



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Roadmap OH-Lkw: SWOT-Analyse

Strategische Analyse des OH-Lkw-Systems und konkurrierender Betriebskonzepte im Umfeld des schweren Straßengüterverkehrs

Julius Jöhrens, Julius Rücker, Fabian Bergk (ifeu)
Wolfgang Schade, Johannes Hartwig (M-Five)

Heidelberg / Karlsruhe, 2017



Inhalt

1 Zusammenfassung	3
2 Hintergrund und Ziel	5
3 Umfeldanalyse des schweren Straßengüterverkehrs	7
3.1 Welche Akteure sind im Transportgewerbe tätig?	7
3.2 Welche Anforderungen werden Nachfrageseitig an Transportleistungen gestellt?	8
3.3 Welche wirtschaftlichen Trends sind im Transportgewerbe zu beobachten?	9
3.4 Welche Rolle spielen Schienenverkehr und Binnenschifffahrt im Vergleich zum Straßengüterfernverkehr?	10
3.5 Welche Besonderheiten sind beim Kombinierten Verkehr zu beachten?	11
3.6 Welche Fahrzeugtypen werden derzeit für welche Einsatzprofile genutzt?	12
3.7 Welche Rolle spielen gebietsfremde Fahrzeuge und Kabotage im deutschen Güterfernverkehr?	13
3.8 Welche Bedeutung könnte die Einführung von CO ₂ -Grenzwerten für Lkw haben?	14
3.9 Welche Rolle spielt die Elektrifizierung des Güterfernverkehrs derzeit auf EU-Ebene?	15
3.10 Welche Planungen existieren für die Entwicklung der Verkehrswege?	16
3.11 Welche Planungen existieren in Bezug auf den Ausbau der Infrastruktur für alternative Antriebe?	17
4 SWOT-Analyse konkurrierender Lkw-Betriebskonzepte	18
4.1 Diesel-Lkw	18
4.2 LNG-Lkw	21
4.3 H ₂ -Lkw	24
4.4 OH-Lkw	26
5 Schlussfolgerungen	30
5.1 Ökonomie und Innovation	32
5.2 Umwelt, Energie und Ressourcen	34
5.3 Betreibersicht	35
5.4 Organisation und gesellschaftliche Akzeptanz	37
Literatur	38

1 Zusammenfassung

Das Vorhaben „Roadmap OH-Lkw“ hat zum Ziel, logistische, wirtschaftliche und betriebliche Herausforderungen einer Einführung von OH-Lkw aus systemischer Sicht zu untersuchen. Dabei sollen geeignete Anwendungsfälle des Systems, mögliche Ausbaupfade sowie notwendige Rahmensetzungen untersucht werden.

In der vorliegenden Analyse wurde das Umfeld des schweren Straßengüterverkehrs hinsichtlich einiger Fragestellungen untersucht, die für die Einführung alternativer Antriebe von Bedeutung sind (Kapitel 3). Vor diesem Hintergrund wurde dann eine Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT-Analyse) von Diesel-Lkw und drei alternativen Lkw-Antriebstechnologien durchgeführt, die einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung von Treibhausgasminderungszielen leisten können und eine gewisse technische Reife erlangt haben (Kapitel 4). Die Ergebnisse der SWOT-Analyse wurden entlang der Dimensionen Ökonomie, Umwelt, Betreibersicht und Organisation bewertet.

Im Bereich „**Ökonomie und Innovation**“ ist zunächst festzuhalten, dass grundsätzlich alle diskutierten Antriebsoptionen (inklusive des Dieselantriebs) „dekarbonisierbar“ sind, da alle benötigten Energieträger prinzipiell aus erneuerbarem Strom hergestellt werden können¹. Unterschiede zwischen den Antriebsoptionen bestehen hinsichtlich der zu erwartenden Kosten, des Primärenergiebedarfs und der benötigten Infrastruktur. Die Unterschiede in den Gesamtkosten werden langfristig durch die Energiekosten dominiert, kurzfristig aber durch die Einführung neuer Fahrzeugtechnologie (bevor Skaleneffekte vollständig eingetreten sind), den Aufbau der Infrastruktur (solange diese noch nicht ausgelastet ist) sowie Kosten für die Anpassung von Betriebsabläufen und die Übernahme technologischer und betrieblicher Risiken durch die Betreiber.

Die derzeitige Klimaschutzpolitik im Verkehrsbereich folgt in weiten Teilen dem Paradigma der Technologieneutralität. Dies kommt grundsätzlich solchen Technologien zugute, die in der Einführungsphase geringe Investitionskosten und sonstige Hürden aufweisen, unabhängig von ihrer Energieeffizienz, ihren langfristigen strategischen Implikationen (Stichwort Energiesicherheit), ihren langfristigen Kosten und ihren langfristigen CO₂-Minderungspotentialen. Konkret führt Technologieneutralität somit dazu, dass der Markt inkrementelle Effizienzverbesserungen konventioneller Antriebe erwirkt und keinem der alternativen Antriebe die Überwindung der genannten initialen Hürden ermöglicht.

Insbesondere ist damit zu rechnen, dass ein Markthochlauf der OH-Lkw-Technologie unter solchen Randbedingungen nicht erreicht werden kann, und zwar aufgrund ihrer relativ hohen initialen Investitionskosten und organisatorischen Hürden. Eine wesentliche Aufgabe im Projekt „Roadmap OH-Lkw“ wird es daher sein zu ermitteln, welche technologiespezifischen staatlichen Fördermaßnahmen erforderlich sind, um die langfristigen Potentiale

¹ Aufgrund der Potentialgrenzen von Biokraftstoffen wird davon ausgegangen, dass diese langfristig nicht für die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs zur Verfügung stehen.

der OH-Lkw-Technologie für Klimaschutz, Energieeffizienz und wirtschaftlichen Güterverkehr nutzbar zu machen.

Im Feld „**Umwelt, Energie und Ressourcen**“ wurde die Primärenergieeffizienz als ein wesentliches Unterscheidungskriterium der Antriebe identifiziert. Hier ist der OH-Lkw durch den hohen Systemwirkungsgrad eindeutig überlegen. Da mit Batterie- oder Brennstoffzellenhybridisierung ein Betrieb ohne Schadstoffemissionen auch abseits der Oberleitung möglich ist, kann der OH-Lkw zudem zur Minderung von Luftqualitätsproblemen in Ballungsgebieten beitragen, die voraussichtlich auch mittelfristig virulent sein werden. Daraus ergibt sich für den weiteren Projektverlauf u.a. die Frage, wie die Einführung des OH-Lkw von aktuellen und geplanten Luftreinhaltungsmaßnahmen profitieren könnte. Des Weiteren wären mögliche Synergien mit der Infrastruktur von Oberleitungsbussen zu untersuchen.

Der Markt für Speditionsdienstleistungen ist stark zergliedert. Um die notwendige Planbarkeit zu gewährleisten und das Investitionsrisiko tragen zu können, müssen mögliche **Betreiber** von OH-Lkw eine gewisse Größe sowie längerfristige Vertragsbeziehungen auf bestimmten Relationen haben.¹ Wie regelmäßig einzelne Fahrzeuge auf bestimmten Routen fahren, hängt zudem stark von der Struktur der Logistiknetzwerke ab. Für das weitere Vorgehen im Projekt erscheint es daher sinnvoll, solche Strukturen näher zu untersuchen, zusätzlich zum ohnehin geplanten Einsatz eines Verkehrsmodells und Telematikdaten.

Beim Thema „**Organisation und Akzeptanz**“ wurden wissenschaftliche und akteursbezogene Hemmnisse für die weitere Entwicklung der OH-Lkw-Technologie identifiziert. Um einen Ausbaupfad für die Oberleitungsinfrastruktur zu optimieren, sind detaillierte Datengrundlagen zu Fahrzeugeinsätzen und logistischen Prozessen notwendig, die derzeit höchstens für Teilbereiche des Markts zur Verfügung stehen. Es könnte sich daher als sinnvoll erweisen, anhand einzelner verfügbarer Datensätze (z.B. für eine größere Spedition oder einen Werksverkehr) Fallstudien für einen OH-Lkw-Einsatz zu erarbeiten und dann ihre Verallgemeinerbarkeit zu prüfen. Begrenzte Anwendungsfälle, die einem wirtschaftlichen Betrieb zumindest nahe kommen, sind zudem wesentliche Voraussetzung für eine Einführung des Systems über die Pilotphase hinaus.

Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die OH-Lkw-Technologie dürfte zudem ein synergetisches Miteinander von OH-Lkw und Schienengüterverkehr sein. Zu prüfen wäre beispielsweise, ob es stark frequentierte Vor- und Nachlaufstrecken des Kombinierten Verkehrs gibt, die durch OH-Lkw bedient werden könnten, und auf welchen längeren Relationen eine Verlagerung größerer Verkehrsmengen auf die Schiene auch längerfristig nicht realistisch erscheint.

¹ Denkbar wäre auch, dass die Fahrzeuge zunächst vorzugsweise geleast werden.

2 Hintergrund und Ziel

Die Verkehrsleistungen des Straßengüterverkehrs sind in der Vergangenheit stetig gestiegen. Aktuelle Prognosen gehen von weiterem Wachstum aus. Effizienzverbesserungen des Dieselantriebs alleine reichen nicht aus, um die von der internationalen Staatengemeinschaft vereinbarten Klimaschutzziele zu erreichen. Während bereits bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen Alternativen zum Verbrennungsmotor zur Anwendung kommen, müssen auch bei schweren Lkw im Fernverkehr alternative Energieträger und Antriebsformen eingeführt werden.

Eine Chance im Verkehrssektor die Dekarbonisierung weiter voran zu treiben bietet der „Oberleitungs-Hybrid-Lkw“ (OH-Lkw). Mit dem elektrischen Antrieb des OH-Lkw, der mit Fahrstrom aus einem zweipoligen Oberleitungssystem gespeist wird, ergibt sich ein großes Potential die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) für Lkw-Transporte zu senken und die Energieeffizienz schwerer LKW (pro transportierter Tonne) deutlich zu verbessern. Technische Begrenzungen der Elektromobilität wie die des Batteriespeichers (Energiedichte, Ladeleistung, Gewicht) könnten so umgangen werden. Die Einführung eines solchen Oberleitungs-Lkw-Systems birgt enorme logistische, wirtschaftliche und betriebliche Herausforderungen. Im Projekt „Roadmap OH-Lkw“ werden diese aus systemischer Sicht untersucht. Um die Kernfragen der Implementierung und der Verbreitung des OH-Lkw-Systems beantworten zu können, werden in drei aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen:

- Vorteilhafte Anwendungsfälle des OH-Systems untersucht (AP1)
- Mögliche Einführungspfade über den Entwicklungszeitraum bis 2050 konstruiert (AP2)
- Geschäftsmodelle für den Markthochlauf erarbeitet (AP3)

Mit der SWOT-Analyse – also der Untersuchung von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken verschiedener Lkw-Betriebskonzepte – gilt es im Rahmen des ersten Arbeitspaketes den strategischen Handlungsrahmen für das OH-Lkw-System abzustecken. Dabei wird zunächst das spezifische Umfeld des schweren Straßengüterverkehrs untersucht (Kap. 3). Dieses setzt sich aus wirtschaftlichen und logistischen, akteursspezifischen, fahrzeugseitigen, infrastrukturellen und politischen Rahmenbedingungen zusammen. Darauf aufbauend wird der OH-Lkw mit weiteren alternativen Lkw-Betriebskonzepten verglichen (Kap. 4). Hierbei werden zunächst die systemseitigen Stärken und Schwächen sowie die marktseitigen Chancen und Risiken untersucht. Während der Diesel-Lkw auf Grund seines hohen Marktanteils als Referenz gesetzt ist, begründet sich die Berücksichtigung von LNG- und H₂-Lkw als Alternativen zum OH-Lkw-System aus deren technischem Reifegrad und Kommerzialisierungspotential. Für eine erfolgreiche Dekarbonisierung der LKW muss in allen drei Fällen unterstellt werden, dass der Energieträger (Strom, LNG, H₂) aus erneuerbarem Strom erzeugt wurde. Abschließend werden aus den Untersuchungen für folgende strategische Dimensionen zentrale Momente des jeweiligen Betriebkonzeptes abgeleitet:

- Ökonomie und Innovation
- Umwelt, Energie und Ressourcen

- Betreibersicht
- Organisation

Für die weitere Untersuchung des OH-Lkw gehen aus den strategischen Dimensionen der SWOT-Analyse nicht nur erste Hinweise auf mögliche Treiber und Hemmnisse des Systems, sondern auch Kriterien möglicher Anwendungsfälle hervor und liefern damit wesentliche Anknüpfungspunkte für die Fortführung der Potentialanalyse.

3 Umfeldanalyse des schweren Straßengüterverkehrs

In unserer arbeitsteilig organisierten und international stark verflochtenen Volkswirtschaft ist der Güterverkehr wesentlicher Bestandteil eines hoch komplexen Netzes verschiedener Logistikdienstleistungen. Die Abläufe des Güterverkehrs sind wesentlich durch folgende Aspekte geprägt:

- die Verflechtung von Planung, Koordination und Durchführung logistischer Prozesse (Transport, Lagerung und Umschlag), wobei der Straßengüterverkehr eine zentrale Rolle spielt
- die Anforderungen der Versender an Zuverlässigkeit, Planbarkeit, Reaktionsschnelligkeit und Kosten ihrer Transportvorgänge
- die dort tätigen Akteure (insbes. Verlader, Spediteure, Frachtführer)
- die verwendeten Verkehrsmittel
- die infrastrukturellen Rahmenbedingungen
- die politischen Rahmenbedingungen (national und EU)
- den internationalen Wettbewerb in langlaufenden Verkehren.

Um die Rahmenbedingungen etablierter und alternativer Lkw-Betriebskonzepte mit hinreichender Schärfe zu konturieren, sollen mit folgenden Fragen zentrale Aspekte bezüglich des Umfelds des schweren Straßengüterverkehrs herausgearbeitet werden. In Kapitel 4 werden dann die Spezifika der einzelnen Antriebssysteme bewertet.

3.1 Welche Akteure sind im Transportgewerbe tätig?

Obwohl die Arbeitsteilung innerhalb der Logistikbranche zunehmend unschärfer wird, lassen sich im Kontext des Güterverkehrs die folgenden drei Akteursgruppen voneinander unterscheiden:

- **Verlader** beauftragen die Transporte, sind für Produktion und zumeist auch Verladung der Güter zuständig
- **Spediteure** sind Handelsvermittler der Verkehrsmärkte und organisieren den Transport oder übernehmen gewerbsmäßig Gütersendungen durch Frachtführer
- **Frachtführer** führen den Transport durch, d. h. übernehmen gewerbsmäßig die Beförderung von Gütern

Verlader können, indem sie den Frachtführer bestimmen, Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl nehmen. Dabei sind neben den wirtschaftlichen oftmals auch unternehmens- und branchenspezifische sowie organisatorische Faktoren ausschlaggebend. Hierzu zählen u. a.

Lieferantenstrukturen und gewachsene Kundenbeziehungen zu Spediteuren und Frachtführern. Diese gefestigten Konstellationen können auch Einfluss darauf haben, wie Verlagerer mit neuen Technologien beim Transport und insbesondere alternativen Antrieben umgehen. Da jedoch über die gesamte Wertschöpfungskette der internationale Wettbewerbsdruck zunehmend die Make-or-Buy Entscheidung relevanter macht, werden für den einzelnen Versender unrentable Prozesse – wie die Organisation von Transportleistungen – zunehmend ausgelagert, um dann effizient gebündelt zu werden. Es findet somit eine Konzentration auf die Kernkompetenzen der Produzenten statt.

Darüber hinaus verschieben sich in der Praxis häufig auch die Kompetenzbereiche innerhalb der Logistikbranche, so dass einzelne Akteure Aufgaben anderer Akteure übernehmen, wodurch die Entscheidung über die Verkehrsmittelwahl nur schwer zuzuordnen ist. Darüber hinaus sorgt ein komplexer werdendes Netz aus zahlreichen Subunternehmern für zunehmende Intransparenz und die Entscheidungsdiffusion bei der Verkehrsmittelwahl.

Auf Grund von deren Kernkompetenz als Handelsvermittler in den Verkehrsmärkten werden 80% der Transportmengen im gewerblichen Straßengüterverkehr durch Spediteure disponiert (Bühler, 2006). Die Wahl des Verkehrsmittels trifft der Spediteur unter Berücksichtigung der Bedürfnisse des Verladeters, möglicher Kostenvorteile und des erforderlichen Dispositionsaufwandes. Allerdings lagern Spediteure das Durchführen von Transportleistungen oftmals wiederum an verschiedene Frachtführer aus, da sich vor allem durch die Weiterentwicklung des europäischen Binnenmarktes der Preiskampf zwischen verschiedenen Frachtführern enorm verschärft hat.

3.2 Welche Anforderungen werden Nachfrageseitig an Transportleistungen gestellt?

Aus den zu transportierenden Gütern ergeben sich entsprechende Anforderungen an die Transportleistung, denen die verschiedenen Verkehrssysteme unterschiedlich gut entsprechen (Müller, 2016):

- Mengenanforderungen
- Preisanforderungen
- Zeit-/ Geschwindigkeitsanforderungen
- Sicherheitsanforderungen
- Verteilanforderungen

So sind z. B. Güter mit hohen Mengen- und hohen Preisanforderungen zumeist durch eine geringe Wertdichte gekennzeichnet. Hierzu zählen u. a. die Schüttgüter, welche sehr sensibel für Transportkosten sind und daher zumeist mit den Verkehrsmitteln transportiert werden, die über Energiekostenvorteile und eine hohe Massenleistungsfähigkeit verfügen; das sind fast immer Bahn oder Binnenschiff.

Mit Blick auf alternative Antriebe stellen Verteilanforderungen ein wichtiges Kriterium dar, da hier eine in der Anfangsphase begrenzte Infrastruktur die Fahrbarkeit von bestimmten Einsatzprofilen begrenzen kann. Beispielsweise sind Einsatzprofile mit hohem Fahranteil abseits der Autobahn für Oberleitungs-Lkw anspruchsvoller. Zudem können Sicherheitsan-

forderungen zum Teil relevant für die Fahrzeugwahl werden (bspw. sind Erdgasantriebe aufgrund ihrer aktuell geringeren Leistung nicht für Gefahrguttransporte zugelassen).

Auch die Wahl des Verkehrsträgers (Straße, Schiene, Wasser) folgt nicht allein Kostenerwägungen. Gerade für die Nutzer des Straßengüterverkehrs sind die Flexibilität und schnelle Reaktionszeit wichtige Motive und bestehende Preisdifferenzen zur Schiene haben lediglich untergeordnete Bedeutung.

3.3 Welche wirtschaftlichen Trends sind im Transportgewerbe zu beobachten?

- **Der Güterstruktureffekt**
beschreibt die sich verändernde Art und Zusammensetzung der transportierten Güter, wobei ein Strukturwandel mit Reduktion der Transportmenge an geringwertigen Massengütern wie Kohle und Erze und eine Zunahme an hochwertigen und eilbedürftigen Stückgütern zu verzeichnen ist.
- **Der Gütermengeneffekt**
beschreibt die Tatsache, dass die Güterverkehrsleistung i.d.R. überproportional zum Bruttoinlandsprodukt wächst. Hervorgerufen wird dies durch die Internationalisierung von Produktionsprozessen und eine Reduktion der Fertigungstiefe an einzelnen Standorten.
- **Der Logistikeffekt**
beschreibt die Einführung neuer Produktions- und Logistikkonzepte und die damit verbundenen Veränderungen der räumlichen Arbeitsteilung und Standortverflechtung. Die sich aus der zunehmenden Reduktion der Fertigungstiefe ergebende Intensivierung der Austauschbeziehungen, begünstigt den Verkehr in kleineren Transporteinheiten und führt zu einem weiteren Anstieg der Transportintensität. Der Trend zu kleineren Transporteinheiten wird zudem durch Just-in-time-Lieferungen (ohne puffernde Warenlager) verstärkt.
- **Der Integrationseffekt**
beschreibt die Wirkung der räumlichen Ausdehnung des Güterverkehrs (äußert sich in einem höheren Wachstum der Beförderungsleistung (Tonnenkilometer) im Verhältnis zur Beförderungsmenge (Tonnen))
- **Die Harmonisierung**
beschreibt die Angleichung der Rahmenbedingungen für den Straßengüterverkehr zwischen den EU-Mitgliedsstaaten (Ziel ist die Schaffung gleicher Wettbewerbsbedingungen)

Diese wirtschaftlichen Trends machen Transportleistungen eiliger, erhöhen den Kostendruck und stellen höhere Anforderungen an die Flexibilität der Sendungen. Dabei ist das Wachstum der Transportleistung eng an das der Wirtschaftsleistung und insbesondere des Außenhandels gekoppelt (Clausen, Holloh, & Kadow, 2014; Kille & Schmidt, 2008). Die Straße als Verkehrsträger kann diese Anforderungen derzeit am besten bedienen, was auch dazu beigetragen hat, dass Versuche der Verlagerung von Güterverkehr auf Schiene und Binnenschiff in den vergangenen Jahren weitgehend erfolglos blieben. Zudem führen diese Effekte zu einer Integration von Planungs- und Steuerungsprozessen innerhalb der Logistikkonzepte.

3.4 Welche Rolle spielen Schienenverkehr und Binnenschifffahrt im Vergleich zum Straßengüterfernverkehr?

Der Straßengüterverkehr dominiert seit etlichen Jahren den gesamten inländischen Gütertransportmarkt. Dies ist auch bei ausschließlicher Betrachtung des langlaufenden Verkehrs ab einer Transportentfernung von 150 km festzustellen (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), obwohl der Verkehrsträger Schiene bei entsprechenden Transportanforderungen (wie Mengen- und Kostenanforderungen) im Fernverkehr durchaus konkurrenzfähig ist.

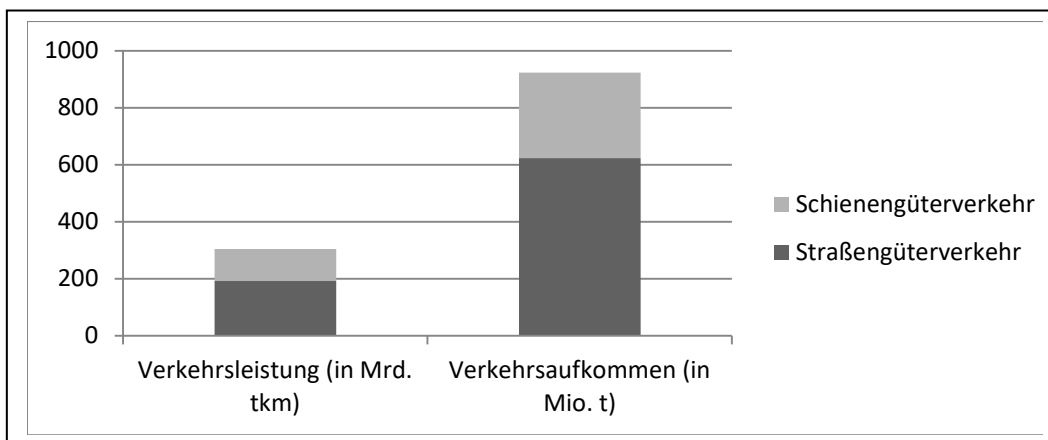


Abbildung 1: Verkehrsleistung und Verkehrsaufkommen für langlaufende Güterverkehre ab 150 km Transportentfernung (BMVI, 2014)

Auf den Schienenverkehr entfällt ein Anteil von 18 % der Transportleistung im Güterfernverkehr. Hier ist neben dem Einzelwagenverkehren vor allem der Ganzzugverkehr für den Transport von Massengütern attraktiv (Kille & Schmidt, 2008). Obwohl die Investitionen in die Schieneninfrastruktur über die letzten zehn Jahre schneller stiegen als die für Straßen, ergab sich keine Veränderung im Modal-Split des Güterverkehrs. Geschuldet ist dieser Umstand nicht zuletzt der von der Wirtschaft dringend nachgefragten Flexibilität, welcher der Schienen- im Gegensatz zum Straßengüterverkehr kaum entsprechen kann.

In Deutschland ist der Schienengüterverkehr aufgrund von Bündelungsvorteilen und geographischen Verläufen auf wenige Strecken konzentriert. Das Rheintal ist neben dem Korridor Hamburg-Fulda-Nürnberg-München und einigen Verbindungsstrecken ins benachbarte Ausland von besonderer Bedeutung. Gründe hierfür sind neben den genannten Markteffekten auch der Rückgang von privaten Gleisanschlüssen sowie der Rückzug der Bahn aus der Flächenbedienung. Insgesamt wurde in der Vergangenheit eher der Personen- als der Güterverkehr auf der Schiene bei der Planung des Verkehrsnetzes sowie des Angebots berücksichtigt, was teilweise auch für den Rückgang des Modalanteils am Güterverkehr verantwortlich ist. In der Folge wirken sich Kapazitätsengpässe an den Schienenverkehrsknoten vor allem auf den Güterverkehr aus. Ein weiteres wichtiges Thema für den Schienengüterverkehr ist die Lärmproblematik. Hier wären erhebliche Investitionen in das Wagenmaterial notwendig, um zu einer substanziellen Verbesserung zu kommen.

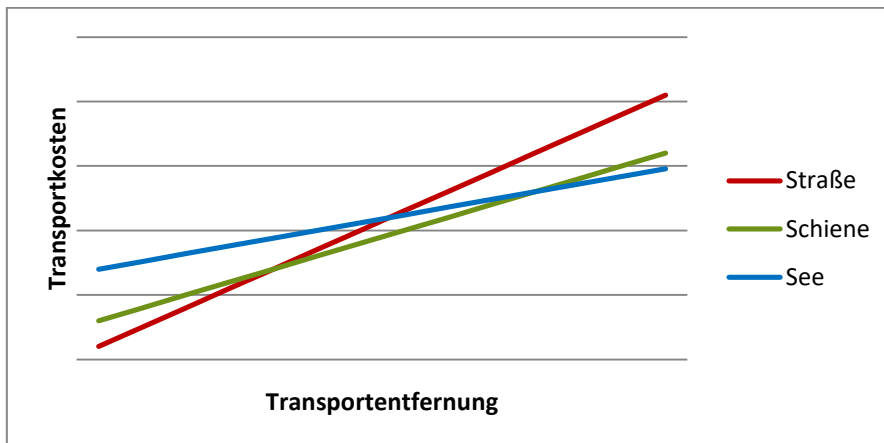


Abbildung 2: Transportkostenvergleich von Straße, Schiene und See (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2006)

Die Binnenschifffahrt schließlich stellt einen stabilen, aber relativ geringen Anteil an der deutschen Güterverkehrsleistung. Besonders der Transport von Schüttgütern (Kies, Kohle etc.) ist mit dem Binnenschiff wirtschaftlich (BMVI, 2014). Aufgrund ihrer spezifischen Stärken steht die Binnenschifffahrt weniger mit der Straße, sondern eher mit der Schiene in Konkurrenz (Müller, 2016). Die Wechselwirkungen der Binnenschifffahrt mit dem Straßengüterverkehr sind daher relativ gering.

3.5 Welche Besonderheiten sind beim Kombinierten Verkehr zu beachten?

Durch die zentrale Lage Deutschlands in Europa wächst besonders hier die Güterverkehrsleistung schneller als das –aufkommen. Dabei bedeuten die längeren Transportentfernungen auch eine Chance für den Kombinierten Verkehr, d. h. der Verknüpfung unterschiedlicher Verkehrsträger innerhalb einer Transportkette. Da im KV Teile des Güterverkehrsaufkommens auf die umweltfreundlicheren Verkehrsträger Schiene und Wasser verlagert werden, werden diese Transporte von öffentlicher Seite unterstützt. Für Lkw, die ausschließlich im Vor- und Nachlauf des KV eingesetzt werden, gelten deshalb folgende gesetzliche Vorteile:

- Befreiung von der Kfz-Steuer
- Kein Fahrverbot an Sonn- und Feiertagen
- 44t zulässiges Gesamtgewicht (zGG) statt 40 t

Um in den Genuss dieser Vergünstigungen zu kommen, müssen Kombinierte Verkehre folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Möglichst kurze Entfernung zwischen Verloader und Versandterminal sowie zwischen Empfänger und Empfangsterminal (nach 92/106/EWG max. 150km Luftlinie)
- Der überwiegende Teil der Strecke muss mit Bahn oder Schiff zurückgelegt werden (min. 80 %)

Der Kombinierte Verkehr ist vor allem für langlaufende Verkehre eine Alternative zur Straße. Sein Anteil an der Transportleistung im Güterfernverkehr (über 150 km Entfernung)

betrug im Jahr 2014 14,6 % (BMVI, 2014). Die KV-Infrastruktur hat mit rund 70 öffentlich zugänglichen Umschlag-Terminals mittlerweile eine gute Flächendeckung erreicht. Die KV-Terminals spielen häufig bei der Standortwahl für Logistikzentren auch deshalb eine Rolle, weil die Schienenanbindung auch eine Ausweichalternative zum hochausgelasteten Straßennetz darstellen kann. Herausforderungen des Kombinierten Verkehrs sind in Deutschland derzeit vor allem:

- die höhere Kapitalbindungskosten des Schienentransports gegenüber der Straße auf Grund der geringeren Reaktions- und Transportgeschwindigkeit
- die Vernetzung der verschiedenen Akteure (wie u. a. Verlader, Empfänger oder Eisenbahnverkehrsunternehmen) zu gewährleisten
- die Überlastung von KV-Terminals in Spitzenzeiten
- die teilweise ungünstige Straßenerreichbarkeit der KV-Terminals

Der Kombinierte Verkehr kann in Hinblick auf die Einführung alternativer Antriebskonzepte sowohl Beispielcharakter für bestimmte Anreize wie den oben genannten Betriebsvorteilen, als auch Hinweise auf mögliche Quelle-Ziel-Relationen geben. Hierbei sollte vor allem der Blick für die hochfrequentierten Streckenbeziehungen der Vor- und Nachläufe des KV geschärft werden.

3.6 Welche Fahrzeugtypen werden derzeit für welche Einsatzprofile genutzt?

Die überwiegende Zahl der Lkw (über 90%) hat laut Kraftfahrtbundesamt einen sogenannten Normalaufbau. Dieser umfasst Plattformen, Isolieraufbau, offene Kästen und sonstige geschlossene Kästen. Die Form des geschlossenen Kastens ist dabei der größte Einzelposten mit etwa 43% sämtlicher Aufbauten. Allerdings umfasst diese Statistik sämtliche Gewichtsklassen und einige der Spezialaufbauten für die Baubranche werden nicht für die schweren Lkws verwendet. Auch die Autotransporter sind in der Regel nicht der schwersten Gewichtsklasse zuzuordnen. Die Verteilung der Aufbauformen lässt zumindest teilweise Rückschlüsse auf die Verwendung zu. Demzufolge werden bei Sattelzugmaschinen überwiegend konventionelle Stückgüter oder Containergüter transportiert. Eine genaue Übersicht der verschiedenen Aufbauten bei den unterschiedlichen Größenklassen zeigt Abbildung 3.

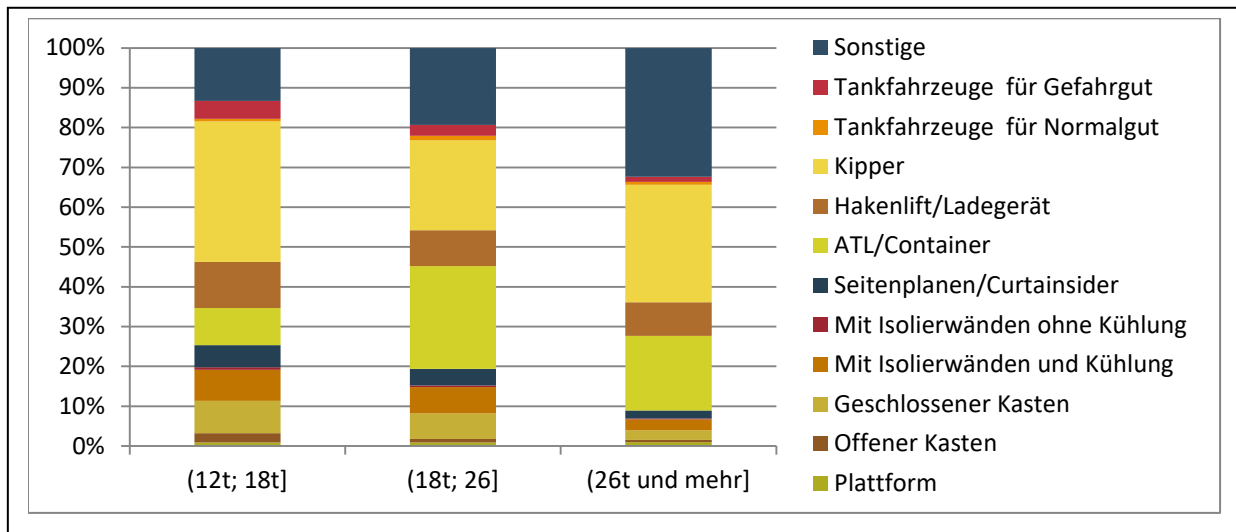


Abbildung 3: Übersicht der Fahrzeugaufbauten für die Größenklassen ab 12t zGG (KBA, 2016)

Die Frage der eingesetzten Fahrzeugtypen hängt eng mit der Wahl der Transportwege und Verteilsysteme und daher auch mit der Branche zusammen, in deren Auftrag der Transport durchgeführt wird. Einen wesentlichen Einfluss haben insbesondere:

- Die Frage nach der **Flexibilität** auf Seiten der Spediteure in Bezug auf Terminierung und Transportmenge
- Die Art der **Beschaffungsstrategie** (Single, Dual, Multiple oder Global Sourcing). Bei festen und wenigen Zulieferern mit höherer Planbarkeit der Produktions- bzw. Absatzmenge besteht weniger Notwendigkeit zu „gemischten Transporten“, also der Zusammenlegung von Transporten von mehreren Produzenten
- Die Wahl der **Logistikstandorte** (auch abhängig von der Branche). So können beispielsweise eher industrielle Logistikstandorte, zentrale Logistikstandorte oder Ballungsraum-Logistikstandorte unterschieden werden. Die jeweilige Form des Logistikstandortes beeinflusst auch die Art der eingesetzten Lkw-Typen, aber nicht ausschließlich. So ist aus dem Lebensmitteleinzelhandel bekannt, dass die Anlieferung von Filialen in der regionalen Distribution auch mit Sattelschleppern im Tourensystem erfolgt und somit eine Ausnahme zu den eher auf die mittlere Gewichtsklasse konzentrierte Form der Distribution bei dieser Art des Logistikstandortes darstellt

3.7 Welche Rolle spielen gebietsfremde Fahrzeuge und Kabotage im deutschen Güterfernverkehr?

Die Fahrleistung gebietsfremder Lkw ist in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen und machte im Jahr 2015 etwa 40 % der gesamten Lkw-Fahrleistung auf deutschen Autobahnen und mautpflichtigen Bundesstraßen aus (BAG, 2016). Dabei haben polnische, niederländische und tschechische Fahrzeuge den größten Anteil. Setzt sich dieser Trend weiter fort, so wird prognostiziert, dass bis 2040 der überwiegende Teil der auf mautpflichtigen Strecken erbrachten Fahrleistung gebietsfremden Lkw zuzurechnen ist (Fahren et al., 2016). Werden Transportleistungen innerhalb eines Landes im Anschluss an eine grenzüberschreitende Beförderung erbracht, spricht man in diesem Fall von Kabotage. Von

dem oben beschriebenen Anteil von 40 % des Verkehrsaufkommens im deutschen Straßengüterverkehr, der durch ausländische Fahrzeuge erbracht wird, entfallen etwa 5 % auf Kabotage.

Zum Schutz des inländischen Transportgewerbes waren ausländische Transportdienstleistungen lange Zeit weitestgehend verboten. Dies führte jedoch zu vermehrten Leerfahrten und damit zu ökonomischen wie ökologischen Nachteilen. Aus diesem Grund wurden innerhalb des Europäischen Binnenraums Kabotagedienstleistungen grundsätzlich freigegeben (s. EU-Kabotage-Richtlinie 1072/2009/EG bzw. für Deutschland die Verordnung über den grenzüberschreitenden Verkehr und den Kabotageverkehr [GüKGrKabotageV]). Regelt werden u. a. die Anzahl der Anschlussfahrten eines einfahrenden, gebietsfremden Lkw innerhalb Deutschlands, bevor dieser Deutschland wieder verlassen muss. Dementsprechend dürfen Lkw drei beladene Anschlussfahrten durchführen, bevor das Land, in dem das Transportunternehmen seinen Sitz hat, wieder angefahren werden muss.

Die Lockerung der Kabotagebeschränkungen begünstigt die weitere Zunahme des Anteils gebietsfremder Lkw an der inländischen Fahrleistung. Dies hat verschiedene Implikationen, die unmittelbaren Einfluss auf die Logistikbranche haben:

- Verschärfung des Wettbewerbs im Straßengüterverkehr
- zunehmende Heterogenität der Stakeholder-Interessen
- zunehmende Komplexität der Transportketten (inkl. Anschlussfahrten)

Die beschriebene Tendenz hin zu gebietsfremden Fahrzeugen hat zudem Auswirkungen auf die Marktchancen alternativer Energieversorgungsinfrastruktur: Solange diese nur in Deutschland eine relevante Abdeckung erreicht, ist für ausländische Fahrzeuge ein Umstieg mit signifikant höheren Hürden verbunden. Im Fall des OH-Lkws mit Diesel-Hybridisierung könnten die Fahrzeuge im Ausland zwar verbrennungsmotorisch fahren, aber die hohen Anschaffungskosten würden sich nur bei sehr hohen Fahrleistungen auf in Deutschland elektrifizierten Strecken lohnen.

3.8 Welche Bedeutung könnte die Einführung von CO₂-Grenzwerten für Lkw haben?

Während es im Pkw-Bereich bereits seit einigen Jahren für die Hersteller verbindliche Flottenzielwerte für die CO₂-Emissionen der verkauften Fahrzeuge gibt, werden bei Lkw bisher lediglich die Schadstoffemissionen (u. a. von CO und NO_x) auf dem Motorenprüfstand reguliert¹. Aktuell werden auf europäischer Ebene Möglichkeiten sondiert, auch für Lkw CO₂-Flottengrenzwerte einzuführen.

Geplant sind derzeit die Einführung eines CO₂-Monitorings für schwere Nutzfahrzeuge, das auf einer entsprechenden Simulationssoftware basieren soll (VECTO)². Das voraussichtlich 2018 beginnende und zwei Jahre dauernde Monitoring könnte Grundlage einer zukünftigen Grenz- bzw. Zielwertgesetzgebung werden. Das Monitoring soll die standardisierte Erfassung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge am Markt ermöglichen. Gleichzeitig liefert es die Grundlage für die Zertifizierung des Ver-

¹ EU-Richtlinie 91/542/EWG und EU-Verordnung 595/2009

² <http://www.acea.be/publications/article/infographic-vecto>; Zuletzt abgerufen am 21.04.2017.

brauchs und der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge sowie für die Entwicklung neuer Messverfahren zum Test verbrauchsrelevanter Komponenten.

Die Einführung von CO₂-Grenzwerten könnte den Durchbruch für eine Reihe von Effizienztechnologien im Lkw-Bereich bringen, deren Amortisationszeit derzeit noch den Planungshorizont der Betreiber übersteigt. Abhängig vom Ambitionsgrad der Grenzwerte könnten sie darüber hinaus die Einführung alternativer Antriebe begünstigen. Wie stark die unterschiedlichen Antriebsoptionen hiervon profitieren würden, hängt stark von der Ausgestaltung ab. Entscheidend ist dabei u.a., welche Fahrzeugsegmente adressiert werden: Batterieelektrische Antriebe sind beispielsweise eher im Bereich kleinerer Verteiler-Lkw zu erwarten.

Sowohl das Bestreben mehrerer Länder um einen Gesetzgebungsentwurf für CO₂-Grenzwerte bei SNF als auch die Forderung nach solchen seitens verschiedener Unternehmen der Privatwirtschaft zeigen das Bewusstsein für die Dringlichkeit von CO₂-Minderungen im Straßengüterverkehr.

„We therefore call on you to propose post-2020 standards that reduce CO₂ emissions and fuel consumption of new trucks and trailers“ (IKEA, Nestlé, DB Schenker, PHILIPS, & other companies and NGOs, 2016)

Allerdings bleibt die CO₂-Grenzwertgesetzgebung wesentlich von dem Vorstoß der Europäischen Kommission (an die sich der oben zitierte Brief richtete) und deren Initiativmonopol europäischer Gesetzgebung abhängig. Die Dringlichkeit für die Effizienzsteigerung und die Reduktion der Emissionen beim Fahrzeugantrieb schwerer Lkw wird jedoch in besonderem Maße durch die von der internationalen Staatengemeinschaft vereinbarten Klimaschutzziele sowie den zurückgehenden Erdölfördermengen verstärkt werden. Damit einhergehend werden auch die Entwicklung der Nutzfahrzeugindustrie und die Rahmenbedingungen für Fahrzeugflottenbetreiber in Zukunft stärker durch politische Maßnahmen wie die der CO₂-Grenzwertgesetzgebung flankiert und determiniert werden.

3.9 Welche Rolle spielt die Elektrifizierung des Güterfernverkehrs derzeit auf EU-Ebene?

Das geltende Weißbuch für Verkehr (2011)¹ erhebt den Klimaschutz im Verkehr zu einem primären Ziel und fordert eine 60%ige Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor bis 2050 gegenüber 1990. Gleichzeitig wird eine Verlagerung des langlaufenden Güterverkehrs auf die Schiene gefordert und auch durch wichtige EU-Richtlinien zum Aufbau der Trans-europäischen Verkehrs-Netze (TEN-V) gefördert (TEN-V 1315/2013², CEF 1316/2013³). Da der OH-Lkw durch seine Ausrichtung an Verkehrsachsen mit hoher gebündelter Nachfrage wahrscheinlich dieselben Transportmärkte adressiert wie die Bahn,

¹ EC (2011): Weißbuch zum Verkehr. Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. KOM 2011/144. Luxemburg.

² Verordnung (EU) Nr. 1315/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2013 über Leitlinien der Union für den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes und zur Aufhebung des Beschlusses Nr. 661/2010/EU.

³ Verordnung (EU) Nr. 1316/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2013 zur Schaffung der Fazilität „Connecting Europe“, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 913/2010 und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 680/2007 und (EG) Nr. 67/2010 (ABl. L 348 vom 20.12.2013).

muss hier von einem Widerspruch zur verkehrspolitischen Zielen der EU ausgegangen werden.

Andererseits forcieren dieselben TEN-V-Richtlinien auch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs, genau wie die AFI-Richtlinie¹. Dass die Stromzuführung via Oberleitung für den Straßenverkehr als Technologie in den Richtlinien nicht explizit genannt wird, lässt sich darauf zurückführen, dass die Technologie im internationalen Rahmen zum Zeitpunkt der Erstellung der Richtlinien noch nicht diskutiert wurde. Da die Oberleitungstechnologie zu den genannten Dekarbonisierungszielen beitragen kann, wäre zu erwarten, dass sie prinzipiell beispielsweise auch Fördergelder im Rahmen der TEN-V-Mittel aus dem CEF Innovations-Topf erhalten könnte. Allerdings sind durch die ersten drei Förderaufrufe die Mittel des CEF nahezu aufgebraucht und bisher vorwiegend in den Aufbau von LNG- und H₂-Infrastruktur sowie -Fahrzeugen in einigen Mitgliedsstaaten geflossen.

Der OH-Lkw ist also zwar konsistent mit den EU-Klimaschutzziele und den Anstrengungen zur Elektrifizierung des Straßenverkehrs als wichtigste alternative Energiequelle, passt jedoch (noch) nicht in die EU-Verkehrspolitik, da er die Verlagerung auf die Bahn in Frage stellt.

3.10 Welche Planungen existieren für die Entwicklung der Verkehrswege?

Auf nationaler Ebene ist verkehrsträgerübergreifend der Bundesverkehrswegeplan (BVWP) wichtigstes Planungsinstrument für Erhalt, Aus- und Neubau der Verkehrswege. Dabei ist eines der Leitthemen des aktuellen in 2016 veröffentlichten BVWP „Erhalt vor Neubau“, womit die Bedeutung des Substanzerhalts der Verkehrswege gemeint ist. Der BVWP wird vom BMVI erarbeitet und vom Kabinett beschlossen. Die Investitionen ins Bundesfernstraßennetz² betragen im Jahr 2015 etwa 5,13 Mrd. € (BMVI, 2014). Die in Deutschland dem Straßengüterverkehr zur Verfügung stehende Verkehrsinfrastruktur umfasst ca. 13.000 km Bundesautobahn und ein überörtliches Straßennetz von ca. 231.000 km (BMVI, 2014).

Wichtige Impulse der Infrastrukturentwicklung werden jedoch zunehmend auch auf europäischer Ebene initiiert. Dabei sind von der EU Kommission ein Kernnetz (zu implementieren bis 2030) und ein umfassendes Netz (zu implementieren bis 2050) definiert worden. Als Implementierungsinstrument wurden 9 Kernnetz-Korridore spezifiziert, auf denen gezielt die Lücken und Engpässe in den Transportnetzwerken zwischen den Mitgliedsstaaten beseitigt werden sollen, um die Integration des europäischen Binnenmarktes und des Bahnsystems weiter voranzutreiben. Von diesen 9 Korridoren betreffen 6 direkt Deutschland.

Auch wenn diese Korridore alle Transportmodi umfassen, liegt der Fokus auf der Integration des Schienennetzes, da sich in den einzelnen europäischen Ländern zum Teil unterschiedliche technische Standards und Organisationsvorschriften etabliert haben und diese unterschiedlichen Standards den langlaufenden innereuropäischen Verkehr erschweren. Hier geht der Blick in die USA, die einen Modalanteil des Güterverkehrs auf der Schiene

¹ BMVI (2016): Nationaler Strategierahmen über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe als Teil der Umsetzung der Richtlinie 2014/94/EU.

² Hier sind die Brutto-Anlageinvestitionen gemeint, welche sowohl Erweiterungs- und Rationalisierungsinvestitionen, als auch Ersatz- bzw. Erhaltungsinvestitionen umfassen.

von über 40% aufweisen, da dort die langlaufenden Verkehr (z.B. von der West- zur Ostküste) Großteils auf der Schiene abgewickelt werden. Ähnlich langlaufende Verkehre in Europa verlaufen immer grenzüberschreitend. Ziel der EU-Kommission ist es daher insbesondere die Hemmnisse für grenzüberschreitende Bahnverkehre zu beseitigen. Deshalb soll auf den 9 Korridoren nicht nur die Netz-Infrastruktur ausgebaut und aufgewertet werden, sondern auch die Steuerungssysteme harmonisiert und modernisiert sowie die Zahl und Kapazität der multi-modalen Umschlagterminals deutlich erhöht werden.

Die infrastrukturellen Hemmnisse der größeren Verbreitung des Schienengüterverkehrs (bzw. des kombinierten Verkehrs) liegen beispielsweise in:

- fehlenden Überholgleisen für 740 Meter-Zügen,
- der Notwendigkeit nach Erneuerung des vorhandenen Bestandes an Rollmaterial (v.a. aus Lärmschutzgründen) sowie
- noch unzureichenden Transportdienstleistungsangeboten für die komplexen Abstimmungsprozesse im multimodalen Verkehr.

3.11 Welche Planungen existieren in Bezug auf den Ausbau der Infrastruktur für alternative Antriebe?

Die Europäische Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien¹ schreibt einen Anteil von 10% erneuerbarer Energie im Verkehrssektor für das Jahr 2020 vor. Dieses Ziel und die Treibhausgasminderungsziele auf europäischer Ebene² geben den Rahmen für die EU-Richtlinie zum Infrastrukturaufbau für alternative Kraftstoffe³, die konkrete Maßnahmen zum Aufbau einer solchen Infrastruktur beinhaltet. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Straßen des TEN-V-Kernnetzes. Insbesondere wird auch die Harmonisierung des Infrastrukturnetzaufbaus für Elektrizität, Erdgas und Wasserstoff angestrebt.

Als Richtschnur für den Durchschnittsabstand von CNG-Tankstellen wird 150 km angegeben. LNG wird von der Kommission als kosteneffizienter Kraftstoff für schwere Nutzfahrzeuge angesehen und hier sieht die Richtschnur einen Durchschnittsabstand von 400 km zwischen den Tankstellen vor. Als spätesten Zeitpunkt zur Erfüllung der Vorgaben der angemessenen Zahl von LNG- sowie CNG-Tankstellen wird Ende 2025 angestrebt. Diese Vorgaben sind in einem nationalen Strategierahmen umzusetzen. Ein wichtiger Punkt ist auch die Vereinheitlichung der Tanktechnologie für die alternativen Antriebe.

Der nationale Strategierahmenplan zum Ausbau der Infrastruktur alternativer Kraftstoffe sieht einen Ausbau von LNG-Tankstellen für schwere Nutzfahrzeuge an den europäischen Verkehrskorridoren vor. Mit 6 bis 10 Tankstellen fällt dieser aber sehr verhalten aus. Ebenfalls wird der Ausbau der Wasserstoffversorgung forciert, welche sich momentan quasi noch im Testbetrieb befindet, sowie der Ausbau der Ladeinfrastruktur für elektrisch angetriebene Fahrzeuge. Die Oberleitungstechnologie für Straßenfahrzeuge spielt in der Richtlinie bislang dagegen keine Rolle.

¹ Renewable Energy Directive 2009/28/EC, kurz RED

² 406/2009/EG

³ Alternative Fuels Infrastructure Directive 2014/94/EU, kurz AFID

4 SWOT-Analyse konkurrierender Lkw-Betriebskonzepte

Die Alternativen zum Dieselantrieb bei schweren Nutzfahrzeugen unterscheiden sich in ihrer technischen Reife, günstigen Einsatzgebieten und Kommerzialisierungsgraden teilweise erheblich. Die nachfolgende SWOT-Analyse soll helfen, den Oberleitungs-Lkw im Vergleich zu anderen Technologien einzuordnen und Untersuchungsschwerpunkte für den weiteren Projektverlauf zu identifizieren. Untersucht werden in der SWOT-Analyse neben dem Diesel-Lkw als Referenzgröße die Betriebskonzepte LNG (Gas)-Lkw, H₂ (Wasserstoff)-Lkw und OH (Oberleitungs-Hybrid)-Lkw. Für die verschiedenen Betriebskonzepte sollen Steckbriefe erstellt werden, die wesentliche Eigenschaften abbilden und so eine Vergleichbarkeit ermöglichen. Dabei sollen sowohl die systemseitigen Stärken und Schwächen der Antriebe, als auch deren marktseitige Chancen und Risiken aufgezeigt werden. Aus der Gegenüberstellung der untersuchten Stärken und Schwächen sowie den Chancen und Risiken werden dann die sich daraus ableitenden strategischen Handlungsfelder der Lkw-Betriebskonzepte anhand folgender Dimensionen aufgezeigt:

- Ökonomie und Innovation
- Umwelt, Energie und Ressourcen
- Betreibersicht
- Organisation

Ziel des Vergleichs ist es, das Umfeld des OH-Lkw im Hinblick auf konkurrierende Antriebssysteme richtig einschätzen zu können und auf dieser Grundlage zu entscheiden, welche Antriebssysteme im weiteren Projektverlauf für welche Anwendungsfälle und in welcher Detailtiefe berücksichtigt werden müssen.

4.1 Diesel-Lkw

Der Dieselmotor ist heute der mit großem Abstand meistgenutzte Antrieb für schwere Nutzfahrzeuge und stellt damit die Referenz für die Bewertung alternativer Antriebskonzepte dar. Wesentliche Stärke des Dieselantriebs ist die hohe Energiespeicherdichte von Diesel, so dass das Gewicht des mitgeführten Diesels die erzielbare Nutzlast nur unwesentlich reduziert. Trotz des mäßigen Wirkungsgrads des Dieselantriebs lassen sich dadurch hohe Reichweiten der Lkw von mehreren hundert Kilometern realisieren. Zudem ist die Betankungsinfrastruktur flächendeckend etabliert, so dass sich aus dem Tanken nur geringe Einschränkungen der logistischen Freiheitsgrade ergeben. Der Dieselantrieb profitiert darüber hinaus von günstigen fiskalischen Rahmenbedingungen. Schwächen zeigt der Dieselantrieb vor allem hinsichtlich seiner Umwelteigenschaften (Treibhausgas-, Schadstoff- und Lärmemissionen) sowie seines weiteren Entwicklungspotentials.

Tabelle 1: Stärken und Schwächen des Diesel-Lkw

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> ● umfassende Erfahrungen mit der Technologie vorhanden → Verlässlichkeit ● Hohe Energiedichte des Kraftstoffs [→ kleiner, leichter Tank → hohe Reichweite] Bsp. 400 l Diesel → > 1000 km Reichweite ● Hohe Reichweite ermöglicht in einem heterogenen Markt die kostenoptimierte Beschaffung von Diesel (z.B. Tanken in Ländern mit niedrigem Diesel-Steuersatz) ● Drop-in-Substitute für Diesel aus erneuerbarer Energie (Biodiesel, PtL-Diesel), sind technisch verfügbar, teilweise bereits seit längerem am Markt vertreten und bergen Potential, die Treibhausgasemissionen weiter zu senken. ● Große Vielfalt an unterschiedlichen Fahrzeugtypen und -konfigurationen verfügbar (optimale Anpassung der Fahrzeuge an konkrete Einsatzprofile) ● Relativ günstige Anschaffungskosten der Fahrzeuge durch Produktion großer Stückzahlen ● Weltweit flächendeckende Tankstelleninfrastruktur ● Flächendeckendes Servicenetz ● Kosten für die Akteure gut kalkulierbar, standardisierte Verfahren im Umgang mit Kostenrisiken ● Globaler Markt für Diesel-LKW (NeulKW und Sekundärmarkt) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Weitere motorseitige Optimierung begrenzt bzw. absehbar sehr kostenintensiv ● Aufwändige Abgasnachbehandlung nötig, um aktuelle Grenzwerte einhalten zu können; z.T. hohe Schadstoffemissionen bei älteren Bestandsfahrzeugen. ● Dieselsubstitute aus erneuerbarer Energie (Biodiesel, PtL-Diesel), mit denen die Treibhausgasemissionen in einer Well-to-wheel-Betrachtung gesenkt werden können, <ul style="list-style-type: none"> – sind deutlich teurer als fossiler Diesel – stehen grundsätzlich in Konflikt mit anderen ökologischen und gesellschaftlichen Schutzgütern (Flächenverbrauch, Biodiversität, etc.) ● Kraftstoffpreis abhängig von internationalem Rohölpreis ● Relativ geringer Wirkungsgrad: Spitzenwerte bis zu 45 %, im Mittel jedoch niedriger [um die 40%] ● Dieselmotor relativ wartungsintensiv; Lebensdauer des Motors deutlich geringer als die des restlichen Fahrzeugs ● Aufwändiges Getriebe notwendig → Zusatzgewicht

Werden die in Tabelle 1 dargestellten Stärken und Schwächen des Diesel-Lkw ins Verhältnis zu den in der Umfeldanalyse des schweren Straßengüterverkehrs untersuchten Rahmenbedingungen gesetzt, so ergeben sich Chancen und Risiken dieses Betriebskonzepts (s. Tabelle 2).

Tabelle 2: Chancen und Risiken des Diesel-Lkw

Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Effizienzsteigerung durch Hybridisierung • Weitere Verbesserung der Abgasnachbereitung • Bekannte und bewährte Technologie (Vertrauen seitens der Flottenbetreiber) • Durch Beimischung von synthetischem Diesel aus erneuerbarem Strom können die Treibhausgasemissionen well-to-wheel ohne Umstellung auf der Nachfrageseite gesenkt werden. • Aufgrund umfangreichen Know-Hows und hoher Wertschöpfung bei der Motorenproduktion haben die Fahrzeughersteller ein starkes Interesse an einer auch zukünftig wichtigen Rolle des Dieselantriebs. 	<ul style="list-style-type: none"> • Endlichkeit fossiler Energieträger bzw. Einschränkung ihrer Verfügbarkeit aus wirtschaftlichen oder politischen Gründen • schwankender Ölpreis • Wirtschaftliche Nutzung von Erneuerbarer Energie durch alternative Antriebskonzepte • Fahrverbote für Dieselfahrzeuge im Rahmen von Luftreinhaltungsmaßnahmen • Regulatorisch bedingte Verteuerung von CO₂-Emissionen • Einführung von CO₂-Grenzwerten für Nutzfahrzeuge • Verschärfung der Grenzwerte für Schadstoffemissionen • verschärfte Umwelanforderungen an Transportdienstleistungen („Green Logistics“) • Verschlechterung der CO₂-Bilanz (well-to-wheel) durch Erhöhung des Anteils unkonventioneller Ölvorkommen am Gesamtfördervolumen

Für die wesentlichen strategischen Bewertungsdimensionen lassen sich aus diesen Ergebnissen für den Diesel-Lkw folgende Schlüsse ziehen:

- **Ökonomie und Innovation:** Der Diesel-Lkw ist in puncto Wirtschaftlichkeit derzeit das Maß der Dinge und hat die Entwicklung der Logistikbranche mit ihren Kostenstrukturen wesentlich beeinflusst. Globaler Absatzmarkt sichert hohe Stückzahlen. Gleichwohl ist er Unsicherheiten durch Ölpreisschwankungen und künftige Emissionsgesetzgebungen ausgesetzt. Der Spielraum für weitere fahrzeugseitige Innovationen, um diesen Unsicherheiten zu begegnen, ist begrenzt.
- **Umwelt, Energie und Ressourcen:** Die Schadstoffemissionen des Dieselantriebs lassen sich mit einigem technischen Aufwand auf ein ökologisch unbedenkliches Niveau bringen. Die Energieeffizienz moderner Dieselmotoren nähert sich allerdings den physikalischen Grenzen. Signifikante CO₂-Minderungen lassen sich nur durch Dekarbonisierung der Kraftstoffvorkette erzielen, was wiederum i.a. Ressourcenprobleme nach sich zieht.
- **Betreibersicht:** Der Dieselantrieb bringt von allen Antrieben die geringsten Risiken mit sich. Das Servicenetz ist gut, die Fahrer mit der Technologie vertraut, und das Risiko der

Kraftstoffkosten wird in vielen Fällen vertraglich an die Verlader weitergegeben. Ein Risiko könnte sich mittelbar aus Einfahrbeschränkungen für Dieselfahrzeuge z.B. in Innenstädten ergeben.

- **Organisation:** Die gesamte Struktur des Straßengüterverkehrs ist derzeit auf den Dieselantrieb und seine Eigenschaften (v.a. Flexibilität und flächendeckende Verfügbarkeit) zugeschnitten.

4.2 LNG-Lkw

Als Alternative zur Dieseltechnik haben in den vergangenen Jahren weltweit Gasantriebe an Bedeutung gewonnen. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Ottomotoren, bei denen die Kraftstoffversorgung und -speicherung, Motorsteuerung und Abgasnachbehandlung modifiziert sind. Statt fossilem Erdgas kann wahlweise auch Biogas eingesetzt werden. Im Gegensatz zu Biodiesel sind hierbei ohne fahrzeugseitige Anpassung beliebige Beimischungsgrade (bis 100%) möglich. Während bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen häufig komprimiertes Erdgas (Compressed Natural Gas, oder kurz CNG) zum Einsatz kommt, bietet sich für schwere Nutzfahrzeuge auf Grund dessen größerer Dichte das verflüssigte Erdgas (Liquified Natural Gas, oder kurz LNG) an. Gängig sind stöchiometrisch ($\Lambda=1$) betriebene Otto-Motoren. Als zweite Technologie zeichnen sich LNG-Motoren nach dem Selbstzündungsbetrieb des Diesels ab (HPDI, High-Pressure-Direct-Injection). Diese weisen eine ähnliche Energieeffizienz wie Dieselmotoren auf und erfordern eine vergleichbare Abgasnachbehandlungstechnologie, verursachen jedoch ca. 20% weniger lokale THG-Emissionen als der Dieselantrieb.

Im Rahmen des Feldversuchs „Blue Corridor“¹ (von der EU gefördert) wird die Eignung dieser Antriebstechnologie für schwere Lkws getestet. Dieses Projekt stellt auch einen Schritt in Richtung europaweiter Harmonisierung technischer Standards und der Identifikation diesbezüglicher Limitierungen dar. Neben Herstellern wie Volvo, Renault und Iveco sind am Feldversuch auch Gasproduzenten wie Linde und Tankstellenbetreiber wie Eni beteiligt. Es wurden neben einigen technischen Hemmnissen, die zum Aufbau einer einheitlichen Infrastruktur noch bewältigt werden müssen, auch regulatorische Hürden der Technologie festgestellt, wie beispielsweise das Nutzungsverbot von LNG im Eurotunnel.

Anhand der in Tabelle 3 dargestellten Stärken und Schwächen des LNG-Lkw wird das Potential des Erdgasantriebs für schwere Nutzfahrzeuge als Alternative zum herkömmlichen Dieselantrieb untersucht.

Tabelle 3: Stärken und Schwächen des LNG-Lkw

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> ● Erdgasantrieb hat technologische Marktreife bereits erreicht und wird für verschiedene Anwendungsfälle angeboten (z. B. werden LNG-Sattelzugmaschinen u. a. von IVECO, Mercedes Benz und Vol- 	<ul style="list-style-type: none"> ● Bisher nur wenige Hersteller und verhältnismäßig teure Fahrzeuge am Markt ● Noch keine flächendeckende Tankstelleninfrastruktur vorhanden

¹ <http://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/urban/studies/doc/2016-01-alternative-fuels-implementation-good-practices-appendix-d.pdf>

<p>vo angeboten)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Reichweite (600 bis 1400 km/Tankfüllung, letzteres bei zwei LNG-Tanks) • Kann ohne fahrzeugseitige Anpassung mit bis zu 100 % erneuerbarem Methan betrieben werden • Im Vergleich zum Diesel verbrennt Gas mit niedrigeren Luftschadstoffemissionen, daher geringerer Aufwand für die Abgasnachbehandlung bei Ottomotoren • Beimischung von Biogas verbessert die CO₂-Bilanz (Well-to-wheel) 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkungsgrad des Otto-Motors ca. 10% schlechter als bei vergleichbaren Dieselfahrzeugen (Fahren et al., 2016), HPDI ähnliche Energieeffizienz • Reduktion der zulässigen Nutzlast durch schwere LNG-Tanks • Betankung erfordert spezielle Schulung der Fahrer sowie das Tragen von Arbeitsschuttmitteln (Grund ist die niedrige Temperatur des LNG) • Höhere Wartungskosten als bei Diesellkw aufgrund komplexerer Technologie, insbesondere höheren Verbrennungstemperaturen • Signifikante Energieverluste innerhalb der Energiebereitstellungskette (v.a. Verflüssigung) • Momentan noch geringere Leistung des Motors durch Gasantrieb → Einschränkung der Anwendungsbereiche (z. B. keine Gefahrguttransporte zulässig) • Hoher Druck und niedrige Temperatur → Aufwendige Lagerung des LNG und Risiko des sog. „Boil off“ durch Erwärmung, z.B. bei längeren Standzeiten • Restwerte der ersten Generationen LNG LKW dürften nahe null liegen
--	--

Aus den Stärken und Schwächen des LNG-Lkw ergeben sich vor dem Hintergrund der spezifischen Rahmenbedingungen des schweren Straßengüterverkehrs verschiedene Chancen und Risiken (s. Tabelle 4):

Tabelle 4: Chancen und Risiken des LNG-Lkw

Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Bisher nicht genutzte Effizienzpotentiale für Gasmotoren können schnell erschlossen werden → THG-Emissionen dann well-to-wheel ca. 5-20% geringer als Diesel (jeweils rein fossile Kraftstoffe) • Synthetisch hergestelltes Gas aus Erneuerbaren Energien (EE) kann ebenfalls zu LNG verflüssigt und beigemischt werden • Voraussichtliche Entkopplung des Gas- 	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Mono-Fuel-Motoren weitere Entwicklung notwendig um Motoreffizienz zu verbessern, bzw. bei Dual-Fuel um Schadstoffklasse Euro VI zu erreichen • Hohe Anschaffungs- und hohe Wartungskosten • Intransparente Marktstruktur der Fahrzeughersteller • Ungewissheit bezüglich der politischen

<p>preises vom Rohölpreis zugunsten des Gaspreises</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Reichweite ermöglicht weite Tankstellenabstände (bis zu 250 km) für ein erstes Ausbauszenario • Geringere Kraftstoffkosten im Vergleich zum Diesel → Betriebskostenvorteile 	<p>Verfügbarkeit vorhandener Erdgasreserven</p> <ul style="list-style-type: none"> • Im Sinne des Klimaschutzes lohnt sich die Einführung der Technologie nur bei gleichzeitiger starker Dekarbonisierung der Vorkette, d.h. längerfristig synthetisches Gas aus erneuerbarem Strom (PtG). Dies wird jedoch wiederum erhebliche Auswirkungen auf die Energiekosten haben.
--	--

Vor dem Hintergrund der Umfeldanalyse des schweren Straßengüterverkehrs lassen sich aus den untersuchten Stärken und Schwächen folgende Schlüsse ziehen:

- **Ökonomie und Innovation:** Gasantriebe stellen auf Grund der vom Verbrennungsmotor einfach zu adaptierenden Technologie auch für schwere Nutzfahrzeuge eine Alternative zum Dieselantrieb dar. Allerdings sorgen die im Vergleich zum Dieselantrieb hohen Anschaffungskosten, die geringere Motoreffizienz und die geringeren Reichweiten des Gasantriebs für eine Einschränkung der Anwendungsfälle. Hierbei stellen vor allem die zunehmenden Transportentfernungen und die internationale Verflechtung des Güterverkehrs den Gasantrieb vor erhebliche Herausforderungen. Vor allem die fehlende Planungssicherheit durch unklare Strategien von Herstellern, Betreibern und Politik stellt derzeit ein erhebliches Investitionsrisiko dar, das längerfristig durch die unsicheren Erdgasreserven und die kritisch zu bewertenden Substitute verstärkt wird.
- **Umwelt, Energie und Ressourcen:** Während Gasantriebe einen Beitrag zur Verringerung lokaler Emissionen leisten können, fällt deren derzeitige Klimabilanz unter Berücksichtigung der Energiebereitstellungskette nicht wesentlich besser aus als beim Dieselantrieb. Schuld daran sind u. a. die hohen Energieverluste bei der Erdgasverflüssigung und die aufwändige Lagerung des LNG sowie die geringere Energieeffizienz heutiger Gasmotoren. Langfristig scheint unter den bekannten Bedingungen ein hinreichender Beitrag der Gasantriebe zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs nicht möglich. Allenfalls durch Beimischung von Biogas und/oder EE-Gas könnte der Beitrag zur Dekarbonisierung substantziell werden. Hinzu kommen die Endlichkeit fossiler Gasreserven sowie die energieintensive Herstellung von synthetischem Methan.
- **Betreibersicht:** Die hohen Anschaffungs- und Wartungskosten der Fahrzeuge, mangelnde Erfahrungen zu Restwerten sowie eine fehlende Infrastruktur an LNG-Tankstellen sind bislang die größten Hemmnisse für die Anwendung des Erdgasantriebs im Bereich des Straßengüterfernverkehrs. Darüber hinaus wirkt die intransparente Angebotsstruktur der Fahrzeughersteller erschwerend auf die Wahl des geeigneten Fahrzeugs.
- **Organisation:** Dort wo Güterverkehre regional begrenzt bleiben (wie im Bereich der Zustellungsverkehre) und nicht auf eine flächendeckende Betankungsinfrastruktur angewiesen sind, gibt es bereits heute vorteilhafte Anwendungsfälle für Gasantriebe. Ob der LNG-Antrieb mittelfristig auch in größerem Umfang für nationale sowie internationale Fernverkehre eingesetzt werden kann, hängt u.a. davon ab, ob die europäische AFI-Richtlinie den Aufbau einer flächendeckenden LNG-Betankungsinfrastruktur bewirkt – hier haben die Mitgliedsstaaten großen Auslegungsspielraum.

4.3 H₂-Lkw

Brennstoffzellenantriebe bestehen aus einem Elektromotor, der über eine Brennstoffzelle mit Strom versorgt wird. Zur Abfederung von Leistungsspitzen ist in der Regel zusätzlich eine Pufferbatterie erforderlich. Die Stromerzeugung aus Wasserstoff und Sauerstoff in der Brennstoffzelle verursacht zwar weder CO₂- noch Schadstoffemissionen, jedoch ist die Wasserstofferzeugung und –verflüssigung energieintensiv. Damit ist für die Klimabilanz des Antriebs entscheidend, wie der Energieträger Wasserstoff produziert wird. CO₂-Neutralität ist nur bei Erzeugung des Wasserstoffs durch Elektrolyse mittels erneuerbaren Stroms gegeben. Erste Feldversuche mit Brennstoffzellenfahrzeugen werden im Bereich leichter Nutzfahrzeuge und Stadtbusse durchgeführt. Die Eignung der Brennstoffzellentechnologie für den Einsatz bei schweren Nutzfahrzeugen hängt nicht zuletzt von den spezifischen Stärken und Schwächen des Betriebskonzeptes ab, die in Tabelle 5 dargestellt sind.

Tabelle 5: Stärken und Schwächen des Brennstoffzellen-Lkw

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> ● TtW-Effizienz (Brennstoffzelle und Elektromotor) etwas höher als beim Dieselantrieb ● Keine Emission von Schadstoffen im Betrieb ● Kurze Betankungszeit ● Hohe Reichweite (mehrere hundert km) ● Geräuscharmer Antrieb ● Kein Leerlaufverbrauch ● Modularer Aufbau ● Geringe Wartungskosten ● Weitere Erhöhung der Energiedichte durch Verflüssigung des Wasserstoffs möglich ● Wasserstofferzeugung kann als flexibler Nachfrager im Stromsystem eingesetzt werden, dadurch u.U. geringere Strompreise erzielbar 	<ul style="list-style-type: none"> ● TtW-Effizienz deutlich schlechter als beim batterie- oder direkt-elektrischen Antrieb; zudem ca. 30 % Energieverlust bei H₂-Produktion durch Elektrolyse → relativ hoher Strombedarf pro km, hohe Energiekosten ● Hohe Kosten der Brennstoffzelle → abhängig vom eingesetzten Katalysator (Platin als Kostentreiber) ● Insgesamt noch weit vom wirtschaftlichen Einsatz im Straßengüterverkehr entfernt ● Mangelndes Fahrzeugangebot durch Nutzfahrzeughersteller ● Hohe Investitionskosten für Elektrolyse-Anlagen zur Wasserstofferzeugung und Verteilinfrastruktur ● Ggf. Ca. 30% Energieverlust bei der Wasserstoffverflüssigung ● Kaum öffentliche Betankungsinfrastruktur vorhanden ● Hohes Leistungsgewicht und großer Bauraumbedarf ● Langzeitverhalten der Brennstoffzellen noch nicht ausreichend erprobt, insbesondere bei Einsatz im Kfz (Vibrationen) ● Hohe Kosten für H₂-Drucktanks.

Die in Tabelle 6 dargestellten Chancen und Risiken des Brennstoffzellen-Lkw ergeben sich aus den spezifischen Stärken und Schwächen (s. Tabelle 5) des Betriebskonzepts vor dem Hintergrund der marktseitigen Rahmenbedingungen des schweren Straßengüterverkehrs:

Tabelle 6: Chancen und Risiken des Brennstoffzellen-Lkw

Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Das technologische Verbesserungspotential ist noch erheblich. Die Technologie könnte mittel- bis langfristig wettbewerbsfähig werden und vor allem für den regionalen Wirtschaftsverkehr eine Alternative darstellen. • Ausbau Erneuerbarer Energien ermöglicht die klimaneutrale Herstellung von Wasserstoff 	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit und Kosten von Edelmetallen (als Katalysator) am Weltmarkt • Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur könnte am Henne-Ei-Problem scheitern. Für den Ausbau der Wasserstofftankstellen gibt es insbesondere in der europäischen AFI-Direktive keine verbindlichen Vorgaben. Deutschland hat sich allerdings zum Aufbau verpflichtet. • Anreize für Investitionen der Logistikbranche in Umwelttechnologien derzeit noch begrenzt • Kostenentwicklung für Druckgastanks abhängig von: Volumetrischer Kapazität, neuen Materialien für den Tank und dem Ausbau von Pipelines zur Wasserstoffversorgung

Aus den genannten Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der Brennstoffzellentechnologie lassen sich folgende Schlussfolgerungen bezüglich der zentralen Bewertungskriterien ableiten:

- **Ökonomie und Innovation:** Wesentliche Kriterien eines Antriebssystems wie Reichweite, Effizienz und Flexibilität, die sich aus den logistischen Anforderungen an Transportleistungen ergeben, werden von der Brennstoffzellentechnologie erfüllt. So ermöglichen die hohe Energiedichte des unter hohem Druck (700 bar) gespeicherten Wasserstoffs entsprechende Reichweiten und der modulare Aufbau des Antriebssystems seine Anpassung an verschiedene Anwendungsfälle. Die Verbreitung der Wasserstofftankstellen ebenso wie die Kostenentwicklung der Brennstoffzelle und der Wasserstofftanks als wesentliche Kostentreiber werden letztlich darüber entscheiden, ob das Brennstoffzellensystem konkurrenzfähig zu den anderen Antriebssystemen wird und sich am Markt durchsetzen kann (UBA, 2016).
- **Umwelt, Energie und Ressourcen:** Der Beitrag des Brennstoffzellenantriebs zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors steht und fällt mit dem Einsatz von Strom aus Erneuerbaren Energien für die Wasserstoffherzeugung und hängt damit wesentlich von der Energiewende ab. Weiterhin wird die Durchsetzung des Brennstoffzellenantriebs durch die Verfügbarkeit der für die Katalyse benötigten Edelmetalle wie Platin determiniert. Dabei birgt vor allem die geopolitische Lage ein erhebliches Risiko für die wirtschaftliche Verfügbarkeit der Edelmetalle.

- **Betreibersicht:** Die fehlende Betankungsinfrastruktur, das mangelnde Angebot an Fahrzeugen, hohe Kosten sowie das hohe Leistungsgewicht und der Raumbedarf des Antriebssystems verhindern bislang einen Markteintritt der Brennstoffzelle im Bereich des schweren Straßengüterverkehrs. Können jedoch die genannten Hürden überwunden werden, so bieten wasserstoffbetriebene Lkw einige Vorteile, wie geringe Wartungskosten und relativ hohe Reichweiten.
- **Organisation:** Für den nationalen wie internationalen Aufbau von H₂-Infrastruktur gibt es bislang kaum verbindliche Vorgaben und widersprüchliche Signale aus der Industrie.

4.4 OH-Lkw

Die Energieversorgung für Lkw über einer Fahrleitung ist im Vergleich zu den anderen Betriebskonzepten eine erst seit wenigen Jahren diskutierte Alternative. Die Technologie des Oberleitungs-Hybrid-Lkw (kurz: OH-Lkw) basiert auf der Elektrifizierung von Fernverkehrsstrecken zur direkten Stromversorgung der Lkw über eine zweipolige Fahrleitung. Um auch abseits der Oberleitung fahren zu können, muss der Lkw mit einer zweiten Energiequelle hybridisiert werden. In den bisherigen Forschungsprojekten wurden hierfür entweder Dieselmotoren oder Batterien eingesetzt, prinzipiell sind jedoch auch Brennstoffzellen oder Gasmotoren denkbar. Die Stromversorgung des OH-Lkw basiert auf bekannten und bewährten Technologien aus den Bereichen O-Busse und Bahnstromversorgung, die für die Anwendung bei schweren Lkw adaptiert wurden. Die grundsätzliche technische Machbarkeit des Systems konnte bereits durch Teststrecken in Brandenburg und Schweden bestätigt werden. Es stellt sich allerdings die Frage, ob eine Umrüstung konventioneller Fahrzeugmodelle ausreicht um die Vorteile des OH-LKW voll zur Geltung zu bringen.

Grundsätzlich gibt es auch die Möglichkeit, eine mobile Stromzuführung über eine in die Straße eingelassene Stromschiene oder durch eine induktive Energieübertragung zu realisieren. Im Vergleich zur Oberleitungstechnologie sind hierbei jedoch die zu erwartenden Kosten signifikant höher. Zudem ist der technische Reifegrad der Alternativen derzeit noch geringer und es ist mit betrieblichen Herausforderungen zu rechnen (Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consulting GmbH, TU Hamburg-Harburg - IUE, & M-Five, 2017). Es stellen sich somit dieselben Herausforderungen wie bei der Oberleitungstechnologie in verschärfter Form, weshalb im Folgenden von einer separaten Betrachtung abgesehen wird.

Während die OH-Technologie bei Nutzung erneuerbaren Stroms hohe Treibhausgasreduktionen bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz ermöglicht, bedeutet sie gleichzeitig grundlegende Änderungen am Fahrzeug- und Nutzungskonzept und die Errichtung einer aufwändigen Elektrifizierungsinfrastruktur. Im Einzelnen konnten folgende Stärken und Schwächen identifiziert werden:

Tabelle 7: Stärken und Schwächen des Oberleitungs-Hybrid-Lkw

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Elektroantrieb ermöglicht hohen Wirkungsgrad, Rekuperation von Bremsenergie und geringen Wartungsaufwand 	<ul style="list-style-type: none"> • Bisher noch kaum Erfahrungen mit der Technologie im Straßenverkehr • Noch fehlende Oberleitungsinfrastruktur

<ul style="list-style-type: none"> • Fährt unter Oberleitung emissionsfrei, ebenso sind emissionsfreie Hybridisierungsvarianten möglich (Batterie, Brennstoffzelle) • Potential zur effizienten Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien • Geringe Betriebskosten durch hohe Antriebseffizienz (bei hinreichendem elektrischen Fahranteil) • Antrieb im elektrischen Betrieb geräuscharm und vibrationsarm → Komfort für den Fahrer • Hohes Drehmoment und gute Fahrodynamik des elektrischen Antriebs • Umfangreiche Erfahrungen mit Oberleitungstechnik im Bahnbereich • Im eingeschwungenen Zustand ökonomische Überlegenheit gegenüber anderen alternativen Antrieben • Abhängig von der Hybridisierung können auch Strecken abseits der Oberleitung gefahren werden, ein Vollausbau der Infrastruktur ist nicht zwingend. 	<ul style="list-style-type: none"> • (Vor)Finanzierung der Oberleitungsinfrastruktur in der Aufbauphase bislang unklar • Oberleitungsinfrastruktur bedeutet einen Eingriff in den Straßenraum → komplexe juristische und sicherheitstechnische Fragen, optische Auswirkungen auf alle Straßenbenutzer • Starke Wechselwirkung der benötigten Fahrleitungsinfrastruktur mit der Fahrzeugauslegung, insbesondere dem Hybridkonzept • OH-Lkw bisher nur als Prototyp aufgebaut (noch keine Serienfertigung und Unklarheit über Technologiekosten) • Erzielbarer elektrischer Fahranteil hängt stark vom Einsatzprofil des Fahrzeugs ab → Geringere Flexibilität und Kostenrisiko für Betreiber
---	--

Entsprechend der besonderen Eigenschaften des OH-Lkw-Systems ergeben sich aus dem Anwendungskontext des schweren Straßengüterverkehrs sowohl Chancen als auch Risiken für die kommerzielle Markteinführung und den Ausbau des Systems (s. Tabelle 8).

Tabelle 8: Chancen und Risiken des Oberleitungs-Hybrid-Lkw

Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Hohes Potential zur Einsparung von THG-Emissionen bei entsprechendem oberleitungselektrischen Fahranteil • Ausbau der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien kann durch das OH-System zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs beitragen • Geringe Volatilität des Strompreises → Kalkulationssicherheit • Die zu erwartenden Energiekostenvorteile könnten die benötigten Infrastrukturinvestitionen bei entsprechender Auslastung ganz oder teilweise refinanzieren 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Auslastungsgrad der Infrastruktur für Rentabilität des Systems notwendig. • Herstellung der Passgenauigkeit zwischen Infrastrukturausbau und potentiellen Nutzern anspruchsvoll • Dynamisches Marktumfeld im Logistikbereich erschwert langfristige Einsatzplanung der Fahrzeuge durch potentielle Nutzer. • Uneinigkeit über Aufteilung von finanziellen Risiken der Systemeinführung unter den Stakeholdern

<p>ren.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bei entsprechender Hybridisierung Einfahrt in zukünftig evtl. emissionsbeschränkte Bereiche (z.B. Innenstädte) möglich. • Durch Hybridisierung mit leistungsfähigen Batterien kann die notwendige Flächendeckung des Oberleitungsnetzes reduziert werden. • Neue logistische Konzepte wie z.B. die Bereitstellung von Shuttleverkehren auf hochfrequentierten Strecken könnten günstige Bedingungen für die neue Technologie auch in einem frühen Marktstadium bedeuten. • Akzeptanz bei den Fahrern durch geringeren Lärmpegel und geringere Vibrationen bei Fahrt unter Oberleitung • Neues Absatzfeld für die Elektrizitätswirtschaft, was Beiträge zu den notwendigen Investitionen begünstigen könnte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mögliche Umlegung der Infrastrukturkosten auf Nutzer muss noch rechtlich geklärt werden • Logistikmarkt stark zergliedert und international verflochten → Hemmnisse für Investitionen, die ein bestimmtes Umfeld benötigen • Anreize für Investitionen der Logistikbranche in Umwelttechnologien derzeit noch begrenzt • Akzeptanz der OH-Technologie aus Sicht der Fahrzeughersteller unsicher, da starke Einflüsse auf Wertschöpfungskette • Nationaler wie internationaler Bedarf an Standardisierung, um Interoperabilität zu ermöglichen
---	---

Für die zentralen Bewertungskriterien der SWOT-Analyse ergibt sich daraus folgendes Bild für die OH-Technologie in ihren verschiedenen Ausprägungen:

- **Ökonomie und Innovation:** Der langfristig voraussichtlich steigende Rohölpreis und die im Vergleich zum Dieselpreis geringere Volatilität des Strompreises ermöglichen dem OH-Lkw auf lange Sicht einen relativ sicheren Planungshorizont. Betriebskostenvorteile könnten dadurch längerfristig teilweise zur Finanzierung der Oberleitungsinfrastruktur eingesetzt werden. Risiken bestehen vor allem hinsichtlich der Finanzierung der Markteinführungsphase und der Integration eines noch nicht flächendeckend ausgerollten Systems in die logistischen Prozesse. Hier sind innovative logistische Geschäftsmodelle gefragt, um die Auslastung der Oberleitungsinfrastruktur in der Anfangsphase zu steigern und somit die absehbar notwendige infrastrukturelle Vorleistung zu verringern.
- **Umwelt, Energie und Ressourcen:** Werden OH-Lkw mit erneuerbarem Strom betrieben, so ermöglichen sie hohe Treibhausgasminderungen im Fernverkehr und nutzen die absehbar knappe Ressource „erneuerbarer Strom“ sehr effizient. Voraussetzung dafür ist insbesondere bei dieselektrischen OH-Lkw ein hoher Streckenanteil unter Oberleitung. Die sich mit dem oberleitungselektrischen Fahren an das übergeordnete Verteilnetz richtenden Leistungsbedarfe müssen für die jeweiligen Ausbaupfade des OH-Systems mit berücksichtigt werden. Im Einzelnen hängen diese stark von der gewählten Hybridisierung der Fahrzeuge ab: Eine Hybridisierung mittels Batterie erfordert möglicherweise eine höhere Leistungsfähigkeit einzelner Oberleitungsabschnitte. Andererseits kann der notwendige Anteil elektrifizierter Abschnitte dadurch verringert werden und gleichzeitig Nullemission im Vor- und Nachlauf der Fahrzeuge ermöglicht werden. Insgesamt ergeben sich starke Wechselwirkungen der OH-Technologie mit der weiteren Entwicklung des batterieelektrischen Antriebs.

- **Betreibersicht:** Da bisher nur Prototypen des OH-Lkw existieren, sind noch keine belastbaren Aussagen zu möglichen Fahrzeugpreisen in einer Serienfertigung möglich, der Fahrzeugpreis wird jedoch auf absehbare Zeit höher liegen als für konventionelle Fahrzeuge. Entscheidend dürfte unter anderem sein, ob die höheren Fahrzeugkosten und tendenziell geringere Flexibilität mit der OH-Technologie auf Betreiberseite durch signifikant geringere Betriebskosten ausgeglichen werden können. Flottenbetreiber werden nur dann auf den OH-Lkw umsteigen, wenn stark frequentierte Strecken über eine hinreichende Elektrifizierung verfügen.
- **Organisation:** Für eine kommerzielle Einführung des Systems sind noch eine Reihe rechtlicher Fragen zu klären. Mit Blick auf die internationale Verflechtung der Güterverkehrsströme sollten zudem zu einem möglichst frühen Zeitpunkt wesentliche technische und organisatorische Parameter (Spannungsebene, Abrechnungsmodalitäten) standardisiert werden. Überdies müsste die OH-Technologie in den regulatorischen Rahmen für alternative Antriebe (z.B. die AFI-Richtlinie) integriert werden.

5 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Analyse wurde das Umfeld des schweren Straßengüterverkehrs hinsichtlich einiger Fragestellungen untersucht, die für die Einführung alternativer Antriebe von Bedeutung sind (Kapitel 3). Vor diesem Hintergrund wurde dann eine Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT-Analyse) von Diesel-Lkw und drei alternativen Lkw-Antriebstechnologien durchgeführt, die einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung von Treibhausgasminderungszielen leisten können und eine gewisse technische Reife erlangt haben (Kapitel 4). Tabelle 9 vergleicht einige wesentliche Eigenschaften der betrachteten Antriebe. Die Erkenntnisse der SWOT-Analyse wurden entlang der Dimensionen Ökonomie, Umwelt, Betreibersicht und Organisation bewertet. In den folgenden Abschnitten werden diese Ergebnisse zusammengeführt und thesenartig Schlussfolgerungen in den genannten Bewertungsdimensionen gezogen.

Tabelle 9: Vergleich der verschiedenen Lkw Betriebskonzepte

	Diesel-Lkw	LNG-Lkw	H₂-Lkw	OH-Lkw
Kraftstoff/Energieträger	Diesel	verflüssigtes Erdgas	Wasserstoff	Strom
Speicher	Konventioneller Tank	LNG-Cryo-Tank (3-10 bar, -160°C)	H ₂ -Tank (700 bar)	je nach Systemauslegung: <ul style="list-style-type: none"> ● Pufferbatterie oder Supercap ● Traktionsbatterie ● H₂-Tank
Betankungs-/Ladeort	Konventionelle Tankstelle	LNG-Tankstelle	H ₂ -Tankstelle	Konduktiv an der Fahrleitung
Tank-/Ladezeit	Wenige Minuten	Wenige Minuten	Wenige Minuten	Strom: keine zusätzliche Ladezeit Diesel: wenige Minuten
Leistungsdichte	36 MJ/l	21 MJ/l	4,6 MJ/l (700bar)	∞
Restriktionen der Anwendung	Politisch (Einfahrverbote etc.)	Heute noch eingeschränkt	Geringe Kommerzialisierung	Standardisierungsbedarf
Erzielbare Reichweite	>1000km	>1000km	>800km (heute)	∞ (Abhängig von Infrastrukturausbau)
Einsatzgebiet	Überall (Kurzstrecken aber wenig effizient)	Langstrecke	Mittel- und Langstrecke	Langstrecke
Wirkungsgrad im Betrieb	Ca. 40% (TTW)	Ca. 35%	Ca. 50-60%	Ca. 80% (Oberleitung bis Rad)
Herausforderungen	Verbrauch, Schadstoffemissionen	Verbrauch, Schadstoffemissionen, Infrastruktur	Kosten, Infrastruktur	Kosten, Infrastruktur
Fahrzeugemissionen	hoch	Abhängig von Technologie	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen im elektrischen Betrieb

5.1 Ökonomie und Innovation

- Allen alternativen Antrieben ist gemein, dass sie den Aufbau zusätzlicher Infrastruktur erfordern und zumindest in einer Einführungsphase mit höheren Fahrzeugkosten verbunden sind. Beide Kostenblöcke verringern sich mit zunehmender Marktdurchdringung des entsprechenden Antriebs: Bei den Fahrzeugkosten primär durch Skaleneffekte der Produktion, bei der Infrastruktur durch deren dann höheren Nutzungsgrad.

→ Für den Lkw-Betrieb spielen in einem eingeschwungenen System aus heutiger Sicht die Energiekosten die entscheidende Rolle bei den Gesamtkosten – mit Ausnahme des Brennstoffzellenantriebs, bei dem auch in fernerer Zukunft mit erheblichen Fahrzeugmehrkosten gerechnet wird (UBA, 2016).

- Das sich daraus ergebende Henne-Ei-Problem zwischen Infrastrukturausbau und Anwenderzahl ist allen alternativen Antrieben inhärent und kann nur überwunden werden, wenn es gelingt, Anwendungsfälle zu finden, bei denen gleichzeitig eine hohe Ausnutzung der Fahrzeuge und der Infrastruktur gegeben ist. Pendelstrecken sind hierfür besonders geeignet. Gleichzeitig bedarf es eines politischen Umfelds, das den Investitionsrisiken für die Fahrzeugbetreiber entgegenwirkt.

→ Beide Fragestellungen sind Kernaufgaben des Projekts „Roadmap OH-Lkw“

- LNG ist derzeit der einzige alternative Kraftstoff, für den im Bereich schwerer Lkw ein serienmäßiges Fahrzeugangebot existiert. Das Hauptargument für die Anschaffung von LNG-Fahrzeugen aus Sicht der Betreiber sind Kosteneinsparungen im Betrieb, die v.a. aus der steuerlichen Förderung von Erdgas im Verkehrsbereich ergeben. Derzeit werden LNG-Fahrzeuge überwiegend im Verteilverkehr regional begrenzt eingesetzt, da hier das infrastrukturelle Risiko beherrschbar ist.
- Grundsätzlich ist eine Dekarbonisierung (WtW) mit allen hier diskutierten Antriebstechnologien möglich. Vor diesem Hintergrund wird im aktuellen politischen Diskurs mehrheitlich ein technologieoffenes Agieren der öffentlichen Hand gefordert und die Entscheidung für oder gegen eine Technologie dem Markt überlassen (siehe Exkurs auf S. 33). Dieses Paradigma verschärft aber das zuvor genannte Henne-Ei-Problem, da es die Planungssicherheit für die Marktteilnehmer verringert und das Risiko von „stranded invests“ vergrößert. Solange sich die Verkehrspolitik nicht auf einen Technologiepfad festlegt, entstehen der öffentlichen Hand hohe Kosten aus der Finanzierung von F&E mehrerer Technologien und den Marktakteuren aus der notwendigen Risikostreuung auf Grund der unsicheren Gesamtstrategie der Technologiepfade. Hierdurch wird wiederum der Infrastrukturausbau für jede einzelne Technologie verlangsamt und somit die Umstellung der Abläufe auf Alternativtechnologien zum herkömmlichen Dieselantrieb bei den Betreibern verlangsamt.

→ Eine entscheidende Fragestellung im Rahmen des Roadmappings im vorliegenden Projekt lautet daher, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, um die Technologieoffenheit einzugrenzen. Zudem ist es wichtig, mögliche Synergien zwischen verschiedenen Antriebssystemen zu identifizieren (bspw. eine Hybridisierung von Oberleitungs-Lkw mit Brennstoffzellen).

Exkurs: Chancen und Risiken von Technologieoffenheit

Klimapolitik und die Dekarbonisierung im Verkehr bedeuten langandauernde Transformationen und sind langfristige Aufgaben. Im frühen Stadium einer solchen Transformation stehen häufig zahlreiche zukünftige und noch nicht am Markt eingeführte Technologien zur Auswahl. Naturgemäß sind die Leistungsfähigkeit und Kosten solcher Technologien nur mit großen Unsicherheiten zu beurteilen. In diesen Fällen wird insbesondere von den industriellen Akteuren von der Politik häufig eine Technologieoffenheit in ihrem Handeln gefordert. Die Konsequenzen dieser Technologieoffenheit sind ambivalent: eine längere Offenheit für die Entwicklung verschiedener Technologien verhindert ein frühzeitiges Lock-in in eine möglicherweise unterlegene Technologie. Damit wird vor allem das Risiko gemindert auf die falsche Technologie zu setzen. Gleichzeitig wird es aber schwieriger First-Mover-Vorteile zu generieren und als erster Akteur von niedrigeren Kosten durch das engagierte Voranschreiten entlang der Lernkostenkurve zu profitieren, was vor allem die Hersteller der Technologien betrifft. Der größte Nachteil der Technologieoffenheit besteht aber in den höheren Kosten für Forschung und Entwicklung, da staatlich und/oder privat Forschungsmittel für mehrere Technologielinien aufgebracht werden müssen. Entweder stehen damit für jede Technologie weniger Mittel zur Verfügung, oder es wird ein Vielfaches der Mittel benötigt, als wenn nur eine Technologieentwicklung forciert würde. Aus Sicht der Politik und der Industrie ist es daher besonders wichtig den frühesten Zeitpunkt zu identifizieren, an dem die Technologieoffenheit aufgegeben werden sollte, zugunsten einer Fokussierung der Ressourcen auf eine oder wenige erfolgversprechende Technologien. Damit werden unnötige Ausgaben für unterlegene Technologien vermieden und den erfolgreichen Technologien mehr Ressourcen zur Verfügung gestellt. Die wichtige Frage für die Roadmap OH-LKW lautet also, wann die Festlegung auf eine Technologie, OH-LKW, LNG-LKW, H2-LKW als Alternative zum Diesel-Antrieb entscheidungsreif ist und entschieden werden sollte.

- Insgesamt verfügt Deutschland über eine gut ausgebaute Verkehrsinfrastruktur, welches sich auch im internationalen Vergleich zeigt. Allerdings wurde in der Vergangenheit häufiger ein Substanzverlust („Sanierungsstau“) bemängelt, welcher die Leistungsfähigkeit der Netze infrage stellt. Neben Neu- und Ausbaumaßnahmen stehen daher auch viele Erhaltungsinvestitionen in die Netze auf der Warteliste. Für die geplante Errichtung oberleitungselektrischer Streckenabschnitte sollten Neu- und Ausbaumaßnahmen berücksichtigt werden. So ermöglicht die Implementierung der OH-Technologie nach einer Ausbaumaßnahme eine höhere Leistungsfähigkeit und darüber hinaus u.U. das Bündeln von Baustellenabschnitten bei Straßenausbau bzw. Errichtung der Oberleitung.
- Zusätzlich zu der Finanzierungsproblematik sind in den letzten Jahren auch Schwierigkeiten bei der Realisierung bereits geplanter Projekte aufgrund von Akzeptanzproblemen seitens direkt betroffener Bürger entstanden. Ein häufiger Grund ist, neben dem zunehmenden Gewähr werden von Umweltbedenken, die Ungleichverteilung von Vor- und Nachteilen der Infrastrukturprojekte. Auch dieser Aspekt sollte im Rahmen der Diskussion um den Ausbau alternativer Kraftstoffinfrastruktur Berücksichtigung finden.

Exkurs: Batterieelektrische Antriebe für schwere Lkw

Auf Grund der geringen Energiedichte und dem hohen Leistungsgewicht von Batteriespeichern, konzentrierte sich die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs bisher auf die Fahrzeugtypen der leichten Nutzfahrzeuge (zGM<3,5 t) und der leichten Lkw (zGM 3,5 bis 7,5 t). Bei diesen hauptsächlich im innerstädtischen Zustelldienst eingesetzten Fahrzeugen überwiegen die Vorteile des elektrischen Antriebs, wie der hohe Wirkungsgrad und die Energierückgewinnung beim Bremsen, die sich aus dem Mitführen des Batteriespeichers ergebenden Nachteile. Außerdem haben die im Nahverkehr eingesetzten Fahrzeuge deutlich geringere Tagesfahrleistungen als die im Fernverkehr eingesetzten, so dass die begrenzte Reichweite keine Einschränkung darstellt. Der wirtschaftliche Einsatz elektrischer Antriebe für Fahrzeuge mit einer höheren zulässigen Gesamtmasse und größeren Tagesfahrleistungen erscheint dagegen bisher nur mit der kontinuierlichen Energieübertragung von außen (z. B. über ein Oberleitungssystem oder eine Stromschiene) möglich.

Einfluss auf mögliche Einführungspfade dieser elektrischen Straßensysteme hat dabei u. a. die sich abzeichnende Weiterentwicklung der Batterietechnologie. Diese könnte zu einer Ausweitung der Anwendungsbereiche batterieelektrischer Antriebe auf den Einsatz bei schweren Lkw und für den Güterfernverkehr führen. Zwar gibt es von verschiedenen Herstellern wie MAN, Mercedes und Terberg erste Prototypen und Kleinserien von elektrischen Sattelzugmaschinen, doch bleiben deren Einsatzgebiete auf Grund der begrenzten Reichweite zunächst auf den Nahverkehr beschränkt. Der amerikanische Elektroautohersteller Tesla hat jedoch nun angekündigt eine Sattelzugmaschine mit einer Reichweite von bis zu 800 km auf den Markt zu bringen. Zu erwarten ist jedoch ein erhebliches Zusatzgewicht durch den Batteriespeicher verbunden mit einem erheblichen Mehrpreis. So kann aus den Herstellerangaben zu den bereits auf dem Markt befindlichen Elektro-Pkw abgeleitet werden, dass unter Berücksichtigung der gegebenen Leistungsangaben die Batterie der Sattelzugmaschine voraussichtlich ein Gewicht von über 7 Tonnen haben und mehr als die Hälfte der Fahrzeuggesamtkosten ausmachen wird. Zwar wird für den elektrischen Antriebsstrang eine höhere Lebensdauer im Vergleich zum herkömmlichen Antrieb erwartet, allerdings gibt es noch keine hinreichenden Erfahrungen zur Entwicklung des Batterielebenszyklus im Einsatz beim schweren Straßengüterverkehr.

Die bekannten Einschränkungen der Batterietechnologie müssen also zumindest mittelfristig noch für Anwendungen bei schweren Lkw berücksichtigt werden. Dabei schließen sich rein batterieelektrische und oberleitungsgebundene Anwendungen im Güterfernverkehr nicht aus, sondern können sich idealerweise auch ergänzen. Durch die Kombination von größeren Batteriespeichern mit Oberleitungssystemen oder Stromschiene kann das Spektrum wirtschaftlicher Anwendungsfälle bestenfalls sogar erweitert und somit die Ablösung konventioneller Antriebe beschleunigt werden.

5.2 Umwelt, Energie und Ressourcen

- Prinzipiell ist eine Dekarbonisierung mit allen Antrieben zu erreichen, da alle Kraftstoffe letztlich aus erneuerbarem Strom hergestellt werden können (strombasierte Kraftstoffe). Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Effizienz, mit der dies geschehen kann (s. Abbildung 4), in den Energiebereitstellungskosten, die sich im Zuge der Dekarbonisierung daraus ergeben, und in den strategischen Versorgungsrisiken, die damit verbunden sind (Öko-Institut, 2013). Da die Verfahren zur Herstellung und Nutzung strombasierter Kraftstoffe mit hohen elektrischen Ener-

gieverlusten im Zuge der Syntheseverfahren verbunden sind, ist die direkte Übertragung elektrischer Energie auf den Fahrzeugantrieb deutlich zu bevorzugen.

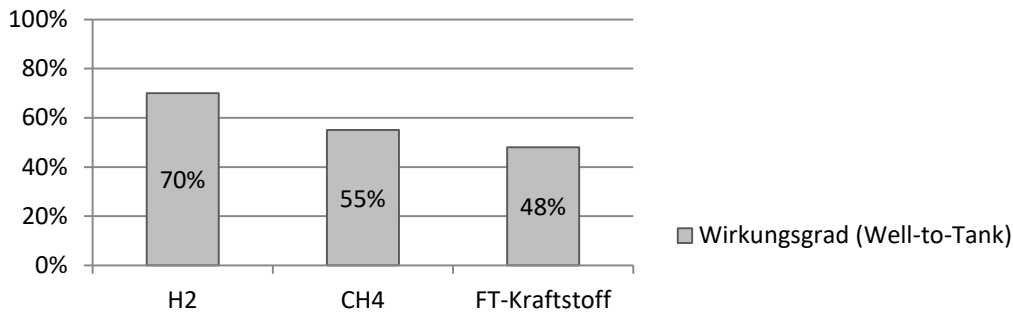


Abbildung 4: Wirkungsgrad (Well-to-tank) der Herstellung stromgenerierter Kraftstoffe nach (UBA, 2015a)

- OH-Lkw haben eine sehr hohe TtW-Energieeffizienz. Der Einsatz von OH-Lkw ist die einzige Möglichkeit für den Straßengüterfernverkehr, einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Reduktionsziele für den Endenergieverbrauch zu erbringen. Die aktuellen Widerstände in der Bevölkerung gegen Netzausbaumaßnahmen sowie den Bau von Windkraftanlagen zeigen zudem, dass die Menge erneuerbaren Stroms, die perspektivisch in Deutschland produziert werden kann, nicht allein durch Kostenaspekte limitiert ist. Energieeffiziente Antriebe können daher helfen, zukünftig die Abhängigkeit von Energieimporten zu begrenzen.
- Nur elektrische Antriebe sind prinzipiell schadstofffrei im Betrieb. Ungelöste Luftqualitätsprobleme werden in Zukunft voraussichtlich zu weiteren Grenzwertverschärfungen für den Schadstoffausstoß von Fahrzeugen führen, was die Kosten für die Abgasnachbehandlung von Verbrennungsmotoren steigern dürfte. Zudem werden aktuell bereits Einfahrverbote für Dieselfahrzeuge in bestimmte Gebiete diskutiert. Neben steigenden Kraftstoffpreisen bedeuten diese Entwicklungen weitere Risiken für die Betreiber von Verbrennungsfahrzeugen.
- Die Energieversorgungsinfrastruktur selber berührt beim OH-Lkw Naturschutzbelange, die bei der Planung frühzeitig berücksichtigt werden sollten.

5.3 Betreibersicht

- Neue Technologien müssen nicht nur betriebswirtschaftlich gegenüber etablierten Technologien bestehen können, sondern auch anwendungsfreundlich und zuverlässig sein um von potentiellen Betreibern adaptiert zu werden. → Betriebswirtschaftlich günstige Einsatzprofile, die im Projekt auf Basis des TCO-Ansatzes ermittelt werden sollen, müssen stets zusätzlich hinsichtlich Akzeptanz und Risiken auf Betreiberseite geprüft werden.
- Fahrzeugbetreiber erwarten aufgrund starker wirtschaftlicher Fluktuation¹ und eines harten Preiswettbewerbs im Logistikbereich in der Regel eine schnelle Amorti-

¹ Die nachgefragte Transportleistung schwankt prozentual in der Regel stärker als die Wirtschaftsleistung.

sation ihrer Investitionen (ca. 2-3 Jahre). Eine Reihe bereits heute verfügbarer Effizienztechnologien für SNF erfüllt diese Forderung noch nicht und hat es daher bislang nicht zu nennenswerter Marktdurchdringung gebracht (UBA, 2015b). Bei alternativen Antrieben tritt dieser Effekt verschärft auf, da hier die Investitionskosten und zu tragenden Risiken in einer Anfangsphase erheblich höher sind und die Betriebskostenvorteile dies erst über eine längere Haltedauer kompensieren können.

- Der Markt der Speditionsdienstleistungen ist stark zergliedert, ein großer Teil der Leistungen wird durch kleine Speditionen mit nur wenigen Fahrzeugen erbracht. Für diese Unternehmen bedeutet die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb ein enormes Risiko, gerade wenn diese Fahrzeuge Anpassungen der logistischen Abläufe erfordern. Es ist daher wahrscheinlich, dass größere Speditionen und Flottenbetreiber früher bereit sein werden, alternative Antriebe in ihren Fuhrpark zu integrieren → sie sollten daher bevorzugt im Rahmen des Projekts angesprochen werden.
- Beim innereuropäischen grenzüberschreitenden Verkehr muss in Hinblick auf die Implementierung neuer Lkw-Betriebskonzepte nach der Zulieferstruktur unterschieden werden. Bei Mengenproduktion und Single Sourcing kann sich ein Wechsel nach Grenzübertritt auf ein anderes System durchaus auszahlen, wenn sich daraus signifikante Kostenersparnisse erzielen lassen. Für andere Zulieferstrukturen ist vermutlich die notwendige Disposition der Transporte durch einen Wechsel erheblich erschwert. Hier könnten sich ähnliche Effekte wie im grenzüberschreitenden Schienenverkehr ergeben, bei welchem unterschiedliche technische Anforderungen die Interoperabilität so erschweren, dass erhebliche Wettbewerbsnachteile entstehen.
- Gefestigte Beziehungen zwischen Verladern und Frachtführern (bzw. Spediteuren) liefern Hinweise auf mögliche Einsatzprofile, die sowohl in ihren geographischen Relationen als auch der Frequenz und dem Transportaufkommen hohe Niveaus zeigen und somit günstige Einführungspfade für neue Lkw-Betriebskonzepte darstellen.
- Ob sich bei Speditionen geeignete Einsatzprofile für alternative Antriebe und insbesondere Oberleitungs-Lkw ergeben, hängt stark von der logistischen Struktur des jeweiligen Speditionsbetriebs zusammen (z.B. Hub-and-Spoke-Systeme, Interkontinentalverkehre, ...). Hier müssen alternative Lkw-Betriebskonzepte und ihre Infrastruktur entsprechend anschlussfähig sein.
- Da die Effizienzsteigerung zum Credo der Logistikbranche gehört, muss die Einführung neuer Technologien darauf bedacht sein, den zusätzlichen organisatorischen Aufwand niedrig zu halten. → Hier kann man vom KV lernen, der in vielen Fällen als zu unflexibel wahrgenommen wird.
- In Deutschland hat der Fahrleistungsanteil gebietsfremder Fahrzeuge (und insbesondere der Anteil von Kobotageverkehren) in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Dies wirkt sich negativ auf die Nutzungsmöglichkeiten alternativer Energieversorgungsinfrastruktur aus, wenn diese in einer ersten Phase nur in Deutschland nennenswert ausgebaut werden kann. Es ist daher notwendig, solche Infrastruktur frühzeitig grenzüberschreitend zu denken und zu planen. Für den Aufbau von Pkw-Ladepunkten sowie CNG-, LNG- und H2-Tankstellen existiert be-

reits eine EU-Richtlinie. Hier könnte zukünftig auch die Energieversorgung per Oberleitung integriert werden.

5.4 Organisation und gesellschaftliche Akzeptanz

- Der O(H)-Lkw erfordert von allen alternativen Antrieben infrastrukturell die weitreichendsten Eingriffe. Daher ist er in besonderem Maße auf gesellschaftlichen und politischen Rückenwind angewiesen. Das vorherrschende Paradigma der Technologieoffenheit bedeutet für ihn im Vergleich zu anderen alternativen Antrieben das größte Risiko.
- Alternative Antriebe und insbesondere OH-Lkw sind gerade für frühe Anwendungen auf passgenaue Infrastruktur angewiesen. Um diese zu ermitteln, bedarf es umfangreicher Daten zu Nutzungsprofilen, die nur unzureichend verfügbar sind.
 - Aktuell muss für Potentialanalysen alternativer Energieinfrastruktur, wie sie hier durchgeführt werden sollen, mit sehr heterogener Datengrundlage gearbeitet werden. Ein Schwerpunkt sollte daher auf Plausibilisierung der Datengrundlage gelegt werden. Zudem schränken die Eingangsdaten möglicherweise die Art der Aussagen ein, die aus der Auswertung der Daten gewonnen werden können. Stehen beispielsweise Lkw-Einsatzdaten einer einzelnen Spedition zur Verfügung, so kann das Elektrifizierungspotential dieser Spedition für bestimmte Randbedingungen bspw. als Fallstudie untersucht werden und die Verallgemeinerbarkeit muss separat untersucht werden.
- Die komplexen Akteurs- und Stakeholderstrukturen machen die Bildung strategischer Allianzen und die interdisziplinäre Zusammenarbeit unter einer gemeinsamen Zielvorstellung dringend erforderlich, um neue Technologien und Betriebskonzepte etablieren zu können. Dabei gilt es schon frühzeitig die verschiedenen Interessengruppen in den Dialog einzubinden um Kooperation und Zusammenarbeit möglich werden zu lassen.
 - Der direkte Dialog mit wichtigen Akteuren ist daher wesentlicher Bestandteil des Projekts.
- Bei OH-Lkw gibt es viele mögliche technische Konfigurationen, die jeweils verschiedene Infrastrukturbedarfe nach sich ziehen. Dies erschwert die Diskussion mit Politik und Öffentlichkeit über diese neue Technologie (im Kopf ist stets das Bild, dass **alle** BAB eine Oberleitung bekommen müssten).
 - Gelingt es, erfolgreiche Anwendungsfälle mit begrenztem infrastrukturellem Aufwand zu demonstrieren, so kann dies auch zu einer differenzierteren öffentlichen Diskussion beitragen.
- Die Güterbahnunternehmen haben viel Erfahrung sowohl mit der Anwendung der Oberleitungstechnik als auch mit Herausforderungen intermodalen Umschlags. Gleichzeitig stehen sie dem OH-Lkw aus Konkurrenzgründen reserviert gegenüber.
 - Hier ist es notwendig, ein gemeinsames Verständnis zu Stärken und Schwächen der Verkehrsträger zu entwickeln und zu eruieren, wie der politische Rahmen gestaltet werden muss, um die OH-Lkw und Schienenverkehr nicht als Alternativen gegeneinander auszuspielen.

Literatur

- BAG. (2016). *Marktbeobachtung Güterverkehr*. Bundesamt für Güterverkehr. Retrieved from http://rzblx1.uni-regensburg.de/ezeit/detail.phtml?bibid=AAAAA&colors=7&lang=de&jour_id=184659
- BMVI. (2014). *Verkehr in Zahlen 2016/2017*. Berlin.
- Bühler, G. (2006). *Verkehrsmittelwahl im Güterverkehr. Eine Analyse ordnungs- und preispolitischer Maßnahmen*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- Clausen, U., Holloh, K.-D., & Kadow, M. (2014). *Zukunftsbilder Transport und Logistik 2030*.
- Fahren, W., Und, L. K. W., Morgen, B. U. S., Nutzfahrzeug-studie, S., Deutschland, S., & Projektleitung, J. A. (2016). *DIESEL ODER ALTERNATIVE ANTRIEBE – DIESEL ODER ALTERNATIVE ANTRIEBE – WOMIT FAHREN LKW UND BUS MORGEN ?* Hamburg.
- Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consulting GmbH, TU Hamburg-Harburg - IUE, & M-Five. (2017). *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw*. Karlsruhe: Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie.
- IKEA, Nestlé, DB Schenker, PHILIPS, & other companies and NGOs. (2016). *Letter on fuel efficiency standards for trucks*. Stakeholder Letter to President of the European Commission Mr. Jean Claude Juncker. Brussels, 26 May 2016.
- KBA. (2016). *Fahrzeugzulassungen (FZ)*. Flensburg.
- Kille, C., & Schmidt, N. (2008). *Wirtschaftliche Rahmenbedingungen des Güterverkehrs - Studie zum Vergleich der Verkehrsträger im Rahmen des Logistikprozesses in Deutschland*. Nürnberg. Retrieved from http://www.scs.fraunhofer.de/content/dam/scs/de/dokumente/studien/Wirtschaftliche_Rahmenbedingungen_des_Gueterverkehrs.pdf
- Müller, S. (2016). *Verkehrswirtschaft und Transportmanagement*. Nürnberg: scriptum wissenschaftliche schriften.
- Öko-Institut. (2013). *Strombasierte Kraftstoffe im Vergleich – Stand heute und die Langfristperspektive*.
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2006). *The Geography of Transport Systems*. Routledge. <http://doi.org/10.1080/10630732.2011.603579>
- UBA. (2015a). *Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung*. UBA Texte (Vol. 2015). INFRAS AG, Quantis, Christa Friedl. Retrieved from <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/postfossile-energieversorgungsoptionen-fuer-einen>

UBA. (2015b). *Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen*. UBA Texte (Vol. 2015). Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) und Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Forschungskennzahl 3711 96 105. Dessau-Roßlau, April 2015. Retrieved from <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/zukuenftige-massnahmen-zur-kraftstoffeinsparung>

UBA. (2016). *Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050*.