



EnergyRoads

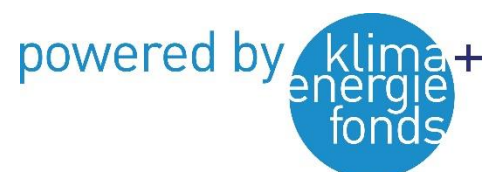
Dynamisches elektrisches Laden im hochrangigen Straßennetz als Option für die Dekarbonisierung des Schwerverkehrs in Österreich

Endbericht

Verfasser:innen: Österreichische Energieagentur:
Christoph Link, Michael Rohrer,
Victoria Schopf
IKK: Michael Schwarz, Bernhard Lackner
Trafility: Florian Koppelhuber,
Eva Medicus, Elisabeth Scherounigg
BVe: Helmut-Klaus Schimany

Auftraggeber:innen: Klima- und Energiefonds

Ort, Datum: Wien, 31.01.2023



Impressum

Herausgeberin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, Mariahilfer Straße 136, 1150 Wien

Telefon: +43 1 586 15 24, Fax-Durchwahl 340, office@energyagency.at, energyagency.at

Für den Inhalt verantwortlich: DI Franz Angerer | Gesamtleitung: Christoph Link

Lektorat: Gabriele Möhring | Layout: Gabriele Möhring

Herstellerin: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency | Verlagsort und Herstellungsort: Wien

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Nachdruck nur auszugsweise und mit genauer Quellenangabe gestattet.

Die Österreichische Energieagentur hat die Inhalte der vorliegenden Publikation mit größter Sorgfalt recherchiert und dokumentiert. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte können wir jedoch keine Gewähr übernehmen.

Kurzfassung

Die Bundesregierung hat sich die Klimaneutralität Österreichs bis spätestens 2040 zum Ziel gesetzt. Das bedeutet eine (fast) vollständige Dekarbonisierung des Güterverkehrs. Die Schiene muss und wird dabei eine wichtige Rolle spielen. Das Verlagerungspotenzial ist aber nicht unbegrenzt. Daher werden klimaneutrale Antriebskonzepte für den Lkw-Straßengüterverkehr benötigt. Dies wird die direkte und indirekte Elektrifizierung des Lkw-Verkehrs bedeuten. Verschiedene technologische Entwicklungspfade sind möglich: Das stationäre Laden batterieelektrischer Fahrzeuge vor der Fahrt, ihr dynamisches Laden während der Fahrt oder die Nutzung von Elektrizität zur Treibstoffherstellung (E-Fuels oder Wasserstoff).

Die vorliegende Studie analysiert Einsatzbereiche sowie Vor- und Nachteile des dynamischen Ladens für den Güterverkehr auf österreichischen Autobahnen und Schnellstraßen bis 2040. Der Schwerpunkt liegt auf der Oberleitung, da diese im Vergleich mit den anderen dynamischen Lademöglichkeiten den höchsten Technologischen Reifegrad (TRL) für schwere Nutzfahrzeuge hat. Im Fokus dieser Studie stehen oberleitungsgebundene batterieelektrische Fahrzeuge (O-BEV) und die dafür notwendige Electric-Road-System-Infrastruktur (ERS-Infrastruktur).

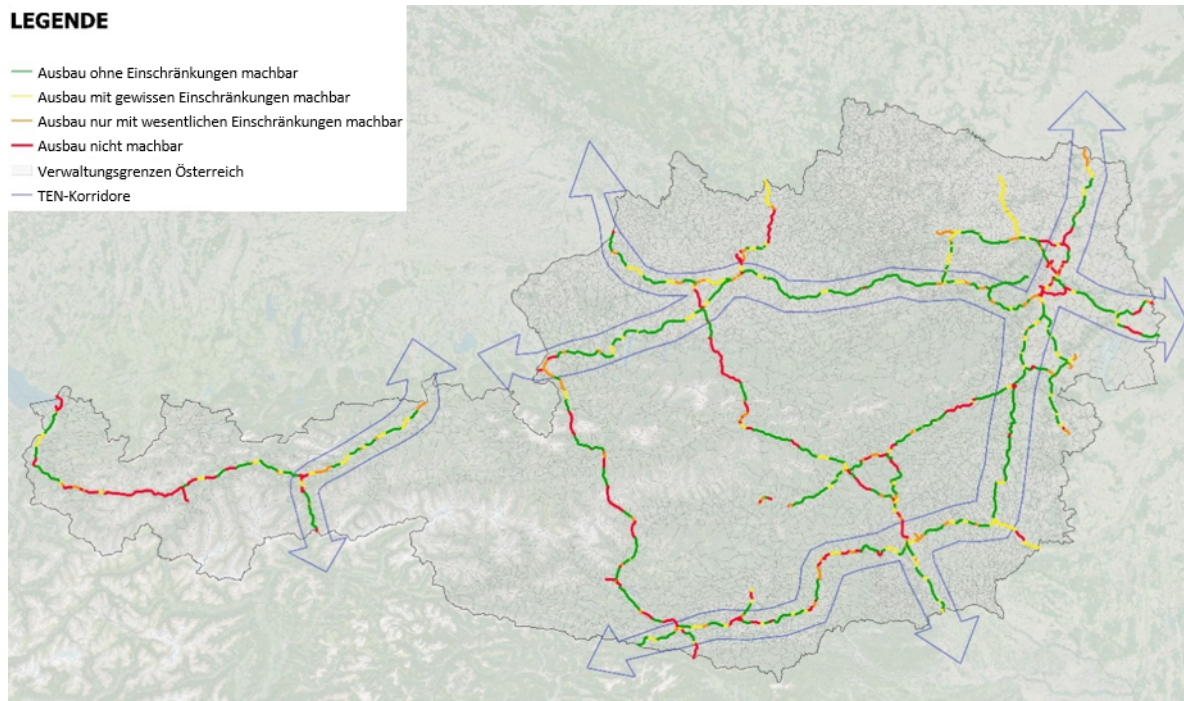
Beim dynamischen Laden entnimmt ein Fahrzeug über einen Pantographen während der Fahrt Energie aus einer Oberleitung. Das Oberleitungssystem wird aus dem Mittel- oder Hochspannungsnetz gespeist. Das Fahrzeug verfügt über eine Traktionsbatterie oder eine zweite Antriebsart mit der es sich auf Strecken ohne Oberleitung bewegen kann. Demnach ist keine durchgehende Oberleitungsinfrastruktur notwendig.

In den Analysen von EnergyRoads wurde kein Faktor identifiziert, der Errichtung und Betrieb eines Oberleitungssystems in Österreich ausschließen würde. Die (technische) Machbarkeit eines oberleitungsgebundenen Electric-Road-Systems wurde in internationalen Teststrecken nachgewiesen. Das System ist erprobt und marktreif. Es stehen anders als für den Einsatz von Wasserstoff oder E-Fuels keine großen technologischen und wirtschaftlichen Entwicklungsschritte aus. Die benötigten Europäischen Normen bzw. Ergänzungen zu Normen sind vorhanden oder zumindest in Vorbereitung. Die Anpassungen von nationalen Gesetzen, Verordnungen, Normen und Richtlinien ist vor dem großflächigen Einsatz im Detail zu prüfen.

Die Analysen in EnergyRoads zeigen, dass es im österreichischen hochrangigen Straßennetz keine flächendeckenden Barrieren für die Installierung der benötigten Infrastruktur gibt. Barrierewirkung entfalten beispielsweise Tunnel, hohe Lärmschutzwände oder in enger Abfolge vorhandene Oberkopfbauwerke. Sie verhindern die Errichtung der ERS-Infrastruktur nicht in jedem Fall, machen sie in manchen Abschnitten aber aufwändiger und teurer. Die Analyse des Straßennetzes anhand eines Bewertungsschemas ergab, dass auf der Hälfte des Autobahn- und Schnellstraßennetzes eine ERS-Infrastruktur ohne Einschränkungen errichtet werden kann (grün markierte Strecken in Abbildung 1). Besonders gut geeignet sind die für den Transitverkehr relevanten transeuropäischen Korridore (TEN-V-Kernnetz und TEN-V-Gesamtnetz). Im TEN-V-Kernnetz ist eine 80 %ige Abdeckung machbar. Eine 50 %ige Mindestabdeckung – definiert als Anteil des mit Oberleitungen versehenen Autobahn- und Schnellstraßennetzes – ist somit sowohl im TEN-V-Kernnetz als auch im TEN-V-Gesamtnetz machbar. Dagegen ist nur auf einem Viertel des hochrangigen Straßennetzes die Errichtung einer entsprechenden Infrastruktur nicht machbar (rot markierte Strecken). Der längste nicht-elektrifizierte Abschnitt im TEN-V-Kernnetz kann demnach kürzer als 20 Kilometer sein. Im TEN-V-Gesamtnetz gibt es aufgrund langer bzw. vieler Tunnel längere nicht elektrifizierbare Streckenabschnitte. Dort wären O-BEV mit höherer

Batteriekapazität notwendig. Die Analyse aller Lkw-Fahrten in Österreich zeigt aber auch, dass vom letzten leicht elektrifizierbaren Streckenstück bis zum Ziel der einzelnen Wege in den allermeisten Fällen eine effektive batterie-elektrische Reichweite von 50 km ausreicht. Die Erreichbarkeit, die Durchführung logistischer Prozesse und die Versorgung ist mit O-BEV mit begrenzter Batteriekapazität somit sichergestellt.

Abbildung 1: Beurteilung der Eignung österreichischer Autobahnen und Schnellstraßen für oberleitungsgebundene ERS-Infrastruktur



Quelle: IKK

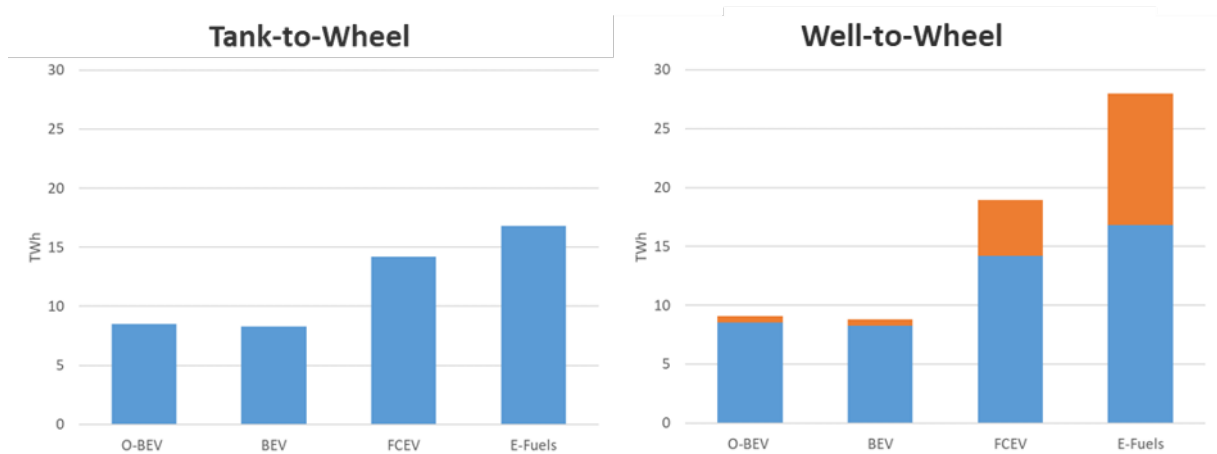
Aus verkehrlich-systemischer Sicht ist ein Oberleitungssystem nur als integriertes, internationales System sinnvoll, bei dem die Infrastruktur nicht an den Landesgrenzen endet und die grenzüberschreitende Nutzung sichergestellt und einfach ist. Um dies zu gewährleisten, bedarf es eines verstärkten internationalen Austauschs zu Kernaspekten wie Korridorauswahl, Ausbaupunkten, O-BEV-Fahrzeugparametern (u. a. Mindest-Batteriekapazität und C-Rate), Mindestabdeckungsgraden oder den längsten nicht-elektrifizierten Abschnitten. Dazu eignen sich gemeinsame Studien und vorhandene Austauschformate (IEA HEV Tasks, PIARC...). Konkret ist eine entsprechende Verankerung von ERS-Infrastruktur auf EU-Ebene notwendig. Ein Ansatzpunkt ist die Anrechnung von ERS-Infrastruktur auf andere Ausbauziele für Zero-Emission-Infrastruktur im Rahmen des Reviews der Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR).

Ob eine oberleitungsgebundene ERS-Infrastruktur in Österreich aufgebaut werden sollte, ist eine normative Frage, die in einer wissenschaftlichen Studie nicht beantwortet werden kann. Es ist aber sehr wohl möglich, Voraussetzungen aufzuzeigen und die Vor- und Nachteile der gegenständlichen Lösung mit alternativen Zero-Emission-Antriebskonzepten darzustellen. Dies umfasst beispielsweise die Energieeffizienz, die Kosten von Errichtung und Betrieb oder Synergien mit dem Ausbau der stationären Ladeinfrastruktur.

O-BEV haben einen ähnlichen Energieverbrauch wie BEV und sind deutlich effizienter als FCEV- und mit E-Fuels betriebene Lkws (Abbildung 2 für eine theoretische 100 %ige Flotte je Antriebsart). Bei einem Anstieg des Lkw-Verkehrs (Fahrzeuge mit mehr als 26 Tonnen (t), N3-26-Verkehr) um ca. 30 % kann bei einem 50 %igen Einsatz von O-BEV mit einem zusätzlichen Jahresstromverbrauch auf Oberleitungsstrecken von 3 Terawattstunden pro

Jahr (TWh/a) und für erforderliche statische Ladevorgänge in der Nacht, am Wochenende, bei Depots und an Destinationen von 1,2 TWh/a ausgegangen werden.

Abbildung 2: Jahresenergieverbrauch der Fahrzeuge (Tank-to-Wheel) und inklusive Treibstoffbereitstellung (Well-to-Wheel), angenommen 100 % der Fahrleistung je Antrieb laut CLEARER-Szenario



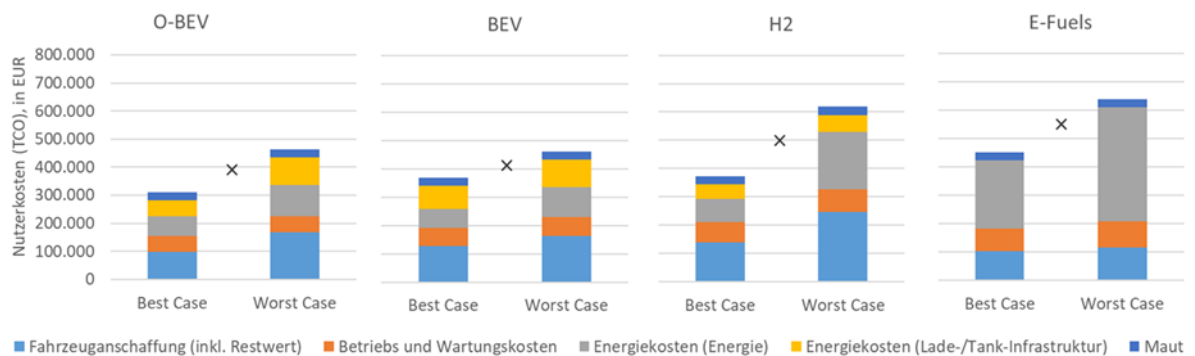
Quelle: AEA, eigene Berechnungen

Die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen von O-BEV (Fahrzeuge ohne Infrastruktur) sind geringer als von vergleichbaren BEV mit ausschließlich stationärem Laden und deutlich geringer als von FCEV und mit E-Fuels betriebene Lkws. Für 2030 basieren die Analysen von EnergyRoads auf einem ca. 5 %igen Flottenanteil. Demnach ist kein signifikanter Effekt von O-BEV auf den Lastgang im österreichischen Stromnetz zu erwarten. Für 2040 wird es bei höheren Flottenanteilen zu signifikanten zusätzlichen Netzlasten kommen. Dies erfordert zusätzlichen Netzausbau und den Ausbau von erneuerbarer Stromaufbringung bzw. elektrischen Speichern.

Die ERS-Infrastruktur ist gut modular skalier- und erweiterbar. Ein verkehrlich sinnvolles und attraktives System erfordert eine erhebliche Anfangsinvestition. In Österreich wären für diese Anfangsinfrastruktur entlang des TEN-V-Kernnetzes 550 km (in beide Fahrtrichtungen) mit Oberleitungen zu versehen und Unterwerke mit einer gesamten Anschlussleistung von ca. 500 MW notwendig. Bezüglich der Investitionskosten für diesen anfänglichen Infrastrukturausbau inklusive Netzbereitstellung ist von ca. 880 – 1.400 Mio. EUR auszugehen. Dies entspricht ca. 1,6 – 2,6 Mio. EUR/km. Der Endausbau im TEN-V-Kernnetz (wenn 50 % des N3-26 Verkehrs in Österreich und ca. 70 % des Verkehrs der TEN-V-Kernnetzes mit O-BEV befahren werden) erfordert ca. 1.360 – 2.040 Mio. EUR an Investitionskosten (inkl. Netzbereitstellung) bzw. 2,5 bis 3,7 Mio. EUR/km. Die Investitionen für die Anfangsinfrastruktur ist höher als bei alternativen Dekarbonisierungsoptionen, da diese eine höhere Modularität haben. Im Endausbau sind die Investitionskosten vergleichbar. Für die ERS-Infrastruktur sind allerdings die Abschreibungs- und Nutzungsdauern mit 20 Jahren deutlich höher als für stationäre Ladeinfrastruktur und Wasserstofftankstellen.

Im Vergleich der Gesamtkosten über Kauf und Nutzung eines Fahrzeugs (Total Cost of Ownership) schneiden O-BEV und BEV besser ab als ihre Alternativen. Ursächlich sind geringere Fahrzeugkosten, geringere Energiekosten (im Vergleich mit H₂ und E-Fuels), längere Abschreibungszeiträume der Infrastruktur und potentiell bessere Finanzierungsbedingungen der Infrastruktur (bei Refinanzierung u. a. durch Nichtnutzer). Die mittleren TCO-Kosten liegen bei O-BEV und BEV bei ca. 400.000 EUR, bei FCEV bei ca. 500.000 EUR und bei mit E-Fuels betriebenen Lkws bei ca. 550.000 EUR (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Total Cost of Ownership Vergleich von O-BEV, BEV, FCEV und mit E-Fuels betriebenen Lkws



Quelle: AEA, eigene Berechnungen

Ob dynamisches Laden eine sinnvolle Option ist, muss im Vergleich zu anderen Lösungsansätzen hinsichtlich der Energieeffizienz, der Verfügbarkeit und der Kosten beurteilt werden. FCEV und mit E-Fuels betriebene Lkws sind deutlich weniger energieeffizient, die (künftige) Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff bzw. E-Fuels zu einem wettbewerbsfähigen Preis muss hinterfragt werden. Internationale Kostenanalysen zeigen übereinstimmend mit dieser Studie signifikant niedrigere Kosten sowohl für BEV als auch O-BEV. Im Vergleich zu einer Begrenzung auf das stationäre Laden ist die O-BEV-Option insbesondere dann sinnvoll, wenn signifikante Verbesserungen in Bezug auf den spezifischen Energiegehalt von Traktionsbatterien oder die Batteriekosten ausbleiben, die Verfügbarkeit von Batterien eingeschränkt ist oder die Nutzung der Schnellladeinfrastruktur zu hohen gleichzeitigen Netzbelastungen und auf wenige Netzanschlusspunkte verteilte Belastungen führt. In all diesen Fällen weisen O-BEV-Lkw deutliche (Kosten-)Vorteile im Vergleich mit BEV-Lkw auf. Insbesondere durch den Ausbau von Zero-Emission-Korridoren, die stationäres und dynamisches Laden gegebenenfalls unter Einschluss weiterer Antriebsarten kombinieren, kann der Ausbaudruck auf die stationäre Ladeinfrastruktur und die Gleichzeitigkeit der Netzbelastung reduziert werden.

Die Nutzung von Synergieeffekten zwischen Oberleitungen und der stationären Ladeinfrastruktur sind bei der Elektrifizierung des Personen- und Güterverkehrs am Autobahn- und Schnellstraßennetz naheliegend und möglich. Untersuchungen in Deutschland haben die Verfahrensdauern für den Ausbau der Stromnetze als eine der größten Herausforderungen für den Markthochlauf von E-Mobilität identifiziert. Durch eine kombinierte und langfristige Betrachtung der Stromnachfrage von Pkw und Lkw können nicht nur Kosten gespart, sondern auch die Anzahl der Genehmigungs- und Netzanschlussverfahren reduziert werden. Die Nutzung dieses Synergiepotenzials kann zu einer früheren zeitlichen Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur von Lkws führen. Für den Güterverkehr ergeben sich Synergiepotenziale, wenn Oberleitungsinfrastruktur auf hochbefahrenen Strecken zum Einsatz kommt und Schnellladeinfrastruktur zur Erschließung der Fläche eingesetzt wird. Die Kombination von dynamischem und stationärem Laden im Sinne von Zero-Emission-Korridoren erhöht die Flexibilität und Resilienz des Systems.

Sollte eine Grundsatzentscheidung für den Ausbau einer Oberleitungsinfrastruktur für den Straßengüterverkehr getroffen werden, ist eine rechtspolitische Entscheidung mit Konsequenzen für die Eigentümerstruktur und Refinanzierungsmöglichkeit notwendig. Die Einordnung der ERS Infrastruktur als „Teil der Straße“, mit Eigentümer ASFiNAG und Refinanzierungsmöglichkeit über die Maut hat Vorteile gegenüber den Alternativen. Die Beteiligung von Nichtnutzern an der Refinanzierung der Infrastruktur über die Maut kann in der Hochlaufphase essentiell sein. Hierfür ist allerdings die rechtliche Machbarkeit zu prüfen und eventuell die EU Wegekosten-Richtlinie weiterzuentwickeln. Eine genaue Analyse der Möglichkeiten der

Leistungserbringung für Planung, Bau, Betrieb, Erhaltung und Finanzierung im Rahmen von funktionaler Privatisierung bzw. öffentlich-privaten Partnerschaften zwischen ASFiNAG und Dritten wird benötigt. Der ERS-Betreiber sollte aus wettbewerbsrechtlichen Gründen nicht als Stromlieferant für die ERS-Nutzer fungieren. Es gibt unterschiedliche Optionen, wie dies alternativ organisiert werden kann. Aus Effizienzüberlegungen ist es naheliegend, die über die ERS-Infrastruktur abgegebene Energie nach dem tatsächlichen Verbrauch abzurechnen und nicht zeit- oder streckenbezogen oder aber als Flatrate-Tarif.

Um diesen möglichen ERS-Infrastruktur-Aufbau zeitlich und wirtschaftlich zu optimieren, ist es empfehlenswert, dass zeitnah mit dem Aufbau und Betrieb einer ERS-Infrastruktur-Teststrecke Erfahrungen gesammelt werden. Eine solche Pilotstrecke kann auf einer ausgewählten Pendelstrecke mit vorab identifizierten Ankerkunden in Österreich etabliert werden.

Das dynamische Laden sollte nicht als Konkurrenz oder Substitut, sondern als komplementäre Lösung zum stationären Laden und gegebenenfalls auch zu anderen Antriebskonzepten im Sinne von Zero-Emission-Korridoren verstanden werden. Das gilt auf Ebene des einzelnen Fahrzeugs, aber auch systemisch. Auf Fahrzeugebene können O-BEV auch stationär laden, für Strecken ohne Oberleitungsinfrastruktur muss auf die Traktionsbatterie oder eine zweite Antriebstechnologie zurückgegriffen werden – die Oberleitungstechnologie ist hier mit allen Antriebskonzepten kompatibel. Systemisch reduziert das dynamische Laden den Ausbaudruck für stationäre Ladeinfrastruktur und erhöht die Flexibilität des Verkehrssystems – ein nur auf stationärer Ladeinfrastruktur basierendes System erfordert entweder sehr hohe (Sicherheits-)Kapazitäten oder eine genaue raum-zeitliche Abstimmung von Elektrizitätsnachfrage und -angebot.

Abstract

The Austrian federal government has set itself the goal of achieving climate neutrality in Austria by 2040 at the latest and aims to make Austria a pioneer in climate protection in Europe. For the freight transport sector, an almost complete decarbonisation by 2040 is necessary in Austria. Parts of freight transport can be shifted to rail, but this shift potential is not sufficient to achieve the climate protection goals. Therefore, climate-neutral drive concepts for truck road freight transport are required.

This will mean the direct or indirect electrification of truck traffic. It is currently still unclear whether, in the future, electricity will be charged in battery-electric vehicles before driving, dynamically charged while driving, or used to produce fuel (e-fuels or hydrogen). The present study examines the possibilities, advantages and disadvantages of establishing dynamic charging for freight traffic on Austrian highways by 2040. The focus of the study is on the overhead catenary line system, since these compared to other dynamic charging options (such as inductive or conductive charging at conductor rails) have the highest level of technological maturity (TRL) for heavy commercial vehicles. Alternative systems such as battery electric vehicles (BEV) or vehicles that use hydrogen (FCEV) or e-fuels are considered in comparative considerations.

With dynamic charging via an overhead catenary line, a vehicle uses a pantograph to draw energy from an overhead line while driving. The medium or high voltage network feeds the catenary system. The vehicle has a traction battery or a second type of drive with which it can move on routes without overhead lines.

Accordingly, no continuous overhead line infrastructure is necessary. This study focuses on overhead catenary battery-electric vehicles (O-BEV) and the necessary Electric Road System (ERS) infrastructure and the infrastructure for stationary charging of such vehicles.

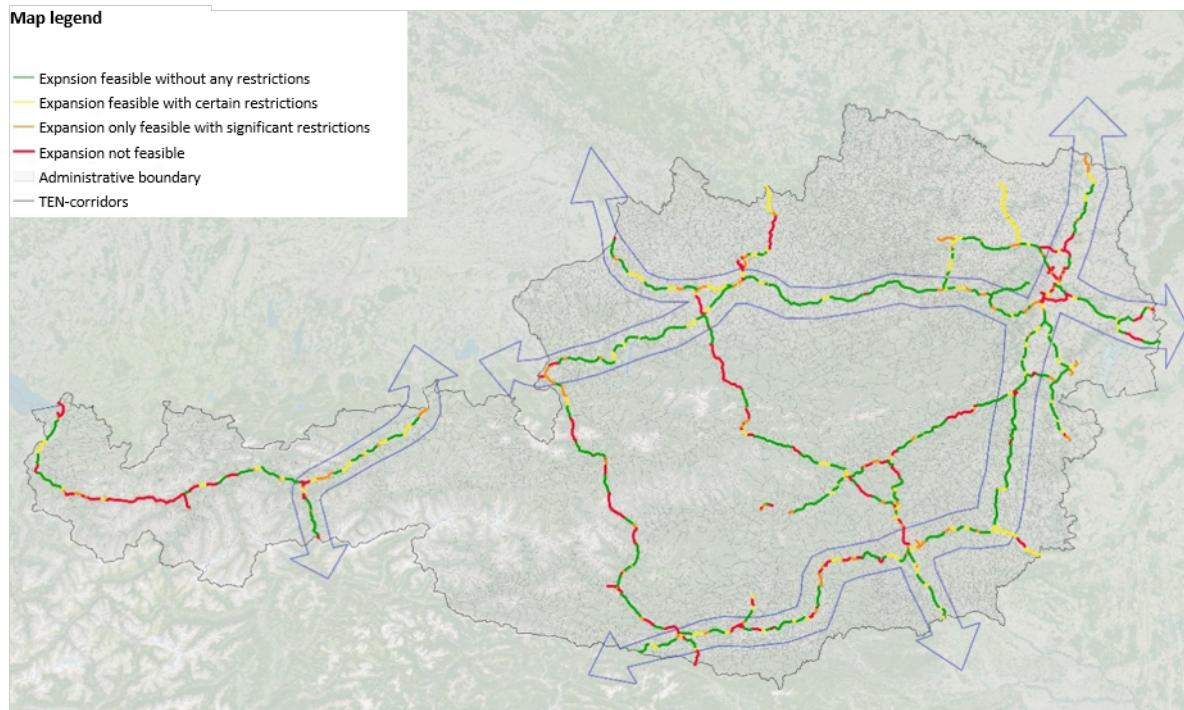
In principle, the establishment of an overhead line system is possible. No factor was identified in EnergyRoads' analyses that would rule this out. The basic (technical) feasibility of an overhead line Electric Road System has been proven in international test tracks, the system has been tried and tested and is ready for the market.

Unlike the use of hydrogen or e-fuels in truck traffic, there are no major technological or economic development steps to be taken. The required European standards or supplements to standards are available or at least in preparation. The adjustments to national laws, regulations, standards and guidelines must however be checked in detail before the large-scale use of overhead line Electric Road System in Austria.

The analyses in EnergyRoads also show that there are partial but no comprehensive barriers to the installation of the required infrastructure in the Austrian high-level road network, especially in the TEN-T network (Trans-European Network for Transport Core Network), which is relevant for transit traffic. Such barriers are, for example, tunnels, high noise protection walls or overhead structures in close succession - this does not prevent the construction of an overhead line infrastructure in all of these cases, but makes the construction in some sections more complex and expensive. Analysis of the road network using an evaluation scheme revealed that ERS infrastructure can be built without restrictions on half of the motorway and expressway network (routes marked in green in figure 1). The trans-European corridors relevant to transit traffic (TEN-T core network and TEN-T comprehensive network) are particularly well suited. In the TEN-T core network, 80% coverage is feasible. A 50% minimum coverage - defined as the proportion of the motorway and expressway network equipped with overhead contact lines - is thus feasible both in the TEN-T core network and in the TEN-T comprehensive network. Only a quarter of the high-level road network is marked in red, which means that dynamic charging is not possible there from the current perspective. The longest non-electrified section in the

TEN-V core network can be shorter than 20 km. In the TEN-T overall network, there are longer non-electrifiable routes due to long or many tunnels, for journeys over this network O-BEV with higher battery capacity would be necessary. The analysis of all truck journeys in Austria also show that, in most cases, an effective range of 50 km is sufficient from the last easily electrified section of the route to the destination of the individual route.

Figure 1: Assessment of the suitability of Austrian highway and expressways for catenary based ERS-infrastructure.



Source: IKK

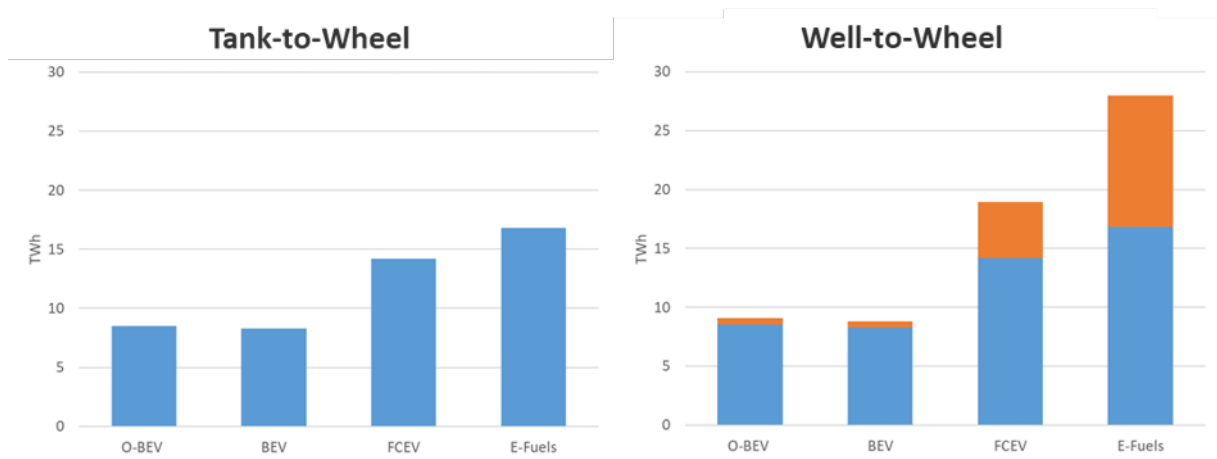
The question of whether an overhead line ERS infrastructure should be set up in Austria is a normative question that cannot and should not be answered in a scientific study. However, what is possible to show are the prerequisites as well as the advantages and disadvantages of the solution in question compared with alternative zero-emission drive concepts. This includes, for example, energy efficiency, the costs of construction and operation or synergies with the expansion of the stationary charging infrastructure.

From a traffic-system point of view, overhead line systems only make sense as an international system, so the infrastructure does not end at national borders. This applies in particular to the international TEN-T core network corridors. In order to ensure this, an increased international exchange is needed to clarify important aspects, for example with regard to the corridor selection, expansion times, O-BEV vehicle parameters (e.g. minimum battery capacity and C-rate), and minimum degrees of coverage or longest non-electrified sections. Joint studies and the use of existing exchange formats (IEA HEV Tasks, PIARC...) are suitable for this. Specifically, it is necessary to anchor ERS infrastructure as a possible and creditable decarbonisation option for road freight transport at EU level, especially as part of the review of the Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR). Corresponding preparatory work must be continued or started immediately.

O-BEV basically cause a similar energy consumption as BEV and are significantly more efficient than FCEV and e-fuel trucks, see Figure 2 (for a theoretical 100 % fleet per drive type). With an increase in truck traffic (vehicles with more than 26 tons, N3-26 traffic) by approx. 30 %, with a 50 % use of O-BEV in the truck fleet an

additional annual energy consumption on the ERS of 3 TWh/a and additionally static charging processes (at night, at weekends, at depots and destinations) of 1.2 TWh/a can be expected.

Figure 2: Annual energy consumption of the vehicles (tank-to-wheel and including fuel supply (well-to-wheel), assumed 100 % of the mileage per drive according to the CLEARER-scenario



Source: AEA calculations

The life cycle greenhouse gas emissions of the vehicles (without infrastructure) of O-BEV are significantly lower than for BEV and significantly lower than FCEV and e-fuel trucks. For a complete analysis of the life cycle greenhouse gas emissions, the influence of greenhouse gas emissions in the production and installation of the necessary charging infrastructure should be included in further studies. No significant effect of O-BEV on the load profile in the Austrian power grid is expected for 2030, since the assumed 5 % fleet share is low. For 2040 there will be significant additional loads in the electricity grid with higher fleet shares. This requires additional grid expansion and the expansion of renewable electricity generation and electricity storage.

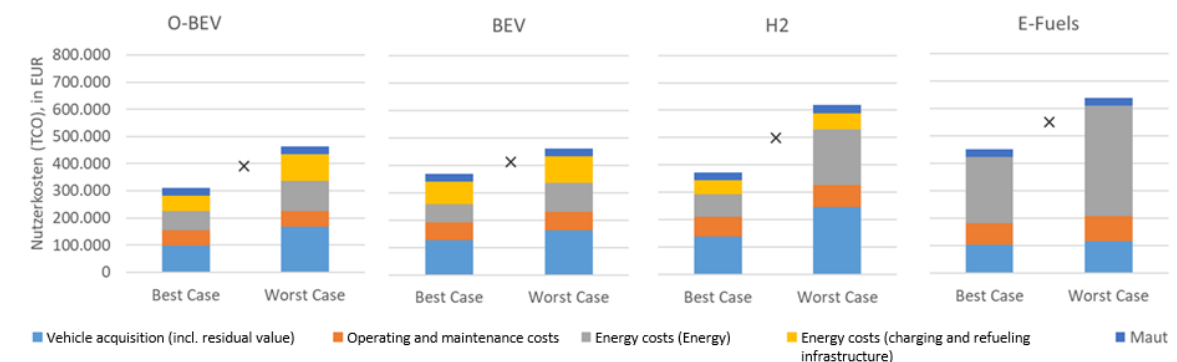
The use of synergy effects in the charging infrastructure required for the electrification of passenger and freight traffic on the highway and expressway-network is obvious and possible. Truck manufacturers (OEMs) and other stakeholders in Germany have identified the length of the procedure for the expansion of the distribution and high-voltage grid as one of the greatest challenges for the market ramp-up of e-mobility. A combined and long-term view of the electricity demand from cars and trucks not only saves costs, but also reduces the number of approval and grid connection procedures. The use of this synergy potential can also lead to earlier availability of the charging infrastructure for trucks. There is also synergy potential for freight transport alone. The German discussion paper on "Infrastructure for electric trucks in long-distance transport" (Ploetz, et al., 2021) describes that overhead line and rapid charging infrastructure can complement each other. The model presented in the discussion paper assumes that overhead line infrastructure is used on busy routes and rapid charging infrastructure is used to develop access in the wider area - the combination of dynamic and stationary charging in the sense of zero-emission corridors should be a very plausible one. This can increase flexibility and resilience of the system.

The ERS infrastructure is easily modularly scalable and expandable. However, a traffic-wise sensible and attractive system requires substantial infrastructural coverage of the TEN-T core network. In Austria, 550 km (in both directions of travel) would have to be provided with overhead lines for this initial infrastructure and a

capacity of approx. 500 MW at substations would be necessary. Individual routes in the TEN-T core network can be expanded separately.

The initial infrastructure of the TEN-T core network causes investment costs (including grid connection) of around EUR 880 - 1,400 million. This corresponds to approx. 1.6 - 2.6 million EUR/km. The final development of the TEN-T core network (when 50 % of the N3-26 traffic in Austria and approx. 70 % of the traffic of the TEN-T core network are operated with O-BEV) requires approx. EUR 1,360 - 2,040 million in investment costs (incl. network provision) or 2.5 - 3.7 million EUR/km. The investment for the initial infrastructure is higher than for the alternatives (which have a higher modularity). With optimal use in the final development, the investment costs are comparable. For the ERS infrastructure, however, the depreciation and useful lives of 20 years are significantly longer than for stationary charging infrastructure and H₂ filling stations. In a TCO comparison with the alternatives, BEV and O-BEV are cheaper than the alternatives due to lower vehicle costs, lower energy costs (compared to H₂ and e-fuels), longer depreciation periods for the infrastructure and potentially better financing conditions for the infrastructure (in the case of refinancing e.g. by non-users). The average TCO costs for O-BEV and BEV are around EUR 400,000, for FCEV around EUR 500,000 and for e-fuels around EUR 550,000, see Figure 3.

Figure 3: Total cost of ownership comparison of O-BEV, BEV, FCEV and e-fuel trucks.



Source: AEA calculations

Whether dynamic charging is a sensible option must be assessed in comparison to other approaches in terms of energy efficiency, availability and costs. FCEV and e-fuel are significantly less energy-efficient, and the (future) availability of green hydrogen or e-fuels at a competitive price must be seriously questioned. Consistent with this study, international cost analyses show significantly lower costs for both BEV and O-BEV. Compared to stationary charging BEV, the O-BEV option makes particular sense when there are no significant improvements in terms of the specific energy content of traction batteries or the battery costs, the availability of batteries is limited or the use of the fast charging infrastructure leads to high simultaneous grid loads and loads distributed over a small number of grid connection points. In all these cases, O-BEV trucks can have significant (cost) advantages compared to BEV trucks. In particular, the expansion of zero-emission corridors, which combine stationary and dynamic charging, possibly including other drive types, can reduce the expansion pressure on the stationary charging infrastructure and the simultaneity of the network load.

If a fundamental decision is made to expand an ERS infrastructure for road freight transport, a legal policy decision with consequences for the ownership structure and refinancing options is necessary. The classification of the overhead line Electric Road System as "part of the road", with ASFINAG as the owner and the possibility of refinancing via the toll, has a number of advantages over the alternatives. Participation in the refinancing of

the infrastructure by non-users via the toll can be essential in the ramp-up phase. For this, however, the legal feasibility has to be checked and the EU transport costs directive has to be adapted if necessary. A precise analysis of the possibilities of providing services for planning, construction, operation, maintenance and financing within the framework of functional privatization or for public-private partnerships between ASFiNAG and third parties is also recommended. The ERS operator should not act as a supplier of electricity to the ERS users. There are different options how this can be organized alternatively. The billing of the energy provided via the ERS infrastructure should be based on kWh (and not on km, distances or via a flat rate).

In order to optimize this possible ERS infrastructure implementation in terms of time and economy, it is advisable to gain experience with the construction and operation of an ERS infrastructure test track in a timely manner. Such a pilot route can be established on a selected shuttle route with previously identified anchor customers in Austria.

Inhaltsverzeichnis

1	Dekarbonisierung des Güterverkehrs durch dynamisches Laden?	17
2	Infrastruktur	21
2.1	Straßeninfrastruktur	21
2.1.1	Systemelemente	21
2.1.2	Grundsätze für die lagemäßigen Festlegungen	23
2.1.3	Kategorisierung des Straßennetzes	24
2.1.4	Errichtung der ERS-Infrastruktur	27
2.1.5	Sonstige Aspekte einer Oberleitungsinfrastruktur	27
2.2	Elektrische Anlagen und Bauelemente	29
2.2.1	Netzanschluss und Unterwerke	29
2.2.1.1	Netzanschluss	29
2.2.1.2	Nennspannung	30
2.2.1.3	Speisekonzepte	30
2.2.1.4	Unterwerke	32
2.2.1.5	Rückspeisung	33
2.2.1.6	Netzurückwirkungen	33
2.2.2	Oberleitung	34
2.2.2.1	Gründungen	35
2.2.2.2	Oberleitungsmasten	35
2.2.2.3	Quertrageinrichtungen	36
2.2.2.4	Leitungsmaterial	36
2.2.2.5	Kettenwerk	36
2.2.2.6	Abspannvorrichtungen	37
2.2.2.7	Streckentrenner und Trennschalter	37
2.2.2.8	Überlappungen und Stromverbinder	37
2.2.2.9	Isolatoren	37
2.2.2.10	Elektrische Schutzeinrichtungen	37
3	Straßengüterverkehr	39
3.1	Verkehrsaufkommen – Status Quo	39
3.1.1	Die österreichische Lkw-Flotte	39
3.1.2	Güterverkehrsaufkommen in Österreich	40
3.1.2.1	Überblick	40
3.1.2.2	Fahrtweiten	42
3.1.2.3	Güterverkehrsaufkommen zeitliche Auflösung	43
3.1.2.4	Güterverkehrsaufkommen räumliche Auflösung	47
3.2	Verkehrsaufkommen – Zukunftsszenarien	48
3.2.1	Verkehrsnachfrage	48
3.2.2	Verkehrsprognose	49
3.2.2.1	Angebotsprognose	49
3.2.2.2	Nachfrageprognose	50
3.2.3	Ergebnisse	52
3.2.3.1	Analysezustand 2019	52
3.2.3.2	Prognose 2040 – MMP	53
3.2.3.3	Prognose 2040 – CLR	54
3.2.3.4	Prognose 2040 – VPÖ	55
3.3	Umweltwirkungen – Status Quo	56
4	Fahrzeuge	57
4.1	Grundlagen	57

4.2	Oberleitung – O-BEV.....	58
4.3	Andere Antriebe	61
4.3.1	Diesel und E-Fuels.....	61
4.3.2	Batterieelektrisch – BEV	62
4.3.3	Brennstoffzelle - FCEV	63
4.3.4	Sonstige	65
4.4	Vergleich.....	67
5	Entwicklungen zum dynamischen Laden	71
5.1	Entwicklung in Österreich.....	71
5.2	Europäische Richtlinien und Verordnungen.....	72
5.3	Entwicklung in Deutschland	74
5.4	Internationale Teststrecken	76
5.5	Einschätzung.....	79
6	Technische Analyse	80
6.1	Annahmen	80
6.2	Ergebnisse – Oberleitung.....	82
6.2.1	Oberleitungsgebundenes ERS-Infrastrukturnetz.....	82
6.2.2	Ausbaustufen.....	83
6.2.2.1	TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken, Anfangsphase	84
6.2.2.2	TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken, Endphase	85
6.2.2.3	TEN-V-Gesamtnetz, Teilstrecken, Endphase	86
6.2.3	Beispiel für einen Autobahnabschnitt.....	87
6.2.4	Stationäres Laden	89
6.2.5	Energie- und Leistungsbedarf.....	90
6.2.5.1	Dynamisches Laden	90
6.2.5.2	Dynamisches und stationäres Laden	92
6.3	Energieverbrauch	94
6.4	Umweltauswirkungen.....	96
6.5	Stromaufbringung	100
6.6	Synergieeffekte von dynamischen und stationärem Laden	102
7	Wirtschaftliche Analyse.....	104
7.1	ERS-Infrastrukturkosten	104
7.1.1	CAPEX dynamisches Laden	104
7.1.2	CAPEX stationäres Laden	105
7.1.3	Vergleich.....	106
7.2	Total Cost of Ownership	106
7.3	Volkswirtschaftliche Effekte	108
8	Betreiber- und Erlösmodelle	111
8.1	Rechtlich-regulatorische Rahmenbedingungen	111
8.2	Beschaffungs- und Organisationsmodell.....	112
8.3	Refinanzierung der Infrastruktur.....	113
8.4	Abrechnungsmodell.....	114
9	Roadmap und Empfehlungen.....	118
10	Annex	121
10.1	Annex I – Annahmen spezifischer Energieverbrauch	121
10.2	Annex II – Vorläufige Machbarkeit TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken	123
10.3	Annex III – Technische Analyse anderer Antriebe	125
10.3.1	Ergebnisse BEV	125
10.3.2	Ergebnisse – FCEV.....	127
10.3.3	Ergebnisse – Diesel/E-Fuels	128
10.4	Annex IV – Infrastrukturkosten	129
10.4.1	ERS-Infrastruktur	129
10.4.2	BEV- und H ₂ -Infrastruktur.....	130

10.5	Annex V – Berechnung TCO	130
	Literatur	133
	Abbildungsverzeichnis	143
	Tabellenverzeichnis	147
	Abkürzungsverzeichnis	149

1 Dekarbonisierung des Güterverkehrs durch dynamisches Laden?

Grob ein Drittel der Treibhausgasemissionen Österreichs stammt aus dem Verkehrssektor, wovon wiederum ein Drittel aus dem Straßengüterverkehr kommt. Die österreichische Regierung hat sich das Ziel der Klimaneutralität 2040 gesetzt (Bundesregierung, 2020). Im Entwurf des Klimaschutzgesetzes (April 2021) wurde dieses Ziel konkretisiert (Schneider, 2021) und ein sektoraler Reduktionspfad aufgezeigt. Der österreichische Mobilitätsmasterplan (BMK, 2021) konkretisiert dies: das Ziel soll durch eine Kombination aus dem Vermeiden von Verkehr, der Verlagerung auf klimafreundliche Verkehrsmittel – im Güterverkehr auf die Schiene – und Verbesserungen im System erreicht werden.

Vermeidung bezieht sich auf das Einsparen von Wegen oder Fahrleistungen. Ansatzpunkte können beispielsweise die Vermeidung von Leerfahrten oder verkehrssparende Produktions- und Logistikkonzepte sein. Auf systemischer Ebene fehlen im international arbeitsteiligen Wirtschafts- und Produktionssystem mit seinen vielfältigen Austausch- und Kooperationsbeziehungen aber überzeugende Argumente, um kurz- oder mittelfristig von einer umfassenden Reduzierung des Transportaufkommens auszugehen. So ist die Güterverkehrsleistung verkehrsträgerübergreifend von 1990 bis 2019 kontinuierlich gewachsen (Abbildung 26). Temporäre Ausnahmen waren die Zeiträume der Finanzkrise 2008 und der COVID-Pandemie. Dementsprechend wird auch im Masterplan Mobilität für Österreich 2030 nicht von einer Reduktion der Transportleistung bis 2030 ausgegangen (BMK, 2021).

Die *Verlagerung* von Transporten auf die Schiene dürfte in alle Masterpläne, Gesamtverkehrspläne und ähnliche Dokumente Eingang gefunden haben. Ansatzpunkte zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der Bahn werden beispielsweise in einer CO₂-Steuer, im Trassenbau oder in der technischen oder organisatorischen Verbesserung der Abwicklung von Transporten etwa bei der internationalen Trassenbuchung über die RFCs (Rail Freight Corridor), Zugsicherungssysteme oder digitale Kupplungen gesehen. Der Masterplan Mobilität für Österreich 2030 geht dementsprechend von einem signifikanten Anstieg der Transportleistung im Schienengüterverkehr aus (BMK, 2021). Dies ist insbesondere auch aufgrund der hohen Energieeffizienz der Bahn sinnvoll, es stellt allerdings eine Trendumkehr dar. Zwischen 1990 und 2019 entfiel (rechnerisch) nicht nur der gesamte Zuwachs der Verkehrsleistung im Güterverkehr auf die Straße, es kam auch zu einer Nettoverlagerung von der Bahn auf die Straße (Umweltbundesamt, 2021).

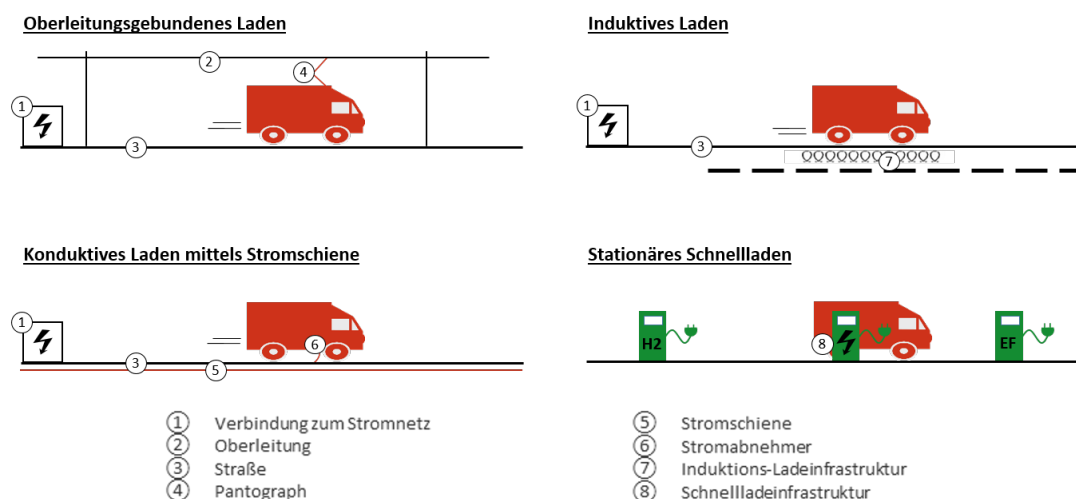
Verbesserung betrifft beispielsweise die Optimierung von Routen und Beladung. Die wesentliche Stellschraube sind die Fahrzeuge und hier vor allem die Antriebstechnologie (Kapitel 4). Die beiden am häufigsten diskutierten Lösungskonzepte sind die Nutzung von Wasserstoff und batterieelektrische Antriebe. Teilweise werden synthetische Kraftstoffe als Lösung genannt, die aus Wasserstoff und einer CO₂-Quelle unter Einsatz von Energie hergestellt werden (E-Fuels). Die Umstellung der Lkw-Flotten oder genauer die Durchdringung der Lkw-Flotten erfordert die Verfügbarkeit entsprechender Fahrzeuge, Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur und Treibstoffmengen. Die Umstellung macht dabei nur bei einer Verbesserung der Emissionsbilanz im Lebenszyklus Sinn: Alle drei Antriebs- bzw. Treibstoffarten sind emissionsfrei im Sinne der lokalen Emission von klimaschädlichen Treibhausgasen. In der Lebenszyklusbetrachtung muss aber insbesondere auch die Produktion des Wasserstoffs bzw. E-Fuels oder der elektrischen Energie berücksichtigt werden. Das Potenzial der Antriebsarten zur Treibhausgasemission hängt direkt von den zur Erzeugung der elektrischen Energie bzw.

des Treibstoffs (H₂ oder E-Fuel) verwendeten Primärenergieträgern und im Falle des Wasserstoffs auch vom Produktionsverfahren ab. Demnach werden zur Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff nur erneuerbare Energieträger eingesetzt, bei der Erzeugung und Nutzung des Wasserstoffs fällt dann kein CO₂ an. Grauer Wasserstoff entsteht dagegen durch die Dampfreformierung fossiler Brennstoffe mit entsprechend hohen Treibhausgasemissionen.

Die drei technologischen Ansätze haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile. In Bezug auf E-Fuels sind die Energieeffizienz, die Kosten des Treibstoffs und die fehlende Verfügbarkeit zu nennen. Der Vorteil ist vor allem, dass vorhandene Fahrzeuge weiterverwendet werden können – dies hat systemische Vorteile, setzt aber im Zweifelsfall voraus, dass der teuerste Treibstoff in den tendenziell ältesten Fahrzeugen verwendet wird. Die Nachteile der E-Fuels gelten im unterschiedlichen Ausmaß auch für wasserstoffbetriebene Lkws. Die Energieeffizienz ist gering, die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff, Fahrzeugen mit Brennstoffzelle und Tankinfrastruktur stark begrenzt und die Kosten (dementsprechend) hoch. Der Vorteil von FCEV-Lkws sind die hohen Freiheitsgrade in der Nutzung durch die hohe Reichweite und die schnelle Betankungsmöglichkeit, die die Aufrechterhaltung der etablierten Logistikmuster ermöglicht. Batterieelektrische Lkws verfügen über eine Traktionsbatterie. Reichweite, Ladebedarf und Lademuster richten sich nach ihrer Kapazität. Ist sie niedrig, so ist die Reichweite begrenzt. Mit zunehmender Größe steigen die Kosten und das Gewicht, bei gegebener Ladeleistung steigt auch der Zeitbedarf für eine Vollladung. Zudem muss genug leistungsstarke Ladeinfrastruktur an Produktionsstätten, Logistikstandorten und Autobahnraststätten verfügbar sein.

Beim dynamischen Laden nimmt das Fahrzeug dagegen während der Fahrt elektrische Energie auf. Voraussetzung ist eine entsprechende straßenseitige Infrastruktur und kompatible Fahrzeuge. Es werden drei Arten des dynamischen Ladens unterschieden (siehe Abbildung 4): (i) Oberleitungsgebundene Fahrzeuge, die mit einem Pantographen ausgestattet sind, (ii) konduktive, kabelgebundene Systeme (zu denen teilweise auch oberleitungsgebundene Systeme gezählt werden), bei denen Stromaufnahme beispielweise über eine Stromschiene erfolgt und (iii) induktive Systeme, bei denen im Boden integrierte Spulen ein hochfrequentes Magnetfeld erzeugen, das wiederum über eine Empfängerspule im Fahrzeug elektrische Energie erzeugt. Dies erfordert, dass unter der Straßenoberfläche Übertragungssysteme eingebaut werden.

Abbildung 4: Dekarbonisierungsoptionen im Straßengüterverkehr: Oberleitungen, konduktives, induktives sowie stationäres Laden (von oben nach unten)



Quelle: AEA, eigene Darstellung

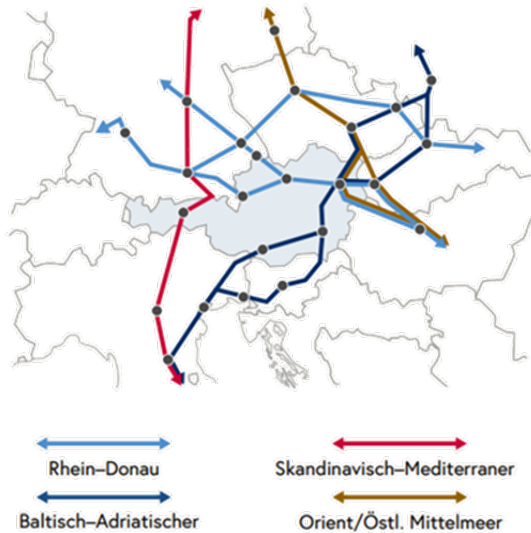
Die drei Systeme eignen sich für jeweils spezifische Fahrzeugsegmente. Induktive Systeme können prinzipiell für alle Fahrzeuge verwendet werden, sie kommen aber aktuell ausschließlich für Pkws und leichte Nutzfahrzeuge zur Anwendung. Ein wesentlicher Grund ist, dass bei Lkws zur Sicherstellung einer ausreichenden Energieübertragung die gesamte Fahrzeuglänge mit Magnetspulen ausgestattet werden müsste. Herausforderungen und Kritikpunkte betreffen den finanziellen Aufwand bei der Errichtung der Infrastruktur – sofern sie nicht mit Erneuerungsarbeiten oder dem Straßenbau kombiniert wird – und den Wirkungsgrad bei der Übertragung der Energie sowie die Abrechnungsmodelle. Bei kabelgebundenen Systemen, insbesondere Stromschienen in der Straße, werden vor allem Sicherheitsbedenken angeführt. Oberleitungsgebundene Systeme werden aufgrund des Gewichts des Pantographen und der Fahrzeugstatik nur für große Fahrzeuge – Lkws der Klassen N2 und N3 sowie Busse – eingesetzt.

Die dynamisch geladene Energie kann in Bewegungsenergie umgewandelt oder in einer Traktionsbatterie gespeichert werden. Die gespeicherte Energie wird zur Bewältigung der letzten Meile von einer Infrastruktur für dynamisches Laden bis zum Ziel einer Fahrt verwendet oder um nicht mit entsprechender Infrastruktur ausgestattete Straßenabschnitte abzudecken. In der Konsequenz kann die Traktionsbatterie kleiner dimensioniert werden als bei ausschließlich stationärem Laden, die Fahrzeuge sind dadurch günstiger und die Anforderungen an die raumzeitliche Verfügbarkeit von Ladeleistungen geringer.

Das dynamische Laden ist eine Komplementärtechnologie, kein Substitut zu den genannten Antriebsarten. Zur Erhöhung der Autonomie des Fahrzeugs wird entweder eine Traktionsbatterie verwendet oder auf eine zweite Antriebsart zurückgegriffen (E-Fuels, konventioneller Antrieb, Wasserstoff). In der systemischen Betrachtung zeigt sich, dass das dynamische Laden Vorteile in Bereichen hat, in denen bei den anderen Antriebsarten ungelöste Herausforderungen bestehen. Die Energieeffizienz ist hoch, der Druck auf die Batterie- und Fahrzeugentwicklung und die Herausforderung des Roll-Outs der stationären Ladeinfrastruktur könnte unter Rückgriff auf eine lange erprobte Technologie reduziert werden. Offensichtlich ist aber auch, dass das dynamische Laden im Sinne von Zero-Emission-Korridoren nur ein Teil der Lösung sein kann und dass eine auf Österreich begrenzte „Insellösung“ nicht sinnvoll ist.

Daher sind die prioritären Einsatzbereiche für Oberleitungen Strecken mit einem hohen Aufkommen an schweren Lkws, insbesondere im internationalen Quell-, Ziel- und Transitverkehr. Relevante Strecken sind dabei Autobahnen und Schnellstraßen und im Speziellen die internationalen Transportkorridore des Transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-V). Diese TEN-V-Korridore sind das Rückgrat der europäischen Verkehrsinfrastruktur. Dabei wird zwischen dem TEN-V-Kernnetz und dem TEN-V-Gesamtnetz unterschieden (Abbildung 5).

Abbildung 5: TEN-V-Kernnetz Korridore durch Österreich



Quelle: BMK 2022

Die vorliegende Studie führt diese einleitenden Überlegungen weiter aus und untersucht Möglichkeiten und Einsatzbereiche des dynamischen Ladens für den Güterverkehr auf österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßen bis 2040. Die Studie wurde im Rahmen des Zero Emission Mobility Programms des Klima- und Energiefonds als Forschungs- und Entwicklungsdienstleistung finanziert. Im Leitfaden zur Ausschreibung wurden konkrete Fragestellungen formuliert, die diese Studie strukturieren und leiten. Diese Fragen sind den einzelnen Kapiteln *in kursiver Schrift* vorangestellt. Die Österreichische Energieagentur (AEA) hat diese Studie gemeinsam mit Trafility GmbH und IKK Group GmbH und mit Unterstützung der Bundesverband eMobility Austria durchgeführt.

Im Fokus der Studie steht die Oberleitung, da diese den höchsten Technologischen Reifegrad für schwere Nutzfahrzeuge im Vergleich zu anderen dynamischen Lademöglichkeiten hat. Für die Oberleitungstechnologie liegen bereits konkrete Erfahrungen auf Teststrecken und eine sehr weitreichende wissenschaftliche Begleitforschung in Deutschland vor. Auf diese Erfahrungen und Ergebnisse wird in der vorliegenden Analyse aufgebaut. Alternative Systeme wie batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) oder Fahrzeuge, welche Wasserstoff (FCEV) oder E-Fuels verwenden, werden in vergleichenden Betrachtungen berücksichtigt. Für diese Studie wurden wichtige Annahmen und Zwischenergebnisse in vielen Gesprächen mit Stakeholdern und in drei Workshops präsentiert und validiert.

Der vorliegende Bericht hat folgende Struktur. Kapitel 2 behandelt die Oberleitungsinfrastruktur. Analysen der Straßeninfrastruktur und die Bewertung der Streckeneignung zur Errichtung einer ERS-Infrastruktur in Österreich wurden von IKK Group durchgeführt. Zusätzliche Ausführungen zu den elektrischen Anlagen und Bauelementen werden separat behandelt. In Kapitel 3 wird das Güterverkehrsaufkommen von Trafility prognostiziert und analysiert. Diese Prognoseszenarien für die Verkehrsbelastung sind Grundlage der weiteren Analysen. Kapitel 4 ist den Fahrzeugen gewidmet. Kapitel 5 gibt einen Überblick über relevante Entwicklungen in Österreich, Deutschland und Europa im Bereich Electric Road Systems (ERS). Kapitel 6 beinhaltet die Ergebnisse der technischen Analyse, Kapitel 7 wirtschaftliche Aspekte. In Kapitel 8 werden Optionen für Betreiber- und Erlösmodelle aufgezeigt. In Kapitel 9 wird eine mögliche Roadmap für die Einführung von Oberleitungs-Lkw für Österreich skizziert. In den Annexen werden detaillierte Annahmen und Ergebnisse beschrieben. Die Studie ist barrierefrei und entsprechend formatiert.

2 Infrastruktur

Die bauliche ERS-Infrastruktur umfasst zunächst die straßenseitige Infrastruktur. Die straßenseitigen Anlagen müssen an das Elektrizitätsnetz angeschlossen sein.

2.1 Straßeninfrastruktur

Im Folgenden wird eine Übersicht über die benötigte straßenseitige Infrastruktur für oberleitungsgebundene Electric Roads Systems (ERS) gegeben. Detaillierte Informationen können dem Buch „Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr“ (Boltze, 2021) entnommen werden.

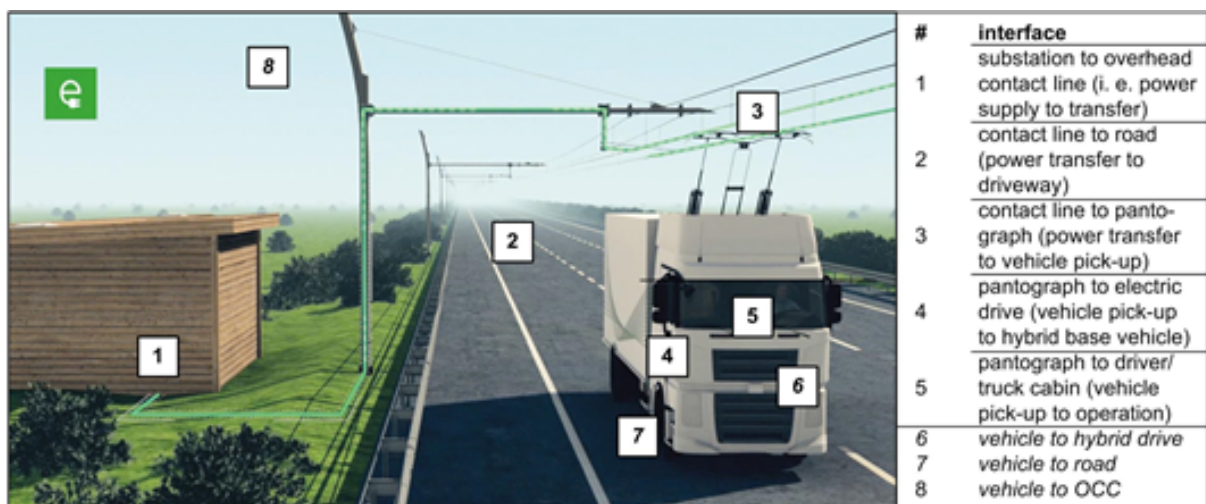
2.1.1 Systemelemente

Die Versorgungsstruktur und -technik für Oberleitungen basiert auf Elementen, die auch in anderen oberleitungsgebundenen Systemen verwendet werden. Wie bei Straßenbahnen und O-Bussen wird die Energie mit folgenden Elementen bereitgestellt:

- Oberleitungen: zweipolige Leitungen über der Fahrbahn, über Querträger an Masten montiert
- Mastsysteme: dienen der Befestigung der Kettenwerke, die Querträger sind in einer Höhe von ca. 8 m über der Fahrbahn montiert
- Kettenwerke: zweipolig, bestehen aus Fahrdrabt, Hänger und Tragseil, max. Länge ca. 1,50 km
- Unterwerke: für Energieversorgung, werden aus dem öffentlichen Stromnetz gespeist; es erfolgt eine Transformation auf die notwendige Spannung

Diese Elemente sind zu einem Gesamtsystem verbunden, das heißt die zweipoligen Oberleitungen werden über Unterwerke gespeist und sind über ein Mastsystem mit Kettenwerken montiert. Die Unterwerke versorgen beide Fahrtrichtungen.

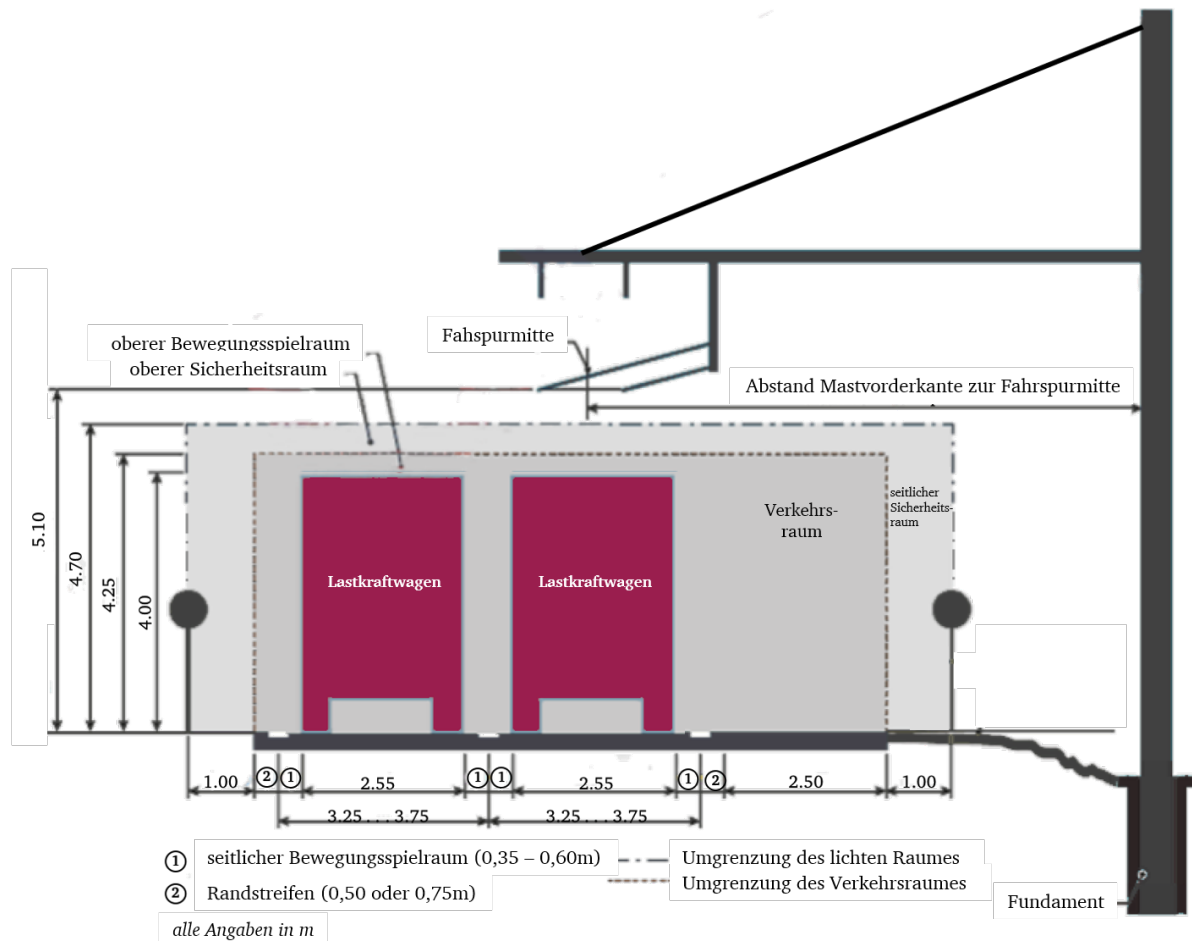
Abbildung 6: Subsysteme und Interfaces von oberleitungsgebundenen ERS



Quelle: Lehmann M., 2021

Die Oberleitungsanlage unterliegt den baulichen Vorgaben [RAA, 2008 in Deutschland bzw. der RVS 03.03.23 und 03.03.31 in Österreich]. Sie geben die maximalen Abgrenzungen von Verkehrsraum, Bewegungsraum, Fahrzeugen und Sicherheitsraum oberhalb und seitlich vom Lkw vor. Der Lichtraum ist von festen Hindernissen freizuhalten. Er besteht aus Verkehrsraum (4,25 m) und Sicherheitsraum (0,45 m) und hat somit eine Höhe von 4,70 m. Die Pantographen erreichen eine maximale Höhe von 5,70 m. Der Fahrdrabt kann somit zwischen einer Höhe von 4,70 und 5,70 Metern angebracht sein (Abbildung 7). Eine Absenkung auf 4,50 m ist mit Sondergenehmigung möglich. Eine Absenkung auf unter 4,50 m ist in keinem Fall zulässig (Boltze, 2021).

Abbildung 7: Lichtraum nach RAA 2008 und Querprofil der Oberleitung



Quelle: Lehmann, 2021

Für die Lage und Gestaltung der Oberleitung gibt es folgende Grundsätze:

- Errichtung am rechten Fahrstreifen
- Regelfahrdrabhöhe: 4,70 m bis 5,70 m (Boltze, 2021)
- Konstruktionshöhe der Fahrleitung (Abstand zwischen Oberleitung und Tragseil): 1,70 m (Boltze, 2021)
- Mastabstand: 40 bis 50 m
- Absicherung der Masten mit FRS (H₂) notwendig
- Sicherheitsabstände zu Hochspannungsleitungen, -masten sind einzuhalten
- Pro Unterwerk kann bis zu 7 km Oberleitung (in beide Fahrtrichtungen) versorgt werden
- Kettenwerkslänge mit ca. 1,5 km begrenzt

2.1.2 Grundsätze für die lagemäßigen Festlegungen

Folgende Punkte beeinflussen die Möglichkeit zur Errichtung von Oberleitungsmasten wesentlich:

- Nah gelegene Bauwerke sowohl seitlich wie auch oberhalb der Strecke
- Schilderbrücken, VBA-Anlagen, sonstige Schilder: Durchfahrtshöhe
- Lärmschutzwände: Höhe zum Teil deutlich höher als Mastoberkante bzw. Drahhöhe
- Einbautentrassen, Beleuchtung und Entwässerungsanlagen: im Bereich von Mastfundamenten

In diesen Fällen sind vor allem Mindest- und Sicherheitsabstände bzw. Lichtraumprofile bzw. normative Festlegungen relevant. Für den laufenden Betrieb der Straße ist zu beachten, dass Ein- und Ausfahrten, Pannengebiete sowie Räumbereiche für den Winterdienst und Grünschnitt freigehalten werden. Neben diesen Faktoren sind noch etliche Einschränkungen zu beachten bzw. gibt es Teile des Netzes, wo der Ausbau nicht sinnvoll erscheint. Dazu zählen z. B. Tunnel und Zentralräume, in denen aufgrund der baulichen Verhältnisse keine Oberleitungen möglich sind (Abbildung 8 und Abbildung 9).

Abbildung 8: S1 Südrand Schnellstraße, Wien



Quelle: Google maps street view

Abbildung 9: A23 Südosttangente, Wien



Quelle: Google maps street view

Bei Brücken und Überführungen werden Sonderkonstruktionen benötigt. Die theoretische Eignung für diese Bereiche ist prinzipiell gegeben, aber nur für kurze Strecken sinnvoll. Bei Baustellen, Reparaturen sowie Sanierungsarbeiten sind Einschränkungen wahrscheinlich. Die Bestandstrassierung des österreichischen Autobahnnetzes bringt keine Einschränkungen mit sich.

2.1.3 Kategorisierung des Straßennetzes

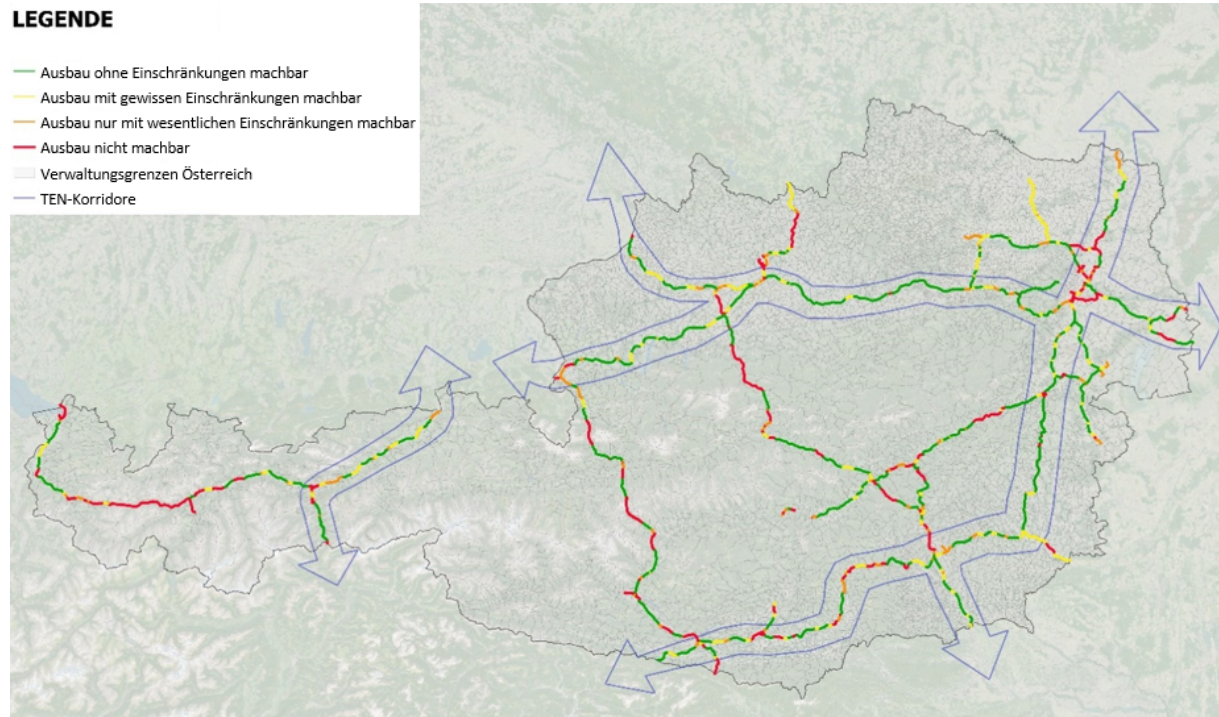
„Wie hoch ist der Anteil an Strecken im A+S Netz, auf denen aufgrund von Erschwernissen wie etwa Tunnel oder Talübergänge keine Elektrifizierungsinfrastrukturen errichtet werden können?“

Basierend auf diesen Aspekten wurde eine vierteilige Einstufungsskala (Kategorisierung) entworfen anhand derer das Autobahnen- und Schnellstraßennetz in Österreich beurteilt wurde:

- Grün: Ausbau ohne Einschränkungen machbar, Mindestlänge zwischen zwei Hindernissen von 3,0 km gegeben, geringe seitliche Verbauung/Einbauten
- Gelb: Ausbau mit gewissen Einschränkungen machbar (z. B. Mindestlänge von 3,0 km unterschritten, Lärmschutzwände, etc.)
- Orange: Ausbau nur mit wesentlichen Einschränkungen machbar (z. B. sehr hohe Lärmschutzwände, rasche Abfolge von Brücken, etc.)
- Rot: Ausbau nicht machbar (z. B. wegen Tunnel/Grünbrücke, gesperrte Fahrstreifen)

Auf Grundlage dieser Kategorisierung ergibt sich für das hochrangige Straßennetz (ohne Berücksichtigung von Rampen) folgendes Bild, siehe Abbildung 10.

Abbildung 10: Beurteilung der Eignung österreichischer Autobahnen und Schnellstraßen für oberleitungsgebundene ERS-Infrastruktur



Quelle: IKK

Zusammenfassend wird die Eignung des österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetzes für oberleitungsgebundene ERS-Infrastruktur wie folgt beurteilt:

- ca. 47 % grün
- ca. 18 % gelb
- ca. 12 % orange
- ca. 23 % rot

Eine Priorisierung im Sinne der zeitlichen Reihenfolge des Infrastrukturaufbaus ist aufgrund der oben angeführten Lagefaktoren alleine nicht sinnvoll. Hier sind vor allem Parameter wie z. B. Verkehrsstärken und die Anbindung von Gebieten zu beachten (siehe auch Kapitel 3).

Abbildung 11: Visualisierung der ERS-Infrastruktur an der B462 in Deutschland



Quelle: Christian Blesinger Fotografie, ewayBW, 2021

Abbildung 12: Oberleitung und Mastverankerung im Brückenbereich der B462 in Deutschland



Quelle: Christian Blesinger Fotografie, ewayBW, 2021

2.1.4 Errichtung der ERS-Infrastruktur

Für den Aufbau der Oberleitungen wurden auf deutschen Teststrecken unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt:

- Teststrecke „FESH“ in Schleswig-Holstein: Auf Anordnung der zuständigen Behörde wurde für die Errichtung der ERS-Infrastruktur ein Fahrstreifen dauerhaft gesperrt.
- Teststrecke „eWayBW“ in Baden-Württemberg: Es handelt sich um eine Bundesstraße mit baulich getrennten Fahrbahnen. Für die Errichtung der ERS-Infrastruktur wurde eine Fahrbahn dauerhaft gesperrt und der Verkehr auf die andere Fahrbahn umgeleitet. Dies hatte Auswirkungen auf die Akzeptanz in der Bevölkerung.
- Teststrecke „Elisa“ in Hessen: Es handelt sich um eine vierspurige Autobahn. Für den Bau der Masten wurde der Seitenstreifen gesperrt, der Betrieb der Autobahn war dadurch aber nicht gestört. Für das Abspannen der Leitungen wurde abschnittsweise ein Fahrstreifen im Rahmen von Tagesbaustellen gesperrt.

Bei einem ausreichenden Straßenquerschnitt ist daher – mit Ausnahme des Abspannens der Leitungen – die Errichtung der ERS-Infrastruktur im Regelbetrieb der Straße möglich. Dabei müssen Einschränkungen durch die beschränkte Höhe bzw. die erforderlichen Sicherheitsabstände beachtet werden. Hier ist in weiteren Schritten mit der Autobahngesellschaft ASFiNAG ein entsprechendes Regelwerk zu entwickeln.

Nicht möglich ist dagegen die Errichtung einer Infrastruktur für induktives oder induktives Laden bei laufendem Straßenbetrieb, da hier die Asphaltdecke der Straße geöffnet werden muss. Das zieht mindestens eine Sperre des betroffenen Fahrstreifens nach sich. Daraus folgt, dass die Errichtung einer induktiven oder induktiven Ladeinfrastruktur insbesondere bei Straßenneubauten oder Sanierungen in Erwägung gezogen werden sollte. Dadurch können die Errichtungskosten signifikant reduziert werden.

2.1.5 Sonstige Aspekte einer Oberleitungsinfrastruktur

„Welche Lösungsansätze stehen für mögliche Problemstellungen wie etwa das Landen von Rettungshubschraubern, Sondertransporte, Baustellen, Grünschnitt und Schneeräumung, Fahrzeugbrände, A+S Auf- und Abfahrten und dergleichen zur Verfügung?“

Neben den planungsrelevanten Aspekten in der Neuerrichtung wirken auch betriebliche Parameter in die Planung ein bzw. beeinflussen die spätere Nutzung.

Aufgrund des Platzbedarfs ist das Landen von **Rettungshubschraubern** im Bereich von Oberleitungen nur eingeschränkt möglich (IKEM, 2022, Abb. 16 ff). Voraussetzung ist das Vorhandensein von mindestens je 4 Fahrstreifen, da eine potenzielle Freifläche mit einer Breite von 13,50 m vorhanden sein muss. Dies ist im österreichischen Netz nur sehr eingeschränkt gegeben. Alternativ sind Landebereiche bei Raststationen oder Innenbereichen von Anschlussstellen und Knoten möglich. Wie bei Autobahntunneln erfordern deshalb auch die elektrifizierten Autobahnabschnitte lokale, individuelle und abschnittsgenaue Rettungskonzepte.

Schwer- und Großraumtransportern sollten durch die Oberleitung keine zusätzlichen Höhereinschränkungen auferlegt werden. Untersuchungen (Boltze, 2021) zeigen, dass der Großteil der Großraum- und Schwertransporte auf möglichen ERS-Abschnitten in Deutschland schwere Nutzfahrzeuge mit einer Höhe unter 4,00 Meter sind. Bei der Mindesthöhe der Oberleitungsanlagen von 4,50 m sollte es deshalb zu keiner mechanischen oder elektrischen Gefährdung kommen. Im Einzelfall muss geprüft werden, ob eine Nutzung des

rechten Fahrstreifens eingeschränkt wird. In Deutschland wäre dies Aufgabe des Straßenbaulastträgers und bedarf einer verkehrsrechtlichen Anordnung durch die zuständige Straßenverkehrsbehörde. Nach einer solchen Umsetzung wäre dies im Genehmigungsverfahren für Großraum- und Schwertransporte vorzusehen.

Sondertransporte bedürfen einer Einzeltrassen-Genehmigung, wo bereits bei der Einreichung auf die örtlichen Gegebenheiten Rücksicht genommen werden muss und Überhöhen berücksichtigt werden. Transporte mit Überhöhe sind aufgrund der eingeschränkten Höhe auf der ersten Fahrspur daher nicht mehr möglich.

Bei **Baustellen** für Sanierungen, Neuerrichtung des Oberbaus und ähnlichem wirkt sich die Oberleitung auf die Auswahl der Baugeräte aus. Obwohl die Oberleitung im Bereich von Baustellen spannungsfrei geschaltet wird, kommt es hierbei zu Behinderungen. Eventuell notwendige Vorkehrungen bereits in der Errichtungsphase (z. B. schwenkbare Ausleger) wären in (noch zu erstellenden) Regelwerken darzustellen bzw. zu berücksichtigen.

Fahrzeugbrände sind im Bereich von Tunneln, Grünbrücken, Unterflurtrassen sowie im Bereich von Überkopfwegweisern oder VBA-Anlagen aufgrund der örtlichen Gegebenheiten gesondert zu betrachten. Im Allgemeinen sind hier keine Einschränkungen für die Errichtung zu erwarten.

Die **rechtlichen Aspekte** bzw. erforderlichen Genehmigungsschritte sind im Augenblick (noch) nicht beurteilbar. Vergleiche mit dem Ausland sind aufgrund unterschiedlicher gesetzlicher Grundlagen nicht sinnvoll.

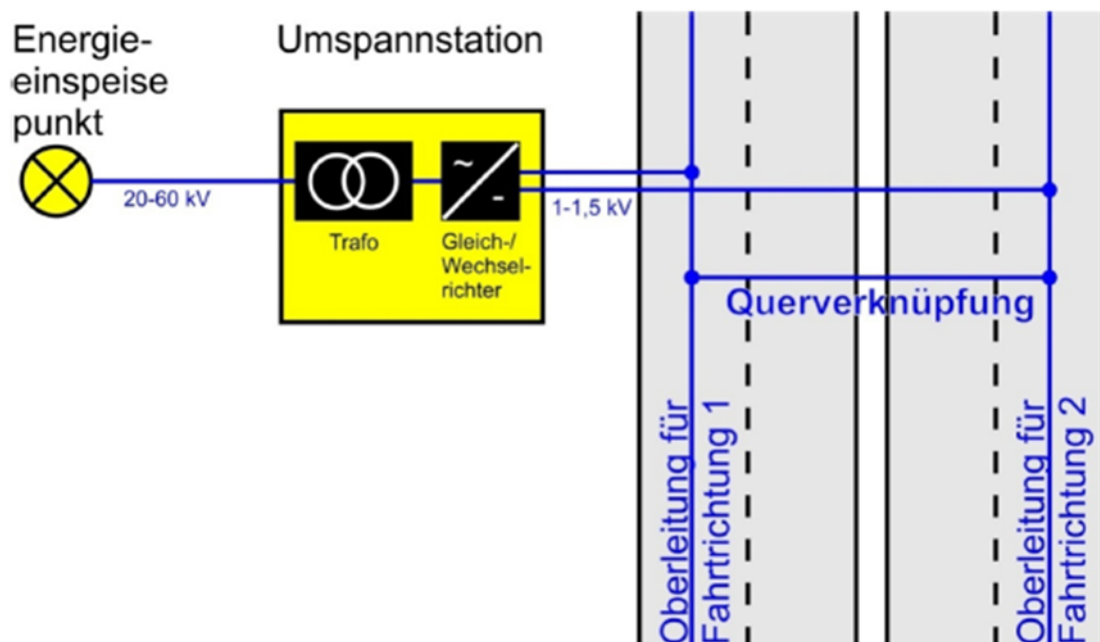
2.2 Elektrische Anlagen und Bauelemente

Die technische Machbarkeit der Oberleitungstechnologie im Straßenverkehr ist durch den Betrieb der Teststrecken belegt. In diesem Kapitel werden die elektrischen Anlagen und Bauelemente beschrieben, welche für die Energieversorgung des ERS notwendig sind. Zu mehr Details sei auf das Buch „Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr – Umsetzung des Systems „eHighway“ von Boltze et al. (2021) verweisen, das auch die Grundlage dieser Darstellung ist.

2.2.1 Netzanschluss und Unterwerke

Jedes Unterwerk braucht einen Mittelspannungsnetzanschluss und kann Oberleitungen auf beiden Fahrtrichtungen für eine bestimmte Länge mit elektrischer Energie versorgen (schematische Darstellung in Abbildung 13). In den nächsten Unterkapiteln wird eine Übersicht über technische Aspekte von Netzanschluss, Nennspannung, Speisekonzepte, Unterwerke, Rückspeisung und Netzzrückwirkung gegeben.

Abbildung 13: Schema der elektrischen Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur



Quelle: Fraunhofer, 2017

2.2.1.1 Netzanschluss

Die Energieversorgung der Anlagen des ERS kann bei einzelnen Gleichrichterunterwerken und wenig ausgelasteten Strecken aus dem Mittelspannungsnetz mittels Kabel oder Leitung erfolgen. Für größere Anlagen mit mehreren Unterwerken auf Strecken mit höherer Auslastung kann ein direkter Anschluss an ein Hochspannungsnetz geplant werden. Hierfür wird ein streckenbegleitender Mittelspannungsring benötigt. Für einen solchen Mittelspannungsring sind die Netzspannungsebenen 10 kV, 20 kV und 30 kV üblich. Dieser Aufbau der Energieversorgung ähnelt dem anderer elektrischer Verkehrssysteme wie der Bahn.

2.2.1.2 Nennspannung

Für ERS kommen nur Gleichspannungssysteme infrage, da Wechselspannungssysteme erst bei einer Spannung ab 10 kV wirtschaftlich und technisch sinnvoll sind und an den Fahrzeugen Hochspannungsdachausrüstung, Hauptschalter, Traktionstransformator und Vierquadrantensteller voraussetzen. Der dadurch entstehende zusätzliche Raumbedarf für die größeren Isolationsabstände sowie das Zusatzgewicht machen die Integrationsaufgaben in Straßenfahrzeugen unlösbar (Boltze, 2021).

Die Wahl der Gleichstrom-Nennspannung für dieses Verkehrssystem ist eine wichtige Größe für die Auslegung der Komponenten. Auf Grundlage von Aussagen von Siemens (2021c) gibt es auf europäischer Ebene eine Einigung der Lkw-Hersteller (Dokument TS 50712) auf eine nominale Nennspannung von 1.200 V Gleichspannung. Dies bezieht sich auf die ISO 6469-3, welche eine maximale Spannung von 1,5 kV auf Fahrzeugen vorsieht (entspricht 1,2 kV nominell). Dies ist auch die Spannung, welche als Basis für die Analyse in EnergyRoads verwendet wurde. Diese Nennspannung hat in weiterer Folge Einfluss auf (Boltze, 2021):

- die bei gleicher Traktionsleistung erforderliche Stromstärke und damit die Leiterquerschnitte,
- die Spannungshaltung im Fahrleitungsnetz unter Beachtung der Spannungsgrenzen und damit die Unterwerksabstände und -leistungen,
- die Übertragungsverluste und damit den Wirkungsgrad des Systems,
- die Auswahl der elektrischen und leistungselektronischen Komponenten mit Leistungsumsatz (Umrichter oder Fahrmotoren) und die Schutztechnik (bspw. Sicherungen) einschließlich deren Kühlung und Einbauräume in den stationären Anlagen,
- die Isolationsabstände und damit ebenfalls die Einbauräume,
- die für den Betrieb und die Instandhaltung der Teilsysteme erforderliche Qualifikation des Service- und Werkstattpersonals.

Grundsätzlich sind elektrische Anlagen bis zu 1.500 V Gleichspannung Niederspannungsanlagen (siehe unter anderem OVE E 8101). Somit gelten für das ERS hinter dem Transformator die für Niederspannungsanlagen notwendigen Sicherheitskonzepte, Zulassungsprozeduren und Qualifikationen für das technische Personal.

Gleichspannungssysteme sind bereits im österreichischen Verkehrssystem üblich. So fahren unter anderem die O-Busse in Salzburg mit 600 V und die U-Bahnen in Wien mit 750 V Gleichspannung.

2.2.1.3 Speisekonzepte

Zusätzlich zur Nennspannung sind die zulässigen Spannungsminima und -maxima im Betrieb für die Auslegung zu berücksichtigen (Boltze, 2021). In Österreich sind hierfür grundsätzlich Spannungsgrenzen in der OVE/ÖNORM EN 50163 definiert. Für ERS-Anwendungen wird im europäischen Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) in der Working Group 27 ein Anhang zu der EN 50712 vorbereitet. Eine finale Abstimmung über diesen Normenvorschlag sind für das Jahr 2023 angesetzt. In diesem werden folgende Parameter vorgeschlagen:

Tabelle 1: Vorläufige Werte der Spannungs- und Stromgrenzen für Traktionsenergie für ERS-Pantographen-Systeme

Parameter	Wert	Erforderliche Aktion des Fahrzeugs/Pantographen
Mindestspannungsschwelle für Trennung - $U_{min,dis}$	DC 500 V	Fahrzeug kann angeschlossen bleiben (Leistungsaufnahme muss 0 W sein).
Permanente Mindestspannung für Leistungsverbrauch - $U_{min,per}$	DC 900 V	Der Stromverbrauch des Fahrzeugs soll auf 0 W reduziert werden.
Mindestspannung für Leistungsverbrauch - $U_{min,n}$	DC 950 V	Betriebswert: Fahrzeug soll Leistungsaufnahme (lineare Degression) auf 0 W zwischen DC 950 V und DC 900 V reduzieren.
Nennspannung, U_n	DC 1.200 V	Normalbetrieb
Maximale Spannung für volle Rekuperation – $U_{max,r}$	DC 1.450 V	Betriebswert: Das Fahrzeug muss die Rekuperation zum Netz (lineare Degression) zwischen DC 1.450 V und DC 1.500 V auf 0 W reduzieren und die Reduzierung bei einem Wert von DC 1.450 V oder weniger beginnen.
Dauerhafte Höchstspannung - $U_{max,per}$	DC 1.500 V	Rekuperation des Fahrzeugs zum Netz soll auf 0 W reduziert werden.

Quelle: Entwurf zum Anhang der EN 50712, ausgearbeitet von der Working Group 27 der CENELEC

Diese Toleranzen, bzw. das zulässige Spannungsband, erlauben relativ große Spannungsfälle im Fahrleitungsnetz. Die elektrische Spannung nimmt grundsätzlich mit zunehmendem Abstand zwischen Unterwerk und Fahrzeug ab. Dies wird allerdings beeinflusst von der Art der Speisung, z. B. ob einseitig durch nur ein Unterwerk, zweiseitig von zwei Unterwerken oder zweiseitig von zwei Unterwerken mit zusätzlicher Querkupplung zwischen den Unterwerken eingespeist wird. Laut Boltze (2021) kommt durch die verhältnismäßig geringe Spannung und die hohen Traktionsströme beim ERS die zweiseitige Speisung mit Querkupplung in den Unterwerken infrage.

Bei den gewählten Leitermaterial, AC-150 mm² CuMg0,5 (siehe unten), kann laut Siemens (2022) bei zweiseitiger Einspeisung von Spannungsverlusten von ca. 50 V/km ausgegangen werden. Dies bedeutet bei Einspeisung von 1.320 V und einem Spannungsminima von 950 V, dass eine Strecke (in eine Richtung) von 7 km von den Unterwerken versorgt werden kann.¹ Dies wird als der maximale Abstand der Unterwerke in der Analyse angenommen. Dieser Abstand wird bei hohen Verkehrslasten und Traktionsströmen reduziert, indem Unterwerke zwischen den zwei anfänglichen Unterwerken ergänzt werden.

¹ Der Spannungsfall beträgt ca. 50 V/km bei einem elektrischen Schleifenwiderstand von ~0,2 mΩ/km und 250 A des Hin- und Rückleiters. Die 250 A ergeben sich aus einem theoretischen Leistungsbedarf eines Lkw von bis zu 300 kW. Die Ströme und damit die Spannungsfälle addieren sich, wenn sich mehrere Fahrzeuge in einem Speisebereich befinden. Die zweiseitige Speisung sorgt für eine Stromaufteilung und damit für geringere Spannungsfälle. Der Spannungsfall an der Fahrleitung ist nur für Einzelfahrten oder Fahrten im Pulk (Platooning) begrenzend. Lkw mit Stromabnehmer begrenzen bei Unterspannung ihren Strom, laden also weniger und stabilisieren somit die Stromversorgung. Bei dichterem Verkehr und Szenario „Endausbau“ ist dann die Stromtragfähigkeit von ca. 900 A systembegrenzend.

Folgende weitere Aspekte sollten beim Speisekonzept (laut Boltze, 2021) berücksichtigt werden:

- die Trennung der Einspeisung der Oberleitung je Fahrtrichtung in den Unterwerken, um bei Störung einer Fahrtrichtung diese unabhängig von der anderen Fahrtrichtung abschalten zu können,
- die Schaffung einzeln abschaltbarer Netzabschnitte (Selektivabschnitte), um die räumliche Auswirkung von Störung zu reduzieren,
- die Reduzierung der Anzahl an Schnellschaltern in den Unterwerken und Nutzung von Streckenrennern zur Trennung von Selektivabschnitten,
- die Vermeidung zusätzlicher Querkupplung außerhalb der Unterwerke, die als querende Freileitung oder Unterörterung der Fahrbahn nur sehr aufwendig ausführbar sind und für die effiziente Betriebsführung fernbedient schaltbar ausgeführt werden müssten,
- falls erforderlich die Berücksichtigung elektrischer Enteisungsschaltungen,
- Unterbrechungen der Oberleitung wegen örtlicher Zwangspunkte,
- sonstige bauliche Randbedingungen.

2.2.1.4 Unterwerke

In den Unterwerken wird die Spannung zuerst von einer Mittelspannung reduziert (beziehungsweise heruntertransformiert), dann von Wechselspannung auf Gleichspannung umgewandelt (bzw. gleichgerichtet) und danach in die Fahrleitung eingespeist und als Traktionsstrom für die Fahrzeuge bereitgestellt. Der Anschluss von Unterwerken an das öffentliche Energieversorgungsnetz erfolgt für einzelne Unterwerke an bereits vorhandene Mittelspannungsnetze. Eine größere Anzahl an aufeinanderfolgenden Unterwerken werden mittels eigenem Mittelspannungsring und über Umspannwerke an ein Hochspannungsnetz realisiert. Die Unterwerke übernehmen sowohl die Spannungsanpassung und Gleichrichtung als auch Schutz- und Steuerungsfunktionen (Boltze, 2021).

Die Hauptkomponenten eines Gleichstromunterwerks sind der Transformator (meist in einem separaten Raum) und eine kombinierte Gleichrichter-Schaltanlage. Die Unterwerke benötigen für den Betrieb ebenfalls elektrische Energie. Diese wird mittels Eigenbedarfsanlage, einem kleinen Transformator zur Bereitstellung von AC-230-V Strom sowie einer Batterieanlage mit Ladegerät zur Pufferung und Bereitstellung von Steuerspannung erzeugt. In dem Unterwerk kann zusätzlich ein Übergabe- und Verrechnungsfeld des Energieversorgers notwendig sein, alternativ können diese in den Versorgungsstationen des Netzanschlusspunktes angebracht sein (Boltze, 2021). Dies ist abhängig von der rechtlichen Verbindungsstelle zwischen öffentlichem Netz und dem Oberleitungsnetz. Als Gebäude kommen Stahlcontainer oder Betonfertiggebäude infrage. Die Fläche dieser Gebäude ist abhängig von der zu übertragenden Leistung. Bei einem 4 MW Umspannwerk beträgt diese Fläche ca. 3 x 12 m (bzw. ca. einem 40 Feet Container).

Laut Boltze (2021) erfolgt der Anschluss an „... ein Drehstromnetz auf der Mittelspannungsebene, z. B. 3 ~AC 20 kV, über eine Mittelspannungsschaltanlage, die häufig schutzgasisoliert ist. Für die Transformatoren sind inzwischen gießharzisierte Trockentransformatoren Stand der Technik. Um nachfolgend mit dem 12-Puls-Gleichrichter eine geringe Restwelligkeit der Gleichspannung zu erhalten, verfügt der Transformator über zwei sekundäre Wicklungssysteme. Diese sind elektrisch phasenverschoben und speisen jeweils eine der in Reihe oder parallel geschalteten 6-Puls-Brücken des Gleichrichters. Stand der Technik sind Leistungsdioden für den Gleichrichter. Um unter Vollast am Unterwerk die Nennspannung bereitstellen zu können, wird im Leerlauf häufig eine höhere Spannung erzeugt, etwa 110 % der Nennspannung [1320 V in einem 1200-V-System]. Alternativ können auch für den Gleichrichter gesteuerte leistungselektronische Elemente (Thyristoren) genutzt

werden. Mit diesen wird der Spannungsfall über das Unterwerk ausgeglichen und auch bei Vollast mit etwas höherer Spannung eingespeist.“

Die Einspeisung in die Oberleitung funktioniert hierbei laut Boltze (2021) wie folgt: *„In Lastflussrichtung hinter dem Gleichrichter ist die Gleichspannungsschaltanlage mit einem Sammelschienensystem angeordnet. Je nach Speisekonzept und notwendiger Trennung der Selektivabschnitte verfügen die Unterwerke über zwei bis vier Gleichstromschnellschaler. Die Einspeisung in die Oberleitung erfolgt durch einzelne Leitungen über die Einspeise-masten, wobei am Mast noch Überspannungsableiter vorzusehen sind. Die Überspannungsableiter schützen die Kalbelanlage und das Unterwerk vor einer Übertragung atmosphärischer Überspannungen (Blitzentladungen) von der Oberleitung in das Unterwerk.“*

Weitere Informationen zu den Unterwerkskomponenten und alternativen Ausführungen können dem Buch „Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr – Umsetzung des Systems eHighway“ von Boltze et al. (2021) oder weiterer einschlägiger Fachliteratur entnommen werden (Biesenack, 2006) (Kießling, 2014).

2.2.1.5 Rückspeisung

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge können mittels Rekuperation Bremsenergie in elektrische Energie zurückwandeln. Diese Energie kann in einem ERS vorzugsweise zum Laden der fahrzeugeigenen Batterie verwendet werden. Die Möglichkeit der Rückeinspeisung in die Fahrleitung zur Nutzung der elektrischen Energie in anderen Fahrzeugen oder die Rückeinspeisung in das öffentliche Mittelspannungsnetz werden als Optionen genannt. Boltze et al. (2021) gehen davon aus, dass der Einsatz von Wechselrichtern insbesondere in Steigungsabschnitten mit asymmetrischen Verkehrsflüssen infrage kommt und für jedes Unterwerk und deren Wirtschaftlichkeit separat durch Simulation zu bewerten ist.

Siemens (2021c) erachtet die Rückspeisung von Bremsenergie in die fahrzeugeitige Batterie als besonders sinnvoll, da hiermit kein technischer Aufwand im Fahrzeug oder in der elektrischen Infrastruktur verbunden ist und keine nennenswerten elektrischen Verluste entstehen. Vielmehr kann damit die Reichweite des Fahrzeugs verlängert werden und ist gängige Praxis in den Feldversuchen. Eine konstruktive Berücksichtigung in der elektrischen Infrastruktur für über das Fahrzeug hinausgehende Rückspeisungen (Punkt 2-4) wäre aufgrund der geringen Energiemengen und auch des daraus entstehenden Aufwands bzgl. der Vergütung nicht wirtschaftlich (Siemens, 2021c). Auch die derzeit verfügbaren Fahrzeuge von Traton/Scania unterstützen diese Form der Rekuperation in das Stromnetz nicht. Die im Zuge von EnergyRoads durchgeführten Analysen in der Energiemodellierung deuten ebenfalls auf ein geringes Potenzial für die Rückeinspeisung von Energie in das Mittelspannungsnetz hin. Aus diesen Gründen wird diese Option in der vorliegenden Analyse vernachlässigt.

2.2.1.6 Netzurückwirkungen

Die Zusammenfassung zu Netzurückwirkungen in ERS Systemen von Boltze et al. (2021) sei hier wiedergegeben:

„Jeder an einem Energieversorgungsnetz betriebene Gleich- bzw. Wechselrichter belastet das Netz mit Oberschwingungen mit einem charakteristischen harmonischen Spektrum, das abhängig vom Schaltungstyp und den leistungselektronischen Bauelementen ist. Die bisher eingesetzten Gleichrichter sind 12-Puls-Diodengleichrichter, der Wechselrichter auf der Versuchsanlage in Groß Dölln ist ein gesteuerter 6-Puls-Thyristor-Wechselrichter.“

Die möglichen Netzurückwirkungen sind Gegenstand der Anschlussbewertung durch den öffentlichen Energieversorger. Dieser gibt Grenzwerte für die Netzharmonischen vor, die besonders kritisch benachbart

zur Pulszahl und deren Vielfachen sind. Im Gleichrichterbetrieb sind das die 11., 13., 23. und 25. Oberschwingung [bei Einsatz eines 12-Puls-Diodengleichrichters] und im Wechselrichterbetrieb² die 5., 7., 11. und 13. Oberschwingung. Über Simulationen und ggf. Messungen wird die Konformität bewertet.

Bei starken Vorbelastungen des Netzes, bspw. durch Wechselrichter für Photovoltaikanlagen, können am Netzanschlusspunkt zusätzliche Filter zur Einhaltung der Grenzwerte erforderlich sein. Um die Leistungsentnahme aus den vorgelagerten Netzen zu verringern oder zu vergleichmäßigen, werden stationäre Energiespeicher in Form großer Batterien an den Unterwerken diskutiert. Auch diese müssen sich als zusätzliche Komponenten wirtschaftlich rechnen und in ihren Umweltwirkungen bewertet werden.“

Bei zweiseitiger Einspeisung gibt es laut Siemens (2022) die Möglichkeit zwei Unterwerke und deren 12-Puls-Gleichrichter leicht in deren Phase zu verschieben und so die Wirkung eines 24-Puls-Gleichrichters zu erhalten. Abhängig von den vorherrschenden Verhältnissen im Mittelspannungsnetz kann dies bis zu 98 % der harmonischen Oberschwingung vermeiden. Wenn auf Oberschwingungsfilter verzichtet werden kann und soll, ist dieses Vorgehen sinnvoll und gängige Praxis. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Analyse der Einsatz von Oberschwingungsfilter an Netzanschlusspunkten vorerst vernachlässigt. Etwaige zusätzliche stationäre Batterien an den Unterwerken werden ebenfalls nicht miteingerechnet.

2.2.2 Oberleitung

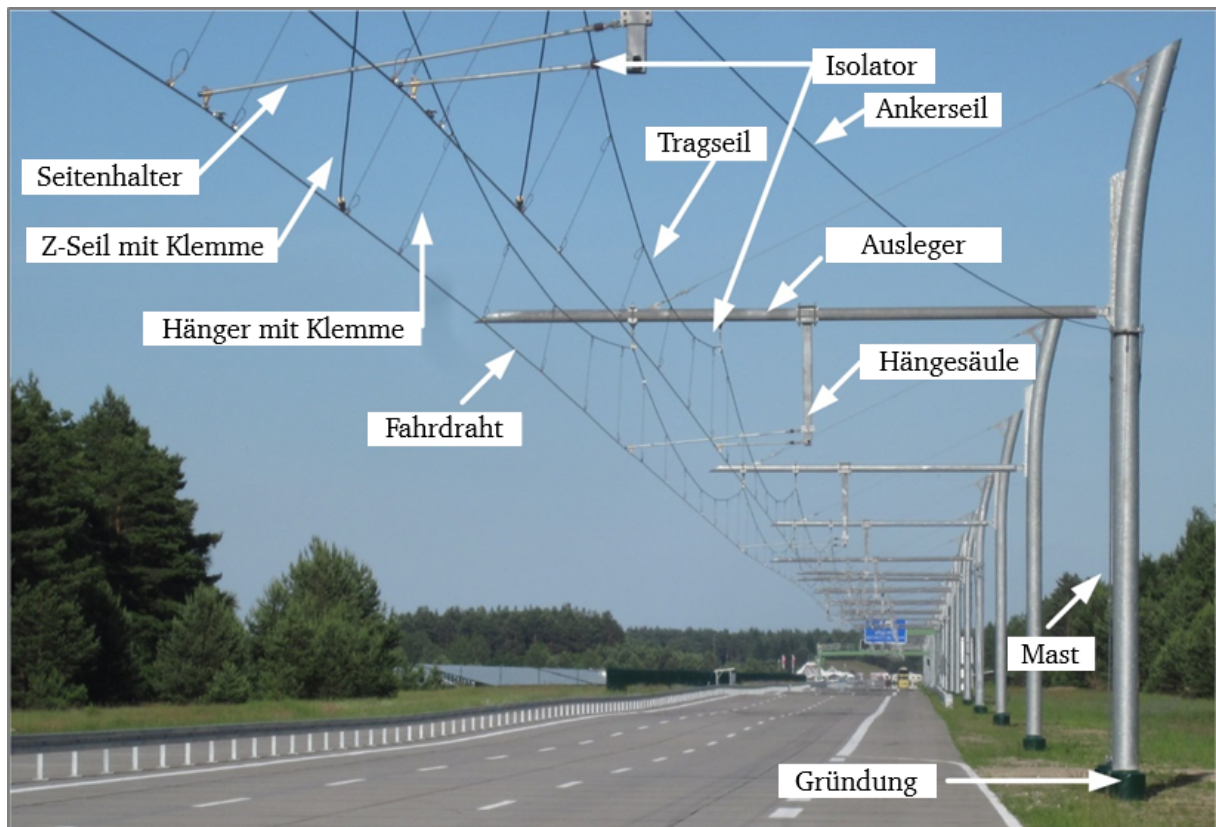
Die Oberleitungsanlage führt die elektrische Energie (Traktionsenergie) zu den dafür ausgerüsteten Fahrzeugen für das dynamische Laden während der Fahrt. Laut OVE EN 50119 umfasst eine Fahrleitungsanlage die „Gesamtheit der Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung von den Unterwerken zu den elektrischen Triebfahrzeugen“. Diese Norm behandelt sowohl Oberleitungen als auch Stromschienen. Für Oberleitungssysteme auf Autobahnen kommt laut Boltze (2021) nur die „Hochkette“ infrage, da diese berührungssicher und wirtschaftlich mit größeren Mastabständen ist, sowie hohe Befahrungsgeschwindigkeiten (bis 100 km/h) und hohe Traktionsströme ermöglicht.

Eine Oberleitungsanlage besteht grundsätzlich aus den folgenden Komponenten (siehe Abbildung 14):

- Gründungen
- Oberleitungsmasten
- Tragkonstruktionen (Quertrageinrichtungen)
- Fahrdrähte
- Kettenwerke je Pol (mit Tragseilen, Fahrdraht, Hängern, Klemmern)
- Abspannvorrichtungen
- Streckentrenner und Trennschalter
- Überlappungen und Stromverbinder
- Isolatoren
- elektrische Schutzeinrichtungen
- Eventuell Verstärkungs-, Speise- und Umgehungsleitungen

² Wechselrichterbetrieb wird in der vorliegenden Analyse von EnergyRoads vernachlässigt.

Abbildung 14: Komponenten und Bauteile einer eHighway-Oberleitung



Quelle: Lehmann, 2021a

Weitere Details zu den Komponenten können dem Buch „Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr – Umsetzung des Systems eHighway“ von Boltze et al. (2021) entnommen werden. Dort werden auch Planungstools und -software vorgestellt.

2.2.2.1 Gründungen

Gründungen müssen die von den Oberleitungsmasten eingebrachten mechanischen Kräfte in das Erdreich ableiten. Die Art der Gründung hängt immer von den Lasten und den örtlichen Boden- bzw. Baugrundverhältnissen ab. Bei den bisherigen Versuchsanlagen kamen Rammrohrgründungen und Blockfundamente als Schwergewichtsrundung zum Einsatz. (Boltze, 2021)

2.2.2.2 Oberleitungsmasten

Oberleitungsmasten können mit unterschiedlicher Funktion und mit unterschiedlichen Materialien ausgeführt werden. Bei Bahnen sind Rundmasten mit verzinkten Stahl oder Doppel-T-Trägern, Beton- oder Stahlgittermaste üblich. Funktional kann zwischen Tragmasten, Tragmasten mit Abwinkelung des Kettenwerkes im Parallelfeld, Festpunktmittelmast, Abspannmasten des Festpunktankerseils und Abspannmasten des Kettenwerkes unterschieden werden. Tragsicherheitsnachweise müssen je nach geographischer Lage und den dortigen Wind- und Eislasten erbracht werden. Die Versuchsanlage in Groß Dölln hat Mastabstände bis 65 m (Boltze, 2021). Für das EnergyRoads-Forschungsprojekt wird ein durchschnittlicher Mastabstand von 50 m angenommen.

2.2.2.3 Quertrageinrichtungen

Quertrageinrichtungen (welche an den Masten montiert sind) halten die Oberleitung auf richtiger Höhe (vertikal) und Fahrbahnzentriert (horizontal) im Arbeitsbereich der Stromabnehmer (Pantographen) der Fahrzeuge. Tragsicherheitsnachweise müssen je nach geographischer Lage und den dortigen Wind- und Eislasten erbracht werden.

2.2.2.4 Leitungsmaterial

Das Leitungsmaterial umfasst die Fahrdrähte. Für das ERS Oberleitungssystem sind zwei Fahrdrähte notwendig, um die Oberleitung elektrisch zweipolig auszuführen, ähnlich wie bei O-Bussen in Salzburg. Der Leiterquerschnitt und das Leitermaterial muss anhand einer Lastflussberechnung und den zu überragenden Strömen, unter Berücksichtigung der entsprechenden Normen, berechnet werden. Über die Lebensdauer kommt es zu einer Abnutzung der Fahrdrahtquerschnitte von im Mittel bis ca. 20 %. (Boltze, 2021) Für das EnergyRoads Forschungsprojekt werden vorerst AC-150 mm² CuMg0,5 Fahrdrähte, nach OVE/ÖNORM 50149, angenommen (ähnlich wie dies auch auf den Versuchsanlagen in Groß Dölln und ELISA umgesetzt wurde). Laut Stakeholdern ist dieses Leitungsmaterial derzeit aufgrund von elektrischer Leitfähigkeit, Gewicht und der relativ besseren Widerstandsfähigkeit gegen mechanischen Verschleiß empfehlenswert. Laut Siemens (2022) haben diese Leiter eine dauerhafte Strombelastbarkeit von ca. 900 Ampere. Kombiniert mit der Nennspannung von 1,2 kV lässt sich somit abschätzen, dass maximal 1,1 MW je Leiter (je Fahrbahn, je Richtung), ohne Verstärkungsleitung, von einem Unterwerk bereitgestellt werden kann.

Um Eisansammlung auf den Leitern zu vermeiden, können elektrische Enteisungsschaltungen eingebaut werden. Diese können entweder nur in Betriebspausen oder bei geringem Betrieb eingeschaltet werden. (Boltze, 2021)

Bei hohen Verkehrslasten, welche über das Oberleitungssystem mit elektrischer Energie versorgt werden, können andere Leitermaterialien, oder die Nutzung von Trageilen oder Verstärkungsleitungen am Mast für die Übertragung von Traktionsenergie notwendig werden. (Boltze, 2021)

2.2.2.5 Kettenwerk

Für das Kettenwerk ist unter anderem die Anordnung der Oberleitung von hoher Bedeutung. Die Oberleitung besteht aus zwei Leitern (zwei Polen). Diese sind symmetrisch zur Mitte der Fahrspur angeordnet. In der Geraden verlaufen diese geradlinig ohne Zick-Zack-Führung (wie oft bei Eisenbahnstrecken üblich). In Kurven muss auch der Fahrdraht kurvenförmig verlaufen. Dies gelingt über windschiefe Konstruktionen. Beide Leiter benötigen hierfür ein separates Trageil und entsprechend separate Kettenwerke. Die horizontale und vertikale Lageberechnung der Kettenwerke müssen die geografisch relevanten Wind- und Eislasten berücksichtigen.

Der Hängerabstand der Kettenwerke bei ERS beträgt aus sicherheitstechnischen Gründen 3 m bis 4 m (dies ist kürzer als bei Straßenbahnen oder Eisenbahnen, welche standardmäßig im Mittel einen Abstand von 10 m haben)³. Durch den verkürzten Hängerabstand kann bei extrem seltenen Fahrdrähttrissen der freizuhaltende Raum, bis 4,5 m über der Fahrbahn, freigehalten werden. Auch der Kontaktpunkt zwischen Fahrdraht und

³ In Deutschland wurden Tests bezüglich der Sichtbarkeit von Signalen und Schildern aus Pkw und Lkw Fahrerperspektive bei Oberleitungsstrecken durchgeführt. Die Lesbarkeit wurde in allen Testsituation nachgewiesen. (Boltze, 2021)

Pantograph hat bei ERS erhöhte Anforderungen bzgl. Hindernisfreiheit. Dies beeinflusst die freizuhaltenen Winkel und Räume über und neben dem Kontaktpunkt. (Boltze, 2021)

Tragseil- und Kettenwerksabsenkungen sind bei Höheneinschränkungen, z. B. durch Überführungsbauwerke oder Verkehrszeichenbrücken, möglich. Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn das Bauwerk eine Mindesthöhe von 4,70 m zwischen Fahrbahn und Unterkante des Bauwerkes hat. Bei Bauwerkshöhen über 4,70 m muss die Eignung, unter anderem die Länge und Höhe des Bauwerks, für eine Absenkung im Einzelfall geprüft werden. (Boltze, 2021)

2.2.2.6 Abspannvorrichtungen

Thermisch bedingte Längenänderung der Drähte und Seile können durch den Traktionsstrom und die Umgebungstemperatur auftreten. Für gute Befahrungseigenschaft der Fahrdrähte und konstante Zugkräfte der Seile müssen beide Komponenten auf den gesamten Temperaturbereich (inklusive erwarteten Temperaturgang über die Standzeit der Oberleitung) ausgelegt sein. In der Versuchsanlage Groß Dölln wurden die Abspannvorrichtungen für Fahrdrähte mit einer Nachspannkraft von 20 kN und für Tragseile mit einer Nachspannkraft von 10 kN eingesetzt. (Boltze, 2021)

2.2.2.7 Streckentrenner und Trennschalter

Die Oberleitung muss in einzeln abschaltbare Selektivabschnitte unterteilt werden, um im Störfall relativ kurze Abschnitte je Fahrtrichtung abschalten zu können. Dies erhöht die Verfügbarkeit. Die Selektivabschnitte können durch Unterbrechungen der Oberleitung oder durch zwei Streckentrenner getrennt werden. Beide Optionen schaffen eine kurze neutrale Zone, welche nicht länger als ca. 5 m lang sein darf, um Kurzschlüsse zu verhindern. Diese 5 m entsprechen der kürzesten Fahrzeuglänge für Lkws und dem kürzesten Pantographen-Abstand. (Boltze, 2021)

2.2.2.8 Überlappungen und Stromverbinder

Durch die Länge der Fahrdrähte je Trommel wird die maximale Länge von einzelnen Fahrdrähten auf ca. 1000 m bis 2000 m je Fahrdrahtabschnitt begrenzt (dies wird auch als Nachspannlänge bezeichnet). Bei Übergang von benachbarten Nachspannlängen kommt es zu Überlappungen, welche als Parallelfelder angeordnet sind. Im Parallelfeld werden endende Fahrdrähte von der Nennhöhe aus nach oben gezogen, während parallel der startende Fahrdraht auf die Nennhöhe abgesenkt wird. In der Feldmitte berühren die Pantographen kurz gleichzeitig beide Fahrdrähte beider Pole. (Boltze, 2021)

2.2.2.9 Isolatoren

Isolatoren müssen anhand der geplanten Nennspannung und über die zulässigen Toleranzen bestimmt werden. Auch hier können die Normen für Bahnanlagen OVE EN 50119, OVE EN 50124-1 und OVE EN 50124-2 verwendet werden (abgeleitet von Boltze, 2021). Für Oberleitungssysteme wird die spezifische elektrische Mindest-Kriechstrecke der Isolatoren nach OVE EN 50124-1 mit dem Wert 43 mm / kV festgelegt.

2.2.2.10 Elektrische Schutzeinrichtungen

ERS-Oberleitungssysteme erfordern zusätzliche Schutzmaßnahmen im Vergleich zu anderen Niederspannungssystemen, nachdem funktionsbedingt blanke metallische Leiter eingesetzt werden. Unter anderem könnten

laut Boltze (2021) „... zu hohe Ströme bei falscher Dimensionierung oder unzureichenden Schutzkonzepten zu unzulässiger Erwärmung und Entfestigung der Leitermaterialien führen. Punktuell stark überhitzte Leiter können unter Umständen den Nachspannkräften nicht mehr standhalten und reißen. Dies würde elektrische und mechanische Gefährdungen nach sich ziehen.“

Es gelten die existierenden nationalen Normen für Niederspannungssysteme für den Personenschutz. Für die Einspeisung aus dem Mittelspannungsnetz gelten die Normen OVE/ÖNORM EN 61936-1 und OVE/ÖNORM EN 50522. Zusätzlich bilden existierende spezialisierte Normen für Bahnoberleitungen (OVE EN 50122 und OVE EN 50153), welche auch auf schienenlose Technologien erweitert wurden, für die Auswahl und Auslegung von elektrischen Schutzeinrichtungen eine weitere Grundlage. Allerdings ist die Infrastruktur für ERS-Oberleitungssysteme eine Neuentwicklung, welche in den Normen noch nicht vollständig abgebildet werden. Zusätzlich sind laut Boltze (2021) folgende Schutzmaßnahmen notwendig:

- Freihalten des Lichtraumes von spannungsführenden Teilen,
- Schnelles Abschalten der Oberleitung für einen verzögerten Rettungseinsatz
- Automatisches Abschalten der Einspeisung bei schwerer Beschädigung der Oberleitung

Elektrische Schutzeinrichtungen umfassen Überstromschutzeinrichtungen, Potenzialausgleichs- und Schutzleiter, Erder und Überspannungsschutz. Wenn alle Isolatoren der Oberleitung für die doppelte Nennspannung unter den lokalen klimatischen Bedingungen ausgelegt sind und die entsprechenden Masten keine weiteren elektrischen Ausrüstungen tragen, kann auf eine Erdung der Masten verzichtet werden. An den Unterwerken ist einer der elektrischen Pole zu erden. Überspannungsschutz verhindert Schäden der Anlagen bei kurzzeitigen Überspannungen (Blitzentladung). Hierfür müssen die Einspeisekabel zwischen Unterwerk und Oberleitung beidseitig mit Überspannungsableitern gesichert werden. Bei Fahrzeugen darf nur ein Ableiter zwischen den beiden Polen verwendet werden. (Boltze, 2021)

3 Straßengüterverkehr

3.1 Verkehrsaufkommen – Status Quo

3.1.1 Die österreichische Lkw-Flotte

Die österreichische Lkw-Flotte besteht aus mehr als 510.000 Fahrzeugen (Statistik Austria, 2021a). Sie können entsprechend ihrer zulässigen Gesamtmasse in drei Klassen unterteilt werden (AT, 2021a):

- Klasse N1: Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse bis 3.500 kg
- Klasse N2: Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 3.500 kg bis 12.000 kg
- Klasse N3: Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 12.000 kg

Bezogen auf die Anzahl ist die Klasse N1 am wichtigsten. Während es in der Klassen N2 tendenziell zu einer Abnahme der Zahl der Fahrzeuge kommt, steigen Anzahl und Anteil der Fahrzeuge der Klassen N1 und N3. In der österreichischen Statistik werden zudem Sattelzugfahrzeuge ausgewiesen, da die Statistik Austria diese nicht zu den Lastkraftwagen zählt. Die Größe dieses Fahrzeugsegments wächst ebenfalls kontinuierlich.

Tabelle 2: Nutzfahrzeugbestand in Österreich in den Jahren 2017 bis 2020

Lkw im Jahr	2017	2018	2019	2020
Alle Lastkraftwagen	456.908	476.327	494.585	512.241
Klasse N1: bis 3,5 t Gesamtmasse	403.984	422.745	440.582	458.253
Klasse N2: über 3,5 t bis 12 t Gesamtmasse	11.271	10.989	10.509	10.082
Klasse N3: über 12 t Gesamtmasse	41.653	42.684	43.494	43.906
Sattelzugfahrzeuge	17.870	18.904	19.334	19.393

Quelle Statistik Austria, 2021a

Für diese Studie wurden Fahrzeuge der Klasse N3 in drei Klassen unterteilt. Relevant ist das in der Folge als N3-26 bezeichnete Fahrzeugsegment:

- N3-12: Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von 12 bis 18 t
- N3-18: Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von 18 bis 26 t
- N3-26: Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 26 t

In Österreich wurden von 2010 bis 2019 etwa 4.500 Lkws mit alternativen Antrieben zugelassen. Das ist weniger als ein Prozent des Gesamtbestandes (WKO, 2021). Diese entfallen fast ausschließlich auf die Fahrzeugklasse N1. Von 30.783 Neuzulassungen in dieser Fahrzeugklasse im ersten Halbjahr 2021 in Österreich hatten 1.165 einen alternativen Antrieb (entspricht 3,8 % der Neuzulassungen), davon waren 1.035 N1-Fahrzeuge mit Elektroantrieb (88,8 % der Neuzulassungen mit alternativem Antrieb). Demgegenüber hatten nur 37 Fahrzeuge der Fahrzeugklassen N2 und N3 im selben Zeitraum einen alternativen Antrieb (1,7 %),

darunter sechs Fahrzeuge einen Elektro-Antrieb (Statistik Austria, 2021b). Alternative Antriebe in der N2-/N3-Fahrzeugklasse sind überwiegend Erdgas- oder Erdgas-Hybrid.

3.1.2 Güterverkehrsaufkommen in Österreich

Daten zum Güterverkehr können auf Basis des Nationalitäts- oder des Territorialprinzips erfasst werden. Beim Territorialprinzip ist nicht das Meldeland eines Fahrzeugs für die statistische Erfassung relevant, sondern die Länder, in denen es eingesetzt wird (Eurostat, 2017). Das ist die für die vorliegende Studie relevantere Abgrenzung, denn sie fokussiert den Güterverkehr auf Österreichs Straßen und nicht Transporte von österreichischen Unternehmen.

3.1.2.1 Überblick

Die EU-Mitgliedsstaaten melden an Eurostat Daten zum Güterverkehr, die auf dem Nationalitätsprinzip basieren. Sie beziehen sich somit auf die in Österreich gemeldeten Unternehmen und ihr Transortaufkommen im In- und Ausland (ohne Leerfahrten siehe Tabelle 3). Im Durchschnitt ist eine beladene Fahrt des schweren Straßengüterverkehrs eines österreichischen Unternehmens 60 km lang und hat eine mittlere Beladung (Netto) von 14-15 t. Die Transportleistung der österreichischen Unternehmen auf österreichischen Strecken betrug 2019 19 Mrd. Tonnenkilometer (tkm) – 71 % der gesamten Transportleistung wird durch österreichische Unternehmen erbracht.

Die Transportleistung auf österreichischen Straßen, unabhängig vom Meldeland des Lkws (Territorialprinzip), wird von der Statistik Austria 2019 mit 54,5 Mrd. tkm ausgewiesen (Statistik Austria, 2022b). Demnach beträgt der Anteil der von österreichischen Unternehmen erbrachten Transportleistung auf österreichischen Straßen knapp die Hälfte der Transportleistung. Ausländische Spediteure spielen daher eine entscheidende Rolle für die Dekarbonisierung des österreichischen Straßengüterverkehrs.

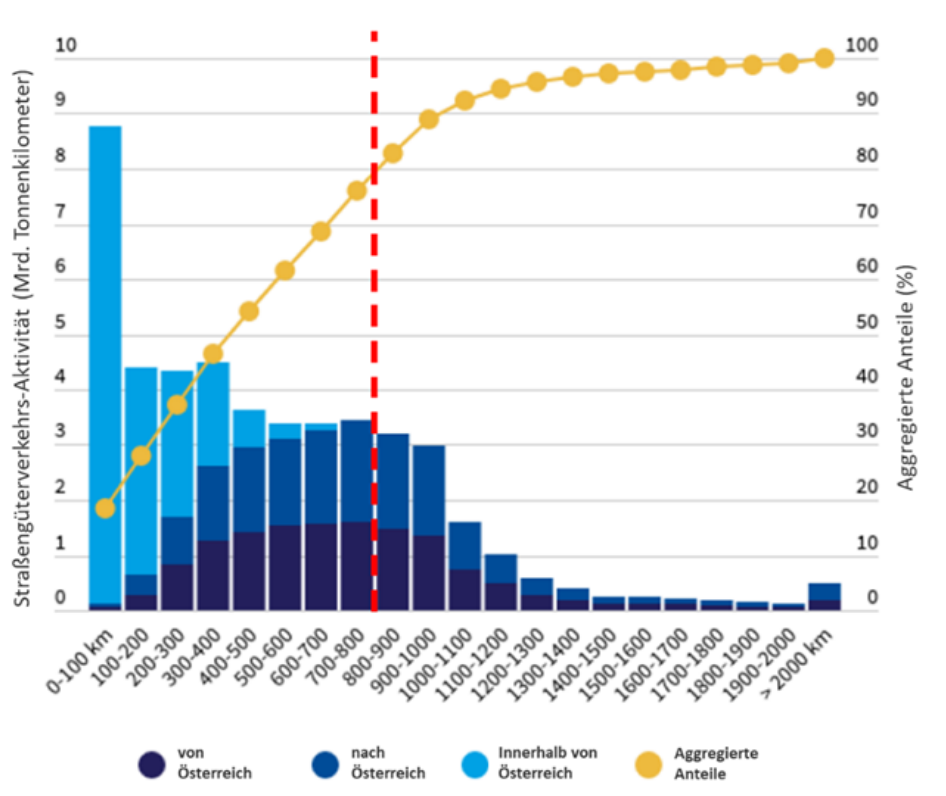
Tabelle 3: Straßengüterverkehr österreichischer Unternehmen nach Nutzlast des Fahrzeugs im Jahr 2019

Nutzlast	Transportleistung (in Mio. tkm)	Fahrleistung (in Mio. km)	Fahrten (in 1.000 Fahrten)
Bis 9,5 t	854	222	5.741
9,6-15,5 t	1.980	238	7.390
15,6-20,5 t	2.026	161	5.307
20,6-25,5 t	8.562	491	5.014
25,6-30,5 t	11.162	580	5.650
Mehr als 30,5 t	1.861	95	971
Gesamt	26.444	1.788	30.073

Quelle: Eurostat, 2022

Eine entfernungsabhängige Übersicht über die gefahrenen tkm im Straßengüterverkehr (inklusive N1) wurde von Technology & Environment (VCÖ, 2021) präsentiert (Abbildung 15).

Abbildung 15: Verteilung der Straßengüterverkehrs-Aktivität über Fahrzeug-Fahrten-Strecken-Bänder in Österreich. Fahrzeug-Fahrten können mehrere Tage dauern. Rote Linie zeigt die Strecken bis 800 km



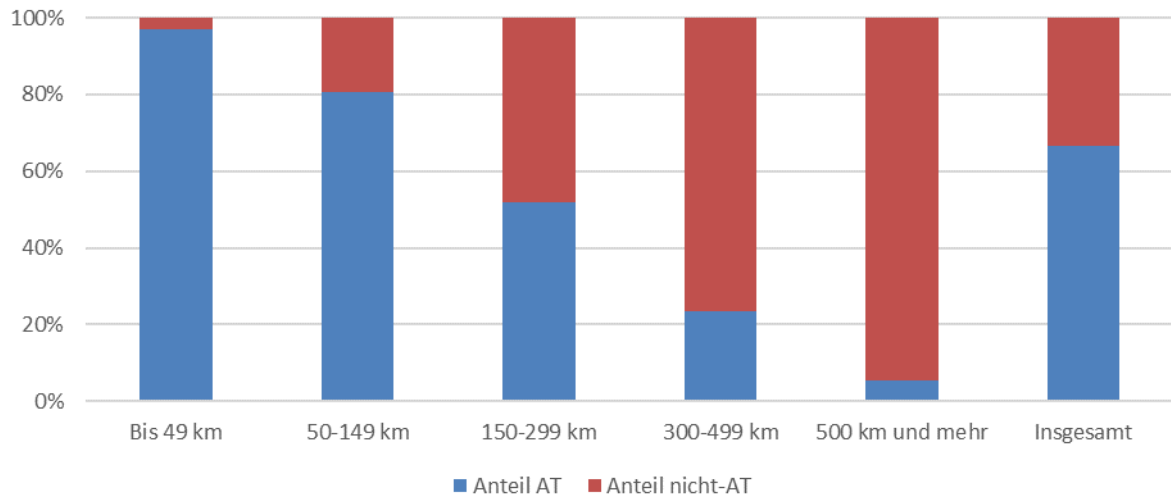
Quelle: TE, 2021c, Übersetzung durch AEA

Es gibt energetisch relevante Unterschiede im Güterverkehr in Abhängigkeit vom Meldeland des Lkws:

- Fahrten im Transitverkehr werden fast ausschließlich von nicht in Österreich gemeldeten Lkws durchgeführt. Laut der CAFT-Erhebung sind diese Lkws zumeist voll beladen (Statistik Austria 2020).
- Im Ausland gemeldete Lkws werden zudem überwiegend im Quell- und Zielverkehr eingesetzt.
- Im Quell- und Zielverkehr gibt es fast keine Teilbeladungen/-entladungen. Diese gibt es fast ausschließlich im Binnenverkehr.
- Im Binnenverkehr dominieren in Österreich gemeldete Lkws.

Dies zeigt sich auch in der Unterteilung des Transportaufkommens in Abhängigkeit von der Fahrtstrecke auf dem österreichischen Autobahnnetz. Bei kürzeren Fahrten dominieren im Inland zugelassene Lkws, bei weiteren Fahrten schwindet ihr Anteil. Dies ist insofern relevant, da Zwischenstopps zum Be- und Entladen – die statistisch eine neue Fahrt bedingen – immer auch ein Zeitfenster für das Laden von Elektrizität im Bedarfsfall sind. Gleichzeitig zeigt dies, dass eine Oberleitungsinfrastruktur vor allem für die nicht in Österreich zugelassenen Fahrzeuge mit hohen Fahrtweiten interessant wäre.

Abbildung 16: Österreichische Anteile am gesamten Straßengüterverkehr auf Österreichs Straßen



Quelle: Statistik Austria, 2020c, AEA, eigene Berechnung

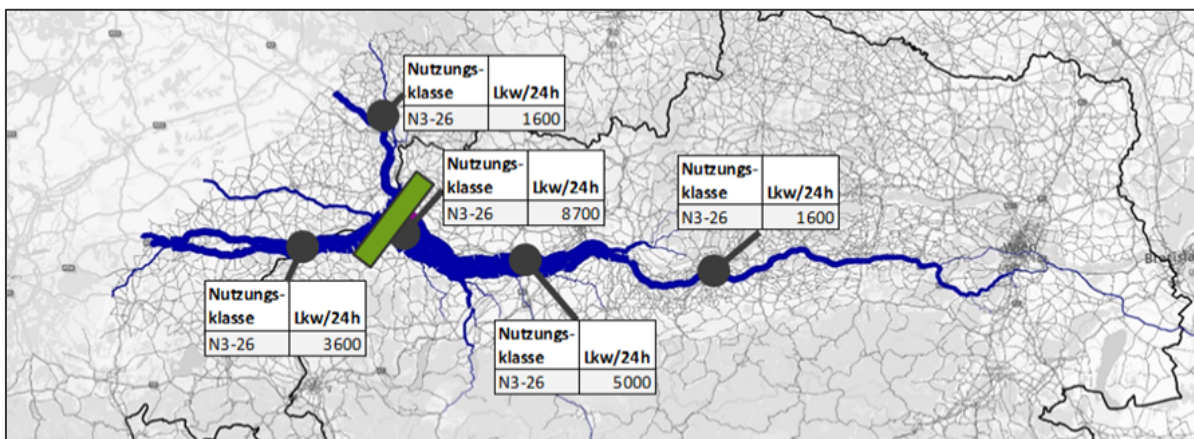
3.1.2.2 Fahrtweiten

„Welche Fahrzeugreichweiten werden für die Fahrten außerhalb des Autobahn- und Schnellstraßennetzes benötigt?“

Oberleitungsfähige Fahrzeuge müssen auch auf Strecken ohne Oberleitung genutzt werden können. Bei O-BEV definiert die Länge der Wegstrecken außerhalb des mit einer ERS-Infrastruktur ausgestatteten hochrangigen Straßennetzes die benötigte Batteriekapazität. Für die Festlegung der Batteriegröße ist somit diese „letzte Meile“ ausschlaggebend.

Diese Fahrtweite lässt sich über Verkehrsspinnen aus einem Verkehrsmodell ableiten. Diese Verkehrsspinnen zeigen alle Verkehrsverflechtungen über einen Straßenquerschnitt. Abbildung 17 zeigt beispielhaft die Verkehrsspinne für die Nutzungsklasse der Lkw N3-26 am Grenzübergang Suben der A8 Innkreisautobahn. Ersichtlich ist die große Anzahl an Lkw-Fahrten, die in weiterer Folge die A1 West Autobahn bis in den Großraum Wien und darüber hinaus nutzen.

Abbildung 17: Beispiel für eine Verkehrsspinne aus dem Verkehrsmodell

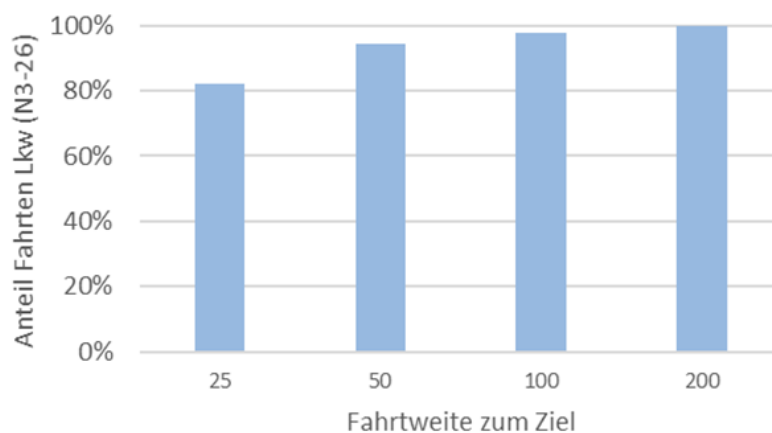


Quelle: Trafility

Für die Analyse der Fahrtweiten im Gesamtnetz wurde folgende Vorgangsweise gewählt. Das Autobahn- und Schnellstraßennetz wurde auf die Abschnitte reduziert, die sich für die Errichtung einer ERS-Infrastruktur sehr gut eignen. Dies sind die in der Bewertung des hochrangigen Straßennetzes (Kapitel 2) identifizierten „grünen Abschnitte“. Diese Abgrenzung stellt infrastruktureitig einen ungünstigen Fall dar (ERS-Infrastruktur wird nur dort errichtet, wo dies gut möglich ist), gleichzeitig aber bezüglich der Ausstattung einen fortgeschrittenen Ausbaustand (wenn eine Strecke geeignet ist, wird sie auch elektrifiziert). Für diese Abschnitte wurde aus dem Verkehrsmodell auf Grundlage aller Fahrten der Lkw der Klasse N3-26 ausgewertet, welche Fahrtweite sie ab dem letzten Abschnitt mit Eignung für dynamisches Laden bis zum jeweiligen Fahrtziel zurücklegen. Es handelt sich um die modellierten Zielpunkte der Fahrt, das heißt es liegt keine Information dazu vor, welche Aktivität und Aufenthaltsdauer an diesem Zielpunkt zu erwarten ist. Die Auswertungen umfassen nur Fahrten mit Ziel innerhalb Österreichs. Fahrten die über die Staatsgrenzen hinausgehen, wurden ausgeklammert, da für das Ausland keine Annahmen zur Verfügbarkeit von dynamischen Lademöglichkeiten vorliegen.

Das Ergebnis der Fahrtweitenauswertung ist in Abbildung 18 dargestellt. Es zeigte sich, dass 88 % der Lkw N3-26-Fahrten vom letzten dynamischen Ladeabschnitt in weniger als 25 km und 94 % der Lkw N3-26-Fahrten vom letzten Ladeabschnitt in weniger als 50 km ihr Fahrziel erreichen. Bezogen auf das österreichische Straßennetz reicht für die meisten Fahrten eine effektive Reichweite von 50 km aus.

Abbildung 18: Fahrtweitenverteilung ab letzter Ladeoption



Quelle: Trafility

3.1.2.3 Güterverkehrsaufkommen zeitliche Auflösung

Die Analysen zur zeitlichen und räumlichen Auflösung des Straßengüterverkehrsaufkommens in Österreich basieren auf Erhebungsdaten der ASFiNAG. Zur Ermittlung des durchschnittlichen Lkw-Werktagverkehrs wurden rund 500 Dauerzählstellen der ASFiNAG aus dem Jahr 2019, verteilt über das österreichische Autobahn- und Schnellstraßennetz, herangezogen und für das untergeordnete Netz ergänzend Landesdauerzählstellen der Bundesländer (Werte für 2019). Allerdings erlauben die Daten der Dauerzählstellen keine Aussage über die Aufteilung des Lkw-Verkehrs in den einzelnen Gewichtsklassen. Aus diesem Grund wurden ergänzend Weigh-in-Motion-Daten (in weiterer Folge: WIM-Daten) aus den Jahren 2019 und 2021 einbezogen. Dabei handelt es sich um Einrichtungen der technischen Unterwegskontrolle, mit der Lkw während der Fahrt erfasst und gewogen werden. In Kombination mit den Cross Alpine Freight Transport Austria Daten (in weiterer Folge: CAFTA-Daten) wurden daraus Aussagen hinsichtlich der Nutzungsklassen abgeleitet.

Aus den WIM-Daten kann die Verteilung des tatsächlichen Beladungsgewichts ermittelt werden. Diese ist in Tabelle 4 ersichtlich. Bei einem Fahrzeuggewicht von 5 bis 6,5 t liegt die Wahrscheinlichkeit, dass das Fahrzeug zur Klasse N2 mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von maximal 12 t gehört, bei rund 80 %. Ab einem aktuellen Gewicht von 12,5 t steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das Fahrzeug der Klasse N3-26 zuzuordnen ist, auf 74 %, ab 14 t liegt diese Wahrscheinlichkeit schon bei 91 %. Weiters geht aus den Daten hervor, dass die durchschnittliche Beladung der Nutzungsklasse N3-26 rund 13,9 t beträgt.

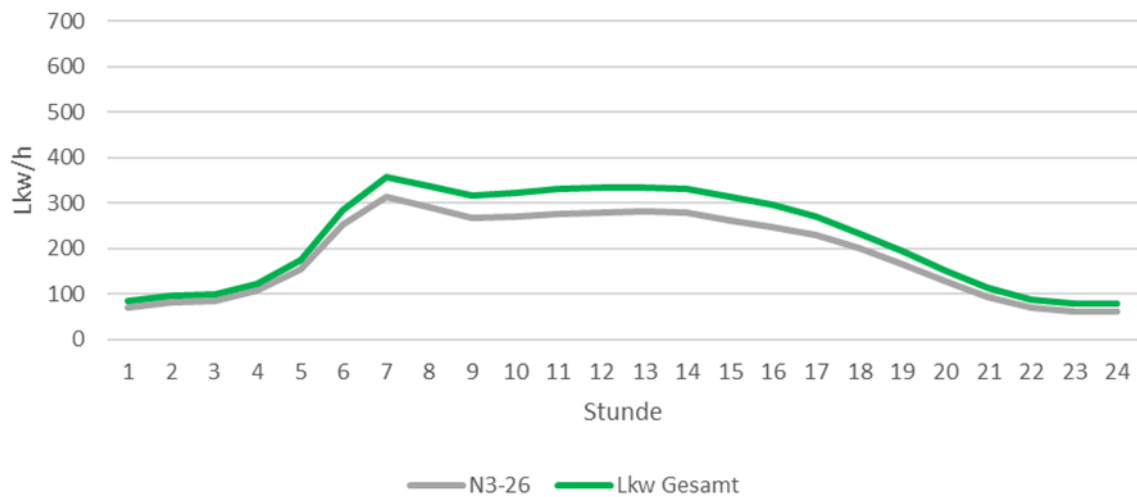
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen aktuellem und höchstzulässigem Gewicht

Aktuelles Gewicht [t]	N2 (hzG: 3,5-12 t)	N3-12 (hzG: 12-18 t)	N3-18 (hzG: 18-26 t)	N3-26 (hzG: > 26 t)
0 - 3,5	64 %	8 %	6 %	22 %
3,5 - 5	63 %	16 %	2 %	19 %
5 - 6,5	80 %	10 %	2 %	9 %
6,5 - 8	46 %	26 %	5 %	23 %
8 - 9,5	17 %	42 %	12 %	29 %
9,5 - 11	16 %	46 %	17 %	21 %
11 - 12,5	5 %	27 %	18 %	49 %
12,5 - 14	0 %	13 %	13 %	74 %
14 - 15,5	0 %	3 %	6 %	91 %
15,5 - 17	0 %	3 %	6 %	91 %
17 - 18,5	0 %	2 %	5 %	93 %
18,5 - 20	0 %	0 %	5 %	95 %
20 - 21,5	0 %	0 %	4 %	96 %
21,5 - 23	0 %	0 %	3 %	97 %
23 - 24,5	0 %	0 %	1 %	99 %
24,5 - 26	0 %	0 %	4 %	96 %
26 - 27,5	0 %	0 %	1 %	99 %
>27	0 %	0 %	0 %	100 %

Quelle: Trafility, eigene Berechnung basierend auf CAFT

Diese Häufigkeitsverteilung für den Zusammenhang zwischen der aktuellen und der höchstzulässigen Gesamtmasse eines Fahrzeuges kann als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden. Bei den Zählstellen der WIM-Daten können diese damit, wahrscheinlichkeitsbasiert, den gewichtsbezogenen Fahrzeugklassen zugeordnet werden. Die WIM-Daten erlauben die Ermittlung von Tagesgang- und Wochenganglinien für den gesamten Lkw-Verkehr und den N3-26 Verkehr. Zusätzlich sind die Jahresverläufe über ausgewählte ASFINAG-Dauerzählstellen dargestellt (siehe Abbildung 19).

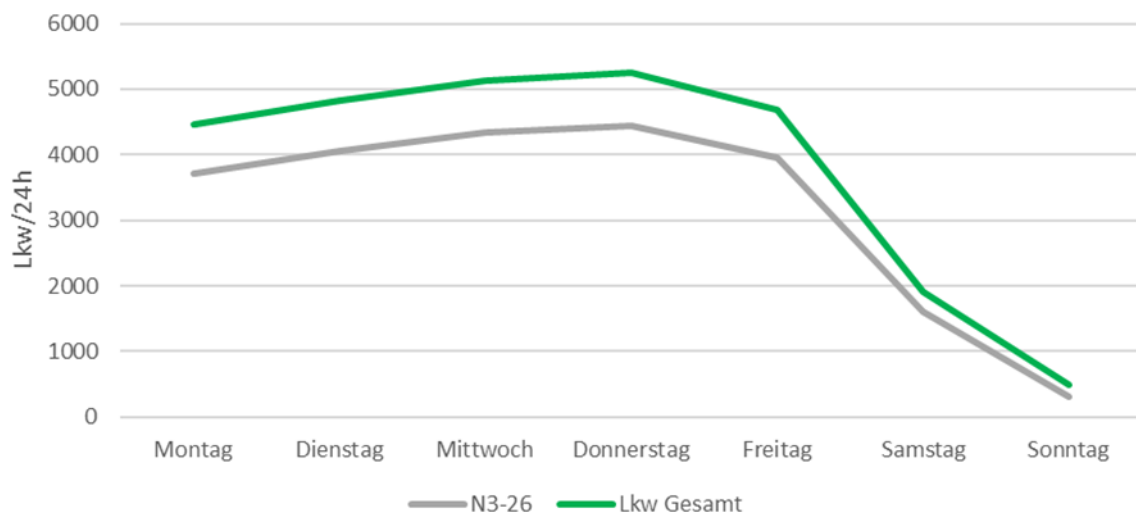
Abbildung 19: Werktägliche Tagesganglinie des Lkw-Verkehrs, WIM-Standorte



Quelle: Trafility, basierend auf ASFiNAG 2019

Die Tagesganglinie des Werktags zeigt zwischen 6 und 17 Uhr ein konstant hohes Lkw-Aufkommen. In den Nachtstunden ergibt sich – auch wegen des teilweise wirkenden Nachtfahrverbots – ein geringeres Level.

Abbildung 20: Wochenganglinie des Lkw-Verkehr, WIM-Standorte



Quelle: Trafility basierend auf ASFiNAG 2019

Im Wochengang zeigt sich, dass an den Werktagen Montag bis Freitag eine deutlich höhere Lkw-Verkehrsbelastung als am Wochenende zu beobachten ist. Tendenziell ist der Donnerstag der höchstbelastete Tag. An Sonntagen sind die wenigsten Lkw-Fahrten zu beobachten.

Abbildung 21 zeigt den Jahresverlauf der Lkw-Verkehrsbelastung für ausgewählte Zählstellen im ASFiNAG-Netz. Trotz abweichender Größenordnung ist eine hohe Ähnlichkeit des Verlaufs zu erkennen. Deutlich ersichtlich sind die Einbrüche am Jahresende. Im Jänner liegen die Belastungen zumeist etwas unter dem Jahresschnitt. Abgesehen davon gibt es keine auffälligen saisonalen Schwankungen.

Abbildung 21: Jahresganglinie Lkw-Verkehr

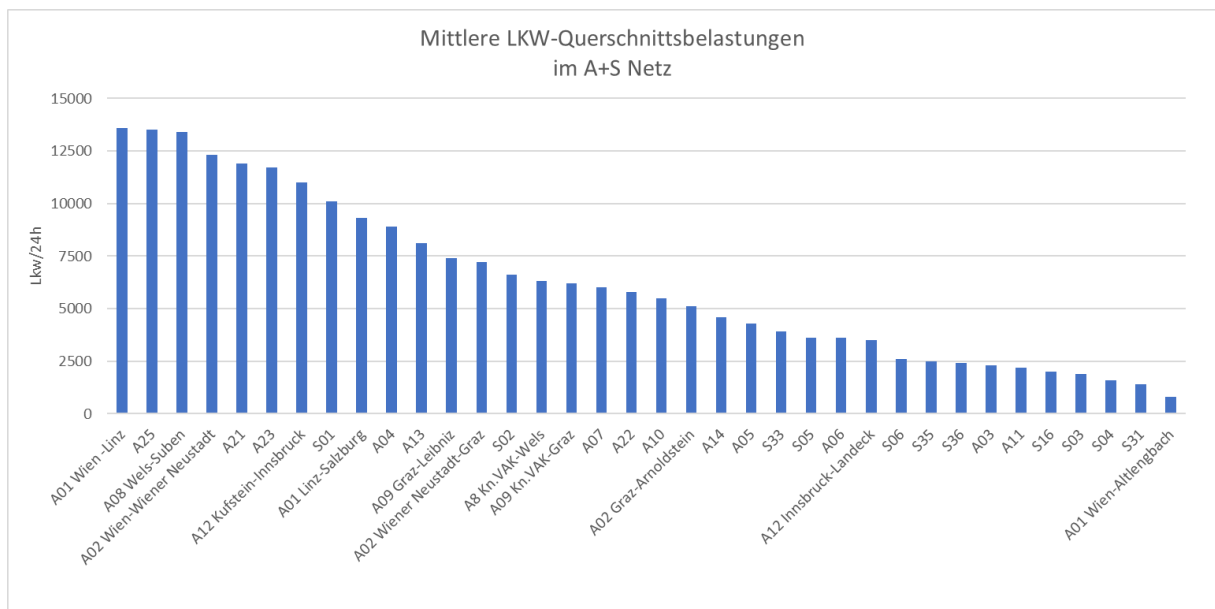


Quelle: Trafality basierend auf ASFINAG 2019

3.1.2.4 Güterverkehrsaufkommen räumliche Auflösung

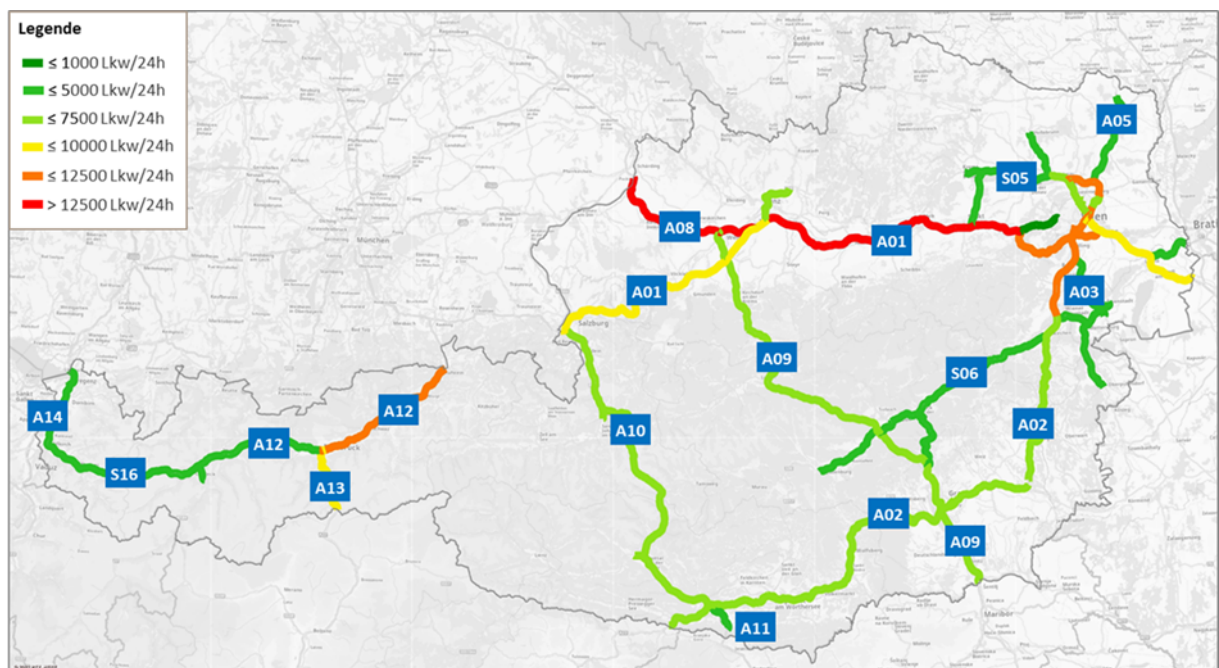
Etwa die Hälfte der Straßengüterverkehrsleistung in Österreich wird im Bundesstraßennetz (Autobahnen und Schnellstraßen) erbracht (Schwammenhöfer, 2017). Die Streckenbelastung verteilt sich heterogen über das Bundesstraßennetz mit den höchsten Streckenbelastungen im Großraum Wien, der Autobahnverbindung A8-A25-A1 zwischen Passau und Wien sowie der A12 Kufstein-Innsbruck (Abbildung 22, Abbildung 23).

Abbildung 22: Mittlere Lkw-Querschnittsbelastung je Streckenabschnitt 2019 im Autobahn- und Schnellstraßennetz



Quelle: Trafility

Abbildung 23: Lkw-Querschnittsbelastung je Streckenabschnitt 2019 – grafisch



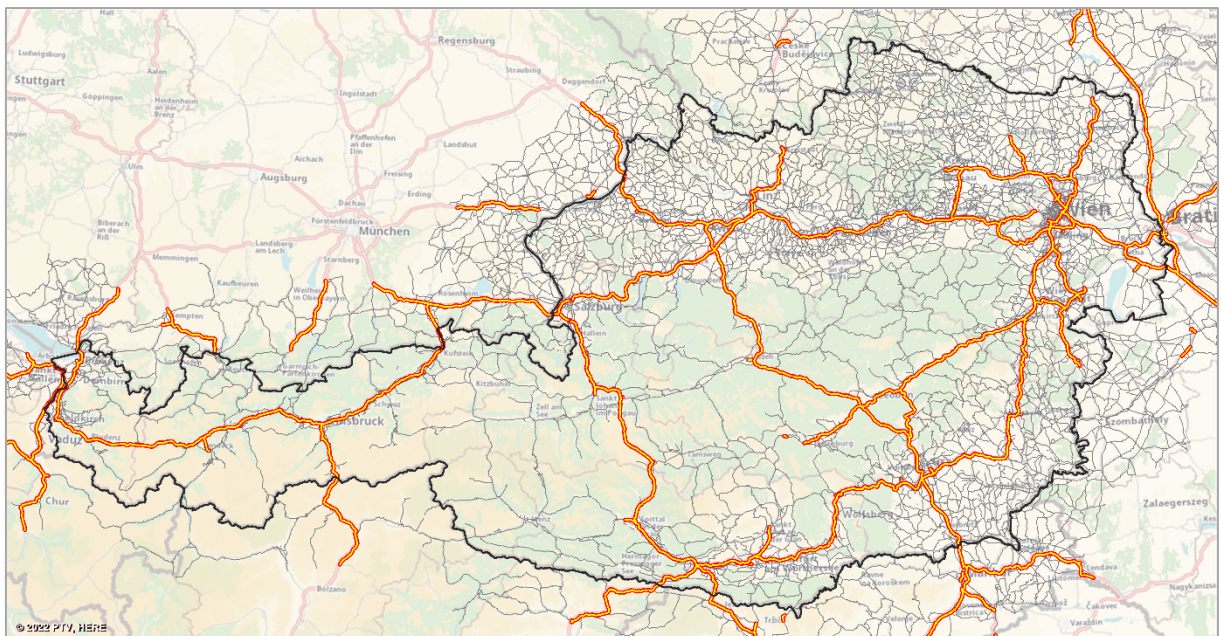
Quelle: Trafility

Dies kann als Reihenfolge für die Priorisierung von Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs interpretiert werden. Wie später dargestellt, gibt es eine positive Korrelation zwischen der Streckeneignung für dynamisches Laden und dieser Priorisierung. Das heißt, die Strecken mit einer hohen Nachfrage haben tendenziell auch gute infrastrukturelle Voraussetzungen für den Aufbau einer ERS-Infrastruktur.

3.2 Verkehrsaufkommen – Zukunftsszenarien

Die Grundlage für energetische und wirtschaftliche Überlegungen sind die bestehende und erwartete Verkehrsnachfrage im Straßengüterverkehr in Österreich. Als Grundlage für EnergyRoads dient ein makroskopisches Verkehrsmodell. Als Basis für das Netzmodell wurde das Netz des Verkehrsmodell Österreichs 2040 herangezogen. Das daraus generierte Teilnetz umfasst das Untersuchungsgebiet Österreich und Kordonbezirke an den Grenzgebieten. Insgesamt ergeben sich daraus rund 2.900 Bezirke, davon rund 2.500 in Österreich. Die Netzlänge im gesamten Netz beträgt rund 337.000 km. Dies beinhaltet sowohl das Autobahn- und Schnellstraßen sowie Landstraßennetz als auch das untergeordnete Netz im gesamten Untersuchungsgebiet. In Abbildung 24 ist das österreichische Netz inkl. Grenzbereich dargestellt. Auch wenn der Fokus auf dem Autobahn- und Schnellstraßennetz liegt, wurde auf eine genaue Verteilung und Modellierung im Landesstraßen- und Ergänzungsnetz geachtet, damit die Fahrtweiten im Vor- und Nachlauf richtig abgeschätzt werden können.

Abbildung 24: Streckennetz Österreich im Verkehrsmodell



Quelle: Trafility

3.2.1 Verkehrsnachfrage

Als Basis für die Verkehrsnachfrage wurden die Nachfragematrizen des Verkehrsmodells zum Projektstand September 2021 des VMÖ40 für den VMÖ-Bestand 2018 herangezogen. Diese wurden vor der Anwendung auf das Jahr 2019 hochgerechnet. Im Lkw-Verkehr erfolgt eine Differenzierung in 4 Nachfrageschichten nach den Gewichtsklassen N2, N3 ab 12 t, N3 ab 18 t und N3 ab 26 t. Anschließend erfolgte die Einpflegung der

Kalibrierungsquerschnitte mit den Lkw-Gewichtsklassen. Basis für die Kalibrierungsquerschnitte sind die Dauerzählstellen der ASFiNAG, sodass jede Dauerzählstelle die Information enthält, wie hoch der Absolutwert der Lkws je Gewichtsklasse ist. Der Aufbau und die Kalibrierung des Verkehrsmodells erfolgen schrittweise, bis die erwünschten Sollwerte erreicht sind. Anzumerken ist, dass sämtliche Kalibrierungsschritte iterativ und per Hand ohne Anwendung von automatisierten Kalibrierungsverfahren erfolgten. Das Basisjahr für das vorliegende Projekt ist 2019. Die Abbildungsqualität des Verkehrsmodells wurde anhand statistischer Kennwerte gemäß HBS 2015 (FGSV, 2015) geprüft und kann für die Anwendung bestätigt werden.

3.2.2 Verkehrsprognose

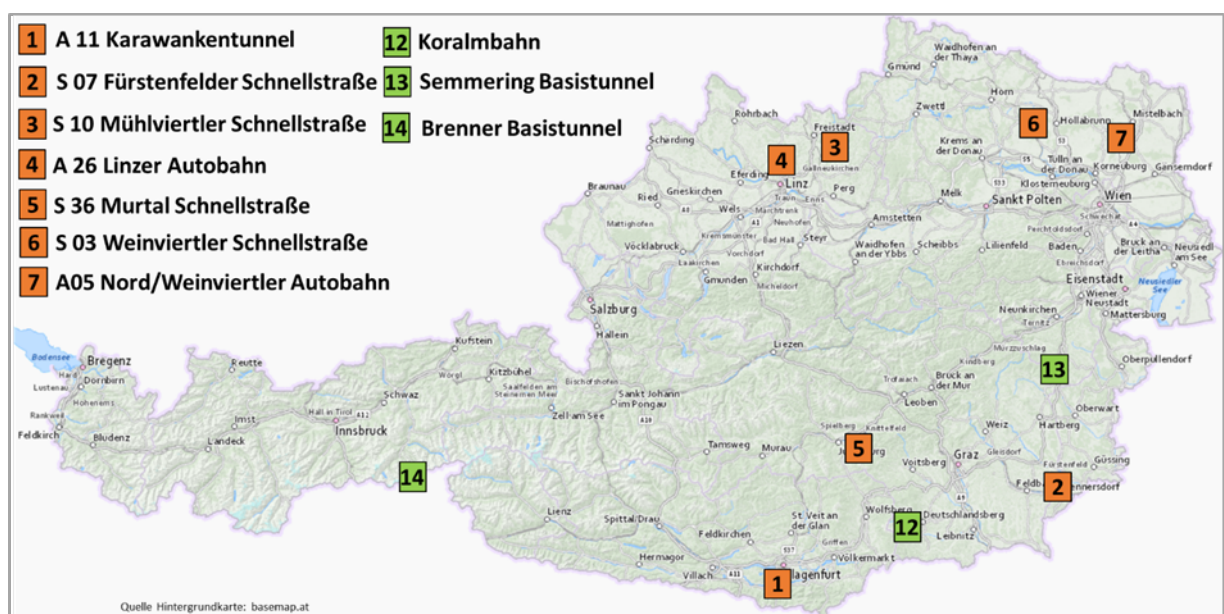
Die Modellierung des Jahres 2019 dient der Analyse der bestehenden Verkehrsströme und der Validierung der Grundlagen für die Verkehrsprognose. Als Prognosezeitpunkt wurde das Jahr 2040 gewählt.

3.2.2.1 Angebotsprognose

Für die Prognose wurden dem Streckennetz des Analysezustands Maßnahmen hinzugefügt, die bis 2021 bewilligt oder umgesetzt wurden. Im Modell eingepflegt wurden dabei Ausbaumaßnahmen im Straßennetz, während Maßnahmen im Schienennetz in der Prognose nur hinsichtlich ihrer Wirkung berücksichtigt wurden. Im Straßennetz werden folgende Maßnahmen berücksichtigt:

- A11 Karawankentunnel
- S07 Fürstenfelder Schnellstraße
- S10 Mühlviertler Schnellstraße
- A26 Linzer Autobahn
- S36 Murtal Schnellstraße
- S03 Weinviertler Schnellstraße
- A05 Nord/Weinviertel Autobahn

Abbildung 25: Ausbaumaßnahmen bis zum Prognosejahr 2040



Quelle: Trafility

3.2.2.2 Nachfrageprognose

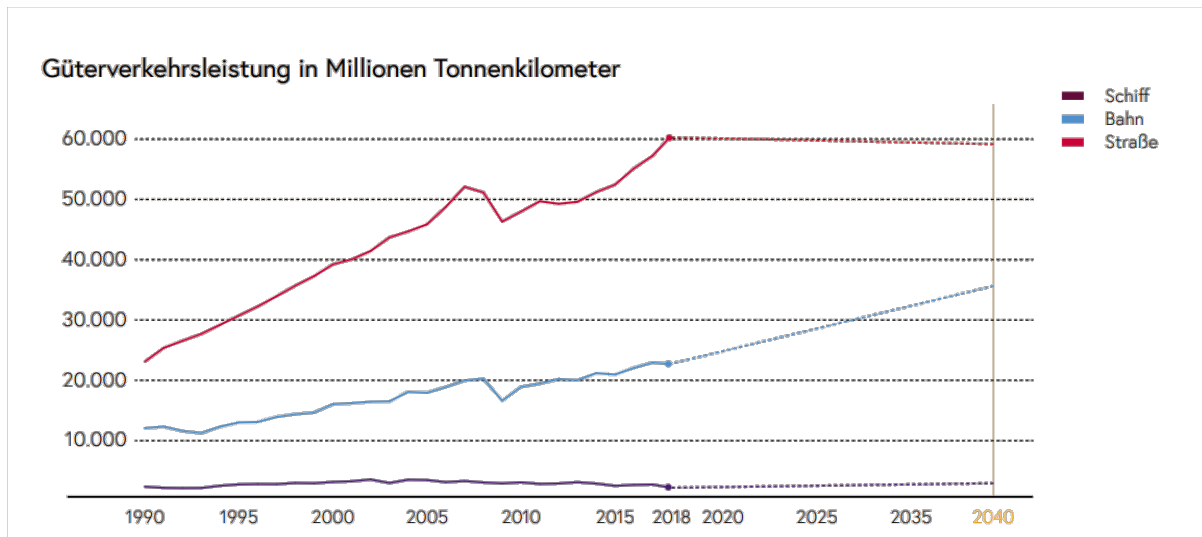
Basisgrößen der Prognose auf der Nachfrageseite sind die Quelle-Ziel-Matrizen, die für den Prognosezeitpunkt erarbeitet bzw. hochgerechnet und dann auf das Prognosenetz umgelegt wurden. Um eine Bandbreite der möglichen Entwicklungen abbilden zu können, wurden drei Prognoseszenarien erarbeitet:

- MMP: Szenario Mobilitätsmasterplan 2030
- CLR: Szenario basierend auf CLEARER-Studie
- VPÖ: Szenario basierend auf VPÖ 2025+

MMP-Szenario Mobilitätsmasterplan 2030

Vorrangig betrachtet wird bei der Prognose die Zielerfüllung des Pariser Klimaabkommens, welche im „Mobilitätsmasterplan 2030 – Neuausrichtung des Mobilitätssektors“ (BMK, 2021) zusammengefasst wurden. Der Mobilitätsmasterplan 2030 ist das Ergebnis eines Backcasting-Ansatzes, was bedeutet, dass ausgehend vom Ziel modelliert wurde. Daraus folgt, dass die Güterverkehrsleistung zwischen 2018 und 2040 nur mehr leicht steigt. Laut Mobilitätsmasterplan 2030 ist in den nächsten Jahren mit einer Angebotsverbesserung auf der Schiene durch innovative Maßnahmen (Digitalisierung, Automatisierung, digitale Kupplung) zu rechnen. Die Güterverkehrsleistung auf der Straße wird demnach bis 2040 leicht sinken, die Bahn in Zukunft deutlich mehr Güterverkehrsleistung in Österreich abwickeln.

Abbildung 26: Entwicklung der Güterverkehrsleistung



Quelle: BMK 2021

Für die Umsetzung im Modell wurde davon ausgegangen, dass die Verkehrssteigerung auf der Schiene längere Fahrten (>150 km) betrifft. Ausbaumaßnahmen der Schieneninfrastruktur (Koralmbahn, Brenner Basistunnel und Semmering Basistunnel) wurden in das Modell eingepflegt. Für den Rest von Österreich wurde die Straßengüterverkehrsleistung etwas erhöht, sodass sich in Summe eine Stagnation ergibt. Dadurch ergeben sich räumlich unterschiedliche Entwicklungen.

CLR-Szenario basierend auf CLEARER-Studie

Dieses Szenario basiert auf der Studie „CLEARER-Climate Neutral Freight Transport“. Die Studie wurde von Herry Consult, Econsult, der Universität Graz und der Technischen Universität Wien durchgeführt und im April 2021 abgeschlossen. Es wird davon ausgegangen, dass die Straßengüterverkehrsfahrleistung in Österreich zwischen 2018 und 2030 um 1,7 % sowie zwischen 2030 und 2040 um 1 % steigt. Die Auswirkungen der COVID-Pandemie sind nicht berücksichtigt.

In der Studie ist aufgeschlüsselt, wie sich die Straßengüterverkehrsleistung je Gewichtsklasse und Fahrtlänge (100 km, 100-200 km und >200 km) entwickelt. Weiters kann der Studie die Entwicklung von internationalen Quell- und Zielfahrten sowie im Transitverkehr entnommen werden. Diese Entwicklungen wurden den projektspezifischen Gewichtsklassen zugeordnet (siehe folgende Auflistung) und nach Fahrtweite im Modell übernommen.

- 3,5 t bis 12 t entspricht: bis 10 t hzG
- 12 t bis 18 t entspricht: 10 t bis 20 t hzG
- 18 t bis 26 t entspricht: 20 t bis 30 t hzG
- >26 t entspricht: >30 t hzG

VPÖ-Szenario basierend auf VPÖ 2025+

Das aktuell gültige Verkehrsmodell für Österreich ist das VPÖ2025+. Der Analysezustand bildet das Jahr 2010 ab, der Prognosehorizont ist 2030 (bzw. 2025). Die Entwicklung zwischen 2010 und 2030 wurde der Verkehrsprognose (VPÖ) VPÖ25+ entnommen und auf das EnergyRoads-Verkehrsmodell umgelegt. Das VPÖ ermöglicht keine Unterteilung nach Gewichtsklassen. Demnach wurden alle Gewichtsklassen gleichmäßig hochgerechnet. In der VPÖ zeigt sich eine Steigerung der Straßenverkehrsfahrleistung zwischen 2019 und 2040 von 1,0 % bis 2,3 % pro Jahr.

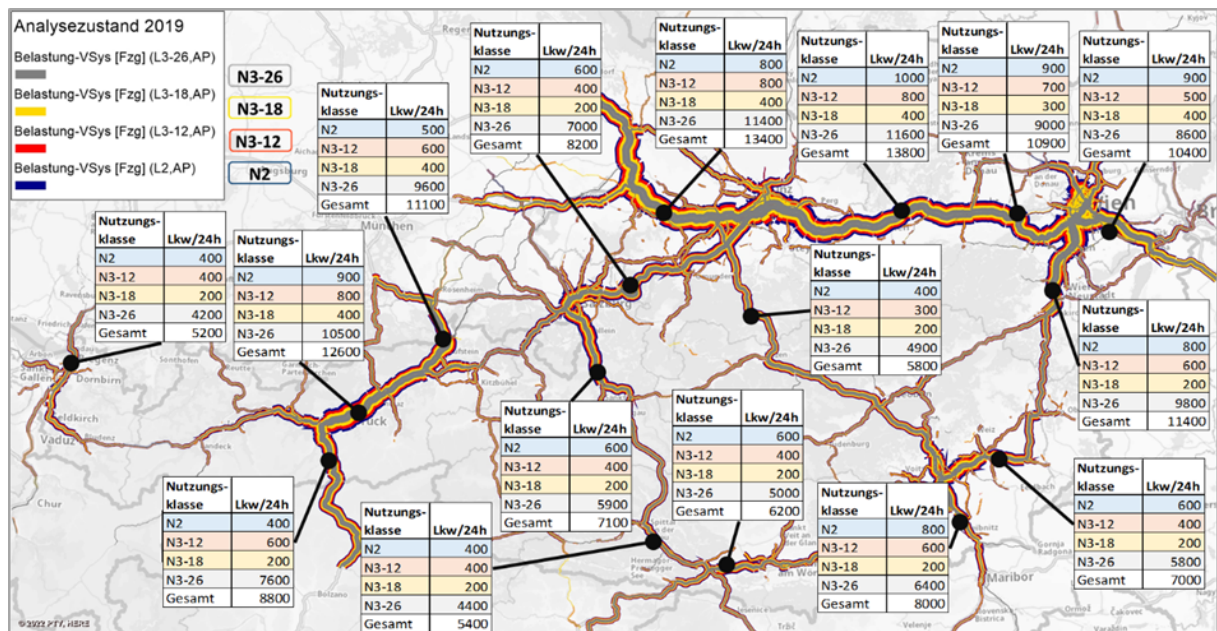
3.2.3 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel sind die umgelegten Verkehrsbelastungen am österreichischen Straßennetz dargestellt. Dabei erfolgt die Ausgabe der Belastungen nach Nutzungsklassen.

3.2.3.1 Analysezustand 2019

Der Analysezustand stellt den realen Zustand an einem Normalwerktag im Jahr 2019 dar (siehe Abbildung 27). Die Balkendicke ist mit der Belastung am Streckenabschnitt skaliert. Dabei ist ersichtlich, dass in und um die Ballungsräume Wien, Graz, Innsbruck und Linz sehr hohe Lkw-Verkehrsbelastungen von rund 8.000 bis 12.600 Lkw/24h am Querschnitt vorliegen. Auch auf der A1 zwischen Passau und Wien sind durchgehend hohe Lkw-Verkehrsbelastungen mit bis zu 13.800 Lkw/24h zu verzeichnen, wobei bis zu 11.600 Lkw/24h der Nutzungsklasse N3-26 zuzurechnen sind. Diese Strecke ist Teil des transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-T, Rhein – Donau). Relativ geringe Lkw-Verkehrsbelastungen gibt es zwischen Innsbruck und Vorarlberg. Insgesamt zeigt sich, dass etwa 60 % bis 80 % der Lkw-Nachfrage der Klasse N3-26 zuzuordnen ist.

Abbildung 27: Durchschnittlich täglicher Verkehr an Werktagen von Lkw nach Nutzungsklassen - Analysezustand 2019

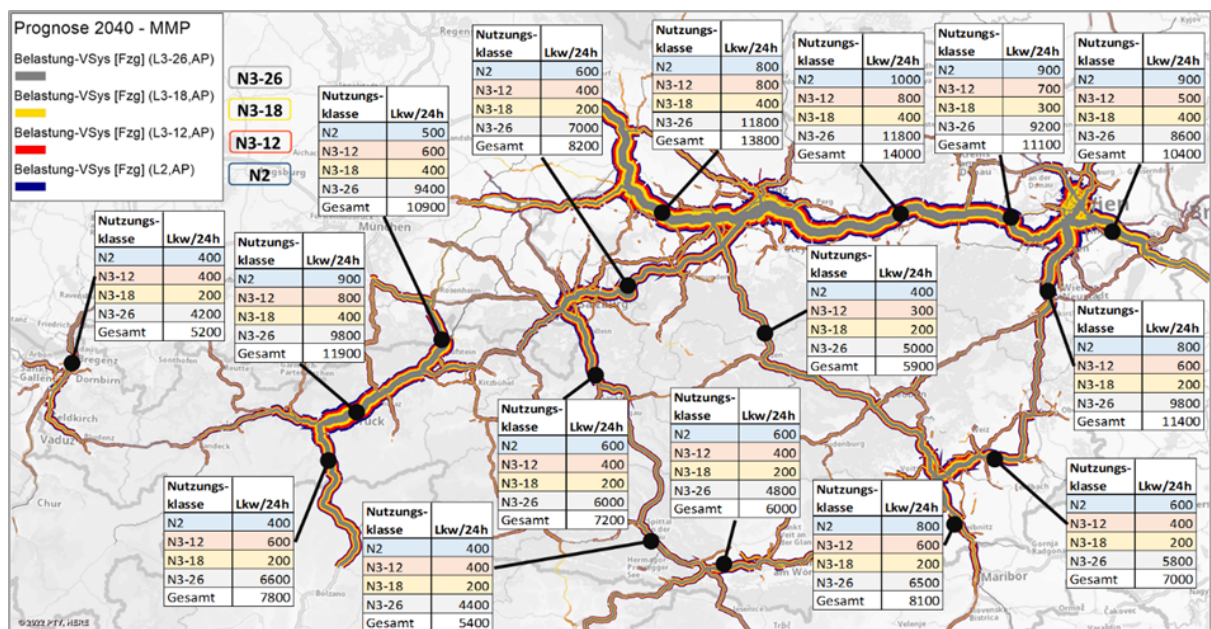


Quelle: Trafility

3.2.3.2 Prognose 2040 – MMP

Im Prognoseszenario „Mobilitätsmasterplan 2030“ (MMP) 2040 sind hohe Lkw-Verkehrsbelastungen auf der A1 mit rund 14.000 Lkw/24h zu verzeichnen. Davon sind 11.800 Lkws der Nutzungsklasse N3-26 zuzuordnen, 400 Lkws der Nutzungsklasse N3-18, 800 Lkws der Nutzungsklasse N3-12 und rund 1.000 Fahrzeuge der Nutzungsklasse N2. In Summe steigt die Güterverkehrsbelastung an diesem hochfrequentierten Abschnitt der A1 vom Analysezeitpunkt 2019 bis zum Prognosezeitpunkt 2040 im Planfall MMP um rund 1,4 %.

Abbildung 28: Durchschnittlich täglicher Verkehr an Werktagen von Lkw nach Nutzungsklassen - Prognose 2040 MMP

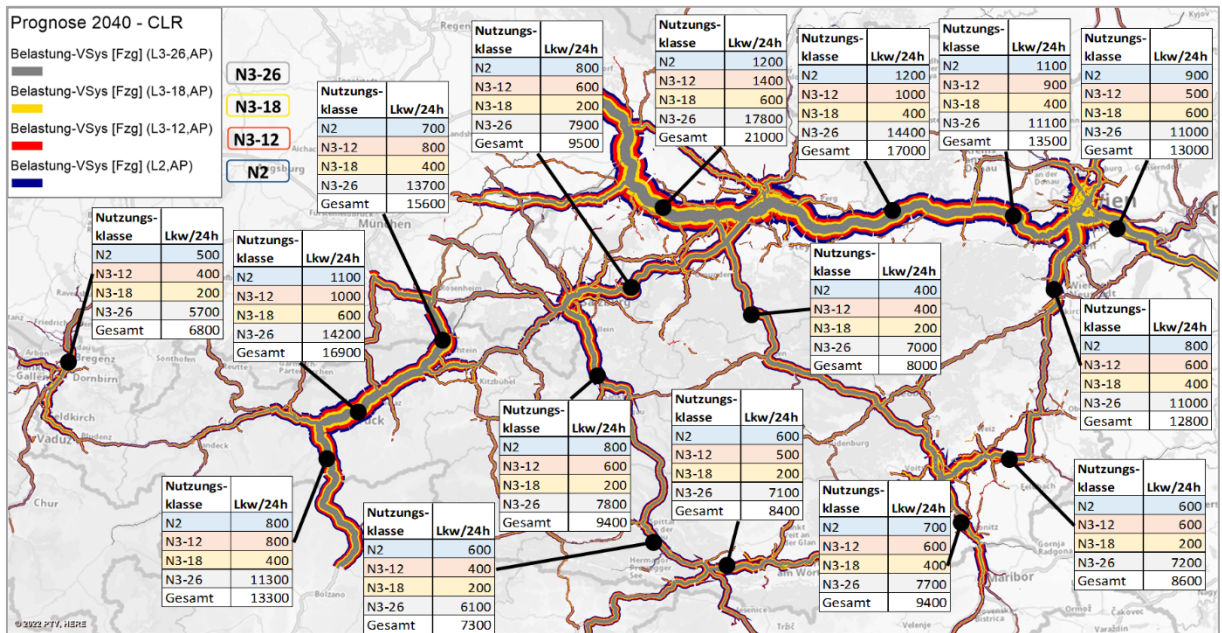


Quelle: Trafility

3.2.3.3 Prognose 2040 – CLR

Im Prognoseszenario gemäß CLEARER-Studie (CLR) 2040 sind hohe Lkw-Verkehrsbelastungen auf der A1 mit rund 17.000 Lkw/24h zu verzeichnen. Davon sind 14.400 Lkws der Nutzungsklasse N3-26 zuzuordnen, 400 Lkws der Nutzungsklasse N3-18, 1.000 Lkws der Nutzungsklasse N3-12 und rund 1.200 Fahrzeuge der Nutzungsklasse N2. In Summe steigt die Güterverkehrsbelastung an diesem hochfrequentierten Abschnitt der A1 vom Analysezeitpunkt 2019 bis zum Prognosezeitpunkt 2040 im Planfall CLR um rund 23,2 %.

Abbildung 29: Durchschnittlich täglicher Verkehr an Werktagen von Lkw nach Nutzungsklassen - Prognose 2040 CLR

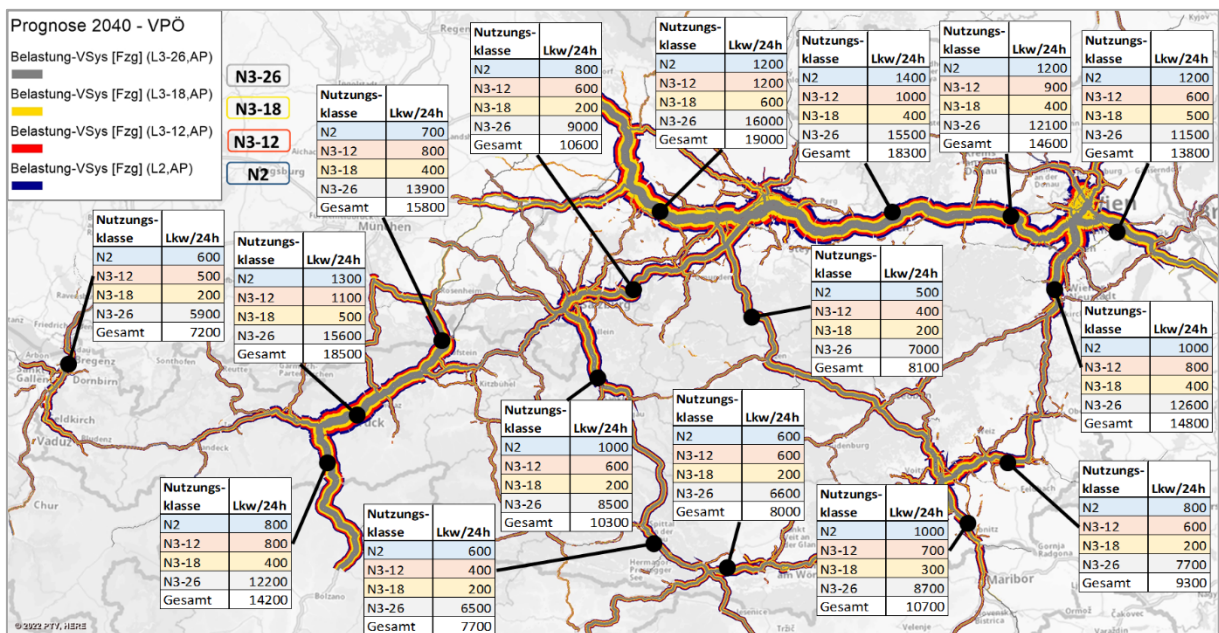


Quelle: Trafility

3.2.3.4 Prognose 2040 – VPÖ

Im Prognoseszenario gemäß Verkehrsprognose Österreich 2025+ (VPÖ) 2040 sind hohe Lkw-Verkehrsbelastungen auf der A1 mit rund 18.300 Lkw/24h zu verzeichnen. Davon sind 15.500 Lkws der Nutzungsklasse N3-26 zuzuordnen, 400 Lkws der Nutzungsklasse N3-18, 1.000 Lkws der Nutzungsklasse N3-12 und rund 1.400 Fahrzeuge der Nutzungsklasse N2. In Summe steigt die Güterverkehrsbelastung an diesem hochfrequentierten Abschnitt der A1 vom Analysezeitpunkt 2019 bis zum Prognosezeitpunkt 2040 im Planfall VPÖ um rund 32,6 %.

Abbildung 30: Durchschnittlich täglicher Verkehr an Werktagen von Lkw nach Nutzungsklassen - Prognose 2040 VPÖ



Quelle: Trafility

3.3 Umweltwirkungen – Status Quo

Der kleinste Teil des Lkw-Bestands in Österreich von rund 54.000 Fahrzeugen (> 3,5 t) entfällt auf die Klasse N3-26 (Statistik Austria, Kfz-Bestand 2019). Die Aufteilung in der Klasse N3 wurde mithilfe des Lkw-Bestandes in Deutschland abgeschätzt, da für Österreich keine detaillierten Daten vorliegen. Die Fahrleistung wurde aus dem Verkehrsmodell errechnet. Die Klasse N3-26 weist die höchste Fahrleistung auf (Abbildung 31). Der CO₂-Ausstoß wurde mit HBEFA (Handbuch für Emissionsfaktoren) berechnet und entspricht dem Stand 2020. Dabei wurde in schwere und leichte Nutzfahrzeuge unterschieden. Aufgrund der höchsten Fahrleistung in der Klasse N3-26 ist auch der höchste CO₂-Ausstoß in dieser Nutzungsklasse ersichtlich. Abbildung 32 zeigt den absoluten CO₂-Ausstoß je Nutzungsklasse. Dabei entfallen rund 3,2 Mio. t der insgesamt 5,8 Mio. t/Jahr auf den Lkw-Verkehr der Nutzungsklasse N3-26. Der kleinste Teil der CO₂-Emissionen entfällt auf den Lkw-Verkehr der Nutzungsklasse N2 mit rund 0,6 Mio. t/Jahr.

Abbildung 31: Fahrzeugbestand im Verhältnis zu Fahrleistung und CO₂-Ausstoß nach Fahrzeugklasse im Jahr 2019

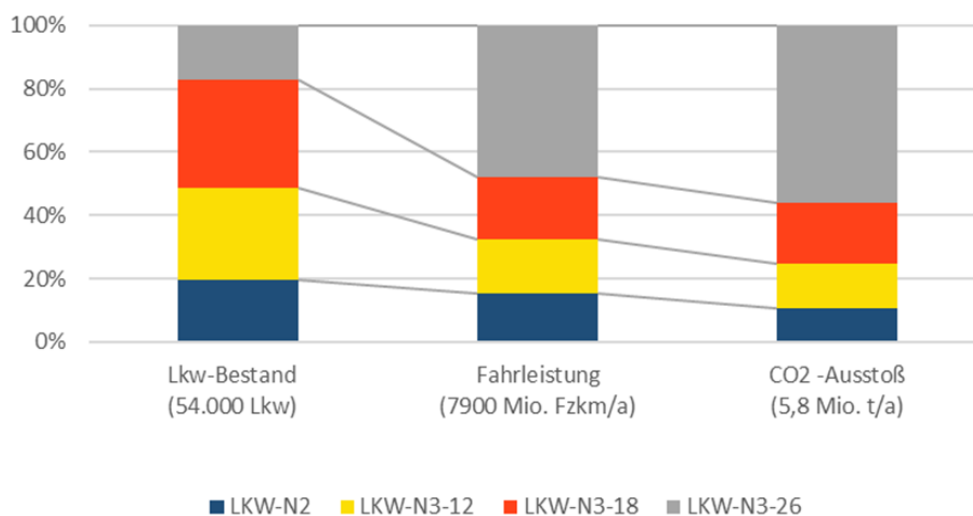
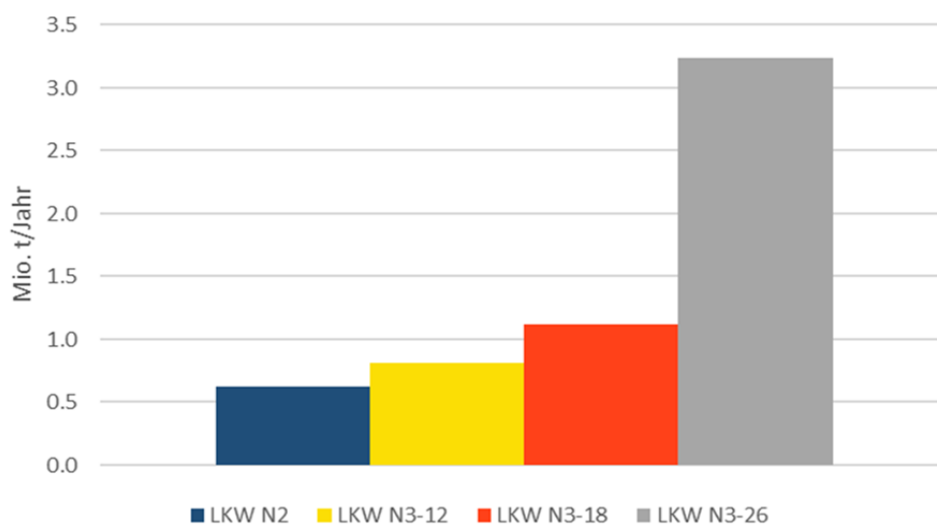


Abbildung 32: CO₂-Ausstoß pro Jahr im Schwerverkehr nach Fahrzeugklasse



Quelle: Trafility

4 Fahrzeuge

„Wie sehen die aktuellen Entwicklungen der Fahrzeughersteller in diesem Sektor aus?“

Dieses Kapitel widmet sich dem Fahrzeugangebot mit alternativen Antrieben mit einem Fokus auf O-BEV, aber auch anderen Dekarbonisierungsoptionen. Im Zentrum stehen technische und wirtschaftliche Annahmen zur Entwicklung der alternativen Antriebssysteme für das Jahr 2030. Diese Einschätzungen der technischen Parameter und Fahrzeugkosten werden auch für das Jahr 2040 verwendet, da aussagekräftige Prognosen für diesen Zeithorizont fehlen. Der Fokus liegt bei den Oberleitungs-Lkw, im Folgenden als O-BEV100 und O-BEV200 bezeichnet. Die Zahlenangabe bezieht sich auf die effektive Batteriereichweite (100 km und 200 km). Zusätzlich werden batterieelektrische Fahrzeuge - BEV400 (400 km Batteriereichweite), wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge - FCEV500 (500 km Reichweite mit einer Tankfüllung) und mit E-Fuels betriebene konventionelle Fahrzeuge analysiert. Weitere Antriebs- und Treibstoffarten, wie z. B. Diesel-Hybrid-O-BEV, Stromschienen-Lkw, Induktions-Lkw, gasbetriebene-Lkw werden nur überblicksartig dargestellt.

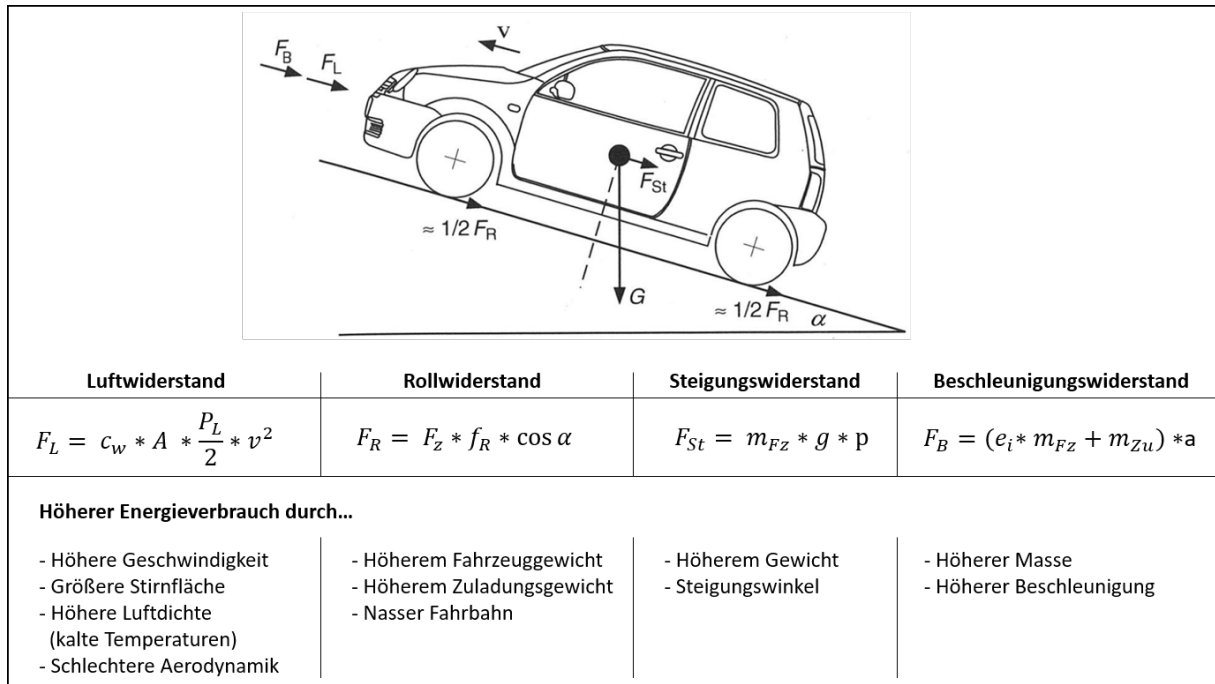
4.1 Grundlagen

Der spezifische Energieverbrauch von Lkws ist für deren Wirtschaftlichkeit entscheidend. Er dürfte in Zukunft deutlich sinken. Dies hängt direkt mit den EU-Flottenemissionsvorgaben für die einzelnen Hersteller zusammen und gilt demnach im Flottendurchschnitt, aber auch für Dieselfahrzeuge. Ansatzpunkte sind beispielsweise Verbesserungen in der Aerodynamik, bei Reifen und beim Fahrzeuggewicht. Diese Verbesserungen werden ebenfalls für ZEM-Fahrzeuge angenommen.

In der EnergyRoads-Analyse wird nicht direkt auf den spezifischen Energieverbrauch der verschiedenen Lkw-Antriebssysteme aus der Literatur zurückgegriffen. Stattdessen wird ein spezifischer Verbrauch unter Berücksichtigung der spezifischen Streckenneigung und der in Österreich typischen Nutzlast für das betrachtete Fahrzeugsegment berechnet. Die Berechnung beruht für alle Lkw auf einer vereinfachten Version der Straßenlastgleichung, welche den Luftwiderstand und den Rollwiderstand bei konstanter Geschwindigkeit und keinem Reifenschlupf berücksichtigt (ähnlich wie in (TE, 2018)).

Für die Ermittlung der Antriebsleistung werden diese Widerstände mit der durchschnittlichen Geschwindigkeit multipliziert. Für die Berechnung des spezifischen Energieverbrauches werden zusätzlich die Wirkungsgrade des Motors, des Antriebs, der Batterie sowie die Leistung der Nebenaggregate eingerechnet. Es wird zudem die Beschleunigungsenergie, minus Bremsenergie bei Rekuperation, abgeleitet und eingerechnet. Der so errechnete spezifische Energieverbrauch entspricht dem Tank-to-Wheel Energieverbrauch. Um einen Vergleich zwischen batteriebetriebenen bzw. dynamisch geladenen Elektrofahrzeugen mit anderen Antriebsarten zu ermöglichen, werden noch Ladeverluste im Fahrzeug und in der Ladeinfrastruktur miteingerechnet.

Abbildung 33: Komponenten der Straßenlastgleichung vereinfacht dargestellt



Quelle: Seiffert, Hans-Hermann, 2003

Nachdem der Zero-Emission-Fahrzeugmarkt für Lkw erst im Entstehen ist, fehlen Daten über die Investitionskosten sowie zu Betriebs- und Wartungskosten. In den nachfolgenden Kapiteln werden Einschätzungen aus der Literatur zu Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten für das Jahr 2030 herangezogen. Daraus wurden Best-Case und Worst-Case Annahmen für die weiteren Analysen gebildet. Restwerte für Zero-Emission-Lkw werden ähnlich wie in der Studie von StratON (Hacker, et al., 2020) mit 15 % für jede Antriebsart angenommen.

Wie in anderen Studien werden für den Zeitraum nach 2030 keine weiteren Verbesserungen des spezifischen Energieverbrauchs und der zugrundeliegenden Parameter angenommen. Dies führt zu konservativen Ergebnissen für den Energieverbrauch aller Antriebe. Detaillierte Annahmen werden in Annex I beschrieben.

4.2 Oberleitung – O-BEV

Die Errichtung einer Oberleitungsinfrastruktur auf Autobahnen und Schnellstraßen ermöglicht das dynamische Laden während der Fahrt. Der Stromabnehmer (Pantograph) ist am Fahrzeug befestigt, wodurch eine direkte Energieübertragung über den Fahrdrabt ermöglicht wird. Nach Verlassen des elektrifizierten Straßenabschnitts können die Fahrzeuge entweder ausschließlich über eine Batterie (O BEV) oder als Hybrid (O-HEV) versorgt werden. Diese Technologie hat sowohl für O-BEV als auch O-HEV einen TRL von 8, da der reguläre Betrieb der Pilotstrecken weitgehend problemlos verlaufen ist.

Für O-HEV sind prinzipiell alle Hybridsysteme denkbar: die Kombination mit einem konventionellen Diesel-Antrieb, mit Flüssiggas, mit einem gasbasierten Antrieb oder mit einer wasserstoffbasierten Brennstoffzelle. Mit Ausnahme der Verwendung einer Brennstoffzelle sind alle Kombinationen auf den deutschen oder schwedischen Teststrecken realisiert worden (Kapitel 5.4). Die zweite Antriebsart kann im Rahmen eines seriellen oder parallelen Hybrid-Systems zugeschaltet werden. Je nach Primärenergieträger und Ausmaß ihrer Nutzung verringern sich durch die zweite Energieform die Gesamtenergieeffizienz und auch die ökologischen

Vorteile. O-HEV Systeme können in der Aufbauphase der Oberleitungsinfrastruktur sinnvoll sein. Im Weiteren werden vor allem O-BEV Fahrzeuge analysiert, da diese bei einer ausreichenden ERS-Infrastrukturabdeckung signifikante Vorteile in Bezug auf Energieverbrauch, ökologische Wirkungen und Wirtschaftlichkeit haben. (Hacker, et al., 2020 S. 82)

Die internationale Studienlage legt nahe, dass vor allem schwere Fahrzeuge mit einem höchstzulässigen Gesamtgewicht von mindestens 26 t mit Pantographen ausgestattet werden können. In Stakeholder-Gesprächen wurden Fahrzeuge mit 18 t höchstzulässigen Gesamtgewicht als untere Grenze für den Einsatz von Pantographen und somit für dynamisches Laden genannt.

Die Leistungsaufnahme über Pantographen ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Laut Siemens (2022) kann bei einer Nennspannung im System von 1,2 kV DC über den Pantographen 350 A (420 kW) Leistung dynamisch (in Fahrt ab 5 km/h) und 100 A (120 kW) statisch bei Fahrtunterbrechungen aufgenommen werden. Der Pantograph ist ein Nebenaggregat des Fahrzeugs, das von einem Zuliefererunternehmen produziert wird. 2021 hat Continental als erster Hersteller angekündigt, in die Serienfertigung einzusteigen. Mit der laut Entwurf der TS 50712 vorgeschlagenen Nennleistung von 1,2 kV in der Oberleitung wird ein DC/DC Wandler im Fahrzeug sowohl für die Spannungsreduktion für die Energieversorgung von Motor und Batterie benötigt. Die Leistung der nächsten Produktionsserie von Oberleitungsfahrzeugen von Scania wird voraussichtlich 250 kW betragen. Diese 250 kW des DC/DC Wandlers stellen die Leistungsgrenze für die Energieaufnahme während der Fahrt dar. Zukünftige Weiterentwicklungen und Erhöhungen der Leistung des DC/DC Wandlers sind laut Scania möglich.

Der zusätzliche Luftwiderstand des Pantographen erhöht den spezifischen Energieverbrauch des Fahrzeugs. Zur Verringerung des Luftwiderstands wird der Pantograph außerhalb der Strecken mit Oberleitungsabdeckung eingeklappt. Das Lichtraumprofil des Fahrzeuges eines Fahrzeuges mit eingefahrenem Pantographen entspricht dem eines identen Fahrzeuges ohne Pantograph. In den Interviews wurden für das Auf- und Abbügeln ein Zeitbedarf von je ein bis drei Sekunden genannt. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h entspricht dies einer Länge von maximal 70 m, die das Fahrzeug schon unter einer Oberleitungsstrecke fährt. Das System kann prinzipiell vollautomatisch erkennen, ob eine Oberleitung vorhanden ist und automatisch aufbügeln. Die gängigen Systeme erfordern aber ein manuelles Betätigen. Das gilt auch für das Abbügeln, das aber auch über bestimmte Bewegungen des Lenkrades eingeleitet werden kann. Die Fahrzeuggeschwindigkeit hat im Bereich der zulässigen Gesamtgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die Ladeleistung des Pantographen. Lediglich bei sehr geringen Geschwindigkeiten bis etwa 5 km/h ist die Leistungsaufnahme reduziert. Bei einer gegebenen Länge einer Oberleitung und Ladeleistung bedingt aber die Geschwindigkeit des Fahrzeuges, wie lange das Fahrzeug unter der Oberleitung laden kann und daher die aufgenommene Energiemenge. Geschwindigkeit und Beschleunigung bedingen, wie viel elektrische Energie das Fahrzeug verbraucht (Boltze, 2021).

Für die vorliegende Analyse wurden zwei unterschiedliche O-BEV Sattelzugmaschinen (SZM) untersucht: O-BEV100 und O-BEV200 (100 km bzw. 200 km Batteriereichweite). Der spezifische Energieverbrauch im Jahr 2030 wurde mit gerundet 1,28 bis 1,29 kWh/km berechnet. Für die entsprechende Batteriereichweite sind, unter der Annahme eines verwendbaren State-of-Charge von 80 % ohne Berücksichtigung der Degradation der Batterie, Batteriekapazitäten von mindestens 160 kWh bzw. 320 kWh notwendig. Für die Analysen wird angenommen, dass bei O-BEV100 die Batterie mit 2C (Vollladung/Entladung in einer halben Stunde) und O-BEV200 mit 1C (Vollladung/Entladung in einer Stunde) betrieben werden können. Die angenommenen Investitionskosten liegen ab dem Jahr 2030 zwischen 110.000 EUR und 190.000 EUR. Die angenommenen Wartungskosten betragen zwischen 12.000 EUR/Jahr und 14.000 EUR/Jahr.

Der spezifische Energieverbrauch von O-Lkws sowie deren Investitions- und Wartungskosten wurde in unterschiedlichen Studien analysiert. Relevante Annahmen und Ergebnisse aus diesen Studien wurden in Tabelle 5 zusammengefasst. In dieser Tabelle sind ebenfalls die Annahmen für O-BEV100 und O-BEV200 angeführt, die für die vorliegende Analyse verwendet wurden. Es wird vereinfachend angenommen, dass O-BEV100 und O-BEV200 trotz unterschiedlicher Batteriekapazität die gleichen Kosten haben.

Tabelle 5: Übersicht O-BEV Fahrzeuge

SZM-O-BEV 2030	Einheit	Fraunhofer (2017)	JRC (2020) für 2025	StratON (2020) O-BEV100	StratON (2020) O-BEV200	TE (2021a)	AEA O-BEV100	AEA (2022) O-BEV200
Fahrzeuggewicht	t	-	13,7	-	-	-	13,0	13,8
Zuladung	t	50 % Auslastung	14,3	-	-	-	13,9	13,9
Tankgröße	kWh	200	105	175	350	288	160	320
Verbrauch	kWh/km	1,6	1,15	1,42	1,42	1,25-1,39	1,28	1,29
Reichweite	km	ca. 100	65	100	200	200	100	200
Investitionskosten	EUR	189.000	-	116.200	137.876	112.028	112.028 bis 189.000	112.028 bis 189.000
Wartungskosten	EUR/a	12.840	-	12.200	12.200	13.637	12.200 bis 13.637	12.200 bis 13.637

Quellen: Fraunhofer 2017, JRC 2020a, Hacker et al. 2020, TE 2021a - O-BEV Pantograph-to-wheel: 1,25 kWh/km und O-BEV from the grid: 1,39 kWh/km, eigene Berechnungen

Als zentrale Herausforderungen der Oberleitungstechnologie werden der Infrastrukturausbau, die Weiterentwicklung der Batterietechnologie, die Akzeptanz und die Integration in Logistikprozesse genannt (Agora Verkehrswende, 2020). Die Fahrzeugverfügbarkeit ist ebenfalls ein kritischer Faktor. Bei den drei existierenden Feldversuchen in Deutschland konnte der Betrieb erst einige Monate nach der Fertigstellung der Infrastruktur beginnen, da Lkws nicht zeitnah zur Verfügung standen (Mottschall, 2022). Im Moment stellt nur Scania in Einzelfertigung oberleitungsfähige Fahrzeuge her. Kein anderer OEMs hat öffentlich verlautbart, O-BEV oder O-HEV Fahrzeuge zu entwickeln. Elektrische Lkw werden allerdings von vielen OEMs entwickelt, der Anpassungsbedarf auf O-BEV ist geringer als auf FCEV-Fahrzeuge (Mottschall, 2022).

4.3 Andere Antriebe

„Welches Energie-Einsparungspotenzial gegenüber alternativen Technologien wie etwa Diesel, Wasserstoff, Biokraftstoffe oder synthetische Kraftstoffe können durch den Ausbau von Elektrifizierungsinfrastruktur gehoben werden?“

Die Oberleitungstechnologie kann komplementär, ergänzend oder konkurrierend zu anderen Antriebsarten sein. Im Projekt EnergyRoads sind dieselfetriebene Fahrzeuge sowie die anderen Dekarbonisierungsoptionen des Güterverkehrs (E-Fuels, Wasserstoff sowie batterieelektrische Fahrzeuge mit stationärem Laden) relevant.

4.3.1 Diesel und E-Fuels

Im Straßengüterverkehr sind Dieselfahrzeuge die dominierende Antriebstechnologie und somit eine geeignete Referenz im Technologievergleich. Dieselfahrzeuge haben eine hohe Technologiereife, eine hohe technische Zuverlässigkeit und ein lückenloses Servicenetzwerk. Der große Nachteil von Dieselfahrzeugen ist, dass der Kraftstoff vorwiegend aus fossilen Ressourcen hergestellt wird und die Nutzung mit Treibhausgas- und lokalen Luftschadstoffemissionen verbunden ist. Dieselmotoren verfügen über einen vergleichsweise geringen maximalen Wirkungsgrad von 38 % bis 46 %, die Effizienzpotenziale sind limitiert (Hacker, et al., 2020).

Für eine Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs mittels Verbrennungskraftmaschinen müssten mit erneuerbarer Elektrizität hergestellte E-Fuels eingesetzt werden. E-Fuels sind strombasierte Kraftstoffe, welche durch die Bindung von Wasserstoff (H₂) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) hergestellt werden. Im Vergleich zu den alternativen Antriebsformen (batterieelektrisch oder wasserstoffbasiert) haben synthetische Kraftstoffe aufgrund der Energieverluste bei der Umwandlung eine geringere Effizienz bzw. einen schlechten Wirkungsgrad und höhere Energiekosten (Umweltbundesamt, 2020) (Umweltbundesamt, 2018) (Klausmann, et al., 2021) (Plötz, et al., 2018).

Diesel-Sattelzugmaschinen (SZM) mit einer Nutzlast von 19,3 t hatten 2015 nach VECTO Fernstrecken-Zyklus Tests einen Treibstoff-Verbrauch von ca. 33,1 l/100 km (3,31 kWh/km) (Delgado, 2017). Mit weitreichenden Verbesserungen der Fahrzeuge kann dieser Verbrauch laut Delgado et al. (2017) bis 2030 auf 18,9 l/100 km bzw. 1,89 kWh/km reduziert werden. Dies entspricht einer Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs von 43 %. Diese Werte werden als ambitionierte Grenze für den spezifischen Energieverbrauch von Diesel-Lkw verstanden. In der Studie von Basma und Rodriguez (2022a) wird von einem derzeitigen Verbrauch von 3,35 kWh/km und einem zukünftigen Verbrauch von 2,51 kWh/km für SZM mit einer Nutzlast von 19,3 t für den Fernstrecken-Zyklus ausgegangen. Die Studie von Unterlohner (TE, 2021a) geht von einem Energieverbrauch von SZM von 23,47 l/100 km (2,35 kWh/km) im Jahr 2030 aus. Eine Fraunhofer-Studie (Fraunhofer, 2017) beschreibt für das Jahr 2030 einen Verbrauch von 2,46 kWh/km für Diesel-SZM.

In der vorliegenden Analyse wird mit einem spezifischen Energieverbrauch von 2,33 kWh/km für SZM mit 40 t zGG gerechnet. Dieser Wert wurde nicht mittels VECTO-Analyse und vorgegebener Streckeneignungen, sondern mittels Analyse der Streckenneigung der betrachteten Strecken in Österreich berechnet. Es werden Investitionskosten von ca. 115.000 EUR bis 129.000 EUR, sowie Wartungskosten von ca. 18.000 EUR/Jahr bis 21.000 EUR/Jahr angenommen. Für die Vergleiche der unterschiedlichen Antriebsarten in späteren Kapitel werden diese Kosten für mit E-Fuels betriebene Lkws angenommen. Weitere Details und eine Gegenüberstellung mit Literaturangaben können Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6: Übersicht Diesel Fahrzeuge

SZM-Diesel-Fahrzeuge 2030	Einheit	Fraunhofer (2017)	Delgado (2017)	JRC (2020) für 2025	ICCT (2022b)	TE (2021a)	AEA (2022)
Fahrzeuggewicht	t	-	12,1	14,4	13,1	12,1	13,2
Zuladung	t	50 % Auslastung	19,3	14,3	19,3	-	13,9
Tankgröße	l	570	-	500	-	570	500
Verbrauch	kWh/km	2,46	1,89	2,62	2,51	2,35	2,33
Reichweite	km	>2.200	-	>1.900	-	>2.300	>2.000
Investitionen	EUR	128.673	-	-	-	115.252	115.252 bis 128.673
Wartung	EUR/a	18.204	-	-	-	21.169	18.204 bis 21.169

Quelle: Fraunhofer 2017, Delgado 2017, JRC 2020a, ICCT 2022b, TE 2021a

Anmerkung zu dem Verbrauch in der Spalte JRC (2020) für 2025: In der Quelle Röck, 2020 wird der Energiebedarf in MJ/tkm angegeben. Dies wurde mittels der Definition von Eurostat (Eurostat, 2022a) für Tonnenkilometer (Beförderung einer Tonne Güter) umgerechnet und somit als Nettotonnenkilometer behandelt.

Anmerkung zur Zeile Wartung: Diese Werte werden inklusive AdBlue (Fraunhofer, 2017) und Steuern (TE, 2021a) verstanden.

4.3.2 Batterieelektrisch – BEV

Batterieelektrische Antriebe sind effizienter als andere Antriebstechnologien. Dies kann auf den hohen Wirkungsgrad des Elektromotors, die geringen Umwandlungsverlusten bei der Erzeugung von elektrischer Energie sowie der Möglichkeit der Rückgewinnung der Bremsenergie durch Rekuperation zurückgeführt werden. Die Hauptkomponenten von BEV sind der Elektromotor, die Batterie mit entsprechender Leistungselektronik und Energiemanagementsysteme. Im Vergleich zu Dieselfahrzeugen fallen viele bewegliche und wartungsintensive Bauteile weg. Dies führt zu einer geringeren Lärmentwicklung und zu weniger Verschleiß. Hierdurch können die Wartungskosten reduziert werden. Es werden bei BEV lokal keine Luftschadstoff- oder Treibhausgasemissionen freigesetzt. Durch den Einsatz von erneuerbaren Strom können BEV vollständig dekarbonisiert werden.

Batterieelektrische Nutzfahrzeuge – insbesondere im schweren Fernverkehr – haben aber ein höheres Gewicht aufgrund der Batterie. Dies kann laut älterer Literatur zu einer Reduktion der Nutzlast, höherer Achslast, hohen Investitionskosten, langen Batterieladedauern bzw. hohen erforderlichen Ladeleistungen führen (Kühnel, et al., 2018 S. 18ff). Allerdings hat die Europäische Kommission durch die EU 2019/1242 Regulation das maximale erlaubte Gewicht von ZEM-Lkw um 2 t erhöht. Zusätzlich dürften BEVs zukünftig von höherer Batterieenergiedichte profitieren. Der derzeit noch existierende Nutzlastnachteil kann somit weitestgehend verringert und eventuell komplett beseitigt werden (ICCT, 2022a). Eine Vielzahl an OEMs produzieren

batterieelektrische Lkw, z. B. Daimler Trucks, MAN, Volvo, Renault und Scania (Plötz, et al., 2021). Die Gewichtsklasse und Reichweite dieser Lkw entsprechen allerdings noch selten dem hier untersuchten Segment.

Für die Analyse wurden BEV Sattelzugmaschinen (SZM) mit einer Batteriereichweite von 400 km angenommen. Die verpflichtende Pause für Lenkende im Straßengüterverkehr spielt hierfür eine wesentliche Rolle: nach 4,5 Stunden muss eine verpflichtende Ruhepause von 45 Minuten eingelegt werden. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h entspricht dies einer Fahrtweite von maximal 360 km. Bei einem angenommenen Verbrauch von 1,25 kWh/km für eine BEV-SZM würden für diese Strecke 450 kWh Energie verwendet werden. An einem Megawatt-Charger können in 30 Minuten bis zu 500 kWh geladen werden. Auch bei den bereits in der AFIR vorgesehenen Ladestellen mit 700 kW können die verwendeten 450 kWh in weniger als 40 Minuten wieder geladen werden. Somit würde die Erreichbarkeit und Erfüllbarkeit fast aller Fahrzyklen mit einem solchen BEV-SZM durch die Batterieladung nachts und in vorgeschriebenen Ruhepausen sichergestellt werden können – wenn örtlich und zeitlich eine entsprechende Ladestelle verfügbar ist.

Es wird im Folgenden angenommen, dass für eine BEV Sattelzugmaschine mit einer Batteriereichweite von 500 km im Jahr 2030 eine Batteriekapazität von ca. 616 kWh benötigt wird und ihr spezifischer Energieverbrauch bei 1,25 kWh/km liegt. Die Investitionskosten wurden mit ca. 145.000 EUR bis 185.000 EUR und die Wartungskosten mit ca. 14.000 EUR/Jahr bis 15.000 EUR/Jahr angesetzt. Weitere Details sowie ein Vergleich mit der Literatur können Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7: Übersicht Batterieelektrische Fahrzeuge

SZM-Batterie-elektrische 2030	Einheit	Fraunhofer (2017)	JRC (2020) für 2025	ICCT (2021)	TE (2021a)	ICCT (2022b)	AEA (2022) BEV400
Fahrzeuggewicht	t	-	16,3	12,5	-	-	14,7
Zuladung	t	50 % Auslastung	14,3	19,3	-	-	13,9
Tankgröße	kWh, kg	240 kg	616 kWh	675 kWh	1.187 kWh	-	616 kWh
Verbrauch	kWh/km	1,232	1,15	0,99	1,15-1,21	-	1,25
Reichweite	km	-	376	500	800	-	400
Investitionen	EUR	185.177	-	170.000-200.000	145.346	150.000	145.346 bis 185.177
Wartung und Instandhaltung	EUR/a	15.120	-	13.240	14.341	-	14.341 bis 15.120

Quellen: AEA, eigene Berechnungen; Datenbasis; Fraunhofer 2017, JRC 2020a, ICCT 2021, TE 2021a - BEV battery-to-wheel: 1,15 und BEV plug to wheel: 1,21, ICCT 2022b.

4.3.3 Brennstoffzelle - FCEV

Auch Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle haben einen elektrischen Antrieb. In dem Fahrzeug befindet sich ein Wasserstoff-Druckspeicher für gasförmigen Wasserstoff. Aus dem Wasserstoff wird über eine Brennstoffzelle elektrische Energie erzeugt und für den Antrieb genutzt (Klausmann, et al., 2021). Hierfür werden ein Brennstoffzellen-Stack, ein Wasserstoff-Tanksystem, ein Kompressor, eine Kühlung und Steuerungselektronik

benötigt. Derzeit werden Brennstoffzellen-Lkw meist als Hybridfahrzeuge mit Batterie zur Pufferung von Leistungsspitzen und für Rekuperation angeboten (ICCT, 2022a). Viele OEMs entwickeln Wasserstoff Lkw-Modelle, z. B. Hyundai, Daimler (Flüssigwasserstoff), Man und Scania (ICCT, 2022a).

Häufig genannte Vorteile der Wasserstoff-Technologie sind die kurze Betankungsdauer, hohe Reichweiten und nur eine geringe Gewichtszunahme des Fahrzeuges im Vergleich zu fossil betriebenen Verbrennungsmotoren (Umweltbundesamt, 2020). Allerdings stellt sich aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff die Herausforderung einer platzsparenden Speicherung des Energieträgers. Aufgrund der Verluste bei der Wasserstoffherstellung und -speicherung sowie des Wirkungsgrades von Brennstoffzellen (70 %), haben Brennstoffzellen-Lkw eine erheblich geringere Well-to-Wheel-Energieeffizienz gegenüber der direkten Stromnutzung (Umweltbundesamt, 2020 und Hacker, et al., 2020). Brennstoffzellen-Lkw werden mit einem TRL 6-7 eingestuft. Die zentralen Herausforderungen dieser Technologie sind der Infrastrukturausbau, der Wirkungsgrad sowie die Kostenreduktion der Kraftstoffherstellung⁴ (Agora Verkehrswende, 2020).

Wasserstoff kann über die Vergasung von Biomasse oder der Aufspaltung von Wasser mithilfe von Strom (Elektrolyse) erzeugt werden. Bei Biomassennutzung oder Elektrolyse mit Elektrizität aus erneuerbaren Quellen für die Produktion von Wasserstoff (grünem Wasserstoff) ist er 100 % erneuerbar und verursacht somit keine Treibhausgasemissionen in der Erzeugung bzw. Nutzung des Energieträgers.

Tabelle 8: Übersicht Wasserstoff-Brennstoffzellen Fahrzeuge

SZM-Batterie- elektrische 2030	Einheit	Fraunhofer (2017)	JRC (2020) für 2025	TE (2021a)	ICCT (2022a)	ICCT (2022b)	AEA (2022)
Fahrzeug-gewicht	t	-	12.700	-	12,8	-	13,5
Zuladung	t	50% Auslastung	14,3	-	19,3	-	13,9
Tankgröße (H₂ und Batterie)	kg, kWh	900	700 bar	54 kg H ₂ – 127 kWh	350 bar – 33 kg H ₂ – 72 kWh	-	350 bar – 33 kg H ₂
Verbrauch	kWh/km	2,25	1,9	1,95	2,21	-	2,15
Reichweite	km	400	746	800	500	-	500
Investitionen	EUR	174.000	-	157.096	-	310.000	157.096 – 280.000
Wartung und Instandhaltung	EUR/a	16.440	-	18.740	-	-	16.440 - 18.740

Quellen: AEA, eigene Berechnungen, Datenbasis: Fraunhofer 2017, JRC 2020a, TE 2021a, ICCT 2022a, ICCT 2022b,

Anmerkung zu Wert 280.000 in Spalte AEA (2022), Zeile Investitionen: ICCT (2022b) gibt für einen 700 bar FCEV-Truck 310.000 EUR an Investitionskosten für das Jahr 2030 an. Dies wurde auf einen 350 bar Truck um 10 % nach ICCT (2022a) reduziert.

⁴ Das Working Paper „Fuel cell electric tractor-trailers: Technology overview and fuel economy“ (ICCT, 2022a) ist sehr empfehlenswert für einen Einstieg in Brennstoffzellen-Lkw.

4.3.4 Sonstige

Weitere Antriebs- und Treibstoffarten, wie z. B. Diesel-Hybrid-O-BEV, Stromschienen-Lkw, Induktions-Lkw oder gasbetriebene-Lkw, welche Biomethan nutzen, werden überblicksartig dargestellt.

Im Gegensatz zu Oberleitungssystemen muss für den Einsatz von Stromschienen sowie induktiven Systemen der Straßenkörper verändert werden. Die Stromschiene wird in die Fahrbahn eingelassen. Das Fahrzeug hat einen Stromabnehmer an der Unterseite des Fahrzeugs. Durch die Einlassung der Stromschiene in die Straße erzeugt dieses System einen geringen visuellen Reiz und kann auch von kleineren Nutzfahrzeugen und Pkw genutzt werden. Jedoch ist die elektrifizierte Schiene in der Straße einem erhöhten Ausfall- und Störungsrisiken durch Witterungsbedingungen ausgesetzt. Des Weiteren stellt sie ein erhebliches Sicherheitsrisiko für andere Verkehrsteilnehmende, etwa einspurige Kraftfahrzeuge, dar. (Umweltbundesamt, 2020) Die Stromschiene hat noch einen relativ geringen Technology Readiness Level von TRL 5 (Agora Verkehrswende, 2020).

Die Ladung mittels Induktion kann sowohl stationär als auch dynamisch (während der Fahrt) stattfinden. Für das dynamische Laden werden lange Linienleiter so in der Fahrbahn verlegt, dass darüberfahrende Fahrzeuge geladen werden können (Schraven, et al., 2010). Induktive Ladesysteme besitzen gegenüber konduktiven Technologien den Nachteil eines geringeren Wirkungsgrads aufgrund von Verlusten bei der Energieübertragung (Hacker, et al., 2020). Der technologische Reifegrad dieser Technologie ist mit einem TRL von 5 gering (Agora Verkehrswende, 2020) einzustufen.

Erdgasantriebe stellen laut Hacker et al. (2020) aufgrund der geringeren CO₂-Emissionen sowie den niedrigeren Luftschadstoffemissionen eine Alternative zum konventionellen Dieselantrieb dar. Aufgrund der geringen Energiedichte von Erdgas muss dieses komprimiert beziehungsweise verflüssigt werden um ausreichend hohe Reichweiten zu bieten. Verflüssigtes Erdgas (Liquified Natural Gas, LNG) wird durch Kühlung auf unter minus 161 °C verflüssigt und weist nur etwa ein Sechshundertstel des Volumens von gasförmigem Erdgas auf. Die Betankungszeit eines LNG-Fahrzeugs ist vergleichbar mit konventionellen Kraftstoffen. Aufgrund des geringeren Kohlenstoffgehalts des Kraftstoffs können die Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von LNG vermindert werden. Der Gesamtwirkungsgrad ist aber aufgrund des verbrennungsmotorischen Antriebs im Bereich von Diesel-Lkw. Um einen klimaneutralen Betrieb gewährleisten zu können, ist der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien erforderlich. Ein weiteres Hemmnis für den breiten Einsatz von LNG-Fahrzeugen ist die fehlende Tankstelleninfrastruktur. Bisher wurden nur wenige Tankstellen errichtet und diese bieten keine flächendeckende Verfügbarkeit. Ebenso bestehen Unsicherheiten in Bezug auf die Fahrzeugrestwertentwicklung, die Wartungskosten sowie die Zuverlässigkeit dieser Technologie. Die Gaspreisentwicklung im Jahr 2022 hat zusätzliche Probleme für den Einsatz dieser Technologie verdeutlicht.

Tabelle 9: Übersicht sonstige Fahrzeuge

SZM-Batterie- elektrische 2030	Einheit	Fraunhofer (2017) – Diesel- Hybrid O- BEV	Fraunhofer (2017) – Stromschiene- BEV	Fraunhofer (2017) – Induktiv – BEV	Fraunhofer (2017) – LNG-Lkw	TE (2021a) – LNG-Lkw
Zuladung	t	50 % Auslastung	50 % Auslastung	50 % Auslastung	50 % Auslastung	-
Tankgröße	kWh	0	200	200	-	205 kg LNG, 170 l Diesel
Verbrauch	kWh/km	1,6	1,	1,9	2,78	2,33
Reichweite	km	0	100	100	-	1.058
Investitionen	EUR	152.000	202.200	18.600	195.910	126.777
Wartung und Instandhaltung	EUR/a	0,135 pro km	0,107 pro km	0,120 pro km	0,1427 pro km	20.930

Quellen: Fraunhofer 2017, TE 2021a

4.4 Vergleich

„Welche unterschiedlichen Elektrifizierungsinfrastrukturen stehen für die Wiederaufladung am Autobahnen- und Schnellstraßennetz zur Verfügung? Wo liegen die Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Systeme?“

Im Folgenden werden auf Grundlage der vorhergehenden Kapitel die Stärken und Schwächen der einzelnen Dekarbonisierungsoptionen als Aufzählungen zusammengefasst.

Batterieelektrisch

Stärken:

- Hohe Energieeffizienz
- Geringe Umwandlungsverluste
- Keine lokale Freisetzung von Treibhausgasen
- Vollständige Dekarbonisierung durch Einsatz erneuerbarer Energien (gilt für alle elektrischen Antriebe)
- CO₂-neutral bei der Nutzung von Ökostrom
- Skaleneffekte der Batterieproduktion lässt deutliche Kostensenkung erwarten
- Flexible Nutzung und Kostenvorteile für Infrastruktur
- Viele Fahrzeughersteller setzen auf diese Technologie

Schwächen:

- Relativ längere Ladezeiten
- Benötigt ein dichtes Netz an Ladeinfrastruktur
- Nutzlast negativ von Batteriegröße und Gewicht beeinflusst
- Begrenzte Fahrzeugverfügbarkeit
- Hohe Kosten für Batterien und Fahrzeuge
- Schnellladeinfrastruktur erforderlich
- Konkurrenz um Batterien mit Pkw und stationären Batterien
- Batterieverschleiß bei Schnellladen mit hoher Leistung
- Lokal hohe Netzbelastung mit hohen Netzanschlusskosten
- Zusätzlich hoher Platzbedarf für Ladeinfrastruktur an Raststationen und Rastplätzen,

Oberleitung

Stärken:

- CO₂-neutral bei der Nutzung von Ökostrom
- Effiziente Stromnutzung
- Etablierte Technologie aus dem Bahnbereich, überschaubare Anpassungen für die Straße notwendig
- Keine Beschädigung der Fahrbahnoberfläche
- Zeitersparnis durch dynamisches Laden
- Tagsüber laden nutzt Synergien mit der Stromerzeugung mittels Photovoltaik-Anlagen
- Günstigere Fahrzeugkosten
- Geringer Bedarf an Batterien
- Keine Nutzlastverluste
- Kaum zusätzlicher Platzbedarf für Infrastruktur

- Technology-Readiness-Level: 8

Schwächen:

- Derzeit keine Fahrzeuge und Infrastruktur in Österreich
- Langfristiger Planungs-, Genehmigungs- und Umsetzungsprozess
- Höhere Einstiegshürde, da nennenswerte Streckenlängen für den wirtschaftlichen Lkw-Betrieb elektrifiziert werden müssen
- Nutzung nur durch Busse und schwere Nutzfahrzeuge möglich
- Platzbedarf des Pantographen verlängert die Zugmaschine
- Visueller Reiz bzw. Trenneffekte in der Landschaft
- Fehlende Akzeptanz durch die Bevölkerung kann Umsetzung verhindern
- Oberleitungssystem ist nur in Kooperation mit den Nachbarländern sinnvoll
- Wenige Fahrzeughersteller setzen derzeit auf diese Technologie

Stromschiene

Stärken:

- Hohe Übertragungseffizienz
- Von allen Fahrzeugen nutzbar (PKW, leichte und schwere Nutzfahrzeuge)
- Geringer visueller Reiz

Schwächen:

- Hohe Wartungshäufigkeit
- Erfordert Einbauten in der Straßenoberfläche
- Hohe Investitionskosten
- Ausfall- bzw. Störungsrisiko durch Schlamm oder Schnee
- Sicherheitsrisiko für Verkehrsteilnehmende durch elektrifizierte Schienen
- Beschädigung der Fahrbahnoberfläche
- Niedriger Technology-Readiness-Level: 5

Induktive Ladesysteme

Stärken:

- Nutzung durch Personen- und Güterfahrzeuge
- Geringer visueller Reiz
- Keine Reibung und kein Verschleiß der Infrastruktur aufgrund der drahtlosen Verbindung

Schwächen:

- Erfordert die Errichtung von Übertragungssystemen in der Straßenoberfläche
- Hohe Investitionskosten
- Potenziell hoher Wartungsaufwand
- Geringer Wirkungsgrad
- Niedriger Technology-Readiness-Level: 5

Brennstoffzelle**Stärken:**

- Hohe Akzeptanz
- Der Energieträger ist speicherbar und in Zukunft in großen Mengen aus dem Ausland beziehbar
- Mögliche Synergien der Transportinfrastrukturnutzung mit der Industrie (Chemie, Stahl)
- Viele Fahrzeughersteller setzen auf diese Technologie

Schwächen:

- Nur dann CO₂-neutral, wenn der Wasserstoff mit erneuerbarer Energie hergestellt wird
- Hohe Unsicherheit über Verfügbarkeit und Kosten
- Energieeffizienz ist niedriger als bei batterieelektrischen Fahrzeugen
- Hohe Brennstoffkosten
- Hohe Umwandlungsverluste
- Mögliche Volumensreduktion der Beladung

Biofuels**Stärken:**

- Umrüstung von Fahrzeugen möglich
- Geringe Kosten (Infrastruktur, Fahrzeuge)
- Etablierte Produktion in Österreich (pflanzliches, gebrauchtes Speiseöl)
- CO₂-neutral auf Basis spezifischer Materialien (Abfall etc.)

Schwächen:

- Etablierte Technik, Fahrzeuge im Einsatz (mit abnehmender Tendenz)
- Umwelteffekte hängen von Rohstoff und Technologie ab
- Wettbewerb um landwirtschaftliche Flächen
- Lokale Schadstoffe
- Ablehnung in der Bevölkerung

E-Fuels**Stärken:**

- Weitgehende Nutzung bestehender Antriebstechnik und Infrastruktur
- Leicht zu transportieren und aus dem Ausland beziehbar
- Keine Anpassung des Logistikprozesses notwendig
- CO₂-neutral, wenn Herstellung auf Basis von Ökostrom passiert
- Gute Lagerfähigkeit

Schwächen:

- Geringe Energieeffizienz
- Hohe Wirkungsverluste in der Herstellung
- Aufwendige und teure Herstellung

EnergyRoads

- Hohe Treibstoffkosten
- Lokale Schadstoffemission
- Hohe Unsicherheit über Verfügbarkeit und Kosten

5 Entwicklungen zum dynamischen Laden

5.1 Entwicklung in Österreich

Im straßengebundenen Güterverkehr gibt es in Österreich keine (Test-)Strecken für das dynamische Laden. Diesbezügliche Planungen sind nicht bekannt. Abgesehen vom schienengebundenen Bereich ist das dynamische Laden in Österreich auf O-Bus-Linien in Salzburg und Linz beschränkt. Für die Stadt St. Pölten wurden 2022 Konzepte für die Einführung eines O-Bus-Systems diskutiert. Im off-road-Bereich gibt es oberleitungsgebundene Fahrzeuge im Tagebergbau am Erzberg.

Bis Ende der 2010er-Jahre hat das Thema „dynamisches Laden“ in Österreich in der fachlichen und politischen Diskussion keine erkennbare Rolle gespielt. Ein Beispiel ist der nationale Strategierahmen "Saubere Energie im Verkehr" (BMVIT, 2016) zur Umsetzung der AFID-Richtlinie (mehr Details im folgenden Kapitel). Der Strategierahmen konkretisierte Ausbauziele für die Ladeinfrastruktur bis zum Jahr 2020 und gibt einen Ausblick bis 2030. Beispielsweise war die Errichtung von 3.000 bis 4.000 öffentlich zugänglichen Normalladepunkten (Ladeleistung bis 22 kW) bis 2020 vorgesehen sowie von 500 bis 700 Schnellladepunkten. Der weitere Ausbau sollte sich nach der Marktdurchdringung von E-Fahrzeugen richten. Dynamisches Laden wurde nicht thematisiert.

Allerdings wurde das Thema in den letzten Jahren in verschiedenen Studien und Dokumenten aufgegriffen:

- **Sachstandsbericht Mobilität des Umweltbundesamts (2018):**

Im Sachstandsbericht werden Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors verglichen. Der Bericht kommt zum Ergebnis, dass die Einführung eines elektrifizierten Systems auf dem hochrangigen Straßennetz (z. B. Oberleitungen) ein sehr hohes Potenzial zur Dekarbonisierung hat und die Treibhausgasemissionen um 2,70 Mio. t CO₂eq reduzieren kann. Es ist damit die Einzelmaßnahme mit der höchsten potenziellen Wirkung. Als Herausforderungen werden die Kosten sowie die Abhängigkeit von den Entscheidungen der Nachbarstaaten genannt.

- **Nationaler Energie- und Klimaplan (NEKP):**

Der NEKP erwähnt in Bezug auf die Elektrifizierungsoffensive, dass die „Machbarkeit von Elektrifizierungsinfrastruktur am Autobahnen- und Schnellstraßennetz zur Wiederaufladung während der Fahrt“ untersucht werden soll (BMNT, 2019). Der Referenzplan NEKP, der eine Grundlage für die Erstellung des NEKP war und in Kooperation zwischen der Universität Graz, der Universität für Bodenkultur in Wien und der Wirtschaftsuniversität Wien entstand, stellt die Einführung eines elektrifizierten Systems auf dem hochrangigen Straßennetz, z. B. durch Oberleitungen, als eine Möglichkeit dar (Kirchengast, et al., 2019).

- **Regierungsprogramm 2020-2024, Kapitel „Verkehr und Infrastruktur“:**

Das Regierungsprogramm 2020-2024 betont die Relevanz der Verwendung alternativer Energieträger in der Mobilität. Das inkludiert die E-Mobilität, die Wasserstoff-Technologie sowie die synthetischen Treibstoffe mit einem Fokus auf die Gesamt-Klimabilanz. In diesem Kapitel wird auch die Elektrifizierung

mittels Oberleitungen als Option („verkehrspolitischen Innovationen wie beispielsweise Elektrifizierung von Oberleitungen“) genannt. (Bundesregierung, 2020).

- **CLEARER-Studie (Climate Neutral Freight Transport):**

Die österreichische CLEARER-Studie vergleicht verschiedene alternative Kraftstoffe und Antriebsarten im Straßengüterverkehr. Sie fokussiert auf die jeweiligen Kosten und Umweltvorteile dieser Technologien. Der Einsatzbereich der Oberleitung wird vor allem für Fahrzeuge auf Langstrecken mit einer hohen Transportkapazität gesehen. Für das WEM-Szenario („With existing measures“) als Fortschreibung des Status Quo wird angenommen, dass bis 2040 keine Oberleitungsinfrastruktur in Österreich errichtet wird. Das Ziel der Klimaneutralität wird im Szenario verfehlt. Im Szenario zur Erreichung der Klimaneutralität 2040 wird für oberleitungsgebundene Lkws ein Anteil von 10 % an der inländischen Transportleistung, für den grenzüberschreitenden Verkehr von 30 % der Straßengütertransportleistung angenommen (Sedlacek, et al., 2021).

- **Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich:**

Der Masterplan zeigt unter den Schlagworten Vermeiden, Verlagern und Verbessern Wege und Möglichkeiten auf, wie die Klimaneutralität 2040 im Verkehrssektor erreicht werden kann. Für den Güterverkehr wird prognostiziert, dass Transporte bis zu einer Tagesfahrleistung von rund 300 km batterieelektrisch abgewickelt werden. Für höhere Fahrtweiten wird die Elektrifizierung mittels Oberleitung als marktnahe und daher aussichtsreiche technologische Option angeführt (BMK, 2021).

Alle genannten Dokumente haben einen untergesetzlichen Charakter. Sie sind strategische Dokumente (Regierungsprogramm) oder zeigen Ziele und plausible Optionen mit eher normativem Anspruch (Mobilitätsmasterplan) auf. In der zeitlichen Abfolge ist aber – auch eingedenk der Beauftragung der vorliegenden Studie – eine intensivere Beschäftigung mit dem Thema ersichtlich. So gibt es einen Übergang von der Einordnung von Electric Road Systems (ERS) als eine von vielen Optionen (NEKP) hin zu einem klar abgesteckten Einsatzbereich (Mobilitätsmasterplan), ohne dass daraus aber eine Umsetzungsagenda abgeleitet werden kann.

5.2 Europäische Richtlinien und Verordnungen

Die Richtlinie 2014/94/EU des europäischen Parlaments und Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFID) schafft einen „Rahmen für Maßnahmen zum Aufbau einer Infrastruktur für alternative Kraftstoffe in der Union“ (Artikel 1). Sie regelt grundlegende Ausbauziele und technische Standards im Sinne von Mindestanforderungen für die verschiedenen alternativen Antriebs- und Kraftstoffarten. Neben Lademöglichkeiten werden Wasserstofftankstellen und Infrastrukturen für erdgasbasierte Kraftstoffe (LNG und CNG) sowie synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe behandelt. In den technischen Spezifikationen (Anhang II) werden in Bezug auf das Laden von E-Fahrzeugen verschiedene Lademöglichkeiten aufgeführt:

- Normalladepunkte für Kraftfahrzeuge
- Schnellladepunkte für Kraftfahrzeuge
- Kabellose Ladepunkte für Kraftfahrzeuge
- Batterieaustausch bei Kraftfahrzeugen
- Ladepunkte für Kraftfahrzeuge der Klasse L
- Ladepunkte für Elektrobusse

Das dynamische Laden fehlt offensichtlich in dieser Aufzählung.

Um das Ziel der Klimaneutralität der EU zu erreichen, wurde ein Maßnahmenpaket „Fit for 55“ entwickelt. Es umfasst die Anpassung verschiedener Richtlinien und Verordnungen. Dazu gehört auch die AFID. Diese Richtlinie (Directive) wird in eine unmittelbar geltende Verordnung (Regulation) mit dem Akronym AFIR weiterentwickelt. Die Verordnung, die Ende 2022 nur als Entwurf vorlag, setzt Zielwerte für den Ausbau der öffentlich zugänglichen Lade- und Tankinfrastruktur für alternative Antriebsarten. Im vorliegenden Entwurf wird hinsichtlich der Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs festgestellt, dass in der EU öffentlich zugängliche Schnellladeinfrastruktur weitgehend fehlt (Randnummer 13). Um diesen Mangel zu beheben werden „abstandsbezogene Zielvorgaben für das TEN-V-Netz, Zielvorgaben für die Infrastruktur zum Aufladen über Nacht und Zielvorgaben für die Bereitstellung an städtischen Knoten“ (Randnummer 13) gemacht. Diese Ladeinfrastruktur dient jeweils spezifischen Zwecken:

- Die Schnellademöglichkeiten im TEN-V-Netz ermöglichen das Laden von Fahrzeugen während der gesetzlich vorgesehenen Fahrtunterbrechungen.
- Ladestellen mit geringerer Ladeleistung entlang der Haupttrouten werden zum Laden während längerer Standpausen genutzt (Randnummer 14).
- Für bestimmte Nutzungsmuster sind zudem öffentlich zugängliche Schnellladestationen in städtischen Knoten und auch auf privaten (Betriebs-)Geländen vorgesehen.

Durch diesen Infrastrukturaufbau soll die Konnektivität innerhalb Europas sichergestellt werden. Konkrete Zielwerte sind (Artikel 4):

- Öffentlich zugängliche Schnellladestellen für schwere Nutzfahrzeuge entlang des TEN-V-Netzes in jede Fahrtrichtung:
 - Bis Ende 2025: Ladestandorte entlang 15 % des TEN-V-Netzes Ladeleistung von min. 1,4 MW je Ladestandort mit mindestens einem Ladepunkt mit einer Ladeleistung von mindestens 350 kW
 - Bis Ende 2030: Ladestandorte entlang des TEN-V-Kernnetzes in einer Entfernung von höchstens 60 km, die auf min. 3,5 MW erweitert wurden sowie mindestens zwei Ladepunkte mit einer individuellen Ladeleistung von mindestens 350 kW
 - Bis Ende 2030: Ladestandorte entlang des TEN-V-Gesamtnetz mindestens alle 100 km mit einer Ladeleistung von mindestens 1,4 MW und mindestens ein Ladepunkt mit einer Ladeleistung von mindestens 350 kW bis Ende 2030
- Zudem muss Ende 2030 an jedem für das nächtliche Abstellen von schweren Nutzfahrzeugen bestimmten Park- und Rastplatz („sicherer Parkplatz“) eine Ladestation mit mindestens 100 kW vorhanden sein.

Bis Anfang 2025 müssen die Regierungen den Entwurf eines nationalen Strategierahmens an die Kommission übermitteln, der die nationalen Ziele, Strategien und Maßnahmen definiert. Dies kann als wichtiger Entscheidungszeitpunkt zum Ausbau einer dynamischen Ladeinfrastruktur interpretiert werden.

Der Entwurf der AFIR-Verordnung beschreibt eine hohe Dynamik der technischen Entwicklung und benennt fehlende einheitliche technische Spezifikationen als ein wesentliches Hindernis für die Entwicklung des Binnenmarkts. Es wird daher festgelegt, dass die Europäische Kommission in unregulierten Bereichen Rechtsakte gemäß Artikel 290 AEUV zur Definition einheitlicher Standards erlassen kann. Als Beispiel werden hier explizit Electric Road Systems genannt. Diese werden in Artikel 2, Randnummer 17 zu den Begriffsbestimmungen definiert als „eine physische Anlage entlang einer Straße, mit der Strom an ein Elektrofahrzeug während der Fahrt übertragen werden kann“.

Im Anhang II werden technische Spezifikationen verschiedener Infrastrukturen aufgeführt. Die meisten Aspekte sind nicht ausgearbeitet, es werden aber Überschriften aufgeführt. Hier sind verschiedene dynamische Ladesysteme – induktive Systeme für verschiedene Fahrzeugarten, Stromschienen und oberleitungsgebundene Systeme – genannt.

Andere europarechtliche Vorgaben

Bezüglich der oberleitungsgebundenen Systemen ist die Verordnung (EU) 2019/1242 zur Reduktion der CO₂-Emissionen der neuzugelassenen schweren Nutzfahrzeuge relevant. Sie sieht CO₂-Flottenzielwerte für schwere Nutzfahrzeuge vor. So sollen bis 2025 die CO₂-Emissionen gegenüber dem Stand von 2019 um 15 % und bis 2030 um 30 % sinken. Dazu werden je Hersteller spezifische Werte resultierend aus deren Neuzulassungen errechnet. Nullemissionsfahrzeuge können dabei bis zu einer gewissen Grenze mehrfach auf den Flottendurchschnitt angerechnet werden. Verfehlt ein Hersteller die Zielwerte, so werden Strafzahlungen fällig. Oberleitungsgebundene Fahrzeuge können einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung dieser Zielwerte leisten, insbesondere auch, weil für Zero-Emission-Fahrzeuge ein Bonus fällig wird. Die Verordnung legt fest, dass das zulässige Maximalgewicht für Nullemissionsfahrzeuge um bis zu zwei Tonnen (t) erhöht wird.

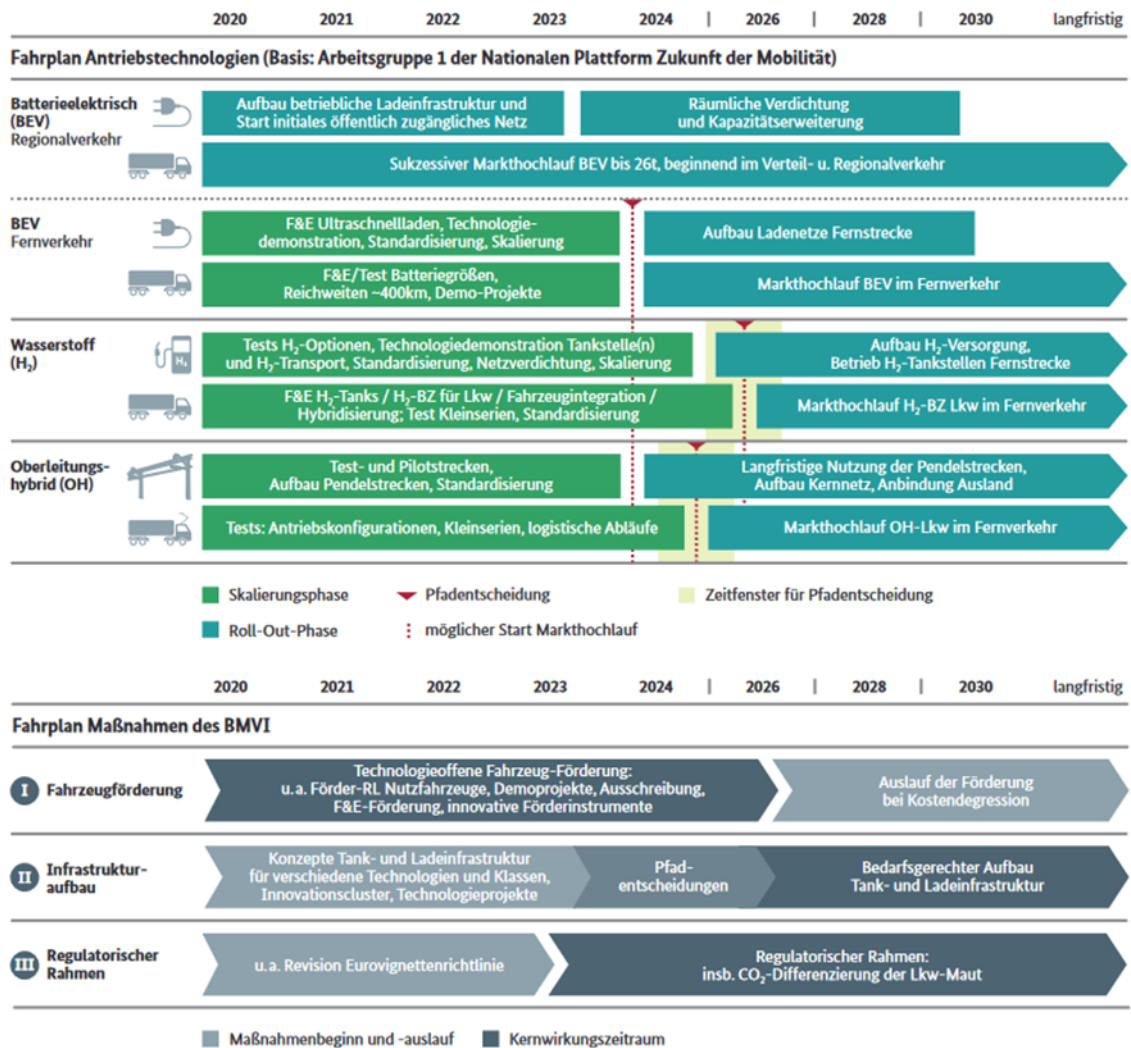
5.3 Entwicklung in Deutschland

Die deutsche Bundesregierung hat zur Bewältigung der Herausforderung der Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs Ende 2020 das Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge vorgestellt. Es beschreibt Entscheidungspfade für den Einsatz unterschiedlicher Antriebstechnologien (Abbildung 34).

Bezogen auf die Einsatzmuster wird davon ausgegangen, dass es im regionalen Verteilerverkehr bei Fahrzeugen bis 26 t einen sukzessiven Markthochlauf batterieelektrischer Fahrzeuge geben wird. Eine Notwendigkeit für dynamisches Laden oder die Nutzung von Wasserstoff wird hier nicht gesehen – der Markthochlauf der entsprechenden Fahrzeuge wäre auf den Fernverkehr beschränkt.

Für die längeren Strecken und intensiveren Nutzungen werden drei Ansätze behandelt: batterieelektrische Fahrzeuge mit stationärem Laden, Oberleitungshybrid-Fahrzeuge und Wasserstoff. Hier ist in zeitlicher Hinsicht bis 2023/2024 eine Skalierungsphase angesetzt, in der alle Technologien erprobt werden. Gegenstand sind der Ausbau von Test- und Pilotstrecken, die Demonstration von technologischen Optionen sowie die Entwicklung von Standards. Die gewonnenen Erfahrungen fließen in eine Pfadentscheidung ein, die die Einstellung oder das Roll-Out der Technologien bedeutet. Die Länge der Skalierungsphase unterscheidet sich je Technologie und hängt im Wesentlichen vom technologischen Reifegrad und der erwarteten Angebotsentwicklung im Bereich Infrastruktur und Fahrzeuge ab. Sie endet für batterieelektrische Fahrzeuge 2023, für oberleitungsgebundene Lkws 2024 und für Brennstoffzellen-Fahrzeuge später. Das Gesamtdokument führt aber klar aus, dass es sich hier auch um rein batterieelektrische, dynamisch geladene Fahrzeuge handelt. Andere Arten des dynamischen Ladens werden nicht berücksichtigt. Wichtig ist auch, dass die Pfadentscheidung für die Oberleitungstechnologie früher getroffen werden kann als für den Bereich Wasserstoff, woraus abgeleitet werden kann, dass weniger die Technologie als vielmehr die Marktfähigkeit und die Akzeptanz zu klärende Fragen sind.

Abbildung 34: Fahrplan Antriebstechnologien und Maßnahmen im deutschen Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge



Quelle: BMVI, 2020

In Deutschland waren die Agenden für oberleitungsgebundene Systeme lange beim Umweltministerium angesiedelt. Dieses betreute auch die Teststrecken. In der weiteren Folge wurde die Zuständigkeit für schwere Nutzfahrzeuge an das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und mit dem Regierungswechsel 2021 ins Bundesministerium für Digitalisierung und Verkehr (BMDV) übertragen. Operativ liegt die Zuständigkeit für die Teststrecken bei der Autobahn GmbH.

5.4 Internationale Teststrecken

Die Relevanz des Themas „Dynamisches Laden“ in verschiedenen europäischen Ländern kann anhand einer vierstufigen Skala bewertet werden: (1) Abwartende Grundhaltung; (2) Öffentlich finanzierte Studien; (3) Teststrecken; (4) Konkrete Pläne zur Errichtung einer permanenten Infrastruktur.

Ein Beispiel für Stufe 1 ist Tschechien. Eine Anfrage beim tschechischen Infrastrukturministerium ergab, dass das Thema dort interessiert verfolgt wird, aber vorerst keine eigenen Schritte eingeleitet werden. Dies ist beispielsweise relevant, da der baltisch-adriatische Korridor (TEN-V) durch Österreich und Tschechien verläuft.

In verschiedenen Ländern werden mit öffentlichen Geldern unterstützte oder finanzierte Forschungsvorhaben oder Machbarkeitsstudien zum dynamischen Laden durchgeführt. Eine Vorreiterrolle hatten hier Deutschland und Schweden. Studien wurden und werden auch in Österreich, Großbritannien, den Niederlande und Belgien (Flandern) erstellt. In Flandern und den Niederlanden ist die Situation mit der Österreichs vergleichbar. Aufgrund der Größe der Länder wird abgewartet, ob Deutschland bei dem Thema eine weitere Vorreiterrolle einnehmen wird. Eigene Teststrecken sind vorerst nicht geplant.

Im internationalen Kontext gibt es mehrere Teststrecken für dynamisches Laden. Die meisten Teststrecken liegen in Deutschland und Schweden. Es kommen unterschiedliche Technologien zum Einsatz. Bei den deutschen Teststrecken handelte es sich um öffentlich geförderte Forschungsprojekte (Ifeu, 2020). Die Länder verfolgen dabei unterschiedliche Strategien, die im Wesentlichen danach unterschieden werden können, ob der Güterverkehr einbezogen oder ein Pkw-orientiertes System entwickelt werden soll.

- Deutschland und Schweden unterzeichneten 2019 eine Innovationspartnerschaft, die auch ein Forschungs- und Innovationsprogramm zur ERS-Infrastruktur umfasste. Ein Schwerpunkt war die Identifizierung geeigneter ERS-Korridore, aber auch die wissenschaftliche Behandlung verschiedener ERS-Infrastrukturen und die Ableitung von Geschäfts- und Finanzierungsmodellen sowie hinsichtlich der notwendigen Standardisierung (Bundesregierung; Government Offices of Sweden, 2019).
- Frankreich: Im Rahmen der deutsch-französischen Energiepartnerschaft war geplant, einen grenzüberschreitenden E-Highway zu errichten (BMW, 2018). Dieses Projekt wird gerade nicht weiterverfolgt. In Frankreich soll in den kommenden Jahren eine Teststrecke errichtet werden, auf der mehrere Technologien zum Einsatz kommen. Ein Fokus liegt dabei auf induktiver Energieübertragung.
- In Italien ist ein induktives Testsystem auf einem nicht-öffentlichen Straßenring Ende 2021 in Betrieb genommen worden. Das System ist nicht für Lkws geeignet.
- In den USA wurde in der Nähe von Los Angeles eine erste Teststrecke mit Oberleitungen im Jahr 2017 gebaut. 2022 wurde eine Strecke für induktives Laden in Michigan vergeben (Ward, 2022).
- In Israel gibt es eine Teststrecke zum induktiven Laden.
- In Schweden wurden anfangs Teststrecken mit Oberleitungen gebaut. Danach wurden auch andere Technologieoptionen getestet. Die induktiven Teststrecken und induktiven Teststrecken mittels Stromschiene sind vergleichsweise kurz.
- In Deutschland kommen fast ausschließlich oberleitungsgebundene Systeme zum Einsatz. Erste Tests gab es auf einer Teststrecke von Siemens in Groß Dölln nahe Berlin. Im Jahr 2019 wurde Teststrecken auf Autobahnen in Hessen („Elisa“) und in Schleswig-Holstein („eHighway“) eröffnet. Die dritte Teststrecke wurden Mitte 2022 auf einer Bundesstraße in Baden-Württemberg (B462) errichtet. Sie wurde von einem Konsortium aus Unternehmen initiiert, die Lkws werden im Werkverkehr von örtlichen Unternehmen eingesetzt. Neben den Oberleitungsstrecken gibt es kürzere Teststrecken, so soll eine 100-Meter lange Teststrecke bei Köln für induktives Laden eröffnet werden.

Tabelle 10: Electric Road Systems Teststrecken

Name	Standort	Technologie	Teststrecken-betrieb	Länge	Fahrzeuge
E16 Electric Road	E16, Gävleborg, Schweden	Oberleitung	2016-2018	2 km	2 OH-Lkw (Biofuels)
SCAQMD	Los Angeles County, USA	Oberleitung	Juli 2017- Dezember 2017	1,6 km	Ein O-BEV, OH-Lkw (LPG) und OH-Lkw (Diesel)
Elways Arlanda	Arlanda Airport, Stockholm, Schweden	Konduktiv	2017-2019	2 km	BEV-Lkw (18 t)
ELISA	A5, Nähe Frankfurt, Deutschland	Oberleitung	2019-ongoing	Zweimal 5 km	5 OH-Lkw
FESH	A1, Schleswig-Holstein, Deutschland	Oberleitung	2020-ongoing	Zweimal 5 km	OH-Lkw (Diesel)
Evolution Road	Lund, Schweden	Konduktiv	2020-ongoing	1 km	Bus
Smartroad Gotland	Visby, Schweden	Induktiv	2020-ongoing	Zweimal 800 m	Lkw, Bus
eWayBW	B462, Nähe Karlsruhe, Deutschland	Oberleitung	2021-ongoing	Zweimal 6 km	5 OH-Lkw (Diesel) und je ein O-BEV-Lkw und ein OH-Lkw (FCEV)

Quelle: AEA, eigene Darstellung

Alle Teststrecken haben einen Erprobungscharakter. Bei den deutschen Teststrecken werden die eingesetzten Fahrzeuge von den Speditionen geleast, sie werden überdurchschnittlich oft und engmaschig überprüft. Die genutzte elektrische Energie ist kostenlos. Es ist geplant, die errichtete Infrastruktur aufzulassen (induktives Laden) bzw. rückzubauen (Oberleitungen). Nach Auskunft von Siemens können die deutschen Teststrecken aber so ertüchtigt werden, dass sie in einen Regelbetrieb überführt werden – hier sind Adaptionen an den Leitungen und Unterwerken nötig, nicht aber an den Masten und Fahrdrähten.

Die erste Strecke mit einer permanent betriebenen dynamischen Ladeinfrastruktur soll die „E20 Hallsberg–Örebro“ in Schweden werden. Die Ausschreibungsunterlagen definieren, dass eine dynamische Ladeinfrastruktur zu errichten ist, aber nicht, welche. Es handelt sich also um eine technologieoffene Ausschreibung. Zuschlagsrelevant ist das Preis-Leistungs-Verhältnis. Der Bau der Infrastruktur soll 2025 abgeschlossen sein.

In Deutschland werden drei Innovationscluster zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs entwickelt (Abbildung 35). Ein Cluster in Zentraldeutschland fokussiert auf das stationäre Hochleistungsladen im

Fernverkehr, die beiden anderen Innovationscluster– geplant in Bayern und Hessen/Baden-Württemberg – beziehen neben dem stationären Laden auch Wasserstofffahrzeuge und dynamisches Laden ein. Für beide Strecken wurden Machbarkeitsstudien durchgeführt. Die Innovationscluster sind für einen Dauerbetrieb vorgesehen. Der aus österreichischer Sicht besonders relevante Cluster in Bayern soll Synergien zwischen den verschiedenen Antriebs- und Ladealternativen untersuchen. Für den bayerischen Innovationscluster wurde eine etwa 100 km lange Strecke an der A9 zwischen Nürnberg und München ausgewählt. Ausschlaggebend waren infrastrukturelle Aspekte sowie das Kommitment von als Ankernutzern bezeichneten Unternehmen, die sich bereit erklärt haben, die Infrastruktur zu nutzen. Die Entscheidung des deutschen Ministeriums zur Realisierung der Innovationscluster steht noch aus.

Abbildung 35: Innovationscluster Deutschland



Quelle: BMDV, 2022

5.5 Einschätzung

In der AFID-Richtlinie von 2014 wurde dynamisches Laden nicht genannt. Bestärkt durch die Vorreiterrolle von Deutschland und Schweden ist das Thema europaweit stärker in den Fokus gerückt und wurde in die Entwürfe zur AFIR-Verordnung aufgenommen. Allerdings werden keine Mindeststandards definiert oder Zielvorgaben gesetzt. Die Regelungstiefe ist also vergleichsweise gering. Dies ist mit spezifischen Aspekten der Technologie hinsichtlich einer gesamteuropäischen Umsetzbarkeit nachvollziehbar – sie ist aufgrund der Investitionskosten vor allem für Strecken mit einem hohen Aufkommen an Fernverkehrsfahrten und weniger für periphere Gebiete geeignet. Der Entwurf zur AFIR sieht vor, dass die Nationalstaaten einen nationalen Strategierahmen vorlegen, der Ziele, Strategien und Maßnahmen festlegt. Es ist naheliegend, dass ein substantieller Beitrag der Technologie zur Klimaneutralität 2040 unwahrscheinlich wird, wenn sie nicht prominent im österreichischen Strategierahmen verankert wird.

Der österreichische Mobilitätsmasterplan kann als Karte und Kompass für die Steuerung der österreichischen Mobilitätsentwicklung bezeichnet werden. In ihm wird an mehreren Stellen auf eine Infrastruktur für das dynamische Laden verwiesen. Dies kann als Ansatz gewertet werden, um das Thema im Bewusstsein von Entscheidungsträger:innen, der Fachöffentlichkeit und der interessierten Bevölkerung zu verankern.

Im zentraleuropäischen Raum ist eine gesteigerte Beschäftigung mit dem Thema in Deutschland und Schweden und mit geringerer Intensität in den Niederlanden, Flandern und Großbritannien feststellbar. Deutschland und Schweden haben dabei klar eine Vorreiterrolle inne. In verschiedenen Ländern, vor allem in Deutschland und Schweden, wurden Teststrecken für das dynamische Laden errichtet. Die drei vorhandenen Teststrecken in Deutschland und die möglichen Innovationscluster in Bayern und Baden-Württemberg nutzen die Oberleitungstechnologie. Hier ist ein Upscaling-Prozess ersichtlich. Die technologieoffene Ausschreibung zur Elektrifizierung der „E20 Hallsberg–Örebro“ in Schweden sowie der Innovationscluster in Deutschland sind auf eine permanente Nutzung ausgelegt und wären so nicht zuletzt ein Signal an die Logistik-Branche und Fahrzeughersteller. Trotzdem fehlt das klare Commitment einer oder mehrerer Regierungen zu einem flächendeckenden und konsequenten Ausbau einer Infrastruktur für das dynamische Laden, was wiederum Rückwirkungen auf die Fahrzeugindustrie und die Logistikunternehmen hat.

Eine von allen Stakeholdern geteilte Einschätzung ist, dass lediglich eine europäische, integrierte Lösung für das dynamische Laden Sinn macht. Zudem gibt es einen klaren Konsens, dass die einzige plausible Form des dynamischen Ladens in Deutschland für den Straßengüterverkehr die Oberleitung ist.

Im Jahr 2024 oder spätestens 2025 soll in Deutschland eine Pfadentscheidung für eine oder mehrere Technologien zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs getroffen werden. Bis dahin werden in einem technologieoffenen Prozess verschiedene Alternativen untersucht. Ein Ausbau stationärer Schnellladeinfrastruktur kann mit großer Wahrscheinlichkeit als ein fixer Bestandteil der künftigen Strategie angenommen werden. Ab dann dürfte ein technologischer Lock-In-Effekt vorliegen. Dieses Jahr bekommt dadurch auch für die österreichische Strategie zur Dekarbonisierung des Güterverkehrs große Bedeutung. Durch die geographische Lage und die Relevanz des Transitverkehrs prägt dies den Möglichkeitsraum für die Wahl einer Technologie für das dynamische Laden in Österreich.

6 Technische Analyse

6.1 Annahmen

Die folgenden Modellierungen und Berechnungen dienen der technischen Analyse eines ERS-Systems auf Autobahnen und Schnellstraßen für den Straßengüterverkehr in Österreich. Es werden nur oberleitungsgebundene Systeme analysiert, da diese Technologie den höchsten TRL für dynamisches Laden aufweist und es aus derzeitiger Sicht das am wahrscheinlichsten implementierte ERS-System für den Lkw-Verkehr ist.

Es wird in Übereinstimmung mit dem Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich angenommen, dass leichtere Fahrzeuge und Fahrzeuge, die vor allem im regionalen (Verteiler-)Verkehr eingesetzt werden, nicht mit einem Pantographen ausgestattet werden. Es wird wie in der österreichischen CLEARER-Studie nicht zwischen Werkverkehr und Fuhrgewerbe unterschieden (Sedlacek, et al., 2021). Entscheidend für die Affinität zum dynamischen Laden ist ein hohes Fahrzeuggewicht, welches meist mit längeren Fahrtweiten einhergeht⁵. Demnach wird das oberleitungsaffine Fahrzeugkollektiv auf N3-Fahrzeuge mit einer höchstzulässigen Gesamtmasse von mindestens 26 t beschränkt.

Die Analyse beruht auf der Verkehrsflussanalyse (siehe Kapitel 3), welche das jährliche Verkehrsaufkommen für das Prognosejahr 2040 beschreibt. Das gewählte Hauptszenario in diesem Kapitel ist das CLEARER-Szenario, welches von einem Anstieg des N3-26-Verkehrs um ca. 30 % von 2019 bis 2040 ausgeht. Ausgewählte Ergebnisse für das Mobilitäts-Masterplan-Szenario (MMP-Szenario), welches von einer Stabilisierung des Straßengüterverkehrs auf dem Niveau von 2019 ausgeht, werden beschrieben.

Um O-BEV Fahrzeuge nutzen zu können, wird ERS-Infrastruktur benötigt. Die Annahmen zur Lkw-Flottendurchdringung sind daher an die Entwicklung der ERS-Infrastruktur gekoppelt. In der Anfangsphase wird demnach mit einer Basis-ERS-Infrastruktur im TEN-V-Kernnetz von einem langsamen Hochlaufen der O-BEV-Flotte ausgegangen. Es wird angenommen, dass eine ERS-Infrastruktur am TEN-V-Kernnetz maximal 50 % des gesamten österreichischen N3-26 Verkehrs im Jahr 2040 versorgen kann. Das sind ca. 70 % des über des TEN-V-Kernnetz fahrenden N3-26 Verkehrs. Es wird angenommen, dass bei einer Erweiterung der ERS-Infrastruktur auf das TEN-V-Gesamtnetz maximal 80 % des österreichischen N3-26 Verkehrs mittels O-BEV im Jahr 2040 abgewickelt werden kann.

Für Oberleitungs-Lkw wird angenommen, dass in einer mittelfristigen Perspektive nur noch batterieelektrische Oberleitungs-Lkws (O-BEV) zum Einsatz kommen. Es wird deshalb kein zweiter Antriebsstrang in den Analysen angenommen, sondern nur eine Traktionsbatterie. Hier werden zwei Batteriegrößen angesetzt, mit denen im Realbetrieb 100 km (O-BEV100) bzw. 200 km (O-BEV200) zurückgelegt werden können, was einer Batteriekapazität von etwa 160 kWh bzw. 320 kWh entspricht (inklusive Berücksichtigung des verwendbaren State-of-Charge (useable SOC) und unter Annahmen für Batteriedichten für das Jahr 2030 von 240 Wh/kg). Nähere Details zu den verwendeten O-BEV sind in Kapitel 4 beschrieben.

⁵ Fahrzeuge mit einer täglichen Fahrtweite von unter 300 Kilometern werden oft als nicht-oberleitungsaffine eingeschätzt, dies wird in der vorliegenden Analyse allerdings vernachlässigt. Somit sind auch N3>26t mit einer Fahrtweite unter 300 km inkludiert.

Die Annahmen zur ERS-Infrastruktur sind im Detail in Kapitel 2 beschrieben. Im Prinzip ist ein 10-30 kV Netzanschluss an ein Mittelspannungsnetz (nur in der Anfangsphase oder bei ERS-Infrastruktur-Strecken mit niedriger O-BEV-Nutzung) oder Hochspannungsnetz mit streckenbegleitendem Mittelspannungsring notwendig. Die Oberleitungsnennspannung nach dem Entwurf zur CENELEC WG 27 Anhang EN 50712 ist 1.200 V DC mit einer Mindestspannung von 900 V DC und einer maximalen Spannung von 1.450 V DC. Es wird eine zweiseitige Speisung mit Querkupplung in den Unterwerken angenommen. Diese Unterwerke können in der Anfangsphase einen maximalen Abstand von 7 km haben. In der Anfangsphase wird auch eine einseitige Speisung an den Enden der Streckenabschnitte der oberleitungsgebundenen ERS-Infrastruktur mit maximal 1,5 km angenommen. Bei intensiverer Nutzung werden zunehmend weitere Unterwerke zwischen existierenden Unterwerken eingefügt. So wird die verfügbare Ladeenergie für O-BEV erhöht (Konzept des Modularen Aufbaus in Abbildung 37). Die Unterwerke haben standardmäßig einen Transformator von 4 MW, 12-Puls-Gleichrichter, diverse Schutz- und Steuereinrichtungen und eine Fläche von ca. 3 x 12 m (ca. 40 Fuß-Container). Rekuperation ist nur in die Fahrzeugbatterie vorgesehen, es gibt keine Rückspeisung in das Netz. Das Oberleitung-Leitungsmaterial besteht aus zwei Fahrdrähten, AC-150 mm² CuMG0,5 und hat eine dauerhafte Strombelastbarkeit von 800 A und kann somit bei 1.200 V ca. 1 MW dauerhaft leiten.

6.2 Ergebnisse – Oberleitung

„Wie hoch muss der Elektrifizierungsgrad am A+S Netz sein um das Güterverkehrsaufkommens im Jahr 2040 auf diesen Strecken emissionsfrei ermöglichen zu können?“

„Welche Anforderungen bzgl. des Leistungs- und Energiebedarfes werden an die Elektrifizierungsinfrastruktur gestellt, auch unter Berücksichtigung der im vorherigen Punkt angeführten Erschwernisse?“

In folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der technischen Analysen in Bezug auf das oberleitungsgebundene ERS-Infrastrukturnetz, den Ausbaustufen und den Ladevorgängen näher erläutert.

6.2.1 Oberleitungsgebundenes ERS-Infrastrukturnetz

Der Fokus der technischen Analyse liegt auf dem Autobahnen und Schnellstraßen, die als Transeuropäische Verkehrsnetze (TEN-V) klassifiziert sind, genauer auf dem TEN-V-Kernnetz und dem TEN-V-Gesamtnetz. Eine Priorisierung des Ausbaus der ERS-Infrastruktur in Österreich auf TEN-V-Kernnetz-Strecken ist aufgrund des höheren Verkehrsaufkommens und der internationalen Verflechtung naheliegend. Der Ausbau kann zeitlich gestaffelt für unterschiedliche Routen erfolgen.

EnergyRoads geht von einem schrittweisen Aufbau aus: Ein Ausbau der ERS-Infrastruktur auf TEN-V-Gesamtnetzstrecken erfolgt erst nach dem Abschluss des Aufbaus auf dem TEN-V-Kernnetz. Für die Auswahl der zu elektrifizierenden Strecken wird folgendes Schema angewendet:

Grundlage ist die Streckeneignung aus der Analyse in Kapitel 2.1. Für die technische Analyse werden sowohl die gut geeigneten (in der Analyse in Kapitel 2.1 grün markiert) als auch die mit kleineren Einschränkungen geeigneten, gelb-markierten Strecken einbezogen. Streckenabschnitte kürzer als 3 km werden grundsätzlich ausgeschlossen. In seltenen Fällen, vor allem im TEN-V-Gesamtnetz, werden manuell orange Strecken als mit größeren Einschränkungen geeignete Strecken einbezogen, um einen Mindestabdeckungsgrad von 50 % zu erreichen, bzw. Streckenlängen zu optimieren. Im TEN-V-Kernnetz wurden dagegen manuell geeignete Strecken reduziert, um den Mindestabdeckungsgrad von 50 % abzubilden. Hierfür wurden längere (5 km bis 30 km) gut verteilte Streckenabschnitte für ERS-Infrastruktur belassen. Der Einbezug der Empfehlung des Forschungsprojekts StratON hinsichtlich eines Maximalabstandes von 20 km zwischen ERS-Strecken ist nicht berücksichtigt.

Bezüglich der Abdeckungsgrade ist in der Literatur eine Entwicklung hin zu höheren Abdeckungsgraden (gemessen an den Soll-Werten für den Anteil des hochrangigen Straßennetzes mit ERS-Infrastruktur am gesamten hochrangigen Straßennetz) feststellbar. Das Fraunhofer-Institut (Fraunhofer, 2017) ging im Jahr 2017 von 30 % Netzabdeckung aus (allerdings bei 3C Ladeleistung der Batterie). StratON (Hacker, et al., 2020) empfiehlt einen Mindestabdeckungsgrad von 50 %. Ursächlich für die Zunahme des ERS-Abdeckungsgrades ist ein Trade-Off zwischen der ERS-Infrastrukturinvestitionen und Investitionen auf Seiten der O-BEV-Fahrzeugeigentümer. Je geringer der ERS-Ausbaugrad ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Quell-Ziel-Relationen nicht abgedeckt werden können. Das Verhältnis von zurückgelegter Entfernung unter einer Oberleitung zur gesamten Quell-Ziel-Entfernung muss dann im Durchschnitt des gesamten Fahrzeugkollektivs statistisch geringer sein. Um die Durchführbarkeit aller Fahrten dennoch garantieren zu können wird eine zweite Antriebsart oder eine größere Traktionsbatterie benötigt. Dies erhöht die Fahrzeugkosten und das Fahrzeuggewicht und verschlechtert dadurch die Energieeffizienz und das ökonomische Kalkül.

Volkswirtschaftliche Modellrechnungen in Deutschland legen nahe, dass es langfristig volkswirtschaftlich günstiger ist, in die ERS-Infrastruktur zu investieren als in die Batteriekapazität der Fahrzeugflotte. Dies spricht

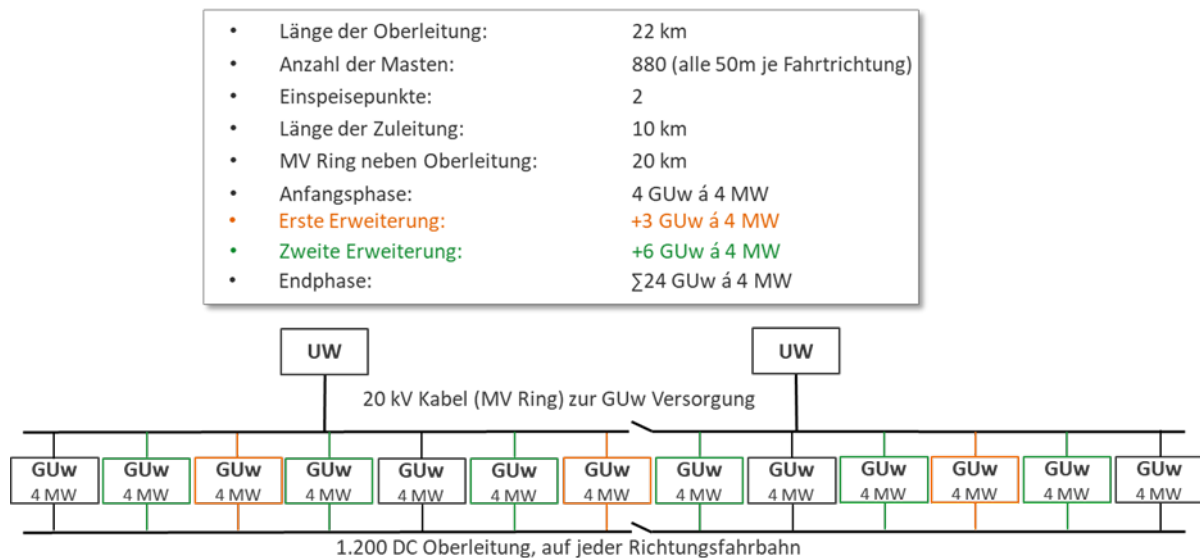
für den Aufbau einer flächendeckendes ERS-Infrastruktur, überall wo es möglich ist. Dies könnte im TEN-V-Kernnetz in Österreich bis ca. 80 % der Strecken bedeuten. Eine solche ERS-Infrastruktur wäre entsprechend resilienter, da Störungen auf einzelnen Abschnitten besser kompensiert werden können. In der vorliegenden Analyse wurde der von StratON empfohlene Mindestabdeckungsgrad von 50 % hinterlegt.

6.2.2 Ausbaustufen

Ein modularer Aufbau der ERS-Infrastruktur bedeutet, dass ausgehend von einer notwendigen technischen Mindestinfrastruktur der Ausbau der ERS-Infrastruktur parallel zu höherem Einsatz von O-BEV erfolgt. Dadurch reduziert sich die Anfangsinvestition. Das Konzept wird von Siemens als weltweit größten technologischen Leitanbieter empfohlen.

In Abbildung 36 wird ein Streckenabschnitt beispielhaft dargestellt. Zu Beginn muss bereits der vollständige Oberleitungsabschnitt inklusive Leiter, Masten, Einspeisepunkte, Zuleitungen und MV-Ring errichtet werden. Die Gleichrichterunterwerke (GUw) können allerdings modular, je nach Energiebedarf der O-BEV, in das ERS-System integriert werden. In dem unten angeführten Beispiel sind für Anfangs nur 4 Gleichrichterunterwerke (mit einem maximalen Abstand von 7 km) notwendig. Weitere Gleichrichterunterwerke können schrittweise ergänzt werden. Abhängig von der Anzahl der O-BEV und deren Leistungsbedarf für die Traktion und das Laden der Batterie lässt sich die Dimensionierung, Anzahl und Abstand der Unterwerke zueinander genauer berechnen.⁶

Abbildung 36: Konzept Modularer Aufbau der ERS-Infrastruktur



Quelle: Konzept Siemens, Beispiel und Darstellung AEA

In der technischen Analyse für ein solches ERS-System in Österreich wurde unter anderem die Länge der Oberleitungsabschnitte (je Fahrtrichtung), die Anzahl der Masten, die Anzahl der Einspeisepunkte, die Länge der Zuleitung und eines etwaigen Mittelspannungs-(MV-)Rings für die Anfangsphase und Endphase für das TEN-V-Kernnetz und für die Endphase des TEN-V-Gesamtnetzes berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen

⁶ Auf Strecken mit starker Steigung führt die in der Studie verwendete Methode durch die Durchschnittsbildung des Energieverbrauchs über beide Fahrtrichtung zu einer erhöhten Leistung bei gleichzeitig reduzierter Anzahl an Unterwerken auf Grund der dauerhaften Strombelastbarkeit von 900 Ampere.

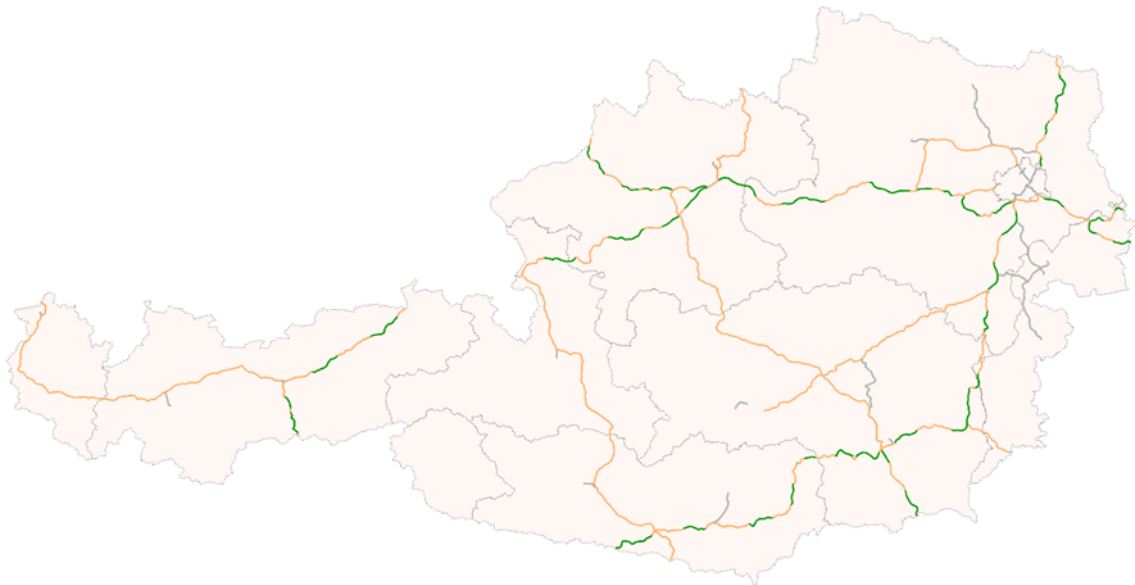
werden für die wirtschaftliche Analyse herangezogen. Detaillierte Ergebnisse zur vorläufigen Machbarkeit für das TEN-V-Kernnetz sind in Annex II angeführt.

6.2.2.1 TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken, Anfangsphase

Das TEN-V-Kernnetz, mit einem Mindestabdeckungsgrad der ERS-Infrastruktur von 50 %, mit einer vorläufigen Streckenführung wie in Abbildung 37 illustriert, hat in der Anfangsphase:

- eine Länge der Oberleitungs-Infrastruktur (je Fahrtrichtung) von 550 km,
- eine Länge der Zuleitungen von ca. 350 km,
- Unterwerke mit einer Leistung von 488 MW (122 Gleichrichterunterwerke mit je 4 MW) und
- kann elektrische Energie bis zu ca. 3,5 GWh/d oder 1 TWh/a transportieren.

Abbildung 37: TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken, Anfangsphase



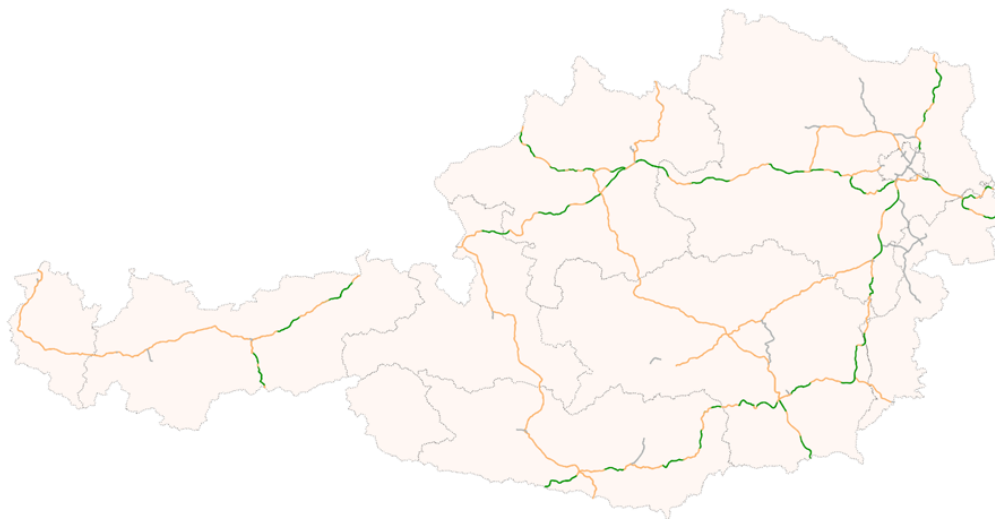
Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

6.2.2.2 TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken, Endphase

Das TEN-V-Kernnetz, mit einem Mindestabdeckungsgrad der ERS-Infrastruktur von 50 %, mit einer vorläufigen Streckenführung wie in Abbildung 38 illustriert, hat in der Endphase:

- eine Länge der Oberleitungs-Infrastruktur (je Fahrtrichtung) von 550 km,
- eine Länge der Zuleitungen von ca. 350 km,
- Unterwerke mit einer Leistung von 1.452 MW (363 Gleichrichterunterwerke mit je 4 MW), und
- kann elektrische Energie bis zu ca. 10,6 GWh/d oder 3 TWh/a transportieren.

Abbildung 38: TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken, Endphase



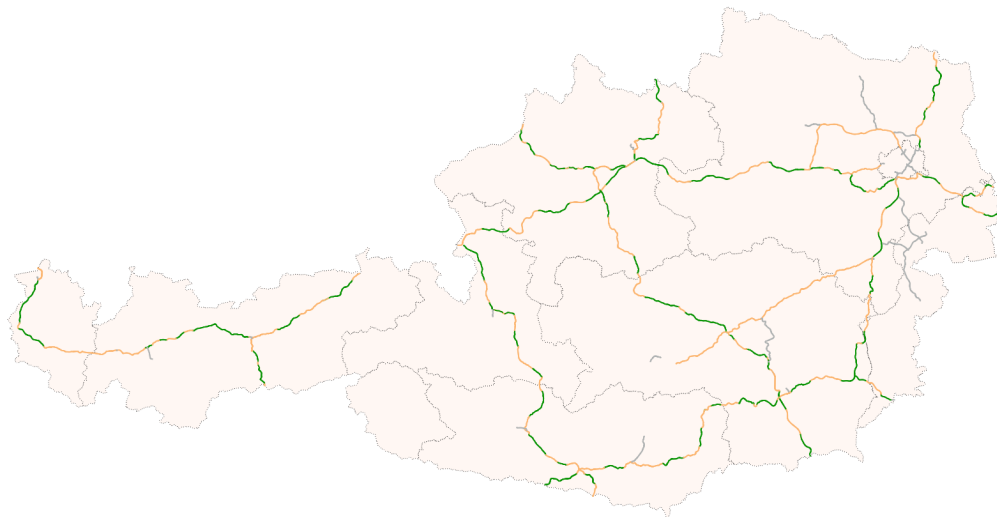
Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

6.2.2.3 TEN-V-Gesamtnetz, Teilstrecken, Endphase

Das TEN-V-Gesamtnetz, mit einem Mindestabdeckungsgrad der ERS-Infrastruktur von 50 %, mit einer vorläufigen Streckenführung wie in Abbildung 39 illustriert, hat in der Endphase:

- eine Länge der Oberleitungs-Infrastruktur (je Fahrtrichtung) von 900 km,
- eine Länge der Zuleitungen von ca. 555 km,
- Unterwerke mit einer Leistung von 2.620 MW (659 Gleichrichterunterwerke mit je 4 MW), und
- kann elektrische Energie bis zu ca. 19,1 GWh/d oder 5,5 TWh/a transportieren.

Abbildung 39: TEN-V-Gesamtnetz, Teilstrecken, Endphase



Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

6.2.3 Beispiel für einen Autobahnabschnitt

„Welche zusätzlichen Ladeleistungen ergeben sich um die notwendige Energie für diese Strecken [=für die Fahrten außerhalb des A+S Netzes] während der Fahrt am A+S Netz zu laden?“

Abbildung 40 illustriert zur Verdeutlichung das Beispiel für den Autobahnabschnitt Linz-Wien/Wien-Linz. Das Beispiel geht von einem Ausbau am TEN-V-Kernnetz in Teilstrecken mit einem Mindestabdeckungsgrad von 50 % aus.

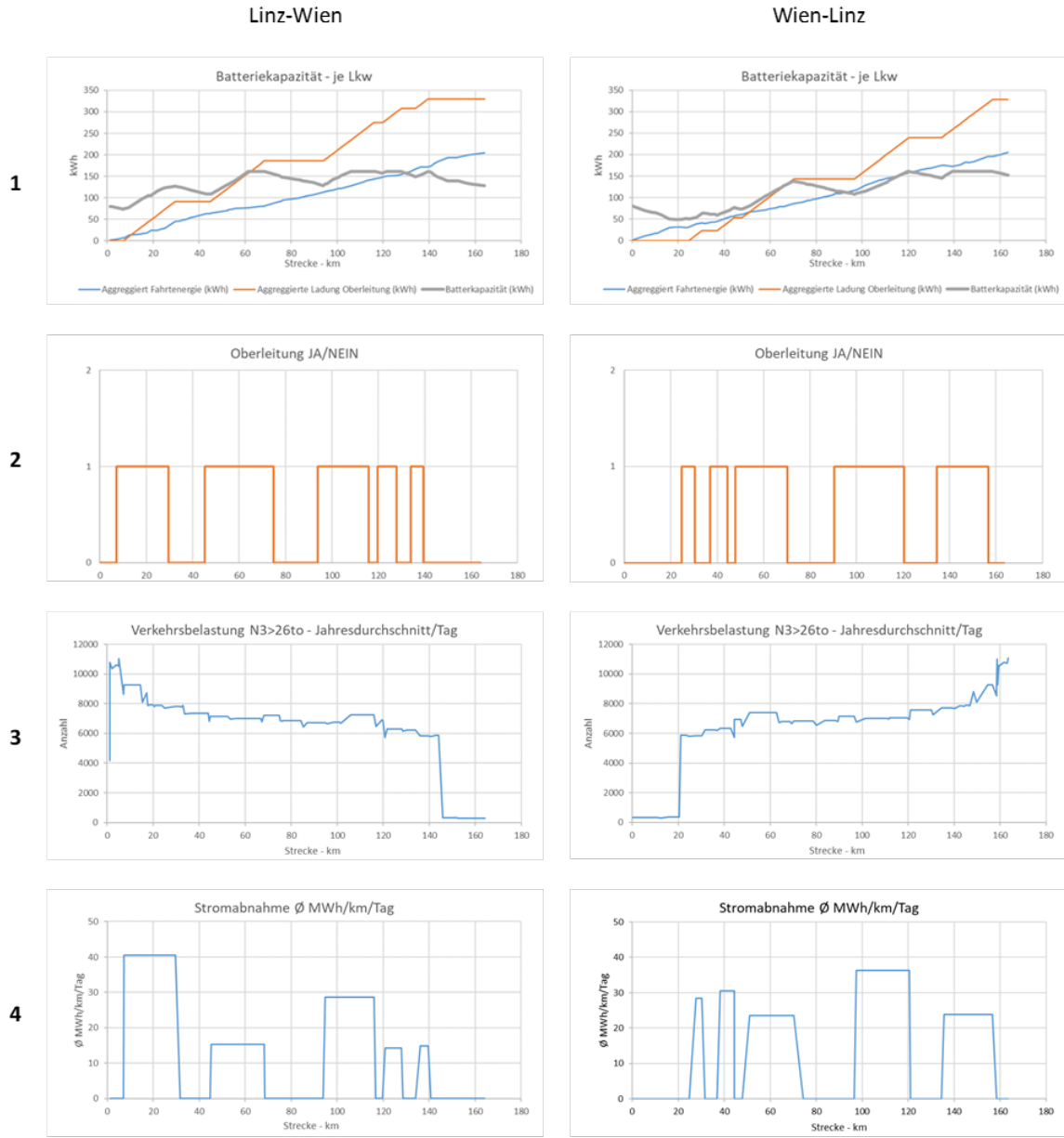
In der oberen Zeile ist für ein einzelnes Fahrzeug die benötigte Traktionsenergie (blau), die aggregierte Ladung über die Oberleitung (orange) und die Batteriekapazität (grau) dargestellt. Die benötigte Traktionsenergie steigt linear mit der gefahrenen Strecke. Sie hängt allerdings auch von der Steigung der Strecke ab und ist deswegen nicht perfekt linear. Die in den mit Oberleitungen ausgestatteten Streckenabschnitten aufgenommen Leistung wird von der Ladeleistung der Batterie begrenzt. Die Batterie wird entsprechend auf Abschnitten ohne Oberleitung entladen (in Abhängigkeit von der Streckenneigung). Es wird angenommen, dass der Ladezustand der Batterie anfangs 50 % beträgt. Auf dieser Route ist die Ladung über die Oberleitung ausreichend um die Traktionsenergie bereitzustellen und die Batterie noch zusätzlich zu laden. In der zweiten Zeile wird angeführt, auf welchen Strecken eine Oberleitung angenommen wird.

Für die Betrachtung von O-BEV-Flotten wurden die Verkehrsprognosen für das Jahr 2040 mit der detaillierten Verkehrsbelastung je Strecke für beide Fahrtrichtungen als Basis verwendet. In den Grafiken unten ist für die Autobahn Linz-Wien und Wien-Linz die Verkehrsbelastung für die Verkehrsprognose des verwendeten CLEARER-Szenarios (Zeile 3) dargestellt.

In Zeile 4 wird ein theoretischer Leistungsbedarf für eine 100%-O-BEV-Flotte für beide Richtungen separat dargestellt. Dieser Leistungsbedarf ist eine vereinfachte erste Berechnung. Die großen Leistungsunterschiede der Abschnitte werden in der Realität nicht erwartet, da eine größere Verkehrsbelastung zu einer Vergleichmäßigung der Belastungen führen würde. Bei dem dargestellten Leistungsbedarf wird nicht nur die Fahrenergie entlang der ERS-Infrastrukturstrecke bereitgestellt, sondern darüber hinaus auch die Batterie geladen. Es wird angenommen, dass die für die Bewältigung der nicht elektrifizierten Strecken auf derselben Route benötigte Traktionsenergie ebenfalls an der vorhandenen ERS-Infrastruktur geladen wird. Das führt bei einem Mindestabdeckungsgrad von 50 % in etwa zu einer Verdopplung der Leistungsnachfrage auf den elektrifizierten Abschnitten. Zusätzlich werden auch 50 % der Fahrenergie für die jeweilige O-BEV-Flotte abseits der elektrifizierten Routen (abseits des TEN-V-Kernnetzes) über die ERS-Infrastruktur geladen. Auch das führt zu einem erhöhten Leistungsbedarf.

Hinterlegt ist zudem eine Tagesganglinie für die elektrische Leistung (durchschnittlicher Wochentag) auf Basis der durchschnittlichen österreichischen Tagesganglinie für den Lkw-Verkehr für N3-26. Diese Szenario-Annahmen können zu relativ hohen Leistungen in dem zu versorgenden Abschnitt führen.

Abbildung 40: ERS-Beispiel für die Route Linz-Wien / Wien- Linz



Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

6.2.4 Stationäres Laden

„In welchem Ausmaß sind zusätzliche Ladeinfrastrukturen (bspw. an Raststationen oder Rastplätzen) mit hohen Ladeleistungen am A+S Netz für den Güterverkehr zur Unterstützung bzw. Ermöglichung der untersuchten Elektrifizierungsinfrastrukturen zukünftig notwendig?“

Zusätzlich zum dynamischen Laden an der ERS-Infrastruktur entlang des Autobahn- und Schnellstraßennetzes wird stationäres Laden nachts, im Depot, bei Destinationen oder an „Schnellladestationen“ angenommen. Es wird angenommen, dass dynamisch während der Fahrt über die ERS-Infrastruktur zusätzlich 50 % der für die Fahrt im untergeordneten Netz benötigten Energie geladen wird. Die verbleibenden 50% werden stationär geladen, die Annahmen zur Aufteilung auf die konkreten Ladearten sind in Tabelle 11 angeführt.

Tabelle 11: Annahmen stationäres Laden von O-BEV

Lademöglichkeit	Leistung	Art	Zeitfenster	Anteil
„Schnellladen“	200 kW	Ladesäule	10 – 15 Uhr	25 %
Destinationsladen	100 kW	Ladesäule	8 – 18 Uhr	25 %
Öffentlich über Nacht	22 kW	Oberleitung	20 – 6 Uhr	20 %
Depot über Nacht	22 kW	Oberleitung	20 – 6 Uhr	30 %

Quelle: AEA

Die Anzahl der benötigten Ladepunkte sind in Tabelle 12 beschrieben. Für das stationäre Laden in der Nacht können ebenfalls Oberleitungen verwendet werden. Hierfür wird angenommen, dass anfangs 20 Lkw je km Oberleitung und in der Endphase 40 Lkw je km Oberleitung stationär geladen werden können. Dies hat Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Systems. Die Anzahl an Ladepunkten zwischen der Endphase des Kernnetzes und des Gesamtnetzes ändert sich nur geringfügig, da a bei einem Vollausbau (TEN-V-Gesamtnetz) O-BEV einen höheren Anteil der Energie dynamisch laden können.

Tabelle 12: Anzahl stationäres Laden von O-BEV

Anzahl der Ladepunkte	TEN-V-Kernnetz, Anfangsphase (circa 5 % O-BEV Anteil)	TEN-V-Kernnetz, Endphase (<50 % O-BEV Anteil)	TEN-V-Gesamtnetz, Endphase (<80 % O-BEV Anteil)
„Schnellladen“ (200 kW)	650	6.500	6.900
Destinationsladen (100 kW)	450	4.300	4.600
Öffentlich über Nacht (22 kW)	1.050	10.300	11.000
Depot über Nacht (22 kW)	1.550	15.500	16.400

Quelle: AEA

Für BEV-Ladesäulen kann mit einem zusätzlichen Platzbedarf bei Lkw-Stellplätzen von ca. 20 % gerechnet werden. Dieser erfordert eine Erweiterung der Lkw-Stellplatzflächen auf österreichischen Autobahnen und

Schnellstraßen. Ein Oberleitungssystem erfordert dagegen keinen zusätzlichen Platz für Lkw-Stellflächen, aber im geringeren Ausmaß für Masten, und Unterwerke.

6.2.5 Energie- und Leistungsbedarf

Derzeit werden die Energienachfrage und der Leistungsbedarf von Oberleitungs-Lkw nicht und von stationärem Laden nur im begrenzten Ausmaß in den langfristigen Netzausbauplanungen berücksichtigt. Tages-, Wochen- und Jahresganglinien des Verkehrsflusses für N3-26 wurden in Kapitel 3 beschrieben und werden hier für die elektrischen Lastflüsse berücksichtigt. Der Verkehrsfluss von N3-26 ist eine gute Grundlage für die Berechnung der elektrischen Lastflüsse des dynamischen Ladens an der ERS-Infrastruktur von O-BEV nachdem diese denselben Ganglinien folgt. Für die vorliegende technische Analyse werden für Österreich gemittelte Tages-, Wochen und Jahresganglinien verwendet. Geringfügige streckenspezifischen Abweichungen werden vorerst vernachlässigt.

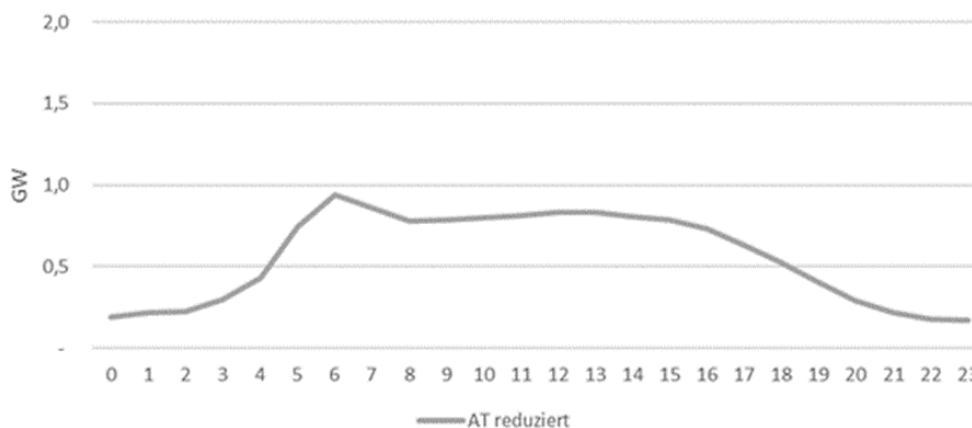
6.2.5.1 Dynamisches Laden

In den folgenden drei Abbildungen sind die Tages-, die Wochen- und die Jahresganglinie für das dynamische Laden an der ERS-Infrastruktur für das TEN-V-Kernnetz in der Endphase (bei 50 % O-BEV Flottenanteil) entsprechend dem CLEARER-Szenario angeführt.

- Die Tageslastspitze an einem durchschnittlichen Werktag tritt um ca. 6 Uhr morgens auf. Sie beträgt in Summe ca. 1 GW (Abbildung 41).
- Die Wochenganglinie (Abbildung 42) zeigt, dass donnerstags die höchste Leistungsaufnahme auftritt und samstags nur ca. ein Drittel der Leistung im Vergleich mit Werktagen nachgefragt wird. Sonntags werden nur sehr geringe Leistungen benötigt.
- Die Jahresganglinie (Abbildung 43) zeigt den Energieverbrauch je Woche. In dieser ist erkennbar, dass in der Weihnachtszeit und der Haupturlaubszeit deutlich weniger Energienachfrage für das dynamische Laden bei der ERS-Infrastruktur erwartet werden kann.

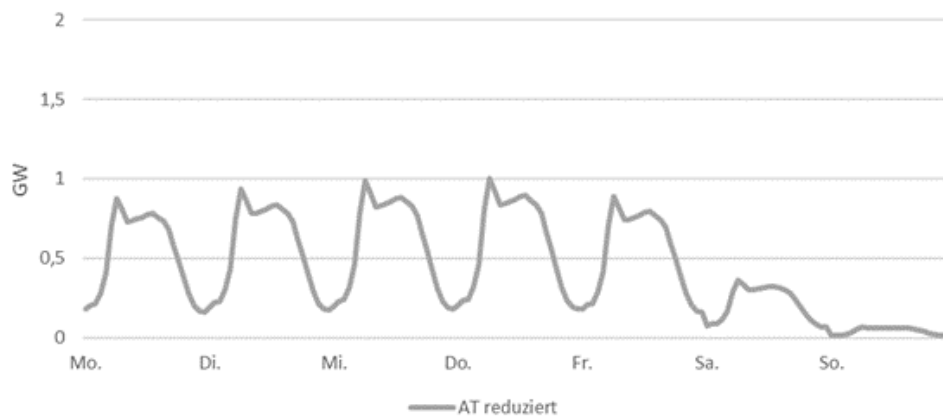
Tabelle 13 beschreibt den Tages- und Jahresenergieverbrauch für weitere Szenarien und Flottendurchdringungen.

Abbildung 41: Tagesganglinie des Leistungsbedarfs für dynamisches Laden an der ERS-Infrastruktur im TEN-V-Kernnetz in der Endphase



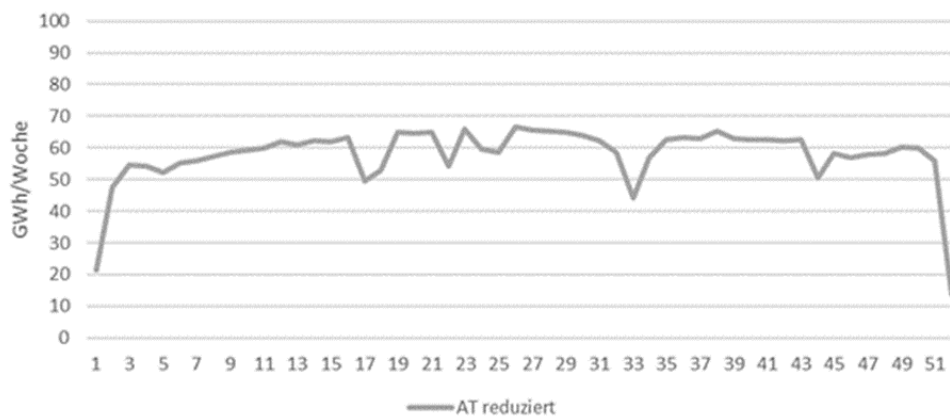
Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 42: Wochenganglinie des Leistungsbedarfs für dynamisches Laden an der ERS-Infrastruktur im TEN-V-Kernnetz in der Endphase



Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 43: Jahresganglinie des wöchentlichen Leistungsbedarfs für dynamisches Laden an der ERS-Infrastruktur im TEN-V-Kernnetz in der Endphase



Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

Tabelle 13: O-BEV Jahresenergieverbrauch dynamisches Laden an der ERS-Infrastruktur des Autobahn- und Schnellstraßennetzes

Anteil des Verkehrs	20 %	20 %	50 %	50 %	80 %	80 %
MMP	3,3 GWh/d	1,0 TWh/a	8,3 GWh/d	2,4 TWh/a	13,3 GWh/d	3,8 TWh/a
CLR	4,2 GWh/d	1,2 TWh/a	10,5 GWh/d	3,0 TWh/a	16,8 GWh/d	4,8 TWh/a
VPÖ	4,5 GWh/d	1,3 TWh/a	11,2 GWh/d	3,2 TWh/a	18,0 GWh/d	5,1 TWh/a

Quelle: AEA, eigene Berechnungen

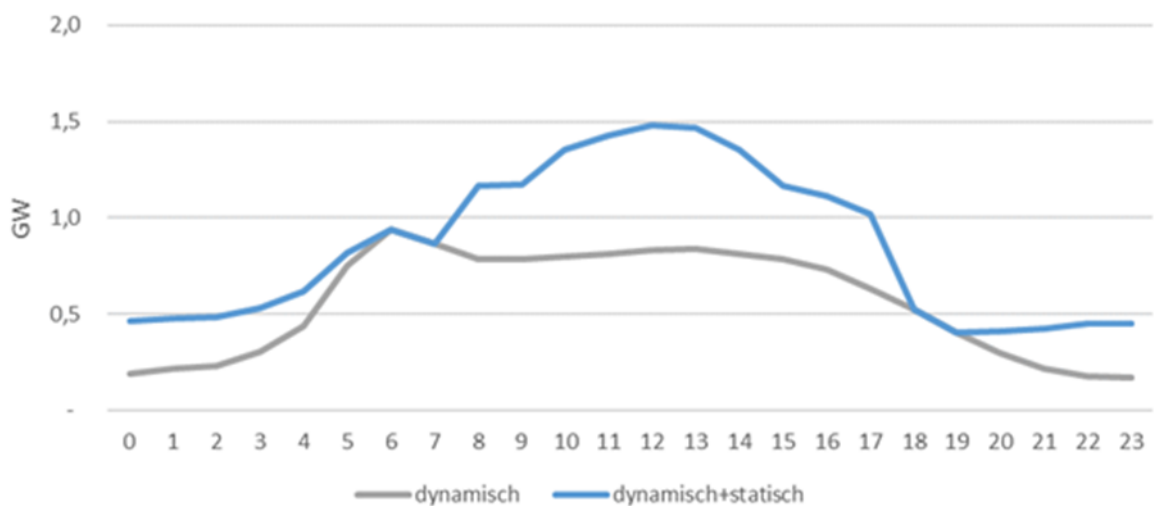
6.2.5.2 Dynamisches und stationäres Laden

In den nächsten drei Abbildungen sind die Tages-, die Wochen- und die Jahresganglinie für das dynamische und stationäre Laden für O-BEV, bei 50 % O-BEV Flottenanteil, entsprechend dem CLEARER-Szenario angeführt. Für stationäres Laden beruhen die Ergebnisse auf weitreichenderen Annahmen und sind weniger robust. Für stationäres Laden wird zusätzlich ca. 40 % mehr elektrische Energie benötigt:

- Die Tageslastspitze an einem durchschnittlichen Werktag tritt für dynamisches und stationäres Laden überlappend mittags auf. In Summe beträgt sie ca. 1,5 GW (Abbildung 44).
- Die Wochenganglinie zeigt, dass donnerstags weiterhin die höchste Leistungsaufnahme auftritt (Abbildung 45).
- Die Jahresganglinie zeigt den Energieverbrauch für dynamisches und stationäres Laden je Woche (Abbildung 46). In dieser ist erkennbar, dass in der Weihnachtszeit und der Haupturlaubszeit deutlich weniger Energienachfrage erwartet werden kann.

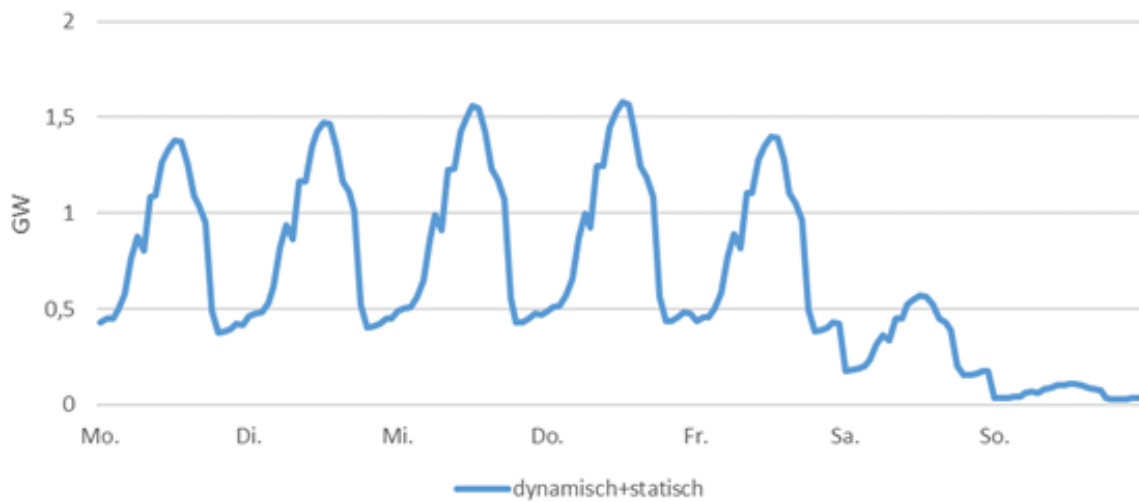
Es gibt Indizien, dass die Leistungsaufnahme über das stationäre Laden am Wochenende und im Jahresverlauf hier vermutlich unterschätzt wird. Eine detailliertere Analyse wäre sinnvoll. Tabelle 14 beschreibt den Tages- und Jahresenergieverbrauch für dynamisches und stationäres Laden für weitere Szenarien und Flottendurchdringungen.

Abbildung 44: Tagesganglinie des Leistungsbedarfs für dynamisches und stationäres Laden von O-BEV bei 50 %igem Flottenanteil



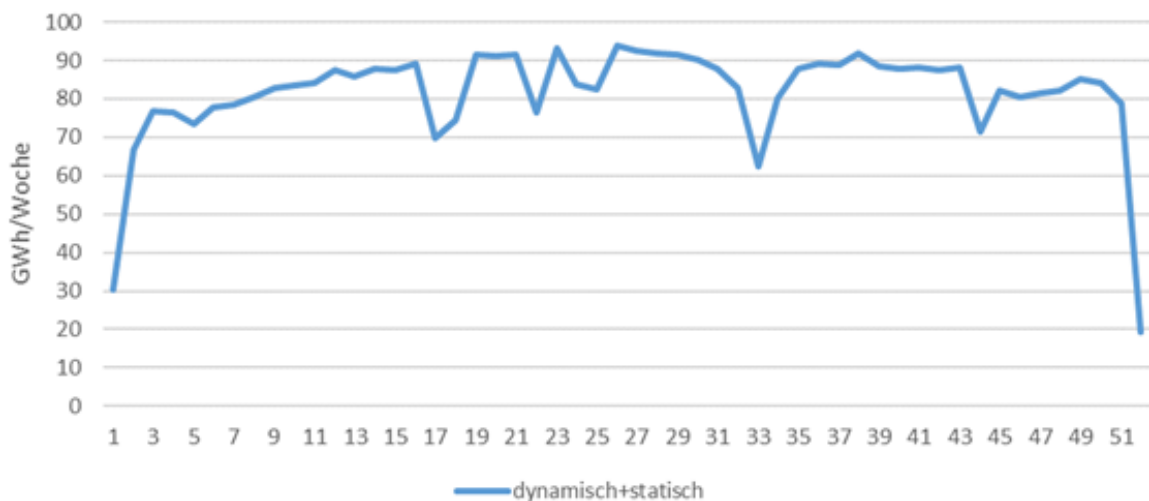
Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 45: Wochenganglinie des Leistungsbedarfs für dynamisches und stationäres Laden von O-BEV bei 50%igem Flottenanteil



Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 46: Jahresganglinie des wöchentlichen Leistungsbedarfs für dynamisches und stationäres Laden von O-BEV bei 50%igem Flottenanteil



Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

Tabelle 14: O-BEV Jahresenergieverbrauch dynamisches und stationäres Laden von O-BEV bei 50%igem Flottenanteil

Anteil des Verkehrs	20 %	20 %	50 %	50 %	80 %	80 %
MMP	4,8 GWh/d	1,4 TWh/a	11,9 GWh/d	3,4 TWh/a	19,0 GWh/d	5,4 TWh/a
CLR	5,9 GWh/d	1,7 TWh/a	14,8 GWh/d	4,2 TWh/a	23,7 GWh/d	6,8 TWh/a
VPÖ	6,4 GWh/d	1,8 TWh/a	15,9 GWh/d	4,6 TWh/a	25,5 GWh/d	7,3 TWh/a

Quelle: AEA, eigene Berechnungen

6.3 Energieverbrauch

„Wie hoch ist der zusätzliche Energiebedarf bei unterschiedlichen Durchdringungsraten von Oberleitungs-LKW und wieviel zusätzliche erneuerbare Energie müsste aufgebracht werden um das Ziel von bilanziell 100 % erneuerbaren Strom zu erreichen?“

Der Energieverbrauch von O-BEV entspricht dem von BEV und ist deutlich geringer als für FCEV oder mit E-Fuels betriebene Lkws. Dies trifft in der Systembetrachtung sowohl auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge (Tank-to-Wheel) als auch auf den Energieverbrauch für die Bereitstellung der Energieträger bzw. Treibstoffe (Well-to-Wheel) zu.

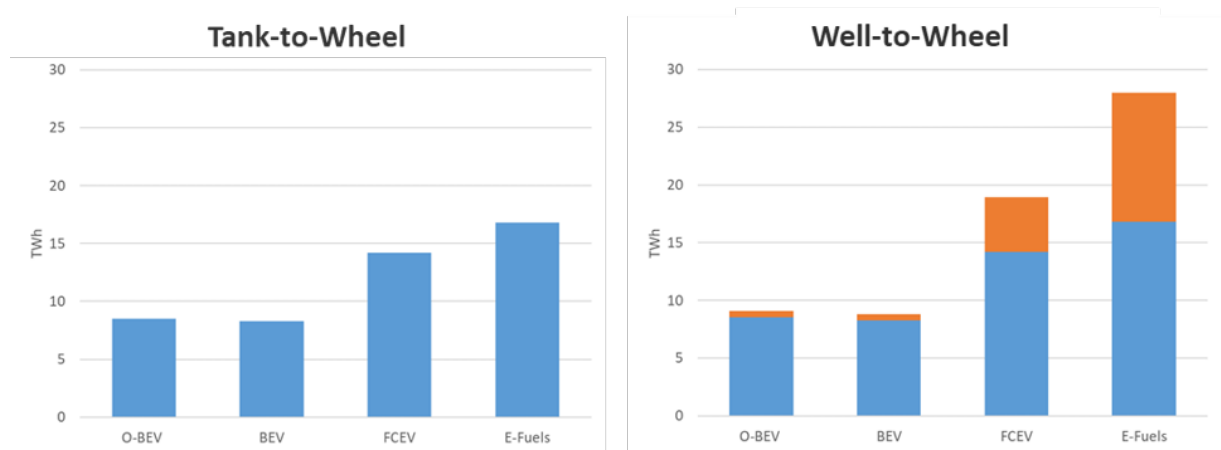
Für den Tank-to-Wheel-Vergleich der unterschiedlichen Antriebe wird eine theoretische 100%ige Marktdurchdringung für die gefahrenen Kilometer der N3-26-Lkws laut CLEARER-Szenario (für das Jahr 2040) hinterlegt und die spezifischen Energieverbräuche je Kilometer (Kapitel 5) angenommen. Die Treibstoff-Produktionseffizienz wurde der Literatur entnommen (TE, 2020). Für O-BEV und BEV wird sie langfristig mit 94 % angegeben und berücksichtigt nur Verteilungsverluste. Unter der Annahme, dass ca. 20 % des Stromverbrauchs (z. B. zur Deckung der Winterlücke) saisonal als Methan gespeichert wird, reduziert sich dies auf 81 %. Selbst mit einer solchen Annahme sind O-BEV und BEV in einer Well-to-Wheel-Betrachtung deutlich effizienter als FCEV oder mit E-Fuels betriebene Lkws. Für die Berechnung wurde angenommen, dass 20 % des Stromverbrauchs über folgende Umwandlungskette mit entsprechenden Effizienzfaktoren erzeugt wird: 97 % Übertragung bis zum Elektrolyseur, 75 % Elektrolyseeffizienz zur Erzeugung von H₂, 80 % Methanisierung zu Methan (CH₄), 95 % Faktor für Transport, Speicherung und Verstromung von Methan in einem GuD-Kraftwerk mit einer Effizienz von 60 %. Für die Produktion von Wasserstoff wird mit 75 % Produktionseffizienz inklusive Transport-, Speicher- und Verteilverlusten gerechnet. Für E-Fuels wird eine Produktionseffizienz von 60 % angesetzt.

Der Tank-to-Wheel Energieverbrauch berücksichtigt für O-BEV und BEV auch die Ladeverluste. Er kann somit auch als Charging station-to-Wheel verstanden werden (TE, 2021a). Das europäische Joint Research Center hat umfassende Tank-to-Wheel (JRC, 2020a) und Well-to-Wheel (JRC, 2020b) Studien für den schweren Straßengüterverkehr veröffentlicht. Diese Ergebnisse konnten leider nicht übernommen werden, da die zu Grunde gelegten Fahrzeugkonfigurationen signifikante Unterschiede aufweisen. Die Ergebnisse dieser Analyse sind vergleichbar mit Ergebnissen aus anderen Studien (TE, 2021a), (JRC, 2020a) oder (Kühnel, et al., 2018).

BEV und O-BEV Batterien müssen im Sommer gekühlt und im Winter während Fahrzeug-Standzeiten beheizt werden. Prinzipiell müsste der Energieverbrauch für BEV400 hierfür höher liegen als für einen O-BEV100, da die Batteriemasse größer ist. Tests und Analysen zu dem hierfür notwendigen Energieverbrauch sind derzeit nicht verfügbar.

Wasserstoff oder E-Fuels können nur mit der direkten Nutzung von Elektrizität konkurrieren, wenn für ihre Produktion ausreichend erneuerbare Energieerzeugung verfügbar ist. Wasserstoff oder E-Fuel-Importe werden wahrscheinlich für den Straßengüterverkehr erst mittel- bis langfristig eine Rolle spielen können, da im Moment weder die Erzeugungskapazitäten für grünen Wasserstoff oder E-Fuels, noch die Transportkapazitäten bereitstehen und es starke Nutzungskonkurrenzen mit anderen Nutzern für diese Energieträger gibt.

Abbildung 47: Jahresenergieverbrauch der Fahrzeuge (Tank-to-Wheel) und inklusive Treibstoffbereitstellung (Well-to-Wheel), angenommen 100 % der Fahrleistung je Antrieb laut CLEARER-Szenario



Quelle: AEA, eigene Berechnungen

Abbildung 48: Jahresenergieverbrauch der Fahrzeuge (Tank-to-Wheel) und inklusive Treibstoffbereitstellung (Well-to-Wheel), angenommen 100% der Fahrleistung je Antrieb für die drei Szenarien

Jahresenergieverbrauch Tank-to-Wheel					Jahresenergieverbrauch Well-to-Wheel				
100% - TWh Jahr	O-BEV	BEV	FCEV	E-Fuels	100% - TWh Jahr	O-BEV	BEV	FCEV	E-Fuels
MMP	6,9	6,6	11,4	13,5	MMP	7,3	7,1	15,2	22,5
CLR	8,5	8,3	14,2	16,8	CLR	9,1	8,8	19,0	28,0
VPÖ	9,2	8,9	15,3	18,0	VPÖ	9,7	9,4	20,4	30,1

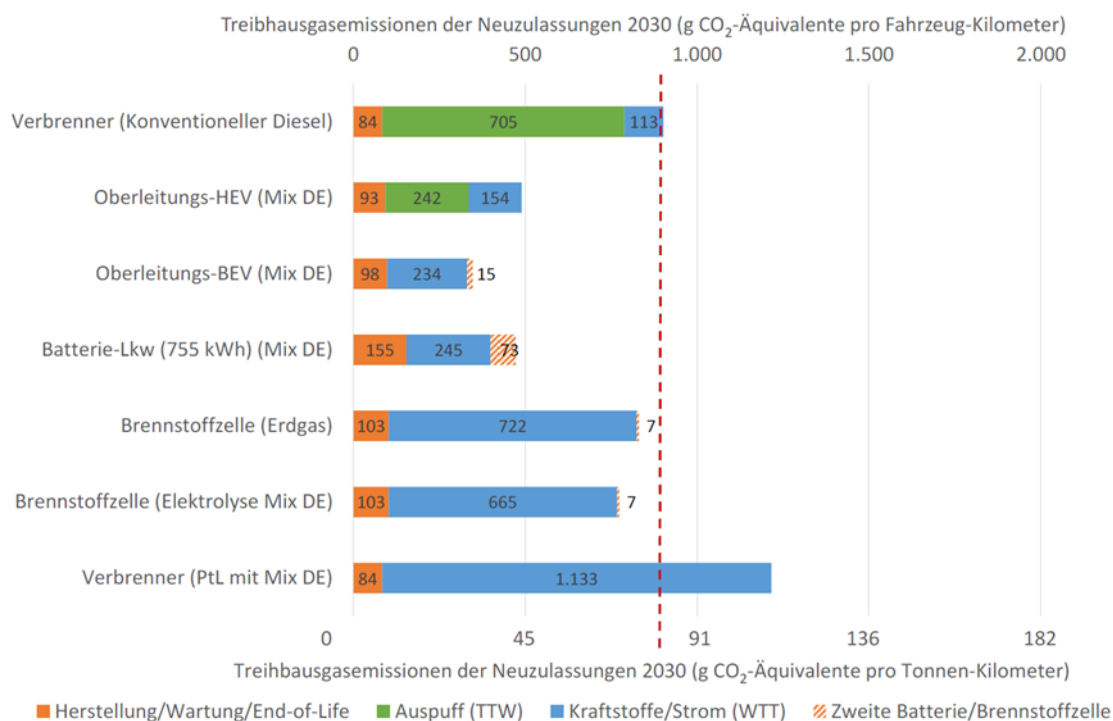
Quelle: AEA, eigene Berechnungen

6.4 Umweltauswirkungen

„Welches CO₂-Einsparungspotenzial gegenüber alternativen Technologien wie etwa Diesel, Wasserstoff, Biokraftstoffe oder synthetische Kraftstoffe können durch den Ausbau von Elektrifizierungsinfrastruktur gehoben werden?“

Für Deutschland wurden detaillierte Analysen bzgl. der erzielbaren Lebenszyklus-Treibhausgas-minderungen der unterschiedlichen Kraftstoff- und Technologiealternativen für das Jahr 2030 durchgeführt (Helms, 2021) (Abbildung 49). Der hierfür verwendete Faktor für die Klimaintensität der Strombereitstellung wurde mit 215 g CO₂-Äquivalent pro Kilowattstunde für das Jahr 2030 angenommen. Diese Annahme beruht auf einem in Deutschland bis dahin erwarteten Anteil erneuerbarer Energieträger an der Stromerzeugung von 73%⁷.

Abbildung 49: Treibhausgasemissionen 2030 zugelassener Sattelzugmaschinen (40 t zGG) mit verschiedenen Antriebskonzepten für typische Nutzungsparameter in Deutschland (800.000 km Laufleistung über 7 Jahre Betriebsdauer, 11 t durchschnittliche Zuladung, Deutscher Strom-Mix)



Quelle: Helms, 2021

Grundsätzlich kann die Klimaintensität der Strombereitstellung auf drei Arten betrachtet werden: nach Herkunftsnachweisen, für den Aufbringungs-Strom-Mix inklusive Importe (A-Mix), oder national-bilanziell bzw. dem Erzeugungs-Strom-Mix exklusive Importe (E-Mix). Der durchschnittliche CO₂-Ausstoß für elektrische Energie in Österreich nach Herkunftsnachweisen betrug laut Stromkennzeichnungsbericht (E-Control, 2022b) für das Jahr 2021 57 g/kWh. Dies berücksichtigt unter anderem den Zukauf von Herkunftsnachweisen von österreichischen Stromversorgungsunternehmen. Laut OIB (2019) betrug der CO₂-Ausstoß für elektrische

⁷ Im Jahr 2020 lag der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Deutschland bei 46% und hatte eine Klimaintensität von 440 g CO₂-Äquivalent.

Energie im Jahr 2018 227 g/kWh, hierbei wurden Herkunftsnachweise für Strom nicht berücksichtigt, sondern die THG-Emissionen der tatsächlichen Stromerzeugung in Österreich und der Stromimporte.

In der national-bilanziellen Methode werden nur die THG-Emissionen in dem jeweiligen Land berücksichtigt, die durch die Erzeugung elektrischer Energie verursacht werden. Emissionsreduktionen durch den Handel von Herkunftsnachweisen und Emissionserhöhung durch Importe von Strom werden nach dieser Methode nicht betrachtet. Deutschland exportiert beispielsweise mehr Strom als es importiert, aus diesem Grund ist eine reine national bilanzielle Betrachtung für Deutschland sinnvoll. Österreich importiert derzeit mehr Strom als es exportiert. Bis 2030 wird in Österreich laut Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz (EAG) implizit angestrebt, dass etwaige Importe durch erneuerbare Exporte kompensiert werden. Nachdem Stromimporte allerdings einen höheren fossilen Anteil haben als der Erzeugungsmix in Österreich, macht es für Österreich auch Sinn den Aufbringungs-Mix, inklusive der Importe für Strom zu betrachten – nachdem auch in Zukunft Stromimporte nach Österreich anfallen werden.

Für den Erzeugungsmix im Jahr 2021 ergibt sich ein THG-Emissionsfaktor für die in Österreich produzierte elektrische Energie von 125 g/kWh. Die Berechnung der bei der Erzeugung von elektrischer Energie relevanten Emissionen erfolgt dabei auf Basis der Energiebilanz (Statistik Austria, 2022) und der Emissionsfaktoren laut IPCC (2006) mittels der Kalorische/IEA-Methode. Die Kalorische/IEA Methode vereinfacht die Aufteilung der bereitgestellten Energie durch Kraft-Wärme-Kopplung auf Strom und Fernwärme aliquot der erzeugten Energie.

Bis 2030 plant Österreich einen 100 % erneuerbaren Anteil elektrischer Energie gemessen am Verbrauch auf jährlich bilanzieller Basis zu erreichen. Bei einer vereinfachten Abschätzung der Klimaintensität der Stromerzeugung (exkl. Importe durch die Stromproduktion in Gas-Kraft-Wärmekopplungs-Kraftwerken) im Jahr 2030 kann für Österreich mit 76 g/kWh THG-Emissionsfaktor gerechnet werden. Hierfür werden nach der oben beschriebenen Methode, angewendet auf das Jahr 2020, die EAG-Ziele für die Stromerzeugung in Österreich (+11 TWh PV, +10 TWh Windkraft, + 5 TWh Wasserkraft, + 1 TWh Biomasse) hinzugerechnet, der Kohleausstieg eingerechnet und angenommen, dass der Öl-Einsatz um 50 % abnimmt. Es wird dabei angenommen, dass der Einsatz von Erdgas, Gichtgas, Kokereigas, Industrieabfall und von sonstigen Nicht-Erneuerbaren Abfällen auf dem Niveau des Jahres 2020 bleibt. Diese vereinfachte Berechnung wurde durchgeführt, da keine öffentliche Analyse über die Klimaintensität der Stromerzeugung für das Jahr 2030 in Österreich vorliegt. Selbst die österreichischen Ziele bedeuten allerdings, dass nach wie vor Importe mit den jeweiligen Klimaintensitäten anfallen. Für den Aufbringungs-Mix wird für 2030 ein Faktor von 130 g/kWh⁸ angenommen.

Für die Betrachtung der Lebenszyklus-Treibhausgasminderungen der unterschiedlichen Kraftstoff- und Technologiealternativen für das Jahr 2030 in Österreich wurden die entsprechenden Parameter aus der Studie von Helms et al. (2021) für Deutschland abgeleitet. Dafür wurden die Kraftstoff-/Strom-Emissionen anhand der österreichischen und deutschen Klimaintensitätsfaktoren skaliert und die Emissionen für Herstellung/Wartung/End-of-Life, Auspuff (für Diesel) sowie zweite Batterie/Brennstoffzelle gleich gelassen. Für O-HEV wurde angenommen, dass der elektrische Fahrleistungsanteil bei rund zwei Dritteln liegt.

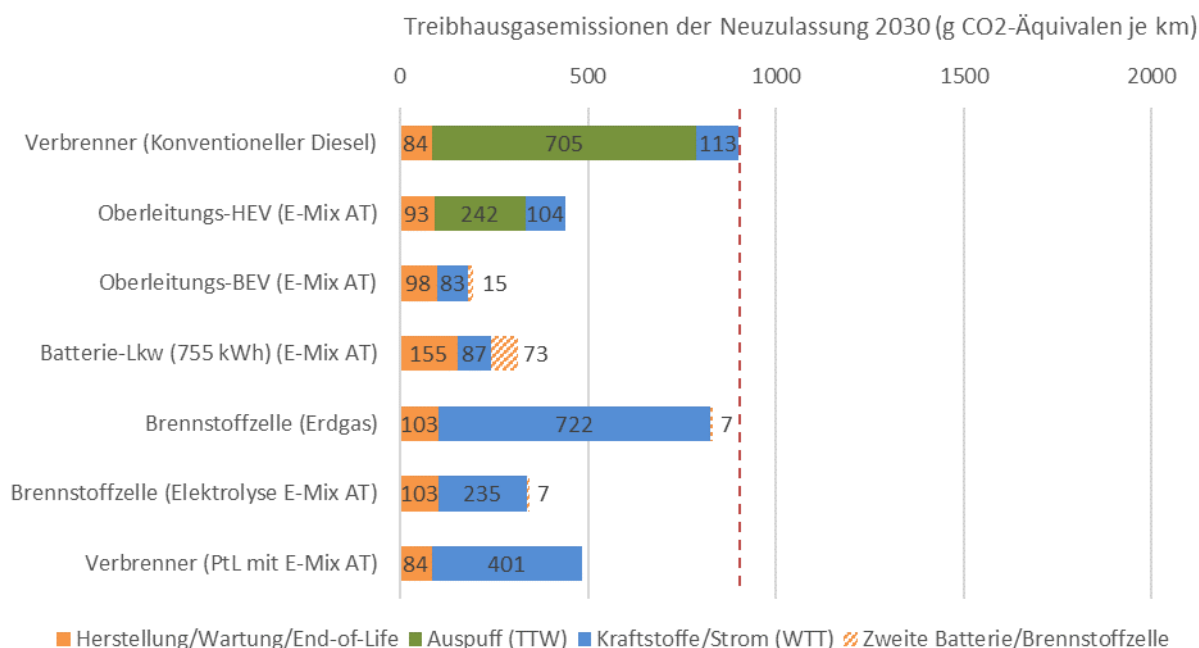
⁸ Dies wurde abgeschätzt, indem der DE Mix als Proxy für die Import-THG-Intensität verwendet wurde, anhand folgender Überlegung: Im Jahr 2019 ist der AT E-Mix bei 119 g/kWh und der AT A-Mix 227 g/kWh. Der DE E-Mix hat im Jahr 2020 440 g/kWh was ca. ¼ der Differenz von AT E-Mix zu AT A-Mix. Bei einem DE E-Mix im Jahr 2030 von 215 g/kWh und Hinzurechnung desselben Faktors auf den AT E-Mixes 2030 ergibt sich ein Faktor von 130 g/kWh für den A-Mix in AT ($215 \text{ g/kWh} \cdot 0,25 + 76 \text{ g/kWh}$).

Die Ergebnisse zeigen, dass alle strombasierten Lkw-Antriebe und Kraftstoffe in Österreich zu THG-Emissionsreduktionen führen können (Abbildung 50, Abbildung 51). Für diesen Vergleich wurden die Fahrzeugparameter aus der Studie von Helm et al. (2021) verwendet.

Bei den ab 2030 als verfügbar angenommenen O-BEV- und BEV Fahrzeugen ergeben sich die deutlichsten Einsparungen an Treibhausgasemissionen im Bereich von 0 % bis 80 % gegenüber der Nutzung konventioneller Dieselfahrzeuge. O-HEV verursachen ca. 50 % weniger THG-Emissionen. Bei elektrolytischer Herstellung von Wasserstoff in Österreich liegt das Minderungspotenzial von FCEV bei 40 % bis 60 %. Dies ist aufgrund hoher Umwandlungsverluste deutlich geringer als bei den direktelektrischen Antrieben BEV und O-BEV. Noch größere Verluste entstehen bei der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels oder Power-to-Liquid-Kraftstoffe). Die Treibhausgasemissionen liegen selbst für 2030 zugelassene Lkw nur 15 % bis 45 % unter denen von Diesel-Lkw.

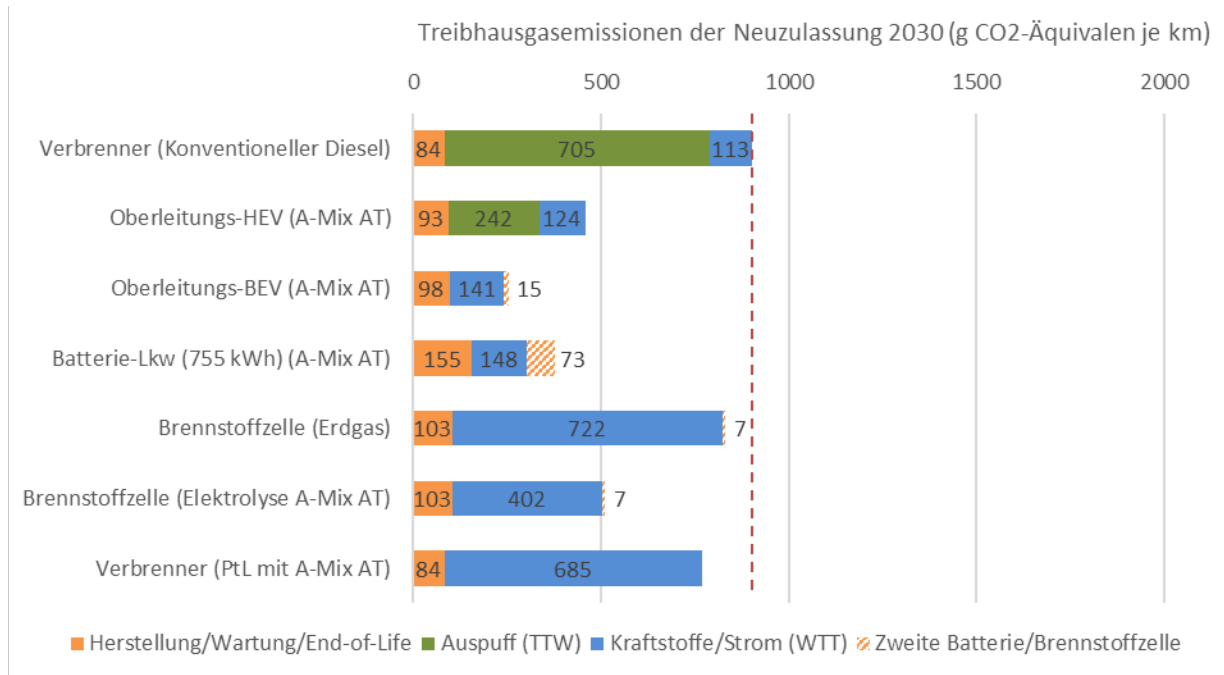
Mittelfristig haben O-Lkw einen deutlichen Klimavorteil gegenüber Brennstoffzellen-Lkw und der Nutzung synthetischer Kraftstoffe. O-BEV haben auch geringe Vorteile bzgl. der THG-Emissionen gegenüber den BEV, welche durch Emissionen der Batterieproduktion und -entsorgung entstehen. Unter dem Blickwinkel des Klimaschutzes ist der Einsatz von O-BEV anstelle von BEV nicht notwendigerweise zu bevorzugen, da bei dieser Betrachtung die Treibhausgasemissionen bei der Herstellung und Installation der Infrastruktur nicht eingerechnet werden. Aus Umweltschutz-Gründen kann dies aufgrund des geringeren Verbrauchs kritischer Ressourcen wie Lithium, Kobalt etc. allerdings sinnvoll sein (Mottschall, 2022).

Abbildung 50: Treibhausgasemissionen 2030 zugelassener Sattelzugmaschinen (40 t zGG) mit verschiedenen Antriebskonzepten für typische Nutzungsparameter für Österreich und den österreichischen Erzeugungstrommix (E-Mix), exkl. Betrachtung von Stromimporten



Quelle: Helms, 2021, AEA, eigene Berechnungen

Abbildung 51: Treibhausgasemissionen 2030 zugelassener Sattelzugmaschinen (40 t zGG) mit verschiedenen Antriebskonzepten für typische Nutzungsparameter für Österreich und den österreichischen Aufbringungs-Strommix (A-Mix) inkl. Betrachtung von Stromimporte



Quelle: Helms, 2021, AEA, eigene Berechnungen

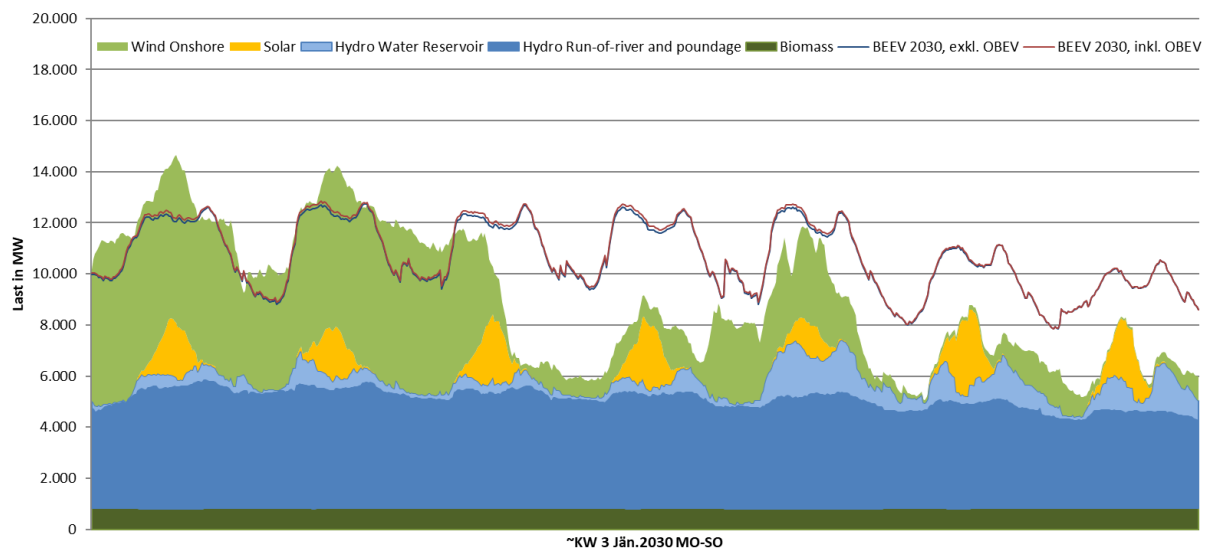
6.5 Stromaufbringung

„Wie kompatibel ist der zu erwartende elektrische Lastgang mit dem zu 100 % aus erneuerbaren Energiequellen erzeugtem Stromdargebot im Jahr 2030?“

Um zu analysieren, wie kompatibel der zu erwartende elektrische Lastgang mit dem zu 100 % aus erneuerbaren Energiequellen erzeugtem Stromdargebot im Jahr 2030 ist, wurde der Lastgang für O-BEV für dynamisches und statisches Laden für eine angenommene Marktdurchdringung von 5 % für O-BEV im Jahr 2030 (ähnlich wie in Abbildung 45) verwendet. Dieser O-BEV-Lastgang wurde zu einem Bruttoendenergieverbrauch (BEEV) im Jahr 2030 für eine Sommer- und eine Winterwoche hinzugerechnet. Dieser Bruttoendenergieverbrauch ist skaliert auf das Ziel von 100 % erneuerbarer bilanzieller Stromversorgung in Österreich mit zusätzlich +27 TWh erneuerbarer Stromerzeugung, auf Basis des Jahres 2019. Gegenübergestellt wird dies der mit den EAG-Ausbauzielen skalierten erneuerbaren Energieerzeugung in Österreich im Jahr 2030. Die Stromerzeugung in den jeweiligen Wochen ist ebenfalls auf Basis 2019 und den EAG-Ausbauzielen skaliert und wird exklusive fossiler Energieträger und Pumpspeicherkraftwerke dargestellt. Abbildung 52 zeigt grafisch eine Gegenüberstellung der Lastgänge mit und ohne O-BEV für eine Winterwoche. Abbildung 53 zeigt dies für eine Sommerwoche. Bei einer für 2030 angenommenen 5 %igen Marktdurchdringung wird der Lastgang sowohl im Winter als auch im Sommer nur sehr geringfügig beeinflusst. Nachdem der Lastgang vor allem untertags auftritt kommt es zu einer positiven Überschneidung mit der Energieerzeugung durch Photovoltaik-Anlagen. 2030 ist der elektrische Lastgang somit gut kompatibel mit der Stromerzeugung.

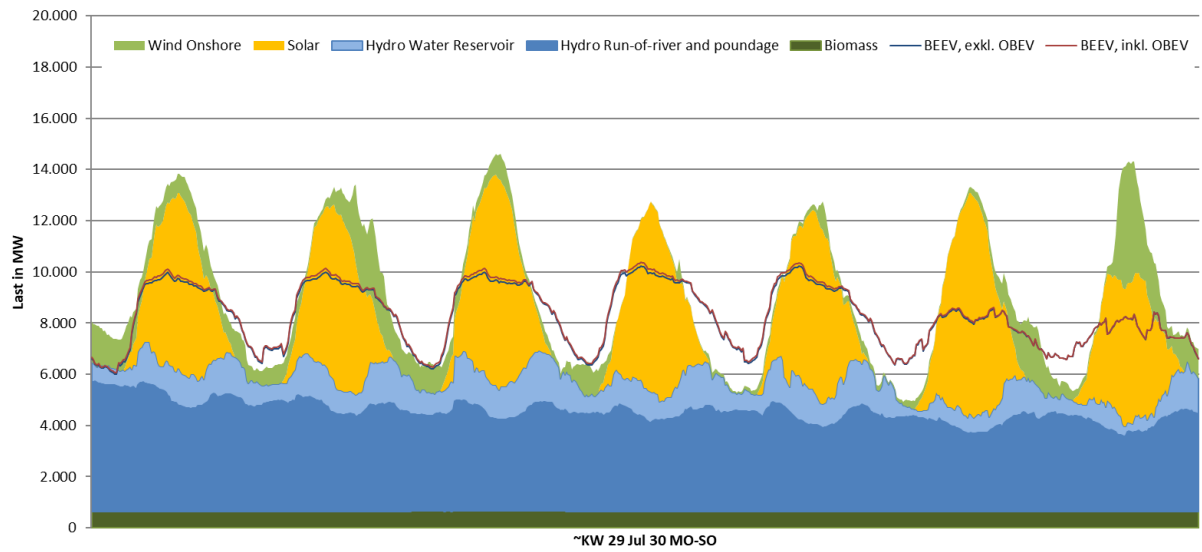
Eine solche Analyse wäre ebenfalls für das Jahr 2040 sinnvoll. Dies erfordert eine umfassende Systemanalyse, da auf der Verbrauchsseite eine einfache Skalierung nicht mehr ausreicht. Dies liegt an den zu erwartenden hohen Einflüsse von Wärmepumpen, E-Pkw und Elektrifizierung in der Industrie.

Abbildung 52: Lastgang versus erneuerbare Stromerzeugung – Winterwoche, skaliert für das Jahr 2030



Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

Abbildung 53: Lastgang versus erneuerbare Stromerzeugung – Sommerwoche, skaliert für das Jahr 2030



Quelle: AEA, eigene Berechnungen und Darstellung

6.6 Synergieeffekte von dynamischen und stationärem Laden

„Welche Synergieeffekte können sich mit der zukünftig notwendigen Ladeinfrastruktur für Personen und Güterverkehr am A+S Netz mit der Elektrifizierungsinfrastruktur ergeben?“

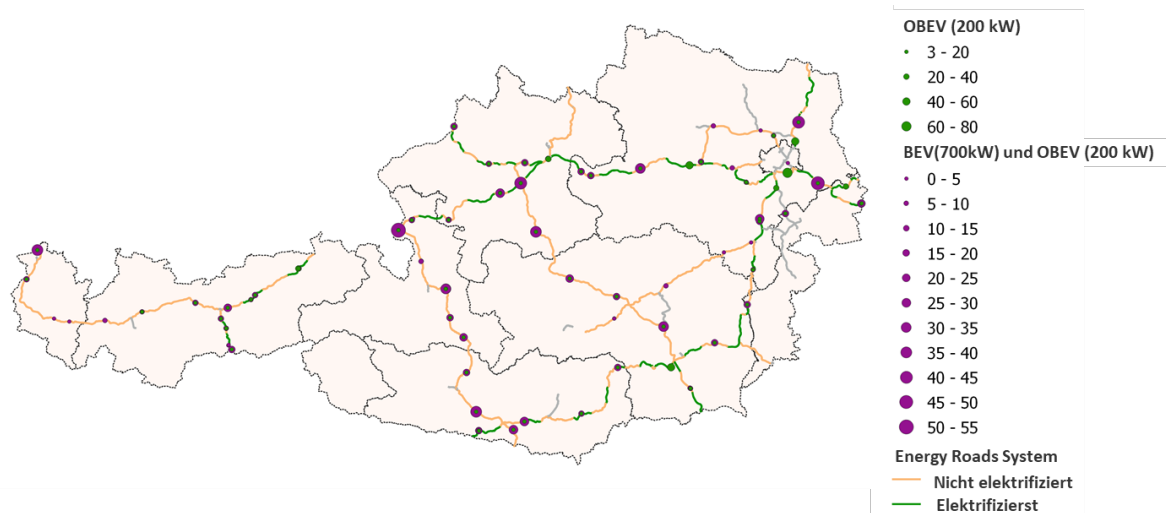
Die Nutzung von Synergien bedeutet, einfachere und schnellere Planungs-, Genehmigungs- und Bauverfahren für dynamische und stationäre Ladeinfrastruktur für Lkws und auch Pkws, eine bessere Ausnutzung der Infrastruktur und geringere Kosten. Insbesondere relevant ist auch, ob und wie effizient Stromangebot und -nachfrage zeitlich synchronisiert und räumlich verteilt werden können und wie der Ladetechnologie-Infrastrukturaufbau für den gesamten Straßenverkehr, Personen- und Güterverkehr, gemeinsam geplant werden kann. Diesbezügliche Analysen wurden in Jöhrens (2022) detailliert durchgeführt.

Bezüglich der Synchronisation von Stromangebot und -nachfrage ist der Gesamtenergie- und Leistungsbedarf sowie die Lastprofile für elektrische Pkw und Lkw mit stationärer und dynamischer Energieversorgung sowohl entlang der Autobahnen als auch an anderen stationären Ladeinfrastrukturen relevant. Mit diesen können die benötigten Kapazitäten für Netzanschlüsse entlang des Autobahn- und Schnellstraßennetzes entsprechend ausgelegt werden und die vorgelagerten Netzebenen optimiert geplant und ausgebaut werden.

OEMs und andere Stakeholder in Deutschland haben die Verfahrensdauern für den Stromnetzausbau als eine der größten Herausforderungen für den Markthochlauf von E-Mobilität identifiziert. Durch eine kombinierte und langfristige Betrachtung der Stromnachfrage von Pkw und Lkw gemeinsam können nicht nur Kosten gespart werden, sondern auch die Anzahl der Genehmigungs- und Netzanschlussverfahren reduziert werden. Die Nutzung dieses Synergiepotenzials kann zu einer früheren zeitlichen Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur von Lkw führen.

Auch für den Güterverkehr alleine ergeben sich Synergiepotenziale. So beschreibt das deutsche Diskussionspapier über „Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr“ (Plötz, et al., 2021), dass sich Oberleitungs- und Schnellladeinfrastruktur langfristig ergänzen können. Das vorgestellte Modell geht davon aus, dass Oberleitungsinfrastruktur auf hochbefahrenen Strecken zum Einsatz kommt und Schnellladeinfrastruktur zur Erschließung der Fläche eingesetzt wird. Vereinfachte erste Analyseergebnisse für die Ausdehnung der ERS-Infrastruktur und die Anzahl an Schnellladestationen am Autobahn- und Schnellstraßennetz in Österreich nach einem solches Modell sind für ein 50 % O-BEV und 50 % BEV-Szenario sind in Abbildung 54 illustriert. Detaillierte Analysen für einen gemeinsamen Aufbau von ERS- und Schnellladeinfrastruktur für O-BEV und BEV werden empfohlen.

Abbildung 54: Vereinfachtes gemeinsames Schnelllade- und ERS-Infrastrukturnetz in Österreich



Quelle: AEA

Aus Sicht der Stromnetzbetreiber ist die zeitliche und räumliche Verteilung der Leistung von Ladevorgängen für Zero-Emission-Fahrzeuge wichtig. Im Prinzip ist der Netzausbaubedarf höher, je schneller geladen wird, je höher die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen ist, je stärker diese mit sonstigen Lastkurven zeitlich übereinstimmen und je weniger diese mit Erzeugungskurven von erneuerbaren Energien übereinstimmen. Ein wichtiger zusätzlicher Faktor ist die räumliche Konzentration von Ladevorgängen und die verfügbaren Netzkapazitäten im Hochspannungsnetz (eventuell Anfangs auch in Mittelspannungsnetzen).

BEV-Lkw haben den Vorteil, dass diese zu ca. 50 % nachts langsam (d.h. mit geringerer Leistung) geladen werden können. Nachts ist die Last im Netz geringer, allerdings gilt dies auch für die erneuerbare Stromerzeugung. Die restlichen 50 % des BEV-Energiebedarf kann bei gegebenen Zeitressourcen unter Tags mit mittlerer Leistung in Depots und an Destination oder aber mit hoher Leistung an Schnellladepunkten geladen werden. Die begrenzte Verfügbarkeit von Schnellladepunkten werden bei steigender Nachfrage zu einer Verstetigung ihrer Nutzung und damit auch der Netzbelastung führen. Dadurch können extreme Lastspitzen verhindert werden.

O-BEV-Lkw haben ein anderes Ladeprofil, diese können zu ca. 70 % bis 80 % unter Tags an der ERS-Infrastruktur relativ langsam und ca. 20 % sehr langsam nachts geladen werden. Im Sommer kann so die gleichzeitige Stromerzeugung von PV-Anlagen besser genutzt werden. Aus derzeitiger Sicht kann die Kombination von BEV und O-BEV Lkw-Flotten mit deren unterschiedlichen Ladeprofilen zu Vorteilen führen. Durch die Kombination sind die Lastprofile von ZEM-Fahrzeugen im Netz breiter, und ebenfalls räumlich stärker verteilt. Netzlasten würden z. B. nicht nur an Lkw-Stellplätzen auftreten, sondern auch entlang der Fahrbahn.

7 Wirtschaftliche Analyse

„Wie hoch sind die Gesamtkosten der unterschiedlichen Systeme für die jeweilige, zu errichtende Infrastruktur über die gesamte Lebensdauer (Errichtung, bauliche Erhaltung, betrieblicher Aufwand)? Welche Kosten entstehen den Transportunternehmen für die Umstellung auf geeignete Fahrzeuge?“

7.1 ERS-Infrastrukturkosten

Die zu erwartenden Gesamtkosten sind eine wichtige Grundlage für die Entscheidung über die Errichtung einer ERS-Infrastruktur. Die Investitionskosten werden im Folgenden dargestellt. Die zu errichtende Infrastruktur wurde in Kapitel 6.2.2 beschrieben. Die Annahmen der spezifischen Kosten für die ERS-Infrastruktur, sowie für stationäre Ladeinfrastruktur und für das Tanken von Wasserstoff werden im Anhang IV im Detail beschrieben.

7.1.1 CAPEX dynamisches Laden

Die Investitionskosten für die ERS-Infrastruktur des TEN-V Kernnetzes in Österreich für die Anfangsphase und für die Endphase sowie für das TEN-V-Gesamtnetz für die Endphase sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Die Werte sind nicht additiv zu verstehen: Beispielsweise sind in den Kosten für den Ausbau der TEN-V-Kernnetz-Endphase auch die Kosten für die Anfangsphase enthalten. Es müssen nicht beide Werte addiert werden.

Tabelle 15: CAPEX dynamisches Laden ERS (in Mio. EUR), CLR-Szenario, 50 % Abdeckungsgrad

Investitionskosten in Mio. EUR nach Phase und Infrastruktur	TEN-V-Kernnetz, Anfangsphase (circa 5 % O-BEV Anteil)	TEN-V-Kernnetz, Endphase (<50 % O-BEV Anteil)	TEN-V-Gesamtnetz, Endphase (<80 % O-BEV Anteil)
Netzbereitstellung	100 - 140	260 - 290	430 - 480
Leitung und Masten	550 - 830	550 - 830	900 - 1.350
Unterwerke	150 - 220	440 - 650	790 - 1.180
Schutzeinrichtungen	10 - 110	10 - 110	20 - 180
Sonstiges	70 - 120	100 - 160	170 - 270
Gesamt	880 - 1.400	1.360 - 2.040	2.310 - 3.460
Spezifische Kosten je Kilometer [Mio. EUR/km] (beide Richtungen)	1,6 - 2,6	2,5 - 3,7	2,6 - 3,8
Spez. Kosten je installierter Leistung [Mio. EUR/MW](beide Richtungen)	1,8 - 2,9	0,9 - 1,4	0,9 - 1,3

Quelle: AEA, eigene Berechnungen

Für die Anfangsphase des TEN-V-Kernnetzes wird bereits dieselbe Anzahl an Oberleitungen und Masten wie für die Endphase benötigt. Daher sind die Investitionskosten anfangs bereits hoch. Die Investitionskosten für den Ausbau eines Startsystems für die ERS-Infrastruktur auf dem TEN-V-Kernnetz würde sich im Bereich von 880 bis

1.400 Mio. EUR bewegen. Für den Endausbau im TEN-V-Kernnetz kann mit 1.360 bis 2.040 Mio. Euro gerechnet werden. Um diese Investitionskosten einordnen zu können, sei auf die Kostenschätzung des Semmering-Basistunnels von 3,9 Mrd. Euro verwiesen (Wiener Zeitung, 2022).

Die spezifischen Kosten je Kilometer (EUR/km) und je installierter Unterwerks-Leistung (EUR/MW) ändern sich je nach Ausbaunetz und Phase, da die bereitgestellte Leistung bzw. Energiemenge je Kilometer in späteren Phasen durch den modularen Zubau von Unterwerken erhöht wird. Die in der vorliegenden Studie errechneten Investitionskosten liegen in einem ähnlichen Bereich wie vergleichbare Studienergebnisse für Deutschland.

Eine Machbarkeitsstudie für Deutschland (Fraunhofer, 2017) weist für die Investitionskosten für ERS-Infrastruktur für O-BEV in der Startphase 1,5 Mio. EUR bis 1,9 Mio. EUR/km und für die Endphase spezifische Kosten von 3,9 bis 4,4 Mio. EUR/km aus (für die Endphase wird hier mit höheren maximalen Leistungen gerechnet). Laut einem Diskussionspapier des Forschungsprojekts BOLD (Plötz, et al., 2021) werden von den folgenden Instituten in Studien die jeweiligen spezifischen Kosten angenommen: PIARC: 2,2 – 2,4 Mio. EUR/km, StratOn 2,55 bis 3,05 Mio. EUR/km, Boston Consulting: 2,2 Mio. EUR/km, und Ifeu: 1,9 bis 2,2 Mio. EUR/km.

Die Kosten in der vorliegenden Studie sind tendenziell höher als in Deutschland. Dies hat zwei Hauptgründe. In der vorliegenden Studie werden die Netzanschlusskosten als Teil der Systemkosten bewertet und somit miteingerechnet. Zudem wurde bei der Bestimmung der Worst-Case-Kosten die starken Kostensteigerungen für elektrische Anlagen in den letzten Jahren berücksichtigt und für die kommenden Jahre fortgeschrieben.

7.1.2 CAPEX stationäres Laden

Die Investitionskosten für das stationäre Laden von O-BEV sind in Tabelle 16 angeführt. In anderen Analysen zu O-BEV werden sie nicht gesondert ausgewiesen. Es wird beim stationären sowie beim dynamischen Laden angenommen, dass 50 % der Anschlüsse auf Netzebene 5 und 50 % der Anschlüsse auf Netzebene 4 erfolgen. Bei Anschlüssen auf Netzebene 4 werden die Kosten der Zuleitungen zusätzlich eingerechnet.

Die Kosten der Netzbereitstellung in der Anfangsphase sind aufgrund der benötigten Anschlussleitungen hoch. Die ermittelten Investitionskosten können die Investitionskosten einer ERS-Infrastruktur um mehr als 10 % erhöhen.

Tabelle 16: CAPEX stationäres Laden O-BEV (in Mio. EUR), CLR-Szenario, 50% Abdeckungsgrad

Investitionskosten in Mio. EUR nach Phase und Infrastruktur	TEN-V-Kernnetz, Anfangsphase (circa 5 % O-BEV Anteil)	TEN-V-Kernnetz, Endphase (<50 % O-BEV Anteil)	TEN-V-Gesamtnetz, Endphase (<80 % O-BEV Anteil)
„Schnellladen“ (200 kW)	19	186	199
Destination (100 kW)	19	191	204
Public overnight (22 kW)	6	94	100
Depot overnight (22 kW)	10	141	151
Netzbereitstellung	70	143	172
Gesamt	124	755	826

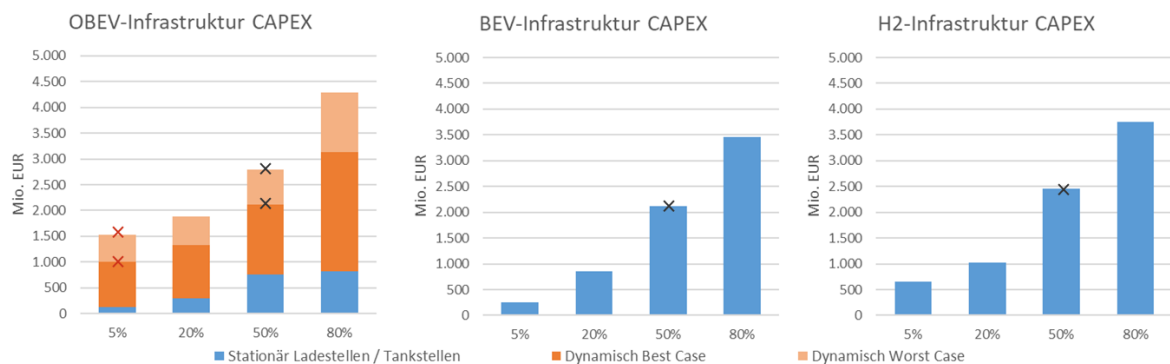
Quelle: AEA, eigene Berechnungen

7.1.3 Vergleich

In Abbildung 55 werden die Investitionskosten für die Infrastruktur für O-BEV, BEV und FCEV verglichen. Die Kosten für die O-BEV wurde detailliert und inklusive Best-Case und Worst-Case für dynamisches Laden analysiert. Für BEV und FCEV-Lkw wurde diese detaillierte Untersuchung nicht durchgeführt. Verschiedene Schlüsse können aus dieser Gegenüberstellung gezogen werden:

1. In der Anfangsphase sind die Investitionskosten für die Infrastruktur für O-BEV deutlich höher als für BEV und FCEV-Lkw.⁹
2. Bei einer optimalen Nutzung des O-BEV TEN-V-Kernetzes (50 % der Lkw-Flotte nutzt die ERS-Infrastruktur) liegen die Investitionskosten im Best-Case im Bereich der Kosten der BEV-Infrastruktur.
3. Wenn die Investitionskosten annualisiert betrachtet werden, ändert sich das Bild deutlich zu Gunsten der O-BEV-Infrastruktur. Dies liegt an der längeren Abschreibungs- und Nutzungsdauern für die ERS-Infrastruktur. Für die ERS-Infrastruktur ist von Abschreibungsdauern von 20 Jahren, für stationäre Ladeinfrastruktur und H₂-Tankstellen von 10 Jahren auszugehen.

Abbildung 55: Vergleich der Lade-/Tankstelleninfrastruktur für O-BEV, BEV und FCEV-Lkw bei unterschiedlicher Flottendurchdringung der jeweiligen Antriebsart



Quelle: AEA, eigene Berechnungen

7.2 Total Cost of Ownership

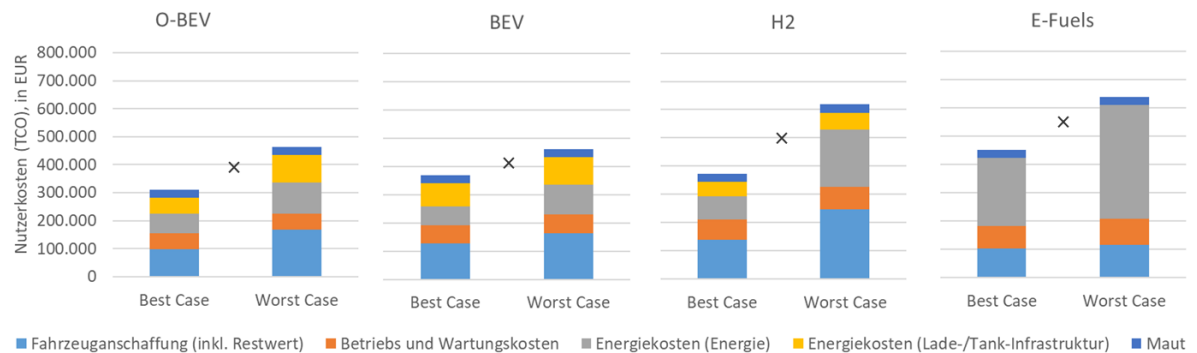
Betrachtungen der Total Cost of Ownership (TCO) ermöglichen es, die Gesamtkosten des Betriebs von Lkws mit unterschiedlichen Antriebsarten zu vergleichen. Dieser Vergleich berücksichtigt Anschaffungskosten der Lkw sowie die laufenden Kosten wie Wartungskosten, Energiekosten und Mautkosten für fünf Jahre, Nutzungsdauer, 120.000 Kilometer pro Jahr und 15 % Fahrzeugrestwert. Die laufenden Kosten werden mit einem Diskontierungszinssatz von 5% abgezinst. Antriebsunabhängige Fixkosten und Personalkosten werden nicht berücksichtigt, da sie auf den Kostenvergleich der Antriebstechnologien keinen Einfluss haben. Die Methode und Zwischenergebnisse werden in Annex V detailliert beschrieben.

Die Ergebnisse der durchgeführten TCO-Berechnungen (Abbildung 56) berücksichtigen das CLEARER-Szenario mit jeweils 50 % Flottendurchdringung und entsprechendem Infrastrukturausbau für die unterschiedlichen Antriebstechnologien. Die mittleren TCO-Kosten (Kreuze in der Abbildung) liegen bei O-BEV und BEV bei ca.

⁹ Ein relativ großer Caveat sind die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff und die relativ optimistischen Annahmen welche der Wasserstoff-Tank- und Transportinfrastruktur hinterlegt sind.

400.000 EUR, bei FCEV bei ca. 500.000 EUR und bei mit E-Fuels betriebenen Lkws bei ca. 550.000 EUR. Dies zeigt einen klaren Kostenvorteil von O-BEV und BEV Lkw gegenüber FEV und mit E-Fuels betriebenen Lkws.

Abbildung 56: Total Cost of Ownership Vergleich O-BEV, BEV, FCEV und E-Fuel Lkw



Quelle: AEA, eigene Berechnungen

In der vorliegenden Studie wurden die möglichen TCO-Ergebnisse zeitlich nicht detailliert aufgeschlüsselt.¹⁰ Die implizierte Annahme aufgrund einer als realistisch eingeschätzten zeitlichen Entwicklung ist, dass für Jahr 2030 die TCO-Kosten näher an den Worst Case und im Jahr 2040 näher am Best Case Ergebnissen liegen. Dies trifft vor allem für Wasserstoff und E-Fuels zu, da die Kosten für die Treibstoffe bzw. bei FCEV-Lkws bei den Fahrzeugen voraussichtlich Zeit benötigen, um niedrigere Kosten und Preise zu erzielen. Die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff bzw. E-Fuels zu einem wettbewerbsfähigen Preis muss stark hinterfragt werden.

Nach dieser Leseart und unter Berücksichtigung der TCO-Analyse wäre der Aufbau einer ERS-Infrastruktur und die Nutzung von O-BEV-Lkw insbesondere dann sinnvoll, wenn es zu weniger signifikanten Verbesserungen in Bezug auf den spezifischen Energiegehalt von Traktionsbatterien (kWh/kg) oder Batteriekosten (EUR/kWh) kommen würde, keine ausreichende Anzahl an Batterien zur Verfügung steht (mit Auswirkung auf Batteriepreise) und wenige stationäre Ladestellen im hochrangigen Straßennetz zur Verfügung stehen. Eine Unterscheidung von Batteriekosten und Batteriepreisen ist ebenfalls empfehlenswert. Bei hoher Nachfrage kann die Preisentwicklung von der Kostenentwicklung abweichen. Sinkende Fertigungskosten von Batterien bedeuten dann nicht unbedingt, dass die entsprechenden Preise ebenfalls sinken. In all diesen Fällen können O-BEV-Lkw deutliche Kostenvorteile im Vergleich mit BEV-Lkw entwickeln.

¹⁰ Für eine detailliertere TCO-Analyse siehe etwa Hacker, et al., 2020.

7.3 Volkswirtschaftliche Effekte

„Welche volkswirtschaftlichen Effekte sind durch die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs zu erwarten?“

Für die Herleitung der volkswirtschaftlichen Effekte werden die durch die Maßnahmen ausgelösten Investitionen anhand von Input-Output-Multiplikatoren bewertet. Die Methode wurde in den 1930er-Jahren von Wassily Leontief entwickelt. Sie macht die Zusammenhänge einer arbeitsteiligen Wirtschaft und die Beiträge der einzelnen Wirtschaftsbereiche zur Wertschöpfung sichtbar. Dadurch kann eine Abschätzung der direkten und indirekten Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte erfolgen. Als direkte Effekte werden die Veränderung des Outputs, der Wertschöpfung und der Beschäftigung bezeichnet, die aufgrund von Nachfrageimpulsen in den unmittelbar betroffenen Wirtschaftsbereichen entstehen. Neben den unmittelbar betroffenen Wirtschaftsbereichen wirken Investitionen auch auf jene Sektoren, die Vorleistungen für den unmittelbar betroffenen Wirtschaftszweig erbringen. Diese indirekten Effekte entstehen nicht in dem unmittelbar von der Investition betroffenen Wirtschaftsbereich, sondern durch Produktionsverflechtungen der Wirtschaft. Diese sekundären Effekte wurden in EnergyRoads nicht berücksichtigt.

Für die Interpretation der Ergebnisse der Berechnung von Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten ist die Abgrenzung der ermittelten Effekte von Bedeutung. In der vorliegenden Analyse wurden die Investitionseffekte errechnet. Die Investitionseffekte zeigen, welche Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch Investitionen rund um ERS-Infrastruktur und O-BEV-Lkw ausgelöst werden können. Die resultierenden Beschäftigungseffekte zeigen, wie viele Arbeitseinheiten erforderlich sind, um die zusätzliche Nachfrage zu befriedigen. Diese zusätzlichen Arbeitseinheiten können aber nicht dahingehend interpretiert werden, dass auch im gleichen Ausmaß neue Arbeitsplätze geschaffen werden. Ob und in welchem Ausmaß tatsächlich neue Arbeitsplätze geschaffen werden, hängt unter anderem von der tatsächlichen Arbeitsauslastung der Beschäftigten und von der Beschäftigungselastizität im jeweiligen Wirtschaftsbereich ab. Darüber hinaus geht aus der Analyse nicht eindeutig hervor, wie lange die jährlich zusätzlich geschaffenen Arbeitsplätze erhalten bleiben.

Nicht berechnet wurden grundsätzlich:

- Effekte durch verdrängte Investitionen: Wenn z. B. ERS-Infrastruktur und O-BEV-Lkw anstatt von stationärer Ladeinfrastruktur und BEV oder H₂-Infrastruktur und FCEV-Lkw angeschafft wird, wird Wertschöpfung und Beschäftigung durch die nicht zusätzlich nachgefragte alternative Infrastruktur und Lkw verdrängt.
- Budgeteffekte: Ist die Nutzung von O-BEV-Lkw günstiger oder teurer als konventionelle bzw. alternative Lkw, führt dies zu Ersparnissen oder Mehrausgaben bei den Lkw-Nutzern. Dies hat einen Einfluss auf andere Ausgaben bzw. das Haushaltsbudget.
- Dynamische Effekte und Außenhandelseffekte (z. B. Effekte der Substitution von importiertem Wasserstoff durch inländische Energieträger)

Ergebnisse

Für die Infrastruktur des TEN-V-Kernnetz in der Endphase für 50 % der N3-26 Flotte für O-BEV-Lkw (nach dem CLEARER-Szenario) und für die Fahrzeuge sind Neuinvestitionen in der Höhe von 5.760 Mio. EUR notwendig. Die Kosten für die ERS-Infrastruktur liegen bei 1.900 Mio. EUR und die für Fahrzeuge bei 3.870 Mio. EUR. Diese

Kosten ergeben sich als Mid-Case-Annahme (Mittelwert aus Best-Case und Worst-Case, in etwa 27.500 Fahrzeuge).

Es wird angenommen, dass ca. 80 % der 1.900 Mio. EUR Investitionskosten für die ERS-Infrastruktur inländisch wirksam sind. Bei den Fahrzeugen sind 40 % der Investitionskosten inländisch wirksam. Es wird weiters angenommen, dass diese inländischen Investitionen für die jeweiligen Infrastrukturkomponenten bzw. Fahrzeugen in den in Abbildung 57 angeführten ÖNACE Sektoren wirksam werden.

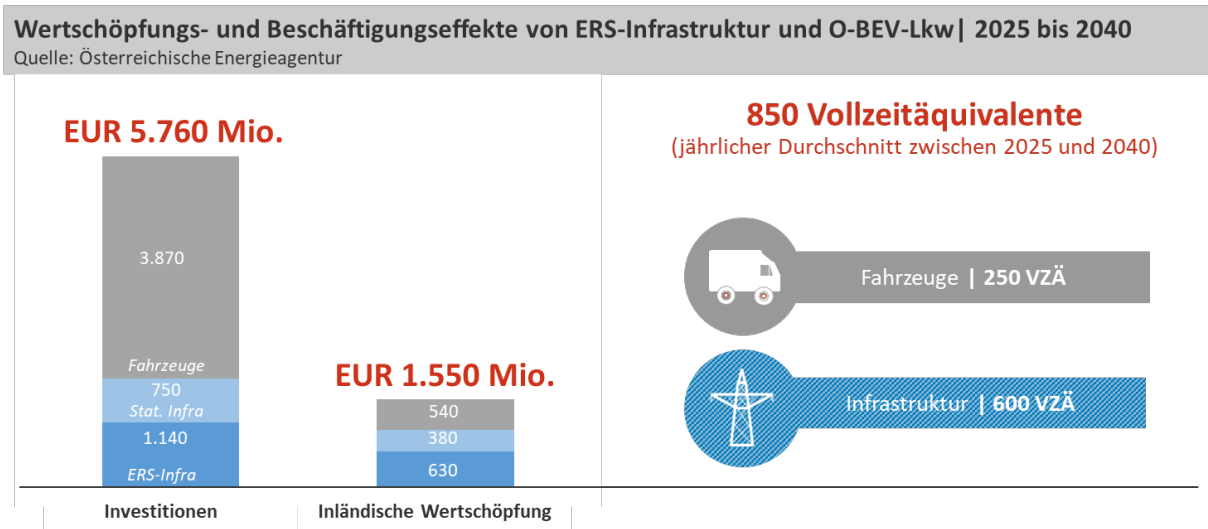
Abbildung 57: Multiplikator-tabelle der Investitionen für O-BEV

ÖNACE	ERS-Untwerke	ERS-Masten	ERS-Oberleitungen	ERS-Schutzeinrichtungen	ERS-Projektierung	ERS-Netzanschluss	O-BEV stationäres Laden	O-BEV Netzanschluss	O-BEV Fahrzeug
25 Metallerzeugnisse	-	60 %	60 %	-	-	-	-	-	-
27 Elektrische Ausrüstungen	80 %	-	-	85 %	-	-	80 %	-	-
29 Kraftwagen und Kraftwagenanteile	-	-	-	-	-	-	-	-	100 %
33 Reparatur und Instandhaltung von Maschinen und Ausrüstung	-	15 %	30 %	-	-	-	-	-	-
35 Energie und Dienstleistungen der Energieversorgung	-	-	-	-	-	100 %	-	100 %	-
42 Tiefbauten und Tiefbauarbeiten	5 %	5 %	-	-	-	-	5 %	-	-
43 Bauinstallations- und Ausbauarbeiten	10 %	10 %	-	10 %	-	-	10 %	-	-
71 Dienstleistungen von Architektur- und Ingenieurbüros	5 %	10 %	10 %	5 %	100 %	-	5 %	-	-

Quelle: AEA, getroffene Annahmen

Mit den Input-Output-Tabellen der Statistik Austria (Statistik Austria, 2020a) lassen sich damit die inländische Wertschöpfung und die inländisch unterstützten Arbeitsplätze ermitteln. Für das betrachtete Szenario betragen die österreichische Wertschöpfung 1.550 Mio. EUR und die jährlichen gesicherten/geschaffenen Jobs im Zeitraum 2025 bis 2040 in Österreich 850 Vollzeitäquivalente, siehe Abbildung 58.

Abbildung 58: Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte von ERS-Infrastruktur und O-BEV-Lkw 2025 bis 2040



Quelle: AEA, eigene Berechnungen

Die nationale Wertschöpfung für ERS-Infrastruktur, gerade Masten und Oberleitungskabelproduktion, dürfte höher sein als bei BEV für die Batterieproduktion.

8 Betreiber- und Erlösmodelle

*„Welche Betreibermodelle sind für die notwendige Elektrifizierungsinfrastruktur denkbar?“
 „Welches Erlösmodell könnte zur Refinanzierung der Gesamtkosten gewählt werden?“*

Betreiber- und Erlösmodelle hängen stark von den rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen ab. Drei wesentliche Aspekte des Betreibermodells sind das Beschaffungs- und Organisationsmodell, das Refinanzierungsmodell und das Abrechnungsmodell (Hacker, et al., 2020).

8.1 Rechtlich-regulatorische Rahmenbedingungen

Bei ERS-Systemen, ähnlich wie bei alternativen Antriebsarten, kommt es zu einem Henne-Ei-Problem mit mehreren involvierten Parteien:

1. EU/staatliche Institutionen,
2. Infrastrukturbereitstellende Institution,
3. Fahrzeugindustrie und
4. Logistikunternehmen/Versender.

Erst wenn alle Gruppen zum Ergebnis kommen, dass die jeweils anderen Gruppen in die Technologie investieren werden, dürften sie ihrerseits zu entsprechenden Investitionen bereit sein. In einer praktischen Sichtweise müssen die EU/staatliche Institutionen die rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen schaffen, bevor die infrastrukturbereitstellende Institution eine ERS-Infrastruktur aufbaut (ausgenommen Test- bzw. Pendelstrecken).

Diese rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen müssen so attraktiv sein, dass die infrastrukturbereitstellende Institution die ERS-Infrastruktur aufbaut, Logistikunternehmen/Versender O-BEV Fahrzeuge kaufen und OEMs für diese Fahrzeuge somit einen Markt haben. Dies kann unter anderem durch die Schaffung von Rechtssicherheit zur Anerkennung von ERS-Infrastruktur als Teil der Straße in der EU-Wegekostenrichtlinie erfolgen (siehe Kapitel 8.2). Dies ermöglicht, dass die ERS-Infrastruktur auch durch Nicht-Nutzer mit Ausnahme anderer ZEM-Fahrzeuge refinanziert wird. Dies wiederum reduziert das Bedarfsrisiko und Einnahmenrisiko für infrastrukturbereitstellende Organisationen sowie die Kosten für Logistikunternehmen/Versender welche auf O-BEV umsteigen. Durch eine solche Gestaltung der rechtlichen Rahmenbedingungen kann ein großer Teil das Henne-Ei-Problem gelöst werden, da die Refinanzierung der Infrastruktur bereits vor der vollen Auslastung sichergestellt werden kann.

In Hinsicht auf einen möglichen System-Roll-Out wäre die Vorbereitung der notwendigen Änderungen der rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen für ERS-Infrastruktur in Österreich naheliegend. Eine gute Grundlage hierfür bietet die Studie „Abrechnungssysteme und -methoden für elektrisch betriebene Lkw sowie deren interoperable Infrastrukturen im europäischen Kontext“ des Projektes Amelie I (Hartwig, 2020). Eine solche Vorbereitung kann von Vorteil sein, um zeitnah auf eine Entscheidung über die Errichtung einer oberleitungsgebundenen ERS-Infrastruktur in einem europäischen Frontrunner-Staat oder eine akkordierte europäische Entwicklung zu reagieren. In diesem Sinne muss die infrastrukturbereitstellende Institution – sei

es der Staat, ein Straßenbetreiber oder auch ein Investorengremium – in Vorleistung gehen und die Infrastruktur aufbauen bevor es eine O-BEV-Flotte gibt.

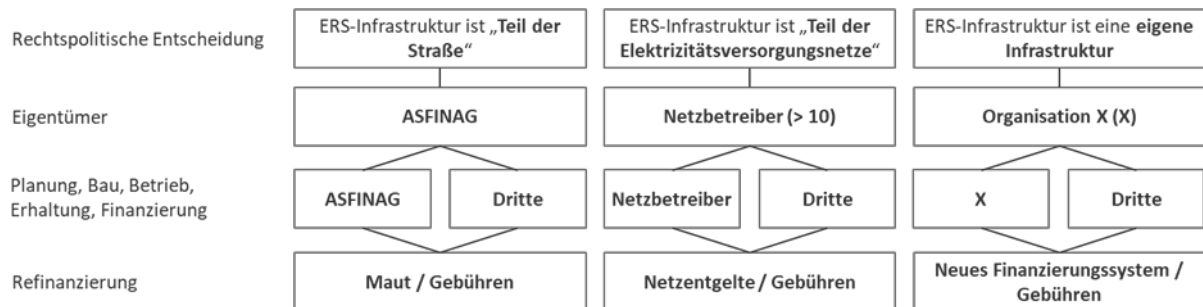
Um diesen ERS-Infrastruktur Aufbau zeitlich und wirtschaftlich zu optimieren, wäre die Sammlung von Erfahrungen auf nationaler Ebene durch einen zeitnahen Aufbau und Betrieb einer ERS-Teststrecke zu erwägen.

8.2 Beschaffungs- und Organisationsmodell

Durch das Beschaffungs- und Organisationsmodell wird der Eigentümer und die Rollenverteilung bestimmt. Die Bestimmung des Eigentümers erfordert eine rechtspolitische Entscheidung. Dabei gibt es drei Optionen (Abbildung 59).

- (1) Die ERS-Infrastruktur als **Teil der Straße**: Für Österreich bedeutet dies, dass die ASFiNAG Eigentümer der ERS-Infrastruktur wäre.
- (2) ERS-Infrastruktur als **Teil der Elektrizitätsversorgungsnetze**: Eigentümer der ERS-Infrastruktur sind die Landesenergieversorgern, eventuell auch die einzelnen städtischen Energieversorger. Insgesamt gibt es im Moment 122 Strom-Verteilnetzbetreiber in Österreich. Wie viele Verteilnetzbetreiber für ein funktionierendes ERS-System notwendig sind hängt von den zu elektrifizierenden Routen ab.
- (3) ERS-Infrastruktur als eine **Infrastruktur eigener Art**: Hierfür müsst eine neue Organisation geschaffen werden.

Abbildung 59: ERS-Infrastruktur Optionen für Eigentümer



Quelle: Darstellung und Anpassung auf Österreich durch AEA auf Grundlage von Knezevic G., 2022

Die Einstufung als „Teil der Straße“ ist die hauptsächlich beforschte Option in Deutschland. In Deutschland hat das Amelie I Projekt (Hartwig, 2020) die Rechtsmeinung dargelegt, dass die Oberleitungsinfrastruktur als Teil der Straße im Sinne des Bundesfernstraßengesetzes einzuordnen ist. Laut der ersten Teilstudie von Amelie II (Knezevic, 2022) wird dies auch von anderen Stimmen in der deutschen und europäischen Rechtspraxis geteilt.

Die Option der ERS-Infrastruktur als Teil der Straße bedingt in Österreich, dass die ASFiNAG als Eigentümer dieser Infrastruktur fungiert. Ihr Unternehmensgegenstand ist im ASFiNAG-Gesetz (§2 I) wie folgt definiert: „Als Unternehmensgegenstand [...] ist insbesondere vorzusehen die Finanzierung, die Planung, der Bau und die Erhaltung von Bundesstraßen, einschließlich der hierzu notwendigen und zweckdienlichen Infrastruktur“. Dieser Unternehmensgegenstand wird in einer Satzung konkretisiert. Diese Satzung kann mit Zustimmung des Bundesministers für Verkehr, Innovation und Technologie [sic!] und des Bundesministers für Finanzen geändert werden (§9 I ASFiNAG-Gesetz). §2 der Satzung führt die verschiedenen Unternehmensgegenstände auf. Hier werden Errichtung und Betrieb eine Infrastruktur für das dynamische Laden nicht genannt. Dies gilt in gleicher

Weise für eine stationäre Ladeinfrastruktur. Allerdings kann die Errichtung einer Infrastruktur für das stationäre Laden von E-Fahrzeugen für den Betrieb der Infrastruktur zwar nicht als notwendig, sicherlich aber als zweckdienlich angesehen werden und dürfte daher dem §2 I ASFiNAG-Gesetz genügen. Zumindest wenn eine entsprechende latente Nachfrage nach dynamischen Laden festgestellt werden kann, wäre auch diesbezüglich die Zweckdienlichkeit eher gegeben sein.

Bei allen Optionen muss die ERS-Infrastruktur zwangsläufig auf Flächen der ASFiNAG errichtet werden. Falls die ASFiNAG nicht Eigentümer der ERS-Infrastruktur ist, muss sie auf jedem Fall der Errichtung und Betrieb zustimmen. Die ASFiNAG hat hier das sogenannte Fruchtgenussrecht.

Grundsätzlich kann bei jeder Option der Eigentümer die Planung, Bau, Betrieb, Erhaltung und Finanzierung selber einnehmen oder Dritten überlassen. Für die Leistungserbringung durch Dritte gibt es diverse Möglichkeiten der funktionalen Privatisierung bzw. für öffentlich-private Partnerschaften. Hacker et al. (2020) haben diese Möglichkeiten für Deutschland analysiert. Es wird davon ausgegangen, dass für Österreich ähnliche Möglichkeiten existieren. Eine genauere Analyse der möglichen Optionen und deren Ausgestaltung für Österreich wird empfohlen.

Die Refinanzierungsmöglichkeiten sind je Option unterschiedlich. Die Finanzierung über Gebühren der Nutzer ist in allen drei Fällen möglich. Die direkte Mautfinanzierung ist nur im Falle der Einordnung der ERS-Infrastruktur als Teil der Straße möglich. Im nächsten Kapitel werden die unterschiedlichen Refinanzierungsoptionen genauer analysiert.

8.3 Refinanzierung der Infrastruktur

Bei der Finanzierung der Infrastruktur kann grundsätzlich zwischen der Finanzierung des Aufbaus (CAPEX – capital expenditures) und der laufenden Finanzierung des Betriebs (OPEX – operating expenditures) unterschieden werden. Die gewählte Option des Refinanzierungsmodells bestimmt, wer am Ende die Kosten für den Aufbau und den Betrieb der Infrastruktur trägt, unabhängig von der Vorfinanzierung des Aufbaus und des Betriebs. Grundsätzlich sind laut Hacker et al. (2020) vier Refinanzierungs-Modelle denkbar: durch den Staat aus Steuermitteln, alleine durch Nutzer:innen, durch Nutzer:innen und Nichtnutzer:innen und alleine durch Nichtnutzer:innen. Die Vor- und Nachteile dieser unterschiedlichen Refinanzierungsoptionen sind in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tabelle 17: Refinanzierungsoptionen und deren Vor- und Nachteile

Option	Vorteil	Nachteil
1. Durch Staat aus Steuermittel	Wenig komplex	Zusätzliche Belastung für den Verkehrshaushalt
2. Allein durch Nutzer:innen über Entgelt für Infrastrukturnutzung	Verursachergerecht, Internationale Anschlussfähigkeit relativ realisierbar, EU-rechtlich in WK-RL 2022 in Artikel 9 abgedeckt	Zusätzliche Belastung für Pioniere (gegebenenfalls Akzeptanzprobleme bei Nutzer:innen), lange Refinanzierungslücke durch die Hochlaufdauer, hoher Risikoaufschlag und dadurch schlechte Finanzierungsbedingungen
3. Durch Nutzer:innen und Nicht-Nutzer:innen gleichermaßen	Wenig komplex, internationale Anschlussfähigkeit relativ gut realisierbar, keine Refinanzierungslücke, Deutsche und schwedische Rechtsmeinungen geben an, dass ERS Infrastruktur als „Teil der Straße“ definiert und somit über die Maut abgerechnet werden kann	Wenig verursachergerecht (gegebenenfalls Akzeptanzprobleme bei Nichtnutzer:innen), rechtliche Machbarkeit ist zu prüfen (aufgrund WK-RL 2022 Artikel 9 derzeit fraglich)
4. Allein durch Nichtnutzer:innen via Anlastung externer CO₂-Kosten	Setzt Anreiz für CO ₂ -Reduktion (keine Änderung der Mautabrechnung notwendig), gut für erste Strecken geeignet, keine Refinanzierungslücke	Schafft sich irgendwann selbst ab (wenig für Endausbau geeignet), rechtliche Machbarkeit ist zu prüfen (aufgrund WK-RL 2022 Artikel 9 derzeit fraglich)

Quelle: AEA, Hacker et al. 2020

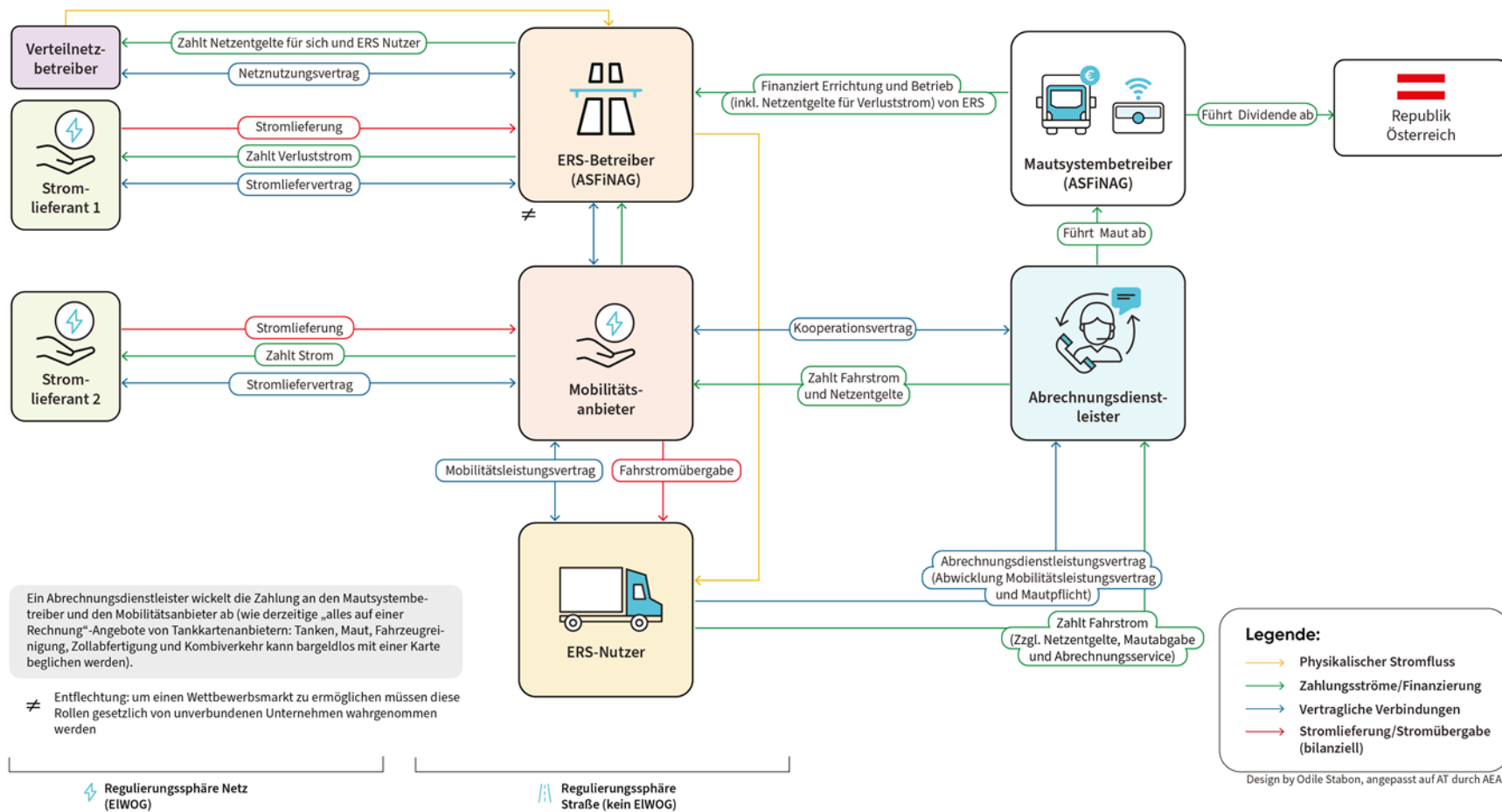
Ein Konsultationsprozess mit Vertreter:innen der Logistikbranche in Deutschland ergab laut Hacker et al. (2020), die klare Präferenz, die Kosten der ERS-Infrastruktur in die Lkw-Maut einzupreisen. Hauptgrund dafür ist die unkomplizierte Abrechnung. Dies würde zu einer gemeinschaftlichen Finanzierung durch Nutzer:innen und Nichtnutzer:innen führen. Auch aus Sicht des Infrastrukturbetreibers ist eine Finanzierung über die Maut durch Nutzer:innen und Nichtnutzer:innen am sinnvollsten um Refinanzierungslücken in der Hochlaufphase zu vermeiden. Dies kann auch das Bedarfsrisiko und Einnahmenrisiko fast vollständig reduzieren und somit die Finanzierungsbedingungen signifikant verbessern.

8.4 Abrechnungsmodell

Das Abrechnungsmodell ist das Bindeglied zwischen Infrastruktur- und Verkehrsmarkt (Hacker, et al., 2020). Im Projekt AMELIE 1 in Deutschland wurden unterschiedliche Abrechnungs- und Akteursmodelle untersucht. Das von deutschen Stakeholdern bevorzugte Vorzugsmodell, die „Nationale Variante 2“ (Knezevic, 2022) wurde in EnergyRoads für Österreich angepasst (Abbildung 60). Dieses Modell berücksichtigt technische, ökonomische und gesellschaftliche Anforderungen.

Das vorgestellte Abrechnungsmodell erlaubt für ERS-Nutzer:innen eine unkomplizierte Abrechnung der Stromrechnung für die Benutzung der Oberleitung sowie der Mautkosten. Hierfür werden Abrechnungsdienstleister einbezogen, welche bereits heute von einer Mehrzahl an Transportunternehmen zur Abrechnungsvereinfachung in Anspruch genommen werden (Knezevic, 2022). Der Abrechnungsdienstleister ist in der dargestellten Variante der Single-Point-of-Contact bzgl. der Strom- und Mautabrechnung für die ERS-Nutzer. Der Mobilitätsanbieter, eine Rolle welche am ehesten durch Energieversorgungsunternehmen oder Ladeinfrastrukturbetreiber erfüllt wird, stellt den Fahrstrom bereit. Der ERS-Betreiber stellt die ERS-Infrastruktur entlang der Autobahnen und Schnellstraßen bereit. Der ERS-Betreiber und der Mobilitätsanbieter müssen unverbundene Unternehmen sein, um einen Wettbewerbsmarkt zu ermöglichen. Es können somit mehrere Mobilitätsanbieter mit unterschiedlichen Stromlieferanten den Fahrstrom für ERS-Nutzer:innen bereitstellen. Der Verluststrom wird nach dieser Variante als Teil der betrieblichen Kosten gesehen und gemeinsam mit den weiteren Kosten des ERS-Betreibers mittels Maut refinanziert.

Abbildung 60: Variante für ein Abrechnungsmodell



Quelle: AMELIE II Nationale Variante 2 (Knezevic G., 2022), Anpassung auf Österreich durch AEA

Im Forschungsprojekt Amelie 1 wurden zwei Stufen für die Abrechnung während dem Markthochlauf vorgeschlagen. Nach aktuellen Analysen in Deutschland (Knezevic, 2022) bietet sich für den Zeitraum unmittelbar nach der Technologieentscheidung für die erste Phase im Hochlauf an, dass der Strombezug gegenüber ERS-Nutzer:innen nicht abgerechnet wird, sondern durch den ERS-Infrastrukturbetreiber kostenfrei bereitgestellt wird. In Stufe 2 sollten demnach ERS-Nutzer den Fahrstrom nach dem individuellen Verbrauch mit eichrechtskonformen Onboard-Zähler bezahlen. Die hierfür notwendigen Zähler sind in Entwicklung.

Neben der verbrauchsabhängigen Abrechnung ist auch die Abrechnung auf Basis von Mautabschnitten, Straßenkilometern oder als Flatrate möglich (Tabelle 18). Es ist wichtig, dass das Abrechnungsmodells zwischen Österreich und den Nachbarländern kompatibel ist.

Tabelle 18: Abrechnungsmodelle und deren Vor- und Nachteile

Option	Vorteil	Nachteil
1. Nach kWh (geeichter Zähler)	Verbrauchsabhängig der Energieabrechnung, Preisinzentiv für erhöhte Effizienz	Umstellung auf zertifizierte und geeichte Zähler, Zusätzliches System neben der Go-Box
2. Nach km (geeichtes Hodometer)	Wäre in Österreich mittels vorhandenem Mautsystem und Go-Boxen implementierbar, keine geeichten Zähler erforderlich	Nicht verbrauchsabhängig, rechtliche Machbarkeit ist zu prüfen
3. Nach Mautabschnitten	Wäre in Österreich mittels vorhandenem Mautsystem und Go-Boxen implementierbar, keine geeichten Zähler erforderlich	Nicht verbrauchsabhängig, rechtliche Machbarkeit ist zu prüfen
4. Flatrate	Wäre in Österreich mittels vorhandenem Mautsystem und Go-Boxen implementierbar, keine geeichten Zähler erforderlich	Nicht verbrauchsabhängig, rechtliche Machbarkeit ist zu prüfen

Quelle: Grundlage Knezevic G. 2022, Anpassung durch AEA

9 Roadmap und Empfehlungen

„Ist eine Ausrollung der betrachteten Elektrifizierungsinfrastrukturen mit dem Zeithorizont 2040 auf der Basis der Verfügbarkeit von Fachkräften, Fahrzeugen und Infrastrukturbestandteile möglich? Welche Engpässe gilt es in diesem Kontext besonders zu betrachten?“

Die Analysen in dieser Studie zeigen, dass die Errichtung einer oberleitungsgebundenen ERS-Infrastruktur technisch machbar ist. Sie ist erprobt und entsprechende Europäische Normen bzw. Ergänzungen zu Normen sind in Vorbereitung. Anpassungen von Verordnungen, Normen und Richtlinien sind allerdings vor dem großflächigen Einsatz von oberleitungsgebundenen ERS notwendig.

Ob eine Oberleitungsinfrastruktur in Österreich errichtet werden sollte, ist eine normative Frage. Bei Umsetzung einer solchen Infrastruktur sollten verschiedene vorbereitende Schritte umgesetzt werden. Aufgrund der Vorlaufzeiten für Planung und Aufbau der Infrastruktur sowie der oberleitungsfähigen Fahrzeugflotte schließt sich das verfügbare Zeitfenster, wenn die Technologie einen signifikanten Beitrag zur Klimaneutralität 2040 leisten soll.

Grundvoraussetzung für die ökologische und volkswirtschaftliche Sinnhaftigkeit einer Oberleitungsinfrastruktur ist ihre internationale Integration. Nur wenn der internationale Quell-, Ziel- und Transitverkehr über das dynamische Laden klimaneutral wird, machen umfassende Investitionen Sinn. EnergyRoads war in verschiedene internationale Austauschformate eingebunden. Europäische Länder wie die Niederlande, Belgien oder Ungarn haben Interesse an dieser Technologie gezeigt. Es gibt aber einen klaren Konsens darüber, dass die Voraussetzung für die Errichtung einer nationalen Oberleitungsinfrastruktur der konsequente Ausbau eines Systems in Deutschland ist. In Deutschland steht die Entscheidung zum Bau von zwei jeweils etwa 100 km langen Oberleitungsstrecken – den sogenannten Innovationsclustern – unmittelbar bevor. Die Umsetzung der Innovationscluster könnte als Pfadentscheidung für das dynamische Laden oder zumindest als Offenhalten dieser Option interpretiert werden, da sie auf einen Dauerbetrieb ausgerichtet und auf verkehrlichen Hauptstrecken verortet sind.

Um die Errichtung einer ERS-Infrastruktur zu ermöglichen sind **rechtliche und organisatorische Vorbereitungen** zu treffen. Dies umfasst die Analyse der notwendigen rechtlichen Änderungen und die Schaffung der rechtlichen Rahmenbedingungen, die Auswahl des Betreiber- und Erlösmodells mit vorhergehender vertiefender Analyse, den Aufbau von Strukturen, die Festlegung von Standards, Normen und Richtlinien sowie die Auswahl der prioritär zu elektrifizierenden Strecken. Hinsichtlich der Beteiligung der Nicht-Nutzer:innen an der Refinanzierung der Infrastruktur über die Maut ist die rechtliche Machbarkeit über die EU Wegekosten-Richtlinie zu prüfen. Eine genaue Analyse der Möglichkeiten der Leistungserbringung für Planung, Bau, Betrieb, Erhaltung und Finanzierung im Rahmen von funktionaler Privatisierung bzw. öffentlich-privater Partnerschaften wird ebenfalls empfohlen. Zur Sicherstellung der Anschlussfähigkeit stellt die intensive Mitarbeit in internationalen Gremien und Formaten sowie – vor allem deutschen und europäischen – Forschungsprojekten und Studien eine naheliegende Lösung dar.

Bezüglich der **Betreiber- und Erlösmodelle** ist der State-of-the-Art in diesem Bericht dargelegt. Für Planung und Betrieb können auf dieser Grundlage Rollenbilder mit spezifischen Funktionen und Aufgaben festgelegt werden. Bei einzelnen Aufgaben ist es im österreichischen Kontext naheliegend, welche Akteure sie einnehmen

können – oder auch nicht. Bezüglich der Erlösmodelle wurden verschiedene Varianten vorgestellt. Fraglich ist insbesondere, ob und wie Nicht-Nutzer:innen in die Finanzierung eingebunden werden können.

In dieser Studie wurde das österreichische Streckennetz hinsichtlich der Möglichkeit zur Errichtung einer Oberleitungsinfrastruktur auf Ebene einer Vormachbarkeitsstudie bewertet. Dies ist ein erster Schritt für die Beurteilung der Umsetzbarkeit, aber nicht hinreichend für die **Auswahl der prioritär zu elektrifizierenden Strecken**. Hier sind weitere Aspekte, insbesondere die Existenz von **Ankernutzern** – also Unternehmen die als Early Adopter sich zum Aufbau einer oberleitungsfähigen Lkw-Flotte bereiterklären – notwendig. Zu berücksichtigen ist zudem die Relevanz von Strecken für die Abwicklung des internationalen Verkehrs und eine detaillierte Planung. Es bietet sich hier insbesondere an, **internationale Machbarkeitsstudien zur Korridorführung** durchzuführen. Hinsichtlich der Identifizierung und Ansprache potenzieller Ankernutzer kann auf das Netzwerk von EnergyRoads aufgebaut werden. Der Stakeholder-Beteiligungsprozess zeigte eine Aufgeschlossenheit für das Thema, aber auch Ausbaupotenzial in Bezug auf die Bekanntheit und eine skeptische Erwartungshaltung.

Die internationale Einbettung erfordert ein System von einheitlichen Standards, um die Herausforderung des internationalen Schienenverkehrs mit unterschiedlichen Vorgaben für Lenkende, technischen Standards, Sicherheitsaspekten etc. zu vermeiden. Umfassende **Normierungsarbeiten** sind auf europäischer Ebene umgesetzt oder in Umsetzung. In bestimmten Fällen ist eine Umsetzung in nationale Normen notwendig.

Der vorliegende Entwurf der AFIR zum Ausbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe erwähnt Oberleitungssysteme als einen sich dynamisch entwickelnden Bereich, setzt aber keine verbindlichen Ziele für den Ausbau. Für die Mitte des Jahrzehnts ist ein Review vorgesehen. Da die AFIR aus einer Richtlinie (AFID) in eine unmittelbar umsetzende Verordnung überführt wird, ist fraglich ob stringente Zielvorgaben, die dann auch einen flächendeckenden Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur bedeuten würden, unbedingt notwendig sind. Vor allem an der europäischen Peripherie mögen andere Lösungen, wie Schienentransporte, die adäquatere Lösung sein. Es ist aber aus aktueller Perspektive schwer vorstellbar, wie ein konsequenter Ausbau einer ERS-Infrastruktur gänzlich ohne Verankerung im **Review der AFIR** funktionieren könnte. Eine Möglichkeit ist die Anrechnung auf andere Ausbauziele. So könnte die Gesamtkapazität der zu errichtenden stationären Ladeinfrastruktur durch den Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur reduziert werden. Zudem müsste die Oberleitungsinfrastruktur in geeigneter Form Eingang in den nationalen Strategierahmen finden, der entsprechend dem AFIR-Entwurf zu erarbeiten ist.

Verglichen mit der Situation in Deutschland kommt das Thema dynamisches Laden in Österreich nur am Rande vor. Bevor eine entsprechende Investition in den Aufbau einer ERS-Infrastruktur getätigt wird, müsste der **Bekanntheitsgrad und die Akzeptanz in der Bevölkerung, bei Infrastrukturbetreibern und Ankernutzern** steigen. Dies könnte ein wesentlicher Faktor für den Erfolg einer **ERS-Teststrecke** in Österreich sein.

In verschiedenen Ländern wurden Teststrecken für das dynamische Laden installiert. Dadurch wurde für oberleitungsgebundene Systeme mit ihrem hohen TRL die technische Machbarkeit nachgewiesen. Dementsprechend setzen Deutschland mit den Innovationsclustern und Schweden mit der Ausschreibung zur Elektrifizierung der E20 den nächsten Schritt zur Etablierung einer auf Dauer ausgerichteten ERS-Infrastruktur. Aus technologischen Gründen ist daher ein weiterer Praxistext im Sinne einer Teststrecke in Österreich nicht unbedingt notwendig. Vorausgesetzt, dass die Entwicklung einer ERS-Infrastruktur politisch ernsthaft erwogen wird, kann eine Teststrecke in Österreich aber aus drei Gründen Sinn machen:

- Technisch-systemische Besonderheiten: Im Stakeholder-Partizipationsprozess wurden zwei Aspekte genannt, die bei Umsetzung einer österreichischen Teststrecke berücksichtigt werden sollten, um einen Mehrwert zu erzielen:
 - Eine grenzüberschreitende Strecke mit gegebenenfalls unterschiedlichen Betreiber- und Abrechnungsmodellen oder gleichen Betreiber- und Abrechnungsmodellen angewendet von unterschiedlichen Organisationen
 - Eine Umsetzung in einem international noch nicht erprobten Setting. Von verschiedenen Expert:innen wurde hier insbesondere die Errichtung in einem Tunnel angeführt, aber auch in einem Streckenverlauf mit relevanten Steigungen oder die Entwicklung und Erprobung von ERS-Infrastruktur unter Grünbrücken.
- Öffentliche Bewusstseinsbildung: Die Bevölkerung anderer europäischer Länder zeigt sich skeptisch dem Thema gegenüber. In Österreich ist das Thema in der öffentlichen Wahrnehmung nicht präsent. Die Errichtung einer Teststrecke würde das Thema sichtbar machen, der öffentlichen Meinungsbildung dienen und könnte zur Akzeptanz beitragen.
- Capacity Building: Die Errichtung einer Teststrecke ist in vielerlei Hinsicht nicht mit der Hochskalierung der Systemausweitung im Rahmen der Vergabe von verschiedenen (Bau-)Losen vergleichbar. Im Rahmen der Entwicklung einer Teststrecke müssen Entscheidungen getroffen und Strukturen festgelegt werden, die Betreiber- und Erlösmodelle, Zuständigkeiten und Rollenverteilungen sowie die Entwicklung der benötigten Organisationsmodelle berücksichtigt. Die gewonnenen Erfahrungen können in der Hochskalierung des Systems Zeit und Kosten sparen.

10 Annex

10.1 Annex I – Annahmen spezifischer Energieverbrauch

Folgende allgemeine Annahmen werden für Fahrzeuge getroffen.

1. Die Masse der Fahrzeuge wird für Sattelzugmaschinen mit 40 t zulässigen Höchstgewicht berechnet und ist abhängig von der Antriebsart und der gewählten Reichweite der Batterie, bzw. einer Tankfüllung. Das Anhängergewicht wird bei allen Fahrzeugen mit 7.000 kg angenommen. Es wurden in dieser Analyse technische Parameter für Sattelzugmaschinen verwendet um den Energieverbrauch und die Kosten aller Fahrzeuge > 26 t darzustellen, da die verfügbare Literatur für die Entwicklung der technischen Parameter für andere Fahrzeugklassen in diesem Segment limitiert ist. Diese Vereinfachung kann zu einer leichten Überschätzung des Energieverbrauches führen. Allerdings werden andere mögliche Nutzer, wie Langstrecken-Busse oder Lkw >18 t, bzw. andere Faktoren wie erhöhter Rollwiderstand bei schlechterer bzw. nasser Fahrbahn sowie erhöhten Reifenschlupf bei schneebedeckter oder vereister Fahrbahn (dies kann laut der Environmental Protection Agency der Vereinigten Staaten zu einer Erhöhung des Treibstoffbedarfs um 7 % bis 35 % führen (Gov. CA, 2022)), vernachlässigt. Diese Faktoren können den Energieverbrauch erhöhen. Es wird vereinfacht angenommen, dass sich diese Vereinfachungen ausgleichen.
2. Für BEV und O-BEV wird die spezifische Energiedichte der Batterie für 2030 auf 240 Wh/kg angepasst. Laut BNEF (BNEF, 2021) lag 2020, die Energiedichte von Lithium-Ionen Batteriepacks bei ca. 170 Wh/kg, und es kann erwartet werden, dass sich dies bis 2030 auf 250 Wh/kg verbessert.¹¹ Weitere Batterietechnologieentwicklungen für andere Batterietypen, können theoretisch diese Energiedichten übersteigen.
3. Das durchschnittliche Gewicht des Frachtgutes für Lkw >26 t auf österreichischen Straßen, lag im Jahr 2019, inklusive Leerfahrten, bei ca. 13,9 t (siehe Analyse Trafility). Dies ist etwas niedriger als die Zuladung von Sattelzügen (40 t) von 15,44 t (laut (UBA, 2022)). Das ist plausibel nachdem in der vorliegenden Studie Lkw >26 t untersucht werden und sich dadurch die Zuladung im Durchschnitt reduziert. Es wird angenommen, dass sich dieses durchschnittliche Gewicht des Frachtgutes in Zukunft nicht verändert.
4. Die durchschnittliche Geschwindigkeit auf Autobahnen beträgt 80 km/h (22 m/s). Diese Geschwindigkeit wird auch für den Energieverbrauch abseits von Autobahnen verwendet. Dies ist eine vereinfachte Annahme.
5. Eine durchschnittliche projizierte Stirnfläche von Sattelzugmaschinen kann mit 10 m² angenommen werden (Delgado, 2017). Es wird angenommen, dass sich die Stirnfläche nicht verändert.
6. Der Fahrtwiderstand wird bei durchschnittlich 13°C und somit einer Luftdichte von 1,26 kg/m³ berechnet, da die durchschnittliche Tagestemperatur in Österreich bei ca. 13°C liegt (Laenderdaten.info, 2022). Durch diese durchschnittliche Tagestemperatur erhöht sich der Luftwiderstand auf 1,26 kg/m³ (im Vergleich zu Standard Test Konditionen von 20°C (1,204 kg/m³)). Für die maximale Leistung könnte mit -10°C und einer Luftdichte von 1,34 kg/m³ gerechnet werden. Dies wird allerdings im Weiteren vernachlässigt.
7. Der für die Beschreibung der Aerodynamik verwendete Faktor der Strömungswiderstandskoeffizient (CD) von Sattelzugmaschinen plus Anhänger wird mit 0,5 für das Jahr 2030 angenommen. Delgado (2017) hat in einer Literaturanalyse derzeitige CD-Werte von 0.47 bis 0.75 mit einem Medianwert von 0,61 gefunden. In

¹¹ T&E (TE, 2021a) rechnet mit 183 Wh/kg im Jahr 2020 und 318 Wh/kg im Jahr 2030. Laut VDE (2015) ist eine spezifische Energie von Lithium-Ionen-Batterien von bis zu 310 Wh/kg zu erwarten.

dieser Studie von Delgado (2017) werden unter anderem auch unterschiedliche Möglichkeiten beschrieben die Aerodynamik in Zukunft zu verbessern. Die Annahme eines CD-Wertes von 0,5 entspricht der Ergänzung von anhängenseitigen Paneelen und kurzen (50 cm) Heckverkleidungen. Langfristig wäre eine Reduktion des CD-Wertes auf 0,35 möglich, dies wird allerdings nicht in der hier durchgeführten Analyse berücksichtigt.

8. Der für den Rollwiderstand wichtige Faktor des Rollwiderstandskoeffizienten (CRR) wird mit 5,0 N/kN angenommen. Delgado hat für diesen CRR-Wert in der Literaturanalyse einen derzeitigen Median-Wert von 5,5 N/kN gefunden. Dies entspricht dem mittleren Wert von Reifen mit der Effizienzklasse C. Die angenommenen 5.0 N/kN entsprechen der Verwendung von Reifen der Effizienzklasse B. Langfristig wäre eine Reduktion auf 4.0 N / kN bei Verwendung von Klasse A Reifen möglich, dies wird allerdings ebenfalls nicht berücksichtigt.
9. Der durchschnittliche Wirkungsgrad von Motor, Getriebe, Radachsen, und Batterie oder Brennstoffzelle sowie Ladeinfrastruktur wird je Antriebsart wie folgt angenommen:
 - i. O-BEV: 0,82
 - ii. BEV: 0,85
 - iii. FCEV: 0,52
 - iv. Diesel/E-Fuels: 0,45

Da die Wirkungsgrade für diese Komponenten von vielen Faktoren abhängen, ist die Darstellung eines durchschnittlichen Wirkungsgrades eine Vereinfachung. In der Literatur werden für Lkw für die Bestimmung dieser Wirkungsgrade manchmal detaillierte Simulationen, z. B. mit dem Vehicle Energy Consumption calculation Tool (VECTO) durchgeführt. Dieses Tool wurde von der Technischen Universität in Graz für die Europäische Kommission zur Bestimmung von CO₂-Emissionen und Treibstoffverbrauch von N2 und N3 Fahrzeugen entwickelt. Eine solche Simulation wird in der vorliegenden Analyse nicht durchgeführt. Aus diesem Grund wurden die berechneten spezifischen Energieverbräuche den Simulationsergebnissen aus der Literatur gegenübergestellt.

10. Der Energieverbrauch der Nebenaggregate wird mit 0,07 kWh/km für alle Antriebe angenommen. Dies wurde aus Delgado (2017) abgeleitet. Die Studie Delgado (2017) beschreibt für eine Referenz Sattelzugmaschine einen Leistungsbedarf von Nebenaggregaten von 5,6 kW. Bei 80 km/h entspricht dies 0,07 kWh/km während der Fahrtzeiten. Der Energieverbrauch der Nebenaggregate während Standzeiten wird vernachlässigt. Fahrzeugbatterien werden mittels Wärmemanagementsystem in einem optimalen Temperaturbereich gehalten. Bei Li-Ion Batterien beträgt dieser circa 15 °C – 35 °C (Chen, 2016). Dies minimiert Verluste an Batterieleistung und Batterielebensdauer. BEV und O-BEV Batterien müssen deshalb im Sommer gekühlt und im Winter während Standzeiten geheizt werden, dies ist ein zusätzlicher Energieverbrauch welcher bei Nebenaggregaten (im Vergleich mit Diesel Lkw und der Annahme für die Leistung der Nebenaggregate) anfällt. Tests und Analysen zu dem hierfür notwendigen Energieverbrauch wurden nicht gefunden. Prinzipiell müsste der Energieverbrauch für BEV400 hierfür deutlich höher liegen als für einen O-BEV100, da die Batteriemasse größer ist. Nachdem hierzu keine Quelle gefunden wurden, musste dieser Aspekt vernachlässigt werden.
11. Beschleunigungs- bzw. verlorene Bremsenergie wird für einen Langstreckenzyklus spezifisch je Antriebsart abhängig vom Rekuperationswirkungsgrad eingerechnet. Für einen Referenz-Diesel Lkw für einen Langstrecken-Zyklus wurde in Delgado (2017) ein Anteil von 7 % des Energiebedarfs für Beschleunigung/Bremsen, bzw. ca. 0,2 kWh/km berechnet. Für BEV und O-BEV wird mit einem Rekuperationswirkungsgrad von 60 %, für FCEV mit 40 % gerechnet.
12. Der Luftwiderstand von Pantographen wird für den Energieverbrauch von O-BEV miteingerechnet. Laut derzeitigen Messwerten führt dieser zu 0,05 kWh/km bis 0,10 kWh/km zusätzlichen Energieverbrauch

während der Nutzung (laut Siemens White Paper „Siemens eHighway – Vehicle – Pantograph Evaluation of Aerodynamics“). Weitere Verbesserungen beim Design des Pantographen zur Reduktion des Luftwiderstands werden derzeit angestrebt. Wir nehmen trotzdem noch die vorhandenen Testergebnisse für die Berechnung an, und somit, dass der Pantograph einen mittleren zusätzlichen Energieverbrauch hat (~0,075 kWh/km) und während ca. 45 % der Fahrzeit genutzt wird (~0,035 kWh/km). Die % der Fahrzeit beinhalten als vereinfachte Annahme auch einen Anteil des zusätzlichen Luftwiderstandes während der Pantograph nicht genutzt wird.

13. Steigungswiderstände werden streckenabhängig für Autobahnen und Schnellstraßen berechnet und inkludiert.

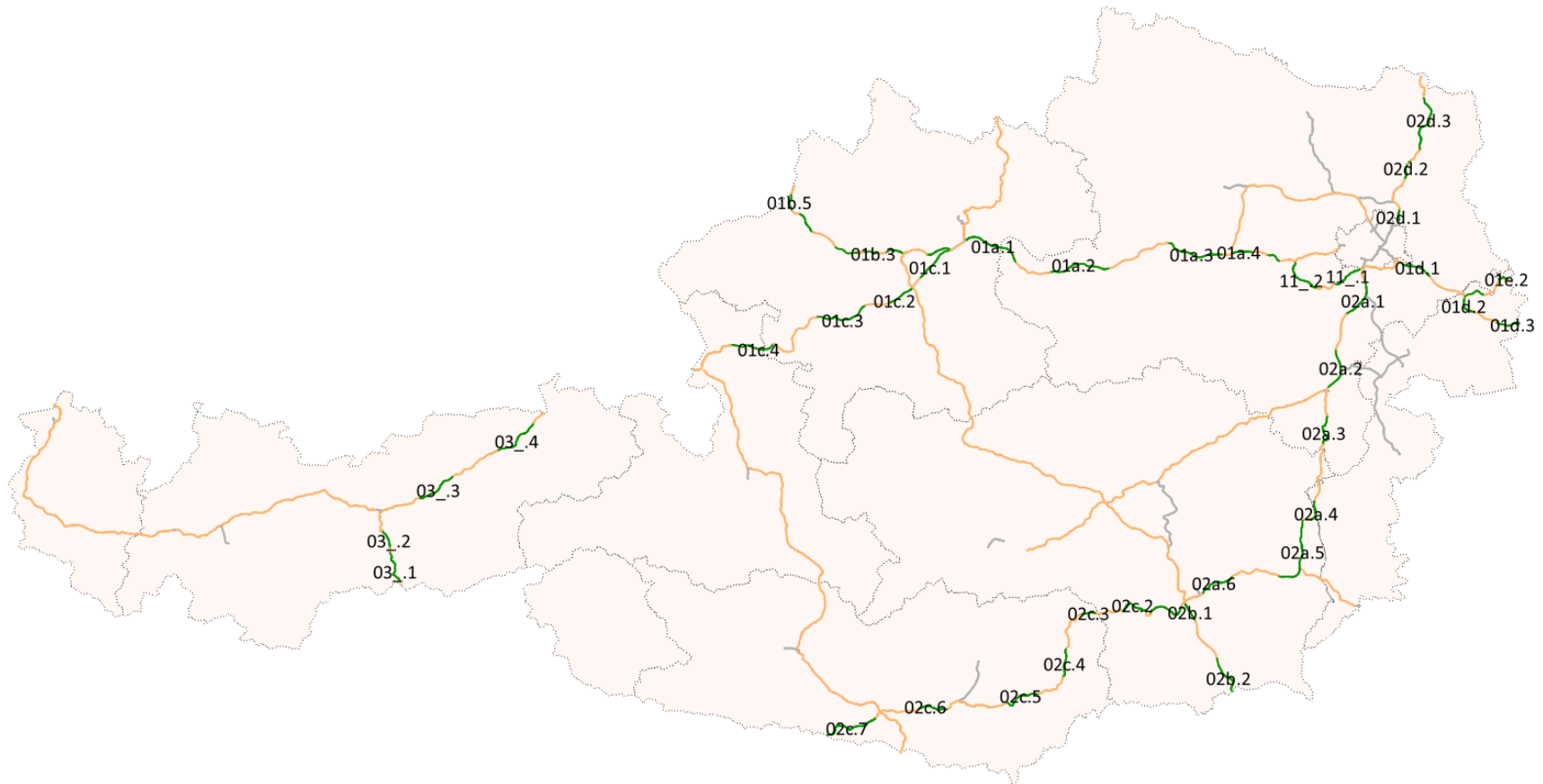
10.2 Annex II – Vorläufige Machbarkeit TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken

Abbildung 61: Vorläufige Machbarkeit, Ergebnisse CLEARER-Szenario TEN-V-Kernnetz, Teilstrecke

#	Länge (km)	UW– Anfangsphase		UW – Phase 50 % O-BEV		#	Länge (km)	UW– Anfangsphase		UW – Phase 50 % O-BEV	
		MW	MWh/d	MW	MWh/d			MW	MWh/d	MW	MWh/d
01a.1	22,3	16	121	88	668	02a.4	7,9	8	53	12	81
01a.2	30,2	20	150	96	728	02a.5	28,7	20	151	48	362
01a.3	22,3	16	120	72	538	02a.6	14,2	12	88	36	272
01a.4	7,8	8	55	24	160	02b.1	6,9	8	55	20	125
01a.5	5,6	8	53	16	113	02b.2	13,1	12	85	20	128
01b.1	8,8	8	59	32	239	02c.1	14,9	12	84	20	126
01b.2	7,0	8	59	36	251	02c.2	12,9	12	85	24	169
01b.3	8,5	8	60	52	398	02c.3	5,6	8	49	8	56
01b.4	9,2	8	59	44	328	02c.4	11,2	12	85	20	137
01b.5	6,4	8	58	28	192	02c.5	14,3	12	84	24	165
01c.1	15,9	12	88	36	274	02c.6	11,5	12	87	24	179
01c.2	9,4	8	60	20	151	02c.7	21,6	16	118	36	273
01c.3	19,4	16	120	40	302	02d.1	4,6	8	47	8	41
01c.4	17,2	16	114	36	264	02d.2	5,8	8	53	8	60
01d.1	11,0	12	87	36	269	02d.3	22,5	16	114	24	171
01d.2	8,3	8	60	20	151	03_1	11,8	12	87	44	318
01d.3	9,6	8	57	24	156	03_2	7,8	8	60	28	205
01e.1	6,7	8	47	8	52	03_3	15,2	12	91	64	467
01e.2	4,9	8	47	8	45	03_4	20,6	16	120	72	540
02a.1	14,2	12	89	44	311	11_1	12,4	12	88	40	280
02a.2	14,9	12	89	36	275	11_2	15,2	12	90	52	382
02a.3	11,7	12	81	24	157						

Quelle: AEA

Abbildung 62: Vorläufige Machbarkeit, Ergebnisse CLEARER-Szenario TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken



Quelle: AEA

10.3 Annex III – Technische Analyse anderer Antriebe

10.3.1 Ergebnisse BEV

Für den Bedarf an Ladeinfrastruktur für BEV werden in der internationalen Literatur nachfrageorientierte Standortmethoden (Rose, 2020) empfohlen. Alternative strategische Standortmethoden (Fraunhofer ISI, 2020) können ebenfalls angewendet werden. Nachdem der Fokus des Projektes auf ERS-Infrastruktur und bei O-BEV-Lkw liegt konnten diese anspruchsvollen Methoden für BEV-Ladeinfrastruktur nicht angewendet werden. Stattdessen wird die Anzahl an Ladeinfrastruktur von BEV vereinfacht nach der Aufteilung der Ladeart, siehe nachstehende Tabelle 19, abgeleitet von (TE, 2021d)¹², angenommen.

Tabelle 19: Annahmen BEV Ladestellen für N3-26

Annahmen	Public HPC	Public overnight	Depot	Destination
Ladepunkt – maximale kW	700	100	100	350
Ladepunkt - durchschnittliche kW bei Vollladung	660	60	60	330
Ladepunkt - durchschnittliche kW bei 75 % des useable SOC	490	50	50	250
Anteil der bereitgestellten Energie	20 %	20 %	45 %	15 %
Auslastung h/d	4	7,2	7,2	4
Kosten Euro/kW	358	448	448	410

Quelle: AEA, auf Basis von TE 2021d

Für den, in Kapitel 4.3, beschriebene BEV400-Verkehr wird nach der vereinfachten Methode (siehe oben) folgende Anzahl an Ladepunkten für Lkw N3-26 für das CLEARER-Szenario im Jahr 2040 benötigt:

Tabelle 20: Ergebnisse BEV Ladestellen, CLEARER-Szenario

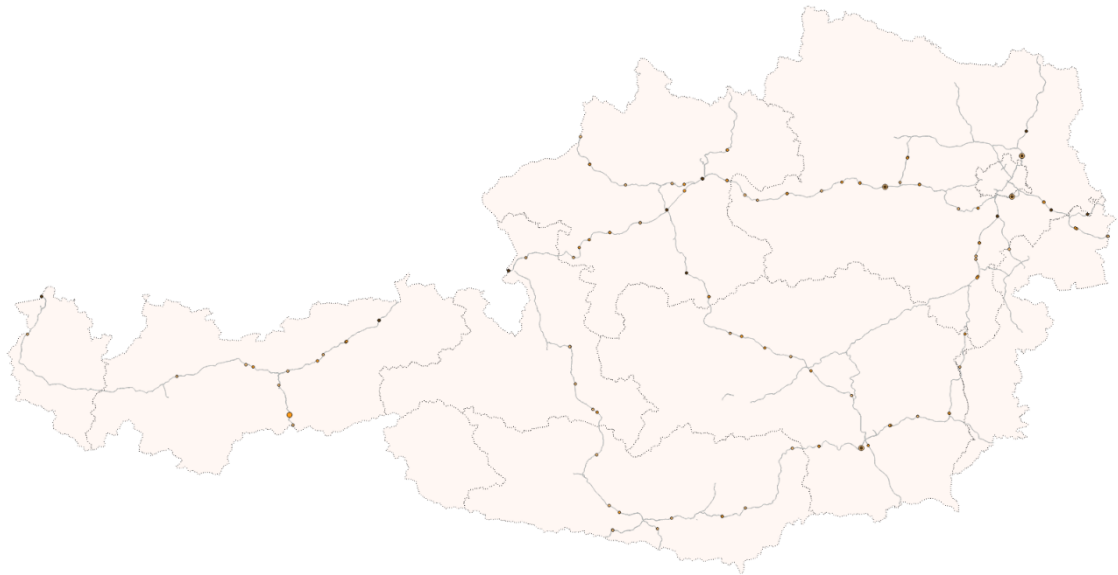
Anzahl der Ladepunkte nach Anteil des BEV-Verkehrs am gesamten Verkehr (N3-26)	20 %	50 %	80 %
Public HPC (700 kW)	600	1.500	2.400
Public overnight (100 kW)	3.200	8.100	13.000
Depot overnight (100 kW)	7.300	18.300	29.200
Destination (350 kW)	900	2.200	3.500

Quelle: AEA, eigene Berechnungen

¹² Die Angaben in der Quelle TE (2021d) wurden auf BEV400 Lkw angepasst. International geht die derzeitige Diskussion stärker in Richtung Megawatt-Charger für BEV-Lkw mit höheren Reichweiten. Dies verschiebt allerdings Kosten der Infrastruktur (weniger Ladepunkte, bei gleicher Leistung aber möglichen geringeren spezifischen Kosten) zu Kosten von Fahrzeug (höhere Batteriekosten, durch größere Batterien oder schnellerer Alterung).

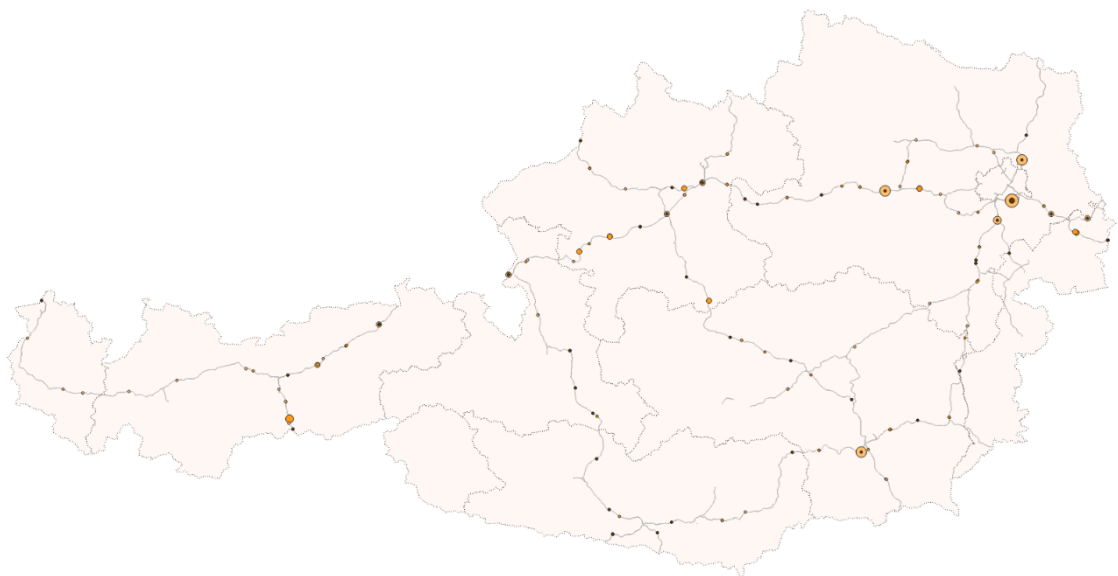
Die Public overnight und Public HPC-Ladepunkte werden vereinfacht den derzeit existierenden Lkw-Stellplätzen an ASFiNAG Raststationen und Rastplätzen (ASFiNAG, 2022a) lokalisiert (Abbildung 63 und Abbildung 64). Dies wurde für erste grafische Gegenüberstellungen und Kombinationen mit O-BEV-Infrastruktur verwendet (ähnlich wie in (Fraunhofer ISI, 2021) für Deutschland). Das Durchführen von detaillierte Analysen zur Standortbestimmung von öffentlicher BEV-Ladeinfrastruktur für den Lkw-Verkehr wird empfohlen.

Abbildung 63: BEV öffentliche Ladestellen für N3-26 entlang des Autobahn- und Schnellstraßennetzes, CLEARER-Szenario, 20 % des N3-26-Verkehrs 2040, Schnellladepunkte (700 kW) in Braun, öffentliche Nachtladepunkte (100 kW) in Orange



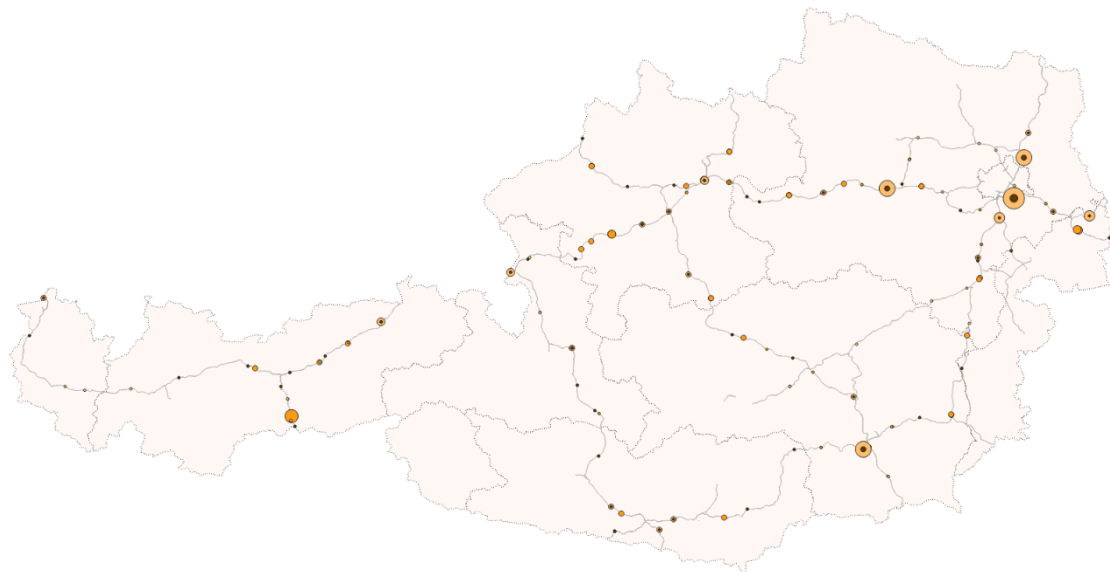
Quelle: AEA, eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 64: BEV öffentliche Ladestellen für N3-26 entlang des Autobahn- und Schnellstraßennetzes, CLEARER-Szenario, 50 % des N3-26-Verkehrs 2040, Schnellladepunkte (700 kW) in Braun, öffentliche Nachtladepunkte (100 kW) in Orange



Quelle: AEA, eigene Berechnung und Darstellung

Abbildung 65: BEV öffentliche Ladestellen für N3-26 entlang des Autobahn- und Schnellstraßennetzes, CLEARER-Szenario, 80 % des N3-26-Verkehrs 2040, Schnellladepunkte (700 kW) in Braun, öffentliche Nachtladepunkte (100 kW) in Orange



Quelle: AEA, eigene Berechnung und Darstellung

10.3.2 Ergebnisse – FCEV

Auch für FCEV-Lkw-Infrastruktur konnten anspruchsvollen Methoden, wie z. B. das Node-Capacity-Flow-Refueling-Location-Model von Fraunhofer ISI (2020) nicht angewendet werden. Es wird angenommen, dass 90 % der H₂ Betankungen bei öffentlich zugänglichen H₂-Tankstellen und 10 % bei privaten H₂-Tankstellen erfolgt. Es wird weiters angenommen, dass je Tankvorgang im Schnitt 80 % des Tankvolumens betankt werden und die Tankstellen einen 90 % Auslastungsgrad haben. Die Anzahl der Tankstellen wird auf diesen Annahmen und Annahmen und Ergebnissen aus Fraunhofer ISI (2020) und Rose (2020) von Deutschland auf Österreich abgeleitet. Die ökonomischen Daten werden in der Wirtschaftlichkeitsanalyse verwendet.

Tabelle 21: Annahme H₂-Tankstellen für N3-26

Annahmen	XS	S	M	L	XL	XXL
H ₂ -Nachfrage [t H ₂ /Tag]	0,9	1,9	3,8	7,5	15,0	30,0
Anzahl Auslässe	1	2	2	4	8	16
CAPEX in Mio. EUR	2,1	3,7	7,2	14,3	27,9	55,3
CAPEX Pipeline/Elektrolyseur	+ 50 %	+ 50 %	+ 50 %	+ 50 %	+ 50 %	+ 50 %

Quelle: AEA, auf Basis von Fraunhofer ISI, 2020 und Rose, 2020

Der hinterlegte FCEV-Lkw hat einen spezifischen Energieverbrauch von 2,15 kWh/km, eine 350 bar 32 kg H₂-Tank und somit eine Reichweite von 500 km. Mehr Informationen werden in Kapitel 4.3 gegeben. Für diesen FCEV-Lkw-Verkehr wird nach der vereinfachten Methode (siehe oben) folgende Anzahl an Tankstellen für Lkw N3-26 für das CLEARER-Szenario im Jahr 2040 benötigt:

Tabelle 22: Ergebnisse FCEV-Tankstellen, CLEARER-Szenario

Art der H ₂ -Tankstelle nach Anteil des FCEV-Verkehrs am gesamten Verkehr N3-26	20 %	50 %	80 %
XXL	5	18	32
XL	8	12	14
L	6	8	5
M	4	5	3
S	2	3	2
XS	1	2	1
Privat S	16	40	64
Gesamt	42	88	111

Quelle: AEA, eigene Berechnungen, abgeleitet von Fraunhofer ISI, 2020 und Rose, 2020

10.3.3 Ergebnisse – Diesel/E-Fuels

Für den Vergleich mit Diesel bzw. mit E-Fuels betriebenen Lkws wird die Betankungsinfrastruktur nicht separat analysiert, sondern als Teil des Treibstoffpreises behandelt.

10.4 Annex IV – Infrastrukturkosten

10.4.1 ERS-Infrastruktur

Die Annahmen für die Berechnung der Investitionskosten der ERS-Infrastruktur sind in den Tabellen 23 und 24 dargestellt. Für die ERS-Infrastruktur wird für den Best-Case auf die sehr detaillierte Untersuchung des Fraunhofer-Instituts (Fraunhofer, 2017) zurückgegriffen. Für den Worst Case wird ein Sicherheitsaufschlag von 50 % hinzugerechnet. Eine Ausnahme ist für Passive Schutzeinrichtung, hierfür werden vom Worst-Case 10 % für den Best Case abgeleitet. Für den Netzanschluss fallen als Investitionskosten Netzbereitstellungsentgelte an. Diese werden in Österreich bundeslandspezifisch berechnet (E-Control, 2022c). In der vorliegenden Analyse werden diese Kosten ebenfalls bundeslandspezifisch ermittelt und eingerechnet. Für stationäre Ladesäulen (exkl. Netzanschluss) wird mit den ausgewiesenen spezifischen Kosten gerechnet.

Tabelle 23: Annahmen spezifische Kosten ERS-Infrastruktur

Kategorie	Einheit	Best Case ¹	Worst Case ³
MV Zuleitung und Mittelspannungsring	EUR/MW	150.000	225.000
Einspeisepunkt	EUR/n	15.000	22.500
Unterwerk	EUR/MVA	300.000	450.000
Masten für dynamisches Laden	EUR/km	400.000	600.000
Masten für stationäres Laden (zweimal so viele Masten je km)	EUR/km	800.000	1.200.000
Oberleitung (DC Fahrdraht)	EUR/km	600.000	900.000
Passive Schutzeinrichtung Fahrbahn⁴	EUR/km	20.000	200.000
Projektierung, Planung, Ausschreibung	%	10	10

Quelle: ¹Fraunhofer (2017); ³Annahme 50 % Sicherheitsaufschlag für Worst Case; ⁴Worst Case Fraunhofer (2017) und Annahme Best Case 10 % vom Worst Case

Tabelle 24: Annahme spezifische Kosten für ERS-Infrastruktur, Netzanschluss und für stationäres Laden

Kategorie	Einheit	Kostenspanne
Netzbereitstellungsentgelt Ebene 5 (abhängig vom Bundelsand)²	EUR/MW	90.500 – 136.900
Netzbereitstellungsentgelt Ebene 5 (abhängig vom Bundelsand)²	EUR/MW	44.000 – 79.000
Ladesäulen⁵ (stationär)	EUR/kW	433

Quelle: ²E-control (2022c) und ⁵TE (2020)

10.4.2 BEV- und H₂-Infrastruktur

Die spezifischen Investitionskosten für stationäre Ladepunkte von BEV wurden abhängig der Ladepunktleistung angenommen, siehe Tabelle 25. Die Investitionskosten für Wasserstofftankstellen, siehe Tabelle 26, wurden der Literatur entnommen.

Tabelle 25: Spezifische Investitionskosten für stationäres Laden BEV

Spezifische Investitionskosten	Depot (100 kW)	Public overnight (100 kW)	Destination (350 kW)	Public HPC (700 kW)
Kosten [EUR/kW]	448	448	410	358

Quelle: AEA

Tabelle 26: Investitionskosten Annahmen H₂-Tankstellen

Investitionskosten nach Tankstellengröße	XS	S	M	L	XL	XXL
CAPEX in Mio. EUR	2,1	3,7	7,2	14,3	27,9	55,3
CAPEX Pipeline/Elektrolyseur	Plus 50 %	Plus 50 %	Plus 50 %	Plus 50 %	Plus 50 %	Plus 50 %

Quelle: AEA, auf Basis von Fraunhofer ISI (2020) und Rose (2020)

10.5 Annex V – Berechnung TCO

Die Berechnung der Total Cost of Ownership (TCO) wird exkl. Umsatzsteuer, für 5 Jahre Nutzungsdauer, 120.000 km pro Jahr, 15 % Fahrzeugrestwert und einem 5 % Diskontierungszinssatz gerechnet. Die in Tabelle 27 dargestellten Kosten werden für die TCO Berechnungen verwendet. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass diese Szenario-Überlegungen mit Unsicherheiten behaftet sind. Die dargestellten Kosten werden als langfristige (>2030) reale Kosten (in EUR₂₀₂₀) betrachtet. In der vorliegenden Studie wird für die wirtschaftliche Analyse eine Vielzahl an Quellen für die Best-Case und Worst-Case Analyse verwendet. In diesen Quellen werden manchmal reale Kosten (inflationbereinigte Kosten), EUR₂₀₁₀ oder EUR₂₀₁₅ (Hacker, et al., 2020), oder Kosten für welche nicht klar hervorgeht ob diese nominal oder real sind, beschrieben. Es wird angenommen, dass die verwendeten Kosten den realen EUR₂₀₂₀ Wert entsprechen, da durch die Best- und Worst-Case Betrachtungen ein relativ breiter Bereich für den Zeithorizont nach 2030 aufgespannt wird (wodurch eine Inflationbereinigung von 2015 auf 2020 nicht unbedingt notwendig ist). Die Kosten für Energie werden in reine Energiekosten und Infrastrukturkosten für die Energiebereitstellung aufgeteilt.

Tabelle 27: Zwischenergebnisse TCO-Berechnung

Kosten	O-BEV Best Case	O-BEV Worst Case	BEV Best Case	BEV Worst Case	FCEV Best Case	FCEV Worst Case	E-Fuels Best Case	E-Fuels Worst Case
Fahrzeug [EUR]	112.000	189.000	145.000	186.000	157.000	280.000	115.000	129.000
Wartungskosten (O&M) [EUR p.a.]	12.800	13.600	14.300	15.100	16.400	18.700	18.200	21.200
Energiekosten [EUR p.a.]	16.300	25.600	15.800	24.800	19.400	46.500	56.000	93.000
Infrastruktur [EUR p.a.]	14.300	23.800	18.700	21.900	11.600	13.900	-	-
Maut [EUR p.a.]	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600	6.600

Quelle: AEA, eigene Berechnungen

In den Kosten für die Fahrzeuge werden sowohl die Anschaffungskosten als auch die Restwertkosten, wie in Kapitel 4 beschrieben, berücksichtigt. Die Normverbrauchsabgabe (NoVA), die motorbezogene Versicherungssteuer und Kraftfahrzeugsteuer werden vernachlässigt, da Elektrofahrzeuge bzw. Wasserstofffahrzeuge von diesen Steuern befreit sind (Oesterreich.gv.at, 2022). Es wird angenommen, dass dies auf alle ZEM-Fahrzeuge auch in Zukunft zutrifft.

Die Wartungskosten (O&M) beinhalten Reparaturkosten, Reifenkosten sowie weitere variable Kosten wie AdBlue. Personalkosten werden weder hier noch in der TCO-Berechnung berücksichtigt.

Die Annahmen für die langfristigen Energiekosten (>2030) in EUR₂₀₂₀ sind für

- Strom: 0,11 bis 0,17 EUR/kWh (inkl. Abgaben)
- Wasserstoff: 0,08 bis 0,18 EUR/kWh (2,5 EUR/kg – 6 EUR/kg)
- E-Fuels: 0,18 bis 0,31 EUR/kWh (1,8 EUR/l – 3,1 EUR/l)

Die Annahme des Strompreises sind exkl. Netznpreis (da in Infrastrukturkosten enthalten), exkl. Ökostromförderbeitrag, exkl. Ökostrompauschale, inkl. Elektrizitätsabgabe, exkl. Steuern (wegen Geltendmachung als Vorsteuer) angegeben. Der durchschnittliche Strompreis der Jahre 2020 und 2021 für Nicht-Haushalte von 20 MWh/a bis 500 MWh/a lag bei 0,06 EUR/kWh (E-Control, 2022d). Dieser Preis wird als Ausgangspunkt für die Berechnungen für O-BEV und BEV verwendet nachdem dies Es wird angenommen, dass dieser Preis langfristig durchschnittlich im Best Case um 50 % höher liegt und im Worst-Case um 150 % höher sein wird. Es wird die Elektrizitätsabgabe von 1,5 Cent/kWh hinzugerechnet.

Die gewählten Annahmen für die Wasserstoffkosten sind für den Best-Case Fall optimistischer und für den Worst-Case Fall leicht pessimistischer als die detaillierte Analyse der Studie „Importmöglichkeiten für erneuerbaren Wasserstoff“ (AIT und Frontier, 2022). In dieser werden die Gesamtkosten des Wasserstoffs inklusive Transportes in Pipelines für Österreich zwischen 3,1 EUR/kg (2040) und 5,7 EUR/kg (2030) angegeben. Zu Bedenken ist, dass dies Erzeugungs- und Transportkosten, exkl. Profit für Produzenten, Pipelinebetreiber und Händler sind und somit nicht den Kosten für die Endnutzer entsprechen. Diese Werte wurden in der

vorliegenden Studie noch nicht verwendet, da diese erst nach den Analyseberechnungen veröffentlicht wurden. Für die Erzeugung von Wasserstoff in Österreich sowie für den Import via Schiff kann mit höheren Kosten für Wasserstoff gerechnet werden.

Es wird angenommen, dass der Preis für E-Fuels langfristig im Best-Case bei 0,18 EUR/kWh und im Worst-Case bei 0,31 EUR/kWh liegt. Als Basis für diese Annahme wurde der Dieselpreis in Österreich von August 2021 bis Juli 2022 (durchschnittliche Monatswerte) verwendet, welcher zwischen 1,224 EUR/l und 2,079 EUR/l liegt (Wissenswertes, 2022). Auf diese Basis des Dieselpreises wurden 50 % für die Abschätzung des E-Fuel-Preises aufgeschlagen.

Die Infrastrukturkosten sind jene für Lade- und Tankinfrastruktur und berücksichtigen bei O-BEV und BEV auch die Netzkosten und bei Wasserstoff Annahmen zu Pipelineinfrastruktur zu den Tankstellen.

Die Infrastrukturkosten werden zuerst annualisiert betrachtet. Hierfür wurde als Abschreibungsdauer für oberleitungsgebundene ERS-Infrastruktur 20 Jahre, für stationäre Ladeinfrastruktur 10 Jahre, für H₂-Tankstellen 10 Jahre und für H₂-Pipelines 30 Jahre hinterlegt. In den annualisierten Kosten für O-BEV und BEV sind auch die OPEX Kosten für Netznutzung, Netzverluste, Verluststrom enthalten. Für die annualisierten Wartungskosten (O&M) für Wasserstoff wird mit der Annahme 2 % der CAPEX Kosten gerechnet.

Auf die annualisierten Infrastrukturkosten werden noch Finanzierungskosten für den Best-Case und den Worst-Case hinzugerechnet. Die Weighted Average Cost of Capital (WACC) Annahmen hierfür sind wie folgt:

- O-BEV: 3 % bis 8 % (Bei O-BEV wird im Best-Case der geringste WACC angenommen, da durch etwaigen Wegfall des Bedarfs und somit Einnahmerisikos, die Finanzierung hier günstiger durchgeführt werden kann.)
- BEV: 4 % bis 6 %
- H₂/FCEV: 4 % bis 8 %

Diese gesamten annualisierten Infrastrukturkosten (inkl. Finanzierung) wurden anschließend durch den Jahresenergieverbrauch (CLEARER-Szenario 50 %) je Antriebsart dividiert. Somit können die Kosten je kWh (für einen optimalen statischen Fall) berechnet werden. Die TCO-Kosten in Hochlaufphasen bzw. bei niedrigeren Auslastungsgraden der Infrastruktur sind ein kritischer Faktor. Bei O-BEV kann durch die Wahl des genutzten Betreiber- bzw. Finanzierungsmodells (Stichwort: Nichtnutzerfinanzierung) beziehungsweise bei BEV durch einen optimierten modularen Ausbau mit TCO-Kosten auch in Hochlaufphasen in ähnlicher Höhe wie im optimiert stationären Fall gerechnet werden.

Die in Tabelle 27 dargestellten Infrastrukturkosten sind je Fahrzeug und Jahr dargestellt. Hierfür wurden die Kosten je kWh, mit dem spezifischen Energiebedarf je Antrieb und der durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 120.000 km multipliziert und noch ein 10 %iger Sicherheitsaufschlag hinzugerechnet.

Für die Maut wurde die in Österreich derzeit gültige Maut für Lkw der Kategorie 4+ (4 und mehr Achsen) für die Antriebsart E/H₂ verwendet. Diese liegt bei ca. 0,11 EUR/km (exkl. Umsatzsteuer) (ASFiNAG, 2022b) (ASFiNAG, 2022a).

Literatur

AAA. 2019: AAA Electric Vehicle Range Testing - AAA proprietary research into the effect of ambient temperature and HVAC use on driving range and MPGe. s.l.: AAA, 2019.

ADAC. 2021: Elektroautos im Winter: Praktische Tipps zur Reichweite. [Online] 12. 02 2021. [Zitat vom: 29. 06 2021.] <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-reichweite-winter/>.

Agora Verkehrswende. 2020: Technologieneutralität im Kontext der Verkehrswende - Kritische Beleuchtung eines Postulats. 2020.

Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics. 2018: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. 2018.

Ainalis, D. T., Thorne, C. und Cebon, D. 2020: Decarbonising the UK's Long-Haul Road Freight at Minimum Economic Cost. London: SRF-The centre for sustainable road freight, 2020.

AIT und Frontier, Kathan J., Kapeller J., Reuter S., Ortman P., Rodgarikia-Dara A., Reger M., Brändle G., Gatzen C. 2022: Importmöglichkeiten für erneuerbaren Wasserstoff. Wien: Austrian Institute of Technology und Frontier Economics, im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), 2022.

ASFiNAG. 2022a: Auskunft Lkw-Stellplätze auf RS und RP. Wien: ASFiNAG, 2022a.

— **2022b:** Go-Maut für Fahrzeuge über 3,5 Tonnen. [Online] 2022b. [Zitat vom: 05. 09 2022.] <https://www.asfinag.at/maut-vignette/go-maut/>.

— **2022c:** A 10 Tauern Autobahn - Generalsanierung Ofenauer und Hiefler Tunnel sowie Tunnelkette Werfen. [Online] 2022c. [Zitat vom: 11. 01 2023.] <https://www.asfinag.at/bauen-erhalten/bauprojekte/a-10-tauern-autobahn-tunnelkette-werfen/>.

AT. 2021a: Oesterreich.gv.at - Themen - Freizeit und Straßenverkehr - Kfz - Fahrzeugklassen. [Online] 2021a. [Zitat vom: 30. 04 2021.] https://www.oesterreich.gv.at/themen/freizeit_und_strassenverkehr/kfz/Seite.061800.html.

— **2021b:** Oesterreich.gv.at. Themen; Freizeit und Straßenverkehr; Kfz; Fahrzeugklassen. [Online] 05. 03 2021b. [Zitat vom: 18. 05 2021.] https://www.oesterreich.gv.at/themen/freizeit_und_strassenverkehr/kfz/Seite.061800.html.

Austriatech. 2021: Electromobility in Austria, Facts & Figures. Wien: Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021.

BEÖ. 2021: Bundesverband Elektromobilität Österreich. <https://www.beoe.at/my-home/>. [Online] 2021. [Zitat vom: 30. September 2021.]

Biesenack, H., George, G., Hofmann, G., Schmieder, A. 2006: Energieversorgung elektrischer Bahnen. Stuttgart: s.n., 2006.

BMBF. 2022: Wissenswertes zu Grünem Wasserstoff. [Online] 15. 05 2022. [Zitat vom: 06. 06 2022.] <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/wissenswertes-zu-gruenem-wasserstoff.html#:~:text=Gr%C3%BCner%20Wasserstoff%20wird%20durch%20die,meist%20aus%20fossilem%20Erdgas%20hergestellt.>

BMDV. 2022: Karte Innovationscluster. [Online] 2022. [Zitat vom: 05. 09 2022.] [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/104-karte-innovationscluster.pdf?__blob=publicationFile.](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/104-karte-innovationscluster.pdf?__blob=publicationFile)

— **2021:** Pressemitteilung - BMVI bringt Innovationscluster für klimafreundliche Lkw-Antriebstechnologien auf den Weg. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. [Online] 08. 09 2021. [Zitat vom: 24. 11 2022.] <https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/104-scheuer-innovationscluster-strassennutzverkehr.html#:~:text=Im%20November%202020%20hat%20das,notwendigen%20Ma%C3%9Fnahmen%20f%C3%BCr%20deren%20Markthochlauf.>

BMK. 2022: Europäisches Verkehrsnetz TEN-T. [Online] 2022. [Zitat vom: 30. 08 2022.] [https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/transport/international_eu/publikationen/TEN-T.html.](https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/transport/international_eu/publikationen/TEN-T.html)

— **2021:** Mobilitätsmasterplan 2030 für Österreich. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021.

— **2020:** Austrian Vision for the Trans-European Transport Network. Wien: Bundesministerium für Klima, Umwelt, Energie, Verkehr, Innovation und Technologie, 2020. Position Paper.

BMNT. 2019: Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich. Periode 2021-2030. Wien: s.n., 2019.

BMVI. 2020: Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Deutschland), 2020.

BMVIT. 2016: Nationaler Strategierahmen "Saubere Energie im Verkehr". Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2017.

BMWE, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2018: Franco-German Energy Declaration. Paris, 12 July 2018. [Online] 2018. [Zitat vom: 28. März 2022.] [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/draft-franco-german-energy-declaration.pdf?__blob=publicationFile.](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/draft-franco-german-energy-declaration.pdf?__blob=publicationFile)

BNEF. 2021: Hitting the EV Inflection Point - Electric vehicle price parity and phasing out combustion vehicle sales in Europe. s.l.: Bloomberg Finance L.P, 2021.

— **2020:** BloombergNEF - Blog - Battery Pack Prices Cited Below \$100/KWh for the First Time in 2020. [Online] 16. 12 2020. [Zitat vom: 28. 06 2021.] [https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/.](https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/)

— **2019:** BloombergNEF - Blog - A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. [Online] 05. 03 2019. [Zitat vom: 28. 06 2021.] <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>.

Boltze, M., Lehmann, M., Riegelhuth, G., Sommer, H., Wauri, D. 2021: Elektrifizierung von Autobahnen für den Schwerverkehr - Umsetzung des Systems eHighway. Bonn: Kirschbaum Verlag GmbH, 2021. ISBN 978-3-7812-2053-9.

Bundesregierung. 2020: Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024. Wien: Bundeskanzleramt Österreich, 2020.

Bundesregierung; Government Offices of Sweden. 2019: Joint Declaration of Intent on a German-Swedish partnership for innovation. Innovation and cooperation for a sustainable future. 2019.

Chen, D., Jiang, J., Kim, G-H., Yang, C., Pesaran, A. 2016: Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. s.l.: Applied Thermal Engineering, 2016.

Delgado, O., Rodriguez, F., Muncrief R. 2017: Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential for the 2020-2030 Time Frame. s.l.: The International Council on Clean Transportation (ICCT), 2017.

Earl, T., Mathieu, L., Cornelis, S., Kenny, S., Calvo Ambel, C., Nix, J. 2018: Analysis of long haul battery electric trucks in EU - Marketplace and technology, economic, environmental and policy perspectives. Graz: European Federation for Transport and Environment (T&E), 2018.

EC. 2021: Hydrogen Factsheet. Brüssel: European Commission, 2021.

— **2019:** Directive (EU) 2019/1161 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 amending Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy-efficient road transport vehicles. Brüssel: Official Journal of the European Union, 2019.

E-Control. 2022a: Erhebung - Status quo der E-Mobilisten in Österreich 2022. Wien: Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizität- und Erdgaswirtschaft, 2022a.

— **2022b:** Stromkennzeichnungsbericht 2022. Wien: E-Control, 2022b. Bericht.

— **2022c:** Systemnutzungsentgelte-Verordnung 2019 - SNE-V 2018, in der Fassung vom 01.01.2022. Wien: Bundesrecht konsolidiert, 2022c.

— **2022d:** Öffentliches Netz Nicht Haushaltspreise (MStOeN-2021_Preise), Datenstand: Mai 2022. Wien: E-Control, 2022d.

ENTSO-E. 2019: ENTSO-E Transmission System Map. [Online] 01. 01 2019. [Zitat vom: 18. 05 2021.] <https://www.entsoe.eu/data/map/>.

ENTsOG. 2019: ENTsOG 2050 roadmap for gas grids. Brüssel: ENTsOG AISIBL, 2019.

Eurostat. 2022a: Statistics Explained - Glossar: Tonnenkilometer. [Online] 2022a. [Zitat vom: 18. 08 2022.] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonne-kilometre_\(tkm\)/de](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonne-kilometre_(tkm)/de).

— **2022b:** Jährlicher Straßengüterverkehr nach der Nutzlast des Fahrzeugs. [Online] 11. Februar 2022b. [Zitat vom: 16. Februar 2022.] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_GO_TA_LC__custom_2105947/default/table?lang=de

— **2022c:** Territorial orientierter Straßengüterverkehr nach Verkehrsumfang - jährliche Daten. [Online] 7. Januar 2022c. [Zitat vom: 16. Februar 2022.] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_TERT_GO/default/table?lang=de&category=road.road_tert.

— **2021:** Jährlicher Straßengüterverkehr nach dem zulässigen Gesamtgewicht des Fahrzeuges (1000 t, Mio. Veh-km, 1000 Jrnys). Brüssel: Eurostat, 2021. Statistische Datenbank.

— **2017:** Statistik des Güterverkehrs. [Online] 21. 09 2017. [Zitat vom: 18. 05 221.] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Freight_transport_statistics/de&oldid=354266#Stra.C3.9Feng.C3.BCterverkehr.

ewayBW. 2021: ewayBW – Baden-Württemberg elektrisiert. [Online] 2021. [Zitat vom: 2021] <https://ewaybw.de/de/ewaybw/>

Fraunhofer ISI. 2021: BOLD - Begleitforschung Oberleitungs-Lkw in Deutschland. Karlsruhe, Berlin, Heidelberg: Fraunhofer ISI, Öko-Institut, ifeu, 2021.

— **2020:** Hochleistungsschnellladernetz für Elektro-Lkw. Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2020.

— **2016a:** Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potenziale des Hybrid-Oberleitungs-Lkws - Einstieg und Übersicht über die Aktuellen Untersuchungen 1. März 2016. Berlin: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, 2016a.

Fraunhofer. 2017: Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potenziale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Karlsruhe: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Harburg - IUE, M-Five, 2017.

Gnann, T. 2018: Technologiebericht 7.2 Elektromobilität - Hybrid-Oberleitungs-Lkw (energiewirtschaftliche Aspekte). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken: Wuppertal Institut, 2018.

Gov. CA. 2022: Government of Canada - Fuel efficiency - Cold Weather. [Online] 2022. [Zitat vom: 23. 08 2022.] <https://www.nrcan.gc.ca/energy-efficiency/transportation-alternative-fuels/personal-vehicles/choosing-right-vehicle/tips-buying-fuel-efficient-vehicle/factors-affect-fuel-efficiency/cold-weather/21032>.

Grosse, B., et al. 2022: Einsatz von Rettungshubschraubern im Bereich von eHighways. Berlin: Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V., 2022.

Guidehouse. 2021: Extending the European Hydrogen Backbone. Utrecht: Guidehouse, 2021.

Hacker, F., et al. 2020: StratOn. Bewertung und Einführungsstrategien für oberleitungsgebundene schwere Nutzfahrzeuge. Berlin: Öko-Institut e.V., 2020.

Hariram, A., Koch, T., Mardberg, B., Kyncl, J. 2019: A Study in Options to Improve Aerodynamic Profile of Heavy-Duty Vehicles in Europe. Basel, Switzerland: MDPI, 2019.

Hartwig M., Bußmann-Welsch A., Claes F., Schneider L. 2020: Amelie - Red - Abrechnungssysteme und -methoden für elektrisch betriebene Lkw sowie deren interoperable Infrastrukturen im europäischen Kontext. Berlin, Greifswald, Stuttgart: IKEM - Institut für Klimaschutz Energie und Mobilität e.V., 2020.

Helms, H., Jöhrens J. 2021: Erfolgsfaktoren für einen effektiven Klimaschutz im Straßengüterverkehr – Hin-. Heidelberg, Berlin, Karlsruhe: ifeu, Öko-Institut, Fraunhofer ISI, 2021.

ICCT. 2017: Transitioning to Zero-Emission Heavy-Duty Freight Vehicles. Washington: International Council on Clean Transportation, 2017. Bericht.

ICCT, Basma H, Saboori A., Rodriguez F. 2021: Total Cost of Ownership for Tractor-Trailers in Europe: Battery Electric Versus Diesel. s.l.: International Council on Clean Transportation, 2021.

ICCT, Basma, H., Rodriguez, F. 2022a: Fuel cell electric tractor-trailers: Technology overview and fuel economy. s.l.: International Council on Clean Transportation (ICCT), 2022a.

ICCT, Sharpe B., Basma H. 2022b: A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks. s.l.: International Council on Clean Transportation, 2022b.

Ifeu. 2020: Roadmap für die Einführung eines Oberleitungs-Lkw-Systems in Deutschland. s.l.: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2020. Bericht.

Jöhrens J., Lehmann M. 2022: Aktuelle technische Erkenntnisse zum eHighway-System aus Feldversuch und Begleitforschung, Stand: Februar 2022. 2022.

Jöhrens, J., et al. 2020: Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030. Heidelberg: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Deutschland), 2020.

JRC, Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M., Edwards. 2020b: JEC Well-To-Wheels report v5 - Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Luxembourg: Office of the European Union, 2020b. EUR 30284 EN.

JRC, Röck, M., Martin, R. and Hausberger, S. 2020a: JEC Tank-To-Wheels report v5 Heavy duty vehicles - Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020a. Bericht. 30271 EN.

Kießling, F., Puschmann, R., Schmieder, A. 2014: Fahrleitungen elektrischer Bahnen: Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb. Erlangen: s.n., 2014.

Kirchengast, G., et al. 2019: Referenzplan als Grundlage für einen wissenschaftlich fundierten und mit den Pariser Klimazielen in Einklang stehenden Nationalen Energie- und Klimaplan für Österreich (Ref-NEKP) - Gesamtband. Wien: Verlag der ÖAW, 2019.

Klausmann, F., et al. 2021: Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030. s.l.: Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO., 2021.

Knezevic G., Grosse B., Claes F., Hartwig M., Radeisen A., Bußmann-Welchs A. 2022: Teilstudie 1 - Rechtlich kohärentes Betriebs- und Marktszenario eines Akteursmodells für Electric-Road-Systems. Berlin: Erstellt im Rahmen des durch das BMWK geförderten Projektes AMELIE 2; Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM) , 2022.

Kühnel, S., Hacker, F. und Görz, W. 2018: StratOn. Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Berlin: Öko-Institut e.V., 2018.

Laenderdaten.info. 2022: Das Klima in Österreich. [Online] 2022. [Zitat vom: 09. 08 2022.] <https://www.laenderdaten.info/Europa/Oesterreich/Klima.php>.

Lehmann M., Staub M. 2021: Standardisierung oberleitungsgebundener ERS. online: Präsentation Energyroads Workshop Dez. 2021, 2021.

M. Mottschall, J. Jöhrens, T. Gnann, F. Hacker, K. Göckeler, F. Heining, H. Helms, U. Burghard, A. Scherrer. 2022: Herausforderungen und Handlungserfordernisse für eine erfolgreiche Gestaltung des Markthochlaufs von Oberleitungs-Lkw – Diskussionspapier. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI, 2022.

Matthes, F. C., et al. 2022: Klimaschutz 2030: Ziele, Instrumente, Emissionsminderungslücken sowie die Verbesserung der Überprüfungs- und Nachsteuerungsregularien, Analyse. Berlin: Öko-Institut e.V. Stiftung Denkfabrik Klimaneutralität (Hg.), 2022.

Oesterreich.gv.at. 2022: Kfz-Steuern und -Abgaben. [Online] 11. 02 2022. [Zitat vom: 25. 08 2022.] https://www.oesterreich.gv.at/themen/freizeit_und_strassenverkehr/kfz/8.html.

Öko-Institut. 2018: Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Berlin: Öko-Institut e.V. Institut für angewandte Ökologie, 2018. Teilbericht.

Plötz, P., et al. 2018: Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr - Handlungsempfehlungen für Deutschland. Karlsruhe, Berlin, Heidelberg: Fraunhofer ISI, Öko Institut, ifeu, 2018.

Plötz, P., et al. 2021: Infrastruktur für Elektro-Lkw im Fernverkehr: Hochleistungsschnelllader und Oberleitung im Vergleich - ein Diskussionspapier. Karlsruhe, Berlin, Heidelberg: Fraunhofer ISI, Öko Institut, ifeu, 2021.

Röck, M., Martin, R. and Hausberger, S. 2020: JEC Tank-To-Wheels report v5: Heavy duty vehicles, Hanarp, P., Bersia, C., Colombano, M., Gräser, H., Gomes Marques, G., Mikaelsson, H., De Prada, L., Prussi, M., Lonza, L., Yugo, M. and Hamje, H. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. ISBN 978-92-76-19928-1, doi:10.2760/541016, JRC117564.

Rose P.K., Nugroho R., Gnann T., Plötz P., Wietschel M., Reuter-Oppermann M. 2020: Optimal development of alternative fuel station networks considering node capacity restrictions. Karlsruhe: Transportation Research Part D 78 (2020) 102189, 2020.

Schneider, Jürgen. 2021: CO₂-Bepreisung - aktuelle Entwicklung auf EU- und nationaler Ebene, EU-Energieforum, Verbund. [Präsentation] Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021.

Schraven, S., Kley, F. und Wietschel, M. 2010: Induktives Laden von Elektromobilen - Eine techno-ökonomische Bewertung. 2010.

Sedlacek, N., et al. 2021: CLEARER - Climate Neutral Freight Transport. Wien: Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, 2021.

Seiffert, U., Hans-Hermann, B. 2003: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Vieweg& Sohn Verlag, 2003.

Siemens. 2021a: eHighway. Nachhaltiger Straßengüterverkehr. Präsentation im Zuge des EnergyRoads Workshop. 2021a.

— **2021b:** White Paper, Siemens eHighway, Vehicle - Pantograph Evaluation of Aerodynamics (v1.0.0). s.l.: Siemens Mobility GmbH 2021, 2021b.

— **2021c:** Fragenbeantwortung von Energyroads. Schriftlich durch Stumpe, G., 18. 6 2021c.

— **2016:** ENUBA 2 - Elektromobilität bei sicheren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen. München: Siemens Mobility Division, 2016. Bericht.

SRF. 2020: White Paper - Decarbonising the UK's Long-Haul Road Freight at Minimum Economic Cost. United Kingdom: The Centre for Sustainable Road Freight, 2020.

Statistik Austria. 2022a: Energiestatistik; Energiebilanz Österreich 2021. Wien: Statistik Austria, 2022a.

— **2022b:** Güterverkehr. [Online] 28. Januar 2022b. [Zitat vom: 16. Februar 2022.]
<https://www.statistik.at/statistiken/tourismus-und-verkehr/gueterverkehr/gueterverkehr-strasse>.

— **2021a:** Fahrzeug-Bestand am 31.12.2020 nach Fahrzeugarten. Kraftfahrzeuge - Bestand. [Online] 2021a. [Zitat vom: 08. 11 2011.]

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html.

— **2021b:** Kraftfahrzeug Neuzulassungen. [Online] 2021b. [Zitat vom: 08. 11 2021.]

http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_neuzulassungen/index.html

— **2021c:** Vorläufiger Fahrzeug-Bestand am 31.08.2021. Wien: Statistik Austria, 2021c.

— **2020a:** Input-Output-Tabelle inklusive Aufkommens- und Verwendungstabelle 2016. Wien: Statistik Austria, 2020a.

— **2020b:** Standard-Dokumentation Metainformation zur Statistik des Straßengüterverkehrs. Wien: Statistik Austria, 2020b. Bericht.

— **2020c:** Straßengüterverkehr auf Österreichs Straßen, Transportaufkommen nach Verkehrsbereichen und Entfernungstufen 2019. Wien: Statistik Austria, 2020c. Tabelle.

— **2020d:** Straßengüterverkehr österreichischer Unternehmen. Wien: Statistik Austria, 2020d. Datentabelle.

TE. 2021a: Die Dekarbonisierung des Lkw-Fernverkehrs in Deutschland - Ein Vergleich der verfügbaren Antriebstechnologien und ihrer Kosten. s.l.: Transport & Environment, 2021a. Bericht.

— **2021b:** How to decarbonise long-haul trucking in Germany. Brussels: Transport & Environment, 2021b.

— **2021c:** Rahmenbedingungen auf EU-Ebene für einen emissionsfreien Straßengüterverkehr - VCÖ-Fachveranstaltung, von Fedor Unterlöhner. s.l.: Transport & Environment, 2021c. Präsentation.

— **2021d:** Unlocking electric trucking in the EU: recharging along highways - Electrification of long-haul trucks (Vol. 2). Brussels: Transport & Environment, 2021d.

— **2020:** Trucks: direct electrification most efficient by far. s.l.: Transport and Environment, 2020.

— **2018:** Analysis of long haul battery electric trucks in EU. s.l.: European Federation for Transport and Environment (T&E), 2018. Amended paper.

Umweltbundesamt. 2022: Emissionskennzahlen 2022. [Online] 2022. [Zitat vom: 09. 08 2022.]

https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/mobilitaet/daten/ekz_pkm_tkm_verkehrsmittel.pdf.

— **2021:** Klimaschutzbericht 2021. Wien: s.n., 2021.

— **2020:** Elektrifizierung der österreichischen Fahrzeugflotte - Auswirkungen auf Strombedarf und Stromaufbringung. 2020.

— **2020:** Pathways to a Zero Carbon Transport Sector. Wien: Umweltbundesamt im Auftrag des Klima- und Energiefonds, 2020. Bericht.

— **2018:** Sachstandsbericht Mobilität und mögliche Zielpfade zur Erreichung der Klimaziele 2050 mit dem Zwischenziel 2030. Wien: Umweltbundesamt, 2018. REP-0667.

VCÖ. 2021: VCÖ-Fachveranstaltung: Emissionsfreier Straßengüterverkehr - Welche Schritte sind nötig. [Online] 11. 05 2021. [Zitat vom: 21. 05 2021.] <https://www.vcoe.at/projekte/vcoe-veranstaltungen/detail/vcoe-veranstaltung-emissionsfreier-strassengueterverkehr-welche-schritte-sind-noetig>.

VDE. 2015: Kompendium: Li-Ionen-Batterien Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik, 2015. Bericht.

Ward, Janine. 2022: Electreon Announces First Public Electric Road System for Wireless Electric Vehicle Charging in the US. [Online] 1. Februar 2022. [Zitat vom: 17. Februar 2022.] <https://www.businesswire.com/news/home/20220201005203/en/Electreon-Announces-First-Public-Electric-Road-System-for-Wireless-Electric-Vehicle-Charging-in-the-US>.

Wiener Zeitung. 2022: Betriebsstart für Semmering-Basistunnel erst 2030. [Online] 15. 04 2022. [Zitat vom: 05. 09 2022.] <https://www.wienerzeitung.at/nachrichten/wirtschaft/oesterreich/2144251-Betriebsstart-fuer-Semmering-Basistunnel-erst-2030.html>.

Wikipedia. 2022: Fahrwiderstand. [Online] Wikipedia, 2022. [Zitat vom: 23. 08 2022.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Fahrwiderstand>.

Wissenswertes. 2022: Preisentwicklung beim Dieselpreis in Österreich. Wissenswertes. [Online] 2022. [Zitat vom: 30. 08 2022.] <https://www.wissenswertes.at/dieselpreis-oesterreich-preisentwicklung>.

WKO. 2021: Fahrzeugindustrie - Wirtschaftskammer Österreich. Zahlen & Fakten; Kraftfahrzeuge (Pkw, Lkw, Busse); Lkw und Sattelzugmaschinen - Neuzulassungen 2020 nach Antriebsart. [Online] 04 2021. <https://www.fahrzeugindustrie.at/zahlen-fakten/statistikjahrbuch/kraftfahrzeuge-pkw-lkw-busse/>.

ZAMG. 2021: Österreichisches Klimabulletin Jahr 2020. Wien: ZAMG - Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2021. Bericht.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beurteilung der Eignung österreichischer Autobahnen und Schnellstraßen für oberleitungsgebundene ERS-Infrastruktur.....	4
Abbildung 2: Jahresenergieverbrauch der Fahrzeuge (Tank-to-Wheel) und inklusive Treibstoffbereitstellung (Well-to-Wheel), angenommen 100 % der Fahrleistung je Antrieb laut CLEARER-Szenario.....	5
Abbildung 3: Total Cost of Ownership Vergleich von O-BEV, BEV, FCEV und mit E-Fuels betriebenen Lkws	6
Abbildung 4: Dekarbonisierungsoptionen im Straßengüterverkehr: Oberleitungen, induktives, induktives sowie stationäres Laden (von oben nach unten)	18
Abbildung 5: TEN-V-Kernetz Korridore durch Österreich.....	20
Abbildung 6: Subsysteme und Interfaces von oberleitungsgebundenen ERS.....	21
Abbildung 7: Lichtraum nach RAA 2008 und Querprofil der Oberleitung.....	22
Abbildung 8: S1 Südrand Schnellstraße, Wien	23
Abbildung 9: A23 Südosttangente, Wien	24
Abbildung 10: Beurteilung der Eignung österreichischer Autobahnen und Schnellstraßen für oberleitungsgebundene ERS-Infrastruktur.....	25
Abbildung 11: Visualisierung der ERS-Infrastruktur an der B462 in Deutschland	26
Abbildung 12: Oberleitung und Mastverankerung im Brückenbereich der B462 in Deutschland	26
Abbildung 13: Schema der elektrischen Komponenten der Oberleitungsinfrastruktur.....	29
Abbildung 14: Komponenten und Bauteile einer eHighway-Oberleitung.....	35
Abbildung 15: Verteilung der Straßengüterverkehrs-Aktivität über Fahrzeug-Fahrten-Strecken-Bänder in Österreich. Fahrzeug-Fahrten können mehrere Tage dauern. Rote Linie zeigt die Strecken bis 800 km	41
Abbildung 16: Österreichische Anteile am gesamten Straßengüterverkehr auf Österreichs Straßen	42
Abbildung 17: Beispiel für eine Verkehrsspinne aus dem Verkehrsmodell.....	42
Abbildung 18: Fahrtweitenverteilung ab letzter Ladeoption	43
Abbildung 19: Werktägliche Tagesganglinie des Lkw-Verkehrs, WIM-Standorte	45
Abbildung 20: Wochenganglinie des Lkw-Verkehr, WIM-Standorte.....	45
Abbildung 21: Jahresganglinie Lkw-Verkehr.....	46
Abbildung 22: Mittlere Lkw-Querschnittsbelastung je Streckenabschnitt 2019 im Autobahn- und Schnellstraßennetz	47
Abbildung 23: Lkw-Querschnittsbelastung je Streckenabschnitt 2019 – grafisch	47
Abbildung 24: Streckennetz Österreich im Verkehrsmodell	48
Abbildung 25: Ausbaumaßnahmen bis zum Prognosejahr 2040.....	49
Abbildung 26: Entwicklung der Güterverkehrsleistung.....	50
Abbildung 27: Durchschnittlich täglicher Verkehr an Werktagen von Lkw nach Nutzungsklassen - Analysezustand 2019.....	52
Abbildung 28: Durchschnittlich täglicher Verkehr an Werktagen von Lkw nach Nutzungsklassen - Prognose 2040 MMP	53
Abbildung 29: Durchschnittlich täglicher Verkehr an Werktagen von Lkw nach Nutzungsklassen - Prognose 2040 CLR.....	54
Abbildung 30: Durchschnittlich täglicher Verkehr an Werktagen von Lkw nach Nutzungsklassen - Prognose 2040 VPÖ	55
Abbildung 31: Fahrzeugbestand im Verhältnis zu Fahrleistung und CO ₂ -Ausstoß nach Fahrzeugklasse im Jahr 2019.....	56
Abbildung 32: CO ₂ -Ausstoß pro Jahr im Schwerverkehr nach Fahrzeugklasse.....	56

Abbildung 33: Komponenten der Straßenlastgleichung vereinfacht dargestellt	58
Abbildung 34: Fahrplan Antriebstechnologien und Maßnahmen im deutschen Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge	75
Abbildung 35: Innovationscluster Deutschland.....	78
Abbildung 36: Konzept Modularer Aufbau der ERS-Infrastruktur.....	83
Abbildung 37: TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken, Anfangsphase	84
Abbildung 38: TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken, Endphase.....	85
Abbildung 39: TEN-V-Gesamtnetz, Teilstrecken, Endphase	86
Abbildung 40: ERS-Beispiel für die Route Linz-Wien / Wien- Linz.....	88
Abbildung 41: Tagesganglinie des Leistungsbedarfs für dynamisches Laden an der ERS-Infrastruktur im TEN-V-Kernnetz in der Endphase	90
Abbildung 42: Wochenganglinie des Leistungsbedarfs für dynamisches Laden an der ERS-Infrastruktur im TEN-V-Kernnetz in der Endphase	91
Abbildung 43: Jahresganglinie des wöchentlichen Leistungsbedarfs für dynamisches Laden an der ERS-Infrastruktur im TEN-V-Kernnetz in der Endphase	91
Abbildung 44: Tagesganglinie des Leistungsbedarfs für dynamisches und stationäres Laden von O-BEV bei 50 %igem Flottenanteil.....	92
Abbildung 45: Wochenganglinie des Leistungsbedarfs für dynamisches und stationäres Laden von O-BEV bei 50%igem Flottenanteil	93
Abbildung 46: Jahresganglinie des wöchentlichen Leistungsbedarfs für dynamisches und stationäres Laden von O-BEV bei 50%igem Flottenanteil	93
Abbildung 47: Jahresenergieverbrauch der Fahrzeuge (Tank-to-Wheel) und inklusive Treibstoffbereitstellung (Well-to-Wheel), angenommen 100 % der Fahrleistung je Antrieb laut CLEARER-Szenario.....	95
Abbildung 48: Jahresenergieverbrauch der Fahrzeuge (Tank-to-Wheel) und inklusive Treibstoffbereitstellung (Well-to-Wheel), angenommen 100% der Fahrleistung je Antrieb für die drei Szenarien	95
Abbildung 49: Treibhausgasemissionen 2030 zugelassener Sattelzugmaschinen (40 t zGG) mit verschiedenen Antriebskonzepten für typische Nutzungsparameter in Deutschland (800.000 km Laufleistung über 7 Jahre Betriebsdauer, 11 t durchschnittliche Zuladung, Deutscher Strom-Mix.....	96
Abbildung 50: Treibhausgasemissionen 2030 zugelassener Sattelzugmaschinen (40 t zGG) mit verschiedenen Antriebskonzepten für typische Nutzungsparameter für Österreich und den österreichischen Erzeugungstrommix (E-Mix), exkl. Betrachtung von Stromimporten	98
Abbildung 51: Treibhausgasemissionen 2030 zugelassener Sattelzugmaschinen (40 t zGG) mit verschiedenen Antriebskonzepten für typische Nutzungsparameter für Österreich und den österreichischen Aufbringungsstrommix (A-Mix) inkl. Betrachtung von Stromimporte	99
Abbildung 52: Lastgang versus erneuerbare Stromerzeugung – Winterwoche, skaliert für das Jahr 2030.....	100
Abbildung 53: Lastgang versus erneuerbare Stromerzeugung – Sommerwoche, skaliert für das Jahr 2030	101
Abbildung 54: Vereinfachtes gemeinsames Schnelllade- und ERS-Infrastrukturnetz in Österreich	103
Abbildung 55: Vergleich der Lade-/Tankstelleninfrastruktur für O-BEV, BEV und FCEV-Lkw bei unterschiedlicher Flottendurchdringung der jeweiligen Antriebsart.....	106
Abbildung 56: Total Cost of Ownership Vergleich O-BEV, BEV, FCEV und E-Fuel Lkw	107
Abbildung 57: Multiplikatorstabelle der Investitionen für O-BEV	109
Abbildung 58: Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte von ERS-Infrastruktur und O-BEV-Lkw 2025 bis 2040	110
Abbildung 59: ERS-Infrastruktur Optionen für Eigentümer.....	112
Abbildung 60: Variante für ein Abrechnungsmodell	116
Abbildung 61: Vorläufige Machbarkeit, Ergebnisse CLEARER-Szenario TEN-V-Kernnetz, Teilstrecke	123

Abbildung 62: Vorläufige Machbarkeit, Ergebnisse CLEARER-Szenario TEN-V-Kernnetz, Teilstrecken	124
Abbildung 63: BEV öffentliche Ladestellen für N3-26 entlang des Autobahn- und Schnellstraßennetzes, CLEARER-Szenario, 20 % des N3-26-Verkehrs 2040, Schnellladepunkte (700 kW) in Braun, öffentliche Nachtladepunkte (100 kW) in Orange.....	126
Abbildung 64: BEV öffentliche Ladestellen für N3-26 entlang des Autobahn- und Schnellstraßennetzes, CLEARER-Szenario, 50 % des N3-26-Verkehrs 2040, Schnellladepunkte (700 kW) in Braun, öffentliche Nachtladepunkte (100 kW) in Orange.....	126
Abbildung 65: BEV öffentliche Ladestellen für N3-26 entlang des Autobahn- und Schnellstraßennetzes, CLEARER-Szenario, 80 % des N3-26-Verkehrs 2040, Schnellladepunkte (700 kW) in Braun, öffentliche Nachtladepunkte (100 kW) in Orange.....	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorläufige Werte der Spannungs- und Stromgrenzen für Traktionsenergie für ERS-Pantographen-Systeme	31
Tabelle 2: Nutzfahrzeugbestand in Österreich in den Jahren 2017 bis 2020	39
Tabelle 3: Straßengüterverkehr österreichischer Unternehmen nach Nutzlast des Fahrzeugs im Jahr 2019	40
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen aktuellem und höchstzulässigem Gewicht	44
Tabelle 5: Übersicht O-BEV Fahrzeuge	60
Tabelle 6: Übersicht Diesel Fahrzeuge	62
Tabelle 7: Übersicht Batterieelektrische Fahrzeuge	63
Tabelle 8: Übersicht Wasserstoff-Brennstoffzellen Fahrzeuge	64
Tabelle 9: Übersicht sonstige Fahrzeuge	66
Tabelle 10: Electric Road Systems Teststrecken	77
Tabelle 11: Annahmen stationäres Laden von O-BEV	89
Tabelle 12: Anzahl stationäres Laden von O-BEV	89
Tabelle 13: O-BEV Jahresenergieverbrauch dynamisches Laden an der ERS-Infrastruktur des Autobahn- und Schnellstraßennetzes	91
Tabelle 14: O-BEV Jahresenergieverbrauch dynamisches und stationäres Laden von O-BEV bei 50%igem Flottenanteil	93
Tabelle 15: CAPEX dynamisches Laden ERS (in Mio. EUR), CLR-Szenario, 50 % Abdeckungsgrad	104
Tabelle 16: CAPEX stationäres Laden O-BEV (in Mio. EUR), CLR-Szenario, 50% Abdeckungsgrad	105
Tabelle 17: Refinanzierungsoptionen und deren Vor- und Nachteile	114
Tabelle 18: Abrechnungsmodelle und deren Vor- und Nachteile	117
Tabelle 19: Annahmen BEV Ladestellen für N3-26	125
Tabelle 20: Ergebnisse BEV Ladestellen, CLEARER-Szenario	125
Tabelle 21: Annahme H ₂ -Tankstellen für N3-26	127
Tabelle 22: Ergebnisse FCEV-Tankstellen, CLEARER-Szenario	128
Tabelle 23: Annahmen spezifische Kosten ERS-Infrastruktur	129
Tabelle 24: Annahme spezifische Kosten für ERS-Infrastruktur, Netzanschluss und für stationäres Laden	129
Tabelle 25: Spezifische Investitionskosten für stationäres Laden BEV	130
Tabelle 26: Investitionskosten Annahmen H ₂ -Tankstellen	130
Tabelle 27: Zwischenergebnisse TCO-Berechnung	131

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AC	Alternative Current (Wechselspannung)
AEA	Österreichische Energieagentur-Austrian Energy Agency
AFID	Alternative Fuel Infrastructure Directive
AFIR	Alternative Fuel Infrastructure Regulation
ASFiNAG	Autobahn- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
BEV	Battery Electric Vehicle
BEV400	Battery Electric Vehicle mit 400 km Batteriereichweite
BMDV	deutsches Bundesministerium für Digitalisierung und Verkehr
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BMVI	deutsches Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CAPEX	Capital expenditure
CENELEC	Europäisches Komitee für elektronische Normung
CH ₄	Methan
CLEARER-Studie	Climate Neutral Freight Transport Studie
CLR-Szenario	Szenario nach CLEARER-Studie
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ eq	Kohlendioxid Äquivalent
CuMg	Kupfermangan
C _D	Strömungswiderstandskoeffizient
C _{RR}	Rollwiderstandskoeffizient
d	Tag
DC	Direct Current (Gleichstrom)
EN	Europäische Norm
ERS	Electric Road System
EU	Europäische Union
EUR	Euro
et al.	und andere
E-Control	Energie-Control Austria
E-Fuel	Electrofuels (synthetische Kraftstoffe)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellen-Fahrzeug)
FCEV500	Fuel Cell Electric Vehicle mit 500 km Tankreichweite
g	Gramm
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GuD	Gas und Dampf Kombikraftwerk
GUw	Gleichrichterunterwerk
GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunde
HPC	High Power Charging
H ₂	Wasserstoff
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
kN	Kilonewton
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
ICCT	International Council on Clean Transportation
IEA	Internationale Energie Agentur
Ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JRC	Joint Research Center
l	Liter
L	Large
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquified Natural Gas
m	Meter
M	Medium
max.	maximal
min.	Minimal
Mio.	Millionen
MMP	Mobilitätsmasterplan
MMP-Szenario	Mobilitätsmasterplan-Szenario
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
mm ²	Quadratmillimeter
UnwMrd.	Milliarden
MV	Mittelspannung
MVA	Megavoltampere
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunden
n	Anzahl
N	Newton
NEKP	Nationaler Energie- und Klimaplan
NOVA	Normverbrauchsabgabe
N3-26	Nutzfahrzeug der Klasse N3 (Lastkraftwagen) mit einer zulässigen Gesamtmasse größer 26 Tonnen
OEM	Original Equipment Manufacturer (Lastkraftwagen-Hersteller)
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
ÖNACE	Klassifikation der Wirtschaftstätigkeiten
ÖNORM	bezeichnet einen österreichischen Standard
OPEX	Operating expenditures
OVE	Österreichischer Verband für Elektrotechnik
O-BEV	Overhead Catenary Battery Electric Vehicle, Oberleitungsgebundenes batterieelektrisches Fahrzeug
O-BEV100	Overhead Catenary Battery Electric Vehicle mit 100 km Batteriereichweite
O-BEV200	Overhead Catenary Battery Electric Vehicle mit 200 km Batteriereichweite
O-HEV	Overhead Catenary Hybrid Electric Vehicle
O&M	Operation and Maintenance
p.a.	pro Jahr
Pkw	Personenkraftwagen
PIARC	World Road Association
s	Sekunde
S	Small
SO	Sonntag
SOC	State of Charge
SZM	Sattelzugmaschinen
t	Tonne(n)
TCO	Total Cost of Ownership
TE	Transport and Environment
TEN-V	Transeuropäische Netze für Verkehr
tkm	Tonnenkilometer
TRL	Technology Readiness Level, Technologiereifegrad
TWh	Terawattstunde
U	Spannung

UW	Unterwerk
V	Volt
VPÖ	Verkehrsprognose Österreich
VPÖ-Szenario	Szenario basierend auf der Verkehrsprognose Österreich
W	Watt
WACC	Weighted Average Cost of Capital
WG	Working Group
Wh	Wattstunden
WK-RL	Wegekostenrichtlinie
XS	Extra Small
XL	Extra Large
XXL	Extra Extra Large
z. B.	zum Beispiel
ZEM	Zero Emission Mobility
zGG	zulässigem Gesamtgewicht
°C	Grad Celcius
∅	Durchschnittlich

Über die Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency (AEA)

Die Österreichische Energieagentur liefert Antworten für die klimaneutrale Zukunft: Ziel ist es, unser Leben und Wirtschaften so auszurichten, dass kein Einfluss mehr auf unser Klima gegeben ist. Neue Technologien, Effizienz sowie die Nutzung von natürlichen Ressourcen wie Sonne, Wasser, Wind und Wald stehen im Mittelpunkt der Lösungen. Dadurch wird für uns und unsere Kinder das Leben in einer intakten Umwelt gesichert und die ökologische Vielfalt erhalten, ohne dabei von Kohle, Öl, Erdgas oder Atomkraft abhängig zu sein.

Das ist die missionzero der Österreichischen Energieagentur.

Mehr als 85 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus vielfältigen Fachrichtungen beraten auf wissenschaftlicher Basis Politik, Wirtschaft, Verwaltung sowie internationale Organisationen. Sie unterstützen diese beim Umbau des Energiesystems sowie bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Bewältigung der Klimakrise.

Die Österreichische Energieagentur setzt zudem im Auftrag des Bundes die Klimaschutzinitiative klima**aktiv** um. Der Bund, alle Bundesländer, bedeutende Unternehmen der Energiewirtschaft und der Transportbranche, Interessenverbände sowie wissenschaftliche Organisationen sind Mitglieder dieser Agentur.

Besuchen Sie uns auf unserer Webseite: energyagency.at.



AUSTRIAN ENERGY AGENCY

energyagency.at