

# RENEWBILITY III

OPTIONEN  
EINER DEKARBONISIERUNG  
DES VERKEHRSSSEKTORS



## INHALTSVERZEICHNIS

Einleitung .....	4
Die Szenario-Philosophie.....	5
Das Basisszenario .....	8
Das Szenario Effizienz .....	12
Ansätze für den Personenverkehr .....	22
Ansätze für den Güterverkehr .....	32
Der Luft- und Seeverkehr.....	35
<b>Die Szenarien im Überblick .....</b>	<b>38</b>
Das Forschungsprojekt Renewbility .....	46

## EINLEITUNG

Der Klimawandel schreitet voran. Wenn wir die Erderwärmung aufhalten wollen, müssen wir den Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase radikal senken. Die Weltwirtschaft muss dazu rasch in eine Form umgewandelt werden, die wesentlich weniger Kohlenstoffdioxid als jetzt freisetzt. In Paris hat sich die Welt zu einer weitgehenden Dekarbonisierung und Treibhausgasneutralität unserer Lebens- und Wirtschaftsweise verpflichtet. Konkret heißt das: Wir müssen die Netto-Treibhausgas-Emissionen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts weltweit auf null bringen. Um Paris umzusetzen, müssen wir unsere Politik auf das Leitbild der weitgehenden Treibhausgasneutralität bis zur Mitte des Jahrhunderts ausrichten. Was wir dann noch an CO<sub>2</sub> ausstoßen, muss an anderer Stelle wieder entzogen werden. Der Handlungsdruck für Maßnahmen zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ist bereits heute enorm. Der Umbau von Energie-, Produktions- und Transportsystemen ist diskussionsintensiv und braucht viel Zeit.

Die Sektoren Landwirtschaft und Industrie können systembedingt nicht vollständig dekarbonisieren. Das heißt, dass die energiebedingten Emissionen praktisch auf null gesenkt werden müssen – das gilt auch für den Verkehr. Im Bereich der Stromerzeugung ist dafür die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien unumgänglich. Der Verkehrssektor kann nur durch eine Kombination von technologischen Neuerungen, effizienzsteigernden Maßnahmen und Änderungen der Rahmenbedingungen vollständig CO<sub>2</sub>-frei werden.

Die Treibhausgasneutralität des Verkehrssektors erfordert eine deutliche Trendumkehr: Während die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen nach 2000 leicht abgenommen haben, steigen sie in den letzten Jahren wieder an und befinden sich derzeit (2015) etwa auf dem Niveau von 1990. Das heißt, der Verkehrssektor hat bis jetzt keinen Beitrag zum Klimaschutz geleistet.

Das Renewability-Team hat sich in den vergangenen Jahren auf vielfältige Weise mit den Optionen für Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft im Verkehrssektor auseinandergesetzt. In dieser Broschüre werden Ihnen die Ergebnisse der dritten Phase von „Renewability“ präsentiert, um zu zeigen, dass – und mit welchen Optionen – eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors möglich ist.

## DAS FORSCHUNGSPROJEKT RENEWABILITY

Renewability ist ein Modellverbund wissenschaftlicher Partner, in dem mögliche Entwicklungen des Verkehrssektors durch die Betrachtung von plausiblen, in sich konsistenten und vorstellbaren Szenarien dargestellt werden. Auf dieser Basis zeigt das Forscherteam die Potenziale konkreter Maßnahmen für Klimaschutz im Verkehr auf. Dabei beachtet es die Auswirkungen auf die Umwelt ebenso wie die ökonomischen Folgen. Die frühzeitige Einbindung von Stakeholdern aus Wirtschaft, Industrie und Zivilgesellschaft macht es möglich, die Szenarien realitätsnah zu formulieren und aus den verschiedensten Blickwinkeln zu betrachten.

## DIE SZENARIO-PHILOSOPHIE

### DIE OPTIONEN FÜR EINE DEKARBONISIERUNG

Es gibt grundsätzlich mehrere Ansätze, Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu reduzieren:

- die Reduktion der Verkehrsnachfrage, beispielsweise durch kürzere Wege oder die Verringerung der Anzahl an Arbeitswegen,
- die Verlagerung vom MIV (motorisierten Individualverkehr) auf energieeffizientere und klimafreundlichere Verkehrsmittel, etwa durch die Stärkung multimodaler Lösungen, die Förderung des Radverkehrs oder steuerliche Maßnahmen,
- den Einsatz energieeffizienterer Fahrzeuge, begünstigt durch verschärfte gesetzliche Rahmenbedingungen bei CO<sub>2</sub>-Grenzwerten oder eine Forcierung der Elektromobilität,
- die Dekarbonisierung der eingesetzten Energieträger durch den Einsatz von nachhaltigen bio- oder strombasierten flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen und Strom aus erneuerbaren Energiequellen.

### DIE RENEWABILITY-SZENARIEN

In Renewability III werden nur Szenarien betrachtet, die bis zum Jahr 2050 zu einer vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors führen. Das bedeutet, dass die benötigte Energie zu diesem Zeitpunkt über Strom aus erneuerbaren Energien, mit strombasierten Kraftstoffen (mit Strom aus erneuerbaren Energien) oder Biokraftstoffen abgedeckt wird.

In verschiedenen Szenarien und Szenarettten wird die Dekarbonisierung der Energieträger auf unterschiedliche Art und Weise mit weiteren Optionen verknüpft. Die Szenarien bieten dabei Antworten auf Fragen wie die folgenden:

- Welche Optionen einer vollständigen Dekarbonisierung sind volkswirtschaftlich günstig, welche weniger?
- Wie viel Kraftstoff und Strom werden für die unterschiedlichen Pfade benötigt?
- Welche möglichen zusätzlichen Vorteile ergeben sich beispielsweise hinsichtlich der externen Kosten?

In dem Szenario Effizienz führt eine Effizienzsteigerung der Fahrzeuge bis zum Jahr 2050 zu einem sehr hohen Anteil der Elektromobilität, und zwar sowohl bei Pkw als auch bei Lkw. Die verbleibenden Flüssigkraftstoffe werden großteils auf Basis von Strom aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt. In einem Szenario Effizienz plus wurden zusätzlich zu den effizienzsteigernden Maßnahmen auch Schritte zur Steigerung der Lebensqualität in Innenstädten und eine Ertüchtigung des Schienengüterverkehrs berücksichtigt.

Ergänzend wurde in der Szenarette Fokus Kraftstoffe analysiert, wie die Entwicklung ohne Maßnahmen zur deutlichen Effizienzsteigerung verlaufen würde. Darüber hinaus wurden in weiteren Szenaretten die Auswirkungen einer Pkw-Maut und die Folgen des Einsatzes von Oberleitungs-Lkw untersucht.

### Szenarien im Überblick

	SZENARIO BASIS	SZENARIO EFFIZENZ	SZENARETTE FOKUS KRAFTSTOFFE	SZENARIO EFFIZIENZ PLUS	SZENARETTE PKW-MAUT	SZENARETTE OHNE O-LKW
Kraftstoffmix	konv. Kraftstoffe	95 % PtX 5 % Biokraftstoffe	95 % PtX 5 % Biokraftstoffe	95 % PtX 5 % Biokraftstoffe	95 % PtX 5 % Biokraftstoffe	95 %PtX 5 % Biokraftstoffe
Kraftstoffpreise	niedrige Kraftstoffpreise	hohe Kraftstoffpreise	mittlere bis hohe Kraftstoffpreise	hohe Kraftstoffpreise	hohe Kraftstoffpreise	hohe Kraftstoffpreise
Pkw-Grenzwert	95 g	60 g (2030) 10 g (2050)	95 g	60 g (2030) 10 g (2050)	60 g (2030) 10 g (2050)	60 g (2030) 10 g (2050)
Verfügbarkeit O-Lkw	konv. Lkw	Oberleitungs-Lkw	konv. Lkw	Oberleitungs-Lkw	Oberleitungs-Lkw	konv. Lkw
Maßnahmen zur Verlagerung				„Lebenswerte Innenstadt“ und „Ertüchtigung Schienengüterverkehr“		
Pkw-Maut	nein	nein	nein	nein	ja (4 ct/km)	nein

Quelle: Renewbility III

## DIE ROLLE DER KRAFTSTOFFE IN DEN SZENARIEN

Der Beitrag der Biokraftstoffe ist aufgrund der ausschließlichen Nutzung von Abfall- und Reststoffen in den Renewbility-Szenarien auf maximal rund 90 Petajoule beschränkt. Im Jahr 2030 entspricht das einem Anteil von rund fünf Prozent (bezogen auf den Energiegehalt) an den flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen.

Bei den strombasierten Kraftstoffen (PtX) wird langfristig eine Verwendung nur dort für sinnvoll erachtet, wo es keine anderen Optionen gibt. Vor dem Hintergrund einer zu erwartenden Fortschreibung der EU-Richtlinie zu erneuerbaren Energien wird in Renewbility von einem Anteil von fünf Prozent strombasierter Kraftstoffe bei Benzin, Diesel und Gas in 2030 ausgegangen. Bis zum Jahr 2050 steigt der Anteil strombasierter Kraftstoffe an den flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen in den Szenarien dann auf 95 Prozent an. Zusammen mit dem Einsatz von Biokraftstoffen, deren Anteil bei fünf Prozent verbleibt, wird so eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors möglich.

Um einen zunehmenden Anteil strombasierter Kraftstoffe zu erzielen, wird in den Renewbility-Szenarien von einer Quote ausgegangen. Der Grund dafür: Die Herstellungskosten werden zwar bis zum Jahr 2050 beispielsweise durch Skaleneffekte erheblich sinken. Trotzdem werden die Kosten strombasierter Kraftstoffe selbst bei optimistischen Annahmen im Jahr 2050 vermutlich noch rund 50 Prozent über denen fossiler Kraftstoffe liegen.

Die Renewbility-Szenarien gehen von einer 100-prozentigen Auslandsproduktion strombasierter Kraftstoffe auf Basis erneuerbarer Energien aus – weil die Stromgestehungskosten dort niedriger sind und es größere Potenziale für erneuerbare Energien gibt. Die zusätzlichen Herstellungskosten für die alternativen Kraftstoffe werden in den Szenarien vom Nutzer getragen.

*„Wir müssen frühzeitig über die Annahme diskutieren, dass strombasierte Kraftstoffe zu einem großen Teil – möglicherweise sogar zu 100 Prozent – importiert werden. Und zwar nicht nur unter Gesichtspunkten wie Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit, sondern auch unter außen- und sicherheitspolitischen Aspekten. Es geht dabei schließlich um die Frage der nötigen Transformationspfade auch außerhalb Deutschlands.“*

Dr. Matthias Deutsch, Agora Energiewende

## EXKURS: DEKARBONISIERTE ENERGIETRÄGER

### BIOKRAFTSTOFFE

Der Beitrag der Biokraftstoffe zur Emissionsminderung im Verkehrssektor war ursprünglich mit hohen Erwartungen verbunden. Das spiegelt sich auch in den Projektergebnissen von Renewability I und II wider. In Renewability III wird bis zum Jahr 2050 eine weitgehende Dekarbonisierung angestrebt. Dies bedeutet, dass spätestens ab 2050 die verkehrsbedingten THG-Emissionen nahe Null liegen und auch alle anderen Sektoren ihre Emissionen so stark wie möglich reduzieren müssen. Da Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse aber immer – neben den Emissionen aus der Konversion/Verarbeitung – signifikante THG-Emissionen aus der Landwirtschaft aufweisen, können solche Biokraftstoffe ab 2050 nicht mehr Teil des Lösungsszenarios sein. Wenn man die Emissionen aus indirekter Landnutzungsänderung berücksichtigt, kann die Klimabilanz von Biokraftstoffen sogar schlechter als diejenige fossiler Energieträger ausfallen. Das gilt für jegliche Form landbasierter Biomasse, die um die global begrenzten Flächen konkurriert und damit zu entsprechenden Verdrängungseffekten führt. Eine Alternative zu landbasierten Biokraftstoffen sind Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen. Das Potenzial an nachhaltigen Biokraftstoffen ist jedoch stark begrenzt, im Inland beruht es im Wesentlichen auf Gülle, Stroh, Altspeisefetten und -ölen, Bioabfall und Alt- bzw. Industrieholz. Der Umfang beläuft sich auf maximal rund 90 Petajoule. Das entspricht in etwa vier Prozent des heutigen Energiebedarfs des Verkehrssektors. Außerdem konkurrieren auch andere Anwendungen wie z. B. die Energie- und Wärmebereitstellung um diese Rohstoffe. Und: Wie eingangs dargestellt, benötigt Deutschland im Grunde ab 2050 auch Kohlendioxid-Senken, um netto Null erreichen zu können. Aus jenen Abfall- und Reststoffen, bei denen es möglich ist (bzw. durch technische Entwicklungen möglich gemacht werden kann), wird die Vermeidung einer CO<sub>2</sub>-Freisetzung in der Zukunft folglich priorisiert werden.

### STROM

Damit die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrs optimal zum Klimaschutz beiträgt, muss der eingesetzte Strom aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. In den Renewability-Szenarien wird davon ausgegangen, dass für die zusätzliche Stromnachfrage des Verkehrs nur Strom aus zusätzlichen erneuerbaren Energien zum Einsatz kommt.

### STROMBASIERTE KRAFTSTOFFE

CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe für den Verkehrssektor können auf Basis von Strom aus erneuerbaren Energien synthetisch hergestellt werden. Zu diesen „strombasierten Kraftstoffen“ zählen Wasserstoff (PtG-H<sub>2</sub>), Methan (PtG-CH<sub>4</sub>) oder Flüssigkraftstoffe (PtL). PtL dient als Ersatz für Benzin, Diesel oder Kerosin. Der Wasserstoff wird dabei über eine chemische Reaktion mit Hilfe von Strom gewonnen. Über Syntheseprozesse werden aus H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> dann Methan oder Flüssigkraftstoffe produziert. Allerdings treten dabei hohe Wandlungsverluste auf. Bei großen Mengen muss das benötigte CO<sub>2</sub> überdies energieaufwendig aus der Luft gewonnen werden. An der Tankstelle stehen dann je nach Verfahren und Endprodukt nur mehr 40 bis 65 Prozent der Energie des Strominputs in Form von strombasierten Kraftstoffen zur Verfügung. Bei den Kosten schneiden strombasierte Kraftstoffe im Vergleich zu den fossilen schlechter ab. Entscheidende Faktoren sind dabei die Kosten des Stroms und die Betriebsstunden der Anlagen. Transport und Verteilung in Deutschland sind dagegen von eher geringer Bedeutung. Strombasierte Flüssigkraftstoffe kosten heute mehr als sechsmal so viel wie das fossile Pendant.

## DAS BASISZENARIO

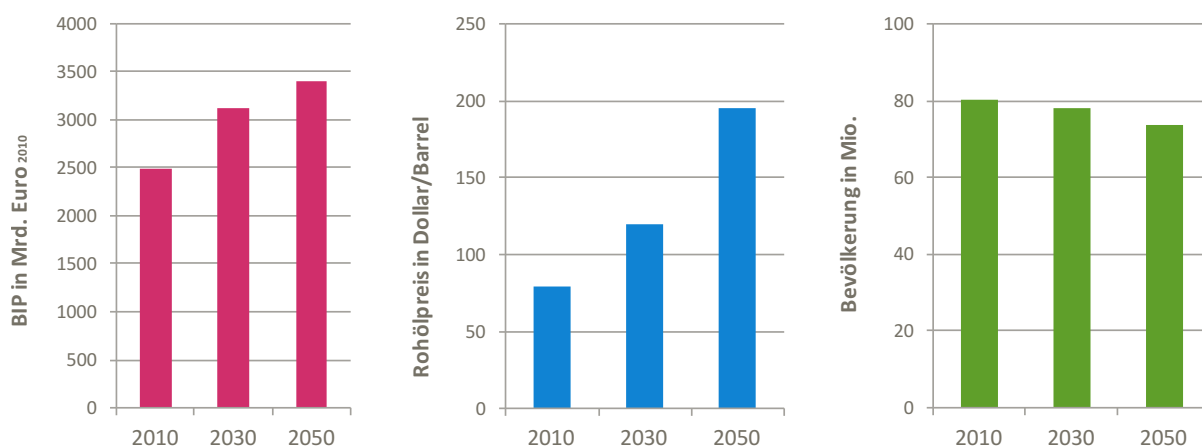
Wo stehen wir in den Jahren 2030 und 2050, wenn nur jene Klimaschutzmaßnahmen gesetzt werden, die bereits jetzt von der Politik vorgesehen sind? Dieses sogenannte „Basisszenario“ – das kein „Klimaschutzszenario“ ist – steht am Beginn dieses Berichts. So lässt sich besser verstehen, welche Änderungen die im Rahmen von Renewbility entwickelten Szenarien bewirken würden.

Alle Nachfragemodelle wurden an der offiziellen Verkehrsprognose 2030 (VP 2030) kalibriert. Für das Basisszenario gilt aber: Nur bereits beschlossene Maßnahmen sind enthalten. Einige in der VP 2030 enthaltenen Annahmen wurden daher modifiziert. Im Basisszenario gibt es, anders als in der VP 2030:

- keine Anhebung der Mineralölsteuer um 2,3 Prozent pro Jahr,
- keine Fortschreibung der Pkw-Grenzwerte, diese bleiben nach 2021 bei 95 Gramm pro Kilometer,
- einen geringeren Anteil Biokraftstoffe: In der Biokraftstoffpolitik werden keine wesentlichen Bewegungen erwartet (rund fünf statt über zehn Prozent im Jahr 2030, keine Biokraftstoffe mehr im Jahr 2050).

Die Rahmendaten zum Bruttoinlandsprodukt, zur Bevölkerungsstruktur und zu den Rohölpreisen wurden für den Zeitraum bis zum Jahr 2030 aus der VP 2030 übernommen. Für die Jahre 2030 bis 2050 hat das Projektteam eine Orientierung an den Rahmendaten des „Klimaschutzszenarios 2050“ des Bundesumweltministeriums vorgenommen. Die Kosten für den öffentlichen Verkehr wurden entsprechend den Steigerungsraten der VP 2030 bis 2050 fortgeschrieben.

### Entwicklung BIP, Rohölpreis und Bevölkerung



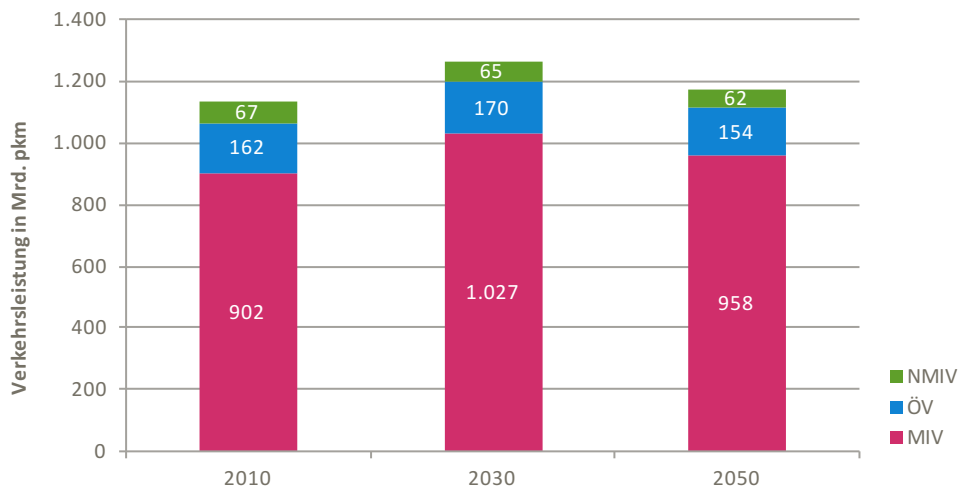
Quelle: Renewbility III



## AUSWIRKUNGEN AUF VERKEHRSNACHFRAGE, ENDENERGIE, TREIBHAUSGASE

Relevant für die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors sind die Verkehrsleistungen von Personen und Gütern, die Antriebe der eingesetzten Fahrzeuge und der Kraftstoffmix. Im Personenverkehr wird es entsprechend der im Basisszenario getroffenen Annahmen im Vergleich zu 2010 bis zum Jahr 2030 einen Anstieg um elf Prozent geben – auf dann 1.261 Milliarden Personenkilometer (pkm). Bis 2050 erfolgt im Basisszenario dann wieder eine leichte Abnahme auf 1.173 Milliarden Personenkilometer. Trotz des Bevölkerungsrückgangs liegt also die Personenverkehrsleistung im Jahr 2050 höher als heute. Beim öffentlichen Verkehr ergibt sich vor allem aufgrund des Rückgangs der Schülerzahlen eine leichte Reduktion. Die gesamte Wegezahl wird hingegen leicht zunehmen – aufgrund zukünftig höherer Einkommen und der leicht steigenden Verfügbarkeit von Pkw.

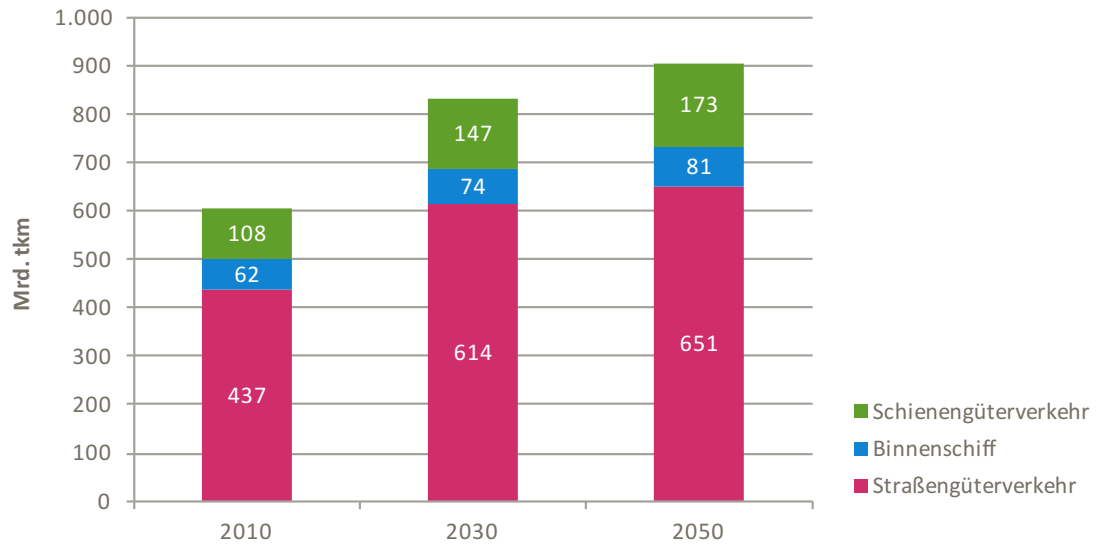
### Entwicklung des Personenverkehrs in der Basis



Quelle: Renewability III

Im Güterverkehr steigt die Verkehrsleistung bis 2030 deutlich um 37 Prozent an. Im Zeitraum 2030 bis 2050 liegt der Anstieg bei weiteren neun Prozent, sodass die Güterverkehrsleistung insgesamt im Jahr 2050 bei 906 Milliarden Tonnenkilometern (tkm) liegt. Vor allem Schiene (plus 60 Prozent) und Straße (plus 49 Prozent) bewältigen diese zusätzliche Verkehrsnachfrage.

### Entwicklung des Güterverkehrs in der Basis

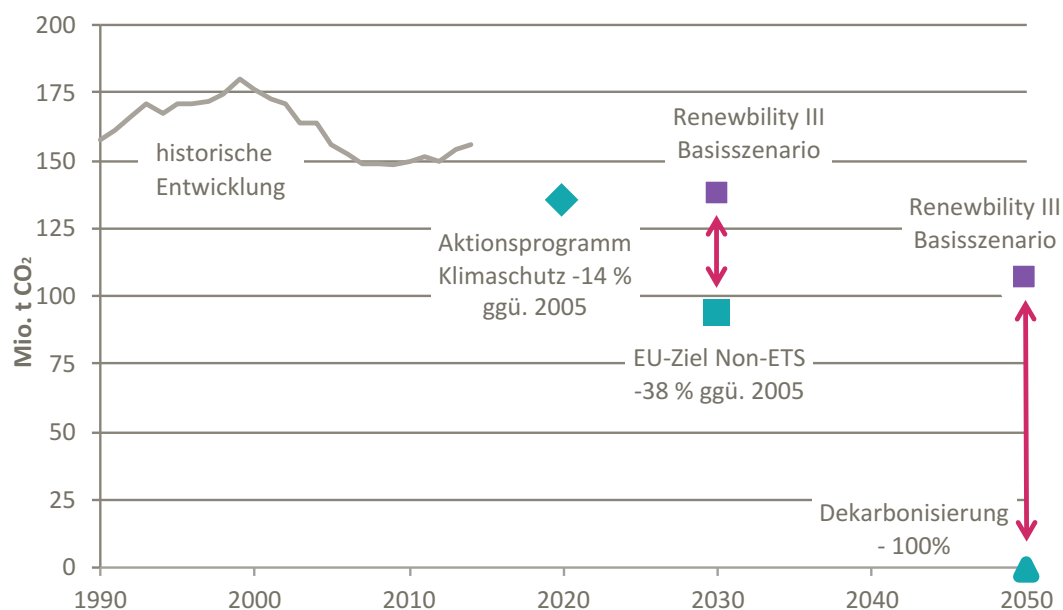


Quelle: Renewability III

## POLITISCHE ZIELE ZU ENDENERGIEBEDARF UND TREIBHAUSGASEN WERDEN VERFEHLT

Wenn keine zusätzlichen Maßnahmen verabschiedet werden, wird es nur zu einer moderaten Entwicklung bei der Effizienz und dem Anteil der Elektromobilität kommen. Der Anteil an der elektrischen Fahrleistung würde in 2050 bei 26 Prozent liegen. Der Endenergiebedarf würde bis 2030 nur um neun Prozent gegenüber 2010 gesenkt, bis 2050 läge die Reduktion bei 26 Prozent. Die Ziele des Energiekonzepts, also eine Minderung um zehn Prozent bis 2020 und 40 Prozent bis 2050, werden ohne zusätzliche Maßnahmen daher deutlich verfehlt.

### Entwicklung der historischen Treibhausgasemissionen, Entwicklung in der Basis und Ziele



Quelle: Renewability III

Bei den nationalen Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors ist bis 2030 eine Senkung um acht Prozent möglich, bis 2050 um 28 Prozent. Auf europäischer Ebene werden derzeit für die Sektoren Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft, die nicht vom EU-Emissionshandel umfasst werden, Ziele für 2030 gesetzt. Demnach sollen in Deutschland die THG-Emissionen dort um 38 Prozent im Vergleich zum Jahr 2005 gesenkt werden. Das Energiekonzept der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 sieht bis 2050 eine sektorübergreifende THG-Emissionsminderung um bis zu 95 Prozent vor – im Vergleich zum Jahr 1990. Dieses Ziel wird in der Basisentwicklung – ebenso wie die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors – deutlich verfehlt. Ohne die Umsetzung weiterer Maßnahmen im Verkehrssektor kann Deutschland seine Klimaschutzziele nicht erreichen.

## DAS SZENARIO EFFIZIENZ

Das Forschungsteam von Renewbility III betrachtete verschiedene Szenarien, die unterschiedliche Maßnahmen voraussetzen, aber eine Gemeinsamkeit haben: Bei allen wird der Verkehrssektor bis 2050 vollständig treibhausgasneutral. Den Ausgangspunkt der Forschungsarbeit bildete ein Effizienz-Szenario. Die zentrale Fragestellung dabei: Was passiert, wenn die Dekarbonisierung der Kraftstoffe mit einer maximalen Fahrzeugeffizienz kombiniert wird, wenn also ein rein technologischer Ansatz zum Klimaschutz gewählt wird? Wesentliche Annahmen im Szenario Effizienz sind:

- für Pkw gilt im Jahr 2030 ein Grenzwert von 60 g/km und in 2050 von 10 g/km,
- Oberleitungs-Lkw und die entsprechende Infrastruktur sind europaweit verfügbar,
- die Kraftstoffkosten steigen durch PtX-Kraftstoffe und Steuern kräftig an.

Die Effizienzsteigerung und der Anteil alternativer Antriebe bei den Neuzulassungen von Pkw und Lkw, welche sich unter diesen Rahmenbedingungen ergeben würden, werden von den eingesetzten Modellen berechnet.

### Grenzwerte für Pkw:

Die Pkw-Grenzwerte von 60 g/km in 2030 und 10 g/km in 2050 sorgen sowohl für eine deutliche Effizienzsteigerung der konventionellen Pkw als auch für einen zunehmenden Anteil elektrischer Fahrzeuge. Zur Ermittlung des Verbrauchs wurde dabei der „Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ)“ herangezogen und um einen Realaufschlag von 35 Prozent ergänzt.

*„Wesentlich ist: Die Verbrauchsmessungen müssen deutlich realitätsnaher werden. Die wachsende Kluft zwischen Testzyklus und realem Verbrauch darf bei Weitem nicht 35 Prozent betragen und muss schnell geschlossen werden.“*

Dietmar Oeliger NABU – Naturschutzbund Deutschland e.V.

### Einführung von Oberleitungs-Lkw:

Der Güterverkehr lässt sich nur zum Teil auf die Schiene verlagern. Als energieeffiziente Option zur Dekarbonisierung des verbleibenden Straßengüterverkehrs wurde die Einführung von Oberleitungs-Lkw berücksichtigt. Dadurch lässt sich die Energieeffizienz des Straßengüterverkehrs gegenüber Verbrennungsmotoren weiter steigern. Die Annahmen gehen von einem langfristigen Aufbau einer europaweiten Infrastruktur und einem maximalen Potenzial in 2050 von 80 Prozent an Oberleitungs-Lkw bei Last- und Sattelzügen aus.

Es wird davon ausgegangen, dass diese wiederum 80 Prozent ihrer Strecken elektrisch zurücklegen. Insgesamt würden damit rund zwei Drittel des Güterstraßenfernverkehrs elektrisch an der Oberleitung zurückgelegt.

**Kraftstoffpreise:**

In diesem Szenario wird der Steuervorteil für Dieselkraftstoff abgeschafft, die Energiesteuern werden nach Energiegehalt bemessen. Sie steigen bis 2040 auf 32 Euro pro Gigajoule für alle Kraftstoffe, was beispielsweise für Benzin eine Erhöhung auf rund ein Euro/Liter bedeutet, für Diesel auf 1,15 Euro und für Strom auf 11,5 ct/kWh. Diese Annahme entspricht der Steuer, die gemäß der VP 2030 im Jahr 2030 auf Benzin erhoben werden soll. Die Nutzer elektrischer Fahrzeuge müssten ab diesem Jahr dann auch die Kosten der Ladeinfrastruktur tragen. Das gilt sowohl für Pkw als auch für das Oberleitungssystem der Lkw.

Die Steuererhöhung ist dabei auch aus dem Staatshaushalt begründet. Denn durch steigende Effizienz würden sonst die Kraftstoffsteuereinnahmen erheblich zurückgehen, obwohl die zurückgelegte Pkw-Fahrleistung und die damit verbundenen volkswirtschaftlichen Kosten etwa für die Infrastruktur auf hohem Niveau blieben. Einen im Vergleich zu den Steuern wesentlich größeren Effekt auf die Nutzerkosten hat der zunehmende Anteil strombasierter Kraftstoffe auf fünf Prozent in 2030 und 95 Prozent in 2050.

Zwischen 2010 und 2030 steigen die Benzinpreise dadurch um 1,3 Prozent pro Jahr, die Dieselpreise um 2,4 Prozent real an – also zusätzlich zur normalen Inflation. Zwischen 2030 und 2050 liegt der Anstieg bei über drei Prozent. Die Verbraucherpreise für einen Liter Diesel sind damit im Jahr 2050 rund dreimal so hoch wie heute. Dagegen steigt der Strompreis zwischen 2030 und 2050 nur noch leicht an.

**EXKURS: „Warum die Nutzer die Kosten strombasierter Kraftstoffe tragen sollen ...“**

*Die Nutzer kalkulieren die Mobilitätskosten in ihre Entscheidungen mit ein – wenn sie sie selbst tragen müssen, führt dies zu einer Verhaltensänderung, ganz ohne den Umweg über den Staat. Die Nutzer können so ganz direkt auf den Preis reagieren. Wird der Preis für die gewünschte Mobilität teurer, senken sie ihre Nachfrage oder kaufen Produkte, deren Verbrauch geringer ist. Wenn der Staat die Mobilität finanziert, also beispielsweise die höheren Kosten der strombasierten Kraftstoffe trägt, kommen die Kosten nur indirekt über höhere Steuern bei der Bevölkerung an. Es erfolgt dabei keine Differenzierung: Alle müssen zahlen, egal ob und in welcher Menge sie strombasierte Kraftstoffe nutzen. Dadurch sinken die verfügbaren Einkommen, und die Haushalte müssen insgesamt ihre Ausgaben reduzieren – mit entsprechend negativen volkswirtschaftlichen Effekten. Wenn dagegen die Kosten für strombasierte Kraftstoffe vom Nutzer getragen werden, dann werden unmittelbar Anreize zur Nutzung energieeffizienter Verkehrsmittel gesetzt, beispielsweise Elektromobilität, öffentlicher Verkehr oder nichtmotorisierter Verkehr.*

## ERGEBNISSE FAHRZEUGBESTAND

Die Pkw-Grenzwerte haben einen deutlich sichtbaren Effekt auf den Fahrzeugbestand. Durch den Grenzwert von 60 g/km sind im Jahr 2030 bereits sechs Millionen Elektro-Pkw im Bestand. Die Effizienzsteigerung konventioneller Fahrzeuge liegt bei rund 1,4 Prozent pro Jahr statt bei 1,1 Prozent im Basisszenario. Die Kosten für Kraftstoffe und die Anschaffung von Pkw liegen höher, sodass der Pkw-Bestand im Jahr 2030 nicht – wie im Basisszenario – auf 47,9 Millionen ansteigt, sondern nur auf 45,9 Millionen.

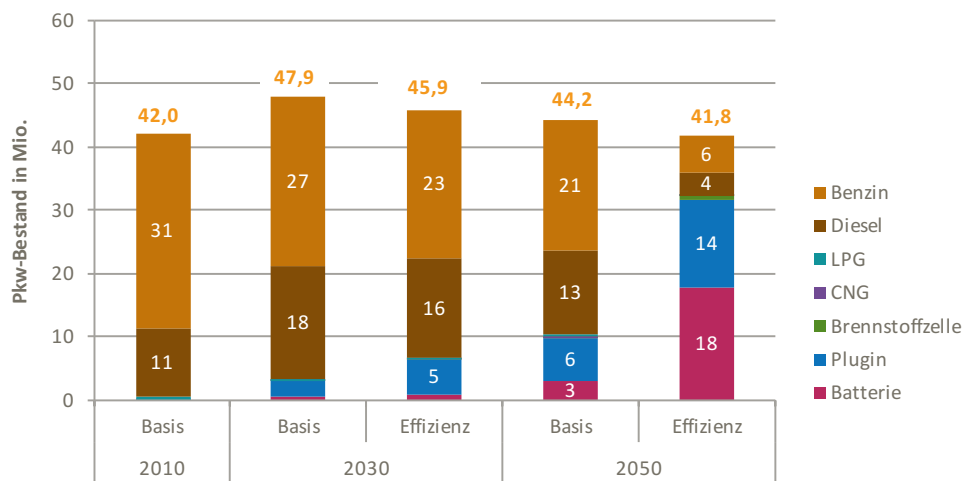
Durch den Grenzwert von 10 g/km im Jahr 2050 werden langfristig praktisch keine konventionellen Fahrzeuge mehr zugelassen, und der elektrische Fahranteil steigt bis zum Jahr 2050 auf 76 Prozent. Mit den Basisannahmen ergeben sich nur 26 Prozent.

Brennstoffzellenfahrzeuge setzen sich in diesem Szenario aufgrund hoher Kosten nicht durch. Auch Gasfahrzeuge spielen keine bedeutende Rolle.

*„Als wir angefangen haben mit dem Projekt ‚Renewability‘, gab es unterschiedliche Antriebsformen, die man untersucht hat. In den jüngsten Jahren hat man gesehen, dass E-Mobilität wahrscheinlich die Zukunft sein wird und einen wichtigen Beitrag zum Erreichen unserer Klimaschutzziele leisten kann.“*

Dr. Andreas Froschmayer, DACHSER SE

### Pkw-Bestand im Szenario Basis und Szenario Effizienz



Quelle: Renewability III

Oberleitungs-Lkw sind, begünstigt durch die steigenden Dieselpreise aufgrund der strombasierten Kraftstoffe, in diesem Szenario mittel- bis langfristig eine günstigere Alternative als Diesel-Lkw. Sie werden daher ab 2030 in immer größerem Umfang eingesetzt.

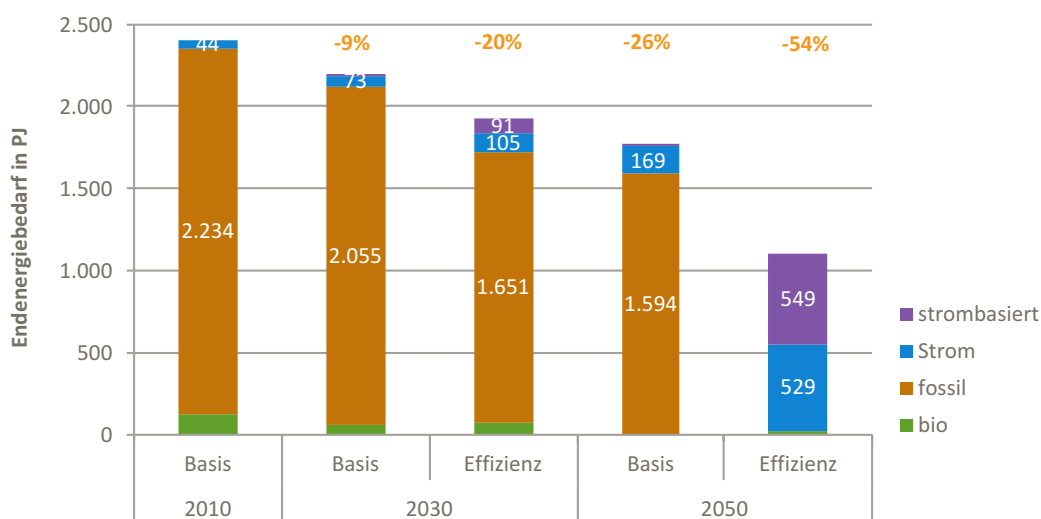
## ERGEBNISSE VERKEHRSNACHFRAGE

Im Vergleich zur Basisentwicklung wird die Verkehrsnachfrage durch die höheren Kraftstoffkosten im Personenverkehr reduziert und liegt im MIV etwa sieben Prozent niedriger als im Basisszenario. Durch die Dekarbonisierung auch in anderen Sektoren und den dadurch sinkenden Transportbedarf wird die Verkehrsleistung im Straßengüterverkehr in 2050 mit sieben Prozent unter jener des Basisszenarios liegen, und im Schienengüterverkehr um rund sechs Prozent. Damit ist die Personenverkehrsnachfrage im Jahr 2050 im Szenario Effizienz in etwa so hoch wie heute, die Güterverkehrsnachfrage steigt – wenn auch im Vergleich zum Basisszenario gedämpft – weiter an.

## ERGEBNISSE ENDENERGIEBEDARF

Bis zum Jahr 2030 wird eine Reduktion des Endenergiebedarfs um 20 Prozent im Vergleich zu 2010 erreicht. In der Basisentwicklung liegt die Reduktion bei neun Prozent. Die Effekte der Effizienzsteigerung und der niedrigeren Verkehrsleistung auf den Endenergiebedarf sind also bereits im Jahr 2030 deutlich sichtbar. Noch stärker ist dies im Jahr 2050 der Fall. Der Energiebedarf des Verkehrssektors liegt hier durch die starke Elektrifizierung um 54 Prozent niedriger als 2010.

### Endenergiebedarf Verkehr (national) in Basis und Szenario Effizienz



Quelle: Renewability III

## ERGEBNISSE ÖKONOMISCHE AUSWIRKUNGEN

Wenn die Grenzwerte für Pkw weiter fortgeschrieben werden, werden Fahrzeuge immer effizienter gestaltet. Das führt auch zu einem starken Wechsel in Richtung Elektromobilität. Und damit wächst sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr die Nachfrage nach Strom aus erneuerbaren Energiequellen.

Wenn die heutige Quote an inländisch produziertem Strom aus erneuerbaren Energien auch in Zukunft gehalten wird, führt dies zu einem deutlich positiven Nachfrageimpuls im Inland. Im Szenario Effizienz wird davon ausgegangen, dass die Inlands-Produktion auch bei den Fahrzeugen konstant bleibt.

Eine negative Auswirkung auf die Wertschöpfung bringt der Kraftstoff-Shift insbesondere in der Branche „Kokereien und Mineralölverarbeitung“ mit sich. Insgesamt ist der Effekt durch die höhere Nachfrage an erneuerbaren Energien jedoch positiv.

Die inländische Wertschöpfung steigt auch durch Investitionen in die Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr. Diese Investitionen sind nutzerfinanziert und in den Energiekosten enthalten. Insgesamt gesehen wird der Konsum der Haushalte gestützt: Die erhöhten Ausgaben für den öffentlichen Verkehr (mehr ÖV) werden durch eine Abnahme der Ausgaben für den motorisierten Individualverkehr (weniger MIV) mehr als ausgeglichen. Die Klimaziele können in diesem Szenario praktisch ohne längerfristige Einbußen bei der Wertschöpfung erreicht werden, die Beschäftigungsquote sinkt dabei minimal.

Fazit: Im Szenario Effizienz steigt die Nachfrage nach heimischem Strom aus erneuerbaren Energiequellen im Güter- und Personenverkehr. Aufgrund der hinterlegten Besteuerung verzeichnet der Staat zwar etwas geringere Einnahmen. Wegen der insgesamt geringeren Mobilitätsausgaben der Haushalte führt dies jedoch netto zu einer Entlastung der Haushaltseinkommen. Im Vergleich zum Basisszenario werden im Jahr 2050 praktisch keine volkswirtschaftlich negativen Effekte auf das Bruttoinlandsprodukt erwartet, die Beschäftigungsbilanz ist nur leicht negativ.

## NEUE MATERIALBEDARFE DURCH NEUE TECHNOLOGIEN

Neue Technologien sowohl auf der Fahrzeugseite als auch bei der Herstellung neuer Kraftstoffe können zu Materialbedarfen und Energieaufwänden führen, die sich von den heutigen unterscheiden. So verändert sich beispielsweise durch viele Millionen Elektrofahrzeuge die technologische Basis der Kfz-Flotten massiv. Das führt dazu, dass Energieaufwand, Treibhausgasemissionen und andere Umweltwirkungen des Verkehrs aus der Phase der Nutzung zum Teil in die Herstellungsphase verlagert werden. Darüber hinaus verändert sich die Nachfrage nach Rohstoffen, da die Fahrzeuge aus anderen Materialien zusammengesetzt werden als bisher. Eine umfassende Betrachtung der Transformation des Verkehrssektors muss daher auch Umweltwirkungen bei der Herstellung der Kraftstoffe und Rohstoffbedarfe der Fahrzeugherstellung einbeziehen. Die Perspektive der Fahrzeugnutzung muss um den Blick auf die Ökobilanz erweitert werden. Dies wird im Folgenden am Beispiel der Fahrzeugherstellung dargestellt. Im nationalen Treibhausgasinventar werden die in Deutschland entstehenden Emissionen der Fahrzeugherstellung der Industrie zugerechnet. Es gibt somit keine direkte Verknüpfung mit den Emissionen des Verkehrs nach der sektoralen Abgrenzung des Treibhausgasinventars.



## MATERIALVORLEISTUNG BENZINER UND ELEKTRO-PKW IM VERGLEICH

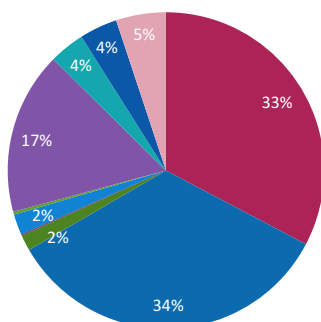
Elektrofahrzeuge benötigen andere Materialien und eine Batterie – das verändert die Energie- und Klimabilanz der Fahrzeugfertigung. Bei der Herstellung eines neuen mittleren Pkw (Kompaktklasse) im Jahr 2030 entstehen für ein Benzinfahrzeug ca. 6.275 Kilogramm Treibhausgas-Emissionen. Für ein Elektrofahrzeug mit Carbonfaser-Leichtbau sind die Emissionen mit 10.087 Kilogramm um etwa 60 Prozent höher.

*„Um die Effizienz auch der konventionellen Fahrzeuge durch Leichtbau zu verbessern, werden bereits heute schon wesentlich mehr leichtere Materialien wie z. B. Aluminium verbaut als noch vor zehn Jahren.“*

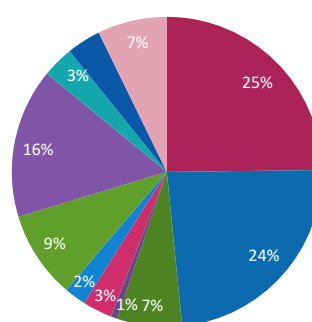
Dr. Stefan Wöhrl, Verband der Automobilindustrie e.V. ( VDA )

### Materialzusammensetzung eines mittleren Pkw nach Antriebstechnologie (Herstellungsjahr 2030)

**Benzin mit Leichtbau**



**BEV mit Leichtbau**

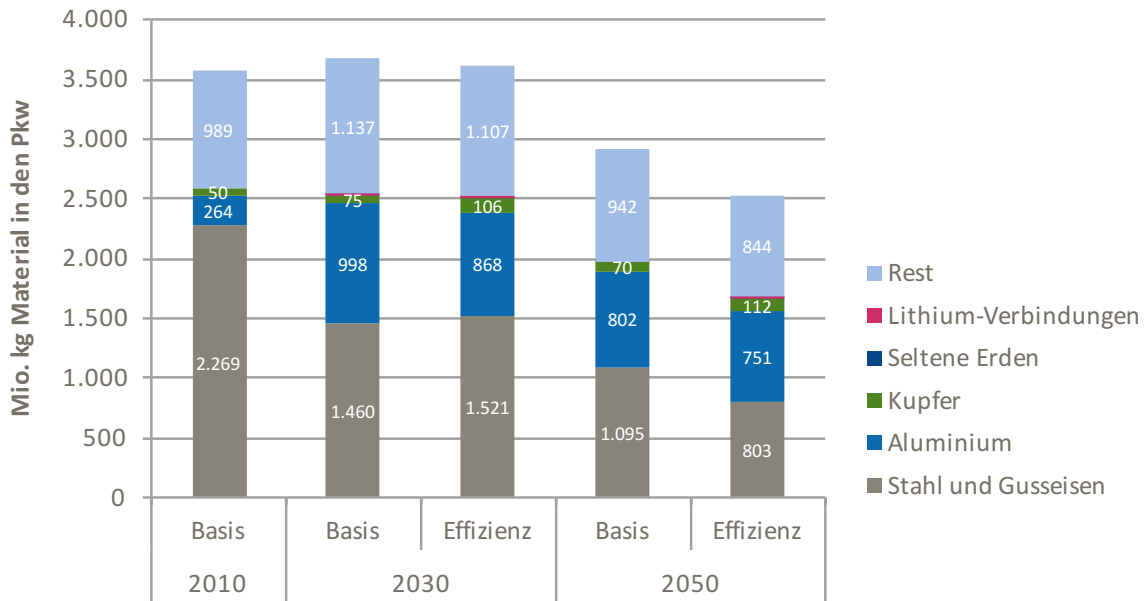


Quelle: Renewability III

## MATERIALVORLEISTUNG IN DEN SZENARIEN GESAMT

Die Materialvorleistungen der Pkw-Produktion sinken nach 2030 in allen Szenarien. Neben einer Verringerung der Pkw-Neuzulassungszahlen insgesamt ist dafür auch die Weiterentwicklung der Batterietechnologie ausschlaggebend. Dort sinkt der Materialeinsatz pro Energiegehalt deutlich mit verbesserter Energiedichte und einer anderen Materialzusammensetzung gegenüber den heute üblichen Lithium-Ionen-Batterien. Im Güterverkehr sind grundsätzlich ähnliche Trends wie bei den Pkw zu beobachten. Die Veränderung der Materialvorleistungen ist jedoch weniger ausgeprägt. Schließlich spielen bei den Lkw vor allem in der Basisentwicklung auch in Zukunft konventionelle Antriebe die zentrale Rolle, batterieelektrische Fahrzeuge haben eine wesentlich geringere Bedeutung als in der Pkw-Flotte.

**Pkw-Materialvorleistungen in den Szenarien Basis und Effizienz**



Quelle: Renewability III

Beim Bau von Elektrofahrzeugen werden neben dem herkömmlichen Materialbedarf insgesamt auch andere Materialgruppen relevant, die bisher noch keine Rolle gespielt haben. Neben einem erhöhten Bedarf an Kupfer steigt vor allem der Bedarf an Lithiumverbindungen zur Batterieherstellung und an seltenen Erden für die Elektromotoren. Bei einer ambitionierten Steigerung der Elektromobilität kann der Bedarf von Lithium und seltenen Erden für 2050 allein mit den heutigen Fördermengen nicht gedeckt werden. Zu beachten ist, dass der Bedarf an diesen Rohstoffen auch durch andere Zukunftstechnologien weiter steigen wird, wie etwa durch die Windkraft.

**DIE SZENARETTE FOKUS KRAFTSTOFFE**

Was passiert, wenn die Effizienzverbesserung von Pkw und Lkw nicht durch politische Maßnahmen wie z. B. Grenzwerte unterstützt wird? Und wenn darüber hinaus auch weder die Voraussetzungen für den Einsatz von Oberleitungs-Lkw geschaffen noch die Kraftstoffsteuern deutlich angehoben werden?

In dieser Situation kann das wesentliche politische Instrument zur Dekarbonisierung nur darin bestehen, einen wachsenden Anteil strombasierter Kraftstoffe im Verkehr sicherzustellen. Den einzigen Treiber für eine Effizienzsteigerung stellt dann die Steigerung der Kraftstoffkosten dar, die durch den über die Jahre ansteigenden Anteil der teureren strombasierten Kraftstoffe zustande kommt. Gegenüber 2010 steigen dadurch die Kraftstoffkosten bis 2030 um rund 30 Prozent und bis 2050 um 110 bis fast 150 Prozent. Der Anstieg der Strompreise liegt gegenüber 2010 dagegen bis 2050 bei nur knapp 50 Prozent.

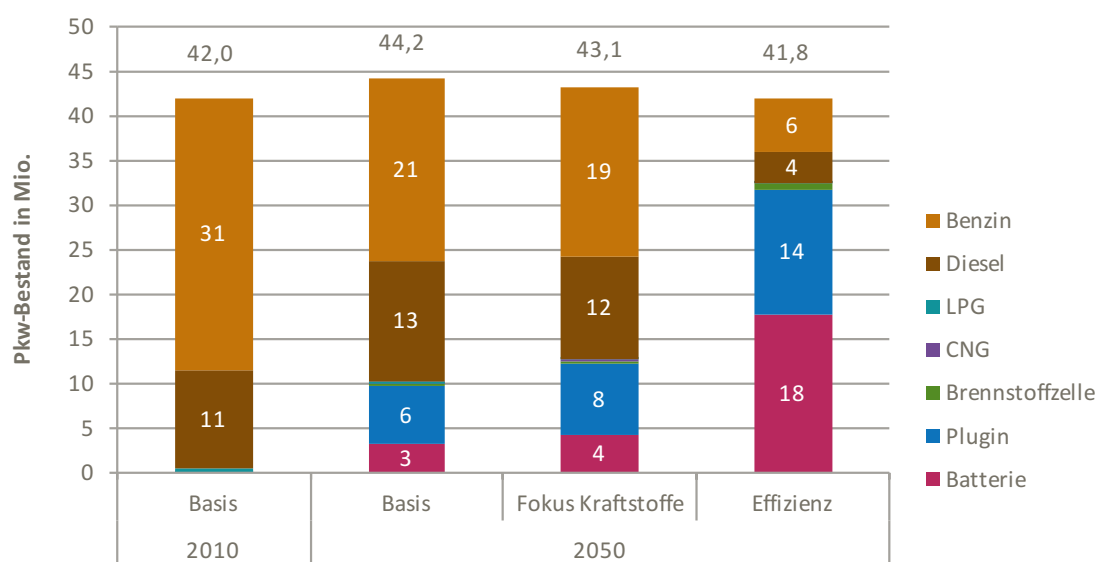
Wie würde sich eine solche rein kraftstoffbasierte Strategie auf Fahrzeugbestände, Verkehrsnachfrage und Energiebedarf auswirken? Das ist die Fragestellung der Szenarette Fokus Kraftstoffe.

## ERGEBNISSE FAHRZEUGBESTAND

In dieser Szenarette werden die Grenzwerte nicht fortgeschrieben, sondern bleiben nach 2021 bei 95 Gramm CO<sub>2</sub>/km. Die Anzahl elektrischer Pkw liegt dann im Jahr 2050 bei rund zwölf Millionen.

Aufgrund der höheren Kraftstoffpreise ist die Anzahl also höher als im Basisszenario (neun Millionen), auch die Effizienzentwicklung konventioneller Fahrzeuge fällt durch die höheren Kraftstoffpreise leicht stärker aus. Der elektrische Fahranteil liegt bei 42 Prozent. Das ist höher als in der Basis (26 Prozent), aber deutlich niedriger als bei einer ambitionierten Fortschreibung der Grenzwerte für Pkw im Szenario Effizienz (76 Prozent). Beim Güterverkehr werden in dieser Szenarette weiterhin überwiegend konventionelle Lkw mit PtL (strombasierten Kraftstoffen) eingesetzt.

### Pkw-Bestand im Szenario Effizienz und der Szenarette Fokus Kraftstoffe



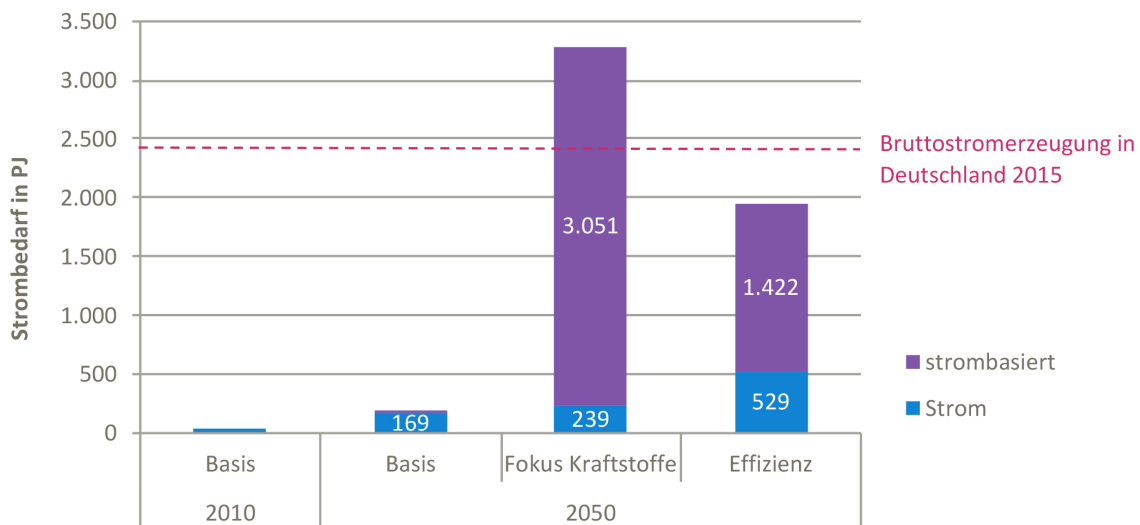
Quelle: Renewability III

Daraus folgt: Die Kostensteigerung der Kraftstoffe durch die Dekarbonisierung reicht als Treiber für die Ausschöpfung maximaler Fahrzeugeffizienz und Elektrifizierung nicht aus. Vielmehr sind weitere politische Maßnahmen wie etwa Pkw-Grenzwerte dringend erforderlich.

## ERGEBNISSE STROMBEDARF DES VERKEHRSEKTORS

Der Endenergiebedarf des nationalen Verkehrs kann in der Szenarrete ohne Grenzwertfortschreibung bis 2050 nur um 39 Prozent reduziert werden. Im Szenario Effizienz wären es hingegen 54 Prozent. Bei einer hohen Menge an strombasierten Kraftstoffen zur Dekarbonisierung ist die Betrachtung vor allem folgender Frage spannend: Welcher Strombedarf des Verkehrssektors entsteht über die direkte Fahrzeugnutzung hinaus durch die Produktion der Kraftstoffe?

### Strombedarf des nationalen Verkehrs 2050



Quelle: Renewbility III

Der gesamte Strombedarf des nationalen Verkehrs – also inklusive des zur Produktion der Kraftstoffe benötigten Stroms – steigt in der Szenarrete durch die hohen Mengen strombasierter Kraftstoffe bis 2050 deutlich an. Der Strombedarf für den Verkehrssektor liegt 2050 bei knapp 3.300 Petajoule. Zum Vergleich: Im Jahr 2015 belief sich die gesamte Bruttostromerzeugung in Deutschland auf rund 2.350 Petajoule, davon stammten 702 Petajoule aus erneuerbaren Energiequellen. Wird die direkte Stromnutzung – also die Elektromobilität und der Einsatz von Oberleitungs-Lkw – maximal vorange-trieben, kann dieser Strombedarf um gut ein Drittel reduziert werden, wie das Szenario Effizienz zeigt. Im Jahr 2050 würde er dann bei rund 2.000 Petajoule liegen.

Fazit: Eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors allein mit strombasierten Kraftstoffen scheint möglich, aber der Energiebedarf ist extrem hoch. Der zusätzliche Bedarf an Strom aus erneuerbaren Energien muss garantiert werden können. Aus Klimaschutzsicht ist eine effiziente Allokation daher dringend erforderlich: Der Strom muss überall dort, wo es möglich ist, direkt genutzt werden. Strom-basierte Kraftstoffe sollten nur dann zum Einsatz kommen, wenn diese Option nicht zur Verfügung steht, also voraussichtlich im Luft- und Seeverkehr.

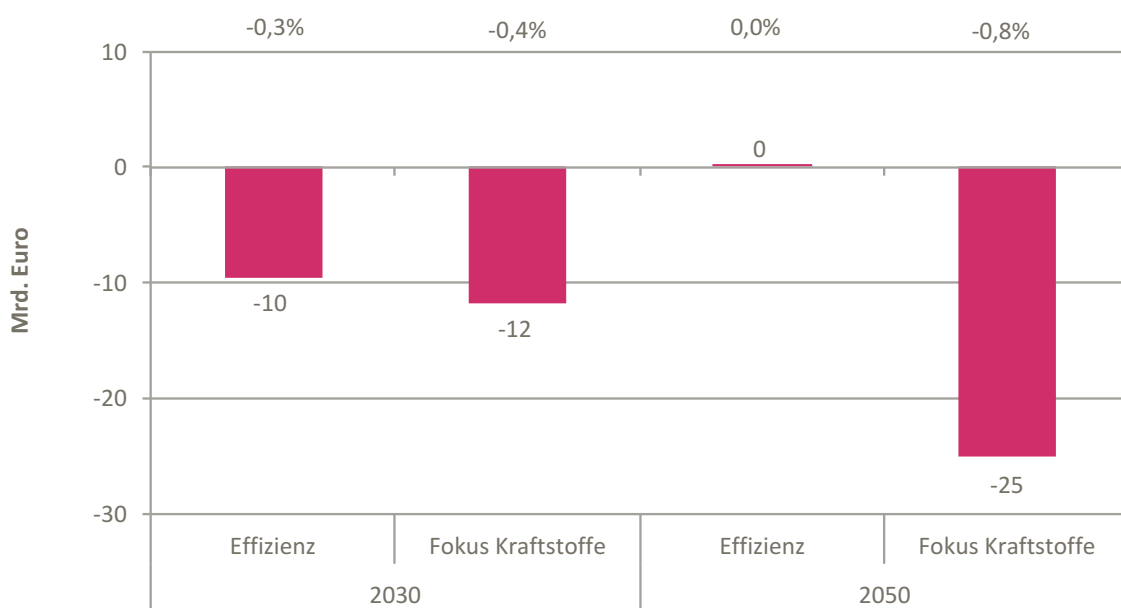
## ERGEBNISSE ÖKONOMISCHE AUSWIRKUNGEN

Durch den geringeren Anteil an Elektromobilität ist die Nachfrage nach der zum Großteil im Inland produzierten Energieform Strom in der Szenarrette Fokus Kraftstoffe geringer als im Szenario Effizienz. Stattdessen dominieren die vollumfänglich importierten PtX-Treibstoffe die Energienachfrage. Der dadurch erhöhte Importanteil bei den Energien wirkt sich negativ auf die inländische Volkswirtschaft aus. Der Grund dafür: Die Nachfrage nach mineralölbasierten Kraftstoffen und deren inländischer Verarbeitung sinkt, die Produktion inländischer erneuerbarer Energien kann diesen Verlust nicht kompensieren.

Die Energiesteuern werden in der Szenarrette Fokus Kraftstoffe nicht erhöht. Das Aufkommen aus Kraftstoff- und Energiesteuern und die Einnahmen der öffentlichen Hand sind damit im Vergleich zum Szenario Effizienz geringer. Im Modell wird unterstellt, dass sich Mehrausgaben des Staates direkt über höhere Steuern finanzieren müssen. Deshalb sinkt das verfügbare Einkommen der Haushalte.

Im Vergleich zum Szenario Effizienz ergibt sich im Jahr 2050 eine Verminderung der Wertschöpfung (BIP) um 25 Milliarden Euro.

### Veränderung der Wertschöpfung ggü. Basis



Quelle: Renewability III

## ANSÄTZE FÜR DEN PERSONENVERKEHR

### DAS SZENARIO EFFIZIENZ PLUS LEBENSQUALITÄT

Das Szenario Effizienz zeigt: Mit einer deutlichen Effizienzsteigerung und dekarbonisierten Kraftstoffen können die Klimaschutzziele erreicht werden, und zwar zu geringen volkswirtschaftlichen Kosten. Ein wirklich nachhaltiger Verkehr ist dies aber noch nicht.

Drängende Probleme wie der Verkehrslärm oder die zunehmende Flächenkonkurrenz in Städten werden nicht adressiert. Gerade in Städten gibt es viele weitere Handlungsoptionen, um Mobilität nachhaltiger zu gestalten und gleichzeitig zum Klimaschutz beizutragen. Daher wurde ein weiteres Szenario entworfen: Effizienz plus Lebensqualität. Darin wurde überprüft, was passiert, wenn zusätzlich Maßnahmen zur Steigerung der Lebensqualität in Innenstädten umgesetzt werden.

Auch die Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur ist bisher nicht nachhaltig. Daher wurden in einer zusätzlichen Szenariette Effizienz plus Lebensqualität plus Pkw-Maut zusätzlich die Konsequenzen der Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut betrachtet.

In dem Szenario Effizienz plus Lebensqualität wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 – zusätzlich zu den bereits im Szenario Effizienz hinterlegten Annahmen – eine Reihe weiterer Maßnahmen umgesetzt sind:

- „Stadt der kurzen Wege“:  
durch verbesserte Nahraumversorgung und eine stärkere Nutzungsdurchmischung in Städten ab 50.000 Einwohnern
- Emissionsfreie Innenstädte:  
innerstädtische Zufahrtsbeschränkungen für emittierende Fahrzeuge in Städten über 200.000 Einwohner mit flächendeckender Ladeinfrastruktur in diesen Gebieten
- Carsharing-Angebote:  
mit Elektrofahrzeugen in allen Städten über 50.000 Einwohner

*„Eine Reform des Parkraum-Managements ist dringend geboten. In erster Linie, um den Parkraumsuchverkehr zu eliminieren und den Flächenbedarf zu reduzieren. Zudem sind dynamische und differenzierende Tarife gleichzeitig ein sehr wirkungsmächtiges Instrument zur Einhaltung von Grenzwerten der Luftreinhaltung und des Klimaschutzes.“*

Dr. Carl-Friedrich Eckhardt, BMW Group

- Parkraummanagement:  
mit substanzieller Erhöhung der Preise, insbesondere in den Carsharing-Zonen, und gleichzeitiger Gebührenbefreiung für Carsharing-Fahrzeuge
- Tempo 30:  
als Regelgeschwindigkeit innerorts mit Ausnahme des Hauptstraßennetzes
- Attraktivitätssteigerung des öffentlichen Verkehrs und des Radverkehrs sowie eine zunehmende Marktdurchdringung von Pedelecs:  
dadurch eine Reisezeitverkürzung um 20 Prozent im öffentlichen Verkehr und 16 Prozent im Radverkehr

Angesprochen werden aber auch die Verkehre über längere Distanzen. Daher geht das Szenario Effizienz plus Lebensqualität auch von einer Steigerung der Attraktivität des öffentlichen Fernverkehrs aus – in Form einer Reisezeitverkürzung von zehn bis zwanzig Prozent.

## DIE SZENARETTE EFFIZIENZ PLUS LEBENSQUALITÄT PLUS PKW-MAUT

80 Prozent der Verkehrsleistung wird außerhalb von Kernstädten und insbesondere auf den langen Distanzen erbracht. Hier ist eine Verlagerung des Personenverkehrs auf energieeffizientere Verkehrsmittel wünschenswert, um den Endenergiebedarf des Verkehrs zu reduzieren und dadurch eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs zu erleichtern.

Dafür gibt es prinzipiell mehrere Optionen, etwa eine stärkere Förderung des öffentlichen Verkehrs, eine Änderung der Dienstwagenbesteuerung, Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen oder aber die Einführung einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut.

Die Option „Pkw-Maut“ wurde in einer eigenen Szenarette abgebildet. Dafür wurde angenommen, dass es im Jahr 2050 eine Pkw-Maut in Höhe von vier Cent pro Kilometer auf allen Straßen gibt. Das entspricht etwa den durchschnittlichen Kosten für Bau und Erhalt der Infrastruktur, welche den Pkw zuzurechnen sind.

Die Einführung der Maut auf allen Straßen verhindert Ausweicheffekte. Die Maut fällt pro gefahrenem Pkw-Kilometer an, ist also abhängig von der tatsächlich erbrachten Fahrleistung. Das sorgt dafür, dass diese Kosten bei jeder neuen Verkehrsmittelwahl berücksichtigt werden.

Wenn die Mauterlöse zu 100 Prozent an die Bevölkerung zurückverteilt werden, handelt es sich um eine reine Lenkungssteuer. Sie ist abgesehen von den Umsetzungskosten für die öffentliche Hand haushaltsneutral.

## ERGEBNISSE FAHRZEUGBESTAND

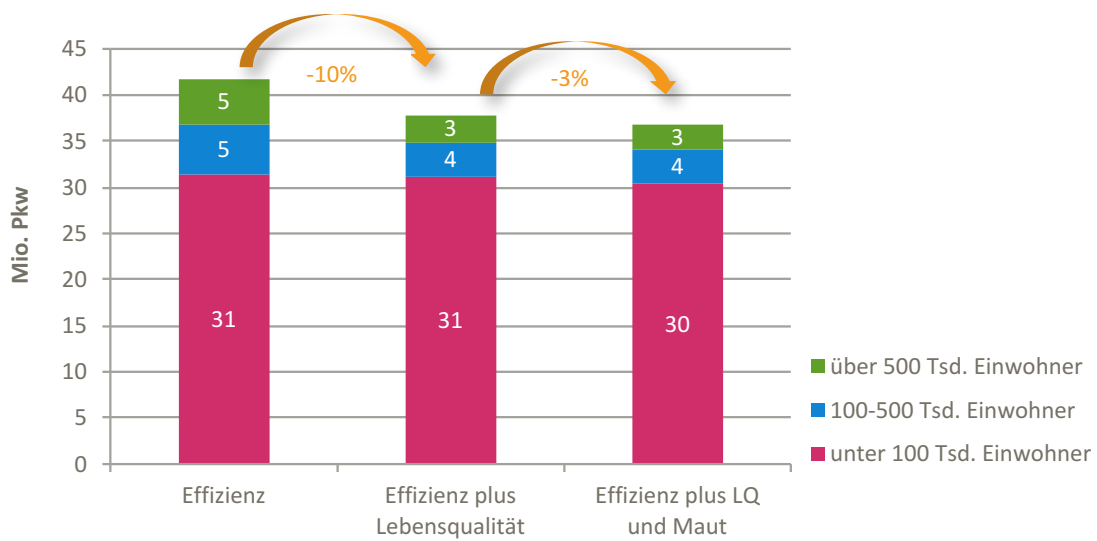
Die Motorisierungsrate geht durch die diversen Maßnahmen für lebenswertere Innenstädte in Deutschland um zehn Prozent zurück, unter anderem deshalb, weil der Pkw-Besitz weniger attraktiv wird und mehr Carsharing genutzt wird. Durch die Einführung einer Pkw-Maut erhöhen sich die Gesamtkosten des Pkw-Besitzes. Das hat einen zusätzlichen Effekt auf die Anzahl der Fahrzeuge: Die Motorisierungsrate geht in der Szenarette um weitere drei Prozent zurück. Insgesamt liegt der Pkw-Bestand in der Szenarette bei 36,8 Millionen Pkw. Das sind 18 Prozent weniger als zu Beginn des Jahres 2016.



*„Es ist durchaus denkbar, dass der Trend zum „Nutzen statt Besitzen“ in lebenswerten Städten dazu führt, dass sich der Pkw-Bestand noch deutlich weiter reduziert.“*

Gerd Lottsiepen, Verkehrsclub Deutschland e.V.

### Pkw-Bestand im Jahr 2050



Quelle: Renewbility III

## ERGEBNISSE VERKEHRSNACHFRAGE IN STÄDTEN

Die Motorisierungsrate in Städten über 100.000 Einwohner geht gegenüber dem „bloßen“ Szenario Effizienz um rund ein Drittel zurück. Die Pkw-Verkehrsleistung in Städten reduziert sich sogar noch stärker als die Motorisierungsrate, und zwar um knapp 50 Prozent. Das liegt daran, dass besonders für kurze Wege innerhalb der Städte attraktive Verkehrsmittelalternativen verfügbar sind. Radverkehr, Carsharing und öffentlicher Verkehr nehmen deutlich zu.

### Personenverkehr in Kernstädten im Jahr 2050



Quelle: Renewbility III

Die Verkehrsleistung geht also insgesamt zurück. Das bedeutet aber nicht, dass es zu einer „Einschränkung“ von Mobilität kommt. Die Anzahl der zurückgelegten Wege nimmt nur marginal ab. Durch die bessere Nahraumversorgung und die verstärkte Nutzung anderer Verkehrsmittel werden nähere Ziele gewählt.

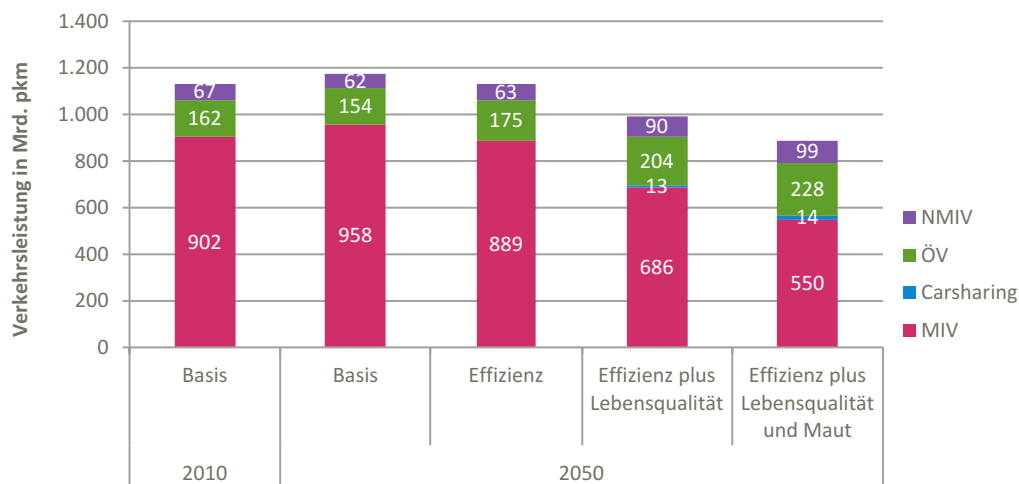
Verkehr in Kernstädten macht etwa ein Drittel der Alltagsverkehrsleistung und rund 20 Prozent der Gesamtverkehrsleistung aus. Das macht deutlich, wie wichtig das Thema „Lebensqualität in Städten“ als Hebel für den Klimaschutz im Verkehrssektor ist und welche wichtige Rolle die Kommunen spielen können. Neben den innerstädtischen Verkehren entfalten die Maßnahmen zudem auch Wirkungen auf die Verkehre des Umlands. So entscheiden sich etwa Einpendler alternativ zum Pkw verstärkt für die Angebote des ÖPNV.

## ERGEBNISSE DER VERKEHRSNACHFRAGE INSGESAMT

Die Parkraumbewirtschaftung erweist sich in den Kernstädten als sehr wirkungsstarke Maßnahme. Die zusätzliche Attraktivierung und Förderung konkurrierender Verkehrsmittel bietet Pkw-Nutzern wählbare Alternativen. Durch die verschiedenen Maßnahmen zur Steigerung der Lebensqualität in Innenstädten geht die Verkehrsleistung des Pkw im Szenario Effizienz plus um 23 Prozent gegenüber dem Szenario Effizienz zurück. Davon sind acht Prozent auf die Wirkung in Städten zurückzuführen, 15 Prozent beziehen sich auf den nicht-städtischen Raum. Die Verkehrsleistung des öffentlichen Verkehrs und des Fahrrad- und Fußverkehrs nehmen dagegen um 17 Prozent beziehungsweise um 43 Prozent zu.

Die Steigerung der Kilometerkosten wirkt sich deutlich auf die Pkw-Verkehrsnachfrage aus. Die Einführung einer Pkw-Maut hat einen deutlich spürbaren Effekt und reduziert die MIV-Verkehrsleistung um weitere 20 Prozent. Die MIV-Verkehrsleistung liegt in der Szenarettete plus Pkw-Maut im Jahr 2050 nun noch gut halb so hoch wie heute. Dafür ist entscheidend, dass die Maut eine unmittelbare Erhöhung der Kilometerkosten zur Folge hat – unabhängig vom Antriebstyp und der Effizienz des Fahrzeugs. Die unmittelbar bei der Fahrt anfallenden Kosten („Out-of-Pocket-Kosten“) steigen durch die Maut um etwa 40 Prozent. Eine Erhöhung der Kraftstoffpreise oder Energiesteuern wirken sich zusätzlich bereits bei der Pkw-Kaufentscheidung aus – im Hinblick auf die Wahl des Antriebstyps und der Effizienz.

### Verkehrsleistung im Jahr 2050

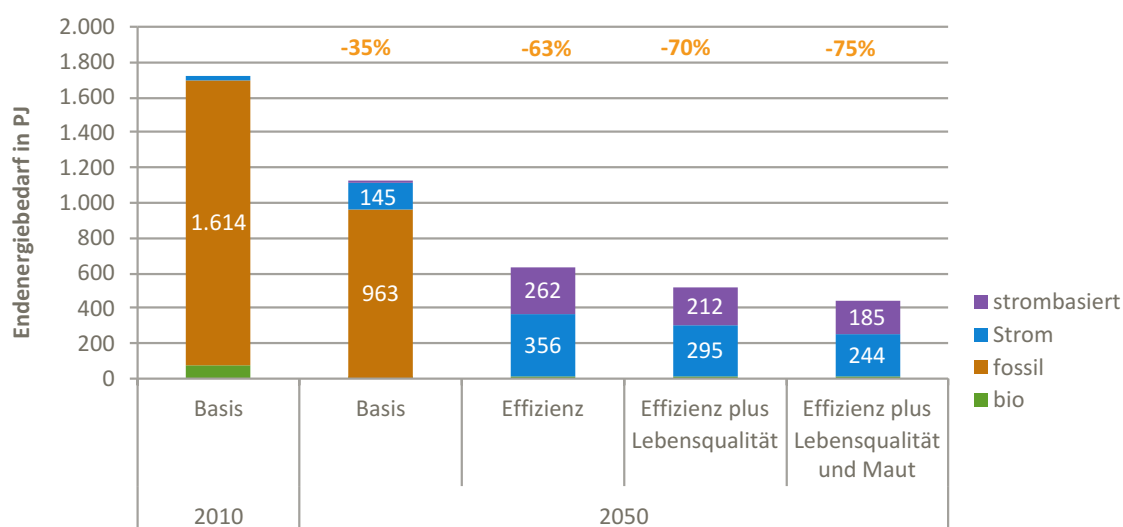


Quelle: Renewbility III

## ERGEBNISSE ENDENERGIE

Im Basisszenario wird der nationale Endenergiebedarf des Personenverkehrs bis 2050 um nur 35 Prozent gegenüber 2010 reduziert. In den Klimaschutzszenarien liegt dieser Wert bei über 60 Prozent. Dafür ist vor allem der hohe Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge verantwortlich. Die zusätzlichen Maßnahmen im Szenario Effizienz plus führen zu einer weiteren Verlagerung und Verkürzung von Wegen. Damit sinkt die Endenergienachfrage noch einmal um rund sieben Prozent. Wird von einer Pkw-Maut ausgegangen, ist sogar mit einer Abnahme um 75 Prozent im Jahr 2050 zu rechnen. Diese Reduktion wird im nationalen Verkehr erzielt. Berücksichtigt man auch den internationalen Luftverkehr, so fällt die Minderung geringer aus.

### Endenergiebedarf des Personenverkehrs im Jahr 2050



Quelle: Renewability III

*„Das autonome Fahren könnte zum ‚Gamechanger‘ werden. Wenn Flotten von mit erneuerbaren Energien angetriebenen fahrerlosen Shuttles als öffentlicher Verkehr unterwegs sind, hilft es, die Klimaschutzziele zu erreichen.“*

Dr. Till Ackermann, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV

### **EXKURS: DIGITALISIERUNG UND AUTONOMES FAHREN**

*Die zunehmende Digitalisierung ist ein Mega-Trend, autonomes Fahren ist in aller Munde. Was bedeutet das für den Verkehr der Zukunft? In der Wissenschaft ist autonomes Fahren momentan ein großes Forschungsthema, der zeitliche Horizont und die Auswirkungen werden kontrovers diskutiert. Dabei stehen sich zwei grundsätzliche Entwicklungstendenzen gegenüber, die sich wie folgt zuspitzen lassen:*

*„Die Automatisierung wird Carsharing sehr stark pushen, private Pkw sind nicht mehr gefragt“: Trifft diese Aussage zu, so wären im städtischen Raum keine privaten Pkw mehr erforderlich, ihre Zahl würde stark zurückgehen. Die verbesserte Integration verschiedener Mobilitätsformen würde zu einer Verlagerung auf Alternativen führen, der Bahnfernverkehr und der Personennahverkehr würden Nutzer gewinnen, indem sie die Angebote komplettieren.*

*„Autofahren wird noch komfortabler, da das Auto alleine parkt und Fahrzeit nutzbar wird“: In dieser Variante steigt die Attraktivität des Pkw, die Nutzung nimmt im städtischen Raum und darüber hinaus substantiell zu. Der öffentliche Verkehr verliert an Bedeutung.*

*Bisher ist jedoch noch völlig unklar, in welche Richtung sich die Situation entwickeln wird. Das wird auch von der Akzeptanz, von der Durchdringung sowie von den sich entwickelnden Angebotsformen und deren Kombinierbarkeit abhängen. Belastbare Daten zur Wirkung des autonomen Fahrens auf den Besitz und die Nutzung entsprechender Fahrzeuge liegen kaum vor. Daher kann das autonome Fahren in den Verkehrsnachfrage-Modellen kaum valide und belastbar abgebildet werden. In den Renewability-Szenarien wird also implizit unterstellt, dass die dargestellten Effekte sich ausgleichen.*

*Entscheidend für die Entwicklung des autonomen Fahrens werden auch die politischen Rahmenbedingungen sein: Fördern diese mehr Lebensqualität, mehr öffentlichen Verkehr und weniger Pkw? Oder wird weiterhin das aktuelle Modell des (privaten) Pkw in den Vordergrund gestellt?*

## ÖKONOMISCHE EFFEKTE

Die höhere Nachfrage nach öffentlichem Verkehr und nach Carsharing führt in beiden Bereichen zu höheren Umsätzen und einer Zunahme der Wertschöpfung. Gleichzeitig nehmen die Mobilitätsausgaben etwa aufgrund von Effizienzsteigerung oder der gemeinsamen Nutzung von Fahrzeugen ab – was in der Summe zunächst als negativer Primäreffekt wirkt. Da die Haushalte aber dadurch einen geringeren Anteil ihres Einkommens für eigene Fahrzeuge und Mobilität insgesamt ausgeben, bleibt ihnen mehr Geld für andere Ausgaben. Netto überwiegt der positive Effekt. Das liegt daran, dass die in Deutschland anfallende Wertschöpfung von Verkehr etwa aufgrund der Treibstoffimporte vergleichsweise geringer ausfällt als im Durchschnitt der Volkswirtschaft.

Negative Auswirkungen werden sich durch die stärkere Nutzung alternativer Verkehrsmittel hingegen in den MIV-nahen Branchen ergeben. Dazu zählen die Produktion, der Handel und die Reparatur von Kfz ebenso wie Garagen oder Versicherungen. Zusätzlich hat der Staat höhere Ausgaben aufgrund der vermehrten Nachfrage nach öffentlichen Verkehrsmitteln, welche weiterhin auch über staatliche Mittel finanziert werden.

Diese in der Summe negativen direkten Effekte werden über die Einkommenseffekte jedoch mehr als kompensiert, was zu einem besseren Ergebnis als im Szenario Effizienz führt. Die generell niedrigere Verkehrsnachfrage entlastet die Haushalte: Die Ausgaben für Mobilität sinken, der öffentliche Verkehr ist günstiger als der MIV – auch wenn ein Teil des Mehreinkommens wegen zusätzlicher Staatsausgaben für den öffentlichen Verkehr wieder wegfällt.

Diese Einsparungen bei den Mobilitätsausgaben führen in zahlreichen Branchen zu zusätzlichem Konsum, wobei dieser im Sinne eines Rebound-Effekts auch gewisse neue negative Auswirkungen auf die Umwelt haben kann.

Aufgrund der Maßnahmen verbessert sich jedoch die Lebens- und Umweltqualität insgesamt – auch wenn dies in der Messgröße „Bruttoinlandsprodukt“ nicht erkennbar ist.

Aus ökonomischer Perspektive werden durch eine Pkw-Maut die Effekte in der Szenarierete noch einmal verstärkt: Da die Verkehrsteilnehmer die Kosten direkt tragen, reduziert sich die Nachfrage im MIV deutlich – und der öffentliche Verkehr wird im relativen Preisvergleich attraktiver. Die Haushaltseinkommen steigen durch die Abnahme des MIV und durch die Rückverteilung der Mauteinnahmen. Die negativen Wirkungen durch weniger Pkw-Käufe und durch die höheren öffentlichen Kosten für den öffentlichen Verkehr werden dadurch mehr als ausgeglichen.

### EXKURS ZUR BERÜCKSICHTIGUNG EXTERNER KOSTEN

Der Verkehr verursacht neben den direkt spürbaren Kosten, etwa für Kraftstoffe oder Fahrscheine, auch externe Kosten. Diese finden sich nicht in den Preisen für Mobilität, die jeder Einzelne bezahlt. Dazu gehören beispielsweise die Kosten, die durch Unfälle verursacht werden, oder die Ausgaben im Gesundheitssektor, welche durch Luftschadstoffe oder Verkehrslärm verursacht sind. Beim Vergleich der ökonomischen Auswirkungen verschiedener Szenarien ist es deshalb sinnvoll, auch die Wirkung auf die externen Umwelteffekte und somit die externen Kosten zu berücksichtigen. Die Nutzung öffentlicher Güter wie Umweltleistungen und der nicht monetäre Nutzen sind im Bruttoinlandsprodukt nicht abgebildet. Da es sich dabei um ein Marktversagen handelt, werden Umweltschäden nicht in Form von Preissignalen am Markt erkennbar. Um Umweltschäden sichtbar zu machen, kann man ihnen aber einen Wert zuordnen, etwa als Vermeidungs- oder Reparaturkosten. So werden die externen Kosten fassbar. Wenn man sie ergänzend zum Bruttoinlandsprodukt berücksichtigt, so ergibt sich eine volkswirtschaftlich breitere Sicht der Auswirkungen und die ökonomischen Ergebnisse bekommen eine höhere Aussagekraft.

Im Rahmen von Renewability kam dabei ein vereinfachter Berechnungsansatz zum Einsatz. Er baut auf den unterschiedlichen Verkehrsleistungen verschiedener Antriebstypen und Kostensätze zu den externen Kosten je Fahrleistungseinheit auf. Die Kostensätze stützen sich auf die Methodenkonvention des Umweltbundesamts und das „Handbook on External Costs of Transport“. Dabei wurden folgende Arten von externen Kosten berücksichtigt:

- Kosten für die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Luftschadstoffe aus Emissionen und Abrieb
- CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Up- und Downstream-Prozessen
- Lärm und Unfallkosten (insb. Kosten für den „Statistical Value of Life“ und Produktionsausfälle)

Externe Kosten stellen in den Szenarioanalysen eine relevante Größe dar. Gegenüber dem Basisszenario können sie in allen Szenarien und Szenareten reduziert werden, und zwar im Umfang von drei bis neun Milliarden Euro (für das Jahr 2030) und 16 bis 20 Milliarden Euro (für das Jahr 2050).

Aufgrund der Reduktion der Klimagas- und Luftschadstoffemissionen sowie teilweise auch des Lärms wirken sich jene Szenarien besonders positiv aus, die auf die Umstellung auf Elektromobilität setzen. Am geringsten sind die externen Kosten des Verkehrs, wenn darüber hinaus noch die Pkw-Verkehrsleistung reduziert wird – etwa durch die Förderung des Langsamverkehrs und der Lebensqualität in Innenstädten. Hier ist auch der zusätzliche Einfluss auf die Unfallzahlen relevant. In den Szenarien Effizienz und Effizienz plus verstärken die vermiedenen externen Kosten somit die positiven Effekte für das Bruttoinlandsprodukt im Jahr 2050.

## ANSÄTZE FÜR DEN GÜTERVERKEHR

Der Güterverkehr trägt momentan etwa ein Viertel zu den Treibhausgasemissionen des Verkehrs in Deutschland bei. Und er ist für ein Viertel des Verbrauchs an Endenergie verantwortlich. Dieser Anteil wird bis 2050 auf knapp ein Drittel anwachsen. Die Dekarbonisierung des Güterverkehrs hat also hohe Priorität. Der wesentliche Grund für die zunehmende Bedeutung liegt darin, dass die Nachfrage im Gegensatz zum Personenverkehr weiterhin wächst. Dafür ist vor allem der internationale Handel verantwortlich. Die Transportweiten nehmen bis 2050 um etwa 20 Prozent zu. Bis zum Jahr 2050 wächst so die Verkehrsleistung, also das Produkt aus Transportmenge und transportierter Entfernung, mit fast 40 Prozent noch stärker als das Güterverkehrsaufkommen mit 25 Prozent.

*„Der Energieeinsatz im Straßengüterverkehr ist sehr hoch. Trotz aller Fortschritte bei Verlagerung, Regionalisierung und Effizienz bleibt die vollständige Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs eine enorme Herausforderung. Deshalb sollte auch eine Reduzierung der Transportleistung in Erwägung gezogen und den hohen Kosten insbesondere für strombasierte Kraftstoffe gegenübergestellt werden.“*

Elmar Baumann, Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e.V.

Hinzu kommt der sogenannte „Güterstruktureffekt“, die Zusammensetzung der transportierten Güter ändert sich also: Massenguttransporte wie beispielsweise Kohle nehmen ab, das Aufkommen an hochwertigeren und häufig auch leichteren, aber dafür voluminöseren Produkten nimmt zu. Neben dem reinen Straßengüterverkehr ist der kombinierte Verkehr ein Gewinner dieser Entwicklung, während beispielsweise Ganzzugverkehre mit der Bahn an Bedeutung verlieren.

Dieser Effekt wird durch eine dekarbonisierte Wirtschaft noch verstärkt. Transporte fossiler Energieträger werden weiter zurückgehen. Durch die Zunahme der Kreislaufwirtschaft und Effizienzverbesserungen werden beispielsweise auch Baustofftransporte abnehmen. Die Verkehrsleistung fällt damit in den Klimaschuttszenarien um etwa sechs Prozent geringer aus als in der Basisentwicklung.

Treibhausgase im Güterverkehr werden in Deutschland derzeit fast ausschließlich vom Straßenverkehr emittiert. Das System Schiene ist im Vergleich zum Straßenverkehr grundsätzlich deutlich energieeffizienter.

Die aufwendige Zugbildung und die schlechtere Flächenerschließung machen die Schiene allerdings betriebswirtschaftlich nur bedingt konkurrenzfähig. Eine Chance hat die Schiene besonders dann, wenn sie große Güterströme bündeln und über große Entfernungen transportieren kann.



## DAS SZENARIO EFFIZIENZ PLUS VERLAGERUNG

Um das Verlagerungspotenzial auf die Schiene abschätzen zu können, wurden aufbauend auf das Szenario Effizienz verschiedene Maßnahmen untersucht, die die Attraktivität der Schiene erhöhen:

- eine Verlängerung von Zügen auf 740 Meter,
- eine Beschleunigung von Umschlagzeiten und Zugbildungszeiten durch effizientere Technik,
- eine höhere Streckengeschwindigkeit und weniger betriebsbedingte Halte.

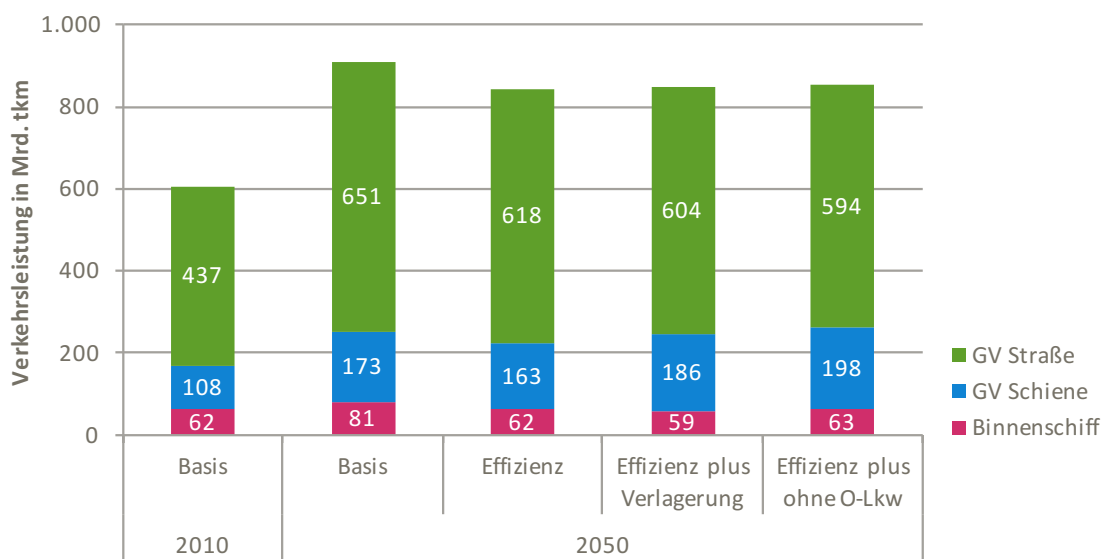
## DIE SZENARETTE EFFIZIENZ PLUS VERLAGERUNG – OHNE OBERLEITUNGS-LKW

Um zu untersuchen, wie sich Endenergiebedarf und Emissionen ohne Einführung eines Oberleitungs-Lkw entwickeln, wurde in einer Szenarette das Szenario Effizienz plus Verlagerung auch ohne Oberleitungs-Lkw abgebildet. So lässt sich auch die Wirkung der Maßnahmen zur Ertüchtigung des Schienengüterverkehrs besser bewerten.

## SZENARIO EFFIZIENZ PLUS & SZENARETTE: ERGEBNISSE GÜTERVERKEHR

Durch die Effizienzgewinne der Schiene nimmt die Modalverteilung im Szenario Effizienz plus im Vergleich zur Basisentwicklung um drei Prozentpunkte zu, die Verkehrsleistung der Schiene steigt um 25 Milliarden Tonnenkilometer. Diese Verlagerungswirkung muss keine Obergrenze darstellen. Trotzdem wird deutlich, dass die unterstellte Effizienzverbesserung des bestehenden Schienenverkehrssystems alleine keine substantziellen Veränderungen des Modal Split zur Folge hat.

### Verkehrsleistung im Jahr 2050



Quelle: Renewability III

*„Deutliche Veränderungen des Modal Split zugunsten des Schienengüterverkehrs sind sicherlich erreichbar, wenn man sich die Chancen der Digitalisierung und Automatisierung und auch weitere Effizienzverbesserungen durch längere Güterzüge über die 740 Meter hinaus vor Augen führt. Hinzu kommt der Aspekt wettbewerbsfähiger Trassenpreise und eine Ausgestaltung der Steuer und Abgabenlast, die die Schiene nicht einseitig schwächt, sondern stärkt.“*

Erhard Michel, Deutsche Bahn AG

Um eine stärkere Verlagerung auf die Schiene zu erreichen, müssen neben veränderten verkehrspolitischen Rahmenbedingungen weitere Nachfragesegmente erschlossen werden. Aus heutiger Sicht kann das vor allem durch multimodale Verkehre erreicht werden, die die Vorteile von Straße und Schiene kombinieren. Fast die halbe Verkehrsleistung entsteht durch Gütertransporte über Entfernungen von mehr als 300 Kilometern, die prinzipiell dazu geeignet sind, über weite Strecken auf der Schiene abgewickelt zu werden und den Lkw nur als Zubringer zur Schiene zu nutzen (multimodaler Gütertransport).

Ein Szenariovergleich zwischen dem Szenario Effizienz plus und der Szenarrette Effizienz plus ohne Oberleitungs-Lkw zeigt, wie sich die Verkehrsnachfrage durch den Einsatz von Oberleitungs-Lkw verschiebt. Auch wenn die Kosten für die Infrastruktur, die mit 13 Milliarden Euro angenommen wurden, über die Strompreise auf die Nutzer umgelegt werden, bleiben die Kosten des Oberleitungs-Lkw im Vergleich zum verbrennungsmotorischen, mit strombasierten Kraftstoffen betriebenen Lkw leicht niedriger. Der Oberleitungs-Lkw erhöht also unter den getroffenen Annahmen die Attraktivität des Straßenverkehrs leicht. Die Verkehrsleistung der Schiene sinkt um 12 Milliarden Tonnenkilometer, was einer Veränderung des Modal Split um einen Prozentpunkt entspricht.

Eine Dekarbonisierungsstrategie für den Güterverkehr sollte daher nicht Straßen- und Schienenverkehr gegeneinander ausspielen, sondern beide Ziele verfolgen:

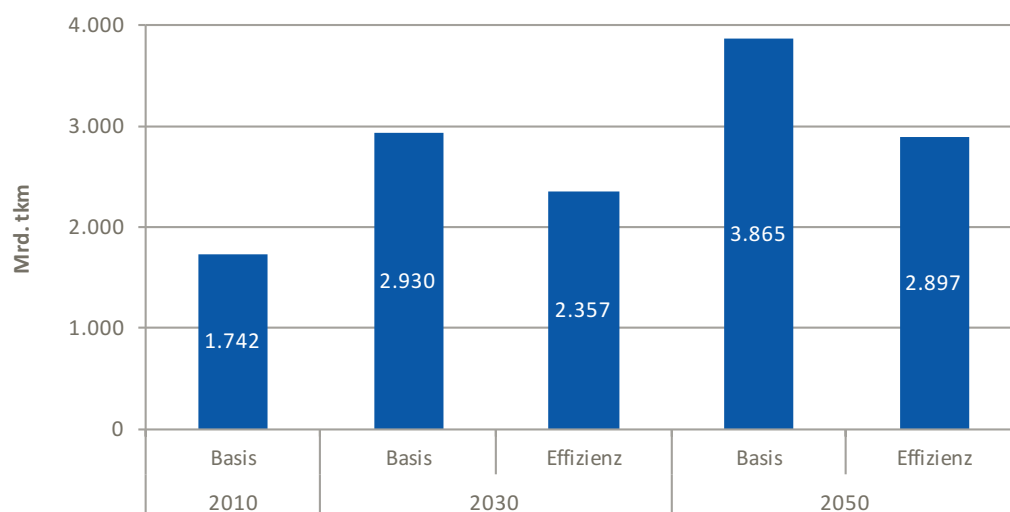
- Eine möglichst starke Verlagerung von Güterverkehr auf die Schiene, um eine hohe Energieeffizienz zu erreichen und die Vorteile der leichteren Dekarbonisierung zu nutzen. Voraussetzung hierfür sind in jedem Fall ausreichende Kapazitäten im Streckennetz und den Knoten.
- Die Dekarbonisierung des verbleibenden Straßenverkehrs, entweder durch CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe oder durch Elektrifizierung der Fahrzeuge. Die zweite Variante ist deutlich energieeffizienter.

## DER LUFT- UND SEEVERKEHR

Der internationale Luft- und Seeverkehr hat in den letzten Jahren die höchsten Wachstumsraten verzeichnet und stellt eine besondere Herausforderung für den Klimaschutz dar. Die Verantwortung zur Minderung der Emissionen liegt bisher nicht bei den Nationalstaaten, sondern bei internationalen Gremien. Grundsätzlich werden die Emissionen des internationalen Luft- und Seeverkehrs nicht dem nationalen Treibhausgasinventar zugerechnet, sondern nur (basierend auf dem Kerosinabsatz in Deutschland) nachrichtlich mitgeteilt.

Wenn man davon ausgeht, dass es nicht zu Trendbrüchen kommt, so steigt der internationale Seeverkehr mit deutschen Häfen bis 2050 um mehr als das Doppelte an. Allerdings: Ein nicht unwesentlicher Teil des Seeverkehrs sind Transporte fossiler Energieträger wie Kohle und Mineralölprodukte, sodass die Energiewende zu einer Reduktion von Seeverkehrstransporten führen kann. In den Klimaschutzszenarien liegt der Anstieg daher niedriger. Die Dekarbonisierung wird über den Einsatz CO<sub>2</sub>-freier Kraftstoffe erreicht.

### Internationaler Seeverkehr mit deutschen Häfen

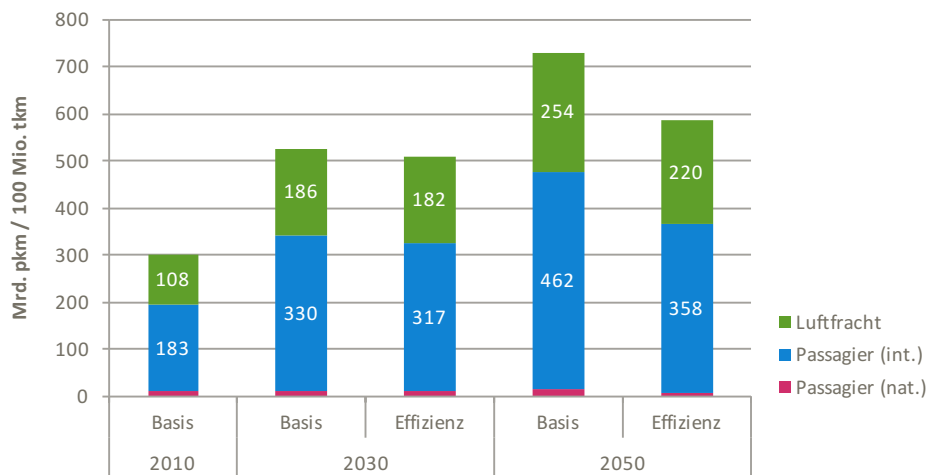


Quelle: Renewability III

Die besonders starke Klimarelevanz pro Kopf und Reise kombiniert mit starken Wachstumsraten machen den Luftverkehr zu einem wesentlichen Handlungsfeld für den Klimaschutz im Verkehrssektor.

Im internationalen Luftverkehr gibt es im Basisszenario eine große Dynamik, er steigt bis 2050 um 150 Prozent an. In den Renewability-Szenarien wird als einzige Maßnahme im Luftverkehr, die auf die Verkehrsnachfrage wirkt, die Nutzerfinanzierung der zusätzlichen Herstellungskosten der CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffe hinterlegt. Die Kerosinkosten haben mit rund 30 Prozent einen hohen Anteil an den Gesamtkosten der Airlines. Der Einsatz strombasierter Kraftstoffe in den Klimaschutzenszenarien wirkt sich daher stark auf die Ticketpreise und damit auch auf die Nutzerzahlen aus. In den Szenarien wird davon ausgegangen, dass im Luftverkehr international alternative Kraftstoffe eingesetzt werden und sich somit die Preise weltweit erhöhen werden. Der Anstieg des Luftverkehrs wird so deutlich gedämpft. Die Personenverkehrsnachfrage liegt im internationalen Luftverkehr in den Klimaschutzenszenarien knapp 25 Prozent niedriger als in der Basisentwicklung, ist allerdings immer noch fast doppelt so hoch wie im Jahr 2010. Im nationalen Verkehr kann sie durch die Nutzerfinanzierung der eingesetzten strombasierten Kraftstoffe gegenüber heute um rund 25 Prozent gesenkt werden.

### Luftverkehr (von deutschen Flughäfen abgehende Flüge)



Quelle: Renewability III

*„Die Flugzeug- und Triebwerkshersteller arbeiten intensiv an der Entwicklung neuer emissionsarmer Triebwerke, die neben einer Effizienzverbesserung auch die NOx-Emissionen im Reiseflug drastisch reduzieren. Parallel beteiligt sich die Luftfahrt an der Forschung zur Reduzierung weiterer Klimaeffekte.“*

Uta Maria Pfeiffer, Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V. BDL

### EXKURS ZUR KLIMAWIRKSAMKEIT DES LUFTVERKEHRS

Der Luftverkehr ist einerseits durch die Emission von Treibhausgasen, insbesondere von CO<sub>2</sub>, direkt klimawirksam. Es gibt aber darüber hinaus noch andere Effekte, die in großer Flughöhe wirksam werden. Dazu zählen Emissionen von Stickoxiden, Rußpartikeln und Wasserdampf ebenso wie die teilweise damit verbundene verstärkte Wolken- und Kondensstreifenbildung. Die Berechnung der Klimawirkung des Luftverkehrs beziehungsweise die Festlegung auf pauschale Faktoren stellt eine besondere Herausforderung dar. Die Klimawirkung ist nämlich neben der Emissionsstärke auch vom Emissionsort, also der Höhe, der geografischen Länge und Breite sowie von der Zeit abhängig. Dass der Luftverkehr großen Einfluss auf das Klima hat, ist in der Wissenschaft unumstritten. Die Klimawirksamkeit kann durch die Berücksichtigung eines „Emission Weighting Factor“ (EWF) dargestellt werden. Dieser gewichtet die aus dem Flugverkehr entstehenden CO<sub>2</sub>- und Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte aus der Verbrennung der Kraftstoffe in großer Höhe gegenüber dem CO<sub>2</sub>-Effekt am Boden. Der EWF wird bei Flughöhen angewendet, die über neun Kilometern liegen. Aufgrund der sehr komplexen Zusammenhänge, die in den Renewbility-Modellen nicht abgebildet werden können, wird die erhöhte Klimawirksamkeit mit einem Gewichtungsfaktor EWF von 1,2 bis 2,7 berücksichtigt. Das bedeutet, dass die tatsächliche Klimawirkung des Luftverkehrs je nach Ort und Höhe der Emissionen 1,2- bis 2,7-mal höher ist als jene der bloßen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Auch wenn CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe eingesetzt werden, bleibt dieser Klimaeffekt bestehen. Das muss entsprechend in Klimaschutzszenarien Berücksichtigung finden.

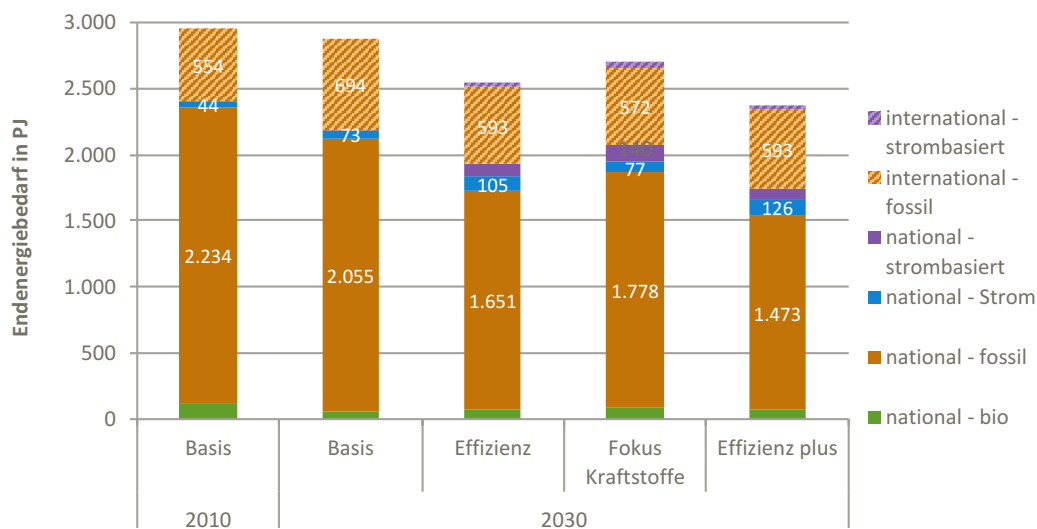
## DIE SZENARIEN IM ÜBERBLICK

Im Rahmen von Renewability III wurden verschiedene Szenarien betrachtet, bei denen der Verkehrssektor bis 2050 vollständig treibhausgasneutral wird. Ausgangspunkt ist das Szenario Effizienz. Eine starke Effizienzsteigerung führt dabei im Jahr 2050 zu einem sehr hohen Anteil Elektromobilität sowohl bei Pkw als auch bei Lkw, inklusive Oberleitungs-Lkw. Die verbleibenden Flüssigkraftstoffe werden größtenteils auf Basis von Strom aus erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt. Die zusätzlichen Herstellungskosten für die Kraftstoffe und die Kosten für die Ladeinfrastruktur trägt der Nutzer. Darauf aufbauend wurde die Szenariette Fokus Kraftstoffe betrachtet, die zwar über den Einsatz vor allem von strombasierten Kraftstoffen eine Dekarbonisierung ermöglicht, bei der der Effizienzfortschritt jedoch ausschließlich kostengetrieben ist. Der Anteil der Elektromobilität ist deutlich geringer, es gibt keine Oberleitungs-Lkw. In einem Szenario Effizienz plus wurden zusätzlich zu den Maßnahmen des Szenarios Effizienz Schritte zur Steigerung der Lebensqualität in Innenstädten berücksichtigt und die Ertüchtigung des Schienengüterverkehrs eingeplant. Ergänzende Szenarietten betrachteten die Auswirkungen einer Pkw-Maut und analysierten die Folgen, die der Einsatz konventioneller Lkw statt Oberleitungs-Lkw mit sich bringt.

## DIE ENTWICKLUNG BIS 2030

Werden – wie im Basisszenario vorgesehen – keine zusätzlichen Maßnahmen hinterlegt, so nimmt der Endenergiebedarf des nationalen Verkehrs bis 2030 um nur neun Prozent ab. Im Effizienz-Szenario sinkt der Bedarf um 20 Prozent. Grund dafür sind die starke Effizienzsteigerung der Fahrzeuge, der hohe Anteil an elektrisch betriebenen Fahrzeugen sowohl bei Pkw als auch bei Lkw und die höheren Kraftstoffkosten, verursacht durch einen Anteil von fünf Prozent strombasierter Kraftstoffe. Die weiteren Maßnahmen im Szenario Effizienz plus, die auf eine Verlagerung und Verkürzung von Wegen vor allem in Innenstädten und auf eine Attraktivitätssteigerung des Schienengüterverkehrs abzielen, können den Bedarf zusätzlich um sieben Prozent reduzieren. Der Strombedarf des Verkehrs steigt durch Elektrofahrzeuge und strombasierte Kraftstoffe bereits bis zum Jahr 2030 mit einem Faktor von rund 5,5 deutlich an.

## Endenergiebedarf in den Szenarien 2030

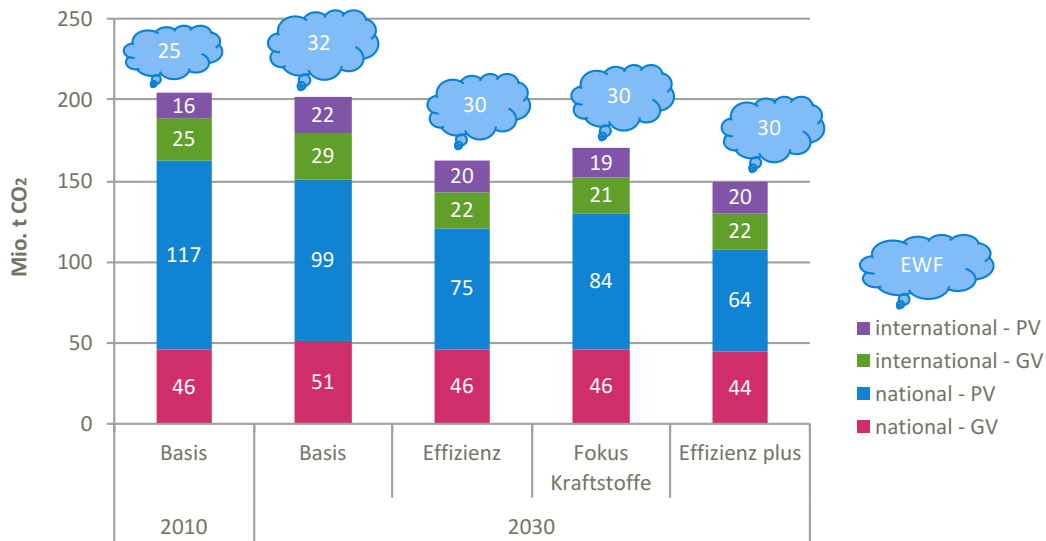


Quelle: Renewability III

Das derzeit diskutierte Ziel der EU, dass Deutschland bis 2030 im Verkehrssektor seine Treibhausgasemissionen um fast 40 Prozent reduzieren muss, wird alleine durch eine hohe Effizienzsteigerung, einen hohen Anteil von Elektrofahrzeugen und einen Anteil von je fünf Prozent strombasierter Kraftstoffe und Biokraftstoffe im Jahr 2030 nicht erreicht. Durch zusätzliche Maßnahmen hinsichtlich der Steigerung der Lebensqualität in Innenstädten und durch die Verlagerung auf den Schienengüterverkehr wird eine Minderung von bis zu 38 Prozent möglich. Das Ziel wird nur in der Szenarettete erreicht, die eine Erhöhung der MIV-Kosten durch die Einführung einer Pkw-Maut vorsieht. Das zeigt, dass Einzelmaßnahmen nicht ausreichen. Zur Erreichung der Klimaschutzziele müssen alle Optionen genutzt werden.

Die Treibhausgasemissionen des internationalen Verkehrs können mit den hinterlegten Maßnahmen in den Klimaschuttszenarien bis 2030 auf dem Niveau von 2010 stabilisiert werden, während sie im Basisszenario weiter ansteigen. Neben der direkten Klimawirksamkeit der emittierten Treibhausgase gibt es zusätzliche Klimawirkungen in großer Flughöhe durch Stickoxide, Rußpartikel und Wasserdampf sowie durch verstärkte Wolken- und Kondensstreifenbildung. Diese können auch durch den Einsatz strombasierter Kraftstoffe nicht vermieden werden. Zur Beschreibung dieser Faktoren dient der „Emission Weighting Faktor“ (EWF). Aufgrund der Unsicherheiten sind diese Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte in den Abbildungen als Wolken dargestellt.

### Direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs in 2030



Quelle: Renewability III

### DIE ENTWICKLUNG BIS 2050

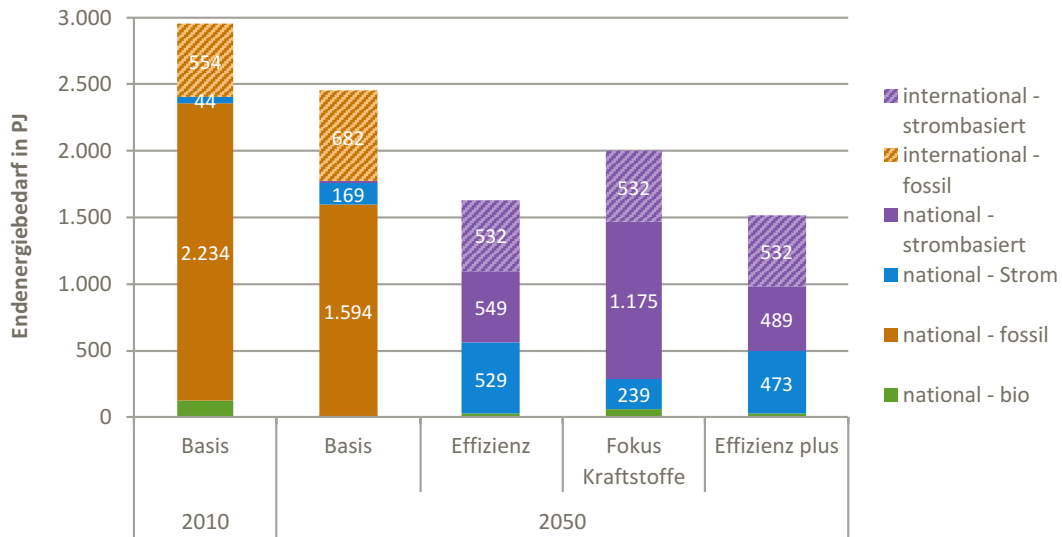
Werden keine zusätzlichen Maßnahmen über das Basisszenario hinaus ergriffen, so wird das Ziel des Energiekonzeptes bis 2050 verfehlt. Statt einer 40-prozentigen Minderung des Endenergiebedarfs im Verkehrssektor werden nur 26 Prozent erreicht. In den Szenarien Effizienz und Effizienz plus dagegen kann der Endenergieverbrauch um 54 Prozent beziehungsweise 59 Prozent reduziert werden. Dabei ist zu beachten, dass der Strombedarf des Verkehrssektors inklusive des internationalen Verkehrs mit über 3.000 Petajoule deutlich über der heutigen Stromproduktion in Deutschland liegt (rund 2.340 Petajoule).

In der Szenarierette Fokus Kraftstoffe, bei der keine politischen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung umgesetzt werden und bei der nur ein leichter Anstieg der Elektromobilität zu verzeichnen ist, liegt der Strombedarf sogar bei über 4.500 Petajoule. Dieser Strom muss zusätzlich aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. Selbst wenn die strombasierten Kraftstoffe aufgrund der höheren Potenziale im Ausland produziert werden, ist es wesentlich, den Energiebedarf des Verkehrssektors so gering wie möglich zu halten. Für erneuerbaren Strom gilt: Er sollte so weit wie möglich direkt genutzt werden, also über Elektromobilität im Straßen- und Schienenverkehr. Strombasierte Kraftstoffe sollten nur dort eingesetzt werden, wo eine direkte Stromnutzung nicht möglich ist. Denn ein Verbrennungsmotor, der mit strombasiertem Flüssigkraftstoff fährt, benötigt im Vergleich zur direkten Nutzung im Elektromotor fünf- bis sechsmal so viel Strom. Der Ausbau der erneuerbaren Energien müsste dann entsprechend diesem Faktor intensiviert werden.

Das bedeutet aber auch, dass eine Verlagerung auf energieeffizientere Verkehrsträger und eine Verringerung der Verkehrsnachfrage durch beispielsweise kürzere Wege unumgänglich sind, wenn es um die Reduktion des Endenergiebedarfs und den achtsamen und nicht zuletzt kosteneffizienten Umgang mit erneuerbaren Energien geht.



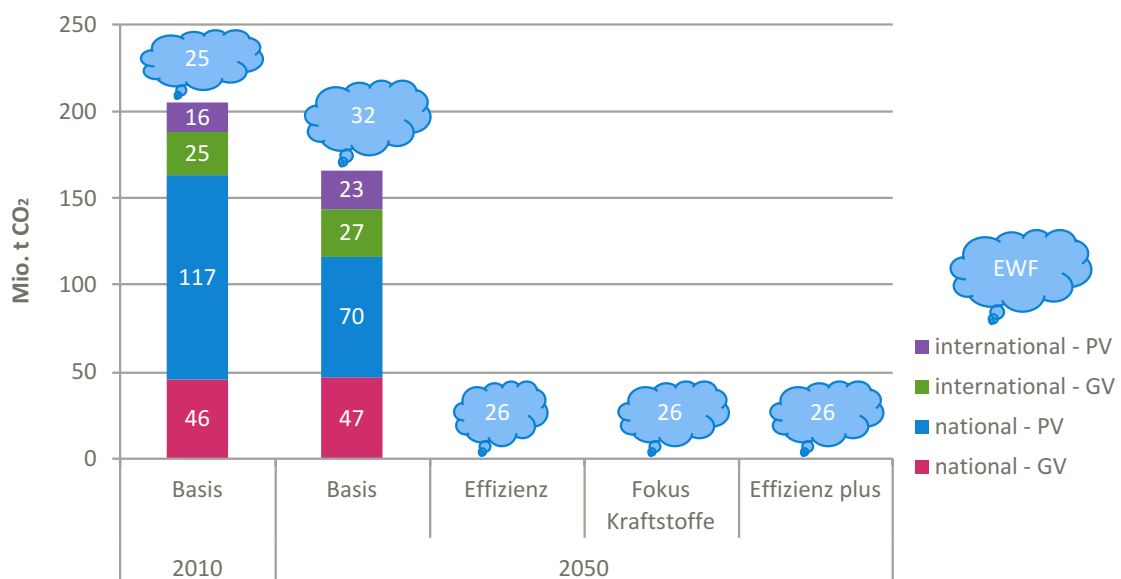
Endenergiebedarf in den Szenarien 2050



Quelle: Renewability III

Die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors wird in den Klimaschutzszenarien im Rahmen von Renewability III vorausgesetzt. Die direkten Emissionen bis 2050 müssen daher durch den Einsatz erneuerbarer Energien vermieden werden. Übrig bleiben die Klimawirkungen des internationalen Luftverkehrs. Werden diese berücksichtigt, so können die Klimawirkungen der direkten Emissionen bis 2050 um rund 89 Prozent reduziert werden.

Direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs in 2050



Quelle: Renewability III

## DIE ÖKONOMISCHEN EFFEKTE DER SZENARIEN

In den Szenarien wurden die Effekte einer Dekarbonisierung des Verkehrs betrachtet, während für den Rest der Realwirtschaft die Dekarbonisierung bereits unterstellt ist. Insgesamt gesehen sind die volkswirtschaftlichen Effekte der Szenarien klein, da die Verkehrsbranchen im Jahr 2050 nur einen Anteil von 3,6 Prozent am Bruttoinlandsprodukt ausmachen. 2008 lag der Wert bei 4,5 Prozent, die Verkehrsbranchen wachsen also bezogen auf das BIP zwischen heute und 2050 leicht unterproportional. Das ist zum einen auf economies of density (die zunehmende Dichte mindert die Durchschnittskosten) und economies of scale zurückzuführen, andererseits auf Effizienzsteigerungen. Dazu zählen ein höherer Auslastungsgrad im Güterverkehr oder Größenveränderungen bei den Fahrzeugen. Zu beachten ist dabei, dass die von privaten Haushalten als Selbstfahrer genutzte Mobilität nicht den produzierenden Branchen zugerechnet wird. Der Luftverkehr ist in der Basisentwicklung der einzige Verkehrsträger, der noch leicht zunehmende Anteile am BIP aufweist.

Es zeigt sich in dem Szenario Effizienz mit einer starken Marktdurchdringung der Elektromobilität sowie dem Einsatz strombasierter Kraftstoffe, dass sich langfristig nach den erforderlichen Anpassungsprozessen – beispielsweise bei Haushalten, Produktionsprozessen und Beschäftigung – verglichen mit der Basisentwicklung keine negativen Effekte auf das BIP ergeben. Wird die mit dem Szenario verbundene Minderung negativer externer Kosten mit betrachtet, ergibt sich sogar ein leicht positiver Wohlfahrtseffekt.

Wenn zusätzlich zum Szenario Effizienz noch Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensqualität in Innenstädten, Attraktivitätssteigerungen im öffentlichen Verkehr und zur Ertüchtigung des Schienengüterverkehrs umgesetzt werden, dann kann langfristig ein positiver Beitrag einer Verkehrswende auf das BIP resultieren, wie sich im Szenario Effizienz plus zeigt.

Hinzu kommt die durch die im Szenario hinterlegten Maßnahmen ausgelöste Minderung der negativen externen Effekte, sodass quantitativ der Wohlfahrtseffekt (BIP plus weniger externe Effekte) noch klarer positiv ausfällt. Die mit dem Szenario einhergehende Verbesserung der Lebensqualität ist im BIP und den externen Kosten nicht abgebildet. Das heißt – vorsichtig ausgedrückt –, dass unter diesen beiden Klimaschutzszenarien langfristig keine negativen BIP-Effekte zu erwarten sind und im Szenario Effizienz plus zusätzliche positive Wirkungen auf die Lebensqualität resultieren können.

### Wohlfahrtseffekte der Szenarien im Jahr 2050

IN MRD. EURO GEGENÜBER DEM BASISSENARIO	EFFIZIENZ	FOKUS KRAFTSTOFFE	EFFIZIENZ PLUS
BIP	0	-25	5
Abnahme der externen Kosten	17	16	18
Total	17	-9	23

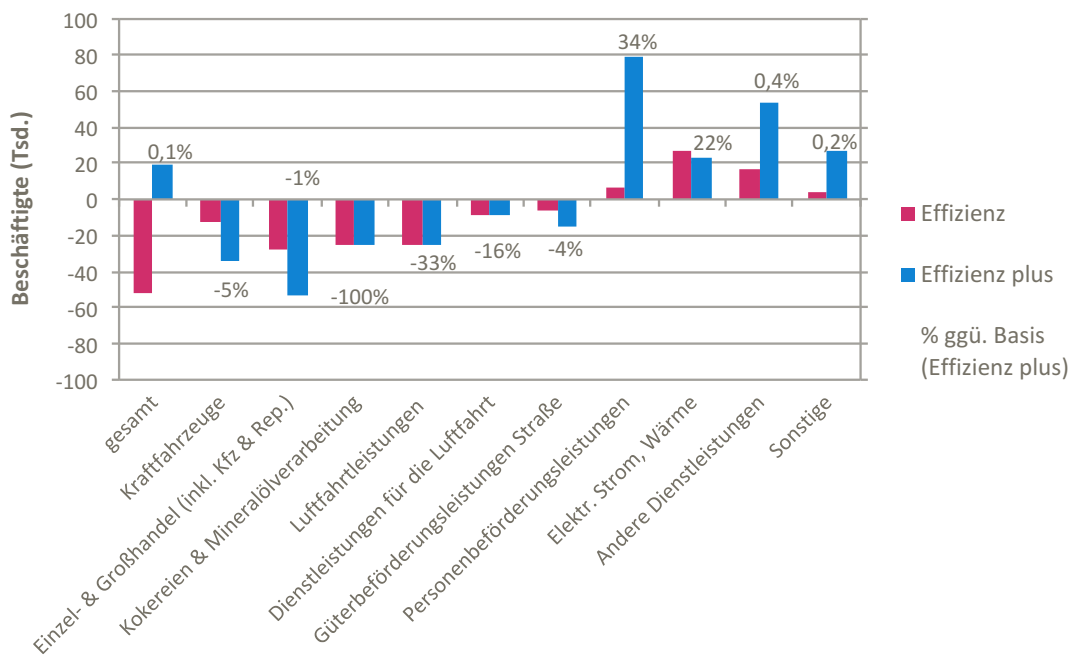
Bei der Analyse der ökonomischen Auswirkungen sind starke branchenspezifische Unterschiede zu beachten. So entstehen, verglichen mit der Basisentwicklung, erhebliche Einbußen in der Mineralölverarbeitung, bei der Herstellung von Kraftfahrzeugen oder im Einzelhandel. Auch der Luftverkehr oder Versicherungen müssen mit Umsatzeinbußen rechnen. Hingegen profitieren Branchen wie die Stromerzeugung, diverse Dienstleistungen, der öffentliche Verkehr oder der Bausektor von deutlich positiven Impulsen.

Die Dekarbonisierung im Verkehr könnte für Deutschland wesentlich positivere wirtschaftliche Auswirkungen haben, wenn beispielsweise im Inland Know-how und Produktionsstrukturen für strombasierte Kraftstoffe aufgebaut werden würden.

*„Obgleich die Energie- und Verkehrswende gesamtwirtschaftlich positive Wohlfahrtseffekte erreichen kann, wird es Gewinner und Verlierer geben. Das Ziel muss sein, den Strukturwandel so zu gestalten, dass es mehr Gewinner als Verlierer gibt.“*

Dr. Jörg Adolf, Shell Deutschland Oil GmbH

### Veränderung der Beschäftigung nach Branchen gegenüber der Basis



Quelle: Renewability III

Fazit: Die Szenarien Effizienz und Effizienz plus bieten die Chance, die Klimaschutzziele zu erreichen und – unter Einbeziehung der vermiedenen externen Kosten – gleichzeitig ein leicht positives volkswirtschaftliches Ergebnis zu erzielen.

## DIE CHANCEN UND RISIKEN DER DEKARBONISIERUNG

Eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist möglich – und es gibt verschiedene Optionen dafür. Wichtig ist dabei die maximale Effizienzsteigerung im Verkehr, also eine direkte Stromnutzung überall dort, wo es machbar ist. Strombasierte Kraftstoffe sollten nur dann zum Einsatz kommen, wenn keine andere Option besteht. Denn eine Dekarbonisierungsstrategie, die ausschließlich auf CO<sub>2</sub>-freien Kraftstoffen basiert, ist aus energetischer und volkswirtschaftlicher Sicht ineffizient.

Um die Dekarbonisierung bei gleichzeitig maximaler Effizienzsteigerung zu stützen, sollte das Endenergieziel für den Verkehrssektor für 2050 von derzeit 40 Prozent auf 60 Prozent angehoben werden. Gleichzeitig muss die Effizienzsteigerung der Fahrzeuge mit entsprechenden Rahmenbedingungen vorangebracht werden. Alleine höhere Kraftstoffpreise reichen nicht aus, um eine maximale Elektrifizierung im Fahrzeugbestand bis 2050 zu erreichen.

Für die verbleibenden Energiebedarfe, wo keine direkte Stromnutzung möglich ist, können strombasierte Kraftstoffe eingesetzt werden. Der zusätzliche Strom aus erneuerbaren Energiequellen muss dafür sichergestellt werden. Auch muss bedacht werden, dass die stromgenerierten Kraftstoffe zum überwiegenden Teil außerhalb Deutschlands in Ländern mit höheren Potenzialen für erneuerbare Energien produziert werden müssen. Wesentlich ist es daher, dass frühzeitig Nachhaltigkeitsstandards für strombasierte Kraftstoffe auf internationaler Ebene z. B. hinsichtlich Konkurrenzen um Wasser in Trinkwasserqualität vereinbart werden. Auch führt die Systemumstellung zu Importabhängigkeiten bei strombasierten Kraftstoffen wie bisher beim Erdöl. Die Effekte der Dekarbonisierung im Verkehr könnten wirtschaftlich für Deutschland positiver ausfallen, wenn im Inland Know-how und Produktionsstrukturen für PtX aufgebaut würden. Die Vor- und Nachteile einer entsprechenden Kopplung von Verkehrs- und Stromsektor müssen jedoch entsprechend überprüft werden.

Die Kommunen spielen eine ganz wesentliche Rolle: Die Verbesserung der Lebensqualität in Städten ist ein relevanter Hebel für den Klimaschutz im Verkehrssektor. Gleichzeitig verringert sie weitere Umweltauswirkungen, indem sie nachhaltige Mobilität unterstützt, und hat positive Auswirkungen für die Wohlfahrt. Wenn der öffentliche Verkehr und Fuß- und Radverkehr gefördert werden, bieten sich Pkw-Nutzern wählbare Alternativen. Wesentliche Flankierungsmaßnahme für die Kommune ist die Parkraumbewirtschaftung mit steigenden Gebühren. Die Zunahme des öffentlichen Verkehrs wirkt sich positiv auf die Beschäftigung aus. Wichtig ist dabei eine optimierte Auslastung der Verkehrsmittel über den Tag. Der höhere Bedarf nach öffentlichem Verkehr kann dann zu einer besseren Auslastung der Infrastruktur sowie der Fahrzeuge und damit zu besseren Kostendeckungsgraden führen.

Eine Minderung der direkten Treibhausgasemissionen um 38 Prozent im nationalen Verkehr bis zum Jahr 2030, wie auf EU-Ebene für die non-ETS-Sektoren in Deutschland diskutiert, gelingt aber nur mit ergänzenden Maßnahmen. So müssten zusätzlich zur Effizienzsteigerung und den Maßnahmen zur Verbesserung der Lebensqualität in Städten auch die Nutzerkosten des MIV erhöht werden. Das könnte beispielsweise in Form einer fahrleistungsabhängigen Pkw-Maut erfolgen. Mautsysteme können besonders positive volkswirtschaftliche Effekte haben, wenn sie verursachergerecht gestaltet sind und eine Rückverteilung der Erträge an die Haushalte erfolgt.

Eine Dekarbonisierungsstrategie für den Güterverkehr darf nicht den Straßen- und Schienenverkehr gegeneinander ausspielen. Sie muss sowohl eine möglichst starke Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene als auch die Dekarbonisierung des verbleibenden Straßenverkehrs verfolgen – entweder durch CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe oder durch die Elektrifizierung der Fahrzeuge. Die zweite Variante ist dabei deutlich energieeffizienter, setzt aber eine entsprechende Kooperation der Staaten Europas voraus.

Grundsätzlich kann die Dekarbonisierung des Verkehrssektors die Chance bieten, Klimaschutz bei positivem volkswirtschaftlichem Ergebnis zu erreichen. Dafür müssen die Fahrzeugeffizienz – unter anderem durch Elektromobilität – und die Effizienz des Verkehrssystems – durch Verlagerung und Vermeidung – politisch vorangebracht werden. Maßgeblich für eine günstige volkswirtschaftliche Bilanz ist auch, dass Deutschland auf dem globalen Markt bei den neuen Technologien (z. B. Elektrofahrzeugen) zukünftig eine ebenso wichtige Rolle spielen wird wie bisher bei den konventionellen Fahrzeugen.

## DAS FORSCHUNGSPROJEKT RENEWABILITY

Renewability betrachtet Mobilitätsangebot und -nachfrage gekoppelt und modelliert darauf basierend den Endenergieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors. Die Wechselwirkungen zwischen Verkehrs- und Energiesektor werden ebenso mit berücksichtigt wie die ökonomischen Auswirkungen der Maßnahmen. So ergibt sich aus dem Modellverbund ein konsistentes Gesamtbild. Renewability betrachtet den innerdeutschen Straßen-, Schienen-, Binnenschiff- und Luftverkehr, aber auch den internationalen Luft- und Seeverkehr. Grundlage hierfür ist eine umfassende Technologiedatenbank zu Fahrzeugen und Kraftstoffen, die Daten zu Energieverbräuchen und Emissionen, aber auch Kosteninformationen enthält.

### Modellverbund Renewability III im Überblick



Quelle: Renewability III

Im Folgenden werden die einzelnen Modelle überblicksartig dargestellt. Ausführlichere Beschreibungen finden sich auf der Projektwebseite [www.renewability.de](http://www.renewability.de) im Bereich „Modellierung“ und im Endbericht.

## DIE MODELLE

	MODELL	DIE WICHTIGSTEN INPUTS	DIE WICHTIGSTEN OUTPUTS
<b>Modellierung der Personenverkehrsnachfrage</b>	<p>Die Ermittlung der Personenverkehrsnachfrage erfolgt durch das Zusammenspiel verschiedener Modelle:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• deutschlandweites Fernverkehrsmodell</li> <li>• deutschlandweites Alltagsverkehrsmodell</li> <li>• städtisches Modell</li> </ul> <p>Alle drei Modelle basieren auf der realitätsnahen Abbildung der Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer und beachten jeweils spezifische Verhaltensmuster. Zentraler Kern ist immer ein Nested-Logit-Modellansatz mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden (makroskopisch für deutschlandweite Betrachtungen und mikroskopisch für städtische Verkehre).</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zukünftige Fahrzeugflottenstruktur aus dem Neuzulassungsmodell</li> <li>• Bevölkerungsdaten</li> <li>• Verkehrsverhaltensdaten</li> <li>• Raumstrukturdaten als Ziele der Nachfrage</li> <li>• Informationen zum Verkehrsangebot und zu den Reisezeiten</li> <li>• Informationen zur Preisstruktur und Technologie verschiedener Verkehrsmittel</li> </ul>	<p>Personenverkehrsnachfrage (Verkehrsaufkommen, Personen- und Fahrzeugkilometer), differenziert nach Verkehrsträgern und Antriebstechnologien sowie Regionstypen</p>
<b>Modellierung Güterverkehrsnachfrage</b>	<p>Ein Modell der deutschlandweiten Nachfrage nach Gütertransporten unter Berücksichtigung des grenzüberschreitenden Verkehrs. Elastizitätenansatz für Fortschreibung des Verkehrsaufkommens, Modalwahl als Logit-Modell, Umrechnung in Fahrten durch Faktormodelle (Leerfahrtenanteile und Auslastungen abgeleitet aus Transportstatistiken)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frachtaufkommen (Referenz und dekarbonisierte Welt)</li> <li>• Transportentfernungen, Transportzeiten und Transportkosten</li> <li>• Bruttoinlandsprodukt</li> </ul>	<p>Güterverkehrsleistung und Fahrzeugkilometer differenziert nach Verkehrsträgern und Fahrzeugarten, mittlere Transportkostenraten der Verkehrsträger</p>
<b>Modellierung Fahrzeugneuzulassungen</b>	<p>Das Modell setzt sich zusammen aus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• TCO-Modell</li> <li>• Logit-Modell für Auswahlwahrscheinlichkeiten der verschiedenen Antriebe</li> </ul> <p>Verkehrspolitische Maßnahmen, wie z. B. die EU-Regulierung zu Flottengrenzwerten, können im Modell abgebildet werden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fahrprofilaten für private und gewerbliche Halter</li> <li>• Kraftstoffpreisentwicklung</li> <li>• Fahrzeugkosten und Kosten für Effizienztechnologien</li> <li>• Entwicklung von Reichweiten elektrischer Fahrzeuge</li> </ul>	<p>Fahrzeugneuzulassungen differenziert nach Größenklasse, Antriebstechnologie und Fahrzeugeffizienz</p>

	MODELL	DIE WICHTIGSTEN INPUTS	DIE WICHTIGSTEN OUTPUTS
<b>Bilanzierung der Materialvorleistungen</b>	TREMOD materials ist ein Modell zur Ermittlung des Materialeinsatzes und der Umweltwirkungen (Energieverbrauch, Treibhausgase, Luftschadstoffe ...) bei der Herstellung von Fahrzeugen (Pkw, LNF, Lkw, Bus, Bahn, Binnenschiff, Flugzeug) für ganze Fahrzeugflotten. Verschiedene Antriebssysteme ebenso wie verbrauchsmindernde Technologien werden berücksichtigt. Grundlage für die Modellierungen bildet das Ökobilanzmodell für generische Einzelfahrzeuge eLCAr (Electric Car LCA).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialrelevante Fahrzeugdaten (Antriebstechnologie, Größenklasse, Herstellungsjahr, Detailtechnologien wie z. B. Leichtbau)</li> <li>• Materialinventare und Ökobilanzdaten für Materialvorleistungen und Produktionsprozesse aus LCA-Datenbanken (z. B. ecoinvent), Herstellerdaten und Literaturdaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energiebedarf pro Fahrzeugherstellung</li> <li>• Treibhausgasemissionen der Fahrzeugherstellung</li> <li>• Weitere Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung</li> <li>• Materialeinsatz im Fahrzeug</li> </ul>
<b>Modellierung der Emissionen und des Energiebedarfs</b>	In dem Modell TEMPS werden die Ergebnisse aus den Modellen zur Verkehrsnachfrage und den Neuzulassungen zusammengeführt, um konsistente Energie- und Treibhausgas-Szenarien zu erstellen.	<p>In die Modellierung fließen die Ergebnisse der verschiedenen Modellbestandteile ein, d. h.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verkehrsnachfrage</li> <li>• Neuzulassungen von Fahrzeugen (Pkw &amp; Lkw)</li> <li>• Technologien (spezifische Verbräuche) übriger Verkehrsmittel</li> <li>• Materialvorleistungen</li> <li>• Energiemix (Anteile von Biokraftstoffen / strombasierten Kraftstoffen)</li> <li>• Emissionsfaktoren (direkt und indirekt)</li> </ul>	Energiebedarf und Treibhausgasemissionen differenziert nach Energieträger, Verkehrsträger, Fahrzeugtypen; Entwicklung des Fahrzeugbestands Pkw und Lkw
<b>Modellierung der ökonomischen Auswirkungen</b>	Um die zukünftige makroökonomische Entwicklung abzubilden, wird ein dynamisches allgemeines Gleichgewichtsmodell (AGM; multisektoral, global) eingesetzt. Darauf baut das verkehrsdifferenzierte Input-Output-Modell VEDIOM auf (Betrachtung der Auswirkungen einzelner Szenarien und Szenarettten auf gesamtwirtschaftliche Größen).	<p>In die Modellierung fließen folgende Ergebnisse verschiedener Modellbestandteile ein:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieverbrauch und Energiekosten</li> <li>• Verkehrsleistungen und Verkehrskosten</li> <li>• Zusammensetzung des Fahrzeugparks</li> <li>• Investitionen in Infrastrukturen</li> <li>• Steuerbelastungen Energie und Verkehr</li> <li>• Treibhausgasemissionen</li> </ul>	<p>Als wesentliche Parameter für eine ökonomische Bewertung werden folgende Aspekte modelliert:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veränderungen in Konsum und Produktion</li> <li>• Veränderungen im Staatsbudget</li> <li>• Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte</li> <li>• Struktureffekte (sektorale Wirkung der Effekte)</li> <li>• Vermiedene externe Kosten</li> </ul>



## DIE SZENARIO-GRUPPE

Im Projekt Renewbility wurde erstmals ein partizipativer Prozess mit der wissenschaftlichen Erarbeitung von Szenarien gekoppelt. Durch die Beteiligung von Stakeholdern aus allen verkehrsrelevanten Branchen gingen auf Basis eines diskursiven Prozesses unterschiedliche Positionen und Interessen in die Gestaltung der Szenarien ein. Dies wurde über eine Diskussion im Rahmen einer sogenannten Szenario-Gruppe gewährleistet. Darin waren Vertreter der Automobil-, Bahn-, Energie- und Logistikbranche sowie der Umwelt- und Verbraucherschutzverbände vertreten. Auch in der dritten Projektphase wurde die erfolgreiche Zusammenarbeit mit Stakeholdern fortgesetzt. Die Szenario-Entwicklung im Rahmen von Renewbility III erfolgte frühzeitig in enger Kooperation. Die Mitglieder der Szenario-Gruppe haben sich in entscheidenden Phasen des Projekts über die gesamte Laufzeit hinweg beratend eingebracht. Aufgrund der Vielfalt an Expertise und Arbeitsfeldern der eingebundenen Personen spiegelt der Bericht nicht notwendigerweise in allen Punkten die Meinung der gesamten Gruppe wieder. Die Ergebnisse der Szenarien wurden in den gemeinsamen Workshops kritisch reflektiert.

Die Szenario-Gruppe umfasst folgende Vertreterinnen und Vertreter:

- ADAC e.V.: Michael Niedermeier
- AGORA Energiewende: Dr. Matthias Deutsch
- BMW Group: Dr. Carl-Friedrich Eckhardt
- BP Europa: Tobias Wolny
- Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V.: Uta Maria Pfeiffer
- Dachser SE: Dr. Andreas Froschmayer
- Deutsche Bahn AG: Erhard Michel
- Deutsche Post DHL: Julia Binder
- E.ON SE: Dr. Stefan Becker
- Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU): Dietmar Oeliger, Daniel Rieger
- Shell Deutschland: Dr. Jörg Adolf
- Verband der deutschen Biokraftstoffindustrie: Elmar Baumann
- Verband der Automobilindustrie (VDA): Dr. Stefan Wöhl
- Verband Deutscher Reeder: Matthias Plötzke
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV): Dr. Till Ackermann
- Verkehrsclub Deutschland e.V. (VCD): Gerd Lottsiepen, Michael Müller-Görnert

## DER AUFTRAGGEBER

Das Projekt wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die fachliche Begleitung erfolgte über das Referat IG I5 „Umwelt und Verkehr, Elektromobilität“.

## DAS PROJEKTTEAM

### ÖKO-INSTITUT E.V., BERLIN/DARMSTADT/FREIBURG



Das Öko-Institut ist eine der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungseinrichtungen für eine nachhaltige Zukunft. Im Projekt Renewbility hat das Institut die Leitung übernommen.

**Ansprechpartner:** Dr. Wiebke Zimmer, w.zimmer@oeko.de  
Ruth Blanck, r.blanck@oeko.de

### DAS INSTITUT FÜR VERKEHRSFORSCHUNG IM DLR, BERLIN



Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus unterschiedlichen Disziplinen forschen hier zum Personen- und Wirtschaftsverkehr. Die Vision: ein modernes und zukunftsfähiges Verkehrssystem, effizient und nachhaltig für Mensch und Umwelt. Das Institut ist wissenschaftlicher Partner von Renewbility.

**Ansprechpartner:** Rita Cyganski, rita.cyganski@dlr.de  
Axel Wolfermann, axel.wolfermann@dlr.de

### IFEU – INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH



Im ifeu arbeiten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus dem Bereich der Natur-, Ingenieurs- und Gesellschaftswissenschaften daran, das Leitbild der nachhaltigen Entwicklung zu konkretisieren. Das Institut ist wissenschaftlicher Partner von Renewbility.

**Ansprechpartner:** Frank Dünnebeil, frank.duennebeil@ifeu.de  
Horst Fehrenbach, horst.fehrenbach@ifeu.de

### INFRAS AG, ZÜRICH



INFRAS forscht in den Bereichen Gesellschaft, Wirtschaft, Umwelt und Politik und berät private Unternehmen und die öffentliche Hand. Das Institut ist wissenschaftlicher Partner von Renewbility.

**Ansprechpartner:** Martin Peter, martin.peter@infras.ch  
Remo Zandonella, remo.zandonelle@infras.ch

### TIPPINGPOINTS GMBH – AGENTUR FÜR NACHHALTIGE KOMMUNIKATION, BONN/BERLIN



Das Team von tippingpoints berät Ministerien, Kommunen und Verbände in Kommunikationsfragen, setzt Kampagnen, redaktionelle Projekte, PR- und Bildungsmaßnahmen um und bindet Stakeholder in Nachhaltigkeitsprozesse ein. tippingpoints wurde mit der Kommunikation von Renewbility beauftragt.

**Ansprechpartner:** Robert Sedlak, robert.sedlak@tippingpoints.de

## IMPRESSUM

**Veröffentlichung:** Oktober 2016

**Herausgeber:** Öko-Institut e.V.

**Ansprechpartner:** Dr. Wiebke Zimmer, Ruth Blanck, Öko-Institut e.V.

### **Büro Berlin**

Schicklerstraße 5–7, 10179 Berlin  
Tel. +49 (0) 30 – 40 50 85-0,  
Fax +49 (0) 30 – 40 50 85-388  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de) | [www.renewbility.de](http://www.renewbility.de)

### **Büro Darmstadt**

Rheinstraße 95, 64295 Darmstadt  
Tel. +49 (0) 61 51 – 81 91-0,  
Fax +49 (0) 61 51 – 81 91-133

### **Geschäftsstelle Freiburg**

Postfach 1771, 79017 Freiburg  
Tel. +49 (0) 7 61 – 4 52 95-0,  
Fax +49 (0) 7 61 – 4 52 95-288

### **Redaktion**

tippingpoints GmbH,  
Robert Sedlak

### **Text**

Projektteam

### **Grafik-Design**

eCouleur :  
Die nachhaltige Designagentur



## FORSCHUNGSPARTNER



## IM AUFTRAG VON

