

CargoBeamer AG

Szenarien für einen nachhaltigen Güterverkehr in Deutschland

Schlussbericht
Zürich, 4. November 2016

Cuno Bieler, Daniel Sutter

Impressum

Szenarien für einen nachhaltigen Güterverkehr in Deutschland

Schlussbericht

Zürich, 4. November 2016

Auftraggeber

CargoBeamer AG

Autorinnen und Autoren

Cuno Bieler, Daniel Sutter

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

Inhalt

Zusammenfassung	5
1. Ausgangslage und Ziel	9
2. Methodische Herleitung der Szenarien	11
3. Beschreibung der Szenarien und verkehrliche Eckwerte	17
3.1. Szenario Trend: Eckdaten der BVWP Verkehrsprognose 2030	17
3.2. Szenario konventioneller UKV	23
3.3. Szenario CargoBeamer	25
3.4. Szenario Oberleitungs-LKW	27
3.5. Übersicht über die Mengengerüste der Szenarien	29
4. Umweltwirkungen und externe Kosten	31
4.1. Umweltwirkungen Szenario «Trend»	31
4.2. Umweltwirkungen: Vergleich Alternativszenarien mit Szenario «Trend»	34
4.3. Externe Umweltkosten	38
5. Betriebswirtschaftliche Kosten der Szenarien	40
6. Beurteilung und Schlussfolgerungen	43
6.1. Ergebnisübersicht	43
6.2. Einschätzung der Ergebnisse	43
6.3. Gesamtbeurteilung und Fazit	47
Literatur	51

Zusammenfassung

Obwohl die Verlagerung der Güter auf die Schiene in der verkehrspolitischen Debatte Deutschlands und der EU vor allem aus Klimaschutzgründen einen hohen Stellenwert hat, wird der weitaus größte Teil der Güter in Deutschland auf der Straße transportiert. Ein wichtiger Hoffnungsträger für die ‚Verkehrswende‘ im Güterverkehr ist der kombinierte Verkehr. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden für Deutschland (Zustand 2030) vier verschiedene Szenarien skizziert, deren verkehrliches Potenzial abgeschätzt und wichtige ökologische und ökonomische Wirkungen (Energiebedarf, Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen, externe Kosten, betriebswirtschaftliche Kosten) vergleichend analysiert.

Folgende vier Szenarien wurden für das Betrachtungsjahr 2030 untersucht:

1. **Trend:** Als Referenz- bzw. Trendszenario dient die Verkehrsprognose, die im Rahmen des Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2015 ermittelt wurde. Das Szenario geht davon aus, dass der Schienenanteil bis 2030 gegenüber heute nur leicht steigen wird.
2. **Konventioneller UKV:** Dieses Szenario stellt ein klassisches Verlagerungsszenario von der Straße auf die Schiene dar (Fokus kombinierter Verkehr). Dieses Szenario deckt sich mit dem Zielszenario, das im Rahmen einer neuen UBA-Studie erarbeitet wurde (UBA 2016). Die Verlagerung basiert vor allem auf der Ausweitung von Finanzierungsinstrumenten (z.B. Lkw-Maut) sowie dem Ausbau des Infrastrukturangebots (KV-Infrastruktur und Schienennetz).
3. **CargoBeamer:** Das dritte Szenario orientiert sich am Szenario 2, wobei angenommen wird, dass die Verlagerung zu einem wesentlichen Teil durch das horizontale Verladungssystem CargoBeamer übernommen wird. Mit diesem System erhöht sich das Verlagerungspotenzial, weil auch nicht kranbare Behälter auf die Schiene verlagert werden können.
4. **Oberleitungs-Lkw:** Als Alternative zur Verkehrsverlagerung können Umweltziele auch durch einen Wechsel des Energieträgers auf der Straße erreicht werden. Dieses Szenario orientiert sich verkehrlich am Trendszenario, geht aber davon aus, dass ein Teil des Straßengüter-Fernverkehrs auf längeren Distanzen mit Oberleitungs-Lkw durchgeführt wird.

Während die verkehrlichen Eckdaten der ersten beiden Szenarien auf der erwähnten UBA-Studie basieren (UBA 2016), wurden für die Festlegung der verkehrlichen Eckwerte der Szenarien „CargoBeamer“ und „Oberleitungs-Lkw“ einfache Potenzialabschätzungen vorgenommen. Die definierten Szenarien stellen aber keinen Prognosen dar, sondern mögliche, realistische Entwicklungen. Die Analyse der Wirkungen entspricht somit einer ‚Wenn-Dann-Analyse‘, indem die ökologischen und ökonomischen Wirkungen für die definierten Szenarien ermittelt werden. Für die einfachere Vergleichbarkeit wurde basierend auf der Potenzialanalyse angenommen, dass in den Szenarien 2 bis 4 jeweils immer die gleiche Verkehrsmenge im Vergleich zum

Trendszenario verlagert wird, nämlich knapp 40 Mrd. Tonnen-km im Jahr 2030. Bei den KV-Szenarien 2 und 3 findet eine Verlagerung von der Straße auf die Schiene statt, beim Szenario „Oberleitungs-Lkw“ wird die gleiche Transportmenge von dieselbetriebenen Lkw auf elektrifizierte Lkw umgelagert.

Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Ergebnisse der Analyse, insbesondere die Umweltkennzahlen und die Kostabschätzung der Szenarien.

Tabelle Z-1: Übersicht Ergebnisse

		Trend	UKV konventionell	Cargo-Beamer	Oberleitungs-Lkw
Verkehrliches Mengengerüst					
Straße	Mrd. tkm	607	550	550	607
Schiene	Mrd. tkm	154	193	193	154
Modalsplit Schiene (trimodal, tkm)	%	18%	23%	23%	18%
Umwelt (Total Trend und Differenz zu Trend)					
Treibhausgasemissionen	Mio. t CO ₂ eq/a	49	-5,0	-5,0	-2,5
Externe Umweltkosten	Mio. EUR/a	13.100	-1.113	-1.113	-258
Reduzierte externe Umweltkosten pro verlagerte Sendung	EUR/Sendung		-500	-500	-55
Betriebswirtschaftliche Kosten (zusätzlich zu Trend)					
Total jährliche Kosten	Mio. EUR / a		180	60	1.570
Kosten pro Sendung//Fahrt	EUR		79	28	333
Eingesparte Umweltkosten im Verhältnis zu betriebsw. Kosten	Faktor		6.3	17.7	0.2

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen auf Basis sämtlicher genutzter Literatur.

Von den drei Alternativszenarien führen „UKV konventionell“ und „CargoBeamer“ zur größten Reduktion negativer Umwelteffekte sowie externer Umweltkosten. Der Einsatz der Oberleitungs-Lkw führt umweltseitig zu deutlich geringeren Verbesserungen, solange die von Diesel-Lkw auf Oberleitungs-Lkw verlagerte Menge nicht deutlich größer ist – was langfristig möglich wäre, wenn immer mehr Lkw umgerüstet würden. Die umweltseitigen Verbesserungen der beiden Szenarien „UKV konventionell“ und „CargoBeamer“ sind in erster Linie eine Folge davon, dass in diesen Szenarien aufgrund der Verlagerung von der Straße auf die Schiene die Treibhausgasemissionen sowie Lärmkosten deutlich geringer sind als bei den anderen Szenarien.

In Bezug auf die betriebswirtschaftlichen Kosten wurden die Infrastruktur- und Betriebskosten für KV-Terminals, Oberleitungen, KV-Waggons und Oberleitungs-Lkw sowie die Veränderung der variablen Infrastrukturkosten von Straßen- und Schienennetz berücksichtigt. Alle Alternativszenarien führen im Vergleich zum Trendszenario zu zusätzlichen betriebswirtschaftlichen Kosten. Allerdings sind die Kosten der beiden Verlagerungsszenarien deutlich geringer

als beim Szenario „Oberleitungs-Lkw“. Das Szenario „CargoBeamer“ weist von den drei Alternativszenarien die geringsten betriebswirtschaftlichen Kosten auf, sowohl insgesamt, als auch pro verlagerter Sendung.

Ein Vergleich der externen Umweltkosten mit den jährlichen Betriebskosten zeigt, dass der volkswirtschaftliche Nutzen der Verlagerung von Gütern auf die Schiene erheblich ist und die betriebswirtschaftlichen Zusatzkosten in den beiden Verlagerungsszenarien deutlich übersteigt. Im Szenario „UKV konventionell“ ist der Nutzen rund 6-mal höher, im Szenario „CargoBeamer“ ist der Nutzen rund 18-mal höher. Allerdings erlaubt die vorliegende Analyse keine umfassende Kosten-Nutzen-Analyse der Szenarien. Dazu müssten auch alle weiteren relevanten Kosten- und Nutzenkomponenten ermittelt werden (z.B. Zeitkosten, Investitionskosten Strasse und Schiene).

Zwar lässt sich auf Basis der Analyse keine abschließende Rangfolge der Szenarien erstellen, aber die Ergebnisse lassen dennoch einige Schlussfolgerungen zu: Aus Umweltsicht schneiden die beiden Verlagerungsszenarien „UKV konventionell“ und „CargoBeamer“ klar am besten ab. Auch wenn man zusätzlich die ökonomische Effizienz und die verkehrlichen Wirkungen bezieht, sind diese beiden Szenarien insgesamt positiv zu würdigen.

Um die ehrgeizigen Verlagerungs- und Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen dürfte es notwendig sein, auf beide Technologien zu setzen. Wird nur der konventionelle UKV ausgebaut, ist das zusätzliche Verlagerungspotenzial beschränkt. Mit einer Technologie zum Vertikalverlad wie CargoBeamer können dagegen weitere Potenziale, v.a. bei den nicht kranbaren Satelaufliegern, genutzt werden. Damit ist das gesamte Verlagerungspotenzial erheblich größer. Ideal wäre eine Kombination der beiden Verlagerungsszenarien, das heißt ein Ausbau sowohl des klassischen UKV (Vertikalverlad) als auch innovativer KV-Technologien wie CargoBeamer. Das Szenario „CargoBeamer“ schneidet in Bezug auf die Kosten-Wirksamkeit am besten ab: Die betriebswirtschaftlichen Kosten pro verlagerter Transportleistung (Tkm) bzw. pro verringerter Tonne CO₂ sind tiefer als in den anderen Szenarien. Voraussetzung dafür ist aber, dass das System CargoBeamer in Zukunft die erwartete Effizienz in Bezug auf Umschlagzeit, Umschlagkosten und Auslastung tatsächlich realisieren kann.

Damit die Verkehrswende im Sinne der gesetzten Ziele der Bundesregierung gelingt, ist ein Ausbau aller KV-Technologien erforderlich, wie auch eine umfassende Anpassung der Rahmenbedingungen, z.B. Förderung und finanzielle Anreize für Terminalinfrastrukturen, Verbesserung der Bewilligungsverfahren, ggf. Anpassung der Lkw-Maut (vgl. UBA 2016). Mit dem Ausbau des konventionellen UKV und neuen, innovativen KV-Lösungen insbesondere im Horizontalverlad vergrößert sich das Segment an verlagerbaren Gütern.

1. Ausgangslage und Ziel

Obwohl die Verlagerung der Güter auf die Schiene in der verkehrspolitischen Debatte einen hohen Stellenwert hat (EU-Weißbuch Verkehrspolitik, Nachhaltigkeitsstrategie Deutschland mit konkreten Modalsplit-Zielen, Aktionsplan Güterverkehr Deutschland), wird der weitaus größte Teil der Güter in Deutschland auf der Straße transportiert. Gemäß BVWP werden 2030 18% der Gütertransportleistung auf der Schiene abgewickelt. Damit sind hohe Umweltbelastungen und Kapazitätsprobleme auf der Straße verbunden. Ein wichtiger Hoffnungsträger für die ‚Verkehrswende‘ im Güterverkehr ist der kombinierte Verkehr. Nur eine optimale Zusammenarbeit von Straße und Schiene kann die Vorteile der Verkehrsträger in der Praxis umsetzen.

CargoBeamer ist ein neues, innovatives, schienengebundenes Güterverkehrssystem für den unbegleiteten Transport (UKV) von allen Sattelaufliegern, Megatrailern, Tank- und Siloaufliegern. Mit Hilfe eines schlanken und flächensparenden Terminalsystems sowie entsprechend ausgestalteten Güterverkehrswaggons (bzw. Waggonaufsätzen) können alle Sattelauflieger – auch nicht kranbare – in etwa analog wie Güter-Container auf die Bahn verladen werden. Im Gegensatz zur Rollenden Landstraße (bzw. Rollenden Autobahn) muss damit nicht der ganze LKW inkl. Führerkabine und Fahrer transportiert werden. Interessant ist das Verlade- und Transportsystem auch deshalb, weil der Verlad vom LKW auf den Waggon automatisch, kranlos und damit sehr schnell erfolgt.

Berechnungen auf Beispielkorridoren (INFRAS 2012) haben die bedeutenden Vorteile von CargoBeamer gegenüber dem Straßenverkehr dargestellt (weniger Energieverbrauch, CO₂-Emissionen, Flächenverbrauch, externe Kosten, Investitionskosten).

Die Firma CargoBeamer möchte mit ihrem neuen Transportsystem einen Beitrag zur Verlagerung des Langdistanzgüterverkehrs auf die Schiene leisten. Weil nicht kranbare Standard-Sattelauflieger heute in Deutschland mehr als die Hälfte aller LKW-Transportleistung erbringen, besteht hier ein besonders hohes Verlagerungspotenzial. Deshalb soll die Analyse ausgeweitet werden und Szenarien und deren Wirkungen für Deutschland aufzeigen und beurteilen. Dazu hat CargoBeamer INFRAS den Auftrag für die vorliegende Studie gegeben. INFRAS hat jüngst eine umfangreiche Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes zu zukünftigen Szenarien im Güterverkehr inklusive Analyse verkehrlicher, umweltseitiger und ökonomischer Wirkungen erarbeitet (UBA 2016). Daraus können sinnvolle Synergien genutzt werden.

Ziel der Studie

Ziel der Studie ist es, für Deutschland (Zustand 2030) in verschiedenen Szenarien (i. Trend, ii. Verlagerung UKV ‚konventionell‘, iii. Verlagerung mit CargoBeamer, iv. modernisierte Straße

mit Oberleitungs-LKW) ein verkehrliches Potenzial abzuschätzen und bezüglich verschiedener Indikatoren (Modalsplit, Energiebedarf, Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen, externe Kosten, betriebswirtschaftliche Kosten) zu bewerten und soweit möglich miteinander zu vergleichen.

2. Methodische Herleitung der Szenarien

Die Analyse bezieht sich auf den Güterverkehr, wobei der Schwerpunkt auf dem Straßen- und Schienengüterverkehr in Deutschland liegt. Die Binnenschifffahrt wird zwar (punktuell) ebenfalls dargestellt, fließt aber nicht in die Berechnung mit ein. Der Analysezeitpunkt ist 2030 (Prognosehorizont der BVWP-Verkehrsverflechtungsprognosen).

Definition der Szenarien

In einem ersten Schritt werden die jeweiligen Szenarien definiert. Die Mengengerüste orientieren sich an den offiziellen Verkehrsperspektiven (BMVI 2014: Verkehrsverflechtungsprognose 2030 zum Bundesverkehrswegeplan 2015) und den im Rahmen des UBA-Vorhabens «Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur» (UBA 2016) erarbeiteten Szenarien. Damit kann eine hohe Kongruenz zu den bestehenden Analysen hergestellt werden. Die in der UBA-Studie hergeleiteten Szenarien «Referenz» und «Ziel» gelten in der vorliegenden Analyse als Basisszenarien und werden «Trend» und «konventioneller UKV» genannt. Auf die methodische Herleitung der Mengengerüste der beiden bestehenden UBA-Szenarien aus der Studie ‚Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur‘ (UBA 2016), wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen¹. Zusammengefasst werden die beiden Szenarien in der Studie wie folgt beschrieben:

- Als **Referenzszenario (hier Szenario «Trend»)** wird die Verkehrsverflechtungsprognose 2030 des Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2015 verwendet. Zu dieser liegen detaillierte verkehrliche Daten vor. Die BVWP-Prognose rechnet zwischen 2010 und 2030 mit einem Wachstum der Verkehrsleistung (tkm) von 39% im Straßengüterverkehr und 43% im Schienengüterverkehr.
- **Zielszenario (hier Szenario «konventioneller UKV»):** Das UBA-Zielszenario besteht insbesondere aus Maßnahmen rund um das Finanzierungssystem (Anpassung und Ergänzung von Finanzierungsinstrumenten) sowie zum Ausbau des Infrastrukturangebots. Im Zentrum stehen Maßnahmen zur Erhöhung der Nutzerfinanzierung und damit der Verursachergerechtigkeit sowie der Sicherung der notwendigen Finanzmittel. Infrastrukturseitig liegt der Fokus auf Maßnahmen zum Ausbau der Kapazitäten im Schienenverkehr bzw. kombinierten Verkehr mit dem Ziel einer Modalsplit-Erhöhung der Schiene.

Zusätzlich zu den verkehrstatistischen Grundlagen werden die Mengengerüste im kombinierten Verkehr weiter vertieft und spezifiziert, namentlich bezüglich Transportart (Ladeeinheiten).

¹ Die Studie Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur ist im Internet unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/finanzierung-einer-nachhaltigen> frei verfügbar.

Den beiden Basisszenarien Trend und «konventioneller UKV» (Zielszenario UBA) werden mit zwei zusätzlichen Szenarien ergänzt:

- Das **Szenario CargoBeamer**, in dem das System CargoBeamer ein gewisses Potenzial (Sattelaufleger) ausschöpfen kann. Aufgrund der größeren Möglichkeiten des horizontalen Verlags bzgl. Behältertypen (das System CargoBeamer ist nicht auf die Kranbarkeit der Behälter angewiesen), darf davon ausgegangen werden, dass CargoBeamer auf der Straße eher noch das größere Potenzial aufweist als der klassische vertikale Verlad.
- Das **Szenario Oberleitungs-LKW**, in dem der Modalsplit Straße/Schiene dem Trendszenario entspricht, aber infolge der Elektrifizierung andere Energieverbräuche, Emissionen und Investitionskosten entstehen. Unterstellt wird dabei, dass ein gewisser Anteil des Straßengüter-Fernverkehrs auf längeren Distanzen mit Oberleitungs-LKW durchgeführt wird und wichtige Infrastrukturen (Bundesautobahnen) mit Oberleitungen ausgerüstet sind.

Verkehrliche Mengengerüste

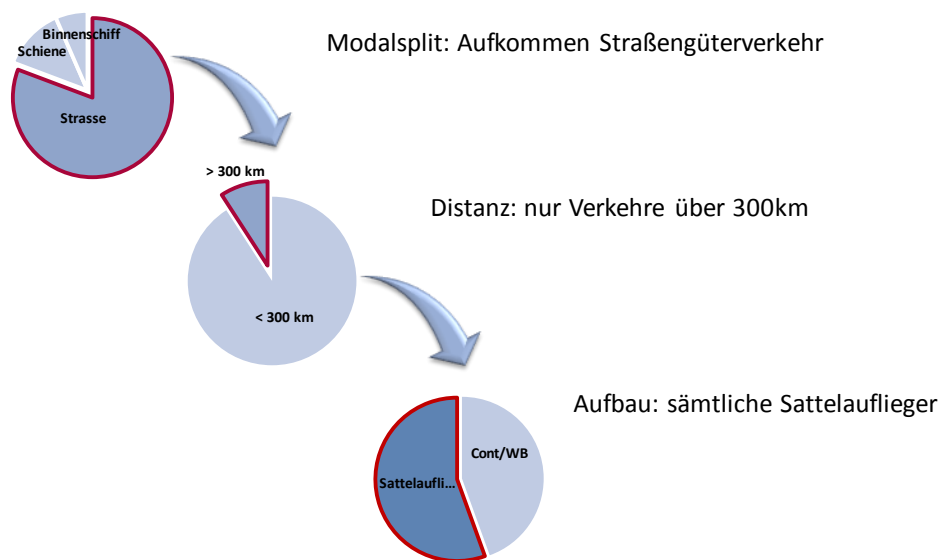
Die Mengengerüste der beiden bestehenden Szenarien stammen, wie oben bereits beschrieben, aus der Studie «Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur» (UBA 2016). Das Szenario «Trend» entspricht dem in der UBA-Studie definierten Referenzszenario, das vollständig auf der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) 2015 basiert.

Die verkehrlichen Wirkungen des Szenarios «konventioneller UKV» wurden für das im Rahmen der erwähnten UBA-Studie definierte Zielszenario (vgl. oben) mit Hilfe eines markoökonomisch orientierten, mehrstufigen Wirkungsmodells abgeschätzt. Dieses Wirkungsmodell differenziert den Güterverkehr in Teilsegmente: 4 Hauptverkehrsverbindungen (Binnenverkehr, Import, Export, Transit), 10 Warengruppen und 3 Modi (Straße, Schiene, Binnenschiff). Das Wirkungsmodell selbst ist vierstufig aufgebaut. Es betrachtet – in genau dieser Reihenfolge – das Aufkommen insgesamt (Tonnage), den Modalsplit (modale Verlagerungen) sowie die Verkehrsleistung (tkm; in diesem Schritt wird auch die Durchschnittsdistanz je Fahrt berücksichtigt) und schließlich die Fahrleistung (Fzkm). Besonders wichtige Einflussfaktoren dieses Wirkungsmodells sind die 4 Hauptverkehrsverbindungen und die Warengruppen.

Die Mengengerüste der beiden neuen Szenarien CargoBeamer und Oberleitungs-LKW werden anhand einer Potenzialanalyse hergeleitet, deren Basis das Mengengerüst des UBA Szenarios «Trend» ist. Allerdings erfolgt die Potenzialanalyse nicht mit dem oben beschriebenen, umfangreichen Wirkungsmodell wie in der UBA-Studie, weil es an dieser Stelle nicht um die Wirkung eines detaillierten Maßnahmenpakets, sondern um die Abschätzung von Potenzialen geht. Das Vorgehen bei der Potenzialanalyse erfolgt deshalb vereinfacht, aber dennoch ähnlich

wie beim Szenario «Trend», indem mit Hilfe einer Kaskade von Kenngrößen das theoretische Potenzial der beiden jeweiligen Technologien (CargoBeamer und Oberleitungs-LKW) identifiziert wird, das im Szenario Trend vom gesamten Güteraufkommen abgeschöpft werden kann.

Abbildung 1: Potenzialanalyse Szenario CargoBeamer



Herleitung des theoretisch maximal möglichen Güteraufkommens für die Technologie CargoBeamer im gleichnamigen Szenario.

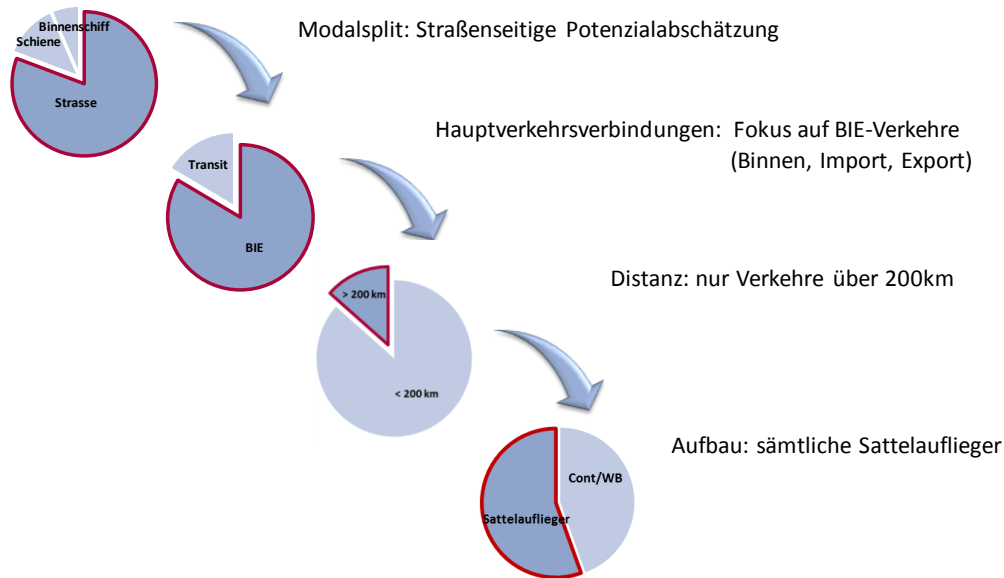
Grafik INFRAS.

Im Szenario CargoBeamer leitet sich das maximal möglichen Güteraufkommen für die gleichnamige Technologie aus drei Kenngrößen ab. Grundsätzlich stützt sich das zusätzliche Verlagerungspotenzial auf das gesamte Aufkommen, in Tonnen, des Straßengüterverkehrs. Im zweiten Schritt wird aus dem gesamten Straßengüterverkehr nur jenes Aufkommen betrachtet, welches auf Distanzen länger als 300 Kilometer transportiert wird. 300 Kilometer gilt als Distanzmarke, bei der die Verlagerung auf Schienen sowohl wirtschaftlich als auch umwelttechnisch Sinn macht². In einem letzten Schritt wird dieses Aufkommen in Behälterttypen disaggregiert, wobei nur die Sattelaufleger (SA) weiterhin betrachtet werden. Die SA, auch Trailer genannt, sind die

² Im Weissbuch der Europäischen Kommission für Verkehrspolitik 2011 wird festgehalten, dass die Emissionen von Treibhausgasen aus dem Verkehr bis 2050, um 60% ggü. dem Niveau 1990, gesenkt werden sollen. Ein Ziel setzt den Fokus konkret auf die Güterverlagerung vom Straßen- zum Schienen- und Schiffsverkehr: „30 % des **Straßengüterverkehrs über 300 km** sollten bis 2030 auf andere Verkehrsträger wie Eisenbahn- oder Schiffsverkehr verlagert werden, mehr als 50 % bis 2050, was durch effiziente und umweltfreundliche Güterverkehrskorridore erleichtert wird. Um dieses Ziel zu erreichen, muss auch eine geeignete Infrastruktur geschaffen werden.“ (EC 2010)

Hauptzielgruppe der Technologie CargoBeamer. Der größte Teil der SA sind nicht kranbar, und somit im klassischen vertikalen kombinierten Verkehr nicht verlagerbar. Das verbleibende Aufkommen wird als theoretisches Potenzial der Technologie CargoBeamer bezeichnet. Es ist sozusagen die Zielgruppe, aus der ein Anteil von CargoBeamer abgeschöpft werden kann.

Abbildung 2: Potenzialanalyse Szenario Oberleitungs-LKW



Herleitung des theoretisch maximal möglichen Güteraufkommens für die Technologie Oberleitungs-LKW im gleichnamigen Szenario.

Grafik INFRAS.

Fast genau gleich wie im Szenario CargoBeamer wird im Szenario Oberleitungs-LKW vorgegangen. Die Basis für das betrachtete Güteraufkommen ist, wie beim Szenario CargoBeamer, der gesamte Straßengüterverkehr aus dem Szenario Trend. Davon beschränkt sich das theoretische Potenzial auf Binnen-, Import- und Exportverkehr. Da die Technologie direkt mit einem Ausbau der Straßeninfrastruktur zusammenhängt, wird der Transitverkehr nicht berücksichtigt (unter der Annahme, dass es im benachbarten Ausland noch keine flächendeckende Oberleitungsinfrastruktur gibt). Als sinnvolle Distanzmarke werden alle Fahrten über 200 Kilometer berücksichtigt, unter der Annahme, dass nur das zentrale Infrastrukturnetz (Autobahnen) mit Oberleitungen ausgerüstet sind und sich somit für kurze und mittlere Transporte der Einsatz von Oberleitungs-LKW kaum lohnt. Es wurde angenommen, dass 75% der Strecke auf elektrifizierten Autobahnen gefahren wird, und 25% im Dieselbetrieb im Vor- und Nachlauf zur Autobahn.

Bezüglich Fahrzeugaufbau beschränkt sich das Potenzial auf die Sattelaufleger. Wie im Szenario CargoBeamer, ergibt sich auch hier ein maximal abschöpfbares Güteraufkommen, ein theoretisches Potenzial.

Diese hergeleiteten Potenziale sind keine Prognosen und prognostizieren somit auch nicht das realistische Güteraufkommen der beiden innovativen Szenarien. Vielmehr handelt es sich um Abschätzungen, teilweise aufgrund statistischer Daten, teilweise aufgrund von Annahmen, um die theoretische Zukunftsszenarien verschiedener Technologien vergleichbar zu machen.

Umweltkennzahlen und Kostenvergleiche

Die verkehrlichen Mengengerüste der Szenarien bilden die Grundlage für verschiedene Analysen. In einem ersten Schritt werden die erarbeiteten verkehrlichen Grundlagen auf ihren Umwelteinfluss untersucht und untereinander verglichen. Im folgenden Schritt werden die externen Kosten (Umweltkosten) ermittelt. Schließlich werden die betriebswirtschaftlichen Kosten der Szenarien ermittelt und eine einfache Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen vorgenommen. Folgende Liste zeigt die notwendigen Daten und ihre Herkunft:

- Die Umweltkennzahlen, die untersucht werden, sind Endenergiebedarf, CO₂-Emissionen sowie die Emissionen von Feinstaub (PM₁₀) und Stickoxiden (NO_x). Die eingesetzten Emissionsfaktoren stammen aus der Studie «Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur» (UBA 2016) und basieren auf der Datenbank TREMOD (UBA/IFEU). Die Umweltkennzahlen der Oberleitungs-LKW sind schwierig messbar, da momentan die Technologie erst in Testphasen eingesetzt wird. Als Grundlage für die Emissionsfaktoren diene die Studie „Fachliche Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs 2050“ im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA 2015).
- Umweltkosten: Mit Hilfe der vorliegenden Ansätze (v.a. auf Basis der UBA Methodenkonvention zur Schätzung von Umweltkosten 2.0, UBA 2014) werden die externen Umweltkosten berechnet. Berücksichtigt werden die Kategorien Luftschadstoffe, Klima, Lärm sowie Natur- und Landschaft.
- Investitionen in Infrastruktur: Bezüglich der Basisszenarien (Trend, Verlagerung) kann auf die Analysen im UBA Projekt zugegriffen werden. Für das Szenario «CargoBeamer» werden uns Datengrundlagen von CargoBeamer zur Verfügung gestellt. Für das Szenario «Oberleitungs-LKW» werden grobe Kenngrößen aus entsprechenden Studien verwendet. Im Vordergrund stehen spezifische Kenngrößen (Kosten pro Einheit), die grob auf Deutschland hochgerechnet werden. Eine geografische Verortung der Investitionen (und des damit verbundenen Flächenverbrauchs) ist nicht Gegenstand der Studie.
- Die Informationen zu den Investitionskosten werden ergänzt mit groben Angaben zu Unterhaltskosten.

- Investitionen Rollmaterial: Für die einzelnen Verkehrsmengen werden mit Hilfe von spezifischen Kostensätzen (mit Unterstützung von CargoBeamer) die entsprechenden Betriebskosten abgeschätzt.
- Die Bewertung der Szenarien erfolgt folgendermaßen:
 - Umweltwirkung: Vergleich der Umwelteffekte (Emissionen, Energieverbrauch) der verschiedenen Szenarien.
 - Wirtschaftlichkeit: Vergleich der zusätzlichen Kosten mit den erzeugten (bzw. eingesparten) Umweltkosten.
 - Kosten-Wirksamkeit: Vergleich der Kosten mit den energetischen und CO₂-Wirkungen.
- Gesamtbeurteilung: Schließlich werden die vier untersuchten Szenarien anhand verschiedener Kriterien miteinander verglichen: Umweltwirkung, Umweltkosten, verkehrliche Wirkung, ökonomische Effizienz, regulatorische und politische Rahmenbedingungen, Realisierbarkeit und Akzeptanz (politisch sowie bei den heutigen Marktteilnehmern).

3. Beschreibung der Szenarien und verkehrliche Eckwerte

3.1. Szenario Trend: Eckdaten der BVWP Verkehrsprognose 2030

Das Basisszenario Trend der Studie «Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur» (UBA 2016) bildet im vorliegenden Vorhaben die Grundlage für das Referenzszenario. Die folgende Tabelle zeigt die Eckdaten der BVWP-Verkehrsprognose 2030, die dem Basisszenario «Trend» entsprechen.

Gemäß Tabelle 1 und Tabelle 2 wird im Schienenverkehr zwischen 2010 und 2030 das größte Wachstum erwartet: Die Transportleistung (tkm) soll um 43% zunehmen, das Aufkommen (t) um 24%. Dieses Wachstum ist hauptsächlich auf den kombinierten Schienenverkehr zurückzuführen, bei dem Wachstumsraten von gegen 80% prognostiziert werden. Der Straßengüterverkehr wird gemäß BVWP-Verkehrsprognose bis 2030 bei der Transportleistung (tkm) prozentual ähnlich stark zunehmen wie der Schienenverkehr (+ 39%), beim transportierten Gewicht jedoch ein etwas geringeres Wachstum aufweisen (+17%). In absoluten Zahlen steigt die Transportleistung des Straßenverkehrs aber um mehr als dreimal so viel wie beim Schienenverkehr (+170 Mrd. Tkm auf der Straße vs. +46 Mrd. Tkm auf der Schiene). Bei der Binnenschiffahrt dagegen wird bei der Transportleistung auch prozentual ein deutlich geringeres Wachstum erwartet (+23%) als auf Schiene und Straße.

Tabelle 1: Entwicklung Transportleistung Güterverkehr 2010 – 2030: in Mrd. Tonnenkilometer

Transportleistung in Mrd. Tkm	2010	2030	Veränderung 2010 – 2030	
			in % total	in % pro Jahr
Straße	437,3	607,4	39%	1,7%
Schiene total	107,6	153,7	43%	1,8%
Schiene KV	38,0	66,2	74%	2,8%
Schiene Rest (konventionell)	69,6	87,5	26%	1,2%
Binnenschiff	62,3	76,5	23%	1,0%
Total	607,2	837,6	38%	1,6%

Transportleistung Szenario Trend

Tabelle INFRAS. Quelle: BVU et al. 2014

Tabelle 2: Entwicklung Verkehrsaufkommen Güterverkehr 2010 – 2030: in Mio. Tonnen

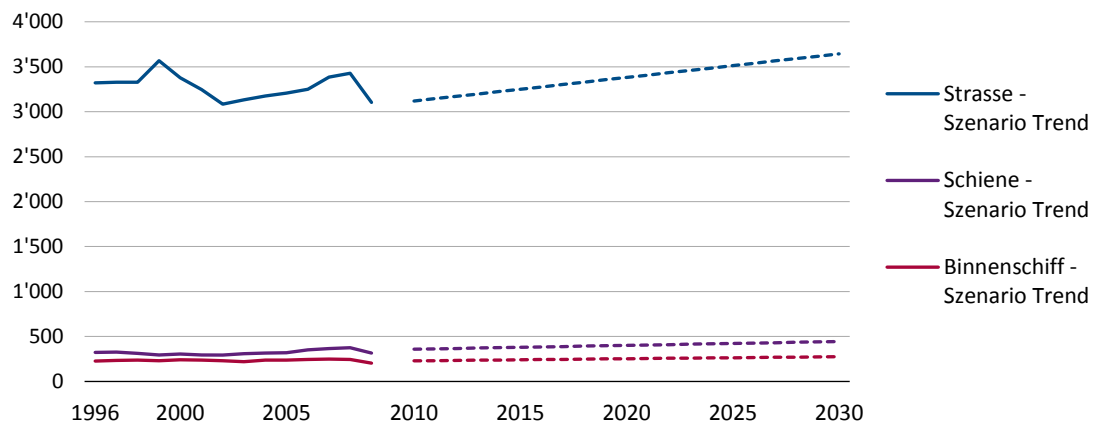
Aufkommen in Mio. Tonnen	2010	2030	Veränderung 2010 – 2030	
			in % total	in % pro Jahr
Straße	3.116	3.639	17%	0,8%
Schiene total	359	444	24%	1,1%
Schiene KV	75	136	81%	3,0%
Schiene Rest (konventionell)	284	308	8%	0,4%
Binnenschiff	230	276	20%	0,9%
Total	3.705	4.358	18%	0,8%

Aufkommen Szenario Trend

Tabelle INFRAS. Quelle: BVU et al. 2014

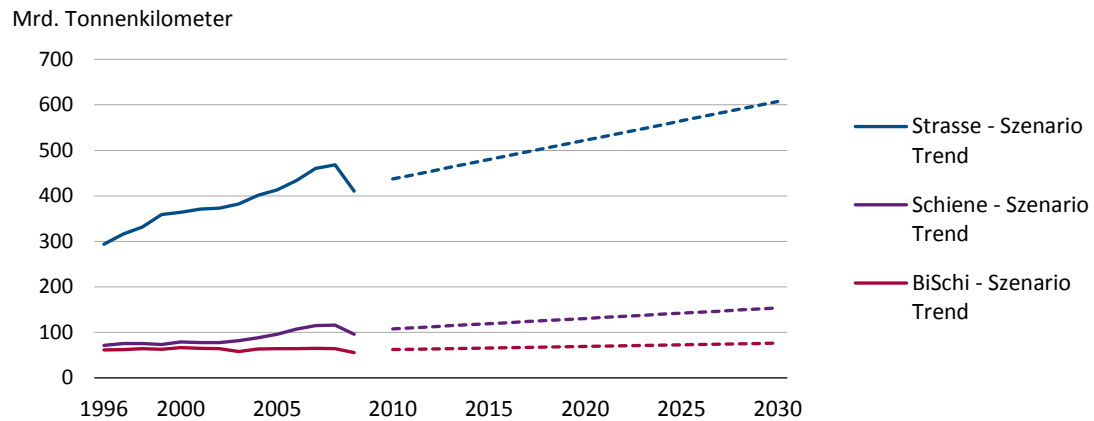
Abbildung 3: Entwicklung Aufkommen Güterverkehr 2010 – 2030: in Mio. Tonnen

Mio. Tonnen



Entwicklung des Aufkommens im Szenario Trend

Grafik INFRAS. Quelle: BVU et al. 2014

Abbildung 4: Entwicklung Transportleistung Güterverkehr 2010 – 2030: in Mrd. Tonnenkilometer

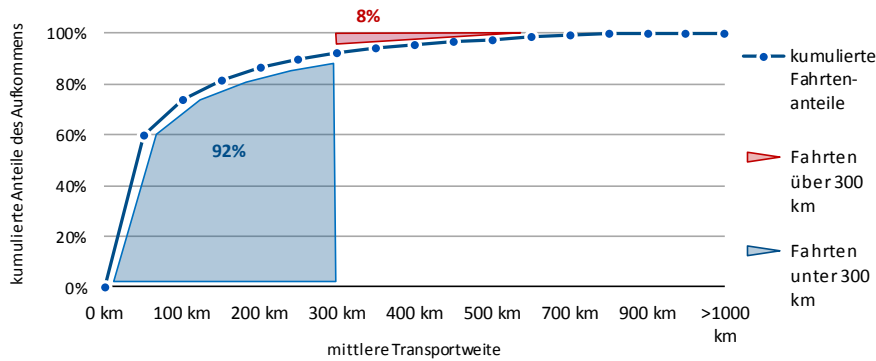
Entwicklung der Transportleistung im Szenario Trend

Grafik INFRAS. Quelle: BVU et al. 2014

Die vorangegangene Abbildung 3 zeigt das Aufkommen des Szenarios «Trend» grafisch und stellt es in Relation zur tatsächlichen Verkehrsentwicklung der letzten fünfzehn Jahre. Die Entwicklung der vergangenen Jahre sieht so aus, dass der Schienengüterverkehr zwischen 1995 und 2010 in Bezug auf das transportierte Gewicht klar am stärksten gewachsen ist (ca. +10%), während der Straßengüterverkehr und die Binnenschifffahrt bei der Transportmenge (Aufkommen) stagniert haben. Betrachtet man jedoch die Transportleistung (tkm) in Abbildung 4, sieht das Bild anders aus: Die Entwicklung des Schienen- und Straßengüterverkehrs verliefen zwischen 1995 und 2010 in etwa parallel (Zunahme um über 50% gegenüber 1995), während die Binnenschifffahrt konstant blieb. Es wird somit deutlich, dass die mittlere Transportdistanz zwischen 1995 und 2010 auf der Schiene (von 210 auf 300 km) und prozentual noch stärker auf der Straße (von 84 auf 140 km) deutlich zugenommen hat.

Für die Potenzialanalyse der weiteren Szenarien ist die Verteilung der Straßentransporte nach Distanzen ein grundlegendes Kriterium. In Abbildung 5 sind die geleisteten Transporte auf der Straße, in Anzahl Fahrten, nach Transportdistanz dargestellt. Die Daten stammen aus der Statistik «Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD)» des Kraftfahrt-Bundesamts, und beziehen sich auf das Jahr 2014 (KBA 2014). Berücksichtigt sind in dieser Statistik nur deutsche Fahrzeuge. Es zeigt sich, dass nur 8% aller LKW-Fahrten Transportweiten von 300 km oder mehr zurücklegen.

Abbildung 5: Kumulierte Anteile der Fahrten nach Transportweiten

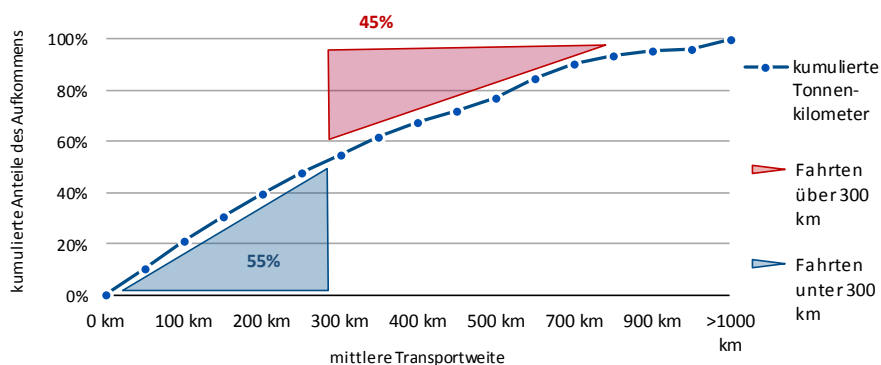


Kumulierte Anteile der Fahrten nach Transportweiten im Jahr 2014

Grafik INFRAS. Quelle: KBA 2014

Anders sieht es aus, wenn die kumulierten Anteile der Transportleistung (in tkm) nach Transportdistanz dargestellt werden. Dies verwundert nicht, da längere Fahrten automatisch höhere Tonnenkilometer generieren, auch bei gleichbleibender Auslastung. In der Auswertung der Daten hat sich allerdings gezeigt, dass die Auslastung auf längeren Distanzen größer ist als auf kürzeren. Bei Distanzen unter 300 Kilometern transportieren deutsche LKWs durchschnittlich 12,55 Tonnen, während bei Transportweiten über 300 Kilometern im Mittel 14,3 Tonnen transportiert werden.

Abbildung 6: Kumulierte Anteile der Transportleistung (tkm) nach Transportweiten



Kumulierte Anteile der Transportleistung nach Transportweiten im Jahr 2014

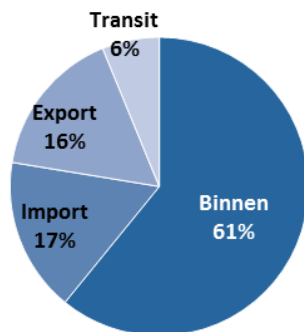
Grafik INFRAS. KBA 2014

Für die auf dem Szenario Trend aufbauenden Szenarien lässt sich festhalten: Eine allfällige Verlagerung von Transporten über 300 km auf die Schiene betrifft nur 8% der gesamthaft getätigten Fahrten (resp. Sendungen).

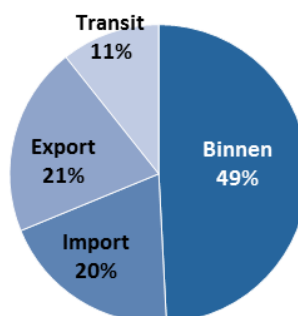
Betrachtet man das Basisszenario «Trend» differenziert nach den Hauptverkehrsbeziehungen Binnenverkehr, Export, Import und Transitverkehr zeigen sich ebenfalls deutliche Unterschiede bei den Anteilen (Abbildung 7). Der weitaus größte Teil (61%) der transportierten Gütermengen sind innerdeutsche Verkehre. Bei der Transportleistung verschieben sich die Anteile, aufgrund der längeren Distanzen, etwas zugunsten der grenzüberschreitenden Verkehre. Nicht in der Grafik zu sehen, aber inhaltlich hinterlegt ist die Entwicklung von 2010 bis 2030. Im Binnenverkehr wird mit einem geringeren Wachstum gerechnet als beim grenzüberschreitenden Verkehr, was insbesondere auf ein starkes erwartetes Wachstum der Exportwirtschaft zurückzuführen ist.

Abbildung 7: Aufkommen [t] und Transportleistung [tkm] nach Hauptverkehrsverbindungen

Aufkommen Strasse 2030 [t]



Transportleistung Strasse 2030 [tkm]



Anteile von Binnen, Import, Export und Transitverkehr an Aufkommen und Transportleistung

Grafik INFRAS. Quelle: BMVI 2014

Die Frage der Anteile verschiedener Fahrzeugaufbauten wurde mittels einer Literaturrecherche untersucht. In die Recherche eingeflossen sind Statistiken des Kraftfahrt-Bundesamts zum Inlandsverkehr, Verkehrszählungen im Schweizerischen alpenquerenden Verkehr, Fahrzeugbestandes-Statistiken vom KBA und verschiedene Artikel aus Fachmagazinen. Die Literaturanalyse führte zum Ergebnis, dass rund 70% der Transportleistung und 56% des Aufkommens von Sattelzugmaschinen mit Sattelaufliegern transportiert werden.³ Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Quellen und Ergebnisse der Literaturanalyse.

³ Zu erwähnen ist, dass sich der Anteil Sattelaufleger von 70% auf die gesamte Nachfrage (Tkm) bezieht. Bei den in der Potenzialanalyse für das Szenario CargoBeamer betrachteten Verkehre >300 km Distanz dürfte dieser Anteil noch höher liegen. Im Sinne einer vorsichtigen (konservativen) Rechnung wird dennoch mit einem Anteil Sattelaufleger von 70% gerechnet.

Tabelle 3: Literaturanalyse zu den Fahrzeugaufbauten

Quelle	Dim.	Sattelaufleger		Rest
		kranbar	nicht kranbar	
Artikel Int. Verkehrswesen, "Mehr Sattelzüge auf die Schiene", Nov. 2014	Tkm		72,4%	27,6%
Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Nutzfahrzeugen, KBA 2015	Anzahl		4,5%	95,5%
Verkehrszählung Kt. Uri, 2013, Alpenquerender Güterverkehr Schweiz	Anzahl	5,1%	94,9%	
Verkehrszählung Kt. Uri, 2014, Alpenquerender Güterverkehr Schweiz	Anzahl	6,5%	93,5%	
KBA, Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD), Inlandsverkehr, Jahr 2014	Fahrten		37,1%	62,9%
	Tonnen		55,5%	44,5%
	Tkm		69,7%	30,3%
Schmaldienst B.; Alternative Umschlagstechniken für nicht kran- bare Sattelaufleger, Österreichisches Verkehrsjournal, 2009/4 (80% nicht kranbar)	Tonnen	11%	44%	44,5%
Studiengesellschaft für den kombinierten Verkehr e.V. (SGKV) - Schätzung (85% nicht kranbar)	Tonnen	8%	47%	44,5%
Verkehrsrundschau 19/2016, Aussage G. Schulze Isfort, Geschäfts- führer der Bernhard Krone Holding (85% nicht kranbar)	Tonnen	8%	47%	44,5%
Daten für Potenzialanalyse: Anteil Sattelaufleger	Tonnen		56%	44%
	Tkm		70%	30%

Anteile der Sattelaufleger an sämtlichen Fahrzeugaufbauten

Tabelle INFRAS. Diverse Quellen

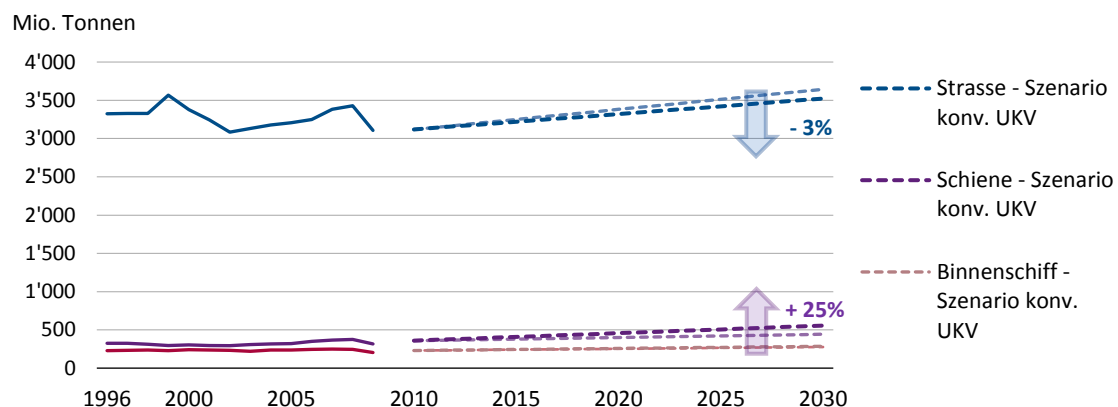
Zusammenfassend ergibt sich für das Szenario Trend einen ganzheitlichen Überblick über die Entwicklung von Aufkommen und Transportleistung des Güterverkehrs, den Modalsplit, die Anteile an den Distanzklassen, die Hauptverkehrsverbindungen (BIET) und die Fahrzeugaufbauten. Diese Kenngrößen sind die im Kapitel 2 beschriebenen zentralen Elemente der Potenzialanalyse für die Szenarien CargoBeamer und Oberleitungs-LKW.

3.2. Szenario konventioneller UKV

Das Szenario «konventioneller UKV» (in der Folge «konv. UKV» abgekürzt) orientiert sich ebenfalls an der Studie «Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur» (UBA 2016) und soll zu einem ökologisch verträglichen und einem ökonomisch effizienten Güterverkehr beitragen. Laut der Studie steht dabei insbesondere die Sicherstellung der Finanzierung der Güterverkehrsinfrastruktur, die Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene sowie die Verminderung der Treibhausgasemissionen des Güterverkehrs im Vordergrund. Die verkehrlichen Wirkungen des Szenarios wurden in der UBA-Studie mit Hilfe eines verkehrlichen Wirkungsmodells abgeschätzt (vgl. Kap. 2).

Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen das Aufkommen (t) und die Transportleistung (tkm) im Szenario «konv. UKV». Gegenüber dem Referenzszenario «Trend» ist das Aufkommen (t) im Straßengütertransport im Jahr 2030 um 3% kleiner, die Transportleistung (tkm) um 9% kleiner. Das Aufkommen (t) und die Transportleistung (tkm) im Schienengüterverkehr sind zum gleichen Zeitpunkt jeweils rund 25% größer. Dies entspricht einer Aufkommens-Verlagerung von rund 110 Mio. Tonnen bzw. rund 39 Mrd. Tkm von der Straße auf die Schiene. Es ist allerdings zu betonen, dass diese Verlagerung im zugrundeliegenden UBA-Zielszenario nicht nur durch infrastrukturelle Maßnahmen und nicht nur beim UKV erreicht wird, sondern durch ein umfassendes Maßnahmenpaket (u.a. auch mit Ausweitung der Lkw-Maut), das auch beim Güterverkehr in der Fläche (Wagenladungsverkehr) zu einem verstärkten Wachstum führt.

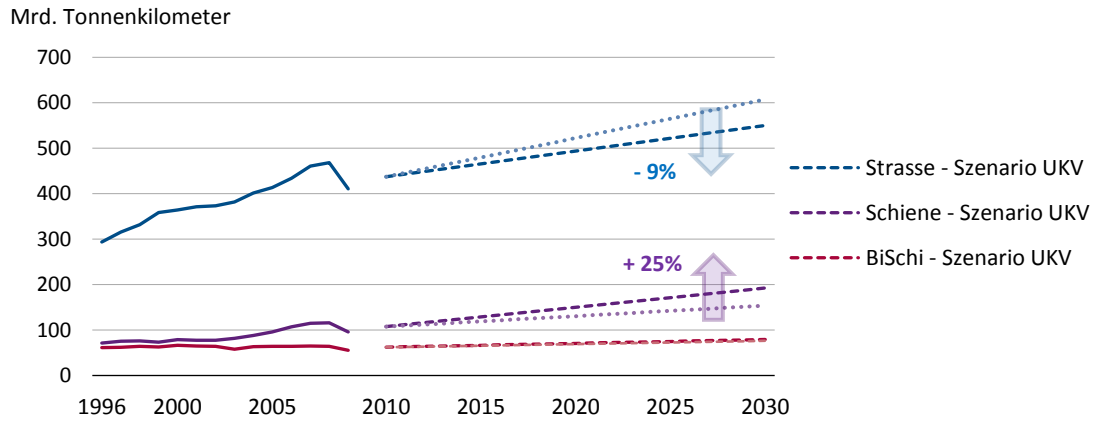
Abbildung 8: Entwicklung des Aufkommens [t] im Szenario «konv. UKV»



Entwicklung des Aufkommens im Szenario konv. UKV

Grafik INFRAS. Quelle: UBA 2016

Abbildung 9: Entwicklung der Transportleistung [tkm] im Szenario «konv. UKV»

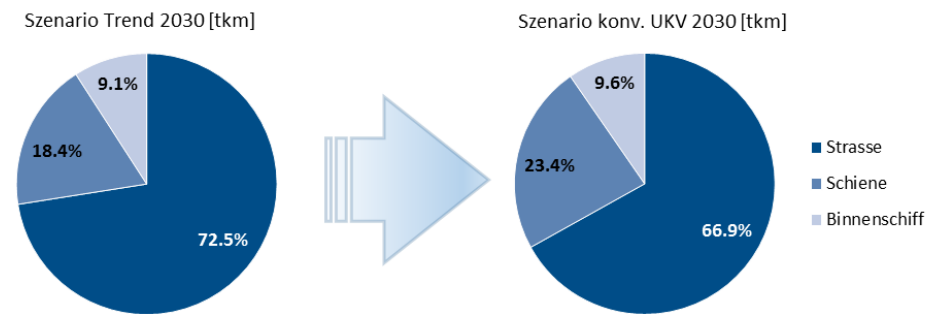


Entwicklung der Transportleistung im Szenario konv. UKV

Grafik INFRAS. Quelle: UBA 2016

Diese Verlagerung führt zu einer Verschiebung des Modalsplits. Abbildung 10 zeigt die Anteile an der Transportleistung der einzelnen Verkehrsträger. Die Schiene hat im Szenario «konv. UKV» neu einen Anteil von über 23% (+5%-Punkte), während der Straßenanteil sich von 72,5% auf rund 67% verringert hat.

Abbildung 10: Modalsplit-Verschiebung im Szenario «konv. UV» (Basis tkm)



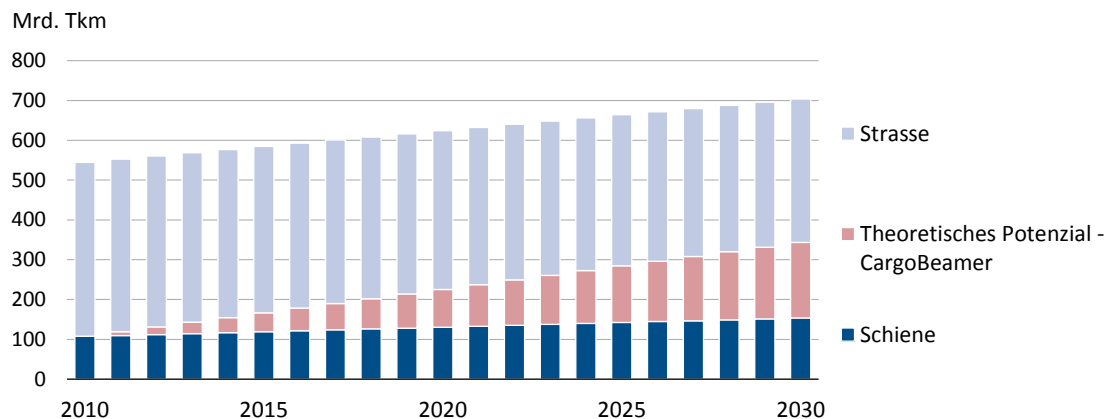
Modalsplit-Verschiebung im Szenario konv. UKV gegenüber Szenario Trend

Grafik INFRAS. Quelle: BMVI 2014, UBA 2016

3.3. Szenario CargoBeamer

Das Mengengerüst im Szenario «CargoBeamer» basiert auf den Verkehrsdaten 2030 des Referenzszenarios «Trend», wobei eine zusätzliche Verlagerung von Gütertransporten von der Straße auf das horizontale Verladungssystem CargoBeamer unterstellt wird. Die zusätzliche Verlagerung im Szenario «CargoBeamer» stützt sich auf die im Kapitel 2 erläuterte Potenzialanalyse (vgl. Abbildung 1). Das Aufkommen und die Transportleistung im Straßengüterverkehr 2030 im Szenario «Trend» wurde nach Distanzklassen (>300 km) und nach Anteil Sattelaufleger zerlegt, und somit das theoretische Potenzial für die Technologie CargoBeamer ermittelt. Eine komplette Verlagerung dieses theoretischen Potenzials ist realistisch betrachtet jedoch nicht möglich. Um den realistischen Anteil des theoretischen Potenzials abzuschätzen, müsste eine Marktanalyse der NST-Warengruppen durchgeführt werden, um die CargoBeamer-affinen Anteile der einzelnen Warengruppen zu identifizieren. Dies war im Rahmen dieser Studie nicht möglich. Das skizzierte Vorgehen führt zu folgendem Mengengerüst: Das theoretische Potenzial im Szenario «CargoBeamer» beträgt rund 190 Mrd. Tonnenkilometer im Jahr 2030. Abbildung 11 zeigt diese verkehrliche Entwicklung im Szenario „CargoBeamer“. Rot eingezeichnet ist die beschriebene Entwicklung des durch die Potenzialanalyse ermittelten theoretischen Potenzials.

Abbildung 11: Theoretisches Verlagerungspotenzial im Szenario „CargoBeamer“



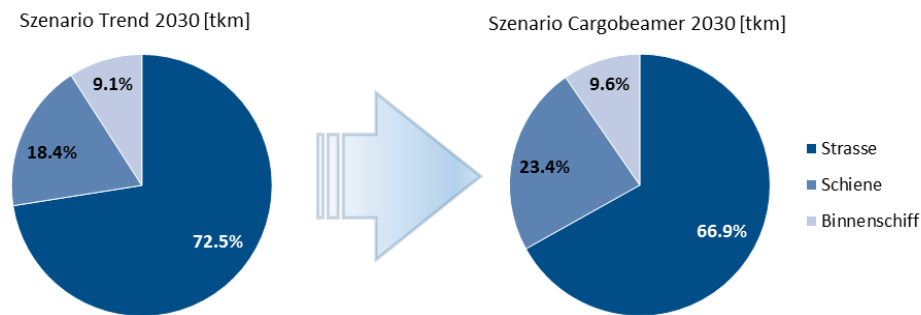
Abgebildet ist das theoretische Potenzial der Technologie CargoBeamer.

Grafik INFRAS. Quelle: UBA 2015, eigenen Berechnungen

Aufgrund der Unsicherheiten bei der Abschätzung des realistischen Potenzial aus dem ermittelten theoretischen Potenzial und um bezüglich Umweltkennzahlen und Umweltkosten einen fairen Vergleich zwischen den Technologien zu ermöglichen, wurde angenommen, dass die verlagerte Menge gleich groß ist wie im Szenario „konventioneller UKV“, nämlich die 39 Mrd. Tkm.

Dies entspricht rund einem Fünftel des theoretischen Potenzials. Hier könnte argumentiert werden, dass die horizontale Verladetechnologie CargoBeamer bzgl. Verladbarkeit der Behältertypen größere Möglichkeiten aufweist als der klassische UKV (vertikaler Verlad mittels Kran), weil die Kranbarkeit beim CargoBeamer keine Rolle spielt. Der Einfachheit halber wird jedoch angenommen, dass die gleiche Transportleistung verlagert wird. Anhand der Auslastung der Sattelaufleger auf Distanzklassen >300 km (14.31 t/Fz) entspricht das Verlagerungspotenzial von 39 Mrd. tkm heute knapp 2,2 Mio. Straßengüterfahrzeugen, welche im vorliegenden Szenario neu mit der CargoBeamer-Technologie auf der Schiene transportiert werden.

Abbildung 12: Modalsplit-Verschiebung Szenario «CargoBeamer» (Basis tkm)



Der Modalsplit verschiebt sich zugunsten der Schiene

Grafik INFRAS. Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, BMVI 2014

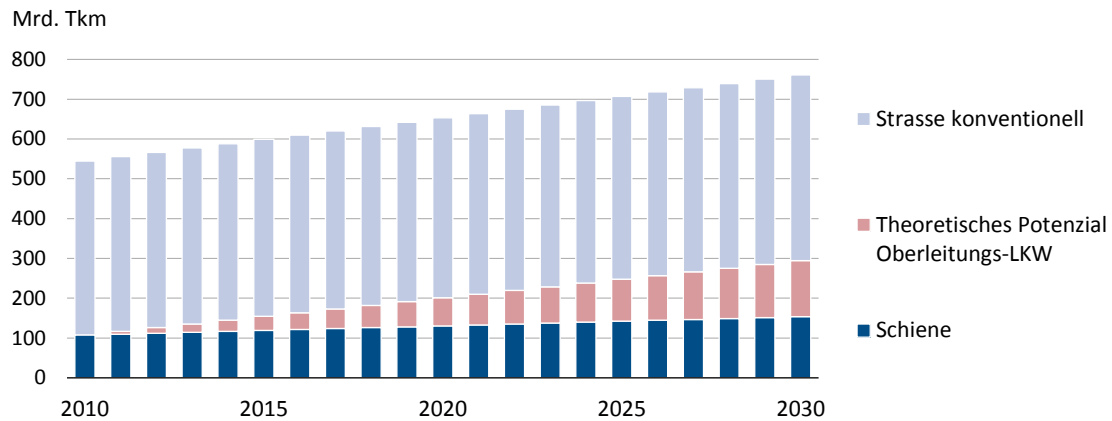
Die im Szenario «CargoBeamer» angenommene Verlagerung führt zu einer Verschiebung des Modalsplits zugunsten der Schiene. Abbildung 12 zeigt die Anteile an der Transportleistung der einzelnen Verkehrsträger. Die Schiene hat im Szenario «CargoBeamer» neu einen Anteil von über 23% (plus gut 4%-Punkte), während der Straßenanteil sich von 72,5% auf rund 67% verringert.

3.4. Szenario Oberleitungs-LKW

Das Szenario «Oberleitungs-LKW» steht, wie das Szenario «CargoBeamer», für ein innovatives Technologie-Szenario, welches im Gegensatz zum Szenario «CargoBeamer» nicht eine Verlagerung von einem Verkehrsträger zum anderen (Straße → Schiene) simuliert, sondern eine Veränderung der Energieträger. Das heißt, im Straßengüterverkehr wird 2030 anstatt fossiler Brennstoff (Diesel bei LKWs) neu zu einem erheblichen Teil Strom als Energieträger genutzt, indem Oberleitungs-LKW eingesetzt werden. Der Einsatz von Oberleitungs-LKW wird im Moment intensiv diskutiert als Maßnahme zur Energiewende im Verkehr (u.a. UBA 2016b). Neben dem Einsatz von Oberleitungs-LKW wären auch andere strombasierte Antriebssysteme denkbar, z.B. Power-to-Liquid (PtL) oder Power-to-Gas (PtG). Für die vorliegende Arbeit wird jedoch ein Szenario für die Technologie der Oberleitungs-LKW skizziert.

Das Problem bei der Abschätzung des theoretischen Potenzials eines Szenarios für Oberleitungs-LKW sind die hohen Investitionen in die Infrastruktur, gekoppelt mit der Frage, welcher Teil der Infrastruktur umgerüstet werden muss, damit die Transportunternehmen auf die Oberleitungs-LKW-Technologie aufspringen. Eine Klärung dieser Fragen ist im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich, weshalb bei der Potenzialanalyse einige Unsicherheiten bestehen. Um diese zu minimieren wurde methodisch gleich vorgegangen wie beim Szenario «CargoBeamer», natürlich mit gewissen Anpassungen bei den Kenngrößen.

Das Aufkommen und die Transportleistung im Straßengüterverkehr 2030 im Szenario «Trend» wurde auch hier nach Distanzklassen (>200 km) und nach Anteil Sattelaufleger zerlegt, und somit das theoretische Potenzial für das Szenario festgelegt. Auch hier muss erwähnt werden, dass die komplette Verlagerung des theoretischen Potenzials nicht realistisch ist. Das skizzierte Vorgehen führt zu folgendem Mengengerüst: Das theoretische Potenzial im Szenario «Oberleitungs-LKW» beträgt rund 140 Mrd. Tonnenkilometer.

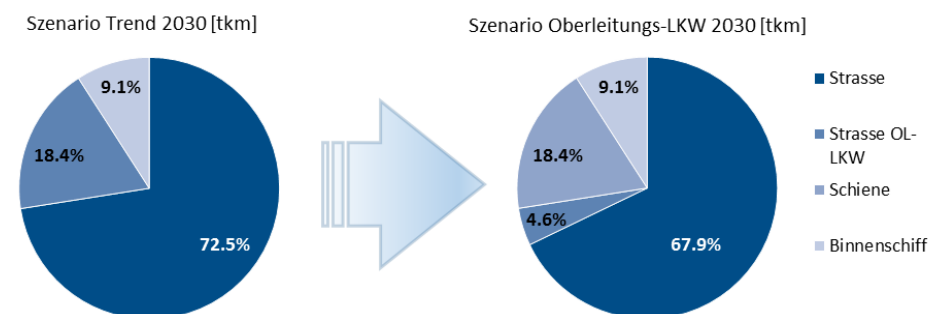
Abbildung 13: Theoretisches Verlagerungspotenzial im Szenario „Oberleitungs-LKW“

Abgebildet ist das theoretische Potenzial der Technologie Oberleitungs-LKW.

Grafik INFRAS. Quelle: UBA 2015, eigen Berechnungen

Auch hier wurde für die Szenario-Definition, wie im Szenario „CargoBeamer“, angenommen, dass die tatsächlich verlagerte Menge gleich groß ist wie im Szenario „konventioneller UKV“, nämlich die 39 Mrd. Tkm. Dies entspricht rund 28% des theoretischen Potenzials.

In diesem Szenario gibt es keine echte Veränderung des Modalsplits, weil die Anteile von Straße und Schiene insgesamt unverändert bleiben. Einzig innerhalb des Straßengüterverkehrs gibt es eine Verlagerung der fossilen LKW zu den Oberleitungs-LKW. Abbildung 14 zeigt die Anteile an der Transportleistung der einzelnen Verkehrsträger. 2030 werden im vorliegenden Szenario neu 4,6% der gesamten Gütertransportleistung mit Oberleitungs-LKW abgewickelt.

Abbildung 14: Modalsplit-Verschiebung Szenario «Oberleitungs-LKW»

Veränderung des Modalsplit nach Einführung der Oberleitungs-LKWs

Grafik INFRAS. Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, BMVI 2014

3.5. Übersicht über die Mengengerüste der Szenarien

Tabelle 4 gibt eine Übersicht zur Herleitung der in den vorangegangenen Teilkapiteln abgeschätzten verkehrlichen Mengengerüste. Dargestellt sind die in der Methodik beschriebenen einzelnen Schritte der Potenzialanalyse. Die abgeschätzten theoretischen Potenziale liegen bei Szenario «CargoBeamer» bei rund 190 Mrd. Tkm und bei den «Oberleitungs-LKW» bei 140 Mrd. Tkm. Die schließlich verlagerten Transportleistungen gegenüber dem Szenario-Trend wurden für die beiden Szenarien „CargoBeamer“ und „Oberleitungs-LKW“ vom Szenario „konventioneller UKV“ übernommen und betraten je 39 Mrd Tkm. Diese Vereinfachung vermeidet arbiträre Annahmen zu den sehr unsicheren realistischen Potenzialen und ermöglicht für folgende Wirksamkeit- und Kostenvergleiche einheitliche Voraussetzungen. Das realistische Potenzial aus dem theoretischen abzuleiten, wäre nur mittels Marktanalysen möglich gewesen. Im Rahmen dieser Studie war dies aus Daten- und Ressourcengründen nicht möglich, weswegen auf das bereits analysierte Szenario „konventioneller UKV“ zurückgegriffen und dessen Verlagerungspotenzial in den beiden anderen Szenarien übernommen wurden.

Tabelle 4: Herleitung der Verlagerungspotenziale [in Mrd. Tkm]

Potenzialanalyse	Szenarien [in Mrd. Tkm]			
	Trend	konv. UKV	CargoBeamer	Oberleitungs-LKW
Güterverkehr DE 2010	838	822	822	838
Straßen-Güterverkehr DE 2030	607	550	607	607
Distanzklassen	> 200 km			367
	> 300 km		272	
Binnenverkehr				202
Nur Sattelaufleger			190	140
Theoretisches Potenzial 2030			190	140
Szenario-Annahme:				
Verlagert ggü. Referenzszenario 2030		39	39	39

Dargestellt sind die einzelnen Rechnungsschritte der Kaskade der Potenzialanalyse

Tabelle INFRAS.

Betrachtet man nun die gesamten Mengengerüste der vier Szenarien (Tabelle 5), erkennt man diese verlagerten Tonnenkilometer in der Differenz zwischen der Summe Schiene der drei Szenarien gegenüber dem Szenario Trend wieder. Die beiden Szenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» sind klassische Verlagerungsszenarien zwischen Straße und Schiene. Beide haben niedrigere Transportleistungen auf der Straße (550 Mrd. Tkm) und höhere auf der Schiene (193 Mrd. Tkm). Das Szenario Oberleitungs-LKW hingegen verlagert keine Güter zwischen Verkehrsträgern, sondern wechselt nur die Art der Energieversorgung eines Teils des Straßengüterverkehrs (39 Mrd. Tkm neu mit Oberleitungs-LKW statt Diesel-LKW). Die Summen auf der Straße

und auf der Schiene bleiben die gleichen wie beim Szenario «Trend». Dies spiegelt auch der Modalsplit wieder, der sich in Szenario «konv. UKV» und «CargoBeamer» zugunsten der Schiene verbessert, während das Szenario «Oberleitungs-LKW» den gleichen Schienenanteil hat wie «Trend». Es ist zu erwähnen, dass die gesamte Transportleistung 2030 auf der Straße und der Schiene beim UBA-basierten Szenario «konv. UKV» (und dem daraus abgeleiteten Schienen Szenario „CargoBeamer“) etwas geringer ist als im Trendszenario. Dies liegt einerseits daran, dass in jenem Szenario aufgrund des breiten Maßnahmenmix (v.a. auch preisliche Maßnahmen, z.B. LKW-Maut) auch ein kleiner Teil der Nachfrage von der Straße auf die Binnenschiffe verlagert wird und die Transportleistung insgesamt gegenüber dem Trendszenario etwas verringert wird. Dieselben Maßnahmen und Wirkungen wurden dem Szenario „CargoBeamer“ hinterlegt.

Tabelle 5: Gesamtübersicht über die Mengengerüste der Szenarien [in Mrd. Tkm]

[Mrd. Tkm]	Szenarien			
	Trend	konv. UKV	CargoBeamer	Oberleitungs-LKW
Straße konventionell	607	550	550	569
Straße Oberleitung				39
Summe Straße	607	550	550	607
Schiene UKV Vertikal	66	105	66	66
Schiene UKV Cargo Beamer			39	
Schiene WLV	88	88	88	88
Summe Schiene	154	193	193	154
Summe: Straße und Schiene	761	743	743	761
Modalsplit Schiene* (Anteil tkm)	18%	23%	23%	18%

Dargestellt sind absoluten Gütermengen nach Verkehrsträger für die alle Szenarien.

* Trimodaler Modalsplit inklusive Binnenschifffahrt.

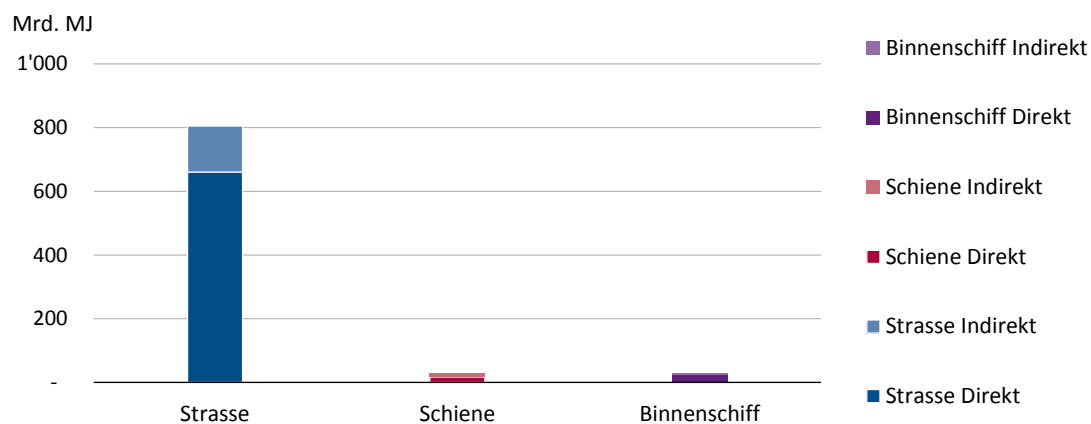
Tabelle INFRAS.

4. Umweltwirkungen und externe Kosten

4.1. Umweltwirkungen Szenario «Trend»

Die Abbildung 15 zeigt den gesamten Endenergieverbrauch im Szenario «Trend», aufgeteilt auf die Verkehrsträger sowie in direkten (Betrieb) und indirekten Energieverbrauch (Stromproduktion und -übertragung; Gewinnung, Aufbereitung und Transport von fossilen Kraftstoffen). Die Berechnung der Umweltwirkungen erfolgte auf Basis der Transportleistung und den entsprechenden Emissionsfaktoren (UBA 2016, basierend auf TREMOD). Mit insgesamt rund 800 Mrd. Megajoule pro Jahr ist der Energieverbrauch im Straßengüterverkehr weitaus am größten. Der Schienengüterverkehr und die Binnenschifffahrt verbrauchen jeweils rund 27 Mrd. Megajoule pro Jahr Endenergie.

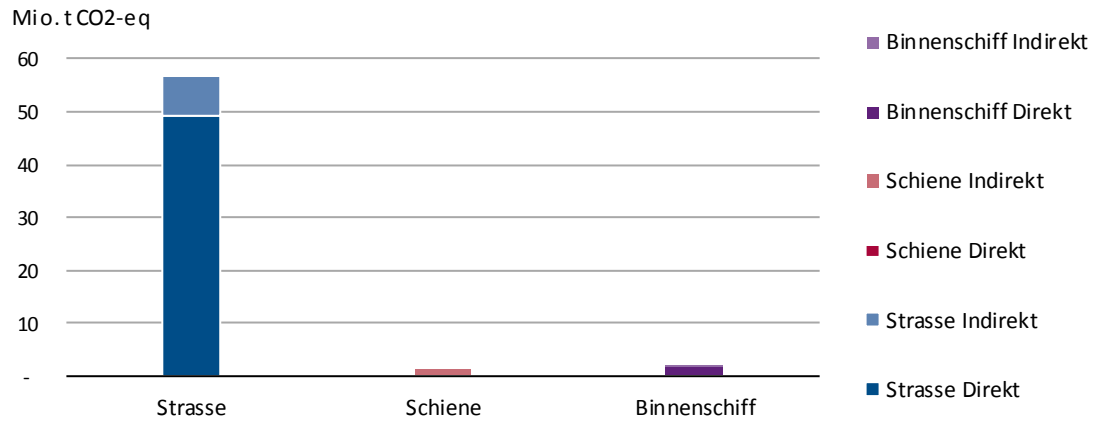
Abbildung 15: Endenergieverbrauch im Referenzszenario «Trend» im Jahr 2030 [in Mrd. MJ / a]



Energieverbrauch verschiedener Verkehrsträger 2030 Szenario Trend

Grafik INFRAS. Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, UBA 2016, BMVI 2014

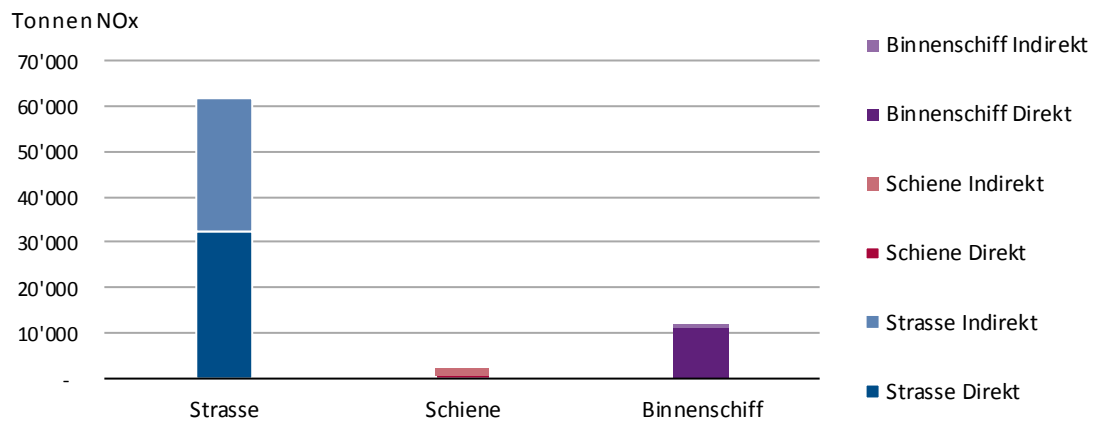
Die Abbildung 16 zeigt die Klimabelastung im Szenario «Trend», aufgeteilt auf die Verkehrsträger sowie in direkte Emissionen (Betrieb) und indirekte Emissionen (z.B. für Stromproduktion, Bereitstellung fossiler Kraftstoffe). Die Berechnung erfolgte auf Basis der Transportleistung und den entsprechenden Emissionsfaktoren (UBA 2016, basierend auf TREMOD). Das Bild korreliert relativ stark mit dem Energieverbrauch. Die Emissionen wurden in CO₂-Äquivalenten berechnet, d.h. die verstärkte Klimawirkung von Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) ist ebenfalls miteingerechnet. Mit knapp 57 Mio. Tonnen CO₂-eq pro Jahr ist die Klimabelastung im Straßengüterverkehr weitaus am größten. Der Schienengüterverkehr emittiert rund 1,2 Mio. Tonnen CO₂-eq pro Jahr und die Binnenschifffahrt rund 2 Mio. Tonnen CO₂-eq pro Jahr.

Abbildung 16: Klimabelastung im Szenario «Trend» 2030 [in Mio. t CO₂-eq / a]

CO₂-Äquivalente nach Verkehrsträger im Szenario Trend 2030

Grafik INFRAS. Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, UBA 2016, BMVI 2014

Die Abbildung 17 zeigt die Stickoxid-Emissionen im Szenario «Trend», aufgeteilt auf die Verkehrsträger sowie in direkte und indirekte Emissionen. Die Berechnungen erfolgten auf Basis der Transportleistung und den entsprechenden Emissionsfaktoren (UBA 2016, basierend auf TREMOD). Auch die Luftschadstoffbelastung ist mit knapp 62.000 Tonnen NO_x pro Jahr im Straßengüterverkehr deutlich am größten. Der Schienengüterverkehr emittiert rund 2.200 Tonnen NO_x pro Jahr, die Binnenschiffahrt rund 12.000 Tonnen NO_x p.a.

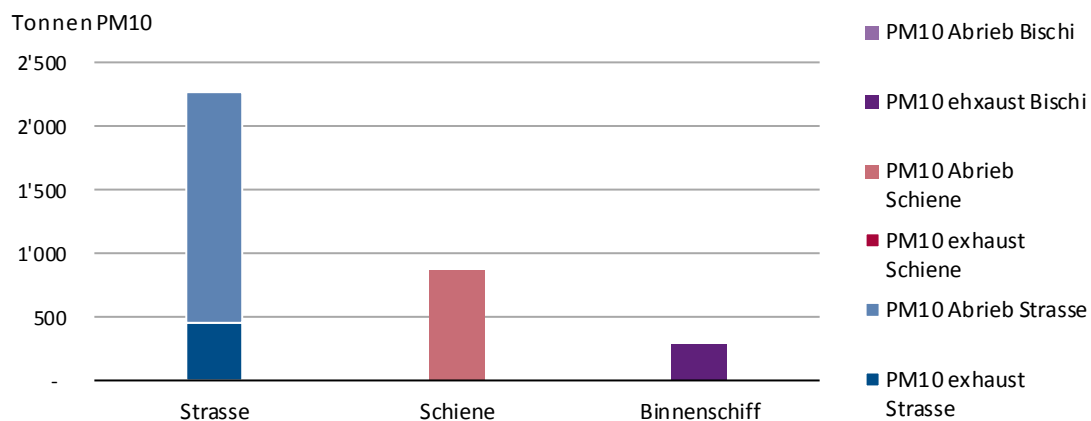
Abbildung 17: Luftschadstoffbelastung Szenario «Trend» 2030 [in t NO_x / a]

Stickoxidemissionen nach Verkehrsträger im Szenario Trend 2030

Grafik INFRAS Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, UBA 2016, BMVI 2014

Die Abbildung 18 zeigt analog die Feinstaub-Emissionen (PM₁₀) im Szenario «Trend», nach Verkehrsträgern sowie direkten und indirekten Emissionen. Die direkten Emissionen sind primär emittierte Feinstäube aus der Verbrennung von Treibstoffen (PM₁₀ exhaust), die indirekten stammen aus mechanischen Prozessen wie z.B. Abrieb, Aufwirbelung (PM₁₀ Abrieb) sowie aus der Energiebereitstellung (z.B. Stromproduktion, Bereitstellung fossiler Kraftstoffe). Die Berechnungen erfolgten auf Basis der Transportleistung und den entsprechenden Emissionsfaktoren (UBA 2016, basierend auf TREMOD). Auch die Luftschadstoffbelastung durch Feinstaub ist mit knapp 2.300 Tonnen PM₁₀ pro Jahr im Straßengüterverkehr klar am größten. Der Schienengüterverkehr emittiert rund 870 Tonnen PM₁₀ und die Binnenschifffahrt rund 280 Tonnen PM₁₀. Beim Straßen- und Schienengüterverkehr sind die indirekten Emissionen durch Energiebereitstellung sowie durch Aufwirbelung und Abrieb sehr viel höher als die direkten Emissionen.

Abbildung 18: Luftschadstoffbelastung Szenario «Trend» 2030 [in t PM₁₀]



Feinstaubemissionen nach Verkehrsträger im Szenario Trend 2030

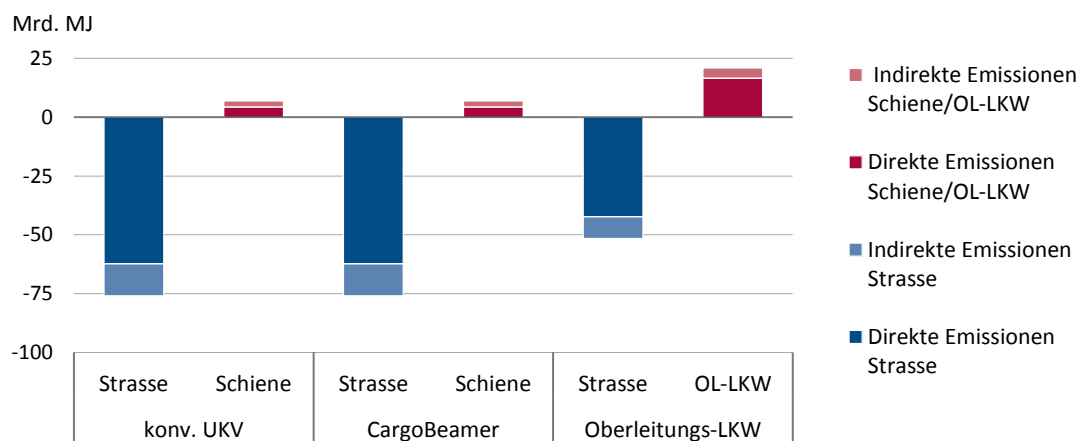
Grafik INFRAS. Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, UBA 2016, BMVI 2014

4.2. Umweltwirkungen: Vergleich Alternativszenarien mit Szenario «Trend»

Interessant ist nun der Vergleich von Energieverbrauch und Emissionen der drei Alternativszenarien zum Referenzszenario. Da im Kern alle Szenarien eine Verlagerung eines Teilaufkommens auf einen ökologischeren Verkehrsträger beinhalten, ist eine insgesamt positive Umweltwirkung der drei Alternativszenarien zu erwarten. Hinzu kommt, dass die verlagerten Tonnenkilometer der drei Alternativszenarien alle als gleich groß angenommen wurden (vgl. Tabelle 4, letzte Zeile), was vor allem bei den beiden Schienen-Verlagerungsszenarien zu ähnlichen Umweltwirkungen führen dürfte.

Abbildung 19 zeigt die Veränderung des Energieverbrauchs der drei Alternativszenarien im Vergleich zum Szenario «Trend». Der Energieverbrauch des Straßengüterverkehrs und des Schienengüterverkehrs bzw. der Oberleitungs-LKW sind separat dargestellt. Im Szenario «konv. UKV» und „CargoBeamer“ werden auf der Straße rund 75 Mrd. Megajoule Endenergie pro Jahr eingespart. Auf der Schiene verbraucht dieselbe Transportleistung nur rund 10% der Energie. Es resultiert eine Einsparung von rund 68 Mrd. MJ pro Jahr. Das Szenario „Oberleitungs-LKW“ weist eine geringere «Energieverlagerung» aus. Auf der konventionellen Straße werden knapp 50 Mrd. MJ pro Jahr eingespart, während die OL-LKWs für die verlagerte Transportleistung rund 20 Mrd. MJ verbrauchen. Es resultiert also eine Energieeinsparung von je gut 30 Mrd. MJ pro Jahr. Das ist weniger als die Hälfte als bei den beiden Schienen-Verlagerung Szenarien.

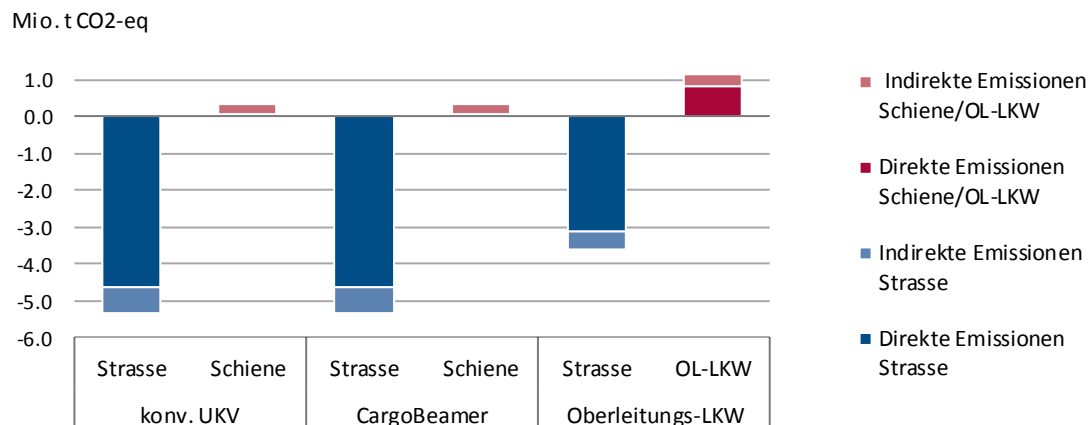
Abbildung 19: Veränderung des Endenergieverbrauchs gegenüber dem Szenario «Trend» [in Mrd. MJ / a]



Veränderung des Energieverbrauchs ggü. dem Referenzszenario.
Grafik INFRAS. Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, UBA 2016, BMVI 2014

Abbildung 20 zeigt ein sehr ähnliches Bild für die Treibhausgasemissionen. Die Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalenten nehmen auf der Straße ab und auf der Schiene resp. OL-LKW zu, wobei in der Summe bei allen drei Alternativszenarien eine deutliche Verringerung der Emissionsreduktion resultiert. Die größte Verschiebung geschieht auch hier im Szenario «konv. UKV» und im Szenario «CargoBeamer» wo knapp 5,4 Mio. Tonnen CO₂-eq pro Jahr eingespart werden. Die verlagerte Transportleistung verursacht auf der Schiene rund 0,3 Mio. Tonnen CO₂-eq pro Jahr, was einer Einsparung von über 90% (knapp 5,1 Mio. Tonnen) entspricht (bezogen auf die verlagerte Transportleistung). Beim OL-LKW Szenario sieht die Abweichung etwas anders aus: Insgesamt (netto) nehmen die CO₂-Emissionen bei diesem Szenario um rund 2,5 Mio. Tonnen CO₂-eq pro Jahr ab⁴.

Abbildung 20: Veränderung der Klimabelastung gegenüber dem Szenario «Trend» [in Mio. t CO₂-eq / a]



Veränderung der Klimabelastung ggü. dem Referenzszenario.

Achtung: unterschiedliche Skalen für Straße einerseits und Schiene bzw. Oberleitungs-LKW andererseits.

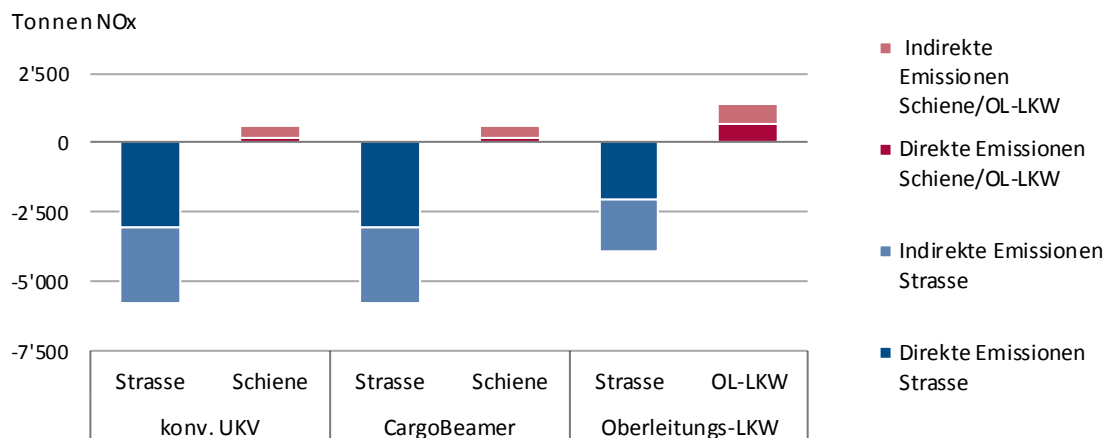
Grafik INFRAS. Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, UBA 2016, BMVI 2014

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Veränderung der Emissionen der beiden Luftschadstoffe Stickoxid (NO_x) und Feinstaub (PM₁₀). Die Verschiebungen gleichen sich stark. Die im Straßengüterverkehr eingesparten Stickoxid Mengen liegen, je nach Szenario, zwischen rund 4.000 und 5.800 Tonnen pro Jahr. Verlagert auf die Schiene verursacht die gleiche Transportleistung noch knapp 600 Tonnen NO_x, das heißt noch rund 8% der ursprünglich auf der Straße emittierten Menge. Wird die Leistung mit OL-LKWs transportiert, sind es rund 1.400 Tonnen,

⁴ Entscheidend für die Treibhausgase der drei Szenarien ist der hinterlegte Strommix. In diesem Fall wurde ein Strommix und der dazugehörige Absenkpfad 2010 bis 2030 aus der Studie «Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050» vom Umweltbundesamt hinterlegt (UBA 2016b, rund 60% Erneuerbare Energien im Jahr 2030). Dies gilt natürlich sowohl für die elektrifizierte Streckenanteile der Oberleitungs-LKW, als auch für die Schienenanteile in den beiden Schienenverlagerung-Szenarien (für alle gleicher Strommix verwendet).

was rund ein Drittel der ursprünglichen Emissionen sind. Bei den Szenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» beträgt die Netto­reduktion des NO_x knapp 5.300 Tonnen, beim Szenario «Oberleitungs-LKW» sind die NO_x-Emissionen gut 2.500 Tonnen pro Jahr geringer als im Trendszenario.

Abbildung 21: Veränderung der NO_x-Belastung gegenüber dem Szenario «Trend» [in t NO_x / a]



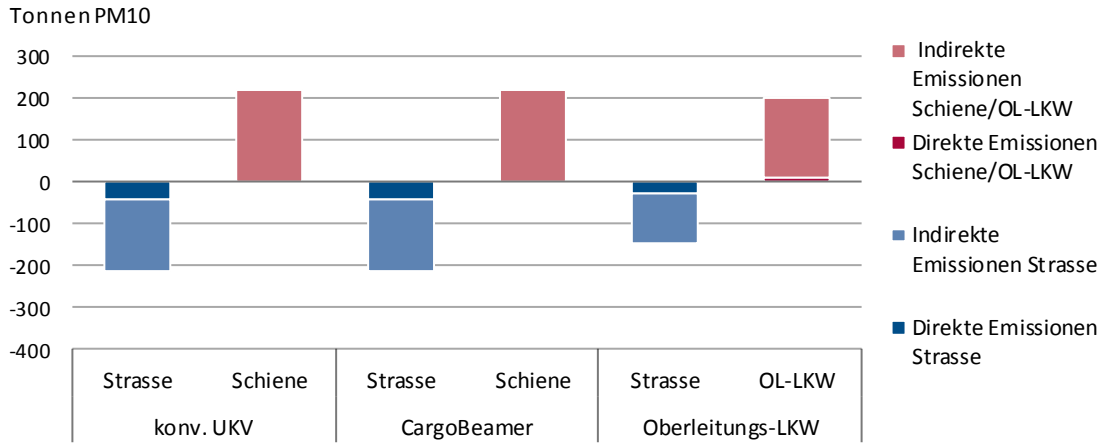
Veränderung der NO_x-Belastung gegenüber dem Referenzszenario.

Achtung: unterschiedliche Skalen für Straße einerseits und Schiene bzw. Oberleitungs-LKW andererseits.

Grafik INFRAS. Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, UBA 2016, BMVI 2014

Etwas anders sieht es beim Feinstaub aus. Hier halten sich die Emissionen vor und nach der Verlagerung in etwa die Waage (Szenario «konv. UKV» und «CargoBeamer»), oder emittieren durch die OL-LKW sogar etwas mehr als die Sattelzüge auf der Straße. Dies liegt vor allem an den indirekten Emissionen aus der Strombereitstellung sowie Abrieb und Aufwirbelung, sowie am Umstand, dass die direkten Feinstaubemissionen aus den Verbrennungsmotoren bis 2030 stark zurückgegangen sein werden. So werden beim «Oberleitungs-LKW» rund 145 Tonnen Feinstaub pro Jahr im klassischen Straßengüterverkehr eingespart, durch die OL-LKWs werden bei der gleichen Transportleistung jedoch rund 200 Tonnen pro Jahr emittiert, was vor allem eine Folge der höheren indirekten Emissionen bei der Stromproduktion ist. Bei den Szenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» werden die Einsparungen durch verminderte Emissionen im Straßenverkehr durch die zusätzlichen Emissionen bei der Schiene (v.a. durch indirekte Emissionen bei der Stromproduktion) ziemlich genau wettgemacht. Generell ist allerdings darauf hinzuweisen, dass bis ins Jahr 2030 die Emissionen von Feinstaub und Stickoxiden gemäß Prognosen sehr stark zurückgehen und damit die Problematik der Luftschadstoffemissionen unabhängig vom Szenario deutlich entschärft wird.

Abbildung 22: Veränderung der PM₁₀-Belastung gegenüber dem Szenario «Trend» [in t PM₁₀ / a]



Veränderung der PM₁₀-Belastung gegenüber dem Referenzszenario.

Grafik INFRAS. Quellen: eigene Berechnungen INFRAS, UBA 2016, BMVI 2014

4.3. Externe Umweltkosten

Auf Basis der berechneten Veränderung der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie der Fahr- und Verkehrsleistung können die Umweltkosten der Szenarien berechnet werden.

Die Umweltkosten beinhalten auch die Gesundheitskosten infolge Luftschadstoff- und Lärmbelastung. Die zentrale Frage für die Berechnung der Umweltkosten bleibt die Höhe der Kostensätze. Verschiedene Studien geben unterschiedliche Empfehlungen ab. Für die Berechnung der Kosten werden Methoden und Kostensätze aus dem Empfehlungen des Umweltbundesamtes verwendet („UBA Methodenkonvention zur Schätzung von Umweltkosten, UBA 2014). Dabei werden Kostensätze für das Jahr 2015 angewandt⁵.

Für die vier betrachteten Kostenkategorien werden folgende Kostensätze angewandt:

- **Luftschadstoffkosten:** Die Luftschadstoffkosten setzen sich aus den Kosten der Feinstaub- und Stickoxidemissionen zusammen. Die Kostensätze stammen aus der UBA Methodenkonvention 2.0 (UBA 2014). Die verwendeten Kostensätze betragen rund 16.000 EUR pro Tonne NO_x und 36.000 EUR pro Tonne PM₁₀ innerorts bzw. 12.000 EUR pro Tonne PM₁₀ außerorts.
- **Klimakosten:** Die aktuellste vorliegende UBA Methodenkonvention 2.0 (UBA 2014) orientiert sich bei ihren Empfehlungen zu Klimakostensätzen stark an den Vermeidungskosten basierend auf Kuik et al. (2009). Allerdings empfiehlt das UBA, als Sensitivität auch die Schadenskosten zu berücksichtigen, um einen Anhaltspunkt über das Ausmaß der möglichen Schäden zu erhalten. In der Methodenkonvention werden 80 EUR pro Tonne CO₂-eq empfohlen.
- **Lärmkosten:** Die Lärmkosten stammen ebenfalls aus der UBA Methodenkonvention 2.0. Berechnet werden sie über die mittleren Kostensätze je Transportleistung (Tkm). Dabei wird unterschieden zwischen Verkehr inner- und außerorts. Der gemittelte Kostensatz beträgt bei LKW innerorts rund 4 Eurocent pro Tkm, beim Schienengüterverkehr rund 0.23 Eurocent pro Tkm (außerorts beträgt der Kostensatz 0).
- **Natur- und Landschaftskosten:** Auch die Natur- und Landschaftskosten (Beeinträchtigung von Ökosystemen z.B. durch Flächenverbrauch) stammen aus der UBA Methodenkonvention 2.0 (UBA 2014). Sie beziehen sich ebenfalls auf die Transportleistung und betragen für LKW rund 0,09 Eurocent pro Tkm, für Güterzüge rund 0,004 €-ct pro Tkm.

Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis der Abschätzung der Umweltkosten für das Szenario «Trend» sowie die Veränderungen der Umweltkosten der drei Alternativszenarien gegenüber dem Szenario Trend.

⁵ Eine Abschätzung von Kostensätzen für das Jahr 2030 wäre mit großen Unsicherheiten verbunden und würde – mit Ausnahme der Klimakosten – vor allem die Teuerungsentwicklung beinhalten, die aber nicht im Fokus der Analyse ist (Betrachtung zu realen Preisen).

Tabelle 6: Veränderung der externen Umweltkosten gegenüber dem Referenzszenario [in Mio. EUR/a]

in Mio. EUR/a	Szenario Trend	Veränderung gegenüber Szenario Trend		
		konv. UKV	CargoBeamer	Oberleitungs-LKW
Luftschadstoffe	1'600	-86	-86	-40
Klima	5'400	-404	-404	-199
Lärm	5'600	-573	-573	-18
Natur- und Landschaft	500	-50	-50	-2
Total Umweltkosten	13'100	-1'113	-1'113	-258
<i>Veränderung ggü. Trend in %</i>		-8.5%	-8.5%	-2.0%

Alle drei Szenarien sparen ggü. dem Referenzszenario externe Umweltkosten ein.

Tabelle INFRAS. Quelle: UBA 2012

Die Summe der externen Umweltkosten des Szenarios «Trend» basiert auf der Studie «Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur» (UBA 2016). Insgesamt verursacht der Güterverkehr im Szenario «Trend» im Jahr 2030 gut 13 Mrd. EUR externe Umweltkosten. Die Umweltkosten liegen im Szenario «konv. UKV» und im Szenario «CargoBeamer» rund 1,1 Mrd. EUR pro Jahr tiefer als im Szenario «Trend». Im Szenario «Oberleitungs-LKW» ist die Reduktion der Umweltkosten am geringsten, beträgt aber immer noch gut 260 Mio. EUR pro Jahr.

Für die Interpretation ist es wichtig zu wissen, dass die Kosten eine ziemlich direkte Folge der veränderten Emissionen sind, welche wiederum direkt auf der Transportleistung basieren. Die Abweichung der externen Umweltkosten vom Referenzszenario sind deshalb stark vom Umfang der verlagerten (von Straße auf Schiene bzw. Oberleitungs-LKW) Transportleistung abhängig. Deswegen ergeben sich bei den beiden Schienen-Verlagerung-Szenarien auch in etwa dieselben Einsparungen.

5. Betriebswirtschaftliche Kosten der Szenarien

Im vorliegenden Kapitel werden die Investitions- und Betriebskosten der Szenarien analysiert und dargestellt. Berücksichtigt werden die Investitionskosten für Verlagerungsinfrastrukturen (konventionelle UKV-Terminals, CargoBeamer-Terminals), die Investitionskosten für die Oberleitungs-Infrastruktur auf Autobahnen, die Investitionskosten für Waggons (UKV, CargoBeamer) sowie Betriebs- und Unterhaltskosten für den Betrieb der Terminals bzw. der Oberleistung-LKW sowie die (variablen) Infrastrukturkosten für das Schienen- und Straßennetz (Unterhalt / Verschleiß, Betrieb). Nicht berücksichtigt sind allfällige Ausbauten (Investitionen) des Schienen- und Straßennetzes, weil dazu die Unsicherheiten sehr groß sind.

Der Fokus der Analyse liegt auf der Differenz der Kosten im Vergleich zum Szenario «Trend». In der Tabelle 7 sind die Inputdaten für die Abschätzung der Kosten aufgelistet.

Tabelle 7: Inputdaten für Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten

		konv. UKV	CargoBeamer	Oberleitungs-LKW
Infrastruktur				
Investitionen Infrastruktur Terminals ¹	Mio. EUR	35,5	20	
Investitionen Infrastruktur Oberleitungen ²	EUR/km			2 bis 3 Mio.
Investitionen Waggons/OL-LKWs				
Investitionen Waggons ¹	EUR/Stk.	80.000	140.000	
Differenz zwischen Diesel LKW und OL-LKW ²	EUR/Stk.			40.000
Betriebskosten Terminals ¹ (Personal, Unterhalt, Rangieren, Energie, Terminalfahrzeuge)	EUR/pro Umschlag	31,65	14,38	
Betriebskosten Oberleitungs-LKW ³ (Energie, Unterhalt, Personal)	EUR / Fz und Jahr			74.000
Umlegung Infrastruktur				
Anzahl Umschläge pro Terminal und Jahr ⁴	Anzahl	120.000	153.000	
Umgerüstete Autobahn-km (tot. 13.500 km in DE) ³	Autobahn-km			6.750
Variable Kosten (Grenzkosten) Infrastrukturnetz				
Variable Kosten Unterhalt & Betrieb Straßennetz ⁵	EUR/Fzkm	0,03 EUR / Fzkm		
	EUR/1.000 tkm	1,2 EUR / 1.000 tkm		
Variable Kosten Unterhalt & Betrieb Schienennetz ⁵	EUR/Fzkm	0,19 EUR / Fzkm		
	EUR/1.000 tkm	0,2 EUR / 1.000 tkm		

Quellen: 1: Angaben CargoBeamer sowie diverse Quellen (u.a. DB Netz) zu neuen KV-Terminals. 2: Fraunhofer 2016, Fachworkshop «Hybrid-Oberleitungs-LKW: Potenziale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs». 3: Eigene Berechnungen, Datengrundlagen aus Fraunhofer 2016. 4: Angaben für konv. UKV = durchschnittliches Terminal, Angaben CargoBeamer Terminal = CargoBeamer. 5. Ricardo-AEA 2014.

Tabelle INFRAS.

Die absoluten jährlichen Kosten der drei Alternativszenarien (im Vergleich zum Trendszenario) sind in der folgenden Tabelle 8 zusammengefasst. Das Szenario «Oberleitungs-LKW», in der die Hälfte der Autobahnen mit Oberleitungen ausgerüstet werden (eigene Annahme) und zudem ein Teil der LKW-Flotte durch Oberleitungs-LKW ersetzt werden muss⁶, führt zu jährlichen Kosten von rund 1,6 Mrd. EUR. Diese Zahl ist allerdings mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, weil es schwierig abzuschätzen ist, welcher Anteil der Autobahninfrastruktur umgerüstet werden muss, um das abgeschätzte Nachfragepotenzial (in Tkm) für Oberleitungs-LKW auszuschöpfen.

Die Kosten der beiden Verlagerungsszenarien («konv. UKV» und «CargoBeamer») sind mit 177 Mio. EUR resp. 63 Mio. EUR pro Jahr um ein Vielfaches tiefer als im Oberleitungs-LKW-Szenario (über 1,5 Mrd. EUR/a). Dennoch sind die jährlichen Kosten nicht unerheblich, führen aber natürlich auch zu einer Verlagerung und einer Verringerung der Umweltkosten (vgl. vorheriges Kapitel). Bestimmend sind in allen Szenarien die Kosten für Infrastrukturbereitstellung. Die Fahrzeuganschaffungskosten tragen ebenfalls zur Erhöhung der Kostendifferenz bei. Bei den beiden Schienen-Verlagerungs-Szenarien führt die Verlagerung von der Straße auf die Schiene zu einem leichten Rückgang der variablen Infrastrukturkosten (Grenzkosten) des Infrastrukturnetzes, weil die variablen Infrastrukturkosten auf dem Schienennetz tiefer sind als auf der Straße.

⁶ In die Berechnung eingeflossen ist jedoch nur die Differenz zwischen den Investitionskosten eines neuen Diesel LKWs und eines neuen Oberleitungs-LKWs.

Tabelle 8: Investitions- und Betriebskosten je Szenario (Unterschiede im Vergleich zum Szenario «Trend»)

		konv. UKV	CargoBeamer	Oberleitungs-LKW
Umlegung Fahrten				
Differenz Aufkommen Schiene 2030	[1000 t]	31.840	31.840	67.535
Auslastung Sattelaufleger DE	[t/Fz]	14	14	14
Anzahl Fahrten // Sendungen*	[1000 Fz]	2.225	2.225	4.720
Umlegung Infrastruktur				
Anzahl Terminals // Strecke OL	[Stk.] / [km]	38	29	6.750
Anzahl Waggons // umgerüstete OL-LKW	[Stk.]	1.360	1.050	9.440
Umlegung Kosten				
Investitionen: Infrastruktur (Terminals // Oberleit.)	[Mio. EUR]	1.345	582	14.000 - 20.000
Investitionen: Waggons // LKW	[Mio. EUR]	109	147	472
Jährliche Abschreibungskosten der Investitionen (Infra. & Waggons) (bei Nutzungsdauer 20 Jahre)	[Mio. EUR/a]	73	36	874
Betriebskosten pro Jahr	[Mio. EUR/a]	141	64	698
Variable Infrastrukturkosten Netz (Schiene, Straße)	[Mio. EUR/a]	-37	-37	-
Total jährliche Kosten	[Mio. EUR/a]	177	63	1.572
Kosten pro Sendung/Fahrt	[EUR]	79	28	333

Kosten für Infrastrukturinvestitionen und Betrieb, gerechnet je Szenario.

* Die durchschnittl. Transportdistanz pro Fahrt ist im Szenario Oberleitungs-LKW kleiner als in den anderen zwei Szenarien.

Tabelle INFRAS. Quelle: CargoBeamer, Fraunhofer 2016.

Bei der Interpretation dieser Resultate gilt es zu beachten, dass beim Szenario «Oberleitungs-LKW» ein Großteil der Infrastruktur neu erstellt werden muss, während es im Kombinierten Verkehr bzw. Schienenverkehr (Schienennetz) doch schon eine große bestehende Infrastruktur gibt. Diese Investitionskosten in ein Oberleitungsnetz betragen bis zu 20 Mrd. EUR (2-3 Mio. EUR pro Km) und fließen in die Kostenrechnung ein.

Bricht man die ermittelten jährlichen Gesamtkosten auf durchschnittliche Kosten pro (verlagerte) Sendung herunter, ergibt dies im Szenario «Oberleitungs-LKW» Kosten von 333 EUR pro Sendung, im Szenario «konv. UKV» 79 EUR pro Sendung, während im Szenario «CargoBeamer» mit 28 EUR pro Sendung die geringsten Kosten resultieren.

Aus Sicht der Autoren ist zudem zu erwähnen, dass die Kostendaten für die bisher weit verbreiteten Systeme (klassischer KV, Schienen- und Straßennetz) sehr robust und durch verschiedene praktische Beispiele überprüfbar sind, während die Angaben zu den ‚neueren‘ Technologien direkt von CargoBeamer sowie aus Studien zu den Oberleitungs-LKW stammen. Die Zahlen scheinen uns plausibel, lassen sich aber nicht abschließend überprüfen.

6. Beurteilung und Schlussfolgerungen

6.1. Ergebnisübersicht

Die folgende Tabelle 9 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kennzahlen und Ergebnisse aus den vorangehenden Kapitel zu den verkehrlichen Mengengerüsten, den Umweltkennzahlen und der Kostabschätzung aller Szenarien.

Tabelle 9: Gesamtübersicht der Ergebnisse (gerundet)

		Trend	konv. UKV	Cargo- Beamer	Oberleitungs- LKW
Verkehrliches Mengengerüst					
Straße	Mio. tkm	607.390	550.070	550.070	607.390
Schiene	Mio. tkm	153.740	192.600	192.600	153.740
verlagerte//umgerüstete Leistung					
vgl. mit Trend	Mio. tkm		38.860	38.860	38.860
Anzahl Sendungen oder OL-Fahrten	1000 Stk.		2.230	2.230	4.720
Modalsplit Schiene* (tkm)	%	18%	23%	23%	18%
Umwelt (Total Trend und Differenz zu Trend)					
Treibhausgasemissionen	Mio. t CO ₂ eq/a	58	-5,0	-5,0	-2,5
Externe Umweltkosten	Mio. EUR/a	13.100	-1.113	-1.113	-258
Reduzierte externe Umweltkosten					
pro verlagerte Sendung	EUR/Sendung		-500	-500	-55
Betriebswirtschaftliche Kosten (zusätzlich zu Trend)					
Total jährliche Kosten	Mio. EUR / a		180	60	1.570
Kosten pro Sendung//Fahrt	EUR		79	28	333
Eingesparte Umweltkosten im					
Verhältnis zu betriebsw. Kosten	Faktor		6.3	17.7	0.2

Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse der vorangehenden Kapitel.

* Trimodaler Modalsplit inklusive Binnenschifffahrt.

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnungen auf Basis sämtlicher genutzter Literatur

6.2. Einschätzung der Ergebnisse

Von den drei Alternativszenarien führen die Szenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» zur größten Reduktion negativer Umwelteffekte sowie externer Umweltkosten. Der Einsatz der Oberleitungs-LKW führt umweltseitig zu deutlich geringeren Verbesserungen, solange die von Diesel-LKW auf Oberleitungs-LKW verlagerte Menge nicht deutlich größer ist. Die umweltseitigen Verbesserungen der beiden Szenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» sind in erster Linie eine Folge davon, dass in diesen Szenarien aufgrund der Verlagerung von der Straße auf die

Schiene die Treibhausgasemissionen sowie Lärmkosten deutlich geringer sind als bei den anderen Szenarien. Ein Teil der Reduktion ist zudem darauf zurückzuführen, dass bei den beiden Szenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» – basierend auf der zugrundeliegenden UBA-Studie (UBA 2016) – infolge umfassender, auch finanzieller Maßnahmen zur Verlagerung (z.B. Ausweitung LKW-Maut) auch die gesamte Transportnachfrage auf der Straße im Vergleich zum Trendszenario leicht zurückgeht. Beim Trendszenario und beim Szenario „Oberleitungs-LKW“, bei denen die Straße im Zentrum steht und keine forcierte Verlagerung auf die Schiene angenommen wird, wurde diese Wirkung nicht berücksichtigt.

In Bezug auf die betriebswirtschaftlichen Kosten führen alle Alternativszenarien zu zusätzlichen Kosten im Vergleich zum Trendszenario. Allerdings sind die Kosten der beiden Verlagerungsszenarien deutlich geringer als beim Szenario Oberleitungs-LKW. Das Szenario «CargoBeamer» weist von den drei Alternativszenarien die geringsten betriebswirtschaftlichen Kosten auf, sowohl insgesamt, als auch pro verlagerter Sendung.

In Bezug auf die Ergebnisse gilt es zudem folgende Aspekte hervorzuheben:

- Die verlagerbare Transportleistung wurde, anhand der Potenzialanalyse, bei allen Szenarien auf knapp 40 Mrd. Tkm geschätzt.
- Der Modalsplit verschiebt sich bei den beiden Verlagerungsszenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» von 18,4% auf 23,5% zugunsten der Schiene.
- Die Güterverlagerung von der Straße auf die Schiene hat grundsätzlich einen positiven Effekt auf die Umweltverträglichkeit im Vergleich zum Trendszenario. Die berechneten Emissionen der Szenarien sehen folgendermaßen aus:
 - Die daraus resultierenden Einsparungen an CO₂-Äquivalenten gegenüber dem Referenzszenario betragen gut 5 Mio. Tonnen bei den Szenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» bzw. rund 2.5 Mio. Tonnen beim Szenario «Oberleitungs-LKW».
 - Die Stickoxidemissionen verringern sich um 5.300 Tonnen in den Szenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» und rund 2.500 Tonnen im Szenario «Oberleitungs-LKW» im Vergleich zum Trendszenario.
 - Beim Feinstaub resultieren aufgrund der erhöhten Schienenaktivitäten in allen Szenarien eine leichte Erhöhung gegenüber dem Referenzszenario. Allerdings sind diese Unterschiede gemessen an den heutigen Emissionen gering. Generell sinken die Luftschadstoffemissionen in allen Szenarien bis 2030 auf ein tiefes Niveau.
- Die externen Umweltkosten basieren größtenteils auf diesen Emissionsdaten und sind ebenfalls als Veränderung zum Referenzszenario berechnet worden. Das Referenzszenario verursacht externe Umweltkosten von gut 13 Mrd. EUR. Die größte Minderung erfolgt im Szenario

«konv. UKV» und im Szenario «CargoBeamer» mit rund 1,1 Mrd. EUR weniger. Die Umstellung eines Teils der LKW Flotte auf Oberleitungs-LKW verringert diese um rund 260 Mio. EUR.

- Die Investitions- und Betriebskosten sind im System CargoBeamer tiefer als im konventionellen UKV. Am höchsten sind die Kosten bei der Flotten- und Infrastrukturmürüstung für Oberleitungs-LKW. Allerdings muss hier erwähnt werden, dass die bei den Infrastrukturkosten für Schiene und Straße nur die variablen Kosten für Betrieb und Unterhalt eingerechnet wurden, nicht aber die Investitionskosten für (mögliche) Ausbauten. Betrachtet man die betriebswirtschaftlichen Kosten betragen diese im Szenario «konv. UKV» rund 177 Mio. EUR pro Jahr, im Szenario «CargoBeamer» 63 Mio. EUR / a und im Szenario «Oberleitungs-LKW» knapp 1,6 Mrd. EUR / a. Somit sind die betriebswirtschaftlichen Kosten für die zusätzliche Terminalinfrastruktur pro Sendung beim konventionellen UKV mehr doppelt so hoch wie bei der Technologie CargoBeamer. Im Szenario Oberleitungs-LKW sind die jährlichen Kosten pro Sendung für Oberleitungsinfrastruktur und Umrüstung der LKW mehr als 4-mal höher als beim Szenario «konv. UKV». Nicht eingerechnet dabei sind die Betriebskosten der Fahrzeuge auf Straße und Schiene.
- Ein Vergleich der externen Umweltkosten (bzw. des Umweltnutzens durch verringerte Umweltkosten) mit den jährlichen Betriebskosten zeigt, dass der volkswirtschaftliche Nutzen der Verlagerung von Gütern auf die Schiene erheblich ist und die betriebswirtschaftlichen Zusatzkosten in den beiden Verlagerungsszenarien deutlich übersteigt. Im Szenario «konv. UKV» ist der Nutzen rund 6-mal höher, im Szenario «CargoBeamer» ist der Nutzen rund 18-mal höher. Allerdings erlaubt die vorliegende Analyse keine umfassende Kosten-Nutzen-Analyse der Szenarien. Dazu müssten auch alle weiteren relevanten Kosten- und Nutzenkomponenten ermittelt werden (z.B. Zeitkosten, Investitionskosten Schiene & Straße etc.). Im Szenario «Oberleitungs-LKW» ist erwähnenswert, dass die Umstellung von rund 28% des abgeschätzten theoretischen Potenzials der Transportleistung, auf Oberleitungs-LKW (entspricht rund 6% der gesamten Transportleistung) mehr als 0,35 Mrd. € / a an Energiekosten einsparen würde.
- Im Rahmen dieser Studie konnte für das Szenario «Oberleitungs-LKW» die Kausalität zwischen umgerüsteter Autobahn-Kilometer und umgerüstetem Anteil der LKW-Flotte nicht untersucht werden. Somit muss dieses Szenario als ein Zeitpunkt betrachtet werden, an dem die Hälfte der Autobahnen (6.750 km) im deutschen Netz umgerüstet sind, und rund 6% der gesamten Transportleistung mit Oberleitungs-LKW transportiert wird.

Kritische Würdigung der Methode

- Grundsätzlich ist es schwierig, aufgrund einer Abschätzung der Potenziale verschiedener Technologien, vergleichbare Szenarien zu erstellen. Gewisse Annahmen und Indikatoren weichen stark voneinander ab und verwässern die Vergleichbarkeit. Detaillierte Prognosen würden hier helfen, waren im Rahmen dieser Studie allerdings nicht möglich. Eine direkte und umfassende Vergleichbarkeit verschiedener Technologien bzw. Szenarien (z.B. im Sinne einer vollständigen Kosten-Nutzen-Analyse) wäre für ausgewählte, konkrete Korridore möglich und sinnvoll. Der Aufwand dafür ist allerdings erheblich. Zudem ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Korridore nur beschränkt möglich. Mit dem hier gewählten Vorgehen der Analyse gesamtdeutscher Szenarien lassen sich gute Gesamtaussagen treffen, ein systematischer Vergleich der Technologien für konkrete Korridore kann daraus aber nicht abgeleitet werden.
- Das Szenario «konv. UKV» ist eigentlich ein umfassendes Zielszenario des UBA aus einem Forschungsvorhaben (UBA 2016). In diesem Szenario steckt ein ganzes Bündel an fiskalischen, infrastrukturellen und technischen Maßnahmen, das für das Szenario „CargoBeamer“ übernommen wurde (vgl. oben).
- Das hier gewählte Vorgehen, die Potenzialanalyse für die drei Szenarien von der Straßenseite her durchzuführen, ist eine geeignete Möglichkeit, die verlagerbaren Anteile des Transportaufkommens abzuschätzen. Eine alternative Möglichkeit wäre es, das bereits bestehende Potenzial auf der Schiene anhand von Behältertypen und Hauptverkehrsverbindungen etc. abzuschätzen.
- Beim Szenario „CargoBeamer“ muss berücksichtigt werden, dass der KV-affine Anteil der Warengruppen wahrscheinlich grösser ist, als derjenige des Szenarios „konv. UKV“. Dies weil die Behältertypen nicht kranbar sein müssen und auch sonst eigentlich keine Beschränkungen haben im System CargoBeamer.

6.3. Gesamtbeurteilung und Fazit

Nach Vorliegen der quantitativen Ergebnisse aus der Wirkungsanalyse wird eine Gesamtbeurteilung der beiden Szenarien vorgenommen, die sich auf folgende Kriterien stützt:

- **Umweltwirkung:** Beitrag zur Minderung negativer Umweltauswirkungen, differenziert in Energie und Treibhausgasemissionen sowie Luftschadstoffe.
- **Umweltkosten:** Beitrag zur Verringerung externer Umweltkosten.
- **Verkehrliche Wirkung (Zielerreichung):** Beitrag zur Verlagerung auf die Schiene (als explizites Ziele der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung)
- **Ökonomische Effizienz:** Betriebswirtschaftliche Kosten und Nutzen, mögliche volkswirtschaftliche Effekte, Sicherstellung des Finanzierungsbedarfs.
- **Randbedingungen:** notwendige regulatorische und politische Randbedingungen
- **Realisierbarkeit, Akzeptanz:** Chancen und Hemmnisse in Bezug auf die Umsetzung

Tabelle 10: Beurteilung der vier untersuchten Szenarien

	Trend	konv. UKV	CargoBeamer	Oberleitungs-LKW
Verkehrliche Wirkung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zunahme Gesamttransportleistung ▪ Schienenanteil in etwa konstant 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anteil Schiene steigt stark an (+5 %-Punkte) ▪ Beitrag zur Erreichung der Verlagerungsziele Bund 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anteil Schiene steigt stark an (+5 %-Punkte) ▪ Beitrag zur Erreichung der Verlagerungsziele Bund 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine modalen Veränderungen ggü. Trend. Lediglich technologische Verlagerung
Umweltwirkung	Negativ: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Treibhausgasemissionen steigen weiterhin. Klimaziele verfehlt ▪ Energieverbrauch nimmt weiter zu ▪ Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen bleibt 	positiv: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Starke Verringerung der Treibhausgasemissionen vgl. mit Trend (-9%) ▪ Energieverbrauch sinkt dank Verlagerung (Schiene energieeffizienter) 	positiv: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhebliche Verringerung der Treibhausgasemissionen vgl. mit Trend (-9%) ▪ Energieverbrauch sinkt dank Verlagerung 	positiv: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhebliche Verringerung der Treibhausgasemissionen vgl. mit Trend (-4%) ▪ Energieverbrauch sinkt dank Umrüstung auf strombasierte Technologie
Umweltkosten	neutral: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sinken zwar ggü. heute, sind aber immer noch sehr hoch (13 Mrd. €/a) 	sehr positiv: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhebliche Verringerung der Umweltkosten von rund 1,1 Mrd. €/a 	positiv: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhebliche Verringerung der Umweltkosten von rund 1,1 Mrd. €/a 	leicht positiv: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nur leichte Verringerung der Umweltkosten, ca. 260 Mio. €/a
Ökonomische Effizienz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine zusätzl. Kosten durch Verlagerungsinfrastruktur ▪ Ausbau Straßeninfrastruktur ▪ Ohne neue Finanzierungsinstrumente Finanzbedarf nicht gesichert 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzl. Kosten für Terminalinfrastruktur & -betrieb von ca. 180 Mio. €/a ▪ Tendenziell positive volkswirtschaftl. Effekte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzl. Kosten für Verlagerungsinfrastruktur moderat: deutlich unter 100 Mio. €/a ▪ Tendenziell positive volkswirtschaftl. Effekte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Zusatzkosten, v.a. hoher Initialaufwand für Ausrüstung der Autobahnen mit Oberleitung ▪ Gesamte Kosten gut 1,5 Mrd. €/a ▪ Ökonom. Effizienz fragwürdig

	Trend	konv. UKV	CargoBeamer	Oberleitungs-LKW
Notwendige Randbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ weiter wie bisher ▪ Straßeninfrastruktur muss deutlich ausgebaut werden, um Kapazität zu gewährleisten. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kranbare Behälter müssen verfügbar sein (schränkt Potenzial ein) ▪ Neue Terminals müssen realisiert werden können. <p>Zudem weitere wichtige Rahmenbedingungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Finanzielle Förderung UKV ▪ Erhöhung Straßenkosten (Lkw-Maut) Netzkapazität Schiene verfügbar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ alle Behälterttypen können verladen werden ▪ Neue Terminals müssen realisiert werden können. ▪ Neue Technologie muss sich am Markt durchsetzen. <p>Zudem weitere wichtige Rahmenbedingungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ analog Szenario «konv. UKV» 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umrüstung eines beträchtlichen Anteils der LKW-Flotte notwendig. ▪ Förderung Umrüstung OL-LKW (z.B. tiefere Mautsätze)
Realisierbarkeit, Akzeptanz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ unkritisch, da ‚business-as-usual‘. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umsetzung erfordert diverse Maßnahmen (Finanzierung, Infrastruktur), die kritische Akzeptanz haben könnten. ▪ Bau neuer Terminals akzeptanzkritisch (Flächenverbrauch, Lärm) 	<ul style="list-style-type: none"> analog Szenario «konv. UKV» 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine klassischen Konflikte zwischen Bahn und Straße ▪ größtes Hindernis dürften die hohen Kosten sein ▪ Auch die umgerüsteten Sattelzugmaschinen müssen eine kritische Größe erreichen

Tabelle INFRAS.

Es nicht möglich, eine abschließende Rangfolge der Szenarien zu erstellen, weil die verschiedenen Kriterien und Aspekte unterschiedlich zu würdigen sind und sich die Szenarien zum Teil deutlich unterscheiden. Ebenfalls sagen die Ergebnisse nichts darüber aus, wie realistisch ein Szenario ist. Die Szenarien weisen absichtlich ganz unterschiedliche Schwerpunkte auf, die sich in der politischen Realität natürlich kombinieren lassen.

Die Ergebnisse und der Gesamtvergleich lassen aber dennoch einige wichtige Schlussfolgerungen zu: Aus Umweltsicht schneiden die beiden Verlagerungsszenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» klar am besten ab. Auch wenn man zusätzlich die ökonomische Effizienz und die verkehrlichen Wirkungen bezieht und sie an bestehenden Zielen der Bundesregierung misst, sind diese beiden Szenarien insgesamt positiv zu würdigen. Die beiden Verlagerungsszenarien «konv. UKV» und «CargoBeamer» können nur teilweise direkt miteinander verglichen werden. Tendenziell schneidet das Szenario «CargoBeamer» aus Sicht der betriebswirtschaftlichen Kos-

ten etwas besser ab als der konventionelle UKV. Um die ehrgeizigen Verlagerungs- und Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen dürfte es notwendig sein, auf beide Technologien zu setzen. Wird nur der konventionelle UKV ausgebaut, ist das zusätzliche Verlagerungspotenzial beschränkt. Mit einer Technologie zum Vertikalverlad wie CargoBeamer können dagegen weitere Potenziale, v.a. bei den nicht kranbaren Sattelaufliegern, genutzt werden. Damit ist das gesamte Verlagerungspotenzial erheblich größer. Ideal wäre tatsächlich eine Kombination der beiden Verlagerungsszenarien, das heißt ein Ausbau sowohl des klassischen UKV als auch innovativer KV-Technologien wie CargoBeamer. Das Szenario «CargoBeamer» schneidet in Bezug auf die Kosten-Wirksamkeit am besten ab: Die betriebswirtschaftlichen Kosten pro verlagerter Transportleistung (Tkm) bzw. pro verringerter Tonne CO₂ sind tiefer als in den anderen Szenarien. Voraussetzung dafür ist aber, dass das System CargoBeamer in Zukunft die erwartete Effizienz in Bezug auf Umschlagzeit, Umschlagkosten und Auslastung tatsächlich realisieren kann.

Für die Erreichung der ehrgeizigen Umweltziele ist anstelle einer Verlagerung Straße → Schiene auch eine energetische-technologische Wende im Straßengüterverkehr denkbar, beispielsweise durch Oberleitungs-LKW. Die Analysen haben gezeigt, dass damit zwar klar positive Umwelteffekte erreicht werden können, dies aber einen hohen Preis hat.

Will die deutsche Bundesregierung ihre ehrgeizigen Klimaziele und Verlagerungsziele im Güterverkehr erreichen, sind erhebliche Anstrengungen notwendig. Zwei neue Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass vor allem für das Erreichen der mittel- und langfristigen Klimaziele eine Verkehrswende (Verlagerung Straße → Schiene) dazu nicht ausreichen wird, sondern nur durch eine Kombination einer Verkehrswende und einer Energiewende im Verkehr möglich sein wird (UBA 2016, UBA 2016b). Eine Energiewende im Verkehr beinhaltet eine Umstellung der zentralen Energieträger von fossilen Kraftstoffen hin zu erneuerbaren, strombasierten Energieträgern. Zur Energiewende im Verkehr können Oberleitungs-LKW einen Beitrag leisten. Eine Alternative sind Verbrennungstechnologien mit strombasierten Brennstoffen wie Power-to-Liquid oder Power-to-Gas (hier nicht untersucht).

Die vorliegende Studie gibt Hinweise, dass die Energiewende in Bezug auf die Wirksamkeit zumindest kurz- und mittelfristig wohl mehr kosten wird als die Verkehrswende. Deshalb sollte in einem ersten Schritt (kurz- und mittelfristig) die Verkehrswende, sprich zusätzliche Verlagerung von der Straße auf die Schiene, weiter forciert werden. Allerdings hat das gesamte klimaseitige Reduktionspotenzial der Verkehrsverlagerung seine Grenzen. Deshalb wird im nächsten Schritt, mittel- und langfristige, auch eine Energiewende im Verkehr notwendig sein, auch wenn diese mit höheren Kosten verbunden sind wird.

Damit die Verkehrswende im Sinne der gesetzten Ziele der Bundesregierung gelingt, ist ein Ausbau aller KV-Technologien erforderlich, wie auch eine umfassende Anpassung der Rahmenbedingungen (z.B. Förderung / finanzielle Anreize für Terminalinfrastrukturen, Verbesserung der Bewilligungsverfahren, ggf. Anpassung der LKW-Maut; vgl. auch UBA 2016). Mit dem Ausbau des konventionellen UKV (Vertikalverlad) und neuen, innovativen KV-Lösungen insbesondere im Horizontalverlad (z.B. CargoBeamer) vergrößert sich das Segment an verlagerbaren Gütern.

Literatur

- BMVI 2014:** Verkehrsverflechtungsprognose (VPP) 2030 zum Bundesverkehrswegeplan 2015 (BVWP); Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014.
- INFRAS 2012:** CargoBeamer: Nutzen für die Umwelt und Volkswirtschaft; Wirkung auf Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und externe Kosten, Schlussbericht, Zürich 2012.
- INFRAS 2014:** Handbuch Emissionsfaktoren im Strassenverkehr (HBEFA); aufdatierte Version 3.2; INFRAS im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Bern 2014.
- KBA 2014:** Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD), Verkehrsaufkommen Jahr 2014, Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg 2014.
- Fraunhofer 2016:** Fraunhofer ISI (Koordination), Fraunhofer IML, PTV Group, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH), M-FIVE; Fachworkshop «Hybrid-Oberleitungs-LKW: Potenziale zur Elektrifizierung des schweren Güterverkehrs», Berlin 2016.
- Ricardo-AEA et al. 2014:** Update of the Handbook on External Costs of Transport; on behalf of DG MOVE, Didcot UK 2014.
- UBA 2014:** Best-Practice-Kostensätze für Luftschadstoffe, Verkehr, Strom- und Wärmeerzeugung. Anhang B der «Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten». Studie im Auftrag des Umweltbundesamts, Dessau, 2014.
- UBA 2015:** Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs im Jahr 2015; Öko-Institut, KIT und INFRAS im Auftrag Umweltbundesamt, 2015. (In Bearbeitung, noch nicht veröffentlicht)
- UBA 2016:** Finanzierung einer nachhaltigen Güterverkehrsinfrastruktur; Anforderungen und Rahmenbedingungen für eine zukunftsorientierte Entwicklung des Güterverkehrs, Umweltbundesamt, Texte | 53/2016, Dessau 2016.
- UBA 2016b:** Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050, Umweltbundesamt, Texte | 56/2016, Dessau 2016.