

# Erneuerbare Energien im Verkehr 2050

Ergebnisse aus fünf explorativen 100 % EE-Szenarien für die  
Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV)  
– Fokus: Deutschland

**P. Schmidt, W. Weindorf, W. Zittel**

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), München/Ottobrunn

## **Kurzfassung**

Vorgelegt werden Szenarienergebnisse für Deutschland am Beispiel Pkw. Die explorativen Szenarienanalysen entstammen der zweiten FVV-Kraftstoffstudie [1], die im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. von der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) erstellt wurde. Eine Energiewende im Verkehr kann zukünftig sehr hohe Stromnachfragen aus dem Verkehr bedeuten. Dies hängt insbesondere von der zukünftigen Verkehrsnachfrageentwicklung und den angenommenen Kraftstoff-/Antriebssystem-Mix ab. Die Investitionsbedarfe erscheinen handhabbar; neue Kraftstoffverteilinfrastrukturen für H<sub>2</sub>-Tankstellen und Batterie-Laden stellen insbesondere eine betriebswirtschaftliche Herausforderung dar, weniger eine volkswirtschaftliche. Eine Elektrifizierung der Energiebasis zukünftiger Kraftstoffe („well-to-tank“) sowie eine Einbettung von Verbrennungskraftmaschinen in zunehmend elektrifizierte Antriebssystemkonzepte („tank-to-wheel“) erscheint aus Gesamtsystemsicht sinnvoll mit Blick auf erneuerbare Stromerzeugungspotenziale, Gesamtwirkungsgrade („well-to-wheel“) und resultierenden kumulierten Investitionsbedarfen.

**Schlagwörter:** Erneuerbarer Strom, Power-to-Gas, Power-to-Liquid, Verkehrsnachfrage, Kraftstoff-/Antriebsszenarien, Investitionen, Deutschland

## 1. Motivation und Vorgehen

Aktuelle Treiber für die Diskussionen um zukunftsfähige Kraftstoffe und Antriebssysteme im Verkehr sind die im Dezember 2015 in Paris völkerrechtlich vereinbarten Klimaschutzziele, die Energiewende im Verkehr und nicht zuletzt auch die wieder in den Vordergrund rückende Schadstoffemissionsthematik. Treibhausgasemissionsziele von -80 bis -95 %<sub>1990</sub> bis 2050 über alle Sektoren werden auch für den Verkehrssektor substantielle Minderungsbeiträge bedeuten. Der aktuelle Klimaschutzplan der Bundesregierung sieht für den Verkehrssektor bis 2030 eine Treibhausgasemissionsreduktion von 40 bis 42 %<sub>1990</sub> vor [2].

Mit der Energiewende im Stromsektor halten in Deutschland, und zunehmend auch in der EU, strombasierte Flüssigkraftstoffe (Power-to-Liquids – PtL) Einzug in die Strategiediskussionen. Benzin, Diesel und Kerosin aus erneuerbarem Strom sind insofern vielversprechend, als dass diese nahtlos in etablierten Infrastrukturen und Antriebssystemen eingesetzt werden können. Zudem erweitern Power-to-Liquids den Strauß an strombasierten Kraftstoffen – wie Power-to-Hydrogen (PtH<sub>2</sub>) für Brennstoffzellenfahrzeug und Power-to-Methane (PtCH<sub>4</sub>) für Verbrennungskraftfahrzeuge – in den Bereich hoch-performeranter Verkehrsanwendungen hinein, wie z.B. Lkw-Fernverkehr oder der internationale Luftverkehr und nicht zuletzt auch bei Arbeitsmaschinen. Darüber hinaus sind strombasierte Kraftstoffe im Vergleich zu Agrarkraftstoffen sehr flächeneffizient in der Herstellung und verfügen auch bei höchsten Nachhaltigkeitsanforderungen über robust höhere technische Produktionspotenziale. In einer nachhaltigen Welt wird erneuerbarer Strom zusehends zur Primärenergie. Der Bedarf an zusätzlichen erneuerbaren Stromanlagen zur Deckung auch der Stromnachfragen aus dem Verkehrssektor hängt dabei wesentlich von der zukünftigen Verkehrsnachfrage sowie den Kraftstoff-Antriebs-Systemen der verschiedenen Verkehrsträger ab (siehe Kapitel 2).

Im Mittelpunkt dieses Beitrags stehen resultierende Energiebedarfe des Verkehrssektors, Kraftstoffkosten sowie kumulierte Investitionen für Deutschland (siehe Kapitel 3). Für eine Leitplankenbetrachtung wurde eine 100 % Energiewende in allen motorisierten Verkehrsträgern bis 2050 auf Basis von ausschließlich erneuerbarem Strom modelliert. Mit explorativen Szenarien wird die Leitfrage der Studie ausgelotet, ob eine solche große Transformation des Verkehrssektors überhaupt im Bereich des Realistischen liegt und welche Implikationen (Energie, Kosten, Investitionen) damit verbunden sind. Die Analysen für die FVV werden in diesem Papier um aktuelle Betrachtungen zur Integration von (fluktuierendem) erneuerbarem Strom durch verkehrliche Stromnachfrage ergänzt (siehe Kapitel 4).

## 2. Szenarien

Für die Ermittlung der möglichen, zukünftigen Energiebedarfe im Verkehrssektor wurden als Eingangsgröße in das LBST-Flottenwälzungsmodell drei Szenarien definiert.

### 2.1 Verkehrsnachfrageszenarien

Um die Bandbreite aktuell diskutierter zukünftiger Verkehrsnachfragen in den Ergebnissen abzubilden, wurden zwei distinkte Nachfrageszenarien (HIGH und LOW) aus einer Reihe von Studien der letzten Jahre ausgewählt. Die Nachfrageänderungen sind in Tabelle 1 für Deutschland zusammengefasst, differenziert nach Personen- und Güterverkehr. Zum Vergleich sind die für die FVV-Studie gewählten Annahmen für EU-28 mit angegeben.

**Tabelle 1: Verkehrsnachfrageentwicklung 2010 bis 2050 im hohen (HIGH) und niedrigen (LOW) Szenario für Deutschland und die EU [1]**

Verkehrsnachfrage-szenario	Verkehrssektor	Änderung von 2010 nach 2050	
		Deutschland	Europäische Union
HIGH	Personen	+30 %	+50 %
	Güter	+60 %	+80 %
LOW	Personen	-25 %	+10 %
	Güter	+20 %	+50 %

Für die Verkehrsplanung in Deutschland maßgeblich ist die im Auftrag des Verkehrsministeriums (BMVI) erstellte Verkehrsverflechtungsprognose für 2030 (VP 2030), die im Rahmen einer Studie für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung nach 2050 extrapoliert wurde. Im HIGH-Szenario steigen sowohl die Personen- als auch die Güter-Verkehrsleistung von 2010 bis 2050 noch signifikant um 30 % bzw. 60 % an. Die LOW-Variante orientiert sich am eMobil-Szenario „Regional“, die das Öko-Institut 2014 im Auftrag des Umweltministerium (BMUB) erstellt hat. Im LOW-Szenario sinkt die Personenverkehrsleistung um 25 %; die Güterverkehrsleistung steigt auch im LOW-Szenario, wenn auch mit +20 % moderater als im HIGH-Szenario (+60 %). Zum Vergleich: In den für die EU-28 identifizierten Verkehrsnachfrageszenarien wird durchweg von Steigerungen in der Verkehrsnachfrageentwicklung ausgegangen.

### 2.2 Entwicklung der spezifischen Treibhausgasemissionen bei den Kraftstoffen

Die Entwicklung der spezifischen Treibhausgasmissionen der verschiedenen Kraftstoffe erfolgt als Zielszenario. Dabei wird angenommen, dass die Primärenergiebasis jedes Kraftstoffs bis 2050 sukzessive auf erneuerbaren Strom umgestellt wird. Nachfolgendes Bild

1 zeigt diese Wälzung der Primärenergiebasis am Beispiel von Benzin/Kerosin/Diesel aus Rohöl hin zu synthetischem Flüssigkraftstoff aus erneuerbarem Strom.

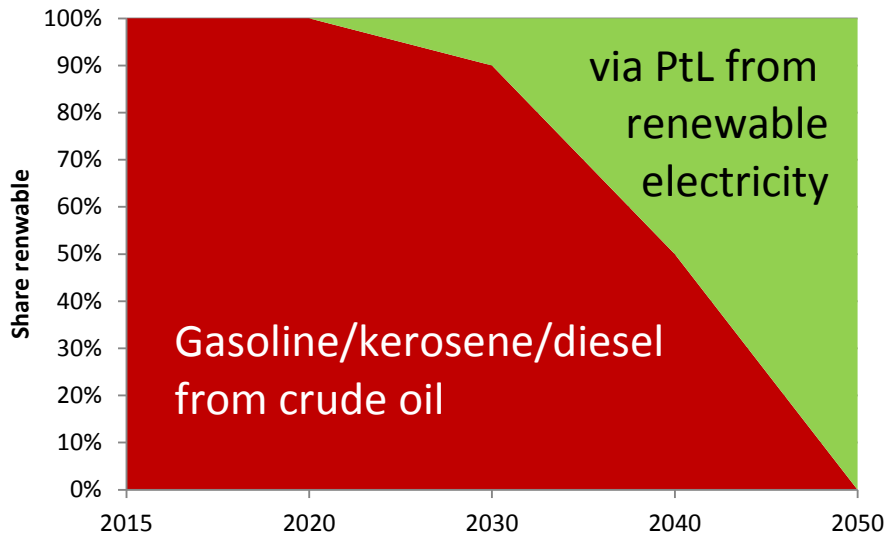


Bild 1: Änderung der Primärenergiebasis (Zielszenario) am Beispiel Benzin/Kerosin/Diesel

Analog hierzu erfolgte das Vorgehen auch bei den anderen in der FVV-Studie angenommenen Kraftstoffen Methanol, Methan, Wasserstoff sowie Lade-/Fahr-Strom.

### 2.3 Kraftstoff-Antriebs-Szenarien

Für die Zuordnung von Antriebssystemen und Kraftstoffen zur Deckung der verschiedenen Verkehrsnachfragen wurden in Abstimmung mit dem FVV-Arbeitskreis „Zukünftige Kraftstoffe“ drei distinkte Szenarien definiert:

Das «**PTL**» Szenario entspricht einer Fortschreibung „business-as-usual“ und ist als synthetisches Leitplankenszenario bewusst konservativ ausgelegt. Heute bei den Verkehrsträgern dominierende Antriebssysteme werden dabei weitgehend beibehalten. Antriebe mit Verbrennungskraftmaschinen werden weiter verbrauchsoptimiert (Evolution), es findet jedoch keine fundamentale Änderung in den Technologiebasen statt. Verkehrsmittel, die heute mit Verbrennungskraftmaschinen betrieben werden, nutzen zunehmend Power-to-Liquids anstelle der fossilen Kraftstoffe. Beim Pkw ist z.B. die 2050 vorherrschende Antriebstechnologie der ICE-Hybrid, der mit PtL-Benzin/-Diesel betrieben wird.

Mit dem Mixszenario «**FVV**» wird der Strauß heute diskutierter bzw. in Ansätzen bereits auch vorhandenen Kraftstoff-/Antriebssystemen aufgemacht, an der Verbrennungskraftmaschine als Basistechnologie jedoch festgehalten. Zur maximalen Verbrauchsminimierung werden

Verbrennungsmotoren in fortgeschrittene elektrische Antriebssysteme eingebettet. Am Beispiel Pkw bedeutet das in 2050, dass ICE-REEV die Neuzulassungen dominieren.

Das «eMob» Szenario orientiert sich am „Regional“-Szenario der Studie „eMobil 2050“ des Öko-Instituts von 2015. Es dominieren elektrische Antriebe auf der Basis von Batterien und Brennstoffzellen, beim Pkw insbesondere Batteriefahrzeuge.

Die Wälzung von Fahrzeugen im Bestand erfolgt in Form von %-Anteilen an Neuzulassungen eines Jahres bis 2050 sowie im Modell definierter Lebensdauer. Als Beispiel für die angenommenen Kraftstoff-/Antriebsszenarien sind in Tabelle 2 die Neuzulassungsanteile von Pkw für die drei Kraftstoff-/Antriebsszenarien dargestellt. Grau hinterlegte Zellen veranschaulichen die beim Pkw angenommenen Verschiebungen in den Schwerpunkten alternativer Kraftstoffe und Antriebe.

**Tabelle 2: Anteile an Pkw-Neuzulassungen in den drei Kraftstoff-/Antriebsszenarien**

Anteil (%) der Neuzulassungen	ICE Benzin/Diesel	ICE Methan	Hybrid Benzin/Diesel	Hybrid Methan	REEV Benzin/Diesel	BEV	FCEV
<b>«PTL»</b>							
2010	100%	0	0	0	0	0	0
2020	80%	0	20%	0	0	0	0
2030	40%	0	60%	0	0	0	0
2040	10%	0	90%	0	0	0	0
2050	0	0	100%	0	0	0	0
<b>«FVV»</b>							
2010	100%	0	0	0	0	0	0
2020	36%	5%	45%	2%	6%	4%	1%
2030	0	0	55%	5%	25%	10%	5%
2040	0	0	37%	2%	45%	16%	9%
2050	0	0	0	0	70%	20%	10%
<b>«eMob»</b>							
2010	100%	0	0	0	0	0	0
2020	86%	5%	3%	0	3%	3%	0
2030	68%	5%	6%	0	9%	12%	0
2040	0	0	10%	0	17%	72%	0
2050	0	0	5%	0	12%	82%	0

Die Kraftstoff-/Antriebsszenarien werden in einem von der LBST entwickelten Flottenwalzungsmodell je mit der hohen sowie der niedrigen Verkehrsnachfrage gefaltet<sup>1</sup> und die resultierenden Kraftstoff-, Emissions- und Kosten-Mengengerüste ermittelt. Wesentliche Ergebnisse sind im nachfolgenden Kapitel 3 dargestellt.

### 3. Ergebnisse für Deutschland

#### 3.1 Treibhausgasemissionen

Die resultierenden Treibhausgasemissionen sind nachfolgend am Beispiel des «FVV» Szenarios für hohe (links) und niedrige (rechts) Verkehrsnachfrage dargestellt.

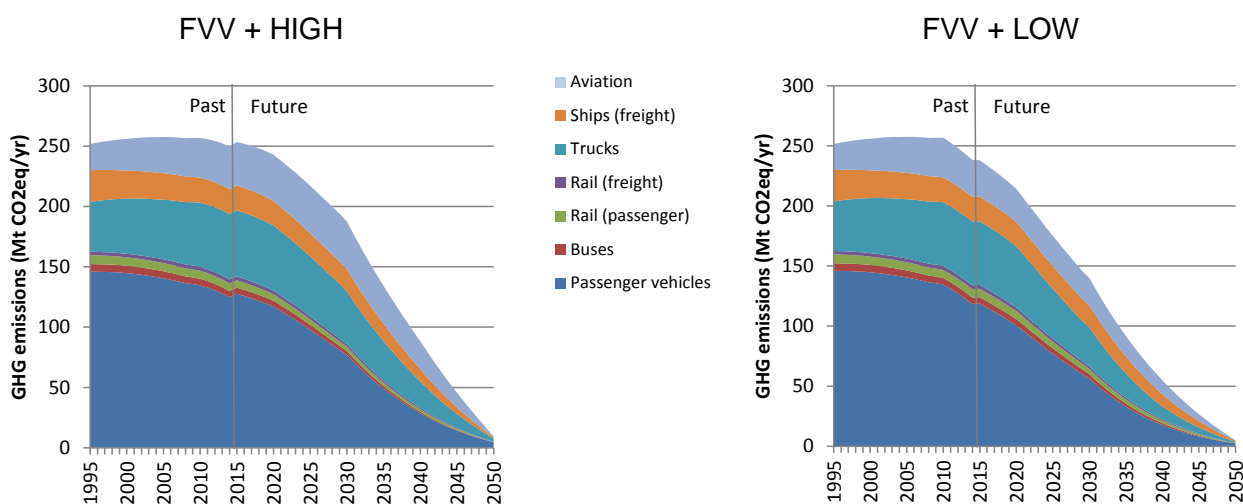


Bild 2: Treibhausgasemissionen «FVV» Szenario, alle Verkehrsmittel, Deutschland

Hauptemittent von Treibhausgasemissionen im Verkehr sind die Pkw, gefolgt von den Lkw. Aufgrund des Zielszenarios 100 % erneuerbarer Strom und strombasierte Kraftstoffe sinken die Treibhausgasemissionen über alle motorisierten Verkehrsmodi bis 2050 gegen Null.

Der Unterschied zwischen der hohen und niedrigen Verkehrsnachfrageentwicklung besteht bei den Treibhausgasemissionen darin, dass die kumulierten Emissionen bei hoher Verkehrsnachfrage höher ausfallen als bei niedriger Verkehrsnachfrage. In wie weit die kumulierten Treibhausgasemissionen von hoher versus niedriger Verkehrsnachfrage mit Blick auf die Klimavereinbarung von Paris im Dezember 2015 einen Einfluss auf die noch verfügbaren Treibhausgas-Emissionsbudgets haben könnten, ist in weiteren Untersuchungen zu analysieren.

<sup>1</sup> «eMob» aus Gründen der Kohärenz zwischen den Szenarienwelten lediglich mit «LOW».

In Bild 2 sind die Klimawirkungen durch Luftfahrtemissionen in großen Höhen<sup>2</sup> nicht berücksichtigt. Werden in der Luftfahrt zukünftig keine elektrischen Antriebe oder andere operationelle Maßnahmen eingeführt, so werden die Nicht-CO<sub>2</sub> Klimawirkungen die verbleibenden THG-Emissionsmengen bestimmen. Bei Treibhausgasreduktionszielen von 95 %<sub>1990</sub> und darüber kann das abhängig vom Luftverkehrswachstum die verbleibenden Emissionsbudgets benötigen. Alle anderen Verkehrssektoren müssten dann THG-Neutralität anstreben.

### 3.2 Energienachfrage

Bild 3 zeigt die Ergebnisse für die **Kraftstoffnachfrage** am Beispiel des «FVV» Szenarios für hohe (links) und niedrige (rechts) Verkehrsnachfrage (inkl. internationale Verkehre).

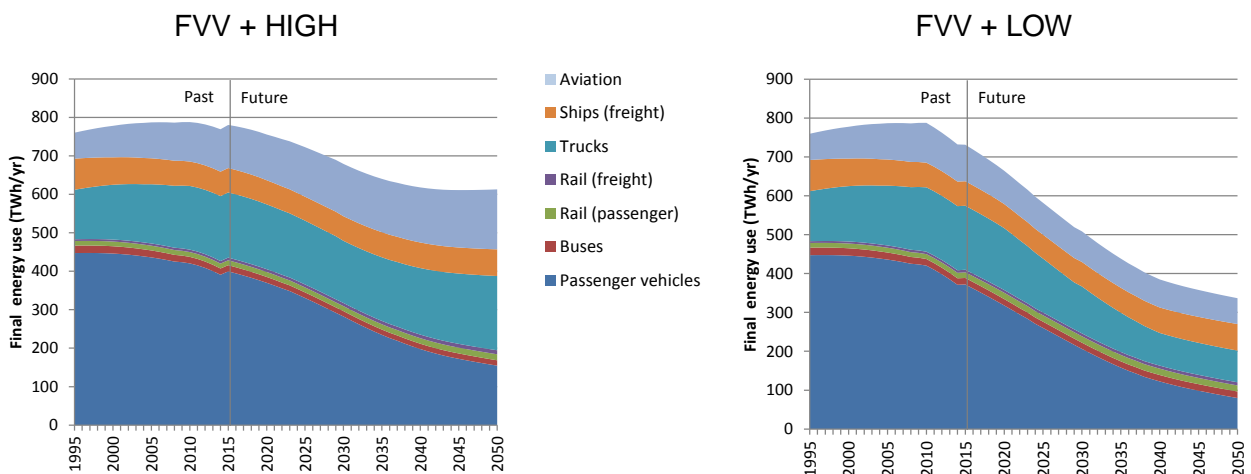


Bild 3: Kraftstoffnachfrage «FVV» Szenario, alle Verkehrsmittel, Deutschland

Analog zu den Treibhausgasemissionen wird heute der überwiegende Anteil an Kraftstoffen von Pkw verbraucht (individueller motorisierter Personenverkehr), gefolgt von Lkw (Nutzfahrzeuge insbesondere für den Gütertransport). Bis 2050 kann sich im FVV-Szenario durch Einbettung von Verbrennungsmotoren in zunehmend elektrifizierte Pkw-Antriebs-Systemkonzepte der Kraftstoffbedarf bei den Pkw drastisch sinken (im FVV-Szenario stellen REEV 70 %, BEV 20 % und FCEV 10 % der Pkw-Neuzulassungen in 2050)<sup>3</sup>. Der

<sup>2</sup> Dabei handelt es sich um Nicht-CO<sub>2</sub> Klimawirkungen durch die Emissionen von Schadstoffen und Wasserdampf in Reiseflughöhen über 9000 m über Erdoberfläche.

<sup>3</sup> Darüber hinaus kann durch Einbettung von Verbrennungskraftmaschinen (VKM) in elektrifizierten Antriebskonzepten dieser im optimalen Betriebspunkt gefahren werden; ein verstetigter VKM-Betrieb verringert zudem die Rohgasemissionen und erleichtert die Abgasaufbereitung.

Kraftstoffbedarf im Verkehr verteilt sich dann in etwa vergleichbaren Größen zwischen Pkw, Lkw, Schiffen und Flugzeugen. Insbesondere die relative Bedeutung von Lkw und Flugzeugen steigt unter Berücksichtigung auch der internationalen Verkehre.

Die verbleibende Gesamtkraftstoffnachfrage in 2050 liegt leicht (hohe Verkehrsnachfrage) bzw. deutlich (niedrige Verkehrsnachfrage) unterhalb der heutigen Gesamtkraftstoffnachfrage im Verkehrssektor.

Was in Bild 3 auffällt ist, dass die zunehmende Effizienz von Antriebssystemen insbesondere beim Pkw in Kombination mit dem im LOW-Szenario angenommen sinkenden Personenverkehr zu signifikant geringerer absoluter Kraftstoffnachfrage bis 2050 führen könnte. Bei steigender Verkehrsnachfrage entsprechend dem HIGH-Szenario könnte die steigende Effizienz der Antriebssysteme jedoch durch die steigende Verkehrsnachfrage überkompensiert werden, so dass nach einer Phase absolut sinkender Kraftstoffnachfrage, diese bis 2050 wieder ansteigt.

Bild 4 zeigt die verkehrliche **Stromnachfrage** für die in der Studie betrachteten Kombinationen aus Verkehrsnachfrage- und Kraftstoff-/Antriebs-Szenarien. Die verkehrliche Stromnachfrage beinhaltet den direkten Stromverbrauch für Batteriefahrzeuge als auch die indirekten Strombedarfe für die Herstellung von strombasierten Kraftstoffen (Power-to-Hydrogen, Power-to-Methane, Power-to-Liquids). Das «eMob» Szenario wurde aus Gründen der Konsistenz mit den unterstellten Szenariowelten lediglich mit der niedrigen Verkehrsnachfrage errechnet<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Der Umkehrschluss, «eMob» könne keine hohe Verkehrsnachfrage bedienen, kann jedoch nicht ohne weiteres gezogen werden da die prinzipielle Machbarkeit dieser Kombination im Rahmen der FVV-Studie schlicht nicht geprüft werden konnte.



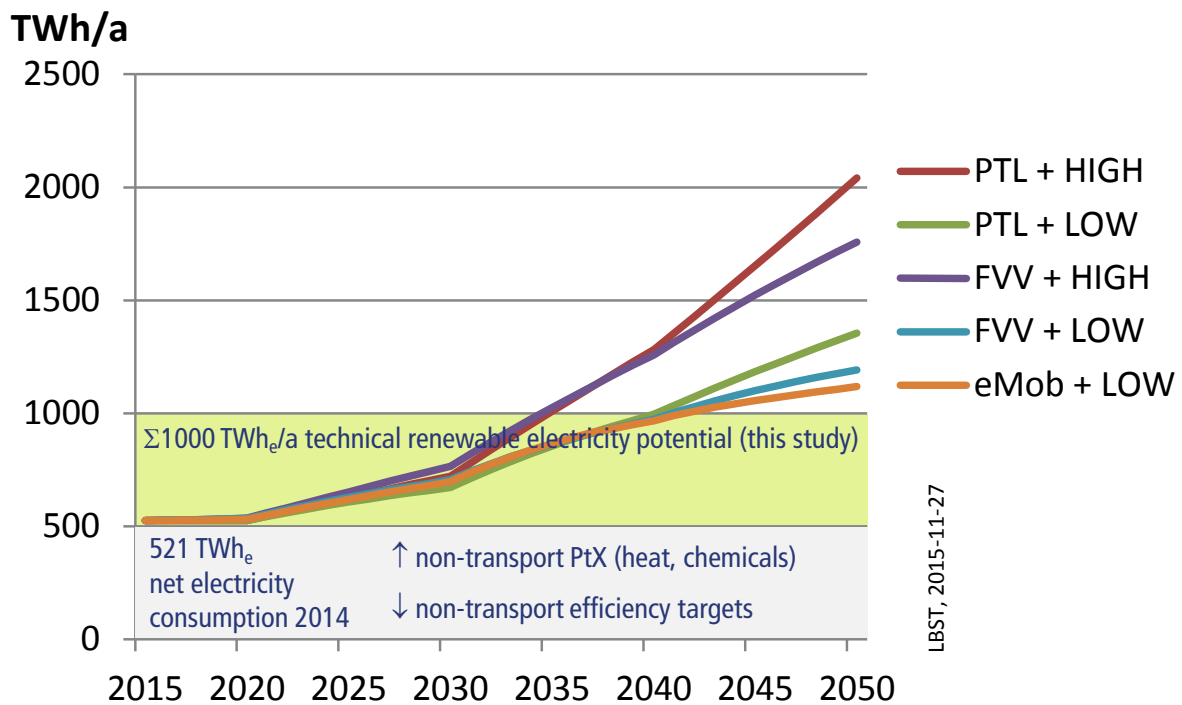


Bild 4: Verkehrliche Stromnachfrage «FVV» Szenario, alle Verkehrsmittel, Deutschland

Die resultierende Gesamtstromnachfrage in 2050 – d.h. stationäre zuzüglich verkehrliche Stromnachfrage – könnte einen Faktor zwei bis vier über der heutigen Stromnachfrage liegen. Der heutige Stromverbrauch wurde dabei in einer ersten Abschätzung bis 2050 als konstant angenommen<sup>5</sup> da Betrachtungen weiterer Sektoren über den verfügbaren Rahmen der FVV-Studie deutlich hinausging.

Die in der FVV-Studie analysierten, technischen Potenziale für die Erzeugung von erneuerbarem Strom aus Windkraft, Solarenergie, Geothermie und Wasserkraft ergeben in einer konservativen Abschätzung etwa 1000 TWh EE-Strom pro Jahr für Deutschland.

Aus Bild 4 wird ersichtlich, dass eine Versorgung mit ausschließlich heimischem erneuerbarem Strom noch am Ehesten bei den Szenarien mit niedriger Verkehrsnachfrage denkbar sein könnte. Eine reine Eigenenergieversorgung wäre aber auch insofern gar nicht notwendig, weil der Verkehrssektor heute zu weit über 90 % von Energieimporten abhängig ist. Da Power-to-Methane und insbesondere Power-to-Liquids aufgrund ihrer Energiedichten

<sup>5</sup> Einerseits gibt es Effizienzziele, die einen sinkenden Strombedarf in Haushalt, Gewerbe und Industrie vorsehen; andererseits zeichnen sich neben dem Verkehr weitere neue Stromverbraucher ab, wie beispielsweise für die Wärmebereitstellung (Power-to-Heat, z.B. via Direktheizung oder Wärmepumpe) oder zur Produktion von Basischemikalien (Power-to-Chemicals, z.B. für Methanol, Ethylen, Hexan), die zu einem steigenden stationären Stromverbrauch führen.

zudem noch sehr leicht in etablierten Infrastrukturen transportiert werden können und darüber hinaus die großen Energiemengen sehr viel leichter und günstiger in anderen Regionen der Welt hergestellt werden können, erscheint ein Import von synthetischen Kraftstoffen nur als legitim. Regionen, die über erneuerbare Strompotenziale weit über ihren eigenen Bedarfen verfügen, stellen aus erneuerbarem Strom hergestellte synthetische Kraftstoffe daher ein mögliches zukünftiges Geschäftsfeld dar [3]. Dies könnte insbesondere den Volkswirtschaften eine Perspektive, die heute im großen Stil noch fossiles Erdöl produzieren und exportieren.

### 3.3 Kumulierte Investitionen

Die aus den Szenarien resultierenden, kumulierten Investitionen umfassen alle Investitionen in EE-Anlagen, PtX-Anlagen sowie Verteilinfrastrukturen für Wasserstoff und Methan. Im Rahmen der FVV-Studie wurde für Batteriefahrzeuge (BEV) Zuhause laden angenommen. Für die Bereitstellung des Fahrleistungsstroms wurde ein Speicheranteil von 50% in Verbindung mit einem Stromspeicherwirkungsgrad von 75% angenommen zur Anpassung des (fluktuierenden) erneuerbaren Stromdargebots an die Stromnachfrage von Elektroloks. Die Fahrzeuge selbst waren nicht Gegenstand der FVV-Studie. Bei der Berechnung der kumulierten Investitionen sind die anfänglich höheren und durch Kapazitäts- und Lernkurveneffekte im Weiteren sinkenden, spezifischen Investitionen per Integral vollumfänglich berücksichtigt.

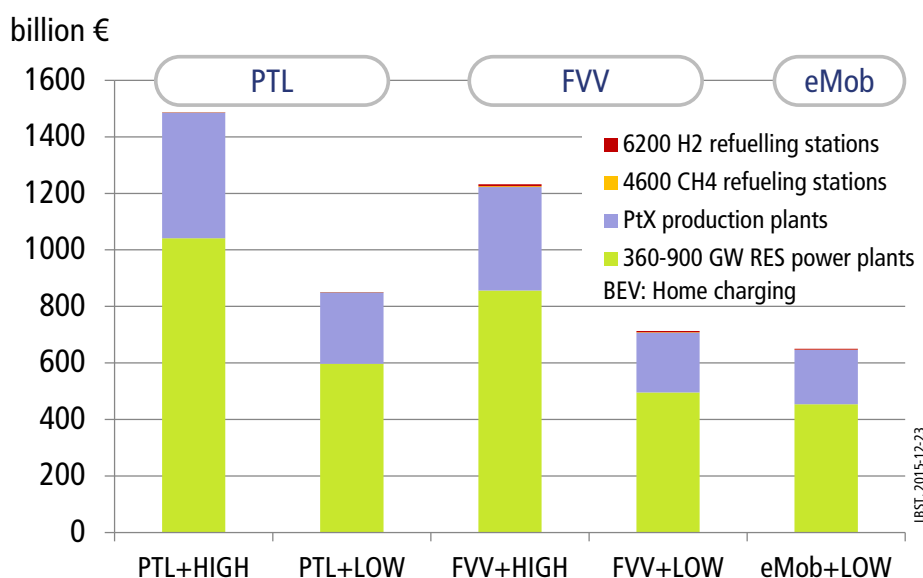


Bild 5: Kumulierte Investitionen für eine Energiewende im Verkehr (Deutschland) bis 2050 für EE-Anlagen, PtX-Anlagen und neuen Tankstellen (ohne Fahrzeuge)

Je nach Szenario liegen die kumulierten Investitionsbedarfe bis 2050 bei etwa 650 (eMob+LOW) bis 1.490 Mrd. € (PTL+HIGH). Es dominieren die Investitionen in EE-Anlagen, gefolgt von PtX-Anlagen. Aus volkswirtschaftlicher Sicht beinahe vernachlässigbar sind die Investitionen in den Aufbau von Methan- und Wasserstofftankstellen<sup>6</sup>. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht stellt der Aufbau alternativer Kraftstoff-Verteilinfrastrukturen, insbesondere in der Anfangsphase bei geringen Auslastungen, eine große Hürde dar.

Im Jahr 2014 betrug das Bruttoinlandsprodukt von Deutschland 2.900 Mrd. €. Das lineare Mittel kumulierter Investitionen über 35 Jahre ergibt mittlere Investitionsbedarfe von 18,6 bis 41,4 Mrd. € pro Jahr. Das entspricht in etwa 0,6 bis 1,4 % des Bruttoinlandsproduktes in Deutschland. Zum Vergleich, die jährlichen Öl-Ausgaben der EU betragen 2014 ca. 290 Mrd. €. Den jährlichen Investitionsbedarfen für eine Energiewende im Verkehr sind sinkende jährliche Ausgaben für fossile Kraftstoffe gegenüberzustellen. Die Potenziale für lokale Wertschöpfung und Energiesicherheit in Deutschland und Europa sind signifikant.

Um die im Verkehr nachgefragten erneuerbaren Strommengen bereitzustellen, müssten je nach Szenario in der Größenordnung von 360 bis 900 GW an erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen installiert werden, für Deutschland angenommen als einen Mix aus Offshore Wind, Onshore Wind sowie Photovoltaik. Zum Vergleich, im Jahr 2014 waren in Deutschland knapp über 70 GW erneuerbare Stromerzeugungsanlagen installiert<sup>7</sup>, die bei einem Nettostromverbrauch von 521 TWh<sub>e</sub> einen EE-Anteil von ca. 27 % im deutschen Gesamtstrommix bedeuteten.

#### **4. Integration verkehrlicher Stromnachfrage in das Stromsystem**

Die FVV-Studie zeigt, dass je nach Szenario der Stromsektor in Deutschland von heute ca. 500 TWh Jahresstromverbrauch auf zukünftig etwa 1.000 bis 2.000 TWh Stromnachfrage pro Jahr ansteigen könnte (siehe Kapitel 3.2). Die verkehrliche Stromnachfrage ist dabei nicht nur ein potenziell großer Treiber für den Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung (bzw. Import von PtX-Kraftstoffen), sondern kann auch Beiträge leisten das (fluktuierende) erneuerbare Stromangebot mit der (stochastischen und ggf. steuerbaren) Nachfrage auszubalancieren und die für den Netzbetrieb notwendigen Stromsystemdienstleistungen zu erbringen [4].

---

<sup>6</sup> Weitere Untersuchungsbedarfe bestehen für eine voll ausgebaute BEV-Ladeinfrastruktur inklusive Netzverstärkungs- und Stromspeicherbedarfen zur Integration insbesondere der BEV-Schnellladetankstellen ins Stromnetz und dem (fluktuierenden) Angebot an erneuerbarem Strom.

<sup>7</sup> Davon waren etwa 38 GW Onshore Wind, 3 GW Offshore Wind und 39 GW Photovoltaik.

Die Analyse verkehrlicher Stromnachfrager zeigt, dass gerade die hocheffizienten direkten Stromanwendungen im Verkehr (Oberleitung, Batterie) eine sehr harte Kopplung mit dem Stromsystem bedeuten. Deren Stromspeicherfähigkeit und Flexibilität zur Anpassung der verkehrlichen Stromnachfrage an das Stromangebot ist gering bzw. bedarf zusätzlicher Maßnahmen, wie z.B. stationärer Stromspeicher, insbesondere bei sehr hohen Anteilen an fluktuierendem erneuerbarem Strom im System. Demgegenüber benötigen chemische Energieträger (Power-to-Hydrogen, Power-to-Methane sowie Power-to-Liquids) zwar einen höheren Energieaufwand „well-to-tank“, stellen zugleich aber auch einen flexible Stromnachfrage mit hoher Speicherfähigkeit auch über Tage, Wochen und Monate dar. Dieser gegenläufige Zusammenhang ist in Bild 6 indikativ dargestellt.

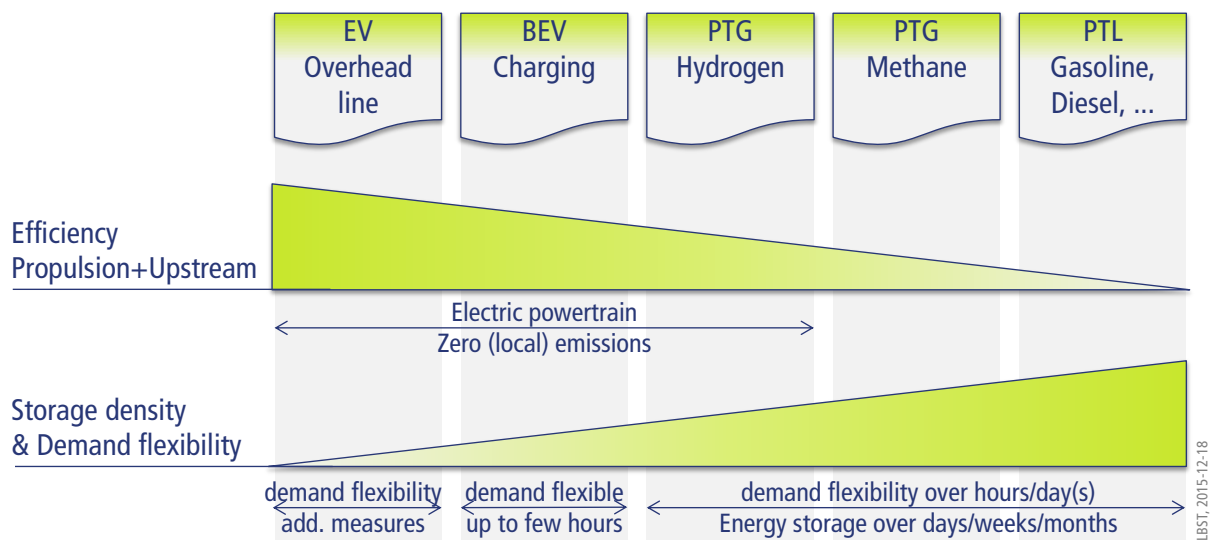


Bild 6: Effizienz versus EE-Integration (indikative Skalierung)

In der Gesamtschau von Bild 6 stellt sich Power-to-Hydrogen als robuste Mitte in der Abwägung zwischen Energieeffizienz und Stromsystemdienlichkeit dar. Power-to-Hydrogen ist darüber hinaus die einzige Option, die sowohl lokal emissionsfrei als auch für die Langfristspeicherung von Strom geeignet ist. Darüber hinaus kann mit Power-to-Hydrogen als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen ein hoher Wirkungsgrad im realen Fahrzyklus erreicht werden, der etwa einen Faktor 1,5 über dem von Verbrennungsmotoren liegt [5].

## **5. Schlussfolgerungen**

Folgende Kernaussagen lassen sich aus den Ergebnissen der FVV-Studie und den darin analysierten Szenarien für Deutschland ziehen:

- Die zukünftige Verkehrsnachfrage (Personen-km, Tonnen-km) ist der sensitivste Parameter für die Entwicklung der Kraftstoffnachfrage und damit verbundenen erneuerbaren Stromnachfrage des Verkehrssektors.
- Abhängig vom Kraftstoffs-/Antriebsszenario könnte sich der Strommarkt um das 2 bis 4-fache vergrößern (Strombedarf heute zzgl. verkehrliche Stromnachfrage in 2050).
- Die resultierenden Strommengen können voraussichtlich nicht allein durch erneuerbare Strompotenziale in Deutschland gedeckt werden (im EU-Kontext jedoch denkbar).
- Die PtX-Kosten sind im Wesentlichen getrieben durch die Stromkosten, die wiederum auch von der Wahl des PtX-Kraftstoffes (Power-to-Hydrogen, Power-to-Methane, Power-to-Liquids) und den damit verbunden Anlagenwirkungsgraden abhängen.
- Die Investitionen in die Kraftstoffverteilinfrastuktur sind vernachlässigbar im Vergleich zu den Investitionsbedarfen in EE- und PtX-Anlagen – dieses Ergebnis gilt für alle analysierten Szenarien.
- Die kumulierten Investitionen in eine Energiewende im Verkehr scheinen für alle betrachteten Szenarien in handhabbaren Größenordnungen zu liegen.
- Der Verkehr muss insgesamt elektrischer werden, bei der Kraftstoffherstellung als auch den Antriebssystemen. Hierdurch können die großen EE-Strompotenziale genutzt werden; geringere Stromnachfragen verringern dabei den EE-Zubaubedarf.
- Strombasierte Kraftstoffe sind aus Kostengründen keine Selbstläufer. Die regulatorischen Voraussetzungen sollten geschaffen werden für eine Anrechnung von PtG und PtL auf Umweltziele im Verkehr sowie für den Zubau von EE-Kapazitäten um auch verkehrliche Stromnachfragen aus dem Mix an erneuerbarer Stromerzeugungsanlagen bedienen zu können. Zusätzliche Anreize bzw. regulatorische Flankierungen bleiben dennoch notwendig. Eine Roadmap-Entwicklung und Diskussion geeigneter Einführungsinstrumente sind weitere Forschungsbedarfe – hierfür stellen die Ergebnisse aus der FVV-Studie eine gute Informationsgrundlage dar.

## **Danksagung**

Danke an die Mitglieder des Arbeitskreises „Zukünftige Kraftstoffe“ der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV).

Danke auch an den VDI für die Präsentationsmöglichkeit auf der Tagung „Innovative Antriebe“ am 23. November 2016 in Dresden.

## Abkürzungen

BEV	Battery-Electric Vehicle
EE	Erneuerbare Energie(n)
eMob	Szenario „Elektromobilität“ (z.B. Batterie, Brennstoffzelle)
EV	Electric Vehicle (z.B. Oberleitung, Batterie, Brennstoffzelle)
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (sowie Name für eines der hier betrachteten Szenarien)
ICE	Internal Combustion Engine
LBST	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH
PtG	Power-to-Gas (z.B. Power-to-Hydrogen, Power-to-Methane)
PTL	Szenario „Power-to-Liquids“ (z.B. Benzin, Kerosin, Diesel, Methanol)
REEV	Range-Extender Electric Vehicle
TWh	Terawattstunden (1 TWh = 1.000 GWh = 1.000.000 MWh)

## Literatur

- [1] P. Schmidt, W. Zittel, W. Weindorf, T. Raksha (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH – LBST): Renewables in Transport 2050 – Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity – Europe and Germany; Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (Hrsg.), FVV-Report 1086 / 2016, <http://www.fvv-net.de/en/download/renewables-in-transport-2050/renewables-in-transport-2050.html>
- [2] Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung, 11. November 2016
- [3] P. Schmidt, W. Weindorf (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH – LBST); A. Roth, V. Batteiger, F. Riegel (Bauhaus Luftfahrt e.V.): Power-to-Liquids – Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel; Umweltbundesamt (Hrsg.), Background // September 2016, ISSN: 2363-829X
- [4] U. Bünger, J. Michalski, P. Schmidt, W. Weindorf (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik – LBST): Wasserstoff – Schlüsselement von Power-to-X; Kapitelbeitrag zum Fachbuch „Wasserstoff“, Springer Verlag, 2017 (Veröffentlichung in Vorbereitung)
- [5] CE Delft, Ecologic Institute, LBST (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH): Shifting renewable energy in transport into the next gear – Developing a methodology for taking into account all electricity, hydrogen and methane from renewable sources in the 10% transport target; Study commissioned by the European Commission, DG Energy; 2012