

TEXTE

114/2019

Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungs- optionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050

Abschlussbericht

TEXTE 114/2019

Projektnummer 110850

FB000063

Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungs- optionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050

Abschlussbericht

von

Moritz Mottschall, Peter Kasten, Sven Kühnel,

Lukas Minnich

Öko-Institut, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin

Abschlussdatum:

Februar 2019

Redaktion:

Fachgebiet I 2.2 „Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr“
Martin Lange

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, September 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungs- optionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050

Ziel dieses Vorhabens ist es, die Gesamtkosten der Transformation hin zu einem vollständig dekarbonisiertem Verkehrssektor für verschiedene Energieszenarien und -optionen in Deutschland bis zum Jahr 2050 genauer zu beleuchten. Dafür werden die Kosten für die Energieversorgung und die Herstellung der Fahrzeuge des Straßenverkehrs von vier Szenarien aus der Studie „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energie-versorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“ in Form von Sensitivitätsbetrachtungen aktualisiert. Im Straßenverkehr, in dem eine direkte Stromnutzung technisch möglich ist, ist die Transformation hin zur Elektrifizierung die kostengünstigste Energieversorgungsoption. PtG-CH₄ und PtL weisen im Straßenverkehr ähnliche Kosten auf, währenddessen die Nutzung von PtG-H₂ in Brennstoffzellenfahrzeugen mit den höchsten Kosten verbunden ist. Im Schiffsverkehr ist die Elektrifizierung keine maßgebliche Option und die Kosten der verschiedenen Energieträger liegen dicht beieinander. Die Kosten für die Energieversorgung des Verkehrssektors und für die Fahrzeugherstellung dominieren sowohl in den Ausgangsszenarien als auch den Sensitivitätsbetrachtungen die Gesamtkosten. Bei hohen Fahrleistungen je Fahrzeug (z. B. Straßenfernverkehr) gewinnen die Kosten der Energieversorgung noch stärker an Bedeutung. Der Umbau der Infrastruktur stellt dagegen eine eher kleine Größe im Vergleich zu den restlichen Kostenblöcken dar.

Abstract: Sensitivities to the cost assessment of various energy supply options for transport up to the year 2050

The project's objective is to shed more light on the total costs of the transformation towards a fully decarbonised transport sector for various energy scenarios and options in Germany by 2050. For this purpose, the costs for the energy supply and the production of road transport vehicles will be updated from four scenarios from the study "Determining an expert strategy for the energy supply of the transport sector up to 2050" in the form of sensitivity analyses. In road transport, where direct use of electricity is technically possible, the transformation to electrification is the most cost-effective energy supply option. PtG-CH₄ and PtL have similar costs in road transport, whereas the use of PtG-H₂ in fuel cell vehicles is associated with the highest costs. In marine transport, electrification is not a viable option and the costs of the different energy sources are close together. The costs for energy supply to the transport sector and for vehicle manufacture dominate the total costs both in the initial scenarios and in the sensitivity analyses. In the case of high mileage per vehicle (e.g. long-distance road transport), the costs of energy supply gain even more importance. The construction of the infrastructure, on the other hand, is a rather small size compared to the remaining cost blocks.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Zusammenfassung.....	11
Summary	12
1 Hintergrund und Ziele	13
2 Vorgehen	14
3 Aktualisierung der Fahrzeugkosten.....	15
3.1 Spezifische Kosten von Erdgas-/Methantanks.....	15
3.2 Spezifische Kosten von Fahrzeugbatterien	16
3.3 Spezifische Kosten von Brennstoffzellensystemen.....	17
3.4 Spezifische Kosten von Wasserstoffspeichern.....	19
3.5 Fahrzeugkosten – Straßennahverkehr	20
3.6 Fahrzeugkosten – Straßenfernverkehr	22
4 Aktualisierung der Energiebereitstellungskosten	24
4.1 Kostenannahmen für die PtG/PtL Kraftstoffe	24
4.2 Kostenannahmen für die fossilen Kraftstoffe	29
4.3 Kostenannahmen für die direkte Nutzung von elektrischem Strom	32
5 Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen.....	34
5.1 Gesamtergebnisse.....	34
5.2 Straßennahverkehr	35
5.3 Straßenfernverkehr.....	38
6 Schlussfolgerungen.....	42
A Tabellenanhang Szenarioannahmen	45
A.1 Komponentenkosten.....	45
A.2 Fahrzeugkosten	46
A.3 Kosten der Energiebereitstellung	49
B Tabellenanhang Ergebnisse.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Spezifische Kosten der Erdgas-/Methantanks in den Sensitivitätsbetrachtungen.....	16
Abbildung 2:	Spezifische Kosten der Batteriesysteme von Straßenfahrzeugen in €/kWh in den Sensitivitätsbetrachtungen.....	17
Abbildung 3:	Spezifische Kosten der Brennstoffzellensysteme von Straßenfahrzeugen in €/kW in den Sensitivitätsbetrachtungen	18
Abbildung 4:	Spezifische Kosten der Wasserstoffspeicher von Straßenfahrzeugen in €/kWh in den Sensitivitätsbetrachtungen.....	20
Abbildung 5:	Herstellungskosten neu zugelassener Pkw-mittel für verschiedene Antriebstypen im Ausgangsszenario UBA (2016) und den Sensitivitätsbetrachtungen mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050	21
Abbildung 6:	Herstellungskosten neu zugelassener Lkw zGG >12 t für verschiedene Antriebstypen im Ausgangsszenario (UBA 2016) und den Sensitivitätsbetrachtungen mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050	22
Abbildung 7:	Herstellungskosten neu zugelassener Fahrzeuge der Kategorie Lastzug/ Sattelzug im Ausgangsszenario UBA (2016) und den Sensitivitätsbetrachtungen mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050	23
Abbildung 8:	Literaturvergleich: Szenarien für PtL-Importkosten* bis zum Jahr 2050 in ct/kWh.....	25
Abbildung 9:	PtL-Importkosten* in ct/kWh – Entwicklung von 2020 bis 2050	27
Abbildung 10:	PtG-Importkosten* in ct/kWh – Entwicklung von 2020 bis 2050	28
Abbildung 11:	Kosten der Dieselpreispumpe bis zur Tankstelle in ct/kWh.....	30
Abbildung 12:	Kosten der Bereitstellung von Erdgas und Wasserstoff aus fossilen Quellen bis zur Tankstelle in ct/kWh.....	31
Abbildung 13:	Stromsystemkosten bis zur Ladeinfrastruktur in ct/kWh.....	32
Abbildung 14:	Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Kosten und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 differenziert nach Verkehrsträger (positiv: Mehrkosten)	34
Abbildung 15:	Straßennahverkehr: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 (positiv: Mehrkosten)	36
Abbildung 16:	Straßennahverkehr: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario in Fünfjahresschritten (positiv: Mehrkosten).....	38

Abbildung 17:	Straßenfernverkehr: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 (positiv: Mehrkosten)	39
Abbildung 18:	Straßenfernverkehr: Differenzkosten der Sensitivität mit hohen Fahrzeug- und Energiebereitstellungskosten im Vergleich zum Referenzszenario in Fünfjahresschritten (positiv: Mehrkosten)	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifische Komponentenkosten in den Ausgangsszenarien (UBA 2016) sowie in der Sensitivitätsbetrachtung mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050 (€).....	45
Tabelle 2:	Herstellungskosten neu zugelassener Pkw-mittel in den Ausgangsszenarien (UBA 2016) sowie in der Sensitivitätsbetrachtung mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050 (€)	46
Tabelle 3:	Herstellungskosten neu zugelassener Lkw >12 t zGG in den Ausgangsszenarien (UBA 2016) sowie in der Sensitivitätsbetrachtung mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050 (€)	47
Tabelle 4:	Herstellungskosten neu zugelassener Last- und Sattelzüge in den Ausgangsszenarien (UBA 2016) sowie in der Sensitivitätsbetrachtung mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050 (€)	48
Tabelle 5:	Kosten der Energiebereitstellung fossiler Energieträger bis zur Tankstelle – Entwicklung von 2020 bis 2050 in ct/kWh	49
Tabelle 6:	PtL- und PtG-Importkosten* in ct/kWh – Entwicklung von 2020 bis 2050	50
Tabelle 7:	Kosten der Energiebereitstellung strombasierter Energieträger bis zur Tankstelle in ct/kWh – Entwicklung von 2020 bis 2050 gemäß UBA (2016).....	51
Tabelle 8:	Kosten der Energiebereitstellung strombasierter Energieträger bis zur Tankstelle in ct/kWh – Sensitivität hohe Kraftstoffkosten.....	52
Tabelle 9:	Kosten der Energiebereitstellung strombasierter Energieträger bis zur Tankstelle in ct/kWh – Sensitivität niedrige Kraftstoffkosten.....	53
Tabelle 10:	Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Kosten und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 differenziert nach Verkehrsträger (Mrd. €)	54

Tabelle 11:	Straßennahverkehr: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Kosten und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 (Mrd. €).....	55
Tabelle 12:	Straßenfernverkehr: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Kosten und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 (Mrd. €).....	56

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (Battery Electric Vehicle)
BEV 150	Batterieelektrisches Fahrzeug (Reichweite: 150 km)
BEV 300	Batterieelektrisches Fahrzeug (Reichweite: 300 km)
CH4	Methan
CO2	Kohlenstoffdioxid
EE	Erneuerbare Energien
EV	Elektrisches Fahrzeug (Electric Vehicle)
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (Fuel Cell Electric Vehicle)
H2	Wasserstoff
HEV	Hybridfahrzeug
HDPI	Hochdruck-Direkteinspritzung (High Pressure Direct Injection)
ICEV	Verbrennungsmotorisches Fahrzeug (Internal Combustion Engine Vehicle)
ICEV-CH4	Verbrennungsmotorisches Fahrzeug (Methan)
ICEV-CNG	Verbrennungsmotorisches Fahrzeug (Erdgas)
ICEV-H2	Verbrennungsmotorisches Fahrzeug (Wasserstoff)
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
LNG	Verflüssigtes Erdgas (Liquid Natural Gas)
OC-GIV	Oberleitungs-Lkw (Overhead Catenary Grid-Integrated Vehicle)
PHEV	Plug-In-Hybrid-Fahrzeug (Plug-In Hybrid Electric Vehicle)
Pkw	Personenkraftwagen
PtG-CH4	Strombasiertes synthetisches Methan (Power-to-Gas Methan)
PtG-H2	Strombasierter synthetischer Wasserstoff (Power-to-Gas Wasserstoff)
PtL	Strombasierter Flüssigkraftstoff (Power-to-Liquid Kraftstoff)
REEV	Elektrofahrzeug mit Reichweitenerweiterung (Range Extended Electric Vehicle)
THG	Treibhausgas
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

Zusammenfassung

Wie die Studie „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“ (UBA 2016) zeigt, ist die Transformation von einem mineralölbasierten zu einem nachhaltigen Energieversorgungssystem des Verkehrs ohne THG-Freisetzung bei Vernachlässigung der Kosten durch vermiedenen Klimafolgeschäden mit gesellschaftlichen Zusatzkosten verbunden. Seit der Erarbeitung der genannten Studie wurden eine Reihe von wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit dem Fokus auf die Kosten der Erzeugung von stromgenerierten PtX-Kraftstoffen veröffentlicht. Weiterhin konnten in den letzten Jahren starke Kostendegressionen z. B. bei Fahrzeugbatterien und Brennstoffzellensystemen beobachtet werden. Das Ziel der vorliegenden Kurzstudie „Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050“ ist deshalb, die Datengrundlage und getroffenen Annahmen der Szenarien in UBA (2016) zu überprüfen und im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen in Hinblick auf die Kosten zu aktualisieren.

In dieser Studie werden Sensitivitätsbetrachtungen für die Szenarien mit der bevorzugten Nutzung der drei Energieversorgungsoptionen des Verkehrs mit synthetischen Kraftstoffen (PtL, PtG-CH₄, PtG-H₂) und der direkte Nutzung von Strom erarbeitet. Es werden die gesamtgesellschaftlichen Differenzkosten gegenüber einem überwiegend auf fossilen Kraftstoffen basierendem Referenzszenario bestimmt. Es werden jeweils zwei Sensitivitäten mit niedrigen und hohen Kostenannahmen erstellt, um den Unsicherheiten bei den Projektionen der spezifischen Kosten gerecht zu werden.

Konkret werden die Kosten der Fahrzeugherstellung aktualisiert, indem die spezifischen Kosten für bestimmte Komponenten wie Fahrzeugbatterien, Brennstoffzellensystemen oder Gastanks aktualisiert werden. Weiterhin werden die Kostenannahmen der Energiebereitstellung sowohl für die synthetischen Kraftstoffe (PtL, PtG-CH₄, PtG-H₂), direkt genutzten Strom als auch die fossilen Energieträger auf Basis aktueller Publikationen aktualisiert.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtung untermauern die in UBA (2016) ermittelten Ableitungen für den Kostenvergleich verschiedener Antriebs- und Energieträgeroptionen eines dekarbonisierten Verkehrssystems. Betrachtet man die Gesamtkosten für die Transformation des Verkehrssystems hin zu einem CO₂-emissionsfreien Sektor sowie die in einem CO₂-freien System langfristig anfallenden Kosten, liegen diese in den Sensitivitäten unter den Ausgangsszenarien. Szenarien mit einem Fokus auf der direkten Stromnutzung in batterieelektrischen und netzgebundenen Fahrzeugen schneiden bei den unterschiedlichen Kostensensitivitäten am günstigsten ab. Szenarien mit einem Fokus auf der Nutzung von Wasserstoff als Energieträger führen hingegen zu den höchsten Zusatzkosten.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Zusatzkosten zu einem Großteil durch die Kosten der Energiebereitstellung und teilweise der Fahrzeuge verursacht werden, die Kosten durch Tankstellen und Ladeinfrastruktur spielen dagegen eine geringere Rolle.

Die Betrachtung der Kosten in Fünfjahresscheiben macht deutlich, dass mit der Umstellung des Verkehrssystems auf die direktelektrische Nutzung zunächst höhere Systemkosten anfallen als bei anderen Minderungstechnologien. Je nach Kostenannahmen ist der direktelektrische Pfad jedoch bereits um das Jahr 2030 bzw. um das Jahr 2035 günstiger als die anderen untersuchten Entwicklungspfade. Klar ist allerdings auch, dass aufgrund der höheren Systemkosten politische Maßnahmen benötigt werden, den im Szenario E+ dargestellten Entwicklungspfad einzuschlagen. Besonders hoch fallen die anfänglichen Zusatzkosten im Vergleich zu den anderen betrachteten Energieversorgungsoptionen jedoch bei einer auf Wasserstoff basierenden Energieversorgung aus.

Summary

As the study "Determining an expert strategy for the energy supply of the transport sector up to 2050" (UBA 2016) shows, the transformation from a mineral oil-based to a sustainable energy supply system for transport without GHG release is associated with additional social costs if the costs for avoided climate damage are neglected. Since the study was carried out, a number of scientific publications have been published focusing on the costs of generating PtX fuels from electricity. Furthermore, strong cost degression has been observed in recent years, e.g. for vehicle batteries and fuel cell systems. The aim of the present short study "Sensitivities for assessing the costs of various energy supply options for transport up to the year 2050" is therefore to review the data basis and assumptions made in the scenarios UBA (2016) and to update them with regard to costs within the framework of sensitivity analyses.

In this study, sensitivity analyses for the scenarios with the preferred use of the three energy supply options of transport with synthetic fuels (PtL, PtG-CH₄, PtG-H₂) and the direct use of electricity are developed. The differential costs for society as a whole compared to a reference scenario based predominantly on fossil fuels are determined. Two sensitivities with low and high cost assumptions are calculated in order to do justice to the uncertainties in the projections of the specific costs.

Specifically, the costs of vehicle production are updated by updating the specific costs for certain components such as vehicle batteries, fuel cell systems or gas tanks. Furthermore, the cost assumptions for energy supply for synthetic fuels (PtL, PtG-CH₄, PtG-H₂), directly used electricity and fossil fuels are updated on the basis of recently published studies.

The results of the sensitivity analysis support the derivations determined in UBA (2016) for the cost comparison of different propulsion and energy carrier options of a decarbonised transport system. If one considers the total costs for the transformation of the transport system towards a CO₂-emission-free sector and the long-term costs incurred in a CO₂-free system, the sensitivities are lower than in the baseline scenarios. Scenarios with a focus on the direct use of electricity in battery-electric and grid-connected vehicles perform best in the various cost sensitivities. Scenarios with a focus on the use of hydrogen as an energy carrier, on the other hand, lead to the highest additional costs.

The results make it clear that the additional costs are largely caused by the costs of energy supply and partly by vehicles, whereas the costs of gas stations and charging infrastructure play a smaller role.

The analysis of the costs in five-year segments makes it clear that the conversion of the transport system to direct electrical use initially results in higher system costs than with other reduction technologies. Depending on cost assumptions, however, the direct-electric path is already cheaper around 2030 or 2035 than the other development paths examined. However, it is also clear that political measures are needed to follow the development path described in the electricity based scenario due to the higher system costs. The initial additional costs are, however, particularly high in comparison with the other considered energy supply options for a hydrogen-based energy supply.

1 Hintergrund und Ziele

Im Jahr 2016 hat das Umweltbundesamt (UBA) die vom Öko-Institut e.V. gemeinsam mit der INFRAS AG und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) erstellte Studie „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“ (UBA 2016) veröffentlicht.

Darin wurden verschiedene Antriebskonzepte und der Einsatz verschiedener Arten von Energieträgern mit dem Ziel der vollständigen Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis zum Jahr 2050 untersucht. Neben den zurzeit dominierenden Flüssigkraftstoffen wurden in der Studie elektrischer Strom, Methan und Wasserstoff, die alle aus erneuerbaren Energien hergestellt werden, als Energie-träger für den Verkehrssektor betrachtet. Diese verschiedenen Energieträgeroptionen wurden mittels vier Szenarien für die unterschiedlichen Verkehrsträger und Anwendungen in Bezug auf die volkswirtschaftlichen Kosten über den gesamten Zeitraum von 2010 – 2050 miteinander verglichen.

Dabei wurden in UBA (2016) die Kosten der Energiebereitstellung, der Fahrzeugherstellung und die Kosten für die Lade- und Tankinfrastruktur bis zum Jahr 2050 berücksichtigt. Die damit abgeleiteten Kosten wurden einem Szenario mit fossilen, hauptsächlich flüssigen Kraftstoffen gegenübergestellt um Differenzkosten zu bestimmen. In Hinblick auf die möglichen Kosten wurden seit der Erarbeitung der genannten Studie eine Reihe von wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit dem Fokus auf die Kosten der Erzeugung von stromgenerierten PtX-Kraftstoffen veröffentlicht (Pfennig et al. 2017, Frontier Economics (2018), Hobohm et al. 2018). Weiterhin basieren die Annahmen zu den Herstellungskosten der Fahrzeuge im Straßenverkehr in UBA (2016) auf Hülsmann et al. (2014) und sind somit erarbeitet worden, als die in den letzten Jahren beobachtete starke Kostendegression insbesondere bei den Fahrzeugbatterien, die in batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), Plug-In-Hybridfahrzeugen (PHEV), Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) und weiteren alternativen Antriebskonzepten zur Anwendung kommen, nicht absehbar war.

Das Ziel der vorliegenden Kurzstudie „Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050“ ist deshalb, die Datengrundlage und getroffenen Annahmen der Szenarien in UBA (2016) zu überprüfen und im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen in Hinblick auf die Kosten zu aktualisieren.

In **Kapitel 2** wird das gewählte Vorgehen kurz skizziert. **Kapitel 3** beschreibt aktualisierte Kostenannahmen einzelner Fahrzeugkomponenten und die daraus resultierenden Gesamtkosten der Fahrzeuge im Straßenverkehr am Beispiel eines Pkw mittlerer Größe und eines Fahrzeuges aus der Kategorie Last- und Sattelzug. Die Aktualisierung der Energiebereitstellungskosten für die synthetischen Kraftstoffe, die fossilen Kraftstoffe und für direkt genutzten Strom wird in **Kapitel 4** beschrieben.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen werden in **Kapitel 5** gezeigt und daraus in **Kapitel 6** abschließend Schlussfolgerungen gezogen.

2 Vorgehen

Das Vorgehen in der vorliegenden Studie entspricht im Wesentlichen der im Bericht „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“ (UBA 2016) beschriebenen Methodik und Berechnungslogik¹.

In UBA (2016) wurden die Kosten für vier Szenarien mit einem Fokus auf unterschiedliche Energieträgeroptionen hergeleitet. Die hinterlegte Fahrleistung und die Anzahl der Fahrzeuge unterscheiden sich dabei in den verschiedenen Szenarien nicht, im Gegensatz zu den Energieverbräuchen und genutzten Energieträgern. Die Szenarien sind

- ▶ Szenario Fl+: PtL-Flüssigkraftstoffe als zentrale THG-freie Energieträgeroption,
- ▶ Szenario E+: Elektrische Energie als zentrale THG-freie Energieträgeroption,
- ▶ Szenario CH₄+: PtG-CH₄ als zentrale THG-freie Energieträgeroption und
- ▶ Szenario H₂+: PtG-H₂ als zentrale THG-freie Energieträgeroption.

Um aktuelle Erkenntnisse in Bezug auf die Kosten der Energiebereitstellung und die Fahrzeugkomponenten für Fahrzeuge im Straßenverkehr zu berücksichtigen, werden diese im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen in der vorliegenden Studie angepasst.

Andere Größen wie die Verkehrsleistung der einzelnen Verkehrsträger, die Anzahl der Neuzulassungen und des Bestands der Fahrzeuge, der Effizienzentwicklung der einzelnen Technologien bleiben in dieser Studie gegenüber den Ausgangsszenarien unverändert. Auch die Kosten für die Lade- und Tankinfrastruktur werden hier nicht geändert, da sie volkswirtschaftlich und über den gesamten Zeitraum betrachtet von untergeordneter Bedeutung sind.

Aufgrund der weiterhin bestehenden Unsicherheit möglicher Kostenentwicklungen werden in dieser Kurzstudie sowohl bei den Kosten der Energiebereitstellung als auch bei den Herstellungskosten der Straßenfahrzeuge jeweils eine niedrige und eine hohe Kostenentwicklung abgeleitet und in zwei Sensitivitätsbetrachtungen kombiniert. Die erste Sensitivitätsbetrachtung für die vier oben genannten Szenarien zieht die höheren Fahrzeugkosten und die höheren Energiebereitstellungskosten heran und stellt für die aktualisierten Kostensätze die obere Grenze der Kosten der Transformation unter den gewählten Annahmen dar. Die zweite Sensitivitätsbetrachtung setzt dagegen auf die niedrigeren Fahrzeug- und Energiekosten auf und bildet eine untere Grenze der Kosten ab.

Abweichend von UBA (2016) werden in den Sensitivitätsbetrachtungen die Szenarien nicht ab dem Jahr 2010, sondern für den Zeitraum 2020 bis 2050 ausgewertet, da es nicht sinnvoll ist, in den Szenarien von einer unterschiedlichen Bestandsentwicklung auszugehen, obwohl die reale Entwicklung bis zum Jahr 2018 bekannt ist. Dies bedeutet, dass im Gegensatz zu den Ausgangsszenarien in den Sensitivitätsbetrachtungen die Kosten bis zum Jahr 2020 in allen Szenarien identisch sind und sich für diesen Zeitraum damit keine Differenzkosten ergeben.

¹ Siehe Kapitel 1.2 und 1.3 in UBA (2016)

3 Aktualisierung der Fahrzeugkosten

Die in UBA (2016) getroffenen Annahmen bezüglich der Herstellungskosten der Fahrzeuge im Straßenverkehr, wie beispielsweise Pkw, leichte Nutzfahrzeuge (LNF), Busse und Lkw, basieren im Wesentlichen auf einer älteren Version der Technologiedatenbasis des Öko-Instituts, welche im Working Paper „Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050“ (Hülsmann et al. 2014) beschrieben ist. Neben Kosten für Effizienzmaßnahmen für verbrennungsmotorische Fahrzeuge und Fahrzeuge mit alternativen Antrieben spielen die Kostenannahmen neuer Fahrzeugkomponenten eine wesentliche Rolle für die gesamten Herstellungskosten. Diese Kosten und insbesondere deren kurzfristige weitere Entwicklung sind mit Unsicherheiten verbunden, da sie beispielweise von der technologischen Entwicklung, den Rohstoffpreisen und der durchlaufenen Lernkurve beeinflusst werden. Zudem wurden in Hülsmann et al. (2014) teilweise unterschiedliche Kostenannahmen und eine zeitlich verschobene Kostendegression für Pkw und schwere Nutzfahrzeuge getroffen, da sich zum damaligen Zeitpunkt im Pkw-Bereich eine wesentlich dynamischere Entwicklung als bei den schweren Nutzfahrzeugen abzeichnete.

Um diesen Unsicherheiten gerecht zu werden und die Marktentwicklung und neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen, werden deshalb in der vorliegenden Studie Sensitivitätsbetrachtungen in Bezug auf die Szenarien in UBA (2016) zu den Fahrzeugkosten durchgeführt. Dafür werden die Kostenannahmen neuer Fahrzeugkomponenten und deren Fortschreibung bis zum Jahr 2050 aktualisiert; die Kostenannahmen von sonstigen Effizienzmaßnahmen werden hingegen nicht verändert. Um eine Anschlussfähigkeit an die Ergebnisse aus UBA (2016) zu gewährleisten, werden die Fahrzeugkonfigurationen (z. B. die Batteriegröße der batterieelektrischen Fahrzeuge oder das Hybridkonzept bei den Oberleitungs-Lkw) ebenfalls nicht verändert.

3.1 Spezifische Kosten von Methantanks

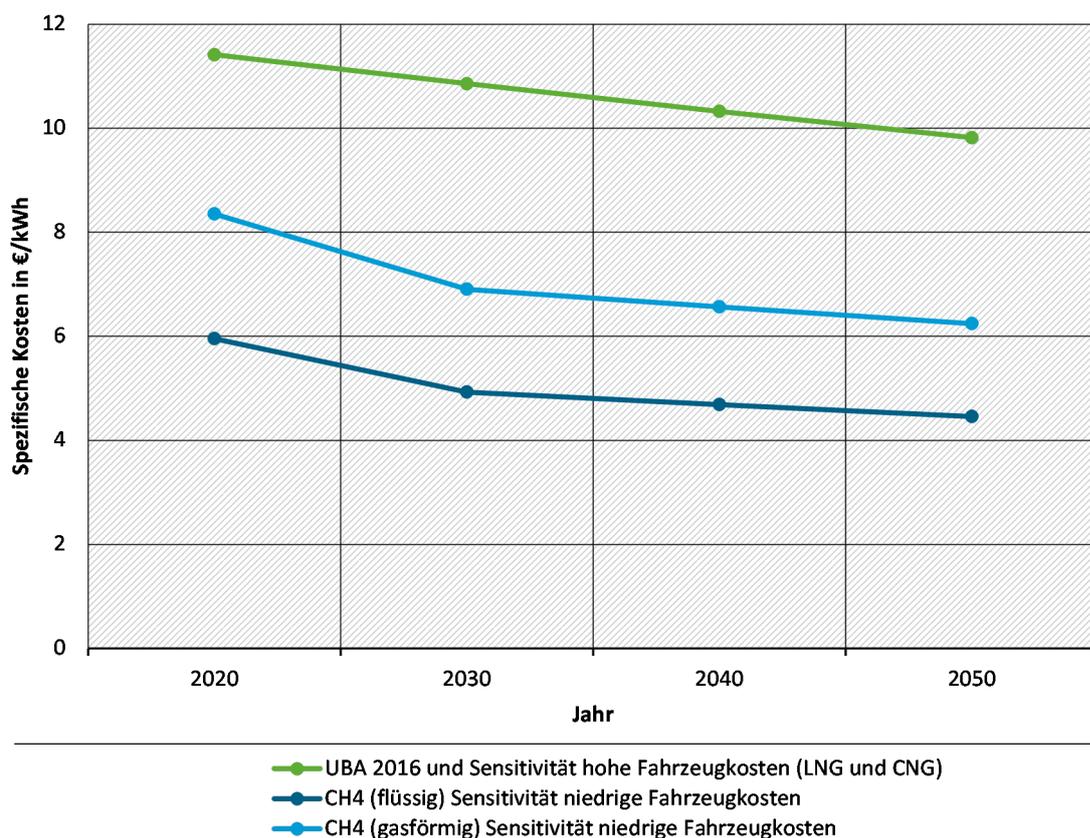
Die spezifischen Kosten für die Methanspeicher sind das CH₄+ Szenario relevant. Bei den Pkw und LNF wurden in UBA (2016) Kosten für den Methantank in Höhe von 2.000 € (Pkw klein), 2.525 € (Pkw mittel) und 3.050 € (Pkw groß und LNF) im Jahr 2010 unterstellt, bei den schweren Nutzfahrzeugen wurden in den Ausgangsszenarien spezifische Kosten im Jahr 2010 in Höhe von 12 € pro kWh Speicherkapazität veranschlagt. In beiden Fällen wurde ab dem Jahr 2010 von einer jährlichen Kostendegression von 0,5 % ausgegangen. Bei den schweren Nutzfahrzeugen wurde dabei nicht zwischen den spezifischen Kosten für Druckgasspeicher für gasförmiges Erdgas bzw. Methan und kryogene Speicher für flüssiges Erdgas bzw. Methan unterschieden. Während bei den Pkw, den leichten Nutzfahrzeugen, den Lkw im Nahverkehr und den Linienbussen davon ausgegangen wurde, dass diese mit gasförmigem Methan betrieben werden, wurde für die Fahrzeuge im Straßenfernverkehr (Lastzug/Sattelzug, Reisebus) von einer flüssigen Speicherung ausgegangen.

Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung getroffenen Annahmen. Der hohe Preispfad entspricht der Kostenannahme aus den Ausgangsszenarien in UBA (2016). Der niedrige Preispfad basiert auf Angaben zu spezifischen Komponentenkosten in Moultak et al. (2017) wobei für den Zeitraum zwischen den Jahren 2030 und 2050 eine weitere jährliche Kostendegression von 0,5 % unterstellt wird.

Die spezifischen Kosten für Methantanks liegen demzufolge in der Sensitivität mit niedrigen Fahrzeugkosten bei den schweren Nutzfahrzeugen rund 50 % (flüssig) bzw. zwischen 27 % bis 36 % (gasförmig) unter den Kosten der Sensitivität mit hohen Fahrzeugkosten bzw. den Kosten im Ausgangsszenario.

Bei den Pkw wird die jeweilige Kostendegression auf die oben genannten absoluten Kosten der Tanks veranschlagt.

Abbildung 1: Spezifische Kosten der Erdgas-/Methantanks in den Sensitivitätsbetrachtungen



Quelle: Eigene Annahmen auf Basis von Moultak et al. (2017)

3.2 Spezifische Kosten von Fahrzeugbatterien

Die Annahmen hinsichtlich der Batteriekostenentwicklung haben einen großen Einfluss auf die Kosten in allen Szenarien. Dies liegt an der unterstellten Bestandsentwicklung im Pkw-Bereich, bei der bspw. auch im FI+ Szenario batterieelektrische Pkw in den Markt kommen. Zudem sind konventionelle Fahrzeuge zunehmend hybridisiert und verfügen über Batteriespeicher. Die Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) im H₂+ Szenario sind ebenfalls mit Batteriespeichern ausgestattet. Den größten Einfluss besitzen die Annahmen hinsichtlich der Batteriekosten jedoch auf das E+ Szenario, da dort mehr batterieelektrische Fahrzeuge und Fahrzeuge mit größeren Batteriespeichern in den Fahrzeugbestand kommen. In der Sensitivitätsbetrachtung der Fahrzeugkosten werden lediglich die Annahmen der spezifischen Batteriekosten aktualisiert, die Annahmen zu Batterieeigenschaften wie Energiedichte oder Entladetiefe bleiben unverändert um eine Anschlussfähigkeit an die Ausgangsszenarien zu wahren.

In den vergangenen Jahren sind die Herstellungskosten von Batteriezellen stärker gesunken als von Hülsmann et al. (2014) unterstellt. Aus diesem Grund werden in den Sensitivitätsbetrachtungen die Annahmen zur Batteriekostenentwicklung aktualisiert. Die Grundlage für die aktualisierten Annahmen stellt die Studie „Assessing the impacts of selected options for regulating CO₂ emissions from new passenger cars and vans after 2020“ (Hill et al. 2018) dar. Diese Studie nimmt eine Analyse möglicher Kostenentwicklungen von Batterien vor und ist die

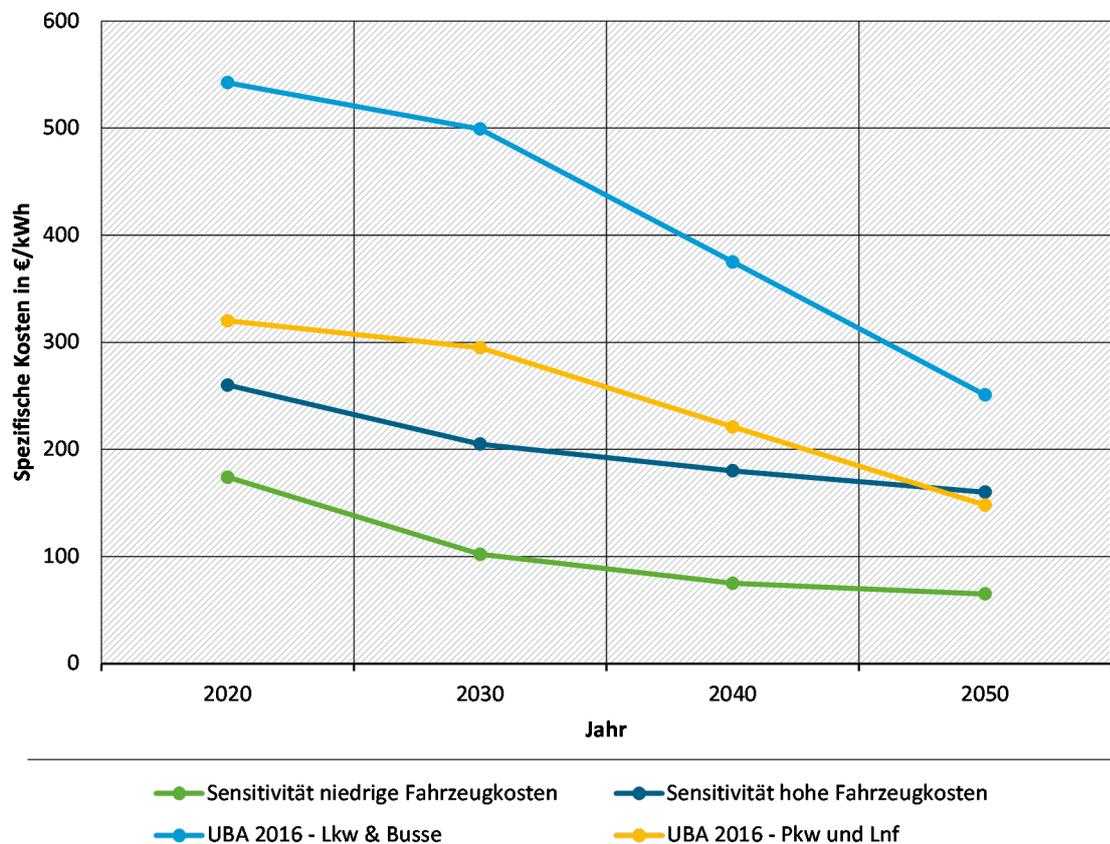
Grundlage für das Impact-Assesment für die Einführung der europäischen CO₂-Flottengrenzwerte darstellt.

Im Gegensatz zu den Szenarien in UBA (2016) wird in den Sensitivitätsbetrachtungen nicht mehr zwischen Batteriekosten für Pkw und schwere Nutzfahrzeuge unterschieden.

Abbildung 2 zeigt die Kostenannahmen aus UBA (2016) und die Annahmen in den Sensitivitätsbetrachtungen. Bei den Pkw und LNF liegen die spezifischen Batteriekosten in den Sensitivitätsbetrachtungen mit niedrigen Fahrzeugkosten 2040 um 66 % unter den ursprünglichen Kostenannahmen. Im Jahr 2050 beträgt die Abweichung dann nur noch -56 %. Bei den Lkw und Bussen sind die Kosten um mehr als 70 % niedriger.

In den Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen Fahrzeugkosten sind die Abweichungen etwas weniger stark ausgeprägt. Bei den Pkw und LNF liegen sie bis zum Jahr 2040 zwischen 20 % und 30 % darunter, im Jahr 2050 hingegen sogar leicht über den Annahmen der ursprünglichen Szenarien in UBA (2016). Bei den Lkw und Bussen liegen die Annahmen in diesem Fall zeitweilig bis zu 60 % unter den ursprünglichen Annahmen.

Abbildung 2: Spezifische Kosten der Batteriesysteme von Straßenfahrzeugen in €/kWh in den Sensitivitätsbetrachtungen



Quelle: Eigene Annahmen auf Basis von Hill et al. (2018)

3.3 Spezifische Kosten von Brennstoffzellensystemen

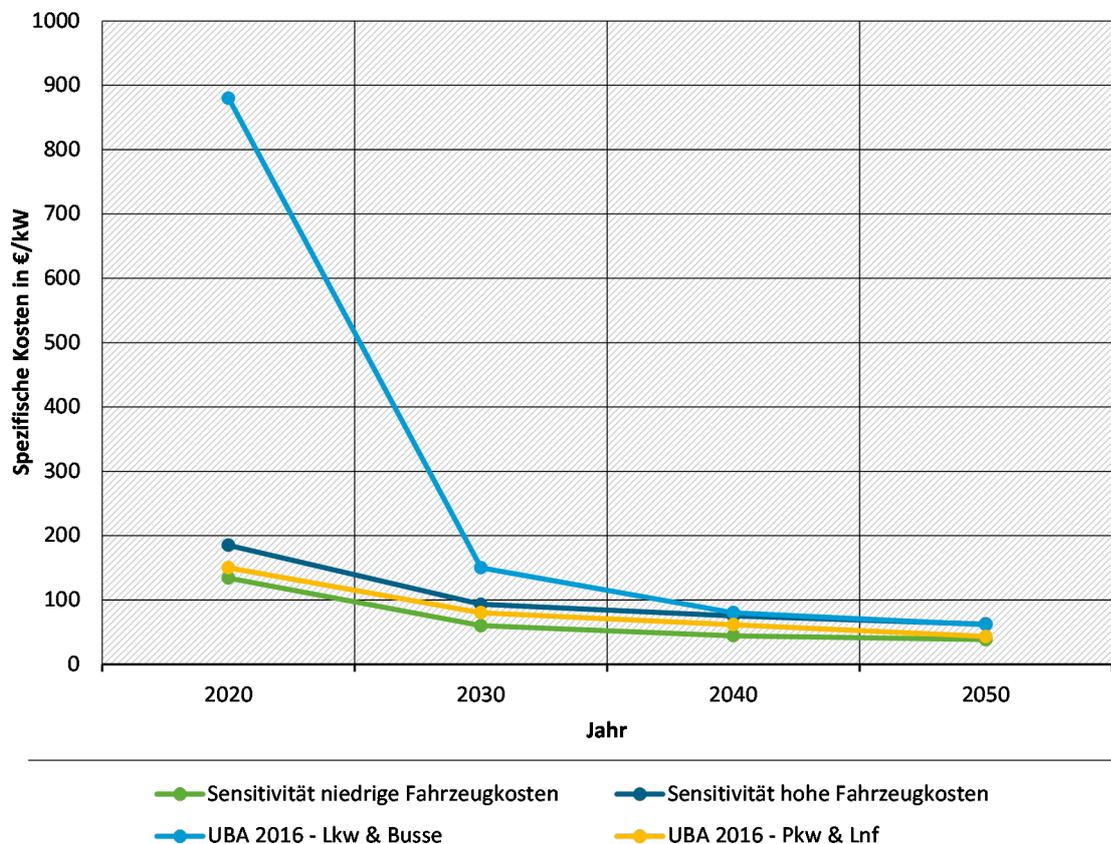
Die Aktualisierung der Annahmen zu der Kostenentwicklung von Brennstoffzellensystemen in FCEV wirkt sich auf die Sensitivitätsbetrachtungen zum H₂+-Szenario aus. Während in UBA (2016) die konservative Annahme getroffen wurde, dass die Kostendegression der Brennstoffzellen bei den Lkw und Bussen im Vergleich zu den Pkw um eine Dekade verzögert

stattfindet, wird in den Sensitivitäten nicht weiter zwischen den Fahrzeugklassen unterschieden. Dadurch ergeben sich insbesondere in den Anfangsjahren bei den Lkw und Bussen starke Abweichungen der spezifischen Kosten in den Sensitivitätsbetrachtungen gegenüber dem Ausgangsszenario.

In der Aktualisierung der Fahrzeugkosten werden lediglich die Annahmen der spezifischen Kosten aktualisiert, die Annahmen zur Fahrzeugkonfiguration, wie die installierte Leistung des Brennstoffzellensystems und die Fahrzeugreichweite, bleiben unverändert. In den Sensitivitätsbetrachtungen werden bis zum Jahr 2030 die spezifischen Kosten für Brennstoffzellensysteme aus Hill et al. (2016) herangezogen und in Anlehnung an die Kostenentwicklung bei den Batterien extrapoliert. Die niedrige Kostenentwicklung basiert auf den Annahmen zum FCEV Extreme Szenario, die hohe Entwicklung auf dem Mixed EVx-Szenario.

Der in UBA (2016) unterstellte Pfad der Kosten bei den Pkw liegt zwischen der Sensitivität mit hohen und niedrigen Kosten. Bei den Lkw und Bussen ergeben sich insbesondere im Zeitraum von 2020 bis 2030 starke Veränderungen der Fahrzeugkosten. Ab dem Jahr 2040 ähnelt die Kostenentwicklung in der Sensitivität mit hohen Fahrzeugkosten den Annahmen in den ursprünglichen Szenarien.

Abbildung 3: Spezifische Kosten der Brennstoffzellensysteme von Straßenfahrzeugen in €/kW in den Sensitivitätsbetrachtungen



Quelle: Eigene Annahmen auf Basis von Hill et al. (2016)

Ähnliche Kostenannahmen wie in der Sensitivität zeigen sich auch in einem von Wolfram und Lutsey (2016) durchgeführtem Literaturreview. Bei hohen Produktionsvolumina (1 Million produzierte Brennstoffzellensysteme) werden darin spezifische Kosten für Brennstoffzellensysteme zwischen 28 und 83 € pro kW Leistung aufgeführt, wobei die meisten Studien bei

hohen Produktionsvolumina von Kosten unter 50 € pro kW ausgehen. Die Kostenannahmen der hinterlegten Sensitivitäten liegen mit 38 bis 62 € pro kW somit in dem von der Literaturrecherche aufgezeigten Kostenpotenzial von Brennstoffzellensystemen.

3.4 Spezifische Kosten von Wasserstoffspeichern

Eine Aktualisierung der spezifischen Kosten für Wasserstofftanks in den Sensitivitätsbetrachtungen führt zu veränderten Fahrzeugkosten der FCEV. In den Ausgangsszenarien wurde zwischen den Kosten für Tanks in Pkw und leichten Nutzfahrzeugen sowie schweren Nutzfahrzeugen unterschieden. Die Kosten liegen bei den schweren Nutzfahrzeugen im Jahr 2020 etwa doppelt so hoch wie bei den Pkw, zudem wurde bei den schweren Nutzfahrzeugen von einer geringeren Kostendegression bis zum Jahr 2050 ausgegangen (Hülsmann et al. 2014).

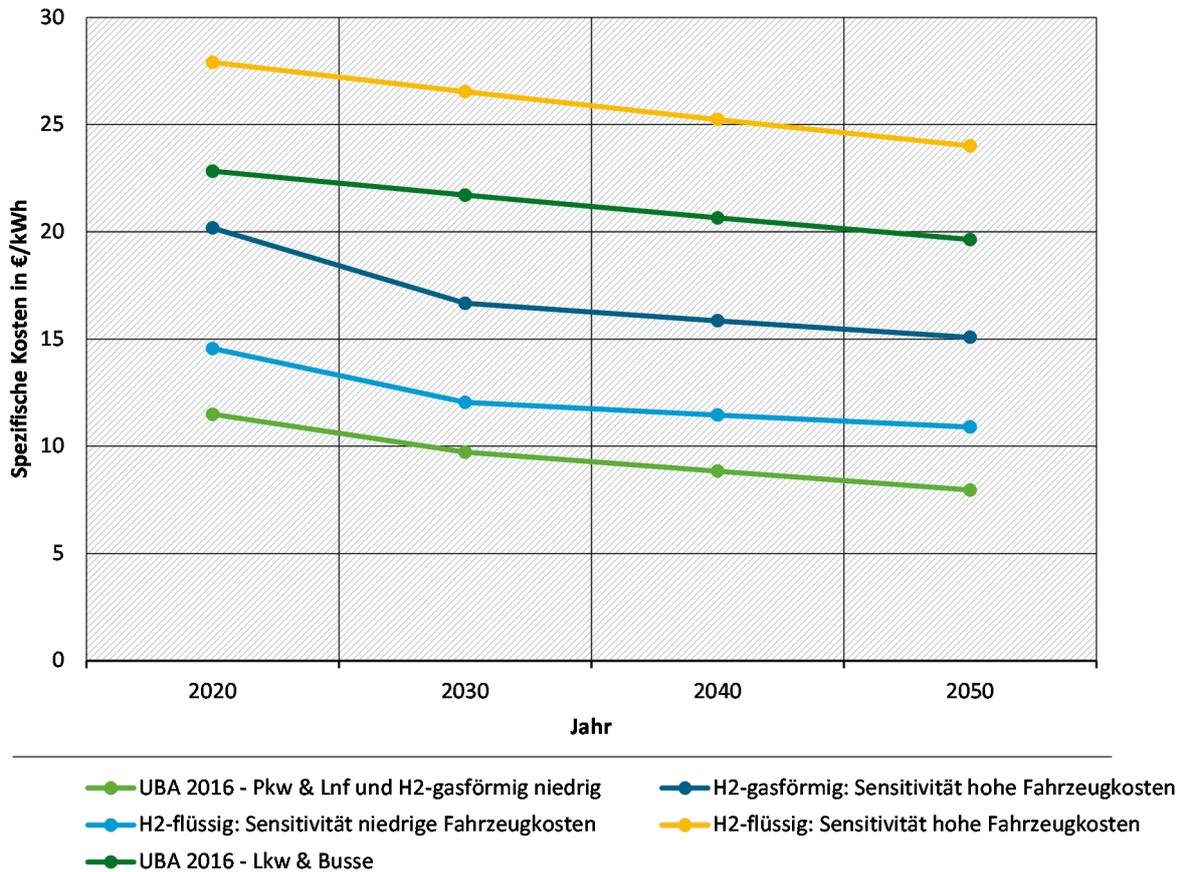
Während in den Szenarien bei Pkw, leichten Nutzfahrzeugen und Lkw im Nahverkehr eine gasförmige Speicherung unterstellt wird, wird für Sattel- und Lastzüge sowie Reisebusse von einer tiefkalten Speicherung von Flüssigwasserstoff ausgegangen. In den Sensitivitätsbetrachtungen wird für die Kostenannahmen daher zwischen den Arten des Speichers (gasförmig/flüssig) differenziert.

Wolfram und Lutsey (2016) unterstellen für einen Tank der Größe von 3,3 kg gasförmigen Wasserstoffs im Jahr 2030 Kosten in Höhe von 1.600 €, was spezifischen Kosten in Höhe von rund 15 €/kWh entspricht. In Moultak et al. (2017) werden im Jahr 2030 spezifische Kosten in Höhe von 19 \$ je kWh (rund 17 €/kWh) für die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff veranschlagt. In einer Monte Carlo Analyse kommen James et al. (2016) hingegen zu dem Ergebnis, dass die Kosten eines Tanksystems zwischen 14 und 16,5 \$/kWh (12,30 bzw. 14,40 €/kWh) liegen dürften. Die Kostenannahmen in UBA (2016) für Pkw sind demzufolge bereits sehr niedrig und werden in der Sensitivität mit niedrigen Fahrzeugkosten beibehalten. Diese sinken von 11,50 €/kWh im Jahr 2020 auf 8 €/kWh im Jahr 2050. Der Kostenpfad für die Sensitivität mit hohen Fahrzeugkosten setzt hingegen auf Moultak et al. (2017) auf, wobei ab dem Jahr 2030 eine jährliche Kostendegression von 0,5 % unterstellt wird.

Die Kostenannahme für die kryogene Wasserstoffspeicherung wird anhand der Kosten von Erdgastanks (flüssig) abgeschätzt. Dabei wird die geringere volumetrische Energiedichte von flüssigem Wasserstoff (2,5 kWh/l) im Vergleich zu flüssigem Erdgas (6,1 kWh/l) und das dadurch benötigte größere Volumen der Tanks durch einen Skalierungsfaktor von 2,4 berücksichtigt. Die Kosteneffekte durch unterschiedliche Materialien bei der kryogenen Speicherung von Wasserstoff und Erdgas bleiben dabei unberücksichtigt. Diese grobe Abschätzung ist mit einer hohen Unsicherheit behaftet, die sich in der großen Spannweite zwischen den beiden Sensitivitätsbetrachtungen widerspiegelt.

Die sich daraus ergebenden Annahmen für die Sensitivitätsbetrachtungen und die Annahmen aus den Ausgangsszenarien sind in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt. Für die Lkw im Nahverkehr ergeben sich daraus um etwa ein Viertel (Sensitivität hohe Fahrzeugkosten) bzw. weniger als halb so hohe (Sensitivität niedrige Fahrzeugkosten) spezifische Kosten für die Wasserstoffspeicherung. Für Lkw im Fernverkehr liegen die spezifischen Kosten der Wasserstoffspeicherung in den Sensitivitätsbetrachtungen um etwa 20 % (Sensitivität hohe Fahrzeugkosten) über bzw. um bis 45 % (Sensitivität niedrige Fahrzeugkosten) unter den Ausgangsszenarien. Bei den Pkw entspricht der niedrige Kostenpfad dem Ausgangsszenario, beim hohen Kostenpfad sind die spezifischen Kosten mit bis zu 90 % über dem Ausgangsszenario angenommen.

Abbildung 4: Spezifische Kosten der Wasserstoffspeicher von Straßenfahrzeugen in €/kWh in den Sensitivitätsbetrachtungen



Quelle: Eigene Annahmen auf Basis von Moultak et al. (2017)

3.5 Fahrzeugkosten – Straßennahverkehr

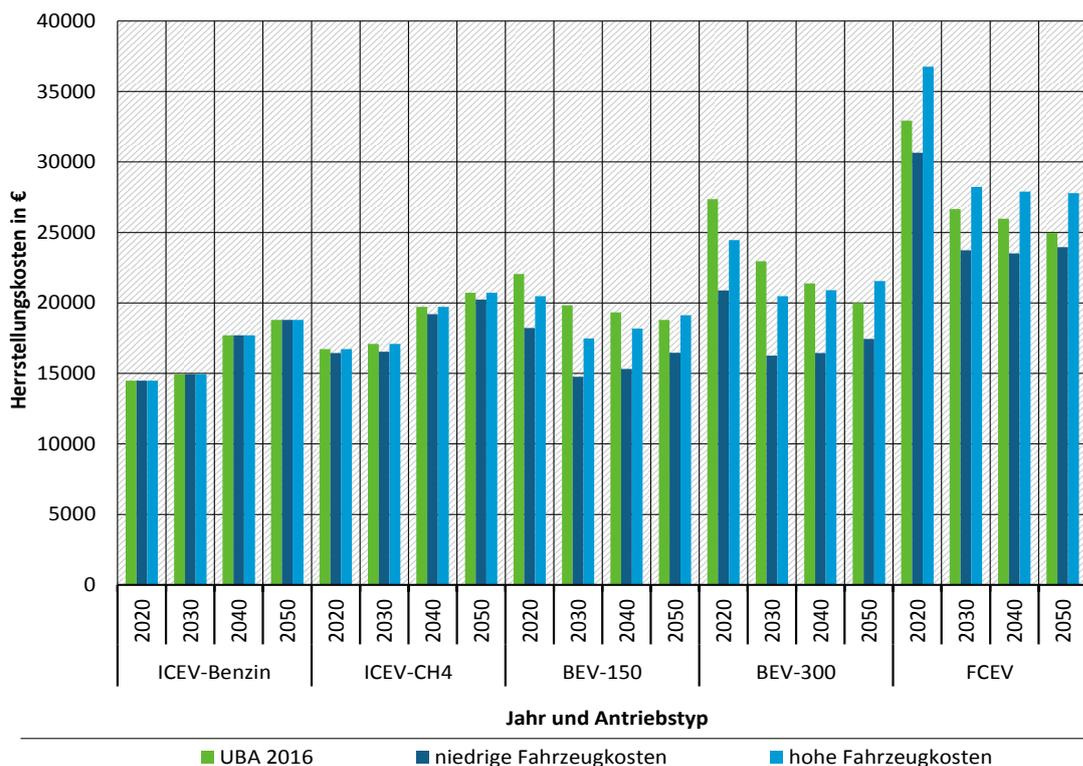
Die in Kapitel 3.1 bis 3.4 beschriebenen Aktualisierungen der Kostenannahmen im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung führen zu einer Veränderung der Fahrzeugkosten im Vergleich zu den Ausgangsszenarien. Zu den Fahrzeugen im Straßennahverkehr gehören neben den Pkw auch die leichten Nutzfahrzeuge und die Lkw mit Ausnahme der Last- und Sattelzüge. Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der Herstellungskosten für das Beispiel eines Pkw-mittel in den Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Fahrzeugkosten im Vergleich zu den Kosten in den Ausgangsszenarien. Die Herstellungskosten aller Antriebstypen sind in Tabelle 2 im Anhang aufgeführt.

Die dargestellte Kostenentwicklung ergibt sich zum einen aus dem Einsatz von Effizienztechnologien, die sowohl bei den verbrennungsmotorischen Fahrzeugen, als auch bei den Fahrzeugen mit alternativen Antrieben zu einer höheren Energieeffizienz führen und mit Zusatzkosten verbunden sind (Hülsmann et al. 2014). Dem entgegen steht die oben beschriebene Kostendegression einzelner Komponenten bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben wie ICEV-CNG, BEV, FCEV und Hybridkonzepte (REEV, PHEV und HEV). Dabei überwiegt bei einigen Antriebskonzepten die Kostensteigerung der nicht antriebsspezifischen Effizienztechnologien die Kostendegression der „neuen“ Antriebskomponenten sowie Energiespeicher, die gemäß den Kostenannahmen (Abschnitte 3.1 bis 3.4) zwischen 2020 und 2030 starke Kostendegressionen erfahren

In den beiden Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Fahrzeugkosten ist die Herstellung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben im Jahr 2020 mit Zusatzkosten im Vergleich zu einem ICEV-Benzin verbunden. So ist die Herstellung eines mittleren ICEV-CH₄ Pkw mit im Vergleich rund 15 % höheren Kosten verbunden. Die Herstellung eines BEV-150 führt zu 25 % (niedrig) bzw. rund 40 % (hoch), die eines BEV-300 zu knapp 50 % bzw. rund 70 % höheren Kosten. FCEV haben im Jahr 2020 mehr als doppelt so hohen Kosten wie ein ICEV-Benzin. Diese Kostenunterschiede nehmen mit der Zeit jedoch deutlich ab. Im Jahr 2050 liegen die ICEV-CH₄ nur noch um weniger als 10 % über den Kosten eines ICEV-Benzin; FCEV weisen dann je nach Sensitivität noch Mehrkosten von rund 30 % bzw. rund 50 % auf. Bei den BEV nehmen die Kosten am stärksten ab, so dass nur in der Sensitivität mit hohen Kosten Zusatzkosten im Vergleich zum ICEV-Benzin in Höhe von 2 % (BEV-150) und 15 % (BEV-300) entstehen. In der Sensitivität mit niedrigen Kosten liegen die Herstellungskosten eines BEV-150 12 % und die eines BEV-300 7 % unter denen eines mittleren Pkw mit Ottomotor. Schon 2030 können BEV-150 ungefähr das Kostenniveau von ICEV-Benzin erreichen.

Im Vergleich zu den Herstellungskosten in den Ausgangsszenarien treten aufgrund der aktualisierten Kostenannahmen für neue Technologien lediglich bei den BEV und FCEV entscheidende Unterschiede auf. Bei den BEV sind die Kosten in beiden Sensitivitätsbetrachtungen bis zum Jahr 2040 niedriger als in den Ausgangsszenarien. Lediglich in den Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen Fahrzeugkosten übertreffen die Kosten im Jahr 2050 diejenigen aus UBA (2016). Im Gegensatz dazu liegen die Kosten des FCEV in der Sensitivität mit niedrigen Kosten unter und in der Sensitivität mit hohen Fahrzeugkosten über den Werten des Ausgangsszenarios (Abbildung 5).

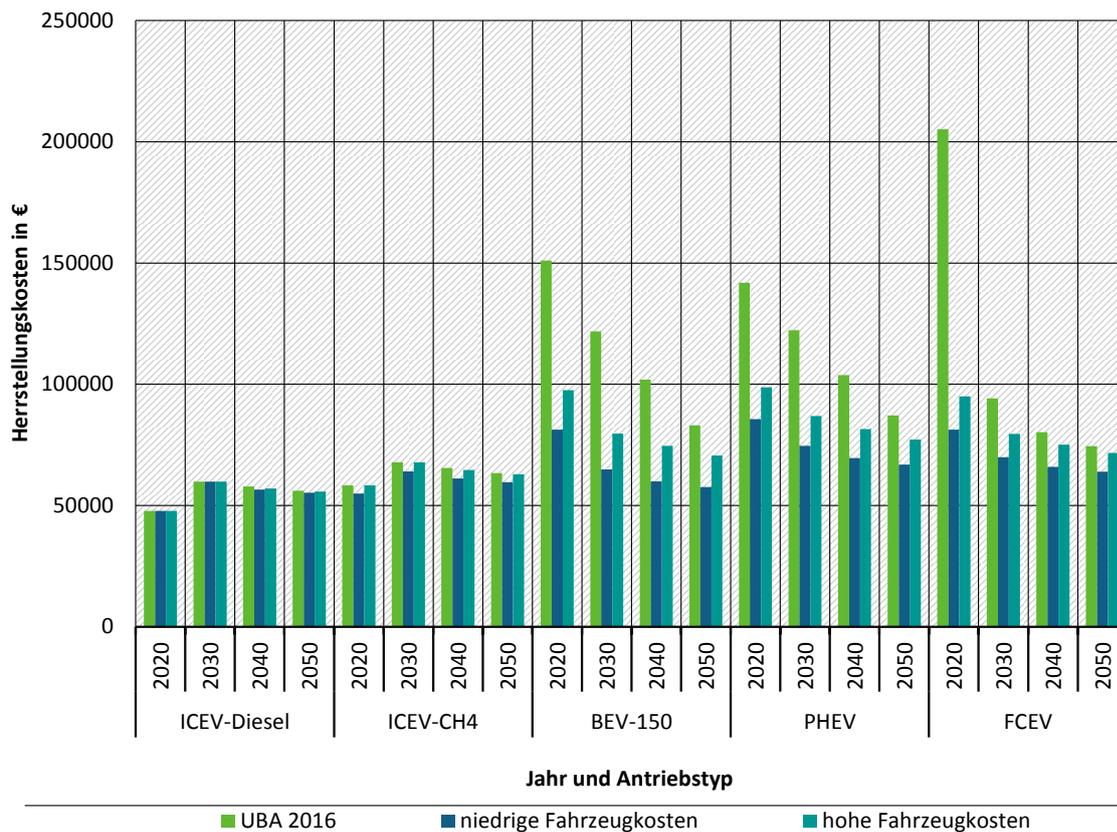
Abbildung 5: Herstellungskosten neu zugelassener Pkw-mittel für verschiedene Antriebstypen im Ausgangsszenario UBA (2016) und den Sensitivitätsbetrachtungen mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

Im Vergleich zu den Pkw wirkt sich die Aktualisierung der Kostenkomponenten bei den Lkw in den Sensitivitätsbetrachtungen, insbesondere in den Anfangsjahren bis einschließlich 2030, wesentlich stärker aus (Abbildung 6). Die Kostenannahmen in den Sensitivitätsbetrachtungen liegen stets unter den Annahmen in UBA (2016). Bei den BEV und PHEV wirken sich die neuen Kostenannahmen bis zum Jahr 2050 deutlich aus, während sich bei den FCEV die Fahrzeugkosten ab dem Jahr 2040 in der Sensitivität mit hohen Fahrzeugkosten nicht mehr wesentlich von den Annahmen in UBA (2016) unterscheiden. In den Sensitivitätsbetrachtungen werden die Zusatzkosten der Fahrzeuganschaffung für alternative Antriebskonzepte dementsprechend niedriger ausfallen, als in den Ausgangsszenarien.

Abbildung 6: Herstellungskosten neu zugelassener Lkw zGG >12 t für verschiedene Antriebstypen im Ausgangsszenario (UBA 2016) und den Sensitivitätsbetrachtungen mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

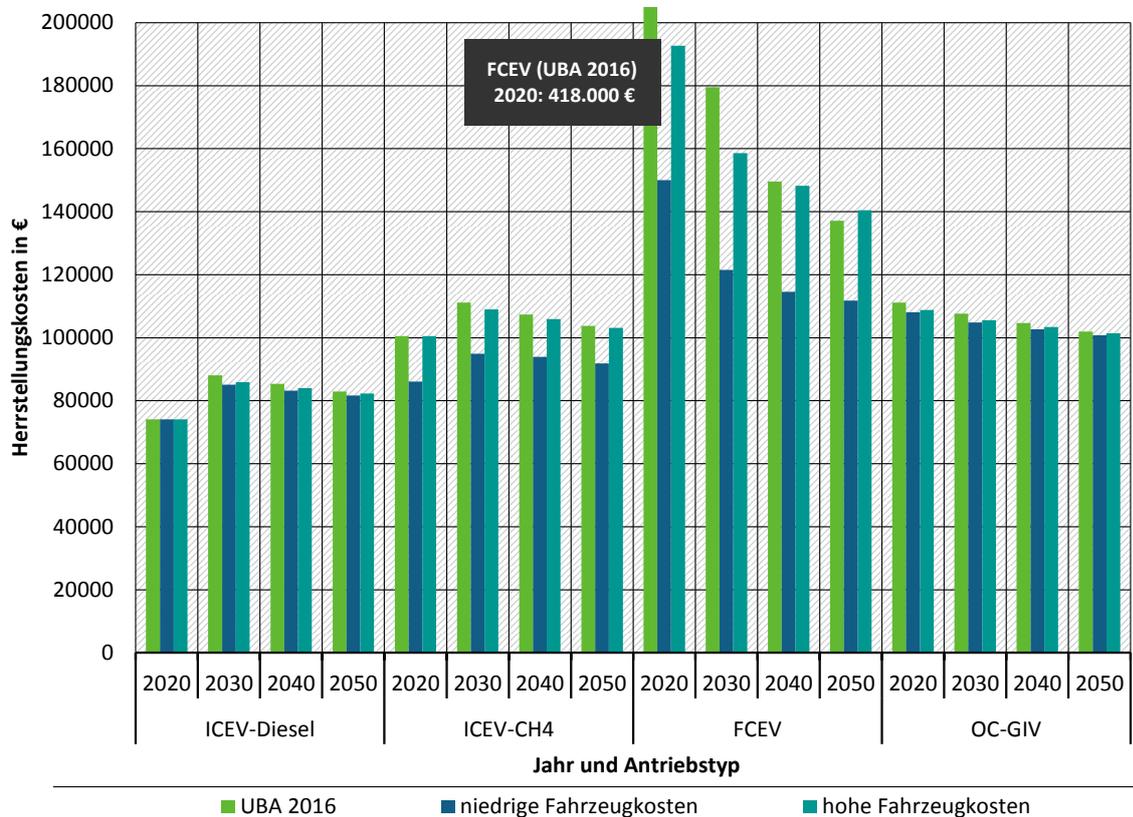
3.6 Fahrzeugkosten – Straßenfernverkehr

Die veränderten Kostenannahmen im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung führen auch bei den Lkw im Straßenfernverkehr zu einer deutlichen Veränderung der Fahrzeugkosten im Vergleich zu den Ausgangsszenarien. Zu den Fahrzeugen im Straßenfernverkehr gehören neben den Last- und Sattelzügen auch die Reisebusse. Abbildung 7 zeigt dies am Beispiel der Last- und Sattelzüge. Die Fahrzeugkosten der Dieselfahrzeuge steigen aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Effizienzmaßnahmen bis zum Jahr 2050 an. Dabei sind die Fahrzeuge ab dem Jahr 2030 mit einem Hybridantrieb ausgestattet, welcher zu stärker steigenden Kosten führt. Zwischen den Ausgangsszenarien aus UBA (2016) und den Sensitivitätsbetrachtungen gibt es

für die ICEV-Lkw allerdings nur kleine Unterschiede, welche sich alleine aus den Annahmen der spezifischen Batteriekosten ergeben.

Die Aktualisierung der spezifischen Kosten für den CH₄-Tank (flüssig) führt bei den Methanfahrzeugen in der Sensitivität mit niedrigen Fahrzeugkosten zu einer Reduktion der Fahrzeugmehrkosten gegenüber einem Dieselfahrzeug im Jahr 2020 von rund 26.000 € (UBA 2016) auf 12.000 € (Sensitivität niedrige Fahrzeugkosten). Besonders stark wirkt sich die Aktualisierung auf die Brennstoffzellenfahrzeuge aus. In Hülsmann et al. (2014) wird für die spezifischen Kosten der Brennstoffzellensysteme noch von einer um eine Dekade verschobenen Preisentwicklung gegenüber den Pkw ausgegangen. Die veränderten Annahmen wirken sich besonders stark bis zum Jahr 2030 aus. Ab dem Jahr 2040 sind die Kosten der FCEV in der Sensitivität mit hohen Fahrzeugkosten vergleichbar mit den Ausgangsszenarien. In der Sensitivität mit niedrigen Fahrzeugkosten liegen die Herstellungskosten jedoch auch langfristig um bis zu 25 % unter den Kosten in UBA (2016). Bei den Oberleitungs-Lkw (OC-GIV) gibt es in den Sensitivitätsbetrachtungen nur kleine Abweichungen gegenüber UBA (2016).

Abbildung 7: Herstellungskosten neu zugelassener Fahrzeuge der Kategorie Lastzug/ Sattelzug im Ausgangsszenario UBA (2016) und den Sensitivitätsbetrachtungen mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

4 Aktualisierung der Energiebereitstellungskosten

Bei der Erstellung der ursprünglichen Studie UBA (2016) stand die Diskussion um die strombasierten Energieträger PtG-CH₄ und PtL noch am Anfang. Wenige Studien zu diesen Themen existierten, so dass damals selbst Kosten für die strombasierten Energieträger über Annahmen zu Volllaststunden, Stromgestehungskosten und Standorten abgeleitet wurden. Mittlerweile ist die Studienlandschaft breiter geworden: Studien zu möglichen Kostenentwicklungen existieren in großer Zahl. Auf diese wird in den Sensitivitätsrechnungen zurückgegriffen, ohne weitere aufwändigere Anpassungen vorzunehmen oder dabei spezielle Standorte für die Produktion strombasierter Energieträger zu berücksichtigen. Dies wäre im aktuellen Projekt auch zu aufwändig gewesen.

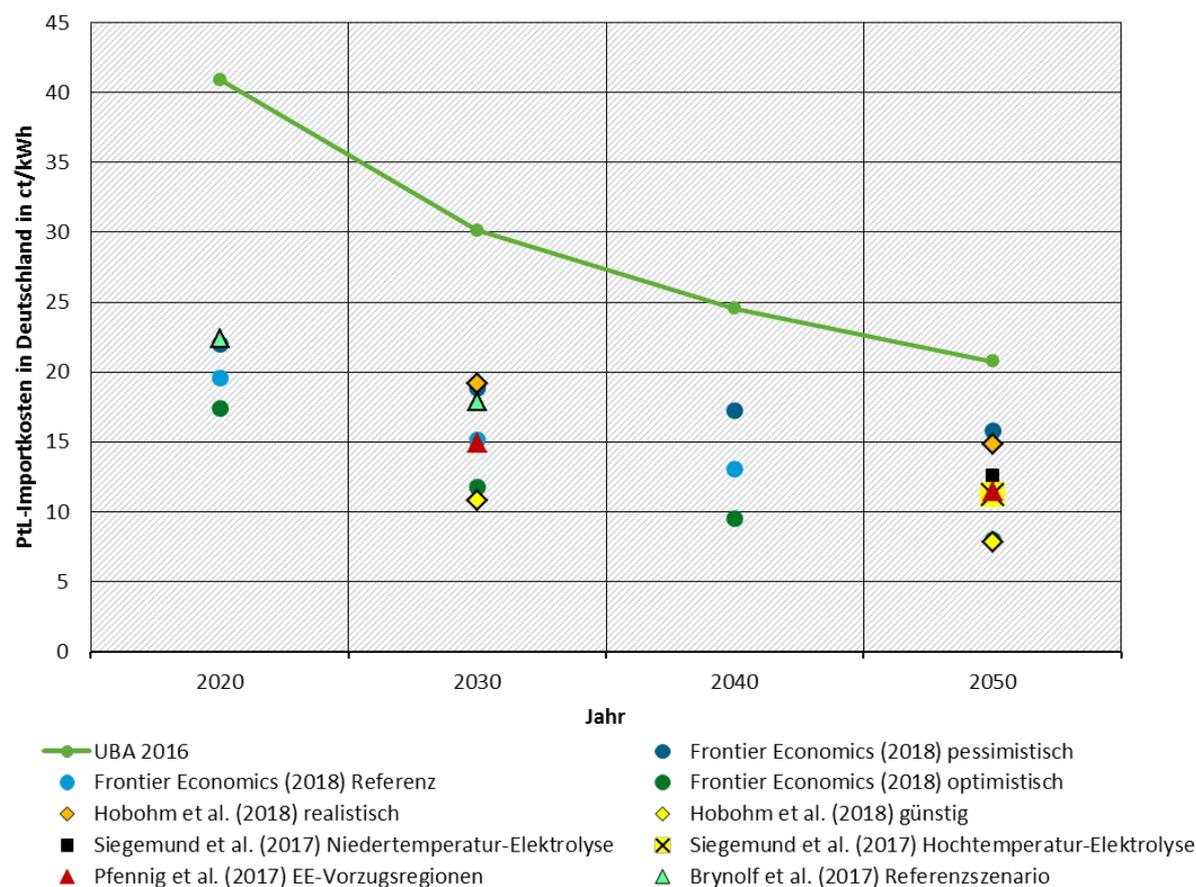
Auch haben sich die Annahmen zu den Kosten fossiler Kraftstoffe seit Erstellung der ursprünglichen Studie verändert. Heutige Kraftstoffkosten sind zumeist niedriger als noch vor einigen Jahren angenommen. Um in der Szenariobewertung konsistent zu bleiben, werden also auch aktualisierte Kostenannahmen zu den fossilen Kraftstoffen mit in die Sensitivitätsrechnungen aufgenommen.

Im Folgenden werden die Sensitivitäten der Annahmen zusammen mit einer Herleitung der Kosten vorgestellt. Dabei wird jeweils auf ein hohes und niedriges Kostenszenario verwiesen, um eine Spannbreite möglicher Kostenentwicklungen abbilden zu können.

4.1 Kostenannahmen für die PtG/PtL Kraftstoffe

Im Bereich der synthetischen Kraftstoffe hat sich die Datenlage gegenüber dem Bearbeitungszeitraum von UBA (2016) deutlich verbessert. Gerade in den Jahren 2017 und 2018 ist eine Vielzahl an Studien zur künftigen Kostenentwicklung von PtL/PtG-Energieträgern erschienen. Abbildung 8 zeigt am Beispiel von PtL-Kraftstoffen, für die es in der Literatur besonders viele Szenarien zur Kostenentwicklung gibt, einen Vergleich aktueller Studien mit den bisherigen Kostenannahmen in UBA (2016).

Abbildung 8: Literaturvergleich: Szenarien für PtL-Importkosten* bis zum Jahr 2050 in ct/kWh



*Kraftstoffgestehungskosten sowie Transport nach Deutschland

Quellen: Eigene Darstellung auf Basis von Frontier Economics (2018), Hobohm et al. (2018), Siegemund et al. (2017), Pfennig et al. (2017) und Brynnolf et al. (2017).

Dabei wird deutlich, dass sämtliche aktuellen Kostenszenarien erheblich unter den in UBA (2016) getroffenen Kostenannahmen liegen. Besonders große Abweichungen ergeben sich dabei in den Jahren bis 2030, in denen PtL-Kraftstoffe in den durchgeführten Szenariorechnungen allerdings auch erst einen geringen Anteil an der gesamten Flüssigkraftstoffnachfrage abdecken. So werden in der aktuellen Literatur für das Jahr 2020 mit ca. 20 ct/kWh nur etwa halb so hohe PtL-Importkosten angenommen wie noch in UBA (2016) unterstellt. Für das Jahr 2030 gehen die aktuellen Studien an Vorzugsstandorten von einer Preisspanne zwischen 11-19 ct/kWh aus, was um 36 % bis 64 % (im Mittel um 50 %) unter der bisherigen Annahme liegt. Bei den aktuellen Prognosen für das Jahr 2050 fällt auf, dass drei verschiedene Studien – Frontier Economics (2018), Pfennig et al. (2017) und Siegemund et al. (2017) – in je einem Szenario fast identische PtL-Importkosten von ca. 11 ct/kWh ausweisen, was um 45 % unter den bisherigen Kostenannahmen in UBA (2016) liegt.

Für die Sensitivitätsbetrachtungen können die Annahmen zu den zukünftigen Kosten von strombasierten Kraftstoffen auf Grund der guten Datenlage direkt aus der Literatur entnommen werden. Dieses Vorgehen unterscheidet sich vom Vorgehen in UBA (2016), wo die Kosten der synthetischen Kraftstoffe aus Annahmen zu den EE-Stromgestehungskosten, Wirkungsgraden und Investitionskosten der Umwandlungsanlagen etc. für verschiedene Produktionsstandorte abgeleitet wurden und ist damit auch nicht eins zu eins vergleichbar.

Da sich die Kostenangaben in der Literatur jeweils auf Neuanlagen der verschiedenen Betrachtungsjahre beziehen, für die Herstellungskosten der strombasierten Kraftstoffe jedoch

der im jeweiligen Jahr bestehende Anlagenmix Ausschlag gebend ist (analog zum Kraftwerkspark im Bereich der Stromerzeugung), wurde in den Sensitivitätsbetrachtungen für die Jahre ab 2030 ein Anlagenbestand angenommen. Dies war auch in UBA (2016) erfolgt. Hierbei sinkt der Anteil der Neuanlagen (Anlagenalter unter 5 Jahren) von 90 % im Jahr 2030 auf unter 40 % im Jahr 2050. Es wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 etwa 10% der strombasierten Kraftstoffe aus Anlagen stammt, die älter als 15 Jahre sind, und dementsprechend ca. 10 % der in diesem Jahr produzierten PtX-Kraftstoffmenge aus älteren Anlagen (mit höheren Kraftstoffgestehungskosten) stammen.

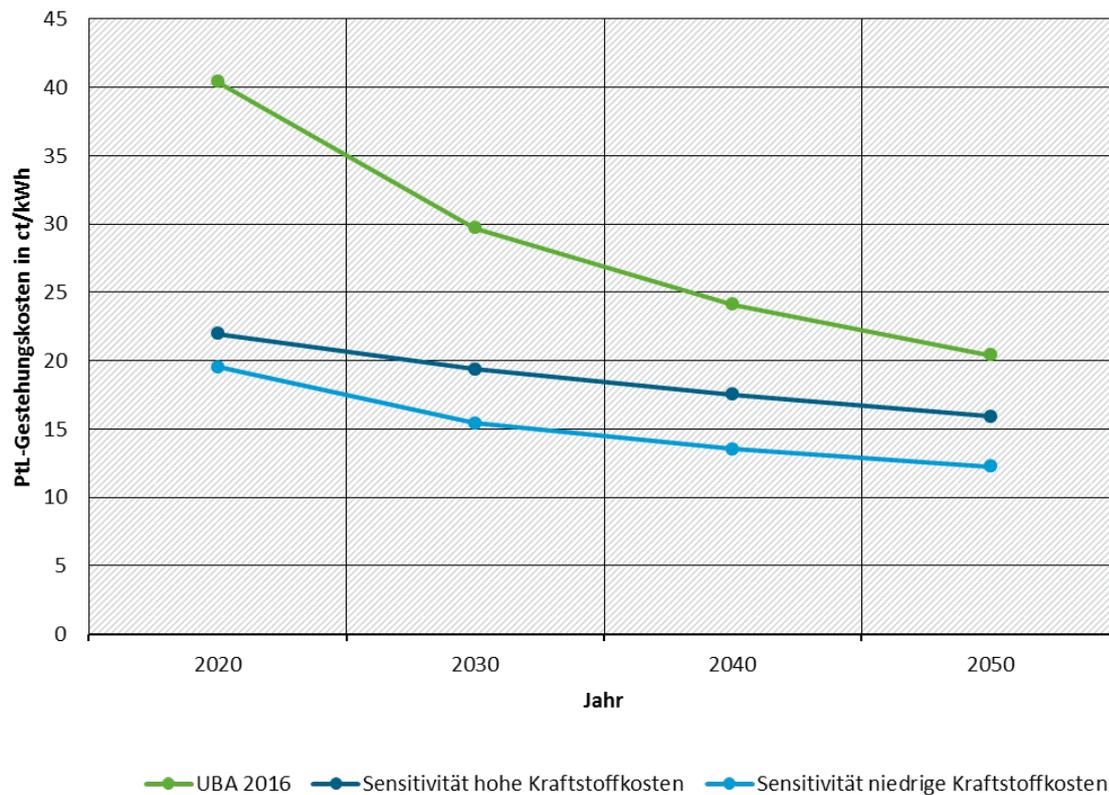
Die Auswirkungen der Betrachtung des gesamten Anlagenbestandes (statt ausschließlich Neuanlagen) sind jedoch beschränkt, da die Kostendegression bei der Herstellung strombasierter Kraftstoffe nach 2030 vergleichsweise langsam und gleichmäßig erfolgt (vgl. Abbildung 8).

Die Sensitivitätsbetrachtung zu niedrigen Kraftstoffkosten für PtL basiert auf den Importkosten des Agora-Referenzszenarios (Frontier Economics 2018), wobei der Mittelwert aus den PtL-Kosten an Standorten Nordafrika und Naher Osten gebildet wurde. Auf diesem Kostenpfad liegen des Weiteren auch die Ergebnisse, die in Pfennig et al. (2017) für PtL-Importe aus internationalen EE-Vorzugsregionen für die Jahre 2030 und 2050 ermittelt wurden, sowie die Kostenprognose der „E-Fuels Study“ im Auftrag des VDA (Siegemund et al. 2017) für PtL-Importe im Jahr 2050, wie in Abbildung 8 ersichtlich ist.

Die Sensitivitätsbetrachtung zu hohen Kraftstoffkosten bezieht sich auf die Kosten, die in Frontier Economics (2018) als pessimistisches Szenario angenommen werden. Diese liegen im Jahr 2030 etwa auf demselben Kostenniveau wie das Szenario aus Hobohm et al. (2018), welches im Auftrag des MWV als realistischer Kostenpfad eingeschätzt wird und im Jahr 2050 leicht über dem realistischen Kostenpfad aus Hobohm et al. (2018).

Die Berücksichtigung des Anlagenbestandes führt bei beiden Sensitivitäten nur zu geringfügig höheren Kosten im Vergleich zur PtL-Produktion aus Neuanlagen: Für das Jahr 2050 ergibt sich ein Kostenaufschlag von ca. 0,8 ct/kWh. Die resultierenden PtL-Importkosten sind in Abbildung 9 dargestellt. Im Vergleich zu den Ausgangsszenarien in UBA (2016) fallen die PtL-Kosten in der Sensitivität hoher Kraftstoffkosten um 36 % (2030) bzw. um 19 % (2050) niedriger aus. In der Sensitivität niedriger Kraftstoffkosten liegen sie um 48 % (2030) bzw. um 40 % (2050) unter den Kosten der Ausgangsstudie.

Abbildung 9: PtL-Importkosten* in ct/kWh – Entwicklung von 2020 bis 2050



*Kraftstoffgestehungskosten sowie Transport nach Deutschland

Quellen: Eigene Annahmen auf Basis von Frontier Economics (2018) und Hobohm et al. (2018).

Im Fall von synthetischem Methan (PtG-CH₄) sind die Importkosten gemäß Frontier Economics (2018) sehr ähnlich zu den PtL-Importkosten. Dies gilt auch in Bezug auf die Kostenstruktur des PtG-Imports, da die Kosten für den Transport nach Deutschland (Verflüssigung und Schiffstransport) auch bei PtG-CH₄ unter 1 ct/kWh liegen (Frontier Economics 2018), siehe auch Tabelle 8 und Tabelle 9.

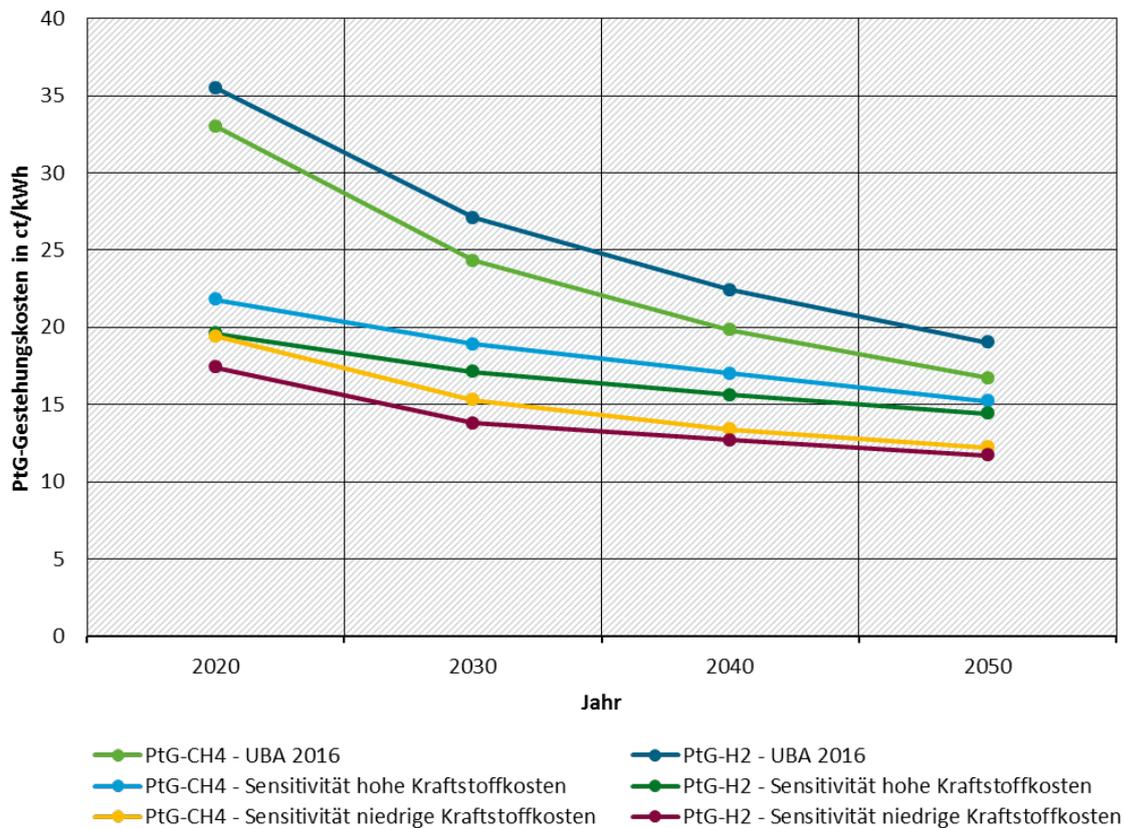
In den Sensitivitätsbetrachtungen wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass synthetisches Methan für den Transport nach Deutschland (und die Verteilung innerhalb Deutschlands) zunächst verflüssigt wird – unabhängig von der späteren Anwendung. Da keine standort-spezifische Betrachtung durchgeführt wird, unterscheiden sich die Bereitstellungskosten von PtG-CH₄ anders als in den Ausgangsszenarien in UBA (2016) nicht zwischen flüssigem und gasförmigem Methan.

Die Sensitivität zu niedrigen Kraftstoffkosten stützt sich, analog zum Vorgehen bei PtL, auf das Referenzszenario aus Frontier Economics (2018). Die Kostenannahmen der „E-Fuels Study“ (Siegemund et al. 2017) für das Jahr 2050 sowie das Referenzszenario von Brynolf et al. (2017) für das Jahr 2030 liegen in dieser Größenordnung. Die hohe Kosten-sensitivität entspricht dem pessimistischen Agora-Szenario, welches für das Jahr 2030 die gleichen PtG-CH₄-Importkosten wie das als realistisch eingeschätzte Szenario aus (Hobohm et al. 2018) ausweist.

Auch für die Sensitivitätsbetrachtungen des synthetischen Methans werden die Kosten-annahmen aus der Literatur nicht direkt übernommen, sondern - wie bei PtL - aus einem angenommenen Anlagenbestand abgeleitet. Die resultierenden Kostenannahmen sind in Abbildung 10 dargestellt. Diese weichen weniger stark von den Ausgangsszenarien in UBA (2016) ab, als es bei PtL der Fall war: Die aktualisierten PtG-CH₄-Importkosten liegen in der

Sensitivität hoher Kraftstoffkosten im Jahr 2030 um 21 % unter den bisherigen Annahmen; im Jahr 2050 ergibt sich mit -1 % kaum eine Veränderung. Auch in der Sensitivität niedriger Kraftstoffkosten fällt der Unterschied mit -37 % (2030) bzw. -27 % geringer als bei den PtL-Importkosten aus.

Abbildung 10: PtG-Importkosten* in ct/kWh – Entwicklung von 2020 bis 2050



*Kraftstoffgestehungskosten sowie Verflüssigung und Transport nach Deutschland

Quelle: Eigene Annahmen auf Basis von Pfennig et al. (2017), Frontier Economics (2018) und Hobohm et al. (2018).

Per Elektrolyse hergestellter Wasserstoff (PtG-H₂) ist der einzige synthetische Energieträger, bei dem der Transport nach Deutschland – bedingt durch die hohen Kosten für die Verflüssigung – einen bedeutenden Anteil an den Importkosten aufweist. Wie bereits in den Ausgangsszenarien in UBA (2016) wird bei den Sensitivitätsbetrachtungen davon ausgegangen, dass Wasserstoff in jedem Fall verflüssigt werden muss. Neben hohen Kosten für die Verflüssigung weist PtG-H₂ auch beim Schifftransport nach Deutschland etwas höhere Kosten als PtG-CH₄ und vor allem als PtL auf, da ein Teil des verflüssigten Wasserstoffs als Boil-off entweicht. Die Zusammensetzung der Energiebereitstellungskosten bis zur Tankstelle ist in Tabelle 8 und Tabelle 9 aufgeschlüsselt.

Die Sensitivität zu hohen Kraftstoffkosten basiert auf dem pessimistischen Szenario aus Frontier Economics (2018). Da Wasserstoff in dieser Studie lediglich als Zwischenprodukt der Methan- und Flüssigkraftstoffherstellung ohne Kosten für die Verflüssigung untersucht wird, werden zu den in der Studie angegebenen PtG-H₂-Gestehungskosten noch die Kosten für die Verflüssigung und den Schifftransport gemäß Tabelle 8 addiert. Die Verflüssigung des Wasserstoffs verursacht im Jahr 2030 gemäß Pfennig et al. (2017) Kosten in Höhe von 4,4 ct/kWh_{H₂} (bzw. 1,47 €/kg_{H₂}). Bis 2050 gehen diese Kosten im Zuge der sinkenden Stromgestehungskosten auf etwa 3,5 ct/kWh_{H₂} zurück.

Die Sensitivität zu niedrigen Kraftstoffkosten basiert auf den Kosten für LH2 aus Pfennig et al. (2017), die für die beiden Jahre 2030 und 2050 angegeben sind und die Verflüssigung und die Boil-off-Verluste bereits mit beinhalten. Für das Jahr 2040 werden die Kosten durch lineare Interpolation ermittelt, während die PtG-H2-Importkosten für das Jahr 2020 aus den PtG-CH4-Importkosten (der niedrigen Kostensensitivität) dieses Jahres abgeschätzt werden. Die PtG-H2-Importkosten aus Pfennig et al. (2017) liegen im Gesamtzeitraum von 2020 bis 2050 in der Größenordnung der Kosten, die sich aus dem Agora-Referenzszenario und den zuvor genannten Kostenannahmen für Verflüssigung und Transport nach Deutschland ergeben würden.

Die Kosten für die Kraftstoffverteilung innerhalb Deutschlands („vom Hafen bis zur Tankstelle“) wurden ebenfalls aktualisiert und sind für beide Sensitivitäten identisch (vgl. Tabelle 8 und Tabelle 9). Für PtL-Kraftstoffe wurden in Anlehnung an Frontier Economics (2018) Kraftstoffverteilungskosten von 0,6 ct/kWh angenommen (verglichen mit 0,1 ct/kWh in UBA (2016)). Für PtG-CH4, das ausschließlich in flüssigem Zustand transportiert und verteilt wird, liegen die Verteilungskosten gemäß Bünger et al. (2016) bei 1,1 ct/kWh (statt 0,4 ct/kWh in den Ausgangsszenarien). Für PtG-H2, das annahmegemäß ebenfalls ausschließlich flüssig in Deutschland transportiert wird und eine geringere volumetrische Energiedichte als flüssiges Methan aufweist, wurden auf Basis von McKinsey (2010) und Bünger et al. (2016) Kraftstoffverteilungskosten in Höhe von 1,6 ct/kWh abgeleitet (bisher 0,6 ct/kWh).

Zusammenfassend ist es offensichtlich, dass die Annahmen zu den Kosten für strombasierte, synthetische Kraftstoffe im Ausgangsszenario aus UBA (2016) als hoch einzuschätzen sind. Neue Studien verweisen auf Kostenrechnungen an EE-Vorzugsstandorten, an denen potenzielle Produktionsanlagen aufgrund höherer Volllaststundenzahlen der EE-Stromerzeugung mit höherer Auslastung betrieben werden können als in UBA (2016) angenommen. Inwieweit die Produktion strombasierter, synthetischer Kraftstoffe allein an Bestandorten stattfindet, ist aus heutiger Sicht nicht abzusehen, so dass die für die Sensitivitätsbetrachtungen abgeleiteten Kostenpfade auch hinsichtlich dieser Aspekte mit Unsicherheiten behaftet sind.

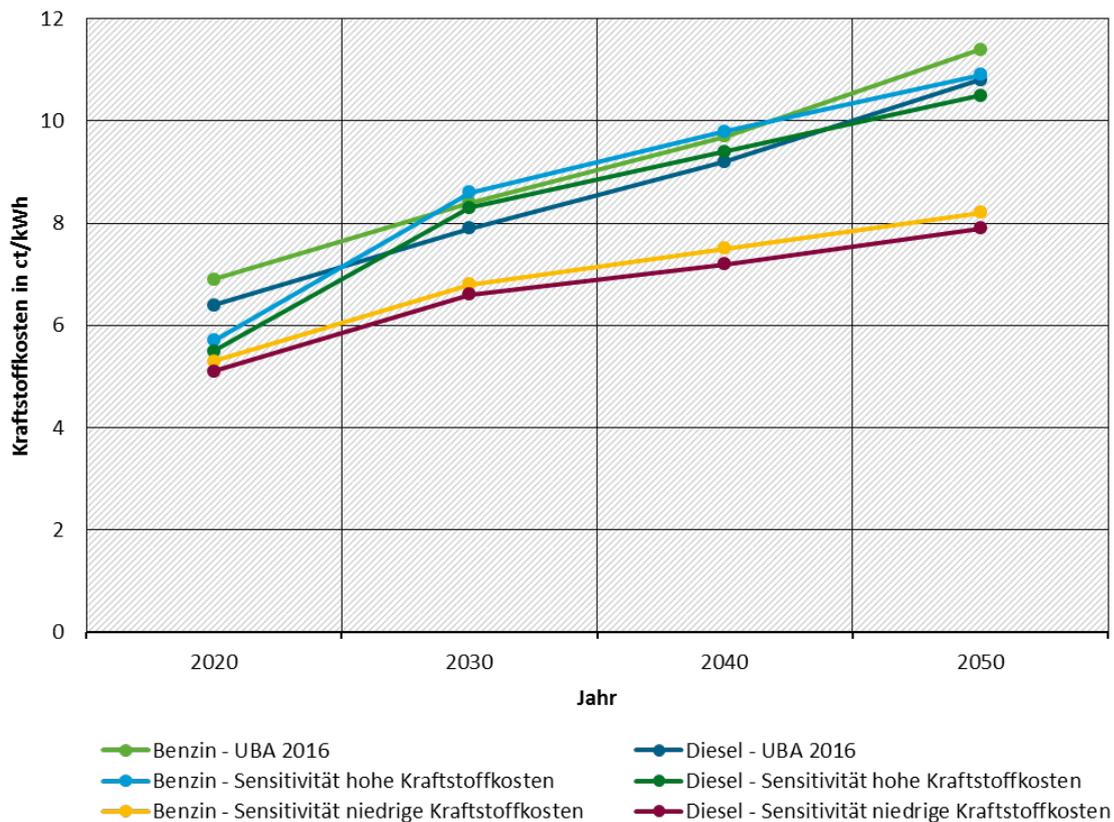
4.2 Kostenannahmen für die fossilen Kraftstoffe

Auch bei der Energiebereitstellung fossiler Energieträger bis zur Tankstelle wird für die Sensitivitätsbetrachtungen eine Aktualisierung der bisherigen Kostenannahmen aus UBA (2016) vorgenommen. Für Diesel, Benzin, Kerosin und Erdgas werden die Kostenannahmen aus Frontier Economics (2018) übernommen, um ein in sich konsistentes Set an Annahmen für synthetische und fossile Kraftstoffe zu gewährleisten. Analog zu den strombasierten Kraftstoffen basieren auch bei den fossilen Kraftstoffen die niedrige Kraftstoffkosten-Sensitivität auf dem Referenzszenario und die hohe Kraftstoffkosten-Sensitivität auf dem pessimistischen Szenario dieser Studie.

Es zeigt sich, dass Kosten der Energiebereitstellung bis zur Tankstelle in der Sensitivität hoher Kraftstoffkosten ab dem Jahr 2030 ungefähr den bisherigen Kostenannahmen entsprechen (siehe Abbildung 11), im Jahr 2020 liegen sie deutlich darunter. In der Sensitivität niedriger Kraftstoffkosten liegen die Kosten der fossilen Flüssigkraftstoffe deutlich unter den bisherigen Annahmen.

Für beide Sensitivitäten wird – wie in UBA (2016) – die Annahme getroffen, dass die Kosten für die Bereitstellung von Kerosin denen der Dieselpreispumpe entsprechen (siehe Tabelle 5). Die Bereitstellungskosten von Benzin lagen in UBA (2016) in allen Jahren jeweils um etwa 0,5 ct/kWh über denen von Dieselpumpe. Dieser Kostenunterschied geht mit der Aktualisierung im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtungen auf ca. 0,2-0,4 ct/kWh zurück, wie ebenfalls in Abbildung 11 und Tabelle 5 ersichtlich ist.

Abbildung 11: Kosten der Dieselpreparierung bis zur Tankstelle in ct/kWh



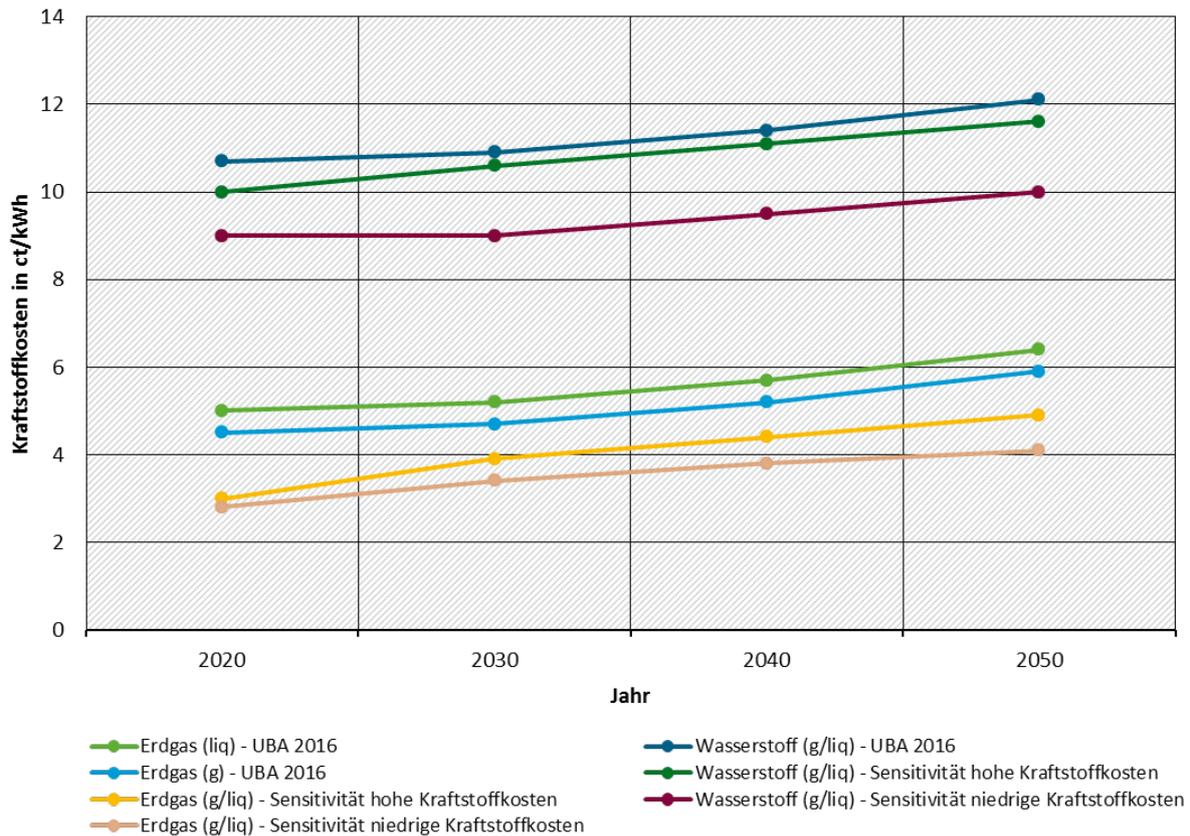
Quelle: Frontier Economics (2018)

Ebenso wie bei den strombasierten Energieträgern wird auch bei den Bereitstellungskosten von Erdgas und fossilem Wasserstoff, der per Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen wird, keine Unterscheidung hinsichtlich der späteren Verwendung als flüssiger oder komprimierter (gasförmiger) Kraftstoff getroffen. Während sich diese Prämisse bei Wasserstoff auch schon in den Ausgangsszenarien in UBA (2016) findet, handelt es sich bei Erdgas um eine neue Annahme.

Diese Änderung wird vorgenommen, weil sich in der Zwischenzeit ein globaler Markt für verflüssigtes Erdgas (Liquefied Natural Gas, LNG) herausgebildet hat, auf dem verflüssigtes Erdgas zu ähnlichen Preisen wie gasförmiges Erdgas aus dem bestehenden Pipeline-System angeboten wird. Im Vergleich zu den Ausgangsszenarien in UBA (2016) ergeben sich, analog zu den fossilen Flüssigkraftstoffen, für Erdgas in beiden Sensitivitäten geringere Kosten für den Energieträgerimport, aber höhere Kosten für die Verteilung und den Vertrieb innerhalb Deutschlands.

Die beiden gegenläufigen Effekte führen in der Summe zu dem Ergebnis, dass die Bereitstellungskosten von Erdgas bis zur Tankstelle in der Sensitivität hoher Kraftstoffkosten ab 2030 um etwa 0,8 ct/kWh unter den bisherigen Kostenannahmen für komprimiertes (gasförmiges) Erdgas in wie in UBA (2016) liegen, im Jahr 2020 beträgt die entsprechende Differenz sogar 1,5 ct/kWh. Die Bereitstellungskosten steigen von etwa 3 ct/kWh im Jahr 2020 auf knapp 5 ct/kWh im Jahr 2050 an, wie in Abbildung 12 dargestellt ist. In der Sensitivität niedriger Kraftstoffkosten steigen die Erdgas-Bereitstellungskosten weniger stark auf knapp über 4 ct/kWh im Jahr 2050 an.

Abbildung 12: Kosten der Bereitstellung von Erdgas und Wasserstoff aus fossilen Quellen bis zur Tankstelle in ct/kWh



Quelle: Eigene Annahmen auf Basis von Frontier Economics (2018), McKinsey (2010), Adolf et al. (2017) und Joest et al. (2009)

Für fossilen Wasserstoff, der per Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen wird, finden sich in der Literatur nur wenige Angaben zu den Produktionskosten und deren zukünftiger Entwicklung. Zur Ableitung von plausiblen Kostenentwicklungen für die Sensitivitätsbetrachtungen wurden Adolf et al. (2017), Joest et al. (2009) sowie McKinsey (2010) herangezogen.

In Joest et al. (2009) wird beschrieben, dass die Bereitstellungskosten an der Tankstelle mittel- bis langfristig bei rund 9 bis 10 ct/kWh liegen würden, wenn der Wasserstoff fast ausschließlich auf konventioneller Basis erzeugt wird. Diese Kostenprognose wird der Sensitivität niedriger Kraftstoffkosten zugeordnet und enthält bereits sämtliche Kosten für Verflüssigung, Komprimierung, Transport und Verteilung. Die H₂-Bereitstellungskosten liegen um ca. ein Sechstel unter den bisherigen Annahmen in UBA (2016).

In der Sensitivität hoher Kraftstoffkosten wird die zentrale Erdgasreformierung als wesentliches Produktionsverfahren für die H₂-Herstellung angenommen. Adolf et al. (2017) gibt für das Jahr 2020 einen gewichteten Mittelwert von 1,8 €/kg bzw. 5,4 ct/kWh für die Kosten der Wasserstoff-Erzeugung mit diesem Verfahren an. In McKinsey (2010) werden die H₂-Produktionskosten per zentraler Erdgasreformierung im Jahr 2030 mit 2,0 €/kg angegeben, was umgerechnet 6,0 ct/kWh entspricht. Für die Folgejahre werden die Produktionskosten von fossilem Wasserstoff auf Basis der angenommenen Erdgaspreise fortgeschrieben und steigen bis auf 7,0 ct/kWh im Jahr 2050 an.

Zu den reinen Produktionskosten in zentralen Großanlagen müssen noch die Kosten für den Transport und die Verteilung des Wasserstoffs in Deutschland addiert werden. Dabei wird wie in Joest et al. (2009) davon ausgegangen, dass ein Teil des Wasserstoffs verflüssigt und per Lkw

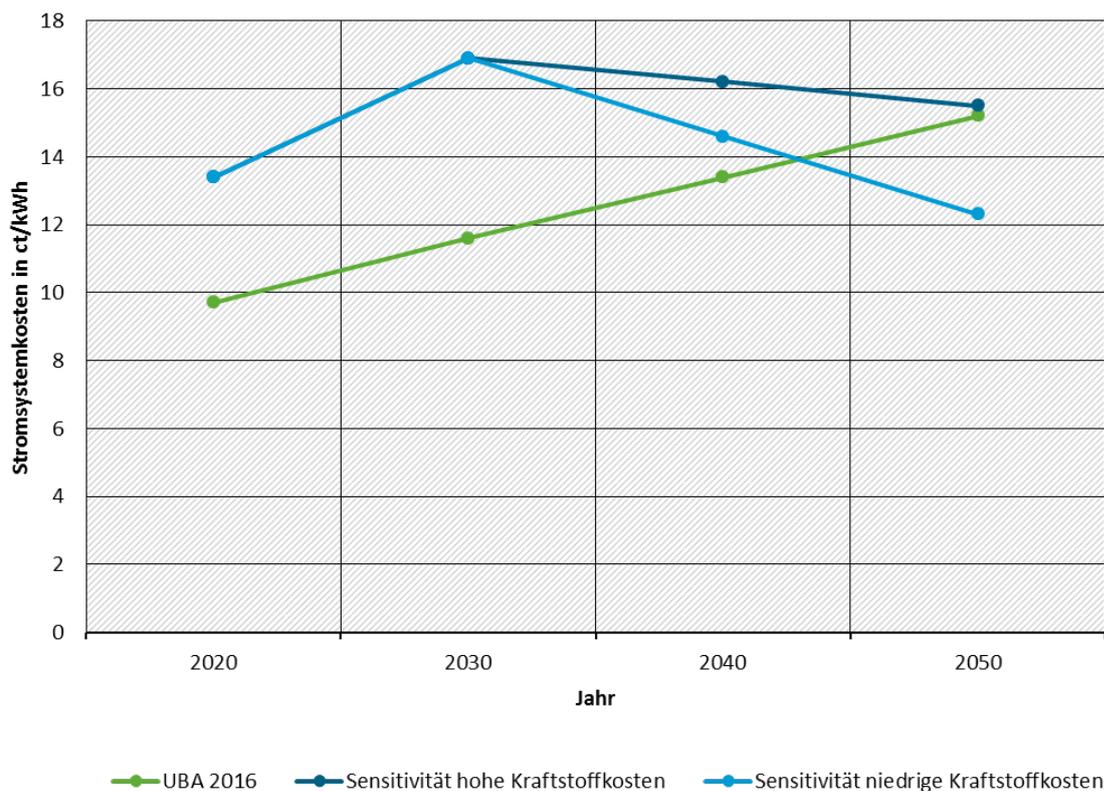
zu den Tankstellen in der Fläche transportiert wird. Der andere Teil des Wasserstoffs wird komprimiert und als Druckwasserstoff per Pipeline an die Tankstellen geliefert; diese Art der Verteilung bleibt allerdings auf einige Ballungsgebiete beschränkt. Für die Verteilung des gesamten Wasserstoffs, der im Verkehrssektor nachgefragt und über beide Transportwege zu den Tankstellen gebracht wird, werden aus Joest et al. (2009) Kosten von durchschnittlich 4,6 ct/kWh abgeleitet (inkl. Verflüssigung und Komprimierung).

Die resultierenden Bereitstellungskosten für fossilen Wasserstoff bis zur Tankstelle steigen in der Sensitivität hoher Kraftstoffkosten von 10,0 ct/kWh im Jahr 2020 allmählich auf 11,6 ct/kWh im Jahr 2050 an (siehe Abbildung 12 und Tabelle 5) und liegen damit geringfügig unter den bisherigen Kostenannahmen in UBA (2016).

4.3 Kostenannahmen für die direkte Nutzung von elektrischem Strom

Der Kostenbetrachtung für die Nutzung des elektrischen Stroms in batterieelektrischen Fahrzeugen und in den netzintegrierten Lkw werden wie in der Ausgangsstudie die Systemkosten der Stromerzeugung in Deutschland zugrunde gelegt. Die Verteilung der Kosten zwischen Haushalten und Industriekunden wird dabei nicht berücksichtigt, da dies eine Verteilungsfrage zwischen unterschiedlichen Verbrauchergruppen betrifft, die an dieser Stelle nicht beantwortet werden soll und kann. Für die Studie UBA (2016) stand den Autoren keine Studie zur Verfügung, in denen die Systemkosten der Stromerzeugung für eine vollständige Dekarbonisierung des Stromsektors angegeben sind. Aus diesem Grund wurde damals auf Basis von Studien zu potenziellen Kostenentwicklungen der Stromerzeugungskosten sowie der Netzkosten selbstständig eine mögliche Kostenentwicklung abgeleitet.

Abbildung 13: Stromsystemkosten bis zur Ladeinfrastruktur in ct/kWh



Quellen: Eigene Annahmen auf Basis von Gerbert et al. (2018a) und Matthes et al. (2017)

Durch neu erschienene Studien zu den Systemkosten einer vollständig dekarbonisierten Stromerzeugung kann in der Sensitivitätsbetrachtung bestehende Literatur genutzt werden, die sich explizit mit den Kosten der Transformation des Stromsektors auseinandersetzt. Die Studie „Klimapfade für Deutschland“ (Gerbert et al. 2018a) im Auftrag des BDI gibt in dem 95%-Szenario die Stromsystemkosten für einen Entwicklungspfad hin zu einer vollständig emissionsfreien Stromerzeugung an. Diese werden für die hohe Kostensensitivität übernommen (Abbildung 13).

Für die niedrige Kostensensitivität werden für das Jahr 2050 die Kostenannahmen aus Matthes et al. (2017) genutzt. Diese liegen mit 12,3 ct/kWh rund 20 % niedriger als in der hohen Kostensensitivität. Bis zum Jahr 2030 wird in der niedrigen Kostensensitivität allerdings auch auf die Kostenannahmen aus Gerbert et al. (2018a) zurückgegriffen.

In Abbildung 13 ist offensichtlich, dass beide Kostensensitivitäten bis zum Jahr 2040 höhere Stromsystemkosten aufweisen als die ursprüngliche Studie UBA (2016). Dies lässt sich darüber erklären, dass in UBA (2016) die hohen Kosten bestehender EE-Anlagen aus der frühen Zeit der EE-Kapazitätssteigerung vernachlässigt wurden. Im Jahr 2050 liegt die hohe Kostensensitivität allerdings auf einem ähnlichen Kostenniveau wie die ursprüngliche Studie. Die niedrige Kostensensitivität liegt – wie zuvor bereits geschrieben – erheblich darunter.

5 Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen

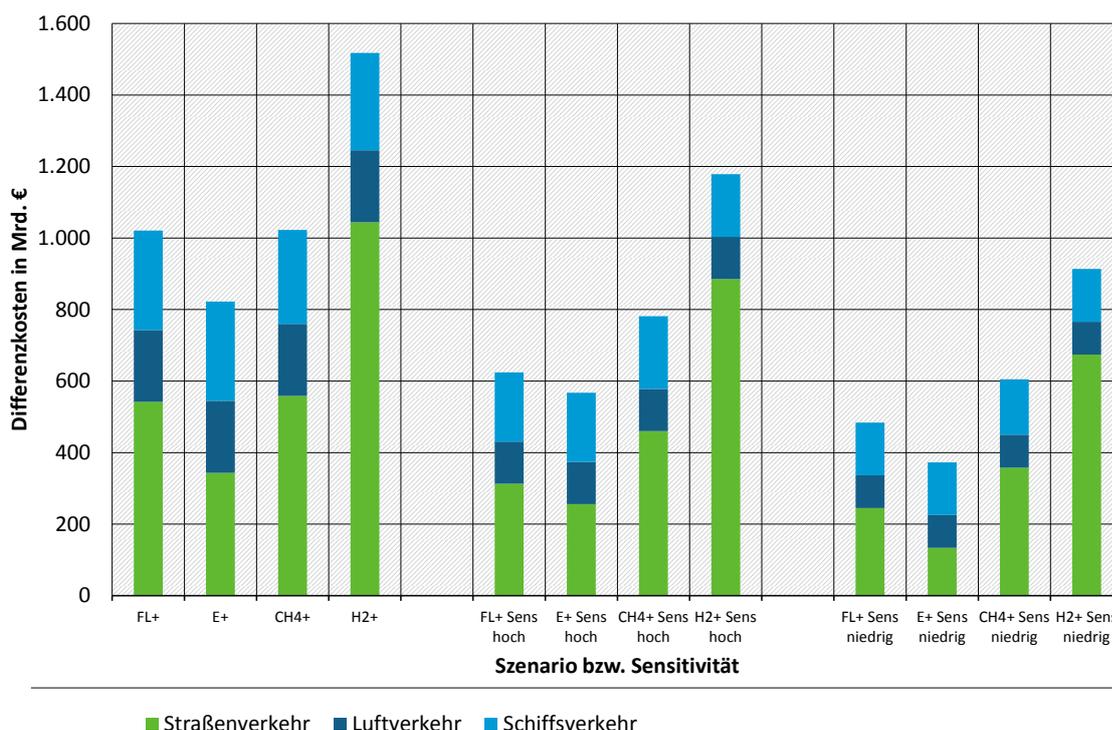
Aufgrund der veränderten Annahmen in Hinblick auf die Fahrzeugkosten und die Kosten der Energiebereitstellung ergeben sich in den Sensitivitätsbetrachtungen Abweichungen gegenüber den Ursprungsszenarien (UBA 2016). In den nachfolgend dargestellten Ergebnissen wird zwischen einer Sensitivität mit hohen Fahrzeugkosten und hohen Kosten der Energiebereitstellung und einer Sensitivität mit niedrigen Kosten unterschieden. Grundsätzlich werden die Ergebnisse wie in der Ausgangsstudie als Differenzkosten zu einem Szenario mit vollständig fossiler Energiebereitstellung ausgewiesen. Für die Sensitivitäten zum FL+-Szenario bedeutet dies, dass es lediglich Differenzkosten auf Seiten der Energiebereitstellung gibt, da sowohl die Tankstelleninfrastruktur als auch die Fahrzeuge unverändert bleiben.

Kapitel 5.1 zeigt die Gesamtergebnisse für den Straßen-, See- und Luftverkehr. Während bei allen Verkehrsarten die veränderten Annahmen der Energiebereitstellungskosten zum Tragen kommen, werden die Fahrzeugkosten lediglich für die Fahrzeuge im Straßenverkehr aktualisiert. Kapitel 5.2 beschreibt die Detailergebnisse für den Straßennahverkehr und Kapitel 5.3 für den Straßenfernverkehr.

5.1 Gesamtergebnisse

Über alle drei Verkehrsträger hinweg liegen die im Zeitraum 2020 bis 2050 kumulierten Differenzkosten gegenüber einem fossilen Referenzszenario im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtungen deutlich unter den Kosten der Ausgangsszenarien (s. Abbildung 14).

Abbildung 14: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Kosten und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 differenziert nach Verkehrsträger (positiv: Mehrkosten)



Quelle: Eigene Berechnungen

In den Sensitivitätsbetrachtungen mit den hohen Kostenannahmen für die Energiebereitstellung und die Fahrzeuge im Straßenverkehr liegen die Kosten rund 40 % (F1+) bis zu rund 20 % (H2+) unter den jeweiligen Ausgangsszenarien. In der Sensitivität mit niedrigen Kosten sind es annähernd 55 % (E+) bis zu 40 % (H2-) niedrigere Differenzkosten. Diese Kostenspanne zwischen den beiden Kostensensitivitäten zeigt die Unsicherheiten hinsichtlich der Höhe der Differenzkosten zu einem fossilen Vergleichssystem auf.

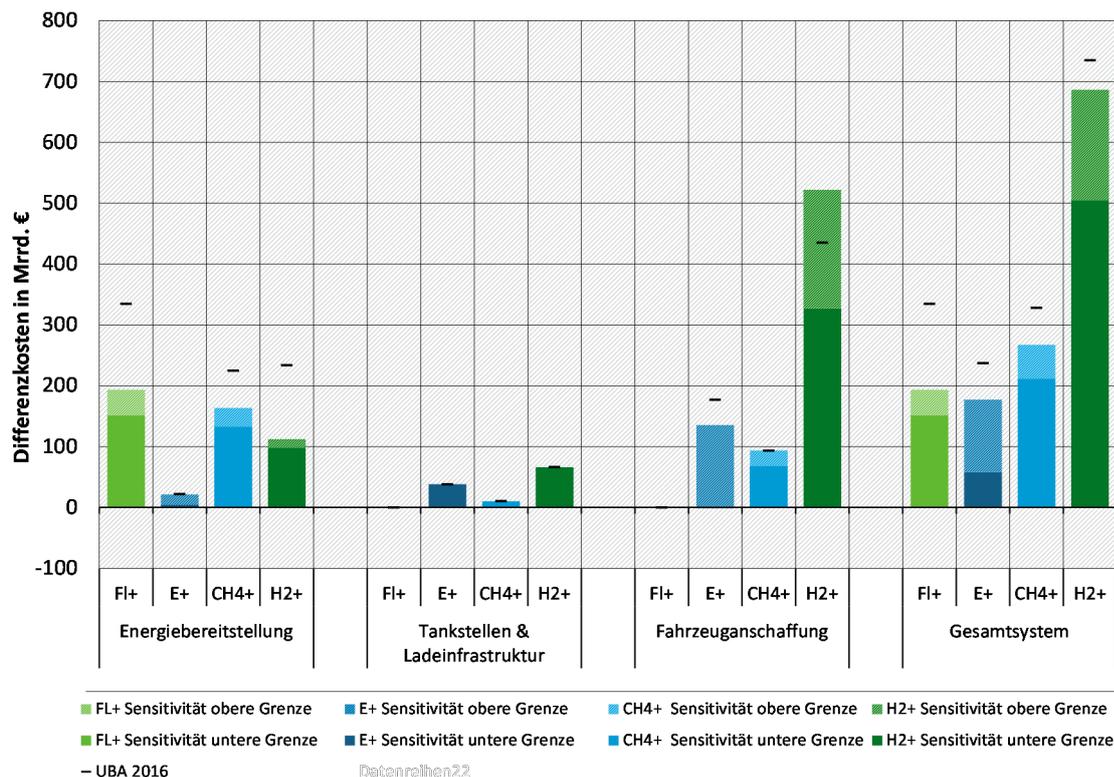
Unabhängig von den gewählten Kostenannahmen zeigt sich jedoch ein einheitliches Bild im Vergleich der Energieträgeroptionen: Die gesamten Kosten für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors sind sowohl in UBA (2016) als auch in den Sensitivitätsbetrachtungen bei einer verstärkten direkten Nutzung von Strom am niedrigsten, gefolgt von dem Energiebereitstellungspfad mit flüssigen synthetischen Kraftstoffen. Während die Gesamtkosten des Pfades mit synthetischem Methan in UBA (2016) auf einem mit dem PtL-Pfad vergleichbaren Niveau liegen, weist der CH₄-Pfad in den Sensitivitätsbetrachtungen leicht höhere Mehrkosten im Vergleich zum PtL-Pfad auf. Dabei ist aber auch zu beachten, dass in den Sensitivitätsbetrachtungen keine Aktualisierung der Energieverbräuche der Fahrzeuge gegenüber UBA (2016) durchgeführt wird. Gerade bei Methan-Lkw zeigen aktuelle Diskussionen zu HDPI-Motoren, die ähnliche Verbräuche wie Diesel-Motoren aufweisen, dass in den Sensitivitäten der Energieverbrauch und die damit verbundenen Kosten für Erdgasfahrzeuge überschätzt sein können. Die Unterschiede zwischen dem PtL- und dem PtG-CH₄-Pfad sollten demnach eher als Unsicherheiten der Annahmen begriffen werden und nicht als Grundlage für eine Pfadentscheidung dienen. Besonders kostenintensiv ist es stets, die Dekarbonisierung mit dem Energieträger Wasserstoff zu erzielen.

Die Ergebnisse der Studie UBA (2016) und der hier gezeigten Sensitivitäten deckt sich auch mit den Ergebnissen der vom BDI beauftragten Studie „Klimapfade für Deutschland“ (Gerbert et al. 2018b), in der Klimaschuttszenarien auf Basis von THG-Vermeidungskosten hergeleitet werden. Auch in diesen Szenarien weist die direkte Stromnutzung im Verkehrssektor die niedrigsten THG-Vermeidungskosten auf, so dass im Straßenverkehr schwerpunktmäßig direktelektrische Pkw und im geringeren Maße auch direktelektrische Lkw zum Einsatz kommen. Bei nicht oder nur teuer elektrifizierbaren Bereichen des Verkehrs kommen vor allem PtL und PtG-CH₄-Kraftstoffe zum Einsatz. Wasserstoff kommt im Verkehrssektor nur geringfügig zum Einsatz.

5.2 Straßennahverkehr

Die Detailergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen für das Modul „Straßennahverkehr“ (Pkw, leichte Nutzfahrzeuge, Lkw bis einschließlich >12 zGG) werden in Abbildung 15 den Kosten aus den Ausgangsszenarien gegenübergestellt (schwarze Striche). Dargestellt sind die kumulierten Differenzkosten für den Zeitraum 2020 bis 2050. Die einfarbigen Säulen stellen jeweils die niedrigeren Differenzkosten der beiden Sensitivitätsbetrachtungen und damit die untere Grenze der Kosten unter den getroffenen Annahmen dar, die schraffierten Säulen die obere Grenze. Dies müssen nicht immer vorher diskutierten Fälle „niedrig“ der jeweiligen Kostenkurven sein.

Abbildung 15: Straßennahverkehr: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 (positiv: Mehrkosten)



Quelle: Eigene Berechnungen

Während die Kosten der Energiebereitstellung in den Sensitivitäten zum Fl+-, CH4+- und H2+-Szenario deutlich unter denen der Ausgangsszenarien liegen, führen die angepassten Kostenannahmen wegen des geringeren Energiebedarfs und der geringeren Anpassungen der Stromsystemkosten zu keiner relevanten Veränderung in den Sensitivitäten zum E+-Szenario.

Die Kosten für Tankstellen und die Ladeinfrastruktur bleiben gegenüber den Ausgangsszenarien unverändert und sind weiterhin der geringste Kostenfaktor. Durch die geringeren Kosten bei der Fahrzeugherstellung und der Energieversorgung gewinnen die Infrastrukturkosten geringfügig an Relevanz. Bei einer aktualisierten Kostenbetrachtung der verkehrsseitigen Energieinfrastruktur, die in dieser Kurzstudie nicht zur Ausgangsstudie verändert wird, könnten wahrscheinlich aber auch niedrigere Kostensätze als in UBA (2016) angenommen werden.

Bezüglich der Fahrzeugkosten führen die veränderten Annahmen in den Sensitivitäten zu allen Szenarien E+, CH4+ und H2+ zu deutlich geringeren Differenzkosten. Am stärksten gehen die Mehrkosten der Fahrzeuganschaffung im E+- und H2+-Szenario zurück, da sich in diesen die veränderten Annahmen für die Batterie- und Brennstoffzellenkosten am stärksten zeigen. Im Szenario E+ betragen diese Differenzkosten in der Sensitivität mit hohen Kosten nur noch 135 Mrd. € (rund 25 % niedriger als im Ausgangsszenario). In der Sensitivität mit niedrigen Fahrzeugkosten wird gegenüber dem fossilem Referenzszenario sogar eine Kostenersparnis von 2 Mrd. € erzielt. Der Grund für diese Kostenersparnis liegt darin, dass die Herstellungskosten der BEV bei den Pkw ab dem Jahr 2040, also dann wenn diese Fahrzeuge einen großen Anteil an den Neuzulassungen aufweisen, unter denen der

verbrennungsmotorischen Fahrzeuge liegen². Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, ist dies vor allem mit den steigenden Effizianzforderungen der verbrennungsmotorischen Fahrzeuge verbunden, die hohe zusätzliche Kosten aufweisen.

Für die Sensitivitäten zum CH₄+ Szenario kommen insbesondere die angepassten Kostenannahmen der Methantanks zum Tragen. Mit 94 Mrd. € sind die Differenzkosten (obere Grenze) vergleichbar mit dem Ausgangsszenario (93 Mrd. €), die untere Grenze liegt mit 69 Mrd. € deutlich darunter (-26 %).

Die angepassten Fahrzeugkosten in der Sensitivität zum H₂+ -Szenario mit niedrigen Kosten führen zu geringeren spezifischen Fahrzeugkosten in allen Kategorien und liegen demzufolge ähnlich wie bei den Methanfahrzeugen deutlich unter dem Ausgangsszenario (-25 %). In der Sensitivität mit hohen Kosten führen die Kostenannahmen dazu, dass die Lkw im Nahverkehr niedrigere spezifische Kosten, die Pkw jedoch höhere Kosten aufweisen. Aufgrund der hinterlegten Fahrzeugzulassungszahlen mit einem hohen Pkw-Anteil steigen die Differenzkosten für die Fahrzeugherstellung im hohen Kostenszenario deshalb gegenüber dem Ausgangsszenario deutlich an (+20 %).

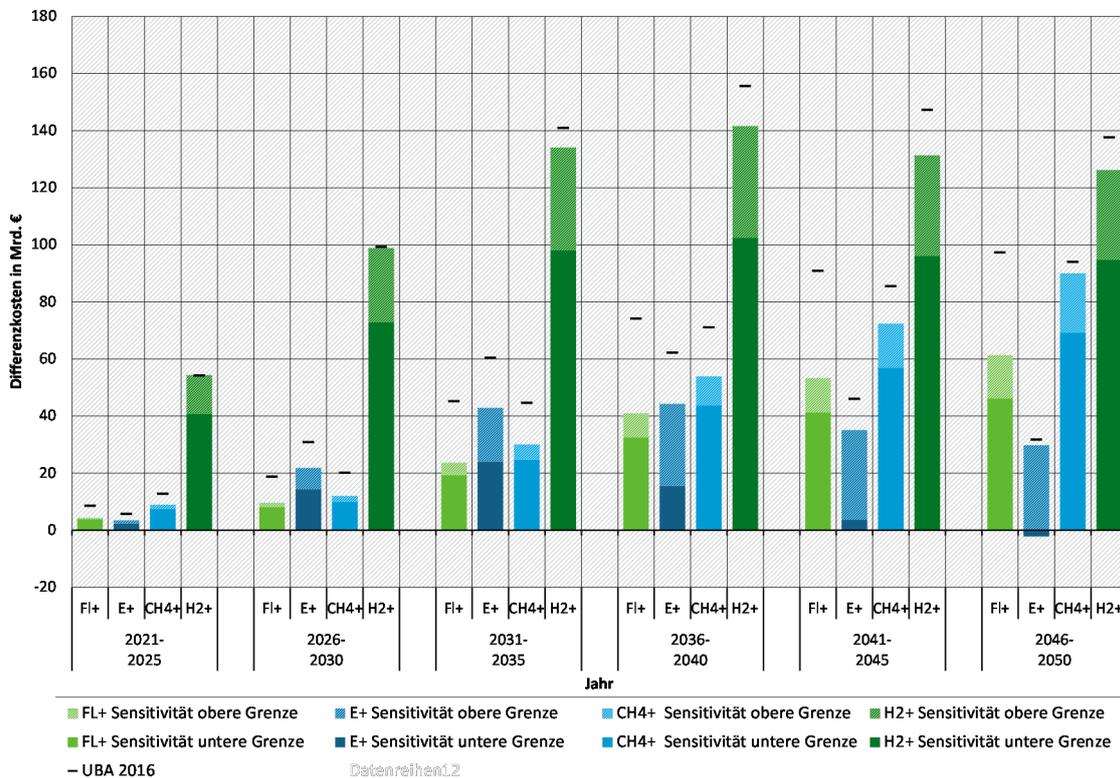
In Bezug auf die gesamten Differenzkosten zeigt sich in den Sensitivitätsbetrachtungen wie bei der Betrachtung über alle Verkehrsträger ein ähnliches Bild wie in UBA (2016). In beiden Sensitivitäten führt der Pfad der direkten Nutzung von Strom (E+) zu den niedrigsten Differenzkosten. Die Gesamtkosten für den Energiebereitstellungspfad H₂+ sind in den Sensitivitätsbetrachtungen ähnlich wie in UBA (2016) bei den Fahrzeugen im Modul „Straßennahverkehr“ am höchsten. Die bessere Energieeffizienz im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen kann die Mehrkosten bei der Fahrzeugherstellung nicht ausgleichen. Deutlich wird aber auch, dass bei den „neuen“ Technologien der batterieelektrischen und der Brennstoffzellenfahrzeuge Unsicherheiten in der Kostenentwicklung vor allem bezüglich der Fahrzeugkosten bestehen, diese aber die robusten Ergebnisse des Kostenvergleichs zwischen den Energieträgeroptionen nicht verändern. Bei optimistischen Kostenannahmen für die Technologieentwicklung sinken die Differenzkosten im Szenario E+ stark ab und der Kostenvorsprung gegenüber den anderen Szenarien erhöht sich erheblich. Eine noch stärkere Kostenreduktion ist bei den optimistischen Annahmen für die Brennstoffzellenfahrzeuge zu erkennen; die höchsten Kosten unter den betrachteten Szenarien für den gesamten Zeitraum von 2020 bis 2050 bleiben aber bestehen.

In der nachfolgenden Abbildung 16 sind für das Modul „Straßennahverkehr“ die gesamten Differenzkosten im Vergleich zum fossilen Referenzszenario in Fünfjahresschritten für die Sensitivitätsbetrachtung mit hohen (obere Grenze) und niedrigen Kosten (untere Grenze) dargestellt. Daran wird ersichtlich, dass in den Anfangsjahren das Szenario E+ kostenseitig schlechter abschneidet als die beiden Szenarien, die stromgenerierte Kraftstoffe PtL und PtG-CH₄ verwenden. Der kurz- bis mittelfristige Kostennachteil im Szenario E+ ergibt sich vor allem durch die höheren Kosten bei der Fahrzeuganschaffung. Je nach Kostenannahme wird der Kostenvorteil des Szenarios E+ bereits bis 2030 (niedrige Kostenannahmen) oder erst bis 2040 (hohe Kostenannahmen) sichtbar. In der Langfristsicht bis 2050 steigt der Kostenvorteil jedoch erheblich an, so dass die direktelektrische Nutzung mit deutlichem Abstand die günstigste Antriebs- und Energieträgeroption im „Straßennahverkehr“ ist. Am höchsten sind die Differenzkosten in der Anfangszeit im Szenario H₂+. Für den Zeitraum bis 2030 verursachen in anderen Szenarien um 80-90 % niedrigere Kosten als im Szenario H₂+ (untere Grenze).

² Siehe Tabelle II-3: Neuzulassungsstruktur für Pkw – Entwicklung 2010 bis 2050 in UBA (2016)

Langfristig nähern sich die Differenzkosten zwar an, jedoch dürften die Mehrkosten in den Anfangsjahren eine große Barriere für den Markthochlauf darstellen.

Abbildung 16: Straßennahverkehr: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario in Fünfjahresschritten (positiv: Mehrkosten)

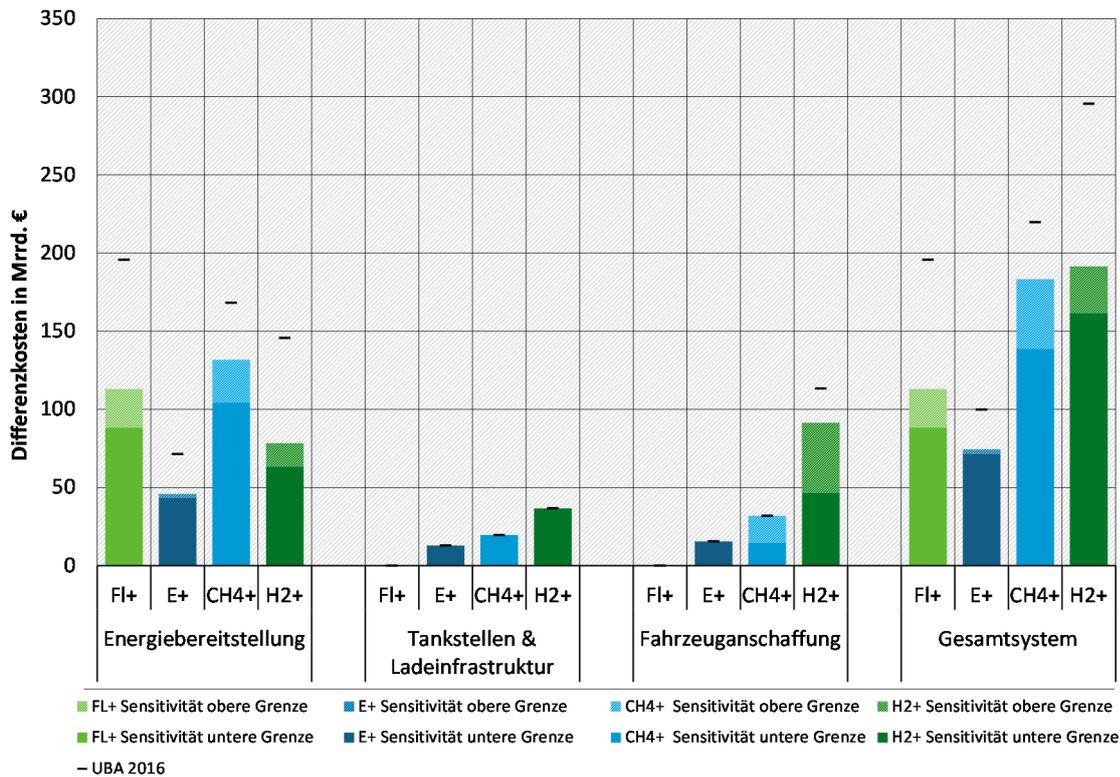


Quelle: Eigene Berechnungen

5.3 Straßenfernverkehr

Die Detailergebnisse der Sensitivitätsbetrachtungen für das Modul „Straßenfernverkehr“ (Last- und Sattelzüge, Reisebusse) werden wie im vorigen Abschnitt als Spannweite der niedrigen und hohen Kostenannahmen den Kosten aus den Ausgangsszenarien gegenübergestellt (schwarze Striche). Dargestellt sind die kumulierten Differenzkosten für den Zeitraum 2020 bis 2050.

Abbildung 17: Straßenfernverkehr: Differenzkosten der Sensitivätsbetrachtungen und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 (positiv: Mehrkosten)



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Kosten der Energiebereitstellung liegen in den Sensitivitäten aller Energiebereitstellungspfade deutlich unter den Ausgangsszenarien, was sich vor allem durch die höhere Bedeutung der Kosten im Bereich Energiebereitstellung an den Kosten des Gesamtsystems im Straßenfernverkehr begründen lässt. Aus diesem Grund erzeugen die niedrigeren Energiekosten der PtL- und PtG-Pfade in den betrachteten Sensitivitäten eine stärkere Wirkung als im Modul „Straßennahverkehr“. Dementsprechend reduzieren sich die Energiekosten vor allem in den Szenarien mit einem hohen Bezug an PtL- und PtG-Kraftstoffen (FI+, CH₄+, H₂+).

Die Kosten für Tankstellen und die Ladeinfrastruktur bleiben gegenüber den Ausgangsszenarien unverändert und stellen weiterhin einen eher geringen Kostenfaktor dar. Bei Kostenaktualisierungen oder veränderten Annahmen zur Tankstellenzahl auf Betriebsgeländen könnten sich dabei gerade die Kosten für die Tankinfrastruktur in den Szenarien CH₄+ und H₂+ verringern.

Bezüglich der Fahrzeugkosten führen die veränderten Annahmen lediglich in den Sensitivitäten zu den Szenarien CH₄+ und H₂+ zu Veränderungen der Differenzkosten. Während die Fahrzeuganschaffung in der Sensitivität mit hohen Fahrzeugkosten im CH₄+-Szenario zu Mehrkosten gegenüber UBA (2016) in Höhe von 32 Mrd. € führt, betragen diese Mehrkosten in der Sensitivität mit niedrigen Kosten nur noch 15 Mrd. € und liegen damit rund halb so hoch wie im Ausgangsszenario in UBA (2016). Die gravierendsten Änderungen gegenüber dem Ausgangsszenario in Bezug auf die Differenzkosten der Fahrzeuganschaffung ergeben sich in den Sensitivitäten zum H₂+Szenario. Sie liegen rund 20 % (Sensitivität hohe Kosten) und 60 % (Sensitivität niedrige Kosten) unter dem Ausgangsszenario. Die Ursache liegt in den deutlich niedrigeren Annahmen für die spezifischen Brennstoffzellenkosten. Die Fahrzeugkosten in den Sensitivitäten zum E+-Szenario ändern sich kaum, da die in diesen Szenarien unterstellten

Oberleitungs-Lkw und Reisebusse kaum von den niedrigeren Batteriekosten-annahmen profitieren.

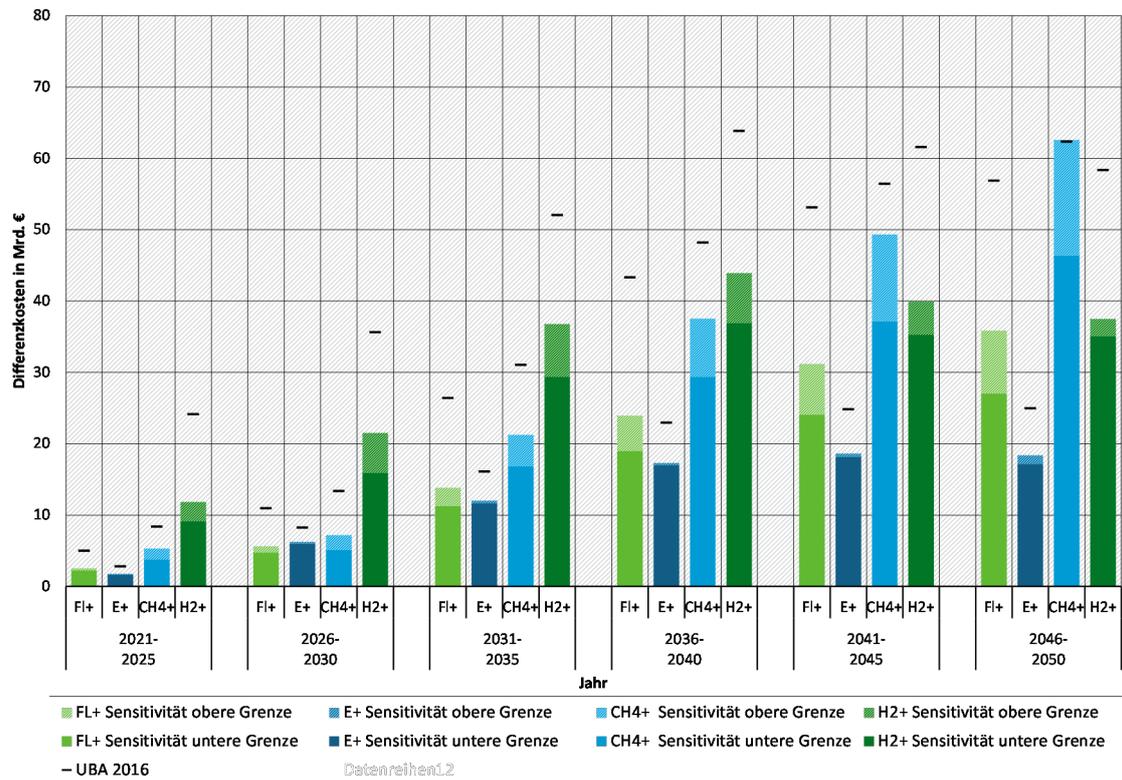
In Bezug auf die gesamten Differenzkosten zeigt sich in den Sensitivitätsbetrachtungen ein ähnliches Bild wie in UBA (2016). In beiden Sensitivitäten führt der Pfad der direkten Nutzung von Strom (E+) zu den niedrigsten Differenzkosten. Der Kostenabstand zu den übrigen Szenarien hat sich durch die starke Reduktion der Kostenannahmen für die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen allerdings erheblich reduziert.

Der PtL-Pfad Fl+ weist in der Gesamtbetrachtung niedrigere Kosten auf als die Szenarien CH₄+ und H₂+. Wie bereits in Abschnitt 5.1 angemerkt, muss bei der Diskussion der Ergebnisse berücksichtigt werden, dass keinerlei Anpassungen bezüglich der Fahrzeugeffizienz stattgefunden hat. Für die Methan-Fahrzeuge wird in UBA (2016) von einer langfristig niedrigeren Energieeffizienz als bei Fahrzeugen mit Dieselmotor ausgegangen. Neue HPDI Motoren könnten jedoch zu einem vergleichbaren Energieverbrauch führen, wodurch sich die Differenzkosten der Energiebereitstellung im CH₄+Szenario und den entsprechenden Sensitivitätsbetrachtungen verringern würden. Auch die relativ hohen Kosten der Tankinfrastruktur in den Szenarien H₂+ und CH₄+ können sich bei einem geringeren Ausbau der Tankinfrastruktur auf eigenen Betriebshöfen erheblich reduzieren. Die Kostenunterschiede zwischen den Szenarien Fl+, CH₄+ und H₂+ sind also mit Unsicherheiten behaftet.

Die mit den hier aufgeführten Sensitivitäten bestätigten Ergebnisse des Ausgangsvorhabens sind in ähnlicher Weise auch in der Studie „Klimapfade für Deutschland“ (Gerbert et al. 2018b) zu finden, in der die Nutzung von direktelektrischen Lkw aufgrund der niedrigeren THG-Vermeidungskosten auf für die Technologie geeigneten Strecken anderen technologischen Optionen vorgezogen wird. Auch gibt es in dieser Studie eine Mischung aus verschiedenen Antriebskonzepten neben der direktelektrischen Lösung, die das mit dieser Studie erzielte Ergebnis inklusive ihrer Unsicherheiten grundsätzlich in seiner Robustheit bestätigt.

In der nachfolgenden Abbildung 18 sind auch für das Modul „Straßenfernverkehr“ die gesamten Differenzkosten im Vergleich zum Referenzszenario in Fünfjahresschritten für die Sensitivitätsbetrachtung mit hohen (obere Grenze) und niedrigen Kosten (untere Grenze) dargestellt. In beiden Sensitivitätsbetrachtungen ergibt sich ein ähnliches Bild wie in UBA (2016) und auch im „Straßennahverkehr“; ab dem Jahr 2030 ergibt sich für den Pfad der direkten Nutzung von Strom (E+) ein Kostenvorteil, der sich über den Zeitverlauf stetig vergrößert. Auch im „Straßenfernverkehr“ ist es wie bei vielen Transformationsprozessen also so, dass zunächst höhere Mehrkosten in Kauf genommen werden müssen, um langfristig den kosteneffizienteren Pfad zu erreichen. Es zeigt sich allerdings auch, dass das H₂+ -Szenario wegen der größeren Bedeutung der Energiekosten langfristig einen ähnlichen Kostenbereich wie die Szenarien mit dem Fokus auf PtL und PtG-CH₄ erreichen kann.

Abbildung 18: Straßenfernverkehr: Differenzkosten der Sensitivität mit hohen Fahrzeug- und Energiebereitstellungskosten im Vergleich zum Referenzszenario in Fünfjahresschritten (positiv: Mehrkosten)



Quelle: Eigene Berechnungen]

6 Schlussfolgerungen

In diesem Vorhaben werden Sensitivitätsbetrachtungen zu den Ergebnissen der Studie „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“ (UBA 2016) erstellt, um aktuelle Kostenannahmen zu Technologiekosten zu berücksichtigen und die getroffenen Annahmen dementsprechend anzupassen. Dabei wird auf den dort erstellten Szenarien aufgesetzt und die Kostenannahmen der Energiebereitstellung und Fahrzeuganschaffung in jeweils einer hohen und einer niedrigen Kostenentwicklung angepasst. Abweichend von UBA (2016) werden die Kosten für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors für den Zeitraum 2020 bis 2050 ausgewiesen. Für eine Einordnung der Ergebnisse wird auf Kapitel 4.1 „Einordnung der Ergebnisse und Einschränkungen in der Betrachtung“ in UBA (2016) verwiesen.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtung in Kapitel 5 bestätigen die in UBA (2016) ermittelten Ableitungen für den Kostenvergleich verschiedener Antriebs- und Energieträgeroptionen eines dekarbonisierten Verkehrssystems. Betrachtet man die Gesamtkosten für die Transformation des Verkehrssystems hin zu einem CO₂-emissionsfreien Sektor sowie die in einem CO₂-freien System langfristig anfallenden Kosten, schneiden Szenarien mit einem Fokus auf der Stromnutzung in batterieelektrischen und netzgebundenen Fahrzeugen bei unterschiedlichen Kostensensitivitäten am günstigsten ab. Da weitere Studien wie beispielsweise „Klimapfade für Deutschland“ im Auftrag des BDI hinsichtlich der THG-Vermeidungskosten ähnliche Aussagen treffen, kann diese Aussage mit hoher Robustheit getroffen werden.

Die Betrachtung der Kosten in Fünfjahresscheiben macht zudem deutlich, dass mit der Umstellung des Verkehrssystems auf die direktelektrische Nutzung zunächst höhere Systemkosten anfallen als bei anderen Minderungstechnologien. Je nach Kostenannahmen ist der direktelektrische Pfad bereits um das Jahr 2030 bzw. um das Jahr 2035 günstiger als die anderen untersuchten Entwicklungspfade. Klar ist allerdings auch, dass aufgrund der höheren Systemkosten politische Maßnahmen benötigt werden, den im Szenario E+ dargestellten Entwicklungspfad einzuschlagen.

Deutlich unklarer ist die Bewertung möglicher weiterer Antriebs- und Energieträgeroptionen. Auch wenn die Szenarien mit dem Fokus auf PtL-Kraftstoffe (FI+) in der Gesamtbetrachtung geringfügig unter den Kosten mit dem Schwerpunkt auf PtG-CH₄ (CH₄+) liegen, kann keine klare Aussage zur Bewertung zwischen diesen beiden Optionen getroffen werden. Der aufgezeigte Kostenunterschied zwischen diesen beiden Szenarien liegt im Unsicherheitsbereich der Szenarien. Ein größerer Abstand in der Kostenbetrachtung ergibt sich zu den Szenarien mit einem Fokus auf die Wasserstoffnutzung (H₂+). Bei der Wasserstoffnutzung ist es in den Szenarien so, dass die Mehrkosten der im Verhältnis zu den übrigen Fahrzeugen teureren Fahrzeuge nicht durch erheblich niedrige Energiebereitstellungskosten ausgeglichen werden können.

7 Literaturverzeichnis

Adolf, Jörg; Balzer, Christoph; Louis, Jurgen; Schabla, Uwe; Fishedick, Manfred; Arnold, Karin et al. (2017): Shell Wasserstoff-Studie. Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂. Shell Deutschland; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Hamburg.

Brynolf, Selma; Taljegard, Maria; Grahn, Maria; Hansson, Julia (2017): Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. Chalmers University of Technology; Swedish Environmental Research Institute (IVL). Göteborg.

Bünger, Ulrich; Landinger, Hubert; Weindorf, Werner; Wurster, Reinhold; Zerhusen, Jan; Zittel, Werner (2016): Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in Lkw im Fernverkehr Abschlussbericht. Eine Expertise für die Open Grid Europe GmbH. Hg. v. Ludwig Bölkow Systemtechnik. LBST.

Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende. Hg. v. Agora Verkehrswende und Agora Energiewende. Frontier Economics. Berlin.

Gerbert, Philipp; Herhold, Patrick; Buchardt, Jens; Schönberger, Stefan; Rechenmacher, Florian; Krichner, Almut et al. (2018a): Klimapfade für Deutschland. Hg. v. Bundesverband der deutschen Industrie (BDI). The Boston Consulting Group (BCG); Prognos. Berlin, Basel, Hamburg, München.

Gerbert, Philipp; Herhold, Patrick; Buchardt, Jens; Schönberger, Stefan; Rechenmacher, Florian; Krichner, Almut et al. (2018b): Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI). The Boston Consulting Group (BCG); Prognos.

Hill, Nikolas; Skinner, Ian; Zazias, Georgios; Siskos, Pelopidas; Petropoulos, Apostolos; Fragkiadakis, Kostas; Paroussos, Leonidas (2018): Assessing the impacts of selected options for regulating CO₂ emissions from new passenger cars and vans after 2020. Final Report for the European Commission. Ricardo Energy & Environment; TEPR; E3MLab.

Hill, Nikolas; Windisch, Elisabeth; Kirsch, Felix, Horton, Gareth; Dun, Craig; Hausberger, Stefan; Matzer, Claus et al. (2016): Improving understanding of technology and costs for CO₂ reductions from cars and LCVs in the period to 2030 and development of cost curves. Service Request 4 to LDV Emissions Framework Contract. Report for DG Climate Action Ref. CLIMA.C.2/FRA/2012/0006. Ricardo Energy & Environment; TU Graz; Cardiff Business School; Joint Research Centre (JRC). Harwell.

Hobohm, Jens; Maur, Alex auf der; Dambeck, Hans; Kemmler, Andreas; Koziel, Sylvie; Kreidelmeyer, Sven et al. (2018): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Endbericht. Hg. v. Prognos AG, Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) und Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Berlin.

Hülsmann, Friederike; Mottschall, Moritz; Hacker, Florian; Kasten, Peter (2014): Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen. Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Working Paper 3/2014. Öko-Institut. Berlin.

James, Brian; Houchins, Cassidy; DeSantis, Daniel; Huya-Kouadio, Jenny (2016): Onboard Type IV Compressed Hydrogen Storage System Cost Analysis. Webinar. Strategic Analysis.

Joest, Steffen; Fichtner, Maximilian; Wietschel, Martin; Bünger, Ulrich; Stiller, Christoph; Schmidt, Patrick; Merten, Frank (2009): Studie zur Frage „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050?“. GermanHy. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS); Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW).

Matthes, Felix; Heinemann, Christoph; Ludig, Sylvie; Cook, Vanessa (2017): Erneuerbare vs. fossile Stromsysteme: ein Kostenvergleich. Stromwelten 2050 - Analyse von Erneuerbaren, kohle-, und gasbasierten Elektrizitätssystemen. Analyse. Hg. v. Agora Energiewende. Öko-Institut. Berlin.

McKinsey (2010): A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. Hg. v. McKinsey.

Moultak, Marissa; Lutsey, Nic; Hall, Dale (2017): Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles. International Council on Clean Transportation (ICCT). Washington DC (White Paper).

Pfennig, Maximilian; Gerhardt, Norman; Pape, Carsten; Böttger, Diana (2017): Mittel- und Langfristige Potenziale von PtL und H2-Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen. Teilbericht im Rahmen des Projektes: KLIMAWIRKSAMKEIT ELEKTROMOBILITÄT - Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES). Kassel.

Siegemund, Stefan; Trommler, Marcus; Kolb, Ole; Zinnecker, Valentin; Schmidt, Patrick; Weindorf, Werner et al. (2017): E-Fuels Study: The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU. An expertise by LBST and dena. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST). Berlin.

UBA (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Endbericht. Unter Mitarbeit von Peter Kasten, Moritz Mottschall, Wolfgang Köppel, Charlotte Degünther, Martin Schmied und Philipp Wüthrich. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Wolfram, Paul; Lutsey, Nic (2016): Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions. International Council on Clean Transportation (ICCT) (Working Paper, 2016-14).

A Tabellenanhang Szenarioannahmen

A.1 Komponentenkosten

Tabelle 1: Spezifische Komponentenkosten in den Ausgangsszenarien (UBA 2016) sowie in der Sensitivätsbetrachtung mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050 (€)

Komponente	Einheit	2020	2030	2040	2050
UBA 2016- Pkw					
FC-System	€/kW	150	80	62	43
H ₂ -Tank (Gasförmig)	€/kWh	11	10	9	8
Batterie	€/kWh	320	295	221	148
UBA 2016- Lkw					
FC-System	€/kW	880	150	80	62
H ₂ -Tank	€/kWh	23	22	21	20
Batterie	€/kWh	542	499	375	251
CH ₄ -Tank	€/kWh	11,4	10,9	10,3	9,8
Sensitivität niedrige Fahrzeugkosten					
FC-System	€/kW	134	60	44	38
H ₂ -Tank (Gasförmig)	€/kWh	11	10	9	8
H ₂ -Tank (flüssig)	€/kWh	15	12	11	11
Batterie	€/kWh	174	102	75	65
CH ₄ -Tank (gasförmig)	€/kWh	8,4	6,9	6,6	6,2
CH ₄ -Tank (flüssig)	€/kWh	6,0	4,9	4,7	4,5
Sensitivität hohe Fahrzeugkosten					
FC-System	€/kW	185	93	75	62
H ₂ -Tank (Gasförmig)	€/kWh	20	17	16	15
H ₂ -Tank (flüssig)	€/kWh	28	27	25	24
Batterie	€/kWh	260	205	180	160
CH ₄ -Tank (gasförmig)	€/kWh	11,4	10,9	10,3	9,8
CH ₄ -Tank (flüssig)	€/kWh	11,4	10,9	10,3	9,8

A.2 Fahrzeugkosten

Tabelle 2: Herstellungskosten neu zugelassener Pkw-mittel in den Ausgangsszenarien (UBA 2016) sowie in der Sensitivätsbetrachtung mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050 (€)

	2020	2030	2040	2050
UBA 2016				
ICEV-Benzin	14.478	14.952	17.697	18.803
ICEV-Diesel	15.387	15.728	17.576	18.721
ICEV-CH ₄	16.730	17.087	19.719	20.719
FCEV	32.925	26.666	25.974	24.968
PHEV	19.755	18.627	20.680	21.243
REEV (Benzin)	22.097	20.345	21.604	21.775
BEV - 150	22.059	19.821	19.325	18.789
BEV - 300	27.360	22.957	21.380	19.999
Sensitivität niedrige Fahrzeugkosten				
ICEV-Benzin	14.478	14.952	17.697	18.803
ICEV-Diesel	15.387	15.728	17.576	18.721
ICEV-CH ₄	16.437	16.546	19.205	20.230
FCEV	30.658	23.740	23.507	23.955
PHEV	17.727	15.934	18.532	19.996
REEV (Benzin)	19.069	16.336	18.414	19.926
BEV - 150	18.228	14.768	15.308	16.463
BEV - 300	20.886	16.259	16.436	17.452
Sensitivität hohe Fahrzeugkosten				
ICEV-Benzin	14.478	14.952	17.697	18.803
ICEV-Diesel	15.387	15.728	17.576	18.721
ICEV-CH ₄	16.730	17.087	19.719	20.719
FCEV	36.754	28.235	27.899	27.787
PHEV	18.921	17.375	20.074	21.423
REEV (Benzin)	20.853	18.482	20.704	22.043
BEV - 150	20.485	17.472	18.192	19.126
BEV - 300	24.455	20.470	20.899	21.560

Tabelle 3: Herstellungskosten neu zugelassener Lkw >12 t zGG in den Ausgangsszenarien (UBA 2016) sowie in der Sensitivitätsbetrachtung mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050 (€)

	2020	2030	2040	2050
UBA 2016				
ICEV-Diesel	47.864	59.890	57.928	56.154
ICEV-CH ₄	58.334	67.848	65.515	63.340
BEV	150.948	121.859	101.970	83.021
PHEV	141.860	122.252	103.740	87.132
FCEV	205.094	94.174	80.283	74.526
Sensitivität niedrige Fahrzeugkosten				
ICEV-Diesel	47.864	59.890	56.556	55.340
ICEV-CH ₄	54.895	64.047	61.137	59.680
BEV	81.363	64.870	59.965	57.617
PHEV	85.663	74.631	69.564	66.849
FCEV	81.280	69.929	65.991	63.965
Sensitivität hohe Fahrzeugkosten				
ICEV-Diesel	47.864	59.890	57.036	55.756
ICEV-CH ₄	58.334	67.848	64.622	62.942
BEV	97.608	79.650	74.667	70.603
PHEV	98.783	86.981	81.526	77.217
FCEV	95.017	79.573	75.062	71.702

Tabelle 4: Herstellungskosten neu zugelassener Last- und Sattelzüge in den Ausgangsszenarien (UBA 2016) sowie in der Sensitivitätsbetrachtung mit niedrigen und hohen Fahrzeugkosten - Entwicklung von 2020 bis 2050 (€)

	2020	2030	2040	2050
UBA 2016				
ICEV-Diesel	74.113	88.075	85.376	82.945
ICEV-CH ₄	100.518	111.169	107.339	103.785
PHEV	114.489	112.332	105.326	98.994
FCEV	418.256	179.534	149.590	137.097
OC-GIV	111.195	107.677	104.680	101.955
Sensitivität niedrige Fahrzeugkosten				
ICEV-Diesel	74.113	85.103	83.239	81.675
ICEV-CH ₄	86.083	94.901	93.937	91.846
PHEV	99.076	98.428	95.329	93.052
FCEV	150.030	121.567	114.576	111.755
OC-GIV	108.115	104.873	102.663	100.755
Sensitivität hohe Fahrzeugkosten				
ICEV-Diesel	74.113	85.874	83.987	82.324
ICEV-CH ₄	100.518	108.968	105.950	103.164
PHEV	102.674	102.034	98.828	96.089
FCEV	192.685	158.615	148.215	140.453
OC-GIV	108.834	105.600	103.369	101.368

A.3 Kosten der Energiebereitstellung

**Tabelle 5: Kosten der Energiebereitstellung fossiler Energieträger bis zur Tankstelle –
Entwicklung von 2020 bis 2050 in ct/kWh**

	2020	2030	2040	2050
UBA 2016				
Benzin	6,9	8,4	9,7	11,4
Diesel	6,4	7,9	9,2	10,8
Kerosin	6,0	7,8	9,3	11,2
fossil-CH ₄ (g)	4,5	4,7	5,2	5,9
fossil-CH ₄ (liq)	5,0	5,2	5,7	6,4
fossil-H ₂ (g)	10,7	10,9	11,4	12,1
fossil-H ₂ (liq)	10,7	10,9	11,4	12,1
Sensitivität hohe Kraftstoffkosten				
Benzin	6,1	9,0	10,2	11,3
Diesel	5,9	8,7	9,8	10,9
Kerosin	5,9	8,7	9,8	10,9
fossil-CH ₄ (g)	3,9	4,9	5,3	5,8
fossil-CH ₄ (liq)	3,9	4,9	5,3	5,8
fossil-H ₂ (g)	8,5	9,9	10,4	10,8
fossil-H ₂ (liq)	8,5	9,9	10,4	10,8
Sensitivität niedrige Kraftstoffkosten				
Benzin	5,7	7,2	7,9	8,6
Diesel	5,5	7,0	7,6	8,3
Kerosin	5,5	7,0	7,6	8,3
fossil-CH ₄ (g)	3,7	4,3	4,7	5,1
fossil-CH ₄ (liq)	3,7	4,3	4,7	5,1
fossil-H ₂ (g)	7,8	8,4	8,8	9,1
fossil-H ₂ (liq)	7,8	8,4	8,8	9,1

Tabelle 6: PtL- und PtG-Importkosten* in ct/kWh – Entwicklung von 2020 bis 2050

	2020	2030	2040	2050
UBA 2016				
PtL	40,4	29,7	24,1	20,4
PtG-CH ₄	33,0	24,3	19,8	16,7
PtG-H ₂	35,5	27,1	22,4	19,0
Sensitivität hohe Kraftstoffkosten				
PtL	22,0	19,4	17,5	15,9
PtG-CH ₄	21,8	18,9	17,0	15,2
PtG-H ₂	19,6	17,1	15,6	14,4
Sensitivität niedrige Kraftstoffkosten				
PtL	19,5	15,4	13,5	12,2
PtG-CH ₄	19,4	15,3	13,4	12,2
PtG-H ₂	17,4	13,8	12,7	11,7

*Grenzübergangspreis – beinhaltet den Transport nach Deutschland inkl. Verflüssigung (bei den PtG-Energieträgern)

Tabelle 7: Kosten der Energiebereitstellung strombasierter Energieträger bis zur Tankstelle in ct/kWh – Entwicklung von 2020 bis 2050 gemäß UBA (2016)

	2020	2030	2040	2050
PtL				
Gestehung	40,4	29,7	24,1	20,4
Transport nach D	0	0	0	0
Verteilung in D	0,1	0,1	0,1	0,1
Gesamt	40,6	29,8	24,2	20,5
PtG-CH₄				
Gestehung	31,6	23,2	18,8	15,9
Verflüssigung	1,1	0,9	0,8	0,7
Transport nach D	0,3	0,2	0,2	0,1
Verteilung in D	0,4	0,4	0,4	0,4
Gesamt	33,4	24,7	20,1	17,1
PtG-H₂				
Gestehung	28,8	21,4	17,2	14,5
Verflüssigung	6,4	5,5	5,0	4,4
Transport nach D	0,3	0,2	0,2	0,1
Verteilung in D	0,6	0,6	0,6	0,6
Gesamt	36,1	27,8	23,0	19,6

Tabelle 8: Kosten der Energiebereitstellung strombasierter Energieträger bis zur Tankstelle in ct/kWh – Sensitivität hohe Kraftstoffkosten

	2020	2030	2040	2050
PtL				
Gestehung	21,9	19,3	17,5	15,9
Transport nach D	0,04	0,04	0,04	0,04
Verteilung in D	1,0	1,0	1,0	1,0
Gesamt	23,0	20,4	18,5	16,9
PtG-CH₄				
Gestehung	20,9	18,0	16,1	14,4
Verflüssigung	0,69	0,67	0,64	0,61
Transport nach D	0,24	0,24	0,24	0,24
Verteilung in D	1,1	1,1	1,1	1,1
Gesamt	22,9	20,0	18,1	16,3
PtG-H₂				
Gestehung	13,2	11,6	10,6	10,0
Verflüssigung	6,1	5,2	4,7	4,1
Transport nach D	0,3	0,3	0,3	0,3
Verteilung in D	2,4	2,4	2,4	2,4
Gesamt	22,0	19,5	18,0	16,8

Tabelle 9: Kosten der Energiebereitstellung strombasierter Energieträger bis zur Tankstelle in ct/kWh – Sensitivität niedrige Kraftstoffkosten

	2020	2030	2040	2050
PtL				
Gestehung	19,5	15,4	13,5	12,2
Transport nach D	0,04	0,04	0,04	0,04
Verteilung in D	1,0	1,0	1,0	1,0
Gesamt	23,0	20,4	18,5	16,9
PtG-CH₄				
Gestehung	18,4	14,4	12,5	11,3
Verflüssigung	0,69	0,67	0,64	0,61
Transport nach D	0,24	0,24	0,24	0,24
Verteilung in D	1,1	1,1	1,1	1,1
Gesamt	20,5	16,4	14,5	13,3
PtG-H₂				
Gestehung	11,1	8,3	7,7	7,3
Verflüssigung	6,1	5,2	4,7	4,1
Transport nach D	0,3	0,3	0,3	0,3
Verteilung in D	2,4	2,4	2,4	2,4
Gesamt	19,8	16,2	15,1	14,1

B Tabellenanhang Ergebnisse

Tabelle 10: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Kosten und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 differenziert nach Verkehrsträger (Mrd. €)

	FL+	E+	CH4+	H2+
UBA 2016				
Straßenverkehr	542	343	559	1.044
Luftverkehr	201	201	201	201
Schiffsverkehr	278	278	263	272
Summe	1.021	822	1.023	1.518
Sensitivität hoch				
Straßenverkehr	313	256	460	886
Luftverkehr	118	118	118	118
Schiffsverkehr	193	193	203	175
Summe	624	567	781	1.179
Sensitivität niedrig				
Straßenverkehr	245	133	358	674
Luftverkehr	92	92	92	92
Schiffsverkehr	147	147	155	148
Summe	484	373	605	914

Tabelle 11: Straßennahverkehr: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Kosten und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 (Mrd. €)

	FL+	E+	CH4+	H2+
UBA 2016				
Energiebereitstellung	335	22	225	234
Tankstellen & Ladeinfrastruktur	0	38	10	66
Fahrzeuganschaffung	0	177	93	435
Gesamtsystem	335	237	328	735
Sensitivität hoch				
Energiebereitstellung	193	4	163	98
Tankstellen & Ladeinfrastruktur	0	38	10	66
Fahrzeuganschaffung	0	135	94	522
Gesamtsystem	193	177	267	687
Sensitivität niedrig				
Energiebereitstellung	151	21,4278	133	112
Tankstellen & Ladeinfrastruktur	0	38	10	66
Fahrzeuganschaffung	0	-2	69	327
Gesamtsystem	151	58	212	505

Tabelle 12: Straßenfernverkehr: Differenzkosten der Sensitivitätsbetrachtungen mit hohen und niedrigen Kosten und der Ausgangsszenarien (UBA 2016) im Vergleich zum jeweiligen Referenzszenario für den Zeitraum 2020 bis 2050 (Mrd. €)

	FL+	E+	CH4+	H2+
UBA 2016				
Energiebereitstellung	196	71	168	146
Tankstellen & Ladeinfrastruktur	0	13	20	37
Fahrzeuganschaffung	0	16	32	113
Gesamtsystem	196	100	220	296
Sensitivität hoch				
Energiebereitstellung	113	46	132	64
Tankstellen & Ladeinfrastruktur	0	13	20	37
Fahrzeuganschaffung	0	16	32	91
Gesamtsystem	113	74	183	192
Sensitivität niedrig				
Energiebereitstellung	88	43	104	78
Tankstellen & Ladeinfrastruktur	0	13	20	37
Fahrzeuganschaffung	0	16	15	47
Gesamtsystem	88	72	139	162