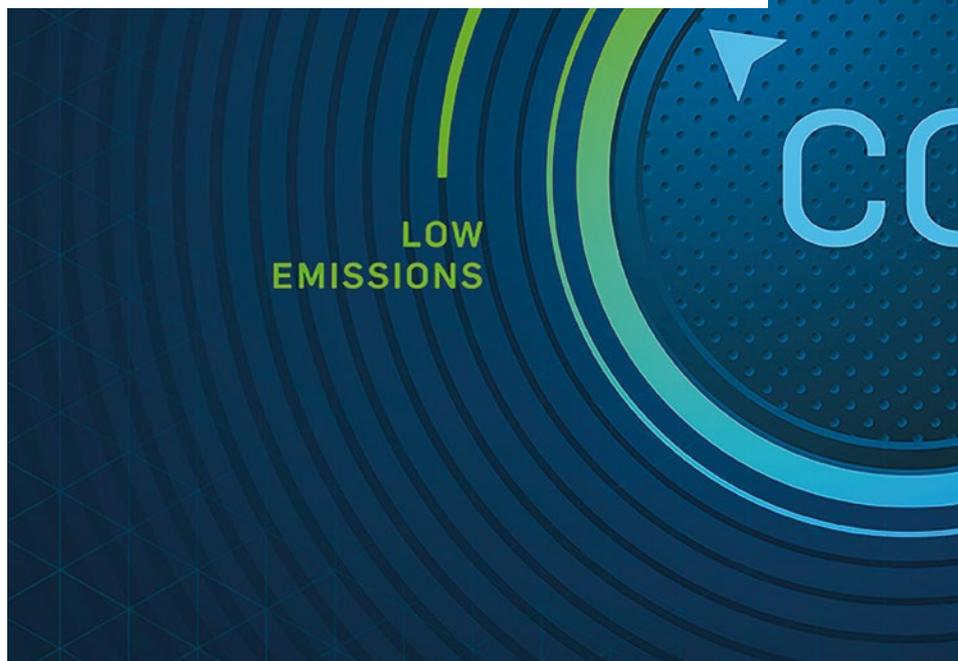


Pfade zu klimaneutraler Mobilität im postfossilen Zeitalter

In einer neuen Orientierungsstudie berücksichtigt die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) nicht nur alle klimarelevanten Emissionen, die durch den Bau und den Betrieb von Fahrzeugen entstehen. Erstmals wird sektorenübergreifend auch die Bereitstellung der Energieträger betrachtet – einschließlich des dafür erforderlichen Infrastrukturaufbaus. Es werden sowohl die kumulierten mobilitätsbedingten Treibhausgasemissionen als auch die kumulierten volkswirtschaftlichen Zusatzkosten berechnet sowie weitere Abhängigkeiten betrachtet.



1 STUDIENDESIGN

Eine bereits 2018 veröffentlichte Studie der FVV [1] für das Jahr 2050 zeigte signifikante Unterschiede hinsichtlich der Verteilung der notwendigen Infrastrukturinvestitionen und der kumulierten Fahrzeugmehrkosten zwischen angenommenen CO₂-neutralen 100%-Pfadern (direkte Stromnutzung in E-Fahrzeugen, Wasserstoffnutzung in der Brennstoffzelle, Umstellung auf synthetische Kraftstoffe). Der drängende Weiterentwicklungsbedarf wurde erkannt und mit einer Lebenszyklusanalyse [2] und mit der hier vorgestellten, im Auftrag der FVV von Frontier Economics und ifeu fertiggestellten Nachfolgestudie durchleuchtet [3]. Hervorzuheben ist die Methodik, die im CO₂-Budget die aus dem Infrastrukturaufbau resultierenden Treibhausgas(THG)-Emissionen berücksichtigt – sie werden anders als bei anderen Studien bei der Betrachtung der Energieträger-Antriebskombinationen sofort in voller Höhe verbucht. Die Sze-



- Neuzulassungen von Fahrzeugen, die mit fossilem Benzin betrieben werden
- Neuzulassungen von Fahrzeugen, die mit fossilem Diesel betrieben werden
- Neuzulassungen von Fahrzeugen, die mit fossilem komprimierten Gas betrieben werden
- Neuzulassungen von Fahrzeugen, die mit kohlenstoffneutralem Kraftstoff betrieben werden

BILD 1 Marktanteil neuzugelassener Pkw/leichter Nutzfahrzeuge in der EU – Prämisse: in 2050 nur noch klimaneutrale Fahrzeuge auf den Straßen (© Frontier Economics)

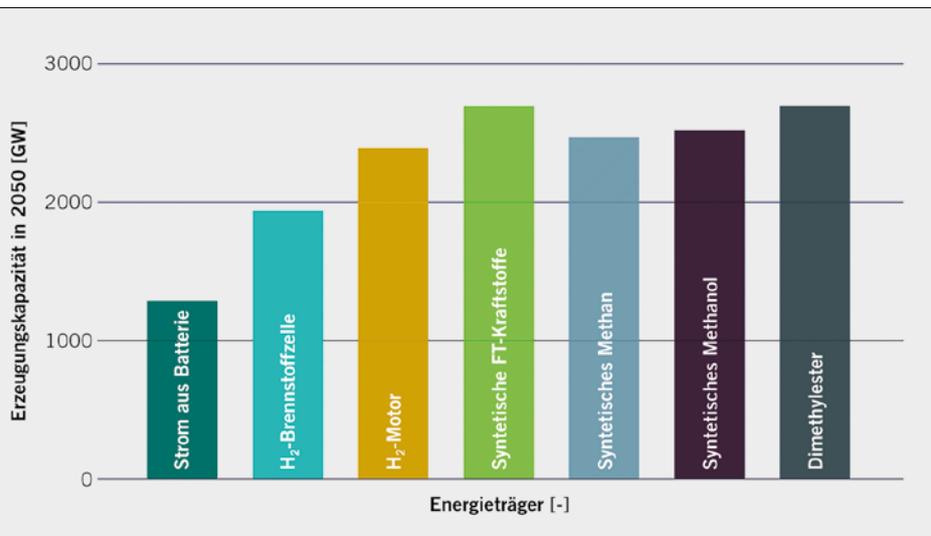


BILD 2 Benötigte Erzeugungskapazität zur Defossilisierung des kompletten europäischen Straßenverkehrs; Direktnutzung von Strom aus innereuropäischer Erzeugung, Nutzung von Wasserstoff und Nutzung von synthetischen Kraftstoffen aus sonnen- und windreichen Regionen (© FVV)

Wichtigstes Ziel war, technische Diskussionsgrundlagen für Strategien hin zur klimaneutralen Mobilität zu schaffen. In die Untersuchung wurden sowohl die Verfügbarkeit von Rohstoffen als auch durch den Standort begünstigte Energieerzeugungen einbezogen. So ist es – zumindest für die 100%-Szenarien und für den europäischen Verkehrssektor – gelungen, die angestrebte neutrale Datengrundlage zu erstellen. Im Folgenden werden gerundete Zahlen verwendet, die exakten Werte sind in [3] nachzulesen.

2 KUMULIERTE THG-EMISSIONEN

Der jeweilige Gesamtenergiebedarf für die verschiedenen Antriebs- und Fahrzeugtechnologien für das Jahr 2050 für Europa lässt sich je nach Szenario bei Status-quo-Technologie mit circa 2000 bis 10.000 TWh/a veranschlagen, wobei erwartungsgemäß die direkte Stromnutzung den geringsten und die synthetischen Kraftstoffe den höchsten Endenergiebedarf aufweisen. Dabei ist für die batterieelektrischen Szenarien bereits die

erforderliche Rückverstromung zuvor erzeugten Wasserstoffs zum Ausgleich saisonaler Schwankungen berücksichtigt. Der Primärenergiebedarf für batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle, BEV) ist etwa um den Faktor 2 geringer als für Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) und etwa um den Faktor 3 bis 4 geringer als für Fahrzeuge, die mit synthetischen Kraftstoffen fahren.

Für den Aufbau einer nachhaltigen Energieinfrastruktur werden die Kosten und die THG-Emissionen allein durch die erforderlichen Kapazitäten des Energiesystems bestimmt. Diese wiederum hängen ganz entscheidend vom Erntefaktor der Solar- und Windanlagen ab, da die erreichbaren Volllaststunden stark standortabhängig sind. Diese Kapazitäten wurden für alle 42 Szenarien berechnet – auch für unwahrscheinliche Fälle wie eine direkte Nutzung von in Äquatornähe erzeugten Stroms, die eine Spreizung in der benötigten Anlagenkapazität zur Versorgung des europäischen Straßenverkehrs von rund 750 bis zu 4.800 GW zeigen. Legt man nur die ökonomisch und technisch umsetzbaren Szenarien zugrunde und unterstellt, dass sich technische Fahrzeugverbesserungen zur Senkung der Emissionen auch durchsetzen, fällt die Spreizung mit dem Faktor 2 deutlich geringer aus (1000 bis 3000 GW), **BILD 2**. Bei der Modellierung der Kapazitäten aller weiteren Anlagen fiel auf, dass die erforderliche

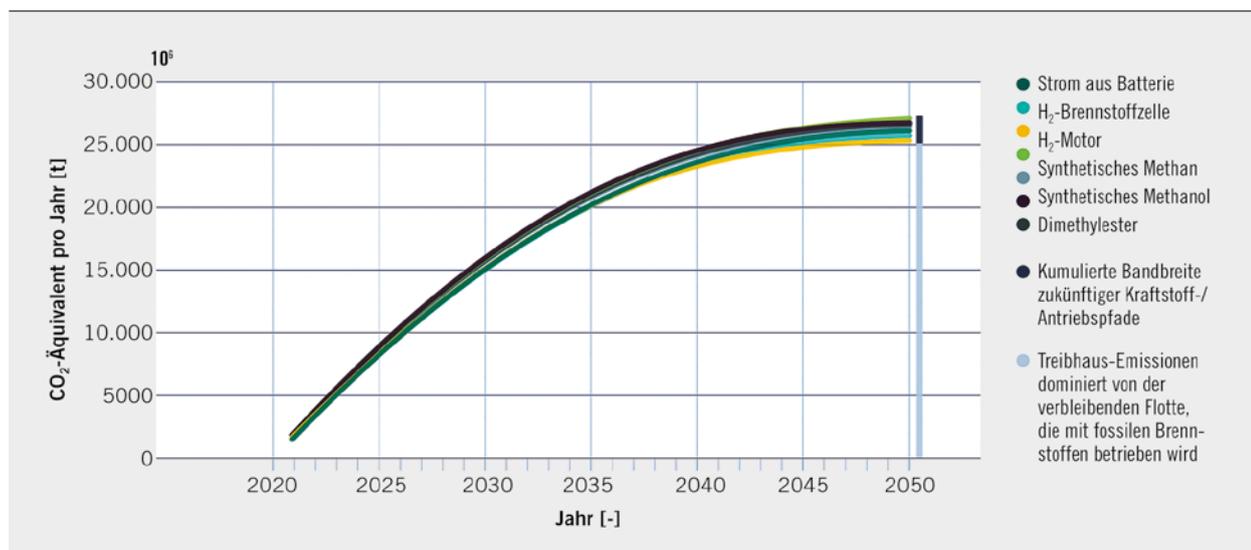


BILD 3 Kumulierte CO₂-Emissionen der Pkw-Flotte in Europa (EU27 plus GB) für verschiedene Energieträger-Antriebskombinationen bei identischer Hochlaufgeschwindigkeit (© FVV)

lichen Elektrolysekapazitäten auch für rein batterieelektrische Szenarien nicht unerheblich sind, um den Wasserstoff für die Rückverstromung zu erzeugen. Für ein „Balanced“-Szenario mit heimischer Stromerzeugung ist eine Elektrolysekapazität von etwas mehr als 1000 GW im Jahr 2050 notwendig, mit der 8,9 % des benötigten Stroms saisonal gepuffert werden. Die nachfolgende Analyse der Klimawirkungen wurde auf den europäischen Straßenverkehr fokussiert.

Die gesamten mobilitätsbezogenen THG-Emissionen wurden für jedes Jahr berechnet und anschließend für 2021 bis 2050 kumuliert. In allen Szenarien wurde die Summe sämtlicher THG-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger im noch nicht umgestellten Teil der Flotte bestimmt. Diese tragen je nach Szenario 66-74 % zur Gesamtemissionen bei. Betrachtet man nur den Pkw-Sektor, so unterscheiden sich die kumulierten CO₂-Emissionen zwischen verschiedenen Energieträger-Antriebskombinationen bei identischer Umstellungsgeschwindigkeit nur um maximal 14 %, **BILD 3**.

Die THG-Emissionen für den Aufbau der Bereitstellungsinfrastruktur betragen kumuliert 5-20 % der Gesamtemissionen. Durch Verlagerung der Stromerzeugung in sonnen- und windreiche Gegenden sinken diese Anteile. Die Fahrzeugproduktion beansprucht 11-24 %; erwartungsgemäß entfallen die höchsten Anteile auf batterieelektrische Antriebe. Unabhängig vom betrachteten Technologiepfad beträgt die Summe der kumulierten THG-Emissionen für Fahrzeugbau und -verschrottung zusammen mit dem Aufbau des kompletten Energiebereitstellungssystems etwa 30 % der Gesamtemissionen, während rund 70 % aus dem Betrieb der Restflotte mit fossilen Kraftstoffen stammen. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor führen sowohl Hybridisierung als auch Leichtbau zu erhöhten produktionsbedingten THG-Emissionen. Diese werden jedoch nur im Fall der Hybridisierung durch Emissionseinsparungen während der Fahrzeugbetriebsphase überkompensiert. Während bei der Hybridisierung die kumulierten THG-Gesamtemissionen sinken, führt Aluminium-Leichtbau zu höheren kumulierten Emissionen.

Vergleicht man die kumulierten Emissionen mit dem verbleibenden CO₂-Budget des Bilanzierungsraums – ein hypothetischer Wert umgelegt über den euro-

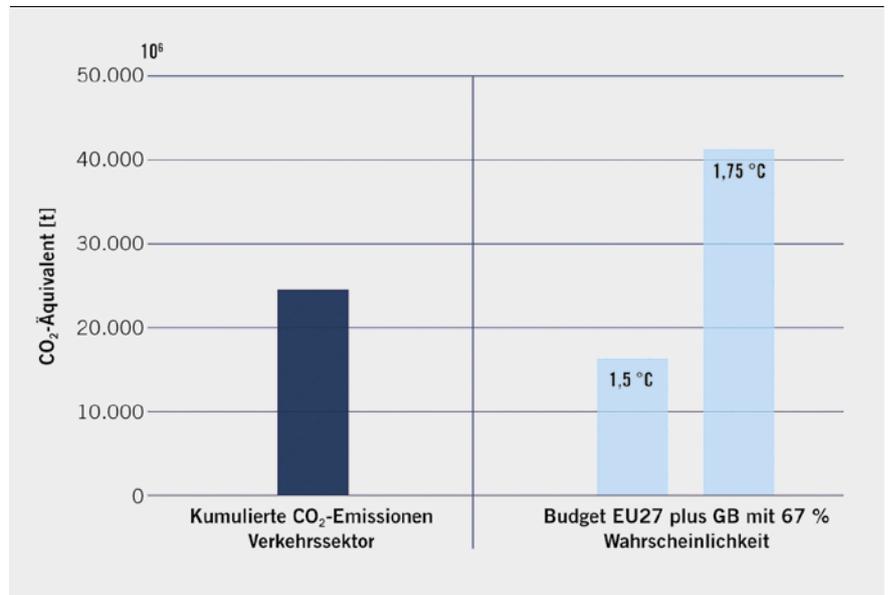


BILD 4: Kumulierte CO₂-Emissionen aus dem Verkehrssektor verglichen mit dem europäischen CO₂-Budget bei Zielerreichung von 1,5 °C beziehungsweise 1,75 °C (© FVV)

päischen Bevölkerungsanteil, für den es keine politische Festlegung gibt –, dann wird folgendes deutlich: Allein die straßenverkehrsbedingten kumulierten Emissionen übersteigen in allen Szenarien das THG-Gesamtbudget, das Europa für alle Sektoren zur Verfügung stünde, um den Zielwert von +1,5 °C Erhöhung der mittleren globalen Temperatur mit einer Wahrscheinlichkeit von 67 % einzuhalten, **BILD 4**. Das Emissionsbudget für einen Zielwert von +1,75 °C würde zu rund zwei Dritteln genutzt, um ausschließlich die Mobilitätsbedürfnisse zu decken.

3 ROHSTOFFE

Die Verfügbarkeit von Rohstoffen bestimmt, inwieweit neue Technologien eingeführt werden können. Neben Kobalt und Lithium für moderne Batterien und Platin als bisher unverzichtbarer Katalysator in Brennstoffzellen wurden weitere Rohstoffe wie Kupfer untersucht. Bei zunehmender Fahrzeugpopulation wurde eine hohe Recyclingquote unterstellt. Der europäische Bedarf an Lithium könnte sogar in einem unrealistischen batterieelektrischen 100-%-Szenario durch die vorhandenen Reserven gedeckt werden, während eine vollständige Umstellung auf Festkörperbatterien mit reiner Lithium-Anode zu Engpässen führen

kann, **BILD 5**. Dies gilt umso mehr, wenn die komplette Welt in der Wahl CO₂-neutraler Antriebe und Energieträger dem europäischen Vorbild folgen. Der kumulierte Kobalt-Bedarf überstiege in einem 100-%-Szenario die weltweiten Ressourcen deutlich, ebenso der Platinbedarf in einem 100-%-Brennstoffzellenszenario – ausgehend von aktuellen Technologien. Kupfer würde in allen Szenarien deutlich knapper, ist aber durch andere leitende Materialien ersetzbar.

4 VOLKSWIRTSCHAFTLICHE KOSTEN

Die volkswirtschaftlichen Kosten für regenerativ erzeugte Energien entstehen im Wesentlichen durch die Investitionen in die Infrastruktur – anhand der dargestellten Kapazitäten lassen sie sich gut abschätzen. Hierbei wurde auf Basis zahlreicher Einzeldaten und Experteneinschätzungen eine erhebliche Degression auch für reife Technologien wie Solaranlagen oder Windkraftanlagen unterstellt. Für die Synthesepfade, mit denen CO₂-neutrale Kraftstoffe hergestellt werden, wirkt vor allem die Skalierung von Anlagengrößen kostensenkend. So gerechnet ergeben sich Investitionskosten zwischen 1.500 und 3.500 Milliarden Euro allein für Erzeugung und Distribution. Im Allgemeinen nehmen die Kosten mit der Zahl der Umwandlungsschritte in der Energiekette zu: Inves-

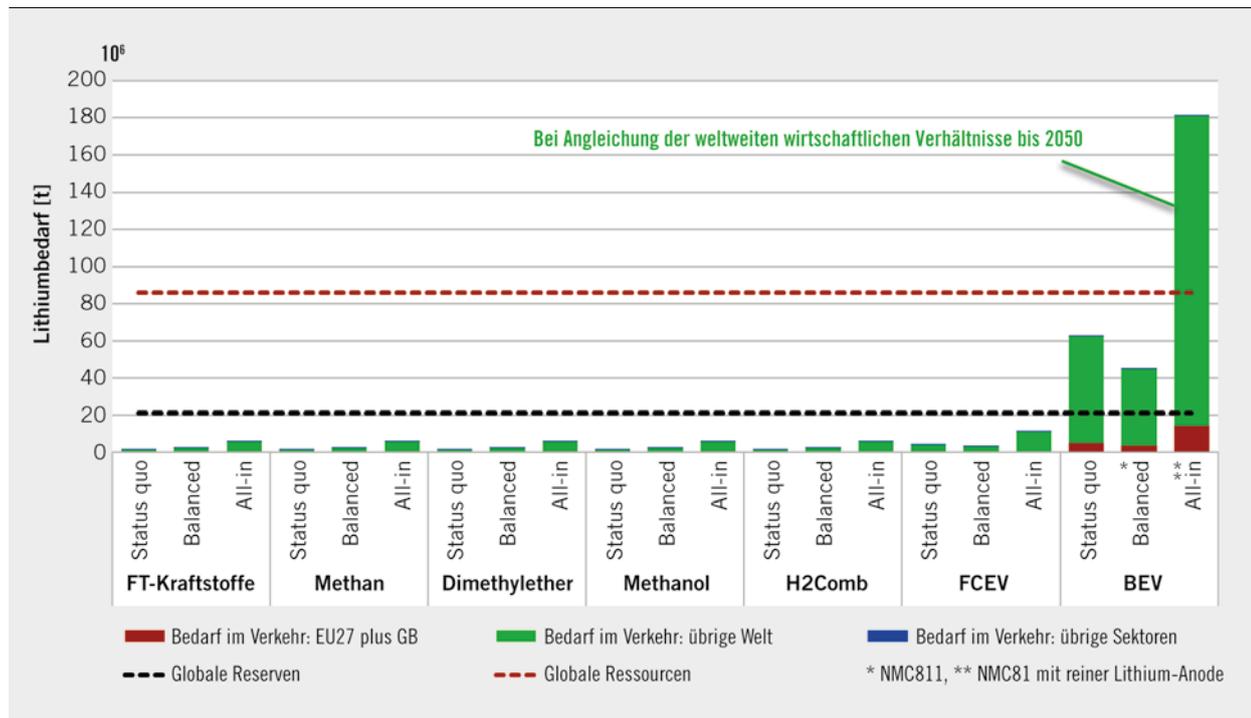


BILD 5 Kumulierter primärer Lithiumbedarf (100%-Szenarien) von 2021 bis 2050 im Vergleich zu den weltweiten Reserven und Ressourcen (© ifeu)

tionen für international hergestelltes Methanol liegen mit etwas mehr als 2000 Milliarden Euro nur knapp über denen für heimischen Strom zur Versorgung von Status-quo-Elektroauto. Die Spreizung ist hier geringer als bei den benötigten Erzeugungskapazitäten, weil CO₂-

neutrale Flüssigkraftstoffe weitgehend über die bestehende Kraftstoff-Infrastruktur in das Fahrzeug gelangen.

Die Berechnung künftiger Fahrzeugnettokosten stellt eine besondere Herausforderung dar, da es noch nicht für alle Technologien Serienerfahrungen gibt.

Über die Bepreisung einzelner Subsysteme sowie eine Abschätzung möglicher Degressionen oder auch Kostensteigerungen, zum Beispiel durch schärfere Abgasgrenzwerte für Verbrennungsmotoren, ist jedoch bei Frontier Economics ein Parametersatz hergeleitet wor-

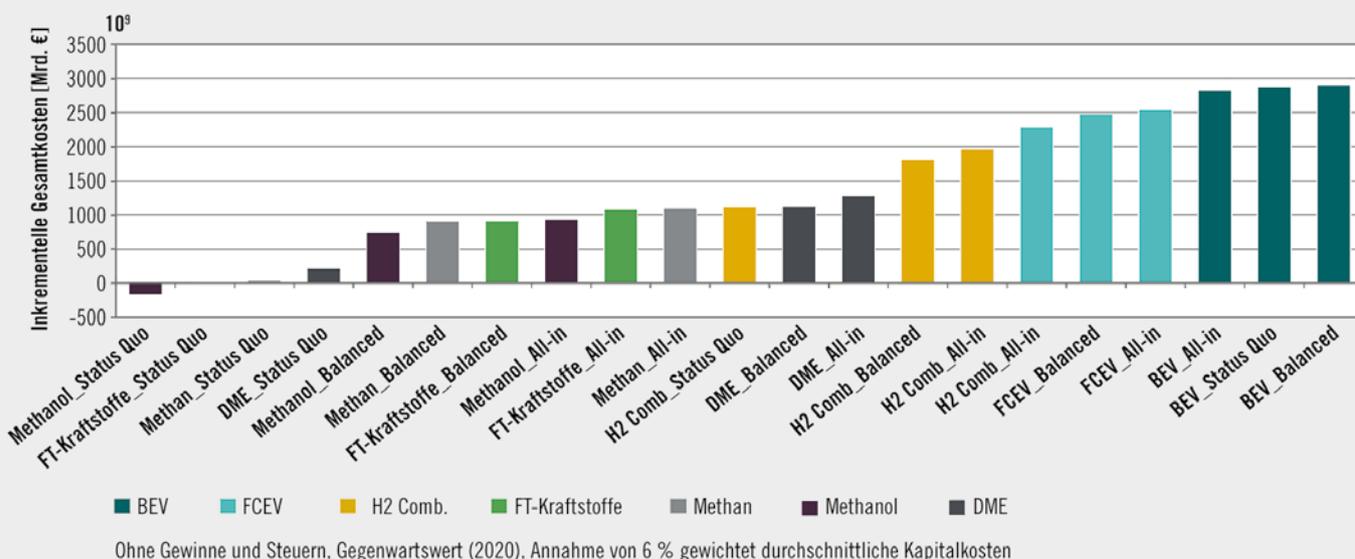


BILD 6 Kumulierte zusätzliche Kosten für emissionsfreie Fahrzeuge in Europa bis zum Jahr 2050 (© Frontier Economics)

den, der näherungsweise die Kosten für bestimmte Fahrzeugkategorien bestimmen lässt. Kumuliert man die Gesamtkosten für alle in Europa zugelassenen klimaneutralen Fahrzeuge bis zum Jahr 2050, so kostet die Flottenerneuerung circa 6000-9000 Milliarden Euro. Es sind lediglich die Mehrkosten zu zukünftigen Fahrzeugen mit Otto- und Dieselmotor (Abgasemissionsstandards EU7+) relevant, **BILD 6**. Bei dieser Betrachtungsweise verursachen mit FT-Kraftstoffen betriebene Fahrzeuge keine Mehrkosten. Da als Basis von Methanolfahrzeugen rein ottomotorische Brennvorgänge angenommen wurden, ergeben sich für diesen Pfad im Vergleich sogar niedrigere Fahrzeugkosten. Für FCEV oder batterieelektrischen Antrieb sind erhebliche kumulierte Mehrkosten zu erwarten.

Addiert man die zusätzlichen Kosten für eine klimaneutrale Fahrzeugflotte und die Investitionskosten für die Energiebereitstellung, so ergibt sich aufgrund der Dominanz der Fahrzeugkosten ein ähnliches Bild wie für die Fahrzeugmehrkosten. Mit Gesamtkosten von 2.600 Milliarden Euro ist die Nutzung international hergestellter Methanols in Fahrzeugen ohne weitere teure Effizienzmaßnahmen die günstigste Möglichkeit, den gesamten Straßenverkehr zu defossilisieren. Unter den Konzepten mit vergleichsweise geringen Gesamtkosten findet sich ferner der Einsatz von Methan, Dimethylether sowie einige FT-Varianten. 100 % batterieelektrische Mobilität verursacht mit rund 5000 Milliarden Euro doppelt so hohe Kosten, um dieselbe Klimawirkung zu erzielen.

5 FAZIT

Jede Klimastrategie, die ausschließlich auf die THG-Neutralität der Neuwagenflotte setzt, macht die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens unerreichbar. Die Unterschiede in den kumulierten Emissionen zwischen den betrachteten Kombinationen aus Antrieb und Energieträgern sind bei gleich angenommener Hochlaufgeschwindigkeit klimaneutraler Technologien vergleichsweise gering. Effektiver Klimaschutz im Verkehr ist vor allem an eine schnelle Verfügbarkeit von regenerativen Energieträgern gekoppelt, die auch in der Bestandsflotte Wirkung entfalten.

In der Realität stehen einem linearen und weltweit skalierbaren Hochlauf in jedem Szenario Hürden wie temporäre kritische Verfügbarkeit von Rohstoffen oder mangelnde Akzeptanz des Ausbaus von regenerativen Stromerzeugungsanlagen entgegen. Ein intelligenter Mix an Antrieben und Energieträgern kann diese Hürden zumindest senken und so dazu beitragen, dass zum einen individuelle Mobilität und Klimaschutz vereinbar werden und zum anderen der essentiell wichtige Ausbau regenerativer Energiebereitstellung so schnell wie möglich voranschreitet. In einem Folgevorhaben widmet sich die FVV daher der Frage, wie ein solcher Mix, der einen möglichst schnellen Ersatz fossiler Transportenergie ermöglicht, in realistischen Szenarien aussehen könnte.

LITERATURHINWEISE

- [1] FVV (Hrsg.): Defossilisierung des Transportsektors: Optionen und Voraussetzungen in Deutschland. Heft R586, Frankfurt am Main, 2018
- [2] FVV (Hrsg.): Cradle-to-Grave-Lebenszyklusanalyse im Mobilitätssektor - Metastudie zur CO₂-Bilanz alternativer Fahrzeugantriebe. Heft R595, Frankfurt am Main, 2020
- [3] FVV (Hrsg.): Transformation der Mobilität im klimaneutralen und postfossilen Zeitalter. Heft H₁269, Frankfurt am Main, 2021
- [4] FVV (Hrsg.): Sechs Thesen zur Klimaneutralität des europäischen Verkehrssektors. Heft R600, Frankfurt am Main, 2021

DANKE

Die FVV dankt Frontier Economics Ltd. und ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH für die gute Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an die für die Studie verantwortlichen Projektleiter Dr. David Bothe und Frank Dünnebeil sowie die Mitglieder des FVV-Vorstandes und die beteiligten Expertinnen und Experten aus rund 60 Unternehmen, Forschungsstellen und weiteren Institutionen, die ihr Wissen zur Verfügung gestellt haben.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.mtz-worldwide.com

