



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 17.07.2024

EMKL – Elektrisches Mehrzwecktransportfahrzeug für Kommunal- und Landwirtschaft



Quelle: DDP Innovation GmbH



Datum: 17.07.2024

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

DDP Innovation GmbH
Guschastrasse 42, 9475 Sevelen
www.terren.ch

Autor/in:

David Pröschel, DDP Innovation GmbH, david.proeschel@ddp-innovation.ch

BFE-Projektbegleitung:

Karin Söderström, karin.soederstroem@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502412-01

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



Zusammenfassung

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung eines elektrischen, geländefähigen Mehrzwecktransportfahrzeugs auf Basis des bestehenden Aebi VT450 Vario. Als erstes Fahrzeug im Sektor Landwirtschaft und Kommunale Dienstleistungen sollte es die Fahrleistung vergleichbarer, von Dieselmotoren angetriebenen Fahrzeugen erreichen oder übertreffen und gleichzeitig komplett ohne lokale Emissionen arbeiten.

Die Kerninnovation ist die Adaption eines mechanisch-hydrostatisch leistungsverzweigten Getriebe für den elektromotorischen Antrieb. Durch das Wegfallen der hydrostatischen Einheit ermöglicht es, das Umsetzen der hohen Drehzahlen der Elektromotoren, bei hoher Effizienz, wobei Sicherheit und Bedienungsfreundlichkeit vollumfänglich beibehalten werden.

Bis Mitte 2022 wurde der Prototyp aufgebaut und es wurden diverse Versuchsfahrten unternommen. Bis Mitte 2023 wurden die nötigen Prüfungen für die Strassenzulassung abgeschlossen und das Fahrzeug wurde als Traktor zugelassen.

Im Winter 23/24 wurde während 4 Monaten ein Langzeittest in der Chilenischen Wüste durchgeführt, welcher komplett privat finanziert wurde durch Zulieferer und potentielle Kunden. Dabei wurden über 1000 km unter Extremen Klima- und Geländebedingungen absolviert.

Im Juni 2024 wurde ein Arbeitseinsatz im Kommunaldienst bei der Gemeinde Buchs durchgeführt.

Résumé

L'objectif du projet était de développer un véhicule de transport tout-terrain électrique polyvalent sur la base de l'Aebi VT450 Vario existant. En tant que premier véhicule dans le secteur de l'agriculture et des services communaux, il devait atteindre ou dépasser les performances de conduite de véhicules comparables entraînés par des moteurs diesel, tout en fonctionnant complètement sans émissions locales.

L'innovation principale est l'adaptation d'une transmission mécanique-hydrostatique à répartition de puissance pour l'entraînement par moteur électrique. En supprimant l'unité hydrostatique, elle permet de convertir les vitesses de rotation élevées des moteurs électriques avec une grande efficacité, tout en conservant la sécurité et la facilité d'utilisation.

Le prototype a été construit jusqu'à la mi-2022 et divers essais ont été effectués. Au milieu de l'année 2023, les tests nécessaires à l'homologation routière étaient terminés et le véhicule était homologué comme tracteur.

Durant l'hiver 23/24, un test de longue durée a été réalisé pendant 4 mois dans le désert chilien, entièrement financé de manière privée par des fournisseurs et des clients potentiels. Plus de 1000 km ont été parcourus dans des conditions climatiques et de terrain extrêmes.

En juin 2024, une mission de service communal a été effectuée auprès de la commune de Buchs, SG.

Summary

The aim of the project was to develop an electric, off-road capable multi-purpose transport vehicle based on the existing Aebi VT450 Vario. As the first vehicle in the agricultural and municipal services



sector, it was to achieve or exceed the performance of comparable vehicles powered by diesel engines and at the same time operate completely without local emissions.

The core innovation is the adaptation of a mechanical-hydrostatic power-split transmission for the electric motor drive. By eliminating the hydrostatic unit, it enables the high rpm of the electric motors to be reduced while maintaining high efficiency, safety and user-friendliness in full.

The prototype was built by mid-2022 and various test drives were undertaken. The necessary tests for road approval were completed by mid-2023 and the vehicle was registered as a tractor.

In the winter of 23/24, a 4-month long-term test was carried out in the Chilean desert, which was financed entirely privately by suppliers and potential customers. Over 1000 km were completed under extreme climatic and off-road conditions.

In June 2024, a municipal work assignment was carried out for the municipality of Buchs, SG.

Take-home messages

- Es konnte nachgewiesen werden, dass der Primärenergieverbrauch eines Mehrzwecktransportfahrzeugs durch die Elektrifizierung um rund 70% verringert werden kann mit einem Potenzial um bis zu 80%.
- Der hohe Wert ergibt sich vor allem auf die höhere Effizienz durch die Elektrifizierung, aber auch aus dem besonderen Einsatzprofil dieser Fahrzeuge, welches viele Berg- und Talfahrten, sowie lange Leerlaufzeiten beinhaltet.
- Mit dem heutigen Stand der Technik und dem Preisniveau in der Industrie ist die Wirtschaftlichkeit eines elektrischen Mehrzwecktransporters ab rund 1000 Betriebsstunden pro Jahr gegeben. Die TCO fallen dabei nach 70% der Nutzungsdauer geringer aus als bei der konventionellen Variante.
- Mit den im Projektverlauf identifizierten Verbesserungsmöglichkeiten könnte dieser Wert in 5 Jahren auf unter 500 jährliche Betriebsstunden gebracht werden.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	3
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	7
1.2 Motivation des Projektes	7
1.3 Projektziele	7
2 Anlagenbeschrieb	8
2.1 Technische Daten.....	9
2.2 Anpassung der Kabine	9
2.3 Anpassung der Fahrzeugstruktur	10
2.4 Batterie	10
2.5 Aufbau des neuen Getriebes sowie des Antriebssystems	11
2.6 Anpassung der Fahrzeugsoftware	12
2.7 Erstellen der Antriebssoftware.....	12
2.8 Remote System	13
3 Vorgehen und Methode.....	13
3.1 Anforderungen	13
3.2 Inbetriebnahme.....	14
3.3 Strassenzulassung	14
3.4 Vergleichsfahrt.....	14
3.5 Arbeitseinsatz	14
3.6 Langzeittest	14
4 Ergebnisse und Diskussion	14
4.1 Umbau	14
4.2 Inbetriebnahme.....	15
4.3 Strassenzulassung	15
4.4 Vergleichsfahrt.....	16
4.5 Langzeittest	19
4.6 Arbeitseinsatz	20
4.6.1 Ausdauerleistung	20
4.6.2 Subjektive Einschätzung	21
4.7 Gesamtumfang des Testbetriebs	23
4.8 Wirtschaftlichkeit.....	23



4.9	Optimierungspotential.....	24
5	Schlussfolgerungen und Fazit	25
6	Ausblick und zukünftige Umsetzung	26
7	Nationale und internationale Zusammenarbeit	26
8	Literaturverzeichnis	27



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Die Wirtschaft in Berggebieten insbesondere Landwirtschaft, Skigebiete, Kommunaldienste und Bauunternehmungen, sind auf hochspezialisierte Mehrzwecktransportfahrzeuge angewiesen. Am weitesten verbreitet sind Transporter der Typen Aebi VT/TP, Reform Muli, Lindner Unitrac, Schiltrac und Caron CTS. Das Alleinstellungsmerkmal dieser Transporter ist die maximale Geländetauglichkeit und Nutzlast von mehr als 5 Tonnen. Ausserdem können sie diverse Aufbaugeräte aufnehmen, mit denen sie unterschiedliche Arbeiten bewältigen können.

Das Arbeitsumfeld dieser Maschinen ist sehr komplex und birgt erhöhte Unfallgefahr. Deshalb liegt der Fokus auf einfacher Bedienbarkeit und intrinsischer Sicherheit. Die Energieeffizienz ist dabei zweitrangig.

Konkret setzen die etablierten Hersteller dazu auf stufenlose, leistungsverzweigte Getriebe mit einem Hydrostatischen und einem Mechanischen Strang. Deren Vorteil ist die enorme Zugkraft und feine Dosierbarkeit. Gleichzeitig bieten sie einen Wirksamen Schutz gegen ungewolltes Wegrollen am Berg und die hervorragende Energiedissipation beim Bergabfahren mit schwerer Last. Der Nachteil ist jedoch der geringe Wirkungsgrad, welcher je nach Betriebszustand zwischen 60-80% schwankt. Hinzu kommen die Lärmemissionen welche bei Fahrzeugen mit Hydrostatischem Antrieb nochmals deutlich höher sind als bei rein mechanischen.

1.2 Motivation des Projektes

Das Ziel des Projektes EMKL ist die Kombination von Sicherheit und Leistung der bestehenden konventionellen Fahrzeuge mit der hohen Effizienz und geringen Lärmemissionen eines Elektrofahrzeugs.

Ausserdem sollen weitere Synergieeffekte des Elektrischen Antriebs genutzt werden, um den Einsatzbereich und die Wertschöpfung des Fahrzeugs zu erhöhen und damit wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen.

Konkret wird ein elektrischer Transporter auf Basis eines Aebi VT450 entwickelt. Kerninnovation ist dabei der Ersatz der Hydrostatischen Einheit durch ein neuentwickeltes Getriebe, welches von zwei Elektromotoren angetrieben wird.

1.3 Projektziele

Das Projekt sollte Erkenntnisse und konkrete Messwerte in den folgenden Punkten liefern:

Im technischen Bereich:

- Arbeits- und Fahrleistung im Vergleich zu einem herkömmlichen Dieselfahrzeug
- Umfang der möglichen Energierückgewinnung beim typischen Nutzungsprofil
- Umsetzung des komplexen Zusammenspiels von zwei Elektromotoren zur Umsetzung von Leistung und Drehmoment in verschiedenen Fahrzuständen
- Entwicklung, Bau und Inbetriebnahme eines neuartigen Getriebes inkl. Steuerungssoftware, zum Erreichen von geforderten Fahrleistungen am Berg mit grossen Lasten

Im wirtschaftlichen Bereich:



- Skalierbarkeit und Wirtschaftlichkeit der entwickelten Lösung zur Umrüstung von ICE auf EV für bestehende und neue Fahrzeuge des Typs Aebi VT450, sowie andere Nutzfahrzeuge für landwirtschaftliche und kommunale Einsatzzwecke
- Erfahrungswerte zur Reduktion der Betriebskosten im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug
- Realitätsbezogene Kennwerte für den effektiven Energieverbrauch in verschiedenen Einsatzfeldern und damit verbunden die Orientierung für die optimale Batteriekapazität für die unterschiedlichen Nutzungsprofile der Kunden
- Erschliessung neuer Einsatzgebiete u.a. im Bergbau und Tourismus

Im sozialen Bereich:

- Zusätzliche Einsatzmöglichkeiten durch dritten Sitzplatz in der Kabine sowie sicherer Transport von 3er-Teams
- Gesundheits- und Arbeitsschutz durch Vermeidung von Lärm und Russpartikeln in der Umwelt
- Reduzierte Fahrgeräusche und Emissionsfreiheit zum Vorteil von Bevölkerung und Tierwelt

2 Anlagenbeschrieb

Im Hinblick auf eine spätere Kommerzialisierung wurde entschieden einen Prototyp zu bauen, basierend auf dem existierenden Modell, welches sich technisch am besten für die Umrüstung eignet. Durch die bestehende Produktionsinfrastruktur und die zuverlässige erprobte Fahrzeugplattform soll der Markteinstieg beschleunigt werden und ein konkurrenzfähiger Verkaufspreis möglich sein.

Die Wahl fiel aus folgenden Gründen auf den Aebi VT450: Das Fahrzeug wird in der Schweiz hergestellt. Damit wird die Zusammenarbeit mit dem Hersteller deutlich vereinfacht. Der VT450 ist in dem Sinn ein Premiumfahrzeug, das es bei sehr vielen Spezialanwendungen zum Einsatz kommt und daher auch eher für Kunden in Frage kommt, die offen für eine Elektrifizierung sind. Das Getriebe und das Chassis eigneten sich zudem von allen untersuchten Konkurrenzprodukten am besten für die Elektrifizierung.



2.1 Technische Daten

Die folgende Tabelle vergleicht die technischen Daten des serienmässig hergestellten Transporters Aebi VT450, welcher als Basis für die Umrüstung dient, mit dem elektrischen Prototyp der im Zuge dieses Projektes gebaut wurde. Quelle für die Werte des VT450 ist der Prüfbericht des BLT Wieselburg (Siehe Anhang). Die Daten des Prototyps wurden im Zuge der Strassenzulassung erhoben.

Technische Daten Prototyp "Terren" vs. VT450							
				Terren		VT450	
Leergewicht				4110 kg		3800 kg	
Zugelassenes Gesamtgewicht				8500 kg		""	
Motorleistung				86 kW		72 kW	
Batterie kapazität Brutto/Netto				90/67 kWh		90 Liter	
Systemspannung				300 V		keine	
Batteriechemie/Temperierung				NMC/passiv		keine	
Länge/Breite/Höhe/Radstand			5150/2120/2340/3250	mm		""	
Onboard Ladegerät				22 kW		keines	
DC Ladung				Nein		keine	
Wendekreis				10 m		""	
Lenkung				Allrad		""	
Antrieb				Allrad		""	
Hydraulik				40/200 l/Bar		""	
Zapfwelle				Variable Drehzahl, 86 kW	An Motordrehzahl gekoppelt, 72 kW		
Höchstgeschwindigkeit				40 km/h		""	
Steigleistung				100% @ 8500kg		""	
Lärmpegel im Fahrbetrieb				82 dB		82 dB	

2.2 Anpassung der Kabine

Durch den Entfall des Verbrennungsmotors sowie des Kühlsystems und der Abgasanlage wurde Bauraum frei. Der komplette Mitteltunnel, wo zuvor der verbrennungsmotor untergebracht war, wurde entfernt. Dies ermöglichte es, die Kabine mit einem dritten Sitzplatz auszustatten. Dazu wurde die Innenausstattung wie Sitzanlage und Cockpit/Armaturenbrett komplett überarbeitet. Im Zuge dieser Arbeiten wurden auch die Bedienelemente und das Monitoring an die Anforderungen des elektrischen Antriebs- und Energiemanagements angepasst. Dazu gehört das Entfernen des ursprünglich vorhandenen Kupplungspedals sowie der Einbau eines neuen Displays, welches das Überwachen der elektrischen Systeme ermöglicht



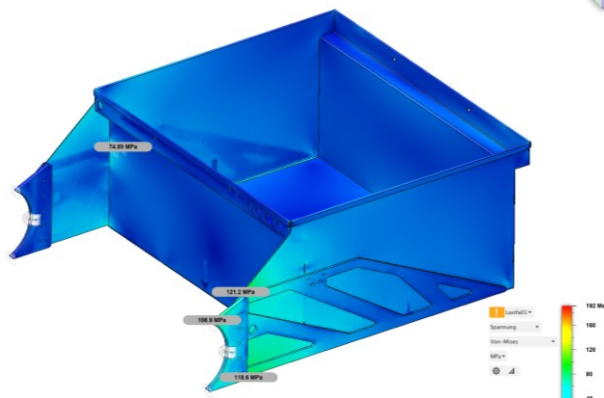
Cockpit vorher



Cockpit nachher

2.3 Anpassung der Fahrzeugstruktur

Die Traktionsbatterie wurde im Bereich der früheren Tankanlage, sowie der gegenüberliegenden Seite untergebracht. Der Raum für die Anbaugeräte konnte dabei vollständig erhalten bleiben. Somit bleibt die Verwendung jeglicher Standardaufbauten ohne Umbauten möglich. Die Auslegung und Konstruktion aller Bauteile wurde von DDP Innovation umgesetzt und mit dem Strassenverkehrsamt St. Gallen auf die Verkehrssicherheit geprüft.



Batteriehalterung hinten links in der Analyse



Alle Batteriehalterungen montiert am Fahrzeug

Die Anpassungen an der Fahrzeugstruktur liessen sich einfacher umsetzen als erwartet. Die Fahrzeugplattform ist sehr massiv gebaut und lässt Veränderungen an den meisten Stellen zu, ohne dass strukturelle Probleme auftreten. Die offene Anordnung der ursprünglichen Komponenten liess viel Spielraum für die Montage des elektrischen Antriebssystems. Einzig die Auswahl der Traktionsbatterie war sehr eingeschränkt auf Grund der Verdrehdämpfung am Zentralrohr, welche in den geplanten Bauraum für die Batterie hineinragt. Diese Anordnung würde nochmals überarbeitet im Falle einer Kommerzialisierung.

2.4 Batterie

Verbaut wurden 9 Module der Ecovolt EvoTraction Battery mit je 10 kWh Kapazität. Die Module wurden 3s3p verschaltet, um eine Systemspannung von 300V zu erreichen. Damit wird eine Installierte Kapazität von 90 kWh erreicht. Davon effektiv nutzbar sind gemäss Messungen jedoch nur 67 kWh. Die



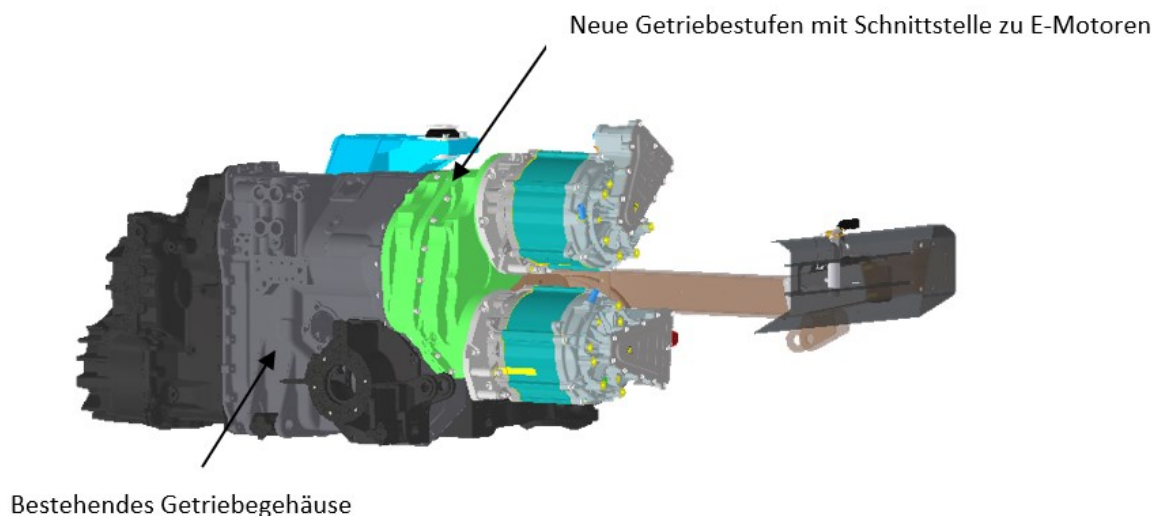
effektiv nutzbare Kapazität wird durch das Battery Management System (BMS) begrenzt. Die tiefe Entladung $>10\%$ SOC sowie die hohe Ladung $<90\%$ SOC reduzieren die Lebensdauer einer Batterie. In diesen Grenzbereichen wird ausserdem die aktive Temperierung, sowie ein aktives Balancing der Zellspannung umso wichtiger, da die Zellen schnell in einen unsicheren Spannungs- oder Temperaturbereich abdriften können, wo es zu einem Thermal runaway kommen kann (Feuer, Explosion). Die verwendete Batterie hat kein aktives Thermomanagement und eine begrenzte Balancing Leistung. Deshalb wird die Verfügbare Kapazität vom BMS stark eingeschränkt.

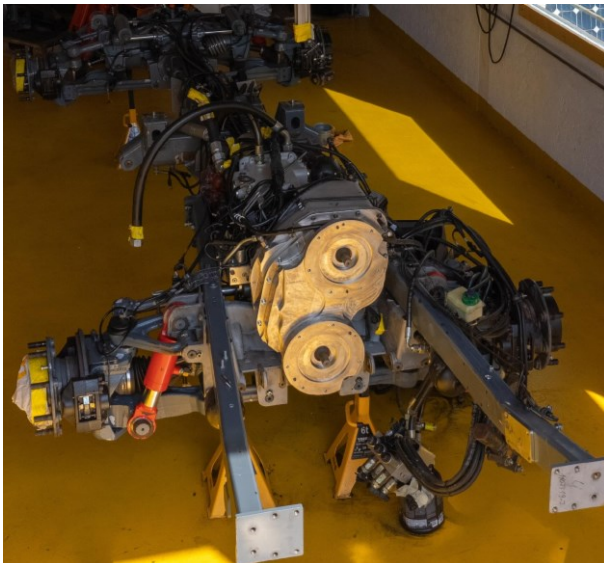
Es wurden auch Konfigurationen mit 120-140kWh installierter Batteriekapazität evaluiert. Aus Kostengründen wurde beim Prototyp darauf verzichtet.

Als weitere Besonderheit wurde ein Batterieheizsystem verbaut, welches im Betrieb via Software gesteuert wird und im ausgeschalteten Zustand extern angesteuert werden kann. So soll sichergestellt werden, dass das Fahrzeug auch bei sehr kalten Bedingungen voll einsatzbereit ist.

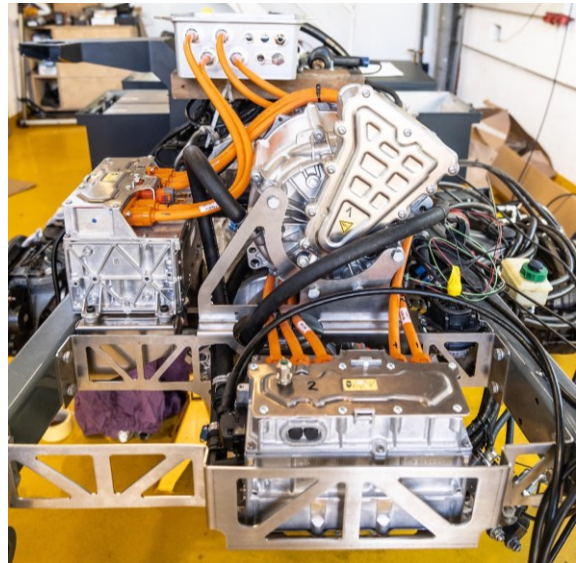
2.5 Aufbau des neuen Getriebes sowie des Antriebssystems

Um die geplanten Energieeinsparungen zu realisieren war der Bau eines neuartigen Adaptergetriebes notwendig, welches die Kerninnovation des EMKL Projekts darstellt. Das Konzept dazu wurde von DDP Innovation erstellt und von VDS Getriebe konstruiert und gefertigt. Dabei wirken zwei Elektromotoren auf die zwei Stränge eines leistungsverzweigten Getriebes, wobei die hydrostatische Einheit entfällt.





Adaptergetriebe vor Montage der Motoren



Motoren und Inverter montiert auf Getriebe

2.6 Anpassung der Fahrzeugsoftware

Die Fahrzeugsoftware war fest mit der Steuerung des Dieselmotors verknüpft. Dessen Wegfallen verursachte eine Vielzahl von Störungsmeldungen, welche das Fahrzeug unbrauchbar gemacht hätten. Mittels Software wurden anschliessend diverse Motordaten simuliert oder wenn möglich von den Elektromotoren übernommen. Informationen betreffend der Fahrzeugsysteme die nicht mit dem Antrieb zusammenhängen (Fahrwerk, Hydraulik etc.) Werden wie bis anhin auf dem bestehenden Display angezeigt.

Die bestehende Getriebesoftware musste dahingehend angepasst werden, dass die Eingaben über die Pedalerie in Befehle für die Drehzahlen der Elektromotoren umgewandelt werden statt wie bisher Drehzahl des Dieselmotors und der hydrostatischen Einheit. Die Softwareanpassung wurde mit der Firma VDS Getriebe aus Wolfers, Österreich umgesetzt.

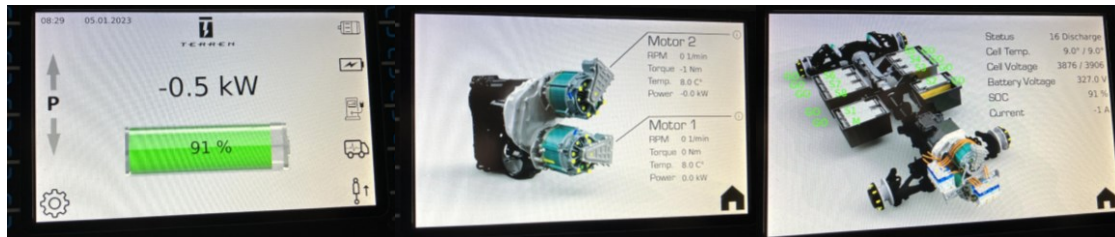
2.7 Erstellen der Antriebssoftware

Die Antriebssoftware wurde in Zusammenarbeit mit der Motics GmbH erstellt. Sie verbindet alle Komponenten des neuen Antriebsstrangs inklusive Onboard-Ladegerät, Ladebuchse, Kühlsystem, Motoren und Inverter. Sie bildet eine geschlossene Einheit, welche alle sicherheitstechnischen Anforderungen erfüllt. Sie bietet eine Schnittstelle für die Kommunikation mit den bestehenden Fahrzeug-Signalgebern wie z.B. Gaspedal, von denen sie ihre Eingaben erhält.

Als Kernstück dient eine neue Vehicle Control Unit mit integriertem Display, über welches alle wichtigen Parameter des Antriebssystems überwacht und gesteuert werden können.

Das System wurde ausserhalb des Fahrzeuges in einem "Hardware in the Loop" Aufbau auf die Funktionstüchtigkeit vor dem finalen Einbau in das Fahrzeug geprüft.

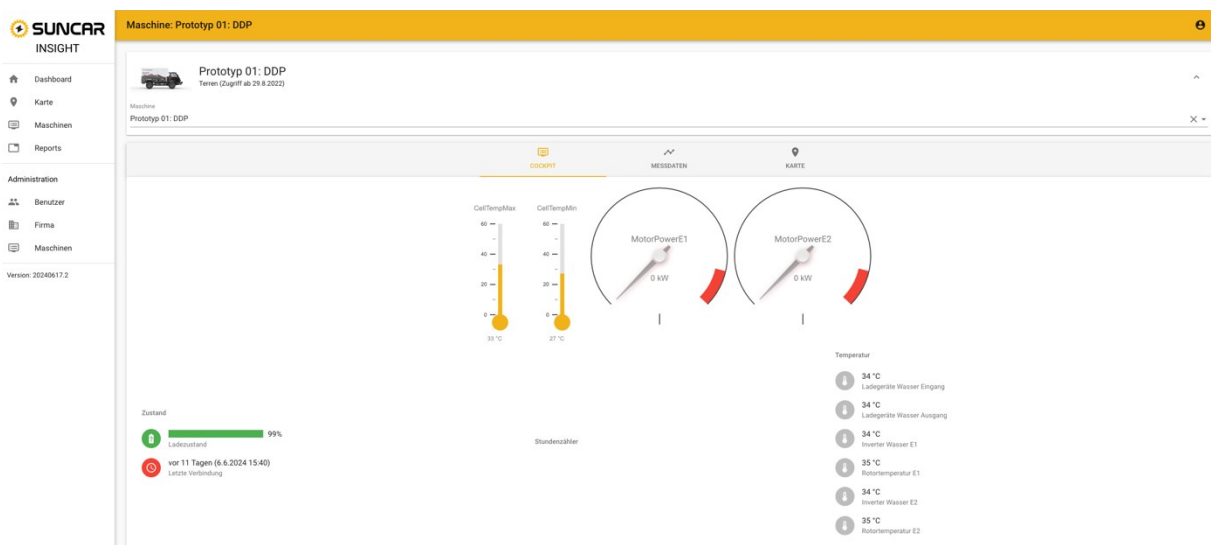
Alle Daten der für den Antrieb relevanten Systeme werden zentral erfasst und auf dem Fahrzeug Display im Cockpit dargestellt. Damit erhält der Fahrzeugführer alle wesentlichen Daten in der Übersicht. Das Display Layout wurde von Grund auf für dieses Fahrzeug designt.



Beispiele von verschiedenen Darstellungsvarianten

2.8 Remote System

Um die Ergebnisse des Testbetriebs optimal auszuwerten, wurde beim Terren Prototyp ein Remote-System verbaut. Das System «Insight» wird von der Firma SUNCAR in der Schweiz entwickelt und betreut. Es verfügt über eine SIM-Karte und bietet Livezugriff auf alle Sensordaten im Fahrzeugsystem. Ausserdem bietet es Zugriff auf die Fahrzeugsteuerung und ermöglicht over-the-air Softwareupdates, während das Fahrzeug unterwegs ist. Dadurch konnten die Testfahrten deutlich effizienter gestaltet werden. Parameter konnten im Gelände anhand vom Feedback der Fahrer angepasst werden, während der zuständige Ingenieur im Büro am Computer sass und die Daten in Echtzeit auswertete.



3 Vorgehen und Methode

3.1 Anforderungen

Um die Anforderungen an das Fahrzeug zu bestimmen, wurde das bestehende Dieselfahrzeug analysiert. Aus Getriebeübersetzung und Motordaten konnte das nötige Drehmoment an den Rädern berechnet werden und aus den Verbrauchsdaten wurden Rückschlüsse auf die notwendige Batteriegrösse gezogen. Zu diesem Zweck wurden Prüfberichte und Erfahrungswerte von Aebi Schmidt beigezogen. Zusätzlich wurde ein Leistungsheft definiert mit zusätzlichen Punkten, bei denen der neue Prototyp das bestehende Dieselfahrzeug übertreffen soll.



3.2 Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme des Antriebssystems erfolgte ausserhalb des Fahrzeugs in einem separaten Aufbau damit die Arbeiten am Fahrzeug parallel weitergeführt werden konnten. Anschliessend wurde das Antriebssystem eingebaut und die Grundfunktionalität des Fahrzeugs geprüft. Um die Getriebesteuerung zu optimieren, wurde das Fahrzeug anschliessend nach Österreich zur Firma VDS transportiert. Ein Teammitglied von DDP Innovation führte dort während einer Woche gemeinsam mit dem Entwicklungsingenieur Testfahrten und Anpassungen durch bis ein zufriedenstellender Stand erreicht wurde.

3.3 Strassenzulassung

Sobald das komplette Umbaukonzept feststand, wurden die Pläne an das Strassenverkehrsamt St. Gallen geschickt. Daraufhin besichtigte ein Experte der Firma FAKT AG das Fahrzeug, um den Prüfumfang festzulegen. Die Prüfungen wurden dann vor Ort bei der Firma FAKT AG auf deren Prüfstrecke absolviert.

3.4 Vergleichsfahrt

Um quantitative Vergleichsdaten zum Dieselfahrzeug zu erhalten, wurde eine Testfahrt mit drei Fahrzeugen durchgeführt. Dabei waren: Der Aebi VT470, der eVT450 (Elektroprototyp von Aebi Schmidt) und Terren. Alle Fahrzeuge absolvierten eine identische Testrunde, mit identischer Zuladung und Rollwiderstand.

Das Dieselfahrzeug wurde vor und nach der Fahrt randvoll getankt und so der Verbrauch ermittelt. Der Stromverbrauch der Elektrofahrzeuge wurde inkl. Ladeverluste, zwischen Zuleitung und Wallbox gemessen. Sie wurden vor und nach der Fahrt zu 100% aufgeladen.

3.5 Arbeitseinsatz

Um die Praxistauglichkeit des Prototyps zu testen wurde ein dreitägiger Arbeitseinsatz beim Werkhof der Gemeinde Buchs SG geleistet. Dabei wurde die Leistungsfähigkeit im Vergleich zum Dieselfahrzeug, sowie der subjektive Eindruck und die Akzeptanz des Fahrzeugs bei den Fahrern erhoben.

3.6 Langzeittest

Unabhängig vom BFE Projekt EMKL wurde in Zusammenarbeit mit, und finanziert durch Zulieferbetriebe und branchennahen Sponsoren eine Medienwirksame Versuchsfahrt in der Chilenischen Wüste durchgeführt. Dabei wurde neben dem Extremtest aller Komponenten auch ein Weltrekord für die grösste Höhe, die je ein Elektrofahrzeug erreicht hat, aufgestellt.

Das Projekt heisst Peak Evolution und soll die zukünftige serienmässige Umsetzung begünstigen.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Umbau

Der Umbau des Aebi VT450 gestaltete sich den Erwartungen gemäss recht speditiv. Es hat sich als Vorteil erwiesen, dass Nutzfahrzeuge aus diesem Sektor allgemein massiv gebaut sind, im Wissen,



dass sie je nach Nutzung komplett unterschiedliche Anwendungen erfüllen müssen. Es ist nicht unüblich, dass im Nachhinein zusätzliche Bauteile an verschiedenen Stellen angeschweisst werden. Demzufolge war auch die Befestigung der Batterien unter Berücksichtigung aller Sicherheitsfaktoren möglich.

Auch der Einbau des neuentwickelten Getriebes und der Elektromotoren war im freiwerdenden Bauraum des Dieselmotors problemlos.

Die grösste Herausforderung war die Umsetzung des dritten Sitzplatzes in der Fahrerkabine. Es erforderte die Komplette Umgestaltung des Innenraums der Kabine und eine extrem kompakte Platzierung der Elektronikkomponenten für den Antrieb.

Die Umsetzung des dritten Sitzplatzes wäre bei einer Serienmässigen Umrüstung des Fahrzeugs nach diesem Konzept ausdrücklich nicht zu empfehlen.

Im Falle einer Grundlegenden Überarbeitung des Elektrifizierungskonzeptes wäre der dritte Sitzplatz jedoch ohne grossen Zusatzaufwand möglich.

4.2 Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme erfolgte in Zwei Schritten:

1. Replikation der Fahreigenschaften und Funktionen des Dieselfahrzeugs,
2. Optimierung der Getriebesteuerung, um die Maximale Effizienzverbesserung zu erreichen.

Der erste Schritt konnte schnell und unkompliziert umgesetzt werden. Die Schwierigkeiten lagen hauptsächlich in der Kommunikation der neugeschriebenen Software mit den Antriebskomponenten.

Der zweite Schritt war ein iterativer Prozess, bei dem durch kleine Softwareanpassungen und Testfahrten das Fahrgefühl und der Energieverbrauch optimiert wurde.

Die neuen Betriebszustände des Getriebes waren unbekannt und Änderungen in der Software wirkten sich nicht immer aus wie erwartet. Die Software ist von Grund auf an das Verhalten eines Dieselmotors angepasst. Dies zwingt nun die Elektromotoren zu einem Verhalten, das suboptimal ist und die Parameter der Getriebesteuerung werden teilweise komplett ausgereizt.

Es wurde schlussendlich ein Stand erreicht, bei dem ein präziseres und intuitiveres Fahrgefühl erzielt wird als beim ursprünglichen Dieselfahrzeug. Im Nachhinein wäre es jedoch zielführender gewesen eine komplett neue Getriebesteuerung zu programmieren, da das Resultat dann noch zufriedenstellender ausgefallen wäre.

4.3 Strassenzulassung

Der Erhalt der Strassenzulassung stellte sich als der zeitintensivste und einer der Teuersten Aspekte heraus. Das Problem ist, dass es keine einsehbaren Richtlinien gibt welche Vorgaben eingehalten werden müssen. Der Umfang der Prüfungen hängt schlussendlich von der Einschätzung des zuständigen Experten ab und kann gemäss Rückmeldungen von anderen abgeschlossenen Projekten, von Kanton zu Kanton deutlich abweichen.

Das grösste Problem ist in dem Sinne nicht der Aufwand für die Umsetzung und Dokumentation, sondern die Unsicherheit ob die getroffenen Massnahmen ausreichend sind und ob neue Anforderungen hinzukommen.

Beispielsweise wurde bei der EMV-Prüfung nicht klargestellt welches Messsetup akzeptiert wird. Also wurde aus Kostengründen eine Feldmessung durchgeführt statt einer Hallenmessung. Erst im Nachhinein wurde entschieden, dass zwar eine Feldmessung akzeptiert wird aber nicht nach dem gewählten Aufbau. Deshalb musste die Messung wiederholt werden, was zu Zusatzkosten von rund CHF 5'000 führte.

Vermeidbare Verzögerungen bei der Strassenzulassung haben das Projekt nach abschliessender Beurteilung um rund sechs Monate verzögert und deutlich verteuert.



4.4 Vergleichsfahrt

Um einen direkten Vergleich zum Dieselfahrzeug herstellen zu können, wurde eine Vergleichsfahrt mit drei Fahrzeugen durchgeführt. Mit dem VT470 kam die neuste Version mit Euro 6e Motor und 100kW Motorleistung zum Einsatz. Als zweites Vergleichsfahrzeug diente der bestehende Elektroprototyp von Aebi (eVT) und zuletzt der Terren.

Auswertungsbericht

Vergleichstestfahrt Aebi VT470/eVT/DDP Innovation Terren

Datum: 20/21.06.23

Ort: Aebi Burgdorf

Gefahrene Teststrecke:

Länge:	36.14 km
Höhendifferenz:	hoch/runter 587m
Durchschnittsgeschwindigkeit:	24.4 km/h
Stillstand/Motorleerlauf	12 Minuten
Fahrer:	Fahrerwechsel nach halber Strecke

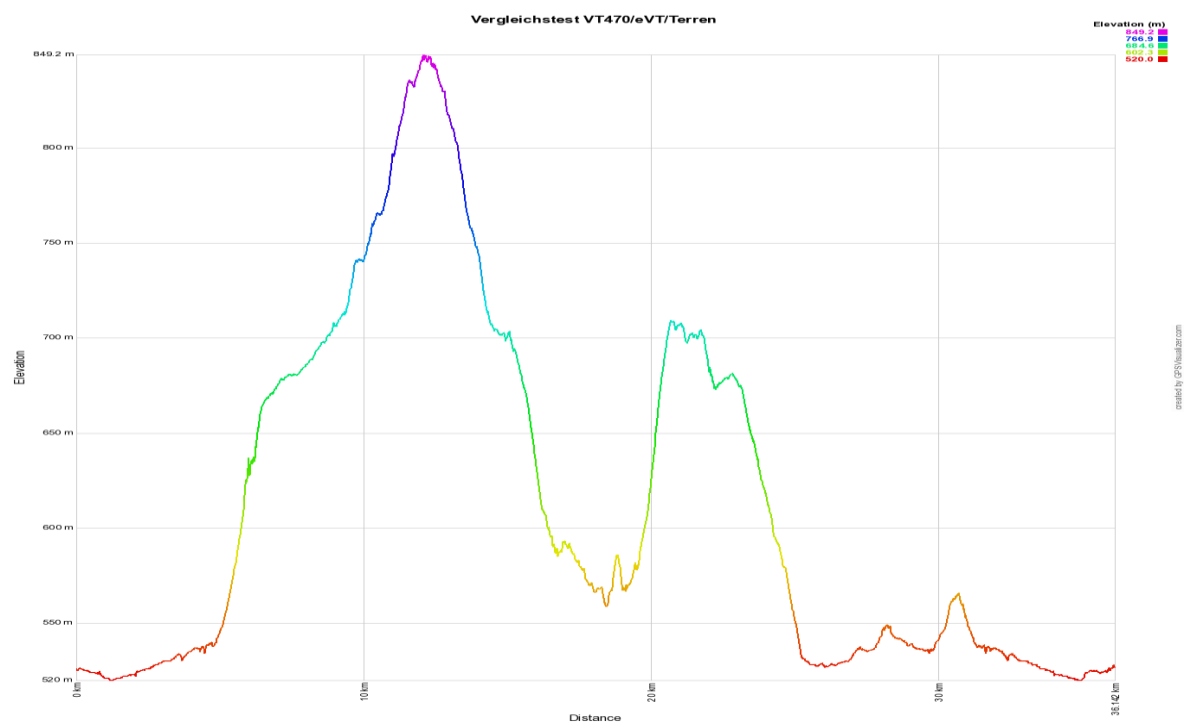
Fahrzeug	VT470	eVT	Terren
Betriebsstunden	2157.7	290.1	1967.3
Zuladung	2000kg (Stahlgewicht)	Kipper(1000kg)+1000kg	Kipper(1000kg)+1000kg
Breifung	Terra	Kommunal	Kommunal
Reifendruck	Max. Gem. Herstellerangaben	5.5 Bar	5.5 Bar
Klimaanlage	Aus	Aus	Aus
Energieverbrauch	9.5 Liter Diesel= 91.2 kWh	40.05 kWh	25.67kWh
Verbrauch relativ	100%	43.9%	28.1%

Bemerkung: Die Messwerte weisen eine Toleranz von +/-5% auf, aufgrund der Datenerfassung und unberechenbaren externen Einflüssen

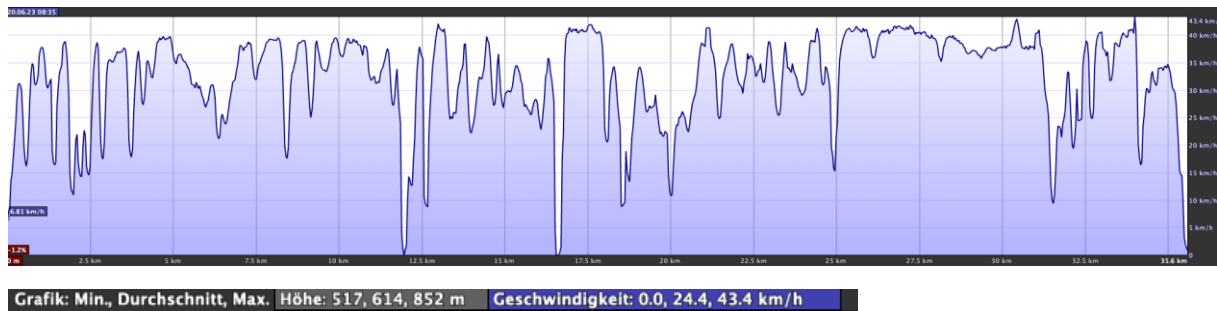
Eckdaten zur Vergleichsfahrt



Karte der abgefahrenen Strecke



Höhenprofil der abgefahrenen Strecke



Geschwindigkeitsverlauf während der Vergleichsfahrt

Interpretation der Resultate:

- Die Differenz zwischen **VT470** und **eVT** (Bestehender Elektroprototyp von Aebi) entspricht dem Ergebnis, dass bei einem Ersatz eines Verbrennungsmotors durch einen Elektroantrieb ohne weitere Anpassungen entspricht. Der Wirkungsgrad eines Dieselmotors liegt bei 35-40%, derjenige eines Elektroantriebs inkl. Ladeverluste etc. bei rund 80-85%. Durch Rekuperation beim Bergabfahren ergeben sich weitere ca. 10% zugunsten des E-Antriebs. Mit **56% weniger** Energieverbrauch liegt unser Resultat in diesem Bereich und dient daher zusätzlich als Validierung unserer Messmethode.
- Die Differenz zwischen **eVT** und **Terren** widerspiegelt die Auswirkungen der Weiteren Massnahmen, die beim Bau des Prototyps umgesetzt wurden. Durch sie konnte im Vergleich zum eVT nochmals **rund 35% weniger** Verbrauch erzielt werden. Folgende drei Faktoren sind massgeblich dafür verantwortlich:
 - Wegfallen der Hydrostatischen Einheit und damit einhergehende Wärmeverluste.
 - Optimierte Getriebesteuerung, welche die Drehzahlen der Hydraulikpumpen senkt und die Rekuperation beim Bremsen verbessert.
 - Automatisches Ausschalten der Elektromotoren beim Stillstand.
- Auf Qualitativer Ebene konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden (Alle drei Fahrer konnten alle drei Maschinen testfahren):
 - Das Fahrgefühl war im Terren am intuitivsten und angenehmsten.
 - Terren ist den anderen beiden Fahrzeugen beim Punkt Beschleunigung und Geschwindigkeit bergauf überlegen, obwohl die elektronisch begrenzte Motorleistung identisch oder leicht tiefer ist. Dies liegt den geringeren Verlusten im Antriebsstrang, wodurch schlussendlich mehr Leistung an den Rädern ankommt.
 - Der Geräuschpegel war im Terren am niedrigsten und Gespräche mit dem Passagier waren am einfachsten möglich, wobei die hohe Frequenz des Fahrgeräusches ebenfalls als deutlich störend empfunden wurde.
 - Um den Effektiven Fahrverbrauch zu ermitteln, wurde ohne Klimaanlage gefahren. Im Terren, sowie im eVT war dies trotz sommerlicher Temperaturen problemlos möglich. Im VT470 stieg die Temperatur auf ein Mass, wo die Klimaanlage im normalen Betrieb ohne Zweifel zum Einsatz gekommen wäre. Dies ist auf den Verbrennungsmotor zurückzuführen, der zwischen den Sitzen angeordnet ist und trotz Verschalung Wärme in die Kabine abgibt.



4.5 Langzeittest



Beim Langzeittest in der Chilenischen Wüste wurde in erster Linie qualitative Langzeiterfahrung gesammelt. Einige Fakten zum Test:

- 3 Monate Einsatzdauer ohne jegliche Wartungsarbeiten.
- HV-System und damit Wasserpumpe und VCU, täglich rund 16 Stunden eingeschaltet.
- 1200km Fahrstrecke, davon über 900km auf unbefestigten Strassen und im freien Gelände.
- Maximale Aussentemperatur 36° über 5 Tage mit Mindesttemperatur nachts 23°.
- Minimale Aussentemperatur -22° mit -14.3° gemessener Kühlwassertemperatur.
- Exposition gegenüber intensivem Salzsprühnebel am Strand während 15 Tagen.
- Exposition gegenüber Staubstürmen mit Wind bis 100km/h während 14 Tagen.
- Exposition gegenüber ferromagnetischem Staub, welcher in Elektronikkomponenten eindringt

Kurz zusammengefasst sind die Erfahrungen aus dem Langzeittest durchwegs positiv. Das Fahrzeug ist während dem ganzen Einsatz kein einziges Mal aufgrund technischer Probleme stehengeblieben. Es gab einen Zwischenfall, bei dem der Kühlkreislauf der Leistungselektronik unterbrochen wurde und der Antrieb ins Derating ging. Dies geschah aufgrund von Luft im Kühlkreislauf, die sich ausdehnte und den Sensor der Pumpe erreichte. Das passierte aufgrund der extremen Höhe von über 6000m und liegt weit ausserhalb jeder normalen Anwendung.

Des weiteren konnte wie erwartet festgestellt werden, dass die Batterie im jetzigen Prototypenstand den Anforderungen nicht gewachsen ist.

Die kalten Temperaturen stellten nie ein Problem dar. Das im Projektverlauf entwickelte Batterieheizsystem und die eingesetzte Isolation funktionierten einwandfrei. Die Batteriezellen wurden zu jedem Zeitpunkt bei der für die volle Leistungsfähigkeit notwendigen Mindesttemperatur von 15° gehalten. Die verfügbare Heizleistung lag bei 390 Watt. Sie wurde während der kältesten Tage jeweils zwei bis drei Stunden täglich benötigt, was einem Verbrauch von ca. 1 kWh entspricht oder rund 1.5% der Batteriekapazität.



Hingegen stellte der Wärmeeintrag aus Betrieb und Umgebung das viel grössere Problem dar. Bei Aussentemperaturen von mehr als 25° C war eine direkte Abfolge von Laden und Fahren unmöglich, obwohl bei relativ geringer Leistung von durchschnittlich 7 kW geladen wurde. Als die Nächtlichen Temperaturen nicht mehr unter 20° C fielen, war auch die Abkühlung über Nacht ungenügend und sowohl das Laden wie auch das Fahren musste regelmässig wegen Überhitzung der Batterie unterbrochen werden.

4.6 Arbeitseinsatz



4.6.1 Ausdauerleistung

Wie in anderen vorgängigen Tests erwies sich auch im Praxiseinsatz die Batterie als grösste Schwachstelle. Dabei sind gleichzeitig die Kapazität, sowie das Thermomanagement begrenzende Faktoren.

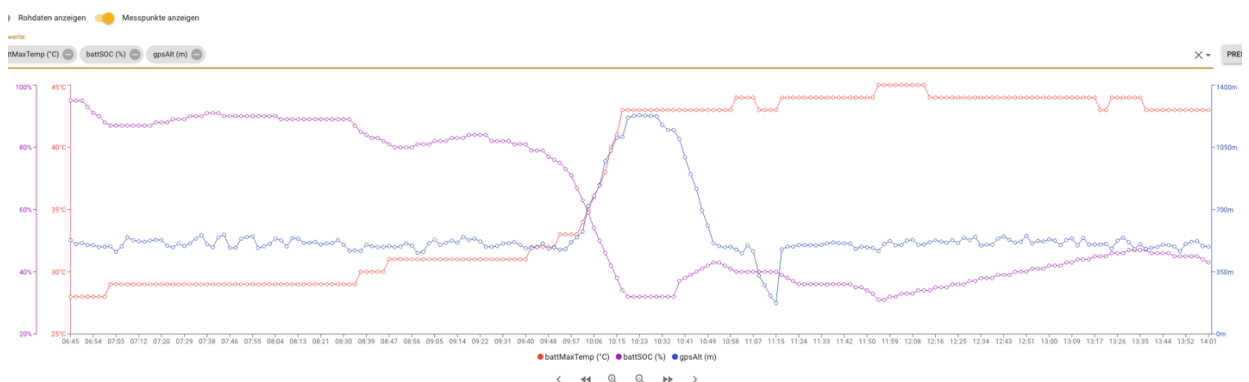
In der untenstehenden Grafik ist der erste Tag des Praxiseinsatzes inkl. Ladung in der Nacht zuvor abgebildet. Folgende Punkte sind dabei bemerkenswert und beleuchten die Batterieprobleme:

- Die Temperatur steigt bereits über Nacht beim Laden auf 28° C, obwohl der Ladevorgang um 00:40 abgeschlossen war. Das hängt mit der balancing Aktivität innerhalb der Batterie zusammen.
- Das Laden wird bereits bei einer Zellspannung von 3943 mV beendet, obwohl eine Vollladung einer Zellspannung von 4050 mV entspricht. Das hängt mit der ungenauen SOC-Bestimmung durch das BMS zusammen.
- Es ist zu erkennen wie um 15:30 sowohl die Temperatur eine Deratingschwelle von 48°C erreicht und gleichzeitig die unterste Zellspannung auf 2950 mV absackt und damit die Batterie vom BMS ausgeschaltet wird. Dies bedeutete das Ende des Einsatzes, 1.5h vor dem Feierabend. Das Auseinanderdriften hat mit Qualitätsdifferenzen der einzelnen Zellen im Batteriepack zu tun. Gleichzeitig greift das BMS nicht rechtzeitig ein und reduziert die Leistung, um die Batterie zu schützen.



Die untenstehende Grafik zeigt den Arbeitseinsatz vom Start um 07:00 bis um 14:00. Bis um 10:00 werden diverse Fahrten innerhalb der Stadt Buchs durchgeführt. Um 10:00 wurden ca. 3000kg Aushubmaterial auf den Buchserberg geführt. Dabei wurde ein Höhenunterschied von 750 Metern bewältigt. Es ist ersichtlich wie die Batterietemperatur und die GPS-Höhe korrelieren. Die Batterietemperatur bleibt anschliessend für den Rest des Tages in einem nicht nachhaltigen Bereich.

Die Batterietemperatur hat sich in diesem Fall innert 20 Minuten um 12°C erhöht. Auf einen Testbetrieb in anderen energieintensiven Anwendungen, wie den Betrieb eines Heuladers oder Schneeräumen wurde aufgrund dieser Erkenntnisse verzichtet. Es könnten keine aussagekräftigen Daten über Ausdauer und Energieverbrauch gesammelt werden, da die Batterietemperatur den limitierenden Faktor darstellt.



4.6.2 Subjektive Einschätzung

Das Personal im Werkhof Buchs SG hat bereits eine grosse Kompetenz im Umgang mit Elektrogeräten und ist der Entwicklung positiv gesinnt. Im Betrieb ist eine Elektrische Kehrmaschine der Marke Bucher, sowie in naher Zeit ein 7.5 t Kehrtrucksammelfahrzeug im Einsatz. Ausserdem Elektrische Handgeräte wie Motorsägen etc. Der Werkhof hat zudem eine eigene PV-Anlage.

Ein elektrischer Geräteträger der Marke Meili wurde evaluiert, aber auf Grund wirtschaftlicher Überlegungen noch vertagt.



Ein mit dem Terren identischer Aebi Transporter ist im Betrieb ebenfalls im Einsatz. Eine Angewöhnungszeit an die Bedienung des Terren ist daher entfallen.

Beim Feedback ist zu bedenken, dass während dem Testbetrieb arbeiten ausgeführt wurden, die 10-20 maliges Ein- und Aussteigen während eines Arbeitstages erforderten.

Nach Abschluss des Testbetriebs wurden folgende Punkte positiv beurteilt:

- Deutlich angenehmeres Fahrverhalten durch zügiges und gleichmässiges Beschleunigen und Bremsen.
- Bessere Fahrleistung in Steigungen mit Beladung.
- Keine Sorge um Fahrzeugsicherung beim Aussteigen, darum einfacherer Arbeitsablauf.
- Schnellere Einsatzbereitschaft, da das Fahrzeug nach dem initialen Aufstarten am Morgen den ganzen Tag eingeschaltet bleibt und nach dem Einsteigen innert 3 Sekunden losfahren kann. (Beim Dieselfahrzeug dauert es mit Starten des Systems, Vorglühen etc. bis zu 30 Sekunden bis die Fahrbereitschaft erreicht ist, darum wird der Motor manchmal laufen gelassen.)
- Der dritte Sitzplatz ermöglichte eine flexiblere Einsatzplanung.

Folgende Punkte wurden negativ beurteilt:

- Batterielaufzeit
- Unerwartet laute Fahrgeräusche für ein Elektrofahrzeug
- Gewöhnungsbedürftige Kennlinie des Gaspedals





4.7 Gesamtumfang des Testbetriebs

Die Tabelle unten stellt den gesamten Umfang des Testbetriebs im Zuge des EMKL Projekts dar. Sie bietet einen Anhaltspunkt über die Aussagekräftigkeit der Testfahrten. Daten zum Energieverbrauch und zur Leistungsfähigkeit konnten exakt ermittelt werden. Aussagen zur langfristigen Funktion und dem Wartungsaufwand können jedoch noch nicht gemacht werden.

Messdaten über alle Anwendungen (Seit Erhalt der Strassenzulassung Februar 2023)							
Einsatzzeitraum						16	Monate
Betriebsstunden						669.4	h
Davon Ladezeit						ca. 290	h
Davon Leerlauf/Wartezeit						ca. 270	h
Davon Fahr-/Arbeitszeit						ca. 110	h
Zurückgelegte Kilometer						2936	km
Verbrauchte Energie						2185	kWh
Durchschnittlicher Verbrauch						74.4	kWh/100km
Durchschnittliche Reichweite mit einer Batterieladung						90	km
Durchschnittliche Autonomie						3.5	h
Vergleich zum Dieselfahrzeug VT450 (Erfahrungswerte)							
Eingesparter Dieselmotorkraftstoff						1030	Liter
Eingespartes CO2 mit Schweizer Strommix						2408	kg
Stromverbrauch pro Liter Diesel						2.7	kWh

4.8 Wirtschaftlichkeit

Aus den gesammelten Messdaten lässt sich ein Vergleich zu einem konventionellen Transporter berechnen.

Die Tabelle unten geht davon aus, dass vom Fahrzeug auf dem jetzigen Stand eine Kleinserie von rund 10 Stück gebaut wird. Mit der einzigen Ausnahme, dass die Batterie angepasst wird auf eine sinnvolle Grösse und Belastbarkeit.

Die Entwicklungskosten, die im Zuge des EMKL-Projekts angefallen sind werden in dieser Berechnung nicht über den Verkaufspreis amortisiert. Zukünftige Preissenkungen bei Komponenten und der technologische Fortschritt werden ebenfalls nicht berücksichtigt.



Vergleich Investitions- und Betriebskosten "Terren" vs. Konventioneller Transporter						
Zugrunde gelegtes Szenario:						
Produktion Kleinserie ca. 10 Stück/Jahr, verbesserte Batterie mit 140 kWh						
Strompreis: 0.30/kWh						
Dieselpreis inkl. AdBlue: 2.-/Liter						
Verbrauch Terren: 2.7kWh/Liter Diesel						
Erfahrungswerte von anderen elektrischen Nutzfahrzeugen: 30% weniger Wartungsaufwand						
Schweizer Strommix 0.128kg CO2/kWh						
Ohne Berücksichtigung der grauen Energie aus der Fahrzeugherstellung						
Anschaffungskosten		Terren		Konventioneller Transporter		
Batterie		80'000.00				
Motoren/Inverter		12'000.00				
Kabel/Steuergerät		7'000.00				
Strukturelle Anpassungen		5'000.00				
Mehraufwand Montage		15'000.00				
Deckungsbeitrag Elektrifizierung 30%		35'700.00				
Basisfahrzeug		180'000.00				
Minderpreis Verbrennungsmotor/Peripherie		- 12'000.00				
Totaler Anschaffungspreis		322'700.00	CHF	180'000.00	CHF	
Restwertfaktor		0.25		0.25		
Nutzungsdauer Zeit		15 Jahre		15 Jahre		
Nutzungsdauer Arbeit		10000 Stunden		10000 Stunden		
Fixe Kosten jährlich						
Abschreibung/Jahr		16'135.00	CHF	9'000.00	CHF	
Kapitalkosten		3'630.00	CHF	2'020.00	CHF	
Vers./Steuern		720.00	CHF	720.00	CHF	
Gebäude		1'065.00	CHF	1'065.00	CHF	
Total		21'550.00	CHF	12'805.00	CHF	
Variable Kosten pro Arbeitsstunde						
Reparatur/Unterhalt/Wartung		9.00	CHF	12.00	CHF	
Strom/Diesel		6.10	CHF	15.00	CHF	
Total jährliche Betriebskosten						
Landwirtschaftliche Nutzung, jährliche Arbeitsstunden	300	26'080.00	CHF	20'905.00	CHF	
Kommunale Nutzung Jährliche Arbeitsstunden	600	30'610.00	CHF	29'005.00	CHF	
Eingepartetes CO2 (Schweizer Strommix)						
Landwirtschaftliche Nutzung 300h/jährlich		5090	kg	0		
Kommunale Nutzung 600h/jährlich		10190	kg	0		

4.9 Optimierungspotential

Anhand der durchgeführten Testfahrten konnten wir eine konkrete Liste von Verbesserungsmöglichkeiten aufstellen. Gemäss unseren Berechnungen liesse sich damit der Energieverbrauch gegenüber dem Terren nochmals um 20-30% senken. Damit würde eine Reduktion des Primärenergieverbrauchs gegenüber dem Dieselfahrzeug von 80% möglich. Die



Batterieproblematik wird hier nicht näher behandelt, weil es heute bereits Produkte am Markt gibt, die die oben beschriebenen Probleme beheben und auch die Bauraumanforderungen erfüllen.

Hier ist eine nicht abschliessende Auflistung der angedachten Optimierungen:

- Separater Antrieb der Vorder- und Hinterachse. Das jetzige Verteilgetriebe mit einem Eingang für alle vier Räder bringt Verluste von rund 10% mit sich. Die Fahrzeugstruktur würde einen direkten Antrieb der Achsen zulassen, wodurch 2/3 der Zahnradstufen und Lager entfallen würden. Das würde ausserdem die Komplexität, das Gewicht und die Kosten deutlich reduzieren.
- Komplette Trennung des Hydrauliksystems und der Zapfwelle vom Antrieb. So kann die Hydraulikpumpe/Zapfwelle bei Nichtgebrauch komplett ausgeschaltet bleiben. Entsprechende Hochvolt PTO existieren bereits auf dem Markt und könnten eingebaut werden.
- Separater Antrieb der Brems- und Lenkkraftunterstützung. Die entsprechenden pumpen sind derzeit an den Fahrtrieb gekoppelt und drehen meistens in suboptimalen Drehzahlen. Es sind bereits Entsprechende elektrische Systeme am Markt verfügbar.
- Nutzung der Abwärme von Motoren und Batterie um heizen der Kabine. Die Abwärme wird zurzeit in die Umwelt entlassen.

5 Schlussfolgerungen und Fazit

Es konnte bewiesen werden, dass das im Verlauf des Projekts EMKL gebaute Prototypenfahrzeug Terren, die meisten Anforderungen an ein Mehrzwecktransportfahrzeug gleichwertig oder besser erfüllen kann als das Dieselfahrzeug. Das angenehme Fahrverhalten, die bessere Fahrleistung und der mögliche dritte Sitzplatz wurde von der Zielgruppe sehr positiv aufgenommen.

Einzig die verbaute Batterie hindert es daran, sofort in den regulären Arbeitsbetrieb überzugehen. Sie hat eine nutzbare Kapazität von 67 kWh, was einem Mittelklasse Elektro PKW entspricht, ist passiv gekühlt und nicht Schnelladefähig. Sie überhitzte bei Leistungsintensiven arbeiten schnell und kühlte nur sehr langsam ab. Auf das Testen weiterer Arbeiten mit hohem Leistungsbedarf wurde deshalb verzichtet.

Mit dem jetzigen Stand des Antriebssystems wäre eine nutzbare Batteriekapazität von rund 180 kWh erforderlich, um die Anforderungen aller Nutzer zu erfüllen. Dies entspräche einer installierten Kapazität von rund 210 kWh.

Im Falle der 4.9 besprochenen Optimierung wäre eine nutzbare Kapazität von rund 140 kWh ausreichend. Zudem ist ein aktives Temperaturmanagement, sowie die Schnelladefähigkeit Pflicht.

Auch mit dieser erweiterten Batteriekapazität wäre bei rund 5% aller Tageseinsätze eine 20-minütige Schnellladung nötig um die Arbeiten abzuschliessen.

Im Verlauf des Projektes EMKL konnte bewiesen werden, dass die Elektrifizierung von Mehrzwecktransportfahrzeugen bereits im Prototypenstadium eine Energieeinsparung von über 70% gegenüber dem Dieselfahrzeug bietet. Es konnten diverse Massnahmen identifiziert werden, um die Effizienz noch einmal deutlich zu steigern.

Es wurde bewiesen, dass die Umsetzung technisch machbar ist und dass die Akzeptanz durch die Endanwender gegeben ist.

Die Gemeinde Buchs hat sich bereit erklärt weitere Tests mit dem Elektrofahrzeug durchzuführen und hat auf Grund der Erfahrungen bereits die Anschaffung eines neuen Dieselfahrzeugs um ein Jahr zurückgestellt.



Wir empfehlen daher den Bau eines weiteren Prototyps unter Berücksichtigung aller in diesem Bericht gewonnenen Erkenntnisse, sowie im Hinblick auf eine anschliessende Serienfertigung.

6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Kosten des Elektrofahrzeugs sind zum heutigen Zeitpunkt rund doppelt so hoch wie beim konventionellen. Bei Betrachtung der Total cost of ownership mit einer typischen Nutzungsdauer von 13 Jahren, rechnet es sich nur bei Betrieben mit sehr vielen jährlichen Arbeitsstunden (>1000/Jahr). Es gibt nur eine Handvoll Schweizer Betriebe, die diese Auslastung erreichen. Eine Serienfertigung des Fahrzeugs mit dem jetzigen technischen Stand ist deshalb nicht sinnvoll.

Durch Optimierung des Fertigungsprozesses und stark sinkende Batteriepreise kann jedoch mit einer Reduktion des Preisaufschlags auf rund 20% gegenüber dem Dieselfahrzeug innert 5 Jahren gerechnet werden. Zusammen mit dem Optimierungspotential aus 4.9, bewegen sich die nötigen jährlichen Betriebsstunden für ein Break-even in Richtung 400 h. Damit würden mehrere hundert Betriebe in den Bereich rücken, wo der Kauf eines Elektrofahrzeugs wirtschaftlich ist.

Im Zuge des Projekts Peak Evolution konnten ausserdem Kontakte in den Bereich Bergbau und Tunnelbau geknüpft werden. Auf Grund der sehr hohen Auslastung der Fahrzeuge in diesen Branchen und weiteren Anreizen, wie reduzierter Wärmeeintrag und Schadstoffe untertage, schreitet die Elektrifizierung dort schneller voran.

Auf Grund der Leistungsfähigkeit besteht ein beachtliches Marktpotential für einen elektrischen Mehrzwecktransporter im Untertagebau.

Der Zeitpunkt für die Entwicklung eines Serienfahrzeugs ist jetzt ideal. Vom jetzigen Stand werden rund drei Jahre für die Entwicklung und Aufbau einer Serienfertigung benötigt. Ab dann wird das Kundensegment ausreichend gross sein, um sinnvolle Absatzzahlen zu erreichen.

DDP Innovation wird sich daher weiterhin für den Bau eines elektrischen Mehrzwecktransporters einsetzen.

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Der Bau des Fahrzeugs erforderte eine intensive Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Partnern. Folgend aufgelistet sind die wichtigsten:

VDS Getriebe GmbH, Österreich: VDS hat das, von DDP Innovation geplante, Adaptergetriebe konstruiert und gebaut. Die Montage erfolgte vor Ort in Österreich. Die Getriebesoftware wurde ebenfalls von VDS geschrieben und in Zusammenarbeit mit DDP Innovation in ausgiebigen Testfahrten optimiert. VDS hat auch die Anpassungen der Fahrzeugsoftware vorgenommen um den fehlenden Dieselmotor zu imitieren und die entsprechenden Fehlermeldungen zu unterdrücken.

Motics GmbH, Brunnen SZ: Motics hat die Integration von Batterie, Ladegerät, Inverter und Motoren übernommen und die Schnittstelle zur Fahrzeugsoftware geschaffen. Dabei wurden alle Sicherheitsmassnahmen für Hochvoltsysteme umgesetzt, um die Bedingungen für die Verkehrssicherheit zu erfüllen.



Ecocoach AG, Brunnen SZ: Ecocoach ist der Hersteller der Traktionsbatteriemodule und hat ebenfalls die Programmierung des Batteriemanagement Systems übernommen und damit die Schnittstelle zur Antriebssoftware bereitgestellt.

BOSCH Engineering AG, Deutschland: BOSCH Engineering lieferte Motoren und Inverter und umfangreichen technischen Support bei der Inbetriebnahme des elektrischen Antriebssystems.

8 Literaturverzeichnis

Prüfbericht VT450: <https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/6308.pdf>

Maschinenkosten Agroscope:

<https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/wirtschaftstechnik/betriebswirtschaft/kostenkatalog.html>