

AUTOREN



**Tobias Stoll, M. Sc.**  
ist Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter am Institut  
für Fahrzeugtechnik  
Stuttgart (IFS) der  
Universität Stuttgart.



**Andreas Geß, M. Sc.**  
ist Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter bei der  
Abteilung Ganzheitliche  
Bilanzierung des Instituts  
für Akustik und Bau-  
physik (IABP) an der  
Universität Stuttgart.



**Prof. Dr.-Ing.  
Michael Bargende**  
ist Inhaber des Lehrstuhls  
Fahrzeugantriebssysteme  
am Institut für Fahrzeug-  
technik Stuttgart (IFS) der  
Universität Stuttgart.



**Prof. Dr.-Ing.  
Philip Leistner**  
ist Direktor des Instituts  
für Akustik und Bau-  
physik (IABP) der  
Universität Stuttgart.

# Antriebsstrangkonfigurationen zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Ziele für 2040

Mit dem im EU-Parlament in der Umsetzung befindlichen Ziel, bis 2035 nur noch klimaneutrale Fahrzeuge zuzulassen, wird oft die Umstellung des motorisierten Individualverkehrs auf batterieelektrische Fahrzeuge verbunden. Im bereits 2018 initiierten Forschungsvorhabens „Antriebsstrang 2040“ (FVV-Nr. 1355) wurden an der Universität Stuttgart Szenarien untersucht, die dem rein batterieelektrischen Antrieb in Pkw und leichten Nfz hinsichtlich des Treibhauspotenzials verschiedene Antriebsstrangarchitekturen gegenüberstellen.



© [M] IABP | Shutterstock.com

1 UNTERSUCHUNGEN

2 FAHRZEUGVARIANTEN

3 ANTRIEBSSTRANGSIMULATION

4 LIFE CYCLE ASSESSMENT

5 TOTAL COST OF OWNERSHIP

6 ZUSAMMENFASSUNG

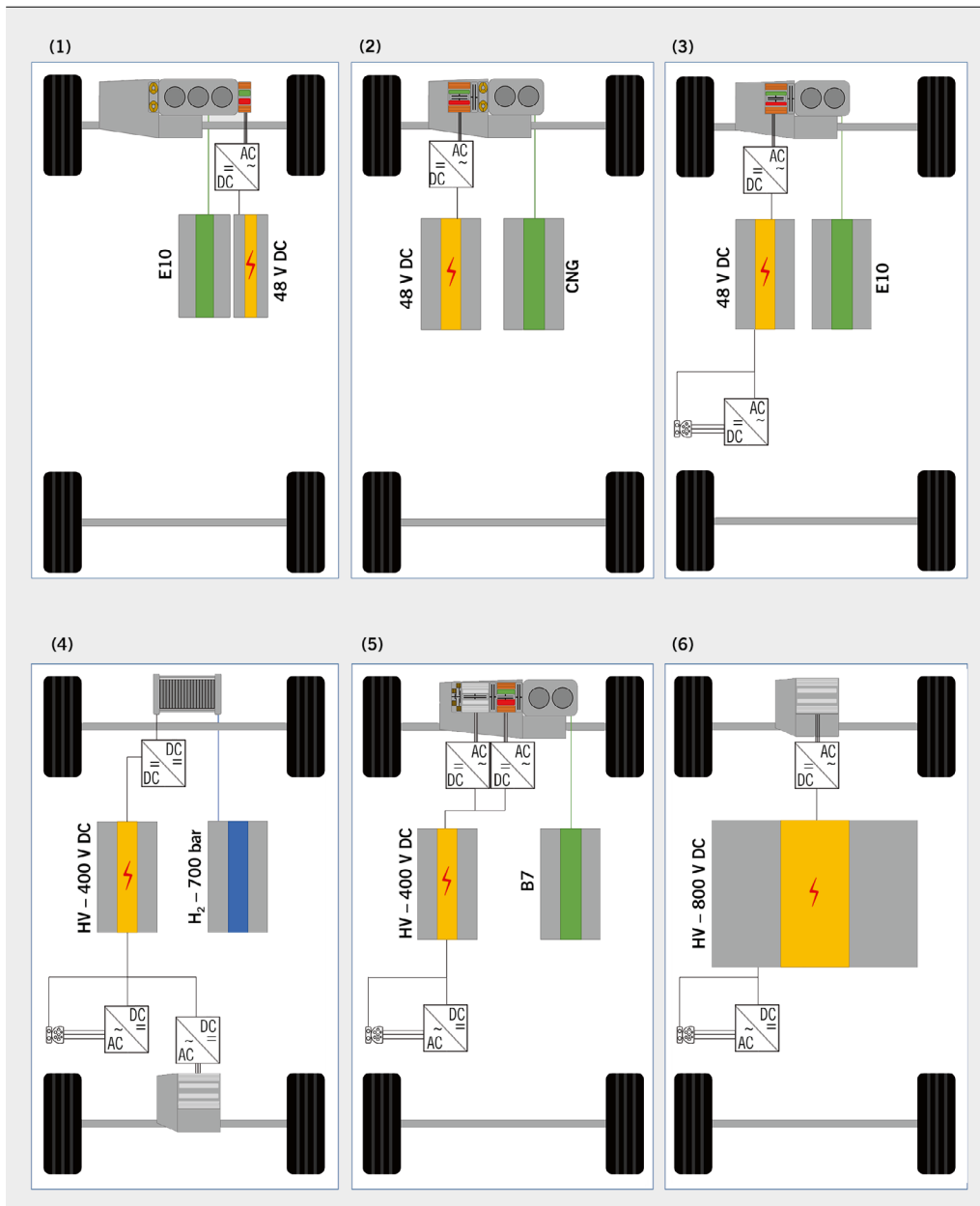
1 UNTERSUCHUNGEN

Am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart wurden detaillierte Antriebsstrangsimulationen und Technologieabschätzungen durchgeführt. Am ebenfalls der Universität angehörigen Institut für Akustik und Bauphysik (IABP),

Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung (GaBi), wurden Szenarien für Lebenszyklusanalysen im Bezug zum Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) und den damit verbundenen Kosten aus Nutzersicht bewertet. Die Analyse umfasst 57 Fahrzeuge in drei verschiedenen Typklassen: Limousine, SUV und Nfz mit 7,5 t maximaler Gesamtmasse.

2 FAHRZEUGVARIANTEN

Für diesen Beitrag wurden sechs repräsentative Antriebsstrangvarianten in der Konfiguration Limousine ausgewählt, deren Antriebskonfigurationen schematisch in **BILD 1** und die zugehörigen Leistungsdaten in **TABELLE 1** dargestellt sind. Variante (1) ist ein Hybridfahrzeug mit PO-Anordnung (PO Hybrid Electric Vehicle, PO-HEV). Der Verbrennungsmotor ist ein Ottomotor mit Vorkammerzündung und variablem Verdichtungsverhältnis. Variante (2) ist ein



**BILD 1** Repräsentative Antriebsstrangvarianten: (1) PO-HEV-48-V-E10 (Benzin); (2) P2-HEV-400-V-CNG (Erdgas); (3) P2-PHEV-400-V-E10 (Benzin); (4) S-PHEV-400-V-H<sub>2</sub> (Brennstoffzelle); (5) S/P2-PHEV-400-V-B7 (Diesel); (6) BEV-800-V (© FKFS)

	Einheiten	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Leistung Verbrennungsmotor (ICE)	kW	100	75	60	–	60	–
Elektrische Antriebsleistung	kW	12	25	40	100	160	100
Leistung Brennstoffzelle (FC)	kW	–	–	–	60	–	–
Kraftstoff	-	E10	CNG	E10	H <sub>2</sub>	B7	–
Batteriekapazität	kWh	0,5	1,8	16	30	16	140
Mittlere Zwischenkreisspannung	V	48	400	400	400	400	800
Gesamtmasse mit Fahrendem	kg	1651	1677	1700	1798	1752	2049

**TABELLE 1** Leistungsdaten der ausgewählten Antriebsstrangvarianten (© FKFS)

P2-HEV. Der Verbrennungsmotor weist die gleichen Eigenschaften wie bei (1) auf und wird mit Erdgas (Compressed Natural Gas, CNG) betrieben. Bei Variante (3) handelt es sich um ein P2-Plug-In(P) HEV. Dessen Ottomotor hat eine Vorkammerzündung, jedoch ohne variables Verdichtungsverhältnis. Bei Variante (4) handelt es sich um einen seriellen (S-)PHEV. Das wasserstoffbetriebene Brennstoffzellensystem weist ein maximalen Systemwirkungsgrad von 61 % auf – bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff. Die Brennstoffversorgung findet über einen Drucktank mit 700 bar statt. Variante (5) ist ein Seriell/Parallel(S/P)2-PHEV. Der Verbrennungsmotor ist ein Dieselmotor mit einem Einspritzdruck von 2800 bar und einem zweistufigen System der selektiven katalytischen Reduktion (SCR). Variante (6) ist ein batterieelektrisches Fahrzeug (BEV).

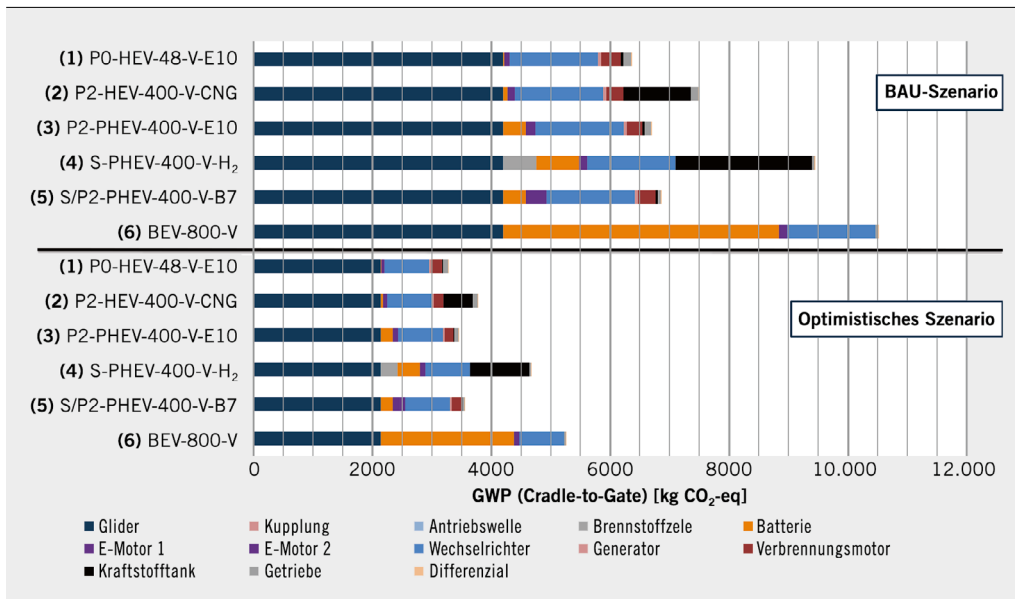
**3 ANTRIEBSSTRANGSIMULATION**

Die sechs Antriebsstrangvarianten werden mit einer optimiert abgestimmten Version der äquivalenten Verbrauchsminimierungsstrategie (Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS) betrieben. Diese weist vergleichbar gute Ergebnisse auf wie die mit dem Dynamic-Programming-Algorithmus (DP) erzeugte Optimie-

rung, kann jedoch flexibler konfiguriert werden [1]. Die Antriebsstrangvarianten werden repräsentativ für zwei Fahrzyklen ausgewertet: für einen hochdynamischen Real-Driving-Emission(RDE)-Zyklus – mit Betrieb im Ladeerhaltungsmodus (Charge-sustaining Mode, CS) – und für einen Stadtzyklus, der den Worldwide harmonized Light Duty Test Cycles (WLTCs) low und medium entspricht – mit Betrieb im rein elektrischen Modus bis zur unteren Ladezustandsgrenze (Charge-depleting Mode, CD). Kraftstoffverbräuche sowie lokale CO<sub>2</sub>-Emissionen für beide Fahrzyklen können **TABELLE 2** entnommen werden. Die Ergebnisse für die lokalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigen, dass die PHEVs mit Verbrennungsmotor (ICE) (3) und (5) sowie PHEV mit Brennstoffzelle (FC) (4) und BEV (6) lokal im urbanen Verkehr frei von CO<sub>2</sub>-Emissionen betrieben werden können. Die Varianten (4) und (6) sind zudem unter allen Betriebsbedingungen lokal CO<sub>2</sub>-emissionsfrei. Bei den Varianten (1) und (3) sinkt mit steigendem Hybridisierungsgrad der Kraftstoffverbrauch im RDE-Zyklus deutlich ab. Variante (2) weist aufgrund der Nutzung von CNG als Kraftstoff niedrige lokale CO<sub>2</sub>-Emissionen auf. Der Dieselmotor (5) zeigt aufgrund der einfacheren Antriebsstrangarchitektur und der aufwendigen Abgasnachbehandlung im Vergleich zum Benzin-PHEV (3) leicht erhöhte CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Variablen	Einheiten	(1) HEV		(2) HEV		(3) PHEV (ICE)	
		RDE-Zyklus	Stadtzyklus	RDE-Zyklus	Stadtzyklus	RDE-Zyklus	Stadtzyklus
Kraftstofftyp	-	E10-Benzin		CNG		E10-Benzin	
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	4,23	3,84	–	–	2,89	0,02
Kraftstoffverbrauch	kg/100 km	–	–	2,49	1,89	–	–
Elektrischer Energieverbrauch	kWh/100 km	–	–	–	–	0,64	8,43
Lokale CO <sub>2</sub> -Emissionen	g/km	93	85	68	52	64	0
Variablen	Einheiten	(4) PHEV (FC)		(5) PHEV (ICE)		(6) BEV	
		RDE-Zyklus	Stadtzyklus	RDE-Zyklus	Stadtzyklus	RDE-Zyklus	Stadtzyklus
Kraftstofftyp	-	Wasserstoff H <sub>2</sub>		B7-Diesel		–	
Kraftstoffverbrauch	l/100 km	–	–	2,96	0,00	–	–
Kraftstoffverbrauch	kg/100 km	0,52	0,00	–	–	–	–
Elektrischer Energieverbrauch	kWh/100 km	-0,09	9,81	-0,02	7,29	13,44	9,80
Lokale CO <sub>2</sub> -Emissionen	g/km	0	0	78	0	0	0

**TABELLE 2** Kraftstoffverbrauch und lokale CO<sub>2</sub>-Emissionen der Antriebsstrangvarianten (© FKFS)



**BILD 2** GWP bei der Herstellung der verschiedenen Fahrzeugvarianten im BAU-Szenario und im optimistischen Szenario (© IABP)

#### 4 LIFE CYCLE ASSESSMENT

Der Ökobilanzteil dieser Studie wird nach den in DIN EN ISO 14040 und 14044 festgelegten Schritten erstellt [2, 3]. Für die

Modellierung wird die Software GaBi Professional mit der Datenbankversion 2021.2 [4] verwendet und als Charakterisierungsmethode CML2001 – Version 2016 eingesetzt [5]. Als Wirkungskategorie werden Treibhausgas(THG)-Emissionen herangezogen.

**ATZ** live

FACHKONFERENZEN FÜR FAHRZEUG- UND MOTORENINGENIEURE

Jetzt online  
buchen!



[www.atzlive.de/videos/](http://www.atzlive.de/videos/)

## chassis.tech plus 2022

Videopräsentationen aus den 4 Fachsektionen

Aufzeichnungen der Veranstaltung  
vom 5. und 6. Juli 2022

- / Redundante Fahrwerksysteme
- / Neue Lenkungen für Steer-by-Wire und digitalen Zwilling
- / Moderne Bremsen
- / Effiziente Rad-Reifen-Systeme

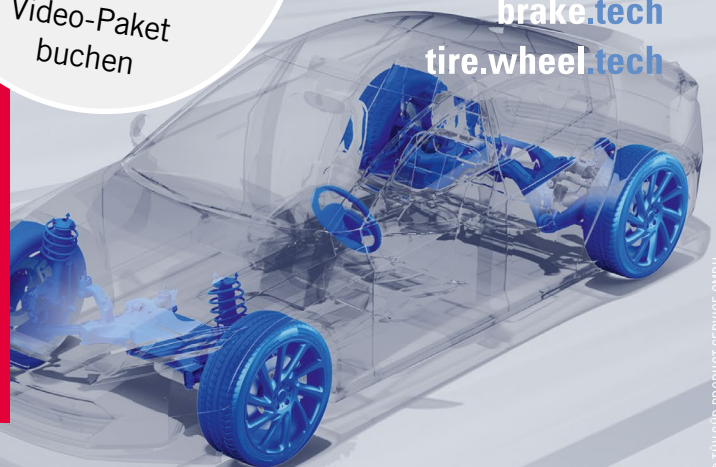
Wir haben Videos und Papers aus der Konferenz für Sie im Abruf.  
Sie entscheiden wann, wo und wie oft Sie die einzelnen Vorträge ansehen.

**KONFERENZ  
VERPASST?**

Jetzt  
Video-Paket  
buchen

**chassis.tech** plus

chassis.tech  
steering.tech  
brake.tech  
tire.wheel.tech



Um das GWP zukünftiger Produktionsprozesse sowohl der Fahrzeuge selbst als auch der Kraftstoffe abzubilden, werden zwei Stromszenarien für den EU-Raum angewandt: ein optimistisches Szenario mit Strom aus Photovoltaikanlagen mit einem GWP von 5 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh und ein Business-As-Usual(BAU)-Szenario mit 213 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh. Diese Energieszenarien werden für die Produktion der für das GWP relevantesten Materialien der Fahrzeugherstellung herangezogen. Anschließend werden die Reduktionspotenziale durch die Materialherstellung veranschlagt. Bei der Stahlherstellung hingegen wird das GWP-Reduktionspotenzial literaturbasiert durch eine zukünftige technologische Weiterentwicklung abgeschätzt [6, 7]. Auf Basis der Materialdaten werden die Fahrzeuge modelliert. Das GWP der Kraftstoffproduktion wird mittels der beiden Energieszenarien über die Energieeffizienzfaktoren aus der „FVV-Kraftstoffstudie III“ [8] kalkuliert. Dabei werden ausschließlich E-Fuels angenommen, die aus Strom und der direkten CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture) gewonnen werden. In der Nutzungsphase wird von einer Lebenslaufleistung von 200.000 km ausgegangen.

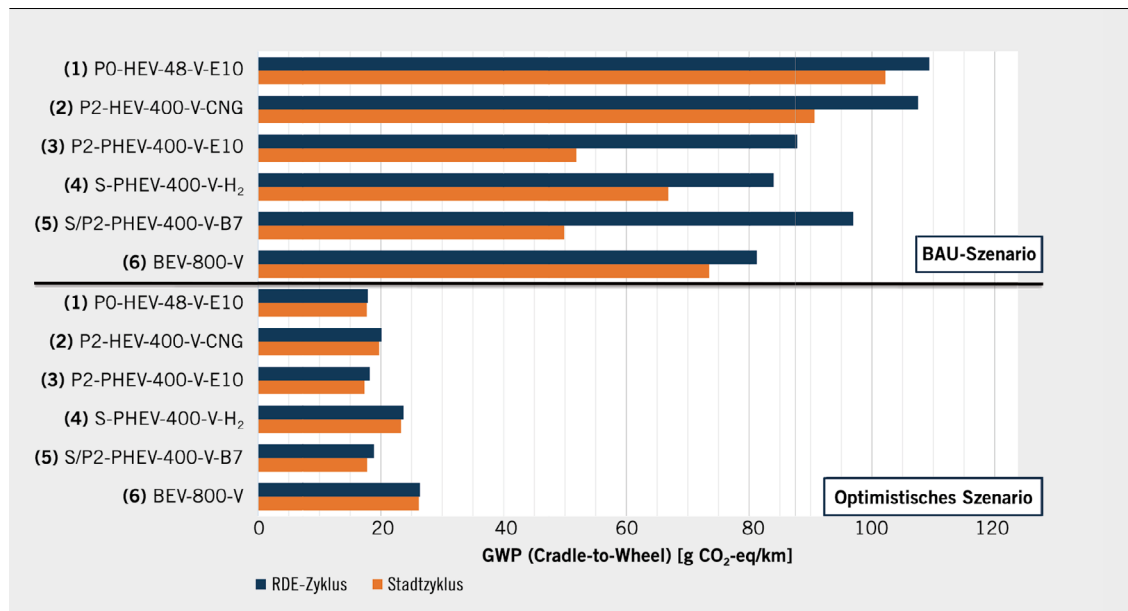
**BILD 2** zeigt das GWP durch die Herstellung aller Fahrzeugvarianten, aufgeschlüsselt nach den jeweiligen Fahrzeugteilen. Den größten Anteil am Gesamt-GWP hat der Glider, der auch den größten Gewichtsanteil des Gesamtfahrzeugs einnimmt. Summiert ergibt sich das höchste GWP für das BEV. Es hat das höchste Gesamtgewicht, wobei die Batterie den größten Anteil ausmacht. Die Kraftstofftanks der CNG- und wasserstoffbetriebenen Varianten weisen relativ hohe Anteile am Gesamt-GWP auf, da diese aus Kohlefasern bestehen, die wiederum mit hohem Emissionsgrad hergestellt werden. Die deutlichste Reduktion des GWPs im Vergleich zu den derzeitigen Werten ist bei der Brennstoffzelle zu erreichen. Dies lässt sich mit der hohen möglichen Reduktion des GWPs für die Platinmasse in den Elektroden erklären. Im optimistischen Szenario lässt sich eine allgemeine Verringerung des GWPs um 50 % im Vergleich zum BAU-Szenario erkennen.

Die Analyse von der Herstellung bis zur Nutzung (Cradle-to-Wheel, CtW) für beide Fahrzyklen ist in **BILD 3** gezeigt. Die GWP-

Werte für die im RDE-Fahrzyklus simulierte CtW-Phase sind bei den HEVs (1) und (2) und den konventionellen PHEVs (3) und (5) im BAU-Szenario am größten. Aufgrund der energieeffizienten Kraftstoffproduktion und dem hohem Antriebsstrangwirkungsgrad weisen das FCEV und das BEV die geringsten Auswirkungen pro gefahrenem Kilometer auf. Im Stadtzyklus zeigen die konventionellen PHEVs (3) und (5) das geringste GWP. Hierfür sind die kleine Batterie und der dadurch bedingte geringere Energieaufwand bei der Herstellung ausschlaggebend. Im optimistischen Szenario wird durch das geringe GWP bei der Fahrzeug- und Kraftstoffherstellung das Gesamt-GWP von HEV (1) und (2) und den konventionellen PHEVs (3) und (5) deutlich geringer als für das PHEV (FC) (4) und das BEV (6). Im Gegensatz zum BAU-Szenario ist für das optimistische Szenario kaum ein Unterschied im GWP zwischen den beiden Fahrzyklen zu erkennen, was durch das geringe Strom-GWP zu erklären ist.

### 5 TOTAL COST OF OWNERSHIP

Neben dem mit technischen Entwicklungsprognosen einhergehenden GWP werden in dieser Studie auch die wirtschaftlichen Aspekte bewertet. Hierfür wird die Total Cost of Ownership (TCO) für jede Fahrzeugvariante herangezogen, da sie die Anschaffungskosten, die Betriebs- und Wartungskosten sowie den Wiederverkaufsgewinn einschließlich des Wertverlusts umfasst. Die angenommenen Kosten sind literaturbasiert. So wird für die Anschaffungskosten eine universitäre Studie zu den Kostentreibern verschiedener Fahrzeugkonfigurationen herangezogen [9] und mit einer Wertverlustrechnung nach Bähr & Fäss Forecasts auf Basis von deren Restwertprognosen für 2019 verrechnet [10]. Für die Kraftstoffkosten sei angemerkt, dass hier keine Steuern oder Gewinnmargen inkludiert werden, da diese stark von der (wirtschafts-)politischen Lage abhängen, die kaum prognostizierbar ist. Es werden daher die prognostizierten Kraftstoffkosten aus den aktuellen FVV-Kraftstoffstudien herangezogen [8, 11]. Für die Betriebs- und Wartungskosten werden aktuelle Durchschnittswerte des ADACs verwendet [12].



**BILD 3** CtW-Ergebnisse der Fahrzeugvarianten für den RDE- und den Stadtzyklus im BAU-Szenario und im optimistischen Szenario (© IABP)

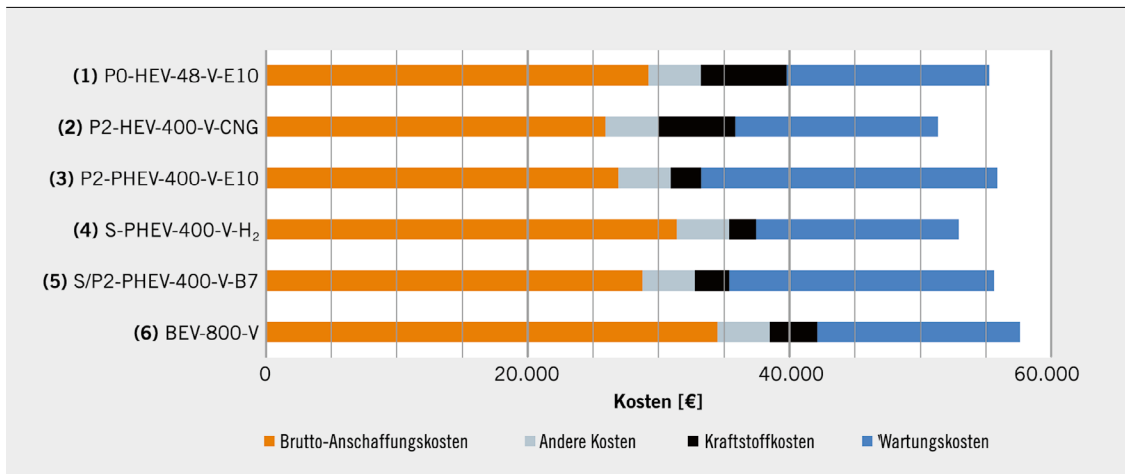


BILD 4 TCO-Ergebnisse für die Fahrzeugvarianten (© IABP)

BILD 4 zeigt die TCO-Berechnungen für die sechs Varianten. Die Gesamtkosten werden von den Bruttoanschaffungskosten dominiert, während die Kraftstoffkosten den geringsten Anteil ausmachen. Dies ist auf die genannte fehlende Einbeziehung von Steuern und Margen zurückzuführen. Den zweitgrößten Anteil machen die Wartungskosten aus, insbesondere bei den Varianten, die einen Austausch der Batterie über die Gesamtlebensdauer erfordern.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorgestellten repräsentativen Antriebsstrangvarianten zeigen, dass ein lokal CO<sub>2</sub>-emissionsfreier Verkehr nur mit Brennstoffzellen und batterieelektrischen Fahrzeugen möglich ist. Jedoch bietet eine Hybridisierung mit externer Lademöglichkeit Potenzial für den urbanen, lokal CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Verkehr. Generell zeigt sich, dass mit zunehmendem Hybridisierungsgrad und optimierter, aber dadurch auch komplexerer Technik des Antriebsstrangs der Kraftstoffverbrauch reduziert werden kann. Ein global CO<sub>2</sub>-emissionsfreier Verkehr wird mit der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen auf Basis von CO<sub>2</sub> aus Direct Air Capture auch für die Antriebsstrangarchitekturen mit Verbrennungsmotor möglich. Durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen lassen sich die GWP-Profile der Fahrzeuge zwischen dem BAU-Szenario (213 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh) und dem optimistischen Szenario (5 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh) um 49 bis 52 % senken. Für die Berechnung der Betriebskosten der Fahrzeuge wird auch in Zukunft die politische Situation sowie die Ressourcenverfügbarkeit ausschlaggebend sein.

### LITERATURHINWEISE

- [1] Geß, A.; Lozanovski, A.; Stoll, T.: Potential powertrain configurations to obtain CO<sub>2</sub> goals in 2040. In: FVV (Hrsg.): Tagungsband R602, S. 97-143, Frankfurt am Main, 2022
- [2] DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin: Beuth-Verlag, Februar 2021
- [3] DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Berlin: Beuth-Verlag, Februar 2021
- [4] Sphera Solutions: GaBi Solutions. Online: <https://gabi.sphera.com/deutsch/index/>, aufgerufen: 29. September 2022
- [5] Leiden University, CML – Department of Industrial Ecology: CML-IA Characterisation Factors. Online: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>, aufgerufen: 10. August 2022

- [6] Verbund AG (Hrsg.): Kainersdorfer, F.: Dekarbonisierung der Stahlproduktion. Online: <http://docplayer.org/72518086-Dekarbonisierung-der-stahlproduktion.html>, aufgerufen: 12. August 2022
- [7] Hille, V.: Dekarbonisierung der Stahlproduktion durch signifikanten Einsatz von Wasserstoff – das Projekt SALCOS. Kurzvortrag VIK-Jahrestagung, Berlin, 2017
- [8] FVV (Hrsg.): FVV Kraftstoffstudie III: Defossilisierung des Transportsektors. Online: [https://www.fvv-net.de/fileadmin/user\\_upload/medien/materialien/FVV\\_Kraftstoffe\\_Studie\\_Defossilisierung\\_R586\\_final\\_v.3\\_2019-06-14\\_DE.pdf](https://www.fvv-net.de/fileadmin/user_upload/medien/materialien/FVV_Kraftstoffe_Studie_Defossilisierung_R586_final_v.3_2019-06-14_DE.pdf), aufgerufen: 12. August 2022
- [9] Kissel, P.: Kostenschätzung für zukünftige Antriebsstrangtechnologien in der Großserienfertigung für das Jahr 2040. Stuttgart, Universität, Master Thesis (unveröffentlicht)
- [10] Bähr & Fess Forecasts: Restwertprognosen. Online: <https://www.bfforecasts.de/restwertprognosen/>, aufgerufen: 10. August 2022
- [11] Kramer, U. et al: Zukünftige Kraftstoffe: FVV-Kraftstoffstudie IV. Abschlussbericht FVV-Projekt Nr. 1378, 2021
- [12] ADAC (Hrsg.): Autokostenübersicht Herbst/Winter 2019/20. Online: <https://assets.adac.de/Autodatenbank/Autokosten/autokostenuebersicht.pdf>, aufgerufen: 10. August 2022

## DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projekt Nr. 1355) wurde am Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart unter der Leitung unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende und am ebenfalls der Universität angehörigen Institut für Akustik und Bauphysik (IABP) unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Philip Leistner durchgeführt. Es wurde mit Eigenmitteln des FVV e. V. finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr.-Ing. Thorsten Schnorbus (FEV Europe GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Aleksandar Lozanovski vom IABP.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: [www.mtz-worldwide.com](http://www.mtz-worldwide.com)