

---

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

Studie im Auftrag der H2 Mobility

---



André Sternberg, Christoph Hank und  
Christopher Hebling

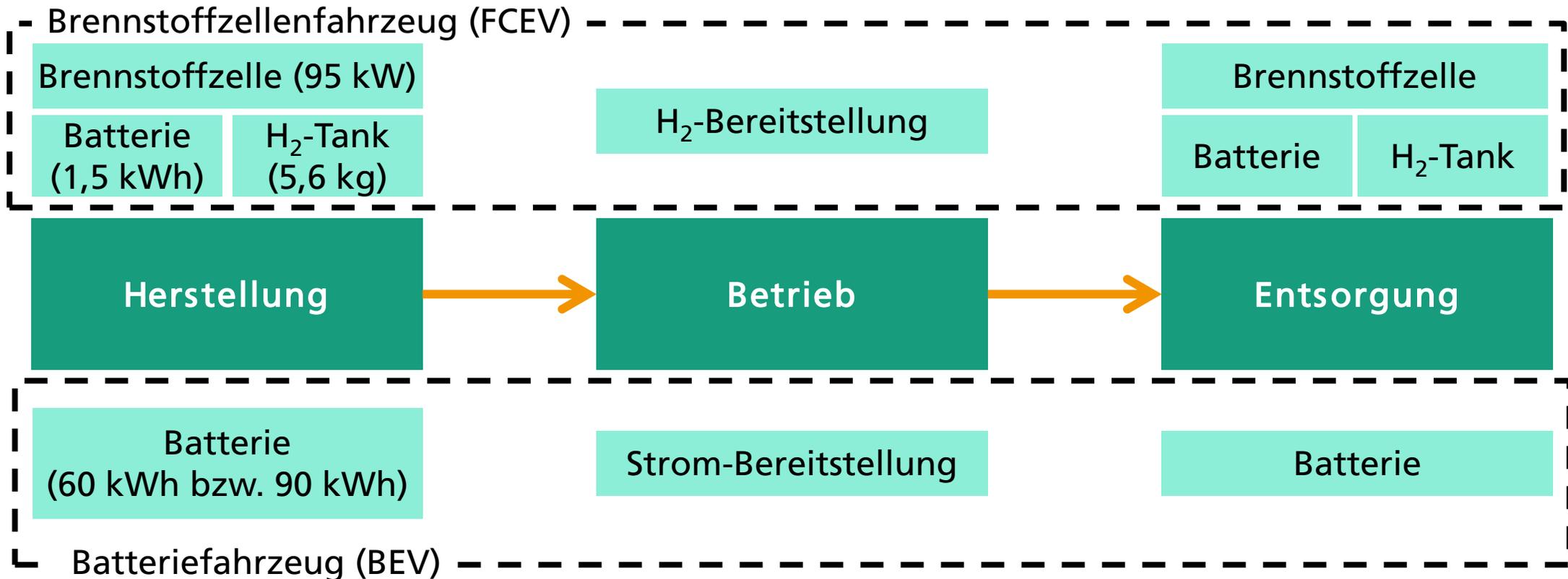
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Freiburg, 13.07.2019

[www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)

# Der betrachtete Lebenszyklus von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug

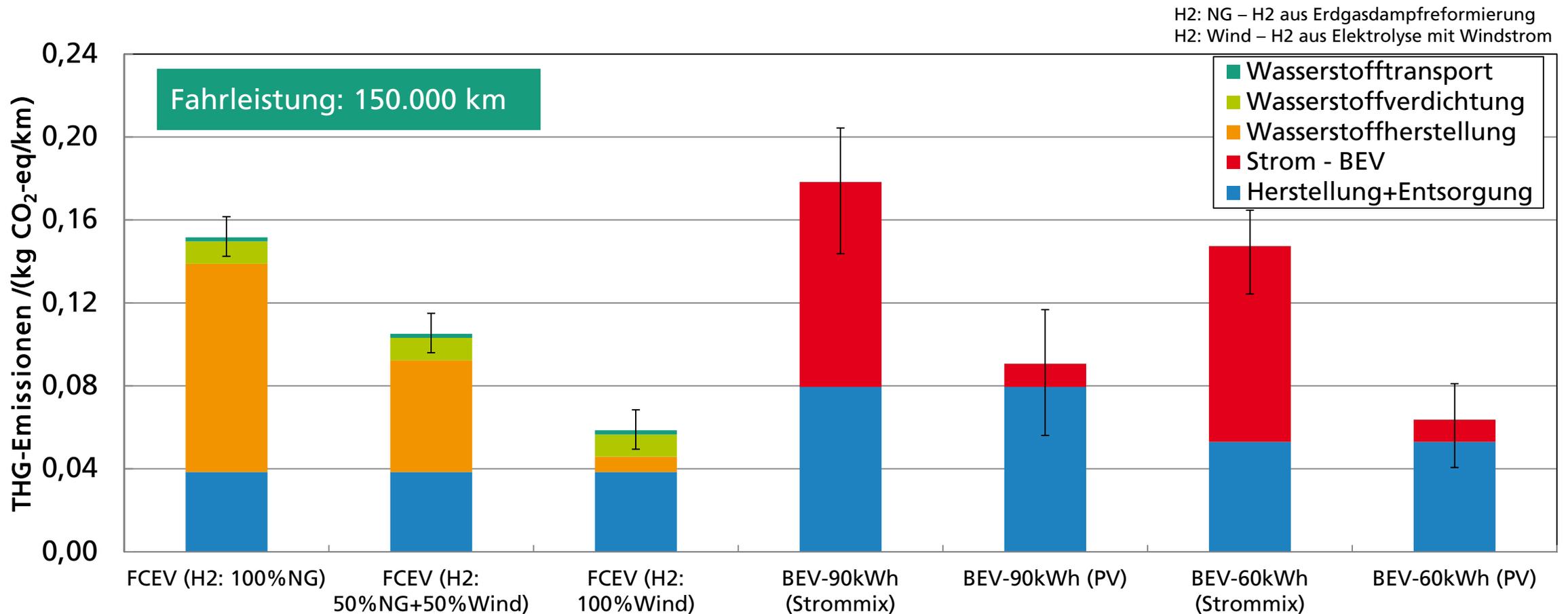
THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030 und 2030-2040



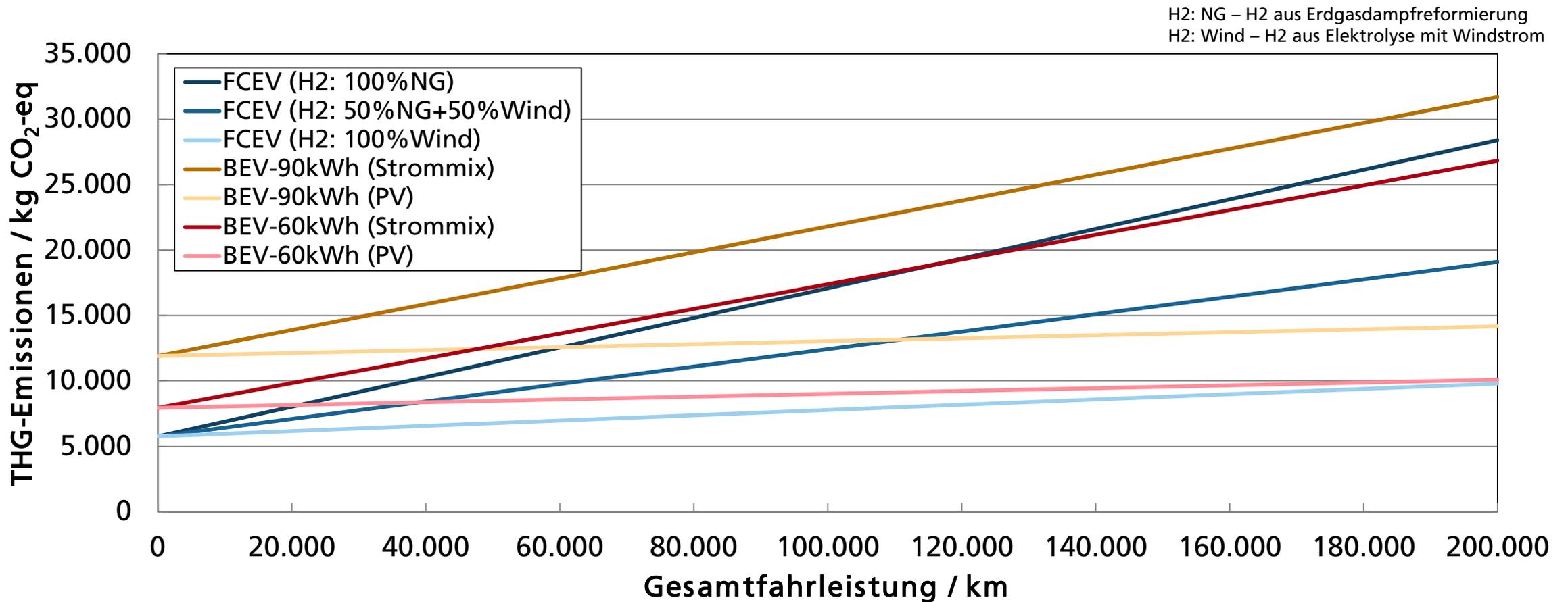
Fahrzeugtyp: SUV

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

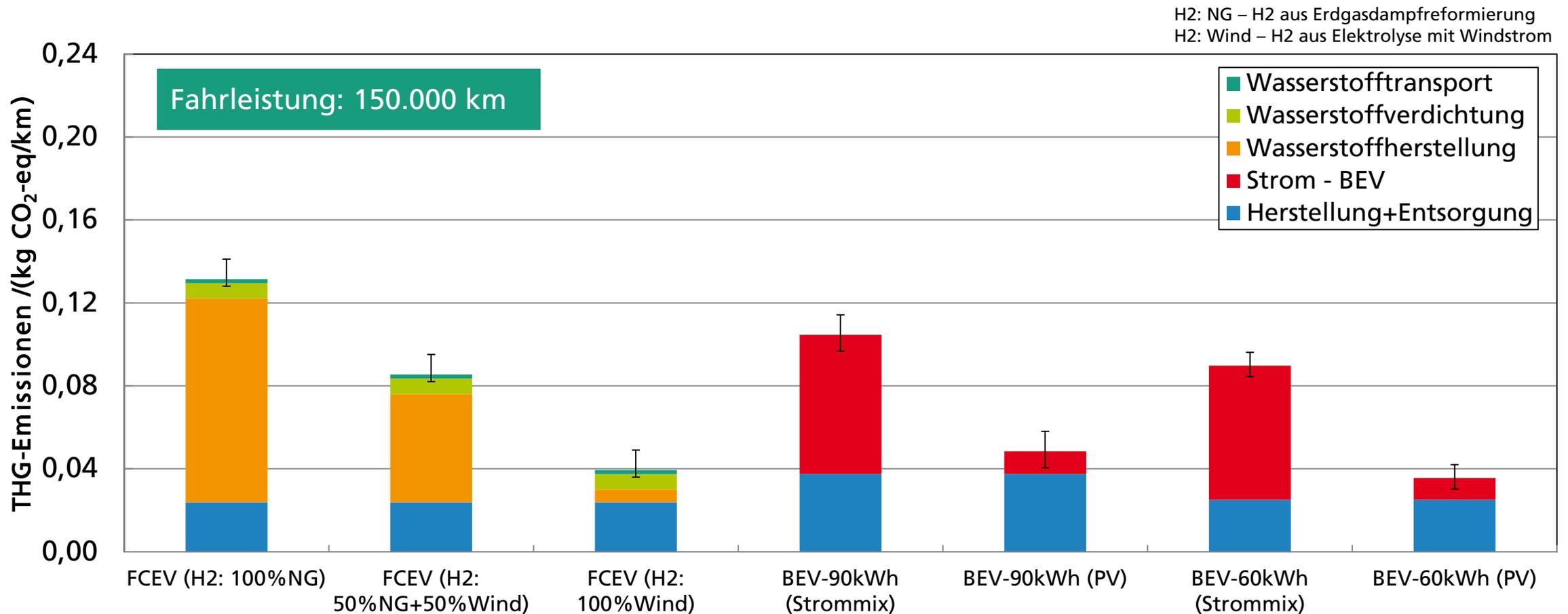
# THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030 (inklusive Herstellung + Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Tank)



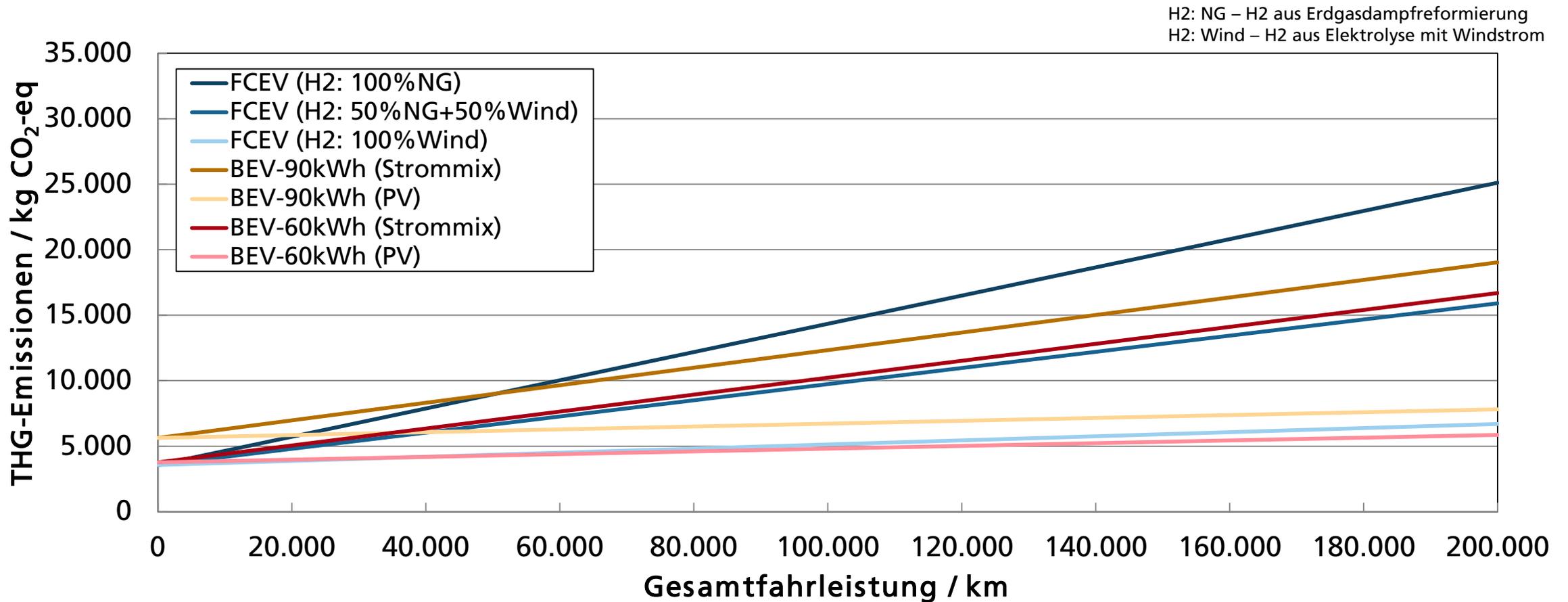
# THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030 (inklusive Herstellung + Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Tank)



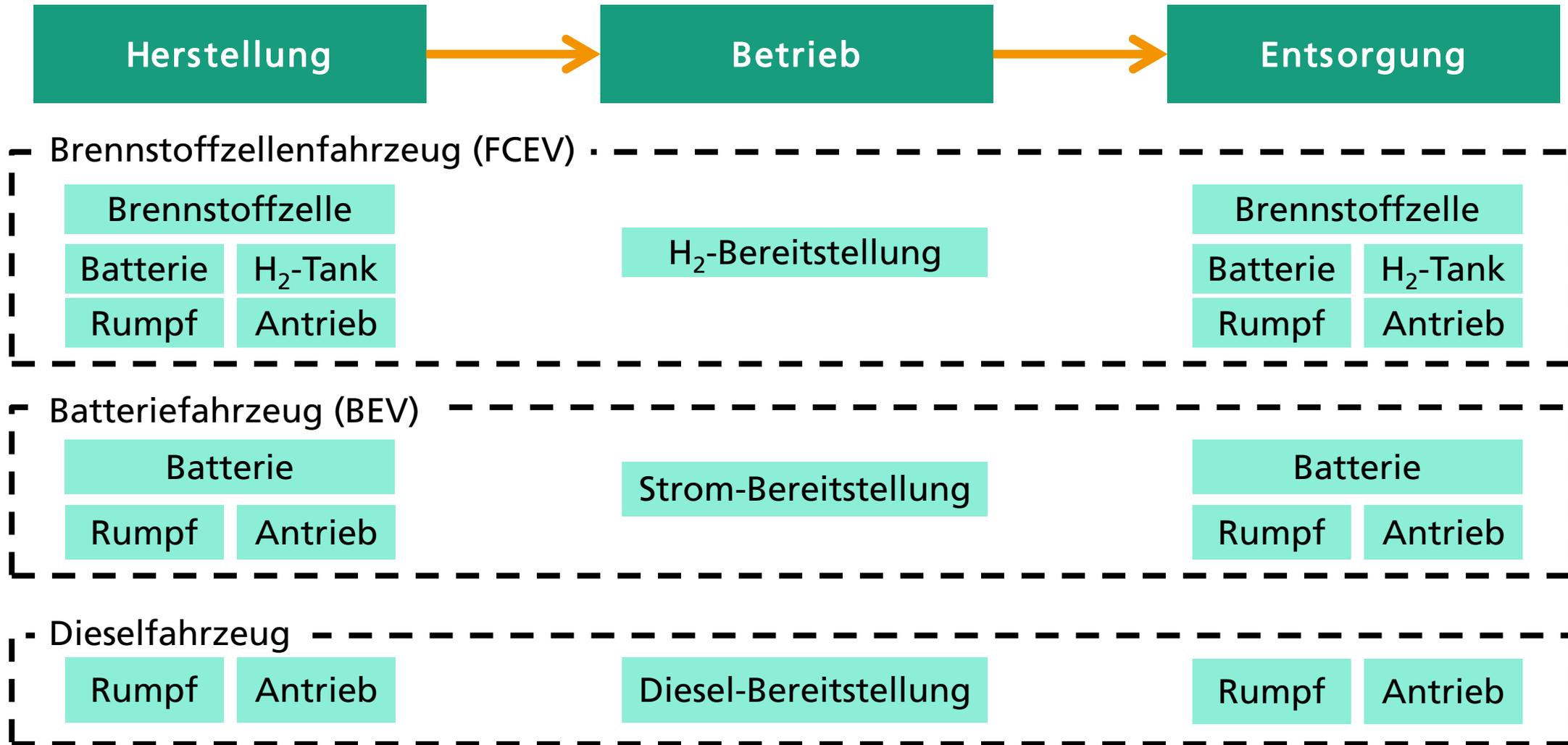
# THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2030-2040 (inklusive Herstellung + Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Tank)



# THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2030-2040 (inklusive Herstellung + Entsorgung Batterie, Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Tank)



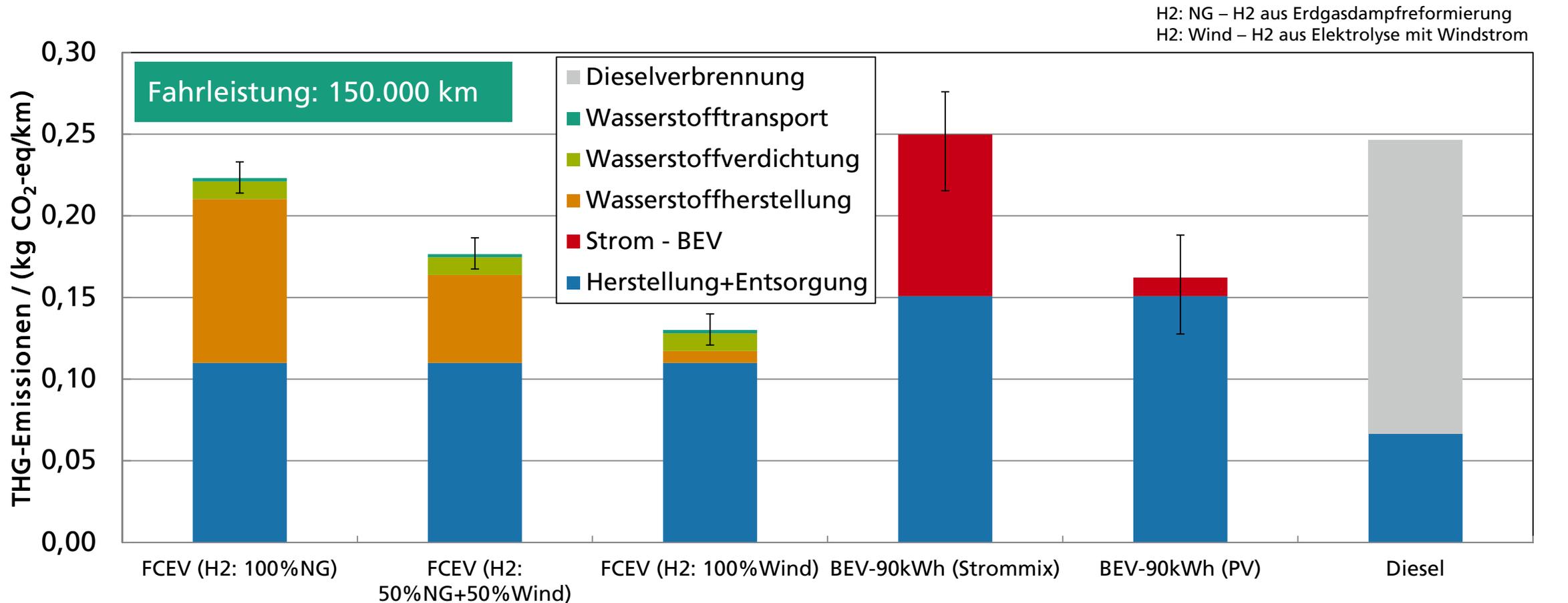
# Vergleich mit Diesel-Fahrzeug (100% fossiler Kraftstoff)



Zeithorizont: Fahrzeugbetrieb von 2020-2030

# THG-Emissionen Fahrzeugbetrieb für 2020-2030

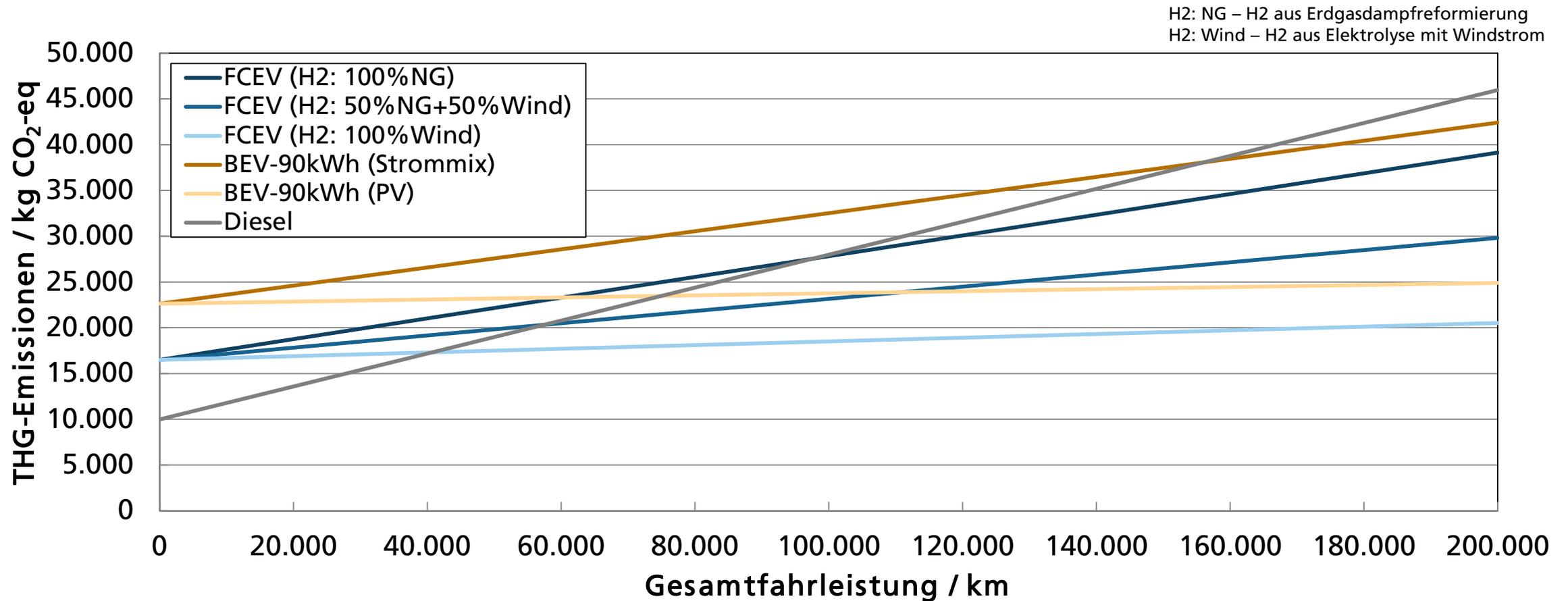
## Vergleich mit Diesel-PKW (100% fossiler Kraftstoff)



Dieselerbrennung enthält auch THG-Emissionen für Dieselerbereitung

# 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 H<sub>2</sub>-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 H<sub>2</sub>-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, H<sub>2</sub>-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

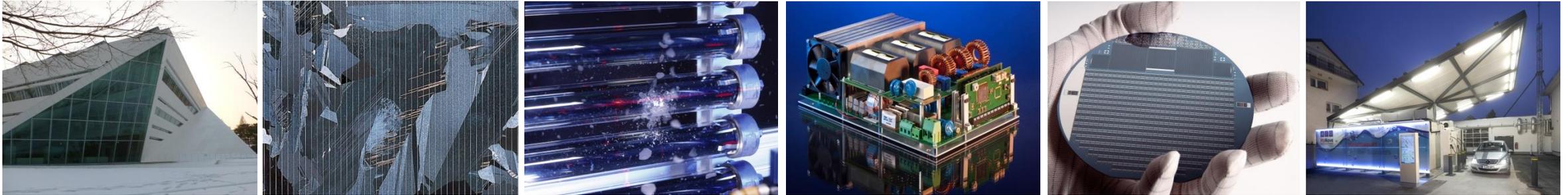
## Batteriefahrzeug

- 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<sup>1,2</sup>, Hofer<sup>1</sup> und Bauer<sup>1</sup> 2017  
Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles  
*The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22, 2017, 94-110
  - <sup>1</sup>Laboratory for Energy Systems Analysis, Paul Scherrer Institute (PSI)
  - <sup>2</sup>Institute 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](http://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 <sup>[1]</sup> (Basis für Vergleich mit Batteriefahrzeug)
  - Wasserstoffverbrauch nach WLTP: 0,95 kg H<sub>2</sub>/100km (genutzt für 2020); 2030: 0,93 kg H<sub>2</sub>/100km
  - Leistung Brennstoffzelle: 95 kW
  - Wasserstofftank: 5,6 kg H<sub>2</sub> → 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 H<sub>2</sub> (Studie IndWEDe, NOW GmbH, Berlin 2019)
  - THG-Emissionen Elektrolyse-Herstellung: 0,18 bzw. 0,08 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub> (2020 bzw. 2030)
- Wasserstoff aus Erdgasdampfreformierung
  - THG-Emissionen: 10,6 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub> (Sternberg et al., Green Chem., 2017, 19, 2244)
- Strombedarf für Wasserstoffverdichtung auf etwa 1000 bar: 2,7 kWh/kg H<sub>2</sub> <sup>[1]</sup>
  - Strombedarf wird durch Strommix gedeckt
- THG-Emissionen H<sub>2</sub>-Transport (200 km): 0,21 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub> <sup>[2]</sup>
- Ladeverluste für Batteriefahrzeuge: 15% (Agora Verkehrswende, 2019)
- THG-Emissionen Strom
  - Strommix 2020-2030: 421 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh (Agora Verkehrswende, 2019)
  - Strommix 2030-2040: 296 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh (Agora Verkehrswende, 2019)
  - PV: 48 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh (IPCC AR5 WGII Annex III, Wert für „Solar PV – utility“)
  - Wind: 11 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh (IPCC AR5 WGII Annex III, Wert für „Wind onshore“)

# Dieselfahrzeug: Bestimmung Fahrzeuggewicht und Verbrauch

## ■ Referenz: Hyundai Tucson 1.6 CRDi (100 kW)

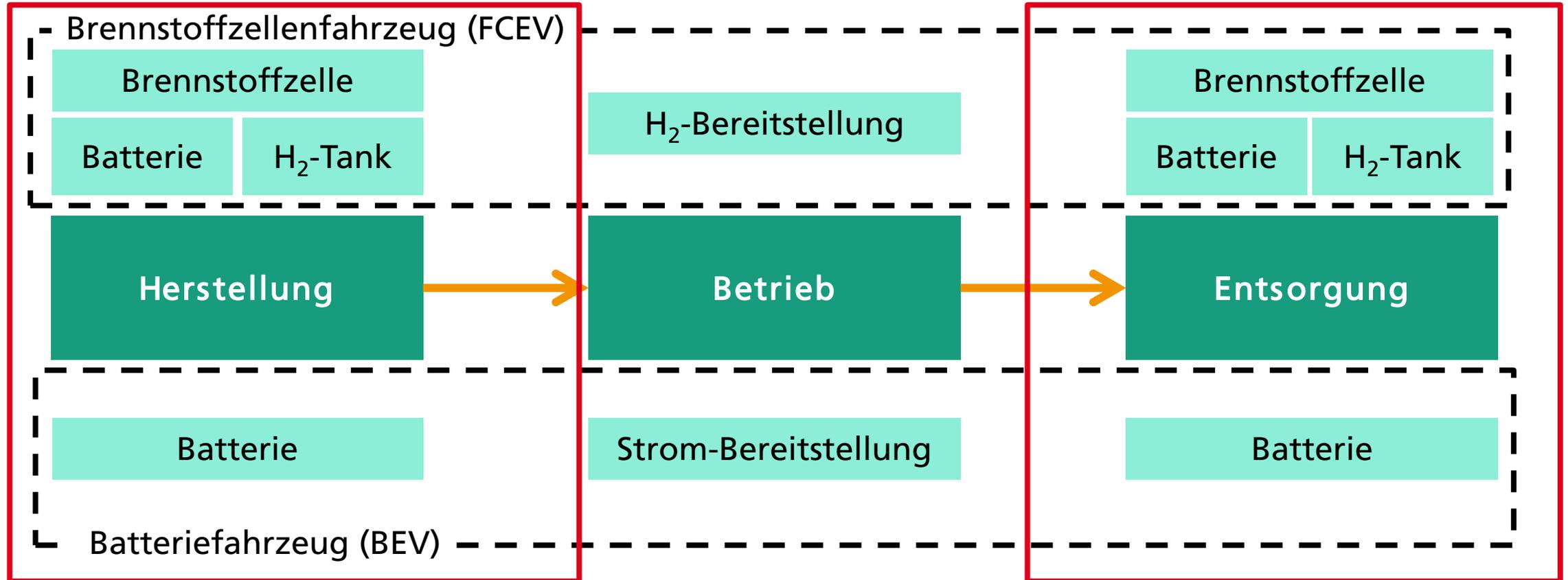
- Leergewicht: 1.683-1.810 kg
- NEFZ-Verbrauch<sup>[1]</sup>: 4,4 l/100km
- CO<sub>2</sub>-Emissionen nach NEFZ: 117 g/km
- CO<sub>2</sub>-Emissionen nach WLTP: 157 g/km
- WLTP-Verbrauch<sup>[2]</sup>: 5,9 l/100km

## ■ 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

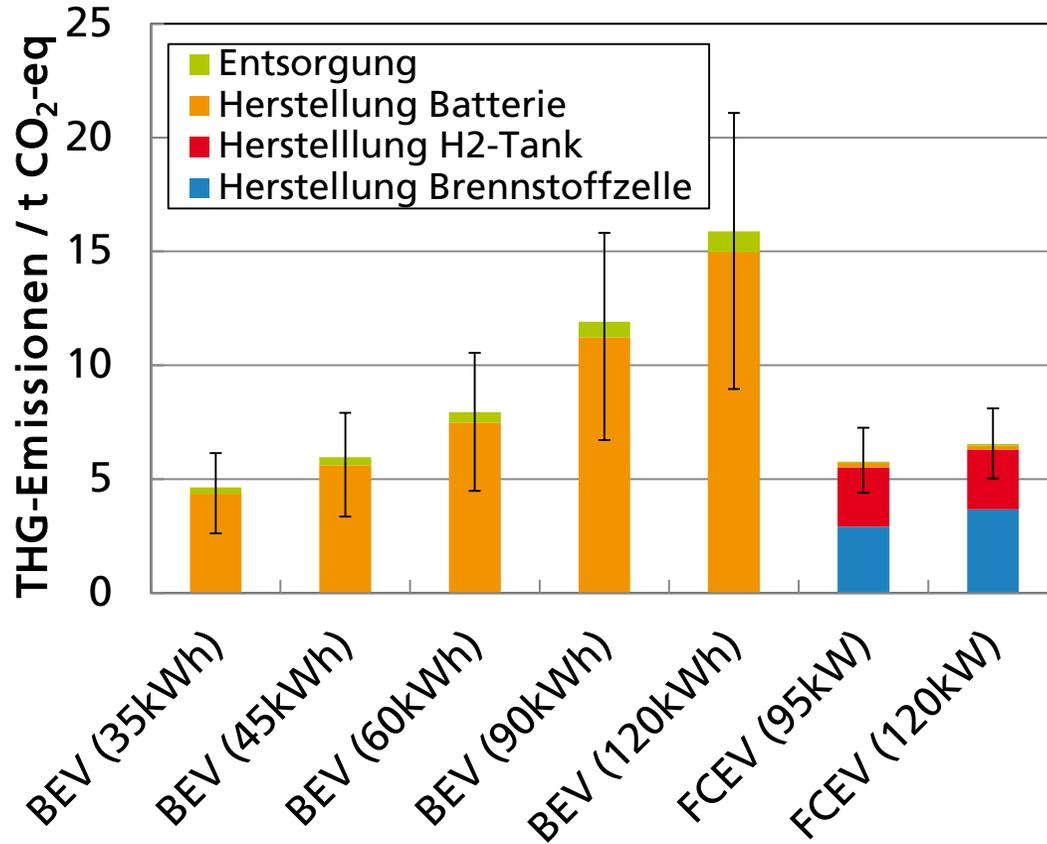


# Herstellung + Entsorgung: Treibhausgasemissionen

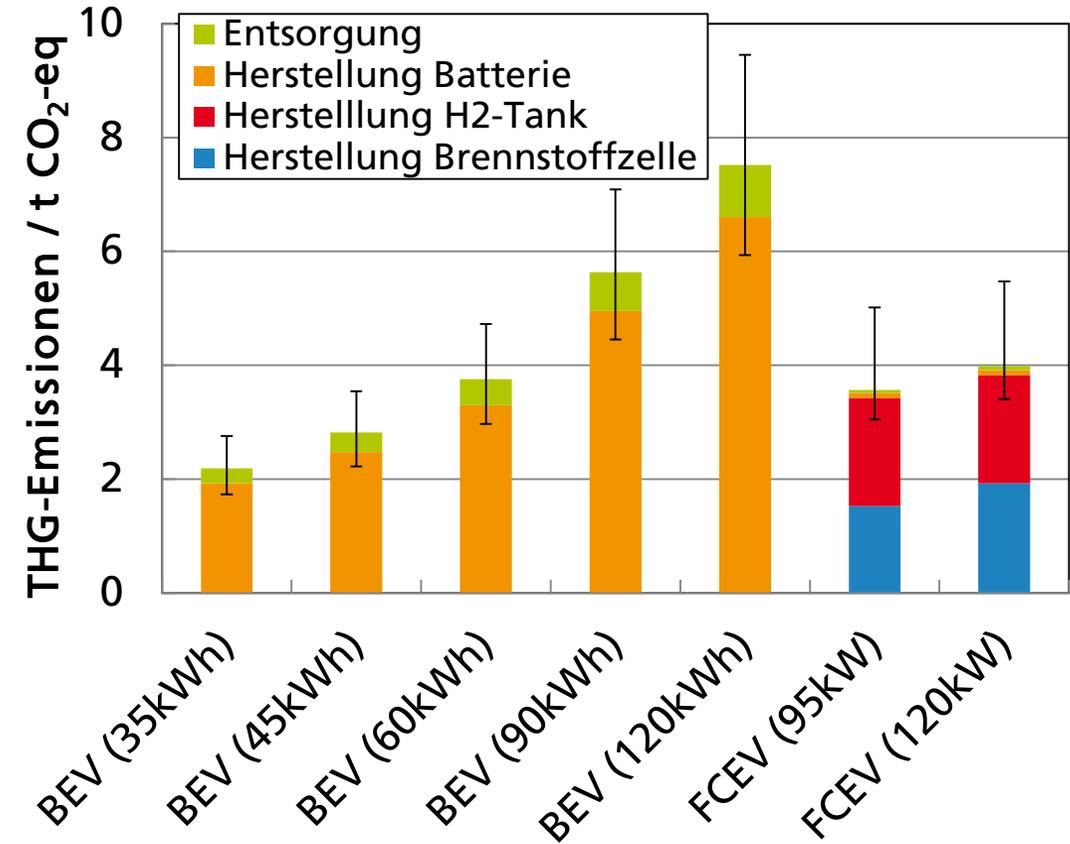
THG Brennstoffzellensystem mit 95 kW  
 ≈ THG Batterie mit 45 kWh

THG Brennstoffzellensystem mit 95 kW  
 ≈ THG Batterie mit 60 kWh

2020

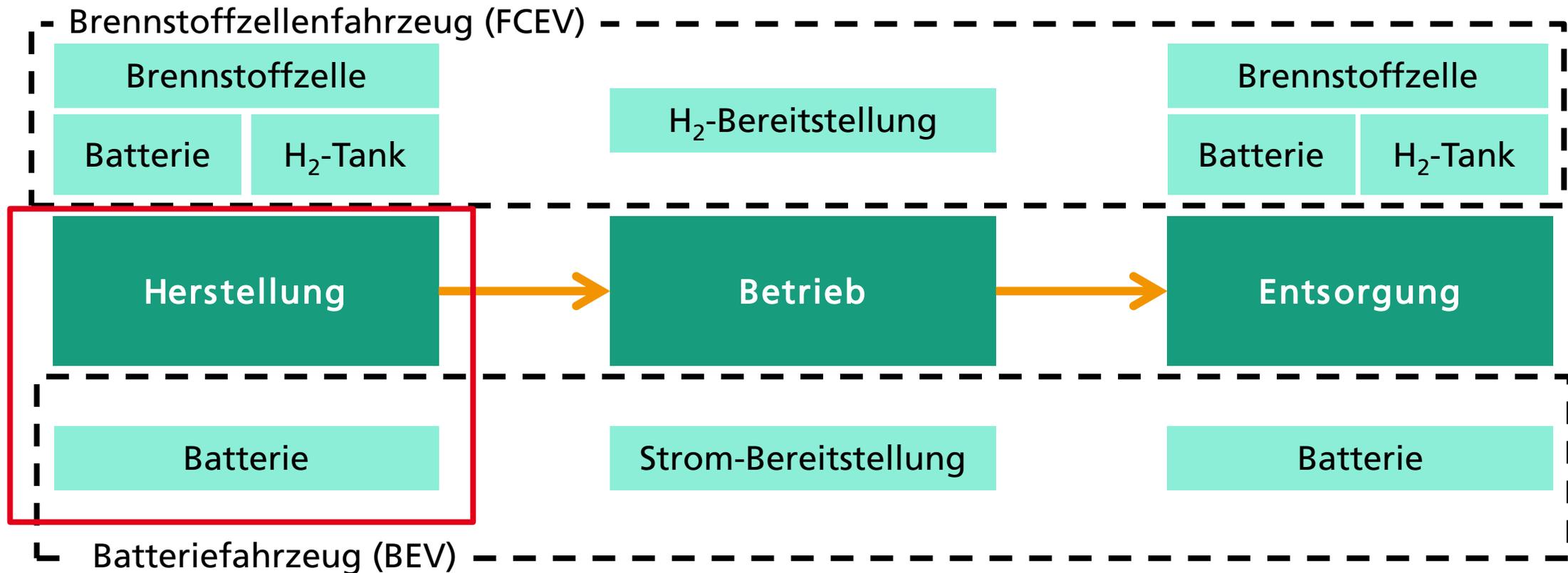


2030



# Der betrachtete Lebenszyklus von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeug

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



# Wichtigste Annahmen für die Batterie

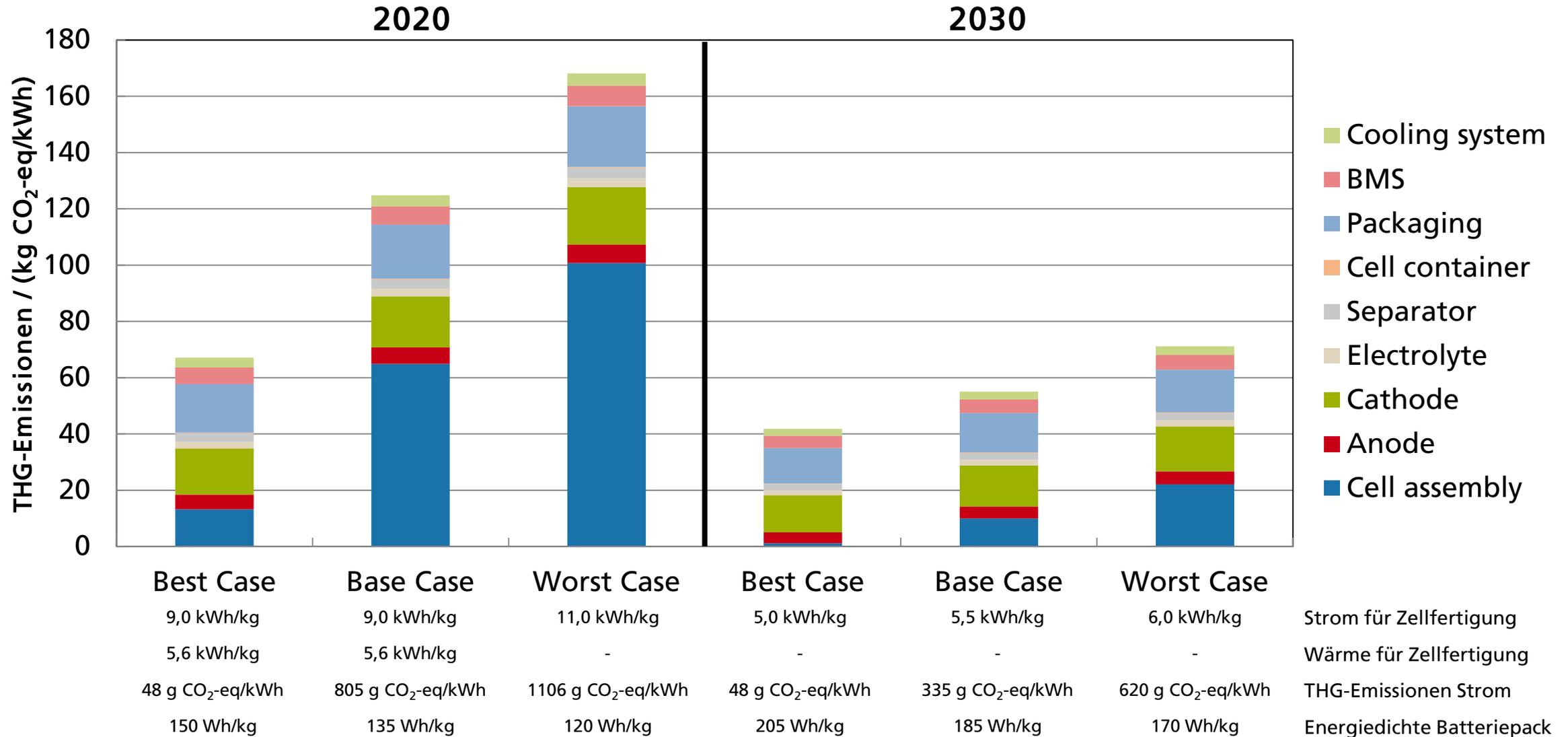
	2020	2030
Zellchemie <sup>[1]</sup>	NCM (6:2:2)	NCM (9:0,5:0,5)
Zellcontainer <sup>[2]</sup>	Pouch	
Pack housing <sup>[2]</sup>	Aluminium	
Elektrolyt - Salz <sup>[2]</sup>	LiPF <sub>6</sub>	
Lösungsmittel <sup>[2,4]</sup>	N-methyl-2-pyrrolidone	
Energiedichte (Batteriepack) <sup>[3]</sup>	135 Wh/kg	185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

N – Nickel  
 C – Kobalt  
 M - Mangan

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

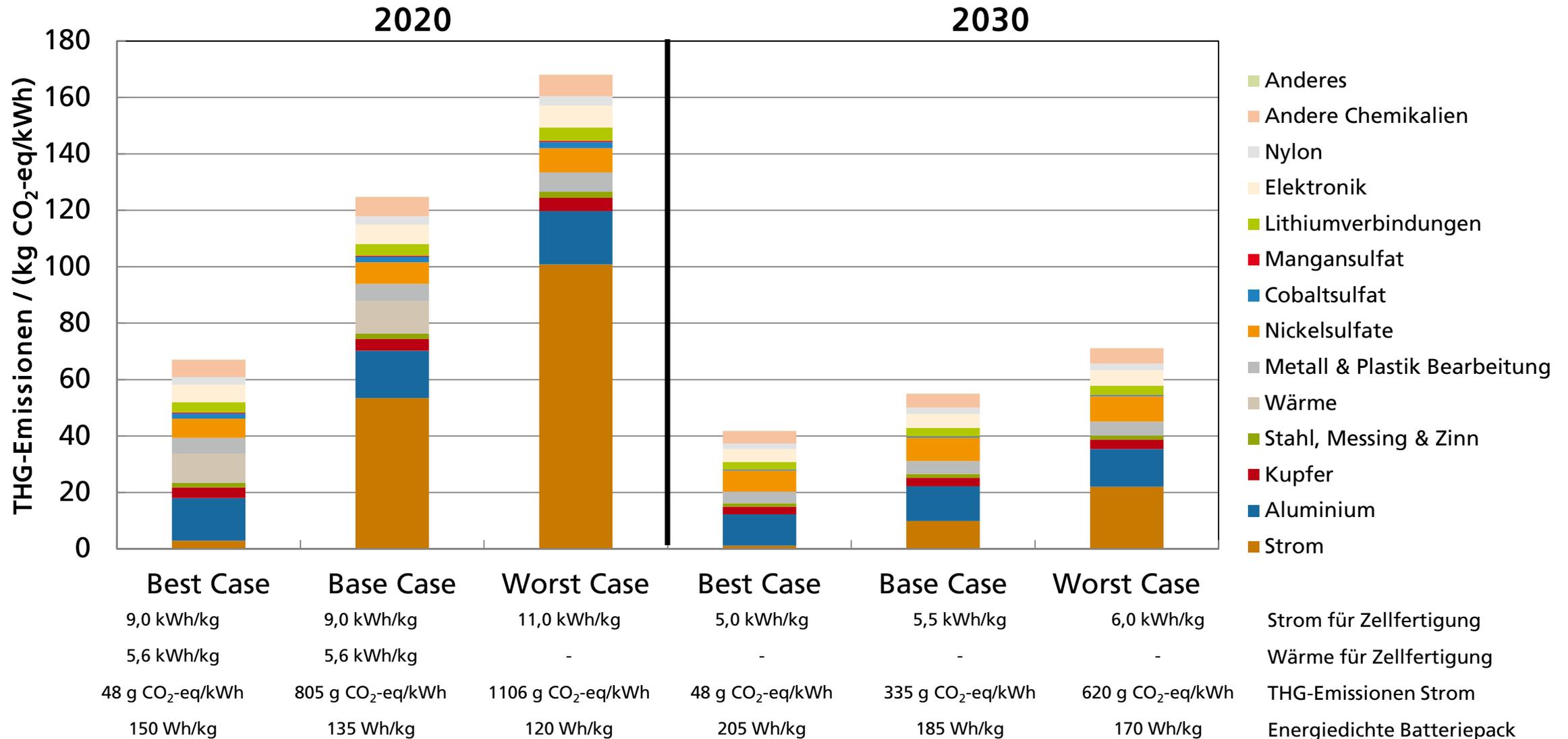
Daten für Herstellung der Batterie basieren auf [2]

# Batterieherstellung: THG-Emissionen



- 2020: Energie für Zellfertigung hat sehr großen Anteil
- 2030: Beitrag sinkt durch geringeren Strombedarf/CO<sub>2</sub>-Footprint Strom

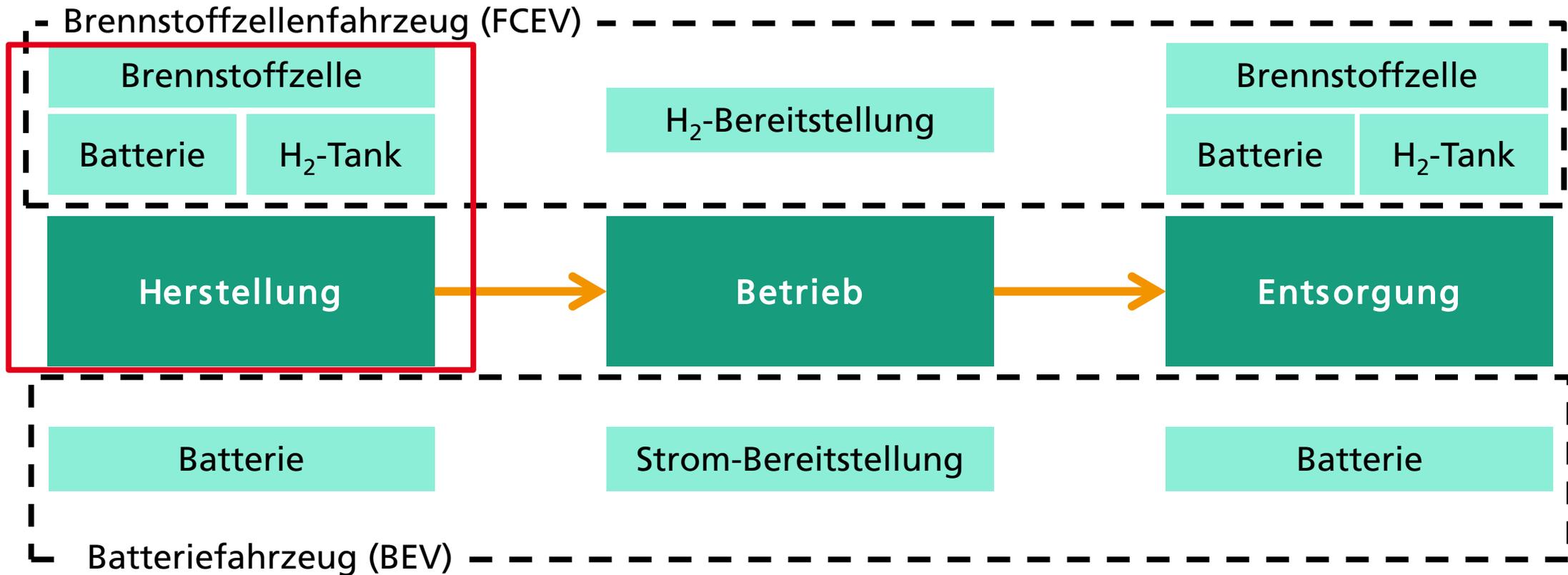
# Batterieherstellung: THG-Emissionen detaillierter aufgelöst



- 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 <sup>[1]</sup>	0,4 mg/cm <sup>2</sup>	0,2 mg/cm <sup>2</sup>
Leistungsdichte <sup>[1]</sup>	1060 mW/m <sup>2</sup>	1310 mW/m <sup>2</sup>
Platinanteil <sup>[1]</sup>	0,43 g/kW	0,165 g/kW

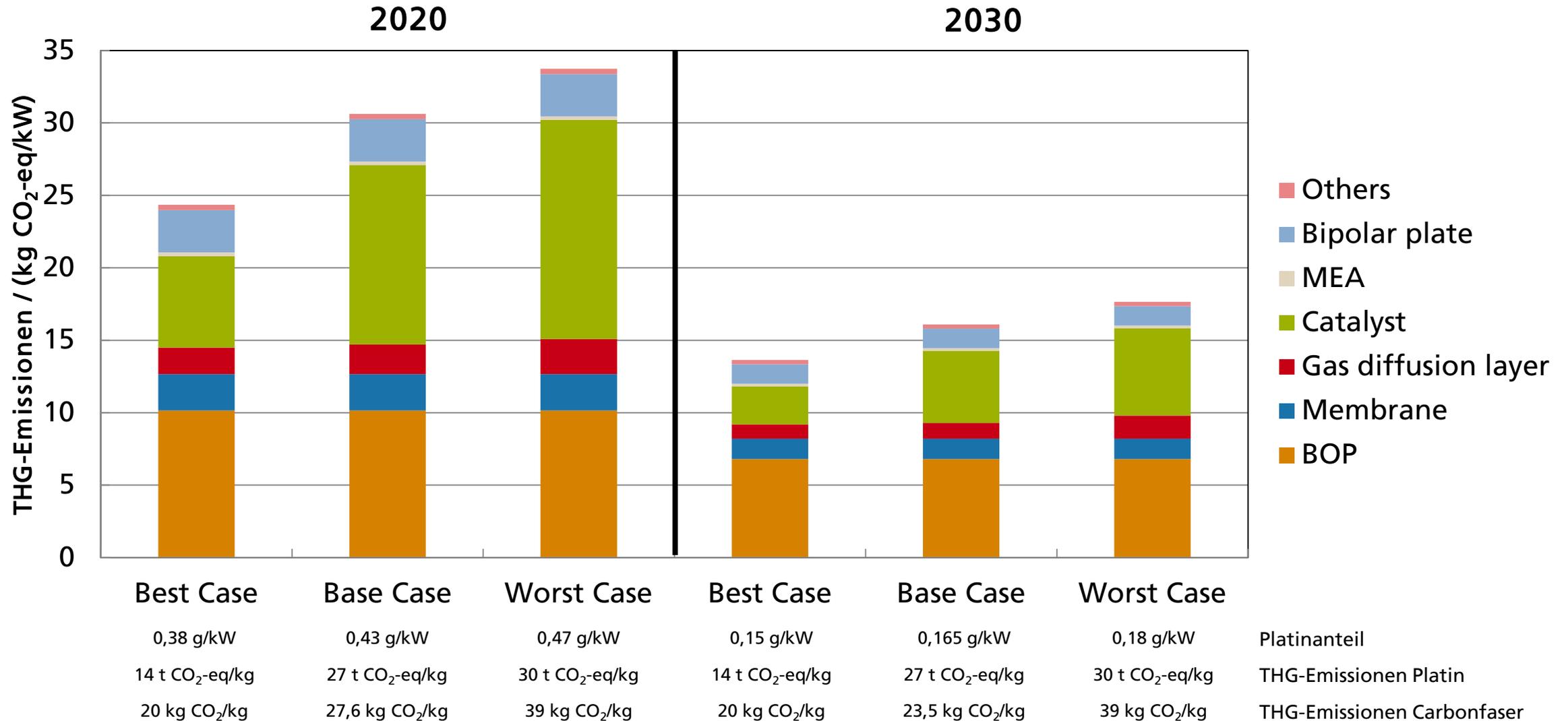
Brennstoffzelle wurde in der LCA-Software Umberto LCA+ mit der Datenbank ecoinvent 3.5 modelliert

Daten für Herstellung der Brennstoffzelle basieren auf [1]

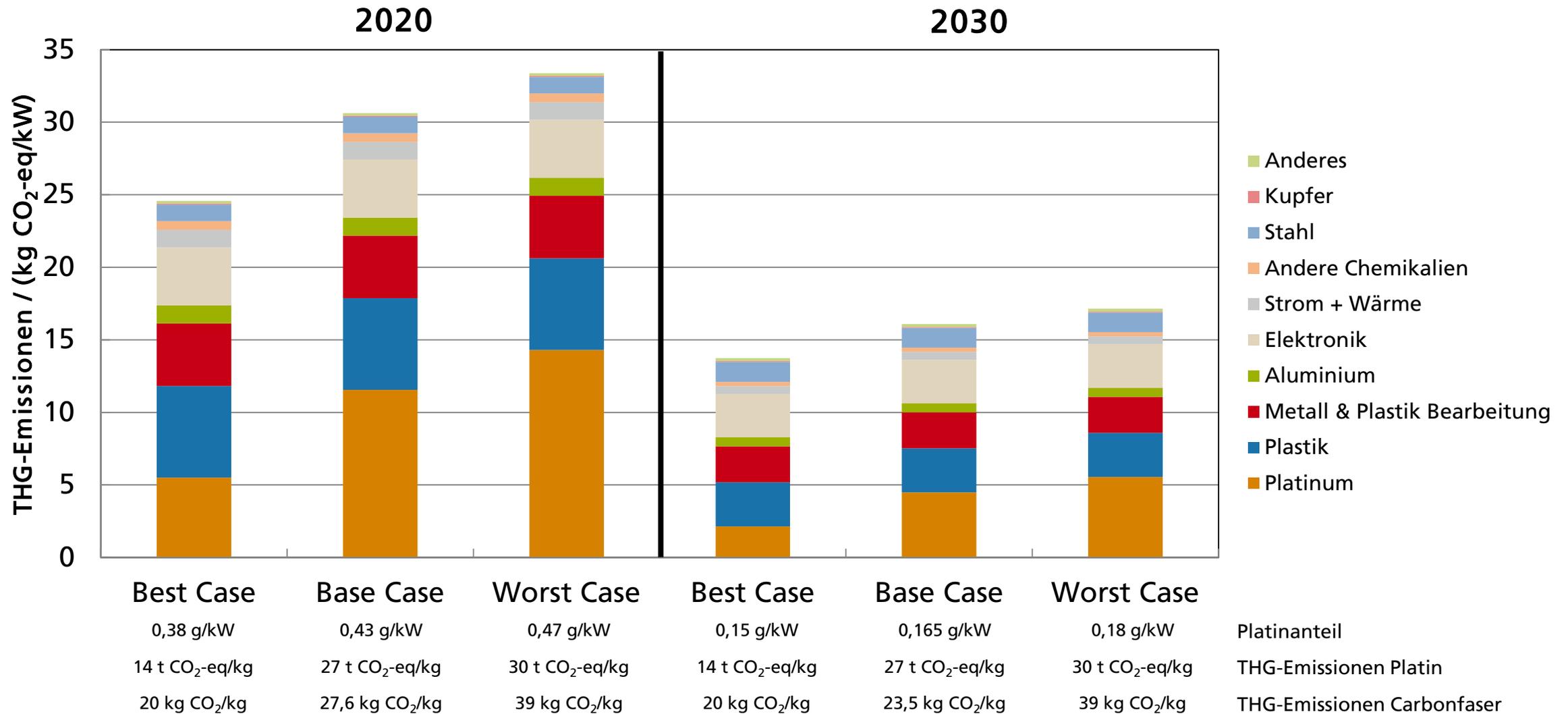
# Brennstoffzellenherstellung: THG-Emissionen

MEA – Membrane electrode assembly

BOP – Balance of plant



# Brennstoffzellenherstellung: THG-Emissionen detaillierter aufgelöst



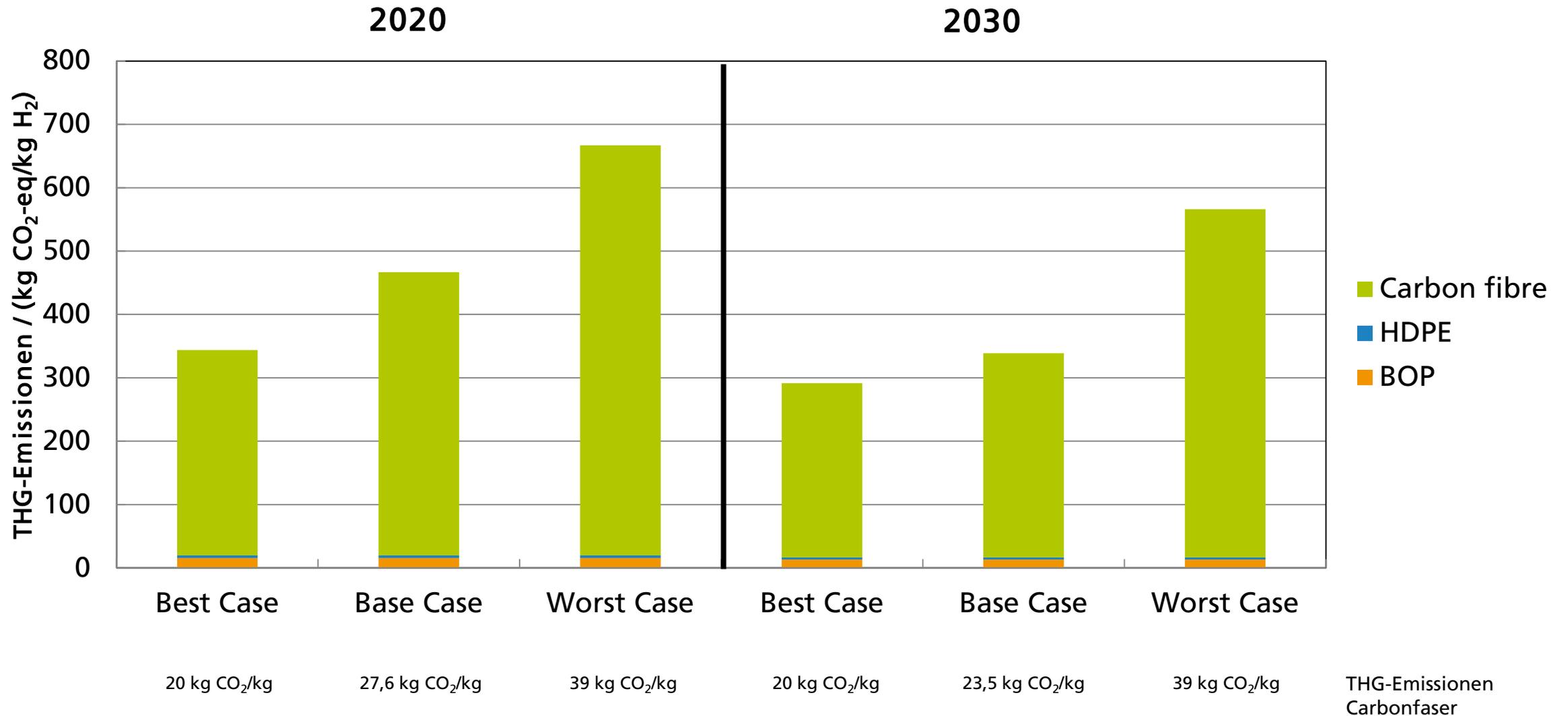
# Wichtigste Annahmen für den Wasserstofftank

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

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 <sub>2</sub> -eq/kWh	805 g CO <sub>2</sub> -eq/kWh	1106 g CO <sub>2</sub> -eq/kWh	48 g CO <sub>2</sub> -eq/kWh	335 g CO <sub>2</sub> -eq/kWh	620 g CO <sub>2</sub> -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 <sup>[1]</sup>	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 <sup>[1]</sup>	250 Wh/kg	225 Wh/kg	200 Wh/kg	340 Wh/kg	310 Wh/kg	280 Wh/kg
Energiedichte Batteriepack <sup>[2]</sup>	150 Wh/kg	135 Wh/kg	120 Wh/kg	205 Wh/kg	185 Wh/kg	170 Wh/kg

# Referenzen für Szenarien bei Brennstoffzellen- und H<sub>2</sub>-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 <sub>2</sub> -eq/kg	27 t CO <sub>2</sub> -eq/kg	30 t CO <sub>2</sub> -eq/kg	14 t CO <sub>2</sub> -eq/kg	27 t CO <sub>2</sub> -eq/kg	30 t CO <sub>2</sub> -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 <sub>2</sub> /kg	27,6 kg CO <sub>2</sub> /kg	39 kg CO <sub>2</sub> /kg	20 kg CO <sub>2</sub> /kg	23,5 kg CO <sub>2</sub> /kg	39 kg CO <sub>2</sub> /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 <sub>2</sub> -eq/kWh	[Eco Impact Calculator] <a href="http://ecocalculator.euica.eu/">http://ecocalculator.euica.eu/</a>	[Miotti et al., 2017]	Eigene Berechnung auf Basis der Dokumentation des Eco Impact Calculators THG-Strom: 335 g CO <sub>2</sub> -eq/kWh	[Eco Impact Calculator] <a href="http://ecocalculator.euica.eu/">http://ecocalculator.euica.eu/</a>