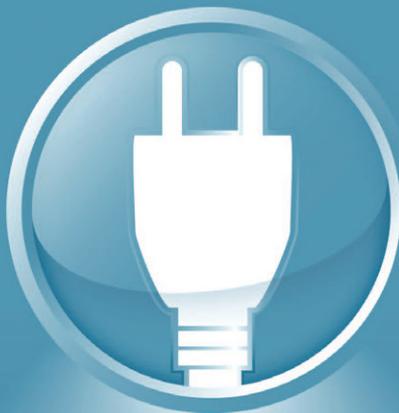


# Ein Portfolio von Antriebs- systemen für Europa: Eine faktenbasierte Analyse



Die Rolle von batteriebetriebenen Elektro-  
fahrzeugen, Plug-in Hybridfahrzeugen  
und Brennstoffzellenfahrzeugen



Aus dem Englischen übersetzt von NOW GmbH  
Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie.

## **Folgende Unternehmen und Organisationen haben an dieser Studie teilgenommen:**

### ***Kraftfahrzeughersteller***

BMW AG, Daimler AG, Ford, General Motors LLC, Honda R&D, Hyundai Motor Company, Kia Motors Corporation, Nissan, Renault, Toyota Motor Corporation, Volkswagen

### ***Öl und Gas***

ENI Refining and Marketing, Galp Energia, OMV Refining and Marketing GmbH, Shell Downstream Services International B.V., Total Raffinage Marketing

### ***Stromversorgungsunternehmen***

EnBW Baden-Wuerttemberg AG, Vattenfall

### ***Industrielle Gasunternehmen***

Air Liquide, Air Products, The Linde Group

### ***Autoausrüstungshersteller***

Intelligent Energy Holdings plc, Powertech

### ***Wind***

Nordex

### ***Elektrolyseunternehmen***

ELT Elektrolyse Technik, Hydrogenics, Hydrogen Technologies, Proton Energy Systems

### ***Europäische nicht-staatliche Organisationen***

European Climate Foundation

### ***Staatliche Organisationen***

European Fuel Cells und Hydrogen Joint Undertaking, NOW GmbH

Dieses Dokument gibt die Ergebnisse einer auf Fakten basierenden Studie wieder, die im Auftrag der oben aufgelisteten Unternehmen und Organisationen durchgeführt wurde. Die in diesem Dokument enthaltenen Informationen und Schlussfolgerungen repräsentieren die kollektive Ansicht der Arbeitsgruppen dieser Studie und nicht die einzelner Unternehmen oder Organisationen. Alle in diesem Dokument bereitgestellten Informationen und Schlussfolgerungen dienen ausschließlich für Referenzzwecke; sie sollten nicht als Ersatz für professionellen Rat oder Urteil in Bezug auf bestimmte Sachverhalte dienen. Keine der oben aufgelisteten Organisationen und Unternehmen garantiert Hinlänglichkeit, Genauigkeit, Aktualität oder Vollständigkeit der Inhalte dieses Dokuments. Die genannten Unternehmen und Organisationen lehnen deshalb alle und jegliche Gewähr und Zusicherungen, ob ausdrücklich oder impliziert, zu den genannten Inhalten ab, einschließlich jeglicher Gewähr für die Eignung für einem besonderen Zweck oder eine besondere Verwendung.

Die Managementberatung McKinsey & Company hat den analytischen Support für die Studie zur Verfügung gestellt. Alle in diesem Bericht gegebenen Empfehlungen oder Positionen liegen in der Verantwortung der Autoren und nicht in der von McKinsey & Company.



# INHALT

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>2</b>
<b>EINFÜHRUNG</b>	<b>11</b>
Das CO <sub>2</sub> -Reduktionsziel der EU für 2050 erfordert die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs um 95%	11
Elektrofahrzeuge (BEVs, FCEVs und PHEVs) sind notwendig, um das CO <sub>2</sub> -Reduktionsziel der EU zu erreichen	12
Technologisch bereit fokussieren sich FCEVs nun auf die kommerzielle Einführung	12
Alle Schlussfolgerungen basieren auf geschützten Industriedaten	14
<b>METHODIK</b>	<b>15</b>
Ein ausgeglichenes Szenario für die Elektrifizierung von Personenkraftwagen in der EU bis 2050	16
Kombinierte Prognose mit Vor- und Rückschau zur Maximierung der Genauigkeit	18
Ein ausgeglichener Wasserstoffproduktionsmix basierend auf einer Auswahl von Technologien	19
Die Annahmen sind robust gegen signifikante Variationen	24
<b>INPUTDATEN</b>	<b>26</b>
Erfassung, Vergleich und Validierung von über 10.000 Datenpunkten	26
<b>ERGEBNISSE</b>	<b>28</b>
1. BEVs und FCEVs haben das Potential für eine signifikante Reduzierung von CO <sub>2</sub> und lokalen Emissionen	28
2. Nach 2025 werden sich die TCO (Total Cost of Ownership) aller Antriebssysteme annähern	33
3. Ein Portfolio von Antriebssystemen kann die Bedürfnisse der Verbraucher und der Umwelt befriedigen	44
4. Die Kosten für die Wasserstoff-Infrastruktur machen ca. 5% der Gesamtkosten von FCEVs aus	46
5. Für die Einführung der FCEVs werden in den Anfangsjahren Kosten für die Gesellschaft entstehen	48
<b>NÄCHSTE SCHRITTE</b>	<b>52</b>
<b>ANHANG</b>	<b>54</b>
<b>GLOSSAR</b>	<b>62</b>

# ZUSAMMENFASSUNG

## *Konventionelle Fahrzeuge alleine können das Ziel der EU zur CO<sub>2</sub>-Reduktion für 2050 nicht erreichen.*

Im September 2009 haben die Europäische Union (EU) und die G8-Führer<sup>1</sup> vereinbart, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um 80% reduziert werden müssen, wenn das CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre auf 450 Teile pro Million<sup>2</sup> stabilisiert werden und die globale Erwärmung unter dem sicheren Niveau von 2°C bleiben soll. Eine Gesamt-De karbonisierung von 80% bis 2050 kann jedoch eine Dekarbonisierung des Straßentransportsektors um 95%<sup>3</sup> erfordern.

Nachdem die Anzahl von Personenkraftwagen bis 2050 in Europa auf 273 Millionen<sup>4</sup> steigt – und auf 2,5 Milliarden<sup>5</sup> weltweit – kann dies durch Verbesserungen der traditionellen Verbrennungsmotoren oder alternative Treibstoffe nicht erreicht werden: Vom Verbrennungsmotor wird eine Verbesserung um 30% erwartet, sodass eine vollständige Dekarbonisierung durch Effizienz alleine nicht möglich ist. Es ist ferner ungewiss, ob große Mengen von (nachhaltig hergestellten) Biotreibstoffen – d. h. über 50% der Nachfrage – für Personenkraftwagen verfügbar sein werden, wenn man die potentielle Nachfrage nach Biotreibstoffen<sup>6</sup> aus anderen Bereichen wie Lastkraftwagen, Flugzeugen, Schifffahrt, Energie- und Schwerindustrie berücksichtigt.

Zusammen mit der zunehmenden Verknappung und den steigenden Kosten für Energieressourcen ist es deshalb essentiell, eine Reihe von Technologien zu entwickeln, die die langfristige Nachhaltigkeit der Mobilität in Europa gewährleisten.

## *Eine auf Fakten basierende Bewertung von BEVs, FCEVs, PHEVs und ICEs auf der Grundlage von geschützten Industriedaten*

Zu diesem Zweck hat eine Gruppe aus Unternehmen, staatlichen Organisationen und NGOs – die Mehrheit von ihnen mit spezifischem Interesse am Potential (oder an der Vermarktbarkeit) von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEVs) und Wasserstoff, jedoch mit einer Produktpalette, zu der auch batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs), Plug-in Hybridfahrzeuge (PHEVs) und konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (ICEs) gehören einschließlich Hybridisierung – eine Studie über Personenkraftwagen durchgeführt, um alternative Antriebssysteme zu bewerten, die die Bedürfnisse am wahrscheinlichsten erfüllen. Mittel- und Schwerlastfahrzeuge sind nicht enthalten.

Elektrofahrzeuge (BEVs, FCEVs und PHEVs mit Elektroantrieb) haben während des Fahrens nicht nur keine Auspuffemissionen<sup>7</sup> – was die lokale Luftqualität signifikant verbessert – sondern sie können im Laufe der Zeit auf der Basis des Kraftstoffpfades (Well-to-Wheel) fast CO<sub>2</sub>-emissionsfrei gemacht werden; dies ist von der genutzten Primärenergiequelle abhängig. Emissionsfreie Antriebssysteme gehen deshalb Hand-in-Hand mit der Dekarbonisierung der Energieversorgung mit dem Potential, bis 2050 Emissionen aus zentraler Energie- und Wasserstoffproduktion signifikant zu reduzieren. Elektrofahrzeuge haben eine erheblich niedrigere Umweltbelastung durch Lärm, NO<sub>2</sub> und Partikel.

1 Die Gruppe der 8 Industrienächte – Kanada, Frankreich, Deutschland, Italien, Japan, Russland, United Kingdom und die USA

2 CO<sub>2</sub>-Äquivalent

3 McKinsey Global GHG: Abnehmender Kostenverlauf; International Energy Agency: Welt-Energieprognose 2009; Umweltschutzministerium der USA; Europäische Umweltagentur (EEA)

4 Parc Auto Gutachten 2009, Globaler Insight 2010; Studienanalyse

5 Europäische Kommission, April 2010

6 Die Studie trifft folgende Annahmen: Bis 2020 werden Biotreibstoffe beigemischt, was zu einer Kraftstoffpfad-Emissionsreduzierung von CO<sub>2</sub> für Fahrzeuge mit Benzin- und Dieselantrieb um 6% gemäß der EU-Treibstoffqualitätsrichtlinie führt. Bis 2050 wächst die Zumischung von Biotreibstoff an, sie ist jedoch entsprechend den Versorgungsbeschränkungen auf 24% begrenzt.

7 FCEVs emittieren ausschließlich Wasserdampf

Als besonders wichtig wurde es erachtet, die Rolle von FCEVs im Licht der neueren technologischen Durchbrüche bei Brennstoffzellen und elektrischen Systemen neu zu bewerten, die nun ihre Effizienz und Kostenwettbewerbsfähigkeit signifikant erhöht haben. Nach zufriedenstellenden Tests in einem Kundenumfeld – mit über 500 Autos, die mehr als 15 Millionen Kilometer gelaufen sind und 90.000 mal betankt wurden – wurde nun der Fokus von der Demonstration hin zur Planung des kommerziellen Einsatzes verschoben, sodass FCEVs wie alle Technologien von Massenproduktion und Kostenersparnissen profitieren können.

Mehr als 30 Interessenvertreter kamen deshalb zusammen, um eine Faktenbewertung von Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Leistung von BEVs, FCEVs, PHEVs und ICEs über die gesamte Wertschöpfungskette zu entwickeln – viele von ihnen hatten gleichermaßen Interesse an allen vier Antriebssystemen.

Dies bedeutete, vertrauliche und geschützte Daten in einer noch nie dagewesenen Größenordnung bereitzustellen<sup>8</sup> – einschließlich Fahrzeugkosten (in diesem Bericht bedeutet Kaufpreis Kosten plus eine hypothetische Standard-Gewinnspanne, die für alle Autos innerhalb eines Segments gleich sind), Betriebskosten, Treibstoff- und Infrastrukturkosten.

Um realistische Ergebnisse zu sichern, wurde Folgendes vereinbart:

- Die Studie sollte eine ausgeglichene Mischung von Fahrzeuggrößen (oder Segmenten) enthalten und sicherstellen, dass es keine Bevorzugung eines bestimmten Antriebssystems gibt und dass die Mehrheit der Fahrzeuge auf dem Markt vertreten ist<sup>9</sup>.
- Obwohl es möglich ist, dass bahnbrechende Technologien zu Fortschritten auf den Wegen zu nachhaltiger Mobilität führen können, sollte diese Studie nur Fahrzeugtechnologien berücksichtigen, bei denen Forschung und Entwicklung heute nachgewiesen sind und die in der Lage sind, a) eine erweiterte und kommerzielle Verwendung zu bieten und b) das CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel für 2050 zu erfüllen.
- Es sollten Durchschnittswerte verwendet werden, ohne „Rosinen rauspicken“, der gefälligsten Daten.
- Inputdaten der beteiligten Unternehmen sollten „gesperrt“, werden, bevor die Ergebnisse bekannt gegeben werden.

### *Ein ausgeglichenes Szenario für die Elektrifizierung von Personenkraftwagen in der EU bis 2050*

Es wurde dann ein Ansatz aus einer Kombination von Prognose und Backcasting verwendet, um die Ergebnisse zu errechnen: Von 2010 bis 2020 wurden globale Kosten und Leistungsdaten auf der Basis geschützter Industriedaten prognostiziert, für die Zeit nach 2020 auf der Grundlage projektierte Lernraten (siehe Anhang, Grafik 42, Seite 54).

Um die Abhängigkeit dieser Daten in einem breiten Spektrum von Marktergebnissen zu testen wurden drei europäische „Welten“ für 2050 definiert, ausgehend von einer unterschiedlichen Durchdringung der Antriebssysteme in 2050:

1. Eine Welt mit Tendenz zu ICE (5% FCEVs, 10% BEVs, 25% PHEVs, 60% ICEs)
2. Eine Welt mit Tendenz zu elektrischen Antriebssystemen (25% FCEVs, 35% BEVs, 35% PHEVs, 5% ICEs)
3. Eine Welt mit Tendenz zu FCEVs (50% FCEVs, 25% BEVs, 20% PHEVs, 5% ICEs).

<sup>8</sup> Für diese Studie wurden über 10.000 Datenpunkte erfasst

<sup>9</sup> Es gab für eine potentielle Verschiebung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte von größeren zu kleineren Autos keine Annahmen. Für den gesamten ICE-Bestand wurde ein Durchschnitt von ~30% Treibstoffeffizienzgewinn berücksichtigt.

Diese drei „Welten“ wurden dann in das Jahr 2010 zurückgesetzt; daraus entstand ein Entwicklungspfad für jedes Antriebssystem. Da sich der Einfluss der verschiedenen „Welten“ auf die FCEV-Kosten als nicht signifikant herausstellte (siehe Seite 18), fokussiert sich dieser Bericht auf die Ergebnisse für die zweite „Welt“, in der es eine ausgeglichene Aufteilung zwischen den vier Antriebssystemen gibt (25% FCEVs, 35% BEVs, 35% PHEVs und 5% ICEs).

### *Die Annahmen haben auch bei signifikanten Änderungen Bestand*

Um die Robustheit zu prüfen, wurden alle Annahmen in den Fahrzeug- und Versorgungsmodellen der Studie variiert, um mögliche „Wendepunkte“ zu identifizieren. Dies zeigte jedoch, dass die Schlussfolgerungen gegenüber signifikanten Abweichungen der Lernraten für die Antriebssysteme und die Kosten für fossile Brennstoffe widerstandsfähig waren (siehe Seite 24).

Der diesem Bericht zugrundegelegte Weg der Energieversorgung basiert auf der „Roadmap 2050“ der European Climate Foundation, die in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt wurde und einen Weg beschreibt, wie der Energiemix der EU bis 2050 dekarbonisiert werden kann. 2020 beträgt der Anteil der erneuerbaren Produktionskapazität (RES) ca. 34%. Dies ist das Minimum, das benötigt wird, um das Ziel der EU mit 20% erneuerbarer Energie zu erfüllen, da es außerhalb des Stromsektors nur beschränkte RES-Möglichkeiten gibt.

Für die folgenden Ergebnisse wurde für 2020 ein konventioneller Wasserstoff-Produktionsmix unter Nutzung existierender Anlagen angenommen – industriell produzierter Wasserstoff und zentralisierte Methandampf-Reformierung (Steam Methane Reforming – SMR) – mit einem zunehmenden Anteil dezentraler Einrichtungen (Wasserelektrolyse und SMR). Nach 2020 wird ein ausgeglichenes und wirtschaftlich gesteuertes Szenario angenommen, einschließlich CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Capture and Storage – CCS), Wasserelektrolyse (zunehmend unter Nutzung erneuerbarer Energie) und Vermeidung übermäßiger Abhängigkeit von einer bestimmten primären Energiequelle.

Ferner wurde ein alternativer Produktionsmix überprüft (siehe Grafik 26, Seite 38), der 100% Elektrolyse mit 80% erneuerbarer Energie bis 2050 darstellt, wodurch die Gesamtbetriebskosten / Total Cost of Ownership (TCO) für FCEVs um 5% bis 2030 und um 3,5% bis 2050 steigen. Beide Produktionsszenarien erzielen bis 2050 CO<sub>2</sub>-freien Wasserstoff.

Der Wert von Elektrofahrzeugen, die ein (zunehmend intermittierendes) Energienetz ausgleichen, kann signifikant werden und könnte auf einen Betrag von mehreren Milliarden Euro kommen (siehe „Roadmap 2050“). Dies ist auf BEVs (laden, wenn Energieversorgung verfügbar ist) wie auf Wasserstoffautos anwendbar (Nutzung von gespeichertem Wasserstoff zur Energieproduktion, wenn die Versorgung knapp ist).

## *ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE*

### *1. BEVs, PHEVs und FCEVs haben das Potential, CO<sub>2</sub> und lokale Emissionen signifikant zu reduzieren*

Elektrofahrzeuge (BEVs, FCEVs und PHEVs mit Elektroantrieb) können durch eine Vielzahl primärer Energiequellen betankt werden, wodurch die Abhängigkeit von Öl reduziert und die Sicherheit der Energieversorgung erhöht wird. Die Analyse der Effizienz des Kraftstoffpfades zeigt, dass Elektrofahrzeuge in einem breiteren Spektrums primärer Energiequellen effizienter als ICEs sind.

Aufgrund der Begrenzungen bei Batteriekapazität und Reichweite<sup>10</sup> (derzeit 100–200 km für einen Mittelklassewagen<sup>11</sup>) und einer derzeitigen Ladezeit von einigen Stunden sind BEVs ideal für Kleinwagen und kürzere Fahrstrecken geeignet, z. B. Stadtverkehr (einschließlich neuer Transportmodelle wie Fahrzeug-Sharing).

Mit einer Reichweite und Leistung, die mit ICEs vergleichbar ist, sind FCEVs die Lösung mit dem niedrigsten Kohlenstoff für mittlere / größere Autos und längere Fahrstrecken. Diese Fahrzeugsegmente stehen für 50% aller Autos und für 75% der CO<sub>2</sub>-Emissionen; deshalb wird durch das Ersetzen eines ICEs durch ein FCEV eine relativ hohe CO<sub>2</sub>-Reduktion erreicht.

Mit einer kleineren Batteriekapazität als BEVs haben PHEVs eine Reichweite von 40–60 km. In Kombination mit einer Zumischung von Biotreibstoffen können sie Emissionsreduzierungen bei längeren Fahrstrecken aufweisen.

ICEs haben das Potential, bis 2020 ihre CO<sub>2</sub>-Bilanz durch eine durchschnittliche Verbesserung der Energieeffizienz um 30% und die Zumischung von Biotreibstoffen zu reduzieren. Nach 2020 ist eine weitere Verbesserung der Motoreffizienz jedoch eingeschränkt und relativ kostspielig, da die verfügbare Menge an Biotreibstoffen wahrscheinlich begrenzt sein wird.

*BEVs, PHEVs und FCEVs haben ein signifikantes Potential, CO<sub>2</sub> und lokale Emissionen zu reduzieren, wenn man davon ausgeht, dass die CO<sub>2</sub>-Reduzierung am Produktionsort erfolgt. Sie spielen eine komplementäre Rolle, wobei BEVs idealer für Kleinwagen und kürzere Fahrstrecken und FCEVs für mittlere / größere Autos und längere Fahrstrecken geeignet sind. PHEVs können im Vergleich mit ICEs bei Kurzstrecken oder durch Nutzung von Biotreibstoffen, je nach Verfügbarkeit, CO<sub>2</sub> erheblich reduzieren. Es wird erwartet, dass Energie- und CO<sub>2</sub>-Effizienz von ICEs bis zu 30% verbessert werden.*

*Mittelklassewagen und größere Autos mit überdurchschnittlicher Fahrtstrecke treffen auf 50% aller Autos zu und sind für 75% der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. FCEVs sind deshalb für einen großen Teil der Fahrzeugflotte eine effektive kohlenstoffarme Lösung. Nach 2030 haben sie in den größten Fahrzeugsegmenten einen TCO-Vorteil gegenüber BEVs und PHEVs (siehe unten).*

## *2. Nach 2025 fließen die Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership / TCO) aller Antriebssysteme zusammen.*

In der Studie basiert der ökonomische Vergleich zwischen den Antriebssystemen auf den Gesamtbetriebskosten (TCO), da sie die Kosten, die mit der gesamten Lebensdauer assoziiert sind, beschreiben (siehe Seite 18). Um einen echten Vergleich zu garantieren sind keine Steuern enthalten, außer wenn dies spezifisch angegeben ist.

Es wird erwartet, dass BEVs und FCEVs höhere Einkaufspreise als ICEs (auf Batterien und Brennstoffzellen bezogen) und geringere Treibstoffkosten (wegen der größeren Effizienz und wegen des Verzichts auf die Verwendung von Öl) sowie niedrigere Wartungskosten (weniger drehende Teile) haben.

Es wird erwartet, dass die Kosten von Brennstoffzellensystemen bis 2020 um 90% und die Kosten für BEVs aufgrund von Skaleneffekte und zunehmender Verbesserungen der Technologie um 80% fallen werden. Rund 30% der Technologieverbesserungen bei BEVs und PHEVs betreffen auch FCEVs und umgekehrt. Das setzt voraus, dass FCEVs und BEVs massenhaft produziert werden,

<sup>10</sup> Der in der Studie für BEVs und PHEVs gewählte Bereich spiegelt die aktuelle Sicht der Kraftfahrzeughersteller über die besten Kompromisse zwischen Reichweite, Kosten und Ladekapazität für das Fahrzeug wieder

<sup>11</sup> Bei Autos aus dem C/D-Segment wird dies mittelfristig auf 150-250 km anwachsen

wobei die bereitgestellte Infrastruktur eine Schlüsselvoraussetzung sein wird. Die Kosten für Wasserstoff werden bis 2025 ebenfalls aufgrund höherer Nutzung der Treibstoffinfrastruktur und der Skaleneffekte um 70% fallen.

PHEVs sind kurzfristig ökonomischer als BEVs und FCEVs. Der Abstand verringert sich allmählich, und bis 2030 werden PHEVs preislich wettbewerbsfähig mit BEVs für kleinere Autos, mit BEVs und FCEVs für Mittelklasseautos und weniger preisgünstig als FCEVs für größere Autos.

Während von der Treibstoffwirtschaftlichkeit von ICEs erwartet wird, dass sie sich bis 2020 durchschnittlich um 30% verbessert, steigen die Kosten aber auch aufgrund der vollständigen Hybridisierung und weiterer Maßnahmen wie der Verwendung von Materialien mit geringerem Gewicht.

Von den TCOs aller vier Antriebssysteme wird erwartet, dass sie sich nach 2025 annähern – oder früher durch Steuerbefreiungen und/oder Anreize während der Anlaufphase.

Für größere Autos wird erwartet, dass die TCO von FCEVs ab 2030 niedriger liegen werden als die von PHEVs und BEVs. Bis 2050 sind sie auch (signifikant) niedriger als die von ICEs. Bei Mittelklassewagen nähern sich die TCOs für alle Technologien bis 2050 an. BEVs haben in den kleineren Fahrzeugsegmenten einen (kleinen) TCO-Vorteil gegenüber FCEVs.

*PHEVs sind kurzfristig ökonomischer als BEVs und FCEVs. Alle Elektrofahrzeuge sind bis 2025 machbare Alternativen zu ICEs, wobei BEVs für kleiner Autos und kürzere Fahrten, FCEVs für mittlere / größere Autos und größere Fahrten geeignet sind. Durch Steueranreize könnten BEVs und FCEVs ab 2020 in den Kosten mit ICEs konkurrenzfähig sein.*

### **3. Ein Portfolio von Antriebssystemen kann die Bedürfnisse von Verbrauchern und Umwelt befriedigen**

BEVs haben eine geringere Reichweite als FCEVs, PHEVs und ICEs: Ein durchschnittliches mittelgroßes BEV mit maximaler Batterieaufladung kann bei 120 km/h auf der Autobahn nicht mehr als 150 km fahren, wenn von realen Fahrbedingungen ausgegangen wird (und wenn man die bis 2020 zu erwartenden Verbesserungen berücksichtigt). Die Ladezeiten sind signifikant länger: 6–8 Stunden bei Verwendung einer normalen Aufladevorrichtung. Es könnte sich schnelleres Aufladen verbreiten, aber die negative Auswirkung auf die Batterieleistung und die Stromnetzstabilität ist unklar. Außerdem benötigt es 15–30 Minuten, um die Batterie (teilweise) aufzuladen. Ein Batterieaustausch reduziert die Tankzeit; es wird erwartet, dass dies machbar ist, wenn es alle zwei Monate oder weniger genutzt wird und von der Mehrheit der Kraftfahrzeughersteller Batteriestandards übernommen werden. BEVs sind deshalb ideal geeignet für kleinere Autos und den Stadtverkehr; im Vergleich zu heute können bis 2030 ~80% CO<sub>2</sub>-Reduzierung erreicht werden.

FCEVs haben eine mit ICEs vergleichbare Fahrleistung (ähnliche Beschleunigung), Reichweite (rund 600 km) und Auftankzeit (<5 Minuten). Sie stellen deshalb einen machbaren kohlenstoffarmen Ersatz für ICEs für mittlere / größere Autos und längere Fahrten dar; im Vergleich zu heute können bis 2030 potentiell ~80% CO<sub>2</sub>-Reduzierung erreicht werden.

PHEVs haben eine ähnliche Reichweite und Leistung wie ICEs, jedoch kann der Elektroantrieb nur für kurze Fahrstrecken genutzt werden, andererseits ist die verfügbare Menge von Biotreibstoffen für längere Fahrstrecken ungewiss. Sie sind jedoch eine attraktive Lösung, und CO<sub>2</sub> wird im Vergleich zu ICEs erheblich reduziert.

*In den nächsten 40 Jahren wird kein einzelnes Antriebssystem alle Schlüsselkriterien für Wirtschaftlichkeit, Leistung und Umwelt erfüllen. Die Welt wird deshalb wahrscheinlich von einem einzigen Antriebssystem (ICE) auf ein Portfolio von Antriebssystemen übergehen, in dem BEVs und FCEVs eine komplementäre Rolle spielen: BEVs sind ideal geeignet für Kleinwagen und kürzere Fahrstrecken, FCEVs für mittlere / größere Autos und längere Fahrstrecken, PHEVs sind eine attraktive Lösung für Kurzstrecken oder wenn nachhaltig hergestellte Biotreibstoffe verfügbar sind.*

#### *4. Die Kosten für eine Wasserstoffinfrastruktur betragen ca. 5% der Gesamtkosten für FCEVs (€ 1.000–2.000 pro Fahrzeug)*

Für Verbraucher, die größere Autos bevorzugen und größere Entfernungen fahren, haben deshalb FCEVs in einer CO<sub>2</sub>-eingeschränkten Welt klare Vorteile. Dieses Segment repräsentiert rund 50% der gefahrenen Autos und rechtfertigt deshalb eine geeignete Wasserstoffinfrastruktur. Der Vorteil von FCEVs gegenüber alternativen Antriebssystemen in Bezug auf TCO und Emissionen (einschließlich der Kosten für die Wasserstoffinfrastruktur) ist nach 2030 positiv. Die ökonomische Lücke vor 2030 wird fast völlig durch die höheren Einkaufspreise, nicht jedoch durch die Kosten der Wasserstoffinfrastruktur bestimmt. Man kann deshalb davon ausgehen, dass wenn dieses Verbrauchersegment FCEV bevorzugt, die Kosten der Infrastruktur (5% der TCO) die Einführung nicht behindern werden. Nachdem dies gesagt wurde, ist ein instrumentierter Investitionsplan notwendig, um die erste kritische Masse der Wasserstoffversorgung aufzubauen.

Zur Entwicklung eines Portfolios von Antriebssystemen sind mehrere Versorgungsinfrastruktur-Systeme notwendig – nicht nur für Benzin und Diesel, sondern auch potentielle neue Infrastrukturen für CNG, LPG, 100% Biotreibstoffe, Elektrizität und Wasserstoff. Eine frühe kommerzielle Einführung von BEVs und PHEVs erfolgt bereits in mehreren europäischen Ländern: Viele Kraftfahrzeughersteller haben bereits die Einführung neuer kommerzieller Modelle zwischen 2010 und 2014 angekündigt. Dieser Bericht fokussiert sich deshalb auf die kommerzielle Einführung von FCEVs, die noch angesprochen werden muss.

Man könnte argumentieren, dass es ineffizient ist, zusätzlich zu den existierenden Infrastrukturen eine weitere Fahrzeug-Betankungsinfrastruktur aufzubauen. Die zusätzlichen Kosten einer Wasserstoffinfrastruktur sind jedoch relativ niedrig im Vergleich zu den Gesamtkosten von FCEVs und vergleichbar mit anderen Treibstoffen und Technologien wie der Aufladeinfrastruktur für BEVs und PHEVs. Die Kosten für eine Wasserstoffdistributions- und Einzelhandelsinfrastruktur betragen rund 5% der Gesamtkosten für FCEVs – der größte Anteil entfällt auf die Kaufpreise. Die Attraktivität der Wirtschaftlichkeitsberechnung für FCEVs ist deshalb von den zusätzlichen Kosten kaum betroffen, die für Distribution und Einzelhandel nötig sind. Mit anderen Worten: Wenn FCEVs kommerziell sinnvoll sind – wie durch diese Studie dargelegt wird – ist der Aufbau einer geeigneten Wasserstoffinfrastruktur berechtigt.

In der ersten Dekade eines typischen Einführungszenarios sind die Kosten pro Fahrzeug für die Versorgungsinfrastruktur – insbesondere die für die Einzelhandelsinfrastruktur – anfangs aufgrund ihrer geringeren Nutzung höher. Trotzdem muss eine ausreichende Netzabdeckung für den Verbraucher verfügbar sein; die erforderlichen Erstinvestitionen für eine Region wie Deutschland können sich auf € 3 Milliarden belaufen (für Wasserstoffproduktion, Distribution und Einzelhandel). Obwohl ein einzelnes Unternehmen zu kämpfen hätte, die Risiken für eine derartige Investition zu übernehmen, ist dies auf Gemeinschaftsebene nicht der Fall. Dies wird von Ländern bestätigt, die alternative Infrastrukturen wie LPG und CNG aufgebaut haben.

Die Kosten pro Fahrzeug für die Einführung einer Wasserstoffinfrastruktur sind mit der Einführung einer Aufladeinfrastruktur für BEVs oder PHEVs vergleichbar. Die Kosten für Wasserstoff-Einzelhandel und -Distribution werden auf € 1.000–2.000 pro Fahrzeug (über die Lebensdauer) geschätzt, einschließlich der Distribution ab Produktionsbetrieb zur Einzelhandelsstation sowie Betriebs- und Kapitalkosten für die Einzelhandelsstationen selbst. Der Aufbau einer Infrastruktur für 25% Marktanteil von FCEVs erfordert Infrastrukturinvestitionen von rund € 3 Milliarden in der ersten Dekade und € 2–3 Milliarden pro Folgejahr. Die jährlichen Infrastrukturinvestitionen in Öl und Gas, Telekommunikation- und Straßeninfrastruktur belaufen sich auf jeweils € 50 – € 60 Milliarden<sup>12</sup>. Zusätzlich erforderliche Investitionen zur Dekarbonisierung des Energiesektors betragen € 20–30 Milliarden pro Jahr<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Global Insight

<sup>13</sup> [http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1\\_fullreport\\_PressPack.pdf](http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1_fullreport_PressPack.pdf)

Die derzeitigen Kosten für eine elektrische Aufladeinfrastruktur reichen von € 1.500 bis € 2.500 pro Fahrzeug. Überwiegend geht man von der Annahme von 50% Aufladung zuhause (Investition von € 200 – € 400 pro Aufladestation) und 50% öffentlichem Aufladen bei € 5.000 pro Aufladestation aus, die zwei Autos bedient (€ 10.000 in den ersten Jahren). Potentielle zusätzliche Investitionen in die Energievertriebsnetze sind nicht enthalten, könnten jedoch je nach örtlicher Situation wichtig werden. Sobald ein Gebiet abgedeckt ist, sind jedoch unabhängig von der Anzahl der Autos aufgrund der schnellen Auftankzeit keine weiteren Investitionen in die Wasserstoffinfrastruktur notwendig. Bei steigender Anzahl von FCEVs profitiert man auch hier von Skaleneffekten.

*Nach den Schlüsselannahmen der Studie (z. B. Null CO<sub>2</sub> aus Energie bis 2050<sup>14</sup>) muss Europa bis 2050 einen signifikanten Durchbruch elektrischer Autos erreichen, wenn es sein CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel erreichen will. Eine frühe kommerzielle Einführung von BEVs hat in mehreren europäischen Ländern bereits begonnen, die Infrastruktur für FCEVs muss jedoch adressiert werden.*

*Im Laufe der nächsten Dekaden liegen die Kosten für Wasserstoffdistribution und Einzelhandelsinfrastruktur bei 5% der Gesamtkosten von FCEVs (€ .000–2.000 pro Fahrzeug) und sind mit der Einführung einer Aufladeinfrastruktur für BEVs und PHEVs vergleichbar (ohne Aufrüstung des Potentials der Energievertriebsnetze). Die Attraktivität der Wirtschaftlichkeitsberechnung für FCEVs wird deshalb kaum von zusätzlichen Kosten betroffen, die für Distribution und Einzelhandel erforderlich sind: Wenn FCEVs kommerziell sinnvoll sind – wie durch diese Studie dargelegt wird – ist der Aufbau einer geeigneten Wasserstoffinfrastruktur berechtigt.*

## 5. Die Einführung von FCEVs führt in den ersten Jahren zu Kosten für die Gesellschaft

Die Vorteile niedrigerer CO<sub>2</sub>-Emissionen, niedrigerer lokaler Emissionen (NO<sub>2</sub>, Partikel), Diversifikation der Primärenergiequellen und des Überganges zu erneuerbarer Energie führen alle zu Einführungskosten. Diese werden letztendlich durch die Reduzierung der Batterie- und Brennstoffzellenkosten, durch Skaleneffekte und potentiell ansteigende Kosten für fossile Brennstoffe und ICE-Spezifikationen an Bedeutung verlieren.

Ein Einführungsszenario, das von 100.000 FCEVs im Jahr 2015, 1 Million in 2020 und einem Anteil von 25% am gesamten EU-Personenwagenmarkt 2050 ausgeht, ergibt eine kumulative ökonomische Lücke von ungefähr € 25 Milliarden bis 2020 – hauptsächlich aufgrund der Kosten für die Brennstoffzellensysteme in der nächsten Dekade, aber auch einschließlich rund € 3 Milliarden für eine Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur. Es wird erwartet, dass die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten 2030 zwischen € 150 und € 200 pro Tonne liegen und für größere Autos nach 2030 noch negativer werden.

Eine Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur für rund 1 Million FCEVs bis 2020 erfordert eine Investition von € 3 Milliarden (Produktion, Distribution, Einzelhandel), wovon € 1 Milliarde auf die Einzelhandelsinfrastruktur entfällt – konzentriert auf Bereiche mit hoher Dichte (Großstädte, Autobahnen) und Baumassnahmen an der existierenden Infrastruktur. Wenn nur ein einzelnes Energieunternehmen in die Wasserstoff-Einzelhandelsinfrastruktur investieren würde, hätte es den Nachteil des Erstanbieters aufgrund der anfangs niedrigen Nutzung durch eine geringe Anzahl von FCEVs und das Risiko von fehlerhafter oder verzögerter Technologiebereitstellung. Im letzteren Fall würde das zu einer möglichen Abschreibung von Hunderten Millionen Euro pro Jahr führen. Die Risiken der Anfangsinvestitionen können etwas reduziert werden, wenn mehrere Unternehmen ebenfalls investieren, und noch mehr, wenn die Einführung durch adäquate Vorsichtsmaßnahmen und Risikoübernahmen, mit einem Wort durch Regierungen unterstützt wird.

<sup>14</sup> Der Energieversorgungsweg, der diesem Bericht zugrunde liegt, basiert auf der European Climate Foundation „Roadmap 2050“, die in Kooperation mit der Industrie entwickelt wurde und einen Weg zur Dekarbonisierung des Energiemix der EU bis 2050 beschreibt – siehe Seite 24

Wasserstoffhersteller haben – sobald die Wirtschaftlichkeit vorliegt – einen Anreiz, ihre Rivalen zu schlagen. Während finanzielle Anreize notwendig sind, um Verbraucher von der Attraktivität der FCEVs zu überzeugen, kann nichts die Wasserstoffhersteller zurückhalten – solange die Einzelhandelsinfrastruktur vorhanden ist. Infrastrukturanbieter tragen andererseits das Erstanbieterrisiko, da sie in große Vorleistungen gehen, um ein Netz aus Einzelhandelsstationen aufzubauen, das einige Jahre lang nicht ausgelastet wird; die Einheitskosten reduzieren sich im Laufe der Zeit, da die festen Kapitalkosten durch eine steigende Anzahl von FCEVs genutzt werden.

Die kumulative ökonomische Lücke von rund € 25 Milliarden für FCEVs bis 2020 ist auf einer globalen kumulativen FCEV-Produktion kalkuliert und hat ihre Hauptursache in höheren Kaufpreisen. Wenn sie nur durch einige Kraftfahrzeughersteller gefüllt wird, müssen sie rund € 1 Milliarde pro Jahr finanzieren. Eine Überbrückung dieser Lücke könnte durch adäquate staatliche Maßnahmen und globale Kooperation erleichtert werden. Nach 2030 kann man sinnvollerweise davon ausgehen, dass die Mehrheit der Verbraucher aus finanziellen Gründen ihre Fahrzeugwahl je nach der Höhe der Steuern und den gesetzlichen Vorschriften trifft.

Ist dies stabil und eindeutig, so können Kraftfahrzeughersteller, Wasserstoffhersteller und Infrastrukturanbieter alle Investitionen auf der Basis erkannter Risiken und projektierter Gewinne machen. Eine globale Einführung würde die ökonomische Lücke für Europa weiter reduzieren.

Es ist ein starkes Argument erforderlich, um die Regierungen von der explizit erforderlichen Subventionshöhe zu überzeugen. In den nachfolgenden Schritten ist es deshalb wichtig, Vorschläge zu machen, die zeigen, wie die Industrie die Verantwortung für alle Risiken übernimmt, die sie angemessen analysieren, kontrollieren und entschärfen kann. Diskussionen mit den Mitgliedsstaaten und EU-Regierungen fokussieren sich auf die Aufteilung der Kosten und Risiken zwischen den öffentlichen und den privaten Sektoren.

*Der entstehende FCEV-Markt (2010–2020) erfordert eine enge Synchronisation der Wertschöpfungskette und externe Stimulation, um die Erstanbieterrisiken beim Aufbau einer Wasserstoff-Einzelhandelsinfrastruktur zu bewältigen. Während die Anfangsinvestitionen relativ niedrig sind, sind die Risiken hoch und deshalb nur dann stark reduziert, wenn viele Unternehmen investieren, koordiniert durch Regierungen und unterstützt durch geeignete Gesetzgebung und Finanzierung. Ist der Markt etabliert, werden Folgeinvestition (2020–2030) eine signifikante Risikoreduzierung aufweisen; Bis 2030 wird erwartet, dass die verbleibende ökonomische Lücke direkt an die Verbraucher weitergegeben wird.*

## ZUSAMMENFASSUNG DER NÄCHSTEN SCHRITTE

Investitionszyklen in die Energieinfrastruktur sind lange; BEV- und FCEV-Infrastruktur und -Ausweitung sollten so schnell wie möglich initiiert werden, um diese Technologien als wichtige Transportoptionen ab 2020 zu entwickeln. Kurzfristig werden CO<sub>2</sub>-Emissionen durch effizientere ICEs und PHEVs reduziert werden müssen – in Kombination mit Biotreibstoffen – während man zwei konkrete Maßnahmen ergreift.

### 1. Prüfung des Startplans des EU-Markts für FCEVs und Wasserstoff-Infrastruktur

Kraftfahrzeughersteller haben signalisiert, dass sie bereit sind, FCEVs in Massenproduktion herzustellen, wie dies im Letter of Understanding 2009 dargestellt ist (siehe Seite 13). Diese Studie zeigt, dass FCEVs technologisch bereit sind und in den nächsten fünf Jahren zu wesentlich niedrigeren Kosten für einen frühen kommerziellen Markt hergestellt werden können. Der nächste logische Schritt ist deshalb, eine umfassende und koordinierte Untersuchung eines Startplan für den EU-Markt für die Einführung von FCEVs und der Wasserstoffinfrastruktur in Europa aufzustellen (siehe Seiten 52–53).

Dieser besteht aus zwei Phasen:

- Eine tiefgreifende Wirtschaftlichkeitsberechnung und ein Implementierungsplan für einen einzelnen Mitgliedsstaat (z. B. Deutschland), um die Risiken der Kommerzialisierung der Technologie zu vermindern und die Versorgungskette für den Rest von Europa, beginnend 2015, zu testen. Gleichzeitig sollte eine Reihe subventionierter FCEV-Vorfühprojekte in anderen Mitgliedsstaaten beginnen, um Erfahrungen mit der Technologie zu gewinnen.
- Ein potentieller abgestufter Einführungsplan – zunächst eine Markteinführung in Mitgliedsstaaten, die durch Vorfühprojekte Erfahrungen gesammelt haben, gefolgt von weiteren Mitgliedsstaaten.

Der Implementierungsplan sollte für Investitionen von Unternehmen und dem öffentlichen Bereich bereit sein. Dazu gehört es, die mit dem Plan verbundenen Risiken zu adressieren, wie Wasserstoff dekarbonisiert wird und wie aus Sicht des Transportsektors die Wirkung auf künftige CO<sub>2</sub>-Emissionen ist.

Die Dynamik des Aufbaus einer Wasserstoff-Einzelhandelsinfrastruktur ist so geartet, dass es eine begrenzte Möglichkeit gibt, Vorteile als „Frühstarter“ zu erhalten, wobei die ersten „Player“ nicht in der Lage sein werden, jegliche Verluste auszugleichen. Sie werden im Gegenteil den Markt für alle anderen Infrastrukturanbieter aufbauen, die dann in einem späteren Stadium die Vorteile ernten werden. Wenn jedoch mehrere Anbieter in Wasserstoff-Einzelhandelsinfrastrukturen investieren – oder ein marktbasierter Mechanismus entwickelt wird, um die Risiken auf verschiedene Infrastrukturanbieter zu verteilen – wird keiner ein „Trittbrettfahrer“ sein können. Der Markteinführungsplan muss deshalb Hand-in-Hand mit geeigneten staatlichen Vorschriften erfolgen.

Nachdem die Risiken der Technologie verringert und Kostenreduzierungen in einem Mitgliedsstaat erreicht wurden – und gleichzeitig weitere Erfahrungen mit einer Reihe von Demonstrationsprojekten in anderen Mitgliedsstaaten gesammelt wurden – muss ein abgestufter Einführungsplan für die nachfolgende Einführung in anderen Mitgliedsstaaten untersucht werden. Er adressiert Versorgungseinschränkungen von Kraftfahrzeugherstellern und Wasserstoffinfrastrukturanbietern und die primären Energieressourcen verschiedener Mitgliedsstaaten sowie die CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele für den Transportsektor als Ganzes.

## *2. Koordination der Einführung von BEVs/PHEVs und der Batterieaufladeinfrastruktur*

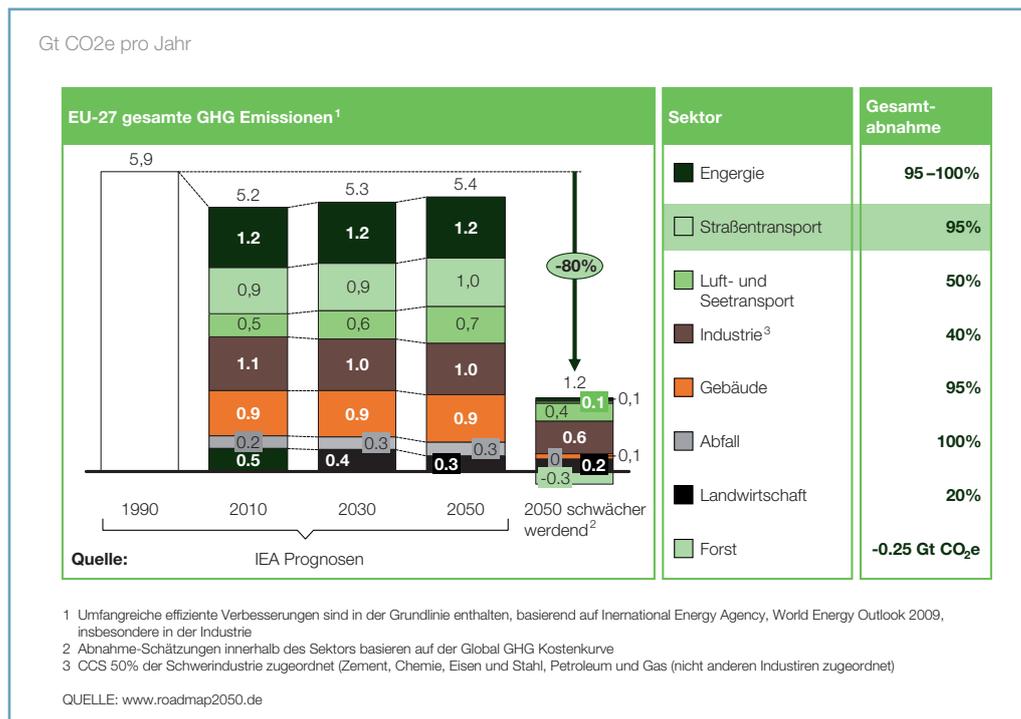
Eine ähnliche Maßnahme wäre zur Unterstützung der Einführung von BEVs und PHEVs in der EU hilfreich. Auch hier existiert das Risiko eines Marktversagens. Obwohl die Investitionen für elektrische Wiederaufladestationen niedrig sind, bleibt ein finanzielles Risiko für Infrastrukturanbieter. Wie bei der Wasserstoffinfrastruktur sind für das öffentliche Aufladen Vorab-Investitionen erforderlich, damit die Verbraucher von Anfang an einen angemessenen Zugang zu dieser Infrastruktur haben.

Um eine solide Markteinführung zu erreichen, muss auch das kommerzielle Risiko der Technologie verringert werden; Programme für BEVs existieren derzeit in einigen europäischen Ländern und auf EU-Ebene, die Themen wie Technologie, Markteinführung, Finanzierungspläne und Standardisierung etc. adressieren. Ein kohärenter Ansatz zu diesen Aktivitäten würde helfen, die Entwicklung zu optimieren und eine frühzeitige Marktreife zu unterstützen.

# EINFÜHRUNG

## Das CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel der EU für 2050 erfordert die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs um 95%

2009 hatten die Europäische Union (EU) und die G8-Führer vereinbart, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um 80% reduziert werden müssen, wenn sich das atmosphärische CO<sub>2</sub> bei 450 ppm<sup>1</sup> stabilisieren und die globale Erwärmung unter dem sicheren Level von 2° C bleiben soll. Eine Gesamt-Dekarbonisierung um 80% bis 2050 erfordert eine Dekarbonisierung des Straßenverkehrssektors um 95%<sup>2</sup> (Grafik 1).



Grafik 1: Um bis 2050 das Ziel der EU einer CO<sub>2</sub>-Reduzierung um 80% zu erreichen, muss der Straßenverkehr eine Dekarbonisierung um 95% erzielen

Die Dekarbonisierung kann durch Effizienz, Biotreibstoffe und elektrische Antriebssysteme (einschließlich Wasserstoff) erreicht werden. Mit einer bis 2050 auf 273 Millionen steigenden Anzahl von Personenkraftwagen in Europa<sup>3</sup> – und auf 2,5 Milliarden<sup>4</sup> weltweit – kann eine vollständige Dekarbonisierung nicht nur durch Verbesserung der traditionellen Verbrennungsmotoren oder durch alternative Treibstoffe erreicht werden. Eine umfassende Untersuchung könnte hilfreich sein zur Bestimmung des realen globalen Potentials von Biotreibstoffen und für welche Bereiche und Regionen sie am effektivsten genutzt werden können.

In Kombination mit der ansteigenden Verknappung und den Kosten der Energieressourcen ist es deshalb unabdingbar, ein Spektrum von Technologien zu entwickeln, um die langfristige Nachhaltigkeit der Mobilität in Europa zu sichern, gemäß der Europäischen Kommission mit „ultra-kohlenstoffarmen elektrischen Antriebssystemen und Wasserstoff-Brennstoffzellen als Optionen, die am meisten versprechen“<sup>5</sup>. Diese Studie wurde deshalb durchgeführt, um Leistung und Kosten alternativer Antriebssysteme für Personenkraftwagen – Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs),

1 CO<sub>2</sub>-Äquivalent

2 McKinsey Global GHG Abatement Cost Curve; International Energy Agency World Energy Outlook 2009; US Environmental Protection Agency; European Environment Agency (EEA)

3 Parc Auto Survey 2009, Global Insight 2010; Studienanalyse

4 Europäische Kommission, April 2010

5 COM (2010) 186: Eine europäische Strategie für saubere und energieeffiziente Fahrzeuge, veröffentlicht im April 2010

batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEVs) und Plug-in-Hybridfahrzeuge (PHEVs) – mit denen konventioneller Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (bekannt als ICEs) zu vergleichen. Dazu gehört jeder Schritt in der Wertschöpfungskette oder der „Kraftstoffpfad,, (Well-to-Wheel).

### *Elektrofahrzeuge (BEVs, FCEVs und PHEVs) sind notwendig, um das CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel der EU zu erreichen.*

Die Vorteile von Elektrofahrzeugen (BEVs, FCEVs und PHEVs mit Elektroantrieb) gegenüber ICEs:

- Elektrofahrzeuge sind während der Fahrt emissionsfrei – signifikante Verbesserung der lokalen Luftqualität. Je nach der verwendeten primären Energiequelle können sie fast CO<sub>2</sub>-frei gemacht werden<sup>6</sup>. Emissionsfreie Antriebssysteme gehen deshalb Hand-in-Hand mit der Dekarbonisierung der Energieversorgung mit dem Potential, Emissionen aus der zentralen Wasserstoffproduktion bis 2050 vollständig zu löschen.
- Elektrofahrzeuge können durch ein breites Spektrum primärer Energiequellen – einschließlich Gas, Kohle, Öl, Biomasse, Wind, Solar- und Nuklearenergie – betankt werden, wodurch die Abhängigkeit von Öl reduziert und die Energiesicherheit vergrößert wird (z. B. durch Stabilisierung eines zunehmend volatilen Stromnetzes).
- Obwohl ICEs das Potential haben, ihre CO<sub>2</sub>-Bilanz durch verbesserte Energieeffizienz zu reduzieren, ist dies zur Erfüllung des CO<sub>2</sub>-Reduktionsziels der EU für 2050 unzureichend. Eine vollständige Dekarbonisierung durch Biotreibstoffe hängt von ihrer Verfügbarkeit ab.

### *Technologisch bereit fokussieren sich FCEVs nun auf die kommerzielle Einführung*

Mehr als 30 Interessenvertreter kamen zusammen, um eine Faktenbewertung der vier Antriebssysteme und ihrer Rolle bei der Dekarbonisierung des Straßenverkehrs zu entwickeln. Insbesondere wurde die Wichtigkeit der Rolle von FCEVs im Licht des technologischen Durchbruchs bei Brennstoffzellen und elektrischen Systemen neu bewertet, die nun ihre Effizienz und Kostenwettbewerbsfähigkeit signifikant verbessert haben (Grafik 2). Frühere Studien<sup>7</sup> sagten voraus, dass alle technologischen Herausforderungen innerhalb von einigen Jahren simultan adressiert werden. In Wirklichkeit erfolgte dies aber aufeinanderfolgend mit stetigen, aber signifikanten Verbesserungen in allen wichtigen Bereichen:

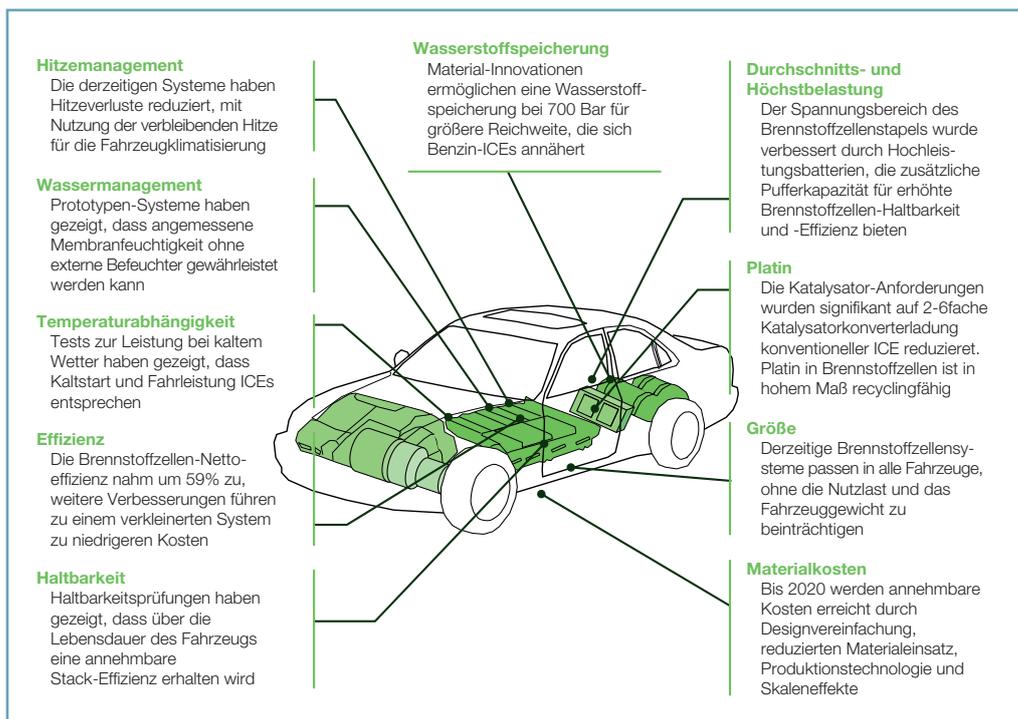
- Mit der Implementierung der 700 bar Speichertechnologie wurde die Speicherkapazität von Wasserstoff erhöht – ohne Volumen einzubüssen – was zu Reichweiten führt, die an Benzin-ICEs herankommen. Insgesamt wurden Sicherheitsbelange adäquat adressiert.
- Kaltstart ist bis –25° C oder sogar niedriger möglich dank der Anwendung von Reinigungsstrategien beim Ausschalten und neuer Materialien (z. B. metallische bipolare Platten), die das Hitzemanagement in den Brennstoffzellen optimiert haben.
- Durch verbesserte Kenntnisse der Mechanismen in Bezug auf die Haltbarkeit und durch die Implementierung von Gegenmaßnahmen wie erweiterte Materialien (z. B. funktionalisierter oder nano-strukturierter Katalysatorsupport) und Management der Zellenspannung wurde die Haltbarkeit (und damit die Kosten) signifikant verbessert.
- Durch die Entwicklung von CCS würde ein zusätzlicher Weg zur Wasserstoffproduktion zu niedrigen Kosten und mit wenig CO<sub>2</sub> verfügbar gemacht.

<sup>6</sup> Dies wird im Allgemeinen durch die Kraftstoffpfad-Emissionen dargestellt, die die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Treibstoffproduktion mit deren Transformationen durch das Antriebssystem integrieren (siehe Anhang, Grafik 43, Seite 54)

<sup>7</sup> Siehe Anhang, Grafik 44, Seite 55

Es wurden allgemeine Standards für Wasserstoff- und FCEV-Ausrüstung vereinbart, die ihre Komplexität und die Kosten weiter reduzieren: Standardanschlüsse, Sicherheitslimits und Leistungsanforderungen für die Wasserstoffbetankung wurden durch mehrere SAE- und ISO<sup>8</sup>-Standards festgelegt, während das elektrische System die SAE- und ISO-Sicherheitsstandards bereits vollständig erfüllt.

Mit über 500 Personenkraftwagen – großen und kleinen – die über 15 Millionen Kilometer gefahren sind und 90.000 Auftankungen<sup>9</sup> vorgenommen haben, werden FCEVs nun als in einer Verbrauchermgebung umfassend getestet betrachtet. Das Ergebnis: Der Fokus hat sich nun von der Vorführung hin zur kommerziellen Einführung verschoben, sodass FCEVs wie alle Technologien von Massenproduktion und Skaleneffekten profitieren können.



Grafik 2: Nach der Lösung aller technologischen Hürden hat sich nun der Fokus für FCEVs von der Vorführung hin zur kommerziellen Einführung verschoben.

Dies wurde im „Letter of Understanding“ vom September 2009 deutlich signalisiert, der von den führenden Kraftfahrzeugherstellern<sup>10</sup> herausgegeben wurde, worin sie als ihr Ziel angeben, FCEVs bis 2015 zu kommerzialisieren, indem sie danach Hunderttausende von Fahrzeugen weltweit einführen – ausgehend davon, dass eine ausreichende Infrastruktur zum Wasserstoffauftanken vorhanden ist. Dies war ein Auslöser für die eingehende Bewertung der vier Antriebssystem-Technologien, die in dieser Studie behandelt wurden.

Es wurde eine öffentlich-private Partnerschaft etabliert, H<sub>2</sub>-Mobilität genannt, die nun einen Businessplan für den Aufbau einer Infrastruktur für die Wasserstoffbetankung in einem einzelnen Mitgliedsstaat entwickelt (z. B. Deutschland) – begleitet von einer Reihe von Demonstrationsprojekten in anderen Mitgliedsstaaten – als essentielle erste Schritte zur vollständigen EU-Einführung (siehe Seiten 52–53).

<sup>8</sup> SAE International (früher Society of Automotive Engineers), die anerkannte Autorität in Bezug auf Standards für kommerzielle Fahrzeuge, zusammen mit ISO (International Organization for Standardization)

<sup>9</sup> Studiendaten

<sup>10</sup> Daimler AG, Ford Motor Company, General Motors Corporation/Opel, Honda Motor Co., Ltd., Hyundai Motor Company, Kia Motors Corporation, die Gemeinschaft von Renault SA und Nissan Motor Co., Ltd. und Toyota Motor Corporation

Das Zeitfenster für diese Möglichkeiten ist klein. Wenn FCEVs innerhalb des Zeitrahmens, der notwendig ist, um die CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele zu erfüllen, Skaleneffekte erreichen sollen, müssen vordringlich zu behandelnde Maßnahmen ergriffen werden. Es besteht auch die Gefahr, dass Europa seine technologische Führung verliert, da die restlichen internationalen Märkte an Boden gewinnen. Die Europäische Kommission hat bestätigt, dass „der globale Trend zu nachhaltigem Verkehr zeigt, dass die europäische Kraftfahrzeugindustrie nur durch die Führung bei den grünen Technologien konkurrenzfähig bleiben kann“<sup>11</sup>.

Realität ist, dass kein Verkehrsmodell über Nacht geändert werden kann – es erfordert Vorbereitung und das Anlaufen der Produktion. „Reflexartige Reaktionen“ als Antwort auf externe Faktoren wie Ölpreissteigerungen, Versorgungsengpässe und die verheerenden Folgen der globalen Erwärmung werden zu wenig sein und zu spät kommen.

### *Alle Schlussfolgerungen basieren auf geschützten Industriedaten*

Diese Studie stellt bis dato die genaueste Studie dar<sup>12</sup>, da die Schlussfolgerungen nicht auf informierten Spekulationen, sondern auf essentiellen vertraulichen und geschützten Daten basieren, die von führenden Playern der Industrie bereitgestellt wurden. Dies ermöglichte einen echten Vergleich der Antriebssysteme, wobei alle zugrunde gelegten Annahmen klar dargestellt wurden (siehe Abschnitt Methodik, Seiten 15–25).

Um eine integrierte Perspektive über die gesamte Wertschöpfungskette vorlegen zu können, adressiert die Studie fünf Schlüsselfragen:

1. Wie sieht ein Vergleich von BEVs, FCEVs und PHEVs mit ICEs auf der Kraftstoffpfad- Basis mittel- bis langfristig in Bezug auf Emissionen, Leistung und Kosten aus?
2. Was sind die Schlüsselfaktoren in Bezug auf Fahrzeuggröße, Fahrleistung, Versorgungstechnologie und Langfristigkeit?
3. Was sind die potentiellen Marktsegmente?
4. Wie kann man Treibstoff-, Elektrizitäts- und Wasserstoff-Produktion, -Distribution und -Einzelhandelskanäle vergleichen?
5. Was ist auf einem hohen Niveau erforderlich, um Elektrofahrzeuge (BEVs, FCEVs, PHEVs) in solchen Größenordnungen einzuführen, dass die Gesellschaft von signifikanter Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen, Vergrößerung der Energiesicherheit und Verbesserung der Luftqualität profitiert, ohne dass ihre aktuellen Erwartungen an Mobilität beeinträchtigt werden?

#### **Der positive Effekt von Elektrofahrzeugen auf die öffentliche Gesundheit**

*Die Vorteile von Elektrofahrzeugen (BEVs, FCEVs und PHEVs im elektrischen Modus) gehen weit über die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs und die Energiesicherung hinaus; sie adressieren die grundlegenden Punkte von Luftverschmutzung und verstopften Städten insgesamt: Die Abgase von ICEs emittieren nicht nur CO<sub>2</sub>, sondern auch lokale Schadstoffe<sup>13</sup> wie Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide. Dieselfahrzeuge emittieren darüber hinaus Partikel, die als Feinstaubemissionen oder Russ bekannt sind. Obwohl diese Emissionen durch Katalysatoren verringert wurden, werden alle Schadstoffe, die nicht verarbeitet werden können, in die Atmosphäre freigegeben, wodurch die Luftqualität herabgesetzt und die Fähigkeit der Großstädte reduziert wird, ihre Luftqualitätsziele zu erreichen. Auf der anderen Seite sind Elektrofahrzeuge in ihrem „Tank-to-Wheel“ Prozess emissionsfrei; die Emissionen beschränken sich auf den „Well-to-Tank“ Prozess, der weit entfernt vom Fahrzeug selbst stattfindet. Die Emissionen hängen auch von der genutzten Primärenergiequelle ab und können potentiell auf Null reduziert werden. Und im Gegensatz zu ICEs sind Elektrofahrzeuge praktisch geräuschlos, sie reduzieren also die Lärmbelästigung signifikant.*

<sup>11</sup> Europäische Kommission, April 2010

<sup>12</sup> Weitere Studien, die berücksichtigt wurden, sind „Hydrogen Highway“: [www.hydrogenhighway.com](http://www.hydrogenhighway.com); Roads2HyCom project [www.roads2hy.com](http://www.roads2hy.com); „On the road in 2035“, veröffentlicht 2008; „The Hydrogen Economy“, veröffentlicht 2009; „Hydrogen Production Roadmap: Technology Pathways to the Future“, veröffentlicht 2010.

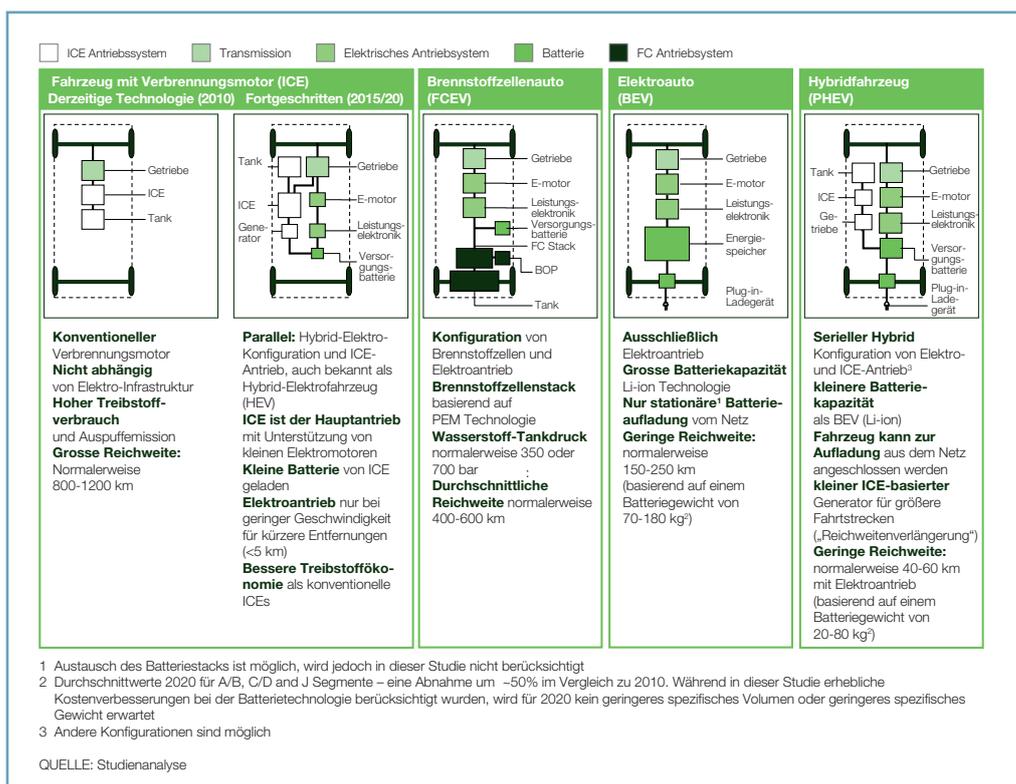
<sup>13</sup> Dies trifft sogar zu, wenn 100% Biotreibstoffe verwendet werden.

# METHODIK

Diese Studie bietet einen Faktenvergleich von vier verschiedenen Antriebssystemen (Grafik 3) – BEVs, FCEVs, PHEVs und ICEs – in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Leistung über die gesamte Wertschöpfungskette<sup>1</sup> zwischen jetzt und 2050, basierend auf vertraulichen und geschützten Industriedaten. Dies wurde möglich durch die zentrale Rolle eines unabhängigen Beraters und eine strikte Trennung zwischen dem „Clean Team“ des Beraters, das für die Erfassung des Inputs, und dem „Analyseteam“, das für die Generierung des Outputs verantwortlich ist.

Für jeden Schritt der Wertschöpfungskette wurden Daten vorgelegt, hinterfragt und erforderlichenfalls bewertet und beurteilt – einschließlich Einkaufspreise, Betriebskosten, Treibstoff sowie Infrastruktur. Da es möglich ist, dass bahnbrechende Technologien auf dem derzeitigen Weg der nachhaltigen Mobilität schrittweise Änderungen aufweisen, berücksichtigte die Studie nur Fahrzeugtechnologien, die sich heute in Forschung und Entwicklung bereits bewährt haben – und dies in vielen Fällen demonstriert haben – und die somit bereit sind a) zu Produktionssteigerung und kommerzieller Einführung und b) zur Erfüllung der CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele für 2050.

**Um ein realistisches Ergebnis sicherzustellen wurde vereinbart, dass alle Schlussfolgerungen auf der Basis von Durchschnittswerten gezogen werden, die aus der bereitgestellten Palette entnommen wurden, ohne „Rosinen herauspicken“, der günstigsten Daten.**



Grafik 3: Die Studie fokussierte sich auf ein Portfolio von Antriebssystemen: BEVs, FCEVs, PHEVs und ICEs unter Berücksichtigung bedeutender Fortschritte in der ICE-Technologie zwischen heute und 2020

Um sicherzustellen, dass kein bestimmtes Antriebssystem bevorzugt wurde, umfasste die Studie eine ausgeglichene Mischung von Fahrzeuggrößen (als „Segmente“ bekannt), die die Mehrheit der Fahrzeuge repräsentieren, die derzeit auf dem Markt sind, und über die es eine hohe Datenverfügbarkeit bei den Studienteilnehmern gibt (Grafik 4). Es wurden Durchschnittswerte für Fahrzeugflotten im Gegensatz zu spezifischen Autos genommen.

1 Allgemein als „Well-to-Wheel“ – „Kraftstoffpfad“ bezeichnet

■ Definierte Referenzsegmente

Fahrzeugsegment	Typische Eigenschaften	Beispiel	EU-Fahrzeugproduktion 2008, %
 A – City	<3,800 mm 3 door hatchback 8k-15k	Hyundai i10 Smart	6
 B – Supermini	3,700-4,200 mm 5 door hatchback 10k-20k	Toyota Yaris Mercedes A	23
 C – Medium	4,000-4,500 mm 5 door hatchback 15k - 25k	Honda Civic Ford Focus	23
 D – Upper medium	4,400-5,000 mm 4 door sedan 25k-45k	Renault Laguna Honda FCX Mercedes C	13
 E – Large	4,700-5,100 mm 4 door sedan 40k-120k	Mercedes E/S Lexus GS	5
 F – Luxury	2/4 door sedan > 100k	Maybach	<1
 S – Sport	2 door coupe > 30k	Mercedes CLK Nissan 370Z	<1
 M1 – Small MPV	3,900-4,400 mm 5 door MPV 10k - 30k	Mercedes B Renault Scenic	12
 M2 – Large MPV	>4,400 mm 5 door MPV 25k-50k	Mercedes R	9
 J1 – Small SUV	3,700-4,000 mm 5 door 4x4 10k-30k	Hyundai Tucson Toyota RAV4	5
 J2 – Large SUV	4,000-5,100 mm 5 door 4x4 25k-75k	Toyota Highlander Ford Explorer	3

QUELLE: HIS Global Einblick 2010; Teilnehmerstudie

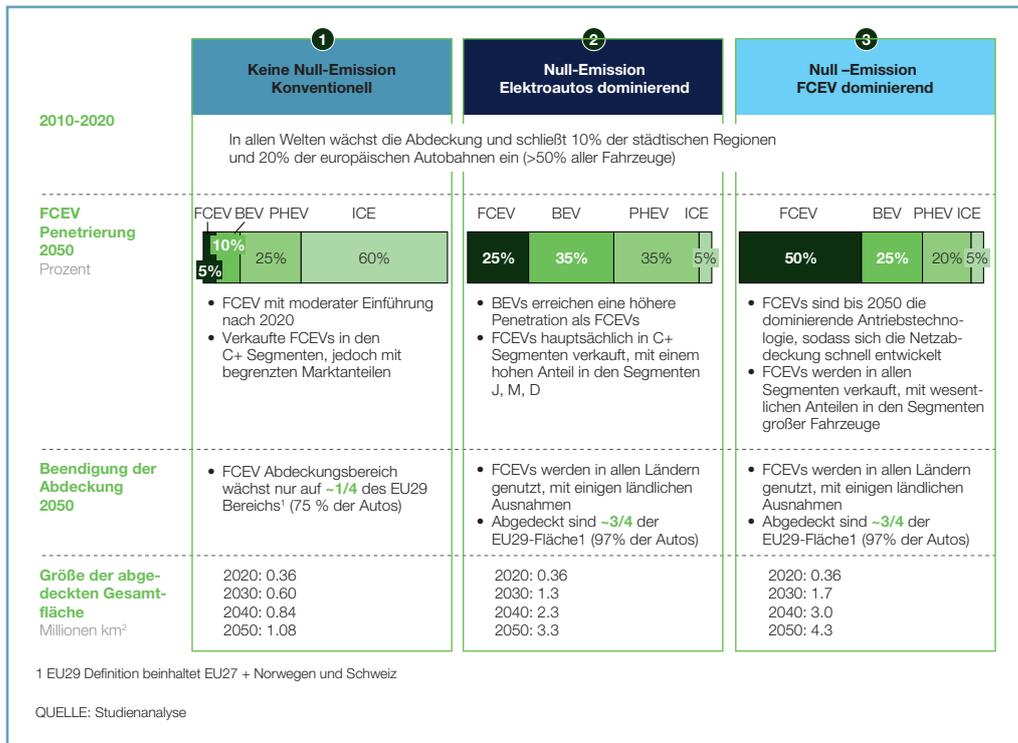
Grafik 4: Die Studie fokussiert sich auf Fahrzeugsegmente, die die Mehrheit des EU-Fahrzeugbestandes repräsentieren (75%) – ausgewählt wurden kleine (A/B), mittlere (C/D) und größere (SUV) Autos

### Ein ausgeglichenes Szenario für die Elektrifizierung von Personenkraftwagen in der EU bis 2050

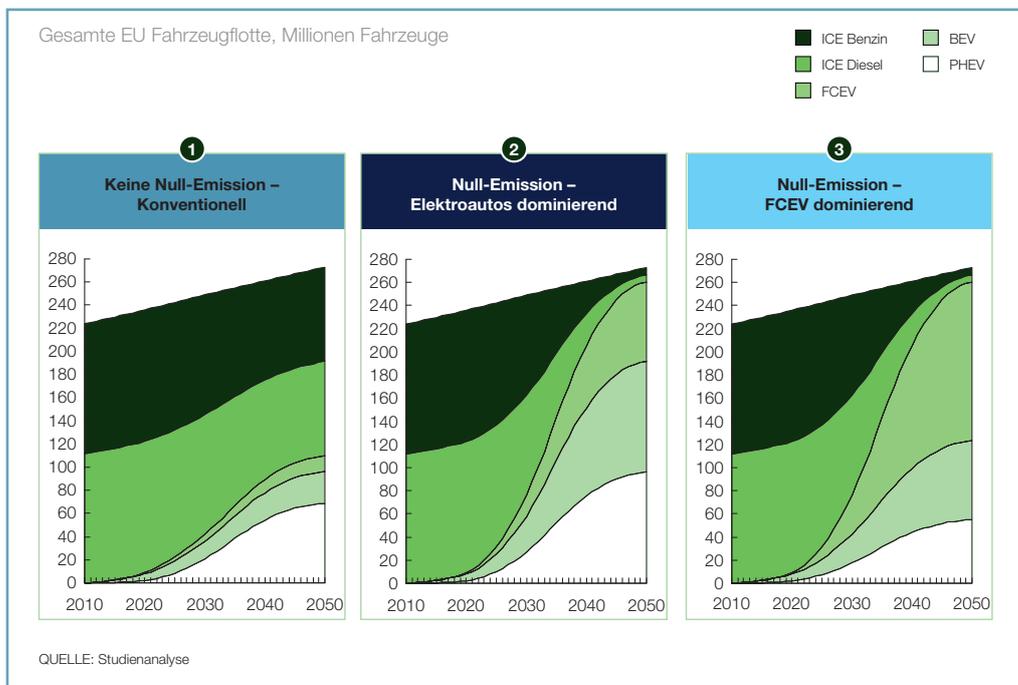
Zum Testen der Abhängigkeit einer größeren Marktreichweite von der Wirtschaftlichkeit hat sich die Studie drei „Welten“ mit unterschiedlichen Stufen der Penetration mit BEV, FCEV und PHEV (Grafik 5) vergegenwärtigt. Sie decken Folgendes ab:

- Das volle für die Zukunft erwartete Spektrum für Wasserstoff, Elektrizität und primäre Energiequellen
- Marktanteile und Segmentpenetrationsraten für die verschiedenen Antriebssysteme
- Abgedeckte Gebiete und Verfügbarkeit von Wasserstoff.

Alle „Welten“ gehen für 2050 von 273 Million Personenkraftwagen in der EU aus, mit einer Infrastruktur des Wasserstoff-Einzelhandelsnetzes, die in den am dichtesten bevölkerten Regionen beginnt (z. B. Großstädte) und wächst, um die Bedürfnisse der zunehmenden Fahrzeuggruppen zu befriedigen, was zur Einführung eines Massenmarktes führt. Der Fahrzeugbestand wird durch die Einführung von BEVs, FCEVs und PHEVs dort aufgebaut, wo sie gegenüber ICEs am wettbewerbsfähigsten sind (Grafik 6).



Grafik 5: Thesen für die drei „Welten“; jede zeigt ein anderes Penetrationsszenario für BEVs, FCEVs, PHEVs und ICEs in der EU 2050



Grafik 6: Für alle drei „Welten“ wird die Fahrzeugflotte von 2010 bis 2050 durch die Einführung von BEVs, FCEVs und PHEVs aufgebaut, wo sie gegenüber ICEs am wettbewerbsfähigsten sind

## Kombinierte Prognose mit Vor- und Rückschau zur Maximierung der Genauigkeit

Um sicherzustellen, dass alle Schlussfolgerungen so genau wie möglich sind, wurde von 2010 bis 2020 sowohl der Prognose- als auch der Backcastingansatz verwendet: Alle Kosten- und Leistungsprognosen basieren auf geschützten Industriedaten, nach 2020 auf projektiertem Lernen und jährlichen Verbesserungsraten. Diese prognostizierten Daten wurden dann von der vorhergesehenen Penetration der Antriebssysteme in der EU für 2050 aus zurückverfolgt, wie oben beschrieben. Die Ergebnisse zeigten, dass die Auswirkungen auf die Kosten für variierende FCEV-Penetrationen nicht signifikant ist<sup>2</sup> (siehe Anhang, Grafik 45, Seite 55):

- Man könnte erwarten, dass 5% Penetration von FCEVs nicht wettbewerbsfähig ist, aber das trifft nicht zu:
- Während die Europa-weite Autobahninfrastruktur eingeführt wird, könnte die große Anzahl der Fahrzeuge in Regionen mit höherer Bevölkerungsdichte verhindern, dass die Treibstoffkosten signifikant ansteigen.
- Eine Fokussierung auf die FCEV-Einführung in den Segmenten mittlerer / größerer Fahrzeuge, wo FCEVs am wettbewerbsfähigsten sind, hilft, die niedrigeren Skaleneffekte und die gestiegenen Fahrzeugkosten gegeneinander aufzurechnen.
- Vergleicht man 5% mit 25% FCEV-Penetration in 2050 auf einer flächenbereinigten Basis, so hat ein C/D-Segment FCEV um 6,1% höhere Einkaufspreise und um 17,4% höhere Treibstoffkosten, woraus sich eine Steigerung des TCO um 7,3% ergibt.
- Es gibt keine signifikanten Verbesserungen der Skaleneffekte, die die Wirtschaftlichkeit von FCEVs oder der Wasserstoffinfrastruktur zwischen 25% und 50% Penetration verbessern.

Die Studie fokussiert sich deshalb auf eine „Welt“ mit einer Penetration von 25% FCEVs, 35% BEVs, 35% PHEVs und 5% ICEs als ausgeglichenes Szenario für die Penetration der Elektrofahrzeuge in der EU.

**Total Cost of Ownership (TCO)**

In dieser Studie basiert der wirtschaftliche Vergleich der Antriebssysteme auf den Total Cost of Ownership (TCO) sowie dem Kaufpreis (siehe Anhang, Grafik 46, Seite 56 für eine Musterberechnung der TCO für ein FCEV).

Der Verbraucher kauft die Fahrzeuge aus verschiedenen Gründen, einschließlich Kaufpreis neu vs. gebraucht, Abschreibungssatz, Styling, Leistung und Verarbeitung, Markenvorliebe und sozialem Image. Die Kosten für das Fahren eines Neuwagens liegen höher als die des nächsten Besitzers. Die Berechnung der Gesamtbetriebskosten (TCO) für ein Antriebssystem ist daher sehr wichtig, da die Kosten, die mit der Lebensdauer assoziiert sind, beschrieben werden – im Anschluss werden noch die individuellen Kundenkriterien angewendet. TCO beinhalten folgendes:

- Kaufpreis: Die Summe aller Kosten, um das montierte Fahrzeug für ein spezifisches Antriebssystem und Segment an den Kunden zu liefern;
- Laufende Kosten;
  - Wartungskosten für Teile und Kundendienstkosten, die für jeden Fahrzeugtyp und jede Kombination von Antriebssystemen spezifisch sind;
  - Treibstoffkosten, basierend auf Kraftstoffökonomie des Autos und Fahrleistung, einschließlich aller Kosten für die Lieferung des Treibstoffs zur Zapfsäule / Aufladestation und Kapitalrückzahlungsbelastungen für Investitionen, die für Treibstoffproduktion, Distribution und Einzelhandel oder für die BEV-/PHEV-Ladeinfrastruktur geleistet wurden.

N.B. Es gibt keine Diskontierung des Cash Flow über die Jahre und keinen Restwert nach 15 Jahren. Der Zeitwert des Geldes wurde nicht berücksichtigt. Alle Fahrzeug- und Treibstoffsteuern (einschl. MwSt.) sind auf Null gesetzt, um sicherzustellen, dass der Vergleich die „echten“ Fahrtkosten reflektiert und für den Staat ertragsneutral ist.

**TCO Ausgleich**

<b>TCO =</b>	Kaufpreis = Teilekosten + Montagekosten + SG&A + Gewinnmarge	+	Betriebskosten = Instandhaltungskosten + Treibstoffkosten (inkl. Infrastruktur & Treibstoffkosten)
--------------	--	---	---

<sup>2</sup> Die TCO von BEVs und PHEVs sind in den drei Welten konstant aufgrund der Tatasche, dass deren Lernraten auf jährlicher Basis definiert sind, nicht auf der Steigerung der Kapazität.

## Ein ausgeglichener Wasserstoffproduktionsmix basierend auf einer Auswahl von Technologien

Die Annahmen zur Energieerzeugung stehen in Übereinstimmung mit der „Roadmap 2050“ der European Climate Foundation, die ein realistisches Szenario für alle Antriebssysteme beschreibt (siehe Seite 24 und Anhang, Grafik 47, Seite 56).

In diesem Bericht enthalten die Kraftstoffpfad-Emissionen keine indirekten Emissionen, die sich aus Rohstoffekundung und dem damit verbundenen Aufbau von Infrastruktur ergeben (z. B. Förderplattformen, Bergbauaktivitäten, Aufbau von Energieanlagen), noch sogenannte CO<sub>2</sub>-äquivalente Treibhausgase. Wenn diese indirekten Emissionen berücksichtigt werden, wird sich die Kraftstoffpfad-Emission der verschiedenen Antriebssysteme abhängig von Produktions- und Versorgungswegen im Laufe der Zeit verändern. Es wäre nützlich, dies in zukünftigen Analysen ebenfalls zu berücksichtigen.

Diese Studie besteht aus zwei Geschäftsmodellen – Fahrzeugmodell (allgemein für alle Antriebssysteme) und Versorgungsmodell (detaillierter für Wasserstoff, da die Elektrizitätsversorgungskette bereits weitgehend existiert). In jedem „Welt-Szenario,“ ist die Treibstoffnachfrage in jedem Jahr entsprechend der Fahrleistung und der Treibstoffökonomie der Antriebssysteme auf der Strasse vorgegeben.

1. Das Fahrzeugmodell kalkuliert Einkaufspreise, Betriebskosten, TCO und CO<sub>2</sub>-Emissionen, basierend auf den Kosten für Elektrizität und Wasserstoff; die CO<sub>2</sub>-Bilanz wird aus dem Versorgungsmodell berechnet. Es enthält auch wichtige Annahmen, die unter den teilnehmenden Kraftfahrzeugherstellern vereinbart wurden (Grafik 7).

Parameter	Vorgeschlagener Wert
• Durchschnittliche Fahrzeuglebensdauer	• 15 Jahre
• Durchschnittliche jährliche Fahrstrecke	• 12.000 km
• Kombinierte Treibstoffersparnisse	• Gewichtete durchschnittliche Entfernung von ECE-15 und EUDC Zyklen
• Umsatzsteuer	• Steuerfreies Basismodell
• Fahrzeug-Montagekosten in % des ICE-Kaufpreises <sup>1,2</sup>	• 13,5%
• SG&A-Kosten (einschließlich Vertrieb) in % des ICE-Kaufpreises <sup>1,2</sup>	• 13,5%
• Anlagerendite in % des ICE-Kaufpreises <sup>1,2</sup>	• 2% - A/B Segment 7% - C/D Segment 8,5% - J Segment

1 Es wird davon ausgegangen, dass es über die Segmente ähnlich ist, mit Ausnahme der Ertragsannahme, da die Gewinnmarge zwischen den Fahrzeugsegmenten signifikant unterschiedlich ist  
2 Der Prozentsatz wird auf den ICE-Kaufpreis für das Referenz-Segment bezogen, die gleichen absoluten Kosten werden dann allen Antriebssystemen im Segment zugeordnet

QUELLE: Euromonitor, Polk, EU MVEG, Credit Suisse, Goldman Sachs Global Investment Research Report, Studienanalyse

Grafik 7: Unter den teilnehmenden Fahrzeugherstellern wurden Schlüsselannahmen für das Fahrzeugmodell vereinbart

2. Das Versorgungsmodell (für FCEVs) kalkuliert dann die CO<sub>2</sub>-Bilanz, die Kosten des gelieferten Wasserstoffs und die erforderlichen Investitionen, basierend auf den Kosten- und Leistungsdaten für die drei Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur – Produktion, Distribution und Einzelhandel.

Bestandteile der Schlüsselannahmen:

- Jedes Jahr werden, basierend auf der Wasserstoffnachfrage für Fahrzeuge, Komponenten hinzugefügt, um die neue Nachfrage zu befriedigen, und Komponenten ersetzt, die das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben.
- Mit Ausnahme von Einzelhandelsinfrastruktur und Liefer-LKWs wird die Nutzung auf 95% festgelegt (80% dezentrale Produktion) wegen des raschen Wachstums der Wasserstoffnachfrage, die es ermöglicht, dass die installierte Ausrüstung innerhalb weniger Jahre die volle Auslastung erreicht (siehe Anhang, Grafik 48, Seite 57).
- Die Verschiebung von kleinen über mittlere zu großen Installationsgrößen hängt von der jährlich hinzukommenden Wasserstoffkapazität ab, z. h. kleine Komponenten werden gebaut, wenn die Wasserstoffnachfrage gering ist, große Komponenten bei hoher Nachfrage.

### a. Produktion

Für Wasserstoff wurden neun Haupt-Produktionspfade berücksichtigt, die alle die Haupttechnologien repräsentieren, mit dem Potential zu schneller Massenproduktionsentwicklung in Europa (Grafik 8). Auf der Basis dieser Produktionspfade sind viele verschiedene Produktionsmix' möglich.

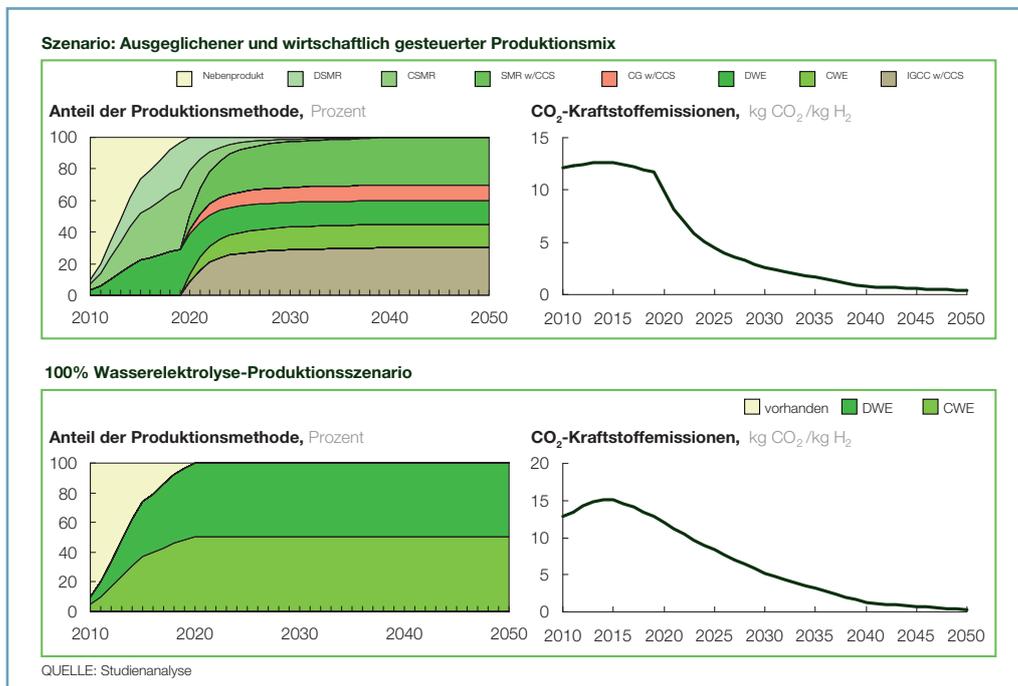
Neben anderen Optionen überprüfte die Studie zwei Konstellationen für die Wasserstoffproduktion: Ein ausgeglichener und wirtschaftlich gesteuerter Produktionsmix mit CCS, der andere ohne CCS, der 100%ige Elektrolyse mit 80% erneuerbarer Energie bis 2050 repräsentiert. Beide führen bis 2050 zu einer CO<sub>2</sub>-freien Wasserstoffproduktion (Grafik 9). Während die Produktion von Wasserstoff aus SMR mit CCS das Szenario mit den niedrigsten Kosten bleibt, erhöht der 100%ige Elektrolyse-Produktionsmix nur den TCO der FCEVs (C/D-Segment) um 5% bis 2030 und 3,5% bis 2050.

Alle Ergebnisse in diesem Bericht basieren auf dem unten beschriebenen ersten ausgeglichenen und wirtschaftlich gesteuerten Produktionsmix

Technologie	Prozess	Wesentliche Reaktionen <sup>1</sup>	Variationen
<b>SMR</b> Methandampf- Reformierung	Methan → Dampf → 	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_2 + \text{CO}_2$	Vor-Ort-SMR Zentrale SMR Zentrale SMR + CCS
<b>WE</b> Wasser- Elektrolyse	Wasser → Elektrizität <sup>3</sup> → 	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	Vor-Ort-WE Zentrale WE
<b>CG/(IGCC)</b> Kohlevergasung Integrierte Vergasung Kombinierte Abläufe	Kohle <sup>2</sup> → Dampf → 	$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	CG CG + CCS IGCC IGCC + CCS

1 Vereinfachte Reaktion  
2 Beinhaltet Zuführung mit Biomasse  
3 100% CO<sub>2</sub>-Reduzierung für Strom bis 2050: www.roadmap2050.eu  
QUELLE: Studienanalyse

Grafik 8: Es wurden neun wichtige Produktionswege bewertet



Grafik 9: Die Studie überprüfte zwei Wasserstoff-Produktionskonstellationen, beide führten zu CO<sub>2</sub>-freiem Wasserstoff bis 2050

Da die gesamte Wasserstoffnachfrage für FCEVs bis 2020 vergleichsweise niedrig ist, wurde von einem konventionellen Produktionsmix ausgegangen, der überschüssigen Wasserstoff aus existierenden Anlagen nutzt (industrielle Anlagen und zentralisierte SMR), mit wachsendem Anteil von dezentralen Einrichtungen (Wasserelektrolyse und SMR).

Wenn ab 2020 die Wasserstoffnachfrage für FCEVs schnell ansteigt, wird ein ausgeglichenes und wirtschaftlich gesteuertes Szenario angenommen, das die Diversität der verfügbaren Ressourcen in den verschiedenen Teilen Europas einschließlich neuer Quellen von sauberem und grünem Wasserstoff reflektiert<sup>3</sup>. Dieses Szenario vermeidet eine übermäßige Abhängigkeit von einer einzelnen Primärenergiequelle und bietet das kosteneffektivste Mittel zur Dekarbonisierung der Wasserstoffversorgung.

Zusammenfassung:

- Vor 2020 haben neben der Nutzung existierender Produktionsanlagen Central Steam Methane Reforming (zentrale Methandampfreformierung – CSMR) 40% und Distributed Steam Methane Reforming (dezentrale Methandampfreformierung – DSMR) sowie Distributed Water Electrolysis (dezentrale Wasserelektrolyse – DWE) jeweils 30% Anteil an der neuen Produktion.
- Nach 2020 haben CSMR und Integrated Gasification Combined Cycle (Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung – IGCC) jeweils 30%, Kohlevergasung 10% und Central Water Electrolysis (zentrale Wasserelektrolyse – CWE) und DWE jeweils 15% Anteil an der neuen Produktion.
- In Übereinstimmung mit der „Roadmap 2050“ Studie wird davon ausgegangen, dass der Anteil erneuerbarer Energie im Energiemix stetig ansteigt (wichtig für Elektrolyse) – siehe Anhang, Grafik 47, Seite 56.
- CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung (CCS) wird bei allen neuen CSMR, IGCC und Kohlevergasungskapazitäten mit Beginn 2020 angewendet; Kohle wird mit 10% Biomasse verfeuert, die drei mal die Schätzung der IEA<sup>4</sup> kostet, weil sie die erforderliche Vorbehandlung vor der Vergasung berücksichtigt.

<sup>3</sup> „Sauberer Wasserstoff“ bezieht sich auf die Anwendung von CCS, „grüner Wasserstoff“ auf erneuerbare Energie

<sup>4</sup> International Energy Agency

Kohle, Erdgas, „saubere Elektrizität,“ und Biomasse sind alle für die Wasserstoffproduktion wichtig. Sowohl Wasserelektrolyse als auch IGCC könnten eine Schlüsselrolle bei der Unterstützung des Elektrizitätsnetzes spielen: Elektrolyse für das Nachfragemanagement, IGCC für abzugebende Energie, z. B. für Speicherung oder Export. Beide Technologien sind kompatibel mit der Versorgung von Lastausgleichsleistungen, bei denen eine große Nachfrage in einem Elektrizitätsnetz bestehen wird, das einen hohen Anteil erneuerbarer Energien enthält.

#### Die Rolle der Biotreibstoffe

Es ist immer noch ungewiss, welche Menge (nachhaltig produzierter) Biotreibstoffe für Pkws lang- und mittelfristig in Europa verfügbar ist. Die Studie geht von folgenden Annahmen aus: Bis 2020 werden Biotreibstoffe vermengt und führen zu einer 6% „Well-to-Wheel“-Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Benzin- und Dieselfahrzeugen in Übereinstimmung mit der EU Treibstoff-Richtlinie, bis 2050 erhöht sich die Reduzierung auf 24%, um die wachsenden Betriebsstoffe zu reflektieren.

Dies gibt auch die Tatsache wieder, dass der Markt einem steigenden Wettbewerb aus anderen Sektoren begegnen wird – insbesondere LKW, Luftfahrt, Seefahrt, Elektroenergie und Schwerindustrie – um die Bedürfnisse dieser Sektoren und eine globale Fahrzeugflotte von 2,5 Milliarden Autos in Jahr 2050 zu befriedigen. Es ist eine umfassende Analyse des tatsächlichen Potentials von Biotreibstoffen notwendig, um festzustellen, wie sie verfügbar sind und für welche Sektoren und Länder sie am effektivsten genutzt werden können.

#### b. Distribution

In die Studie wurde eine Reihe von Distributionsmethoden einbezogen (Tabelle 1).

Vertriebsmethode	Tonnen Wasserstoff / Tag
Flüssig-Tankwagen	3,5
Gas-LKWs	0,4 (250 bar), 0,8 (500 bar)
Pipelines	1; 2,5; 10; 100

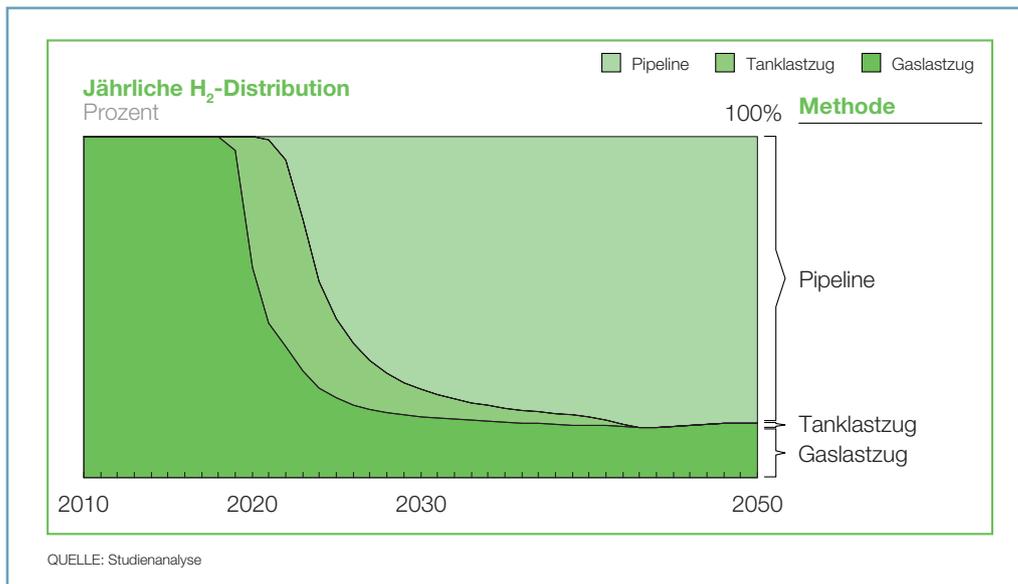
Tabelle 1: Überblick über die in der Studie enthaltenen Distributionsmethoden

Es wurden dann Industriedaten zur Kalkulation der Distributionskosten<sup>5</sup> für verschiedene Volumina und Entfernungen verwendet; dabei wurde die für die geforderte Lieferentfernung günstigste Distributionsmethode gewählt.

Je nach Wasserstoffvolumen, Entfernungen und lokalen Besonderheiten können viele verschiedene Distributionsinfrastrukturen berücksichtigt werden. Diese Studie geht von einer Distributions-Roadmap aus, bei der anfangs Gas-LKWs die wichtigste Methode sind und Flüssigkeits-LKWs die Lücke zu Pipelines überbrücken<sup>6</sup>, was zu einer signifikanten Reduzierung der Lieferkosten und der CO<sub>2</sub>-Emissionen führt (Grafik 10).

5 Vertriebskosten = Produktionskosten + Distributionskosten + Einzelhandelskosten (jede Kostenposition ergibt sich aus den gewichteten Durchschnittskosten aller Betriebskomponenten unter Anwendung der aktuellen Rohstoff- und Elektrizitätspreise). Bei bereits gebauten Komponenten wird davon ausgegangen, dass sie über ihre Lebensdauer bis zur Stilllegung in Betrieb bleiben.

6 Private Unternehmen in Europa besitzen und betreiben bereits das weltweit größte Wasserstoffpipeline-Netzwerk, das ~1600 Kilometer in Frankreich, Deutschland und den Beneluxländern abdeckt. Kleinere Pipelines sind in Italien und Schweden in Betrieb.



Grafik 10: Der für die Studie angenommene Wasserstoff-Distributionsmix

### c. Einzelhandelsstationen

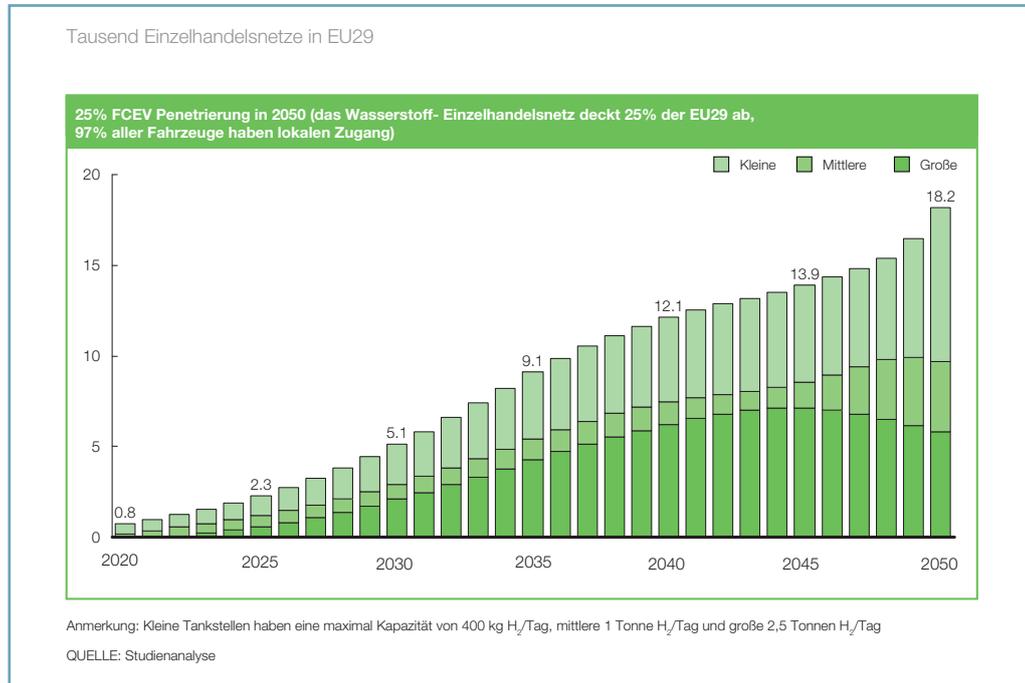
<i>Kleinstation (70–100 Autos pro Tag)</i>	<i>2 Zapfsäulen, 0,4 Tonnen Wasserstoff / Tag</i>
<i>Mittelstation (150–250 Autos pro Tag)</i>	<i>4 Zapfsäulen, 1 Tonne Wasserstoff / Tag</i>
<i>Großstation (450–600 Autos pro Tag)</i>	<i>10 Zapfsäulen, 2,5 Tonnen Wasserstoff / Tag</i>

Tabelle 2: Übersicht über die in der Studie enthaltenen Einzelhandelsstationen

Die Größe der Einzelhandelsstationen wurde durch die Wasserstoffnachfrage und den abgedeckten Bereich festgelegt: Wenn sich die Abdeckung schneller als die Nachfrage entwickelt, sind neue Einzelhandelsstationen klein, wenn die Nachfrage schneller wächst als die Abdeckung, entstehen größere Einzelhandelsstationen etc..

In der ersten Dekade ist die Nutzung der Einzelhandelsstationen niedrig, was zu höheren Kosten führt; bis 2020 werden jedoch 80% der geplanten Kapazität erreicht, basierend auf den Erfahrungen der Industrie im Treibstoffeinzehandel (siehe Anhang, Grafik 48, Seite 57). Wie erwartet haben große Einzelhandelsstationen eine bessere Wirtschaftlichkeit als kleine und mittlere Stationen.

Für die Simulation in allen „Welten“ (siehe Seiten 16–18) wächst die Anzahl der Einzelhandelsstationen von einer Startgruppe von vier in 2010 auf 198 in 2015 und 755 in 2020; für die von Elektrofahrzeugen dominierte „Welt“ zeigt Grafik 11 einen Zusammenbruch der Einzelhandelsstationen von 2020 bis 2050.



Grafik 11: Anzahl der Wasserstoff-Einzelhandelsstationen von 2020 bis 2050 in der von Elektrofahrzeugen dominierten „Welt“

#### Wichtige Annahmen

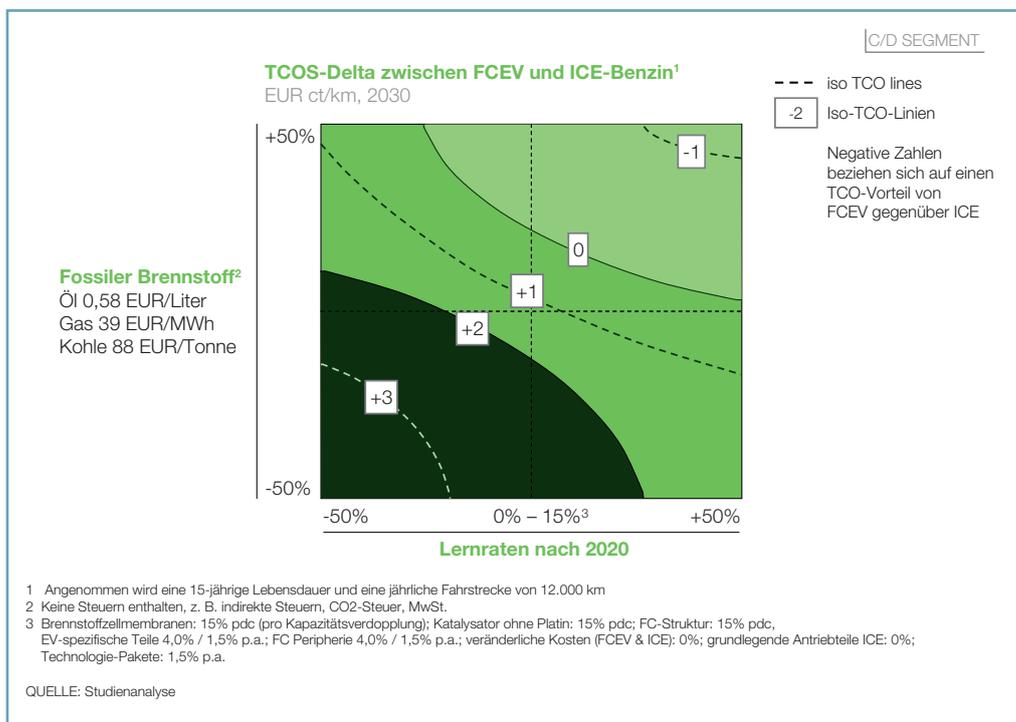
- WACC (gewichtete Durchschnitts-Kapitalkosten) von nominal 7% (nach Körperschaftsteuer), ohne zusätzliche Marge
- Anlagen-Lebensdauer von 20 Jahren (30 Jahre bei Pipelines)
- Öl-, Gas- und Kohlepreise werden von der IEA übernommen (siehe Anhang, Grafik 49–51, Seiten 57–58)
- Wichtige Rohmaterialpreise (z.B. Metall) sind aus der Konsens-Analyse der Industrie entnommen.

Der Energieversorgungspfad, der diesem Bericht zugrunde liegt, basiert auf der European Climate Foundation "Roadmap 2050", die in Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt wurde und einen Weg beschreibt, wie man den EU-Energiemix bis 2050 entkarbonisiert. 2020 beträgt der zu erwartende Anteil erneuerbarer Produktionskapazität ca. 34%. Dies ist das Minimum, das notwendig ist, um das Ziel der EU von 20% erneuerbarer Energie zu erreichen, da es nur eingeschränkte RES-Möglichkeiten außerhalb des Energiesektors gibt (siehe Anhang, Grafik 47, Seite 56). Dies stellt sicher, dass die Behandlung des Antriebssektors mit dem CO<sub>2</sub>-Reduzierungsziel der EU von 80% bis 2050 übereinstimmt (d. h. Null CO<sub>2</sub> aus Energie bis 2050) und zeichnet ein selbstständiges Set von Elektrizitätstarifen für Großhandels-, Industrie- und Einzelhandelsnutzung, zusammen mit CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energieerzeugung.

### Die Annahmen sind robust gegen signifikante Variationen

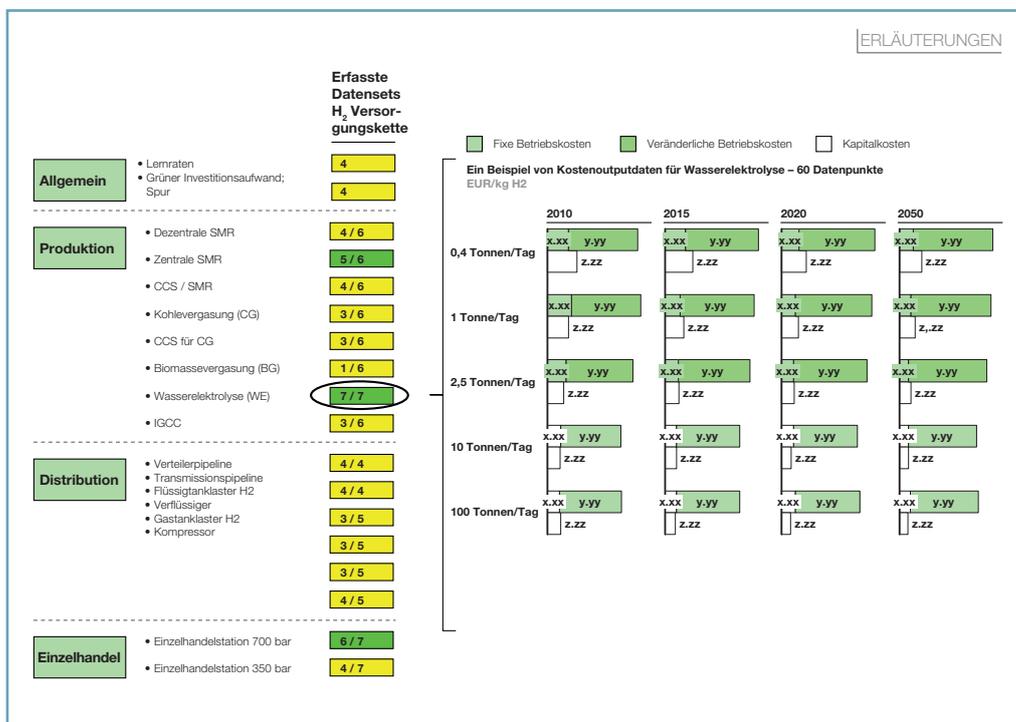
Die projizierten Kostenreduzierungen basieren auf jahrelanger Erfahrung mit konventionellen Fahrzeugen – ICEs – einschließlich Lernraten, Simplifikation der Systeme und Skaleneffekten, die durch das Wachsen zu größeren Produktionsanlagen erreicht werden. Die Einführung von Hybrid-Elektrofahrzeugen (HEVs) andererseits – wovon es bereits Millionen auf den Strassen gibt – hat in den letzten 10 Jahren einen tiefen Einblick in die Geschwindigkeit der Kostenreduzierung für innovative Antriebssysteme und Komponenten gegeben.

Alle Schlussfolgerungen sind robust gegenüber signifikanten Variationen von Lernraten und Kosten fossiler Brennstoffe; bis 2030 gibt es nur einen kleinen Unterschied von –1 bis +3 Cent pro Kilometer (basierend auf Kosten vor Steuern von 18 Cent pro Kilometer), sogar bei Variationen von +/- 50% (Grafik 12).



Grafik 12: Alle Schlussfolgerungen sind robust gegenüber signifikanten Variationen von Lernraten und Kosten fossiler Treibstoffe





Grafik 14: Beispiel von Kosten-Outputdaten für Wasserelektrolyse

Nach Freigabe aller Outputdaten wurden sie fixiert und die Analyse der Antriebssysteme begann.

# ERGEBNISSE

Die folgenden Schlussfolgerungen sind keine Prognosen, sondern ein mögliches Ergebnis – das Ergebnis eines Backcastings auf der Basis einer Penetration von 25% FCEVs, 35% BEVs, 35% PHEVs und 5% ICEs in der EU bis 2050 (siehe Seiten 16–18).

## 1. BEVs und FCEVs haben das Potential für eine signifikante Reduzierung von CO<sub>2</sub> und lokalen Emissionen

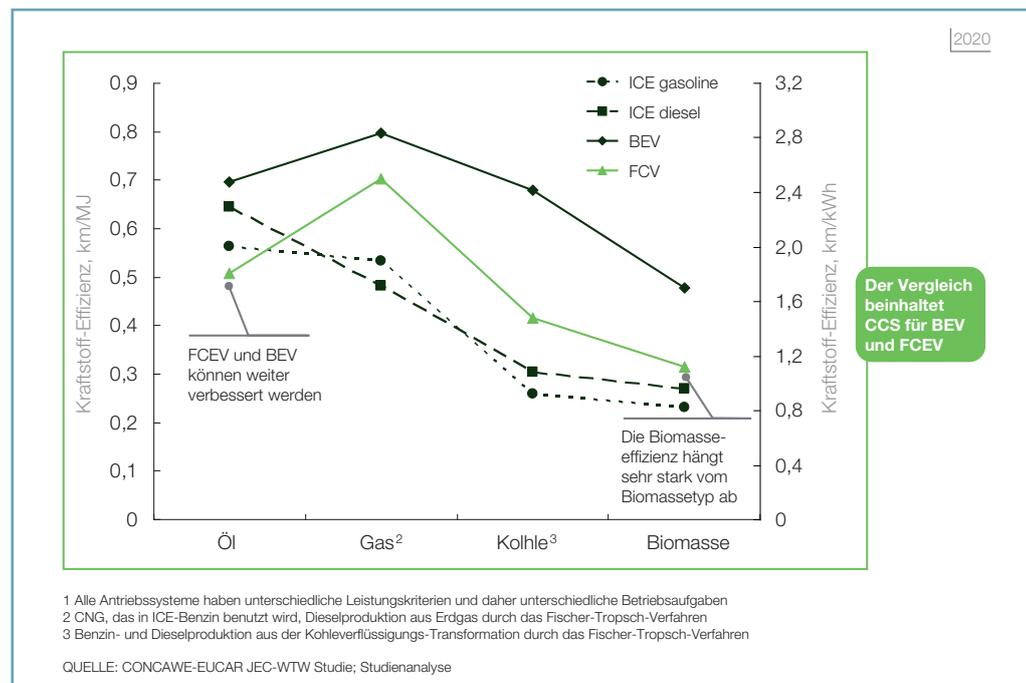
**BEVs:** Mit ihrer beschränkten Energie-Speicherkapazität und Reichweite (150–250 km<sup>1</sup>) – und einer derzeitigen Ladezeit von einigen Stunden – sind BEVs ideal geeignet für kleinere Autos und kürzere Fahrten, z. B. Stadtverkehr.

**FCEVs:** Mit einer mit ICEs vergleichbaren Reichweite und Leistung sind FCEVs die Lösung mit der niedrigsten Karbonbelastung für mittlere / grössere Autos und längere Fahrten.

**PHEVs:** Mit einer kleineren Batteriekapazität als BEVs ist das elektrische Fahren bei PHEVs auf Kurzfahrten (40–60 km) beschränkt. In Kombination mit der Zumischung von Biotreibstoffen (siehe Seite 2) zeigen sie für längere Fahrten ebenfalls Emissionsreduzierungen, jedoch bleibt eine Unsicherheit in Bezug auf die Menge der nachhaltig hergestellten Biotreibstoffe, die für diesen Markt verfügbar sein werden. Trotzdem sind sie eine attraktive Lösung, die die Emissionen im Vergleich zu ICEs erheblich reduziert.

**ICEs:** ICEs haben ebenfalls ein Potential zur signifikanten Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz durch verbesserte Energieeffizienz und Biotreibstoffe. Nach 2020 sind jedoch weitere Verbesserungen der Motoreffizienz beschränkt und relativ teuer, während die Verfügbarkeit von Biotreibstoffen ebenfalls eingeschränkt sein kann.

### a. Elektrofahrzeuge sind durch ein größeres Spektrum der Rohstoffe energieeffizienter als ICEs

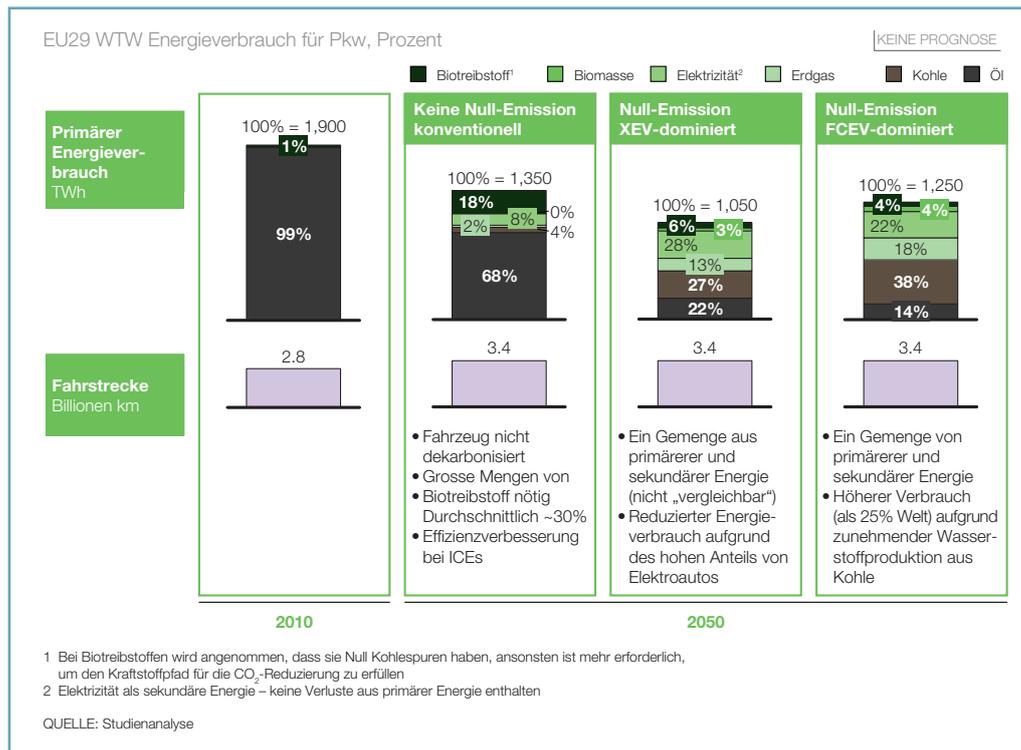


Grafik 15: Die Kraftstoffpfad-Effizienz von FCEVs ist vergleichbar mit ICEs, BEV bleibt das effizientere Antriebssystem

1 Mittelfristig für Autos aus dem C/D-Segment

In einer Welt mit Beschränkung von Energie und Kohlenstoff, in der wir nun leben, ist eine effiziente Nutzung primärer Energieressourcen essentiell.

Grafik 15 zeigt die Effizienz der Kraftstoffpfade der verschiedenen Antriebssysteme unter Verwendung unterschiedlicher Primärenergiequellen. BEVs sind die effizienteste Lösung. FCEVs sind bei Gas und Kohle effizienter als ICEs. Bei Öl- und Biotreibstoffen ist der Unterschied zwischen ICEs und FCEVs klein (siehe Anhang, Grafik 43, Seite 54 für eine detailliertere Analyse).

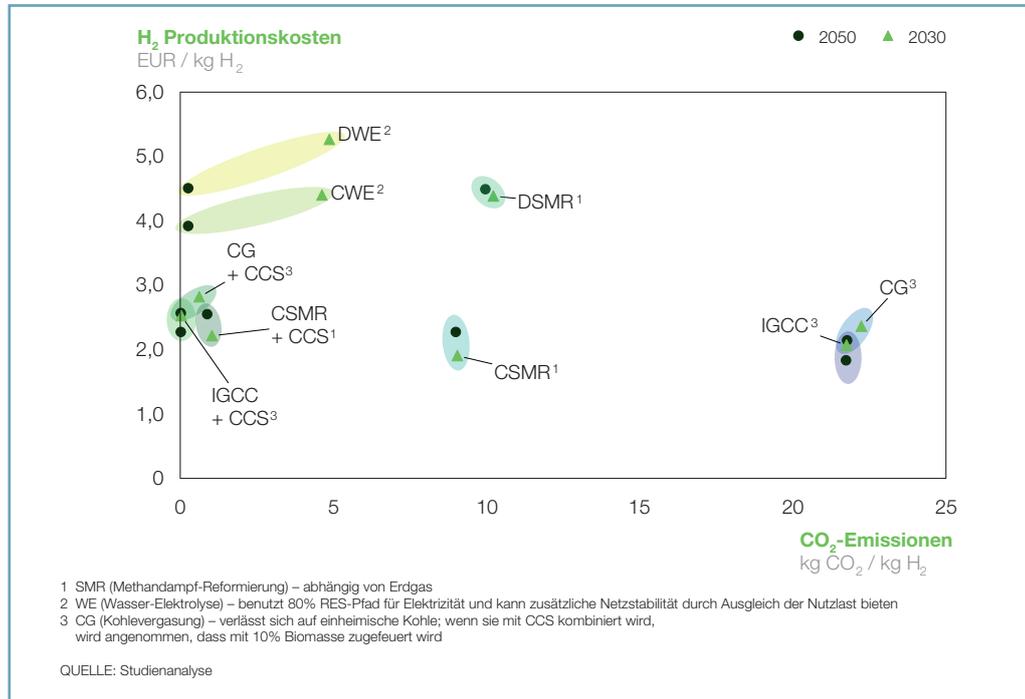


Grafik 16: Auf der Basis der gefahrenen Nettoentfernung könnten Elektrofahrzeuge potentiell bei geringerem Energiebedarf mehr Kilometer erreichen als ICEs.

Die Daten in dieser Grafik sind das Ergebnis einer Rückschau, basierend darauf, dass FCEVs bis 2050 in der EU eine weitgehende Penetration erreichen (siehe Seiten 16–18), und auf dem Szenario für Stromerzeugung, das im Bericht der European Climate Foundation „Roadmap 2050“ skizziert ist (siehe Seite 24).

Während Öl kurz- bis mittelfristig Hauptenergiequelle für Personenkraftwagen sein wird, wird der Wechsel zu einem höheren Anteil von Elektrofahrzeugen die Flexibilität und Sicherheit der Energieversorgung erhöhen, da sie mit verschiedenen Primärenergiequellen aufgetankt werden können.

Für alle zukünftigen Szenarien – und auf Basis einer gesamten globalen Fahrleistung – können BEVs, FCEVs, PHEVs und zukünftige ICEs mehr Gesamtkilometer fahren als die heutigen ICEs, wobei sie durch gesteigerte Effizienz weniger primäre Energie benötigen.



Grafik 17: Es sind unterschiedliche Technologien verfügbar, um CO<sub>2</sub>-freien Wasserstoff zu produzieren (zukünftige Kostenlevels)

Eine Reihe von Technologien und Rohstoffen wird in der Lage sein, CO<sub>2</sub>-freien Wasserstoff zu produzieren, einschließlich fossiler Brennstoffe, erneuerbarer Elektrizität, Nuklearenergie und Biomasse.

Die kosteneffektivsten zukünftigen Produktionsmethoden verwenden existierende Technologien – Dampfreformierung und Kohlevergasung.

Die Kosten der existierenden Technologien wie SMR und Kohlevergasung werden aufgrund steigender Treibstoffpreise und Kosten von CCS ansteigen (teilweise ausgeglichen durch Technologiefortschritte).

Die Kosten der Wasserelektrolyse werden aufgrund von Effizienzverbesserungen reduziert. Der angenommene Energiepreis spiegelt wieder, dass diese Anlagen intermittierend laufen können und so für die Stromversorgungsnetze eine ausgleichende Lösung bieten.

Wasserstoff kann kosteneffektiv im kleinen und im großen Rahmen – von 0,4 bis 1000 Tonnen pro Tag – in zentralisierter oder dezentralisierter Produktion hergestellt werden.

**CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung (CCS)**

CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (CCS) wurde als eine wichtige Lösung identifiziert, um CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, mit dem Potential, 20% des von der EU bis 2020 geforderten Abbaus zu erbringen und bis 2050 die global geforderten 20% abzubauen.

Während die Technologie entwickelt wird, um die CO<sub>2</sub>-Spur bei der Energieerzeugung zu reduzieren, entsteht ein zusätzlicher Vorteil dadurch, dass es die Vorbrennkammer ermöglicht, eine große Menge CO<sub>2</sub>-freien Wasserstoff zu produzieren. Dies ist für die ökonomischen Annahmen dieser Studie wichtig, da im abgestimmten und wirtschaftlich gesteuerten Wasserstoffproduktionsszenario (siehe Seiten 20–22) davon ausgegangen wird, dass 70% des Wasserstoffs unter Nutzung von CCS produziert wird.

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung wurde bereits in kleinen Umfang praktiziert, während die Technologie für die CO<sub>2</sub>-Speicherung bereits seit Jahrzehnten von der Öl- und Gasindustrie genutzt wird, um Erdgas zu speichern oder für erweiterte Erdölförderung (EOR). Die CO<sub>2</sub>-Speichertechnologie in Kombination mit EOR ist also sehr fortgeschritten und stellt ausreichende Daten für die Speicherung in erschöpften Öl- und Gasfeldern zur Verfügung, während die „reine“ Lagerung seit mehr als einer Dekade in einem begrenzten Bereich tiefer ehemaliger Gaslagerstätten aufgezeigt wurde.

Die spezifischen Risiken, die mit Bereitstellung und Vergrößerung verbunden sind, wurden erkannt.

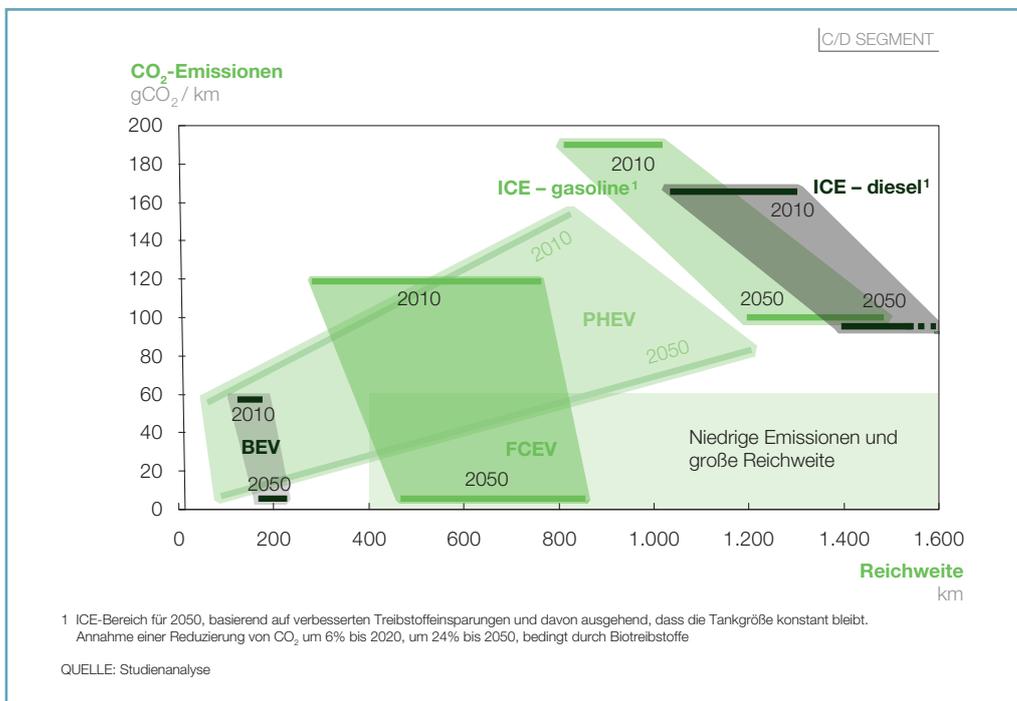
Der nächste Schritt ist die Vergrößerung der Technologie mit Vorführprojekten, die groß genug sind, um anschließend Projekte in kommerzieller Größenordnung zu ermöglichen. Dies baut auch Vertrauen in der Öffentlichkeit auf, da sie nun sieht, dass die CO<sub>2</sub>-Speicherung sicher und verlässlich ist.

Die EU hat bereits bedeutende technologische Fortschritte bei der Förderung von CCS gemacht. Es wurde ein rechtlicher Rahmen für die geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> festgelegt und es wurden öffentliche Mittel bereitgestellt, um das EU-Programm für bis zu 12 CCS Vorführprojekte zu unterstützen.

Das Ziel ist, die kommerzielle Verfügbarkeit für CCS bis 2020 zu ermöglichen. Dies fand ein großes Echo bei vielen ähnlichen weltweiten Initiativen.

Für weitere Informationen verweisen wir auf die European Technology Plattform for Zero Emissions Fossil Fuel Power Plants (ZEP), auch bekannt als die Zero Emissions Platform: [www.zeroemissionsplatform.eu](http://www.zeroemissionsplatform.eu).

**b. BEVs sind ideal für kleinere Autos und kürzere Fahrstrecken geeignet**

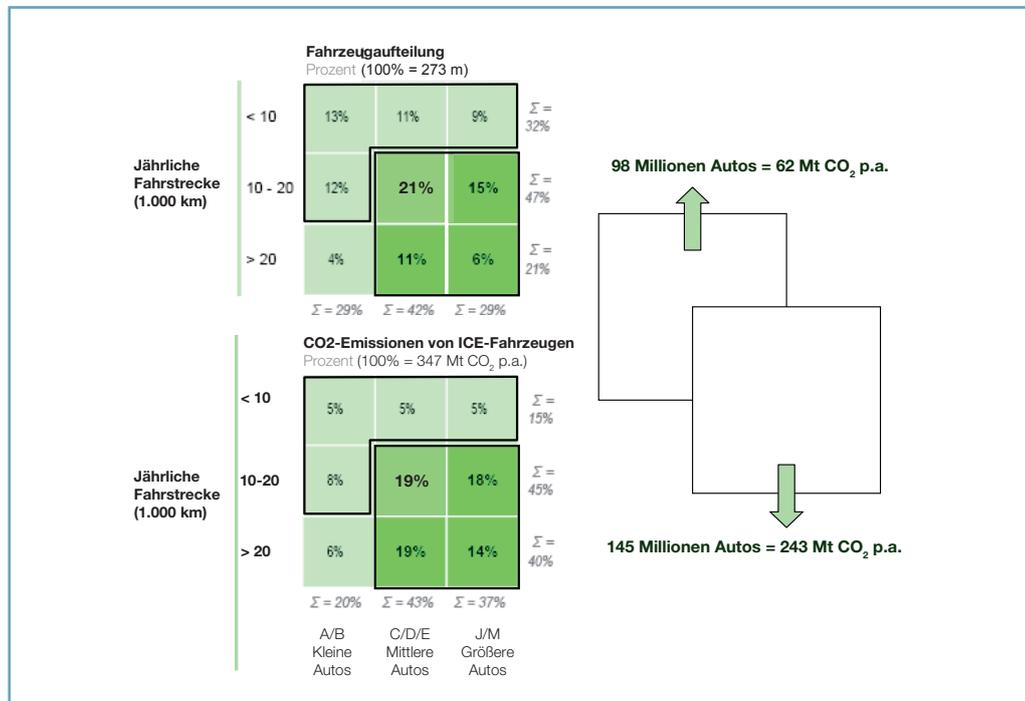


Grafik 18: BEVs und FCEVs können signifikant niedrige CO<sub>2</sub>-Emissionen erreichen, wobei BEVs eingeschränkte Reichweiten aufweisen

Trotz Verbesserungen bei der Kraftstoffeinsparung ist die Leistung der ICEs, CO<sub>2</sub> zu reduzieren, bedeutend geringer als bei BEVs und FCEVs, die nahezu Null CO<sub>2</sub>-Emissionen erreichen können (Kraftstoffpfad). Da die Reichweite von BEVs für Mittelklassewagen eingeschränkt ist, sind diese ideal für Kleinwagen und kurze Fahrstrecken geeignet.

Siehe Anhang (Grafik 52, Seite 59) für die grafische Analyse, wie BEVs, FCEVs und PHEVs CO<sub>2</sub>-Emissionen im Lauf der Zeit reduzieren können.

c. FCEVs sind die kohlenstoffärmste Lösung für mittlere / große Pkws und längere Fahrstrecken



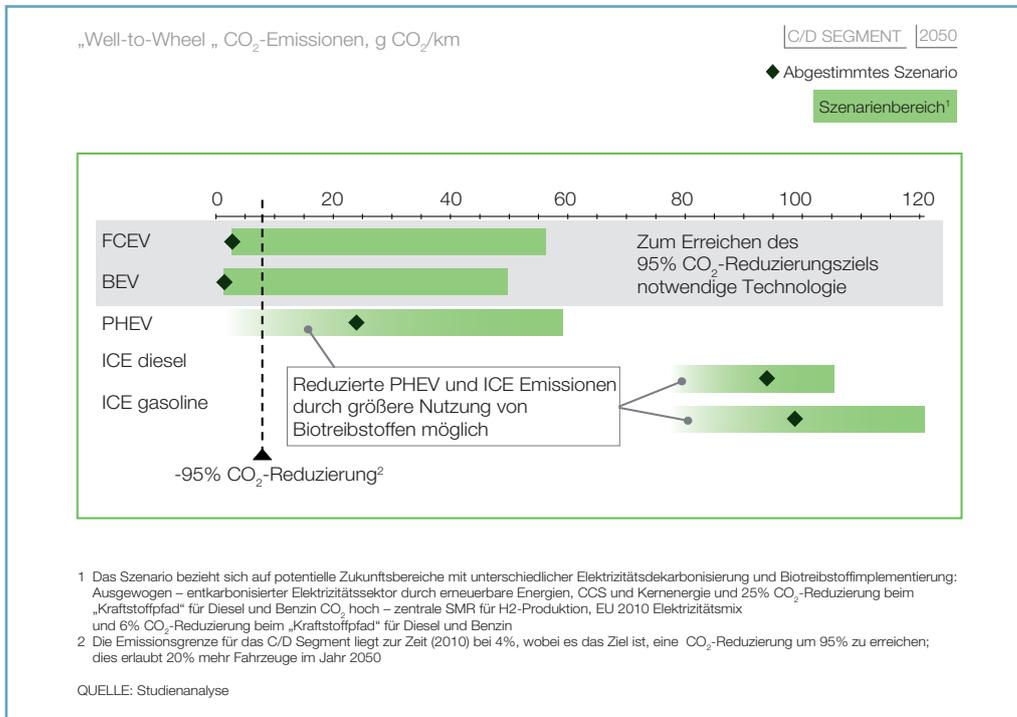
Grafik 19: Mittlere / große Pkws mit überdurchschnittlicher Fahrstrecke machen 50% aller Autos und 75% der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus

Mittlere / große Autos sind unverhältnismäßig für einen größeren Anteil von CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich, weil sie im allgemeinen größere Entfernungen zurücklegen und mehr CO<sub>2</sub> emittieren. Das Ersetzen von einem ICE in diesen Segmenten durch einen FCEV führt zu einer entsprechenden höheren CO<sub>2</sub>-Reduzierung.

FCEVs haben einen eindeutigen TCO-Vorteil gegenüber BEVs und PHEVs für mittlere / große Autos und längere Fahrstrecken (siehe Grafik 32, Seite 42); FCEVs repräsentieren die kohlenstoffärmste Lösung für einen großen Teil der Fahrzeugflotte, basierend auf einem aktuellen Mobilitätsmuster.

BEVs und FCEVs haben das Potential, CO<sub>2</sub> und lokale Emissionen signifikant zu reduzieren.

**d. PHEVs sind eine attraktive Lösung für Kurzstrecken oder bei Nutzung von Biotreibstoffen**



Grafik 20: BEVs und FCEVs können 95% Dekarbonisierung des Straßenverkehrs bis 2050 erreichen

Damit das EU-Ziel erreicht wird, CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 um 80% zu reduzieren, müssen diese im Strassenverkehrssektor um 95% reduziert werden.

PHEVs können CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren, jedoch nur bei kurzer Fahrtstrecke (40–60 km), wenn sie den Elektroantrieb nutzen. In Kombination mit der zusätzlichen Zumischung von Biotreibstoffen zeigen sie auch eine Emissionsreduzierung bei längeren Fahrtstrecken, es ist jedoch ungewiss, welche Menge für diesen Markt zur Verfügung steht (siehe Seite 2).

**2. Nach 2025 werden sich die TCO (Total Cost of Ownership) aller Antriebssysteme annähern**

In der Studie basiert der ökonomische Vergleich zwischen den Antriebssystem auf der Grundlage der Gesamtbetriebskosten / Total Cost of Ownership (TCO) und der Einkaufspreise, da dies die Kosten über die gesamte Lebensdauer beschreibt (siehe Seite 18). Alle Kosten sind „bereinigt“, von steuerlichen Auswirkungen, einschließlich Kohlenstoffpreisen.

Es wird erwartet, dass BEVs und FCEVs höhere Einkaufspreise als ICEs haben (in Bezug auf Batterie und Brennstoffzellen), jedoch niedrigeren Treibstoffkosten (aufgrund der besseren Effizienz und ohne Ölverbrauch) und niedrigere Instandhaltungskosten (weniger rotierende Teile).

Es wird erwartet, dass bis 2020 aufgrund der Massenproduktionsvorteile und zunehmender Technologieverbesserungen die Kosten für Brennstoffzellen-Systeme um 90% und die Komponentenkosten für BEVs um 80% fallen. Rund 30% der Technologieverbesserungen bei BEVs und PHEVs treffen auch auf FCEVs zu und umgekehrt, vorausgesetzt, dass FCEVs und BEVs in Serie hergestellt werden und dass die Infrastruktur vor Ort als wichtigste Voraussetzung vorhanden ist.

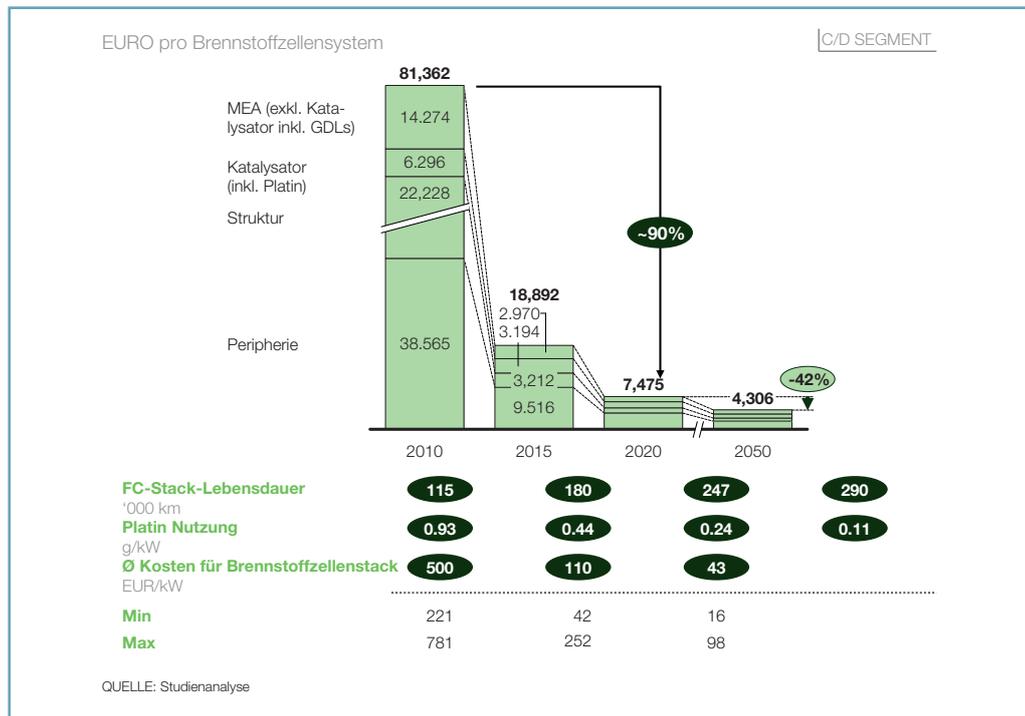
Die Kosten für Wasserstoff werden sich bis 2025 aufgrund der höheren Auslastung der Betankungs-Infrastruktur und der Massenproduktion um 70% reduzieren. Zum Beispiel wird erwartet, dass sich der Kapitalaufwand für Wasserstoffbetankungsstationen zwischen 2010 und 2020 um 50% reduzieren wird.

PHEVs sind kurzfristig ökonomischer als BEVs und FCEVs. Die Lücke schließt sich allmählich und bis 2030 sind PHEVs mit BEVs Kosten-wettbewerbsfähig bei kleineren Autos und BEVs mit FCEVs bei Mittelklassewagen, jedoch weniger wettbewerbsfähig mit FCEVs bei größeren Autos.

Während erwartet wird, dass sich die Treibstoffersparnis durchschnittlich bis 2020 um 30% verbessert, werden die Kosten aufgrund der vollständigen Hybridisierung und weiterer Maßnahmen wie der Verwendung von leichteren Materialien steigen. Es wird erwartet, dass sich die TCO für alle vier Antriebsysteme nach 2025 annähert – oder früher aufgrund von Steuerbefreiungen und/oder Anreizen während der Startphase.

Bei großen Autos wird erwartet, dass die TCO der FCEVs ab 2030 niedriger ist als die von PHEVs und BEVs. Ab 2050 sind die Gesamtbetriebskosten sogar (signifikant) niedriger als die von ICEs. Bei Mittelklassewagen werden sich die Gesamtbetriebskosten für alle Technologien bis 2050 annähern. In den kleineren Fahrzeugsegmenten haben BEVs einen geringen TCO-Vorteil gegenüber FCEVs.

**Bis 2020 fallen die Kosten von Brennstoffzellen-Systemen um 90% und von BEVs-Komponenten um 80%.**



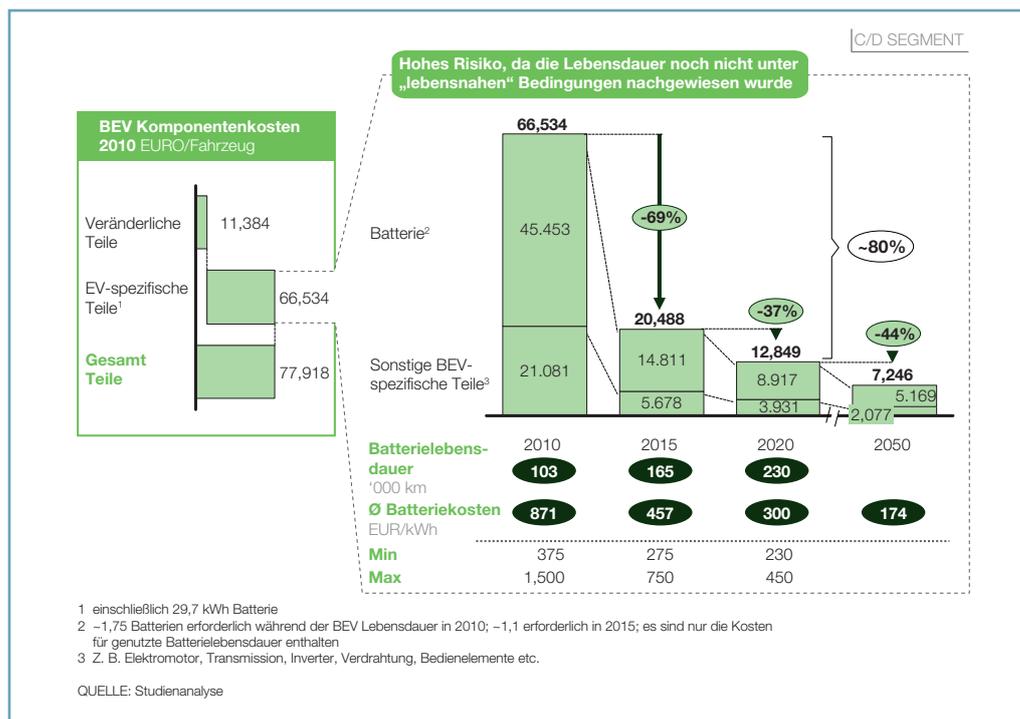
Grafik 21: Die Kosten des Brennstoffzellen-Systems fallen bis 2020 um 90%

Grafik 21 basiert auf einem Datensatz, der von den teilnehmenden Unternehmen bereitgestellt wurde. Wie im Methodik-Abschnitt diskutiert wird für die weiteren Berechnungen der Durchschnittswert für die Kosten des Brennstoffzellen-Systems verwendet. Die Daten, beginnend in den Jahren 2010, 2015 und 2020, stellen ein breites Spektrum dar (siehe Anhang, Grafik 53, Seite 59), was für eine Industrie normal ist, die eine Massenproduktion plant. Der Unterschied zwischen den besten und den schlechtesten Kosten-Datenpunkten kann um einen Faktor von 5 schwanken, abhängig von den unterschiedlichen Technologien und Verfahren, die von den Fahrzeugherstellern benutzt werden.

Das Brennstoffzellen-System ist das maßgebliche Kostenelement in einem FCEV (andere Kostenelemente beinhalten die elektrischen Antriebssysteme und die Wasserstofftanks). Wenn alle kritischen technologische Hürden überwunden sind, sind alle veranschlagten Kostenreduzierungen für FCEVs basisbezogen auf technische Verbesserung und Produktionseffizienz für die kommerzielle Herstellung. Dies beinhaltet:

- Verbesserungen des Designs, z. B. Entfernen von Komponenten, Arbeiten bei höheren Temperaturen, um die Anlagen zu vereinfachen.
- Verwendung von verschiedenen Materialien, z. B. weniger Verwendung von Platin durch Nutzung von Legierungen und Smart-Katalysator-Strukturen, Verringerung des Brennstoffzellenabbaus.
- Verbesserung der Produktionstechnik – weg von Partienfertigung, hin zum kontinuierlichen Produktionsmuster, lösungsmittelfreie Trocknungsverfahren mit hohem Durchlauf.
- Skaleneffekte (1 Million FCEVs in der EU bis 2020)

Alle veranschlagten Kostenreduzierungen für FCEVs und Wasserstoffversorgung bis 2020 basieren auf geschützten Daten. Um ein realistisches Ergebnis sicher zu stellen, sind die Lernraten nach 2020 konservativer und wesentlich niedriger angesetzt als die historischen Verbesserungen vergleichbarer Technologien wie Wind, Solar-PV oder LNG (Flüssigerdgas) (siehe Anhang, Grafik 42, Seite 54).

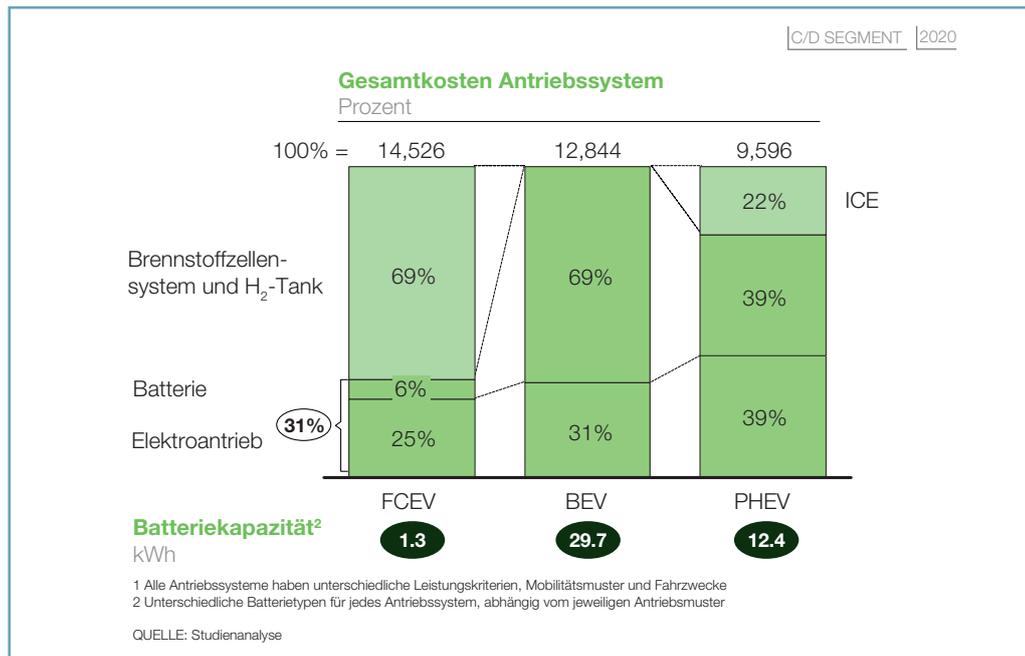


Grafik 22: Die Kosten für BEV Komponenten fallen bis 2020 um 80%

Grafik 22 basiert auf einen Datensatz, der von den teilnehmenden Unternehmen bereitgestellt wurde. Wie im Methodik-Abschnitt diskutiert, wird für die weiteren Berechnungen der Durchschnittswert der Kosten von BEV verwendet. Die Daten beginnen in den Jahren 2010, 2015 und 2020 stellen ein breites Spektrum dar (siehe Anhang, Grafik 54, Seite 60), was für eine Industrie normal ist, die eine Massenproduktion gestartet hat. Der Unterschied zwischen den besten und den schlechtesten Kostendatenpunkten können um einen Faktor von 3 schwanken.

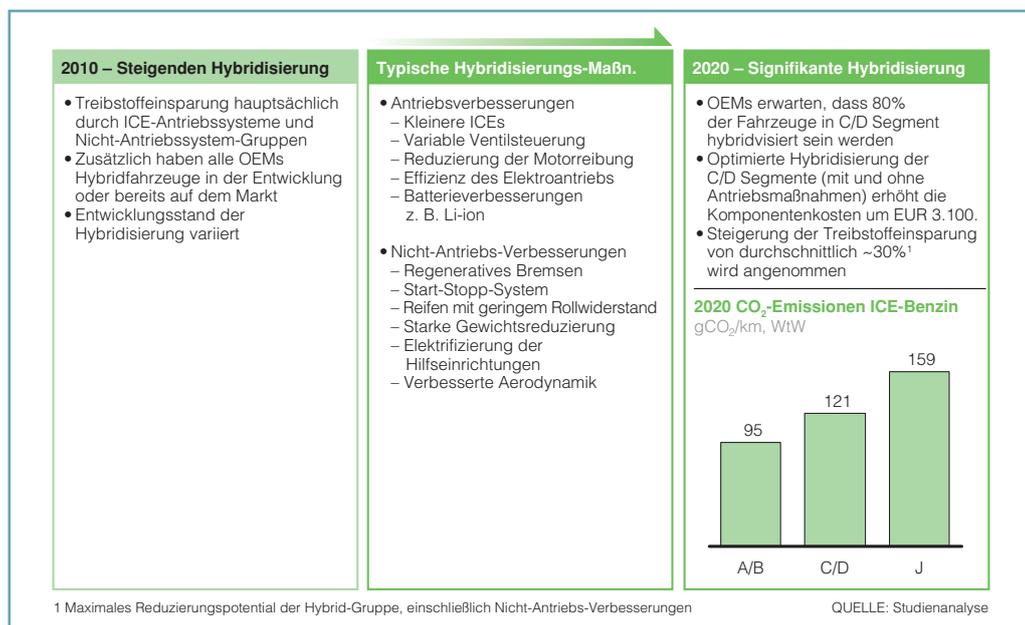
Alle veranschlagten Kostenreduzierungen für BEV-Komponenten basieren auf geschützten Daten und beinhalten:

- Verbesserungen der Produktionstechnik: Abläufe wie Elektrodenreinigung, Herstellung, Stapelung und Kollektorenkontakt werden allmählich effizienter durch die Einführung von fortgeschrittener Lasertechnologie und eine Verschiebung von der Stapelproduktion hin zu einem kontinuierlichem Produktionsmodus. Automatisierung und Rationalisierung der Qualitätsprüfung entlang der Produktionslinie wird zu einem Effizienzgewinn führen.
- Skaleneffekte durch größere Produktionsanlagen (3 Millionen BEVs in der EU bis 2020).



Grafik 23: Im Jahr 2020 werden 31% der Technologieverbesserungen bei BEVs und PHEVs auch auf FCEVs zutreffen

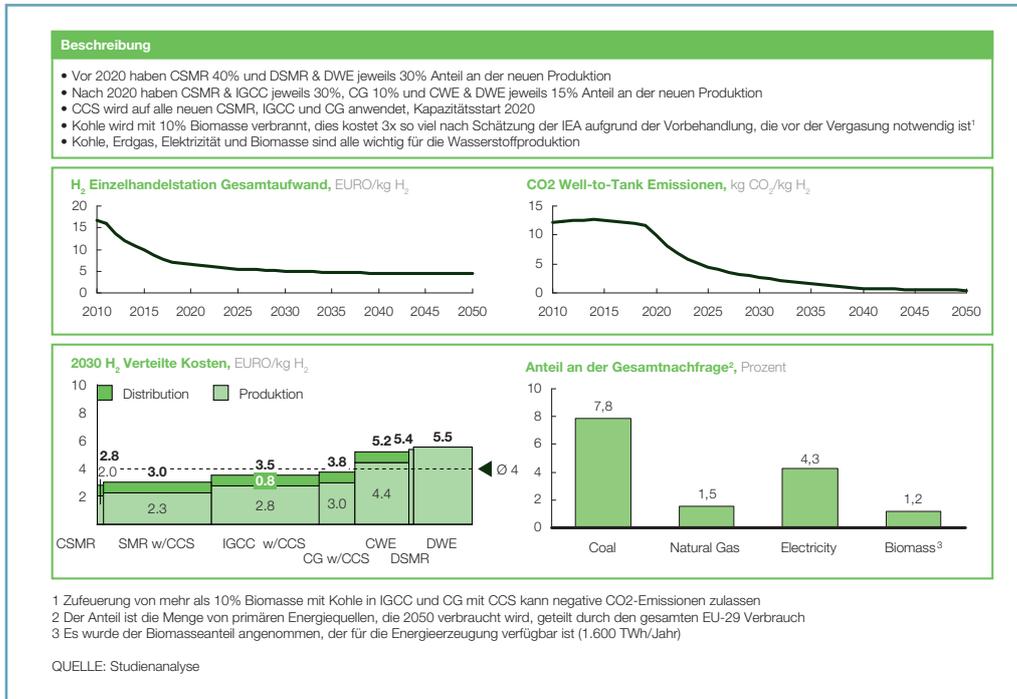
BEVs, FCEVs und PHEVs sind komplementäre Technologien, da sie viele ähnliche elektrische Antriebssystemkomponenten haben wie z. B. Batterien und Elektroantrieb. Investitionen in BEVs und PHEVs sind auch für FCEVs vorteilhaft, und umgekehrt.



Grafik 24: Es wird eine Verbesserung der ICE-Treibstoffökonomie bis 2020 um 30% angenommen

Die Ergebnisse der Studie berücksichtigen signifikante Verbesserungen bei der Kraftstoffeinsparung bei ICEs bis 2020.

**a. Die Kosten für Wasserstoff reduzieren sich bis 2025 um 70%**



Grafik 25: Der angenommene Produktionsmix ist robust gegen Energieschocks

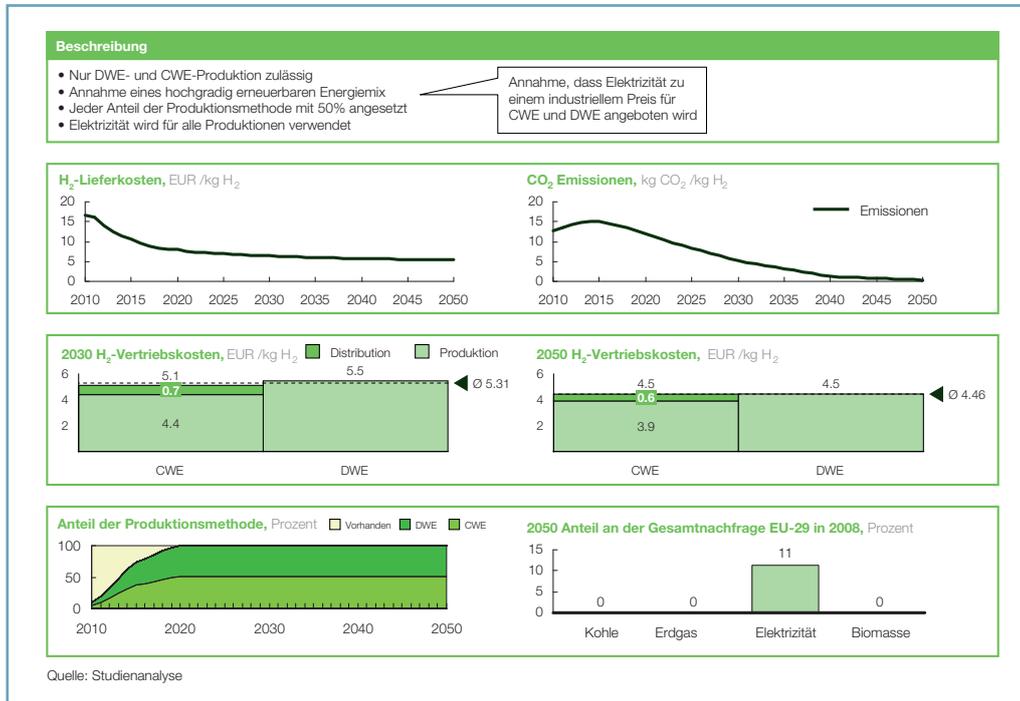
Von den neun untersuchten Wasserstoff-Produktionssortimenten wurden zwei als für diese Studie wichtig erachtet: Das erste (Grafik 25) ist ökonomisch bedingt und basiert auf einem Mix aus fossilen Brennstoffen und erneuerbarer Energie, das zweite basiert ausschließlich auf erneuerbarer Energie (siehe Grafik 26). Beide Sortimente reduzieren CO<sub>2</sub>-Emissionen auf annähernd Null (Kraftstoffpfad).

Vor 2020 geht der erste Produktionsmix von der Annahme aus, dass das eingeschränkte Volumen von benötigtem Wasserstoff unter Nutzung von zentralisierter SMR (40%), dezentralisierter SMR (30%) und dezentralisierter Wasserelektrolyse (30%) hergestellt wird. Nach 2020, wenn die Kosten für FCEVs gefallen sind und die Wasserstoffnachfrage rasch gestiegen ist, wird folgendes vorausgesetzt: Zentralisierte SMR + CCS (30%); IGCC + CCS (30%); Kohlevergasung + CCS (10%), zentralisierte Wasserelektrolyse (15%) und dezentralisierte Wasserelektrolyse (15%). Zwischen 2010 und 2050 geht die Studie für den Energie-Mix von einem steigenden Anteil der erneuerbaren Energien aus (siehe Anhang, Grafik 47, Seite 56).

Die Grafik zeigt die Ergebnisse für den ersten Wasserstoff-Produktionsmix, auf dem diese Studie basiert: Das Diagramm zeigt unten links die Kosten für den gewählten Produktionsmix. Oben links im Diagramm nähern sich die Einzelhandels-Bezugsnebenkosten für Wasserstoff rasch € 4,50/kg an, während oben rechts im Diagramm die CO<sub>2</sub>-Kraftstoffpfademissionen erst steigen und sich dann nach 2020 schnell reduzieren.

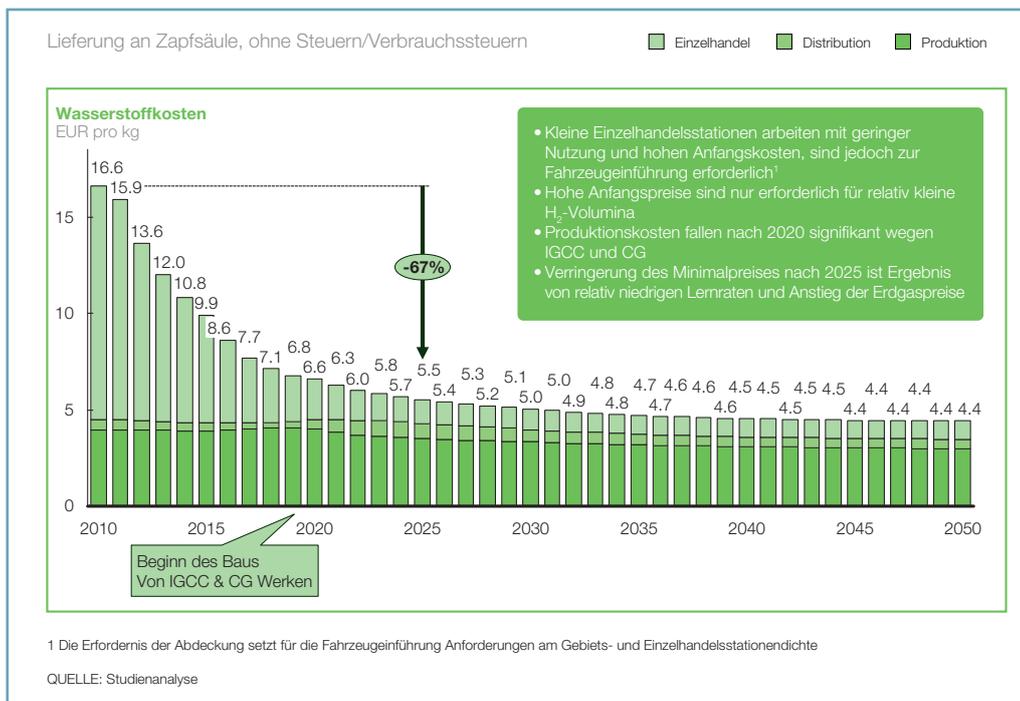
Wie man unten links im Diagramm erkennt, kann Wasserstoff aufgrund der Vielfältigkeit der Rohmaterialien kosteneffektiv hergestellt und indirekt bis 2020 vertrieben werden, um sich den örtlichen Marktbedingungen anzupassen.

**Alle Ergebnisse in diesem Bericht erfolgen auf der Basis eines ausgeglichen wirtschaftlich gesteuerten Produktionsmix, wie in Grafik 25 beschrieben.**



Grafik 26: Ein alternativer Produktionsmix, der 100% Elektrolyse mit 80% erneuerbarer Produktion bis 2050 darstellt.

Der alternative Produktionsmix – der sich aus 100% Elektrolyse mit 80% erneuerbarer Produktion bis 2050 darstellt – erhöht die Gesamtbetriebskosten von FCEVs um 5% bis 2030 und um 3,5% bis 2050.



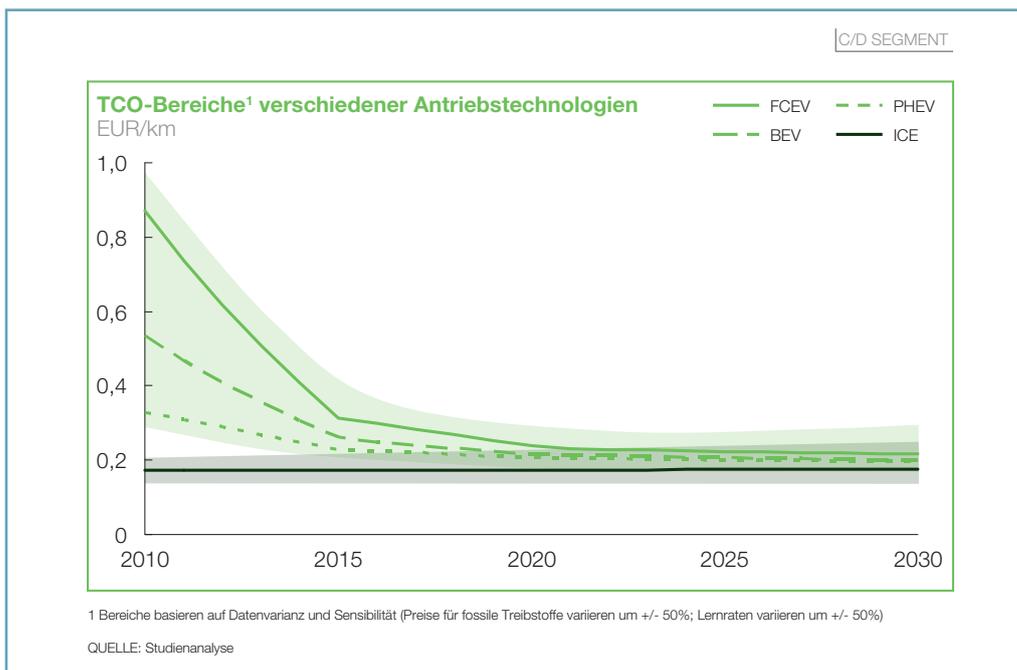
Grafik 27: Die Kosten für Wasserstoff reduzieren sich bis 2025 um 70% und bleiben anschließend stabil (ausschließlich Steuern und Anreizen)

Die Kosten für Wasserstoff werden aufgrund der nicht genutzten Kapazitäten der Einzelhandelsstationen und der Tatsache, dass nur kleine Stationen gebaut werden, um die Investitionskosten zu reduzieren, in den ersten fünf Jahren hoch sein (2010–2015). Dies ist immer noch ein zu entwickelnder Markt, sodass diese Stationen einen niedrigen Skaleneffekt haben. Um die Tankstellenpächter zu überzeugen, Wasserstoff anzubieten, muss der Wasserstoff steuerfrei sein, und die Händler werden Subventionen benötigen.

In den nächsten fünf Jahren in der frühen kommerziellen Phase, wenn die Stationen größer werden und die Nutzung steigt, da mehr FCEVs auf die Straße kommen, kann Wasserstoff (angenommen es ist steuerfrei) kostenwettbewerbsfähig mit Benzin-ICEs werden (angenommen, Benzin ist noch besteuert).

Bis 2020 werden sich die Einzelhandelskosten bedeutend reduzieren, da mehr FCEVs auf der Straße sind und größere Stationen mit mehreren Zapfsäulen und einer höheren Nutzung gebaut werden. Neue Größenordnungen von IGCC- und CG-Anlagen werden gebaut, wodurch sich die Kosten für Wasserstoff weiter reduzieren.

**b. Bis 2030 sind alle BEVs, FCEVs, PHEVs in den relevanten Segmenten kostenwettbewerbsfähig mit ICEs.**



Grafik 28: Nach 2025 werden sich die Gesamtbetriebskosten aller Antriebssysteme annähern.

Aufgrund des anfänglich starken Kostenabfalls für Brennstoffzellen-Systeme, BEV-Komponenten und Wasserstoff als Ergebnis der höheren Nutzung und der Skaleneffekte werden sich die Gesamtbetriebskosten für alle Antriebssysteme nach 2025 annähern.

EURO Tausend | AUSSCHLIESSLICH STEUERN | 2020

Segment	Fahrzeug	Kaufpreis	+	Wartung	+	Treibstoffkosten <sup>1</sup>	+	Infrastruktur <sup>2</sup>	=	TCO
A/B Segment	FCEV	20.0		2.8		4.6		2.2		29.6
	BEV	16.9		2.3		2.8		2.5		24.5
	PHEV	14.7		2.9		3.3		1.4		22.3
	ICE - Benzin	11.3		3.0		3.7		0.5		18.5
	ICE - Diesel	11.3		3.0		3.7		0.4		18.4
C/D Segment	FCEV	30.9		4.5		5.6		2.7		43.8
	BEV	28.9		3.7		3.4		2.5		38.5
	PHEV	26.8		4.9		3.8		1.4		36.9
	ICE - Benzin	21.4		5.5		4.7		0.6		32.3
	ICE - Diesel	21.9		5.7		4.7		0.5		32.8
J Segment	FCEV	38.9		5.6		6.9		3.3		54.8
	BEV	41.0		5.4		4.2		2.5		53.1
	PHEV	37.0		6.7		5.1		1.4		50.2
	ICE - Benzin	28.5		7.1		6.2		0.8		42.5
	ICE - Diesel	29.5		7.5		6.5		0.7		44.1

1 Beinhaltet Produktions- und Vertriebskosten  
2 Beinhaltet Einzelhandelskosten  
ANMERKUNG: Ausgehend von einer Lebensdauer von 15 Jahren, jährlicher Fahrstrecke von 12.000 km, keine Steuern (z. B. Kraftstoffabgaben, MwSt)  
QUELLE: Studienanalyse

Grafik 29: Bis 2020 liegt der Einkaufspreis für BEVs, FCEVs und PHEVs um mehrere tausend Euro höher als für ICEs, dies könnte durch Steuerbefreiungen ausgeglichen werden.

Bis 2020 ist der Einkaufspreis für Elektrofahrzeuge um mehrere tausend Euros teurer als der von ICEs, jedoch sollten angemessene öffentliche Prämien für Fahrzeuge, Treibstoff und ein Nutzungsversprechen für Kunden ausreichen, die Kostenlücke zu überbrücken (siehe Seite 43). Der Einkaufspreis für BEVs liegt unter dem von FCEVs.

Der Einkaufspreis von Elektrofahrzeugen kann sich je nach Marktbedingung und Kraftfahrzeugherstellern, die einen Fortschritt in der Kostenreduzierung erreicht haben und/oder sich entscheiden, ihre Aufschläge zu begrenzen, stark verändern. Die Einkaufspreise sind auch sehr von der Markenstrategie innerhalb eines gesamten Fahrzeugsegments abhängig – von kostengünstigen bis hin zu Premium-Fahrzeugen.

EURO Tausend | AUSSCHLIESSLICH STEUERN | 2030

A/B Segment	Fahrzeug	Kaufpreis	+	Wartung	+	Treibstoffkosten <sup>1</sup>	+	Infrastruktur <sup>2</sup>	=	TCO
	FCEV	16.0			2.5		4.4		1.2	
BEV	15.2			2.2		2.7		2.5		22.6
PHEV	13.7			2.8		3.4		1.4		21.3
ICE - Benzin	11.1			3.0		4.1		0.5		18.7
ICE - Diesel	11.2			3.0		4.1		0.4		18.7

C/D Segment	Fahrzeug	Kaufpreis	+	Wartung	+	Treibstoffkosten <sup>1</sup>	+	Infrastruktur <sup>2</sup>	=	TCO
	FCEV	25.7			4.2		5.2		1.4	
BEV	26.3			3.6		3.2		2.5		35.6
PHEV	25.0			4.9		3.7		1.4		35.0
ICE - Benzin	21.1			5.4		5.3		0.6		32.3
ICE - Diesel	21.6			5.6		5.2		0.5		32.9

J Segment	Fahrzeug	Kaufpreis	+	Wartung	+	Treibstoffkosten <sup>1</sup>	+	Infrastruktur <sup>2</sup>	=	TCO
	FCEV	32.7			5.3		6.2		1.7	
BEV	37.3			5.2		3.9		2.5		48.9
PHEV	34.7			6.7		5.1		1.4		47.9
ICE - Benzin	28.3			7.0		6.9		0.8		42.9
ICE - Diesel	29.1			7.4		7.2		0.7		44.4

1 Beinhaltet Produktions- und Vertriebskosten  
2 Beinhaltet Einzelhandelskosten  
ANMERKUNG: Ausgehend von einer Lebensdauer von 15 Jahren, jährlicher Fahrstrecke von 12.000 km, keine Steuern (z. B. Kraftstoffabgaben, MwSt)  
QUELLE: Studienanalyse

Grafik 30: Bis 2030 sind alle Elektrofahrzeuge machbare Alternativen für ICEs mit vergleichbaren laufenden Kosten und einen Kaufpreis, der fast mit dem für größere Autos vergleichbar ist.

Bis 2050 werden die Vorteile der niedrigeren Betriebskosten die höhere Einkaufspreise für Elektrofahrzeuge fast aufheben und die Lücke zu ICEs in Bezug auf Einkaufspreis und Gesamtbetriebskosten beginnt sich zu schließen. Normalerweise liegen die Kosten für Elektrofahrzeuge (BEVs, FCEVs, PHEVs) um 2–6 Cent pro Kilometer höher als bei ICEs.

EURO Tausend | AUSSCHLIESSLICH STEUERN | 2030

A/B Segment	Fahrzeug	Kaufpreis	+	Wartung	+	Treibstoffkosten <sup>1</sup>	+	Infrastruktur <sup>2</sup>	=	TCO
	FCEV	14.3			2.3		3.7		1.0	
BEV	13.4			2.2		2.4		2.5		20.5
PHEV	12.8			2.8		3.5		1.4		20.5
ICE - Benzin	10.8			2.9		4.6		0.5		18.8
ICE - Diesel	11.0			2.9		4.6		0.4		18.9

C/D Segment	Fahrzeug	Kaufpreis	+	Wartung	+	Treibstoffkosten <sup>1</sup>	+	Infrastruktur <sup>2</sup>	=	TCO
	FCEV	23.7			4.0		4.0		1.1	
BEV	23.5			3.5		2.8		2.5		32.3
PHEV	23.5			4.8		3.6		1.4		33.3
ICE - Benzin	20.5			5.1		5.8		0.6		32.0
ICE - Diesel	21.2			5.4		5.8		0.5		32.9

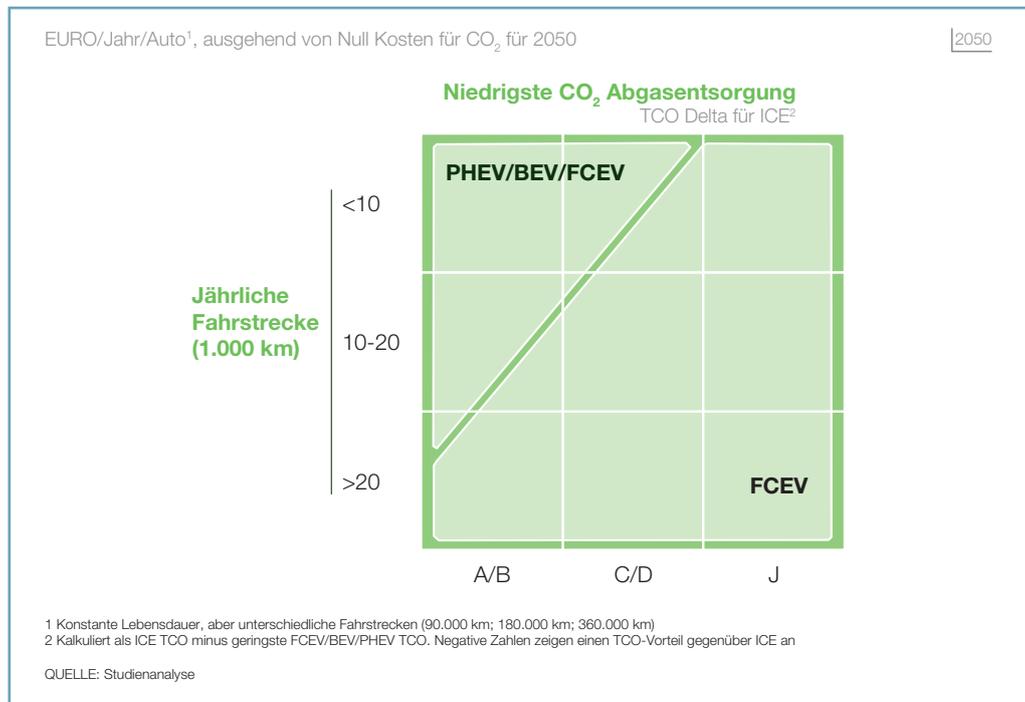
  

J Segment	Fahrzeug	Kaufpreis	+	Wartung	+	Treibstoffkosten <sup>1</sup>	+	Infrastruktur <sup>2</sup>	=	TCO
	FCEV	30.4			5.0		4.6		1.3	
BEV	33.3			5.1		3.4		2.5		44.3
PHEV	32.6			6.6		5.1		1.4		45.7
ICE - Benzin	27.9			6.9		7.7		0.8		43.2
ICE - Diesel	28.7			7.2		8.0		0.7		44.6

1 Beinhaltet Produktions- und Vertriebskosten  
2 Beinhaltet Einzelhandelskosten  
ANMERKUNG: Ausgehend von einer Lebensdauer von 15 Jahren, jährlicher Fahrstrecke von 12.000 km, keine Steuern (z. B. Kraftstoffabgaben, MwSt)  
QUELLE: Studienanalyse

Grafik 31: Bis 2050 sind FCEVs wirtschaftlicher als ICEs in Bezug auf größere Autos und völlig wettbewerbsfähig bei Mittelklassewagen.

Bis 2050 sind alle Elektrofahrzeuge kostenwettbewerbsfähig mit ICEs, FCEVs sind die Niedrigkostenlösung für größere Autos (J-Segment).



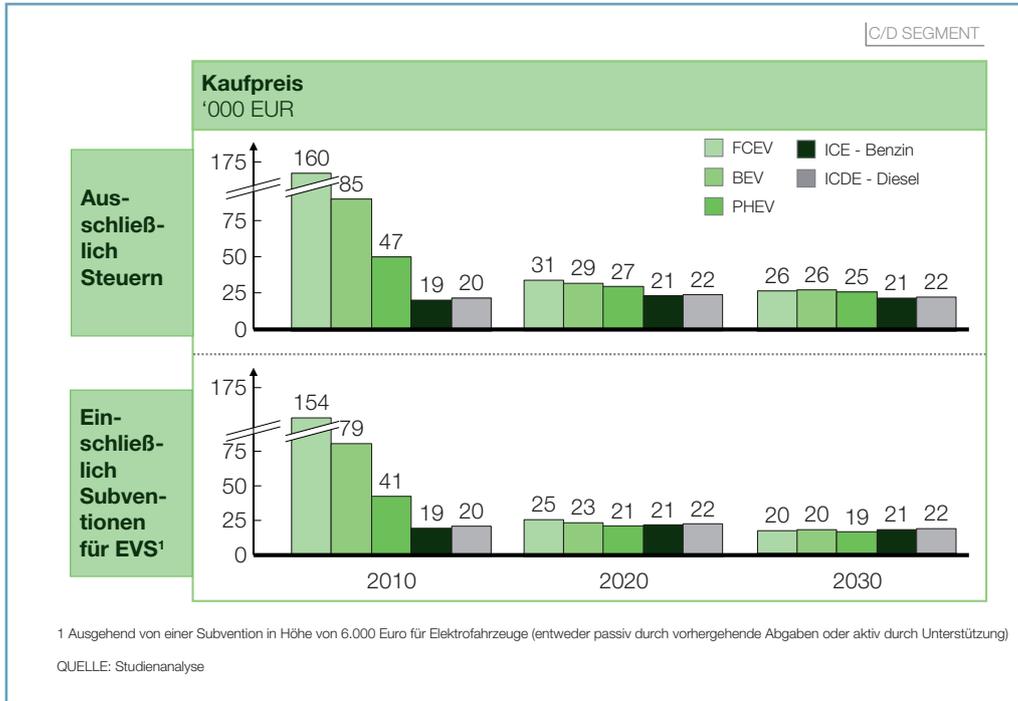
Grafik 32: FCEVs haben einen TCO-Vorteil gegenüber BEVs und PHEVs in den Segmenten für schwere und Langstreckenfahrzeuge

Bezüglich Fahrzeuggröße und jährlicher Fahrstrecke sind BEVs für Kleinwagen und kurze Fahrstrecken wirtschaftlicher, während FCEVs für die C/D und J-Segmente (Mittelklassewagen und größere Autos) und längere Fahrten eine bessere Leistung bieten.

FCEVs punkten fast so gut wie BEVs bei einer jährliches Fahrstrecke von 10.000–20.000+ km in den A/B-Segmenten (kleine Fahrzeuge).

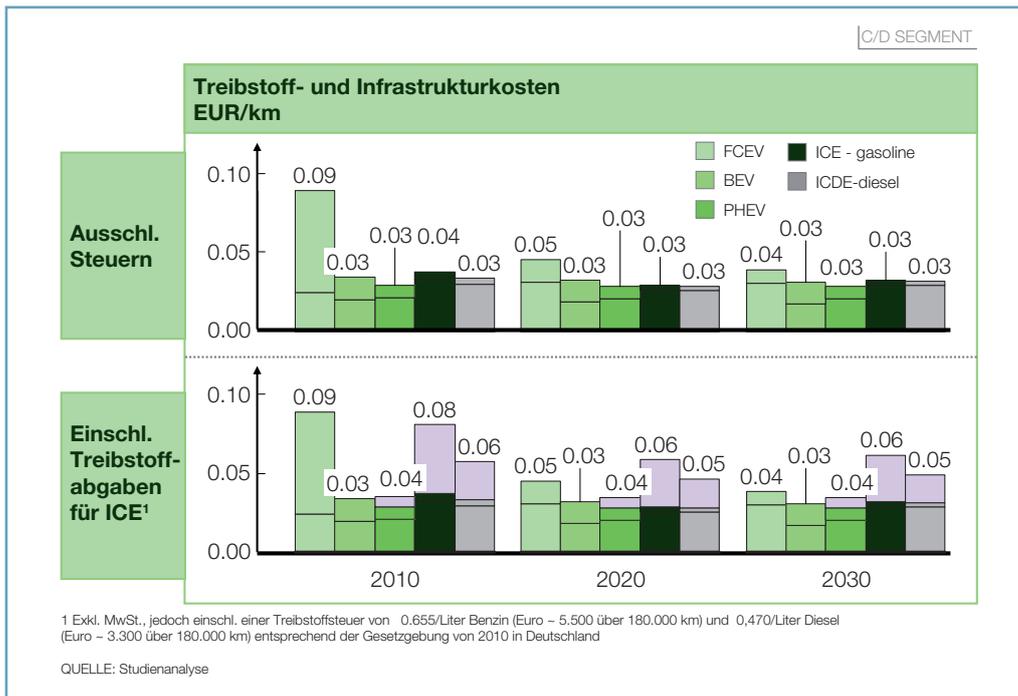
Da Mittelklassewagen und große Fahrzeuge, die überdurchschnittliche Entfernungen fahren, 50% aller Autos ausmachen, jedoch 75% der CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen, sind FCEVs eine attraktive Option für einen Grossteil der Fahrzeugflotte.

c. Prämien könnten BEVs und FCEVs bis 2020 kostenwettbewerbsfähig mit ICEs machen



Grafik 33: Die höheren Einkaufspreise für BEVs, FCEVs und PHEVs könnten teilweise durch Steuerbefreiungen angeglichen werden.

Mit einer durchschnittlichen Fahrzeugsubvention von fast € 6.000 für FCEVs, wie sie zur Zeit in mehreren EU Mitgliedstaaten für BEVs geleistet wird, könnten sich die Einkaufspreise für FCEVs bis 2020 denen von ICEs annähern und bis 2030 niedriger sein.



Grafik 34: Der temporäre Verzicht auf Treibstoff- und Elektrizitätssteuer wird die Treibstoffkosten für alle Antriebssysteme in 10 bis 20 Jahren angleichen.

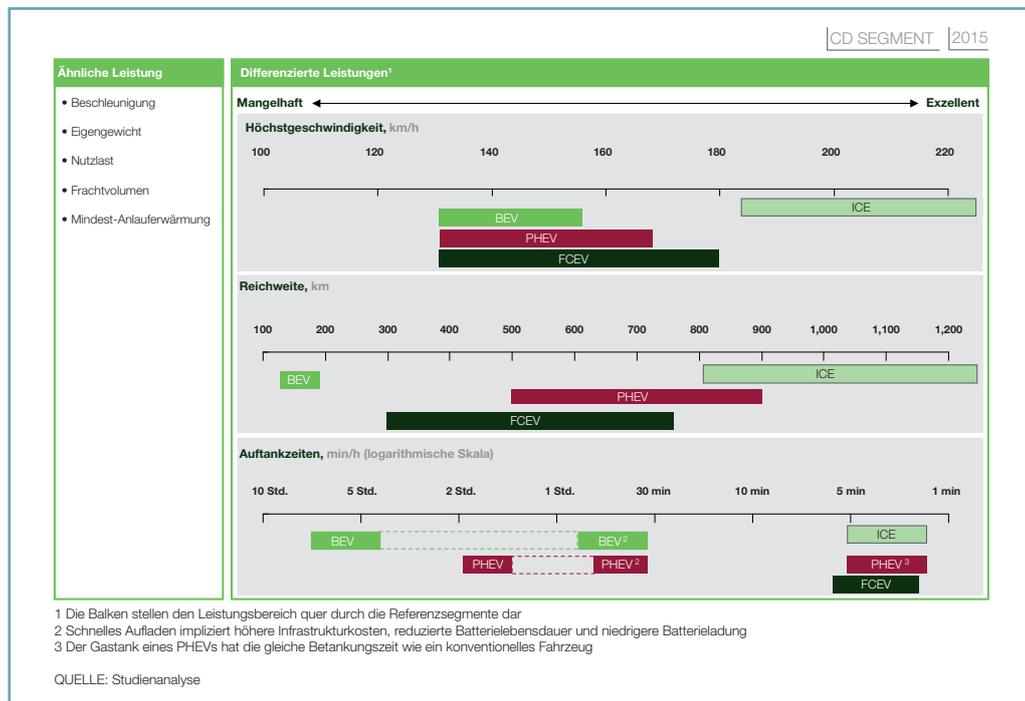
Wenn Wasserstoff in der Anfangsphase nicht wie Benzin und Diesel besteuert wird, können die Kosten für Infrastruktur und Treibstoff für FCEVs bereits im Jahr 2020 mit denen von ICEs kostenwettbewerbsfähig sein.

### 3. Ein Portfolio von Antriebssystemen kann die Bedürfnisse der Verbraucher und der Umwelt befriedigen

In den nächsten 40 Jahren wird kein einzelnes Antriebssystem alle wichtigen Kriterien wie Wirtschaftlichkeit, Leistung und Umwelt befriedigen. Da unterschiedliche Antriebssysteme die Bedürfnisse von unterschiedlichen Verbrauchern erfüllen, wird sich die Welt von einem einzelnen Antriebssystem (ICE) entfernen und Ausschau nach einem Portfolio von Antriebssystemen halten, in dem BEVs und FCEVs eine komplementäre Rolle spielen.

Die Ergebnisse zeigen, dass BEVs für Kleinwagen und kurze Fahrstrecken und FCEVs für Mittelklassewagen und größere Autos sowie längere Fahrstrecken ideal geeignet sind, während PHEVs eine Zwischenlösung für eine Welt mit Null Emissionen sind.

#### a. FCEVs und PHEVs sind in Bezug auf Fahrleistung und Reichweite mit ICEs vergleichbar



Grafik 35: Fahrleistung und Reichweite von FCEVs und PHEVs sind mit ICEs vergleichbar

Durch die eingeschränkte Energie-Speicherkapazität befinden sich BEVs in einer anderen Kategorie als FCEVs, PHEVs und ICEs in Bezug auf Geschwindigkeit, Reichweite oder Betankungszeit.

- Zum Beispiel wird ein durchschnittlicher mittelgroßer BEV mit einer maximalen Batterieladung (von z. B. 30 kWh, rund 220 kg in 2020) nicht in der Lage sein, mehr als 150 km bei 120 km/h zu fahren, wenn realistische Fahrbedingungen unterstellt werden (bis 2020 zu erwartende Verbesserungen wurden berücksichtigt).

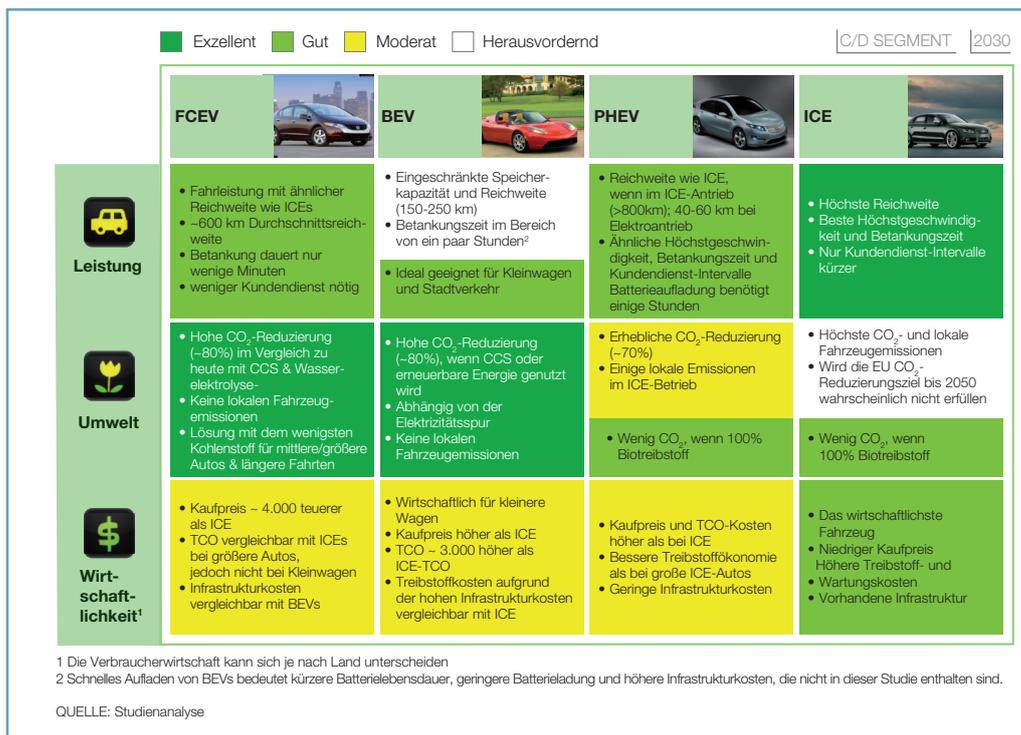
- Die Aufladezeiten sind auch bei einem optimalem bewährtem Batterietechnologie-Potential länger: 6–8 Stunden unter Nutzung einer normalen Aufladevorrichtung. Wenn man technisch ausgereifte und teure Technologien nutzt, so kann sich die Aufladezeit verringern. Das schnelle Batterieladen wird sich verbreiten, jedoch ist die Auswirkung auf die Batterieleistung und die Energienetz-Stabilität ungewiss. Außerdem dauert es 15–30 Minuten, bis die Batterie (teilweise) geladen ist. Das Austauschen der Batterien reduziert die Aufladezeit; dies ist machbar, wenn es einmal alle zwei Monate oder seltener benutzt wird und von allen großen Fahrzeugherstellern Batteriestandards übernommen werden.

FCEVs haben Fahrleistungen und Reichweiten, die mit ICEs vergleichbar sind: Eine durchschnittliche Reichweite von 500–600 km, ähnliche Beschleunigung und einen Betankungszeitaufwand von weniger als 5 Minuten, ähnlich der ICE-Betankung, die ein erwiesenes Geschäftsmodell ist.

Reichweite und Leistung der PHEVs ist denen von ICEs ähnlich, wenn sie sich in ICE-Antrieb befinden.

Siehe Anhang, Grafik 55, Seite 60, für eine grafische Analyse der Auswirkung der Reisegeschwindigkeit auf die Reichweite.

**b. Schnappschuss in das Jahr 2030: Unterschiedliche Antriebssysteme befriedigen unterschiedliche Bedürfnisse**



Grafik 36: Schnappschuss vom Jahr 2030 – nur ein Portfolio von Antriebssystemen kann die wichtigen Kriterien wie Leistung und Umwelt befriedigen

Mit einer Fahrleistung, die vergleichbar mit ICEs ist, und Betriebsgesamtkosten, die mit dem J-Fahrzeugsegment vergleichbar sind, sind FCEVs die kohlenstoffärmste Lösung für Mittelklassewagen, größere Fahrzeuge und längere Fahrtstrecken.

Durch die begrenzte Reichweite sind BEVs ideal für Kleinwagen und die städtische Mobilität geeignet. Obwohl erhebliche Kostenverbesserungen in der Batterie-Technologie in dieser Studie berücksichtigt wurden, wird nicht erwartet, dass das untere spezifische Volumen oder Gewicht nach 2020 erreicht wird.

PHEVs können eine erhebliche CO<sub>2</sub>-Reduzierung aufweisen. Dies trifft zu, wenn man Biotreibstoffe nutzt oder Kurzstrecken fährt. Die kleine installierte Batterie ist bei hoher Geschwindigkeit, schwerer Ladung oder größerer Entfernung schnell verbraucht. Obwohl die Kraftstoffeinsparung bei großen Autos besser ist als bei ICEs (insbesondere bei Stopp-/Start-Fahrten in der Stadt), liegen der Einkaufspreis und die TCO höher und ab 2030 haben PHEVs keine Kostenvorteile im Vergleich zu FCEVs.

#### *4. Die Kosten für die Wasserstoff-Infrastruktur machen ca. 5% der Gesamtkosten von FCEVs aus (€ 1.000–2.000 pro Fahrzeug)*

Um ein Portfolio für Antriebssysteme zu entwickeln sind mehrere Versorgungsinfrastrukturen nötig – nicht nur für Benzin und Diesel, sondern möglicherweise für CNG, LPG, 100% Biotreibstoffe, Elektrizität und Wasserstoff. Die frühe kommerzielle Einführung von BEVs und PHEVs ist bereits in mehreren europäischen Ländern im Gange: Viele Fahrzeughersteller haben die Produktion angekündigt und die ersten kommerziellen Modelle werden zwischen 2011 und 2014 erwartet. Der Bericht fokussiert sich daher auf die kommerzielle Einführung von FCEVs, die noch adressiert werden muss.

Man könnte argumentieren, dass es ineffizient ist, eine zusätzliche Betankungs-Infrastruktur zu den bereits vorhandenen aufzubauen. Allerdings sind die zusätzlichen Kosten für eine Wasserstoff-Infrastruktur relativ niedriger im Vergleich zu den Gesamtkosten von FCEVs und im Vergleich zu anderen Treibstoffen und Technologien, wie die Batterieaufladungsstruktur für BEVs und PHEVs.

Die Kosten für Wasserstoffvertrieb und Einzelhandelsinfrastruktur repräsentieren 5% der Gesamtkosten für FCEVs – ein Grossteil liegt in den Einkaufspreisen. Die Attraktivität des Geschäftskonzepts bei FCEVs ist daher kaum von den zusätzlichen notwendigen Kosten für Vertrieb und Einzelhandel betroffen. Mit anderen Worten: Wenn FCEVs einen wirtschaftlichen Sinn haben sollen – wie in dieser Studie dargestellt – ist der Aufbau einer geeigneten Wasserstoff-Infrastruktur gerechtfertigt.

In der ersten Dekade eines typischen Einführungsszenarios sind die Kosten für die Bereitstellung der Infrastruktur – insbesondere die für die Einzelhandelsstruktur – anfangs aufgrund der geringeren Nutzung höher. Trotzdem muss eine ausreichende Netzabdeckung für den Verbraucher zur Verfügung stehen, sodass sich die Erstinvestitionen auf € 3 Milliarden belaufen könnten (dies umfasst die Wasserstoffproduktion, den Vertrieb und den Einzelhandel). Obwohl ein einzelnes Unternehmen kämpfen müsste, um die Risiken einer solcher Investition aufzufangen, ist dies nicht der Fall auf gesellschaftlicher Ebene. Dies wird von Ländern bestätigt, die eine alternative Infrastruktur wie CNG und LPG aufgebaut haben.

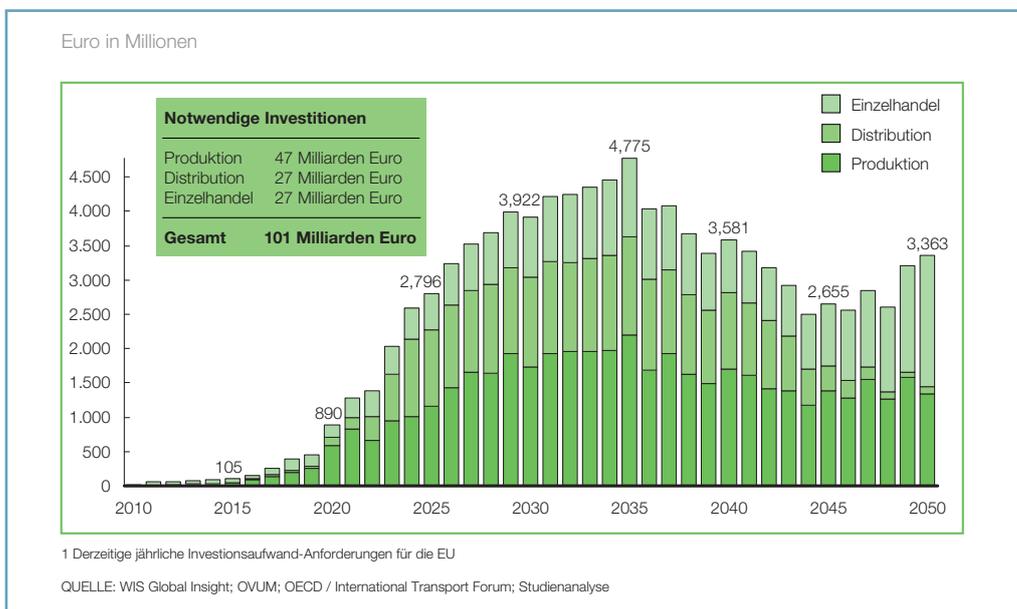
Die Kosten für den Start einer Wasserstoff-Infrastruktur sind den Kosten der Einführung einer Batterieaufladungsstruktur für BEVs oder PHEVs vergleichbar (ausschließlich potentieller Aufrüstungen im Energievertriebsnetz) – siehe Grafik 38 unten. Die Kosten für den Wasserstoff-Einzelhandel und -Vertrieb werden auf € 1.000–2.000 pro Fahrzeug geschätzt (über die gesamte Nutzungsdauer), einschließlich Vertrieb vom Produktionsort zur Einzelhandelsstation sowie Betriebs- und Investitionskosten für die Einzelhandelsstation selbst. Die jährliche durchschnittliche Investition von € 2,5 Milliarden ist mit anderen Industrien wie Öl, Gas, Telekommunikation und Straßeninfrastruktur vergleichbar, die jeweils auf € 50–60 Milliarden<sup>2</sup> kommen. Sie ist auch bedeutend geringer als zusätzliche Investitionen, die für die Dekarbonisierung erforderlich sind (€ 1,3 Billionen<sup>3</sup> im Laufe von 40 Jahren).

<sup>2</sup> Global Insight

<sup>3</sup> www.roadmap2050.eu

Die Kosten der Infrastruktur für elektrische Aufladung bewegen sich zwischen € 1.500 und € 2.500 pro Fahrzeug, wobei der obere Bereich der Abgrenzung mit 50% privater Aufladestruktur (Investition € 200 bis € 400 pro Ladestation) und 50% öffentlicher Aufladestruktur (Investition von € 5.000 bis € 10.000 für eine Ladetankstelle, die zwei Fahrzeuge bedient) angenommen wurde. Mögliche zusätzliche Investitionen für das Vertriebsnetz sind nicht enthalten, könnten jedoch je nach örtlicher Situation wichtig werden. Wenn ein Gebiet abgedeckt ist, sind im Gegensatz dazu aufgrund der schnellen Betankung keine weiteren Investitionen in die Wasserstoff-Infrastruktur nötig – ungeachtet der Anzahl der Fahrzeuge. Indem die Anzahl der FCEVs steigt, profitiert man auch von den Skaleneffekten.

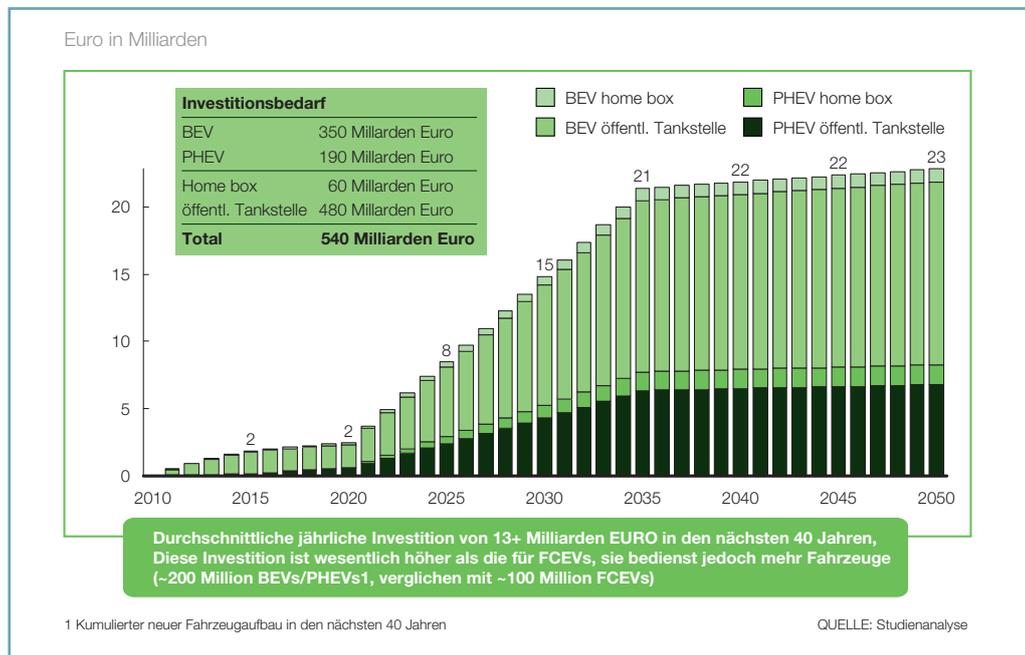
**a. Bis 2020 benötigen FCEVs eine Investition von € 3 Milliarden für die Versorgungsinfrastruktur für eine Millionen Fahrzeuge**



Grafik 37: Die gesamte Kapitalinvestition für einen Massenstart der Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur in Europa wird auf € 100 Milliarden in den nächsten 40 Jahren geschätzt

Die Erstinvestition vor 2020 ist relativ niedrig, da sie sich auf Regionen mit hoher Dichte wie Großstädte konzentriert. Investitionen in Einzelhandelstankstellen sind erforderlich, um eine ausreichende Gebietsabdeckung zu sichern, obwohl diese anfangs nicht ausgelastet wird. Die Einzelhandelskosten werden sich reduzieren, wenn mehr Fahrzeuge eingesetzt sind und die Einzelhandelstankstellen eine höhere Auslastung haben.

Die Schlussfolgerungen in dieser Studie basieren auf 25% Penetration von FCEVs in Europa bis 2050 (siehe Seiten 16–18). Um 50% Penetration zu erreichen würden die Kosten für die Infrastruktur um weitere € 75 Milliarden steigen, jedoch würde sich dadurch kein signifikanter Unterschied in den Gesamtbetriebskosten pro Fahrzeug ergeben.



Grafik 38: Eine Einführung von BEVs und PHEVs in Europa in großen Umfang würde in den nächsten 40 Jahren bis zu € 500 Milliarden erfordern

Die elektrische Infrastruktur könnte bis 2050 eine durchschnittliche jährliche Investitionen von € 13 + Milliarden erfordern, um 200 Millionen BEVs/PHEVs zu bedienen. Zwei Drittel betreffen die BEV-Infrastruktur, da diese einen höheren Anteil an öffentlichen Auflade-Stationen benötigen könnte als PHEVs.

### 5. Für die Einführung der FCEVs werden in den Anfangsjahren Kosten für die Gesellschaft entstehen

Die Vorteile von niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionen, niedrigen lokalen Emissionen (NO<sub>2</sub>, Partikel), Diversifizierung von primären Energiequellen und dem Übergang zu erneuerbaren Energien benötigen alle eine Erstinvestition. Diese wird jedoch letztendlich aufgrund reduzierter Batterie- und Brennstoffzellenkosten, Massenproduktion und potentiell steigender Kosten für fossile Brennstoffe und ICE-Spezifikationen schwinden.

Ein Einführungsszenario, das von 100.000 FCEVs in 2015, 1 Million in 2020 und einem Anteil von 25% am gesamten PKW-Markt der EU in 2050 ausgeht, resultiert in einer zunehmenden Lücke<sup>4</sup> von € 25 Milliarden bis 2020. Fast 90% beziehen sich auf die relativ hohen Kosten von FCEV in der nächsten Dekade. Es wird erwartet, dass die Kosten für eine CO<sub>2</sub>-Verringerung 2030 in einem Bereich von € 150 bis € 200 pro Tonne liegen und für größere Fahrzeuge nach 2030 noch negativer sind.

Ein starkes Argument ist notwendig, um die Regierungen von der Höhe der benötigten Subvention zu überzeugen. In den folgenden Schritten ist es daher sehr wichtig, Vorschläge zu unterbreiten, die aufzeigen, in welchem Umfang die Industrie bereit ist, die Verantwortung für Risiken zu übernehmen, die sie analysieren, kontrollieren und mindern kann. Gespräche mit den Mitgliedsstaaten und den EU-Regierungen werden sich höchstwahrscheinlich auf die Teilung von Kosten und Risiken zwischen privatem und öffentlichem Sektor fokussieren.

<sup>4</sup> Die wirtschaftliche Lücke ist das Delta zwischen den Gesamtbetriebskosten der betroffenen Antriebssysteme und denen von ICEs, multipliziert mit der Anzahl von Fahrzeugen im jeweiligen Jahr

### ***Bis 2020 eine kumulative ökonomische Lücke von € 25 Milliarden***

Ungefähr € 3 Milliarden müssen bis 2020 in die Wasserstoffversorgungs-Infrastruktur (Herstellung, Vertrieb, Einzelhandel) für eine Million FCEVs investiert werden. Von dieser Investition fällt rund € 1 Milliarde auf die Einzelhandelsinfrastruktur. Diese wird sich auf Regionen mit hoher Dichte (Großstädte, Autobahnen) konzentrieren und auf der vorhandenen Infrastruktur aufbauen. Wenn nur ein einzelnes Energieunternehmen in den Einzelhandel investieren würde, würde es aufgrund der niedrigen Anfangsnutzung durch eine geringe Anzahl von FCEVs den Nachteilen des „First Mover“ begegnen. Dies könnte zu einer Abschreibung von ca. € 0,5 Milliarden pro Jahr führen, wenn die Markteinführung befristet ist oder sich verzögert. Das Risiko der Erstinvestition reduziert sich, wenn mehrere Unternehmen investieren, und sogar noch mehr, wenn die Einführung staatlich koordiniert und durch geeignete Gesetze und Finanzierungen unterstützt wird.

Die verbleibenden € 2 Milliarden, die für Produktion und Vertrieb benötigt werden, stellen ein unterschiedliches Investitionsrisiko dar: Wasserstoffhersteller erwarten keinen Engpass und können sich auf die Wasserstoffnachfrage einstellen, da sie für das Produkt den Kurs erhalten, den sie benötigen, um ihre Kosten zu decken. Insbesondere in den ersten Jahren können Wasserstoffhersteller ohne spekulative Ausgaben im Voraus die Nachfrage durch vorhandene Produktionskapazitäten befriedigen. Eine schrittweise Kapazitätserhöhung könnte durch kleine Anlagen zu annehmbaren Kosten erfolgen. Dies trifft auch auf den Vertrieb von Wasserstoff zu, der für diesen Zeitraum vorgesehen ist.

Während Wasserstoffhersteller in den Genuss der Vorteile eines Erstanbieters kommen, tragen Erstinvestoren im Einzelhandel die Nachteile. Wasserstoffhersteller haben einen Anreiz – sobald die Wirtschaftlichkeit funktioniert – einen Wettlauf zu starten, um den Gegner zu schlagen. Während finanzielle Anreize nötig sind, um den Verbraucher von FCEVs zu überzeugen, gibt es nichts, was den Wasserstoffhersteller zurückhalten kann – solange die Infrastruktur vor Ort ist. Sie könnten sogar einen Marktvorteil gewinnen. Infrastrukturanbieter tragen das Risiko des Erstanbieters und haben einen erheblichen Vorkostenaufwand beim Aufbau eines Einzelhandelstations-Netzwerkes, das für einige Jahre nicht voll ausgenutzt ist. Die Anlagenkosten reduzieren sich im Laufe der Zeit, weil die einmaligen Investitionsausgaben von einer ansteigenden Anzahl von FCEVs genutzt werden.

Um in den Genuss der Vorteile von niedrigen Emissionen, Energievielfalt und technologischen Entwicklungen zu kommen, könnte sich aufgrund der höheren Einkaufspreise bis 2020 für FCEVs eine kumulative wirtschaftliche Lücke von € 25 Milliarden ergeben. Wenn dies nur von wenigen Fahrzeugherstellern ausgeglichen wird, benötigen diese € 1 Milliarde pro Jahr, um dies zu finanzieren. Ein Anreiz, die Produktion zu starten, ist nur dann gegeben, wenn sich die Mehrheit der Fahrzeughersteller verpflichtet und zusammenarbeitet und wenn der Staat eine temporäre finanzielle Unterstützung bereitstellt.

Dieser Bericht geht von einer vollständigen Steuerneutralität unter den vier Antriebssystemen aus, was einen anschaulichen Vergleich der Technologien ermöglicht; dies ist jedoch wahrscheinlich dort unrealistisch, wo praktische Vorgehensweisen betroffen sind. Das Benzin ist in der gesamten EU hoch besteuert und es sind bereits verschiedene ökologische Anreize vorhanden ([siehe Seite 43](#)).

Eine finanzielle Unterstützung für Kraftfahrzeughersteller kann durch eine Abstimmung des Steuerregelwerks erfolgen. Für den Zeitraum bis 2020 können detaillierte Subventionen pro Fahrzeug angewendet werden. Bei einer Unterstützung der Infrastruktur könnte ein Art Risikoübernahme oder Investitionsbeteiligung seitens der Regierung angemessener sein – das Problem sind nicht so sehr die Kosten des Aufbaus der Infrastruktur, sondern das Risiko, dass sich der Markt nicht entwickelt und die Infrastruktur zu verlassenen Anlagen werden.

Es ist möglich, dass die Regierungen nicht nur die „Karotte“, sondern auch die „Angel“, für die Gesetzgebung zur Unterstützung von Fahrzeugherstellern und Infrastrukturanbietern bereitstellen. Die Gesetzgebung muss glaubwürdig sein und kann die Risiken von ungewissen Ergebnissen aufzeigen, wobei die Probleme des „First Movers“, nur teilweise gelöst werden; es könnte jedoch trotzdem eine Rolle spielen.

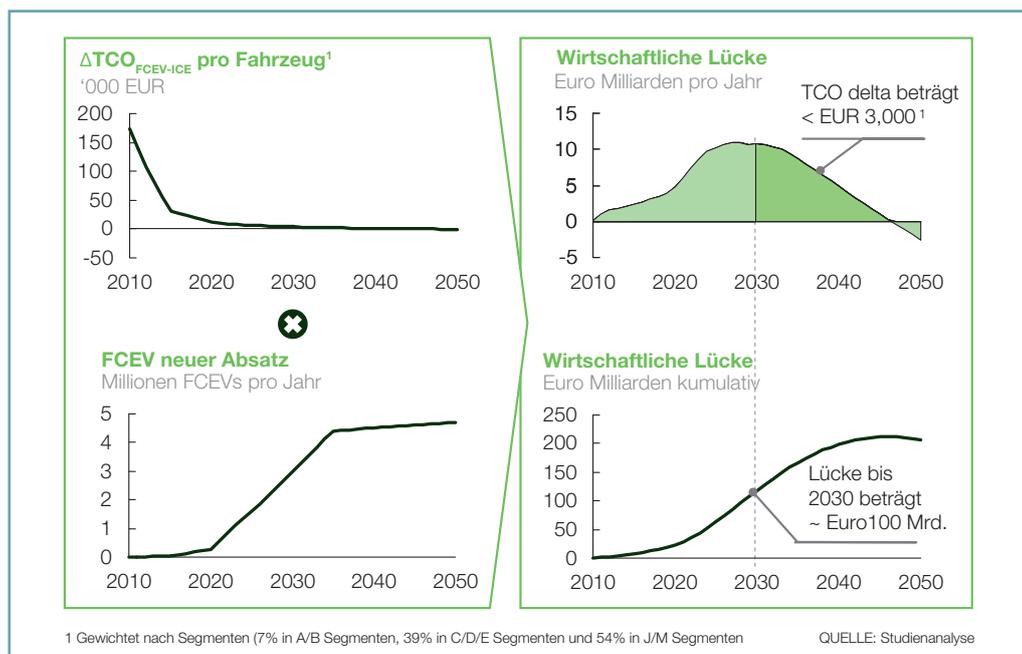
**2020–2030: Es gibt eine kumulative ökonomische Lücke in Höhe von € 75 Milliarden aufgrund des steigenden Fahrzeugvolumens.**

Wenn eine Kerninfrastruktur bis 2020 auch nur gebietsweise bereitgestellt wurde und eine kritische Masse von FCEVs auf der Strasse ist, könnte die Bereitschaft zu investieren größer sein und Raum für feinabgestimmte legislative Maßnahmen und steuerlichen Anreize schaffen. Je näher wir an das Jahr 2020 kommen, umso deutlicher wird, ob die angestrebten Fahrzeugzahlen und Kosten erreicht werden – und ob 1 Million Fahrzeuge tatsächlich der Impuls sind, um das Ziel zu erreichen. In dieser Phase ist es möglich, dass jede staatliche Unterstützung, die während dieser Periode benötigt wird, durch ein Steuersystem und behördliche Auflagen geregelt wird, ohne außerordentliche Maßnahmen oder Subventionen.

**Es wird erwartet, dass nach 2030 jede verbleibende potentiell zu erwartende ökonomische Lücke pro Fahrzeug klein ist und vom Verbraucher getragen wird.**

Nach 2030 wird angenommen, dass die Mehrheit der Verbraucher bei der Fahrzeugwahl aufgrund der festgelegten steuerlichen und legislativen Regelwerke finanziell gesteuert wird. Vorausgesetzt, dass diese Verordnungen stabil und eindeutig sind, sollten Fahrzeug- und Wasserstoffhersteller sowie Infrastrukturanbieter in der Lage sein, Investitionen auf der Basis von erkannten Risiken und prognostizierten Gewinnen zu machen.

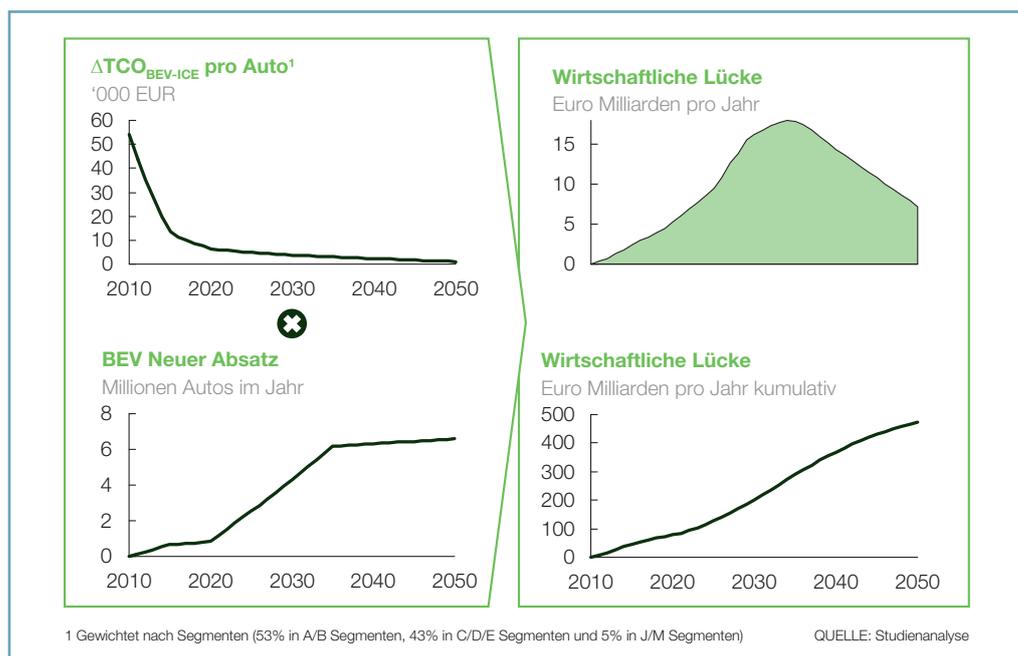
**a. FCEVs stehen einer zunehmenden ökonomischen Lücke von € 25 Milliarden (Autos + Infrastruktur) bis 2020 gegenüber.**



Grafik 39: Die Kosten für die Verschiebung von ICEs zu FCEVs können sich auf € 4,5 Milliarden pro Jahr in Europa belaufen (€ 500 pro neues Fahrzeug). Die ökonomische Lücke wird sich nach 2030 allmählich schließen

Bis 2020 kann für FCEVs eine zunehmende ökonomische Lücke (Autos + Infrastruktur) von € 25 Milliarden (hauptsächlich aufgrund der höheren Einkaufspreise) sowie eine zusätzliche Lücke von € 75 Milliarden bis 2030 entstehen.

Die Gesamtbetriebskosten der FCEVs fallen gegenüber den ICEs bis 2030 dramatisch und sind bis 2020 bei Mittelklassewagen und größeren Autos mit ICEs wettbewerbsfähig; ab diesen Zeitpunkt wird voraussichtlich die ökonomische Lücke pro Fahrzeug an den Verbraucher weitergegeben. Jedoch nimmt die ökonomische Lücke aufgrund des steigenden Absatzes zu.



Grafik 40: BEVs können einer zunehmenden ökonomischen Lücke von € 80 Milliarden bis 2020 und € 500 Milliarden bis 2050 gegenüberstehen

Insgesamt ist eine zunehmende Lücke von € 80 Milliarden für BEVs bis 2020 und € 500 Milliarden bis 2050 vorhanden (für eine Analyse der ökonomischen Lücke für PHEVs (siehe Anhang, Grafik 56, Seite 61).

Aufgrund der Modulbauweise<sup>5</sup> sind elektrische Infrastrukturen besser aufzubauen, aber nach 2020 sind die Infrastrukturkosten für FCEVs niedriger als die für BEVs, da aufgrund der langen Ladezeit die Anzahl der öffentlichen Aufladestationen im Verhältnis zur Anzahl der Fahrzeuge gleich bleibt. Im Gegensatz dazu sind aufgrund der schnelleren Betankung keine weiteren Investitionen in die Wasserstoffstruktur notwendig, wenn das Gebiet einmal abgedeckt ist – ungeachtet der Anzahl der Fahrzeuge. Bis 2030 liegen die Kosten für BEVs daher bei 1,5 – 2,5 Cent pro Kilometer im Vergleich zu 1,5 Cent pro Kilometer für FCEVs.

<sup>5</sup> Die Studie geht aus von 50% privater Aufladung (75% für PHEVs), 50% öffentlicher Aufladung, mit zwei Buchsen, die jeweils zwei Fahrzeuge pro öffentliche Aufladestation bedienen, d.h. vier Fahrzeuge

# NÄCHSTE SCHRITTE

Im April 2010 bestätigte die Europäische Kommission, dass „umweltfreundliche Fahrzeuge einschließlich derjenigen, die Elektrizität, Wasserstoff, Biogas, flüssige Treibstoffe und hochwertige Mischungen zu nutzen in der Lage sind, wahrscheinlich einen bedeutenden Beitrag für die Europäischen Prioritäten für 2020 leisten können ... zur Förderung einer Ressourcen-effizienteren, umweltfreundlicheren und wettbewerbsfähigeren Wirtschaft“<sup>1</sup>. Dies veranlasste 2007 das Europäische Parlament zu dem Aufruf, „die Speicherkapazitätstechnologie für Wasserstoff-Brennstoffzellen und andere Speichertechnologien für tragbare, stationäre und transportable Zwecke einzuführen und eine dezentralisierte Wasserstoffinfrastruktur von unten nach oben bis 2025 in allen EU-Mitgliedsstaaten einzuführen.“

*Es sind dringende Maßnahmen für Privatfahrzeuge erforderlich, damit das EU CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel erreicht wird.*

Pläne für die Markteinführung von Elektrofahrzeugen sollten daher von Fahrzeugherstellern, Ausrüstungsherstellern und Infrastrukturanbietern gemeinsam eingeleitet werden. Kurzfristig müssen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch effizientere ICEs und PHEVs in Kombination mit Biotreibstoffen reduziert werden.

Investitionszyklen in die Energieinfrastruktur sind jedoch langfristig, und damit BEVs und FCEVs die Skaleneffekte erreichen, die notwendig sind, um das CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel der EU zu erreichen, müssen die Maßnahme Priorität erhalten. Implementierungspläne für BEVs und PHEVs werden in den anderen Berichten beschrieben, daher ist dieser Bericht auf FCEVs fokussiert.

## **a. Die Vorbereitung einer Markteinführungsstudie für FCEVs und eine Wasserstoff-Infrastruktur**

Die Studie zeigt die ersten Schritte zu einer umfangreicheren, koordinierten EU-Markteinführung von FCEVs und einer Wasserstoffstruktur. Nachdem alle technologischen Hürden genommen und Tausende von Teststunden in einem Verbraucherumfeld durchgeführt wurden, ist die Industrie bereit – wie im Letter of Understanding dargestellt, der 2009 von den Fahrzeugherstellern (siehe Seite 13) und vom Globalen Konsortium der Interessenten herausgegeben wurde, die bereit waren, ihre vertraulichen Daten ausschließlich für die Zwecke dieser Studie zu teilen. Der nächste logische Schritt wäre, eine umfassende und koordinierte EU-Markteinführungsstudie zu entwickeln (Grafik 41). Diese besteht aus zwei Phasen:

1. Eine gründliche Fallstudie und ein Implementierungsplan für einen einzelnen Mitgliedstaat (z. B. Deutschland), der 2015 beginnt. Gleichzeitig sollte eine Reihe von FCEV-Vorführprojekten in anderen Mitgliedsstaaten starten, um Erfahrungen mit dieser Technologie zu sammeln.
2. Eine abgestufte Einführungsplanstudie – zunächst zur Markteinführung in den Mitgliedsstaaten, die bereits Erfahrungen durch die o. g. Vorführprojekte gesammelt haben, gefolgt von weiteren Mitgliedsstaaten.

Der o. g. Implementierungsplan für einen einzelnen Mitgliedsstaat soll für Investitionen durch Unternehmer und die öffentlichen Hand geeignet sein. Dies beinhaltet die Adressierung der mit dem Plan verknüpften Risiken, wie Wasserstoff dekarbonisiert werden soll, und die Auswirkung von künftigen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Transportsektor.

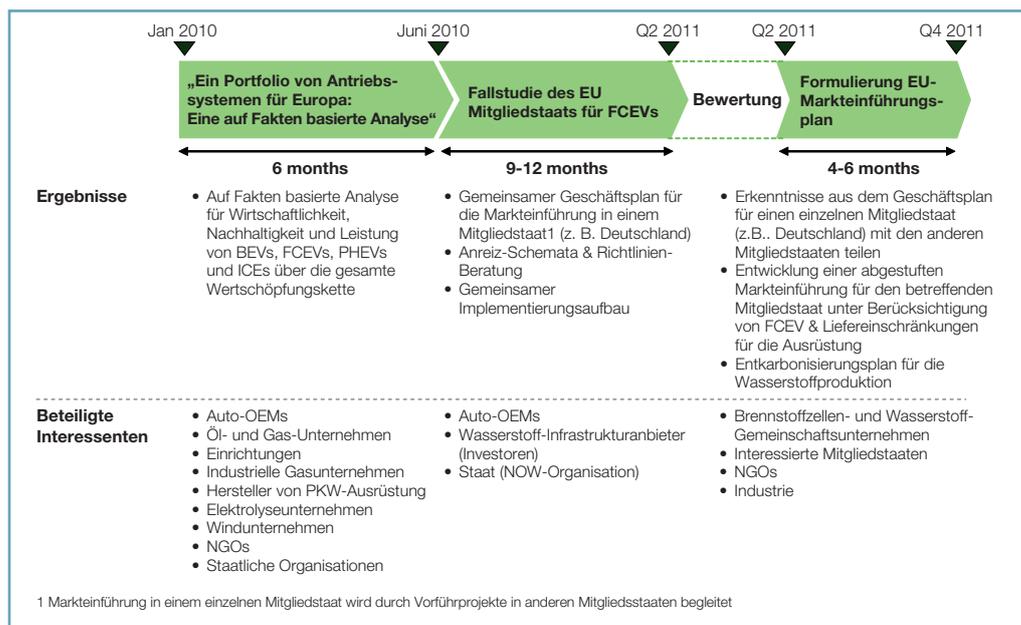
Wie die Studie zeigt, gibt es für Erstinvestoren im Einzelhandel einen Nachteil. **Wenn jedoch mehrere Wasserstoff-Einzelhandelsanbieter investieren (z. B. durch ein Konsortium) oder ein marktbasierter Mechanismus entwickelt wird, um die Risiken der unterschiedlichen Infrastrukturanbieter zu streuen, gibt es keine „Trittbrettfahrer“.** Der Markteinführungsplan muss Hand in Hand mit einem deutlichen staatlichen Anreizmechanismus gehen, um die Risiken auszugleichen, oder der Start wird nicht stattfinden.

<sup>1</sup> COM(2010)186: Eine europäische Strategie für saubere, energieeffiziente Fahrzeuge

Nachdem das technologische Risiko entschärft und eine Kostenreduzierung in einem der Mitgliedstaaten erreicht wurde – durch einer Reihe von kleinen, subventionierten Vorführprojekten, die parallel in anderen Mitgliedstaaten durchgeführt wurden – ist eine stufenweise EU-Markteinführungsplanstudie notwendig, mit einer Markteinführung in den Mitgliedstaaten, die durch die Markteinführung bei vorangegangenen Vorführungen Erfahrungen gesammelt haben.

Die stufenweise Einführung adressiert die Versorgungseinschränkungen der Kraftfahrzeughersteller und Wasserstoff-Infrastrukturanbieter, die nicht in der Lage sind, eine gleichzeitige Markteinführung in allen Mitgliedstaaten durchzuführen. Die Markteinführung und der Aufbau der Wasserstoff-Versorgungsinfrastruktur soll auch die bevorzugten primären Energieressourcen der unterschiedlichen Mitgliedstaaten und die CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele für den gesamten Transportsektor berücksichtigen.

FCEV-Vorführprojekte in anderen Mitgliedsstaaten werden wahrscheinlich 2015 starten. Diese können von den Erkenntnissen aus Deutschland profitieren. Ein zu früher Start könnte zu 50% höheren Investition für die gleiche Anzahl von Fahrzeugen führen; z. B. würde in einem Land wie Belgien ein FCEV-Vorführprojekt mit 100 Fahrzeugen und vier Stationen im Jahr 2011 € 30 Mio. kosten gegenüber € 12–13 Mio., wenn die Implementierung nach dem Start in Deutschland erfolgt (die Kosten für FCEVs werden sich mit einem Faktor 4–5 reduzieren und die der Einzelhandelsstationen mit einem Faktor von 2).



Grafik 41: Markt-Startplan für FCEVs in Europa

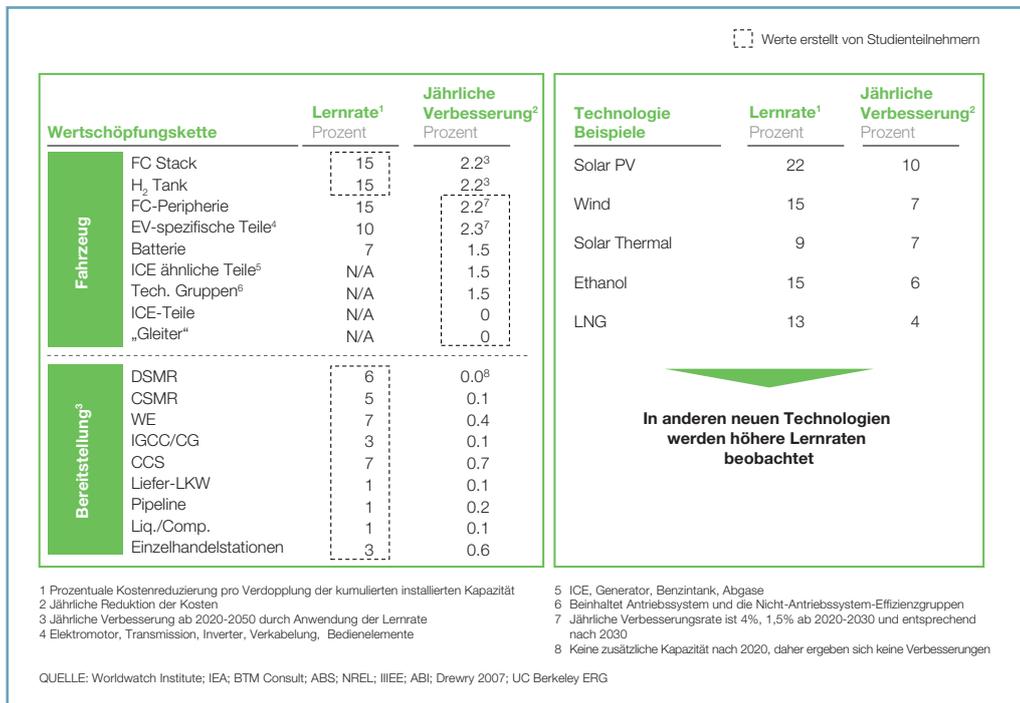
### b. Koordinierte Einführung von BEVs/PHEVs und der Batterieaufladungs-Infrastruktur

Ähnlich Maßnahmen wären bei der Einführung von BEVs und PHEVs in der EU hilfreich. Auch hier ist das Risiko des Marktversagens vorhanden, da jedoch die Investition pro elektrische Aufladestation in nicht öffentlichen Einrichtungen niedrig ist, ist auch das finanzielle Risiko der Infrastrukturanbieter in diesem Fall niedrig. Wie bei der Wasserstoff-Infrastruktur ist eine Vorab-Investition für die öffentlichen Aufladeeinrichtungen notwendig, damit der Verbraucher vom Start an einen angemessenen Zugang zur Infrastruktur hat.

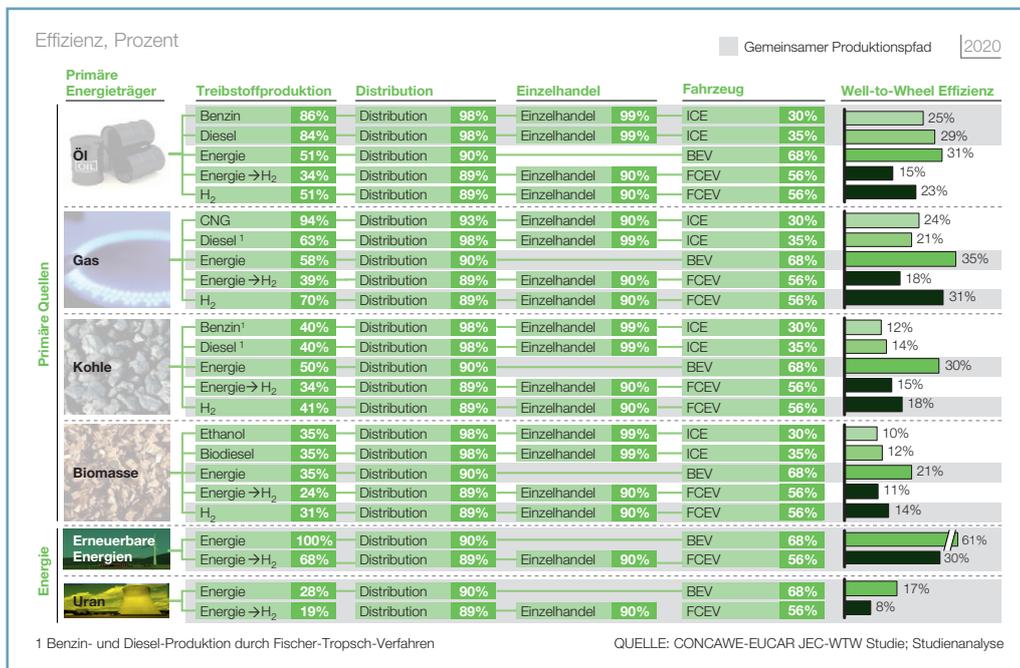
Um eine einwandreiche Markteinführung zu verwirklichen muss das technologische Risiko kommerziell entschärft werden. Es gibt bereits mehrere Programme für BEVs in verschiedenen europäischen Ländern und auf EU-Ebene<sup>2</sup>, die Themen wie Technologie, Markteinführung, Förderungsmittel, Standardisierung etc. adressieren. Ein einheitliches Konzept könnte helfen, die Entwicklung zu optimieren und eine frühe Marktbereitschaft zu unterstützen.

<sup>2</sup> Europäische Initiative für umweltfreundliche Autos

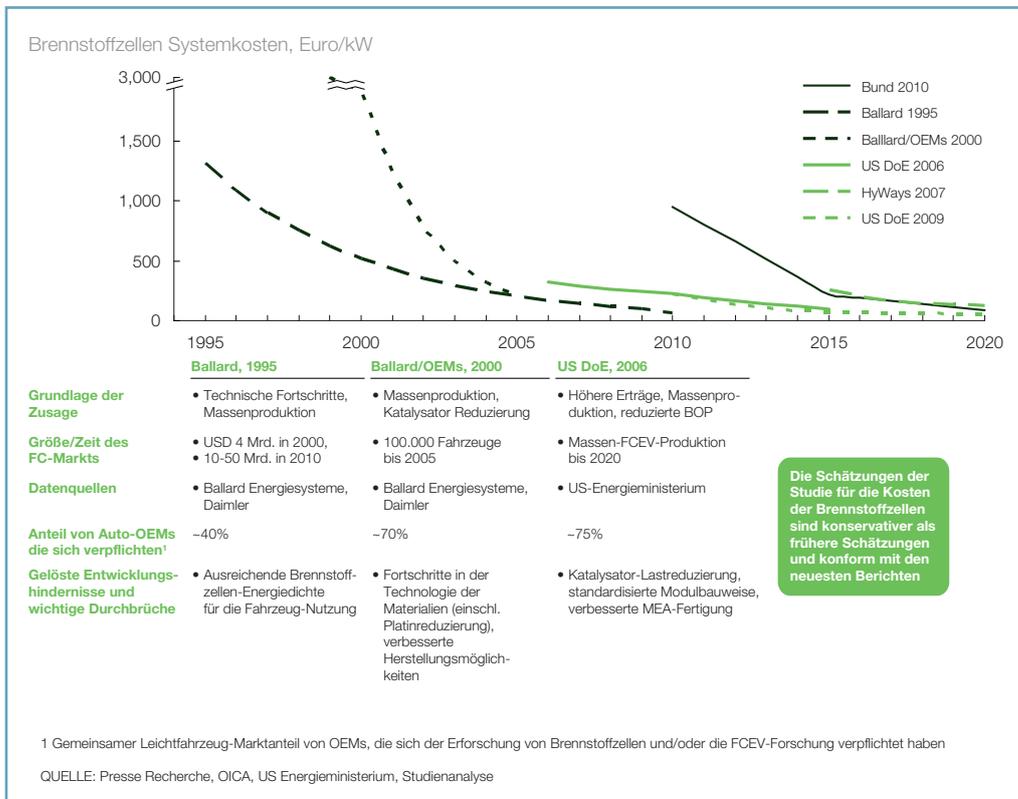
# ANHANG



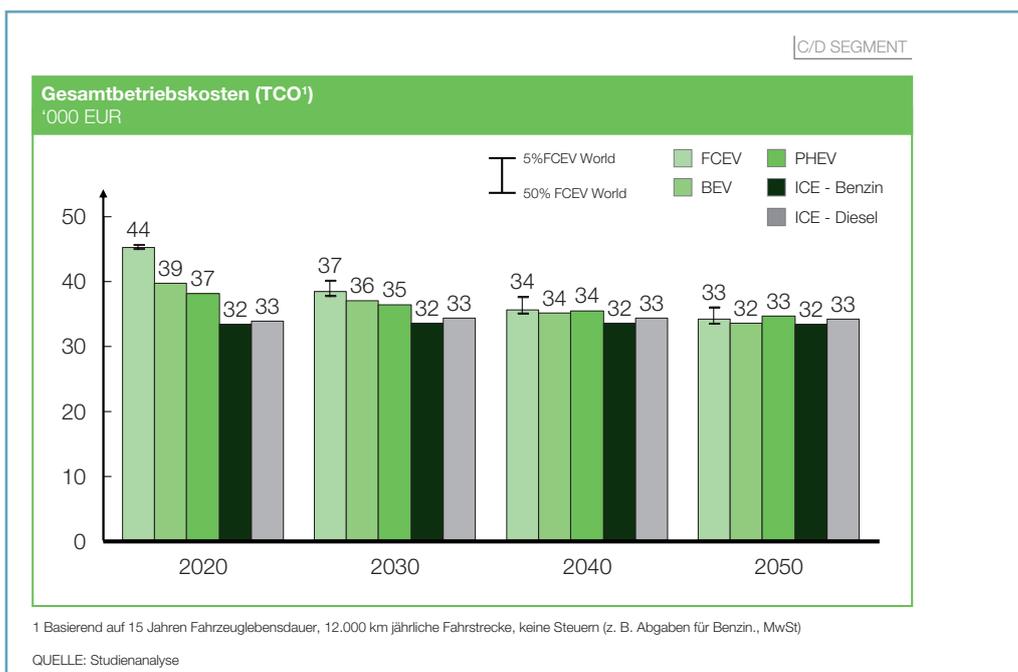
Grafik 42: Prognostizierte Kostenreduzierungen für FCEVs und Wasserstoffversorgung sind niedriger als historische Verbesserungen für vergleichbare Technologien



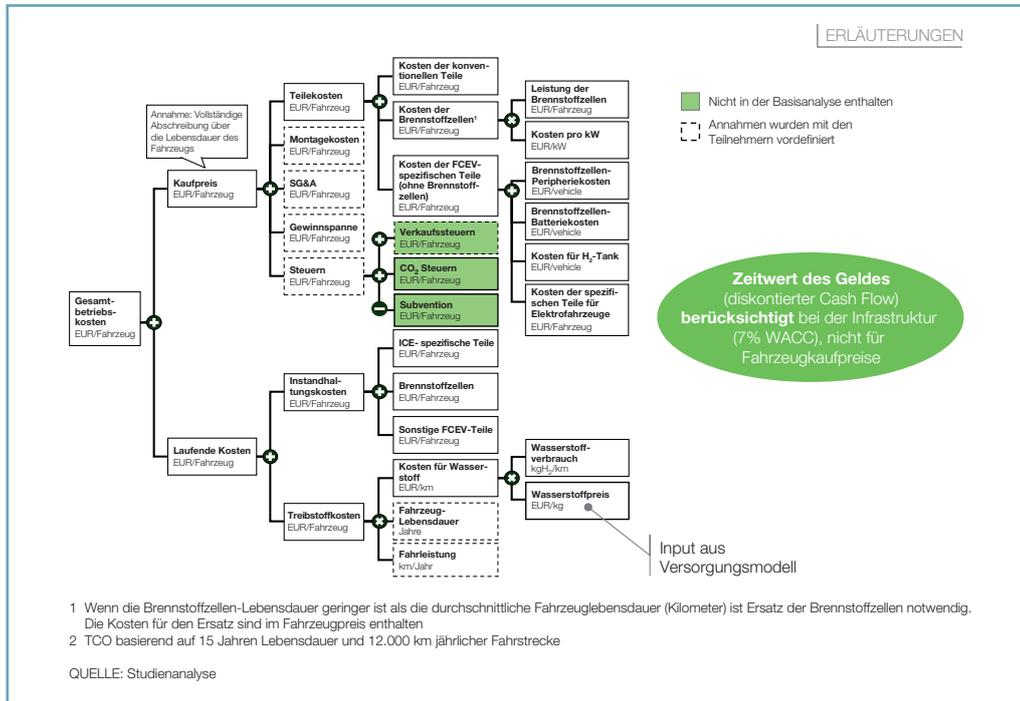
Grafik 43: Die FCEV-Kraftstoffpfadeffizienz ist bei flexibler Rohstoffnutzung mit dem ICE wettbewerbsfähig, wobei BEV das effizientere Antriebssystem bleibt



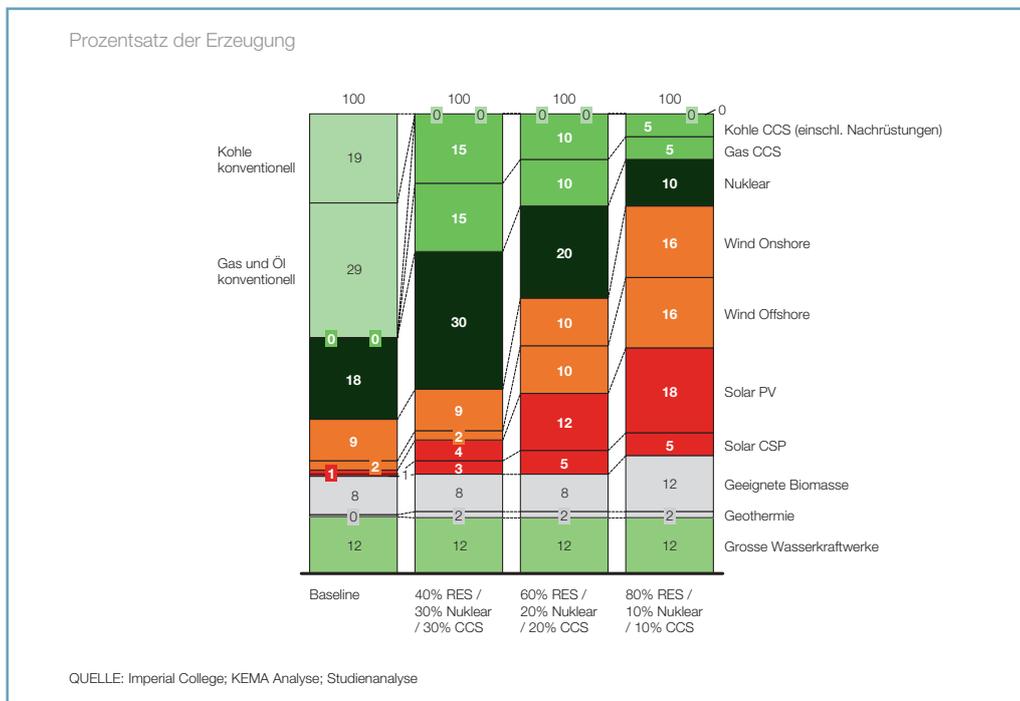
Grafik 44: Zusammenfassung der vorangegangenen Studien, die nicht auf geschützten Industriedaten basieren



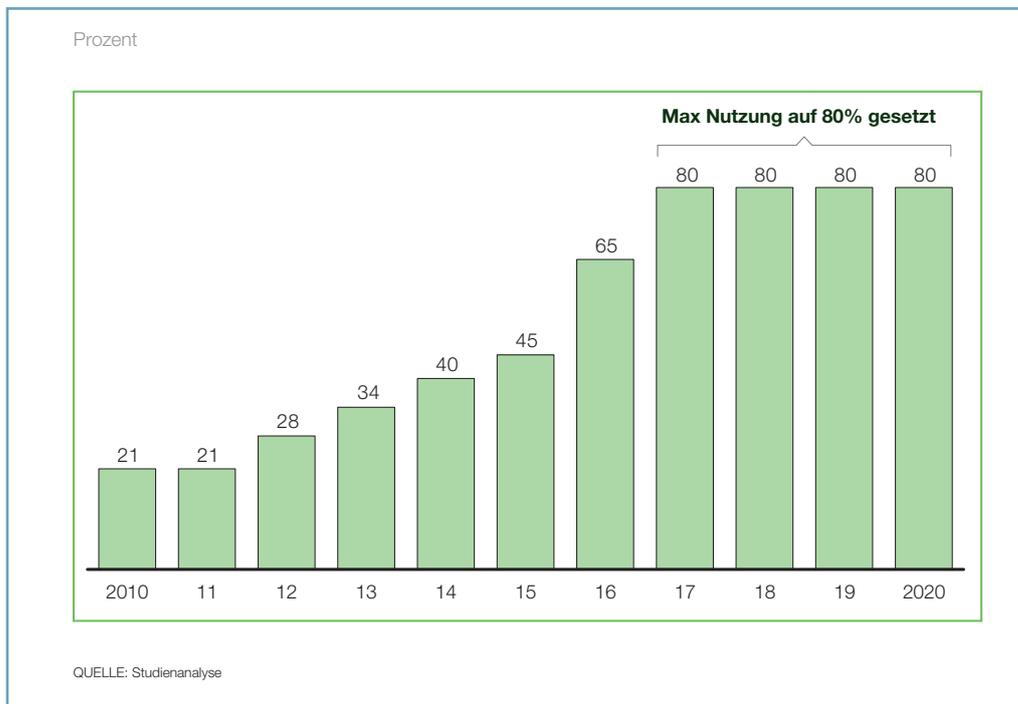
Grafik 45: Die unterschiedlichen „Welt“-Szenarien für die Penetration von FCEVs in der EU – 5%, 25% und 50% – verursachen keine dramatischen Veränderungen der Fallstudie



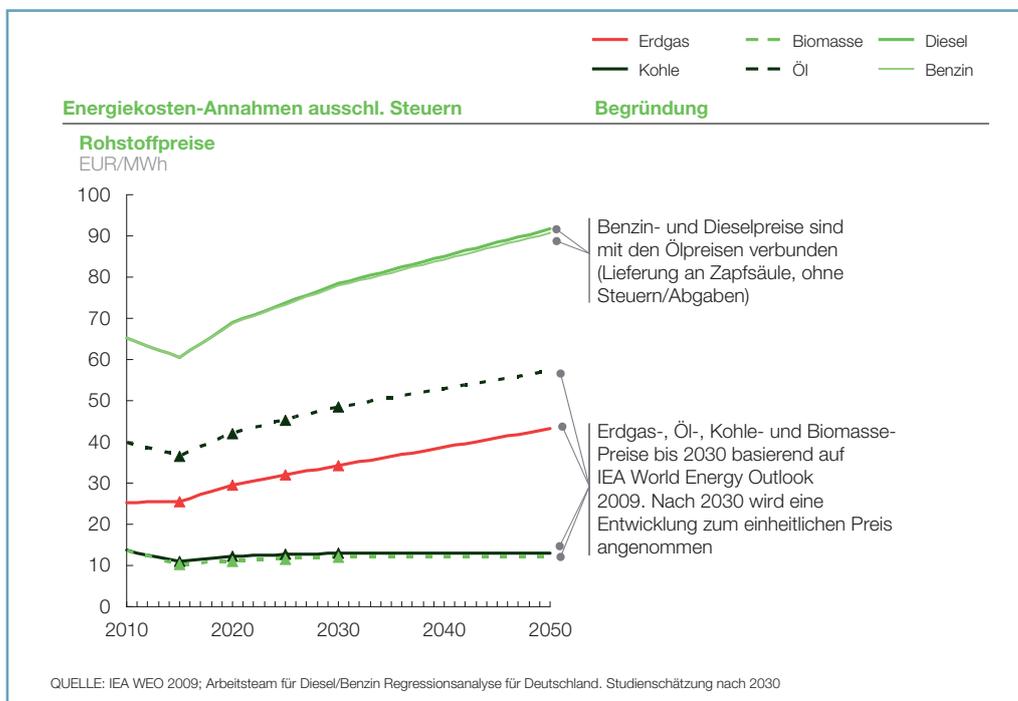
Grafik 46: Beispiel einer Kalkulation der TCO für FCEVs



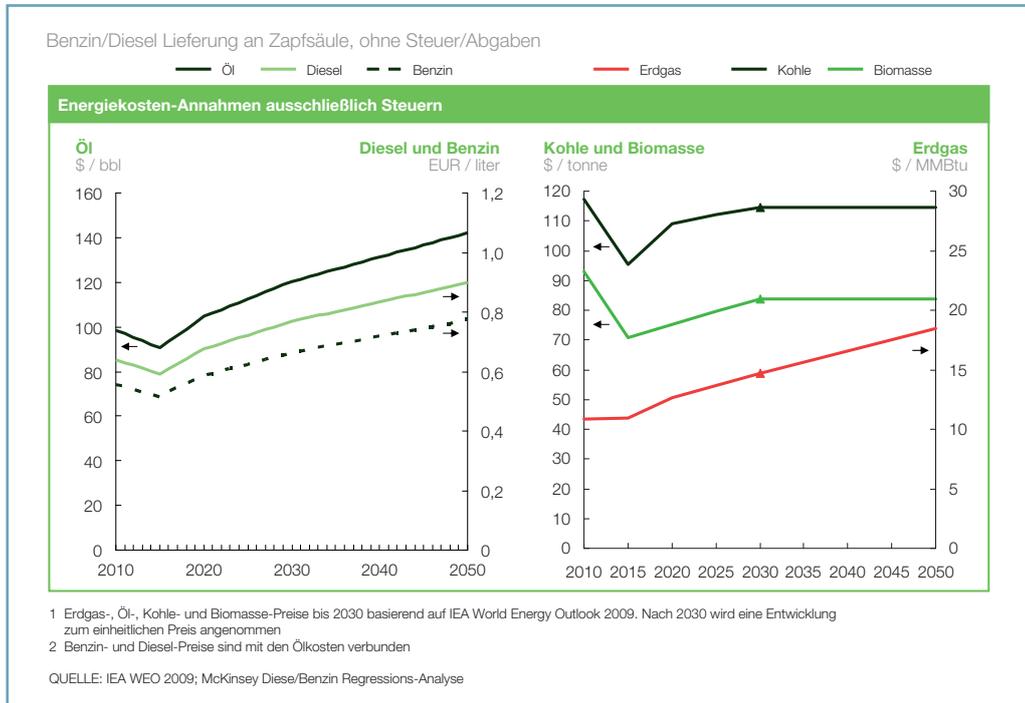
Grafik 47: Es wurde ein Produktionsmix der EU 2050 von 60% RES angenommen



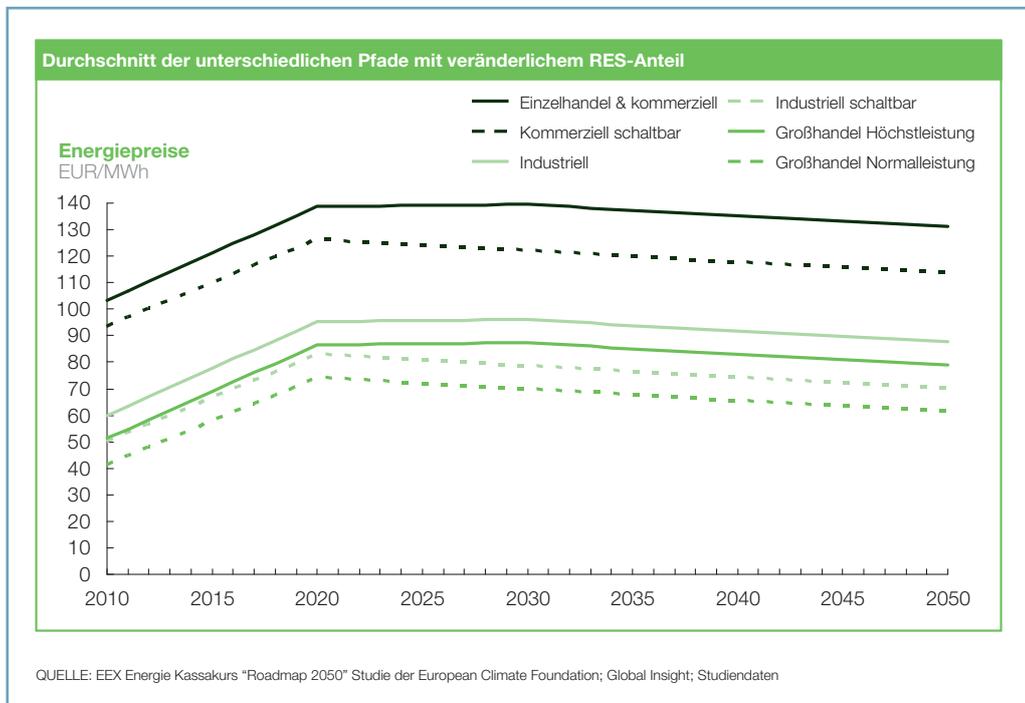
Grafik 48: Durchschnittliche Nutzung der Wasserstoff-Tankstellen



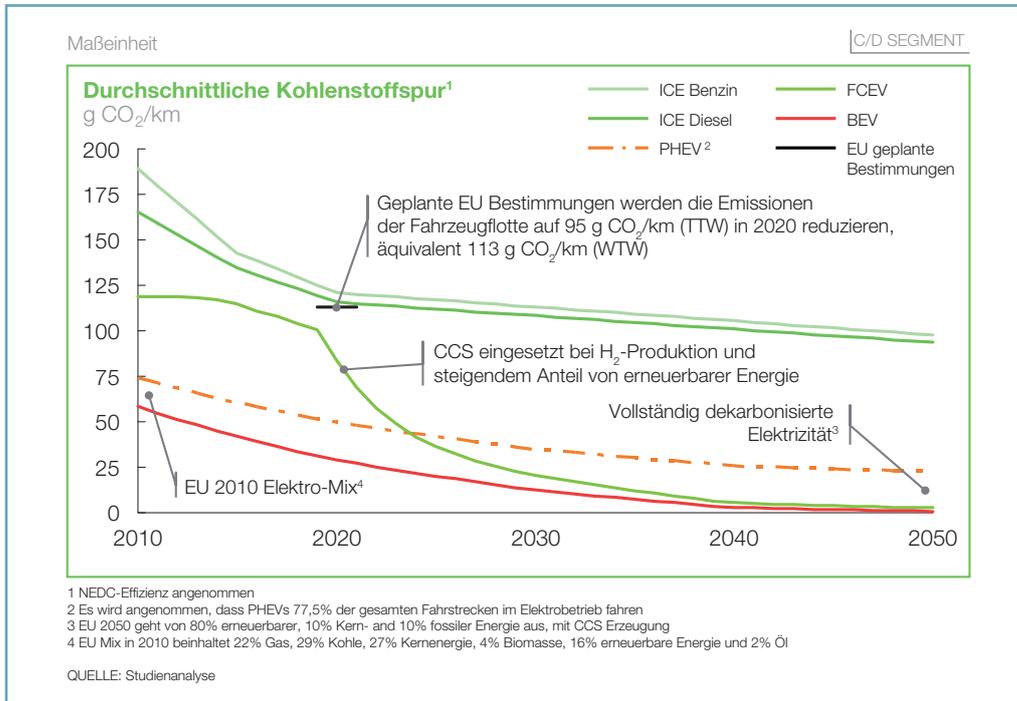
Grafik 49: Rohstoff-Preisannahmen bis 2050 und entsprechende Benzin- und Dieselpreise (Version 1)



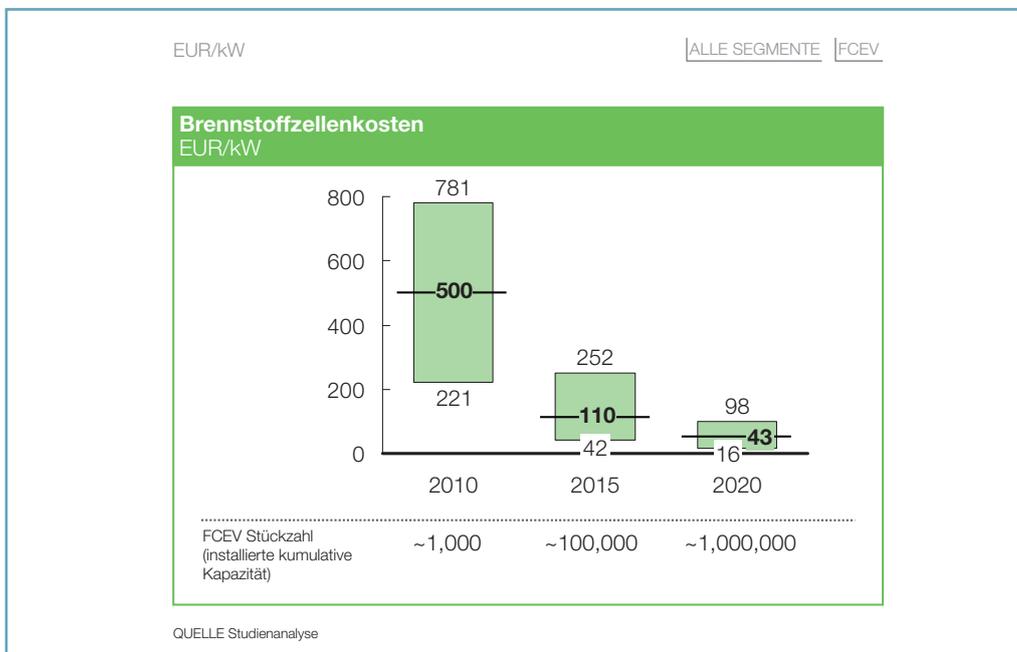
Grafik 50: Rohstoff-Preisannahmen bis 2050 und entsprechende Benzin- und Dieselpreise (Version 2)



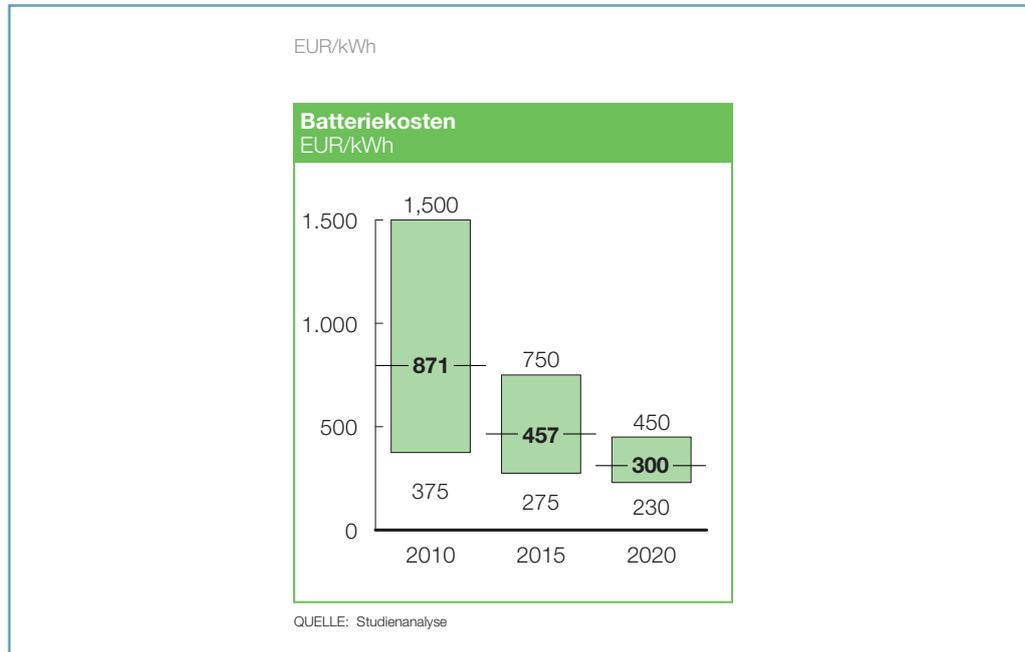
Grafik 51: Energiepreis-Annahmen für das Elektrolyse-Produktionsszenario



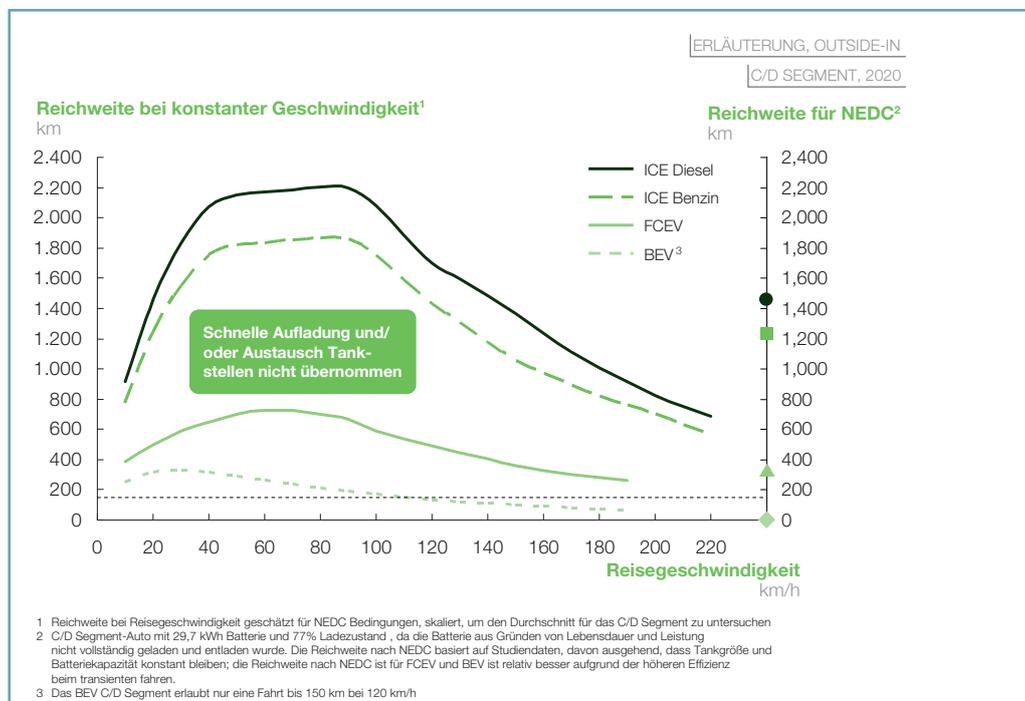
Grafik 52: Langfristig haben BEVs und FCEVs das größte Potential, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren



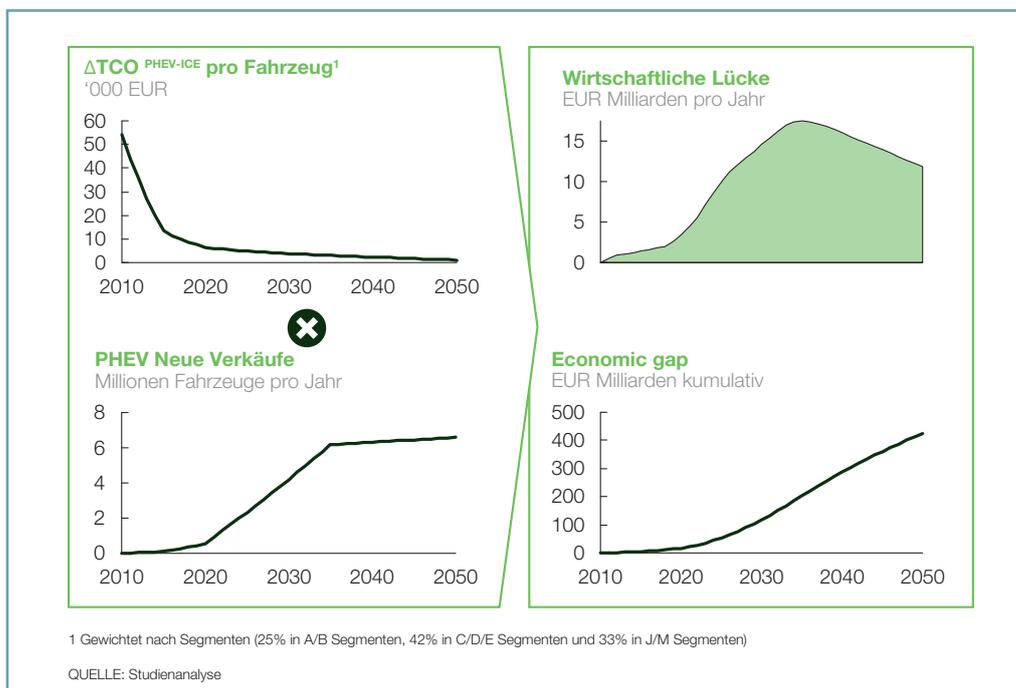
Grafik 53: Die Kosten des Brennstoffzellenblocks, basierend auf den Daten, die von teilnehmenden Fahrzeugherstellern und Lieferanten übermittelt wurden



Grafik 54: Die Kosten für die Batterie, basierend auf den Daten, die von teilnehmenden Fahrzeugherstellern und Lieferanten übermittelt wurden



Grafik 55: FCEVs haben eine ausreichende Reichweite bei einer höheren Dauergeschwindigkeit, während die Reichweite von BEVs eingeschränkt ist



Grafik 56: PHEVs werden bis 2050 einer ökonomischen Lücke von € 420 Milliarden gegenüberstehen

# GLOSSAR

<b>350/750 bar</b>	Druckpegel für Wasserstoff-Speichertanks
<b>4 x 4</b>	Allradantrieb
<b>BBL</b>	Barrel Öl
<b>BEV</b>	Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug
<b>CCS</b>	CO <sub>2</sub> -Abscheidung und -Speicherung
<b>CG</b>	Kohlevergasung
<b>CNG</b>	Komprimiertes Erdgas
<b>CO<sub>2</sub></b>	Kohlendioxid
<b>CO<sub>2</sub>e</b>	Kohlendioxid-Äquivalente
<b>CSMR</b>	Zentrale Dampf-Methanreformierung
<b>CWE</b>	Zentrale Wasserelektrolyse
<b>DSMR</b>	Dezentralisierte Dampf-Methanreformierung
<b>DWE</b>	Dezentralisierte Wasserelektrolyse
<b>ECE-15</b>	United Nations Economic Commission zur Spezifizierung einer städtischen Fahrzyklussimulation
<b>EU</b>	Europäische Union
<b>EU27</b>	Europäische Mitgliedsstaaten
<b>EU29</b>	Europäische Mitgliedsstaaten + Schweiz und Norwegen
<b>EUDC</b>	Extra Urban Driving Cycle – Spezifizierung einer städtischen Fahrzyklussimulation
<b>EV</b>	Elektroauto
<b>FC</b>	Brennstoffzellen
<b>FCEV</b>	Brennstoffzellenfahrzeug
<b>GDL</b>	Gasdiffusionsschicht
<b>GHG</b>	Treibhausgasemissionen
<b>Gt</b>	Gigatonnen (Milliarden)
<b>H<sub>2</sub></b>	Wasserstoff
<b>HEV</b>	Hybrid-Elektroauto
<b>ICE</b>	Interne Verbrennungsmotoren
<b>IEA</b>	International Energy Agency
<b>IGCC</b>	Integrated Gasification Combined Cycle
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>km</b>	Kilometer
<b>m</b>	Millionen
<b>MEA</b>	Membrane Elektrodenanordnung
<b>MWh</b>	Megawattstunde
<b>MPV</b>	Mehrzweckfahrzeug
<b>MJ</b>	Megajoule
<b>Mt</b>	Megatonne (Million)
<b>NEDC</b>	New European Driving Cycle – Neuer Europäischer Fahrzyklus
<b>NGO</b>	Nichtstaatliche Organisation
<b>OEM</b>	Hersteller der Originalausstattung
<b>p.a.</b>	Pro annum
<b>PEM</b>	Protonen-Austauschmembrane
<b>PDC</b>	Pro Verdoppelung der Kapazität
<b>PHEV</b>	Plug-in Hybrid-Elektrofahrzeug
<b>PPM</b>	Teile pro Million
<b>R&amp;D</b>	Forschung und Entwicklung
<b>RES</b>	Erneuerbare Energiequellen
<b>RTD</b>	Forschung und Technologie-Entwicklung
<b>SAE</b>	Verband der Automobilingenieure (SAE International)
<b>Segment (A/B)</b>	Kleinwagen (siehe Seite 16)
<b>Segment (C/D)</b>	Mittelklasse-PKW (siehe Seite 16)
<b>Segment (J)</b>	Großer Allradwagen SUV-Typ (siehe Seite 16)
<b>SG&amp;A</b>	Verkaufs-, Allgemein- und Verwaltungskosten
<b>SMR</b>	Dampfreformierung von Methan
<b>SUV</b>	Sportwagen
<b>TCO</b>	Total Cost of Ownership (Gesamtbetriebskosten)
<b>TWh</b>	Terawattstunde
<b>VAT</b>	Mehrwertsteuer
<b>WACC</b>	Gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten
<b>WE</b>	Wasserelektrolyse



**Weitere Informationen:**

Technische Fragen, die sich im Zusammenhang mit diesem umfassenden Bericht ergeben, können an [info@zeroemissionvehicles.eu](mailto:info@zeroemissionvehicles.eu) gerichtet werden. Spezifische Fragen beantworten auch die jeweils beteiligten Unternehmen.

[www.zeroemissionvehicles.eu](http://www.zeroemissionvehicles.eu)  
[info@zeroemissionvehicles.eu](mailto:info@zeroemissionvehicles.eu)