

AUTOREN



Dipl.-Ing. Aleksandar Lozanovski
ist Wissenschaftlicher
Mitarbeiter in der
Abteilung Ganzheitliche
Bilanzierung an der
Universität Stuttgart.



Dipl.-Ing. Oliver Dingel
ist Senior Fachreferent
Energie Management im
Bereich Powertrain
Nutzfahrzeuge bei der
IAV GmbH in Chemnitz.



Dipl.-Ing. (FH) Torsten Semper
ist Team Manager
Sustainable Engineering &
Benchmarking bei der
IAV GmbH in Chemnitz.



Andreas Geß, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher
Mitarbeiter in der
Abteilung Ganzheitliche
Bilanzierung an der
Universität Stuttgart.

Technische und ökobilanzielle Analyse von Langstrecken-Lastkraftwagen für das Jahr 2050

Alternative Antriebskonzepte werden momentan an vielen Stellen erforscht, und einzelne sind auch schon marktreif. Die Aktivitäten in diesem Bereich sind jedoch hauptsächlich bei Pkw zu sehen. Wo die Reise bei Schwerlast-Lastkraftwagen hinget, ist momentan noch nicht ersichtlich. Die Universität Stuttgart und IAV haben in einem Forschungsprojekt der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen die Antriebsstränge zukünftiger Schwerlast-Lastkraftwagen für den Fernverkehr untersucht, welche möglichst wenig CO₂ emittieren sollen.



© IAV

1	MOTIVATION
2	RAHMENBEDINGUNGEN UND TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN DER ANTRIEBSKONZEPTE
3	ÖKOBILANZ
4	ERGEBNISSE
5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

1 MOTIVATION

Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion um den Ausstoß von Treibhausgasen und dem auch in Zukunft weiterwachsenden Güterverkehr auf der Straße stellt sich immer dringender die Frage nach geeigneten Fahrzeugkonzepten, die diesen Zielkonflikt auflösen können. Um aus einer Vielzahl möglicher Antriebe für Fernverkehr-Lkw im Jahr 2050 eine geeignete Auswahl treffen zu können, wurden fünf Antriebsstränge für eine detaillierte Untersuchung ausgewählt. Zwei davon sind Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeuge (PHEV) mit für synthetisch hergestellte Kraftstoffe (Fischer-Tropsch Diesel (FTD)) und synthetisches Erdgas (SNG)) optimierten Verbrennungsmotoren. Die drei anderen Fahrzeuge haben alle einen elektrischen Antriebsstrang, allerdings mit unterschiedlicher Energieversorgung. Das batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) bezieht den Strom aus der Batterie, während der Oberleitungs-Lkw (Catenary Electric Vehicle, CEV) auf der Autobahn über eine Oberleitung mit elektrischer Energie versorgt wird. Im Gegensatz dazu wandelt das Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) chemische Energie (Wasserstoff, H₂) in einer Polymerelektrolytmembran (PEM)-Brennstoffzelle während der Fahrt in elektrische Energie um.

2 RAHMENBEDINGUNGEN UND TECHNISCHE EIGENSCHAFTEN DER ANTRIEBSKONZEPTE

Vor Beginn der Untersuchungen galt es, die Rahmenbedingungen für das Jahr 2050 zu definieren. Für die Energieerzeugung und -verteilung wurden folgende Annahmen postuliert:

- Emissionen zur Errichtung von Infrastruktur werden nicht betrachtet.
- Der Strom stammt zu 100 % aus erneuerbaren Energien mit 21,8 g CO₂ Äquivalente/kWh elektrischer Energie in der EU und 27,4 g CO₂ Äquivalente/kWh elektrischer Energie in der MENA (Middle East, North Africa)-Region.
- BEV und CEV beziehen erneuerbare Energie unter Berücksichtigung von Stromspeicherung mit Power-to-Gas aus der EU.
- Der für FCEV benötigte Wasserstoff wird in der EU dezentral über Elektrolyse produziert.
- SNG und FTD werden mittels Power-to-X-Technologie in den MENA-Staaten produziert.

Für die Fahrzeugmodelle und deren Einsatz auf der Straße wurde von folgenden Rahmenbedingungen ausgegangen:

- Alle Fahrzeuge können zwischen 6:00 und 22:00 Uhr autonom auf Level 5 fahren. Zu den anderen Zeiten gilt ein Nachtfahrverbot, in dem nachgetankt und nachgeladen werden kann.
- Als typische, mehrtägige, internationale Langstrecke wurde Almeria – Berlin gewählt.
- BEV und FCEV tanken/laden einmal tagsüber, die anderen Fahrzeuge können ohne Stopp durchfahren.
- Lkw entsprechen dem EMS (European Modular System)-Standard mit 25,25 m Länge.

- Die beiden Anhänger sind identisch für alle Antriebskonzepte und haben ein Transportvolumen von 140 m³.
- Aufgrund von angenommenen, emissionsfreien, urbanen Zonen haben alle Fahrzeuge eine minimale, rein elektrische Reichweite von 100 km.

Der Energiespeicher ist eine Lithium-Hochenergie-Nickel-Mangan-Kobalt (Li-HE-NMC)-Batterie mit festem Elektrolyt. Die Zellspeicherdichte liegt mit 400 Wh/kg beziehungsweise 1200 Wh/l deutlich über der heutiger Batteriezellen [1]. Da von einem nutzbaren Ladezustand zwischen 10 % und 90 % ausgegangen wurde, ist die Bruttospeicherkapazität um 20 % größer als die benötigte Nettokapazität, **TABELLE 1**.

Aufgrund der Hybridisierung des Antriebsstrangs wurde die Leistung der Verbrennungsmotoren auf 250 kW begrenzt. Bei einem maximalen Mitteldruck von 29 bar sind dafür 8 l Hubraum und vier Zylinder ausreichend. Der maximale Wirkungsgrad beträgt unter Berücksichtigung von reduzierter Reibung, optimiertem Brennverfahren und Abwärmerückgewinnung 55 % beim FTD- und 54 % beim SNG-Verbrennungsmotor. Auf der Fahrzeugseite wurde von einer deutlichen Absenkung der Fahrwiderstände gegenüber dem heutigen Stand ausgegangen. Für den Luftwiderstand wurde ein c_w-Wert von 0,35 und für den Rollwiderstand ein c_R-Wert von 3,5‰ angenommen.

Alle Verbrauchsrechnungen wurden mit der zulässigen Gesamtmasse von 50 t durchgeführt. Für die Berechnung der Zuladung wurde von der Umsetzung von Leichtbaumaßnahmen mit bereits heute üblichen Standardmaterialien ausgegangen. Auf dieser Basis wurde für die Anhänger ein Gewicht von 4,75 t und 4,95 t ermittelt. Aufgrund der unterschiedlichen Antriebsstränge ergeben sich für die Zugfahrzeuge individuelle Leergewichte, **TABELLE 1**. Das CEV hat den leichtesten Antrieb, da die Batterie vergleichsweise klein ist und die elektrische Antriebsachse weniger wiegt als ein Verbrennungsmotor mit Getriebe. Dies gilt auch für das FCEV, welches zudem eine noch kleinere Batterie, dafür aber

	BEV	CEV	FCEV	SNG-PHEV	FTD-PHEV
Leistung ICE / FC [kW]	–	–	180	250	250
Leistung Elektromotor [kW]	330	330	330	210	210
Batterie Brutto Kapazität [kWh]	1238	166	63	166	166
Reichweite [km + elektrische km]	864	∞ + 100	864	1536 + 100	1536 + 100
Gewicht Antriebsstrang [t]	4,26	1,44	1,78	3,14	2,81
Leergewicht inklusive Antrieb [t]	18,57	15,75	16,09	17,43	17,10
Nutzlast [t]	31,43	34,25	33,91	32,57	32,90

TABELLE 1 Technische Eigenschaften der betrachteten Fahrzeugkonzepte (© Universität Stuttgart)

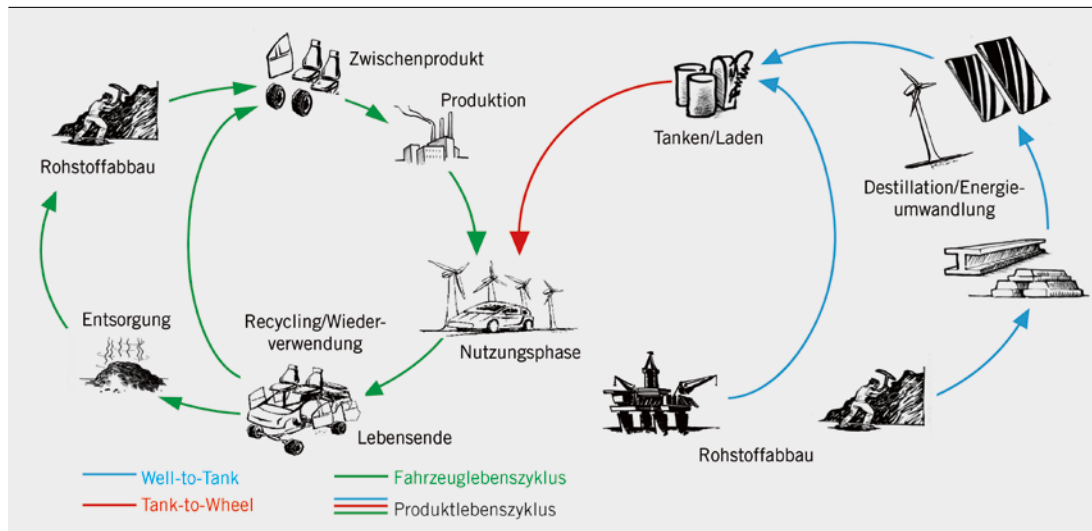


BILD 1 Übersicht Well-to-Wheel und gesamter Produktlebenszyklus [4] (modifiziert) © Universität Stuttgart | Fraunhofer IBP)

die Brennstoffzelle und die 500 bar Wasserstoffdrucktanks an Bord hat. Das hohe Gewicht des BEV resultiert hauptsächlich aus der großen und schweren Batterie. Damit ist es auch deutlich schwerer als die beiden PHEV-Fahrzeuge mit ihren Verbrennungsmotoren und dem 4x2-Getriebe. Das höhere Gewicht des SNG-PHEV resultiert dabei aus der geringeren Speicherdichte des tiefkalt gespeicherten SNG und der notwendigen Kryogen-

tanks. Trotz der genannten Unterschiede liegt die Zuladung aller untersuchten Fahrzeuge in einem relativ schmalen Streuband.

3 ÖKOBILANZ

Die Ökobilanz wurde durchgeführt in Anlehnung an DIN 14040 und 14044 [2, 3]. Die Umweltwirkungen der verschiedenen Inputs

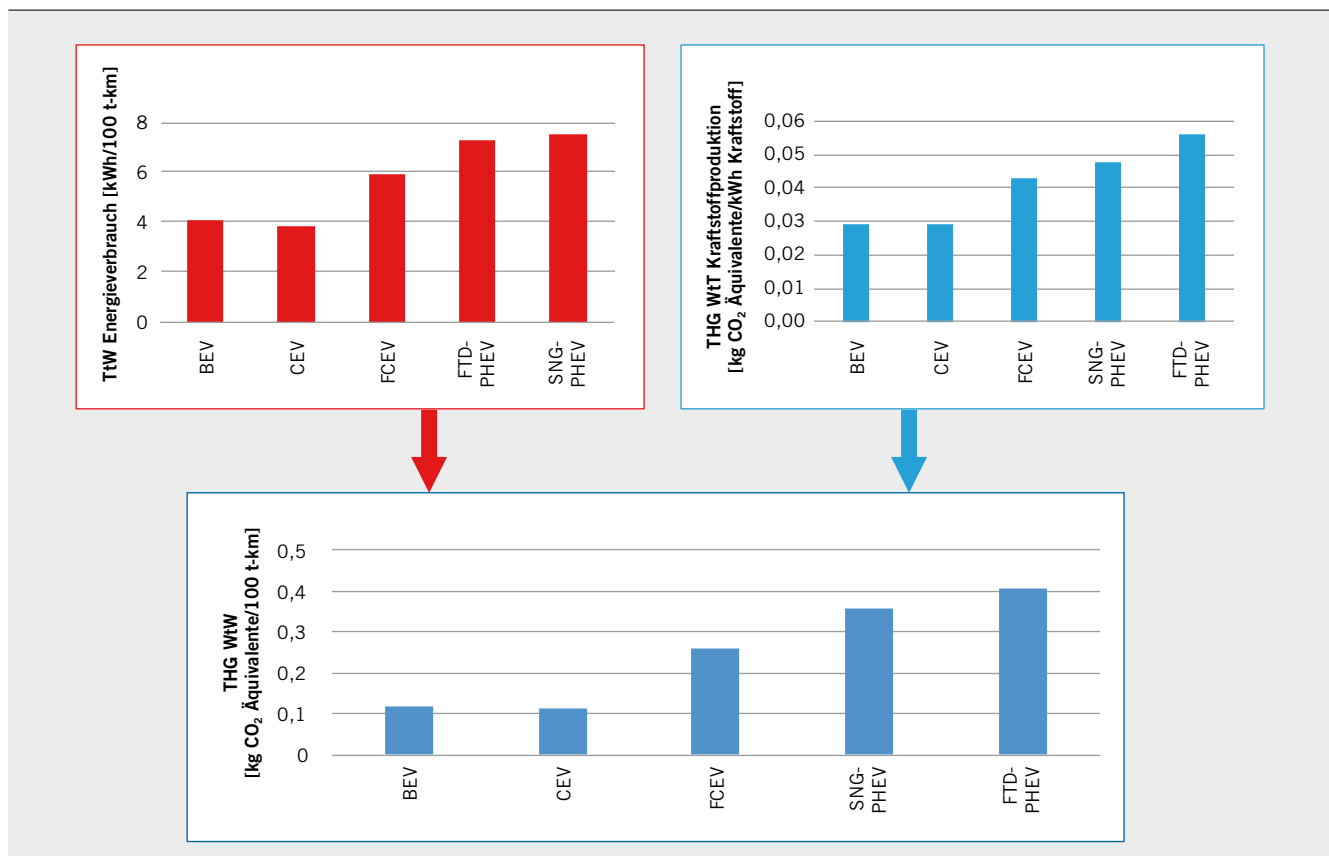


BILD 2 Treibhausgas-Well-to-Wheel-Betrachtung © Universität Stuttgart

und Outputs werden kumuliert und auf 100 Tonnenkilometer (t-km) bezogen betrachtet. In **BILD 1** (blaue Pfeile) ist die Well-to-Tank(WtT)-Kraftstoffherstellung dargestellt. Bei der dargestellten, aber für 2050 nicht berücksichtigten fossilen Kraftstoffherstellung beinhaltet dies die Rohöl-/Erdgasförderung sowie die Weiterverarbeitung und den Transport bis zum Fahrzeugtank. Bei E-Fuels startet die Kette bei der Herstellung und dem Aufbau von erneuerbaren Energieanlagen inklusive der dafür benötigten Rohstoffe und geht weiter über Wasser und (falls nötig) CO₂ aus Luft zur Erzeugung der Kraftstoffe. Der nächste Schritt ist die in **BILD 1** (rote Pfeile) dargestellte Tank-to-Wheel(TtW)-Betrachtung, welche maßgeblich vom Kraftstoff- beziehungsweise Energieverbrauch der Fahrzeuge bestimmt wird. Des Weiteren ist in **BILD 1** (grüne Pfeile) der Fahrzeuglebenszyklus dargestellt. Dieser beginnt ebenfalls mit dem Rohstoffabbau, der Weiterverarbeitung zu Zwischenprodukten und der Fahrzeugherstellung. Das Lebensende mit Recycling und Deponierung wird, wie bei Ökobilanzen von Fahrzeugen üblich, nicht betrachtet [5].

4 ERGEBNISSE

4.1 TANK-TO-WHEEL

Für die Berechnung des TtW-Verbrauchs wurde das Fahrprofil des in dem Vehicle Energy Consumption calculation TOol (VECTO) hinterlegten Fernverkehrszyklus mehrfach aneinandergereiht verwendet. Die ersten und letzten 50 km wurden im regionalen Verteilerverkehrszyklus rein elektrisch angetrieben simuliert. Um die unterschiedlichen Verbräuche von FTD, SNG, H₂ und Strom unter

Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzlasten vergleichbar zu machen, wurden diese in kWh/100 t-km umgerechnet. **BILD 2** (linkes Diagramm oben) zeigt, dass BEV und CEV aufgrund des hohen Wirkungsgrads des Elektromotors die niedrigsten Energieverbräuche haben. Der etwas höhere Verbrauch des BEV resultiert dabei aus der aufgrund des hohen Batteriegewichts niedrigsten Nutzlast im Vergleichsfeld. Das FCEV ordnet sich in der Mitte zwischen BEV, CEV und PHEV ein, da der Wirkungsgrad aus Brennstoffzelle und Elektromotor etwas besser ist, als der der hybridisierten Verbrennungsmotoren. Außerdem verfügt das FCEV wegen der kleinen Batterie über die zweithöchste Nutzlast der hier verglichenen Fahrzeuge.

4.2 WELL-TO-WHEEL

Das Treibhausgaspotenzial (THG) der WtT Kraftstoffproduktion ist in **BILD 2** (rechtes Diagramm oben) dargestellt. Die Strombereitstellung für BEV und CEV ist gleich hoch. H₂, SNG und FTD unterscheiden sich in dem Herstellungswirkungsgrad und damit hinsichtlich ihrer THG-Ergebnisse. In **BILD 2** (unten) ist die Kombination von WtT und TtW zu einer WtW-Betrachtung dargestellt. Die niedrigen Ergebnisse von BEV und CEV bei WtT und TtW zeigen sich in den niedrigsten WtW-Ergebnissen. Der Abstand zu FCEV, SNG-PHEV und FTD-PHEV ist im Vergleich zu der TtW-Betrachtung größer geworden.

4.3 GESAMTLEBENSZYKLUS

BILD 3 zeigt die Kombination der in **BILD 2** beschriebenen WtW-Emissionen, **BILD 3** (oben links), und der Lkw-Herstellung, **BILD 3**

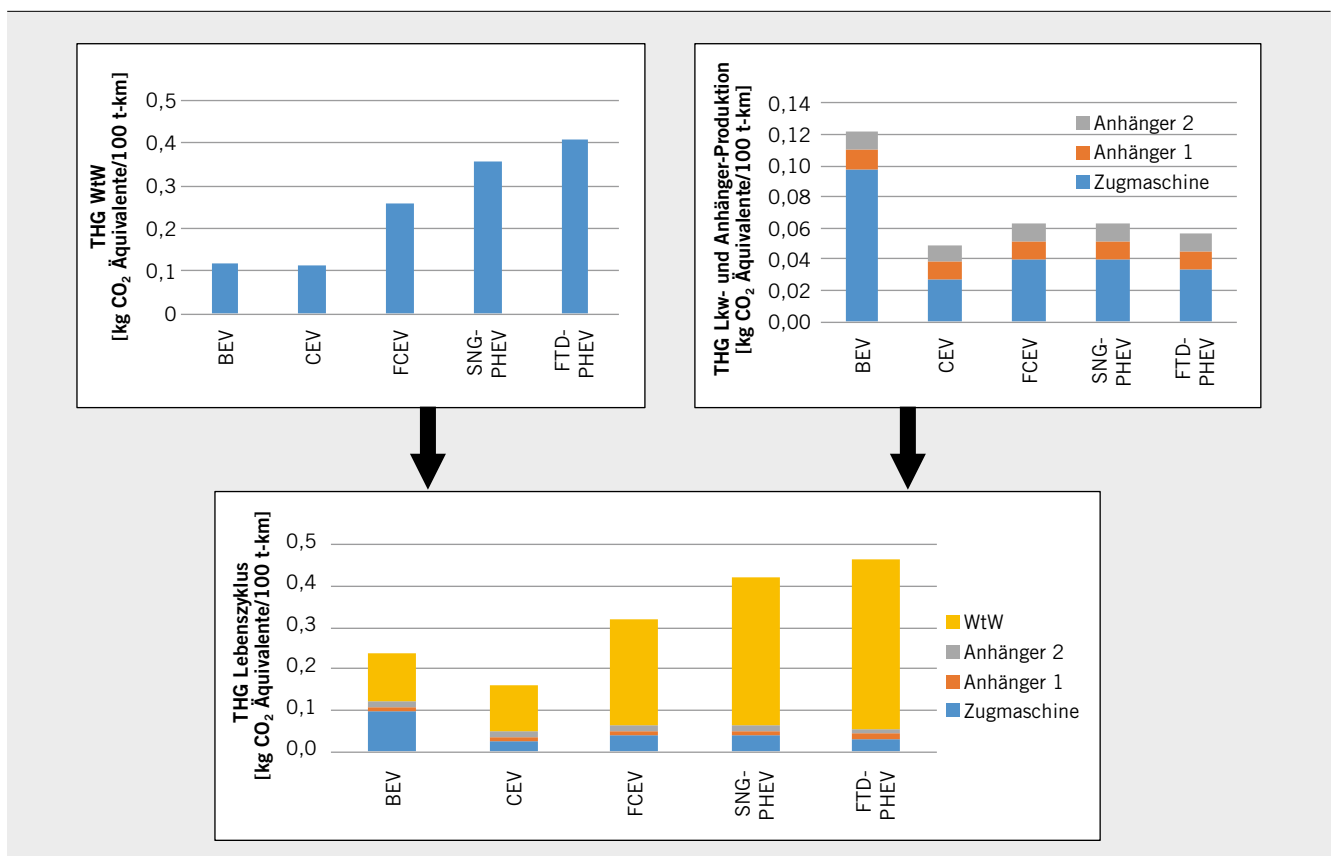


BILD 3 Treibhausgaspotenzial für den Gesamtlebenszyklus (© Universität Stuttgart)

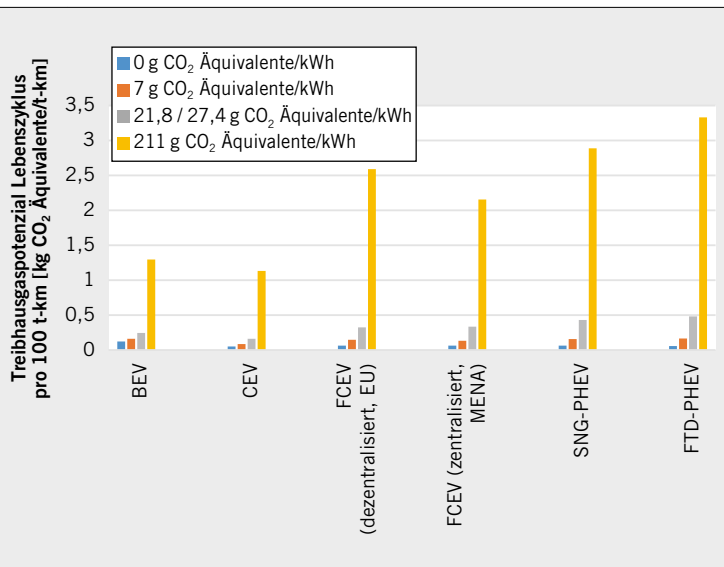


BILD 4 Treibhausgaspotenzial über den Lebenszyklus für verschiedene Energieszenarien (© Universität Stuttgart)

(oben rechts), zum Gesamtlebenszyklus. Um die Ergebnisse aus der Fahrzeugproduktion je 100 t-km zu berechnen, werden zuerst die detaillierten THG-Ergebnisse fahrzeugspezifisch berechnet und anschließend mit der erwarteten Lebensdauer von 1,5 Millionen km sowie der antriebsspezifischen Nutzlast aus **TABELLE 1** kombiniert. Die Herstellung der Fahrzeuge findet hierbei mit erneuerbaren Energien und zukünftigen Herstellungsverfahren für die Materialien statt. Das BEV hat die höchsten Werte bei der Fahrzeugherstellung, was hauptsächlich der größten Batterie im Vergleichsfeld geschuldet ist. Beim FCEV ist die Herstellung der Brennstoffzelle und der Tanks relevant, beim SNG-PHEV sind die Kryogentanks ausschlaggebend. Das CEV hat die niedrigsten Werte aufgrund des leichtesten Antriebs und des niedrigsten technischen Aufwands im Fahrzeug. Beim THG-Lebenszyklus hat das CEV die geringsten Emissionen. Die Emissionen des BEV steigen im Vergleich zum CEV durch den Aufwand für die Fahrzeugherstellung. Das FCEV liegt in der Mitte. Die SNG-PHEV und FTD-PHEV haben die höchsten Emissionen über den gesamten Lebenszyklus.

4.4 ENERGIESZENARIEN FÜR DIE KRAFTSTOFFHERSTELLUNG

Der in den WtW- und Lebenszyklus-Ergebnissen ersichtliche Einfluss der Kraftstoffherstellung resultiert hauptsächlich aus der CO₂-Bilanz der mit dem heutigen Strommix hergestellten Anlagen zur Strombereitstellung. Deswegen wurde die THG-Bilanz der Strombereitstellung in weiteren Szenarien variiert, **BILD 4**. Zum einen wird ein konservatives „Business as Usual“-Szenario der EU dargestellt, in dem 2050 immer noch fossile Energie verwendet wird und so in 211 g CO₂ Äquivalente/kWh resultiert [6]. Zum anderen wurde berechnet, auf welchen THG-Schwellwert (Break-even) die Strombereitstellung sinken müsste, damit die mit E-Fuels betriebenen Fahrzeuge die gleichen Lebenszyklus-THG-Emissionen haben wie das BEV:

- Break-even für BEV versus FCEV: 10 g CO₂ Äquivalente/kWh Strombereitstellung (darüber ist BEV vorteilhaft, darunter FCEV)

- Break-even für BEV versus SNG-PHEV: 8 g CO₂ Äquivalente/kWh Strombereitstellung (darüber ist BEV vorteilhaft, darunter SNG-PHEV)
- Break-even für BEV versus FTD-PHEV: 7 g CO₂ Äquivalente/kWh Strombereitstellung (darüber ist BEV vorteilhaft, darunter FTD-PHEV).

Im Vergleich zum „Business as usual“-Szenario sind alle anderen Ergebnisse um ein vielfaches niedriger, und die Unterschiede zwischen den Antriebskonzepten spielen eine untergeordnete Rolle. Für eine klimafreundliche Zukunft ist der Einsatz von 100 % erneuerbarem Strom daher von elementarer Bedeutung.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Fünf verschiedene mögliche Antriebskonzepte wurden für 2050 unter Berücksichtigung von potenziellen Weiterentwicklungen innerhalb der nächsten Jahrzehnte bewertet. Basierend auf der Annahme, dass es 2050 100 % erneuerbare Energie geben wird, welche durch heutige Anlagen erzeugt werden, hat das CEV die geringsten Treibhausgasemissionen, gefolgt vom BEV. Das FCEV liegt im mittleren Bereich und die Verbrenner haben die höchsten THG-Werte. Diese Reihenfolge bleibt auch bei der Strombereitstellung mit höheren THG-Emissionen bestehen. Ab einem bestimmten, sehr niedrigen Schwellwert liegen die THG-Emissionen der Fahrzeuge mit E-Fuels gleichauf mit denen eines BEV. Insgesamt zeigt sich, dass die Bereitstellung von Strom mit sehr niedrigem Treibhausgaspotenzial von zentraler Bedeutung ist.

Für eine abschließende Bewertung der Konzepte ist es des Weiteren notwendig, neben den Kosten für Fahrzeugherstellung und Energieverbrauch auch die THG-Bilanz zukünftiger Anlagen zur Stromerzeugung und die Infrastruktur für ein Überleitungsnetz sowie Ladepunkte und Second-Life-Konzepte von Batterien mit zu betrachten. Das soll in einem Folgeprojekt geschehen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Thielmann, A.; et al.: Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. Karlsruhe, 2017
- [2] DIN EN ISO 14040: Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. 2009
- [3] DIN EN ISO 14044: Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. 2006
- [4] N. N.: Übersicht Well-to-Wheel und gesamter Produktlebenszyklus. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2019
- [5] Altenburg, S.; Maur, A.; Labinsky, A.; Eckert, S.; Faltenbacher, M.; Reuter, B.: Nullemissionsnutzfahrzeuge: Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative. Stuttgart, 2017
- [6] European Commission: EU Reference Scenario 2016: Energy, Transport and GHG Emissions – Trends to 2050. Main results. 2016GHG Emissions – Trends to 2050. Main results. 2016

DANKE

Das Vorhaben CO₂ neutrale Langstrecken Lkw (FVV-Vorhaben Nr. 1303) wurde durch Eigenmittel der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV, Frankfurt am Main) finanziell gefördert. Die Autoren danken der FVV für die Möglichkeit zur Durchführung des Vorhabens sowie für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Matthias Erath (MTU) begleitet. Diesem projektbegleitenden Arbeitskreis gebührt unser Dank für die große Unterstützung.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:

www.emag.springerprofessional.de/atz-heavyduty-worldwide

digital · interaktiv · mobil

Exklusiv für Abonnenten kostenlos zur gedruckten Ausgabe – das E-Magazin.



GRATIS
für
Abonnenten!



Schlagwortsuche

In Sekundenschnelle die komplette Ausgabe nach einem Schlagwort durchsuchen.



Responsives Webdesign

Zugriff auf Ihr E-Magazin von Desktop, Laptop, Smartphone und Tablet.



PDF-Downloads

Download von Artikeln aus dem umfangreichen Online-Archiv.



Einfach und direkt ohne App

Zugriff ohne App-Store durch direkte Anbindung an die Website mit HTML5-Technologie.



Interaktive Empfehlungen

Zusätzliches Spezialwissen durch verlinkte Quellenangaben der Fachartikel rund um die Heftthemen.



Interaktives Inhaltsverzeichnis

Mit einem Klick zum gewünschten Beitrag.



Interaktive Heftnews und Inhalte

Ergänzende Informationen zum Heft durch verlinkte Firmen- und Produktnews sowie Videos und Bildergalerien.

ATZ heavyduty

►► Ihr E-Magazin finden Sie unter: www.emag.springerprofessional.de/atz-heavyduty