

Bundesamt für Umwelt BAFU

# **Elektrifizierung des Strassengüterverkehrs in der Schweiz Eckwerte**

Schlussbericht  
Bern, 9. März 2015

Philipp Wüthrich, Martin Schmied  
Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)



# **Impressum**

## **Elektrifizierung Strassengüterverkehr Schweiz**

Eckwerte

### **Schlussbericht**

Bern, 9. März 2015

7305a\_Elektrifizierung\_GV\_Schlussb\_V7.docx

### **Auftraggeber**

Bundesamt für Umwelt BAFU

Ittigen, Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

### **Projektleitung**

K. Kammer, BAFU

### **Autorinnen und Autoren/Auftragnehmer**

Ph. Wüthrich, M. Schmied

INFRAS, Mühlemattstrasse 45, 3007 Bern

Tel. +41 31 370 19 19

**Hinweis:** Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Inhalt

<b>1.</b>	<b>Einleitung, Ausgangslage</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Varianten und Mengengerüst</b>	<b>7</b>
2.1.	Fahrzeuge	7
2.2.	Berechnungsvarianten	8
2.3.	Mengengerüst	10
2.3.1.	Fahrleistungen	10
2.3.2.	Flottenzusammensetzung	12
2.4.	Verbrauchs- und Emissionsfaktoren	13
2.4.1.	Endenergieverbrauchsfaktoren	13
2.4.2.	Emissionsfaktoren	15
2.5.	Kostensätze	15
<b>3.</b>	<b>Resultate</b>	<b>19</b>
3.1.	Emissionen	19
3.1.1.	Treibhausgase	19
3.1.2.	Luftschadstoffe	20
3.2.	Kosten	23
3.3.	Fazit	25
<b>Annex</b>		<b>27</b>
Annex 1 -	Fahrleistungen schwere Nutzfahrzeuge	27
Annex 2 –	Fahrzeuggewichte	28
Annex 3 –	Emissionsfaktoren	29
Annex 4 –	Kostensätze	31
Annex 5 –	Emissionen	33
Annex 6 –	Kosten	35
<b>Literatur</b>		<b>37</b>

## 1. Einleitung, Ausgangslage

Im Strassengüterverkehr wird aufgrund des prognostizierten Wachstums zukünftig mit weiter steigenden Umweltbelastungen insbesondere durch CO<sub>2</sub>-Emissionen gerechnet, weshalb als eine mögliche Lösungsstrategie vermehrt über eine Elektrifizierung des Lkw-Verkehrs nachgedacht wird. Ergänzend zur Vermeidungs- und Verlagerungspolitik sehen Fachorgane (z.B. der Deutsche Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU oder der Österreichische Verein für Kraftfahrzeugtechnik ÖVK) in der Elektrifizierung des Güterverkehrs eine prüfenswerte Alternative zur Reduzierung der Klimafolgen des Strassengüterverkehrs. Ausserdem werden in Feld- und Pilotversuchen Oberleitungs-LKW und Batteriefahrzeuge getestet.

In der vorliegenden Kurzstudie werden die Potenziale einer Elektrifizierung des Strassengüterverkehrs in der Schweiz grob abgeschätzt. Die hier vorliegenden Auswertungen basieren weitgehend auf bereits in anderen Studien verwendeten Mengengerüsten, Emissionsfaktoren und Kostensätzen. Weitere Abklärungen wurden im Rahmen der zur Verfügung gestellten Ressourcen getroffen. Die Genauigkeit der Resultate ist vor diesem Hintergrund einzuschätzen. Zusätzliche Recherchen wären aus Sicht von INFRAS zwingend notwendig um die Verlässlichkeit der Eckwerte weiter zu erhöhen. Bei einer Vertiefung müssten aber zusätzlich andere alternative Antriebs- und Treibstoffoptionen mit betrachtet werden, die derzeit für Nutzfahrzeuge diskutiert werden (z.B. Hybrid-LKW, Flüssiggas-LKW, batterieelektrische LKW für Verteilerverkehre).

Die wichtigsten Grundannahmen bzw. Systemgrenzen für diese Kurzstudie sind die Folgenden:

- In dieser Studie wird unter „Elektrifizierung des Güterverkehrs“ ausschliesslich das System der **Oberleitungs-LKW** (OL-LKW) verstanden und zwar in der Kombination mit einem Dieselmotor, um Oberleitungsfreie Strecken überbrücken zu können. Andere Konzepte (Oberleitung/Batterie, reine Batteriefahrzeuge, Hybridfahrzeuge, Gas-Lkw mit PtG<sup>1</sup>-Methan etc.) sind nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.
- Die Abschätzungen beziehen sich auf das **Referenzjahr 2035**.
- Es wird ausschliesslich der Schwerverkehr auf den **Autobahnen und Autostrassen** des Schweizer Strassennetzes betrachtet. Der Verkehr auf dem untergeordneten Strassennetz bzw. die Zubringerstrecken im Ausland werden ausgeklammert. Spezieller Fokus liegt auf den wichtigen Transitachsen durch die Schweiz, sowohl in Nord-Süd-Richtung (A2) als auch in West-Ost-Richtung (A1).

---

<sup>1</sup> „Power-to-Gas“: Chemische Herstellung von Methangas unter Einsatz elektrischer Energie.

- Es werden sowohl die beim **Betrieb** der Fahrzeuge („Tank-to-Wheel“ oder TTW) als auch die für die **Herstellung** der Energieträger Diesel und Strom („Well-to-Tank“ oder WTT) anfallenden Emissionen betrachtet.
- Nebst den **Treibhausgasemissionen** (berechnet als CO<sub>2</sub>-Äquivalente) werden auch die **Luftschadstoffemissionen** für NO<sub>x</sub> und Feinstaub (PM10) betrachtet.
- Eine grobe **Kostenabschätzung** berücksichtigt die Positionen Infrastrukturinvestitionen und -unterhalt, Fahrzeuganschaffung und Energiekosten.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung können die unterstellten Technologien (Oberleitungs-LKW) nur bedingt evaluiert werden. Die Sicht beschränkt sich auf Aspekte der technischen Machbarkeit, soweit diese aus Untersuchungen abgeleitet werden können. Über die grundsätzliche Sinnhaftigkeit von Oberleitungs-geführten Güterverkehren bzw. die politische Machbarkeit kann an dieser Stelle keine Würdigung geliefert werden. Es stellt sich zumindest die Frage, ob in der Schweiz, wo in den letzten Jahrzehnten und auch in Zukunft im Rahmen der Verlagerungspolitik grosse Anstrengungen unternommen werden, um den Bahngüterverkehr auszubauen und zu fördern, ein Oberleitungs-LKW-System politisch opportun wäre. Zudem macht diese Studie keine Aussagen zum Vergleich des Oberleitungs-LKW mit anderen alternativen Antriebs- und Treibstoffoptionen. Auch aus diesem Grund kann diese Kurzstudie keine umfassende und abschliessende Bewertung des Oberleitungs-LKW liefern.

## 2. Varianten und Mengengerüst

### 2.1. Fahrzeuge

Der Betrieb von schweren Güterverkehrsfahrzeugen mit Hilfe elektrischer Energie kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Nach heutigem Entwicklungsstand bzw. für den Planungshorizont bis 2050 stehen im Wesentlichen folgende Konzepte zur Diskussion (siehe auch INFRAS/Quantis 2014; Öko-Institut 2014):

- **Hybridfahrzeuge** mit Batterie-elektrischem und Verbrennungsmotor (Diesel oder CNG). Diese können als reine Hybridfahrzeuge (HEV; Speisung der Batterie ausschliesslich über die beim Bremsen reperierte Energie) oder als sogenannte Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeuge (PHEV) konzipiert sein, bei welchen sich die Batterien auch über einen Anschluss ans Stromnetz laden lassen. HEV werden vollständig mit fossilem Brennstoff betrieben, wobei der Verbrauch sich entsprechend dem Rekuperationsanteil gegenüber reinen Diesel-LKWs verringert. Bei HEV handelt es sich also weiterhin um klassische LKW mit Verbrennungsmotor, die aufgrund der Hybridisierung weniger Energie benötigen. Demgegenüber sind PHEV Elektrofahrzeuge, die im Vergleich zu HEV eine deutlich grössere Batterie besitzen und damit grösser Strecken rein elektrisch zurücklegen können. Der in PHEV-Fahrzeuge enthaltene Verbrennungsmotor kommt erst dann zum Einsatz, wenn die Batterie leer ist und ermöglicht so höhere Reichweiten im Vergleich zu reinen batterieelektrischen Fahrzeugen.<sup>2</sup> Bei beiden Konzepten spielen damit fossile Brennstoffe mehr oder weniger eine Rolle für den Antrieb. Grundsätzlich könnten diese fossilen Treibstoffe langfristig auch durch stromgenerierte Treibstoffe, die aus regenerativem Strom hergestellt werden (so genannte Power-to-Liquid-Treibstoffe), ersetzt werden. Diese Treibstoffe werden aber bis 2035 nicht im nennenswerten Umfang zur Verfügung stehen, weshalb HEV und PHEV in der vorliegenden Untersuchung nicht betrachtet werden.
- **Batteriebetriebene** Fahrzeuge („eTrucks“): Dabei handelt es sich um rein batteriebetriebene Fahrzeuge ohne Verbrennungsmotor. Schon heute sind batteriebetriebene LKW zumindest als Versuchsfahrzeuge erhältlich (z.B. als 18t-LKW<sup>3</sup>). Die Reichweite für diese Fahrzeuge liegt derzeit noch bei maximal 250 km, womit sie primär im Verteilverkehr zum Einsatz kommen dürften. Selbst bei steigenden Energiedichten der Batterien ist bis zum Jahr 2035 nicht mit Reichweiten über 500 km zu rechnen. Da der Fokus der vorliegenden Untersuchung auf den langen Transitkorridoren liegt, werden diese in vorliegender Analyse ausgeklammert.

<sup>2</sup> Elektrofahrzeuge mit Range Extender entsprechen PHEV; auch sie enthalten einen Verbrennungsmotor zur Reichweitenverlängerung, bei denen allerdings im Unterschied zu PHEV der Dieselmotor nicht direkt die Antriebsachse antreibt, sondern einen Generator, der wiederum die Batterie lädt. Auch Elektrofahrzeuge mit Range Extender benötigen einen weiteren (fossilen) Treibstoff (INFRAS/Quantis 2014).

<sup>3</sup> z.B. von EFORCE (siehe [www.eforce.ch](http://www.eforce.ch))

- **Oberleitungs-LKW** (OL-LKW, Trolley-Trucks oder OC-GIV<sup>4</sup>): Darunter werden Fahrzeugssysteme zusammengefasst, welche mit Hilfe eines Stromabnehmers die für den Betrieb notwendige elektrische Energie von einer Stromleitung (Oberleitung oder Stromschiene) beziehen (analog zu den in der Schweiz eingesetzten Trolley-Bussen). Derzeit finden Pilotversuche mit diesem Antriebskonzept statt, beispielsweise in einem Versuch von Siemens mit einem 18t-LKW in Deutschland (Projekt ENUBA; siehe Siemens AG 2014). Diese Fahrzeuge können vollständig elektrisch betrieben werden und gegebenenfalls rekuperierte Energie zurück ins Netz speisen. Grundsätzlich stellen sie die energieeffizienteste Alternative zum konventionellen Dieselantrieb dar, weshalb auch in SRU (2012) diese Alternative als vielversprechend für den schwere Nutzfahrzeugverkehr gewertet wird. Im Detail sind verschiedene Varianten des Oberleitungs-LKW denkbar. In ÖVK (2013) sind nebst einer Hybridvariante (mit einem Batterie- oder Verbrennungsmotor für die Überwindung von Oberleitungsfreien Zwischenstrecken) auch Elektrozugmaschinen, welche für die Oberleitungsstrecke die Diesel-Zugmaschine umkuppeln oder Schleppersysteme diskutiert. Die grösste Flexibilität weisen klar die Hybridvarianten mit zusätzlicher Batterie oder zusätzlichem Dieselmotor auf. Da in der Praxis nur Teile des Strassennetzes mit Oberleitungen elektrifiziert sein können (z.B. Autobahnen), sind diese Hybridvarianten notwendig, um die Strecken ohne Oberleitungen zurückzulegen. Aus energetischen und Umweltgesichtspunkten wäre die Kombination mit einer Batterie am sinnvollsten. Aufgrund der Batteriegewichte und den Kosten der Batterie ist aber davon auszugehen, dass bis 2035 nur Oberleitungs-LKW mit zusätzlichem Dieselmotor zum Einsatz kommen werden (INFRAS/Quantis 2014). In der vorliegenden Studie wird daher von einem Hybrid-LKW mit Stromabnehmer und Dieselmotor ausgegangen.

## 2.2. Berechnungsvarianten

Welcher Anteil des schweren Nutzverkehrs auf Schweizer Autobahnen kann nun mit OL-LKW bewerkstelligt werden? Für die Beantwortung dieser Frage bestehen zurzeit noch kaum Grundlagen, sie ist lediglich spekulativ zu beantworten. Aus diesem Grund wurden verschiedene Berechnungsvarianten analysiert. Diese Varianten gliedern sich in zwei Teile, die miteinander kombiniert werden:

- Teil Verkehrsart (Binnen-, Import/Export- und Transitverkehr - BIET): je nach Verkehrsart sind unterschiedliche Verlagerungspotenziale denkbar.
- Teil Grössenklassen, wobei folgende Klassen nach zulässigem Gesamtgewicht unterschieden werden: Solo-LKW < 12t, Solo-LKW 12-26t, Solo-LKW >26t, Last- und Sattelzüge < 40t und Last- und Sattelzüge 40t.

---

<sup>4</sup> Overhead catenary – grid integrated vehicles

Über diese beiden Parameter (BIET und Grössenklassen) werden vier Varianten definiert und untenstehende Verlagerungspotenziale (= Anteil der Fahrleistung die statt mit Diesel-Fahrzeugen mit OL-LKW abgewickelt wird) unterstellt (siehe Tabelle 1). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnten die tatsächlichen Verlagerungspotenziale für die gewählten Grössenklassen/Verkehrsarten nicht vertieft untersucht werden. Aus diesem Grund wurde entschieden, lediglich mit 0 %- bzw. 100 %-Verlagerungsanteilen zu rechnen. Das effektive Verlagerungspotenzial müsste differenzierter untersucht werden um zu verfeinerten Aussagen zu gelangen (z.B. unter Einbezug der transportierten Güterarten oder den realen Fahrwegen, unterstützt z.B. durch Abklärungen bei Logistikern).

<b>Tabelle 1: Verlagerungspotenzial nach Verkehrsart und Grössenklasse,</b> in % der Fahrleistung in der betreffenden Kategorie						
Variante	Verkehrsart	Grössenklasse				
		LKW < 12t	LKW 12-26t	LKW > 26t	LZ/SZ < 40t	LZ/SZ 40t
1	Binnen-V. (BiV)	100%	100%	0%	100%	100%
	Import/Export-V.	100%	100%	0%	100%	100%
	Transit-V.	100%	100%	0%	100%	100%
2	Binnen-V. (BiV)	0%	0%	0%	0%	0%
	Import/Export-V.	0%	100%	0%	100%	100%
	Transit-V.	0%	100%	0%	100%	100%
3	Binnen-V. (BiV)	0%	0%	0%	0%	0%
	Import/Export-V.	0%	0%	0%	0%	100%
	Transit-V.	0%	0%	0%	0%	100%
4	Binnen-V. (BiV)	100%	100%	0%	100%	100%
	Import/Export-V.	0%	0%	0%	0%	0%
	Transit-V.	0%	0%	0%	0%	0%

- **Variante 1:** Mit Ausnahme der LKW > 26 t werden sämtliche Fahrleistungen mit OL-LKW abgewickelt. In die Klasse der LKW > 26 t fallen vorwiegend Baustellen- oder Sonderfahrzeuge, deren Fahrten sich grundsätzlich wenig eignen um mit OL-LKW gefahren zu werden (hohe Anteile von nicht-Autobahnstrecken pro Fahrt). Diese Gewichtsklasse wird in allen Varianten von der Verlagerung ausgeschlossen.
- In der **Variante 2** werden nur die mittelgrossen LKW (12-26t) und die Last-/Sattelzüge im internationalen Verkehr (Import/Export- und Transitverkehr) mit OL-LKW gefahren. Die Fahrten im Binnenverkehr werden vollständig ausgeschlossen.
- In der **Variante 3** werden ausschliesslich die Last-/Sattelzüge im internationalen Verkehr mit OL-LKW gefahren.
- In **Variante 4** werden ausschliesslich Fahrleistungen des Binnenverkehrs mit OL-LKW abgewickelt (mit Ausnahme der LKW > 26 t, Begründung siehe Variante 1).

Diese Varianten werden mit folgenden Korridoren/Teilnetzen kombiniert:

- I) Schwerverkehr auf dem gesamten Autobahn-/Autostrassennetz der Schweiz wird mit OL-LKW abgewickelt. Dies betrifft rund 2'000 Strassenkilometer.
- II) Der Schwerverkehr auf dem Nord-Süd-Korridor (A2 von Basel bis Chiasso) wird mit OL-LKW gefahren; Gesamtlänge 287 km.
- III) Der Schwerverkehr auf dem West-Ost-Korridor (A1 von St. Margrethen bis Genf) wird mit OL-LKW abgewickelt; Gesamtlänge 388 km.

Dadurch ergeben sich insgesamt 12 Variantenkombinationen für die Emissionsberechnung. Diese werden als Varianten I-1, I-2, ..., bis III-4 bezeichnet.

## 2.3. Mengengerüst

### 2.3.1. Fahrleistungen

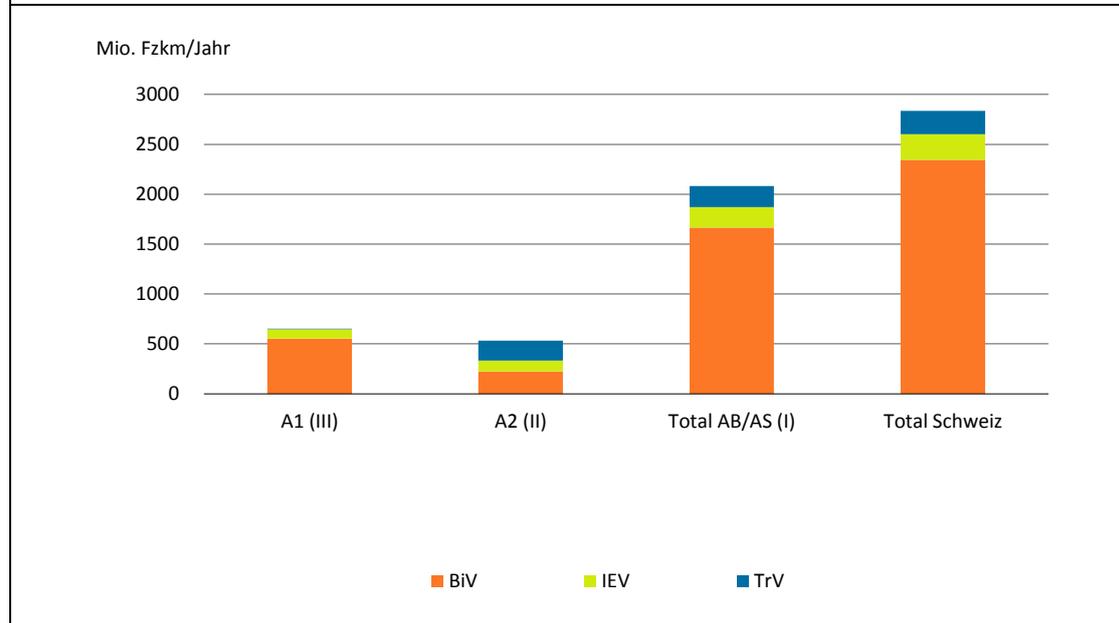
#### Referenz 2035

Die in der vorliegenden Studie verwendeten Fahrleistungen beruhen auf der in SVI 2013 entwickelten Grundlage. Dort wurden die Fahrleistungen für das gesamte Strassennetz für die Zeitpunkte 2010 und 2020 nach Verkehrsart und Verkehrszusammensetzung (Grössenklassen, EURO-Stufen) hergeleitet und auf dem Strassennetz verortet. Damit können auch weitere Netzattribute wie Steigungsklassen und Tunnels mit den Fahrleistungen verknüpft werden. Basis bildete ein Auszug aus dem Verkehrsmodell des Bundes (VM UVEK).

Für die vorliegende Studie wurden die Fahrleistungen mit einem pauschalen Wachstumsfaktor (+9.4 % für 2020-2035) für die schweren Nutzfahrzeuge (SNF), wie sie in für die Arbeiten zum Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA) Version 3.2 hergeleitet wurden, auf das Referenzjahr 2035 hochgerechnet.

Insgesamt ergeben sich so für das Jahr 2035 rund 2'835 Mio. Fzkm für die SNF (siehe Abbildung 1 bzw. Annex 1). Davon entfallen rund 73 % auf die Autobahnen und -strassen. Rund 19 % der gesamtschweizerischen SNF-Fahrleistungen entfallen auf die A2, rund 23 % auf die A1. Die Aufteilung nach Verkehrsart (BIET) ist je nach Korridor unterschiedlich: Während auf der Nord-Süd-Achse rund 58 % auf den internationalen Verkehr entfallen, sind es auf dem West-Ost-Korridor lediglich 16 %, vorwiegend im Import-/Export-Verkehr. Auf den Transitachsen entfallen 84 % (A1) bzw. 42 % (A2) der Fahrleistungen auf den Binnenverkehr.

**Abbildung 1: Fahrleistungen des schweren Güterverkehrs für das Referenzjahr 2035, nach Korridoren und Verkehrsarten (Binnen-, Import/Export- und Transitverkehr; BiV, IEV, TrV)**



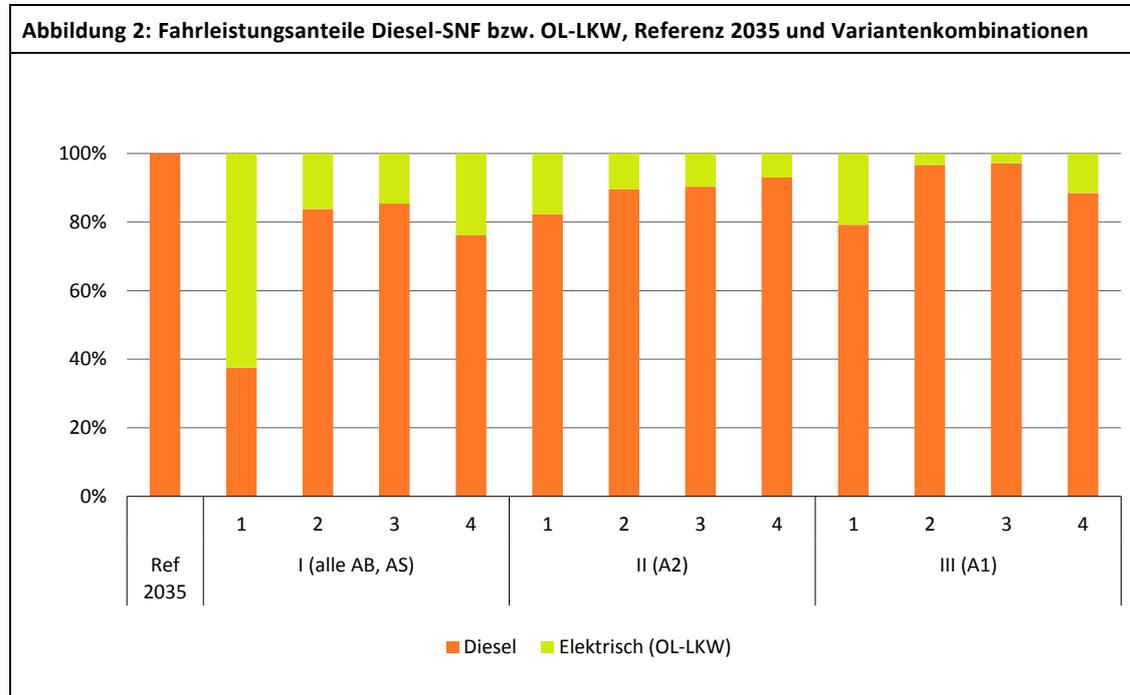
Legende: BiV = Binnenverkehr, IEV = Import-/Export-Verkehr, TrV = Transit-Verkehr, AB/AS = Autobahn-/Autostrassennetz.  
Quellen: SVI 2013; eigene Berechnungen.

### Variantenkombinationen

Da die Fahrleistungen in den Variantenkombinationen lediglich von konventionellen Diesel-SNF auf elektrisch betriebene OL-LKW verlagert werden, bleibt die Gesamtfahrleistung gleich wie im Referenzzustand 2035. Die Anteile der Fahrleistungen, die in den Variantenkombinationen elektrisch bewältigt werden, sind in Abbildung 1 dargestellt. In der Maximalvariantenkombination I-1 (sämtliche Autobahnen/Autostrassen sind mit Oberleitungen ausgestattet und mit Ausnahme der 26t-LKW verkehren alle SNF als OL-LKW) entfallen rund 62 % der Schweizer SNF-Fahrleistungen auf die OL-LKW. Bei einer vollständigen, ausschliesslichen Verlagerung des Binnenverkehrs (I-4) würden 24 % der Fahrleistungen mit OL-LKW gefahren.

Wird lediglich der Nord-Süd-Korridor (A2) mit Oberleitungen ausgerüstet und nur der internationale Verkehr auf OL-LKW verlagert, so können maximal rund 18 % der SNF-Fahrleistungen in der Schweiz mit OL-LKW gefahren werden, mit dem West-Ost-Korridor (A1) wären es höchstens 23 %.

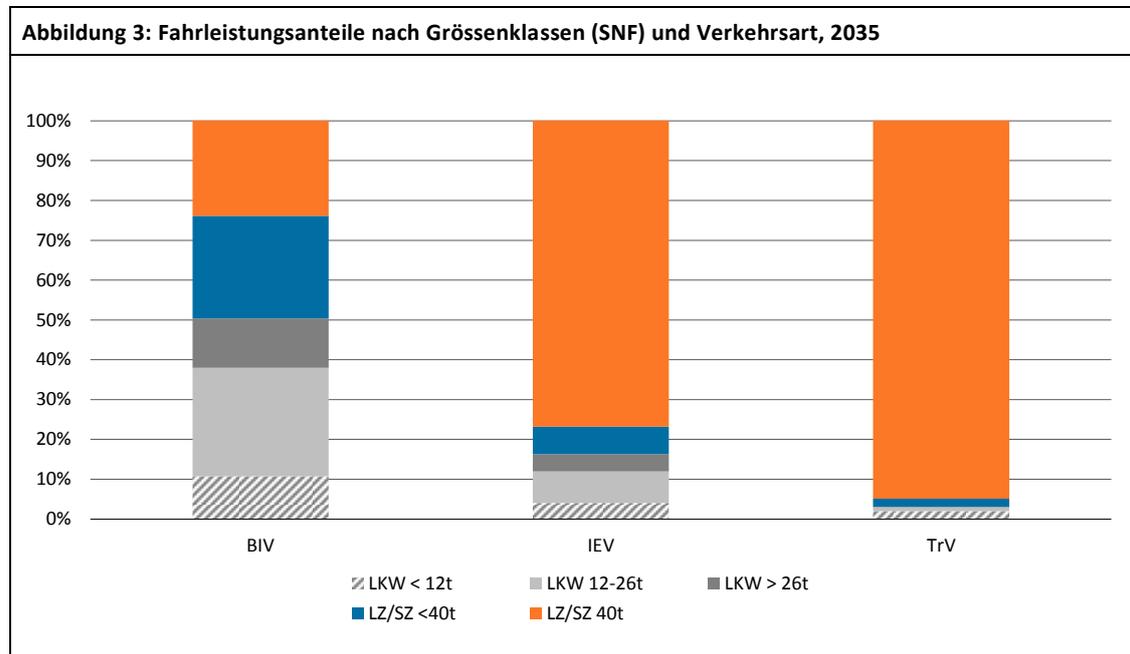
Werden einzelne SNF-Grössenklassen von der Verlagerung ausgeschlossen, so sind die Fahrleistungsanteile der OL-LKW entsprechend geringer. Der Unterschied zwischen den Varianten 2 und 3 ist in allen Variantenkombinationen sehr gering, da die 40t-LZ/SZ den Hauptanteil der Fahrleistungen im internationalen Verkehr ausmachen.



### 2.3.2. Flottenzusammensetzung

Unter der Flottenzusammensetzung wird im Kontext der Emissionsberechnung mit HBEFA die relative Verteilung der Fahrleistungen nach Grössenklassen und EURO-Stufen verstanden. Da sich die vorliegende Analyse auf das Referenzjahr 2035 bezieht, wird davon ausgegangen, dass die Flotte der schweren Nutzfahrzeuge praktisch vollständig aus EURO-VI-Fahrzeugen besteht.

Die folgende Abbildung zeigt die relative Verteilung der Fahrleistungen nach Grössenklassen. Diese unterscheiden sich deutlich je nach Verkehrsart. Im internationalen Verkehr dominieren die Last-/Sattelzüge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40t deutlich. Im Binnenverkehr spielen diese dagegen eine untergeordnete Rolle.



Legende: BiV = Binnenverkehr, IEV = Import-/Export-Verkehr, TrV = Transit-Verkehr.

Quellen: INFRAS 2014, BAFU 2010; eigene Berechnungen

## 2.4. Verbrauchs- und Emissionsfaktoren

### 2.4.1. Endenergieverbrauchsfaktoren

In den in Kapitel 2.2 vorgestellten Variantenkombinationen werden Teile des mit konventionellen Dieselfahrzeugen abgewickelten Verkehrs zu strombetriebenen OL-LKW verlagert. Deshalb wird zunächst der Endenergieverbrauch der OL-LKW abgeschätzt. Der Endenergieverbrauch von schweren Nutzfahrzeugen wird von der Längsneigung der befahrenen Strecken und von der Auslastung der Fahrzeuge beeinflusst. Bei elektrischen Fahrzeugen kommt dazu, dass ein Teil der Bremsenergie bei Talfahrt durch Rekuperation zurückgewonnen werden kann. Da der Fokus der vorliegenden Abschätzung u.a. auf der alpenquerenden Achse Basel-Chiasso (A2) liegt, gilt es den Einfluss der Steigungen/Gefälle auf den Endenergieverbrauch der OL-LKW einzubeziehen. Die Verbrauchsfaktoren für die OL-LKW werden daher wie folgt hergeleitet:

- Ausgangspunkt sind die spezifischen Endenergieverbräuche der Diesel-SNF gemäss HBEFA Version 3.2. Diese liegen differenziert nach Grössenklasse der Fahrzeuge, Steigungsklasse (0%, +2%, +4%, +6%) und Auslastung vor. Tabelle 2 zeigt die Diesel-Endenergieverbrauchsfaktoren, wie sie in dieser Studie verwendet werden.
- Daraus wird der spezifische Stromverbrauch der OL-LKW abgeleitet, differenziert nach denselben Kriterien. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

- Wirkungsgradverhältnis Diesel-/Elektromotor: Im Rahmen des Projekts „ENUBA“<sup>5</sup>, das sich mit den Einsatzmöglichkeiten von OL-LKW beschäftigt, wird von einem Wirkungsgradverhältnis von ca. 40 % (Dieselmotor) zu ca. 80 % (Elektromotor) ausgegangen. In Siemens AG 2014 wird das Wirkungsgradverhältnis eines SNF mit 27.5 t Gesamtgewicht (Leer- plus Ladungsgewicht) mit 0.51 - 0.56 angegeben (d.h. ein OL-LKW benötigt lediglich im Mittel 53 % der Endenergie eines Dieselfahrzeugs). Darauf basierend werden die Effizienzgewinne der Diesel- (ca. 0.5 %/Jahr) und der Elektrofahrzeuge (-0.3 %/Jahr) bis 2035 eingerechnet.<sup>6</sup> Schliesslich wird so ein Wirkungsgradverhältnis OL-LKW zu Diesel-LKW von 56 % im Jahr 2035 unterstellt. Die Diesel-Endenergieverbrauchsfaktoren aus HBEFA 3.2 werden zunächst mit diesem Faktor multipliziert.
- Rekuperation: Gemäss ÖVK 2013 steht ungefähr ein Viertel der potenziellen Energie<sup>7</sup> bei der Talfahrt eines SNF zur Rekuperation (Rückgewinnung) zur Verfügung und kann ins Oberleitungsnetz zurückgespeist wird. Für die Berechnung der Rekuperationsenergie in dieser Kurzstudie wird mit diesen Vorgaben gerechnet, die unterstellten Fahrzeuggewichte sind in Annex 2 einsehbar. Es wird davon ausgegangen, dass diese zurückgespeisene Energie von den übrigen auf dem Oberleitungsnetz verkehrenden Fahrzeugen vollständig genutzt werden kann und nicht verloren geht. Da von OL-LKW mit Dieselmotor ausgegangen wird, spielt eine Speicherung der Rekuperationsenergie im Fahrzeug keine Rolle.
- Tabelle 4 zeigt den so ermittelten, spezifischen Endenergieverbrauch nach Grössen- und Steigungsklassen:

Grössenklasse	mittlere Auslastung	Steigung			
		0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%
LKW < 12t	50%	1.7	1.7	2.0	2.5
LKW 12-26t	50%	2.2	2.3	3.0	3.9
LKW >26t	43%	3.1	3.2	4.3	5.7
LZ/SZ < 40t	45%	2.6	2.7	3.8	5.0
LZ/SZ 40t	43%	2.9	3.2	4.7	6.3

Quelle: HBEFA 3.2

<sup>5</sup> „Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen“ (ENUBA II) ist ein Projekt, das das deutsche Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit zusammen mit den Projektpartnern Siemens AG und TU Dresden durchführt.

<sup>6</sup> Die zukünftigen Effizienzgewinne eines OL-LKW werden nur bei rund zwei Drittel des Wertes eines Diesel-LKW gesehen, da der Elektromotor nur noch wenig Optimierungspotential bietet. Die Effizienzgewinne kommen daher in erster Linie durch Optimierungen des Fahrzeuges zustande.

<sup>7</sup> Potenzielle Energie [J] = Fahrzeugmasse [kg] \* Erdbeschleunigung (g = 9.8 Nms<sup>-2</sup>) \* Höhendifferenz [m]. Die Höhendifferenz beträgt pro gefahrenen Kilometer bei einer Steigung von -2% 20 Meter (bei -4% 40 Meter, bei -6% 60 Meter, etc.).

Grössen- klasse	mittlere Auslastung	Steigung			
		0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%
LKW < 12t	50%	0.9	0.9	0.9	1.0
LKW 12-26t	50%	1.2	1.1	1.3	1.6
LKW >26t	43%	n.rel.	n.rel.	n.rel.	n.rel.
LZ/SZ < 40t	45%	1.3	1.2	1.6	2.0
LZ/SZ 40t	43%	1.5	1.4	1.9	2.4

Quellen: HBEFA 3.2, eigene Berechnungen

## 2.4.2. Emissionsfaktoren

### Betriebsemissionen (Tank-to-Wheel; TTW)

Die Emissionsfaktoren für Treibhausgase (als CO<sub>2</sub>-Äquivalente bzw. CO<sub>2</sub>e), NO<sub>x</sub> und PM<sub>10</sub> (nur Auspuff<sup>8</sup>) basieren auf den Angaben aus HBEFA 3.2 (siehe INFRAS 2014). Die Betriebsemissionen der OL-LKW sind im Strombetrieb definitionsgemäss gleich Null. Die Tank-to-Wheel (TTW) Emissionsfaktoren sind in Annex 3 einsehbar.

### Energieherstellung (Well-to-Tank; WTT)

Die Emissionsfaktoren für die Energiebereitstellung von Diesel basieren auf der LCA-Datenbank Ecoinvent (Version 3.1, Ecoinvent 2014). Für den Strom wurden ebenfalls die Emissionsfaktoren von Ecoinvent (aus Konsistenzgründen zu früheren Berechnungen in der Version 2.2) verwendet und für die Berechnung des Strommix die Energieträgeranteile für das Jahr 2035 aus den Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 des Bundes (Prognos/INFRAS 2012) verwendet. Für die vorliegenden Berechnungen wurde das Szenario „Politische Massnahmen (POM)“ unterstellt, welches bezüglich Stromherstellungsemissionsfaktoren (z.B. 138 g CO<sub>2</sub>e/kWh) ungefähr in der Mitte zwischen den übrigen Szenarien („Weiter wie bisher“ und „Neue Energiepolitik“) liegt. Die Well-to-Tank (WTT) Emissionsfaktoren sind in Annex 3 zusammengestellt.

## 2.5. Kostensätze

Für die Abschätzung der Kosten einer Einführung und des Betriebs eines OL-LKW-Systems in der Schweiz werden folgende Kostenbereiche betrachtet:

- Investitions-/Unterhaltskosten für die Installation der Oberleitungen,
- Anschaffungskosten für die Fahrzeuge (OL-LKW),
- Energiekosten (Diesel, Strom).

<sup>8</sup> Die nicht-Auspuff-PM<sub>10</sub>-Emissionen aus Bremsen, Abrieb und Aufwirbelung werden hier nicht betrachtet, da die Unterschiede zwischen Diesel- und OL-LKW diesbezüglich gering sein dürften bzw. im Detail noch kaum erforscht sind. Beispielsweise dürften bei den OL-LKW nebst den Brems- und Aufwirbelungsemissionen auch Abriebsemissionen am Fahrdrat bzw. dem Stromabnehmer anfallen.

Die Betrachtung in vorliegender Studie fokussiert auf die Kostendifferenzen zwischen Diesel- und OL-LKW. Daher werden Kostenpositionen nicht berücksichtigt, die bei beiden Systemen identisch sein dürften oder nur geringe Unterschiede aufweisen (z.B. Fahrzeugunterhalt). Die in dieser Kurzstudie durchgeführten Kostenbetrachtungen haben orientierenden Charakter und müssten in zukünftigen Studien vertieft untersucht werden.

### **Investitions-/Unterhaltskosten Oberleitungen**

In SRU (2012) werden für den Bau von Oberleitungen für den Betrieb von OL-LKW rund 1.1-2.5 Mio. €/Strassen-km angegeben (beide Richtungen). SRU 2012 beruft sich dabei auf die schwedische Studie von Ranch (2010), welche ihre Erkenntnisse aus Analogieschlüssen zur Bahn ableitet sowie auf Brauner (2000) basiert. INFRAS-Untersuchungen zu Trolleybus-Umstellungsprojekten in der Schweiz kommen auf Werte zwischen 1.1 – 1.4 Mio. €/km (beide Richtungen), wobei die Oberleitungen von OL-LKW bezüglich Konstruktion eher denjenigen von Bahnen als den von Trolleybussen entspricht. Gemäss Deutscher Bahn (DB) werden die Ausbaukosten für die Elektrifizierung des rund 155 km langen Teilstücks Lindau – Geltendorf (Projekt ABS 48) rund 1.9 Mio. €/km geschätzt, wobei darin teilweise auch Spur-Ausbauten enthalten sind. Insgesamt ist das Spektrum dieser Angaben also relativ breit. Die von SRU (2012) als obere Grenze angegebenen 2.5 Mio. €/km erscheinen als zu hoch. Für die vorliegende Untersuchung wird mit einem durchschnittlichen Wert von **2 Mio. CHF/km** (beide Richtungen) gerechnet.

Im Kontext insbesondere der alpenquerenden Achsen – aber auch für das gesamte Schweizer Autobahnnetz – gilt es den Aspekt der Tunnelstrecken zu berücksichtigen: 16 % oder rund 45 km der Strecke Basel-Chiasso und 4 % oder 14 km der Strecke St. Margrethen-Genf liegen in Tunnels<sup>9</sup>. Entscheidend ist dabei der zusätzliche Platzbedarf von Oberleitungen in Tunnels. Im Gotthard-Strassentunnel ist derzeit eine minimale Höhe von 4.5 m vorhanden. Die maximale Höhe von SNF gemäss LSVA ist 4 m. Dies zeigt, dass der verfügbare Platz für Oberleitungs-Installationen in Schweizer Tunnels sehr begrenzt ist. Als Alternative sind Systeme mit Deckenstromschienen (anstelle von Leitungen) in Tunnels denkbar, im Bahnverkehr (z.B. Zimmerbergtunnel) sind solche Systeme bereits heute im Einsatz. Die Deckenstromschienen sind allerdings teurer als konventionelle Oberleitungen. Ebenfalls deutlich höher sind die Kosten wenn das Tunnelprofil zusätzlich ausgebrochen und erweitert werden müsste. Allerdings können im Rahmen der vorliegenden Untersuchung lediglich grobe Annahmen zu den zusätzlichen Kosten für Installationen in Tunnels getroffen werden. Es wird pauschal von rund 50% höheren Kosten auf **Tunnelstrecken (d.h. 3 Mio. CHF/km)** ausgegangen.

---

<sup>9</sup> Angaben auf Basis von Auswertungen des VM UVEK-Strassennetzes.

Aus diesen Angaben werden unter der Annahme von einer Lebensdauer der Oberleitungen von 20 Jahren und einem Zinssatz von 4 % die jährlichen Kapitalkosten bestimmt. Für die Abschätzung der Unterhaltskosten wird vereinfachend von einem Satz von 2.5 % der Investitionskosten ausgegangen (SRU 2012). Die so ermittelten Kostensätze pro Strassenkilometer sind in Annex 4 einzusehen.

### **Anschaffungskosten Fahrzeuge**

Die Abschätzung der Anschaffungskosten der Diesel- bzw. OL-LKW basieren auf einer Studie, die INFRAS in Kooperation mit Quantis für das Umweltbundesamt in Deutschland durchgeführt hat (INFRAS/Quantis 2014). Dort werden mit folgenden Annahmen die fahrleistungsspezifischen Anschaffungskosten für einen 10t-LKW und eine 40t-SZ/LZ für das Jahr 2035 abgeschätzt:

- Kosten für die Fahrzeuganschaffung in € (2010):
  - 40t-SZ/LZ: 121'000 € bis 148'000 € (Diesel) bzw. 211'000 € bis 258'000 € (OL-LKW)
  - 10t-LKW: 71'000 € bis 87'000 € (Diesel) bzw. 121'000 € bis 147'000 € (OL-LKW)
- Mittlere jährliche Fahrleistungen:
  - 40t-SZ/LZ: 142'000 Fzkm/Jahr
  - 10t-LKW: 52'000 Fzkm/Jahr
- Allgemeine Parameter:
  - Zinssatz: 4 %
  - Lebensdauer: 40t-SZ/LZ: 8 Jahre; 10t-LKW: 10 Jahre
  - Umrechnung € (2010) zu CHF (2035): Faktor 1.2, berücksichtigt den Wechselkurs und die höheren Anschaffungspreise für Fahrzeuge in der Schweiz, wobei zu beachten ist, dass nur ein Teil der OL-LKW in der Schweiz beschafft werden (inländische Unternehmen).

Die daraus ermittelten Differenzkosten (Mehrkosten) der OL-LKW zu den Diesel-SNF betragen für 40t-SZ/LZ rund **0.13 CHF/Fzkm bzw. 0.19 CHF/Fzkm** für LKW < 12t. Die Werte für die übrigen Grössenklassen werden interpoliert. Die Tabelle mit den detaillierten Werten ist in Annex 4 abgelegt.

### **Energiekosten**

Für die Energiepreise im Jahr 2035 werden die Werte aus den Energieperspektiven 2050 des Bundes (Prognos/INFRAS 2012) beigezogen. Im Szenario „Politische Massnahmen“ kostet dabei im Jahr 2035 Strom 0.27 CHF/kWh und Diesel 2.-- CHF/Liter (in Preisen 2010, ohne Mehrwertsteuer). Dabei handelt es sich um Endverbraucherpreise. Denkbar ist, dass die für OL-LKW verrechneten Strompreise tiefer liegen könnten. Mangels konkreten Daten zu den effektiven

Strompreisen für den OL-LKW-Verkehr werden aber die oben genannten Werte verwendet. In Annex 4 ist die Tabelle mit den verwendeten Preisen (inkl. MWSt.) im Detail einsehbar.

## 3. Resultate

### 3.1. Emissionen

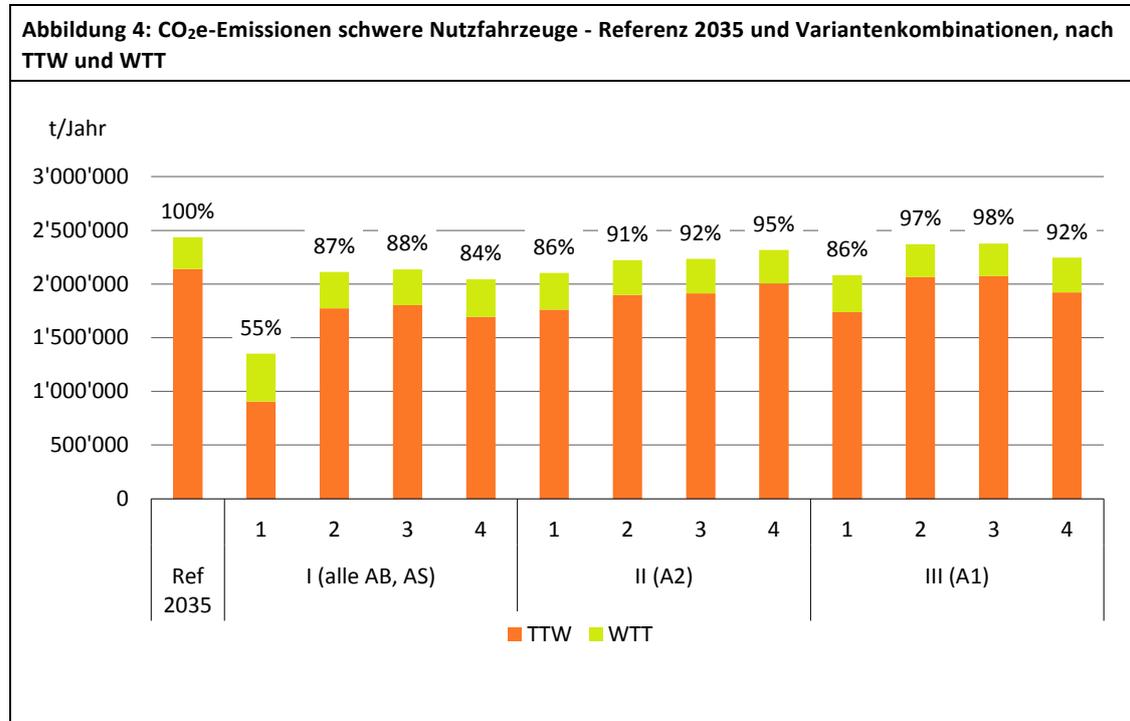
#### 3.1.1. Treibhausgase

Die Treibhausgasemissionen sind in Abbildung 4 dargestellt. Im Referenzfall 2035 werden durch die schweren Nutzfahrzeuge in der Schweiz knapp 2.5 Mio. t CO<sub>2</sub>e ausgestossen. Liessen sich der schwere Güterverkehr grossflächig auf OL-LKW verlagern (Variantenkombination I-1), so liessen sich rund 45 % der SNF-Emissionen vermeiden. Der Hauptanteil der Emissionen und damit auch der Einsparungen entfallen auf die Betriebsemissionen (TTW). Diese Variantenkombination entspricht allerdings einem theoretischen Potenzial, deren vollständige Umsetzung eher unwahrscheinlich ist.

Würde der Nord-Süd-Korridor (A2) mit Oberleitungen ausgestattet und der Grossteil der SNF-Fahrten darauf auf OL-LKW verlagert (Kombination II-1), so liessen sich rund 14 % der Treibhausgasemissionen der schweren Nutzfahrzeuge in der Schweiz einsparen, ein ähnliches Resultat liefern die Berechnungen für den West-Ost-Korridor (A1; III-1).

Wenn lediglich die 40t LZ/SZ im internationalen Verkehr verlagert würden, so betragen die Einsparungen noch rund 10 %, wenn gleichzeitig beide Korridore (A1 und A2; Summe II-3 und III-3) mit Oberleitungen ausgerüstet würden. Für das gesamte Autobahn-/Autostrassennetz ergäbe sich eine Reduktion von 12 %. Der Unterschied zu den beiden Korridoren A1 und A2 wäre also gering.

Das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial des Binnenverkehrs bewegt sich in ähnlichen Grössenordnungen wie dasjenige des internationalen Verkehrs, d.h. maximal 16 % (I-4), bzw. 5 – 8 % auf den Transitkorridoren A1 und A2 (II-4 bzw. III-4) gegenüber dem Referenzfall 2035.



Quelle: eigene Berechnungen

### 3.1.2. Luftschadstoffe

In der Referenzrechnung 2035 werden durch den schweren Güterverkehr in der Schweiz rund 2'200 t NO<sub>x</sub> ausgestossen. Etwa die Hälfte entfallen davon auf die Emissionen aus der Herstellung von Diesel (siehe Abbildung 6).

In der Variantenkombination I-1 verringern sich die NO<sub>x</sub>-Emissionen um rund 12 % gegenüber der Referenzrechnung. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen, die bei der Stromherstellung anfallen sind relativ hoch, weshalb die Einsparungen geringer als bei den Treibhausgasen ausfallen. Grund dafür ist die praktisch vollständig aus EURO-VI-SNF bestehende Flotte im Jahr 2035. Fahrzeuge dieser Emissionsstufe stossen lediglich geringe Mengen von NO<sub>x</sub>-Emissionen im Betrieb aus.

Würde ausschliesslich der gesamte Binnenverkehr auf OL-LKW verlagert (I-4), so ergäbe sich eine Reduktion von 9 % bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen.

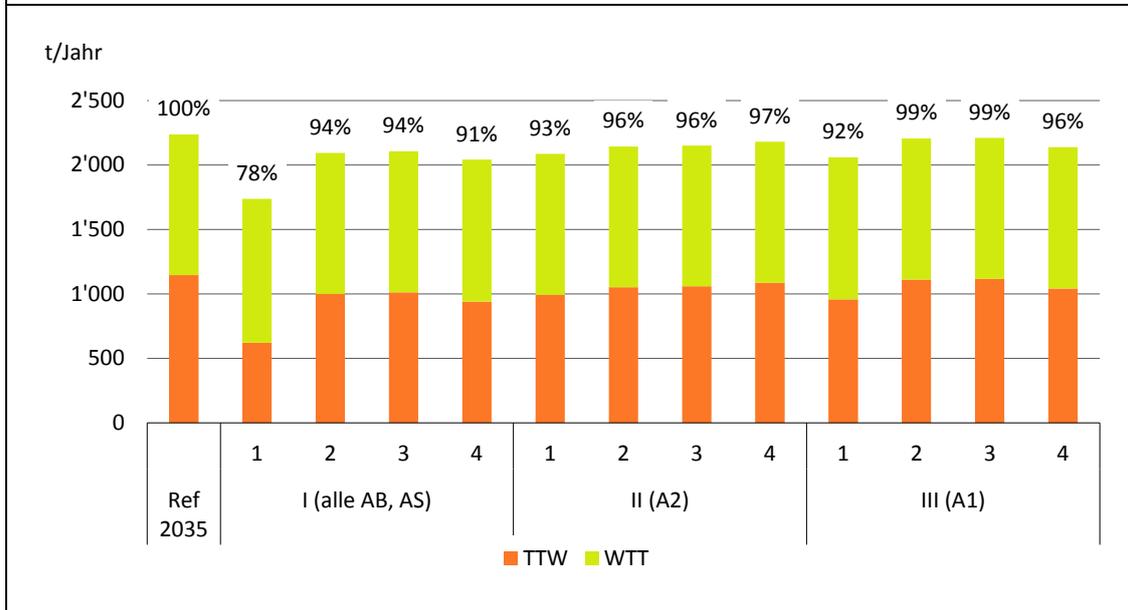
Würden beide Korridore mit Oberleitungen ausgerüstet und die schweren LZ/SZ des internationalen Verkehrs verlagert (Kombinationen II-3 und III-3) so betragen die Emissionsreduktionen rund 5 % gegenüber der Referenzrechnung.

Noch ausgeprägter ist die Bedeutung der Feinstaubemissionen aus der Energiebereitstellung (siehe Abbildung 6). Von den rund 250 t PM<sub>10</sub>, die in der Referenzrechnung 2035 durch die SNF in der Schweiz emittiert werden, stammen lediglich knapp 5 % aus dem Betrieb (TTW),

der Rest stammt aus der Energiebereitstellung. Auch hier liegt dies darin begründet, dass die Fahrzeugflotte bis 2035 nahezu vollständig aus EURO-VI-Fahrzeugen bestehen dürfte, welche aufgrund von Verbesserungen in der Motorentechnologie und der Abgasnachbehandlung nur noch sehr geringe Mengen an Feinstaub-Emissionen ausstossen. Rein durch die Verlagerung von den dieselbetriebenen Fahrzeugen zu elektrisch betriebenen OL-LKW lassen sich die Feinstaub-Emissionen bei der Energiebereitstellung maximal um rund 44 % verringern. Ähnlich wie bei den Stickoxiden sind allerdings die Minderungen deutlich geringer, wenn lediglich die wichtigen Korridore A1 und A2 mit Oberleitungen ausgerüstet würden: die Reduktion läge in Summe lediglich im Bereich von ca. 5 %.

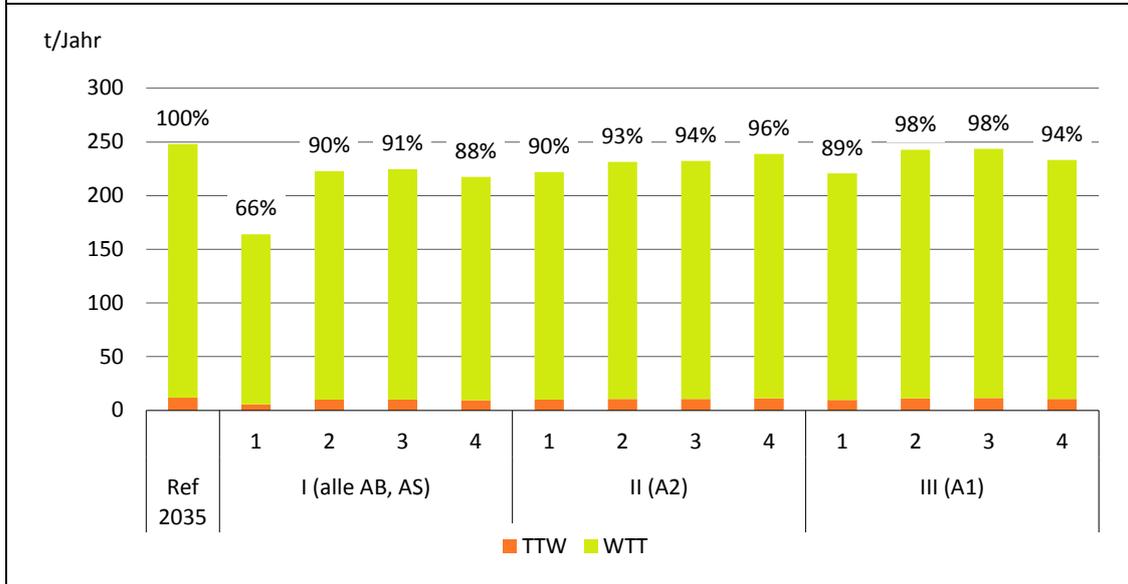
Bei der Gegenüberstellung der Luftschadstoffemissionen stellt sich allerdings die grundsätzliche Frage, wie weit die Emissionen, die aus unterschiedlichen Quellen stammen (Dieselemissionen der Lastwagen bzw. Staubemissionen bei der Strom- bzw. Treibstoffherstellung) miteinander verglichen werden dürfen. Anders als bei den global wirkenden Treibhausgasemissionen, sind für die lokale Bevölkerung primär diejenigen Emissionen massgebend, welche direkt vor Ort ausgestossen werden. Die Emissionen, die bei der Produktion der Energieträger anfallen (WTT-Teil), werden dagegen meist in grosser Entfernung in der Nähe der Kraftwerke bzw. der Raffinerien ausgestossen und beeinträchtigen daher die Gesundheit der in den Alpentälern oder den Agglomerationen lebenden Bevölkerung nicht entscheidend. Die Unterschiede der TTW-Emissionen sowohl bei NO<sub>x</sub> als auch bei PM mit und ohne OL-LKW fallen relativ gering aus.

**Abbildung 5: NOx-Emissionen schwere Nutzfahrzeuge - Referenz 2035 und Variantenkombinationen, nach TTW und WTT**



Quelle: eigene Berechnungen

**Abbildung 6: PM10-Emissionen (Auspuff) schwere Nutzfahrzeuge - Referenz 2035 und Variantenkombinationen, nach TTW und WTT**

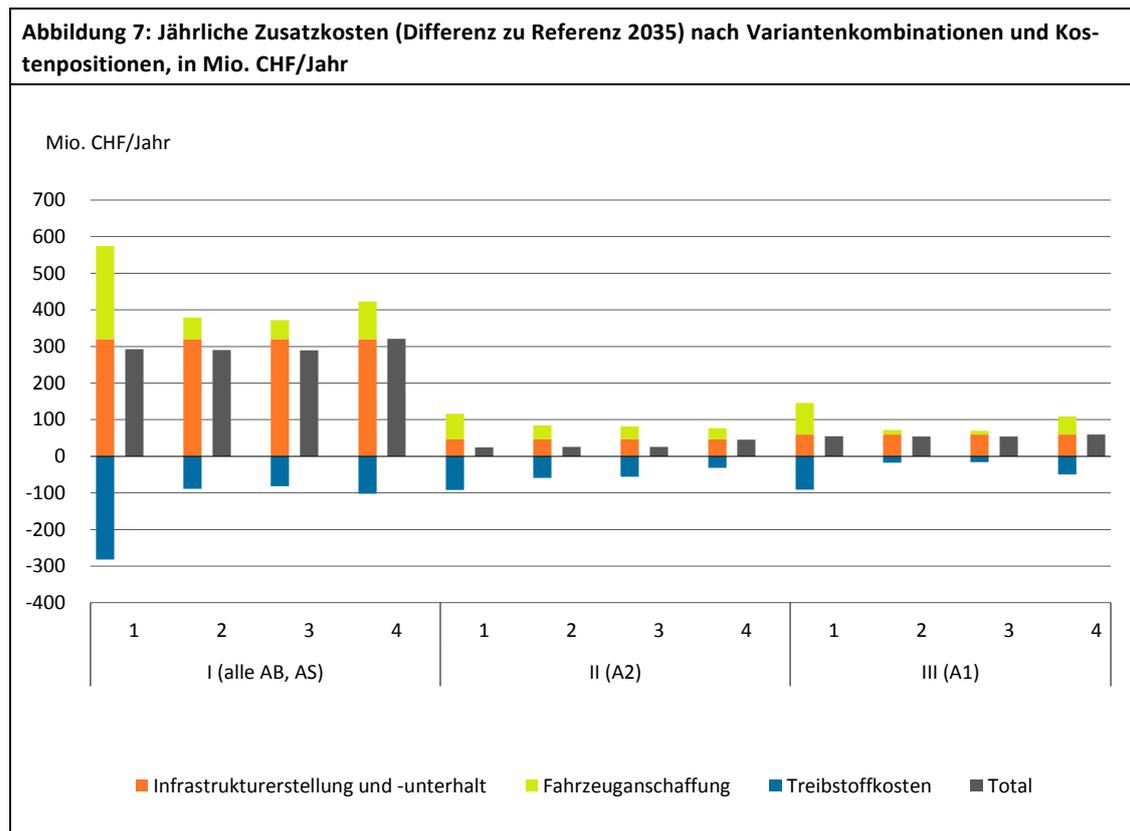


Quelle: eigene Berechnungen

## 3.2. Kosten

Die absoluten jährlichen Kosten, ausgedrückt als Differenz zur Referenzrechnung 2035 für die Variantenkombinationen sind in Abbildung 7 zusammengestellt. Die Potenzialvariante I, in der sämtliche Autobahn- und Autostrassenabschnitte mit Oberleitungen ausgerüstet werden, kostet jährlich knapp 300 Mio. CHF. Die Kosten der beiden Korridor-Varianten sind entsprechend tiefer (25 Mio. CHF für die A2 bzw. rund 55 Mio. CHF für die A1).

Bestimmend sind in allen Varianten die Kosten für Infrastrukturerstellung und –unterhalt. Die Fahrzeuganschaffungskosten tragen ebenfalls zur Erhöhung der Kostendifferenz bei, während ein Teil der Gesamtkosten durch die niedrigeren Energiekosten der strombetriebenen OL-LKW wettgemacht wird.

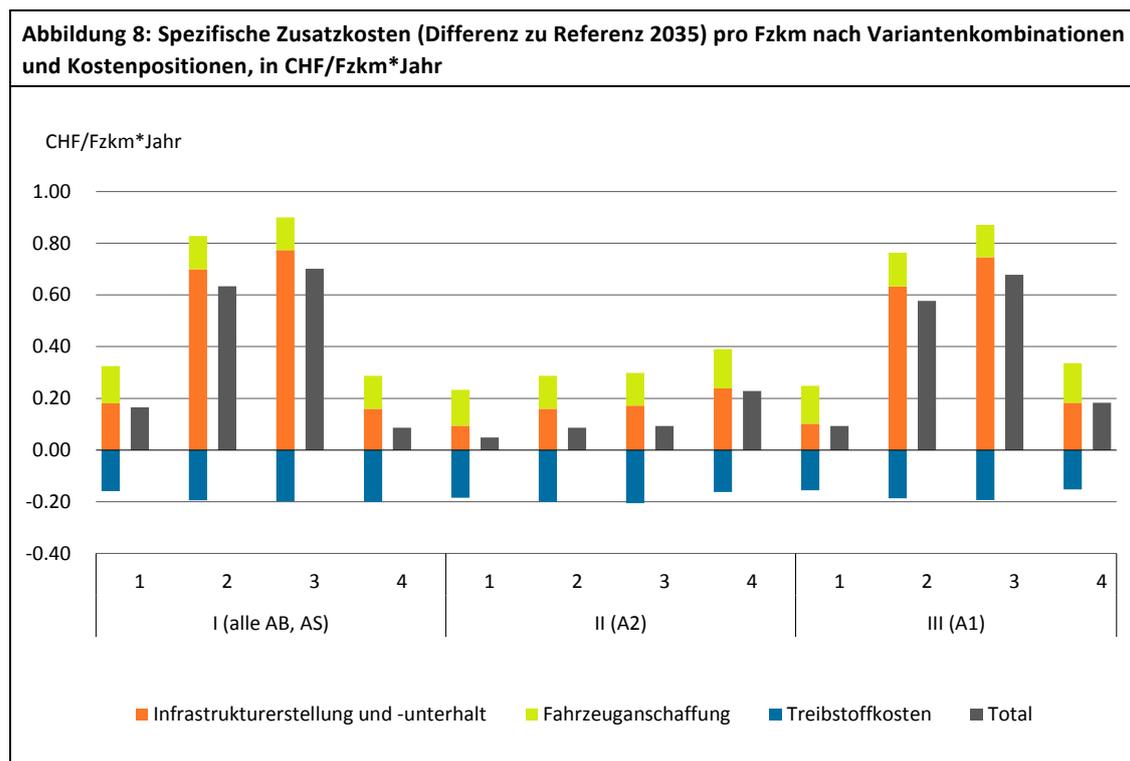


Quelle: eigene Berechnungen

Die spezifischen Kosten pro gefahrenen Kilometer sind in Abbildung 8 dargestellt. Die höchsten Kosten pro Fahrzeugkilometer weisen die Varianten auf, wo verhältnismässig geringe Verlagerungswirkungen erwartet werden müssen (die 2-er und 3-er Variantenkombinationen) mit Kostensätzen von über 0.60 CHF/Fzkm. Die Potenzialvarianten (1-er-Kombinationen) schneiden

diesbezüglich günstiger ab mit 0.09-0.17 CHF/Fzkm, ebenso die Binnenverkehrs-Varianten (4-er-Kombinationen). Beide sind aber in dieser extremen Ausprägung als wenig realistisch in der Umsetzung einzuschätzen. Verhältnismässig günstig schneiden auch die Variantenkombinationen auf der Nord-Süd-Achse (A2) ab. Dort ist das Verlagerungspotenzial höher, da vergleichsweise hohe Anteile an schweren SNF (40t-Fahrzeuge) verkehren.

Bei diesen Darstellungen ist grundsätzlich zu beachten, dass es sich um so genannte „Steady-state“ Kosten handelt. Dies bedeutet, dass die jährlichen Infrastrukturkosten sich bereits auf die maximal mögliche Anzahl an OL-LKW und damit deren Fahrleistung aufteilen. In den Anfangsjahren ist aber bereits eine vollständige Oberleitungsinfrastruktur notwendig, während die Zahl der OL-LKW erst im Anwachsen ist. Zu Beginn wären die auf die Fzkm bezogenen Kosten daher deutlich höher, was ohne staatliche Förderung ein noch grösseres Hemmnis bei der Anschaffung von OL-LKW darstellen dürfte.



Quelle: eigene Berechnungen

### 3.3. Fazit

Die vorliegende Studie zeigt erste Einschätzungen auf zum Elektrifizierungspotenzial des schweren Güterverkehrs in der Schweiz mittels Oberleitungs-LKW (OL-LKW). Bezüglich praktisch sämtlichen getroffenen Annahmen bestehen relativ grosse Unsicherheiten: Verlagerungspotenziale, Energieverbräuche und Kostenwirkungen. Weitere vertiefende Analysen sind daher notwendig, um die Resultate zu verfeinern und abzusichern. Die hier präsentierten Resultate sind mit entsprechender Vorsicht zu bewerten. Um zudem die Treibhausgasemissionen von alternativen Antrieben und Treibstoffen für schwere Nutzfahrzeuge umfassend bewerten zu können, müssten die anderen Alternativen (z.B. Hybrid-LKW und Gas-LKW mit nachhaltig erzeugten Biotreibstoffen und stromgenerierten Treibstoffen, batterieelektrische LKW) in den Vergleich zum OL-LKW mit einbezogen werden.

Die Abschätzungen in dieser Kurzstudie zeigen, dass die Auswirkungen auf die Lufthygiene durch die Verlagerung des Verkehrs auf OL-LKW gering sind. Insgesamt lassen sich die Luftschadstoffemissionen des gesamten Systems (inklusive Bereitstellung der Energieträger) reduzieren. Insbesondere beim Feinstaub fallen die Reduktionen aber vorwiegend bei der Energiebereitstellung an und entlasten die lokale Bevölkerung an den grossen Durchganskorridoren kaum.

Grösser ist das Reduktionspotenzial bei den Treibhausgasemissionen der schweren Nutzfahrzeuge. Würden die West-Ost- (A1) und Nord-Süd-Korridore (A2) mit Oberleitungen ausgestattet werden, könnten mit Reduktionen von 6% bis maximal 28% % der Treibhausgasemissionen gerechnet werden. Im Maximalfall (Oberleitungen auf dem gesamten Autobahn- und Autostrassennetz und weitgehend alle LKW-Grössenklassen nutzen die Oberleitungen) würden die Einsparungen 45 % betragen. Die so eingesparten Treibhausgasemissionen zusammen mit den zu tätigen Investitionen und Unterhaltmassnahmen, führen zu Kosten in der Spannbreite zwischen rund 70-1000 CHF je eingesparter t CO<sub>2</sub>e, je nach Variante (siehe auch Annex 6).

Die Kosten für die Umstellungen sind allerdings erheblich: Die Installation und der Unterhalt von Oberleitungen auf den beiden wichtigen Achsen der Schweiz in Nord-Süd und Ost-West-Richtung würde absolut zu Kosten von rund 1.5 Milliarden CHF oder zu jährlich rund 107 Mio. CHF führen. Die Ausrüstung des gesamten Autobahnnetzes zu Gesamtkosten von rund 5.9 Milliarden CHF und zu jährlichen Kosten von 320 Mio. CHF. Daneben sind von den Fuhrhaltern namhafte Zusatzinvestitionen in neue Fahrzeuge notwendig, nämlich nochmals im Rahmen von rund 50-250 Mio. CHF jährlich, je nach Variante. Demgegenüber können Kostenreduktionen beim Treibstoffverbrauch in ähnlichen Grössenordnungen erwartet werden. Des Weiteren ist zu beachten, dass das Oberleitungssystem grundsätzlich zuerst erstellt werden

muss, bevor mit einer Umstellung beim Fahrzeugpark mit OL-LKW gerechnet werden kann. Die hier präsentierten Rechnungen entsprechen einer statischen Betrachtung des betriebsbereiten Systems („Steady-state“-Kostenbetrachtung).

Daneben sind weitere Fragen für die Umsetzung offen, beispielsweise was die Möglichkeiten der Umrüstung der bestehenden Infrastrukturen im Bereich von Brücken oder Tunnels mit Oberleitungen betreffen. Die zusätzlichen Kosten für alternative Leitungssysteme bei knappem Platzbedarf oder die Statik von Brücken im Zusammenhang mit der Installation von Oberleitungsmasten bedürfen weiterer Abklärungen.

Auch die Koordination mit den umliegenden Ländern bzw. mit der gesamten EU bezüglich der Erstellung eines möglichst flächendeckenden Oberleitungs-Netzes für den schweren Güterverkehr stellt eine wichtige, unabdingbare Rahmenbedingung dar. Gleichzeitig ist es noch zu früh, um diesbezüglich Schlussfolgerungen zu ziehen. Einzelne umliegende Länder wie z.B. Deutschland prüfen allerdings derzeit die Möglichkeiten der OL-LKW intensiv.

Schliesslich muss die politische Realisierbarkeit insbesondere im Kontext der Schweizer Verlagerungspolitik Strasse-Schiene und den in diesem Zusammenhang bereits getätigten und noch anstehenden, beschlossenen Investitionen eher kritisch gesehen werden. Es ist derzeit – zumindest auf der Nord-Süd-Achse – schwer vorstellbar, dass quasi parallel zum bestehenden, elektrifizierten Bahnsystem, ein Oberleitungssystem für den LKW-Verkehr erstellt würde.

## Annex

### Annex 1 - Fahrleistungen schwere Nutzfahrzeuge

Fahrleistungen nach Verkehrsart und Korridor -2035					
<i>Mio. Fzkm/Jahr</i>					
Jahr	Korridor	<i>BIV</i>	<i>IEV</i>	<i>TrV</i>	Total
2035	A1 (III)	551	95	8	654
2035	A2 (II)	225	107	201	533
2035	<b>Total AB/AS (I)</b>	<b>1'666</b>	<b>206</b>	<b>211</b>	<b>2'082</b>
2035	<b>Total Schweiz</b>	<b>2'345</b>	<b>256</b>	<b>234</b>	<b>2'835</b>

## Annex 2 – Fahrzeuggewichte

Tabelle 4: Fahrzeuggewichte nach Grössenklassen und mittlerer Auslastung					
Grössenklasse	Mittlere Auslastung	Leergewicht [t]	Zulässiges Gesamtgewicht [t]	Maximales Ladungsgewicht [t]	Effektives Gesamtgewicht bei mittl. Auslastung [t]
RT =7,5t	50%	3.5	5.8	2.3	4.7
RT >7,5-12t	50%	6.0	11.0	11.0	8.5
RT >12-14t	50%	7.3	13.5	13.5	10.4
RT >14-20t	50%	8.8	17.2	17.2	13.0
RT >20-26t	50%	11.8	25.5	25.5	18.7
RT >26-28t	43%	12.2	27.0	27.0	18.5
RT >28-32t	43%	13.6	32.0	32.0	21.4
RT >32t	43%	14.3	35.5	35.5	23.3
LZ/SZ =7,5t	50%	3.5	5.8	2.3	4.7
LZ/SZ >20-28t	43%	12.8	28.0	28.0	19.3
LZ/SZ >28-34t	43%	13.6	32.0	32.0	21.4
LZ/SZ >34-40t	43%	15.1	39.8	39.8	25.6

Quelle: HBEFA 3.2

## Annex 3 – Emissionsfaktoren

## Betriebsemissionen (Tank-to-Wheel)

Tabelle 5: Mittlere Tank-to-Wheel-CO <sub>2</sub> e-Emissionsfaktoren für Diesel-SNF nach Grössen- und Steigungs- klassen in g/km, für 2035					
Grössenklasse	Mittlere Auslastung	Steigung			
		0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%
LKW < 12t	50%	455	466	530	656
LKW 12-26t	50%	601	608	796	1'033
LKW >26t	43%	837	858	1'158	1'517
LZ/SZ < 40t	45%	686	720	1'015	1'344
LZ/SZ 40t	43%	783	860	1'248	1'672

Quelle: HBEFA 3.2, Global Warming Potential (100 Jahre) gemäss IPCC 2007

Tabelle 6: Mittlere Tank-to-Wheel-NO <sub>x</sub> -Emissionsfaktoren für Diesel-SNF nach Grössen- und Steigungs- klassen in g/km, für 2035					
Grössenklasse	Mittlere Auslastung	Steigung			
		0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%
LKW < 12t	50%	0.24	0.29	0.27	0.25
LKW 12-26t	50%	0.37	0.52	0.36	0.42
LKW >26t	43%	0.43	0.59	0.46	0.51
LZ/SZ < 40t	45%	0.33	0.45	0.38	0.46
LZ/SZ 40t	43%	0.37	0.49	0.44	0.54

Quelle: HBEFA 3.2

Tabelle 7: Mittlere Tank-to-Wheel-PM10 (Auspuff)-Emissionsfaktoren für Diesel-SNF nach Grössen- und Steigungsklassen in g/km, für 2035,					
Grössenklasse	Mittlere Auslastung	Steigung			
		0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%
LKW < 12t	50%	0.003	0.002	0.002	0.002
LKW 12-26t	50%	0.004	0.003	0.003	0.004
LKW >26t	43%	0.005	0.004	0.004	0.005
LZ/SZ < 40t	45%	0.004	0.003	0.003	0.004
LZ/SZ 40t	43%	0.005	0.004	0.004	0.006

Quelle: HBEFA 3.2

**Energiebereitstellung (Well-to-Wheel)**

<b>Tabelle 8: Emissionsfaktoren für die Energiebereitstellung (Well-to-Wheel)</b>				
<b>Energieträger</b>	<b>Einheit</b>	<b>CO<sub>2</sub>e</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>PM10</b>
Diesel, schwefelarm	g/kg	444	1.92	0.21
Lieferantestrommix, 2035, Szenario "Politische Massnahmen" (C)	g/kWh	138	0.28	0.03

Quelle: Ecoinvent 3.1, Ecoinvent 2.2, eigene Berechnungen.

## Annex 4 – Kostensätze

### Investitions- und Unterhaltskosten Oberleitung

<b>Kostenfaktoren Oberleitung - Investitionen und Unterhalt pro Netz-km</b>		
<b>Kostenposition</b>	<b>Kosten</b>	<b>Einheit</b>
Kostensatz offene Strecke	2'000'000	CHF/NetzkM
Kostensatz Tunnel	3'000'000	CHF/NetzkM
Jährliche Kapitalkosten (20J./4%) offene Strecke	147'164	CHF/NetzkM
Jährliche Kapitalkosten (20J./4%) Tunnel	220'745	CHF/NetzkM
Unterhalt (2.5% der Invest.Kosten) offene Strecke	3'679	CHF/NetzkM
Unterhalt (2.5% der Invest.Kosten) Tunnel	5'519	CHF/NetzkM
<b>Kostensatz Inv/Unterhalt offene Strecke</b>	<b>151'000</b>	<b>CHF/NetzkM</b>
<b>Kostensatz Inv/Unterhalt Tunnel</b>	<b>226'000</b>	<b>CHF/NetzkM</b>

Quelle: eigene Berechnungen

### Fahrzeuganschaffung

<b>Fahrzeuganschaffung pro Fzkm für 2035</b>				
<b>Grössenklasse</b>	<b>Diesel</b>	<b>OL-LKW</b>	<b>Differenz</b>	<b>Einheit</b>
LKW < 12t	0.27	0.46	0.19	CHF/Fzkm
LKW 12-26t	0.24	0.42	0.17	CHF/Fzkm
LKW >26t	0.21	0.36	0.15	CHF/Fzkm
SZ/LZ < 40t	0.20	0.34	0.14	CHF/Fzkm
SZ/LZ 40t	0.17	0.29	0.13	CHF/Fzkm

Quelle: INFRAS/Quantis 2014, eigene Berechnungen

## Energiekosten

<b>Endverbraucherpreise, real 2010, inkl. MWSt.</b>							
<b>Energieträger</b>	<b>Einheit</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>	<b>2035</b>	<b>2040</b>	<b>2050</b>
<b>Szenarien WWB und POM</b>							
Elektrizität	Rp./kWh	23.6	25.7	27.8	29.3	28.7	28.8
Benzin 95	CHF/l	1.64	1.84	1.94	1.98	2.00	2.04
Benzin 98	CHF/l	1.69	1.88	1.98	2.02	2.04	2.09
Diesel	CHF/l	1.72	1.97	2.09	2.13	2.15	2.19
<b>Szenarien NEP</b>							
Elektrizität	Rp./kWh	23.6	27.1	30.6	32.1	32.3	33.6
Benzin 95	CHF/l	1.64	2.00	2.25	2.36	2.44	2.57
Benzin 98	CHF/l	1.69	2.05	2.29	2.40	2.48	2.61
Diesel	CHF/l	1.72	2.15	2.40	2.53	2.61	2.74

Quelle: Prognos/INFRAS 2012

## Annex 5 – Emissionen

THG-Emissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente)

Emissionen nach Variantenkombinationen			
t/Jahr	CO <sub>2</sub> e		
Variante	TTW	WTT	WTW
Ref2035	2'138'796	296'686	2'435'482
I1	905'319	446'301	1'351'620
I2	1'773'626	338'235	2'111'861
I3	1'802'471	334'754	2'137'225
I4	1'693'487	350'590	2'044'077
II1	1'763'060	339'173	2'102'233
II2	1'899'634	323'287	2'222'920
II3	1'914'135	321'587	2'235'722
II4	2'005'718	312'115	2'317'833
III1	1'736'636	345'800	2'082'435
III2	2'064'837	305'296	2'370'133
III3	2'074'078	304'170	2'378'248
III4	1'923'108	322'733	2'245'841

NO<sub>x</sub>

Emissionen nach Variantenkombinationen			
t/Jahr	NO <sub>x</sub>		
Variante	TTW	WTT	WTW
Ref2035	1'145	1'093	2'238
I1	620	1'118	1'738
I2	999	1'095	2'094
I3	1'012	1'094	2'107
I4	941	1'102	2'043
II1	992	1'094	2'087
II2	1'052	1'093	2'145
II3	1'059	1'093	2'152
II4	1'086	1'094	2'181
III1	958	1'102	2'060
III2	1'112	1'094	2'206
III3	1'117	1'094	2'211
III4	1'042	1'097	2'139

## PM10

Emissionen nach Variantenkombinationen			
t/Jahr	PM		
Variante	TTW	WTT	WTW
Ref2035	12	236	248
I1	6	159	164
I2	10	213	223
I3	10	215	225
I4	9	208	218
II1	10	212	222
II2	11	221	231
II3	11	222	232
II4	11	228	239
III1	10	211	221
III2	11	232	243
III3	11	232	244
III4	11	223	233

## Annex 6 – Kosten

<b>Differenzkosten zu Referenz 2035</b>				
<i>Mio. CHF/Jahr</i>				
<b>Variante</b>	<b>Infrastrukturerstellung und -unterhalt</b>	<b>Fahrzeuganschaffung</b>	<b>Treibstoffkosten</b>	<b>Total</b>
I1	319.7	255.0	-282.1	292.7
I2	319.7	59.1	-88.8	290.0
I3	319.7	52.1	-82.1	289.7
I4	319.7	103.0	-102.2	320.5
II1	46.9	69.4	-92.0	24.3
II2	46.9	37.8	-59.4	25.3
II3	46.9	34.4	-55.9	25.4
II4	46.9	30.1	-31.9	45.1
III1	59.6	86.4	-91.3	54.6
III2	59.6	12.3	-17.6	54.3
III3	59.6	10.1	-15.5	54.2
III4	59.6	49.6	-49.6	59.6

<b>Spezifische Differenzkosten zu Referenz 2035, pro Fahrleistung</b>				
<i>CHF/Fzkm</i>				
<b>Variante</b>	<b>Infrastrukturerstellung und -unterhalt</b>	<b>Fahrzeuganschaffung</b>	<b>Treibstoffkosten</b>	<b>Total</b>
I1	0.18	0.14	-0.16	0.17
I2	0.70	0.13	-0.19	0.63
I3	0.77	0.13	-0.20	0.70
I4	0.47	0.15	-0.15	0.47
II1	0.09	0.14	-0.18	0.05
II2	0.16	0.13	-0.20	0.09
II3	0.17	0.13	-0.21	0.09
II4	0.24	0.15	-0.16	0.23
III1	0.10	0.15	-0.16	0.09
III2	0.63	0.13	-0.19	0.58
III3	0.75	0.13	-0.19	0.68
III4	0.18	0.15	-0.15	0.18

Variante	CO <sub>2</sub> e-Einsparung ggü. Referenz 2035	Spezifische Kosten
	Mio. t/Jahr	CHF/t CO <sub>2</sub> e
I1	-1.08	270
I2	-0.32	896
I3	-0.30	971
I4	-0.39	819
II1	-0.33	73
II2	-0.21	119
II3	-0.20	127
II4	-0.12	383
III1	-0.35	155
III2	-0.07	831
III3	-0.06	947
III4	-0.19	314

#### Vergleichswerte:

- Total CO<sub>2</sub>-Ausstoss Schweiz 2012 gemäss National Inventory Report 2014 (excl. LULUCF; BAFU 2014):
 

	51.5 Mio. t CO <sub>2</sub> e	(100 %)
--	-------------------------------	---------
- CO<sub>2</sub>e-Ausstoss Strassenverkehr:
 

	15.9 Mio. t CO <sub>2</sub> e	(31 %)
--	-------------------------------	--------
- CO<sub>2</sub>e-Ausstoss Güterverkehr (LKW+Lieferwagen):
 

	2.6 Mio. t CO <sub>2</sub> e	(5 %)
--	------------------------------	-------
- CO<sub>2</sub>e-Ausstoss Güterverkehr (LKW):
 

	1.9 Mio. t CO <sub>2</sub> e	(3 %)
--	------------------------------	-------

## Literatur

- BAFU 2010:** Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs, 1990-2035. Aktualisierung 2010. Bundesamt für Umwelt, Bern; Umwelt-Wissen Nr. 1021.
- BAFU 2014:** Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2012, National Inventory Report 2014, Submission of 15 April 2014 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol, Berne 2014
- Brauner, G., Lenz, H. P., Litzka, J., Pucher, E. (2000):** LKW-Alpentransit elektrisch? VDI-Berichte 1565, S. 605–623.
- Ecoinvent 2014:** Datenbank für Life-Cycle-Analyse, Version 3.1, Zürich 2014;  
[www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)
- INFRAS 2014:** Handbuch Emissionsfaktoren für den Strassenverkehr, Version 3.2, im Auftrag der Umweltbundesämter der Schweiz, Deutschland, Österreich, und Norwegen, sowie der Energieagentur Frankreich (ADEME) und der schwedischen Road Administration, Bern, Berlin, Wien, Paris, Stockholm, Oslo 2014; [www.hbefa.net](http://www.hbefa.net)
- INFRAS/Quantis 2014:** Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes Deutschland. Bern/Zürich: 2014.
- Öko-Institut 2014:** eMobil 2050, Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz, Berlin 2014
- ÖVK 2013:** Potenziale und Kosten der Elektrifizierung des schweren Nutzfahrzeugverkehrs, Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik, Wien 2013
- Prognos/INFRAS 2012:** Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie. Basel: 2012.
- Ranch, P. (2010):** Elektriska vägar – elektrifiering av tunga vägtransporter. Förstudie. Stockholm: Grontmij AB.
- Siemens AG 2014:** Energiebedarf und Wirkungsgrad im elektrischen Strassengüterverkehr, Vortragsunterlagen zum Referat von M. Lehmann anlässlich der 24. verkehrswissenschaftlichen Tagen der TU Dresden, München 2014
- SRU 2012:** Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt, Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), Berlin 2012
- SVI 2013:** Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs – Teile 1 und 2, Forschungsauftrag SVI 2009/011, INFRAS, Bern 2013