



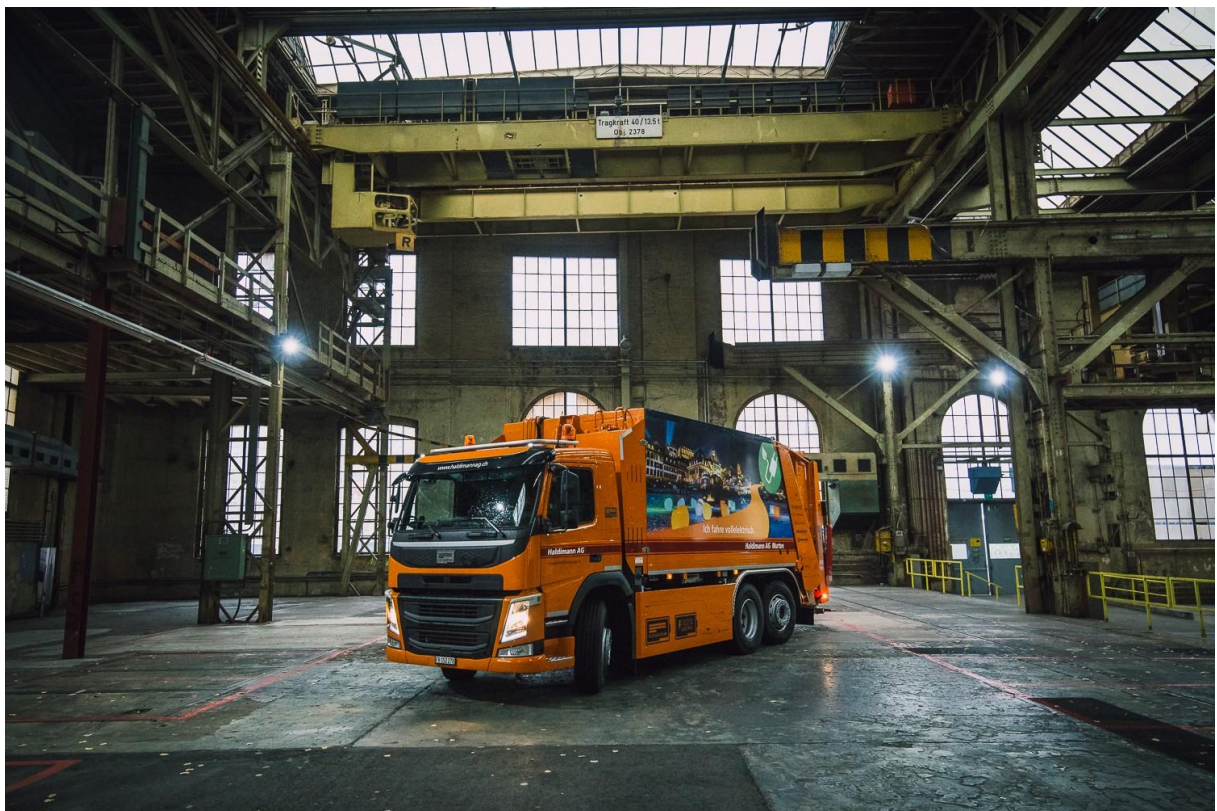
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Cleantech

Schlussbericht vom 17. Dezember 2019

Ökologisches und leises 26-Tonnen- Elektro- Wertstoff-Sammelfahrzeug (EWS)



© Designwerk GmbH 2017



Datum: 17. Dezember 2019

Ort: Winterthur

Subventionsgeberin:

Schweizerische Eidgenossenschaft,
handelnd durch das
Bundesamt für Energie BFE
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger:

Designwerk GmbH
Lagerplatz 27, 8400 Winterthur
www.designwerk.com

Volvo Schweiz (Group) AG
Lindenstrasse 6, 8108 Dällikon
www.volvotrucks.ch

Contena-Ochsner AG
Steinackerstrasse 31, 8902 Urdorf
www.contena-ochsner.ch

Haldimann AG
Grand Ferme 8, Postfach 242,
3280 Murten
www.haldimannag.ch

ZHAW Zürcher Hochschule für
angewandte Wissenschaften
Lagerplatz 22, 8400 Winterthur
www.zhaw.ch



Autoren:

Duga Hoti, Designwerk Products AG, duga.hoti@futuricum.com

Fabian Wyssmann, Designwerk GmbH, fabian.wyssmann@design-werk.ch

Frank Loacker, Designwerk GmbH, frank.loacker@design-werk.ch

Silvan Rohrbach, Designwerk GmbH, silvan.rohrbach@design-werk.ch

Tobias Wülser, Designwerk GmbH, tobias.wuelser@design-werk.ch

Vivien Dettwiler, Designwerk GmbH, vivien.dettwiler@design-werk.ch

BFE-Programmleitung: Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

BFE-Projektbegleitung: Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501366-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Ziel dieses Projektes war es, den Einsatz elektrisch betriebener Wertstoff-Sammelfahrzeuge auf Schweizer Strassen zu erproben und dabei deren Wirtschaftlichkeit und ökologisch positiven Einfluss zu untersuchen. Es wurden dazu vier Prototypen entwickelt, aufgebaut und über ein Jahr im üblichen Sammelbetrieb bei zwei städtischen und zwei privat geführten Unternehmen eingesetzt und getestet. Die Überwachung und Aufzeichnung der Fahrdaten über ein eigens dafür entwickeltes Online-Monitoringsystem, durchgeführte Messungen und eingeholte Meinungen bestätigen die aufgestellten Hypothesen: Die Fahrzeuge können die Anforderungen an die nötige Reichweite einhalten, vermindern die Lärm- und Schadstoffbelastung erheblich und geniessen positiven Zuspruch von der Bevölkerung sowie den Einsatzbetrieben.

Neben den technischen Herausforderungen neuer Antriebsarten stellt sich auch immer die Frage nach der Wirtschaftlichkeit. Die deutlich höheren Anschaffungskosten der vier Prototypen stellen heute die höchste Hürde beim Kauf neuer Fahrzeuge dar. Das Leuchtturmprojekt sollte aufzeigen, dass die in der Theorie proklamierten tieferen Unterhaltskosten der elektrisch betriebenen Wertstoff-Sammelfahrzeuge auch in der Praxis umsetzbar sind. Die Resultate der aufgezeichneten Fahrdaten legen einerseits einen deutlich tieferen Verbrauch der Futuricum-Fahrzeuge dar. Andererseits veranschaulichen die seit knapp zwei Jahren im Einsatz stehenden Fahrzeuge, dass die Unterhaltskosten zwar tatsächlich auch in der Praxis minimiert werden können, diese werden jedoch von den teureren elektrischen Hochvolt-Komponenten wieder kompensiert. Insgesamt resultierten in den ersten beiden Betriebsjahren aller vier Prototypen im Gegensatz zu einem Dieselfahrzeug leicht kleinere Wartungsaufwände für die Fahrzeughalter. In einem der vier Fälle zeigte sich der elektrische LKW von Futuricum als das zuverlässigste Fahrzeug. Dies in einem Betrieb, der bis auf die Ausnahme eines Hybrid-Fahrzeuges aus Diesel-Modellen besteht.

Die im Laufe des Projektes eingegangenen Partnerschaften mit Volvo Schweiz (Group) AG und der Contena-Ochsner AG konnten über die letzten Monate nochmals vertieft werden. Diese Partnerschaften waren nicht nur für die Umsetzung des Leuchtturmprojektes notwendig, sondern sind auch in Zukunft wichtige Pfeiler für die Weiterführung des Leuchtturmprojektes. Die vier Prototypen nutzen das breite Servicenetz der Partner noch weiter aus und können so von der Erfahrung aller Partner des Leuchtturmprojektes noch weiter profitieren.

Aus verschiedensten Gesprächen mit Personen rund um die Fahrzeughalter (Bevölkerung, Mitarbeiter, Fahrer, etc.) kommt deutlich zum Ausdruck, dass die entwickelten Prototypen die wahrgenommenen Lärmemissionen reduzieren können. Dadurch werden die Umwelt, Bewohner sowie die Arbeiter, die das Fahrzeug bedienen, weniger belastet. Die lokalen CO₂- und weitere Schadstoff-Emissionen konnten gänzlich eliminiert werden und tragen ebenfalls stark zur positiven Veränderung der Umwelt rund um die Bevölkerung und der Fahrzeughalter bei.

Die vier Prototypen des Leuchtturmprojektes lieferten wichtige Daten und Erkenntnisse zum Ausbau weiterer elektrisch angetriebener Nutzfahrzeuge. Aus dem Projekt geht die neue Firma Designwerk Products AG hervor, die sich dem Bau von elektrischen Nutzfahrzeugen verschrieben hat. Seit dem Bau des ersten Prototyps folgte eine elektrische 40-Tonnen-Sattelzugmaschine, Hakengeräte und weitere in der Planung befindende Fahrzeuge. Die Kosten konnten seit dem Bau der ersten Prototypen bis zum aktuellen Zeitpunkt um etwa 10–15% reduziert werden. Diese positive Entwicklung spürt auch die Bevölkerung, die sich zunehmend interessierter an elektrischen Wertstoff-Sammelfahrzeugen zeigen.

Résumé

L'objectif de ce projet était de tester l'utilisation des véhicules de collecte de matériaux recyclables sur les routes suisses et d'analyser leur rentabilité ainsi que leur influence positive sur l'environnement. Pour ceci, quatre prototypes ont été développés, construits, puis mis en service et testés pendant plus d'un an dans le cadre d'une collecte normale, par deux entreprises municipales et deux entreprises privées. La surveillance et l'enregistrement constants des données de trajet par un système de contrôle en ligne de conception propre, ainsi que des mesures instaurées et des avis recueillis confirment les hypothèses formulées : Les véhicules satisfont aux rayons d'action nécessaire, réduisent de manière conséquente les nuisances sonores et la pollution, et sont perçus très favorablement par la population et les entreprises locataires de services. En outre, il a été possible de démontrer que ces véhicules sont capables dès aujourd'hui d'affronter la concurrence et que leur supplément de prix d'achat peut être amorti sur la durée de vie. L'infrastructure, qui est la plus fréquemment utilisée en entreprise, évite un investissement coûteux dans la structure de chargement. Les partenariats lancés durant le projet garantissent l'assistance des camions électriques modifiés, l'utilisation ultérieure de la technologie sur toute la durée de vie des véhicules et permettent ainsi une poursuite judicieuse du projet sur le plan économique.

D'une part, les données de conduite enregistrées montrent une consommation nettement inférieure des véhicules Futuricum. D'autre part, les véhicules utilisés depuis près de deux ans montrent que les coûts d'entretien peuvent être réduits au minimum dans la pratique, mais qu'ils sont compensés par les composants électriques haute tension plus coûteux. Alors, au cours des deux premières années de fonctionnement des quatre prototypes, il n'y a pas eu de coûts d'entretien majeurs pour les propriétaires des véhicules. Dans l'un des quatre cas, le camion électrique de Futuricum s'est montré le plus fiable des véhicules disponibles pour l'exploitation, qui se compose des modèles diesel à part d'un véhicule hybride. Les partenariats conclus avec Volvo Suisse (Groupe) SA et Contena-Ochsner SA dans le cadre du projet se sont encore renforcés ces derniers mois. Ces partenariats étaient non seulement nécessaires pour la réalisation du projet de phare, mais ils constituent également un pilier important pour la poursuite. Les quatre prototypes s'appuient sur le vaste réseau de services des partenaires et peuvent ainsi bénéficier de leur expérience dans le projet phare.

D'après diverses discussions autour des propriétaires de véhicules (population, employés, conducteurs, etc.), il est clair que les prototypes développés pourraient réduire les émissions sonores perçues. Cela réduit la pression sur les résidents et les travailleurs qui conduisent le véhicule. Les émissions locales de CO₂ ont été éliminées complètement et contribuent également à des changements positifs pour la population et les propriétaires de véhicules.

Les quatre prototypes du projet de phare ont apporté d'importantes données et conclusions sur l'expansion d'autres véhicules industriels à propulsion électrique. La nouvelle entreprise Designwerk Products AG, qui se destine à la construction de véhicules électriques, est le résultat de ce projet. Depuis la construction du premier prototype, un tracteur de semi-remorque de 40 tonnes, une machine de crochet et d'autres véhicules en phase de planification du projet ont suivi. Depuis la construction des premiers prototypes jusqu'à aujourd'hui, les coûts ont été réduits d'environ 10 à 15 %. Cette évolution positive est également ressentie par la population, qui s'intéresse de plus en plus aux véhicules électriques de collecte de matériaux recyclables.



Abstract

The aim of this project was to test the use of electrically powered refuse collection vehicles on Swiss roads and to investigate their economic efficiency and positive ecological impact. To this end, four prototypes were developed, assembled and then used and tested over a period of one year in normal collection operations at two municipal and two privately owned companies. The continuous monitoring and recording of the driving data via a specially developed online monitoring system, the measurements taken and the opinions surveyed confirm the hypotheses put forward: The vehicles are able to meet the required coverage, significantly reduce noise and pollution levels, and receive a positive reception from the general population and the hirers.

In addition to the technical challenges posed by new drive technologies, the question of cost-effectiveness also arises. The significantly higher acquisition costs of the four prototypes represent the highest hurdle today when purchasing new vehicles. The lighthouse project was intended to demonstrate that the lower maintenance costs proclaimed in theory for electrically powered recyclables collection vehicles can also be implemented in practice. The results of the recorded driving data show on one hand a significantly lower consumption of Futuricum vehicles. On the other hand, the vehicles that have been in use for almost two years demonstrate that although maintenance costs can actually be minimized in practice, they are compensated by the more expensive high-voltage electrical components. Still, in the first two years of operation of all four prototypes, there were no major maintenance costs for vehicle owners. In one of the four cases, the electric truck from Futuricum proved to be the most reliable vehicle. This in an operation that consists of diesel models with the exception of one hybrid vehicle.

The partnerships entered into with Volvo Switzerland (Group) AG and Contena-Ochsner AG in the course of the project have been further intensified in recent months. These partnerships were not only necessary for the implementation of the lighthouse project but will also be important pillars for the continuation of the lighthouse project in the future. The four prototypes make even greater use of the partners' broad service network and can thus profit even more from the experience of all partners in the lighthouse project.

From various discussions with people around the vehicle owners (population, employees, drivers, etc.), it is clearly expressed that the developed prototypes can reduce the perceived noise emissions. This means that the environment, residents and workers operating the vehicle are less affected. The local CO₂ and other pollutant emissions have been completely eliminated and also contribute greatly to the positive change in the environment around the population and vehicle owners.

The four prototypes of the lighthouse project provided important data and findings on the expansion of other electrically powered commercial vehicles. The new company Designwerk Products AG, which is dedicated to the construction of electric commercial vehicles, emerged from the project. Since the first prototype was built, a 40-tonne electric tractor truck followed, as did hook equipment and other vehicles currently in the planning stage. Costs have been reduced by about 10 to 15% since the first prototypes were built. This positive development is also being felt by the population, who are increasingly interested in electric refuse collection vehicles.



Take-home messages

- Die aufgezeichneten Verbrauchswerte der vier Prototypen haben einen durchschnittlichen Verbrauchswert von 190 kWh pro 100 km ergeben. Das errechnete Dieseläquivalent ergibt einen Verbrauchswert von 19.6 l/100km.
- Die Kosten beim Bau eines elektrischen Wertstoffsammelfahrzeug konnten von den ersten vier Prototypen bis zur heutigen Serienproduktion um 10–15% reduziert werden.
- Insgesamt haben die vier EWS-Prototypen bis zum heutigen Stand über 100'000 km zurückgelegt.
- Das Leuchtturmprojekt hat gezeigt, dass in der Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen, insbesondere bei den Wertstoff-Sammelfahrzeugen, ein grosses Potenzial liegt.
- Die vier EWS-Prototypen konnten bisher 1324 Tonnen CO₂-Emissionen gegenüber vier Diesel-Wertstoffsammelfahrzeugen sparen.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
Résumé.....	5
Abstract	6
Take-home messages	7
Inhaltsverzeichnis	8
Ausgangslage	11
Potenzial der Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge	11
Projektarbeit als Durchführungsgrundlage	11
Über die verantwortliche Projektpartnerin	12
Über die involvierten Projektpartnerinnen und -partner	12
Ziele des Projektes	13
Ziele des Leuchtturmprojekts	13
Ziele gemäss Projekthandbuch	13
Grundlagen – Rahmenbedingungen	14
Allgemeine Anforderungen an die Kehrrichtlogistik.....	14
Bedürfnisse von privatwirtschaftlichen Kehrrichtlogistikunternehmen	14
Anforderungen an ein elektrisches Wertstoff-Sammelfahrzeug.....	14
Sicherheit und Ergonomie im Sinne des Betriebspersonals	15
Erwartete Anforderungen an die Reichweite.....	15
Marktumfeld der Schweizer Kehrrichtlogistik	16
Stand der Technik und bestehende Lösungen	17
Konzept – Fahrzeugbeschrieb	19
Chassis als Grundlage	19
CAN-Bus.....	20
Pressmüllaufbau des Fahrzeugs.....	20
Systemkonzept Gesamtfahrzeug	20
Getriebe	22
Befestigungspunkte am Chassis.....	22
Keine Schaltvorgänge	23
Modularität.....	25
Redundanz	26
Tiefes Gewicht.....	26
Entwicklung	27
Zusammenfassung	29
Das Hochvoltkonzept in der Übersicht	31
Sicherheitskonzept Gesamtfahrzeug	32



Kühlkonzept und Klimatisierung	33
Selektion der Batterietechnologie.....	33
Verwendetes Batteriesystem.....	34
Verwendetes Batterie-Management-System (BMS)	35
Verwendete Ladetechnologie	37
Fahrzeugzulassung und Tests	38
Monitoringkonzept der Fahrzeuge.....	39
Funktionalität des Monitoring-Systems	39
Vorgehen / Methode	41
Entwicklung Mechanik	41
Entwicklung Hardware und Verkabelung	41
Entwicklung Batterie	43
Entwicklung Software	44
Ergebnisse	45
Erfahrungen aus dem Bau der Fahrzeuge	45
Auswertung der Fahrdaten	46
Batterie	47
Energieverbrauch	50
Topografie	50
Witterung / Temperatur	53
Nebenantrieb	54
Zusammenfassung	56
Gesamtkosten des Betriebs über die gesamte Lebensdauer	58
Lebenszyklusanalyse	63
Lärmmessung	66
Konzept zur Lärmmessung	66
Messbedingungen während der Lärmmessung	66
Durchführung der Lärmmessung.....	67
Resultate der Lärmmessung	67
Akzeptanzerhebung und Erfahrungsberichte	71
Wahrnehmung der Bevölkerung	75
Kommunikation	77
Kommunikationskonzept des Projekts	77
Umgesetzte Kommunikationsmassnahmen.....	77
Was hat das Leuchtturmprojekt bewirkt?	81



Ausblick.....	83
Diskussion	90
Schlussfolgerungen	94
Anhang	96
Anhang A – Beispielbericht Monitoringportal	96
Anhang B – Auswertung Fahrdaten	100
Anhang C – Medienspiegel	101
Anhang D – Emissionsvergleich.....	103
Anhang E – Interview	104
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	117
Abbildungsverzeichnis.....	117
Tabellenverzeichnis.....	119
Abkürzungsverzeichnis	120



Ausgangslage

Am Anfang war eine Idee. Sie basierte auf der Fragestellung, in welchem Einsatzfeld höchstmögliches und unerschlossenes Potenzial für die Elektrifizierung von Fahrzeugen besteht. Dies unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit zum Zeitpunkt der Fragestellung, der anfallenden Betriebskosten über den Lebenszyklus des Fahrzeugs sowie der Reduktion des Energieaufwands und von Schadstoffemissionen. Die Frage wurde von Martin A. Meier, einem Architekten, Unternehmer und zu diesem Zeitpunkt MBA-Studierenden, sowie Tobias Wülser, Industrie Designer und Gründer der Designwerk GmbH, als auch dessen Umfeld, mit der Elektrifizierung von Wertstoff-Sammelfahrzeugen beantwortet.

Potenzial der Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge

Im Fernverkehr sind Nullemissions-LKW gegenüber denen mit Verbrennungsmotoren derzeit noch nicht konkurrenzfähig. Ein Elektro-Wertstoff-Sammelfahrzeug (EWS) legt in seinem Einsatzspektrum kürzere Routen als andere LKW zurück – hier kann die Elektrifizierung Vorteile bringen. Seine Routen sind beschränkt und definiert. Entsprechend kann der Energieaufwand genauer ermittelt und damit die Batteriegrösse definiert werden. Leerfahrten bei der Anfahrt zur Entsorgung, wie sie in der Kehr- und Recyclinglogistik üblich sind, können sich dabei positiv auf die Reichweite auswirken, da die Nutzlast nicht konstant ausgeschöpft wird. Zudem müssen die Fahrzeuge zum Sammeln von Wertstoffen und Abfällen häufig anhalten. In diesem *Stop-and-go-Betrieb* erweisen sich rekuperierende Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren als vorteilhaft. Die Energie, die bei der Bremsung des Fahrzeugs entsteht, kann zu grossen Teilen zurückgewonnen werden. Gleichzeitig erlauben Elektromotoren – trotz der heterogenen Schweizer Topographie – ein schnelles und leises Beschleunigen. Der leise Betrieb kann dabei sensible Wohn- und Lebensräume von Lärmemissionen entlasten. Für Kehrverbrennungsanlagen (KVA) besteht zudem die Möglichkeit, die Traktionsbatterien mit selbst produziertem Strom zu laden.

Projektarbeit als Durchführungsgrundlage

Bald lag dem Projekt mehr als eine Idee zu Grunde. Den theoretischen Nachweis der Wirtschaftlichkeit solcher Fahrzeuge erbringt eine am 28. November 2014 vorgelegte EMBA-Projektarbeit von Martin A. Meier. Die Arbeit verdeutlicht, dass durch ein «intelligentes» Fuhrparkmanagement und festgelegten Strecken von Elektro-Wertstoff-Sammelfahrzeugen massiv an CO₂-Emissionen gespart werden kann. Gleichzeitig zeigt die Arbeit jedoch auch auf, dass die Anschaffung solcher Fahrzeuge noch nicht wirtschaftlich ist und es Investitionen sowie Innovationen seitens der Hersteller verlangt.

Um den entsprechenden Tatbeweis erbringen zu können, beginnt die Designwerk GmbH in der Folge mit der Planung der Entwicklung von vier 26-Tonnen-EWS. Bei der Umsetzung des Projekts knüpft die Unternehmung an Erfahrungen aus dem Bau schwerer Nutzfahrzeuge und weiterer Fahrzeugelektrifizierungen an. Bereits im Jahre 2011 wurde an der Entwicklung eines 18-Tonnen-Elektrolastwagens gearbeitet. Die Firma Feldschlösschen betreibt seit 2013 erfolgreich das erste in der Schweiz hergestellte 18-Tonnen-Elektronutzfahrzeug. Kurz darauf folgten weitere Fahrzeuge für Coop, Lidl und Aldi. Auf die Entwicklung und den Bau dieser Fahrzeuge baut die Erfahrung der Designwerk GmbH auf und nutzt diese für die EWS-Fahrzeuge des Leuchtturmprojektes. Gleichzeitig greift sie auf ein Netzwerk von Partnerunternehmen und Forschung zurück.



Über die verantwortliche Projektpartnerin

Die Designwerk GmbH wurde im Jahr 2007 durch Tobias Wülser, Industriedesigner, und Frank Loacker, Ingenieur, gegründet. Die Faszination für Elektromobilität entstand bei den Pionieren während ihrer 80-tägigen, vollelektrischen Weltrekordumrundung mit dem eigens dafür entwickelten Kabinenmotorrad Zerotracer. Beflügelt von ihrem Weltrekord und der anhaltenden Begeisterung für die Technologie bauten sie die Unternehmung auf und aus. Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses zählt die Unternehmung bereits mehr als 50 Mitarbeitende.

Das Portfolio des Unternehmens umfasst u.a. die elektrische Auslegung des Postzustellfahrzeugs DXP, die Entwicklungen eines elektrischen Go-Karts und eines 18-Tonnen-LKWs der Marke E-Force wie auch die elektrische Umrüstung eines BMW Isetta. Für den Bau von Fahrzeugen kann die Firma auf Erfahrungen im Bau von individuellen, modularen Batteriesysteme zurückgreifen. Die Unternehmung beliefert zudem führende Fahrzeughersteller und Logistikbetriebe Europas mit mobilen Schnellladegeäten aus eigener Produktion.

Das Leuchtturmprojekt sowie der erforderliche Kapazitätsausbau in der Produktion waren Anlass für die Gründung einer Tochtergesellschaft für die Serienfertigung, den Vertrieb sowie den Service von Eigenprodukten.

Über die involvierten Projektpartnerinnen und -partner

An der Umsetzung des Projekts beteiligen sich auch weitere Partnerinnen und Partner aus der Privatwirtschaft und dem Hochschulumfeld.

Zu den federführenden Projektpartnerinnen gehören initial die Volvo Group (Schweiz) AG als Lieferantin von Fahrzeugen und die Contena-Ochsner AG als Anbieterin von Pressmüllaufbauten.

Die Volvo Group hat sich seit deren Gründung zur grössten Herstellerin schwerer LKW in Europa entwickelt. Volvo ist in 190 Ländern präsent, verfügt über Produktionsstandorte in 19 Ländern und beschäftigt international mehr als 100'000 Mitarbeitende. Nutzfahrzeuge von Volvo zeichnen sich durch ihren Innovationsgrad und ihre Zuverlässigkeit aus. Grundwerte von Volvo sind Qualität, Sicherheit und Umweltschutz.

Die Contena-Ochsner AG ist ein Zusammenschluss der beiden Traditionsfirmen Contena Handels AG und J. Ochsner AG. Sie ist die führende Schweizer Anbieterin von Entsorgungstechnik sowie Pressmüllaufbauten. Das Angebot der Unternehmung umfasst auch Recyclinglösungen, Abroll- und Absetzkipper, Kehrmaschinen, Abfallbehälter und Serviceleistungen. Die Unternehmung gehört zur deutschen Kirchhoff Gruppe und bietet langlebige und leistungsstarke Produkte.

Unterstützt wird das Projekt auch von weiteren Partnern wie der Batteriewerk Schweiz AG, einem assoziierten Unternehmen der Designwerk GmbH, das Lithium-Ionen-Batterien herstellt, Huber und Suhner, als Lösungsanbieterin im Bereich der Verbindungstechnik, sowie der Haldimann AG, die als erste Unternehmung die Futuricum E-LKW in ihren Betrieb aufnahm und ausführlich testete.



Ziele des Projektes

Gemeinsam haben die Projektpartner Ziele für das Gesamtprojekt definiert. Ergänzt werden sie mit weiterführenden Zieldefinitionen im Lastenheft der Designwerk GmbH.

Nachfolgend werden die Ziele des Gesamtprojekts aufgeführt.

Ziele des Leuchtturmprojekts

- Entwicklung eines konkurrenzfähigen und ökologischen Elektro-Wertstoff-Sammelfahrzeuges (EWS), das für die heterogene Topographie der Schweiz geeignet ist und dem wirtschaftlichen Vergleich mit dem Betrieb von konventionellen Fahrzeugen mindestens standhält. Als Vergleichskriterien gelten beispielsweise Betriebs-, Wartungs- und Versicherungskosten.
- Massive Reduktion des CO₂-Ausstosses über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeuges. Angestrebt wird eine CO₂-Reduktion von rund 550 Tonnen pro Fahrzeug über die gesamte Lebensdauer bei Verwendung von in KVA produziertem Strom.
- Lärmreduktion der Wertstoffabfuhr durch den Elektroantrieb und eine elektrisch betriebene Wertstoffpresse, die optional das nächtliche Entsorgen von Industriewertstoffen zur Verkehrsentlastung in Ballungsgebieten ermöglicht.
- Entwicklung und Erprobung eines leistungsstarken Antriebsaggregates, bestehend aus einem neuen Getriebe, welches zukünftig bis zu vier Motoren mit jeweils 125 kW Leistung aufnehmen kann.
- Entwicklung und Erprobung einer Lithium-Ionen-Normbatterie inklusive Batterie-Management-System (BMS), welche auch für weitere Anwendungszwecke eingesetzt werden kann.

Ziele gemäss Projekthandbuch

Im Projekthandbuch der Designwerk GmbH werden zudem die folgenden, weiterführenden Ziele festgehalten:

- Sammeln von Eindrücken in der Bevölkerung bezüglich elektrischen LKW im Bereich der Wertstoffentsorgung.
- Einsatz der E-LKW im öffentlichen Raum, um Messdaten zu erheben sowie den pauschalen Vergleich zu konventionell betriebenen Wertstoffsammelfahrzeugen über längere Zeit zu erhalten.
- Der Entwicklungsprozess soll eine spätere Serienproduktion des E-LKWs begünstigen. Die Entwicklung soll auch die Möglichkeit der Nutzung des Antriebs für ein 40-Tonnen-Fahrzeug als Triebwagen inklusive Anhänger ermöglichen.



Grundlagen – Rahmenbedingungen

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen im Bereich der Kehrlichlogistik sowie der Stand der Technik zu Beginn des Projekts festgehalten.

Allgemeine Anforderungen an die Kehrlichlogistik

Einwohnerinnen und Einwohner von Städten und Gemeinden verlangen nach einer zuverlässigen und sauberen Kehrlichlogistik. Für sie ist die regelmässige und geordnete Sammlung und Entsorgung von Wertstoffen und Abfällen wichtig. Diese muss nicht nur kostengünstig, sondern auch umweltverträglich sein. Für die Erbringung der entsprechenden Leistungen sind die Gemeinden und Städte verantwortlich. Dazu gehören die Sammlung, der Transport und die Behandlung von Kehrlich und Separatabfällen. Dabei sind sie mit dem Spannungsfeld der technischen Machbarkeit, Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und sozialer Verträglichkeit der Kehrlichlogistik ausgesetzt. Das Bedürfnis nach Kehrlichlogistik – und damit nach Kehrlichfahrzeugen – kann somit mit dem gesetzlichen Auftrag und der Deckung der Bedürfnisse von Bürgerinnen und Bürger begründet werden. Bei Ausschreibungen entsprechender Sammelfahrzeuge durch die öffentliche Hand werden grundsätzlich die Bereiche «Praktische Eignung», «Preis» sowie «Garantie, Service und Umwelt» bewertet. Die Gewichtung der einzelnen Kriterien kann je nach Profil des Entscheidungsgremiums abweichen. Eine Energiestadt könnte das Kriterium Ökologie beispielsweise stärker gewichten als andere.

Bedürfnisse von privatwirtschaftlichen Kehrlichlogistikunternehmen

Gemeinde und Städte können die Abfallentsorgung auch auslagern. Entsorgungsleistungen können an Zweck- oder Abfallverbände delegiert oder – abhängig von kantonalen Regelungen – von Privatunternehmen erbracht werden. Das ist insbesondere bei Gemeinden der Fall. Nur knapp ein Zehntel der Gemeinden nimmt die Kehrlichsammlung in Eigenregie vor. Im Gegenzug verfügt mehr als die Hälfte der Städte über eigene Flotten. Die Anforderungen an Fahrzeuge dürften dabei ähnlich sein. Bezüglich der Ökonomie privatwirtschaftlicher Fuhrparks bestehen jedoch weitergehende Bedürfnisse. Als Beispiel dienen Empfehlungen zur Submission der Kehrlichlogistik an Dritte des Kantons Zürich. Diesen zufolge sollten bei Ausschreibungen Mindestanforderungen an die Fuhrparks der Auftragnehmerschaft gestellt werden. Handeln die Gemeinden gemäss Empfehlung, hat die Lufthygiene des Fuhrparks grosse Auswirkungen auf den Erfolg bei der Auftragsvergabe. Vorgeschlagen wird eine Gewichtung des Fuhrparks als Zuschlagskriterium von 20 bis 40%. Die Punktevergabe nach Abgasnormen der Flotte fällt bei Fahrzeugen mit alternativem Antrieb doppelt so hoch aus. Eine möglichst ökologische Fahrzeugflotte zu betreiben, kann also erfolgsentscheidend sein. Deshalb dürfte bei Dienstleistungsunternehmen wirtschaftliches Interesse an alternativ angetriebenen Fahrzeugen bestehen.

Anforderungen an ein elektrisches Wertstoff-Sammelfahrzeug

Im Falle eines EWS kann die potenzielle Käuferschaft auch weitere, spezifische Anforderungen einbringen. Da bei Projektbeginn keine Erfahrungswerte vorhanden waren, musste mit Vorbehalten der potenziellen Einsatzbetriebe gerechnet werden. Dazu gehören beispielsweise die «Reichweitenangst» oder die Ungewissheit in Bezug auf die Zuverlässigkeit von EWS. Spezifische Anforderungen ergeben sich des Weiteren aus Erfahrungen des Personals beim Kehrlichverlad. Die Herausforderung der Designwerk GmbH bestand zu Beginn des Projekts somit auch darin, mehr über die Eigenheiten der Kehrlichlogistik in Erfahrung zu bringen und sich mit den Bedürfnissen der Pilotbetriebe auseinanderzusetzen.



Sicherheit und Ergonomie im Sinne des Betriebspersonals

Kehrlichtladerinnen und Kehrlichtlader hieven beim Einsammeln von Kehrlichtsäcken von Hand pro Tag 3 bis 8 Tonnen Abfall in die Schüttmulde eines Sammelfahrzeugs. Dabei müssen sie 300 bis 400 Mal auf- und absteigen. Niederflurkabinen können dem Personal das Ein- und Aussteigen erleichtern. Entlastend für das Personal sind weiterhin tiefe Ladekannten und Trittbretter am Fahrzeugaufbau. Beschwerden am Bewegungsapparat und Fussverletzungen kann so vorgebeugt werden. Moderne Sammelfahrzeuge müssen zudem hohen technischen Anforderungen genügen und Normen wie *SN EN 1501-1*¹ erfüllen. Auch abgasfreie und geräuscharme Fahrzeuge sowie eine ruckfreie Beschleunigung sind für die Mitarbeitenden aus Sicht der SUVA ein zusätzliches Plus.

Erwartete Anforderungen an die Reichweite

In Bezug auf «Reichweitenangst» lohnt sich die Frage zu stellen, welche Wege und welche Distanzen tatsächlich zurückgelegt werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt Beispiele pro Einsatztag zurückgelegter Strecken von herkömmlichen Kehrlicht-LKW auf.

Einsatzbetrieb	Anzahl LKW	Ø km / Tag
Winterthur Stadtwerk	6.0	54.0
St. Gallen	5.0	57.9
Stadt Chur	4.0	58.0
Zürich Hagenholz ERZ	8.7	64.2
Bern Energiezentrale Forsthaus EWB	10.0	81.3
KEZO Hinwil	9.0	86.0
Bazenheid ZAB	7.0	111.8
Mittelwert	49.7	73.3

Tabelle 1: Durchschnittlich zurückgelegte Strecken von 26t-Kehrlicht-LKW pro Tag in ausgewählten Schweizer Betrieben im Jahr 2014.

Der Zweckverband Abfallverwertung Bazenheid verfügt mit 111.8 Kilometern über den Maximalwert. Ein EWS in dessen Einsatz müsste somit mindestens diese Strecke zuzüglich einer Reserve zurücklegen können. Bei der Festlegung der Reserven sind dabei Faktoren wie Distanzen für Leer- und Überführungsfahrten für den Service beim Hersteller zu berücksichtigen. Ob ein Fahrzeug eine definierte Tagesstrecke absolvieren kann ist zudem nicht nur von der Distanz und der Topologie abhängig, sondern auch vom Einsatzort. In der Stadt werden im Vergleich zum Land in weniger Kilometern mehr Wertstoffe gesammelt, womit der Verbrauch pro zurückgelegten Kilometer höher sein dürfte.

¹ Allgemeine Anforderungen und Sicherheitsanforderungen an Abfallfahrzeuge.



Marktumfeld der Schweizer Kehrrichtlogistik

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns schwankten die Verkäufe von Wertstoff-Sammelfahrzeugen nach Angaben der Projektpartner schweizweit stark und lagen bei circa 70 bis 110 Einheiten pro Jahr. Volatil war der Wert insbesondere aufgrund der Einführung neuer Abgasnormen, welche einen kurzfristigen Anstieg über zwei Jahre auf 100 bis 110 Fahrzeuge verursacht haben dürfte. Die Projektpartner gingen von insgesamt 800 bis 1'000 immatrikulierten Fahrzeugen aus. Die Erfahrungswerte der Projektpartner und -partnerinnen liessen auf eine Lebensdauer der Fahrzeuge von 8–12 Jahren schliessen. In betriebsspezifischen Ausnahmefällen betrug sie allerdings bis zu 15 Jahren.



Stand der Technik und bestehende Lösungen

Schweizweit waren den Projektpartnern zu Projektbeginn keine Lösungen zur vollelektrischen Wertstoffentsorgung innerhalb der 26-Tonnen-Klasse bekannt. Im Bereich der Verteillogistik haben sich bei Projektbeginn die E-Force One AG als Hersteller sowie die Ceekon AG als Händler mit 18-Tonnen-Elektro-LKW positioniert. Die Ceekon AG bietet das Fahrzeug als Sammelfahrzeug an, wobei das Fahrzeug nicht explizit auf diesen Einsatzbereich ausgelegt wurde.

Der Blick hinaus über die Landesgrenze hat allerdings ergeben, dass es bei Projektbeginn mindestens fünf vergleichbare Referenzprojekte gab. Die nachfolgenden Tabelle fasst die den Projektpartnern bekannten Bestandeslösungen zusammen.

Hersteller	Motiv Power Systems, Inc.	Power Vehicle Innovation	Transportation Power, Inc.	Zero Emission Vehicles Limited	Emoss Mobile Systems BV
Typ	Refuse Truck	Refuse Truck	Refuse Truck	Enviro 18000	Refuse Truck
Einsatzort	Chicago, USA	Courbevoie, Paris	Poway, Kalifornien	Neuseeland	Niederlande
Kosten/Fahrzeug	685'000 \$	592'000 CHF	600'000 \$	375'000 CHF	k.A.
Stückzahl	10	11	k.A.	k.A.	k.A.
Gewicht	27.2 t	26 t	26 t	18 t	27 t
Payload/Kapazität	9 t	8 t	9 t	5.5 t	4.6 t
Reichweite/Einsatz	96.5	Tagestour	k.A.	k.A.	Tagestour
Reichweite Weg	k.A.	k.A.	160 km	153 km (bei 80%)	160 km
Batteriekapazität	200 kWh	250 kWh	300kWh	230 kWh	120 kWh
Zelltyp	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4	LiFePO4
Motorenleistung / Dauerleistung	280 kW	103kW	240 kW	k.A.	240 kW
V-Max	80 km/h	70 km/h	88 km/h	85 km/h	85 km/h
Ladeleistung	60 kW	k.A.	70 kW	50 kW (optional)	k.A.
Ersteinsatz	16.09.14	10.05.11	04.03.13	offen	offen

Tabelle 2: Übersicht über internationale EWS-Projekte und Hersteller Stand 2015.

Auffallend an den technischen Spezifikationen der Fahrzeuge ist insbesondere, dass bei allen bereits existenten Produkten und Projekten LiFePO4-Batterietechnologie zur Anwendung kam. Dieser initiale Stand der Technik bei bekannten EWS-Projekten dürfte wohl mit der besseren und rascheren Verfügbarkeit der Batteriezellen zu begründen sein. Gleichzeitig weisen sie teils grössere Zellformate auf, weshalb die Anforderungen an die Verbindungstechnik innerhalb der Batteriemodule oder -pakete weniger komplex sind. Als nachteilig könnte sich in Abhängigkeit der freigegebenen Batteriekapazität allerdings die Lebensdauer erweisen. Auffallend ist zudem die geringere Motorenleistung des in Paris eingesetzten PVI-Fahrzeugs, welche sich in einer geringeren Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs widerspiegelt. Hier ist davon auszugehen, dass das Fahrzeug insbesondere auf den (rein) innerstädtischen Einsatz ausgelegt wurde, wobei der Zeitpunkt der Lancierung bemerkenswert früh war.



Seit dem Projektbeginn hat sich in der Entwicklung von elektrischen Nutzfahrzeugen einiges getan. Nebst kleineren Anbietern von elektrischen Nutzfahrzeugen gibt es vermehrt grössere Ankündigungen von grossen Herstellern von Nutzfahrzeugen, die den Markt in den nächsten ein bis drei Jahren bedienen möchten. Insbesondere der Markt von elektrischen Wertstoffsammelfahrzeugen ist in den letzten zwei Jahren gewachsen. Dieser Einsatzort bildet den optimalen Einstieg in die neue Antriebstechnik. Zurückzuführen ist diese Entwicklung auf die fixen Routen von solchen Einsatzfahrzeugen. Batteriekapazität und Leistung lassen sich optimal auf die Einsatzrouten planen. Die damit gewonnenen Erfahrungen werden genutzt, um zusätzliche Produkte in weiteren Segmenten anbieten zu können.

Diese Vorgehensweise bewährte sich auch bei Designwerk, die seit Beginn des Jahres 2019 nebst den EWS-Fahrzeugen auch weitere Produkte wie Sattelschlepper, Kranfahrzeuge, Betonmischer und andere im Angebot hat.

Hersteller	E-Force One	Framo	MAN Truck & Bus	Mercedes Benz	Volvo Trucks
Typ	E44 R 747	E75-E440	eTGM	eActros	FL Electric
Einsatzort	Logistik	Logistik	Logistik	Logistik	Logistik
Kosten/ Fahrzeug	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Stückzahl	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Gewicht	18 t	18 t	18 t – 26 t	18 t	16 t
Payload/ Kapazität	k. A.	k. A.	k. A.	12.800 kg	k. A.
Reichweite/ Einsatz					
Reichweite Weg	200–300 km	bis zu 350 km	130 km (SZM), 200 km (FG)	200 km	bis zu 300 km
Batterie- kapazität	120–310 kWh	57–346 kWh	125 kWh (SZM), 185 kWh (FG)	240 kWh	100-300 kWh
Zelltyp	Lithium-Ionen	Lithium-Ionen	Lithium-Ionen	Lithium-Ionen	Lithium-Ionen
Motorenleistung / Dauerleistung	360–550 kW	80–495 kW	264 kW	2 × 125 kW	185 kW
V-Max	85 km/h	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Ladezeiten/ Ladeleistung	300 min (100 % bei 230 V), 360 min (100 % bei 400 V)	130 min bei 260 kWh (CCS-Stan- dard, 150 kW)	60 min (100 %, CCS-Standard, 150 kW)	120 min (100 %, CCS-Standard, 150 kW)	90 min bei 300 kWh (CCS-Stan- dard, 150 kW)
Ersteinsatz	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

Tabelle 3: Übersicht über internationale EWS-Projekte und Hersteller Stand 2019.

Konzept – Fahrzeugbeschreibung

Im Folgenden wird das im Leuchtturmprojekt gebaute Fahrzeug des Typs «Futuricum Collect 26E» beschrieben.

Chassis als Grundlage

Als Basischassis für den Collect 26E und als Partner im Leuchtturmprojekt wurde Volvo gewählt. Ausschlaggebend für die Entscheidung war zum einen die hohe Qualität und Akzeptanz der Fahrzeuge in der Branche im Premiumsegment. Zum anderen hat sich Volvo bereit erklärt, der Designwerk GmbH Zugang zu den CAN-Bus-Informationen zu erteilen. Diese sind erforderlich, um den Elektroantrieb ins Chassis zu integrieren.

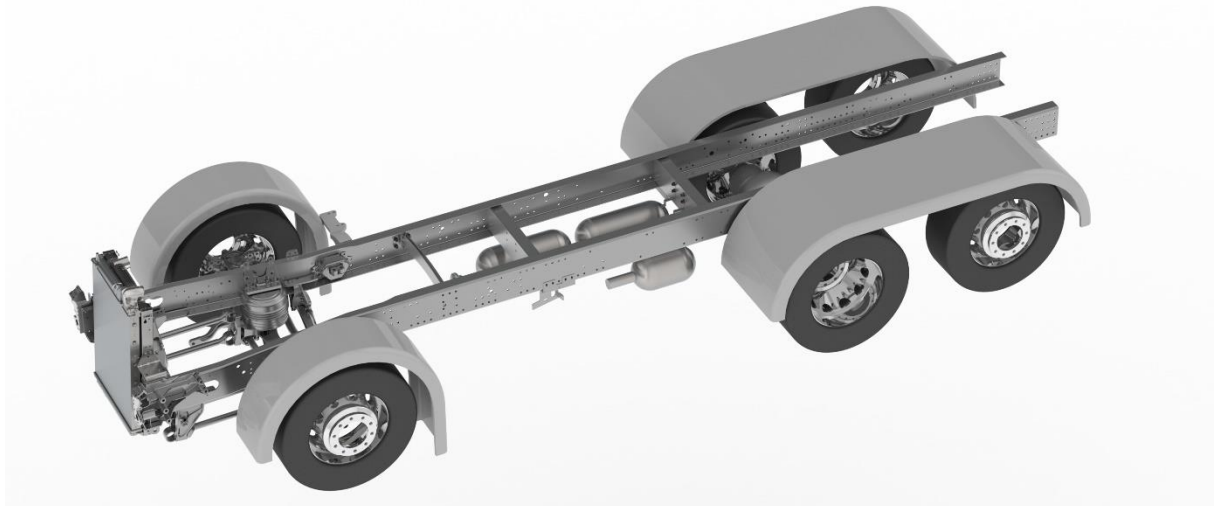


Abbildung 1: Chassis Volvo FM, ohne Antriebsstrang.

Die Entwicklungsunterstützung durch Volvo wurde auf eine gewisse Anzahl Arbeitsstunden festgelegt. Durch diesen Zugang konnten die Schnittstellen zwischen den einzelnen CAN-Kommunikationsknoten festgelegt werden. Gleichzeitig stellte Volvo der Designwerk GmbH auch die Daten von CAN-Protokollen zur Verfügung.

Die von Volvo gelieferten Fahrzeuge wurden schliesslich durch die Volvo Schweiz (Group) AG «rückgebaut» bzw. der gesamte Antriebsstrang entfernt. Die an den Seiten angebrachten Lufttanks wurden von Volvo ebenfalls so angepasst, dass zwischen den Achsen genügend Platz für die Traktionsbatterien besteht. Die weiteren Komponenten des gelieferten Fahrzeuges, wie Kühler, Lenkungsanlage und Fahrwerk (Luftfederung), blieben weitestgehend unberührt. Durch diesen gegenseitigen Wissensaustausch wurde Projektzusammenarbeit mit Volvo immer enger und noch weiter ausgebaut. Die Wartungsarbeiten des Trägerfahrzeugs wurden trotz des neuen Antriebs durch Designwerk weiter von Volvo übernommen und fortgesetzt. Diese Schnittstelle zwischen den Arbeiten an den Hochvolt-Komponenten und den gleichbleibenden Trägerfahrzeug-Komponenten wurden in Absprache mit Volvo klar definiert.



CAN-Bus

Die CAN-Bus-Kommunikation bildete die mit Abstand grösste Herausforderung für die Umsetzung des E-LKWs. Werden die CAN-Daten einmal geloggt und so simuliert, dass die einzelnen Steuergeräte des Trägerfahrzeugs mit dem neuen elektrischen Drivemodul kommunizieren, schränken sie die Anwendung auf andere Trägerfahrzeuge ein. Die Erweiterung auf andere Trägerfahrzeuge stellt aufgrund der notwendigen CAN-Daten eine grosse Herausforderung dar. So erwies sich auch die «reibungslose» Integration des neuen Drivemoduls – ohne dass dabei Fehlermeldungen auf dem Fahrerdisplay aufleuchten – als Knackpunkt. Die Fehlerkontrollleuchten zeigten dabei unter anderem fehlende CAN-Informationen des Ad-Blue-Steuergerätes an. Solche und ähnliche CAN-Informationen mussten bei den einzelnen Steuergeräten simuliert werden, um einen reibungslosen und sicheren Zustand des Fahrzeugs garantieren.

Pressmüllaufbau des Fahrzeugs

Die Pressmüllaufbauten sind das primäre Arbeitsmittel im Sammelbetrieb. Als Aufbauhersteller für den Collect 26E und als Partnerin für das Leuchtturmprojekt wurde die Contena-Ochsner AG gewählt. Ihre Aufbauten sind innerhalb der Branche weit verbreitet und wurden schon jahrelang auf die entsprechende Anwendung optimiert. Die Nutzung des E-LKWs sollte in diesem Aspekt nicht vom Bekannten abweichen. Durch eine separate elektrische Hydraulikpumpe wird der Pressaufbau mit Energie versorgt. Diese lässt sich bedarfsgerecht ansteuern. Dadurch reduziert sich im Vergleich zum konventionellen Antrieb sowohl der Energieverbrauch als auch der Lärm im Betrieb wesentlich. Ein weiterer Vorteil des vom Fahrzeug unabhängigen Antriebs ist die Möglichkeit des Müllpressens während der Fahrt. Bei einem herkömmlichen Dieselfahrzeug ist dies nicht uneingeschränkt möglich, da der Pressbetrieb einen Leistungsabfall bei der Traktion zur Folge hat. Dadurch bietet das Elektrofahrzeug ein weiteres Potenzial für Zeiteinsparnisse im Sammelbetrieb.

Systemkonzept Gesamtfahrzeug

Fahrertrieb, Pressmüllaufbau und alle anderen Verbrauchskomponenten sind elektrisch ausgeführt und nutzen im Betrieb die Batterien als alleinige Energiequelle. Dadurch fährt das Fahrzeug im Betrieb komplett abgasfrei. Die Batterien sind so dimensioniert, dass sie genügend Kapazität für den gesamten Arbeitstag bieten. Aufgeladen wird über Nacht im Depot mit einem eingebauten Ladegerät. Damit startet das Fahrzeug jeden Morgen vollgeladen in den nächsten Arbeitstag. Die Fahrt zur Tankstelle entfällt.

Der Elektroantrieb wird an derselben Stelle montiert wie der Dieselmotor bei einem «konventionellen» Fahrzeug. Die Antriebskomponenten werden in einer Baugruppe als sogenanntes «Drivemodul» (siehe Abbildung 2) zusammengefasst. Die Erfahrung aus vorhergehenden Projekten hat gezeigt, dass sich dadurch bei der Montage Zeit und Flexibilität gewinnen lässt. Das Drivemodul besteht aus Sammelgetriebe, vier Elektromotoren, vier Inverter, Ladegerät, Stromverteilung, Kühlungskomponenten sowie der Steuerungseinheit. Der Kern bildet das von Designwerk speziell entwickelte Sammelgetriebe zur Aufnahme von bis zu 4 Motoren. Die schnelldrehenden Motoren wirken zusammengefasst über das Getriebe und die Kardanwelle auf das Differenzial und schliesslich auf die Antriebsachse.

Die Luftversorgung und Hydraulik für die Lenkunterstützung erfolgen ebenfalls bedarfsgerecht und elektrisch. Diese Komponenten sind auf einem Nebenaggregat-Träger zu einer eigenen Baugruppe zusammengefasst.

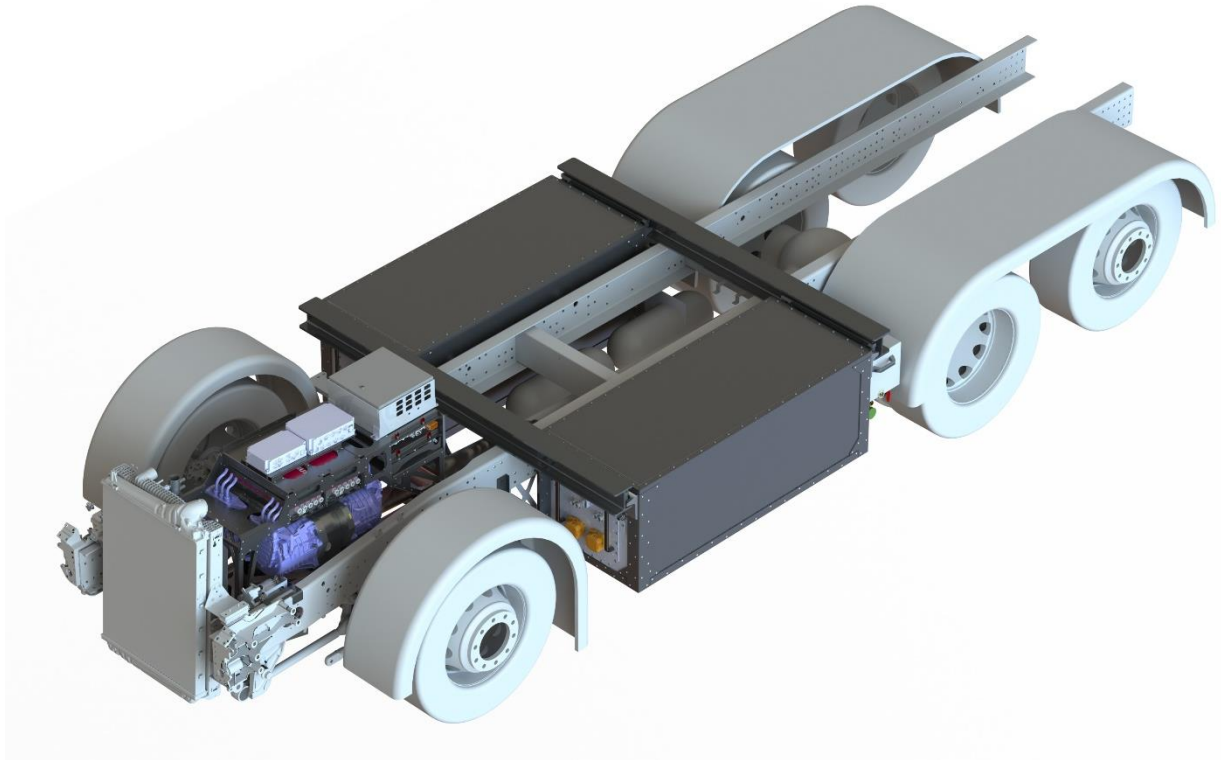


Abbildung 2: Gesamtübersicht Chassis und deren Komponenten.

Das elektrische Drivemodul wiegt im Gegensatz zum Dieselantriebsstrang (ca. 1'400 kg) nur noch einen Drittel. Die beiden Traktionsbatterien wiegen zusammen knapp über 2'000 Kg und verlagern dadurch den Schwerpunkt nach hinten. Dies bedingt wiederum eine grösser ausgelegte Liftachse, um die Achsen – vor allem bei voll beladenem Fahrzeug – nicht zu überlasten. Abbildung 3 zeigt ferner die versetzten Lufttanks, die vor dem Umbau zwischen den Achsen angebracht wurden.

Getriebe

Das Getriebe bildet das Herzstück des Antriebsstranges. Hauptziel war von Anfang an, dass keine technische Änderungen am Chassis und Bremssystem vorgenommen werden müssen. Zusätzlich sollte das Getriebe servicefreundlich sein, sprich die Montage bzw. Demontage sollte möglichst einfach sein.

Mit diesen Zielen im Hinterkopf begann auch die eigentliche Entwicklung des Getriebes. In einem Brainstorming wurden Must-Kriterien zusammengetragen und besprochen.

Die Must-Kriterien waren:

- Befestigungspunkte am Chassis
- keine Schaltvorgänge
- Modularität
- Redundanz
- Tiefes Gewicht

Befestigungspunkte am Chassis

Eines der Hauptziele bei der Entwicklung des Getriebes war es, die Bauanordnung des Antriebsstranges so unverändert wie möglich zu halten. So war es von Anfang an das Ziel, sich an den Befestigungspunkte des Dieselmotors zu orientieren und diese zu nutzen. Die Fluchtpunkte des Antriebsstranges (Kardanwelle) bleiben dabei unverändert. Mit diesem Konzept wird der – nach dem Ausbau des Dieselmotors inkl. Getriebe – leergewordene Bauraum optimal genutzt. In Abbildung 3 sind die entsprechenden Befestigungspunkte rot umkreist.

Mit dieser Vorgehensweise wurden von Beginn an Konzepte, welche beispielsweise Radnabenmotoren vorsahen, aus den oben genannten Gründen verworfen.

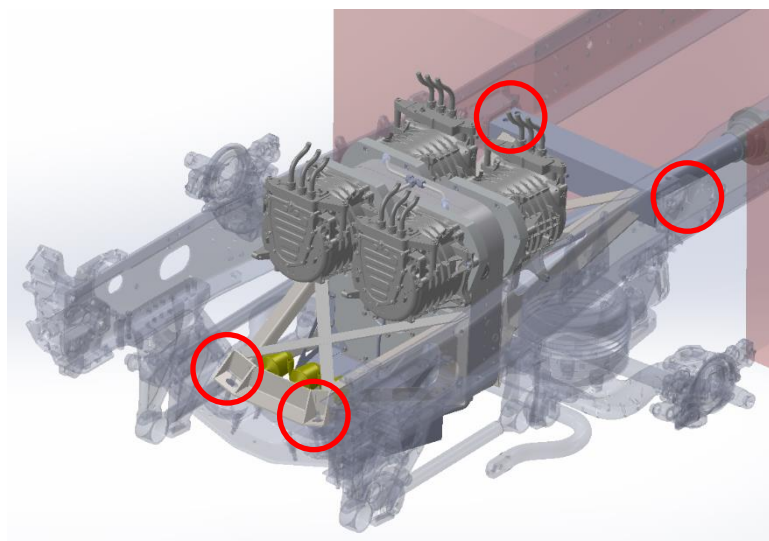


Abbildung 3: Befestigungspunkte Drivemodul.

Abbildung 4 zeigt den freigewordenen Bauraum der Fahrzeuge. Dieser wurde optimal genutzt.

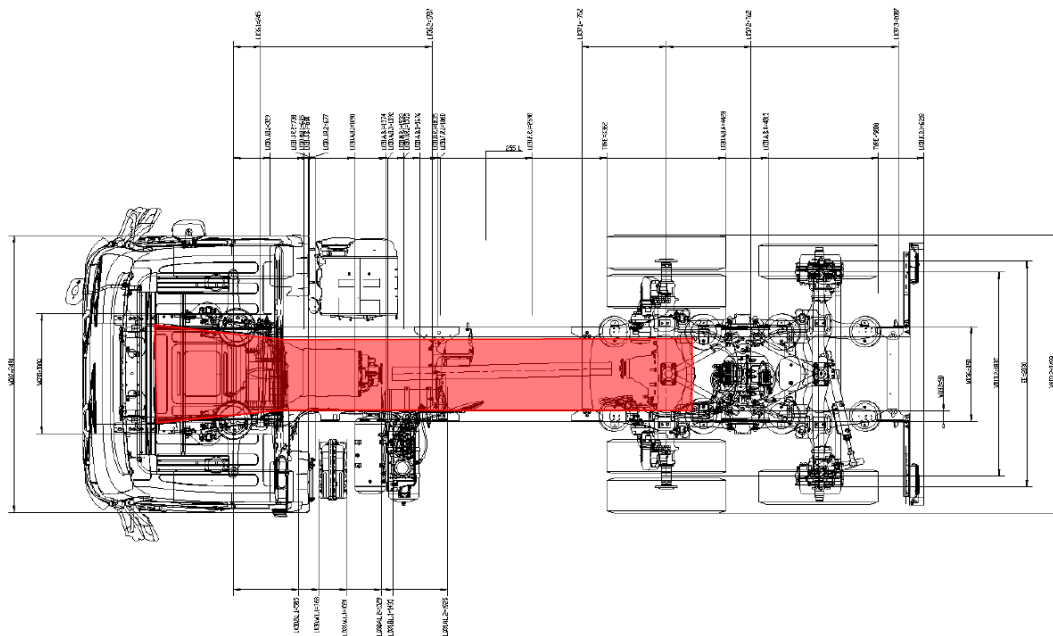


Abbildung 4: Bauraum Antriebsstrang.

Keine Schaltvorgänge

Bei der Entwicklung bzw. Evaluation des Getriebes wurde der «Verzicht» auf Schaltvorgänge als eines der wichtigsten Kriterien gewertet. Durch das Weglassen von Schaltvorgängen werden nicht nur Schubunterbrechungen verhindert, sondern auch die gesamte Effizienz des Antriebsstranges verbessert. Nach dem Entscheid auf ein automatisiertes Schaltgetriebe zu verzichten, startete die Suche nach einem dafür geeigneten Elektromotor. Dieser sollte über das Drehzahlband hindurch genügend Drehmoment liefern, um den Anforderungen eines 26t schweren Nutzfahrzeuges gerecht zu werden.

Dabei muss der Elektromotor genügend Leistung und Drehmoment für eine konstante Steigung von 5% mit einem Gesamtzugsgewicht von 27 Tonnen zur Verfügung stellen können. Die Übersetzungen wurden ebenfalls so festgelegt, dass eine Endgeschwindigkeit von mindestens 86 km/h erreicht werden kann. In Abbildung 5 werden die Antriebsmomente an den Rädern dargestellt.

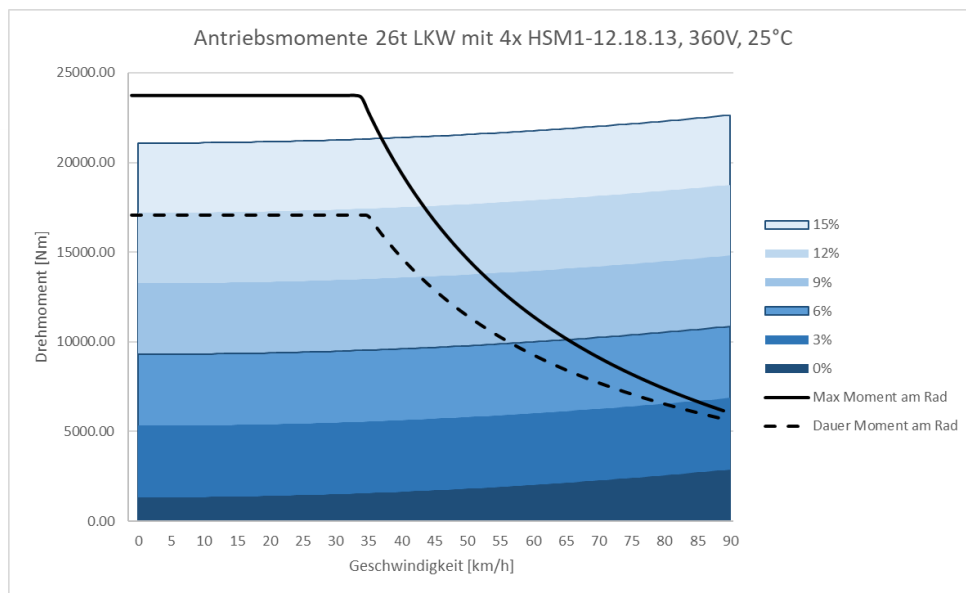


Abbildung 5: Antriebsmomente 26t E-LKW.

Abbildung 5 zeigt, dass mit diesem Konzept (vier zugeschaltete Elektromotoren) Steigungen von 12% möglich sind. Das Anfahren ist sogar bei Steigungen von über 15% problemlos möglich.

Die technischen Daten der vier Elektromotoren sind in Abbildung 6 abgebildet:

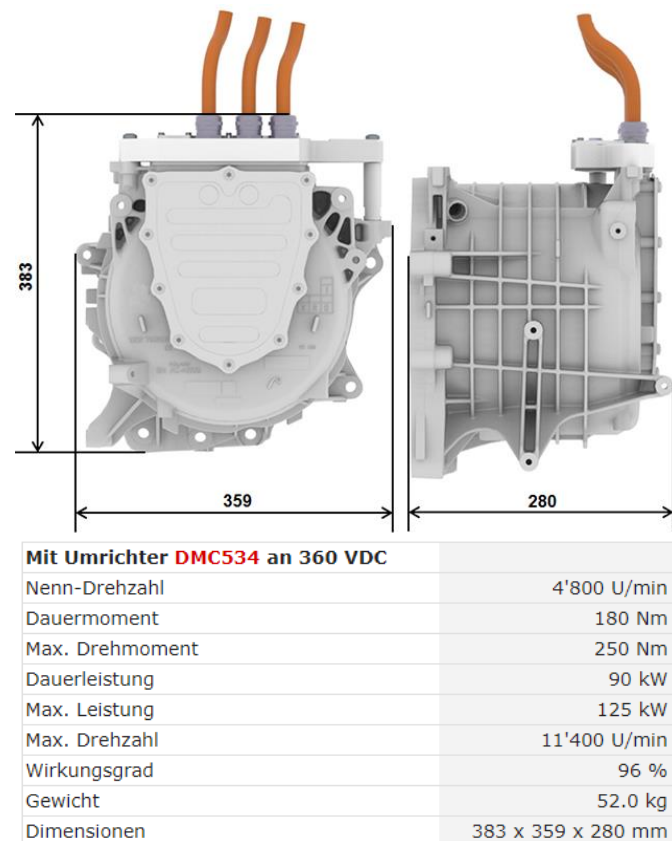


Abbildung 6: Technische Daten Elektromotor.

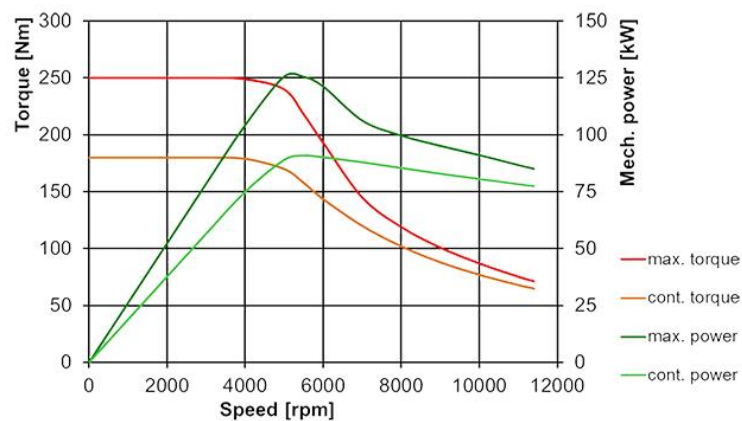


Abbildung 7: Motorcharakteristik der vier Elektromotoren.

Modularität

Die Konzeptauslegung mit den vier parallel geschalteten und dem zentral angeordneten Getriebe ermöglicht eine Modularität, die mit einem automatisierten Schaltgetriebe und einem grossen Elektromotor nicht möglich gewesen wären. So kann beispielsweise auf Kundenwunsch auf zwei Motoren verzichtet werden. Dem Kunden stehen mit zwei Motoren noch immer 250 kW Leistung zur Verfügung und er erzielt gleichzeitig eine erhebliche Preisreduktion. Zudem sind Elektromotoren in dieser Grösse wesentlich einfacher in der Beschaffung als grössere Elektromotoren.

Dass zwei Motoren jeweils zwischen dem Getriebe eingebaut werden, erlaubt eine äusserst kompakte Bauweise des ganzen Drivemoduls.

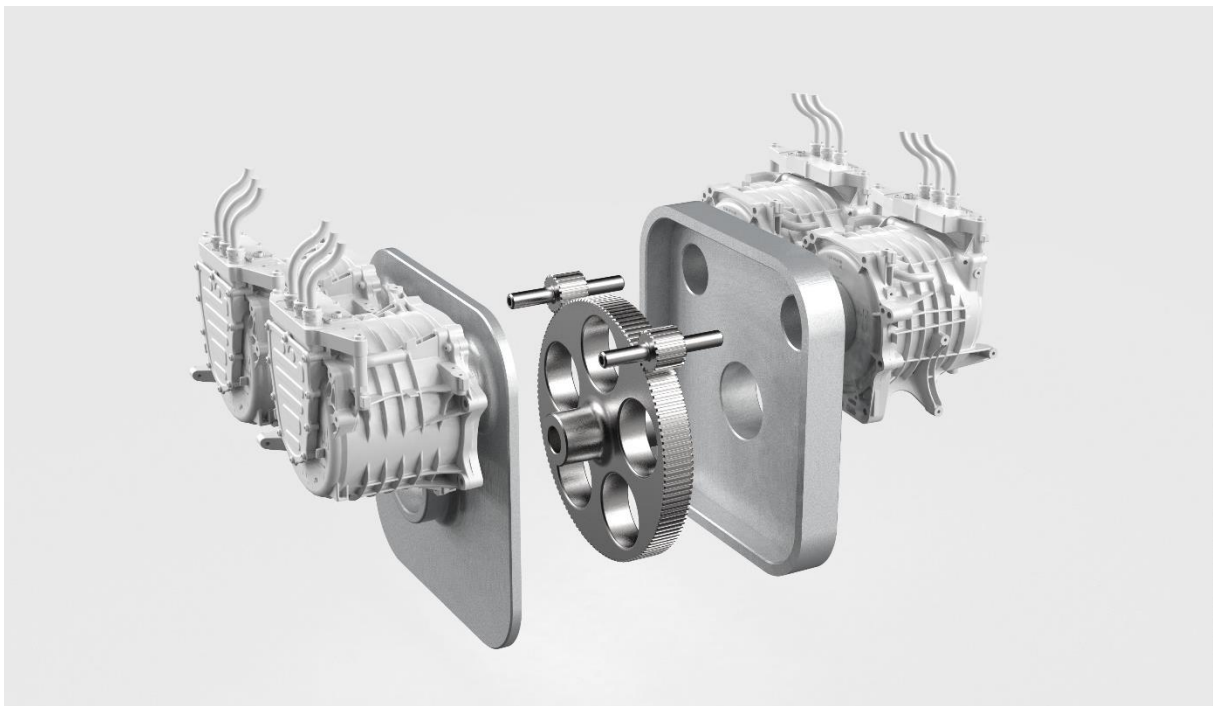


Abbildung 8: Die Modularität des Getriebes.

Redundanz

Die Sicherstellung der ständigen Verfügbarkeit eines E-LKWs war ebenfalls ein Kriterium für das verwendete Konzept. Die vier parallel geschalteten Elektromotoren können sich bei einem Ausfall eines einzelnen Elektromotors gegenseitig unterstützen und damit die Weiterfahrt garantieren. Diese Überlegung hat sich im Verlaufe der Testphase als essentiell erwiesen. Bei der effektiven Umsetzung und den ersten Tests offenbarte sich, dass die Abstimmung der Umrichter und der Motoren noch Handlungsbedarf hat. Dies zeigte sich darin, dass es immer wieder zu Ausfällen einzelner Elektromotoren kam. Trotzdem musste kein Prototyp in der Testphase abgeschleppt werden. Die hohe Leistung der einzelnen Elektromotoren führte so weit, dass einige Testfahrer den Ausfall eines Elektromotors nicht feststellen konnten. Diese vierfache Redundanz gibt den Fahrern und Fahrzeughaltern eine Sicherheit, welche bei einem einzelnen Elektromotor nicht möglich wäre.

Tiefes Gewicht

Bei der Entwicklung des Antriebes eines Lastwagens gilt es, ein besonderes Augenmerk auf das Gewicht zu legen. Je höher das Leergewicht eines LKWs, desto niedriger die Nutzlast. Diese wiederum spiegelt sich in der Frage der Wirtschaftlichkeit wider. Durch die Verwendung eines eigens dafür entwickelten 1-Gang-Getriebes kann viel Gewicht gegenüber einem Schaltgetriebe eingespart werden. Das Abtriebsrad und die einzelnen vier Antriebsräder können in einem Alugehäuse untergebracht werden.

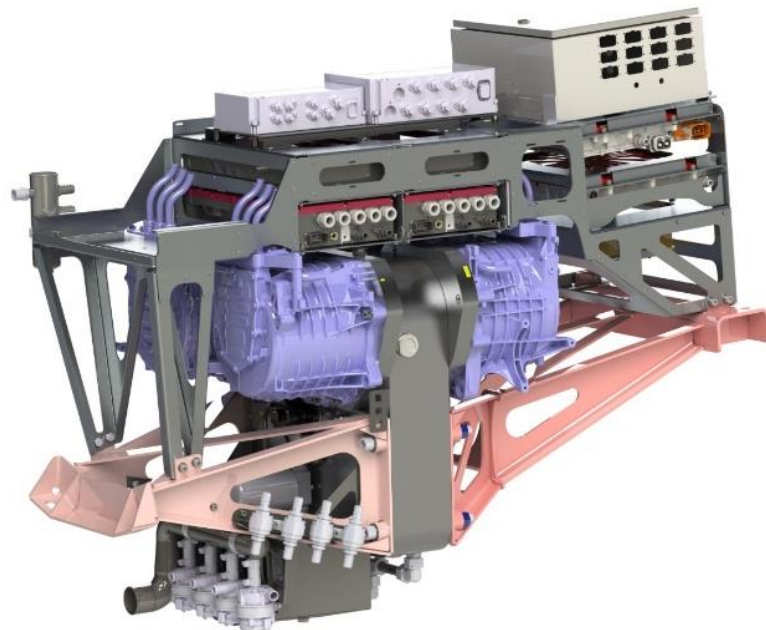


Abbildung 9: Das komplette «Drivemodul». Kompakte Bauweise.

Entwicklung

Bei der Auslegung des gesamten Antriebsstranges spielte die Verfügbarkeit von zuverlässigen und genügend starken Elektromotoren die zentrale Rolle. Der verwendete Motor, der beim BMW i3 zum Tragen kommt, verfügt über ein Dauerdrehmoment von 180 Nm und ein kurzzeitiges Spitzendrehmoment von 250 Nm (siehe Abbildung 7). Ein einzelner Elektromotor wäre für den schweren Nutzfahrzeugbereich damit nicht ausreichend. Die Leistung und das Drehmoment sind dafür zu schwach. Bei der Verwendung von vier solcher Motoren kann das Drehmoment von einem einzelnen Elektromotor aber erwartungsgemäss vervierfacht werden. So stehen dem Fahrer beim Anfahren (Getriebeeingang) ein Spitzendrehmoment von 1000 Nm zur Verfügung. Das Getriebeverhältnis von 6.4:1 wurde so gewählt, dass Steigungen von 12% problemlos anfahrbar sind und der Elektromotor sich trotzdem in einem «effizienten» Bereich bewegen kann. Die Elektromotoren weisen ein Drehzahlband von 0 bis 12'000 Umdrehungen pro Minute auf. Diese Drehzahlen sind im Nutzfahrzeugbau ebenfalls eher unüblich. Doch mit der Anordnung der vier Elektromotoren, welche grundsätzlich im PKW-Bereich ihre Anwendung finden, können die Vorteile dieses Elektromotors optimal genutzt werden. Mit der Reduktion ($i=6.4:1$) weist das Getriebeabtriebsrad somit keine höheren Drehzahlen auf als 1'875 Umdrehungen pro Minute. In diesem Umdrehungsbereich wurden die besten Erfahrungen gemacht bezüglich Effizienz und Wärmeentwicklung. Bei Testläufen auf einem Getriebebestand wurde das Zahnflankenspiel so weit angepasst, dass keine unnötige Wärme entsteht (hohe Reibung entsteht durch zu grosses Zahnflankenspiel) und gleichzeitig keine unnötigen Geräusche entstehen.

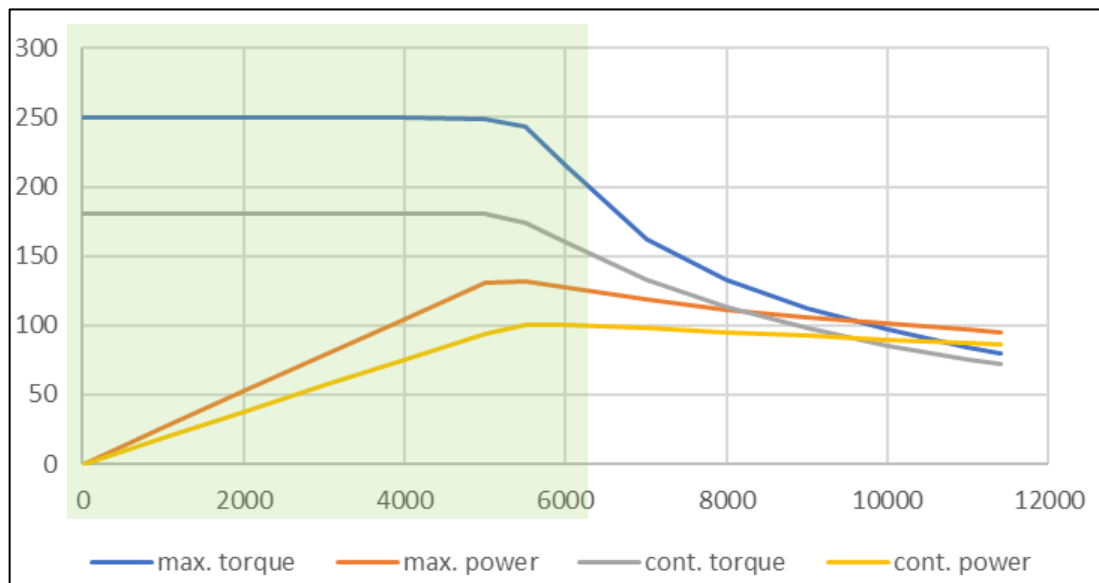


Abbildung 10: Drehmomentverlauf Elektromotoren über Drehzahl.

Die EWS-Fahrzeuge weisen in ihrem Betrieb – der hauptsächlich aus Stop-and-go-Betrieb und tiefen Geschwindigkeiten besteht – Drehzahlen von 0 bis 6'000 Umdrehungen pro Minute auf. In diesem Bereich bewegen sich die Motoren in einem Effizienzbereich von 85 bis 93%. Gleichzeitig liefern sie in diesem Abschnitt das höchstmögliche Drehmoment. Das grüne «Feld» in Abbildung 10 zeigt den Drehzahlbereich, in dem sich die EWS-Fahrzeuge in ihrem Betrieb mehrheitlich bewegen.

Abbildung 11 zeigt die Aufteilung der Übersetzungen am gesamten Fahrzeug auf. Je nach Gewicht und Einsatzort können die Hinterachsübersetzungen bei Volvo angepasst werden. Diese variieren zwischen 4.11 und 4.63. Bei EWS-Fahrzeugen spielt das Anfahrtdrehmoment eine grössere Rolle als die Endgeschwindigkeit, die zwischen 83 und 97 km/h variieren kann.

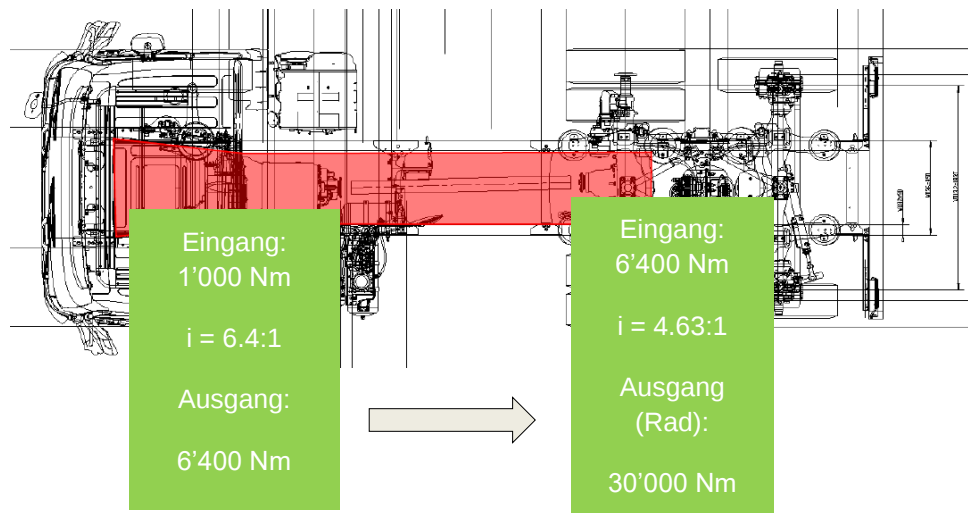


Abbildung 11: Übersetzungsverhältnisse Übersicht.

Diese Drehmomentaufteilung wurde spezifisch für EWS-Fahrzeuge bzw. deren Betrieb mit vielen kurzen Beschleunigungsphasen ausgelegt. Bei anderen Einsatzgebieten ändern sich die Übersetzungen an der Hinterachse. Aus Kosten- und Effizienzgründen wurde auf die Entwicklung von mehreren Übersetzungen verzichtet. Ändern sich die Einsatzgebiete unserer Kunden (z.B. bei höherem Gewicht oder höhere Anfahrtdrehmomente), werden die Hinterachsübersetzungen dementsprechend angepasst.

Die für den Nutzfahrzeugbau eher unüblichen «kleinen» Elektromotoren bringen den grossen Vorteil, dass sie durch höhere Drehzahlen ein hohes Drehmoment liefern. Somit kann durch das Getriebe die Drehzahlen untersetzt und das Drehmoment vergrössert werden. Diese Vorgehensweise lässt grosse Ersparnisse beim Gewicht zu. Die einzelnen Elektromotoren wiegen knapp über 52 kg. Das Gewicht aller vier Motoren beläuft sich dementsprechend auf etwas mehr als 200 kg. Vergleicht man andere Elektromotoren in diesen Gewichtsklassen, weisen diese im Verhältnis zum Gewicht die geringeren Drehmomente und Leistungen auf. Die hohen Drehmomente fallen somit erst beim Rad an. Das Getriebe kann leichter dimensioniert werden und es kann an Gewicht eingespart werden. Vergleiche zeigen, dass durch diese Vorgehensweise das Gewicht des gesamten Antriebsstranges gegenüber der Konkurrenz um 30 bis 40% tiefer ist.

Das Getriebegehäuse wird aus einem hochfesten Aluminiumblock gefräst. Die Zahnräder wurden aus vergütetem Zahnradstahl gefertigt und einsatzgehärtet. Beim Bau der Zahnräder und des Getriebegehäuses kamen somit keine «speziellen» Verfahrenstechniken zur Anwendung. Einzig an der Antriebswelle wurden spezielle Spindelmugellager verwendet, um bei hohen Drehzahlen die Lebensdauer von mindestens 500'000 km sicherstellen zu können. Dieses Lager erfährt durch die hohen Drehzahlen die grössten Belastungen und muss für eine Lebensdauer von mindestens 500'000 km speziell vergütet werden. Die Zahnflanken wurden so ausgelegt, dass das Material auch bei permanenten Lasten über mehrere Stunden nicht zu Schaden kommt.



Zu Beginn der Entwicklung und nach den ersten mehreren Tausend Kilometern wurden immer wieder Ölproben genommen. Die Getriebezahnräder weisen bis zum heutigen Stand bei allen vier Prototypen keinerlei Verschleiss auf. Bei den jährlichen Wartungen werden noch immer Ölproben genommen, um den «Verschleiss» des Getriebes über die Jahre zu beobachten.

Bei der Weiterentwicklung des Getriebes (erste Versionen nach den vier Prototypen) wurden die Schmierungen aller Lager im Getriebe selbst optimiert. Zeigten einige Lager eine «Sumpfschmierung» auf, wurden alle Lager bei der Weiterentwicklung der Fahrzeuge über weitere Ölbohrungen «zwangsgeschmiert». Diese Massnahme soll die Antriebsräder bei hohen Drehzahlen entlasten bzw. die Haltbarkeit sicherstellen sowie die Lebensdauer des Getriebes bzw. der Zahnräder und Lager zusätzlich verlängern.

Zusammenfassung

Die dem Designerk zur Verfügung stehende Erfahrung im Bau von elektrischen Antrieben, die insbesondere durch Frank Loacker (CTO) und Stefan Rittler (Fahrzeugingenieur) gestützt wird, liess die Entwicklung des Getriebes von Beginn an rasch vorangehen. Bei der Entwicklung des ersten elektrischen LKW für die Firma E-Force One AG (Entwicklungsauftrag der Designwerk GmbH) kam ein ähnliches Antriebskonzept zum Zug. Anstelle von zwei Elektromotoren, wie bei den ersten E-Force-Lastwagen, wurden nun vier Elektromotoren zu einem «Sammelgetriebe» kombiniert. Diese in den frühen Jahren gesammelten Erfahrungen führten dazu, dass andere Konzepte theoretisch begutachtet und bewertet wurden, jedoch nicht in die Praxis für weitere Evaluationsstufen umgesetzt wurden. Das Drivemodul ist sehr kompakt und im Vergleich zum Dieselaggregat und dem automatisierten Schaltgetriebe sehr leicht.

Über die Kardanwelle wird die Kraft und das Drehmoment auf die Antriebsachse geleitet und sorgt dafür, dass die grössten Drehmomente ($>28'000$ Nm) «erst» an der Hinterachse anliegen. Für die Abführung der Wärme wurde am Getriebe eine «Kühlplatte» angebracht, die mit dem Kühlkreislauf der Elektromotoren verbunden ist. Dadurch kann die Getriebetemperatur konstant gehalten werden und die Getriebeteile geschont werden.

Bei der Entwicklung von E-LKW im Bereich von mehr als 32'000 kg Gesamtgewicht kamen die Motoren an ihre Grenzen. Die Elektromotoren lieferten zwar die nötigen Anfahrtdrehmomente, kamen aber bei Dauertests an ihre thermischen Grenzen. Nach einer kurzen «Auskühlungszeit» konnte die Weiterfahrt jeweils fortgesetzt werden. Diese Belastungsgrenzen werden jedoch erst bei den «neu» entwickelten 4-Achs-Fahrzeugen deutlich. Um hier die permanente Verfügbarkeit der Fahrzeuge sicherzustellen, wurden bei der Weiterentwicklung der Fahrzeuge (Entwicklungsarbeit nach den vier Prototypen) auf grössere Motoren gesetzt. Die grösseren Motoren weisen in ihrem Durchmesser keinen Unterschied auf. Einzig der Stator und Rotor wurden «länger» dimensioniert. So konnten bereits in diesem Jahr die ersten vollelektrisch angetriebenen 40-Tonnen-Nutzfahrzeuge mit diesem Antriebskonzept realisiert werden.

Die Entwicklung eines eigenen Getriebes brachte bei der Realisation der vier Prototypen somit mehrere Vorteile mit sich. Es konnte erstens auf die schweren und meist für Dieselaggregate entwickelten Schaltgetriebe verzichtet werden. Die Unabhängigkeit von Zulieferern bei solch wichtigen Komponenten konnte zweitens minimiert werden. Kamen drittens komplexere Anforderungen hinzu (beispielsweise grössere Anfahrtdrehmomente durch höhere Gesamtgewichtsklassen), konnte man auf diesem Konzept aufbauen und die Elektromotoren sowie deren Steuerung entsprechend anpassen. Viertens konnten dadurch weitere Beschaffungen zusätzlicher Getriebearten verhindert werden.



Keiner der vier Prototypen hatte Schwierigkeiten mit dem Getriebe. Dieser Umstand bestärkte das Entwicklerteam, an diesem Konzept weiterhin festzuhalten und den stetig steigenden Anforderungen durch beispielsweise grössere Elektromotoren gerecht zu werden. Durch die wachsende Absatzzahlen konnten auch grosse Sprünge bei der Beschaffung und Fertigung der Getriebe gemacht werden. Arbeitete ein Mechaniker an den Getrieben der Prototypen zuvor mehr als eine Woche am Zusammenbau, werden heute die Getriebe in zwei Arbeitstagen zusammengebaut und für die weiteren Schritte der Produktion fertiggestellt. Die Beschaffungskosten konnten durch Rahmenverträge sowie höhere Absatzzahlen ebenfalls gesenkt werden.



Das Hochvoltkonzept in der Übersicht

Das nachfolgende Blockschaltbild verdeutlicht das Hochvoltkonzept des Fahrzeugs.

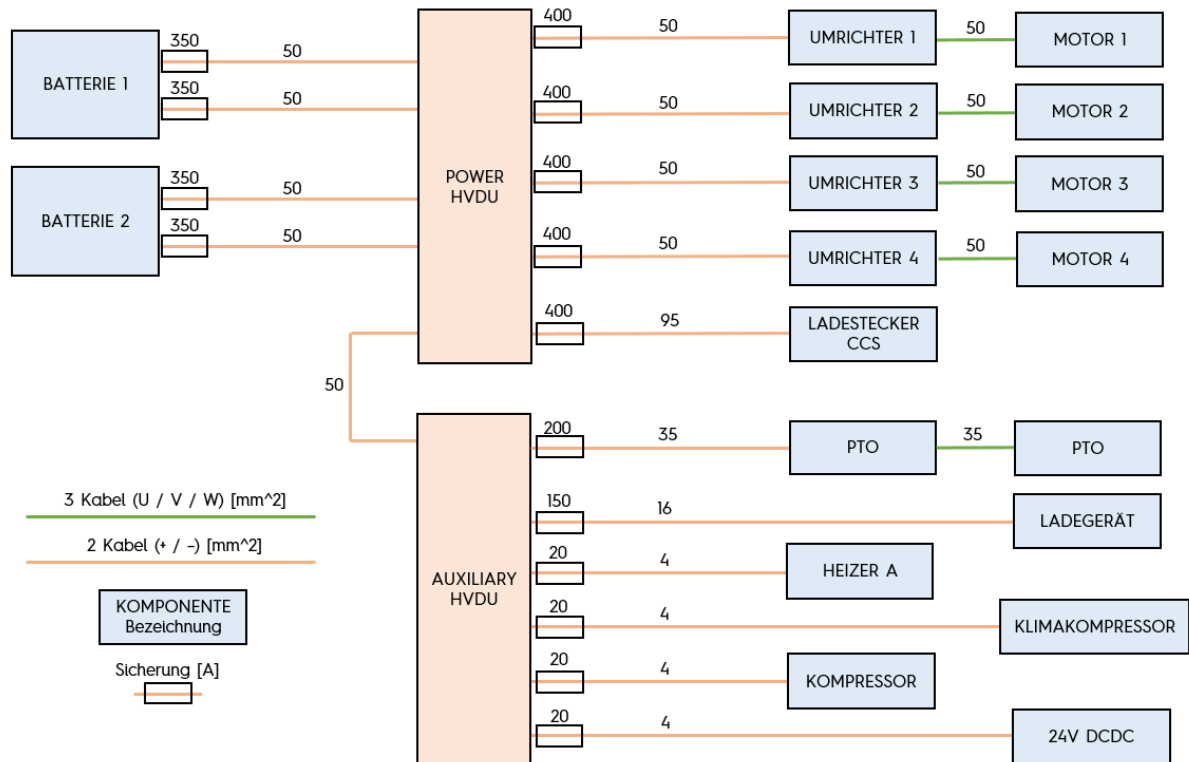


Abbildung 12: Hochvolt-Blockschaltbild des Futuricum Collect 26E.

Sicherheitskonzept Gesamtfahrzeug

Zum Schutz von Personen bei Arbeiten am Fahrzeug kommt das in der folgenden Abbildung verdeutlichte Sicherheitskonzept zu tragen.

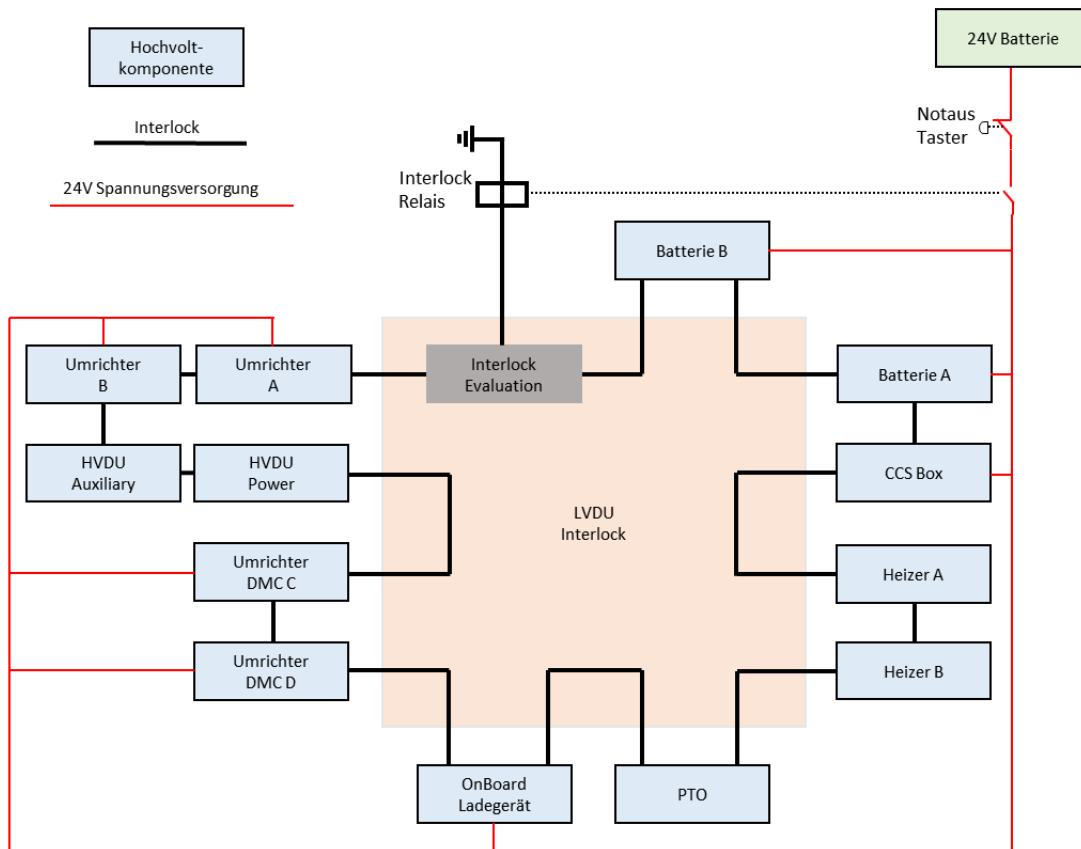


Abbildung 13: Sicherheitskonzept mit Interlock und Not-Halt.

Das Sicherheitskonzept dient dem Schutz der Person beim Öffnen der Hochvoltkomponenten und im Umgang mit dem Fahrzeug. Eine der Massnahmen ist ein serieller Interlockkreis. Ladegerät, Motorensteuerung, Hochvoltheizer, CCS-Box, Batterien, Nebenantrieb und Hochvoltverteilerboxen befinden sich in einem seriellen Interlockkreis. Das heisst: Der Kreis wird unterbrochen, sobald an einer der Komponente der Gehäusedeckel geöffnet oder ein Hochvoltstecker getrennt wird. Über die Fahrzeugsteuerung wird die Spannung am Interlockkreis ständig gemessen. Damit wird ermittelt, ob der Kreis geschlossen ist. Im Fall, dass die Spannung wegen eines Unterbruchs fällt, wird über das Interlock-Relais unmittelbar die 24-Volt-Spannungsversorgung im gesamten Fahrzeug unterbrochen. Dies hat zur Folge, dass die Schütze in den Hochvoltbatterien geöffnet werden und der Hochspannungskreislauf vom Antriebsstrang getrennt wird. Dadurch wird der Zwischenkreis innerhalb von einer Sekunde auf weniger als 60 Volt entladen. Darüber hinaus befindet sich im Fahrgastraum in Reichweite des Fahrers ein Nothaltschalter. Dieser ist mit dem Interlock und den Schützen in der Batterie in Serie geschaltet. Die Schütze der Batterien öffnen sich zudem beim Ausziehen des Batteriesteckers, da der Nothaltkreislauf auch über den Stecker geführt wird. Schliesslich gibt es keine freiliegenden Hochstromteile, die für den Endnutzer oder das Betriebspersonal zugänglich sind.



Kühlkonzept und Klimatisierung

Die Fahrerkabine wird im Sommer über einen elektrischen Klimakompressor und im Winter über einen Hochvoltheizer klimatisiert. Der Fahrer bedient dazu wie gewohnt die entsprechenden Bedienelemente in der Fahrerkabine. Für ein schnelleres Enteisen im Winter ist bei den Leuchtturmfahrzeugen zusätzlich eine elektrische Frontscheibenheizung verbaut. Über ein automatisch gesteuertes Umschaltventil und den Hochvoltheizer lassen sich die Batterien im Winter während dem Ladevorgang temperieren. Dadurch ist sichergestellt, dass die Batterien nach einer kalten Nacht dank der richtigen Temperierung am Morgen voll leistungsfähig und einsatzbereit sind. Da die Selbsterwärmung der Batterie im Müllsammelbetrieb nur sehr gering ist, wurde vorerst auf eine aktive Batteriekühlung verzichtet. Nicht nur die Leistungsfähigkeit, sondern auch die Lebensdauer hängt von der guten Temperierung der Batterie ab, welche grundsätzlich zwischen 20 und 30°C liegt. Deswegen wäre für andere Anwendungen mit höheren Fahr- und Ladeleistungen zusätzlich eine aktive Kühlung der Batterie mittels Umschaltventil und eigenem Kühlkreislauf vorzuziehen.

Selektion der Batterietechnologie

Die Wahl der Batteriezellen beruht auf den vielfältigen Erfahrungen aus bereits abgeschlossenen Projekten der Designwerk GmbH über die letzten 10 Jahre. Diese sind auch in die assoziierte Batteriewerk Schweiz AG eingeflossen. Bei der Auswahl von Batterietechnologie und Zellen waren Anforderungen an Kapazität und Leistung massgebend, aber auch die Ansprüche an Modularität und Redundanz spielten eine wichtige Rolle. Durch Aufteilung in zwei Batteriegehäuse und einzelne Strings pro Gehäuse konnten all diese Anforderungen erfüllt werden. Falls in einem String ein Fehler auftreten sollte, kann mit den restlichen weitergefahren werden. Die Aufteilung in Strings ermöglicht auch bei eventuellen Schäden (z.B. durch Unfall) eine Weiterverwendung der intakten Lagen. Dies ist auch darum wichtig, weil die Batterien einen hohen Anteil an den Materialkosten haben. Weitere Kriterien waren die Qualität und Zuverlässigkeit der Batterietechnologie und Zellen. Dabei sollten vor allem Serienprodukte verwendet werden, zum Beispiel aus der Automobil- oder Unterhaltungselektronik. Die typischerweise in Laptops verwendeten Rundzellen ermöglichen durch die hohe Energiedichte entsprechend hohe Kapazitäten bei begrenztem Bauvolumen. Die Fertigung von Batterien aus einzelnen Rundzellen ist jedoch schwierig, da eine grosse Anzahl an Bauteilen verarbeitet werden muss. Als Alternative dazu wurden prismatische Zellen aus der Automobilindustrie evaluiert. Diese können bereits in Modulen verbaut bezogen werden und sorgen für einen reduzierten Montageaufwand.

Als alternative Zellchemie zu den Lithium-Ionen-Batterien mit Nickel-Mangan-Kobalt-Charakteristik (NMC) wurden Lithium-Eisenphosphat-Batterien (LiFePo₄) evaluiert. Der grösste Nachteil dieser Alternative liegt in der zu geringen kalendarischen Haltbarkeit. Die geringere Anzahl möglicher Zyklen ist ein weiterer Kritikpunkt. Der Vorteil des erweiterten Temperatureinsatzbereiches von LiFePo₄-Batterien wurde durch die Klimatisierung der Batterie wettgemacht.

Die ausgewählten und zertifizierten Module bestehen aus 94-Ah-NMC-Zellen. Die Zellen entsprechen dem Standard *EUCAR L4*. Externe Einflüsse wie Erwärmung, Überladen, Tiefentladen, zu hohe Ladeströme oder externe Kurzschlüsse können zwar einen Masseverlust von über 50% zur Folge haben. Ausgeschlossen werden können gemäss der Klassifizierung aber Feuer, Brüche oder Explosionen. Zudem sind die Module robust genug, um Kollisionen standzuhalten.

Verwendetes Batteriesystem

Für die Stromversorgung des E-LKWs werden pro LKW zwei Fahrzeugbatterien des Typs *Individua 133* der Batteriewerk Schweiz AG verwendet.

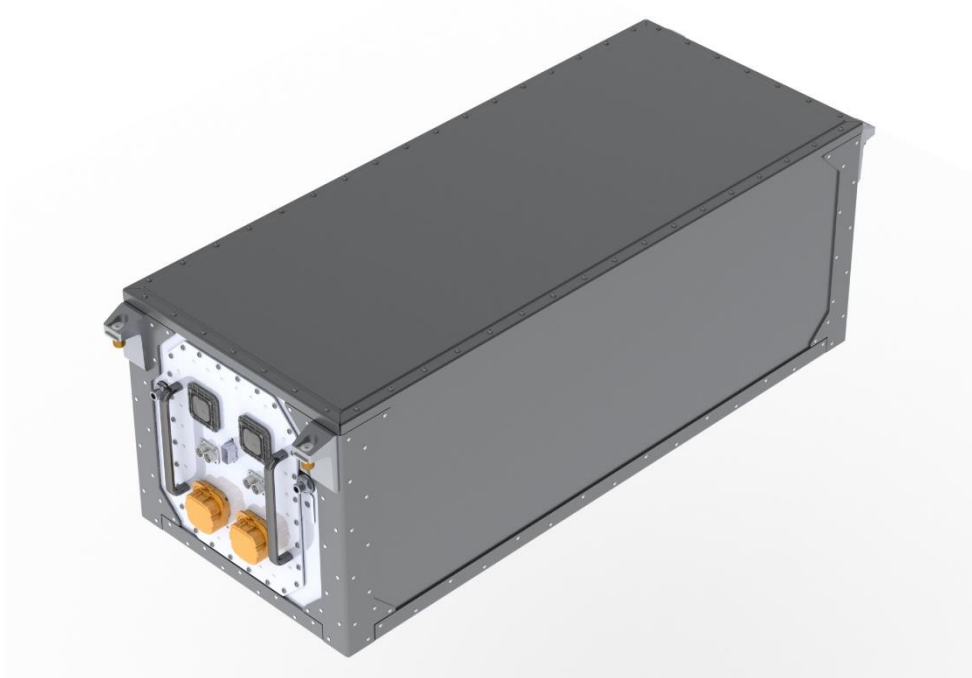


Abbildung 14: Batterie *Individua 133* von Batteriewerk.

Pro Fahrzeug werden zwei Hochvoltbatterien benötigt, welche links und rechts mittels Trägern montiert werden. Die Batterien sind dank einem Wechselsystem austauschbar, was allfällige Servicearbeiten oder den Schichtbetrieb erleichtert. Die einzelnen Batterien haben eine Systemspannung von 360V nominal und 135kWh Energieinhalt. Sie bestehen ihrerseits im Inneren aus vier individuellen Einzelbatterien (sogenannten Strings).

Das verwendete Batteriesystem eignet sich für Betriebstemperaturen zwischen –25 und 50 Grad Celsius. Im Sinne einer längeren Lebensdauer der Batterie kommt beim E-LKW eine Wasserkühlung und -heizung zur Anwendung. Eine eingebaute Isolation beugt zudem ungewollten thermischen Verlusten vor. Alles in allem hat das komplette Batteriesystem pro E-LKW 270kWh Energieinhalt, bei etwas mehr als zwei Tonnen Gewicht, und besitzt eine achtfache Redundanz. Die Batterie überdauert mindestens 4'500 Vollzyklen. Das Gehäuse der Batterie entspricht der Schutzklasse IP6K9K und ist staub- und wasserdicht. Die Batterie verfügt über einen Hochspannungs-Interlock und ist mit einem Isolationswächter sowie Berstplatten ausgestattet. Für die Wartung verfügt sie über einen zusätzlichen Service-Disconnect. Die Diagnosefunktion der Batterien ermöglicht zudem, den Zustand der Batterie in Echtzeit auszuwerten.



Die Technischen Daten der *Individua 133* weisen die folgenden Spezifikationen auf:

Technische Daten *Individua 133*

Modul pro Pack	8s 4p
Kapazität	94 Ah
Nennspannung	360 V
Spannung Max.	395 V
Spannung Min.	260 V
Entladeleistung (5s)	480 kW
Ladeleistung (5s)	400 kW
Interne Sicherung	4 x 350 A
Ansteuerung	CAN 2.0 24 V
Kapazität	135 kWh
Energiedichte	120 Wh/kg
Gewicht	1080 kg
Zellchemie	NMC

Tabelle 4: Technische Spezifikationen Batteriesystem *Individua 133*.

Verwendetes Batterie-Management-System (BMS)

Die Suche nach einer externen Entwicklungsfirma gestaltete sich bei Projektbeginn als herausfordernd. Die meisten auf dem Markt erhältlichen BMS sind für die Nutzung in PKW-Batterien ausgelegt, bei denen Ströme geringer sind als bei LKW-Batterien. Das BMS für den E-LKW muss gleichermaßen über moderne Algorithmen verfügen und den Anforderungen an die Sicherheit im Strassenverkehr gerecht werden. In der Munich Electrification GmbH hat die Batteriewerk Schweiz AG einen Partner für die Auftragsentwicklung gefunden. So beabsichtigte Munich Electrification bereits in der Evaluierungsphase die Entwicklung eines BMS für Batterien in der gewünschten Grössenordnung.

Wichtigstes Merkmal des BMS ist die Funktion des Master/Slave Betriebs. Durch den Aufbau der Batterie aus einzelnen Strings muss das BMS die Parameter zu einer Batterie zusammenfassen. So werden aus den gemessenen Temperaturen und Ladezuständen der einzelnen Strings ein Gesamtbild der Batterie erstellt. Auf Basis dieses Gesamtbildes wird vom BMS die mögliche Leistung der Batterie ermittelt und der Fahrzeugsteuerung mitgeteilt. Dies ist wichtig, um die Batteriezellen nicht übermässig zu belasten. Während im normalen Betrieb höchstens die Entladeleistung bei sehr geringem SoC limitiert wird, kann es vorkommen, dass nach längerer Standzeit bei kalter Umgebungstemperatur die Leistungsfähigkeit eingeschränkt werden muss, bis die Temperatur durch Betrieb und Heizung wieder im optimalen Bereich liegt.

Durch die Messung des Stromes pro String, von Temperaturen an verschiedenen Orten eines Strings und allen Zellspannungen kann das BMS Warnungen und Errors ausgeben falls die festgelegten Betriebsparameter über- oder unterschritten werden. Dies geht bis zum Ausschalten eines Strings um eine Zerstörung der Batteriezellen zu verhindern.

Um eine möglichst grosse Kapazität der Batterien zu nutzen, müssen die einzelnen Zellen möglichst identische Spannungen haben. Damit die möglichen geringfügigen Herstellungsunterschiede der Zellen ausgeglichen werden können, besitzt das BMS eine «Balancingfunktion». Durch die hohe Qualität der Zellen und die seltene Notwendigkeit des Balancings wurde die passive Balancingfunktion als genügend eingestuft. Passives Balancing bedeutet, dass nur die höchstgeladenen Zellen entladen werden. Die Alternative dazu – das aktive Balancing – verschiebt die Ladung von einzelnen höher geladenen Zellen zu weniger geladenen Zellen. Der grössere Aufwand für die Entwicklung und die komplizierteren Schaltungen, dazu die Notwendigkeit dies auch über alle Strings hinweg zu ermöglichen sowie die seltene Notwendigkeit aufgrund der hohen Zellqualität, führten zum Beschluss, das passive Balancing zu verwenden.

Das gelieferte BMS basiert auf dem bestehenden Monaco BMS, welches der ISO-Norm 26262 entspricht und damit die funktionale Sicherheit von elektrischen und elektronischen Komponenten in Kraftfahrzeugen gewährleistet. Die Software-Architektur erlaubt dabei Anpassungen bei der Hardware, Fahrzeugschnittstelle oder bei Batteriepaketen. Gleichzeitig bietet die Software eine Schnittstelle für den Code von Designwerk zur Fahrzeugsteuerung.

Das BMS misst den Strom mit einer Fehlerquote von weniger als 0.5% und kann auf zu hohe Ströme reagieren. Gleichzeitig verfügt das BMS über eine Kollisionserkennung. Es ist in der Lage, die Ladung des Fahrzeugs zu steuern, Ströme und Spannungen zu limitieren, den Lade- und Lebenszustand der Batterie zu ermitteln sowie den Energieverbrauch vorauszusagen.

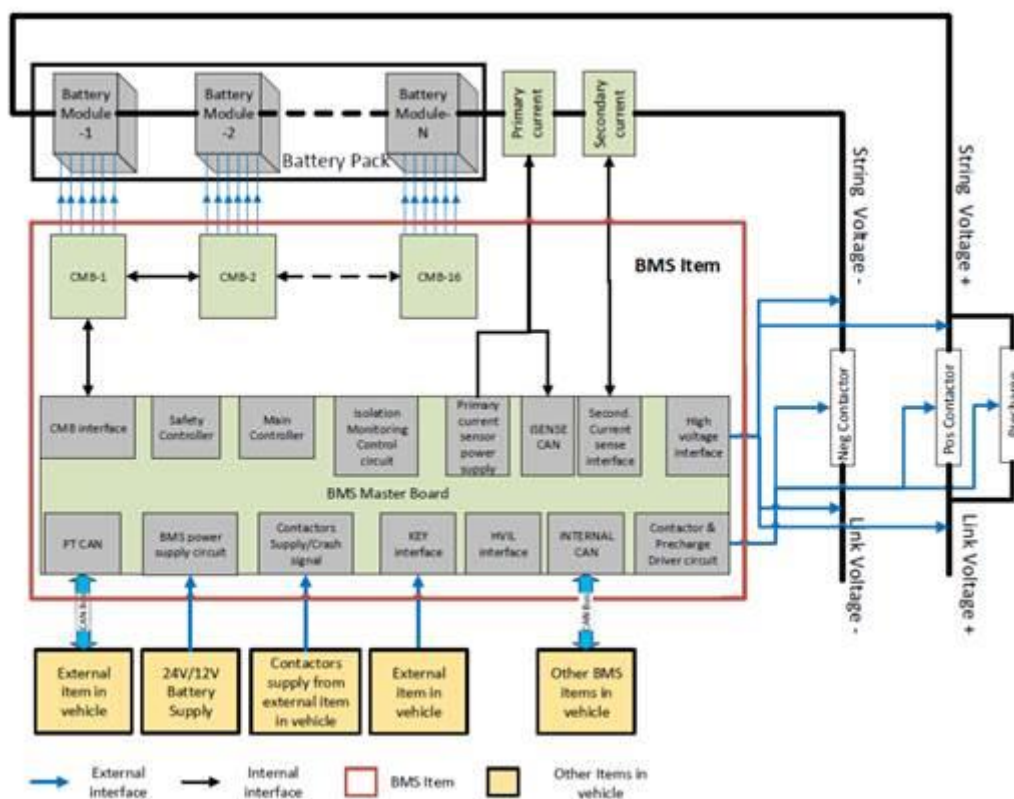


Abbildung 15: Aufbau Batterie-Management-System (BMS).



Verwendete Ladetechnologie

Zur Ladung der Batterie wird im E-LKW ein *OnBoard*-Ladegerät mit einer Leistung von 22 kW verbaut. Das Ladegerät dient dazu, Wechselstrom von Steckdosen in Gleichstrom umzuwandeln. Gleichzeitig stellt es die galvanische Trennung des Netzes vom Hochvoltsystem im Fahrzeug sicher.

Die Alternative dazu wäre, das Fahrzeug direkt mit Gleichstrom zu laden, da die verwendeten Batterien schnellladefähig sind. Aufgrund der Präferenzen der Pilotkunden und dem in der Schweiz geltenden Nachtfahrverbot für LKW geht das Entwicklungsteam davon aus, dass die Ladung über Nacht ausreichend ist und von der Kundschaft akzeptiert wird.

Beide Lademöglichkeiten werden durch entsprechende Sicherungen gegen zu hohe Ströme abgesichert. Die Initialisierung des Ladevorgangs übernimmt die Fahrzeugkontrolleinheit (VCU). Während des Ladevorgangs ist der Fahrbetrieb nicht möglich, um das Ausreissen von Kabeln zu verhindern. Über CAN werden Informationen zwischen den Batterien, beziehungsweise deren Batterie-Management-System, mit dem Ladegerät ausgetauscht. Das sorgt wiederum für einen sicheren und effizienten Ladevorgang. Offen bleibt die Möglichkeit, das Ladegerät auf geringere Ströme sowie den einphasigen Betrieb einzustellen. Der Verschlussmechanismus in der Ladebuchse verhindert das unwillentliche Ausstecken des Ladekabels während dem Ladevorgang, bis dieser ordnungsgemäss durch die Fahrzeugsteuerung beendet wurde.

Die folgende Tabelle verdeutlicht die Ladezeiten gemäss den entsprechenden Ladesystemen. Bei der Ladung wird von der bestehenden Batteriekapazität von 270 kWh bei einer Ladung von 80% ausgegangen. Grundsätzlich wird das Fahrzeug vor seinem Einsatz nicht vollgeladen, um die Batterielebensdauer zu erhöhen. Vorschriften in Bezug auf die Fahrzeugbremse setzen zudem voraus, dass ein Fahrzeug verschleissfrei gebremst werden kann. Damit das in diesem Fall möglich ist, muss der Motor beim Bremsen als Generator verwendet werden. Dabei fliesst die beim Bremsen gewonnene Energie zurück in den Batteriespeicher. Um das verschleissfreie Bremsen des E-LKWs zu ermöglichen, wird die Ladekapazität deshalb standardmässig auf 90% beziehungsweise 243 kWh reduziert.

System	SOC / Kapazität	Ladedauer	Kosten
Verwendetes OnBoard-Ladegerät 22 kW	80% von 270 kWh	9.80 Stunden	ca. 6'590 CHF
Alternativen, die mit DC-Ladung möglich wären:			
Fahrzeugseitige Komponenten für OffBoard-System			ca. 6'500 CHF
OffBoard-Ladegerät MDC-Linie 44 kW	80% von 270 kWh	4.90 Stunden	ca. 52'700 CHF
OffBoard-Ladegerät MDC-Linie 88 kW	80% von 270 kWh	2.45 Stunden	ca. 98'800 CHF
OffBoard-Ladegerät 200 kW	80% von 270 kWh	1.08 Stunden	ca. 197'700 CHF

Tabelle 5: Ladezeiten nach verwendetem Ladesystem.



Fahrzeugzulassung und Tests

Für die Zulassung vollelektrischer E-LKW sind verschiedene Tests erforderlich. Die Fahrzeuge wurden den folgenden Tests unterzogen:

- Motorfahrzeugkontrolle (MFK) – Typ X, Einzelzulassung
- Bremsenprüfung
- Lenkprüfung
- Einhaltung Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse (NEV)
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Während des Zulassungsverfahrens konnte die Designwerk GmbH von Erfahrungen aus vergangenen Projekten profitieren. Allerdings sind die Anforderungen an Einzelzulassungen des Typs X gestiegen. Neu gefordert werden im Falle der Einzelzulassung von Elektrofahrzeugen die Prüfung auf deren Elektromagnetische Verträglichkeit sowie eine FAKT-Prüfung. Die Tests erwiesen sich dabei als aufwändiger als ursprünglich geplant. So musste das Fahrzeug insgesamt dreien Tests unterzogen werden bis die elektromagnetische Verträglichkeit bestätigt werden konnte.

Ausschlaggebend für das initiale Scheitern bei der EMV-Prüfung war ein einziger nicht korrekt verbundener Pin. Die zweite Fehlerquelle wurde Bauteilen innerhalb der Low Voltage Distribution Unit (LVDU) zugeordnet, welche Störungen verursacht haben. Nach der korrekten Verbindung des Pins und der Filterung der Abstrahlung der LVDU konnten die Probleme behoben und der Test bestanden werden.

Hinderlich bei der FAKT-Prüfung war des Weiteren ein Beschleunigungstest. Ausschlaggebend waren hier die höhere Fahrzeugleistung und die damit verbundenen Getriebe- und Abrollgeräusche. Rein subjektiv werden diese Geräusche – insbesondere im Verhältnis zur erbrachten Leistung – nicht als Lärm wahrgenommen. Beim Test waren die aufgrund der hohen Fahrzeugleistung verursachten Geräusche dennoch hinderlich. Dem Problem konnte letztlich mittels einer moderateren Fahr- und damit Beschleunigungsweise entgegengewirkt werden.

Die Designwerk GmbH geht aufgrund der neu gesammelten Erfahrungen davon aus, dass das neue, aufwändigere Zulassungsverfahren für Fahrzeuge des Typen X künftig Einfluss auf Umrüstungsprojekte hat. *Retrofits* – wie Umrüstungen von Fahrzeugen genannt werden – weg vom Verbrennungs- hin zum Elektroantrieb erfreuten sich in der Vergangenheit grosser Beliebtheit. Möglich wäre, dass hohe personelle und finanzielle Aufwände solche Projekte von Privaten und kleineren Unternehmungen künftig erschweren oder gar verunmöglichen.



Monitoringkonzept der Fahrzeuge

FuturicumTrack

info@design-werk.ch

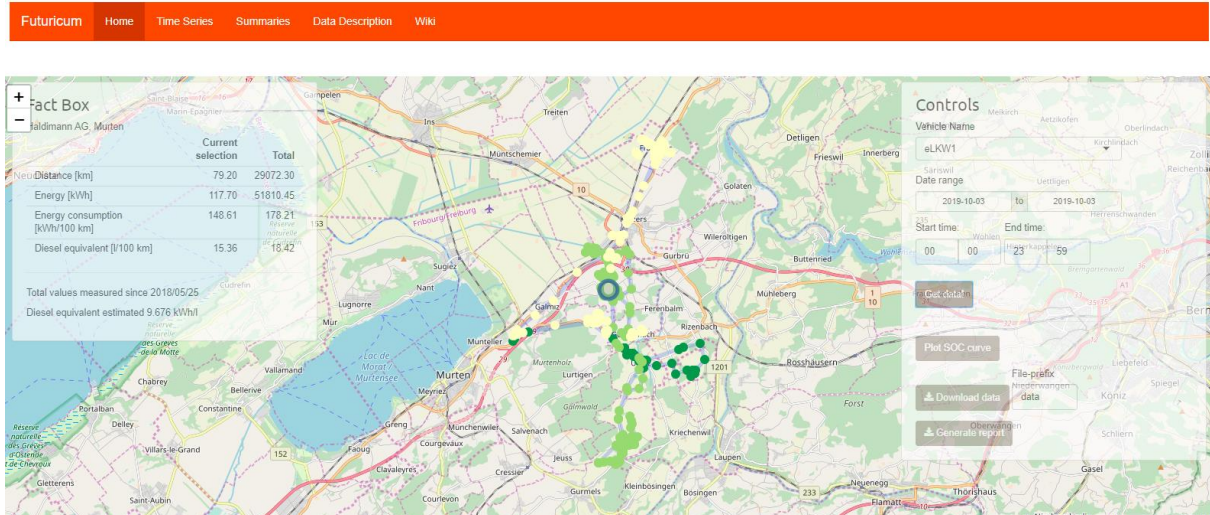


Abbildung 16: Dashboard Monitoring Futuricum Track.

Das in den Fahrzeugen installierte Datenaufzeichnungsgerät ist direkt am *CAN-Bus* angebunden. Neben den zur eventuellen Fehleranalyse erstellten Datensätzen werden unter anderem folgende relevante Daten einmal pro Minute aufgezeichnet und an eine Cloud übertragen:

- State Of Charge (SoC)
- Batterieleistung
- Motorenleistung
- Leistung der Wertstoffpresse
- Temperaturen verschiedener Komponenten
- Verbleibende Energie der Batterie
- Total gefahrene Kilometer
- Gesamtgewicht des Fahrzeugs
- GPS Ortungsdaten

Funktionalität des Monitoring-Systems

Für die Übermittlung der Daten kommt ein CANlink mobile 5303 der *RM Michaelides Software & Elektronik GmbH* zur Anwendung. Das Gerät zeichnet die ausgewählten CAN-Messages des Bus-Systems gemäss dem in der VCU programmierten Nachrichtensatz auf. Eine DBC-Datei dient dabei der Interpretation dieser Daten und verdeutlicht, welchen Stellen welche Bedeutung im Nachrichtensatz zukommt. Der Datenlogger übermittelt die Daten anschliessend jede Minute mittels GSM an die Cloud des Hardware-Anbieters.



Zur Interpretation der Daten kommt ein Parser zum Einsatz, welcher die übermittelten Daten in das entsprechende Format für die Weiterverarbeitung umwandelt. Die Fahrzeugdaten können dann einerseits im Portal des Herstellers für die manuelle Auswertung heruntergeladen oder online visualisiert werden. Möglich ist es auch, diese Daten mittels REST API anderen Programmen zur Verfügung zu stellen. Von dieser Möglichkeit macht auch Designwerk Gebrauch. Gemeinsam mit der Interstaatlichen Hochschule für Technik (NTB) hat sie auf einem virtuellen Server die quelloffene Applikation *Shiny* aufgesetzt. Die NTB wird anschliessend mittels REST auf die Daten des Proemion Servers zugreifen. *Shiny* ermöglicht darauf unter Anwendung der Programmiersprache «R» die Abwicklung statistischer Aufgaben. Dazu gehören etwa Berechnungen oder auch die Darstellung von Grafiken. Das so gestaltete Datenportal ermöglicht es nach dessen Fertigstellung, auf Zeiträume bezogene Berichte für Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsauswertungen zu generieren.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht vereinfacht die Funktionsweise des Monitorings der Fahrzeugdaten.

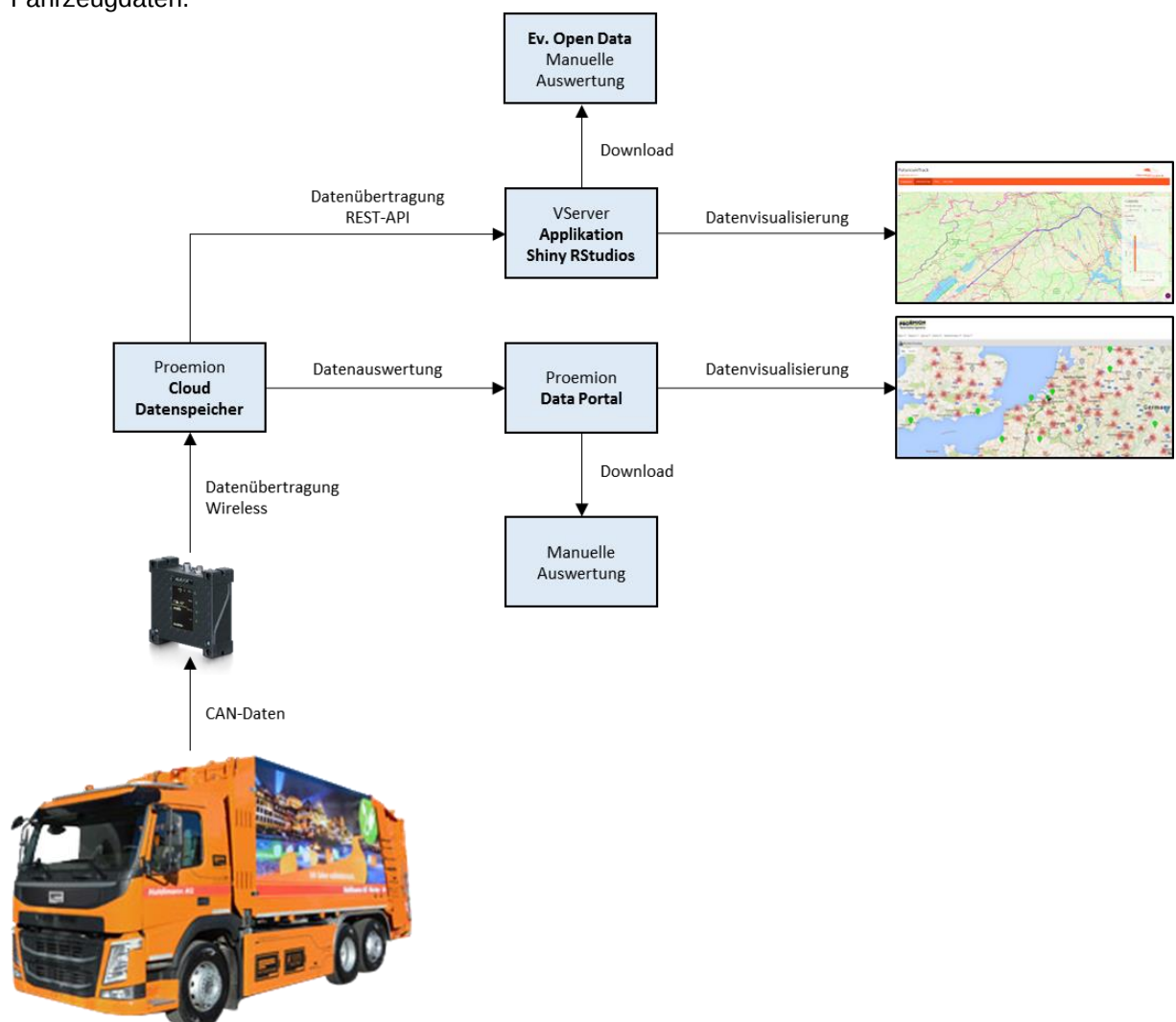


Abbildung 17: Funktionsweise des Monitorings.



Vorgehen / Methode

Grundsätzlich hat sich die Designwerk GmbH an den leitenden Entwickler im Rahmen der Projektumsetzung am firmeneigenen Design- und Entwicklungsprozess orientiert. Zunächst wurden die Anforderungen gesammelt und in ein Lastenheft geschrieben. Davon abgeleitet wurden das Pflichtenheft sowie ein Projekthandbuch. Da die Designwerk GmbH bereits in früheren Projekten fundierte Erfahrungen bei Entwicklung und Bau von elektrischen Nutzfahrzeugen sammeln durfte, profitierte die Unternehmung zudem von Erfahrungsdaten, welche für das neue Projekt skaliert werden konnten.

Eine unbekannte Variable war allerdings der Energieverbrauch des Fahrzeugs. Hierbei war noch nicht klar, wie viel *Stop-and-go-Betrieb* effektiv anfällt und wie hoch der Verbrauch des Pressaufbaus ausfällt. Für die entsprechende Abschätzung wurde der Dieserverbrauch eines herkömmlichen Dieselfahrzeugs sowie die Erfahrungswerte der Contena-Ochsner AG herangezogen. Anhand dieser Werte wurde die Soll-Batteriegrösse ermittelt.

Entwicklung Mechanik

Bei der mechanischen Auslegung wurde der Fokus – neben der Einhaltung aller vorausberechneten Kenngrössen – vor allem auf folgende Punkte gelegt:

- Modularer Aufbau: Es werden klare Schnittstellen zum Chassis definiert und die Komponenten in Baugruppen aufgeteilt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine einfache Vormontage aller entscheidenden Komponenten unabhängig vom Chassis – und erlaubt damit eine hohe Planungsflexibilität.
- Verwendung von Normteilen und Grossserien-Komponenten: Neben einer hohen Verfügbarkeit und den guten Preisen profitiert die Entwicklung auch von einem hohen Qualitätsstandard und Reifegrad der einzelnen Komponenten.
- Wartungsfreundlichkeit: Die Komponenten werden im Hinblick auf grösstmögliche Zugänglichkeit platziert. Dies ermöglicht eine hohe Wartungsfreundlichkeit und möglichst kurze Ausfallzeiten.
- Redundanz: Kernkomponenten vom Antrieb und Batterie werden in mehrfacher Ausführung verbaut. Dadurch ist der Fahrbetrieb – mit reduzierter Leistung – auch bei Ausfall von einzelnen Komponenten möglich.

Entwicklung Hardware und Verkabelung

Bei der Elektrik stellte sich zunächst die Frage nach der Höhe der HV-Spannung. Für höhere Antriebs- und Ladeleistungen ist generell eine möglichst hohe Spannung anzustreben, damit die Ströme und folglich die Kabelquerschnitte nicht übermässig gross gewählt werden müssen. Wegen den für Elektrofahrzeuge vorgesehenen Spannungsklassen sollte dennoch in keinem Betriebsfall 1000V DC überschritten werden. Grössere Nutzfahrzeuge wie Elektrobusse, aber auch Strassenbahnen und U-Bahnen, nutzen einen Spannungsbereich im Bereich von 650V DC. Bei elektrischen Automobilen sind Spannungen von 320 bis 450V DC üblich. Erste Serienfahrzeuge mit über 800V DC wurden im Projektverlauf angekündigt und werden ab 2019 als Serienmodelle lanciert.

Die Wahl ist im Endeffekt – trotz der höheren Ströme – auf den Spannungsbereich im Bereich 360V DC nominal gefallen, da hier bislang die meisten ausgereiften und kostengünstigen Komponenten am Markt verfügbar sind. Dies betrifft nicht nur den Antrieb mit den Invertern und Motoren, sondern auch Klimakompressoren, HV-Heizer, Sicherungen, Stecker und weitere Komponenten. Somit fiel die Wahl auf Spannungsebenen in der Höhe von 360V DC für alle Leistungskomponenten, 24V für Fahrzeugverbraucher und Steuerungskomponenten, und 12V für einige wenige Komponenten, die nicht



in der Spannungsklasse von 24V erhältlich waren. Das HV-Netz muss die HV-Batterien, die HVDU mit Sicherungen, die Inverter mit Motoren, den PTO (*power take-off*), Inverter mit Motor, den Luftkompressor, den Klimakompressor und den HV-Heizer umfassen. Das HV-Netz wurde nach den gängigen Automotiv-Normen als IT-Netz ausgelegt. Alle HV-Kabel sind dabei geschirmt und dank der orangenen Farbe klar gekennzeichnet. Die Verbindung zu den HV-Batterien ist steckbar ausgeführt, was deren einfachen Ersatz ermöglicht.

Die Signalverkabelung mit CAN-Bus und 12- und 24V-Leitungen verlaufen sternförmig, ausgehend von dem Steuerungs- und Verteilerkasten (LVDU) zu den einzelnen Komponenten in den einzelnen Baugruppen. Aus Montage- und Wartungsgründen wurden viele Verbindungen steckbar ausgeführt. Das hat sich inzwischen im Betrieb bewährt, zum Beispiel als einzelne Komponenten (DC-DC-Wandler, HV-Heizer) einen Defekt hatten und ausgetauscht werden mussten.

In der Fahrerkabine sind alle CAN-Bus-Leitungen für die Diagnosemöglichkeit zugänglich. Der Datenlogger und das Telemetrie-Gerät für Ferndiagnose und Auswertung befindet sich ebenfalls dort. Für den Fahrer sind alle antriebsrelevanten Daten in einem separaten Display abrufbar. Über dieses Display lassen sich zudem einige Einstellungen wie der maximale Ladezustand oder die Farbmodi verändern.

Die hydraulische Energieversorgung des Aufbaus (PTO) erfolgt über einen separaten Motor, der eine Hydraulikpumpe antreibt und von HV-Netz versorgt wird. Dieser Motor wurde an der Rückwand des Aufbaus montiert.

Das 24V-Bordnetz wird von den zwei originalen Bleibatterien gepuffert, welche über den Boardnetzwanandler (DC/DC) geladen werden – und zwar immer dann, wenn die HV-Batterien zugeschaltet sind. Die Batterien sind jeweils links und rechts hinter den HV-Batterien montiert. Unter der linken Batterie befinden sich die Sicherungen zur Grobverteilung für das gesamte Fahrzeug. Ebenfalls unter der Batterie gibt es eine NATO-Anschlussbuchse, um die 24V-Batterie extern nachladen oder von einem anderen Fahrzeug überbrücken zu können.



Entwicklung Batterie

Die Positionierung der Batterien zwischen der ersten und zweiten Achse des LKWs ermöglicht ein einfaches montieren am Fahrzeug. Durch das Gewicht von über einer Tonne ist ein manuelles Anheben unmöglich. Mit der Luftfederung des LKWs kann das ganze Fahrzeug abgesenkt werden und die Batterie auf einem Transportwagen deponiert werden.

Für die mechanischen Anforderungen an die Aufhängepunkte der Batterie wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit verschiedene Simulationen und Shakertests durchgeführt, um die mechanische Stabilität zu überprüfen. Die dabei entdeckten Schwachstellen konnten in der Folge eliminiert werden. Neben der mechanischen Stabilität ist die Wasserdichtheit ein weiteres zentrales Kriterium. Diese wurde bei der Konstruktion der Deckel und Dichtungen an einem leeren Gehäuse überprüft und erfolgreich getestet.



Abbildung 18: Aufbau *Individua 33*.



Entwicklung Software

Durch den Wegfall des Dieselmotors, des Schaltgetriebes, der Abgasreinigungsanlage und deren Steuergeräte mussten deren Signale auf dem CAN-Bus mittels der eigenen Steuerung simuliert werden. Für diesen Zweck ist der Zugriff auf CAN-Informationen des Chassis-Herstellers erforderlich. Ohne diese Simulation würden Fahrassistenzsysteme, Anzeigen, Fehlermeldungen und dergleichen nicht oder nicht korrekt funktionieren. Dieses Programm, welches auch die Schnittstelle zum Chassis darstellt, läuft zusammen mit dem Programm für die Kontrolle des kompletten Elektroantriebs und des Energie- und Lademanagements auf einem Steuergerät, und ist auf dem Drivemodul montiert. Das Steuergerät wurde dort zusammen mit der LV 24V- und 12V-Verteilung mit Sicherungen in einem Schaltkasten (LVDU) untergebracht.



Ergebnisse

Das nachfolgende Kapitel verdeutlicht die innerhalb des Leuchtturmprojekts gewonnenen Erkenntnisse. Es zeigt auf, welche Erfahrungen die Projektpartner und Einsatzbetriebe sammeln konnten. Anschliessend geht es auf die erhobenen telemetrischen Daten und deren Auswertung ein. Auf deren Basis werden auch die Betriebskosten über den Lebenszyklus ermittelt sowie ein energetischer Vergleich mit Dieselfahrzeugen vorgenommen. Das Kapitel verdeutlicht zudem die Ergebnisse der Lärmmessungen und schliesst mit der Erhebung der Akzeptanz der Fahrzeuge anhand von Erfahrungsberichten und Rückmeldungen.

Erfahrungen aus dem Bau der Fahrzeuge

Wie in jedem Projekt dieser Grössenordnung gab es während dem Bau der Fahrzeuge stetig erfreuliche, aber auch weniger erfreuliche Ereignisse und Erfahrungen. Folgend einige Punkte, denen ein zukünftiger Leiter eines ähnlichen Projektes besondere Beachtung beim Aufbau schenken sollte:

Die Fahrzeuge zum Rollen zu bringen erwies sich dank dem zuvor gut ausgearbeiteten Konzept als erstaunlich einfach, sodass die Detailarbeiten schon früh angegangen werden konnten.

Immer wieder erwies sich dafür die Integration von OEM-Teilen schwieriger als erwartet, da die Dokumentationen teilweise unzureichend sind. So mussten beispielsweise Sonderteile angefertigt werden, um die Druck- und Saugleitungen des Klimakompressors anschliessen zu können. Dies weil die genauen Masse nicht ausfindig gemacht werden konnten bis die Komponenten ausgeliefert wurden. Auch ist das Beziehen von kleinen Stückzahlen oft nicht ganz einfach und die Lieferfristen können mehrere Monate betragen.

Konstruktions- und produktionstechnisch sind die unterschätzten Drehschwingungen der langen Antriebswelle sowie die Bewegung des Drivemoduls durch die extremen Momente am Abtrieb erwähnenswert, wobei die Schwingungen der Welle mittels Regelung minimiert werden konnten. Auch die zwingend nötige, aber schwierig zu erreichende Präzision der grossen Zahnräder im Getriebe wurde unterschätzt: Das erste gelieferte Zahnrad war oval und daher nicht brauchbar. Ein neues, passendes Zahnrad zu fertigen und auszuliefern dauerte vier Monate.

Softwareseitig war die Simulation und Steuerung der originalen, aber nun ausgebauten oder ausgetauschten Komponenten die grösste Herausforderung. Sämtliche Komponenten wie zum Beispiel die Antischlupfregelung oder der Druckluftkompressor werden im originalen Fahrzeug stets überprüft und für optimale Laufleistung angesteuert. Exemplarisch hatte der ausgetauschte Luftkompressor eine im Vergleich zum Original unterschiedliche Füllleistung. Diese Diskrepanz addierte sich im Verlauf der ersten Wochen zu einem Fehler im Druckluftspeicher, welcher nach einer gewissen Zeit zu einer Fehlerausgabe im Steuergerät führte. Dieser musste für die Zukunft softwareseitig behoben werden. Zusätzlich war es eine Herausforderung, solche Fehler für die Fahrer der Fahrzeuge verständlich und nicht abschreckend darzustellen.

Zusätzlich erwiesen sich einige Komponenten wie beispielsweise die HV-Heizung, der Nebenantrieb sowie die Lenkung als aufwändiger zum Programmieren als erwartet, da teilweise uns unbekannte Protokolle (z.B. LIN-Bus) oder Software benutzt werden musste. Verallgemeinernd ist die grösste Herausforderung, die Insassen des Fahrzeugs nicht wissen zu lassen, dass sie in einem umgebauten Fahrzeug sitzen und ihnen maximale Sicherheit bei hohem Fahrkomfort zu bieten. Dafür muss nach dem initialen und schnellst möglichen Fahren vor allem viel Zeit in die Softwareoptimierung investiert werden.



Auswertung der Fahrdaten

Mittels des mit der NTB entwickelten Monitoringportals hat die Designwerk GmbH automatisch Berichte analog dem Beispiel in Anhang A (Report eines Monitorings) über den Auswertungszeitraum vom 01.09.2018 bis zum 01.09.2019 erstellt. Das Dieseläquivalent des Stromverbrauchs in Kilowattstunden wird zudem mit einem Heizwert pro Liter Diesel in der Höhe von 9.676 kWh/l errechnet. Diese Werte dienen im Anschluss dem Vergleich mit Fahrzeugen mit anderen Antriebsformen.

Fahrzeug	Gefahrene Distanz [km]	Umgesetzte Energie [kWh]	Durchschnittsverbrauch [kWh/100km]	Errechnetes Dieseläquivalent [l]	Errechnetes Dieseläquivalent Heizwert [l/100km]
E-LKW 1: Haldimann AG	20'989	37'773	180.0	3'348	18.60
E-LKW 2: Svedel S.A.	27'468	43'283	157.6	2'566	16.28
E-LKW 3: Stadt Thun	15'814	30'677	194.0	3'889	20.10
E-LKW 4: Stadt Lausanne	11'646	26'353	226.3	5'292	23.38
	Σ 75'917	Σ 138'086	Ø 189.47	Σ 15'095	Ø 19.59

Tabelle 6: Zusammenfassung der Fahrdaten auf Basis von Anhang B (Auswertung der Fahrdaten).

Insgesamt haben die Fahrzeuge im Auswertungszeitraum eine Strecke von 75'917 km zurückgelegt. Davon ausgegangen, dass in diesem Zeitraum von 365 Tagen abzüglich von 104 Wochenendtagen und neun Feiertagen an 252 Arbeitstagen Abfälle gesammelt wurde, beläuft sich die durchschnittliche Sammelstrecke auf 75.31 km. Dieser Wert liegt leicht unter den im Rahmen der Projektarbeit ermittelten Wert von 73.3 km pro Tag. Die SVEDEL S.A. hat unter den vier Einsatzbetrieben die höchste kalkulatorische Strecke von 109 km pro Tag zurückgelegt. Diese Ergebnisse und die nachfolgende Abbildung 10 verdeutlichen, dass die Batterie sowie deren Energiereserven im Sammelbetrieb ausreichend dimensioniert wurden.

Wie die Ergebnisse aus Tabelle 5 bereits vermuten lassen, legen die vorwiegend innerstädtisch betriebenen Fahrzeuge geringere Strecken zurück. Allerdings weisen sie einen höheren Durchschnittsverbrauch (ausgedrückt in Kilowattstunden pro hundert Kilometer) auf. Begründen lässt sich dies mit der Anzahl Stopps aufgrund der höheren Siedlungsdichte und der damit verbundenen Anzahl Hebe- und Pressvorgänge. Diese haben im innerstädtischen Betrieb einen höheren Energieverbrauch des Nebenaggregats zur Folge.

Der wesentlich höhere Energieverbrauch im Einsatz in der Stadt Lausanne dürfte zusätzlich mit den topografischen Gegebenheiten zusammenhängen. So ist das Terrain im Sammelgebiet steiler als in den Gebieten der anderen Betriebe. Folglich wird bei einer häufigeren Anzahl Anfahrten aus dem Stand zusätzlich eine höhere Fahrleistung abgerufen. Der höhere Energieaufwand kann dabei nicht vollständig durch die Gewinnung der beim Bremsen rekuperierten Energie kompensiert werden. Aus verschiedensten Tests bei den Kundenfahrzeugen geht hervor, dass die Rekuperationsrate stark von der Topographie und dem Fahrer abhängig ist. Die durchgeführten Tests zeigten auf, dass bei grossen Höhenunterschieden die Hälfte der Energie, die bei der Bergauffahrt aufgewendet wurde, wieder zurückgewonnen werden konnte. Hier wird jedoch auch deutlich, dass dabei das Gewicht eine wesentliche Rolle spielt. Je höher das Gewicht bei der Bergabfahrt, desto höher der Anteil an gewonnener Energie bei Rekuperationsvorgängen. Abbildung 11 verdeutlicht die Aufteilung des Energieaufwands auf die Verbraucher der Fahrzeuge der Haldimann AG (oben) und der Stadt Lausanne (unten).

Batterie

Bei der Batterie konnten nach den ersten Messungen aus dem Monitoringtool keine Beschädigung bzw. Einschränkung der Batterie festgestellt werden. Der SoH (State of Health) der Batterie erwies an den beiden Messdaten (18.01.2018 und 25.07.2019) jeweils 100%. Um hier jedoch aussagekräftigere Schlüsse auf den «Gesundheitszustand» der Batterien ziehen zu können, ist eine Messung auf einem Prüfstand notwendig. Festzuhalten ist jedoch, dass die Kunden der vier Fahrzeuge keine Reklamationen hinsichtlich reduziertem «Range» meldeten.

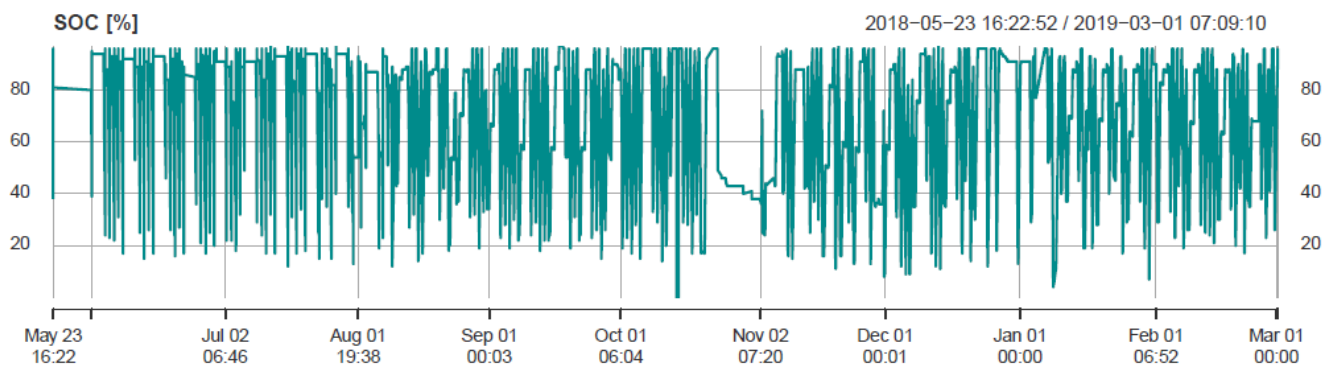


Abbildung 19: SoC des E-LKW Lausanne über den Zeitraum 23.05.2018 – 01.03.2019.

Das Fahrzeug der Stadt Lausanne beendete seine Sammeltouren mit Ausnahme von Überführungen für Messeauftritte und Servicearbeiten meist mit einem SoC von über 40% (vgl. Abbildung 10). In der Tabelle 5 ausgewiesene Unterschiede bei den gefahrenen Kilometern zwischen den Einsatzbetrieben dürften insbesondere auf die geografische Nähe zum Sammelgebiet und der jeweiligen KVA zurückzuführen sein.

Die nachfolgende Abbildung 12 visualisiert die benötigte Energie für die jeweiligen Arbeitsvorgänge in dem Zeitraum 18.05.2018 – 01.03.2019.

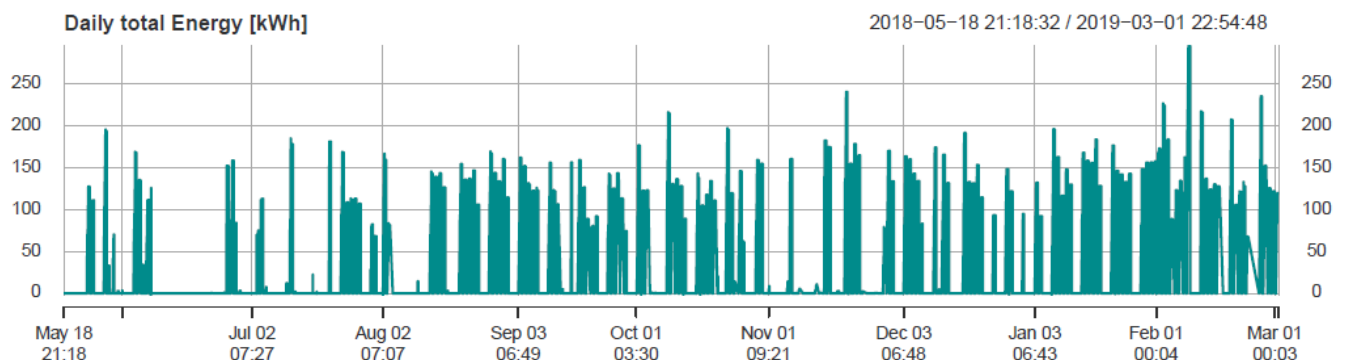


Abbildung 20: Daily total Energy über den Zeitraum 23.05.2018 – 01.03.2019.

Folgend werden die Begrifflichkeiten der unten aufgeführten Abbildung kurz erläutert:

- **Motor:** Die für die Bewegung notwendige Energie
- **Aux (Auxiliary):** Komponenten, die Energie benötigen, wie z.B. Lenkenergie, Luftaufbereitung etc.
- **PTO (Power take-off):** Die Energie für die Nebenaggregate (Presssystem)
- **DCDC.24V:** Energie für die Versorgung der 24V-Komponenten

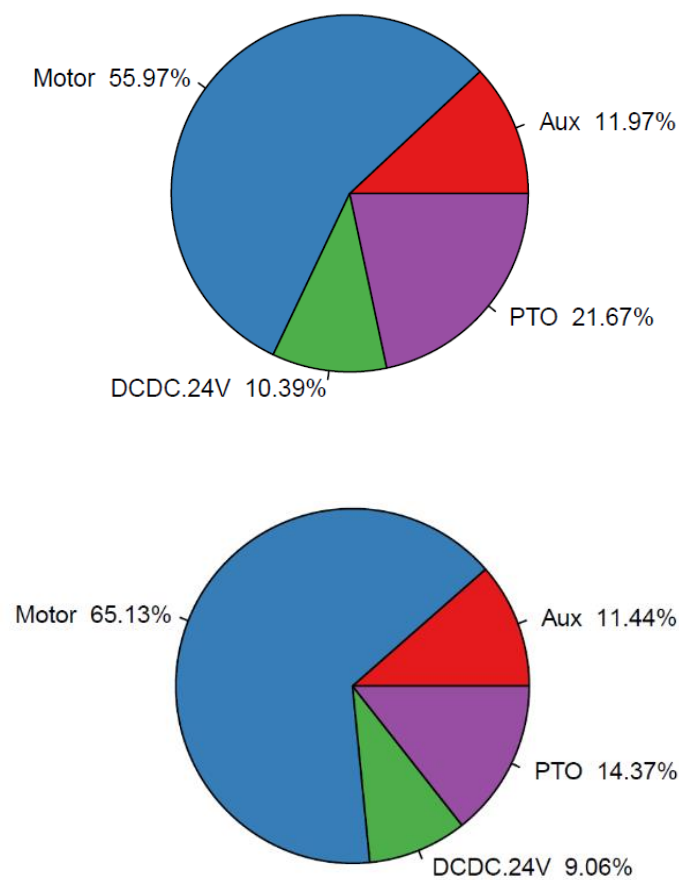


Abbildung 21: Prozentuale Anteile des Energiebedarfs der Fahrzeuge der Haldimann AG (oben) und der Stadt Lausanne (unten).



Der errechnete Durchschnitts-Energieverbrauch für **100 Kilometer Strecke** beläuft sich auf **189.47 kWh**. Dieser Verbrauch entspricht einem **Energieäquivalent** von rund **19.59 l Diesel** für eine Strecke von 100 Kilometern. Dem gegenüber stehen die nachfolgenden Verbrauchsdaten ausgewählter Diesel- und Hybrid-Fahrzeuge der Haldimann AG.

Kennzeichen	Jahrgang	Fahrzeug	Aufbau	Schüttung	Verbrauch in l/100 Km
FR 152277	2013	Volvo FM 12 6x2 Hybrid	Stummer Plug In	SK 351	47.4
FR 152252	2014	Volvo FM 12 6x2	Stummer	Zöller Gamma	67.39
FR 152275	2015	Volvo FM 12 6x2	Stummer	Zöller Rotary Spüleinheit	65.75

Tabelle 7: Verbrauchsdaten ausgewählter Fahrzeuge der Haldimann AG im Jahr 2016.

Die Tabelle bezieht sich auf das Jahr 2016. Abgebildet sind gemäss der Haldimann AG Daten von Fahrzeugen, welche bereits mit verhältnismässig modernen Technologien ausgerüstet sind. In den Motorenleistungen sind die Leerlaufstunden inbegriffen. Ältere, mit automatisierten Getrieben ausgerüstete Sammelfahrzeuge wenden gemäss der Haldimann AG ansonsten bis zu 100 Liter Diesel für 100 Kilometer Strecke auf. So weist die vor dem Leuchtturmprojekt durchgeführte Projektarbeit anhand der 2013 bei KVA erhobenen Verbrauchsdaten einen durchschnittlichen Dieserverbrauch in der Höhe von 92.9 l pro 100 km aus. Der Höchstwert liegt im Falle der KVA Bazenheid bei 115 l. Bei Hybridsystemen rechnet die Haldimann AG generell mit einem bis zu 30% niedrigerem Treibstoffverbrauch pro 100 Kilometer Sammelstrecke im Vergleich zu rein dieselpetriebenen Fahrzeugen im eigenen Fuhrpark.

Die folgende Tabelle verdeutlicht die eingesparte Energie für den Betrieb der innerhalb des Leuchtturmprojekts gebauten Fahrzeugen. Für den Vergleich werden die in der Projektarbeit ermittelten Verbrauchsdaten der Dieselfahrzeuge herangezogen.

Fahrzeug	Durchschnitts- verbrauch Diesel [l/100km]	Durchschnitts- verbrauch [kWh/100km]	Rechnerisches Dieseläquivalent Heizwert [l/100km]	Energie Vergleich Dieselfahrzeug
E-LKW 1: Haldimann AG	80 – 85	180.0	18.6	77.46%
E-LKW 2: Svedel S.A.	95	157.6	16.28	82.86%
E-LKW 3: Stadt Thun	85	194.0	20.1	76.35%
E-LKW 4: Stadt Lausanne	95 – 100	226.30	23.38	76.02%
Mittelwerte	Ø 90	Ø 189.47	Ø 19.59	78.17%

Tabelle 8: Einsparung Fahrzeuge Leuchtturmserie im Vergleich mit Durchschnittswerten von Dieselfahrzeugen.

Energieverbrauch

Die Messung der Energieverbräuche der vier Fahrzeuge stellte nach der Entwicklung und Auslieferung einen weiteren zentralen Punkt des Projektes dar. Bei der Initiierung des Projektes wurden mehrere Gespräche mit den Fahrzeugbetreibern durchgeführt. Alle Betreiber gaben über die vier Fahrzeuge einen ähnlichen Verbrauch von 80 bis 90 Liter Diesel / 100 km an. Bei der Umrechnung auf kWh würde das einen Verbrauch von 180 kWh auf 100 km bedeuten. Bei der Untersuchung und Messung über das Monitoring decken sich diese Annahmen nahezu gänzlich mit den gemessenen Werten. Diese lagen über den Durchschnitt aller vier Fahrzeuge bei knapp 190 kWh. Die vier Kunden konnten durch den Umstieg vom Dieselfahrzeug auf ein elektrisches Wertstoffsammelfahrzeug zwischen 76 und 82% an Energie einsparen. Die unterschiedlichen Verbrauchswerte und Einsparpotenziale haben unterschiedliche Gründe und müssen auf mehreren Ebenen betrachtet werden. Erstens hat der Fahrer einen grossen Einfluss auf den Verbrauch des Fahrzeuges. Dieser Umstand ist zwar bei einem Dieselfahrzeug auch wichtig, bei einem EWS Fahrzeug kann aber durch ein geschultes Fahrpersonal (Rekuperation und gleichmässiges Beschleunigen) noch stärker auf den Gesamtverbrauch Einfluss genommen werden. Zweitens spielen naturbedingte Einflüsse wie Topografie und Witterung eine nicht unwesentliche Rolle beim Energieverbrauch des Fahrzeuges. So steigt der Energiebedarf bei «extremere» Temperaturen. In sehr heissen Tagen wird mehr Energie für die Kühlung benötigt und in sehr kalten Wintertagen wird mehr Energie für die Beheizung des Fahrgastraumes und der Batterien benötigt. Auch die Topografie und die zurückgelegten Höhenmeter haben einen Einfluss auf den Energieverbrauch. Schliesslich müssen drittens bei einer Beurteilung der Gesamtenergieverbräuche die genutzte Energie für den Nebenantrieb (Pressungen und Schüttungen für den Aufbau) bei den Wertstoffsammelfahrzeugen miteinbezogen werden.

Topografie

Für die Untersuchung bzw. Beurteilung des Einflusses der Topografie auf den Verbrauch müssen die Routen der Fahrzeuge genauer betrachtet werden. In allen der vier Fällen ändern sich die Routen in der Woche täglich. Somit wird jeden Tag eine andere Route bzw. ein anderes Gebiet «abgefahren». Im Beispiel des Kunden Svedel S.A. wurde eine Route der Topografie angepasst. In diesem Fall fährt der leere E-LKW am Morgen zum höchsten Punkt der Route und sammelt auf dem Rückweg ein. Dies hat zur Folge, dass das leere Fahrzeug bei der Steigung weniger Energie benötigt und beim Gefälle durch das höhere Gewicht mehr an Energie durch die Rekuperation zurückspeisen kann.



Abbildung 22: Routenänderung Svedel S.A.

Diese Routenänderung hat zur Folge, dass die Firma über die gesamte Strecke ein Ersparnis von 10% erzielt. Die Leerfahrt bis zum höchsten Punkt (Fleurier, im in Abbildung 19 gezeigten Beispiel) bringt zwar einen Verlust mit sich. Die Fahrt mit den gesammelten Wertstoffen und dem damit schwereren Fahrzeug hat jedoch zur Folge, dass mehr rekuperiert werden kann. Dies wirkt sich auf den gesamten Energieverbrauch positiv aus.

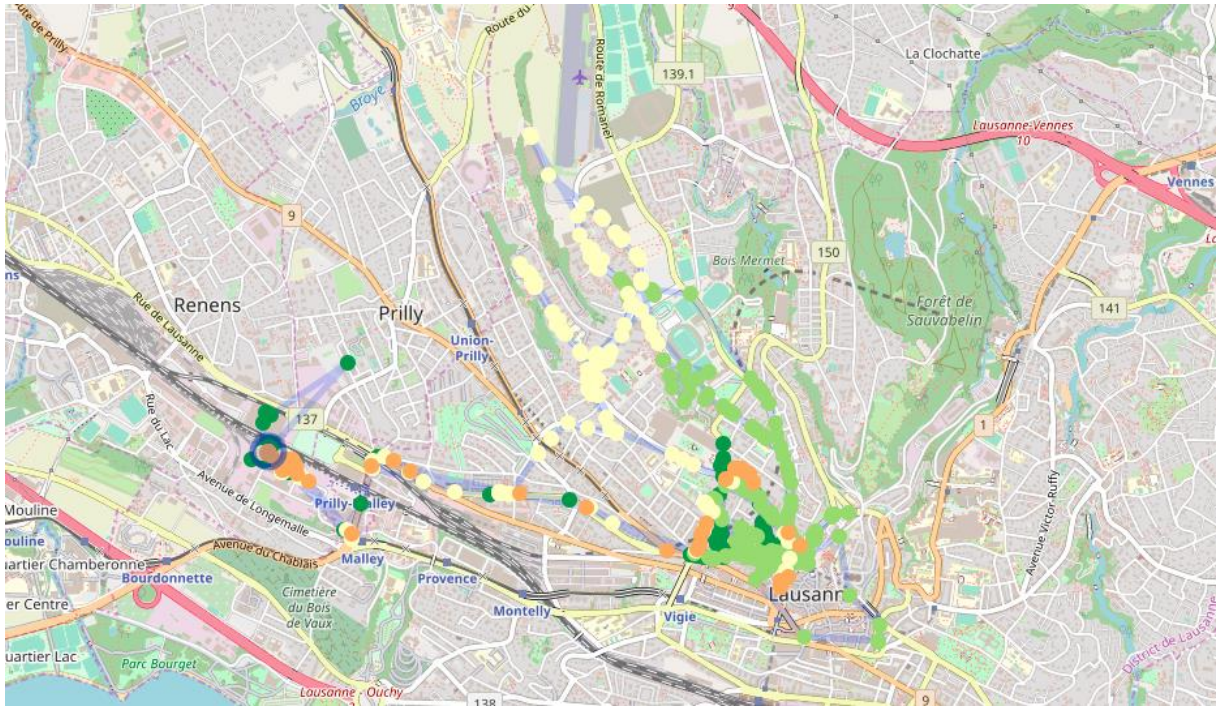


Abbildung 23: Sammelstrecke der Stadt Lausanne.

Vergleicht man die beiden Fahrzeuge «Lausanne» und «Thun» und deren Routen, sieht man deutliche Unterschiede in den Gefällen und Steigungen. Das Fahrzeug in Thun bewegt sich mehrheitlich in ruralen Gebieten, während das Fahrzeug in Lausanne die Wertstoffe im urbanen Bereich einsammelt. Durch die hohe Rate an Starts und Stopps kann das Fahrzeug in Lausanne nicht von der Möglichkeit der Rekuperation profitieren.

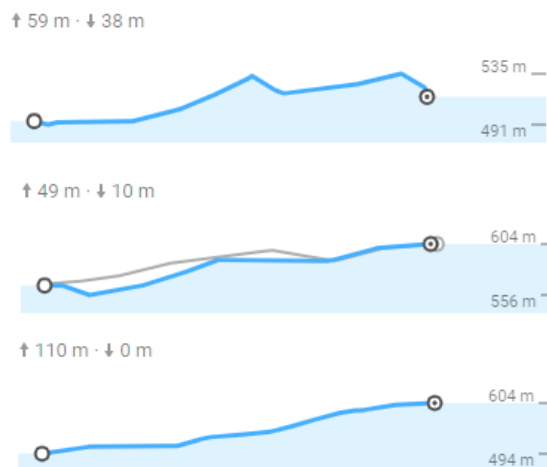


Abbildung 24: Die zurückgelegten Höhenmeter eines Abschnitts bei der Sammeltour in der Stadt Lausanne.

Zieht man die Route und das Gebiet rund um Thun zum Vergleich heran, sieht man deutliche Unterschiede in den zurückgelegten Höhenmetern dieser zwei verschiedenen Einsatzgebieten. Die Höhenunterschiede rund um Thun sind derart klein, dass Messungen (mittels Google Maps) keine genügend genauen Informationen liefern.

Diese Differenz trägt zum unterschiedlichen Energieverbrauch der beiden Fahrzeuge bei.

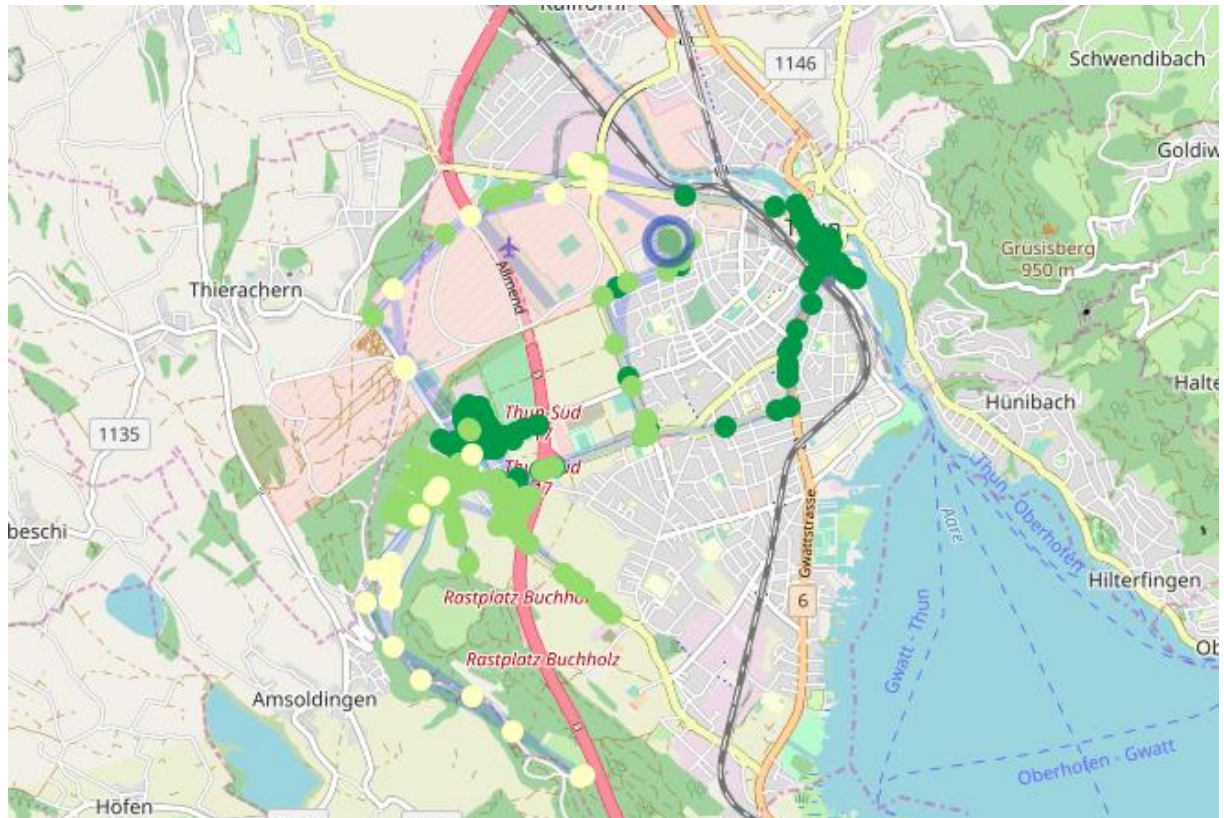


Abbildung 25: Sammelroute der Stadt Thun.

Witterung / Temperatur

Bei der Untersuchung der Einflüsse von Temperatur und Witterung auf den Energieverbrauch können Messungen von «wärmeren» und «kälteren» Tagen herangezogen werden. Während und nach den Entwicklungsarbeiten der vier Prototypen ist bei längeren Fahrten immer wieder der starke Einfluss von Wind und Regen zum Vorschein gekommen. Dieser Einfluss ist wiederum sehr schwierig messbar. Trotzdem ergaben sich bei längeren Testfahrten und stark auftretendem Wind immer wieder höhere Energieverbräuche.

Zur besseren Gegenüberstellung wurde darum ein Vergleich des *State of Charge* (SoC) über eine Woche im Sommer und einer Woche im Winter herangezogen. Die Routen sind in diesem Fall komplett identisch. Das Fahrzeug der Firma Svedel S.A. weist dabei signifikante Unterschiede auf. Fährt der Fahrer im Sommer noch mit einer Restkapazität von ca. 30% zurück zum Depot, weist er an kalten Wintertagen tiefere SoC-Stände auf, die sich zwischen 20 und 25% bewegen. Dieser Unterschied wurde auch von den Fahrern der vier Fahrzeuge gemeldet. Die nachfolgend aufgeführten Abbildungen 23 und 24 weisen eher «extremere» Temperaturen auf. Die Temperaturen gegen Ende Juni 2019 bewegten sich zwischen 28 und 35° C. Diese heissen Tage haben zur Folge, dass die Kühlleistung im Fahrgastraum ebenso steigt wie die Kühlleistung der Antriebsmotoren. Die Temperatur der Batterie weist durch die aktive Kühlung jedoch eine konstantere Temperatur auf, so dass dieser Einfluss auf die Batterie minimiert werden kann.

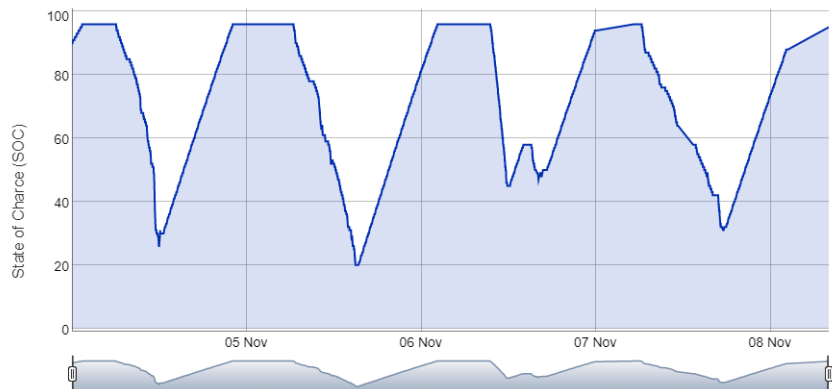


Abbildung 27: SoC über eine Woche im November 2019 «Svedel S.A.».

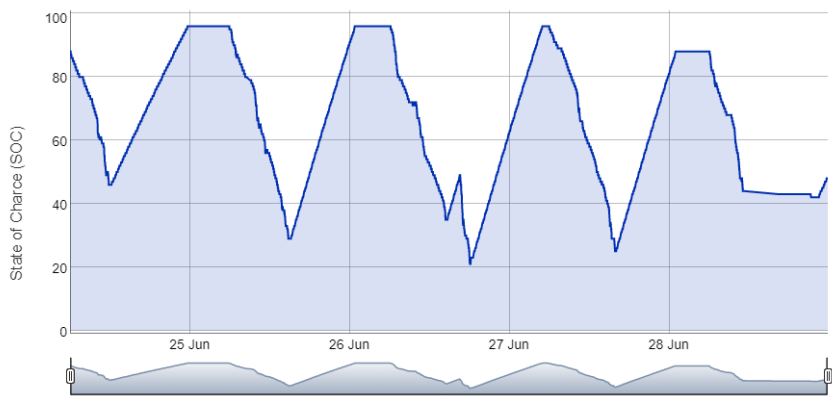


Abbildung 26: SoC über eine Woche im Sommer 2019 «Svedel S.A.».

Nebenantrieb

Die in Tabelle 9 aufgeführten Energieverbräuche beziehen sich auf den Gesamtenergieverbrauch pro Fahrzeug (Abbildungen 25 bis 28). Das Monitoring überprüft die unterschiedlichen Energiebedarfsquellen einzeln, so dass der Einfluss der PTOs (*power take-off* / Nebenantriebe) genauer untersucht werden kann. Die vier Fahrzeuge werden über die bisher gesamte Lebensdauer untereinander verglichen. Dabei sieht man den Einfluss der Anzahl Pressungen und Schüttungen allerdings nicht.

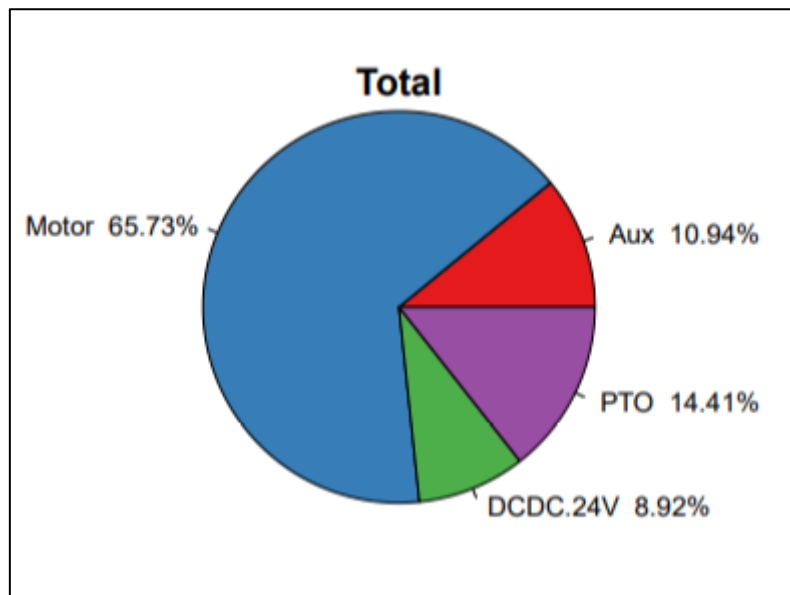


Abbildung 29: Energieaufteilung über gesamte Lebensdauer «Haldimann» (Stand 12.12.2019).

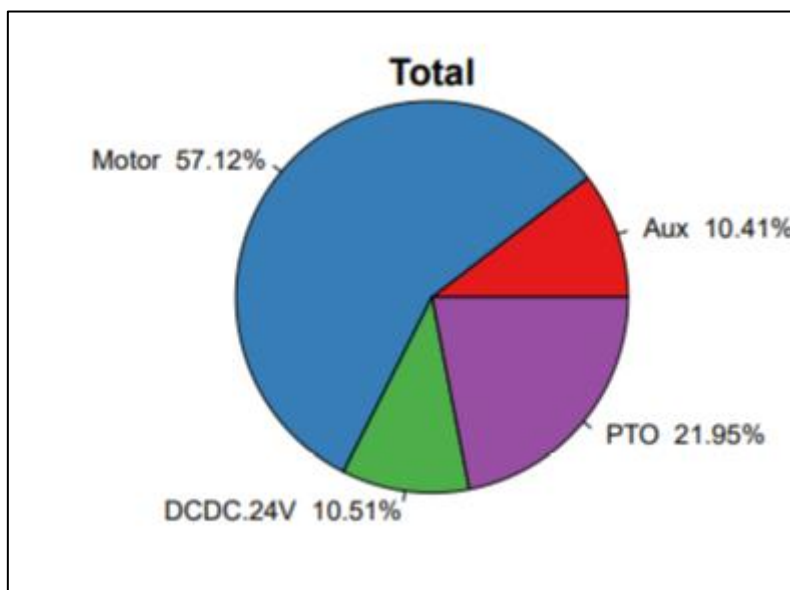


Abbildung 28: Energieaufteilung über gesamte Lebensdauer «Lausanne» (Stand 12.12.2019).

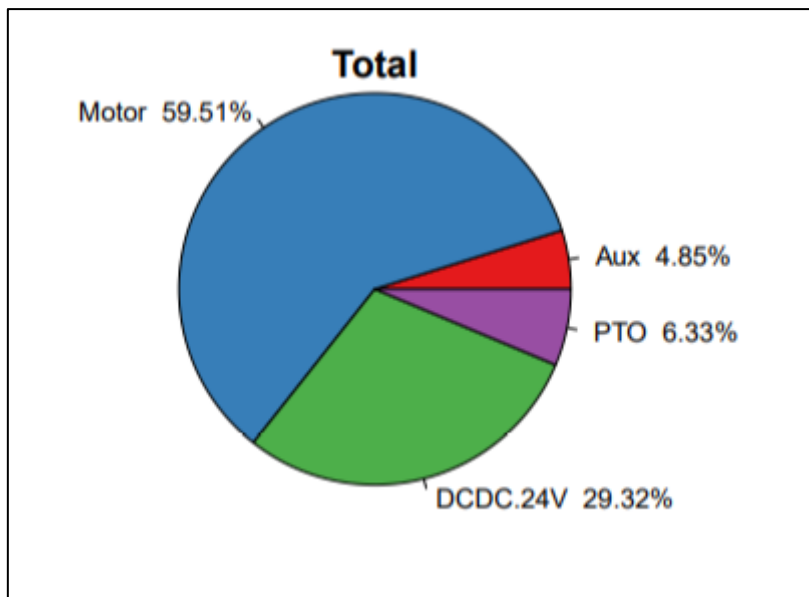


Abbildung 30: Energieaufteilung über gesamte Lebensdauer «Svedel» (Stand 12.12.2019).

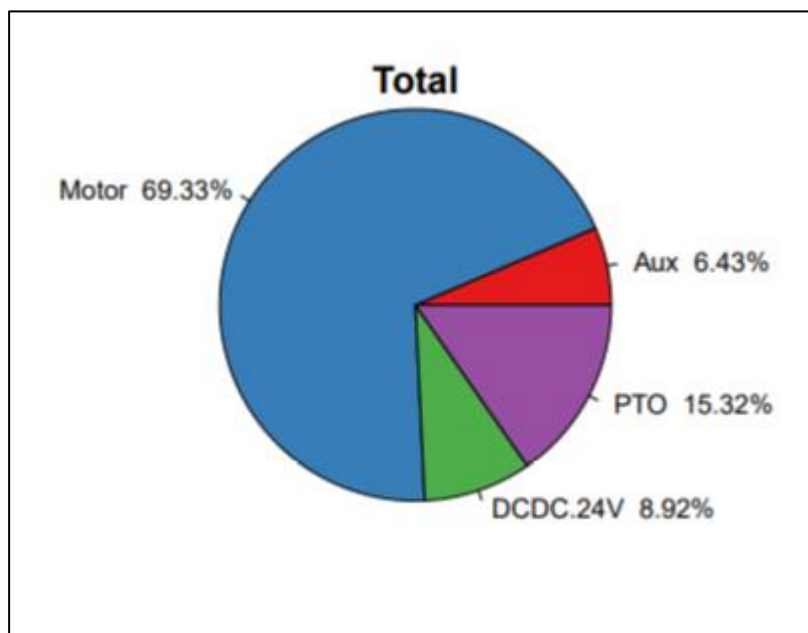


Abbildung 31: Energieaufteilung über gesamte Lebensdauer «Thun» (Stand 12.12.2019).



Fahrzeug	Antriebsmotor	Auxiliary	PTO (Nebenantr.)	DC/DC 24V
Haldimann AG	65.73%	10.94%	14.41%	8.92%
Stadt Lausanne	57.12%	10.41%	21.95%	10.51%
Svedel S.A.	59.51%	4.85%	6.33%	29.32%
Stadt Thun	69.33%	6.43%	15.32%	8.92%
Mittelwerte	Ø 62.92%	Ø 8.15%	Ø 14.5%	Ø 14.41%

Tabelle 9: Energieaufteilung aller vier Fahrzeuge über die gesamte Lebensdauer (Stand 12.12.2019).

Bei der Betrachtung der Tabelle 9 fallen die unterschiedlichen Energieaufteilungen der vier Fahrzeuge auf. Die Antriebsleistung nimmt dabei stets den grössten Teil ein. Bei einem Durchschnitt von knapp 63% werden für die reine Antriebsleistung der Fahrzeuge (im Schnitt ein Verbrauch von 180kWh/100 km, siehe Tabelle 8) folglich 113 kWh auf 100 km benötigt werden.

Der Nutzen des elektrischen Nebenantriebes variiert dabei stärker. Dieser Unterschied muss auf die Häufigkeit der Press- und Schüttungsvorgänge pro Sammelroute zurückzuführen sein. Denn alle vier Prototypen weisen komplett identische Komponenten auf, so dass ein Unterschied aufgrund von unterschiedlichen Motoren auszuschliessen ist. Die Anzahl Schüttungen und Pressvorgänge lassen sich jedoch nur abschätzen und können von Woche zu Woche ändern. Die Container können zudem immer wieder unterschiedlich gefüllt sein, was wiederum die Länge der Pressvorgänge beeinflusst.

Auffallend ist ferner der grosse Unterschied des Energiebedarfs für den DC/DC-Wandler der Firma Svedel S.A. Die zwei 12V Batterien (zusammengeschaltet auf 24V) werden über einen DC/DC-Wandler von der Hochvoltspannung (400V) geladen. Die 24V Einheit liefert die Energie für die Nutzung von Licht, Lenkung und allen Armaturen-, Beleuchtungs- und Steuereinheiten. Die Nutzung von 24V Komponenten wie Sitzheizung kann diesen Verbrauch deutlich steigern.

Zusammenfassung

Eine komplett reproduzierbare Messfahrt für die Untersuchung der Verbrauchsänderungen von E-LKW würde einen noch effektiveren Vergleich der vier Fahrzeuge zulassen. Die Gesamtverbräuche der vier Prototypen stützen sich jedoch sehr stark auf die vorherigen Prognosen und Umrechnungen der Verbräuche von Diesel (l/100km) auf die elektrische Energie (kWh/100Km), die für die Recherche des Leuchtturmprojektes gemacht wurden. Die Fahrzeuge brauchen im Schnitt mit knapp 190kWh etwas mehr als die vorgerechneten 180kWh/100 km. Die individuellen Verbrauchsdaten hängen folglich mit den Einsatzgebieten (Topografie) und den Anzahl zu leerenden Containern zusammen. Gleichzeitig kann sich die Menge an Wertstoffen verändern. Im Sommer während den Sommerferien wird z.B. tendenziell weniger «Müll» gesammelt.

Die vier Kunden der ersten Prototypen haben auf die Umstellung von Diesel- auf Elektro-LKW entsprechend reagiert. Die Routen wurden teilweise so angepasst, dass mit einem gefüllten Sammelkasten Fahrten bergabwärts vorgenommen werden. Die Fahrer wurden durch die Ingenieure auf ein gleichmässiges Beschleunigen sensibilisiert und darauf hingewiesen, dass mit der Rekuperation deutlich an Reichweite pro Tag gewonnen werden kann.

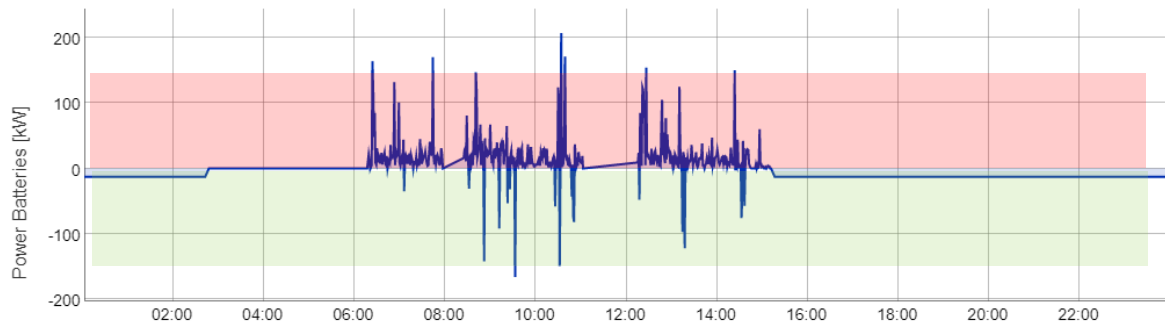


Abbildung 32: Leistung Batterie der Stadt Lausanne.

In Abbildung 29 sind die Aufteilung der Beschleunigungen und die Rekuperationsraten dargelegt. Im roten Abschnitt ist der Anteil des Energiebedarfs, im grünen Abschnitt ist der Anteil der zurückgewonnenen Energie ersichtlich. Bei dieser Fahrt in Lausanne (mit starkem Gefälle und vielen Steigungen) werden die Batterien mit über 150 kW geladen. Auf diese Möglichkeit der Rückgewinnung der Energie wurden die Fahrer geschult und sensibilisiert.



Gesamtkosten des Betriebs über die gesamte Lebensdauer

Die Elektromobilität stellt nicht nur die Ingenieure bei der Entwicklung der neuen Antriebe vor neue Herausforderungen. Auch bei Beschaffungsentscheiden sind neue Lösungsansätze gefragt. Bei der Berechnung der Amortisationsdauer eines E-LKWs fallen die fixen und variablen Kosten unterschiedlich aus. Herkömmliche Dieselfahrzeuge weisen zwar einen geringeren Anschaffungspreis auf, im Gegenzug kann das elektrisch betriebene Pendant mit geringeren Betriebs- und Unterhaltskosten punkten. Betreibt man ein Fahrzeug über mehrere Jahre, stellen die Anschaffungskosten meist nicht den grössten Teil dar. So gesehen bilden bei mit Diesel betriebenen Wertstoff-Sammelfahrzeuge die Betriebs-, Energie-, und Unterhaltskosten mit knapp 70% der Gesamtkosten den grössten Teil der «Ausgaben».

Somit bilden diese 70% der Gesamtkosten über die gesamte Einsatzdauer der Fahrzeuge das grösste Sparpotenzial. Die elektrisch betriebenen Nutzfahrzeuge sind durch die geringere thermische und mechanische Belastung bei den Wartungsarbeiten wesentlich günstiger und profitieren von der Befreiung der Leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgaben (LSVA) und den wesentlich tieferen Energiekosten.

Für die Berechnung der effektiven Kosten fallen bei der Beschaffung neuer Fahrzeuge somit zwei Grundfragen besonders ins Gewicht:

- Die pro Jahr zurückgelegten Strecken der Fahrzeuge
- Die Zeitdauer der geplanten Amortisation der Fahrzeuge

Je nach Einsatzart der Fahrzeuge tritt die «Abnutzung» früher ein. Massgeblich ist hierbei der Aufbau, der über die Jahre starken Belastungen ausgesetzt wird. Bei den Wertstoffpresssystemen gehen die Einsatzbetriebe im Regelfall von einer Einsatzdauer von 8 bis 10 Jahren aus. Nach dieser Zeit ist die Abnutzung des Presssystems so gross, dass ein Wechsel des Aufbaus erforderlich wäre. Nach dieser Frist wird meistens nicht nur der «Aufbau» ersetzt, sondern gleich das gesamte Fahrzeug durch ein neues ersetzt.

Den Entsorgungsbetrieben stellt sich somit die Frage nach der Amortisationszeit bei gleichzeitig höheren Anschaffungskosten. Je mehr Kilometer ein elektrisches Fahrzeug pro Jahr zurücklegt, desto schneller werden die Anschaffungskosten des E-LKWs amortisiert. Somit müssen die elektrisch betriebenen Wertstoff-Sammelfahrzeuge so stark wie möglich ausgelastet werden, um gegenüber den Diesel-Varianten Kosten einzusparen. Betrachtet man das nachfolgende Beispiel, lohnt es sich den Fokus auf die Gesamtkosten (Total Cost of Ownership) zu legen, anstatt nur die zu Beginn tieferen Anschaffungspreise der Diesel-LKW zu betrachten.

Neben den nachfolgend aufgeführten und bekannten Kostentreibern wie Energie, Wartung, Steuern und dergleichen gilt es bei der Beschaffung von elektrisch angetriebenen Sammelfahrzeugen meist auch unberücksichtigte Kosten zu berücksichtigen: So führen beispielsweise entfallene Leerfahrten zu den Dieseltankstellen zu einer Zeitersparnis von rund 20 Minuten pro Tag. Solche Kostenstellen lassen sich nur schwer in einer Berechnung miteinkalkulieren. Durch die hohe Leistung des Futuricum Collect E26 lassen sich Pressungen ferner auch während der Fahrt durchführen, währenddessen diese beim Dieselfahrzeug durch die geringere Leistung nur im Stillstand möglich sind. Dadurch lassen sich die Sammelfahrten ebenfalls optimieren und Zeit und Kosten einsparen.



TCO-Berechnung – im direkten Vergleich

Die im Rahmen des Leuchtturmprojekts gebauten Fahrzeuge liefern nun reale Werte für die Berechnung effektiver Betriebs- und Unterhaltskosten. Neben den erfassten Daten, wie der zurückgelegten Strecke, dem Energieverbrauch und den Ladezuständen, werden für die Berechnungen Annahmen getroffen, die über die Jahre variieren können. Die Preisentwicklungen für den Dieseldraftstoff und der Stromkosten der nächsten 10 Jahre lassen sich nur schwer abschätzen, weshalb meist Annahmen getroffen werden müssen. Die Wiederverkaufswerte von gebrauchten elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen lässt sich ebenfalls nur schwer vorhersehen, da noch keine Erfahrungswerte und Referenzpreise eines Gebrauchtfahrzeugmarkts vorliegen. Auch die zunehmenden Dieselfahrverbote älterer EURO-Klassen werden die Preisbildung auf dem Gebrauchtfahrzeugmarkt in den nächsten Jahren beeinflussen.

Auswertungen	Diesel-LKW	Elektro-LKW
Kosten ohne Kapitalkosten		
Total jährliche Fixkosten	CHF 3'680.32	CHF 2'674.03
Total Jährliche variable Kosten	CHF 80'423.05	CHF 21'585.84
Total Jährliche Kosten ohne Kapitalkosten	CHF 84'103.37	CHF 24'259.87
Total Kosten über eine Amortisationsdauer von 8.42 Jahren ohne Kapitalkosten	CHF 708'567.66	CHF 204'388.51
Kapitalkosten		
Jährliche Kapitalkosten	CHF 35'347.00	CHF 95'190.57
Total Kapitalkosten über Amortisationsdauer von 8.42 Jahren	CHF 297'797.77	CHF 801'976.92
Kosten inklusive Kapitalkosten		
Total Jährliche Kosten	CHF 119'450.45	CHF 119'450.45
Total Kosten über Amortisationsdauer von 8.42 Jahren	CHF 1'006'365.42	CHF 1'006'365.42
Differenz pos/ neg Elektro-LKW gegenüber Diesel-LKW		
Differenz pos/ neg Elektro-LKW gegenüber Diesel-LKW bei einer Amortisationsdauer von 8.42 Jahren	8.42 Jahre	CHF -
Nach 8.42 Jahren ist Gewinnschwelle, Elektro-LKW gegenüber Diesel-LKW, erreicht!	Button für Berechnung Jahre bis zur "Gewinnschwelle"	
Kosten pro km		
Kosten pro km bei einer Amortisationsdauer von 8.42 Jahren	4.44 CHF/ km	4.44 CHF/ km
Kosten pro km nach einer Amortisationsdauer von 8.42 Jahren	3.13 CHF/ km	0.90 CHF/ km
Gewinn Elektro-LKW gegenüber Diesel-LKW (erscheint nur bei Drücken von Button "Jahre bis zur Gewinnschwelle")		
Gewinn bei 9 Jahren LKW-Einsatzdauer nach Gewinnschwelle von 8.42 Jahren und gleichbleibendem Restwert	9 Jahre	CHF 34'709.23
Gewinn bei 10 Jahren LKW-Einsatzdauer nach Gewinnschwelle von 8.42 Jahren und gleichbleibendem Restwert	10 Jahre	CHF 94'552.72
Gewinn bei 11 Jahren LKW-Einsatzdauer nach Gewinnschwelle von 8.42 Jahren und gleichbleibendem Restwert	11 Jahre	CHF 154'396.22
Gewinn bei 12 Jahren LKW-Einsatzdauer nach Gewinnschwelle von 8.42 Jahren und gleichbleibendem Restwert	12 Jahre	CHF 214'239.71

Abbildung 33: Maske TCO Berechnung.

Ein für die Berechnung erstelltes Excel-Auswertungstool ermöglicht eine einfache und schnelle Berechnung der Dauer bis die höheren Anschaffungspreise durch niedrige Betriebs- und Unterhaltskosten amortisiert werden (Break-Even-Point). Zudem sind auf dem rot markierten Feld die «Gewinne» ersichtlich, welche aus der Nutzung eines elektrisch betriebenen Wertstoffsammelfahrzeugs nach dieser Amortisationsdauer erzielt werden können.

Gemäss den Berechnungen würde der Futuricum Collect 26E nach 12-jährigem Einsatz dem Unternehmen eine Ersparnis von 214'000 CHF gegenüber einem Dieselfahrzeug ermöglichen. Vorausgesetzt, die E-LKW legen pro Jahr mindestens 26'000 km zurück. Betrachtet man die im Kapitel «Auswertung der Fahrdaten» zurückgelegten Strecken der vier gebauten Prototypen, sind je nach Auslastung der Fahrzeuge 26'000 Km pro Jahr durchaus realistisch. Die daraus resultierenden 8.42 Jahre weisen auf die Amortisationsdauer hin, die aktuell auf dem Markt «akzeptiert» wird. Ergeben sich bei den Berechnungen mit dem Kunden längere Zeiten, bis sich der Futuricum gegenüber dem Diesel-LKW rechnet, wird von der Beschaffung eines E-LKW's eher abgesehen.



Folgende Fahrzeuge und Daten, die anhand des Projektes gewonnen und zur Berechnung der TCO immer wieder herangezogen werden, wurden für die oben aufgeführte Berechnung verwendet (diese Daten werden bei Berechnungen neuer TCOs den aktuellen Umständen angepasst):

Diesel-LKW:

- Hubraum:	10'800 ccm
- Leistung:	243 kW
- Gesamtgewicht:	26'000 kg
- Listenpreis:	286'0000 CHF (mit Aufbau, ohne Waage, inkl. MwSt.)
- Verbrauch:	93 l/100km (im Sammelbetrieb)
- AdBlue:	500 CHF/Jahr
- Dieselpreis:	1.70 CHF/l (Mittelwert aus dem Jahre 2018)
- LSVA:	0.0228 CHF/km (Kat. 6)
- Wartungs- und Reparatur-Kosten:	18'000 CHF/Jahr
- Verschleisssteile:	2'000 CHF
- Wartungs- und Reparatur-Kosten (Aufbau):	2'000 CHF

E-LKW:

- Hubraum:	-
- Leistung:	560 kW
- Gesamtgewicht:	27'000 kg
- Listenpreis:	745'000 CHF (mit Aufbau, ohne Waage, inkl. MwSt.)
- Verbrauch:	180 kWh/100km (im Sammelbetrieb)
- AdBlue:	-
- Energiepreis:	0.219 CHF/kWh
- LSVA:	-
- Wartungs- und Reparatur-Kosten:	13'200 CHF/Jahr
- Verschleisssteile:	1'000 CHF
- Wartungs- und Reparatur-Kosten (Aufbau):	2'000 CHF



Mit den oben aufgeführten Daten und einer jährlichen Kilometerleistung von 26'000 km werden die höheren Anschaffungskosten des E-LKWs gegenüber einem Diesel-LKW amortisiert. Die Kosten der Fahrzeuge würden sich über die 8.42 Jahre (vgl. Abbildung 16) wie folgt aufteilen:

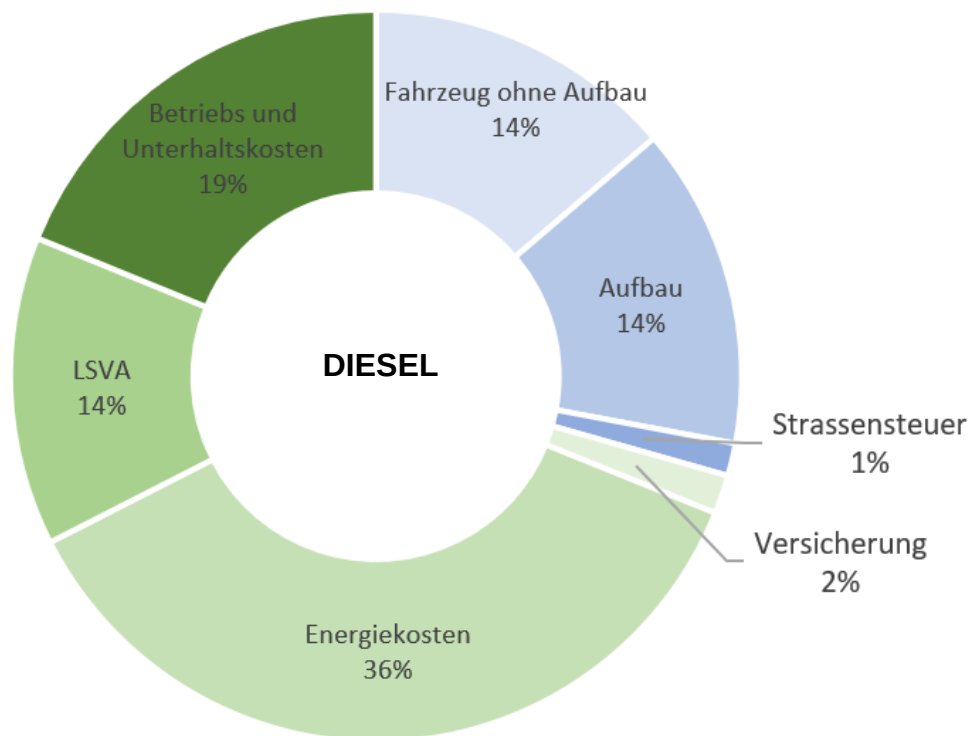


Abbildung 34: Kostenverteilung Dieselfahrzeug.

Fahrzeug ohne Aufbau	135'000 CHF
Aufbau	139'670 CHF
Strassensteuer	14'148 CHF
Versicherung	16'840 CHF
Energiekosten	357'773 CHF
LSVA	134'148 CHF
Betriebs- und Unterhaltskosten	185'240 CHF
Annuität	35'347 CHF
Total	1'018'167 CHF

Tabelle 10: Auflistung der Aufwände Dieselfahrzeug.

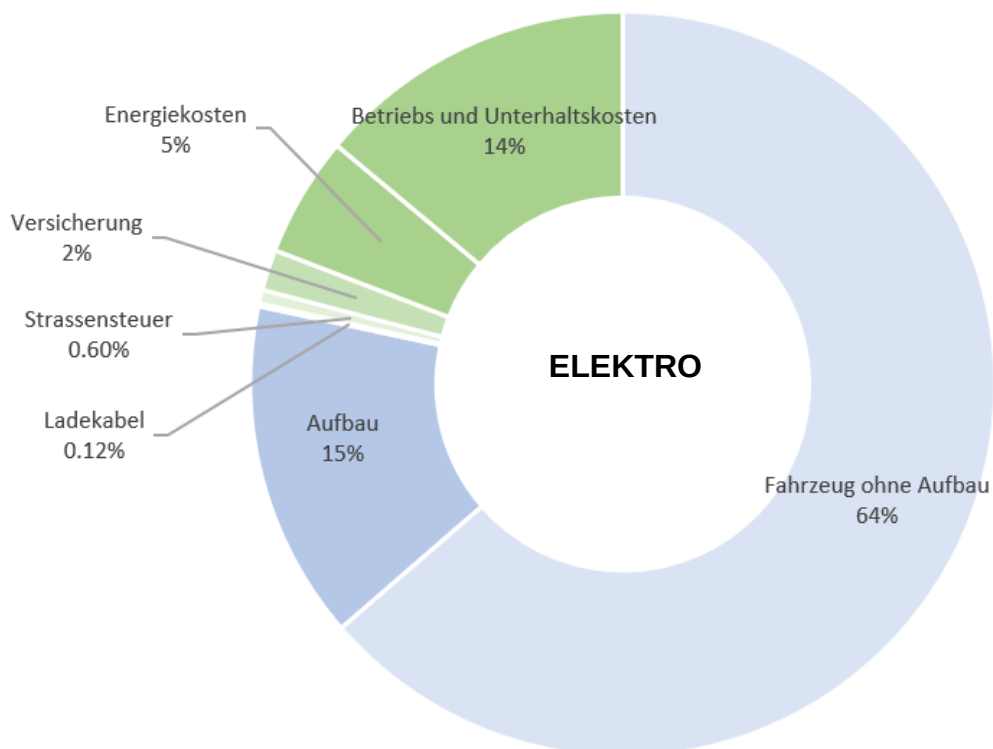


Abbildung 35: Kostenverteilung Elektrofahrzeug.

Fahrzeug ohne Aufbau	604'000 CHF
Aufbau	139'670 CHF
Ladekabel	1'150 CHF
Strassensteuer	5'675 CHF
Versicherung	16'840 CHF
Energiekosten	49'558 CHF
Betriebs- und Unterhaltskosten	132'194 CHF
Annuität	95'190 CHF
Total	1'044'278 CHF

Tabelle 11: Auflistung der Aufwände E-LKW.

Lebenszyklusanalyse

Die Lebenszyklusanalyse eines Produktes – in diesem Falle eines Fahrzeuges – zeigt die Auswirkung über die gesamte Lebensdauer auf das Klima, Gesundheit, Ökosysteme und Ressourcen auf. In vorliegendem Fall steht lediglich die CO₂-Belastung auf die Umwelt der zu vergleichenden Fahrzeuge im Fokus: Wie stark ist die CO₂-Umweltbelastung eines elektrisch angetriebenes Wertstoff-Sammelfahrzeugs im Vergleich zu einem mit Diesel betriebenen Fahrzeug?

Durch die höhere Effizienz des Elektrolastwagens werden während der Nutzung dementsprechend weniger Ressourcen verschwendet. Zusätzlich arbeitet der Elektrolastwagen im «Stillstand» nicht. Das Drivemodul arbeitet nur während des Gebrauchs, anders als beim Dieselfahrzeug, das während den Standzeiten ständig im Leerlaufbetrieb wertvolle Ressourcen verschwendet. Über die gesamte Nutzungsdauer der Fahrzeuge bilden sich somit grosse Differenzen im Bereich der CO₂-Emissionen. Nebst den stark in den Fokus stehenden CO₂-Emissionen, die für die globale Erwärmung hauptverantwortlich gemacht werden, fallen beim Elektrosammelfahrzeug sämtliche Emissionen wie giftige Stickoxide oder die stetig kleiner werdenden Partikel weg. Ebenso entfallen Warmlaufphasen bei den elektrisch angetriebenen Fahrzeugen, bei denen die Dieselfahrzeuge eine noch schlechtere Effizienz aufweisen.

Die Abschnitte mit den entsprechenden CO₂-Emissionen der Fahrzeuge teilen sich wie in Abbildung 17 visualisiert auf.

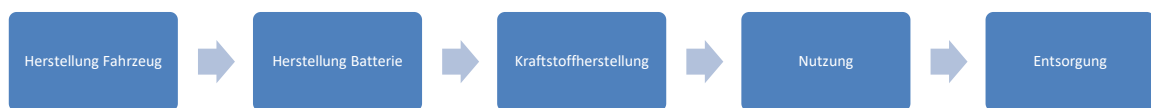


Abbildung 36: Lebenszyklusanalyse Grafik

Ein oft genannter Kritikpunkt bei Elektrolastwagen bzw. Elektrofahrzeuge: Die Herstellung der Batterien. Diese sollen mehr CO₂-Emissionen verursachen als ein dieselbetriebenes Fahrzeug über die gesamte Lebensdauer. Die Bereitstellung des Diesels an den Zapfsäulen wird dabei gänzlich ausser Acht gelassen. Diese Bereitstellung schlägt jedoch deutlicher ins Gewicht als in der Wahrnehmung der Bevölkerung spürbar ist. Die aus der Datenbank von Ecoinvent entnommenen Werten ermöglichen die Hochrechnung der CO₂-Emissionen über der gesamten Lebensdauer der verschiedenen Fahrzeugtypen.



Vergleicht man ein Dieselsammelfahrzeug, das im Schnitt einen Verbrauch von 80l/100km aufweist (im Vergleich zu den Befragungen und Berechnungen der Leuchtturmprojektspartner eher ein tiefer Schnitt), mit einem Elektrosammelfahrzeug, das im Schnitt ein Energiebedarf von 189.47 kWh/100km (gestützt auf Hochrechnungen und Annahmen) aufweist, ergeben sich folgende Werte:

CO₂-Emissionen in Tonnen – Dieselsammelfahrzeug über eine Lebensdauer von 500'000 km:

Herstellung des Fahrzeuges	218.5 t (500'000 Km x 437g)
Bereitstellung des Diesels (Treibstoff)	246 t (500'000 Km x 492g)
Im Einsatz	1'229 t (500'000 Km x 2458g)
Total	1'693 t (218.5t + 246t + 1'299t)

Tabelle 12: CO₂-Emissionen in Tonnen – Dieselsammelfahrzeug über eine Lebensdauer von 500'000 km.²**CO₂-Emissionen in Tonnen – Elektrosammelfahrzeug über eine Lebensdauer von 500'000 Km:**

Herstellung des Fahrzeuges	218.5 t (500'000 Km x 437g)
Herstellung Li-Io-Batterie	52.5 t (500'000 Km x 105g)
Bereitstellung des «Stromes» (Strommix, Schweiz)	98 t (500'000 Km x 196g)
Bereitstellung des «Stromes» (Ökostrom, Schweiz)	15 t (500'000 Km x 30g)
Im Einsatz	0 t
Total	369 t oder 286 t (500'000Km x 338g oder Ökostrom 500'000Km x 182g)

Tabelle 13: CO₂-Emissionen in Tonnen – Elektrosammelfahrzeug über eine Lebensdauer von 500'000 km.³

Die Annahmen von 180 kWh/100km spiegeln sich fast identisch mit den effektiven Werten der vier im Einsatz stehenden Sammelfahrzeuge wider, die über das Monitoring aufgezeichnet wurden.

So erzielten die vier Fahrzeuge während dem Zeitraum vom 01.09.2018 bis zum 01.09.2019 eine gesamte zurückgelegte Strecke von **75'917 km** und verwendeten dafür **138'086 kWh**. Dies ergibt einen Energiebedarf von **180.2 kWh/100km**.

Die Fahrzeuge unterliegen dabei teils stark heterogenen Topografien, je nach Einsatzgebiet. Der leistungsstarke und etwa 2.5-mal effizientere Elektroantrieb sorgt für einen ressourcenschonenden Einsatz. Neben den deutlich geringeren CO₂-Emissionen über die gesamte Lebensdauer der Elektrofahrzeuge lassen sich die Emissionen in Zukunft noch weiter senken. Durch die eigene Bereitstellung des Energiebedarfes (Solarstrom) oder durch erneuerbare Energien (Windkraft etc.) wird der Einsatz von elektrisch angetriebenen Wertstoff-Sammelfahrzeugen noch ökologischer.

² CO₂-Emissionsvergleich_provisorischer_energetischer_Vergleich (Diesel) Anhang D

³ CO₂-Emissionsvergleich_provisorischer_energetischer_Vergleich (Elektro) Anhang D

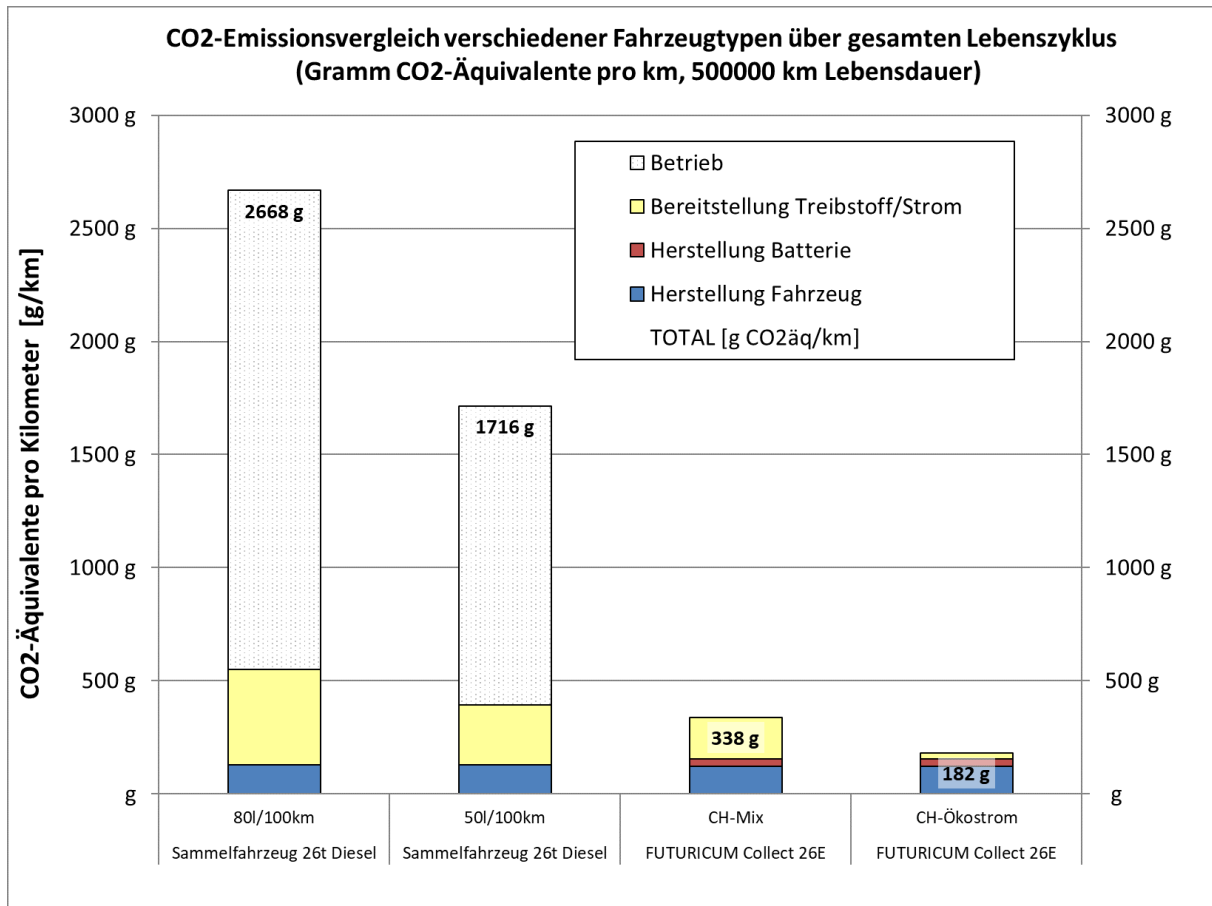


Abbildung 37: CO₂-Emissionvergleich verschiedener Fahrzeugtypen über gesamten Lebenszyklus.

Abbildung 18 stellt die aufgelisteten Werte bzw. Hochrechnungen der CO₂-Emissionen über eine Laufleistung von 500'000 km grafisch dar. Der Wegfall der CO₂-Ausstösse während des Betriebs macht dabei den grössten Anteil der Gesamtemissionen aus. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Herstellung der Batterie (Li-Io) – anders als in der Bevölkerung wahrgenommen – einen geringeren Anteil aufweist als die Bereitstellung des Diesels. Ein dieselbetriebenes Sammelfahrzeug belastet die Umwelt demnach rund 7.8-mal mehr als ein elektrisch betriebenes. Noch nicht miteinberechnet sind dabei giftige Stickoxide und die für den Menschen gefährlichen Dieselpartikel. Zudem profitiert sowohl die Umwelt (Bevölkerung und Natur) als auch das Arbeitspersonal der Sammelbetriebe von geringeren Lärmemissionen.



Lärmmessung

Im nachfolgenden Kapitel wird das Konzept für die Durchführung von Lärmmessungen am E-LKW sowie seinem dieselbetriebenen Pendant beschrieben. Im Anschluss werden die Messdaten ausgewiesen und interpretiert.

Konzept zur Lärmmessung

Die Lärmmessung soll die Betriebslautstärke des Futuricum E-LKWs untersuchen und mit konventionellen Müllsammelfahrzeugen mit Verbrennungsmotor verglichen werden. Dazu werden Lärmmessungen in verschiedenen Situationen der Fahrzeuge im Realbetrieb durchgeführt.

Es werden folgende Szenarien verglichen:

- Hintergrundgeräusch, bevor sich Fahrzeug im Messbereich befindet
- Geräuschentwicklung im Stillstand (abfahrtbereites Fahrzeug, alle Systeme ein)
- Geräuschentwicklung im Stillstand bei Müllpressung
- Geräuschentwicklung bei normaler Wegfahrt von 0 auf 30 km/h in 5s ($\sim 1.7 \text{ m/s}^2$)
- Geräuschentwicklung bei Vorbeifahrt mit 30 km/h
- Geräuschentwicklung bei Vorbeifahrt mit 50 km/h
- Geräuschentwicklung bei maximaler Beschleunigung von 0 auf 30 km/h

Messbedingungen während der Lärmmessung

Um möglichst faire Bedingungen für den Vergleich zu schaffen, sollen die beiden Fahrzeuge auf ähnlicher Strecke unter Einhaltung der folgende Punkte gemessen werden:

- Die Geräuschmessungen sind auf einer freien, möglichst ebenen Strasse durchzuführen. Die Strasse muss einen Belag aus Beton oder Asphalt aufweisen, der keine aussergewöhnlichen Reifengeräusche verursacht.
- Im Umkreis um das Mikrofon dürfen keine schallreflektierenden Gegenstände vorhanden sein. Grössere Hindernisse müssen mindestens 50 m entfernt sein.
- Die Messungen müssen bei gutem, möglichst windstillem Wetter stattfinden. Am Mikrofon ist ein Windschutz anzubringen.
- Der Umgebungsschallpegel und andere Hintergrundgeräusche, die nicht vom Fahrzeug stammen, sowie allfällige Windeinwirkungen müssen mindestens 10 dB niedriger liegen als das Fahrgeräusch.
- Zwischen dem Fahrzeug und dem Mikrofon und unmittelbar hinter diesem dürfen sich während der Messung keine Personen aufhalten.
- Die Messungen sind an vergleichbar beladenen Fahrzeugen durchzuführen.

Durchführung der Lärmmessung

Die Messungen wurden wie folgt durchgeführt:

- Das Mikrofon ist 1.20 m über dem Boden und in 7.50 m Abstand von der Mitte der Fahrspur angeordnet. Die Achse seiner höchsten Empfindlichkeit ist waagrecht ausgerichtet; sie verläuft senkrecht zur Bahn des Fahrzeugs.
- Bei Stillstandmessungen (und Beschleunigung aus Stillstand) wurde das Mikrofon seitlich des Fahrzeugs aufgestellt.
- Bei bewegten Messungen wurde das Mikrofon 10 m vor dem Start der Beschleunigung/konstanten Geschwindigkeit aufgestellt. Der erreichte Maximalpegel während jeder Messung wurde gespeichert.
- Pro Szenario wurden jeweils 3 Messungen durchgeführt. Der jeweilige Durchschnitt wurde als belastbarer Wert daraus errechnet.

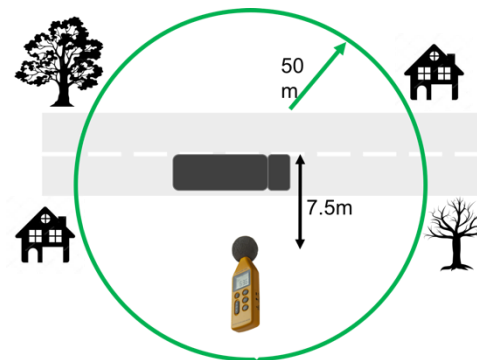


Abbildung 38: Distanzen bei der Lärmmessung.

Resultate der Lärmmessung

Bei der Stadt Thun konnte ein Futuricum E-LKW mit einem herkömmlichen dieselbetriebenen Sammelfahrzeug neuer Generation (Euro 5 Norm) im alltäglichen Normalbetrieb verglichen werden. Die beiden Fahrzeuge wurden dafür jeweils einen Morgen lang auf ihrer Müllsammeltour durch die Stadt begleitet, wobei wiederholt die genannten Vergleichsmessungen durchgeführt werden konnten. Dabei wurde stets darauf geachtet, dass sämtliche Bedingungen bestmöglich eingehalten wurden.

Bevor die Resultate diskutiert werden, gibt es einige grundlegende Eigenschaften der Dezibel-Skala (dB) festzuhalten:

Die Einheit zur Kennzeichnung von Pegeln ist das Bel (B). Das Dezibel (dB) und die damit verbundene dB-Skala werden weltweit genutzt, um Geräuschpegel einzustufen. Bei dem Begriff Dezibel handelt es sich nicht um einen festen Wert wie Volt oder Meter. Der Wert eines dB hängt von dem jeweiligen Kontext ab, denn wo das Ohr bei geringen Lautstärken in der Lage ist, bereits kleinste Änderungen wahrzunehmen, braucht es bei lauter Umgebung grössere Veränderungen. Die Dezibel-Skala ist eine logarithmische Skala, in der die Verdoppelung des Schalldrucks (Lautstärke) einer Pegelzunahme von 6 dB entspricht. Diese logarithmische Skala ist nützlich, da sehr grosse und sehr kleine Werte damit eleganter ausgedrückt werden können.

Einige Beispiele, um die Werte in einen Kontext zu bringen:

- 0 dB: der leiseste Ton, der das menschliche Ohr wahrnehmen kann
- 30 dB: Geflüster
- 60 dB: Gespräch
- 90 dB: Stadtverkehr



Abbildung 39: Der E-LKW bei der Lärmmessung (Durchfahrtsmessung). Dynamic Test Center, Vauffelin.

In der folgenden Tabelle sind die Resultate der durchgeführten Messungen ersichtlich. Jeder aufgeführte Wert resultiert aus dem Durchschnitt dreier Messungen. Wichtig bei der Betrachtung der Ergebnisse ist also, dass ein Unterschied von 6 dB einer gefühlt doppelten Lautstärke entspricht.

Durchschnittliche Messpunktschalldruckpegel aus jeweils 3 Messungen in dB(A):	E-LKW Futuricum	Diesel LKW
Umgebungsschallpegel ohne Fahrzeug	46.8	46.6
Stillstand (abfahrtbereites Fahrzeug, alle Systeme ein)	57.2	68.7
Stillstand bei Müllpressung	73.9	84.2
Normale Wegfahrt von 0 auf 30 km/h in 5s (~1.7 m/s ²)	81.3	83.8
Vorbeifahrt mit 30 km/h	74.9	79.0
Vorbeifahrt mit 50 km/h	80.7	84.7
Maximale Beschleunigung von 0 auf 30 km/h	84.7	84.3

Tabelle 14: Resultate der Lärmmessung.

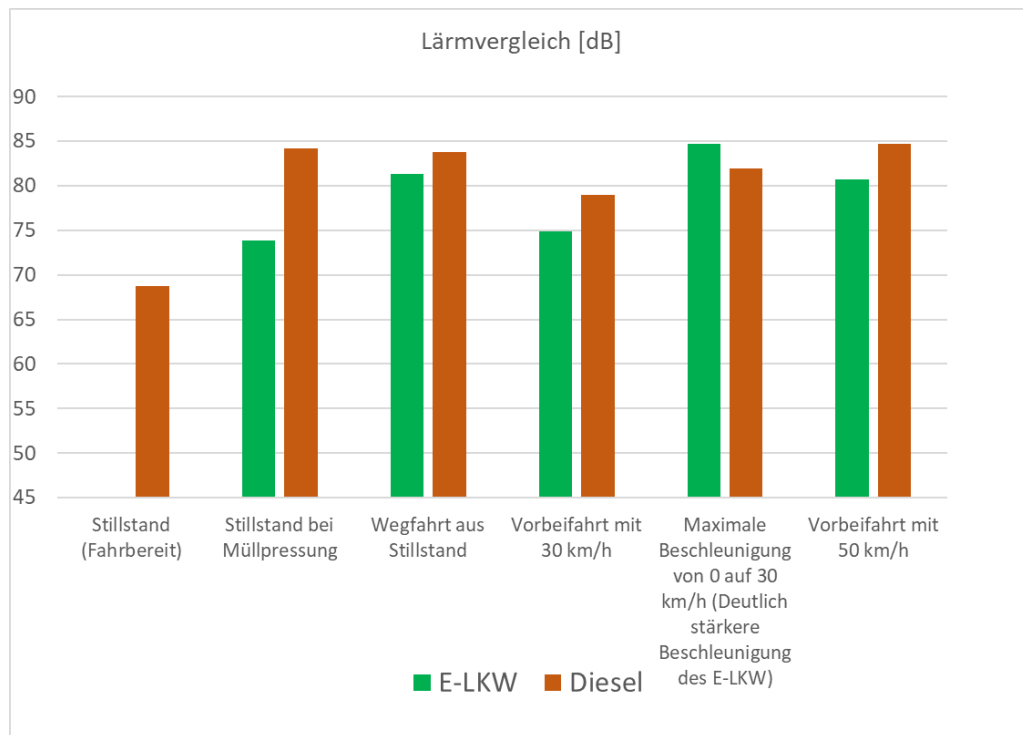


Abbildung 40: Grafische Darstellung der Lärmemissionswerte von E-LKW und Diesel-LKW im direkten Vergleich.

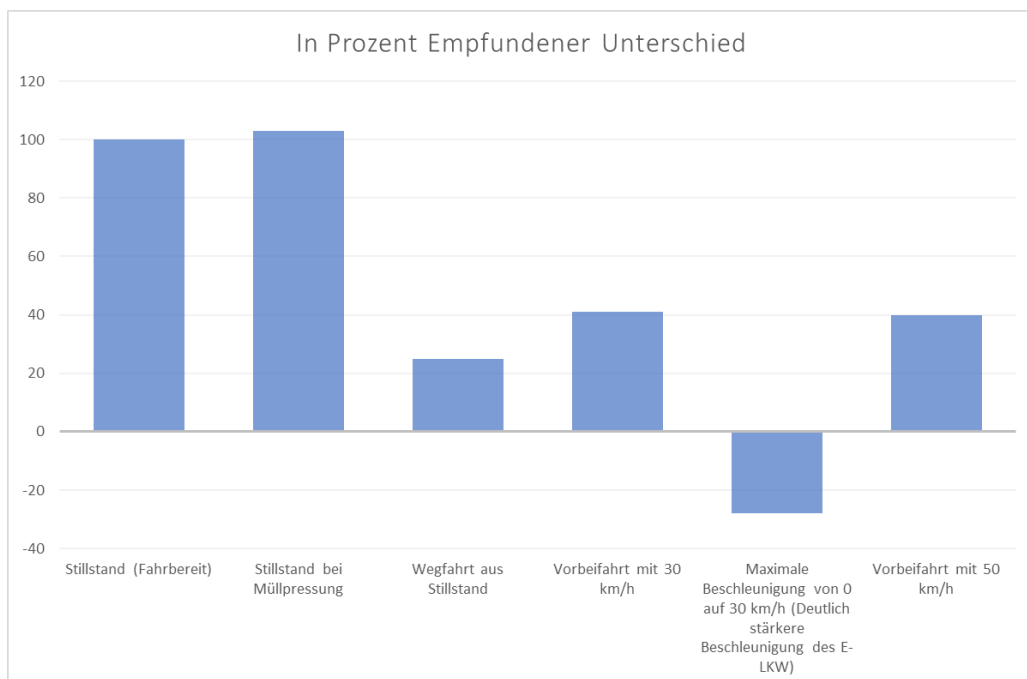


Abbildung 41: Grafisch dargestellt in Prozent empfundener Unterschied im Vergleich zu einem Diesel-Sammelfahrzeug.



Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass das herkömmliche mit Diesel betriebene Fahrzeug bei fast allen Messungen einen höheren Lautstärkepegel aufweist. Nur bei maximaler Beschleunigung von 0 auf 30 km/h ist beim Elektrofahrzeug ein höherer Wert festzustellen. Dies ist auf das erheblich höhere Drehmoment und die daraus resultierende höhere Beschleunigung des Elektrofahrzeuges zurückzuführen. Die Reifen verursachen bei einer derartigen Beschleunigung mehr Lärm. Bei einer durchschnittlichen Beschleunigung im «Normalbetrieb» kommt dies in der Regel nicht vor. Besonders auffallend ist die erheblich höhere Lärmemission des Dieselfahrzeugs im Stillstand und bei der Müllpressung. Das primär wahrnehmbare Geräusch der stehenden Fahrzeuge in 7.5 m Distanz ist beim Elektrofahrzeug das Summen von Hydraulikpumpen, beim Dieselfahrzeug ist es das Brummen des Dieselmotors. Für Anwohner sind diese Werte besonders relevant, da die Fahrzeuge an einem Müllsammelort eine gewisse Verweildauer aufweisen und je nach Situation zusätzlich das Presswerk betätigt wird.



Akzeptanzerhebung und Erfahrungsberichte

Im Rahmen von Fahrzeugtests in diversen Städten hat die Designwerk GmbH verschiedenste Feedbacks zur Nutzung des Futuricum Collect 26E zusammengetragen. Erfreulich war dabei die Bereitschaft von Fahrern, Ladern und Disponenten, Erfahrungen mit dem Fahrzeug zu teilen. Im Folgenden werden verschiedene Erkenntnisse und Vorschläge aus Tests in Obwalden, Bern, Zürich, Luzern und Basel festgehalten.

Die befragten Mitarbeitenden des Entsorgungszweckverbands Obwalden schlagen dabei verschiedene Verbesserungen am Aufbau vor. Positiv erachten sie die Bewältigung von Steigungen durch das Futuricum-Fahrzeug sowie dessen geräuscharmen Betrieb. Das Fahrzeug eigne sich im *Stop-and-go-Betrieb* – auch dank der Rekuperation – bestens für den täglichen Einsatz. Die unabhängigen Berechnungen des Entsorgungszweckverbands hätten zudem bestätigt, dass die Wirtschaftlichkeit aufgrund des Wegfalls der LSWA und der tieferen Energiepreise gegeben sei. Die befragten Personen erwarten darüber hinaus geringere Infrastruktur- und Unterhaltskosten. Schliesslich wurden der Entwicklungsstand und die Testtiefe als hoch wahrgenommen.

Tests der ERZ (Entsorgung + Recycling Zürich) haben ergeben, dass die Fahrer durch den Wegfall des Schaltvorgangs und den damit einhergehenden ruckartigen Bewegungen entlastet und Rückenschmerzen reduziert werden. Bis anhin musste der Fahrer das Wanken der Kabine mit eigenen Gegenbewegungen ausgleichen. Die Lader und der Chauffeur schätzten zudem die Möglichkeit, sich im Betrieb verbal austauschen zu können. Die direkte Kommunikation habe das Potenzial, Unfällen vorzubeugen. Am Ende der Entsorgungsfahrten fühlte sich das Personal aufgrund der Lärmreduktion besser.

Der Test in Basel hat ergeben, dass auch engere Passagen problemlos mit einem E-LKW befahrbar sind. So hat der 2.3 Meter breite Collect 26E selbst im engen Steinenbachgässlein Abfälle gesammelt. Der Einsatzbetrieb schlägt zusätzlich eine Art *Soft-Abstellung* der Container mittels Softwareanpassung vor, um die Lärmbelastung in der Stadt zusätzlich zu reduzieren. Der Einsatzbetrieb würde zudem einen elektrischen *Lifter* begrüßen, welcher den Deckel von Containern autonom öffnet. Der Chauffeur fühlte sich aufgrund des Elektromotors und niedrigerem Geräuschpegel weniger abgelenkt. Die Lader bestätigen, dass im Betrieb von brennstoffbetriebenen Fahrzeugen Ohrenschäden voraussehbar wären, sie nach dem Einsatz des Collect 26E allerdings erstmals kein Pfeifen in den Ohren hatten. Generell wurde der Testarbeitstag als weniger stressig wahrgenommen. Positiv aufgenommen wird auch die schnellere Beschleunigung, die einen besseren Verkehrsfluss erlaubt. Das sei nötig, da sich die Durchschnittsgeschwindigkeit bei Fahrten auf lediglich 1.5km/h beläuft. Ein positiver Nebeneffekt der Elektrifizierung sei auch, dass die Schüttung schneller funktioniere als bei den Vergleichsfahrzeugen des Einsatzbetriebs. Dies spare – dank des schnelleren Pressvorgangs – Zeit. Gemäss dem Personal war die gesellschaftliche Akzeptanz beim Testtag in Basel sehr hoch.

Ein weiterer Test durch REAL (Recycling Entsorgung Abwasser Luzern) hat ergeben, dass die Aerodynamik des Fahrzeugs noch verbessert werden könnte – insbesondere für lange Fahrten bei hohen Geschwindigkeiten. Der emissionslose Betrieb und die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern stiess gemäss Aussagen auf grosse Akzeptanz in der Stadt und der Agglomeration.

Auch in der Stadt Bern stiessen die E-LKW auf hohe Akzeptanz. Zusätzlich erwähnten die Mitarbeiter die Eignung des Aufbaus der Contena-Ochsner AG sowie die hohe Wendigkeit dank dem kurzen Überhang. Allerdings – so schätzen die Berner Entsorgungslogistiker – würden sich künftig auch bei Diesel-LKW vermehrt sogenannte *Low-Entry-Kabinen* mit Bustüren und Fahrzeuge mit einer Breite von 2.3m durchsetzen. Dies wird auch von den Entwicklern so wahrgenommen. Die tiefen Einstiege in die Kabine erlauben eine höhere Ergonomie und eine geringere Stolpergefahr.



Erfahrungsbericht Haldimann AG Murten / Morat

„In den Grundüberlegungen unserer Firma besteht seit längerer Zeit die Überlegung, dass wir die zukünftige Mobilität aus folgenden Gründen unbedingt umstellen wollen:

- Endliche Energieträger für die Mobilität
- Standorte der Herkunft – potenzielles hohes Risiko – politisch und wirtschaftlich
- Sehr rascher und hoher Verbrauch der fossilen Treibstoffe-Reserven durch die Menschheit
- Dadurch zunehmende Umwelt- und Klimaprobleme
- Wir wollen eine unabhängige dezentrale Energieversorgung

Wir sind überzeugt, dass wir für die Zukunft neue Wege der Energieversorgung mit den von uns vorhandenen natürlichen und erneuerbaren Ressourcen wie Erdwärme, Wasser, Sonne, Wind und Biomassen suchen müssen.

Aus allen diesen Überlegungen war die Vorstellung des E-LKW von Designwerk genau eine der Möglichkeiten nach unseren Vorstellungen. Deshalb haben wir dem Projekt trotz sehr vielen Risiken sehr schnell zugestimmt.

Vorphase Projekt Futuricum E-LKW

In sämtlichen Testphasen hat der Prototyp absolut überzeugt und uns nie von der Funktionalität zweifeln lassen. Wir waren von der Fahrweise, der Handhabung und der Leistung sofort sehr begeistert. Wir waren bei der Präsentation des gesamten Systems sehr erstaunt wie einfach der Motor und das Getriebe gegenüber den Verbrennungsmotoren und herkömmlichen Getrieben aufgebaut sind. Sofort habe ich bemerkt, warum man mit einer «so einfachen» Technik nicht viel früher gekommen ist. Bei der Rohbauabnahme beim Aufbauer haben wir ein Problem der Hydraulikpumpe mit sehr viel Lärm festgestellt, der das Grundfahrzeug wesentlich übertönt hat. Dieses Problem wurde aber innert kurzer Zeit gelöst und ist seit der Auslieferung einwandfrei.

Inbetriebnahme Futuricum E-LKW

Im Herbst vor zwei Jahren war es dann soweit. Mit viel Spannung wurde das Fahrzeug an uns übergeben und in Betrieb genommen. Ohne irgendwelche Vorfälle und sehr unkompliziert ging das Fahrzeug in Betrieb.

Betriebserfahrung nach zwei Jahren

Das Fahrzeug macht wirklich noch nach zwei Jahren sehr viel Freude. Vier Vorkommnisse von technischen Problemen haben wir während dieser Zeit erlebt. Jeder Fall wurde praktisch innerhalb 24 Stunden erledigt und die Ursachen sind bekannt. Diesbezüglich kann Ihnen der Hersteller nähere Angaben wiedergeben. Das Fahrzeug ist sehr zuverlässig und wird jeden Tag wie jedes andere Fahrzeug eingesetzt. Das Fahrzeug gilt im Fuhrpark der Einsammelfahrzeuge (7 Fahrzeuge) als das Zuverlässigste.



Vorteile:

Aus folgenden Gründen überzeugt die Technologie:

- Sehr leise – sehr grosser Komfort für die Umgebung von unserer Tätigkeit des Einsammelndienstes, aber auch für das Einsammelteam ein sehr angenehmer und ruhiger Arbeitsplatz gegenüber früher. Ist ein sehr wichtiger Beitrag für den langfristigen Gesundheitsschutz für die Mitarbeiter
- Kleiner Energieverbrauch und die angewendete Energie noch erneuerbar – Im Vergleich zu Fahrzeugen mit Dieselmotor.
- Sehr feine Fahrweise durch das einfache Getriebesystem – Vorteil für die Auflader und ebenfalls eine Feststellung – sehr tiefer Reifenverbrauch.
- Im Schnee sehr sanftes Verhalten, das auch der Fahrsicherheit hilft Gute Gewichtsverteilung mit den Batterien – Vorteil im Schnee.
- Sehr grosse Rückladung bei der Rückgewinnung der Bremsenergie.
- Im Einsammeldienst gibt es sehr viele «Stop-and-gos». Durch die sehr hohe Energieeffizienz und schnelle Energieübertragung erlangen wir sehr hohe Tagesleistungen. Dadurch gewinnt das Fahrzeug von der Technologie her pro Tag ca. 45 Minuten.
- Die Reichweite für unsere Anwendungen waren sehr ideal und es gab grundsätzlich keine Engpässe, die zu Einschränkungen der Arbeiten geführt haben.
- Das Nachladen der Batterien funktionierte ebenfalls einwandfrei und einfach. In unserem Betrieb wurde das Fahrzeug mit dem Stecker am Abend verbunden und am nächsten Morgen wieder abgehängt.
- Die gesamte Fahrweise resp. der Fahrkomfort mit diesem Fahrzeug ist auf einem sehr hohen Niveau.

Nachteile:

- Batterietechnologie ist zwar bestechend, aber die Entsorgung resp. die Verwendung der Grundstoffe sicher nicht eine zukunftssträchtige Lösung. Hier ist ein sehr grosses Forschungspotential nötig.
- Dieser Nachteil stand aber bei uns für dieses Fahrzeug nicht im Vordergrund, sondern war ganz klar die Idee dahinter, ob es möglich ist die fossilen Brennstoffe für die Zukunft abzulösen.
- Das Gewicht und der Platzbedarf sind für diesen Typ Einsammelfahrzeug sehr ideal und stehen einem herkömmlichen Einsammelfahrzeug nichts nach. Bei anderen Anwendungen kann diese Technologie ein Nachteil sein. Nicht nur Platz und Gewicht, sondern auch die Reichweiten spielen hier erhebliche Rollen.



Meinungen aus dem Betrieb

Bis heute sind verschiedenste Berichte über das Projekt resp. das Fahrzeug von uns geschrieben worden (vgl. Anhang E).

Schlussfolgerung

Wir sind stolz, ein derartiges Fahrzeug zu besitzen. Wir sind auch Stolz, diesen Mut gehabt zu haben und das erste 26-Tonnen-Fahrzeug in dieser Art und Weise auf der Welt in Betrieb genommen zu haben und dass wir massgich zu dieser positiven Entwicklung beigetragen haben.

Wir können uns vorstellen, weitere Fahrzeuge in dieser Art in unserem Fuhrpark zu haben. Voraussetzung ist, dass die Investitionskosten erheblich gesenkt werden können. Wir stellen uns auch eine Weiterentwicklung dieser Technologie vor.“



Christian Haldimann
Geschäftsführer
Verwaltungsratspräsident

Volvo Schweiz (Group) AG

„Wir von der Volvo Group Schweiz sind sehr zufrieden mit der erfolgreichen Partnerschaft. Auch unsere Entwicklungsabteilung in Schweden steht dem Projekt positiv gegenüber und tauscht sich mit Designwerk aus. Um die Kooperation zu vertiefen, laufen zurzeit Gespräche mit unserem Mutterhaus für eine engere Zusammenarbeit.“

Contena-Ochsner AG

„Die Firma Contena-Ochsner AG in 8902 Urdorf steht für Innovation, Kompetenz und Know-how und gilt als führender Anbieter der Entsorgungstechnik in der Schweiz.

Der stetige Wandel auf dem Markt erfordert eine schnelle Umsetzung von kundenorientierten Lösungen. In Zusammenarbeit mit der Firma Designwerk Products AG wurde mit dem „Leuchtturmprojekt“ die perfekte Lösung gefunden, um dem Markttrend hin zu Kehrichtfahrzeugen mit Vollelektro-Antrieb voll zu entsprechen.

Schon 4 vollelektrische Kehrichtfahrzeuge wurden bereits realisiert und sind auf dem Schweizer Markt seit über 2 Jahren im täglichen Einsatz. Weitere Fahrzeuge folgen, diese befinden sich zur Zeit in Produktion.

In der Gesellschaft finden die Fahrzeuge beachtlichen Anklang und setzen ein Zeichen dafür, dass in der Branche ein Umdenken betreffend Thema Umweltschutz, Klimawandel etc. stattfindet und dementsprechend auch umgesetzt wird.

Die Realisierung der Fahrzeuge war nur möglich, dank den Visionären Gedanken von allen Projektpartnern und den ersten 4 Kunden, welche von Beginn weg von der Idee begeistert waren.“

Wahrnehmung der Bevölkerung

Für die Untersuchung der Wahrnehmung der Fahrzeuge auf die Bevölkerung wurden an einem Sammeltag vorbeilaufende Passanten auf das Fahrzeug angesprochen. Dabei wurden über diesen Sammeltag im Raum Murten (Kanton Bern) 25 Personen befragt. Die Befragung wurde indes sehr «offen» gehalten, da die Situationen sehr unterschiedlicher Natur waren. Das Ziel der Befragung war es, die ersten Wahrnehmungen der Leute herauszufiltern, ohne sie spezifisch auf das Fahrzeug hinzuweisen. So wurden beispielsweise folgende Fragen gestellt: «Was fällt Ihnen an diesem Fahrzeug auf?» oder «Vermissen Sie in dieser aktuellen Situation etwas?». Auf diese Frage angesprochen merkten die Passanten relativ schnell, dass das «Aufheulen» des Dieselmotors bei den Pressvorgängen fehlte und man sich während der Arbeit und des Wegfahrens des Fahrzeuges gut unterhalten konnte.



Abbildung 42: Befragung von Passanten auf die Wahrnehmung des Fahrzeuges (Murten, Oktober 2019).

So gaben beispielsweise mehrere Passanten an, dass sich die Reihenfolge der «Lärmemissionen» verändert habe. Das Geräusch der Verbrennungsmotoren sei gänzlich verschwunden und man höre nur noch das «Auf- und Zuschlagen» der Metallcontainer. Einigen Passanten ist das Fahrzeug beim Vorbeifahren sofort aufgefallen und sie haben sich das Fahrzeug bewusst angesehen. Doch der grösste Teil der Befragungen lief so ab, dass die Unterschiede erst beim Gespräch bzw. beim aktiven Hinweisen auf das Fahrzeug deutlich wurden. Denn viele Menschen haben sich im Alltag an die Sammlung von Wertstoffen schon so fest daran gewöhnt, dass es für sie grundsätzlich nichts Neues darstellt. Beim Gespräch zeigten sich die Passanten aber grundsätzlich begeistert vom Fahrzeug. Sie schätzten die Ruhe und sahen ebenfalls eine grosse Entlastung für die Mitarbeiter.

Bei den Fahrten durch engere Gassen und über belebte Marktplätze offenbarten sich zudem verschiedene Situationen, in denen die Passanten vom heranfahrenden Fahrzeug überrascht wurden. Diese Verkehrssituationen stellen insbesondere für Kinder und sehbehinderte Menschen eine Herausforderung dar. Viele Menschen haben sich an die Geräusche der Verbrennungsmotoren gewöhnt und orientieren sich entsprechend. Mit den Elektrofahrzeugen ist das schwieriger. Die Menschen müssen dafür sensibilisiert werden und sich entsprechend umgewöhnen – insbesondere bei tieferen Geschwindigkeiten, bei denen die Geräuschemissionen gegenüber den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren drastisch sinken. Die vier Fahrzeuge wurden aus diesem Grund mit einem zusätzlichen Warnton ausgestattet, der bei Fahrten durch Gassen und Marktplätzen mit vielen Fussgängern manuell eingeschaltet werden kann. Somit können vorbeilaufende Passanten auf das heranfahrende Fahrzeug aufmerksam gemacht werden.



Abbildung 43: Ausschnitt aus einem Sammeltag bei der Befragung von Passanten.

Festzuhalten ist, dass sich die Unterschiede der elektrischen Müllsammelfahrzeuge auf die Bevölkerung positiv auswirken. Nicht jeder Passant oder Bewohner realisiert den elektrischen Antrieb auf Anhieb. Wird die oder der Passant/in jedoch auf das Fahrzeug angesprochen, sind die Reaktionen positiv. Die Mehrkosten bei der Beschaffung stellte bei einigen Personen noch ein Hindernis bei der Beschaffung von grösseren Flotten dar. Einige auf das Thema «Elektromobilität» sensibilisierte Passanten fragten nach der Bereitstellung der Energie bei mehreren Fahrzeugen. Durch konstruktive Diskussionen wurden die Vor- und Nachteile der elektrischen Müllsammelfahrzeuge besprochen.

Die befragten Personen äusserten sich insgesamt über alle Gespräche positiv und freuten sich über die Entwicklung der Elektrofahrzeuge und die damit verbundenen «ruhigeren» Strassen. Dass die Elektrifizierung gerade bei den Müllsammelfahrzeugen – deren Routen sehr absehbar und planbar sind – Sinn macht, sahen alle Passanten und äusserten sich entsprechend in den Befragungen.

Kommunikation

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit dem Kommunikationskonzept, den umgesetzten Massnahmen sowie dem Effekt der Kommunikationsaktivitäten des Leuchtturmprojekts.

Kommunikationskonzept des Projekts

Die Fortschritte, Erkenntnisse und Resultate des Projekts wurden anhand eines grundlegenden Kommunikationskonzepts dargelegt. Das Konzept wurde vom Verein Student Impact, einer studentischen Unternehmensberatung, in mehreren Workshops erarbeitet. Der gemeinnützige Verein verfolgt soziale und ökologische Ziele und bezweckt die Integration von Nachhaltigkeit in der Wirtschaft. Die dreiphasige Konzepterstellung umfasste eine externe Analyse, die Definition von Zielgruppen und Kanälen sowie Massnahmen. Die Resultate flossen in den Umsetzungsplan ein. Für dieses und weitere Projekte wurden Student Impact und die Designwerk GmbH als Kunde am 29. Juni 2017 gemeinsam mit dem ASCO Award ausgezeichnet. Die ASCO prämiiert mit dem Award «Best Business Transformation» jährlich die besten und nachhaltigsten Unternehmenstransformationen in der Schweiz.

Umgesetzte Kommunikationsmassnahmen

Bei Projektbeginn hat die Designwerk GmbH in einem moderierten, demokratischen Verfahren einen Markennamen für die E-LKW ausgewählt. Die Wahl fiel auf Futuricum aufgrund der Bedeutung des Namens. Er lehnt sich an den Markennamen eines einstigen Zürcher Fahrzeugherstellers an. Der Name Futuricum ist damit eine Hommage an die Schweizer Fahrzeugbau-Pioniere und ein Bekenntnis zum Standort Winterthur. Die Ergänzung um die Silbe «Fu» verdeutlicht zudem das Versprechen, die elektromobile Zukunft (*Future*) aktiv mitzugestalten. Im Anschluss an die Auswahl der Wortmarke hat die Designwerk GmbH einen Wettbewerb für die Wahl der Bildmarke durchgeführt. Die Wahl fiel schliesslich auf die unten abgebildete und beim IGE eingetragene Bildmarke.



Abbildung 44: Wort-/Bildmarke von Futuricum.

Nach der Namensgebung wurde eine Projektwebsite erstellt, welche im Verlauf des Projekts mehrmals überarbeitet wurde. Auf der Seite wurden Projektinformationen, technische Daten und Blogeinträge publiziert. Um Produktinformationen auf kompakte Art und Weise zu verdeutlichen, erstellte Designwerk zudem einen Produkteflyer in drei Landessprachen. Da die Fahrzeuge nicht unter dem Markennamen Volvo vertrieben werden, wurden neue *Corporate Design* Elemente definiert und alle Fahrzeuge neu *gebrandet*. Dabei wird einerseits das Futuricum-Emblem eingesetzt, andererseits hat die Industriedesign-Abteilung der Designwerk GmbH eine neue Frontblende für die Fahrzeuge gestaltet.

Im Rahmen des Kommunikationskonzepts wurden zudem zwei erste Events durchgeführt. Dazu gehörten ein Kick-off-Meeting und die erste öffentlichkeitswirksame Inbetriebnahme eines Testfahrzeugs. Während den Veranstaltungen wurden auch Arbeiten am Fahrzeug und Demonstrationen durchgeführt. Im Januar 2017 durfte die Designwerk GmbH erstmals ein Filmteam des Schweizer Radio und Fernsehens SRF bei sich begrüßen. Der entstandene Beitrag wurde im Rahmen des Programms «Schweiz aktuell» am 31. Januar 2017 unter dem Titel «Elektrolastwagen für Müllabfuhr» ausgestrahlt.

Von Freitag, 9. Juni bis Samstag, 17. Juni 2017 wurde der erste Futuricum E-LKW der Haldimann AG während einer neuntägigen Roadshow durch die Schweiz vorgestellt. Dabei wurde das Fahrzeug an der Messe Suisse Public, der grössten Leistungsschau des öffentlichen Sektors der Schweiz, im Rahmen einer Abendveranstaltung mit Referaten vorgeführt. Ausserdem fuhr der E-LKW an der Rallye WAVE Trophy – der grössten E-Mobil-Rally der Welt – mit. Die Projektpartner traten dabei als Infrastruktur-, Film- sowie Ladepartner auf. Die Roadshow inklusive den Besuchen von Städten und CleanTech-Unternehmen haben die Sichtbarkeit und Bekanntheit des Leuchtturmprojekts massgeblich erhöht. Zudem konnten die Mitarbeitenden von Designwerk zahlreichen Messebesucher, darunter Behördenvertretungen von Gemeinden und Städten sowie Pressevertretungen, die Vor- und Nachteile der elektromobilen Kehrrichtentsorgung näherbringen. Viele der anwesenden Beschafferinnen und Beschaffer von Fahrzeugen waren nach den Veranstaltungen überzeugt, bei künftigen Ausschreibungen auch Elektrofahrzeuge zu evaluieren.



Abbildung 45: E-LKW 1 (Haldimann AG) beim Rollout 2017.



Im Jahr 2017 war die Designwerk GmbH zudem am Swiss Energy and Climate Summit präsent. Die Veranstaltung war geprägt von zahlreichen Fachgesprächen, Vorträgen und einem Ausbau des Netzwerks. Die Designwerk GmbH hat die Gelegenheit auch genutzt, um am Messestand über das Leuchtturmprojekt zu informieren. In Zusammenarbeit mit der AXA Winterthur entstand parallel ein Video über den E-LKW und die leitende Projektpartnerin. Auf sozialen Medien wurde es innert Kürze zehntausendfach angeklickt.

Weitere Auftritte erfolgten 2017 im Rahmen der Messe Transport.ch, einem Schweizer Nutzfahrzeugsalon. Hier waren die Projektpartner gleich mit zwei Fahrzeugen – einem am Stand und einem auf der Teststrecke – präsent. Den Berufsfahrern der Haldimann AG und der ebenfalls präsenten E-Force One AG ist es bei den zahlreichen Testfahrten gelungen, zahlreiche Berufschaffende vom vollelektrischen Fahren zu überzeugen. Besonders erfreut war das anwesende Designwerk-Team über die Testfahrt von Boije Overink, dem Schwedischen Rennfahrer und LKW-Geschwindigkeits-Weltrekordhalter, und über seine Aussage, die Zukunft sei elektrisch und er begeistert vom Projekt sei.

In einem internationalen Umfeld wurde das Projekt im Rahmen der EVS30, der 30. International Electric Vehicle Symposium & Exhibition, vorgestellt. Hier durften sich die Projektpartner Designwerk GmbH und Batteriewerk Schweiz AG Rückmeldungen von deutschen Fahrzeugherstellern wie der Daimler AG abholen und Erfahrungen austauschen. Eine Ausstellung erfolgte zudem im Rahmen der IFAT 2018, der Weltleitmesse für Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Rohstoffwirtschaft, gemeinsam mit Projektpartnern. Beim Fachpublikum schnitt der Futuricum E-LKW – auch im Quervergleich mit erstmals präsenten, internationalen Mitbewerbern in der vollelektrischen Kehrlichlogistik – sehr gut ab. Das Interesse der zahlreichen Standbesucher, darunter viele Delegationen von Städten, war dabei sehr gross. Als Gründe wurden unter anderem die drohenden oder bereits eingeführten Dieselvebote und das stets wachsende Umweltbewusstsein genannt.

Gegen Projektende war der E-LKW zudem Teil eines Elektromobilität-Experiments in Anwil. Die basellandschaftliche Gemeinde Anwil stieg während einer Woche auf Elektrofahrzeuge um. Im Rahmen eines Experiments erprobte sie die Energiestrategie 2050 des Bundes. Damit auch Abfälle elektrisch gesammelt werden, setzte die für die Kehrlichtentsorgung zuständige Unternehmung einen Futuricum E-LKW ein. Im September 2019 folgte zudem ein Radioauftritt der Designwerk GmbH über das E-LKW-Projekt auf SRF 3.

Seit dem offiziellen Kick-off des Leuchtturmprojekts im September 2016 konnten vier Fahrzeuge entwickelt, gefertigt und den ersten Kunden übergeben werden. Die ersten vier Kunden waren somit die wichtigsten Referenzpunkte über das gesamte Projekt. Im Frühjahr 2019 konnte mit einem dieser vier Fahrzeuge eine «Demonstrations-Tour» durch Deutschland realisiert werden. Dabei konnten im Vorfeld angemeldete Gemeinden oder private Unternehmen das Fahrzeug bei «echten» Einsätzen testen und sich von der Technik überzeugen lassen. Diese positiven Rückmeldungen wurden in den deutschen Medien rege verbreitet und diskutiert. Erstaunlich dabei: Das elektrisch angetriebene Sammelfahrzeug absolvierte die Fahrt nach Frankfurt problemlos. Dabei waren über die 1'355 zurückgelegten Kilometer (Thun–Frankfurt–Mainz–Mannheim–Colmar–Freiburg–Thun) insgesamt 16 Ladevorgänge nötig.

Das Fahrzeug konnte somit nicht nur theoretisch überzeugen, sondern durch den direkten Betrieb die Gemeinden und Unternehmen begeistern. Die drohenden Dieselfahrverbote in deutschen Städten sorgen dafür, dass die elektrischen Versionen immer mehr in den Vordergrund rücken und dabei eine naheliegende und sinnvolle Lösung für die Zukunft darstellen.

Solche Testfahrten wurden in Deutschland mehrmals durchgeführt und sorgten dafür, dass sich immer mehr Städte und Gemeinden (oder Kommunen in Deutschland) für elektrische Müllsammelfahrzeuge

interessierten. Die Nachfrage stieg seit dem Start des Projekts kontinuierlich. Dies zeigt, dass der Zeitpunkt der Durchführung des Leuchtturmprojektes optimal war und die grösseren Hersteller sukzessive nachziehen und genau in diese Nische einsteigen.

Die meisten der genannten Kommunikationsmassnahmen und -aktivitäten wurden darüber hinaus von zahlreichen weiteren, durchgehend positiven Medienberichten begleitet. Ein Medienspiegel ist in Anhang C aufgeführt.

Drohende Fahrverbote

Frankfurt testet vollelektrisches Müllfahrzeug

Veröffentlicht am 04.02.19 um 14:51 Uhr



Der Gast aus der Schweiz sammelt für drei Tage in Frankfurt Müll ein. Bild © picture-alliance/dpa

Im Frankfurter Norden testet der lokale Entsorger FES ein neues Elektro-Müllauto. Es ist teuer in der Anschaffung - könnte aber der Stadt helfen, ein Dieselfahrverbot zu verhindern.

ORTE

 [Frankfurt](#)

Abbildung 46: Zeitungsausschnitt hessenschau.de.

Was hat das Leuchtturmprojekt bewirkt?

Das Leuchtturmprojekt rund um die EWS Fahrzeuge von Designwerk konnte in den vergangenen zwei Jahren immer wieder grosse Wellen schlagen. Waren zu Beginn des Projektes im Jahre 2016 noch keine vollelektrische Nutzfahrzeuge über 18 Tonnen Gesamtgewicht im Einsatz, sind heute mehrere vollelektrisch angetriebene Nutzfahrzeuge verschiedener Marken im Betrieb. Dieser wachsende Markt sorgte dafür, dass sich die Konkurrenz in der Kommunaltechnik vergrössert hat. Die positiven Erfahrungen der vier Halter der ersten Futuricum-Fahrzeuge ermutigten weitere Gemeinden, bei Ausschreibungen und Beschaffungen neuer Fahrzeuge die vollelektrisch angetriebenen Nutzfahrzeuge zu berücksichtigen. So stimmte beispielsweise das Parlament der Stadt Basel anfangs 2019 der Beschaffung von 20 EWS Fahrzeugen zu.

Die Akzeptanz von vollelektrisch angetriebenen Lastwagen ist in den letzten Monaten nochmals stark gestiegen. Diese Akzeptanz zeigte sich auch in den bei Designwerk eingegangenen Bestellungen, die heute nicht nur die Wertstoffsammelfahrzeuge umfassen. Die beim Bau der EWS Fahrzeuge gewonnenen Erfahrungen konnten mittlerweile auf weitere Segmente ausgeweitet werden. Aktuell werden vollelektrische 5-Achs-Betonmischer entwickelt und im Spätsommer 2020 an den ersten Kunden ausgeliefert. Diese positive Entwicklung ist auf die vier Leuchtturmfahrzeuge zurückzuführen, die durch ihre täglichen Einsätze die Machbarkeit solcher Fahrzeuge demonstrieren und somit die besten Botschafter von vollelektrischen Nutzfahrzeugen darstellen.

electrive.net
Branchendienst für Elektromobilität

Nachrichten Videos Premium Jobmarkt Termine S
Automobil Nutzfahrzeug Energie & Infrastruktur Speichertechnik Flotten Politik Zweirad Luftfahrt

Flotten >

21.03.2019 - 14:39

Stadt Basel beschafft 20 E-Müllfahrzeuge

Basel BEV E-Lkw Schweiz



Die Stadt Basel hat vom Grossen Rat grünes Licht für den Kauf von elektrischen Müllfahrzeugen und der dazugehörigen Ladeinfrastruktur erhalten. Das Tiefbauamt will die neuen E-Lkw in zwei Tranchen beschaffen, wobei die Auslieferung der ersten neun Fahrzeugen ab 2021 vorgesehen ist.

Insgesamt hat der Große Rat die Bewilligung für die Beschaffung von 20 Müllfahrzeuge erteilt, deren Ausschreibung nun vorbereitet wird. Auch die übrigen der insgesamt rund 240 Fahrzeuge des Amtes sollen am Ende ihrer Lebensdauer durch elektrische ersetzt werden. Konkret hat die Stadt vor, die Umstellung bis zum Jahr 2025 zu 90 Prozent zu bewerkstelligen.

Wie berichtet, hatte der Regierungsrat des Kantons Basel-Stadt für den Kauf beim Grossen Rat bereits Anfang des Jahres 19,11 Millionen Schweizer Franken (knapp 17 Mio Euro) beantragt. Diese Summe hat das Gremium nun bewilligt. Geladen werden soll die Elektro-Flotte über Nacht an insgesamt sechs Standorten der Stadtreinigung sowie in der Werkstatt des Tiefbauamts. Dabei will die Kommune nur auf Ökostrom zurückgreifen.

bzbasel.ch

Autor: Cora Werwitzke

Beitrag teilen





Abbildung 47: Auszug der Meldung «Stadt Basel beschafft 20 E-Müllfahrzeuge». Quelle: electrive.net.

Die Firma «Futuricum AG» wurde anfangs 2019 zur Marke der Designwerk Products AG und produziert neben den Traktionsbatterien die Futuricum-Fahrzeuge in Wülflingen. Dank der hohen Nachfrage an die E-LKW und dem positiven Verlauf des Leuchtturmprojektes konnten in den letzten 12 Monaten über 40 neue Arbeitsstellen geschaffen werden. Die Designwerk Products AG wurde im November mit dem «Stellenschafterpreis» in Winterthur ausgezeichnet (2. Platz). Dieses Wachstum der Designwerk Gruppe wäre ohne das Wirken des Leuchtturmprojektes rund um die EWS Fahrzeuge nicht möglich gewesen.



Abbildung 48: Auszug aus dem Artikel «Die Zukunft der Müllabfuhr».

Ausblick

Der Wandel in der Mobilität wurde in den letzten zwei Jahren deutlich spürbar. Die zunehmenden Dieselfahrverbote in Städten und die technische Weiterentwicklung von Batteriezellen sind zwei Faktoren, die den Aufstieg der elektrisch angetriebenen Fahrzeuge stark beschleunigen können. Zusätzlich erleichtert die Politik durch verschiedene Vergünstigungen in immer mehr Ländern den Einstieg in die Elektromobilität.

Im Zuge des Leuchtturmprojekts konnten die Fahrzeuge in vielerlei Hinsicht überzeugen. So wurde etwa die durch das 1-stufige Getriebe und dem fehlenden Schaltvorgängen angenehmere Fahrweise von den Fahrern und Anwendern durchgängig positiv wahrgenommen. Die Bevölkerung profitiert durch deutlich geringere Umweltbelastungen. Die Gemeinden, Städte und Dörfer werden von CO₂-, Russpartikel- und Stickoxid-Belastungen gänzlich befreit. Auch die Lärmemissionen, insbesondere die subjektive Wahrnehmung der vorbeilaufenden oder in den Häusern wohnenden Personen, zeigten sich dank den effizienten Elektromotoren stark reduziert. Klar war aber auch seit Projektbeginn, dass die Preisgestaltung eines E-LKWs die grösste Hürde darstellen würde. Die bei Projektbeginn etwa viermal höheren Anschaffungskosten stellten das gesamte Projekt in Frage. Dieses Hindernis liess sich nur mit der Umsetzung der ersten vier Prototypen, dem Willen der ersten Kunden, ein «schwierig einzuschätzendes» Risiko einzugehen, sowie mit der finanziellen Unterstützung des Bundesamtes für Energie überwinden. Im Verlauf des Projektes zeigten sich zahlreiche Kunden begeistert und gratulierten dem Unternehmen für deren Mut.

Die bei Elektrofahrzeugen immer wieder proklamierten deutlich geringeren Unterhaltskosten liessen sich nach Abschluss des Projektes nicht gänzlich bestätigen. Zwar weisen die Elektrofahrzeuge tatsächlich geringere Unterhaltsarbeiten auf, diese werden jedoch von den teureren elektrischen Hochvolt-Komponenten wieder kompensiert. Alle vier Prototypen wurden mit einem sogenannten «Gold-Contract» von Volvo und Designwerk ausgestattet. Dieser beinhaltet die Übernahme jeglicher Kosten, die während dieser Vertragsdauer anfallen. Diese lagen bei Projektbeginn bei 18'000 CHF pro Jahr. Mit der Erfahrung der im Einsatz stehenden EWS-Fahrzeugen und deren geringen Standzeiten bzw. Ausfällen konnte man diesen Betrag auf einen Viertel reduzieren. Die Fahrzeuge wiesen in den zwei Projektjahren keine langen Standzeiten auf. Beim ersten Kunden, der Haldimann AG, schnitt das Futuricum-Fahrzeug gar als das Zuverlässigste unter den sieben im Einsatz stehenden Einsammelfahrzeugen ab. Solche positiven Rückmeldungen aus der Praxis beflügeln nicht nur das Entwicklerteam und die beteiligten Partner, die Entwicklung stetig voranzutreiben, sondern können auch eine positive Resonanz bei Unternehmen und der Bevölkerung auslösen – und die Akzeptanz von elektrischen Wertstoffsammelfahrzeugen weiter erhöhen.

Mit den vier realisierten Prototypen haben auch weiteren Interessenten in anderen Anwendungsbereichen die Möglichkeit erhalten, ein elektrisches Nutzfahrzeug zu fahren und von den gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnissen rund um die Anschaffung, Unterhalt und Führung dieser Fahrzeuge zu profitieren. Die Entwicklung einer CCS-Schnittstelle hat zudem das Anwenderspektrum noch weiter geöffnet. Die maximale Batteriekapazität wurde heute auf 340 kWh bei gleichbleibenden Dimensionen erhöht. So stehen zurzeit konkrete Offerten-Anfragen für Sattelzugmaschinen im Raum, die ein Gesamtgewicht von 40 Tonnen aufweisen. Diese Kombination aus Batterien mit höheren Energiedichten und der CCS-Ladetechnik, die Ladeleistungen von bis zu 150 kW zulassen, lassen die elektrischen Fahrzeuge auch in der Wirtschaftlichkeitsfrage attraktiver wirken. Die Fahrzeuge legen so deutlich mehr Kilometer als die Wertstoffsammelfahrzeuge zurück und können durch den geringeren Verbrauch und die geringeren Preise für die Energie die Amortisationszeit verkürzen.



Serienproduktion

Die Basis für eine allfällige Serienproduktion legten die vier Prototypen. Hier stellte sich den Projektpartnern die Frage nach der Preisentwicklung der Batteriezellen sowie die allgemeine Akzeptanz bzw. Nachfrage elektrischer Wertstoffsammelfahrzeugen. Die Basis für eine Serienproduktion sollten schliesslich die in der Praxis eingesetzten Wertstoffsammelfahrzeuge liefern, da man auf diese Weise konkrete und fundierte Erfahrungen sammeln konnte.

Durch die vertiefte Arbeit mit Volvo und Contena-Ochsner AG konnten die Lieferzeiten der Fahrzeuge bereits während des Leuchtturmprojektes verkürzt werden. Hier rechnete man für die Anlieferung der Trägerfahrzeuge von der Bestellung bis zum Beginn des Umbaus mit drei Monaten. Die anschliessende Elektrifizierung dauerte ebenfalls drei Monate, bis anschliessend der Aufbau mit der Arbeit beginnen konnte. Im letzten Schritt hatte der Aufbau (Stummer) knapp vier Monate Zeit. So musste der Kunde von der Bestellung bis zur Auslieferung knapp 10–11 Monate (inkl. Zulassung) warten.

Produktionsstandort

Um die Lieferzeiten von 11 Monaten auf mindestens die Hälfte reduzieren zu können, musste man auch die Schnittstellen zwischen den einzelnen Lieferanten (Trägerfahrzeug und Aufbau) genau definieren und die daraus resultierenden Prozesse stetig optimieren. So sind bereits heute keine Entwicklungsarbeiten mehr notwendig bei den Wertstoffsammelaufbauten. Die Schnittstellen zwischen Designwerk und Contena-Ochsner sind definiert und laufen praktisch automatisch. Im Verlauf des Abschlusses des Leuchtturmprojektes wurde über einen Standortwechsel der Produktionsstätte nachgedacht. Im Januar 2019 wurde schliesslich umgezogen. Die neue Produktionshalle ermöglicht nun eine Produktionskapazität von 30 Fahrzeugen pro Jahr. So konnte die Durchlaufzeit bei Designwerk von den ursprünglichen drei Monaten auf einen Monat reduziert werden. Diese Reduktion der Produktionszeit bringt auch tiefere Kosten mit sich. Dies war eines der Hauptziele bei der Erhöhung der Produktionskapazität. Das E-LKW-Team innerhalb von Designwerk wurde in dieser Zeit knapp verdreifacht. Diese Vergrösserung ist notwendig, um die eingehenden Bestellungen verarbeiten zu können, aber auch um die Fahrzeuge in einer möglichst kurzen Zeit «produzieren» zu können.

Anwendungsspektrum

Das Anwendungsspektrum der elektrischen Nutzfahrzeuge ist breitgefächert. Die drei zur Auswahl stehenden Batteriegrössen der Futuricum-Fahrzeuge sind zurzeit:

- 42 kWh
- 85 kWh
- 170 kWh

Zusammen mit dem effizienten und leistungsstarken elektrischen Antrieb ermöglicht dies eine individuelle Zusammenstellung von Batteriekapazitäten.

Das Anwendungsspektrum von elektrisch betriebenen Nutzfahrzeugen ist durch die vorangeschrittene Entwicklung von Batteriezellen sehr vielfältig. Neben dem Einsatzgebiet in der Wertstoffsammlung ist der Einsatz von schweren Nutzfahrzeugen in verschiedenen Logistikbranchen realistisch. Dazu gehören etwa die Verteil- und Transportlogistik, die Baulogistik sowie die Landwirtschafts- und Forstlogistik. Die



dafür entwickelte Technik soll zukünftig sowohl Städten, Gemeinden als auch Unternehmen eine wirtschaftlich sinnvolle Lösung bieten. Je nach Einsatzprofil der Kunden werden die Batteriegrößen eruiert und zusammengebaut. Neben den zurückgelegten Strecken wird auch der Energiebedarf des Presssystems – und zukünftig auch von vielen anderen Nebenantrieben – für die Auslegung der Batteriegrößen herangezogen. Förster könnten beispielsweise in Zukunft emissionsfrei in Naturschutzgebiete mit schweren, elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen ihre Arbeiten verrichten. Nachfolgend werden die modularen Traktionsbatterien visuell dargestellt.

ESS42 (42 kWh)

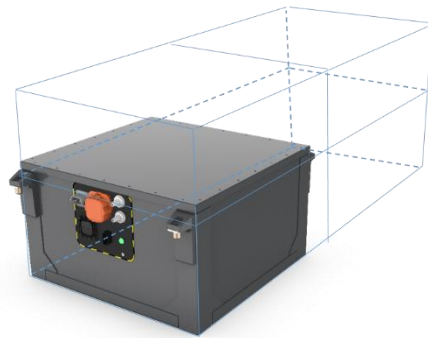


Abbildung 51: ESS42 (42kWh)

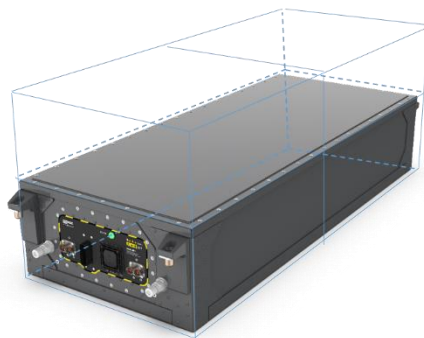


Abbildung 50: ESS85 (85kWh)

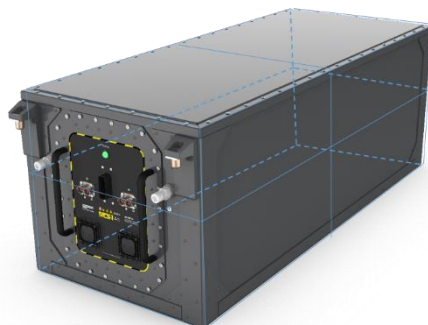


Abbildung 49: ESS170 (170 kWh)



Der Energiespeicher

In der Automobilbranche steigt die Nachfrage nach elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Dieser Trend führt zu einer stetigen Entwicklung der Batteriezellen. Die Batterien sind heute noch der grösste Kostenpunkt bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Durch die steigende Nachfrage von batteriebetriebenen Fahrzeugen ist der Preis für eine «kWh» über die letzten 10 Jahre kontinuierlich gesunken. Bei der Umstellung von Diesel- auf Elektro-LKW müssen die elektrischen Versionen die hohen Anforderungen vollständig abdecken und dürfen keine Nachteile aufweisen. Die sich stetig weiterentwickelnde Technik der Batterien wird in Zukunft Energiedichten aufweisen, die es den elektrisch betriebenen Lastwagen erlauben, das gesamte Anwendungsspektrum abdecken zu können. Zurzeit bieten die Lithium-Ionen Batterien die grössten Vorteile, was Sicherheit, Energie, Lebensdauer, Kosten und Leistung betrifft. Verschiedene Universitäten, Start-ups und Institute forschen derzeit an effizienteren Batteriezellen, die einerseits eine grössere Energiedichte aufweisen und sich andererseits noch schneller aufladen lassen.

Bei der Beschaffung von Batteriezellen muss aufgrund der weltweit steigenden Nachfrage mit Lieferzeiten von ca. 6 Monaten warten. Diese Lieferzeiten müssen bei der Planung von grösseren Stückzahlen zurzeit berücksichtigt werden. In Zukunft dürften sich durch die nahezu exponentielle Nachfrage die Lieferzeiten noch vergrössern.

Für eine ökonomisch sinnvolle Nutzung von schweren Nutzfahrzeugen im Langstreckenverkehr ist die derzeitige Batterietechnologie bereits an ihre Grenzen gestossen. Strecken von mehr als 400 km unter Vollbeladung (40 Tonnen) sind mit der heutigen Lade- und Batterietechnik noch nicht möglich.

Die Produktion

Nach der Auswertung der gesammelten Daten, Werten und Erfahrungen der vier Prototypen wurde die Weiterentwicklung des Futuricums beschlossen. Für die Betriebs- und Produktionersparnisse wird eine «Serienproduktion» angestrebt. Diese ermöglicht neben den Kostenersparnissen auch die Fertigung von grösseren Stückzahlen. Dabei werden die Arbeitsprozesse fest definiert und die Qualitätssicherung über die gesamte Produktionszeit gewährleistet.

Es können folgende Kernmerkmale und Vorteile festgehalten werden:

- Ausfall von hohen Zulassungsgebühren pro Fahrzeug
- Kostensenkung bei der Beschaffung einzelner Bauteile in grösseren Mengen
- Deutliche Steigerung der Qualitätssicherung durch feste Arbeitsschritte
- Allgemeine Preissenkung der Fahrzeuge

Bereits während der Weiterentwicklung des Futuricum-Fahrzeugs wurde der Umzug in eine grössere Produktionshalle getätigt. Bis ins Jahr 2020 sollen so vier Fahrzeuge in 2-Monatstakten ausgeliefert werden können. Steigt die zu erwartete Nachfrage wird die Produktionskapazität nochmal ausgeweitet. Gleichzeitig wurde das Personal aufgestockt und das Team innerhalb der letzten zwei Jahre nahezu verdoppelt.

Laden

Die Ladetechnik wurde bei der Entwicklung der zweiten Version um die CCS-Schnittstelle erweitert. So können in Zukunft die Fahrzeuge mit den immer häufiger auftretenden DC-Stromquellen mit bis zu 150 kW geladen werden. Diese zusätzliche Option erlaubt es den Kunden, auf nicht geplante Sammeltouren, wie z.B. nach grösseren Festivals, reagieren zu können. Mit der grössten Batterie (340 kWh) können Ladezeiten von nur 2.5 Stunden erreicht werden. Mit der mobilen MDC-88 von der Firma Designwerk Products AG können so die DC-Stromquellen an beliebigen Standorten verteilt und die Stromzufuhr aller Fahrzeuge gesichert werden. In Zukunft sollen an Autobahnraststätten auch Ladeleistungen mit bis zu 450 kW möglich sein.



Abbildung 52: Schnellladegerät für die CCS-Schnittstelle (MDC-88, Designwerk Products AG).

Multi-Energy-Cube

Der «Multi-Energy-Cube» soll als aktives Netzelement agieren und die Nutzung der Batterien des Futuricum Collect 26E als Energiespeicher für jegliche Form externer Anwendungen ermöglichen. Das Kernstück dieser Innovation ist dabei die Verbindung der im Fahrzeug verbauten Hochvoltbatterie zu einer beliebigen Infrastruktur sowie die Wandlung von DC-Strom in AC-Strom und dessen Transformation. Die Anwendung ist ausserordentlich flexibel und erlaubt den Strombezug mittels verschiedener Steckdosen für alle gängigen Spannungen (Ausgangsdaten: max. 88kW/CEE/125A und weitere beliebige Steckdosen 230–400V). Der im Fahrzeug Futuricum Collect 26E gespeicherte Strom (z.B. aus regenerativen Quellen wie «Naturemade») kann dank dem «Multi-Energy-Cube» für viele wichtige Anwendungen eingesetzt werden, z.B. als Inselnetzgenerator für einen externen mobilen Strombetrieb, Notfallstromversorgung, Rückspeisung ins Netz etc. Für diese innovative Anwendung wird ein neues, intelligentes Energiemanagement-Regelsystem mittels einer bi-direktionalen Schnittstelle zum Fahrzeug entwickelt und auf die Bedürfnisse spezifischer Kundenwünsche abgestimmt.

Mittels dieser Entwicklung werden folgende weitere Anwendungsbereiche möglich:

- Mobil für den Antrieb von jeglichen elektrischen Arbeitsgeräten (bis 88kW) verwendbar.
- Betrieb von Beleuchtungskörper für Strasseneinsatz, Strassenbau, Beleuchtung, Kompressoren, Pumpen.
- Speicherkapazität für das Stromnetz, dadurch flexiblere Nutzung für erneuerbare Energien.
- Wegfall des üblichen Dieselgenerators bei einer Nutzung als «Energielieferant».

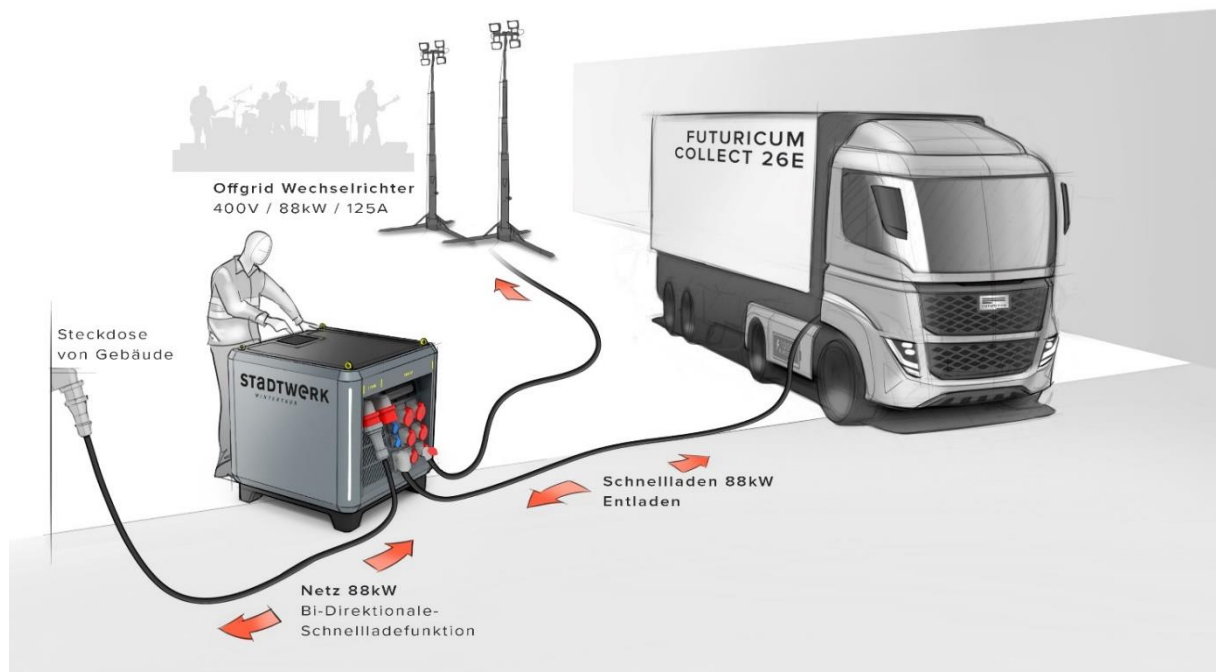


Abbildung 53: Funktion «Multi-Energy-Cube».



Diskussion

Beschaffung neuer Wertstoffsammelfahrzeuge

Im Vorfeld des Leuchtturmprojekts gab es einige Vorbehalte gegenüber der neuen Technologie. Dazu gehörten etwa die «Reichweitenangst» sowie die Angst vor Ausfällen und Defekten bzw. der Zuverlässigkeit der EWS-Fahrzeuge. Bei der Beschaffung neuer Wertstoffsammelfahrzeugen hat die Erfahrung aber gezeigt, dass die Reichweite in der Praxis selten eine Hürde darstellt. Die durchschnittlich zurückgelegten Wege pro Sammelfahrzeug konnten bereits im Vorfeld empirisch-theoretisch dargelegt werden. Durch die Demonstration der vier Prototypen konnte auch gezeigt werden, dass die heutige Batterietechnik den heutigen Anforderungen (durchschnittlich ca. 75 km/Tag) bereits gerecht wird. Die zu Beginn des Projektes gespürte Unsicherheit bei der Zuverlässigkeit von elektrisch betriebenen Wertstoffsammelfahrzeugen konnte ebenfalls reduziert werden. So konnten die vier eingesetzten Fahrzeuge im zweijährigen Praxistest demonstrieren, dass die Zuverlässigkeit bereits mit den ersten vier Prototypen gegeben ist.

Bei weiteren Anwendungsbereichen wie der Transport- und Verteillogistik, dem Baustelleneinsatz oder gar dem Fernverkehr wird der Reichweite wieder eine stärkere Bedeutung zukommen. Die heutigen Logistiker müssen heute immer flexibler aufgestellt sein und auf «unerwartete» Aufträge reagieren können. Das Gegenteil von den immer gleichbleibenden Strecken der EWS-Fahrzeugen. Die elektrische 40-Tonnen-Sattelzugmaschine soll Interessierten die Plattform bieten, ihre täglichen Strecken im Testbetrieb fahren zu können und dabei die ersten Erfahrungen mit elektrischen Nutzfahrzeugen machen zu können. Dieses Vorgehen ist bei neuen Antriebsformen unablässig. Zukünftige Kunden sehen die Vor- und Nachteile bei Live-Demonstrationen am besten und können die elektrischen Fahrzeuge gleich selbst testen.

Beschaffung öffentliche Hand / private Kunden

Bei den Beschaffungen neuer EWS-Fahrzeugen unterscheidet man grundsätzlich von privaten Unternehmen, die im Auftrag der öffentlichen Hand handeln und den Städten/Gemeinden, die bei Beschaffungen neuer Fahrzeuge klar definierten Beschaffungsrichtlinien unterliegen. Bei Ausschreibungen ist die Tendenz zu beobachten, dass die öffentliche Hand immer offener gegenüber alternativen Antrieben wird und elektrisch angetriebene Fahrzeuge nicht grundsätzlich ausschliesst. Aktuell finden denn auch vermehrt Ausschreibungen statt, die das elektrische Fahrzeug klar bevorzugen bzw. gar als Grundbedingung sehen. Diese Entwicklung ist auch dem grossen Echo des Leuchtturmprojektes geschuldet, das auch international immer mehr Anklang findet.

Die privaten Unternehmen sind bei der Beschaffung neuer Fahrzeuge wesentlich flexibler. Diese Einkäufe werden oft aus rein rational-wirtschaftlichen Gründen durchgeführt. Hier zeigte sich, dass bei einer Einsatzzeit von acht Jahren die höheren Anschaffungskosten amortisiert sein müssen. Diese Zeit hängt stark mit dem Verschleiss des Aufbaus zusammen. Dieser ist in der Regel nach zwölf Einsatzjahren so verschlissen, dass das gesamte Fahrzeug ausgewechselt werden muss. So können die Fahrzeughalter nach den acht Jahren Amortisationszeit die Fahrzeuge vier Jahre lang zu einem deutlich geringeren Aufwand an Wartung- und Unterhaltskosten betreiben. Die Auswertung der Fahrdaten zeigt ebenfalls, dass die Fahrzeuge der privaten Kunden längere Strecken pro Tag bzw. im gesamten Jahr zurücklegen.

Die Tendenz zeigt, dass die öffentliche Hand wie aber auch private Unternehmen zunehmend gewillt sind, elektrisch betriebene Wertstoffsammelfahrzeuge zu beschaffen. Diese Entwicklung ermöglicht es der Designwerk GmbH die Kosten pro Fahrzeug stetig senken zu können und die Fahrzeuge noch weiter entwickeln zu können.



Bei der Berechnung der Amortisationszeit eines E-LKWs spielt die Befreiung von den LSVA eine zentrale Rolle. Hier stellt sich den Haltern die Frage nach der langfristigen Ausrichtung des Bundes. Aktuell sind die elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeuge gänzlich von den Leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgaben befreit. Noch sind keine Diskussionen im Gange, die diese Regelung in Frage stellt. Sollten in Zukunft elektrische Nutzfahrzeuge in der Schweiz immatrikuliert werden, könnte die LSVA-Befreiung in Frage gestellt werden. Trotzdem ist die Schweiz im Vergleich zu anderen europäischen Ländern eher zurückhaltend bei Subventionen und Förderungen von alternativen Antrieben. In Deutschland werden derzeit konkrete Förderungsgelder gesprochen, die die Kommunen und Gemeinden dazu bewegen sollen, auf alternative Antriebe zu setzen.

So ist aktuell davon auszugehen, dass die kleine Zahl an immatrikulierten elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeugen die LSVA-Befreiung nicht in Frage stellt. Will man die international hochgesteckten Klimaziele erreichen, wird der Bund zudem die Förderung von alternativen Antrieben noch weiter vorantreiben müssen.

Zulassung

Bei der Zulassung der vier realisierten Prototypen mussten im Wesentlichen vier Prüfstationen durchlaufen werden. Bei Änderungen von bereits typengeprüften Fahrzeugen sind gesetzlich vorgeschriebene Prüfungen durchzuführen. Bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen umfassen diese Prüfverfahren die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), die Niederspannungsverordnung (NEV), Geräuschemessung, Brems- und Lenkkräfte sowie die Befüllungszeit der Lufttanks. Diese Prüfungen müssen bei zertifizierten Instituten oder Unternehmen erfolgen.

Die ersten vier Prototypen wurden bei den jeweiligen Strassenverkehrsämtern einzeln zugelassen. Die Einzelzulassung bietet Kleinunternehmungen die Möglichkeit, die von ihnen umgerüsteten Fahrzeuge relativ unkompliziert für die Strasse zuzulassen. Es dürfen jedoch nicht mehr als fünf Einzelzulassungen des gleichen Typs pro Jahr erfolgen. Gleichzeitig stellt diese Zulassungsprozedur für Unternehmen, die eine grössere Stückzahl anstreben, zeitliche- sowie kostenumfängliche Hindernisse dar. Bei der Projektplanung wurde der zeitliche Faktor der Zulassung massiv unterschätzt. Die Lärmmessung erfordert witterungsfreundliche Verhältnisse, die sich je nach Jahreszeit über einen längeren Zeitraum nicht «realisieren» lassen. Den Umfang der Messung der Elektromagnetischen Verträglichkeit konnte im Vorfeld ebenfalls nur schwer abgeschätzt werden. Diese erforderte letztlich mehrere Tage, was die Auslieferung des Fahrzeuges ebenfalls verzögerte.

Für die Fertigung und die Inverkehrsetzung von mehr als fünf Fahrzeuge pro Jahr stellt sich die «Einzelzulassung» somit als zeitlich zu aufwendig und zu kostspielig dar. Die angestrebte Typengenehmigung erlaubt die Serienfertigung bzw. die anschliessende Zulassung und Inverkehrsetzung von mehr als fünf Fahrzeugen pro Jahr. Die Firma Designwerk Products AG arbeitet somit intensiv an der typengeprüften Zulassung, welche die ambitionierten Pläne des jungen Unternehmens von mehr als 10 Inverkehrsetzungen pro Jahr ermöglichen soll.

Bei der Typengenehmigung werden nebst den oben erwähnten Prüfungen am Fahrzeug auch die Hochvolt-Batterie getestet und geprüft. Der Umfang wird dadurch nochmals grösser, jedoch nur «einmalig» über die gesamte Fertigung und Auslieferung des Fahrzeuges anfallen.



Abbildung 54: Der E-LKW 1 bei der EMV Messung.

Einsatzgebiete

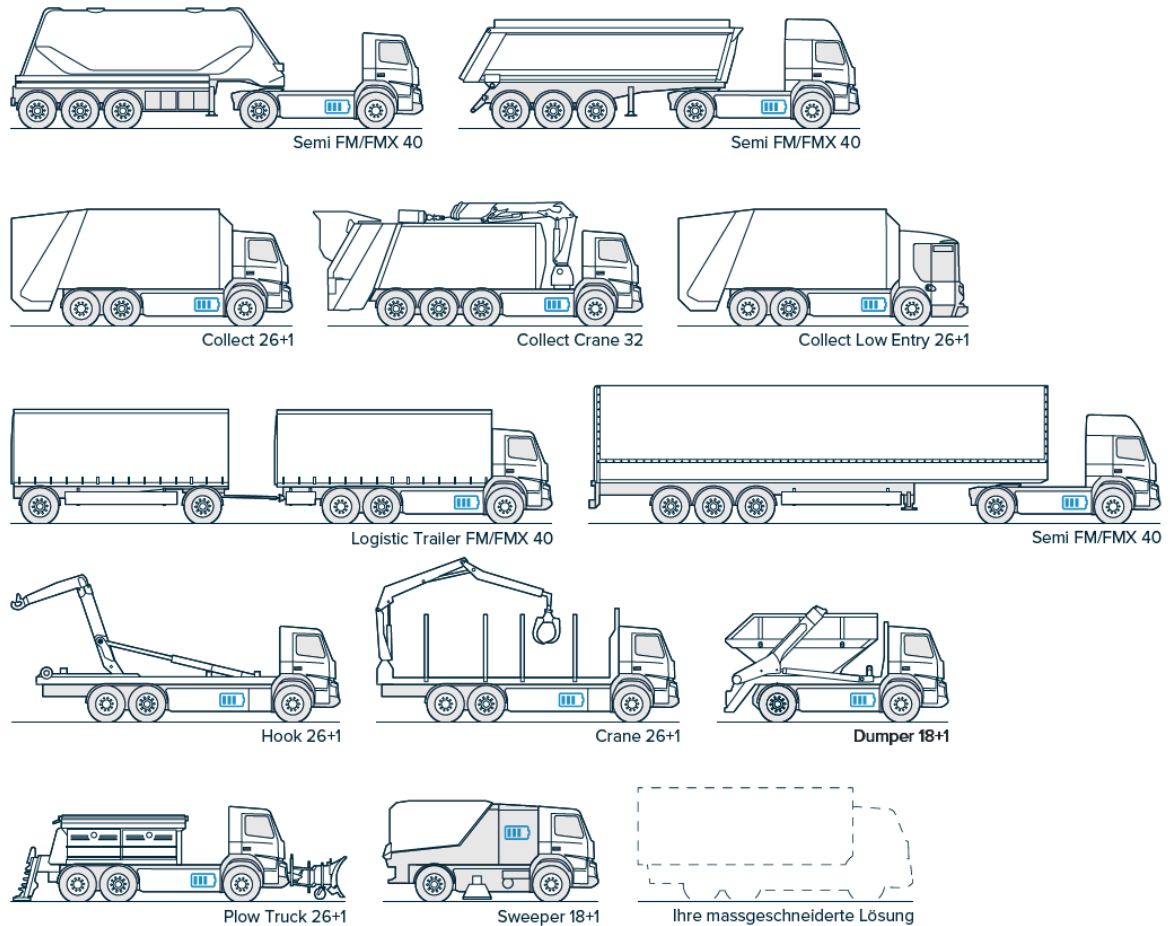


Abbildung 55: Piktogramm Anwendungsspektrum Designwerk.

Im September 2017 wurde der erste Futuricum Collect 26E ausgeliefert. Drei weitere folgten ein halbes Jahr später. Seit dieser Zeit stehen die Fahrzeuge ununterbrochen im Einsatz. Die Einsatzgebiete der vier Fahrzeuge sind bis auf die unterschiedlichen Topografien nahezu identisch. Der effiziente Elektroantrieb eignet sich optimal für den täglichen *Stop-and-go-Betrieb*, dem die Wertstoff-Sammelfahrzeuge ausgesetzt sind. Durch den leisen und effizienten Antrieb eignen sich Einsatzgebiete, die besonders starken Lärmemissionen ausgesetzt sind. Neben den Einsätzen in Sammelbetrieben können die Futuricum-Lastwagen auch anderweitig eingesetzt werden. Einsatzgebiete mit besonders hohen Anforderungen wie sie in Naturschutzgebieten anzufinden sind, eignen sich besonders für den Futuricum.

Lebensmitteltransporte, die von den Nachtfahrverboten befreit sind, können mit dem effizienten und leisen Antrieb für weniger Emissionen und Stressbelastung bei der Bevölkerung sorgen. Die Einsatzgebiete sind durch die grösser werdenden Kapazitäten der Batterien äusserst vielfältig. Den funktionalen Beweis dafür liefern die täglich im Einsatz stehenden Futuricum Collect 26E.



Schlussfolgerungen

Das Leuchtturmprojekt, das über zwei Jahre zielstrebig und mit grosser Hingabe verfolgt wurde, hat für die Weiterentwicklung von neuen elektrisch angetriebenen Sammelfahrzeugen wichtige Aufschlüsse gebracht. Während die grossen Hersteller von Nutzfahrzeugen den Fokus auf die Elektrifizierung von 18-Tonnen-Fahrzeuge gelegt haben, konnte das Team der Designwerk GmbH den bislang nur theoretisch untersuchten wirtschaftlichen und ökologischen Nutzen von Wertstoff-Sammelfahrzeugen über 26 Tonnen eindrücklich in der Praxis demonstrieren. Die heute noch deutlich höheren Anschaffungskosten eines E-LKWs, die grösstenteils auf die Batterien zurückzuführen sind, können gemäss den Testresultaten mit den wesentlich tieferen Betriebskosten wiederum eingespart werden. Denn mit zunehmender Nutzung der elektrisch angetriebenen Sammelfahrzeugen sinken die Gesamtkosten über die Lebensdauer gegenüber einem Diesel-LKW. Eine definitive Antwort auf die Frage nach der Wirtschaftlichkeit kann es allerdings erst geben, wenn mehrere elektronische Nutzfahrzeuge einen kompletten Lebenszyklus durchlaufen haben.

Die Erfahrungen der letzten zwei Jahre zeigen allerdings, dass die Elektrifizierung von Sammelfahrzeugen über 26 Tonnen realisierbar ist und zahlreiche Vorteile gegenüber den Dieselfahrzeugen bietet. Die derzeitige Befreiung der LSVA (Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe), die geringeren Wartungskosten und die günstigeren Energiekosten sprechen für die Beschaffung von elektrisch angetriebenen Sammelfahrzeugen. Die noch zu hohen Anschaffungskosten sollen in Zukunft, u.a. durch Serienproduktionen, weiter gesenkt werden.

Nebst den wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten sind die im Alltag «unsichtbaren» Faktoren wie die entfallene Betankungszeit oder die deutlich leiseren und angenehmeren Arbeitsbedingungen der elektrischen Sammelfahrzeugen zu berücksichtigen. Das stufenlose und somit ruckfreie Anfahren sorgt für eine starke Reduktion der körperlichen Belastung. Die «Sammler» berichteten von stressfreieren Arbeitstagen und bevorzugten die elektrische Variante deutlich. Die Wahrnehmung der Bevölkerung ist ebenfalls äusserst positiv. Die beim Pressen vom Dieselmotor verursachten lauten Geräusche entfallen grösstenteils. Die Bevölkerung würde nach Sammelfahrten, die z.B. nach grösseren Festivals hauptsächlich während der Nacht durchgeführt werden, weniger belastet werden.

Die aus dem Leuchtturmprojekt gezogenen Schlüsse und Erkenntnisse liefern nun wichtige Daten für die Entwicklung und Fertigung der zweiten Generation. Diese geht bereits dieses Jahr in Serie und wird nach der Typengenehmigung 46EG zugelassen.

Bei der Auslegung der Batteriekapazitäten spielen neben den pro Tag zurückgelegten Strecken auch die Nutzung des Presssystems eine wesentliche Rolle. Die grösste Batterievariante bilden zwei 170 kWh Batterien, die direkt hinter der Fahrerkabine links und rechts angebracht werden. Diese Kapazität ermöglicht den Betreibern eine überdurchschnittliche Nutzung des Fahrzeuges sowie den im Aufbau integrierten Presssystem, sodass der E-LKW auch in Punkto Reichweite den Dieselvarianten in keinem Nachteil steht. Im Depot können die Fahrzeuge mit dem günstigen Nachtstrom über das im Fahrzeug integrierte Ladegerät geladen werden. Dabei können die Fahrzeuge mit bis zu 44kW geladen werden. Die Ladezeit beträgt in diesem Fall gerade einmal sieben Stunden.

Die Akzeptanz aller beteiligten Projektpersonen war und ist nach wie vor sehr gross. Die leisen und emissionsfreien Fahrzeuge begeistern die Gemeinden, Privatfirmen und vor allem auch die Chauffeure, die von der Technik und Umsetzung überzeugt sind. Die Elektromobilität steht im Jahre 2019 kurz vor dem Durchbruch und der Akzeptanz der breiten Bevölkerung.



Es gilt nach wie vor die hohen Anschaffungskosten zu senken und die Energiedichte der Batteriezellen zu erhöhen. Durch den Ausbau der CCS-Schnittstellen (Schnellladung) werden die neuen Fahrzeuge von Futuricum auch fähig sein, mit einer Leistung von bis zu 150 kW geladen zu werden. Damit werden auch Fahrten mit bis zu 40 Tonnen über längere Strecken möglich. Diese werden durch die langen Strecken pro Tag für die Unternehmen besonders attraktiv. In diesem Szenario könnten die höheren Anschaffungskosten bereits nach 4 bis 5 Jahren amortisiert werden.



Anhang

Anhang A – Beispielbericht Monitoringportal

Der nachfolgende Bericht wurde automatisch auf dem Monitoringportal der Designwerk GmbH erstellt.
Der Auszug bezieht sich auf die Fahrdaten des E-LKW der Stadt Lausanne.



Futuricum Report eLKW

Generation date: 02 April, 2019

Short report for the eLKW of Commune de Lausanne

This is an automatically generated report. For further information please contact Designwerk GmbH in Winterthur info@design-werk.ch.

Meta-data description

The following table provides some meta-data for the current report. Start and end time of selected data correspond to the time window that was selected at the time when the report was requested. Throughout the report this time window is referred to as *current selection*. On the other hand, *total* refers to the total lifetime of the eLKW which initiates on 25th of May 2018 and last until the moment the report was requested.

Start time of selected data	2018-03-01 00:00:00
End time of selected data	2019-03-01 23:59:00
Owner of the vehicle	Commune de Lausanne
Vehicle Type	FUTURICUM Collect 26E
Data logging device	Proemion CANLink mobile

Summary

Energy sensitive parameters are listed below for the current selection (left column) and the total lifetime of the eLKW (right column). The diesel equivalent was computed by assuming that 1 litre of diesel corresponds to an effective energy content of 9.676 kWh.

	Current selection	Total
Distance [km]	7439.6	8484.1
Energy [kWh]	17951.8	20693.7
Energy consumption [kWh/100 km]	241.3	243.9
Diesel equivalent [l/100 km]	24.9	25.2

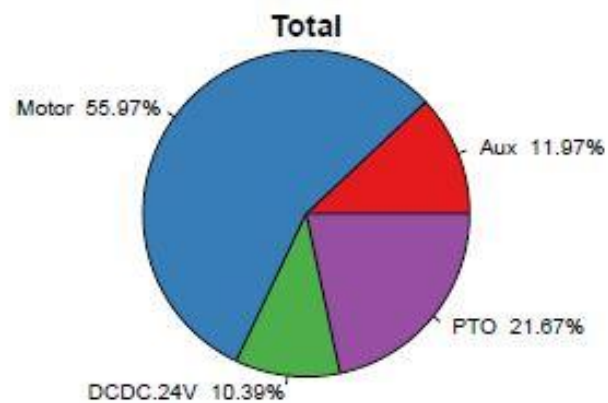
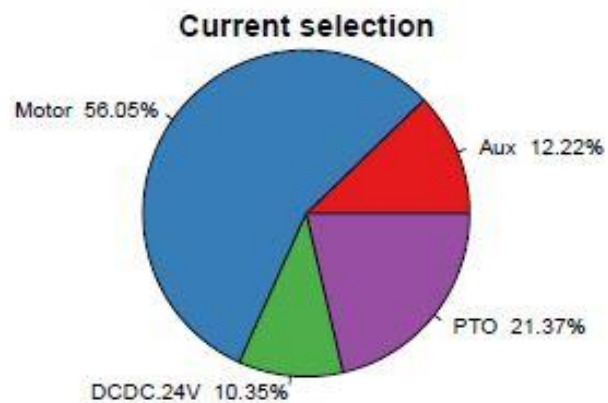


Energy disaggregation

The total energy consumed by the vehicle is distributed to 4 major subsystems:

- Motor
- Power Take-Off (PTO) for garbage press system
- Auxiliary systems (Aux) containing air compressor and heating
- Low voltage circuit (DCDC.24V) powering lighting, water pumps, steering, etc.

The pie charts below visualize the total energy disaggregation for the current selection (top) and for the total lifetime (bottom)

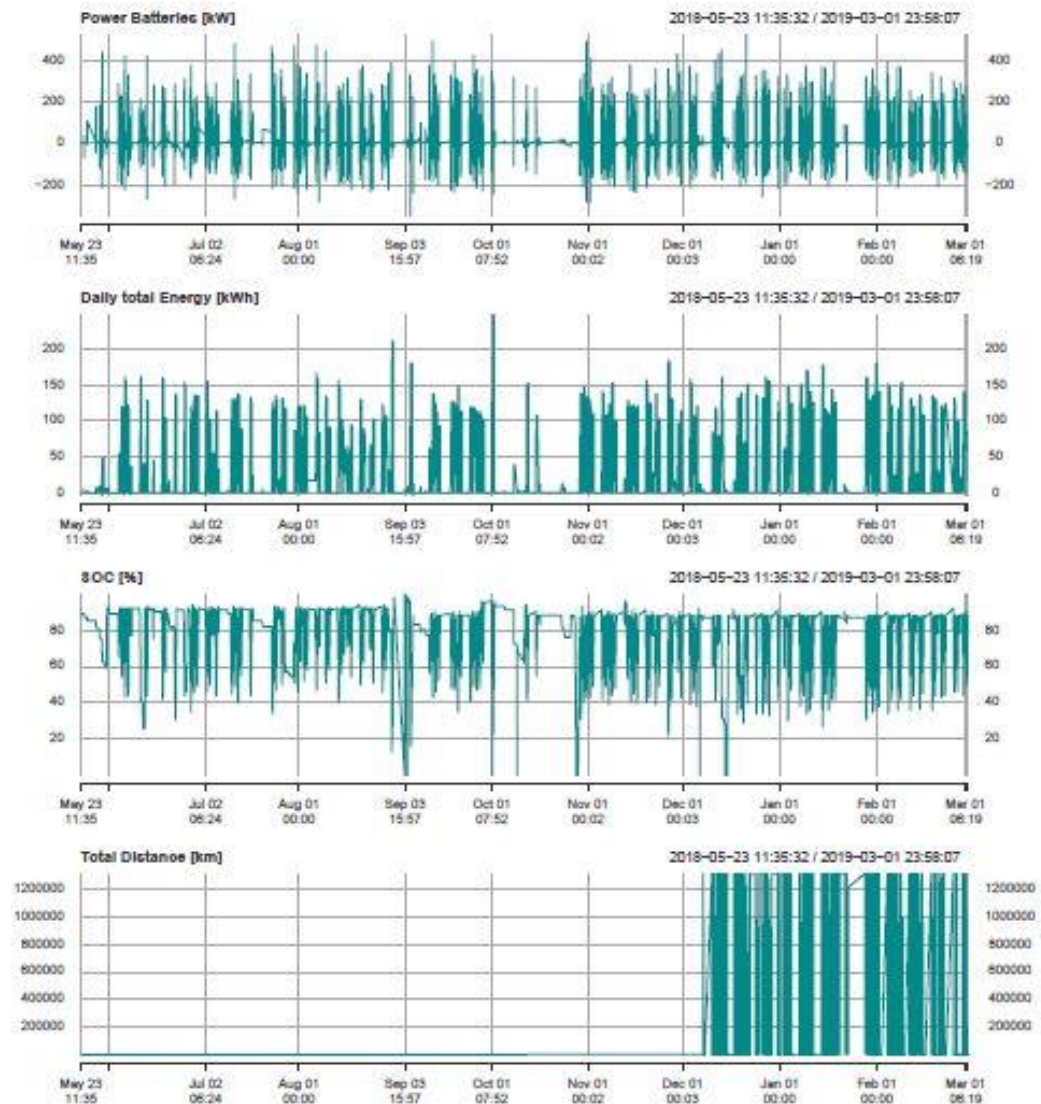




Time Series

The time series for the following parameters in the current selection are shown

- Power Batteries in kW
- Total daily energy in kWh: This is the net energy consumption (inkl. recuperation and exkl. charging).
- State of Charge (SOC) in %
- Total distance in km



**Anhang B – Auswertung Fahrdaten**

Die Tabelle fasst die Auswertung der Monitoringdaten der im Leuchtturmprojekt gebauten E-LKW über den Zeitraum vom 01.06.2017 bis zum 01.09.2019 (Gesamten Zeitraum über die Zeit des Leuchtturmprojektes) zusammen. Das Dieseläquivalent des Stromverbrauchs in Kilowattstunden wurde mit einem Heizwert pro Liter Diesel in der Höhe von 9.676 errechnet.

Fahrzeug	Kilometerstand 01.06.2018 [km]	Kilometerstand 01.09.2019 [km]	Gefahrene Distanz [km]	Umgesetzte Energie [kWh]	Durchschnitts- verbrauch [kWh/100km]	Errechnetes Dieseläquivalent [l]	Errechnetes Dieseläquivalent Heizwert [l/100km]
E-LKW 1: Haldimann AG	0	28'388	28'388	50'510	177.9	3'270	18.38
E-LKW 2: Svedel S.A.	0	37'095	37'095	56'216	151.5	2'372	15.65
E-LKW 3: Stadt Thun	0	19'755	19'755	37'412	189.4	3'707	19.57
E-LKW 4: Stadt Lausanne	0	14'903	14'903	34'075	228.6	5'400	23.62
	Σ 0	Σ 100'141	Σ 100'141	Σ 178'213	Ø 186.85	Σ 6'508	Ø 18.59

**Anhang C – Medienspiegel**

Datum	Titel	Medium
05. Februar 2019	Frankfurt: Vollelektrisches Müllfahrzeug im Test	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung
04. Februar 2019	FES testet vollelektrisches Müllfahrzeug Futuricum	kommunalwirtschaft.eu
04. Februar 2019	FES testet vollelektrisches Müllfahrzeug ‚Futuricum‘	frankfurt.de
04. Februar 2019	Frankfurt testet vollelektrisches Müllfahrzeug	Oberhessische Presse
04. Februar 2019	Alternativen zu Dieselmotoren - Testbetrieb: Das ist Frankfurts vollelektrisches Müllfahrzeug	Frankfurter Neue Presse
04. Februar 2019	Testfahrt: Automatisierte Müllfahrzeuge	rheinmaintv
04. Februar 2019	Elektrisch Abfall sammeln: Collect 26 E	heise online
04. Februar 2019	Elektrische Müllentsorgung - Die Zukunft der Müllabfuhr	Frankfurter Rundschau
04. Februar 2019	Drohende Fahrverbote - Frankfurt testet vollelektrisches Müllfahrzeug	hessenschau.de
04. Februar 2019	Mainz und Frankfurt setzen auf saubere Busse und Müllwagen	Sat.1
6. November 2018	Nicht nur für den Kehricht tauglich	Jungfrau Zeitung
16. September 2018	Wenn die Müllabfuhr elektrisch unterwegs ist	Echo der Zeit – Radio SRF
4. Juni 2018	Un camion-poubelle 100% électrique pour les déchets lausannois	lfm - la radio
4. Juni 2018	Beau comme un camion-poubelle 100% électrique	24 heures
4. Juni 2018	Un camion-poubelle 100% électrique à Lausanne	20 minutes
4. Juni 2018	Un camion-poubelle 100% électrique circule dans les rues de Lausanne	RTS Info
4. Juni 2018	Un camion-poubelle 100% électrique à Lausanne	Le Matin
16. Mai 2018	Stadt präsentiert Öffentlichkeit neuen eLKW	Jungfrau Zeitung
30. März 2018	Thun flottet Elektro-Kehrichtfahrzeug ein	Ecomento
28. März 2018	Stadt Thun setzt auf elektrisches Müllfahrzeug	Electrive.net
26. März 2018	Erstes elektrisches Kehrichtfahrzeug legt los	Jungfrau Zeitung
23. März 2018	In Thun fährt neu ein Elektro-Kehrichtauto	Der Bund
21. März 2018	Nach dem Tesla kommt jetzt der E-Abfallwagen	20 minuten
17. März 2018	Neuchâtel, des camions électriques pour collecter les poubelles	RTS
9. März 2018	Ramasser les poubelles grâce à l'électricité	ARC Info
23. Februar 2018	Fünf Fragen an Frank Loacker (Mitgründer Designwerk)	Energate-Messenger
10. Januar 2018	Vollelektrischer Abfallsammler aus Winterthur	powernewz
31. Januar 2018	Zöller stellt elektrischen Müllwagen vor	eurotransport.de
13. November 2017	Futuricum: E-Power macht "Güselabfuhr" sauber	Blick - Nutzfahrzeug Extra
3. Juli 2017	Un camion-poubelle du futur à travers les rues de Morat	La Liberté
29. Juni 2017	Fünf sind auf dem Podest	Handelszeitung
28. Juni 2017	Haldimann fährt vollelektrisch	Freiburger Nachrichten



26. Juni 2017	Elektromobilität: 26-Tonnen Elektro-Kehrichtabfuhrlastwagen bald in Murten unterwegs?	ee-news.ch
9. Juni 2017	Electric wacky racers take to Switzerland's roads	Reuters/weltweit
8. Juni 2017	Tobias Wülser: Für 400 Fr. die ganze Welt umrundet	Finanz und Wirtschaft
31. Mai 2017	Cleantech für die öffentliche Hand	Energieplus
29. Mai 2017	Elektro geht (fast) überall	Kommunalmagazin
04/2017	Das Projekt „Futuricum“	Swiss Camion
11. Mai 2017	Elektromobilität macht Müllabfuhr zur sauberen Sache	KMT Kommunaltechnik
16. März 2017	Leiser Start für E-Brummis	Energie Experten
Januar 2017	Schweiz Aktuell	Schweizer Radio und Fernsehen

Tabelle 15: Übersicht über Berichterstattungen über den Futuricum E-LKW während des Leuchtturmprojekts.



Anhang D – Emissionsvergleich

Reale CO₂-Emissionen der heute am Markt erhältlichen Fahrzeugtypen und ihrer TreibstoffeCO₂ ist das für die Erderwärmung hauptverantwortliche Treibhausgas.

Bemerkung Designwerk GmbH:

Bei den vorliegenden Berechnungen handelt es sich um einen provisorischen, rein energetischen Vergleich.

Für die abschliessende Betrachtung ist eine vollständige Cradle-to-Grave Betrachtung erforderlich.

Deren Erstellung ist Teil des noch laufenden Leuchtturmprojekts.

Credits: martin_rotta@hispeed.ch Anpassungen: marcel.gauch@empa.ch, Juni 2016	Elektro II Nissan Leaf Modell 2015	Diesel Sammelfahrzeug 26t Diesel: Durchschnittsdaten 90l/100km	Diesel Sammelfahrzeug 26t Diesel: modernes Kundenfahrzeug 67.4l/100km	Elektro FUTURICUM Collect 26E CH-Mix	Elektro FUTURICUM Collect 26E CH-Ökostrom
Emissionen: Fahren	Ökostrom			Strommix CH	Ökostrom
Verbrauch, Herstellerangabe (irrelevant) [pro 100km]	15.0 kWh	60.0 l	60.0 l	190.0 kWh	190.0 kWh
Verbrauch, real im Alltag [pro 100km]	18.8 kWh	92.9 l	67.4 l	190.3 kWh	190.3 kWh
realer Durchschnitt aller Fahrzeuge vom gleichen Typ (A) Strom: inkl. Ladeverluste von 10%					
CO₂-Emissionen pro Verbrauchseinheit	–	2.65 kg	2.65 kg	–	–
Werte physikalisch festgelegt (B)					
CO₂ pro km (Fahren)	g	2458 g	1783 g	g	g
Emissionen: Bereitstellung Treibstoff					
CO₂ pro Verbrauchseinheit	16 g	529 g	529 g	103 g	16 g
Benzin / Diesel: Förderung des Rohöls, Transport in die Raffinerien, Herstellung der Kraftstoffe und Weitertransport zur Zapfsäule (C, E)					
Elektrizität: an der Steckdose des Konsumenten, inkl. Verluste und Emissionen durch Bereitstellung der Infrastruktur (D)	nahezu frei von Schadstoffemissionen	Abgasreinigung über selektive katalytische Reduktion SCR (Adblue) und Partikelfilter teuer, offizielle Messwerte zumindest fragwürdig (VW Skandal 2015)	Abgasreinigung über selektive katalytische Reduktion SCR (Adblue) und Partikelfilter teuer, offizielle Messwerte zumindest fragwürdig (VW Skandal 2015)	fährt lokal emissionsfrei	fährt lokal emissionsfrei
Erdgas: Bohrung und Förderung, Transport (See oder Pipeline), Verarbeitung, Lagerung und Distribution (E)	zertifizierte, garantiert erneuerbare Energie, z.B. naturemade star			Hoher Anteil an Wasserkraft, aber auch 36% aus Kernkraft (F)	Hoher Anteil an Wasserkraft, aber auch 36% aus Kernkraft (F)
Biogas: Infrastruktur, Primärenergieeinsatz zur Gewinnung und Aufbereitung, Infrastruktur und Transport (E)	Aufpreis ca. 150.- CHF pro Jahr gegenüber Strommix				
Wasserstoff: Well-to-Tank, nicht berücksichtigt sind Lagerung, Distribution und Aufbau der notwendigen Infrastruktur (F)					
CO₂ pro km (Bereitstellung Treibstoff)	3 g	492 g	357 g	196 g	30 g
Emissionen: Herstellung Fahrzeug					
Masse Fahrzeug Total	1'578 kg	16'000 kg	16'000 kg	16'000.0 kg	16'000.0 kg
davon Masse Batterie bei Elektroauto	300 kg	kg	kg	2'200 kg	2'200 kg
CO ₂ -eq. pro kg Fahrzeug (Chassis, Antriebssystem, Unterhalt)	4.0 kg	4.0 kg	4.0 kg	4.0 kg	4.0 kg
CO ₂ -eq. pro kg Batterie (Li-Ionen oder NiMH)	7.0 kg	7.0 kg	7.0 kg	7.0 kg	7.0 kg
CO₂ aus Herstellung Fahrzeug (ohne Batterie bei E-Autos)	5'112 kg	64'000 kg	64'000 kg	64'000 kg	64'000 kg
CO₂ aus Herstellung Batterie Elektrofahrzeug	2'100 kg	kg	kg	15'400 kg	15'400 kg
CO₂ aus Herstellung Fahrzeug total	7'212 kg	64'000 kg	64'000 kg	79'400 kg	79'400 kg
Lebensdauer	200'000 km	146'600 km	146'600 km	146'600 km	146'600 km
CO₂ pro km (Herstellung Fahrzeug)	26 g	437 g	437 g	437 g	437 g
CO₂ pro km (Herstellung Batterie)	11 g	g	g	105 g	105 g
Emissionen: TOTAL (Lebenszyklus)					
Total CO₂-Emissionen pro Kilometer	39 g	3386 g	2576 g	738 g	572 g
Lifetime-CO ₂ -Emissionen [Tonnen CO ₂ -äq.]	7.8	496.4	377.7	108.1	83.9
Gesamtemissionen Well-to-Wheel	A+++	G	G	G	G
Klassifizierung anhand der offiziellen, deutschen Verordnung (G) "Emissionseffizienz" im Verhältnis zum Fahrzeuggewicht					
Fahrzeuggewicht gemäss Schweizer Energieetikette	1'578 kg	1'504 kg	1'505 kg	2'074 kg	2'075 kg
Fahrleistungen und Kosten	Elektro II	Diesel	Diesel	Elektro	Elektro
Motorleistung	109 PS	?	?	560 kW	560 kW
Beschleunigung 0-100 km/h	11.5 s	?	?	?	?
Preis pro Verbrauchseinheit	0.19 CHF	1.61 CHF	1.61 CHF	0.12 CHF	0.12 CHF
Treibstoffkosten auf 100km	4 CHF	150 CHF	108 CHF	23 CHF	23 CHF
Treibstoffkosten auf gesamte Lebensdauer mit 20% Tesla Supercharger (Gratis-Schnellladung)	CHF 7'144	CHF 219'268	CHF 159'058	CHF 33'478	CHF 33'478
	–	–	–	–	–
Zusammenfassung: Total CO₂-Emissionen pro Kilometer aufgeteilt:					
Nissan Leaf	Sammelfahrzeug 26t Diesel: Durchschnittsdaten	Sammelfahrzeug 26t Diesel: modernes Kundenfahrzeug	FUTURICUM Collect 26E	FUTURICUM Collect 26E	
Modell 2015	90l/100km	67.4l/100km	CH-Mix	CH-Ökostrom	
Herstellung Fahrzeug	26 g	437 g	437 g	437 g	437 g
Herstellung Batterie	11 g	g	g	105 g	105 g
Bereitstellung Treibstoff/Strom	3 g	492 g	357 g	196 g	30 g
Betrieb	g	2458 g	1783 g	g	g
TOTAL [g CO₂äq./km]	39 g	3386 g	2576 g	738 g	572 g
Benzinverbrauchs-Äquivalent eines VW Golf 1.2 TSI					
Referenz Vergleichs-Golf [gCO ₂ /km]					103/121
Vergleichswert für CO ₂ pro km [gCO ₂ /km]	39 g	3386 g	2576 g	738 g	572 g
Anteil Auto, nur Herstellung, ohne Betrieb [gCO ₂ /km]	36 g	437 g	437 g	542 g	542 g
Zur Verfügung für Treibstoff und Bereitstellung [gCO ₂ /km]	3 g	2950 g	2140 g	196 g	30 g
Treibstoffmenge inkl. Bereitstellung für entsprechende CO ₂ -Emissionen [l/100km]	.1 l/100km	125.0 l/100km	90.7 l/100km	8.3 l/100km	1.3 l/100km
Verbrauchsäquivalent gleiches Fz mit ICE Motor [l/100km]	.1 l/100km	104.2 l/100km	75.6 l/100km	6.9 l/100km	1.1 l/100km
Verbrauchsäquivalent eines VW Golf [l/100km]	.5 l/100km	118.6 l/100km	90.0 l/100km	25.1 l/100km	19.3 l/100km
"Der CO ₂ -Ausstoss des Fahrzeugs entspricht einem VW Golf, welcher l/100km verbraucht"					



Anhang E – Interview

Die aufgeführten Fragen wurden den vier Fahrzeugbesitzern gestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle involvierten Personen berücksichtigt werden, da die Sicht auf das Fahrzeug auch von der Art und Weise der Anwender abhängt. Es wird deutlich ersichtlich, dass alle Anwender die Zukunft der Müllfahrzeuge elektrisch sehen. Die Fahrzeuge beeinflussen die Effizienz der Sammler positiv. Sie wollen keine Umstellung mehr auf ein mit Diesel betriebenes Sammelfahrzeug. Die Fahrer berichten von wegfallenden Fahrten zur Dieseltankstelle und der damit gewonnenen Zeit. Die Bevölkerung reagiere praktisch jeden Morgen positiv auf die Umstellung auf elektrische Sammelfahrzeuge. Auch der *Stop-and-go-Betrieb* spricht für die elektrische Version. Die unmittelbar nach der Beschleunigung auftretenden Verzögerungsphasen erlauben dem Fahrer hohe Rekuperationsraten. Diese tragen sich äusserst positiv auf die gesamte Energiebilanz aus und ermöglichen dem Fahrer eine zusätzliche Reichweite.

Die Kunden der vier realisierten Fahrzeuge konnten uns mit ihren subjektiven Wahrnehmungen ebenfalls wichtige Inputs liefern. Folgender Fragebogen wurde erstellt:

Geschäftsführer, Beschaffer:

- Was sind die Vorteile der elektrischen Müllfahrzeuge nach der Praxiserfahrung?
- Wie wird der Einsatz der elektrischen LKW in der Bevölkerung und bei den Mitarbeitenden wahrgenommen? Gab es direkte Reaktionen? Gibt es eine spannende Anekdote?
- Ist die Wirtschaftlichkeit bereits heute gegeben?
- Wie wirkt sich der Wegfall von LSVA und STVA (kantonsabhängig) aus?
- Welche Stromquelle wird zum Aufladen der Batterien verwendet?
- Gibt es eine deutliche Betriebsoptimierung gegenüber herkömmlich betriebenen Fahrzeugen?
- Könnten Sie sich vorstellen, den Strom auch selber zu produzieren? (z.B. mit einer Photovoltaikanlage)
- Gibt es Ausfälle oder Servicearbeiten zu tätigen?
- Wie schätzen Sie die Zukunft der elektrischen Müllfahrzeuge ein?
- Wie ist die Fahrt und das «Betanken» im Vergleich mit einem Dieselfahrzeug? Gewinnen Sie mehr Zeit? Ist die Fahrweise anders? Was bedeutet dies für die Mitarbeitenden auf dem Fahrzeug betreffend Handhabung und Kommunikation?



Fahrer:

- Was sind die Erfahrungen im Umgang mit dem elektrischen Fahrzeug?
- Was sind die Vor- und Nachteile?
- Wie sind die Reaktionen auf der Strasse?
- Wie praktisch ist die Rekuperation im Stop-and-go-Betrieb?
- Sind die deutlich geringeren Infrastruktur- und Unterhaltsarbeiten spürbar?
- Wie spüren Sie die gesellschaftliche Akzeptanz während der Arbeit? Haben Sie eine schöne Geschichte zu erzählen?
- Wie ist der heutige Entwicklungsstand? Was würden Sie an den Fahrzeugen noch verbessern?
- Welche Antriebseinheit (Diesel/Elektro) bevorzugen Sie und warum?

Lader:

- Was sind die Erfahrungen im Umgang mit dem elektrischen Fahrzeug?
- Was sind die Vor- und Nachteile?
- Was würden Sie an den Fahrzeugen noch verbessern?
- Wie sind die Reaktionen auf der Strasse?
- Möchten Sie wieder zu einem Dieselfahrzeug wechseln?
- Ist die deutlich geringere Emissionsfreigabe des Fahrzeuges in der Innenstadt spürbar?
- Wie ist die geringe Lärmbelastung während der Arbeit?
- Sind die wegfallenden Feinstaubemissionen spürbar?
- Wie spüren Sie die gesellschaftliche Akzeptanz während der Arbeit? Haben Sie eine schöne Geschichte zu erzählen?



Die nachfolgenden Antworten der vier Halter und Führer der Fahrzeuge werden farblich getrennt aufgeführt.

Haldimann AG
Svedel S.A.
Stadt Thun
Stadt Lausanne

Geschäftsführer, Beschaffer

Was sind die Vorteile der elektrischen Müllfahrzeuge nach der Praxiserfahrung?

Die Fahrzeuge sind sehr lärmarm. Dies spiegelt sich einerseits bei der Gesundheit der Mitarbeiter positiv aus und andererseits senkt es den Lärmpegel bei der Bevölkerung. Es werden keine fossilen Treibstoffe mehr verwendet. Die Unterhalts-, und Energiekosten senken sich. Die einfache Bedien-, sowie Fahrbarkeit sprechen für die Fahrzeuge. Die Betankungszeiten fallen weg, da die Fahrzeuge über Nacht geladen werden. Die Technik wirkt ausgereift. Die Systeme arbeiten bis dahin sehr zuverlässig.

Persönlich sehe ich keinen Unterschied zu dem elektrischen Sammelfahrzeugen und den herkömmlichen Dieselfahrzeugen. Viele Kollegen haben uns anfängliche Schwierigkeiten prophezeit. Diese waren jedoch unbegründet. Ebenso sehe ich keinen technischen Vorteil des elektrischen Systems. Die Lärmemissionen steigen bei höheren Belastungen und Drehzahlen. Es scheint bzw. klingt so als würde sich das Fahrzeug auf einem Luftpolster bewegen.

Die Vorteile sehen wir bei den entfallenen Abgasen und den stark reduzierten Emissionen von Lärm. Das Fahrzeug ruckelt beim Anfahren nicht und lässt sich mühelos manövrieren. Die Lader und der Fahrer können nun kommunizieren. Die Arbeiter wirken nach der Arbeit, durch den Wegfall der Lärmemissionen, ständiges Ruckeln des Fahrzeuges sowie den ausfallenden Vibrationen lockerer.

Die Hauptvorteile sind die Flexibilität des Fahrzeuges, seine Ruhe und die Tatsache, dass es keine schädlichen Emissionen in die Umwelt gibt.

Wie wird der Einsatz der elektrischen LKW in der Bevölkerung und bei den Mitarbeitenden wahrgenommen? Gab es direkte Reaktionen? Gibt es eine spannende Anekdote?

Das Fahrzeug sorgt für grosse Begeisterung und wird durch die leise Fahrweise wahrgenommen. Die Bevölkerung ist stolz auf ein solch innovatives Unternehmen. Die leise Fahrweise stellt sich jedoch auch die Frage der «Wahrnehmung der Fahrzeuge». Zudem stösst das Fahrzeug immer wieder Diskussionen an mit der Bevölkerung, den Behörden und der Presse über die Zukunft der Mobilität.

Die Akzeptanz des Fahrzeuges ist insgesamt sehr gut. Wir erhalten von den Kunden Glückwünsche für die bisher geleistete Arbeit. Die Bevölkerung reagiert immer wieder positiv auf das Fahrzeug, die sich oftmals die Frage nach der Reichweite der Fahrzeuge stellt. Durch die leise Fahrweise der Fahrzeuge, die sich auf die Bevölkerung sehr positiv auswirkt, haben die Anwohner angefangen vergessen den Müll nach Draussen zu bringen.

Siehe Fahrer/Lader

Gute Wahrnehmung - Die Menschen sind empfindlich gegenüber den Auswirkungen auf die Umwelt.



Ist die Wirtschaftlichkeit bereits heute gegeben?

Bezüglich dem Gesamtpreis ist die Amortisation eines solchen Fahrzeuges eher schwierig. Der Preis müsste noch weiter sinken. Es müssen immer auch die ökologischen Vorteile in Betracht gezogen werden. Wie stark sich die höhere Wartungsfreundlichkeit der Elektromotoren positiv auswirkt, kann im Moment noch nicht beurteilt werden.

In der Gemeinde hat sich hauptsächlich die Frage der Batterie gestellt. Wie sieht die Entsorgung aus? Gibt es ein Secondlife der Batterie bzw. wie hoch sind die grauen Energiekosten? Wir sind bestrebt die Batterien nach etwa 10 Jahren stationär zu betreiben. Nach etwa 20 Jahren wird die Frage des Recyclings vollständig gelöst sein.

Ja, aufgrund des Ausfalls von LSVA Kosten, den Steuerersparnisse, den tieferen Energiekosten. Zudem sind die Fahrzeuge wartungsarm, was mit tieferen Kosten verbunden ist. Ebenso fallen pro Tag ca. 15 Min Betankungszeiten weg. Auch hier sind versteckte Kosten minimiert.

Aufgrund der hohen Anschaffungskosten kommt eine wirtschaftliche Effizienz nicht in Frage.

Wie wirkt sich der Wegfall von LSVA und STVA (kantonsabhängig) aus?

Wir sparen im Monat im Durchschnitt 1200.- an LSVA Zahlungen. Der Betrag ist eher klein wegen den geringen Kilometerleistungen.

Gewinn auf der Netto-LSVA von rund CHF 15'000, eine geringere Einsparung von rund CHF 2'000 an Zulassungssteuer.

Keine LSVA und halbe STVA.

Budgeteinsparungen von CHF 7'104 pro Jahr in der LSVA und CHF 2'341 pro Jahr in der Kfz-Steuer.

Welche Stromquelle wird zum Aufladen der Batterien verwendet?

Normales Stromnetz. (Strommix)

Derzeit nutzen wir Strom aus dem Netz. (Strommix)

Kehrichtstrom (KVA) und Wasserkraft-Strom (Energie Thun).

Der Sektor.

Gibt es eine deutliche Betriebsoptimierung gegenüber herkömmlich betriebenen Fahrzeugen? Könnten Sie sich vorstellen den Strom auch «selber» zu produzieren? (z.B. mit einer Photovoltaikanlage)

Absolut ein Thema – müssten aber mehrere Fahrzeuge versorgen können.

Ja diese Überlegungen wurden bereits gemacht. Die Investitionen sind jedoch noch zu hoch bzw. die Anbringung von Photovoltaikanlagen noch zu unrentabel. Die Politik müsste die privaten Unternehmer noch stärker unterstützen.

Können wir noch nicht aussagen. Ja (zur Frage Strom «selber» produzieren).



Im Moment können wir nur die Verbesserung des Komforts für die Nutzer hervorheben.



Gibt es Ausfälle oder Servicearbeiten zu tätigen?

Ausfälle waren äusserst selten und im Vergleich zu herkömmlichen Modellen ist das Fahrzeug, trotz seines Prototyp Status, genauso zuverlässig einsetzbar. Einzelne Komponenten wie Heizung, Klimaanlage und Luftkompressor machen hin und wieder Probleme.

Ein Ausfall wurde bisher verzeichnet.

Kleinere Ausfälle von Systemen.

Insgesamt gab es nicht viele Probleme. Nur kleine Korrekturen.

Wie schätzen Sie die Zukunft der elektrischen Müllfahrzeuge ein?

Die technische Lösung – Umgesetzt durch den Futuricum Collect 26E ist nach unserem Erleben einwandfrei. Die Fahrzeuge sind im Moment jedoch noch zu teuer. Mit der zunehmenden Wirtschaftlichkeit, der günstigeren Unterhaltung und der funktionierenden Technik ist es durchaus vorstellbar die ganze Flotte umzurüsten. Vorstellbar wäre auch auf Wasserstoff umzurüsten.

Aus meiner Sicht ist das elektrische Sammelfahrzeug von Futuricum eine ausgezeichnete Lösung – Trotzdem ist Vorsicht geboten. Es gibt heute mehrere Gründe für den Elektroantrieb wie z.B. die Befreiung von LSVA Kosten, stabilen und günstigen Strompreisen. Auf der anderen Seite herrscht eine grosse Unsicherheit über die Entwicklung der Erdölpreise. Diese Unsicherheit wird sicherlich bis ins Jahr 2025 andauern. Für ein Unternehmen, das wie wir Wertstoffsammelfahrzeuge im Einsatz hält, sind mit hohen Ausgaben für den Treibstoff zu rechnen. Der Verbrauch eines Sammelfahrzeuges liegt im Schnitt bei etwa 70l/100 Km. Hier liegt also ein grosses Sparpotenzial mit effizienteren elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Ebenso für Unternehmen, die im Jahr zwischen 60'000 und 100'000 Km pro Jahr zurücklegen und in einem kleineren Umkreis (mit einer geeigneten Infrastruktur mit Schnellademöglichkeiten) bilden die elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeuge grosse Sparpotenziale. Nebst den wirtschaftlichen Aspekten kann es für ein Unternehmen aus Marketingtechnischen Gründen spannend sein die Dieselfahrzeuge durch elektrische umzutauschen.

100% Elektro – die Umstellung hat schon begonnen.

Sobald diese Technologie mit wettbewerbsfähigen Marktstandards übereinstimmt, ist es denkbar, dass Kommunalfahrzeuge über eine umweltfreundliche Technologie verfügen.



Wie ist die Fahrt und das «Betanken» im Vergleich mit einem Dieselfahrzeug? Gewinnen Sie mehr Zeit? Ist die Fahrweise anders? Was bedeutet dies für die Mitarbeitenden auf dem Fahrzeug betreffend Handhabung und Kommunikation?

Das Fahrzeug wird überwiegend über die Nacht geladen. Das Fahrzeug in den Pausen oder am Mittag aufzuladen macht aus Zeitgründen keinen Sinn. Die Fahrweise muss angepasst werden. Der Chauffeur ist auf eine hohe Rekuperationsrate angewiesen. So wird die «Sammelroute» etwa ausgewählt, dass das Fahrzeug mit leeren Batterien am «obersten» Punkt der Route beginnt. Ein rücksichtsloser Fahrstil entleert die Batterien sehr schnell. Die Schüttungs-, und Pressvorgänge fallen dagegen nicht ins Gewicht.

Der Fahrstil muss angepasst sein. Wir haben die «Sammelroute» so gewählt, dass das Fahrzeug auf dem Weg nach «unten» und nicht nach «oben» anfängt zu sammeln. Der Fahrer macht ansonsten die gleiche Arbeit.

Siehe Antwort des Fahrers/Laders.

Bei der Rückkehr von der Mission wird die Akkuladung nicht vollständig genutzt. Am Ende des Tages verbindet der Fahrer also seinen Lkw mit dem Sektor. Im Falle von Lade-, technischen oder Handhabungsproblemen kann es vorkommen, dass das Fahrzeug mehrere Stunden lang nicht verfügbar ist, während es auf die Ladung wartet. Die Zeitersparnis entspricht der Zeit, die für die Fahrt und das Betanken des Kraftstoffs benötigt wird. Für die Mitarbeiter gibt es außer dem Gewinn an Arbeitsqualität durch Lärm keine weiteren Veränderungen.



Fahrer

Was sind die Erfahrungen im Umgang mit dem elektrischen Fahrzeug?

Wir sind durchwegs sehr zufrieden. Die neue Technologie ist sehr zuverlässig und wir hatten kaum Störungen oder Ausfälle. Einen Leistungsverlust der Batterie konnten wir im ersten Betriebsjahr nicht feststellen. Einzig im Winter steigt der Stromverbrauch um ca. 20%.

Einjährige Erfahrung.

Sehr ruhig im täglichen Gebrauch, keine Schaltvorgänge, sehr genaues Fahren und Manövrieren sind mit dem Fahrzeug möglich.

Nur positive.

Was sind die Vor- und Nachteile?

Vorteile: Leiser Betrieb, keine Abgasemissionen, sportliches Fahren und schnelles entleeren. Pressvorgänge während dem Fahren sind durch die hohe Leistung nun möglich. Nachteile: Lange Ladezeiten und die etwas komplexen Bordsysteme. Die Leute hören das Fahrzeug nicht kommen und vergessen deshalb ihren Abfall an die Strasse zu stellen.

Vorteile: weniger Lärm, weniger Rauch, hohes Drehmoment.

Nachteile: Zu wenig Lärm, insbesondere im Straßenverkehr und in Anwesenheit von Personen mit Kopfhörern im Ohr. Der Schwerpunkt des Fahrzeuges liegt nun etwas höher als zuvor. Zudem verlagert sich der Schwerpunkt etwas nach hinten, was zur Entlastung der Vorderachse führt. Diese Verlagerung wird als eher unangenehm empfunden. Die Batteriekapazität fordert den Fahrer mehr als zuvor: Er muss mehr auf den Verbrauch achten.

Vorteile: Ruhig, keine Abgase, kein Schalten, effizienter.

Nachteile: Kabinengrösse zu klein, Sitze unbequem, Staumöglichkeit fehlt.

Die «Stille» ist ein Vorteil für den Fahrer und ein Nachteil für Fußgänger, Radfahrer und Roller.

Wie sind die Reaktionen auf der Strasse?

Durchwegs positiv. Elektroantrieb fällt sofort allen auf. Die Leute erkundigen sich wie denn das Ganze funktioniert, und zeigen sich sehr interessiert. Ein Nachteil ist, dass die Fussgänger das Fahrzeug nicht mehr hören.

Positiv in Bezug auf Lärm und Verschmutzung. Es ist jedoch problematisch für Menschen, die nicht besonders aufmerksam sind im Strassenverkehr.

Nur positiv! Manche machen sich Gedanken über die Entsorgung.

Positiv, die Leute sagen, es ist toll!



Wie praktisch ist die Rekuperation im Stop-and-go-Betrieb?

Für die Reichweite essenziell. Ohne intelligente Nutzung der Rekuperation (d.h. mit vollem Fahrzeug den Berg runterfahren und mit «Retarder» bremsen) wäre die Reichweite für die meisten Touren nicht ausreichend.

Die Rekuperation ist bei sehr kurzen *Stop-and-go-Betrieben* klein. Die Rekuperation ist im steilen Gefälle sinnvoll.

Sehr praktisch für die Müllabfuhr (*Stop-and-go-Betrieb*).

Keine Manipulation des Getriebes.

Sind die deutlich geringeren Infrastruktur- und Unterhaltsarbeiten spürbar?

Das wird sich erst in nächster Zeit zeigen. Die wichtigste Frage ist wie hoch der Leistungsverlust und Verschleiss der Batterie ist. Sollte dieser sehr hoch sein so wären die Unterhaltskosten ungemein höher.

Es ist wahrnehmbar, aber nicht besonders offensichtlich. Es ist klar, dass die Wartungskosten sehr niedrig sind, dass es weniger zu kontrollieren gibt. Andererseits scheint der Verschleiß der Reifen viel grösser zu sein als bei einem Verbrennungsmotorfahrzeug.

Ja, sicher eine Fahrt weniger bis zur Tankstelle. Unterhaltsarbeiten praktisch keine mehr (Fahrgestell).

Wie spüren Sie die gesellschaftliche Akzeptanz während der Arbeit? Haben Sie eine schöne Geschichte zu erzählen?

Die Akzeptanz für unsere Arbeit war schon immer hoch und dürfte infolge der Sorge für die Umwelt noch weiter steigen. Elektrofahrzeuge sind da keine Ausnahme und werden in Zukunft noch an Bedeutung gewinnen.

Die Aufnahme erscheint positiv. Die Bemerkungen der Bevölkerung sind immer positiv. Ein Passant, der konzentriert auf sein Smartphone schaute, hörte das ihm entgegenkommende Sammelfahrzeug nicht. Erst als er sehr nah am Fahrzeug war, bemerkte er das Fahrzeug.

Die Bevölkerung ist sehr positiv eingestellt.

Gute Akzeptanz der Bevölkerung.



Wie ist der heutige Entwicklungsstand? Was würden Sie an den Fahrzeugen noch verbessern?

Zuverlässigkeit einzelner Komponenten muss verbessert werden (z.B. Heizung, Klimaanlage) Kompatibilität mit dem Borsystem von Volvo ist nur Mangelhaft (z.B. der Tempomat). Die Batterie lässt sich nicht immer gleich hochladen, das könnte jedoch auch an der Anzeige liegen. Eine Warnmeldung auf das Smartphone während des Ladevorgangs wäre sehr praktisch. Für ein schonenderes Anfahren (Für Mensch und Fahrzeug) wäre eine Drosselung der Software sicherlich von Vorteil.

In Zukunft sollen in der Kabine weniger Fehler auftreten. Das Radio hat einmal kurz ausgesetzt. Ein akustisches Warnsignal für die Fussgänger wäre sinnvoll. Das aktuell verbaute ist zu laut.

Keine Antwort.

Keine Erholung mehr in der hydraulischen Retarderphase. Lenkgeräusche reduzieren (Pumpe oder Lenkmotor).

Welche Antriebseinheit (Diesel/Elektro) bevorzugen Sie und warum?

Für unsere Art der Arbeit ist klar die elektrische Version unser Favorit. Die Geschwindigkeit beim Arbeiten mit dem Fahrzeug sprechen für sich. Unser Hybrid-Fahrzeug ist punkto Wirtschaftlichkeit dem Futuricum Collect 26E unterlegen. Wir hoffen in Zukunft den Strom selbst produzieren zu können. Was die Wirtschaftlichkeit noch mehr steigern würde. Wegen der mangelnden Flexibilität (Höhere Ladezeiten) könnte man aber auf herkömmliche Fahrzeuge trotzdem nicht ganz verzichten.

Obwohl der «Originale» FMX ein hervorragendes Fahrzeug ist, bevorzugt der Fahrer die elektrische Version. Das ist auf den gesamten Nutzungskomfort zurückzuführen.

Ganz klar die elektrische Version von Futuricum.

Elektrisch ohne zu zögern!



Lader

Was sind die Erfahrungen im Umgang mit dem elektrischen Fahrzeug?

Durchwegs positiv. Da der Aufbau und Schüttung weitgehend unseren anderen Fahrzeugen entspricht ergeben sich nur geringe Unterschiede in der Handhabung. Die Erfahrungen decken sich deshalb mit herkömmlichen Fahrzeugen.

Ein Jahr Erfahrung ohne Probleme.

Sehr ruhig im ganzen Handling auch der Aufbau sprich der Pressvorgang ist sehr effizient.

Viele Komplimente auf der Straße.

Was sind die Vor- und Nachteile?

Vorteile: Leiser betrieb, keine Abgase, Schnelles Arbeiten. Nachteile: Man hört das Fahrzeug nicht kommen, zu starke Beschleunigung beim Anfahren.

Vorteile: Weniger Lärm, Abgase und Wärme.

Nachteile: Zu hohes Gehen => erhöhte Müdigkeit. (Gemeint ist der Tritt der Lader)

Ruhigere und effizientere Arbeitsalltage, kein Schaltvorgang, kein ruckeln. Einziger Nachteil ist der Platz in der Kabine. (Standardkabine von Volvo)

Vorteile: Kein Lärm, keine Verschmutzung und keine Abgasatmung.

Nachteile: Kein Platz für den mittleren Passagier bei Fahrten in der Kabine.

Was würden Sie an den Fahrzeugen noch verbessern?

Die Beschleunigung beim Anfahren reduzieren.

Höhenverstellung des Fahrgestells. (Tritt für die Lader).

Grössere Kabine mit mehr Staumöglichkeiten für Kleidung.

Nichts Besonderes.

Wie sind die Reaktionen auf der Strasse?

Die Leute schauen uns nach und erkundigen sich nach dem Antriebssystem.

Siehe Antwort des Fahrers.

Positiv, sind verwundert, dass es sowas schon gibt.

Gut! Kein Lärm!



Möchten Sie wieder zu einem Dieselfahrzeug wechseln?

100% Nein.

Nein, aber wir möchten, dass der Fahrer weniger auf seine Batterien achtet und sich schneller bewegt.

Nein!

Nein.

Ist die deutlich geringere Emissionsfreigabe des Fahrzeuges in der Innenstadt spürbar?

Ja. Gerade beim Pressvorgang werden die Touren bei herkömmlichen Fahrzeugen erhöht, und dementsprechend viele Emissionen (Lärm und Abgas) freigesetzt.

Ein Vergleich ist nicht möglich.

Ja, man spürt eher den Strassenstaub auf den Strassen.

Ja.

Wie ist die geringe Lärmbelastung während der Arbeit?

Angenehm und Stresshemmend.

Kein Problem mehr. Wir können den Fahrer trotz geschlossenem Fenster hören. Einzig die Hydraulikpumpe ist noch zu laut.

Sehr angenehme Arbeitsweise im täglichen Gebrauch. Kommen ruhiger nach Hause.

Ja.



Sind die wegfallenden Feinstaubemissionen spürbar?

Schwierig zu sagen. Die grösste Staubbelastung ergibt sich beim Entleerungsvorgang und ist stark vom entleerten Material abhängig.

Es gibt nichts mehr, es ist viel bequemer.

Ja.

Ja.

Wie spüren Sie die gesellschaftliche Akzeptanz während der Arbeit? Haben Sie eine schöne Geschichte zu erzählen?

Unsere Arbeit erfährt eine grosse gesellschaftliche Akzeptanz. Wir erhalten viel Lob von den Leuten auf den Touren die wir fahren.

Siehe Antwort des Fahrers.

Keine Antwort.

Die Leute sagen, der Truck ist hübsch und macht keine Geräusche. Die Bevölkerung ist zufrieden.



Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Chassis Volvo FM, ohne Antriebsstrang.	19
Abbildung 2: Gesamtübersicht Chassis und deren Komponenten.	21
Abbildung 3: Befestigungspunkte Drivemodul.	22
Abbildung 4: Bauraum Antriebsstrang.	23
Abbildung 5: Antriebsmomente 26t E-LKW.	24
Abbildung 6: Technische Daten Elektromotor.	24
Abbildung 7: Motorcharakteristik der vier Elektromotoren.	25
Abbildung 8: Die Modularität des Getriebes.	25
Abbildung 9: Das komplette «Drivemodul». Kompakte Bauweise.	26
Abbildung 10: Drehmomentverlauf Elektromotoren über Drehzahl.	27
Abbildung 11: Übersetzungsverhältnisse Übersicht.	28
Abbildung 12: Hochvolt-Blockschaltbild des Futuricum Collect 26E.	31
Abbildung 13: Sicherheitskonzept mit Interlock und Not-Halt.	32
Abbildung 14: Batterie <i>Individua</i> 133 von Batteriewerk.	34
Abbildung 15: Aufbau Batterie-Management-System (BMS).	36
Abbildung 16: Dashboard Monitoring Futuricum Track.	39
Abbildung 17: Funktionsweise des Monitorings.	40
Abbildung 18: Aufbau <i>Individua</i> 33.	43
Abbildung 19: SoC des E-LKW Lausanne über den Zeitraum 23.05.2018 – 01.03.2019.	47
Abbildung 20: Daily total Energy über den Zeitrahmen 23.05.2018 – 01.03.2019.	47
Abbildung 21: Prozentuale Anteile des Energiebedarfs der Fahrzeuge der Haldimann AG (oben) und der Stadt Lausanne (unten).	48
Abbildung 22: Routenänderung Svedel S.A.	50
Abbildung 23: Sammelstrecke der Stadt Lausanne.	51
Abbildung 24: Die zurückgelegten Höhenmeter eines Abschnitts bei der Sammeltour in der Stadt Lausanne.	51
Abbildung 25: Sammelroute der Stadt Thun.	52
Abbildung 26: SoC über eine Woche im Sommer 2019 «Svedel S.A».	53
Abbildung 27: SoC über eine Woche im November 2019 «Svedel S.A».	53
Abbildung 28: Energieaufteilung über gesamte Lebensdauer «Lausanne» (Stand 12.12.2019).	54
Abbildung 29: Energieaufteilung über gesamte Lebensdauer «Haldimann» (Stand 12.12.2019).	54
Abbildung 30: Energieaufteilung über gesamte Lebensdauer «Svedel» (Stand 12.12.2019).	55
Abbildung 31: Energieaufteilung über gesamte Lebensdauer «Thun» (Stand 12.12.2019).	55
Abbildung 32: Leistung Batterie der Stadt Lausanne.	57
Abbildung 33: Maske TCO Berechnung.	59
Abbildung 34: Kostenverteilung Dieselfahrzeug.	61
Abbildung 35: Kostenverteilung Elektrofahrzeug.	62



Abbildung 36: Lebenszyklusanalyse Grafik	63
Abbildung 37: CO ₂ -Emissionvergleich verschiedener Fahrzeugtypen über gesamten Lebenszyklus.	65
Abbildung 38: Distanzen bei der Lärmmessung.	67
Abbildung 39: Der E-LKW bei der Lärmmessung (Durchfahrtsmessung). Dynamic Test Center, Vauffelin.....	68
Abbildung 40: Grafische Darstellung der Lärmemissionswerte von E-LKW und Diesel-LKW im direkten Vergleich.....	69
Abbildung 41: Grafisch dargestellt in Prozent empfundener Unterschied im Vergleich zu einem Diesel-Sammelfahrzeug.	69
Abbildung 42: Befragung von Passanten auf die Wahrnehmung des Fahrzeuges (Murten, Oktober 2019).	75
Abbildung 43: Ausschnitt aus einem Sammeltag bei der Befragung von Passanten.	76
Abbildung 44: Wort-/Bildmarke von Futuricum.....	77
Abbildung 45: E-LKW 1 (Haldimann AG) beim Rollout 2017.	78
Abbildung 46: Zeitungsausschnitt hessenschau.de.	80
Abbildung 47: Auszug der Meldung «Stadt Basel beschafft 20 E-Müllfahrzeuge». Quelle: electrive.net.	81
Abbildung 48: Auszug aus dem Artikel «Die Zukunft der Müllabfuhr».	82
Abbildung 51: ESS170 (170 kWh).....	86
Abbildung 50: ESS85 (85kWh).....	86
Abbildung 49: ESS42 (42kWh).....	86
Abbildung 52: Schnellladegerät für die CCS-Schnittstelle (MDC-88, Designwerk Products AG).....	88
Abbildung 53: Funktion «Multi-Energy-Cube».	89
Abbildung 54: Der E-LKW 1 bei der EMV Messung.....	92
Abbildung 55: Piktogramm Anwendungsspektrum Designwerk.....	93



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittlich zurückgelegte Strecken von 26t-Kehrlicht-LKW pro Tag in ausgewählten Schweizer Betrieben im Jahr 2014.	15
Tabelle 2: Übersicht über internationale EWS-Projekte und Hersteller Stand 2015.	17
Tabelle 3: Übersicht über internationale EWS-Projekte und Hersteller Stand 2019.	18
Tabelle 4: Technische Spezifikationen Batteriesystem <i>Individua 133</i>	35
Tabelle 5: Ladezeiten nach verwendetem Ladesystem.	37
Tabelle 6: Zusammenfassung der Fahrdaten auf Basis von Anhang B (Auswertung der Fahrdaten).	46
Tabelle 7: Verbrauchsdaten ausgewählter Fahrzeuge der Haldimann AG im Jahr 2016.	49
Tabelle 8: Einsparung Fahrzeuge Leuchtturmserie im Vergleich mit Durchschnittswerten von Dieselfahrzeugen.	49
Tabelle 9: Energieaufteilung aller vier Fahrzeuge über die gesamte Lebensdauer (Stand 12.12.2019).	56
Tabelle 10: Auflistung der Aufwände Dieselfahrzeug.	61
Tabelle 11: Auflistung der Aufwände E-LKW.	62
Tabelle 12: CO ₂ -Emissionen in Tonnen – Dieselsammelfahrzeug über eine Lebensdauer von 500'000 km.	64
Tabelle 13: CO ₂ -Emissionen in Tonnen – Elektrosammelfahrzeug über eine Lebensdauer von 500'000 km.	64
Tabelle 14: Resultate der Lärmmessung.	68
Tabelle 15: Übersicht über Berichterstattungen über den Futuricum E-LKW während des Leuchtturmprojekts.	102



Abkürzungsverzeichnis

AC	alternating current
Ah	Amperestunde
API	Application-Programming-Interface
ASCO	Association of Management Consultants
BMS	Batterie-Management-System
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAN-Bus	Controller Area Network
CCS	Combined-charging-system
CO₂	Kohlenstoffdioxid
dB	Dezibel
DBC-Datei	Data base CAN (Controller Area Network)
DC	Gleichstrom
EMBA	Executive Master of Business Administration
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EVS30	Electric Vehicle Symposium, Messe in Stuttgart
FAKT	Akkreditiertes Prüflabor und Technischer Dienst
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HVDU	Hochspannungs-Verteileinheit
IFAT	Fachmesse für Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Rohstoffwirtschaft
IGE	Institut für Geistiges Eigentum
IT	Informationstechnik
KVA	Kilovoltampere
kWh	Kilowattstunden
LKW	Lastkraftwagen



LSVA	leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe
LV	Low-Volt
LVDU	Low-voltage-Distribution-Unit
MDC	Mobile-DC-Charger
MDC-88	Mobile-DC-Charger 88kW
MFK	Motorfahrzeugkontrolle
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NEV	Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse
NMC-Zellen	Nickel-Mangan-Cobalt-Zellen, Stromspeicher
NTB	Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs
OEM	Original Equipment Manufacturer
PKW	Personenkraftwagen
PTO	Power-Take-OFFre
REST	REpresentational State Transfer
SoC	State of Charge
SRF	Schweizer Radio und Fernsehen
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
TCO	Total Cost of Ownership
VCU	Vehicle Control Unit
WAVE Trophy	Grösster E-Mobil-Event der Welt