



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 31. August 2025

Batterieelektrischer Mobilbagger 15t Klasse

Markterprobung von innovativen elektrischen Fahrzeugen und Maschinen



**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Subventionsempfänger/innen:

SUNCAR AG
Hinterwiden, 9245 Oberbüren
www.suncar-ag.com

KTEG GmbH
Baindter Strasse 29
88255 Baienfurt

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

Autor/in:

Rik Bättig, SUNCAR AG, rik.baettig@suncar-ag.com
Stefan Schneider, SUNCAR AG, stefan.schneider@suncar-ag.com

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, 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 auf innerstädtischen Baustellen eingesetzt, da sie sich mit entsprechender Zulassung auf öffentlichen Straßen bewegen können und so als flexibles Bindeglied zwischen mehreren Einsatzorten dienen. Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und in Kombination mit diversen Anbaugeräten eignen sich Mobilbagger besonders für die Elektrifizierung. Das elektrische Mobilbagger-Projekt ZE150W setzt mit zwei Prototypen unterschiedliche Elektrifizierungsstufen um. Die erste Maschine verfügt neben einem elektrischen Pumpen-Antriebsstrang auch über einen elektrischen Fahrantrieb. Die Zweite wurde zusätzlich mit einem elektrischen Schwenkantrieb und ein elektrohydraulischen Hubsystem ausgestattet.

Die Messergebnisse zeigten deutliches Energieeinsparpotenzial des elektrischen Fahrantriebs, der den Energiebedarf im Vergleich zum hydraulischen Antrieb durchschnittlich um über 70% (~27 kWh/h) senken konnte. Der elektrische Schwenkantrieb zeigte je nach Einsatzszenario Einsparungen von bis zu 80% (3 bis 7 kWh/h), verglichen mit dem Hydraulischen. Der Hubzylinder erzielte Einsparungen von 50 bis 80% (4 bis 10 kWh/h), was noch weiter gesteigert wird, durch massiv reduzierte Drosselverluste. Für einen aus Ladespiel, Aushub und diversen Fahrten zusammengestellten Arbeitstag wird eine Einsparungspotenzial von bis 40% (20 kWh/h) gegenüber dem rein hydraulischen Elektrobagger erwartet. Auch wenn die Ansteuerung und Integration noch weiterentwickelt werden müssen, ist die Grundlage für eine innovative Lösung zu einer signifikanten Reduktion des Energieverbrauchs gelegt. Allgemein bestand eine zentrale Herausforderung darin, die über Jahre hinweg optimierte Hydraulik des Herstellers anzupassen und neue Aktuatoren hinzuzufügen, ohne das von Anwendern erwartete präzise Bediengefühl zu beeinträchtigen.

Neben technischen Ergebnissen lieferte das Projekt auch wertvolle Erkenntnisse von Demonstrationen und Pilotbaustellen. Die CO₂-Bilanz fällt mit 80% reduzierten CO_{2eq} gegenüber dem konventionellen Bagger hingegen deutlich zugunsten der elektrischen Varianten aus.

Der parallele Aufbau zweier unterschiedlicher Prototypen mit variierenden Softwareständen und Komponenten brachte zwar einen erhöhten Entwicklungsaufwand mit sich, führte jedoch zu einer guten Vergleichbarkeit und schärfe das Verständnis für die Systeminteraktion und ermöglicht neue Massstäbe im Thema Energieeffizienz. Gleichzeitig wurden bestehende und neue Partnerschaften wichtigen Zulieferern und dem OEM selbst gestärkt.

Insgesamt bestätigt das Projekt, dass eine erweiterte Elektrifizierung des Mobilbaggers technisch machbar ist, auch wenn für die Serienreife weitere Optimierung in der technischen Feinabstimmung und bei den Herstellungskosten notwendig bleiben. Mit den gewonnenen Erkenntnissen, dem grossen Marktinteresse und den geplanten Folgeprojekten ist die Grundlage für eine erfolgreiche Serieneinführung geschaffen. Damit leistet der ZE150W einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung und zur nachhaltigen Transformation von Baustellen.

Résumé

Les pelles mobiles sont fréquemment utilisées sur les chantiers urbains, car elles peuvent circuler sur la voie publique avec l'autorisation appropriée et servent ainsi de maillon flexible entre plusieurs sites d'intervention. En raison de leurs nombreux domaines d'application et de leur compatibilité avec une large gamme d'accessoires, elles se prêtent particulièrement bien à l'électrification. Le projet de pelle mobile électrique ZE150W réalise deux niveaux d'électrification au moyen de deux prototypes : la première machine dispose d'une transmission électrique de pompe ainsi que d'un entraînement de translation électrique, tandis que la seconde est en outre équipée d'un moteur d'orientation électrique et d'un système de levage électrohydraulique.

Les résultats des mesures ont montré un potentiel d'économie d'énergie significatif pour l'entraînement électrique, qui a permis de réduire la consommation d'énergie de plus de 70% (~27 kWh/h) par rapport à l'entraînement hydraulique. Selon le scénario d'utilisation, l'entraînement électrique pivotant a permis



de réaliser jusqu'à 80% (3 à 7 kWh/h) d'économies par rapport à l'entraînement hydraulique. Le vérin de levage a permis de réaliser des économies de 50 à 80% (4 à 10 kWh/h), ce qui est significatif en raison de sa forte consommation d'énergie. Pour une journée de travail composée d'un cycle de chargement, d'excavation et de divers déplacements, on peut s'attendre à un potentiel d'économies pouvant atteindre 40% (20 kWh/h) par rapport à une pelle électrique purement hydraulique. Même si la commande et l'intégration doivent encore être perfectionnées, les bases d'une solution innovante permettant une réduction significative de la consommation d'énergie sont posées. De manière générale, l'un des principaux défis consistait à adapter le système hydraulique du fabricant, optimisé au fil des ans, et à ajouter de nouveaux actionneurs sans nuire à la précision de commande attendue par les utilisateurs.

Outre les résultats techniques, le projet a fourni des enseignements précieux issus de démonstrations et de chantiers pilotes. Le bilan CO₂ est quant à lui clairement en faveur des variantes électriques, avec une réduction d'environ 80% des émissions eq-CO₂ par rapport à une pelle conventionnelle.

La construction parallèle de deux prototypes différant par leurs logiciels et leurs composants a certes accru l'effort de développement, mais elle a permis une comparaison cohérente, a approfondi la compréhension des interactions systémiques et a établi de nouvelles références en matière d'efficacité énergétique. En même temps, le projet a renforcé les partenariats existants ainsi que les collaborations avec de nouveaux fournisseurs et avec l'OEM.

Dans l'ensemble, le projet confirme que l'électrification étendue d'une pelle mobile est techniquement réalisable, même si des optimisations sont encore nécessaires pour atteindre la maturité de série, tant sur le plan technique que sur celui des couts de production. Avec les connaissances acquis, le fort intérêt du marché et les projets de suivi prévus, les bases d'une introduction réussie en série sont réunies. Le ZE150W apporte ainsi une contribution importante à la décarbonation et transformation durable des chantiers.

Abstract

Mobile excavators are widely used on urban construction sites because, with the appropriate approval, they can travel on public roads and therefore serve as a flexible link between multiple work locations. Due to their versatile applications and compatibility with a wide range of attachments, mobile excavators are particularly well suited for electrification. The ZE150W electric mobile excavator project implements different electrification levels with two prototypes: the first machine features an electric pump drive and an electric travel drive, while the second is additionally equipped with an electric swing drive and an electrohydraulic lifting system.

The measurement results showed significant energy-saving potential for the electric drive, which reduced energy consumption by over 70% (~27 kWh/h) compared to the hydraulic drive. Depending on the application scenario, the electric swivel drive showed savings of up to 80% (3 to 7 kWh/h) compared to the hydraulic drive. The lift cylinder achieved savings of 50 bis 80% (4 bis 10 kWh/h), which is significant due to its high energy consumption. For a working day consisting of loading, excavation and various trips, a savings potential of up to 40% (20 kWh/h) is expected compared to a purely hydraulic electric excavator. Even though the control system and integration still need to be further developed, the foundation for an innovative solution that significantly reduces energy consumption has been laid. In general, a key challenge was to adapt the manufacturer's hydraulics, which had been optimised over many years, and add new actuators without compromising the precise operating feel expected by users.

In addition to technical results, the project yielded valuable insights from demonstrations and pilot construction sites. The CO₂ footprint is clearly improved, with approximately 80 percent lower CO₂-equivalent emissions compared to a conventional excavator.

Building two prototypes in parallel with differing software versions and component configurations increased development effort but enabled meaningful comparisons, sharpened understanding of system interactions, and set new efficiency benchmarks. At the same time, the project strengthened existing and new partnerships with key suppliers and the OEM.



Overall, the project confirms that extended electrification of mobile excavators is technically feasible, even though further optimization in technical fine-tuning and production costs is required for series readiness. With the insights gained, strong market interest, and planned follow-up projects, the foundation for a successful market introduction has been established. The ZE150W thus makes an important contribution to decarbonizing and sustainably transforming construction sites.

Kernbotschaften «Key-Messages»

- Der batterieelektrische Mobilbagger ZE150W zeigt, dass praxisnahe Dekarbonisierung im Bauwesen möglich ist und durch höhere Energieeffizienz sowie geringere Abhängigkeit von fossilen Importen direkt zu den Schweizer Klimazielen und zur Energiestrategie 2050 beiträgt. Durch enge Kooperationen von OEMs, Zulieferern und Forschung hat das Projekt die Innovationskraft der Schweiz gestärkt und marktnahe, international wirkende Lösungen geschaffen.
- Die erweiterte Elektrifizierung (nicht nur Pumpenelektrifizierung) ist heute technisch realisierbar, verlangt aber Anpassungen an der vom OEM über Jahre optimierten Hydraulik sowie sorgfältiges Maschinentuning, damit das erwartete, präzise Bediengefühl für den Fahrer erhalten bleibt.
- Die Verfügbarkeit von entsprechenden Komponenten verbessert sich stetig, was auch den Wettbewerb und folglich die Preisgestaltung zum Vorteil der Abnehmer verbessert. Dadurch senkt sich die kommerzielle Hürde, um weitere Elektrifizierungsmassnahmen umzusetzen.
- Direkt-elektrische Antriebe (Fahr-, Schwenk- und Hubsystem) ermöglichen signifikante Energie- und CO₂-Einsparungen: der Fahrantrieb reduzierte den Energiebedarf um mehr als 60%, der Schwenkantrieb erreicht je nach Einsatz bis zu 80% Einsparung und das Hubsystem liegt im Bereich von rund 50–80%.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Abstract	4
Kernbotschaften «Key-Messages»	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Einleitung	12
1.1 Kontext und Motivation	12
1.2 Projektziele	14
2 Vorgehen und Anlagebeschrieb	15
2.1 Projektabschnitte und Arbeitspakete	15
2.2 Systemarchitektur	17
2.3 Antriebsdimensionierung	19
2.3.1. Messstrategie, -aufbau und Durchführung	19
2.3.2. Resultate der Hydraulik-Leistungsmessungen	21
2.3.3. Lehren aus der Hydraulik-Messkampagne	22
2.4 Thermo-Auslegung	22
2.5 Elektrische Auslegung und Softwareentwicklung	23
2.6 Design und Packaging	25
2.7 Komponenten	27
2.7.1. HV-Batterie	27
2.7.2. Hochvoltverteilsystem (HVDU)	28
2.7.3. DC-Schnellladeschnittstelle	28
2.7.4. AC-Ladegeräte	29
2.7.5. Antriebsstränge	30
2.7.6. Drehdurchführung	34
2.7.7. Thermoeinheit	34
2.8 Konzept zur Überprüfung der Effizienzsteigerung	34
2.9 Quantifizierung der einzelnen Elektrifizierungsmassnahmen	37
3 Ergebnisse und Diskussion	39
3.1 Gemessene Energieeinsparung	39
3.1.1. Fahrantrieb	39
3.1.2. Schwenkantrieb	43
3.1.3. Hubsystem	43



3.1.4.	Weiterentwicklung der Hydraulikansteuerung und Maschinentuning.....	44
3.1.5.	Feedback der Testfahrer	45
3.2	Lärm- und Vibrationsmessungen.....	46
3.1	CO2 Berechnungen.....	46
3.2	Reflexion der Komponentenzusammenstellung und Systemarchitektur.....	47
3.3	Projektverlauf und Herausforderungen	49
3.3.1.	Vorbereitungen	49
3.3.2.	Aufbau.....	49
3.3.3.	Messungen und Testing	50
4	Schlussfolgerungen und Ausblick	51
4.1	Überprüfung der Zielsetzung PT1	51
4.2	Überprüfung der Zielsetzung PT2	52
4.3	Pilotbaustellen	52
4.4	Technisches Fazit.....	53
4.5	Ausblick	53
5	Nationale und internationale Zusammenarbeit	55
6	Publikationen und andere Kommunikation	56



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: HCM Diesel-Mobilbagger "ZX150W-7" mit technischen Daten	14
Abbildung 2: Schematische Darstellung der verschiedenen elektrischen Ausbaustufen des Mobilbaggers	16
Abbildung 3: Systemschaubild des ZE150W für PT1 und PT2.....	18
Abbildung 4: Übersichtsdiagramm der zu messenden Verbraucher, der elektrischen Ersatzkomponenten und der ausgewählten Arbeitsszenarien.....	19
Abbildung 5: Aufbau der Sensorik für die Benchmark Messungen an einer ZX155W Dieselmashine während den Messtagen.	20
Abbildung 6: Berechnetes Drehmoment des elektrischen Schwenkmotors während eines Grabzyklus.	21
Abbildung 7: Thermokreis des Unterwagens mit vier Ladegeräten, Fahrinverter und -motor.	23
Abbildung 8: Verschalung Ansicht links	25
Abbildung 9: Verschalung Ansicht rechts.....	25
Abbildung 10: Packaging der Maschine in Ausführung des PT2: 1. HV-Batterien, 2. HVDU, 3. Schnellladeschnittstelle, 4. AC-Ladegeräte, 5. Elektrischer Dieselsatz, 6. Elektrischer Fahrantrieb, 7. Elektrisches Hubsystem, 8. Elektrischer Schwenkantrieb, 9. Elektrische Brems- und Pilotpumpe, 10. Hydraulische und elektrische Drehdurchführung, 11. Thermosysteme	26
Abbildung 11: Designiteration 1, Von Mises-Spannung.....	27
Abbildung 12: Designiteration 1, Verschiebung	27
Abbildung 13: Designiteration 2, Von Mises-Spannung.....	27
Abbildung 14: Designiteration 2, Verschiebung	27
Abbildung 15: Die HVDU FUSION800M (oben) als Herzstück des elektrischen HV-Kreises. Die Aufnahme zeigt nicht den finalen Verkabelungszustand.	28
Abbildung 16: Seitenkasten mit Netz-Ladegeräten und HVDU FUSION800M.....	29
Abbildung 17: Auswurfstecker zur Sicherheit für Schadensprävention	29
Abbildung 18: Nennmoment des elektrischen Pumpenantriebs (grün: Nennmoment bei 40 °C, orange: Nennleistung bei 60 °C Kühlmitteltemperatur) im Vergleich zum Drehmoment des Dieselantriebs (obere schwarze Linie).	30
Abbildung 19: Evaluationsmatrix für alternative Antriebskonfigurationen. Die schematischen Fahrzeugabbildungen zeigen das Getriebe (G), den Motor (M), Die Antriebswelle und mittig zwischen den Achsen die Drehdurchführung.	31
Abbildung 20: Der neue Schwenkantrieb mit kundenspezifischem Ritzel und erhöhtem Übersetzungsverhältnis.....	33
Abbildung 21: Inverter und Motor für die Pilot- und Bremspumpe	33
Abbildung 22: Elektrische Drehdurchführung unterhalb der hydraulischen.	34
Abbildung 23: Thermoeinheit des ZE150W ohne aufgesetzte Wärmepumpe.....	34
Abbildung 24: Dumper Strecke im Coreum. Variante "Dirt" (420m)	36
Abbildung 25: Dumper Strecke im Coreum. Variante "Street" (1300m)	36
Abbildung 26: Bild eines Teilausschnitts mit Steigung: Vorne der ZX175-W und hinten der ZE150W PT1.	40



Abbildung 27: Externer Dieseltank auf dem Dach, Messgerät und Sensoren auf Seitenwand und an Verschlauchung.....	41
Abbildung 28: Dieseltank mit Paketwage zur Verbrauchsquantifizierung über ein gesamtes Messzenario hinweg.....	41
Abbildung 29: Vergleich elektrischen Fahr-Inverter Leistung (ZE150W PT1) und hydraulischer Leistung ab Pumpe (ZX175W-7).....	42
Abbildung 30: CO ₂ Ausstoss des Dieselfahrzeugs und der elektrischen Fahrzeugkonfigurationen gemäss Tabelle 1. Ein verringelter elektrischer Energieverbrauch verursacht weniger CO ₂ -Ausstoss in der Energieproduktion.	47



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezeichnungs- und Konfigurationsübersicht der verschiedenen Maschinen.....	17
Tabelle 2: Äussere Einflussfaktoren auf die Messungen und deren Ergebnisse.....	20
Tabelle 3: Formeln zur Berechnung des Energieverbrauchs der Maschinen und der Effizienzsteigerung	35
Tabelle 4: Berechnung des Energieverbrauchs der Maschine in unterschiedlichen Ausbaustufen im Fahrbetrieb	35
Tabelle 5: Berechnung des Energieverbrauchs der Maschine in unterschiedlichen Ausbaustufen, während einem Ladespiel oder eines Materialumschlags. Die Maschine PT0 unterscheidet sich nicht von PT1, da nicht gefahren wird.....	37
Tabelle 6: Berechnung des Energieverbrauchs der Maschine in unterschiedlichen Ausbaustufen während dem Aushub und Zuschütten eines Grabens. Die Maschine PT0 unterscheidet sich geringfügig von PT1, da der Bagger immer wieder ein Stück vorrückt.....	37
Tabelle 7: Berechnungsmethoden der Energieverbräuche einzelner Antriebe zur Quantifizierung der Energieeinsparungen. Für die Wirkungsgrade der elektrischen Inverter und Motoren wurden Annahmen getroffen.....	38
Tabelle 8: Eckdaten der Fahrzeuge PT1 und PT2.....	39
Tabelle 9: Übersicht des durchschnittlichen Energieverbrauchs während Fahrszenarien. Für beide Fahrzeuge sind es die Durchschnittsleistungen ab Batterie. Die Nettoenergie berücksichtigt auch Energieverbrauch, sowie Rekuperation. "Dirt" referenziert auf den Track in Abbildung 24 und "street" auf Abbildung 25. Der Mittelwert "av" berücksichtigt eine identische Anzahl Rundkursfahrten je Szenario	42
Tabelle 10: Vergleich des Energiebedarfs des Schwenkantriebs. Für PT1 unter Berücksichtigung der Effizienz von Hauptpumpe (85%) und Pumpenantrieb (90%). PT2 direkt ab Batterie. *Während dem 90° Dig and Dump (DnD mit dem PT2 wurde wegen höherer Bewegungsgeschwindigkeit 25% mehr Zyklen in derselben Zeit gefahren.	43
Tabelle 11: Übersicht der erreichten Verbrauchseinsparungen der elektrifizierten Antriebe.	51
Tabelle 12: Durchschnittlicher Verbrauch des ZX175W-7 und PT1 (vor Tuning) für die gefahrenen Arbeitsszenarien. Der Dieselverbrauch beim Ladespiel 180° erscheint eher tief, was auf eine Abweichung an der Waage liegen könnte.....	51



Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating current (Wechselstrom)
ACDU	Alternating current distribution unit (Wechselstrom-Verteilbox)
API	Application programming interface (Anwendungsprogrammierschnittstelle)
CAD	Computer-aided design (Computerbasiertes Konstruieren)
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalenz
DC	Directional current (Gleichstrom)
DnD	Dig and Dump
GUI	Graphic User Interface
HCM	Hitachi Construction Machinery
HV	High voltage (Hochvolt)
HVDU	High voltage distribution unit (Hochvoltverteilsystem)
IBN	Inbetriebnahme
INSIGHT	Remote System für eine digitale Maschinen Schnittstelle via Mobilfunknetz
LV	Low voltage (Niedervolt)
LVDU	Low voltage distribution unit (Niedervoltverteilsystem)
MISO	Multiple Inputs Single Output
MOVLIMIT	Kombinierte Hub- und Schwenkbegrenzung für Bagger
NMC	Nickel Mangan Cobalt
OEM	Original equipment manufacturer (Erstausrüster)
OW	Oberwagen
PDU	Power distribution unit (Leistungsverteilung)
PFC	Positive Flow Control
PL	Performance level
PT	Prototyp
PTO	Power Take-Off
rpm	Rotations per minute
SOC	State of charge (Ladestand der Batterie)
SOH	State of Health (Zustand der Batterie)
UW	Unterwagen
VCU	Vehicle control unit (Fahrzeug Steuerung)



1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Während der letzten Jahre hat SUNCAR in Zusammenarbeit mit verschiedenen Partnern kontinuierlich ihr Wissen im Bereich der Elektrifizierung von Baumaschinen, speziell auch bei Baggern erweitert und vertieft. Durch die erfolgreiche Markteinführung von verschiedenen E-Maschinen von 2 bis 30 Tonnen wurden wertvolle Erfahrungen gesammelt, was sich einerseits positiv auf die Qualität der Maschinen und Produkte auswirkt und andererseits hilft, schnell auf verändernde Anforderungen oder neue Kundenbedürfnisse reagieren zu können.

Stand heute sind auf dem europäischen Markt über 250 batterie-elektrische-Raupenbagger (auf Basismodellen von Herstellern wie Takeuchi, Hitachi und Caterpillar) im täglichen produktiven Einsatz, welche mit SUNCAR entwickelt wurden – unter anderem auch Maschinen, welche im Rahmen von vergangenen BFE-Projekten gefördert wurden¹. Durch die vermehrte direkte Zusammenarbeit mit OEMs (Original Equipment Manufacturer) wird eine kostengünstigere Serienproduktion angestrebt, wodurch batterie-elektrische Baumaschinen früher oder später den internationalen Durchbruch schaffen sollen.

Allgemein ziehen Elektrobagger im Vergleich zu herkömmlichen Dieselmotoren nicht nur gleich, sondern weisen in einigen Bereichen deutliche Vorteile auf, wobei die Anforderungen an Sicherheit und Robustheit weiterhin erfüllt werden. Die elektrische Umrüstung erlaubt substantielle Einsparungen an Primärenergie (Kraftstoff und Netzenergie) dank signifikanter Effizienzsteigerung, bis zu 80 % reduzierte Treibhausgasemissionen, weniger Lärm und Vibrationen sowie Energiekosteneinsparungen von bis zu 70 %. Das Arbeiten mit einer elektrischen Maschine fühlt sich laut vielen begeisterten Maschinenfahrern direkter und effizienter an. Dies ist auf die hohe Dynamik des Elektromotors und kurzzeitige abrufbare Spitzenleistungen zurückzuführen.

Der Mobilbagger sind für SUNCAR ein neuer Maschinentyp, jedoch wird viel Potenzial in dieser Kategorie gesehen. Ihr häufigstes Einsatzgebiet liegt im städtischen Raum, wo elektrische Maschinen umso sinnvoller sind, um Anwohner vor Lärm und lokalen Emissionen zu schützen. Mit entsprechender Zulassung dürfen die Mobilbagger auf öffentlichen Straßen fahren und können somit flexibel verschiedene Teilbaustellen verbinden. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die elektrische Infrastruktur entlang von städtischen Baustellen oft gegeben ist, was für ausreichende Ladepunkte sorgt. Dies kann bei anderen Baustellen eine Herausforderung darstellen, wenn die Maschine zum Einsatz kommt bevor die Infrastruktur die Baustelle erreicht.

Mobilbagger sind vorwiegend in den Gewichtsklassen zwischen 10 und 20 Tonnen zu finden. Die während des Projektverlaufs neu angekündigten und inzwischen sehr limitiert verfügbaren, elektrischen Modelle basieren auf Marken wie Mecalac² (bauma22), Volvo^{3 4} (bauma25), Develon (bauma25), Liebherr (bauma25), Atlas (bauma25), Staad (bauma25), E TEC⁵ und ECE (neu unter dem Namen Staad)⁶. Die Umrüstung wird dabei einerseits von den Herstellern selbst angegangen, wie beispielsweise bei Mecalac oder Volvo, jedoch gibt es auch selbstständig agierende Entwickler, wie Gstaad, welcher sich bei den Umrüstungen am Develon Sortiment bedient.

Die Elektrifizierung von Mobilbaggern befindet sich in einer frühen, aber dynamischen Entwicklungsphase. Verschiedene Hersteller verfolgen dabei unterschiedliche Strategien hinsichtlich Antriebskonzepte sowie Energieversorgung und -speicherung. Während einige auf auswechselbare Batteriepacks setzen, priorisieren andere Effizienzsteigerungen oder leistungsfähige Ladesysteme. Im Rahmen

¹ <https://www.aramis.admin.ch/texte/?projectid=36955>

² <https://mecalac.com/en/machine/e12.html>

³ <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/about-us/news/2024/volvo-ce-unveils-ambitious-new-product-line-up-at-volvo-days-2024/>

⁴ <https://www.volvoce.com/deutschland/de-de/products/electric-machines/ewr150-electric/#overview>

⁵ <https://www.etecltd.nl/en/electric-excavators/etec-e160w/>

⁶ <https://www.staad-group.com/electric-excavators/dx165w-electric/>



dieses Projekts lag der Fokus klar auf der Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Dennoch mussten alternative Energieversorgungskonzepte mitgedacht und in der Bewertung berücksichtigt werden.

Der gängigste Ansatz ist momentan die Elektrifizierung des Hauptpumpenantriebs, der als Minimalvariante gilt. Darüber hinaus sind jedoch auch elektrische Fahr-, Schwenk- und Hubantriebe in der Diskussion, wobei deren Umsetzung bislang uneinheitlich erfolgt. Von den direkt-elektrischen Lösungen scheint sich der elektrische Fahrantrieb zunehmend als Standard durchzusetzen. Dies dürfte auf zwei wesentliche Faktoren zurückzuführen sein: Erstens bietet der Mobilbagger im Vergleich zum Raupenbagger ein höheres Potenzial zur Energierückgewinnung, und zweitens dürfte die aus dem On-Highway-Segment bekannte Akzeptanz elektrischer Fahrantriebe eine beschleunigende Wirkung haben. Vermutlich lässt sich der Trend auch durch den hohen Verbrauch durch hydraulisches Fahren erklären, welcher bei den vielen kurzen Fahrten über den Tag ins Gewicht fallen dürfte.

Offen bleibt hingegen die ideale Lösung für die Elektrifizierung der Arbeitshydraulik. Während sich ein rotatorisch arbeitender Schwenkantrieb relativ einfach elektrifizieren lässt, verspricht ein elektrisches Hubsystem wesentlich höhere Effizienzgewinne.

Die Umsetzung direkt-elektrischer Antriebe ist teilweise noch mit technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen verbunden. Hohe Anforderungen an Dynamik, Steuerbarkeit und Robustheit sowie der Mangel an standardisierten, mobiltauglichen Industriekomponenten erschweren die Integration. Zudem liegen die Systemkosten weiterhin über jenen konventioneller Dieselloesungen. Die Total Cost of Ownership (TCO) kann dennoch unter bestimmten Rahmenbedingungen – wie hoher Auslastung und günstiger Stromversorgung – bereits heute konkurrenzfähig sein.

Vor diesem Hintergrund verfolgte das Projekt ZE150W das Ziel, verschiedene elektrische Systemlösungen hinsichtlich Energieeffizienz, Skalierbarkeit und Übertragbarkeit zu evaluieren. Hierfür wurden zwei Dieselmotoren des Typs Hitachi ZX150W-7 zu batterie-elektrischen Prototypen umgebaut. Beim ersten Prototyp wurde das originale Hydrauliksystem weitgehend beibehalten und lediglich der Pumpenantrieb elektrifiziert. Die zweite Maschine erhielt zusätzlich einen direkt-elektrischen Schwenkantrieb sowie ein überarbeitetes Hubzylindersystem. Diese Konfiguration soll insbesondere die Energierückgewinnung ermöglichen und die Systemeffizienz signifikant steigern.

Ein zentraler Anspruch des Projekts war der energieautarke Betrieb über einen gesamten Arbeitstag hinweg – ohne Zwischenladung. Daraus ergaben sich unmittelbare Anforderungen an Batteriekapazität, Antriebsauslegung und Ladeinfrastruktur. Diese Systemelemente sind stark miteinander verknüpft: Ein effizienter Antriebsstrang kann den Energiebedarf senken und damit sowohl die Batteriegröße als auch die Anforderungen an das Ladesystem reduzieren – zwei entscheidende Hebel zur Kostensenkung.

Ziel der Systemanalyse im Projekt war es daher nicht, eine universell gültige Lösung zu finden, sondern verschiedene technische Varianten gegenüberzustellen, die je nach Einsatzszenario spezifische Vorteile und Nachteile aufweisen. Von besonderer Bedeutung war dabei das Potenzial zur Effizienzsteigerung, da diese es erlaubt, die teure Batteriekapazität zu reduzieren, ohne die Betriebsdauer einzuschränken. Damit wurde eine der wesentlichen Markthürden – die hohen Investitionskosten – direkt adressiert.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse sollen nicht nur in die geplante Serienfertigung des ZE150W einfließen, sondern auch auf andere Maschinenkonzepte übertragen werden. Insbesondere die modularen und skalierbaren Ansätze bei Schwenk- und Hubsystemen bieten Potenzial für breitere Anwendung in verschiedenen Maschinengrößen und Einsatzfeldern.

Langfristig strebt das Projekt an, durch gleichwertige oder sogar verbesserte Betriebszeiten sowie reduzierte Gesamtkosten die Marktakzeptanz elektrischer Baumaschinen deutlich zu erhöhen. Entscheidend hierfür ist ein kontinuierlicher Innovationsprozess, der batterie-elektrische Systeme nicht nur als umweltfreundliche, sondern auch als wirtschaftlich vorteilhafte Antriebstechnologie etabliert. Das Projekt ZE150W leistet in diesem Zusammenhang einen wesentlichen Beitrag auf dem Weg zu effizienten, leistungsfähigen und zukunftsfähigen elektrischen Baumaschinen.



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

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

Tieflöffel (ISO gehäuft): **0.19 - 0.66m³**

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 1: HCM Diesel-Mobilbagger "ZX150W-7" mit technischen Daten⁷

1.2 Projektziele

Der Fokus der Projektziele lag auf den erwähnten Effizienzsteigerungsmassnahmen, in Kombination mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und der technischen Prüfung zur Serientauglichkeit. Folgende konkreten Ziele und Fragestellungen sollen beantwortet werden:

- Deutliche Steigerung des **Gesamtwirkungsgrades** vom Diesel- zum Elektrobagger (anhand realitätsnaher Standard-Arbeitsprofile)
 - o >3x Effizienz beim batterie-elektrischen Prototyp mit originalem Hydrauliksystem und direkt-elektrischen Fahrantrieben
 - o >3.5x Effizienz beim elektrisch erweiterten Prototyp mit direkt-elektrischen Fahr- und Schwenkantrieb, sowie optimiertem Hydrauliksystem
- **Mehrkosten** einer Serienproduktion der Elektromobilbagger ZE150W sollen nicht höher sein als die Energie- und Betriebskosten-Einsparungen während der Lebensdauer des Baggers
 - o Elektrische Drehdurchführung und elektrische Fahrmotoren bringen die notwendige Reichweite für den alltäglichen Betrieb
 - o Hydraulische Optimierungen bringen die relevante Betriebszeitverlängerung und ermöglichen eine kleinere Batteriekapazität bzw. höhere Betriebszeiten
- Verringerung der **Lärmimmission** im Betrieb, minimale Lärmemission im Stillstand
- Untersuchung technischer **Serientauglichkeit**, Robustheit und Zuverlässigkeit von den einzelnen Innovationen im Antriebs- und Hydrauliksystem
 - o Applikationsabnahme aller neuen Komponenten im System, zusammen mit den Herstellern, als Grundlage für die technische Freigabe für einen Serienanlauf
 - o Einsatz auf dem Testgelände und realen Baustellen mit professionellem Personal

Alle Ziele wurden anhand der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Messungen und Erfahrungsberichte evaluiert. Das Messkonzept sollte dabei als Grundlage für die meisten Messungen gelten, wobei ergänzende Daten erhoben wurden wo nötig.

⁷ <https://www.hitachicm.eu/de/maschinen/bagger/mobilbagger/zx150w-7/>



2 Vorgehen und Anlagebeschrieb

2.1 Projektabschnitte und Arbeitspakete

Das Projekt kann grob in die folgenden Entwicklungsabschnitte eingeteilt werden:

1. In einer ersten Phase wurde eine konzeptionelle **Komponentenzusammenstellung** aller wichtigen Bauteile der Maschine erstellt und zu einem Gesamtsystem zusammengefügt. Dafür wurde das Fahrzeug fortlaufend analysiert und jede neue Komponente durch die folgenden Fragestellungen überprüft:
 - Welchem Anforderungsprofil soll die Komponente über einen Tag genügen? Welche Dauer- und Spitzenwerte sind zu erwarten?
 - Ist die neue Komponente dafür geeignet? Ergeben sich Chancen oder müssen Abstrikte gemacht werden?
 - Hat der Elektrifizierung einen Einfluss auf andere Komponenten oder die Funktionsfähigkeit der Gesamtsystems? Müssen ergänzende Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden?
 - Kann die Komponente in das neue Gesamtsystem integriert werden (Konstruktion, elektrische Einbindung, Kühlung etc.)?

Begleitend wurde Kontakt mit Lieferanten aufgenommen, welche nebst technischen Anforderungen auch logistische und kaufmännische Kriterien erfüllen mussten.

Da die Umbauten sehr umfangreich waren, wurde eine **konventionelle Dieselmashine hydraulisch vermessen** (siehe Abschnitt 2.3). Dies, um das Leistungsprofil für die neuen elektrischen Systeme für die Komponentenselektion mitzunehmen

2. Die **Entwicklung** und **Integration** der Komponenten werden in den Fachbereichen **Konstruktion, Elektroengineering, Thermomanagement** und der **Softwareentwicklung** verteilt. Frühzeitiges Feedback aus den Fachbereichen kann die Komponentenwahl nochmals beeinflussen.
Während der Phasen 1 und 2 wurde die Risikoanalyse durchgeführt, um Änderungen in der Komponentenzusammenstellung oder konstruktive Anpassungen früh genug einfließen lassen zu können.
3. Der **Aufbau** der Baugruppen, welche später auf der Maschine zusammengesetzt wurden, folgte sukzessive. Parallel zu den Aufbauarbeiten wurden elektrische Komponenten auf dem Prüfstand in Betrieb genommen (**IBN**), um Schwierigkeiten und Verzögerungen der Maschinen-IBN vorzubeugen. Sobald der Aufbau komplettiert war, wurde zuerst das ganze LV-Bordnetz getestet und im Anschluss die HV-Batterie und -Komponenten dazugeschaltet. Alle Komponenten im Verbund können Probleme hervorrufen, welche im Einzelbetrieb nicht aufgefallen sind.
4. Sobald Teile der Elektronik und der Komponenten funktionstüchtig auf der Maschine verbaut waren, wurde mit dem **Testing** begonnen, welches nach der Fertigstellung bis hin zu Feldtests bei potenziellen Kunden reichte. Die dabei erhobenen **Daten** wurden **analysiert** und Anpassungen am System eingeleitet. Eine abschließende **Dokumentation** zieht Bilanz über das Projekt und garantiert für einen sachgemäßen Gebrauch der Maschine.

Folgende **Arbeitspakete** wurden im Vorfeld definiert und den Projektparteien zugewiesen:

- Systemauslegung (SUNCAR)
 - Bestimmung der übergeordneten Systemarchitektur



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

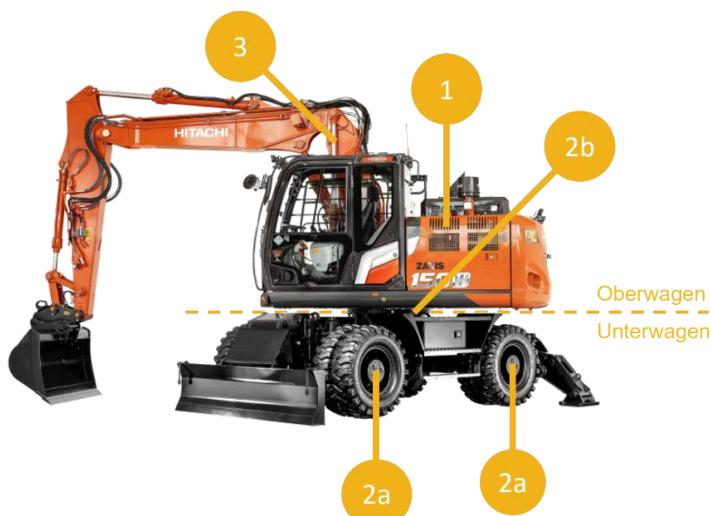


Abbildung 2: Schematische Darstellung der verschiedenen elektrischen Ausbaustufen des Mobilbaggers



2.2 Systemarchitektur

Der Mobilbagger ZE150W kann gemäss Abbildung 2 grob in zwei Bauräume aufgeteilt werden: den Unter- (UW) und den Oberwagen (OW). Diese sind in der Originalmaschine durch eine hydraulische und elektrische (24V) Drehdurchführung miteinander verbunden. Zur Übertragung der elektrischen Leistungen musste für die Prototypen aber eine erheblich grössere elektrische Drehdurchführung eingesetzt werden. Diese ermöglicht zum einen die Versorgung des elektrischen Fahrantriebs über die im Oberwagen liegenden HV-Batterien, andersherum aber auch um Energie der im UW verbauten Ladegeräte nach oben zu speisen. Weiterhin wurden auch eine Signalübertragung und LV-Versorgung vorgesehen.

Die effizienzsteigernden Massnahmen, welche auf den zwei Maschinen umgesetzt wurden, können in drei Kategorien zugeteilt werden:

Elektrischer Antrieb ersetzt den Dieselmotor: Das Pumpenverteilergetriebe, ehemals durch den Dieselmotor getrieben, versorgt auf der Maschine alle Hydraulikverbraucher mit Energie. Die ehemals an einem Power-Take-Off (PTO) des Dieselmotors angeflanschte Brems- und Pilotpumpe wird durch einen separaten elektrischen Antrieb betrieben.

- 1) **Rotatorische Antriebe werden neu direkt-elektrisch betrieben:** Nebst den hydraulischen Zylindern wird die Hydraulik auch für rotatorische Antriebe eingesetzt. Ein Ersatz durch ein elektrisches Pendant ist naheliegend und effizienter.
 - a. Ein elektrischer Fahrantrieb steigert die Effizienz und erlaubt die Rekuperation von kinetischer und potenzieller Energie bei Verzögerung und Talfahrten.
 - b. Gleiches gilt für den Schwenkantrieb, welcher effizienter als die Hydraulik arbeiten und bei einem Ladespiel die Energie beim Abbremsen der Drehung zurückgewinnen kann.
- 2) **Hydroelektrisches Hubsystem zur Effizienzsteigerung und Energierückgewinnung:** Mit einem neuartigen System, welches elektrische Energie und hydraulische Energie rückgewinnt, wird einer der grössten hydraulischen Verbraucher aus dem regulären Hydrauliksystem ausgeklinkt.

Da jede einzelne Elektrifizierungsmassnahme individuell bewertet werden sollte, wurden die Prototypen nicht baugleich geplant und aufgebaut. Ursprünglich waren drei Ausbaustufen (PT0, PT1 und PT2) geplant, wobei PT0 eine Vorstufe der PT1 Maschine sein sollte, nämlich noch ohne elektrischen Fahrantrieb. Von dieser wurde jedoch nach eingehender Prüfung abgesehen, da die Aufwände eines Umbaus als unverhältnismässig zu den daraus gewonnenen Erkenntnissen und Energieeinsparungen eingeschätzt wurden. Um die Energieeinsparungen eines elektrischen Fahrantriebs trotzdem quantifizieren zu können, wurden zusätzliche Hydraulikmessungen an einem diesel-hydraulischen Fahrzeug durchgeführt. Die im Bericht diskutierten Maschinen sind gemäss Antriebsübersicht in Abbildung 2 und Tabelle 1, konfiguriert, wobei A0, A2 und A3 nicht physisch umgesetzt wurden und nur analytisch betrachtet werden:

Tabelle 1: Bezeichnungs- und Konfigurationsübersicht der verschiedenen Maschinen

Konzeptbezeichnung	Antriebe	Kommentar
A0	1	Nicht gebaut (entspricht Maschine PT0)
A1	1+2a	Entspricht Maschine PT1
A2	1+2b	Nicht gebaut
A3	1+3	Nicht gebaut
A4	1+2a+2b+3	Entspricht Maschine PT2

Die Systemarchitektur wurde in einem frühen Projektstadium skizziert (Abbildung 3), um im Anschluss die passenden Komponenten auf dem Markt zu evaluieren.

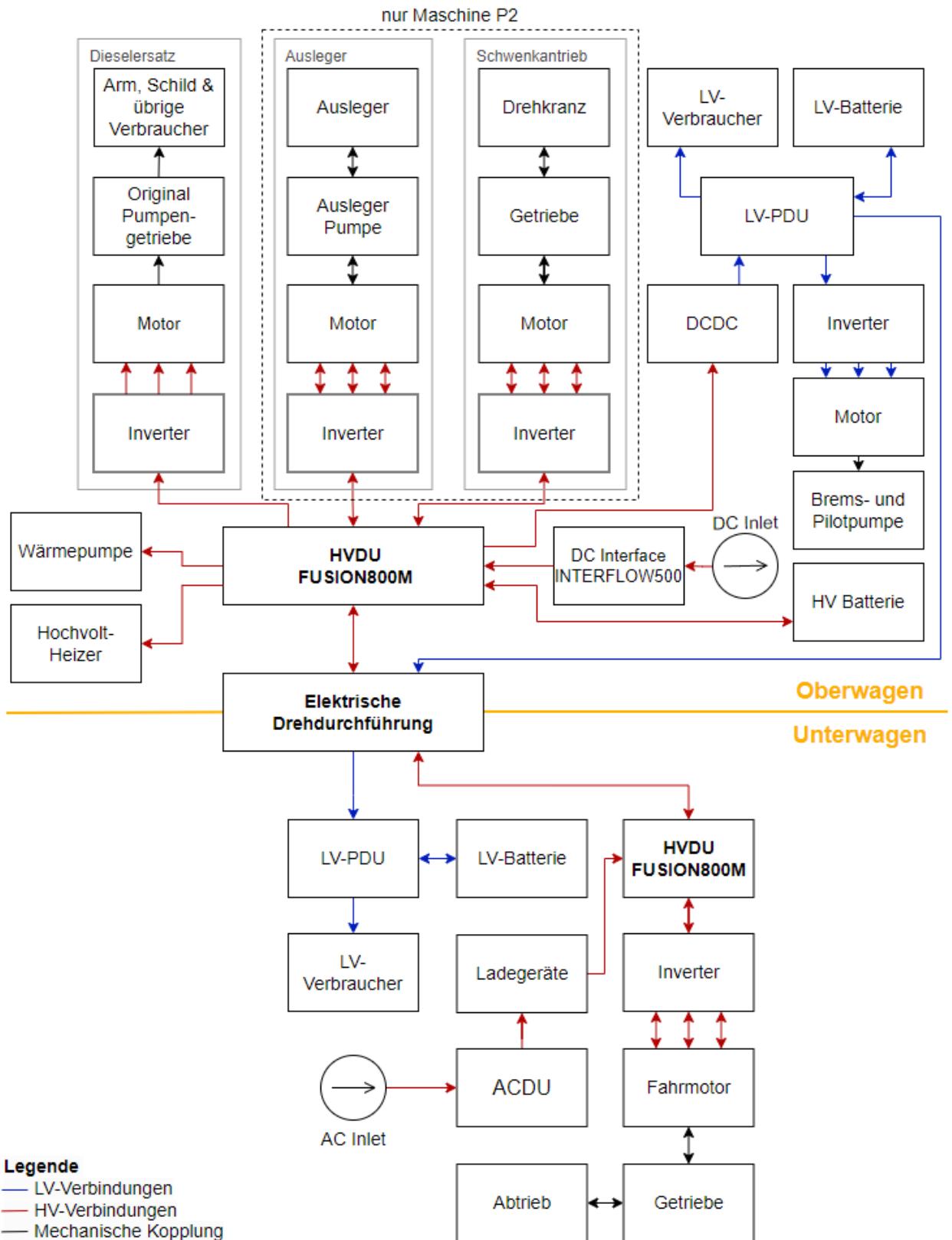


Abbildung 3: Systemschaubild des ZE150W für PT1 und PT2.

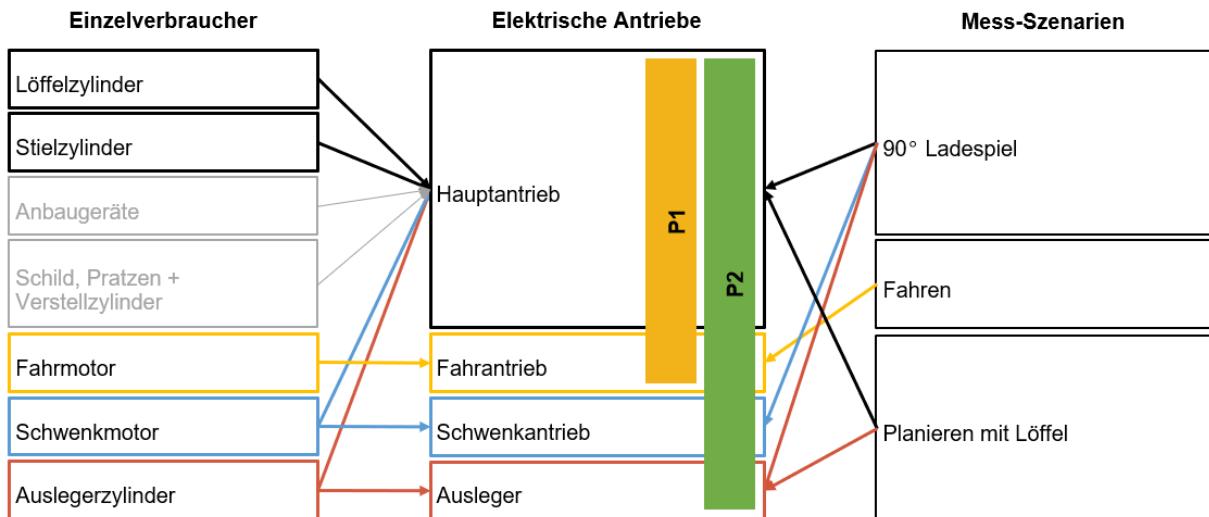


Abbildung 4: Übersichtsdiagramm der zu messenden Verbraucher, der elektrischen Ersatzkomponenten und der ausgewählten Arbeitsszenarien.

2.3 Antriebsdimensionierung

Beim ZE150W wurde eine Vielzahl hydraulischer Nebenantriebe durch direkt elektrische Systeme ersetzt. Dadurch kann nicht nur effizienter gearbeitet werden, sondern es wird auch Energie rekuperiert und somit in den Energiespeicher zurückgeführt. Viele bisherige Elektrifizierungsprojekte konzentrierten sich hauptsächlich darauf, den Dieselmotor elektrisch zu ersetzen. Die technischen Daten einzelner Nebenantriebe sind jedoch oft nicht ohne Weiteres aus Handbüchern oder anderen verfügbaren Unterlagen ersichtlich, weshalb eine detaillierte Analyse notwendig ist.

2.3.1. Messstrategie, -aufbau und Durchführung

Für die korrekte Dimensionierung der Antriebe wurde deshalb eine Messkampagne geplant, welche das Vermessen von hydraulischen Leistungen an einer Dieselmashine zum Ziel hatte. Ein ZX155W, welcher bezüglich Leistung und Aufbau beinahe deckungsgleich mit dem ZX150W ist, wurde dafür mit verschiedenen hydraulischen und elektrischen Messinstrumenten ausgerüstet. Aus den erhobenen Daten konnte der Leistungsbedarf einzelner Verbraucher und der gesamten Maschine berechnet werden, was Aufschluss über die eingeforderten Betriebszyklen der neuen elektrischen Arbeitsstränge gab.

In einem ersten Schritt wurde eine Übersicht aller hydraulischen Verbraucher erstellt (vgl. Abbildung 4). Verbraucher, die entweder bereits in der Vergangenheit vermessen (z.B. Anbaugeräte) oder nicht leistungsrelevant sind (Schild/Pratzen und Verstellzylinder), wurden nicht weiter analysiert. Anschliessend wurden die Verbraucher den künftig elektrischen Antrieben zugeteilt. Da die Verschaltung der Hydraulik zwischen Pumpen und Verbrauchern aber nicht linear 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.

Die Auswahl und der Aufbau der Sensoren, sowie die Messszenarien wurden umfangreich geplant, um alle involvierten Parteien miteinzubeziehen und schlussendlich die effektiv benötigten Daten erhoben zu haben. Dafür wurden alle benötigten Messpunkte/Messgrößen und das am Bagger dafür benötigte Setup definiert. Dieser Aufstellung entsprang ein Messaufbau (Abbildung 5) in zwei verschiedenen Konfigurationen:

- 10 Drucksensoren: Diese griffen den Druck an Pumpen und Verbrauchern ab, um Verlust- und Arbeitsleistung zu berechnen.
- 2 Messturbinen: Der hydraulische Volumenstrom wurde zusammen mit dem Druck für die hydraulische Leistungsberechnung verwendet.



Abbildung 5: Aufbau der Sensorik für die Benchmark Messungen an einer ZX155W Dieselmashine während den Messtagen.

- 5 Neigungssensoren: Das MOVLIMIT Sensor Kit 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 floss wiederum in die Leistungsberechnung ein.
- 2 Kameras: Eine externe und eine interne Kamera wurden installiert. Erstere filmte die Kabine, damit alle Steuerinputs, welche beispielsweise mit Drucksensoren gemessen werden, einem visuellen Plausibilitätscheck unterzogen werden könnten. Die externen Aufnahmen wurden verwendet, um auffällige Messdaten mit den effektiven Arbeiten zu vergleichen.

Jede Messung wurde im Voraus genaustens definiert, um aussagekräftige 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. Nebst dem Teil der Checkliste, welcher sich mit den eigentlichen Vorbereitungsarbeiten befasst, sind auch Punkte aus der Umwelt/Umgebungsanalyse eingeflossen, wie in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Äussere Einflussfaktoren auf die Messungen und deren Ergebnisse.

Einflussgrösse	Stärke	Steuerbar	Konsequenz zur Minderung des Einflusses
Aussentemperatur	Rot (Hoch)	Grün (Niedrig)	Maschine aufwärmen und Klimageräte separat betrachten. Alle Messungen möglichst kurz aufeinanderfolgend durchführen.
SoC Batterie	Gelb (Mittel)	Grün (Niedrig)	Bereich: 30-100 % und notieren
Öltemperatur	Rot (Hoch)	Grün (Niedrig)	Aufwärmen der Hydraulik vor den Tests
Baggerfahrer	Gelb (Mittel)	Gelb (Mittel)	Nach Möglichkeit gleicher Fahrer für alle Tests
Dichte des Aushubs	Rot (Hoch)	Gelb (Mittel)	Gleiche Testumgebung nutzen
Bodenbeschaffenheit	Rot (Hoch)	Grün (Niedrig)	Gleiche Testumgebung
Neigung Untergrund	Gelb (Mittel)	Grün (Niedrig)	Gleiche Testumgebung



2.3.2. Resultate der Hydraulik-Leistungsmessungen

Fahrantrieb

Für die Leistungsmessungen am hydraulischen Fahrantrieb wurde in der A- und B-Leitung jeweils ein Drucksensor, verbaut, sowie eine Volumenstrom-Messturbine. Daraus kann die hydraulische Leistung berechnet werden nach $P_{hydr.} = \frac{p[\text{bar}] \cdot \dot{V}[\text{l}/\text{min}]}{600}$

Insgesamt wurden neun Messfahrten à drei Minuten gemacht, wovon sieben in gültigen Messdaten resultierten. Die Fahrten decken ein breites Spektrum an Steigung (bis max. 14°), Kurvenfahrt und Geschwindigkeitsniveaus (0-20 km/h) ab. Die Auswertung zeigt das der Hydraulik-Motor steile Flankenwechsel in Leistung bewältigen, sprich innert weniger Sekunden auf Maximalleistung gehen muss. Wobei längere Spitzenleistung nur bei hohen Geschwindigkeiten (>10 km/h) erreicht werden und weniger von der Hangneigung abhängt als erwartet. Dies liegt daran, dass sich das Fahrzeug am Hang deutlich verlangsamt und dadurch den Volumendurchsatz stark verringert. Durchschnittlich wurde mit einer Leistung von 15 kW gefahren, was insofern erstaunlich ist, als dass die hydraulische Leistung ab Pumpe im Oberwagen um ein Vielfaches höher ist.

Schwenkantrieb

Die Auslegung des Schwenkantriebs wurde massgeblich durch die Auswertung der Messdaten vorangetrieben. Die technischen Angaben des bis anhin eingesetzten Hydraulikmotors konnten zwar eingeschätzt werden, aber die effektiv benötigte und abgerufene Leistung war 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 Spitzens- und Dauerbetriebsbereich unterscheidet. Die erhobenen Messdaten mussten so gefiltert werden, dass nur jene Datenpunkte berücksichtigt werden, in denen der Motor Arbeit verrichtet, da die während passiver Bremsphasen aufgezeichneten Drücke sonst die Ergebnisse 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 6 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 Drehkrantz zum Ritzel und das

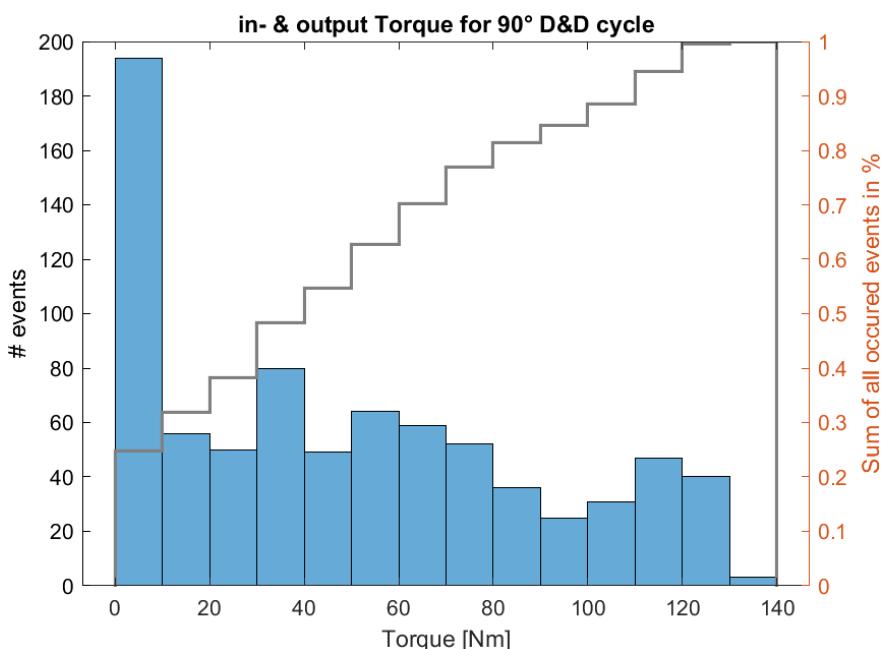


Abbildung 6: Berechnetes Drehmoment des elektrischen Schwenkmotors während eines Grabzyklus.



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 musste aber auch ein Getriebe gewählt werden, welches innerhalb einer Frist geliefert werden konnte, eine Bremse enthält und möglichst aus Standardkomponenten besteht. Gerade das war jedoch sehr schwierig, weil herkömmliche Getriebe auf den hydraulischen Betrieb ausgelegt wurden, sich die tiefen Übersetzungsverhältnisse aber nur bedingt für den Einsatz mit einem Elektromotor eignen.

Hubsystem

Die Auslegung des elektrohydraulischen Systems erfolgte unter Berücksichtigung der im Maschinenhandbuch spezifizierten Parameter sowie der Analyse der tatsächlichen Lastzyklen im Betrieb. Die Zylindergeschwindigkeiten, Fläche der Stangen- und Kolbenseite, sowie Betriebsdrücke (resp. Grenzwert des Überdruckventils) gaben Aufschluss über die erforderliche Fördergeschwindigkeit und Leistung. Über das Schluckvolumen der neuen Hubpumpe, konnte somit Drehzahl und -moment des elektrischen Antriebs geschlussfolgert werden. Für die Feinabstimmung und insbesondere um das Effizienzsteigerungspotenzial vollständig auszuschöpfen, lohnte 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 Hydraulikspeichergrößen abzuschätzen. Weiter wurde damit ein Input für die Simulation generiert, welche frühzeitig gewisse Prognosen zur Energieeinsparung erlaubten.

Brems- und Pilotpumpe

Im ZX150W wird die Pumpe, welche die Vorsteuerung und die Bremse versorgt, über einen power take-off (PTO) direkt am Dieselmotor angetrieben. Aus diesem Grund musste für diese Pumpe auf der elektrischen Maschine ein separates Aggregat evaluiert werden.

Aus der Messung im Normalbetrieb ging eine durchschnittliche Förderleistung von ca. 25 l/min und ein Förderdruck von 55 bar hervor. Nach einer Bremsung wurden kurzzeitige Druckspitze beobachtet. Mit einem konservativen Wirkungsgrad von 80% für die Pumpe resultiert eine Dauerleistung von 3 kW für den elektrischen Antrieb. Das Schluckvolumen der neuen Pumpe bestimmt Drehzahl und Moment.

2.3.3. Lehren aus der Hydraulik-Messkampagne

Nach den Messungen wurde mit den Projektpartnern eine Liste von Lehren zusammengestellt:

- Nomenklatur: Da für jede Messung eine Reihe von verschiedenen Messgeräten und Kameras involviert waren, bewährte sich eine vorgängig definierte eindeutige Benennung jedes Messversuchs, um am Ende eines Messtages den Überblick über die erfassten Daten zu behalten.
- Sicherheit: Wird auf Flächen getestet, welche auch von anderen Personen benutzt/befahren werden, muss der Bewegungsbereich klar mit Pylonen gekennzeichnet werden.
- Testablauf: Um Prozessfehler zu vermeiden, sollten die Test-Skizzen dem Baggerfahrer immer vorliegen, damit die Abläufe klar sind und falsche Manipulationen vermieden werden können.
- Messaufbau: Wenn möglich sollte die Anzahl der Messcomputer, welche die Daten der Sensoren aufnehmen auf ein Minimum reduziert werden. Das Synchronisieren von verschiedenen Daten mit unterschiedlichen Zeitstempeln und Aufzeichnungsfrequenzen ist aufwändig.

2.4 Thermo-Auslegung

Um die Leistungselektronik auch bei hohen Umgebungstemperaturen und unter starker elektrischer Belastung betreiben zu können werden diese in den meisten Fällen über einen Kühlkreis gekühlt (vgl. Abbildung 7).

Basierend auf ausgewählten Lastszenarien und den selektierten Komponenten wurde die zu erwartende Verlustleistung bestimmt, welche über das Kühlungssystem abgeführt werden muss. Anschliessend



wurde mit den realistischerweise herrschenden Umweltbedingungen (Umgebungstemperatur, Sonnen-einstrahlung, Luftfeuchtigkeit) eine Kombination aus Kühlmittelpumpen und Kühlern ausgelegt, die auch unter extremer Belastung die erforderliche Kühlleistung erbringen können. Zwischen OW und UW kann keine thermische Verbindung geschaffen werden, weshalb die Ladegeräte und der Fahrantriebsstrang ihre Wärme im UW über ein eigenes Lüfterpaket abführen. Nahe dem Untergrund, wo potenziell mehr Wärme abgestrahlt wird, und aufgewirbelter Staub die Lüfterlamellen verschmutzt, wird ein grosszügiger Sicherheitsfaktor für die Auslegung verwendet. Um langfristig zweiterem Problem vorzubeugen, werden Lüfter verwendet, welche durch Reversieren der Lüfter Verschmutzung ausblasen können.

Die Thermo-Architektur im Oberwagen gestaltete sich um einiges komplexer, da die anfallende Wärme aus Effizienzgründen, wann immer möglich, 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 aktive Kühlen des HV-Batteriesystems ist für einen zuverlässigen Betrieb unter allen Temperatur- und Lastbedingungen zwingend notwendig. Ergänzt wird das System durch einen Hochvolt-Heizer, damit die Batterie auch bei einem Kaltstart innerhalb weniger Minuten betriebsbereit ist, ohne die Lebensdauer der Batterie-Zellen in Mitleidenschaft zu ziehen.

Die Kabine verfügt weiterhin über eine Klimaanlage, wobei sich das Hezwasser gleichermassen an der Wärme der Leistungskomponenten und bedarfsweise des HV-Heizers bedient. Nebst weniger Lärm, Vibrationen und Abgasen soll die Temperatur in der Kabine damit zuverlässig auf angenehme Temperaturen geregelt werden können, um das Wohlbefinden des Maschinenfahrers zu fördern.

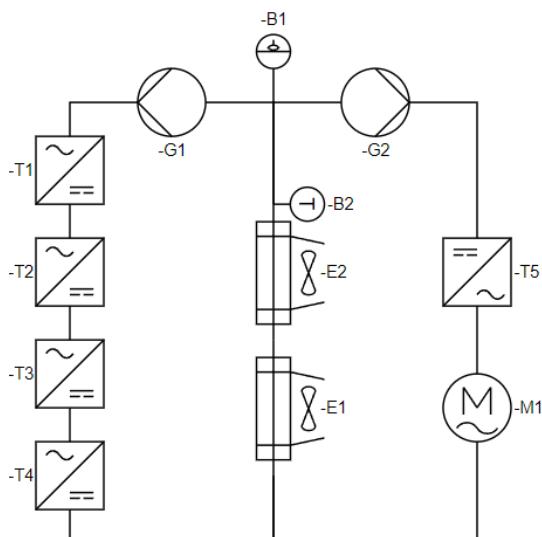


Abbildung 7: Thermokreis des Unterwagens mit vier Ladegeräten, Fahrinverter und -motor.

2.5 Elektrische Auslegung und Softwareentwicklung

Die Entwicklung eines batterielektrischen Mobilbaggers bringt komplexe Herausforderungen in der elektrischen Auslegung und Softwareentwicklung mit sich. Besonders in frühen Projektphasen ist es essenziell, grundlegende Anforderungen klar zu definieren. Ein zentrales Thema war die Planung der elektrischen Signale und Leitungen, welche durch die Drehdurchführung geführt werden müssen. Diese verbindet den drehbaren Oberwagen mit dem "feststehenden" Unterwagen und stellt damit eine zuverlässige Übertragung der Signale und Versorgungsspannungen sicher. Nebst der Bordnetzversorgung (LV), Masse und CAN-Kommunikation müssen auch analoge und digitale Signale berücksichtigt werden. Eine frühzeitige Definition dieser Schnittstellen war entscheidend, um spätere Anpassungen zu minimieren und die Funktionalität zu gewährleisten. Die vier Reserve-Signalleitungen in der Drehdurchführungen wurden bis zum Schluss vollständig durch unvorhergesehenen Bedarf aufgebraucht.



Um den Entwicklungsaufwand zu optimieren, wurde ein Fokus auf die Wiederverwendung von Komponenten zwischen dem ersten Prototyp (PT1) und dem zweiten Prototyp (PT2) gelegt. Der Einsatz standardisierter Schnittstellenstecker sorgte für eine gewisse Modularität, die nicht nur die Montage vereinfachte, sondern auch die Kompatibilität zwischen unterschiedlichen Entwicklungsstufen sicherstellt. Diese Herangehensweise förderte die Effizienz und ermöglicht eine flexiblere Integration neuer Komponenten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft den ausreichenden mechanischen Schutz der LV- und HV-Leitungen. Insbesondere im Bereich des Unterwagens, der nahe am Boden liegt, besteht ein erhöhtes Risiko mechanischer Beschädigungen. Schutzmassnahmen wie verstärkte Kabelummantelungen und strategisch geplante Verlegungen wurden eingesetzt, um die Zuverlässigkeit und Sicherheit zu gewährleisten.

Eine weitere besondere Herausforderung stellte die Integration des Originalkabelbaums dar, der für die Steuerung der Hydraulikventile, das Einlesen von Sensoren und die Nutzung von Kameras verantwortlich ist. Fast 90 Signalleitungen mussten nahtlos in den neuen SUNCAR-Kabelbaum eingebunden werden, der auf die spezifischen Anforderungen des elektrischen Antriebs zugeschnitten ist. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, dass die Ansteuerung der Originalteile so gestaltet ist, dass HCM diese zu einem späteren Zeitpunkt wieder übernehmen kann. Diese vorausschauende Planung ermöglicht eine einfache Rückführung des Systems an den OEM für eine Vorserienproduktion.

Die virtuelle Verlegung der Kabel auf der Maschine spielt ebenfalls eine zentrale Rolle, um die Biegeradien der HV-Leitungen einzuhalten und ausreichend Platz zwischen den neuen Stahlkonstruktionen, Hydraulik- und Kühlmittelleitungen freizuhalten. Eine enge Abstimmung mit der mechanischen Konstruktion war essenziell für die integrative Planung, welche eine funktionale, langlebige und wartungsfreundliche elektrische Installation sicherstellen soll.

Nicht nur für die Elektroplanung, sondern auch in der Softwareentwicklung lag eine der grössten Herausforderungen in der Integration der Original-Sensorik und -Ventile – gerade auch, weil die Datenlage zu diesen Komponenten eher spärlich ist. Allgemein führt die erhöhte Anzahl von Komponenten und Steuergeräten von Dritten zu einer erhöhten Auslastung der Kommunikationsbusse sowie der zentralen SUNCAR-Steuerung. Dies erforderte eine sorgfältige Optimierung der Bus-Last, Anpassungen der Taktfrequenz, sowie eine sorgfältige Verteilung von IDs. Auch wenn SUNCAR inzwischen über eine grosse Bibliothek an Softwaredreibern verfügt, erfordert jede neue Maschinenkonfiguration einige spezifische Anpassungen.

Die Entwicklung des batterie-elektrischen Mobilbaggers erforderte daher ein hochgradig koordiniertes Zusammenspiel zwischen elektrischer Auslegung, mechanischer Konstruktion und Softwareentwicklung. Durch eine sorgfältige Planung konnten sowohl technische Herausforderungen gemeistert als auch zukunftsorientierte Lösungen implementiert werden.



2.6 Design und Packaging

Der Aufbau der beiden Prototypen PT1 und PT2 wurde wo immer möglich identisch gehalten um den Konstruktions- und den Fertigungsaufwand zu minimieren. Da die zweite Prototypenmaschine mit mehr elektrischen Antrieben und zusätzlichen Hydrauliksystemen dichter gepackt werden musste, hauptsächlich PT2 das Packaging geprägt. Entsprechend weist PT1 gewisse Leerräume auf.

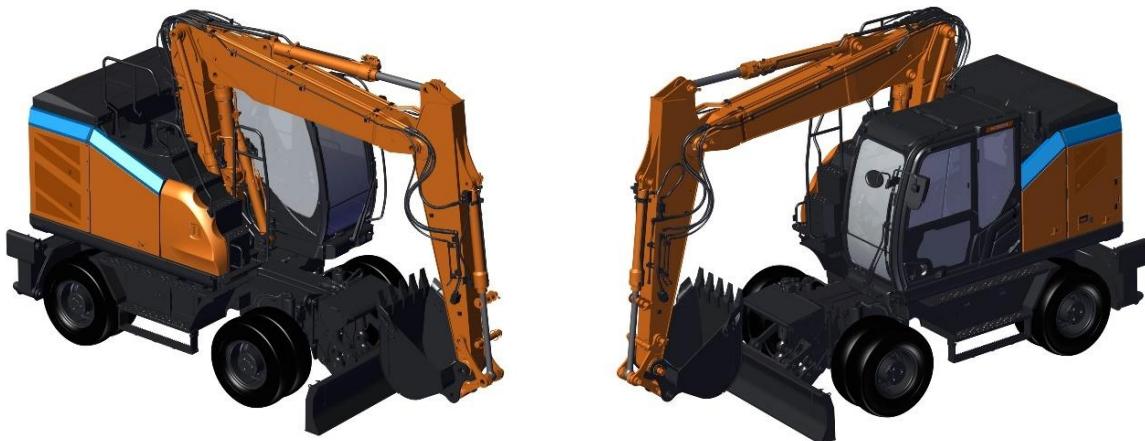


Abbildung 8: Verschalung Ansicht links

Abbildung 9: Verschalung Ansicht rechts

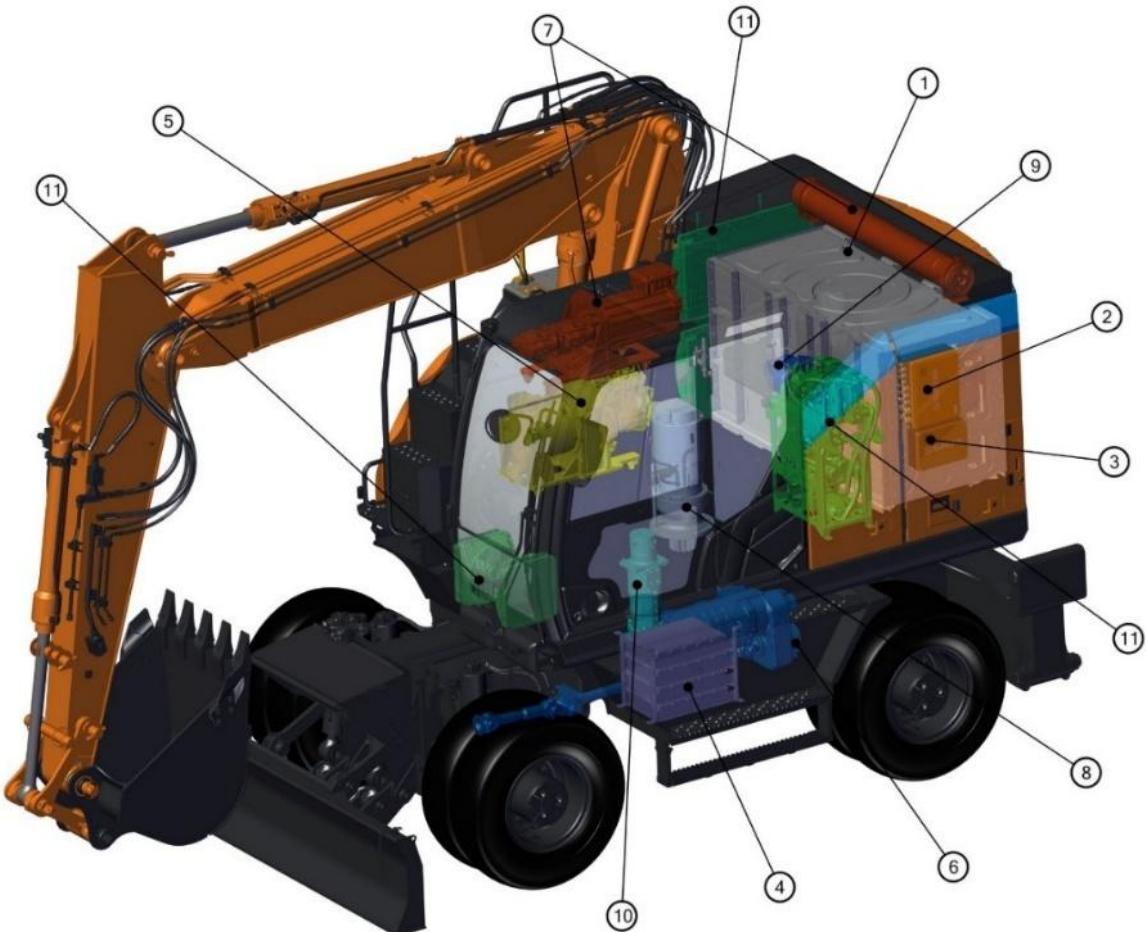


Abbildung 10: Packaging der Maschine in Ausführung des PT2: 1. HV-Batterien, 2. HVDU, 3. Schnellladeschnittstelle, 4. AC-Ladegeräte, 5. Elektrischer Dieselsatz, 6. Elektrischer Fahr'antrieb, 7. Elektrisches Hubsystem, 8. Elektrischer Schwenkantrieb, 9. Elektrische Brems- und Pilotpumpe, 10. Hydraulische und elektrische Drehdurchführung, 11. Thermosysteme

Im Unterwagen wurde der ursprünglich für Werkzeug vorgesehene Seitenkasten ausgebaut und auf beiden Fahrzeugseiten ein neuer Kasten eingebaut. Deren Konstruktion konnte dadurch optimal auf die darin untergebrachten elektrischen Komponenten zugeschnitten werden und erlaubte eine saubere Verlegung aller HV- und Signalkabel.

Das Design der Verschalung des Oberwagens wurde bewusst etwas futuristisch gestaltet – mit gerader Kantenführung und minimalistischen Formfeatures. Nichtsdestotrotz wurden einige Aspekte der Originalmaschine übernommen, um den Wiedererkennungswert zu steigern.

Für alle strukturell stark belasteten Stahlkonstruktionen wurden FEM-Analysen durchgeführt, welche schnell und effektiv eine Beurteilung der Stabilität einer Konstruktion zulässt. Die Simulation des Motorgestells wird hier weiter beispielhaft aufgeführt:

Mit dem Vorwissen aus vorhergehenden Projekten wurde ein erster Entwurf dieses Motorgestells konstruiert. Anschliessend wurden die Materialeigenschaften (S355+N mit einer Streckgrenze von 355 MPa) und die einwirkenden Kräfte definiert. Letztere wurde aus dem maximalen Drehmoment des Motors und der eigenen Gewichtskraft gefolgt und mit einem intern gängigen Sicherheits-Faktor von 4 multipliziert. Der hohe Sicherheitsfaktor berücksichtigt die zusätzliche Belastung, die während Arbeiten auftreten können.



Eine erste Iteration (Abbildung 11 und Abbildung 12) ergab eine lokale Maximalspannung von 642 MPa, was weit über der Streckgrenze des Stahls liegt und zu plastischer Verformung führen würde. Wiederum muss der Wert aber auch kritisch hinterfragt werden, da lokale Spannungen auch aus ungünstigen

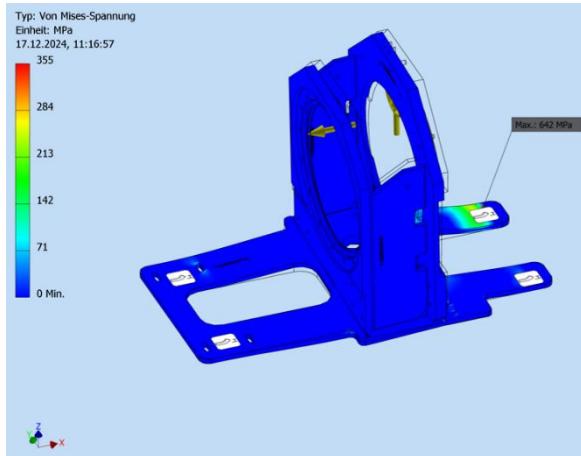


Abbildung 11: Designiteration 1, Von Mises-Spannung

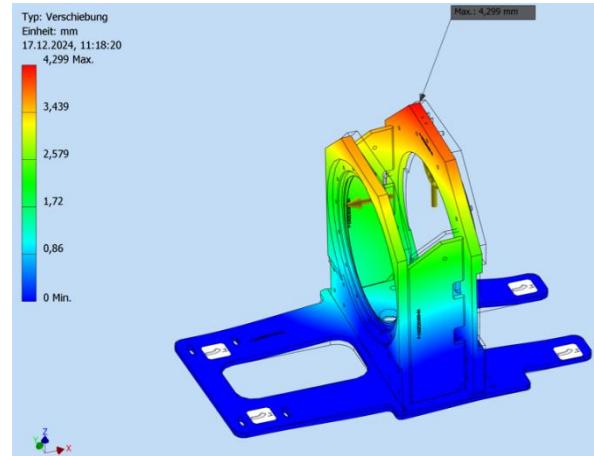


Abbildung 12: Designiteration 1, Verschiebung

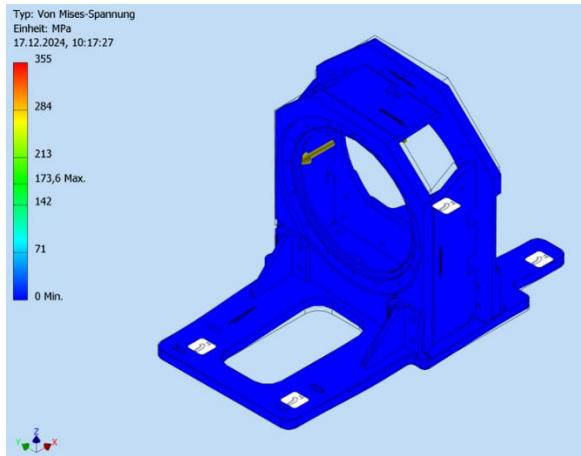


Abbildung 13: Designiteration 2, Von Mises-Spannung

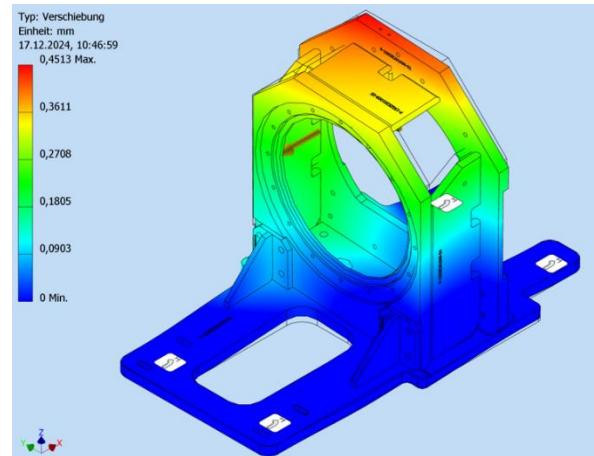


Abbildung 14: Designiteration 2, Verschiebung

Randbedingungen oder suboptimalem Mesh-Aufbau resultieren können. Die maximale Verschiebung von knapp 4.3 mm ist durchaus plausibel.

Darauf folgte eine Weiterentwicklung (Abbildung 13, Abbildung 14), welche verstifende Elemente zwischen Grundplatte und Glocke beinhaltete, sowie eine weitere Verstärkung am oberen Rand. Alle Werte konnten auf ein akzeptables Mass reduziert werden, sprich eine plastische Verformung wurde ausgeschlossen.

2.7 Komponenten

In diesem Abschnitt wird auf die im Systemschaubild (Abbildung 3) ersichtlichen Hauptkomponenten, sowie die damit einhergehenden Arbeiten eingegangen.

2.7.1. HV-Batterie

Die HV-Batterie des ZE150W besteht aus drei parallel verschalteten 100 kWh Lithium-Ionen NMC Batteriepacks. Um optimale Voraussetzungen für den erhöhten Platzbedarf der erweiterten Maschinenarchitektur (zusätzlichen elektrischen Antriebe und Hydrauliksysteme) zu schaffen, wurde für den



Mobilbagger eine neue Batterie mit zylindrischen Zellen vorgesehen, welche gegenüber dem vorhergehenden Batterie-Modell eine 50% höhere volumetrische Energiedichte aufweist. Die Batterien erfüllen die einschlägigen Normen, wie beispielsweise die ECE R10.6 (Elektromagnetische Verträglichkeit), ECE R100.3 (elektrische Sicherheit, Umwelt- und Funktionstests) und ist CE konform.

Die Batterien wurden in der Maschine auf Dämpfern installiert, welche die einwirkenden Vibratoren und Erschütterungen auf ein zulässiges Niveau vermindern. Die dadurch entstehenden Freiheitsgrade mussten im Packaging berücksichtigt werden, damit der hohe Batteriestapel bei ruckartigen Bewegungen nicht auf andere Komponenten schlägt.

2.7.2. Hochvoltverteilsystem (HVDU)

Eine HVDU ist ein elektrischer Energieverteiler, welcher die HV-Komponenten einer Maschine miteinander verbindet (Abbildung 15). Gleichzeitig ist sie der "Sicherungskasten" der Maschine. Vorab wird jeder angeschlossene Verbraucher, respektive Quelle, auf den nominellen und maximalen Strom geprüft und entsprechende Kabel und Sicherungen werden ausgelegt. Die in den von Maschinen von SUNCAR eingesetzten HVDUs werden eigens entwickelt, hergestellt und in Standardgrößen oder nach Kundenbedarf gefertigt.

2.7.3. DC-Schnellladeschnittstelle

Um den Mobilbagger während einer einstündigen Mittagspause über eine externe DC-Ladesäule aufzuladen, wurde die DC-Schnellladeschnittstelle INTERFLOW von SUNCAR verbaut, welche bis zu 300 kW Ladeleistung ermöglicht. Die Kommunikationseinheit, die Strommessung und die Schützen ermöglichen einen kontrollierten Start des Ladenvorgangs, eine laufende Überwachung und ein sicheres Trennen der Vergindung, falls nötig. Dafür wird der weltweit verbreitete CCS2.0 Standard genutzt. Gerade im städtischen Betrieb sind die Chancen auf eine vorhandene DC-Schnelllade-Infrastruktur gut.

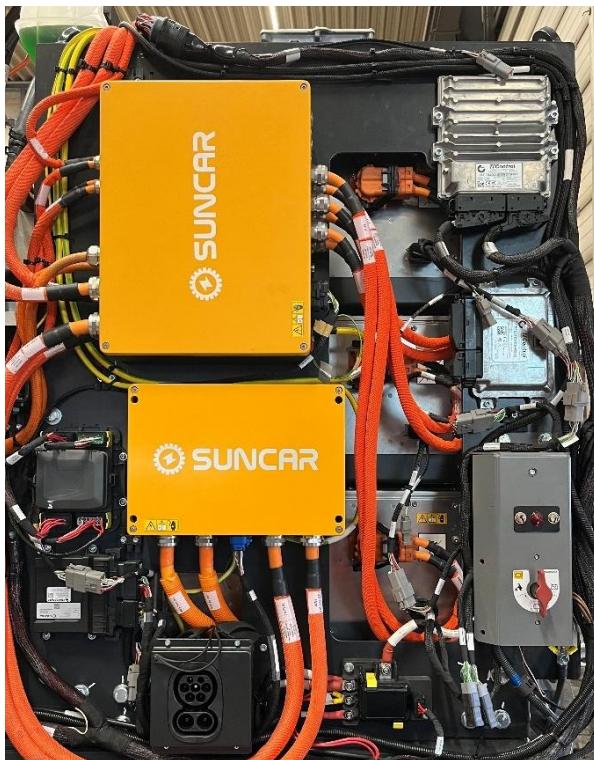


Abbildung 15: Die HVDU FUSION800M (oben) als Herzstück des elektrischen HV-Kreises. Die Aufnahme zeigt nicht den finalen Verkabelungszustand.



Abbildung 16: Seitenkasten mit Netz-Ladegeräten und HVDU FUSION800M

2.7.4. AC-Ladegeräte

Die vier Netz-Ladegeräte gewährleisten die Energiezufuhr ab 3-Phasen-Netz (CEE-Steckdosen bzw. Baustromverteiler) während dem Betrieb oder über Nacht. Mit total 88 kW Ladeleistung ermöglichen sie die Batterie über Mittag um einen Drittel nachzuladen. Je nach Bedarf kann die Anzahl auch flexibel auf zwei Stück bzw. 44 kW Ladeleistung reduziert werden.

Zu Beginn der Designphase wurde über die Positionierung der Ladegeräte (Unter- oder Oberwagen) diskutiert. Schlussendlich fiel der Entscheid auf den UW. Die Option OW mit AC-Anschluss im UW (Kabelbetrieb) hätte weitere AC-Leitungen in der Drehdurchführung benötigt, wofür kein Platz war. Des Weiteren verfügte der UW über ungenutzte Platzreserven, welche somit sinnvoll genutzt werden konnten. Die Ladegeräte sind im Schubladenprinzip eingebaut (vgl. Abbildung 16), was einen schnellen Austausch im Schadensfall ermöglicht.

Im Zuge der Risikoanalyse wurden die Gefährdungen eines kabelgebundenen Baggerbetriebs analysiert. Für den Fall, dass das Kabel unter Zug geraten könnte, wurde eine Steckverbindung evaluiert, welche in diesem Fall automatisch für das sichere Trennen durch Auswurf des Ladesteckers sorgen würde (siehe Abbildung 17). So kann vermieden werden, dass ein Schaden an der Maschine, dem Kabel oder der Infrastruktur entstehen kann. Trotzdem sollte ein Trennen der Steckverbindung unter Last immer vermieden werden, da ein Funkensprung die Kontakte beschädigen kann. Ein entsprechendes Ladekabel von Auswurfstecker auf den Industrieanchluss CEE63 wird dem Benutzer deshalb mit der Maschine zur Verfügung gestellt.

Das Aufteilen des Netzanschlusses auf zwei CEE63 anstelle eines grossen CEE125 wurde aufgrund besseren Handlings und gängigerer Anschlussgrösse so gewählt.



Abbildung 17: Auswurfstecker zur Sicherheit für Schadensprävention



2.7.5. Antriebsstränge

Bei der Selektion von Antriebskomponenten wurde allgemein darauf geachtet, dass sie für den Off-Highway Bereich geeignet sind. Dies setzt vor allem eine hohe Vibrations- und Temperaturbeständigkeit, sowie eine entsprechende IP-Schutzklasse voraus. Für die Ansteuerung wurde eine Kommunikation mittels CAN-Bus bevorzugt und die Komponenten sollten im Normalfall flüssigkeitsgekühlt sein, um eine Überhitzung bei hohen Außentemperaturen vorzubeugen.

Pumpenantrieb (Dieselersatz)

Der Antrieb des Pumpenverteilergetriebes wird über einen Radialfluss-Motor sichergestellt. Trotz der geringeren Auslastung des Hydrauliksystems auf dem PT2, wurde auf beiden Prototypen ein identischer Antrieb eingesetzt. Nicht zuletzt, da Anbaugeräte weiterhin hydraulisch arbeiten und einen grossen Teil der anfallenden hydraulischen Last ausmachen können. Zudem sollten, wo immer möglich, Gleichteile zum Einsatz kommen, um den Aufwand zu minimieren.

Auch wenn das Nennmoment des elektrischen Antriebs unter der Spitzenleistung des Dieselmotors liegt, deckt das verfügbare Spitzennmoment (über 40% höher als Dieselkurve) ausreichend ab.

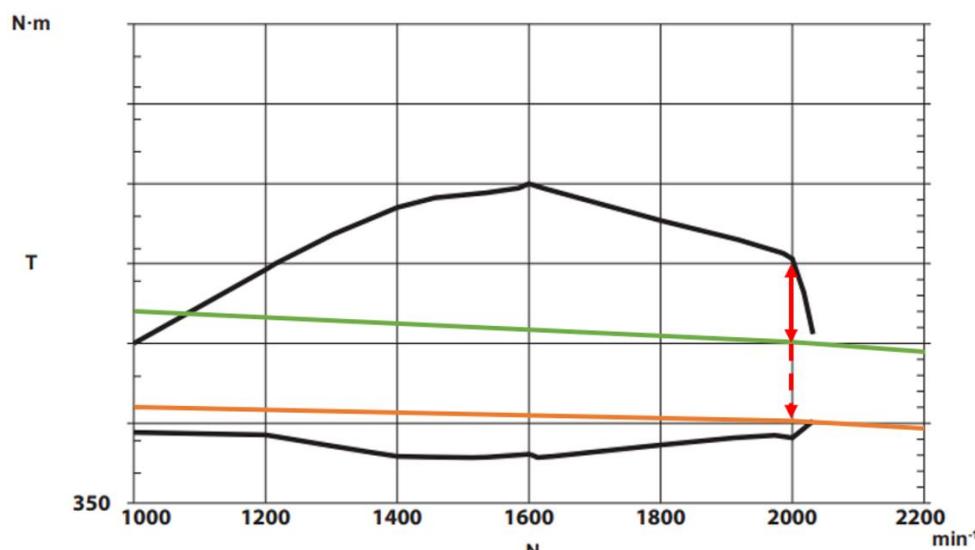


Abbildung 18: Nennmoment des elektrischen Pumpenantriebs (grün: Nennmoment bei 40 °C, orange: Nennleistung bei 60 °C Kühlmittelttemperatur) im Vergleich zum Drehmoment des Dieselantriebs (obere schwarze Linie).

Zum Pumpenantrieb zählt auch das hydraulische System, bestehend aus rund 20 Drucksensoren sowie einer vergleichbaren Anzahl an Ventilen. Da in der aktuellen Entwicklungsphase eine Anpassung der OEM-Maschinenansteuerung von HCM bei diesem Projektstand noch nicht unterstützt wurde, mussten die Original-Controller ersetzt werden. Die Erfassung der Sensordaten erfolgt nun über die SUNCAR-VCU in Kombination mit zusätzlichen IO-Modulen. Genauso wie die Ansteuerung sämtlicher Ventile, welche so gut wie möglich nach vorhandener Dokumentation neu implementiert wurden. Wobei die erste Hürde das Eruieren der Hardwarespezifikationen selbst war.

Fahrmotor

Die Evaluation eines passenden Fahrantriebsystems 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



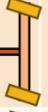
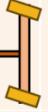
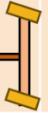
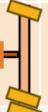
	Beschrieb / Kommentar	Leistung	Komplexität	Konstruktion	Total
1	 Vertikales Zweiganggetriebe (Originalkonfiguration) + Leistungsanforderungen können abgedeckt werden - Enge Platzverhältnisse (Schleifringkörper und Antriebswelle)	+	o	+	++
2	 Vertikales Einganggetriebe mit höherer Übersetzung +/- Mehr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

Abbildung 19: Evaluationsmatrix für alternative Antriebskonfigurationen. Die schematischen Fahrzeugabbildungen zeigen das Getriebe (G), den Motor (M), Die Antriebswelle und mittig zwischen den Achsen die Drehdurchführung.

Dimension der elektrischen Drehdurchführung noch nicht geklärt war, musste parallel in Varianten gearbeitet werden, welche nachfolgend und in Abbildung 19 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.

Nebst dem einen Zweigang-Lastschaltgetriebe, wie in der Originalmaschine vorhanden, wurde auch ein Eingang-Getriebe 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.

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 erlaubte jedoch nicht mehr genügend Platz für den Längenausgleich der Pendelachse.

Schlussendlich wurde ein Fahrantrieb evaluiert, welcher aus demselben Haus wie die Radachsen des Originalbaggers stammt. Das System entspricht der Antriebskonfiguration 1 aus der Evaluationsmatrix (Abbildung 19), was als optimale Lösung evaluiert wurde. Zusätzlich unterstützte der Hersteller auch mit der Systemansteuerung, was einen Mehrwert in Sachen Sicherheit und Features bot. Die Feinabstimmung des Motors, sowie die Koordination der Parkbremse mit Fahrantrieb – für beispielsweise ein sogenanntes "Hill-Hold" – wurden somit ausgelagert. Die Gestaltung der Schnittstelle benötigte jedoch auch hier viel Zeit, speziell, da das Produkt des Herstellers bei der Integration noch nicht auf Serienstand verfügbar war. Schlussendlich waren die benötigte Anzahl Signal Inputs aus der Kabine aber überschaubar:



- Ein vom neu elektrischen Fahrpedal redundant an die SUNCAR VCU gesandtes Signal, welches diese überprüft und per CAN an das Fahr-Steuergerät übermittelt.
- Der Fahrstufenschalter wird von der VCU eingelesen, um die Gang-Anforderung (Schildkröte: langsam; Hase: schnell; AUTO: automatische Gangwahl) per CAN in den Unterwagen weiterzuleiten.
- Der Wahlschalter für die Drehzahlregelung bestimmt über den Kriechgang (Schnecke) und die Deckelung der Fahrgeschwindigkeit mit Drehzahlregler oder Fahrpedal. Die Information wird in der VCU mit dem Fahrpedal-Input kombiniert und es wird nur noch ein Sollwert/Maximalwert weitergegeben.
- Die Betriebsbremse (Bremspedal) wirkt weiterhin hydraulisch. Das Signal der hydraulischen Bremse kann aber verwendet werden, um auch die rekuperative Verzögerung in diesem Moment zu verstärken, um möglichst viel der kinetische Energie in die HV-Batterie zurückzuspeisen.
- Der Parkbremsschalter hat zur Folge, dass das Getriebe schlüssig mit dem Getriebe-Gehäuse verbunden wird, was einer Feststellbremse entspricht.
- Der Fahrrichtungsschalter bestimmt die Drehrichtung des Elektroantriebs.

In Bezug auf **Sicherheit** findet beim Wechsel eines hydraulischen zu einem elektrischen Fahrantrieb eine Verlagerung mechanisch inhärenter Sicherheit hin zu elektronisch zu gewährleistender Redundanz, beziehungsweise Ausfallsicherheit, statt. Als kritische Sicherheitsfunktionen wurde beispielsweise das ungewollte Anfahren, das Verbleiben in einer falschen Fahrtrichtung oder auch ein ungewolltes Wegrollen (gelöste Parkbremse), sowie weitere Funktionen identifiziert. Um diese sicher zu gestalten, wurde ein erforderliches "Performance Level" (PL) nach DIN 14121-2 "Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung – Teil 2" evaluiert. Daraus wurde abgeleitet, welche Bauteile vom Input (Stellteil/Knopf o.Ä.) bis hin zum Output (Motor, Getriebe, Ventil o.Ä.) verwendet werden können, um den geforderten Performance Level (PL) zu erreichen. Dies war teilweise herausfordernd, wenn keine Informationen zu Originalkomponenten vorlagen.

Hubsystem

Die Abklärungen, Vorbereitungen und die Integration des neuen elektrohydraulischen Hubsystems gestalteten sich als sehr umfangreich. Im Gegensatz zum Fahr- und Schwenkantrieb treibt das System weiterhin hydraulische Arbeitszylinder an. Jedoch wurde der Ausleger vom positive flow control (PFC) System des HCM Steuerblocks entkoppelt und in ein neues geschlossenes Hydrauliksystem integriert.

Im Fall des ZE150W muss der Steuerinput des Fahrers über die hydraulischen Vorsteuerung mittels Drucksensor eingelesen werden. Das herstellerspezifische Druckprofil muss dementsprechend richtig interpretiert werden, damit sich die Maschine nach dem Umbau weiterhin wie gewohnt verhält. Die VCU von SUNCAR sendet dementsprechend eine Geschwindigkeitsvorgabe an die ECU des Hubsystems, welches diesen mit dem aktuellen Zustand gegenprüft. Sind alle Parameter im richtig initialisiert und überprüft, kommt ein identisches Signal zurück und der elektrische Hubantrieb wird in Bewegung gesetzt. Kann das Hubsystem die geforderte Geschwindigkeit nicht umsetzen, wird ein entsprechend leicht angepasster Wert an das Fahrzeug zurückgegeben. Allgemein wird das komplexe hydraulische System mit unzähligen Ventilen und Sensoren durch den Systemhersteller überwacht, jedoch war vor allem für die Erstintegration ein vertieftes Verständnis der Funktionsweise seitens SUNCAR unabdingbar, um eine saubere Integration sicherzustellen.

Der elektrische Antrieb wurde anhand der hydraulischen Drücke an den Zylindern sowie der erforderlichen Fahrgeschwindigkeit ausgelegt.

Schwenkmotor

Bezüglich mechanischer Integration stellte der neue rund 220 kg schwere Schwenkantrieb (Abbildung 20) die grösste Herausforderung aller Antriebe dar. Der direkte Eingriff eines neuen Ritzels in den bestehenden Zahnkranz musste genaustens abgestimmt werden. Entscheidend dabei war die Zahnflanken Höhe, der Modul, der Flankenwinkel, sowie der richtige Abstand zwischen Zahnkranz und Ritzel.



Letzteres musste über einen Passstift mit hoher Toleranz sichergestellt werden. Die Zähnezahl ist aus mechanischer Sicht weniger wichtig, jedoch für die Abstimmung mit dem Kennfeld des elektrischen Motors relevant. Dieser ist bei sehr tiefen Drehzahlen nicht sonderlich effizient, weshalb das Übersetzungsverhältnis erhöht wurde.

Schlussendlich wurde ein 30 kW Motor mit zweistufigem Planetengetriebe gewählt. Das um mehr als Faktor zwei erhöhte Übersetzungsverhältnis, die elektromagnetische Bremse, sowie der etwas grössere elektrische Antrieb, zeigte sich in 300 mm mehr Bauhöhe und einem Gewicht von rund 220 kg. Dies stellte ein gewisses Konfliktpotenzial mit den bestehenden Hydraulikleitungen des Auslegers dar, welches beim Aufbau berücksichtigt werden musste.

Der ausgewählte Inverter musste auf jeden Fall die Rekuperation von Energie aus dem Schwenken unterstützen. Allgemein wurde das System konservativ ausgelegt, um keinesfalls in der Energierückgewinnung limitiert zu werden.



Abbildung 20: Der neue Schwenkantrieb mit kundenspezifischem Ritzel und erhöhtem Übersetzungsverhältnis.



Abbildung 21: Inverter und Motor für die Pilot- und Bremspumpe

Pilotpumpe

Trotz der vorhandenen Sicherheitsinstallationen in der Hydraulik (Drucksensoren und Blasenspeicher), fiel die Wahl auf einen 24 V Antrieb (Abbildung 21), welcher im Falle eines HV-Batteriefehlers oder eines Nothalts, den Vorsteuer- und Bremsdruck über eine gewisse Zeit weiterhin ab der LV-Batterie gewährleisten kann. Die Pumpe selbst wurde durch eine besonders leise, schrägverzahnte Pumpe ersetzt, um Lärmimmissionen weiter zu verringern. Speziell, da diese teils auch bei Inaktivität des Baggers laufen muss.



2.7.6. Drehdurchführung

Den Unter- und Oberwagen elektrisch miteinander zu verbinden, stellte eine weitere Herausforderung dar. Zwar verfügt die Originalmaschine bereits über einen Niedervolt-Schleifring mit einer geringen Anzahl an Signalen, jedoch musste für die hohen Leistungen im HV-Bereich ein neues System eingebaut werden. Nebst der Anzahl elektrischer Leitungen musste speziell darauf geachtet werden, dass die Übertragungstechnologie über längere Zeit hohe Leistungen im Stillstand übertragen kann. Dies schloss beispielsweise Produkte mit Kohlebürsten aus, welche für eine effiziente Übertragung auf konstante Bewegung angewiesen sind. Andererseits wurden unterschiedliche geometrische Ansätze betrachtet. So könnte die Drehdurchführung um die bestehende hydraulische Durchführung herum gebaut werden. Für die Installation hätte dies aber ein Abheben des OW vorausgesetzt. Größere Leiterbahnradien führen auch zu höheren Schleifgeschwindigkeiten, was zu Rauschen in Signalwegen führen kann.

Für die vorliegende Maschine wurde ein Schleifringübertrager mit LV- und HV-Leitungen gewählt, welcher kompakt unterhalb der hydraulischen Drehdurchführung eingebaut werden konnte. Herausfordernd war dabei die beschränkte Einbauhöhe zwischen Antriebswelle und hydraulischer Durchführung.

2.7.7. Thermoeinheit

Die Thermoeinheit wurde, im Gegensatz zur restlichen Konstruktion, von SUNCAR designt. Die fünf Pumpen, wurden zusammen mit dem Heizer, der Wärmepumpe und dem Mischventil kompakt auf einem abgesetzten Gestell (Abbildung 23) aufgebaut, verkabelt und erst im Anschluss auf den Hauptcontainer montiert. Für eine bessere Montagefreundlichkeit wurden an den Schlauchübergängen Schnellverschlüsse verwendet. Die Wärmepumpe wurde ganz oben auf der Einheit platziert, um sie im Servicefall mühelos austauschen zu können.

Allgemein wurde auf dieser Maschine nochmals speziell auf eine strömungsoptimierte Schlauchführung, sprich möglichst wenige Durchmesseränderungen, Übergänge und enge Schlauchbiegungen geachtet, um die Verluste in der Thermoeinheit tief zu halten.

2.8 Konzept zur Überprüfung der Effizienzsteigerung



Abbildung 22: Elektrische Drehdurchführung unterhalb der hydraulischen.



Abbildung 23: Thermoeinheit des ZE150W ohne aufgesetzte Wärmepumpe.

Zur Überprüfung der Effizienzsteigerung wurde zusammen mit Testingenieuren von KTEG eine Testkampagne zusammengestellt. Für die Vergleichsmessungen werden drei Fahrzeuge benötigt:

- Dieselbetriebener **ZX175W-7** als Referenz: Identisch zu einem ZX150W-7 was die Hydraulikarchitektur anbelangt. Mit einem Gewicht von 16.7 t passt er gut zum Einsatzgewicht der beiden umgebauten ZE150W. Die Stiellänge von 2.5 m weicht etwas von den 2.1 m der Elektromaschinen ab.



- Batterieelektrischer **ZE150W PT1** als Basis der elektrifizierten Maschine mit elektrischem Fahr-antrieb
- und der **ZE150W PT2** als Maximallösung. Dazu kommt ein rechnerisch abgebildeter **ZE150W PT0**, welcher über keinen elektrischen Fahrantrieb verfügt, sondern rein hydraulisch betrieben wird (vgl. Tabelle 1).

Einerseits sollen die Verbräuche der einzelnen Fahrzeuge gemessen, ausgewertet und deren Effizienzsteigerung ($\eta_{Steigerung}$) bewertet werden (vgl. Tabelle 3, Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6). Dafür wird jeweils die über die Systemgrenze eingebrachte Energie in Form von chemisch in Dieselkraftstoff gebundener (E_D), berechnet aus der Dieselmasse \dot{m}_D und unterem Heizwert $H_{l,D}$, oder elektrisch aus dem Stromnetz geladener ($E_{El.}$) Energie betrachtet. Auf der elektrischen Maschine wird von der HV-Batterie nicht nur Energie abgegeben ($E_{B,out}$), sondern auch wieder Energie von Antrieben rekuperiert, respektive zurückgeführt ($E_{B,in}$). Unter dem Strich bleibt die netto verbrauchte Energie ($E_{B,net}$). Andererseits soll der Effekt des elektrischen Fahr-, Schwenk- und Hubsystems gemäss Tabelle 7 so gut wie möglich einzeln quantifiziert werden. Um die verschiedenen Maschinen zu vergleichen, wird jeweils davon ausgegangen, dass die zu leistende Arbeit gleich ist – dem wird wo möglich mit entsprechenden Massnahmen Rechnung getragen.

Tabelle 3: Formeln zur Berechnung des Energieverbrauchs der Maschinen und der Effizienzsteigerung.

$$E_D = \int \dot{m}_D \cdot H_{l,D} dt = m_D \cdot H_{l,D} \quad (1)$$

$$E_{El.} = \frac{\int P_{B,out} dt - \int P_{B,in} dt}{\eta_B} = \frac{E_{B,out} - E_{B,in}}{\eta_B} = \frac{E_{B,net}}{\eta_B} \quad (2)$$

$$\eta_D = \frac{E_{Arbeit}}{E_D}, \quad \eta_{El.} = \frac{E_{Arbeit}}{E_{El.}} \quad (3)$$

$$\eta_{Steigerung} = \frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{E_1}{E_2} \quad (4)$$

Tabelle 4: Berechnung des Energieverbrauchs der Maschine in unterschiedlichen Ausbaustufen im Fahrbetrieb.

ZX175W	$\int \dot{m}_D \cdot H_{l,D} dt$
ZE150W PT0 (fiktiv)	$\frac{\int \frac{\dot{V}_{Fahrmotor} \cdot p_{Pumpe1}}{\eta_{el. Motor} \cdot \eta_{Inverter}} + (P_{PT1} - P_{Fahrinverter}) dt}{\eta_B}$
ZE150W PT1	$\frac{\int P_{B,out} - P_{B,in} dt}{\eta_B}$
ZE150W PT2	

Da der Bagger typischerweise im städtischen Strassenbau eingesetzt wird, wurden folgende Szenarien definiert, welche mit allen drei Maschinen gefahren werden sollen:

Fahren

- Abfahren der Dumper Teststrecke (Abbildung 24) im Coreum (Test- und Demogelände) von KIESEL, wo bereits die Hydraulikleistungsmessungen zu Beginn des Projekts stattgefunden haben. Diese soll dazu dienen, das Fahren unter Last im unebenen Gelände und die Rekuperation während Hangfahrten zu untersuchen. Der Fahrstufenschalter wird dafür auf "Schildkröte" gesetzt.



- Für die Strassenfahrt, oder einfach das Fahren im ebenen Gelände, wird die angrenzende Testpiste verwendet (Abbildung 24 und Abbildung 25). Dies ist eine längere, abwechslungsreiche Fahrt (Kurven, lange Geraden, viele Beschleunigungswechsel etc.) auf verschiedenen Untergründen (Asphalt, Schotter, Erde). Der Fahrstufenschalter wird dafür auf "AUTO" gesetzt.
- Das Dieselfahrzeug wird dafür einerseits mit Hydraulikmessequipment ausgestattet und andererseits wird mit einem Dieselkraftstoffmessauflauf der Verbrauch über die einzelnen Tests festgestellt. Die elektrischen Maschinen werden dabei grösstenteils durch das Aufzeichnen der Maschinen-CAN Nachrichten ausgewertet.

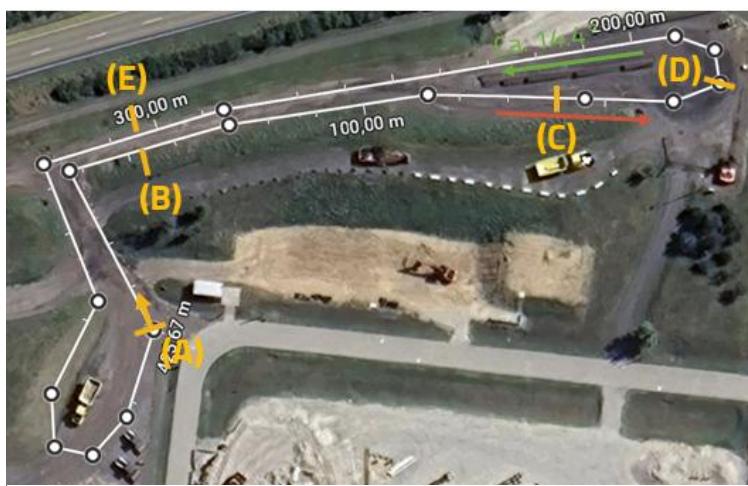


Abbildung 24: Dumper Strecke im Coreum. Variante "Dirt" (420m)



Abbildung 25: Dumper Strecke im Coreum. Variante "Street" (1300m)

Ladespiel / Materialumschlag

- Der Bagger steht auf einem grossen Kieshaufen und arbeitet über einen Drehwinkel von 90° (Messungen 2a.VX.1) um Kies umzuschlagen und 180° (Messungen 2a.VX.2), um einen Dumper zu beladen. Der Hub von Kies-Aufnahme zu Abgabe beträgt zwischen 6 und 8 Meter. Es wird bei allen Tests die Zeit, die Anzahl Ladespiele, sowie das umgeschlagene Gewicht (über die im Dumper integrierte Waage) notiert. Wenn immer möglich soll der gleiche Baggerführer alle drei Maschinen bedienen.



Tabelle 5: Berechnung des Energieverbrauchs der Maschine in unterschiedlichen Ausbaustufen, während einem Ladespiel oder eines Materialumschlags. Die Maschine PT0 unterscheidet sich nicht von PT1, da nicht gefahren wird.

ZX175W	$\int \dot{m}_D \cdot H_{l,D} dt$
ZE150W PT0 (fiktiv)	Äquivalent zu PT1
ZE150W PT1	$\int P_{B,out} - P_{B,in} dt$
ZE150W PT2	η_B

Grabenaushub und Verfüllen

Ein 15 m langer, 1 m breiter und 2 m tiefer Graben wurde ausgehoben und der Aushub wird neben dem Graben deponiert. Nach Abschluss des Aushubs wurde der Graben wieder verfüllt und die Oberfläche mit dem Löffel abgezogen. Die Arbeitszeit sollte bei allen Maschinen etwa gleich sein und jedes Mal wurde ein neuer Graben (versetzt zum Vorherigen) ausgehoben. Damit sollte verhindert werden, dass nachfolgende Maschinen von aufgelockerter Erde profitieren können.

Tabelle 6: Berechnung des Energieverbrauchs der Maschine in unterschiedlichen Ausbaustufen während dem Aushub und Zuschütten eines Grabens. Die Maschine PT0 unterscheidet sich geringfügig von PT1, da der Bagger immer wieder ein Stück vorrückt.

ZX175W	$\int \dot{m}_D \cdot H_{l,D} dt$
ZE150W PT0 (fiktiv)	Vergleichbar mit PT1 und PT2
ZE150W PT1	$\int P_{B,out} - P_{B,in} dt$
ZE150W PT2	$\eta_B \cdot \eta_{charger}$

Allgemeine Aspekte

- Die subjektive Wahrnehmung des Fahrers betreffend Bedienbarkeit, Performance usw. soll nach jedem Test erfasst werden, um nicht nur zahlen-, sondern auch erfahrungsbasierte Aussagen treffen zu können.
- Die Rahmenbedingungen der Tests werden auf Papier festgehalten und mit Fotos dokumentiert.
- Die Lehren aus der ersten Testkampagne werden in die zweite Testreihe mitgenommen. Insbesondere was die klare Benennung der Tests und die Datensynchronisation angeht.

2.9 Quantifizierung der einzelnen Elektrifizierungsmassnahmen

Das Herausrechnen von einzelnen Antrieben stellte sich als schwierig heraus, da nicht jede Elektrifizierungsstufe in einer eigenen Maschine abgebildet wurde. So handelt es sich bei den in Tabelle 7 gezeigten Berechnungsmethoden teilweise um eine analytische Approximation unter einigen Annahmen:

- Da beide elektrischen Prototypen über einen elektrischen Fahrantrieb verfügen, musste der hydraulische Verbrauch am Dieselfahrzeug gemessen werden. Der Volumenstrom zum **hydraulischen Fahrmotor** wurde mit einer Messturbine im Unterwagen aufgezeichnet, wobei der Druck auf der A-Seite (im UW) und abgehend von Pumpe 1, welche den Fahrantrieb speist, gemessen wurde. Ein konstanter Wirkungsgrad für einen fiktiven elektrischen Dieselsatzantrieb wurde angenommen, um die Konfiguration eines PT0 zu simulieren.



- Für den Energieverbrauch des **hydraulischen Schwenkantriebs** wurde angenommen, dass dieser nicht bestimend für den Systemdruck ist. Das heisst, es wird davon ausgegangen, dass die Elektrifizierung keinen erweiterten positiven Einfluss auf das Gesamtsystem hat. Es wurde demnach nur der Verbrauch des hydraulischen Schwenkmotors zusammen mit einer typischen Effizienz für den fiktiven elektrischen Dieselsatzantrieb verwendet. Für die hydraulische Leistungsberechnung wurde der Motor-Volumenstrom über den gemessenen Schwenkwinkel berechnet und mit den Drücken der A- und B-Leitungen, sowie dem Druck, abgehend von Schwenkpumpe 2, verrechnet. Diese Annahme kann unter bestimmten Umständen in einer zu tiefen hydraulischen Leistung bei der darauf basierenden Hub-Berechnungen resultieren. Auf die direkten Schwenk-Energieresultate hat diese Annahme keinen Einfluss.
- Am komplexesten gestaltete sich die Berechnung der Energieeinsparung des elektrischen **Hubsystems**: Da sich der Druck der Auslegerzyylinder im Betrieb massgeblich auf den Systemdruck auswirkt, wurde der Verbrauch über die restlichen Verbraucher der Maschinen erörtert. Dafür musste in einem ersten Schritt die Energieeinsparung durch den Schwenkantrieb berechnet werden, welche anschliessend zum Nettoverbrauchs des PT2 gerechnet wurde. Dies approximiert dann den fiktiven Verbrauch eines PT2 mit hydraulischem Schwenkantrieb. Zieht man davon den Verbrauch des PT1 ab, sollte daraus die reine Energieeinsparung durch das elektrische Hubsystem resultieren. Zur Validierung dieser Berechnung wurde die Einsparung auch über die gemessenen Drücke und Volumenströme approximiert (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Tabelle 7: Berechnungsmethoden der Energieverbräuche einzelner Antriebe zur Quantifizierung der Energieeinsparungen. Für die Wirkungsgrade der elektrischen Inverter und Motoren wurden Annahmen getroffen.

Antrieb	Mess-objekt	Fahren	Ladespiel	Grabarbeiten
Hydr. Fahrantrieb	ZX175W	$\frac{\int \dot{V}_{Fahrmotor} \cdot p_{Pumpe1} dt}{\eta_{el. Motor} \cdot \eta_{Inverter}}$		x
El. Fahrantrieb	ZE150W PT1	$\int P_{Fahr-Inverter} dt$		x
Hydr. Schwenkantrieb	ZX175W	x	$\int \frac{\dot{V}_{Schwenkmotor} \cdot p_{Schwenk}}{\eta_{el. Motor} \cdot \eta_{Inverter}} dt$	
El. Schwenkantrieb	ZE150W PT2	x	$\int P_{Schwenk-Inverter} dt$	
Hydr. Hubsystem	ZE150W PT1 & PT2	x	$\int P_{PT1} - \left[P_{PT2} + \left(\frac{\dot{V}_{Schwenkmotor} \cdot p_{Schwenk}}{\eta_{el. Motor} \cdot \eta_{Inverter}} - P_{Schwenk-Inverter} \right) \right] dt$	
El. Hubsystem	ZE150W PT2	x	$\int P_{Hub Inverter} dt$	



3 Ergebnisse und Diskussion

Die präsentierten Ergebnisse basieren auf Messungen und Tests an den beiden umgesetzten Prototyp-Fahrzeugen PT1 und PT2 (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 8: Eckdaten der Fahrzeuge PT1 und PT2

	PT1	PT2
Abmasse	Ähnlich zu Original	Ähnlich zu Original
Einsatzgewicht	16.5 t	17.2 t
Batteriekapazität	300 kWh	300 kWh
Leistung	Dieselsatz: 60 kW Pilotpumpe: 4 kW Fahrantrieb: 80 kW	Dieselsatz: 60 kW Pilotpumpe: 4 kW Fahrantrieb: 80 kW Schwenkantrieb: 30 kW Hubantrieb: 115 kW

3.1 Gemessene Energieeinsparung

Die Energiemessungen wurden in mehreren Teilmessungen durchgeführt:

- KW11 und KW12 2025: Vergleichsmessungen zwischen ZX175W-7 und ZE150W PT1
- KW27 2025: Vergleichsmessungen zwischen ZE150W PT1 und ZE150W PT2
- KW30 2025: Messungen am ZE150W PT2 mit verbesserten Software-Parametern

Um die Szenarien so ähnlich wie möglich zu gestalten, wurden die Einflussfaktoren nach Tabelle 2 bewertet. Folgende Faktoren waren schwieriger zu beeinflussen als erwartet oder wurden nicht vorhergesessen:

- Im Gegensatz zu den Umschlagsarbeiten, welche auf den dafür vorgesehenen Plätzen mit homogenem Untergrund durchgeführt wurden, musste für die Planier- respektive Abzieh-Szenarien auf einer Brache gearbeitet werden. Da für zwei Maschinen jeweils ein separates Arbeitsfeld abgezogen werden sollte, um der zweiten Maschine nicht den Vorteil eines lockeren Untergrunds zu geben, unterschied sich die Bodenbeschaffenheit teilweise massgeblich.
- Was im Vorfeld nicht beachtet wurde, ist, dass sich die Produktivität einer Maschine durch den Umbau potenziell verändert. So wurde mit dem PT2, welcher über einen neuen Schwenk- und Hubantrieb verfügt, ein deutlich höheres Arbeitstempo erreicht. D.h. in gleicher Zeit kann mehr Arbeit verrichtet werden und folglich verzerrt sich ein Vergleich, da entweder gleiche Arbeitszeit oder gleiche Arbeit gewählt werden muss.

3.1.1. Fahrantrieb

Um die Fahrten auf den Teststrecken "dirt" und "street" (siehe Abbildung 24 und Abbildung 25) möglichst vergleichbar zu gestalten, fuhren die zwei Maschinen jeweils direkt hintereinander her (vgl. Abbildung 26). Die hydraulischen Werte wurden mittels HMG 4000-00 aufgezeichnet, einer Messturbinen (HySense QT100 mit HySense RS200 ISDS) und verschiedenen Drucksensoren aufgenommen (Abbildung 27).



Abbildung 26: Bild eines Teilabschnitts mit Steigung: Vorne der ZX175-W und hinten der ZE150W PT1.

ZX175-W

Auf dem ZX175W-7 wurde der Dieselverbrauch für alle gefahrenen Tests gemessen. Dafür wurde die Dieselzufuhr vom Originaltank zu einem auf dem Dach befestigten Kanister umgeleitet (Abbildung 28), welcher jeweils vor und nach der Fahrt gewogen wurde. Die Messwerte des Dieselverbrauchs und die darauf basierenden Berechnungen sind mit Vorsicht zu geniessen, da die Waage teilweise zwischen Werten gesprungen ist. Deshalb wurde der Kanister jedes Mal mehrmals gewogen. Der Vergleich zwischen PT1 und Dieselfahrzeug wird anhand der verbrauchten Primärenergie erstellt. Dafür wird mit einer gravimetrischen Energiedichte von 11.8 kWh/kg Diesel gerechnet.

- Das Dieselfahrzeug verbrauchte auf 3.8 km "dirt" gesamthaft 7.4 kg Diesel, was knapp 9 l und 87 kWh_{chem} entspricht. Umgerechnet sind das 2.4 l/km oder 23.1 kWh_{chem}/km.
- Auf 11.7 km "street" sind es knapp 9.9 kg, sprich knapp 12l Diesel. Das sind 117 kWh_{chem} Diesel. Es ergibt sich ein geringerer Verbrauch pro gefahrenem Kilometer mit 1 l/km oder 20.1 kWh_{chem}/km.
- Mit einem Fassungsvermögen von 250 l kann der Originalbagger dadurch gut 100 km weit auf Baustellengelände ("dirt") und 250 km auf der Strasse ("street") zurücklegen.

PT0

Die hydraulischen Werte für den fiktiven ZE150W PT0 wurden gemäss Abschnitt 2.8 am ZX175W-7 gemessen, welcher konventionell, also rein hydraulisch, angetrieben ist. Um von der gemessenen Pumpenleistung auf den Verbrauch ab Batterie zu kommen, wird gemäss Tabelle 4 die Effizienz der Hydraulikpumpe (85%) und des elektrischen Antriebstrangs (90%) pauschal berücksichtigt. Dazu wird der am PT1 berechnete Grundverbrauch dazu addiert.

- Die hydraulische Fahrleistung ist massgeblich von der Fahrgeschwindigkeit, respektive der Gangwahl abhängig. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der hydraulische Volumenstrom gleichbleibt, während die Drücke steigen (vgl. 1a.ZX.V4.2 (1. Gang) und 1b.ZX.V6.1 (2. Gang)).
- Hydraulische Leistung am Fahrmotor



- Über Druck und Volumenstrom am Motor kann die hydraulische Leistung berechnet werden. Diese betrug für "dirt" (1. Gang) im Schnitt 4 kWh/km oder 16 kWh/h.
- Für "street" (automatische Gangwahl "AUTO") im Schnitt 2 kWh/km oder 32 kWh/h.
- Im Schnitt betragen die hydraulischen Verluste (Ventilblock, Verschlauchung und hydraulische Drehdurchführung) zwischen Pumpe und Motor rund 20%. Folglich muss die hydraulische Leistung ab Pumpe höher sein als am Fahrmotor.
- Basierend auf den erhobenen Daten ist eine PT0-Reichweite von 27 km unter "dirt" Konditionen und 66 km in "street" Konditionen erreichbar. Dies bedeutet, dass reger Fahrbetrieb auf der Baustelle oder längere Fahrten die Energie der Batterie massgeblich beeinflussen und Ladepausen unter dem Tag unvermeidbar werden.

PT1

Der mit einem elektrischen Fahrantrieb ausgestattete PT1 wurde auf identischem Parcours gefahren:

- Auffällig sind die negativen Leistungspunkte, welche auf die Rekuperation bei Talfahrt und Bremsen hinweist. In Graph 1a.ZE.V4.1 ist die Bergfahrt von Sekunde 200 bis 250 und gleichermassen die Talfahrt von Sekunde 260 bis 300 deutlich zu sehen. Das Bremsen während Geschwindigkeiten von bis 6 km/h ("dirt") fällt kaum ins Gewicht. Umso mehr bei "street", wo das Verzögern der 17t Baggergewichts klar zu erkennen ist. Im Schnitt konnte während den langsam gefahrenen Szenarien 16% der Fahrernergie wieder zurückgewonnen werden. Bei schnellen Fahrten sind es bis zu 25%.
- Letztlich konnte beobachtet werden, dass der Energieverbrauch der übrigen Verbraucher (Leerauf des Hydraulikaggregats, Lenkpumpe, Pilotpumpe und Nebenverbraucher) wegen des niedrigen Verbrauchs des Fahrantriebs stark ins Gewicht fallen – mit gut 50% der gesamten Batterieleistung. Hier sollte künftig weiter optimiert werden, um das Potenzial des elektrischen Antriebs vollständig auszuschöpfen.
- Basierend auf den erhobenen Daten ist eine Reichweite von 66 km unter "dirt"- und 112 km in "street"-Konditionen erreichbar. Eine Optimierung im Bereich der hydraulischen Grundlast kann diese künftig noch weiter boosten. Damit sind längere Fahrten zwischen Baustellen oder aus dem Depot heraus problemlos möglich, ohne den übrigen Arbeitstag massgeblich zu beeinflussen.



Abbildung 27: Externer Dieseltank auf dem Dach, Messgerät und Sensoren auf Seitenwand und an Verschlauchung.



Abbildung 28: Dieseltank mit Paketwage zur Verbrauchsquantifizierung über ein gesamtes Messzenario hinweg.



1a.ZEX.V4.2: Eine Runde "dirt" mit 5 Stops

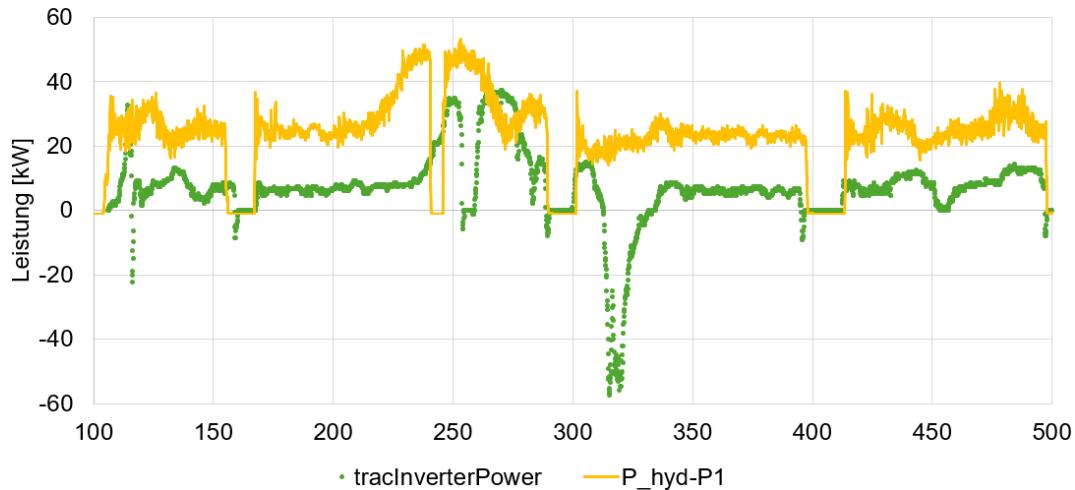


Abbildung 29: Vergleich elektrischen Fahr-Inverter Leistung (ZE150W PT1) und hydraulischer Leistung ab Pumpe (ZX175W-7)

Vergleich ZX175W-7 zu PT0

Um den Diesel- mit dem Elektrobagger zu vergleichen wird für beide die verbrauchte Energie ab Fahrzeugspeicher berechnet. Aus diesem Grund wird nebst dem elektrischen Antrieb auch die Batterie berücksichtigt mit einer durchschnittlichen Effizienz von 98%. Diese dürfte sich über den Lebenszyklus noch bis auf ca. 95% verschlechtern. Für die 3.8 km "dirt"-Strecken ergibt sich daraus ein Verbrauch von 34.7 kWh_B am PT0. Für die gefahrenen 11.7 km "street", 47 kWh. Der Diesel verbraucht somit rund 2.4x mehr als PT0. Dieser Vergleich führt primär die Verluste im Verbrennungsmotor vor Augen, welcher dem elektrischen Antrieb hoch unterlegen ist.

Vergleich PT0 zu PT1

Der direkte Vergleich zwischen den zwei Antriebsarten wurde einerseits über die durchschnittlichen Verbräuche quantifiziert, welche während den insgesamt 1.6 Fahrstunden gemessen wurden, aber auch im Direktvergleich der Fahrleistung anhand eines Ausschnitts aus dem Szenario 1a.ZEX.V4.2 (Abbildung 29). Darin wird der Effizienzsprung klar ersichtlich. Für den Energievergleich ab HV-Batterie muss für PT0 die Effizienz der Pumpe und des elektrischen Pumpenantriebs dazugerechnet werden. Durchschnittlich ("dirt" und "street") wird mit dem elektrischen Fahrantrieb (inkl. Rekuperation) 73% weniger Energie ab Batterie verbraucht. Aufgrund des hydraulischen Grundverbrauchs schrumpft der Vorteil auf des elektrischen Fahrantriebs im Schnitt aber auf etwa 60%.

	E _{trac,net} (dirt)	E _{trac,net} (street)	E _{main}	E _{trac,tot,av}
PT0	28 kWh/h	48 kWh/h	Nicht einzeln gemessen	46 kWh/h
PT1	6 kWh/h (-78%)	16 kWh/h (-67%)	6 kWh/h	17 kWh/h (-62%)

Tabelle 9: Übersicht des durchschnittlichen Energieverbrauchs während Fahrszenarien. Für beide Fahrzeuge sind es die Durchschnittsleistungen ab Batterie. Die Nettoenergie berücksichtigt auch Energieverbrauch, sowie Rekuperation. "Dirt" referenziert auf den Track in Abbildung 24 und "street" auf Abbildung 25. Der Mittelwert "av" berücksichtigt eine identische Anzahl Rundkursfahrten je Szenario.



3.1.2. Schwenkantrieb

Die Leistung des Schwenkantriebs wurde während den Szenarien "Ladespiel" und "Graben Aushub" am PT1 und PT2 erhoben (Tabelle 10). Der ZX175W-7 spielt dabei eine untergeordnete Rolle und es wurde lediglich der Dieselkraftstoffverbrauch als Referenz daran gemessen.

Tabelle 10: Vergleich des Energiebedarfs des Schwenkantriebs. Für PT1 unter Berücksichtigung der Effizienz von Hauptpumpe (85%) und Pumpenantrieb (90%). PT2 direkt ab Batterie. *Während dem 90° Dig and Dump (DnD mit dem PT2 wurde wegen höherer Bewegungsgeschwindigkeit 25% mehr Zyklen in derselben Zeit gefahren.

	Differenz PT1 - PT2
90° DnD Umschlag (15 min) *	-3 kWh/h (-49%) -83 Wh/Zykl. (-70%)
90+ DnD inkl. Synchronisation der Produktivität *	-5.6 kWh/h (-70%)
180° DnD auf Dumper (15 min)	-7.1 kWh/h (-82%)
Graben Aushub (1x10m)	-2.7 kWh/h (-79%)
Graben Verfüllen (1x10m)	-1.4 kWh/h (-31%)

Die Reduktion des Energiebedarfs ist stark abhängig vom Einsatzszenario. Am tiefsten fällt die Einsparung beim Verfüllen des Grabens aus, was dadurch zu erklären ist, dass der während dem Aushub erstellte Erdwall neben dem Graben auch mittels Schwenkbewegung in den Graben zurückgeschoben wurde. Dabei kann der elektrische Antrieb nicht mit Rekuperation punkten und die langsame Bewegung mit hohem Moment liegt nicht im optimalen Betriebspunkt des Motors.

Im Gegensatz zu den anderen Szenarien fällt bei dem 90° Zyklus die 25% höhere Produktivität, durch schnellere Bewegungen mehr ins Gewicht, weil dadurch in derselben Zeit nicht 65 sondern 81 Zyklen gefahren werden konnten. Aus diesem Grund wird in Tabelle 10 auch noch die Energie pro Zyklus angegeben, welche noch etwas besser abschneidet, da effektiv dieselbe Arbeit verglichen wird.

Der Vorteil des elektrischen Schwenkantriebs ist am deutlichsten sichtbar bei Arbeiten mit hoher Schwenkgeschwindigkeit, sprich über einen maximalen Winkel von 180°, wo viel kinetische Energie aufgebaut und wieder zurückgewonnen werden kann. Interessant ist auch, dass die Leistung zur Beschleunigung fast bis hin zur Spitzengeschwindigkeit zunimmt. Das zeigt, dass der Fahrer sehr lange positiv beschleunigt, bevor er dann wieder in kurzer Zeit abremst, um eine maximale Produktivität zu erreichen.

Während über einen Winkel von 90° durchschnittlich eine Geschwindigkeit von 1500 rpm erreicht wird, wird über 180° zwischen 2000 und 2500 rpm erreicht, je nach Löffelgewicht.

Klar ersichtlich ist auch das aktuell implementierte Drehmomentlimit von 190 Nm. Dieses wurde aus Sicherheitsgründen implementiert, um das maximale Haltemoment der Schwenkbremse nicht zu übersteigen.

Abschliessend kann gesagt werden, dass der Schwenkantrieb mit Energieeinsparungen zwischen 31 und 82% einen sehr grossen Effizienzsprung verzeichnet. Im Schnitt bedeutet das eine Reduktion der Schwenkarbeit um fast 60%, wobei während den meisten Zyklen mit fast 80% Einsparung gerechnet werden kann. Die Effizienzsteigerung ist dementsprechend vergleichbar mit dem Fahrantrieb.

3.1.3. Hubsystem

Die Quantifizierung des Hubsystems nach Tabelle 7 hat sich als schwieriger herausgestellt als gedacht. Problematisch ist hierbei die im Messkonzept getroffene Annahme, dass sich das Wegfallen des



konventionellen Auslegers ohne weiteres im Verbrauch des Pumpenantriebs ("Main") abzeichnen würde. Es musste jedoch festgestellt werden, dass dies ein gründliches Tuning der Hydraulikansteuerung bedingt, um das volle Potenzial abzuschätzen.

Deshalb wurden die zur Antriebsdimensionierung durchgeführten Hydraulikmessungen erneut zur Hand genommen und nochmals vertieft analysiert. Anhand des damals aufgezeichneten 90° Ladespiels (Versuch 2.1.a) wurden Graphen erstellt, um im Folgenden anhand dieser und drei weiterer Messungen eine Größenordnung für Wirk- und Verlustleistung jedes Verbrauchers festzulegen.

- **Druckverteilung** ("Pressures"): Der oberste Graph zeigt den Verlauf des Drucks an Pumpe 1 (P1), Pumpe 2 (P2), dem Ausleger (boom), Löffel (bucket), Stiel (stick) und Schwenkantrieb (Slew), wobei die Zahl neben jedem Verbraucher den Anteil der Zeit anzeigt, während welcher dieser den höchsten Druck ins System eingebracht hat. Der Ausleger sticht in diesem Beispiel mit den gut 40% als druckbestimmender Aktuator heraus.
- **Ölbedarf pro Verbraucher** ("Volume Flows"): Aus den Zylindergeschwindigkeiten und -abmessungen wurde der Ölbedarf pro Hydraulikverbraucher quantifiziert. Es zeigt sich, dass alle Verbraucher während des gemessenen Szenarios einen vergleichbaren Ölverbrauch aufweisen.
- **Hydraulische Leistung der Verbraucher** ("Power & Energy"): Es wird jeweils die Wirkleistung, sowie die durch den Aktuator im System induzierte Drossel-Verlustleistung (jeweils schattiert oberhalb der Wirkleistung) aufgezeichnet. Der Drosselverlust je Verbraucher wurde vereinfacht berechnet, wenn immer der Systemdruck über dem am Verbraucher gemessenen Druck liegt. Quereinflüsse zwischen Blockpassagen konnten nicht berücksichtigt werden. Der Ausleger verbraucht in diesem Szenario mit 36% mit Abstand am meisten Energie. In allen vier Messungen bewegt sich der Energieanteil des Auslegers zwischen 35 und 41%.

Um abzuschätzen, wie gross die Einsparung des elektrischen Hubsystems ist, wird der Energieverbrauch "Main" anteilmässig nach hydraulischer Leistung auf dem Originalbagger mit durchschnittlich 39% dem Hubzylinder zugeordnet. Unter Berücksichtigung von allen elektrischen Verlusten kann eine beeindruckende durchschnittliche Verbrauchsreduktion von 64% am Hubzylinder approximiert werden. Die Einsparungen sind jedoch stark abhängig von den jeweiligen Szenarien:

- Der "90° Dig & Dump" Zyklus bietet quantitativ das grösste Einsparpotenzial mit durchschnittlich 10.3 kWh/h weniger Verbrauch. Jedoch ist das schnelle Heben von Last über mehrere Meter Höhenunterschied leistungsintensiv.
- Das "trenching" bietet relativ gesehen noch etwas mehr Potenzial, welches auf einen vorteilhaften Betriebspunkt des Hydraulikspeichers und langsame, aber kraftvolle Bewegungen zurückgeführt werden – ungefähr 6 kWh/h können eingespart werden.
- Im "trench filling" die höchste relative (80%) aber absolut gesehen kleinste Energieeinsparung ist dadurch zu erklären, dass der Löffel beim Verfüllen des Grabens in gefülltem Zustand abgesenkt wird, wodurch Energie in die HV-Batterie zurückgespiesen werden kann.

3.1.4. Weiterentwicklung der Hydraulikansteuerung und Maschinentuning

Nach den ersten Referenzmessungen zur Quantifizierung der Effizienzsteigerung, wurden erste Massnahmen ergriffen, um den Verbrauch des Hauptantriebs weiter zu senken. Diese wurden anhand einer erneuten 90° dig and dump Messung überprüft. Es wurde versucht möglichst identische Messbedingungen zu schaffen, sprich es wurde derselbe Untergrund über denselben Winkel umgeschlagen. Genauso wurde ein möglichst identischer Hub gefahren.

Der Hauptantrieb verringert seinen Verbrauch auf beiden Maschinen um 22%, was darauf hindeutet, dass die Abstimmung der Originalsystems auf beiden Maschinen Wirkung zeigt. Der hydraulische und elektrische Schwenkantrieb bleibt vergleichbar im durchschnittlichen Verbrauch. Das elektrische Hubsystem verringert seinen Verbrauch um 28%, was seinen Ursprung in einem verbesserten Tuning hat aber möglicherweise seinen Ursprung in einem etwas verringerten Arbeitshub haben könnte. Insgesamt konnte der Verbrauch auf beiden Maschinen nochmals um fast 20% verringert werden.



3.1.5. Feedback der Testfahrer

Erstes Feedback unmittelbar nach Inbetriebsetzung

In einer frühen Projektphase wurden die zwei Prototypen überwiegend von einem Demo-Fahrer des Coreums testgefahren. Wobei auch einige andere Mitarbeiter von KTEG und Kiesel ein paar Stunden auf den Maschinen verbracht haben. Die Tests mit den Prototypen des Mobilbaggers ZE150W-7 im Coreum zeigen deutliche Fortschritte, jedoch auch klar benennbare Optimierungspotenziale spätestens bis zur Serienüberführung wahrgenommen werden müssen.

Der elektrisch betriebene Fahrmotor überzeugt im Vergleich zum ZX175W-7 mit spürbaren Vorteilen. Besonders positiv wirkt sich die Möglichkeit aus, Arbeitsbewegungen ohne Einfluss des Fahrantriebs auszuführen, was die Effizienz und Präzision signifikant steigert. In Verbindung mit Tempomat- und Joysticklenkung entstehen neue Optionen zur individuellen Geschwindigkeitsanpassung, abhängig von Einsatzbedingungen und Arbeitsaufwand. Das Fahrverhalten, insbesondere Arbeitsbremse und Bergverhalten, wurde bereits spürbar verbessert.

Im Bereich Arbeitsfunktionen sind jedoch noch Anpassungen erforderlich. Bei PT1 zeigen sich deutliche Defizite in der Harmonisierung mehrerer gleichzeitiger Bewegungen. Die mechanische Ansteuerung bietet zwar gutes Feedback, erfordert aber weitere Feinjustierung. Bei PT2 unterstützt der elektrische Antrieb für Hub- und Schwenkfunktion die Leistungsfähigkeit grundsätzlich sehr gut, allerdings führen spürbare Unterschiede im Bediengefühl (hydraulisch vs. elektrisch) zu Einschränkungen bei der Feinarbeit.

Eine Optimierung der Geschwindigkeit, kombiniert mit der Beseitigung der Unruhe in den Bewegungsabläufen, könnte die Praxistauglichkeit deutlich verbessern. Beide Prototypen zeigen eine solide Basis mit hohem Entwicklungspotenzial, sodass bei gezielten Anpassungen ein Markteintritt in absehbarer Zeit realistisch erscheint.

Feedback zum PT1 nach Tuning der Arbeitshydraulik

Die Testfahrer bewerten den Prototypen insgesamt positiv und sehen grosses Potenzial im Vergleich zu dieselbetriebenen Maschinen. Fahrer 1 hebt hervor, dass die Maschine trotz ihres Prototypenstatus bereits vorzeigbar sei. Besonders die Fahrgeschwindigkeit und das Arbeiten unter Last überzeugten. Kritisch äusserte er sich jedoch über den Schwenklöffel, der zu ruckartig arbeitet und dadurch die Einsatzmöglichkeiten einschränkt. Auch die Übertragung der Hydraulikventile auf das Fahrwerk sowie das Ruckeln des Stiels in senkrechter Stellung wurden als ungewohnt beschrieben.

Fahrer 2 fühlte sich nach kurzer Eingewöhnung ebenfalls schnell vertraut. Positiv hob er das direkte Anfahren im schnellen Gang sowie die uneingeschränkte Nutzung der Arbeitshydraulik während der Fahrt hervor. Probleme zeigten sich dagegen beim Rangieren im niedrigen Gang, bei Steigungen sowie durch häufige Störungen beim Gangwechsel. In der Arbeitshydraulik bemängelte er ein starkes Ventilzucken, verzögerte und ruckartige Zusatzhydraulik sowie eine ungewohnt schnelle Reaktion bei leerem Löffel.

Insgesamt bestätigen beide Tester die Funktionsfähigkeit und Einsatzreife des Prototyps, sehen jedoch insbesondere bei der Hydraulikabstimmung, der Feinfähigkeit des Schwenklöffels und der Gangabstimmung deutlichen Verbesserungsbedarf.

Feedback zum PT2 nach Tuning der Arbeitshydraulik

Da mit dem elektrohydraulischen Hubsystem und dem elektrischen Schwenkantrieb zwei grosse Hydraulikverbraucher entfallen, vereinfacht sich auch die zuvor komplexe hydraulische Ventilschaltung. Die Komplexität beim Tuning des PT2 lag deshalb eher in der Abstimmung der Geschwindigkeiten der elektrischen Funktionen.

Bei der hydraulischen Maschine wird bei kombinierten Bewegungen im Vergleich zu Einzelbewegungen die Geschwindigkeit durch die Begrenzung des maximalen Ölflusses reduziert. Da diese Geschwindigkeitslimitierung bei den elektrischen Funktionen nicht greift, gaben mehrere Testfahrer das Feedback, dass die Maschine zu schnell wirke. Da bei einem Mobilbagger das Arbeitstempo nicht die höchste Priorität hat, wurde entschieden, die Maschine auf die gleichen maximalen Geschwindigkeiten wie die



hydraulische Maschine bei kombinierten Bewegungen zu begrenzen. Durch diese Reduktion konnten die Schwingungen im Hubsystem deutlich verringert und mithilfe eines gezielten Tunings der Be- und Entschleunigungs-Rampen vollständig eliminiert werden – was auch von den Testfahrern bestätigt wurde.

Das Feedback nach dem Tuning am PT2 fiel insgesamt sehr positiv aus. Mehrere Testfahrer aus dem Coreum zeigten sich begeistert. "Durch die angepassten Geschwindigkeiten ist die Maschine nun besser mit der hydraulischen Variante vergleichbar, wodurch sich die Umgewöhnung in Grenzen hält." Das fühlbare Schalten gewisser Steuerventile konnte jedoch noch nicht vollständig eliminiert werden, was weiterhin bemängelt wurde. Dennoch lobten die Fahrer die hohe Leistungsfähigkeit des Prototyps und meinten, dass der PT2 im Vergleich zum PT1 sich auf dem Markt als Innovationsträger besser verkaufen würde. Ein Fahrer fasste es folgendermassen zusammen: „Durch das elektrohydraulische Hubsystem fühlt sich die Maschine viel kraftvoller und gleichzeitig leichter an. Die Zukunft mit elektrischen Baumaschinen wird uns noch viel Freude bereiten!“

3.2 Lärm- und Vibrationsmessungen

Auf das quantitative Erheben von Vibrations- und Schallpegeldaten wurde bisher verzichtet. Das Konzept der Serienmaschine wurde noch nicht definitiv festgelegt, weshalb die resultierenden Vibrationsprofile zu diesem Zeitpunkt keinen langfristigen Mehrwert bieten würden.

Qualitativ lässt sich sagen, dass die Geräuschkulisse auf den elektrischen Maschinen trotz teils noch fehlender Schallschutzverkleidung an den Blechen deutlich geringer ist. Die Abwesenheit jeglicher Lärmkulisse des Verbrenners bringt aber einige Geräusche zu Tage, welche vorher nicht zu hören waren. Einerseits ist dies der Fahrantrieb, welcher im ersten Gang (geradeverzahnt) ein gut hörbares Summen von sich gibt. Andererseits ist auch das Hydrauliksystem unter Last sehr gut zu hören. Zweiteres nimmt aber nochmals deutlich ab durch den elektrischen Schwenkantrieb, der weitgehend lautlos arbeitet, und durch das elektrische Hubsystem, das ein hörbares, aber durchaus angenehmes Summen erzeugt.

3.1 CO₂ Berechnungen

Im folgenden Abschnitt wird eine vereinfachte und grobe Abschätzung der Emissionen vorgenommen. Ziel ist es, die Größenordnungen der entstehenden Emissionen sowie die relativen Unterschiede zwischen einzelnen Komponenten und Phasen (z.B. Herstellung und Betrieb) aufzuzeigen. Es handelt sich nicht um eine vollständige Lebenszyklusanalyse (LCA), da hierfür deutlich detailliertere Datengrundlagen und Systemgrenzen erforderlich wären. Für diese Berechnungen wurde mit einer Lebensdauer von knapp 9000 Arbeitsstunden gerechnet.⁸⁹

Herstellung der Basismaschine: Unter der vereinfachten Annahme, dass die Basismaschine zu 100% Stahlbau ist wird für 15t Stahl CO₂ Emissionen in der Höhe von 29 tCO₂e (1.92tCO₂e/tStahl) veranschlagt¹⁰. Für die elektrischen Maschinen wurden zusätzliche 25 tCO₂e (83.5 kgCO₂e/kWh)¹¹ für die Produktion der Li-Ionen-Batterien angerechnet (vgl. Abbildung 30 "Vor dem Betrieb")

Well-to-tank Emissionen: Der CO₂e Ausstoss für die Bereitstellung von Diesel beläuft sich auf 0.057 kgCO₂/kWh_{chem}¹². Für Strom wird nach CH-Strommix 0.128 kgCO₂/kWh_{el})¹³ angerechnet.

⁸ https://newexcavator.com/excavator-lifespan-10-essential-factors-that-determine-operating-hours/?utm_source=chatgpt.com

⁹ https://www.know-howequipment.com/industry-news/what-is-the-life-expectancy-of-an-excavator.html?utm_source=chatgpt.com

¹⁰ https://worldsteel.org/wider-sustainability/sustainability-indicators/?utm_source=chatgpt.com#co2-emissions-and-energy-intensity

¹¹ https://www.researchgate.net/publication/339237011_Lithium-Ion_Vehicle_Battery_Production_Status_2019_on_Energy_Use_CO_2_Emissions_Use_of_Metals_Products_Environmental_Footprint_and_Recycling

¹² <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-16258/152888035>

¹³ [Umweltbilanz Strommix Schweiz 2018](#)



Tank-to-wheel Emissionen: Bei der Verbrennung von Diesel wird $0.267 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}_{\text{chem}}$ ausgestossen. Die elektrische Maschine stösst keine lokalen Emissionen aus.

Abbildung 30 zeigt die Grössenordnung der Emissionen der verschiedenen Fahrzeuge. Unabhängig von der groben Annahme der Herstellungs-Emissionen der Grundmaschine wird klar, dass die während dem Betrieb ausgestossenen CO₂e die Gesamtbilanz prägen. Unter den elektrischen Konfigurationen wird der Effizienzunterschied im betrieblichen Anteil sichtbar. Bleibt jedoch Grössenordnungen kleiner als der Sprung zwischen Diesel und Elektro.

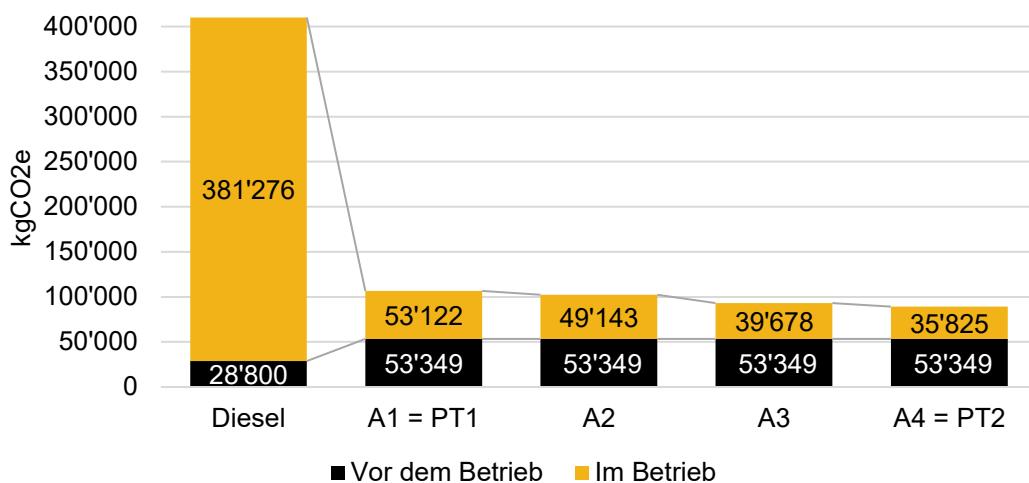


Abbildung 30: CO₂ Ausstoss des Dieselfahrzeugs und der elektrischen Fahrzeugkonfigurationen gemäss Tabelle 1. Ein verringelter elektrischer Energieverbrauch verursacht weniger CO₂-Ausstoss in der Energieproduktion.

3.2 Reflexion der Komponentenzusammenstellung und Systemarchitektur

- **HV-Batterie:** Die drei Batteriepacks mit total 300 kWh Bruttokapazität lassen sich mit den im Markt auftretenden Maschinen vergleichen. Die bisherigen Verbrauchstests zeigen, dass eine geringere Kapazität auch mit dem aktuellen Stand des PT2 nicht für einen ganzen Arbeitstag ausreichen würde (Abschnitt 3.1). Die Ladeleistung ist in diesem Fall nicht limitiert durch die Batterie, da das Laden primär mit geringer Leistung über Nacht gemacht werden soll. Eine Schnellladung mit 300 kW/1h ist jedoch jederzeit möglich.
- **Pumpenantrieb und Hydrauliksystem:** Zu Beginn des Projekts wurde die Option eines komplett neuen Pumpenantriebsystems ("Power Pack") diskutiert, welches die übrigen hydraulischen Verbraucher hätte versorgen sollen. Dieses hätte den bisherigen Ventilblock weiter genutzt, anstelle der zwei Schwenkpumpen aber mit einer drehzahlvariablen Pumpe Volumenstrom auf Bedarf gefördert. In der Konzeptphase wurde aber entschieden, dass der Umbau mit zu vielen "Unbekannten" ein grösseres Risiko darstellen würde als ein Tuning der bestehenden Architektur.

Im Rückblick ist diese Entscheidung nachvollziehbar und behält seine Gültigkeit grösstenteils. Jedoch wurde der Aufwand und die hydraulische Komplexität des Originalsystems unterschätzt. Grund dafür ist, dass sich der Steuerblock und die Schwenkplattenansteuerung massgeblich von den bisher umgebauten Systemen unterscheiden. So gab es in der Vergangenheit beispielsweise nur ein Ventil, welches den Dieselmotor vor Überlast schützte und die Plattenstellung ansonsten rein hydraulisch rückgekoppelt wurde. Im Radbagger wird dieses aber nicht nur hydraulisch, sondern auch elektrisch angesteuert, was den Regelaufwand erheblich erhöht und ein fundamentales Verständnis der hydraulischen Logik voraussetzte.



- **Fahrantrieb:** Während der Entwicklungs- und Integrationsphase wurden vom Antriebshersteller noch mehrmals Anpassungen am Kabelbaum vorgenommen, um schlussendlich Serienstand zu erreichen. Gleichzeitig erfolgte ein intensiver Wissensaufbau beim Lieferanten in Bezug auf die eingesetzten Komponenten, um eine reibungslose Umsetzung sicherzustellen. Ein zentrales Element war die gemeinsame Ausarbeitung und Gestaltung der CAN-Kommunikation. Dabei wurden maschinenspezifische Abstimmungen vorgenommen, wie etwa die korrekte Ansteuerung und das sichere Einlegen der Park- und Betriebsbremse. Neben diesen Anpassungen erfolgte ein umfangreiches Tuning, das sowohl auf die spezifischen Anforderungen des ZE150W als Leitprojekt für den Hersteller als auch auf allgemein gültige Optimierungen für elektrische Radbagger abzielte. Viele zusätzliche Arbeiten entstanden dabei parallel zur laufenden Entwicklung des Lieferanten. Zur Validierung des Systems wurden verschiedenste Fahrsituationen erprobt, darunter das Schalten unter Last in der Steigung, sowie das Verhalten bei Überbeschleunigung während Bergabfahrten und Gangwechseln. Da es sich um ein sicherheitskritisches System handelt, welches massgeblich für das sichere Fahren auf öffentlichem Gelände und Straßen verantwortlich ist, wurde ein mehrstufiger Freigabeprozess etabliert. Dieser beinhaltet umfangreiche Erprobungsphasen sowohl beim Hersteller als auch beim Kunden, um die Funktions- und Sicherheitsanforderungen vollumfänglich zu gewährleisten.
- **Hubsystem:** Nach den ersten Betriebserfahrungen und der Auswertung umfangreicher Messdaten kann die Auslegung der einzelnen Systemkomponenten erneut überprüft werden.

Die Inbetriebnahme verlief trotz nachträglicher Änderungen an elektrischen Schnittstellen und Software dank einer laufenden, engen Abstimmung insgesamt erfolgreich. Zahlreiche Parameter wurden vom Hersteller auf Basis von Simulationen berechnet, was den Prozess deutlich erleichterte. Um jedoch eine hohe Effizienz des Gesamtsystems zu gewährleisten, waren umfangreiche Tests und Optimierungen erforderlich. Ein Beispiel hierfür ist die Ölversorgung des Hubsystems: Erfolgt diese nur dann, wenn das externe Steuergerät ein Nachladen des Speichers anfordert, wird die Leckage im Betrieb nicht kompensiert. Aus diesem Grund wurde ein Proportionalventil integriert, welches die Leckage laufend automatisch ausgleicht. Die Einstellung dieses Ventils ist abhängig von der Drehzahl der Hauptpumpe, was ein aufwändiges und zeitintensives Mapping erforderlich machte.

Die Ansteuerung des Hubsystems stellt weiterhin eine Herausforderung dar, da eine lange Reaktionskette durchlaufen wird. Das Signal, welches eine Bewegung des Hubsystems auslöst, wird zunächst über einen Pilotdrucksensor in der Vorsteuerung erfasst. Anschließend erfolgt die Weiterleitung über die VCU an das externe Steuergerät, das daraus eine Drehzahlanforderung an den Inverter generiert. Diese wird wiederum an die VCU zurückgegeben und anschließend an den Inverter weitergeleitet. Eine elektrische Vorsteuerung könnte helfen die Signalkette zu verkürzen und die Verzögerung zu reduzieren.

- **Schwenkantrieb:** Da für den Schwenkantrieb eine Motor-Inverter Paarung ausgesucht wurde, musste ein Motoren-Pairing mit dem Hersteller des Inverters gemacht werden. Dabei wurden Resolver und Kommutationoffset ermittelt und ein erstes Regeltuning vorgenommen. Der Vorteil einer abgesetzten Paarung ist, dass der Elektromotor nicht direkt mit dem Antrieb in Verbindung steht, und es nicht zu einer gefährlichen Situation durch einen unkontrollierten Oberwagen kommen kann. Durch dieses Pairing am Prüfstand verlief die Inbetriebnahme an der Maschine reibungslos. Eine Herausforderung am elektrischen Schwenkantrieb ist das Lösen der elektrischen Bremse im richtigen Moment. Zudem muss sobald die Bremse elektrisch gelöst wird, der Elektromotor den Oberwagen aktiv in der Nullstellung halten. Dies fordert eine passende Abstimmung zwischen Regelparametern.
- **Brems- und Pilotpumpen-Antrieb:** Die Pilotpumpe wurde gleich wie bei der Originalmaschine mit einer konstanten Drehzahl angesteuert. Dies aus dem Grund, dass sichergestellt werden muss, dass die Bremsspeicher zu jedem Zeitpunkt vollständig gefüllt sind. Da die Pumpe in diesem System vom Antrieb der Haupt-Hydraulikpumpe entkoppelt ist, könnte die Ansteuerung der Pilotpumpe mit einem Regler noch weiter verbessert werden, um den Energiebedarf zu verringern.



- Insgesamt zeigt sich, dass die Anpassung bestehender Antriebsarchitekturen ein sinnvoller Weg war, auch wenn die Umsetzung komplexer und aufwändiger als erwartet ausfiel. Die hydraulischen Steuerungen mit ihren zusätzlichen Ventilen erforderten ein deutlich tieferes Verständnis der Systemlogik. Fahr- und Schwenkantrieb konnten durch enge Kooperation mit den Herstellern sowie gezieltes Tuning zuverlässig und sicher umgesetzt werden. Die Implementierung des Hubsystems erwies sich als speziell herausfordernd und bildet weiterhin einen Schwerpunkt für Optimierungen.

Der Brems- und Pilotantrieb setzt auf ein bewährtes Konzept und birgt noch Potenzial zur Effizienzsteigerung. Die Erfahrungen verdeutlichen, dass erfolgreiche Elektrifizierung nur durch enge Zusammenarbeit mit Partnern, umfassende Tests und breites Fachwissen gewährleistet werden kann.

- **Hochvoltverteilsystem (HVDU):** Seit der im Frühling 2023 getroffenen Komponentenzusammensetzung hat sich in der Entwicklung der SUNCAR-Produkte einiges getan. Speziell für den Unterwagen bietet sich inzwischen ein kompakteres Produkt (FUSION800S) an, um die verbaute FUSION800M zu ersetzen, welche eine reduzierte Anschlusszahl vorweist. Durch den verringerten Platzbedarf wird die Montage der übrigen Komponenten im Seitenkasten erheblich vereinfacht.

3.3 Projektverlauf und Herausforderungen

3.3.1. Vorbereitungen

Im Rahmen der Vorbereitungen zum Projekt zeigte sich, dass der parallele Aufbau von Know-how bei den Systemlieferanten während des Projektverlaufs eine grosse Herausforderung darstellte. Dadurch war es schwierig, in frühen Phasen immer die richtigen Entscheidungen zu treffen. Eine besonders weitreichende Entscheidung war die definitive Entscheidung die Maschine ohne HCM-Controller aufzubauen. Rückblickend wäre es deshalb eventuell vorteilhaft gewesen, eine ältere Maschinen-Generation zu wählen, die über mehr hydraulische Logik und weniger softwarebasierte Funktionen verfügt hätte.

Ein weiterer zentraler Punkt war der Wissenstransfer. Mitarbeitende von KTEG und Kiesel, die bereits langjährige Erfahrung mit dem Originalsystem hatten, besaßen angesammeltes Fachwissen, das nicht immer zeitgerecht an die richtigen Stellen vermittelt werden konnte. Jedoch und vielleicht umso mehr, konnten die Ingenieure bei SUNCAR sehr viel Fachwissen generieren, da sie über den Verlauf des Projekts immer wieder wertvolle Kenntnisse und Einsichten gewannen.

Die Phase der Komponentenselektion gestaltete sich anfangs als zeitintensiv, erwies sich jedoch als äußerst lohnend. Sämtliche ausgewählten Produkte erfüllten die definierten Anforderungen in vollem Umfang. Ebenso zeigte sich die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern als konstruktiv und zielgerichtet. Die frühzeitige Einbindung partnerschaftlich orientierter Lieferantenbeziehungen zahlte sich insbesondere dadurch aus, dass neben den fachlichen auch die persönlichen Abstimmungen reibungslos verliefen. Auf dieser Grundlage konnten stabile Beziehungen aufgebaut werden, die eine wesentliche Voraussetzung für langfristig erfolgreiche Kooperationen darstellen.

3.3.2. Aufbau

Der Aufbau der neuen Maschine hat deutlich länger gedauert als ursprünglich geplant. Mit insgesamt einem Jahr Verzögerung, konnten die Maschinen jedoch genau rechtzeitig für die wichtigste öffentliche Weltleitmesse, die bauma 2025 in München, fertiggestellt werden. Dies lag vor allem an der Komplexität der Anlage, die eine Vielzahl von spezifischen Anforderungen und Anpassungen mit sich brachte. Insbesondere die umfangreichen Arbeiten an der Hydraulik erwiesen sich als zeitintensiv. Viele Anpassungen mussten vorgenommen werden, um die neuen Komponenten optimal in das System zu integrieren und gleichzeitig eine reibungslose Funktionalität sicherzustellen.

Ein zusätzlicher Faktor, der den Aufbau erschwerte, waren die engen Platzverhältnisse. Durch die Installation zahlreicher neuer Antriebe wurde der verfügbare Bauraum stark eingeschränkt, was die Planung und Umsetzung der Arbeiten erheblich verkomplizierte. Gleichermassen herausfordernd war die Gestaltung der Schnittstelle zwischen dem neuen System und dem bestehenden Originalsystem. Diese



Integration erforderte eine aufwändige Abstimmung der technischen Parameter sowie mehrere Testläufe, um sicherzustellen, dass alle Systeme fehlerfrei zusammenarbeiten.

Ein weiterer wesentlicher Punkt war das Versetzen des Hydrauliktanks. Aufgrund der beengten Verhältnisse musste die gesamte Hydraulikverlegung neu geplant und durchgeführt werden. Dies erforderte nicht nur einen hohen Arbeitsaufwand, sondern auch eine präzise Koordination, um Konflikte mit anderen Komponenten zu vermeiden und gleichzeitig die Funktionalität der Anlage sicherzustellen.

Die Verschalung wurde erst während dem Aufbau fertig konstruiert was zu einigen Platzkonflikten geführt hat. Auch wenn die Ressourcen knapp sind, müssen gewisse konstruktive Meilensteine eingehalten werden, um den Aufbau schlussendlich nicht zu behindern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Komplexität der Maschine und die schwierigen räumlichen Gegebenheiten wesentliche Herausforderungen beim Aufbau darstellten. Obwohl diese Faktoren zu Verzögerungen führten, wurden alle notwendigen Anpassungen mit grosser Sorgfalt umgesetzt, um die langfristige Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Maschine sicherzustellen.

3.3.3. Messungen und Testing

Die detaillierte Planung der Testing-Kampagnen hat dazu beigetragen, dass alle beteiligten Personen mit dem gleichen Wissensstand in die Testwochen starten konnten. Für den Energievergleich wurden drei Tage am Stück Messungen mit beiden Maschinen durchgeführt. Ein Teil der Erkenntnisse hätte jedoch bereits nach einem Messtag gewonnen werden können. Durch frühzeitige Zwischenauswertungen liesse sich die Möglichkeit schaffen, grobe Fehler rechtzeitig zu erkennen und zu korrigieren, bevor weitere Daten aufgenommen werden. Der Remote-Zugriff auf die Maschine erwies sich zudem als besonders hilfreich, da er es erlaubte, effizient aus der Ferne bei Tuning-Aktivitäten zu unterstützen. Auf diese Weise wird punktuell und zeiteffizient unterstützt und kurzfristige Verfügbarkeit gewährleistet, um bei Problemen schnell einzutreten.

Die in Abschnitt 3.1.3 beschriebenen Schwierigkeiten bei der Auswertung entstanden dadurch, dass versucht wurde, den Umfang der auszuwertenden Daten möglichst gering zu halten. Ziel war es, den Installationsaufwand für die Messausrüstung sowie die Menge der aufzuzeichnenden Daten zu reduzieren. Da sich die Messwerte jedoch nicht wie erwartet verhielten, entstand eine Lücke im ursprünglichen Konzept. Daraus folgt, dass beim Messkonzept stets berücksichtigt werden muss, wie hoch das Risiko ist, dass ein Wert nicht wie vorgesehen gemessen oder berechnet werden kann. Ebenso sind die Einflussfaktoren zu identifizieren, welche das Ergebnis verändern oder verfälschen können.



4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Energieeinsparungen können unter Berücksichtigung der diskutierten Randbedingungen und Annahmen wie in Tabelle 11 gezeigt zusammengefasst werden. Die Einsparungen pro Antrieb müssen aber immer nach Szenario gewichtet werden. Im Folgenden werden die Zahlen nochmals in den Kontext der formulierten Ziele gesetzt.

Tabelle 11: Übersicht der erreichten Verbrauchseinsparungen der elektrifizierten Antriebe.

	Ø Fahrantrieb	Ø Schwenkantrieb	Ø Hubsystem (Approximation)
Hydraulisch	37.8 kWh/h	6.1 kWh/h	12.3 kWh/h
Elektrisch	11 kWh/h (-71%)	1.9 kWh/h (-69%)	4.4 kWh/h (-56%)

4.1 Überprüfung der Zielsetzung PT1

Zu Projektbeginn wurde eine Effizienzsteigerung mit Faktor 3 von Dieselfahrzeug zu PT1 als Ziel festgelegt. Diese wird gemäss Formel (4) berechnet.

Fahrbetrieb

- ZX zu PT0: Eine beinahe identische Effizienzsteigerung von 2.42 für "dirt" und 2.37 für "street". Darin widerspiegelt sich primär das Wegfallen der Verluste im Verbrennungsmotor. Die Abweichung zwischen "dirt" und "street" ist auf den aus PT1 verwendeten Grundverbrauch zurückzuführen.
- PT0 zu PT1: Der Reingewinn durch die Eliminierung der Hydraulik bezweckt eine Effizienzsteigerung von 2.39 für "dirt" und 1.98 für "street".
- ZX zu PT1: Eine grosse Effizienzsteigerung von 6.03 für "dirt" und 4.89 für "street" wird durch den direktelektrischen Antrieb ermöglicht. Damit wird im Fahrbetrieb das Ziel von einer Verdreifachung der Effizienz klar übertroffen.
- Der während dem Fahren identifizierte hohe Grundverbrauch muss nochmals genauer analysiert werden, um ihn auf ein Minimum reduzieren zu können. Dadurch lässt sich nebst dem Fahrbetrieb auch andere Betriebszustände weiter optimieren.

Ladespiel und Graben

Die augenscheinlich geringere Effizienzsteigerung (vgl. Tabelle 12) in der Arbeitshydraulik ist hauptsächlich auf zwei Aspekte zurückzuführen: Einerseits war das Hydrauliksystem zu diesem Zeitpunkt noch unzureichend abgestimmt und andererseits ist der zu erwartende Effizienzgewinn lediglich zwischen Diesel und Elektroantrieb zu verorten. Die verlustreiche Hydraulik bleibt unverändert.

Tabelle 12: Durchschnittlicher Verbrauch des ZX175W-7 und PT1 (vor Tuning) für die gefahrenen Arbeitsszenarien. Der Dieselverbrauch beim Ladespiel 180° erscheint eher tief, was auf eine Abweichung an der Waage liegen könnte

	Ladespiel 90°	Ladespiel 180°	Grabenaushub	Graben verfüllen
ZX175W	142.4 kWh/h	82.7 kWh/h	128.4 kWh/h	139.7 kWh/h
PT1	68.7 kWh/h (-52%)	55.9 kWh/h (-32%)	74.8 kWh/h (-42%)	63.4 kWh/h (-55%)



Schlussfolgerung Effizienzsteigerung PT1

Wie sich im Tuning gezeigt hat lässt sich die Arbeitshydraulik auf der elektrischen Maschine noch um etwa 20 Prozent effizienter gestalten. Somit kann ein Effizienzsteigerungsfaktor von 2.1 erreicht werden. Bei einer anteiligen Nutzung mit 20% Fahr- und 80% Arbeitsbetrieb ergibt sich sogar ein Faktor von 2.9. Damit wird bereits ein sehr hohes Niveau erreicht, das zwar noch leicht unter dem angestrebten Ziel liegt, jedoch eine deutliche Annäherung daran zeigt und großes Potenzial für weitere Optimierungen erkennen lässt.

Die vorliegenden Resultate zeigen, dass vor allem die Direktelektrifizierung des Fahrantriebs massgeblich zur Effizienzsteigerung beiträgt. Ohne weiterführende Elektrifizierungsschritte in der Systemarchitektur der Effizienzgewinn überschaubar bleibt. Eine Maschine auf dem Stand des PT1 ist angewiesen auf eine leistungsstarke Ladeinfrastruktur oder mehr Batteriekapazität, soll sie 8h Leerlaufzeiten auf der Baustelle arbeiten können.

4.2 Überprüfung der Zielsetzung PT2

Der Fahrantrieb des PT2 gestaltet sich identisch zum PT1. Es bleibt die Bilanz für die Arbeitshydraulik zu ziehen; In Abschnitt 3.1.3 wird für ein 90° Ladespiel eine Reduktion der Auslegerenergie von 10.3 kWh/h berechnet. Die Einsparung am Schwenkantrieb während genanntem Szenario beträgt 5.6 kWh/h. In Summe wäre durch die Elektrifizierung der beiden Funktionen eine Verbrauchsreduktion von 15.9 kWh/h am Pumpenantrieb ("Main") zu erwarten – weitere Einsparungen aus reduzierten Drosselverlusten vorweg gelassen. Es ist jedoch nur eine Reduktion von 13.3 kWh/h zu sehen. Folglich scheint noch nicht das vollständige Potenzial ausgeschöpft zu sein. Durch ein weiteres Tuning oder durch die Reintegration der Originalsteuerung lassen sich schätzungsweise weitere 5-10 kWh/h am Pumpenantrieb einsparen.

Da zum PT2 die umfangreichste und verlässlichste Datenbasis für das 90°-Ladespiel vorliegt, werden diese Resultate zur Überprüfung des Projektziels herangezogen: Unter der Annahme, dass sich die verbleibende Hydraulik noch um weitere 5 bis 10% energiesparender gestalten lässt, ergibt sich ein Gesamtverbrauch von rund 50 kWh/h. Dies entspricht einer Effizienzsteigerung um den Faktor 2.8. Bei einem Nutzungsanteil von 20% Fahren und 80% Arbeitshydraulik resultiert daraus ein Faktor von 3.4. Damit wird das Ziel von 3.5 zwar knapp verfehlt, jedoch zeigt sich, dass der aktuelle Projektstand bereits eine sehr nahe Annäherung an das angestrebte Niveau ermöglicht und nur noch geringes Optimierungspotenzial benötigt wird.

Die Direktelektrifizierung zeigt auch hier das grosse Effizienzsteigerungspotenzial gegenüber konventioneller Hydraulik auf. Während der elektrische Schwenkantrieb konzeptionell sehr einfach umgesetzt werden kann, muss für eine Serienumsetzung an der Wirtschaftlichkeit gearbeitet werden. Das elektrohydraulische Hubsystem kann die Laufzeit der Maschine massgeblich erhöhen, ist aber in der Integration etwas komplexer.

4.3 Pilotbaustellen

Ab August 2025 markiert die Einführung des ersten elektrischen 15-Tonnen-Mobilbaggers in der Schweiz einen wichtigen Schritt – mit neuen Chancen für die E-Pilotbaustellen, die Produktentwicklung und den Markterfolg.

Durch den Einsatz im realen, nahegelegenen schweizerischen Arbeitsumfeld können echte Belastungsszenarien erfasst werden, die im Labor oder auf Testplätzen nicht in diesem Umfang simuliert werden können. Dabei zeigt sich, wie der Bagger mit unterschiedlichen Bodenverhältnissen, Einsatzzeiten und Aufgabenbereichen zurechtkommt. So lassen sich Stärken und mögliche Schwächen frühzeitig erkennen.

Die mehrwöchige Nutzung eröffnet die Möglichkeit, technische Optimierungen zur Robustheit und Stabilität des Systems mit überschaubaren Umständen einzuführen. Kleine Störungen, Softwarefehler oder unerwartete Verschleisserscheinungen treten häufig erst bei kontinuierlichem Einsatz auf. Dank der



Rückmeldungen von Maschinisten und Servicetechnikern können diese Punkte zielgerichtet behoben werden, bevor das Gerät in grösserer Stückzahl auf den Markt kommt.

Neben den technischen Erkenntnissen liefert eine Pilotbaustelle auch wichtiges Feedback der beteiligten Personen.

- Maschinisten geben Rückmeldungen zu Ergonomie, Bedienbarkeit und Leistung.
- Betreiber können Aussagen zu Betriebskosten, Logistik und Wirtschaftlichkeit machen.
- Anwohner und Umfeld äussern sich zu Lärm, Emissionen und Akzeptanz.

Diese ganzheitliche Perspektive bildet eine solide Basis für Produktoptimierungen.

Besonders spannend ist die Analyse des Energieverbrauchs unter realen Bedingungen. Die Daten ermöglichen eine genaue Einschätzung der Reichweite pro Batterieladung, der Ladezyklen und der betrieblichen Verfügbarkeit. Damit lassen sich Prognosen zur Wirtschaftlichkeit und Umweltbilanz verifizieren, was für künftige Kunden ein entscheidendes Kaufkriterium ist.

Eine Pilotbaustelle mit einem neu entwickelten elektrischen Bagger zeigt Innovationskraft und Pioniergeist. Sie sendet ein starkes Signal an die Branche, dass emissionsfreie Alternativen einsatzfähig sind und sich im Alltag bewähren können. Damit leistet sie nicht nur einen Beitrag zur Weiterentwicklung des eigenen Produkts, sondern beschleunigt auch die Transformation im Bauwesen.

4.4 Technisches Fazit

Der parallele Aufbau von zwei unterschiedlichen Maschinen hat zahlreiche Herausforderungen mit sich gebracht. Unterschiedliche Softwarestände, abweichende Komponentenkonfigurationen und ein jeweils verschiedener Projektfortschritt führten dazu, dass laufend Anpassungen nachgezogen und synchronisiert werden mussten. Dieser zusätzliche Koordinationsaufwand war zwar anspruchsvoll, lieferte jedoch wertvolle Einsichten in den Umgang mit komplexen Entwicklungsprozessen.

Unabhängig vom anstehenden Konzeptentscheid für die geplante Industrialisierung konnte durch diese Arbeiten ein bedeutendes Knowhow bei den Projektpartnern aufgebaut werden. Das gesammelte Wissen bietet nicht nur unmittelbaren Nutzen für die aktuelle Maschine, sondern stellt auch eine wichtige Grundlage für künftige Projekte dar. Verschiedene Massnahmen konnten hinsichtlich ihres Potenzials evaluiert werden, und das Verständnis für die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Systemen wurde deutlich geschärft. Dadurch wird die Basis gelegt, um auch weiterhin eine führende Rolle in der elektrischen Entwicklung auf dem Markt einzunehmen.

Darüber hinaus wurde die Vernetzung mit wichtigen Marktakteuren intensiviert und bestehende Beziehungen weiter gefestigt. Diese enge Zusammenarbeit mit Partnern und Zulieferern trägt entscheidend dazu bei, Innovationen voranzutreiben und die technologische Spitzenposition nachhaltig abzusichern.

4.5 Ausblick

Im Hinblick auf die Serieneinführung wird eine EMV-Messung im Labor durchgeführt. Damit sollen mögliche Risiken identifiziert werden, welche durch neue Komponenten entstehen können. Parallel dazu wird das System fertig getunt und vermessen, sodass im Anschluss die Grundlage für einen Konzeptentscheid geschaffen ist. Dieser Entscheid wird in enger Abstimmung diskutiert und schlussendlich von HCM gefällt. Als kritisch wird derzeit noch das Fahrgefühl des elektrischen Auslegersystems, beziehungsweise die Vergleichbarkeit zum Hydraulikbagger beurteilt, da diese für die spätere Einsatzfähigkeit im Alltag von zentraler Bedeutung ist. Das Feedback von vielen Kunden deutet darauf hin, dass die Maschine nicht an Produktivität gemessen muss, sondern eher an Präzision und Bedienbarkeit. Gerade in letztere muss künftig unbedingt noch weiter investiert werden, um die Akzeptanz im Feld zu fördern und zu zeigen, dass die Vorzüge der elektrischen Antriebe nicht auf Kosten von Bedienbarkeit gehen.

Sobald der Konzeptentscheid gefallen ist, beginnt die eigentliche Serienentwicklung. In diesem Rahmen sollen wieder die bestehenden OEM-Steuergeräte im Fahrzeug eingesetzt werden, welche die originale



Ansteuerung der Kabine und der Hydraulik wieder übernehmen können. SUNCAR auf ihrer Seite kann auf die Antriebssteuerung konzentrieren, sowie die Sicherheitsfunktionen weiter ausbauen und den funktionalen Sicherheitsnachweis vorantreiben.

Mittelfristig ist eine Strassenzulassung und die CE-Zertifizierung für die beiden Prototypen geplant. Unter anderem um auch der erhöhten Nachfrage von weiteren Pilot- und Testbaustellen in der Schweiz, und Europa gerecht zu werden und einen flexiblen Einsatz und weiterreichende Felderprobung zu ermöglichen.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden aber nicht nur im Zusammenhang mit dem 15t Mobilbagger eine Rolle spielen. Das Energiesparpotenzial wird umso interessanter, desto grösser die Maschinen werden. Nicht nur wird proportional zur Grösse mehr Batteriekapazität eingespart werden, auch die Ladeinfrastruktur wird entlastet. Ein geringerer Verbrauch bedeutet inhärent, dass weniger Energie über Mittag oder die Nacht nachgeladen werden muss. Die entwickelte und erprobte Direktelektrifizierung wird deshalb eine Schlüsselrolle auf der elektrischen Baustelle spielen.



5 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.

Nachfolgend eine Auswahl an wertvollen nationalen sowie internationalen Geschäftsbeziehungen:

- **Bucher Hydraulics GmbH**

Bucher Hydraulics ist seit Jahren für die innovativen Ansätze in puncto Technologie, Qualität, Fertigung, Lieferung und Kundenbetreuung im Bereich der Hydraulik für mobile Arbeitsmaschinen bekannt.

- **BorgWarner Akasol GmbH**

In Zusammenarbeit mit der Akasol konnte eine geeignete HV-Batterie für die geforderten Einsatzzwecke gefunden werden, die ebenso modular für zukünftige Projekte eingesetzt werden kann.

- **Bosch Rexroth Schweiz AG**

Bosch Rexroth bietet ein verlässliches Lösungs-Portfolio, das perfekt aufeinander abgestimmte Komponenten umfasst, um Off-Highway-Maschinen zu elektrifizieren.

- **BRUSA HyPower AG**

Als führendes Schweizer Entwicklungsunternehmen im Bereich der Elektromobilität bietet BRUSA als Lieferant seit Jahren Produkte im Bereich der Leistunselektronik-, Lade- und Antriebstechnik an.



6 Publikationen und andere Kommunikation

Der vollelektrische Mobilbagger ZE150W stösst seit seiner Vorstellung auf grosses Interesse in der Baubranche. Insbesondere im städtischen Umfeld, wo Emissionsfreiheit und geringer Lärmpegel immer wichtiger werden, zeigt sich eine stark steigende Nachfrage. Die erste öffentliche Präsentation an der Weltleitmesse bauma 2025 erfolgte in einem Umfeld, in dem zahlreiche Hersteller ihre neuen Elektro-Mobilbagger vorstellten – ein deutliches Zeichen, dass das Marktpotenzial erkannt wurde. Zudem konnte der ZE150W PT1 bereits kurz nach dem Abschluss der Entwicklungsarbeiten für eine acht-wöchige Pilotbaustelle in Basel, sowie einen Probeeinsatz in Luzern vermietet werden.

Eine Zusammenfassung von den wichtigsten medienwirksamen Auftritten und Publikationen:

- **SUNCAR Referenzseite „KTEG ZE150W“** – Projektbeschreibung, technische Eckdaten und Zielsetzungen.
<https://www.suncar-ag.com/de/referenzen/kteg-ze150w/>
- **Kanton Basel-Stadt, August 2025**, – Wenn der Bagger summt: Basler Pilotversuch für e-Baustellen startet | Kanton Basel-Stadt
- **bd baumaschinendienst, Juli 2025** – Kurzmeldung „Vollelektrischer Debütant“ zum ZE150W.
<https://www.baumaschinendienst.de/artikel/vollelektrischer-debutant-29287/>
- **bi-e-bau magazin, Mai 2025** – Fachartikel zu Technik, Effizienz und Vorteilen des dezentralen Antriebskonzepts.
<https://bi-medien.de/fachzeitschriften/baumagazin/tiefbau-strassenbau/elektrobagger-ohne-umwege-effizient-b19665>
- **E-Mobility Engineering, Mai 2025** – Internationaler Fachartikel zu Technik, Batterie und Einsatzprofil des ZE150W.
<https://www.emobility-engineering.com/kteg-ze150w-electric-wheeled-excavator>
- **Lectura Press, April 2025** – „KTEG ZE150W – die nächste Stufe emissionsfreier Effizienz“ mit Fokus auf dezentralem Antriebskonzept und 300-kWh-Batterie.
<https://press.lectura.de/de/article/kteg-ze150w-mobilbagger-die-naechste-stufe-emissionsfreier-effizienz/65856>
- **Baumagazin-online.de, März 2025** – Bericht zu bauma-Neuheiten, inkl. ZE150W im KTEG Line-up.
<https://www.baumagazin-online.de/d/hitachi-construction-elektrobagger-im-mittelpunkt/>
- **World Construction Equipment, Februar 2025** – Bericht zu Hitachis Zero-Emission-Line-up inkl. ZE150W.
<https://world-construction-equipment.com/newsitem/news-2311>
- **Finalist Innovationspreis bauma 2025** – Offizielle Nominierung des ZE150W in der Kategorie „Nachhaltigkeit“.
<https://www.bauma-innovationspreis.de/de/preisverleihung/finalisten-2025.html>

Kommunikation von SUNCAR und KTEG:

- **Bauma2025**, Weltleitmesse für Baumaschinen, April 2025 in München: Als Finalist in der Kategorie Klimaschutz weckt das Projekt schon vor Messebeginn Interesse in der Community. Der schliesslich am Stand von KTEG/HCM ausgestellte ZE150W begeistert bei Kunden – ein baliger Verkaufsstart wird verlangt.



- **iVT Expo Conference 2025**, in Chicaco: Keynote von Stefan Schneider (SUNCAR) zum Thema: "Power up: Increasing efficiency for the future of electric construction machinery"
- **Innovatrix**, 6nd Design & Development of Zero-Emission Off-Highway Machinery, Mai 2025 in Berlin: Keynote von Roger Staubli (SUNCAR) zum Thema: " Power up: Increasing efficiency for the future of electric construction machinery"
- **10-Jahres-Jubiläum SUNCAR**, Juni 2025, Schlieren: Präsentation, Projekterläuterung und Demofahrten als erfolgreich umgesetztes Projekt an wichtigste Lieferanten und Kunden, sowie Mitarbeiter und Aktionäre
- **Amistat NRMM Forum 2025** in Berlin: Keynote von Stefan Schneider (SUNCAR) zum Thema: "Power up: Increasing efficiency for the future of electric construction machinery"
- **ZAPI The Future of Electrification 2024 Online**: Keynote von Stefan Schneider (SUNCAR) zum Thema: " The All-Electric Construction Machine - Fully optimized hydraulics at 15t wheeled battery-electric excavator"
- **Mobile PartnerDay Bosch Rexroth 2024**: Keynote von Stefan Schneider (SUNCAR) zum Thema: " Transformation of Mobile Machines: Powering Electrification"
- **Amistat NRMM Forum 2024** in Berlin: Keynote von Stefan Schneider (SUNCAR) zum Thema: " Case Study: Research project 15t wheeled excavator - next level electrification"
- **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.
- **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.
- Posts in sozialen Medien (**LinkedIn & Facebook**) von SUNCAR
 - Post vom März 2023: "Fortschritte im 15t Mobilbagger-Projekt"
 - Post vom August 2023: "Future Project – Electric 15t wheeled excavators"
 - Post vom August 2024: "We are a finalist for the Innovation Award 2025!"
 - Post vom April 2025: "Review of bauma 2025"
 - Post vom September 2025: "Innovatives Pilotprojekt in Basel: e-Baustelle mit 15t Mobilbagger"