
TREIBHAUSGAS-EMISSIONEN FÜR BATTERIE- UND BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUGE MIT REICHWEITEN ÜBER 300 KM

Studie im Auftrag der H2 Mobility



André Sternberg, Christoph Hank und
Christopher Hebling

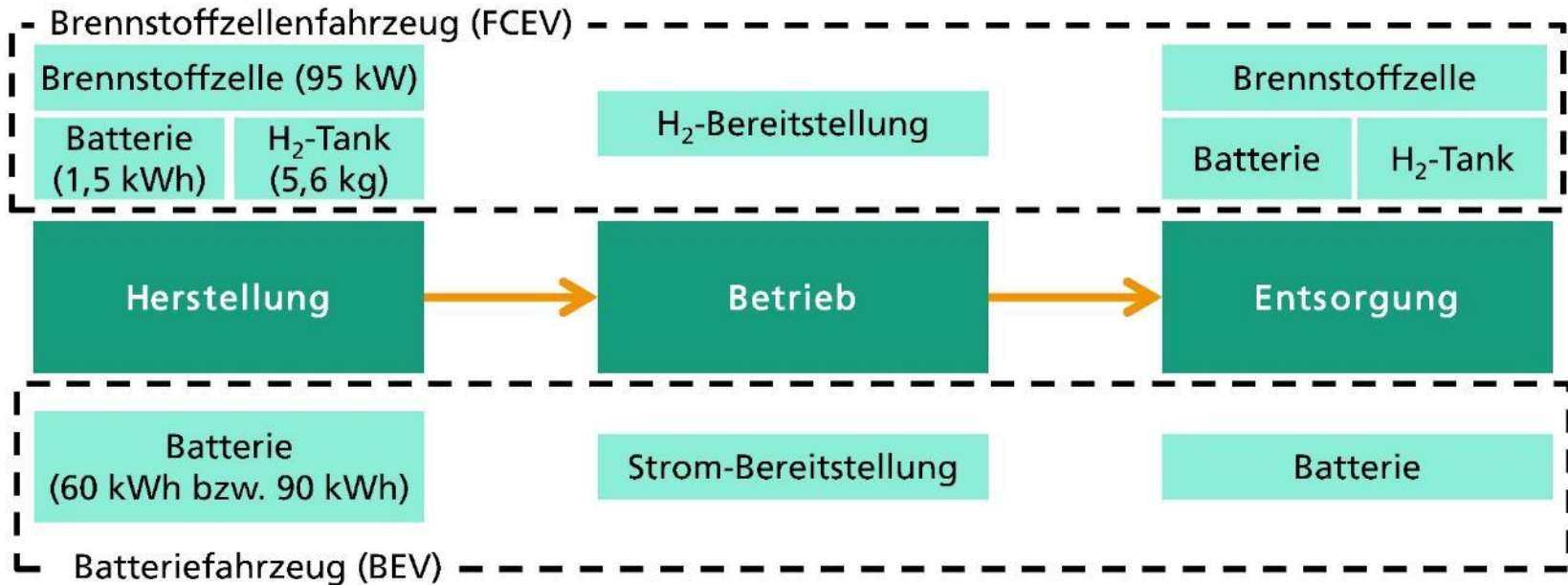
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Freiburg, 13.07.2019

www.ise.fraunhofer.de

Der betrachtete Lebenszyklus von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug

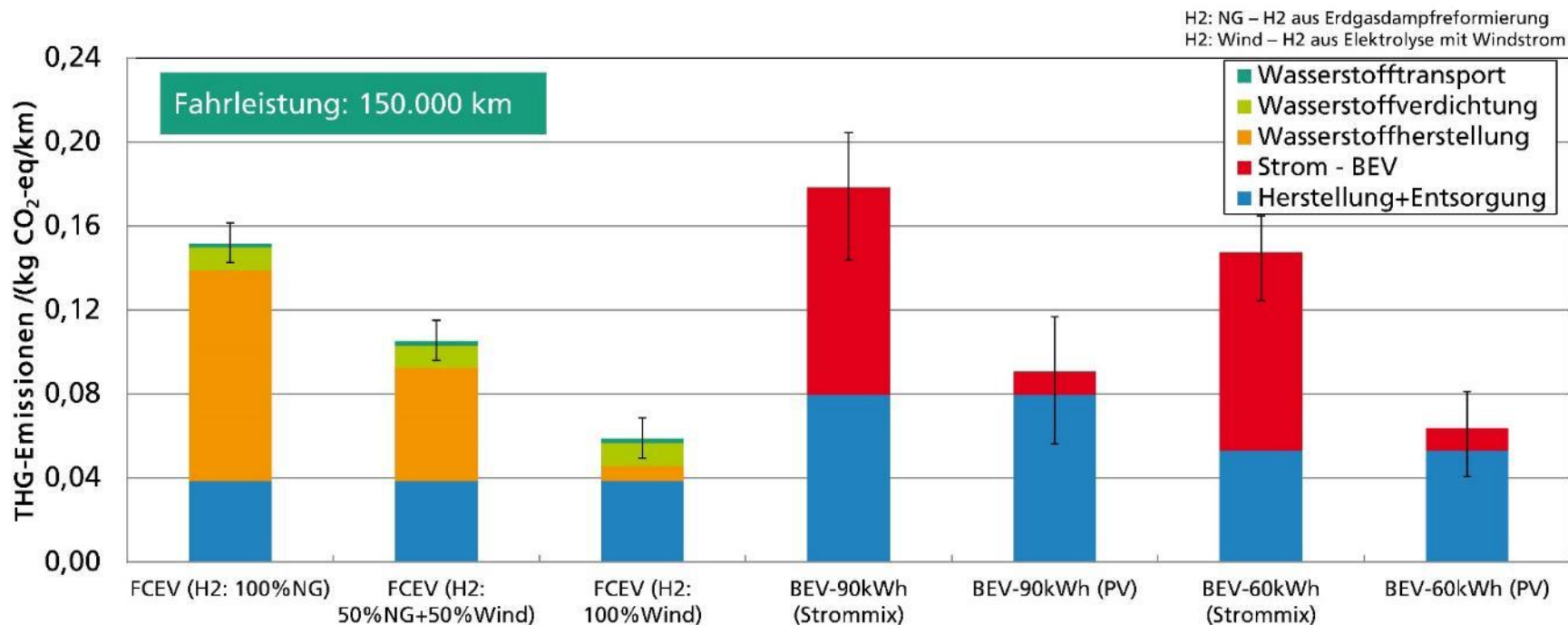
THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030 und 2030-2040



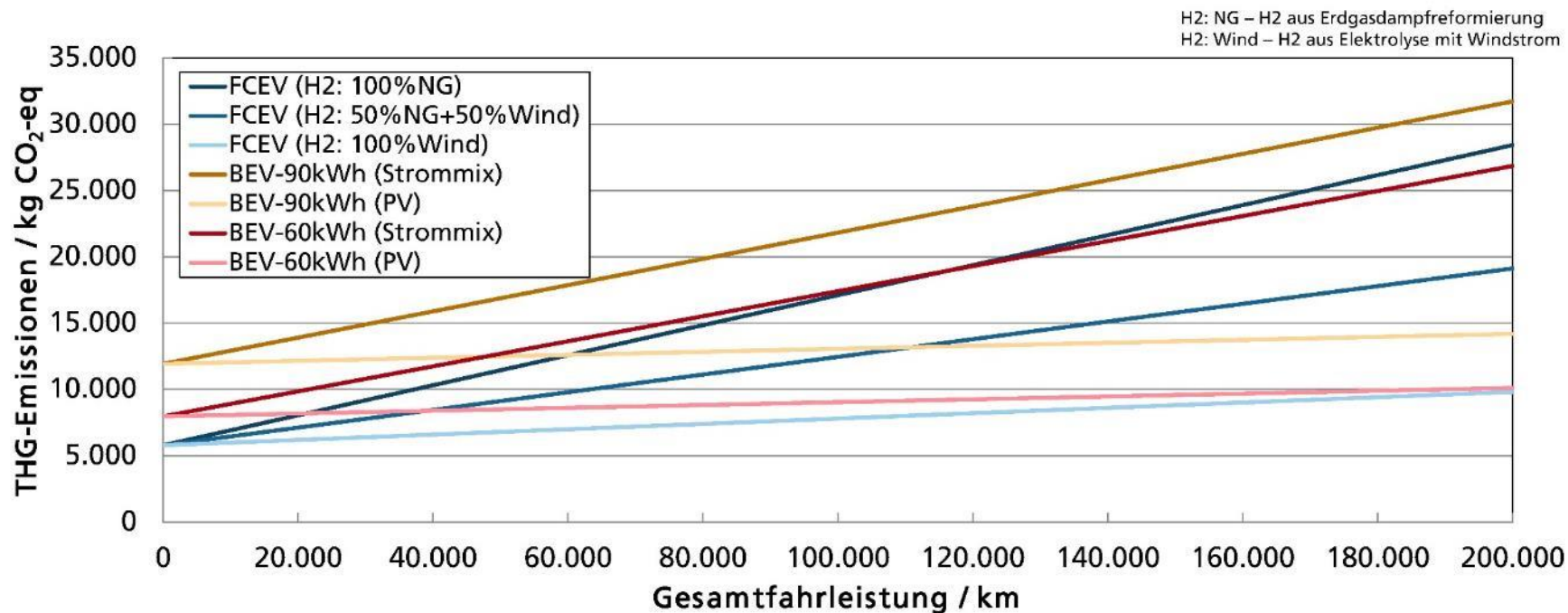
Fahrzeugtyp: SUV

Annahme: Alle nicht explizit aufgelisteten Komponenten sind bei Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug identisch → werden erst einmal nicht betrachtet

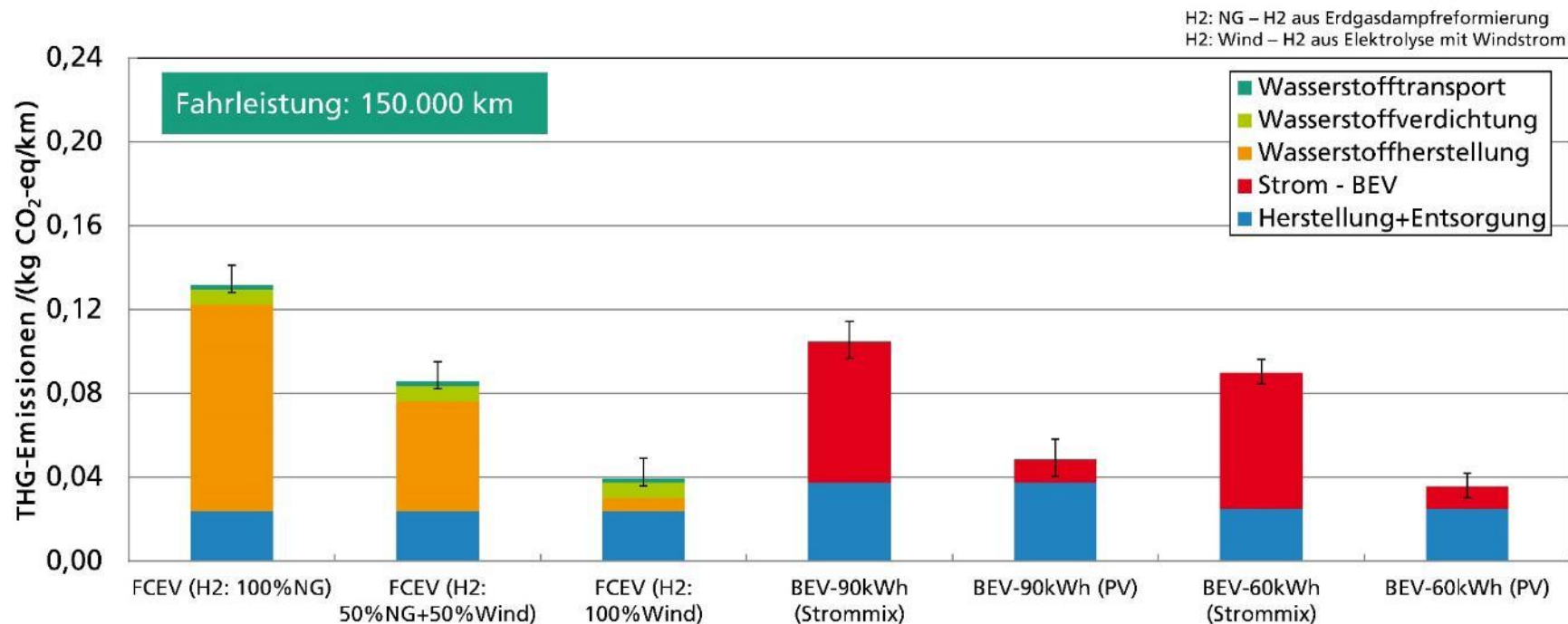
THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030 (inklusive Herstellung + Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H₂-Tank)



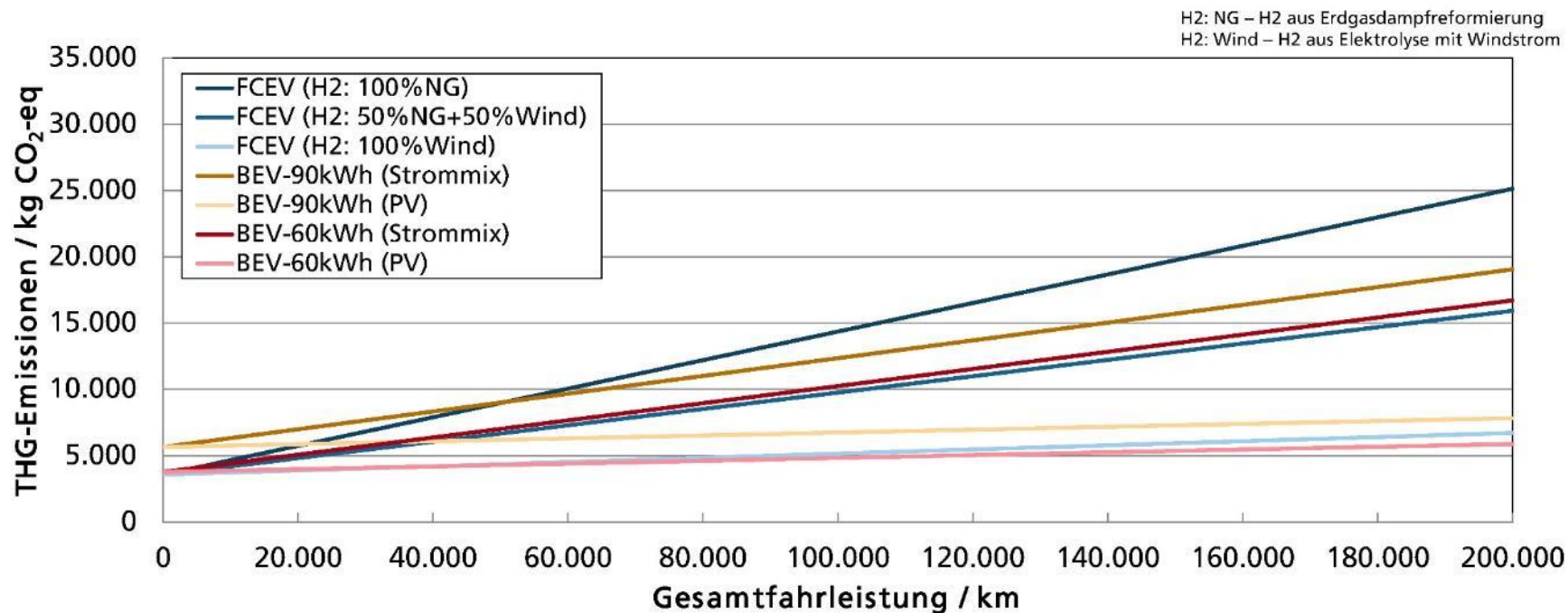
THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030 (inklusive Herstellung + Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H₂-Tank)



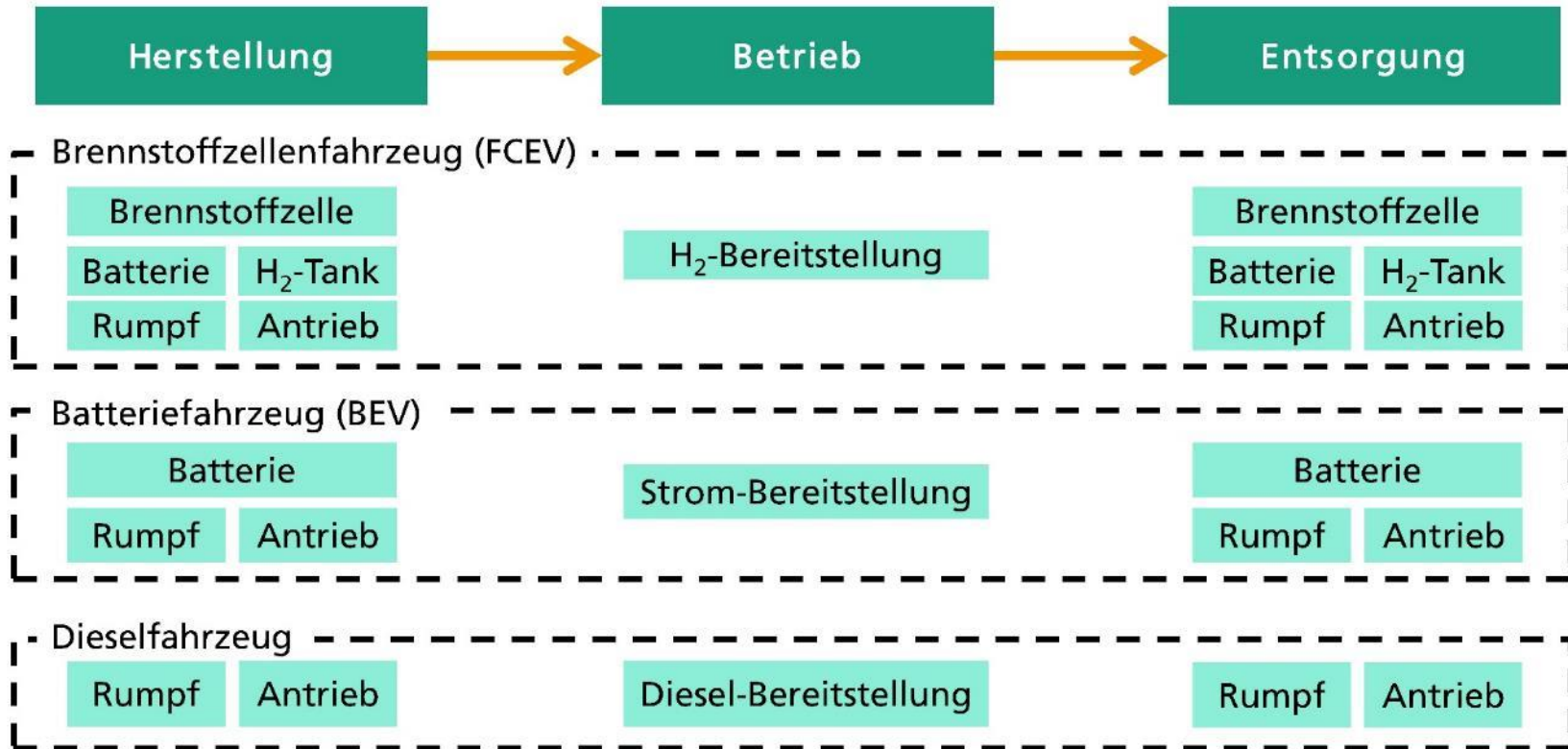
THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2030-2040 (inklusive Herstellung + Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H₂-Tank)



THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2030-2040 (inklusive Herstellung + Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H₂-Tank)



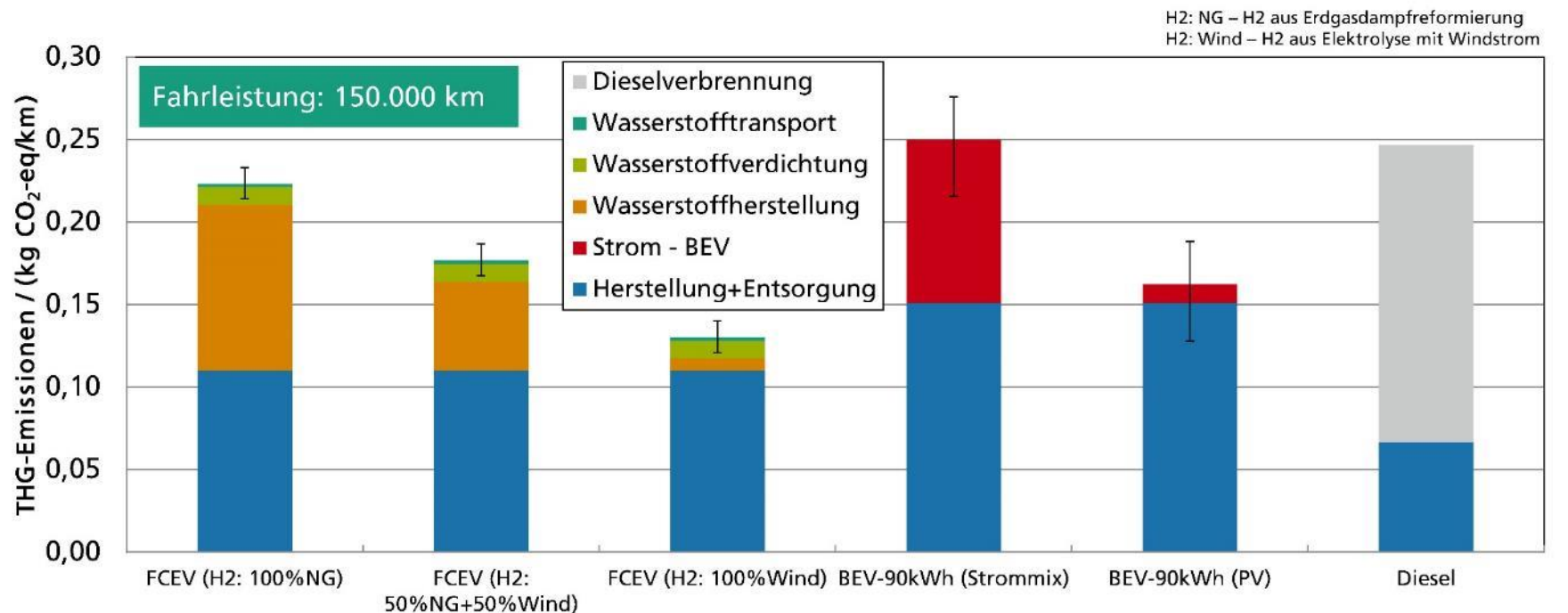
Vergleich mit Diesel-Fahrzeug (100% fossiler Kraftstoff)



Zeithorizont: Fahrzeugbetrieb von 2020-2030

THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030

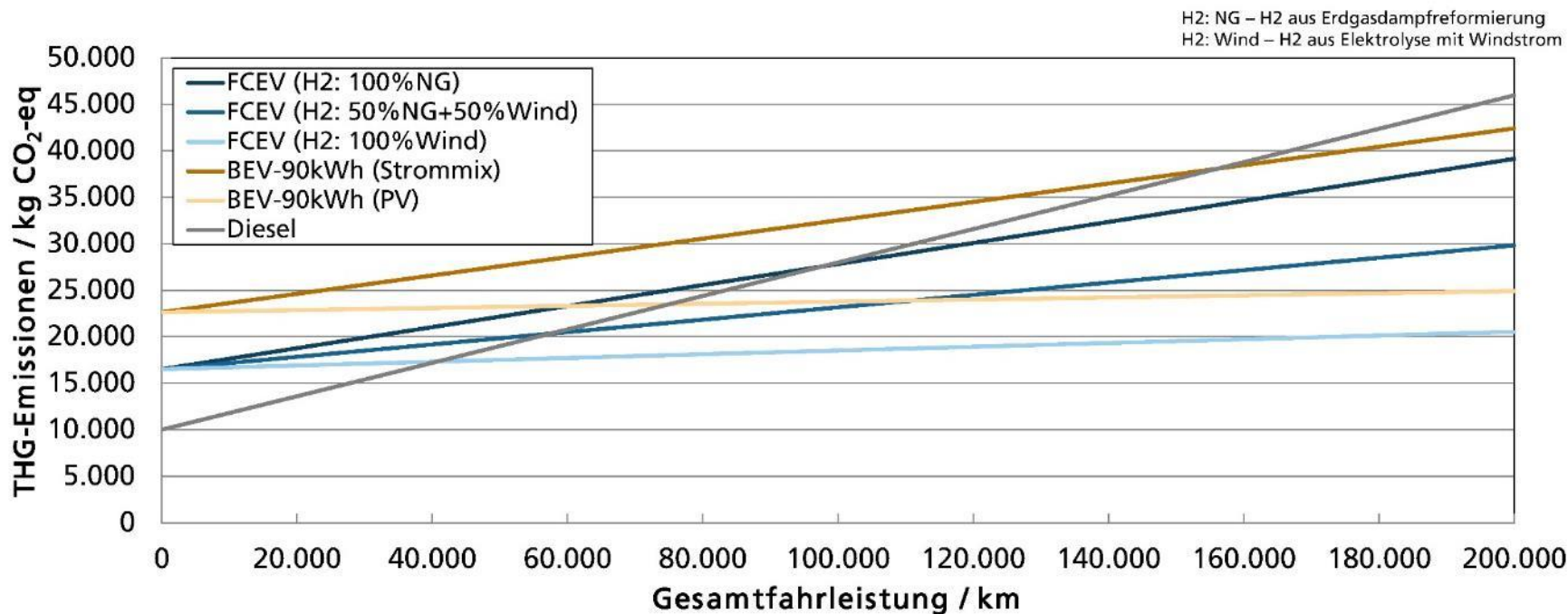
Vergleich mit Diesel-PKW (100% fossiler Kraftstoff)



Dieselverbrennung enthält auch THG-Emissionen für Dieselbereitstellung

THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030

Vergleich mit Diesel-PKW (100% fossiler Kraftstoff)



Zentrale Botschaften

■ Herstellung:

- Treibhausgas (THG)-Emissionen Brennstoffzellenfahrzeug geringer als für betrachtete Batteriefahrzeuge (60 kWh und 90 kWh Batteriekapazität)
 - Entscheidende Faktoren für Batteriefahrzeug: Zellfertigung und THG-Footprint Strom
 - Entscheidende Faktoren für Brennstoffzellenfahrzeug: Platin und H₂-Tank

■ Gesamtbetrachtung:

- Zeitraum 2020-2030: THG-Emissionsvorteile des Brennstoffzellenfahrzeugs
 - Höhere Effizienz des Batteriefahrzeugbetriebs kompensiert nicht den THG-Nachteil aus dessen Herstellung
 - Herstellung von Wasserstoff mittels Windstrom → Pfad mit geringsten Emissionen
- Zeitraum 2030-2040
 - Bei vergleichbarer Reichweite hat Brennstoffzellenfahrzeug THG-Emissionsvorteile, wenn beide Fahrzeuge erneuerbaren Strom nutzen
 - Batteriefahrzeuge mit geringerer Batteriekapazität/Reichweite (ca. < 50 kWh/250 km) bieten THG-Emissionsvorteile gegenüber Brennstoffzellenfahrzeugen

Einschränkungen

- Verbesserungspotential bei der Herstellung von Materialien (Platin, Aluminium, etc.) wurde nicht berücksichtigt
- Neuartige H₂-Tankkonzepte konnten in der Betrachtung nicht berücksichtigt werden
- Neben THG-Emissionen sollten noch weitere Wirkungskategorien untersucht werden (Flächenverbrauch, Wasserverbrauch, etc.)
- Umweltwirkung für die Errichtung der Mobilitätsinfrastruktur wurde nicht betrachtet (Ladeinfrastruktur, H₂-Verteilung, etc.)
- Systemische Aspekte / Wechselwirkung mit Energiesystem sollten genauer untersucht werden
- Betrachtung weiterer Antriebskonzepte notwendig (z.B. Hybride, Verbrennungsmotor mit synthetischen Kraftstoffen)
- Keine Berücksichtigung von Second-Life-Aspekten für Batterie und Brennstoffzelle
- Keine THG-Gutschrift für Materialien nach der Entsorgung

Wichtigste Referenzen

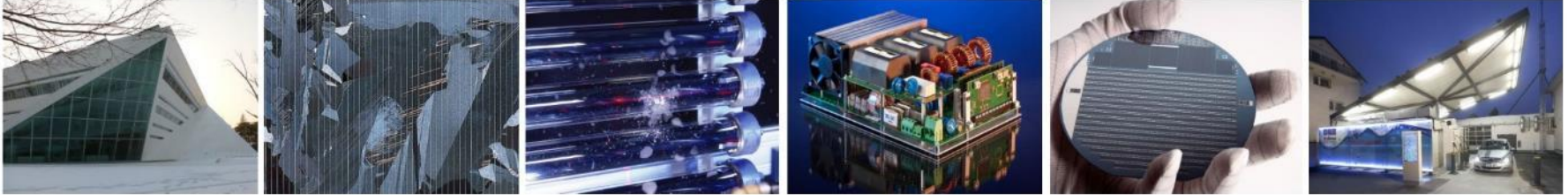
Batteriefahrzeug

- Ellingsen, Majeau-Bettez, Singh, Srivastava, Valøen und Strømman, Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack
Journal of Industrial Ecology, 18, 2014, 113-124
 - Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology
- Agora Verkehrswende (2019)
Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial.
- Batterieabteilung am ISE

Brennstoffzellenfahrzeug

- Miotti^{1,2}, Hofer¹ und Bauer¹ 2017
Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles
The International Journal of Life Cycle Assessment, 22, 2017, 94-110
 - ¹Laboratory for Energy Systems Analysis, Paul Scherrer Institute (PSI)
 - ²Institute for Data, Systems, and Society (IDSS), Massachusetts Institute of Technology (MIT),
- Brennstoffzellenabteilung am ISE

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

André Sternberg

www.ise.fraunhofer.de

ANHANG

- Annahmen für Fahrzeugbetrieb
- Vergleich Herstellung von Batteriefahrzeug und Brennstoffzellenfahrzeug
- Details zur Batterieherstellung
- Details zur Brennstoffzellenherstellung
- Details zur Wasserstofftankherstellung
- Referenzen für Szenarien

Fahrzeugbetrieb – Annahmen

- FCEV auf Basis von Nexo
 - Gewicht: 1919 kg
 - Gewicht ohne Brennstoffzelle und Tank: 1600 kg ^[1] (Basis für Vergleich mit Batteriefahrzeug)
 - Wasserstoffverbrauch nach WLTP: 0,95 kg H₂/100km (genutzt für 2020); 2030: 0,93 kg H₂/100km
 - Leistung Brennstoffzelle: 95 kW
 - Wasserstofftank: 5,6 kg H₂ → Reichweite: > 500 km
- BEV mit 60 kWh Batterie (generisch, Gewicht ohne Batterie = 1600 kg)
 - Gewicht, inkl. 60 kWh Batterie: 2044 kg (2020) bzw. 1924 kg (2030)
 - Stromverbrauch (ohne Ladeverluste): 19,5 kWh/100km (2020) bzw. 19,0 kWh/100km (2030)
 - Reichweite: ~300 km
- BEV mit 90 kWh Batterie (generisch, Gewicht ohne Batterie = 1600 kg)
 - Gewicht, inkl. 90 kWh Batterie: 2266 kg (2020) bzw. 2086 kg (2030)
 - Stromverbrauch (ohne Ladeverluste): 20,4 kWh/100km (2020) bzw. 19,7 kWh/100km (2030)
 - Reichweite: > 400 km

Fahrzeugbetrieb – Annahmen für Kraftstoffbereitstellung

- Wasserstoff aus Elektrolyse
 - Strombedarf: 54 kWh/kg H₂ (Studie IndWEDe, NOW GmbH, Berlin 2019)
 - THG-Emissionen Elektrolyse-Herstellung: 0,18 bzw. 0,08 kg CO₂-eq/kg H₂ (2020 bzw. 2030)
- Wasserstoff aus Erdgasdampfreformierung
 - THG-Emissionen: 10,6 kg CO₂-eq/kg H₂ (Sternberg et al., Green Chem., 2017, 19, 2244)
- Strombedarf für Wasserstoffverdichtung auf etwa 1000 bar: 2,7 kWh/kg H₂ ^[1]
 - Strombedarf wird durch Strommix gedeckt
- THG-Emissionen H₂-Transport (200 km): 0,21 kg CO₂-eq/kg H₂ ^[2]
- Ladeverluste für Batteriefahrzeuge: 15% (Agora Verkehrswende, 2019)
- THG-Emissionen Strom
 - Strommix 2020-2030: 421 g CO₂-eq/kWh (Agora Verkehrswende, 2019)
 - Strommix 2030-2040: 296 g CO₂-eq/kWh (Agora Verkehrswende, 2019)
 - PV: 48 g CO₂-eq/kWh (IPCC AR5 WGII Annex III, Wert für „Solar PV – utility“)
 - Wind: 11 g CO₂-eq/kWh (IPCC AR5 WGII Annex III, Wert für „Wind onshore“)

[1] Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing; Technical Status and Costs; NREL 2014

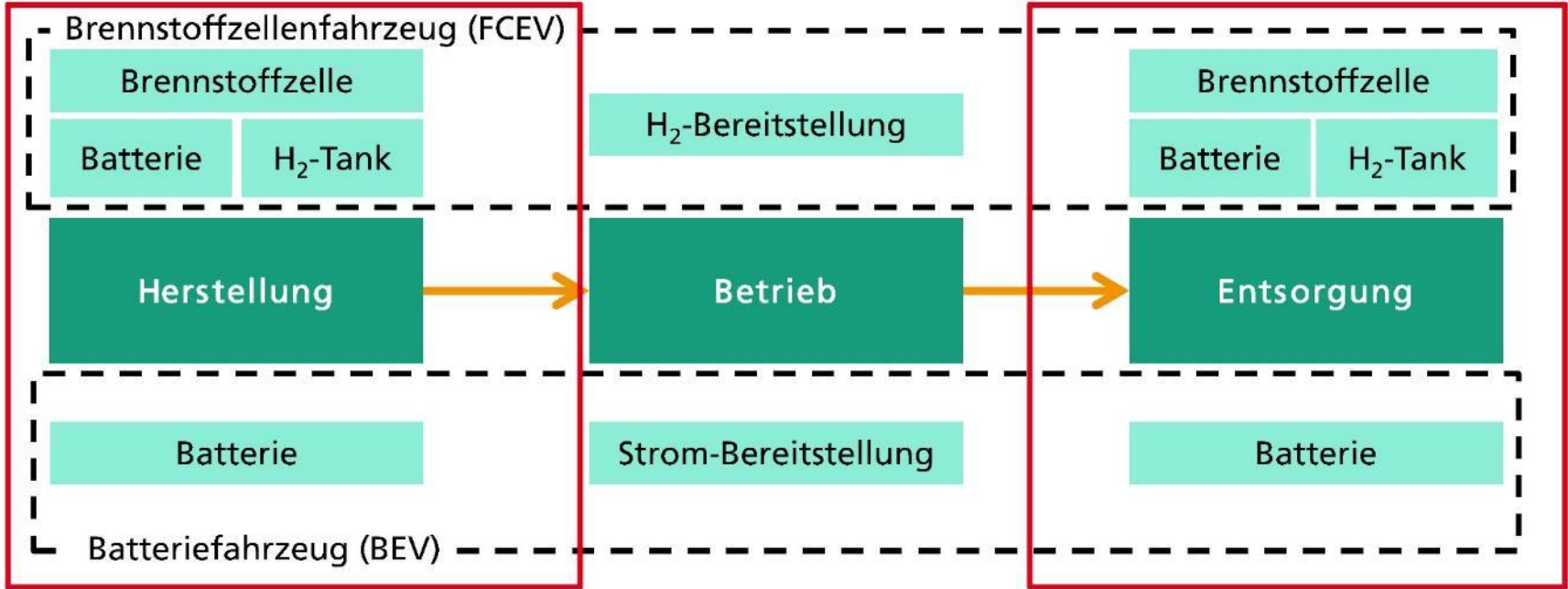
[2] (Robinius et al., 2018, Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles)
Trailer für GH₂: Dieselbedarf = 0,35 l/km; Netto H₂-Kapazität = 1000 kg

Dieselfahrzeug: Bestimmung Fahrzeuggewicht und Verbrauch

- Referenz: Hyundai Tucson 1.6 CRDi (100 kW)
 - Leergewicht: 1.683-1.810 kg
 - NEFZ-Verbrauch^[1]: 4,4 l/100km
 - CO₂-Emissionen nach NEFZ: 117 g/km
 - CO₂-Emissionen nach WLTP: 157 g/km
 - WLTP-Verbrauch^[2]: 5,9 l/100km
- Genutzter Wert:
 - Leergewicht: 1.750 kg
 - WLTP-Verbrauch: 5,9 l/100km (100% fossiler Kraftstoff)

Der betrachtete Lebenszyklus von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug

THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030 und 2030-2040

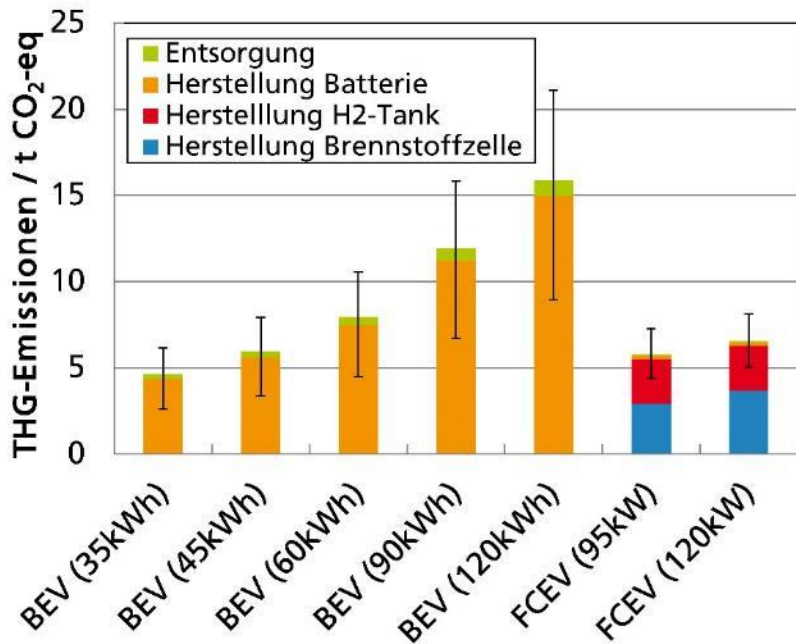


Herstellung + Entsorgung: Treibhausgasemissionen

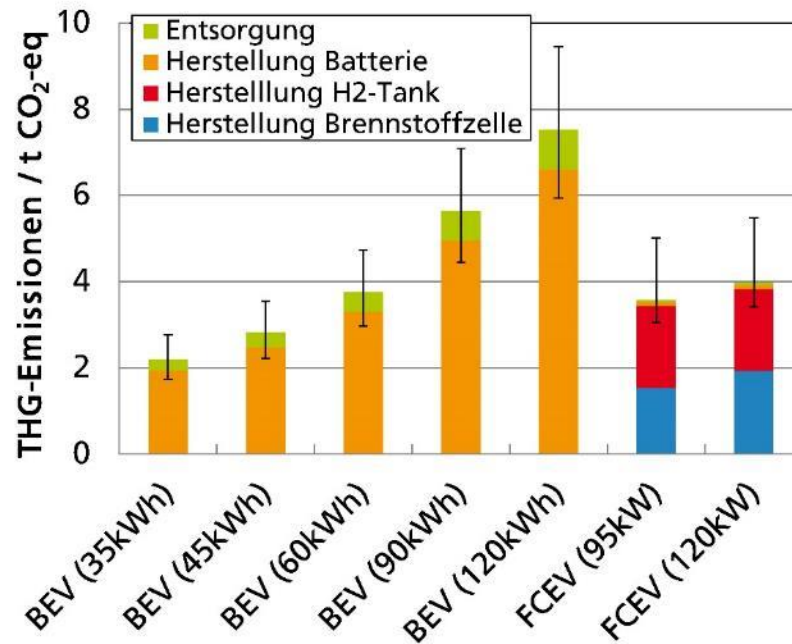
THG Brennstoffzellensystem mit 95 kW
 ≈ THG Batterie mit 45 kWh

THG Brennstoffzellensystem mit 95 kW
 ≈ THG Batterie mit 60 kWh

2020

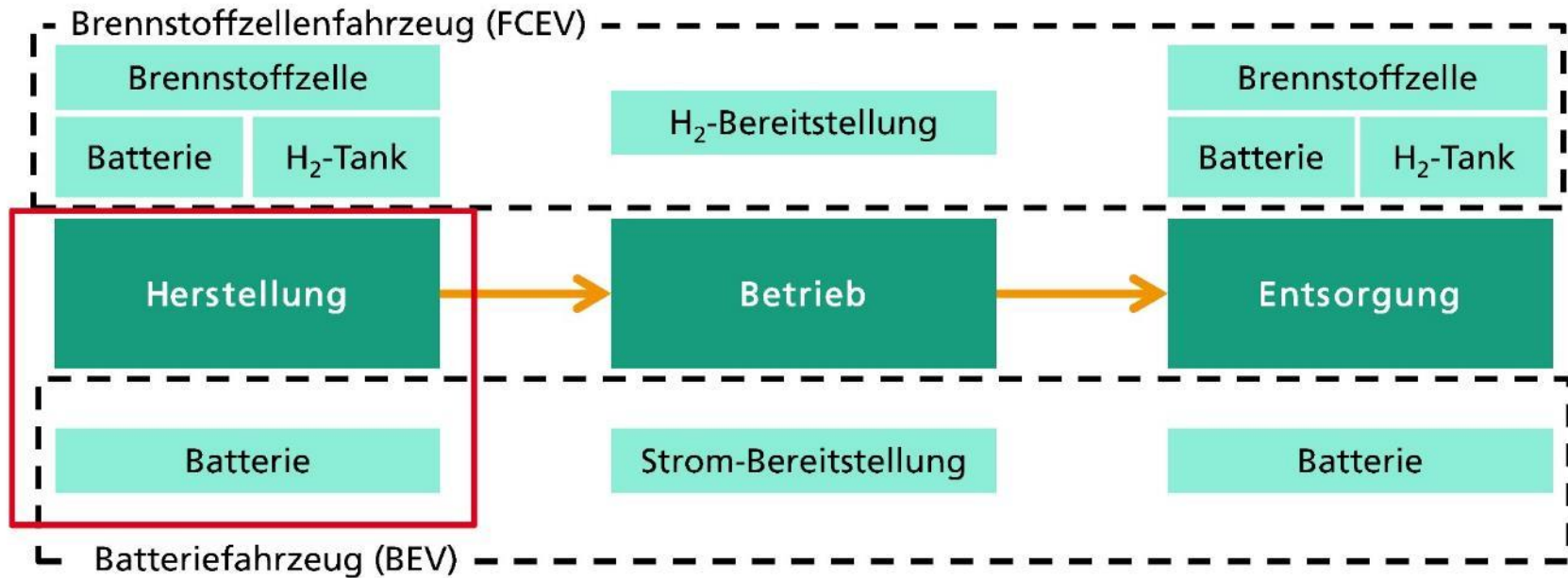


2030



Der betrachtete Lebenszyklus von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug

THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030 und 2030-2040



Wichtigste Annahmen für die Batterie

	2020	2030
Zellchemie ^[1]	NCM (6:2:2)	NCM (9:0,5:0,5)
Zellcontainer ^[2]	Pouch	
Pack housing ^[2]	Aluminium	
Elektrolyt - Salz ^[2]	LiPF ₆	
Lösungsmittel ^[2,4]	N-methyl-2-pyrrolidone	
Energiedichte (Batteriepack) ^[3]	135 Wh/kg	185 Wh/kg

N – Nickel
 C – Kobalt
 M - Mangan

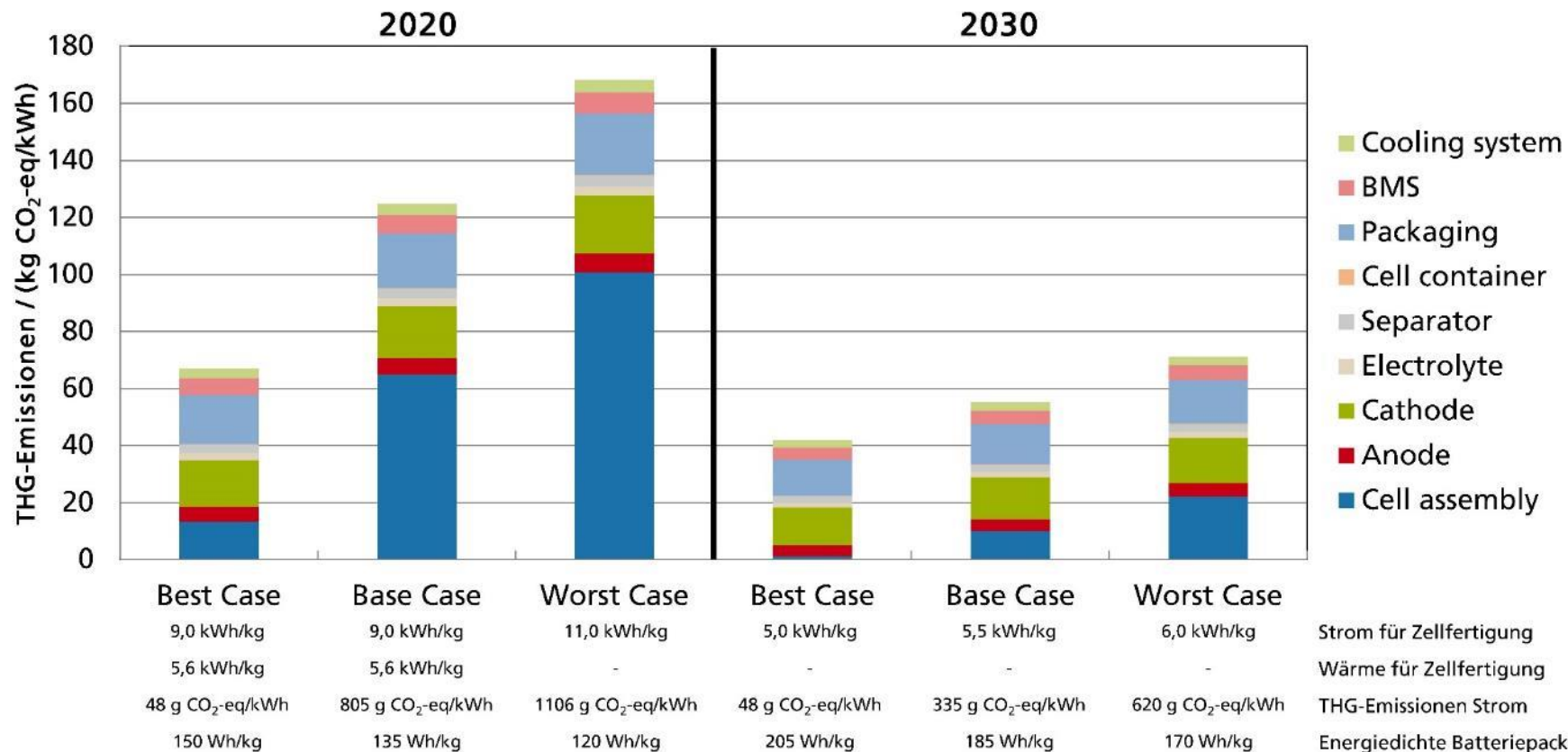
Batterie wurde in der LCA-Software Umberto LCA+ mit der Datenbank ecoinvent 3.5 modelliert
 Daten für Herstellung der Batterie basieren auf [2]

[1] Zellchemie mit höchstem Marktanteil nach Azevedo et al., Lithium and cobalt – a tale of two commodities, Metals and Mining, June 2018

[2] Ellingsen et al., 2014

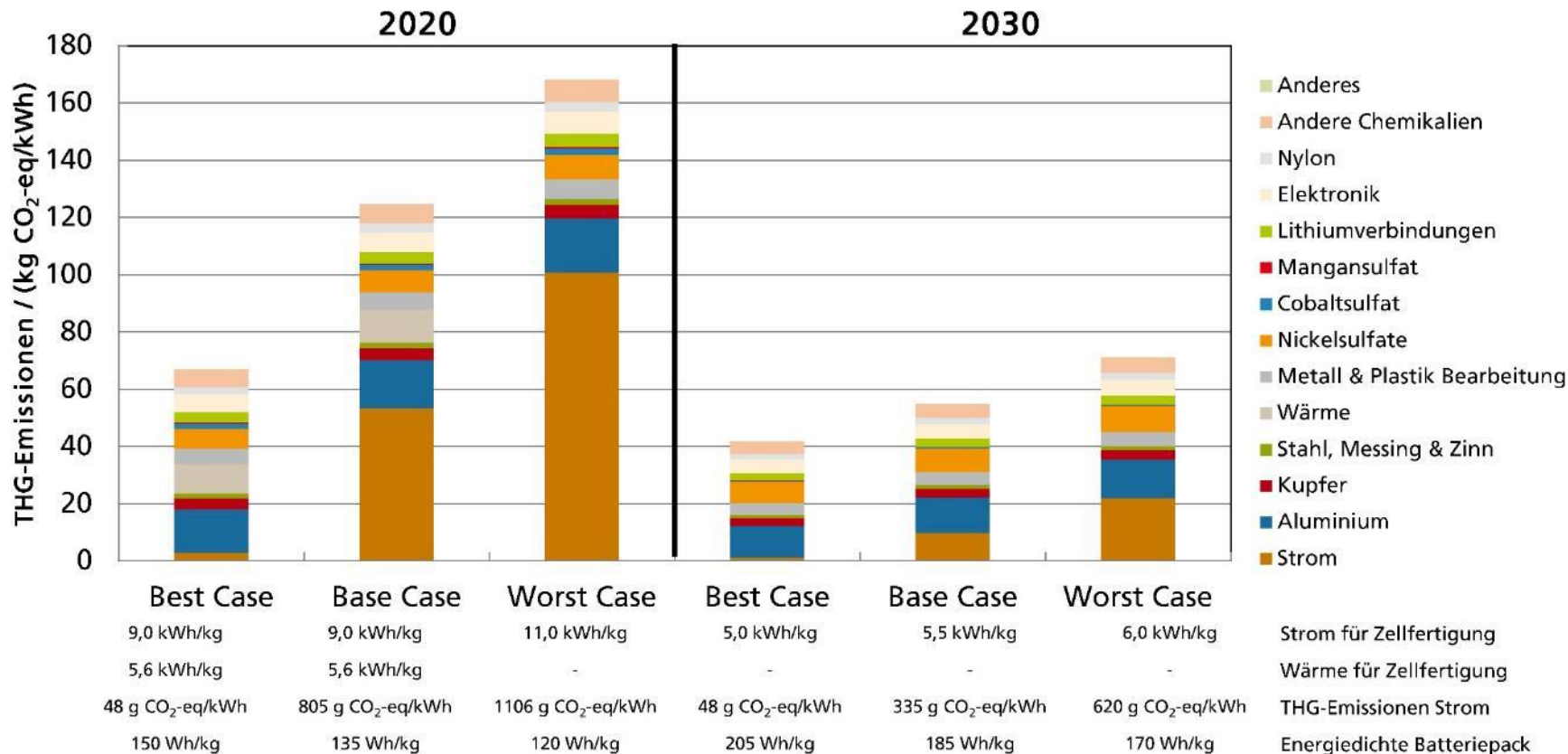
[3] siehe Folie „Energiedichte für Batteriepacks“

[4] nach Agora Verkehrswende (2019) werden 99,5% recycelt



- 2020: Energie für Zellfertigung hat sehr großen Anteil
- 2030: Beitrag sinkt durch geringeren Strombedarf/CO₂-Footprint Strom

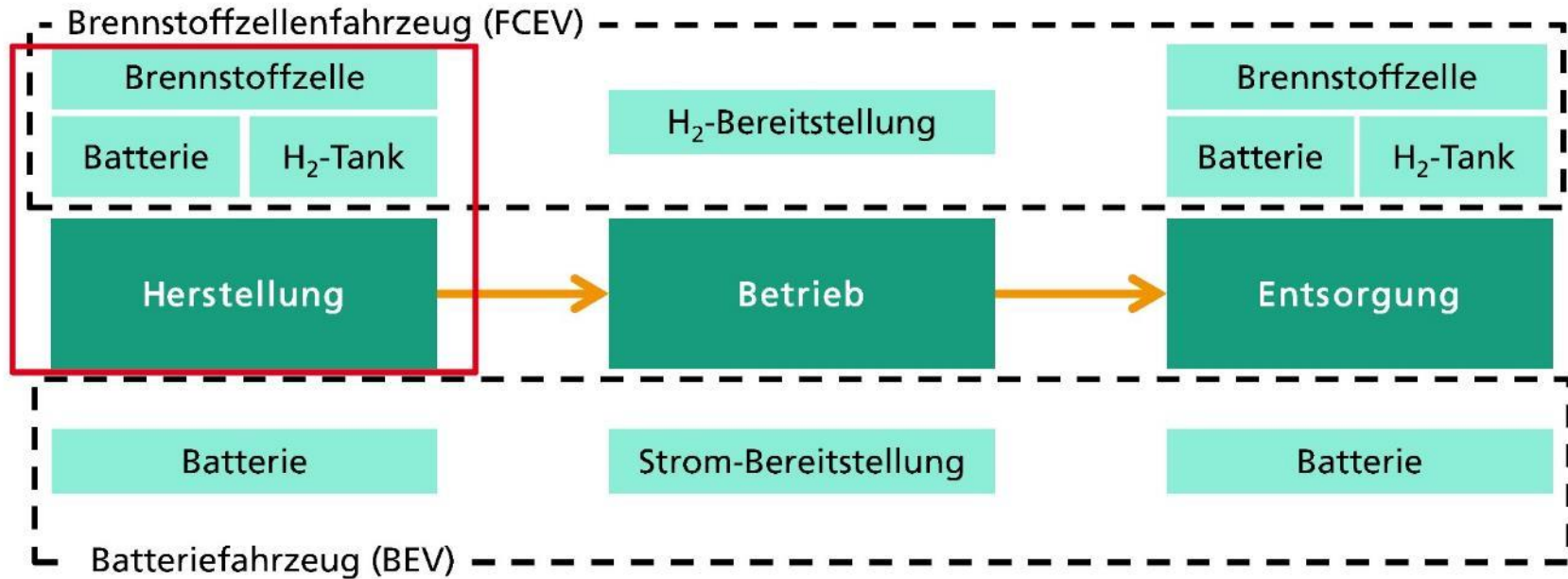
Batterieherstellung: THG-Emissionen detaillierter aufgelöst



- Material mit höchstem Beitrag: Aluminium
- Einfluss von Nickel, Kobalt, Mangan und Lithium eher gering

Der betrachtete Lebenszyklus von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug

THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030 und 2030-2040



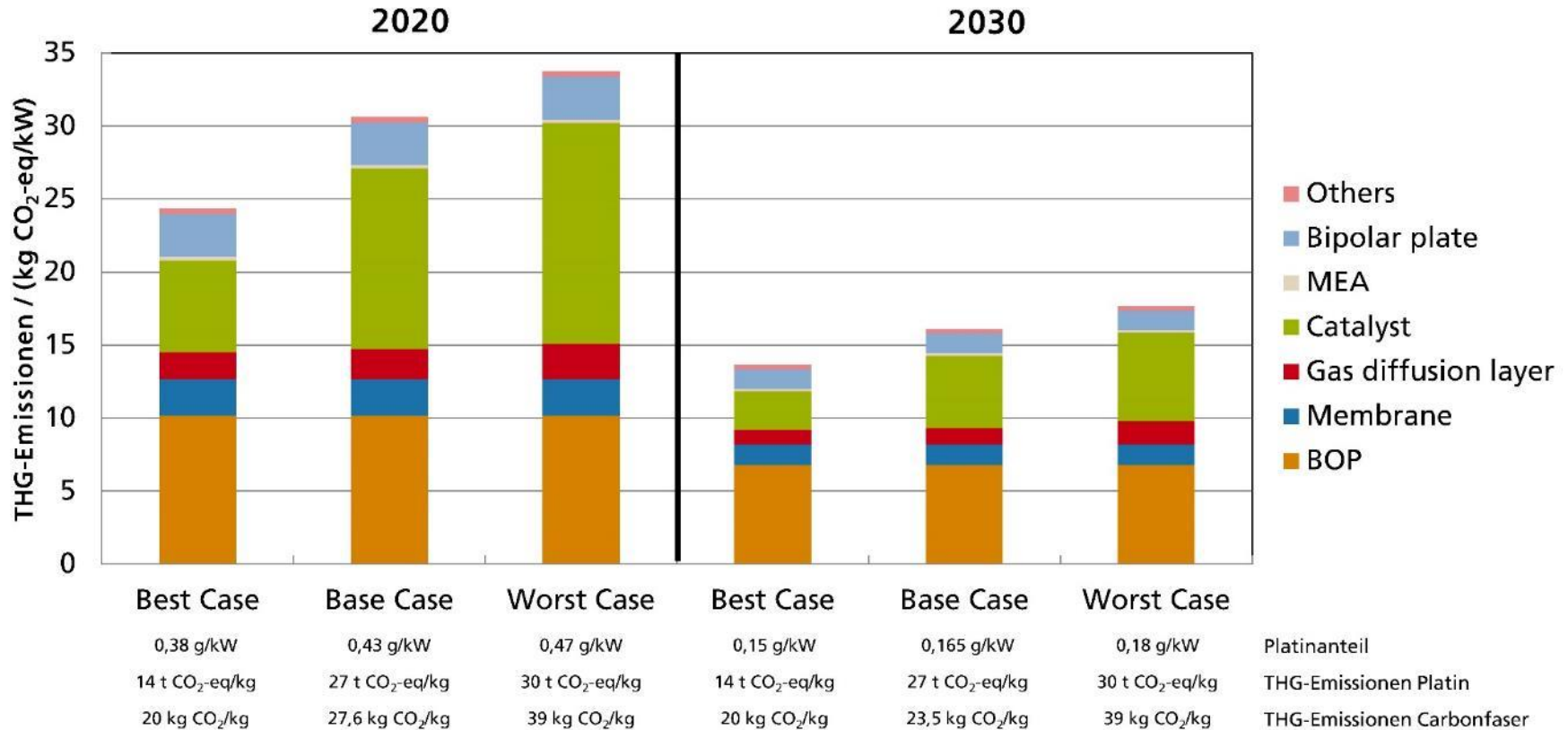
Wichtigste Annahmen für die Brennstoffzelle

	2020	2030
Platinbeladung ^[1]	0,4 mg/cm ²	0,2 mg/cm ²
Leistungsdichte ^[1]	1060 mW/m ²	1310 mW/m ²
Platinanteil ^[1]	0,43 g/kW	0,165 g/kW

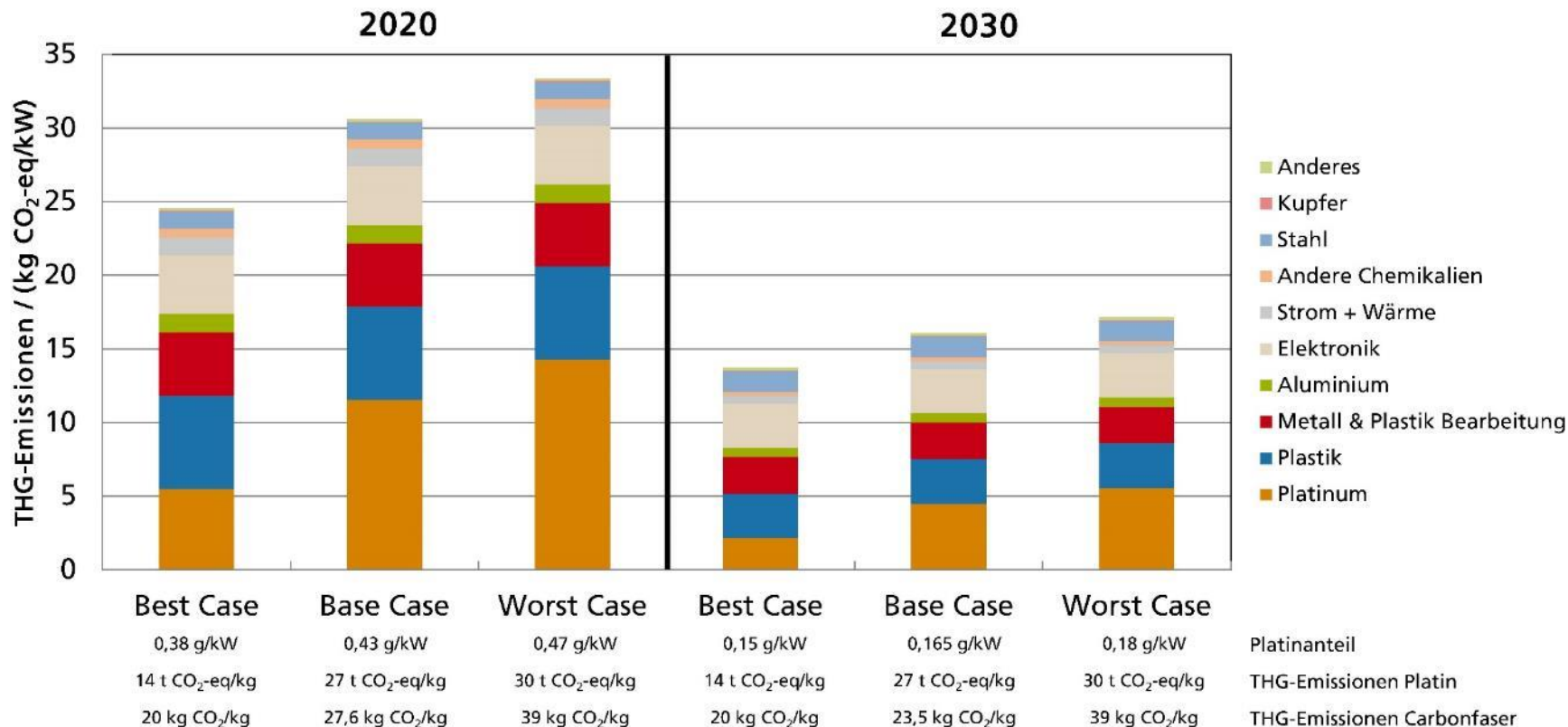
Brennstoffzelle wurde in der LCA-Software Umberto LCA+ mit der Datenbank ecoinvent 3.5 modelliert

Daten für Herstellung der Brennstoffzelle basieren auf [1]

Brennstoffzellenherstellung: THG-Emissionen



Brennstoffzellenherstellung: THG-Emissionen detaillierter aufgelöst



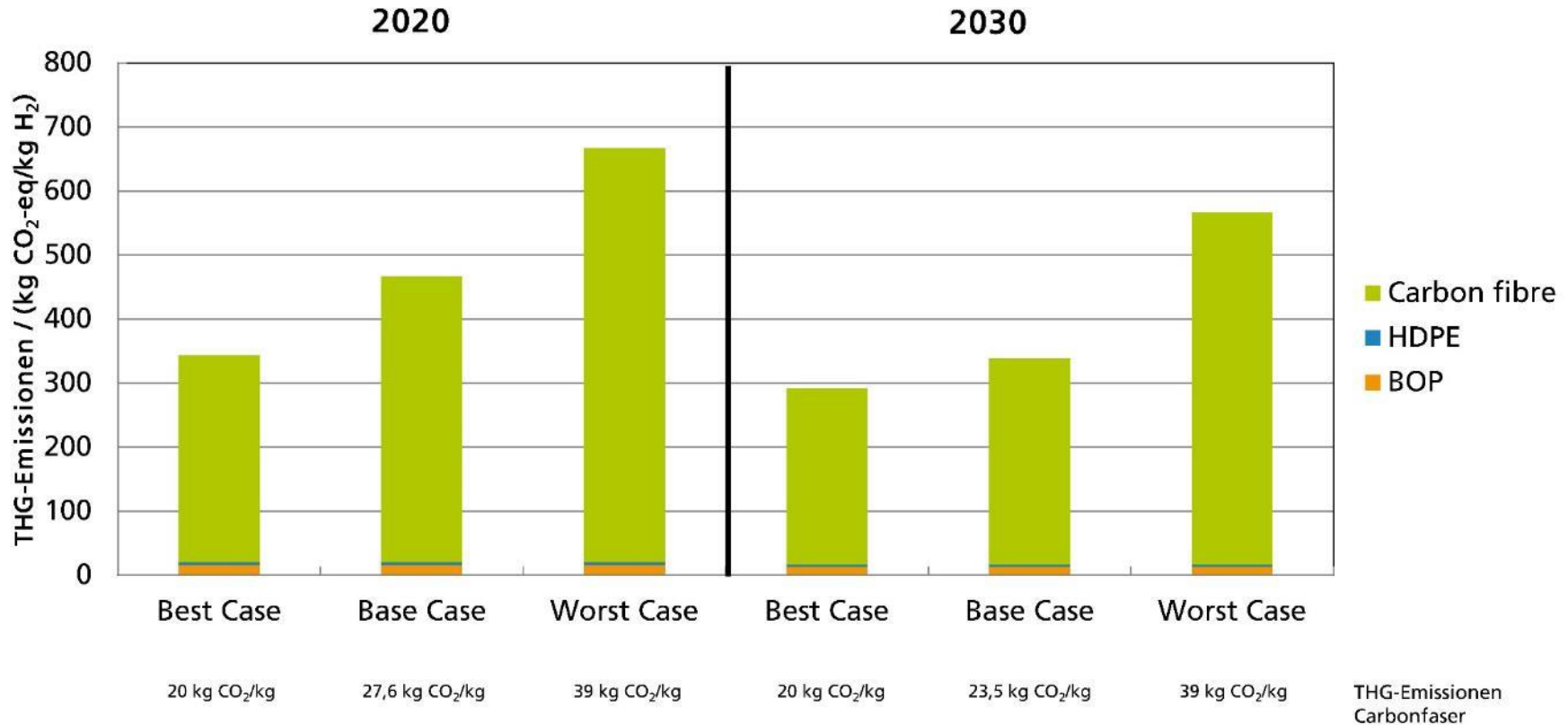
Wichtigste Annahmen für den Wasserstofftank

	2020	2030
Tankart		Typ IV (700 bar)
Ausführung		2-Tank-System
Größe		5,6 kg H ₂
Materialbedarf		15% geringerer gegenüber 2020 [1]

Wasserstofftank wurde in der LCA-Software Umberto LCA+ mit der Datenbank ecoinvent 3.5 modelliert

Daten für Herstellung des Wasserstofftanks basieren auf „Argonne National Lab, ANL-10/24 Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications“

Wasserstofftankherstellung: THG-Emissionen



Referenzen für Szenarien bei Batterieherstellung

	2020			2030		
	Best Case	Base Case	Worst Case	Best Case	Base Case	Worst Case
Strom für Zellfertigung	9,0 kWh/kg	9,0 kWh/kg	11,0 kWh/kg	5,0 kWh/kg	5,5 kWh/kg	6,0 kWh/kg
Wärme für Zellfertigung	5,6 kWh/kg	5,6 kWh/kg	-	-	-	-
Referenz für Strom- und Wärmebedarf	[Peters et al., 2018]	[Peters et al., 2018]	[Agora Verkehrswende, 2019]	Eigene Annahme: -10% vom Base Case	[Agora Verkehrswende, 2019]	Eigene Annahme: +10% vom Base Case
THG-Emissionen Strom	48 g CO ₂ -eq/kWh	805 g CO ₂ -eq/kWh	1106 g CO ₂ -eq/kWh	48 g CO ₂ -eq/kWh	335 g CO ₂ -eq/kWh	620 g CO ₂ -eq/kWh
Referenz für THG-Emissionen Strom	[IPCC] PV Strom	[Agora Verkehrswende, 2019] Strommix Herstellungsländer	[Agora Verkehrswende, 2019] Strommix China	[IPCC] PV Strom	[Agora Verkehrswende, 2019] Strommix EU, 2030	Prognose Strommix China, 2030
Energiedichte Batteriepack ^[1]	150 Wh/kg	135 Wh/kg	120 Wh/kg	205 Wh/kg	185 Wh/kg	170 Wh/kg

Energiedichte für Batteriepacks

	2020			2030		
	Best Case	Base Case	Worst Case	Best Case	Base Case	Worst Case
Energiedichte Batteriezelle ^[1]	250 Wh/kg	225 Wh/kg	200 Wh/kg	340 Wh/kg	310 Wh/kg	280 Wh/kg
Energiedichte Batteriepack ^[2]	150 Wh/kg	135 Wh/kg	120 Wh/kg	205 Wh/kg	185 Wh/kg	170 Wh/kg

Referenzen für Szenarien bei Brennstoffzellen- und H₂-Tank-Herstellung

	2020			2030		
	Best Case	Base Case	Worst Case	Best Case	Base Case	Worst Case
Platinanteil	0,38 g/kW	0,43 g/kW	0,47 g/kW	0,15 g/kW	0,165 g/kW	0,18 g/kW
Referenz für Platinanteil	Eigene Annahme: -10% vom Base Case	[Miotti et al., 2017]	Eigene Annahme: +10% vom Base Case	Eigene Annahme: -10% vom Base Case	[Miotti et al., 2017]	Eigene Annahme: +10% vom Base Case
THG-Emissionen Platin	14 t CO ₂ -eq/kg	27 t CO ₂ -eq/kg	30 t CO ₂ -eq/kg	14 t CO ₂ -eq/kg	27 t CO ₂ -eq/kg	30 t CO ₂ -eq/kg
Referenz für THG-Emissionen Platin	[ecoinvent 3.5] Platin aus Russland	[ecoinvent 3.5] Globaler Platinmix, etwa 20% Russland + 80% Südafrika	[ecoinvent 3.5] Platin aus Südafrika	[ecoinvent 3.5] Platin aus Russland	[ecoinvent 3.5] Globaler Platinmix, etwa 20% Russland + 80% Südafrika	[ecoinvent 3.5] Platin aus Südafrika
THG-Emissionen Carbonfaser	20 kg CO ₂ /kg	27,6 kg CO ₂ /kg	39 kg CO ₂ /kg	20 kg CO ₂ /kg	23,5 kg CO ₂ /kg	39 kg CO ₂ /kg
Referenz für THG-Emissionen Carbonfaser	[Miotti et al., 2017]	Eigene Berechnung auf Basis der Dokumentation des Eco Impact Calculators THG-Strom: 805 g CO ₂ -eq/kWh	[Eco Impact Calculator] http://ecocalculator.euica.eu/	[Miotti et al., 2017]	Eigene Berechnung auf Basis der Dokumentation des Eco Impact Calculators THG-Strom: 335 g CO ₂ -eq/kWh	[Eco Impact Calculator] http://ecocalculator.euica.eu/