Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030

Optimierung des Infrastrukturaufbaus für O-Lkw und Analyse von Kosten- und Umwelteffekten in der Einführungsphase

Untersuchung im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“

Julius Jöhrens, Julius Rücker, Jan Kräck, Michel Allekotte, Hinrich Helms, Kirsten Biemann, Maybritt Schillinger (ifeu)
Volker Waßmuth, Daniela Paufler-Mann (PTV Transport Consult), Felix Frischmuth, Norman Gerhard (Fraunhofer IEE)

Heidelberg, März 2020

ifeu Wilckensstraße 3 D - 69120 Heidelberg Telefon +49 (0)6 221. 47 67 - 0 Telefax +49 (0)6 221. 47 67 - 19 E-Mail ifeu@ifeu.de www.ifeu.de

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Erneuerbar
mobil

Inhalt

Abkürzungen **4**

Zusammenfassung **5**

Executive Summary **8**

1 Ziel und Rahmen der Analyse **11**

1.1 Zielstellung 11

1.2 Zugrundeliegende Potentiale für O-Lkw 12

1.3 Rahmen und Systemgrenzen der Modellierung 14

1.3.1 Zeitliche Beschränkung auf die ersten 10 Jahre einer Systemeinführung 14

1.3.2 Räumliche Beschränkung auf innerdeutsche Relationen 15

1.3.3 Technologische Beschränkung auf Diesel- und O-Lkw 15

2 Modellierungsansatz **17**

2.1 Daten – Lkw-Fahrmuster 17

2.2 TCO-Rechnung und Verbrauchssimulation 20

2.3 Optimierung des Gesamtsystems 21

2.3.1 Modellgrundsätze und Randbedingungen 21

2.3.2 Vorgehen bei der Optimierung des Gesamtsystems 23

2.4 Umweltbewertung 27

3 Einführungsszenarien **29**

3.1 Leitgedanken und Rahmenbedingungen 29

3.2 Beschreibung der Szenarien 30

3.3 Ergebnisse der Modellrechnungen 32

3.3.1 Fahrzeugbestand 32

3.3.2 Fahrleistung 35

3.3.3 Energiebedarf 37

3.3.4 Umweltwirkungen über den Lebenszyklus 37

3.3.5 Kosten und Einsparungen 43

3.3.6 Streckenelektrifizierung 49

3.4 Zusammenfassung und Kosten-Nutzen-Gegenüberstellung 53

Inhalt

4 Schlussfolgerungen für Einführungspfade **57**

4.1 Für Errichtung und Betrieb eines Oberleitungs-Basisnetzes von 3.200 km müssten einmalig über 10 Jahre etwa 7 Mrd. € investiert werden. Ein ähnlicher Betrag wird derzeit jedes Jahr in die Bundesfernstraßen investiert. 57

4.2 Eine Vorfinanzierung der Infrastruktur ist nötig, da eine Kostenverteilung auf die Lkw-Betreiber erst durch einen hohen Nutzungsgrad ermöglicht wird. Später ist eine Gegenfinanzierung durch die Nutzer möglich. 58

4.3 Strecken auf den Nord-West- und Nord-Süd-Achsen ermöglichen bereits bei geringem Oberleitungsausbau eine vergleichsweise hohe elektrische Fahrleistung. 60

4.4 Ergreift der Staat Anreizmaßnahmen zusätzlich zum Infrastrukturausbau, so kann der Markthochlauf in den ersten Jahren deutlich beschleunigt und die Systemeinführung damit stabilisiert werden. 61

4.5 Eine Mautbefreiung im elektrischen Fahrbetrieb und eine Kaufprämie erhöhen zwar den O-Lkw-Bestand, senken jedoch die elektrische Fahrleistung pro Fahrzeug. 63

4.6 Kaufprämie und Mautbefreiung für O-Lkw beschleunigen den Markthochlauf, sind längerfristig aber mit erheblichen zusätzlichen Kosten für den Staat verbunden. Eine CO_2-Bepreisung erhöht dann die Kosteneffizienz. 64

4.7 Während der gesamten Einführungsphase ist aus wirtschaftlicher Sicht der gleichzeitige Einsatz unterschiedlicher O-Lkw-Konfigurationen möglich. 66

4.8 Auch wenn ein O-Lkw-System lediglich durch besonders geeignete inländische Lkw-Verkehre genutzt wird, ist es im Jahr 2030 gegenüber dem Einsatz von PtL-Kraftstoffen wirtschaftlich konkurrenzfähig. 68

5 Ausblick jenseits des betrachteten Zeitraums **71**

Literatur **73**

Anhang **78**

A1: Eingangsgrößen und Annahmen 78

A2: Dokumentation der Modellkomponenten 89

A3: Methodik der Umweltbewertung 94

Abkürzungen

BAB	Bundesautobahn
CAPEX	Capital Expenditures
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU-ETS	Emission Trading System (Emissionshandel in der EU)
Fzg	Fahrzeug
LCA	Life-cycle Assessment (Ökobilanz)
O-BEV	Oberleitungs-Batterie- Fahrzeug (rein elektrisch)
O-HEV	Oberleitungs-Hybrid-Fahrzeug (mit Diesel-Hybridantrieb)
O-Lkw	Oberleitungs-Lkw (O-BEV oder O-HEV)
OH-Lkw	Oberleitungs-Hybrid-Lkw (ein als O-HEV ausgelegter Lkw)
OPEX	Operational Expenditures
PM_{10}	Partikel (Particulate Matter) mit einem Durchmesser < 10 µm
PtL	Power-to-Liquid
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
SZM	Sattelzugmaschine
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgase
TtW	Tank to wheel (nur Fahrzeugbetrieb)
WtT	Well to tank (nur Energievorkette)
WtW	Well to wheel (Fahrzeugbetrieb und Energievorkette)

Zusammenfassung

Im vorliegenden Papier wird die Einführungsphase eines möglichen O-Lkw-Systems in Deutschland quantitativ untersucht. **Im Kern geht es dabei um folgende Fragen**:

Gegenstand der Studie ist die Einführungsphase eines O-Lkw-Systems in Deutschland.

- **Ist ein Markthochlauf von O-Lkw in Deutschland zu erwarten**, wenn eine politische Entscheidung zum Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur getroffen wurde?
- **Welche finanziellen und ökologischen Auswirkungen** sind während der Einführungsphase eines O-Lkw-Systems zu erwarten?
- **Welche Förderinstrumente für O-Lkw sind effektiv** (bezüglich des Markthochlaufs und der CO_2-Minderungen) **und kosteneffizient** (bezüglich der Kosten für den Staat und ggf. Infrastrukturbetreiber)?
- **Welche Strecken** sind für einen schnellen und kosteneffizienten Markthochlauf in welcher Reihenfolge zu elektrifizieren?

Dazu wurden modellbasierte Berechnungen für die ersten 10 Jahre nach der politischen Entscheidung für die Einführung eines O-Lkw-Systems durchgeführt und deren Implikationen untersucht. Zum Einsatz kam ein Modellverbund, der Komponenten für die Güterverkehrsnachfrage, die fahrzeugseitigen Energieflüsse, die Kostenstruktur aus Sicht der Fahrzeugbetreiber sowie die geographisch aufgelöste Analyse von Fahrzeugeinsatz und Infrastrukturzubau beinhaltet. Grundlage der Modellierung stellten lediglich innerdeutsche Verkehre mit Last- und Sattelzügen dar, die zudem einige weitere Eignungskriterien erfüllten. Das der Marktmodellierung zugrundeliegende Fahrleistungspotential wurde somit im Sinne einer konservativen Betrachtung stark eingeschränkt.

Basierend auf einem Verkehrsmodell werden die ersten 10 Jahre einer Systemeinführung von O-Lkw modelliert.

Zielpunkt der betrachteten O-Lkw-Einführungsphase ist ein Oberleitungsnetz von rund 3.200 km Gesamtlänge auf stark befahrenen deutschen Autobahnen. Durch Umstellung geeigneter innerdeutscher Lkw-Verkehre auf diesem Netz könnten jährlich etwa 9,2 Mio. Tonnen CO_2 aus der Verbrennung von Dieselkraftstoff vermieden werden. Davon entfallen etwa 3,6 Mio. Tonnen CO_2 auf solche Verkehre, die prinzipiell als Pendelverkehre durchgeführt werden könnten und somit ein besonders hohe Eignung für O-Lkw-Betrieb aufweisen. Diese Teilmenge ist Grundlage der hier durchgeführten Marktmodellierung.

Ein Oberleitungsnetz von 3.200 km ermöglicht CO_2-Minderungen von ca. 9,2 Mt p.a. durch prinzipiell geeignete Lkw-Verkehre.

In fünf Maßnahmenszenarien und einem Referenzszenario wurden die Einflüsse möglichen politischen Handelns auf den Markthochlauf von O-Lkw in Deutschland untersucht. Für jedes Szenario wurde die zeitliche Abfolge der Oberleitungs-Ausbaumaßnahmen aus Systemkostensicht optimiert. Die Szenarien wurden sodann hinsichtlich der Entwicklung der Fahrzeugflotte, der Energieverbräuche, der resultierenden Umweltwirkungen sowie der Kostenbilanz für Lkw-Betreiber und öffentliche Hand verglichen. **Aus den Analysen lassen sich folgende Kernaussagen ableiten:**

Mittels Szenarien wurde der Einfluss verschiedener politischer Rahmenbedingungen untersucht.

- Bei Existenz eines Oberleitungs-Basisnetzes im Jahr 2030, das hier mit etwa 3.200 km Länge angenommen wurde, lassen sich fast alle hier betrachteten Verkehre unabhängig vom gewählten Szenario wirtschaftlich mit O-Lkw betreiben, und zwar ohne Änderungen der regulatorischen Rahmenbedingungen (und auch ohne CO_2-Preis im Verkehrssektor).

Für O-Lkw geeignete Verkehre rechnen sich in 2030 in der Regel.

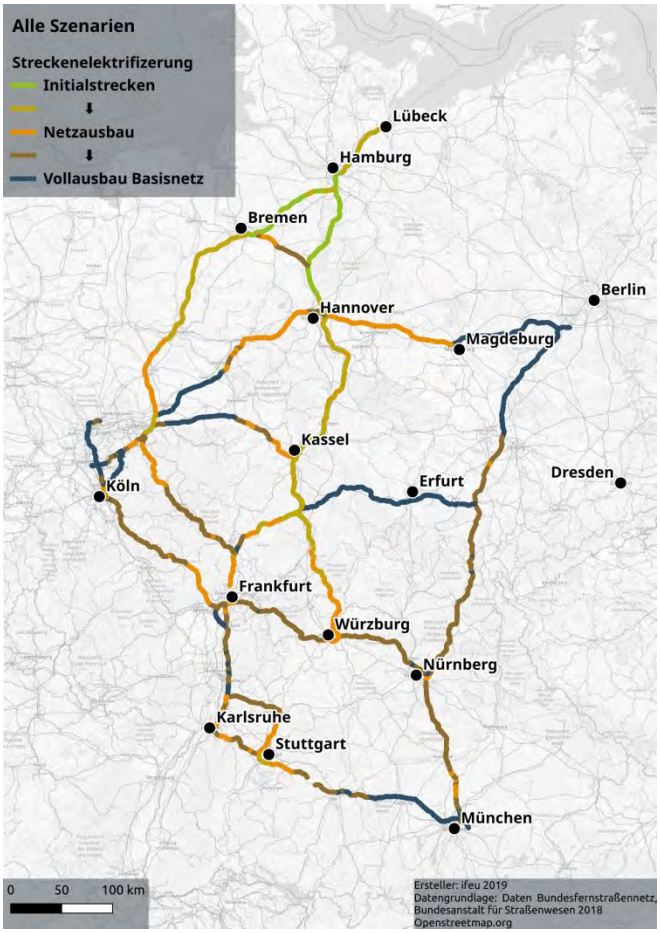
- Eine Vorfinanzierung der Infrastruktur ist nötig, da eine Kostenverteilung auf die Lkw-Betreiber erst durch einen hohen Nutzungsgrad ermöglicht wird. Etwa 10 Jahre nach Systemeinführung ist voraussichtlich eine Gegenfinanzierung der laufenden Kosten (Instandhaltung und Abschreibung der Infrastruktur) durch die Nutzer möglich. In der Folge können bei den Nutzern dann auch sukzessive Überschüsse zur Refinanzierung der Einführungsphase abgeschöpft werden.

Die O-Infrastruktur, muss vorfinanziert werden, kann mittelfristig aber durch ihre Nutzer refinanziert werden.

- Strecken im Nord-Westen (A1) und auf der zentralen Nord-Süd-Achse (A7) Deutschlands ermöglichen bereits bei geringem Oberleitungsausbau eine vergleichsweise hohe elektrische Fahrleistung. Sie eignen sich somit als Startpunkte eines Systemausbaus.

Aus den Rechnungen folgen Empfehlungen zur zeitlichen Priorisierung des Oberleitungsausbaus.

- Ergreift der Staat Anreizmaßnahmen zusätzlich zum Infrastrukturausbau, so kann der Markthochlauf in den ersten Jahren deutlich beschleunigt und die Systemeinführung damit stabilisiert werden. Dies kann zusätzliche Sicherheit für Lkw-Betreiber, Fahrzeughersteller und politische Akteure schaffen.



- Eine Reduktion oder Befreiung von der Lkw-Maut für elektrische Betriebsanteile stellt das effektivste Instrument dar, um hohe elektrische Fahrleistungen zu erreichen. Eine Kaufprämie hingegen führt zu hohen O-Lkw-Beständen, aber durchschnittlich geringen elektrischen Fahrleistungen pro Fahrzeug.
- Während der gesamten Einführungsphase ist aus wirtschaftlicher Sicht der gleichzeitige Einsatz unterschiedlicher O-Lkw-Konfigurationen möglich.
  - O-HEV können technisch gesehen überall eingesetzt werden, die Entscheidung für ihren Einsatz folgt im Wesentlichen wirtschaftlichen Erwägungen. Abhängig von den fahrzeugbezogenen Fördermaßnahmen wird der Einsatz von O-HEV etwa 3-6 Jahre nach Systemeinführung für eine größere Zahl von Einsatzprofilen möglich.
  - Aufgrund ihrer begrenzten Reichweite abseits der Oberleitung ist der Markthochlauf rein elektrischer O-BEV stärker als bei O-HEV an den Oberleitungsausbau gekoppelt und erfolgt insgesamt langsamer und stetiger. O-BEV profitieren besonders von künftigen Kostendegressionen bei den Traktionsbatterien und zeigen mit fortschreitender Zeit steigende Batteriekapazitäten.
- Auch wenn ein Oberleitungsbasisnetz lediglich durch besonders geeignete inländische Lkw-Verkehre genutzt wird, ist das O-Lkw-System bereits im Jahr 2030 gegenüber dem Einsatz von PtL-Kraftstoffen wirtschaftlich konkurrenzfähig (deutliche Kostenvorteile für die Nutzer sowie leichte gesamtsystemische Vorteile).

Das betrachtete O-Lkw-System ist in 2030 kostengünstiger als der Einsatz von PtL für gleiche CO_2-Minderungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur von 3.200 km Länge auf deutschen Autobahnen einen signifikanten Markthochlauf von O-Lkw ermöglichen kann. Die Infrastruktur kann dann mittelfristig von den Nutzern refinanziert werden, auch wenn das Potential internationaler Verkehre außen vor gelassen wird. Die Entscheidung, eine Oberleitungsinfrastruktur für geeignete Verkehre aufzubauen, ist damit unabhängig

Ein O-Lkw-System kann auch ohne internationalen Ausbau sinnvoll sein.

vom internationalen Umfeld robust und kann einen wesentlichen Teil der Klimazielerreichung im Güterverkehr sichern. Gleichwohl ist es sinnvoll, frühzeitig auf eine internationale Anschlussfähigkeit des Systems hinzuarbeiten, so dass weitere, bisher nicht berücksichtigte Nutzerkreise von der Infrastruktur profitieren können.

O-Lkw sind für hoch frequentierte Strecken besonders geeignet und können Teil eines effizienten Technologiemixes im zukünftigen Güterfernverkehr sein.

Ob und in welchem Umfang ein weiterer Ausbau der Infrastruktur über das hier untersuchte Basisnetz hinaus sinnvoll ist, kann auf Grundlage der Ergebnisse nicht beantwortet werden. Fest steht: Ein O-Lkw-System kann seine Kostenvorteile nur bei einer gewissen Mindestauslastung der Infrastruktur ausspielen. Für weniger frequentierte Strecken können andere Technologien vorteilhafter sein, sodass im Straßengüterfernverkehr künftig ein Technologiemix zu erwarten ist. Ein Hauptaugenmerk der weiteren Forschung sollte darauf liegen, die jeweils sinnvollen Anwendungsgebiete der einzelnen Technologien abzustecken, um robuste Infrastrukturentscheidungen treffen zu können.

Executive Summary

This paper quantitatively examines the introductory phase of a potential Electric Roads System (ERS) with overhead catenary trucks (OC-trucks) in Germany. It aims to answere the following questions:

- Can a market upturn of OC-trucks be expected in Germany once a political decision has been made to build an overhead line infrastructure?
- What financial and ecological effects can be expected during the introductory phase of an OC-truck system?
- Which funding instruments for OC-trucks are effective (with regard to market ramp-up and CO_2 reductions) and cost-efficient (with regard to total costs costs for the state and vehicle operators and potentially infrastructure operators)?
- Which routes need to be electrified for a fast and cost-efficient market ramp-up of OC-trucks?

For this purpose, model-based calculations were carried out for the first 10 years after the political decision to introduce an OC-truck system and their effects were examined. A network of models was used, which included modules for freight transport demand, the energy flows on the vehicle side, the cost structure from the vehicle operators point of view and a geographically resolved analysis of vehicle deployment and infrastructure construction. The modelling was based only on domestic German traffic with trucks and articulated lorries, which also fulfilled a number of other suitability criteria. The mileage potential for electrification on which the market model is based was thus limited for the purpose of presenting a conversative estimate.

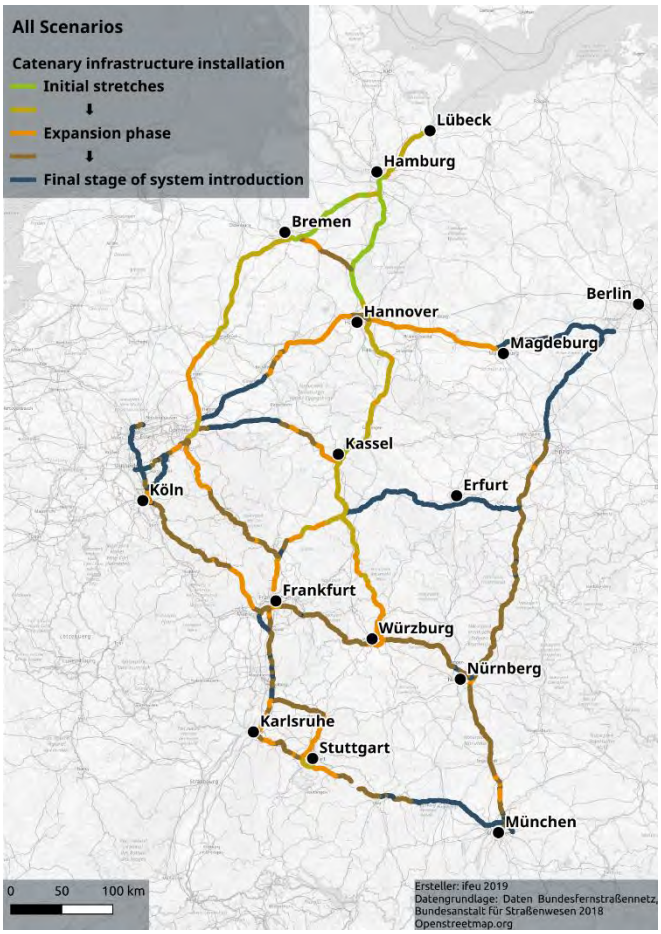
The final stage of the OC-truck introduction phase assumed in this study is an overhead line network of about 3,200 km total length on heavily used German motorways. By conducting suitable inner-German truck traffic on this network with OC-trucks, about 9.2 million tons of CO_2 from the combustion of diesel fuel could be avoided per year. About 3.6 million tons of CO_2 are allotted to transports that could in principle be carried out as shuttle services and are therefore particularly suitable for O-truck operation. This subset is the basis of the market modelling carried out here.

The influences of potential political measures on the market ramp-up of OC-trucks in Germany were examined in five scenarios of measures and one reference scenario. For each scenario, the sequence of the overhead line extension was optimised from a system cost perspective. The scenarios were then compared with regard to the development of the vehicle fleet, energy consumption, the resulting environmental impacts and the cost balance for truck operators and the public sector. The following core statements can be derived from the analyses:

- With a basic overhead line network of 3,200 km in 2030, almost all the considered transport operations can be carried out economically with OC-trucks, regardless of the

scenario selected, and without changes to the regulatory framework (and also without CO_2 prices in the transport sector).

- Pre-financing of the infrastructure is necessary, as a cost distribution among the truck operators is only feasiblew with a high degree of utilisation. Approximately 10 years after system introduction, it is expected that users can finance the running costs (maintenance and depreciation of the infrastructure). Users will have sufficient economic advantage from using the system to refinance the introduction phase.
- Routes in north-western Germany allow a comparatively high electrical mileage even with a low level of overhead line expansion. They are therefore suitable starting points for a system expansion.



- If the state takes gives further incentives in addition to up front infrastructure built up, the market ramp-up can be significantly accelerated in the first few years and the introduction of the system thus stabilised. This can create additional planning reliability for truck operators, vehicle manufacturers and political players.
- Reducing or exempting trucks in electric operation from road tolls is the most effective instrument to realise high share of electrical driving. A purchase premium, on the other hand, leads to high number of OC-trucks but lower average electric mileage per vehicle.
- During the entire introductory phase, the simultaneous use of different OC-truck configurations is possible from an economic point of view.

- From a technical point of view, OC-HEVs (hybrid vehicles with electric and diesel power train) can be used anywhere, the purchase decision is thus essentially based on economic considerations. Depending on the vehicle-related incentives, OC-HEVs can be used for a larger number of applications about 3-6 years after system introduction.
- Due to their limited driving range off the overhead line, the market uptake of purely electric OC-BEVs (purely electric battery vehicles) is more strongly linked to the deployment of the overhead line network than with OC-HEVs and is generally slower and more continous. OC-BEVs benefit in particular from assumed future cost degression for traction batteries and show increasing battery capacities during the introductory phase.

- Even if an overhead line basic network is only used by particularly suitable domestic truck traffic, the OC-truck system is likely to be economically competitive in 2030 compared to the use of power-to-liquids fuels (clear cost advantages for the users, slight reduction in overall system costs).

The results show that the construction of a 3,200 km long overhead line infrastructure on German motorways allows for a significant market uptake of OC-trucks. The infrastructure can then be refinanced by users in the medium term, even if the potential of international traffic disregarded. The decision to build an overhead line infrastructure for suitable transport relations is thus robust and independent of the international environment and can substantially contribute to the achievement of the climate target for freight transport. However, preparing international system integration at an early point in time can have great benefits in the long-run, adding international road freight transports to the potential user base of a future ERS infrastructure.

Whether and to what extent a further expansion of the infrastructure beyond the basic network examined here is reasonable cannot be answered on the basis of the results of this project. One thing is certain: an OC-truck system only leads to a cost advantage if the infrastructure is used by a minimum number of trucks. For less frequented routes, other technologies may be more advantageous, so that a technology mix can be expected in long-distance road freight transport in the future. Further research should focus on identifying the appropriate areas of application for the individual technologies in order to make robust infrastructure decisions.

1 Ziel und Rahmen der Analyse

1.1 Zielstellung

Nach aktuellem Stand der Forschung haben Oberleitungs-Lkw ein signifikantes Potential zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Güterfernverkehr[1]. Derzeit wird die Technologie im Rahmen zweier Feldversuche auf deutschen Autobahnen getestet, ein weiterer Feldversuch wird voraussichtlich 2020 starten. Bei der Betrachtung möglicher Systemausbauszenarien spielen Hemmnisse im Bereich Fahrzeug, Infrastruktur und Logistik eine wichtige Rolle und wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bereits eingehend untersucht (Jöhrens / Rücker / Helms / et al. 2018). Darauf aufbauend geht es im vorliegenden Papier um eine quantitative Untersuchung der Einführungsphase eines O-Lkw-Systems in Deutschland. Kernfragen sind dabei:

- In welcher zeitlichen und örtlichen Abfolge sollte eine Oberleitungsinfrastruktur in der Einführungsphase ausgebaut werden, um die Markteinführung von O-Lkw optimal zu unterstützen?
- Unter welchen (technischen und wirtschaftlichen) Voraussetzungen kommt es in den ersten 10 Jahren nach einer Systemeinführung zu einem Markthochlauf von O-Lkw?
- Welche Förderinstrumente für O-Lkw sind effektiv (bezüglich des Markthochlaufs und der CO_2-Minderungen) und kosteneffizient (bezüglich der Kosten für den Staat und ggf. Infrastrukturbetreiber)?
- Welche Strecken sind für einen schnellen und kosteneffizienten Markthochlauf in welcher Reihenfolge zu elektrifizieren?

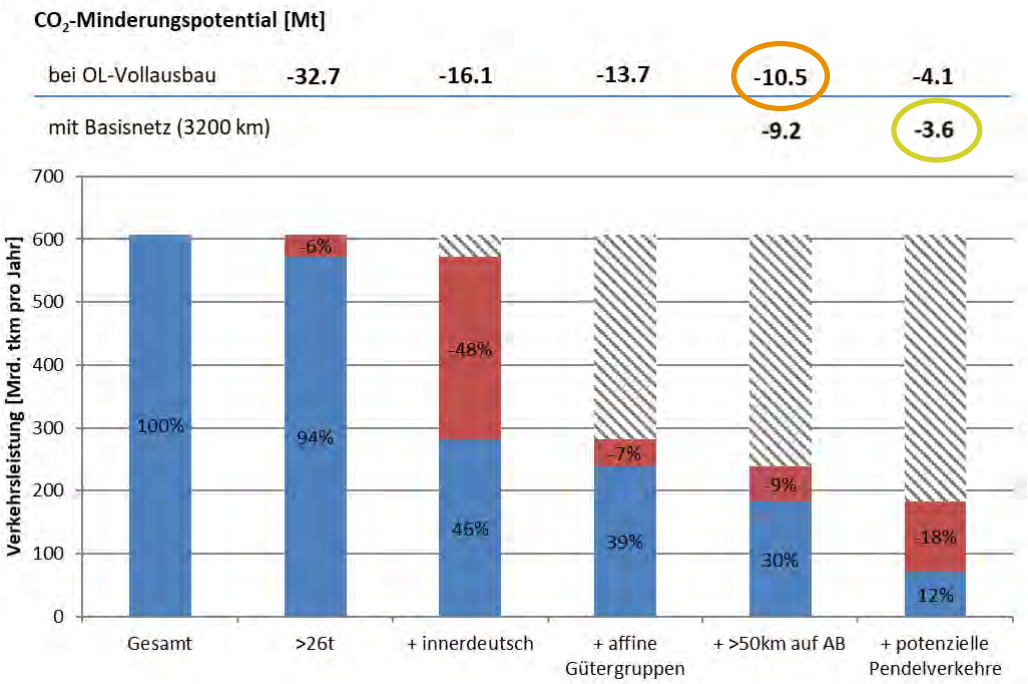
Dazu werden modellbasierte Berechnungen für die ersten 10 Jahre nach der politischen Entscheidung für die Einführung eines O-Lkw-Systems durchgeführt (Abschnitt 3) und deren Implikationen untersucht (Abschnitt 4).

Die zugrundeliegenden Analysen basieren auf einer quantitativen Betrachtung des Markthochlaufs unter Berücksichtigung infrastruktureller Restriktionen. Hierfür wurde ein Modellverbund genutzt, der Komponenten für die Güterverkehrsnachfrage, die fahrzeugseitigen Energieflüsse, die Kostenstruktur aus Sicht der Fahrzeugbetreiber sowie die geographisch aufgelöste Analyse von Fahrzeugeinsatz und Infrastrukturzubau beinhaltet (siehe Abschnitt 2).

[1] Vgl. (ISI 2017), (Kühnel et al. 2018), (Jöhrens / Rücker / Kräck / et al. 2018)

1.2 Zugrundeliegende Potentiale für O-Lkw

Die Modellierung der Einführungsphase setzt auf den Ergebnissen der im Vorhaben durchgeführten Potentialanalyse auf (Jöhrens / Rücker / Kräck / et al. 2018) . Grundgesamtheit stellen diejenigen Verkehre dar, die in der Potentialanalyse für das Jahr 2030 als potentiell geeignet und für den O-Lkw-Betrieb wirtschaftlich sinnvoll identifiziert wurden. Die Fahrleistungen schwerer Nutzfahrzeuge in Deutschland wurden in der Potentialanalyse hinsichtlich verschiedener Eignungskriterien abgeschichtet (Abbildung 1-1). Die Eingrenzung auf innerdeutsche Verkehre halbiert das Fahrleistungspotential in etwa, durch Ausschluss weniger geeigneter Gütergruppen sowie von Verkehren, die nur kurze Strecken < 50 km auf elektrifizierbaren Straßen unterwegs sind, fällt nochmals etwa ein Drittel der Fahrleistung weg.



Anmerkungen: blau: jeweils verbleibende Verkehrsleistung; rot: im jeweiligen Schritt ausgeschlossene Verkehrsleistung); Zusätzlich sind die entsprechenden CO_2-Minderungspotentiale (ohne Strombereitstellung) bei Vollausbau eines Oberleitungsnetzes auf Autobahnen und 4-streifigen Bundesstraßen dargestellt. Bezugsjahr für die Verkehrsleistungen und angenommenen Verbräuche ist 2030.

Abbildung 1-1: Eingrenzung der betrachteten Lkw-Verkehrsleistung für die Untersuchung

Für die Modellierung des Markthochlaufs wurde zusätzlich zur Potentialanalyse die vereinfachende Annahme getroffen, dass O-Lkw stets auf einer bestimmten Relation im Pendelbetrieb eingesetzt werden. Dies hat zur Konsequenz, dass nur solche Lkw-Fahrten im Verkehrsmodell für die Bildung von O-Lkw-geeigneten Einsatzprofilen herangezogen wurden, für die es auch eine entsprechende geeignete Fahrt in der Gegenrichtung gibt. Im Ergebnis bedeutet dies, dass lediglich 40 % der für O-Lkw geeigneten Fahrleistung im Modell auch als Lkw-Einsatzprofil hinterlegt ist und somit bei der Modellierung des Markthochlaufs von O-Lkw in der Einführungsphase berücksichtigt wird (rechter Balken in Abbildung 1-1).

Zielpunkt des modellierten Infrastrukturzubaus stellt das in der Potentialanalyse gezeigte Basisnetz dar (Abbildung 1-2). Ein Großteil des Basisnetzes besteht aus Streckenabschnitten, die eine überdurchschnittliche Befahrungsstärke durch solche Lkw-Fahrten aufweisen, die im Rahmen der Potentialanalyse als für O-Lkw wirtschaftlich sinnvoll identifiziert wurden.

Kürzere Verbindungsstücke mit unterdurchschnittlicher Befahrungsstärke wurden dabei aufgefüllt, um die Durchgängigkeit wichtiger Achsen (Ost-West sowie Nordost-Südost) zu gewährleisten. Eine mögliche Elektrifizierung von Autobahnabschnitten abseits des ermittelten Basisnetzes bleibt in der vorliegenden Analyse unberücksichtigt.

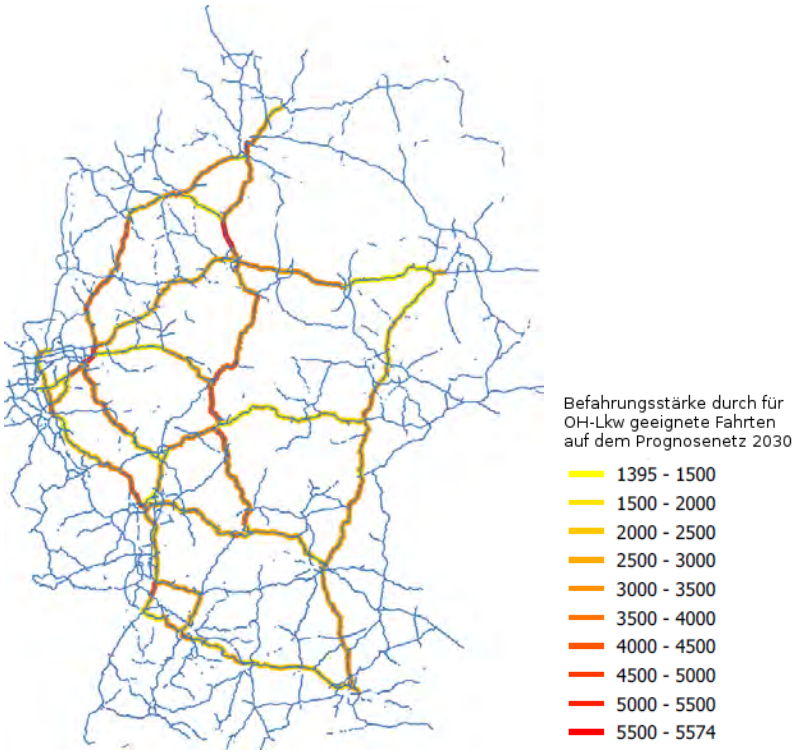


Abbildung 1-2: Zugrunde gelegtes Basisnetz für den Oberleitungsausbau, definiert anhand der Befahrungsstärken durch wirtschaftlich geeignete Lkw-Fahrten im Betrachtungsjahr 2030

Die erzielbaren CO_2-Minderungen durch ein O-Lkw-System sind stets ein Produkt der Marktdurchdringung von O-Lkw und des angenommenen Infrastrukturausbaus, der den Fahranteil unter Oberleitung bestimmt (Abbildung oben). In der Potentialanalyse (Jöhrens / Rücker / Kräck / et al. 2018) wurde das CO_2-Minderungspotential (ohne Strombereitstellung) durch geeignete Verkehre auf einem angenommenen voll ausgebauten Oberleitungsnetz[1] auf etwa 10,5 Mt im Jahr 2030 abgeschätzt (in der Abbildung orange markiert). Für die Modellierung des Markthochlaufs in der Einführungsphase im vorliegenden Bericht wird hingegen lediglich ein ausgebautes Basisnetz als Zielsystem zugrunde gelegt, wodurch sich die prinzipiell erzielbare CO_2-Reduktion auf 9,2 Mt vermindert. Zudem ergibt sich eine geringere Verkehrsleistung geeigneter Verkehre durch die Zusammenfassung der Relationen zu Pendelbeziehungen, wie oben beschrieben. Es ergibt sich somit in den Modellrechnungen ein maximales absolutes CO_2-Minderungspotential von 3,6 Mt im Jahr 2030 (in der Abbildung grün umkreist).

Bei der Bewertung der Modellergebnisse sollte daher bedacht werden, dass das Fahrleistungspotential für die Einführungsphase hier sehr konservativ abgeschätzt wurde. Die nicht betrachteten Verkehre sind nicht zwangsläufig für den Betrieb mit O-Lkw ungeeignet. Lediglich ist bei diesen Verkehren die Wahrscheinlichkeit geringer, dass Hemmnisse für den O-Lkw-Betrieb bereits während der Einführungsphase eines O-Lkw-Systems überwunden

[1] alle BAB und 4-streifigen Bundesstraßen werden hierbei als elektrifiziert angenommen

werden können. Sobald ein Oberleitungs-Basisnetz aufgebaut ist, ist mit zusätzlichen Nutzungspotentialen für diese Infrastruktur zu rechnen:

- Je mehr sich die Infrastruktur von Einzelstrecken in Richtung eines Netzes entwickelt, desto eher wird auch für solche Fahrzeuge ein Betrieb als O-Lkw attraktiv, die nicht im Pendelverkehr auf einer bestimmten Relation unterwegs sind. Sofern Relationen zusätzlich berücksichtigt werden, die in der Hochlaufphase aufgrund ihrer Fahrstruktur keine besondere Eignung für Betrieb mit O-Lkw aufweisen, würde dies das errechnete Potenzial um den Faktor 3 erhöhen.
- Grenzüberschreitend fahrende Lkw können auch bei ausschließlichem Oberleitungsausbau in Deutschland einen elektrischen Fahranteil erreichen, der den Betrieb als O-Lkw wirtschaftlich machen könnte. Zudem ist es denkbar, dass Nachbarländer angestoßen durch deutsche Aktivitäten vergleichbare Systeme einführen. Rund die Hälfte der Verkehrsleistung auf der Straße sind grenzüberschreitende Verkehre und Transitverkehre. Dies spiegelt das hohe Minderungspotenzial und die Wichtigkeit wider, den internationalen Verkehr langfristig ebenfalls für die Oberleitungstechnologie zu adressieren. Eine Ausweitung auf den internationalen Verkehr würde somit erneut eine Verdopplung des Potenzials bedeuten.

Die Modellrechnungen wurden in erster Linie mit dem Ziel durchgeführt, Erkenntnisse über wichtige Einflussfaktoren während der Einführungsphase zu gewinnen. Um bei Existenz eines Basisnetzes auch die absoluten zu erwartenden Fahrzeugmengen und die entsprechenden CO_2-Minderungspotentiale voll abzubilden, wären Erweiterungen am Modellverbund notwendig, insbesondere das Zulassen von Nicht-Pendelverkehren und die Integration von Daten zu internationalen Verkehren.

1.3 Rahmen und Systemgrenzen der Modellierung

1.3.1 Zeitliche Beschränkung auf die ersten 10 Jahre einer Systemeinführung

Die Modellierung beschränkt sich auf einen Zeitraum von 10 Jahren nach einer politischen Entscheidung zur Einführung eines O-Lkw-Systems. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass diese Entscheidung im Jahr 2020 stattfindet und der betrachtete zeitliche Rahmen sich dann bis 2030 erstreckt. Die Ergebnisse behalten unter der Berücksichtigung allgemeiner Unsicherheiten jedoch auch für einen zeitnahen späteren Beginn eines Ausbaus ihre Gültigkeit.

Die Beschränkung des Zeithorizonts in dieser Untersuchung hat mehrere Gründe. Einer davon ist die Existenz einer relativ stabilen Verkehrsprognose für diesen Zeitraum. Darüberhinausgehende Szenarien wären von einer deutlich größeren Unsicherheit bezüglich der weiteren verkehrlichen Entwicklung sowie sonstiger Rahmenbedingungen gekennzeichnet, insbesondere der Gestehungskosten für Energie (v.a. fossile Energieträger, PtX) sowie der allgemeinen Entwicklung bei konkurrierenden alternativen Antrieben. Weiterhin kann die Digitalisierung mittel- bis langfristig sowohl Umfang als auch Struktur des Gütertransports auf heute noch unbekannte Weise stark beeinflussen. Diese Entwicklungen können in gewiessem Umfang bereits qualitativ antizipiert werden, eine quantitative Berücksichtigung im Rahmen der Modellierung erscheint aus heutiger Sicht jedoch wenig zielführend.

Im Zeitraum bis 2030 ist überdies nur mit einer begrenzten Bedeutung internationaler O-Lkw-Verkehre zu rechnen, die daher in dieser Untersuchung noch vernachlässigt werden

können. Zudem existieren für 2030 bereits verbindliche Klimaziele[1], deren Erreichung nicht auf neue Technologien hoffen darf, sondern mit dem bereits verfügbaren technischen Möglichkeiten erfolgen muss. Daher kommt der Frage, inwiefern O-Lkw zur Erreichung dieser Ziele beitragen können, eine elementare Bedeutung zu.

Für den Zeitraum bis 2050 gibt es bereits einige Szenarienstudien, aktuell z.B. (Öko-Institut et al. 2020). Im Rahmen der o.g. Unsicherheiten sind hier keine wesentlichen neuen Erkenntnisse zu erwarten.

1.3.2 Räumliche Beschränkung auf innerdeutsche Relationen

Fast die Hälfte der Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs auf deutschem Gebiet wird durch grenzüberschreitende Verkehre erbracht (siehe Abbildung 1-1). Für den Einsatz von O-Lkw sind hier jedoch besondere Hemmnisse zu beachten. Dazu gehören neben der offenen Frage des Infrastrukturausbaus im Ausland auch Fragen der Standardisierung und Interoperabilität. Die internationale Koordination zu diesen Fragen benötigt voraussichtlich einigen zeitlichen Vorlauf. Im Sinne der hier angestrebten konservativen Potentialbewertung und des auf den Zeitraum bis 2030 beschränkten Zeitrahmens wird dieses Potential daher zunächst außen vor gelassen.

Der Einbezug von internationalen Relationen ist daneben auch modelltechnisch mit erheblichem Zusatzaufwand verbunden. Die benötigten Daten liegen in der erforderlichen Qualität, Auflösung und Symmetrie nur für innerdeutsche Relationen vor.

Im schwedisch-deutschen Kooperationsprojekt „CollERS“, an dem das ifeu ebenfalls beteiligt ist, werden die Herausforderungen und Potenziale eines grenzüberschreitenden O-Lkw-Verkehrs exemplarisch für einen Korridor zwischen Deutschland und Schweden untersucht (ifeu et al. 2020). Darüberhinaus werden in einem weiteren Arbeitspaket des Vorhabens „Roadmap OH-Lkw“ Methoden entwickelt, die es erlauben, mittels Telematiksystemen erfasste europaweite Lkw-Betriebsdaten zu nutzen, um entsprechende Ausbaupotentiale zu ermitteln. Diese Methodik ist für die internationale Betrachtung angemessener.

1.3.3 Technologische Beschränkung auf Diesel- und O-Lkw

Für die Defossilisierung des Straßengüterverkehrs werden verschiedene technologische Optionen diskutiert, die unterschiedliche Stärken und Schwächen haben. Dabei ist insbesondere im Straßengüterfernverkehr davon auszugehen, dass verschiedene Technologien sich auch sinnvoll ergänzen können und so langfristig auch ein Mix verschiedener Technologien entsteht. Neben dem O-Lkw werden dabei vor allem Brennstoffzellen-Lkw sowie rein batterieelektrisch Lkw als Optionen gehandelt. Gelegentlich wird auch LNG als Alternative diskutiert, das CO_2-Minderungspotenzial ist allerdings jenseits von mit erneuerbarem Strom produziertem synthetischen Gas (Power-to-Gas) gering (Heidt et al. 2013).

Eine systemische Detailbetrachtung dieser Alternativtechnologien war im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich. Insbesondere die infrastrukturellen Anforderungen können im Rahmen des Modells derzeit nicht abgebildet werden. Zudem gibt es fahrzeugseitig für fernverkehrstaugliche Brennstoffzellen- und Batterie-Lkw bisher lediglich Ankündigungen, aber noch keine am Markt verfügbaren Fahrzeuge. Damit sind die technischen Parameter nicht

[1] Vgl. (Bundesregierung 2016), (Bundesregierung 2019), (Europäische Kommission 2018a)

hinreichend genau bekannt, um eine symmetrische Modellierung mit O-Lkw zu gewährleisten. Strombasierte Kraftstoffe (Power-to-Liquids) können dagegen auch in konventionellen Diesel-Lkw genutzt werden. Damit kann diese im Nfz-Bereich viel diskutierte Defossilisierungsoption abgebildet werden, ohne neue Fahrzeugtechnologien zu berücksichtigen.

Ziel dieser Studie ist es, sinnvolle Ausbaupfade eines O-Lkw-Systems zu identifizieren **unter der Voraussetzung, dass eine politische Entscheidung pro Oberleitung getroffen wurde**. Wesentliche Kriterien für diese Entscheidung sollten die Beiträge der Technologien zu Nachhaltigkeitszielen, langfristigen strategischen Erwägungen sowie die langfristige Kosteneffizienz sein. Eine direkte Konkurrenz von O-Lkw mit anderen alternativen Antriebssystemen in weiten Teilen des Güterfernverkehrs wird unter diesen Voraussetzungen als eher unwahrscheinlich angesehen und wäre systemisch gesehen auch nicht effizient, siehe (Agora Verkehrswende 2020). Vielmehr stellt sich dann die Frage, wie sich Lkw-Nutzungsprofile nach ihrer Eignung für Oberleitungsbetrieb oder Alternativen kategorisieren lassen. Die Modellierung ist in diesem Vorhaben auf Einsatzprofile (und somit Teilmärkte) beschränkt, die eine hohe prinzipielle Eignung für O-Lkw-Betrieb aufweisen. Somit erlaubt es die Fragestellung, bei der Modellierung ausschließlich den Vergleich von O-Lkw mit konventionellen Diesel-Lkw zu betrachten.

Ungeachtet dessen sind auch technologische Synergien zwischen den verschiedenen elektrischen Antriebssystemen zu erwarten. Für das Stromabnehmersystem von O-Lkw sind nach Hebung von Skaleneffekten nur relativ geringe spezifische Kosten zu erwarten, da weder eine größere Menge teurer Materialien noch besonders aufwändige Prozessschritte für seine Herstellung erforderlich sind. Bei einem ausgebauten Oberleitungsnetz könnte es somit in bestimmten Fällen sinnvoll sein, auch Batterie - oder Brennstoffzellen-Lkw um einen Stromabnehmer zu erweitern, um von geringeren Energiekosten auf Oberleitungsabschnitten zu profitieren bzw. die Batterie unterwegs laden zu können. Dies ist ein weiterer Anhaltspunkt dafür, dass die technologische Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen alternativen Antrieben bei der Infrastrukturplanung der kommenden Jahre nicht im Vordergrund stehen sollte.

2 Modellierungsansatz

Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg der Oberleitungstechnologie ist ihre Wirtschaftlichkeit. Diese erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass Lkw-Fahrten auf die Oberleitungstechnologie umgestellt werden. Die Einführungsszenarien – also der Ort und Zeitpunkt der Elektrifizierung von Autobahnabschnitten und Lkw-Fahrten – werden daher auf Basis einer Gesamtkostenbetrachtung (Total Cost of Ownership, kurz: TCO) aus Sicht der Lkw-Betreiber (Spediteur, selbständiger Fahrer, etc.) bestimmt. In diesem Zusammenhang bedeutet ein wirtschaftlicher Betrieb des Oberleitungsfahrzeugs, dass die Gesamtkosten für Beschaffung, Abschreibung, Betrieb und Wartung des Oberleitungsfahrzeugs niedriger sind als die Kosten eines vergleichbaren konventionellen Lkw.

Zur Erstellung der Einführungsszenarien sind neben den Fahrmuster der Lkw sowohl die variablen und fixen Kosten der Lkw-Betreiber über ein TCO-Modell als auch ein Verbrauchsmodell der Fahrzeuge notwendig. Die Ergebnisse der Fahrmuster-, TCO- und Verbrauchsbetrachtungen werden als Ausgangsdaten für eine Kostenoptimierung des Gesamtsystems verwendet. Der Modellverbund ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Bausteine näher beschrieben.

2.1 Daten – Lkw-Fahrmuster

Als Ausgansgpunkt für die Analyse werden Daten von PTV Validate verwendet, einem bundesweiten Straßenverkehrsnachfragemodell (siehe Anhang A2). Das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsströme werden darin getrennt für Pkw und Lkw abgebildet. Damit können auch Analysen für Teilbereiche/Regionen und einzelne Streckenabschnitte durchgeführt werden. Die in Validate angenommenen Verkehrsmengen für den Betrachtungszeitraum basieren auf der Bundesverflechtungsprognose 2030 (BVU et al. 2014). Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass der Eintritt in einen Massenmarkt für O-Lkw in den Szenarien eher in der zweiten Hälfte des zehnjährigen Einführungszeitraums erfolgt und somit die für das Jahr 2030 zu erwartenden Verkehrsmengen für die Ergebnisse deutlich relevanter sind als die gegenwärtigen.

Eine ausschließliche Bewertung von Streckenelektrifizierungen anhand des Verkehrsaufkommens ist jedoch unzureichend, denn die Eignung konkreter Transportrelationen für eine Elektrifizierung per Oberleitung hängt neben dem Fahrzeugaufkommen auch von zahlreichen weiteren Kriterien ab. Um für eine Umstellung geeignete Fahrten zu identifizieren, werden die Daten aus PTV Validate anhand folgender Kriterien gefiltert und weiterverarbeitet:

1. Fahrzeugtypen: Zunächst fokussiert die Modellierung auf Sattelzüge, da diese eine besondere Eignung für die Oberleitungstechnologie aufweisen, siehe (Jöhrens / Rücker / Helms / et al. 2018) und (Jöhrens / Rücker / Kräck / et al. 2018).

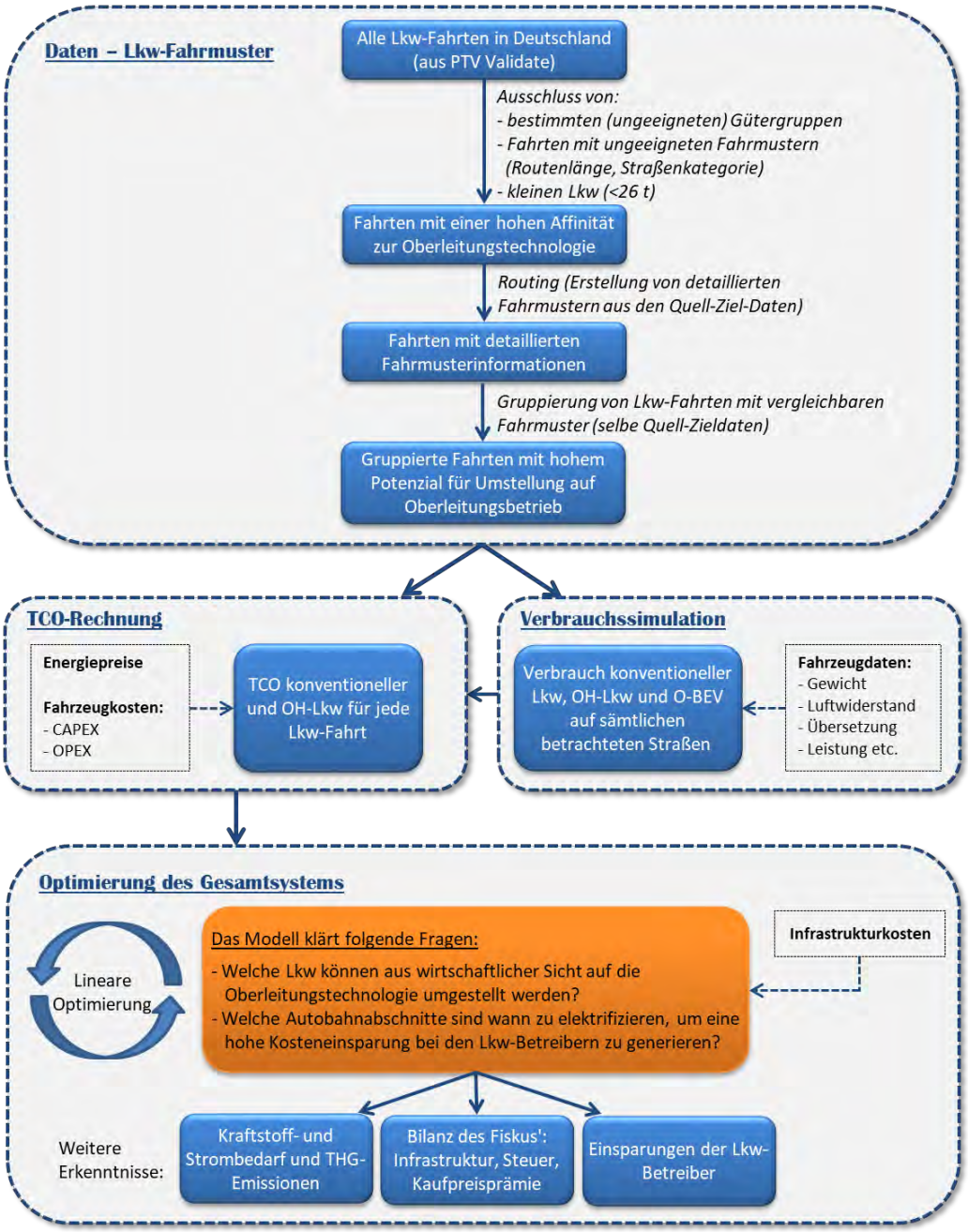


Abbildung 2-1: Überblick über den verwendeten Modellverbund

2. Gütergruppen: Im nächsten Schritt werden Fahrten eliminiert, die keine besondere Eignung auf Basis der transportierten Güter aufweisen. Die gewählten Kriterien für die Transportgutfilterung sind die Logistik-Teilmarktfunktion, Logistik-Standortfunktion, Bahnaffinität, Saisonalität, Preissensibilität und Endkundenaffinität. Der gesamte Bewertungsansatz wird in der bereits veröffentlichten Potenzialanalyse ausführlich beschrieben (Jöhrens / Rücker / Kräck / et al. 2018).

3. Straßentypen: Neben diesen Einschränkungen wurde auch das Kriterium eingeführt, dass ein Mindestanteil der Fahrleistung auf Autobahnen zu erfolgen hat, da nur auf diesen ein potenzieller Oberleitungsinfrastrukturausbau angenommen wird.

4. Routing: Für die verbliebenen Fahrten erfolgt im Anschluss ein Routing der aus PTV Validate entnommen Quell-Zielbeziehungen, um die Daten in konkrete Lkw-Nutzungsprofile zu übertragen.[1] Erst die genauen Informationen über die Route ermöglichen eine routenspezifische Verbrauchs- und Kostenermittlung sowie die Auswirkung der Elektrifizierung eines spezifischen Streckenabschnitts (bspw. Strecke A3 zwischen Kreuz-Köln Ost und Kreuz Leverkusen). Um die Anzahl der betrachteten Relationen gering zu halten, werden diese von Verkehrzellebene (9783 Zellen) auf Kreisebene (294 Kreise) aggregiert.[2]
5. Pendelbeziehungen: Die Ausgangsdaten werden weiter im Hinblick auf potenzielle Pendelbeziehungen gefiltert. Das heißt, auf jeder Relation verkehrt eine definierte Anzahl an Lkw, die sowohl hin als auch zurück fahren und lediglich auf dieser Relation betrieben werden. So wird der Annahme Rechnung getragen, dass für die Oberleitungstechnologie insbesondere Pendelbeziehungen geeignet, da hier auf einem kleinen Netz hohe elektrische Fahrleistungen erzielt werden können.Diese dürften daher in der Einführungsphase verstärkt auftreten. Die Pendelaffinität war auch ein Kriterium bei der Auswahl geeigneter Gütergruppen in den Verkehrsmodelldaten.

Abbildung 2-2 zeigt die Verkehrsleistungen, die nach jedem Filterungsschritt verbleiben.

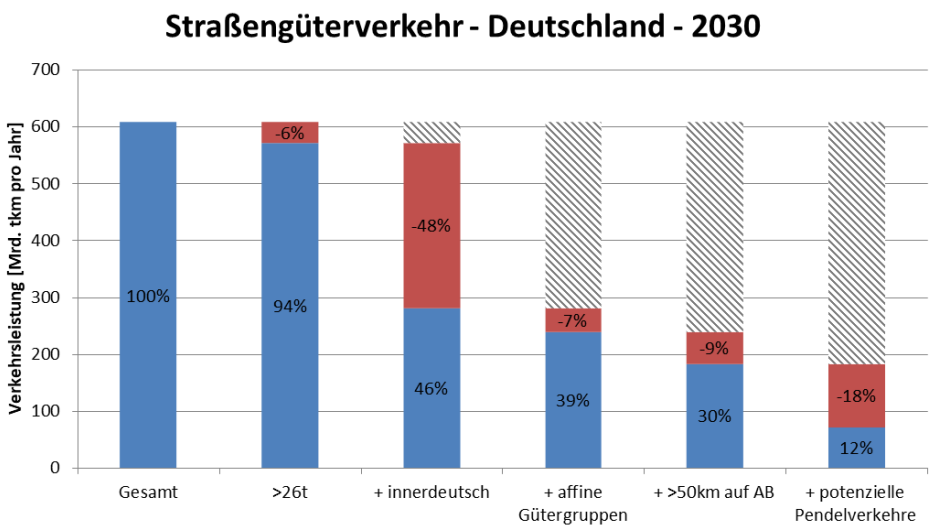


Abbildung 2-2: Verbliebene Verkehrsleistungen nach jedem Filterungsschritt

Für die ermittelten Fahrmuster werden auf dieser Basis die TCO für jede Relation auf Kreisebene (z.B. Köln nach Hamburg) berechnet. Die TCO für jede Relation sind zeitlich variabel, d.h. die Kosten ändern sich über den Zeitraum sowohl für konventionelle als auch für oberleitungsgebundene Lkw. Die zeitlichen Änderungen resultieren aus diversen Randbedingungen wie Energiepreise, Fahrzeugpreise oder die Energieeffizienz. Die Kosten für den Betrieb eines Lkws können grob in jährliche Fixkosten, fahrleistungsspezifische Betriebskosten und

[1] So wird bspw. aus der Information, dass eine Lkw-Fahrt von Köln-Deutz (Quelle) nach Hamburg Hafencity (Ziel) stattfindet die spezifische Route „Deutz-Mühlheimer Straße → B55 → A3 (Kreuz-Köln Ost) → A1 (Kreuz Leverkusen) → A255 (Dreieck HH-Süd) → Zweibrückenstraße →Baakenwerder Straße“.

[2] Bezogen auf das Beispiel könnte die Relation dann alle Fahrten vom Kreis Köln nach Kreis Hamburg umfassen. So würden zu der genannten Relation nicht nur Fahrten von „Köln-Deutz nach Hamburg Hafencity“ zählen, sondern auch Fahrten von bspw. „Köln-Kalk nach Hamburg Wilhelmsburg“.

Energiekosten differenziert werden. Die Berechnung der TCO für jede Relation wird im Folgenden Abschnitt erläutert.

2.2 TCO-Rechnung und Verbrauchssimulation

Durchgeführt wird eine jährliche Vollostenberechnung (TCO = Total Cost of Ownership) für den Betrieb auf verschiedenen Relationen unter Berücksichtigung der jährlich abgeschriebenen Fixkosten (CAPEX = Capital Expenditures) und der jährlichen variablen Kosten (OPEX = Operational Expenditures).

Die CAPEX für eine Relation hängen dann von der Anzahl der eingesetzten Lkw auf dieser Relation sowie den CAPEX pro Lkw ab. Die Lkw-spezifischen CAPEX wurden für das TCO Modell in (Jöhrens / Rücker / Kräck / et al. 2018) abgeleitet. Die Anzahl der benötigten Lkw pro Relation ergibt sich aus der Jahresfahrleistung pro Relation und der Lkw-spezifischen Fahrleistung.

Beispielrechnung für Lkw-Anzahl pro Relation

Für die Relation „Köln nach Hamburg“ sind über die Ausgangsdaten (aus PTV Validate) z.B. 500 Fahrten pro Jahr gegeben, die in beide Richtungen erfolgen. Das Routing ergibt eine Fahrleistung pro Fahrt und Richtung von 430 km. Dies entspricht einer jährlichen Gesamtfahrleistung auf dieser Relation von 430.000 km. Aus der Fahrleistungserhebung 2014 (Bäumer et al. 2016) wird eine Funktion abgeleitet, die die jährliche Fahrleistung pro Lkw in Abhängigkeit der Fahrdistanz bestimmt. Für die Distanz 430 km ergibt sich nach der Funktion eine jährliche Fahrleistung von 101.400 km/a; siehe Abbildung 2-3. Dies ergibt somit eine Anzahl von rund 4,24 Lkw auf der genannten Relation, sodass die gesamten CAPEX dieser Relation für die jeweiligen Antriebstechnologien ermittelt werden können.

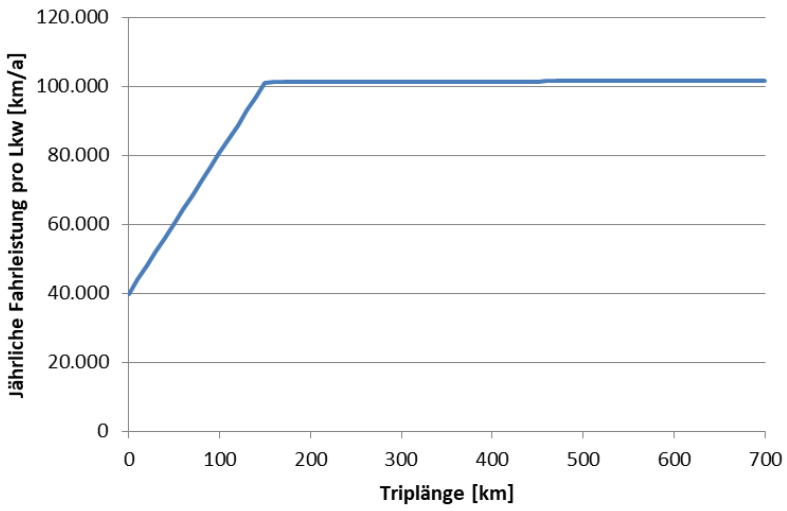


Abbildung 2-3: Jahresfahrleistung eines Lkws in Abhängigkeit der Triplänge

Die fahrleistungsspezifischen Kosten (variable Kosten pro gefahrenen Kilometer) bilden zusammen mit den Energiekosten die OPEX. Die erstgenannte Kostenstelle wird direkt mit der jeweiligen Fahrleistung multipliziert. Zur Ermittlung der Energiekosten sind neben der Fahrleistung auch der Verbrauch und die Energiepreise relevant.

Der streckenbezogene Endenergieverbrauch von Oberleitungsfahrzeugen und konventionellen Dieselfahrzeugen wird dabei mit dem Fahrzeugsimulationsmodell VEHMOD streckenfein ermittelt. Dies basiert auf einer Vorwärtssimulation verschiedener Antriebskonfigurationen von Pkw und Lkw und kann jeden Fahrzyklus als Eingangsgröße verarbeiten[1]. Topographische Streckeneigenschaften sowie die Außentemperatur und der entsprechende Nebenverbrauch der Fahrzeuge können so streckenbezogen in die Gesamtoptimierung einfließen. So unterscheiden sich bspw. der Verbrauch und somit auch die Energiekosten auf einer Fahrt von Köln nach Hamburg deutlich von den Energiekosten der Fahrt von Gießen nach Hamburg, obwohl beide Relationen eine gleiche Distanz aufweisen. Grund hierfür ist der deutlich höhere Verbrauch auf der letztgenannten Relation durch die Kasseler Berge.

Mithilfe dieser Daten werden anhand der Verbräuche (Diesel und/oder Strom) und der Energiepreise die gesamten Energiekosten für jede Relation und Antriebstechnologie ermittelt. Bei oberleitungsgebundenen Lkw wird dabei zwischen dem Oberleitungsbetrieb (Strom) und dem Betrieb ohne Oberleitung (Diesel) unterschieden. Die Gesamtkosten für jede Relation hängen für die Oberleitungs-Lkw (O-HEV und O-BEV) also vom Infrastrukturausbau für jeden Autobahnabschnitt ab. Diese Entscheidungsfreiheit, also die Wahl der Lkw-Betreiber welche Technologie aus Kostensicht gewählt wird, ist Grundlage der Optimierungsrechnung, die im folgenden Abschnitt eingehend erläutert wird.

2.3 Optimierung des Gesamtsystems

Die Einführungsszenarien der Oberleitungstechnologie werden im Sinne einer Optimierung des Gesamtsystems ermittelt. Als Input für die Berechnung des optimalen Ausbaupfads dienen die Relationen mit ihren jeweiligen TCO. Gesucht ist ein Infrastrukturausbau, aus dem sich minimale Gesamtsystemkosten (= Summe aus TCO auf allen Relationen) über den kompletten Zeitraum von 2020 bis 2030 ergeben. Dabei wird im Modell jedoch der jährliche Infrastrukturzubau beschränkt um den notwendigen Planungsprozessen und Bauphasen Rechnung zu tragen.

Für die Minimierung der Gesamtkosten unter Berücksichtigung dieser Bedingung wird der Ansatz der linearen Optimierung verwendet.

2.3.1 Modellgrundsätze und Randbedingungen

Die Optimierung des Gesamtsystems geht von einigen zentralen Annahmen und Randbedingungen aus, die für das Verständnis des Modells und der Ergebnisse wichtig sind. Diese Annahmen werden daher kurz dargestellt und begründet:

- **Die Grundgesamtheit für den Infrastrukturausbau stellt ein Basisnetz von gut 3.200 km Länge dar**: Im Rahmen der Potenzialanalyse wurde bereits ein potenziell geeignetes und sinnvolles Basisnetz von etwa 3.200 km Länge identifiziert. Eine Elektrifizierung außerhalb des gewählten Basisnetzes erscheint aufgrund zu geringer Befahrungsstärken durch

[1] Siehe (Kräck et al. 2015)

oberleitungsaffine Lkw-Relationen in dem Betrachtungszeitraum als unwahrscheinlich. Daher bildet das Basisnetz den sinnvollsten Lösungsraum für die Optimierungsrechnung und erlaubt dabei eine effiziente Berechnung. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die betrachteten Lkw-Relationen lediglich auf dem Basisnetz verkehren. Fahranteile, die außerhalb des Basisnetzes stattfinden, sind durchaus kosten- und somit auch entscheidungsrelevant, sodass diese ebenfalls berücksichtigt werden, auch wenn diese Fahrleistung nicht oberleitungsgebunden erfolgt.

- **Infrastrukturkosten werden in der Einführungsphase nicht pauschal auf die Nutzer umgelegt**: Die Infrastrukturkosten eines Ausbaus werden insbesondere am Anfang eines Ausbaus in Bezug auf die Anzahl der Nutzer sehr hoch ausfallen. Es liegt daher auf der Hand, dass in der Einführungsphase die Kosten des Infrastrukturausbaus nicht pauschal und vollständig auf die Nutzer umgelegt werden können. Daher wird in den ersten Jahren von einer kompletten Vorfinanzierung des Infrastrukturausbaus außerhalb der Nutzer ausgegangen (Staat, Venture Capital,…). Im Optimierungsschritt haben die Infrastrukturkosten somit keinen direkten Einfluss auf die Umstellungsentscheidung der Lkw-Betreiber. Für die optimierten Ausbaupfade wird jedoch hinterher geprüft, inwiefern die Infrastrukturkosten zu einem gewissen Zeitpunkt auf die Nutzer umgelegt werden könnten. Dies stellt ein wichtiges Ergebnisse der Optimierungsrechnung dar.
- **Die Lkw-Betreiber folgen dem Prinzip des rationalen Agenten:** Modelltechnisch wird ein Fahrzeug auf die Oberleitungstechnologie umgestellt, sofern hierdurch ein finanzieller Vorteil für den Lkw-Betreiber entsteht. Die Entscheidung beruht lediglich auf der Wirtschaftlichkeit. Sobald ein Oberleitungs-Lkw geringere TCO auf einer Relation aufweist als ein konventioneller Lkw, erfolgt die Umstellung. Die Höhe der Einsparungen ist für diese Entscheidung (Umstellung des Lkws) nicht relevant, sodass bereits ab dem ersten eingesparten Euro pro Jahr umgestellt wird. Weitere ökonomische Aspekte, wie bspw. die Liquidität oder die Risikobereitschaft der Akteure sowie eventuelle Markenpräferenzen, bleiben unberücksichtigt.
- **Die Netzauslegung erfolgt auf Basis des Kostenvergleichs konventioneller Lkw vs. O-HEV:** Entscheidungsgrundlage für einen eventuellen Netzausbau ist der Kostenvergleich zwischen konventionellem Lkw und O-HEV, da die O-HEV-Technologie als Brückentechnologie hin zu einem rein elektrischen Oberleitungsfahrzeug (O-BEV) erachtet wird. O-BEV werden in der Anfangsphase nur für sehr lokale Transporte mit einem dichten Oberleitungsnetz als sinnvoll erachtet, da die spezifischen Batteriepreise hoch sind und die Batterien eine große Kapazität aufweisen müssen, um Lücken im Netz überbrücken zu können. Beide Aspekte haben einen negativen Einfluss auf die TCO, sodass der großflächige Einsatz von O-BEV lediglich bei weiterer starker Kostendegression der Batteriepreise und einem umfassenden Netzausbau zu erwarten ist. O-HEV hingegen haben bei einem lückenhaften Oberleitungsnetz in der nahen Zukunft deutliche Kostenvorteile gegenüber O-BEV. Zudem wird das Risiko eines Einsatzes von O-BEV als höher angesehen, da mögliche Einsatzprofile von O-BEV sehr direkt mit der Oberleitungsinfrastruktur verknüpft sind, wogegen O-HEV auch als Hybridfahrzeuge weitab von Oberleitungen im Dieselbetrieb genutzt werden könnten. Um bereits in der Anfangsphase eine große Anzahl an Lkw-Betreibern zu adressieren, wurde die Optimierung des Netzausbaus auf Basis der Wirtschaftlichkeit von O-HEV vorgenommen. O-BEV werden anschließend in einem nachgelagerten Berechnungsschritt – also nach der Netzausbauoptimierung – in die Betrachtung mit einbezogen und auf ihre Wirtschaftlichkeit überprüft.
- **Es wird immer ein Ausbau in beide Richtungen angenommen:** In den Modellrechnungen werden nur Pendelfahrten berücksichtigt. Das heißt, für den Rückweg wird dieselbe Strecke wie auf dem Hinweg angenommen und ein Lkw wird dabei lediglich auf dieser Pendelrelation eingesetzt. Daher wird für die Infrastruktur angenommen, dass immer eine

Elektrifizierung in beide Richtungen vorgenommen wird. Diese Elektrifizierung in beide Richtungen hat auch (kosten-)technische Vorteile.

2.3.2 Vorgehen bei der Optimierung des Gesamtsystems

Zur Kostenminimierung wird das Verfahren der linearen Programmierung angewendet. Formal ist die lineare Programmierung eine Technik zur Optimierung einer Zielfunktion, die unter Gleichheits- und Ungleichheitsanforderungen steht. Dies bedeutet, dass die Zielfunktion – hier die Summe der TCO aller betrachteten Lkw-Relationen über den Betrachtungszeitraums – minimiert wird. Die Minimierung erfolgt bei einer gleichzeitigen Einhaltung bestimmter Randbedingungen. Die Zielfunktion ist durch folgende mathematische Gleichgung gegeben:

$$\min\{\underbrace{\sum_{i,t} v_{i,t} \cdot \mathrm{n}_{\mathrm{i,t}} \cdot \left(\Delta \mathrm{k}_{\mathrm{i,t}}^{\mathrm{fix}} + \Delta \mathrm{k}_{\mathrm{i,t}}^{\mathrm{abseits\ Netz}}\right)}_{\text{Fixkosten und variable Kosten außerhalb des Basisnetzes}} + \underbrace{\sum_{i,j,t} e_{i,j,t} \cdot \mathrm{n}_{\mathrm{i,t}} \cdot \Delta \mathrm{k}_{\mathrm{i,j,t}}^{\mathrm{var,el}}}_{\text{Variable Kosten auf elektrifizierten Autobahnabschnitten}} + \underbrace{d_{i,j,t} \cdot \mathrm{n}_{\mathrm{i,t}} \cdot \Delta \mathrm{k}_{\mathrm{i,j,t}}^{\mathrm{var,D}}}_{\text{Variable Kosten auf nicht elektrifizierten Autobahnabschnitten}}\}$$

Die folgende Auflistung beschreibt die Variablen und Konstanten der Gleichung (Zielfunktion). Im Anschluss erfolgt eine eingehende Erläuterung der Kostenpunkte.

Variablen

$v_{i,t}$	Eingesetzte Antriebstechnologie auf der Relation $_i$ im Jahr *t* (0: konventionell, 1: O-HEV)
$e_{i,j,t}$	Elektrischer Betrieb eines O-HEV auf der Relation *i* und Abschnitt *j* im Jahr *t* (0: nein, 1: ja)
$d_{i,j,t}$	Dieselbetrieb eines O-HEV auf der Relation *i* und Abschnitt *j* im Jahr *t* (0: nein, 1: ja)

Konstanten

$n_{i,t}$	Anzahl an Lkw, die auf der Relation *i* im Jahr *t* fahren
$\Delta k_{i,t}^{fix}$	Jährliche Fixkosten (Differenz zwischen O-HEV und konventionellen Lkw) auf der Relation *i* im Jahr *t*
$\Delta k_{i,t}^{abseitsNetz}$	Jährliche variable Kosten (Differenz zwischen O-HEV und konventionellen Lkw) auf der Relation *i* im Jahr *t* abseits des Basisnetzes
$\Delta k_{i,j,t}^{var,el}$	Jährliche variable Kosten (Differenz zwischen O-HEV und konventionellen Lkw) auf der Relation *i* und dem Abschnitt *j* im Jahr *t*im Strombetrieb des O-HEV
$\Delta k_{i,j,t}^{var,D}$	Jährliche variable Kosten (Differenz zwischen O-HEV und konventionellen Lkw) auf der Relation *i* und dem Abschnitt *j* im Jahr *t*im Dieselbetrieb des O-HEV

Die Zielfunktion setzt sich grob aus drei Kostenpunkten zusammen. Der erste Teil der Gleichung beschreibt die Fixkosten, die lediglich dadurch entstehen, dass auf einer Relation statt

konventioneller Lkw nun O-HEV eingesetzt werden. Die Variable, die diese Entscheidung widerspiegelt ist *v* und kann nur den Wert 0 oder 1 einnehmen. Der Wert 0 bedeutet, dass konventionelle Lkw eingesetzt werden und keine Zusatzkosten entstehen und bei 1 werden O-HEV auf der jeweiligen Relation eingesetzt. Für jede Relation *i* und jedes Jahr *t* gibt es auch eine Variable *v*. Die Kosten und/oder Einparungen durch die Umstellung auf die OH-Technologie werden im Modell als Differenzkosten (Δk) zum konventionellen Lkw definiert. Die Gesamtdifferenzkosten einer Relation ergeben sich aus der Anzahl der Lkw (*n*), die auf der Relation eingesetzt werden und der Fixkosten und variablen Kosten außerhalb des Basisnetzes pro Lkw.

Der zweite Kostenpunkt beschreibt die Kosteneinsparungen eines O-HEV im Strombetrieb gegenüber der eines konventionellen Lkws. In diesen Kostenpunkt gehen u.a. der Verbrauch und die Energiepreise direkt ein. Wird ein O-HEV auf einer Relation *i* eingesetzt und ist einer der befahrenen Autobahnabschnitte *j* mit einer Oberleitung versehen, so kann der Lkw elektrisch betrieben werden (e=1) und erzielt i.d.R. eine Kosteneinsparung gegenüber einen konventionellen Lkw. Sollte jedoch bei dem Einsatz eines O-HEVs ein Autobahnabschnitt nicht elektrifiziert sein, müsste der Lkw im Dieselhybridmodus betrieben werden (d=1). Dies wird durch den dritten Kostenpunkt beschrieben.

Die beschriebenen Entscheidungsvariablen sind über Nebenbedingungen gekoppelt. Diese Kopplung können wie folgt zusammengefasst werden:

Tabelle 2-1: Entscheidungskriterium für den Betriebszustand von O-HEV im Optimierungsmodell

		Autobahnabschnitt j ist im Jahr t elektrifiziert	
		Ja	Nein
O-HEV wird im Jahr *t* auf der Relation *i* eingesetzt	Ja: $v_{i,t}$=1	Strommodus: $e_{i,j,t}$=1 ($d_{i,j,t}$=0)	Dieselhybridmodus: $d_{i,j,t}$=1 ($e_{i,j,t}$=0)
	Nein: $v_{i,t}$=0	$d_{i,j,t}$=0 und $e_{i,j,t}$=0	

Das Optimierungsmodell setzt die Variablen so, dass die Gesamtkosten minimiert bzw. die Einsparungen aller Relationen über den gesamten Zeitraum maximiert werden. Neben der beschriebenen Kopplung der Variablen ist in dem Modell eine Randbedingung definiert. Diese spiegelt den maximalen jährlichen Infrastrukturausbau wider. Das bedeutet: ein uneingeschränkt schneller Ausbau des Basisnetzes wird in dem Modell unterbunden, da er nicht als realitsisch angesehen wird. Es wird angenommen, dass in den Anfangsjahren des Betrachtungszeitraums nur eine geringe Zubaurate bewerkstelligt werden kann. Diese Rate steigt jedoch sukzessive an, wodurch ein Komplettausbau des Basisnetz im letzten Jahr der Betrachtung (2030) erreicht wird (siehe Abbildung 2-4). Diese maximale Ausbaurate muss jedoch nicht der resultierenden Ausbaurate entsprechen. Sie stellt lediglich ein Grenzwert dar, der in der Berechnung durchaus auch unterschritten werden kann.

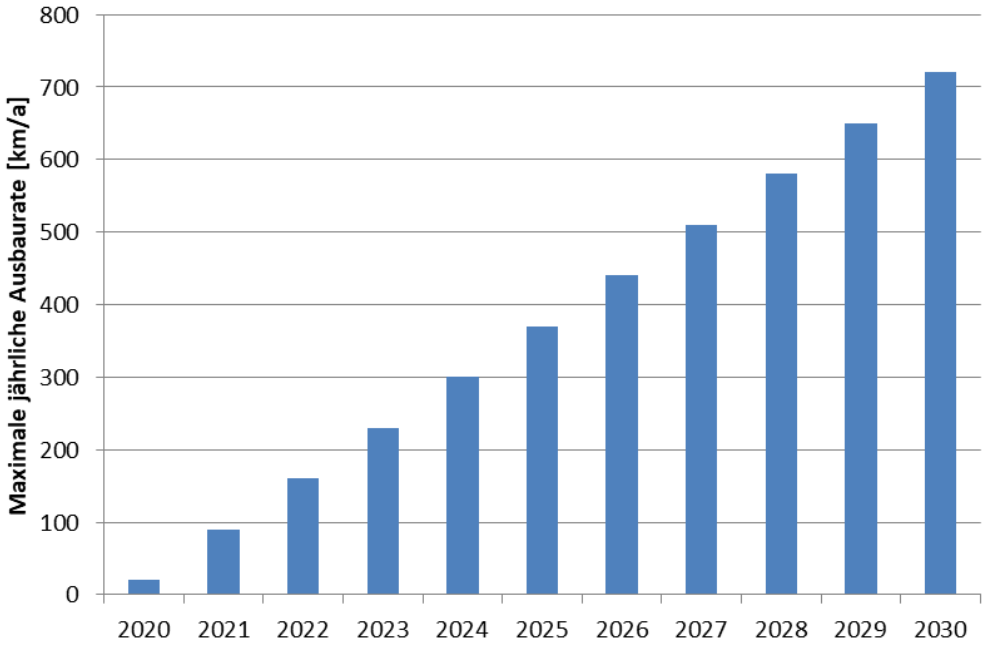


Abbildung 2-4: Maximale jährliche Ausbaurate im Modell

Nach der eigentlichen Optimierung erfolgt die Berücksichtigung zweier weiterer Aspekte in einem nachgelagerten Schritt. Der erste Aspekt betrifft den möglichen Einsatz von O-BEV. Es wird überprüft, ob O-BEV gegenüber Diesel-Lkw bzw. O-HEV bei der optimierten Infrastruktur eine höhere Wirtschaftlichkeit aufweisen. Hierbei werden zusätzlich die nötigen Batteriekapazitäten relations- und jahresfein ermittelt.

Der zweite Aspekt betrifft die Integration einer realistischen Bestandsumschichtung. Das Optimierungsmodell rechnet lediglich mit rechnerischen Beständen ohne Berücksichtigung von Neuzulassungen und Fahrzeuglebensdauern. Durch die Integration des Bestandsumschichtungsmodells wird gewährleistet, dass bspw. ein Lkw, der im Jahr 2021 in den Bestand eintritt, nicht bereits im nächsten Jahr durch einen (in der Optimierungsrechnung) wirtschaftlicheren Lkw ersetzt wird. Des Weiteren ermöglicht ein Bestandsumschichtungsmodell die Ermittlung der Neuzulassungen. Die Neuzulassungen sind insbesondere relevant für die Evaluierung der absoluten Kaufprämien.

Als weitere Einschränkung wird die Anzahl der Neuzulassungen von O-Lkw zu Beginn der Einführungsphase limitiert, um sehr schnelle Marktdurchdringungen, die in der Realität aufgrund von Produktionskapazitäten und zeitlichen Verzögerungen im Erwerb schwer zu erreichen sind, modellseitig zu vermeiden. Hier wird angenommen, dass im Jahr 2020 lediglich 10 Oberleitungsfahrzeuge in den Markt eintreten können. Die Zahl der Neuzulassungen steigt in den Folgejahren auf 100, 1.000 bzw. 10.000. Ab dem Jahr 2024 gelten die Hemmnisse als beseitigt, sodass hier keine Beschränkungen mehr angenommen werden.

Abbildung 2-5 gibt einen Überblick der Optimierung mitsamt der nachgelagerten Prozessschritte.

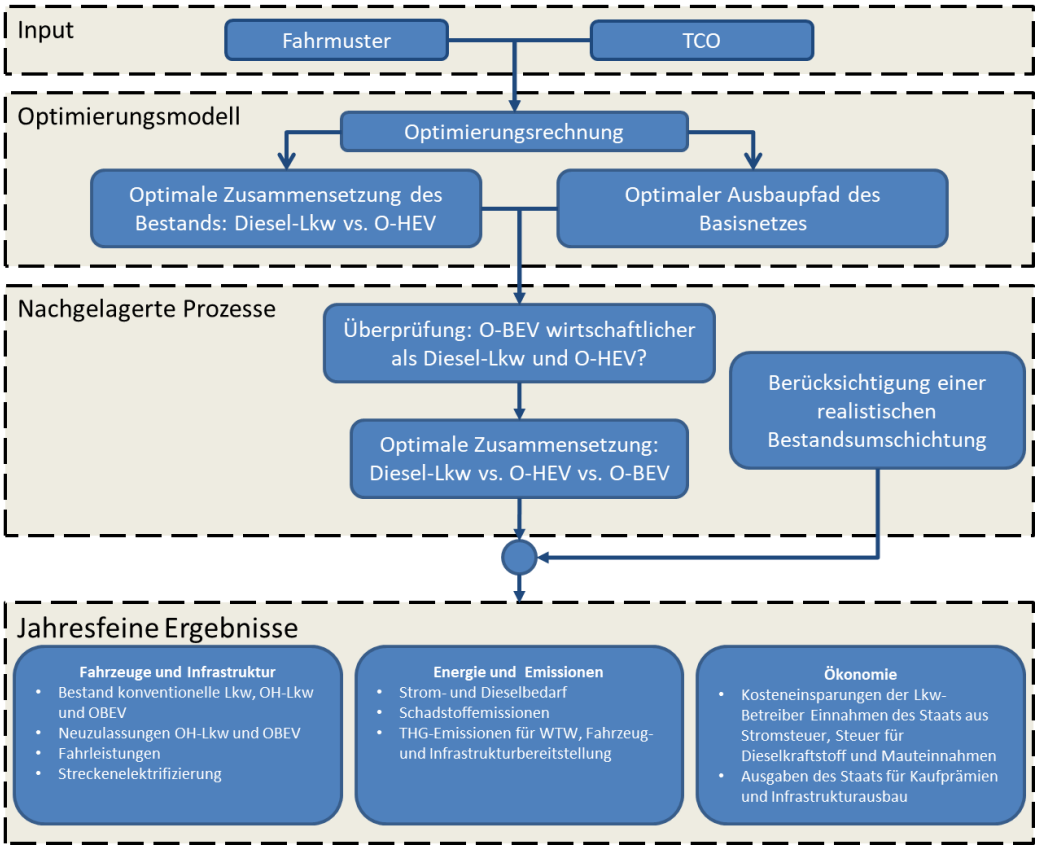


Abbildung 2-5: Ablaufschema Optimierungsmodell inkl. nachgelagerte Prozesse

Diese beiden Schritte komplettieren die Modellrechnungen. Die Resultate der Optimierung sowie der nachgelagerten Prozessschritte können schlussendlich u.a. folgende Größen für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums liefern:

- Bestand konventionelle Lkw, O-HEV und O-BEV
- Neuzulassungen O-HEV und O-BEV
- Streckenelektrifizierung (geographischer Ort)
- Strom- und Dieselbedarf (Gesamtmenge und geographischer Ort)
- Kosteneinsparungen der Lkw-Betreiber (relationsfein)
- Einnahmen des Staats aus Stromsteuer, Steuer für Dieselkraftstoff (Ökosteuer und ggf. CO_2-Steuer) und Mauteinnahmen
- Ausgaben des Staats für Kaufprämien und Infrastrukturausbau

Durch Änderungen der Randbedingungen bzw. der Inputparameter können unterschiedliche Szenarienrechnungen durchgeführt werden. Hier können bspw. staatliche Maßnahmen wie Mautbefreiungen oder Kaufprämien analysiert werden, die direkte Auswirkungen auf die TCO für die Lkw-Betreiber haben und somit die Optimierungsrechnung sowie die Ergebnisse beeinflussen. Im folgenden Abschnitt werden die definierten Szenarien erläutert.

2.4 Umweltbewertung

Ziel bei der Berechnung der Umweltwirkungen ist es, die gesamte Prozesskette von der Fahrzeugherstellung/-entsorgung über die Wartung und die Fahrzeugnutzung (inklusive der Bereitstellung der Energieträger) zu bilanzieren.

Abbildung 2-6: Prozesskette des Oberleitungs-Lkw (schematische Darstellung)

Der Fokus liegt hierbei auf den Treibhausgasemissionen nach IPCC[1], zusätzlich werden noch ausgewählte Luftschadstoffe untersucht. Besonders relevant sind hierbei die Feinstaubemissionen (d.h. alle Partikel mit einer Größe kleiner 10 µm) sowie die Stickoxidemissionen. Wichtige Kenngröße für die Bewertung der Umweltwirkungen sind die WtW (well-to-wheels) Emissionen (also die Emissionen aus der Fahrzeugnutzung und der Energiebereitstellung) sowie aus der Fahrzeug- und Infrastrukturbereitstellung.

Die zukünftige Entwicklung des deutschen Strommixes ist ein zentraler Einflussfaktor auf die Emissionen der O-Lkw. In den letzten Jahren sind die Treibhausgasemissionen des deutschen Strommixes deutlich gefallen und neuere politische Entwicklungen wie der Kohlekompromiss dürften zu weiteren deutlichen Verbesserungen in den nächsten Jahren führen. Die meisten der aktuell verfügbaren Zahlen zur Entwicklung des Strommixes wie z.B. die Langfrist- und Klimaszenarien des BMWi (ISI et al. 2017) berücksichtigen diese Trends noch nicht. Daher werden aktuelle Szenarienergebnisse des Fraunhofer IEE verwendet, welche deutlich ambitioniertere Klimaziele (auf europäischer und deutscher Ebene) erreichen. Als europäisches Langfristziel wird eine Reduktion der THG – Emissionen bis 2050 um 95 % in Bezug auf das Referenzjahr 1990 betrachtet, so dass eine Vollversorung mit EE Strom im Jahr 2050 angenommen wird. Für das Zwischenjahr 2030 bedeutet dies europaweit eine Reduktion um 45 % gegenüber 1990, um die Ziele der EU-Effizienzrichtlinie und des EU-Erneuerbarenrichtlinie einzuhalten. Auf deutscher Ebene wird mit diesem Szenario ein vollständiger Kohleausstieg bis 2035/38 erreicht.

Anhand von eigens abgeleiteten Werten für die unterschiedlichen Stromerzeugungstechnologien wurden damit die Umweltwirkungen des Strommixes berechnet (siehe Tabelle 2-2). Eine genauere Dokumentation der Ableitung der Strommixe und ihrer Emissionen findet sich im Anhang A3.

[1] Verwendet werden die Treibhausgasemissionen nach IPCC 2013 für eine 100 Jahres Perspektive und ohne Feedback (climate-carbon feedback), d.h. ohne Einflüsse auf den Kohlenstoffkreislauf zu berücksichtigen, welche zu einer Verstärkung des Effektes führen können.

Tabelle 2-2: Emissionsfaktoren für die Stromproduktion in der Zeitreihe (ab Kraftwerkspark)

	2017	2020*	2030
Treibhausgasemissionen [g CO_{2eq}/kWh]	559	499	300
NO_X-Emissionen [g/kWh]	0,581	0,565	0,512
PM_{10} Emissionen [g/kWh]	0,091	0,090	0,088

*Anmerkung: *aus linearer Interpolation zwischen 2017 und 2030*

Die verwendeten Kraftstoffvorketten stammen aus der aktuellsten TREMOD Version 6. Die fossilen Kraftstoffvorketten wurden hierfür aus dem Referenzszenario der UBA-Studie Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050 (Bergk / Knörr / et al., 2016) übernommen und um Annahmen zu den (zukünftigen) Bioanteilen ergänzt. Bei den Biokraftstoffanteilen wird in TREMOD davon ausgegangen, dass der Biodieselanteil bis 2020 auf 6,5 % ansteigt und danach bis 2030 konstant bleibt. Für die Berechnung der Umweltwirkungen in diesem Projekt wird daher für den gesamten Betrachtungszeitraum bis 2030 mit den in Tabelle 2-3 gezeigten Werten für 2020 gerechnet.

Tabelle 2-3: Emissionen für Diesel im TREMOD 6 Trendszenario (ab 2020 mit 6,5 % Biodieselbeimischung)

	CO_{2eq}	NO_X	PM_{10}
TtW	2,658 kg/l		
WtT	0,426 g/l	1,521 g/l	0,073 g/l

Anmerkung: Biokraftstoffe haben im WtT Teil negative CO_2 Emissionen (CO_2 Aufnahme), dafür wird im TtW Teil die gesamten CO_2 Emissionen verrechnet (und nicht nur der fossile Anteil)

Die Biokraftstoffanteile in TREMOD halten die Quoten und Anrechnungsmöglichkeiten für erneuerbare Energie im Verkehrssektor nach der Erneruebaren Richtlinie (RED II) ein, eine genauere Ableitung der Anteile findet sich im TREMOD Endbericht (ifeu 2020).

Die direkten (TtW) spezifischen Stickoxid- und PM_{10}-Emissionen stammen ebenfalls aus TREMOD. Weiterhin werden die Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung, -entsorgung und -wartung sowie der Oberleitungsinfrastruktur benötigt, die im Anhang A3 näher beschrieben sind.

3 Einführungsszenarien

3.1 Leitgedanken und Rahmenbedingungen

Wesentliches Ziel der im Vorhaben durchgeführten Modellierung ist es, die Einflussfaktoren auf die Einführung eines O-Lkw-Systems besser zu verstehen. Die Modellierung entspricht somit einem „Forecasting"-Ansatz und basiert auf dem Vergleich von Vollkosten (TCO), die den Fahrzeugbetreibern durch den Betrieb von O-Lkw bzw. Diesel-Lkw entstehen. Rechnet sich der Einsatz von O-Lkw auf einer bestimmten Relation für den Betreiber aus TCO-Sicht, so wird diese Relation im Modell auf O-Lkw umgestellt. Untersucht wird also die Attraktivität von O-Lkw für den Fall, dass eine politische Entscheidung für die Einführung eines O-Lkw-Systems getroffen wurde.

Den Szenarien liegen keine direkten Vorgaben für die durch Lkw zu erreichenden CO_2-Emissionsminderungen zugrunde, wie es typischerweise bei „Backcasting"-Szenarien der Fall ist. Gleichwohl fließen die bestehenden Klimaziele indirekt in Gestalt verschiedener Rahmenbedingungen ein. Neben der Entwicklung des deutschen Strommix (siehe Kapitel 2.4) betrifft dies vor allem die die Effizienzentwicklung der Lkw.

Gemäß (EU-Parlament / EU-Kommission 2019) sollen die CO_2-Emissionen neuer schwerer Nutzfahrzeuge bis 2025 um 15 % und 2030 – um 30 % gegenüber dem Referenzzeitraum (1. Juli 2019 bis zum 30. Juni 2020) sinken. Daher wurden im Zuge der Verbrauchsimulation die kosteneffizientesten Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstofverbrauchs konventioneller Lkw, wie aerodynamische Massnahmen am Chassis, Erhöhung des Motorwirkungsgrades, dem Einsatz effizienter Leichtlaufreifen oder der Reduzierung des Leergewichts berücksichtigt. Relativ teure Maßnahmen, wie eine Hybridisierung des Antriebsstranges oder der Wärmerückgewinnung aus dem Abgasstrang wurden im Falle der konventionellen Lkw nicht einbezogen, da davon ausgegangen wird, dass die CO_2-Flottenziele zu einem erheblichen Anteil durch den Markthochlauf elektrisch angetriebener Fahrzeuge erreicht werden[1]. Somit verringert sich der Verbrauch der konventionellen Fahrzeuge in den Szenarienbetrachtungen um rund 15 %.

Konstituierende Merkmale der Szenarien sind die angenommenen politischen Instrumente. Grundvoraussetzung für signifikante Marktaktivität bei O-Lkw in den kommenden 10 Jahren ist die staatliche Entscheidung für einen Infrastrukturausbau, der derzeit (noch) nicht geplant ist. Das Ausbleiben einer politischen Entscheidung für den Infrastrukturaufbau wird als Referenzszenario abgebildet; in diesem Szenario gibt es keine O-Lkw. In allen anderen Szenarien wird ein Infrastrukturausbau angenommen, der durch den Staat vorfinanziert wird. Basierend auf den Modellergebnissen werden dann Aussagen über die Möglichkeit einer Refinanzierung der Infrastruktur durch die Nutzer getroffen. In jedem Fall kann der

[1] Kommt es zu einer Markteinführung von O-Lkw, so ist bzgl. der Nfz-CO_2-Flottengrenzwerte zu klären, wie diese Fahrzeuge auf die Grenzwerte angerechnet werden (v.a. die Bestimmung des elektrischen Fahranteils für die Typgenehmigung)

Aufbau eines Oberleitungsnetzes nur mit einer begrenzten Geschwindigkeit erfolgen, die in der Modellierung über eine entsprechende Randbedingung abgebildet ist.

Wird eine Infrastruktur aufgebaut, so gibt es verschiedene mögliche Stellschrauben, um den Einsatz von O-Lkw auf dieser Infrastruktur attraktiver zu machen. In den Szenarien untersucht wird

- eine Mautbefreiung für elektrisch zurückgelegte Streckenanteile,
- eine Reduktion der EEG-Umlage für den Fahrstrom (entsprechend der Regelung für den elektrischen Schienenverkehr),
- eine Kaufprämie für O-Lkw sowie
- die Einführung eines während des Betrachtungszeitraums steigenden CO_2-Preises.

3.2 Beschreibung der Szenarien

Es werden fünf Szenarien mit verschiedenen Bedingungen für den Markteintritt von O-Lkw definiert. Die Szenarien decken den Zeitraum 2020 bis 2030 ab, stellvertretend für die ersten 10 Jahre einer potentiellen Systemeinführung. Im Rahmen der Unsicherheiten der Eingangsparameter sollten die Ergebnisse aber auch für eine um einige Jahre verzögerte Markteinführung Gültigkeit haben.

In einem zusätzlichen Referenzszenario, auf das sich die Kosten bzw. Einsparungen der anderen Szenarien beziehen, wird eine Entwicklung abgebildet, die bis zum Jahr 2030 keine alternativen Antriebskonzepte berücksichtigt. Das heißt, es werden hier lediglich konventionelle Lkw eingesetzt, die durch Effizienzverbesserungen gekennzeichnet sind, aber mit dem derzeitigen Diesel-Kraftstoffmix betrieben werden. In einer separaten Betrachtung (Abschnitt 4.8) wird der fossile Dieselkraftstoff teilweise durch PtL-Diesel ersetzt, um die resultierenden Kosten zu untersuchen und dem O-Lkw gegenüberzustellen. Damit wird eine Vergleichbarkeit der Treibhausgasminderung zwischen Referenz und O-Lkw hergestellt.

All diese Szenarien haben gemeinsam, dass der Aufbau der Infrastruktur im Betrachtungszeitraum vom Staat auf einer Gesamtlänge von 3.235 km finanziert wird. Der maximale jährliche Infrastrukturzubau unterliegt dabei den in Abbildung 2-4 dargestellten Begrenzungen. Zudem wird die Annahme getroffen, dass O-Lkw hinsichtlich der Maut analog zu anderen alternativen Antriebskonzepten behandelt werden. Konkret wird für O-Lkw standardmäßig eine Mautermäßigung von 1,1 ct/km angesetzt, was der Mautermäßigung für Erdgas-Lkw ab 2021 entspricht[1]. Daneben werden verschiedene Politikinstrumente abgebildet, um die Auswirkungen auf den Markthochlauf, Kosten und THG-Minderungen zu untersuchen:

- Szenario „**Infrastruktur**“: Hier wird lediglich die Infrastruktur staatlich finanziert, ansonsten aber keine O-Lkw-spezifischen Fördermaßnahmen ergriffen.
- Szenario „**+ elektrische Mautbefreiung**“: O-Lkw werden für elektrisch gefahrene Abschnitte auf Bundesfernstraßen vollständig von der Lkw-Maut befreit. Dies gilt auch für Streckenabschnitte, die abseits der Oberleitung im Batteriebetrieb gefahren werden. Für

[1] Elektro-Lkw und Erdgas-Lkw sind derzeit vollständig von der Maut befreit. Für Erdgas-Lkw läuft diese Befreiung Ende 2020 aus, ab 2021 muss ein reduzierter Mautsatz entrichtet werden. Es wird erwartet, dass für Elektro-Lkw aufgrund der hohen Kosten im Zuge des Markthochlaufs der Fahrzeuge ähnlich verfahren wird.

verbrennungsmotorisch zurückgelegte Streckenabschnitte von O-Lkw muss der standardmäßig angesetzte Mautsatz für O-Lkw (Reduktion um 1,1 ct/km ggü. dem Normalsatz, siehe oben) entrichtet werden. Diese Ausgestaltung reizt somit besonders den elektrischen Betrieb von O-Lkw an.

- Szenario „**+ reduzierte EEG-Umlage**“: Standardmäßig haben O-Lkw für ihren Stromverbrauch die volle EEG-Umlage zu entrichten. In diesem Szenario wird die EEG-Umlage um 80 % reduziert. Dies bedeutet, dass O-Lkw dann hinsichtlich der EEG-Umlage nach (EEG 2017) wie schienengebundene Fahrzeuge behandelt würden.
- Szenario „**+ Kaufprämie**“: Für die Anschaffung einer Oberleitungs-Sattelzugmaschine wird eine Kaufprämie von 40.000 € gewährt. Diese Förderung wird aktuell bereits für Elektro-Lkw gewährt, ist allerdings bis Ende 2020 befristet (BMVI 2018). In diesem Szenario wird angenommen, dass die Regelung bis zum Jahr 2030, also bis zum Ende des Betrachtungszeitraums, unverändert fortgeschieben wird.
- Szenario „**+ CO2-Preis**“: Dieselkraftstoff wird mit einem zusätzlichen CO_2-Preis beaufschlagt, der im Betrachtungszeitraum linear auf 90 €/t im Jahr 2030 ansteigt. Das durch die Bundesregierung beschlossene Klimapaket sieht vor, dass die CO_2-Preise für die Non-ETS-Sektoren sich ab dem Jahr 2026 am Markt bilden sollen. Für die Jahre ab 2027 wurden dafür bisher noch keine Unter- oder Obergrenzen festgelegt. Der hier angenommene Preis von 90 € pro Tonne entspricht einer konservativen Annahme, die nach (Kriegler et al. 2018) erforderlich sein wird, um das 2 °C Ziel (mit wenigen negativen Emissionen) bzw. das 1,5 °C-Ziel (mit vielen negativ Emissionen) einzuhalten.

Tabelle 3-1 fasst die Eckdaten der Szenarienrechnungen zusammen. Parameter, die mit einem Stern (*) versehen sind, variieren je nach Szenario geringfügig. Zum Beispiel hat die Befahrungsstärke einen Einfluss auf das Fahrdrahterneuerungsintervall und somit auch auf die Infrastrukturkosten.

Tabelle 3-1: Wichtige Eingangsparameter der Szenarienrechnungen

	2020	2030
Spezifische Infrastrukturkosten [€/km/a]	72.636*	183.454*
Dieselpreis [€/l]	1,024	1,187[1]
Strompreis[2] [ct/kWh]	18,6[2]	13,9[3]
Verbrauch Diesel-Lkw [l/100km]	31,4*	27,2*
Verbrauch O-HEV Hybridmodus [l/100km]	27,8*	24,3*
Verbrauch O-HEV Oberleitungsmodus [kWh/100km]	129*	121*
Verbrauch O-BEV Batteriemodus [kWh/100km]	116*	106*
Verbrauch O-BEV Oberleitungsmodus [kWh/100km]	128*	120*
Betrachtete Relationen	22.553	
Streckenabschnitte	738	
Jahresfahrleistung [Mio. km]	6,751	
Betrachtete Lkw	67.784	
Länge des Basisnetzes im Endausbau [km]	3.235	

Anmerkungen: [1]1,417 €/l im Szenario „+CO2-Preis“; [2]13,5 ct/kWh im Szenario „+EEG-Ermäßigung“; [3] 11,5 ct/kWh im Szenario „+EEG-Ermäßigung“

3.3 Ergebnisse der Modellrechnungen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Szenarienrechnungen dargestellt. Wesentliche verkehrliche Ergebnisse sind dabei der Fahrzeugbestand (Kapitel 3.3.1) und die Fahrleistung (Kapitel 3.3.2). Daraus werden dann die Ergebnisse für den jeweiligen Energiebedarf (Kapitel 3.3.3), die Umweltwirkungen (Kapitel 3.3.4) sowie die Kostenbilanz des Staates und Einsparungen für die Betreiber berechnet (Kapitel 3.3.5). Abschließend werden noch geograpische Unterschiede beim wirtschaftlich optimalen Ausbaupfad zwischen den Szenarien betrachtet (Kapitel 3.3.6).

Zwar wird bei der Optimierungsrechnung ein hoher Detaillierungsgrad abgebildet und zwischen einer Vielzahl an Relationen differenziert, jedoch werden bei der Ergebnisdarstellung - außer bei der Streckenelektrifizierung - lediglich die aggregierten Werte für alle betrachteten Relationen dargestellt.

3.3.1 Fahrzeugbestand

Die Anzahl der Neuzulassungen von Lkw >26 t beträgt im TREMOD Trendszenario zwischen 2020 und 2030 konstant rund 42.500 Fahrzeuge. Abbildung 3-1 zeigt die aus der Modellierung resultierenden jährlichen Neuzulassungen von O-Lkw in drei Abschnitten des Betrachtungszeitraums. In der Anfangsphase (2020-2023) liegt der Anteil von O-Lkw an den gesamten SNF-Neuzulassungen demzufolge in allen betrachteten Szenarien bei unter 7 %, allerdings gibt es deutliche Unterschiede. Ohne Fördermaßnahmen ist in dieser Phase kein nennenswerter Markteintritt von O-Lkw zu verzeichnen. Die momentan existierenden Instrumente Mautbefreiung und Kaufprämie können allerdings jeweils für sich genommen bereits etwa 2.600 jährliche Neuzulassungen (aus TCO-Sicht) ermöglichen.

Im mittleren Zeitraum (2024-2026) kommt es dann in allen Szenarien zu einem merklichen Hochlauf der Neuzulassungen auf bis zu 50 % (bei fortgeführter Kaufprämie). Das absolute Niveau der Neuzulassungen unterscheidet sich aber wiederum erheblich. Ohne weitere Fördermaßnahmen (Szenario „Infrastruktur“) kommt es erst im letzten Abschnitt des Betrachtungszeitraums (2027-2030) zu einem deutlich steigenden Anteil von O-Lkw an den Neuzulassungen.

Aus den jährlichen Neuzulassungen wird der Fahrzeugbestand in den verschiedenen Jahren ermittelt. Dabei ist zu berücksichtigem, dass die der hier durchgeführten Modellierung zugrundeliegenden und besonders geeigneten Relationen (siehe Abschnitt 1.2) über den gesamten Zeitraum nur durch eine Teilmenge von etwa 68.000 Fahrzeugen bedient werden. Der Bestand aller zugelassener Lkw >26 t in Deutschland beträgt nach dem TREMOD-Trendszenario im Jahr 2020 rund 288.000 Fahrzeuge und steigt bis zum Jahr 2030 auf 334.000 Fahrzeuge. Somit werden rund 20-24 % der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge berücksichtigt. Als Ergebnis der Optimierung ändert sich jedoch die Flottenzusammensetzung entsprechend der Anzahl neu zugelassener O-Lkw. Abbildung 3-2 zeigt die sich ergebenden Bestände von O-Lkw, differenziert nach O-HEV und O-BEV, für die Jahre 2023, 2026 und 2030 in den einzelnen Szenarien.

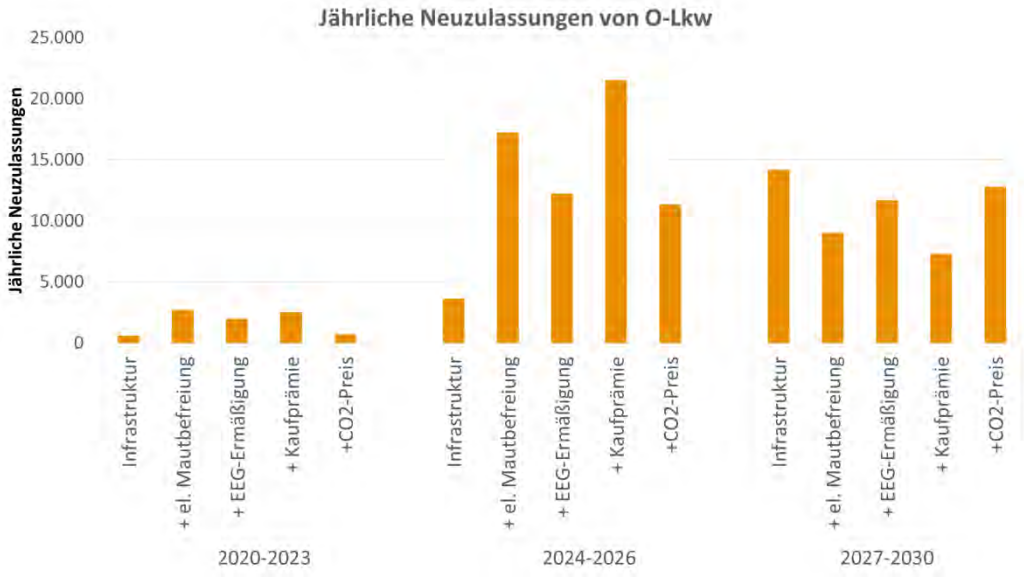


Abbildung 3-1: Jährliche Neuzulassungen O-HEV und O-BEV für die Zeiträume 2020-2023, 2024-2026 und 2027-2030

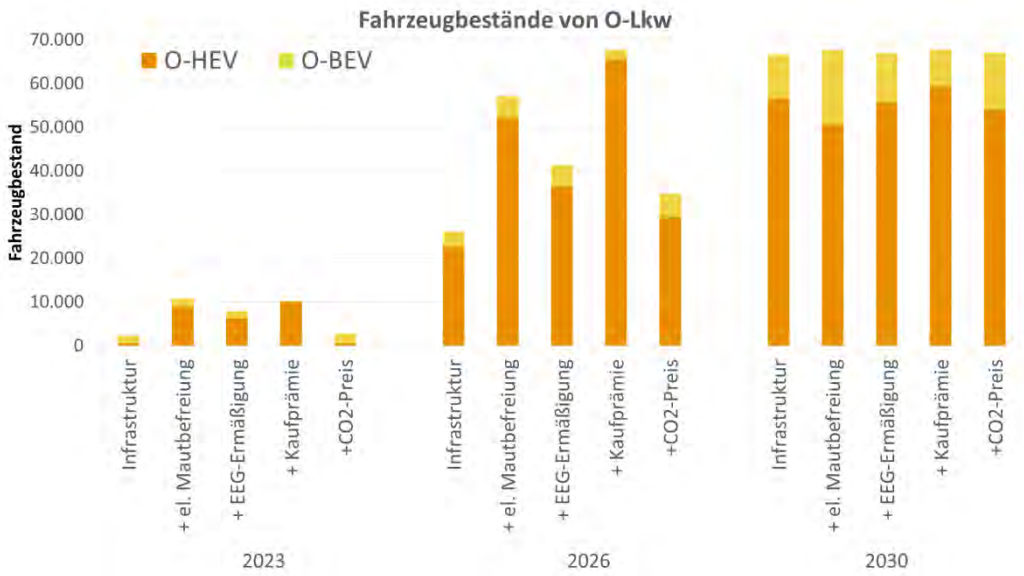


Abbildung 3-2: Fahrzeugbestände O-HEV und O-BEV für die Jahre 2023, 2026 und 2030

In den Anfangsjahren sind die Bestände gering, bei einer Förderung, die über die reine Infrastrukturförderung hinaus geht, ergeben sich jedoch früh signifikannte Wachstumsrraten von O-Lkw. Insbesondere die elektrische Mautbefreiung und die Kaufprämie führen zu einer schnellen Marktdiffusion. Im Zieljahr 2030 werden in allen Szenarien auf den betrachteten Relationen fast ausschließlich O-Lkw eingesetzt.

Sowohl das Verhältnis von Hybridfahrzeugen (O-HEV) zu rein elektrischen Fahrzeugen (O-BEV) variiert zwischen den Szenarien als auch der Beginn des Markthochlaufs. Bei allen Szenarien nimmt jedoch die Bedeutung von O-BEV mit zunehmenden Netzausbau und Kostendegression der Traktionsbatterien zu. Die Zuwachsraten sind aufgrund der starken Förderung bei den Szenarien „+el. Mautbefreiung“ und „+Kaufprämie“ im Zeitraum 2024-

2026 besonders hoch. Dieser Hochlauf erfolgt in den Szenarien „Infrastruktur“ und „+CO2-Preis“ erst zu einem späteren Zeitpunkt.

Da O-HEV im ersten Teil der Hochlaufphase im Schnitt eine höhere Wirtschaftlichkeit aufweisen, wird der O-Lkw-Bestand zunächst durch O-HEV dominiert. Aufgrund der steigenden Zulassungszahlen von O-BEV zum Ende des Betrachtungszeitraums hin wird ein Teil des O-HEV-Bestands durch O-BEV ersetzt. Diese Entwicklung ist insbesondere bei den Szenarien „+el. Mautbefreiung“, „+EEG-Ermäßigung“ und „+CO2-Preis“ erkennbar, da durch die gezielte Förderung der elektrischen Fahrleistung die O-BEV stärker profitieren als O-HEV. Im Zieljahr 2030 werden in allen Szenarien fast ausschließlich O-Lkw eingesetzt, wobei der Anteil von O-BEV im Szenario „+el. Mautbefreiung“ deutlich höher ist als in den anderen Szenarien.

Bei der Entscheidung, ob der Einsatz von O-BEV auf einer bestimmten Relation technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll ist, wird die Kapazität der Traktionsbatterie durch das Modell variiert. Unter den technisch möglichen Fahrzeugkonfigurationen wird schlussendlich die wirtschaftlich günstigste gewählt, also entweder ein O-BEV mit einer bestimmten Batteriegröße, ein O-HEV oder ein konventionelles Dieselfahrzeug. Für die O-BEV wurden neben den Beständen auch die eingesetzten Batteriekapazitäten ausgewertet (siehe Abbildung 3-3):

- Es zeigt sich, dass in allen Szenarien in der Anfangsphase Batterien mit einer geringen Kapazität eingesetzt werden können. Die notwendige Kapazität steigt jedoch bis zum Jahr 2030 durch die angenommene Kostendegression der Batterien. Besonders hoch sind die eingesetzten Batteriekapazitäten bei einer elektrischen Mautbefreiung. Hier steigen sie auf im Mittel 250 kWh an, was einer elektrischen Reichweite von ca. 190 km entspricht. Die große Batteriedimensionierung kommt daher, dass die höheren Kosteneinsparungen im Strombetrieb auch die höheren Investitionskosten für größere Batterien kompensieren können.
- In einigen Szenarien kommt es um 2026 zu einem Rückgang der durchschnittlichen Batteriekapazität. Dies liegt an der hohen Netzausbaurate auf dicht befahrenen Autobahnabschnitten in dieser Phase. Dies ermöglicht einigen Lkw, die auf kurzen Relationen verkehren und daher auch nur kleine Batterien benötigen, einen wirtschaftlichen Betrieb. Da der O-BEV-Bestand in dieser Phase gering ist, sind die Änderungen zum Vorjahr hierdurch deutlicher erkennbar.
- In der Endphase steigt die Batteriekapazität wiederum an. Hintergrund dieser Entwicklung ist die Kostendegression der Batterien. Hierdurch wird ein Einsatz auf Relationen ermöglicht, auf denen große Reichweiten abseits des Oberleitungsnetzes zurückgelegt werden müssen. In diesem Fall können große Batterien eingesetzt werden. In den Szenarien liegen die durchschnittlichen Batteriekapazitäten im Jahr 2030 im Bereich zwischen 150 und 250 kWh.

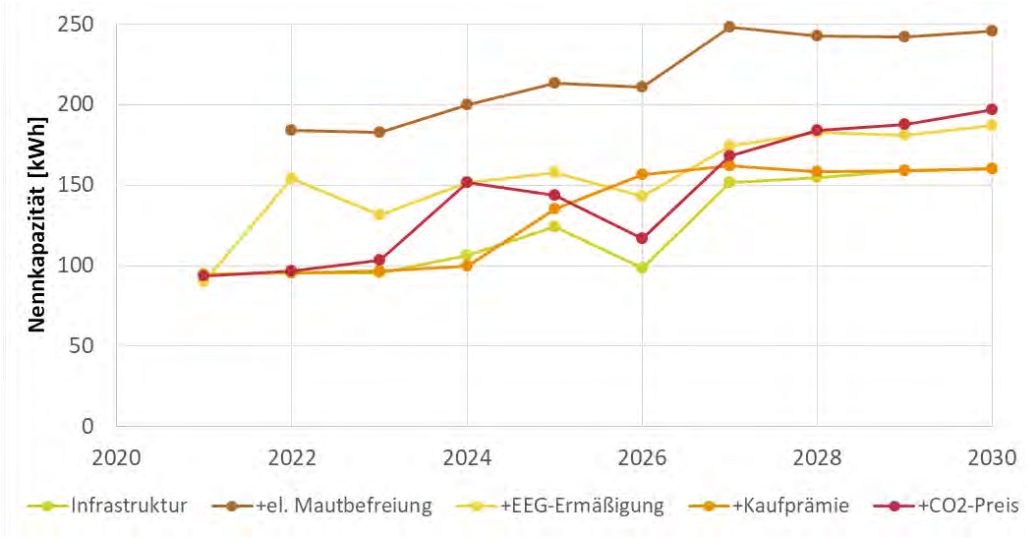


Abbildung 3-3: Durchschnittliche Größe der eingesetzten O-BEV-Traktionsbatterien

3.3.2 Fahrleistung

Die jährliche Fahrleistung von Lkw >26 t beträgt in Deutschland nach dem TREMOD-Trendszenario im Jahr 2020 gut 36,3 Mrd. Fahrzeugkilometer. Diese steigt bis zum Jahr 2030 deutlich auf knapp 41,0 Mrd. an. In den Modellrechnungen wird der Ausschnitt einer konstanten Fahrleistung von gut 6,7 Mrd. Fahrzeugkilometer betrachtet. Abbildung 3-4 zeigt die gesamte jährliche Fahrleistung von O-Lkw über den Betrachtungszeitraum für die Szenarien. Analog zur Bestandsentwicklung steigt die Fahrleistung insbesondere in den Jahren 2024 bis 2028 in allen Szenarien sehr stark an. Die Szenarien „+el. Mautbefreiung“ und „+ Kaufprämie“ erreichen bereits in der frühen Phase hohe Fahrleistungen der O-Lkw. Im Zieljahr 2030 sind die Unterschiede zwischen den Szenarien bzgl. der Gesamtfahrleistung der O-Lkw wieder gering, da der betrachtete Bestand szenarienübergreifend fast vollständig aus O-Lkw besteht.

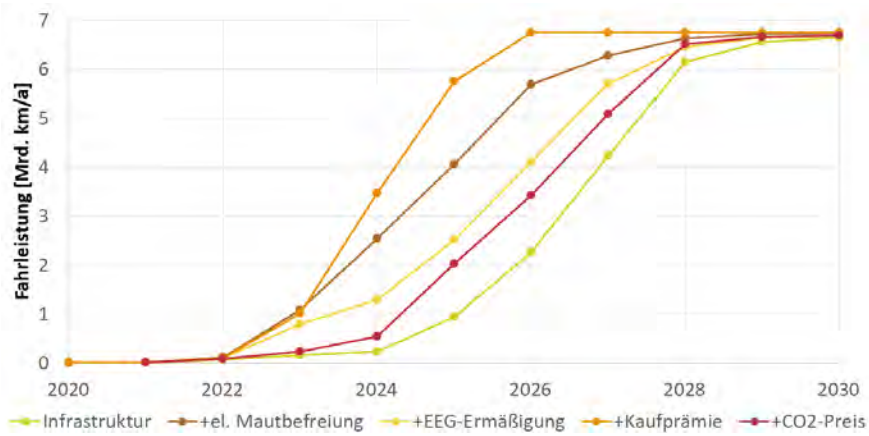


Abbildung 3-4: Jährliche Fahrleistung von Oberleitungs-Lkw

Die elektrische Fahrleistung variiert ebenfalls zwischen den Szenarien insbesondere in den mittleren Jahren der Markteinführung (siehe Abbildung 3-5). Im Szenario „+el. Mautbefreiung“ werden viele O-BEV eingesetzt, sodass hier der elektrische Fahranteil am höchsten ist. Der Markthochlauf im Szenario „Infrastruktur“ findet später statt als in den anderen Szenarien. Somit steigt hier auch die elektrische Fahrleistung verzögert.

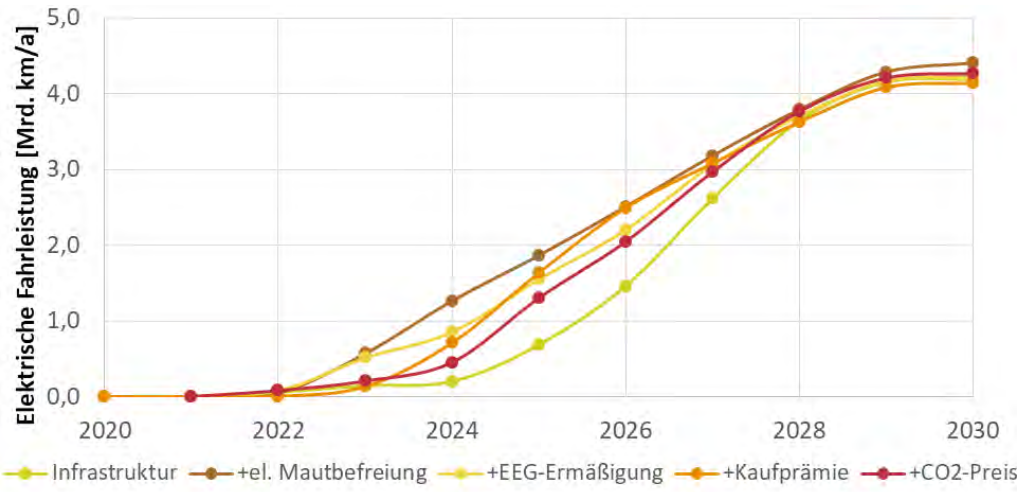


Abbildung 3-5: Jährliche elektrische Fahrleistung von Oberleitungs-Lkw

Der elektrische Fahranteil von O-HEV unterscheidet sich in den Szenarien mit Besserstellung der Betriebsphase (Mautbefreiung, EEG-Ermäßigung und CO_2-Preis) zum Szenario „+Kaufprämie“, in dem die Fixkosten gesenkt werden (siehe Abbildung 3-6). Beim letztgenannten Szenario ist in den ersten Jahren der elektrische Fahranteil sehr gering und steigt mit zunehmenden Netzausbau. In den anderen Szenarien stagniert der Wert bei ca. 50 %, da ein hoher Anteil Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit ist.

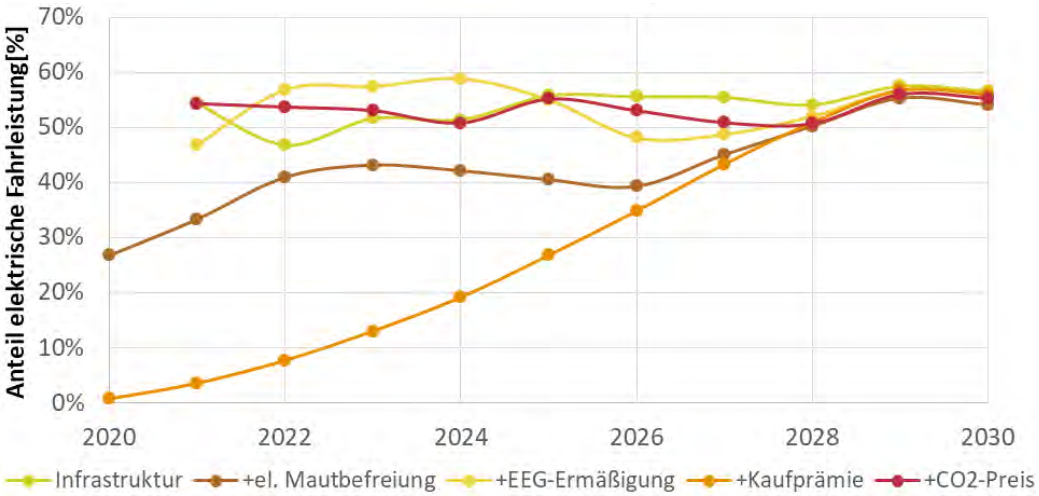


Abbildung 3-6: Elektrischer Fahranteil bei O-HEV

3.3.3 Energiebedarf

Abbildung 3-7 zeigt den jährlichen Strombedarf durch O-Lkw unter Berücksichtigung der Oberleitungsverluste (Bilanzgrenze: Mittelspannungsanschluss) und den Dieselbedarf von konventionellen Lkw und O-HEV. Der Stromverbrauch steigt im wesentlichen proprtional mit der elektrischen Fahrleistung (siehe Abschnitt 3.3.1) an. Die Szenarien weisen im Jahr 2030 einen Verbrauch von knapp 6 TWh pro Jahr auf. Dieser Strombedarf wäre somit zu erwarten, wenn das Potential besonders geeigneter Verkehre für den O-Lkw-Betrieb weitgehend ausgeschöpft wird. Verglichen mit dem gesamten Strombedarf in Deutschland in Höhe von 596 TWh (AG Energiebilanz 2019) im Jahr 2018 wäre dies eine Erhöhung von rund einem Prozent. Durch die benötigte Strommenge an sich sind daher nur begrenzte Auswirkungen auf das Energiesystem zu erwarten. Relevanter dürfte die zeitliche und örtliche Verteilung der Stromnachfrage sein. Hierzu liegen erste Erkenntnisse aus anderen Vorhaben vor[1].

Beim Dieselverbrauch ist im Referenzszenario bereits eine stetige Minderung zu verzeichnen, die auf Effizienzsteigerungen beim Dieselantrieb selbst und eine zunehmende Verbreitung weiterer Effizienztechnologien (Leichtlaufreifen, aerodynamische Optimierung etc.) bei Lkw zurückgeht. Da das für O-Lkw-Umstellung zugrundeliegende Fahrleistungspotential über den Betrachtungszeitraum konstant bleibt[2], sind die zu erwartenden absoluten Steigerungen der Verkehrsleistung dabei nicht berücksichtigt. Durch die Einführung von O-Lkw kann der Dieselbedarf in Bezug auf diese Teilmenge deutlich stärker gesenkt werden als in Bezug auf den gesamten Verbrauch. In allen Szenarien mit Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur sinkt der Dieselbedarf der umgestellten Fahrzeuge bis zum Jahr 2030 um ca. 72 % gegenüber dem Jahr 2020. Für die hier betrachteten O-Lkw-geeigneten Verkehre kann also durch ein Oberleitungs-Basisnetz im Jahr 2030 der Dieselbedarf um rund drei Viertel verringert werden. Die Geschwindigkeit der Absenkung unterscheidet sich dabei je nach eingesetzten Förderinstrumenten und entsprechender Marktdurchdringung.

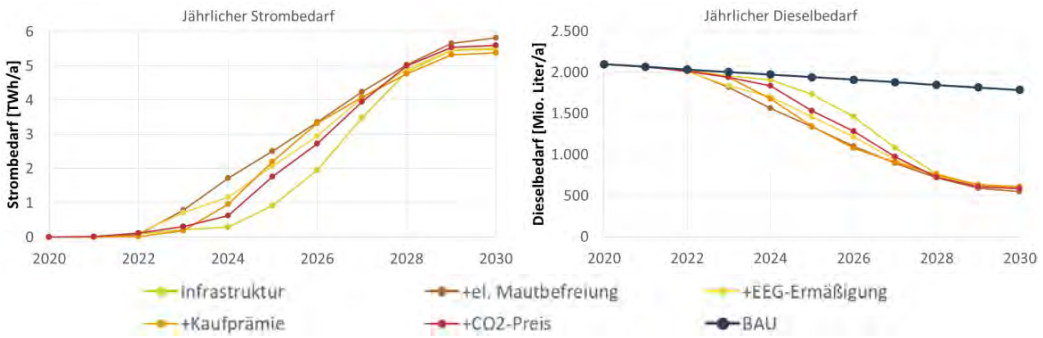


Abbildung 3-7: Jährlicher Strom- und Dieselverbrauch der betrachteten Lkw

3.3.4 Umweltwirkungen über den Lebenszyklus

Die Emissionen von THG sowie Luftschadstoffen wurden für die betrachteten Szenarien unter Berücksichtigung aller relevanten Lebenswegstationen berechnet. Dies schließt neben dem Betrieb der Fahrzeuge und der Energiebereitstellung auch die Fahrzeugherstellung und -entsorgung sowie die Bereitstellung der Infrastruktur ein. Die eingesetzte Methodik und

[1] Siehe hierzu (Öko-Institut et al. 2020) und (Fraunhofer IEE 2017)
[2] Grundlage ist hier die Verkehrsnachfrage nach Verflechtungsprognose 2030

die Annahmen sind im Detail in Anhang A3 dokumentiert. Nachfolgend werden zunächst die betrachteten Antriebstechnologien hinsichtlich der Emissionen für ein einzelnes Fahrzeug verglichen. Anschließend erfolgt eine Hochrechnung der Emissionen auf die Szenarien.

3.3.4.1 Treibhausgasemissionen

Zur Einordnung der Treibhausgasemissionen bezogen auf einen Fahrzeug-Kilometer wird ein Vergleich der unterschiedlichen Antriebe für Last-/ und Sattelzüge durchgeführt (siehe Abbildung 3-8). Die Parameter der Fahrzeugnutzung (Verbrauch, Anteil Autobahn) orientieren sich dabei an einem durchschnittlichen Fahrzeug im Jahr 2030 des Szenarios „Infrastruktur". Berücksichtigt werden der Ausbaustand der Oberleitungsinfrastruktur und die Fahrleistungen der Oberleitungs-Lkw unter Oberleitung in diesem Szenario. Betrachtet werden jeweils die Lebenszyklusemissionen eines neuen Lkw im Jahr 2030 bezogen auf einen Fahrzeugkilometer bei einer Lebensfahrleistung von 1 Mio. Kilometer.

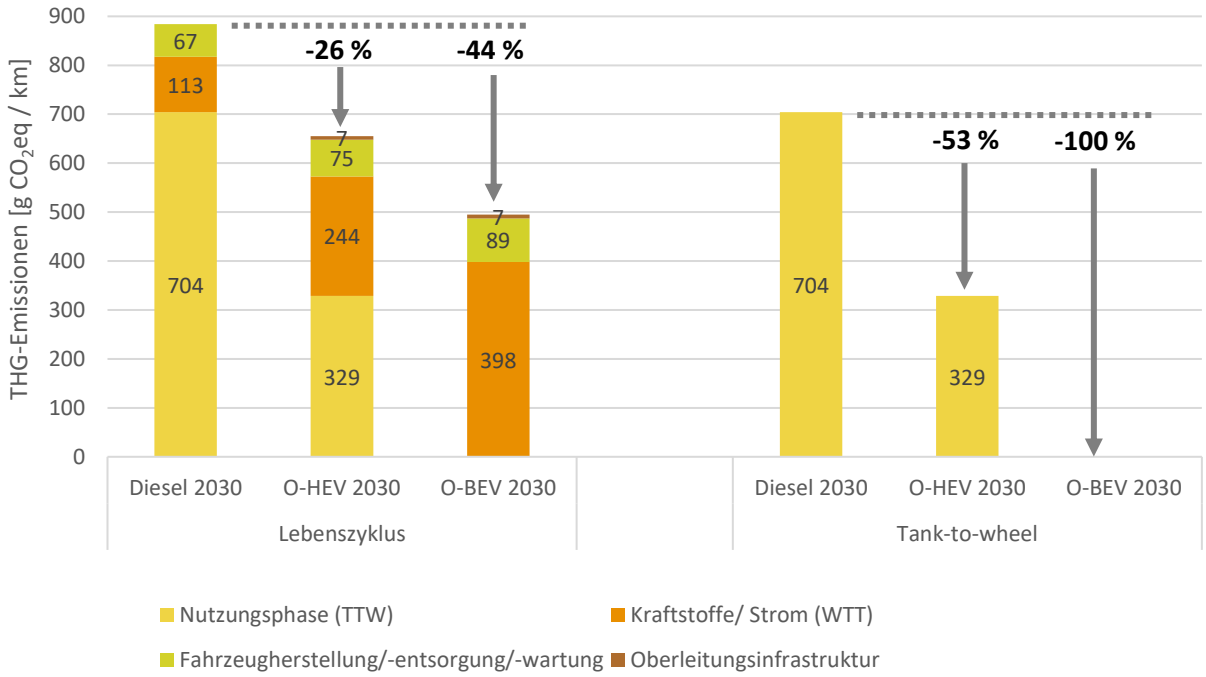


Abbildung 3-8: Treibhausgasemissionen pro Fzg-km im Vergleich zwischen Diesel, O-HEV und O-BEV (Szenario Infrastruktur) 2030

Abbildung 3-8 zeigt die THG-Emissionen der betrachteten Antriebe pro Fzg.-km. Auf der rechten Seite sind nur die Tank-to-wheel-Emissionen aufgetragen, die während des Fahrzeugbetriebs entstehen; für die Erreichung der CO_2-Sektorziele im Verkehrssektor stellt dies die relevante Bilanzgrenze dar. Im Betrachtungsjahr 2030 halbieren sich die CO_2-Emissionen durch den Ersatz eines Diesel-Lkw mit einem Oberleitungs-Hybrid-Lkw (O-HEV) in etwa. Batterieelektrische O-Lkw (O-BEV) haben keinen Auspuff und können die TtW-Emissionen somit vollständig vermeiden.

Auf der linken Seite von Abbildung 3-8 ist die Situation unter Einbezug aller Lebenswegphasen dargestellt. Für die Strombereitstellung wird dabei das Szenario einer Minderung der

europäischen THG-Emissionen im Jahr 2030 um 45 % gegenüber 1990 angenommen und der Strommarkt entsprechend modelliert (siehe Anhang A3). Für Deutschland würde dies einer Umsetzung des Kohleausstiegs etwa gemäß des aktuellen Gesetzentwurfs[1] entsprechen.

Beim klassischen Diesel-Lkw werden die Treibhausgasemissionen durch die Nutzungsphase (d.h. die direkten Emissionen beim Fahrzeugbetrieb) dominiert. Im Gesamtvergleich haben O-Lkw (sowohl O-HEV als auch O-BEV) deutlich geringere THG-Emissionen pro Fzg.-km als Diesel-Lkw. Die hinzukommenden Emissionen für die Oberleitungsinfrastruktur (inklusive der Erneuerung es Fahrdrahtes) sind sehr gering und können zumindest in einem eingeschwungenen System in erster Näherung vernachlässigt werden. Die Fahrzeugherstellung der Oberleitungs-Lkw verursacht etwas höhere Emissionen als die von Diesel-Lkw, da der elektrische Antriebstrang und vor allem der Akku zusätzliche Lasten zur Folge haben. Während die direkten Emissionen während des Fahrzeugbetriebs (TtW) beim O-BEV wegfallen (und beim O-HEV stark verringert werden), kommen zusätzliche Treibhausgasemissionen für den benötigten Fahrstrom hinzu, der im Jahr 2030 noch eine Treibhausgaswirkung von 300 g CO_{2eq}/ kWh mitbringt. Der O-HEV schneidet insgesamt bzgl. der THG-Emissionen ca. 26 % besser als das konventionelle Fahrzeug ab. Der O-BEV weist einen Vorteil von 44 % gegenüber dem Diesel-Lkw auf.

Je ambitionierter die Energiewende fortgesetzt wird, desto besser schneiden die Oberleitungs-Lkw ab. Denkbar ist, dass aufgrund des Green New Deal auf EU-Ebene die Klimaziele im Strombereich noch einmal verschärft werden auf EU-weit 52,5 % Minderung bis 2030 (siehe Anhang A3). Dies würde für Deutschland einen vollständigen Ausstieg aus der Kohle noch vor 2030 bedeuten. In diesem Fall würden die Treibhausgasminderungen gegenüber dem Diesel-Lkw auf 37 % (für den O-HEV) bzw. 46 % (für den O-BEV) ansteigen.

Um abzuschätzen, welche Folgen ein Ausbleiben weiterer Klimaschutzmaßnahmen im Energiesektor hätte, wurde die THG-Bilanz der Antriebssysteme auch unter Fortschreibung des gesetzlichen Status quo berechnet[2]. Auch in diesem Fall erreichen O-Lkw noch Treibhausgasminderungen von 15 % (O-HEV) bzw. 21 % (O-BEV). Somit kann unter sämtlichen Bedingungen des Energiesektors, die realistischerweise erwartet werden können, eine signifikante THG-Reduktion durch O-Lkw bereits im Jahr 2030 realisiert werden. Mit fortschreitender Dekarbonisierung des Stromsektors steigen die erzielbaren Minderungen dann auf der Zeitschiene weiter an.

Die hier betrachteten Szenarien beziehen sich lediglich auf für O-Lkw-Betrieb besonders geeignete Teile des SNF-Verkehrs in Deutschland (siehe Abschnitt 1.2). Vor diesem Hintergrund sind auch die Hochrechnungen der Ergebnisse für die spezifischen THG-Emissionen auf die Lkw-Flotte zu sehen: Der Güterverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen verursacht nach dem TREMOD-Trendszenario WtW-Emissionen in Höhe von 590 Mio. t CO_2 im Zeitraum 2020-2030. Hierbei entfallen rund 492 Mio. t CO_2 auf Fahrzeuge >26t. Die in den Simulationsrechnungen berücksichtigten Relationen umfassen WtW-Emissionen in Höhe von knapp 66 Mio. t CO_{2eq} (unter der Annahme, dass sie ausschließlich mit Diesel-Lkw betrieben werden). Somit werden ca. 13 % der THG-Emissionen für WtW von SNF >26t abgedeckt. Dies ist das Ergebnis einer bewussten Eingrenzung der Betrachtung auf Fahrzeuge mit besonderer Eignung für O-Lkw-Betrieb in einer Anfangsphase. Mit zunehmendem Netzausbau können allerdings auch weitere Teile des Fahrzeugbestands (insbesondere Nicht-Pendelverkehre) für O-Lkw-Betrieb relevant werden.

[1] (Bundesregierung 2020)
[2] Hier wurde das Basisszenario der BMWi-Langfristszenarien zugrunde gelegt, siehe (ISI et al. 2017).

Tabelle 3-2 stellt die kumulierten THG-Emissionen in den Szenarien im Zeitraum 2020-2030 dar. Es wird hierbei zwischen den Beiträgen durch Oberleitungsinfrastruktur, Fahrzeugherstellung, Energievorkette (WtT) und Auspuffemissionen (TtW) unterschieden. Die Oberleitungsinfrastruktur hat den mit Abstand geringsten Anteil und ist insgesamt bezüglich der THG-Emissionen vernachlässigbar. In allen Szenarien mit O-Lkw nehmen die THG-Emissionen für die Fahrzeugherstellung verglichen mit dem Referenz-Szenario inbesondere aufgrund der Batterieherstellung zu. Der Anteil an den gesamten THG-Emissionen ist jedoch mit unter 10 % eher gering. In allen Szenarien können Reduktionen der kumulierten THG-Emissionen im Betrachtungszeitraum erzielt werden, die im Bereich von 7,5-9,2 Mio. t CO_{2eq} liegen.

Tabelle 3-2: Kumulierte THG-Emissionen im Zeitraum 2020-2030 der Szenarienrechnungen in Mio. t_{CO2eq}

Szenario	Referenz	Infra-struktur	+el. Mautbe-freiung	+EEG-Ermä-ßigung	+Kaufprämie	+CO_2-Preis
O-Infrastruktur	0,00	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13
Fzg-Herstellung	4,97	5,31	5,57	5,42	5,76	5,81
WtT	9,02	14,82	16,67	16,05	15,68	15,61
TtW	56,95	43,23	39,36	40,76	40,40	41,76
Summe	70,94	63,48	61,73	62,36	61,97	63,31
Reduktion ggü. Referenz (nur TtW):		13,7	17,6	16,2	16,6	15,2
Reduktion ggü. Referenz (LCA):		7,46	9,21	8,59	8,98	7,64

Die unterschiedlichen Markthochläufe bewirken also über den Einführungszeitraum unterschiedlich ausgeprägte kumulierte Einsparungen. Jedoch sind die Einsparungen des Jahres 2030 nahezu identisch, da in allen Szenarien früher oder später beinahe die gesamte betrachtete Flotte auf Oberleitungs-Lkw umgestellt wird; siehe folgende Tabelle.

Tabelle 3-3: THG-Emissionen im Jahr 2030 der Szenarienrechnungen in Mio. t_{CO2eq}

Szenario	Referenz	Infra-struktur	+el. Mautbe-freiung	+EEG-Ermä-ßigung	+Kaufprämie	+CO_2-Preis
O-Infrastruktur	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fzg-Herstellung	0,45	0,53	0,58	0,55	0,58	0,63
WtT	0,75	1,93	2,03	1,95	1,92	1,97
TtW	4,76	1,62	1,47	1,59	1,64	1,56
Summe	5,97	4,10	4,09	4,10	4,14	4,17
Reduktion ggü. Referenz (nur TtW):		3,1	3,3	3,2	3,1	3,2
Reduktion ggü. Referenz (LCA):		1,87	1,88	1,87	1,82	1,80

3.3.4.2 Luftschadstoffemissionen

Neben den Treibhausgasemissionen wurden auch die Luftschadstoffemissionen ausgewertet. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle (neuzugelassenen) Lkw die Schadstoffnorm Euro VI einhalten. Im Antriebsvergleich zeigen sich hier nur geringe Unterschiede zwischen dem Diesel-Lkw und den Oberleitungsfahrzeugen. Der Wegfall bzw. die Verringerung der

direkten Stickoxidemissionen wird durch die Strombereitstellung und durch die etwas höheren Emissionen der Fahrzeugbereitstellung teilweise kompensiert.

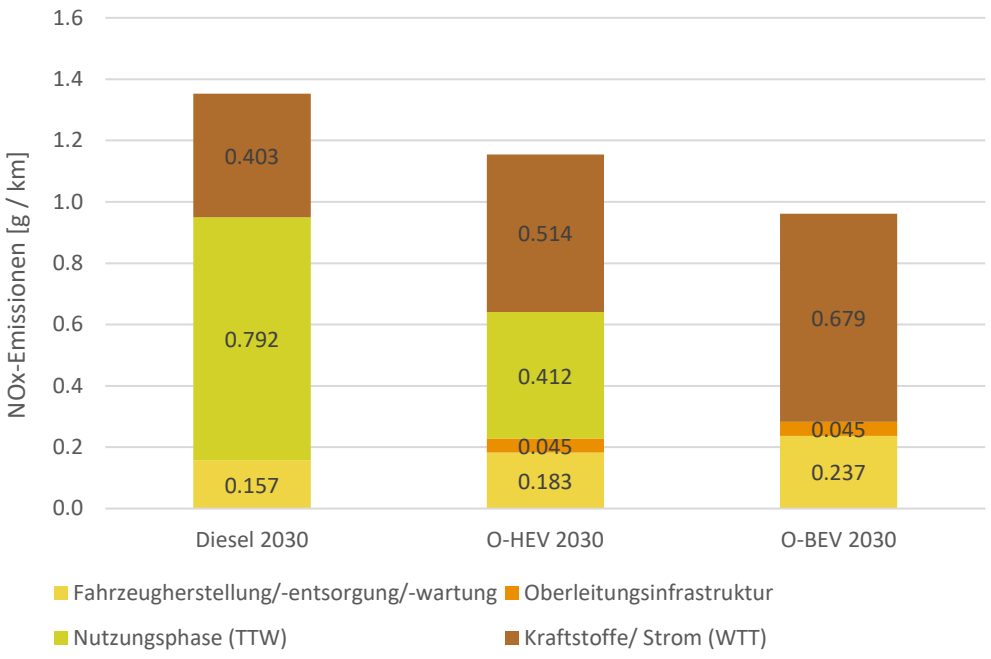


Abbildung 3-9: Stickoxidemissionen pro Fzg-km im Vergleich zwischen Diesel, O-HEV und O-BEV (Szenario Infrastruktur) 2030

Ein etwas anderes Bild zeigt sich bei den Feinstaubemissionen PM_{10} (alle Partikel bis zu einer Größe von 10 µm), die stark von der Energiebereitstellung und der Fahrzeugherstellung/-entsorgung und -wartung dominiert werden. Bei den PM_{10}-Emissionen schneidet der Diesel-Lkw am besten ab und der O-BEV am schlechtesten. Dies ist auf die immer noch relativ hohen Feinstaubemissionen in der Stromproduktion sowie bei der Fahrzeugherstellung/-entsorgung und -wartung zurückzuführen. Auch die Oberleitungsinfrastruktur (inklusive Fahrdraht) hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die PM_{10}-Emissionen der Oberleitungs-Lkw.

Partikelgröße und Bevölkerungsexposition konnten dabei jedoch nicht im Detail untersucht werden, sind aber für eine abschließende Bewertung des daraus entstehenden gesundheitlichen Risikos entscheidend. Während die Emissionen aus den vorgelagerten Prozessen (z.B. dem Rohstoffabbau) oft räumlich und zeitlich getrennt von der Nutzung anfallen, sind die Auspuffemissionen relevant für die lokale Luftqualität im Bereich der Fahrstrecken.

Zentral für die Gesundheitsbelatung sind vor allem die Konzentrationen von PM_{10} und NO_2 in dicht besiedelten Gebieten. Hier können häufige Überschreitungen der Grenzwerte relevante Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben. Diese Überschreitungen werden häufig in der Nähe von Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen beobachtet und sind somit zumindest teilweise auf die Emissionen des Straßenverkehrs zurückzuführen. Im elektrischen Betrieb werden die PM_{10}- und NO_2-Emissionen aus dem Auspuff vollständig vermieden, was potenziell sehr positive Auswirkungen auf die Luftqualität haben kann. Dieser Effekt wird jedoch begrenzt sein, da der Straßenverkehr insgesamt und vor allem der Schwerlastverkehr nur in begrenztem Maße zu den städtischen Konzentrationen beiträgt.

Dies kann am Beispiel der mittleren Quellanteile an Hauptverkehrsstraßen in Berlin veranschaulicht werden (siehe Abbildung 3-11).

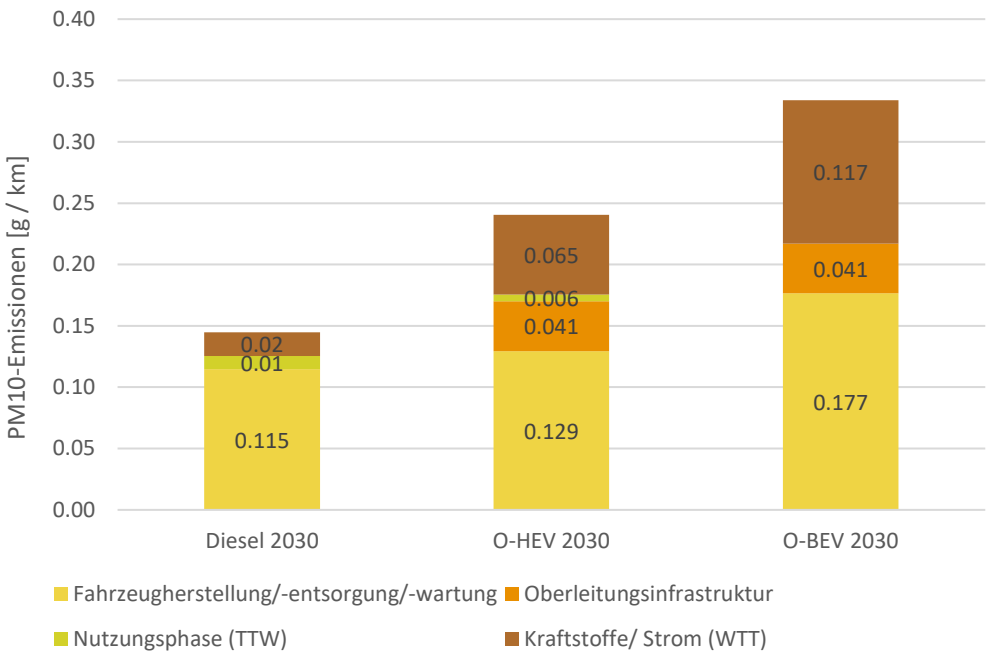


Abbildung 3-10: PM_{10}-Emissionen pro Fzg-km im Vergleich zwischen Diesel, O-HEV und O-BEV (Szenario Infrastruktur) 2030

Der regionale NO_2-Hintergrund – der hauptsächlich von O-Lkw auf Autobahnen profitieren würden - trägt nur 14 % zu den NO_2-Konzentrationen an städtischen Hauptverkehrsstraßen bei, während 26 % auf Kfz im städtischen Raum zurückzuführen sind. Stärker noch trägt der lokale Verkehr zu den NO_2-Konzentrationen an den Hauptverkehrsstraßen in Berlin bei (48 %), wobei jedoch nur 12 % davon auf Nutzfahrzeuge entfallen. Hier können dann vor allem O-BEV einen relevanten Beitrag zur NO_2-Reduktion leisten, da die Fahrzeuge ihren Elektroantrieb auch abseits der Oberleitung nutzen.

Bei den PM_{10}-Konzentrationen stellt sich die Situation etwas anders dar. Hier ist der Beitrag der regionalen Quellen zu den städtischen Konzentrationen im Allgemeinen höher, aber der Straßenverkehr ist nur eine von vielen PM-Emissionsquellen. Daher sind nur 5 % der Gesamtkonzentration an den Hauptverkehrsstraße in Berlin auf einen straßenverkehrsbedingten Hintergrund zurückzuführen. Auch wenn der Anteil der lokalen Kfz-Emissionen mit 21 % relevant ist, sind diese auch auf die Wiederaufwirbelung, den Bremsabrieb und den Reifenverschleiß zurückzuführen, die für O-Lkw ähnlich zu erwarten sind. Der Anteil der Lkw-Abgasemissionen an den städtischen PM-Konzentrationen ist daher eher gering.

Potenzielle Vorteile der O-Lkw für die Luftqualität sind also zwar in gewissem Umfang vorhanden, werden aber eher gering ausfallen. Um in den kommenden Jahren einen relevanten Beitrag zur Verbesserung der Luftqualität zu leisten, wäre eine sehr kurzfristige Einführung erforderlich, bei der die O-Lkw auch in den Städten mit Elektroantrieb fahren, z.B. durch eine ausreichende Batteriekapazität.

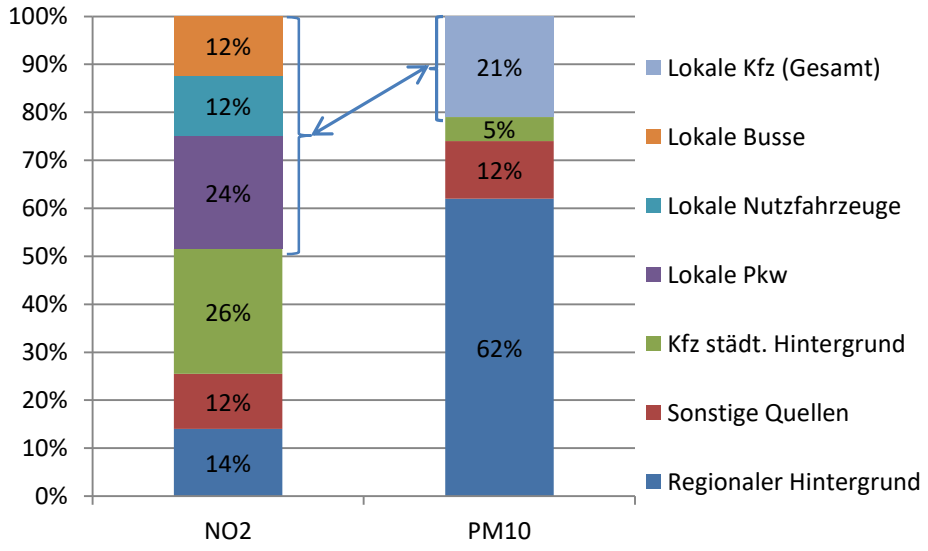


Abbildung 3-11: Mittlere Quellanteile an der NO_2- und PM_{10}-Belastung an Hauptverkehrsstraßen in Berlin aus dem Mittel über 27 Straßenabschnitte im Jahr 2015. Eigene Darstellung auf Grundlage von (Senatsverwaltung Berlin 2019)

3.3.5 Kosten und Einsparungen

Bei der kostenseitigen Betrachtung der Einführungsszenarien sind zwei Blickwinkel zu unterscheiden:

- den Blickwinkel der **Fahrzeugbetreiber**. Für diese wird im Modell angenommen, dass sie ihre Entscheidung bezüglich der Antriebstechnologie auf Grundlage einer Differenzkostenbetrachtung treffen. Hier sind die Vollkosten für die Betreiber (Total Cost of Ownership) maßgeblich.
- den Blickwinkel der **öffentlichen Hand**. Diese hat zum einen die Infrastrukturkosten vorzufinanzieren und muss zum anderen ggf. die Kosten für Förderinstrumente auf der Fahrzeugseite tragen. Zudem ändern sich abhängig von der Flottenzusammensetzung die Energiesteuereinnahmen des Staates.

3.3.5.1 Fahrzeugbetreiber

Nachfolgend wird zunächst auf den Blickwinkel der Fahrzeugbetreiber eingegangen. Abbildung 3-12 zeigt die Einsparungen, die sich aus den Szenarienrechnungen ergeben. Es wird ersichtlich, dass inbesondere in den Szenarien „+el. Mautbefreiung“ und „+Kaufprämie“ in Summe sehr hohe Kosteneinsparungen für die Betreiber verzeichnet werden können. Weiter unten wird dargestellt, wie sich diese Einsparungen auf die einzelnen Betreiber verteilen.

Im Szenario „+CO2-Preis“ wird hingegen der Dieselkraftstoff durch den angenommenen CO_2-Preis verteuert. Die spezifischen Kosten für dieselbetriebene Streckenabschnitte (auch verbrennungsmotorische Abschnitte von O-HEV) steigen somit. Die Einsparungen bei den elektrisch gefahrenen Streckenabschnitten gleichen diese Kostensteigerungen bei der hier angenommenen CO_2-Bepreisung für die Betreiber von O-Lkw insgesamt wieder aus. Diese vollständige Kompensation ist hierbei zufällig und nicht durch die Annahmen explizit eingestellt worden.

Abbildung 3-12: Kumulierte Einsparungen der Fahrzeugbetreiber gegenüber dem Referenzszenario im Zeitraum 2020-2030

Die Einsparungen der Betreiber pro O-Lkw-Kilometer gegenüber dem Referenzszenario streuen recht stark je nach Relation, Jahr und Szenario. Die durchschnittlichen Einsparungen der O-Lkw-Betreiber im Jahr 2030 gegenüber dem Referenzszenario liegen im Bereich von 4 ct/km („+CO2-Preis“) bis zu 18 ct/km („+el. Mautbefreiung“). Anhand der kilometerbezogenen Einsparungen können Rückschlüsse auf die Zahlungsbereitschaft für die Oberleitungsinfrastrukturnutzung gezogen werden, was für die Kostenbilanz des Systemausbaus relevant ist.

Abbildung 3-13 zeigt die Einsparungen von Lkw-Betreibern im Jahr 2026 und im Jahr 2030 für das Szenario „Infrastruktur“. In der Hochlaufphase profitieren 31 % der Lkw-Betreiber nennenswert (über 1 ct/km). Rund 8 % weisen hohe Einsparungen von 4-8 ct/km auf. Im Jahr 2030 profitieren beinahe alle Lkw-Betreiber. Gut die Hälfte hat hohe Einsparungen in Höhe von 4-8 ct/km. Ein Viertel der Betreiber haben Einsparungen von über 8 ct/km. Dies ist ein deutlicher Hinweis, dass hier bereits bei ansonsten unveränderten Rahmenbedingungen eine signifikante Zahlungsbereitschaft zur Refinanzierung der Infrastruktur bestehen könnte.

Die Szenarien mit zusätzlichen Förderinstrumenten sind erwartungsgemäß durch höhere Einsparungen der Fahrzeugbetreiber gekennzeichnet. Abbildung 3-14 zeigt die Verteilung für das Szenario „+EEG-Ermäßigung“. Hier werden bereits in der Anfangsphase im Mittel deutlich höhere Einsparungen erzielt als im Szenario „Infrastruktur“. Mehr als die Hälfte haben Einsparungen von über 1 ct/km. Im Jahr 2030 haben rund 52 % der Betreiber sehr hohe Einsparungen (über 8 ct/km). Dies kann als Indiz gewertet werden, dass die Förderung degressiv gestaltet werden sollte, um nicht unnötig Kosten für die Allgemeinheit (hier: die Gemeinschaft der EEG-Zahler) zu generieren.

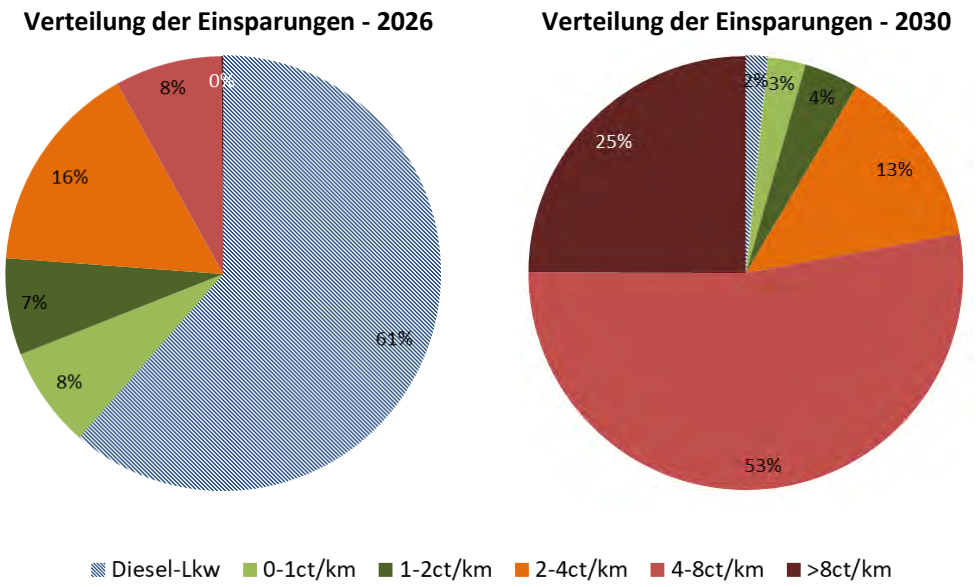


Abbildung 3-13: Einsparungsverteilung der Lkw-Betreiber im Szenario „Infrastruktur“ für die Jahre 2026 und 2030

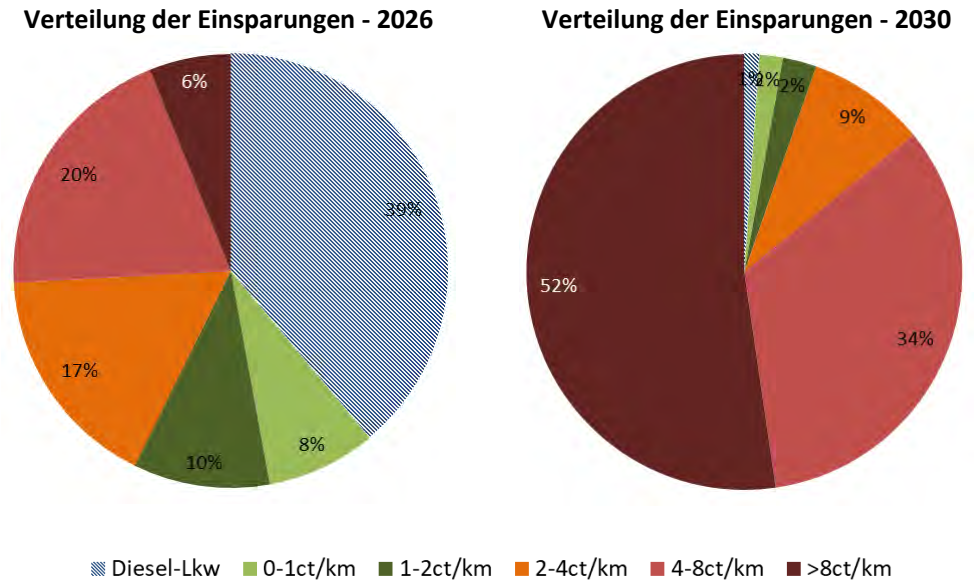


Abbildung 3-14: Einsparungsverteilung der Fahrzeugbetreiber im Szenario „+EEG-Ermäßigung“ für die Jahre 2026 und 2030

3.3.5.2 Öffentliche Hand

In den Szenarien werden unterschiedliche Förderinstrumente angenommen. Diese haben direkte sowie indirekte Auswirkungen auf die Staatsfinanzen. Die Kosten für die Infrastruktur werden in den nachfolgenden Darstellungen nicht in Gestalt der Investitionskosten, sondern in Form von Abschreibungskosten zzgl. Instandhaltungskosten angesetzt. Desweiteren entstehen dem Staat Kosten (Kaufprämie) sowie Einnahmeausfälle (Mautbefreiung) durch

die Förderung selbst. Überdies resultieren indirekte Kosten durch den sinkenden Dieselabsatz und somit geringere Ökosteuereinnahmen gegenüber dem Referenz-Szenario. Höhere Einnahmen entstehen indes durch den steigenden Strombedarf und die höheren Stromsteuereinnahmen. Quantifiziert werden zudem die Einnahmen durch den getätigten EEG-Umlagenbeitrag. Diese werden allerdings nicht der Staatsbilanz zugerechnet. Tabelle 3-4 fasst die Bilanzen des Fiskus' für den gesamten Zeitraum (2020-2030: 11 Jahre) zusammen. Die Kosten für den Staat liegen im Bereich von rund 4 bis 11 Mrd. € für den gesamten Betrachtungszeitraum. Der Anteil der Infrastruktur an den Gesamtkosten beträgt je nach Szenario zwischen 28 % und 66 %.

Tabelle 3-4: Kosten und Einnahmen der öffentlichen Hand für den Zeitraum 2020-2030 in Mrd. €

Szenario	Referenz	Infrastruktur	+el. Mautbefreiung	+EEG-Ermäßigung	+Kaufprämie	+CO2-Preis
EEG-Umlage	0,00	0,78	1,04	0,95	0,92	0,88
Stromsteuer	0,00	0,21	0,26	0,24	0,24	0,23
Dieselsteuer	10,06	7,64	6,95	7,20	7,14	8,73
Maut	13,23	12,94	9,03	12,87	12,77	12,91
Kaufprämie	0,00	0,00	0,00	0,00	-4,16	0,00
O-Infrastruktur	0,00	-2,63	-2,99	-2,89	-2,90	-2,76
Summe ohne EEG	23,29	18,15	13,25	17,43	13,08	19,10
Kosten ggü. Referenz:		-5,14	-10,04	-5,86	-10,21	-4,19

Die jährlichen Staatskosten gegenüber dem Referenz-Szenario können Abbildung 3-15 entnommen werden. Alle Szenarien sind über den gesamten Zeitraum durch jährliche Mehraufwendungen (außer Szenario „+CO2-Preis") gekennzeichnet. Die Aufwendungen steigen ab dem Jahr 2023 deutlich an. Hier ist insbesondere das Szenario „+Kaufprämie" hervorzuheben. Bis zum Jahr 2025 kommt es hier zu einem sehr hohen Anstieg auf knapp 1,55 Mrd. €/a. Danach sinken die Zulassungszahlen und somit die Ausgaben für die Kaufprämie, da bereits eine komplette Marktdurchdringung der O-Lkw auf den betrachteten Relationen stattgefunden hat. Ab dem Jahr 2026 sind die jährlichen Kosten für die öffentliche Hand im Szenario „+el. Mautbefreiung" am höchsten. Grundhierfür ist die stark steigende elektrische Fahrleistung. Das Szenario „+CO2-Preis" ist in den Anfangsjahren durch Mehreinnahmen durch die zusätzliche Steuerbelastung der Lkw-Betreiber charakterisiert. Ab dem Jahr 2025 übersteigen jedoch auch hier die Kosten die Einnahmen, was durch die Mindereinnahmen bei der Energiesteuer auf Diesel bedingt ist.

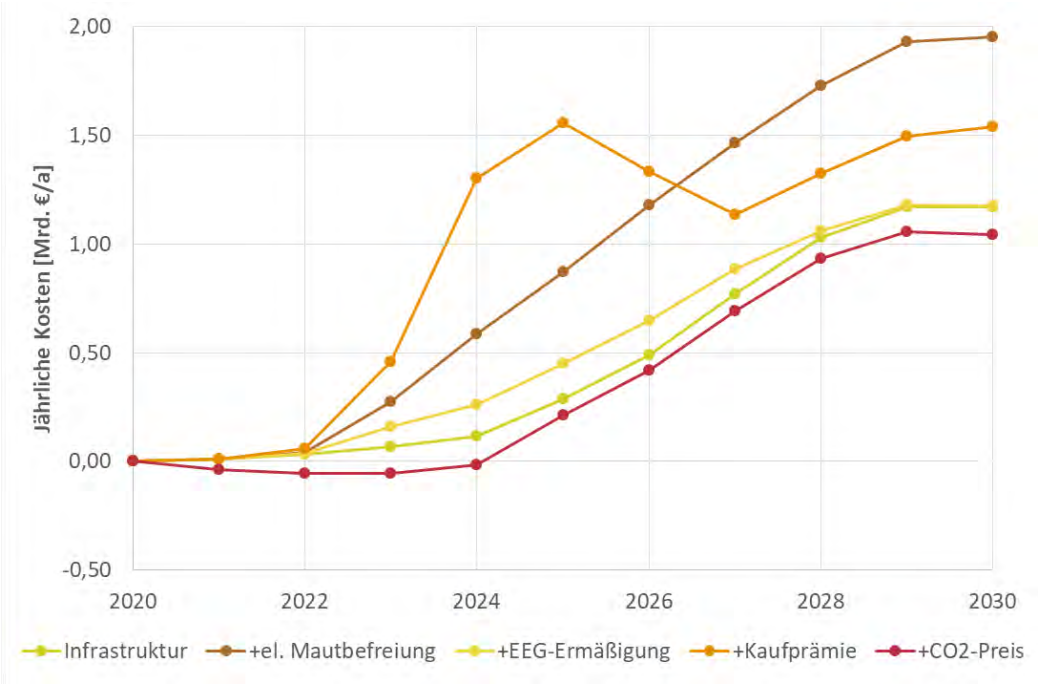


Abbildung 3-15: Jährliche direkte und indirekte Kosten der öffentlichen Hand

Die Investitonskosten spielen in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle, da die bisher angesetzte Abschreibung nicht die Zeitpunkte der tatsächlichen Zahlungsflüsse widerspiegelt. Der Staat muss hier in Vorleistung treten und die Bereitstellung der benötigten Gelder organisieren. In Abbildung 3-16 sind daher zusätzlich die Investitionskosten für die Infrastruktur in den einzelnen Jahren dargestellt. Die Abbildung umfasst die Kosten sowohl für den Ausbau neuer Strecken als auch für die Erneuerung von Komponenten (in dem gewählten Betrachtungszeitraum werden lediglich die Fahrdrähte erneuert). Zudem werden die Wartungs- und Instandhaltungskosten berücksichtigt. Es wird hier nur das Szenario „Infrastruktur“ dargestellt, da die Infrastrukturkosten sich zwischen den Szenarien nicht grundlegend unterscheiden. Zu berücksichtigen ist, dass der zeitliche Verlauf der Ausbaurate und damit die zeitliche Verteilung der Investitionen zwar durch gewisse Randbedingungen beeinflusst wird (siehe Abschnitt 3.2), letztlich jedoch eine Setzung in den Szenarien darstellt.

Ersichtlich wird, dass bis zur Fertigstellung des Basisnetzes im Jahr 2029 die jährlichen Infrastrukturausgaben bis auf 1,3 Mrd. € ansteigen. Unter der Annahme, dass der Ausbau damit zunächst abgeschlossen ist, würden die jährlichen Kosten ab dem Jahr 2030 deutlich niedriger ausfallen. Die Kosten, die für das Jahr 2030 anfallen, betreffen lediglich die Fahrdrahterneuerung und die Wartung und Instandhaltung. Weitere Kostenblöcke, wie bspw. die Erneuerung von den Umspannwerken, sind hier nicht berücksichtigt und demnach sind die Kosten des Jahres 2030 gering. Perspektivisch sind jährliche Ausgaben anzusetzen, die höher sind als der Wert des Jahres 2030, da auch weitere Infrastrukturkomponenten neben dem Fahrdraht zu erneuern sind. Langfristig wären für den Erhalt des Basisnetzes (also ohne weiteren Ausbau) ca. 600 Mio. € jährlich aufzuwenden. Dieser Wert entspricht den Abschreibungskosten zzgl. Wartung und Instandhaltung.

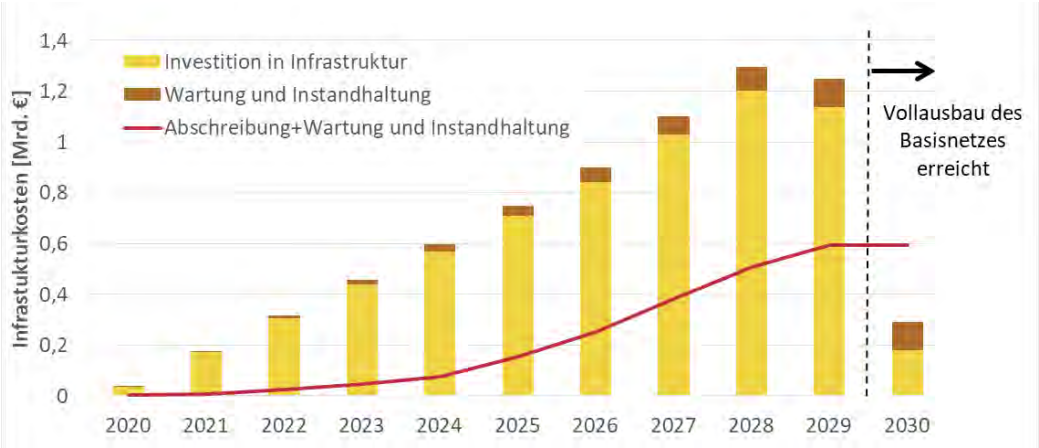


Abbildung 3-16: Investitions- und Instandhaltungskosten im Szenario „Infrastruktur“

Um einen kostendeckenden Betrieb des Oberleitungsnetzes gewährleisten zu können, ist eine Beteiligung der Nutzer (also der Fahrzeugbetreiber) an seiner Finanzierung notwendig. Abbildung 3-17 stellt die Differenz aus den jährlichen Einsparungen der Lkw-Betreiber und den jährlichen Infrastrukturkosten[1] dar. Sofern die Werte im positiven Bereich liegen, könnten die Kosten für die Infrastruktur prinzipiell durch die Lkw-Betreiber gedeckt werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die reine TCO-Betrachtung an dieser Stelle eine Vereinfachung darstellt. In der Praxis wird die Antriebsentscheidung von vielen weiteren Erwägungen beeinflusst. Diese können sowohl dazu führen, dass die Betreiber einen gewissen finanziellen Mindestvorteil für den Einsatz von O-Lkw fordern, als auch zu einer zusätzlichen Zahlungsbereitschaft (wenn z.B. unter bestimmten Bedingungen für emissionsfreie Transporte höhere Preise verlangt werden können). Somit ist im Detail unsicher, welcher Anteil des finanziellen Vorteils für die Refinanzierung der Infrastruktur abgeschöpft werden kann.

Von hoher Relevanz bei der Kostenbetrachtung in Abbildung 3-17 ist vor allem das Ergebnis für das Szenario „Infrastruktur“, da hier neben der Infrastrukturfinanzierung keine weitere Förderung gewährt wird. In diesem Szenario steigen die Einsparungen nach dem Jahr 2028 überproportional zu den Infrastrukturaufwendungen, sodass bei einer optimalen Kostenumlegung auf die Betreiber im Jahr 2030 lediglich knapp 200 Mio. € durch den Staat zu decken wären. Anhand des Kurvenverlaufs ist erkennbar, dass perspektvisch dieser Wert weiter sinken wird und sich insbesondere beim Hinzukommen weiterer Nutzerkreise (z.B. internationale Verkehre) ein positiver Saldo einstellen dürfte. Dies bedeutet wiederum einen wirtschaftlichen Betrieb der Oberleitungsinfrastruktur ohne Bezuschussung durch den Staat.

Für die Szenarien mit zusätzlichen Fördermaßnahmen ist die Differenz zwischen betreiberseitigen Einsparungen und Infrastrukturkosten zwar durchgehend höher als im Szenario „Infrastruktur“. Da die Fördermaßnahmen an sich aber wiederum Kosten für den Staat verursachen, wäre hier zunächst eine Reduktion der Förderung anzustreben, anstatt die Förderung konstant zu halten und eine Infrastrukturumlegung anzustreben.

[1] Abschreibung zzgl. Wartung und Instandhaltung

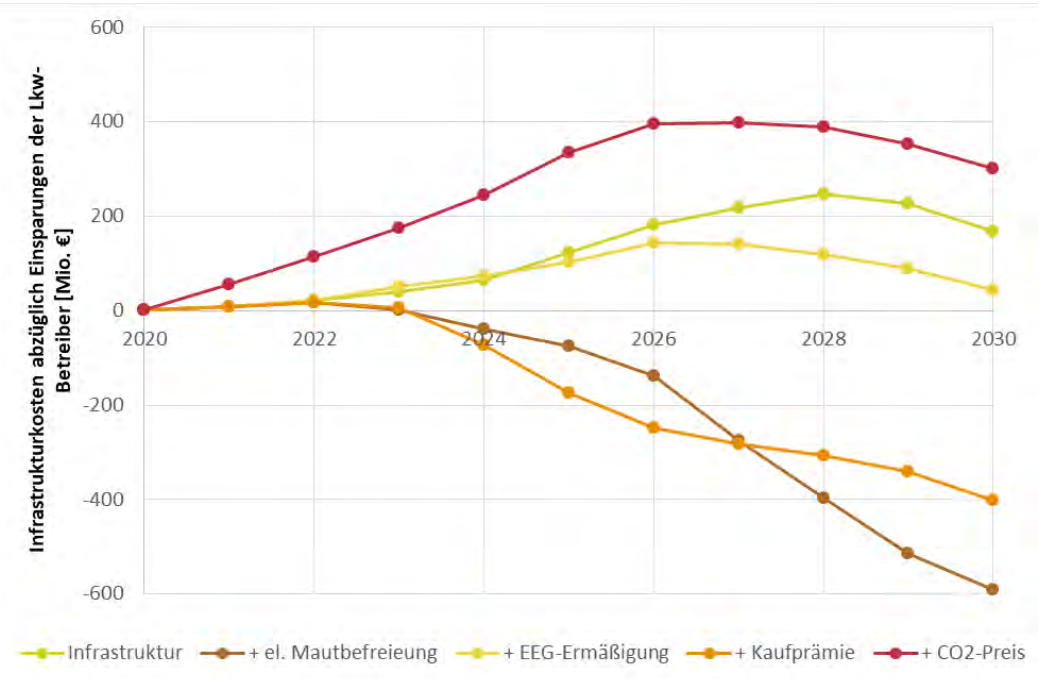


Abbildung 3-17: Differenz der Einsparungen der Lkw-Betreiber zu den Infrastrukturkosten

3.3.6 Streckenelektrifizierung

3.3.6.1 Streckenauswahl

Aus den Optimierungsrechnungen lässt sich ableiten, welche Autobahnabschnitte unter Wirtschaftlichkeitsaspekten vorrangig elektrifiziert werden sollten (siehe Abbildung 3-20). Bei der Darstellung wird entsprechend des Geschehens auf dem Fahrzeugmarkt (siehe Abschnitt 3.3.1) zwischen drei verschiedenen Abschnitten der Einführungsphase differenziert:

- der Initialphase, während derer der Fahrzeugbestand noch sehr niedrig ist,
- der Hochlaufphase, während derer der Fahrzeugbestand schnell ansteigt und
- der Endphase, während derer das Wachstum des Fahrzeugbestands sich spürbar verlangsamt.

Fördermaßnahmen ändern die Kostenstruktur der Lkw-Betreiber, daher unterscheidet sich die Reihenfolge der ausgebauten Strecken teilweise in den einzelnen Szenarien. Auf bestimmten Autobahnabschnitten werden bspw. durch eine Kaufprämie mehr Lkw-Betreiber adressiert als bei einer elektrischen Mautbefreiung. Faktoren, die Auswirkungen auf die Kostenstruktur der Lkw-Betreiber und somit auch auf den optimalen Ausbaupfad haben, sind insbesondere die Relationslänge, aber auch der Mautstraßenanteil und der spezifische Energiebedarf. Diese Größen haben einen Einfluss auf die TCO der Lkw-Betreiber und somit beeinflussen sie, welche Lkw-Betreiber von einer Elektrifizierung profitieren können. Von hoher Relevanz, welcher Streckenabschnitt zeitlich zu priorisieren ist, ist zudem die Befahrungsstärke auf dem Abschnitt.

Ersichtlich wird der Einfluss der Förderungen anhand der Korrelation des Ausbaujahres eines Streckenabschnitts mit der durchschnittlichen Relationslänge aller Lkw, die auf den jeweiligen Anschnitten verkehren, und die Korrelation des Ausbaujahres mit der Befahrungsstärke. Zum Verständnis: Eine Korrelation, die im Bereich von knapp 1 liegt, bedeutet, dass Strecken umso früher elektrifiziert werden, je länger die auf ihnen verkehrenden Relationen sind und je höher ihre Befahrungsstärke ist. Je mehr die Korrelation gegen 0 geht, desto geringer ist der Einfluss der jeweiligen Größe auf den Streckenausbau. Ein Wert von 0 würde bedeutet, dass kein Einfluss der Befahrungsstärke bzw. der Relationslänge auf das Ausbaujahr nachweisbar ist. Eine negative Korrelation, die im Bereich von knapp -1 liegt, weist darauf hin, dass eine Elektrifizierung umso früher stattfindet, je kürzer die Relationen sind und je geringer die Befahrunsstärke ist. Tabelle 3-5 zeigt diese Korrelationen für die modellierten Szenarien. Im Szenario „Infrastruktur“ liegt keine eindeutige Korrelation (0,14) zwischen der Befahrungsstärke und dem Ausbaujahr vor. In diesem Fall weist jedoch die durchschnittliche Relationslänge eine hohe negative Korrelation auf (-0,57). Das bedeutet, dass Strecken umso früher elektrifiziert werden, je kürzer die auf ihnen verkehrenden Relationen im Schnitt sind. Hintergrund ist, dass ohne zusätzliche Förderung ein wirtschaftlicher Betrieb nur bei einem hohen elektrischen Fahranteil möglich wird. Da das Netz in der Anfangsphase klein ist, können entsprechend auch nur kurze Relationen im Pendelbetrieb mit einem hohen Fahranteil auf dem (begrenzten) elektrifizierten Netz wirtschaftlich betrieben werden.

Tabelle 3-5: Korrelation des Streckenausbaujahrs mit der Befahrungsstärke und der durchschnittlichen Relationslänge auf den jeweiligen Abschnitten

Szenario	Befahrungsstärke	Durchschnittliche Relationslänge
Infrastruktur	0,14	-0,57
+el. Mautbefreiung	0,91	0,21
+EEG-Ermäßigung	0,87	0,21
+Kaufprämie	0,95	0,24
+CO2-Preis	0,58	-0,20
Durchschnitt	0,86	-0,03

Anders sieht es bei den Szenarien aus, die eine weitere Förderung für O-Lkw-Betreiber beinhalten. Hier hat die durchschnittliche Relationslänge der Lkw, die auf einem Straßenabschnitt verkehren, nur einen geringen Einfluss auf die zeitliche Streckenpriorisierung. Dies betrifft die Szenarien „+el. Mautbefreiung“, „+EEG-Ermäßigung“ und „+Kaufprämie“. Hier ist kein sehr hoher elektrischer Fahranteil nötig, um einen rentablen Betrieb zu gewährleisten, da entweder die Einsparungen im elektrischen Betrieb sehr hoch sind oder die Kaufprämie die Fixkosten der O-Lkw stark senkt, sodass die Fahrzeugmehrkosten schnell kompensiert werden. Demnach erreichen bereits bei einem kleinen Netzausbau viele O-Lkw die Rentabilität. Die Wahl, welche Abschnitte priorisiert auszubauen sind, hängt demnach in einem höheren Maße von der Befahrungsstärke ab. Die Korrelation ist hoch und liegt im Bereich von 0,87-0,95. Das Szenario „+CO2-Preis“ weist eine gemischte Tendenz auf. Der Grund ist, dass in der Anfangsphase ein geringer CO_2-Preis angenommen wird. Daher unterscheidet sich dieses Szenario in der Anfangsphase kaum vom Szenario „Infrastruktur“, sodass hier Streckenabschnitte, auf denen kürzere Relationen verkehren, zuerst elektrifiziert werden. Mit steigendem CO_2-Preis gewinnt die Befahrungsstärke jedoch zunehmend an Bedeutung. Dies spiegelt sich auch in der mittleren Korrelation wider.

Da der Ausbaupfad sich zwischen den Szenarienrechnungen unterscheidet, stellt Abbildung 3-18 exemplarisch die zeitliche Streckenpriorisierung für die Szenarien „Infrastruktur“ und

„+Kaufprämie“ gegenüber. Im erstgenannten Szenario wird zuerst die A1 elektrifiziert, wogegen bei einer Kaufprämie die A7 zeitlich priorisiert wird. Bei der Entscheidung über die zeitliche Priorisierung des Streckenausbaus kann es also durchaus sinnvoll sein, das vorgesehene Fördersystem mit zu berücksichtigen.

Sofern eine Kaufprämie gewährt wird, senkt dies die Fixkosten der Lkw. In diesem Fall können auch längere Relationen mit einer geringeren elektrischen Fahrleistung wirtschaftlich betrieben werden. Solche langläufigen Relationen verkehren vermehrt auf der zentralen Achse Hamburg-Hannover-Kassel. Wenn hier die Strecken in der Anfangsphase elektrifiziert werden, können absolut gesehen dann mehr Lkw wirtschaftlich betrieben werden. Demnach wird in diesem Szenario zuerst dort elektrifiziert anstatt auf der Nord-West-Achse. Dies bestätigt auch die Auswertung der durchschnittlichen Relationslänge aller Lkw, die auf den elektrifizierten Autobahnabschnitten verkehren. Bei einem Netz von 500 km (Jahr 2023 , grün und hell-braun) ist die durchschnittliche Relationslänge im Szenario „Infrastruktur“ 327 km, wogegen die Relationslänge im Szenario „+Kaufprämie“ 437 km beträgt.

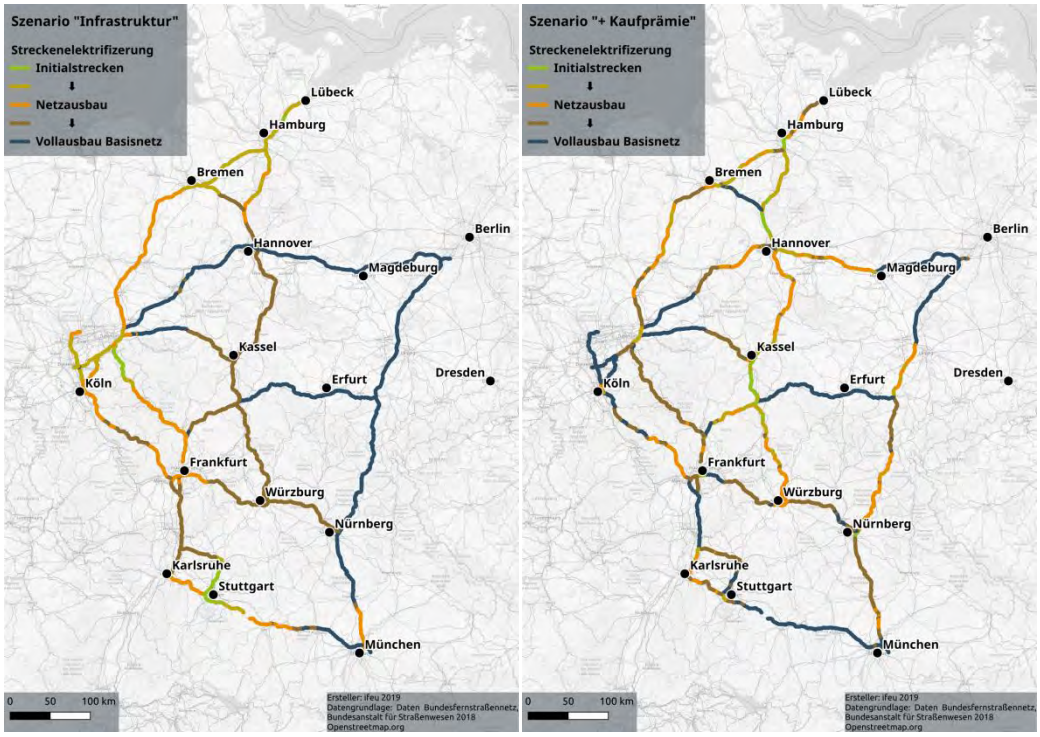


Abbildung 3-18: Streckenpriorisierung der Szenarien „Infrastruktur“ und „+Kaufprämie“

3.3.6.2 Netzausdehnung

In den Szenarienrechnungen wird stets ein Komplettausbau des Basisnetzes (rund 3.200 km) im Betrachtungszeitraum 2020-2030 angenommen. Um demgegenüber einen geringeren Ausbau hinsichtlich des Kosten-Nutzen-Verhältnisses zu analysieren, wird in der nachfolgenden Sensitivität das Szenario „Infrastruktur“ mit unterschiedlichen Endausbaustufen betrachtet. Verglichen werden die kumulierten Kosten der öffentlichen Hand mit den THG-Emissionsminderungen zwischen 2020-2030 und dem O-Lkw-Bestand im Jahr 2030. Die Größen werden für unterschiedliche Endausbaulängen dem Komplettausbau gegenübergestellt, siehe Abbildung 3-19.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein großer Teil des hier zugrunde gelegten Potentials für O-Lkw-Verkehre auch dann gehoben werden kann, wenn das Basisnetz des Jahres 2030 insgesamt kürzer ausfällt. Bei nur 2.000 km Netzlänge können bespielsweise im Vergleich zu einem Basisnetz mit 3.200 km Länge bereits knapp 90 % des THG-Minderungspotentials gehoben werden. Sollten sich 3.200 km nicht vollständig realisieren lassen, so stellt dies demnach nicht per se die Sinnhaftigkeit einer O-Lkw-Systemeinführung in Frage.

Andererseits ist zu erwarten, dass vor allem für internationale Verkehre (die in dieser Berechnung nicht betrachtet wurden) die Attraktivität eines O-Lkw-Systems mit zunehmender Abdeckung des Oberleitungsnetzes in Deutschland deutlich ansteigt, da dies die Flexibilität erhöhen würde und für die Wirtschaftlichkeit benötigte elektrische Fahranteile dann sicherer zu erreichen wären. Demnach könnte der Grenznutzen von späteren Stufen des Netzausbaus auch erheblich über den in Abbildung 3-19 genannten Werten liegen.

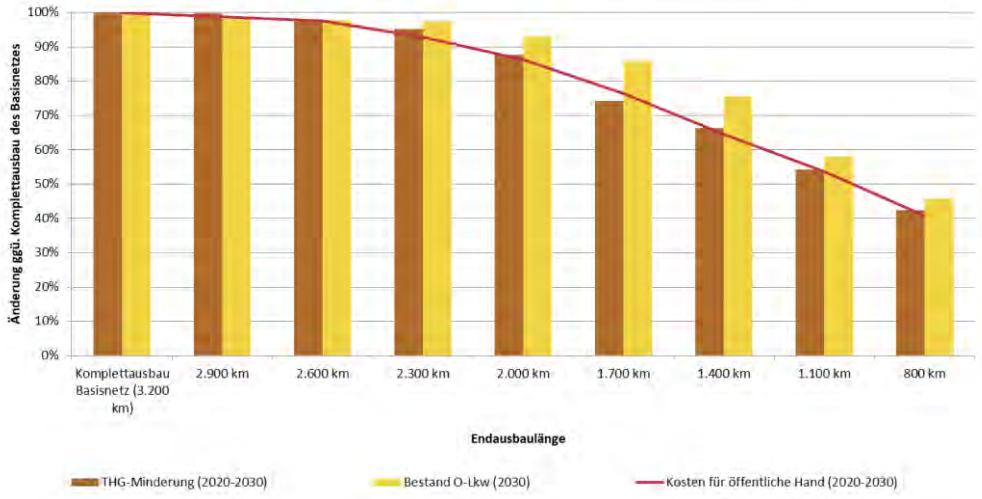


Abbildung 3-19: Kumulierte THG-Minderung und Kosten für die öffentliche Hand im Zeitraum 2020-2030 sowie der O-Lkw-Bestand im Jahr 2030 in Abhängigkeit des ausgebauten Netzes

3.3.6.3 Fazit zum Netzausbau

Obgleich es zwischen den betrachteten Szenarien im Detail Unterschiede hinsichtlich der genauen Reihenfolge des wirtschaftlich optimalen Streckenausbaus gibt, sind doch in der Gesamtschau klare Tendenzen erkennbar. Um diese herauszuarbeiten, wurden die Ergebnisse der Szenarien in einer gemeinsamen Karte zusammengefasst (Abbildung 3-20). Die Einfärbung der Streckenabschnitte repräsentiert dort das durchschnittliche Zubaujahr der jeweiligen Streckenabschnitte über alle Szenarienrechnungen hinweg. Es wird ersichtlich, dass insbesondere die Nord-Süd-Achse A1-A7 über „Lübeck-Hamburg-Hannover-Würzburg“ und die Nord-West-Achse A1 „Hamburg-Bremen-Leverkusen“ aus Wirtschaftlichkeitssicht priorisiert werden sollte. Weitere wichtige Abschnitte sind die Verbindungen „Bad Hersfeld-Frankfurt“ und „Hannover-Magdeburg“ sowie die Autobahnen um Stuttgart. Der Ausbau der Abschnitte „Magdeburg-Berlin“, „Leipzig-Berlin“, „Bad-Hersfeld-Jena“ und „München-Ulm“ spielen hingegen in der Initial- und Hochlaufphase szenarienübergreifend eine eher geringere Rolle.

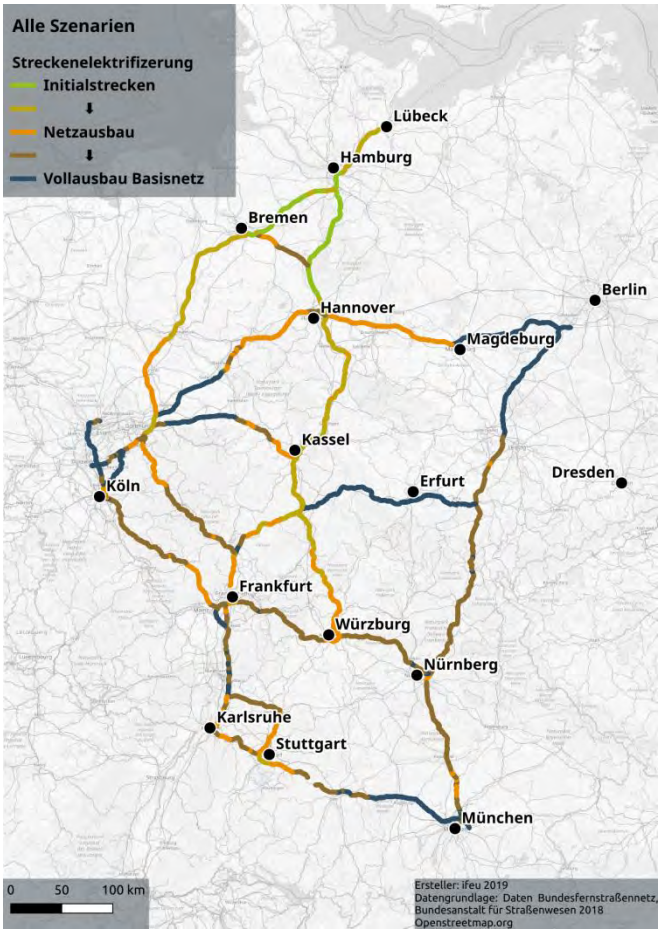


Abbildung 3-20: Streckenpriorisierung als Durchschnitt aller Szenarienrechnungen

3.4 Zusammenfassung und Kosten-Nutzen-Gegenüberstellung

In den betrachteten Szenarien wurde der Markthochlauf von O-Lkw während des Ausbaus eines Basisnetzes von 3.200 km Länge in Deutschland untersucht. Grundlage der Berechnungen war ein stark eingegrenztes Marktpotential von für den O-Lkw-Betrieb besonders geeigneten Verkehren (siehe Abschnitt 1.2). Dieses Marktpotential wird im betrachteten Einführungszeitraum bis 2030 zu einem hohen Anteil von über 90 % gehoben, sofern der Aufbau des Oberleitungs-Basisnetzes vorfinanziert wird. Dies gilt unabhängig vom betrachteten Szenario. Vor allem zum Ende des Einführungszeitraums hin sowie darüber hinaus ist damit zu rechnen, dass weitere Lkw-Verkehre das Oberleitungsnetz nutzen könnten, die im hier zugrunde gelegten Marktpotential nicht berücksichtigt sind (v.a. Verkehre, die nicht im Pendelbetrieb stattfinden, sowie internationale Verkehre). Für eine detailliertere Einordnung dieser zukünftigen Potentiale sei auf Kapitel 0 dieses Berichts verwiesen.

Der Dieselbedarf des Jahres 2030 sinkt in allen Szenarien gegenüber 2020 um ca. 1,5 Mrd. Liter, demgegenüber ist ein Anstieg des Strombedarfs zu verzeichnen. Hier kann bei einem Komplettausbau des Basisnetzes mit einem zusätzliche Strombedarf von 5,5 TWh pro Jahr gerechnet werden. Kumuliert über den Einführungszeitraum können durch den geringeren Dieselverbrauch ca. 4,7-6,2 Mrd. t_{CO2eq} THG-Emissionen vermieden werden. Dem stehen dann etwas höhere Emissionen der Fahrzeugherstellung sowie geringfügige Emissionen

durch den Infrastrukturausbau und Emissionen aus der Energiebereitstellung (WtT-Betrachtung des Strombezugs) gegenüber. Unter dem Strich überwiegt jedoch klar die Einsparung direkter Emissionen (TtW), sodass im Einführungszeitraum insgesamt eine deutlich positive Klimabilanz entsteht. Ein großer Teil dieser Einsparungen wird in der zweiten Hälfte der Einführungsphase erreicht (durch den dann höheren O-Lkw-Bestand, die höheren elektrischen Fahranteile und die Verbesserungen des Strommixes) und würde sich im Falle einer Umsetzung auch über den Betrachtungszeitraum hinaus fortsetzen.

Wesentliches Ziel der Szenarienrechnungen war es, Erkenntnisse abzuleiten, wovon die Geschwindigkeit des Markthochlaufs abhängt, wie effizient diesbezüglich unterschiedliche Förderinstrumente sind und welche Antriebskonfiguration unter welchen Bedingungen zum Zuge kommt. Diese Erkenntnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

In allen Szenarien werden in den Anfangsjahren vornehmlich O-HEV eingesetzt, wogegen in den späteren Jahren des Betrachtungszeitraums die Möglichkeit für den wirtschaftlichen Einsatz der O-BEV zunimmt. Aufgrund der Batteriekostendegression und des sich ausweitenden Oberleitungsnetzes könnten mehr Relationen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht auf O-BEV umgestellt werden, wobei damit auch die durchschnittlich verbaute Batteriekapazität steigt. Im Jahr 2030 kann ein Bestand von knapp 68.000 O-Lkw erreicht werden, wobei der wirtschaftlich sinnvolle Anteil von O-BEV in diesem Jahr ca. 14-26 % beträgt. Die im Jahr 2030 eingesetzten Batterien weisen dann eine Kapazität von 150-250 kWh auf.

Bei der Priorisierung der Streckenabschnitte für den Netzaufbau ist der Nord-Westen Deutschlands im Fokus. Hier sind inbesondere die Achsen „Lübeck-Kassel“ und „Lübeck-Ruhrgebiet“ hervorzuheben.

Durch die Einführung von O-Lkw entstehen den O-Lkw-Betreibern in den Szenarien Kostenvorteile; dies ist zu erwarten, da die Entscheidung zur Umstellung im Modell durch den wirtschaftlichen Vorteil bedingt wird. Die Einsparungen variieren je nach Szenario deutlich: Während ein O-Lkw-Betreiber im Szenario „Infrastruktur“ im Mittel ca. 6 ct/km einspart, so profitiert er beim Szenario „+el. Mautbefreiung“ von einer Kostenersparnis von knapp 18 ct/km.

Dem Nutzen für die Betreiber stehen Kosten für den Staat gegenüber. Diese fallen in Abhängigkeit der Förderung unterschiedlich hoch aus. In den Szenarien fallen kumulierte Kosten zwischen 2020 und 2030 in Höhe von ca. 4-11 Mrd. € an. Im letzten betrachteten Jahr 2030 liegen die Kosten bei 1,0-2,0 Mrd. €, sodass ein Phase-out der Förderung sinnvoll erscheint. Im Szenario „Infrastruktur“ übersteigen die Infrastrukturaufwendungen zwar noch die Einsparungen der Lkw-Betreiber, jedoch nähern sich zum Ende des Betrachtungszeitraum die operativen Einsparungen den Infrastrukturkosten an, wodurch perspektivisch ein selbsttragendes System erwartet werden kann.

Vor allem langfristig ist bei einem erfolgreichen Hochlauf durch Preisdegressionen und eine weitere Dekarbonisierung der Strombereitstellung mit einem auch insgesamt wirtschaftlichen Betrieb und deutlichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen zu rechnen. Die Kosten- und Klimaeffekte im Einführungszeitraum sind dagegen absolut gesehen deutlich geringer. Um die langfristigen Effekte sicherzustellen, kommt es in den Anfangsjahren vor allem darauf an, das Vertrauen in den Systemaufbau durch einen raschen und planbaren Markhochlauf zu stärken. Die Fördermaßnahmen sollten also vor allem nach ihrem Potenzial zur Steigerung der Neuzulassungen bzw. Erhöhung der elektrischen Fahrleistung in der Frühphase des Hochlaufs (hier definiert bis 2026) bewertet werden. Dieses Potenzial kann dann den jeweiligen Kosten für den Staat gegenübergestellt werden (siehe Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Kennwerte der Szenarien für die ersten 6 Jahres des angenommenen Einführungszeitraums (2020-2026)

	Infrastruktur	+el. Mautbefreiung	+EEG-Ermäßigung	+Kaufprämie	+CO2-Preis
Neuzulassungen	27.648	62.515	44.673	74.834	36.936
Elektrische Fahrleistung [Mio. Fzg-km]	2.901	6.271	5.203	4.986	4.104
Kosten des Staats ggü. Referenz [Mio. €]	1.001	2.960	1.562	4.725	470
Einsparungen der Lkw-Betreiber [Mio. €]	119	1.082	360	1.231	-667
THG-Minderungen (Lebensweg) [Mio. t]	1,16	2,62	2,04	2,53	1,50
Kosten Staat pro Neuzulassung [€/Fzg]	36.205	47.349	34.965	63.134	12.725
Kosten Staat pro elektrische Fahrleistung [ct/Fzg-km]	34,5	47,2	30,0	94,8	11,5
Kosten Staat pro vermiedene t THG [€/t]	866	1.130	765	1.867	314

Unter den direkten Fördermaßnahmen stellt sich die Mautbefreiung für den elektrischen Betrieb als mit Abstand effektivster Anreiz dar, um eine hohe elektrische Fahrleistung zu erzielen (siehe Tabelle 3-6). Zudem steigert diese Förderung den Bestand deutlich. Beide Größen werden durch die Maßnahme mehr als verdoppelt. Der Kostenzuwachs für den Staat liegt gegenüber einer reinen Infrastrukturfinanzierung pro neuzugelassenem Fahrzeug dann gut 30 % und pro elektrischem Kilometer gut 37 % höher.

Die angenomme Kaufprämie von 40.000 € pro Fahrzeug führt zwar absolut gesehen zu 20 % mehr Neuzulassungen als die elektrische Mautbefreiung, jedoch legen diese Fahrzeuge gleichzeitig 20 % weniger elektrisch gefahrenen Kilometer zurück als bei der elektrischen Mautbefreiung. Die Kaufprämie bringt damit also zwar potenziell viele Fahrzeuge auf Straße, entfaltet jedoch deutliche Fehlanreize hinsichtlich ihrer Nutzung. Die Gesamtkosten für den Staat pro neuzugelassenes Fahrzeug liegen dann auch 74 % höher und pro elektrischen Kilometer sogar 175 % höher als im Szenario mit ausschließlicher Infrastrukturfinanzierung.

Dagegen stellt die Einführung eines spürbaren CO_2-Preises für den Staat die günstigste Maßnahme dar, um das System anzukurbeln, da damit vor allem die Konkurrenztechnologie verteuert wird. Der hier angenommene Anstieg des CO_2-Preises auf 90 €/t in 2030 bleibt in seiner zusätzlichen Anreizwirkung hinsichtlich der Neuzulassungen und des elektrischen Fahranteils unter Oberleitung gegenüber den direkten Fördermaßnahmen jedoch deutlich zurück. Um eine ähnliche Anreizwirkung zu entfalten wie bei den anderen Maßnahmen müsste also ein höherer CO_2-Preis veranschlagt werden.

Auch eine EEG-Ermäßigung stellt sich staatlicherseits als günstig dar, da die Ausfälle von der Gesamtheit der deutschen Stromkunden mitgetragen werden. Unter den getroffenen Annahmen ist die Anreizwirkung auch größer als bei dem angesetzten CO_2-Preis, die absolute Wirkung bleibt jedoch auch deutlich hinter der Mautbefreiung und Kaufprämie zurück.

Vor diesem Hintergrund kann einerseits mit einer zumindest begrenzten Anreizwirkung durch den im Klimaschutzpaket bereits beschlossenen CO_2-Preis gerechnet werden. Eine zusätzliche Ermäßigung der EEG-Umlage sollte vor allem hinsichtlich potenziell negativer Auswirkungen auf andere Stromkunden näher untersucht werden. Um gerade in der Frühphase einen besonders schnellen Markthochlauf zu erreichen, müssten jedoch auch weitere Fördermaßnahmen ergriffen werden. Hier bietet sich insbesondere die elektrische Mautbefreiung an. Eine Mautspreizung wurde bereits als Anreiz für die Einführung neuer Abgasnormen angewendet und stellt damit kein vollständig neues Instrument dar. Entstehende Ausfälle bei den Einnahmen sollten jedoch genau beobachtet werden und die Maßnahme kann ggf. auch degressiv ausgestaltet werden. Eine wirksame Kaufprämie ist dagegen wahrscheinlich mit vergleichbar hohen staatlichen Kosten verbunden und führt mittelfristig auch zu Fehlanreizen. Vor allem diese Maßnahme sollte daher lediglich auf die erste Phase des Markthochlaufs zielen und degressiv ausgestaltet werden.

Grundsätzlich steht bei der Bewertung von Fördermaßnahmen in einer Frühphase der Einführung neuer Technologien vor allem die Effektivität im Vordergrund. Da der Fahrzeugbestand in dieser Phase noch verhältnismäßig gering ist, ist das finanzielle Risiko für den Staat durch die Wahl ineffizienter Fördermaßnahmen absolut verhältnismäßig gering, es kommt vielmehr auf eine wirksame Marktaktivierung an. Mit zunehmendem Markthochlauf kommt der Effizienz der Fördermaßnahmen dann eine zunehmende Bedeutung zu.

4 Schlussfolgerungen für Einführungspfade

4.1 Für Errichtung und Betrieb eines Oberleitungs-Basisnetzes von 3.200 km müssten einmalig über 10 Jahre etwa 7 Mrd. € investiert werden. Ein ähnlicher Betrag wird derzeit jedes Jahr in die Bundesfernstraßen investiert.

Das hier betrachtete Basisnetz wurde auf Basis von Verkehrsmodelldaten identifiziert. Dabei wurde die Wirtschaftlichkeit einzelner Transportrelationen für den Betrieb mit O-HEV bewertet (siehe Potentialanalyse) und ermittelt, welche Netzabschnitte durch diese Relationen genutzt werden. Das Basisnetz stellt in dieser Untersuchung den Zielpunkt der Entwicklung des O-Lkw-Systems im Rahmen der Systemeinführung dar (hier über einen Zeitraum von 2020-2030 angenommen).

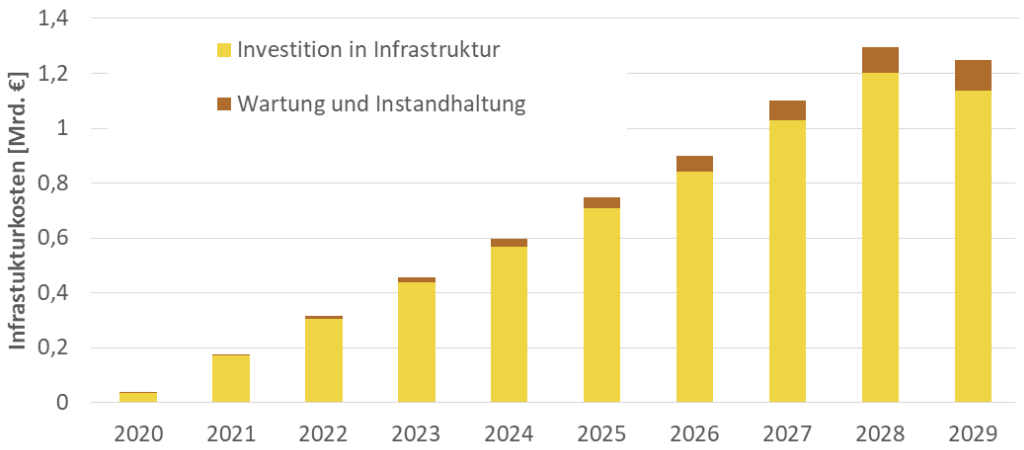


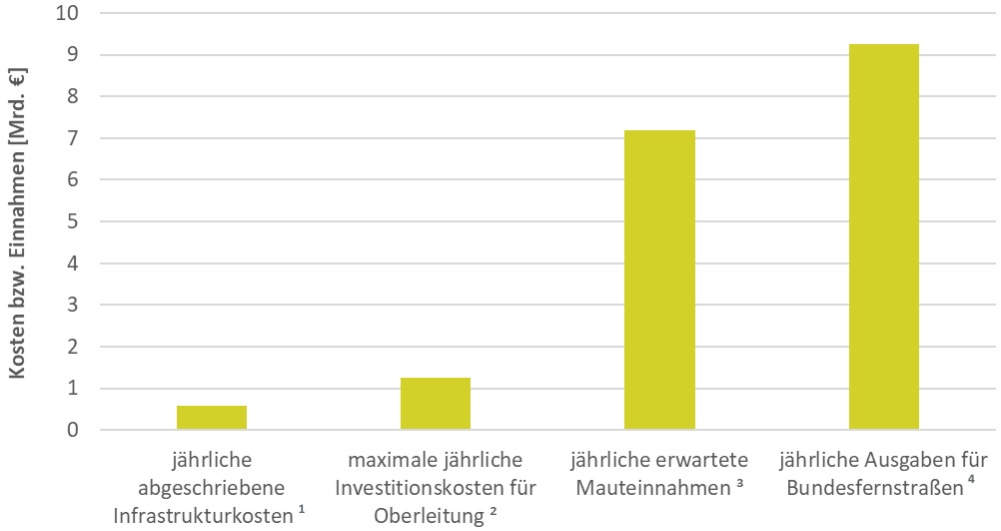
Abbildung 4-1: Jährliche Investitionskosten und operative Kosten für die Oberleitungsinfrastruktur während der Einführungsphase

Die Kosten[1] für den Bau und Betrieb des O-Lkw-Netz setzen sich zusammen aus Investitionskosten[2] (für den Bau neuer Oberleitungen) und Kosten für Wartung und Instandhaltung. Es wird davon ausgegangen, dass die jährlichen Zubauraten für das Oberleitungsnetz nur sukzessive gesteigert werden können, da zunächst die notwendigen Planungs- und Umsetzungskapazitäten aufgebaut und Erfahrungen mit den Genehmigungsverfahren gesammelt werden müssen. Trotz verbleibender Unsicherheiten bezüglich der der Investitions- und Betriebskosten kann die Größenordnung auf Basis von Literaturdaten ermittelt werden. Abbildung 4-1 zeigt die geschätzten Investitions- und Instandhaltungskosten, die kumuliert bei gut 7 Mrd. € liegen. Sobald ein Komplettausbau des Basisnetzes (im Zeitraum 2029/2030)

[1] Siehe Anhang unter der Rubrik Eingangsgrößen-Infrastruktur
[2] Berücksichtigt wurden hier die Kosten bis zum Anschluss an ein Mittelspannungsnetz.

erreicht ist, fallen nur noch Betriebskosten und Erneuerungen an. Die Bandbreite von Angaben zu den Kosten des Aufbaus und Betriebs von O-Lkw-Netzes ist jedoch erheblich, sodass die Kosten unter günstigen Annahmen auch bei nur 5,5 Mrd. €, unter ungünstigen Annahmen jedoch auch bei bis zu 15,6 Mrd. € liegen könnten[1].

Verglichen mit dem jährlichen Haushalt des Verkehrsressorts (etwa 30 Mrd. €) liegen die jährlichen Ausgaben jedoch bei nur wenigen Prozent – im gesamten betrachteten Zeitraum bleiben die jährlichen Kosten unter 1,3 Mrd. €. Auch im Vergleich zu relevanten Einzelposten fallen sie gering aus: So liegen die erwarteten Einnahmen aus der Lkw-Maut für die Jahre 2018 bis 2022 bei jährlich etwa 7,2 Mrd. €. Die jährlichen Ausgaben für Neubau und Erhaltung der Bundesfernstraßen lagen 2018 bei 9,26 Mrd. €. Abbildung 4-2 stellt diese Ausgaben vergleichend gegenüber.



[1]Betriebskosten bei Komplettausbau des Basisnetzes (ab 2029); [2]maximale Investitionskosten (im Jahr 2028); [3]jährliche erwartete Mauteinnahmen laut BMVI (für 2018-2022); [4]Ausgaben für Bundesfernstraßen (im Jahr 2018)

Abbildung 4-2: Einordnung der Infrastrukturkosten bzgl. relevanter Größen im Verkehrsbereich

4.2 Eine Vorfinanzierung der Infrastruktur ist nötig, da eine Kostenverteilung auf die Lkw-Betreiber erst durch einen hohen Nutzungsgrad ermöglicht wird. Später ist eine Gegenfinanzierung durch die Nutzer möglich.

In der Initialphase (in etwa die ersten 6-7 Jahre nach Beginn der Systemeinführung) ist aufgrund der hohen Fahrzeugpreise ein wirtschaftlicher Betrieb von O-Lkw nur für solche Einsatzprofile möglich, in denen mit der vorhandenen Oberleitungsinfrastruktur ein hoher elektrischer Fahranteil erreicht werden kann. Der Kostenvorteil für Fahrzeuge, die wirtschaftlich als O-Lkw betrieben werden können, beträgt in dieser Phase (Jahr 2026) im Durchschnitt jedoch nur 2,7 ct/km. Sofern keine Förderung erfolgt, würde eine Umlage der Infra-

[1] Eine Bandbreite möglicher spezifischer Kostensätze wurde in (ISI 2017) ermittelt.

strukturkosten in dieser Phase den Oberleitungs-Antrieb für einen Großzahl der potenziellen Lkw unwirtschaftlich machen. Für nur 8 % der O-Lkw, die wirtschaftlich betrieben werden können, liegt der Kostenvorteil bei über 4 ct/km. Dieser Kostenvorteil könnte zumindest teilweise zur Kostendeckung der Infrastruktur herangezogen werden; siehe Abbildung 4-3.

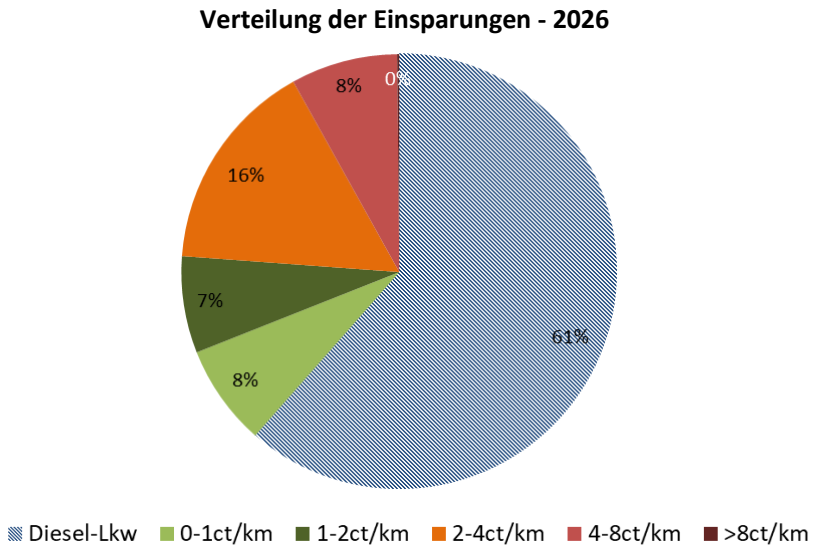


Abbildung 4-3: Einsparungen von Lkw-Betreibern im Jahr 2026 (Szenario „Infrastruktur“)

Dies spiegelt sich auch in Abbildung 4-4 wider. Hier werden die Einsparungen der O-Lkw-Betreiber den Infrastrukturkosten gegenübergestellt, die sich aus Abschreibung[1] und Instandhaltung der Oberleitungsinfrastruktur ergeben. Es wird deutlich, dass die jährlichen Kosten für die Infrastruktur in den Anfangsjahren die Einsparungen der Lkw-Betreiber deutlich übersteigen.

Acht Jahre nach Szenarienbeginn verringert sich die Spreizung zwischen Einsparungen und Infrastrukturkosten jedoch kontinuierlich, sodass eine Kostendeckung bei gleichbleibender Energiepreisentwicklung ca. 13 Jahre nach Szenarienbeginn erreicht werden könnte. Ab diesem Zeitpunkt könnten Abschreibung sowie Betrieb und Wartung der Infrastruktur demzufolge prinzipiell vollständig durch Nutzungsgebühren der Lkw-Betreiber gegenfinanziert werden, sofern deren Einsparungen vollständig abgeschöpft würden.

Da die in diesem Vorhaben durchgeführte Modellierung auf die Einführungsphase fokussiert, liegt der Betrachtung nur eine Teilmenge der Lkw-Verkehrsmengen in Deutschland zugrunde (siehe einleitende Bemerkungen). Diese Teilmenge wird in der Modellierung im Jahr 2030 dementsprechend weitgehend ausgeschöpft. Je weiter die Systemeinführung voranschreitet, desto eher können allerdings auch Verkehre jenseits der betrachteten Teilmenge von der Oberleitungsinfrastruktur profitieren (insbesondere weitere Gütergruppen, die für die Einführungsphase als eher ungeeignet bewertet wurden, sowie internationale Lkw-Verkehre). Berücksichtigt man eine entsprechende Erweiterung der Nutzergruppen, so ist auch nach 2030 mit einem weiteren Anstieg der Einsparungen, die über die beschriebene Einsparung durch steigende Kostenspreizung hinausgehen, zu rechnen, sodass zusätzliche Beiträge zur Infrastrukturfinanzierung zu erwarten sind.

[1]Da es hier um einen Vergleich der Betriebskosten geht, wird die Abschreibung der Infrastruktur und nicht die Zahlungsflüsse durch die Investitionen angesetzt.

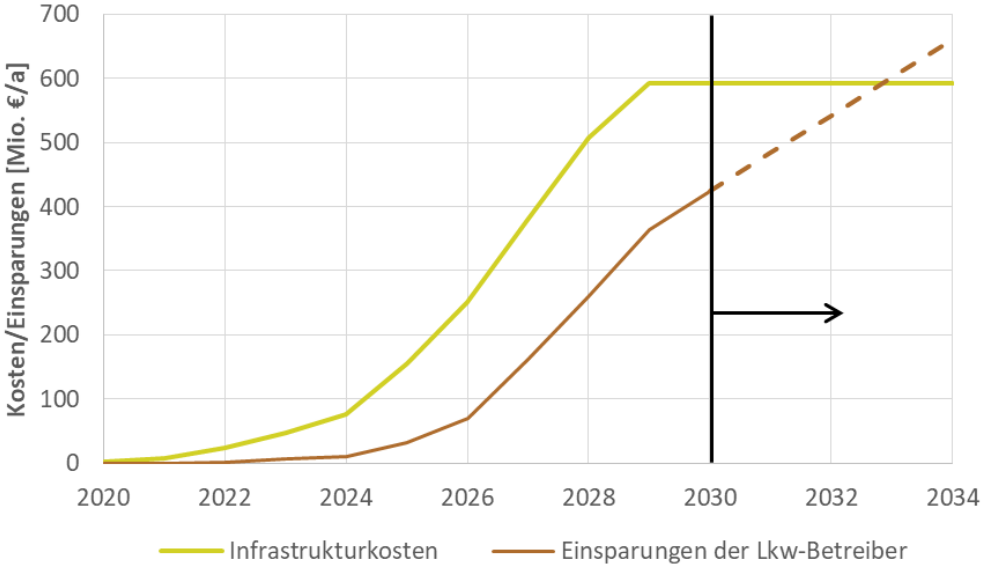


Abbildung 4-4: Jährliche Infrastrukturkosten und Einsparungen der Lkw-Betreiber (Szenario „Infrastruktur“)

4.3 Strecken auf den Nord-West- und Nord-Süd-Achsen ermöglichen bereits bei geringem Oberleitungsausbau eine vergleichsweise hohe elektrische Fahrleistung.

Der kostenoptimale Ausbaupfad hängt vom gewählten Förderinstrument ab. Eine Förderung, die die Fixkosten senkt, wie bspw. eine Kaufprämie, begünstigt insbesondere Lkw mit einer geringen jährlichen Fahrleistung. Maßnahmen, die wiederum den elektrischen Fahranteil begünstigen, fördern Relationen mit einem hohen Fahranteil auf (elektrifizierten) Autobahnabschnitten. Dies bewirkt, dass je nach Förderinstrument auch unterschiedliche Strecken elektrifiziert werden, da auf einigen Strecken tendenziell eher kürze Relationen verkehren, wogegen auf anderen Autobahnabschnitten vermehrt langläufige Relationen zu finden sind.

Dennoch sind klare Tendenzen zu erkennen, in welchen Regionen bzw. auf welchen Achsen generell hohe Potenziale für eine Streckenelektrifizierung vorliegen. Abbildung 4-5 zeigt eine qualitative Einordnung des Elektrifizierungspotenzials der Streckenabschnitte basierend auf allen Szenarienrechnungen. Hohe Potenziale weisen hierbei insbesondere die Nord-Süd-Achse „Lübeck-Hamburg-Hannover-Kassel-Würzburg“ und die Nord-West-Achse „Hamburg-Bremen-Ruhrgebiet“ auf. Auf diesen Streckenabschnitten können demnach bereits bei einem verhältnismäßig geringen Ausbau bereits in der Anfangsphase eine große Anzahl an Lkw-Betreiber adressiert werden.

Für die Hochlaufphase sind hingegen die Autobahnen A2 (Magdeburg-Berlin), A9 (Berlin-Gera) und A4 (Gera-Bad Hersfeld) bezogen auf das gewählte Basisnetz von geringerer Relevanz.

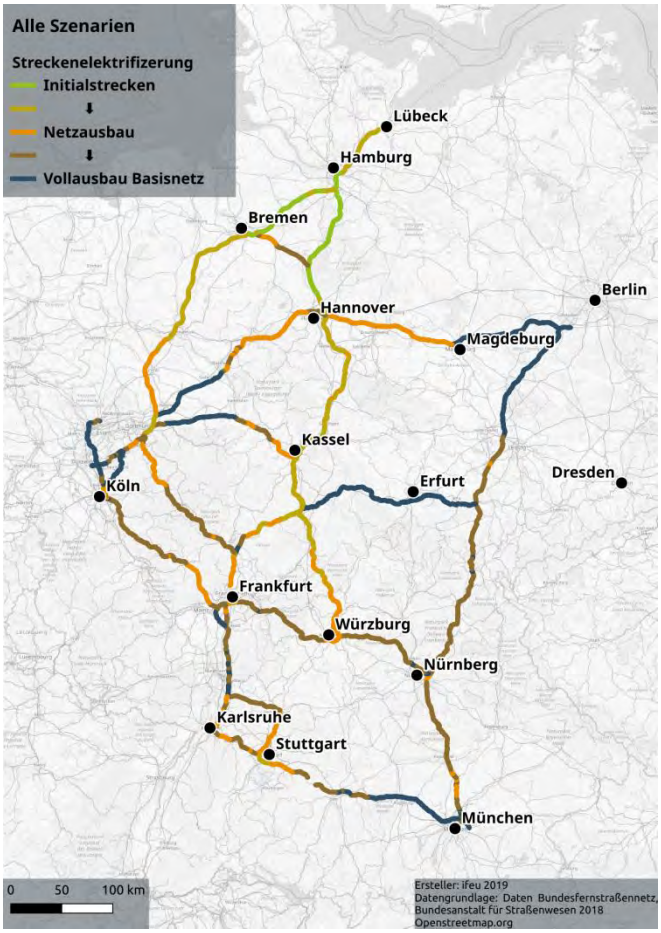


Abbildung 4-5: Elektrifizierungspotenzial der deutschen Bundesautobahnen

4.4 Ergreift der Staat Anreizmaßnahmen zusätzlich zum Infrastrukturausbau, so kann der Markthochlauf in den ersten Jahren deutlich beschleunigt und die Systemeinführung damit stabilisiert werden.

Finanziert der Staat lediglich den Aufbau von Oberleitungsinfrastruktur vor und verzichtet auf weitere Fördermaßnahmen[1], so ist der Bestand an O-Lkw in den ersten Jahren noch sehr gering und steigt erst ab dem Jahr 2026 merklich an. Allerdings gibt es verschiedene Gründe, weswegen ein rascher Markthochlauf vor allem in den ersten Jahren wichtig ist:

- Die Fahrzeughersteller müssen in der Lage sein, mit größeren Stückzahlen zu planen, um Kostendegressionen realisieren zu können.
- Die Akzeptanz bei den Nutzern des Systems wird voraussichtlich stark von seiner praktischen Erfahrbarkeit abhängen.

[1] Dies bedeutet auch, dass die aktuell bestehende Kaufprämie für elektrische Nfz nicht gewährt wird.

- Eine starke Nutzung der Oberleitungsinfrastruktur und intensive Erfahrungen im Fahrzeugbetrieb ermöglichen eine schnellere Weiterentwicklung des Systems.
- Das Vertrauen in den Systemaufbau wird durch einen raschen Markthochlauf gestärkt.

Es wurde daher die Wirkung verschiedener Anreizmaßnahmen auf den Markthochlauf (in fünf Szenarien) modelliert. Diese werden in Abbildung 4-6 hinsichtlich ihrer Wirkung auf den O-Lkw-Bestand im dritten sowie im sechsten Jahr nach Beginn der Systemeinführung untersucht.

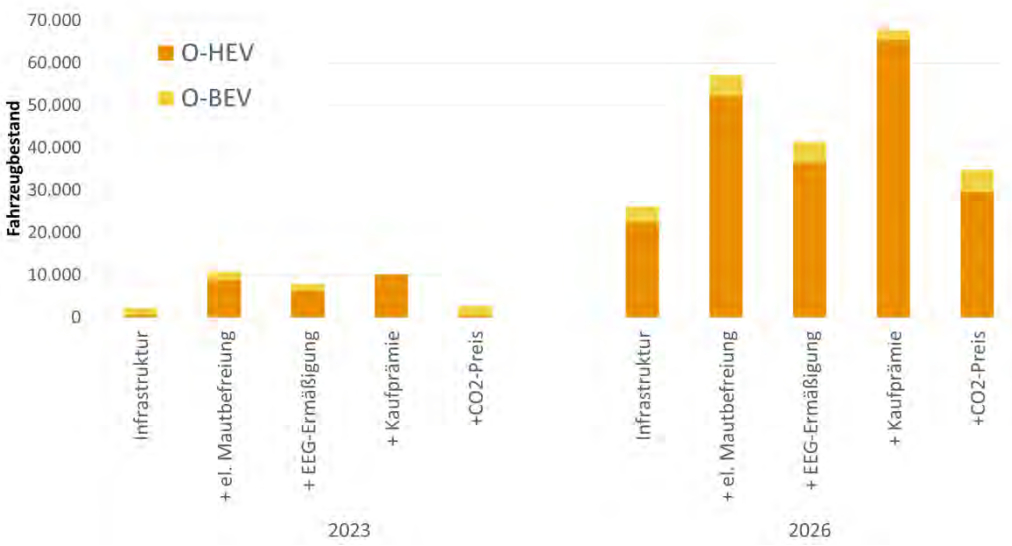


Abbildung 4-6: O-Lkw-Bestand unter Annahme verschiedener Förderregime nach 3 Jahren bzw. 6 Jahren (bezogen auf den Beginn der Systemeinführung)

Alle betrachteten Förderinstrumente beschleunigen den Markthochlauf von O-Lkw sichtbar, sie unterscheiden sich allerdings hinsichtlich der Stärke und des zeitlichen Verlaufs ihrer Wirkung:

- Eine Mautbefreiung im elektrischen Betrieb stellt ein wirkungsvolles Förderinstrument dar. Hieraus ergibt sich bei einem Vollausbau des Basisnetzes (im Jahr 2030) eine durchschnittliche Kostenreduktion für die Lkw-Betreiber von etwa 18 ct pro Kilometer. Durch die hohen Kosteneinsparungen wird der für die Wirtschaftlichkeit nötige elektrische Fahranteil gesenkt.
- Eine EEG-Ermäßigung für O-Lkw in Höhe von 80 % vergünstigt ähnlich wie die Mautbefreiung den elektrischen Betrieb der Fahrzeuge. Hier sind allerdings nur Einsparungen um etwa 8 ct/km zu erwarten. Selbst bei einer Komplettbefreiung wären nicht dieselben Einsparungen wie bei der Mautbefreiung auf den elektrischen Betrieb zu erzielen. Der Hebel des Instruments ist damit geringer.
- Beim CO_2-Preis wurde eine lineare Anhebung über den Einführungszeitraum unterstellt. Demzufolge ist der Effekt hier anfänglich noch gering, wird später aber im Vergleich zu den anderen Maßnahmen stärker. Im Jahr 2030 werden hier Einsparungen der Lkw-Betreiber im Bereich von 10 ct/km generiert.
- Eine Förderung der Fahrzeuganschaffung wirkt auf die Fixkosten. Bereits 2023 können durch die angenommen Förderhöhe von 40.000 € pro Fahrzeug deutlich mehr O-Lkw wirtschaftlich betrieben werden als im Szenario „Infrastruktur“. In den folgenden Jahren

steigen die Bestände weiter stark an, was den großen Einfluss dieses Instruments zeigt. Durch Fördermaßnahmen wird allerdings der für einen wirtschaftlichen Betrieb notwendige Anteil elektrischer Fahrleistung gesenkt. Die Lkw-Betreiber haben im Jahr 2030 Einsparungen in Höhe von 15 ct/km zu verzeichnen.

- Die Effekte des hier angenommenen CO_2-Preises schließlich sind gegenüber dem Szenario „Infrastruktur“ zum hier betrachteten Zeitpunkt noch verhältnismäßig gering, da der CO_2-Preis über die Einführungsphase erst sukzessive angehoben wird. Dennoch bewirkt dieser einen schnelleren Markthochlauf und eine Kostenreduktion der öffentlichen Hand.

4.5 Eine Mautbefreiung im elektrischen Fahrbetrieb und eine Kaufprämie erhöhen zwar den O-Lkw-Bestand, senken jedoch die elektrische Fahrleistung pro Fahrzeug.

Ein Förderung durch eine Mautbefreiung im elektrischen Fahrbetrieb und eine Kaufprämie in Höhe von 40.000 € bewirken zwar einen starken Hochlauf des Bestands, jedoch haben beide Förderungen den Nachteil, dass der elektrische Fahranteil, der für die Wirtschaftlichkeit eines O-Lkw nötig ist, sinkt. Da die Mehrkosten für den Fahrzeugerwerb dadurch geringer ausfallen, sind auch nur geringere elektrische Fahranteile notwendig, um eine monetäre Amortisation zu erreichen. Der niedrigere elektrische Fahranteil bewirkt wiederum auch, dass die erzielbare THG-Minderung pro eingesetztem O-Lkw geringer ausfällt.

Eine ähnliche Wirkung mit einer anderen Ursache hat die Mautbefreiung im elektrischen Fahrbetrieb. Eine Mautbefreiung vergünstigt elektrische Transporte stark und steigert demzufolge die elektrische Fahrleistung absolut gesehen signifikant. Gleichzeitig wird es dadurch allerdings auch attraktiv, Relationen mit O-Lkw zu betreiben, bei denen der Anteil elektrifizierter Strecke geringer ist. Hier sind die Einsparungen auch bei begrenztem elektrischen Fahrbetrieb so hoch, dass eine Amortisation schnell erreicht wird. Zwar ist es für die Wirtschaftlichkeit eines O-HEV prinzipiell nicht dienlich eine hohe Fahrleistung abseits der Oberleitung zurückzulegen (aufgrund des höheren absoluten Wertverlustes des Fahrzeugs), jedoch kann eine sehr hohe Einsparung im Oberleitungsbetrieb sowohl die Mehrkosten durch die höhere Invesition als auch höhere Kosten durch größere Fahrleistungsanteile im Hybridbetrieb kompensieren. Der mittlere Anteil der elektrischen Fahrleistung an der Gesamtfahrleistung der O-Fahrzeuge liegt im Szenario „+el. Mautbefreiung“ im Jahr 2026 dementsprechend etwa 20 %-Punkte gegenüber einer Situation ohne Mautbefreiung. Für den Fall einer angenommenen EEG-Befreiung ist ein ähnlicher Effekt in allerdings etwas schwächerer Ausprägung zu beobachten, da auch hier selektiv der elektrische Fahranteil begünstigt wird.

Abbildung 4-7 zeigt die durchschnittliche jährliche elektrische Fahrleistung der O-Lkw (O-HEV und O-BEV). Die o.g. Tendenzen sind hier klar erkennbar. Im Szenario „Infrastruktur“ müssen die O-Lkw einen sehr hohe elektrische Fahrleistung aufweisen, um rentabel betrieben werden zu können. Demgegenüber sind in den beiden Szenarien „+el. Mautbefreiung“ und „+Kaufprämie“ nur geringe elektrische Fahrleistungen nötig. Zwar nähern sich die drei Kurven gegen Ende der Einführungsphase an, jedoch liegt dies an dem umfassenden Netzausbau, der zwangsläufig einen Anstieg des elektrischen Fahranteils bei den beiden Förderszenarien bewirkt. Der elektrische Fahranteil sinkt demgegenüber im Szenario „Infrastruktur“ aufgrund von Kostendegressionen beim O-Lkw und einer vorteilhaften Entwicklung der Kostenspreizung der beiden Energieträger Diesel und Strom.

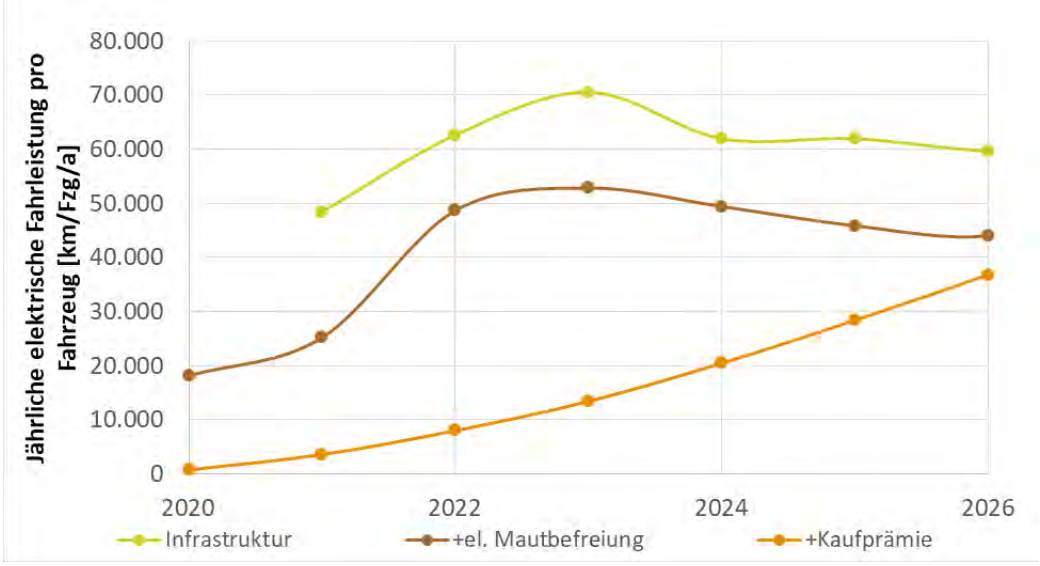


Abbildung 4-7: Elektrische Fahrleistung von Oberleitungs-Lkw in der Hochlaufphase

Aufgrund der geringeren elektrischen Fahranteile in den Förderszenarien erscheint ein „Phase-out" der Maßnahmen sinnvoll, um keine falschen Anreize zu setzen. Zwar würden bei einer gleichbleibenden Förderungen hohe Bestandsanteile von O-Lkw erreicht werden, die Kosten für den Staat sind dann jedoch unverhältnismäßig hoch und der THG-Minderungseffekt fällt aufgrund der niedrigen elektrischen Fahranteile geringer aus.

4.6 Kaufprämie und Mautbefreiung für O-Lkw beschleunigen den Markthochlauf, sind längerfristig aber mit erheblichen zusätzlichen Kosten für den Staat verbunden. Eine CO_2-Bepreisung erhöht dann die Kosteneffizienz.

Durch die Umstellung auf O-Lkw vermindern sich pro Fzg-km die staatlichen Einnahmen aus der Energiesteuer. Alle Förderinstrumente erhöhen die absolute elektrische Fahrleistung und führen somit verglichen mit dem Szenario „Infrastruktur" zu verminderten Energiesteuereinnahmen. Demgegenüber steigen die Stromsteuereinnahmen des Staats durch den erhöhten Stromberarf, jedoch sind diese im Verhältnis zu den Energiesteuerausfällen beim Diesel gering. Durch Einführung eines CO_2-Preises können zusätzlichen Einnahmen generiert werden, die zumindest teilweise die Energiesteuereinbußen kompensieren können. Insgesamt sind unter dem angenommenen CO_2-Preis (indirekte) Belastungen des Staats bezogen auf die Energie- und Stromsteuer in Höhe von 1,1 Mrd. € im gesamten betrachteten Zeitraum zu erwarten. Dieser Kostenpunkt liegt in den anderen Szenarienrechnungen bei 2,2-2,8 Mrd. €.

Da in allen Szenarien eine Mautermäßigung um 1,1 ct als Baseline für alle alternativen Antriebe angesetzt wurde, taucht in allen Szenarien ein begrenzter Kostenblock durch entgangene Mauteinnahmen auf. Hier liegen die kumulierten indirekten Kosten durch Mauteinnahmeausfälle im Bereich von 0,29-0,46 Mrd. €. Eine komplette Befreiung von der Maut im elektrischen Betrieb führt hingegen zu Mautausfällen von über 4,2 Mrd. € kumuliert über

die Einführungsphase und stellt somit den größten Einzelposten bei den auftretenden Kosten dar. Wird dieses Instrument gewählt, so sollte die Ausgestaltung degressiv sein, um Kosten und Mitnahmeeffekte zu begrenzen.

In etwa genauso hoch sind die Kosten für die Fahrzeugförderung bei einer Kaufprämie von 40.000 € anzusetzen. Dadurch wird dieses Szenario zum teuersten Szenario aus Sicht des Staates. Um diese Kostenpunkt senken zu können, wäre zum einen eine niedrigere Prämie und zum anderen ein „Phase-out“ der Förderung denkbar.

Eine EEG-Ermäßigung ist verglichen mit einer Mautbefreiung oder Kaufprämie mit deutlich geringeren Gesamtkosten für den Staat verbunden. Jedoch bewirkt diese unter der Annahme, dass der Ausbau der Erneuerbaren Energien proportional zur EEG-Umlage steigen sollte, eine Belastung der Allgemeinheit, da die verringerten EEG-Beiträge der Lkw-Betreiber durch alle EEG-Beitragspflichtigen zu decken wäre.

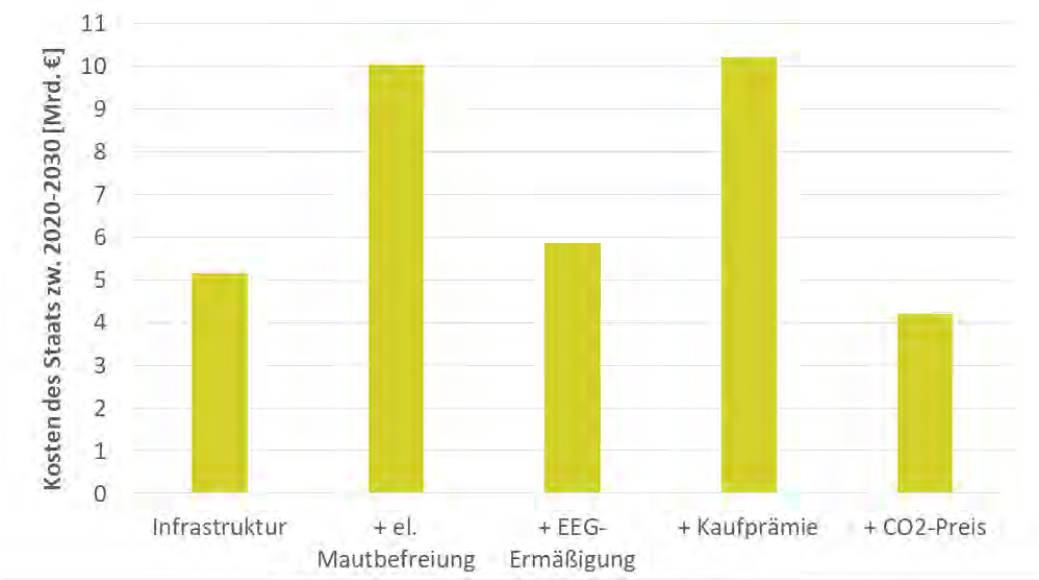


Abbildung 4-8: Kosten für die öffentliche Hand gegenüber dem Referenz-Szenario unter Annahme verschiedener Fördermaßnahmen (kumulierten Kosten im Zeitraum 2020-2030). EEG-Einnahmen werden hier nicht berücksichtigt.

Abbildung 4-8 fasst sowohl die direkten als auch die indirekten Kosten des Staats zusammen. Diese Kosten stellen die Differenz zum Referenz-Szenario dar und beinhalten: Energiesteuer auf Diesel, CO_2-Steuer (nur Szenario „+CO2-Preis“), Stromsteuer, Kaufprämie, Maut und Oberleitungsinfrastruktur. Für den Staat sind die Gesamtkosten über den Zeitraum 2020-2030 bei den Szenarien „+el. Mautbefreiung“ und „+Kaufprämie“ in etwa gleich hoch und belaufen sich zu 10 Mrd. €. Diese beiden Szenarien stellen damit die kostenintensivsten Föderungen (unter den getroffenen Annahmen) dar. Die Maßnahme der EEG-Ermäßigung erzeugt nur aufgrund der geringeren Ökosteuer und Mauteinnahmen aufgrund des schnelleren Hochlaufs gegenüber des Basisszenarios „Infrastruktur“ nur geringfügig höhere Kosten.

Diese ergeben knapp 5,9 Mrd. € („+EEG-Ermäßigung“) gegenüber 5,1 Mrd. € („Infrastruktur“). Zu beachten ist jedoch, dass aus einer Reduktion der EEG-Umlage in Höhe von 80 % ein Ausfall von EEG-Zahlungen von insgesamt knapp 580 Mio. € resultiert.[1]

Bemisst man die Effizienz der einzelnen Instrumente anhand des Verhältnisses der Kosten der öffentlichen Hand zum O-Lkw-Bestand, zur elektrischen Fahrleistung und zu den vermiedenen THG-Emissionen sind ebenfalls deutliche Unterschiede zu identifizieren. Tabelle 4-1 fasst die Durchschnittskennzahlen für den Hochlaufzeitraum 2020-2026 zusammen. Erwartungsgemäß sind die Kosten des Staats bei einer Einführung eines CO_2-Preises am geringsten. Die Kaufprämie ist in diesem Zeitraum durch die höchsten Kosten gekennzeichnet. Die Neuzulassungen werden durch die Maßnahme jedoch mehr als verdoppelt. Somit stellt die Kaufprämie bezüglich eines schnellen Markthochlaufs eine effektive Maßnahme dar, aber sie weist in dieser Förderhöhe verglichen mit den anderen Förderinstrumenten nur eine geringe Kosteneffizienz auf. Kosteneffizienter als die Kaufprämie scheint bei den betrachteten Bezugsgrößen die elektrische Mautbefreiung zu sein, jedoch sind mit einer steigenden absoluten elektrischen Fahrleistung in den Folgejahren sehr hohe staatliche Einnahmeausfälle zu erwarten.

Die ermittelten Werte gelten jeweils nur für die angenommenen Ausgestaltungen der Förderungen. Die Ergebnisse könnten bzgl. der Effizienz anders ausfallen, sofern bspw. die Kaufprämie in abweichender Höhe gewährt wird oder nur eine Ermäßigung statt einer Komplettbefreiung von der Maut im elektrischen Betrieb erfolgt.

Tabelle 4-1: Durchschnittskennwerte der Szenarien für den Zeitraum 2020-2026

Kosten des Staats pro...	Infrastruktur	+el. Mautbefreiung	+EEG-Ermäßigung	+Kaufprämie	+CO2-Preis
Neuzulassung [€/Fzg]	36.205	47.349	34.965	63.134	12.725
elektr. Fahrleistung [ct/Fzg-km]	34,5	47,2	30,0	94,8	11,5
vermiedene t THG [€/t]	866	1. 130	765	1.867	314

4.7 Während der gesamten Einführungsphase ist aus wirtschaftlicher Sicht der gleichzeitige Einsatz unterschiedlicher O-Lkw-Konfigurationen möglich.

Auf Grundlage der hier unterstellten Technologiekosten ist während der Einführungsphase eine Koexistenz von O-BEV-Lkw und O-HEV wirtschaftlich möglich, da sie jeweils für einen Teil der geeigneten Anwendungsfälle Kostenvorteile aufweisen. Hierbei spielen unterschiedliche Effekte eine Rolle. Zum einen werden über den Einführungszeitraum sinkende Batteriepreise angenommen (304 €/kWh in 2020, 136 €/kWh in 2030). Dies macht O-BEV zunehmend konkurrenzfähig, insbesondere auf Relationen, bei denen längere Vor- und Nachläufe elektrische zurückgelegt werden müssen und dementsprechend eine größere Batteriekapazität benötigt wird. Die Gesamtkosten für einen O-BEV-Lkw mit einer 200-kWh-

[1] Verglichen mit erwarteten EEG-Zahlungen von ca. 22 Mrd. € im Jahr 2020 (Schiffler / Ebert 2017) ist dieser kumulierte Wert jedoch eher gering. Eine Ermäßigung könnte dennoch schwer durchsetzbar sein, beobachtet man die kontroverse Diskussionen bzgl. der Ermäßigung der energieintensiven Industrie.

Batterie (Reichweite auf Batterie in etwa 200 km) sinken von 191.000 € in 2020 auf 136.000 € in 2030 (um etwa 29 %) und damit anteilig deutlich stärker als bei O-HEV (minus 17 %).

Zum anderen sind zu Beginn der Einführungsphase die infrage kommenden Relationen für O-Lkw noch relativ kurz. Damit sind auch die Vor- und Nachläufe im Durchschnitt kurz, sodass nur relativ kleine Batterien für O-BEV benötigt werden.

Je nach Szenario dominieren in den ersten drei bis vier Jahren unterschiedliche Effekte die Anteile wirtschaftlich sinnvoller O-BEV. In einigen Szenarien ist der O-BEV-Anteil in diesem Zeitraum zwar relativ hoch, jedoch sind die Zahlen bezogen auf den Gesamtbestand zu gering, um klare Tendenzen zu erkennen. Während des starken Markthochlaufs (nach 2023) werden in allen Szenarien vornehmlich O-HEV eingesetzt. Der Anteil der O-BEV nimmt hingegen am Ende des betrachteten Zeitraums wieder zu. Abbildung 4-9 stellt die Entwicklung der Szenarien „Infrastruktur“ und „+el. Mautbefreiung“ gegenüber. Im ersten Szenario haben die O-BEV im Jahr 2030 einen Anteil von 15 % am O-Lkw-Bestand. Im zweiten Szenario, in dem der elektrische Betrieb gezielt gefördert wird, beträgt dieser Anteil 25 %.

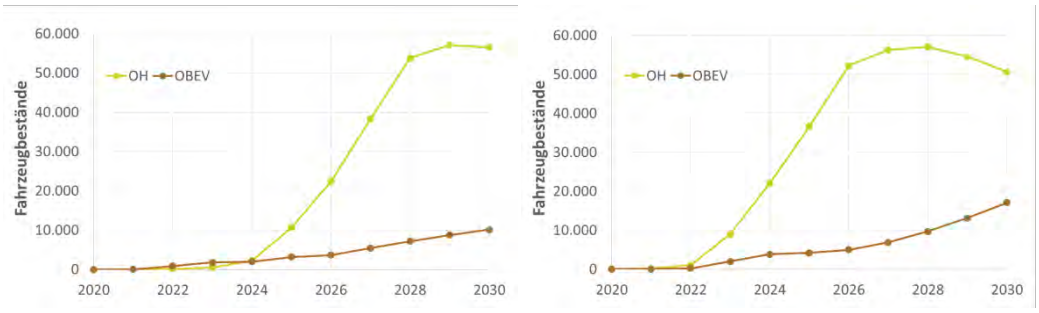


Abbildung 4-9: Bestandsentwicklung von O-HEV und O-BEV für die Szenarien „Infrastruktur“ und „+el. Mautbefreiung“

Mit Blick auf die Realitäten des Marktes ist allerdings nicht zu erwarten, dass sich die gewählte Fahrzeugkonfiguration allein anhand solch finanzieller Überlegungen entscheidet. Zu berücksichtigen sind darüber hinaus zum einen mögliche Vorbehalte der Fahrzeugbetreiber; hier könnten Sorgen um die Hinlänglichkeit der elektrischen Reichweite (z.B. bei schwankenden Witterungsbedingungen) sowie um die Zuverlässigkeit der Oberleitungsinfrastruktur (notwendige Voraussetzung für den Betrieb von O-BEV, aber nicht von O-HEV) eine Rolle spielen. Zum anderen haben die derzeit bei O-Lkw aktiven Hersteller erkennen lassen, dass sie den Hybridantrieb mit Blick auf einen anstehenden Markthochlauf zunächst favorisieren würden. Im Verlauf der Markteinführung ist aber ein stufenloser Übergang von O-HEV auf O-BEV möglich.

4.8 Auch wenn ein O-Lkw-System lediglich durch besonders geeignete inländische Lkw-Verkehre genutzt wird, ist es im Jahr 2030 gegenüber dem Einsatz von PtL-Kraftstoffen wirtschaftlich konkurrenzfähig.

Neben dem Einsatz von elektrischen Antrieben kann grundsätzlich auch der Einsatz von Power-to-Liquid-Kraftstoffen (sog. eFuels) zur strombasierten Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs beitragen. Die Einführung von PtL-Kraftstoffen weist in vieler Hinsicht (beteiligte Akteure, benötigte Energiemengen, infrage kommende Instrumente zur Einführung usf.) deutliche Unterschiede zur Einführung elektrischer Antriebe auf, die hier nicht detailliert dargestellt werden können. Eigen ist ihnen jedoch die Verwendung der gleichen Fahrzeugtechnik und Tankinfrastruktur wie Diesel-Lkw. Die Kostenrechnung wird hier also um diese Elemente erleichtert, so dass bei Nutzung von PtL-Diesel oftmals Kostenvorteile im Vergleich zur Elektromobilität im Güterfernverkehr vermutet werden. Dem sind jedoch die – nicht zuletzt bedingt durch hohe Konversionsverluste und entsprechend hohem Strombedarf - tendenziell höhere Energiekosten gegenüberzustellen. Zur Einordnung werden im Folgenden die Systemkosten für folgende Fälle gegenübergestellt:

1. **O-Lkw-System des Jahres 2030** (Szenario „Infrastruktur“): Durch den Einsatz von Oberleitungs-Lkw auf einem Basisnetz von 3.200 km werden hierbei 36 % Treibhausgasemissionen (WtW) gegenüber einem System mit konventionellen Diesel-Lkw (ohne PtL-Einsatz) eingespart. Bei den Systemkosten sind Fahrzeugmehrkosten (ggü. Diesel-Lkw), Energiekosten und Infrastrukturkosten (Abschreibung und Instandhaltung) berücksichtigt.
2. **PtL-Beimischung**: Sämtliche Lkw, die in Fall 1 als O-Lkw betrieben werden, werden stattdessen als Diesel-Lkw mit einem Kraftstoffmix aus konventionellem Kraftstoff unter Beimischung von PtL-Diesel betrieben. Dabei wird für die Herstellung des PtL-Diesels eine vollständig erneuerbare Stromgewinnung unterstellt, über seinen Lebenszyklus wird der PtL-Kraftstoff daher als CO_2-neutral angenommen[1]. Um dieselbe Minderung der WtW-Treibhausgasemissionen wie das O-Lkw-System in Fall 1 zu erreichen, ist daher eine PtL-Beimischung von 36 % im Dieselkraftstoff erforderlich. Bei den Systemkosten sind hier allein die Energiekosten berücksichtigt, da keine zusätzlichen Kosten für Fahrzeuge und Infrastruktur anfallen. Der angenommene Preis für erneuerbaren PtL-Diesel beträgt 0,21 €/kWh[2].

Beim Kostenvergleich dieser beiden Fälle für das Jahr 2030 werden im folgenden zwei verschiedene Perspektiven eingenommen:

- **Systemkosten inklusive Energiesteuern:** Dieser Vergleich ermöglicht eine Aussage darüber, welche der beiden Technologien sich unter derzeitigen fiskalischen Rahmenbedingungen aus Sicht der Fahrzeugbetreiber kostengünstiger darstellt. Annahme ist dabei, dass die Fahrzeugbetreiber im Betrachtungsjahr 2030 den Betrieb, die Instandhaltung und die Abschreibung der Oberleitungsinfrastruktur finanzieren müssen.
- **Systemkosten exklusive Energiesteuern:** Hier werden die summierten Kosten der Systeme für den Staat und die Fahrzeugbetreiber gegenübergestellt. Daraus kann (unter Abstraktion von derzeitigen fiskalischen Rahmenbedingungen) abgeleitet werden, welche Technologie aus volkswirtschaftlicher Sicht die geringeren Kosten aufweist. Mögliche

[1] Dies stellt eine optimistische Annahme dar, da bereits kleine Mengen nicht-erneuerbaren Stroms bei der PtL-Erzeugung aufgrund des geringen Wirkungsgrads der Gesamtkette erhebliche CO_2-Mengen bezogen auf das Endprodukt (PtL-Diesel) bewirken können.
[2] nach Referenz-Szenario für Nord- und Ostsee-Wind Offshore der Studie “Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe“ (Agora Verkehrswende et al. 2018)

Effekte auf Arbeitsplätze, Wertschöpfung und weitere volkswirtschaftlich relevante Größen sind hierbei allerdings nicht berücksichtigt.

Aus Sicht der Fahrzeugbetreiber ist das O-Lkw-System im Szenario „Infrastruktur“ im Jahr 2030 durch geringere Kosten gekennzeichnet als das System im PtL-Szenario; siehe Abbildung 4-10. Der Kostenvorteil liegt bei rund 807 Mio. € im Jahr 2030. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass das O-Lkw-System entsprechend der eingangs beschriebenen Eingrenzung (siehe Abschnitt 1.2) nur einen relativ geringen Anteil des Güterfernverkehrs abdeckt, sodass die Infrastrukturkosten anteilig noch relativ hoch sind. Dieses Ergebnis deckt sich jedoch mit dem Befund, dass sich auch im Vergleich zu mit fossilem Diesel betriebenen Fahrzeugen das O-Lkw-System des Szenarios „Infrastruktur“ nach etwa 13 Jahren selbst tragen kann (siehe Abschnitt 4.2). Die Einführung eines CO_2-Preises für die Non-ETS-Sektoren, wie er im aktuellen Klimapaket der Bundesregierung vorgesehen ist, würde zudem den Preis von fossilem Dieselkraftstoff erhöhen; das würde im PtL-Szenario vergleichsweise stärker zu Buche schlagen, da hier mehr fossiler Dieselkraftstoff eingesetzt wird.

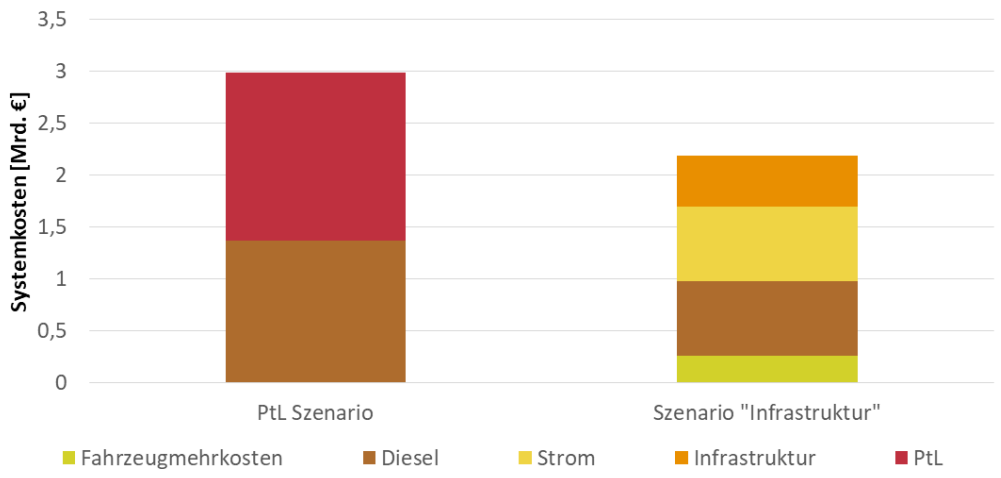


Abbildung 4-10: Vergleich der Systemkosten einschließlich Energiesteuern im Jahr 2030 zwischen einem O-Lkw-System (Szenario „Infrastruktur“) und einer PtL-Beimischung für die gleiche Fahrzeuggruppe unter der Bedingung gleicher CO_2-Minderung (WtW)

Bezogen auf ihre Gestehungskosten werden Kraftstoffe in Deutschland deutlich höher besteuert als elektrischer Strom. Nimmt man die Energiesteuern (und somit alle hier relevanten Zahlungsflüsse zwischen Betreibern und Staat) aus dem Kostenvergleich heraus, so ändert sich das Bild (Abbildung 4-11). Der Kostenvorteil des O-Lkw-Systems reduziert sich deutlich, jedoch bleibt ein Kostenvorteil von ca. 300 Mio. für die betrachteten Verkehre bestehen.

Werden weitere Fahrzeuge für eine Nutzung der O-Infrastruktur in Betracht gezogen (insbesondere Nicht-Pendelverkehre sowie internationale Verkehre), so ist damit zu rechnen, dass das O-Lkw-System gegenüber dem Betrieb mit PtL bezüglich der Kosten weiter an Attraktivität gewinnt, da der Kostenblock „Infrastruktur“ dann anteilig gesehen geringer wird. Auch bei den Fahrzeugkosten ist längerfristig eine weitere Angleichung zu erwarten, so dass der Kostenpunkt „Fahrzeugmehrkosten“ dann an Bedeutung verliert. Bei der Entwicklung der Gestehungskosten für fossilen sowie PtL-Dieselkraftstoff bestehen grundsätzlich Unsicherheiten in beide Richtungen.

Insgesamt lässt sich somit ein deutlicher betriebswirtschaftlicher sowie ein leichter systemischer Kostenvorteil für das untersuchte O-Lkw-System gegenüber einer THG-seitig äquivalenten PtL-Beimischung zum Diesel konstatieren.

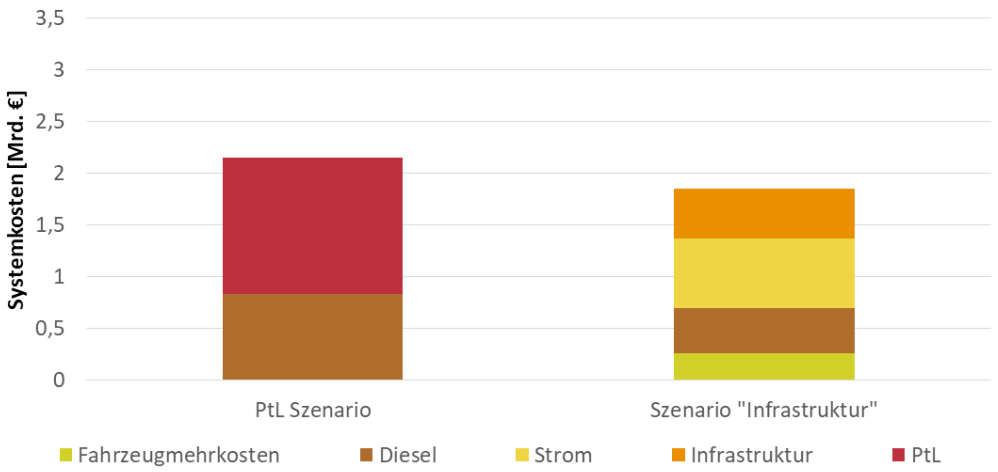


Abbildung 4-11: Vergleich der Systemkosten ohne Energiesteuern im Jahr 2030 zwischen einem O-Lkw-System (Szenario „Infrastruktur“) und einer PtL-Beimischung für die gleiche Fahrzeuggruppe unter der Bedingung gleicher CO_2-Minderung (WtW)

5 Ausblick jenseits des betrachteten Zeitraums

Im Vorhaben „Roadmap OH-Lkw“ wurden die ersten 10 Jahre der Einführung eines O-Lkw-Systems in Deutschland modelltechnisch untersucht. Am Ende dieses Betrachtungszeitraums wird ein Oberleitungsbasisnetz von etwa 3.200 km Länge angenommen. Nach einer erfolgreichen Systemeinführung stellt dieser Zustand nicht zwingend den Endpunkt der zu erwartenden Entwicklung dar. Mit weiter fortschreitender Zeit und einem möglichen weiteren Systemausbau kommen jedoch teilweise andere Effekte zum Tragen, die nachfolgend qualitativ angerissen werden.

Die in Kapitel 3 berechneten Markthochläufe von O-Lkw basieren auf einer für O-Lkw besonders geeigneten Teilmenge der Lkw-Verkehre in Deutschland, die nur etwa 12 % der gesamten Verkehrsleistung von Nutzfahrzeugen in Deutschland umfasst (siehe Abschnitt 1.2). Für diese Teilmenge wird nach ca. 13 Jahren ein Break-even der Systemkosten erreicht (siehe Abschnitt 4.2). Von diesem Zeitpunkt an sollte das System bei unverändertem Ausbauzustand der Infrastruktur kostendeckend betrieben werden können. Zusätzliche Verkehre auf dem Basisnetz, die in den Berechnungen bislang nicht betrachtet wurden (z.B. internationale Verkehre), würden die Kostenbilanz über folgende Effekte weiter verbessern:

- Bei weiter hochlaufendem Fahrzeugmarkt sind weitere Kostendegressionen bei den Fahrzeugen möglich. Dies macht wiederum den Einsatz der Technologie auch als „Zweitantrieb“ attraktiver, also z.B. für Brennstoffzellenfahrzeuge, die nur einen relativ geringen Fahranteil auf Oberleitungsstrecken erreichen.
- Die Infrastrukturkosten können auf eine größere Menge an Nutzern umgelegt werden.

Sobald in Deutschland ein Oberleitungs-Basisnetz existiert, ändern sind auch die Voraussetzungen für eine Oberleitungs-Elektrifizierung in benachbarten Ländern. Wie attraktiv die O-Lkw-Technik dann für internationale Verkehre ist, hängt stark davon ab,

- ob auch in den Nachbarländern bereits mit dem Aufbau von Oberleitungsinfrastruktur begonnen wurde und
- welche Anstrengungen dort bis dahin bei anderen alternativen Antrieben unternommen wurden.

O-Lkw weisen systemisch bedingt signifikante Betriebskostenvorteile (v.a. Energiekosten) ggü. anderen alternativen Antrieben auf (Öko-Institut 2019). Der Grad des künftigen Einsatzes von O-Lkw hängt somit wesentlich vom weiteren Ausbau der Infrastruktur ab, der wiederum von folgenden Fragen beeinflusst wird:

- Bis zu welchem Grad ist eine Elektrifizierung der verbleibenden Autobahnen / des sekundären Straßennetzes realistisch?
- Erfolgt ein (koordinierter) Ausbau auch in anderen Ländern? Findet die O-Lkw-Technologie Eingang in EU-Strategien und -Regulierung?

Bei einem weiteren Systemausbau über das Basisnetz hinaus sinkt allerdings tendenziell die relative Auslastung des OL-Systems, was die Systemkosten pro Fahrzeugkilometer ab einem bestimmten Ausbaugrad wieder ansteigen lassen könnte. Außerdem könnten andere Technologien (z.B. Brennstoffzellensysteme oder Batterie-Lkw) dann kosteneffizienter sein und so die durch das Oberleitungssystem nicht erfasste Teilbereiche des schweren Güterverkehrs zu dekarbonisieren. Hier kommt es dann darauf an, die Synergien zwischen den komplementären Antrieben optimal zu nutzen; Möglichkeiten dazu werden unter anderem im Vorhaben „My eRoads“ untersucht. Die zukünftige technische und preisliche Entwicklung der Antriebstechnologien (O-Lkw ebenso wie Alternativen) wie auch der Güterverkehrsnachfrage spielt dabei eine zentrale Rolle, kann jedoch aus heutiger Sicht nicht sicher vorhergesagt werden. Somit kann auch noch keine Aussage über die langfristig optimale Ausdehnung eines Oberleitungsnetzes getroffen werden.

Es ist zu beachten, dass Auslegung und Kosten der Infrastruktur erheblich von den Befahrungsstärken abhängen. Insbesondere ist noch die Frage zu klären, ob eine deutliche Erhöhung der Spannungslage oder gar eine Umstellung auf Wechselspannung an der Oberleitung deutliche Effizienzgewinne des Systems verspricht und evtl. einen Betrieb oberhalb einer gewissen Befahrungsstärke erst ermöglichen könnte.

Schlussendlich ist auch der Einsatz von O-Lkw mit Umweltwirkungen verbunden. Im elektrischen Betrieb hängen die CO_2-Emissionen von der Stromerzeugung und insbesondere dem Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung ab. Die Mengenpotentiale dafür sind in Deutschland begrenzt, zudem ist der Ausbau mit Kosten und ggf. weiteren Umweltwirkungen verbunden. Auf der anderen Seite ist mit deutlich geringeren Betriebskosten von O-Lkw gegenüber Diesel-Lkw auf einem ausgebauten Oberleitungsnetz zu rechnen. Um eine dadurch induzierte Steigerung der Fahrleistung und somit einen Rebound-Effekt zu verhindern, ist es längerfristig unumgänglich, den Straßengüterverkehr insgesamt zu verteuern (z.B. im Rahmen des bestehenden Mautsystems).

Literatur

AG Energiebilanz (2019): Stromerzeugung nach Energieträgern 1990-2018 (Stand März 2019). *https://www.ag-energiebilanzen.de/*.

Agora Verkehrswende (2019): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. AGORA Verkehrswende., Berlin. *https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf* (07.05.2019).

Agora Verkehrswende (2020): Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende - Kritische Beleuchtung eines Postulats. *https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Technologieneutralitaet/33_Technologieneutralitaet_LANGFASSUNG_WEB.pdf*.

Agora Verkehrswende; Agora Energiewende; Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. *https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf* (16.01.2020).

Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.; Stock, W.; Lenz, B.; Kuhnimhof, T.; Köhler, K. (2016): Fahrleistungserhebung 2014: Begleitung und Auswertung - Schlussbericht zur Inlandsfahrleistung. Mannheim.

Berckmans, G.; Messagie, M.; Smekens, J.; Omar, N.; Vanhaverbeke, L.; Van Mierlo, J. (2017): Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. MOBI Research Group. *https://www.academia.edu/36165825/Cost_Projection_of_State_of_the_Art_Lithium-Ion_Batteries_for_Electric_Vehicles_Up_to_2030*.

BGL (2019): Dieselpreis-Information (ab Tankstelle). http://www.bgl-ev.de/images/downloads/dieselpreisinformation_tankstelle.pdf. (16.01.2020).

BMVI (2018): Richtlinie über die Förderung von energieeffizienten und/oder CO2-armen schweren Nutzfahrzeugen in Unternehmen des Güterkraftverkehrs. *https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/richtlinie-foerderung-von-energieeffizienten-nutzfahrzeugen.pdf?__blob=publicationFile* (17.12.2019).

den Boer, E.; Aanink, S.; Kleiner, F.; Pagenkopf, J. (2013): Zero emission trucks – An overview of state-of-the-art technologies and their potential.

Bundesregierung (2016): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.

Bundesregierung (2019): Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030. *https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975232/1673502/768b67ba939c098c994b71c0b7d6e636/2019-09-20-klimaschutzprogramm-data.pdf?download=1* (29.02.2020).

Bundesregierung (2020): Entwurf eines Gesetzes zur Reduzierung und zur Beendigung der Koh-leverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsge-setz). *https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesetzentwurf-kohleausstiegsgesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=6* (04.03.2020).

BVU; Intraplan; IVV; Planco Consulting (2014): Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Schlussbericht. *http://daten.clearingstelle-verkehr.de/276/1/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf* (29.01.2020).

Delgado, O.; Rodríguez, F.; Muncrief, R. (2017): Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020–2030 timeframe. In: *ICCT*.

Ding, T.; Yuan, J.; Fan, Y.-J.; Yang, Y.; Xiong, W. (2017): Tribology Behaviors of Carbon Strip/Copper Contact Wire of Pantograph/Centenary System Under Electric Current. School of Mechanical Engineering, Hubei Engineering University, Xiaogan. *https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjbj_u2-ZHoAhXK16QKHVbeDdoQFjAAegQIBxAB&url=http%3A%2F%2Fdpi-proceedings.com%2Findex.php%2Fdtetr%2Farticle%2Fdownload%2F14772%2F14287&usg=AOvVaw1KXq5FG5YBb5M3Cq2wusxn*.

EEG (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien.

ELVIS (2017): Europäischer Ladungs-Verbund Internationaler Spediteure AG.

EU-Kommission (2019): Communication on The European Green Deal. *https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf* (04.03.2020).

EU-Parlament; EU-Kommission (2019): Regulation (EU) 2019/1242 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 setting CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC.

Europäische Kommission (2018a): Effort Sharing Regulation.

Europäische Kommission (2018b): Ein sauberer Planet für alle - Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft. Brüssel. *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN* (16.03.2020).

EurotaxSchwacke (2015): Schwacke Liste Nutzfahrzeuge. IV.

Eurotransport (2015): Fernfahrer - Heft 5.

Eurotransport (2017): Lastauto Omnibus Katalog 2017.

Fraunhofer IEE (2017): Analyse eines europäischen -95%-Klimazielszenarios über mehrere Wetterjahre. *https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Jahreberichte/Auswertung_7Wetterjahre_95Prozent_final_Fraunhofer-IWES.pdf* (02.03.2020).

Fraunhofer IEE (2018): SCOPE - Sektorenübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems. *https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Broschueren/2018_F_SCOPE_Einzelseiten.pdf* (16.03.2020).

Gerhardt, N.; Scholz, A.; Hahn, H.; Schumacher, P.; Sager, C.; Bergk, F. (2015): Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr - Endbericht. Fraunhofer IWES, Kassel. *https://stiftung-umweltenergierecht.de/wp-content/uploads/2016/02/stiftungumweltenergierecht_Endbericht_EE-Strom_W%C3%A4rme-Verkehr_2015.pdf*.

Heidt, C.; Lambrecht, U.; Hardinghaus, M.; Knitschky, G. (2013): CNG und LPG –Potenziale dieser Energieträger auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Energieversorgung des Straßenverkehrs. Heidelberg, Berlin, Ottobrunn, Leipzig. *https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/mks-kurzstudie-cng-lpg.pdf?__blob=publicationFile* (17.12.2019).

Hillenbrand, T.; Toussaint, D.; Böhm, E.; Fuchs, S.; Scherer, U.; Rudolphi, A.; Hoffmann, M.; Kreißig, J.; Kotz, C. (2005): Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden - Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen. In: *Umweltbundesamt*. Vol. Forschungsbericht 202 242 220/02, No.Texte 19-05.

IEA (2017): World Energy Outlook.

ifeu (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018) – Berichtsteil „TREMOD“. Heidelberg.

ifeu; Öko-Institute; RISE Research Institutes of Sweden; Intraplan Consult GmbH (2020): Connecting countries by Electric Roads - Feasibility Analysis of a Swedish-German ERS corridor.

INFRAS; ifeu; TU Graz (2019): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 4.1. *http://www.hbefa.net/*.

ISI (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Karlsruhe. *https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/studie-potentiale-hybridoberleitungs-lkw.pdf?__blob=publicationFile*.

ISI; consentec; ifeu (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4. (02.03.2020).

Jöhrens, J.; Rücker, J.; Helms, H.; Schade, W.; Hartwig, J. (2018): Roadmap OH-Lkw: Hemmnisanalyse. *https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Roadmap-OH-Lkw_Hemmnisanalyse.pdf*.

Jöhrens, J.; Rücker, J.; Kräck, J.; Allekotte, M.; Jamet, M.; Keller, M.; Lambrecht, U.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.; Veres-Homm, U.; Schwemmer, M.; Scs, F.-A. (2018): Roadmap

OH-Lkw: Potentialanalyse 2020-2030. *https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/2018-12-20-ifeu-PTV-SCS-Potentialanalyse-Roadmap-OH-Lkw.pdf*.

KBA (2010): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) - Verkehrsaufkommen Jahr 2009.

KBA (2012): Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD) - Verkehrsaufkommen Jahr 2011.

Knupfer, S.; Hensley, R.; Hertzke, P.; Schaufuss, P.; Laverty, N.; Kramer, N. (2017): Electrifying insights: How automakers can drive electrified vehicle sales and profitability. McKinsey Advanced Industries. *https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/electrifying%20insights%20how%20automakers%20can%20drive%20electrified%20vehicle%20sales%20and%20profitability/how%20automakers%20can%20drive%20electrified%20vehicle%20sales%20and%20profitabilitymck.ashx*.

Kolwich, G. (2013): Light-Duty Vehicle Technology Cost Analysis – European Vehicle Market. FEV, Auburn Hills. *https://theicct.org/sites/default/files/ICCT%20Phase%201%20Revised%20Final%20Report_Trans_%20080713B.pdf*.

Kräck, J.; Jöhrens, J.; Helms, H. (2015): Ermittlung des realitätsnahen und nutzerspezifischen Energieverbrauchs aktueller Elektrofahrzeuge auf Basis individueller Fahrprofile und standardisierter Messdaten. In: *Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement VI*. Haus der Technik Fachbuch expert-Verlag, Renningen. S. 177–190.

Kriegler, E.; Luderer, G.; Bauer, N.; Baumstark, L.; Fujimori, S.; Popp, A.; Rogelj, J.; Strefler, J.; van Vuuren, D. (2018): Pathways limiting warming to 1.5°C: a tale of turning around in no time? *https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.2016.0457*.

Kühnel, S.; Hacker, F.; Görz, W. (2018): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Öko-Institut, Berlin. *https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-09/Teilbericht%201%20O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf*.

Lambert, F. (2016): Tesla confirms base Model 3 will have less than 60 kWh battery pack option, cost is below $190/kWh and falling. *https://electrek.co/2016/04/26/tesla-model-3-battery-pack-cost-kwh/*.

Laslau, C. (2015): Crossing the Line: Li-ion Battery Cost Reduction and Ist Effect on Vehicles and Stationary Storage. Lux Research.

Mareev, I.; Sauer, D. (2018): Energy Consumption and Life Cycle Costs of Overhead Catenary Heavy-Duty Trucks for Long-Haul Transportation. ISEA, Aachen. *https://publications.rwth-aachen.de/record/752194/files/752194.pdf*.

Meszler, D.; Delgado, O.; Rodriguez, F.; Muncrief, R. (2018): European Heavy Duty Vehicles: Cost-effectiveness of fuel-efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2025–2030 timeframe. In: *ICCT*.

MWV (2019): Ölpreis - Monatliche Kraftstoffpreise - Tankstellenbestand. In: *MWV – Mineralölwirtschaftsverband e.V.*

Norris, J.; Escher, G.; Energy, R. (2017): Heavy Duty Vehicles Technology Potential and Cost Study. In: *Final Report for the International Council on Clean Transportation*. No.5.

Nykvist, B.; Nilsson, M. (2015): Rapidly falling cost of battery packs for electric vehicles. Nature Climate Change 5. S. 329–322.

von Oehsen, A. (2012): Entwicklung und Anwendung einer Kraftwerks- und Speichereinsatzoptimierung für die Untersuchung von Energieversorgungsszenarien mit hohem Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland. *https://kobra.uni-kassel.de/bitstream/handle/123456789/2013050742706/DissertationAmanyVonOehsen.pdf;sequence=5* (16.03.2020).

Öko-Institut (2019): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050 - Abschlussbericht.

Öko-Institut; Hochschule Heilbronn; Fraunhofer IAO; Intraplan (2020): Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. *https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Endbericht.pdf* (25.02.2020).

Schiffler, A.; Ebert, M. (2017): Mittelfristprognose zur deutschlandweiten Stromabgabe an Letztverbraucher 2018 bis 2022. In: *TransnetBW GmbH*.

Schmidt, O.; Hawkes, A.; Gambhir, A.; Staffell, I. (2017): The future cost of electrical energy storage based on experience rates. *https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/50848/10/20170620_FINAL_ExpCurves_Main.pdf*.

Senatsverwaltung Berlin (2019): Luftreinhalteplan für Berlin - 2. Fortschreibung.

Siemens - Mobility Division; TU Dresden - Fakultät Verkehrswissenschaften “Friedrich List”; DLR - Institut für Verkehrssystemtechnik (2016): ENUBA 2-Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zurUmweltentlastung von Ballungsräumen. https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2016-09/ENUBA2_Abschlussbericht_V3_TIB_31-08-2016.pdf. (11.03.2020).

Trost, T. (2016): Erneuerbare Mobilität im motorisierten Individualverkehr: Modellgestützte Szenario Analyse der Marktdiffusion alternativer Fahrzeugantriebe und deren Auswirkungen auf das Energiever-sorgungssystem. Stuttgart.

TruckScout24 (2017): LKW, Transporter, Baumaschinen & Wohnwagen. https://www.truckscout24.de/. (14.01.2020).

United Nations Environment Programme (2019): The emissions gap report 2019.

Zhiyong, W.; Fengyi, G.; Zhonghua, C.; Aixia, T.; Zhiling, R. (2013): Research on Current-Carrying Wear Characteristics of Friction Pair in Pantograph Catenary System.

Anhang

A1: Eingangsgrößen und Annahmen

Verkehrsnachfrage (PTV Validate)

Die Aufbereitung der Verkehrsnachfrage im Güterverkehr im Verkehrsmodell Validate wurde hinsichtlich den Güterabteilungen und den Fahrzeuggrößen differenziert. Die folgende Tabelle zeigt den Überblick über die verwendeten Güterabteilungen analog der Verwendung im Rahmen der Bundesverflechtungsprognose 2030 des Bundes.

Tabelle 5-1: Verwendete Güterabteilungen

Nr	Güterabteilung
1	Erzeugnisse der Land- und Forstwirtschaft sowie der Fischerei
2	Kohle, rohes Erdöl und Erdgas
3	Erze, Steine und Erden, Bergbauerzeugnisse
4	Nahrungs- und Genussmittel
5	Textilien und Bekleidung; Leder und Lederwaren
6	Holzwaren, Papier, Pappe Druckerzeugnisse
7	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse
8	Chemische Erzeugnisse
9	Sonstige Mineralerzeugnisse (Glas, Zement, Gips et ceterra)
10	Metalle und Metallerzeugnisse
11	Maschinen und Ausrüstungen, Haushaltsgeräte et ceterra
12	Fahrzeuge
13	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte et ceterra
14	Sekundärrohstoffe, Abfälle
15	Post, Pakete
16	Geräte und Material für die Güterbeförderung
17	Umzugsgut und sonstige nichtmarktbestimmte Güter
18	Sammelgut
19	Gutart unbekannt

Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung des Güterverkehrsaufkommens je Verkehrsträger und Gütergruppe entsprechend der Grundlagen der Bundesverflechtungsprognose 2030 (BVU et al. 2014).

Gütergruppe		Verkehrsmenge in 1.000 t				Anteil in %			
		Schiene	Straße	Schiff	Summe	Schiene	Straße	Schiff	Summe
10	Land- und forstwirtsch. Erzgn.	7.585	184.644	15.909	208.137	2,1	5,9	6,9	5,6
21	Steinkohle	30.401	3.830	32.161	66.391	8,5	0,1	14,0	1,8
22	Braunkohle	9.061	3.599	1.452	14.112	2,5	0,1	0,6	0,4
23	Erdöl und Erdgas	547	1.212	765	2.524	0,2	0,0	0,3	0,1
31	Erze	20.404	750	27.829	48.983	5,7	0,0	12,1	1,3
32	Düngemittel	1.949	4.115	672	6.736	0,5	0,1	0,3	0,2
33	Steine und Erden	27.299	862.324	31.575	921.198	7,6	27,7	13,8	24,9
40	Nahrungs-und Genussmittel	2.120	341.735	11.453	355.308	0,6	11,0	5,0	9,6
50	Textilien, Bekleidung, Leder	28	21.053	55	21.136	0,0	0,7	0,0	0,6
60	Holzwaren, Papier, Papier, Druckerei	9.756	166.411	3.734	179.902	2,7	5,3	1,6	4,9
71	Koks	6.508	7.054	2.369	15.931	1,8	0,2	1,0	0,4
72	Mineralölerzeugnisse	37.961	90.553	33.466	161.980	10,6	2,9	14,6	4,4
80	Chemische Erzeugnisse	29.910	167.522	21.359	218.791	8,3	5,4	9,3	5,9
90	Sonstige Mineralerzeugnisse	11.143	322.070	4.619	337.833	3,1	10,3	2,0	9,1
100	Metalle und Metallerzeugnisse	61.923	174.017	11.580	247.520	17,3	5,6	5,0	6,7
110	Maschinen und Ausrüstungen etc	840	76.038	667	77.545	0,2	2,4	0,3	2,1
120	Fahrzeuge	9.539	91.409	854	101.802	2,7	2,9	0,4	2,7
130	Möbel, Schmuck, Musikinstru-mente etc	53	20.913	152	21.119	0,0	0,7	0,1	0,6
140	Sekundärrohstoffe, Abfälle	15.231	253.961	13.277	282.469	4,2	8,1	5,8	7,6
150	Post, Pakete	0	35.167	0	35.167	0,0	1,1	0,0	0,9
160	Geräte und Material für Güteförd.	3.591	87.054	1.774	92.420	1,0	2,8	0,8	2,5
170	Umzugsgut	53	39.102	4	39.159	0,0	1,3	0,0	1,1
180	Sammelgut	1.800	114.782	0	116.582	0,5	3,7	0,0	3,1
190	Gutart unbekannt	71.240	46.815	13.881	131.936	19,8	1,5	6,0	3,6
200	Sonstige Güter ..	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SUMME	358.945	3.116.131	229.607	3.704.683	100,0	100,0	100,0	100,0

Abbildung 5-1: Güterverkehrsaufkommen je Güterabteilung und Verkehrsträger. Quelle: (BVU et al. 2014)

Für die Aufteilung des Lkw-Verkehrs auf Lkw-Größenklassen wurde die vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) verwendet Einteilung eingesetzt:

- 3,5-7,5t zul. Gesamtgewicht
- 7,5-12t zul. Gesamtgewicht
- 12-26t zul. Gesamtgewicht
- Sattelzüge.

Die Lkw <3,5t zGG bleiben bei der weiteren Verwendung im Rahmen des Güterverkehrs unberücksichtigt.

Für jeden Fahrzeugtyp und für jede Güterabteilung wurde eine Bewertungsfunktion ermittelt. Berücksichtigt wurde bei der Wahl des Fahrzeugtyps neben der zurückzulegenden Strecke vor allem die Eigenschaften der jeweiligen Güterabteilungen, sodass der Anteil der einzelnen Fahrzeugtypen an der Transportleistung variiert. Aufbauend auf den Grundlagen der Verflechtungsdaten erfolgte die Umrechnung der transportierten Tonnen-Strömen zu ein-

zelnen Fahrten. Dazu wurden die mittlere Nutzlast und Auslastung eines Fahrzeugtyps ermittelt. Die Nutzlast unterscheidet sich dabei geringfügig je nach transportierter Güterabteilung. Die Nutzlast wurde abgeschätzt anhand von Auswertungen der KBA-Statistiken zu zulässigem Gesamtgewicht und Nutzlast, die Auslastung wurde der KBA-Statistik entnommen (siehe Abbildung 5-2).

Zul. Gesamtgewicht	Nutzlast	Auslastung [KBA 2010 VD 1]
3,5 – 7,5 t	2,2	0,437
7,5 – 12 t	4,3	0,518
12- - 26 t	11	0,531
Sattelzüge	26	0,638

Abbildung 5-2: Nutzlast und Auswertung

In Abhängigkeit der Fahrtenlänge erfolgte zudem die Anpassung der Matrizen aufgrund von Leerfahrten. Gemäß der nachfolgenden Abbildung wurde das Fahrtenaufkommen je nach Distanz differenziert erhöht.

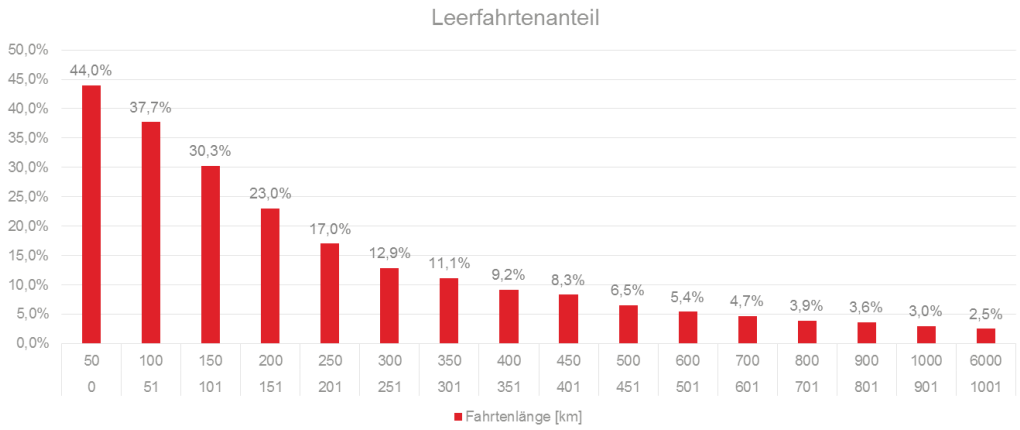


Abbildung 5-3: Leerfahrtenanteile gemäß (KBA 2012)

Zur Prüfung der Aufteilung der transportierten Güter auf die Fahrzeugtypen wurde ein Abgleich der Transportleistung mit den statistischen Daten des KBA durchgeführt. Die folgende Abbildung 5-4 zeigt eine sehr gute Anpassung der Berechnungsergebnisse an die statistischen Daten.

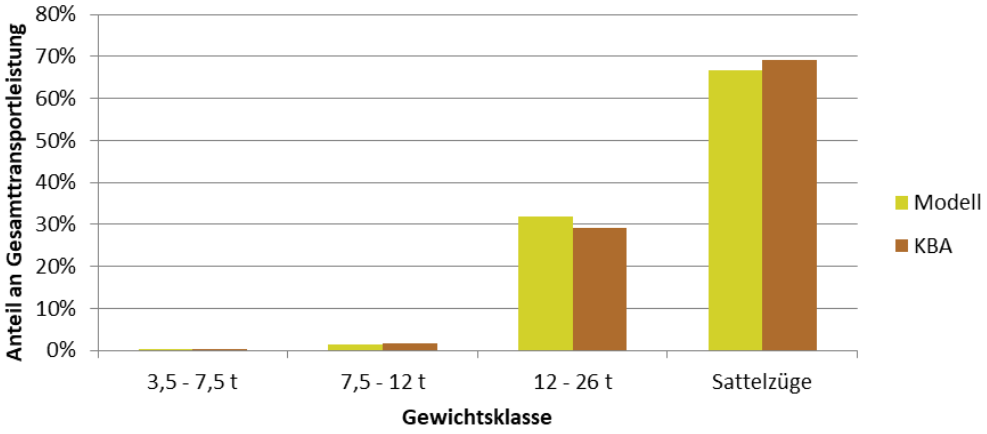


Abbildung 5-4: Anteile der Fahrzeugtypen an der Transportleistung (KBA 2010)

Dieses Ergebnis wird bestätigt durch den Abgleich auf Basis der Güterabteilungen. Daraus kann abgeleitet werden, dass sowohl die Aufteilung auf die Fahrzeugtypen als auch die Umsetzung der Nutzlast und Auslastungsgrade zu einem Ergebnis geführt hat, das mit den statistischen Daten vergleichbar ist.

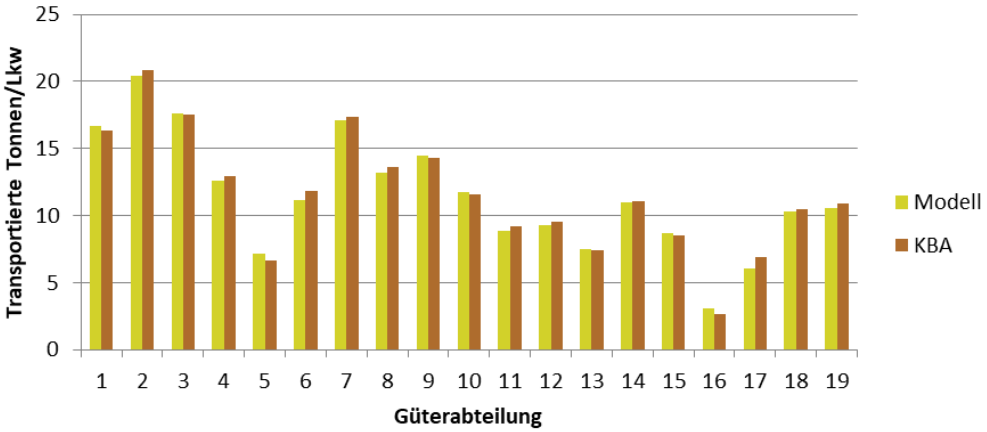


Abbildung 5-5: Transportierte Tonnen je Lkw und je Güterabteilung (KBA 2010)

Fahrzeuge – Technologie

Die folgenden Fahrzeugkonfigurationen werden für die Modellierung der Kosten als auch Verbräuche angenommen. Angegeben sind die Eckdaten für das Jahr 2020, jedoch werden Verbesserungen der Fahrzeugkennwerte über den Betrachtungszeitraum angenommen. Die Verbesserungen betreffen sowohl die Fahrwiderstände als auch die Wirkungsgrade der Komponenten und stammen aus (Delgado et al. 2017) und (Norris et al. 2017). Bei den konventionellen Fahrzeugen werden bis 2030 weder eine Hybridisierung noch eine aufwändige Wärmerückgewinnung (abseits einer gewöhnlichen Turboaufladung) angenommen.

Tabelle 5-2: Betrachtete Fahrzeugkonfiguration (Baseline 2020)

Konventioneller Lkw	O-HEV	O-BEV
• Sattelzugmaschine (zGG des gesamten Zuges = 40t) • Ohne große Schlafkabine • c_WA-Wert (Zugmaschine)[1]: 4,02 m² • mittl. Rollwiderstandsbeiwert: 0.0055 • Beladung: 50 % Auslastung		
• Leistungsbereich: 440-500 PS • Ohne Hybridantrieb	• Leistungsbereich: 420 kW_{el} • Batteriekapazität: 15 kWh	• Leistungsbereich: 420 kW_{el} • Batteriekapazität: 90-500 kWh

Aus den Verbrauchssimulationen ergeben sich die folgenden Verbräuche. Es werden sowohl die mittleren Verbräuche aller Relationen als auch die Extramwerte bezogen auf die Streckenabschnitte angegeben.

Tabelle 5-3: Diesel- und Stromverbräuche in l_{Diesel}/100km bzw. kWh_{el}/100km

		2020	2030
Konventioneller Diesel-Lkw		**Ø31,4 l/100km** **26,8-35,8 l/100 km**	**Ø27,2 l/100km** **23,2-30,9 l/100 km**
O-HEV	**Strommodus**	**Ø129 kWh/100km** **110-147 kWh/100km**	**Ø121 kWh/100km** **104-138 kWh/100km**
	Hybridmodus	**Ø27,8 l/100km** **23,8-31,7 l/100 km**	**Ø24,3 l/100km** **20,7-27,6 l/100 km**
O-BEV	**Oberleitungsmodus**	**Ø128 kWh/100km** **109-145 kWh/100km**	**Ø120 kWh/100km** **102-136 kWh/100km**
	Batteriemodus	**Ø116 kWh/100km** **99-132 kWh/100km**	**Ø106 kWh/100km** **91-121 kWh/100km**

Quelle: Berechnungen aus VEHMOD

Fahrzeuge - Kosten

Der angesetzte Kaufpreis der konventionellen Sattelzugmaschine ist als Nettopreis gegeben und wird auf Basis von (Eurotransport 2015) und (Eurotransport 2017) auf rund 98.000 $€_{2017}$ taxiert.

[1] Im Fall von O-Lkw wird beim Oberleitungsbetrieb ein erhöhter Wert für den ausgefahrenen Pantographen berücksichtigt.

Der Fahrzeugpreis der Oberleitungs-Fahrzeuge errechnet sich aus dem Preis des konventionellen Fahrzeugs zzgl. einer Preiserhöhung durch die notwendigen Zusatzkomponenten. Der Preis der Zusatzkomponenten wird über die Produktionskosten multipliziert mit dem „Retail Price Equivalent Factor“ ermittelt; siehe folgende Gleichung. Das „Retail Price Equivalent“ wird hier nach (den Boer, 2013) auf 1,53 festgesetzt.

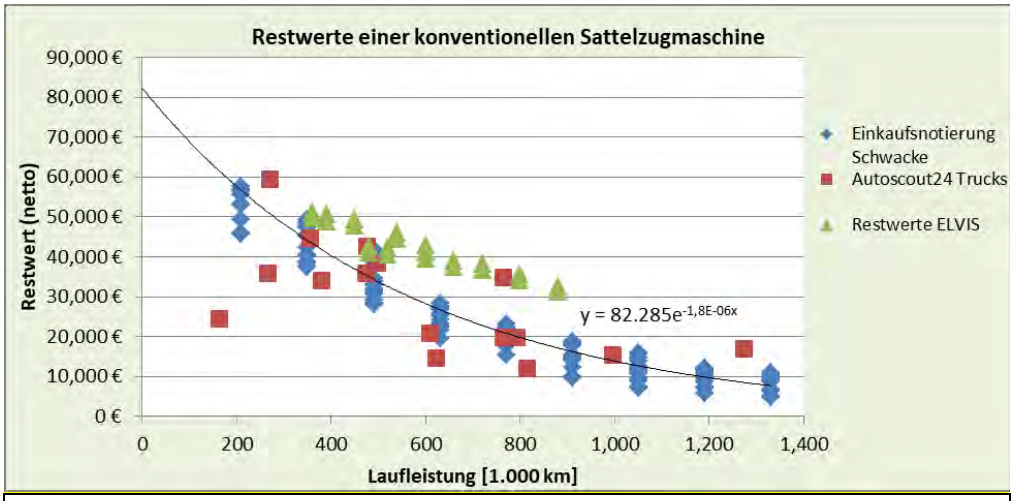
$$Fahrzeugpreis_{O-Lkw} = Fahrzeugpreis_{Konventionell} + 1{,}53 \cdot Produktionskosten_{Zusatzkomponente}$$

Bei der Kostendegression wird angenommen, dass ein Übergang von einer Kleinserienproduktion im Jahr 2020 zu einer Massenproduktion im Jahr 2030 vollzogen wird.

Tabelle 5-4: Kaufpreis der O-HEV für die Jahre 2020 und 2030 in $€_{2017}$

	Quelle	2020	2030
Basisfahrzeug	(Eurotransport 2017)	*98.000 €*	*98.000 €*
		+ 1,53 · …	
Elektromotor	(den Boer et al. 2013)	*17,5 €/kW$_{el}$*	*16,4 €/kW$_{el}$*
Akku	(Nykvist / Nilsson 2015), (Laslau 2015), (Berckmans et al. 2017), (Lambert 2016), (Gerhardt et al. 2015), (Schmidt et al. 2017), (IEA 2017), (Knupfer et al. 2017)	*199 €/kWh*	*89 €/kWh*
Leistungselektronik/ Batteriemanagement	(den Boer et al. 2013)	*17,5 €/kW$_{el}$*	*14,2 €/kW$_{el}$*
Stromabnehmer	(den Boer et al. 2013)	*25.500 €*	*10.900 €*
Leistungsübertragung, Kupplung, regenerative Bremsen, Karosserie, Klimatisierung	(Kolwich 2013)	*480 €*	*350 €*
		4,6 €/kW$_{el}$	*3,3 €/kW$_{el}$*
		=	
Kaufpreis O-HEV		**138.000 €** **+62 €/kW$_{el}$** **+310 €/kWh**	**115.000 €** **+52 €/kW$_{el}$** **+140 €/kWh**

Der Preis von O-BEV (exkl. Batterie) im Jahr 2025 wird aus (Kühnel et al. 2018), (Gerhardt et al. 2015) und (Mareev / Sauer 2018) verwendet. Der Mittelwert der Quellen ergibt einen Fahrzeugpreis (exkl. Batterie) von 119.500 $€_{2017}$. Die Fahrzeugpreisentwicklung über die Zeitache wird analog zum O-HEV angenommen und es werden dieselben Preise für die Batterien angesetzt. Der Wertverlust der Fahrzeuge ist in der folgenden Abbildung angegeben. Der prozentuale Wertverlust eine O-Lkw bezogen auf den Neufahrzeugpreis entspricht dem eines konventionellen Fahrzeugs. Die Abschreibung der Batterie erfolgt gleichmäßig über 400.000 km. Der Wertverlust wird auf die Fahrleistung umgelegt.



$$Restwert_{O-Lkw}\ [€] = 82.285 \cdot e^{-1{,}8*10^{-6} \cdot Laufleistung\ [km]} \cdot \frac{Kaufpreis_{O-Lkw}}{Kaufpreis_{Diesel}}$$

Quellen: (EurotaxSchwacke 2015), (TruckScout24 2017), (ELVIS 2017)

Abbildung 5-6: Angenommener Wertverlust der Fahrzeuge

Für die Optimierung werden die TCO in fixe (jährliche) und variable (kilometerspezifische) Kosten aufgeteilt. Die beiden folgenden Tabellen geben alle betrachteten Kostenpunkte für die Jahre 2020 und 2030 an. Hinzu kommt noch der Kostenpunkt „Energie“.

Tabelle 5-5: Fixe Betriebskosten für die Jahre 2020 und 2030 in $€_{2017}$/a

	Diesel-Lkw	O-HEV	O-BEV
Finanzierungskosten	1.500	3.050 (2020) 2.410 (2030)	3.550 (2020) 2.340 (2030)
Kfz-Steuer	560		
Haftpflicht- & Kaskoversicherung	6.090 (2020) 6.070 (2030)	7.010 (2020) 6.980 (2030)	
Unterstellung/Garage	1.140 (2020) 1.100 (2030)		
Fuhrparkverwaltungskosten	8.620		
Prüfgebühren	200 (2020) 220 (2030)		

Quelle: (Eurotransport 2017)

Tabelle 5-6: Variable Betriebskosten für die Jahre 2020 und 2030 in ct_{2017}/100km

	Konventionell	O-HEV	O-BEV
Fahrzeug – Abschreibung (Wertverlust)*	12,36	23,22 (2020) 18,69 (2030)	43,50 (2020) 26,16 (2030)
Schmierstoffkosten	0,77 (2020) 0,89 (2030)	0,58 (2020) 0,67 (2030)	0,00
Reifenkosten	2,26	2,28	
Reparatur, Wartung und Pflege	10,57 (2020) 12,15 (2030)		
Maut	18,70	17,60**	
Fahrerkosten	24,25 (2020) 27,63 (2030)		
Harnstoffe	0,84 (2020) 0,56 (2030)	0,45 (2020) 0,30 (2030)	0,00

*Anmerkungen: *O-BEV-Wert variiert je nach Batteriekapazität, **außer bei Szenario „+el. Mautbefreiung"; Quellen: eigene Berechnungen und (Eurotransport 2017)*

Infrastruktur

Bei der Auslegung der Infrastruktur wird von einem Spannungsniveau von 600 V und einem maximalen Leistungsbezug pro Lkw von 200 kW ausgegangen. Die benötigte elektrische Traktionsleistung von Sattelzugmaschinen liegt im Mittel bei etwa 130 kW und kann bei Strecken mit einem hohen Steigungsanteil auch deutlich höher liegen (siehe Dokumentation der Energieverbrauchsmodellierung in Anhang A2). Im Mittel stehen somit etwa 70 kW zur Verfügung, um die Traktionsbatterie während der Fahrt unter Oberleitung zu laden.

Die Maximallast pro Speiseabschnitt der Oberleitungsinfrastruktur ergibt sich dann über die maximale Anzahl der Lkw auf dem Speiseabschnitt multipliziert mit der maximalen Leistung von 200 kW pro Lkw. Auf Grundlage eines Mindestabstands von 50 m zwischen zwei Fahrzeugen sind bei stetigem Verkehrsfluss maximal etwa 30 Lkw pro km zu erwarten. Dies wurde für die Modellierung (im Sinne eines konservativen Ansatzes) als Auslegungsgrundlage gewählt, auch wenn die modellierten Befahrungsstärken im Betrachtungszeitraum in der Regel deutlich niedriger waren.

Bei Stau oder stockendem Verkehr können die Abstände auch geringer sein und es können dann beim Anfahren ggf. Leistungsspitzen auftreten. Die resultierenden Effekte werden hier nicht vertieft untersucht. Allgemein ist bei Energieversorgungssystemen eine kurzfristige Überlastung in der Regel unkritisch. Gegebenenfalls sind Maßnahmen zum lokalen Lastmanagement der Fahrzeuge erforderlich, um lokale Überlastungen auf einzelnen Speiseabschnitten zu verhindern.

Bezüglich der Auslegung (und teilweise auch der spezifischen Komponentenkosten) der Oberleitungsinfrastruktur wird auf Ergebnisse des Fraunhofer IEE im gleichen Projekt zurückgegriffen, die in einem separaten Bericht dokumentiert werden. Die Investitionskosten für die Einspeisepunkte pro km betragen demnach rund 29.000 € und ergeben sich aus dem spezifischen Kosten von 15.000 €/Einspeisepunkt (ISI 2017) und einem Abstand der Einspeisepunkte von 520 m. Für die Zuleitungen sind Investitionskosten von 24.000 € pro km angesetzt. Die Kosten der Umspannstationen werden mit 670.000 €/km angenommen und ergeben sich aus dem o. g. Leistungsbedarf, einem cos(φ)=0,9, Verlusten von 5 % und leistungsspezifische Kosten pro Umspannstation von 50.000 €/MVA. Die Kosten für die Masten, den Fahrdraht, die Planung und die Instandhaltung werden aus (ISI 2017) übernommen.

Um die Investitionskosten auf ein Jahr zu beziehen, werden zusätzlich die Abschreibedauern der Komponenten benötigt. Diese werden ebenfalls aus (ISI 2017) genommen. Die Planungskosten werden auf 40 Jahre abgeschrieben (eigene Annahme).

Die folgende Tabelle fasst die Kosten für einen elektrifizierten Autobahnkilometer (beidseitig) zusammen:

Tabelle 5-7: Annahmen für die spezifischen Kosten der Oberleitungsinfrastruktur

Kostenpunkt	Investitions-kosten [€/km]	Abschreibungs-dauer [a]	Abschreibungs- und Instand-haltungskosten [€/km/a]
Einspeisepunkt	29.000*	40	700
Zuleitung	24.000*	35	700
Umspannstation	670.000*	30	22.300
Masten	400.000	40	10.000
Fahrdraht	600.000	Abhängig von der Befahrungsstärke (s. u.)*	
Planung (10 % der Investition)	172.000	40*	4.300
Instandhaltung (2 % der Investition)	/	/	34.500
Summe	**1.895.000 €/km**		**72.600 €/km/a zzgl. Kosten für Fahrdrahtabnutzung**

*Anmerkung: *eigene Annahmen*

Die Abschreibedauer des Fahrdrahts ist in (ISI 2017) mit 7 Jahren gegeben. Hierzu wurde eine eigene Berechnung durchgeführt, und zwar unter Berücksichtigung der in den Szenarien dieser Studie auftretenden O-Lkw-Befahrungsstärken. Die Berechnungen ergeben, dass eine Fahrdrahterneuerung nach ca. 3,3 Mio. Befahrungen nötig wird. Bei einer Befahrungsstärke von knapp 1.200 O-Lkw pro Tag, was in etwa dem sich in den Szenarien ergebenden Maximalwert für das betrachtete Basisnetz und die berücksichtigten Relationen im Jahr 2030 entspricht, ergibt sich eine Lebensdauer des Fahrdrahts von etwa 7,5 Jahren. Dieser Wert deckt sich gut mit der Annahme aus (ISI 2017). Bei 300.000 € pro Richtung und km für den Fahrdraht und einer Lebensdauer von 3,3 Mio. Befahrungen resultieren zusätzliche umgelegte Kosten pro Streckenkilometer von 9,1 ct pro Fahrzeugkilometer. Für die Berechnung der verschleißbedingten Kosten und Umweltwirkungen durch den Fahrdraht wurden in den Berechnungen stets die modellierten Befahrungsstärken zugrunde gelegt.

Vergleicht man die Infrastrukturkosten mit der im Rahmen der MKS durchgeführten Machbarkeitsstudie zu O-Lkw (ISI 2017), so liegen die Investitionskosten am unteren Rand der

dort genannten Bandbreite von 1,5-4,4 Mio. €. Anzumerken ist, dass die hohen Werte durch einen sehr hohen Leistungsbedarf gekennzeichnet ist, der in der vorliegenden Studie nicht angenommen wird, da der Leistungsbezug der Lkw hier begrenzt angenommen wird.

Fahrdrahtabnutzung

Die Fahrdrahtabnutzung ist bezogen auf die Infrastrukturkosten eine kritische Größe. Viele Einflussfaktoren bestimmen den Verschleiß. Um den Abrieb des Materials zu ermitteln, werden die folgenden Größen verwendet:

- Normalkraft auf den Fahrdraht [N]
- Stromstärke [A]
- Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]

(Zhiyong et al. 2013) gibt den Abrieb [g/km] in Abhängigkeit der Geschwindigkeit [km/h] und der Stromstärke [A] an. Die Eingangsgrößen sind hier mit 80 km/h und 333 A gegeben, wobei die Stromstärke sich aus der angenommenen maximalen Entzugsleistung von 200 kW und dem Spannungsniveau von 600 V errechnet. Für diese beiden Werte ergibt sich ein Abrieb von 38,1 mg/km. Dieser Wert gilt jedoch nur für eine Normalkraft von 70 N. Da bei O-Lkw jedoch höhere Kräfte zu erwarten sind, ist dieser Abrieb zu korrigieren. In (Ding et al. 2017) erfolgt die Ermittlung des Abriebs in Abhängigkeit der Stromstärke und der Normalkraft. Die Kraft wird hier mit 120 N angesetzt (S. 78 in (Siemens - Mobility Division et al. 2016) blauer Wert). Bezogen auf die Normalkraft von 70 N (aus der ersten Quelle) ergibt sich bei einer Kraft von 120 N ein Abrieb, der um den Faktor 2,37 höher ist (bei einer Stromstärke von 333 A). Hieraus ergibt sich ein Abrieb an einem Fahrdraht von 90,2 mg/Fzg-km.

(Siemens - Mobility Division et al. 2016) gibt eine Querschnittsfläche eines Fahrdrahts von 120 mm² an. Eine Auswechslung des Fahrdrahts sollte nach (maximal) 15 % Reduktion des Durchmessers erfolgen (Hillenbrand et al. 2005). Bei einer Dichte von rund 8,9 mg/mm³ und der angenommenen Querschnittsfläche und Durchmesserreduktion folgt eine nötige Erneuerung bei einer Abtragung von 296,4 kg/km. Somit ergibt sich eine Erneuerung nach 3,3 Mio. Fzg-km (was bezogen auf einen Streckenkilometer den Befahrungen entspricht).

Energie

Die Dieselpreisentwicklung basiert auf dem Reference Technology Scenario der IEA und Statistiken von (MWV 2019) und (BGL 2019). Die folgende Tabelle gibt einen Überblick der abgeleiteten Kostenstellen für den Dieselpreis. Es wird angenommen, dass aufgrund des unterstellten Pendelbetriebs überwiegend an Tankstellen auf Betriebshöfen getankt werden kann und daher Großabnehmerrabatte gewährt werden, die ebenfalls aus den Statistiken abgeleitet sind. Es wird angenommen, dass die Energiesteuer und der Großabnehmerrabatt real konstant bleibt. Die Preise der Zwischenjahre werden linear interpoliert.

Tabelle 5-8: Dieselpreisannahmen

ct_{2017}/l	2020	2030
Deckungsbeitrag	15,54	18,19
Produktbeschaffung	46,88	60,49
Energiesteuer	47,04	47,04
Großabnehmerrabatt	-7,06	-7,06
Dieselpreis	102,4	118,7

Im Szenario „+CO2-Preis“ wird ein CO_2-Preis von 90 €/t im Jahr 2030 angesetzt, wodurch hier der Dieselpreis in diesem Jahr bei 141,7 ct/l liegt. Es erfolgt ebenfalls eine lineare Interpolation für die Zwischenjahre.

Beim Kostenvergleich Einsatz PtL zu Oberleitungstechnologie (siehe Abschnitt 4.8) werden die PtL-Preise für Nord-/Ostseestrom aus (Agora Verkehrswende et al. 2018) verwendet. Diese Preise liegen bei 259,2 ct/l und 195,9 ct/l für die Jahre 2020 bzw. 2030.

Die Strompreise beruhen Annahmen, die im Rahmen dieses Projekts durch Fraunhofer IEE erarbeitet wurden. Die folgenden Abbildung zeigt den Strompreis differenziert nach Kostenstellen. Zusätzlich wird der Gesamtstrompreis für das Szenario „+EEG-Ermäßigung“ angegeben. Die Preise gelten für den Strombezug ab Mittelspannung. Eine zusätzliche Bepreisung der Verluste an der Oberleitung wird nicht angenommen. Die Verluste zwischen dem Einspeisepunkt Mittelspannung und dem Stromabnehmer werden mit 5 % angenommen.

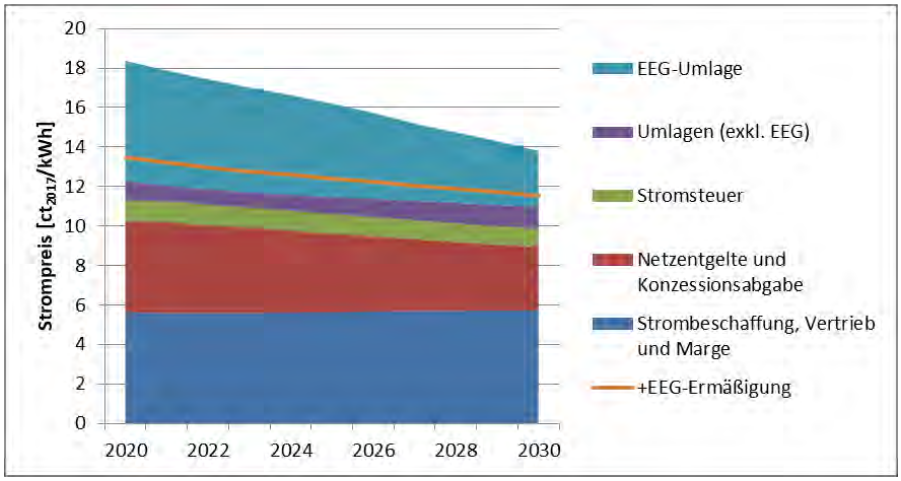


Abbildung 5-7: Strompreisannahmen für den Zeitraum 2020-2030

A2: Dokumentation der Modellkomponenten

Relationsdaten (PTV Validate)

PTV Validate ist ein deutschlandweites Straßenverkehrsmodell mit Berücksichtigung des europäischen Bezugs. Verkehrsmengen und Verkehrsströme werden getrennt für Pkw und Lkw abgebildet. Somit können auch für Teilgebiete/Regionen und einzelne Streckenabschnitte Analysen durchgeführt werden.

Das PTV Validate-Modell differenziert die Verkehrsnachfrage räumlich in über 10.000 Verkehrszellen, auf ca. 5,6 Millionen Einzelstrecken (basierend auf den kontinuierlich aktualisierten Navigationsnetzen von HERE) und bildet circa 120 Millionen tägliche Fahrten ab. Die Verkehrszellen orientieren sich an den administrativen Grenzen und werden im Schnitt über vier bis acht Anbindungen mit dem Streckennetz verbunden. Im Modell ist ein umfangreicher Strukturdatensatz verarbeitet, der neben Einwohnern u.a. auch Schulen und Arbeitsplätze umfasst. Im Güterverkehr basieren die Verflechtungen auf den Grundlagendaten des Kraftfahrtbundesamtes, ergänzt um eine lokale Differenzierung bezüglich der Aufkommens- und Produktionsschwerpunkte. Zur gütergruppenspezifischen Aufbereitung werden zudem die Daten Verflechtungsprognose des BMVI für die Analyse- und Prognsoesituation verwendet.

Das Gesamtmodell bildet das Mobilitätsprogramm der Bevölkerung und der Unternehmen Deutschlands im motorisierten Individualverkehr und im straßenbezogenen Güterverkehr nach. Im Güterverkehr werden die Warentransporte je Güterabteilung unter Verwendung von entfernungsabhängigen Widerstandsfunktionen und Auslastungsgraden in Fahrzeugbewegungen umgerechnet. Dabei werden die Lkw nach Größenklassen aufgeteilt. Die so entstehenden Lkw-Fahrten werden über Einspeisungspunkte in das Netzmodell aufgebracht. Die Routenwahl erfolgt dabei getrennt vom Pkw-Verkehr.

In der Überlagerung der Einzelfahrten für Pkw und Lkw bezogen auf Deutschland ergeben sich tägliche Verkehrsmengen auf allen relevanten Straßen des deutschen Streckennetzes. Dieses umfasst neben dem klassifizierten Netz auch alle innerstädtischen Strecken mit Verbindungsfunktion. Der Transitverkehr sowie der Quell- und Zielverkehr Deutschlands werden im europäischen Kontext ergänzt. Kalibriert und validiert wird das Modell unter Verwendung von Zähldaten im Straßennetz. Unter Zugrundelegung der Verflechtungsprognose 2030 kann neben dem Status quo auch das Szenariojahr 2030 im deutschen Straßennetz analysiert werden.

In der vorliegenden Analyse wurde PTV Validate dazu eingesetzt, um stark befahrene Relationen von Lkw-Transporten zu identifizieren. Die detailliert vorliegenden Informationen über Start und Ziel der einzelnen Fahrten, der verwendeten Routen, der daraus ableitbaren Wegelänge je Straßenkategorie sowie der transportierten Güterabteilungen ermöglicht die gezielte Selektion der für O-HEV-Betrieb geeignete Fahrten und somit auch die Auswahl der relevanten Korridore. Für die Analysen wurde die Kalibrierung von PTV Validate auf die Bundesverflechtungsprognose 2030 verwendet. Die Verkehrsströme der einzelnen Relationen, die in PTV Validate auf Ebene der Verkehrszellen vorliegen, wurden für die Modellierung in diesem Vorhaben auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte (insgesamt etwa 400 Einheiten) zusammengefasst, um eine effiziente Berechnung zu ermöglichen.

Fahrzeugmodell (VEHMOD)

Um streckenspezifische Endenergieverbräuche für O-HEV, O-BEV und konventionelle Diesel-Lkw zu ermitteln, wird das Fahrzeugsimulationsmodell VEHMOD eingesetzt. Es beruht auf einer Vorwärtssimulation verschiedener Antriebskonfigurationen von Pkw sowie Lkw und kann als Eingangsgröße beliebige Fahrzyklen verarbeiten. Nenndaten für die Leistung oder das Drehmoment bei entsprechender Drehzahl werden zur Erstellung generischer Wirkungsgradkennfelder für Dieselmotoren, Elektromotoren sowie Elektrogeneratoren verwendet. Diese Kennfelder werden zur Berechnung des fahrzustandsabhängigen momentanen Verbrauchs oder des Energieflusses zur sowie von der Batterie herangezogen. Berücksichtigt werden ferner sowohl topographische Streckeneigenschaften als auch die Außentemperatur sowie entsprechende Nebenverbräuche der Fahrzeuge.

Die Betriebslogik von VEHMOD ist in Abbildung 5-8 schematisch dargestellt. Für die vorliegende Potentialanalyse wurde VEHMOD eingesetzt um typische Verbräuche für ein O-HEV, O-BEV sowie ein konventionelles Dieselfahrzeug unter sonst identischen Bedingungen zu berechnen (für Details der Fahrzeugkonfiguration siehe Anhang A1). Für die Betrachtung des Jahres 2030 wurden dabei Reduktionen der Fahrwiderstände als auch Effizienzsteigerungen der Komponenten, abgeleitet aus (Delgado et al. 2017) und (Norris et al. 2017), unterstellt. Die berechneten Verbrauchswerte finden sich im Anhang A1.

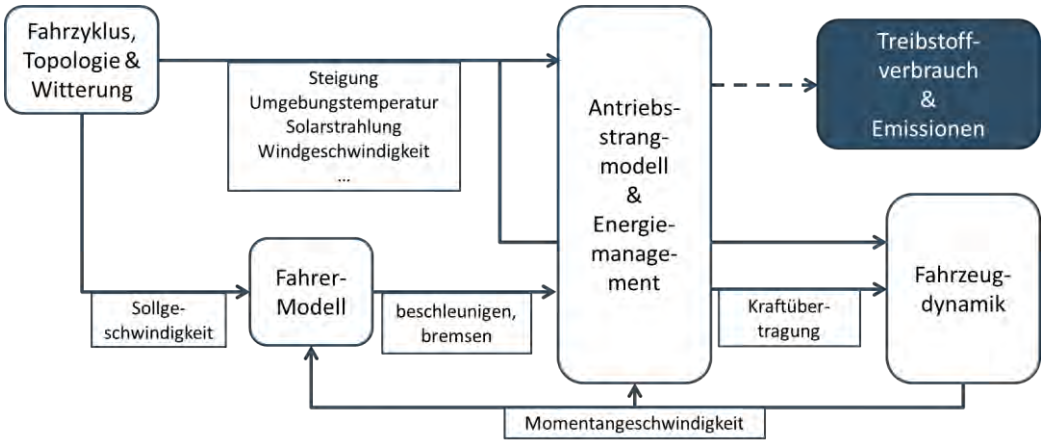


Abbildung 5-8: Schema der Verbrauchs- und Emissionsberechnung in VEHMOD

TCO-Modell

Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg der Oberleitungstechnologie ist ihre Wirtschaftlichkeit. Diese wird im vorliegenden Papier aus Sicht des Betreibers (Spediteur, selbstständiger Fahrer etc.) analysiert, da davon ausgegangen wird, dass die Infrastruktur in einer Frühphase öffentlich finanziert wird und ihre Kosten nicht auf die Fahrzeugbetreiber umgelegt werden. In diesem Kontext bedeutet ein rentabler Betrieb des O-Lkw, dass die gesamten Kosten, die mit Beschaffung, Abschreibung, Betrieb und Instandhaltung des O-Fahrzeugs verbunden sind, geringer sind als die Kosten eines vergleichbaren konventionellen Lkws.

Die betrachteten „Total Cost of Ownership“ (TCO) werden für Sattelzugmaschinen ermittelt (Fahrzeugkonfiguration siehe Anhang A1). Das Modell ist zeitlich variabel gestaltet, es sind also sowohl ein Startjahr (Jahr der Inbetriebsetzung des Fahrzeugs) als auch ein Zeithorizont

des Betriebs zu definieren. Der Zeitpunkt des Betriebs ist relevant, da viele Randbedingungen, wie z.B. Energiepreise, Fahrzeugkosten oder Energieverbrauch der Fahrzeuge, sich über die Zeit ändern. Berücksichtigt werden ausschließlich monetäre Aspekte, während darüberhinausgehende Aspekte wie bspw. die Liquidität, Risiken oder Einsatzflexibilität außerhalb der Betrachtung liegen. Allgemein werden ausschließlich Zahlungsflüsse berücksichtigt, wobei aufgrund der kurzen Haltedauer des Fahrzeugs auf eine Diskontierung zukünftiger Zahlungen verzichtet wird. Alle Zahlungen sind exklusive Mehrwertsteuer und werden als reale Größen auf das Jahr 2017 normiert. Die relevanten Kosten lassen sich grob in vier Kategorien einteilen: Fahrzeugkosten, jährliche Fixkosten (exkl. Fahrzeug), Energiekosten und variable Kosten (exkl. Energie).

Die **Fahrzeugkosten** werden unter der Annahme ermittelt, dass das Fahrzeug zu Beginn der Betriebsdauer gekauft und nach einer Haltedauer von 5 Jahren wieder verkauft wird. Die Finanzierung erfolgt mittels eines Annuitätendarlehens mit einem effektiven Zinssatz von 4,5 %. Der reale Kaufpreis der O-Sattelzugmaschine ist als Funktion der elektrischen Leistung und der Batteriekapazität gegeben, wobei eine Preisdegression hinterlegt ist (siehe Anhang A1).

Der Fahrzeugrestwert wird als Prozentsatz des Kaufpreises berechnet und hängt in dem Modell vereinfacht lediglich von der Laufleistung der Sattelzugmaschine innerhalb der Betriebszeit ab (siehe Anhang A1). Der Restwert des O-Fahrzeugs ist von konventionellen Sattelzugmaschinen abgeleitet. Bei beiden Technologien wird derselbe prozentuale Wertverlust angenommen[1].

Die **Fixkosten** sind unabhängig von der Fahrleistung und fallen stets jährlich an. Sie setzen sich aus den Kostenstellen Kfz-Steuer, Versicherung, Unterstellung/Garage, Fuhrparkverwaltung und Prüfgebühren zusammen (Werte siehe Anhang A1).

Die **variablen Kosten** beziehen sich ausschließlich auf die Laufleistung des Fahrzeugs in Kilometern. Fahrerkosten werden dabei auf Kosten pro Kilometer umgerechnet. Für den Speditionsbetrieb zwar von hoher Relevanz, sind die Fahrerkosten in der Berechnung jedoch nicht von Bedeutung, da kein Unterschied zwischen beiden Technologien angenommen wird. Reifen-, Schmierstoff-, Reparatur-, Wartungs- und Pflegekosten weisen keine oder nur marginale Unterschiede auf. Bei der Kostenberechnung wird die Option für weitere Analysen gegeben. So kann eine Mautreduktion für O-Lkw abhängig von dem Straßentyp (elektrifiziert, nicht elektrifiziert) angegeben werden. Die kilometerspezifischen Kosten setzen sich aus Schmierstoffen, Harnstoffen, Reifen, Reparatur/Wartung/Pflege, Maut und Fahrer zusammen (Werte siehe Anhang A1).

Die **Energiekosten** hängen von den Diesel- und Strompreisen sowie den Verbräuchen ab und werden getrennt von den übrigen variablen Kosten betrachtet. Während das konventionelle Fahrzeug ausschließlich mit Diesel betrieben wird, ist für den O-Lkw zudem relevant, ob eine Strecke elektrifiziert ist und somit die Traktion mit Strom aus dem Netz erfolgen kann. Neben dieser Unterscheidung ist ebenfalls die Straßenkategorie von Bedeutung, da der Verbrauch eines Fahrzeugs in hohem Maße vom Straßentyp abhängt. Die Verbräuche

[1] Bei der Restwertentwicklung von O-Lkw sind mehrere Effekte möglich. Zum einen sind Elektroantriebe im Allgemeinen langlebiger als verbrennungsmotorische. Zum anderen dürfte der Restwert von O-Lkw stark von der Infrastrukturverfügbarkeit zum Zeitpunkt des Verkaufs, der allgemeinen Akzeptanz der Technologie sowie den zum Zeitpunkt des Verkaufs verfügbaren Neufahrzeugen abhängen. Vor allem eine unzureichende Infrastruktur kann auch zu überproportionalem Wertverlust der Fahrzeuge führen. Da noch nicht klar ist, welche Effekte überwiegen werden, wird hier eine prozentuale Entwicklung des Restwerts entsprechend der bei konventionellen Fahrzeugen angenommen.

werden mittels VEHMOD streckenspezifisch ermittelt (siehe Abschnitt A2) und anhand der hinterlegten Energiepreisen können die Energiekosten für das Fahrzeug ermittelt werden.

Lineare Optimierung des Netzausbaus

Für die Optimierung des Netzausbaus wird die lineare Programmierung genutzt. Formal besteht bei die lineare Programmierung die Problemstellung aus einer Zielfunktion und einem System aus Gleichungen und Ungleichungen. Die Systemvariablen werden gewichtet mit Kostenkoeffizienten in der Zielfunktion aufsummiert und der Algorithmus minimiert diese Zielfunktion, wobei die Variablen über die Gleichungen und Ungleichungen definiert und begrenzt werden Die Koeffizienten werden durch die Relationsdaten und das TCO-Modell vorgegeben. Aufbauend auf diesen Eingangsdaten wird das lineare Optimierungsmodell verwendet, um innerhalb des Betrachtungszeitraums einen optimalen Infrastrukturausbau zu ermitteln, sodass die Gesamtkosten der Lkw-Betreiber minimiert werden.

Die Zielfunktion ist die Minimierung der Gesamtkosten (fixe und variable Kosten) der Lkw-Betreiber. Diese Kosten werden in dem Modell als Differenzkosten zwischen O-HEV und konventionellen Lkw angegeben. Alle Kosten werden hierbei auf ein Jahr bezogen. Daher werden Investitionskosten auf die Nutzungsjahre verteilt. Die Zielfunktion ist wiefolgt definiert:

$$\min\{\sum_{i,t} v_{i,t} \cdot \mathrm{n_{i,t}} \cdot \left(\Delta \mathrm{k}_{\mathrm{i,t}}^{\mathrm{fix}} + \Delta \mathrm{k}_{\mathrm{i,t}}^{\mathrm{abseits\ Netz}}\right)$$

➔ Fixkosten und variable Kosten außerhalb des Basisnetzes

$$+\sum_{i,j,t} e_{i,j,t} \cdot \mathrm{n_{i,t}} \cdot \Delta \mathrm{k}_{\mathrm{i,j,t}}^{\mathrm{var,el}}$$

➔ Variable Kosten auf elektrifizierten Autobahnabschnitten

$$+\sum_{i,j,t} d_{i,j,t} \cdot \mathrm{n_{i,t}} \cdot \Delta \mathrm{k}_{\mathrm{i,j,t}}^{\mathrm{veh,var,D}}\}$$

➔ Variable Kosten auf nicht elektrifizierten Autobahnabschnitten

Die kursiven Buchstaben stellen die Variablen des Modells dar. Die Koeffizienten sind Ausgangsgrößen und werden vor der Optimierung für jede Relation ermittelt. Die folgende Tabelle beschreibt die verwendeten Variablen, Indizes und Koeffizienten:

Variablen

$v_{i,t}$	Beschreibt, ob O-HEV auf der Relation *i* im Jahr *t* eingesetzt werden (0-konventionell, 1-O-HEV)
$e_{i,j,t}$	Beschreibt, ob O-HEV auf der Relation *i* und dem Abschnitt *j* im Jahr *t* elektrisch betrieben werden (0-nein, 1-ja)
$d_{i,j,t}$	Beschreibt, ob O-HEV auf der Relation *i* und dem Abschnitt *j* im Jahr *t* im Dieselbetrieb operieren (0-nein, 1-ja)

$s_{j,t}$	Beschreibt, ob ein Streckenabschnitt *j* im Jahr *t* elektrifiziert wird (0-nein, 1-ja)

Koeffizienten

$\mathrm{n}_{i,t}$	Anzahl an Lkw, die auf der Relation *i* im Jahr *t* verkehren
$\Delta\mathrm{k}_{\mathrm{i,t}}^{\mathrm{fix}}$	Jährliche Fixkosten (Differenzkosten zwischen O-HEV und konventionellen Lkw) aller Lkw auf der Relation *i* im Jahr *t*
$\Delta\mathrm{k}_{\mathrm{i,t}}^{\mathrm{abseits\ Netz}}$	Jährliche variable Kosten (Differenzkosten zwischen O-HEV und konventionellen Lkw) aller Lkw auf der Relation *i* im Jahr *t*, die abseits des Basisnetzes entstehen
$\Delta\mathrm{k}_{\mathrm{i,j,t}}^{\mathrm{var,el}}$	Jährliche variable Kosten (Differenzkosten zwischen O-HEV und konventionellen Lkw) aller Lkw auf der Relation *i* und Abschnitt *j* im Jahr *t*, die im Strombetrieb entstehen
$\Delta\mathrm{k}_{\mathrm{i,j,t}}^{\mathrm{var,D}}$	Jährliche variable Kosten (Differenzkosten zwischen O-HEV und konventionellen Lkw) aller Lkw auf der Relation *i* und Abschnitt *j* im Jahr *t*, die im Dieselbetrieb entstehen

Diverse Nebenbedingungen (Gleichungen und Ungleichungen) werden benötigt, um das Modell mathematisch zu beschreiben:

$I)\ 0 \leq v_{i,t}, e_{i,j,t}, d_{i,j,t}, s_{j,t} \leq 1\ \forall\ i,j,t$

→ Alle Variablen sind binär.

$II)\ e_{i,j,t} + d_{i,j,t} = \mathrm{f}_{\mathrm{i,j,t}} \cdot v_{i,t} \forall\ i,j,t \text{ with } \mathrm{f}_{\mathrm{i,j,t}} \in [0,1]$

➔ Wenn O-HEV auf der Relation *i* im Jahr *t* eingesetzt werden ($v_{i,t}$=1), muss der O-HEV entweder im Strom- (*e*) or Dieselmodus (*d*) betrieben werden. Der Koeffizient f spiegelt die Information wider, ob die Relation *i* auf dem Abschnitt *j* im Jahr *t* verkehrt.

$III)\ v_{i,t} \leq 1\ \forall\ i,t$

➔ Wenn *v*=0 wird ein konventioneller Lkw auf der Relation *i* im Jahr *t* eingesetzt. Wenn die Variable 1 entspricht, dann wird ein O-HEV eingesetzt.

$IV)\ e_{i,j,t} \leq s_{j,t}\ \forall\ i,j,t$

➔ Der elektrische Betrieb (*e=1)* eines O-Lkw auf der Relation *i* auf einem Abschnitt *j* ist nur möglich, sofern dieser Abschnitt elektrifiziert ist (*s*=1).

$V)\ s_{j,t} \leq s_{j,t+1}\ \forall\ j,t$

➔ Sobald ein Streckenabschnitt elektrifiziert wird, bleibt dieser in den Folgejahren ebenfalls elektrifiziert.

Zudem ist dir folgende Ungleichung definiert, die den maximalen Ausbau pro Jahr begrenzt:

$$VI)\ \sum_j (s_{j,t} - s_{j,t-1}) \cdot l_j \leq L_t^{max}\ \forall\ t$$

Die Summe der Länge der ausgebauten Streckenabschnitte im Jahr t dürfen nicht die jeweilige maximale Ausbaurate L^{max} des Jahres t überschreiten.

A3: Methodik der Umweltbewertung

Ziel bei der Berechnung der Umweltwirkungen ist es die gesamte Prozesskette von der Fahrzeugherstellung/-entsorgung über die Wartung und die Fahrzeugnutzung (inklusive der Bereitstellung der Energieträger) zu bilanzieren.

Der Fokus liegt hierbei auf den Treibhausgasemissionen nach IPCC 2013 (ohne Feedback), zusätzlich werden noch ausgewählte Luftschadstoffe untersucht. Besonders relevant sind hierbei die Feinstaubemissionen (d.h. all Partikel mit einer Größe kleiner 10 um) sowie die Stickoxidemissionen.

Bilanzierung der Fahrzeugherstellung und -entsorgung

Bei schweren Nutzfahrzeugen spielt der Herstellung aufgrund der hohen Lebensfahrleistungen nur eine geringe Rolle in der Gesamtbilanz. Daher wird die Fahrzeugherstellung nur überschlägig auf Basis vorhandener Datensätze abgebildet. Das modulare LCA-Modell für die Fahrzeugherstellung baut daher auf einem Datensatz für einen konventionellen Lkw aus ecoinvent auf. Über die Ergänzung weiterer Fahrzeugkomponenten können Datensätze für weitgehend vergleichbare Lkw mit verschiedenen Antriebskonzepten abgeleitet werden. Der Aufbau des Modells ist in Abbildung 5-9 gezeigt, wobei die einzelnen Komponenten jeweils parametrisiert sind, so dass unterschiedliche Auslegungen abgebildet werden können.

Abbildung 5-9: LCA Modell ifeu (Software: umberto LCA+ und Datenbank ecoinvent 3.5)

Die Sachbilanzdaten zum elektrischen Antriebsstrang sowie zum Fahrzeugakku wurden auf Grundlage eines am ifeu vorliegenden detaillierten Datensatzes für die Pkw-Herstellung abgeleitet (Agora Verkehrswende 2019). Für die Fahrzeugakkus wird von einer NMC (Nickel-Mangan-Kobalt) Zelle mit einer Energiedichte auf Akkusystemebene von 115 Wh/kg ausgegangen. Bis 2030 wird eine Steigerung der Energiedichte auf 130 Wh/kg angenommen sowie eine Änderung der Zellchemie von 1-1-1 auf 6-2-2. Weitere Verbesserungen werden in der zukünftigen Zellfertigung angenommen. Damit verbessert sich die Klimabilanz des Akkus für Herstellung und Entsorgung von heute 146 kg CO_{2eq}/ kWh auf 70 kg CO_{2eq}/ kWh in 2030.

Detaillierte Angaben zur Ableitung der Akkueigenschaften (heute und in Zukunft) und den damit verbundenen Klimawirkungen sowie Sensitivitätsanalysen sind in der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ [Helms et al. 2019] dokumentiert.

Bei den Lkw wird (in der Dieselvariante) von einem Leergewicht des Last-/ Sattelzuges von 15,1 t ausgegangen und einer Motorleistung von 420 kW (Elektro- bzw. Dieselmotor). Die elektrischen Lkw wiegen damit entsprechend etwas mehr als die konventionellen, es wurde jedoch keine Anpassung der mittleren Zuladung vorgenommen da davon ausgegangen wird, dass diese in der Regel unter dem zulässigen Gesamtgewicht liegt.

Anhand der Fahrzeuglebensdauer/ Lebenslaufleistung (beziehungsweise der Lebensdauer einzelner Komponenten wie dem Akku), kann dann eine Umlegung der Umweltwirkungen pro Fahrzeug auf den Fahrzeugkilometer erfolgen.

Zudem werden die Wartungsaufwendungen aus einem bestehenden ecoinvent Datensatz übernommen. Hierbei wird, aufgrund der geringen erwarteten Unterschiede, nicht zwischen dem klassischen Diesel-Lkw und dem O-HEV unterschieden, da auch der O-HEV noch einen konventionellen Antriebsstrang benötigt. Lediglich beim O-BEV verringern sich die Wartungsaufwände, da die Schmierstoffe für den Verbrennungsmotor wegfallen. Dadurch liegen die Wartungsaufwendungen beim O-BEV etwas niedriger als beim Diesel-Lkw, hinzu kommen beim O-BEV jedoch die (getrennt berücksichtigten) Aufwendungen für den Tausch der Li-Ionen Akkus. Während ein O-HEV nur einen kleinen Akku benötigt, der vermutlich ein Fahrzeugleben (1 Mio. km) lang hält, braucht der O-BEV zwischen 2 und 5 Akkus (Standardwert: 2,5 Stück; siehe (Meszler et al. 2018)) über die Lebenszeit von 1 Mio. Kilometern.

Die Aufwände für die Herstellung und Entsorgung des konventionellen Diesel-Lkw liegen bei 42 t CO_{2eq} pro Fahrzeug, die für den O-HEV bei etwa 51 t (2030). Der O-BEV benötigt keinen konventionellen Antriebsstrang mehr und „spart“ damit gegenüber dem O-HEV (ohne Akku) etwa 3,5 t CO_{2eq} ein. Dazu kommen jedoch Treibhausgasemissionen für die benötigten Fahrzeugakkus, die bei einer in den Hochlaufszenarien errechneten mittleren Batteriekapazität von 160 kWh bei etwa 28 t CO_{2eq}. liegen, da ein Akkuwechsel alle 400.000 km angenommen wird.

Bilanzierung der Oberleitungsinfrastruktur

Zusätzlich zu den Fahrzeugen wurde eine grobe Abschätzung der Umweltwirkungen der Oberleitungsinfrastruktur vorgenommen, wobei in Fahrdraht (aus Kupfer) und restliche Infrastruktur (Oberleitungen, Masten, Fundamente und Unterwerke) unterschieden wurde.

Die Daten für die Oberleitungsinfrastruktur stammen aus der Machbarkeitsstudie zu Oberleitungs-Lkw im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (ISI 2017) und ergeben über die Lebensdauer gerechnet (ohne Fahrdraht) etwa Treibhausgasemissionen von 4,7 t pro km Streckenabschnitt (in beide Richtungen) pro Jahr (bzw. 20 kg NO_x/km/a und 21 kg PM_{10}/km/a). Dabei wird bereits miteinbezogen, dass die verschiedenen Komponenten eine unterschiedliche Lebensdauer aufweisen.

Die mit dem Fahrdraht assoziierte Klimawirkung ist abhängig von den angenommenen Befahrungsstärken und der Fahrdrahtabnutzung. Bei etwa 3,3 Mio. Befahrungen entstehen hier allein für das Kupfer Treibhausgasemissionen von etwa 17 g CO_{2eq}/ Fzg-km, diese liegen damit etwas höher als die Emissionen der Oberleitungsinfrastruktur selbst, wenn diese auf die Fahrzeuge umgelegt wird.

Eine Schwierigkeit bei den Infrastrukturaufwendungen ergibt sich durch die benötigte Umlage dieser auf alle Nutzer und die Abschreibung der Umweltwirkungen auf die Lebensdauer. Der aktuell ermittelte mittlere Treibhausgaseffekt pro km Strecke und Jahr bezieht bereits die sehr unterschiedlichen Lebensdauern der einzelnen Komponenten ein.

In einem nächsten Schritt müssen nun die resultierenden Umweltwirkungen auf die auf der Strecke fahrenden Fahrzeuge umgelegt werden. Wichtige Größen hierfür sind zum einen die elektrifizierten Streckenlängen im Gesamtnetz und die an der Oberleitung von Lkw zurückgelegten gesamten Kilometer.

Anhand dieser kann eine Umlegung erfolgen, wobei entweder gemittelte Werte für das gesamte Netz oder relationsfeine Werte angegeben werden können.

Werden jedoch die Infrastrukturemissionen aus den Anfangsjahren (also beim Markthochlauf) auf die wenigen dort bereits fahrenden Lkw umgelegt, müssten diese sehr hohe Lasten tragen. In einem eingeschwungenen System lägen die Emissionen dann deutlich niedriger. Um eine Benachteiligung der frühen Oberleitungs-Lkw zu vermeiden, werden jeweils die kumulierten Infrastrukturaufwendungen auf die kumulierten Fahrleistungen an der Oberleitung im Betrachtungszeitraum 2020 bis 2030 umgelegt. Somit bekommt jeder Lkw (egal in welchem Jahr die Fahrt stattfindet) dieselben Infrastrukturaufwendungen angerechnet. In späteren Jahren neu hinzukommende Fahrzeuge werden damit auch am Markthochlauf in der Anfangsphase (gerecht) beteiligt.

Bilanzierung der Strombereitstellung

Ziel der Umweltbilanzierung für den O-Lkw ist es jeweils die vollständigen Prozessketten abzubilden. Daher müssen bei den Stromvorketten sowohl die Emissionen aus dem Kraftwerksbetrieb und Emissionen aus der Brennstoffbereitstellung als auch der Bau der Kraftwerke mitbilanziert werden. Vor allem bei den erneuerbaren Energien sind die Emissionen aus der Kraftwerksbereitstellung (z.B. Wind mit ca. 15 g CO_{2eq}/kWh oder PV mit ca. 100 g CO_{2eq}/kWh) relevant und dort auch die einzigen Beiträge.

Zeitlicher Bezugsrahmen für die Szenarienbetrachtungen in diesem Bericht sind die Jahre 2020-2030, für diesen Zeitraum werden daher auch Parameter für die Strombereitstellung abgeleitet. Aktuell werden in Deutschland jährlich etwa 520 TWh Strom verbraucht, der zusätzliche Strombedarf für die Oberleitungs-Lkw liegt, selbst im Szenario mit der höchsten Elektrifizierung, jedoch nur bei etwa 5,5 TWh/a. Dieser zusätzliche Stromverbrauch von unter 1 % des Gesamtverbrauchs wird vermutlich zu keinen nennenswerten Änderungen am Energiesystem führen, daher kann mit bestehenden Szenarien für den zukünftigen deutschen Strommix gerechnet werden.

Zur Bestimmung der Umweltwirkungen heutiger und zukünftiger Strommixe werden folgende Daten benötigt:

- die spezifischen Emissionen der einzelnen Kraftwerkstypen
- die Zusammensetzung der Strombereitstellung (also die Anteile der einzelnen Kraftwerkstypen)
- die Leitungsverluste beim Stromtransport

Transparente und qualitätsgeprüfte Ökobilanzdatensätze stehen in der Schweizer ecoinvent–Datenbank zur Verfügung, die hier für alle Hintergrundprozesse verwendet wird (aktuell in Version 3.5). Sie enthält auch Ökobilanzdaten zu den Kraftwerken und den spezifischen Emissionen, die verwendet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kraftwerke selbst (z.B. Wirkungsgrad, spezifische Schadstoffemissionen) sich im Zeitverlauf nicht ändern, sondern sich lediglich der Strommix (also der Einsatz der verschiedenen Energieträger) ändert. Die resultierenden spezifischen Umweltwirkungen der einzelnen Stromerzeugungstechnologien (adaptiert nach ecoinvent 3.5[1]) sind in Tabelle 5-9 gezeigt.

Tabelle 5-9: Emissionsfaktoren für die Stromproduktion (eigene Berechnungen basierend auf ecoinvent 3.5)

	CO_{2eq} [g/kWh]	NO_X [g/kWh]	PM_{10} [g/kWh]
Kernenergie	11	0,04	0,05
Steinkohle	1065	1,55	0,16
Braunkohle	1224	0,86	0,08
Kohle-KWK	1151	3,25	0,14
Öl (andere konv.)	833	0,88	0,12
Gas	543	0,51	0,08
Biomasse	238	0,46	0,13
Wasser (andere EE)	13	0,12	0,02
Wind	19	0,06	0,06
PV	100	0,24	0,15

Die Umweltwirkungen des heutigen Strommixes (Referenzjahr 2017) werden anhand der Strommixzusammensetzung aus Eurostat ermittelt, die in Tabelle 5-10 dargestellt ist.

Tabelle 5-10: Strommix Deutschland 2017 nach Eurostat

Energieträger	Anteil
Steinkohle	14,0 %
Braunkohle	22,4 %
Heizöl	0,9 %
Gas	15,6 %
Anteil Kernkraft	11,8 %
Wasser	3,3 %
Wind	16,9 %
Solar	6,4 %
Erdwärme*	0,0 %
Biomasse	6,7 %
Abfallverbrennung*	2,0 %

*Anmerkung: *Nicht verwendet, Mix wurde für übrige Technologien auf 100 % hochgerechnet*

[1] ecoinvent selber unterteilt in mehr als 25 verschiedene Stromerzeugungsarten, gängige Strommixdaten (vor allem für zukünftige Entwicklungen) sind jedoch deutlich gröber. Anhand eines bestehenden deutschen Strommixes in ecoinvent 3.5 (für das Jahr 2014) werden die verschiedenen Erzeugungstechnologien derart aggregiert, dass ihre Anteile anhand vorhandener Szenariendaten variiert werden können.

Für den zukünftigen deutschen Strommix werden aktuelle Szenarien des IEE zugrundegelegt, die auf den europäischen Klimazielen basieren. Dieser Ansatz trägt der Tatsache Rechnung, dass es sich beim Strommarkt um einen europäischen Markt mit vielfältigen internationalen Wechselwirkungen handelt. Die Szenarien werden über die sektorübergreifende Ausbau- und Einsatzplanung SCOPE[1] für ein historisches Wetterjahr in stündlicher Auflösung unter der Restriktion der im ETS entsprechend der Minderungsziele verfügbaren CO_2-Zertifikate ermittelt. Für das Projekt wird dabei das verfügbare CO_2-Budget im Emissionshandel für das Modell vorgegeben, und die Investitiosentscheidungen für Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speichertechnologien getroffen sowie der Anlageneinsatz dieser Anlagen und bestehender Kraftwerke ermittelt. Als Region wird dabei Europa mit den einzelnen Ländern und den Kuppelstellen im Strommarkt der EU28 zzgl. Norwegen und Schweiz abzügl. Malta und Zypern bestimmt (EU28 + NO/CH-MT/CY).

Grundsätzlich wird als europäisches Langfristziel eine Reduktion der THG-Emissionen bis 2050 um 95 % bis 100 % CO_{2eq} in Bezug auf 1990 betrachtet (Europäische Kommission 2018b). Dabei wird unterstellt, dass noch 5 % Emissionen in der Landwirtschaft und den nicht vermeidbaren Emissionen aus Industrieprozessen im nichtenergetischen Bereich verbleiben, bzw. diese durch zusätzliche Senken und negative Emissionen kompensiert werden. In jedem Fall führt dies zu einer EE Vollversorgung und zu einer Klimaneutralität im Energiebereich bis 2050 (vgl. Abbildung 5-10).

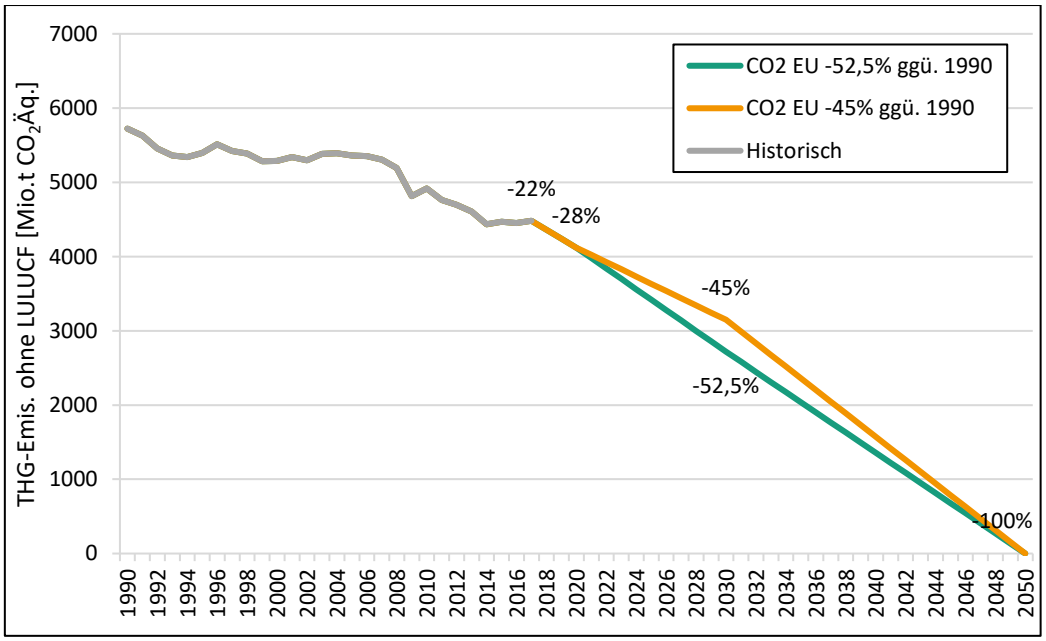


Abbildung 5-10: THG Emissionen der EU bis 2017, Minderungsziele 2030 bis 2050 (eigene Annahmen IEE)

Für das Szenariojahr 2030 bestehen Inkonsistenzen bezüglich der politischen Vorgabe auf nationaler und europäischer Ebene. Zwar besteht aktuell auf EU-Ebene offiziell noch das veraltete Ziel einer Minderung der THG-Emissionen um 40 % gegenüber 1990, welches für Deutschland ungefähr einer Minderung um 55 % im gleichen Zeitraum entspricht (siehe Abbildung 5-11) und mit dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung in Einklang steht (Bundesregierung 2016). Dieses Ziel kann aufgrund der beschlossenen EU-Effizienzrichtlinie und EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie allerdings bereits heute als überholt gelten, zumal

[1] Für Informationen zum Modell SCOPE siehe u.a. (Fraunhofer IEE 2018), (von Oehsen 2012), (Trost 2016)

es mit dem oben beschriebenen langfristigen Zielpfad (Klimaneutralität bis 2050) kaum vereinbar ist. Zudem wird das entsprechende Zwischenziel von minus 20 % bis zum Jahr 2020 auf EU-Ebene heute bereits deutlich übererfüllt (siehe Abbildung 5-10).

Aufgrund dieser Tatsachen kann eine Reduktion der THG-Emissionen im Stromsektor der EU um -45 % gegenüber 1990 aktuell als konservatives Szenario angesehen werden. Eine solche Emissionsreduktion ergibt sich schon aufgrund der bereits beschlossenen EU-Effizienzrichtlinie und EU-Erneuerbare-Energien-Richtlinie (United Nations Environment Programme 2019). Dies würde für Deutschland eine gewisse Verschärfung des bisherigen nationalen Klimaziels auf etwa –60 % bedeuten (siehe Abbildung 5-11). Dieses Ziel bildet den Rahmen für die erste und in diesem Bericht standardmäßig verwendete Strommarktmodellierung.

Ende 2019 hat die EU-Kommission mit dem sogenannten „Green New Deal“ deutlich weitgehendere Klimaziele beschlossen, die eine THG-Emissionsreduktion von 50-55 % für 2030 vorsehen (EU-Kommission 2019). Diese Ziele müssen jedoch noch mit konkreten Maßnahmen und entsprechenden Budgets unterlegt werden. Die Zielverschärfung des Green New Deals wird in einem zweiten Strommarktszenario abgebildet und in diesem Bericht als Sensitivität untersucht.

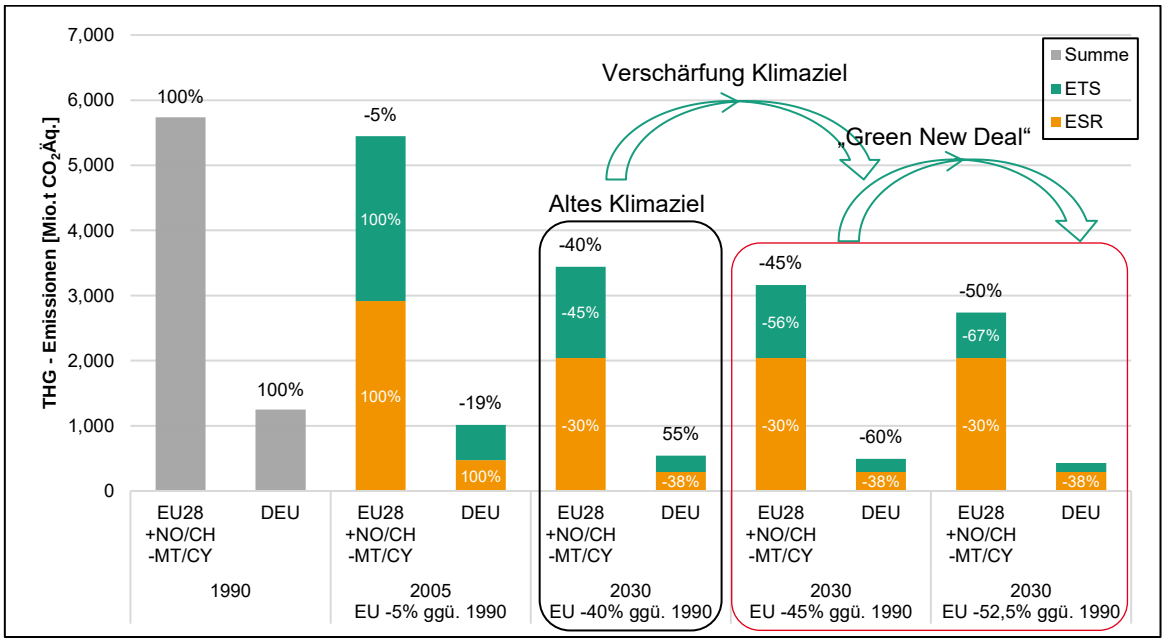


Abbildung 5-11: Emissionsreduktionsziele der EU und Deutschland bis 2030 (eigene Annahmen IEE)

Die europäischen THG-Emissionen teilen sich in den europäischen ETS (Emission Trading System) für die Bereiche Stromerzeugung und Industrie sowie den nationalen ESR (Effort Sharing Regulation) für die übrigen Sektoren auf. Die Verschärfungen der Klimaziele werden vereinfachend für beide Szenarien einseitig über den ETS-Bereich erreicht, da in diesem Bereich zum einen zusätzliche THG-Reduktionen technisch vergleichsweise schneller erreichbar sind (insbesondere über eine schnellere Reduktion der Kohleverstromung und Beschleunigung des EE-Ausbaus) und mit dem EU-ETS zum anderen bereits ein Instrument zur effizienten Mengensteuerung existiert. Durch diese Annahmen ergibt sich eine Erhöhung der Reduktion des europäischen 2030er ETS-Zieles von aktuell -45 % auf -56 % bzw. -72,5 % gegenüber 2005 (siehe Abbildung 5-11). Die Reduktion der nicht ETS – Emissionen wird in bei-

den Szenarien hingegen europaweit als konstant angesehen (vgl. Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12), wobei die Sektorenziele im Verkehrs – und Gebäudesektor für Deutschland eingehalten werden.

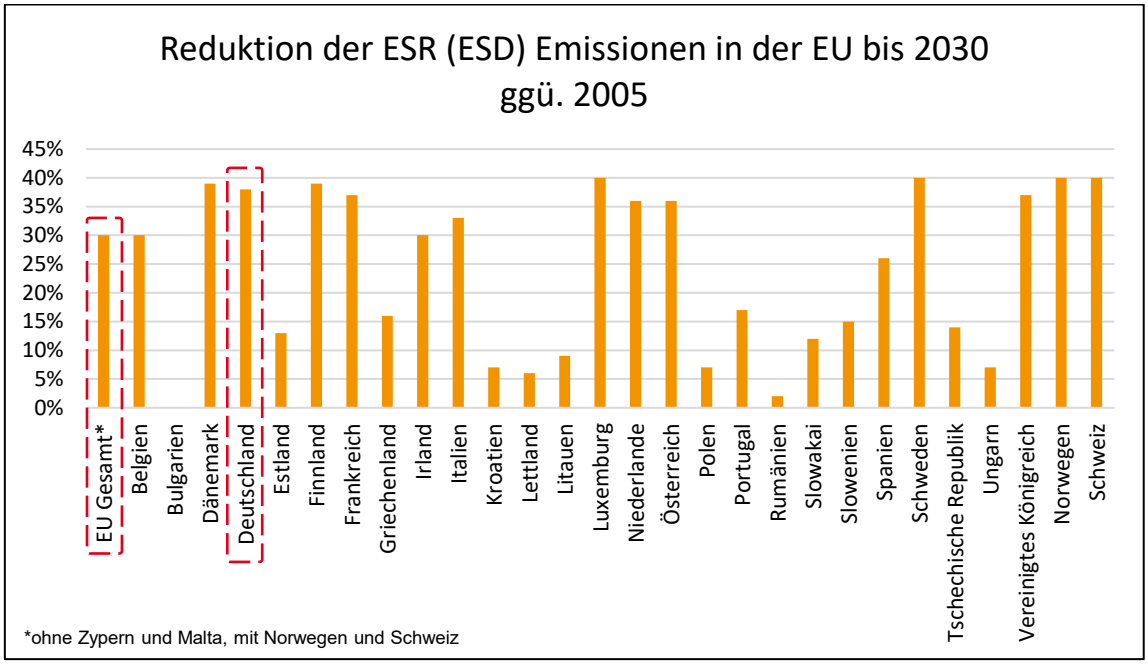


Abbildung 5-12: Reduktion der ESR (ESD) Emissionen in der EU bis 2030 ggü. 2005 (eigene Annahmen IEE)

Die mittelfristigen Marktpotenziale für installierte EE Leistungen in den Szenarien orientieren sich für Deutschland an den NEP 2030 und NEP 2035 Szenarien der ÜNB und BNetzA und für Europa am dem TYNDP 2018 und TYNDP 2020 Report der ENTSO-E. Das -45 % Szenario entspricht weitestgehend dem für Deutschland beschlossenen Kohleausstiegsplan bis 2035/38. Die Verschärfung des Klimaziels auf -52,5 % wird durch den im Modell abgebildeten Strommarkt über den Hebel des Braunkohleausstiegs vor 2030 in DEU und Westeuropas, einer Drosselung der Braunkohlestromerzeugung in Osteuropa, einer Erhöhung des Atomstromes in Frankreich und eines schnelleren Ausbaus von Photovoltaik und Windkraftanlagen an Land realisiert. Steinkohle wird modellbedingt zunehmend in die Spitzenlast gedrängt. Was die Energiesystemmodellierung für die Emissionen der einzelnen Sektoren in Deutschland bedeutet, zeigt Abbildung 5-13. Über alle Sektoren in Summe ergibt sich eine Reduktion der Treibhausgasemission von ca. 543 Miot.t CO_{2eq} nach dem Klimaschutzplan der Bundesregierung auf ca. 494 Mio.t im -45 % Szenario bzw. ca. 428 Mio.t im -52,5 % Szenario, wobei die größten Einsparungen in der Energiewirtschaft zu sehen sind (siehe Abbildung 5-13).

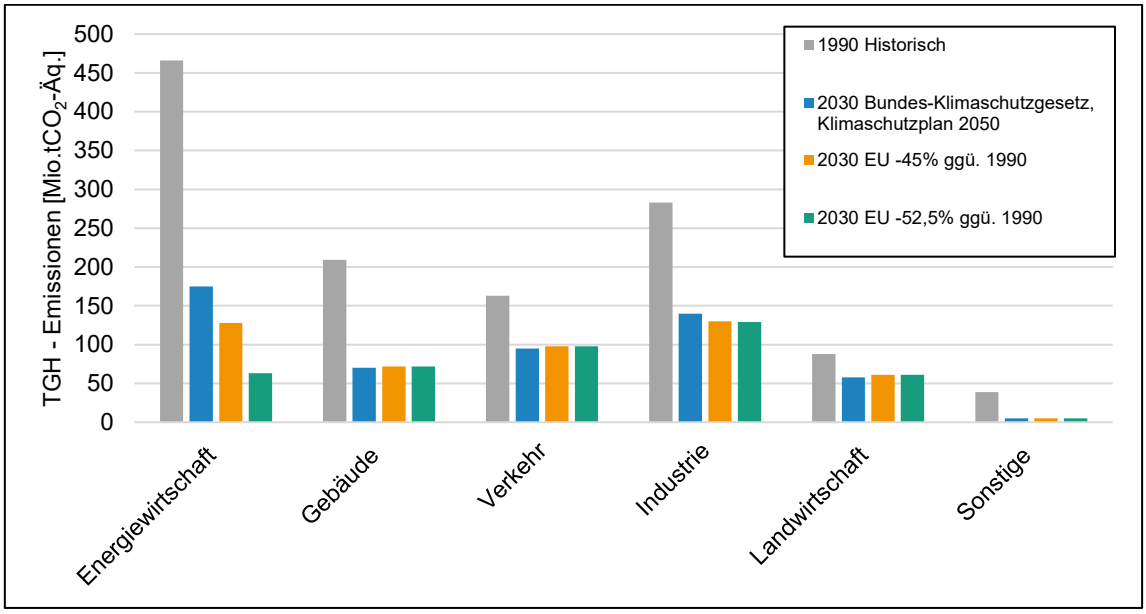


Abbildung 5-13: Deutsche TGH Emissionen nach Sektoren 1990 und 2030 (eigene Annahmen IEE)

Die nachfolgende Tabelle 5-5-11 zeigt die Anteil der einzelnen Kraftwerkstypen an der Stromerzeugung in den beiden Szenarien, wie sie mit dem Energiesystemmodell SCOPE des Fraunhofer IEE berechnet wurden.

Tabelle 5-5-11: Anteile der Kraftwerkstypen im deutschen Strommix in den betrachteten Szenarien (modelliert mit dem Energiesystem-modell SCOPE) und dem BMWi Basisszenario

Nettostrom-erzeugung DE	2030 BMWi	2030 -45 % EU	2030 -52,5 % EU	2050 -95 % EU
Kernernergie	0 %	0 %	0 %	0 %
Braunkohle	13,3 %	6,5 %	0 %	0 %
Steinkohle	7,6 %	3,1 %	0 %	0 %
andere kon-ventionelle	1,7 %	0 %	0 %	0 %
Kohle-KWK	9,0 %	7,7 %	0,6 %	0 %
Erdgas	0,6 %	0,2 %	1,1 %	1,0 %
Gas- KWK	13,0 %	12,7 %	17,1 %	2,9 %
Biomasse	4,9 %	2,5 %	2,5 %	0 %
Biomasse KWK	4,9 %	4,6 %	4,6 %	0,7 %
Andere EE	3,3 %	3,9 %	3,9 %	2,8 %
Wind onshore	20,4 %	33,9 %	40,3 %	49,5 %
Wind offshore	12,6 %	13,5 %	13,6 %	19,5 %
Photovoltaik	8,6 %	11,4 %	16,4 %	23,5 %

Damit werden in der Zeitreihe die in nachfolgender Tabelle gezeigten spezifischen Umweltwirkungen für die Strombereitstellung ermittelt.

Tabelle 5-12: Emissionsfaktoren für die Stromproduktion in der Zeitreihe (ab Kraftwerkspark)

	2017	2020 *	2030 (-45 % EU) DE	2030 (-52,5 % EU) DE	2050 -95 % DE
Treibhausgasemissionen [g CO_{2eq}/kWh]	559	499	309,1	149,8	60,0
NO_X-Emissionen [g/kWh]	0,581	0,565	0,514	0,222	0,125
PM_{10} Emissionen [g/kWh]	0,091	0,090	0,087	0,082	0,081

*Anmerkung: *aus linearer Interpolation zwischen 2017 und 2030*

Werden die Treibhausgasemissionen des Basisszenario aus den Langfristszenarien des BMWi berechnet, ergibt sich ein Wert von 455 g CO_{2eq}/ kWh.

Da die Oberleitungsinfrastruktur den Strom auf Mittelspannungsebene abnimmt, müssen die in einem anschließenden Schritt die Netzverluste eingerechnet werden. Die kumulierten Netzverluste bis Mittelspannung betragen aktuell in Deutschland 2,6 % (INFRAS et al. 2019), damit erhöhen sich z.B. die Treibhausgasemissionen 2017 auf Mittelspannungsebene auf 569 g CO_{2eq}/ kWh. Die Verluste am Pantographen werden bei der Fahrzeugnutzung bilanziert.