

Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen 18 t Lastwagens E-FORCE von Feldschlösschen Getränke AG

Bericht

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung (IWF)
Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich



Autor

Stefan Schneider

Mitarbeit

Dr. David Dyntar
Leandro Morales
Patrik Nüssli
Thursan Nagalingam

August 2014

Abriss

Dieser Bericht wurde im Auftrag der Feldschlösschen Getränke AG verfasst, um den seit September 2013 im Einsatz stehenden elektrischen Lastwagen E-FORCE bezüglich Effizienz und Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Der 18 t Lastwagen E-FORCE läuft zu 100 Prozent elektrisch und wird bei Feldschlösschen mit Strom aus Wasserkraft betrieben. Die Durchführung von eigenen Verbrauchsmessfahrten mit einem Lastwagen mit konventionellem Dieselmotor und dem E-FORCE bietet die Grundlage für den Vergleich der beiden Fahrzeuge. Der Umfang des Berichts hat jeweils eine Woche an Fahrten für die Messungen zugelassen. Um möglichst prüfstandsnahe Bedingungen zu schaffen, wurden die Einflüsse der wichtigsten Fahrwiderstände, wie der Luft- und Rollwiderstand der Fahrzeuge berücksichtigt und angepasst. Die Messfahrten wurden mit maximaler Beladung von 18 t durchgeführt. Der Elektrolastwagen war auf allen Streckenprofilen mindestens um Faktor 2 effizienter unterwegs als der Diesellastwagen. Dank dieser Effizienz stösst der E-FORCE nur einen Teil der CO₂-Emissionen eines Diesellastwagen pro Kilometer aus, sogar mit europäischen Strommix.

Inhaltsverzeichnis

Abriss	i
Nomenclature	iii
1 Einleitung	1
2 Fahrzeuge	2
2.1 Elektrolastwagen - E-FORCE	2
2.2 Diesellastwagen - Iveco Stralis 460 E6	3
3 Vorbereitungen für Messfahrten	4
3.1 Fahrwiderstand	4
3.2 Messtechnik	5
3.3 Routen	6
4 Messungen	8
4.1 E-FORCE	8
4.1.1 Route 1	8
4.1.2 Route 2	9
4.2 IVECO	9
4.2.1 Route 1	9
4.2.2 Route 2	9
4.3 Messunsicherheit	10
5 Resultate	11
5.1 Verbrauch	11
5.1.1 Route 1	11
5.1.2 Route 2	13
5.2 Ökologie	14
5.3 Wirtschaftlichkeit	17
6 Fazit	20
A Rohdaten Verbrauchsmessungen	21
A.1 E-FORCE Rohdaten von 1. Fahrt	21
A.2 Iveco Rohdaten von 2. Fahrt	25
Literaturverzeichnis	28
Abbildungsverzeichnis	29

Nomenclature

Symbols

F_{Luft}	Luftwiderstand	[N]
F_{Roll}	Rollwiderstand	[N]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
α	Hangneigung	[rad]

Indices

Fz Fahrzeug

Acronyms and Abbreviations

ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
E-FORCE	Elektrolastwagen der E-FORCE ONE AG
PKW	Personenkraftwagen
LKW	Lastkraftwagen
LSVA	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe
LiFePo ₄	Lithium-Eisenphosphat
WTW	Well-to-Wheel (Analysemethode für gesamte Wirkkette bei Fahrzeugen)
WTT	Well-to-Tank (Energiebereitstellung)
TTW	Tank-to-Wheel (Fahrzeugwirkungsgrad)
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
WHSC	World Harmonized Stationary Cycle (heavy-duty engines)
WHTC	World Harmonized Transient Cycle (heavy-duty engines)

Kapitel 1

Einleitung

Die Fahrzeugindustrie befindet sich im Wandel der Zeit. Es wird verstärkt nach effizienten und umweltfreundlichen Antriebseinheiten gesucht. Beschleunigt wird diese Lösungsfindung mit den Emissionsvorschriften der europäischen Union. Vor allem in der PKW Branche werden Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien vorgestellt und auf den Markt gebracht. Dazu gehören Hybridfahrzeuge mit Verbrennungsmotor oder Brennstoffzelle sowie reine Elektroautos.

Die Nutzfahrzeughersteller steigen immer mehr auf diese Technologien um und präsentieren Fahrzeuge im kleineren Nutzlastbereich mit analogen Antrieben. Ab einem Gesamtgewicht von mehr als 18 t wird auf die neueste Generation Dieselmotoren und die zugehörigen Abgasreduktionsysteme gesetzt. Der Fahrzeugumbau zu einem komplett elektrischen 18 t Lastwagen, wie der E-FORCE, ist eine Neuheit. Feldschlösschen betreibt, in der Schweiz, diesen ersten, rein elektrischen 18 t Lastwagen seit September 2013.

Für diesen Bericht wurden Verbrauchsmessefahrten mit einem konventionell und einem elektrisch angetriebenen Lastwagen durchgeführt. Diese Vergleichsfahrten geben Aufschluss über den jeweiligen effektiven Energieverbrauch. Ausserdem können Rückschlüsse auf die ökologischen Auswirkungen (z.B. CO₂-Bilanz) gezogen werden. Die Betrachtung einiger Betriebskosten, wie Treibstoff- und Stromkosten, lässt Aussagen über die Wirtschaftlichkeit des Elektrolastwagens zu.

Die Aktualität des Berichtes ist anhand der Nutzung von Fahrzeugen der neuesten Generation gewährleistet. Das verwendete Dieselfahrzeug hat Baujahr 2013 und erfüllt die Emissionsnorm Euro 6. Der Elektrolastwagen steht noch in der 1. Generation.

Im Kapitel 2 werden die Fahrzeuge, mit welchen die Verbrauchsmessungen gemacht wurden, kurz beschrieben. Das Kapitel 3 erklärt die getroffenen Massnahmen und welche Voraussetzungen gegeben sein müssen, um vergleichbare Messungen an den Fahrzeugen zu garantieren. Im Kapitel 4 werden einige Fakten und Rohdaten der Fahrten präsentiert, welche als Grundlage für die genauere Analyse dienen. Die daraus folgenden Resultate werden im Kapitel 5 vorgestellt.

Kapitel 2

Fahrzeuge

Das folgende Kapitel beschreibt die Fahrzeuge und der aktuelle Stand der Technik im Allgemeinen. Es treffen zwei Generationen von Fahrzeugen aufeinander, der eine mit konventionellem, aber modernstem Dieselmotor, der andere mit vollständigem elektrischen Antrieb. Grundsätzlich bleibt aber das Erscheinungsbild von aussen her dasselbe, obwohl Getriebe, Motor, Treibstofftanks und vieles mehr mit der Batterie, den Ladegeräten und den Elektromotoren ausgetauscht wird.

2.1 Elektrolastwagen - E-FORCE

Der E-FORCE basiert auf einem 18 t Iveco Stralis Lastwagen. Der Umbau auf einen reinen elektrischen Lastwagen erfordert leistungsstarke Elektrokomponenten. Das Herzstück aller elektrischen Fahrzeuge ist der Energiespeicher, kurz gesagt die Batterie. Neue Batterietechnologien ermöglichen längere Lebensdauer sowie grössere Energie- und Leistungsdichte. Dennoch beansprucht die Batterie mehr Platz und Gewicht als im Vergleich dazu für den (Diesel-) Kraftstofftank benötigt wird, da flüssiger Treibstoff eine viel grössere Energiedichte besitzt (mehr als Faktor 100). Die Netto-Nutzlast des E-FORCE verringert sich auf 6.1 t.

Kurz ein paar Kennzahlen zu der Batterie des E-FORCE.

- Batterietechnologie: LiFePo4
- Kapazität: 240 kWh
- Gewicht: 2600 kg

Die elektrische Antriebseinheit besteht aus der Batterie, Motoren (mit Umrichter) und dem Getriebe. Elektromotoren sind bei gleicher Leistungsklasse um einiges kleiner als konventionelle Verbrennungsmotoren. Die Drehmomentcharakteristik und hohen Drehzahlen des Elektromotors ermöglichen, das Getriebe mit einer fixen Übersetzung auszustatten. Somit ist auch das Getriebe einiges wartungsfreier und kompakter als das im Dieselfahrzeug eingesetzte 12-gängige Schaltgetriebe. Die Elektromotoren können auch als Generatoren arbeiten und erlauben damit die Rückgewinnung der Bremsenergie. Die sogenannte Rekuperation ist schonend für Bremsanlage und erweitert die Reichweite und Effizienz des elektrischen Antriebs.

Der E-FORCE ist mit zwei baugleichen Motoren ausgestattet und erreicht damit eine Spitzenleistung von über 400 PS.

- Motortyp: Brusa Hybrid Synchron Motor
- Max. Motorleistung: 204 PS
- Max. Drehmoment: 305 Nm

- Max. Drehzahl: 13000 rpm

Es folgen einige Angaben zur Fahrzeugkonfiguration des umgebauten Fahrzeugs:

- Kabine: HI-Way
- Gesamtgewicht: 18 t (Netto-Nutzlast 6.1 t)
- Federung: Luftfederung
- Zusatzachse: -

Die Reichweite des Fahrzeugs wird mit 200-300 km angegeben[?] und auf die Abhängigkeit von der Zuladung, Topologie und Fahrtgeschwindigkeit aufmerksam gemacht. Die Vorteile und Anreize für den Betrieb eines elektrischen Lastwagens sind emissionsfreies Fahren, eine grössere Energieeffizienz und die geringe Lärmentwicklung der Antriebseinheit.

Weitere Informationen zum Fahrzeug E-FORCE finden Sie auf der Herstellerseite¹.

2.2 Diesellastwagen - Iveco Stralis 460 E6

Der Lastwagen, welcher für die Messfahrten zur Verfügung stand ist ein 26 t Iveco Stralis 460 Euro 6. Dieses Fahrzeug besitzt eine zusätzliche Achse im Vergleich zum 18 t Fahrzeug. Die hinterste Achse (Nachlaufachse) muss erst ab dem Erreichen eines Grenzwerts der Zuladung auf der Hinterachse heruntergefahren werden. Die Messfahrten wurden alle mit angehobener Nachlaufachse durchgeführt, womit gleiche Bedingungen geschaffen waren.

Der Lastwagen entspricht dem neusten Stand der Technik und erfüllt die Emissionsnorm Euro 6.[3] Der 6-Zylinder-Viertakt-Diesel-Reihenmotor ist mit Direkteinspritzung (Commonrail System) ausgestattet. Zur Steigerung der Effizienz werden Turbolader (mit variabler Geometrie), automatische Vorwärmung für den Kaltstart, Ladeluftkühlung und weitere Technologien angewendet. Die Abgase werden durch ein SCR System (selektive katalytische Reduktion) gefiltert und in Stickstoff (N₂) und Wasser (H₂O) geformt. Der Ablauf der Reaktion geschieht durch den Zusatz von Ammoniak (bekannt unter AdBlue). Das automatisierte Schaltgetriebe besteht aus 12 Gängen und nimmt neben dem Verbrennungsmotor viel Platz im Motorraum ein.

Ein paar technische Daten zum Dieselmotor des Fahrzeugs [4]:

- Motortyp: Cursor 11 (F3G) Euro VI
- Max. Motorleistung: 460 PS
- Max. Drehmoment: 2150 Nm
- Max. Drehzahl: 2100 rpm

Die Fahrzeugkonfiguration ist bis auf die zusätzliche Nachlaufachse und das höhere maximale Zuladungsgewicht gleich wie der E-FORCE.

- Kabine: HI-Way
- Gesamtgewicht: 26 t (Netto-Nutzlast 12.7 t)
- Federung: Luftfederung
- Zusatzachse: HA gelenkt

Weitere Informationen zum Fahrzeug Iveco Stralis finden Sie auf der Herstellerseite².

¹<http://eforce.ch/>

²<http://www.iveco.com/>

Kapitel 3

Vorbereitungen für Messfahrten

Die Herausforderung ist es, analoge Test- und Messbedingungen für alle Fahrten zu schaffen. Die Fahrzeuge wurden soweit vorbereitet, dass die wichtigsten Faktoren für den Energieverbrauch identisch sind. Auch das Auslesen der Fahrzeugsensorik verspricht exakte und vertrauenswürdige Messdaten. Die beiden befahrenen Routen führen durch den Kanton Zürich und St. Gallen.

3.1 Fahrwiderstand

Der Fahrwiderstand setzt sich aus Luft-, Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand zusammen. Für alle Fahrten sollen diese Widerstände vergleichbar sein, so dass die effektive Effizienz des Antriebskonzepts gemessen werden kann. Der Steigungswiderstand ist von der Route abhängig und wird sich unterhalb der Fahrten nicht ändern. Die Beschleunigung des Fahrzeugs wird direkt vom Fahrzeuglenker beeinflusst. Um die Varianz des Beschleunigungswiderstands klein zu halten, war bei allen Messfahrten der gleiche Fahrer am Steuer.

$$F_{Luft} = \rho_{Luft} / 2 * c_W * A * (v_{Fz} + v_{Wind})^2 \quad (3.1)$$

Der Luftwiderstand bleibt vergleichbar, bei Verwendung eines baugleichen Lastwagens (gleiche Angriffsfläche A und Strömungswiderstandskoeffizient c_w). Die einzige Variable v_{Wind} wird definiert durch die Wetterverhältnisse.

$$F_{Roll} = m_{Fz} * g * f_{Roll} * \cos(\alpha) \quad (3.2)$$

Der Rollwiderstand ist abhängig von dem Fahrzeuggewicht m_{Fz} und dem Rollwiderstandskoeffizient f_{Roll} . Dieser Koeffizient variiert mit der Auswahl des Reifens und des Reifendrucks. Die Bereifung des Iveco Fahrzeugs wurde dem E-FORCE angepasst.

Zusammenfassung der Vorbereitungen an den Fahrzeugen:

- Gewicht: Vollladung 18 t (siehe Abbildung 3.1 und 3.2)
- Bereifung:
 - Vorderachse: 385/55 R22.5, Dunlop SP 344
 - Hinterachse: 315/70 R22.5, Dunlop SP 444
- Reifendruck: 9 bar
- Fahrzeugaufbau: identisch (siehe Kapitel 2)

Weitere Einflüsse auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge nehmen unter anderem die verschiedenen Verbraucher im Fahrraum. Deshalb wurde in allen Fahrten auf die Klimaanlage verzichtet, und die Bordelektronik nicht zusätzlich belastet. Die Wetter und Witterungsbedingungen wurden protokolliert. In fast allen Fahrten war das Wetter stabil sonnig und die Strassen trocken. Die einzelnen Routen wurden mehrmals mit gleichem Fahrer befahren. Das Verkehrsaufkommen war, wie die Erfahrung zeigt, leicht unterschiedlich. Darüber hinaus wurden keine bemerkenswerten Unregelmäßigkeiten notiert.



Abbildung 3.1: E-FORCE - Messung des Gesamtgewichts

3.2 Messtechnik

Alle Messdaten wurden am CAN Bus per Software PCAN Explorer 5 aufgezeichnet. Die Logdateien wurden im entsprechenden Datenformat gespeichert.

Von beiden Herstellern der Fahrzeuge waren die CAN Datenbankdateien zur Verfügung gestellt worden. Es wurden keine eigenen Messgeräte verwendet beziehungsweise in die Fahrzeuge verbaut. Dies verunmöglicht Probleme bei der Installation der Messgeräte, welche zu falschen Messergebnissen führen würden. Die direkte Verwendung der Fahrzeugsensorik garantiert vom Hersteller anerkannte und reale Daten.

Zur Vollständigkeit wurden alle Nachrichten, welche auf dem angeschlossenen CAN Bus vorhanden waren, aufgezeichnet. Die wichtigsten Werte für die weitere Analyse wurde mit den jeweiligen Fachpersonen abgesprochen.

Iveco: In firmeneigenen Messfahrten wurde der Kraftstoffverbrauch des High-Resolution Wert für die Berechnungen verwendet.[17] Anhand eines Massendurchflusssensors konnte dieser Wert für den Verbrauch validiert werden. Nebenbei wurde auch der Verbrauch des Abgasreduktionsmittel AdBlue, die gefahrene Distanz und die Fahrzeuggeschwindigkeit gemessen.

Eforce: Der Energieverbrauch eines elektrischen Fahrzeugs kann anhand der Strom- und Spannungswerte der Batterie ermittelt werden. Zusätzlich sind alle weiteren Hochleistungskomponenten



Abbildung 3.2: Iveco - Messung des Gesamtgewichts

mit Strom- und Spannungsmessungen ausgestattet. Dies ermöglicht den Energiekonsum jeder Komponente direkt zu bestimmen. Analog garantieren die Komponenten präzise Messungen, um die eigene Sicherheit zu gewährleisten und eine hohe Effizienz zu erzielen.

3.3 Routen

Es sind zwei unterschiedliche Routen befahren worden. Die erste setzt sich aus unterschiedlichen Abschnitten/Streckenprofilen zusammen. Die zweite Route führte auf Überlandstrassen quer durchs Zürcher Oberland. Anhand der Streckenprofile kann eine differenzierte Analyse des Energieverbrauchs der Fahrzeuge gemacht werden.

Route 1 (Abbildung 3.3)

Start- und Zielort der ersten Route ist im Industriegebiet in Bassersdorf. Zuerst führt eine Überlandroute hinaus auf Wittenwil, wo auf die Autobahn Richtung Zürich aufgefahren wird. In Wallisellen endet die Fahrt auf der Autobahn und es folgt ein Streckenabschnitt quer durch die Stadt Zürich bis hinaus zum Zielort.

Wie beschrieben setzt sich diese Route aus unterschiedlichen Abschnitten zusammen. Somit ist im Nachhinein eine Analyse über die ganze Fahrt sowie aufgeteilt in einzelnen Profile (Stadt, Überland, Autobahn) möglich.

Ein kurzer Überblick über die gefahrenen Distanzen bringt die folgende Aufzählung:

- km 0 bis 38: Überland (Bassersdorf 460 m.ü.M. nach Wittenwil)
- km 38 bis 75: Autobahn (Wittenwil 503 m.ü.M. Richtung Zürich)
- km 75 bis 102: Stadt (Zürich 410 m.ü.M. und Umgebung)

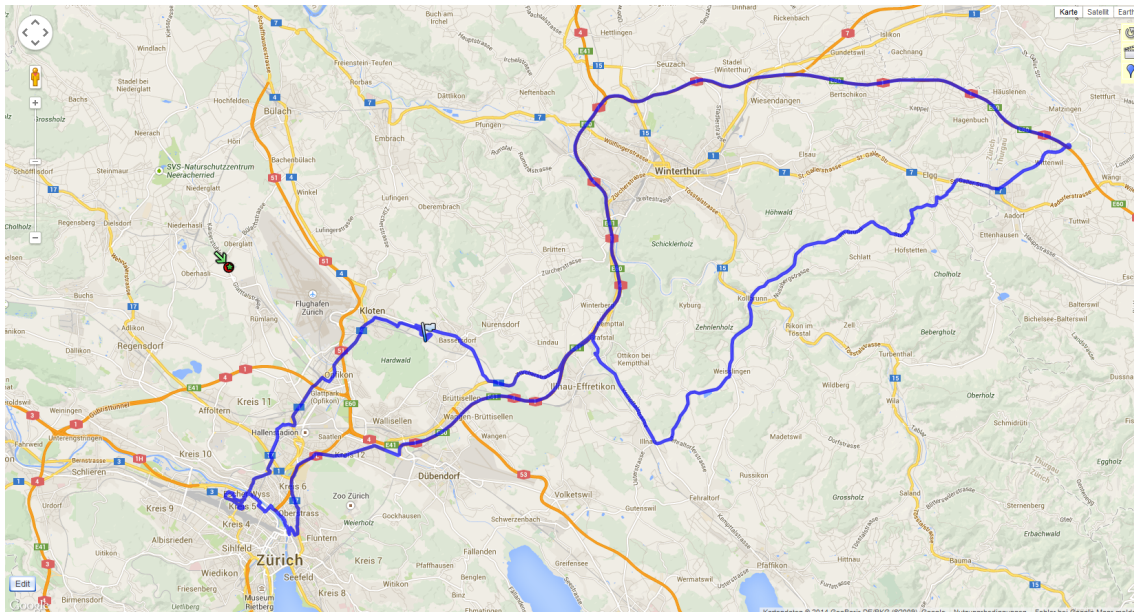


Abbildung 3.3: Kartenansicht zur Route 1

Route 2 (Abbildung 3.4)

Die zweite Route ist eine reine Überlandstrecke. Start- und Zielort ist im gleichen Industriegebiet. Die Strecke führt über Uster und den Hügelzug Pfannenstiel 727 m.ü.M. nach Meilen am Zürichsee 411 m.ü.M. und zurück über Wetzikon ins Tösstal. Es werden einige Höhenmeter zurückgelegt. Die gesamte Streckendistanz dieser Route beträgt fast 100 km. Die Rückgewinnung der Bremsenergie sollte nach Theorie dem E-FORCE einen ersichtlichen Vorteil bringen.

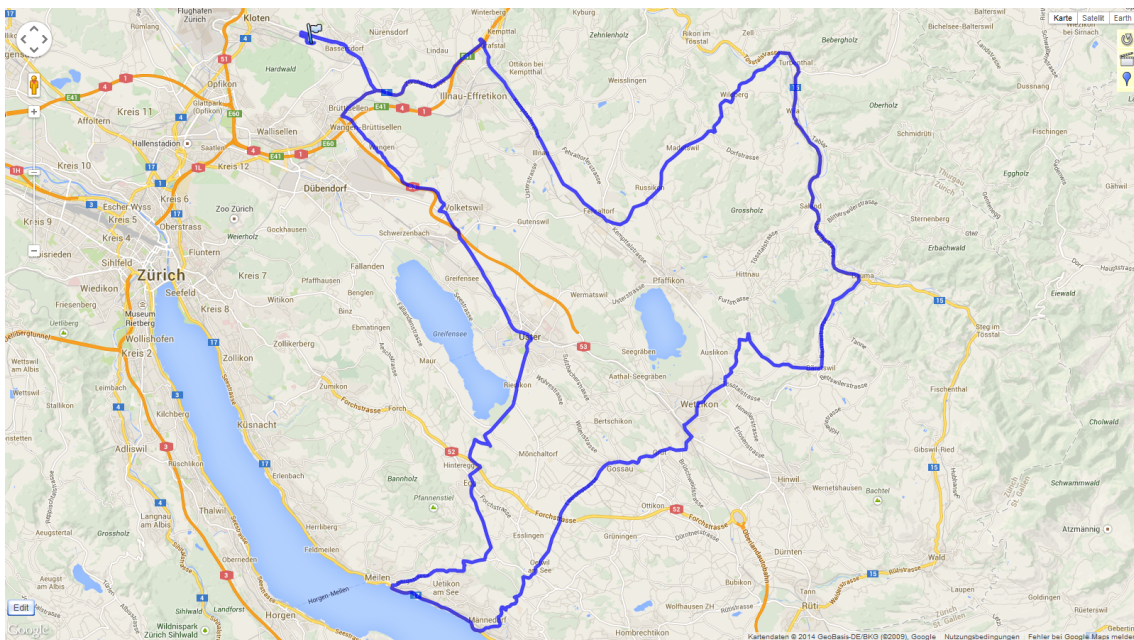


Abbildung 3.4: Kartenansicht zur Route 2

Kapitel 4

Messungen

In jeweils einer Woche wurden Messfahrten mit beiden Fahrzeugen durchgeführt. Das Ziel war es, möglichst viele variable Unsicherheiten zu minimieren. Zur nachträglichen Analyse existieren zu allen Messfahrten Videoaufnahmen (GoPro Kamera). Weitere spezielle Ereignisse, unter anderem die Verkehr- und Wetterlage, wurden in einem Fahrtenprotokoll festgehalten.

Im Anhang A.1 und A.2 sind einige Diagramme zu finden, welche die Rohdaten der Messfahrten beider Fahrzeuge wiedergeben.

4.1 E-FORCE

In der Kalenderwoche 26 wurden die Messfahrten mit dem elektrischen Lastwagen durchgeführt. Der E-FORCE befand sich technisch in der ganzen Woche in einem einwandfreien Zustand. Die Batterie wurde jeweils über Nacht wieder vollständig aufgeladen.

4.1.1 Route 1

Während den ersten zwei Fahrten war die Wetterlage konstant heiter und die Strassen waren trocken. Leichter Schauer und kurze Abschnitte mit nassen Strassen gab es auf der 3. Fahrt. Die Verkehrssituation war über alle Fahrten ruhig.

In Tabelle 4.1 folgt eine kurze Zusammenfassung einiger Messdaten:

Fahrt	Distanz	Durchschnitts- geschwindigkeit	Totaler Energieverbrauch	Anteil Rekuperation
[-]	[km]	[km/h]	[kWh]	[%]
1	101.00	44.25	83.80	19.23
2	101.10	42.46	83.79	29.01
3	101.40	43.89	83.73	22.48

Tabelle 4.1: Daten von Verbrauchsfahrten Eforce

Die Größenrelation des Messfehlers der gefahrenen Distanz liegt im tausendstel Bereich. Die anderen Messwerte sind stark vom Fahrer bzw. dem Fahrverhalten und den äusseren Bedingungen abhängig. Der totale Energieverbrauch über die Fahrten ist einiges näher zusammen, als hätte erwartet werden können. Der grösste Unterschied ist im Rekuperationsanteil auszumachen.

4.1.2 Route 2

Wie aus den Protokollen zu entnehmen ist, haben die beiden weiteren Fahrten auf der zweiten Route bei gleichbleibenden Bedingungen stattgefunden.

Fahrt	Distanz	Durchschnitts- geschwindigkeit	Totaler Energieverbrauch	Anteil Rekuperation
[-]	[km]	[km/h]	[kWh]	[%]
4	99.00	42.27	76.74	32.39
5	99.00	41.53	73.26	32.40

Tabelle 4.2: Daten von Verbrauchsfahrten Eforce

Im Vergleich zur ersten Route ist der Energieverbrauch kleiner und der Rekuperationsanteil bei beiden Fahrten grösser, was auf das Streckenprofil zurückzuführen ist.

4.2 IVECO

Die Messfahrten mit dem konventionellen Dieselfahrzeug wurden in der Kalenderwoche 29 in Angriff genommen. Das Fahrzeug fuhr sich einwandfrei über die Tage.

4.2.1 Route 1

Direkt in der ersten Fahrt hatte es einige nasse und regnerische Abschnitte. Die weiteren Fahrten konnten bei sonnigem Wetter und trockenen Strassen durchgeführt werden. Das Verkehrsaufkommen war normal und vergleichbar zu den Fahrten mit dem E-FORCE.

Folgend in Tabelle 4.3 eine kurze Zusammenfassung einiger Messdaten:

Fahrt	Distanz	Durchschnitts- geschwindigkeit	Totaler Kraft- stoffverbrauch	Äquivalenter Energieverbrauch
[-]	[km]	[km/h]	[l]	[kWh]
1	102.01	43.91	28.70	281.28
2	101.98	43.20	27.88	273.22
3	101.77	43.51	27.62	270.68

Tabelle 4.3: Daten von Verbrauchsfahrten Iveco

Der totale Kraftstoffverbrauch der ersten Fahrt wurde durch das Wetter leicht erhöht. Die dritte Fahrt mit dem E-FORCE wurde bei ähnlicher Wettersituation durchgeführt. Somit lassen sich die beiden Fahrten vergleichen.

4.2.2 Route 2

Auch die weiteren Fahrten auf der Überlandroute fanden unter gleichen Verhältnissen statt und verliefen ohne weitere Probleme.

Der totale Kraftstoffverbrauch ist im Vergleich zur Route 1 leicht angestiegen.

Fahrt	Distanz	Durchschnitts- geschwindigkeit	Totaler Kraft- stoffverbrauch	Äquivalenter Energieverbrauch
[-]	[km]	[km/h]	[l]	[kWh]
4	101.42	40.62	29.67	290.74
5	101.46	40.84	28.54	279.67

Tabelle 4.4: Daten von Verbrauchsfahrten Iveco

4.3 Messunsicherheit

Es gibt verschiedene Faktoren, die eine Messung ausserhalb des Prüfstands beeinflussen und einen grösseren Unsicherheitsbereich der verwendeten Daten verursachen. Die folgenden drei Abschnitte beinhalten die von den wichtigsten Faktoren ausgehende Problematiken und Kommentare zu den realen Bedienungen in den Messfahrten.

Fahrzeuglenker

Problematik: Mit einem ökonomischen Fahrverhalten kann Treibstoff bewusst eingespart werden. Dies verringert die Betriebskosten und hat zugleich einen positiven Einfluss auf die Umwelt. Nach einer Studie kann mit ökonomischen Fahrstil (beinhaltet unter anderem auch vorausschauendes Fahren) 4-17% an Treibstoff gespart werden.[1]

Kommentar: Alle Fahrten wurden vom gleichen Fahrer gemacht. Die Verbrauchswerte zeigen, dass in jeder weiteren Fahrt leicht weniger Kraftstoff gebraucht wurde. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine bekannte Strecke vorausschauender zu fahren ist.

Wetter (Wind, Temperatur, Luftfeuchtigkeit)

Problematik: Die klimatischen Bedingungen beeinflussen vor allem ein Fahrzeug mit konventionellem Antrieb, da die Aussenluft für die Verbrennung benötigt wird. Daneben hat der Wind erheblichen Einfluss auf den Luftwiderstand und der Regen auf die Strassenverhältnisse bzw. auf den Rollwiderstand.

Kommentar: Die Fahrten konnten bis auf je einen Tag bei stabilem, sonnigem und warmem Wetter durchgeführt werden.

Verkehr

Problematik: Je nach Uhrzeit, Wochentag und Kalenderwoche ist das Verkehrsaufkommen auf den Strassen unterschiedlich.

Kommentar: Nach Protokoll sind in allen Fahrten keine bemerkenswerten, grösseren Verkehrsaufkommen aufgetreten.

Unsicherheitsbereich

Die Annahme auf den Unsicherheitsbereich über alle Fahrten und berechneten Mittelwerte beträgt $\pm 2\%$.

Kapitel 5

Resultate

Die Daten der Messfahrten liefern die Basis für die erfolgreiche Analyse. Es konnte die gleiche Messtechnik in beiden Fahrzeugen verwendet werden. Für die weitere Verarbeitung wurde die Software Matlab genutzt. Es folgen Aussagen über die unterschiedliche Effizienz der Antriebstechnologien, die Ökobilanz und die Wirtschaftlichkeit in Bezug auf die anfallenden Kosten pro Kilometer.

5.1 Verbrauch

5.1.1 Route 1

Der Energieverbrauch hängt stark mit der Fahrzeuggeschwindigkeit zusammen. Zur Überprüfung zeigt Abbildung 5.1 den Mittelwert der Durchschnittsgeschwindigkeiten über die verschiedenen Streckenabschnitte. Überraschend ist die Abweichung des Durchschnitts über alle Fahrten enorm klein.

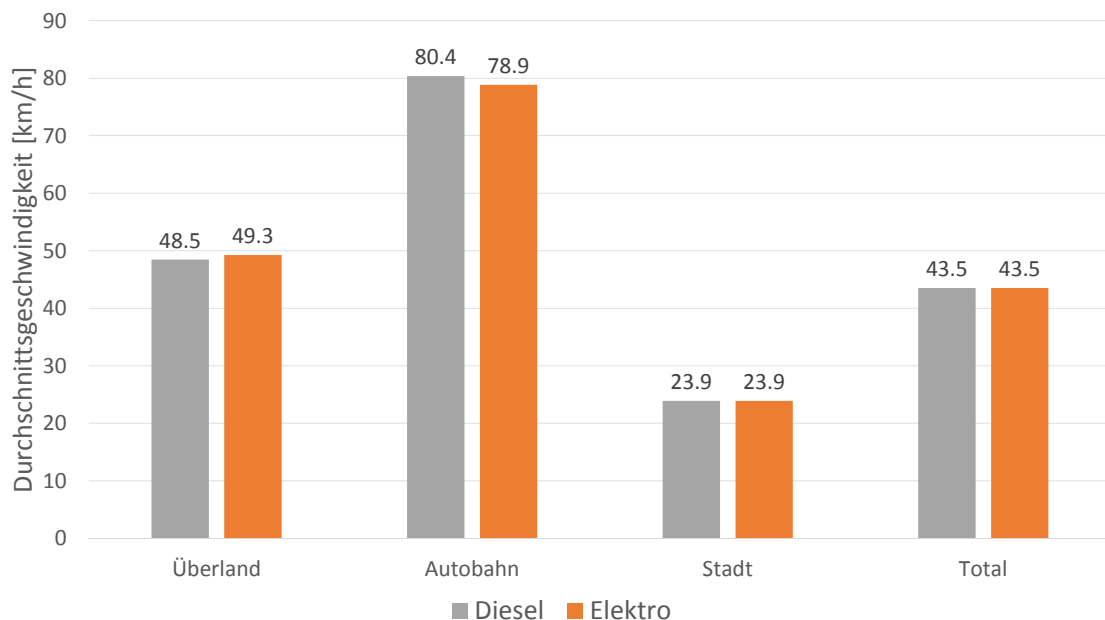


Abbildung 5.1: Vergleich der Durchschnittsgeschwindigkeiten nach Streckenprofil

Der Energieverbrauch der beiden Fahrzeuge bringt Aufschluss über die Differenz der Effizienz des Antriebs. In der Abbildung 5.2 ist der durchschnittliche Verbrauch an Energie pro 100 km darge-

stellt. Das Energieäquivalenz (Heizwert) von 11 Diesel ist 9.8kWh. Die Verbrauchswerte für den Elektrolastwagen sind zu Illustrationszwecken auch ohne den Rekuperationsanteil dargestellt. Es sind deutliche Unterschiede des Verbrauchs auf den verschiedenen Streckenprofilen ersichtlich. Das Dieselfahrzeug hat in allen Fällen mindestens den doppelt so hohen Durchschnittsverbrauch. Die Angaben aus der Abbildung 5.2 können nicht als allgemein geltende Werte angeschaut werden, da die Topologie der Strecke Auswirkungen darauf hat. Im Überlandteil werden ein paar Höhenmeter (ca. 50 m) gewonnen und die Autobahn führt ins (ca. 100 m) tiefer gelegene Zürich.

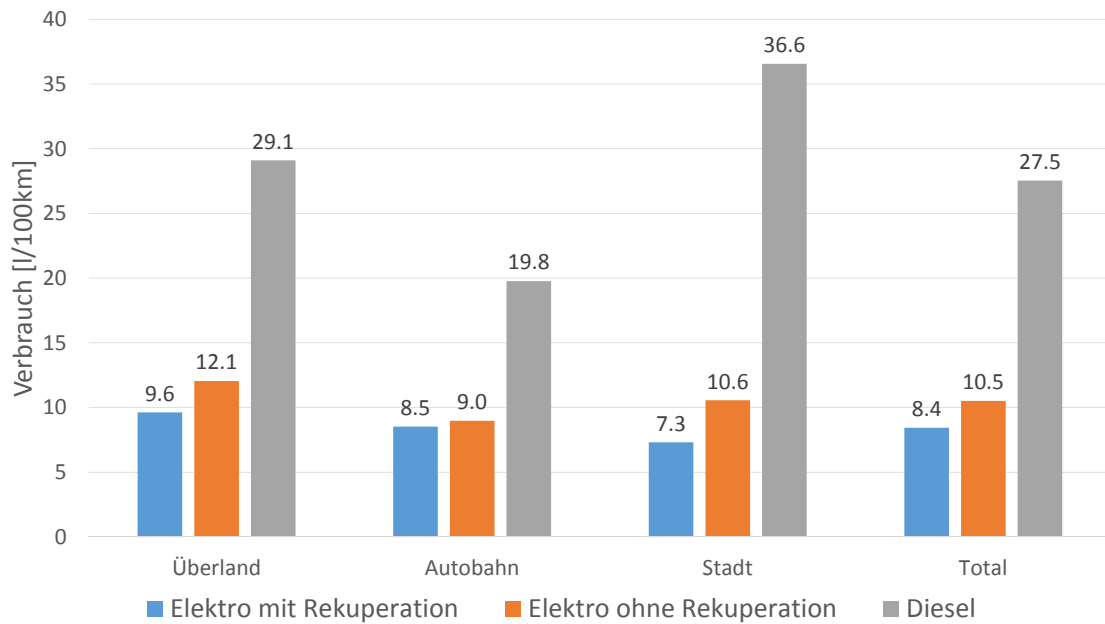


Abbildung 5.2: Verbrauch an Diesel pro 100 km unterteilt nach Streckenprofil (Dieseläquivalent)

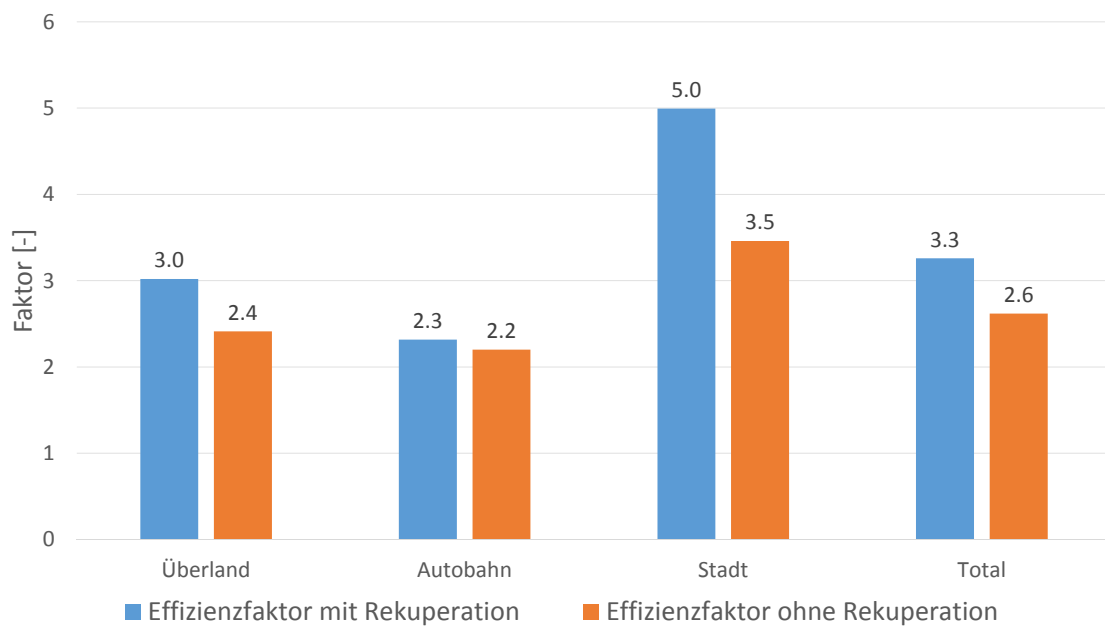


Abbildung 5.3: Faktor der Effizienz des Elektrolastwagens im Vergleich zum Diesellastwagen

Die Abbildung 5.3 zeigt den Effizienzfaktor des elektrischen Antriebs gegenüber dem Dieselmotor. Die Faktoren werden über die gemessenen Durchschnittsverbräuche [l/100km] aus Abbildung 5.2 berechnet. Die Stärken des elektrischen Antriebs in Kombination mit der Rekuperation bewirken in der Stadt einen fünffach besseren Durchschnittsverbrauch. Der geringste Unterschied ist auf der Autobahnstrecke auszumachen, wobei stets noch eine mehr als doppelt so hohe Effizienz erreicht wird.

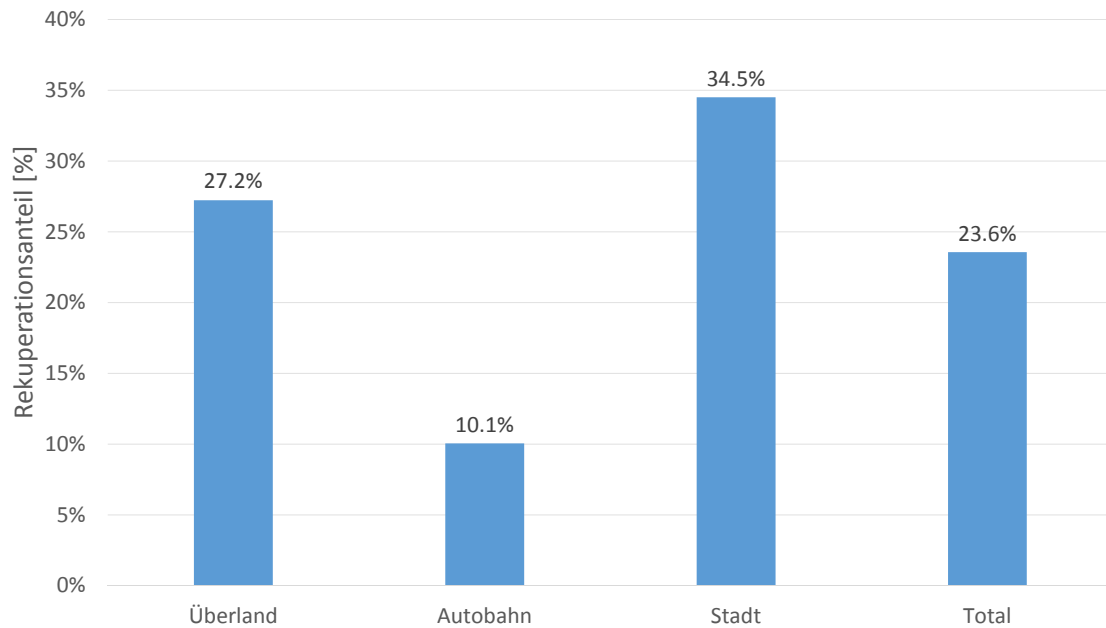


Abbildung 5.4: Rekuperationsanteil unterteilt nach Streckenprofil

Wie kurz angesprochen, ermöglicht die Rekuperation die Bremsenergieerückgewinnung und vergrößert somit die Reichweite des Elektrolastwagens. In Abbildung 5.4 wird der Nutzen der Rekuperation auf den unterschiedlichen Strecken ersichtlich. Die Fahrten im Überland und in der Stadt fallen dabei besonders ins Gewicht. Da das elektrische Bremspedal vom Fahrer betätigt werden muss, spielt die Einweisung beziehungsweise Schulung des Fahrers eine entscheidende Rolle. Der E-FORCE erlaubt es in fast allen Situationen komplett auf die mechanische Bremse zu verzichten und das Fahrzeug alleine mit der Rekuperation (bis zum Stillstand) zu verlangsamen.

5.1.2 Route 2

Die Abbildung 5.5 zeigt den Durchschnittsverbrauch auf 100 km der reinen Überlandstrecke. Dank der Rekuperation wurden 32 % der insgesamt verbrauchten Energiemenge von 105 kWh zurückgewonnen. Dies ermöglicht, mit dem Elektrolastwagen einen Durchschnittsverbrauch von 75.7 kWh/100km zu erzielen. Im Vergleich zum Diesellastwagen reduziert sich somit der Verbrauch um das 3.7-fache. Die Messwerte des Verbrauchs liegen alle unterhalb denen, die im ersten Streckenabschnitt der Route 1 gemessen wurden (siehe Abbildung 5.2). Der E-FORCE verbraucht ca. 20 % weniger Energie auf der Überlandstrecke der Route 2. Dagegen ist die Einsparnis mit dem Diesellastwagen von 2 % verhältnismässig klein. Dies ist vor allem auf die beschriebene Höhendifferenz des Start- und Zielorts der Strecke und auf den hohen Anteil der Rekuperation zurückzuführen.

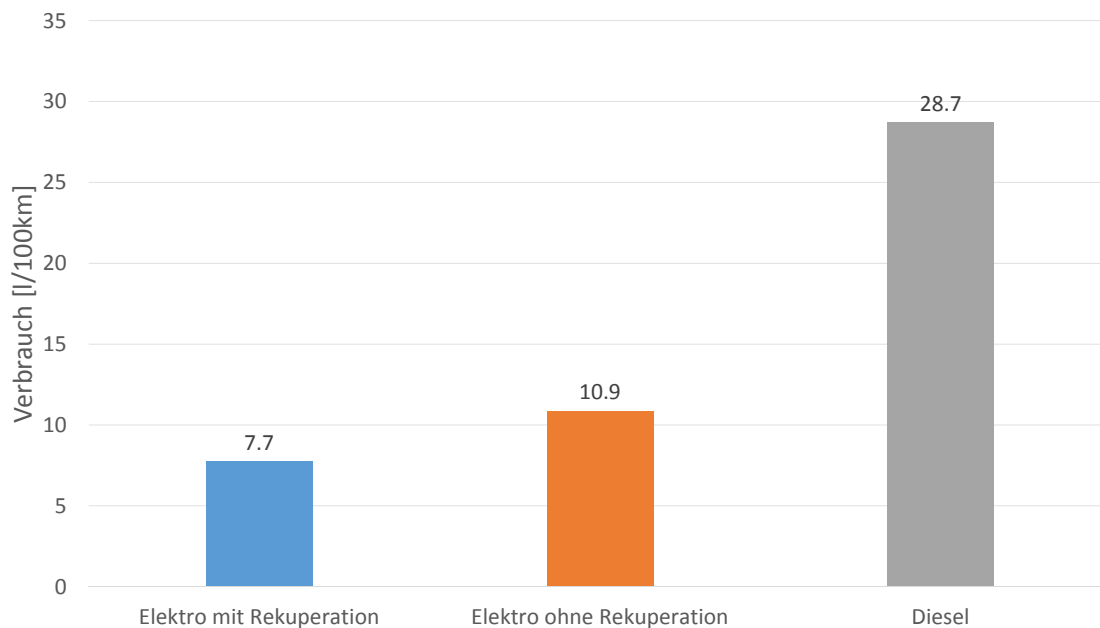


Abbildung 5.5: Verbrauch an Diesel pro 100 km (Dieseläquivalent)

5.2 Ökologie

Der Verkehr in der Schweiz ist mit 31 % an den gesamten Treibhausgasemissionen beteiligt und somit die grösste Verursacherkategorie. Die Aufteilung nach den Verkehrsträgern zeigt, dass an erster Stelle Personenwagen mit 68 % und an zweiter Lastwagen/Busse mit 13 % die Bilanz beeinflussen.[6] Dies unterstreicht die Priorität der Reduktion von Emissionen im Strassenverkehr.

Eine vollständige Ökobilanz von Strassenfahrzeugen betrachtet die Auswirkungen durch die Strassen (Infrastruktur), dem Fahrzeug inklusive Batterie, der Batterie, der Fahrzeugemissionen (Abgase) und dem Treibstoff. Für den Diesel- und Elektrolastwagen unterscheiden sich die Ökobilanz nur bezüglich Batterie, Fahrzeugemissionen und dem Treibstoff. Folglich werden die Emissionswerte berechnet und dienen als ökologischen Vergleichswerte für die beiden Lastwagen. Der Bericht liefert keine Werte zur vollständigen Ökobilanz der Fahrzeuge. Dies erfordert zusätzlich die Einbeziehung der CO₂-Kosten der Strassen (Infrastruktur) und des Fahrzeugs (exklusive Batterie).

Euro 6

Die europäische Union bestimmt Abgasnormen für Kraftfahrzeuge aller Art. Die Fahrzeuge können damit in verschiedene Schadstoffklassen unterteilt werden. Die Einteilung wird mittels einem normierten Tests am Prüfstand gemacht. Es werden Emissionswerte für Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickstoffoxide (NO_x) und Partikel (PM) gemessen.

Der Austoss an Kohlendioxide (CO₂) bleibt nicht geregelt und bleibt im Ermessen des Herstellers und Käufers, obwohl auch CO₂ den Treibhauseffekt entscheidend verstärkt. Die vollständige Verbrennung von 1 l Diesel entspricht einer Produktion von 2.65 kg CO₂.

Für Lastwagen mit Dieselmotoren (Kategorie Heavy-Duty) gibt es folgende Emissionsstandards:

1. EU Emissionsstandard für Heavy-Duty Dieselmotoren: Steady-State Test
Euro 6: siehe Tabelle 5.1
2. EU Emissionsstandard für Heavy-Duty Diesel- und Benzinmotoren: Transient Test
Euro 6: siehe Tabelle 5.2

Date	Test	CO	HC	NOx	PM	PN	Smoke
[-]	[-]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[l/kWh]	[l/m]
2013.01	WHSC	1.5	0.13	0.40	0.01	$8.0 * 10^{11}$	-

Tabelle 5.1: EU Emissionsstandard für Heavy-Duty Dieselmotoren: Steady-State Test, Quelle [3]

Date	Test	CO	NMHC	CH ₄	NOx	PM	PN
[-]	[-]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[l/kWh]
2013.01	WHTC	4.0	0.16	0.5	0.46	0.01	$6.0 * 10^{11}$

Tabelle 5.2: EU Emissionsstandard für Heavy-Duty Diesel- und Benzinmotoren: Transient Test, Quelle [3]

Well-to-Wheel

Die Analysemethode Well-to-Wheel betrachtet die Ökobilanz beginnend bei der Energiegewinnung (z.B. am Bohrloch) bis und mit der Umwandlung in kinetische Antriebsenergie im Fahrzeug. Es wird weiter zwischen Well-to-Tank (Energiebereitstellung) und Tank-to-Wheel (Fahrzeugwirkungsgrad) unterteilt. Die Bilanz für die Fahrzeugherstellung und alle verbauten Bauteile ist nicht inbegriffen. Da die Fahrzeuge bis auf den Antriebsstrang baugleich sind, fallen primär die Batterien ins Gewicht. Die anderen Komponenten sind mit dem des Diesels vergleichbar. Studien zeigen, dass der Lithium-Ionen Antrieb des Elektroautos die Umwelt nur mässig belastet. Maximal 15 % der Gesamtbelastung stammen von der Batterie durch deren Herstellung, Unterhalt und Entsorgung. Die Hälfte davon macht die Gewinnung und Herstellung der Batterierohstoffe Kupfer und Aluminium aus. Der Abbau von Lithium verursacht nur etwa 2.3 %.[2]

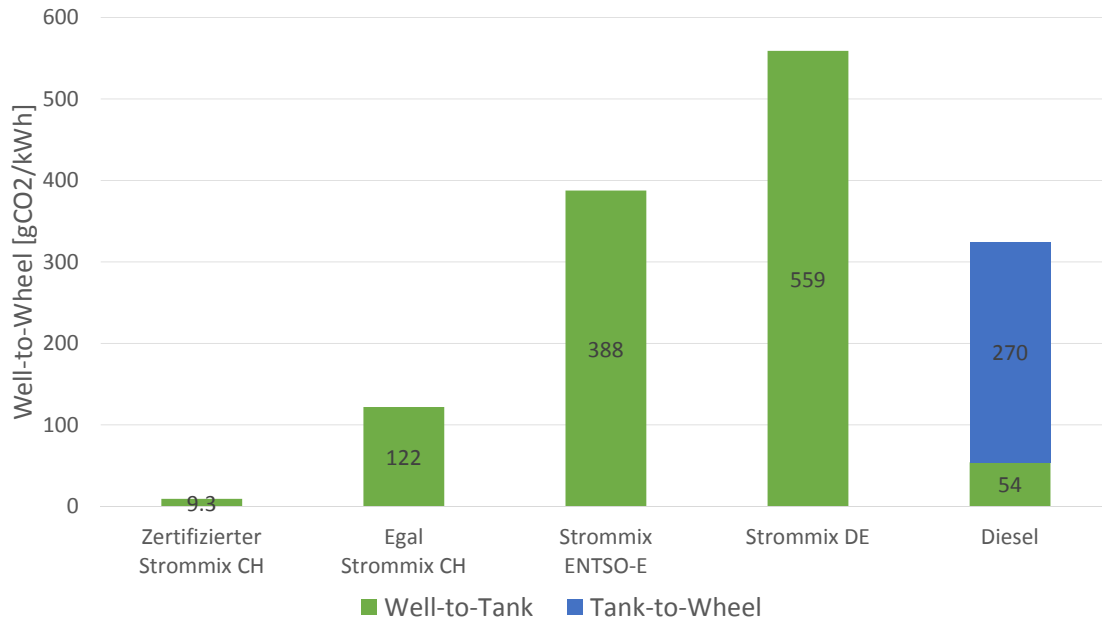


Abbildung 5.6: Well-to-Wheel CO₂-Bilanz pro kWh, Quelle [20], [15], [19]

In Abbildung 5.6 wird der Ausstoss an Gramm CO₂ pro Kilowattstunde der Well-to-Wheel Analyse dargestellt. Der Elektrolastwagen verursacht keine Emissionen bei der Umwandlung der elektrischen

Energie (der Batterien) in die kinetische Antriebsenergie. Die Verbrennung des Dieseldraftstoffs bewegt sich wiederum um $270 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$. Durch die Förderung/Gewinnung des Diesels addiert sich die gesamte Bilanz für das Dieselfahrzeug auf $324 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$. Die ökologischen Kosten für die Stromproduktion hängen stark von den verschiedenen Stromkraftwerken ab. Die Schweiz produziert im Gegensatz zu Deutschland viel CO_2 -armen Strom, dank vieler Wasserkraftwerke und den Atomkraftwerken.

Der Schweizer Stromkunde hat die Wahl zwischen verschiedenen Strommixen bzw. Preisarifen. Die Möglichkeit, zertifizierten (aus erneuerbaren Energiequellen generierten) Strom zu beziehen, lässt die eigene CO_2 -Bilanz nochmals verbessern. Der zertifizierte Strommix der Schweiz besteht zu knapp 98 % aus Wasserkraft. Die dazugehörigen Treibhausgasemissionen betragen $9.3 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$. Daneben verursacht der Schweizer Egal-Strommix $122 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$. Im Vergleich zum europäischen oder deutschen Strommix schneidet dieser stets um ein Vielfaches besser ab (siehe Abbildung 5.6).

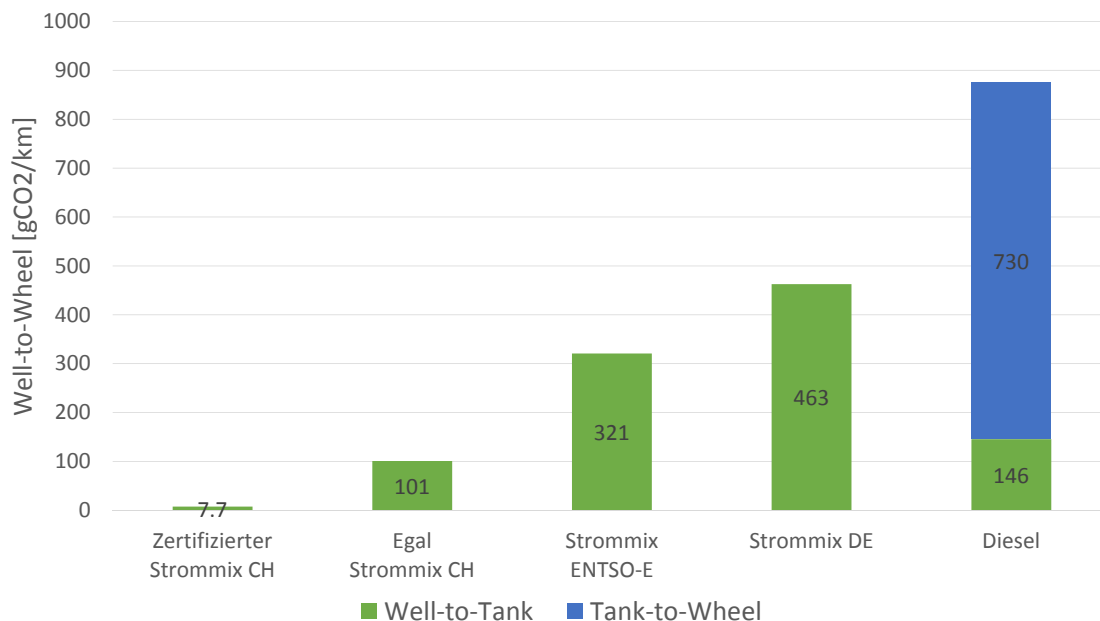


Abbildung 5.7: Well-to-Wheel CO_2 -Bilanz pro km, Quelle [20], [15], [19]

Die Abbildung 5.7 zeigt die ganze Situation in Gramm CO_2 pro Kilometer. Der Effizienzunterschied der Antriebstechnologien bewirkt, dass der elektrische Lastwagen eine viel bessere Bilanz hat. Sogar mit dem Strommix aus Deutschland ist nur mit der Hälfte an CO_2 -Emissionen pro Kilometer zu rechnen.

Batterie

Ein weiterer Unterschied in der ökologischen Betrachtung betrifft die Herstellung der Fahrzeuge. Es fallen CO_2 -Emissionen für die verwendeten Materialien und den Stromverbrauch der Produktion an. Der Elektrolastwagen unterscheidet sich primär im Antriebsstrang vom Diesel (siehe Kapitel 2). Die Herstellung einer Batterie braucht signifikante Mengen an Energie und es werden verschiedene, teils seltene, metallische Rohstoffe verwendet. Die Produktion eines Elektromotors schneidet im Vergleich zum Verbrenner besser ab, beeinflusst aber die CO_2 -Bilanz quantitativ nur minimal.

Es existieren verschiedenen Studien, die für Lithium-Batterien CO_2 -Emissionen pro Kilowattstunde Batteriekapazität berechnet haben. Die geschätzten Werte reichen von circa $50 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ bis

zu $140 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$. Die Angaben variieren stark und sind auch vom Batteriehersteller abhängig. Ein Bericht der EMPA und dem PSI [13] vergleicht verschiedene Schweizer Ökobilanzstudien von Elektrofahrzeugen und beschreibt unter anderem die Ursachen der Differenzen in den Bilanzen für die Batterien.

Literaturwerte für die CO_2 -Bilanz von Lithium Batterien:

- [8]: $53 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$
- [16]: $63 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$
- [11]: $123 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$
- [14]: $139 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$

Für die weiteren Berechnungen der Bilanz wird ein mittlerer Wert von $100 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$ angesetzt.

Angaben der E-FORCE ONE AG zu den Batterie und den Zellen:

Der E-FORCE besitzt Batterien mit einer Gesamtkapazität von 240 kWh . Die Lebensdauer der Batteriezellen für den Automobilgebrauch (80 % Restkapazität) beträgt bis zu 2000 Zyklen und 6 Jahre. Für den E-FORCE entspricht dies $400000\text{-}600000 \text{ km}$.

Die Validierung dieser Angaben ist noch ausstehend, da der E-FORCE ein Fahrzeug erster Generation ist und somit kein Lastwagen diese Kilometerleistung/Alter erreicht hat.

$$\text{abs. Emissionen der Batterie } [\text{kgCO}_2] = 100 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} * 240 \text{ kWh} = 24000 \text{ kgCO}_2 \quad (5.1)$$

$$\text{rel. Emissionen der Batterie } [\text{gCO}_2/\text{km}] = 24000 \text{ kgCO}_2/500000 \text{ km} = 48 \text{ gCO}_2/\text{km} \quad (5.2)$$

Mit den beschriebenen Annahmen muss für den E-FORCE mit zusätzlichen 24 tCO_2 , verursacht durch die Batterie, gerechnet werden. Dies, geteilt durch die Lebensdauer der Batteriezellen, ergibt $48 \text{ gCO}_2/\text{km}$. Diese Angabe dient grundsätzlich als Hochrechnung, da die Lebensdauer der Batterie durch viele Faktoren beeinflusst wird und sich in diesem Einsatz erst noch gewähren muss.

5.3 Wirtschaftlichkeit

Die Gesamtbetriebskosten (siehe Abbildung 5.8) setzen sich aus den Kosten für den Kraftstoff, die Mautstellen und Gebühren, den Fahrer, die Investition und die Wartung/Reparatur zusammen. Prozentual gesehen, haben die Kraftstoffkosten mit 36 %, knapp gefolgt von den Kosten für den Fahrer, den grössten Anteil daran.

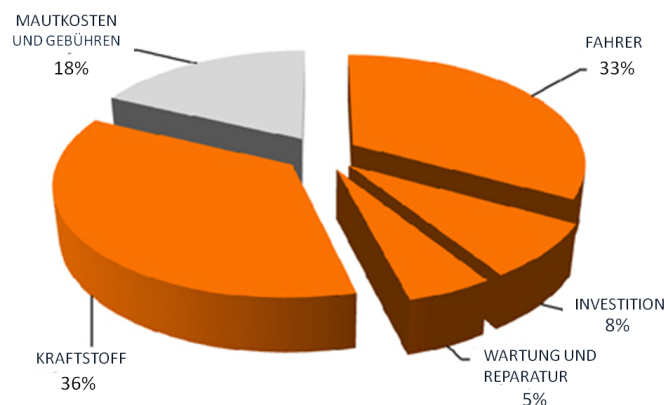


Abbildung 5.8: Gesamtbetriebskosten eines Diesellastwagens, Quelle [5]

Im folgenden Abschnitt werden hauptsächlich die leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA) und die Kosten für den Treibstoff bzw. den Strom genauer betrachtet. Diese beiden Faktoren machen den grössten Unterschied für die Gesamtbetriebskosten eines Elektrolastwagens aus.

LSVA

Die leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe wird durch die drei folgenden Kriterien berechnet^[9]:

- gefahrene Distanz [km]
- Gesamtgewicht [t]
- Abgabekategorie für Schadstoffwerte [Emissionsnorm]
 - 1: Euro 0 - 2
 - 2: Euro 3
 - 3: Euro 4-6

Der Tarif wird jeweils günstiger, wenn eine bessere Emissionsnorm erreicht wird. Die dritte Abgabekategorie ist zurzeit die Höchste, wobei für Euro 6 Fahrzeuge ein reduzierter Tarif von 2.05 Rp./tkm gilt. Das Reglement hält verschiedene Ausnahmen für Fahrzeuge fest, die von der Abgabe ausgenommen sind. Darunter zählen Motorwagen mit elektrischem Antrieb. Dies bedeutet, dass der E-FORCE von der LSVA befreit ist.

Formel zur Berechnung der Abgaben:

$$\text{LSVA [CHF]} = \text{Gewicht [t]} * \text{Distanz [km]} * \text{Schadstofftarif [CHF/tkm]} \quad (5.3)$$

Tarif für ein Euro 6 Fahrzeug pro km:

$$\text{Abgabe [CHF/km]} = 0.0205 \text{ CHF/tkm} * 18 \text{ t} = 0.37 \text{ CHF/km} \quad (5.4)$$

Die Berechnung für ein 18 t Euro 6 Diesellastwagen zeigt, dass im Vergleich zum Elektrolastwagen Betriebskosten in der Höhe von 37 Rp./km mehr anfallen.

Treibstoff- und Stromkosten

Der Kraftstoff macht bei einem Dieselfahrzeug den grössten Teil der Gesamtbetriebskosten aus. Dies bedeutet, dass effizientere Motoren/Antriebe auch ein Profit für den Fahrzeugbesitzer ergeben.

Die folgenden Durchschnittspreise galten in der Schweiz 2013:

- Dieselpreis^[12]: 1.89 CHF/l
- Strompreis^[10]: Haushalt: 0.194 CHF/kWh, Gewerbe: 0.193 CHF/kWh

Die Kosten für dieselbe Menge an Energie, wie 1 l Diesel besitzt, sind für den Strom identisch mit 1.89 CHF/l. Da, wie gesehen, der Durchschnittsverbrauch des Dieselfahrzeugs sicher dreimal grösser ist, werden die Kosten pro Kilometer demnach auch in diesem Verhältnis sein.

$$\text{Treibstoffkosten [CHF/km]} = 0.2754 \text{ l/km} * 1.89 \text{ CHF/l} = 0.52 \text{ CHF/km} \quad (5.5)$$

$$\text{Stromkosten [CHF/km]} = 0.8388 \text{ kWh/km} * 0.193 \text{ CHF/kWh} = 0.16 \text{ CHF/km} \quad (5.6)$$

Für die Berechnung wurden die gemessenen Durchschnittsverbräuche von Route 1 verwendet. Die absolute Differenz der Kosten beträgt 36 Rp./km.

Wartungs- und Reparaturkosten

Wie in Abbildung 5.8 ersichtlich ist, fällt der Anteil der Wartungs- und Reparaturkosten an den Gesamtbetriebskosten relativ klein aus. Es gibt erhebliche Unterschiede in der Wartung des elektrischen Antriebs.

Bei Elektroautos senken sich die reinen Wartungs- und Reparaturkosten um bis zu 35 %.[18] Dies basiert auf weniger Verschleiss der Bremsanlage, einfacheren Getriebe und der höheren Lebensdauer elektronischer Geräte, die ohne bewegliche Teile auskommen.

Nach Angaben und Garantie der E-FORCE ONE AG beträgt die Lebensdauer der Batterie (80 % Restkapazität) bis zu 2000 Zyklen innerhalb 6 Jahren. Dieser Wert dient als Richtwert für diesen Bericht. Ein kompletter Batteriewechsel (Batteriezellen und Arbeit) kostet 150000CHF. Die Betriebskosten [CHF/km] der Batterie sind direkt von den gefahrenen Kilometer innerhalb der Garantiezeit abhängig. Bei hoher Kilometerleistung sinken die Betriebskosten für die Batterie des Elektrolastwagen. Im folgenden ein Beispiel mit 500000 km innerhalb den 6 Jahren:

$$\text{Batteriewechselkosten [CHF/km]} = 150000 \text{ CHF} / 500000 \text{ km} = 0.3 \text{ CHF/km} \quad (5.7)$$

Dieser Wert für die Betriebskosten ist nur eine Hochrechnung und direkt auf Angaben der Lebensdauer der Batteriezellen gestützt, welche erst noch verifiziert werden müssen.

Im Dieselfahrzeug hat der Einsatz von AdBlue für die Abgasreduktionssysteme eine positive Auswirkung auf die Betriebskosten. Der Verbrauch entspricht circa 5 % vom Kraftstoffverbrauch und die Kosten betragen unter 50 Rp./l, somit weniger als $\frac{1}{3}$ des Dieselpreises.[7] Dies macht insgesamt etwas mehr als 1 Rp./km aus, womit es sich um einen vernachlässigbaren Anteil handelt.

Kapitel 6

Fazit

Der elektrische Lastwagen E-FORCE besitzt ein hocheffizientes Antriebskonzept. Bei maximaler Zuladung, das heisst einem Gesamtgewicht von 18 t, kann mit einem Durchschnittsverbrauch von 83 kWh/100km beziehungsweise einem Dieselläquivalenz von 8.41/100km gerechnet werden. Im Vergleich dazu verbraucht der Diesellastwagen 27.51/100km. Je mehr Verkehr herrscht bzw. je kleiner die Durchschnittsgeschwindigkeit ist, desto grösser ist das Einsparungspotenzial. In der Stadt wurde 5-mal weniger Energie verbraucht. Auf der Autobahn konnte ein 2.2-fache Verbesserung gemessen werden. Der Anteil der Rekuperation betrug auf der Route 1 in der Stadt knapp 35 %, im Überland 27 % und auf der Autobahn 10 %.

Ein Problem ist zurzeit noch das erhöhte Leergewicht des E-FORCE. Im Vergleich zum Originalfahrzeug muss auf rund 2 t an Zuladung verzichtet werden. Die Motor- und Getriebeeinheit spart gegenüber dem Diesel an Gewicht und Platz ein, welcher aber durch die beiden Batteriepacks mehr als kompensiert wird. Dagegen wird sich jeder Fahrer ab den durchzugsstarken Elektromotoren freuen, mit welchem er seine Mitstreiter auf der Startgeraden stehen lässt.

Dank des sparsamen und emissionsneutralen Antriebs ist der elektrische Lastwagen von den leistungsabhängigen Schwervekehrsabgaben (LSVA) befreit. Zusammen mit den kleineren Betriebskosten für den Strom (als Kraftstoff) macht dies eine Differenz von mehr als 70 Rp./km zwischen den beiden Fahrzeugen aus. Für einen Vergleich der Gesamtbetriebskosten müssen konkrete Werte für Investitions-, Wartungs- und Reparaturkosten ergänzt werden. Dazu braucht es unter anderem Daten zur Lebensdauer der Batterie, welche in diesem Einsatz noch nicht verifiziert sind.

Nebenbei schneidet das elektrische Fahrzeug in der ökologischen Bilanz (Well-to-Wheel) mindestens doppelt so gut ab wie ein vergleichbares Dieselfahrzeug. Die Herstellung des Stromes ist entscheidend und dies unterscheidet sich innerhalb Europas stark. Mit zertifiziertem Schweizer Strom (aus Wasserkraft) stösst der E-FORCE nur 7.7 gCO₂/km aus, hingegen mit dem Strommix aus Deutschland 463 gCO₂/km. Der Diesellastwagen verursacht 876 gCO₂/km. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Fahrzeugen macht die grosse Batterie des E-FORCE. Diese belastet die CO₂-Bilanz zusätzlich mit ungefähr 48 gCO₂/km. Ausserdem müssen für eine vollständige Ökobilanz die ökologischen Kosten der Strasse und des Fahrzeugs inklusive Batterie addiert werden, welche aber keinen weiteren Einfluss auf den Vergleich der Fahrzeuge untereinander haben.

Anhang A

Rohdaten Verbrauchsmessungen

A.1 E-FORCE Rohdaten von 1. Fahrt

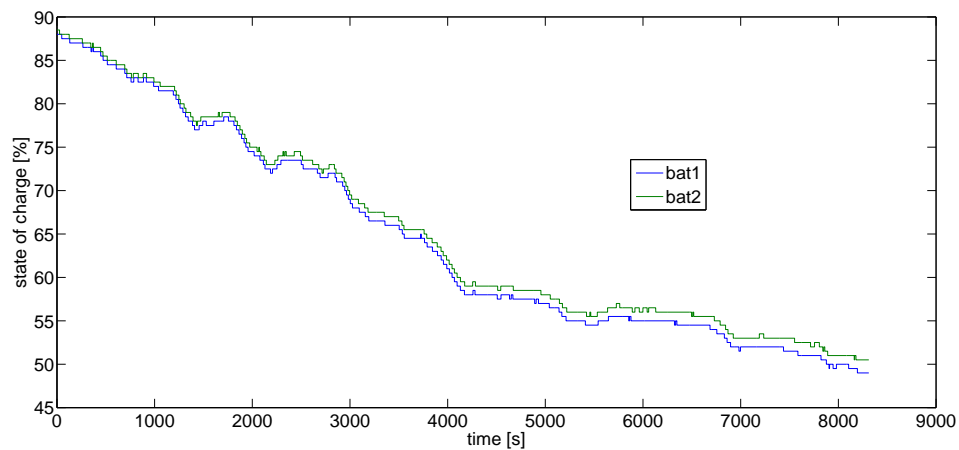


Abbildung A.1: Batterieladestand

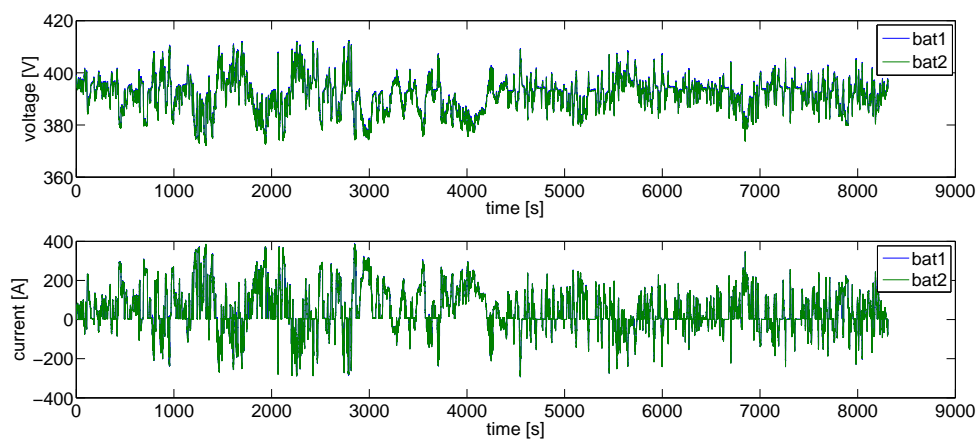


Abbildung A.2: Batterie Spannungs- und Stromverlauf

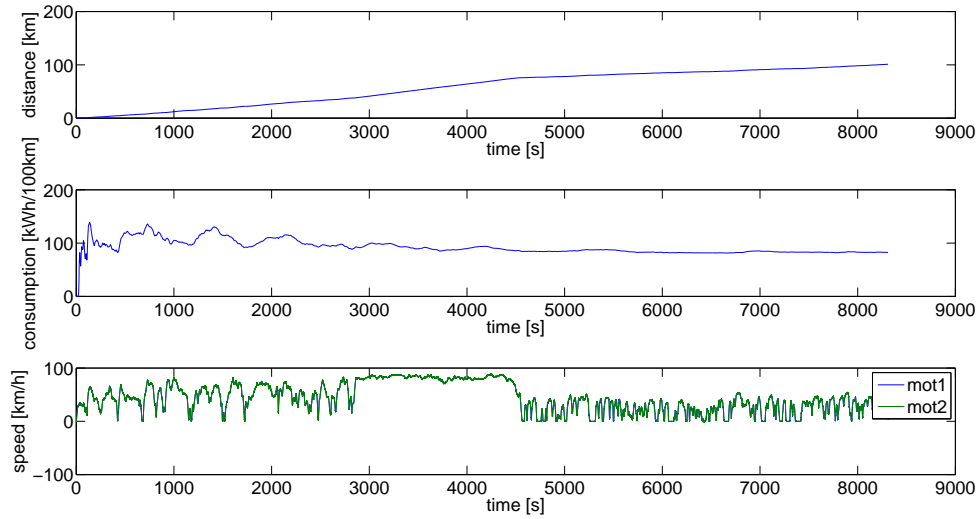


Abbildung A.3: Distanz- und Geschwindigkeitsprofil, Verbrauch pro 100 km

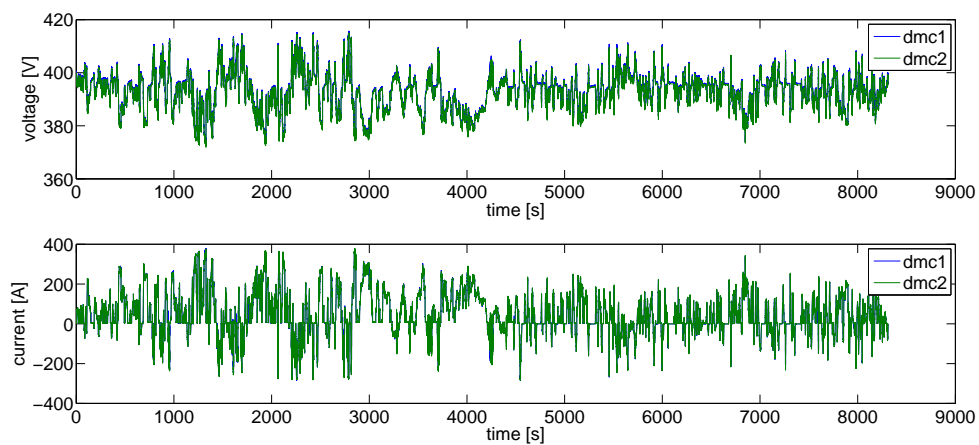


Abbildung A.4: Motoren Spannungs- und Stromverlauf

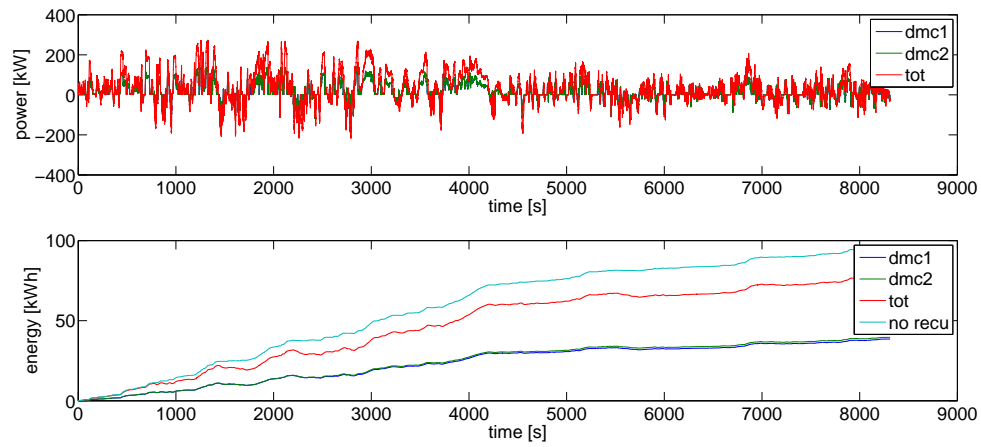


Abbildung A.5: Motoren Leistungs- und Energieverlauf

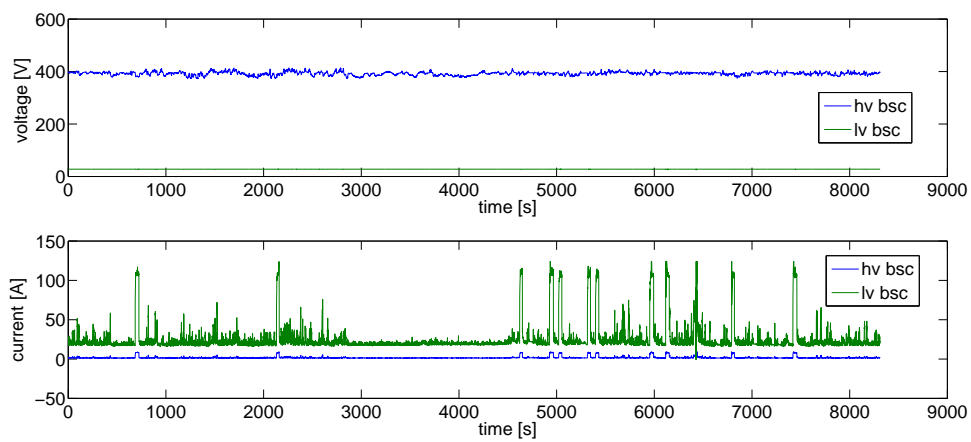


Abbildung A.6: Gleichrichter Spannungs- und Stromverlauf

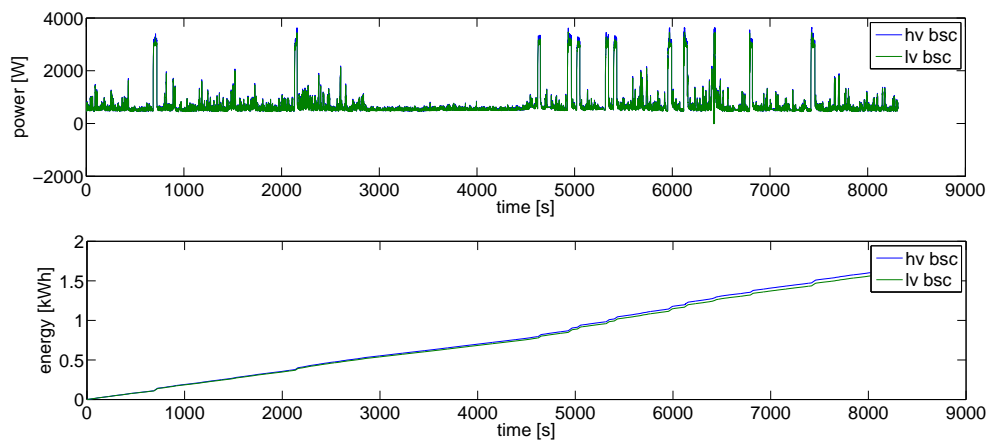


Abbildung A.7: Gleichrichter Leistungs- und Energieverlauf

A.2 Iveco Rohdaten von 2. Fahrt

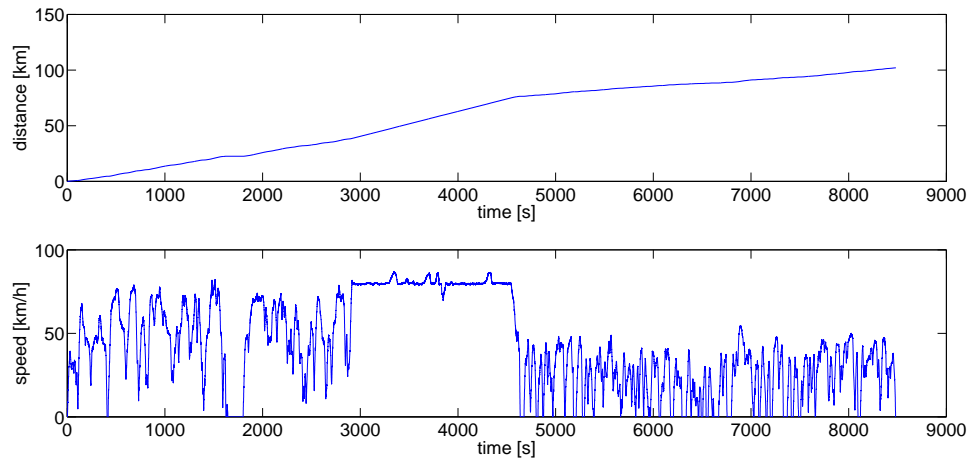


Abbildung A.8: Distanz- und Geschwindigkeitsprofil

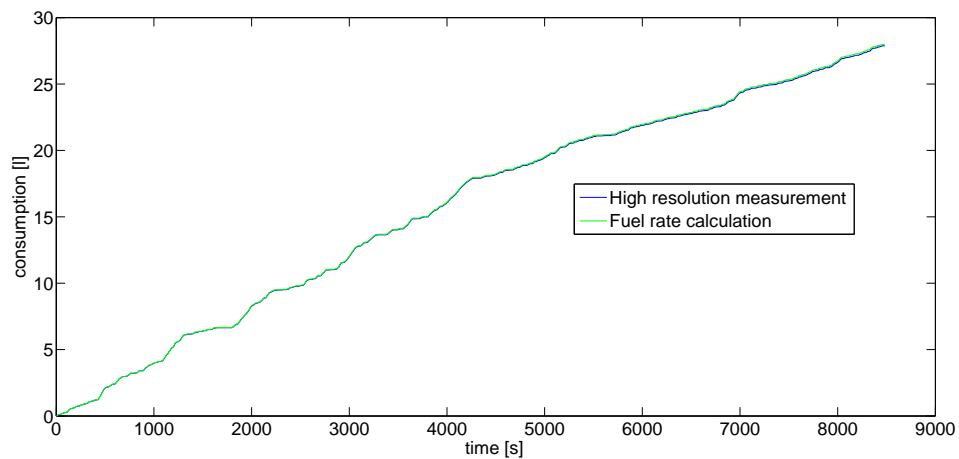


Abbildung A.9: Treibstoffverbrauch in Liter

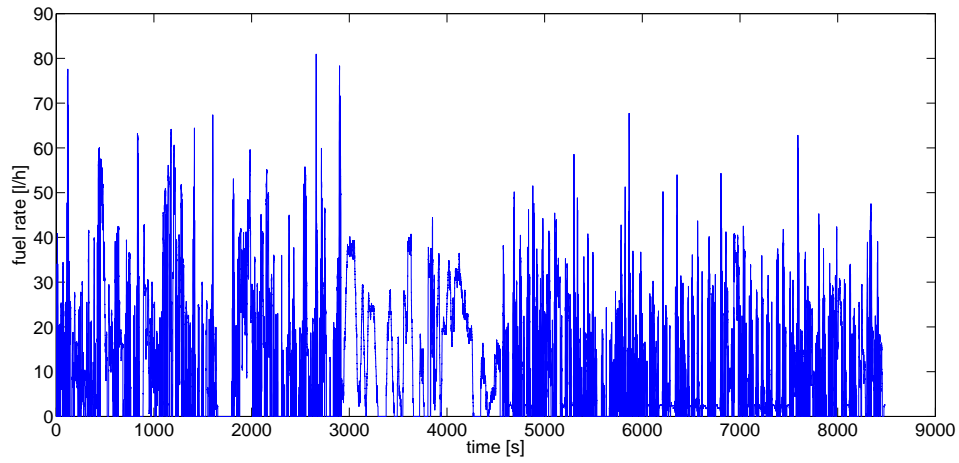


Abbildung A.10: instantaner Treibstoffverbrauch

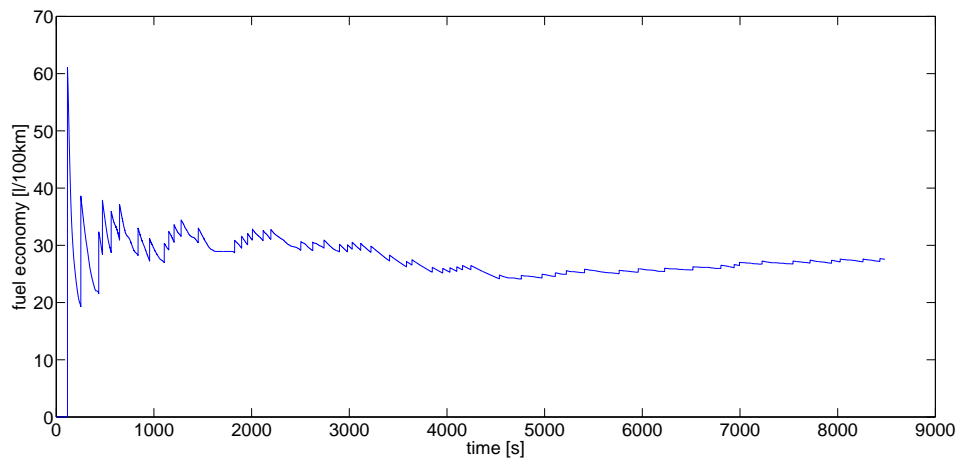


Abbildung A.11: Treibstoffverbrauch im Durchschnitt pro 100 km

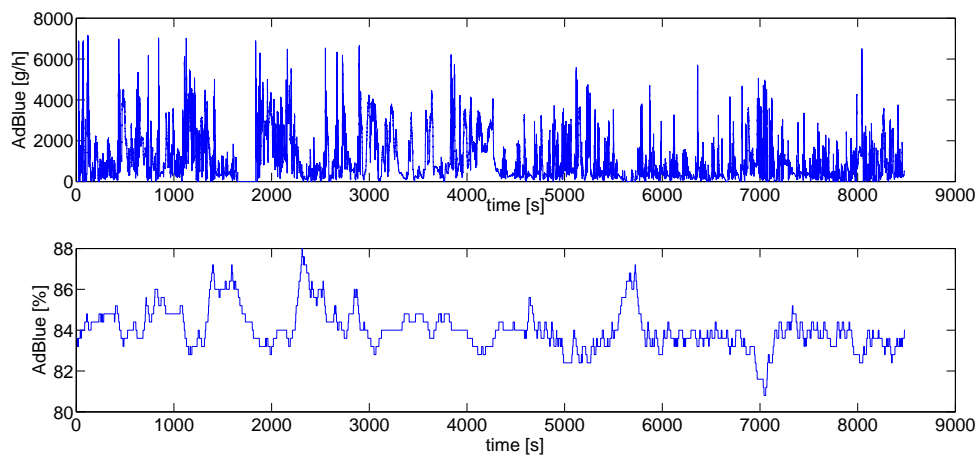


Abbildung A.12: AdBlue Verbrauch und Tanklevelanzeige

Literaturverzeichnis

- [1] Eco-fahrertraining: Sprit sparen dank moderner fahrweise. <http://www.auto.de/magazin/showArticle/article/28072/Eco-Fahrertraining-Sprit-sparen-dank-moderner-Fahrweise>, 09 2009.
- [2] Die ökobilanz von lithium-ionen-akkus für elektroautos. Technical report, EMPA, 08 2010.
- [3] Emission standards european union. <https://www.dieselnet.com/standards/eu/>, 07 2014.
- [4] New stralis hi-way technische beschreibung euro vi. Technical report, Iveco AG, 2014.
- [5] Total cost of ownership. <http://www.iveco.com/switzerland-de/neufahrzeuge/pages/stralis-hi-way-total-cost-of-ownership.aspx>, 07 2014.
- [6] Verkehr und klima. <http://www.uvek.admin.ch/verkehrspolitikdesbundes/02767/02879/?lang=de>, 07 2014.
- [7] Was ist adblue? <http://schweiz.air1.info/de/all-about-adblue/what-is-adblue/>, 07 2014.
- [8] Rolf Widmer Patrick Wäger Anna Stamp Rainer Zah Hans-Jörg Althaus Dominic A. Notter, Marcel Gauch. Contribution of li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles, 2010. notter.
- [9] Eidgenössisches Finanzdepartement EFD. Lsva übersicht leistungsabhängige schwerverkehrsabgabe, 03 2013.
- [10] Eidgenössische Elektrizitätskommission. Strompreise 2013: Im durchschnitt sinken die tarife für haushalte und gewerbebetriebe um 1 prozent. <https://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=de&msg-id=45883>, 07 2014.
- [11] Dr. Rolf Frischknecht. Königsweg oder sackgasse? das elektroauto in der ökobilanz, 01 2011. frisch.
- [12] Bundesamt für Statistik (BFS). Treibstoff - jahresdurchschnittspreise pro liter in franken.
- [13] Christian Bauer (PSI) Hans-Jörg Althaus (Empa). Gegenüberstellung verschiedener aktueller schweizer ökobilanzstudien im bereich elektromobilität, 11 2011.
- [14] Jan Hanusch Ulrich Höpfner Udo Lambrecht Martin Pehnt Hinrich Helms, Julius Jöhrens. Umbrella umweltbilanzen elektromobilität, 2011.
- [15] Petra Icha. Entwicklung der spezifischen kohlendioxid- emissionen des deutschen strommix in den jahren 1990 bis 2012. Technical report, Umweltbundesamt, 07 2013.
- [16] A. WENZEL J. SPITZER L. CANELLA A. ENGEL M. SCHMUCK-S. KOLLER M. BEERMANN, G. JUNGMEIER. Quo vadis elektroauto? grundlagen einer road map für die einföhrung von elektro-fahrzeugen in österreich, 04 2010.
- [17] Daniel Marti. Kraftstoffverbrauchsmessung euro 6. Technical report, Iveco AG, 2014.

- [18] Deutsche Presse-Agentur. Elektroautos punkten in der Werkstatt. <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/studie-zu-wartungskosten-elektroautos-punkten-in-der-werkstatt-6146082.html>, 07 2014.
- [19] David RICKEARD (CONCAWE) Werner WEINDORF (LBST) Robert EDWARDS (JRC), Jean-Francois LARIVÉ (CONCAWE). Well-to-tank report version 4.0 jec well-to-wheels analysis. Technical report, 2013.
- [20] Karin Flury Rolf Frischknecht, René Itten. Treibhausgas-emissionen der schweizer strommixe. Technical report, Bundesamt für Umwelt BAFU, 2012.

Abbildungsverzeichnis

3.1	E-FORCE - Messung des Gesamtgewichts	5
3.2	Iveco - Messung des Gesamtgewichts	6
3.3	Kartenansicht zur Route 1	7
3.4	Kartenansicht zur Route 2	7
5.1	Vergleich der Durchschnittsgeschwindigkeiten nach Streckenprofil	11
5.2	Verbrauch an Diesel pro 100 km unterteilt nach Streckenprofil (Dieseläquivalent) .	12
5.3	Faktor der Effizienz des Elektrolastwagens im Vergleich zum Diesellastwagen . . .	12
5.4	Rekuperationsanteil unterteilt nach Streckenprofil	13
5.5	Verbrauch an Diesel pro 100 km (Dieseläquivalent)	14
5.6	Well-to-Wheel CO ₂ -Bilanz pro kWh, Quelle [20], [15], [19]	15
5.7	Well-to-Wheel CO ₂ -Bilanz pro km, Quelle [20], [15], [19]	16
5.8	Gesamtbetriebskosten eines Diesellastwagens, Quelle [5]	17
A.1	Batterieladestand	21
A.2	Batterie Spannungs- und Stromverlauf	21
A.3	Distanz- und Geschwindigkeitsprofil, Verbrauch pro 100 km	22
A.4	Motoren Spannungs- und Stromverlauf	22
A.5	Motoren Leistungs- und Energieverlauf	23
A.6	Gleichrichter Spannungs- und Stromverlauf	23
A.7	Gleichrichter Leistungs- und Energieverlauf	23
A.8	Distanz- und Geschwindigkeitsprofil	25
A.9	Treibstoffverbrauch in Liter	25
A.10	instantaner Treibstoffverbrauch	26
A.11	Treibstoffverbrauch im Durchschnitt pro 100 km	26
A.12	AdBlue Verbrauch und Tanklevelanzeige	26