(Foto: Hyundai)

Die klimafreundliche Zukunft der Mobilität mit Wasserstoff

Aktionswochen E-MOB 2020 vom 10.02 – 09.03.2020
im Windstützpunkt Uffenheim am 05.03.2020

Prof. Dr. Jörg Kapischke | Hochschule Ansbach

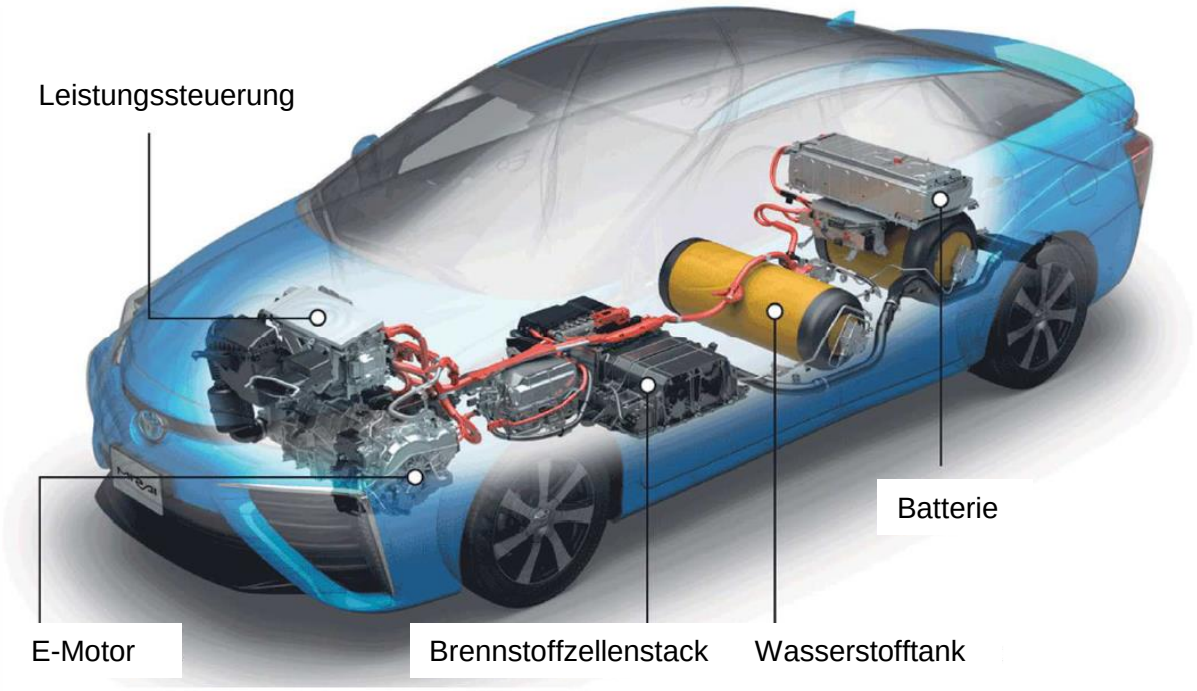
HOCHSCHULE
ANSBACH

1. Einleitung
2. Gewichte und Reichweiten
3. Treibhausgasemissionen im Vergleich
   - Unterschiedliche Stromquellen spielen eine wichtige Rolle
   - Unterschiedliche Fahrzeuge im Vergleich
4. Kosten
5. Infrastruktur
6. Zukünftige Wasserstoffmobilität mit Potenzial
   - Bus
   - LKW
   - Zug
7. Fazit

Stärken und Schwächen von Elektrofahrzeugen (BEV und FCEV)

- Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) weisen einen höhere Effizienz auf, solange sie aufgrund des Battteriegewichts nicht zu schwer sind.
- Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) sind deshalb besser für leichte Fahrzeuge und für den Betrieb über kürzere Entfernungen geeignet.
- Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV) können mehr Energie im Verhältnis zu ihrem Gewicht speichern und schneller betankt werden.
- Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge (FCEV) sind effizienter für Anwendungen, die große Reichweiten erfordern und Fahrzyklen mit minimalen Pausenzeiten.

- Das Brennstoffzellenfahrzeug ist ein Elektroauto, weil der Motor durch Strom angetrieben wird.



Brennstoffzellenstack

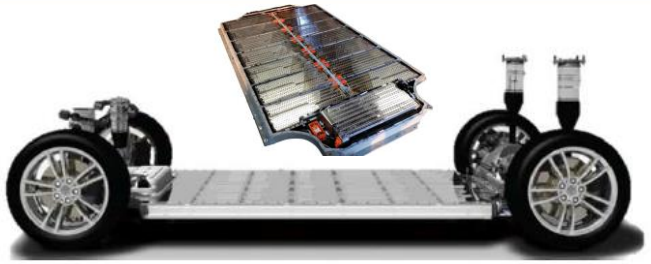
Wasserstofftanksystem

Quelle: Dr. Geert Tjarks I NOW GmbH, Toyota Outline of the Mirai

- Bei hohen Reichweiten benötigt man mehr Energie.
- Mehr Energie erfordert mehr Batterien und damit mehr Gewicht.
- Eine hohes Batteriegewicht führt zu einem höheren Energiebedarf gemessen in kWh/100 km.
- Wasserstoff bei 700 bar Speicherdruck und der dazugehörige Wasserstofftank sind bei großen Energiemengen leichter als Batterien mit vergleichbarem Energieinhalt.
- Deshalb benötigt ein batterieelektrisches Fahrzeug viel mehr elektrischen Strom als ein Brennstoffzellenfahrzeug bei großen Reichweiten.

Tesla Model S (90 kWh)	Toyota Mirai (5 kg H_2)
Reichweite	**Reichweite**
560 km	500 km
Ladezeit	**Betankungszeit**
60 min (120 kW)	3 min (1,5 kg/min)

Quelle: Dr. Geert Tjarks I NOW GmbH

Tesla Model S (90 kWh)	Toyoto Mirai (166.5 kWh) 5 kg H_2
	
Speichervolumen	**Speichervolumen**
380 Liter	180 Liter (+ 320 Liter FC)
Speichergewicht	**Speichergewicht**
590 kg	100 kg (+ 230 kg FC)

Quelle: Dr. Geert Tjarks I NOW GmbH

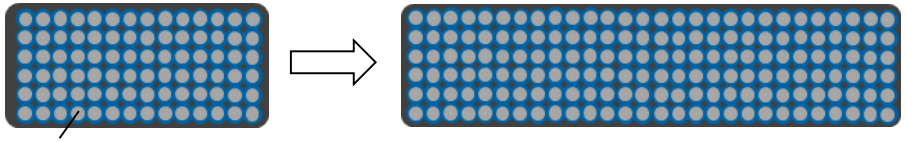
Batteriefahrzeug

BEV

Tesla Model S*

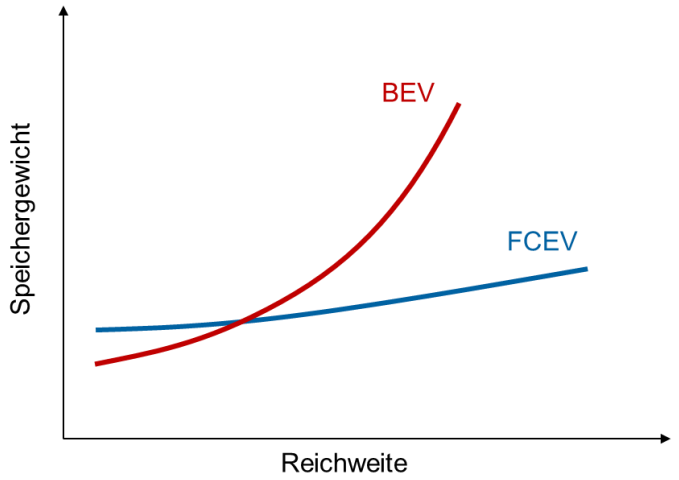
380 l / 590 kg / 90 kWh_{el}

760 l / 1180 kg / 180 kWh



Batteriezelle

Energiedichte
Li-Ionen Akku
0,15 kWh_{el} / kg



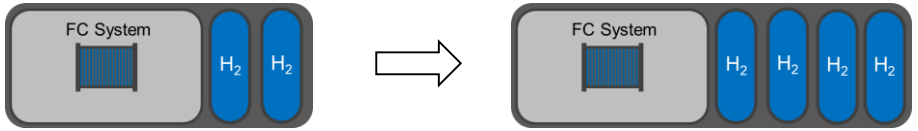
Brennstoffzellenfahrzeug

FCEV

Toyota Mirai*

500 l / 330 kg / 167 kWh_{th}

680 l / 430 kg / 334 kWh



H_2 Tank: 180 l / 100 kg

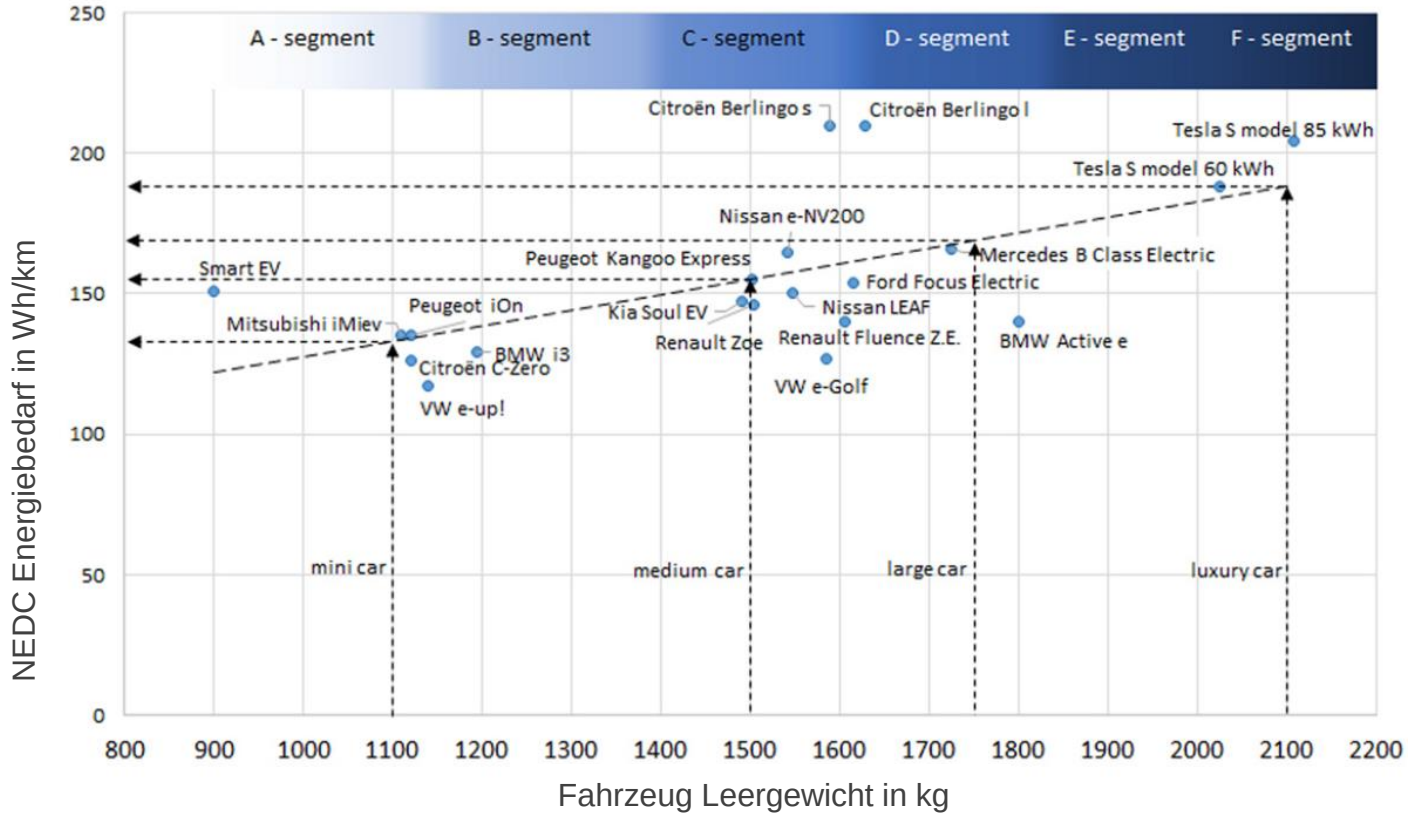
Energiedichte
700 bar H_2-Tank IV
1,67 kWh_{th} / kg

*Quelle: Dr. Geert Tjarks I NOW GmbH

HOCHSCHULE
ANSBACH

Kilometerbezogener Energiebedarf verschiedener Elektrofahrzeuge

- Je größer das Leergewicht des Elektrofahrzeuges desto höher der Energiebedarf.
- Je größer der Energiebedarf desto höher der Kohlendioxidausstoß (D-Strommix).

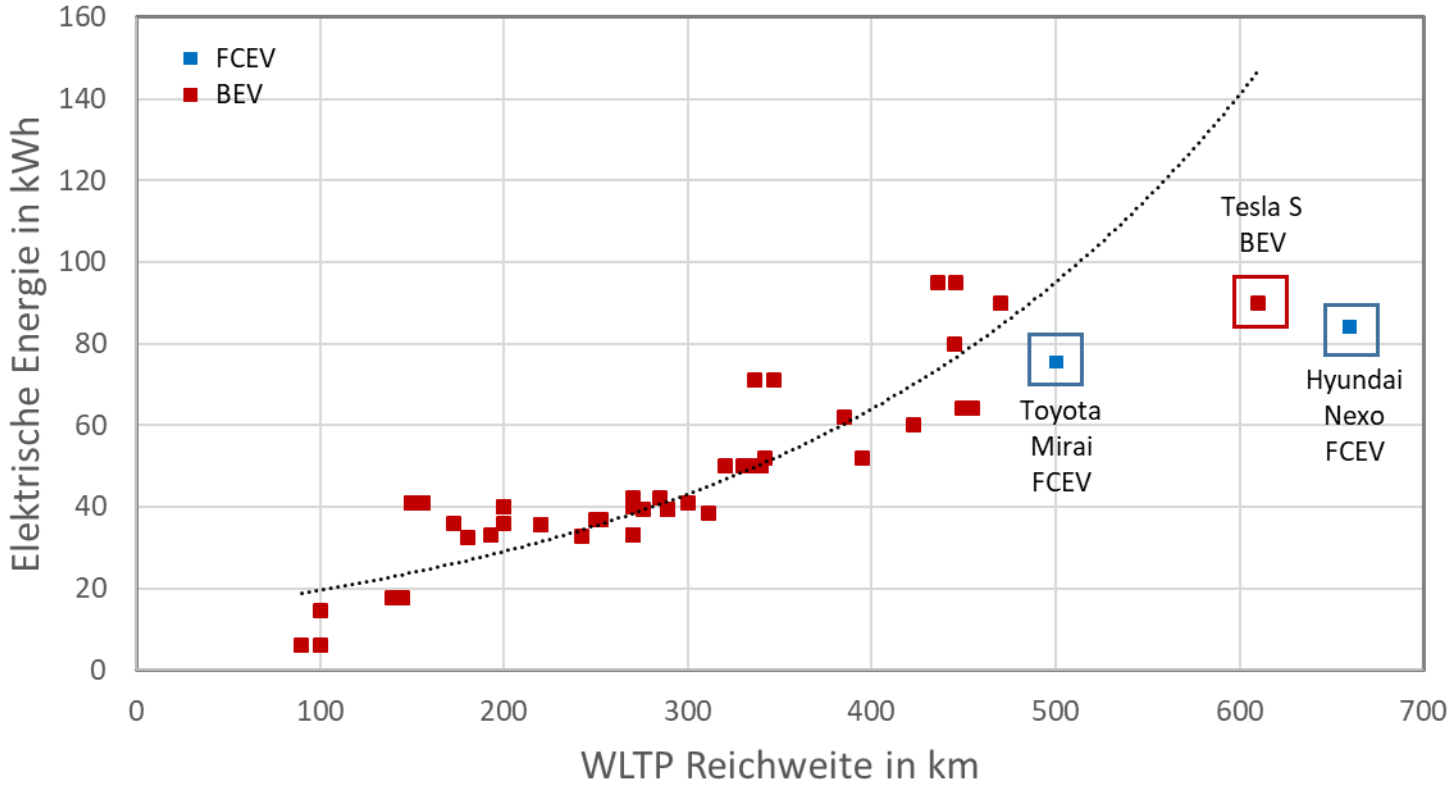


NEDC Energiebedarf von Elektrofahrzeugen als Funktion des Fahrzeug-Leergewichts

Quelle: The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles, ellingsen at all, 2016

Elektrische Energie von Batterie-und Brennstoffzellenfahrzeugen 2020

- Eine Vergrößerung der Batterie (Lithium-Ionen) verlängert die Reichweite.
- Das Batteriefahrzeug wird mit zunehmenden Gewicht ineffizient.



Quelle: Marktübersicht: Liste der Elektroautos im Jahr 2020, greengear.de

3. Treibhausgasemissionen im Vergleich

Emissionen für 2020-2030 bei Herstellung und Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H_2-Tank

Brennstoffzellenfahrzeug FCEV

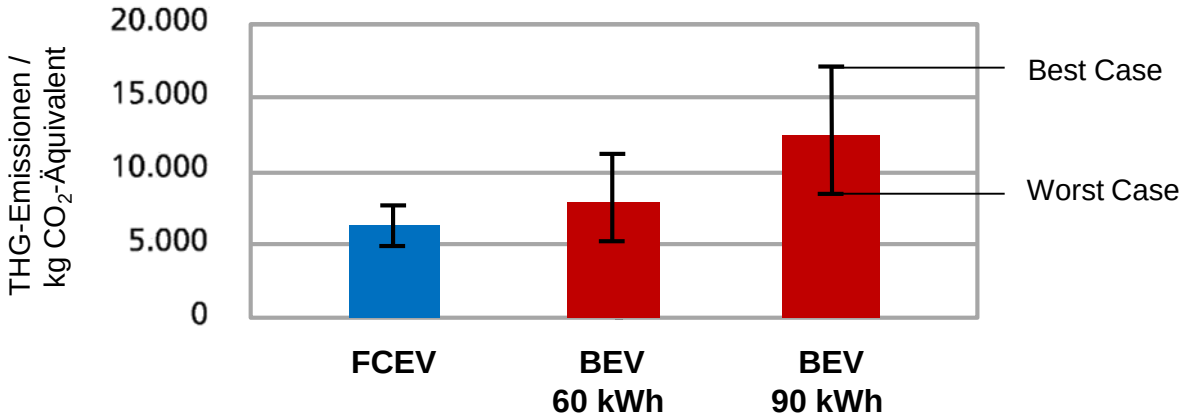
Hyundai Nexo (186.5 kWh) 5.6 kg H_2

Reichweite WLTP 660 km

Batteriefahrzeug BEV

Tesla Model S (90 kWh)

Reichweite WLTP 610 km

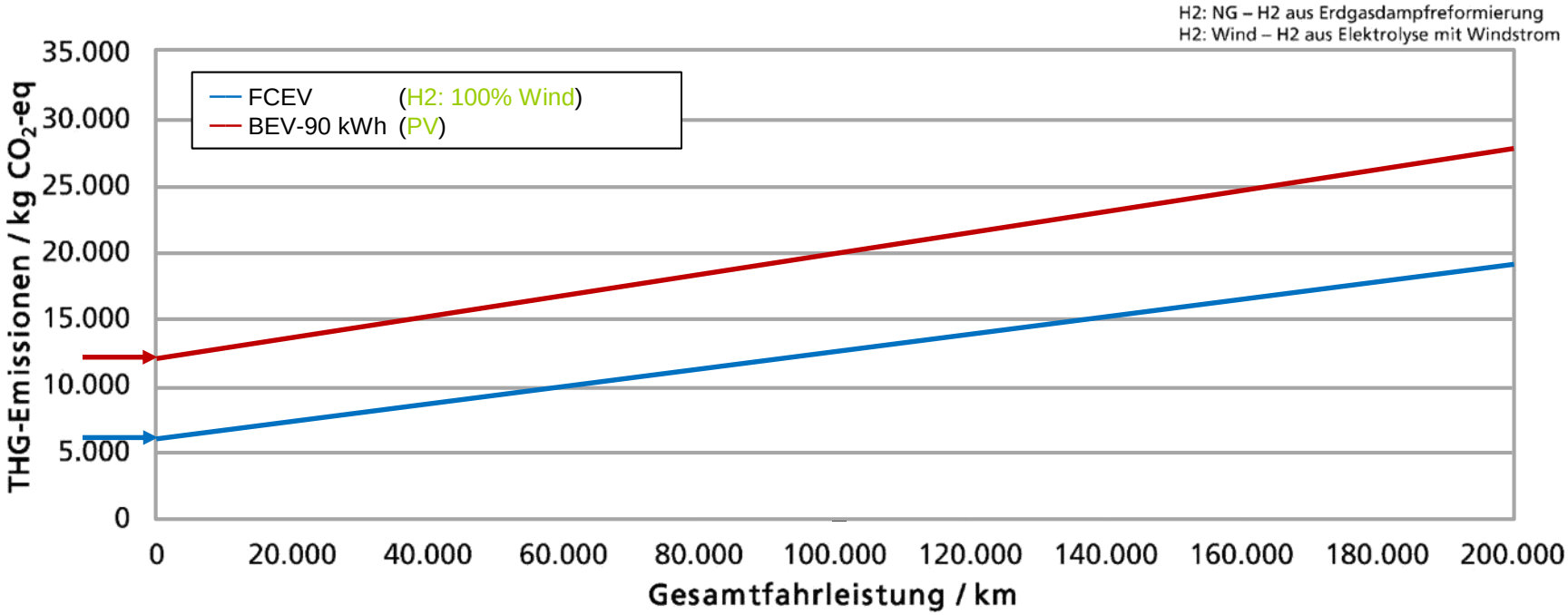


Quelle: André Sternberg, Christoph Hank und Christopher Hebling: Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweite über 300 km. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 13.07.2019

3. Treibhausgasemissionen im Vergleich

Emissionen für 2020-2030 bei Herstellung und Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H_2-Tank

Strom aus Wind: 11 g CO_2/kWh
Strom aus Photovoltaik: 48 g CO_2/kWh
Strommix Deutschland: 421 g CO_2/kWh
Wasserstoff aus Erdgas:10,6 g CO_2/g H_2

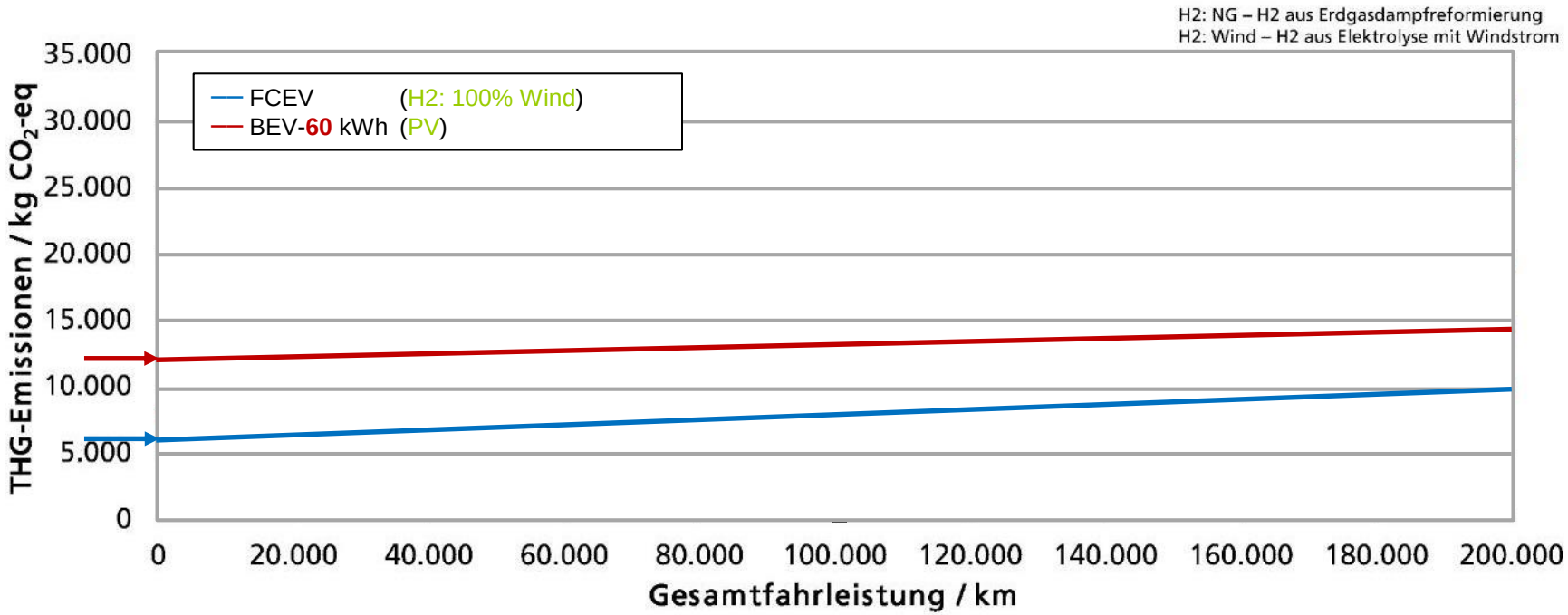


Quelle: André Sternberg, Christoph Hank und Christopher Hebling: Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweite über 300 km. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 13.07.2019

3. Treibhausgasemissionen im Vergleich

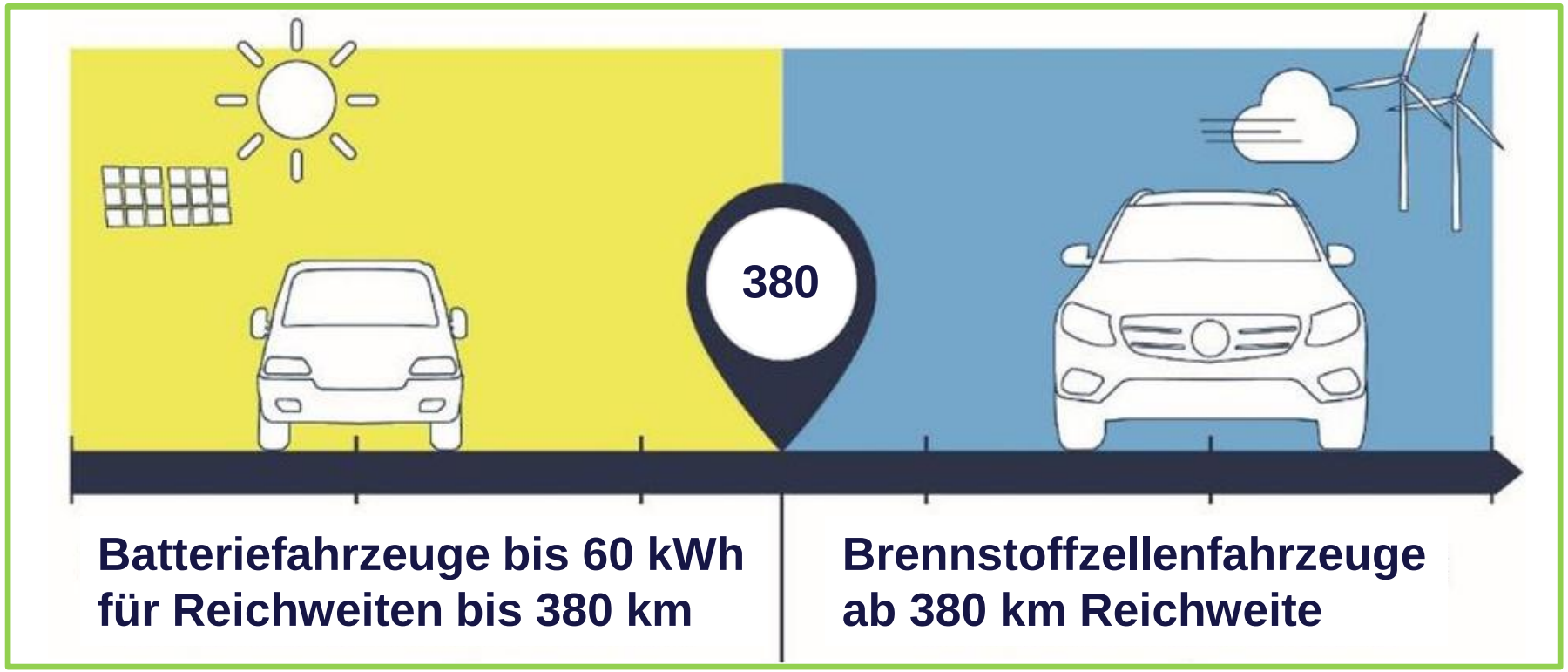
Emissionen für 2020-2030 bei Herstellung und Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H_2-Tank

Strom aus Wind: 11 g CO_2/kWh
Strom aus Photovoltaik: 48 g CO_2/kWh
Strommix Deutschland: 421 g CO_2/kWh
Wasserstoff aus Erdgas:10,6 g CO_2/g H_2



Quelle: André Sternberg, Christoph Hank und Christopher Hebling: Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweite über 300 km. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 13.07.2019

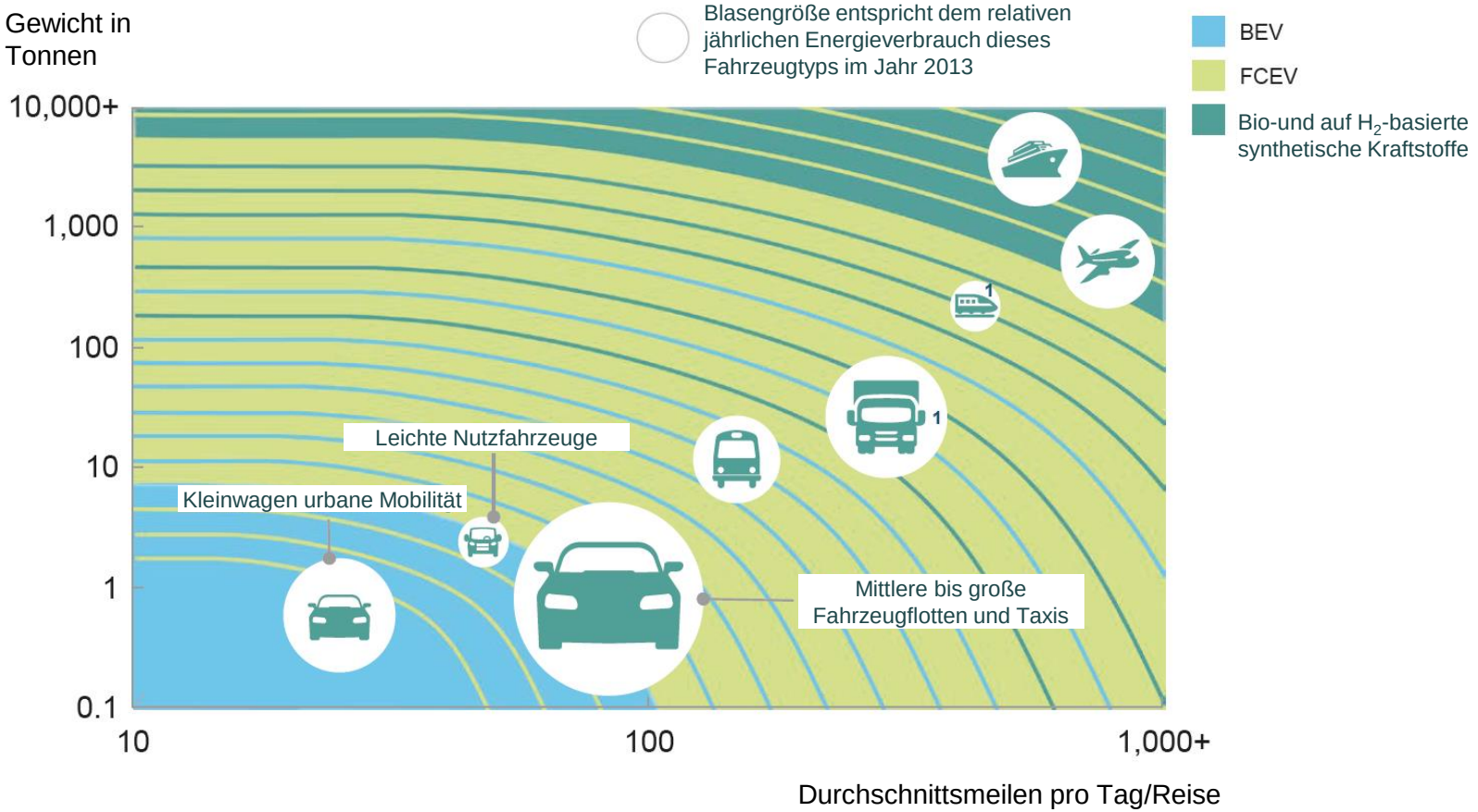
Ab einer Reichweite von 380 km sind Pkw mit **Wasserstoff und Brennstoffzelle klimafreundlicher** als Batteriefahrzeuge.



Quelle: Bild H2 Mobility 2019

Gewichte und Reichweiten unterschiedlicher Fahrzeuge

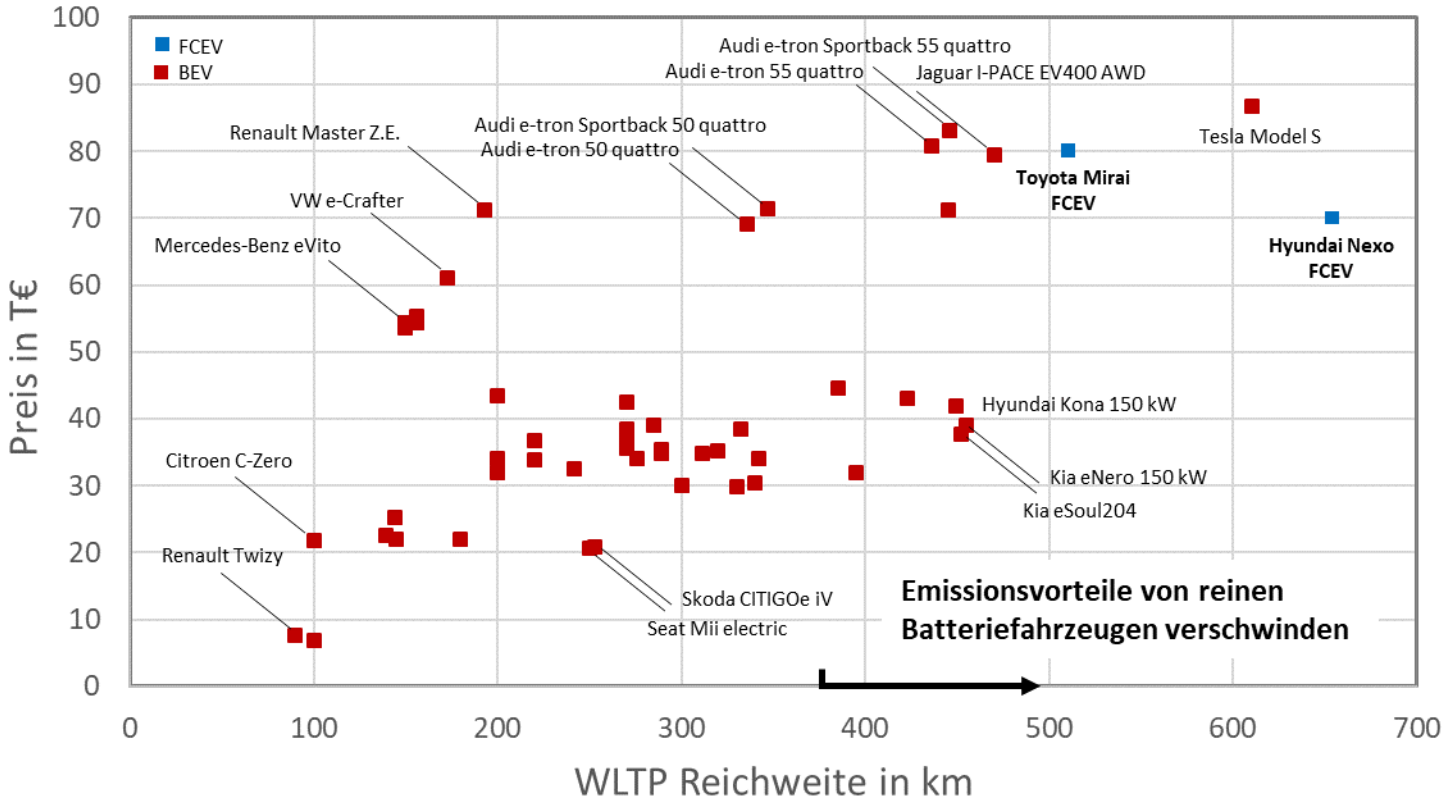
- Nicht nur das **Gewicht**, sondern auch die durchschnittlichen **Reichweiten** pro Tag unter Berücksichtigung des **Antriebsystems** (Batterie, Brennstoffzelle, synthetische Kraftstoffe) beeinflussen den Kohlendioxidausstoß.



Quelle: How hydrogen empowers the energy transition, Hydrogen Council January 2017

Preis von Batterie-und Brennstoffzellenfahrzeugen 2020

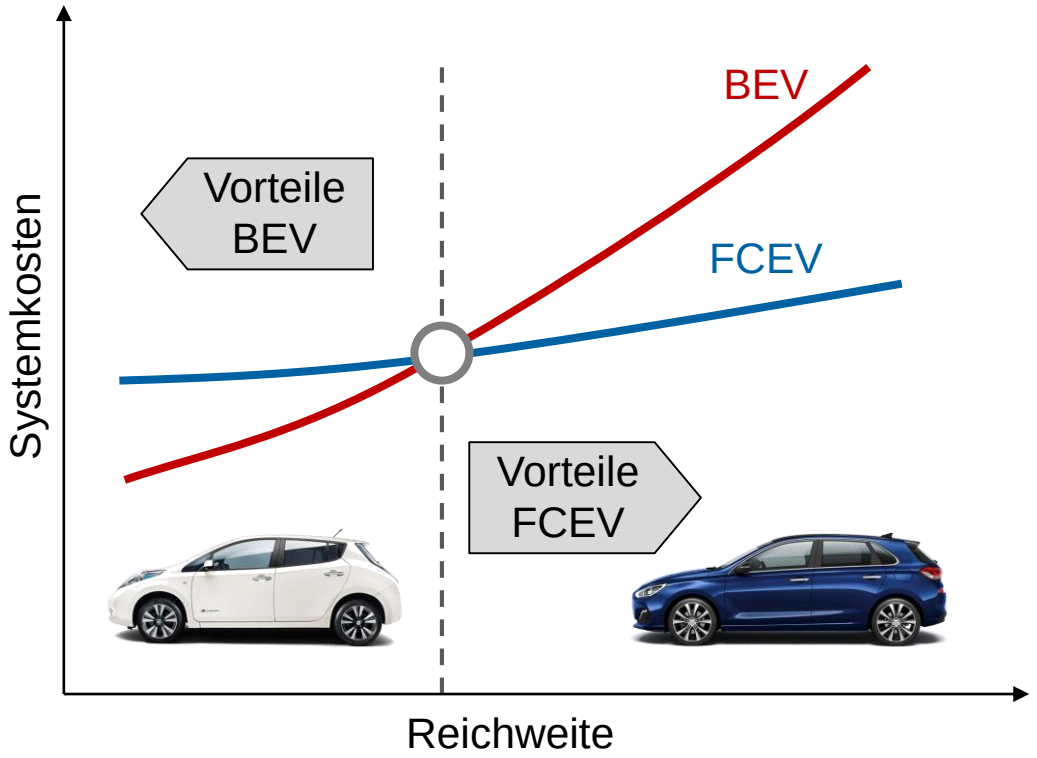
- Die Investitionskostenvorteile für Brennstoffzellenfahrzeuge überwiegen ab Reichweiten von 600 Kilometern.



Quelle 1: https://www.greengear.de/vergleich-brennstoffzellenautos-fuel-cell-fcev/
Quelle 2: https://www.mobile.de/magazin/artikel/wasserstoffautos-kaufen-das-sind-die-modelle-auf-dem-markt--3702#hyundai-nexo-technische-daten

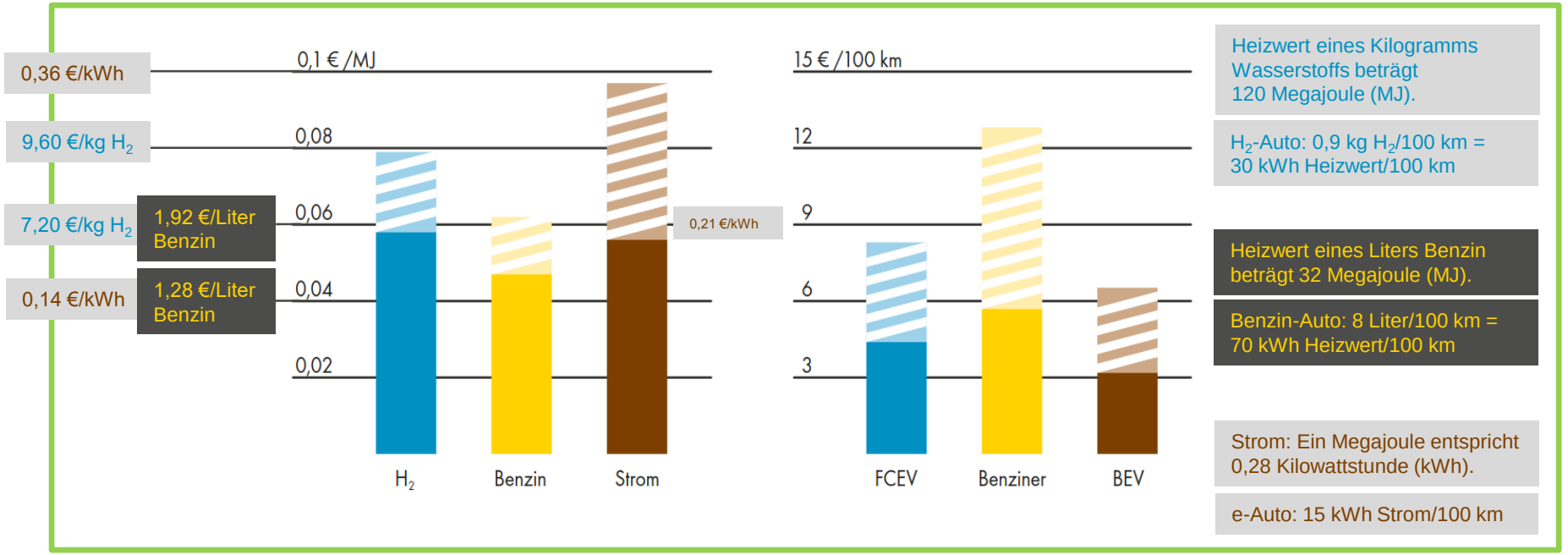
Systemkosten Batterie-/Brennstoffzellenfahrzeuge

- Die Systemkosten von Brennstoffzellenfahrzeugen verringern sich im Vergleich zu Batteriefahrzeugen mit zunehmender Reichweite.



Quelle: Dr. Geert Tjarks | NOW GmbH

- Preis bezogen auf die Energie für Benzin ist am geringsten.
- Weil der Otto-Motor über den geringsten Wirkungsgrad verfügt, kehren sich die Kosten bezogen auf die Fahrleistung um.



Quelle: Dr. Adolf, Jörg; Dr. Balzer, Christoph H.; Dr. Louis, Jurgen; Dipl. Ing. Schabla, Uwe; Prof. Dr. Fischedick, Manfred; Dr. Arnold, Karin et al. (2017): Energie der Zukunft ? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzellen und H2. Hg. v. shell Deutschland. Hamburg.

- Bei günstigeren Anschaffungskosten für den Toyota Mirai und den hier unterstellten Energiekosten ist bereits heute von annähernder Kostenparität mit dem Tesla S 75 auszugehen.

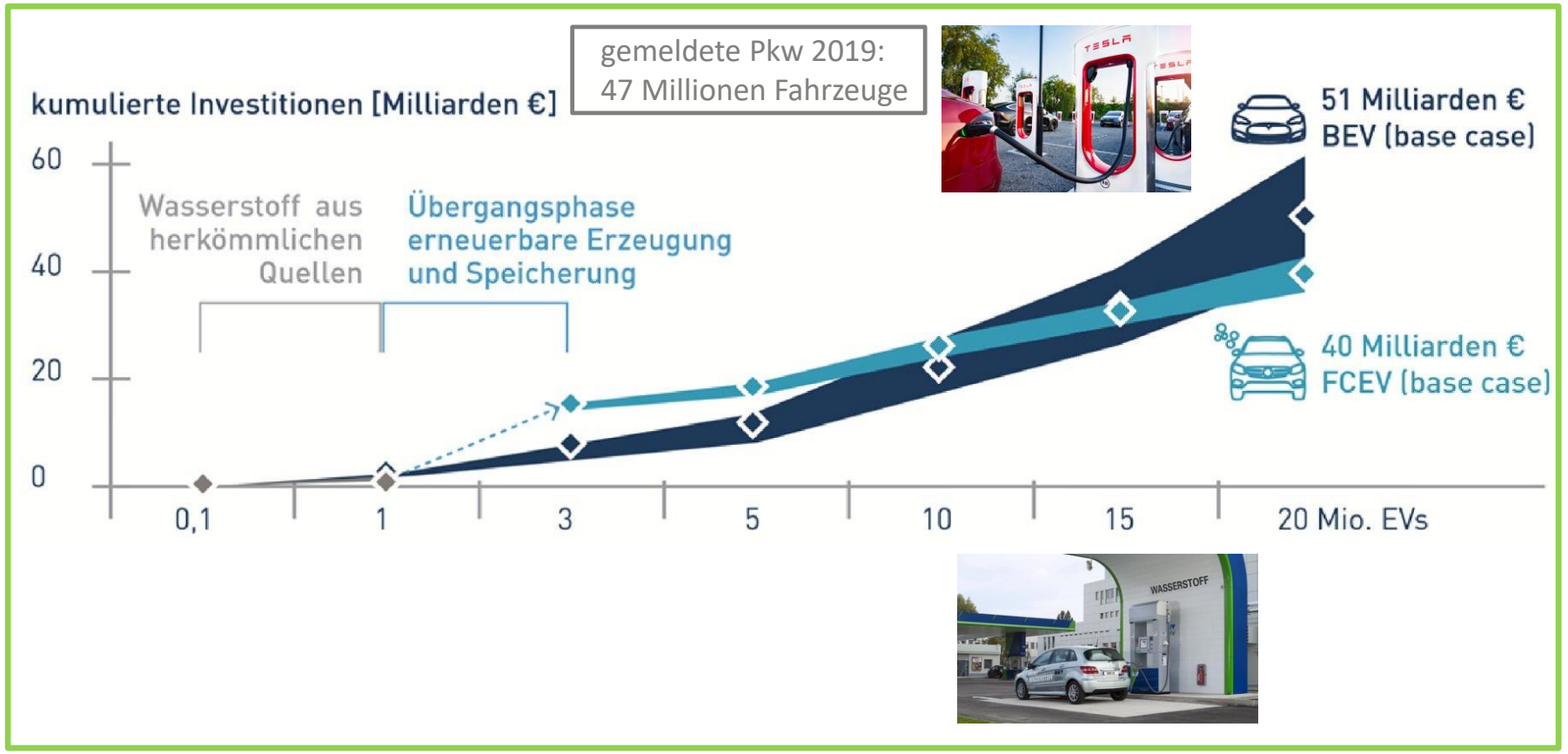
Wasserstoffpreis: 9,50 Euro/kg = 0,285 Euro/kg
Strom: 0,296 Euro/kWh

Vergleich Jahreskosten von FCEV und BEV (Quelle: Fraunhofer ISE)

	Anschaffung in €	Abschreibung (10 Jahre) in €	Energiekosten in €/kWh	Verbrauch in kWh je 100 km	Energiekosten (10.000 km) in €	Kosten pro Jahr in €
Toyota Mirai	78.600	7.860	0,285 (H_2)	25,308 (H_2)	722	8.582
Toyota Mirai (preisreduziert)	71.999	7.200	0,285 (H_2)	25,308 (H_2)	722	7.922
Tesla S 75	71.999	7.200	0,296 (el.)	18,500 (el.)	548	7.748
Nissan Leaf	31.950	3.195	0,296 (el.)	14,600 (el.)	432	3.627

Quelle: Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge, VDI/VDE-Studie, Mai 2019
Bedeutung für die Elektromobilität

- Bei einer hohen Marktdurchdringung (20 Mio. Fahrzeuge) liegen die Investitionen für eine Ladeinfrastruktur mit rund 51 Milliarden Euro deutlich höher im Vergleich zur Wasserstoffinfrastruktur mit rund 40 Milliarden Euro.

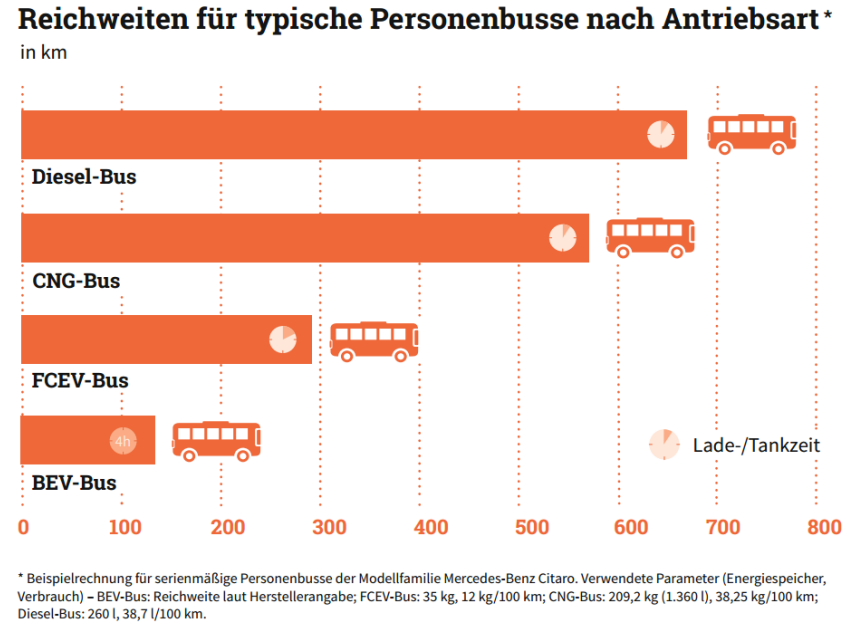


Quelle: Robinius, M.; Linßen, J.; Grube, T.; Reuß, M.; Stenzel, P.; Syranidis, K. et al. 2018: Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. Forschungszentrum Jülich. Jülich (Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie und Umwelt, 408), S. V

6. Zukünftige Wasserstoffmobilität mit Potenzial

Brennstoffzellen - Bus

- Busse mit Brennstoffzellenbetrieb weisen im Vergleich zu batterieelektrischen Bussen **höhere Reichweiten** und deutlich **kürzere Betankungszeiten** auf.



Quelle: http://en.renewnews.ru/toyota-sora/

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzellenfahrzeug

Quelle: Wilms, Susan; Lerm, Verena; Schäfer-Stradowsky, Simon; Sandén, Julia; Jahnke, Phi-lipp; Taubert, Giacomo (2018): Heutige Einsatzgebiete für Power Fuels. Factsheets zur Anwendung von klimafreundlich erzeugten syntheteischen Energieträgern. Hg. v. Deut-sche Energie-Agentur GmbH. Berlin.

6. Zukünftige Wasserstoffmobilität mit Potenzial

Brennstoffzellen - LKW

- Nutzfahrzeuge weisen im Vergleich zu batterieelektrischen Nutzfahrzeugen **höhere Reichweiten, größere Nutzlasten (Pay-loads)** und deutlich **kürzere Betankungszeiten** auf.
- Der amerikanische Hersteller Nikola Motors entwickelt Brennstoffzellen-LKWs für den Fernverkehr (Typ: Nikola Tre). Hyundai Motors entwickelt ebenso Fahrzeuge des Typs (hier: Hyundai H2 Xcient)
- Neben dem Zulieferer Bosch investierte auch CNH Industrial, der Mutterkonzern des Lkw-Herstellers Iveco, in das Start-up.

Die Nikola Motor Company, auch Nikola Motors genannt, ist ein amerikanisches Hybrid-Truck-Entwicklungs- beziehungsweise Designunternehmen.

Hyundai Motor wird mit dem Schweizer Wasserstoff-unternehmen H2 Energy (H2E) eine Brennstoffzellen-Lkw-Flotte von 1.000 Fahrzeugen bereitstellen.

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Brennstoffzellenfahrzeug

6. Zukünftige Wasserstoffmobilität mit Potenzial

Brennstoffzellen - LKW

*"Ein typischer regionaler Transport, bei dem Sie ungefähr **560 km** fahren, würde ungefähr 54 kg Wasserstoff verbrauchen", sagt Brian Lindgren, der die Forschung und Entwicklung in Kenworth/ Toyota (Mirai fuel cell) leitet. "Der schwerste Teil dieses Systems sind die **H_2-Tanks mit etwa 1800 kg**, aber wir sind immer noch weit unter den **7300 kg Batterien**, die Sie für dieselbe Entfernung benötigen. Und dann ist da noch Ladezeit. Das Aufladen der Batterien würde mehrere Stunden dauern, aber Sie können 54 kg Wasserstoff in etwa 15 Minuten tanken. "*

Quelle: Will Future Trucks Be Powered by Batteries or Fuel Cells?, 2019, Jim Park

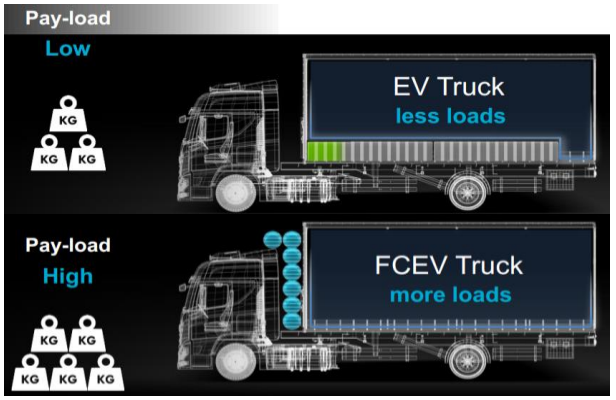
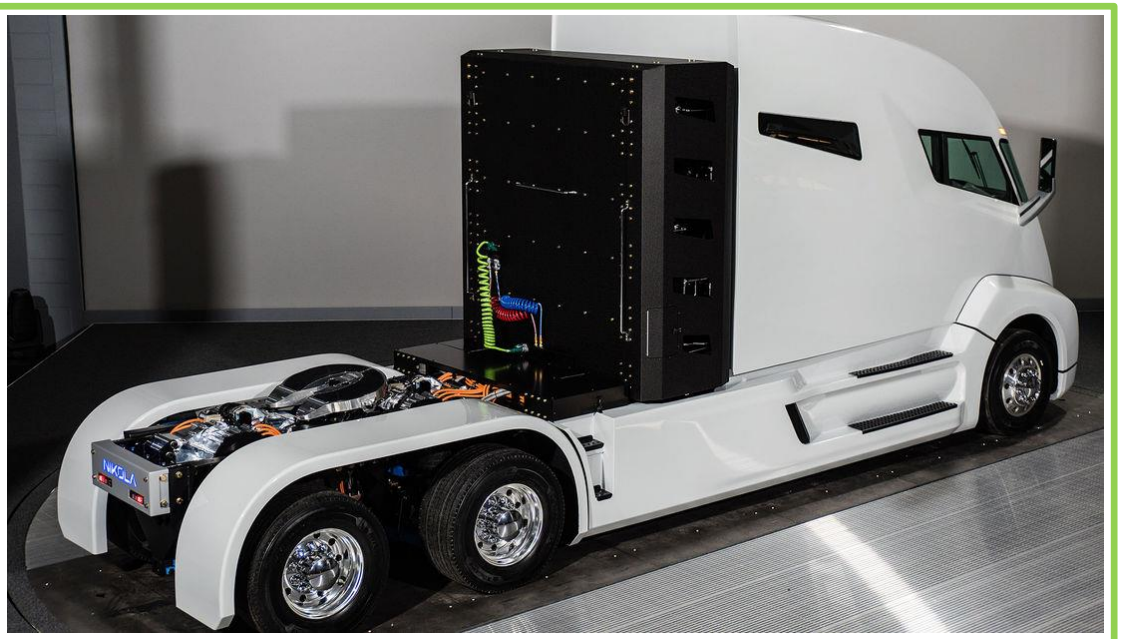


Bild: Freymüller, 2018

Technische Daten Nikola One

- 105 km/h bei 6 % Steigung und 36 t
- 6 E-Motoren 750 kW
- Tankinhalt 100 kg H_2
- 300 kW Brennstoffzelle Nikola/Bosch
- 320 kWh Batterie
- Verbrauch: 4.6 kg H_2 / 100 km
- 1900 km Reichweite

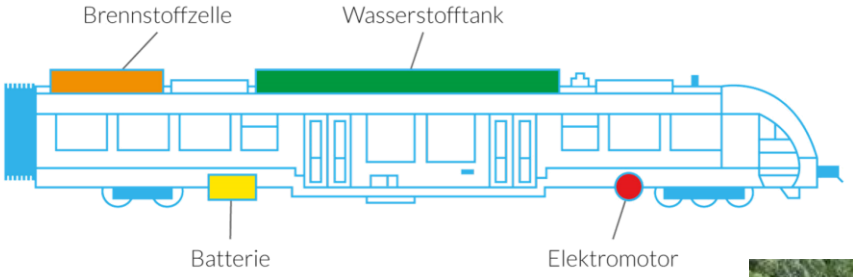


Quelle: auto-motor-und-sport.de, Nikola Motors

6. Zukünftige Wasserstoffmobilität mit Potenzial

Brennstoffzellen - Zug

- Elektrifizierung alter Dieselzüge mittels Wasserstoff
- Einsparung von Oberleitungen
- CO_2-neutral und emissionsarm



Technische Daten* Coradia iLint Alstom

- 156 Sitzplätze
- 140 km/h Höchstgeschwindigkeit
- 119 t Gewicht, 54 m Triebzuglänge
- bis zu 4 Triebzüge miteinander kuppelbar
- 2 Brennstoffzellenanlagen
- 2 H_2-Tanks a 130 kg
- 1000 km Reichweite pro Triebzug
- H_2 - Verbrauch 26 kg / 100 km

Bild: Alstom

Quelle: *Wasserstoff als Schlüssel zum emissionsfreien Schienenverkehr, Lorenz Heller, 12 Deutscher Nahverkehrstag

- 10 MW elektrische Leistung erneuerbarer Energie sind notwendig für die Stromversorgung einer 4 MW Elektrolyseanlage, die zum Betreiben einer Flotte von 15 iLints Züge erforderlich wäre.

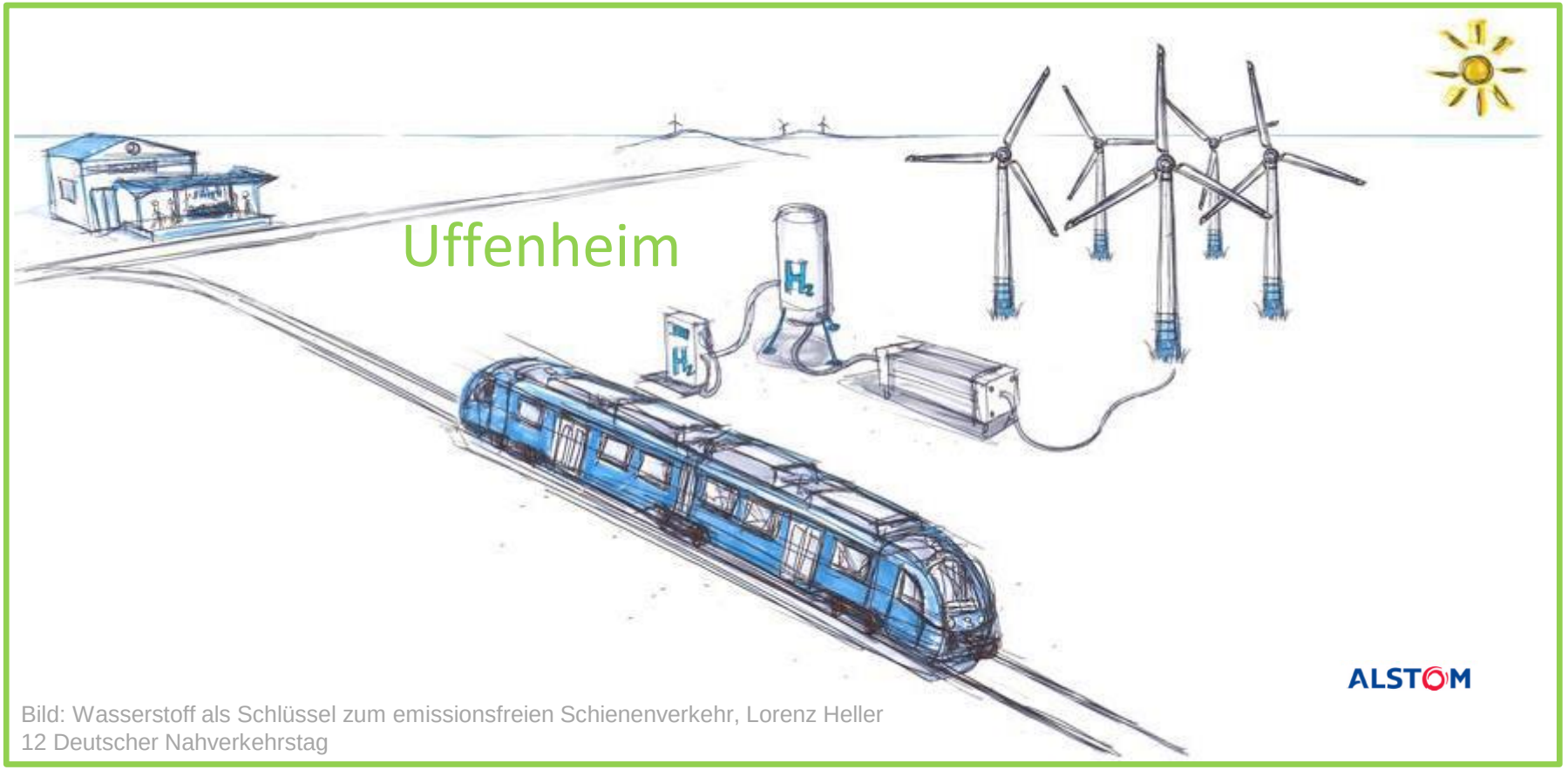


Bild: Wasserstoff als Schlüssel zum emissionsfreien Schienenverkehr, Lorenz Heller
12 Deutscher Nahverkehrstag

Resümee für Wasserstofffahrzeuge

- Wasserstoff hat gegenüber Batterien deutlich **höhere Energiedichten**, was bei Fahrzeugen zu erheblich größeren Reichweiten führt.
- Brennstoffzellenfahrzeuge haben **ein geringeres Gewicht** und damit eine höhere Nutzlast (Reichweite > 300 km).
- **Emissionen geringer** bei hoher Reichweite.
- **Betankungszeit** mit Wasserstoff ist sehr **kurz**.
- Infrastruktur: Elektroladestationen und Wasserstofftankstellen müssen ausgebaut werden.
- Anschaffungskosten für Brennstoffzellenfahrzeuge sind noch sehr hoch, sie besitzen jedoch **Kostenvorteile** gegenüber Batteriefahrzeugen **bei hohen Reichweiten**.
- Im **Schwerlastverkehr** bietet **das geringere Gewicht** einen klaren Vorteil gegenüber batteriegetriebenen Fahrzeugen.

Möchten Sie mehr wissen?

Warum studieren Sie nicht?

Bachelor of Engineering:

Angewandte Ingenieurwissenschaften

Wirtschaftsingenieurwesen

Master of Engineering:

Energiemanagement und Energietechnik

SAVE THE DATE: Tag der offenen Tür am 28.03.2020 (10:00-14:30 Uhr)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Kapischke
joerg.kapischke@hs-ansbach.de

HOCHSCHULE
ANSBACH