

# Energiepfade für den Straßenverkehr der Zukunft

Optionen für eine klimaneutrale Mobilität im Jahr 2050







PROF. DR.-ING.  
**PETER GUTZMER**  
 Vorsitzender  
 FVV



DIPL.-ING.  
**DIETMAR GOERICKE**  
 Geschäftsführer  
 FVV

Viele Wege führen nach Rom, sagt ein Sprichwort. In der Tat verbanden schon vor 2.000 Jahren mehr als 370 Hauptstraßen die römischen Provinzen. Der über diese Straßen abgewickelte Handel bildete das Fundament, auf dem sich die antike Hochkultur Roms entwickelte. Heute gilt mehr denn je: Mobilität von Menschen und Gütern stellt das Rückgrat einer erfolgreichen Wirtschaft dar. Trotzdem ist ein „Weiter so“ nicht angesagt. Nur ein beherztes Gegensteuern wird es uns ermöglichen, die Klimaziele des 2015 geschlossenen Pariser Abkommens zu erreichen. Dazu muss der Straßenverkehr bis zum Jahr 2050 weitgehend auf klimaneutrale Energiepfade umgestellt werden.

Es reicht nicht aus, dafür allein den Fahrzeugantrieb zu betrachten. Denn erst wenn Klimaneutralität für die gesamte Energiekette erreicht wird, schützen wir unsere Atmosphäre wirklich. Ein Arbeitskreis der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) unter Leitung von Dr. Ulrich Kramer (Ford) hat daher in intensiver Detailarbeit verschiedene Energiepfade analysiert. Die so entstandene Studie betrachtet den Einsatz von Elektrizität, Wasserstoff und synthetischen E-Kraftstoffen als Energieträger im Straßenverkehr sowohl unter technischen als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Erstmals sind ingenieurwissenschaftlich valide Schätzungen zum Investitionsbedarf für die verschiedenen Optionen entlang der gesamten Energiekette entstanden. Das vorliegende Informationspapier fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen und ermöglicht so einen faktenbasierten Dialog über Energieträger und Antriebe der Zukunft. So viel sei vorweg genommen: Auch hier führt nicht ein einzelner Weg, sondern die geschickte Kombination verschiedener Energiepfade zum Ziel.

Wir danken dem Arbeitskreis, dem zeitweise mehr als 40 Experten aus dem branchenübergreifenden Innovationsnetzwerk der FVV angehörten, sowie Herrn Dr. Kramer für die engagierte Arbeit und freuen uns auf eine fruchtbare Diskussion der Ergebnisse.

SEITE 6-9  
Zielsetzung

---

Ein Ziel, mehrere Pfade	6
100% erneuerbar – nur wie?	8

SEITE 10 – 15  
**100-%-Szenarien**

SEITE 16 – 20  
**Schlussfolgerungen**

Das Szenario „100% Elektro“	10	Kosten und Investitionen im Vergleich	16
Das Szenario „100% Wasserstoff“	12	Klimaschutz und Marktakzeptanz	18
Das Szenario „100% E-Kraftstoffe“	14	Perspektiven	20

## Ein Ziel, mehrere Pfade

Im Dezember 2015 hat sich die internationale Staatengemeinschaft auf ein gemeinsames Klimaschutzziel geeinigt. Die Emission von Treibhausgasen (THG) soll so weit gedrosselt werden, dass die durchschnittliche Erderwärmung bis zum Jahr 2100 maximal zwei Grad Celsius beträgt, idealerweise sogar deutlich unter 1,5 Grad Celsius. Zu erreichen sind diese Ziele nur, wenn der Verkehrssektor bis zur Mitte des Jahrhunderts weitgehend klimaneutral wird.

Das Ziel ist eindeutig: Bis zum Jahr 2050 soll der Straßenverkehr nahezu klimaneutral werden. Geht es darum, welcher Weg zum Ziel führt, sind zwei Randbedingungen zu beachten:

Eine Betrachtung, die nur den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Fahrzeugpopulation betrachtet, greift zu kurz. Denn auch wenn die CO<sub>2</sub>-Emission eines einzelnen Fahrzeugs einen Wert von Null erreicht, so können durch die Herstellung und den Transport des verwendeten Energieträgers doch Treibhausgase erzeugt werden. Eine vollständige Klimaneutralität kann daher nur erreicht werden, indem man den Bilanzrahmen erweitert und auch die Emissionen aus Energiebereitstellung und -distribution einbezieht. Eine solche Betrachtung wird „Well-to-Wheel“-Analyse (WtW-Analyse) genannt, weil sie von der Quelle („Well“, das Bohrloch) bis zum Rad („Wheel“) die gesamte Energiekette berücksichtigt. Die Herstellung und Verschrottung von Anlagen und Fahrzeugen, die zu einer kompletten Lebenszyklusanalyse gehört, werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Für die tatsächlich eintretende Klimaveränderung sind zudem nicht die THG-Emissionen im Jahr 2050 oder 2100 entscheidend, sondern die Menge

des bis dahin in die Atmosphäre eingebrachten CO<sub>2</sub>. Es geht, mathematisch gesprochen, um das Integral aller einzelnen Emissionswerte. Ziel einer verantwortungsvollen Steuerung muss es daher sein, möglichst bald eine Entscheidung darüber herbeizuführen, auf welchen Wegen klimaneutrale Energieträger im Verkehrssektor eingesetzt werden sollen. Diesem Aspekt trägt die vorliegende Studie Rechnung, indem der technische Reifegrad und das Markteinführungspotenzial der unterschiedlichen Pfade detailliert analysiert werden.

Eine vollständig THG-neutrale Mobilität ist nur zu erreichen, wenn es gelingt, erneuerbare Energie im Verkehrssektor einzusetzen. Realistisch betrachtet ist der hohe Energiebedarf nur zu decken, in dem dafür heute bereits zur Verfügung stehende Erzeugungswege genutzt werden, also vor allem Solar- und Windenergie. Als Energieträger steht daher am Anfang der Energiekette stets erneuerbarer Strom. Vor diesem Hintergrund ist die bereits eingeleitete Elektrifizierung des Straßenverkehrs sinnvoll und unumgänglich. Die Frage, die im Zentrum der FVV-Studie steht, lautet daher nicht, ob der Einsatz von Strom im Verkehr sinnvoll ist, sondern auf welchem Weg die elektrische Energie in mobilen

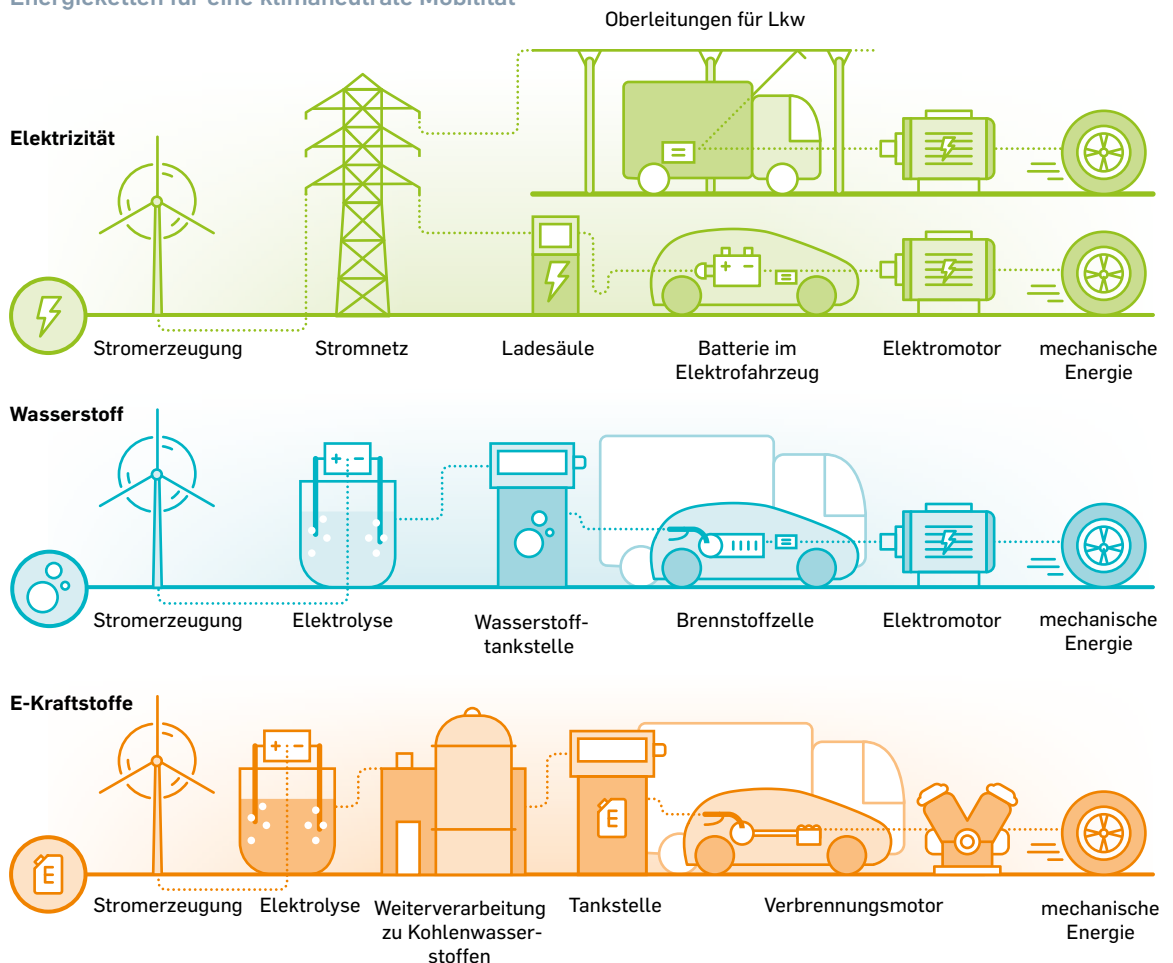
Anwendungen genutzt werden soll. Technisch stehen dafür im Wesentlichen drei Pfade zur Verfügung:

1. Der Strom wird über eine Lade-Infrastruktur und Akkus elektrochemisch direkt im Fahrzeug gespeichert und von einem Elektroantrieb für die mechanische Fortbewegung genutzt.
2. Aus dem Strom wird per Elektrolyse Wasserstoff erzeugt, der über eine Wasserstoff-Tankstelle an Bord des Fahrzeugs gelangt, wo eine Brennstoffzelle Strom für den Elektroantrieb erzeugt.
3. Der per Elektrolyse erzeugte Wasserstoff wird durch chemische Weiterverarbeitung mit Kohlenstoff aus CO<sub>2</sub> in einem geschlossenen

CO<sub>2</sub>-Kreislauf angereichert. So entstehen gasförmige oder flüssige Kraftstoffe (sogenannte „E-Kraftstoffe“), die – über die vorhandene Tankstellen-Infrastruktur distribuiert – in Verbrennungskraftmaschinen genutzt werden können, um mechanische Energie zu erzeugen.

Ziel der Studie ist es, die mit einer Realisierung der drei Pfade verbundenen Kosten zu analysieren und daraus den Investitionsbedarf abzuschätzen sowie den Forschungsbedarf zu benennen. Zudem werden weitere für die Umsetzung relevante Kriterien, etwa zur Sicherheit oder zur erwarteten Marktakzeptanz, betrachtet.

### Energieketten für eine klimaneutrale Mobilität



## 100% erneuerbar – nur wie?

Zur Umstellung des Verkehrssektors auf erneuerbare Energieträger existiert mittlerweile eine Vielzahl an Studien. Die meisten dieser Arbeiten basieren methodisch darauf, dass gewisse Annahmen zu Kosten für Energieträger und Antriebe, Verkehrsaufkommen, Wirkungsgraden und einer Vielzahl weiterer Parameter getroffen und dann für verschiedene Marktanteile der Antriebe und Energieträger durchgerechnet werden. Je nachdem, welche Parameter wie gewichtet und welche Marktanteile verwendet werden, divergieren die Ergebnisse. Die FVV hat sich bewusst für ein anderes Vorgehen entschieden.

Für die vorliegende Studie haben Vertreter von Automobilherstellern und -zulieferern, Energie- und Mineralölunternehmen, der chemischen Industrie sowie verschiedener Verbände ihr Wissen über die einzelnen Technologien zusammengetragen. Dabei wurden sowohl technische als auch wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt und in einer Arbeitsgruppe konsolidiert. Für alle relevanten Kriterien, insbesondere für den Gesamtenergiebedarf und die Mobilitätskosten, die die Kosten der Energiebereitstellung und -verteilung, sowie die Fahrzeugkosten berücksichtigen, wurden unter Beteiligung von Experten verschiedener Branchen vergleichbare Szenarien entworfen. Dabei sind die Randbedingungen für jedes Szenario identisch, so dass Energiebedarf und Mobilitätskosten direkt vergleichbar sind. Das technische Entwicklungspotenzial und damit der zu erzielende Wirkungsgrad bei nahezu allen Schritten der Energiewandlung sind langfristig nur abschätzbar. Um die verbleibenden Unsicherheiten abzubilden, wurden jeweils Minimal- und Maximalkosten definiert.

Methodisch arbeitet die Studie bewusst mit fiktiven 100%-Szenarien, für die jeweils ein Marktanteil

von 100 % im Jahr 2050 angenommen wurde:

- 100 % Elektro: Es werden ausschließlich batterieelektrische Pkw genutzt. Für den Lkw-Fernverkehr wird in diesem Szenario eine Oberleitungsinfrastruktur auf den Autobahnen aufgebaut.
- 100 % Wasserstoff: Die Energiewandlung erfolgt im Fahrzeug durch eine Brennstoffzelle.
- 100 % E-Kraftstoffe: Es wurden 100%-Szenarien für acht Kraftstoffe aus Power-to-X-Anlagen gerechnet.

Die so gewonnenen Erkenntnisse stehen künftig auch für die Berechnung von Mischszenarien zur Verfügung, in denen unterschiedliche Marktanteile der Antriebsarten, hybridisierte Antriebe und Kraftstoffbeimischungen berücksichtigt werden. Die Verminderung von THG-Emissionen durch Biokraftstoffe wurde in der Studie bewusst ausgeklammert, da aufgrund der limitierten Verfügbarkeit von Biomasse ein 100%-Szenario per se extrem unwahrscheinlich ist. Allerdings können biogene Kraftstoffe (flüssig und gasförmig) in den wahrscheinlich eintretenden Mischszenarien eine wichtige Rolle spielen, um die Klimaneutralität des Verkehrs sicherzustellen. Ausgangspunkt aller in dieser Studie erzeugten



Ergebnisse ist die Energie, die tatsächlich für die mechanische Fortbewegung – also den Antrieb der Räder – benötigt wird. Zugrunde liegt der Berechnung der Energieinhalt der im Jahr 2015 in Deutschland verbrauchten Kraftstoffmenge (560 TWh, davon 440 TWh für Pkw und 120 TWh für Lkw), die auf den heutigen Fahrzeugbestand umgelegt wurde. Unter Berücksichtigung heutiger Antriebseffizienz beträgt der gesamte deutsche „Rad-Energiebedarf“ 143 TWh. Für alle drei 100%-Szenarien wurde der Energiebedarf anschließend unter Berücksichtigung aller Wirkungsgradverluste in der gesamten Energiekette bis

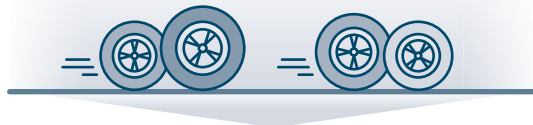
zur Stromerzeugung zurückgerechnet. Dieses vereinfachte Verfahren eliminiert bewusst den Einfluss nichttechnischer Größen, wie sie etwa sinkende Jahresfahrleistungen oder ein geringerer Fahrzeugbestand aufgrund eines geänderten Mobilitätsverhaltens darstellen. Weitere deutliche Effizienzsteigerungen durch Hybridisierung der verbrennungsmotorischen Konzepte wurden in der vorliegenden Studie noch nicht berücksichtigt. Da im Rahmen der Studie ein Berechnungstool entstanden ist, das diese Größen berücksichtigt, besteht jedoch die Grundlage dafür, weitere Parametervariationen durchzuführen.

### Wie wurde der Energiebedarf ermittelt?

Energieinhalt aller im Straßenverkehr verbrauchten Kraftstoffe: **560 TWh**



Tatsächlich mechanisch genutzte Energie für den Radantrieb: **143 TWh**



Bei Umstellung auf klimaneutrale Antriebe benötigte Gesamtenergie:



Zum Vergleich: Bruttostromverbrauch in Deutschland 2017: **600 TWh\***

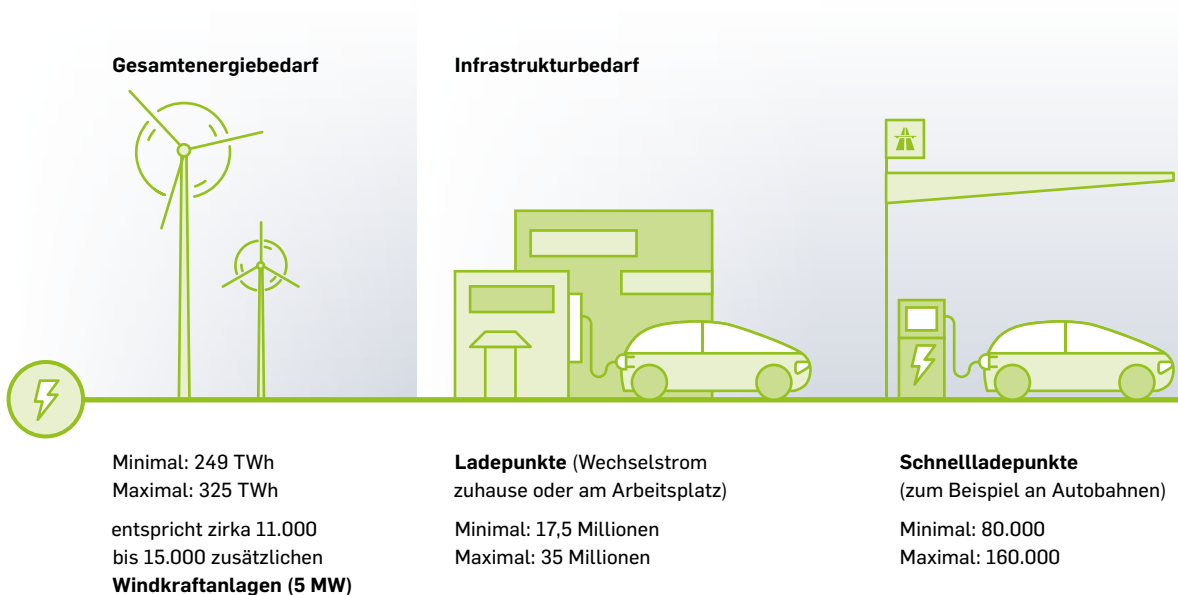
\*Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB – Energy Balances Group)

## Das Szenario „100% Elektro“

Gelingt es, den regenerativ erzeugten Strom direkt im Fahrzeug zu nutzen, ist dieser Pfad aus Sicht der Energieeffizienz stets zu bevorzugen, da ein Großteil der Umwandlungsverluste entfallen, die bei dem Weg über eine chemische Speicherung auftreten. Daher dient in der Studie die 100-prozentige Elektrifizierung aller Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 als Referenzszenario.

Berücksichtigt man die im rein batterieelektrischen Pfad verbleibenden Wirkungsgradverluste, so beträgt der elektrische Gesamt-Energiebedarf in diesem Szenario minimal 249 TWh und maximal 325 TWh pro Jahr. Dies entspricht in etwa der Hälfte des heutigen deutschen Gesamtbedarfs an elektrischer Energie. Allerdings ist bei dem späteren Vergleich mit anderen Szenarien zu berücksichtigen, dass dieser Wert nicht die für

die Beheizung und Klimatisierung des Innenraums benötigte Energie enthält, die in der Praxis bis zu einem Drittel des Gesamt-Fahrzeugenergiebedarfs ausmachen kann. Berücksichtigt sind hingegen die durch den Stromtransport zum Ladepunkt und während des Ladens auftretenden Verluste in Höhe von mindestens sechs Prozent und maximal 28 Prozent bei ausschließlichem Schnellladen.



Das 100-%-Elektroszenario geht davon aus, dass permanent elektrischer Strom zur Verfügung stehen muss, da weder in den Fahrzeugen noch dezentral an den Ladestationen ausreichend Strom gespeichert werden kann, um übliche „Dunkelflauten“ (kein Wind, keine Sonne) – also Zeiten ohne nennenswerte Stromproduktion aus regenerativen Quellen – abzufedern. Stattdessen ist davon auszugehen, dass rund 20 Prozent des für den Fahrzeugbetrieb benötigten Stroms aus Gaskraftwerken stammt, die klimaneutral mit Gas auf Basis erneuerbaren Stroms (Power-to-Gas) betrieben werden. Dies schlägt sich in den Stromsystemkosten nieder. Dennoch liegen die streckenbezogenen Energiekosten für Pkw infolge des hohen Wirkungsgrades mit 1,99 bis 4,68 Euro pro 100 Kilometer unterhalb aller anderen Pfade.

Lkws werden in diesem Szenario durch eine Kombination aus Batterie und Oberleitung mit Strom versorgt („Hybrid-Oberleitungs-Lkw“). Dabei sind minimal 4.000 und maximal 13.000 km der Bundesautobahnen mit Oberleitungen ausgestattet. Der Lieferverkehr abseits der Autobahnen erfolgt über die Batterie, die während der Oberleitungsfahrten geladen wird.

Um den volkswirtschaftlichen Investitionsbedarf für ein 100-%-Elektroszenario abzuschätzen, sind zudem die Kosten für den Ausbau der Strom-Verteilinfrastruktur von erheblicher Bedeutung. Inwieweit ein Ausbau erfolgen muss, hängt zum einen davon ab, wie dezentral die Erzeugung in Zukunft erfolgt. Der erhebliche Gesamt-Energiebedarf spricht jedoch tendenziell für einen hohen Anteil zentraler Produktion in Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee. Zum anderen liegt in der zeitlichen Steuerbarkeit der Ladevorgänge ein erheblicher Stellhebel, da sie die Anschlussleistung der Ortsnetztrafos und damit die Dimensionierung der Verteilnetze beeinflusst. Die vorliegende Studie geht davon aus, dass zwischen 0 und 98 Milliarden Euro in die Stromnetzinfrasturktur investiert werden müssen, wobei bis zu 21 Milliarden Euro auf die Errichtung von Oberleitungstrassen für den Straßengüterverkehr entfallen. Für Pkw sind zusätzlich die Kosten der Ladeinfrastruktur zu berücksichtigen. Die im Arbeitskreis versammelten Experten gehen für ein 100-%-Szenario von minimal 80.000 und maximal 160.000 Schnellladepunkten sowie minimal 17,5 Millionen und maximal 35 Millionen Wechselstrom-Ladepunkten zuhause und am Arbeitsplatz aus.



**Oberleitungen für Lkw**  
auf Bundesautobahnen:

Minimal: 4.000 Kilometer  
Maximal: 13.000 Kilometer

Ggf. Ausbau der **Stromnetze**  
für bis zu 77 Mrd. Euro

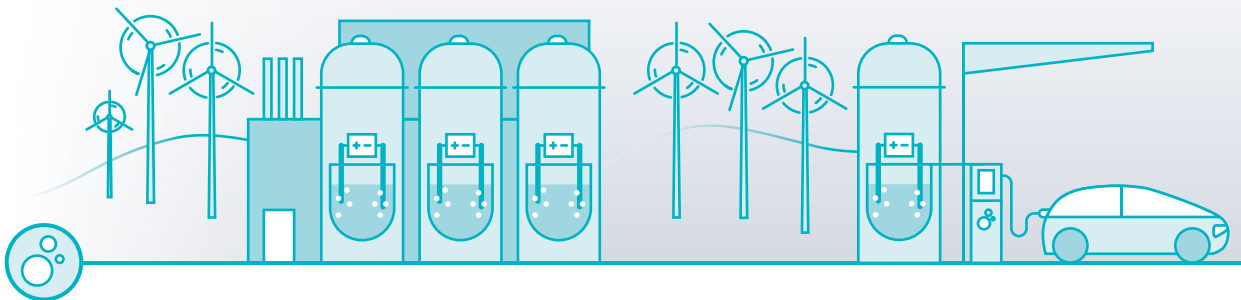
## Das Szenario „100 % Wasserstoff“

Die technischen Fortschritte der letzten drei Jahrzehnte sowohl bei der Elektrolyse als auch vor allem bei der Brennstoffzelle ermöglichen es, Wasserstoff in absehbarer Zeit als Energieträger im Verkehr einzusetzen. Der Wasserstoff-Pfad verbindet hohe Wirkungsgrade mit einer guten Speicherfähigkeit.

Die Wasserstoffherstellung durch Elektrolyse wird großtechnisch grundsätzlich beherrscht, der Wirkungsgrad beträgt dabei bis zu 73 Prozent. Aufgrund der im Vergleich zu Strom guten Speicher- und Transportfähigkeit des Wasserstoffs

über sehr lange Strecken könnten die benötigten Anlagen auch in Ländern mit deutlich höherer Sonneneinstrahlung errichtet werden, was zu verringerten Herstellkosten führt.

### Gesamtenergiebedarf



#### Bei zentraler Elektrolyse

Minimal: 502 TWh

Maximal: 574 TWh

entspricht zirka 23.000

bis 26.000 zusätzlichen

**Windkraftanlagen (5 MW)**

#### Bei dezentraler Elektrolyse

an der Tankstelle

Minimal: 607 TWh

Maximal: 703 TWh

entspricht zirka 28.000

bis 32.000 zusätzlichen

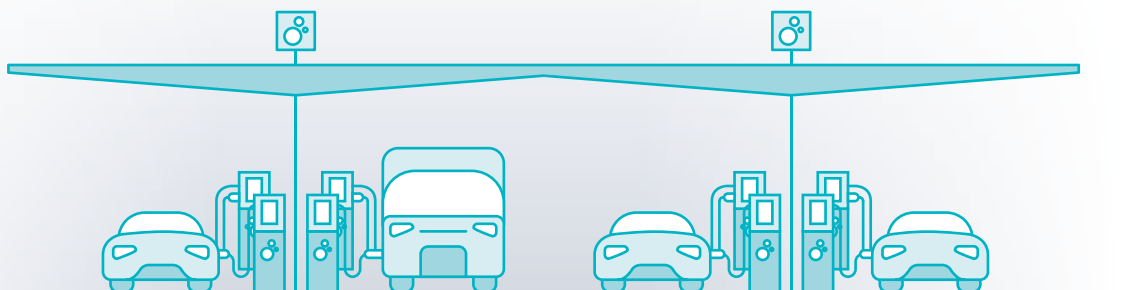
**Windkraftanlagen (5 MW)**

Alternativ wurde aber auch eine lokale Wasserstoffproduktion an den Tankstellen betrachtet. Wie im Szenario „100 % Elektro“ sind dabei auch Zeiten mit geringerer Stromproduktion aus Erneuerbaren Energien durch die Rückverstromung in Power-to-Gas-Kraftwerken zu überbrücken. Im Gegenzug entfällt der Energieaufwand für den Wasserstofftransport per Lkw, der rund drei Prozent des transportierten Energiegehaltes ausmacht.

Rückgerechnet aus dem Rad-Energiebedarf ergibt sich für das Szenario „100 % Wasserstoff“ ein Gesamt-Primärenergiebedarf von 502 bis 574 TWh elektrischer Energie, sofern der Wasserstoff zentral produziert wird. Das entspricht dem 1,8- bis 2,0-fachen Energiebedarf des Szenarios „100 % Elektro“. Eine dezentrale Produktion erhöht vor allem aufgrund der benötigten konstanten Stromversorgung und der damit eingehenden Verluste in der Rückverstromung den Primärenergiebedarf auf 607 bis 703 TWh.

Betrachtet man die minimalen Kraftstoffherstellkosten, so fällt der Abstand zwischen zentraler Wasserstoffproduktion in sonnenreichen Regionen mit 8 Cent/kWh und lokaler H<sub>2</sub>-Herstellung an der Tankstelle mit 18 Cent/kWh deutlich ins Gewicht. Die streckenbezogenen Kraftstoffkosten für ein Brennstoffzellenfahrzeug liegen im günstigsten Fall um 32 Prozent (Pkw) und 42 Prozent (Lkw) über denen des Szenarios „100 % Elektro“. Da eine Tankstellen-Infrastruktur für Wasserstoff noch nicht existiert, mussten für ein 100-%-Szenario zunächst Annahmen über die gewünschte Dichte des Netzes getroffen werden. Minimal 5.000 und maximal 10.000 Tankstellen (jeweils mit acht Zapfstellen) wurden als ausreichend für eine Vollabdeckung angesehen. Entsprechende Skalierung vorausgesetzt, ist pro Tankstelle mit Investitionskosten von 3,3 Millionen Euro zu rechnen.

### Infrastrukturbedarf



### H<sub>2</sub>-Tankstellen

(mit jeweils acht Zapfstellen)

Minimal: 5.000

Maximal: 10.000

Pro Tankstelle ist mit Kosten von 3,3 Millionen Euro zu rechnen.

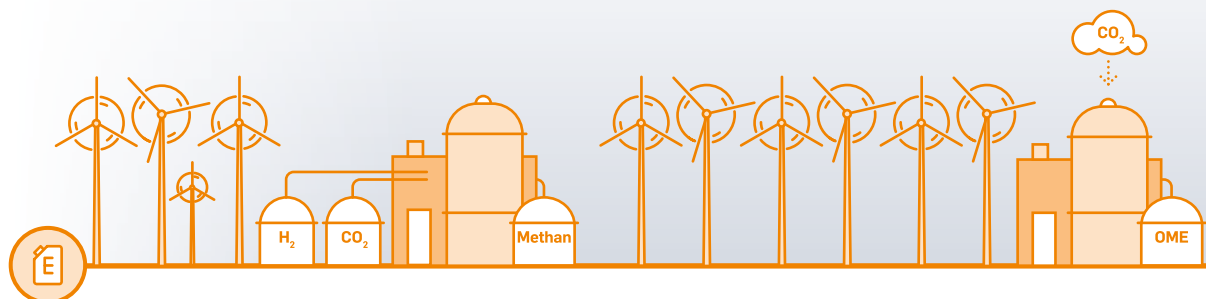
## Das Szenario „100% E-Kraftstoffe“

Geschlossene Stoffkreisläufe und Müllvermeidung bilden die Basis jedes ökologisch verantwortlichen Wirtschaftens. Das aus der Nutzung fossiler Energieträger resultierende CO<sub>2</sub> kann auch als Abfall betrachtet werden, den die Menschheit in der Atmosphäre deponiert. Vor diesem Hintergrund ist die Idee entstanden, Kraftstoffe auf der Basis von Wasser, Kohlendioxid und regenerativ erzeugter Energie herzustellen. Diese CO<sub>2</sub>-neutralen, gasförmigen oder flüssigen Kohlenwasserstoffe erfordern aufgrund der guten Speicher- und Transportierbarkeit keine grundsätzliche Umstellung der Verteilinfrastruktur und der Fahrzeug-Antriebstechnik.

Für E-Kraftstoffe gibt es mehrere Alternativen, die sich sowohl hinsichtlich der Herstellung als auch ihrer chemischen Struktur deutlich unterscheiden. Für die Studie wurden insgesamt sieben Kraftstoffe in acht Antriebsstrang- / Kraftstoffszenarien

untersucht, das Spektrum umfasst zwei Szenarien für Methan, sowie je ein Szenario für Methanol, DME (Dimethylether), OME (Oxymethylenether) sowie – basierend auf der Fischer-Tropsch-Synthese – synthetisches

### Gesamtenergiebedarf



Minimal: 625 TWh (Methan, CO<sub>2</sub>-Quelle vorhanden) entspricht zirka 35.000 bis 40.000 zusätzlichen **Windkraftanlagen (5 MW)**

Maximal: 1.315 TWh (OME, CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft) entspricht zirka 60.000 zusätzlichen **Windkraftanlagen (5 MW)**

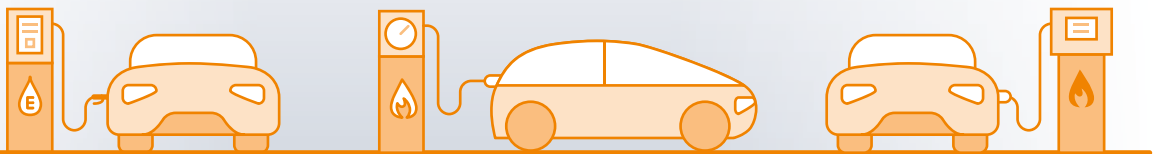
Benzin, Diesel und Flüssiggas. Die Wirkungsgrade der einzelnen Verfahren sind durch die Expertise mitwirkender Vertreter der Energiewirtschaft und der chemischen Industrie abgesichert und jeweils in einer Minimal- und einer Maximalbetrachtung dargestellt. Wesentlichen Einfluss hat dabei die Bereitstellung des Kohlendioxids: Wird es aus der Luft abgeschieden, muss dafür zusätzliche Energie aufgewendet werden. Geht man davon aus, dass im Übergang zu einer weitgehend klimaneutralen Weltwirtschaft weiterhin anthropogene CO<sub>2</sub>-Quellen vorhanden sind, können diese – zumindest in realistischen Mischszenarien – für die Produktion von E-Kraftstoffen herangezogen werden. Im Bestfall kann die Produktion von synthetischem Methan auf diesem Weg mit einem Wirkungsgrad von 65 Prozent erfolgen. Den schlechtesten Wirkungsgrad weist die Produktion von OME mit 31 Prozent aus, wenn sie mit einer CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft gekoppelt wird.

Für den Gesamt-Energiebedarf entscheidend ist zudem die Energiewandlung durch den Verbrennungsmotor. Dessen Potenzial ist noch nicht ausgeschöpft. Basis für die in dieser Studie angenommenen Wirkungsgrade sind die besten Benzin- und Diesel-

fahrzeuge im C-Segment (Volkswagen Golf, Ford Focus, Opel Astra), die im Jahr 2015 verfügbar waren. Nicht berücksichtigt wurde die Möglichkeit, verbrennungsmotorische Antriebsstränge zu elektrifizieren und dadurch den Wirkungsgrad deutlich zu steigern. Dieses Vorgehen dient der besseren Abgrenzung gegen das Szenario „100 % Elektro“, auch wenn in der Realität elektrifizierte und hybridisierte Fahrzeug-Antriebsstränge voraussichtlich bereits 2030 sehr hohe Marktanteile erreichen werden. Insgesamt ergibt sich in dieser Betrachtung je nach E-Kraftstoff und Verbrennungsverfahren ein Bedarf an elektrischer Energie in Höhe von 625 TWh (Methan, CO<sub>2</sub>-Quelle vorhanden) bis zu 1.315 TWh (OME, CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft).

Zwar beschäftigt sich diese Studie ausdrücklich nur mit den Wegen, einen klimaneutralen Straßenverkehr zu realisieren. Dennoch wird der Einsatzbereich von E-Kraftstoffen auch jenseits der Straße derzeit intensiv diskutiert. Insbesondere im Langstrecken-Flugverkehr und in der Hochsee-Schifffahrt stellen E-Kraftstoffe mit ihrer hohen Energiedichte aus heutiger Sicht neben Wasserstoff die einzige Option dar, mit der Klimaneutralität erreicht werden kann.

### Infrastrukturbedarf



Die vorhandene Infrastruktur kann komplett genutzt werden. Heute bestehen in Deutschland bereits:

- 14.000 Tankstellen für **Flüssigkraftstoffe**
- 6.800 Tankstellen für **Autogas**
- 900 Tankstellen für **Erdgas**

## Kosten und Investitionen im Vergleich

Dass die Kosten einer klimaneutralen Mobilität höher sein werden als für den bisher auf fossilen Rohstoffen basierenden Verkehr, ist aus heutiger Sicht wahrscheinlich. Doch die Mobilitätskosten aus Nutzersicht unterscheiden sich zwischen den Energiepfaden nicht signifikant. Der Investitionsbedarf schwankt hingegen deutlich, wobei die Fahrzeugmehrkosten dominieren.

Vergleicht man die streckenbezogenen Kosten, so bewegen sich die Minimalwerte für den Pkw-Verkehr in allen Szenarien zwischen 28,4 und 33,1 Euro pro 100 Kilometer, sofern man Kostenparität von Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeugen zu Dieselfahrzeugen unterstellt. Unter ungünstigen Randbedingungen ist die Schwankungsbreite deutlich höher, sie beträgt dann 37,7 bis 52,8 Euro pro 100 Kilometer, wobei lediglich die dezentrale Wasserstoffproduktion an der Tankstelle auf Kosten von mehr als 50 Euro pro 100 Kilometer kommt. Im Nutzfahrzeugverkehr ist die Schwankungsbreite höher. Die streckenbezogenen Gesamtmobilitätskosten betragen 70,1 bis 155,2 Euro pro 100 Kilometer.

Für die einzelnen Szenarien ergeben sich unterschiedliche Spannweiten der Mobilitätskosten:

- 100 % Elektro: Die tatsächlichen Mobilitätskosten für den Nutzer können bei einem batterieelektrischen Pkw zwischen 29,4 und 45,1 Euro pro 100 Kilometer betragen. In der Studie wurde mit einem Aufpreis eines batterieelektrischen Mittelklasse-Pkw (mit einer Reichweite von 500 km) gegenüber einem vergleichbaren Fahrzeug mit Ottomotor von minimal 2.400 Euro bis maximal 11.300 Euro gerechnet. Dabei ist der heute in Deutschland gültige Mehrwertsteuersatz berücksichtigt. Die Voraussage zukünftiger Elektrofahrzeug-

kosten ist sehr schwierig, was zu einem relativ großen Unschärfebereich der Voraussage führt. Für Lkw ergeben sich Mobilitätskosten zwischen 76,3 und 124,4 Euro pro 100 Kilometer.

- 100 % Wasserstoff: Legt man die Kosten für die Energiebereitstellung, die Infrastruktur und die Fahrzeuge (Aufpreis gegenüber Pkw mit Ottomotor von minimal 2.400 Euro bis maximal 12.500 Euro) zugrunde, ergeben sich für einen Pkw Mobilitätskosten von 29,9 Euro pro 100 Kilometer im Bestfall und unter ungünstigen Bedingungen von 52,8 Euro pro 100 Kilometer. Die Spanne resultiert ebenfalls vor allem aus der unsicheren Entwicklung der Fahrzeugkosten sowie den standortabhängigen Kosten der Wasserstoffproduktion.
- 100 % E-Kraftstoffe: Die Spannweite der Mobilitätskosten bewegt sich zwischen 28,4 und 45,1 Euro pro 100 Kilometer, wenn das für die Herstellung benötigte CO<sub>2</sub> aus der Luft abgeschieden wird. Können andere CO<sub>2</sub>-Quellen kostenneutral genutzt werden, betragen die Mobilitätskosten im Bestfall nur 27,1 Euro pro 100 Kilometer.

Es ist davon auszugehen, dass die Marktakzeptanz künftiger Antriebskonzepte wesentlich von den Vollkosten abhängen. Diese werden von den Fahrzeugkosten (konkret deren Abschreibung) und nicht primär von den Energieträgerkosten dominiert.

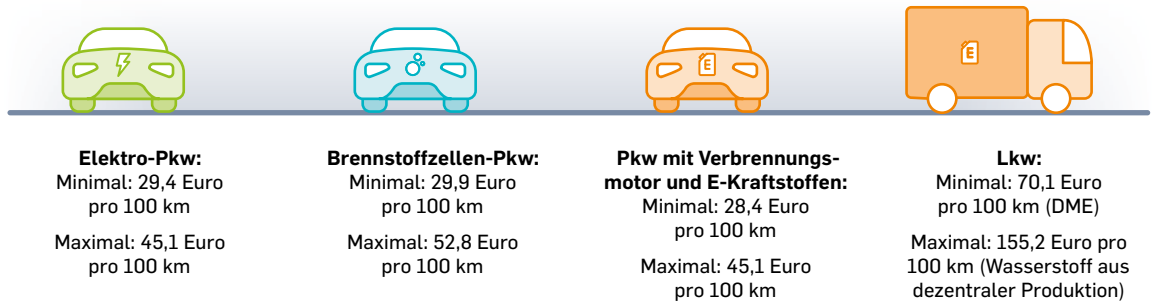


Allerdings wurden nur die Herstellkosten der Energieträger betrachtet, nicht die gegebenenfalls anfallenden Steuern und Abgaben. Die auf den Betrieb umgelegten Infrastrukturkosten fallen in allen Szenarien vergleichsweise niedrig aus.

Große Unterschiede weisen die Szenarien hinsichtlich des Gesamt-Investitionsbedarfes auf, der zwischen knapp 300 und rund 1.700 Milliarden Euro beträgt. Wesentlichen Einfluss haben dabei die Investitionen in die Stromerzeugungskapazität. Die Mindestinvestition in Anlagen für die Kraftstoffherstellung und die Infrastruktur zur Verteilung haben daran nur einen kleinen Anteil: Sie schwanken zwischen 40 und 200 Milliarden Euro für das Szenario „100% Elektro“. Größeren Einfluss weisen die über 20 Jahre kumulierten Fahrzeugmehrkosten auf. Sie betragen bis zu 860 Milliarden Euro

für das Szenario „100% Elektro“ und sogar rund 980 Milliarden Euro für das Wasserstoffszenario. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass die Kosten für künftige Fahrzeugantriebe über einen langen Zeitraum (bis 2050) großen Unsicherheiten unterliegen. So könnten die kumulierten Mehrkosten für Pkw bei entsprechendem technischen Fortschritt auch den Wert Null annehmen. Sowohl das Wasserstoff- als auch das Elektroszenario unterliegen daher einem erheblichen Investitionsrisiko. Für „100% Elektro“ besteht ein weiteres Risiko im Ausbau der Verteilnetze, der im ungünstigsten Fall bis zu 98 Milliarden Euro kosten kann. Das geringste Risiko hinsichtlich Kraftstoffproduktion und -distribution weist das Szenario „100% E-Kraftstoffe“ auf, da sich die maximalen Investitionen bei allen Kraftstoffen unterhalb von 300 Milliarden Euro bewegen.

**Mobilitätskosten\***



**Investitionsbedarf**

	1 Stromerzeugung Investitionskosten	2 Kraftstoffherstellung Investitionskosten	3 Infrastruktur Investitionskosten	4 Kumulierte Fahrzeugmehrkosten (20 Jahre)
<b>100% Elektro</b>	110–260 Mrd. €	0	40–200 Mrd. €	160–770 Mrd. € (Pkw) 50–90 Mrd. € (Lkw)
<b>100% Wasserstoff</b>	90–340 Mrd. € (zentral) 270–570 Mrd. € (dezentral)	70–90 Mrd. EUR (zentral) 60–70 Mrd. EUR (dezentral)	20–40 Mrd. € (zentral) 20–130 Mrd. € (dezentral)	160–850 Mrd. € (Pkw) 40–125 Mrd. € (Lkw)
<b>100% E-Kraftstoffe</b>	140–780 Mrd. €	100–250 Mrd. €	0–6 Mrd. €	0–230 Mrd. €

\* Die Mobilitätskosten umfassen die Kosten für den Energieträger (steuer- und abgabenfrei), die umgelegten Kosten für die Distribution sowie die Abschreibung auf den Fahrzeugpreis (Mehrwertsteuer inklusive)

## Klimaschutz und Marktakzeptanz

Künftige Energieträger und Fahrzeugantriebe sind vor allem daran zu messen, inwieweit sie einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Dabei sind nicht nur die CO<sub>2</sub>-Emissionen selbst zu betrachten, sondern auch die Geschwindigkeit mit der eine hohe Marktdurchdringung erreicht werden kann. Denn letztlich zählt allein die bis zum Jahr 2050 insgesamt vermiedene Menge an Treibhausgasen.

Für die Marktakzeptanz sind nicht nur die Mobilitätskosten relevant, sondern weitere Kriterien wie die Erfüllung von Kundenanforderungen, zum Beispiel an die Reichweite. Hinzu kommen gesellschaftliche Anforderungen an die lokale Schadstoffemission, die Sicherheit sowie die ökologische Verträglichkeit des erforderlichen Infrastrukturaufbaus. Deshalb hat die FVV-Studie für alle drei Szenarien auch diese Fragen betrachtet.

Aus technischer Sicht ermöglichen alle drei betrachteten Szenarien eine klimaneutrale Mobilität im Jahr 2050. Für das Szenario „100 % E-Kraftstoffe“ gilt das jedoch nur, wenn der für die Herstellung benötigte Kohlenstoff entweder aus biogenen CO<sub>2</sub>-Quellen stammt oder aus der Luft abgeschieden wird. Entscheidend für den zeitabhängigen Beitrag zum Klimaschutz sind daher zwei Fragen, die für den jeweiligen Technologiepfad beantwortet werden müssen:

1. Wie schnell kann die für den jeweiligen Pfad benötigte Infrastruktur aufgebaut werden?
2. Wie rasch findet die Antriebstechnologie ausreichend Akzeptanz beim Fahrzeugkäufer?

Der Aufbau der Infrastruktur ist in einem marktwirtschaftlichen Gesellschaftsmodell wesentlich von der Investitionsbereitschaft einzelner Unternehmen abhängig. Die in dieser Studie berechneten

Gesamtinvestitionen für Stromgewinnung, Kraftstoffherstellung, Infrastruktur sowie die Fahrzeugmehrkosten betragen mehrere hundert Milliarden Euro und werden vermutlich ohne staatliche Rahmsetzung nicht zustande kommen. Dies gilt insbesondere für das Szenario „100 % E-Kraftstoffe“, da sie bei einer „Tank-to-Wheel“-Betrachtung, wie sie die Europäische Union für die CO<sub>2</sub>-Flottenemissionsziele festschreibt, durch das Raster fallen: Lokal emittieren die mit synthetischen Kraftstoffen arbeitenden Motoren durchaus Kohlendioxid, auch wenn dieses vorher aus der Luft abgeschieden wurde. Die auf den Energieinhalt des Kraftstoffs bezogene lokale CO<sub>2</sub>-Emission kann für einige E-Kraftstoffe sogar höher ausfallen als bei fossilen Benzin oder Diesel. Ohne eine Anrechenbarkeit des bei der Kraftstoffherstellung vermiedenen CO<sub>2</sub> fehlen den beteiligten Industriezweigen daher die Investitionsanreize.




Für die Marktakzeptanz ist zunächst festzuhalten, dass für den Kunden Fahrzeuganschaffungspreis und Betriebskosten auch künftig eine dominierende Rolle spielen werden. Wie dargestellt, unterscheiden sich vor allem für Pkw die Vollkosten nur wenig: Jedes Szenario ermöglicht Mobilitätskosten von zirka 30 Euro pro 100 Kilometer. Hinsichtlich der Antriebs- und damit der Fahrzeugkosten bestehen vor allem für die Szenarien „100 % Elektro“ und

„100% Wasserstoff“ noch erhebliche Bandbreiten, da die langfristige Kostendegression für Batterien und Brennstoffzellen nicht sicher zu prognostizieren ist. Für eine raschere Marktdurchdringung und damit eine schnellere Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Straßenverkehr kann zudem eine Bestandskompatibilität hilfreich sein, also die Möglichkeit, den neuen Energieträger innerhalb der Benzin-, Diesel- und Gas-Infrastruktur einzusetzen. Dies ist für Plug-in-Hybridfahrzeuge per se der Fall. Fünf der betrachteten E-Kraftstoffe eignen sich als Beimischung zu heute im Straßenverkehr verwendeten flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen, wenn auch zum Teil nur in sehr begrenzten Mengen. Brennstoffzellenfahrzeuge sind nicht mit der heutigen Infrastruktur kompatibel.

Hinsichtlich der lokalen Schadstoffemissionen sind nur batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge völlig emissionsfrei. Es ist jedoch mit allen

Konzepten eine „Zero Impact Mobility“ zu erreichen. Das gilt auch für künftige Verbrennungsmotoren, deren Emissionen so niedrig ausfallen werden, dass sie messtechnisch kaum noch zu erfassen sind und deutlich unter den geltenden gesetzlichen Grenzwerten liegen werden. E-Kraftstoffe bieten im Zusammenspiel mit optimierten Motoren die Chance auf besonders niedrige Rohemissionen; hierzu besteht allerdings weiterer Forschungsbedarf.

Im 21. Jahrhundert ist – anders als in den Gründerjahren der Automobilindustrie – die Einführung neuer Technologien ohne eine ausführliche Risikoabwägung nicht mehr möglich. Der Arbeitskreis hat daher alle Energieträger im Hinblick auf Risiken in Herstellung, Distribution und Betrieb untersucht. Dabei zeigte sich: Zwar weist jeder Technologiepfad spezifische Risiken auf, grundsätzlich sind jedoch alle Pfade technisch beherrschbar.

	Bestandskompatibilität (max. Zumischung in %)			
	Benzin	Diesel	LPG	CNG
 <b>Batterieelektrisch*</b>	-	-	-	-
 <b>Wasserstoff</b>	-	-	-	2
 <b>E-Kraftstoffe</b>				
DME	-	-	-	-
OME	-	-	-	-
Methan – komprimiert (LD/HD)	-	-	-	100
Methan – flüssig (HD)	-	-	-	-
Methanol (M100)	3	-	-	-
FT-Benzin**	100	-	-	-
FT-Diesel**	-	100	-	-
FT-Propan**	-	-	100	-

\*Über Plug-in-Hybridfahrzeuge kann Strom als Energieträger indirekt zugemischt werden. Der Anteil ist dann abhängig von der Größe des Batteriespeichers im Verhältnis zur Gesamtreichweite.  
 \*\*Produktionsverfahren: Fischer-Tropsch(FT)-Synthese

## Perspektiven

Die Realisierung eines 100%-Szenarios ist weder wünschenswert noch sinnvoll. Die FVV-Studie stellt Fakten bereit, die für den politischen Diskurs benötigt werden. Zudem identifiziert sie künftigen Forschungsbedarf.

Aus den in der diesem Informationspapier zugrunde liegenden Studie zusammengetragenen Fakten lassen sich einige **grundlegende**

**Feststellungen** ableiten:

- Die Realisierung eines „100 % Szenarios“ ist weder wünschenswert noch sinnvoll. Das Referenzszenario „100 % Elektro“ weist den geringsten Primärenergiebedarf auf, kann vermutlich aber auch künftig nicht die Anforderungen aller Kunden (Ladezeit, Reichweite und Fahrzeugkosten) erfüllen. Dies gilt insbesondere für den Pkw-Langstreckenverkehr und schwere Nutzfahrzeuge. Insofern scheint es ratsam, auch bei dem Versuch, dem Szenario „100 % Elektro“ möglichst nahe zu kommen, ergänzend mindestens einen weiteren Pfad zu verfolgen.
- Die Verwirklichung von 100 %-Szenarien wäre voraussichtlich mit den höchsten Kosten verbunden, daher sind Mischszenarien auch aus ökonomischer Sicht zu bevorzugen.
- Einer Kombination der Szenarien „100 % Elektro“ und „100 % E-Kraftstoffe“ stehen keine grundsätzlichen technischen Hürden entgegen. Die Szenarien ergänzen sich gut, mindern das Investitionsrisiko und können in Summe zu einer schnelleren Absenkung der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen führen. Dies gilt insbesondere, wenn E-Kraftstoffe nicht als Reinkraftstoffe, sondern übergangsweise als Beimischung zu fossilen Kraftstoffen eingesetzt werden.

- Der Brennstoffzellenantrieb bietet mittel- und langfristig das Potenzial, die Vorteile von batterieelektrischen Fahrzeugen (lokale Emissionsfreiheit) und konventioneller Pkw (Flexibilität und Langstreckentauglichkeit) zu wettbewerbsfähigen Kosten miteinander zu kombinieren.

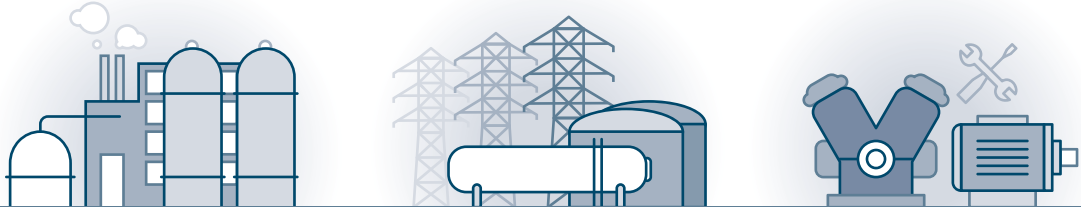
Der identifizierte Forschungsbedarf kann grundsätzlich in die Kategorien „Energieträger“ und „Antriebstechnik“ unterteilt werden, wobei hinsichtlich der Klimaziele eine enge Interdependenz besteht und daher immer auch entsprechende Gesamtsystembetrachtungen notwendig sind.

Für die Herstellung der jeweiligen Energieträger sind zwei grundsätzliche Forschungsfragen leitend. Einerseits soll der Wirkungsgrad in allen Prozessschritten weiter verbessert werden, um den Gesamt-Energieaufwand zu vermindern. Ein optimierter Wirkungsgrad in diesem Teil der Energiekette führt nicht nur dazu, dass geringere Stromerzeugungskapazitäten benötigt werden, sondern er stärkt auch die Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus. Andererseits müssen die Herstellprozesse und – vor allem für den Energieträger Strom – Distributionssysteme in Zukunft extrem flexibel mit unterschiedlichen Lasten umgehen können. Hohe Flexibilität und optimaler Wirkungsgrad stellen einen Zielkonflikt dar, der allerdings durch Hochtechnologie gemindert werden kann.

In der Antriebstechnik ist und bleibt die Verbesserung des Wirkungsgrades ebenfalls ein wichtiger Schwerpunkt. Von besonderer Relevanz ist dabei der Systemwirkungsgrad in elektrifizierten Antriebssträngen, wie er im FVV-Projekt „ICE2025+: Ultimate System Efficiency“ untersucht wird. Darüber hinaus gilt es, das Betriebs- und Langzeitverhalten aller Antriebsvarianten zu untersuchen und so zu optimieren, dass die Bedürfnisse des Fahrzeughalters erfüllt werden. Beispiele dafür stellen das Tief-temperaturverhalten und die Langzeitstabilität dar,

die nicht nur für Traktionsbatterien und Brennstoffzellen eine Herausforderung darstellen, sondern auch für jene E-Kraftstoffe relevant sind, die sich hinsichtlich ihrer chemischen Struktur von fossilen Energieträgern unterscheiden. Zudem besteht die Notwendigkeit, das Abgasverhalten synthetischer Kraftstoffe, auch bei Zumischung zu Benzin oder Diesel, zu analysieren. Nicht zuletzt sind weitere E-Kraftstoffe, etwa aus Methanol synthetisierter Ottokraftstoff, auf ihre Eignung im Fahrzeugbetrieb hin zu untersuchen.

Ausgewählte Forschungsschwerpunkte



Produktion der Energieträger	Energiebereitstellung	Fahrzeug- und Antriebstechnik
<ul style="list-style-type: none"> <li>• hochdynamische Elektrolyse</li> <li>• Verbesserung des Elektrolyse-Wirkungsgrades, zum Beispiel durch die Nutzung von Prozessabwärme</li> <li>• hochdynamische Wasserstoffverflüssigung</li> <li>• Speicherbedarf für erneuerbaren Strom und Nutzung in intermittierend betriebenen Chemie-Anlagen</li> <li>• Wasserstoff-Speichertechnologien (Kavernen, Rückverstromung etc.)</li> <li>• Kosten und Energiebedarf der CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft sowie Erschließung anderer CO<sub>2</sub>-Quellen, zum Beispiel aus Biomasse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kostensenkende Maßnahmen für H<sub>2</sub>-Druckspeicher</li> <li>• Infrastrukturbedarf und Kosten des erforderlichen Strom-Netzausbaus, inklusive der Neuinstallation Erneuerbarer-Energien-Anlagen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energiebedarf unter Berücksichtigung realer Betriebsbedingungen, vor allem bei tiefen Temperaturen</li> <li>• Kundenakzeptanz</li> <li>• benötigte Rohstoffe, technische Verfügbarkeit und geopolitische Abhängigkeiten (Life Cycle Assessment)</li> <li>• Sub-Zero-Emission-Potenzial und Abgasverhalten unter realen Betriebsbedingungen</li> <li>• Anpassungsbedarf von Verbrennungsmotoren an den Betrieb mit E-Kraftstoffen</li> <li>• Kompatibilität von E-Kraftstoffen mit fossilen und Biokraftstoffen</li> <li>• Nachrüstbarkeit</li> <li>• Betrieb mit gasförmigen Kraftstoffen in geschlossenen Gebäuden</li> <li>• Eignung und Kosten weiterer E-Kraftstoffe.</li> </ul>

Das Informationspapier ›Energiepfade für den Straßenverkehr der Zukunft – Optionen für eine klimaneutrale Mobilität im Jahr 2050‹ wurde zur allgemeinen Orientierung erstellt. Der Inhalt dieses Angebots kann und soll eine spezifische fachliche Beratung nicht ersetzen. Die FVV übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben und haftet nicht für Schäden, die sich aus der Verwendung der in dieser Studie enthaltenen Informationen ergeben.

Das Informationspapier beruht auf der FVV-Studie:  
**›Defossilisierung des Transportsektors – Optionen und Voraussetzungen in Deutschland‹.**

Beide Publikationen sind online verfügbar:

→ [www.fvv-net.de](http://www.fvv-net.de) | **Medien**

---

→ [www.themis-wissen.de](http://www.themis-wissen.de)

---



HERAUSGEBER

Forschungsvereinigung  
Verbrennungskraftmaschinen e.V.  
Lyoner Strasse 18  
60528 Frankfurt am Main  
[www.fvv-net.de](http://www.fvv-net.de)

VERÖFFENTLICHT

09 | 2018

REDAKTION

Johannes Winterhagen, delta eta

GESTALTUNG

Barbara Geising

DRUCK

h. reuffurth gmbh

**Bis zum Jahr 2050 soll der Straßenverkehr nahezu klimaneutral werden.**

Dies kann nur gelingen, wenn erneuerbare Energie im Verkehrssektor eingesetzt wird. Vor diesem Hintergrund hat ein Arbeitskreis der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) verschiedene Energiepfade analysiert. In der so entstandenen Studie wird der Einsatz von Elektrizität, Wasserstoff und synthetischen E-Kraftstoffen als Energieträger im Straßenverkehr sowohl unter technischen als auch wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet. Dieses Informationspapier fasst die wesentlichen Ergebnisse der FVV-Studie ›Defossilisierung des Transportsektors – Optionen und Voraussetzungen in Deutschland‹ (R586 | 2018) zusammen und soll so einen faktenbasierten Dialog über Energieträger und Antriebe der Zukunft ermöglichen.

**Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.**  
Research Association for Combustion Engines

Lyoner Strasse 18 | 60528 Frankfurt/M. | Germany  
T +49 69 6603 1345 | F +49 69 6603 2345 | info@fvv-net.de

[www.fvv-net.de](http://www.fvv-net.de)