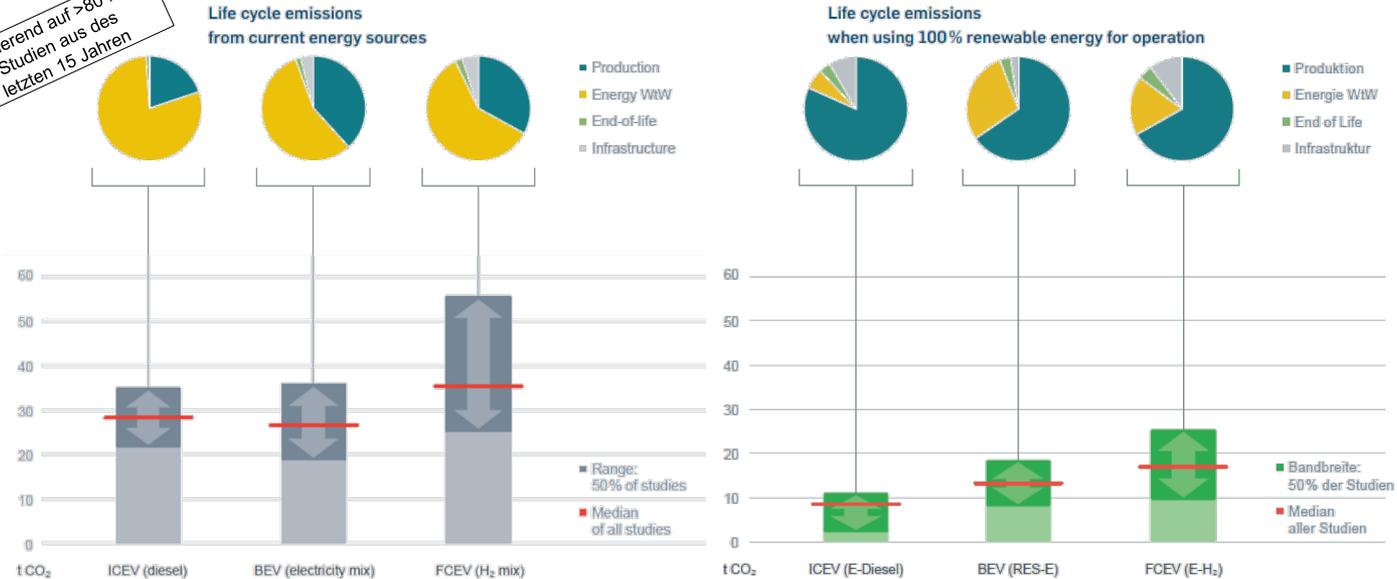
## Tank to Wheel



Tatsächliche CO<sub>2</sub> Emissionen hängen maßgeblich von den Systemgrenzen ab  
Tank to Wheel: Vorgelagerte Phasen werden nicht betrachtet  
→ Grundlage des regulatorischen Betrachtungsrahmen

# CO<sub>2</sub>-Fußabdruck über den gesamten Lebenszyklus

Basierend auf >80  
Studien aus des  
letzten 15 Jahren

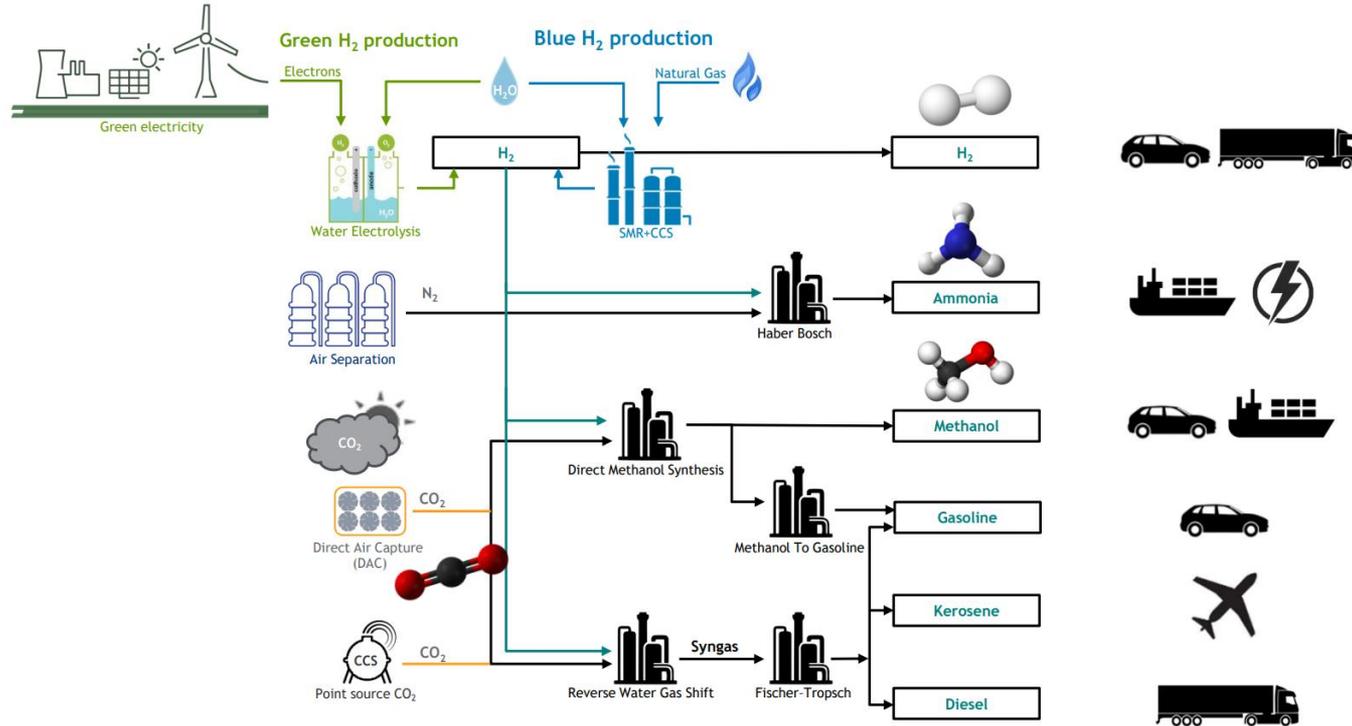


1. Analysen zeigen **keine überlegene Technologie** – Stelle der Emissionen unterscheidet sich
2. Vorteile hängen von jedem **individuellen Anwendungsfall** ab
3. Alle Antriebssysteme ermöglichen eine nahezu Treibhausgas neutrale Mobilität

**Technologieoffene Ansätze** auf der Grundlage von Lebenszyklusemissionen erforderlich

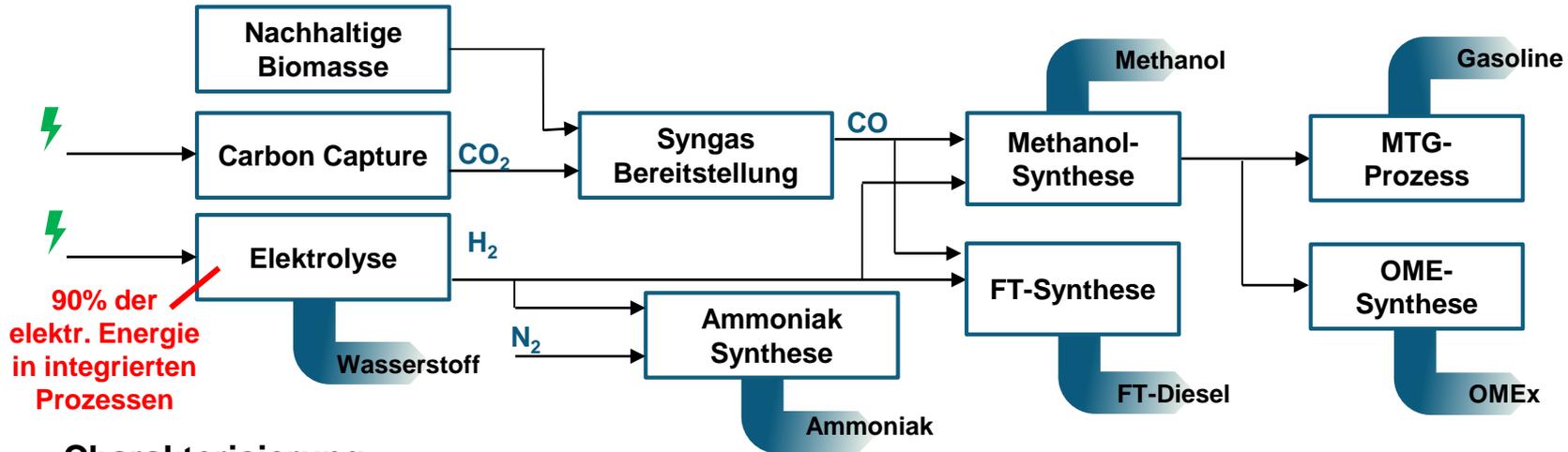
Quelle: Frontier economics

# Kraftstoffe (eFuels) als Derivate von Wasserstoff - Überblick



Quelle: Aramco

# Der Weg von Wasserstoff zu flüssigen Kraftstoffen



## Charakterisierung

- Pfad 1: **Direkte  $\text{H}_2$**  Nutzung → Nur bei lokal verfügbarer Infrastruktur [**Wandler: BZ & VKM**]
- Pfad 2: **Methanol** → Noch keine Zulassung als Kraftstoff, umfassende Anpassungen an Motoren nötig!
- Pfad 3: **Ammoniak** → Geringes TRL (va. für Marineanwendungen interessant)
- Pfad 4: **Drop-In** fähige Kraftstoffe [**FT, aber auch HVO aus Reststoffverwertung**]
- Pfad 5: Kraftstoffe mit **Anpassungen am Energiewandler**

# Die „Komplexitätsfalle“

Treibhausgasemissionen von elektrischen Antrieben:

0

Treibhausgasemissionen bei der Produktion und Verwendung von Biokraftstoffen:

$$E = e_{cc} + e_i + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr}$$

wobei:

$E$	=	Gesamtemissionen bei der Verwendung des Kraftstoffs
$e_{cc}$	=	Emissionen bei der Gewinnung oder beim Anbau der Rohstoffe
$e_i$	=	auf das Jahr umgerechnete Emissionen aufgrund von Kohlenstoffbestandsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen
$e_p$	=	Emissionen bei der Verarbeitung
$e_{td}$	=	Emissionen bei Transport und Vertrieb
$e_u$	=	Emissionen bei der Nutzung des Kraftstoffs
$e_{sca}$	=	Emissionseinsparung durch Akkumulierung von Kohlenstoff im Boden infolge besserer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungspraktiken
$e_{ccs}$	=	Emissionseinsparung durch Abscheidung und geologische Speicherung von $CO_2$
$e_{ccr}$	=	Emissionseinsparung durch Abscheidung und Ersetzung von $CO_2$

# CO<sub>2,eq</sub>-Bewertung

Kraftstoff 1 (nach RED II):

Anbau (0)

Nutzung (0)

HVO aus Altspeiseöl:  
11,9 gCO<sub>2,eq</sub>/MJ



→ 87% CO<sub>2</sub>-  
Reduktion\*

Transport (1,7)

Verarbeitung (10,2)

Typische Werte  
nach RED II

Kraftstoff 2 (nach RED II):

Anbau (0)

Nutzung (0)

Benzin aus Reststoffen  
21,2 gCO<sub>2,eq</sub>/MJ



→ 77% CO<sub>2</sub>-  
Reduktion\*  
Zukünftig: 92 %

Verarbeitung &  
Transport (21,2)

Berechnung mit  
EU-Strommix!!

Status quo BEV:

Gewinnung (0)

Verarbeitung (0)

BEV: 0 gCO<sub>2,eq</sub>/MJ



→ 100%  
CO<sub>2</sub>-  
Reduktion

Transport (0)

Nutzung (0)

Idealisierte  
Annahmen,  
nicht realistisch

\*Fossile Vergleichsgröße: 94 gCO<sub>2eq</sub>/MJ

# PKW und Vans - EU

## European Union (EU27)

**Summary** Target tracker Country comparison Vehicles and fleet Infrastructure Incentives & legislation Useful information

### Summary

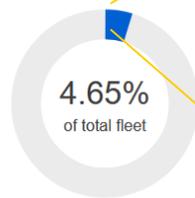
Population	Total land area	Highway (km)
447,007,596	4,225,127 km <sup>2</sup>	106,650 km

Total passenger cars  
286,807,270

Alternative fuels passenger cars  
13,343,128

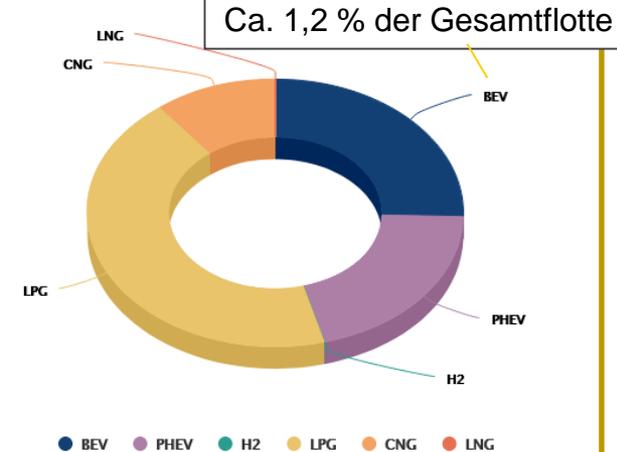
Data last updated  
08 Feb 2023  
[Read more on the data sources](#)

### Alternative fuels vehicles share



### AF Fleet (M1&N1)

Total number of alternative fuelled (BEV, PHEV, H2, LPG, CNG, LNG) passenger cars (M1) and vans (N1) by type.



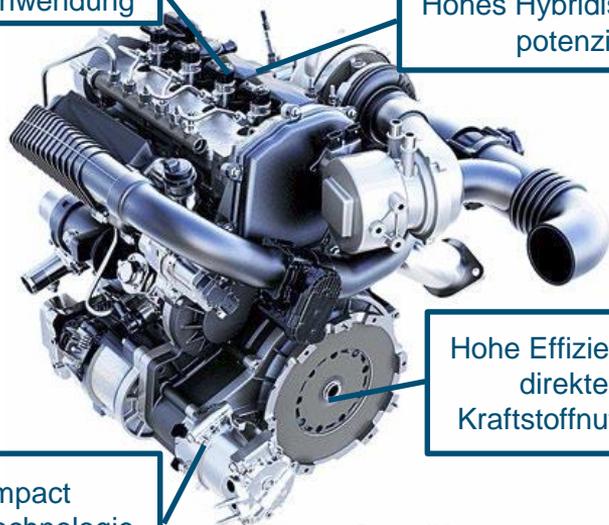
Verbrennungsmotoren als hochentwickelte Energiewandler für molekulare Energieträger spielen eine entscheidende Rolle weltweit  
→ **Mit E-Fuels nachhaltiger, klimaneutraler Betrieb möglich**

<https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>

# Der Verbrennungsmotor als Energiewandler für zukünftige kraftstoffbasierte Energiesysteme

Robuste Technologie,  
vielfältige Anwendung

Hohes Hybridisierungspotenzial



Hohe Effizienz bei direkter Kraftstoffnutzung

Zero Impact Emissionstechnologie

Source: AVL

Über zukünftige Energieträger

- ✓ CO<sub>2</sub> neutral
- ✓ Zero Impact Emission
- ✓ Hochflexibler Energiewandler für die direkte Nutzung flüssiger oder gasförmiger Kraftstoffe

„Fossiler“ Verbrennungsmotor

Zukunftstechnologie



# Einordnung des Begriffs Wirkungsgrad

**Der Wirkungsgrad** ist entscheidend, wenn

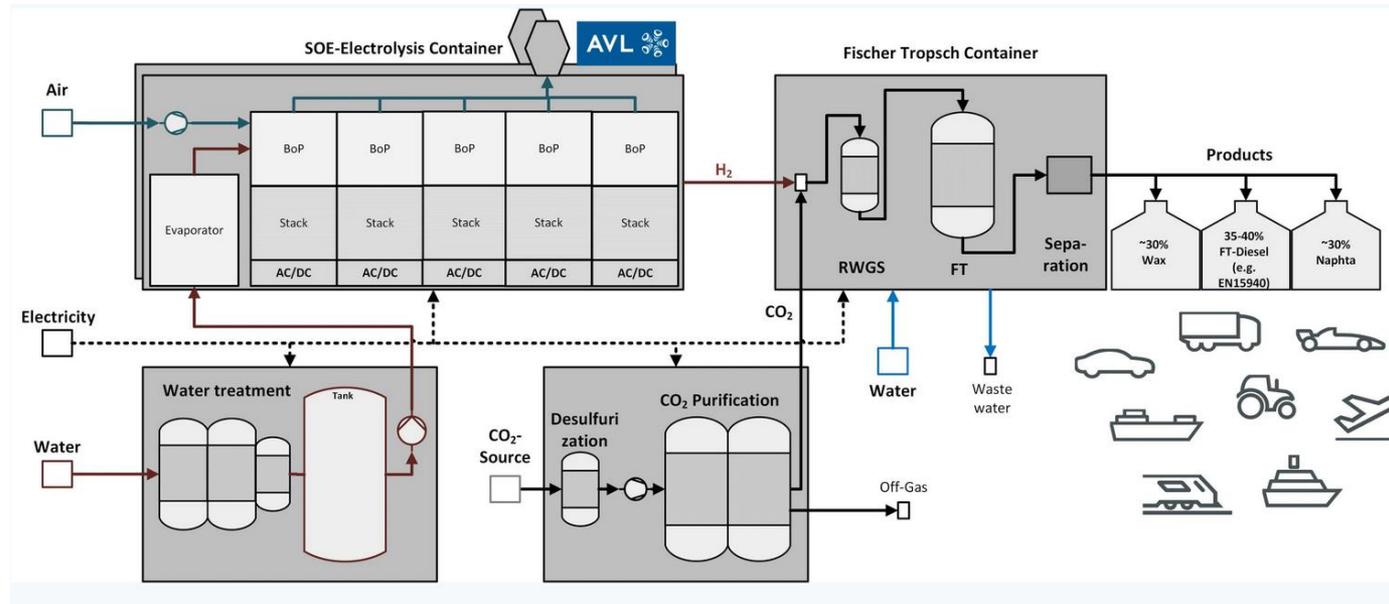
- die Ressourcen begrenzt sind (z.B. e.g. supply, in vehicle)
- Kostenwettbewerbsfähigkeit für Marktakzeptanz erforderlich ist (z.B. TCO)

aber...

**Wirkungsgrad  $\neq$  Nachhaltigkeit**

# Energiebedarf/Wirkungsgrad in der Herstellung

Österreichische Forschungsarbeit: Hochtemperaturelektrolyse ermöglicht bereits Wirkungsgrade in der Wasserstoffelektrolyse > 80%

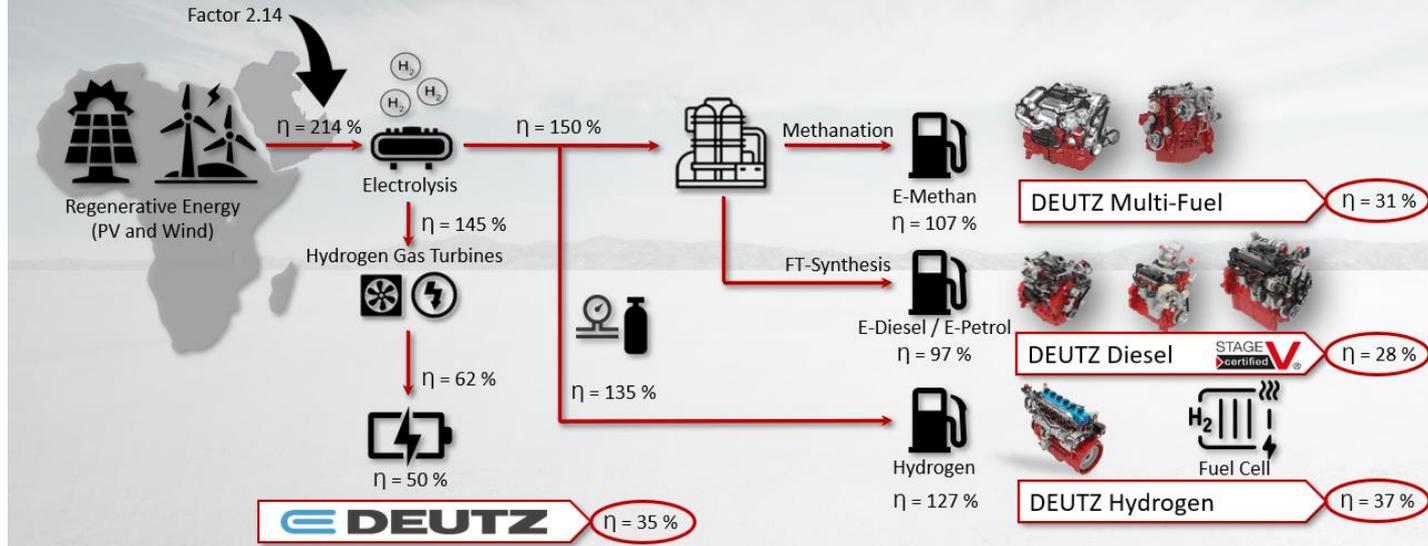


Quelle: AVL

# Gesamtbetrachtung eFuels mit Ertragseffizienz

## Solutions for CO<sub>2</sub>-free Powertrains for Mobile Machinery

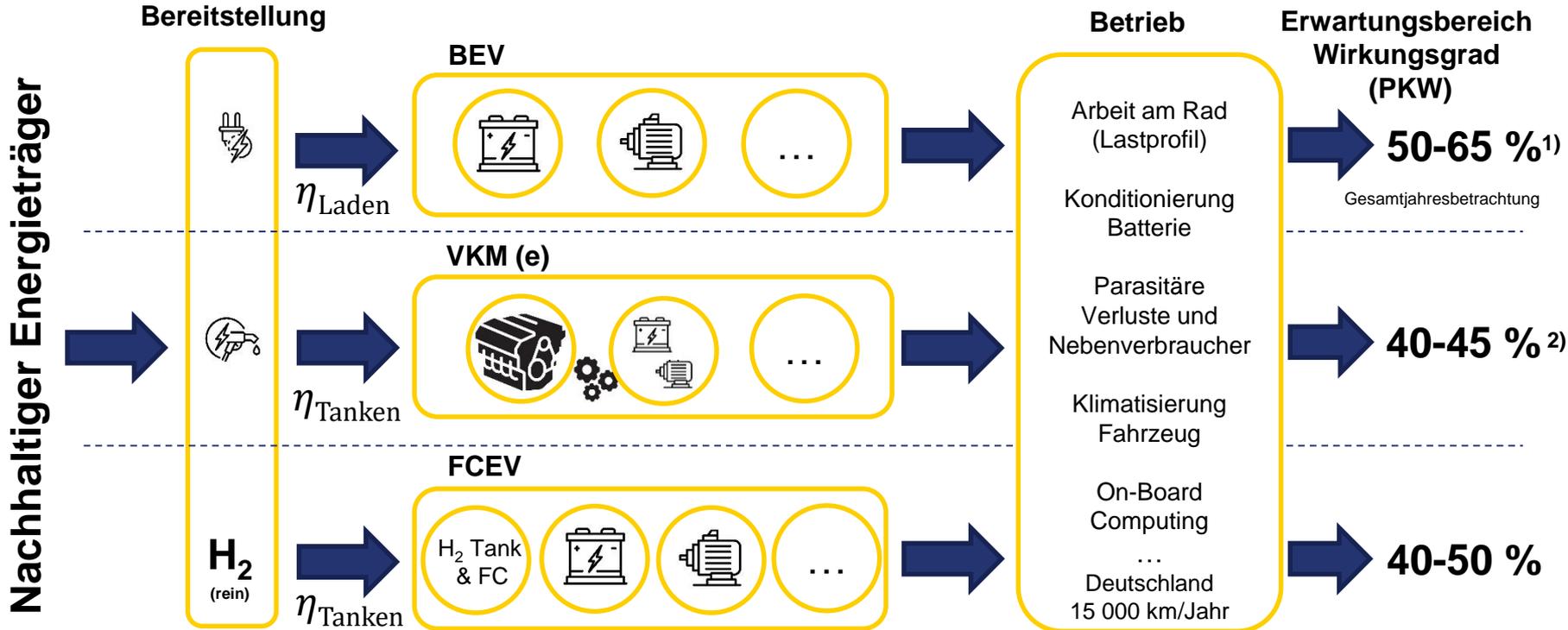
Well-to-Wheel Analysis: Scenario for H<sub>2</sub> produced in North Africa (Morocco + Algeria)



Import of renewable hydrogen suggests a pluralist drive mix including a widespread use of eFuels

# Quervergleich zum Thema Antriebswirkungsgrad

## PKW Fahrzeugwirkungsgrad in der Realfahrt (Stand der Technik)



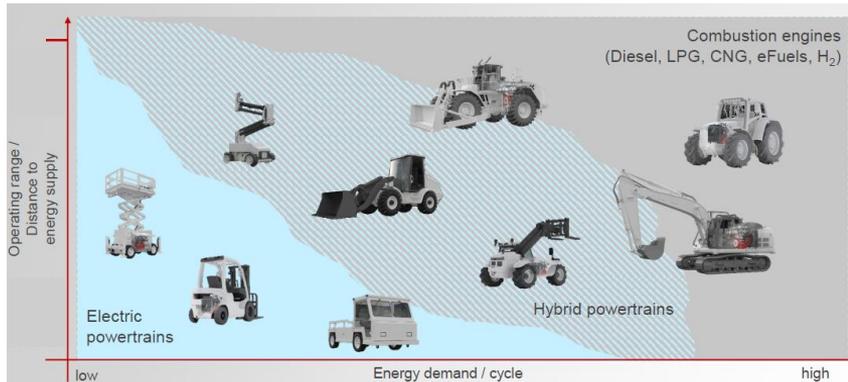
Anmerkung: Plug-in Hybrid kombiniert BEV & VKM (e)

<sup>1)</sup> Berechnung nach [1], [2] <sup>2)</sup> Potenzial heute bekannter Technologien nach [3]

# Welcher Energieträger ist der Richtige?

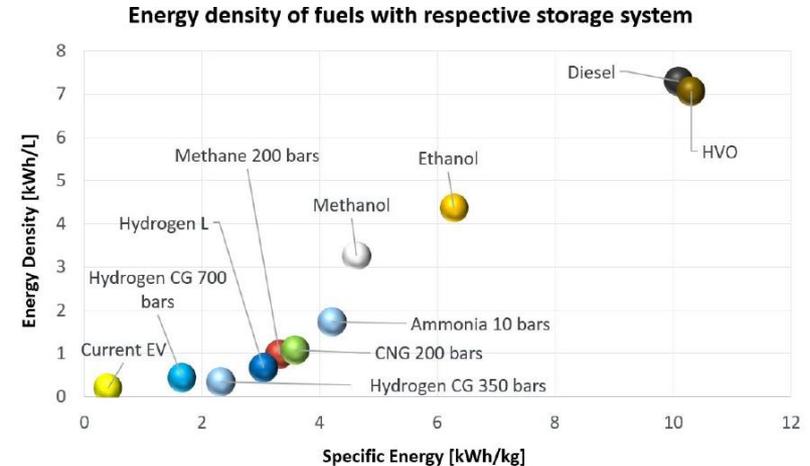
## Identifikation des Anwendungsfalls

### Anforderungsprofil



Quelle: Winkler. CO<sub>2</sub>-neutral mobility: potential of alternative and renewable fuels and electrification in off-highway applications, Fuels of the Future, Berlin, 2022

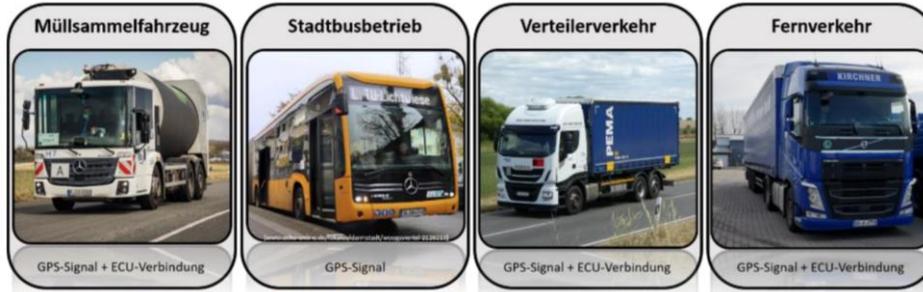
### Energiedichte



Quelle: Weiss. The off-highway sector in the field of tension of future power train concepts - Which chances has the internal combustion engine (ICE) in this industry?, Motorenkongress, Baden Baden, 2022

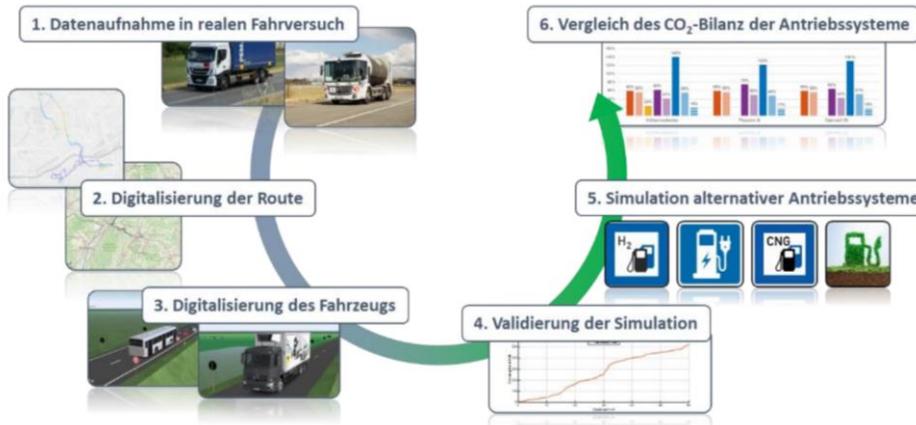
Anwendungen in der Landwirtschaft: ca. 1/3 der Antriebe sinnvoll elektrifizierbar (energetischer Anteil) [4]

# CO<sub>2</sub> Analyse: Stadtbetrieb und Gütertransport



Studie im Rahmen einer  
Dissertation an der TU  
Darmstadt:

Vergleich verschiedener  
Antriebssysteme und  
Energieträger in einer  
Gesamtbewertung realer  
Einsatzprofile



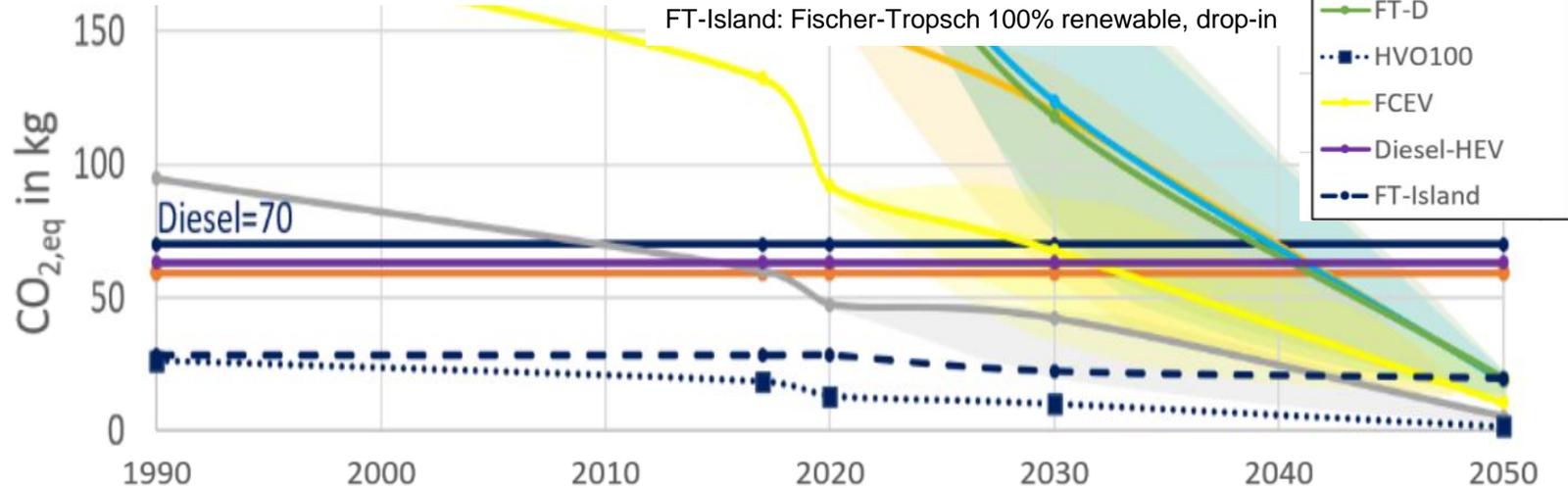
TU Darmstadt, Hummel, 2023

# Well-to-Wheel CO<sub>2</sub> Emission für einen Stadtbus

## Simulation Stadtbus Darmstadt, Linie L

(gemittelt über Jahrestemperaturverlauf, Produktionsanteil nicht berücksichtigt, deutscher Strommix)

- ⇒ eFuel Produktion mit deutschem Strommix führt zu erhöhter CO<sub>2</sub> Emission
- ⇒ Nachhaltig hergestellte eFuels und HVO bringen **sofortige Verbesserung**



Quelle: Hummel, Dissertation  
TU Darmstadt 2023

# Luftqualität im Kontext kraftstoffbetriebener Fahrzeuge



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Entwicklung der lokalen verkehrlichen Emissionen und der resultierenden Immission am Beispiel Darmstadt

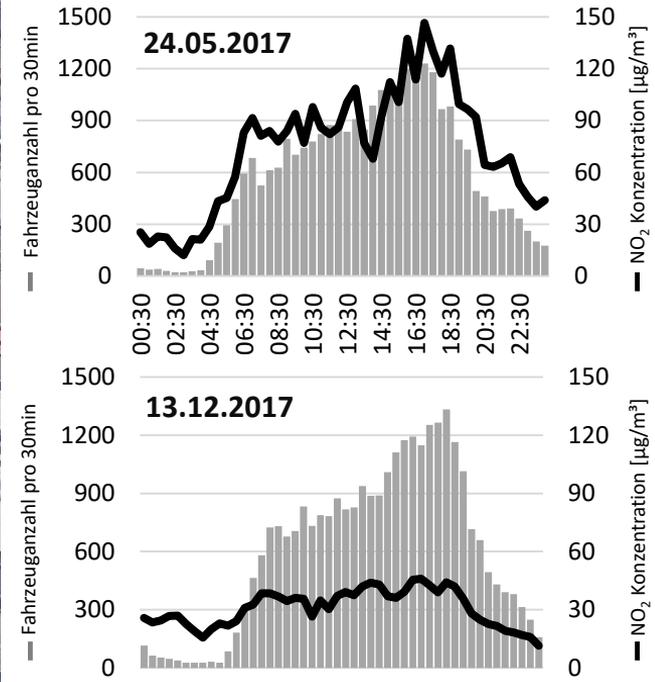


# NO<sub>2</sub>-Immission am Beispiel Darmstadt

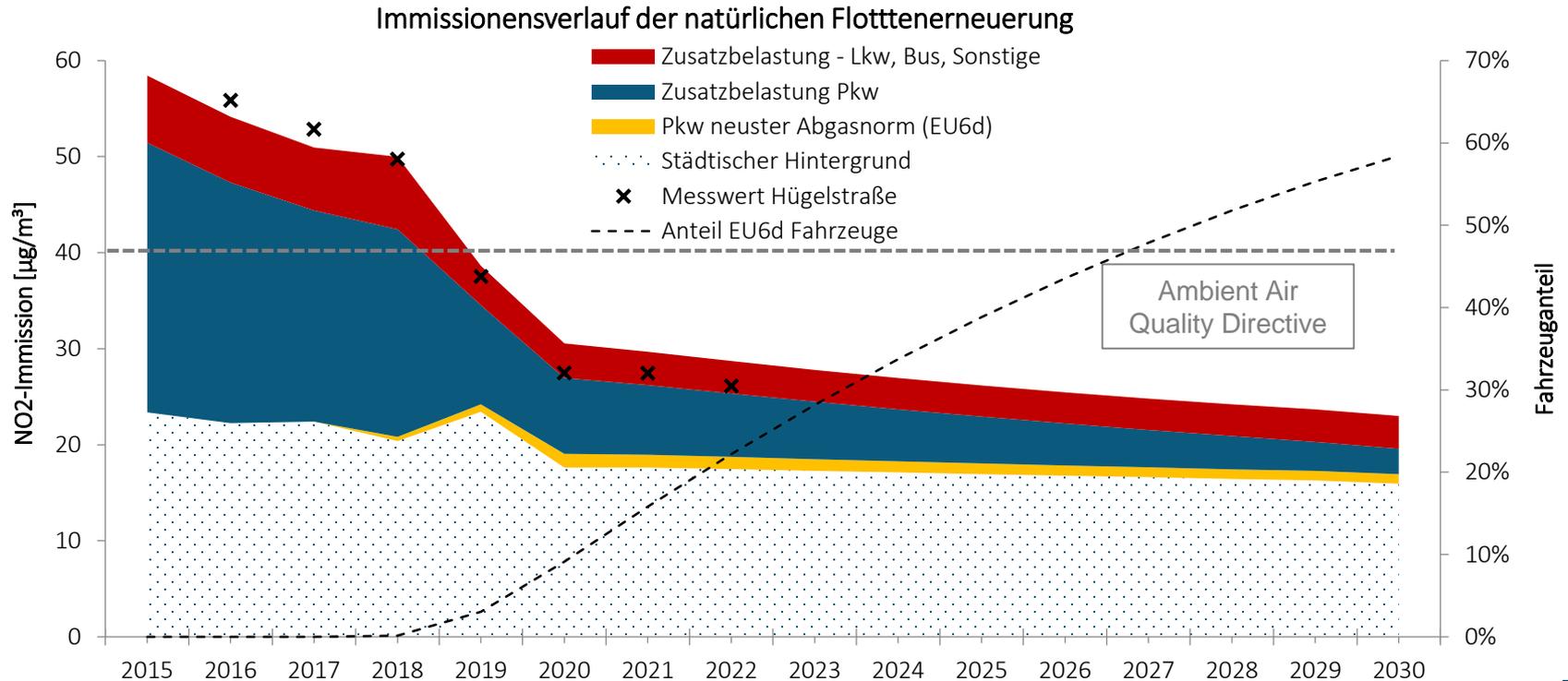
Position der Messstation Darmstadt Hugelstrae (Verkehrsnah / „Hot-Spot“)



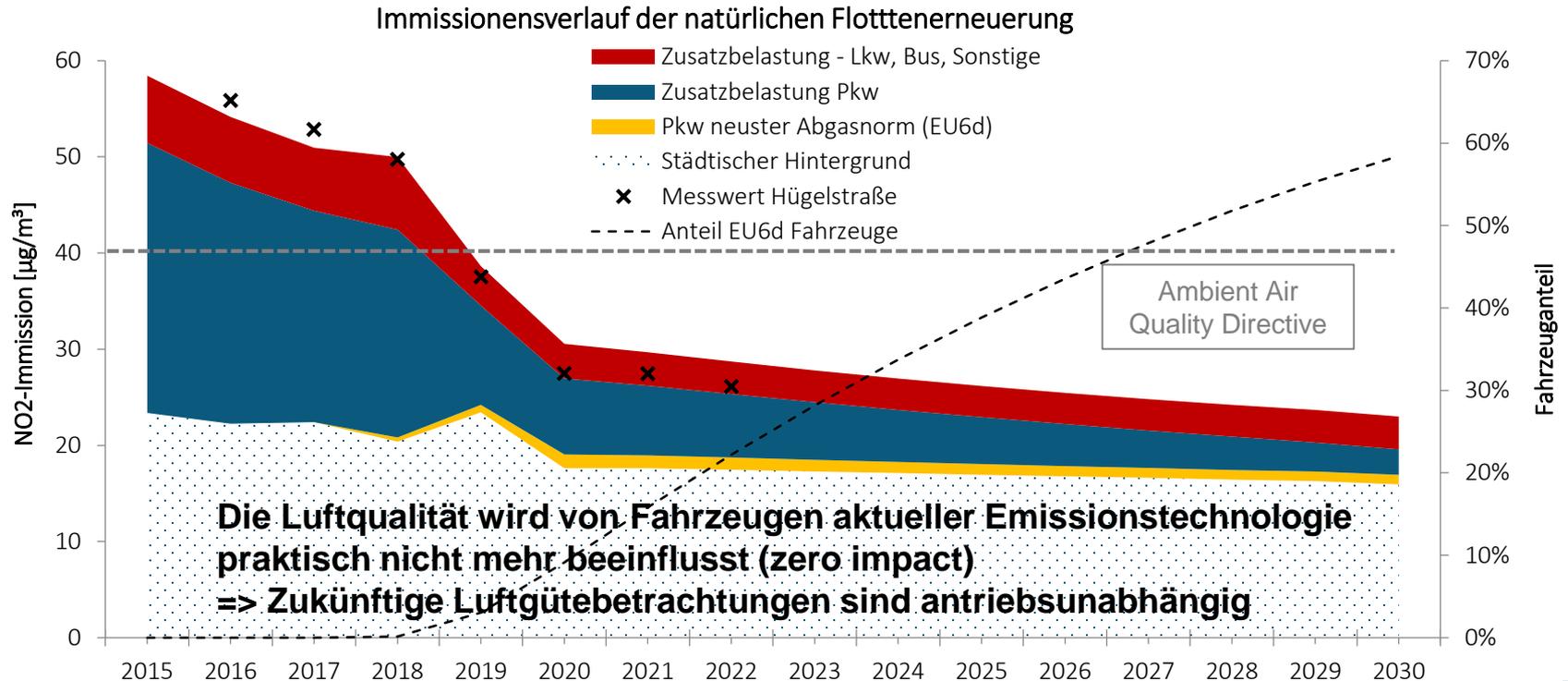
## Beispielhafter Tagesgang



# Vorhersage der NO<sub>2</sub>-Immissionen anhand des modellbasierten Darmstädter Immissionsmodells



# Vorhersage der NO<sub>2</sub>-Immissionen anhand des modellbasierten Darmstädter Immissionsmodells



# Kosten und Verfügbarkeit von eFuels

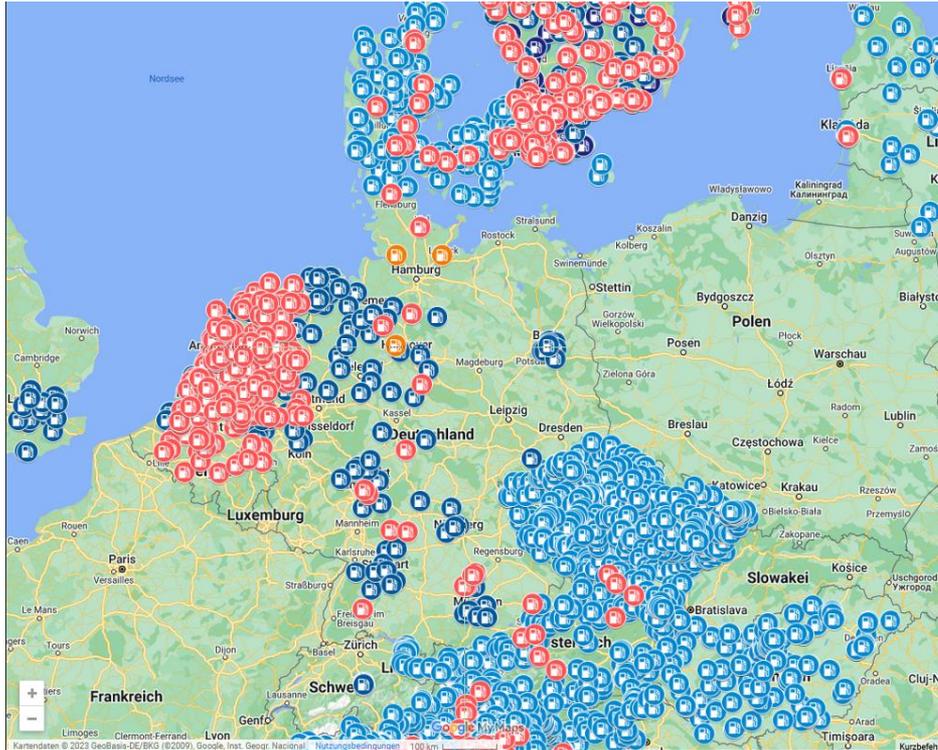
## Kosten:

- Aramco, Tec4Fuels, Neste, ... geben Kostenprognose **< 1€ / l**

## Verfügbarkeit:

- > 100 Projekte für eFuel Anlagen weltweit
- Enormer Investitionsschub in Verbindung mit H<sub>2</sub> Strategien
- Reststoffbasierte Kraftstoffe heute schon in erheblichen Mengen verfügbar

# Aktuell bereits verfügbar: HVO in Europa



## Tankkarten Symbole

-  95-100% HVO
-  80% HVO
-  20-50% HVO
-  5-20% HVO
-  HVO-GTL-Mix

<https://efuelsnow.de/tankstellen-karte>

# Beispiel BMW X1

Aktuelle Veröffentlichung des ÖAMTC für Österreich:  
Werte **inkl.** Vorkettenemissionen **ohne** Produktion (keine vollständige LCA)

Diesel: 163g CO<sub>2</sub>/km

BEV: **34g CO<sub>2</sub>/km** (Strommix Österreich)

Quelle: auto touring November 2023, Artikel „Die sparsamsten Autos“



Dieselmotor mit HVO\* betankt: ca. **21g CO<sub>2</sub>/km**

\*zertifiziert

# Zusammenfassung

- Zunehmende **Diversifizierung** der **Antriebsarten** je nach **Anwendungsbereich** – systemische Funktionalität ist entscheidend, Resilienz ist ein zunehmend wichtiger Faktor.
- Steigerung des Anteils an **CO<sub>2</sub>-neutralen Kraftstoffen** ist der **größte Hebel** um Klimaziele im Mobilitätssektor (mobile Antriebssysteme) zu erreichen.
- Wichtigstes Kriterium aus Klimasicht ist die **Nachhaltigkeit** im Gesamtsystem, nicht einzelne Wirkungsgradbetrachtungen. **Fahrzeuge, die mit regenerativ hergestelltem Kraftstoff betrieben werden, haben den niedrigsten CO<sub>2</sub>-Footprint aller Antriebsarten.**
- **reFuels** (inkl. H<sub>2</sub>) ermöglichen die Erschließung **zusätzlicher regenerativer** Energiequellen und können damit fossile Energiequellen substituieren. **Sie stehen NICHT im Widerspruch zum Hochfahren elektrischer Antriebslösungen – im Gegenteil!**
- Wir brauchen **so schnell / so viel wie möglich grüne Moleküle!** Sie stehen für **Klimaeffizienz**

# Es ist höchste Zeit!



**Institut für Verbrennungskraftmaschinen  
und Fahrzeugantriebe**

Otto-Berndt-Straße 2  
64287 Darmstadt

[www.new-energy-vehicles.com](http://www.new-energy-vehicles.com)  
[www.verbrennungskraftmaschinen.de](http://www.verbrennungskraftmaschinen.de)  
[www.real-driving-emissions.com](http://www.real-driving-emissions.com)  
[www.automotive-clean-air.com](http://www.automotive-clean-air.com)

**MASCHINENBAU**  
We engineer future



**MASCHINENBAU**  
We engineer future



# Vielen Dank!

## Literatur:

[1] Klement, W.: Realenergiebedarf alternativer Fahrzeugkonzepte. In: ATZ 122 (2020), Nr. 12, S. 76 - 80

[2] Lipp, S.: Real World Emissionen elektrifizierter Antriebe und Effekte der RDE-Gesetzgebung. Graz, Technische Hochschule, Dissertation, 2021

[3] Wouters, C.G.L. et al: ICE2025+ Ultimate System Efficiency, 30. Aachen Colloquium Sustainable Mobility, Aachen, 2021

[4] KTBL (2023): Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)



**Institut für Verbrennungskraftmaschinen  
und Fahrzeugantriebe**

Otto-Berndt-Straße 2  
64287 Darmstadt

[www.new-energy-vehicles.com](http://www.new-energy-vehicles.com)

[www.verbrennungskraftmaschinen.de](http://www.verbrennungskraftmaschinen.de)

[www.real-driving-emissions.com](http://www.real-driving-emissions.com)

[www.automotive-clean-air.com](http://www.automotive-clean-air.com)