



Schlussbericht vom 21. September 2018

---

## SUNCAR Elektrobagger

---



© SUNCAR HK 2018



**Datum:** 21. September 2018

**Ort:** Zürich

**Subventionsgeberin:**

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das  
Bundesamt für Energie BFE  
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger:**

SUNCAR HK AG  
Hinterwiden  
9245 Oberbüren  
[www.suncar-hk.com](http://www.suncar-hk.com)

ETH Zürich  
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung IWF  
Leonhardstrasse 21  
8092 Zürich

Huppenkothen Baumaschinen AG  
Hinterwiden  
9245 Oberbüren

**Autoren:**

Stefan Schneider, SUNCAR HK AG, [stefan.schneider@suncar-hk.com](mailto:stefan.schneider@suncar-hk.com)  
Daniel Vincenz, SUNCAR HK AG, [daniel.vincenz@suncar-hk.com](mailto:daniel.vincenz@suncar-hk.com)

**BFE-Programmleitung:** Yasmine Calisesi, [yasmine.calisesi@bfe.admin.ch](mailto:yasmine.calisesi@bfe.admin.ch)

**BFE-Projektbegleitung:** Martin Pulfer, [martin.pulfer@bfe.admin.ch](mailto:martin.pulfer@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501304-01

**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](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## Zusammenfassung

Während der letzten Projektjahre hat das SUNCAR-Team kontinuierlich sein Wissen verbreitert und vertieft sowie wertvolle Erfahrungen gesammelt. Eine stete Produktverbesserung war die Folge. Gestartet wurde mit dem Prototypenbau der 16-t-Elektrobagger. Nach deren erfolgreicher Inbetriebnahme folgte die Entwicklung und Inbetriebnahme der 2-t- sowie anschliessend der 7-t-Elektrobagger. Parallel dazu wurden die Entwicklungen und Komponenten im Testbetrieb validiert. Die SUNCAR Elektrobagger, weisen, neben den allgemein an eine Baumaschine geforderten Eigenschaften wie Sicherheit, Robustheit und Verlässlichkeit, einige Vorteile im Vergleich mit Dieselmaggen auf: Ein geringerer Ressourcenverbrauch dank mindestens 2.5-facher Effizienz, um teilweise über 90 % reduzierte Treibhausgas-Emissionen, weniger Lärm und Vibrationen sowie Energiekosteneinsparungen von 70 % können präsentiert werden. Mit Rundzellen-Batteriesystemen kann auf den Elektromaggen genug Kapazität für einen ganzen Arbeitstag installiert werden. Ein Elektrobagger kann anwendungs- und kundenspezifisch mit weniger oder mehr Batterietrögen ausgestattet werden.

## Résumé

L'équipe de SUNCAR HK a continuellement élargi et approfondi ses connaissances et a fait des expériences précieuses pendant les années passées du projet. Par conséquent, le produit a été perfectionné sans cesse. La construction des prototypes a commencé avec les pelles électriques de 16 t. Après la mise en service réussie, les pelles électriques de 2 t et ensuite les pelles électriques de 7 t ont été développées et mises en service. En même temps, les innovations et les composants ont été validés en mode de test. Les pelles de SUNCAR satisfont à toutes les exigences, qu'on a vis-à-vis une machine de construction en général. Elles sont sûres, robustes et fiables. En plus de tous ces qualités, les pelles électriques de SUNCAR ont quelques avantages assez pertinents par comparaison avec une pelle à diesel. Une baisse de la consommation des ressources grâce à son efficacité, qui est 2.5 fois plus élevée, une réduction des émissions de gaz à effet de serre de parfois plus de 90%, moins de bruit et de vibrations et une réduction des coûts de l'énergie de 70% distingue les pelles électriques de SUNCAR. L'installation des systèmes de batterie à cellules rondes garantie une capacité suffisante pour un jour de travail entier. Dépendant de l'application et du client, la pelle électrique peut être fournie avec plus ou moins de coffres de batterie.

## Abstract

During the last few years of this project, SUNCAR's team has continuously expanded and deepened its knowledge and has gained valuable experience. Consequently, the product was constantly improved. The construction of prototypes started with the 16-t electric excavators. After their successful launch, the 2-t electric excavators and later on the 7-t electric excavators followed. At the same time, innovations and components were validated in test mode. Apart from the general qualities that a construction machine needs to fulfil such as safety, robustness and reliability, SUNCAR's electric excavators show some crucial advantages in comparison with diesel excavators. A reduced consumption of resources thanks to its at least 2.5 times higher efficiency, a reduction of greenhouse gas emissions of up to more than 90%, less noise and vibrations as well as energy costs savings by 70% distinguish SUNCAR's electric excavators. With the installation of round cells battery systems, the electric excavator has enough capacity in order to be in use during a whole day of work. Depending on the use and customer, the electric excavator can be equipped with either fewer or more battery trays.



## Take-home messages

- Der Elektrobagger reduziert dank «Full performance – Zero Emission» die Treibhausgasemissionen ohne Leistungseinbusse und kann so einen Beitrag an die Erreichung der Klimaziele leisten.
- Der Elektrobagger weist reduzierte Energiekosten auf und ermöglicht Bauunternehmen ihre Umweltbilanz beziehungsweise CO<sub>2</sub>e-Emissionen<sup>1</sup> auf wirtschaftliche Weise zu verbessern.
- Der grösste Kostenpunkt des Elektrobaggers – die Batterie – wird sich dank reduzierter Batteriepreise in Zukunft sowie bei Serienproduktion verringern.
- Der Elektroantrieb ist heutzutage die effizienteste Antriebslösung und in Kombination mit Strom aus erneuerbarer Energie ein unschlagbares Ensemble, das sich in Zukunft bei immer mehr Fahrzeugen und Maschinen durchsetzen wird.



- weniger Ressourcenverbrauch
- 2.5-fache Effizienz



- weniger Treibhausgase
- bis zu 95 % weniger CO<sub>2</sub>e-Emissionen



- weniger Lärm und Vibrationen
- um 50 % reduzierte Lautstärke



- kein Dieserverbrauch
- 70 % tiefere Energiekosten



- leistungsstarke Batterie
- 4 - 8 h Laufzeit (bei 1 h nachladen)

Abbildung 1: Piktogramme zeigen Vorteile eines Elektrobagger

---

<sup>1</sup>CO<sub>2</sub>e-Emissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente) sind eine vereinheitlichte Masseinheit für Treibhausgase. Die durch eine bestimmte Aktivität entstandenen verschiedenen klimawirksamen Gase werden dabei in Bezug auf ihre Wirkung in CO<sub>2</sub> umgerechnet.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>3</b>
<b>Take-home messages</b> .....	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Ausgangslage</b> .....	<b>7</b>
<b>Ziel des Projekts</b> .....	<b>8</b>
<b>Rückblick</b> .....	<b>10</b>
2015 - 2016 .....	10
2016 - 2017 .....	11
2017 - 2018 .....	15
<b>Grundlagen – Randbedingungen</b> .....	<b>17</b>
Batterietechnologien.....	17
Batterievergleich.....	19
Messdaten Batteriezellen .....	23
<b>Vorgehen / Methode</b> .....	<b>25</b>
Konstruktion und Bau 16-t-Elektrobagger .....	25
Konstruktion und Bau 2-t-Elektrobagger .....	29
Konstruktion und Bau 7-t-Elektrobagger .....	33
<b>Ergebnisse</b> .....	<b>36</b>
Fernwartung und Datenauswertung .....	36
Standard Arbeitstag.....	40
Messdatenanalyse .....	44
Ökologie .....	51
Ökonomie .....	55
<b>Kommunikation</b> .....	<b>58</b>
<b>Ausblick</b> .....	<b>60</b>
Alternative Antriebstechnologien.....	60
Effizienzsteigerung der Hydraulik.....	60
Vollelektrischer Antrieb.....	63
Situation im Batteriemarkt in Europa.....	64
<b>Diskussion</b> .....	<b>66</b>



<b>Schlussfolgerungen</b> .....	<b>68</b>
<b>Referenzen</b> .....	<b>69</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>73</b>
Nationale Zusammenarbeit .....	73
Internationale Zusammenarbeit.....	74
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>75</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>78</b>



## Ausgangslage

Mit der Vision, die Sonnenenergie zu nutzen, welche 10'000 Mal mehr Energie liefert, als die Menschheit benötigt, wurden am Institut IWF der ETH Zürich seit 2010 verschiedene Projekte im E-Mobilitätsbereich durchgeführt. Angefangen hat alles mit Rennautos der Formula Student, welche mit Studierenden des akademischen Motorsportverein (AMZ) an der ETH Zürich realisiert wurden. Darauf folgten verschiedene Elektrifizierungen von Fahrzeugen, so etwa von einem Lotus Evra oder einem Skoda Octavia.

Es zeigte sich, dass die Autoindustrie sich im Thema E-Mobilität bereits etabliert hat und nicht mehr einfach konkurrenziert werden kann. Dagegen benötigt es in alternativen Anwendungsbereichen noch viel Entwicklungsarbeit, wobei die Branche der Baumaschinen sehr interessant erscheint. Nachdem erste Kontakte in der Bauwirtschaft geknüpft waren und ein starker Partner im Baugeschäft (die Firma Huppenkothen Baumaschinen AG) gefunden war, wurde das Ziel definiert, einen mit Dieselmotor betriebenen Bagger in einen Demonstrator-Elektrobagger mit Li-Ion-Batterie umzubauen. Die mögliche Realisierung dieses Demonstrators wurde davor mit einer Machbarkeitsstudie nachweislich belegt. Nach monatelangen Berechnungen, Tüfteln und einigen Rückschlägen war der elektrisch betriebene 16-t -Bagger funktions- und einsatzbereit. Dieses Projekt, welches im Rahmen des Fokusprojektes «SunCar-Bagger» entstand, wurde durch das Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der ETH Zürich ermöglicht. Insbesondere die Unterstützung des Institutsleiters, Prof. Dr. Konrad Wegener vom Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung sowie weitere Partner und Sponsoren, wie die NTB Buchs (Prof. Max Stöckli), HSLU T&A Horw (Prof. Sascha Götte), Huppenkothen Baumaschinen AG, Takeuchi und Affentranger Bau AG haben massgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen.

Von allen Seiten entstand das Interesse, die Entwicklung von Elektrobaggern fortzuführen und zu vertiefen, um einen Nutzen für die Bevölkerung zu schaffen und zu zeigen, was batteriebetriebene Baumaschinen zum heutigen Stand der Technik leisten können. Um dieses Projekt realisieren und finanzieren zu können, wurde im Mai 2015 der Antrag für Finanzhilfe für Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte beim Bundesamt für Energie (BFE) eingereicht.



## Ziel des Projekts

Basierend auf den Erkenntnissen des ersten 16-t-Demonstrator-Elektrobaggers TB1140E der ETH Zürich sollen im Demonstrations-Projekt zwei weitere Modelle, der 2-t-Elektrobagger TB216E und der 7-t-Elektrobagger TB260E entwickelt und gebaut werden.

Die Anforderungen an einen autonomen Betrieb des Elektrobaggers während eines ganzen Tages definieren die benötigte Batterie-, Antriebs- und Ladetechnik. Die Batterie und der E-Antrieb sollen eine Lebensdauer von mindestens acht Jahren aufweisen. Die Mehrkosten des zukünftigen Serien-Elektrobaggers sollen nicht höher sein als die Treibstoffkosten-Einsparungen während der Lebensdauer des Baggers. Damit können die erhöhten Investitionskosten über die Gesamtkosten des Betriebs amortisiert werden.

Die Meilensteine des Projekts sehen wie folgt aus:

- Bis Ende 2017 werden zwei 2-t-Elektrobagger und zwei 7-t-Elektrobagger mit anderen, neuen Batterietechnologien gebaut.
- Der Einsatz von Rundzellen-Batterien in den 2-t- und 7-t-Elektrobaggern ermöglicht verschiedene Daten dieser Batterie-Technologie, wie etwa die Zuverlässigkeit, Zyklenfestigkeit oder die Temperierung zu erfassen. Die daraus folgende Datenauswertung beantwortet die Frage, ob diese Batterie-Technologie besser geeignet ist als eine andere.
- Bis Frühjahr 2018 wird eine Batterie bestehend aus prismatischen 94 Ah-Samsung-Zellen aus dem BMW i3 aufgebaut und auf ihre Funktionalität und Eignung für Bagger der grösseren Leistungsklasse getestet.
- Die zwei 7-t-Elektrobagger-Prototypen werden mit modularen Rundzellen-Batterien ausgerüstet, deren 18650-Zellen direkt mit 3M-Spezialflüssigkeit gekühlt werden. Die Rundzellen-Batterien der zwei 2-t-Elektrobagger werden nur mittels Luft gekühlt.

Vergleiche dazu auch den in Abbildung 2 ersichtlichen Zeitplan des Projekts.

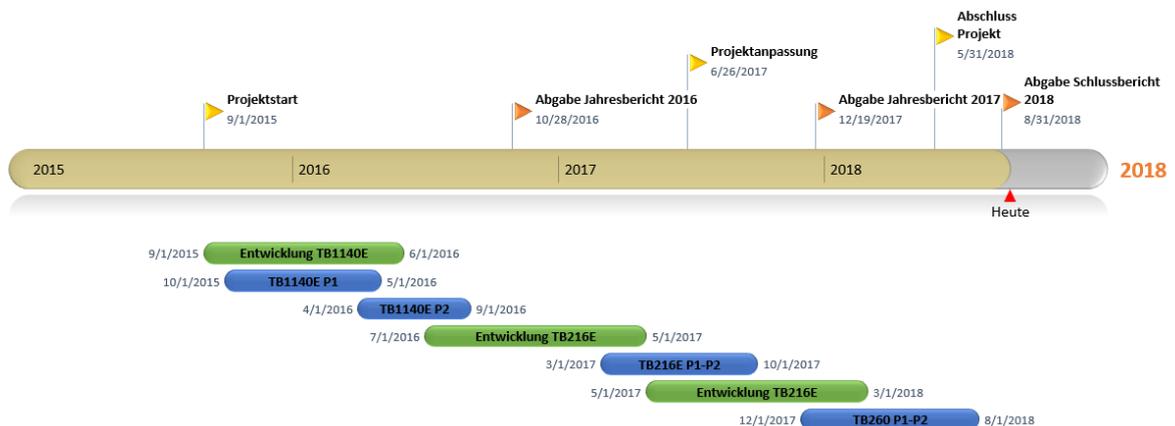


Abbildung 2: Projektzeitplan



Bei der Entwicklung der neuen Elektrobagger können auf die bereits gemachten Erfahrungen, den Entwicklungs- und den damit einhergehenden Lernprozess zurückgegriffen werden. Dies vereinfacht die Arbeit, insbesondere beim Antriebskonzept, als auch beim Thermomanagement, weil das gleiche Grundkonzept verfolgt werden kann, und somit Verbesserungen implementiert werden können.

Durch das Projekt können insbesondere Erkenntnisse zu den folgenden Batterietechnologien gewonnen werden:

- Modulare Batterie mit gekühlten Pouch-Zellen (von Kokam) bei den 16-t-Elektrobagger-Prototypen
- Modulare Batterie mit gekühlten 18650-Zellen (von Samsung) bei den 7-t-Elektrobagger-Prototypen
- Modulare Batterie mit ungekühlten 18650-Zellen (von Panasonic) bei den 2-t-Elektrobagger-Prototypen
- Modulare Batterie mit gekühlten prismatischen Zellen (von Samsung) als Alternative bei den 16-t-Elektrobagger-Prototypen

Unter anderem wird die Kontinuität des Demonstrationsprojekts mit der Neuentwicklung des 2-t-Elektrobagger besser gewahrt, als mit der Elektrifizierung der neuen Bagger-Generation.

Mit den bereits beim 16-t-Elektrobagger gemachten Erfahrungen und dem erarbeiteten Wissen konnte der 2-t-Elektrobagger vollständig entwickelt und bis Ende 2017 aufgebaut werden. Parallel dazu konnte auch die Entwicklung des 7-t-Elektrobagger vorangetrieben werden. Der erste 7-t-Elektrobagger wurde ebenfalls Anfang 2018 fertig aufgebaut.



## Rückblick

Die Entwicklung der SUNCAR Elektrobagger lief über ganze drei Jahre. Die gemachten Erfahrungen und einige Erkenntnisse daraus werden zusammenfassend in einem Rückblick dokumentiert und kurz beschrieben.

### 2015 - 2016

Nach der Planung und Konstruktion des voll funktionsfähigen Demonstrator-Elektrobaggers im Mai 2014, welche die technische Machbarkeit eindeutig und Beweis gestellt hatte, wurde ein neues ehrgeiziges Konzept ausgearbeitet. In diesem neuen Projekt sollten Elektrobagger-Prototypen, entwickelt werden, welche bis zur Serienreife getrieben werden sollten.



Abbildung 3: 16-t-Demonstrator-Elektrobagger

Während den Verhandlungen und dem intensiven Austausch mit dem BFE wurde im Juni 2015 das Start-up SUNCAR HK AG ins Leben gerufen und aufgebaut. Dieses Start-up wurde mit der Idee gegründet, ein neues, innovatives Produkt (Elektrobagger) im bestehenden Markt (Bauwirtschaft) einzuführen. Kurz nach der Gründung wurde mit der eigentlichen Arbeit angefangen: Der bereits entwickelte und aufgebaute Demonstrator-Elektrobagger wurde erneut genauestens analysiert, um alle Ergebnisse und die getroffenen Entscheidungen nochmals zu validieren und in die Neuentwicklung der ersten Prototypenmodelle einfließen zu lassen.

Mit einem 16-t-Elektrobagger sollen während seiner Lebensdauer 400'000 kg CO<sub>2</sub> und 150'000 Liter Diesel pro Bagger durch die Nutzung der Sonnenenergie eingespart werden. Bei einem Dieselpreis von 2 CHF/l und etwa CHF 30'000 für den Solarstrom bei einem Preis von 0.2 CHF/kWh würden CHF



210'000 eingespart. Nicht nur die Betriebskosten würden um ein Vielfaches reduziert werden, auch die Servicekosten sind bei einem Elektrobagger im Vergleich zu einem konventionellen Bagger als minimal zu qualifizieren. Zudem arbeitet ein Elektrobagger geräuscharm und ist damit für Umwelt und Bevölkerung angenehmer. Neben diesen enormen Vorteilen eines Elektrobaggers gegenüber einem herkömmlichen Dieselbagger gibt es einen grossen Nachteil, nämlich den Anschaffungspreis eines solchen E-Baggers.

Nach einigen Monaten Planung wurde das Material für die ersten beiden 16-t-Elektrobagger-Prototypen bestellt. Eine hohe Qualität der eingesetzten Produkte wurde gefordert. Deshalb wurden fast ausschliesslich europäische Lieferanten für die Batterie und Elektrokomponenten ausgewählt. Ab Dezember 2015 wurde mit dem mechanischen Zusammenbau der ersten Maschine begonnen. Als Zieltermin für die Inbetriebnahme und Fertigstellung galt Mitte Frühjahr 2016.

Bereits in die ersten Prototypen wurde ein eigens dafür entwickeltes Fernwartungssystem integriert. Dieses ermöglicht das Aufzeichnen von Betriebsdaten, welche anschliessend ausgewertet werden. Die gewonnenen Daten ermöglichen unter anderem einen genauen Einblick in das Verhalten der eingesetzten Batterien über einen längeren Zeitraum. Die daraus erhaltenen Erkenntnisse werden dann in die Entwicklung nachfolgender Elektrobaggermodelle einfließen.

Neben dieser drahtlosen Datenerfassung können Softwareupdates auf die betreffende Maschine aufgespielt werden. So kann, bei einer Freigabe eines neuen Softwarepakets, dieses drahtlos auf die Maschine auf der Baustelle heruntergeladen und installiert werden. Diese Funktion ist insbesondere für die entwickelten Prototypen essenziell, da die selbst entwickelte Software unerwartete Fehler aufweisen könnte, was zum Stillstand der Maschine führen könnte. Ein weiterer Vorteil eines solchen Remotesystems liegt in der Fernwartung der Maschinen. Mit diesem System kann der Techniker in einem allfälligen Servicefall jederzeit vom Büro aus auf die entsprechende Maschine zugreifen und den Fehler analysieren. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch ein solches Remotesystem die Supportmöglichkeiten für den Bediener merklich erhöht werden.

## **2016 - 2017**

Durch die ersten beiden 16-t -Elektrobagger, welche zu Beginn des Projektes gebaut wurden und seit Mitte Juli 2016 auf verschiedenen Baustellen im Einsatz sind, konnten zahlreiche Betriebsdaten gesammelt werden. Aus diesen Daten konnten viele wichtige Schlüsse für die Verbesserung und Weiterentwicklung der nächsten Generation von Elektrobaggern gezogen werden. Auf dem Weg von der Systemoptimierung des Demonstrators bis zur Entwicklung der ersten beiden fertigen 16-t-Elektrobagger-Prototypen wurden weitere Erfahrungen gemacht.

Die Wahl der Hauptkomponente, das heisst der Batterie, durchlief ein komplexes Entscheidungsverfahren. Als Kriterien für die Wahl der Batterien wurden Preis, Kapazität, Nutzung des Bauraums, Qualität, Lebensdauer und Sicherheit definiert.

Für den 16-t-Elektrobagger wurde eine Batterie auf der Basis von Pouch-Zellen mit langer Lebensdauer und einer Gesamtkapazität von 170 kWh, wovon circa 145 kWh effektiv nutzbar sind, gewählt. Der Grund für die Kapazitätseinschränkung ist, eine möglichst lange Lebensdauer der Batterien zu ermöglichen. Mit einer solchen Einschränkung wird nämlich die Lebensdauer um ein Vielfaches erhöht. Dieses Batteriesystem der Firma Akasol wurde gemeinsam für die Anwendung auf dem Elektrobagger spezifiziert und anschliessend produziert. Diese Lösung sticht im Verhältnis zum Batteriesystem des Demonstrators, bei welchem Samsung SDI Zellen verbaut wurden, insbesondere durch die erhöhte Sicherheit, die höhere Modularität und die bessere Qualität hervor.



Abbildung 4: 16-t-Elektrobagger, Prototyp 1

Die Batterie der ersten zwei Prototypen des Typs 16-t-Elektrobagger besteht aus je vier parallelgeschalteten Batterietrögen. Aufgrund des Kriteriums der einfachen Modularität ist gewährleistet, dass der 16-t-Elektrobagger mit einer Anzahl von zwei bis fünf Trögen konfiguriert werden kann, womit neben einer Variante mit einer längeren Betriebsdauer auch ein kostenoptimiertes Modell zur Auswahl steht. Ein weiterer Vorteil von parallelgeschalteten Batterietrögen ist, dass, falls einer dieser Tröge aus irgendeinem Grund ausfallen sollte, die Betriebsdauer reduziert wird, der Bagger aber weiterhin mit voller Leistung arbeiten kann. Damit fällt der Bagger auch für den weiteren Einsatz nicht abrupt aus und die Reparatur eines Batterietrogs kann besser geplant werden.

Mit der verbauten Batteriekapazität erreicht der 16-t-Elektrobagger theoretisch eine Laufzeit von bis zu 8 h mit einer Durchschnittsleistung von 27.5 kW und inklusive einer Nachladezeit von 1.5 h über den Tag verteilt. Da diese Laufzeit stark anwendungsabhängig ist, werden die effektiven Batterielaufzeitdaten während des realen Einsatzes auf den Baustellen mit dem Remotesystem erfasst und nachfolgend ausgewertet.

Die ersten Einsätze haben gezeigt, dass der Referenz-Arbeitstag aus der Vorstudie nicht einen realen Verbrauch einer Baustelle widerspiegelt. Zusätzlich ist der 16-t-Dieselmotor in der Serie 2 mit einem über 10 % stärkeren Dieselmotor von 77 kW, anstatt der ehemaligen 69.2 kW, ausgerüstet. Die Auswertung zeigt eine Laufzeit von mindestens 4 h bei einer durchschnittlichen Arbeitslast von 35 kW Leistung. Wenn über Mittag 1 h mit voller Ladeleistung von 44 kW geladen werden kann, wird die Gesamtlaufzeit auf über 5 h erhöht.

Aus diesen Daten sowie aus den Gesprächen mit den Maschinisten, Betreibern und involvierten Personen aus der Baubranche hat sich herausgestellt, dass eine hohe Laufzeit auf der Baustelle einen



sehr grossen Stellenwert hat. Mit den ersten beiden 16-t-Elektrobagger-Prototypen konnte die Erwartung von einer Batterielaufzeit von 8 h pro Tag bedauerlicherweise nicht erfüllt werden, da der Durchschnittsverbrauch über den Annahmen lag. Folglich musste die eingesetzte Batterietechnologie überdacht und für die nachfolgenden Maschinen verbessert werden. Dieses Defizit der Batteriekapazität wurde schnell nach der Fertigstellung der ersten zwei Prototypen festgestellt. Die Problematik steigt, da in der Baubranche lange Arbeitstage zur Tagesordnung gehören und meistens nicht mehrere Bagger dieser Grösse auf einer Baustelle vorhanden sind und somit kein Ersatz bereitsteht, wenn die Batterie einmal zu früh leer sein sollte.

Damit die Leistung der Batterie während des ganzen Jahres verfügbar ist, musste ein Thermosystem ausgearbeitet werden, welches mit den Temperaturen im Hochsommer, wie auch im Winter umgehen kann. Dazu wurden die Batterien mit einer Heizung und einer Klimaanlage versehen. Nur mit einer solchen Thermoeinheit kann gewährleistet werden, dass die Batterien zu jeder Jahreszeit die geforderte Leistung erbringen können. Zusätzlich wird mit diesem Temperaturmanagementsystem die Lebensdauer der Batterien deutlich verlängert, da diese jeweils in der optimalen Arbeitstemperatur genutzt werden können, was zu einer gleichmässigen Belastung der Batteriezellen führt. Durch das verbaute Temperaturmanagementsystem wird eine Zelltemperaturdifferenz von wenigen Grad Celsius erreicht.

Die Kabine des Demonstrator-Elektrobaggers wurde, insbesondere aufgrund der räumlichen Nähe zum Hydrauliköl und zum Kühler für die Elektrokomponenten, recht stark erwärmt. Dies wurde bei der Entwicklung der beiden 16-t-Elektrobagger-Prototypen geändert. Der Luftstrom wurde so umgeleitet, dass die Kabine weniger erwärmt wird und somit die Klimaautomatik weniger eingesetzt werden muss. Da die Abwärme im Hydraulikblock grösser war als gedacht, musste jedoch auch diese Lösung nachträglich nochmals überarbeitet werden. An warmen Sommertagen mit über 30°C wurde gemessen, dass gewisse Komponenten der Leistungselektronik an ihre spezifizierten Temperaturgrenzen sties. Dies hat zur Folge, dass die Lebensdauer der Komponenten leidet, obwohl diese alle eigensicher sind und die Leistungsabgabe automatisch reduzieren. Es zeigt sich, dass auch ein Elektrobagger eine gut ausgelegtes Thermomanagement benötigt, um bei höheren Temperaturen keine Einschränkung zu haben.

Unter anderem sind diese Erkenntnisse direkt in die Entwicklung der nachfolgenden vollelektrischen Prototypen, das heisst in den 2-t-Mini-Elektrobagger (Abbildung 5) und den später entwickelte 7-t-Elektrobagger (Abbildung 6) miteingeflossen.

Nach den Erfahrungen mit den 16-t-Elektrobagger wurde die Entwicklung des 2-t-Elektrobagger begonnen. In der kleineren Gewichtsklasse ist deutlich weniger Laufzeit gefordert und es bietet sich die Möglichkeit, den Bagger auch teilweise kabelgebunden zu betreiben. Damit wird höchste Verlässlichkeit und Ausfallsicherheit garantiert. Diese Baggergrösse eignet sich auch für viele Arbeiten innerhalb geschlossener Räume, womit die Emissionsfreiheit des Elektrobagger ein entscheidender Vorteil gegenüber dem Diesel darstellt.

Das Thermomanagement gestaltet sich bedeutend einfacher, da die Batterie nicht flüssigkeitsgekühlt und der Bagger ein Überrollbügel bzw. keine Klimatisierung einer Kabine besitzt. Die Leistungselektronik und das Hydrauliköl werden stets noch mit je einem Elektrolüfter vor Überhitzung geschützt. Die Ladegeräte, der Inverter und DCDC-Wandler sind gemeinsam auf einer Kühlplatte installiert. Die Klimatests bei warmen und kalten Umgebungsbedingungen sind beim 2-t-Elektrobagger problemlos verlaufen.



Abbildung 5: 2-t-Elektrobagger



Abbildung 6: 7-t-Elektrobagger



Bei der Berechnung der benötigten Batteriekapazität wurde auf die ersten Erkenntnisse aus den realen Einsätzen der 16-t-Elektrobagger zurückgegriffen. Die Zielsetzung war es, eine zufriedenstellende Laufzeit des neuen Modells zu gewährleisten und deshalb wurde eine volumetrisch kompakte Batterie nur mit Luftkühlung von der Firma Mattro ausgewählt. Das Batteriesystem mit einer Nennspannung von 100 VDC besteht aus drei parallelgeschalteten Trögen von je 10 kWh Kapazität. Somit errechnet sich die nutzbare Energie auf 24 kWh. Mit einer Durchschnittsleistung von 6 kW werden 4 h als Mindestlaufzeit angegeben. Die Ladeleistung von maximalen 6 kW garantiert im kabelgebundenen Betrieb eine 24-stündige Einsatzfähigkeit. Die theoretisch berechneten Werte haben sich folgend auf den Baustellen bestätigt.

## 2017 - 2018

Um die nächste Entwicklung des 7-t-Elektrobagger noch effizienter zu gestalten und gewisse Schwächen der ersten 16-t- und 7-t-Elektrobagger-Prototypen zu beseitigen wurden nochmals alle verfügbaren Daten zusammengetragen, analysiert und ausgewertet. Mit dem Fokus auf die Modularität auch in Hinsicht auf die weitere Produktpalette von Minibaggern muss ab einer Gewichtsklasse von 4-6 Tonnen auf eine Systemspannung von 400 VDC gewechselt werden. Entscheidend ist da die benötigte Motor- und Ladeleistung einer Maschine, und die entsprechende Berechnung der Ströme. Je grösser die Leistungsanforderung ist, desto höhere Systemspannung wird benötigt.

Mit diesem Schritt der Erhöhung der Batteriekapazität für die nächsten Prototypen sollen die Einsatzgebiete eines Elektrobaggers erweitert werden, damit die Laufzeit einem Diesebagger ebenbürtig ist. Für die Entwicklung der nachfolgenden Baggerprototypen wurde die Batterietechnologie von Pouch auf Rundzellen gewechselt. Rundzellen-Batterien erreichen eine fast doppelt so hohe Dichte als Batterien mit Pouch- oder prismatischen Zellen. Dies führt zu einer Erhöhung der Kapazität auf gleichem Volumen, was wiederum eine grössere Einsatztauglichkeit ermöglicht und so zu einer noch grösseren Akzeptanz beim Betreiber führt. Der beschriebene volumetrische Vorteil wirkt sich leicht negativ auf die Lebensdauer der Batterie aus. Um dies zu kompensieren, wurden verschiedene Gegenmassnahmen getroffen. Dies wird unter anderem damit umgesetzt, dass der nutzbare Spannungsbereich um circa 20 % eingeschränkt wurde und dass die Batterien laufend temperiert werden.

Um eine möglichst effiziente Maschine zu entwickeln und herzustellen, musste ein ausgeklügeltes Heiz- und Kühlsystem für die Batterie und Kabine erarbeitet werden. Ziel war es hierbei, möglichst alle Wärmequellen und -senken miteinander zu verbinden, um überflüssige Energien weiter nutzen zu können. Da verschiedene Elektrokomponenten schnell eine hohe Betriebstemperatur erreichen, kann diese Abwärme beispielsweise für das Heizen der Kabine oder der Batterien genutzt werden. Die grösste Wärmequelle im System, das Hydrauliköl, ist nicht mit dem restlichen System gekoppelt, weil das Öl bei verschiedenen Temperaturen eine unterschiedliche Viskosität besitzt und eine zu komplexe Auslegung im Vergleich zum Nutzen aufzeigt. Nicht ausser Acht zu lassen ist, dass die Batterie und die Kabine auch aktiv gekühlt werden müssen. Auf diesen Anforderungen wurde eine neue und kompaktere Thermoeinheit entwickelt, welche alle Komponenten optimal kühlen und heizen soll, damit eine möglichst lange Lebensdauer dieser erreicht werden kann. Im 7-t-Elektrobagger wird dies mit Hilfe einer Wärmepumpe ermöglicht, die die Leistungsfähigkeit sowie die Effizienz des Baggers erhöht.

Bezüglich des Komforts in der Kabine soll der Bediener keinen Unterschied zu einem konventionellen Bagger feststellen. Dies gilt insbesondere in Bezug auf das Heiz- und das Kühlsystem. Auch bezüglich der Bedienung des Elektrobaggers hat sich nichts geändert, um so die Akzeptanz eines Elektrobaggers zu steigern. Um ein angenehmes Kabinenklima zu schaffen, bieten die neuen Prototypen neben einer Klimaautomatik auch eine Sitzheizung. Durch das Multifunktionsdisplay können weitere



Klimaanpassungen eingestellt werden. Damit bestehen zahlreiche Möglichkeiten, Energie zu sparen, indem etwa die Heizung/Klima auf ein Minimum reduziert wird, wenn die Fahrertüre geöffnet wird.

Da das bereits existierende Remotesystem aufgrund der stetig wachsenden Zahl an Maschinen langsam an seine Grenzen gekommen ist, wurde es in Zusammenarbeit mit Informatikstudenten der Hochschule für Technik Rapperswil nochmals komplett neu aufgebaut. Mit dem neuen Fernwartungssystem stehen nun neben einer viel grösseren Datenbank auch neue Auswertungstools zur Verfügung. Das ganze System wurde benutzerfreundlicher mit genaueren und aussagekräftigeren Tabellen, Grafiken usw. ausgestattet, damit Betreiber, welche Interesse an den Betriebsdaten ihrer Bagger-Flotte haben, selbst darauf zugreifen können.

Die 7-t-Elektrobagger beweisen im Einsatz auf den Baustellen eine Batterielaufzeit von mindestens 6 h, und ermöglichen mit 1 h nachladen über Mittag einen garantierten 8-stündigen Arbeitseinsatz. Dieses Konzept besteht auch wieder aus drei parallelgeschalteten Trögen, und kann ohne Schwierigkeit auch mit nur einem Batterietrog funktionieren. Der Elektrobagger ist vorbereitet für den Kabelbetrieb, und garantiert mit 44 kW Ladeleistung, dass sich die Batterie bei einem Durchschnittsverbrauch von 21 kW während dem Betrieb wieder auflädt.



Abbildung 7: BMW Batterie 33 kWh

In Hinsicht auf die Weiterentwicklung von grossen Elektrobaggern (> 10 t), wie der 16-t-Elektrobagger, wurde eine weitere Batterie, welche aus der Serienproduktion stammt, genauer analysiert. Es handelt sich um die Fahrzeugbatterie des BMW i3, aus prismatischen 94 Ah-Zellen der neusten Generation von Samsung, siehe Abbildung 7. Diese Batterie basiert auf prismatischen Zellen und kann über die Klimaanlage direkt gekühlt werden. Das Beheizen wird über Heizmatten im Innern der Batterie gewährleistet. Es zeigt sich, dass die Vorteile von Qualität, Preis und Liefersicherheit rein wirtschaftliche Vorteile bieten, aber dass es sich aus technischer Sicht nicht rechtfertigt, als Ersatz für die Rundzellen-Batterien zur Verwendung zu kommen. Die vorgesehene Batterie besteht aus acht Trögen à 33 kWh, was sich zu einer Batteriekapazität von 264 kWh summiert, wobei circa 225 kWh nutzbar sind. Bei einem theoretischen Durchschnittsverbrauch von 51 kW beim neuen 16-t-Modell TB2150, würden nur 0.5 h mehr Arbeitszeit möglich.



## Grundlagen – Randbedingungen

Das Verständnis von Elektrobaggern beinhaltet Themen der Hydraulik, des Thermomanagements, der Mechanik und vor allem der Elektrotechnik. Die Randbedingung für den Bau eines batteriebetriebenen Elektrobaggers ist die Verfügbarkeit von Komponenten wie dem Elektromotor, dem Ladegerät oder der Batterie. Die neue Li-Ion-Batterietechnologie ermöglicht erst seit wenigen Jahren die Elektrifizierung von leistungsstarken Fahrzeugen wie einem Bagger.

### Batterietechnologien

Bei der Elektrifizierung von Baumaschinen kommen unterschiedliche Technologien von Batterien in Frage. Es werden robuste, zuverlässige und allwettertaugliche Systeme gefordert. Diese Voraussetzungen sind in Gesprächen mit verschiedenen Batterie-Hersteller genau besprochen worden, um eine geeignete Batterie zu evaluieren.

#### Lithium-Ionen-Batterien

Nach heutigem Stand der Technik sind die konventionellen Blei-Säure-Batterien von den Lithium-Ionen fast vollständig überholt worden. Die wichtigsten Eigenschaften einer Batterie, namentlich hohe Leistungs- und Energiedichte und lange Lebensdauer, werden durch die neue Zellchemie deutlich verbessert. Die Blei-Säure-Batterien haben zurzeit noch den Vorteil von einem tiefen Anschaffungspreis im Vergleich zu den modernen Lithium-Ionen-Batterien.

Da die Technologie noch relativ neu ist, gibt es noch wenige Batterie-Hersteller für die Baumaschinen-Branche. Die Herausforderung war, die Anwendung in den Baumaschinen genau zu spezifizieren und die Elektrobagger mit den besten Batterien auszurüsten. Nur dank dem technologischen Fortschritt ist es überhaupt möglich, alltagstaugliche Maschinen zu entwickeln, welche bei allen Umgebungsbedingungen dauerhaft einsatzbereit sind.

#### Begriffsdefinitionen bei Batterien

Die folgenden Begriffe sind grundlegend für die Diskussion über Batterien.

- Zelle, Modul, Batterie

Eine Batterie besteht aus mehreren Modulen mit einzelnen Zellen. Eine Batterie ist eine fertige Systemlösung mit Gehäuse, integrierter Elektronik und Sicherheitsfunktion. Module sind Zellpakete, welche mit offenem oder geschlossenem Gehäuse, Teil der Gesamtbatterie sind.

- Bruttoenergie

Dieser Wert in kWh gibt an, wie viel Energie die Batterie speichern kann. Er entspricht auch den kWh, welche gekauft werden.

- Nettoenergie

Die Nettoenergie der Batterie ist die tatsächlich im Anwendungsfall nutzbare Energie in kWh. Dieser Wert entspricht in der Anwendung einem Ladestand von 100 %. Wie stark der Bruttowert und der Nettowert der Batterie auseinanderliegen, hängt von der chemischen Zusammensetzung der Zelle und dem Batteriemangement ab.

- State of Charge (SoC)

Der SoC gibt den aktuellen Ladestatus der Batterie in Prozent an.



- **Begin of Life (BoL)**

Dies ist die nutzbare Energie zu Beginn eines Batterielebens. Dieser Wert entspricht der Nettoenergie des Systems.

- **End of Life (EoL)**

Das Lebensende einer Batterie wird erreicht, wenn nur noch ein definierter Wert von typischerweise 80 % des ursprünglichen SoC abrufbar sind. Die Batterie ist zu diesem Zeitpunkt noch voll funktionsfähig, kann aber nicht mehr gleich viel Energie speichern wie zu Beginn ihres Lebens.

### Zellenformate

Auf dem Markt sind unterschiedliche Batteriezellen verfügbar. Durch Seriell- und Parallelschalten dieser Zellen entstehen die Batterien. Es kann zwischen Rundzellen, Pouch-Zellen und prismatischen Zellen unterschieden werden.



Abbildung 8: Rundzellen



Abbildung 9: Pouch-Zellen



Abbildung 10: Prismatische Zellen

Diese Auflistung der Formate ist nicht vollständig für den ganzen Batteriemarkt, aber liefert grundlegend eine Übersicht über die prioritären Formate im Bereich der Elektromobilität.

- **Rundzellen**

Eine Rundzelle besitzt standardisierte Formate und ist als Energie- sowie Leistungszelle verfügbar. Stand der Technik ist die 18650er-Zelle (Durchmesser 18 mm, Länge 65 mm), zukünftig wird sich das Zellformat 21700 durchsetzen. Weitere grosse Vorteile dieser Batterietechnologie sind die sehr gute Volumen- und Energiedichte und der mit der Grossserienproduktion verbundene tiefe Preis. Nachteile sind die kleine Kapazität pro Zelle und die eher bescheidene Zyklenfestigkeit im Vergleich zu anderen Batterietechnologien. Das Unternehmen Tesla setzt seit Jahren bei seinen Fahrzeugen auf Rundzellenbatterien.

- **Pouch-Zellen**

Aktuell gibt es diverse namhafte Batteriehersteller. Ein Vorteil dieser Batterieform ist die grosse Fläche, welche zum Kühlen genutzt werden kann. Auch sind die Pouch-Zellen als Energie- und Leistungszellen verfügbar. Ein weiterer Pluspunkt ist ihre gute Zyklenfestigkeit. Nachteilig sind bei solchen Batterien jedoch die aufwändige Kontaktierung, der hohe Preis, die verfügbare Volumendichte und der Problematik, dass es keine Standardgrössen gibt. Als Referenz für den Einsatz von diesen Zellen gilt Renault.

- **Prismatische Zellen**

Vorteile der prismatischen Zellen sind insbesondere die einfache Kontaktierung, die kleine Anzahl Zellen, die Sicherheit, der Preis und dass sie als Energie- und Leistungszellen verfügbar sind. Nachteilig sind die volumetrischen Verhältnisse der Batterie und dass es keine Standardgrössen gibt. BMW verbaut in den Fahrzeugen i3 und i8 Batteriemodule aus diesen Zellen.

### Spannungslagen

Es werden Batteriesysteme mit unterschiedlichen Spannungslagen gebaut. Welche Systemspannung verwendet wird, hängt unter anderem davon ab, welche Bauteile auf dem Markt verfügbar sind und welche Motorenleistung für die Anwendung benötigt wird. Eine Machbarkeitsstudie für den 2-t-Elektrobagger hat gezeigt, dass es sich bezüglich Kosten, Platzverhältnisse, Sicherheitsaspekte und Wartungsfreundlichkeit lohnt, auf ein 100 VDC System zu setzen. Beim grösseren Bagger wie dem 7-t-Elektrobagger ist es wiederum sinnvoll, analog zum 16-t-Elektrobagger mit einem 400 VDC System zu arbeiten. Bei noch grösseren Baumaschinen liegt die nächste Systemspannung bei circa 700 VDC.

### Batterievergleich

Nachfolgend werden die erfolgversprechendsten, auf dem Markt verfügbaren, Batterien von verschiedenen Firmen in Bezug auf den Einsatz in einem Bagger miteinander verglichen. Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass dies keine abschliessende Darstellung aller Batteriehersteller ist.



Abbildung 11: Mattro Batterie



Abbildung 12: Kreisel Batterie

<b>Spezifikation</b>	EP97	KBP60
<b>Technologie</b>	Panasonic 3.5 Ah (Li-Ion)	Samsung 2.9 Ah (Li-Ion)
<b>Kapazität (Brutto/Netto)</b>	9.7 / 7.8 kWh	49.9 / 42.5 kWh
<b>Grav. Energiedichte</b>	170 Wh/kg	138 Wh/kg
<b>Vol. Energiedichte</b>	240 Wh/l	172 Wh/l
<b>Ladestrom</b>	bis 45 A (0 bis 45 °C)	bis 150 A (-10 bis 45 °C)
<b>Entladestrom</b>	bis 220 A (-20 bis 60 °C)	bis 500 A (-20 bis 60 °C)
<b>Nennspannung</b>	100 VDC	374 VDC
<b>Gewicht</b>	57.5 kg	322 kg
<b>Schutzart</b>	IP65	IP67
<b>Lebenserwartung</b>	800 Zyklen (EoL 80 %)	1200 Zyklen (EoL 80 %)
<b>Anwendung</b>	Elektrobagger 1-6 Tonnen (3 Stück pro 2-t-Elektrobagger)	Elektrobagger 6-30 Tonnen (3 Stück pro 7-t-Elektrobagger)



Abbildung 13: BMW Batterie



Abbildung 14: Akasol Batterie

<b>Spezifikation</b>	BMW i3 HVS	Akasystem 18 AEM
<b>Technologie</b>	Samsung 94 Ah (Li-Ion)	Kokam 53 Ah (Li-Ion)
<b>Kapazität (Brutto/Netto)</b>	33 / 28.0 kWh	42.3 / 36 kWh
<b>Grav. Energiedichte</b>	131 Wh/kg	100 Wh/kg
<b>Vol. Energiedichte</b>	120 Wh/l	141 Wh/l
<b>Ladestrom</b>	bis 180 A (-5 bis 42 °C)	bis 200 A (2 bis 46°C)
<b>Entladestrom</b>	bis 125 A (-25 bis 42 °C)	bis 200 A (-15 bis 60°C)
<b>Nennspannung</b>	360 VDC	400 VDC
<b>Gewicht</b>	255.6 kg	421 kg
<b>Schutzart</b>	IP6K9K	IP6K9K
<b>Lebenserwartung</b>	1500 Zyklen (EoL 80 %)	3000 Zyklen (EoL 80 %)
<b>Anwendung</b>	Elektrobagger 16-30 Tonnen (nicht eingebaut)	Elektrobagger 16-60 Tonnen (4 Stück pro 16-t-Elektrobagger)

Der Vergleich der im Projekt eingesetzten Batterien zeigt, welche Kriterien für einen Elektrobagger entscheidend sind. Für die Beurteilung der besten Einsatztauglichkeit ist ein Abwägen zwischen den wichtigsten Kennwerten notwendig. Je nach Gewichtung kann eine andere Wahl getroffen werden.

Es hat sich gezeigt, dass die volumetrische Energiedichte eine der wichtigsten Kenngrößen darstellt. Die Rundzellenbatterie von Mattro EP97 und Kreisel KBP60 zeigen gegenüber dem BMW i3 HVS mit prismatischen Zellen eine 100 % respektive 40 % höhere Dichte. Weiter steht die Lebensdauer im Vordergrund, um der entsprechenden Lebensdauer des Baggers gerecht zu werden. Die gravimetrische Energiedichte hat nur zweite Priorität, da bei einem Bagger ein Gegengewicht gebraucht wird und dieses Gewicht durch die Batterie kompensiert werden kann. Die Leistungsdichte muss nicht betrachtet werden, da bei einem Elektrobagger zu keiner Zeit hohe Spitzenströme abgefragt werden. Somit kommen auch ausschliesslich Energiezellen zum Einsatz.

Eine weitere Anforderung, die eine Batterie für den Einsatz auf einer Baumaschine zu erfüllen hat, ist ihre Robustheit gegen diverse Umwelteinflüsse. Notwendig sind ein staub- und wasserdichtes Gehäuse, ein Schutz gegen Vibrationen und Schläge, ein gutes Thermomanagement und beste Sicherheitsfunktionen.



Die BMW i3 Batterie hat aber den entscheidenden Nachteil der niedrigen volumetrischen Energiedichte und die folgend kurze Laufzeit und Lebensdauer der Batterie. Ein weiteres Problem stellt das Batteriemanagementsystem dar, welches nicht direkt zugänglich ist und das Parallelschalten von mehreren Trögen nicht ohne weitere Schnittstelle unterstützt. Dies folgt aus der anwendungsspezifischen Entwicklung für den Einsatz als Einzelstück in einem Serien-Elektroauto.

### **Einsatztauglichkeit für Elektrobagger**

Die Batteriesysteme sind abhängig von der Nennspannung für einen gewissen Leistungsbereich geeignet. Bei höherer Leistung und gleichbleibender Spannung steigen die fließenden Ströme kontinuierlich. Je grösser der Strom, desto höher werden die Verluste durch die Erwärmung der Kabel und Komponenten.

Eine Empfehlung für das Spannungsniveau von Elektrobagger wird folgend gegeben:

- Elektrobagger 1-6 Tonnen: Elektrische Antriebsleistung 10-40 kW, ca. 100 VDC System
- Elektrobagger 6-26 Tonnen: Elektrische Antriebsleistung 40-160 kW, ca. 400 VDC System
- Elektrobagger 16-60 Tonnen: Elektrische Antriebsleistung 80-280 kW, ca. 700 VDC System

Aus technischer Sicht werden Hochvoltsysteme bei höherer Systemspannung teurer. Die 100 VDC Batteriesysteme meistens mit Blei-Säure Zusammensetzung sind bereits seit einigen Jahren bei Flurförderfahrzeugen im Einsatz. Die Systeme auf 400 VDC setzen sich im Automobilbereich durch, wobei die 700 VDC hauptsächlich in Schwerlastbereich Verwendung finden.

Die SUNCAR Elektrobagger sind mit den folgenden Systemen ausgestattet:

- 2-t-Elektrobagger TB216E: Batterietyp Mattro EP97
  - Entscheidungskriterien: Energiedichte, Einfachheit, Kosten
  - Minimale Laufzeit: 4 h mit Brutto 29.1 kWh
  - Lebensdauer Bagger / Batterie: 4000 / 3200 h
- 7-t-Elektrobagger TB260E: Batterietyp Kreisel KBP60
  - Entscheidungskriterien: Energiedichte, Flüssigkeitskühlung
  - Minimale Laufzeit: 6.5 h mit Brutto 149.7 kWh
  - Lebensdauer Bagger / Batterie: 8000 / 9600 h
- 16-t-Elektrobagger TB1140E: Batterietyp Akasol Akasystem 18 AEM
  - Entscheidungskriterien: Zuverlässigkeit, Qualität, Flüssigkeitskühlung
  - Minimale Laufzeit: 3.2 h mit Brutto 169.2 kWh
  - Lebensdauer Bagger/Batterie: 10000 / 9600 h



## Batteriekühlsysteme

Die verschiedenen Batterietechnologien bzw. die verschiedenen Batteriehersteller verbauen ganz unterschiedliche Batteriekühlsysteme.

### Kühlsystem der Firma Akasol

Bei den Batteriesystemen von Akasol werden die Module durch eine Kühlplatte gekühlt. Dies führt dazu, dass die entstandene Wärme direkt abgeführt werden kann und die Batterie dadurch sehr gut temperiert ist. Als Kühlmedium wird eine Wasserglykol-Mischung verwendet.

Die Batterien im 16-t-Elektrobagger verfügen über zwei externe Anschlüsse, welche sehr einfach in das Kühlsystem im Fahrzeug integriert werden können.



Abbildung 15: Konzept Wasserkühlung der Akasol Batterien

### Kühlsystem der Firma Kreisel Electric

Die Firma Kreisel geht einen Schritt weiter und umspült die Zellen direkt mit einer dielektrischen Flüssigkeit. So kommt das Spezialkühlmedium direkt an die Rundzellen, wo die Wärme entsteht und so auch direkt abgeführt werden kann. Somit ist eine nahezu perfekte und effiziente Konditionierung der Batterie möglich.

Die beiden externen Anschlüsse der Kühlung müssen sorgfältig an einen zusätzlichen Kühlkreislauf des 7-t-Elektrobaggers angeschlossen werden.



Abbildung 16: Konzept Wasserkühlung der Kreisel Batterien

### Luftkühlung der Firma Mattro

Die Batterien von Mattro werden nicht flüssigkeitsgekühlt, sondern mit einer Luftumwälzung in der Batterie.

Im 2-t-Elektrobagger wird über die grosse Oberfläche des Batteriegehäuses eine gute Luftzirkulation erzeugt. Die Frischluft wird mit einem Lüfter auf der einen Seite des Baggers angesaugt und über die Batterien auf die andere Seite geleitet, sodass nie ein Wärmestau entsteht.



Abbildung 17: Luftkühlung Batteriecontainer Mattro

### Kühlsystem der Firma BMW

Die Batteriemodule von BMW werden direkt über das Kältemittel der Klimaanlage gekühlt. Die Kühlplatte im Unterboden der Batterie entspricht dem Kondensator des Klimakreislaufes. Geheizt wird dagegen einfach über elektrische Heizelemente.

Es sind zwei standardisierte Anschlüsse für die Klimaleitungen an der Batterie angebracht. Der Klimakreislauf muss auf die Anforderung der Batterie abgestimmt werden. Bei mehreren parallelgeschalteten Batterien ist die Kühlung schwierig umzusetzen.



Abbildung 18: Konzept Flüssigkeitskühlung der BMW Batterien



## Messdaten Batteriezellen

Die Lebensdauer einer Lithiumionenzelle ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Dabei spielen neben der Auswahl der Zelle (Zelltechnologie) und der Belastung der Batterie (C-Rate) auch die Einsatzbedingungen (Umgebungstemperaturen) des Systems eine entscheidende Rolle.

Zum Beispiel können durch die Optimierung der Temperierung und die Reduktion von Vibrationen die Lebensdauer erhöht werden. Einer der grössten Einflüsse auf die Lebensdauer hat der Spannungsbereich der Zelle, in welchem die Batterie betrieben und gelagert wird. Durch die Einschränkung des Spannungsbereichs um circa 20 % kann die Zyklenzahl überproportional bis zu 50 % erhöht werden, denn ein entscheidender Faktor ist der Energiedurchsatz. Zukünftige Batteriezellen werden für automobiler Anwendungen (EV) und höhere Lebensdauern ausgelegt und produziert.

Die Zellenmessungen über die Lebensdauer beanspruchen enorm viel Zeit. Die Validierung der Angaben der Hersteller können in Laboren wie beim EMPA getestet werden. Da aber diese Messungen nicht ansatzweise mit den Anwendungen in Realität verglichen werden können, ist es schwierig Aussagen zu treffen, welche nicht die Angaben der Hersteller wiedergeben. Zukünftig müssen anwendungsspezifische Lastprofile gesammelt und auf Prüfständen getestet werden. Alle umgebauten Elektrobagger zeigen nach den ersten paar hundert Betriebsstunden noch keine Kapazitätsreduktion.

Die Fahrzeugindustrie on- und off-road zeigt einen Trend nach Anwendungen mit langer Laufzeit und hoher Reichweite. Die chemische Zusammensetzung von Batterien für eine solche Anwendung kann unabhängig vom Zellenformat eingesetzt werden. Die Kombination von hoher volumetrischer Dichte und eine Lebensdauer von bis zu 3000 Zyklen können vor allem mit Rundzellensystemen kostengünstig abgebildet werden. Mit konventioneller Zellchemie wurden die Rundzellen ursprünglich für andere Anwendungen und eine Lebensdauer von 500 Zyklen ausgelegt.

### Lebensdauerstatistik der Rundzellenbatterie

In der Automobilindustrie ist der Einsatz von Rundzellen insbesondere durch Tesla bekannt geworden. Von Beginn an, das heisst vom Tesla Roadster, zum Model S und X, bis zur Serienproduktion des Model 3 wurde auf die Batterietechnologie von Rundzellen gesetzt.

Eine gross angelegte Studie der Tesla Community über die restliche Batteriekapazität in den Fahrzeugen hat bestätigt, dass die Batterien bei einem vielversprechenden Thermomanagement eine aussergewöhnlich hohe Lebensdauer aufweisen. Nach Aussagen von Elon Musk hat Tesla eine Batterielebensdauer von über 500'000 Meilen simuliert, was rund 800'000 Kilometern entspricht. Nach dieser enormen Distanz verfügen die Batterien noch immer über eine Restkapazität von mehr als 80 % ihres originalen Zustands.

Ein Vergleich lässt sich zu den verwendeten Rundzellen-Batterien im Einsatz vom 2-t und 7-t-Elektrobagger ziehen, da auch Rundzellenbatterien vom Hersteller Panasonic und Samsung in Verwendung sind. Der Einsatz unterscheidet sich in einigen Faktoren, aber es ist ebenfalls eine mobile Anwendung mit sehr hohen Anforderungen.

Die Abbildung 19 veranschaulicht, dass mit Ausnahme von ein paar Ausreissern, die Batteriekapazität bei fast allen Teslafahrzeugen bis zu 800 Zyklen nach wie vor über 90 % des originalen Zustands liegt. Die Angaben unter den ersten Zyklen zeigen, dass die meisten Zellen beziehungsweise Batterien sogar mit mehr Kapazität als auf dem Datenblatt versprochen sind, ausgeliefert werden. Die Streuung der Messpunkte erstreckt sich über 5 % Kapazität, was die starke Kopplung zu unterschiedlichen Umweltbedingungen und dem Nutzungsverhalten bestärkt.

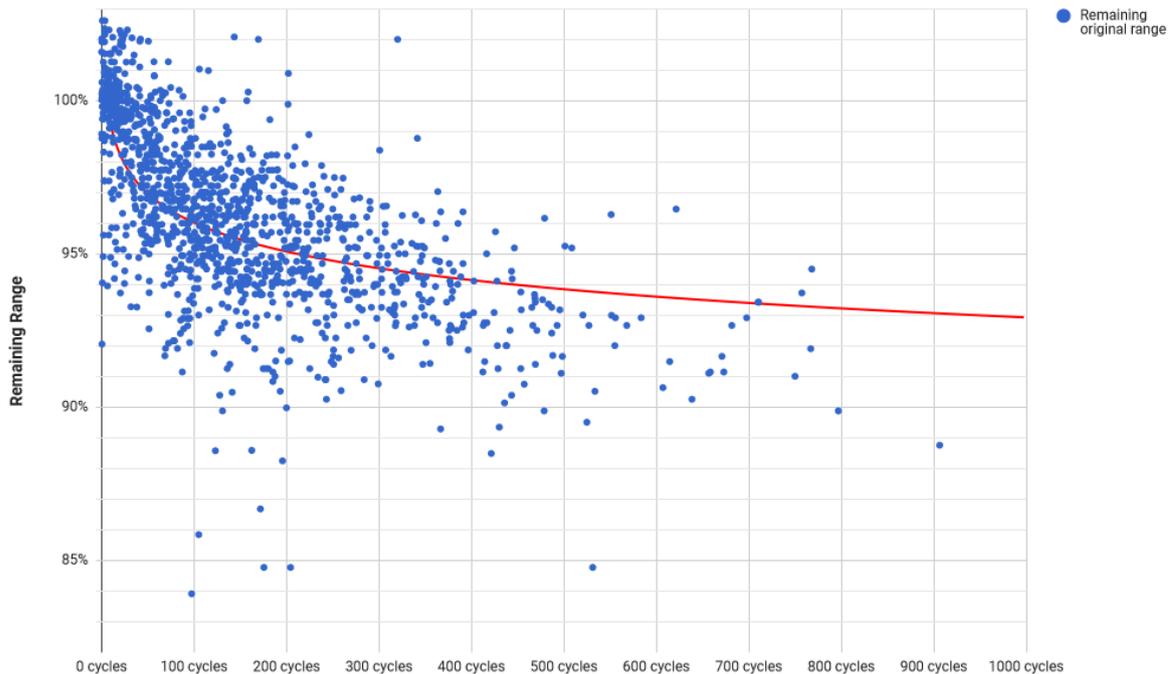


Abbildung 19: Kapazitätsverlust in Abhängigkeit der Zyklen beim Tesla Model S/X, Quelle: Tesla Battery Survey

Die im 7-t-Elektrobagger eingesetzte Batterie verwendet ein ähnliches Thermomanagement wie das in den Fahrzeugen von Tesla. Demgegenüber belastet der Elektrobagger die Batterie mit sehr kleinen C-Raten, was sich positiv auf die Batterielebensdauer auswirkt. Aufgrund des sogenannten Max Range Modus wird die Einschränkung des Zellspannungsbereichs bei Tesla nicht konsequent eingehalten. Dies wird beim Elektrobagger nur in Notfällen dem Servicetechniker ermöglicht. Die Teslas fahren auch bedeutend höhere Strombelastung, da kurzzeitig bis zu 400 kW Entladeleistung (4.5 C bei 90 kWh Batterie) und bei der Schnellladung bis zu 135 kW Ladeleistung (1.5 C bei 90 kWh Batterie) erlaubt wird. Folglich kann die Vermutung aufgestellt werden, dass die Batterielebensdauer in den von SUNCAR elektrifizierten Baumaschinen im Vergleich bedeutend grösser und damit erfolgsversprechend sein wird.

## Vorgehen / Methode

Der Bau der Prototypen Elektrobagger beinhaltet unzählige technische Themenbereiche beginnend bei der Hydraulik, über das Thermomanagement bis hin zur Mechanik. Die Auswahl der Komponenten im Bereich Batterie, Antrieb und Laden hat entscheidende Auswirkung auf den Zusammenbau, die Inbetriebnahme und die erreichten Ergebnisse. Zusammenfassend wird dargestellt, wie die Elektrobagger mit den Komponenten konzipiert und aufgebaut wurden.

### Konstruktion und Bau 16-t-Elektrobagger

Die Grundüberlegung bei der Systemintegration des elektrischen Antriebssystems war, dass eine möglichst schnelle Umrüstungszeit vom Diesel- zum Elektrobagger erreicht wird. Dies senkt zum einen die Kosten für die Montage und zum andern lässt sich das System auch auf andere Bagger leichter anpassen. Daher ist das System konstruktiv in drei Teile, sogenannte Baugruppen, aufgeteilt:

- Chassis
- Antriebseinheit
- Batteriecontainer

Dazu kommt das Steuersystem mit dem dazugehörigen Kabelbaum, der baugruppenübergreifend im ganzen Bagger verlegt ist.

#### Chassis

Das Chassis mit Kabine und das hydraulische System wurden möglichst original belassen. Vor allem am Hydrauliksystem wurden nur minimale Änderungen vorgenommen, um die bestehende funktionale Sicherheit des Systems beizubehalten. Die Serviceunterlagen und die Ersatzteile können vom original Dieselbagger verwendet werden. Somit kann in diesen Aspekten auch der Elektrobagger problemlos durch einen ausgebildeten Maschinenmechaniker gewartet werden.

In der Vorbereitung zum Umbau wurden alle Komponenten des Dieselaggregats sowie das Heckgewicht und sämtliche Steuergeräte und Kabelbäume entfernt. Danach wurde im Heckbereich die Aufhängung für den Batteriecontainer vorbereitet und der neue Kabelbaum eingelegt. In der Kabine wurden die nicht mehr benötigten Elemente wie die Klima-Bedieneinheit sowie der Schlüsselschalter ebenfalls entfernt.

#### Antriebseinheit

Die Antriebseinheit (Abbildung 20) besteht aus den Hauptkomponenten Hydraulikpumpe, Elektromotor und Wechselrichter (Inverter) und ist auf einer eigenen Grundplatte aufgebaut. Da die Antriebseinheit starken Vibrationen und Schwingungen durch die Hydraulikpumpe ausgesetzt ist, wurde die Festigkeit mittels FEM nachgewiesen. Die Einflüsse durch das Bewegen des Baggers sind mit sehr tiefer Frequenz und hohen Amplituden verbunden, werden aber im Lastfall nicht berücksichtigt.

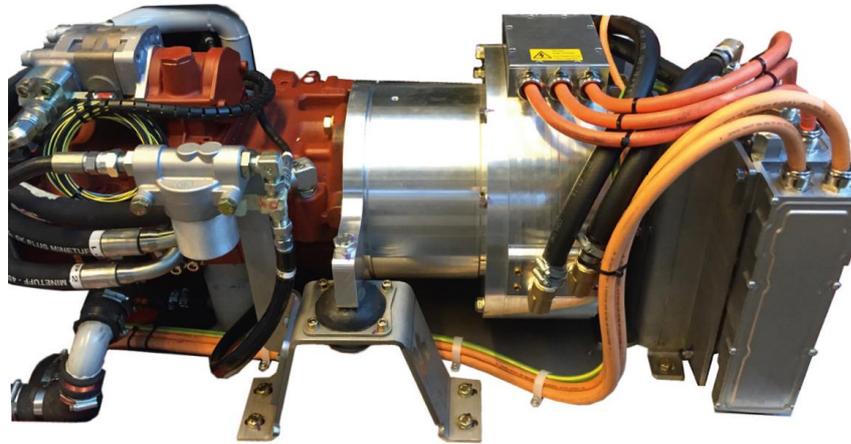


Abbildung 20: Antriebseinheit bestehend aus Wechselrichter, Elektromotor und Hydraulikpumpe

Die berechneten Vergleichsspannungen von Mises (Abbildung 21) zeigen die Stellen der höchsten Belastung. Die Dämpfer wurden so ausgelegt, dass möglichst wenig Vibrationen auf das Chassis übertragen werden. Die Kupplung wird zur Schwingungsoptimierung zudem für jede Einheit einzeln ausgewuchtet.

Die Kabelführung der Hochspannungsleitungen (orange Kabel) ist besonders sicherheitsrelevant und wurde in Bezug auf Biegeradien und Befestigungen bei der Montage besonders berücksichtigt.

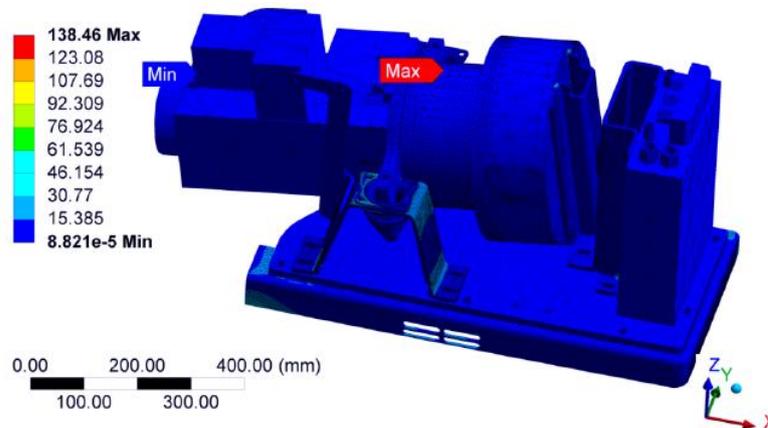


Abbildung 21: Antriebssystem im kompletten Verbund, Übersicht Vergleichsspannungen von Mises [MPa]

### Batteriecontainer

Die Heckpartie bietet durch den Ausbau des Dieselmotors und dem Gegengewicht einen optimalen Bauraum für eine grosse Baugruppe. Der Grundgedanke der kurzen Montagezeiten am Bagger wieder spiegelt sich an dieser Baugruppe am besten. Die grösste und mit Abstand komplexeste Baugruppe, die zudem den grössten Teil der Hochspannungverkabelung enthält, wird auf einer Grundplatte aufgebaut und kann unabhängig von den restlichen Komponenten des Baggers montiert und getestet werden.

Der Heckaufbau, das Kernstück des Elektrobaggers, beinhaltet zum grössten Teil die aus vier Trögen bestehende Hochvoltbatterie. Die Parallelschaltung dieser vier Tröge ermöglicht es, die Elektrobagger

auch mit einem allfälligen Moduldefekt mit den verbleibenden Trögen und weniger Kapazität weiter zu betreiben, um unnötige Stillstandzeiten auf der Baustelle zu vermeiden. Seitlich sind auf dem Heckaufbau zwei Ladegeräte, mit total 44 kW Ladeleistung sowie ein Gleichstrom-Wandler (400 VDC auf 24 VDC) für das ursprüngliche Bordnetz mit Radio, Scheibenwischer, Lüfter, Steuergerät verbaut. Dies wird zusätzlich durch zwei seriell geschaltete Bleibatterien gestützt, die ebenfalls im Heckaufbau montiert sind.

Auf der anderen Seite ist die Hochvoltverteilung (HVDU) mit den entsprechenden Sicherungen verbaut. Wie auf Abbildung 22 zu erkennen ist, kann auch diese Einheit unabhängig aufgebaut und getestet werden. Die komplette Einheit wiegt etwa 2 t und kann mittels Krans auf das Heck des Originalbaggers gehoben und anschliessend befestigt werden.

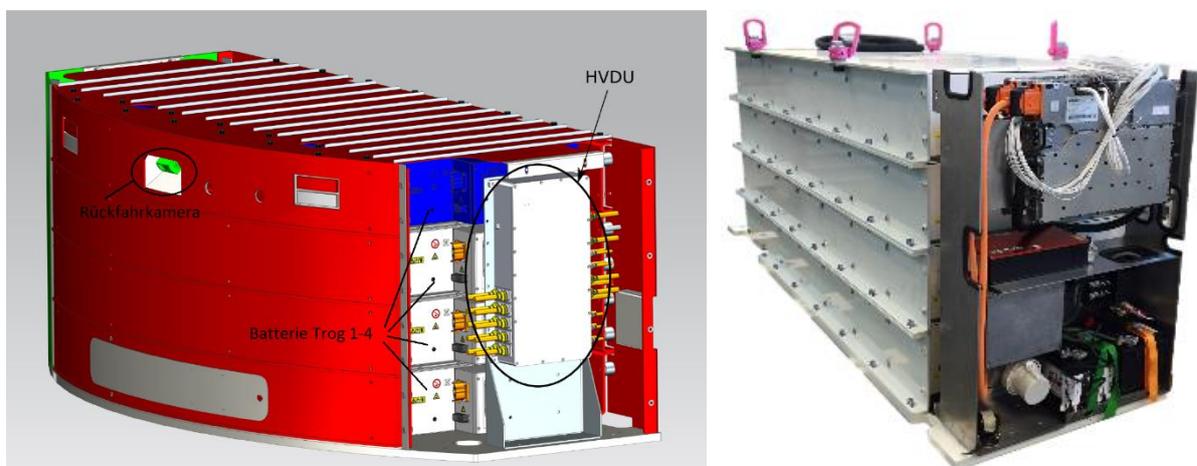


Abbildung 22: Baugruppe Batterie-Plattform, links CAD Rendering, rechts nach Montage und Inbetriebnahme

Da die gesamte Heckpartie sicherheitsrelevante und teure Komponenten beinhaltet, wurde darauf geachtet, dass diese bei einem Unfall besonders gut geschützt sind. Dafür wurden Crashelemente eingebaut und die Einheit mittels FEM Analyse gemäss den ROBS/FOBS Normen ausgelegt. Weiter ist unterhalb des Heckaufbaus eine massive Stossstange montiert, welche Kräfte bei einer Kollision direkt in das Chassis einleitet. Dadurch sind Batterie und Elektrokomponenten besser geschützt.

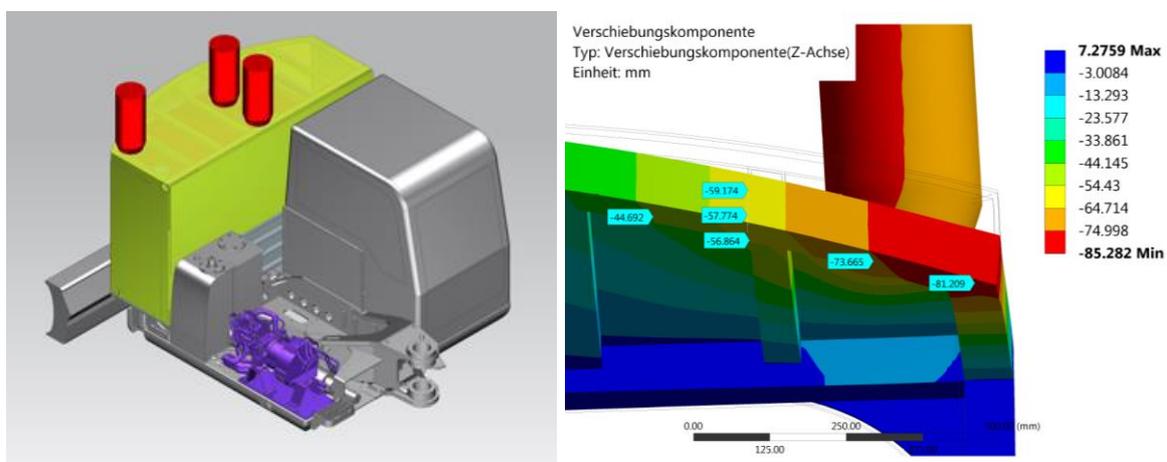


Abbildung 23: FOPS (Falling Object Protection Structure), Abstand zu DLV (maximale Auslenkung)



Für die Weiterentwicklung wird untersucht, wie diese Einheiten modularer und freistehender aufgebaut werden können. Weiter wird mehr Zeit für die Planung der Verkabelung und Verrohrung investiert, damit diese effizient aufgebaut und die Komponenten schnell (Plug and Play) angeschlossen und im Notfall auch ausgetauscht werden können.

Da bei Konstruktionsbeginn kein Zugriff auf originale Konstruktionsdaten über den japanischen Hersteller Takeuchi möglich war, wurde das komplette System in 3D aufgebaut. Dies erlaubt eine bessere Ausnutzung, da der zur Verfügung stehende Bauraum besser planbar ist.

### **Kabelbaum und Steuerung**

Da von der Originalmaschine nach dem Entfernen des Dieselaggregates nur noch einige wenige Sensoren und Aktoren verblieben, wurden alle Steuerungen sowie der vorhandene Kabelbaum komplett ersetzt. Dies bedeutete wesentlich weniger Aufwand, als den bestehenden Systemen alle Signale des Dieselmotors zu simulieren. Zudem hätte der originale Kabelbaum sowieso erweitert werden müssen.

Um die Flexibilität für kurzfristige Änderungen zu gewährleisten und maximale Zugänglichkeit zu haben, wurde in der Kabine hinter dem Fahrersitz ein Schaltschrank eingebaut. Der Bauraum ist optimal von Umwelteinflüssen geschützt und zentral gelegen. Zusätzlich sind für die früheren Steuergeräte bereits Durchführungen für alle Kabel vorhanden. Im Schaltschrank werden alle ankommenden Signale zuerst auf Klemmen im unteren Bereich und danach erst zu ihrem jeweiligen Ziel geführt. Dies hat insbesondere bei der Inbetriebnahme enorm geholfen, um gewisse Fehler schnell und Effizienz zu orten und zu beheben. Weiter sind Änderungen sehr einfach umzusetzen. Im Schaltschrank sind ebenfalls die beiden Steuergeräte für Batterie und Bagger sowie ein Datenlogger für die Batterie untergebracht.

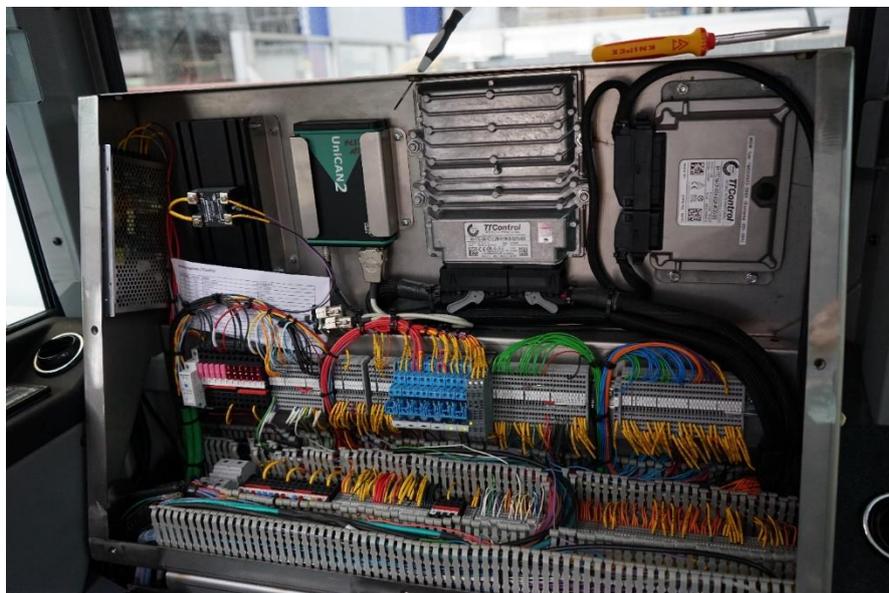


Abbildung 24: Schaltschrank inklusive Steuergeräte und Datenlogger

## Konstruktion und Bau 2-t-Elektrobagger

Aus den Erkenntnissen des Umbaus der beiden 16-t-Elektrobagger wurde bei der Konstruktion des 2-t-Elektrobaggers besonders auf die Modularität geachtet, damit es möglich ist, unabhängig von Anpassungen an der Originalmaschine oder sogar auf einer Basismaschine eines anderen Herstellers aufzubauen. Der 2-t-Elektrobagger ist so konzipiert, dass ein kompletter Batteriecontainer im Heckbereich des ehemaligen Gegengewichts und Dieselmotors auf das Chassis des originalen Baggers gebaut wird. Dabei wurde darauf geachtet, dass die grosse Mehrheit der Elektrokomponenten auf diesem Container montiert und in Betrieb genommen werden können. So lässt sich der Bagger in zwei Bereiche einteilen: Baggerfront und der Batteriecontainer.



Abbildung 25: CAD Rendering von Baggerfront und Batteriecontainer

### Baggerfront

Im Frontbereich ist die komplette Hydraulik der Originalmaschine, sowie der elektrische Antriebsmotor und der modifizierte Hydrauliköltank eingebaut. Diese wurden zugänglich und platzsparend unter dem Fahrersitz direkt hinter der herausnehmbaren 12 V Bleibatterie verbaut.

Die Abbildung 26 zeigt wie der wassergekühlte Elektromotor über eine Kupplung an die originale Hydraulikpumpe angeflanscht wird. Dieser Axial-Fluss-Motor leistet im Vergleich zum Dieselmotor kontinuierlich über 10 % mehr Drehmoment und fast 30 % mehr Leistung. Die Einschränkung der Arbeitsleistung des Baggers bestimmt weiterhin die Hydraulikpumpe, welche die Originale ist. Diese Antriebseinheit befindet sich zwischen Baggerfront und Batteriecontainer. Im Servicefall muss das Bodenblech, wo sich der Sitz befindet, entfernt werden oder bei grösseren Arbeiten der Batteriecontainer demontiert werden. Für die Schwingungsentkopplung zum Chassis wurden geeignete Dämpfer ausgewählt, welche die Antriebseinheit auf drei Punkten lagert.

Ebenfalls ist die Kühleinheit (Abbildung 27) für die Hydraulik und das Ausgleichsgefäss sowie die Wasserpumpen für das Kühlsystem der Elektrokomponenten auf der rechten Seite des Fahrersitzes zu finden. Diese sind jeweils als eigene Baugruppe vormontiert und danach an das Chassis angebracht worden. Die Temperaturüberwachung und Ansteuerbarkeit des Hydraulikölkühlers erlaubt eine bedarfsorientierte Kühlleistungsregelung und ist somit um ein Vielfaches effizienter wie der fix angetriebene Lüfter des Dieselmotors.



Abbildung 26: Antriebseinheit mit Hydraulikpumpe und Elektromotor



Abbildung 27: Thermomodul Hydraulik

### Batteriecontainer

Auf dem Batteriecontainer (Abbildung 29) sind neben den drei Batterietrögen auch alle Komponenten des Hochvoltsystems sowie die Hochvoltverteilung und die Steuerungselektronik des gesamten Elektrobaggers untergebracht.

An dem Kern aus drei Batterietrögen ist eine flüssigkeitsdurchflossene Kühlplatte mit den leistungselektronischen Komponenten (Ladegeräte, Wechselrichter und Gleichstrom-Wandler) angebracht. Diese Kühlplatte besitzt zwei Funktionen. Die erste Funktion ist die Kühlung der Komponenten und die zweite die Wärmetrennung zwischen der erhitzten Baggerfront und dem Kern des Batteriecontainers. Die Ladegeräte liefern mit dreifach einphasigen 2 kW eine Gesamtleistung von 6 kW.

Oberhalb der Batterietröge wurde ein Platz für die HVDU (Hochspannungsverteiler) gefunden sowie die LVDU (Niederspannungsverteiler und Steuerungsplatine) untergebracht. Damit sind diese gut zugänglich positioniert. Beide Verteilungen sind für den 2-t-Elektrobagger massgeschneidert spezifiziert und konstruiert worden. Seitlich sind die Kühler für den Elektrokomponenten-Kühlkreislauf angebracht, die mit ihren Lüftern automatisch auch einen Luftstrom zur Kühlung der Batterietröge generieren. Somit kommt das Batteriesystem ohne zusätzliche Kühlung aus und ist damit effizienter.



Abbildung 28: Kern des Batteriecontainers mit 3 Batterietrögen und den Kühlern für die Elektrokomponenten

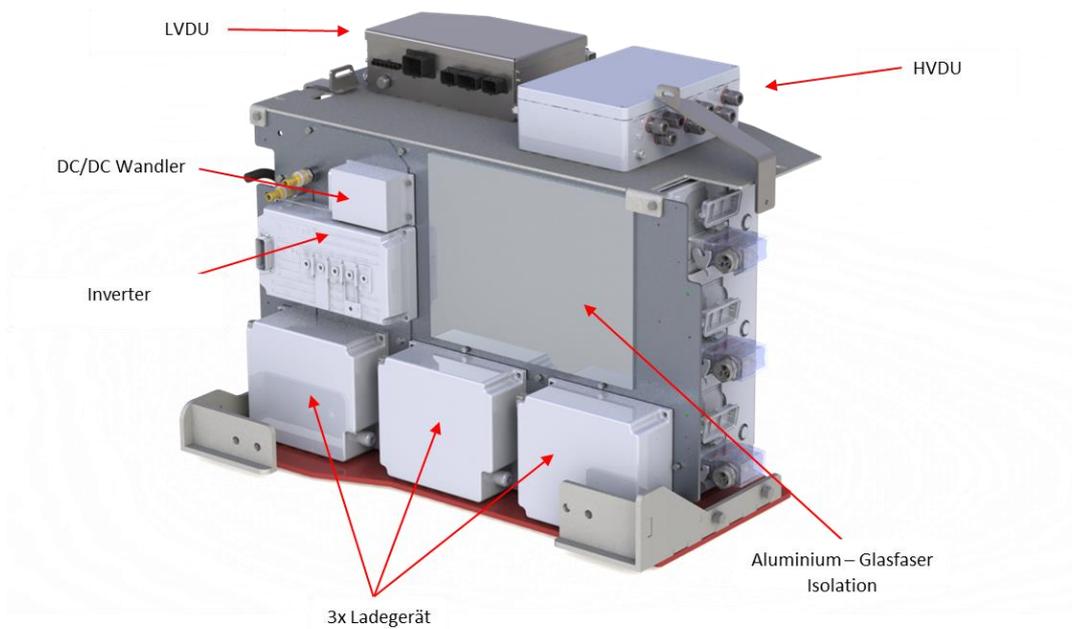


Abbildung 29: Frontseite des Batteriecontainers mit Leistungselektronik und Verteilern

### Steuerung und Verkabelung

Auch bei der Verkabelung wurde das modulare System des Batteriecontainers aufgegriffen. Im 2-t-Elektrobagger sind insgesamt vier getrennte Kabelbäume verbaut, die alle an die LVDU angeschlossen werden. Innerhalb dieser findet auch die Absicherung und die Verteilung der einzelnen Signale statt. Es gibt jeweils einen Kabelbaum für die Batterien, die Leistungselektronik, das Steuergerät und die ganze Baggerfront. Das elektrische Schema und die Kabelbaumverlegung wurde mit einer CAE Software im dreidimensionalen Modell geplant, wie es in der Abbildung 30 ersichtlich ist.

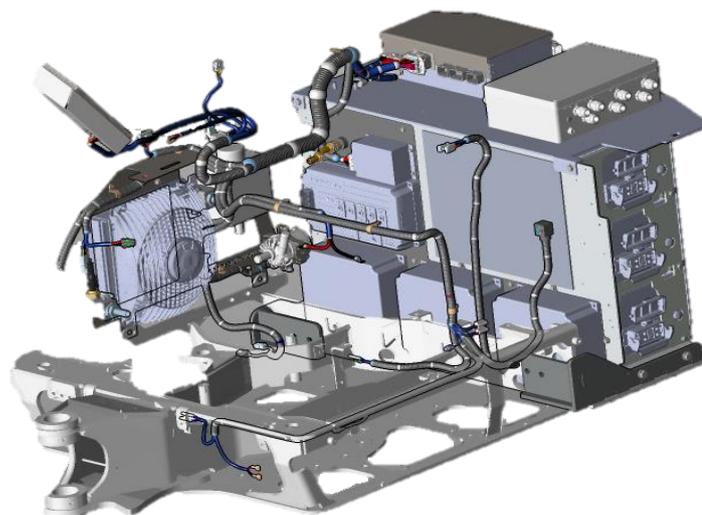


Abbildung 30: Kabelbaum Baggerfront im eingebauten Zustand



Die beschriebene Aufteilung der Kabelbäume hat den Vorteil, dass diese bereits einzeln vormontiert werden können. Insbesondere beim Kabelbaum, der in der gesamten Baggerfront verbaut wird, ist die Zugänglichkeit am Anfang des Umbaus enorm vorteilhaft beim Einbau.



Abbildung 31: Leiterplatte mit Absicherung, Relais und Verteilung der Signale

Mit der eigens entwickelten Platine zur Verteilung aller Signale, konnte erreicht werden, dass in allen Kabelbäumen nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen ohne Verzweigungen verbaut wurden. Dies führt zu einer viel robusteren Verkabelung und vereinfacht die Fehlersuche im Störfall bedeutend. Die grösste Herausforderungen ist es, die Platine bestmöglich vor Verschmutzung, Feuchtigkeit und Vibrationen zu schützen.

## Konstruktion und Bau 7-t-Elektrobagger

Der 7-t-Elektrobagger wird analog zum 16-t-Elektrobagger durch ein 400 VDC Hochvolt-Batteriesystem betrieben. Damit die gewünschte Laufzeit von einem ganzen Arbeitstag erreicht werden kann, sind auf diesem Elektrobagger drei 49.9 kWh grosse Batterietröge verbaut. Diese und alle weiteren Systemkomponenten sind in einer modularen Bauweise aufgebaut, einem Containersystem, das eine variable und schnelle Integration ermöglicht. Der Container kann somit unabhängig von der Grundmaschine bereits aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Die Heirat von Grundmaschine und Container kann ganz am Schluss erfolgen. Die Vorgehensweise in der Konstruktion und der Montage werden chronologisch beschrieben.

Im ersten Schritt wurden in der Konstruktion die 3D Modelle ergänzt, welche unvollständig, aber notwendig waren. Darauf basierend entstanden die Konzepte. Später wurden die Teile auskonstruiert und in die Fertigung gegeben.

Parallel dazu wurden die Bagger bereits abgebaut und die notwendigen Anpassungen am Chassis realisiert.

Die tragende Originalkonstruktion wurde dabei erhalten. Da die Batterien in einer Gewichtszunahme resultierten, wurde der Rahmen zusätzlich verstärkt (graue Träger).



Abbildung 32: Grundmaschine mit ergänztem Stahlbau



Abbildung 33: Elektrischer Antriebsstrang

Als nächstes wurden die Baugruppen, wie der Antriebsstrang sowie die Elektro- und Thermoereinheit, mechanisch aufgebaut. Der hocheffiziente Elektromotor hätte im Vergleich zum Dieselmotor etwa 25 % mehr Drehmoment und 60 % mehr Leistung verfügbar. Da dieser direkt über eine Kupplung an der originalen Hydraulikpumpe angehängt ist, wird die Leistung dadurch limitiert.

Der elektrischen Antriebsstrang ist über Dämpfer mit dem Container verschraubt, um den Motor beziehungsweise das Chassis vor Vibrationen zu entkoppeln.

Der Axial-Fluss-Motor und der entsprechende Wechselrichter sind die typengleichen wie diejenigen, die im 16-t-Elektrobagger verbaut wurden. Dieser Motorentyp besitzt die Charakteristik, ein hohes Drehmoment bei niedriger Drehzahl aufzuweisen, welche vorteilhaft für einen elektro-hydraulischen Antrieb ist. Die Erfahrungen von den ersten Baustelleneinsätzen hat gezeigt, dass die Elektrokomponenten aus Überlegungen zu thermischer Stabilität lieber leicht überdimensioniert werden. Die Bagger müssen über einen 8 h Arbeitstag kontinuierlich die volle Leistung abrufen können.



Die Elektroeinheit kann ebenfalls separat vormontiert werden. Sie beinhaltet die beiden Ladegeräte mit je 22 kW, die Steuerung, Sicherungen und Verteilung (HVDU und LVDU) für den 400 VDC Antriebsstrang und das 12 VDC Bordnetz, sowie den zugehörigen DCDC-Wandler, um das Bordnetz von den Hochvoltbatterien speisen zu können (analog zu der Funktion der Lichtmaschine).



Abbildung 34: Elektroeinheit inklusive Hoch- und Niedervoltverteilung



Abbildung 35: Thermoeinheit

Die Thermoeinheit besteht aus einer Wärmepumpe, Ventilen, Wasserpumpen und Wärmetauschern. Eine Aufgabe dieser Einheit ist, alle Elektrokomponenten im Betrieb zu kühlen und dafür zu sorgen, dass auch die Batterie und die Kabine auf dem richtigen Temperaturniveau gehalten werden, um die Lebensdauer zu erhöhen, volle Leistung erbringen zu können sowie dem Bediener besten Fahrkomfort zu bieten.

Das Herzstück der Thermoeinheit bildet die bidirektionale Wärmepumpe, mit welcher die geforderte Kühlflüssigkeitstemperatur an die gewünschte Stelle gebracht werden kann. Durch das gezielte Verschieben der Abwärme wird eine höhere Effizienz erreicht als bei herkömmlichen Klimatisierungssystemen, wo die Wärme an die Umwelt verloren geht.

Erst durch die Ergänzung mit weiteren Komponenten entsteht eine komplette Thermoeinheit. Die Wärmepumpe erfüllt ihre gewünschte Funktion einwandfrei und erreicht durch die Effizienzsteigerung im 7-t-Elektrobagger eine Halbierung des Energieverbrauchs für die Klimatisierung.

Als letzte Baugruppe, gezeigt in Abbildung 36, wurde die Batterie bestehend aus drei Batterietrögen aufgebaut. Besonders wichtig bei diesen Li-Ion-Batterien ist die Dämpfung, welche dafür sorgt, dass die Schwingungen und Stöße von einer Baumaschine nicht hart bis auf die Zellen übertragen werden. Dadurch lässt sich ebenfalls die Lebensdauer der Batterien und somit die des gesamten Baggers erhöhen.

Nach dem alle einzelnen Baugruppen, der Antriebsstrang, die Elektro- und die Thermoeinheit, vollständig aufgebaut waren, konnten diese auf der Grundplatte des Containers (Abbildung 37) montiert werden. Die Grundplatte bildet auch aus mechanischer Sicht die Schnittstelle zur Grundmaschine. Der gesamte Container beinhaltet auch einen Rahmen zum Schutz der Batterien und der weiteren Komponenten. Dieser Rahmen dient später auch der Aufnahme der Verschalungselemente, welche aus mehreren symmetrischen Teilen bestehen.



Abbildung 36: Vormontierte Batterietröge



Abbildung 37: Vollständig assemblierter Container

Zum Schluss wurde der Container mit der Grundmaschine verheiratet, fertig verschlaucht und verkabelt sowie mechanisch befestigt, die Verschalung wurde montiert und alle Flüssigkeiten aufgefüllt, bevor die Inbetriebnahme des gesamten elektrischen Baggers gestartet werden konnte.

Der 7-t-Elektrobagger wurde mechanisch als auch elektrisch als 3D Modell erarbeitet. Es zeigt sich eindrücklich, wie mit guter Konstruktion und Planung am Computer eine reale voll funktionsfähige Maschine entstehen kann, welche in der Folge sauber dokumentiert werden kann.



Abbildung 38: CAD Rendering des 7-t-Elektrobaggers



Abbildung 39: Realer 7-t-Elektrobagger

Die zwei gebauten Prototypen haben im Vergleich zur Originalmaschine ausserdem einige spezielle Features: eine automatische Drehzahlreduktion, wenn die Joysticks nicht bewegt werden, eine Rückfahrkamera, ein übersichtliches Touch-Screen-Display mit integriertem Handbuch und eine Option von Durchflusseinstellungen für verschiedene Anbaugeräte. Über eine neue Serviceschnittstelle im Cockpit sowie den Remotezugriff mit Übertragung von Betriebsdaten werden Service, Wartung und Softwareupdates weltweit vereinfacht. Die Elektrobagger arbeiten 2.5-fach effizienter, stossen keine lokalen Emissionen aus, bieten mehr Fahrkomfort und haben den Vorteil von weniger und verkürzten Service- und Wartungsarbeiten.



## Ergebnisse

Die Elektrobagger wurden nach hohen Anforderungen entwickelt. Während der Inbetriebnahme und in den Testeinsätzen wurden die Resultate zusammengefasst.

### Fernwartung und Datenauswertung

Bereits zu einem frühen Zeitpunkt war geplant, dass die Informationen aus der Fernwartung auch für die interessierten Bediener und Betreiber zugänglich gemacht werden sollten. Dies in dem Sinne, dass diese die Möglichkeit erhalten, mit einer Applikation über die Weboberfläche am Computer oder Smartphone ihre eigene Bagger-Flotte und deren Betriebsdaten überblicken zu können.

Das selbst entwickelte Remotesystem ist für die Verbesserung der nächsten Baggenergenerationen von enormer Bedeutung. Mit diesem System werden die Maschinen mit dem Internet vernetzt, damit diese weltweit verfügbar sind. Das System ermöglicht, wichtige Betriebsdaten wie etwa die Leistungsdaten des Motors, Temperaturdaten und Batteriewerte zu erfassen und auszuwerten. Mit einer genauen Analyse und Auswertung dieser Daten kann die Maschinenentwicklung weiter vorangetrieben werden und die bereits gefällten Entscheide können überprüft werden. Ein weiterer Grund für die Datenbearbeitung liegt im Bereich der Kundenbetreuung und der Erbringung von Serviceleistungen. Mit der Datenverarbeitung können allfällig auftretende Fehlermeldungen aufgrund der übermittelten Daten rasch behoben werden. Ohne diese Daten wäre zuerst eine umfangreiche und zeitraubende Fehleranalyse notwendig. Diese Ausfallzeit der Maschinen und die damit verbundenen Kosten möchten möglichst vermieden werden. Zusätzlich wird erhofft, aufgetretene Fehler bei anderen Maschinen proaktiv im Voraus beheben zu können. Zusätzlich können mit einem solchen System die notwendigen Sicherheits- und Softwareupdates direkt von Bürostuhl aus implementiert werden. Dadurch können Serviceleistungen vor Ort minimiert werden, was mit einer schnelleren Reparatur und einer kürzeren Ausfallzeit der Maschine einhergeht.

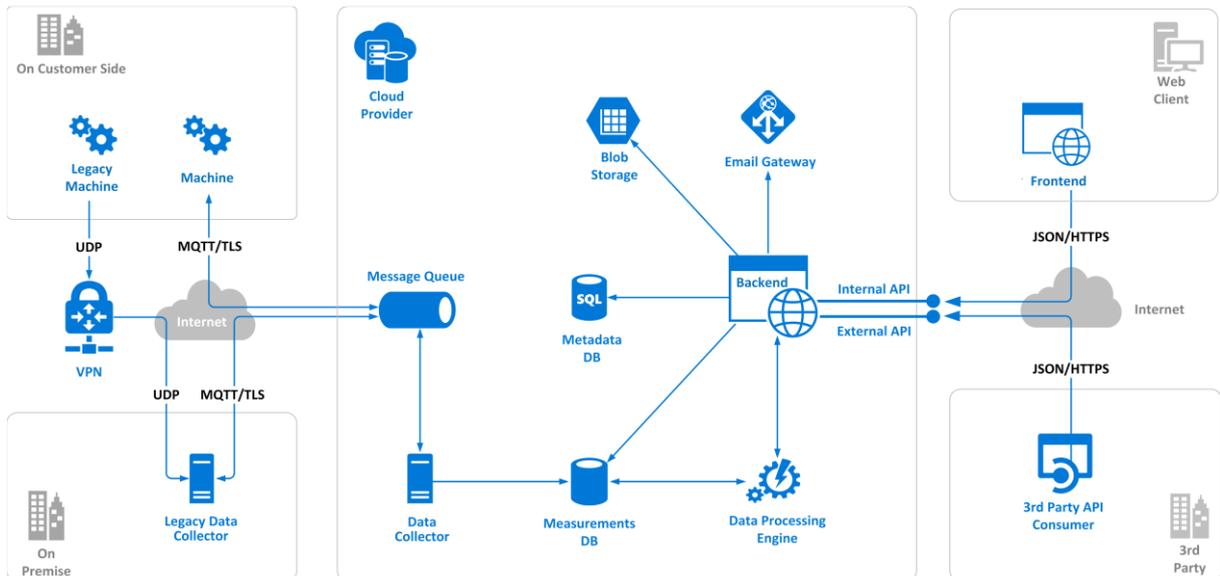


Abbildung 40: Systemübersicht des Remotesystems

Die verschiedenen Sensoren an den Elektrobaggern übermitteln Millionen von Messwerten an einen zentralen Datensammler, sodass eine zentrale Überwachung der Maschinen inklusive Auswertung und Fehleranalyse möglich ist. Mit dem Remotesystem kann eine neue Baumaschine ihre Messdaten

an den Datensammler übermitteln. Der Datensammler nimmt die Messdaten entgegen und überträgt diese in die Eingangsdatenbank. Das Backend stellt die Meta- und Messdaten über eine Web API zur Verfügung und ermöglicht so dem Frontend, die Daten dem Benutzer in Form von Messdiagrammen oder einem virtuellen Cockpit zu präsentieren. Weitere Features wie die Maschinen-Verwaltung und das Event-Alerting runden die Möglichkeiten des Frontends ab (Abbildung 40).

Nach dieser eher technischen Beschreibung des Systems sollen die Möglichkeiten des Remotesystems anhand der Benutzeroberfläche (Abbildung 41) verdeutlicht werden. So können etwa die jeweiligen gesuchten Maschinentypen und danach die einzelne Maschine ausgewählt werden. An diesem Beispiel ist ersichtlich, dass der Ladezustand des 16-t-Elektrobagers P2 100 % beträgt und dass die Maschine gerade in Betrieb ist.

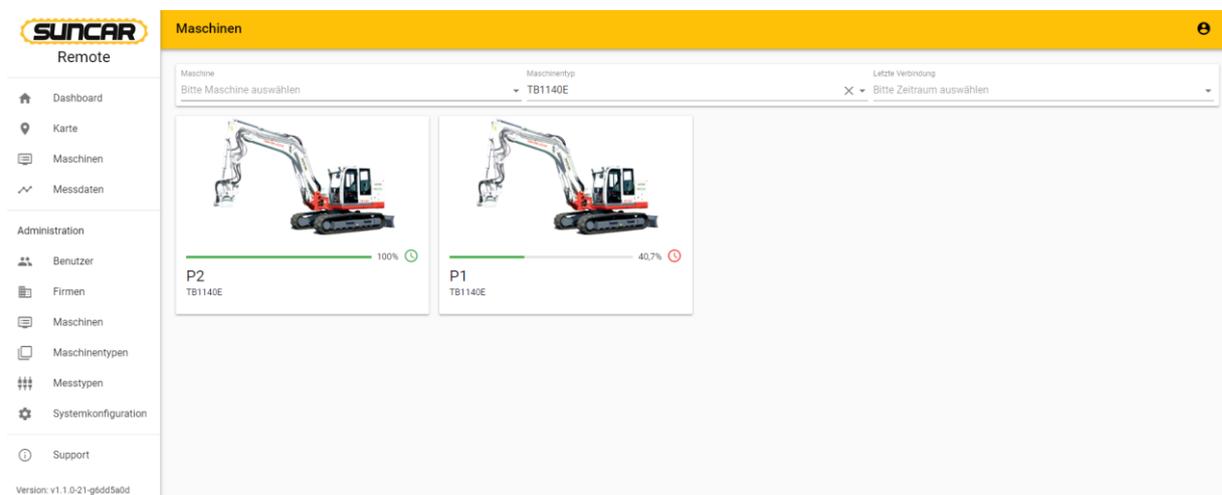


Abbildung 41: Benutzeroberfläche des eigens entwickelten SUNCAR Remotesystems

Die Abbildung 42 zeigt den letzten Standort aller Elektrobagger, welche mit dem Remotesystem ausgestattet sind und die Daten des GPS per Mobilfunknetz übermitteln konnten. Wie ersichtlich ist, befindet sich zu diesem Zeitpunkt eine der Maschinen in der Schweiz, Region Bern und die zweite in Österreich, Lauterach.

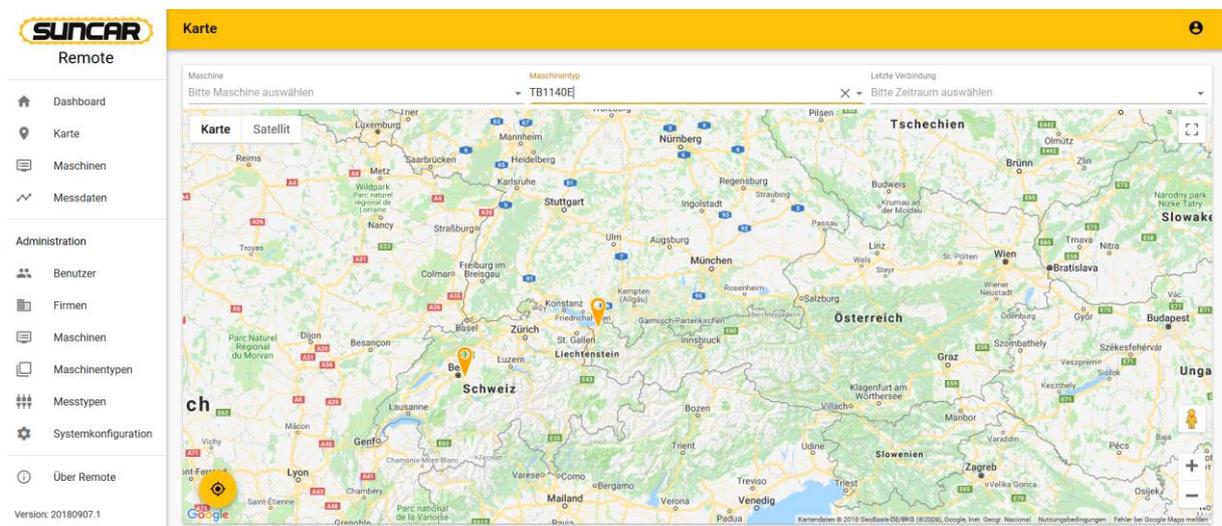


Abbildung 42: Karte mit allen 16-t-Elektrobaggern (orange: letzte GPS-Position maximal 1 Woche alt)



Danach können alle empfangenen Daten im sogenannten Cockpit ausgelesen und weiterverarbeitet werden (Abbildung 43). Dieses zeigt auf den ersten Blick einige der wichtigsten Maschinenkennwerte. Dazu gehören der Betriebsstundenzähler und der Batterieladezustand. Bei den Betriebsstunden kann zwischen Motor-, und Batteriestundenzähler unterschieden werden. Im Vergleich zum Dieselmotor wird der Zähler des Elektromotors tendenziell weniger Stunden anzeigen, da keine Leerlaufdrehzahl benötigt wird. Dies hat eine positive Auswirkung auf die Wartung und Lebensdauer des Elektromotors.

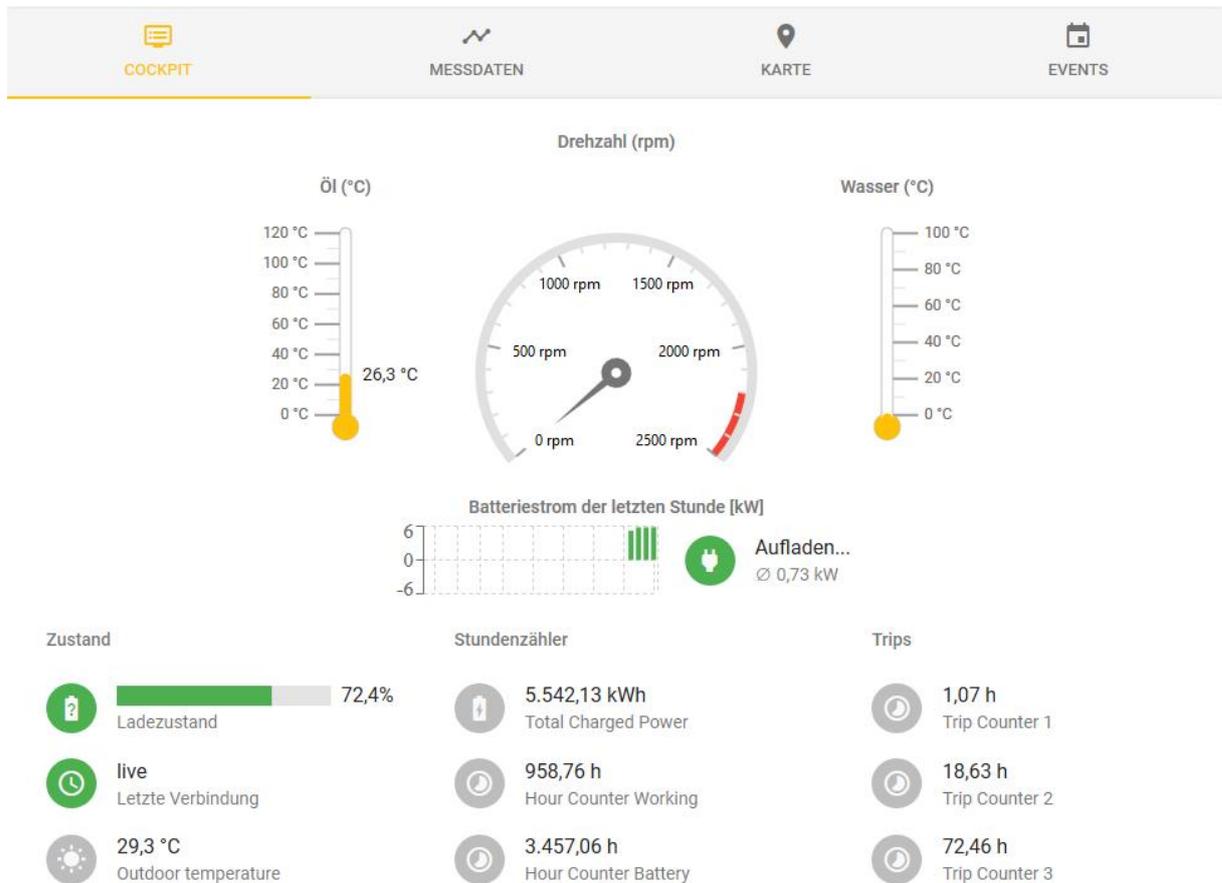


Abbildung 43: Cockpit eines 2-t-Elektrobaggers

In Abbildung 44 ist beispielsweise der Verlauf des Ladestands der Batterie (in rot) und die Geschwindigkeit des Motors (in violett) während zwei Arbeitstagen ersichtlich (vgl. horizontale Achse). Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass der 16-t-Elektrobagger in der Nacht die Batterien voll auflädt und dann, wenn der Motor in Betrieb ist, Energie gebraucht wird. Auch ist der rote Peak (Ladestatus der Batterie) während der Mittagspause sichtbar. Das Laden über die Mittagszeit führt bei normalen Arbeitstagen zu einer genügend grossen Laufzeit des 16-t-Elektrobaggers (vgl. linke vertikale Achse). Auch ist zum Beispiel gut ersichtlich, dass der Motor während der Ladezeit, wenn der Bagger ausgeschaltet ist, seine Umdrehungen pro Minute auf 0 senkt (vgl. rechte vertikale Achse). Daraus lässt sich ableiten, dass der Motor sauber den Vorgaben folgt.

Neben diesen Messwerten sind noch zahlreiche weitere Daten verfügbar, wie etwa die Temperatur der Batterie oder des Inverters, der Druck der Wärmepumpe, die Zellspannung oder die GPS-Koordinaten der Maschine. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden diese nicht vollständig aufgelistet.

Auch sei an dieser Stelle erwähnt, dass SUNCAR zu keinem Zeitpunkt der Datenbearbeitung personenbezogene Daten erhält und die Einhaltung des Datenschutzgesetzes gewährleistet ist.

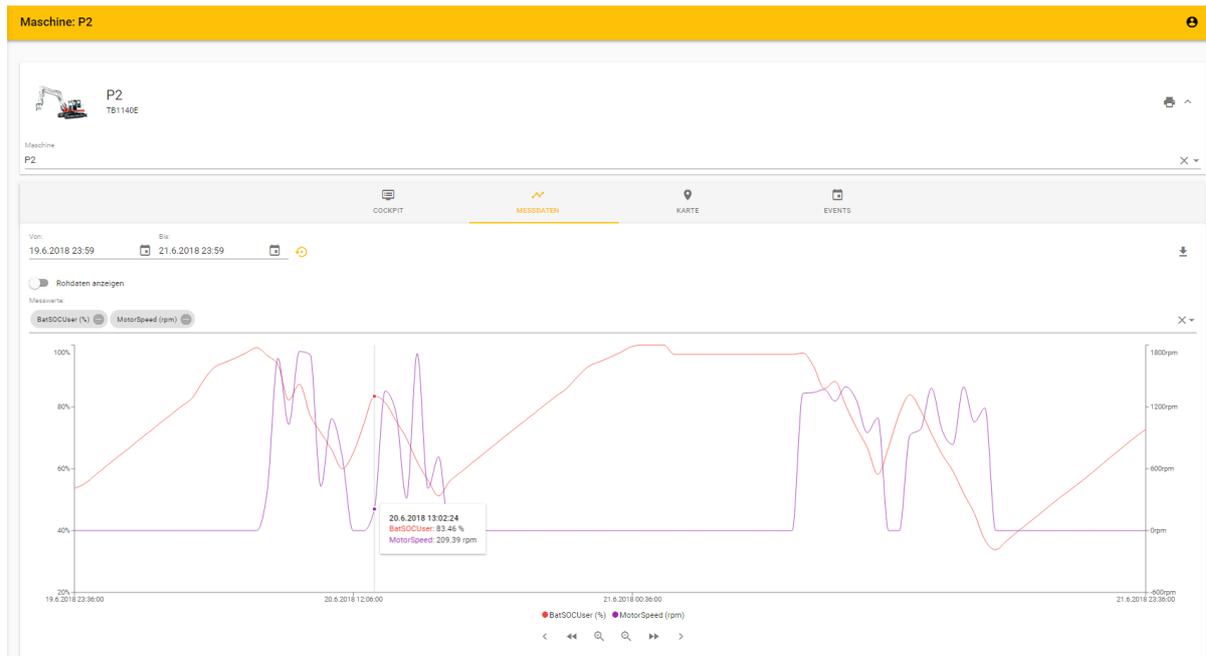


Abbildung 44: Messdaten (rot: Ladestatus der Batterie, violett: Geschwindigkeit des Motors) eines 16-t-Elektrobaggers

Durch das Remotesystem besteht weiter die Möglichkeit, sogenannte Events festzulegen. Damit kann etwa eine Nachricht generiert werden, wenn an einem Arbeitstag die Maschine um 19.00 Uhr bereits seit 30 Minuten ausgeschaltet ist, aber nicht geladen wird. Der Betreiber soll informiert werden, dass das Laden nicht richtig funktioniert oder der Benutzer etwa vergessen hat, das Ladekabel einzustecken. Damit weiss der Benutzer, dass er gegebenenfalls nochmals die Baustelle aufsuchen sollte, wenn er den Bagger am nachfolgenden Tag voll aufgeladen benötigt.



## Standard Arbeitstag

Für einen Einblick zu erhalten, werden qualitativ kurze Auszüge aus einzelnen Arbeitstagen von allen Elektrobaggern wiedergeben.

### Baustelleneinsatz 16-t-Elektrobagger

Die Abbildung 45 zeigt über das Remotesystem aufgezeichnete Messungen vom 12.08.2016 von einem typischen Arbeitstag eines 16-t-Baggers auf einer Baustelle. Die Grafik zeigt die Aktivität des Baggers durch den Verlauf des Ladestands der Batterie unter Belastung und Ladung. Unter Berücksichtigung der Ladephase über Mittag und den natürlichen Einsatzpausen ist die Energiekapazität ausreichend für diesen durchschnittlichen Arbeitstag. Weitere über den Tag gemittelte Angaben sind in Tabelle 1 ersichtlich. Bei einer mittleren Aussentemperatur von 24 °C und Sonnenschein erreichten die Kühlkreisläufe der Elektrokomponenten bereits erhöhte Temperaturen, welche durch die mangelnde Kühlung verursacht wurden.

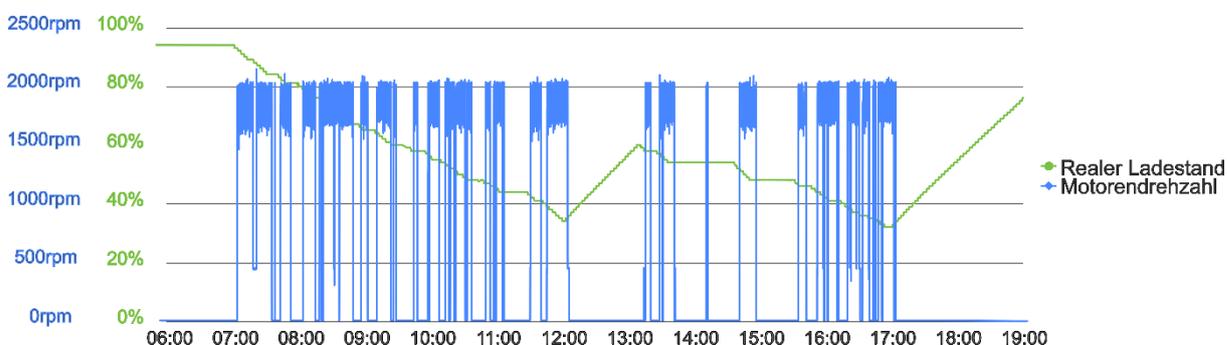


Abbildung 45: Arbeitsprofil 16-t-Elektrobaggers, unter hoher Auslastung auf der Baustelle in Döttingen

Tabelle 1: Betriebsdaten des TB1140E (16 t) während eines Arbeitstages unter hoher Belastung

Motorenlaufzeit	4 h 30 min
Durchschnittliche Leistung	33 kW
Total genutzte Kapazität	148 kWh
Mittlere Aussentemperatur	24 °C
Ladestand Abfall pro Stunde	11 %

Im Vergleich dazu sind in Tabelle 2 zwischen dem 22. und 24. August überdurchschnittliche Arbeitstage auf der Baustelle aufgezeichnet worden. Die längste Motorenlaufzeit mit rund 5.5 h wurde am 23. August gemessen. Die genutzte Kapazität überschreitet die Batteriekapazität und bedingt eine Nachladung über Mittag. Die Durchschnittsleistung beträgt an allen Arbeitstagen ungefähr 32 kW. Um längere Arbeitstage zu ermöglichen, muss die Batterie grösser dimensioniert werden.

Weitere Erkenntnisse bezüglich der Temperatur können ebenso anhand der Auswertungen erfasst werden. Die warmen Sommertage im August haben den 16-t-Elektrobagger thermisch an die maximale Belastbarkeit geführt. Die starke Erwärmung der Kühlkreisläufe verursachen keine direkten Ausfälle, aber sie beeinflussen die Lebensdauer der beanspruchten Komponenten negativ. Erfreulich ist, dass die Batterietemperatur dank dem aktiven Kühlsystem in einem optimalen Bereich gehalten werden konnte.

Tabelle 2: Betriebsdaten des TB1140E (16 t) während mehrerer Arbeitstage unter mittlerer Belastung

	Tag 1 (22.08.)	Tag 2 (23.08.)	Tag 3 (24.08.)
Motorenlaufzeit	5 h 17 min	5 h 34 min	4 h 43 min
Durchschnittliche Leistung	33 kW	30 kW	31 kW
Total genutzte Kapazität	176 kWh	178 kWh	145 kWh
Mittlere Aussentemperatur Min/Avg/Max	14 °C / 30 °C / 39 °C	18 °C / 32 °C / 45 °C	19 °C / 34 °C / 42 °C
Elektronikkomponenten Min/Avg/Max	12 °C / 58 °C / 85 °C	17 °C / 60 °C / 91 °C	19 °C / 58 °C / 87 °C
Öltemperatur Min/Avg/Max	16 °C / 57 °C / 83 °C	20 °C / 57 °C / 88 °C	22 °C / 58 °C / 85 °C
Batterietemperatur Min/Avg/Max	19 °C / 29 °C / 34 °C	19 °C / 29 °C / 34 °C	19 °C / 31 °C / 35 °C

### Baustelleneinsatz 2-t-Elektrobagger

In Abbildung 46 wird ein Arbeitsprofil des 2-t-Elektrobaggers Prototyp 2 präsentiert. Der dargestellte Wert (BatSOCReal) zeigt den ungefilterten Batterieladestand in Prozent. Dieses Arbeitsprofil zeigt den beispielhaften Umgang mit einem Elektrobagger bei hoher Auslastung. Um etwa 7:00 Uhr beginnen die Arbeiten und bis zur Pause am Vormittag wird ununterbrochen gearbeitet. Danach wird der Bagger kurz für eine gute halbe Stunde aufgeladen. Die Kapazität steigt zum Ende der Pause auf knapp 75 % und erreicht beim Start der Mittagspause ein Minimum von 12 %. Mit den installierten Ladegeräten und einer Ladeleistung von 6 kW werden nach dem Laden über den Mittag die Arbeiten mit über 40 % Kapazität wieder aufgenommen, nun aber im Kabelbetrieb. Sobald der Einsatz, ein gleichzeitiges Laden ermöglicht, kann dies ausgenutzt werden, um die Batterie während dieser Arbeitszeit, mindestens auf gleichem Niveau zu halten. Dieser Verbrauch im Kabelbetrieb ist zwischen 16:00 und 17:30 auch deutlich ersichtlich. Am Feierabend kann der Elektrobagger für den nächsten Tag wieder vollgeladen werden.

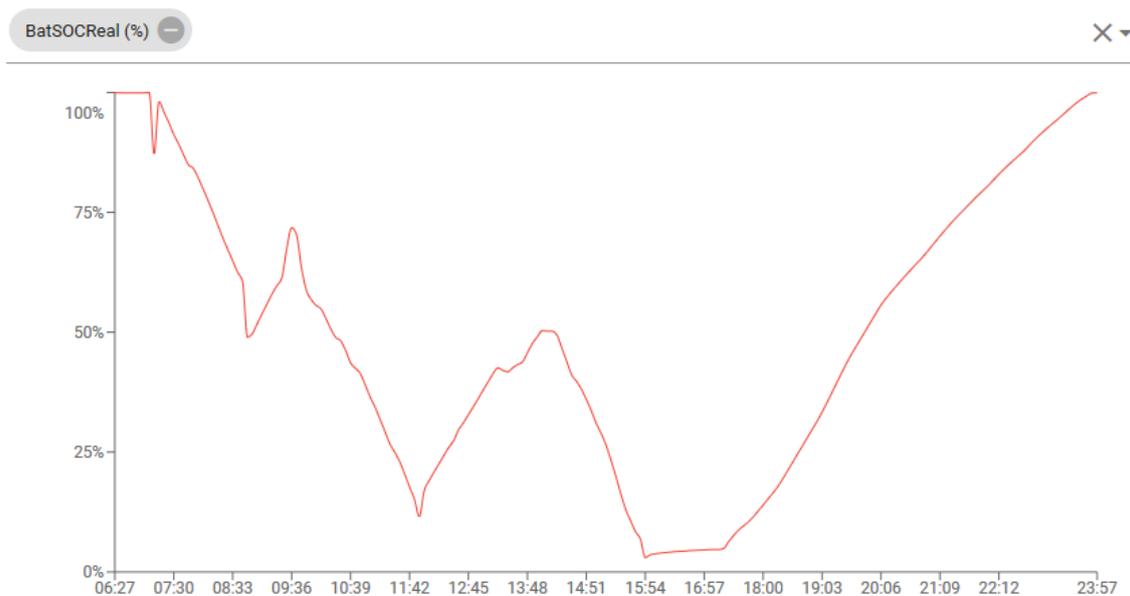


Abbildung 46: Arbeitsprofil 2-t-Elektrobagger, unter hoher Auslastung auf der Baustelle am Zürich HB



### Baustelleneinsatz 7-t-Elektrobagger

Beim 7-t-Elektrobagger wurde genug Batteriekapazität verbaut, damit das Zwischenladen während Pausen und über den Mittag normalerweise vernachlässigt werden kann. In der Abbildung 47 werden der Batterieladestand und die Motordrehzahl gezeigt. Der Elektrobagger wurde am Morgen während fast 4 h eingesetzt, bei maximaler Drehzahl von 2400 rpm. Am Mittag waren noch knapp 40 % der Kapazität vorhanden und da am Nachmittag nicht mehr viel gearbeitet wurde, reichte die Restenergie für den ganzen Arbeitstag. Über Mittag hätte bei voller Ladeleistung über 30 % wieder nachgeladen werden können. Der 7-t-Elektrobagger stellt unter Beweis, dass mit den neusten Rundzellen-Batteriesystemen hervorragende Laufzeiten erreicht werden können. Es würde sogar die Möglichkeit bestehen, diesen Elektrobagger am Morgen leer an die Steckdose zu hängen, im Kabelbetrieb gute 4 h zu arbeiten und nach der Mittagspause eine 100 % geladene Batterie zu haben.

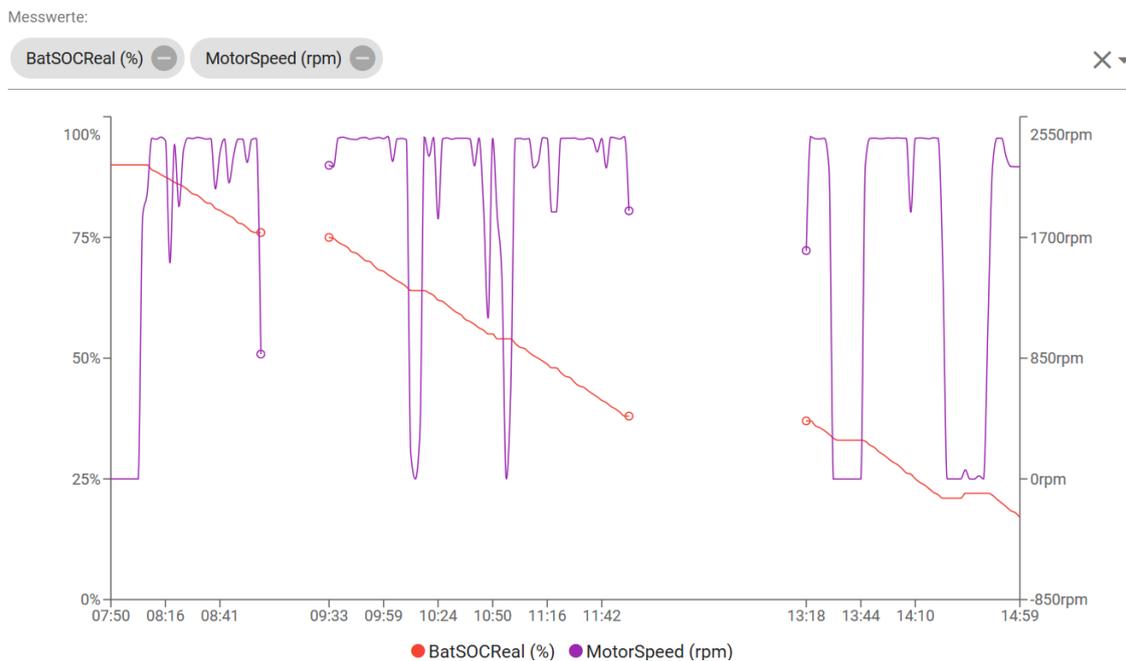


Abbildung 47: Arbeitsprofil 7-t-Elektrobagger, unter hoher Auslastung im Recyclingwerk in Wädenswil

### Einsatzbedingungen

Die Laufzeit der Elektrobagger ist unter anderem von diversen Umwelteinflüssen abhängig. Beispielsweise verursachen hohe und tiefe Umgebungstemperaturen einen Mehrverbrauch, da die Heizung oder Klimaanlage für ein aktives Thermomanagement genutzt wird. Dies stellt den mit Abstand grössten Nebenverbrauch dar. Weiter sind auch angeschaltete Scheinwerfer bei Dunkelheit und das lautstarke Radio andere kleine Verbraucher.

Die prozentuale Reduktion der Laufzeit durch diese Nebenverbraucher ist im Elektrobagger im Vergleich zu einem Diesel, aufgrund des kleineren Energiespeichers, grösser. Effektiv gesehen hat die Kühlung beim Elektrobagger die leicht bessere Effizienz, da die Drehzahl des Klimakompressors lastabhängig geregelt werden kann. Wiederum gibt ein elektrischer Antrieb nicht so viel Abwärme ab, wie ein Verbrennungsmotor, um bei jeder Gelegenheit, ohne zusätzliche Unterstützung heizen zu können.

Die unterschiedlichen Elektrobagger haben verschiedene Thermomanagement-Systeme verbaut:

- 2-t-Elektrobagger TB216E: einfaches System ohne Kabine
  - Batterie: Heizlack und Luftkühlung über Oberfläche
- 7-t-Elektrobagger TB260E: kombiniertes System
  - Innenraum: Wärmepumpe (kühlen und heizen) und Sitzheizung
  - Batterie: Wärmepumpe (kühlen und heizen)
- 16-t-Elektrobagger TB1140E: aufwändiges, kompliziertes System
  - Innenraum: Widerstands-Luftheizer, Elektrokomponenten-Abwärme Wärmetauscher, Sitzheizung, Klimaanlage
  - Batterie: Durchlauferhitzer und Luft-Wasser Wärmetauscher (Kopplung Klimaanlage)

Das kombinierte Thermomanagement des 7-t-Elektrobaggers besitzt Potential für die Zukunft. Dieses System zeichnet sich durch hohe Effizienz, dank möglicher Abwärmenutzung aus. Auf dieser Basis lässt sich eine Einschätzung über die Laufzeitreduktion bei hoher Kühl- oder Heizanforderung berechnen. An kalten Wintertagen, kann mit einer durchschnittlichen elektrischen Heizleistung von 2 kW bei einer Durchschnittsleistung des Gesamtsystems von 20 kW gerechnet werden. Dies bedeutet einen Mehrverbrauch von 10 %. Der energieintensive Kaltstart, aufgrund der sehr hohen Wärmekapazität von Batterien, soll deshalb in Hinsicht auf eine lange Laufzeit vermieden werden. Es hat sich gezeigt, dass sich die Batterien des 2-t-Elektrobagger über eine Betriebspause von 12 h der Umgebungstemperatur anpassen. Bei den grösseren Batteriemodulen dauert dies entsprechend länger. Es empfiehlt sich bei sehr kalten oder warmen Aussentemperaturen, die Elektrobagger stets an der Steckdose zu lassen, da das Thermomanagement dann die Batterietemperaturen regeln kann, und anschliessend im Einsatz keine Energie dafür aufgewendet werden muss.

Messwerte:

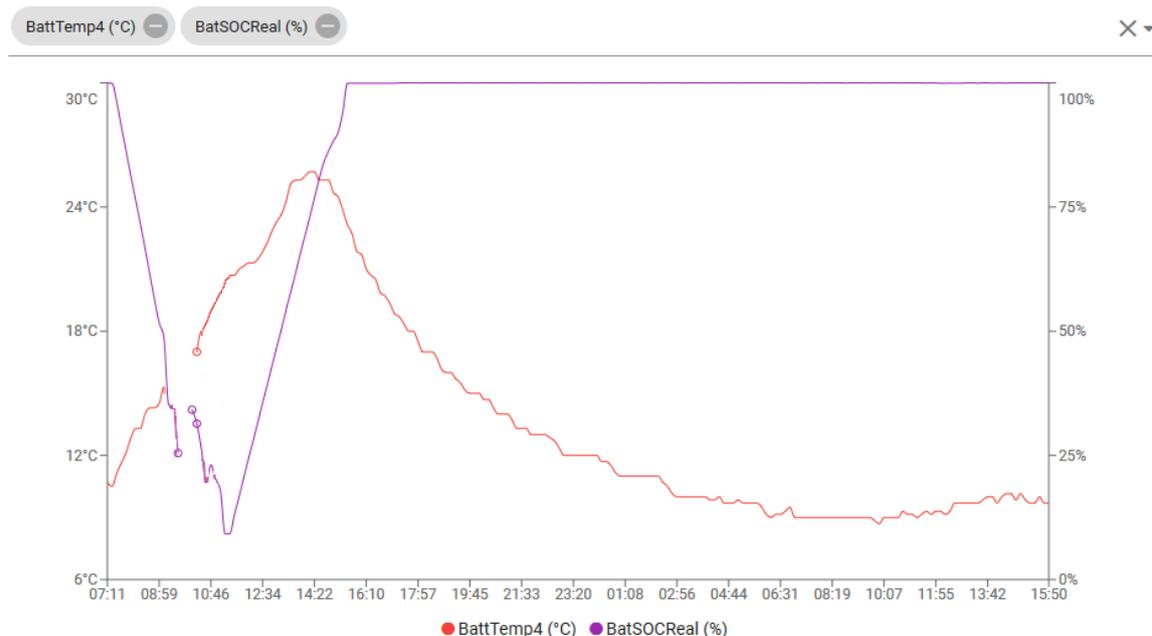


Abbildung 48: Batterietemperaturprofil 2-t-Elektrobagger, Anpassung an Umgebungstemperatur nach 12 h



## Messdatenanalyse

Für den Vergleich der Dieselmotoren mit den neu entwickelten Elektrobaggern werden verschiedene Messungen und Tests durchgeführt. Es werden wichtige Kennwerte über Nutzung, Verbrauch und Effizienz verständlich dargestellt, wobei gewisse Unsicherheiten systembedingt vorhanden bleiben.

### Berechnete Laufzeit

Mit dem vorher beschriebenen Remotesystem können Daten bezüglich der Baggerlaufzeit ermittelt werden. So lässt sich anhand der Daten ermitteln, wie lange und mit welcher Last ein Bagger effektiv pro Tag und mit welcher Last im Einsatz stand. Das heisst, es wird anhand der Motorlaufzeit ermittelt, wie lange eine Maschine effektiv pro Tag in Betrieb war. Mit diesen Daten entsteht ein Datensatz davon, wie Kunden eine Maschine einsetzen. Hier ist jedoch zu beachten, dass diese Daten nicht die maximal mögliche Laufzeit der Maschine darstellen, da meist nicht die volle Kapazität der Batterie genutzt wird.

Im Allgemeinen werden die Bagger oft am Vormittag für 30 min und über Mittag für 1 h nachgeladen und ein durchschnittlicher Arbeitstag beträgt 8 h. Abhängig davon, wie viel Ladeleistung auf der Baustelle verfügbar beziehungsweise von den internen Ladegeräten abrufbar ist, errechnet sich die aufladbare Kapazität innerhalb der Pausen und mit der gemittelten Arbeitsleistung wird ein Tagesverbrauch bestimmt. Daraus kann für die verschiedenen Elektrobagger die benötigte Zeit im Kabelbetrieb an einem Standard Arbeitstag berechnet werden.

Tabelle 3: Laufzeit und Kabelbetrieb anhand theoretisch durchschnittlicher Arbeits- und maximaler Ladeleistung

	TB216E (2 t)	TB260E (7 t)	TB1140E (16 t)
Batterie (Netto)	24 kWh	128 kWh	144 kWh
Arbeitsleistung	-6 kW	-20 kW	-45 kW
Arbeiten (8 h)	-48 kWh	-160 kWh	-360 kWh
Ladeleistung	+6 kW	+44 kW	+44 kW
Laden (1.5 h)	+9 kWh	+66 kWh	+66 kWh
Total Arbeitstag	-15 kWh	+34 kWh	-150 kWh
Kabelbetrieb	2.5 h nötig	Nicht nötig	3.5 h nötig

Der 7-t-Elektrobagger, der neuste aller Typen, garantiert eine sehr gute Laufzeit auf der Batterie. An einem normalen Arbeitstag wird kein Kabelbetrieb benötigt, sondern es wäre sogar mit 1 h Nachladen am Mittag ein 9.5 h Tag zu bewältigen. Beim 2-t-Elektrobagger ist der Kabelbetrieb im Vergleich zum 16-t-Elektrobagger kein grosser Nachteil, ein solch kleiner Elektrobagger ist einfacher und unkomplizierter mit einem Kabel zu betreiben. Zudem ist auch die Zuleitung entweder CEE16 oder CEE32 ausreichend, wobei für den 16-t-Elektrobagger ein CEE63-Anschluss und ein Verlängerungskabel bereitgestellt werden müssen.

Im täglichen Einsatz auf den heutigen Baustellen sind keine Schnellladungsmöglichkeiten vorhanden. Die Logistik und Installation für eine Baustromanschluss über 63 A ist bei den meisten Baustellen mit sehr hohem Aufwand und Kosten verbunden. In weiter Zukunft kann erwartet werden, dass auch Schnellladungssysteme grössere Baustellen erreichen, aber zurzeit bestätigt sich die Annahme, dass eine hohe installierte Batteriekapazität für die Einsatztauglichkeit eines Elektrobaggers essentiell ist.



Diese Informationen über das Nutzungsverhalten und Nachladen über die Pausen, welche dank des Remotesystems beobachtet werden konnten, sind sehr wichtig, um künftige Maschinen richtig zu dimensionieren und mit der nötigen Kapazität auszustatten. So könnten auch unter anderem kundenspezifische Bagger entwickelt werden, je nachdem, welchem der folgenden Punkte mehr Gewicht beimessen wird: eine grössere Batterie, eine schnellere Ladezeit oder tiefere Beschaffungskosten.

### Realer Durchschnittsverbrauch

Im Direktvergleich bestätigt der Elektrobagger eine erheblich grössere Energieeffizienz. Dies senkt die Betriebskosten und erweitert die Einsatzmöglichkeiten. Für eine Gegenüberstellung von Diesel- und Elektrobagger sind diese in jeder der verschiedenen Tätigkeiten aus dem Referenz-Arbeitsprofil gemessen und verglichen worden.

Tabelle 4: Standard Arbeitsprofil pro Stunde und pro Tag

Fahren	10 min	1 h 20 min
Baggern	40 min	5 h 20 min
Leerlauf	10 min	1 h 20 min
Total	1 h	8 h

Die Abbildung 49 zeigt die Durchschnittsleistung ab Energieträger (Batterie oder Diesel), welche für das Erbringen der Arbeitsleistung in der jeweiligen Disziplin erforderlich ist. Das Fahren zeigt den höchsten Verbrauch. Zuzüglich des Standard Arbeitsprofils (Tabelle 4) kann der durchschnittliche Energieverbrauch pro Stunde berechnet werden. Dieser beträgt 45.8 kWh/h für den 16-t-Ektrobagger.

### DURCHSCHNITTSLEISTUNG TB1140(E) [kWh/h]

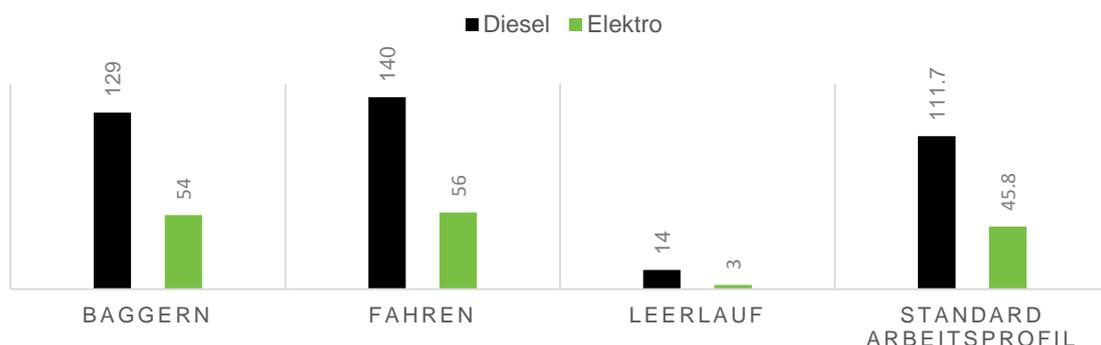


Abbildung 49: Durchschnittsleistung TB1140(E) ab Energieträger (Batterie oder Diesel), Dieselbagger berechnet mit Dieseläquivalent von 10.4 kWh/l (Brennwert)



Zu einem späteren Zeitpunkt wurden die gleichen Messungen für den Durchschnittsverbrauch des 2-t-Elektrobaggers und 7-t-Elektrobaggers durchgeführt. Der 7-t-Elektrobagger hat einen gemessenen Verbrauch im Standard-Profil von nur 14.2 kWh/h. Dies sind im Vergleich zum 16-t-Elektrobagger prozentual tiefere Werte, weil die Testbedingungen nicht gleich stark belastend waren. Zusätzlich sind die Angaben vom Dieserverbrauch ungenauer, da diese nicht mehr über das Motorsteuergerät des Baggers ausgelesen werden konnten.

### DURCHSCHNITTSLEISTUNG TB260(E) [kWh/h]

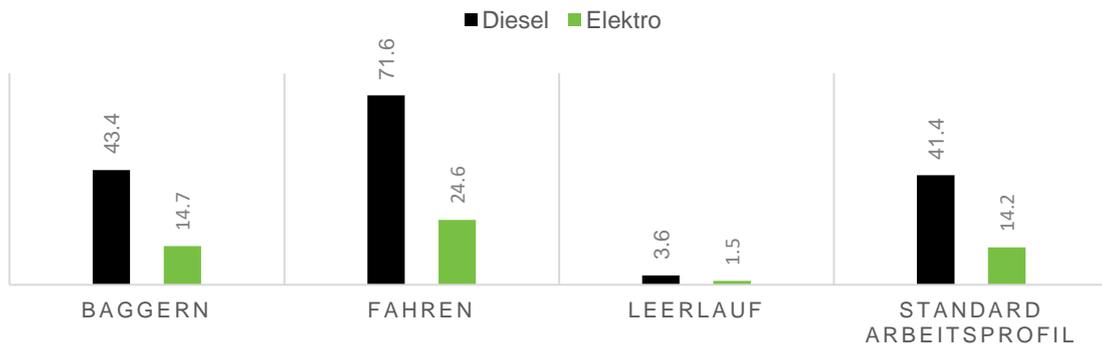


Abbildung 50: Durchschnittsleistung TB260(E) ab Energieträger (Batterie oder Diesel)

Beim 2-t-Elektrobagger wurde ein Durchschnitt von 4.7 kWh errechnet. Auch dieser liegt erfahrungsgemäss höher. Abschliessend muss angenommen werden, dass der Referenz-Arbeitstag oder die Messungen noch nicht ganz den realen Messdaten und teilweise höheren Verbräuche aus dem Remote System entsprechen. Weiter beeinflussen die Umgebungsbedingungen, vor allem die Aussen- und Betriebstemperaturen des Elektro- und Dieselantriebs die Messungen bedeutend.

### DURCHSCHNITTSLEISTUNG TB216(E) [kWh/h]

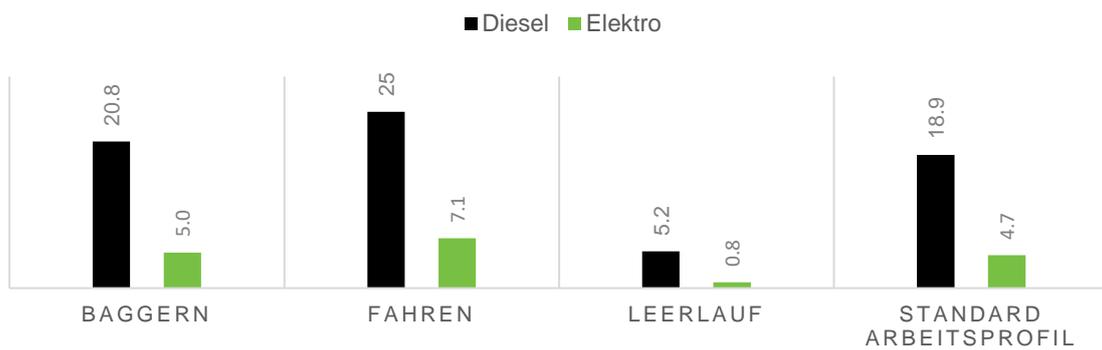


Abbildung 51: Durchschnittsleistung TB216(E) ab Energieträger (Batterie oder Diesel)



## Effizienzmessung

Die Effizienzsteigerung des Elektrobaggers um beinahe Faktor 3 ist der Effizienz des Elektromotors zu verdanken. Diese Gesamteffizienz inklusive aller Nebenaggregate erreichte beim 16-t-Elektrobagger einen Durchschnitt von 87 % bei voller Auslastung im Fahren und sank im Leerlauf auf nur 61 %, was immer noch beinahe doppelt so gross ist wie diejenige des Dieselmotors. Der Effizienzverlust beim Betrieb ohne Last ist auf die Optimierung des Motors auf erhöhte Beanspruchung zurückzuführen.

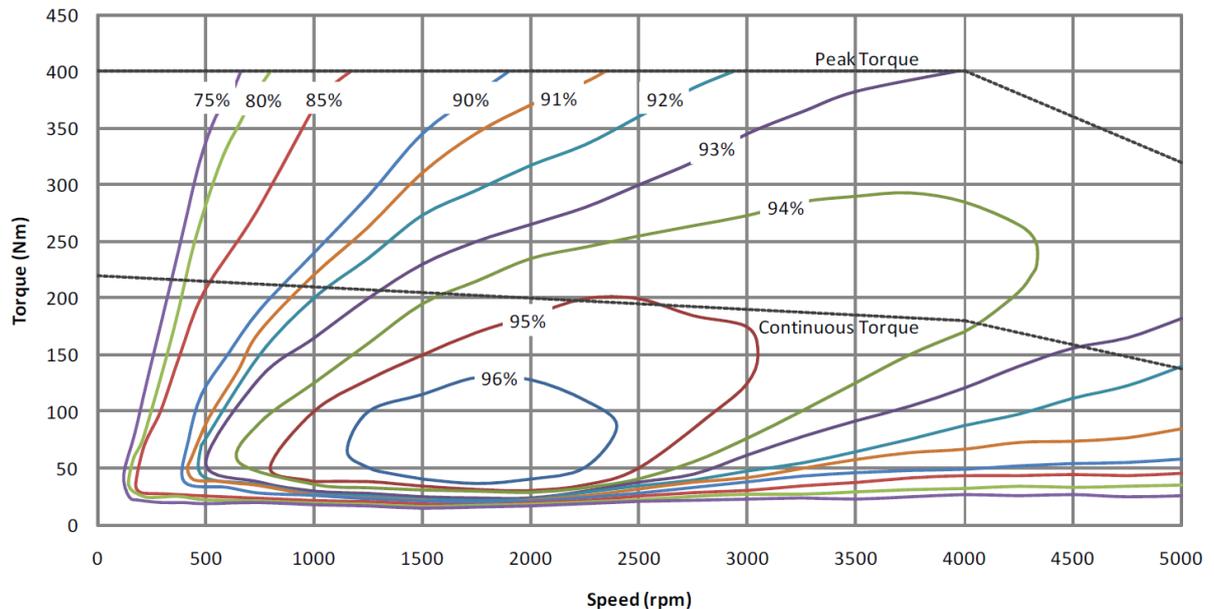


Abbildung 52: Effizienz des Elektromotors des 16-t- und 7-t-Elektrobaggers

Die Effizienz des Gesamtsystems erreichte bei hoher Belastung beim Fahren und Baggern Werte von über 80 % und lag in allen Fällen ein Mehrfaches höher als der Dieselmotors. Die tiefere Effizienz im Leerlauf fällt nicht ins Gewicht, da dort nur vergleichbar wenig Energie verbraucht wird. Die hohe Effizienz ist wichtig in den meist gefragten, leistungsstarken Betriebspunkten.

Tabelle 5: Gesamteffizienz der Elektrobagger berechnet aus Batterie- und Verlustleistung

Effizienz	TB216E (2 t)	TB260E (7 t)	TB1140E (16 t)
Fahren	89 %	85 %	87 %
Baggern	86 %	80 %	85 %
Leerlauf	48 %	54 %	61 %



### Lärmmessungen

Es wurde für die stationären Disziplinen Baggern und Leerlauf eine Lärmpegelmessung durchgeführt. Die Messpunkte befanden sich auf einer Halbkugelhüllfläche mit Radius 10 m. Schalldruckpegel an weiteren Radien und der Schalleistungspegel können rechnerisch ermittelt werden.

Obwohl die Interaktionsgeräusche mit der Umgebung dieselben sind, zeigt der Elektrobagger im Schnitt eine geringere Lärmbelastung, da der Elektromotor praktisch keine Lärmemissionen verursacht. Besonders im Leerlauf ist der Elektrobagger deutlich leiser (Tabelle 6). Im effektiven Einsatz wird beim Elektrobagger nach einem Stillstand von mehr als 3 min eine automatische Abschaltung des Motors aktiv, was die Emissionen weiter senkt.



Abbildung 53: Lärmmessungen, Messungen des A-bewerteten Schallpegels an drei Messpunkten

Bei den 2-t- und 7-t-Elektrobaggern ist auch ein deutlich kleinerer Schalleistungspegel gemessen worden. Die Geräusche beim Elektrobagger entstehen durch die Hydraulikpumpe, welche stets die Originale ist und neu vom Elektromotor angetrieben wird. Mit einem neuen Hydrauliksystem mit integriertem Lastmanagement, könnte die Drehzahl des Elektromotors gesenkt werden und damit verbunden auch die Lärmbelastung.

Tabelle 6: Schallpegelmessungen für die Disziplinen Baggern und Leerlauf. Pegel in unmittelbarer Nähe der Schallquelle. Die Schallquelle der Vergleichsgeräusche ist jeweils als in typischer Entfernung zu interpretieren.

	<b>Schalleistungspegel Elektrobagger TB1140E (16 t)</b>	<b>Schalleistungspegel Dieselbagger TB1140</b>
Baggern	90dBA (Lastwagen)	100dBA (Disco, 1m vom Lautsprecher)
Leerlauf	82dBA (Telefonläuten)	87dBA (Lastwagen)

### Vibrationsmessungen

Um Erfahrungswerte zu erhalten, welche Vibrationsbelastungen an einem Elektrobagger auftreten, wurden Messungen mit Beschleunigungssensoren durchgeführt. Da die Messungen im Betrieb auf einer Baustelle durchgeführt wurden, konnten reale Belastungen gemessen werden. Als erstes wurden die Sensoren auf der Maschine in Betrieb genommen. Anschliessend wurden die Beschleunigungen am Dieselmotor vor und nach der Motordämpfung während dem Betrieb gemessen. Dies sollte einerseits dem Testen der Sensoren dienen und andererseits eine Aussage darüber erlauben, wie das Dämpfungspotential einer gängigen Dämpfung einzuordnen ist.

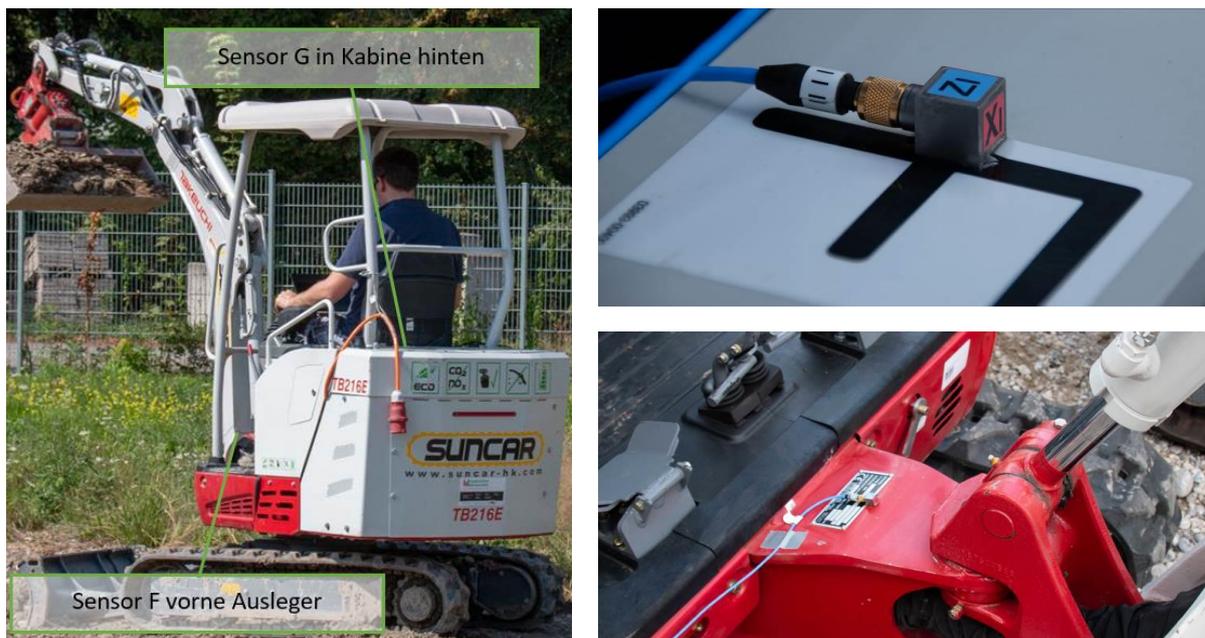


Abbildung 54: Vibrationsmessungen am 2-t-Elektrobagger, Sensor G (oben rechts), Sensor F (unten rechts)

Bei den Messungen wurden Beschleunigungssensoren eingesetzt, welche piezoelektrisch in alle drei Achsenrichtungen messen. Die Betrachtung der Vibrationen in den gängigen Fahrzeugnormen geht bis zu einer Frequenz von 2 kHz. Das Einwirken einer hohen Schwingungsenergie erhöht die Wahrscheinlichkeit eines Komponentenschadens durch Lockern von Verbindungen oder Rissbildung. Ein Mass um Vibrationen einschätzen zu können, ist die spektrale Leistungsdichte (PSD).

Alle drei Typen des Elektrobaggers wurden genauer analysiert. Gewisse hohe Belastungen beim Baggern werden nur erreicht, wenn die Maschine nicht zulässig bedient wird. Das bedeutet beispielsweise, wenn die Schaufel mit Anlauf auf harten Untergrund geschlagen wird, oder die ganze Grundmaschine angehoben und anschliessend fallen gelassen wird. Ansonsten treten starke Vibrationen bei der Nutzung von Anbaugeräten wie einem Hammer auf.

In Abbildung 55 wird ein Auszug aus dem Messbericht gezeigt, in dem das Fahren des 2-t-Elektrobaggers betrachtet wird. Die maximalen Beschleunigungswerte ergeben sich in der Hochachse (Z-Richtung) des Baggers. Die Vibrationen entlang der Längsachse (X-Richtung) weisen, wie erwartet, die zweithöchsten Werte auf. Die Belastungsspektren PSD der Abbildung 56 wurden mit den Belastungsgrenzen aus den gängigen Fahrzeugnormen verglichen.

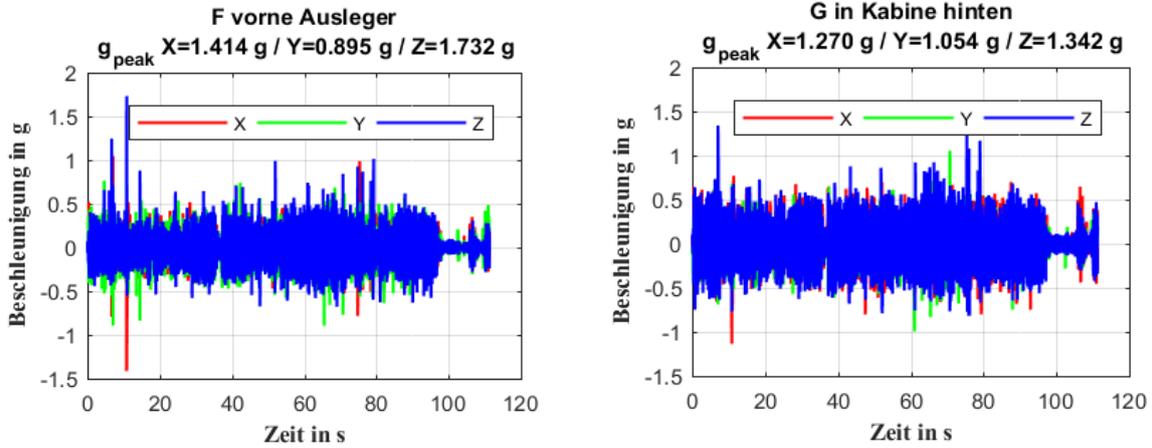


Abbildung 55: Beschleunigungsmessungen beim Fahren mit dem 2-t-Elektrobagger

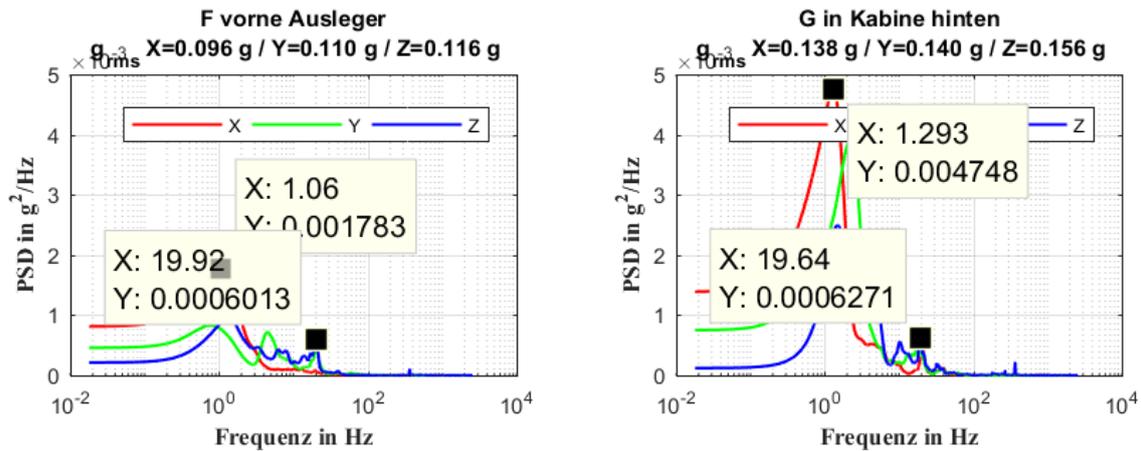


Abbildung 56: Frequenzanalyse der Beschleunigungsmessungen beim Fahren mit dem 2-t-Elektrobagger

Die Messungen dienen dazu, Vibrationen und Stöße aufzuzeichnen, welche im Betrieb an verbauten Komponenten als Belastung erwartet werden müssen. Die Analyse der aufgetretenen Belastungen kann als Basis zur Auslegung von Dämpferelementen dienen. Mit den Messdaten haben sich die verwendeten Elektrokompenten, Batterien und Konstruktionen validieren lassen.



## Ökologie

Die Elektrobagger weisen im Vergleich mit konventionellen dieselbetriebenen Baggern entscheidende Vorteile in der Umweltfreundlichkeit auf. Der Elektroantrieb spart mit seiner 2.5-fachen Effizienz gegenüber dem Dieselmotor massgebend Ressourcen ein. Zudem läuft er nur dann, wenn der Maschinist auch tatsächlich mit dem Bagger arbeitet. Der Elektromotor verschwendet folglich keine Energie aufgrund von Leerlaufphasen. Auch die Aufwärmphasen entfallen.

Neben der Ressourceneffizienz punkten die Elektrobagger mit der massiven Reduktion von Abgasen dank ihrem emissionsfreien Betrieb. Beim Betrieb durch Schweizer Strom aus erneuerbaren Energien hat der 16-t-Elektrobagger, auf die gesamte Lebensdauer von 12'000 Betriebsstunden gerechnet, einen um 93 % geringeren Ausstoss von CO<sub>2e</sub> und spart so 415 t CO<sub>2e</sub> ein.

Die CO<sub>2e</sub>-Emissionen des 16-t-Elektrobaggers setzen sich wie folgt zusammen:

- 10'000 kg für die Herstellung der Basismaschine (geschätzt)<sup>2</sup>
- 17'000 kg für die Herstellung der Li-Ion-Batterie (100 kg/kWh Kapazität)<sup>3</sup>
- 6'240 kg für die Herstellung und den Transport von Schweizer Strom aus erneuerbaren Energien (13 g/kWh)<sup>4</sup>

Ergibt Total: 33 t CO<sub>2e</sub>

Die CO<sub>2e</sub> Emissionen des originalen Dieselbaggers setzen sich wie folgt zusammen:

- 10'000 kg für die Herstellung der Basismaschine
- 77'760 kg für die Herstellung des Diesels<sup>5</sup>
- 360'000 kg im Betrieb<sup>6</sup>

Ergibt Total: 448 t CO<sub>2e</sub>

Die Auflistung und Gegenüberstellung zeigt, dass die Herstellung und Aufbereitung vom Dieseltreibstoff deutlich mehr Belastung darstellen als die Produktion der Li-Ionen Batterien.

---

<sup>2</sup> [https://www.mobilservice.ch/admin/data/files/news\\_section\\_file/file/2505/die-vergessenen-faktoren-der-co2-bilanzen.pdf?lm=1418801187](https://www.mobilservice.ch/admin/data/files/news_section_file/file/2505/die-vergessenen-faktoren-der-co2-bilanzen.pdf?lm=1418801187), VCÖ: Gesamtbilanz Verkehr - Rohstoffe, Fahrzeuge, Infrastruktur, 1/2011 (S. 1 Factsheet)

<sup>3</sup> ETH & IWF (Stefan Schneider): Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen 18 t Lastwagens E-FORCE von Feldschlösschen Getränke AG, August 2014 (S.17)

<sup>4</sup> [http://treeze.ch/fileadmin/user\\_upload/downloads/589-Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2014-v3.0.pdf](http://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/589-Umweltbilanz-Strommix-Schweiz-2014-v3.0.pdf) (05.11.2018), treeze (Annika Messmer, Rolf Frischknecht): Umweltbilanz Strommix Schweiz 2014, 7. Dezember 2016, Uster (S. 21 & 33)

<sup>5</sup> ETH & IWF (Stefan Schneider): Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen 18 t Lastwagens E-FORCE von Feldschlösschen Getränke AG, August 2014 (S.15)

<sup>6</sup> <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4306.pdf>, Umweltbundesamt (Martin Schmied, Wolfram Knörr): Carbon Footprint - Teilgutachten "Monitoring für den CO<sub>2</sub>-Ausstoss in der Logistikkette", Dessau-Rosslau, 2012 (S. 16)

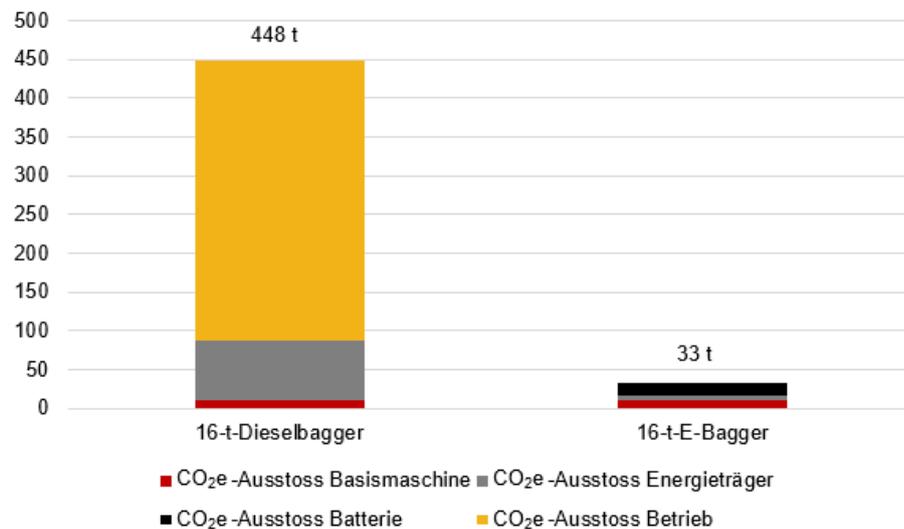


Abbildung 57: Vergleich CO<sub>2</sub>e-Emissionen des 16-t-Dieselbaggers und des 16-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit Schweizer Strom aus erneuerbaren Energien über die gesamte Lebensdauer in t

Beim Betrieb mit Schweizer Strom aus erneuerbaren Energien hat der 7-t-Elektrobagger, auf die gesamte Lebensdauer von 10'000 Betriebsstunden gerechnet, einen um 86 % geringeren Ausstoss von CO<sub>2</sub>e und spart so 170 t CO<sub>2</sub>e ein.

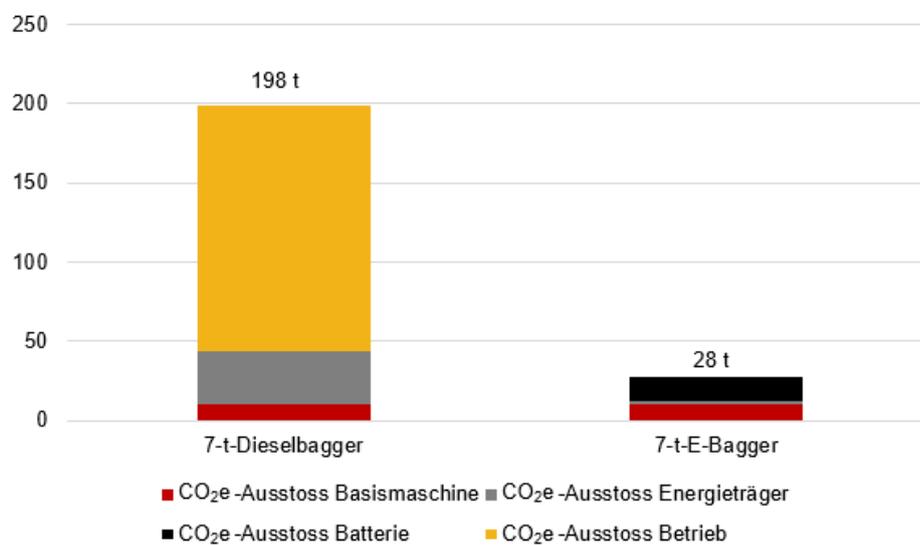


Abbildung 58: Vergleich CO<sub>2</sub>e-Emissionen des 7-t-Dieselbaggers und des 7-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit Schweizer Strom über die gesamte Lebensdauer aus erneuerbaren Energien in t

Beim Betrieb mit Schweizer Strom aus erneuerbaren Energien hat der 2-t-Elektrobagger, auf die gesamte Lebensdauer von 6'000 Betriebsstunden gerechnet, einen um 65 % geringeren Ausstoss von CO<sub>2</sub>e und spart so 30 t CO<sub>2</sub>e ein.

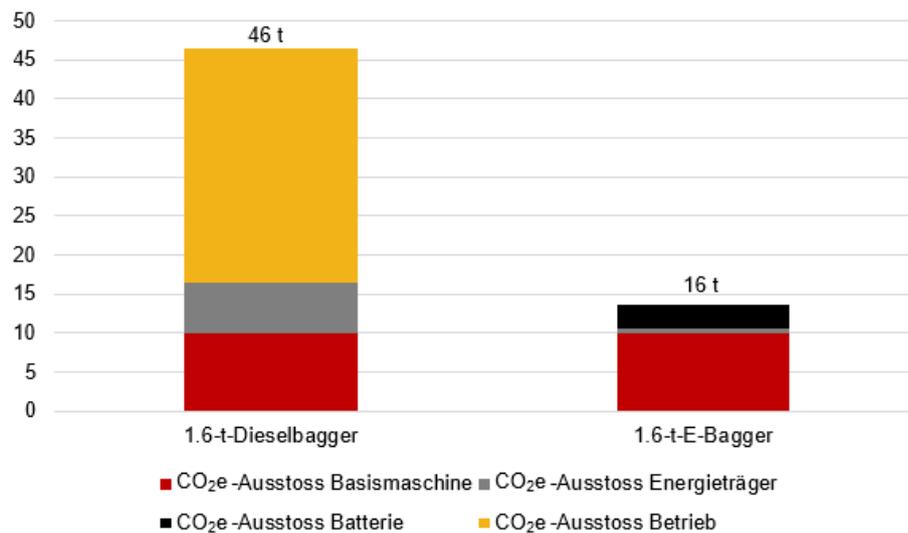


Abbildung 59: Vergleich CO<sub>2</sub>e-Emissionen des 2-t-Dieselbaggers und des 2-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit Schweizer Strom aus erneuerbaren Energien über die gesamte Lebensdauer in t

Für die Berechnung der CO<sub>2</sub>e-Emissionen des Stroms ist mit Schweizer Strom aus erneuerbaren Energien mit 13 g CO<sub>2</sub>e/kWh gerechnet worden. Dieser Wert ist erstaunlich tief und lässt sich dank der sauberen schweizerischen Wasserkraft erklären. Wenn in der Kalkulationsvorlage stattdessen mit Schweizer Verbraucher-Strommix mit 181.5 g CO<sub>2</sub>e/kWh gerechnet wird, spart der 7-t-Bagger nicht mehr 86 %, sondern 68 % und 135 t CO<sub>2</sub>e ein (Abbildung 60). Wenn stattdessen mit dem europäischen ENTSO-E-Strommix und 466 g CO<sub>2</sub>e/kWh gerechnet wird, spart der der 7-t-Bagger nicht mehr 86 %, sondern 39 % und 77 t CO<sub>2</sub>e ein (siehe Abbildung 61: Vergleich CO<sub>2</sub>e-Emissionen des 7-t-Dieselbaggers und des 7-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit europäischen ENTSO-E-Strom über die gesamte Lebensdauer in t). Die Vergleiche mit verschiedenen Stromprodukten zeigen, dass die Wahl des Stroms für die Ökobilanz äusserst relevant ist. Die Vergleiche zeigen aber auch, dass der Elektrobagger, auch bei Nicht-Ökostrom, umwelttechnisch gesehen noch immer deutlich besser abschneidet als der Dieselbagger.

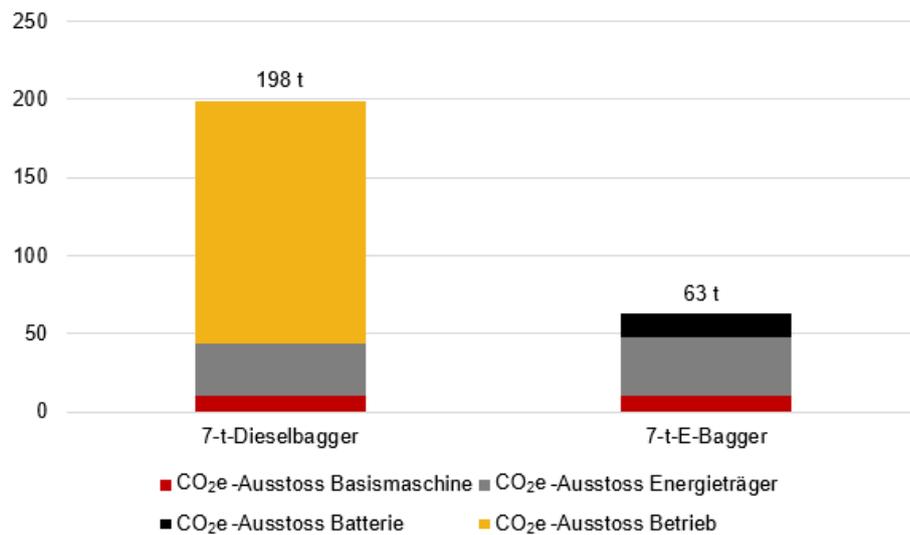


Abbildung 60: Vergleich CO<sub>2</sub>e-Emissionen des 7-t-Dieselbaggers und des 7-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit Schweizer Verbraucher-Strommix über die gesamte Lebensdauer in t

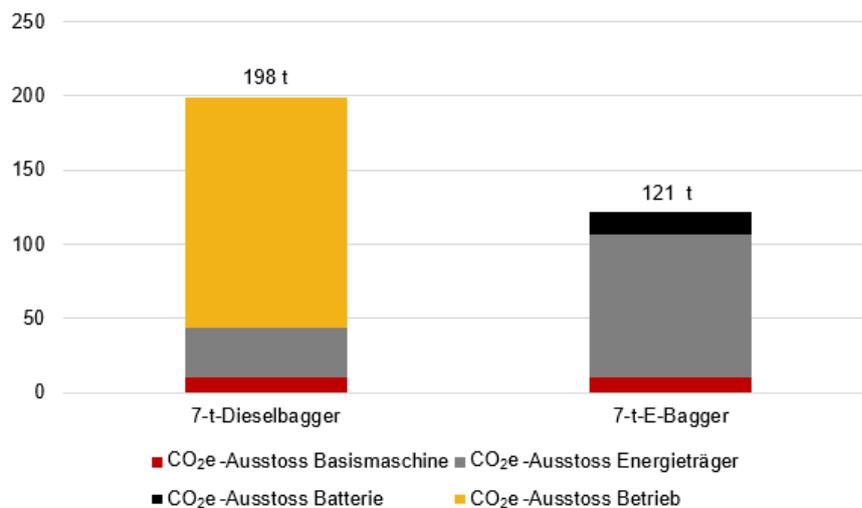


Abbildung 61: Vergleich CO<sub>2</sub>e-Emissionen des 7-t-Dieselbaggers und des 7-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit europäischen ENTSO-E-Strom über die gesamte Lebensdauer in t

Im Vergleich zu Elektroautos machen Elektrobaumaschinen normalerweise mehr Betriebsstunden. Daraus ergibt sich ein weiterer Vorteil in der ökologischen Bilanz. Jede weitere Betriebsstunde wirkt sich positiv auf diese Bilanz aus. Dank der hohen Effizienzsteigerung bei elektro-hydraulischen Antriebssystemen ist es möglich grosse Emissionseinsparungen zu machen. Zu bemerken ist, dass neben dem CO<sub>2</sub> auch bedeutende Mengen an Feinstaub, und giftigen NO<sub>x</sub> Gasen nicht in die Atmosphäre gelangen.

## Ökonomie

Zwar liegt der Anschaffungspreis eines Elektrobaggers über demjenigen eines vergleichbaren Dieselmotors, doch die Gesamtkostenrechnung zeigt, dass die tieferen Kosten im Betrieb und bei der Wartung des Elektrobaggers die anfängliche Mehrinvestition, je nach Baggermodell und Anzahl Batteriemodulen, kompensieren oder nahezu kompensieren. Die Betriebskosten eines Elektrobaggers sind (bei einem gleichbleibenden Dieselpreis von 1.77 CHF/l<sup>7</sup> und einem Strompreis von 0.159 CHF/kWh<sup>8</sup>) rund 70 % unter denjenigen eines vergleichbaren Dieselmotors. Der Elektromotor ist zudem wartungsarm, weshalb bei der Wartung nochmals etwa 35 % der Kosten eingespart werden können. Insbesondere die Kosten für die teuren Partikelfilter entfallen. Die Wirtschaftlichkeit eines Elektrobaggers kann zudem durch den Verkauf von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten zusätzlich verbessert werden.

Die Anschaffungskosten für einen batterieelektrischen Bagger sind in jedem Fall einigesimal höher als diese eines Dieselmotors. Die Basismaschine der Marke Takeuchi stammt aus der Grossserienproduktion aus Japan und wird per Schifftransport nach Europa importiert. Die Mehrkosten des Elektrobaggers entstehen durch die Arbeitsstunden und Materialkosten. Der Preis der Elektrobagger wird in Zukunft aber deutlich tiefer sein, da mit einer Halbierung des Batteriepreises in den nächsten zehn Jahren gerechnet wird.

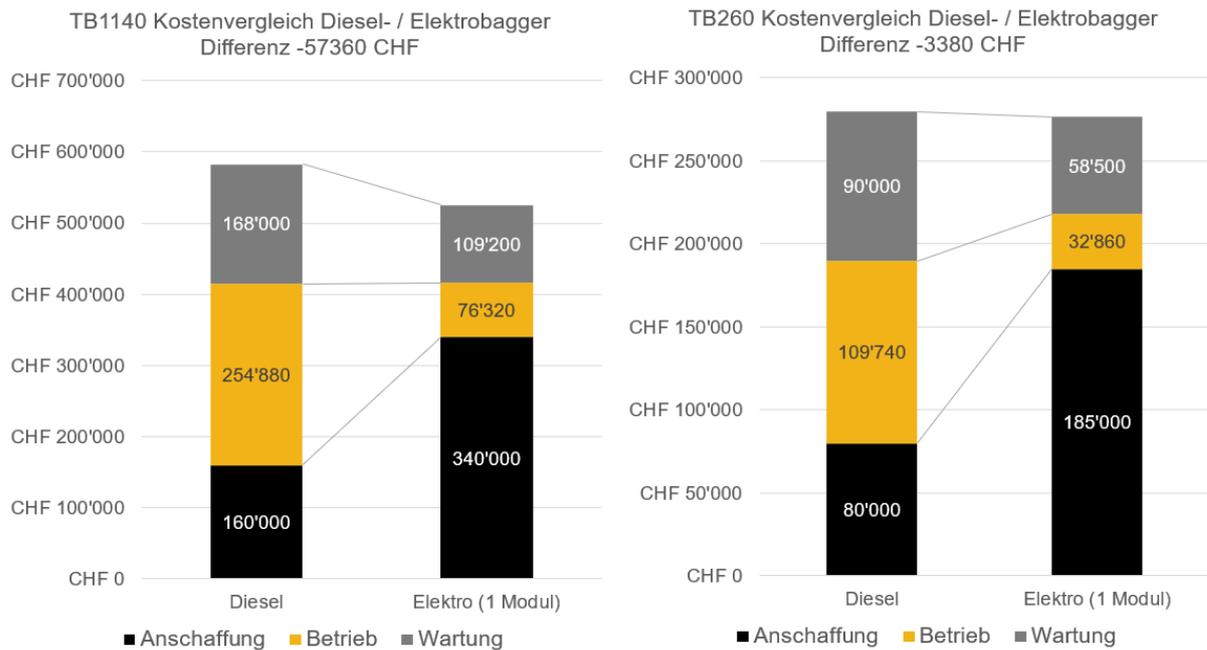


Abbildung 62: Betrachtung der Gesamtkosten für den Betrieb der 16-t- und 7-t- Elektrobagger

<sup>7</sup> [https://www.shell.ch/de\\_ch/autofahrer/shell-treibstoffe/shell-treibstoffpreise.html](https://www.shell.ch/de_ch/autofahrer/shell-treibstoffe/shell-treibstoffpreise.html) (27.06.2018): Durchschnittliche monatliche Treibstoffpreise 2018, Mai 2018

<sup>8</sup> <https://www.ewz.ch/content/dam/ewz/services/dokumentencenter/energie-beziehen/dokumente/gruener-strom-fuer-mein-unternehmen/stromtarif-2018-zh-geschaefskunden.pdf> (27.06.2018)

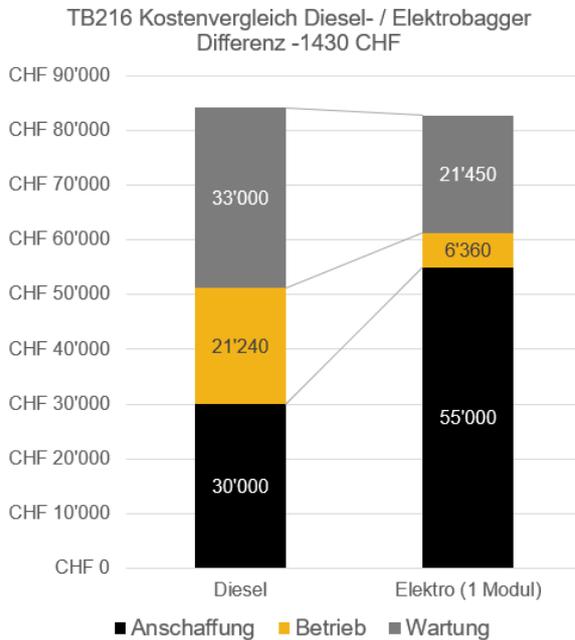


Abbildung 63: Betrachtung der Gesamtkosten für den Betrieb des 2-t-Elektrobaggers

Bei den Materialkosten ist die sensitivste Komponente, die Li-Ion-Batterie, gefolgt von Elektromotor, Wechselrichter und Ladegeräten. Um die Laufzeit von einem ganzen Arbeitstag zu ermöglichen, werden Kosten für die Batterie im Umfang der Anschaffungskosten des Dieselmotors benötigt. Beispielsweise kosten die 150 kWh des 7-t-Elektrobaggers etwa CHF 82'500. In der Abbildung 62 und Abbildung 63 werden die Berechnungen nur mit der Bestückung von einem Batterietrog, beziehungsweise einem Drittel der Laufzeit präsentiert. Die Arbeitsstunden für den Umbau beinhaltet das Demontieren des Dieselmotors und die Vorbereitungsarbeiten und Montage der neuen Baugruppen. Die vorliegenden Kosten werden mit Kleinserien von circa zehn Stück erreicht. Bei einer Stückzahl von 100 Elektrobaggen könnte mit 20-30 % Kostenreduktion für die Anschaffung gerechnet werden. Um langfristig die Kosten optimieren zu können, muss mit einem Hersteller einer Basismaschine zusammengearbeitet werden. Mindestens müssen die Vorbereitungen am Chassis gemacht sein und die nicht benötigten Teile weggelassen werden, wodurch etwa weitere 10 % gespart werden könnten.

Mit einer hohen Anzahl von Betriebsstunden, rechnet sich die Anfangsinvestition umso schneller. Es wird berechnet, dass die Zyklenfestigkeit der Batterie bis zum Lebensende 80 % beträgt. Wenn ein Elektrobagger mit nur einem Batterietrog ausgestattet ist, wird der Kabelbetrieb umso mehr benötigt und somit die Batterielebensdauer geschont.

Zurzeit sind die Anschaffungskosten mit ungefähr dem mehr als doppelten Preis der originalen Dieselmotors zu hoch. Bei einer Serie von 100 Maschinen könnte ein Verkaufspreis unterhalb dem doppelten Baggerpreis angeboten werden. Wie die aktuelle Resonanz der Baumaschinenbranche zeigt, wären Elektrobagger zu einem solchen Preis verkäuflich. Um die Technologie für den Massenmarkt zugänglich zu machen, muss ein Mehrpreis bis maximal 50 % erzielt werden.



Durch den Elektroantrieb und der dementsprechend hohen Lebenserwartung der Leistungskomponenten kann mit weniger Wartungskosten gerechnet werden. Im Vergleich zur Wartung von Dieselmotoren wird eine Mindestausbildung für den Umgang mit batterieelektrischen Fahrzeugen benötigt. Bei der Arbeit an einem Hochvoltfahrzeug mit einer Spannung grösser 30 VAC bzw. 60 VDC müssen spezielle Vorkehrungen für die Sicherheit getroffen werden. In den Anfängen werden deshalb Mehrkosten für die Service- und Wartungsarbeiten fällig, bis die Werkstätten und Mitarbeiter entsprechend ausgerüstet und ausgebildet sind.

Grundsätzlich könnte die heutige Technologie für die Grossserienproduktion verwendet werden. In den nächsten Jahren wird es sehr wahrscheinlich auf dem E-Mobilitätsmarkt noch einige grosse Veränderungen geben. Es kristallisieren sich bereits heute zuverlässige Lieferanten heraus, wobei im Bereich der Batterien noch die grösste Unsicherheit besteht.



## Kommunikation

Die Elektrobagger erwecken immer stärker das Interesse der Medien. Die SUNCAR Elektrobagger wurden mehrfach öffentlich ausgezeichnet sowie an diversen Messen und verschiedenen Veranstaltungen ausgestellt beziehungsweise thematisiert. Weiter erschienen in Medien (gedruckt und digital) Medienmitteilungen, Artikel und Interviews zu den Elektrobagger. (genauere Angaben auf Anfrage)

- Ausstellung des ersten Prototypen an der bauma 2016 (31. Weltleitmesse für Baumaschinen, über 580'000 Besucher aus 200 Ländern und 3'423 Aussteller)
- Auszeichnung mit dem europäischem Solarpreis 2015 (Kategorie Transportsysteme)
- Auszeichnung mit dem schweizerischen Solarpreis 2015 (Kategorie Energieanlagen)
- Ausstellung Tag der Sonne in Grabs, Mai 2016 (schweizerische Veranstaltung rund um die Sonnenenergie)
- Demonstrationstag von SUNCAR HK AG, Juli 2016
- Artikel in der GaLaBau 4/16, Baggern mit Lithium-Ionen-Power
- Broschüre von Akasol, SUNCAR 16-t-Elektrobagger
- Interview und Bericht von rro über Elektrobagger in Saas-Fee: Bagger unter Strom
- Podiumsgespräch in Zermatt mit Dr. David Dyntar
- Artikel in Report.at 04/2017: Wir erwarten ein deutliches Marktwachstum
- Artikel in der GalaBau 07/2017: Schön grün mit Strom (Elektrobaumaschinen)
- Präsentation Elektrobagger in Paris Stadt FR und Stockstadt DE (bei Kiesel)
- Präsentation Elektrobagger am E-Mobilitätstag in Nenzing AT, 9. Juni 2017
- Präsentation Elektrobagger am E-Mobilitätstag in Au/Schopperrau AT, 6/7. Oktober 2017
- Tagung inspire / ETH Zürich, Batterien für die E-Mobilität, 1. Februar 2018 mit Dr. David Dyntar
- Präsentation Elektrobagger 2-t-Elektrobagger in Norwegen, 2. Mai 2018 (bei NASTA)
- Präsentation Rechenzentrum Gais, 30. Mai 2018
- Publikation Medienmitteilung «Die Huppenkothen Baumaschinen AG ergänzt ihr SUNCAR HK Elektrobagger-Portfolio», 30. Mai 2018: diverse Publikationen
  - Artikel in PresseBox, 30. Mai 2018
  - Artikel in LECTURA Press, 30. Mai 2018
  - Artikel in sses.ch (Schweizerische Vereinigung für Sonnenenergie), 30. Mai 2018
  - Artikel in emobilitaet.online, 31. Mai 2018



- Artikel in stromschnell.de, 31. Mai 2018
- Artikel in Baublatt Österreich, Juni 2018
- Artikel in ee-news, 1. Juni 2018
- Artikel in fontavis.ch, 1. Juni 2018
- Artikel in oekonews.at, 4. Juni 2018
- Artikel in electrive.net, 4. Juni 2018
- Artikel in emove360, 5. Juni 2018
- Artikel in schweizerbauwirtschaft.ch, 6. Juni 2018
- EKZ News, Blue Magazin, 7. Juni 2018
- Präsentation Elektrobagger an der HSR Rapperswil, 15. Juni 2018
- Messe Intersolar mit Akasol 16-t-Elektrobagger, 20-22. Juni 2018, München DE
- Diplomprüfung KZEI Winterthur, Präsenz mit 2-t-Elektrobagger und Spiel «heisser Draht», 5. Juli 2018
- Präsentation Elektrobagger am Tag der offenen Tür «Mit Grüscher Solarstrom durch Graubünden», 8. September 2018



## Ausblick

Die Elektrifizierung von Baumaschinen rückt bei vielen Herstellern in den Fokus. Das Ziel ist es die Gesamtkosten des Betriebs im Vergleich zum Dieselantrieb zu senken. Es öffnen sich auch neue Märkte, da sich ein Elektrobagger dank Emissionsfreiheit und Lärmreduktion für diverse spezielle Einsätze eignet. Wie genau die Bagger der Zukunft aussehen, kann nicht vorausgesagt werden, der Elektroantrieb mit einem Batteriespeicher spielt sicher eine zentrale Rolle.

Die möglichen Anwendungen für einen elektro-hydraulischen Antrieb sind breit gefächert. Zurzeit auszuschliessen sind explosionsgeschützte Einsatzbereiche und weit abgelegene Baustellen ohne Stromanschluss. Geeigneter sind Maschinen, die viel Leerlaufzeit haben und einen gemässigten Durchschnittsverbrauch haben. Die nächstgelegenen Baumaschinen wären Radlader und Dumper. Um eine höhere Effizienz zu erreichen, sind, wenn möglich, direkt elektrische Antriebe umzusetzen. Dennoch ist es möglich, wie mit den Elektrobaggern gezeigt, die hydraulischen Systeme original zu belassen.

### Alternative Antriebstechnologien

Der Elektroantrieb ist eine der energieeffizientesten Erfindungen für den Betrieb von kleinen bis zu grossen Baumaschinen. Die Herausforderung liegt im Bereich der Energiespeicherung. Ein Elektrobagger soll im Vergleich zu einem Diesel keine Einschränkungen voraussetzen. Der Bagger muss einen realen Arbeitstag von 8 h ohne Probleme durchhalten.

Das Speichern von Strom für einen elektrischen Antrieb wird über einen Batteriespeicher ermöglicht. Um den hohen Anforderungen bezüglich Speicherkapazität und Lebensdauer gerecht zu werden, empfiehlt sich eine Li-Ion-Batterie der neusten Technik einzusetzen. Es werden stets neue Zellen auf den Markt kommen, welche eine höhere nutzbare Kapazität aufweisen. Mit diesen kann bei gleichbleibendem Bauraum eine noch höhere Energiedichte erreicht werden. Es wird im Zyklus von 3 Jahren eine Kapazitätssteigerung von bis zu 20 % erwartet.

Bei Maschinen grösser 16 t kann eine Wasserstoff-Brennstoffzelle als zusätzlicher Speicher konzeptionell Sinn machen. Bei den 2-t-, 7-t- und 16-t-Elektrobaggertypen ist ein solches System, rein volumetrisch, nicht integrierbar. Im Arbeitsumfeld von Baumaschinen muss beachtet werden, dass die Luft für den Betrieb einer Brennstoffzelle speziell aufbereitet werden muss.

Alternative Antriebsmöglichkeiten wie Erdgas-Motoren wurden nicht weiters betrachtet, da diese Lösungen in der ökologischen Bilanz langfristig schlechter abschneiden werden. Der Effizienzvorteil von Elektro- gegenüber Verbrennungsmotoren wird sich dank hohen Betriebskostensparnissen und ökologischen Faktoren in naher Zukunft durchsetzen.

### Effizienzsteigerung der Hydraulik

Nach der erfolgreichen Fertigstellung und Inbetriebnahme der Elektrobagger von mehreren Typen sind Ideen für die Weiterentwicklung zusammengetragen worden. Die Betriebsdaten aller Baggermodelle wurden kontinuierlich gesammelt und aufbereitet. Bisher stand die Bestätigung der Konzepte von Batterie, Antrieb, Laden und Thermomanagement im Fokus. Ziel war es, die gemachten Erfahrungen auf den realen Baustellen jeweils in die nächsten Baggermodelle zu integrieren. Der momentan hohe Preis und die Laufzeit eines Elektrobaggers ist eine der grössten Herausforderung auf dem Weg zur Markttauglichkeit. Demzufolge hat die Energieeffizienz des Gesamtsystems eine sehr hohe Priorität, da die Batterie mit einer höheren Effizienz kleiner und der Bagger günstiger oder die Laufzeit bei gleicher Batteriegrösse verlängert wird.

Das Sankey-Diagramm eines konventionellen Baggers (Abbildung 64) zeigt mit dem eines Elektrobaggers (Abbildung 65) verglichen, dass die Effizienz des Elektrobaggers sehr viel höher ist als diejenige des Dieselmotors. Ebenfalls auffällig ist, dass eine weitere Effizienzsteigerung am einfachsten im Bereich der Hydraulik (genauer bei der Hydraulikpumpe und der Ventilsteuerung) realisiert werden kann.

Die heute hauptsächlich im Einsatz stehenden Hydraulik-Systeme sind für die Verwendung in Kombination mit einem Dieselmotor optimiert. Ein Elektrobagger bringt mit dem Elektroantrieb hingegen ganz andere Voraussetzungen mit. Insbesondere ist die sehr einfach zu realisierende Drehzahlvariabilität ein grosser Vorteil gegenüber dem Dieselmotor. Deswegen kann ein neues Hydrauliksystem entworfen werden, welches eine wesentliche Effizienzsteigerung mit sich bringt.

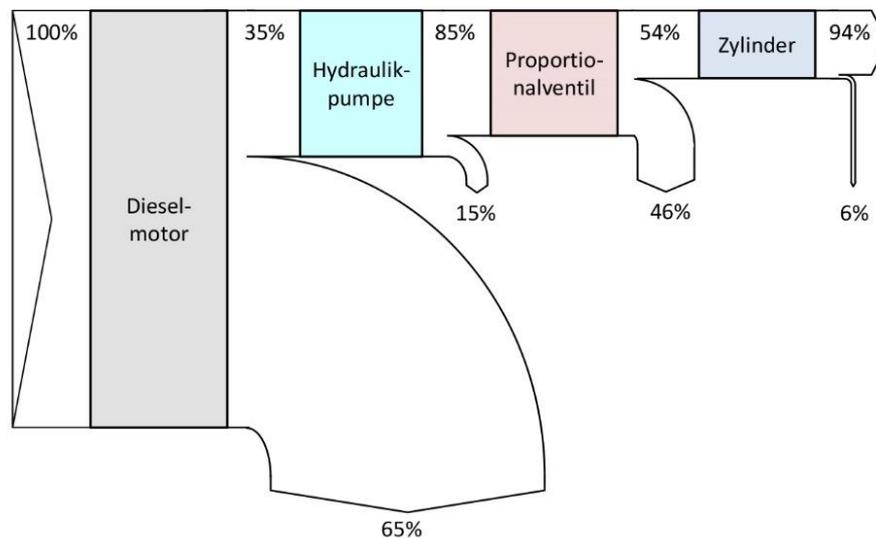


Abbildung 64: Sankey Diagramm eines Dieselmotors

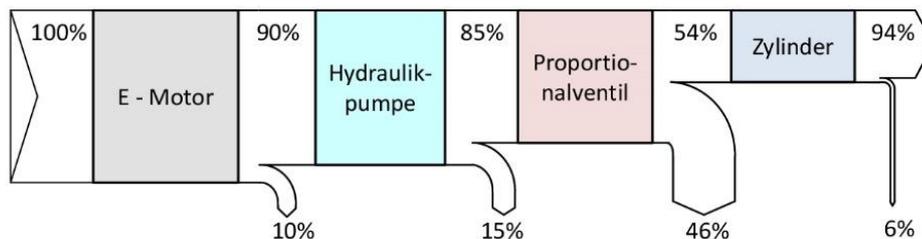


Abbildung 65: Sankey Diagramm eines Elektrobaggers

### Elektrische Vorsteuerung

Ein möglicher Ansatz, um die Energie effizienter zu nutzen, ist die aktuell hydraulische Vorsteuerung elektrisch zu realisieren (Abbildung 66). Bei den heutigen Systemen wird die Vorsteuerung meist hydraulisch umgesetzt, indem eine Pumpe konstant Öl fördert und so die Joysticks mit einem Vorsteuerdruck versorgt. Kleine Hydraulikventile in den Joysticks steuern einen kontrollierten Druck in den Vorsteuerleitungen. Dieser Druck sorgt im Ventilblock anschliessend für die gewünschte Bewegung des Hauptschiebers und bewirkt damit eine Bewegung in den hydraulischen Verbraucher (z.B. Zylinder, Fahrmotor, etc.).



Eine elektrische Vorsteuerung verzichtet auf Joysticks mit hydraulischen Ventilen und ersetzt diese durch elektronische. Mit einem Steuergerät werden die Signale der Joysticks ausgewertet und die gewünschte Verschiebung der Hauptschieber wird dem Ventilblock gemeldet. Elektrische Ventile am Ventilblock setzen diese Vorgaben um. Eine solche elektrische Vorsteuerung ermöglicht es, auf die konstant laufende Vorsteuer-Pumpe zu verzichten. Zusätzlich sind sämtliche Eingaben des Nutzers bekannt, womit die Pumpe (resp. der Elektromotor) daraufhin bedarfsgerecht geregelt werden kann. Daraus leitet sich eine erhebliche Effizienzsteigerung im Vergleich zu den heute häufig verbauten Systemen ab.

Mit zahlreichen Drucksensoren kann der aktuelle Systemzustand genau überwacht werden, was in einem noch einfacheren Hydrauliksystem mündet, welches den Bagger nochmals effizienter macht.

Weiter ermöglicht eine elektrische Vorsteuerung unzählige Entwicklungsmöglichkeiten. Dazu zählen beispielsweise die Implementierung von Assistenz-Systemen, eine individualisierte Steuerung, umschaltbares Ansprechverhalten der Joysticks, Fernsteuerung, bis hin zum vollständig autonomen Baggen.

Ein zusätzlicher, positiver Effekt einer Effizienzsteigerung der Hydraulik ist, dass weniger Abwärme anfällt. Diese Abwärme hat bedeutende Konsequenzen für die Kühlung der Elektronikkomponenten und der Batterie. Die anfallende Wärme muss dem System entzogen werden, was wiederum einen hohen Energieaufwand verursacht. Eine Effizienzsteigerung der Hydraulik und der damit einhergehenden kleineren Abwärme wirkt sich also doppelt positiv auf die Gesamtenergiebilanz aus.

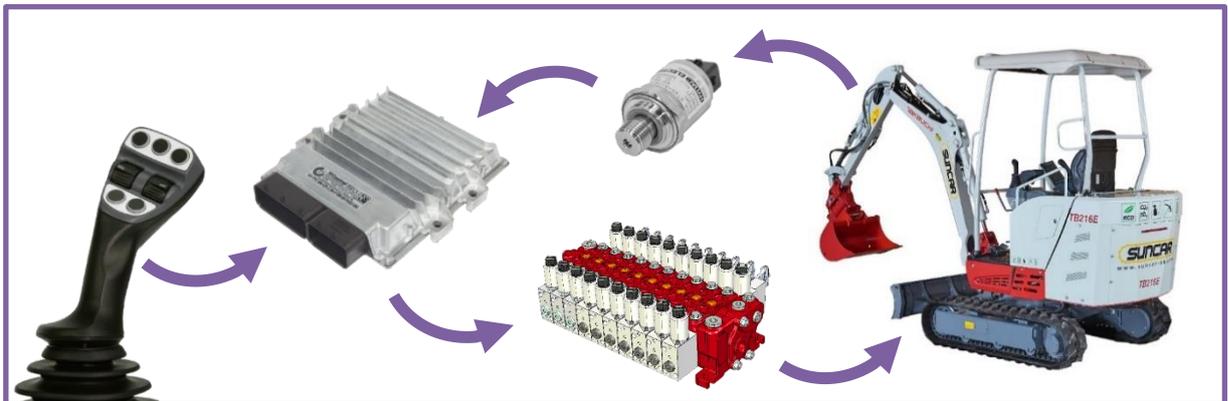


Abbildung 66: Schematische Darstellung einer elektrischen Vorsteuerung mit dem elektronischen Joystick, dem Steuergerät, den Drucksensoren (oben) und dem Ventilblock (unten) im Elektrobagger (v.l.n.r.).

### Aufgelöste Steuerkanten

Eine weitere Möglichkeit, die Effizienz eines Hydrauliksystems zu steigern, ist die Verwendung von aufgelösten Steuerkanten (Abbildung 67). In den meisten momentan verbauten Systemen der Mobilhydraulik kommt für jeden Verbraucher ein eigenes Ventil zum Einsatz. Damit wird sowohl die zulaufende, wie auch die ablaufende Steuerkante geregelt. Dadurch entstehen aber je nach Betriebspunkt hohe Drosselverluste und der Arbeitsbereich ist wegen teilweise hoher Kavitationsgefahr eingeschränkt. Kavitation ist die Bildung und Auflösung von dampfgefüllten Hohlräumen in Flüssigkeiten. Das kommt vor, wenn der Druck im Öl zu schnell und zu stark abfällt, was zu mechanischen Schäden an den Hydraulikkomponenten führen kann. Mit aufgelösten Steuerkanten werden die beiden Kanten (Zulauf und Ablauf) unabhängig voneinander geregelt womit die beiden erwähnten Nachteile entschärft werden. Durch die tieferen Drosselverluste steigt auch die Effizienz des Gesamtsystems. Die-

ses System ist insbesondere dann interessant, wenn der hydraulische Verbraucher dynamischen Lasten (auch ziehend) ausgesetzt ist und sehr häufig verwendet wird. Der Einsatz bei einem Ausleger-Zylinder am Bagger bietet sich somit an.

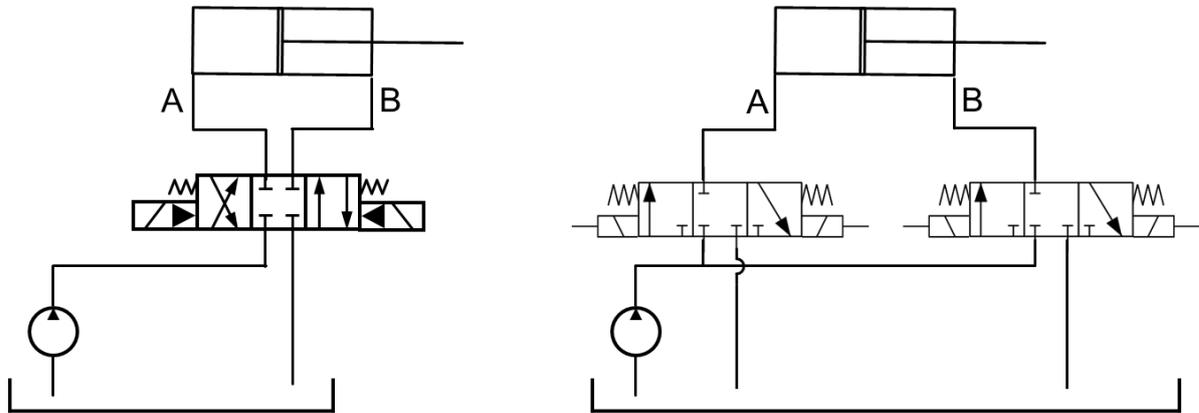


Abbildung 67: Herkömmliche Ventilsteuerung mit zwei Steuerkanten in einem Ventil (links) gegenüber einem möglichen System mit aufgelösten Steuerkanten in zwei Ventilen (rechts).

Aus all diesen Überlegungen lässt sich ableiten, dass, auch nach dieser intensiven Entwicklungsarbeit an den bereits fertiggestellten Elektrobaggern, zum effizientesten Elektrobagger noch weitere Schritte durchaus möglich und notwendig sind, um die konventionellen Dieselmotoren vollständig ersetzen zu können. Auch wird durch die beschriebenen Optimierungsmöglichkeiten ersichtlich, in welche Richtung sich die nächste Generation von Elektrobaggern entwickelt. SUNCAR wird in Zukunft weiterhin in Richtung der Effizienzsteigerung von Elektrobaggern forschen und neue Prototypen entwickeln.

## Vollelektrischer Antrieb

Die Krönung der Elektrifizierung ist ein direkter, vollelektrischer Antrieb. Die gesamte Hydraulikanlage wird ersetzt durch elektrische Antriebe. Anstelle der Hydraulikzylinder wird mit elektromechanischen Linearantrieben gearbeitet. Die Fahrmotoren und der Schwenkantrieb können einfach mit tiefdrehenden Elektromotoren ausgetauscht werden. Eine Kompatibilität für den Betrieb von hydraulisch betriebenen Anbaugeräte ist nicht gegeben.

Die Bedienung jeder Bewegung benötigt einen weiteren Elektromotor. Nur um die grundlegendsten Bewegungsfunktionen abzubilden, werden zwei unabhängige Fahrmotoren, ein Schwenkantrieb, vier Zylinder für Baum, Stil, Schaufel und Schild benötigt. Die Anzahl der elektrischen Antriebe (Motor und Inverter) treibt die Kosten für einen solchen Elektrobagger in die Höhe. Zu beachten gilt, dass mit der hydraulischen Architektur jede einzelne Bewegung die gesamte Systemleistung zur Verfügung hat und somit die elektrischen Einzelantriebe alle auf das Maximum dimensioniert werden müssen. Die Verluste der Hydraulikpumpe und Proportionalventilen und der Fakt, dass nur die halbe Batteriekapazität verbaut werden muss, ermöglichen eine Verdopplung der Effizienz.

In ferner Zukunft ist es durchaus möglich, dass sich dieses Konzept durch die Einsparungen in der Effizienz und Betriebskosten durchsetzen wird. Vor allem gilt dies, wenn die Kosten für die Elektroantriebe weiter fallen und die Batterie stets der grösste Kostenträger bleibt.



### Volvo Konzept-Elektrobagger

Der Volvo-Kompaktbagger EX2 von Volvo Construction Equipment ist ein Konzeptbagger, welcher diese Vision in die Realität umsetzt. Es werden eine zehnfach bessere Effizienz und ein zehnmals geringerer Geräuschpegel versprochen. Die Hydraulikarchitektur wurde komplett durch ein elektrisches Antriebssystem mit elektromechanischen Linearantrieben ersetzt. Ohne Hydraulik und Verbrennungsmotor sowie der dafür minimal notwendigen Kühlung ist eine signifikant geringere Geräuschemission vorhanden. Derzeit ist der Elektrobagger EX2 ein reiner Forschungsprototyp. Es gibt aktuell keine Pläne für eine Serienfertigung. Das Projekt baut auf einem Forschungsprojekt auf, welches mit 7 Millionen Euro gefördert wurde.



Abbildung 68: Volvo EX2 vollelektrischer Konzeptbagger

### Situation im Batteriemarkt in Europa

Bei der Elektrifizierung einer Baumaschine stellt die Batterie den grössten Kostenpunkt dar. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass auch die Marktwirtschaft gewissenhaft analysiert wird. Die Nachfrage nach Li-Ion-Batterien wird in den nächsten Jahren weiterhin stark steigen. Dies könnte einerseits dazu führen, dass die Batterieproduktion günstiger wird und sich die Kapazität der Batterien weiter erhöht. Gleichzeitig ist aber die Gefahr vorhanden, dass aufgrund einer stark erhöhten Nachfrage die Verfügbarkeit von Li-Ion-Batterien zurückgehen wird, was sich wiederum negativ auf die Preisentwicklung in Nischenmärkten auswirken könnte.

Wie in der Abbildung 69 Abbildung 69 gezeigt wird, ist der Trend der Batteriekosten sinkend. Am Markt kam es in den letzten drei Jahren aber immer wieder zu Lieferengpässen. Dies schlägt sich als eine zwischenzeitliche Erhöhung der Zell- und Batteriepreise nieder.

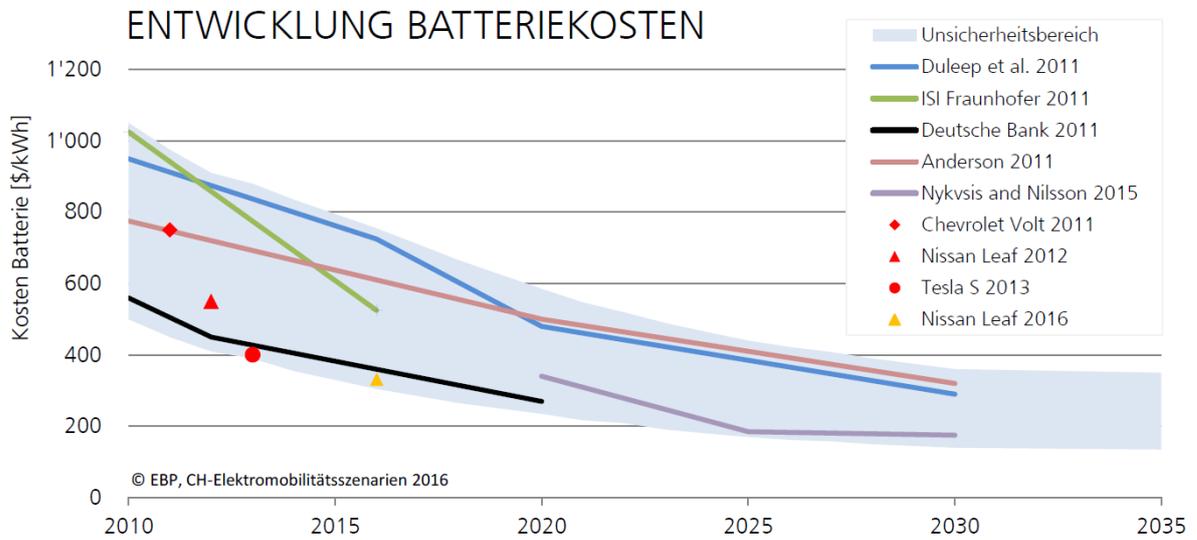


Abbildung 69: Batteriekosten EBP Studie, 2016

Die sehr grosse Nachfrage nach Batteriezellen auf dem Weltmarkt erhöht die Lieferzeit von Zellen und Standard-Batterien auf sechs bis neun Monate. Die Batteriepreise befinden sich, wie in der Studie gezeigt, im Jahr 2018 bei ungefähr 500-600 \$/kWh. Der Preis von Batteriesystemen setzt sich aus mehreren Positionen zusammen. Der Hauptbestandteil haben die Batteriezellen, nicht zu vernachlässigen sind das Batteriemanagementsystem, die Kühlung und das Gehäuse inklusive Stecker.



## Diskussion

Die Entwicklungszeit von drei Jahren erlaubte eine genaue Analyse der Ergebnisse. Die meisten daraus folgenden Erkenntnisse, welche während der Entwicklung und Inbetriebnahme gemacht wurden, konnten direkt im nächsten Baggertyp integriert werden.

### **Batterielebensdauer**

Die geringste Lebensdauer der in den Elektrobagger eingesetzten Zellen werden bei den luftgekühlten Batterien von Mattro im 2-t-Elektrobagger erwartet. Die geschätzte Lebenserwartung bis EoL, 80 % von der Anfangskapazität, beträgt 800 Zyklen. Beim 7-t-Elektrobagger mit flüssigkeitsgekühlten Rundzellen wird von 1500 Zyklen ausgegangen. Alle anderen verwendeten Batterien beim 16-t-Elektrobagger haben eine Lebenserwartung bis zu 3000 Zyklen. Zum Ende des Projekts hatte der 2-t-Elektrobagger die meisten Betriebsstunden erreicht, fast 1000 h. Daraus errechnen sich bei 4 h Batterielaufzeit und etwa durchschnittlich 1 h Kabelbetrieb, ungefähr 200 Zyklen. Dies lässt darauf schliessen, dass etwa 95 % Restkapazität erwartet wird, was auch erste Messungen unterzeichnen. Die Aussage hat leider noch keine statistische Aussagekraft, da abhängig von den Einsatzbedingungen, den Umgebungstemperaturen und weiteren beeinflussenden Faktoren, sich jeder Bagger anders verhalten wird.

Diese Beurteilung lässt sich schlussendlich erst machen, wenn bei mehreren Elektrobaggern, nach einer kalendarischen Alterung von circa 5 Jahren, ihre Zyklenfestigkeit bewiesen wird. Sonst sind solche Hochrechnungen wissenschaftlich gesehen nicht stichhaltig.

### **Trägheit Batterietemperatur**

Die thermische Masse von Batterien wird stark unterschätzt. Eine Batteriezelle besteht grösstenteils aus Metallen mit hoher Wärmekapazität. Um die Batterien im Winter zu heizen und im Sommer zu kühlen wird ein Kühl- und Heizsystem verbaut. Bei der Entwicklung der Elektrobagger wurde darauf geachtet, dass die Leistungsfähigkeit des Thermosystems abhängig von der Lebensdauer der Batterie dimensioniert wurde. Proportional zu der Grösse der Batterie verändert sich die thermische Masse.

Die Batterien der Elektrobagger nähern sich über eine Nacht langsam an die Umgebungstemperaturen an. Spätestens nach einem Wochenende ist auch die Batterie des 16-t-Elektrobagger gleich der gemittelten Aussentemperatur. Im Sommer und Winter wird mit der verbauten Batterietemperierung mit circa 30 min für 5 K Temperaturveränderung gerechnet. Idealerweise bleiben die Elektrobagger über das Wochenende am Ladekabel angesteckt, um die Batterie stets im Komfortbereich zu halten. Alle Systeme von Luftkühlung im 2-t-Elektrobagger, bis zu der Flüssigkeitskühlung im 16-t-Elektrobagger sind so entwickelt und mit minimalen Verbesserungen serientauglich. Bei intelligentem Umgang mit den Elektrobaggern kann somit ohne Einschränkungen im europäischen Sommer und Winter gearbeitet werden.

### **Einsatzgebiete**

Die Einsatzgebiete der Elektrobagger könnten nicht verschiedener sein. Die SUNCAR Elektrobagger waren unter anderem bereits bei archäologischen Ausgrabungen in Bern, bei der Unterkellerung des Zürcher Hauptbahnhofes, in der größten Eisgrotte der Welt in Saas-Fee oder bei der Entkernung einer Kühlzelle in einer Bäckerei im Einsatz. Eines haben aber all die zahlreichen Einsatzorte gemeinsam: Emissionen sind dort denkbar ungünstig. Sei es wegen der Gesundheit der Arbeiter, die beim Baggern in einem geschlossenen Raum nicht riskiert werden darf, sei es wegen der Gäste in einem Touristenort, für die die frische Bergluft keinesfalls mit Abgasgestank vermischt werden sollte oder sei es wegen der Lebensmittel, die sich in unmittelbarer Nähe der Baustelle befinden und die nicht kontaminiert werden dürfen.



Die Elektrobagger stossen, obwohl die unterschiedlichsten Einstätze möglich sind, ab und zu noch auf Limitierungen. Die wichtigste Voraussetzung für den einwandfreien Betrieb ist eine geeignete Ladeinfrastruktur. In der Entwicklung wurde vorgesehen, das Laden so einfach wie möglich zu gestalten und sich am industriellen, dreiphasigen Steckerstandard (CEE) anzupassen. Die Absicherung der Zuleitung entscheidet, wie viel Ladestrom vorhanden ist und diese resultierende Ladeleistung wird für einen uneingeschränkten Betrieb benötigt. Die Anforderung bei einem 2-t-Elektrobagger beginnt bei 11 kW, dreiphasig 16 A und erhöht sich bis auf 44 kW beim 16-t-Elektrobagger. Die Laufzeit der Batterie und die Möglichkeit für einen Kabelbetrieb sind die vorhandenen Limiten des Elektrobaggers.

### Defekte

Der Betrieb der Elektrobagger im Feldeinsatz war überaus erfolgreich. Die Robustheit des Systemdesigns ermöglichte einen ganzjährigen Betrieb ohne Einschränkungen. Vor allem konnten die Erfahrungen, welche bei den ersten Einsätzen der 16-t-Elektrobagger gemacht wurden, direkt in die nächsten Entwicklungen mitgenommen werden. Es werden qualitativ die wichtigsten Erkenntnisse aus den Serviceeinsätzen wiedergeben.

- Motordrehzahlregelung TB1140E
  - Problem: Niedrige Drehzahl unter Volllast
  - Massnahme: Analyse verschiedener Regelkonzepte
  - Lösung: Ansteuerung Drehzahlregelung direkt auf Inverter
- Kühlung Elektrokomponenten TB216E
  - Problem: Überhitzung von Inverter und Ladegeräte
  - Massnahme: Flüssigkeitskühlung aller Elektrokomponenten
  - Lösung: Kühlplatte verbauen
- Heizen mit Wärmepumpe TB260E
  - Problem: Kaltstartverhalten im Winter
  - Massnahme: Wärmebedarf von Kabine und Batterie berechnen
  - Lösung: Wärmepumpe im Dreiecksprozess ansteuern

Alle weiteren Defekte, welche einen Service benötigt haben, sind sauber dokumentiert und haben geholfen, die Elektrobagger zu verbessern. Nicht alle Fehler sind auf das eigene Verschulden zurückzuführen, sondern durch den Hersteller verursacht.

- Unterdimensionierung der HV-Sicherung von Ladegeräten TB1140E und TB260E
- Vibrationsfestigkeit von Platine für Batteriemanagementsystem TB216E
- Undichte HV-Steckverbindungen vom DCDC Wandler TB216E

Grundsätzlich haben all diese Defekte zu einem erweiterten Erfahrungsschatz geführt. Durch die unterschiedlichen Modelle konnten neue Lösungen kombiniert werden, was den Gedanken der Modularität unterstützt. Baumaschinen müssen höchsten Anforderungen bezüglich Robustheit und Umweltbedingungen wie Allwettertauglichkeit genügen. Es wurde die Erkenntnis gewonnen, dass die Qualität der eingesetzten Komponenten entscheidend ist über die Zuverlässigkeit des Baggers.



## Schlussfolgerungen

Während die Entwicklung der Elektromobilität im Automobilbereich mittlerweile weit fortgeschritten ist, ist diese in der Baumaschinenbranche gerade am Entstehen. Die Hersteller von Baumaschinen beginnen, erste elektrische Prototypen von Mini-Elektrobaggern zu bauen. Der Fokus liegt zurzeit noch auf den kleineren Maschinen, da die Schwierigkeit der Elektrifizierung und die Kosten zusammen mit der Baggergrösse ansteigen. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ist ein 2-t-Elektrobagger mit einem 100 VDC Hochvoltssystem im Vergleich zu den grösseren Elektrobaggern mit 400 VDC und mehr mit einem tieferen Anschaffungspreis besser zu vertreten. Da aber die Auslastung und Betriebsstunden eines Baggers mit zunehmender Gewichtsklasse steigen, haben die grösseren Bagger deutlich höhere Betriebskostensparnisse. Ab der Leistungsklasse eines 7-t-Elektrobaggers ist der Wechsel auf eine höhere Hochvoltspannung notwendig. Dies bewirkt, dass die Kosten überproportional steigen, und sich der 16-t-Elektrobagger mit der gleichen Systemspannung vergleichsweise günstiger bauen lässt.

Die gesammelten Erfahrungen haben gezeigt, dass die meisten Hochvoltkomponenten noch nicht für den Einsatz in Baumaschinen qualifiziert und validiert sind. Die Elektrobagger bieten auch einigen Herstellern eine Möglichkeit, ihre Produkte im Einsatz zu testen und die nötigen Verbesserungen für die anwendungsspezifische Nutzung einfließen zu lassen. Dies ist eine der Voraussetzungen, um die Elektrobagger weiter zu optimieren und eine Zuverlässigkeit für eine zukünftige Serienfertigung zu garantieren.

Der Elektrifizierung von Grossbaggern mit einem Gewicht von mehr als 10 t steht aus technischer Sicht grundsätzlich nichts im Wege. Die eingesetzten Li-Ion-Batterien verfügen über genügend Energie- und Leistungsdichte, um eine grosse Baumaschine einen ganzen Arbeitstag zu versorgen. Alle weiteren benötigten Komponenten, wie die Leistungselektronik oder der Elektromotor, sind für die benötigte Leistungsklasse verfügbar. Eine grössere Herausforderung stellt jedoch das Wiederaufladen dar. Zurzeit kommen noch keine Konzepte mit Schnellladung in Frage, da die dafür notwendige Infrastruktur auf Baustellen bisher fehlt. Das Laden mit bis zu CEE32 hingegen ist standardmässig auf den Baustromverteilern verfügbar.

Der 2-t- und 7-t-Elektrobagger sind in Bezug auf die Laufzeit konzeptionell dem 16-t-Elektrobagger überlegen, da diese auch kombiniert im Kabelbetrieb arbeiten können. Der Betrieb mit eingestecktem Ladekabel benötigt eine gewisse Vorsicht und ist nicht für alle Einsätze geeignet. Empfehlenswert wird der Kabelbetrieb bis zu einer Grössenklasse von etwa 10 t genutzt.

Der sichere Umgang mit den Hochvolttechnologien hat hohe Priorität und ist eine der Hürden, die geschaffen werden muss, um der Elektromobilität den kompletten Durchbruch zu ermöglichen. Ein rein elektrisches Antriebssystem hat mit einem konventionellen Dieselantrieb nicht mehr viele Parallelen. Die Akzeptanz für einen elektrischen Bagger muss unter anderen beim Maschinisten, Servicemonteure, Bauleiter und Bauherr vorhanden sein. Die Rückmeldungen der Öffentlichkeit auf die SUNCAR Elektrobagger sind durchaus positiv. Viele interessieren sich sehr für das Thema Elektromobilität. Die Überraschung ist gross, wenn ein bis zu 16-t-grosser Bagger batterieelektrisch sauber und leise arbeitet. Die Begeisterung von Maschinisten, Bauleitern sowie weiteren beteiligten Personen machen die Arbeit an dieser innovativen Entwicklung dankbar. Die Zukunft der Baumaschinen, speziell der Bagger, wird, wie die Branche langsam auch zu zeigen vermag, definitiv elektrisch sein.

## Referenzen

Seit der Inbetriebnahme der ersten 16-t-Elektrobagger sind fast drei Jahre vergangen. Seitdem stehen die Elektrobagger auf verschiedenen Baustellen im Einsatz. Insbesondere für Arbeiten im Gebäudeinnern (Unterkellerung, Aushöhlung einer Kühlzelle u.v.m.) und in Gemeinden mit einem zeitlichen Verbot von Baumaschinen mit Verbrennungsmotor (Saas-Fee und Zermatt) sind die Elektrobagger sehr beliebt. Erwähnenswert ist insbesondere der Einsatz eines Elektrobaggers in der grössten Eisgrotte der Welt im Innern des Fee-Gletschers. Ein Dieselmogger war ausgeschlossen, denn die Abgase hätten nicht abgeführt werden können. Auch ein kabelbetriebener Elektrobagger kam, aufgrund fehlender Steckdosen in der Nähe nicht in Frage. Der SUNCAR Elektrobagger war somit die einzige Lösung. Ein anderes bedeutendes Beispiel ist der Einsatz eines SUNCAR Elektrobaggers bei den archäologischen Ausgrabungen im Innern des alten Kinos in Bern.

Die Bagger liefern über das Remote System stetig informationsreiche Daten zur weiteren Optimierung der nächsten Maschinenmodelle. Neben diesen reinen Betriebsdaten ist auch die Meinungen der Bediener und Kunden enorm wichtig, da diese zukünftig über den Erwerb oder Nicht-Erwerb der Maschinen entscheiden und einen wesentlichen Einfluss auf das Überleben des Start-ups haben. Aus diesem Grund wird ein enger Kontakt zu dem Umfeld gepflegt, um allfällige Schwachstellen ausbessern zu können und konstruktive Inputs in die nächste Baggergeneration miteinfließen zu lassen.



Abbildung 70: Erwin Schmid, Huppenkothen-Vertreter Oberwallis, auf Baustellenbesuch beim 7-t-Elektrobagger in Saas-Fee



Nachfolgend sind einige ungefilterte Rückmeldungen aus Kurzinterview dargestellt, um einen Einblick in die Impressionen der Betreiber betreffend dem Umgang mit den Elektrobaggern zu gewähren:

**Interview mit Erwin Schmid**, Inhaber von Schmid GmbH Mechanik, Susten (04.09.2018)

(Die Schmid GmbH Mechanik ist der Huppenkothen-Vertreter im Oberwallis und betreut regelmässig SUNCAR Elektrobagger.)

- Wie ist die Akzeptanz der Betreiber gegenüber den Elektrobaggern?

Sie sind begeistert, weil sie mit den Elektrobaggern an Orten arbeiten können, wo die Arbeit mit einem Dieselbagger wegen der Abgase unmöglich ist (geschlossene Räume) oder wo Dieselbagger während einer gewissen Zeit verboten sind (Bsp. Saas-Fee). Dank den Elektrobaggern sind die Bauunternehmen flexibler geworden.

- Haben die Betreiber Bedenken wegen der Sicherheit (Laden/Geräuschlosigkeit) geäussert?

Noch nie hat ein Kunde Bedenken geäussert. Die Arbeiter auf der Baustelle sind sich den Einsatz von elektrischen Geräten gewohnt und wissen deshalb auch, wie sie mit einer elektrischen Baumaschine umgehen müssen. Die Geräuschlosigkeit betreffend ist es so, dass der Elektrobagger zwar leiser ist, aber eben nicht geräuschlos. Er wird folglich gehört und die Arbeiter werden nicht davon überrascht.

- Was sind typische Rückmeldungen der Maschinisten?

Sie sind oft überrascht, dass die Handhabung so einfach und selbsterklärend ist und dass die Laufzeit ausreichend ist.

Der Einsatz von allen drei Typen Elektrobagger in Saas-Fee zeigt, wie politische beziehungsweise regulatorische Eingriffe im Thema Umweltschutz positive Auswirkungen haben können. Wenn es vorgeschrieben wird, ohne Dieselmotor zu arbeiten, werden neue Lösungen gesucht. Die persönliche Einstellung zu Diesel- oder Elektroantrieb ist zweitrangig und alte Gewohnheiten dienen nicht als Entscheidungsgrundlage, sondern es werden innovative Lösungen, wie die SUNCAR Elektrobagger, er- oder gefunden. Diese grossen Arbeitsmaschinen mit emissionsfreiem Antrieb begeistern nicht nur die Maschinisten und Betreiber, sondern auch Anwohner und Touristen. Es beweist, wie fortschrittlich die Technologie und umweltbewusst Gemeinden sowie Städte der Schweiz sind.



Abbildung 71: 2-t- (links) und 16-t-Elektrobagger (rechts) im Einsatz in Saas-Fee

**Interview mit Tristan Huber**, Baggerführer bei KIBAG, Zürich (12.09.2018)  
(Die KIBAG ist langjähriger Kunde von Huppenkothen Oberbüren.)



Abbildung 72: Tristan Huber, Baggerführer bei KIBAG, Baustellenbesuch, Zürich HB

- Arbeiten Sie gerne mit dem SUNCAR Elektrobagger?  
Ja, denn ich schätze, dass er im Betrieb leise ist.
- Treffen Sie besondere Sicherheitsvorkehrungen, wenn Sie mit dem Elektrobagger anstatt mit einem Dieselmotobagger arbeiten?  
Nein, dafür sehe ich keine Notwendigkeit.
- Worin liegt der Unterschied für Sie zwischen der Arbeit mit einem kabelbetrieben und akkubetriebenen Elektrobagger?  
Bei Arbeiten, die viel Bewegung erfordern, arbeite ich lieber mit einem akkubetriebenen Elektrobagger, weil ich mich dann nicht zusätzlich auf das Kabel konzentrieren muss, welches sich schnell verheddern kann.



**Interview mit Rolf Wenger**, Facharbeiter Archäologischer Dienst Bern, Bern (26.09.2018)

(Bei einer Ausgrabung in Bern kam ein SUNCAR Elektrobagger zum Einsatz. Weitere Einsätze sind geplant.)

- Stellt das Aufladen des Baggers während der Pausen ein Problem dar?

Da wir den Bagger nicht ständig im Betrieb haben, reicht es uns, wenn wir ihn jeweils über den Mittag aufladen. Die Laufzeit reicht so aus, sodass wir den Bagger nicht zusätzlich über Nacht laden müssen. Aufgefallen ist uns aber, dass das Laden ein hochfrequentes Geräusch macht, weshalb es empfehlenswert ist, zu laden, wenn sich niemand in der Nähe befindet.

- Wird auch im Kabelbetrieb gearbeitet?

Dies ist nicht nötig, weil die Laufzeit ausreichend ist. Der Kabelbetrieb wäre aber auf unseren Baustellen gut möglich, da wir grundsätzlich sorgfältig arbeiten müssen und somit auch gut darauf Acht geben könnten, das Kabel nicht zu beschädigen.

- War die Handhabung des Elektrobaggers selbsterklärend?

Ich konnte ohne Anlaufschwierigkeiten mit dem Bagger arbeiten. Allerdings war mir ohne Schulung nicht klar, ob dieser noch zusätzliche Funktionen oder Einstellungen – über die ein Dieselmotorbagger nicht verfügt – aufweist.

Anmerkung zum letzten Interviewpunkt: In Zukunft wird darauf geachtet, dass beim ersten Einsatz bei einem Neukunden eine kurze Einführung stattfindet.

In Gesprächen mit weiteren Baggerführern kristallisierten sich folgende Punkte heraus:

1. Es wird geschätzt, dass die Handhabung dieselbe ist wie bei einem Dieselmotorbagger.
2. Die reduzierte Lautstärke und die Abwesenheit von Abgasen macht die Arbeit angenehmer.
3. Die einzigen Bedenken gelten der Laufzeit. Es ist deshalb wichtig, dass die Ladeinfrastruktur so eingerichtet ist (wenn nötig mit Verlängerungskabeln), dass auch während kurzen Pausen geladen werden kann, ohne dass der Baggerführer den Bagger zuerst noch über eine grössere Distanz zur Ladestation bewegen muss.
4. Der Fokus kann nicht auf einen energiesparenden Betrieb gelegt werden. Aufgrund des zeitlichen Druckes auf den Baustellen ist «eco-drive» eine Illusion.

Auch die Rückmeldungen aus Gesprächen mit Anwohnern der Baustellen waren durchwegs positiv. Bei lauten Arbeiten mit beispielsweise Kies ist die Lautstärke generell hoch und der Bagger selbst fällt nicht ins Gewicht. Bei grundsätzlich leiseren Arbeiten wie beispielsweise Sand fiel die halbierte Lautstärke des Baggers den Baustellen-Nachbarn positiv auf.



# Anhang

## Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit nationalen Unternehmen ermöglicht eine einfache Absprache, persönliche Besuche und genaues Controlling. Diese Vorteile waren während der ganzen Entwicklung und des Zusammenbaus enorm hilfreich. Der Standort Schweiz ist dank der Gewährleistung von hoher Qualität und Sicherheit für den Einkauf von Komponenten für den Elektrobagger sehr interessant.

Mit folgenden Lieferanten oder Partnern besteht eine weiterführende Zusammenarbeit:

- Huppenkothan Baumaschinen AG, Herr Martin Hofer, Hinterwiden, 9245 Oberbüren
- ETH Zürich, IWF, Herr Prof. Dr. Konrad Wegener, Leonhardstrasse 21, 8092 Zürich
- inspire AG, Herr Martin Stöckli, Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich
- NTB Buchs, Herr Prof. Dr. Maximilian Stöck, Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs
- HSR Rapperswil, Herr Manuel Bauer, Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
- BRUSA Elektronik AG, Herr Marco Naef, Neudorf 14, 9466 Sennwald
- Phi-Power AG, Herr Dr. Michael Lampérth, Kempptalstrasse 46, 8330 Pfäffikon
- Huber + Suhner AG, Low Frequency Division, Herr Marc-André Beck, 8330 Pfäffikon
- USE Metalltechnik AG, Herr Beat Scheidegger, 6030 Ebikon
- eMDe Blechfabrik AG, Herr Marco Wüst, 8722 Kaltbrunn
- Hydac Engineering AG, Herr Marco Pfyl, Allmendstrasse 11, 6312 Steinhausen
- Bossard AG, Herr Felix Lüscher, Steinhauserstrasse 70, 6301 Zug
- Confecta AG, Herr Martin Geisser, Industriestrasse 9, 8583 Sulgen
- Heizmann AG, Neumattstrasse 8, 5000 Aarau



## Internationale Zusammenarbeit

Wertvolle internationale Geschäftsbeziehungen bestehen mit den aufgeführten Unternehmen:

- Takeuchi MFG.CO.,LTD, 205 Uwadaira, Sasaki-Machi, Hanishina-Gun Nagano, Japan

Die laufenden Verhandlungen mit der Firma Takeuchi befassen sich mit der Serienproduktion des Elektrobaggers. Takeuchi soll bestenfalls einen Basis-Bagger ohne Aufbauten an die SUNCAR HK AG liefern. Diese Basis braucht unter anderem keinen Dieselmotor, Dieseltank, Kabelbaum und keine Steuergeräte und Bedienungsanzeigen. Für den Transport der Bagger aus Japan in die Schweiz soll ein mobiles Hydraulikaggregat entwickelt werden, welches die Fahrbereitschaft der Bagger während der Überlieferung sicherstellt.

- AKASOL GmbH, Landwehrstraße 55, 64293 Darmstadt, Deutschland

Die Firma Akasol liefert die qualitativ hochwertigen Batteriesysteme, welche im 16-t-Elektrobagger eingebaut werden konnten. Die Firma hat in fachlichen Fragen immer kompetente Unterstützung geboten.

- Mattro Production GmbH, Alte Landstrasse 15, 6130 Schwaz, Österreich

Die Firma Mattro verkauft interessante Batteriesysteme auf der Basis von 100 V an. So konnte der 2-t-Elektrobagger erfolgreich und mit ausreichender Laufzeit im Tagesbetrieb entwickelt werden. Nur durch solche hochwertigen Produkte ist es möglich, dass sich die Elektrofahrzeuge auf dem hart umkämpften Markt behaupten können.

- Kreisel Electric GmbH & Co KG, Kreiselstrasse 1, 4261 Rainbach im Mühlkreis, Österreich

Mit der Firma Kreisel Electric konnte eine Batterie für die geforderten Einsatzzwecke entwickelt werden, welche modular für zukünftige Projekte eingesetzt werden kann. Die Firma beweist im Moment eine grosse Innovationskraft und wächst sehr stark.

- rational motion GmbH, Toyota Allee 7, 50858 Köln, Deutschland

Die Firma rational motion vertreibt die Produkte im Bereich Antriebstechnik von TM4, welches den Hauptsitz in Québec, Kanada hat. Die Motoren und Inverter überzeugen durch gute Qualität und hohe Lebensdauer, geeignet für den Einsatz in robusten Maschinen.

- HEINZMANN GmbH & Co. KG, Am Haselbach 1, 79677 Schönau, Deutschland

Die Firma HEINZMANN bietet ein breites Portfolio von Antriebssystem für E-Fahrzeuge an. Ihre Produktpalette bedient sowohl tiefe Bordnetzspannungen von konventionellen Blei-Säure Batteriefahrzeugen bis zu modernen Hochvoltsystemen mit Li-Ion-Batterien.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Piktogramme zeigen Vorteile eines Elektrobagger	4
Abbildung 2: Projektzeitplan	8
Abbildung 3: 16-t-Demonstrator-Elektrobagger	10
Abbildung 4: 16-t-Elektrobagger, Prototyp 1	12
Abbildung 5: 2-t-Elektrobagger	14
Abbildung 6: 7-t-Elektrobagger	14
Abbildung 7: BMW Batterie 33 kWh	16
Abbildung 8: Rundzellen	18
Abbildung 9: Pouch-Zellen	18
Abbildung 10: Prismatische Zellen	18
Abbildung 11: Mattro Batterie	19
Abbildung 12: Kreisel Batterie	19
Abbildung 13: BMW Batterie	20
Abbildung 14: Akasol Batterie	20
Abbildung 15: Konzept Wasserkühlung der Akasol Batterien	22
Abbildung 16: Konzept Wasserkühlung der Kreisel Batterien	22
Abbildung 17: Luftkühlung Batteriecontainer Mattro	22
Abbildung 18: Konzept Flüssigkeitskühlung der BMW Batterien	22
Abbildung 19: Kapazitätsverlust in Abhängigkeit der Zyklen beim Tesla Model S/X, Quelle: Tesla Battery Survey	24
Abbildung 20: Antriebseinheit bestehend aus Wechselrichter, Elektromotor und Hydraulikpumpe	26
Abbildung 21: Antriebssystem im kompletten Verbund, Übersicht Vergleichsspannungen von Mises [MPa]	26
Abbildung 22: Baugruppe Batterie-Plattform, links CAD Rendering, rechts nach Montage und Inbetriebnahme	27
Abbildung 23: FOPS (Falling Object Protection Structure), Abstand zu DLV (maximale Auslenkung)	27
Abbildung 24: Schaltschrank inklusive Steuergeräte und Datenlogger	28
Abbildung 25: CAD Rendering von Baggerfront und Batteriecontainer	29
Abbildung 26: Antriebseinheit mit Hydraulikpumpe und Elektromotor	30
Abbildung 27: Thermomodul Hydraulik	30
Abbildung 28: Kern des Batteriecontainers mit 3 Batterietrögen und den Kühlern für die Elektrokomponenten	30
Abbildung 29: Frontseite des Batteriecontainers mit Leistungselektronik und Verteilern	31
Abbildung 30: Kabelbaum Baggerfront im eingebauten Zustand	31
Abbildung 31: Leiterplatte mit Absicherung, Relais und Verteilung der Signale	32
Abbildung 32: Grundmaschine mit ergänztem Stahlbau	33
Abbildung 33: Elektrischer Antriebsstrang	33
Abbildung 34: Elektroeinheit inklusive Hoch- und Niedervoltverteilung	34



Abbildung 35: Thermoeinheit .....	34
Abbildung 36: Vormontierte Batterietröge .....	35
Abbildung 37: Vollständig assemblierter Container .....	35
Abbildung 38: CAD Rendering des 7-t-Elektrobaggers.....	35
Abbildung 39: Realer 7-t-Elektrobagger .....	35
Abbildung 40: Systemübersicht des Remotesystems .....	36
Abbildung 41: Benutzeroberfläche des eigens entwickelten SUNCAR Remotesystems .....	37
Abbildung 42: Karte mit allen 16-t-Elektrobaggern (orange: letzte GPS-Position maximal 1 Woche alt) .....	37
Abbildung 43: Cockpit eines 2-t-Elektrobaggers .....	38
Abbildung 44: Messdaten (rot: Ladestatus der Batterie, violett: Geschwindigkeit des Motors) eines 16- t-Elektrobaggers .....	39
Abbildung 45: Arbeitsprofil 16-t-Elektrobaggers, unter hoher Auslastung auf der Baustelle in Döttingen .....	40
Abbildung 46: Arbeitsprofil 2-t-Elektrobagger, unter hoher Auslastung auf der Baustelle am Zürich HB .....	41
Abbildung 47: Arbeitsprofil 7-t-Elektrobagger, unter hoher Auslastung im Recyclingwerk in Wädenswil .....	42
Abbildung 48: Batterietemperaturprofil 2-t-Elektrobagger, Anpassung an Umgebungstemperatur nach 12 h.....	43
Abbildung 49: Durchschnittsleistung TB1140(E) ab Energieträger (Batterie oder Diesel), Dieselbagger berechnet mit Dieseläquivalent von 10.4 kWh/l (Brennwert) .....	45
Abbildung 50: Durchschnittsleistung TB260(E) ab Energieträger (Batterie oder Diesel) .....	46
Abbildung 51: Durchschnittsleistung TB216(E) ab Energieträger (Batterie oder Diesel) .....	46
Abbildung 52: Effizienz des Elektromotors des 16-t- und 7-t-Elektrobaggers .....	47
Abbildung 53: Lärmmessungen, Messungen des A-bewerteten Schallpegels an drei Messpunkten ..	48
Abbildung 54: Vibrationsmessungen am 2-t-Elektrobagger, Sensor G (oben rechts), Sensor F (unten rechts).....	49
Abbildung 55: Beschleunigungsmessungen beim Fahren mit dem 2-t-Elektrobagger .....	50
Abbildung 56: Frequenzanalyse der Beschleunigungsmessungen beim Fahren mit dem 2-t- Elektrobagger .....	50
Abbildung 57: Vergleich CO <sub>2</sub> e-Emissionen des 16-t-Dieselbaggers und des 16-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit Schweizer Strom aus erneuerbaren Energien über die gesamte Lebensdauer in t.....	52
Abbildung 58: Vergleich CO <sub>2</sub> e-Emissionen des 7-t-Dieselbaggers und des 7-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit Schweizer Strom über die gesamte Lebensdauer aus erneuerbaren Energien in t.....	52
Abbildung 59: Vergleich CO <sub>2</sub> e-Emissionen des 2-t-Dieselbaggers und des 2-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit Schweizer Strom aus erneuerbaren Energien über die gesamte Lebensdauer in t.....	53
Abbildung 60: Vergleich CO <sub>2</sub> e-Emissionen des 7-t-Dieselbaggers und des 7-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit Schweizer Verbraucher-Strommix über die gesamte Lebensdauer in t .....	54
Abbildung 61: Vergleich CO <sub>2</sub> e-Emissionen des 7-t-Dieselbaggers und des 7-t-Elektrobaggers bei Betrieb mit europäischen ENTSO-E-Strom über die gesamte Lebensdauer in t.....	54
Abbildung 62: Betrachtung der Gesamtkosten für den Betrieb der 16-t- und 7-t- Elektrobagger .....	55



Abbildung 63: Betrachtung der Gesamtkosten für den Betrieb des 2-t-Elektrobaggers .....	56
Abbildung 64: Sankey Diagramm eines Dieselmotors .....	61
Abbildung 65: Sankey Diagramm eines Elektrobaggers .....	61
Abbildung 66: Schematische Darstellung einer elektrischen Vorsteuerung mit dem elektronischen Joystick, dem Steuergerät, den Drucksensoren (oben) und dem Ventilblock (unten) im Elektrobagger (v.l.n.r.). .....	62
Abbildung 67: Herkömmliche Ventilsteuerung mit zwei Steuerkanten in einem Ventil (links) gegenüber einem möglichen System mit aufgelösten Steuerkanten in zwei Ventilen (rechts).....	63
Abbildung 68: Volvo EX2 vollelektrischer Konzeptbagger .....	64
Abbildung 69: Batteriekosten EBP Studie, 2016.....	65
Abbildung 70: Erwin Schmid, Huppenkothen-Vertreter Oberwallis, auf Baustellenbesuch beim 7-t-Elektrobagger in Saas-Fee.....	69
Abbildung 71: 2-t- (links) und 16-t-Elektrobagger (rechts) im Einsatz in Saas-Fee.....	70
Abbildung 72: Tristan Huber, Baggerführer bei KIBAG, Baustellenbesuch, Zürich HB.....	71



## Abkürzungsverzeichnis

API	Application programming interface <i>Anwendungsprogrammierschnittstelle</i>
CAD	Computer-aided design <i>Rechnerunterstütztes Konstruieren</i>
CAE	Computer-aided engineering <i>Rechnerunterstützte Entwicklung</i>
CEE	Commission on the Rules for the Approval of the Electrical Equipment <i>Internationale Kommission für die Regelung der Zulassung elektrischer Ausrüstungen</i>
CO <sub>2e</sub>	Treibhauspotential (CO <sub>2</sub> -Äquivalent)
EoL	End of Life <i>Lebensende der Batterie</i>
FEM	Finite-Elemente-Methode
GPS	Global Positioning System <i>Globales Positionsbestimmungssystem</i>
HVDU	High-Voltage Distribution Unit <i>Hochvoltverteilung</i>
LVDU	Low-Voltage Distribution Unit <i>Niedervoltverteilung</i>
SoC	State of Charge <i>Ladestand der Batterie</i>
TCO	Total Cost of Ownership <i>Gesamtbetriebskosten (Summe der Kosten über den Produktlebenszyklus)</i>
VCU	Vehicle Control Unit <i>Fahrzeugkontrolleinheit</i>



AMZ	Akademischer Motorsportverein Zürich
BFE	Bundesamt für Energie
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ETH	Eidgenössische technische Hochschule
HSR	Hochschule Rapperswil
HSLU	Hochschule Luzern
NTB	Neu-Technikum Buchs
TB216	Takeuchi 1.6-Tonnen-Bagger
TB216E	SUNCAR 2-Tonnen- Elektrobagger auf Basis TB216
TB260	Takeuchi 6-Tonnen-Bagger
TB260E	SUNCAR 7-Tonnen- Elektrobagger auf Basis TB260
TB1140	Takeuchi 16-Tonnen-Bagger
TB1140E	SUNCAR 16-Tonnen- Elektrobagger auf Basis TB1140