

WASSERSTOFFREGION  
**CHYSTARTER**  
GEMEINDE PERL

WASSERSTOFF: VON DER ERZEUGUNG BIS ZUR ANWENDUNG

Infoveranstaltung Perl, 01.02.2023  
Dr. Frank Koch, , EE Energy Engineers GmbH



Vergabe und Projektbegleitung durch:



# AGENDA

1

**Wasserstoff – heute und in Zukunft**

2

**Stationäre Anwendungen von Wasserstoff**

3

**Mobile Anwendungen von Wasserstoff**

# WASSERSTOFF (H<sub>2</sub>) – EIGENSCHAFTEN UND HEUTIGE VERWENDUNG

## Eigenschaften

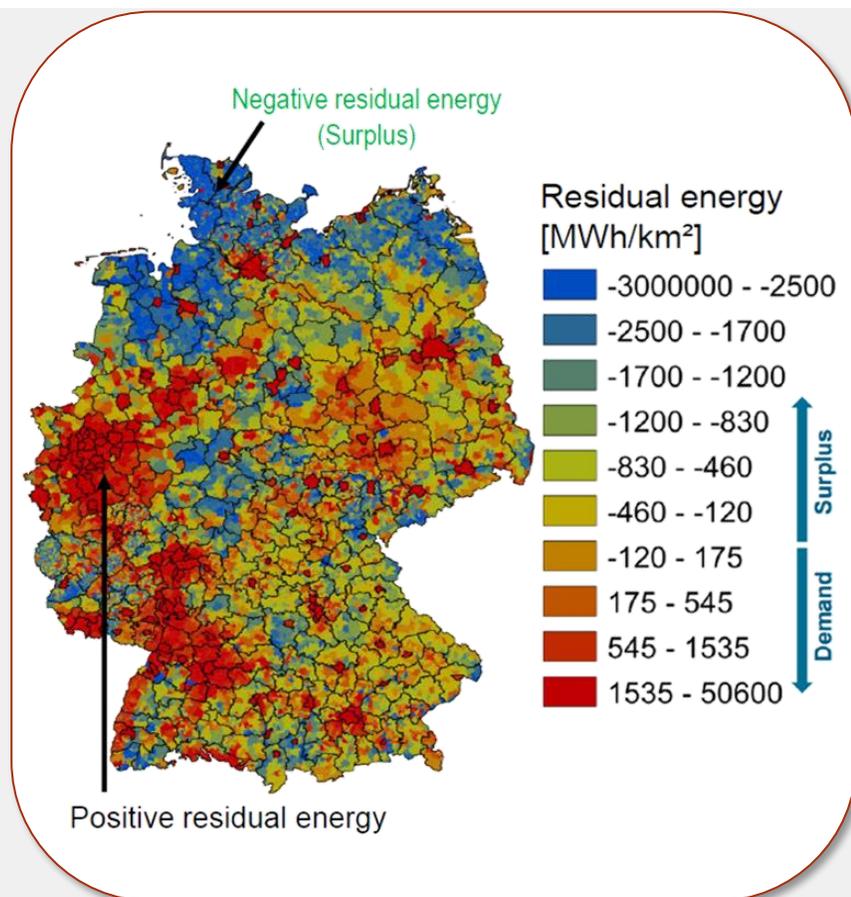
- Farb- und geruchloses Gas, ungiftig, nicht cancerogen
- Brennbar, leichter als Luft
- Sekundärer Energieträger, herstellbar aus Kohlenwasserstoffen (z.B. Erdgas) und per Elektrolyse (Strom)

## Herstellung und Verwendung

- Wasserstofferzeugung weltweit:
  - 96 % fossil (Erdgasreformierung: Methan + Dampf → Wasserstoff und CO<sub>2</sub>)
  - 4 % Nebenprodukt aus Chlor-Alkali-Elektrolyse (Kochsalz + Wasser → Chlor + Natronlauge + Wasserstoff)
  - Jährlich: 50 Mio. t weltweit (1,65 Mio. t in D, davon 0,6 Mio. in NRW)
- Wasserstoff wird seit Jahrzehnten in der Industrie eingesetzt
  - Chemische Produkte: Ammoniaksynthese (Düngemittel), Methanolsynthese (Kunststoffe):  $N_2 + 3 H_2 \rightarrow 2 NH_3$ ;  $CO + 2 H_2 \rightarrow CH_3OH$
  - Kraft- und Schmierstoffe: Hydrierung, Cracken; Margarineherstellung; Glasindustrie
- Künftig: auch Energiespeicher und -transportmedium, Kraftstoff



# HERAUSFORDERUNGEN DER ENERGIEWENDE



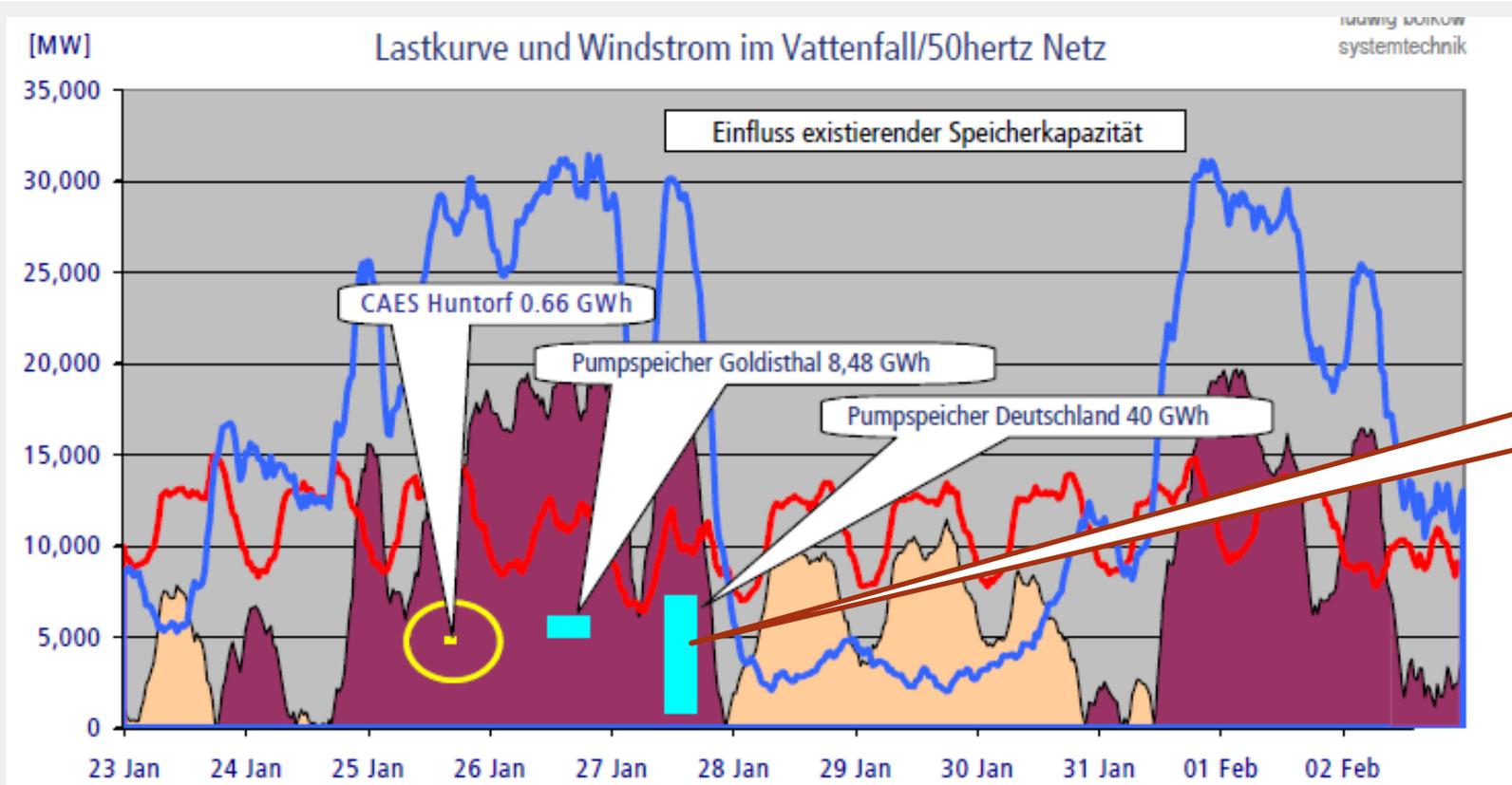
## Aussagen

- Überschüsse vor allem durch im Norden installierte Windkraft
- Bei 80 % Stromerzeugung durch Erneuerbare kann der Überschuss bis zu 270 TWh betragen
- 90 TWh reichen aus, um H<sub>2</sub> für 20 Mio PKW (50 % der Fahrzeug-Flotte) zu erzeugen
- Aber: Auch ein perfektes Stromnetz kann nur max. 50 der 270 TWh verteilen



Transport der Energie notwendig

# HERAUSFORDERUNGEN DER ENERGIEWENDE



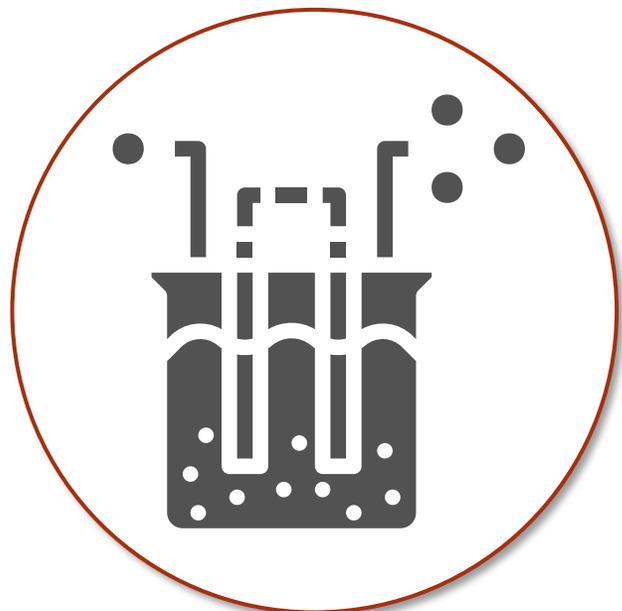
## Aussage

Auch größte Energiespeicher wie Pumpspeicherkraftwerke reichen nicht aus, um die Überschüsse zu speichern

» Speicherung der Energie notwendig

# WASSERSTOFF KÜNFTIG – BAUSTEIN DER SEKTORENKOPPLUNG

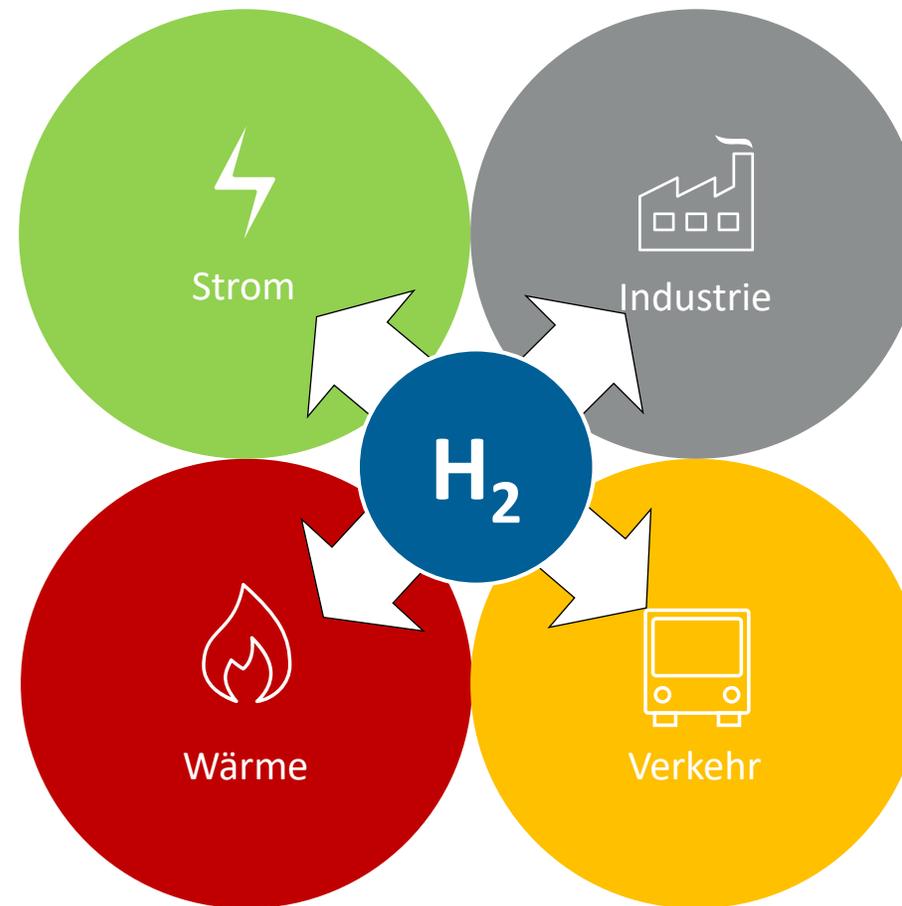
15 L/kg H<sub>2</sub>      H<sub>2</sub>O  
 Strom      55 kWh/kg H<sub>2</sub>



1 kg  
 H<sub>2</sub>

8 kg  
 O<sub>2</sub>

16 kWh  
 Wärme



# H2-GEWINNUNG AUS RESTSTOFFEN (BLUEFLUX-VERFAHREN)

Schritt 1: Hydrolyse → Erzeugung von Bio-Kohle und Dampf

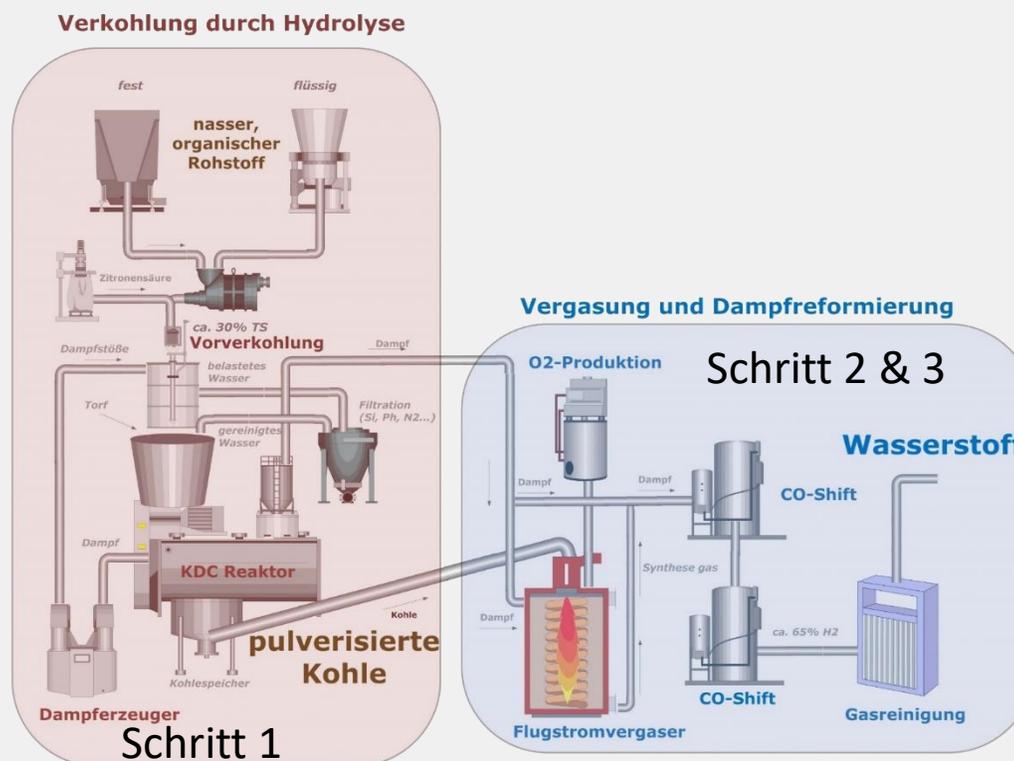
Schritt 2: Bio-Kohle und Dampf werden über einen Vergasungsprozess in Synthesegas umgewandelt

Schritt 3: H<sub>2</sub>-Erzeugung über eine CO-Shift-Reaktion

## blueFLUX

### Benötigte Komponenten

- Häcksler/Mischer
- Dampferzeuger
- KDC Reaktor
- O<sub>2</sub>-Erzeuger
- Flugstromvergaser
- CO-Shift Reaktor
- Gasreiniger



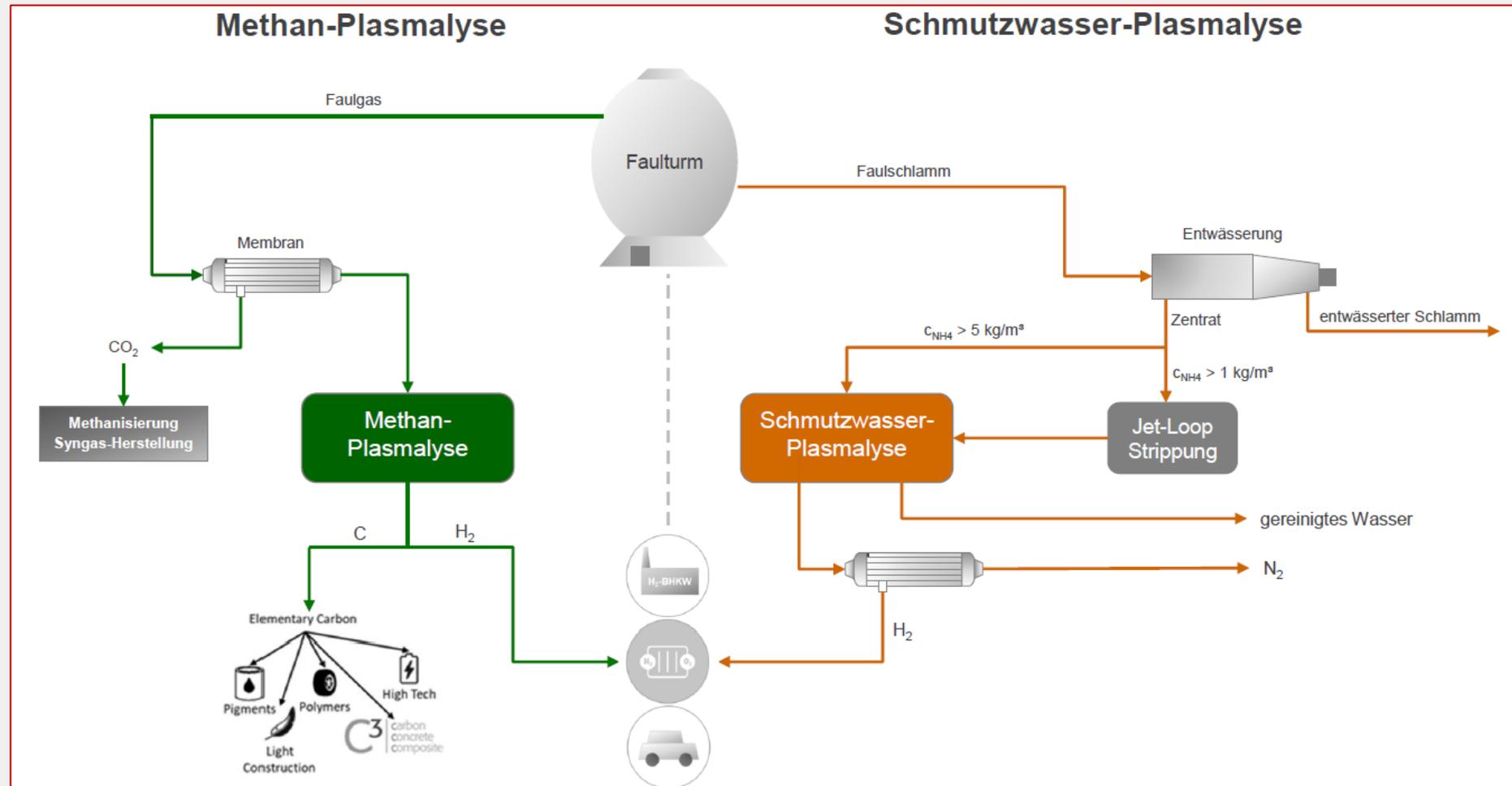
## Edukte

- Klärschlamm, Gülle, Mist
  - Bio- / Organische Abfälle
  - Plastik (~ 30 %)
  - GFK/CFK (Faserhaltiger-Abfall)
  - Reifen
- Min. 30 % Feststoffanteil für Bio-Kohle

## Produkte

- H<sub>2</sub>
- Bio-Methan
- Bio-Kohle
- Dünger
- Bio-Methanol

# WASSERSTOFFERZEUGUNG AUS METHAN UND SCHMUTZWASSER (GRAFORCE)



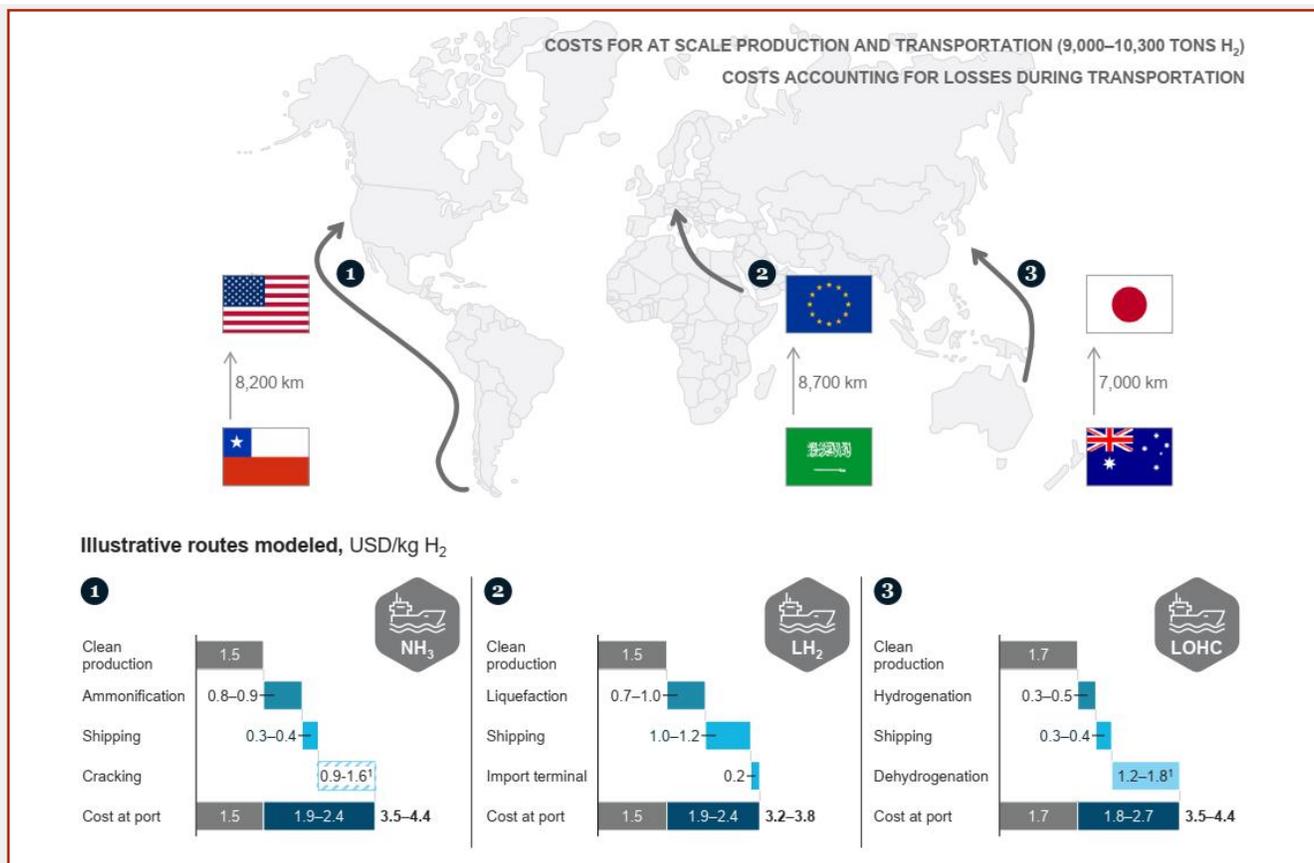
- **Betrieb:**  
Erdgas und Biomethan
- **Leistungsbereich:**  
115 – 6.500 Nm<sup>3</sup>/h
- **Nebenprodukte:**
  - 30 kW Wärme
  - 30 kg Carbon-Black
- **Pro kg H<sub>2</sub> werden 13,8 kWh<sub>el</sub> + 0,6 Nm<sup>3</sup> Methan benötigt**

Dieses Verfahren benötigt **weniger Strom<sup>1</sup>**, jedoch wird als zusätzliches Edukt **Methan benötigt** 

# FARBENLEHRE DES WASSERSTOFFS

| FARBE   | ENERGIEQUELLE               | H <sub>2</sub> -ERZEUGUNGSVERFAHREN           |
|---------|-----------------------------|-----------------------------------------------|
| Schwarz | Steinkohle                  | Vergasung/Dampfreformierung                   |
| Braun   | Braunkohle                  | Vergasung/Dampfreformierung                   |
| Grau    | Erdgas                      | Dampfreformierung                             |
| Weiß    | Natur/Industrie             | Natür. Vorkommen/Nebenprodukt                 |
| Blau    | Fossile Energieträger + CCS | Dampfreform. mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung |
| Rot     | Kernenergie                 | Elektrolyse                                   |
| Türkis  | Methan- /Erdgaspyrolyse     | Pyrolyse                                      |
| Grün    | Biogas / Biomasse           | Dampfreformierung / Pyrolyse                  |
| Grün    | Erneuerbare Energien        | Elektrolyse                                   |

# IMPORT VON WASSERSTOFF



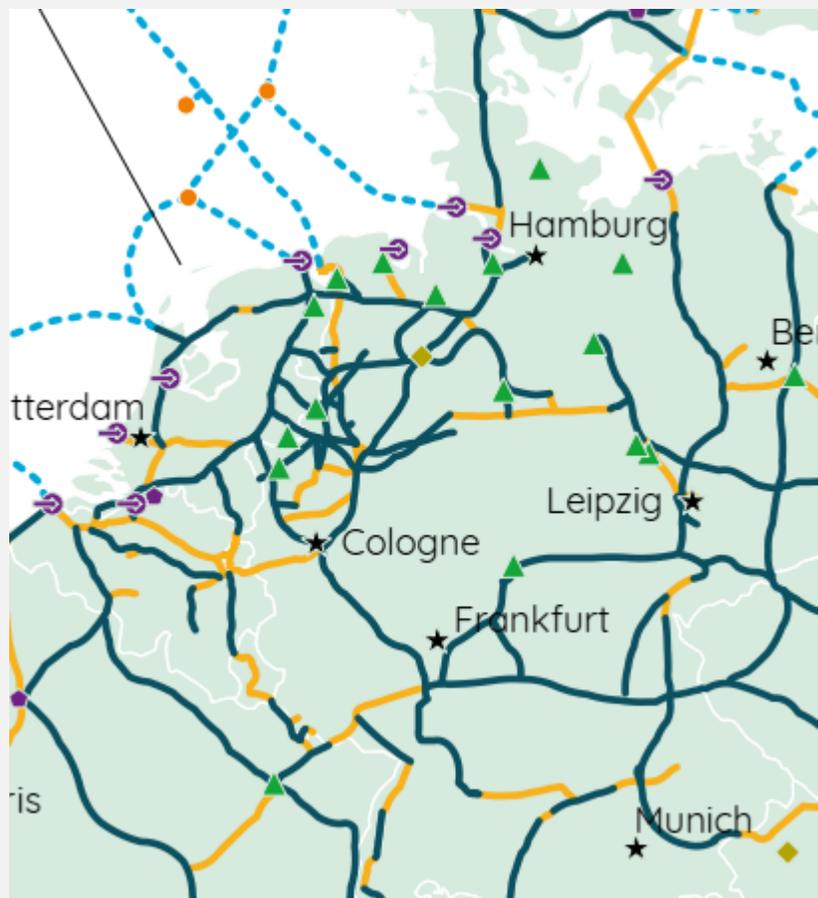
## Transportarten

- Ammoniak NH<sub>3</sub> und Reformierung im Hafen
- Flüssig-Wasserstoff und Gasifizierung im Hafen
- LOHC (chem. Verbindung) und Dehydrierung im Hafen
- H<sub>2</sub>-Weitertransport ab Hafen vor allem Pipeline, teilweise per Trailer

Die drei Routen erzeugen **vergleichbare Gestehungskosten am Hafen**

# FERNLEITUNGSNETZBETREIBER STELLEN PLAN FÜR EUROPÄISCHEN WASSERSTOFF BACKBONE VOR

1



■ H<sub>2</sub>-Pipeline (Umwidmung) ■ H<sub>2</sub>-Pipeline (Neubau) ■ Exist. Industriecluster

## Projekt

**Ausbau in Europa, 75% aus umgewidmeten Erdgasleitungen, 25% neue Leitungsabschnitte:**

- 2030 ca. 6.800 km
- 2040 ca. 23.000 km

**Zwei parallele Fernleitungsnetze:**

- reines Wasserstoffnetz
- (Bio-) Methannetz

## Kosten

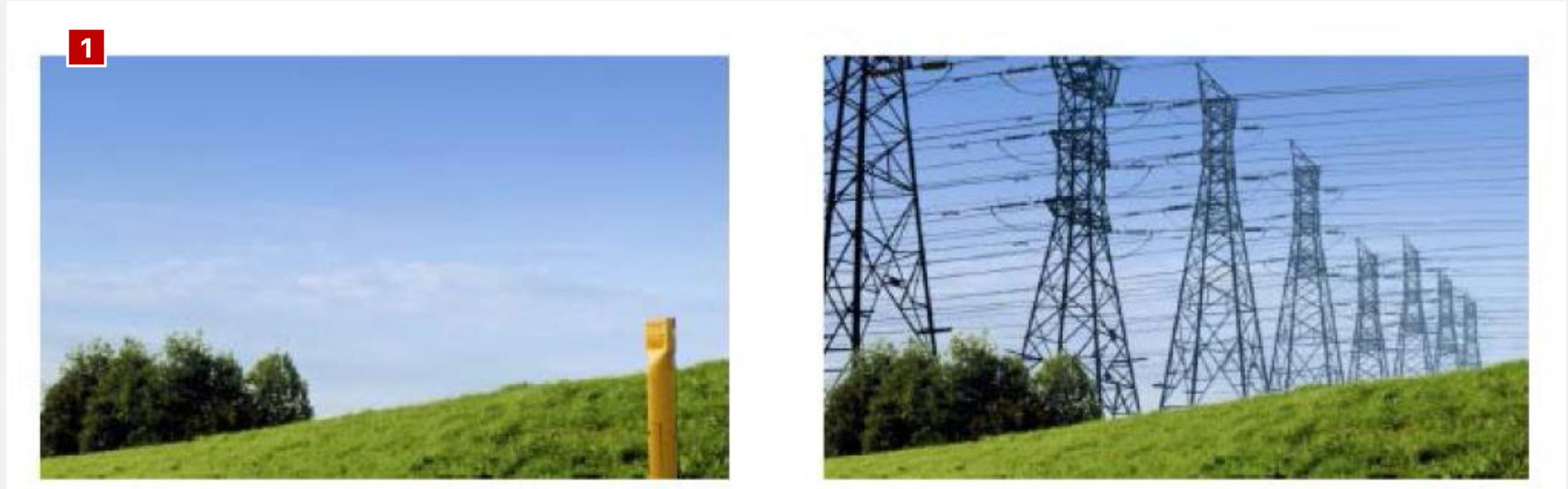
- Investitionskosten ca. 27 - 64 Mrd. €
- H<sub>2</sub>-Transport je 1.000 km ca. 0,09 – 0,17 €/kg

» Trailer ca. 3,96 € / kg je 1.000 km

## Technik

- H<sub>2</sub>-Kapazität 13 GW, Durchmesser 121 cm (48“)
- Eingangsdruck 67-80 Bar / Ausgangsdruck 30-40 Bar
- Entfernung zwischen Kompressoren 100 – 600 km

# VERGLEICH DER ENERGIETRANSPORTKAPAZITÄTEN



**Eine Gas-Pipeline ( $\varnothing$  1,20 m) transportiert so viel Energie wie acht Hochspannungsleitungen (mit jeweils 3 GW).**

# AGENDA

1

**Wasserstoff – heute und in Zukunft**

2

**Stationäre Anwendungen von Wasserstoff**

3

**Mobile Anwendungen von Wasserstoff**

# GEBÄUDEENERGIEVERSORGUNG MITTELS BZ-KWK

|                                  | Buderus BLUEGEN BG15         | SenerTec Dachs 0.8                                                     | SOLIDpower BLUEGEN BG15      | Viessmann Vitocalor PT2                                                | Viessmann Vitocalor PA2      | Remeha eLecta 300                                      | Sunfire Sunfire-Home 750     |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------|
| Anlage                           | Brennstoffzellen-Einzelgerät | Brennstoffzelle mit integriertem Brennwertgerät und Warmwasserspeicher | Brennstoffzellen-Einzelgerät | Brennstoffzelle mit integriertem Brennwertgerät und Warmwasserspeicher | Brennstoffzellen-Einzelgerät | Brennstoffzelle mit Zusatzheizgerät und Speichersystem | Brennstoffzellen-Einzelgerät |
| Typ Brennstoffzelle              | SOFC                         | PEMFC                                                                  | SOFC                         | PEMFC                                                                  | PEMFC                        | PEMFC                                                  | SOFC                         |
| Maße nur Grundgerät (T x B x H)  | 800 x 550 x 1.200 mm         | 1.080 x 1.410 x 1.870 mm                                               | 800 x 550 x 1.200 mm         | 595 x 1.200 x 1.800 mm                                                 | 595 x 600 x 1.600 mm         | 1.080 x 410 x 1.870 mm                                 | 600 x 680 x 1.150 mm         |
| Elektrische Leistung             | 1.500 W                      | 750 W                                                                  | 1.500 W                      | 750 W                                                                  | 750 W                        | 750 W                                                  | 750 W                        |
| Thermische Leistung              | 850 W                        | 1.100 W                                                                | 850 W                        | 1.100 W                                                                | 1.100 W                      | 1.100 W                                                | 1.250 W                      |
| Elektrischer Wirkungsgrad        | 55 %                         | 38 %                                                                   | 55 %                         | 38 %                                                                   | 38 %                         | 38 %                                                   | 36 %                         |
| Thermischer Wirkungsgrad         | 33 %                         | 54 %                                                                   | 33 %                         | 54 %                                                                   | 54 %                         | 54 %                                                   | 54 %                         |
| Gesamtwirkungsgrad               | 88 %                         | 92 %                                                                   | 88 %                         | 92 %                                                                   | 92 %                         | 92 %                                                   | 90 %                         |
| Pufferspeicher Heizungswasser    | extern                       | 300 l                                                                  | extern                       | 220 l Trinkwasserspeicher                                              | extern                       | 300 l                                                  | extern                       |
| KfW-Festbetrag                   | 5.700 €                      | 5.700 €                                                                | 5.700 €                      | 5.700 €                                                                | 5.700 €                      | 5.700 €                                                | 5.700 €                      |
| Leistungsabhängiger Zusatzbetrag | 6.750 €                      | 3.600 €                                                                | 6.750 €                      | 3.600 €                                                                | 3.600 €                      | 3.600 €                                                | 1.800 €                      |
| Pauschaler KWK-Zuschlag          | 3.600 €                      | 1.800 €                                                                | 3.600 €                      | 1.800 €                                                                | 1.800 €                      | 1.800 €                                                | 780 €                        |
| Gesamtförderung                  | 16.050 €                     | 11.100 €                                                               | 16.050 €                     | 11.100 €                                                               | 11.100 €                     | 11.100 €                                               | 11.100 €                     |



Buderus BlueGen



SenerTec Dachs



SOLIDpower BlueGen BG-15



Viessmann Vitocalor



Remeha eLecta



Sunfire Home 750

# GEBÄUDEENERGIEVERSORGUNG MITTELS BZ-KWK

## Anwendungsbereiche<sup>2</sup>

- Größere Gebäude i. A.

## Technische Daten<sup>2</sup>

- Erd(Bio-)gas, H<sub>2</sub>, Propan etc.
- Elektr. Leistung: 250 kW (Kombination SOFC + Mikrogasturbine)
- Wärme: 86 kW auf 88 °C (15 t/h Heißwasser oder 80 kg/h Dampf (178 °C))
- Elektr. Wirkgrd. 53 %, gesamt 73 %)
- 1 MW in Planung
- Seit Juni am GWI Essen in Betrieb

Mitsubishi MegaMie



# GEBÄUDEENERGIEVERSORGUNG MITTELS BZ-KWK (INKL. BRANDSCHUTZ)

## Anwendungsbereiche<sup>2</sup>

|                |                 |                 |
|----------------|-----------------|-----------------|
| » Bibliotheken | Museen          | Archive         |
| » Lagerhallen  | IT              | Rechenzentren   |
| » (Kühl)-lager | Chem. Industrie | Energiespeicher |

## Technische Daten<sup>2</sup>

- » Erd(Bio-)gas- und H<sub>2</sub>-Betrieb
- » Elektr. Leistung: 100 kW
- » Wärme: 54 kW auf 62 °C      Kälte: 40 kW
- » Brandschutz: mehrere 1000 m<sup>3</sup> (O<sub>2</sub> ca. 15 Vol.-%)
- » modular erweiterbar

NORDFROST-Halle



N2intelligence BZ-BHKW

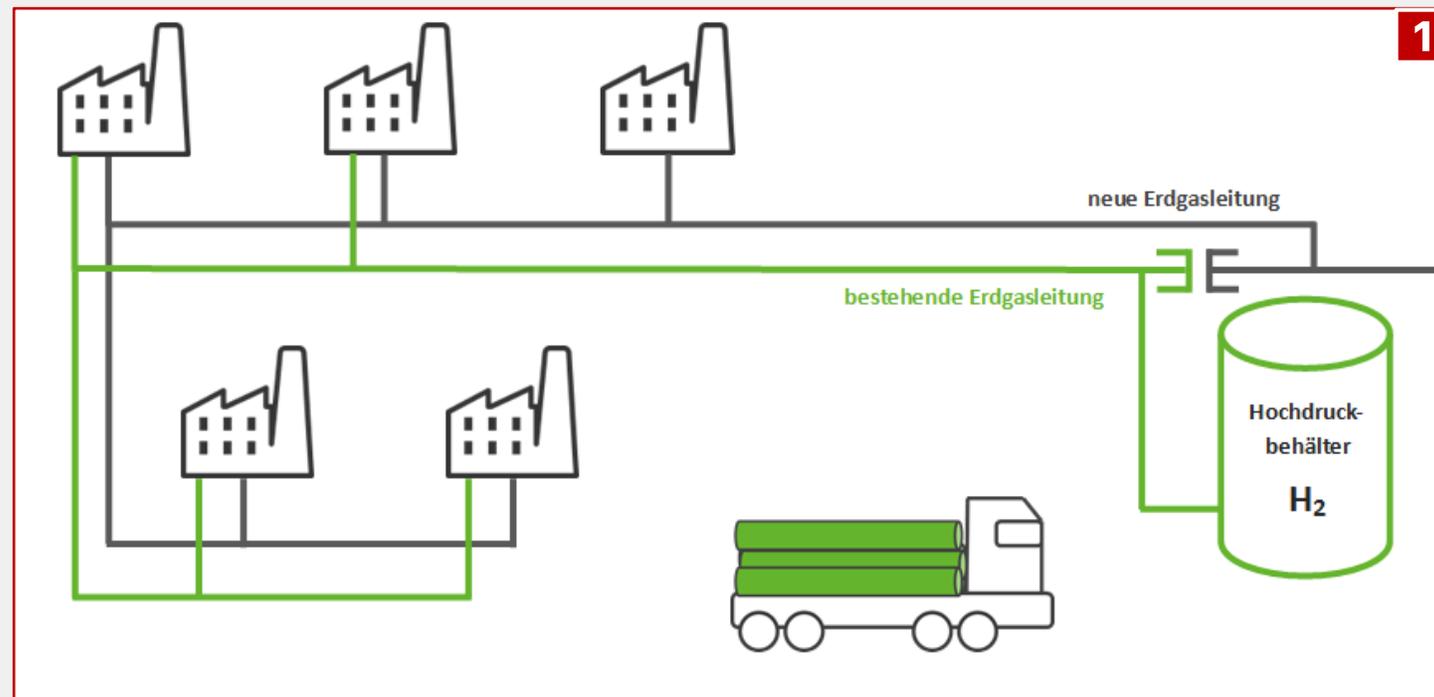


# BEISPIEL: H<sub>2</sub>-VERSORGUNG GEWERBEGEBIET HOLZWICKEDE

## Fakten

- Standort: unmittelbare Nähe zum Dortmunder Flughafen
- Länge: 500 m, MOP 1, DN 150
- Zusätzliche neue Erdgasleitung für Versorgungssicherung und Ergänzung der Heizleistung
- H<sub>2</sub>-Brennwertkessel von remeha 25 kW
- Hochdruckbehälter:
  - DP 40
  - 440 kg Fassungsvermögen
  - Wöchentliche Befüllung von ca. 200 kg geplant
- 4 Gewerbekunden werden umgerüstet (Wärmeversorgung)

## Wasserstoff-Inselnetz-Versorgung



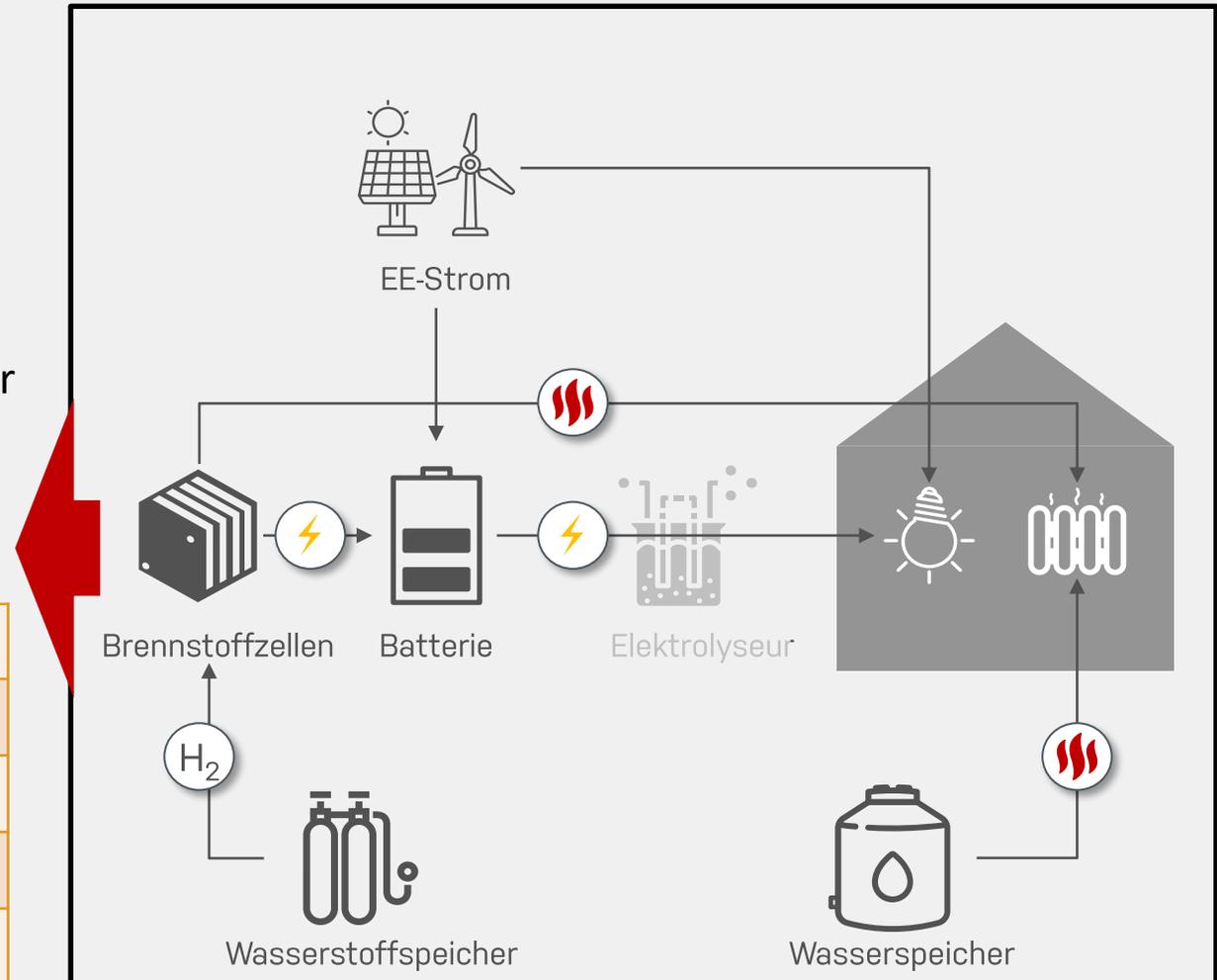
- Umwidmung bestehender Erdgas-Leitungen auf H<sub>2</sub>
- H<sub>2</sub>-Anlieferung per LKW
- Back-Up Erdgasleitung

# AUTARKE GEBÄUDEENERGIEVERSORGUNG



- Simultane Produktion von Strom und Wärme
- Notstromfähig
- Kompakte Bauweise
- Modular erweiterbar
- Fernüberwachung und -support

|                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| Elektrische Leistung     | 5 kW <sub>el</sub>   |
| Thermische Leistung      | 9,5 kW <sub>th</sub> |
| Wasserstoffqualität      | 5.0                  |
| Wasserstoffverbrauch     | 70 SLPM              |
| Leitfähigkeit Kühlwasser | 10 µS/cm             |



# ANWENDUNGEN VON H<sub>2</sub> IN DER INDUSTRIE



## Reaktant oder Prozessgas



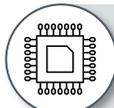
Düngemittelherstellung Ammoniak & Stickstoff



Basischemikalien: Methanol, Ethylen etc.



Erdöl-Raffination



Trägergas für Aktivgase in der Elektrotechnik



Reduktionsmittel in der Metallurgie



Synthetische Kraftstoffe



## Brennstoff



Autogenes Schweißen



Brennstoffzellen (Rückverstromung, Fahrzeuge etc.)



Heiz- und Prozesswärme (z. B. Öfen)

# AGENDA

1

**Wasserstoff – heute und in Zukunft**

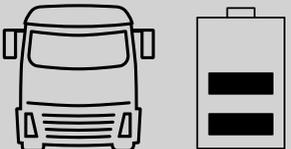
2

**Stationäre Anwendungen von Wasserstoff**

3

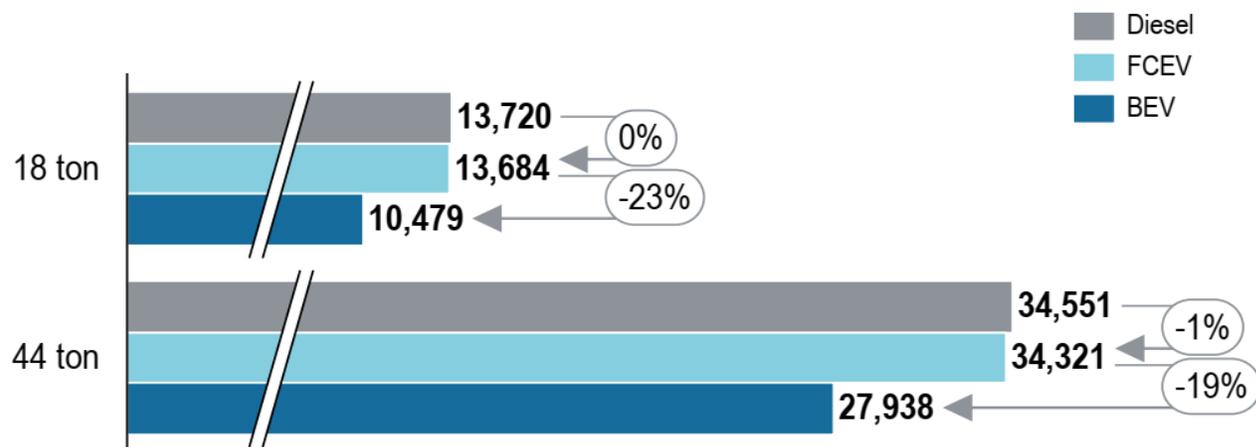
**Mobile Anwendungen von Wasserstoff**

# VERGLEICH DER KRAFTSTOFFSYSTEME

|                | Antriebsart                                                                                   | Benötigte Energiemenge im Tank                               | Verbrauch je 100 km | Tanksystemleistung                                         | Reichweite bei 5 min. tanken |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Diesel         | <br>500 km   | 2.011 kWh<br>(200 l; 180 kg)                                 | 40 l                | Tankstelle<br>27.000 kW<br>(ca. 50 l / min)                | 625 km                       |
| H <sub>2</sub> | <br>500 km   | 1.332 kWh<br>(40 kg H <sub>2</sub> ; 1,1 t inkl. Drucktanks) | 8 kg                | HRS<br>10-12 MW<br>(4-6 kg / min)                          | 250 km                       |
| Batterie       | <br>560 km | 900 kWh<br><b>(5.440 kg Li-Ion)</b>                          | ca. 160 kWh         | Ladestation<br>0,12 MW DC /<br>1 MW DC<br>(2 / 17 kWh/min) | 6 / 53 km                    |

# NUTZLASTVERGLEICH BATTERIE- U. BZ-LKW GGÜ. DIESEL

Nutzlastvergleich<sup>1</sup>



### Schlussfolgerungen

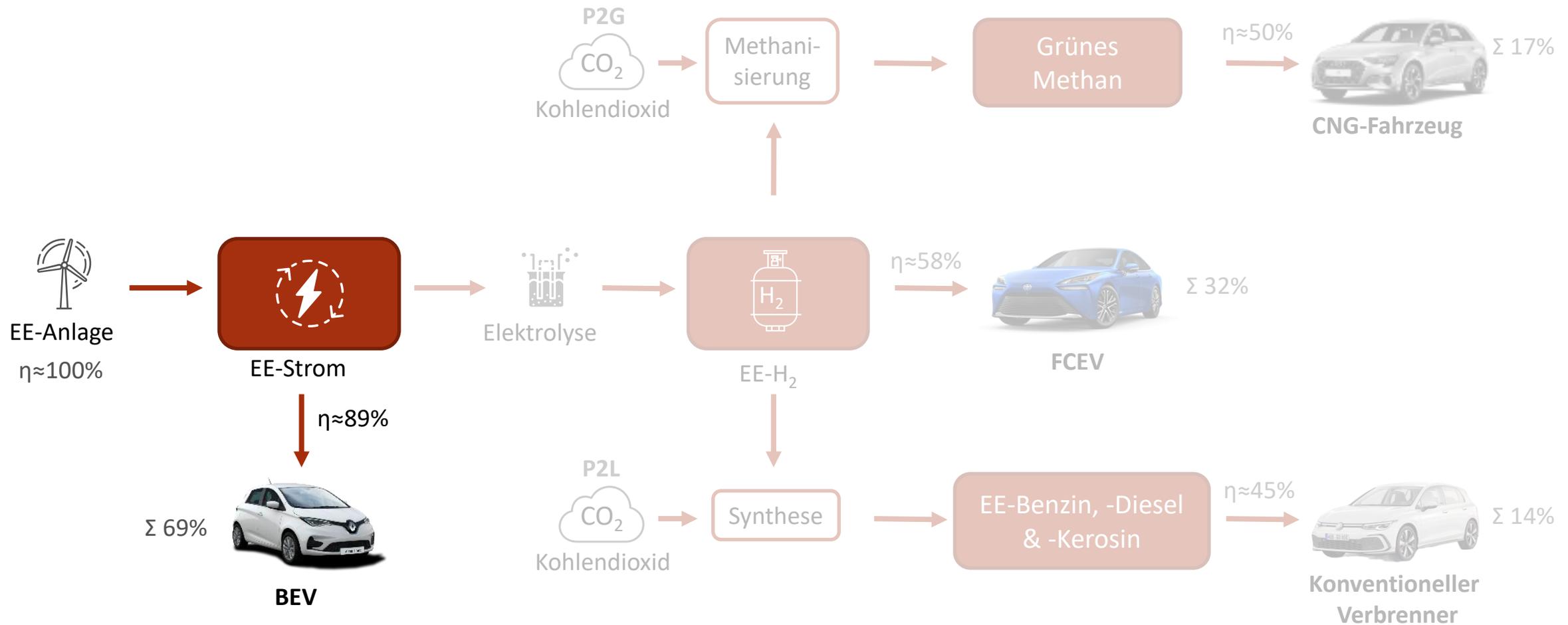
- Bei großen Reichweiten sind Brennstoffzellen-LKW aufgrund der geringeren Nutzlastverringerung wirtschaftlicher
- Bei gleicher Transportmenge sind mehr batterieelektrische LKW erforderlich

➤ Höheres Verkehrsaufkommen

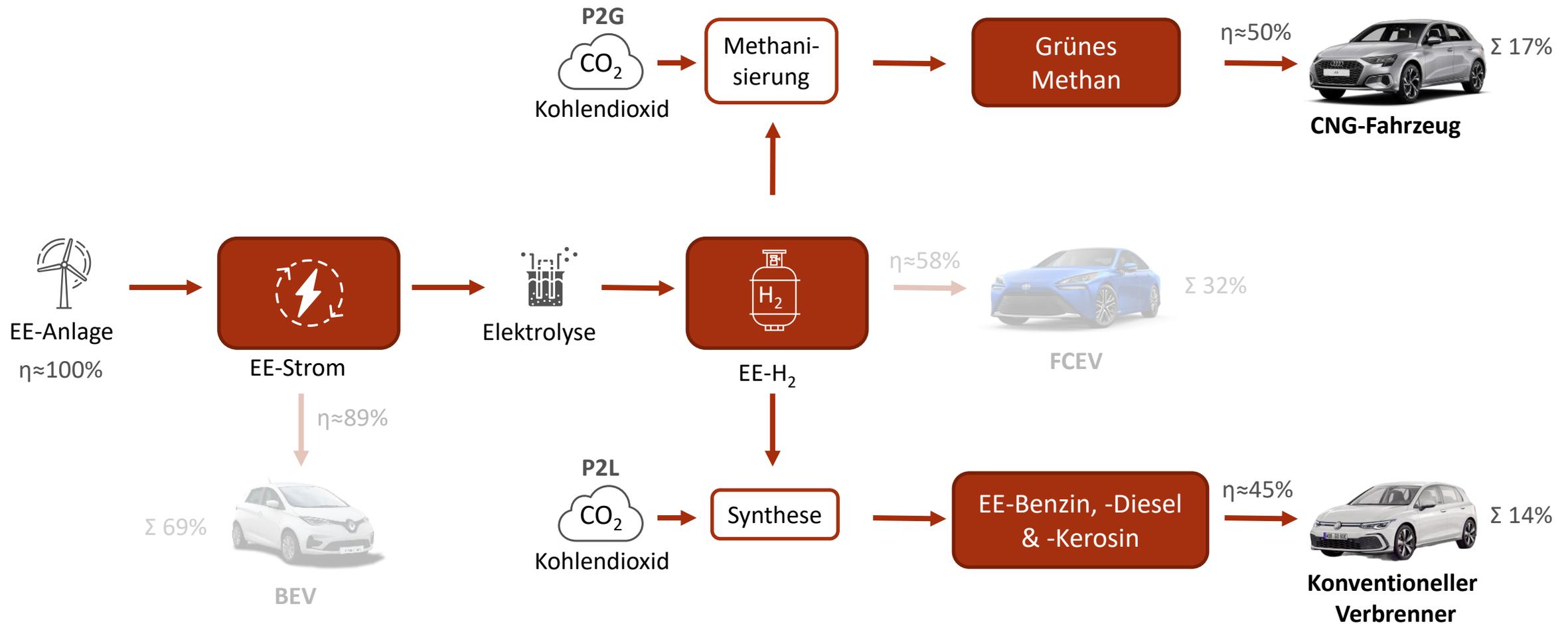
Battery Electric Vehicle
  Fuel Cell Electric Vehicle
  Diesel

<sup>1</sup> US Department of Energy 2016 | Annahme: Reichweite 800 km

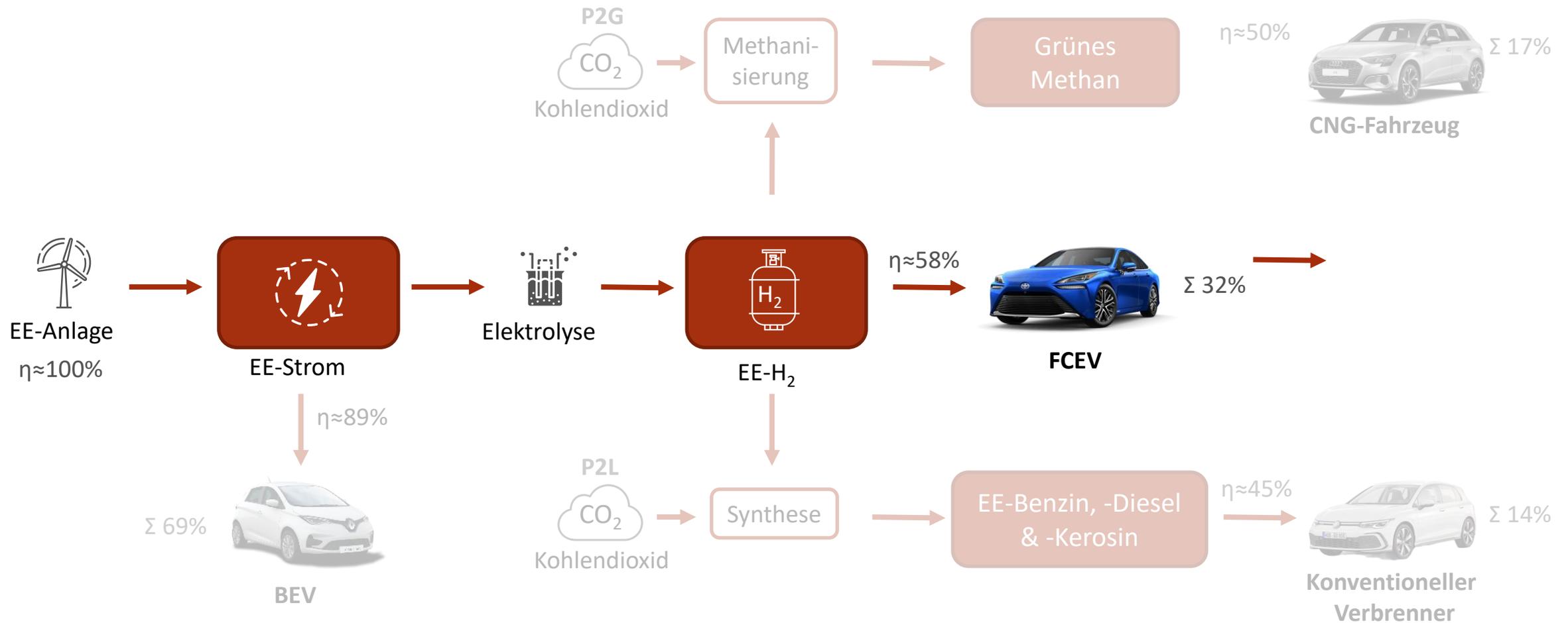
# WIRKUNGSGRADKETTE: BATTERIE, H<sub>2</sub> & CO.



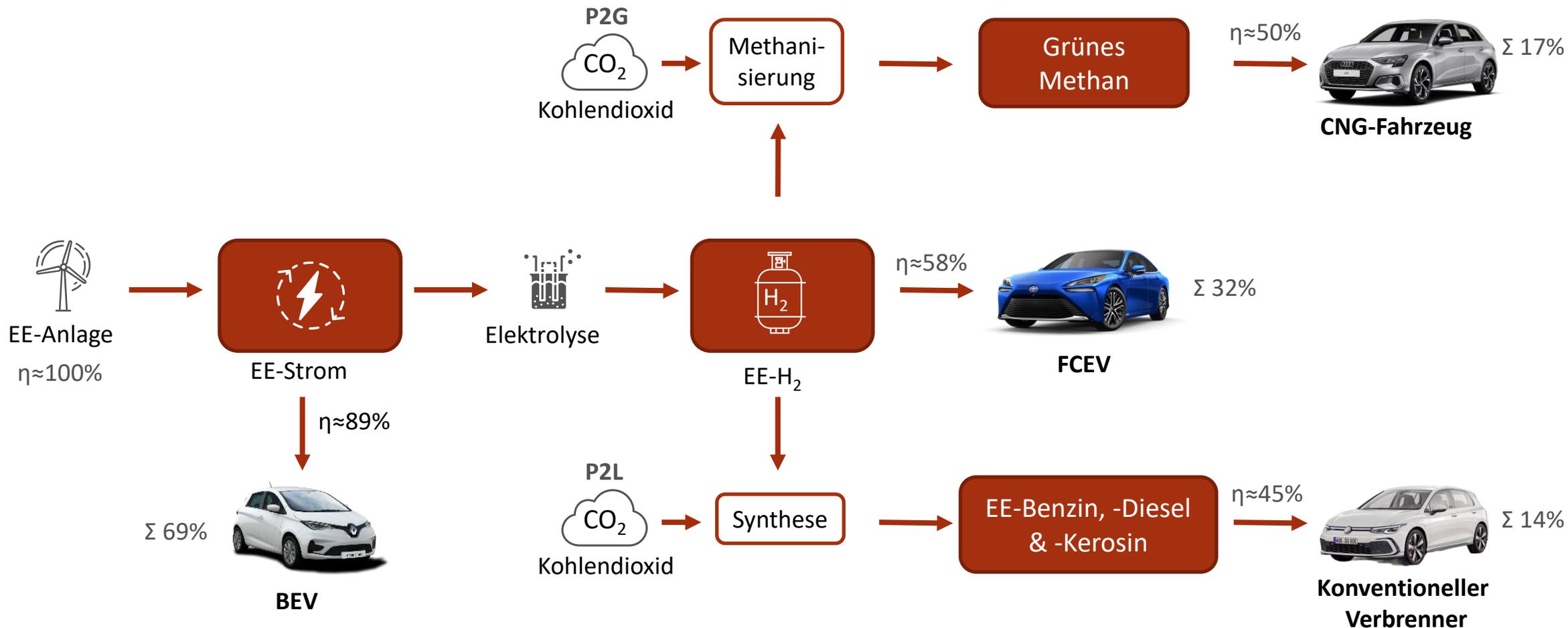
# WIRKUNGSGRADKETTE: BATTERIE, H<sub>2</sub> & CO.



# WIRKUNGSGRADKETTE: BATTERIE, H<sub>2</sub> & CO.



# WIRKUNGSGRADKETTE: BATTERIE, H<sub>2</sub> & CO.





# PKW MIT H<sub>2</sub> AKTUELL ZWEI FAHRZEUGE IN SERIENFERTIGUNG



 Toyota - Mirai 2. Generation

 Hyundai - Nexo

 650 km

 756 km

 5,6 kg / 0,8 kg pro 100 km

 6,3 kg / 0,8 kg pro 100 km

 63.900 € - BAFA (3.000 €)

 77.200 €

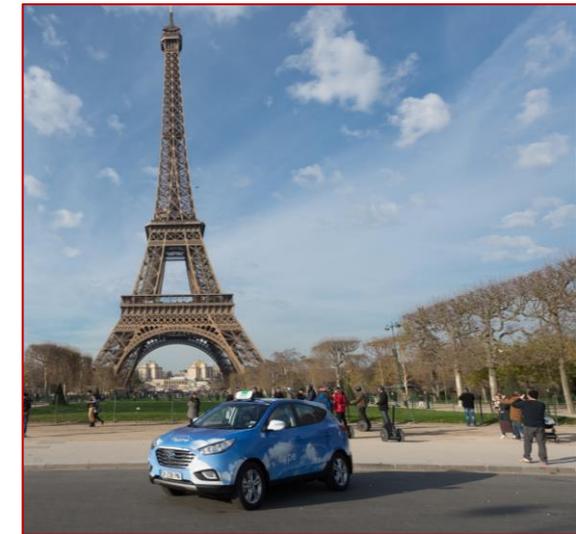
 Seit März 2021 in DE

 Seit Ende 2019



## Société du Taxi Electrique Parisien (STEP)

Brennstoffzellen-Taxis in Paris



 > 100 Fahrzeuge im Betrieb

 > 500 km am Tag

# SCHWERE UND LEICHTE NUTZFAHRZEUGE MIT H<sub>2</sub> VERSCHIEDENER HERSTELLER

L-LKW



LKW



1 Renault | 2 Stellantis | 3 Holthausen | 4 Quantron | 5 Hyundai | 6 Hyzon | 7 Daimler | 8 Enginius | 9 Clean Logistics | 10 Paul Hydrogen Power | Iveco Nikola

# SONDERFAHRZEUGE

Müllfahrzeuge



Faun



Hytrucks / Geesinknorba



HS-Fahrzeugbau

Kehrmaschinen /  
Hakenfahrzeuge



Faun



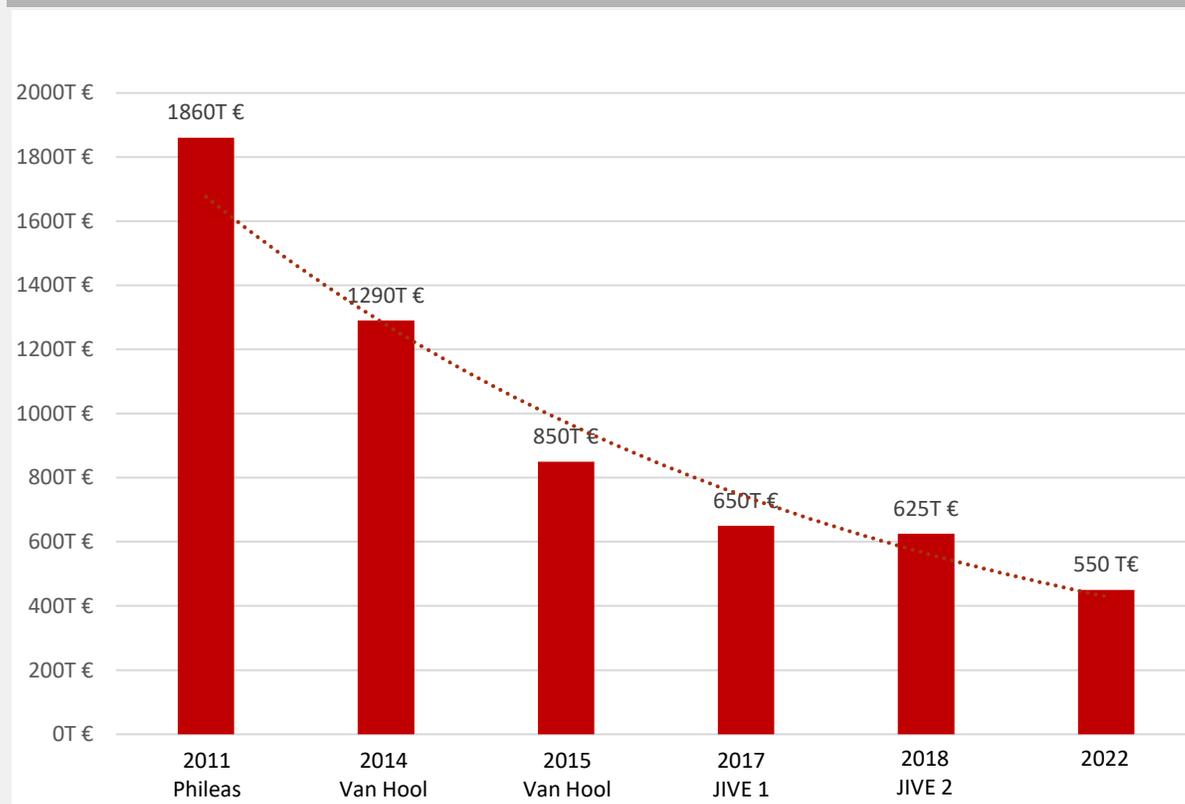
Holthausen



Palfinger

# BRENNSTOFFZELLEN-BUSSE

## Preisentwicklung von 12 m H<sub>2</sub>-Bussen



## Aktuelle Modelle



Solaris



Van Hool



Skoda



Caetano



Wright Bus



Rampini

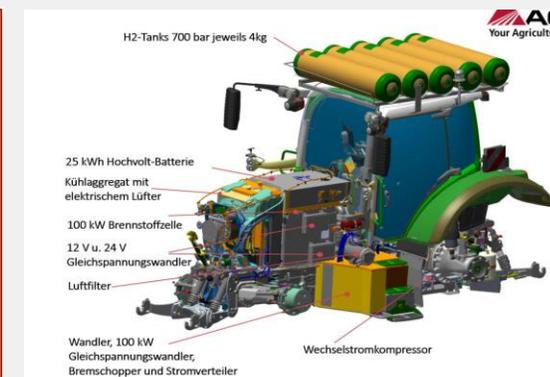


Clean Logistics



Karsan

# LAND- UND BAUMASCHINEN



 Hyundai Motors und Hyundai Mobis

 Liebherr 916

 EOX 175

 Fendt

 Serienproduktion ab 2023 geplant

 Prototyp Januar 2023 vorgest.

 In Entwicklung

 In Entwicklung / H2AGRAR

 Nicht näher bekannt

 Brennstoffzelle von zepp.solutions (NL)

 Brennstoffzelle / Batterie

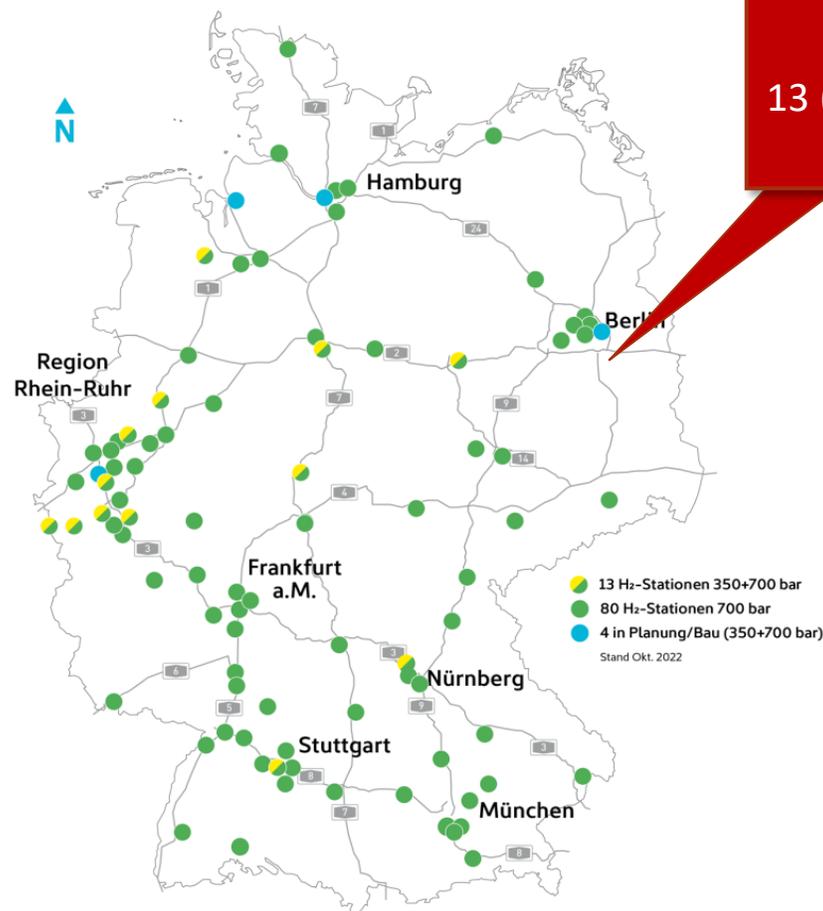
 Brennstoffzelle

# TANKSTELLEN-INFRASTRUKTUR

Entwurf der Alternative Fuel Infrastructure Regulation – AFIR:

- Alle 100 km eine H2-Tankstelle bis 2028 (urspr. alle 150 km bis 2030) entlang der sog.. TEN-T Korridore → ca. 140 Tankstellen entlang der 14.000 Autobahnkilometer
- Kapazität 6 t/Tag

## H2 MOBILITY Netzwerk



80 öffentliche  
700 bar Tankstellen zzgl.  
13 (+4) 350/700 bar Tankstellen  
( Stand Oktober 2022)

Quelle: H2 Mobility

# FAZIT

- Wasserstoff wird elementarer Bestandteil des künftigen Energiesystems
- Erzeugung überwiegend mittels Elektrolyse, aber auch alternative Verfahren möglich
- Deutschland kann seinen Wasserstoffbedarf nicht selbst decken, sondern ist auf Importe angewiesen
- Breitgefächertes Anwendungsspektrum
  - Stationär zur Gebäudeenergieversorgung oder für Industrieprozesse als Erdgasersatz
  - Mobil in Brennstoffzellenfahrzeugen, die im Vgl. zu Batteriefahrzeugen größere Reichweiten, höhere Nutzlasten und kürzere Betankungszeiten aufweisen und auch im Winter keine Leistungseinbußen haben

# KONTAKT



**Dr. Frank Koch**  
Senior Consultant

Tel.: +49 173 724 1853

E-Mail: [koch@energy-engineers.de](mailto:koch@energy-engineers.de)

