



Zwischenbericht vom 25.07.2023

---

# Batterie-elektrischer Mobilbagger 15t Klasse

## Markterprobung von innovativen elektrischen Fahrzeugen und Maschinen



[SUNCAR]



**Datum:** 25.07.2023

**Ort:** Bern

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Sektion Energieforschung und Cleantech  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger/innen:**

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

KTEG GmbH  
Baindter Strasse 29  
88255 Baienfurt

EAC European Application Center GmbH  
Helmut-Kiesel-Strasse 2  
64589 Stockstadt

**Autor/in:**

Stefan Schneider, SUNCAR HK AG, [stefan.schneider@suncar-ag.com](mailto:stefan.schneider@suncar-ag.com)  
Rik Bättig, SUNCAR HK AG, [rik.baettig@suncar-ag.com](mailto:rik.baettig@suncar-ag.com)

**BFE-Projektbegleitung:**

Men Wirz, [men.wirz@bfe.admin.ch](mailto:men.wirz@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/502407-01

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



## Zusammenfassung

Mobilbagger werden häufig in innerstädtischen Baustellen eingesetzt, weil diese sich mit geeigneter Zulassung auf den öffentlichen Strassen bewegen können. So kann der Mobilbagger Aufgaben als Bindeglied zwischen mehreren Teilbaustellen fungieren und flexibel und effizient eingesetzt werden. Ein Mobilbagger ist vor allem auch ein universeller Anbaugeräteträger und keine Maschine, die stets die maximale Leistung abrufen. Dies sind geeignete Einsatzbedingungen, um lange Laufzeiten einer batterie-elektrische Maschine zu erreichen. Weitere Optimierungen im Antriebskonzept sind geplant, damit die geladene Energie einerseits zielgerichteter und effizient eingesetzt wird, aber auch die Rückspeisung in hydraulische und elektrische Speicher ermöglicht.

Durch die Umsetzung von zwei Prototypen in unterschiedlichen elektrischen Ausbaustufen wird dieses Projekt den direkten Vergleich zwischen hydraulischen, elektrohydraulischen und vollelektrischen Ansätzen erlauben. Eine Komponentenzusammenstellung, welche einen vollen Arbeitstag mit nur einer Batterieladung ermöglicht, wird gegen den Umrüstaufwand, Kosten und Komplexität abgewogen, mit dem Ziel, eine saubere und innovative Maschine für den wirtschaftlichen Betrieb in Städten zur Verfügung zu stellen. Als Herausforderungen im Projekt wurde in erster Linie die limitierte Verfügbarkeit von elektrischen und mechanischen Bauteilen und Komponenten für die Umsetzung von Einzelantrieben identifiziert. Lange Lieferzeiten und wenig ausgereifte, sprich wenig auf die Kundenanforderungen optimierte Produktlinien, haben bisher zu einem zeitintensiven Selektionsprozess geführt.

## Résumé

Les excavatrices mobiles sont fréquemment utilisées sur les chantiers urbains car elles peuvent circuler sur les routes publiques avec une autorisation appropriée. La polyvalence et l'efficacité de la pelle sur pneus lui permettent d'être utilisée de manière flexible sur plusieurs chantiers partiels. C'est un porte-outil universel et non une machine qui sollicite toujours la puissance maximale. Ces conditions sont idéales pour maximiser les durées de fonctionnement d'une machine électrique à batterie. D'autres optimisations du concept d'entraînement sont prévues afin d'utiliser l'énergie chargée de manière ciblée et efficace, mais également de permettre la récupération dans des réservoirs hydrauliques et électriques.

Grâce à la mise en œuvre de deux prototypes avec différents niveaux d'électrification, ce projet permettra une comparaison directe entre des approches hydrauliques, électrohydrauliques et entièrement électriques. Une configuration de composants permettant une journée de travail complète en une seule recharge sera évaluée en comparant les coûts, la complexité et les efforts de conversion, dans le but de fournir une machine propre et innovante pour une exploitation économique en milieu urbain. Le principal défi identifié dans le projet est la disponibilité limitée des pièces et composants électriques et mécaniques pour la mise en œuvre de systèmes d'entraînement indépendants. Les temps de livraison élevés et les lignes de produits peu développées, c'est-à-dire peu optimisées pour répondre aux exigences des clients, ont entraîné jusqu'à présent un processus de sélection de produits long et fastidieux.

## Summary

Mobile excavators are often used in inner-city construction sites because they can move on public roads with suitable permission. Thus, the wheeled excavator can act as a link between several sub-sites and can be used flexibly and efficiently. Above all, a wheeled excavator is also a universal attachment carrier and not a machine that always calls up maximum power. These are suitable operating conditions for achieving long run-times for a battery-electric machine. Further optimisations



in the drive concept are planned so that the charged energy is used in a more targeted and efficient manner on the one hand, but also enables the energy to be fed back into hydraulic and electric on-board storage systems.

By implementing two prototypes in different electrical configurations, this project will allow a direct comparison between hydraulic, electro-hydraulic and all-electric approaches. A component set that allows a full working day with only one battery charge will be weighed against the conversion effort, cost and complexity, with the aim of providing an environmentally friendly and innovative machine for economical operation in cities. Challenges identified in the project were primarily the limited availability of electrical and mechanical parts and components for the implementation of direct single drives. Long delivery times and product lines that are not very mature, i.e. not very optimised to customer requirements, have so far led to a time-consuming selection process.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>3</b>
<b>Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>8</b>
1.1 Ausgangslage und Hintergrund .....	8
1.2 Motivation des Projektes .....	8
1.3 Projektziele .....	9
<b>2 Anlagenbeschrieb</b> .....	<b>10</b>
2.1 Systemarchitektur .....	10
2.2 HV-Batterie .....	11
2.3 Hochvoltverteilsystem (HVDU) .....	11
2.4 Antriebsstränge .....	11
2.5 Drehdurchführung.....	11
2.6 AC-Ladegeräte .....	12
2.7 DC-Schnellladeschnittstelle.....	12
<b>3 Vorgehen und Methode</b> .....	<b>14</b>
3.1 Systemauslegung .....	14
3.2 Leistungsmessungen an Hydraulikbagger .....	15
3.2.1 Messstrategie .....	15
3.2.2 Messaufbau .....	16
3.2.3 Vorbereitung und Durchführung der Messungen .....	17
3.2.4 Schlussfolgerungen und Learnings .....	17
<b>4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse</b> .....	<b>18</b>
4.1 Auswahl der Komponenten .....	18
4.1.1 Elektrohydraulische Linearachse.....	18
4.1.2 Schwenkantrieb .....	18
4.1.3 Fahrtrieb .....	19
4.1.4 Elektrischer Hauptantrieb (Dieselersatz).....	20
4.1.5 Brems- und Pilotpumpe .....	21
4.2 Elektro.....	21
4.3 Thermomanagement .....	22
4.4 Konstruktion.....	22
<b>5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse</b> .....	<b>24</b>



<b>6</b>	<b>Weiteres Vorgehen .....</b>	<b>25</b>
6.1	Nächste Schritte .....	25
6.2	Erprobung, Monitoring & Datenanalyse .....	26
6.2.1	Eckpunkte der Vergleichsmessungen .....	26
6.2.2	Weitere Messaspekte .....	27
<b>7</b>	<b>Nationale und internationale Zusammenarbeit .....</b>	<b>28</b>
<b>8</b>	<b>Kommunikation .....</b>	<b>28</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>29</b>



## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bezeichnung</b>
AC	Wechselstrom (alternating current)
ACDU	Wechselstrom-Verteilssystem (alternating current distribution unit)
DC	Gleichstrom (directional current)
GUI	Graphic User Interface
HV	Hochvolt (high voltage)
HVDU	Hochvoltverteilsystem (high voltage distribution unit)
INSIGHT	Remote System für eine sichere Verbindung von Fahrzeugen & Maschinen mit dem Internet
LV	Niedervolt (low voltage)
LVDU	Niedervoltverteilsystem (low voltage distribution unit)
MOVLIMIT	Kombinierte Hub- und Schwenkbegrenzung für Bagger
OEM	Original Maschinenhersteller (original equipment manufacturer)
OW	Oberwagen
PDU	Leistungsverteilung (power distribution unit)
SoC	Ladestand der Batterie (state of charge)
UW	Untergarten



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Während der letzten Jahre hat SUNCAR, in Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern kontinuierlich ihr Wissen im Bereich der Elektrifizierung von Baggern erweitert und vertieft. Es wurden wertvolle Erfahrungen gesammelt, wodurch die Produkte stetig verbessert und weiterentwickelt werden konnten. Inzwischen kann SUNCAR auf die erfolgreiche Markteinführung von verschiedensten Maschinen von 2 bis 20 Tonnen zurückblicken. Über die interne Serviceabteilung, welche als Bindeglied zwischen Betreiber/Händler und Hersteller agiert, entsteht ein Feedback-Loop, welcher die Weiter- und Neuentwicklung von Maschinen direkt mit den Erfahrungen aus dem Feld verbindet. Stand heute sind auf dem europäischen Markt über 250 Elektro-Raupenbagger (auf Basismodellen von Herstellern wie Takeuchi, Hitachi und Caterpillar), welche mit SUNCAR entwickelt wurden, im täglichen produktiven Einsatz. Mit der Zusammenarbeit der herstellenden Firmen (OEMs) erhofft man sich in den nächsten Jahren dank kostengünstiger Serienproduktion von elektrischen Baggern einen Durchbruch im Weltmarkt. Zwischenzeitlich werden die umweltbewussten lokalen, europäischen Märkte mit Kleinserien von lokalen Händlern bedient.

Elektrobagger ziehen im Vergleich zu herkömmlichen Dieselmotoren nicht nur gleich, sondern weisen sogar weitreichende Vorteile auf, wobei die regulären Anforderungen an Sicherheit und Robustheit weiterhin erfüllt werden. Die elektrische Umrüstung erlaubt substantielle Einsparungen an Primärenergie dank 2.5-facher Effizienzsteigerung, je nach Maschine über 90% reduzierte Treibhausgas-Emissionen, weniger Lärm und Vibrationen sowie Energiekosteneinsparungen von 70%.<sup>1</sup> Das Arbeiten mit einer elektrischen Maschine ist laut vielen begeisterten Maschinenfahrern auch direkter und effizienter, da der Elektromotor sehr dynamisch ist und bei Bedarf Spitzenleistungen abrufen kann.

## 1.2 Motivation des Projektes

Basierend auf den Erkenntnissen der bisher entwickelten Raupen-Elektrobagger, sollen in diesem Projekt zwei Hitachi ZX150W-7 Dieselmotoren für den batterie-elektrischen Betrieb (mit neuer Bezeichnung ZE150W) umgerüstet werden. Beim ersten der beiden Prototypen wird, abgesehen von einem direkt-elektrischen Fahrantrieb, das originale Hydrauliksystem unter Verwendung eines elektrischen Antriebs beibehalten. Der zweite erhält zusätzlich einen direkt-elektrischen Schwenkantrieb und eine überarbeitete Hydraulik, um eine noch höhere Energieeffizienz zu erreichen und sogar Energierückgewinnung (Rekuperation) über den Hubzylinder zu ermöglichen. Die Anforderungen an einen energieautarken Betrieb des 15t Mobil-Elektrobaggers während eines ganzen Tages definieren die benötigte Batterie-, Antriebs- und Ladetechnik. Die Mehr- bzw. Investitionskosten des künftigen Serien-Elektrobaggers sollen sich, über die Lebensdauer des Baggers, durch tiefere Betriebs- und Servicekosten amortisieren lassen.

---

<sup>1</sup> Siehe dazu den BFE Schlussbericht "SUNCAR Elektrobagger" vom 21. September 2018, Seite 3ff. Abrufbar unter: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=46789&Load=true>.



**Abbildung 1: Hitachi ZX150W-7, neuste Baureihe Diesel-Mobilbagger**

Motornennleistung (kW): **105 (ISO 14396)/100 (ISO 9249)**

Betriebsgewicht (kg): **15,300 - 17,200 kg**

Tieföffel (ISO gehäuft): **0.19 - 0.66m<sup>3</sup>**

Verfügbar in: **Europe**

Mit dem neuen Mobilbagger ZX150W-7 haben Sie alles sicher unter Kontrolle. So können Sie sich auf die Leistung Ihrer Maschine verlassen und Ihre Gewinne steigern. Darüber hinaus können Sie sich auf höchste Qualität, ultimativen Bedienkomfort und sinkende Betriebskosten freuen.

**Abbildung 2: Technische Daten**

[[hitachim.eu/de/maschinen/bagger/mobilbagger/zx150w-7/](http://hitachim.eu/de/maschinen/bagger/mobilbagger/zx150w-7/)]

Die Lehren und Schlussfolgerungen aus dem Projekt sollen indes nicht nur für die angedachte Serie des elektrifizierten ZX150W-7 verwendet werden, sondern auch möglichst breit in andere Projekte einfließen. Insbesondere die Resultate aus dem gemessenen Einsparpotenzial aus elektrischem Schwenkantrieb und effizienzgesteigerter Hubzylinder-Hydraulik können mit entsprechendem Hintergrundwissen auf andere Maschinengrößen skaliert werden.

Die angestrebte Effizienzsteigerung kann in einem zweiten Schritt entweder für einen Betrieb ohne Zwischenladung angepriesen oder für eine reduzierte Anzahl Batterien in der Maschine verwendet werden. Langfristig wird dadurch eine erhöhte Akzeptanz durch ebenbürtige Betriebszeiten von elektrischen Maschinen angestrebt. Wobei eine Reduktion der verbauten Batteriekapazität zu geringeren Investitionskosten führen könnte.

Eine laufende Verbesserung der Produkte und kontinuierliche Innovation ist essenziell, sodass die batterie-elektrischen Baumaschinen für mehr und mehr Anwendungen zur vorteilhaften, und nicht nur umweltneutralen, Antriebstechnologie wird. In diesem Aspekt ist das laufende ZE150W Projekt ein wichtiger Baustein hin zu effizienten, saubereren und wirtschaftlich attraktiven elektrischen Baumaschinen.

### 1.3 Projektziele

Der Fokus der Projektziele liegt auf der erwähnten Effizienzsteigerung, in Kombination mit der Analyse der Wirtschaftlichkeit und der technischen Prüfung zur Serientauglichkeit.

Folgende konkreten Ziele und Fragestellungen sollen beantwortet werden:

- Deutliche **Steigerung des Gesamtwirkungsgrades** vom Dieselbagger zum Elektrobagger (anhand realitätsnaher Standard-Arbeitsprofile)
  - >3x Effizienz beim batterie-elektrischen Prototyp mit originalem Hydrauliksystem und rotatorischen direkt-elektrischen Fahrtrieben
  - >3.5x Effizienz beim Prototyp mit direkt-elektrischen Schwenkantrieb und zusätzlich optimierten Hydrauliksystem
- **Mehrkosten** einer **Serienproduktion** der Elektromobilbagger ZE150W sollen nicht höher sein als die Energie- und **Betriebskosten-Einsparungen** während der Lebensdauer des Baggers
  - Elektrische Drehdurchführung und elektrische Fahrmotoren bringen die notwendige Reichweite für den alltäglichen Betrieb
  - Hydraulische Optimierungen bringen die relevante Betriebszeitverlängerung und ermöglichen eine kleinere Batteriekapazität bzw. höhere Betriebszeiten



- Verringerung der **Lärmemission** im Betrieb, minimale Lärmemission im Stillstand
- Untersuchung **technischer Serientauglichkeit, Robustheit** und **Zuverlässigkeit** von den einzelnen Innovationen im Antriebs- und Hydrauliksystem
  - Applikationsabnahme aller neuen Komponenten im System, zusammen mit den Herstellern, als Grundlage für die technische Freigabe für einen Serienanlauf
  - Einsatz auf dem Testgelände und realen Baustellen mit professionellem Personal

## 2 Anlagenbeschreibung

Der Bagger kann grob in zwei Bauräume unterteilt werden, den Unter- (UW) und den Oberwagen (OW) (Abbildung 3 und Abbildung 4). Diese sind in der Originalmaschine durch eine hydraulische Drehdurchführung miteinander verbunden, welche die Antriebssysteme bzw. Hydraulikpumpen im OW mit dem Hydraulik-Fahrmotor und anderen Hydraulikverbrauchern im UW verbindet. Basierend auf der neuen Anforderung wird zur Übertragung des elektrischen Stroms für die geplanten Prototypen eine zusätzliche elektrische Drehdurchführung eingesetzt. Diese ermöglicht zum einen die Versorgung des elektrischen Fahrtriebs über die im Oberwagen liegenden HV-Batterien, andersherum aber auch Energie der im UW verbauten Ladegeräte nach oben in die HV-Batterie zu speisen.

### 2.1 Systemarchitektur

Die beiden Prototypen werden nicht baugleich gebaut, um die Ansätze direkt miteinander vergleichen zu können.

- Prototyp 0: 1 (temporäre Ausbaustufe der Maschine 1)
- Prototyp 1: 1+2a (Maschine 1)
- Prototyp 2: 1+2a+2b+3+4 (Maschine 2)

1. Es wird ein elektrisches Antriebskonzept für die Haupthydraulik (Dieselersatz) umgesetzt.
2. Die rotatorischen Hydraulikmotoren werden durch elektrische Antriebe ersetzt.  
Im Falle der vorliegenden Maschine wird je ein elektrischer Antrieb für den Schwenkantrieb sowie den Fahrtrieb eingesetzt.
  - a. Ein elektrischer Fahrtrieb setzt die Versorgung des Unterwagens mit Strom mittels elektrischer Drehdurchführung voraus.
  - b. Die Integration eines elektrischen Schwenkantriebs stellt aufgrund verschiedener technischer Herausforderungen ein Risiko dar.

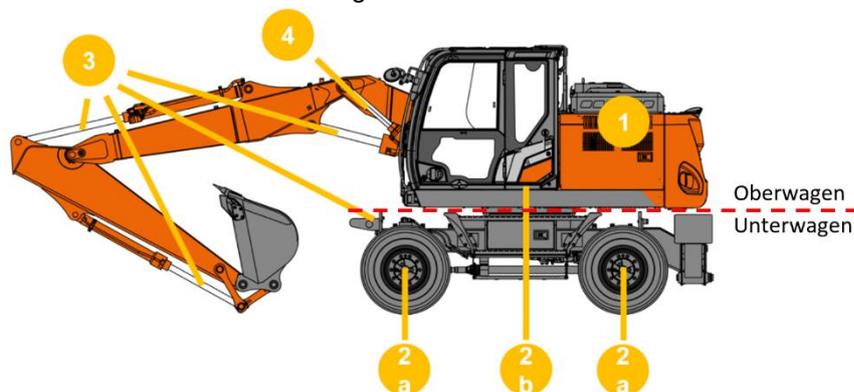


Abbildung 3: Schematische Darstellung der verschiedenen elektrischen Ausbaustufen des Mobilbaggers



3. Die hydraulischen Funktionen (z.B. Stiel, Löffel, Schild, etc.) sollten ursprünglich mit einer zusätzlichen Pumpen-Lösung versorgt werden, welche für den Einsatz mit einem Elektromotor optimiert wurde. Nach eingehender Betrachtung der originalen Hydraulik-Architektur wurde aber davon abgesehen, weil sich die erhöhte Komplexität, die Kosten und der Aufwand nicht genügend im Nutzen widerspiegelt hätten. Des Weiteren bedeutet die Auskopplung des Auslegers über die 4. Ausbaumassnahme bereits eine substantielle Reduktion von Hydraulikverlusten im Übrigen hydraulischen Regelkreis.
4. Der Antrieb des Auslegers soll mit einem neuartigen elektrohydraulischen Linearantrieb ausgestattet werden.

## 2.2 HV-Batterie

Die für den ZE150W vorgesehene HV-Batterie besteht aus drei parallel verschalteten Lithium-Ionen NMC Modulen. Um optimale Voraussetzungen für den erhöhten Platzbedarf der erweiterten Maschinenarchitektur (zusätzlichen elektrische Antriebe und Hydrauliksysteme) zu schaffen, wurde für den Mobilbagger eine Batterie mit zylindrischen Zellen vorgesehen, welche gegenüber vorhergehenden Modellen eine 50% höhere volumetrische Energiedichte aufweist.

## 2.3 Hochvoltverteilsystem (HVDU)

Eine HVDU ist ein elektrischer Knotenpunkt, welcher die HV-Komponenten einer Maschine miteinander verbindet. Gleichzeitig ist es der Sicherungskasten der Maschine. Jeder angeschlossene Verbraucher und alle Quellen werden bezüglich der jeweiligen nominellen und maximalen Strombedarfs analysiert und entsprechende Kabel und Sicherungen dafür ausgelegt. Die in den von Maschinen von SUNCAR eingesetzten HVDUs werden selbst entwickelt, hergestellt und in verschiedenen Standardgrößen aber auch nach Kundenwunsch gefertigt.

## 2.4 Antriebsstränge

Die Antriebe des ZE150W sind in elektrohydraulische und elektrische Stränge zu unterteilen. Es werden Fahrtrieb, Schwenkantrieb, Hauptpumpenantrieb (Dieselersatz), Ausleger-Zylinder, und Brems- und Pilottrieb individuell genauer analysiert. Der Vorteil von direkt elektrischen Antrieben gegenüber der Leistungsübertragung über die Hydraulik ist, dass Energie wieder ins System zurückgespielt werden kann. Gleichermassen kann die für den Ausleger eingesetzte elektrohydraulische Linearachse auch Energie rekuperieren, da die dort eingesetzte Hydraulikpumpe nicht nur Arbeit verrichten, sondern auch Energie aus der Hydraulik über die Pumpe und den Elektromotor elektrisch zurückführen kann. Denn, anders als bei herkömmlicher Hydraulik, wird die von extern verrichtete Arbeit nicht gegen den Tank entlastet, sondern einerseits über die Pumpe elektrohydraulisch abgebaut und andererseits in einem Hydraulikakkumulator zwischengespeichert.

## 2.5 Drehdurchführung

Den Unter- und Oberwagen elektrisch miteinander zu verbinden, ist eine neue Herausforderung, welche bei anderen Baggern noch nicht realisiert wurde. Zwar verfügte die Originalarchitektur des Mobilbaggers bereits über einen Niedervolt-Schleifring mit einer geringen Anzahl an Signalen, jedoch muss für die HV-Leitungen und die höheren Leistungen ein neues System eingebaut werden. Neben verschiedenen Übertragungstechniken gibt es auch unterschiedliche geometrische Ansätze. Für die vorliegende Maschine wurde eine kombinierte Durchführung aus LV- und HV-Wegen gewählt, welche unterhalb der hydraulischen Drehdurchführung aufgebaut wird.



## 2.6 AC-Ladegeräte

Die Aufgabe der AC-Ladegeräte ist es, die Energiezufuhr während und nach dem Betrieb zu gewährleisten. Die AC-Ladetechnik ermöglicht es, unkompliziert und direkt von der vorhandenen Steckdose zu laden.

Zu Beginn wurde über die Positionierung der Ladegeräte im Oberwagen, respektive Unterwagen diskutiert. Es sprechen jedoch mehrere Gründe dafür, diese im UW zu verstauen, vor allem weil für den Inverter des Fahrmotors bereits Gleichstrom HV-Wege für die Drehdurchführung vorgesehen sind, welche auch für die Verbindung der Ladegeräte mit der HV-Batterie mitgenutzt werden können. Des Weiteren verfügt der UW noch über weitestgehend ungenutzten Bauraum, der verwendet werden kann. Abschliessend wurde entschieden, optimale Voraussetzungen für den Kabelbetrieb zu schaffen. Einen Anschluss im Unterwagen bei den Ladegeräten ist aus diesem Grund sinnvoll, da der UW während den Arbeiten eher noch stationär bleibt, wobei der OW tendenziell oft wiederholt rotiert.

## 2.7 DC-Schnellladeschnittstelle

Der Mobilbagger soll in weniger als 1h wieder betriebsbereit sein, um maximale Verfügbarkeit zu ermöglichen. Dies wird nur durch eine DC-Schnellladeschnittstelle erreicht, welche bis zu 300 kW Ladeleistung ermöglicht. Es wurde eine Lösung evaluiert, welche sich mit wenig Aufwand zukünftig auch optional, auf Kundenwunsch, in eine Maschine integrieren lässt. Der Betrieb eines separaten AC-Ladegeräts muss weiterhin gewährleistet bleiben. Die Kommunikationseinheit, die Strommessung und die Relais ermöglichen ein sicheres Laden der HV-Batterien nach dem CCS2.0 Standard.

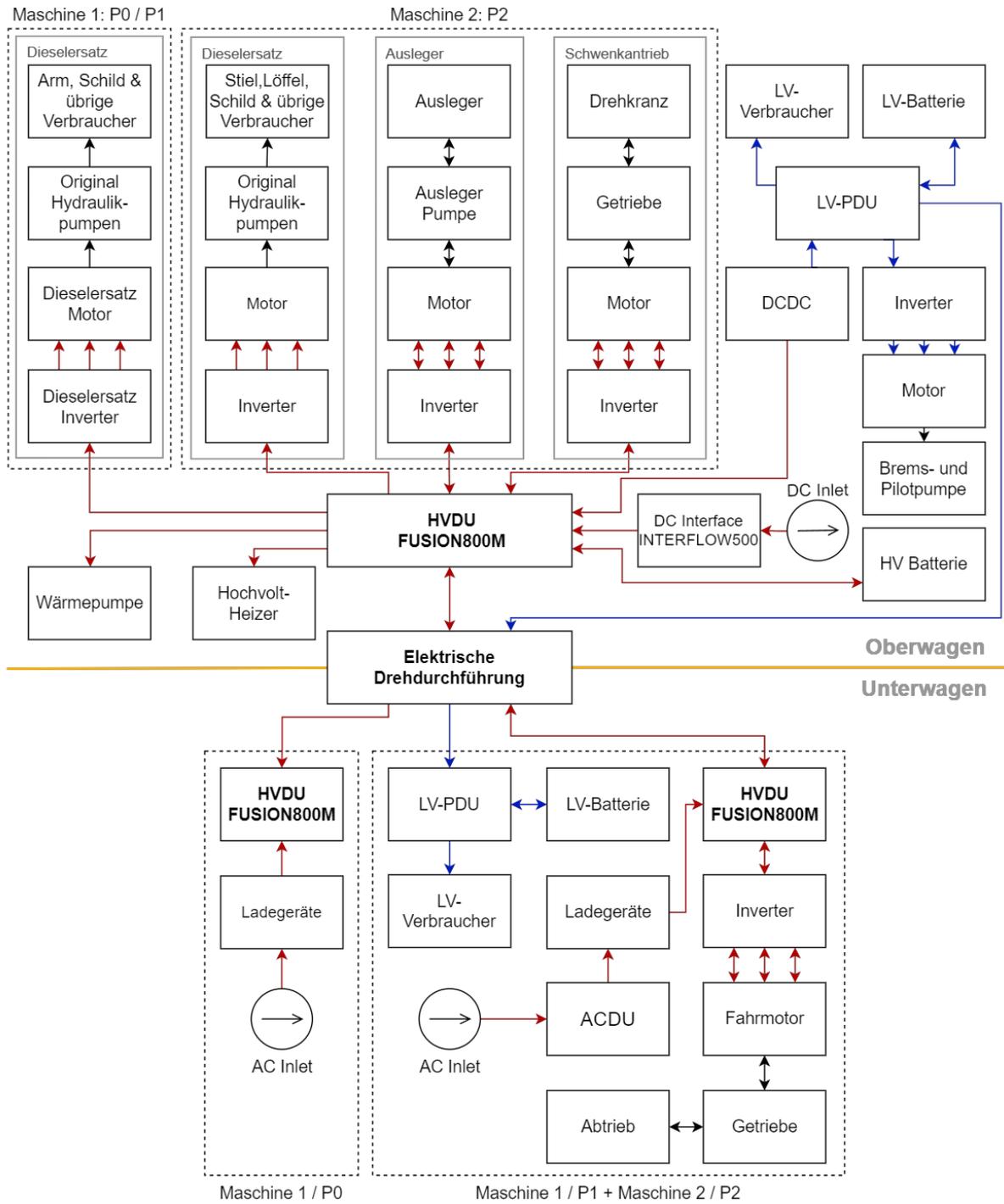


Abbildung 4: Systemschaubild des ZE150W in unterschiedlicher Ausführung als P0, P1 und P2.



## 3 Vorgehen und Methode

Das Projekt kann in die Arbeitsschritte Entwicklung, Montage & Inbetriebnahme, Dokumentation & Zulassung, Erprobung & Monitoring & Datenanalyse gegliedert werden. Diese Schritte werden im Folgenden erklärt. Es werden jeweils einzelne Arbeitspakete besonders hervorgehoben welchen innovativen Charakter haben und / oder eine besondere Herausforderung im Rahmen des Projektes darstellen.

- Systemauslegung (Verantwortlich: SUNCAR)
  - Bestimmung der übergeordneten Systemarchitektur
  - Auslegung des Thermomanagement-Konzepts
  - Recherche und Definition der Haupt-Komponenten (Batterie, Inverter, Motor, elektrische Drehdurchführung, etc.)
- Elektro-Engineering (Verantwortlich: SUNCAR)
  - Definition des Elektro-Schemas
  - Projektierung und Erstellung Unterlagen aller Kabelbäume (HV, LV, Masse)
- Thermomanagement (Verantwortlich: SUNCAR)
  - Auslegung Kreisläufe und Definition Thermo-Schema
  - Planung Thermoeinheit
- Software (Verantwortlich: SUNCAR)
  - Programmierung Ansteuerung des gesamten elektrischen Antriebstranges
  - Programmierung Benutzerschnittstelle ergänzend zu Standarddisplay
  - Schnittstellen zu Hydraulik und Original-Maschine
  - Schnittstelle zum Remote System
- Konstruktion (Verantwortlich: KTEG)
  - Positionierung aller Komponenten (Packaging)
  - Konstruktion Befestigungselemente, sowie von neuen Baugruppen (Batteriecontainer, Thermomanagementsystem, etc.)
- Projektmanagement (Verantwortlich: SUNCAR)
  - Materialbeschaffung
  - Zeitplanung und Ressourcenmanagement
  - Technische Projektleitung

### 3.1 Systemauslegung

Die Systemauslegung kann grob in drei Abschnitte unterteilt werden, welche im Folgenden kurz erläutert werden. Die erfahrenen Schwierigkeiten oder voraussichtliche Herausforderungen werden hervorgehoben.

1. In einer ersten Phase wird eine allgemeine **Komponentenzusammenstellung** aller wichtigen Bauteile der Maschine erstellt. Dafür wird das Fahrzeug fortlaufend analysiert und alles betrachtet, was Optimierungspotenzial birgt. Jede neue Komponente wird durch die folgenden Fragestellungen überprüft:
  - Wie gestaltet sich der Betrieb der Komponente über einen Tag? Welche Dauer- und Spitzenwerte sind zu erwarten? Soll dieser unverändert bleiben oder kann optimiert werden?
  - Ist die neue Komponente dazu geeignet, die gewünschte Funktion zufriedenstellend abzubilden? Ergeben sich Vorteile oder müssen Abstriche gemacht werden?
  - Hat der Komponentenwechsel einen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Maschine? Müssen bspw. ergänzende Sicherheitsmassnahmen getroffen werden?



Begleitend dazu wird Kontakt mit verschiedenen Herstellern aufgenommen, welche nebst technischen Anforderungen auch logistische und kaufmännische Kriterien erfüllen müssen.

2. Selbstredend sind auch während der Komponentenrecherche bereits konstruktive Abklärungen nötig. Die **Auskonstruktion** wird aber möglichst aufgeschoben, um die Bestellungen möglichst früh auslösen zu können. Darauf folgen der **Stahlbau**, die **Kabelbaumfertigung** und der **Aufbau** der Container, welche schlussendlich auf die Maschinen aufgebaut werden.
3. Überschneidend mit den Aufbauarbeiten werden elektrische Komponenten **in Betrieb genommen**, um das Mass an Anpassungen auf der Maschine zu reduzieren. Sobald Teile der Elektronik und der Komponenten funktionstüchtig auf der Maschine verbaut sind, wird das **Testing** hochgefahren, welches nach der Fertigstellung bis hin zu Feldtests bei potenziellen Kunden reicht. Eine abschliessende **Dokumentation** zieht Bilanz über das Projekt und garantiert für einen sachgemässen Gebrauch der Maschine.

## 3.2 Leistungsmessungen an Hydraulikbagger

Die weiterführende Umrüstung einzelner Verbraucher auf dem Mobilbagger hat neue Herausforderungen mit sich gebracht, welche bei SUNCAR bisher nicht in diesem Ausmass umgesetzt wurden. Viele der bisherigen Elektrifizierungsprojekte haben sich entweder auf einen alleinigen Ersatz des Dieselmotors konzentriert oder die Spezifikationen der Nebenantriebe konnten mit dem Kunden eruiert werden.

Im Sinne der ersten (Komponentenselektion) und letzten (Testing und Dokumentation) Phase wurde deshalb im Februar eine erste Messkampagne an einer Dieselmachine durchgeführt. Einerseits wurde dadurch eine solide Entscheidungsbasis für die Auswahl der elektrischen Antriebe und anderer Hauptkomponenten geschaffen und andererseits konnte ein erster Benchmark als Vergleichsbasis für die künftig umgerüsteten Maschinen gemacht werden. Ein ZX155W, welcher bezüglich Leistung und Aufbau deckungsgleich mit dem ZX150W ist, wurde deshalb hydraulisch während verschiedenen Arbeits- und Bewegungsabläufen vermessen. Aus den Daten konnten der Leistungsbedarf einzelner Verbraucher aber auch der gesamten Maschine berechnet werden, was Aufschluss über die eingeforderten Betriebszyklen der neuen elektrischen Arbeitsstränge gibt.

### 3.2.1 Messstrategie

In einem ersten Schritt wurde eine Übersicht aller hydraulischen Verbraucher gemäss Abbildung 5 erstellt. Solche die entweder bereits in vergangenen Datenerhebungen quantifiziert wurden oder nicht regelmässig und über längere Zeit im Einsatz stehen, wurden nicht weiter analysiert (vgl. ausgegraute

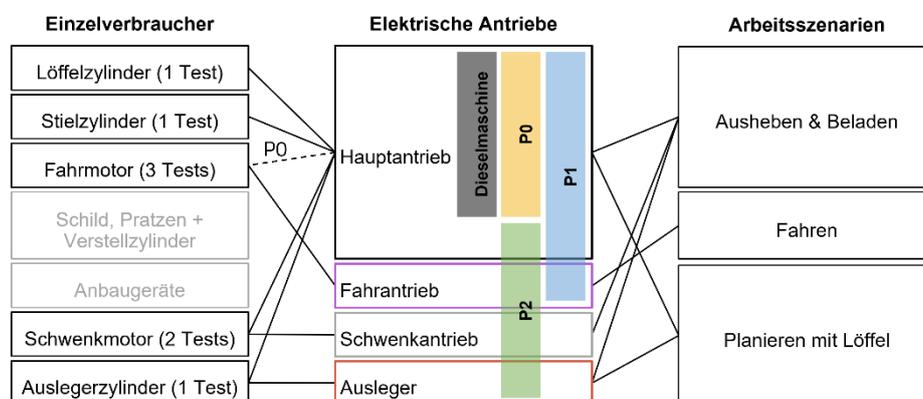


Abbildung 5: Übersichtsdigramm der zu messenden Verbraucher, der elektrischen Ersatzkomponenten und der ausgewählten Arbeitsszenarien.



Felder in Abbildung 5). Die übrigen Verbraucher wurden im Anschluss den vorgesehenen elektrischen Antrieben zugeteilt. Da die Verschaltung der Hydraulik zwischen Pumpen und Verbrauchern aber nicht geradlinig ist, war umso mehr auch die Aufzeichnung von Leistungsdaten während vordefinierten Arbeitsszenarien wichtig. Aus einer Mischung von Einzelverbraucher- und Szenarien-Messung konnte anschliessend eine fundierte Komponentenauslegung und eine Abschätzung des Energieverbrauch gemacht werden.

### 3.2.2 Messaufbau

Die Auswahl und der Aufbau der Sensoren, sowie die Messszenarien wurden umfangreich geplant, um alle involvierten Parteien zu miteinzubeziehen und schlussendlich die effektiv benötigten Daten erhoben zu haben. In einem ersten Schritt wurde für jeden neuen elektrischen Antrieb die Messstrategie und das am Bagger dafür benötigte Setup definiert. Dieser Aufstellung entsprang ein Messaufbau (Abbildung 6) in zwei verschiedenen Konfigurationen:

- **10 Drucksensoren:** Diese greifen den Druck an Pumpen und Verbrauchern ab, um Verlust- und Arbeitsleistung zu berechnen.
- **2 Messturbinen:** Der hydraulische Volumenstrom wird zusammen mit dem Druck für die hydraulische Leistungsberechnung verwendet. Gleichzeitig wurden die Messdaten zur Validierung mit den Resultaten der Neigungssensoren; Speziell bei komplexeren Gelenkkinematiken war der Vergleich sehr wichtig, da kleine Fehler in Bewegungsgleichungen schnell zu falschen Resultaten führen können.
- **5 Neigungssensoren:** Das MOVLIMIT Sensor Kit aus dem Produktportfolio von SUNCAR wurde für die Bewegung des Oberwagens und der Armkomponenten verwendet. Die relativen Winkel zwischen den Sensoren wurden anschliessend in Zylinderbewegungen umgerechnet, was auf den Öl-Volumenstrom schliessen lässt. Dieser fliesst wiederum in die Leistungsberechnung ein.
- **2 Kameras:** Eine externe und eine interne Kamera wurde installiert. Erstere filmte die Kabine, damit alle Steuerinputs, welche beispielsweise mit Drucksensoren gemessen werden, einem



Abbildung 6: Aufbau der Sensorik für die Benchmark Messungen an einer ZX155W Dieselmachine während den Messtagen [SUNCAR].



visuellen Plausibilitätscheck unterzogen werden könnten. Die externen Aufnahmen wurden verwendet, um auffällige Messdaten mit den effektiven Arbeiten zu überprüfen.

### 3.2.3 Vorbereitung und Durchführung der Messungen

Jede Messung wurde im Voraus genauestens definiert, um möglichst eindeutige Resultate zu erhalten und einen späteren Vergleich unter gleichen Bedingungen zu ermöglichen. Dafür wurde neben einem genauen Beschrieb der Ausgangslage, der auszuführenden Arbeit oder Bewegung und der Endposition auch eine Checkliste erstellt. Diese fordert eine Prüfung spezifischer Punkte zu Beginn des Messtages, nach jeder Messung, vor jeder Messung und nach grösseren Pausen. Nebst dem Teil der Checkliste, welcher sich mit den eigentlichen Vorbereitungsarbeiten befasst, sind auch Punkte aus der Umwelt/Umgebungsanalyse eingeflossen, wie in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Äussere Einflussfaktoren auf die Messungen und deren Ergebnisse.

<b>Einfluss</b>	<b>Ausmass</b>	<b>Steuerbar</b>	<b>Konsequenz</b>
Aussentemperatur	Red	Yellow	Aufwärmen und Klimageräte separat betrachten. Alle Messungen möglichst kurz aufeinanderfolgend durchführen.
SoC Batterie	Yellow	Yellow	Bereich: 30-100 % und notieren
Öltemperatur	Red	Green	Aufwärmen der Hydraulik vor den Tests
Baggerfahrer	Yellow	Red	Nach Möglichkeit gleicher Fahrer für alle Tests
Dichte des Aushubs	Red	Yellow	Gleiche Testumgebung
Bodenbeschaffenheit	Yellow	Green	Gleiche Testumgebung
Neigung Untergrund	Yellow	Green	Gleiche Testumgebung

### 3.2.4 Schlussfolgerungen und Learnings

Nach den Messungen und während den Auswertungen wurde mit den Projektpartner und Hydraulikexperten eine Liste von Learnings erstellt Ein paar Punkte werden hier wiedergegeben:

- **Nomenklatur:** Da für jede Messung eine Reihe von verschiedenen Messgeräten und Kameras involviert waren, stellte sich eine vorgängig definierte, logische und eindeutige Benennung jeder Messung als sehr wertvoll dar, um am Ende eines Messtages den Überblick über die erfassten Daten zu behalten.
- **Sicherheit:** Wird auf Flächen getestet, welche auch von anderen Personen teilweise benutzt/befahren werden, muss der Bewegungsbereich klar mit Pylonen gekennzeichnet werden.
- **Testablauf:** Um Fehler möglichst zu vermeiden sollten die Test-Skizzen dem Baggerfahrer während den Messungen immer zur Hand sein, damit die Abläufe klar sind und falsche Manipulationen vermieden werden können.



## 4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Ein beachtlicher Teil der bisherig investierten Ressourcen wurde in die sorgfältige Komponentenrecherche investiert, welche sich deutlich zeitintensiver gestaltet hat als initial eingeschätzt. Die vielen Neuerungen in der Maschinenarchitektur, sowie teilweise undurchsichtige Portfoliopäsentation der evaluierten Hersteller und Lieferanten setzten einen intensiven Dialog im Selektionsprozess voraus, wobei sich schlussendlich teilweise herausstellte, dass nicht geliefert werden kann was versprochen wurde. Gerade hinsichtlich dessen hat sich eine ausführliche und umfangreiche Messkampagne definitiv ausgezahlt.

### 4.1 Auswahl der Komponenten

#### 4.1.1 Elektrohydraulische Linearachse

Um das elektrohydraulische System auf die entsprechende Maschine auszulegen, reichen die Angaben aus dem Maschinenhandbuch weitestgehend aus. Für die Feinabstimmung und insbesondere um das Effizienzsteigerungs-Potenzial vollständig auszuschöpfen, lohnt es sich mit der Diesel-Maschine einige Arbeitszyklen aufzuzeichnen und auszuwerten.

Die erhobenen Messdaten wurden im Anschluss verwendet, um den Einfluss verschiedener zur Auswahl stehenden Hydraulikspeichergrossen abzuschätzen. Weiter wurde damit ein Input für die Simulation generiert, welche bereits jetzt gewisse Prognosen zur potenziellen Energieeinsparung erlaubt.

#### 4.1.2 Schwenkantrieb

Die Auslegung des Schwenkantriebs wurde massgebend durch die Auswertung der Messdaten vorangetrieben. Die technischen Angaben des bis anhin eingesetzten Hydraulikmotors konnten zwar eingesehen werden, aber die effektiv benötigte und abgerufene Leistung ist schwierig einzuschätzen. Teilweise wird vom Maschinenhersteller eine Gleichteile-Strategie verfolgt, was bedeutet, dass die Leistung des Motors eventuell auf grössere Maschinen des Herstellers ausgelegt wurde. Dazu kommt, dass ein Hydraulikmotor nicht zwischen einem Spitzen- und Dauerbetriebs-Bereich unterscheidet,

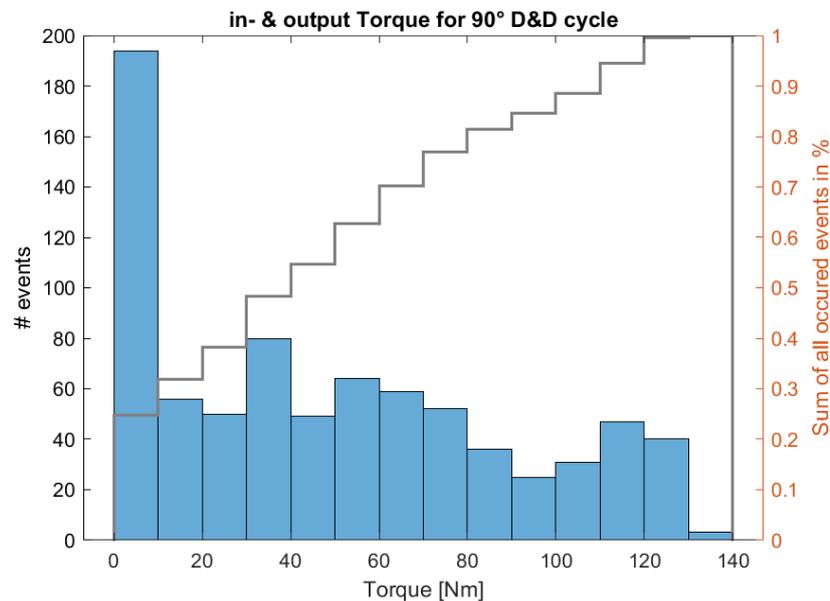


Abbildung 7: Berechnetes Drehmoment am Ritzel des elektrischen Schwenkmotors während eines Grabzyklus auf der primären y-Achse. Histogramm des Drehmoments, inklusive Rekuperationsbelastung, auf der sekundären y-Achse.

Die erhobenen Messdaten mussten so gefiltert werden, dass nur Datenpunkte zählen, während welchen der Motor Arbeit verrichtet, da die aufgezeichneten Drücke während passiven Bremsphasen die Resultate ansonsten verfälscht hätten. Das bedeutet wiederum, dass die Rekuperation, welche den Motor gleichermassen thermisch belastet, später wieder in die Daten eingesetzt werden musste. Der Graph in Abbildung 7 berücksichtigt all diese Faktoren, und zeigt deutlich, dass der Motor in 25% der Fälle während eines Grabzyklus nicht beansprucht wird. Um die effektiv auf den Motor wirkenden Momente abzuleiten, musste anschliessend die neue Übersetzung vom Drehkranz zum Ritzel und das mehrstufige Planetengetriebe berücksichtigt werden. Bei der Wahl der Übersetzungen wurde darauf geachtet, dass die voraussichtlichen Betriebspunkte innerhalb hoher Effizienzbereiche des Antriebsstrangs zu liegen kommen. Nicht zuletzt muss aber auch ein Getriebe gewählt werden, welches innert nützlicher Frist geliefert werden kann und möglichst aus Standardkomponenten besteht. Gerade das scheint aber sehr schwierig zu sein, weil herkömmliche Getriebe auf den hydraulischen Betrieb ausgelegt wurden, sich die tiefen Übersetzungsverhältnis aber nur bedingt für den elektrischen Einsatz eignen.

#### 4.1.3 Fahrtrieb

Die Evaluation eines passenden Fahrtriebs war vor allem aus Platzgründen eine besondere Herausforderung. Der Bauraum wird durch das Chassis, die Antriebswelle und in der Länge von der neuen elektrischen Drehdurchführung begrenzt. Da zum Zeitpunkt der Antriebsselektion aber auch die Dimension der elektrischen Drehdurchführung noch nicht geklärt war, musste parallel in Varianten gearbeitet werden, welche nachfolgend und in Abbildung 8 kurz beschrieben werden.

Der vertikale Einbau des Getriebes (Option 3 und 4) führte zu einer grossen exponierten Fläche der elektrischen Komponenten auf der Fahrzeug-Unterseite, wobei auch die Platzverhältnisse nicht massgeblich verbessert werden würden, weshalb dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde.

Neben dem einen Zweigang-Lastschaltgetriebe, wie in der Originalmaschine vorhanden, wurde auch ein Einganggetriebe diskutiert (Option 2 und 3). Dieses würde zwar die Komplexität des Antriebsstrangs verringern, konnte mit den evaluierten Komponenten (Getriebe und Motoren) aber nicht gleichzeitig genügend Drehmoment und eine ausreichende Abdeckung des Fahrgeschwindigkeitsspektrums erreichen.



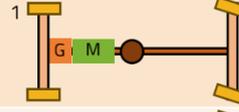
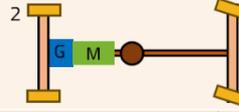
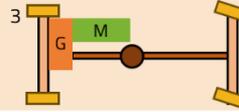
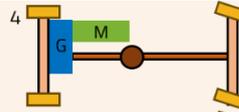
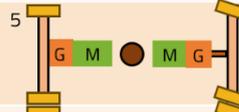
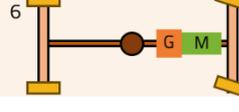
	Beschrieb / Kommentar	Leistung	Komplexität	Konstruktion	Total
1	 <b>Vertikales Zweigangetriebe</b> (Originalkonfiguration) + Leistungsanforderungen können abgedeckt werden - Enge Platzverhältnisse (Schleifringkörper und Antriebswelle)	+	o	+	++
2	 <b>Vertikales Einganggetriebe mit höherer Übersetzung</b> +/- Mehr Leistung bei tiefen Fahrgeschwindigkeiten, tieferer Topspeed - Konstruktive Änderungen am Chassis (grösserer Achsabstand Getriebe) - Enge Platzverhältnisse (Schleifringkörper)	+	+	--	o
3	 <b>Horizontales Zweigangetriebe</b> + Längerer Motor kann eingebaut werden - Bodennähe (Getriebe und Motor exponiert und wenig Bodenfreiheit)	+	o	-	+
4	 <b>Vertikales Einganggetriebe</b> +/- Mehr Leistung bei tiefen Fahrgeschwindigkeiten, tieferer Topspeed + Längerer Motor möglich, Durchmesser abhängig von Achsversatz - Bodennähe (Getriebe und Motor exponiert und wenig Bodenfreiheit)	+	+	-	+
5	 <b>Zweimotorenlösung</b> - Zusätzliches Getriebe - Wenig Platz für Pendelachse und Längenausgleich - Synchronisierung Motoren komplex	++	--	--	--
6	 <b>Zweigangetriebe axial verschieben</b> - Chassis muss stark angepasst werden - Wenig Platz für Pendelachse und Längenausgleich	+	-	---	---

Abbildung 8: Evaluationsmatrix für alternative Antriebskonfigurationen. Die schematischen Fahrzeugabbildungen zeigen die starre, sowie die gelenkte Achse, das Getriebe (G), den Motor (M), Die Antriebswelle und mittig zwischen den Achsen die hydraulische und elektrische Drehdurchführung.

Weiter wurde ein separater Antrieb für jede Achse betrachtet (Option 5), dies wurde aber aus Gründen der Komplexität in der Ansteuerung bzw. Synchronisation und Platzgründen ausgeschlossen. Eine axiale Verschiebung des Getriebes (Option 6) in den vorderen Teil des Fahrzeugs wurde ebenfalls geprüft. Dies führt jedoch zu Schwierigkeiten mit ausreichendem Platz für den Längenausgleich der Pendelachse.

Schlussendlich wurde ein neues Zweigangetriebe zusammen mit einem Motor und Umrichter aus gleicher Hand gewählt (Option 1), um Schwierigkeiten bei der Schnittstellendefinition vorzubeugen. Obschon der Motor als Fahrtrieb vorgesehen ist, musste aufgrund seines grossen Durchmessers die Kardanwelle überarbeitet werden. Dies zeigt exemplarisch, dass die angebotenen Produkte für die weitergehende Elektrifizierung von Baumaschinen teilweise noch nicht ausgereift sind. Die Kardanwelle muss deshalb leicht gewinkelt ab dem Getriebe geführt werden und ist im Durchmesser optimiert auf die anliegenden Kräfte. Zur Überprüfung der Lasten im Realbetrieb werden Dehnmessstreifen installiert, um allfällige Überlastungen festzustellen und Massnahmen ergreifen zu können.

#### 4.1.4 Elektrischer Hauptantrieb (Dieselersatz)

Wie eingangs in Kapitel 2 erwähnt, wurde auf einen weiteren separaten Antrieb im Prototypen 2 für die restlichen hydraulischen Verbraucher verzichtet. Aus diesem Grund wurde nach einem Antrieb gesucht, welcher in beiden Prototypen sämtliche nicht direkt-elektrifizierte Antriebe abdecken kann. Basierend auf den durchgeführten Messungen konnte ein Antrieb evaluiert werden, welcher bereits in einem Bagger ähnlicher Grösse als Dieselersatz eingesetzt wird. Ein bewährtes Bauteil erneut



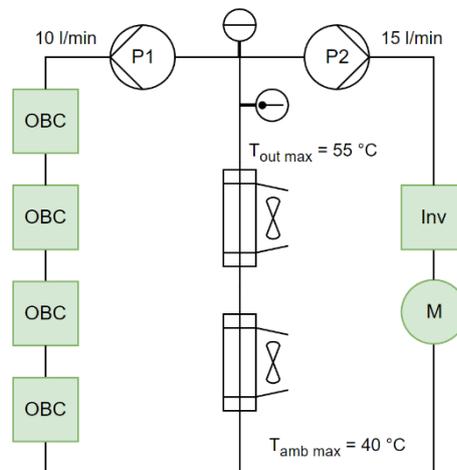


Abbildung 10: Thermoschema Unterwagen

### 4.3 Thermomanagement

Basierend auf den selektierten Leistungskomponenten wurden die zu erwartenden Verlustleistungen bestimmt, welche über das Kühlsystem abgeführt werden müssen. Zusammen mit den im Betrieb realistischerweise herrschenden Umweltbedingungen, wird eine entsprechende Kombination aus Kühlmittelpumpen und Kühlmittelkühler-Lüfter ausgelegt, die auch unter extremer Belastung die erforderliche Kühlleistung erbringen können. Im Unterwagen (Abbildung 10) können keine thermischen Synergien zwischen Komponenten geschaffen werden, weshalb die zwei Teilkreise (Ladegeräte und Antriebsstrang) über zwei geteilte Lüfter ihre Wärme vollständig über die Umgebungsluft abführen. Speziell im UW, wo eine potenziell höhere Umgebungstemperatur wegen abgestrahlter Wärme vom Untergrund herrscht, und aufgewirbelter Staub die Lüfterlamellen verschmutzt, wird ein grosszügiger Sicherheitsfaktor für die Auslegung verwendet.

Die Thermo-Architektur im Oberwagen ist um einiges komplexer, da die anfallende Wärme im System wo möglich wieder genutzt werden soll. Ein zentraler Bestandteil dessen ist die reversible Wärmepumpe, welche den Kabinen- und Batteriekreislauf mit den Leistungskomponenten koppelt und die Wärme effizient umverteilt.

Das Batteriesystem ist flüssigkeitsgekühlt, um einen zuverlässigen Betrieb unter allen Umweltbedingungen zu erlauben. Dank der aktiven Kühlung und Heizung des Batteriesystems sind diese auch bei einem Kaltstart innerhalb weniger Minuten betriebsbereit, ohne die Lebensdauer der Zellen in Mitleidenschaft zu ziehen.

Die Kabine kann ebenfalls aktiv gekühlt werden, wobei sich die Kabinenheizung gleichermaßen an der Wärme der Leistungskomponenten und bedarfsweise des HV-Heizers bedient. Neben weniger Lärm, Vibrationen und Abgase soll die Temperatur in der Kabine damit zuverlässig auf angenehme Temperaturen geregelt werden können, um das Wohlbefinden des Maschinenfahrers zu fördern.

### 4.4 Konstruktion

Der Aufbau der beiden Prototypen wird wo immer möglichst identisch gestaltet, um den Konstruktionsaufwand zu minimieren und die Fertigung möglichst effizient zu gestalten. Da die zweite Prototypenmaschine mit mehr elektrischen Antrieben und zusätzlichen Hydrauliksystemen dichter gepackt werden muss, wird diese das Packaging massgebend beeinflussen. Der erste Prototyp wird deshalb gewisse Leerräume aufweisen, welche in sich gesehen vielleicht zu einer suboptimalen Ausnützung des Bauraums oder einer etwas umständliche Kabelführung führt, im Sinne der Einfachheit über beide Maschinen aber durchaus sinnvoll ist.



Der Unterwagen der Maschine konnte dank der überschaubaren Menge an Komponenten und einer im Vergleich zum Oberwagen früher abgeschlossenen Komponentenselektion bereits zu grossen Teilen abgeschlossen werden. Die beidseitigen zwischen den Radachsen angebrachten Seitenkästen wurden ursprünglich für das Verstauen von Maschinenwerkzeug verwendet. Diese wurden mit auf die darin untergebrachten elektrischen Komponenten zugeschnittenen Kästen ersetzt, welche den vorhandenen Platz optimal ausnutzen und eine saubere Verlegung aller HV- und Signalkabel erlauben.



## 5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse

Der aktuelle Projektfortschritt ist hinsichtlich der ursprünglichen Vorstellung aufgrund längerer Bearbeitung erster Arbeitspakete etwas im Rückstand. Dies steht jedoch in keinem Zusammenhang mit den vorhandenen, und eingesetzten Ressourcen, sondern mit der Komplexität und Tiefe der Analyse. Es wurde viel in den Aufbau von Basiswissen investiert, um nachvollziehbare, ausgiebig Recherchen und Messungen zu tätigen, welche in anderen Projekten aufgrund des zeitlichen Drucks auch schnell mal zu kurz kommen können.

Aus der sorgfältig durchgeführten Komponentenselektion wird sich mehr Sicherheit im folgenden Projektverlauf und ein möglichst seriennahes Produkt erhofft. Probleme und Fehler in der Auslegung können später zu grossen Mehrkosten in der Realisierung führen. Schlimmstenfalls können ganze Funktionen einer Maschine ausfallen, weshalb gerade bei einem Innovationsträger, wie dem ZE150W, besonderer Wert auf einen sauberen Abschluss der Selektionsphase geachtet wird.

Die Schwierigkeiten bei der Komponentenselektion sind grösstenteils auf die Neuheiten in der System- bzw. Maschinenarchitektur, in Kombination mit neuen Lieferanten, und Partner zurückzuführen. Um den sicheren Einsatz aller Systemkomponenten zu garantieren, muss für jedes neue Bauteil ein Grundverständnis aufgebaut werden, damit ein professioneller Austausch zwischen Lieferanten und dem Systemintegrator SUNCAR stattfinden kann. Dies geschieht teilweise in aufwändiger Eigenrecherche aber auch im Dialog mit externen Partnern, welche teilweise schon langjährige Erfahrung auf dem Gebiet haben.

Neben technischen Parametern müssen auch immer wieder kommerzielle, und operative Hindernisse geprüft und überwunden werden. Um neue Horizonte zu öffnen, sind visionäre Entscheidungen gefragt, um auch Innovationen zusammen mit neuen Geschäftskontakten zu ermöglichen.

All diese Herausforderungen bringen eine Zeitplanverzögerung gegenüber dem originalen Zeitplan (Abbildung 11) von ungefähr 2-3 Monaten. Gemäss letzten Besprechungen mit den Projektpartner, wurden gemeinsam Massnahmen getroffen, diese Verzögerung in den folgenden Wochen und Monaten wieder zu verringern. Somit wird noch keine Verschiebung des Projektabschluss diskutiert oder in Erwägung gezogen, aber für den weiteren Projektverlauf ist es ganz klar kritisch zu beobachten.

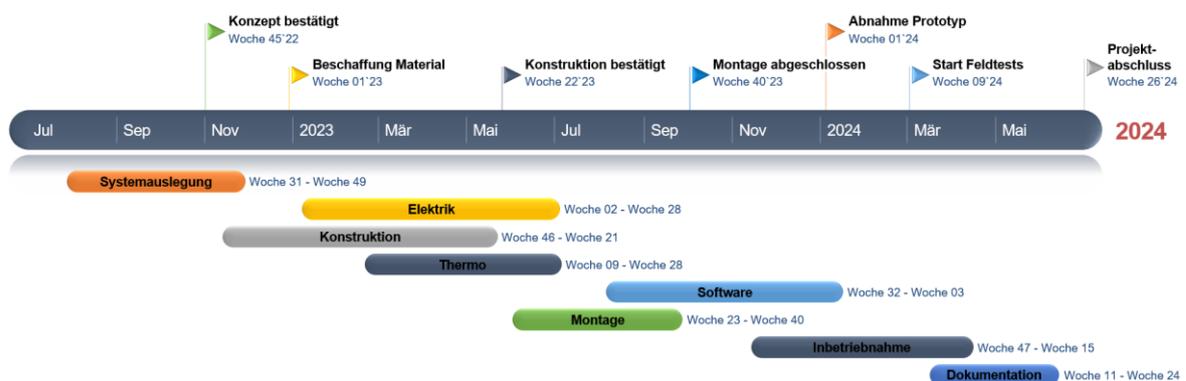


Abbildung 11: Projektzeitplan mit Arbeitspaketen und Meilensteinen



## 6 Weiteres Vorgehen

Seit wenigen Wochen ist die System- und Komponentenauslegungsphase abgeschlossen, sodass die Beschaffung der Komponenten eingeleitet werden konnte. Mit dem Fokus auf die Hauptkomponenten, welche aktuell oft lange Lieferzeiten aufweisen, werden die voraussichtlichen Liefertermine zusammengetragen, um eine Übersicht zu erhalten, welche Komponenten zu welchem Zeitpunkt ins System integriert werden können. Dazu wird auch ein entsprechender Zeitplan aufgestellt, damit alle beteiligten Parteien möglichst gut aufeinander abgestimmt und Totzeiten auf ein Minimum reduziert werden können. Der parallele Aufbau von zwei in der Basis baugleichen Prototypen erlaubt es zudem, die Montage-Schritte zeitlich so zu gestalten, dass einerseits Lehren aus dem ersten Aufbau direkt in den zweiten einfließen können aber auch gleichzeitig und effizient an zwei identischen Baugruppen gearbeitet werden kann.

Gerade für den Aufbau von grossen Maschinen lohnt sich die vorgängige Montage aller Komponenten auf einem oder mehreren Containern. Die gute Zugänglichkeit über mehrere Montagestufen hinweg erlaubt es, die verfügbaren Komponenten gestaffelt einzubauen und an den vormontierten Kabelbaum anzuschliessen.

Trotz der verlängerten Komponentenevaluationsphase wird sich von einer rollenden Fertigungs- und Montageplanung erhofft, dass sich die langen Lieferzeiten und etwaigen Verspätungen nur geringfügig auf den geplanten Abschluss des Projekts auswirken wird. Eine Verzögerung einiger Wochen ist jedoch in Kauf zu nehmen, falls andernfalls die Qualität und ein sauberer Abschluss des Projekts auf dem Spiel stehen würden.

### 6.1 Nächste Schritte

Während die Beschaffung der Komponenten läuft, werden in den nächsten Wochen und Monaten die folgenden Themen in den Fokus rücken:

- Die **Risikoanalyse** und die Dokumentation werden weiter ausgebaut, damit alle sicherheitsrelevanten Funktionen und Komponenten abschliessend erfasst werden können. Die daraus folgenden Massnahmen werden – wo noch nicht berücksichtigt – eingeleitet, um den sicheren Betrieb der Maschine und die Unversehrtheit aller Arbeitenden zu gewährleisten.
- Die **Bewilligung** des Mobilbaggers wird **in zwei Stufen** vorbereitet, damit nach der Inbetriebnahme möglichst rasch die Erprobung auf der Baustelle gestartet werden kann. Der erste Prototyp, welcher zumindest die Ansätze 1+2a (elektrischer Hauptantrieb und direkt-elektrischer Fahrentrieb) beinhaltet, bietet dabei die Möglichkeit die Bewilligung auf einer etwas geringeren Komplexitätsstufe durchzuführen und Probleme frühzeitig zu identifizieren.
  1. In einem ersten Schritt wird die Bewilligung für den Betrieb der Maschine auf der Baustelle angestrebt, wodurch bereits erste Erfahrungen auf echten Baustellen gesammelt werden können. Diese Bewilligungsstufe entspricht weitestgehend dem Prozess, welcher auch für Raupenbagger durchlaufen wird.
  2. Um den Bagger voll einsatzfähig zu machen, benötigt er aber auch eine Bewilligung für die öffentlichen CH-Strassen (Strassenzulassung). Nur so kann er vollumfänglich auf innerstädtischen Baustellen eingesetzt werden. Bisher wurden nur wenige Maschinen für den Gebrauch auf öffentlichen Strassen entwickelt, wobei die Zulassung meist durch den Maschinenhersteller durchgeführt wurde. Obwohl nicht ganz unbekannt, muss der Schritt für Schritt Prozess noch genauer eruiert werden.



## 6.2 Erprobung, Monitoring & Datenanalyse

Allgemein sollen die beiden Prototypen in unterschiedlichen Anwendungsgebieten (unterschiedliche Baustellen, unterschiedliche Fahrer, unterschiedliche Firmen) getestet werden. Die Realisierung von zwei Maschinen in drei Ausbaustufen (gem. Abbildung 4) erlaubt einen erhöhten, bzw. objektiveren Erkenntnisgewinn und bietet optimale Voraussetzungen für die direkte Serienfertigung im nächsten Schritt, womit das Multiplikationspotential am schnellsten gewährleistet werden kann. Die beiden Maschinen beschleunigen durch ihre unterschiedlichen Ausbaustand die Definition einer optimalen, markttauglichen Serienmaschine mit erhöhter Energieeffizienz.

Da die Maschinen vollständig durch Software von SUNCAR angesteuert werden, kann der Einsatz einzelner Funktionen lückenlos über das Remote System INSIGHT von SUNCAR nachvollzogen und ausgewertet werden. Über den gemessenen SoC vor und nach gewissen Arbeiten, Dauer von Ladezyklen und Kabelbetrieb, sowie Pilotkundenfeedback wird validiert, ob eine zufriedenstellende Laufzeit erreicht wurde.

### 6.2.1 Eckpunkte der Vergleichsmessungen

Zusammen mit den in Tabelle 1 aufgeführten Punkten wurde eine Analyse der relevanten Messbedingungen durchgeführt. Die resultierenden Eckpunkte werden in Unter- und Oberwagen, sowie einen allgemeinen Teil gegliedert und im Folgenden mit der zugrundeliegenden Argumentation ergänzt:

#### **Unterwagen**

Für die Messungen und das Testing des Unterwagens wird der Fokus auf warme Umgebungstemperaturen gelegt:

- Warme Sommertage mit erhöhter Wärmeabstrahlung des Asphalts stellen die maximale Belastung für das Thermosystem des Unterwagens dar.
- Der UW verfügt im Gegensatz zum OW über keinen aktiven Kältemittelkreislauf, weshalb die Kühlleistung direkt vom  $\Delta T$  zwischen Kältemittelkreislauf und Aussenluft abhängt.

Zyklisches, langsames und steiles manövrieren im Kabelbetrieb:

- Die Ladegeräte belasten den Thermokreislauf des Unterwagens zusätzlich und beanspruchen dadurch dieselben Kühler wie der Fahrmotor.
- Spitzenmomente aus dem Stillstand treten beim Anfahren im Gelände an.
- Der Fahrmodus *Kriechen* kann nicht über eine grössere Übersetzung im Hydraulikmotor umgesetzt werden. Die entsprechende elektrische Umsetzung muss geprüft werden.

Längere Bergfahrten (aufwärts) in warmer Umgebung müssen für die Messungen berücksichtigt werden (P0 und P1/2):

- Verlustleistung des Hydraulikmotors (P0) macht sich im Oberwagen bemerkbar.
- Die Rekuperation einer Talfahrt kann beliebig mit den Hydraulikbremsen entlastet werden, weshalb die Bergfahrt als relevanter Lastfall gilt.

Temperaturüberwachung in der Drehdurchführung

- Das Führen von Leistungskabeln in geschlossenen Kanälen kann die Lebensdauer der Kabel negativ beeinflussen, wenn die Temperatur über längere Zeit gewisse Schwellenwerte übersteigt.



## Oberwagen

Erprobung im Feld mit verschiedenen Pilotkunden

- Das Feedback unabhängiger Parteien hilft bei der Verbesserung der Maschine, damit sie den diversen Anforderungen des täglichen Baustellenbetriebs gerecht wird.
- Das mit der Ausstattung der Maschine mit SUNCARs Software und Bedienerschnittstellen einhergehende Bedienerlebnis muss sich in die gewohnte Bedienumgebung einfügen.
- Aufgesetzte Testszenarien, welche gewollt unter möglichst einheitlichen Bedingungen stattfinden, decken nur einen Teil des gesamten Arbeitsspektrums ab. Unterschiedliche Fahrer, Unternehmen verschiedener Anwendungsgebiete und der Einsatz unter realen Baustellenbedingungen erhöhen die Chance Schwachstellen in der Maschinenarchitektur aufzudecken.

Gezieltes Testen verschiedener Armfunktionen/-anwendungen

- Der Vergleich der Originalmaschine mit den elektrischen Ausbaustufen, im Speziellen des P2, erlaubt das Finetuning der elektrischen Parameter, um ein zufriedenstellendes Bedienerlebnis zu ermöglichen.
- Die Architektur der Maschinenvorsteuerung wird für die elektrische Maschine überarbeitet, was auf die Bedienbarkeit und das Fahrgefühl keinen negativen Einfluss haben soll.

## Allgemein

Das Definieren von reproduzierbaren Arbeitsabläufen

- Ziel des Projekts ist die Effizienzsteigerung der Maschinen um mehr als die Faktoren 3 und 3.5 zu erhöhen. Neben den praktischen Tests mit Pilotkunden, wird ein vordefiniertes Arbeitsszenario als Vergleichsbasis verwendet.
- Das Zusammenspiel mehrerer Aktuatoren in natürlichen Arbeitsbewegungen ist wichtig, da die hydraulischen Verbraucher im Betrieb massgebenden Einfluss aufeinander ausüben.

Die Notwendigkeit eines Testings über eine Zeitdauer von 6 Monaten wird etwas geschmälert dadurch, dass SUNCAR auf einen grossen Erfahrungsschatz zurückgreifen kann. Nichtsdestotrotz werden in dieser Maschine neue Komponenten und Funktionen eingefügt, welche ausreichend getestet werden müssen. Deshalb wird der Erfolg der Messkampagne laufend beurteilt und entsprechende Massnahmen getroffen werden. Die Ausdehnung der Testphase wird in Betracht gezogen, wenn die Messdaten unzureichend sein sollten.

Schlussendlich werden alle erhobenen Daten abschliessend sortiert und ausgewertet, um zu prüfen, welche Ausbaustufe sich energetisch, operationell und wirtschaftlich eher lohnt.

### 6.2.2 Weitere Messaspekte

Um die Messungen abzurunden und maximalen Komfort des Maschinenfahrers zu gewährleisten, werden zusätzliche Lärm- und Vibrationsmessungen durchgeführt und mit der herkömmlichen Maschine verglichen.



## 7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die SUNCAR arbeitet traditionell mit verschiedensten Industriepartnern zusammen und hat sich dadurch als unabhängigen Entwicklungsdienstleister im Markt positionieren können. Für das aktuelle Projekt wurde ein ausgewogener Mix von bewährten und neuen Lieferanten gewählt. Um die Qualität hochzuhalten und Innovation im Markt zu fördern muss konstant nach neuen Lösungen von etablierten Herstellern aber auch neuen Ansätzen gesucht werden. Gerade weil für dieses Projekt neue Gebiete erschlossen wurden, namentlich der Schwenkantrieb, ein leistungsstarker Fahrtrieb aber auch die überholte Hydraulik für den Ausleger, mussten neue Partnerschaften geschlossen werden.

## 8 Kommunikation

Aktuell wird in den Medien rege über eine Verringerung von Emissionen und anderweitigen Belastungen auf Baustellen – insbesondere in Städten – diskutiert. Auch an der bauma2022 im vergangenen Herbst wurde deutlich, dass elektrische Baumaschinen die Zukunft bestimmen werden. Mit grossem Interesse wurde die Ankündigung der Entwicklung eines elektrischen Mobilbaggers bei Kunden und Medien aufgenommen.

Eine kurze Zusammenfassung von den wichtigsten medienwirksamen Auftritten und Publikationen.

- **Bauma2022**, Weltleitmesse für Baumaschinen, Oktober 2022 in München: Wahrnehmung einer starken Nachfrage nach elektrischen Mobilbaggern und Kommunikation, dass sich ein Modell in der Entwicklung befindet.
- **Construction Equipment Forum**, die Managementkonferenz für Baumaschinen und Bauwirtschaft, November 2023 in Berlin: Keynote von Stefan Schneider (SUNCAR) und Harald Thum (KTEG) zum Thema: "SUNCAR & KTEG: How we built a state of the art electric excavator and what's to expect next." Praxisbeispiel ZE150W als zukunftsweisendes Projekt für optimierte elektrische Hydraulik.
- **Innovatrix**, 2nd Design & Development of Zero-Emission Off-Highway Machinery, Mai 2023 in Berlin: Keynote von Stefan Schneider (SUNCAR) und Felix Hornstein (KTEG) zum Thema: "Next step in electrification. Fully optimized hydraulics at 15t wheeled battery-electric excavator"
- **BAM**, Bits And Machines – Die Zukunftskonferenz im Coreum, Mai 2023 in Stockstadt am Rhein: Keynote zum Thema: "Und sie bewegt sich doch – wie sich die Zero Emission Baustelle in der Praxis bewährt", Praxisbeispiel ZE150W.
- **Tag der Offenen Tür SUNCAR**, April 2023, Schlieren: Präsentation und Beispiel als aktuelles Projekt.
- Diverse Posts in sozialen Medien (**LinkedIn & Facebook**) von SUNCAR



## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hitachi ZX150W-7, neuste Baureihe Diesel-Mobilbagger.....	9
Abbildung 2: Technische Daten [hitachicm.eu/de/maschinen/bagger/mobilbagger/zx150w-7/].....	9
Abbildung 3: Schematische Darstellung der verschiedenen elektrischen Ausbaustufen des Mobilbaggers .....	10
Abbildung 4: Systemschaubild des ZE150W in unterschiedlicher Ausführung als P0, P1 und P2. ....	13
Abbildung 5: Übersichtsdiagramm der zu messenden Verbraucher, der elektrischen Ersatzkomponenten und der ausgewählten Arbeitsszenarien. ....	15
Abbildung 6: Aufbau der Sensorik für die Benchmark Messungen an einer ZX155W Dieselmachine während den Messtagen [SUNCAR].....	16
Abbildung 7: Berechnetes Drehmoment am Ritzel des elektrischen Schwenkmotors während eines Grabzyklus auf der primären y-Achse. Histogramm des Drehmoments, inklusive Rekuperationsbelastung, auf der sekundären y-Achse. ....	19
Abbildung 8: Evaluationsmatrix für alternative Antriebskonfigurationen. Die schematischen Fahrzeugabbildungen zeigen die starre, sowie die gelenkte Achse, das Getriebe (G), den Motor (M), Die Antriebswelle und mittig zwischen den Achsen die hydraulische und elektrische Drehdurchführung. ....	20
Abbildung 9: Auszug aus dem Elektroschema des Unterwagens .....	21
Abbildung 10: Thermoschema Unterwagen .....	22
Abbildung 11: Projektzeitplan mit Arbeitspaketen und Meilensteinen .....	24