

Zukünftige Kraftstoffe: FVV Kraftstoffstudie IVb
FVV Nr. 1452 | Abschlussbericht (AB)

Frontier Economics Ltd. (Frontier Economics Ltd.), Köln
Dr. David Bothe

Thema:	Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter
Laufzeit:	01.11.2021 – 30.09.2022
Fördergeber:	FVV e.V. (FVV)
Fördernummer(n):	FVV 601452
Bearbeiter und Verfasser:	Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH) Dr. David Bothe (Frontier Economics Ltd.) Dr. Christoph Gatzen (Frontier Economics Ltd.) André Pfannenschmidt (Frontier Economics Ltd.) Carolin Baum (Frontier Economics Ltd.) Fabian Schrogl (Frontier Economics Ltd.) Osama Mahmood (Frontier Economics Ltd.)
Vortragende(r):	Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH)
Projektkoordination/projektbegleitender Ausschuss:	Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH)

Danksagung

Dieser Bericht ist das wissenschaftliche Ergebnis einer Folgestudie, die von der FVV e.V. gestellt und von Frontier Economics Ltd. in Köln unter der Leitung von Dr. David Bothe bearbeitet wurde.

Die FVV dankt Dr. David Bothe und den wissenschaftlichen Bearbeitern Dr. Christoph Gatzert, André Pfannenschmidt, Carolin Baum, Fabian Schrogl, Osama Mahmood (alle Frontier Economics Ltd.) für die Durchführung des Vorhabens. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der Leitung von Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH) begleitet. Diesem projektbegleitenden Ausschuss gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

Die Autoren bedanken sich bei der FVV und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.

Das Forschungsvorhaben wurde durch die FVV e.V. aus Eigenmitteln (Fördernummer 601452) finanziell gefördert.

Kurzfassung¹

Im Rahmen des "Green Deal" strebt die Europäische Union (EU) an, bis zum Jahr 2050 über alle Sektoren hinweg den Nettoausstoß von Treibhausgasen (THG) auf Null zu reduzieren [3]. Für den europäischen Straßenverkehrssektor kann dieses Ziel nur mit THG-neutralen Kraftstoffen und Antriebssträngen erreicht werden, die den heute noch üblichen Fahrzeugbetrieb mit Verbrennungsmotoren und fossilen Kraftstoffen wie Diesel und Benzin ablösen. Um einen klimaneutralen Straßenverkehrssektor zu erreichen und sowohl die nationalen als auch die europäischen CO₂-Reduktionsziele zu erfüllen, sind daher zukunftsorientierte Konzepte für den Straßenverkehrssektor erforderlich.

Es ist jedoch ein zentrales Defizit des aktuellen EU-Politikansatzes, wie z.B. des EU-Pakets "Fit for 55" sowie des "Green Deal", sich vorwiegend auf sektorspezifische Maßnahmen zu konzentrieren. Flottenemissionsziele, wie sie im „Fit for 55“-Paket der EU festgelegt sind, sowie (unter anderem) das Ziel einer 100-prozentigen Reduzierung der THG-Emissionen bis 2035 für PKW, berücksichtigen ausschließlich die direkten Emissionen der Fahrzeuge am Auspuff (sog. „Tank-to-Wheel“-Emissionen), während Emissionen aus der Fahrzeugproduktion oder der zugehörigen Versorgungskette für Energie von der Förderung bis zum Endverbrauch (sog. „Well-to-Tank“-Emissionen) außer Acht gelassen werden. Viele Studien, darunter auch die Lebenszyklusanalyse-Metastudie der FVV [4], belegen, wie ein enger regulatorischer Fokus auf sektorspezifische Maßnahmen zu verfehlten Klimazielen führen kann, da die Vorteile eines effektiven, sektorübergreifenden Technologie-Mixes vernachlässigt werden.

Im Jahr 2021 hat die FVV eine umfassende Analyse (Fuels Study IV) von 7 verschiedenen Fahrzeug-Antriebstechnologien ("Powertrains") für den europäischen Verkehrssektor im Hinblick auf ihren gesamten Infrastrukturbedarf, ihre Kosten und die damit verbundenen Emissionen (WtW-Emissionen) vorgelegt [5]. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass die kumulierten Gesamtemissionen zwischen den verschiedenen Antriebsarten (z.B. Elektro- vs. Verbrennungsmotoren, die mit THG-neutralen Kraftstoffen betrieben werden) weit weniger variieren als üblicherweise erwartet. **Tatsächlich ist die Geschwindigkeit, mit der THG-neutrale Mobilitätslösungen (vollständige THG-neutrale Pfade auf WtW-Basis) eingeführt werden, viel wichtiger als die Wahl der Technologien.** Je schneller eine defossilisierte Fahrzeugflotte verfügbar ist, desto geringer sind die kumulierten THG-Emissionen und damit die Effekte auf den Klimawandel.

In diesem Zusammenhang untersucht die FVV-Kraftstoffstudie IVb den Übergang des europäischen Straßenverkehrssektors zur Klimaneutralität bis 2050 weiter. In Anlehnung an die vorangegangene Kraftstoffstudie IV werden verschiedene Fahrzeug-Antriebstechnologien und Wertschöpfungsketten der THG-neutralen Energieträger betrachtet, die alle ausschließlich auf Erneuerbaren Energien aus Wind- und Solaranlagen basieren.

Im Vergleich zur Vorgängerstudie weist diese Studie vier wichtige, zusätzliche Charakteristika auf: Eine stärkere Fokussierung auf den Straßenverkehrssektor, die Hinzunahme neuer Energieträger-/Antriebspfade (Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge und Methanol-to-Gasoline als Drop-In-Kraftstoff), die explizite Berücksichtigung des technischen Hochlauf-Potenzials THG-neutraler Wertschöpfungsketten ("technische

¹ Der ausführliche Abschlussbericht wird zeitnah über THEMIS veröffentlicht.

Bottlenecks") sowie die Berücksichtigung einer Kombination verschiedener Energieträger und Fahrzeug-Antriebspfade im „Mix-Szenario“, um möglichst früh Treibhausgasneutralität im europäischen Straßenverkehrssektor zu erreichen.

Insbesondere werden in dieser Studie maximal erreichbare Hochläufe („Ramp-Ups“) neuer Fahrzeugtechnologien, die dafür notwendigen Stromerzeugungskapazitäten und Infrastruktur der Wertschöpfungskette bis zum Endverbraucher sowie die Rohstoffverfügbarkeit auf quantitativer Basis berücksichtigt. In sieben Expertengruppen ermittelten über 50 Experten aus mehr als 40 Unternehmen und Organisationen die maximal (technisch) erreichbaren Hochläufe für die Produktion und Installation von THG-neutralen Fahrzeugen und dazugehöriger Infrastruktur der benötigten Wertschöpfungskette je Fahrzeug-Antriebsart. Zentrale Annahme waren ideale rechtliche und finanzielle Rahmenbedingungen für jeden untersuchten THG-neutralen Kraftstoff und den dazugehörigen Fahrzeug-Antriebspfad.

Wie in der vorangegangenen Studie (FVV-Kraftstoffstudie IV) gezeigt, ist das Ausbaupotenzial der gesamten Wertschöpfungskette, die für die Nutzung THG-neutraler Kraftstoffe und Fahrzeug-Antriebe notwendig ist, von großer Bedeutung, um die Pariser Klimaziele zu erreichen. Der Großteil der THG-Emissionen wird durch den Ausstoß durch den Teil der Fahrzeugflotte verursacht, der noch mit fossilen Energieträgern betrieben wird. Je schneller eine defossilisierte Fahrzeugflotte eingeführt werden kann, desto geringer sind die kumulierten THG-Emissionen und damit die Effekte auf den Klimawandel. Unter Berücksichtigung des technischen Hochlauf-Potenzials hat Frontier eine Analyse durchgeführt, die unter anderem eine Kombination verschiedener Energieträger bzw. Fahrzeug-Antriebsstränge ermöglichen, um so früh wie möglich THG-Neutralität zu erreichen und technische Restriktionen einzelner THG-neutraler Fahrzeugtechnologien zu umgehen.

In Übereinstimmung mit der Methodologie nationaler THG-Bilanzen spiegelt diese Studie die Treibhausgasemissionen vollständig in dem Jahr wider, in dem sie tatsächlich anfallen. Dementsprechend verteilen wir die Emissionen, die aus der Fahrzeugproduktion und der Infrastruktur der Energie-Wertschöpfungskette resultieren, nicht künstlich über ihre Betriebsdauer (z. B. in Form von Jahren, Kilometern oder Energiemenge), wie dies in vielen anderen Studien zur Bewertung der Umweltauswirkungen des Übergangs in ein dekarbonisiertes Energiesystem angenommen wird.

Unsere neue modellbasierte Optimierung in Kombination mit dem in dieser Studie verwendeten analytischen Rahmen befasst sich daher explizit mit der Frage, wie die kumulierten THG-Emissionen im Straßenverkehrssektor der EU27+UK minimiert werden können.

Wir bewerten insgesamt 11 THG-neutrale Pfade, sowohl in ihren jeweiligen Einzeltechnologieszzenarien (in denen jeweils nur ein einziger, zuvor festgelegter THG-neutraler Energieträger bzw. Fahrzeug-Antriebsstrang für alle Fahrzeuge verfügbar ist) als auch in einem technologieneutralen „Mix-Szenario“ (in dem alle THG-neutralen Energieträger bzw. Fahrzeug-Antriebsstränge verfügbar sind und über Fahrzeugtypen und Zeit variieren können). In jedem Fall berücksichtigen wir explizit die erreichbaren Hochläufe der neuen Fahrzeugtechnologie, die dafür notwendigen Stromerzeugungskapazitäten und Infrastruktur der Wertschöpfungskette bis zum Endverbraucher sowie die Rohstoffverfügbarkeit auf quantitativer Basis. Unser zentrales Ziel der mathematischen Optimierung ist die Minimierung der kumulierten Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2020 bis 2050.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Ein Mix aus THG-neutralen Energieträgern bzw. Fahrzeug-Antriebspfaden kann den Übergang zur THG-Neutralität für den Straßenverkehrssektor der EU27+UK beschleunigen:** Unsere Studie zeigt, dass alle THG-neutralen Antriebspfade mit technischen Engpässen („Bottlenecks“) verschiedener Art konfrontiert sind, die den maximalen Hochlauf für jede einzelne THG-neutrale Technologie einschränken. Ein Technologiemix kann daher den Hochlauf THG-neutraler Fahrzeug-Antriebe erheblich beschleunigen (siehe **Abbildung 1** und **Abbildung 2** unten). Eine Kombination von Antriebstechnologien könnte somit die kumulierten Treibhausgasemissionen erheblich reduzieren: Beispielsweise führt ein Szenario, das sich auf batterieelektrische Fahrzeuge (mit europäischer Energieversorgung) als einzige verfügbare THG-neutrale Antriebstechnologie konzentriert, zu 39 % höheren kumulierten THG-Emissionen bis 2050 im Vergleich zu einem Mix aus THG-neutralen Antriebstechnologien.
- **Entscheidend für die Minimierung der THG-Emissionen ist der schnellstmögliche Ausstieg aus fossilen Energieträgern - Infrastruktur- und Rohstoffengpässe müssen schnell behoben werden:** Um die THG-Emissionen im Straßenverkehrssektor der EU27+UK zu minimieren, müssen Infrastruktur- und Rohstoffengpässe schnell behoben werden. Dies gilt insbesondere für den notwendigen Hochlauf der benötigten Infrastruktur für alternative Antriebsarten und die Verfügbarkeit von Materialien für die verschiedenen Technologien.
- **E-Fuels bieten eine einzigartige technologische Option für den klimaneutralen Betrieb der Bestandsflotte:** Rückwärtskompatible Kraftstoffe wie synthetisches Benzin und synthetischer Diesel (z. B. über Methanol-to-Gasoline- und Fischer-Tropsch-Herstellungspfade) ermöglichen eine schnelle Defossilisierung der bestehenden Flotte, sobald diese in großem Maßstab verfügbar sind. Trotz der langen Vorlaufzeiten und Planungshorizonte für die Errichtung der notwendigen Synthesenanlagen können E-Fuels daher die THG-Reduktion deutlich beschleunigen.
- **Trotz der Annahme idealer Bedingungen für den Hochlauf notwendiger Infrastruktur- und Rohstoffverfügbarkeit ist eine Defossilisierung des Straßenverkehrssektors der EU27+UK im Rahmen des 1,5°C-Ziels von Paris kaum möglich²:** Auch bei der Modellierung des THG-optimalen Szenarios mit einem Mix an klimaneutralen Energieträgern bzw. Fahrzeug-Antriebsarten, welches den THG-Fußabdruck des Straßenverkehrssektors bis 2050 minimiert, würden die kumulierten WtW-Emissionen im Zusammenhang mit dem Bau notwendiger neuer Infrastruktur und Fahrzeugen das verbleibende, theoretisch verfügbare europäische THG-Budget übersteigen.³

² Unter Annahme des 67%-Wahrscheinlichkeitsszenarios des IPCC. Siehe IPCC (2018), „Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.“, Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> (zuletzt abgerufen: 08.09.2022).

³ Das theoretisch verfügbare THG-Budget wurde in dieser Studie anhand des Anteils der europäischen Bevölkerung zur globalen Gesamtbevölkerung ermittelt.

- **Ein Verbot von Verbrennungsmotoren ab 2035 würde zu höheren THG-Emissionen führen als nötig:** Zwar ließe sich eine Defossilisierung des Straßenverkehrssektors der EU27+UK in der vorliegenden Modellierung ohne Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor erreichen, doch würde dies die kumulierten Emissionen bis 2050 gegenüber dem technologieneutralen Mix-Szenario erhöhen. Ein Verbot von Verbrennungsmotoren verstärkt die Abhängigkeiten gegenüber kritischen technischen Hochläufen der notwendigen Infrastruktur für alternative Antriebstechnologien entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Es schränkt zudem die Möglichkeit ein, die weitere Defossilisierung der Fahrzeug-Flotte durch den Einsatz kompatibler synthetischer Energieträger (E-Benzin, E-Diesel) in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu beschleunigen.⁴
- **Die Umstellung des Lastkraftverkehrs und schwerer Nutzfahrzeuge auf THG-neutrale Antriebe ist ein wichtiger Hebel, um erhebliche Emissionseinsparungen zu realisieren:** Während der Lastkraftverkehr und schwere Nutzfahrzeuge nur ca. 2 % des Fahrzeugbestands in der EU27+UK ausmachen, sind sie für ca. 45 % des heutigen Gesamtkraftstoffverbrauchs im europäischen Straßenverkehrssektor verantwortlich.⁵ Sie bergen damit enormes Potenzial für die Einsparung von Treibhausgasemissionen bei Umstellung auf THG-neutrale Antriebe.

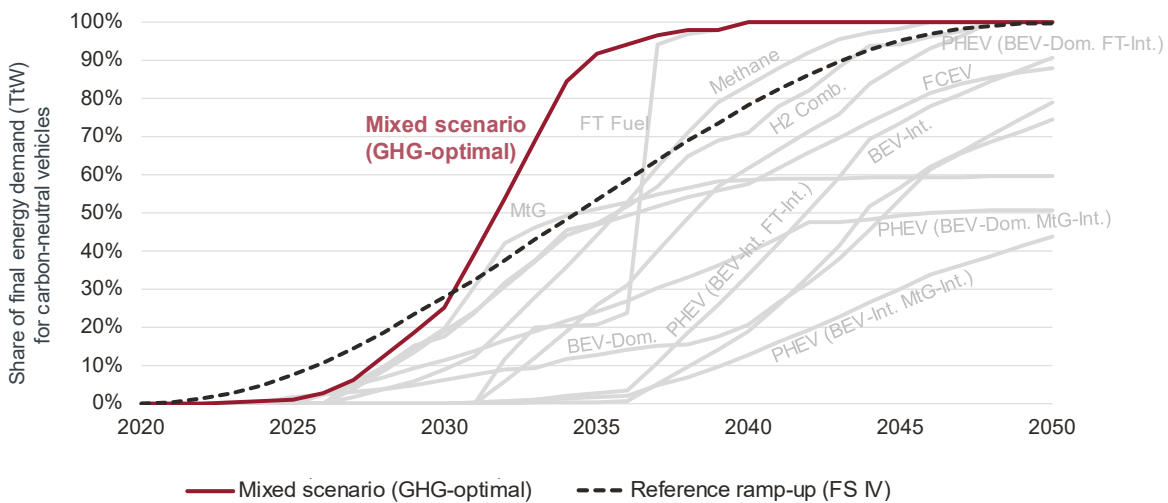


Abbildung 1: Anteil THG-neutraler TtW Energiebedarf im THG-optimalen technologieneutralen Mix-Szenario; Einzeltechnologieszenerarien in grau hinterlegt.

⁴ Wir stellen fest, dass es in den in dieser Studie betrachteten Szenarien für das Verbot von Verbrennungsmotoren immer noch möglich ist, die bereits zugelassene Bestandsflotte bis zum Ende ihrer Lebensdauer mit E-Fuels zu betreiben. Im Gegensatz dazu können Neufahrzeuge, die nach einem effektiven Verbrenner-Verbot (d. h. im Jahr 2035) zugelassen werden, nicht mit E-Kraftstoffen betrieben werden und sind daher auf Technologiepfade ohne Verbrennungsmotoren angewiesen. Auch wenn dieser Ansatz im Rahmen des derzeitigen EU-Pakets "Fit for 55" unrealistisch erscheint, entspricht er unserer allgemeinen Annahme in dieser Studie, die von idealen finanziellen und rechtlichen Bedingungen für alle verfügbaren Antriebstechnologien ausgeht. Siehe auch Council of the EU (2022), "Fit for 55 package: Council reaches general approaches relating to emissions reductions and their social impacts", <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/06/29/fit-for-55-council-reaches-general-approaches-relating-to-emissions-reductions-and-removals-and-their-social-impacts/> (zuletzt abgerufen: 08.09.2022).

⁵ Analyse von Frontier auf Basis von ACEA-Daten. Siehe auch ACEA (2022), "Vehicles in use Europe 2022", <https://www.acea.auto/files/ACEA-report-vehicles-in-use-europe-2022.pdf> (zuletzt abgerufen: 08.09.2022).

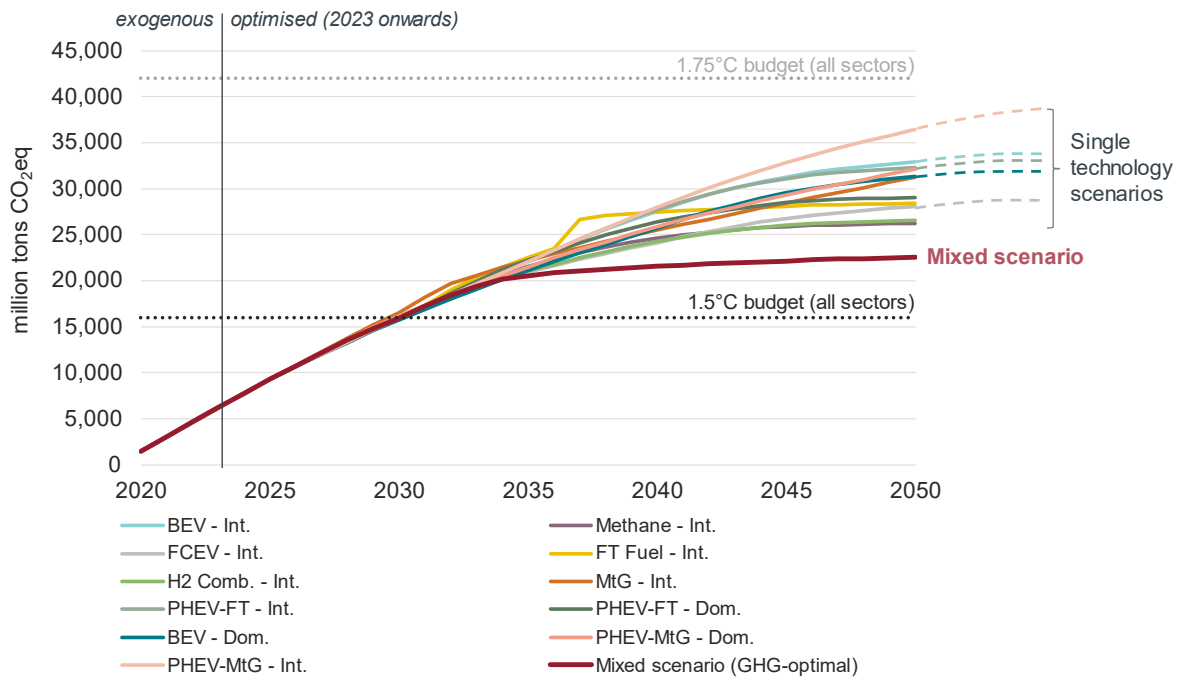


Abbildung 2: Kumulierte THG Emissionen im technologieneutralen „Mix-Szenario“ und Einzeltechnologieszzenarien. Hinweis: In Anbetracht technischer Hochlauf-Restriktionen und Annahmen zur Lebenszeit der Fahrzeuge erreichen die folgenden Einzeltechnologieszzenarien keinen 100-prozentige Dekarbonisierung bis 2050: BEV Dom./Int., FCEV, PHEV-FT Int. and PHEV-MtG Int. (siehe gestrichelte Linien). Das theoretisch verfügbare THG-Budget für die EU27+UK wurde unter der Annahme abgeleitet das 1.5°C/1.75°C Ziel mit 67% Wahrscheinlichkeit zu erreichen; der europäische Anteil wurde aus dem Verhältnis der europäischen Bevölkerung zur globalen Gesamtbevölkerung abgeleitet. Mehr Informationen in FVV (2021), Kapitel 10.3.4.

Future Fuels: FVV Fuels Study IVb

FVV no. 1452 | Final report (AB)

Frontier Economics Ltd. (Frontier Economics Ltd.), Köln
Dr. David Bothe

Full title:	Transformation of mobility to the GHG-neutral post-fossil age
Duration:	01.11.2021 – 30.09.2022
Funding organisation(s):	FVV eV (FVV)
Funding number(s):	FVV 601452
Research associate(s) / author(s):	Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH) Dr. David Bothe (Frontier Economics Ltd.) Dr. Christoph Gatzen (Frontier Economics Ltd.) André Pfannenschmidt (Frontier Economics Ltd.) Carolin Baum (Frontier Economics Ltd.) Fabian Schrogl (Frontier Economics Ltd.) Osama Mahmood (Frontier Economics Ltd.)
Lecturer(s):	Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH)
Project coordination / user committee:	Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH)

Acknowledgement

This report is the scientific result of the research project (follow-up study) undertaken by the FVV eV and performed by Frontier Economics Ltd. in Köln under the direction of Dr. David Bothe.

The FVV would like to thank Dr. Bothe and his colleagues – Dr. Christoph Gatzen, André Pfannenschmidt, Carolin Baum, Fabian Schrogl, Osama Mahmood (all Frontier Economics Ltd.) – for the implementation of the project. The project was conducted by an expert group led by Dr.-Ing. Ulrich Kramer (Ford-Werke GmbH). We gratefully acknowledge the support received from the project coordination and from all members of the project user committee.

In addition, the authors gratefully acknowledge the support received from the FVV and from all those involved in the project.

The research project was self-financed (funding no. 601452) by the FVV eV.

Abstract⁶

As part of its “Green Deal” the European Union (EU) is striving to achieve zero net emissions of greenhouse gases (GHG) across all sectors by 2050 [3]. For the European road sector this goal can only be achieved with carbon-neutral energy carriers and powertrains replacing combustion engine powered vehicles using fossil energy carriers such as diesel and gasoline prevalent today. As such, to reach a carbon-neutral road sector and meet both national as well as European CO₂ reduction targets, appropriate concepts for the road sector are required.

However, it is yet a fundamental deficit of the current EU policy approach, such as the EU “Fit for 55” package, as well as EU’s “Green Deal” aiming for net zero emissions by 2050 across all sectors, to predominantly focus on sector-specific measures. Fleet emission targets as laid out in the EU “Fit for 55” package, as well as (amongst others) the 100% GHG emission reduction target by 2035 for passenger cars, exclusively take into account tailpipe emissions of the respective vehicles (so called “Tank-to-Wheel” (TtW) emissions) – while ignoring any emissions from vehicle production or the associated energy supply chain (so called “Well-to-Tank” (WtT) emissions). Many studies, including FVV’s life-cycle analysis meta study [4], evidence why a narrow regulatory focus on sector-specific policy interventions may fail to reach the climate objectives by neglecting the benefits of an effective technology mix across sectors.

In 2021 FVV provided a comprehensive analysis (Fuels Study IV) of 7 different powertrain technologies (“powertrains”) for the European transport sector with regards to their overall infrastructure requirement, costs and associated emissions (“Well-to-Wheel” (WtW) emissions) [5]. The study concluded that overall cumulated emissions vary much less across different powertrains (e.g. electric vs. combustion engines operated with carbon-neutral energy carriers) than typically expected. In fact, **the speed of deploying GHG-neutral mobility solutions (complete GHG-neutral pathways on a WtW basis) is much more important than the choice of technologies**. The faster a defossilised vehicle fleet can be introduced, the lower are the cumulative GHG emissions and thus the impact on climate change.

In this context, this FVV Fuels Study IVb further explores the transition of the European road sector towards climate-neutrality by 2050. Consistent with the previous Fuels Study IV we consider various powertrain technologies and energy carrier pathways, all of which are exclusively based on renewable energy sourcing through wind and solar generation capacities.

Compared to the precedent study, this study includes four important features: A more pronounced focus on the road sector, the addition of new energy carrier/powertrain pathways (plug-in hybrid electric vehicles and Methanol-to-Gasoline drop-in fuel), explicit considerations of the technical ramp-up potential of defossilised transportation pathways (“technical bottlenecks”), as well as allowing for a combination of different energy carriers/powertrains to achieve GHG neutrality as early as possible.

In particular, this study includes achievable ramp-ups of new vehicle technology, power generation and distribution infrastructure as well as raw material supply on a quantitative basis. In seven expert groups over 50 experts from more than 40 companies and organisations identified the maximum (technically)

⁶ The detailed final report will be published via THEMIS shortly.

achievable build-up rate for production and installation of vehicles and infrastructure – assuming ideal legal and financial conditions for each investigated energy carrier/powertrain pathway. As shown in the preceding study (FVV Fuels Study IV), the ramp-up potential is of high importance to meet the Paris climate targets. The majority of GHG emissions is caused by the phase-out of the vehicle fleet which is still operated with fossil energy carriers. Therefore, the faster a defossilised vehicle fleet can be introduced, the lower are the cumulative GHG emissions and thus the impact on climate change. Taking into account the technical ramp-up potential, Frontier carried out an analysis of technology-neutral mixed technologies scenarios allowing for a combination of different energy carriers/powertrains to achieve GHG neutrality as early as possible.

In line with national GHG emission inventories, this study properly reflects GHG emissions in the year when they physically occur. Accordingly, we do not artificially distribute emissions resulting from vehicle production and energy supply chain infrastructure over their operational life (e.g. in terms of years, km, energy output) as assumed in many other studies evaluating the environmental impact of the transition towards a decarbonised energy system.

Our new model-based optimisation in combination with the analytical framework used in this study, therefore, explicitly addresses the question how cumulated GHG emissions in the EU27+UK road sector could be minimised.

We evaluate a total of 11 carbon neutral pathways, both in their respective single technology scenarios (where only a single carbon-neutral energy carriers/powertrain selected upfront is available for all vehicles) as well as in a technology-neutral mixed technologies scenario (where all carbon-neutral energy carriers/powertrains are available and, therefore, may vary over vehicle types and time). In each case, we explicitly take into account achievable ramp-ups of new vehicle technology, power generation and distribution infrastructure and raw material supply on a quantitative basis. Our main optimisation target is to minimise cumulated GHG emissions over the period 2020 to 2050.

The results can be summarised as follows:

- **A mix of carbon-neutral energy carrier/powertrain pathways can speed up the transition to GHG neutrality for the EU27+UK road sector:** Our study shows that all carbon-neutral pathways face bottlenecks of various kinds, constraining the maximal deployment rate for each individual technology. A mix of technologies can, therefore, accelerate the penetration of carbon-neutral powertrains significantly (see **Figure 1** and **Figure 2** below). A combination of powertrain technologies could thereby reduce cumulated GHG emissions significantly: For example, a scenario focussing on BEV (with domestic energy sourcing) as the only GHG-neutral powertrain technology available yields to 39% higher cumulated GHG emissions by 2050 compared to a mix of GHG-neutral powertrain technologies.
- **The decisive factor to minimise GHG emissions is the fastest possible departure from fossil fuels – infrastructure and material bottlenecks need to be addressed quickly:** In order to minimise GHG emissions in the EU27+UK road sector infrastructure and material bottlenecks need to be addressed quickly. This holds in particular for the necessary scale-up of infrastructure and material availability across technologies.

- **E-fuels provide a unique technology option to carbon-neutrally operate the existing fleet:** Backward compatible energy carriers such as e-gasoline and e-diesel (e.g. via Methanol-to-Gasoline and Fischer-Tropsch pathways) allow a quick defossilisation of the existing fleet once they become available at large scale. Despite long lead times for setting up synthesis plants, they can, therefore, accelerate overall GHG reductions.
- **Despite assuming ideal conditions for infrastructure and material availability, defossilisation of the EU27+UK road sector is not possible within the 1.5°C Paris target⁷:** Even in the GHG-optimal mixed technologies scenario modelling which minimises the GHG footprint of the EU27+UK road sector, the cumulated WtW emissions related to new infrastructure and vehicles would exceed the remaining European CO₂ budget theoretically allocated.⁸
- **Banning ICE vehicles from 2035 would lead to higher GHG emissions than necessary:** While a defossilisation of the EU27+UK road sector could also be achieved without ICE vehicles, this would in turn increase cumulated emissions, as it further reinforces dependencies on critical technical bottlenecks and limits the option to accelerate further defossilisation through compatible synthetic energy carriers (e-gasoline, e-diesel) to any existing ICE vehicle fleet.⁹
- **Shifting the heavy-duty segment towards carbon-neutral powertrains is a big lever to enable significant GHG emission savings:** While heavy-duty vehicles only make up for approx. 2% of the EU27+UK vehicle stock, they account for approx. 45% of today's overall total fuel consumption of the European road sector.¹⁰ Therefore, they hold an enormous potential for GHG emission savings.

⁷ Under the 67% probability scenario of the IPCC. See IPCC (2018), "Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.", Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> (last accessed: 08.09.2022).

⁸ The theoretical allocation of the GHG budget is derived via the European population share.

⁹ We note that in the ICE ban scenarios considered in this study it is still possible to operate the existing legacy fleet with e-fuels until the end of their lifetime. In contrast, new vehicles registered after an effective ICE ban (i.e. in 2035) cannot be operated with e-fuels and therefore rely on technology pathways excluding internal combustion engines. While this approach may seem unrealistic under the current EU "Fit for 55" policy approach, it is consistent with our general assumption in this study assuming ideal financial and legal conditions for all powertrain technologies available. See Council of the EU (2022), "Fit for 55 package: Council reaches general approaches relating to emissions reductions and their social impacts", <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/06/29/fit-for-55-council-reaches-general-approaches-relating-to-emissions-reductions-and-removals-and-their-social-impacts/> (last accessed: 08.09.2022).

¹⁰ Assessment by Frontier Economics based on ACEA data. See ACEA (2022), "Vehicles in use Europe 2022", <https://www.acea.auto/files/ACEA-report-vehicles-in-use-europe-2022.pdf> (last accessed: 08.09.2022).

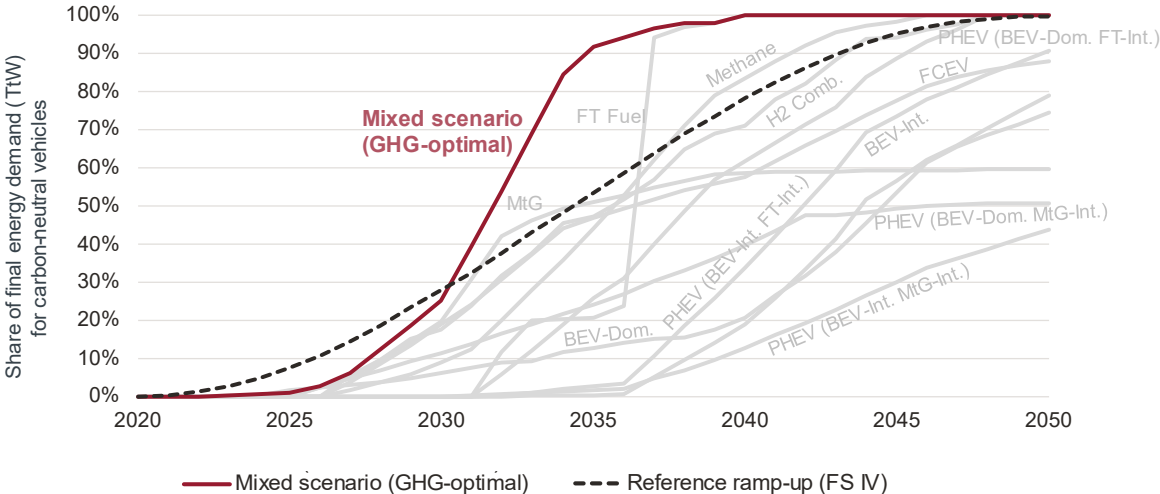


Figure 3: Share of carbon-neutral TtW energy demand in GHG-optimal mixed technologies scenario; single technology scenarios greyed out.

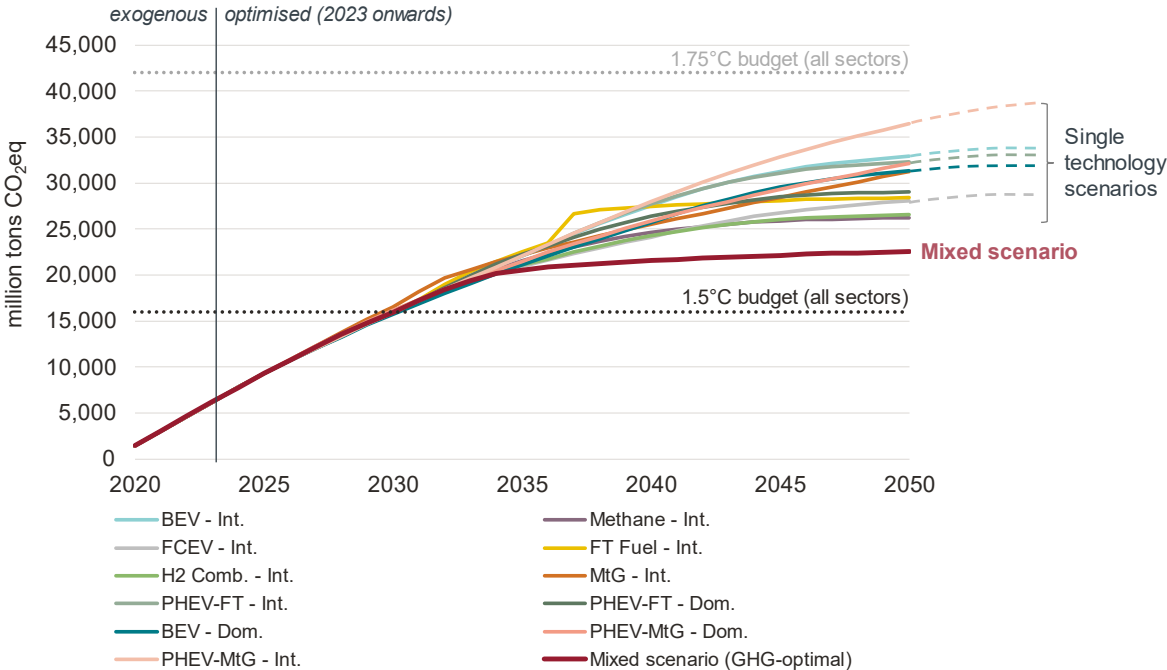


Figure 4: Cumulated GHG emissions in mixed technologies scenario and single technology scenarios. Note: Given technical bottlenecks and vehicle lifetime assumptions, no full decarbonisation is reached in single technology scenarios of BEV Dom./Int., FCEV, PHEV-FT Int. and PHEV-MtG Int. by 2050 (dashed lines). The theoretical CO₂ budget for EU27+UK is derived under the assumption to reach the 1.5°C/1.75°C target with a 67% probability and Europe’s share of global population. For more details see FVV (2021), Section 10.3.4.

Appendix

Bibliography

- [1] ACEA (2022), "Vehicles in use Europe 2022", <https://www.acea.auto/files/ACEA-report-vehicles-in-use-europe-2022.pdf> (last accessed: 08.09.2022).
- [2] Council of the EU (2022), "Fit for 55 package: Council reaches general approaches relating to emissions reductions and their social impacts", <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/06/29/fit-for-55-council-reaches-general-approaches-relating-to-emissions-reductions-and-removals-and-their-social-impacts/> (last accessed: 08.09.2022).
- [3] European Commission (2022), "A European Green Deal", https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en#timeline (last accessed: 08.09.2022).
- [4] FVV (2020), "Primemovers – Bilanz gezogen: FVV-Metastudie zur Lebenszyklusanalyse alternativer Antriebe", <https://www.primemovers.de/de/denken/bilanz-gezogen> (last accessed: 08.09.2022).
- [5] FVV (2021), "FVV Future Fuels Study IV: Transformation of Mobility to the GHG-neutral Post-fossil Age", https://www.fvv-net.de/fileadmin/user_upload/medien/download/FVV_Future_Fuels_StudyIV_The_Transformation_of_Mobility_H1269_2021-10_EN.pdf (last accessed: 08.09.2022).
- [6] IPCC (2018), "Global Warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.", Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> (last accessed: 08.09.2022).