



DER WEG HIN ZU EINER CO₂-ARMEN MOBILITÄT

Neue Perspektiven zur
Verkehrs- und Energiewende
in Deutschland

White Paper
Juni 2020

Dr. Martin Stahl · Dr. Markus Seeberger · José Miguel Escobar Coto



Ergebnisse der Studie im Überblick

- Um die CO₂-Auswirkungen der E-Mobilität zu quantifizieren, werden **zwei Szenarien** betrachtet. Im **Basis-Szenario** wird ein **Wettbewerb von Elektromobilität und Kohleausstieg** angenommen – im **Extrem-Szenario** wird **100 % erneuerbare Energie (EE)** für das Laden von EVs unterstellt, auch wenn dies aus verschiedenen Gründen (Verfügbarkeit überschüssiger EE, Ladeinfrastrukturkosten, Praktikabilität) unrealistisch ist. Im **Basis-Szenario erhöht** E-Mobilität in Deutschland zwischen **2020 und 2030 die CO₂-Emissionen netto um 40 Mio. t** – im **Extrem-Szenario** hingegen können bis zu **95 Mio. t CO₂ eingespart** werden.
- Gleichzeitig entstehen für die Elektromobilität bis 2030 im Basis-Szenario **gesamtgesellschaftliche Kosten von 47–75 Mrd. EUR** (Extrem-Szenario ohne Berücksichtigung zusätzlicher Kosten für z. B. Ladeinfrastruktur 40–68 Mrd. EUR). Somit sind auch im unwahrscheinlichen **Extrem-Szenario die CO₂-Vermeidungskosten mit 400–700 EUR prohibitiv hoch**. In Deutschland werden **Elektrofahrzeuge** somit absehbar **keinen sinnvollen Beitrag zur CO₂-Einsparung** leisten.
- Würden die **Mehrkosten der Elektromobilität (~75 Mrd. EUR)** für die **Subventionierung von Wasserstoff** aufgewendet, ließen sich auf diese Weise **ca. 200 Mio. t CO₂ einsparen**.
- Ab **Anfang der dreißiger Jahre** wird eine **Kostenparität** zwischen **Wasserstoff** und fossilen Kraftstoffen erwartet – **Fahrzeugmehrkosten** für FCEVs müssen **auch nach diesem Zeitpunkt** gesamtgesellschaftlich getragen werden. Eine **Konversion des Verkehrssektors** hin zu **Wasserstoff** erfordert die **Überwindung hoher technischer Hürden** und **hohe Investitionen** (Aufbau Produktions- und Distributionsinfrastruktur, Ersatz der Fahrzeugflotte) und stellt folglich eine **risikoreiche Alternative** dar.
- Ein Teil der **Mehrkosten der Elektromobilität (~73 Mrd. EUR)** könnte alternativ für die **Subventionierung von synthetischen Kraftstoffen** verwendet werden. Bis 2030 ließen sich so **mit synthetischen Kraftstoffen bis zu 600 Mio. t CO₂ einsparen**, was einem signifikanten Beitrag zur CO₂-Reduktion entspricht. **Wird die Kostenparität zwischen synthetischen und fossilen Kraftstoffen erreicht**, betragen die **Einsparungen jährlich ca. 180 Mio. t CO₂**. **Umsetzungsrisiken** bei synthetischen Kraftstoffen beschränken sich auf den Aufbau der **Produktionsinfrastruktur** in sonnenreichen Ländern und die Erzielung der notwendigen **Skaleneffekte** bei den **Kosten**.

Eine gesamtheitliche Perspektive auf die Elektromobilität ist notwendig

Zahlreiche Studien und Veröffentlichungen haben sich in den letzten Jahren mit der Klimabilanz von Elektrofahrzeugen (EV) beschäftigt und diese mit verbrennungsmotorischen Fahrzeugen (ICE) verglichen. Die Ergebnisse unterscheiden sich dabei teilweise erheblich, was zum Großteil auf die getroffenen Grundannahmen zurückzuführen ist. Je nach betrachteten Vergleichsfahrzeugen, prognostizierter Fahrleistung, Verbrauch, angenommenen Stromemissionen und den Annahmen bzgl. Batterieherstellung schneiden aus CO₂-Perspektive Elektroantrieb oder Verbrennungsmotor besser ab.

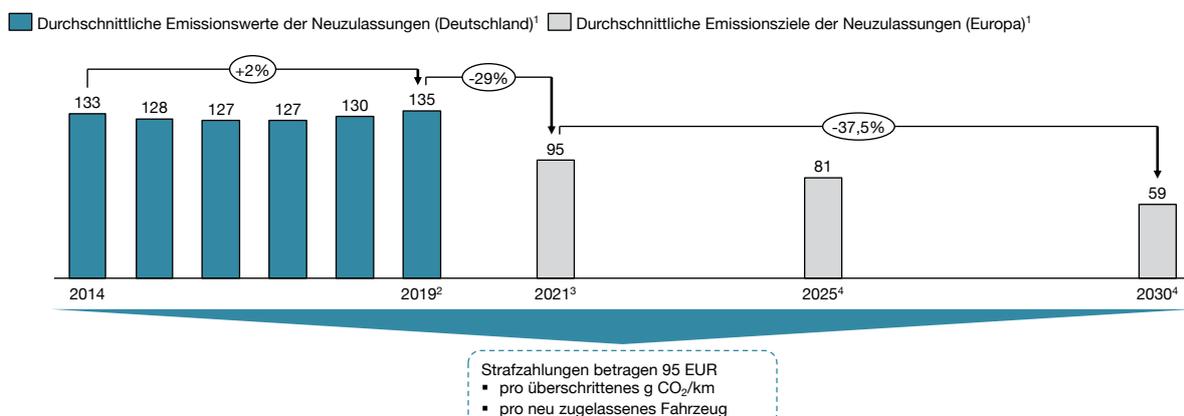
Die bisherigen Analysen beschränken sich jedoch auf einen Vergleich der den Fahrzeugen direkt zuordenbaren Emissionen im Verkehrssektor. Diese Vergleiche greifen zu kurz, da sie die Effekte im Energiesektor vernachlässigen. Da erneuerbare Energie auf absehbare Zeit nur begrenzt zur Verfügung steht, existiert ein Konkurrenzverhältnis zwischen dem in Deutschland geplanten Kohleausstieg und dem Betrieb von Elektrofahrzeugen. Im Rahmen der vorliegenden Analyse haben wir den CO₂-Effekt von Elektrofahrzeugen in Deutschland im Zusammenspiel von Energie- und Verkehrssektor quantifiziert und mögliche Alternativen (Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe) untersucht.

Die Gesetzgebung erzwingt einen starken Anstieg der Elektrofahrzeug-Neuzulassungen

Der Klimawandel war 2019 das beherrschende Thema der öffentlichen Diskussion in Deutschland. Je nach Standpunkt werden die Auswirkungen des Klimawandels unterschiedlich eingeschätzt. Da der Klimawandel jedoch dramatische Auswirkungen auf die Umwelt haben kann, ist ein sofortiges Handeln angebracht. Der Verkehrssektor steht mit etwa 20 % (171 Mio. t CO₂-Äquivalente p. a., ohne Well-to-Tank, also Förderung, Raffinierung, Transport etc.) der CO₂-Emissionen im Fokus der politischen und medialen Aufmerksamkeit. Um die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu reduzieren, hat der Gesetzgeber auf europäischer Ebene Flottengrenzwerte für Neufahrzeuge festgelegt (Abbildung 1).

Im Jahr 2019 haben neu zugelassene Fahrzeuge in Deutschland nach NEFZ-Zyklus 135 g CO₂/km emittiert¹. Bis 2021 dürfen alle in Europa neu zugelassenen Fahrzeuge im herstellerübergreifenden Durchschnitt nur noch maximal 95 g CO₂/km emittieren. Bis 2030 soll der Grenzwert um weitere 37,5 % sinken. Werden diese Werte nicht eingehalten, so drohen den Automobilherstellern empfindliche Strafzahlungen. Allein durch Optimierungen des Verbrenners werden diese Grenzwerte aber nicht zu erreichen sein. Um die geforderten Verbesserungen zu schaffen, müssen in den kommenden Jahren zahlreiche EVs zugelassen werden, da diese den rechnerischen Flottendurchschnitt deutlich senken. Geht man davon aus, dass die Verbrennungsmotoren hinsichtlich ihrer CO₂-Emissionen kaum noch Optimierungspotenzial haben, so ist bis

Um die Emissionen im PKW-Sektor zu reduzieren, hat die Politik mit der Einführung von CO₂-Grenzwerten und erheblichen Strafen bei deren Überschreitungen reagiert



¹ Emissionswerte und -ziele sind jeweils herstellerspezifisch. Dargestellte Werte entsprechen herstellerübergreifenden Durchschnitten

² NEFZ-Wert berechnet aus WLTP-Wert nach BMWi

³ „Phasing-in“ Effekt: Grenzwert von 95g CO₂/km gilt im Jahre 2020 für 95% der Neuzulassungen – ab 2021 werden 100% der neu zugelassenen Fahrzeuge berücksichtigt

⁴ Für die Jahre 2025 und 2030 berechnen sich die Grenzwerte als Verbesserung ggü. dem 2021 Wert um 15% bzw. 37,5%

Abb. 1: Überblick der durchschnittlichen CO₂-Emissionswerte und -ziele (NEFZ) für PKW-OEMs in Deutschland bzw. Europa
(in g CO₂/km)

¹ Um eine Vergleichbarkeit der Zahlen zu ermöglichen, wurden die Emissionen der Neuzulassungen für das Jahr 2019 von einem WLTP-Wert (157 g CO₂/km, Mix Diesel und Benzin) in einen NEFZ-Wert (135 g CO₂/km) umgerechnet

Um CO₂-Emissionsziele zu erreichen, müssen im Jahr 2030 in Deutschland ~1,5 Mio. EVs neu zugelassen und eine Gesamtflotte von 10,6 Mio. EVs erreicht werden

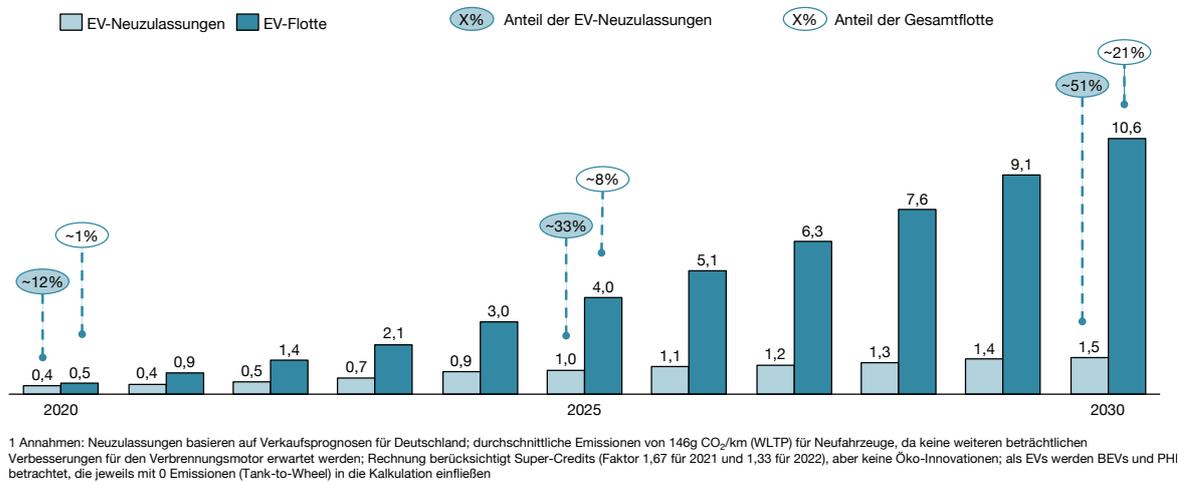


Abb. 2: Notwendige EV-Neuzulassungen und EV-Flotte in Deutschland
in Mio. Fahrzeuge

2030 eine EV-Flotte von ca. 10,6 Mio. Fahrzeugen notwendig, um die definierten Emissionsziele zu erreichen. Mehr als die Hälfte aller Neuzulassungen im Jahr 2030 müssen dazu einen elektrischen Antrieb haben (Abbildung 2). Im Rahmen der Studie wurde eine reine BEV²-Flotte unterstellt, da diese im Hinblick auf Emissionen und Kosten das optimale Szenario für die E-Mobilität darstellt – denn PHEVs³ haben einerseits eine geringere elektrische Fahrstrecke und benötigen andererseits überproportional mehr Ladeinfrastruktur bezogen auf ihre elektrische Fahrleistung.

Diese EV-Flotte benötigt jedoch auch eine große Menge an Energie zum Laden. Bei einer jährlichen Laufleistung von ca. 13.700 km und einem Durchschnittsverbrauch von 20,8 kWh/100km benötigt jedes EV im Jahr ca. 2,9 MWh. Bezogen auf die Gesamtflotte entspricht dies im Jahr 2030 zusätzlichen 30 GWh Energie bzw. einer Erhöhung des jährlichen Bruttoenergieverbrauchs in Deutschland um 5 %.

In Deutschland werden Elektrofahrzeuge nicht sinnvoll zur CO₂-Einsparung beitragen

Um die CO₂-Bilanz von Verbrennungsmotoren und EVs gesamtheitlich vergleichen zu können, müssen alle Effekte beachtet werden – dies umfasst neben den offensichtlichen Auswirkungen im Verkehrssektor auch die Effekte im Energiesektor. Wie bereits erwähnt sind erneuerbare Energien nur begrenzt verfügbar. In letzter Zeit mehren sich sogar die Stimmen, die fürchten, dass das im Koalitionsvertrag festgeschriebene Ziel, 2030 einen Anteil von 65 % des Strombedarfs aus erneuerbarer Energie zu speisen, nicht

erreicht werden könnte. Daher ist es von zentraler Bedeutung, dass jede kWh erneuerbarer Energie eine maximale CO₂-Vermeidung erreicht.

Im Basis-Szenario haben wir daher einen Wettbewerb zwischen EE und dem Kohleausstieg angenommen, was in der gegenwärtigen Situation mit unterentwickelter Ladeinfrastruktur, ohne flächendeckendem Einsatz von gesteuertem Laden und noch nicht ausgebauter Übertragungsnetze die Realität widerspiegelt. Es gibt jedoch auch Stimmen, die den Wettbewerb von Kohleausstieg und E-Mobilität bezweifeln. Kritiker argumentieren, dass EVs durch eine optimierte Ladestrategie zu 100 % aus überschüssigen EE geladen werden können und somit eine Verbreitung der E-Mobilität keinen Einfluss auf den Kohleausstieg hat. Dieser Ansatz setzt jedoch voraus, dass die derzeit abgeregelten EE für EVs nutzbar gemacht werden können und in den kommenden Jahren weiter ansteigen, um den Energiebedarf der EVs decken zu können. Gleichzeitig müsste es trotz des Übertragungsnetzausbaus Überschüsse geben, die im Netz nicht verwertet werden können, jedoch als Ladeenergie für EVs nutzbar sind. Auch wenn wir dieses Extrem-Szenario für unwahrscheinlich halten, wurde es im Rahmen der Studie betrachtet und bei der Analyse der Vermeidungskosten aufgenommen (Abbildung 10). Dieses Szenario wäre mit weiteren Kosten für Ladeinfrastruktur und Netzausbau verbunden, die sich heute nur schwer quantifizieren lassen, jedoch die genannten Vermeidungskosten noch einmal deutlich erhöhen dürften. Im Folgenden stellen wir das Basis-Szenario dar, das Extrem-Szenario folgt einer analogen Rechenlogik und wird ebenfalls (Abbildung 10) ausgewiesen.

2 BEV (battery electric vehicle): rein batterieelektrisches Fahrzeug

3 PHEV (plug-in hybrid electric vehicle): Plug-in-Hybrid Fahrzeug



Beladen der Elektrofahrzeuge mit erneuerbarer Energie verhindert die Vermeidung von Kohlekraftwerksemissionen – pro gefahrenem km werden 57g CO₂ weniger gespart

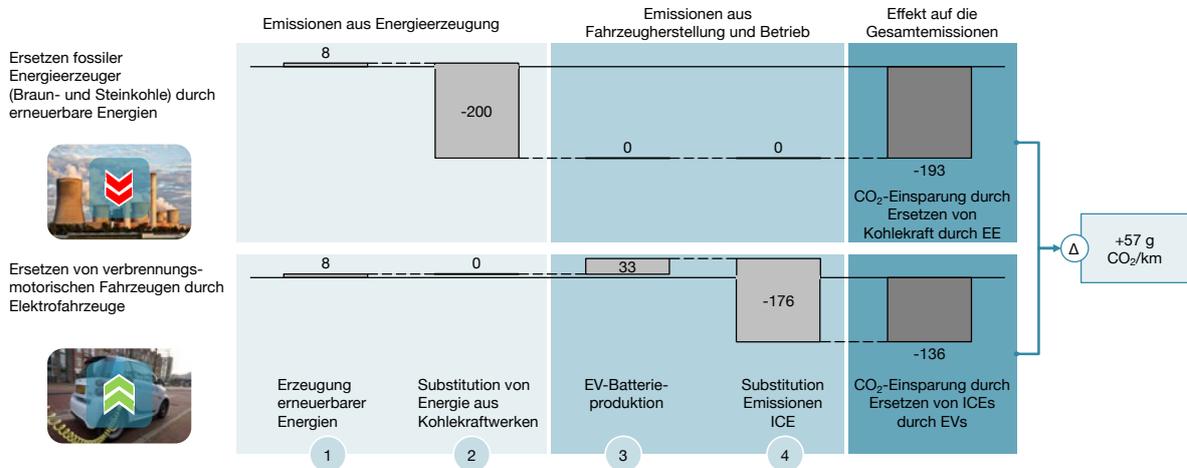


Abb. 3: Vergleich der CO₂-Emissionen in g CO₂/km

EVs werden Mehremissionen in Höhe von 8,2 Mio. t CO₂ im Jahr 2030 verursachen – dies entspricht ca. dem Vierfachen der Emissionen des innerdeutschen Flugverkehrs (2018)

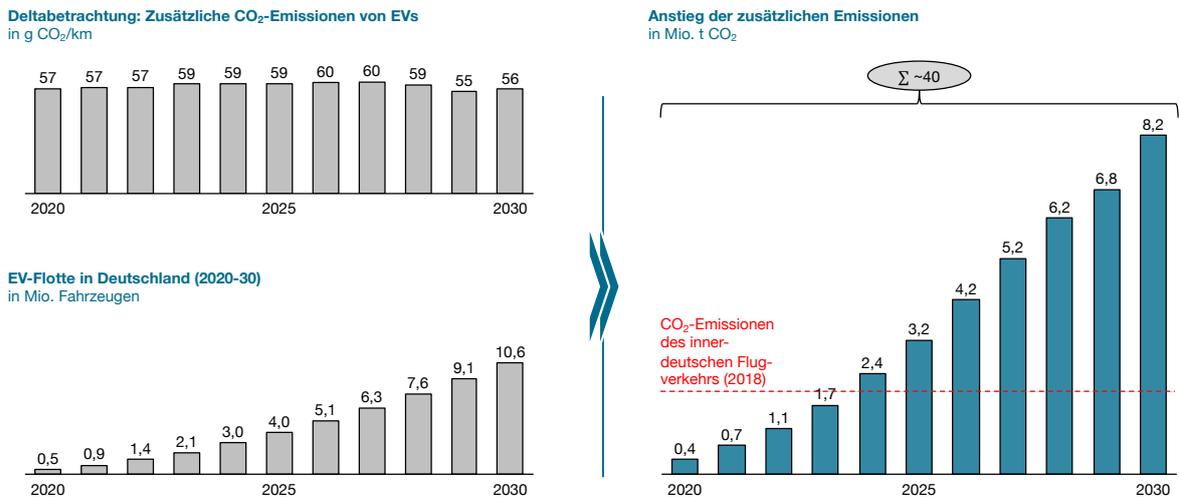


Abb. 4: Zusätzliche CO₂-Emissionen von EVs

Das Basis-Szenario beschäftigt sich im Kern mit der Frage, ob es sinnvoller ist, eine kWh erneuerbarer Energie zur Substitution von Kohlestrom oder für das Betreiben von EVs zu verwenden. Dazu nehmen wir im Folgenden eine Deltabetrachtung zum gegenwärtigen Status vor.

Entscheidet man sich für die Substitution von Kohle, so können auf diese Weise hohe Emissionen im Energiesektor vermieden werden, was die Kernidee der Energiewende darstellt: 1 kWh erneuerbare Energie erzeugt 2020 36 g CO₂-Emissionen und kann idealerweise die Produktion von 1 kWh Kohlestrom vermeiden (mittlere Emissionen im Mix von Braun- und Steinkohle: 962 g CO₂/kWh). Dies bedeutet

jedoch auch, dass die erneuerbare Energie nicht mehr für EVs genutzt werden kann, da sie knapp ist und Deutschland noch viel Kohlestrom produziert, der substituiert werden sollte. In diesem Szenario bleibt der Verbrennungsmotor weiterhin die dominierende Antriebsart auf deutschen Straßen und die CO₂-Emissionen der deutschen PKW werden sich nicht deutlich reduzieren. In Summe verringern sich in diesem Szenario die CO₂-Emissionen durch die Substitution von Kohlestrom um 889 g CO₂/kWh für jede eingesetzte kWh erneuerbarer Energie. Um die genannten Werte mit den Emissionen von Fahrzeugen vergleichen zu können, wurden sie in die in der Automobilwelt gebräuchliche Einheit g CO₂/km umgerechnet. Beispiel: Verbraucht

ein EV 20,8 kWh/100km, so kommt es mit 1 kWh 4,8 km weit. Die genannten 36 g CO₂/kWh für die Erzeugung erneuerbarer Energie dividiert durch 4,8 km/kWh ergeben 8 g CO₂/km (Abbildung 3).

Entscheidet man sich stattdessen für das Ersetzen der Verbrennungsmotoren durch elektrische Antriebe, so entstehen ebenso die Emissionen der erneuerbaren Energie (36 g CO₂/kWh bzw. 8 g CO₂/km). Dazu kommen die Emissionen in der EV-Batterieproduktion (33 g CO₂/km). Für die Vergleichsrechnung wurden im Sinne des EVs optimistische Annahmen gewählt (z. B. in Bezug auf CO₂-Emissionen in der Batterieproduktion). Dabei ist zu beachten, dass Batterieproduktion eine konstante Last im Energienetz darstellt und diese in jedem Szenario direkt mit einer Abschaltung von Kohleverstromung im Wettbewerb steht. Da die erneuerbare Energie hier verwendet wird, können keine Emissionen aus der Kohleverstromung vermieden werden. Allerdings werden die Emissionen des Verbrenners eingespart (- 176 g CO₂/km). Vergleicht man allein die Emissionen des Verkehrssektors (EV 41 g CO₂/km, ICE 176 g CO₂/km), liegt das EV natürlich deutlich vorne, was auch den genannten optimistischen Annahmen (Betrieb nur mit erneuerbarer Energie, Emissionen aus Batterieproduktion) geschuldet ist. Die Einsparung von 135 g CO₂/km bildet die Grundlage für das Extrem-Szenario. Bei Einbeziehung der Substitutionseffekte im Energiesektor dreht sich das Bild jedoch ins Gegenteil: Die Rechnung zeigt, dass jeder gefahrene EV-Kilometer zu zusätzlichen Emissionen von 57 g CO₂ im Vergleich zur Kohlesubstitution führt. Daher erhöhen EVs die CO₂-Emissionen in Deutschland bei einer sektorübergreifenden Betrachtung im Basis-Szenario. Rechnet man analog für die Jahre bis 2030, so bleibt dieser Effekt bestehen (Abbildung

4). Erst wenn keine fossile Energieerzeugung mehr durch erneuerbare Energie substituiert werden kann, hat das EV demnach einen Vorteil gegenüber dem ICE mit fossilen Kraftstoffen.

Bei einer EV-Flotte, die bis 2030 voraussichtlich etwa 10,6 Millionen Fahrzeuge umfasst, entstehen über die kommenden 10 Jahre demnach zusätzliche Emissionen in Höhe von 40 Mio. t CO₂. Im Jahre 2030 allein werden 8,2 Mio. t Mehremissionen ausgestoßen – dies entspricht mehr als den vierfachen Emissionen des gesamten heutigen innerdeutschen Flugverkehrs (Abbildung 4).

Auch eine alternative Versorgung kann nicht zur CO₂-Einsparung beitragen

Verschiedene Alternativen könnten erwogen werden, um den CO₂-Effekt von Elektrofahrzeugen zu verbessern. Ein möglicher Ansatz wäre der Einsatz von Batterien oder anderen Energiespeichern. Oftmals wird angeführt, dass z. B. ein heimischer Energiespeicher in Kombination mit einer Solaranlage das emissionsfreie Laden von EVs ermögliche. In diesem Fall könnte die Energie jedoch ebenso bei Bedarf ins Netz eingespeist werden und damit fossile Energieerzeugung substituieren. Der Effekt bleibt wie in Abbildung 3 dargestellt.

Ebenso könnte man erwägen, Nuklearenergie zum Laden von EVs zu verwenden. Auch hier wäre stattdessen das Abschalten der Kohlekraftwerke die aus CO₂-Sicht bessere Variante. Würden Atomkraftwerke die bestehenden Kohlekraftwerke vollständig ersetzen, wäre die CO₂-Bilanz des EVs gegenüber dem mit fossilen Kraftstoffen betriebenen ICE natürlich positiv. Jedoch halten wir dies in Deutschland

Bei Preisstabilität der EVs entstehen Gesamtkosten für die Elektromobilität von ~75 Mrd. EUR. Sinken die Preise für Elektrofahrzeuge bis 2030 um 30% sind es ~47 Mrd. EUR

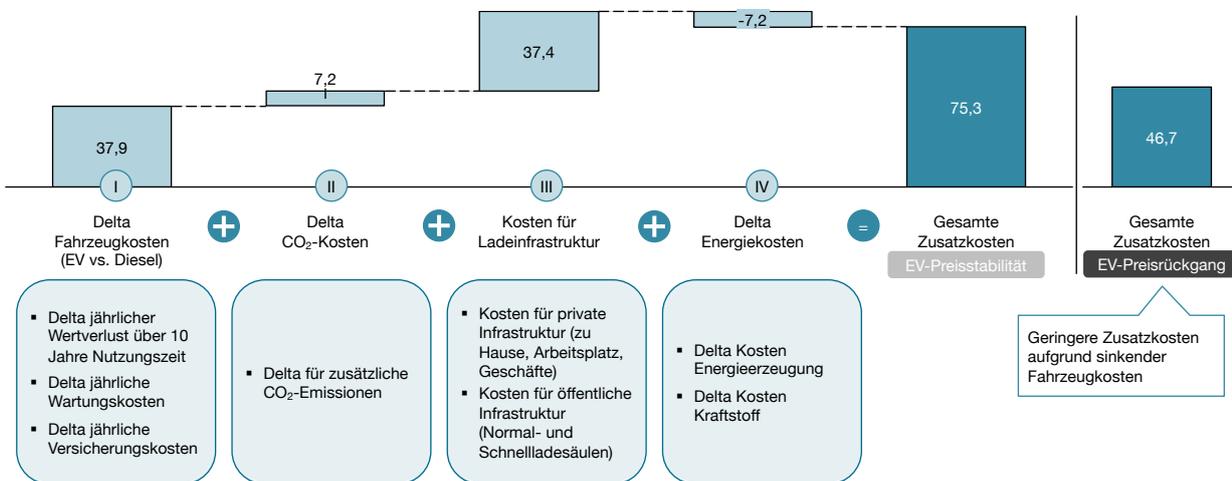


Abb. 5: Kostenarten für die durch EVs verursachten, gesamtgesellschaftlichen Zusatzkosten (2020-2030) in Mrd. EUR

für ein zum gegenwärtigen Zeitpunkt unrealistisches Szenario.

Die Elektromobilität kostet Deutschland bis 2030 zwischen 40 und 75 Mrd. EUR

Da es eine Vielzahl von Maßnahmen zur CO₂-Reduktion gibt, ist es wichtig, die jeweiligen Kosten quantifizieren zu können, um die geeignetste Maßnahme zu wählen.

Um die Kosten der Elektromobilität zu quantifizieren, werden volkswirtschaftliche Kostendifferenzen zwischen EVs und verbrennungsmotorischen Fahrzeugen analysiert. Diese setzen sich aus Differenzen in den Fahrzeugkosten (I), CO₂-Kosten (II), Ladeinfrastrukturkosten (III) und Energiekosten (IV) zusammen (Abbildung 5). Da Steuern und Subventionen keinen gesamtgesellschaftlichen Kosteneffekt erzeugen, werden diese nicht berücksichtigt.

(I) Die Fahrzeugkosten setzen sich aus dem Wertverlust der Fahrzeuge über 10 Jahre, jährlichen Wartungs- bzw. Reparaturkosten und Versicherungskosten zusammen. Im Rahmen der Studie werden zwei mögliche Preisentwicklungen bei Elektrofahrzeugen betrachtet. Zum einen wird angenommen, dass (wie in der Vergangenheit) Batteriekapazitäten in EVs steigen und sich die Preise der Elektrofahrzeuge auf heutigem Niveau halten. Die beiden gegenläufigen Effekte von sinkenden Batterieproduktionskosten und wachsenden Batteriegrößen gleichen sich dabei aus. Es wird jedoch auch ein Szenario analysiert, in dem eine 30-prozentige Preisreduktion für EVs bis 2030 angenommen wird. Dies würde bedeuten, dass EVs im Jahr 2030 billiger als verbrennungsmotorische Fahrzeuge wären. Wir halten dieses Szenario für unwahrscheinlich, jedoch nicht undenkbar. Die Analyse zeigt, dass für EVs im Vergleich zum Verbrennungsfahrzeug in Summe höhere Kosten anfallen. So ist, je nachdem, ob die Preise der EVs bis zum Jahre 2030 stabil bleiben oder sinken, über die gesamte Flotte mit zusätzlichen Kosten in Höhe von 37,9 (Preisstabilität) bzw. 9,3 Mrd. EUR (30 % Preisreduktion) zu rechnen.

(II) Für das Basis-Szenario werden die CO₂-Kosten der entstehenden zusätzlichen Emissionen mit Hilfe des vom Umweltbundesamt ermittelten „fairen“ CO₂-Preises von 180 EUR/t CO₂ berechnet. Für die erzeugten Mehremissionen in Höhe von 40 Mio. t CO₂ entstehen durch EVs somit zusätzliche CO₂-Kosten in Höhe von 7,2 Mrd. EUR.

(III) Für den Betrieb der EVs muss außerdem Ladeinfrastruktur aufgebaut werden. Die Anzahl der Ladepunkte für die Berechnung basiert auf vom VDA⁴ verwendeten Werten. Es werden pro EV 1,2 private und öffentliche Ladepunkte sowie 0,01 Schnellladepunkte angenommen. Daraus resultieren bis 2030 kumulierte Ladeinfrastrukturkosten in Höhe von 37,4 Mrd. EUR. Bei diesem Betrag handelt es sich nur um Abschreibungen für den genannten Zeitraum,

sie enthalten keine Investitionen, die sich nach 2030 auszahlen würden. Skaleneffekte bei der Ladeinfrastruktur werden berücksichtigt. Kosten für den notwendigen Ausbau der Netzinfrastruktur sind in diesen Zahlen nicht enthalten, dürften aber noch einmal einen erheblichen Kostenblock ausmachen. Auch erscheint der flächen-deckende Ausbau von Ladeinfrastruktur besonders in Städten mit Umsetzungsproblemen behaftet zu sein. Ebenso werden keine Kosten für die Netzanbindung der EV-Ladeinfrastruktur berücksichtigt. Die im Extrem-Szenario entstehenden zusätzlichen Kosten für Ladeinfrastruktur sind hier ebenfalls nicht berücksichtigt.

(IV) Hinsichtlich der Energiekosten schneiden EVs bei optimistischen Annahmen zu den EE-Gestehungskosten besser ab, denn der Strom für deren Betrieb ist günstiger als der Kraftstoff der Verbrenner. Folglich sparen EVs bis 2030 insgesamt 7,2 Mrd. EUR an Energiekosten.

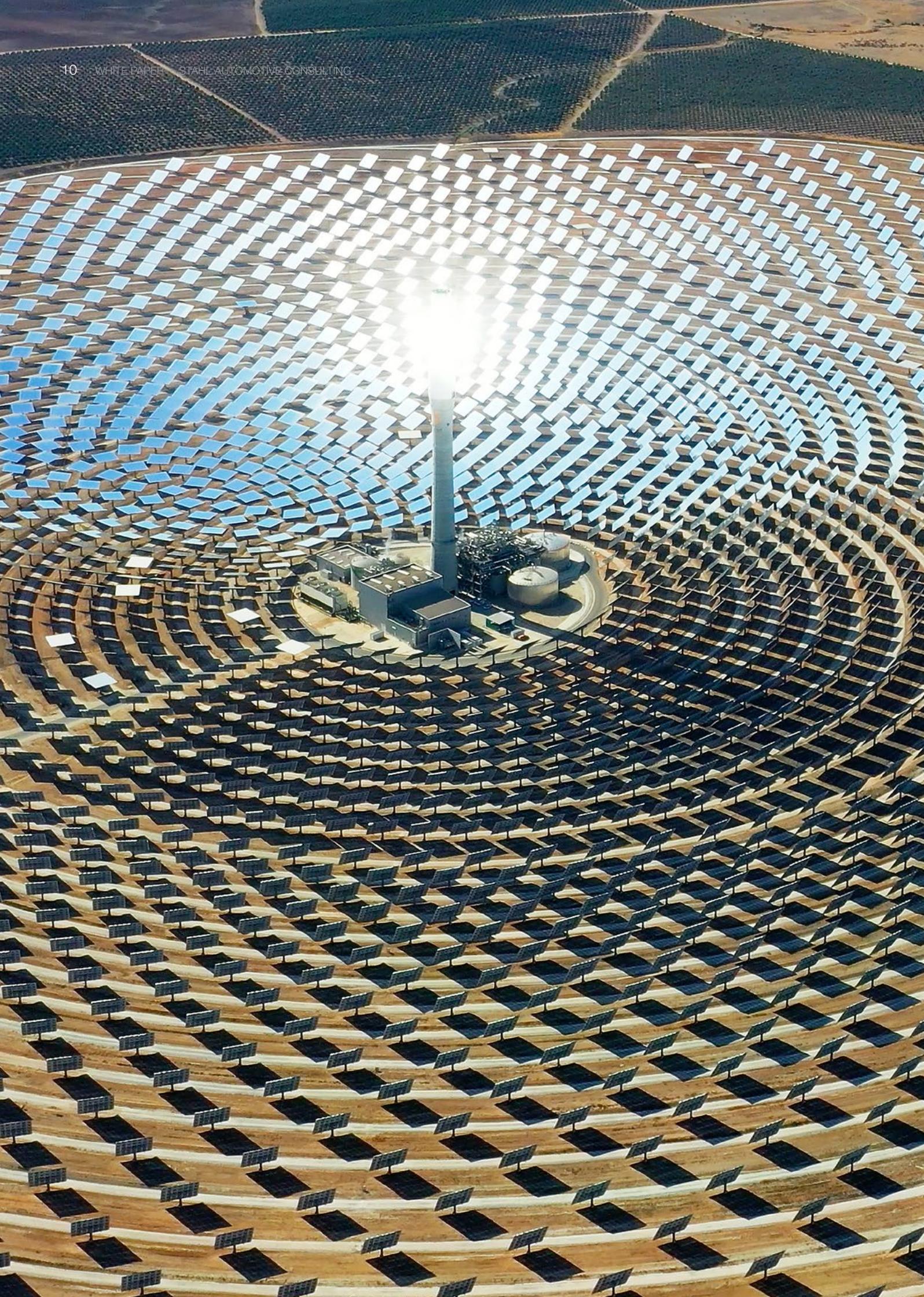
Addiert man alle Mehrkosten bzw. Einsparungen zusammen, so ergeben sich im Basis-Szenario je nach Preisentwicklung der Elektrofahrzeuge Zusatzkosten in Höhe von 47 (30% Preisreduktion) bis 75 Mrd. EUR (Preisstabilität) im Zeitraum zwischen 2020 und 2030. Im Extrem-Szenario liegen diese, ohne Berücksichtigung der höheren Ladeinfrastrukturkosten, bei 40–68 Mrd. EUR.

Kombiniert man die ökologische mit der ökonomischen Perspektive, zeigt sich ein klares Bild: Die Elektromobilität leistet in keinem Szenario einen sinnvollen Beitrag zur CO₂-Reduktion. Dennoch muss eine Alternative zur CO₂-Reduktion im Verkehrssektor gefunden werden.

Alternativen zur E-Mobilität

Am Markt existieren derzeit zahlreiche Alternativen zur Elektromobilität. Erdgas (CNG) bzw. verflüssigtes Propan- gas (LPG), Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe und auch Kraftstoffe aus pflanzlichen Rohstoffen stellen diesbezüglich sicherlich die bekanntesten Lösungen dar. Da CNG/LPG jedoch auf fossilen Energieträgern basiert, kann dies allenfalls eine Brückentechnologie sein und stellt keine sinnvolle Alternative zur Elektromobilität dar. Kraftstoffe, die auf pflanzlichen Rohstoffen basieren (z. B. Bio-Ethanol oder Rapsmethylester), bewirken nur eine relativ geringe CO₂-Ersparnis und stehen darüber hinaus im Wettbewerb mit dem Anbau von Nahrungsmitteln – daher stellt auch dies keine sinnvolle Alternative dar und wird hier nicht weiter untersucht. Wasserstoff bzw. synthetische Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien können jedoch aufgrund ihrer hohen Emissionseinsparungen eine sinnvolle Alternative sein. Im Folgenden werden die Brennstoffzelle mit Wasserstoff und der Verbrennungsmotor (ICE) auf Basis synthetischer Kraftstoffe betrachtet und hinsichtlich ihrer ökologischen und ökonomischen Auswirkungen analysiert.

4 Annahmen vom VDA basieren auf EU-AFID-Richtlinie (Alternative Fuels Infrastructure Directive) sowie auf Angaben der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität



Wasserstoff kann zu erheblichen CO₂-Einsparungen beitragen – jedoch ist die Technologie mit hohen Kosten und Risiken verbunden

Aus Wasser und erneuerbarem Strom lässt sich durch Hydrolyse Wasserstoff gewinnen. Nach der Kompression und Kühlung kann dieser in Druckbehältern gespeichert, schließlich transportiert und in Fahrzeugen verwendet werden. Um ein kg Wasserstoff hydrolytisch zu erzeugen, müssen ca. 50,6 kWh Energie aufgewendet werden. Der dafür notwendige Strom muss auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt werden. Solarthermische Anlagen z. B. in Nordafrika stellen diesbezüglich eine sehr gute Lösung dar, da diese mit 14 g CO₂/kWh deutlich geringere Emissionen aufweisen als der in Deutschland erzeugte Strom aus erneuerbaren Energien. Der auf diese Weise produzierte Wasserstoff verursacht Well-to-Wheel 163 g weniger CO₂ je Kilometer als fossile Kraftstoffe und stellt eine ~90 % Emissionsreduktion gegenüber Dieselmotoren dar.

Mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge bedeuten für das heutige etablierte automobilen Ökosystem einen deutlichen Wandel. Produktionskapazitäten für nachhaltigen Wasserstoff müssen aufgebaut und eine neue Distributionsinfrastruktur geschaffen werden. Auch können

die bestehenden Fahrzeuge nicht sinnvoll auf Wasserstoff umgestellt werden, so dass ein Ersetzen der Fahrzeugflotte notwendig würde. Da Brennstoffzellen-Fahrzeuge jedoch im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen deutlich teurer sind und auf absehbare Zeit bleiben, werden erhebliche Kosten verursacht. Werden die Mehrkosten der E-Mobilität in Höhe von ~75 Mrd. EUR für die Subventionierung von Wasserstoff und Brennstoffzellenfahrzeugen aufgewendet, könnten bis im Jahre 2030 ca. 40 % der gesamten Fahrleistung in Deutschland durch Wasserstoffantriebe ersetzt werden (Aufbau Produktionskapazitäten und Verfügbarkeit von Wasserstoff unterstellt). Im Zeitraum 2020 bis 2030 könnten auf diese Weise ca. 200 Mio. t CO₂ eingespart werden (Abbildung 6). Fast 40 % der durch den Verkehrssektor verursachten Emissionen ließen sich auf diese Weise im Jahr 2030 einsparen. Der Ausbau der Distributionsinfrastruktur bleibt hier unberücksichtigt, wird aber wegen der anfallenden Emissionen den berechneten CO₂-Effekt reduzieren.

Manche Quellen prognostizieren für Anfang bis Mitte der dreißiger Jahre Kostenparität zwischen Wasserstoff und fossilen Kraftstoffen, insbesondere wenn man die von der Bundesregierung ab 2021 eingeführte CO₂-Steuer berücksichtigt. Ab dann würden sich die notwendigen Subventionen in Abhängigkeit von der Preisentwicklung der Brennstoffzellen-Fahrzeuge möglicherweise reduzieren.

Werden die Mehrkosten der E-Mobilität (~75 Mrd. EUR) für die Subventionierung von Wasserstoff aufgewendet, können bis 2030 ca. 40 % der PKW-Kilometer mit emissionsarmen Wasserstoff-Fahrzeugen abgedeckt werden

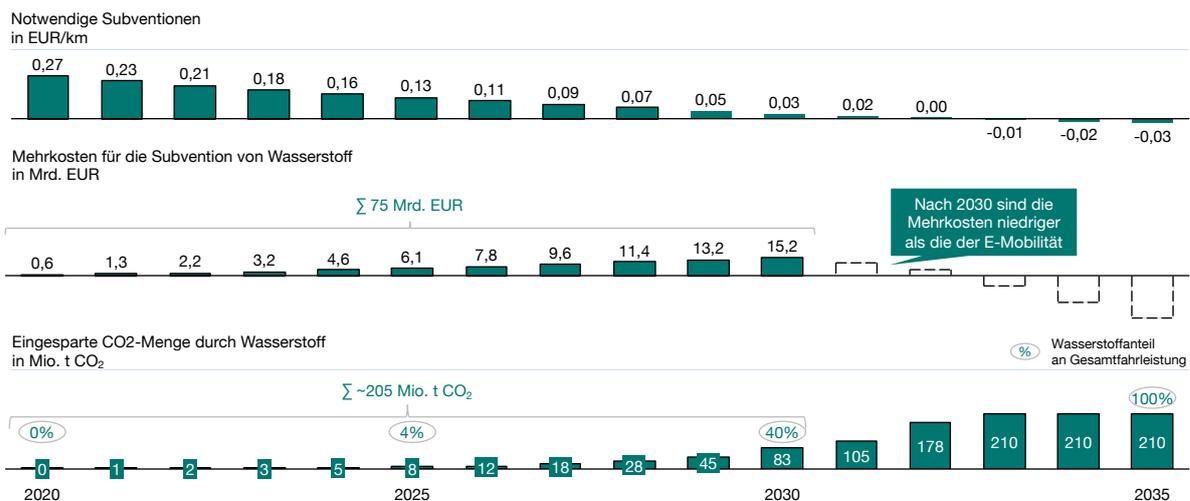


Abb. 6: Entwicklung der Subventionen, Mehrkosten und eingesparten CO₂-Menge durch Wasserstoff (2020–2035)

Synthetische Kraftstoffe sind die effizienteste Variante, um im Verkehrssektor CO₂-Emissionen einzusparen

Synthetische Kraftstoffe auf Kohlenstoffbasis bieten eine Reihe von Vorteilen: Im Gegensatz zu Wasserstoff kann die gesamte Distributionsinfrastruktur von fossilen Kraftstoffen genutzt werden, sie sind einfach zu lagern und können grundsätzlich in bestehenden Fahrzeugen verwendet werden. Auch können die synthetischen Kraftstoffe, wie heute schon Bio-Kraftstoffe, den fossilen beigemischt und so ein sofortiger Effekt erreicht werden.

Für die Herstellung von synthetischen Kraftstoffen wird CO₂ aus der Luft entnommen und Wasserstoff durch Hydrolyse erzeugt (Abbildung 7). Daraus wird z. B. mittels Fischer-Tropsch-Verfahren der synthetische Kraftstoff (Diesel-, Benzin-, Kerosin-ähnlich) hergestellt. Für jeden erzeugten Liter Kraftstoff müssen ca. 20,9 kWh Energie aufgewendet werden. Damit der synthetische Kraftstoff einen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten kann, muss dies erneuerbare Energie mit niedrigen CO₂-Emissionen sein. Dafür bieten sich, wie beim Wasserstoff, Solarthermieanlagen zum Beispiel in Nordafrika an, da diese Emissionen von nur 14 g CO₂/kWh verursachen. Werden synthetische Kraftstoffe mit dieser CO₂-armen Energie produziert, können im Vergleich zu Dieselkraftstoff 2835 g CO₂/Liter (Well-to-Wheel) eingespart werden, was einer Emissionsersparnis von ca. 90 % entspricht. Aus einer Emissionsperspektive haben Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe bei intelligenter Umsetzung also ein ähnliches Einsparpotenzial.

Da synthetische Kraftstoffe derzeit noch teurer sind als fossile, sind wie beim Wasserstoff Subventionen notwendig. Würden die Mehrkosten der Elektromobilität zum großen Teil (73 Mrd. EUR) dafür verwendet, ließen sich durch den Einsatz synthetischer Kraftstoffe bis 2030 nahezu 600 Mio. t CO₂ einsparen (Abbildung 8). Skaleneffekte bei synthetischen Kraftstoffen, steigende Rohölpreise und die Besteuerung der CO₂-Emissionen von fossilen Kraftstoffen würden vermutlich ab Anfang der dreißiger Jahre zu Kostenparität ohne Subventionen führen. Ab diesem Zeitpunkt könnten die gesamten Emissionen des deutschen Verkehrssektors um ca. 90 % reduziert werden und würden so zu einer Einsparung in der Größenordnung von ca. 180 Mio. t CO₂ p. a. (inklusive Well-to-Tank Emissionen) führen. Im Vergleich zum Wasserstoff wären jedoch die notwendigen Investitionen in Infrastruktur sowie die Umsetzungsrisiken relativ gering.

Die Alternativen im Vergleich: Synthetische Kraftstoffe mit dem höchsten Potenzial

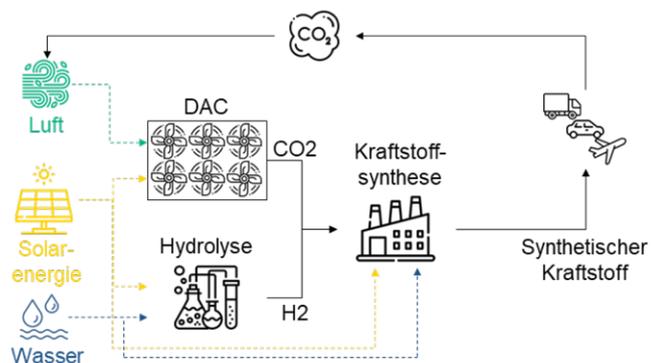
Vergleicht man nun die CO₂- und Kosteneffekte der betrachteten Alternativen, so zeigt sich deutlich, dass die E-Mobilität keine sinnvolle Lösung zur CO₂-Reduktion darstellt (Abbildung 9). Wasserstoff stellt eine Alternative zur Elektromobilität dar, da bei ähnlichen Mehrkosten ca. 200 Mio. t CO₂ eingespart werden können. Synthetische Kraftstoffe, obwohl sie pro km geringfügig weniger einsparen als Wasserstoff, haben das Potenzial gesamthaft mehr Emissionen zu sparen, da sie im Vergleich zu Wasserstoff geringere Mehrkosten haben und einfacher einzuführen sind.

Die Herstellung synthetischer Kraftstoffe basiert auf CO₂ und Wasserstoff – beide Stoffe können aus Luft, Wasser und dem Einsatz von Solarenergie gewonnen werden



Herstellung synthetischer Kraftstoffe

- Mit Hilfe erneuerbarer Energien wird Kohlendioxid (CO₂) aus der Luft extrahiert (DAC¹) und Wasserstoff (H₂) aus Wasser gespalten
- H₂ und CO₂ werden durch weitere Prozesse zu synthetischen Kraftstoffen mit gleicher chemischer Zusammensetzung (z.B. Diesel, Benzin, Kerosin) verarbeitet
- Emissionen entstehen nur aus benötigter erneuerbarer Energie bzw. Anlagenbau. Das CO₂ befindet sich in einem Kreislauf



¹ DAC: Direct Air Capturing

Abb. 7: Synthetische Kraftstoffe als Alternative zu EVs

Werden ein Teil der Mehrkosten der E-Mobilität (~73 Mrd. EUR) für die Subventionierung von synthetischen Kraftstoffen aufgewendet, ergeben sich ab ca. 2032 Einsparungen

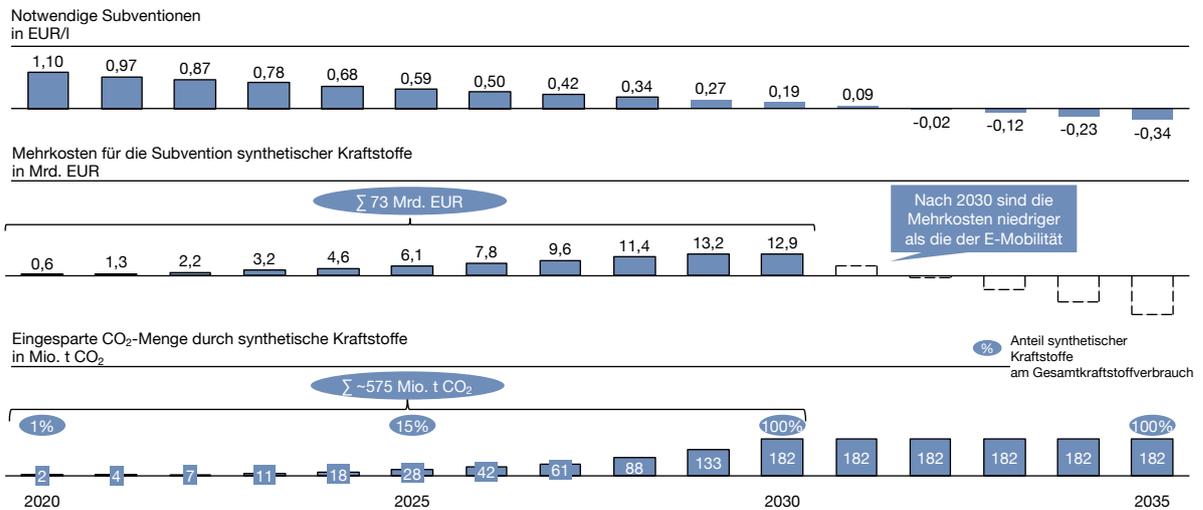


Abb. 8: Entwicklung der Subventionen, Mehrkosten und eingesparten CO₂-Menge durch synthetische Kraftstoffe (2020–2035)

Betrachtet man die Vermeidungskosten der dargestellten Alternativen zur CO₂-Reduktion (Abbildung 10), so zeigt sich, dass die E-Mobilität realistisch betrachtet nicht sinnvoll zur CO₂-Reduktion beitragen kann. Entweder lassen sich keine CO₂-Einsparungen erzielen (Basis-Szenario), oder die E-Mobilität weist prohibitiv hohe Kosten auf (Extrem-Szenario). Es wird deutlich, dass selbst synthetische Kraftstoffe – im betrachteten Zeitraum bis 2030 – im Vergleich zu Maßnahmen in anderen Sektoren pro eingesparter Tonne CO₂ teuer (~127 EUR/t CO₂) sind. Aus gesamtgesellschaftlicher Perspektive wäre es deshalb sinnvoll, zuerst die Maßnahmen zur Emissionsreduktion anzugehen, die mit geringeren Kosten mehr einsparen können.

Erweitert man den Betrachtungszeitraum bis 2040, so könnten sich die zusätzlichen gesamtwirtschaftlichen Kosten besonders für synthetische Kraftstoffe auf nahe null verringern. Der Grund dafür liegt in der erwarteten Preisparität zu fossilen Kraftstoffen. Dadurch könnte im Verkehrssektor bis 2040 die enorme Menge von über 2.000 Mio. t CO₂ eingespart werden. Durch das real höhere Einsparpotenzial und die deutlich geringeren Umsetzungsrisiken sprechen die Fakten aus unserer Sicht für eine forcierte Einführung synthetischer Kraftstoffe. Sie sind ökologisch wie ökonomisch ein sinnvoller Weg zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors.

Man könnte anmerken, dass Elektrofahrzeuge in einer dekarbonisierten Welt mit beliebig verfügbarer erneuerbarer Energie einen sinnvollen Beitrag zur CO₂-Reduktion im Verkehrssektor liefern. Die Zahlen spiegeln diese Aussage jedoch nicht wider. Selbst wenn man einen weiteren Rückgang der Emissionen erneuerbarer Energien um 50% (im Vergleich zu 2030) auf ~15 g CO₂/kWh annimmt, emittieren verbrennungsmotorische Fahrzeuge mit synthetischen Kraftstoffen aus solarthermisch erzeugter erneuerbarer Energie und Elektrofahrzeuge eine ähnliche Menge an CO₂ pro km. Die Ursache dafür liegt in den niedrigen CO₂-Emissionen für die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen aus solarthermischen Kraftwerken in sonnenreichen Regionen. Diese gleichen den Wirkungsgradnachteil der Prozesskette synthetischer Kraftstoffe aus.

Die Fakten zeigen, dass ein Umdenken notwendig ist

Die Diskussion über die Dekarbonisierung des Verkehrssektors wird heute oft mit nahezu religiösem Eifer geführt. Wir plädieren für eine nüchterne Bestandsaufnahme – die Faktenbasis dafür haben wir in diesem Dokument geliefert. Natürlich können die Analysen noch verfeinert werden, die von uns im Rahmen dieser Studie durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt jedoch, dass keine grundsätzlich anderen Ergebnisse zu erwarten sind. Auch bezieht sich die Studie auf Deutschland, jedoch sind die Ergebnisse im Grundsatz auf andere Länder übertragbar. Nun ist die Politik gefordert,

Synthetische Kraftstoffe stellen die sinnvollste Alternative dar, da sie am effizientesten CO₂-Emissionen im Verkehrssektor reduzieren können

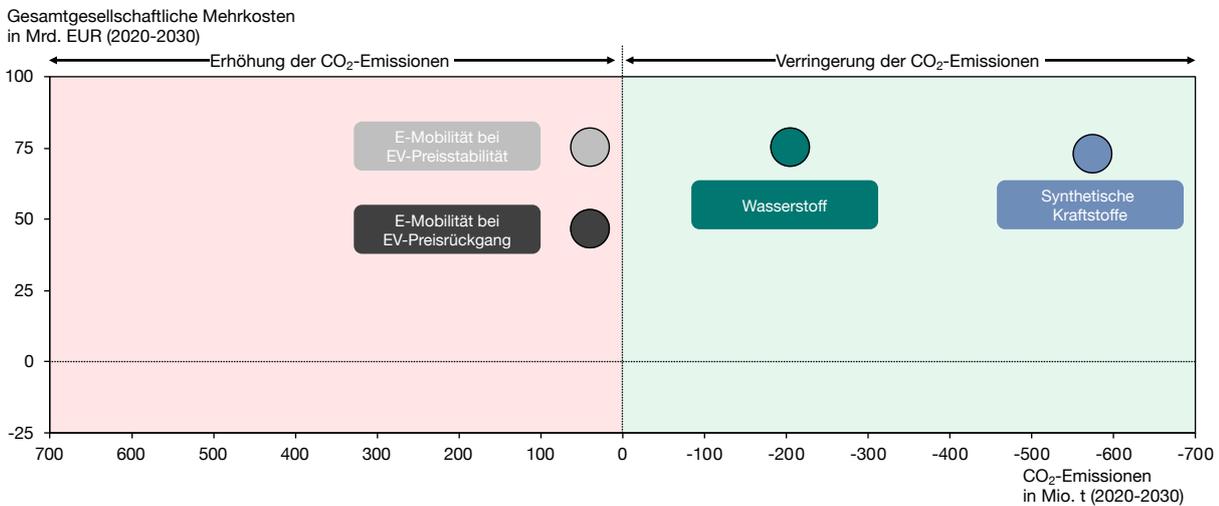


Abb. 9: Vergleich der gesamtgesellschaftlichen Mehrkosten und CO₂-Emissionen von Elektromobilität, Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen (2020–2030)

Synthetische Kraftstoffe stellen die kosteneffizienteste Möglichkeit dar, CO₂-Emissionen im Verkehrssektor zu reduzieren

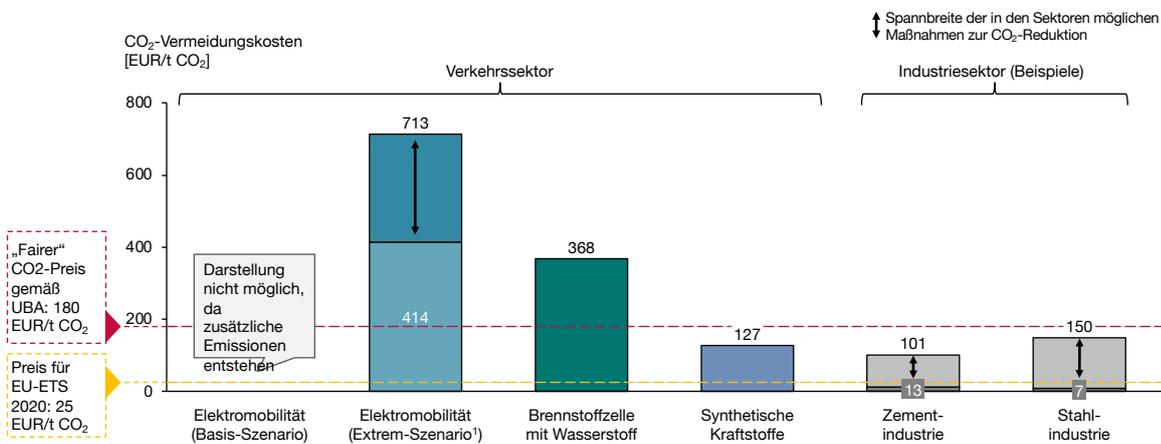


Abb. 10: Kosten der Vermeidung von CO₂-Emissionen in Deutschland in EUR/t CO₂

die Erkenntnisse undogmatisch in politisches Handeln zu übersetzen. Synthetische Kraftstoffe könnten steuerlich gefördert, in das regulatorische Rahmenwerk integriert und mit ihren tatsächlichen Emissionen in den Flottenverbrauch eingerechnet werden. Im Rahmen des europäischen Green Deals könnte in einer konzertierten europäischen

Initiative die großindustrielle Produktionsinfrastruktur für synthetische Kraftstoffe in Nordafrika geschaffen werden („Desertec Next Generation“). Dies wäre nicht nur ein starker Beitrag zum Klimaschutz, sondern auch ein Beitrag zur Entwicklung der nordafrikanischen Länder. Es ist eine klassische Win-win-Situation. Wann handeln wir?

S T A H L
AUTOMOTIVE CONSULTING

Stahl Automotive Consulting

Otto-Heilmann-Straße 5
82031 Grünwald, Germany

E-Mail info@sac-group.eu

www.sac-group.eu