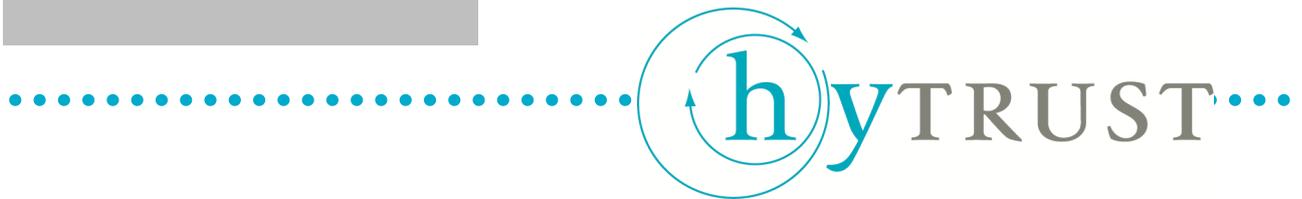


Klimaschutzpotenziale von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) im PKW-Sektor



Arbeitsbericht Nr. 07 im Rahmen des Projektes
„HyTrust - Auf dem Weg in die Wasserstoffgesellschaft“

Autor
Falko Ueckerdt

Mai 2013

Gefördert durch:



Abstract	2
1 Einleitung	3
2 Klimaschutzbedarf im PKW-Sektor	4
3 Optionen für Klimaschutz im PKW-Sektor	6
3.1 <i>Alternative Antriebstechnologien</i>	7
3.2 <i>Effizienzmaßnahmen</i>	7
3.3 <i>Verhaltensveränderungen</i>	8
4 Berechnung von Klimaschutzszenarien	9
4.1 <i>Definition der Klimaschutzszenarien</i>	11
4.2 <i>Entwicklung des PKW-Bestandes und alternativer Antriebe</i>	12
4.3 <i>Zwei Produktionsszenarien für Wasserstoff</i>	15
5 Ergebnisse und Diskussion	20
5.1 <i>Die Entwicklung der Emissionen in den Szenarien</i>	21
5.2 <i>Die kumulierten Emissionen der Szenarien</i>	23
5.3 <i>Das breite Klimaschutzszenario</i>	25
6 Zusammenfassung	27
7 Referenzen	28
8 Abkürzungsverzeichnis	30

Abstract

In der Studie konnte festgestellt werden, dass sich die für die Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele abgeleiteten Orientierungsmarken für den PKW-Sektor als ambitioniert darstellen. FCEV können einen Beitrag zur langfristigen Reduktion der Emissionen leisten. Ihre reduzierende Wirkung auf die kumulierten Emissionen ist jedoch vergleichsweise klein. Es empfiehlt sich somit eine breite Förderung weiterer Klimaschutzoptionen wie BEV, PHEV, Effizienzmaßnahmen und Verhaltensänderungen. Dies schafft zudem Sicherheit, falls einzelne Optionen hinter den erwarteten Entwicklungen zurückbleiben oder falls die Reduktionsziele für den Stromsektor nicht erreicht werden. Letztere sind eine wichtige Voraussetzung für die Klimaschutzwirkung von alternativen Antrieben.

This study derives points of reference for emission reductions in the automobile sector that are consistent with national reduction targets in Germany. However, achieving these sectorial emission reductions turns out to be ambitious. While fuel-cell electric vehicles can contribute significantly to long-term reductions, their reducing effect on the cumulative emissions until 2050 is comparable small. Effective climate protection in the automobile sector requires a broad range of further mitigation options like battery electric vehicles, plug-in hybrid electric vehicles, efficiency improvements and behavioral changes. Such a portfolio hedges the risk if one option lags behind its expectations or if the emission reduction targets in the power sector are not reached. Decarbonizing the power sector widely is an important prerequisite for unlocking the mitigation potential of alternative fuels like fuel-cell electric vehicles.

1 Einleitung

Begrenzung der Erderwärmung auf 2 Grad erfordert massive Emissionsreduktionen

Beim G8-Gipfel 2009 haben sich die G8-Staaten sowie die wichtigsten Schwellenländer darauf geeinigt, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf höchstens zwei Grad gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen (G8 Summit 2009). Dieses sogenannte 2-Grad-Ziel und dafür nötige Emissionsreduktionen sind in den letzten Jahren auf unterschiedlichen politischen Ebenen verankert worden. Beim Weltklimagipfel 2010 in Cancun wurde das 2-Grad-Ziel von der internationalen Staatengemeinschaft als gemeinsames politisches Ziel anerkannt (UNFCCC 2010).

Der Weltklimarat IPCC nennt in seinem Sachstandsbericht von 2007 (IPCC 2007) Emissionsminderungen, die mit dem 2-Grad-Ziel in Einklang stehen. Bis 2050 wäre eine globale Reduktion der Treibhausgase von 50-85 Prozent gegenüber 1990 nötig. Die Industriestaaten sollten ihre Emissionen um 80% bis 95% senken.

Die deutsche Bundesregierung strebt, wie im Energiekonzept festgehalten wurde (Bundesregierung 2010), folgenden Entwicklungspfad bei der Minderung der Treibhausgasemission bis 2050 an (ggü. 1990): minus 40% bis 2020, minus 55% bis 2030, minus 70% bis 2040, minus 80% bis 95% bis 2050.

Für den nationalen Stromsektor bleibt aus heutiger Sicht aufgrund des Ausstiegs aus der Atomenergie (Bundesregierung 2011) und den Unsicherheiten der CCS¹-Technologie (von Hirschhausen et al. 2012, Van Noorden 2013) nur eine Klimaschutzoption: der weitere Ausbau der erneuerbaren Energien. 2050 sollen 80% des Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energien erzeugt werden (Bundesregierung 2010). Die restlichen 20% werden noch konventionell erzeugt werden müssen und somit nicht emissionsfrei sein. Des Weiteren gibt es nicht vermeidbare Emissionen, sogenannte Prozessemissionen aus der Stahl-, Eisen- und Zementproduktion. Für diese Emissionen muss ein Teil der in 2050 noch verbleibenden Emissionen reserviert werden. Um vor diesem Hintergrund die nationalen Reduktionsziele zu erreichen, muss der Verkehrssektor einen signifikanten Beitrag leisten.

Zielstellung der Studie

Diese Studie analysiert das Klimaschutzpotential von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV²) im PKW-Sektor. Zunächst werden zwei Kriterien als Orientierung für einen geeigneten Klimaschutzbeitrag des PKW-Sektors abgeleitet (Kapitel 0). Kapitel 3 stellt die berücksichtigten Klimaschutzoptionen im PKW-Sektor vor. In Kapitel 4 werden die Szenarien definiert und ihrer wesentlichen Annahmen erläutert. Für die Klimaschutzoptionen werden unterschiedliche Entwicklungen angenommen und in 20 Szenarien kombiniert. Diese werden hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen ausgewertet und an den entwickelten Kriterien für den PKW-Sektor gemessen (Kapitel 5). Dabei werden Rückschlüsse auf die Bedeutung der einzelnen Klimaschutzoptionen insbesondere der von FCEV gezogen. Schließlich werden für zwei ausgewählte Szenarien die Klimaschutzbeiträge der einzelnen Optionen berechnet und verglichen.

¹ Abscheidung und Speicherung der CO₂-Emissionen von Kraftwerken.

² FCEV ist eine übliche englische Abkürzung für Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles)

2 Klimaschutzbedarf im PKW-Sektor

Das Energiekonzept der Bundesregierung formuliert ein konkretes Ziel für die Energieeinsparung im gesamten Verkehrssektor: Der Endenergieverbrauch soll bis 2020 um 10 Prozent und bis 2050 um 40 Prozent gegenüber 2005 sinken (Bundesregierung 2010). Jedoch bestehen keine Reduktionsziele für die Entwicklung der Gesamtemissionen im Verkehrssektor, da Energie unterschiedlich CO₂-intensiv bereitgestellt werden kann. Somit ist kein Klimaschutzbeitrag zur Erreichung der nationalen Reduktionsziele festgelegt. Um einen ökonomisch effizienten Beitrag des Verkehrssektors abzuleiten, bedarf es einer langfristigen, ökonomischen Analyse des Strom-, Wärme- und Transportsektors. Dies überschreitet den Analyserahmen dieser Studie. Sicher ist jedoch, dass ohne eine deutliche Senkung der Emissionen im Verkehrssektor die langfristigen nationalen Reduktionsziele nicht erreicht werden können.

Ohne eine deutliche Senkung der Emissionen im Verkehrssektor können die langfristigen nationalen Reduktionsziele nicht erreicht werden.

In diesem Kapitel werden Orientierungspunkte für einen geeigneten Klimaschutzbeitrag des PKW-Sektors abgeleitet. Ausgangspunkt sind dabei zwei Zielmarken, die für die Erreichung ambitionierter globaler Klimaschutzziele, wie dem 2-Grad-Ziel, notwendig sind (M. Meinshausen et al. 2009, WBGU 2009):

1. Ab 2050 sollten die jährlichen Pro-Kopf-Emissionen im globalen Durchschnitt etwa 3t CO₂ nicht überschreiten.
2. Für das Erreichen des 2-Grad-Zieles mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% sollte die kumulierte Menge (2010 bis 2050) von globalen Treibhausgasemissionen etwa 1150 Gt CO₂ nicht überschreiten.

Es wurde somit wissenschaftlich gezeigt, dass es neben deutlichen Reduktionen bis 2050 ein zweites Klimaschutzkriterium gibt: Die Summe der Treibhausgasemissionen bis 2050 sollte möglichst gering sein. Das deutsche Energiekonzept sieht für 2050 eine Emissionsreduktion von 80% vor. Aus den geplanten Reduktionen bei der Entwicklung der nationalen Emissionen resultiert eine kumulierte Menge von etwa 18000 Mt CO₂ (2010-2050). Nun stellt sich die Frage, wie sich diese Reduktionsziele auf den PKW-Bereich herunterbrechen lassen.

Der Verkehrssektor wird im Vergleich zum Stromsektor voraussichtlich weniger Reduktionen leisten können. Im Stromsektor wurden in den letzten Jahren massiv Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Quellen ausgebaut. Der Anteil am Stromverbrauch in Deutschland belief sich auf 20% in 2011 (BDEW 2013). Die CO₂-Emissionen sind zwischen 1990 und 2010 um etwa 15% gesunken (UBA 2012).

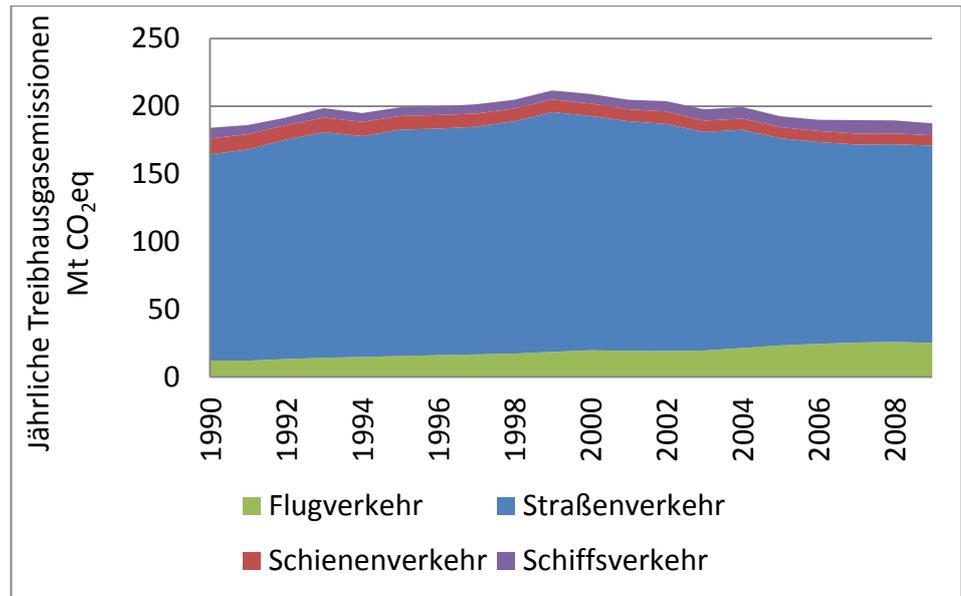


Abbildung 1: Jährliche Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor. Eigene Darstellung.
Datenquelle: UBA 2011.

Der Verkehrssektor war 2009 für 20% der jährlichen Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich.

Der Anteil des Verkehrssektors an den jährlichen Treibhausgasemissionen Deutschlands ist in den letzten 20 Jahren von 15% (1990) auf 20% (2009) gestiegen. Die Bedeutung von Klimaschutz im Verkehr hat somit im Vergleich zu anderen Sektoren zugenommen. Absolut betrachtet sind die Verkehrsemissionen bis 1999 um etwa 20% gegenüber 1990 gestiegen (Abbildung 1). Erst seit 1999 gehen die absoluten Zahlen wie im restlichen Energiesystem zurück. Die Reduktion der absoluten Verkehrsemissionen geht auf eine Reduktion der Emissionen im Straßenverkehr zurück, die teilweise durch die stark steigenden Emissionen aus dem Flugverkehr kompensiert werden. Seit 1990 haben sich die Flugemissionen etwa verdreifacht. Es ist nicht realistisch, diesen Mobilitätsbedarf auf andere Verkehrsmittel zu verlagern (Rodt et al. 2010). Zudem sind alternative CO₂-arme Antriebe im Flugsektor derzeit nicht zu erwarten (Rodt et al. 2010). Bis 2050 ist somit eine weitere Vervielfachung der Emissionen im Luftverkehr möglich (Schallaböck et al. 2006). Daher wird der Flugverkehr voraussichtlich keinen Beitrag zu den Emissionsreduktionen leisten können.

Ähnliches gilt für den Güterverkehr. Seine Transportleistung und die damit verbundenen CO₂-Emissionen sind in den letzten 20 Jahren gestiegen (Abbildung 2). Auch in Zukunft ist keine Reduktion der Emissionen unter das Niveau von 1990 zu erwarten (BMU 2009).

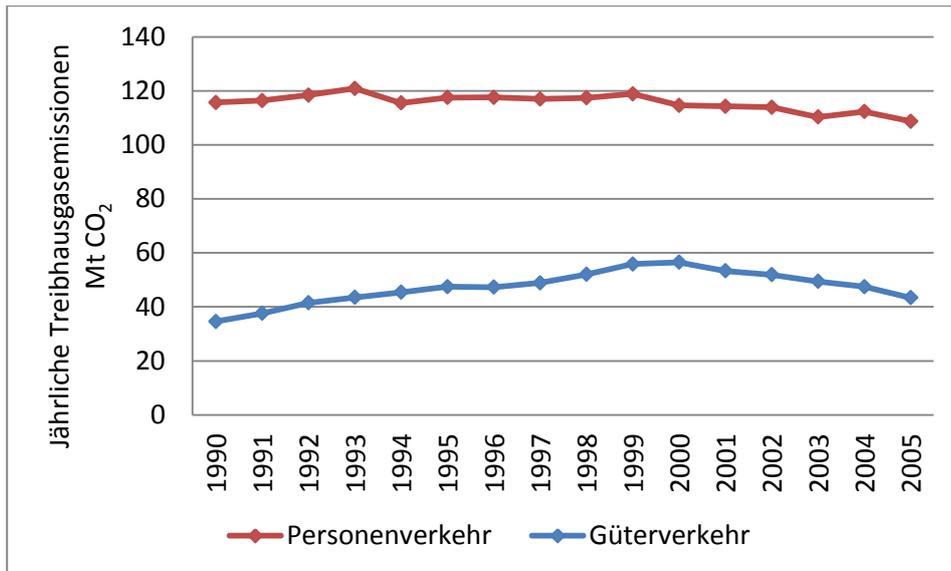


Abbildung 2: CO₂-Emissionen aus dem Straßenverkehr. Eigene Darstellung. Datenquelle: UBA 2011.

Vom Flugverkehr sowie vom Frachtverkehr sind somit keine signifikanten Emissionsreduktionen zu erwarten. Somit ergeben sich innerhalb des Verkehrssektors stärkere Anforderungen für den Personenverkehr, insbesondere den PKW-Sektor, der 2005 einen Anteil von über 50% an den Emissionen im Verkehrssektor hatte. Obwohl der Verkehrssektor insgesamt voraussichtlich einen unterdurchschnittlichen Beitrag zu den nationalen Reduktionszielen leisten wird, werden für den PKW-Bereich in dieser Studie Reduktionen proportional zu den Gesamtemissionszielen angenommen:

1. 80% Reduktion in 2050 im Vergleich zu 1990. Für die jährlichen PKW-Emissionen in 2050 ergibt sich eine Zielmarke von etwa 21 Mt CO₂ (das entspricht 20% der PKW-Emissionen in 1990 (103 Mt CO₂), siehe McKinsey & Company 2007).
2. Der Anteil der PKW-Emissionen an den kumulierten Emissionen (2010-2050) verhält sich wie der Anteil der PKW-Emissionen an den heutigen jährlichen Emissionen (ca. 11%). Somit ergeben sich für die kumulierten Emissionen ein Zielwert von etwa 2000 Mt CO₂ (das entspricht 11% von 18000 Mt CO₂).

Diese zwei Kriterien wurden als grobe Orientierung für einen geeigneten Klimaschutzbeitrag des PKW-Sektors abgeleitet. Sie stellen keine Empfehlung für politische Ziele dar und entsprechen nicht zwangsläufig dem ökonomisch effizienten Beitrag des PKW-Sektors. Dennoch dienen sie in dieser Studie als Richtgrößen, um die Emissionsentwicklung in den berechneten Szenarien einzuschätzen und zu vergleichen.

3 Optionen für Klimaschutz im PKW-Sektor

Es gibt drei übergeordnete Optionen für Klimaschutz im PKW-Sektor. Die wichtigste Option für eine vor allem langfristig CO₂-arme Mobilität sind alternative Antriebstechnologien. Da diese Antriebe voraussichtlich erst in 10 bis 30 Jahren größere Anteile am PKW-Bestand haben werden, werden konventionelle Antriebe auf der Basis von fossilen Energieträgern noch länger von Bedeutung sein. Somit sind kurz- bis mittelfristig Maßnahmen zur Verbesserung der Ener-

Der PKW-Verkehr muss den Hauptteil der Emissionsminderungen tragen, da von Flugverkehr und Frachtverkehr keine nennenswerten Beiträge zu erwarten sind.

Alternative Antriebe, Effizienzmaßnahmen und die Reduzierung des Mobilitätsbedarfs sind Optionen für Klimaschutz im PKW-Sektor.

gieweffizienz und CO₂-Intensität dieser konventionellen Antriebe eine zweite wichtige Option. Aber auch die Reduktion des Mobilitätsbedarfs und der Wechsel zu CO₂-ärmeren Verkehrsträgern haben großes Klimaschutzpotential, bedeuten allerdings zum Teil erhebliche Verhaltensänderungen.

3.1 Alternative Antriebstechnologien

Elektrofahrzeuge wie Brennstoffzellenfahrzeuge, Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEV³) und batterieelektrische Fahrzeuge (BEV⁴) können ihre WTW-Emissionen⁵ auf nahezu Null senken. Eine Voraussetzung für die volle Nutzung dieses Potentials ist die Dekarbonisierung des Stromsektors, da diese Antriebe zumindest teilweise auf dem Energieträger Strom basieren.

FCEV haben eine deutlich geringere Energieeffizienz (18-26%) verglichen mit BEV (58-72%)⁶ (Creutzig et al. 2010). Somit ist der Strombedarf für FCEV knapp dreimal so groß wie bei BEV. Andererseits bietet der Sekundärenergieträger Wasserstoff eine vielversprechende Option zur Speicherung von (erneuerbarem) Strom (UBA 2010, Sterner 2009). Diese Synergieeffekte zwischen Strom- und Transportsektor könnten die Nachteile der geringeren Effizienz der FCEV eventuell kompensieren. Um die Bedeutung dieser möglichen Synergie zu bestimmen, ist weitere Forschung notwendig.

Die Verwendung von Biokraftstoffen ist eine weitere Klimaschutzoption. Jedoch beinhaltet diese Option einige Nachteile, sodass sie in dieser Studie nicht betrachtet wird. Biokraftstoffe der ersten Generation können in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion stehen. Dies bringt große Akzeptanzprobleme gegenüber der Nutzung von Biokraftstoffen mit sich. Des Weiteren ist die Lebenszyklusanalyse der Treibhausgasemissionen von Biokraftstoffen im Allgemeinen mit großen Unsicherheiten behaftet. Diese beruhen zum einen auf der Emission von Stickstoffoxiden aufgrund des Anbaus der Energiepflanzen, zum anderen auf Emissionen aus Landnutzungsänderungen. Erweitert man bei der Berechnung der Klimabilanz von Biokraftstoffen die Systemgrenzen, so steigen zum einen die spezifischen Emissionen als auch die Komplexität des Systems und somit die Unsicherheit des Klimaschutzpotentials (Creutzig et al. 2010). Für den Klimaschutz kommt somit nur der Teil des Biomassepotentials in Frage, der sicher nachhaltig erzeugt wird und dessen Nutzung nicht durch Akzeptanzprobleme verhindert wird. Aus Systemperspektive sollte dieser Teil nicht für den PKW-Sektor genutzt werden, sondern im Fernverkehr für LKW, Schiffe und Flugzeuge, bei denen kaum alternative Möglichkeiten zur Emissionsminderung bestehen.

3.2 Effizienzmaßnahmen

Effizienzmaßnahmen können die spezifischen CO₂-Emissionen pro gefahrenen Kilometer von Fahrzeugen mit konventionellen Verbrennungsmotoren (ICE⁷ Benzin/Diesel) reduzieren. Dies ist durch die Reduktion der Energieintensität (eingesetzte Energie pro Kilometer) von Fahrzeugen möglich. Grundsätzlich

³ PHEV ist eine übliche englische Abkürzung für Plug-in Hybrid Electric Vehicles

⁴ BEV ist eine übliche englische Abkürzung für Battery Electric Vehicles

⁵ Weel-to-wheel Emissionen einer Technologie umfassen alle Treibhausgasemissionen, die während des gesamten Lebenszyklus auftreten. Sie sind die für den Klimaschutz entscheidende Maßzahl.

⁶ Effizienzen berechnet für einen Pfad mit erneuerbarer Stromerzeugung.

⁷ ICE: Internal Combustion Engine = Verbrennungsmotor

Die Nutzung von Wasserstoff bietet die Möglichkeit Strom- und Transportsektor miteinander zu verknüpfen.

kann auch die CO₂-Intensität (Emissionen pro Energieeinheit) von Kraftstoffen durch die Beimischung von Biokraftstoffen reduziert werden. Biokraftstoffe sind jedoch aufgrund der damit verbundenen Unsicherheiten und Akzeptanzprobleme nicht berücksichtigt (siehe 3.1).

Verbesserungen der Energieintensität von PKW lassen sich zum einen durch eine Optimierung des Motors oder des Getriebes erreichen. Zum anderen können die Eigenschaften des Gesamtfahrzeugs verbessert werden, zum Beispiel durch eine Reduktion des Gewichts oder des Rollwiderstands. Eine weitere wesentliche Effizienzmaßnahme ist die Einführung von Hybrid-Fahrzeugen (Hybride). Hybride sind Fahrzeuge, die Bremsenergie zurückgewinnen, in einer Batterie speichern, und in einem zusätzlichen Elektromotor nutzen können. Dadurch wird der Kraftstoffverbrauch reduziert. Der primäre Kraftstoff ist weiterhin Benzin oder Diesel. Erst beim PHEV wird die Batterie nicht mehr ausschließlich über den Verbrennungsmotor sondern auch direkt über das Stromnetz geladen. Verfügt ein Fahrzeug über eine Start-Stopp-Automatik, so spricht man von einem Mikro-Hybrid-Fahrzeug.

Es gibt eine Reihe von Studien, die die Potentiale von Effizienzverbesserungen für die Reduktion von THG-Emissionen analysieren. Anhand einer Auswertung von Einzelmaßnahmen für PKW wurde ohne die Verwendung von Biokraftstoffen eine Reduktion von etwa 15% in 2020 und 30% bis 2030 im Vergleich zu einem Referenzszenario berechnet (McKinsey & Company 2007). Etwa die Hälfte der Effizienzverbesserungen sind bei einem CO₂-Preis von 20 €/t CO₂ wirtschaftlich. Um das gesamte genannte Potential auszuschöpfen, bedarf es somit eines höheren CO₂-Preises oder anderer politischer Instrumente, falls die Kosten eines PKW maßgeblich über dessen Kauf entscheiden. Eine weitere Studie McKinsey & Company (2010) geht von einer Verbesserung der Effizienz für Verbrennungsmotoren und einer Reduktion der THG-Emissionen von etwa 30% bis 2020 aus. Weitere Reduktionen nach 2020 werden als eingeschränkt und kostspielig eingeschätzt. Eine weitere Analyse des Klimaschutzszenarios „BLUE Map“ in IEA (2009) zeigt, dass weltweit Effizienzverbesserungen von etwa 30% bis 2020 und 50% bis 2050 für leichte Nutzfahrzeuge (inklusive PKW) erreicht werden können. Diese starken Reduktionen sind als sehr ambitioniert einzuschätzen. In dem konservativen Referenzszenario („Baseline“) der gleichen Studie verbessert sich die Effizienz um etwa 25% in 2030.

3.3 Verhaltensveränderungen

Unter Verhaltensänderungen zur Reduktion der Emissionen im Verkehrssektor werden hier die Reduktion des gesamten Mobilitätsbedarfs sowie der Wechsel zu CO₂-ärmeren Verkehrsträgern verstanden. Es gibt eine Reihe von Maßnahmen, die hilfreich sind, um Verhaltensänderungen zu induzieren (IEA 2009). Das Ausmaß der Verhaltensänderungen hängt vom Umfang und der Intensität der in der Realität umgesetzten Maßnahmen sowie von der Bereitschaft der Bevölkerung ab.

Eine nachhaltige Stadtplanung kann lokale Strukturen und Bewusstsein stärken. Eine gemischte räumliche Nutzung, bei der zum Beispiel Bürogebäude in Wohngebieten integriert sind, verkürzt Verkehrswege und senkt somit den Mobilitätsbedarf. Die Nutzungs- und Transportstruktur einer Stadt zu verändern kann Jahrzehnte dauern. In Nicht-OECD-Ländern, in denen Städte stärker wachsen und neue Städte entstehen, können stadtplanerische Maßnahmen schneller greifen.

Optimierung des Motors, Reduzierung des Gewichts und Hybridisierung des Fahrzeugs sind wichtige Maßnahmen zur Reduzierung der PKW-Emissionen.

Durch die Reduktion des gesamten Mobilitätsbedarfs sowie der Wechsel zu CO₂-ärmeren Verkehrsträgern können die Emissionen im PKW-Verkehr gesenkt werden.

Die Förderung sogenannter Telearbeit, bei der außerhalb der konventionellen Arbeitsräume zum Beispiel von zu Hause (sogenanntes Home-Office) gearbeitet wird, kann den Mobilitätsbedarf senken. Hierfür bedarf es oft der Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologie wie Breitband-Internetzugang. Videokonferenzen sind eine weitere nützliche Option, um arbeitsbedingte Verkehrswege zu verkürzen.

In Fahrgemeinschaften teilen sich mehrere Personen ein PKW, während beim Car-Sharing meist eine Anzahl von Autos gemeinschaftlich genutzt wird. Bei beiden Möglichkeiten wird ein Fahrzeug effizienter genutzt, da sich die Anzahl der jährlichen Personenkilometer auf weniger Autos und weniger gefahrene Kilometer verteilt. Daher sind sie zudem für die Einführung alternativer Antriebe geeignet, denn BEV, PHEV oder FCEV lohnen sich eher bei hohen jährlichen Fahrleistungen, da ihre Kraftstoffkosten tendenziell niedriger als die von ICE sind.

Bedeutsame Beispiele für den Wechsel von Verkehrsträgern sind der Umstieg von einem eigenen PKW auf öffentliche Nahverkehrsmittel, Züge, Fußwege oder Fahrräder, sowie Carsharing. Die Nutzung von CO₂-ärmeren Verkehrsträgern kann „belohnt“, und die Nutzung CO₂-intensiverer Verkehrsträgern „bestraft“ werden. Eine einfache Möglichkeit ist die Einführung oder Erhöhung von Parkgebühren oder die generelle Reduktion von Parkmöglichkeiten. Öffentliche Verkehrsmittel, Fuß- und Fahrradwege können ausgebaut und die Tarife für öffentliche Verkehrsmittel reduziert werden.

4 Berechnung von Klimaschutzszenarien

Für die Bestimmung des Klimaschutzpotentials von FCEV und den genannten anderen Optionen im PKW-Sektor wurden verschiedene Klimaschutzszenarien berechnet. Diese Szenarien repräsentieren den nationalen PKW-Sektor von 2010 bis 2050.

In die Szenarientwicklung gehen Annahmen zur Entwicklung technischer, ökonomischer, gesellschaftlicher und politischer Einflussfaktoren ein.

Die Entwicklung entscheidender Einflussfaktoren für den Klimaschutz im PKW-Sektor ist unsicher. Das gilt sowohl für technische, ökonomische, gesellschaftliche als auch für politische Parameter und Rahmenbedingungen. So hängt zum Beispiel die zukünftige Ausbreitung von FCEV entscheidend von deren gesellschaftlicher Akzeptanz ab. Dabei sind die relevanten Einflussfaktoren, wie die Kostenentwicklung der Fahrzeuge und der Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur, mit großer Unsicherheit behaftet.

Diese Studie entwickelt und untersucht eine Vielzahl von Szenarien, bei der jedes Szenario auf spezifischen Annahmen bezüglich relevanter Einflussgrößen basiert. Für ein umfassendes Bild, das den vorliegenden Unsicherheiten Rechnung trägt, werden diese Annahmen variiert. Dabei werden keine Kosten betrachtet. Die vorliegende Analyse stellt somit keine ökonomische Optimierung dar.

Abbildung 3 zeigt zum einen die in die Berechnung eingehenden Größen, für die verschiedene Annahmen getroffen werden. Zum anderen sind die daraus berechneten Größen aufgelistet, die der Auswertung dienen. So werden zum Beispiel verschiedene Entwicklungen der Neuzulassungen von FCEV und den restlichen PKW-Sektor angenommen. Zusätzliche Annahmen sind bezüglich der Produktion der verschiedenen Treibstoffe wie Wasserstoff und Strom und den damit verbundenen Emissionen notwendig. Mit der Auswertung der berechne-

ten Größen für die verschiedenen Szenarien entsteht ein umfassendes Bild des Klimaschutzpotentials von FCEV und anderer Optionen.

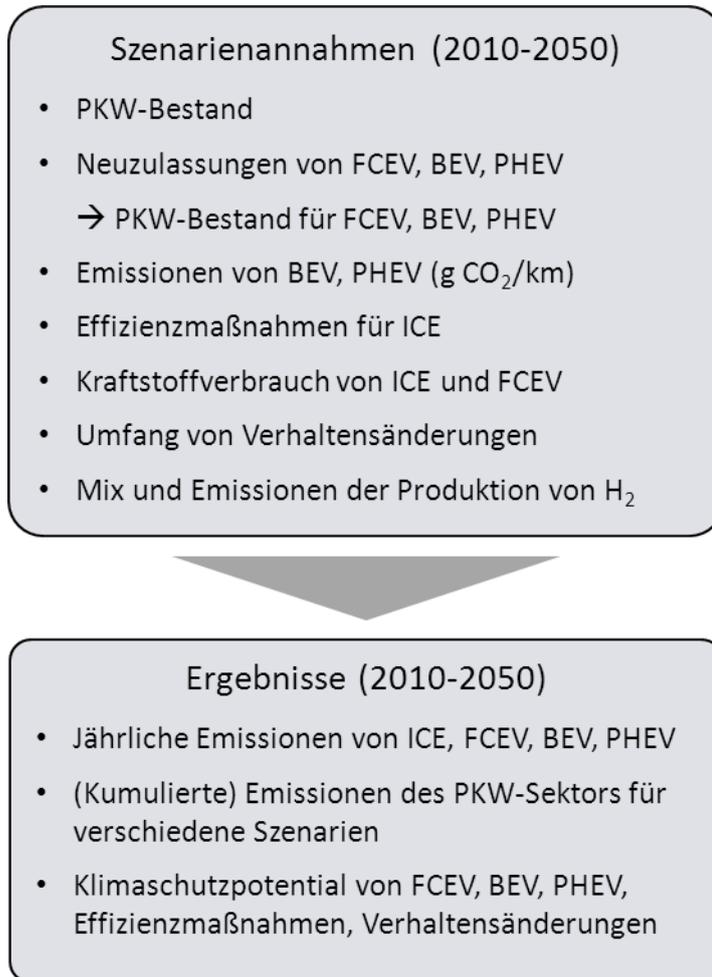


Abbildung 3: Annahmen und Ergebnisse der berechneten Klimaschutzszenarien für den nationalen PKW-Sektor.

Methodisch sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Berechnung der in Kapitel 5.3 gezeigten Klimaschutzbeiträge für die einzelnen Optionen ist nicht trivial, da diese nicht eindeutig definierbar sind. Der Klimaschutzbeitrag einer einzelnen Option ist nicht unabhängig von der Umsetzung der anderen Optionen. Somit entsteht eine Abhängigkeit von der Reihenfolge der Anwendung der Maßnahmen. Zum Beispiel haben Verhaltensänderungen sehr hohes Reduktionspotential, wenn keine alternativen Antriebe verwendet werden. Dieselben Verhaltensänderungen haben nahezu keine reduzierende Wirkung in einem PKW-Sektor, in dem sich bereits vollständig alternative Antriebstechnologien durchgesetzt haben. Da sich die verschiedenen Maßnahmen und Optionen mit starkem zeitlichen Überlapp ausbreiten, lässt sich keine eindeutige Reihenfolge festlegen. Diese methodische Herausforderung wurde bewältigt, indem die einzelnen Klimaschutzbeiträge aus einer Mittelung von verschiedenen Reihenfolgen bestimmt wurden.

Im nächsten Unterkapitel sind die Szenarien definiert. In Unterkapitel 4.2 sind die Annahmen bezüglich der Entwicklung des PKW-Bestandes und der Ausbreitung von alternativen Antrieben dargestellt. In Unterkapitel 4.3 werden zwei Szenarien für die Produktion von Wasserstoff dargestellt.

Klimaschutzbeiträge durch die Einführung alternativer Antriebe, Effizienzsteigerungen und Verhaltensänderungen sind abhängig von der Reihenfolge der Anwendung dieser Maßnahmen.

4.1 Definition der Klimaschutzszenarien

Es wurden zwanzig Szenarien definiert und analysiert. Diese ergeben sich aus der Kombination von verschiedenen Annahmen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Zwanzig Szenarien für die Bewertung des Klimaschutzpotentials der Wasserstofftechnologie im PKW-Sektor wurden berechnet.

20 Szenarien	Keine Effizienzmaßnahmen		Effizienzmaßnahmen	
	Keine Verhaltensänderung	Verhaltensänderung	Keine Verhaltensänderung	Verhaltensänderung
BAU („Business as usual“)	1	2	3	4
FCEV – niedrig (10% in 2050)	5	6	7	8
FCEV – mittel (30% in 2050)	9	10	11	12
FCEV – hoch (73% in 2050)	13	14	15	16
FCEV – mittel und PHEV/BEV	17	18	19	20

In der Studie werden 20 Szenarien definiert und analysiert, die sich durch unterschiedliche Grade der Nutzung alternativer Antriebssysteme, Effizienzmaßnahmen und Verhaltensänderungen unterscheiden.

Für die Ausbreitung alternativer Antriebe im PKW-Sektor gibt es fünf verschiedene Entwicklungspfade:

- In einem Referenzfall „Business-as-usual“-Szenario (BAU) werden weiterhin ausschließlich konventionelle Verbrennungsmotoren und keine alternativen Antriebe genutzt.
- In drei Szenarien werden verschiedene Entwicklungspfade für FCEV angenommen (niedrig, mittel und hoch). Bei diesen steigt der Anteil von FCEV am PKW-Bestand auf 10%, 30% bzw. 73% in 2050.
- In einem weiteren Szenario werden jeweils mittlere Verbreitungen (30% in 2050) von PHEV, BEV und FCEV angenommen.

Diese fünf Szenarien werden mit zwei Entwicklungspfaden für die Effizienz von ICE (niedrig, hoch) sowie mit zwei Annahmen bezüglich Verhaltensänderungen (mit/ohne) kombiniert, sodass zwanzig Szenarien entstehen.

In dieser Studie steigen die THG-Einsparungen aufgrund von Effizienzverbesserungen für ICE in Deutschland bis 2030 auf 25% im Vergleich zu 2010. Das entspricht einer konservativen Abschätzung im Vergleich zu anderen Studien, die langfristige Reduktionspotentiale im Bereich von 25% - 50% berechnen oder annehmen (siehe Kapitel 3.2).

In den Szenarien mit Verhaltensänderungen wird angenommen, dass die Nachfrage nach PKW sinkt. Zum einen wird auf andere Verkehrsträger wie öffentliche Verkehrsmittel umgestiegen, und zum anderen sinkt der gesamte Mobilitätsbedarf. Die in Kapitel 3.3 erläuterten Optionen und Maßnahmen können diese Entwicklung induzieren. Es wird angenommen, dass der PKW-Bestand ab 2010 im Vergleich zum Referenzpfad exponentiell um insgesamt 30% bis zum Jahr 2050 schrumpft (Abbildung 4).

4.2 Entwicklung des PKW-Bestandes und alternativer Antriebe

Im Folgenden werden die Annahmen bezüglich der Entwicklung des PKW-Bestandes und der Ausbreitung von alternativen Antrieben in den Szenarien dargestellt.

Der PKW-Bestand steigt, falls keine Verhaltensänderungen angenommen werden, bis 2050 leicht auf 52,1 Mio (dena et al. 2009) (Tabelle 2, Abbildung 4). In den Szenarien mit Verhaltensänderungen hingegen sinkt der PKW-Bestand bis 2050 auf 36,1 Mio Fahrzeuge. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass sich Verhaltensänderungen exponentiell ausbreiten. Auf diese Weise werden Verhaltensänderungen als eine Option mit vorwiegend langfristigem CO₂-Reduktionspotential eingeschätzt. Die kurzfristigen Effekte sind klein, sodass sich Verhaltensänderungen erst vergleichsweise spät durchsetzen. Zudem ist in der exponentiellen Ausbreitung reflektiert, dass Menschen ihr Verhalten eher dann verändern, wenn sie Alternativen von einer größeren Anzahl anderer Menschen vorgelebt bekommen.

Tabelle 2: Wesentliche Annahmen der Szenarien für ausgewählte Jahre.

		2010	2020	2030	2040	2050
PKW-Bestand ohne Verhaltensänderungen (Mio)		47	50,6	51,9	52,4	52,1
PKW-Bestand mit Verhaltensänderungen (Mio)		47	47,14	44,55	40,88	36,30
FCEV-Bestand ohne Verhaltensänderungen (Mio)	Niedrig	0	0,21	0,83	2,38	5,2
	Mittel	0	0,25	1,67	7,34	15,6
	Hoch	0	0,46	3,53	17,92	38,05
	BAU	0	0	0	0	0
PKW im breiten Szenario ohne Verhaltensänderungen (Mio)	ICE	47	43,08	31,17	16,37	5,23
	PHEV	0	5,88	12,90	15,38	15,63
	BEV	0	1,38	6,16	13,31	15,63
	FCEV	0	0,25	1,67	7,34	15,6

In Abbildung 4 sind die drei angenommenen Entwicklungspfade für die Neuzulassungen von FCEV im PKW-Sektor mit und ohne Verhaltensänderungen dargestellt. Aus den Neuzulassungen ergeben sich die Entwicklungspfade für den Bestand von FCEV (Abbildung 4, Tabelle 2).

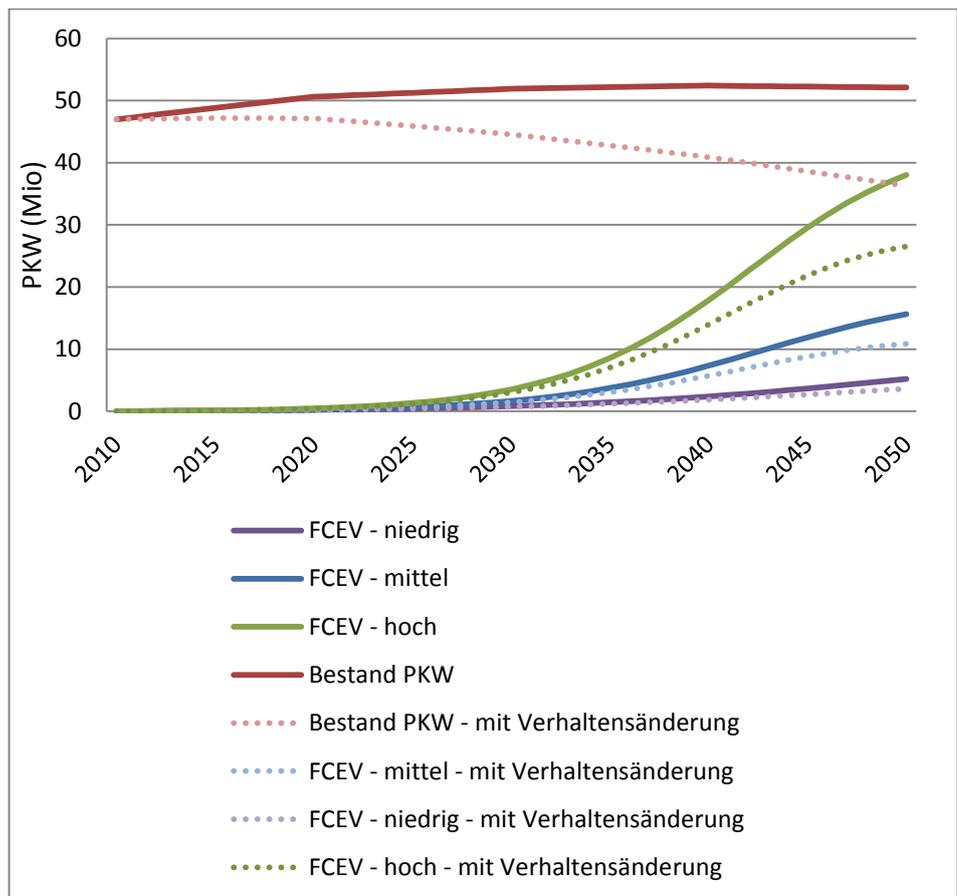
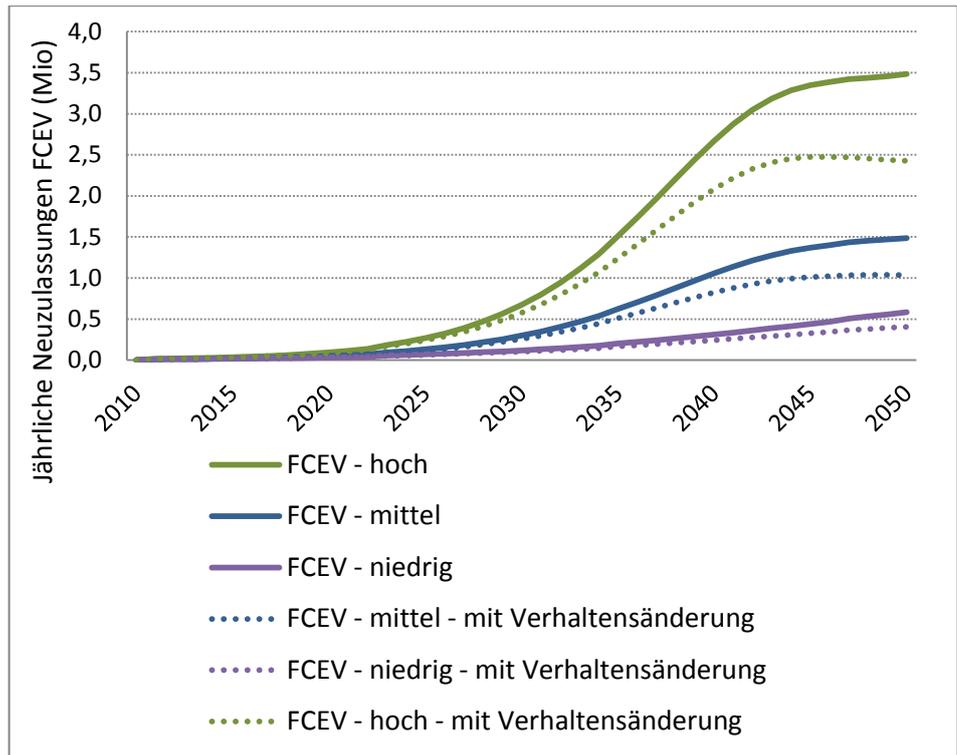


Abbildung 4: Die Neuzulassungen (oben) und der Fahrzeugbestand (unten) für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) in den drei angenommenen Entwicklungspfaden.

In den drei Ausbreitungspfaden „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ erreichen die FCEV einen Anteil von 10%, 30% bzw. 73% des PKW-Bestandes in 2050 (Abbildung 5). Im konventionellen „Business-as-usual“-Szenario (BAU) bleibt eine Verbreitung von FCEV aus. Stattdessen bleibt der PKW-Sektor von kon-

ventionellen Antrieben (Benzin ICE, Diesel ICE) dominiert. Dieser Fall wird als Referenzfall ohne Reduktion von Treibhausgasemissionen verwendet. Er entspricht einer hypothetischen Welt ohne Klimawandel, sodass keine Klimaschutzmaßnahmen notwendig sind.

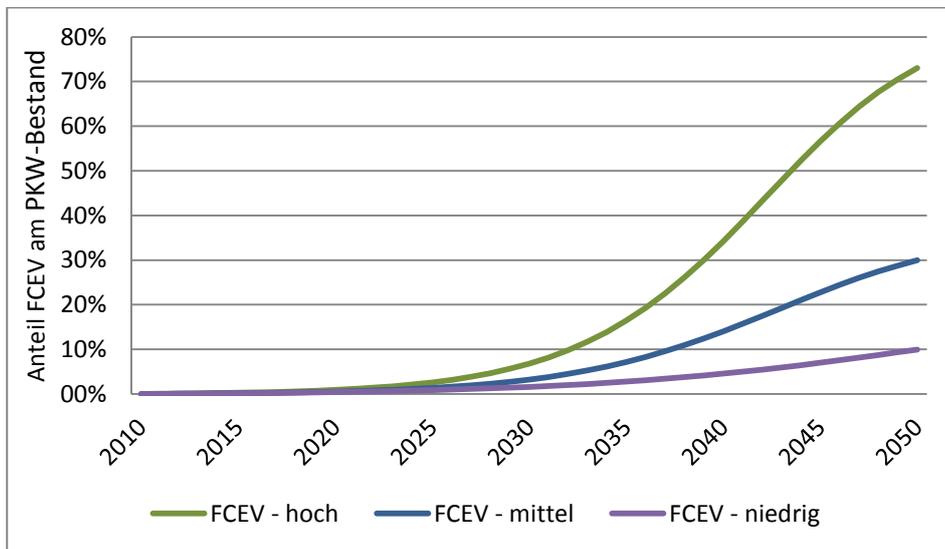


Abbildung 5: Der Anteil von Brennstoffzellenfahrzeugen am Gesamt-PKW-Bestand in den drei angenommenen Entwicklungspfaden.

Für die drei Ausbreitungspfade von FCEV wurden einige Werte für bestimmte Jahre als Orientierungspunkte aus folgenden Studien berücksichtigt. Bei der FCEV-Durchdringung im Jahr 2050 wird sich an den Werten aus der Studie McKinsey & Company (2010) orientiert, die Szenarien für Europa entwickelt. Dabei wird angenommen, dass Deutschland als Kernmarkt für FCEV einen etwas größeren FCEV-Anteil entwickelt. Des Weiteren wurde eine Expertenschätzung der NOW⁸ für FCEV-Anteile in den Jahren 2020 und 2030 für Deutschland verwendet, die im mittleren Szenario repräsentiert sind. Der FCEV-Anteil von 73% für 2050 im hohen Szenario orientiert sich an der GermanHy-Studie (dena et al. 2009). Eigene Berechnungen ergeben den Übergang zwischen den Orientierungspunkten. Dafür wurden Annahmen gemacht, wie sich die Neuzulassungen von FCEV in Abhängigkeit vom derzeitigen FCEV Bestand verändern. Mathematisch folgt die Entwicklung der Anzahl von FCEV einem exponentiellen Wachstum mit einem Dämpfungsterm.

⁸ Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

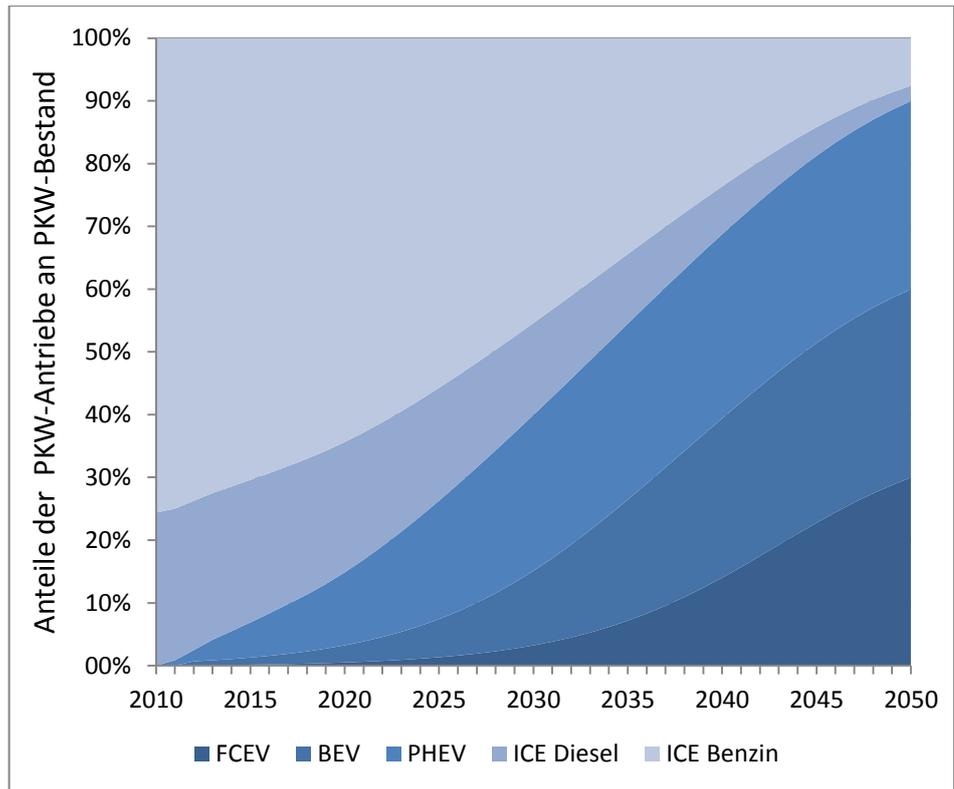


Abbildung 6: Drei Pfade für die Anteile von FCEV am PKW-Bestand wurden unterschieden (oben). In zwei Szenarien wurde zusätzlich zum Pfad „mittel“ für FCEV noch PHEV und BEV berücksichtigt, um ein breites Szenario zu konstruieren (Szenario 17-20).

Aus heutiger Sicht ist die Ausbreitung nur einer einzigen alternativen Antriebstechnologie wie FCEV unwahrscheinlich.

Die bisher definierten Szenarien ermöglichen die Berechnung des Klimaschutzpotentials von FCEV im Vergleich zu und im Zusammenwirken mit Effizienzmaßnahmen und Verhaltensänderungen. Allerdings ist die Ausbreitung nur einer alternativen Antriebstechnologie wie FCEV aus heutiger Sicht weder sinnvoll noch wahrscheinlich. In einer weiteren Klasse von Szenarien werden daher neben FCEV auch BEV und PHEV berücksichtigt. Für die drei Antriebstechnologien wird in diesen Szenarien eine Gleichverteilung von jeweils mittlerer Ausbreitung von 30% für das Jahr 2050 angenommen (Abbildung 6). Dies folgt der plausiblen Annahme, dass die drei Technologien schwerpunktmäßig in unterschiedlichen Fahrzeugklassen und Konsumentengruppen vertreten sein werden. Die Entwicklung von FCEV entspricht dem mittleren Ausbaupfad, der auf einer Expertenschätzung der NOW basiert. Aufgrund der bisherigen Entwicklung von Neuzulassungen und aktuellen Kostenunterschieden wird des Weiteren angenommen, dass zunächst PHEV, dann BEV und schließlich FCEV signifikante Marktdurchdringungen erreichen. Tabelle 2 zeigt die Ausbreitung der Fahrzeuge der verschiedenen Technologien in diesem ausgeglichenen Szenario für den Fall, dass keine Verhaltensänderungen angenommen werden.

4.3 Zwei Produktionsszenarien für Wasserstoff

Beim Fahren von FCEV entstehen lokal keine Treibhausgasemissionen. Jedoch ist es bei der Bestimmung des Klimaschutzpotentials der Wasserstofftechnologie im Transportsektor notwendig, die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus und die gesamte Prozesskette der Wasserstoffnutzung zu berücksichtigen (Abbildung 7). Das heißt, dass die Betrachtung der Produktion, des Transports sowie der Speicherung des Wasserstoffs notwendig ist.

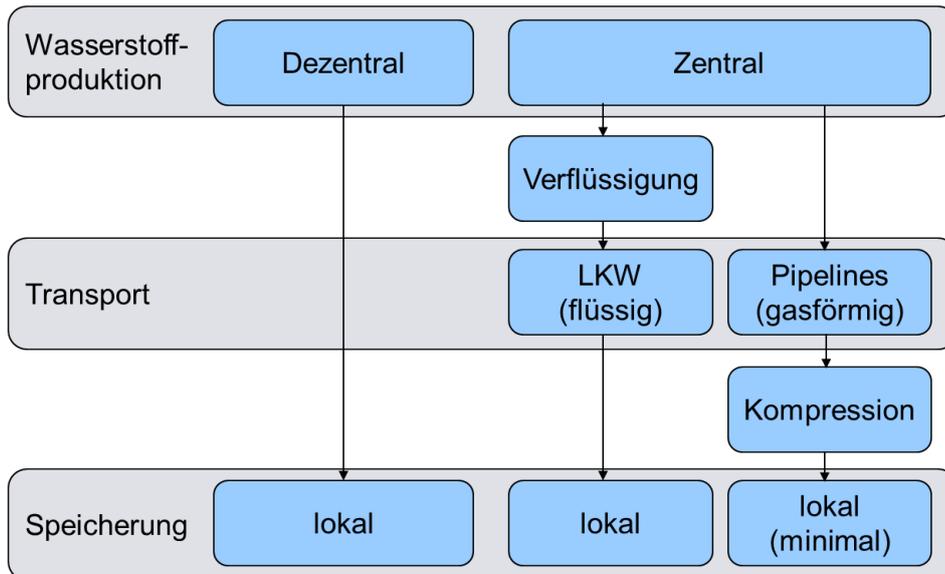


Abbildung 7: Wasserstoff kann dezentral an der Wasserstofftankstelle erzeugt und gespeichert werden. Zentrale Erzeugung macht Transport mit Tankwagen oder via Pipelines notwendig.

Die Erzeugung von Wasserstoff basiert entweder auf konventionellen (Nuklear, Erdgas, Kohle) oder auf erneuerbaren Primärenergiequellen (Biomasse, Sonne, Wind, Wasserkraft, Geothermie). Bei der Umwandlung sind zwei wesentliche Prozesse zu unterscheiden: die Gasreformierung und die Elektrolyse aus Strom.

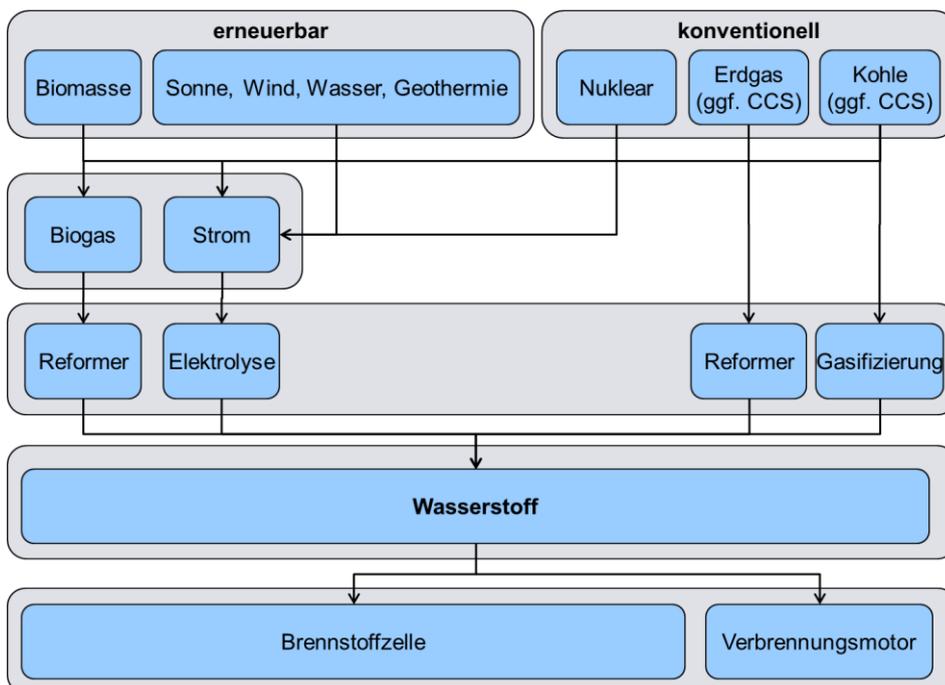


Abbildung 8: Wasserstoff kann aus verschiedenen Primärenergieträgern hergestellt werden, aus denen entweder aus Elektrolyse mit Strom oder mit Gasreformierung Wasserstoff hergestellt wird.

Bei den betrachteten FCEV wird der Wasserstoff im Fahrzeug in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt und treibt einen Elektromotor an. Die Verbrennung von Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor führt aufgrund von niedrigeren Effizienzen zu deutlich höheren Emissionen. Dieser Pfad wird daher in dieser Studie nicht betrachtet.

Die zwanzig Entwicklungsszenarien des PKW-Sektors werden mit zwei Szenarien für die Wasserstoffproduktion kombiniert. Hierbei werden Annahmen für

Die zwanzig Entwicklungsszenarien des PKW-Sektors werden mit zwei Szenarien für die Wasserstoffproduktion kombiniert.

die Entwicklung der Anteile von verschiedenen Erzeugungspfaden an der Gesamtproduktion von Wasserstoff getroffen (Abbildung 9, Abbildung 10). Diese stimmen mit den Annahmen für Europa der Studie McKinsey & Company 2010 überein.

Im ersten Produktionsszenario wird Wasserstoff langfristig aus vorwiegend erneuerbarem Strom erzeugt (Abbildung 9). Dabei wird Wasserstoff ausschließlich mittels Elektrolyse hergestellt. Der Prozess der Elektrolyse wurde vor über 200 Jahren entdeckt. Hierbei wird Wasser mit Hilfe von elektrischem Strom in die Elemente Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt. Wegen der vergleichsweise hohen Kosten leistet das Verfahren aktuell nur einen kleinen Beitrag zur weltweiten Wasserstoffproduktion. Es besteht großer Forschungsbedarf bei der weiteren Entwicklung der Elektrolyse. Zum einen bedarf es weiterer Kostenreduktionen. Zum anderen sollten die Elektrolyseure weiterentwickelt werden, die mit schwankendem erneuerbarem Strom und in großskaligen Anlagen betrieben werden können.

Der Wasserstoff kann dezentral, das heißt an der Wasserstofftankstelle, erzeugt werden. Effizienter ist die zentrale Erzeugung mit Großanlagen. Hierbei muss der Wasserstoff jedoch noch zu der Tankstelle transportiert werden. Aktuell wird dies typischerweise mit Tankwagen gemacht, die mit flüssigem Wasserstoff befüllt sind. Verlustärmer ist der Transport in Wasserstoff-Pipelines. Bereits heute gibt es Netzsysteme aus Wasserstoff-Pipelines, in die Wasserstofftankstellen integriert werden können. Voraussetzung für eine starke Senkung der Emissionen ist ein fortschreitender Ausbau der erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung. Gemäß dem Energiekonzept der Bundesregierung soll der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien auf 35% bis 2020, 50% bis 2030, 65% bis 2040 und 80% bis 2050 steigen (Bundesregierung 2010). Bis 2020 ist der Wasserstoffbedarf sehr niedrig und wird teilweise von der Chemieindustrie bereitgestellt, wo er als Nebenprodukt anfällt.

Die Wasserstoffelektrolyse kann eine besondere Rolle für die Integration erneuerbarer Energien im Stromsektor spielen. Mit zunehmendem Ausbau von Wind- und Solaranlagen wird es zunehmend Zeiten geben, in denen das Angebot aus erneuerbaren Energien größer ist als die Stromnachfrage. Es kommt zu Überschüssen, die nicht direkt genutzt werden können. Mit Hilfe von Elektrolyseuren kann dieser erneuerbare Strom in Wasserstoff umgewandelt, in Kavernen gespeichert und somit nutzbar gemacht werden (Sternier 2009, UBA 2010). Wasserstoff aus ausschließlich erneuerbarer Überproduktion ist CO₂-frei. Jedoch ist die Menge der der Elektrolyse zur Verfügung stehenden Überschüsse mit Unsicherheiten behaftet. Die Größe der Überschüsse hängen vom Ausbau der erneuerbaren Energien und der Regelbarkeit der thermischen Kraftwerke im Stromsystem ab. Zudem können verschiedene konkurrierende Optionen diese Überschüsse nutzen: vor allem Netzübertragung (ggf. mit zusätzlichem Stromnetzausbau), Lastflusssteuerung (englisch: Demand-Side-Management), Power-to-Heat (z.B. Boiler, Wärmespeicher, Wärmepumpen) und batterieelektrische Fahrzeuge.

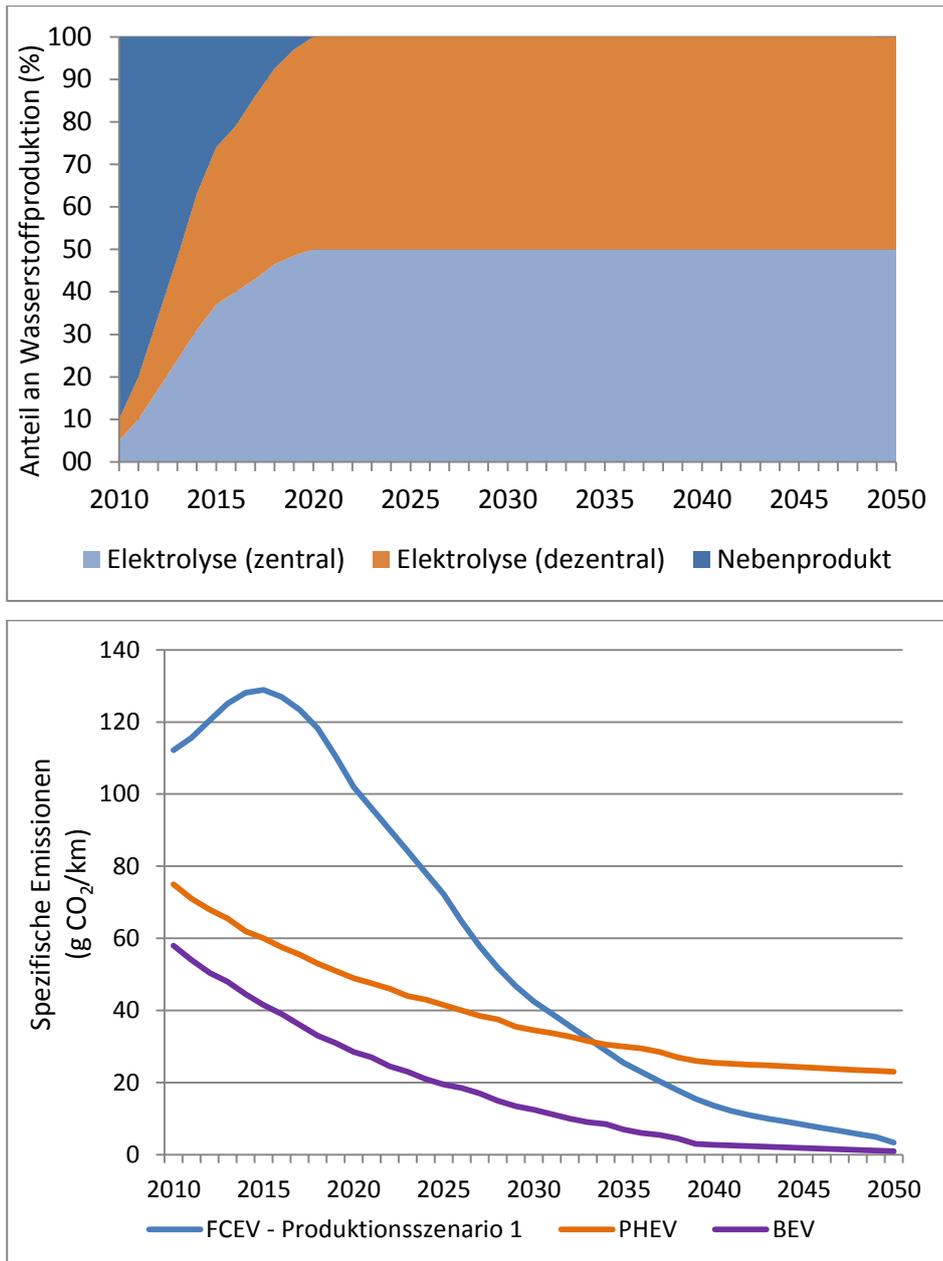


Abbildung 9: Wasserstoff-Produktionsszenario 1. Die Anteile von verschiedenen Erzeugungspfaden an der Gesamtproduktion von Wasserstoff (oben). Dieser Produktionsmix verwendet langfristig fast ausschließlich die Elektrolyse aus erneuerbarem Strom. Die spezifischen Emissionen sind somit in 2050 nahezu Null (unten) und liegen langfristig unter denen von PHEV. BEV können bereits kurzfristig niedrigere spezifische Emissionen erreichen.

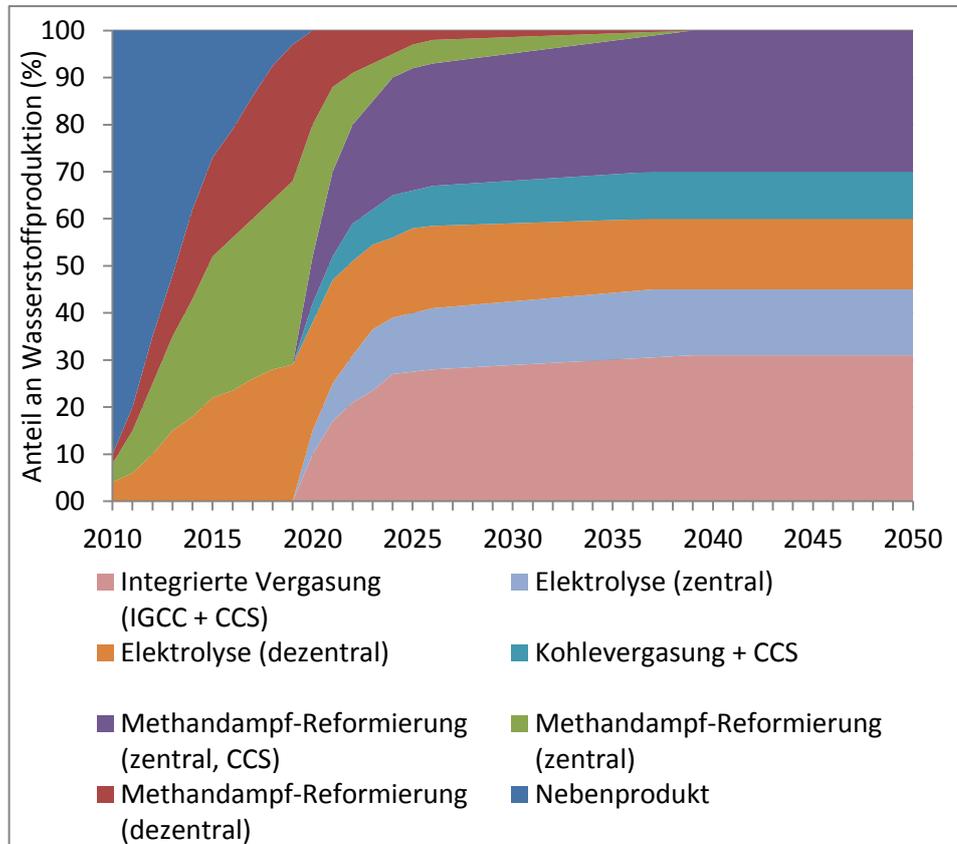
Die spezifischen Emissionen von FCEV liegen in den nächsten Jahren noch in der Größenordnung von emissionsarmen konventionellen Antrieben in Neuwagen (Abbildung 9). Dies liegt daran, dass kurzfristig Nebenprodukt-Wasserstoff aus der Industrie verwendet wird, der andernfalls typischerweise zur Wärmeerzeugung genutzt werden würde. Da dieser Wasserstoff durch fossiles Erdgas ersetzt werden muss, fallen in der Gesamtbilanz Emissionen an. Daher sind die spezifischen Emissionen der Wasserstoffproduktion kurzfristig hoch. Diese Emissionen haben allerdings nur einen kleinen Effekt, da sich FCEV in den betrachteten Szenarien, erst mittelfristig ausbreiten. Jedoch, fallen auch mittelfristig FCEV-Emissionen an, da der Strom für die Elektrolyse erst langfristig dekarbonisiert ist. Da der Stromeinsatz bei FCEV etwa dreimal so groß ist wie der von BEV, liegen die spezifischen Emissionen von FCEV auch langfristig

über denen von BEV. Für PHEV wird angenommen, dass durchschnittlich 77,5% der Fahrstrecken im Elektrobetrieb gefahren werden (McKinsey & Company 2010). PHEV werden somit vor allem für kurze und mittlere Distanzen eingesetzt.

Das zweite Produktionsszenario für Wasserstoff besteht aus einem Mix von fossilen Brennstoffen und erneuerbarer Energie (Abbildung 10). Trotz der Verwendung fossiler Energieträger können niedrige spezifische Emissionen erreicht werden, wenn man annimmt, dass die CCS-Technologie verwendet wird. Jedoch ist der zukünftige Einsatz von CCS-Technologien derzeit insbesondere in Deutschland fraglich (von Hirschhausen et al. 2012), sodass in diesem Bericht nur Ergebnisse gezeigt werden, denen das erste Produktionsszenario zugrunde liegt.

Als fossile Energieträger werden Erdgas oder Kohle verwendet. Die Methandampf-Reformierung von Erdgas ist die momentan vorherrschende Methode zur Wasserstofferzeugung. Sie ist energieeffizienter und kostengünstiger als die Elektrolyse. Hierbei werden die langkettigen Kohlenwasserstoffe im Erdgas bei hohen Temperaturen und Druck aufgespalten und dann in einem Reformer zu unter anderem Wasserstoff umgesetzt. Außerdem kann Wasserstoff aus der Vergasung von Kohle erzeugt werden. Besonders effizient ist die Vergasung von Kohle in IGCC-Kraftwerken. Dabei ist die Vergasung von Kohle einem kombinierten Gas-und-Dampf-Prozess vorgeschaltet.

Der Verlauf der spezifischen Emissionen (g CO₂/km) beider Produktionsszenarien ist ähnlich. Die Emissionen sinken langfristig auf nahezu Null.



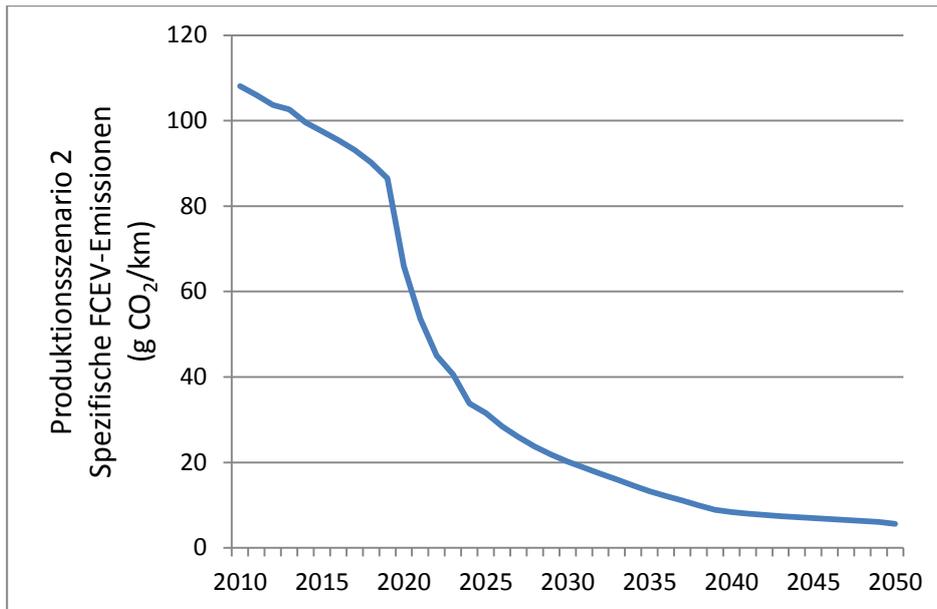


Abbildung 10: Wasserstoff-Produktionsszenario 2. Die Anteile von verschiedenen Erzeugungspfaden an der Gesamtproduktion von Wasserstoff (oben). Dieser Produktionsmix baut unter anderem auf der Verwendung fossiler Brennstoffe mit der CCS-Technologie auf. Die spezifischen Emissionen sind langfristig nahezu Null (unten).

5 Ergebnisse und Diskussion

Dieses Kapitel analysiert für alle Szenarien die zeitliche Entwicklung der jährlichen Emissionen (Unterkapitel 5.1) und die kumulierten Emissionen (Unterkapitel 5.2). In Unterkapitel 5.3 wird dann das breite Klimaschutzszenario mit allen Klimaschutzoptionen im Einzelnen ausgewertet. Hier folgt zunächst ein Überblick über die Szenarienergebnisse.

In Kapitel 4 wurden zwei Kriterien zur groben Orientierung für einen Klimaschutzbeitrag des PKW-Sektors abgeleitet, der im Einklang mit den gesamtwirtschaftlichen Klimaschutzzielen Deutschlands steht.

1. Die jährlichen PKW-Emissionen sollten um 80% in 2050 im Vergleich zu 1990 sinken. Es ergibt sich eine Zielmarke von etwa 21 Mt CO₂.
2. Der Anteil der PKW-Emissionen an den angestrebten kumulierten Emissionen (2010-2050) sollte ca. 11% nicht überschreiten. Somit ergibt sich ein Zielwert von etwa 2000 Mt CO₂.

Berechnet man daher die Emissionen des PKW-Sektors für das Jahr 2050 (Abbildung 11 und Abbildung 12) sowie die kumulierten Emissionen (Abbildung 13) für die betrachteten zwanzig Szenarien, so kann man deren Klimaschutzwirkung vergleichen und an den abgeleiteten Orientierungsmarken messen.

Diese Orientierungsmarken stellen eine große Herausforderung für den PKW-Sektor dar. In Tabelle 3 ist die Auswertung der Szenarien anhand der zwei entwickelten Klimaschutzkriterien im Überblick dargestellt. Nur Szenario 20 (grün) erfüllt beide Kriterien und wird somit den hier abgeleiteten Orientierungsmarken für den PKW-Sektor gerecht. Dieses Szenario beinhaltet alle in dieser Studie modellierten Klimaschutzmaßnahmen. Neben einer moderaten Ausbreitung von FCEV leisten PHEV, BEV, Effizienzmaßnahmen und Verhaltensänderungen einen signifikanten Klimaschutzbeitrag. Im Unterkapitel 5.3 wird dieses

Nur bei einer Ausbreitung verschiedener alternativer Antriebe in Kombination mit Effizienzmaßnahmen und Verhaltensänderungen können die Zielwerte für jährliche und kumulierte PKW-Emissionen erreicht werden.

breite Szenario genauer analysiert und insbesondere die Beiträge der verschiedenen Klimaschutzoptionen verglichen.

Tabelle 3: Die zwanzig Szenarien werden hinsichtlich der zwei entscheidenden Klimaschutzkriterien untersucht: Kumulierte Emissionen (2010-2050) und Restemissionen in 2050. Beide Kriterien werden nur in Szenario 20 (grün) erreicht, bei dem sämtliche Klimaschutzmaßnahmen gemeinsam realisiert werden. In weiteren fünf Szenarien wird zumindest eines der beiden Kriterien erreicht (gelb).

20 Szenarien	Keine Effizienzmaßnahmen		Effizienzmaßnahmen	
	Keine Verhaltensänderung	Verhaltensänderung	Keine Verhaltensänderung	Verhaltensänderung
BAU („Business as usual“)	1	2	3	4
FCEV – niedrig (10% in 2050)	5	6	7	8
FCEV – mittel (30% in 2050)	9	10	11	12
FCEV – hoch (73% in 2050)	13	14	15	16
FCEV – mittel und PHEV/BEV	17	18	19	20

Im vorliegenden Analyserahmen sind die ambitionierten Kriterien für Klimaschutz somit nur in einem breit gefächerten Szenario zu erreichen, bei dem verschiedene alternative Antriebe durch Effizienzmaßnahmen sowie Verhaltensänderungen ergänzt werden.

Der gelbe Bereich in Tabelle 3 markiert die Szenarien, in denen zumindest eines der beiden Kriterien erfüllt ist. Die langfristige Reduktion um 80% ist in den Szenarien leichter zu erreichen, als eine signifikante Reduktion der kumulierten Emissionen. Eine hohe Verbreitung von FCEV zusammen mit Verhaltensänderungen sind dafür notwendig. Alternativ kann eine mittlere Verbreitung von FCEV durch PHEV und BEV sowie Verhaltensänderungen oder Effizienzmaßnahmen ergänzt werden. Alle anderen Szenarien erfüllen keines der beiden Kriterien.

5.1 Die Entwicklung der Emissionen in den Szenarien

Abbildung 11 zeigt die Entwicklung der jährlichen CO₂-Emissionen im PKW-Sektor für die Szenarien, in denen keine Verhaltensänderungen angenommen wurden. Abbildung 12 stellt die entsprechenden Szenarien mit Verhaltensänderungen dar.

Eine Reduktion der Emissionen auf 80% bis 2050 wird in sechs der zwanzig Szenarien realisiert. Dafür ist entweder eine hohe Verbreitung von FCEV nötig, die ergänzt wird um Verhaltensänderungen, oder aber eine mittlere Verbreitung von FCEV wird ergänzt durch PHEV und BEV sowie Verhaltensänderungen oder Effizienzmaßnahmen.

Hohe Anteile von alternativen Antrieben sind somit notwendig, um die Emissionen langfristig deutlich zu senken, wenn wie in dieser Studie angenommen

Effizienzmaßnahmen und Verhaltensänderungen nur begrenztes Potential besitzen.

Allerdings reichen FCEV als alleinige Klimaschutzoption nicht aus, auch dann wenn ein hoher FCEV-Verbreitungspfad angenommen wird. Es bedarf der Ergänzung um weitere Klimaschutzoptionen (PHEV/BEV, Effizienzmaßnahmen oder Verhaltensänderungen).

In Szenarien in denen FCEV die einzige Klimaschutzoption darstellen, steigen die jährlichen Emissionen noch mindestens bis 2020, da FCEV erst später große Verbreitungen erreichen. Effizienzmaßnahmen greifen bereits kurzfristig und senken die Emissionen nahezu linear bis 2030. Diese Reduktionen wirken langfristig nach, da auch 2050 noch konventionelle Antriebe genutzt werden.

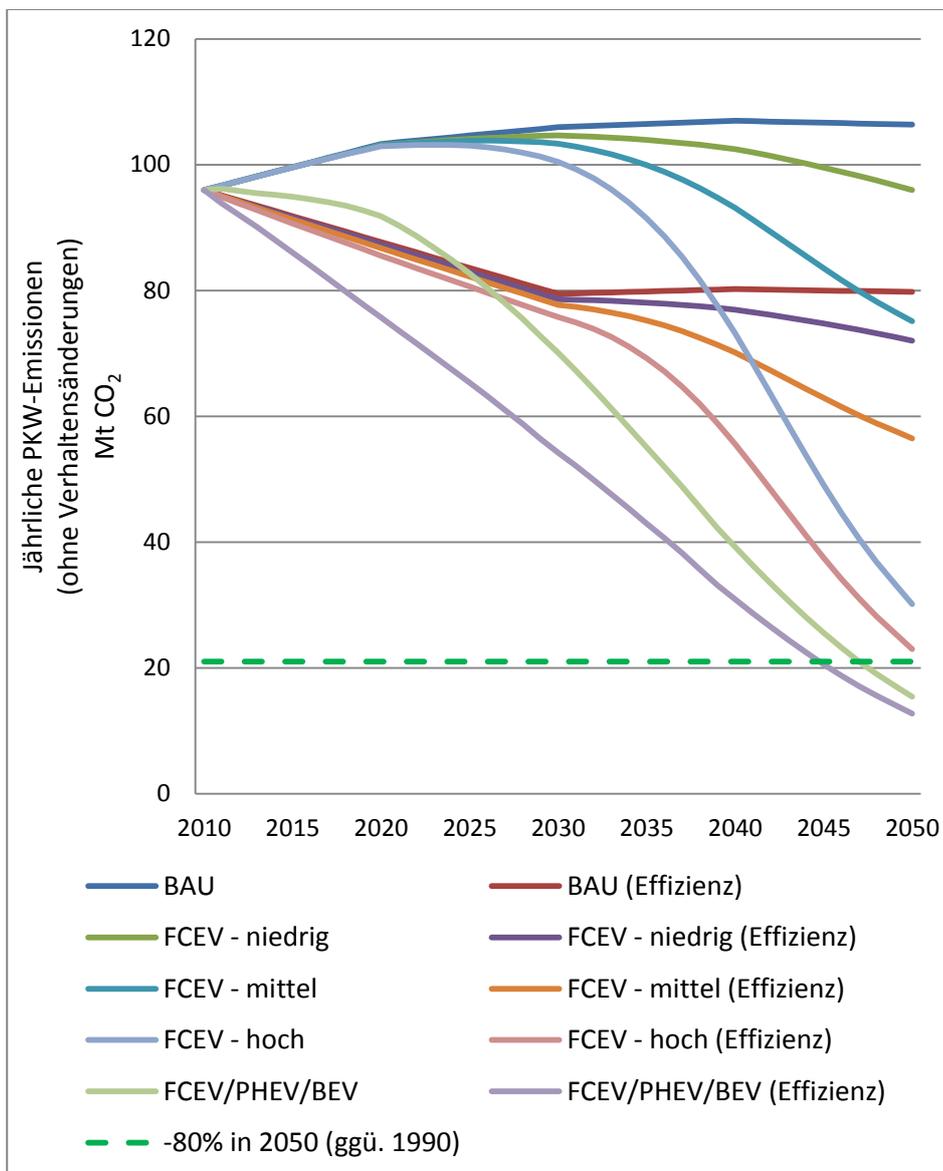


Abbildung 11: Emissionstrajektorien (2010-2050) für die zehn verschiedenen Szenarien ohne Verhaltensänderungen (siehe Tabelle 1).

Die Emissionspfade des breiten Szenarios mit PHEV, BEV und FCEV sowie Effizienzmaßnahmen liegen insbesondere kurz- und mittelfristig deutlich unter denen der anderen Szenarien. PHEV und Effizienzmaßnahmen senken die Emissionen kurzfristig, während BEV mittelfristig und FCEV langfristig ihre Wirkung entfalten.

PHEV und Effizienzmaßnahmen senken die Emissionen kurzfristig, während BEV mittelfristig und FCEV langfristig ihre Wirkung entfalten.

onen kurzfristig, während BEV mittelfristig und FCEV langfristig ihre Wirkung entfalten.

Verhaltensänderungen sind in solchen Szenarien besonders wichtig, in denen sich alternative Klimaschutzoptionen schwächer entwickeln. Falls PKW auch langfristig zu hohen Emissionen führen, kann eine eingeschränkte Nutzung von PKW die Emissionen besonders stark reduzieren. Im BAU-Szenario haben Verhaltensänderungen folglich das größte Reduktionspotential.

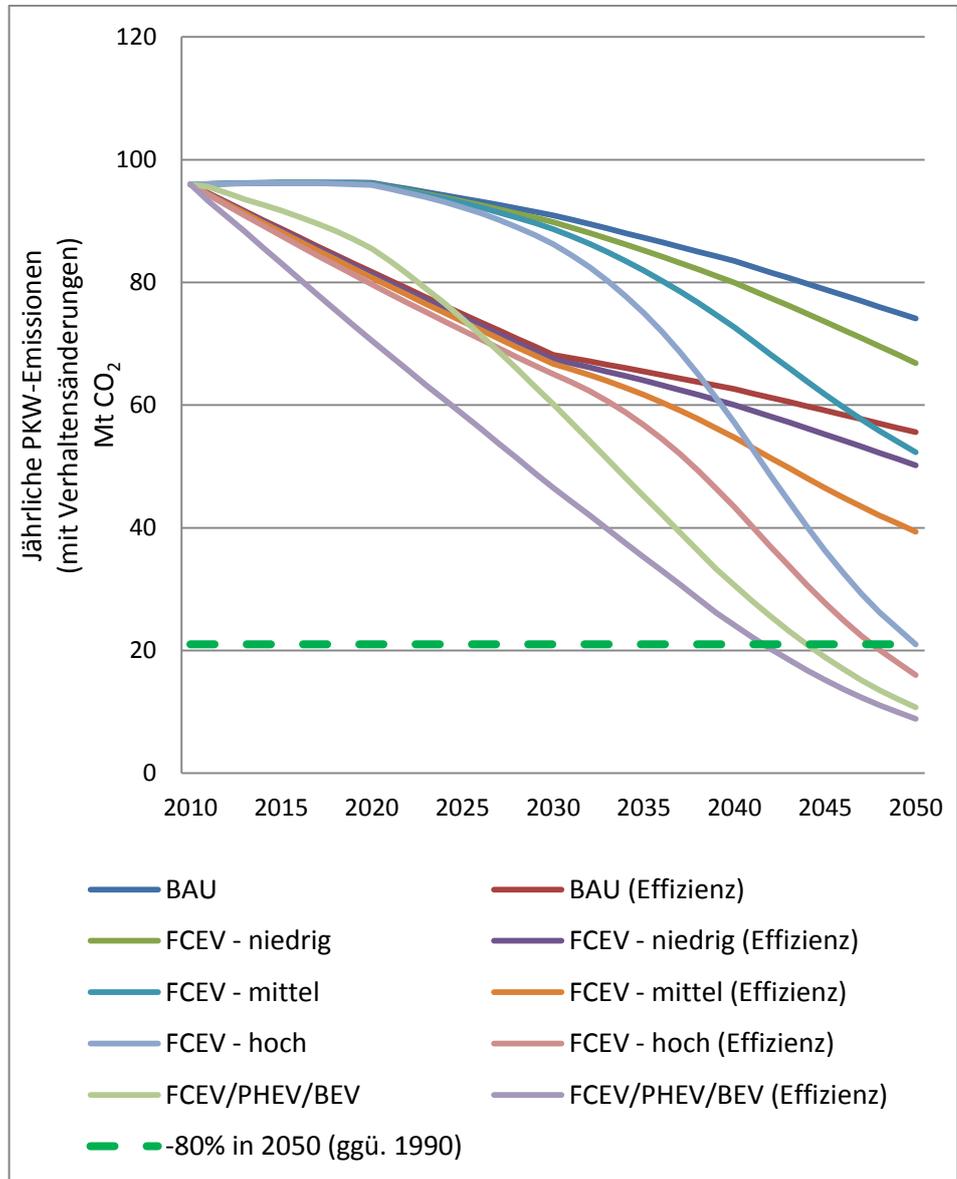


Abbildung 12: Emissionstrajektorien (2010-2050) für die zehn verschiedenen Szenarien mit Verhaltensänderungen (siehe Tabelle 1).

5.2 Die kumulierten Emissionen der Szenarien

In Abbildung 13 sind die kumulierten Emissionen, das heißt die Summe der Treibhausgasemissionen von 2010 bis 2050, für alle Szenarien dargestellt. Eine Reduktion der kumulierten Emissionen auf unter 2000 Mt CO₂ wird nur in dem Szenario erreicht, bei dem sämtliche modellierte Klimaschutzmaßnahmen zur Anwendung kommen. Da FCEV auch bei optimistischen Annahmen erst vergleichsweise spät hohe Anteile im Fahrzeugbestand entwickeln, ist ihre kumulative Vermeidungswirkung bis 2050 begrenzt.

Kumulative Vermeidungswirkung von FCEV bis 2050 ist begrenzt.

Effizienzmaßnahmen sind für die Reduktion der kumulierten Emissionen von besonderer Bedeutung, weil sie vergleichsweise früh realisierbar sind und sie die jährlichen Emissionen somit über einen längeren Zeitraum reduzieren können. Auch die Ergänzung von FCEV mit PHEV oder BEV ist sinnvoll, da auch deren Klimaschutzwirkung früher einsetzt. Dies hat zwei Gründe. Zum einen wird hier eine frühere Verbreitung der batterieelektrischen Antriebe im Vergleich zu den FCEV als wahrscheinlich angenommen. Zum anderen sind sowohl BEV als auch FCEV auf einen raschen Ausbau von erneuerbarer Stromerzeugung angewiesen, wenn die WTW-Emissionen signifikant reduziert werden sollen. BEV nutzen diesen Strom effizienter als FCEV, sodass mehr erneuerbarer Strom für die eigentliche Nachfrage im Stromsektor zur Verfügung steht.

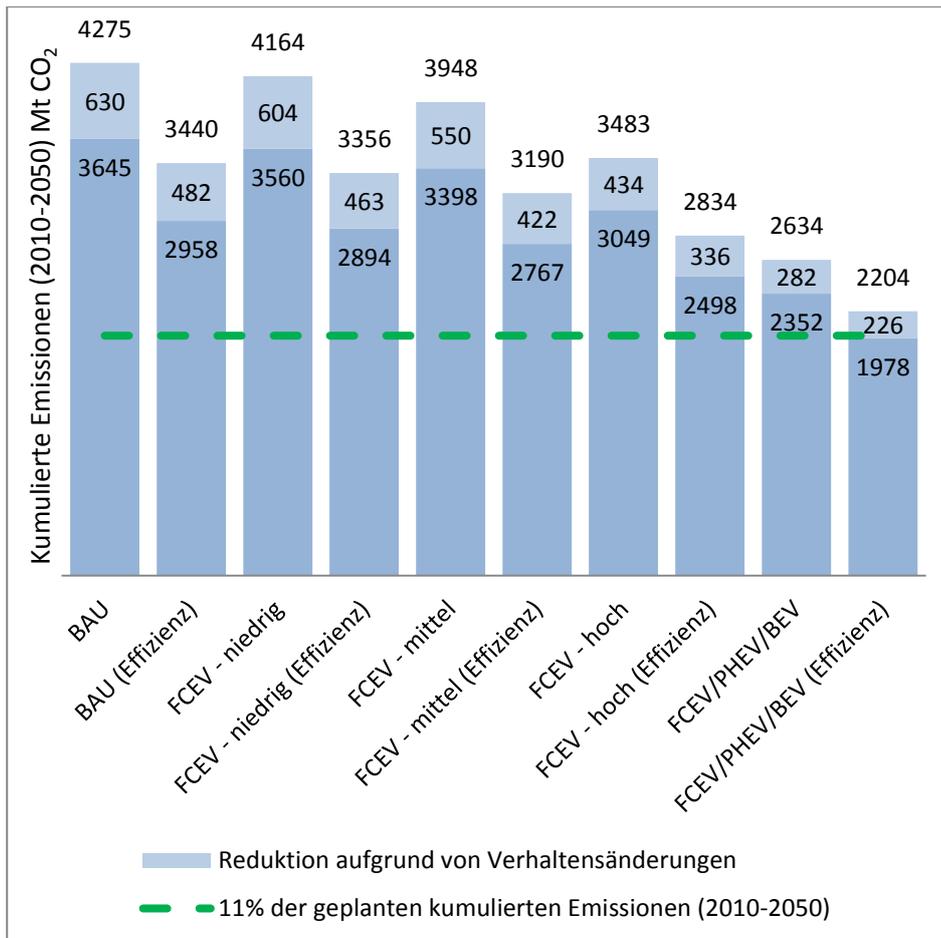


Abbildung 13: Kumulierte Treibhausgasemissionen (2010-2050) für die zwanzig verschiedenen Szenarien.

Der jeweils hellblaue Teil des Emissionsbalkens in Abbildung 13 repräsentiert den Teil der kumulierten Emission, der aufgrund von Verhaltensänderungen reduziert werden kann. Obwohl in allen Szenarien Verhaltensänderungen dieselbe Wirkung auf den Gesamtbestand von PKW haben, ist die jeweilige Klimaschutzwirkung abhängig von den anderen Klimaschutzmaßnahmen in einem Szenario. Bei starker Verbreitung alternativer Antriebe, sind die zusätzlichen Emissionsreduktionen aufgrund von Verhaltensänderungen kleiner, als bei einem hohen Anteil konventioneller Treibstoffe. Das heißt, dass Verhaltensänderungen gerade dann wichtig werden, wenn alternative Treibstoffe nicht die gewünschte Ausbreitung oder Reduktionswirkung erzielen.

Verhaltensänderungen werden dann wichtig, wenn alternative Treibstoffe nicht die gewünschte Ausbreitung oder Reduktionswirkung erzielen.

5.3 Das breite Klimaschutzscenario

Im Folgenden wird das breite Szenario näher untersucht, in dem alle Klimaschutzoptionen berücksichtigt sind (Szenario 20 in Tabelle 3). Dies ist das einzige Szenario, das beide Klimaschutzkriterien erfüllt.

In (Abbildung 14) sind die Emissionspfade des Klimaschutzscenario und des BAU-Szenarios dargestellt (untere und obere Linie). Die große Emissionslücke zwischen den Kurven illustriert den Reduktionsbedarf im PKW-Sektor, der von den Klimaschutzoptionen geleistet werden muss. Für jede Option sind Klimaschutzbeiträge berechnet worden. Diese sind als eingefärbte Flächen dargestellt. Anhand der Größe und Form der Flächen können die Optionen verglichen werden.

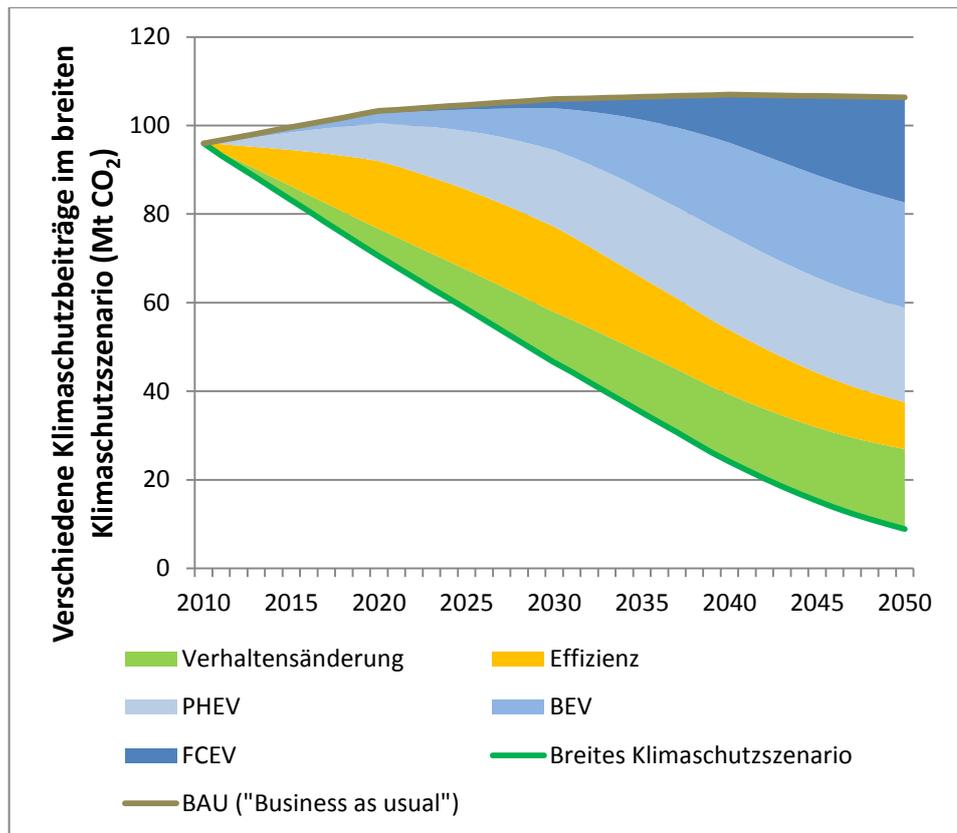


Abbildung 14: Die Lücke zwischen den Emissionstrajektorien des konservativen Referenzszenarios und des breiten Klimaschutzscenario wird durch die Klimaschutzbeiträge der verschiedenen Optionen gefüllt.

FCEV leisten wichtigen Beitrag zur Emissionsreduktion – aber erst ab 2030.

Die Emissionsreduktionen von FCEV sind erst langfristig von Bedeutung. Ab 2030 steigt ihr Klimaschutzbeitrag schnell auf ein hohes Niveau an. PHEV reduzieren Emissionen bereits kurzfristig, und BEV mittelfristig. Ihr Klimaschutzpotential stabilisiert sich langfristig ebenfalls jeweils auf hohem Niveau. In 2050 sind die Reduktionsbeiträge der drei alternativen Antriebe ähnlich hoch. Das ist plausibel, da für die drei Antriebe die gleichen hohen Verbreitungen in 2050 angenommen wurden und ihre spezifischen Emissionen jeweils sehr stark sinken.

Das Klimaschutzpotential von Effizienzmaßnahmen (orangene Fläche) ist typisch für alle Szenarien. Die meisten der zugrunde liegenden technischen Maßnahmen stehen bereits in den nächsten Jahren zur Verfügung, sodass sich deren reduzierende Wirkung kurzfristig entfalten kann. Diese Wirkung hält an, solange wie konventionelle Antriebe genutzt werden. Der Großteil des PKW-

Bestandes wird noch bis mindestens 2030 konventionelle Antriebe nutzen. Langfristig nimmt ihre Bedeutung ab, da immer weniger konventionelle Antriebe verwendet werden.

Emissionsreduktionen aus Verhaltensänderungen steigen gleichmäßig an, obwohl sie aufgrund ihrer exponentiellen Ausbreitung erst langfristig zu einer deutlichen Reduktion des PKW-Bestands führen (siehe Abbildung 4). Kurzfristig ist der Effekt auf den PKW-Bestand zwar klein, die reduzierende Wirkung auf die Emissionen jedoch stark, da der Anteil von konventionellen Antrieben in den nächsten Jahren noch am größten ist. Langfristig ist der Klimaschutzbeitrag von Verhaltensänderungen kleiner als der der einzelnen alternativen Antriebe.

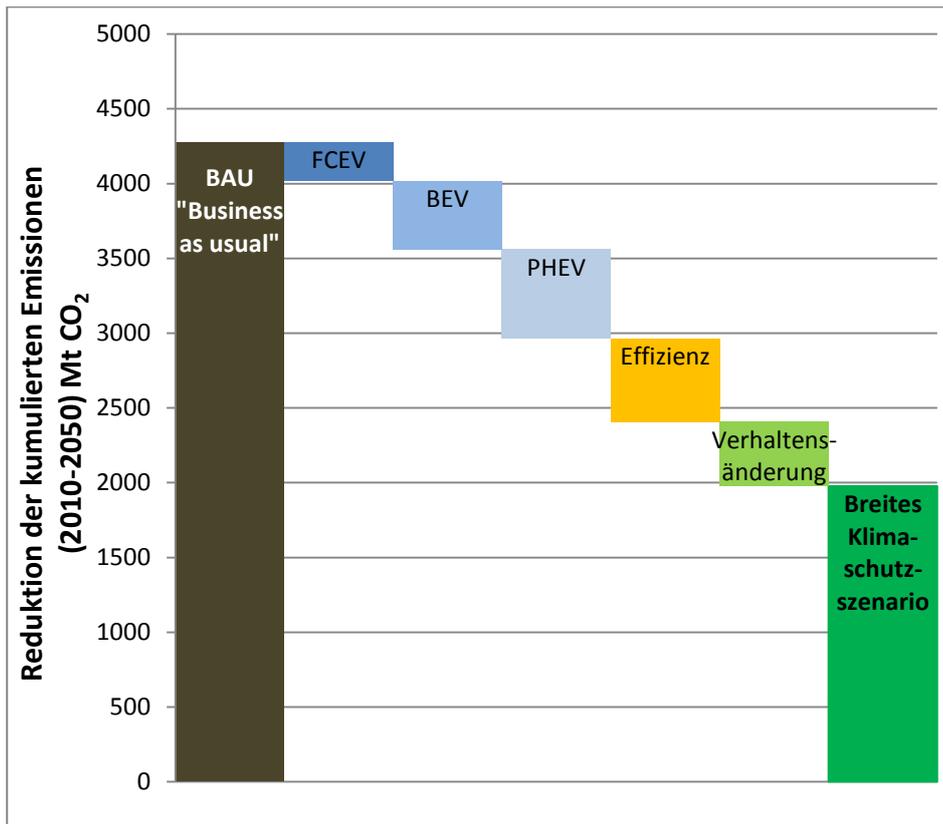


Abbildung 15: Die Lücke zwischen den kumulativen Emissionsreduktionen des konservativen Referenzszenarios (BAU) und des breiten Klimaschutzszenarios beinhaltet die kumulativen Klimaschutzbeiträge der verschiedenen Optionen.

In Abbildung 15 sind die Beiträge der verschiedenen Maßnahmen zur Senkung der kumulierten Emissionen im breiten Klimaschutzszenario im Vergleich zum Referenzszenario (BAU) gezeigt. Der Beitrag der FCEV ist vergleichsweise gering, da erst langfristig hohe Anteile im PKW-Bestand erreicht werden. Die anderen Klimaschutzoptionen werden schon früher wirksam und haben somit einen größeren Effekt auf die kumulierten Emissionen. FCEV sind daher vor allem geeignet, um langfristig Emissionsreduktionen zu erreichen, während die kumulierten Emissionen von anderen Maßnahmen wirksam reduziert werden. Es gibt keine Maßnahme, die allein angewendet, ambitionierte Klimaschutzzielen genügen würde. Es empfiehlt sich im PKW-Sektor eine breite Förderung der verschiedenen Optionen.

Die Szenarien dieser Studie berücksichtigen ausschließlich die Nutzung von Wasserstoff im PKW-Sektor. Wasserstoff als Sekundärenergieträger kann jedoch eine große systemische Bedeutung für das Gelingen der Energiewende spielen. Der Ausbau von variablen erneuerbaren Energiequellen wie Wind-

Die systemische Bedeutung von Wasserstoff für die Nutzung und Speicherung von erneuerbarem Strom kann das Klimaschutzpotential von FCEV deutlich erhöhen.

kraft- und Photovoltaik-Anlagen führt schon heute zu Netzengpässen, sodass ein Teil der Produktion nicht genutzt werden kann. Diese Überproduktion kann mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt werden, der dann zum Beispiel im Verkehrssektor genutzt werden kann. Einige Studien zeigen großes Potential für Wasserstoff bei der Nutzung und Speicherung von erneuerbarem Strom (UBA 2010, Sterner 2009). Die potentielle, systemische Bedeutung von Wasserstoff kann das Klimaschutzpotential von FCEV im Vergleich zu den hier gezeigten Ergebnissen deutlich erhöhen.

6 Zusammenfassung

Die internationale Staatengemeinschaft hat sich auf das Ziel geeinigt, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf höchstens 2 Grad gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Viele Staaten haben dieses Klimaszutzziel in nationalen Programmen und Emissionsreduktionszielen verankert. Für die Erreichung der ambitionierten deutschen Klimaschutzziele ist ein signifikanter Beitrag des PKW-Sektors nötig. Hierfür gibt es verschiedene Optionen:

- Alternative Antriebe wie batterieelektrische Antriebe oder Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) nutzen potentiell CO₂-freie Energieträger.
- Maßnahmen zur Effizienzsteigerung in Fahrzeugen reduzieren den Energiebedarf pro gefahrenen Kilometer.
- Verhaltensänderungen in der Gesellschaft induziert durch zum Beispiel eine nachhaltigere Stadtplanung, können den Mobilitätsbedarf senken und den Wechsel zu emissionsarmen Verkehrsträgern induzieren.

In 20 Szenarien werden die oben genannten Klimaschutzoptionen auf Basis sinnvoll erscheinender Annahmen kombiniert. Der Fokus liegt hierbei auf der Entwicklung von FCEV. Die Szenarien werden anhand zweier hierfür entwickelter Kriterien für ambitionierten Klimaschutz im PKW-Bereich ausgewertet. Zum einen müssen die PKW-Emissionen langfristig (~2050) ein sehr niedriges Niveau erreicht haben. Zum anderen müssen die PKW-Emissionen möglichst bald stark sinken, sodass die Summe der Emissionen, die sogenannten kumulierten Emissionen, bis 2050 möglichst niedrig ist.

Die Auswertung dieser Szenarien für den PKW-Sektor hinsichtlich ihrer Emissionsreduktionen zeigt, dass eine breite Umsetzung verschiedener Klimaschutzoptionen notwendig ist, um beide Klimaszutzkriterien zu erreichen. Signifikanter Klimaschutz im PKW-Sektor stellt sich als große Herausforderung dar. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) können die Emissionen im PKW-Sektor langfristig deutlich reduzieren. Der kurz- und mittelfristige Beitrag ist jedoch begrenzt, da zum einen die Markteinführung und Durchdringung dieses neuen Antriebs nur allmählich stattfindet. Zum anderen werden die Emissionen, die für die Produktion des benötigten Wasserstoffs anfallen, erst mittelfristig deutlich reduziert. Kurzfristig kommt ein Teil des Wasserstoffs als Nebenprodukt aus der Chemieindustrie kommen. Erst langfristig kann die Wasserstoffproduktion ausschließlich durch die Elektrolyse mit erneuerbarem Strom geleistet werden. Die senkende Wirkung von FCEV auf die kumulierten Emissionen ist somit vergleichsweise gering.

Es bedarf daher der Ergänzung durch weitere Klimaschutzmaßnahmen, um die Emissionen im PKW-Sektor zu reduzieren. Die Verbesserung der Effizienz der im Verkehrssektor verbleibenden konventionellen Benzin- und Diesel-PKW ist von besonderer Bedeutung. In allen Szenarien wird der Großteil des PKW-Bestandes noch bis mindestens 2030 konventionelle Antriebe nutzen. Effizi-

enzmaßnahmen können somit auf breiter Front Treibhausgasemissionen reduzieren. Zudem stehen die meisten dieser Maßnahmen bereits in den nächsten Jahren zur Verfügung, sodass sich deren reduzierende Wirkung kurzfristig entfalten und in den Szenarien solange wirken kann, wie konventionelle Antriebe genutzt werden. Um die nötigen langfristigen Reduktionen zu erreichen, reichen Effizienzmaßnahmen jedoch nicht aus.

Batterieelektrische Antriebe (BEV) können die Emissionen langfristig deutlich senken. Ihre Wirkung auf die kumulierten Emissionen ist potentiell größer als die von FCEV, wenn man, wie es die derzeitige Entwicklung andeutet, annimmt, dass sie früher verbreitet sein werden. Zudem sind BEV etwa dreimal so effizient wie FCEV, sodass deren Emissionen entsprechend kleiner sind. BEV bieten mit der schrittweisen Elektrifizierung der Fahrzeuge über Hybride und Plug-in-Hybride einen besonderen Vorteil bei der Markteinführung.

Auch Verhaltensänderungen können zu Emissionsreduktionen im Verkehrssektor führen, wenn die Anzahl und die Häufigkeit der Benutzung von PKW reduziert werden. Nennenswerte Beiträge zur Emissionsreduktion sind allerdings erst mittel- und langfristig zu erwarten. Sie sind insbesondere in solchen Szenarien bedeutsam, in denen auch langfristig noch ein großer Anteil konventioneller Antriebe besteht, falls den alternativen Antrieben nicht die wünschenswerte Verbreitung gelingt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die für die Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele abgeleiteten Orientierungsmarken für den PKW-Sektor als ambitioniert darstellen. FCEV können einen Beitrag zur langfristigen Reduktion der Emissionen leisten. Ihre reduzierende Wirkung auf die kumulierten Emissionen ist jedoch vergleichsweise klein. Es empfiehlt sich somit eine breite Förderung weiterer Klimaschutzoptionen wie BEV, PHEV, Effizienzmaßnahmen und Verhaltensänderungen. Dies schafft zudem Sicherheit, falls einzelne Optionen hinter den erwarteten Entwicklungen zurückbleiben oder falls die Reduktionsziele für den Stromsektor nicht erreicht werden. Letztere sind eine wichtige Voraussetzung für die Klimaschutzwirkung von alternativen Antrieben.

7 Referenzen

BDEW, 2013. Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2013).

BMU, 2009. Güterverkehr. Verfügbar unter:
<http://www.bmu.de/verkehr/gueterverkehr/doc/39420.php>.

Bundesregierung, 2011. *Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes*.

Bundesregierung, 2010. *Energiekonzept*.

Creutzig, F. et al., 2010. CITIES: Car Industry, Road Transport and an International Emission trading Scheme – policy options.

dena et al., 2009. *Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?*

G8 Summit, 2009. *G8 Leaders Declaration: Responsible Leadership for a Sustainable Future*.

Von Hirschhausen, C. et al., 2012. *CO₂-Abscheidung europaweit vor dem Aus*, DIW Wochenbericht.

IEA, 2009. *Transport Energy and CO₂ : Moving towards Sustainability*.

IPCC, 2007. *Fourth Assessment Report: Climate Change*.

McKinsey & Company, 2010. *A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis*.

McKinsey & Company, 2007. *Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland - Sektorperspektive Transport*.

Meinshausen, M. et al., 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2[thinsp][deg]C. *Nature*, 458(7242), pp.1158–1162.

Van Noorden, R., 2013. Europe's untamed carbon. *Nature*, 493(7431), pp.141–142.

Rodt, S. et al., 2010. *CO₂-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland*. Available at: http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3773.

Schallaböck, K.O. et al., 2006. *Klimawirksame Emissionen des PKW-Verkehrs und Bewertung von Minderungsstrategien*.

Sterner, M., 2009. *Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems*. Kassel University. Available at: <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-798-2.volltext.frei.pdf>.

UBA, 2010. *Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen*.

UBA, 2012. *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011*.

UBA, 2011. *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990*. Available at: http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/archiv/Entwicklung_in_D_Trendtabelle_THG_1990-2009_v1.6.0_out.xls.zip.

UNFCCC, 2010. *Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010*.

WBGU, 2009. *Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz*, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen.

8 Abkürzungsverzeichnis

BAU – Referenzszenario (Business as usual)

BEV – batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles)

BMU – Bundesumweltministerium

CCS – Abscheidung und –Speicherung von CO₂-Emissionen (Carbon Capture and Storage)

CO₂ – Kohlenstoffdioxid

Dena – Deutsche Energie-Agentur

FCEV – Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicles)

Gt – Gigatonne(n), das heißt 10⁹ Tonnen

ICE – Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine)

IEA – International Energy Agency

IGCC – Integrated Gasification Combined Cycle: Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung

IPCC – Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change)

Mt – Megatonne(n), das entspricht 1.000.000 Tonnen

NOW – Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

PHEV – Plug-in Hybride Electric Vehicles

PKW – Personenkraftwagen

THG – Treibhausgas

UBA – Umweltbundesamt

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

WTW – vom Bohrloch bis zum Rad (Weel-to-wheel)