



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 1. November 2024

Vollelektrischer Einachsgeräteträger

Elektro-Einachser





novaziun'

Datum: 0111.2024

Ort: Rueun

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

novaziun AG
Pellas 222A, 7144 Vella
www.novaziun.com

Autor/in:

Dominik Bär, novaziun AG, dominik.baer@novaziun.com
Daniel Vincenz, novaziun AG, daniel.vincenz@novaziun.com

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502243-01

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



Zusammenfassung

Nachhaltige und emissionsfreie Einachsgeräteträger können in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt werden. Damit diese jedoch wirtschaftlich und sinnvoll eingesetzt werden können, müssen sowohl Laufzeit als auch die Anschaffungskosten stimmen. Ziel ist es, durch eine von Grund auf neu entwickelte Maschine, die Effizienz so weit zu steigern, dass viele Arbeiten mit der batteriebetriebenen Maschine erledigt werden können. Dabei liegt der Fokus auf der effizienten Ansteuerung der Elektromotoren und dem Verzicht der Hydraulik. Die Batterien bilden dabei das Herzstück und werden schwerpunktoptimiert in die Maschine integriert. Die Maschine besitzt drei separate Antriebe. Pro Rad ist jeweils ein Elektromotor mit einem Getriebe verbaut und für die Anbaugeräte ein weiterer Elektromotor. Dieses Antriebskonzept ermöglicht einen sehr effizienten Betrieb, da das Anbaugerät mit der optimalen Drehzahl betrieben wird und nicht direkt abhängig ist von der Fahrgeschwindigkeit. Weiter bietet dieses Konzept die Möglichkeit Steuerungstechnisch neue Features zu implementieren, wie zum Beispiel das Wenden auf der Stelle, automatisches Abschalten des Anbaugeräts während dem Zurückfahren oder auch das Rückwärtsdrehen der Schneefräse, wenn diese verstopft ist. Zudem verfügt sie über eine Universalschnittstelle für bestehende Anbaugeräte verschiedener Hersteller.

Im Rahmen dieses Projektes sind drei Prototypen erfolgreich entwickelt, aufgebaut und getestet worden. Diverse Feldtests haben die Tauglichkeit in verschiedensten Einsatzbereichen bewiesen. Die Rückmeldungen von Fachpersonen sind sehr positiv und bestätigen die Konkurrenzfähigkeit mit vergleichbaren Einachsgeräteträgern anderer Hersteller. Die Anschaffungskosten sind zwar höher als bei der Konkurrenz, aber die geringeren Wartungskosten und der tiefere Ressourcenverbrauch dank gesteigerter Effizienz, machen die Maschine auch wirtschaftlich Konkurrenzfähig.

Vergleichsmessungen bezüglich Verbrauch, Lärm und Vibrationen zwischen der neu entwickelten Maschine mit einzelnen Elektroantrieben (monotrac), einem konventionellen Einachser mit Verbrennungsmotor (Verbrenner) und einem Einachser mit elektrohydraulischem Antrieb (ePowerUnit) haben folgende Ergebnisse über verschiedene Einsätze gezeigt:

Reduktion des Energieverbrauchs:

- ePowerUnit gegenüber Verbrenner → ~81-84%
- Monotrac gegenüber ePowerUnit → ~17-20%
- Monotrac gegenüber Verbrenner → ~84-87%

Damit können mit einer Maschine Jährlich bis zu 2.7 Tonnen CO₂ pro Jahr eingespart werden.

Bei den Vibrations- und Schallpegelbelastung ist der Einfluss der Anbaugeräte deutlich zu erkennen. Die neu entwickelte Maschine zeigt eine Reduktion der Vibrationsbelastung für den Bediener von durchschnittlich mehr als Faktor drei. Bei der Lärmbelastung ist eine Reduktion von 8 dBa gegenüber dem Verbrenner gemessen worden. Was ein Arbeiten ohne Gehörschutz ermöglicht.

Ein vollelektrischer Einachsgeräteträger ist ökologisch und kommerziell sinnvoll, wenn er mehr als 150 Stunden pro Jahr im Einsatz ist. Um viele Anwendungen abzudecken ist es wichtig, dass auch Anbaugeräte für den Kommunalbereich gut abgestimmt und effizient betrieben werden können.

Es wird aktuell bereits, basierend auf den gesammelten Erkenntnissen der Prototypen, an einer überarbeiteten Version gearbeitet. Auch laufen Vorbereitungen für die Serienfertigung, welche noch im Jahr 2024 mit einer ersten Kleinserie anlaufen wird.



Résumé

Les porte-outils monoroues durables et sans émissions peuvent être utilisés dans une grande variété de domaines. Cependant, pour que ceux-ci puissent être utilisés de manière économique et judicieuse, la durée de fonctionnement ainsi que les coûts d'acquisition doivent être adéquats. L'objectif est d'augmenter l'efficacité à un tel point que de nombreuses tâches puissent être accomplies avec la machine alimentée par batterie grâce à une conception entièrement nouvelle. L'accent est mis sur le contrôle efficace des moteurs électriques et l'élimination de l'hydraulique. Les batteries constituent le cœur de la machine et sont intégrées de manière optimale dans la machine en se concentrant sur la répartition du poids. La machine dispose de trois lecteurs distincts. Il y a un moteur électrique avec une boîte de vitesses installée sur chaque roue et un autre moteur électrique pour les accessoires. Ce concept d'entraînement permet un fonctionnement très efficace car l'accessoire fonctionne à la vitesse optimale et ne dépend pas directement de la vitesse de déplacement. Ce concept offre également la possibilité d'implémenter de nouvelles fonctionnalités en termes de technologie de contrôle, comme tourner sur place, éteindre automatiquement l'outil en marche arrière ou faire reculer la fraise à neige si elle est bloquée. De plus, elle dispose d'une interface universelle pour les accessoires existants de différents fabricants.

Dans le cadre de ce projet, trois prototypes ont été développés, construits et testés avec succès. Divers tests sur le terrain ont prouvé leur aptitude dans différents domaines d'application. Les retours des experts sont très positifs et confirment leur compétitivité par rapport à des porte-outils monoroues comparables d'autres fabricants. Bien que les coûts d'acquisition soient plus élevés que ceux de la concurrence, les coûts de maintenance inférieurs et la réduction de la consommation de ressources grâce à l'efficacité accrue rendent la machine également compétitive sur le plan économique.

Des mesures comparatives concernant la consommation, le bruit et les vibrations entre la nouvelle machine à entraînement électrique individuel (monotrac), un tracteur à un essieu conventionnel avec moteur à combustion interne (brûleur) et un tracteur à un essieu à entraînement électro-hydraulique (ePowerUnit) ont été effectuées. a montré les résultats suivants dans différentes applications :

Réduction de la consommation d'énergie :

- ePowerUnit versus moteur à combustion → ~81-84 %
- Monotrac versus ePowerUnit → ~17-20 %
- Monotrac versus moteur à combustion → ~84-87 %

Cela signifie qu'une machine peut économiser jusqu'à 2,7 tonnes de CO₂ par an.

L'influence des accessoires est clairement visible en ce qui concerne les niveaux de vibrations et de bruit. La machine nouvellement développée présente une réduction des contraintes vibratoires pour l'opérateur d'un facteur moyen de plus de trois. Une réduction des nuisances sonores de 8dBa par rapport au moteur thermique a été mesurée. Ce qui permet de travailler sans protection auditive.

Un porte-outils à un essieu entièrement électrique est écologique et commercial s'il est utilisé plus de 150 heures par an. Afin de couvrir de nombreuses applications, il est important que les attachements destinés au secteur municipal puissent également être bien coordonnés et exploités efficacement.

Sur la base des connaissances acquises grâce aux prototypes, une version révisée est déjà en cours de développement. Les préparatifs pour la production en série sont également en cours, avec un démarrage prévu d'une première petite série en 2024.



Summary

Sustainable and emission-free single-axle tool carriers can be used in a wide range of applications. However, for these to be used economically and sensibly, both runtime and acquisition costs must be appropriate. The goal is to increase efficiency to such an extent that many tasks can be performed with the battery-powered machine through a completely new design. The focus is on the efficient control of the electric motors and the elimination of hydraulics. The batteries are the heart of the machine and are optimally integrated into the machine with a focus on weight distribution. The machine has three separate drives. An electric motor with a gearbox is installed for each wheel and another electric motor for the attachments. This drive concept enables very efficient operation, as the attachment is operated at the optimal speed and is not directly dependent on the driving speed. This concept also offers the possibility of implementing new control features, such as turning on the spot, automatically switching off the attachment when reversing or even reversing the snow blower when it is clogged. Additionally, it features a universal interface for existing attachments from various manufacturers.

As part of this project, three prototypes have been successfully developed, built, and tested. Various field tests have proven their suitability in different areas of application. Feedback from experts has been very positive, confirming their competitiveness with comparable single-axle tool carriers from other manufacturers. Although the acquisition costs are higher than those of the competition, the lower maintenance costs and reduced resource consumption due to increased efficiency make the machine economically competitive as well.

Comparative measurements regarding consumption, noise and vibrations between the newly developed machine with individual electric drives (monotrac), a conventional single-axle vehicle with a combustion engine (combustion engine) and a single-axle vehicle with an electro-hydraulic drive (ePowerUnit) have shown the following results across various applications:

Reduction in energy consumption:

- ePowerUnit compared to combustion engine → ~81-84%
- Monotrac compared to ePowerUnit → ~17-20%
- Monotrac compared to combustion engine → ~84-87%

This means that up to 2.7 tonnes of CO₂ can be saved per year with one machine.

The influence of the attachments is clearly visible in the vibration and noise levels. The newly developed machine shows a reduction in the vibration load for the operator of an average of more than a factor of three. A reduction of 8dBa in noise load compared to the combustion engine was measured. This makes it possible to work without hearing protection.

A fully electric single-axle implement carrier makes ecological and commercial sense if it is used for more than 150 hours per year. In order to cover many applications, it is important that attachments for the municipal sector can also be well coordinated and operated efficiently.

Based on the insights gained from the prototypes, work is already underway on a revised version. Preparations for series production are also in progress, with an initial small series set to begin in 2024.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	4
Summary	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	9
1.2 Motivation des Projektes	11
1.3 Projektziele	11
2 Anlagenbeschrieb	13
2.1 Funktionsschema	13
2.2 Grundmaschine	14
2.2.1 Chassis	14
2.2.2 Radmotoren	15
2.2.3 Holmen	16
2.2.4 ePTO	17
2.2.5 Verschalung.....	17
2.2.6 Elektronik	18
2.3 Anbaugeräte / Einsatzgebiete	19
2.4 Technische Spezifikationen.....	21
3 Vorgehen und Methode.....	22
4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	25
4.1 Aufbau Prototypen.....	29
4.2 Überarbeitung Holmen	31
4.2.1 Rückblick	31
4.2.2 Holmen 2.0	31
4.3 Feldtests	33
4.3.1 Fahrverhalten.....	33
4.3.2 Spezifikation der Monotracs	34
4.4 Vergleichsmessungen	36
4.4.1 Mähen.....	37
4.4.2 Mulchen	39
4.4.3 Schneefräsen.....	40
4.4.4 Fahren	41
4.5 Auswertung der Vergleichsmessungen	42
4.5.1 Vibrations- & Schallpegelmessungen.....	42
4.5.2 Verbrauchsmessungen.....	43



4.5.3	Nutzerrückmeldung	45
4.6	Energiespeichersystem	46
4.7	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	47
4.7.1	Beispielrechnung Landwirtschaftsbetrieb.....	47
4.7.2	Beispielrechnung Kommunalbetrieb.....	49
5	Schlussfolgerungen	51
5.1	Wirtschaftlichkeit.....	51
5.2	Erreichung der gesteckten Ziele.....	52
6	Weiteres Vorgehen	54
6.1	Entwicklung.....	54
6.2	Vermarktung	54
7	Nationale und internationale Zusammenarbeit	56
8	Kommunikation	57
9	Abbildungsverzeichnis	58
10	Verweise	59



Abkürzungsverzeichnis

ePTO	electric Power takeoff
mPTO	mechanical Power takeoff
PDU	Power Distribution Unit
VDC	Volts of Direct Current
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
CAN	Controller Area Network



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Einachsgeräteträger sind Universalmaschinen mit einem breiten Anwendungsspektrum. Sie kommen in der Landwirtschaft, bei Gemeindebetrieben, Baustellen, Freizeitanlagen wie Golf- und Skigebieten zum Einsatz. Sie sind eine Art «Schweizer Taschenmesser» mit Motor, heute vorwiegend Benzinmotoren.



Abbildung 1: Aebi

Quelle: <https://www.aebi-schmidt.com/de/produkte-loesungen/mehr/#aebi-combicut-anbauger%C3%A4te>

Die Anbaugeräte, welche an den Einachsgeräteträgern angebaut werden können, sind sehr vielfältig. Diese reichen vom Messerbalken für die Landwirtschaft über Bodenbearbeitungsgeräte bis hin zu Schneefräsen für den Winterdienst. Die folgende Grafik zeigt einen Ausschnitt von unterschiedlichen Anbaugeräten.

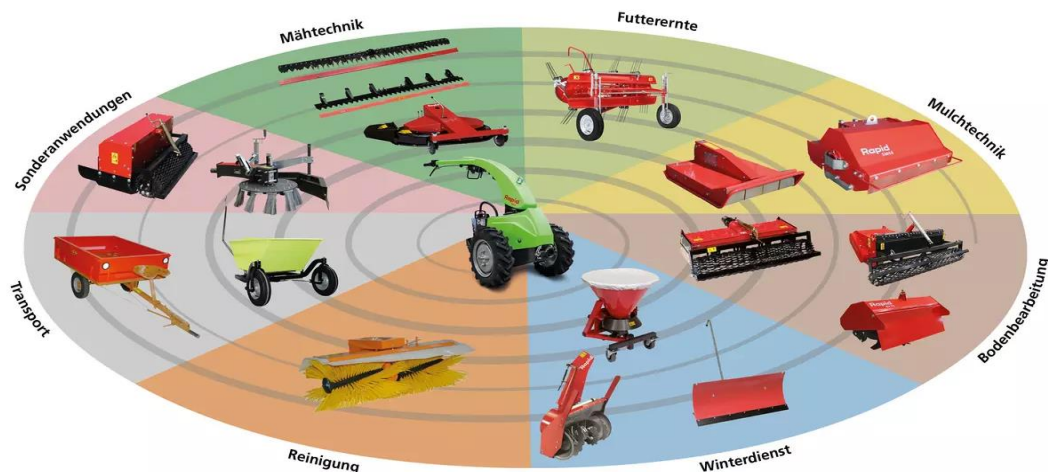


Abbildung 2: Anbaugeräte Rapid

Quelle: <https://www.rapid.ch/de/rapid-uri>

Der heutige Antrieb dieser Maschinen beruht meistens auf Benzinmotoren im Bereich von 5-15kW. Dabei wird der Antrieb der Räder hydraulisch gelöst und die Benzinmotoren laufen auf eine fix eingestellte Drehzahl. Durch die Hydraulik wird ein stufenloser Fahrtrieb umgesetzt, was eine komfortable Bedienung der Einachser zulässt. Die hohe Menge an Öl, die dabei umgewälzt werden



muss, führt dazu, dass die Geräte ineffizient sind. Zudem birgt das Öl sowie das Benzin stets ein lokales Risiko für die Gewässer und Felder.

Der eingebaute Benzinmotor verursacht viel Lärm und grosse Vibrationen, welche für den Bediener/in unangenehm sind und ein gesundheitliches Risiko mit sich bringen. Durch den Aufbau mit dem Anbaugerät vorne, läuft der Bediener/in hinter dem Gerät her und atmet somit die ganze Zeit Abgase ein.

Es gibt bereits einige elektrische Einachsgeräteträger auf dem Markt. Diese werden hier beschrieben:

Die OC Engineers GmbH setzt sich aktuell mit der Umrüstung von Einachsgeräteträgern und Motorgeräten auseinander. Dabei wird der Benzinmotor durch einen Elektromotor ersetzt. Weiter wird eine Batterie fix auf der Maschine verbaut. Die Räder und Anbaugeräte werden weiterhin hydraulisch angetrieben. Die Leistung des Umrüstkits «e Power Unit» beträgt 10kW mit einer Batteriekapazität von maximal 15kWh.

Der Rapid URI E041 ist ebenfalls ein vollelektrischer Einachsgeräteträger mit einer Leistung von maximal 4.2kW. Die Batterie hat dabei eine Kapazität von 2.9kWh und kann gewechselt werden. Dieses Gerät ist sehr einfach aufgebaut, besitzt keine aktive Lenkung, sondern nur eine lösbare Differenzialsperre zum Lenken. Grössere Anbaugeräte können somit nicht betrieben werden, da die Maschine dann nur unter hohem Kraftaufwand gelenkt werden könnte.

Die Firma Köppl bietet auch eine elektrische Variante seiner Maschinen an. Diese Maschine hat eine Spitzenleistung von 7.3kW und die grösste Batterie hat eine Kapazität von rund 10kWh. Hier wurde, ganz ähnlich wie beim der «e Power Unit» der Benzinmotor durch eine elektrische Antriebseinheit ersetzt. Der restliche Antriebsstrang des Einachsers ist nach wie vor hydraulisch umgesetzt.

Der AMEA ist ein autonomer, elektrischer Mähroboter welcher an der OST für Forschungszwecke entwickelt wird.

Diese Übersicht zeigt, dass die Elektrifizierung von kleinen Einachsgeräteträgern bis ca. 7kW Leistung und 10kWh Batteriekapazität bereits im Gange ist und eine Nachfrage besteht.

Im Bereich von 10-15 kW gibt es nur Ansätze, jedoch bis heute keine zufriedenstellende batteriebetriebene Lösung.

Besonders für bestehende Produzenten von Einachsern ist das elektrisch-hydraulische Antriebskonzept eine naheliegende Lösung, da eine bestehende Maschine relativ einfach auf den elektrischen Antrieb angepasst werden kann. Der Entwicklungsaufwand ist damit deutlich geringer. Betrachtet man den Wirkungsgrad, macht das elektrisch-hydraulische Antriebskonzept jedoch wenig Sinn. Die mechanische Energie des Elektromotors wird dabei in hydraulische Energie und beim Hydraulikmotor dann wiederum in mechanische Energie umgewandelt. Diese Umwandlungen bringen immer gewisse Verluste mit sich.

Der Grund dafür, dass es noch keine zufriedenstellende Batteriebetriebene Lösung im Bereich von 10-15 kW gibt, liegt vermutlich bei dem oben genannten grösseren Entwicklungsaufwand. Bei einer batteriebetriebenen Maschine in dieser Leistungsklasse stösst das elektrisch-hydraulische Konzept an seine Grenzen. Der Bauraum des zwischengeschalteten Hydrauliksystems wird für mehr Batteriekapazität benötigt. Man kommt bei dieser Leistungsklasse an einen Punkt, wo es mehr Sinn macht die Maschine von Grund auf neu zu entwickeln und mit dem direkten elektrischen Antrieb auszustatten.



1.2 Motivation des Projektes

Unser Ziel ist es einen von Grund auf elektrischen Einachsgeräteträger im Bereich von 10-15kW zu entwickeln und auf den Markt zu bringen. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, gibt es in diesem Bereich noch keine zufriedenstellende Lösung und diese Lücke möchten wir füllen. Dabei wird der Ansatz eines Neuentwickelten Einachsgeräteträgers mit direktem elektrischen Antrieb verfolgt. Dies bringt mehrere Vorteile mit sich:

- Vorteile eines elektrischen gegenüber eines thermischen Antriebes
 - Antrieb stösst kein CO₂ aus im Betrieb.
 - Lärmbelastung für Bediener/In und die Umwelt wird gesenkt
 - Wartungsaufwand ist geringer
- Vorteile einer Neuentwicklung gegenüber einer Umrüstung
 - Die Maschine kann optimal an das neue direkte elektrische Antriebskonzept angepasst werden
 - Mehr Anwendungsbereiche sollen mit der neuentwickelten Maschine abgedeckt werden können, was den Kundennutzen steigert
- Vorteile eines elektrischen gegenüber eines elektrisch-hydraulischen Antriebes
 - Der Gesamtwirkungsgrad wird gesteigert
 - Gewichtseinsparung, da ein Teil des Antriebes weggelassen werden kann
 - Wartungsarmer

Weiter entstehen neue Anwendungsfelder durch die Lärmreduktion. Dabei denken wir an Nachteinsätze in touristischen Regionen (beispielsweise leise Schneeräumung oder nächtliche Reinigung von Terrassen in der Nähe einer Hotelanlage).

Im Bereich Landwirtschaft soll untersucht werden, welche Feldflächen mit einer Akkuladung bearbeitet werden können. Dabei ist anzustreben mit dem Elektro-Einachser kleinere Traktoren zu substituieren. Was für weniger Bodendruck und Bodenverdichtung sorgt und wiederum positive Effekte auf die CO₂ Bilanz hat.

1.3 Projektziele

Klimaschutz Ziel: **CO₂ Reduktion** (weniger Abgasemissionen)

- Wie viel CO₂ kann durch den Elektro-Einachser gegenüber einem konventionellen Einachser eingespart werden?
- Wie viel CO₂ kann durch den Elektro-Einachser gegenüber einem konventionellen Kleintraktor oder Geräteträger eingespart werden?
 - Vergleichsmessung der Arbeitsleistung (Mähen von 1 Hektar Wiese mit gleichem Anbaugerät und gleichen Umweltbedingungen)

Im Durchschnitt wird ein Einachsgeräteträger während 150 Tagen im Jahr eingesetzt und verbraucht dabei 5 Liter Benzin pro Tag. Dies entspricht einer Einsparung von 750 Liter Benzin, oder 1,7 Tonnen CO₂ pro Jahr. Als Grundlage wurde ein Wert von 2,34 kg CO₂ pro Liter Benzin verwendet. (1)



Technisches Ziel: **rein elektrischer Antriebsstrang** (keine hydraulischen Antriebe)

- Können alle benötigten Funktionen, rotativ wie linear mit elektrischen Aktuatoren und Motoren umgesetzt werden? (Ziel: Verzicht auf die Hydraulik)
- Alle gängigen Anbaugeräte für die Grössenklasse können mit dem elektrischen Einachsgeräteträger betrieben werden.

Kommerzielles Ziel: **Steigerung der Energieeffizienz**

- Um wie viel kann die Energieeffizienz eines rein elektrischen Antriebs gegenüber einem elektrisch-hydraulischen Antrieb gesteigert werden?
 - Vergleichsmessung der Arbeitsleistung vom Elektro-Einachser mit der «e Power Unit» an einem konventionellen Einachser (Bsp. Aebi CC56) gegenüber der vollelektrischen Variante.
- Welche Kosteneinsparungen werden dadurch erreicht?
 - Vom obigen Vergleich kann abgeleitet werden, wie effizient der rein elektrische Antrieb ist und wie viel Batteriekapazität eingespart werden kann, um die gleiche Arbeitsleistung zu verrichten.
- Was sind sinnvolle Batteriekapazitäten, um verschiedene Einsätze abdecken zu können?

Gesundheit: **Komfortsteigerung für den Bediener/in**

- Vibrationsbelastung für den Bediener/in reduzieren (am Holmen)
 - Vergleichsmessung mittels Beschleunigungssensor am Holmen.
 - Vergleich zu einem konventionellen Einachser (Bsp. Aebi CC56)
- Lärmemissionen für den Bediener/in reduzieren; im Bereich des Bedieners / im Umfeld
 - Vergleichsmessung mittels Schallpegelmessung im Bereich des Bedieners / im Umfeld
 - Vergleich zu einem konventionellen Einachser (Bsp. Aebi CC56)

Wir erwarten eine deutliche Reduktion der Vibrations- und Lärmbelastung für den Bediener/in.



2 Anlagenbeschreibung

2.1 Funktionsschema

Bei dem Antriebskonzept, wurde auf Direktantriebe gesetzt. So besitzen beide Räder je einen eigenen direkten Antrieb, sowie das Anbaugerät ebenfalls über einen direkten Antrieb verfügt. Für den Antrieb des Anbaugerätes wird es zwei Ausführungen geben – ein interner Antrieb, integriert in die Grundmaschine und ein externer Antrieb, direkt auf dem Anbaugerät. Damit können ein Grossteil der auf dem Markt erhältlichen Anbaugeräte bedient werden.

Bezeichnung der Schnittstellen:

- Schnittstelle mit internem Antrieb → mPTO
- Schnittstelle mit externem Antrieb → ePTO

Beide Schnittstellenoptionen sind mit derselben Grundmaschine kompatibel und können je nach Bedarf umgerüstet werden. Die drei Prototypen werden vorerst mit der Schnittstelle ePTO ausgestattet.

Mit dem Direktantriebskonzept werden drei Motoren benötigt, was jedoch den Vorteil mit sich bringt, dass jeder Antrieb passend dimensioniert werden kann. Bei der Dimensionierung des Anbaugeräteantriebes, ist das Anbaugerät mit der höchsten erforderlichen Leistung als Massstab gewählt worden. Dies geschah in Absprache mit verschiedenen Herstellern von Anbaugeräten.

Dank der direkten Antriebe kann ein sehr hoher Gesamtwirkungsgrad der Maschine erreicht werden, da es durch die wenigen Energieumwandlungen – es geschieht lediglich eine Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie – nur geringe Verluste gibt.

An allen Motoren ist ein Untersetzungsgetriebe angeflanscht. Dank dieser Getriebe werden die Motoren in ihren effizienten Drehzahlbereichen betrieben und das Drehmoment auf den Rädern bzw. dem Anbaugerät erhöht. Neben dem sehr effizienten Betrieb, ermöglicht dieses Antriebskonzept auch neue Steuerungstechnische Features. So können die zwei Fahrmotoren gegenläufig angesteuert werden, was ein Wenden auf der Stelle ermöglicht oder auch eine Trimmung, welche der Schwerkraft entgegenwirkt, ist umsetzbar. Ein weiterer Pluspunkt ist der schonende Betrieb von Anbaugerät. Durch den eigenen Antrieb, kann die Drehzahl auf jedes Anbaugerät optimal angepasst werden und beim Zurücksetzen beispielsweise abgeschaltet werden. Auch ein Rückwärtsdrehen des Anbaugeräts ist möglich, um beispielsweise Verstopfungen bei einer Schneefräse zu lösen.

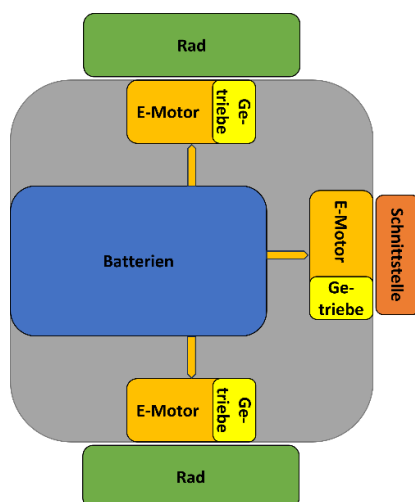


Abbildung 3: Funktionsschema mit mPTO

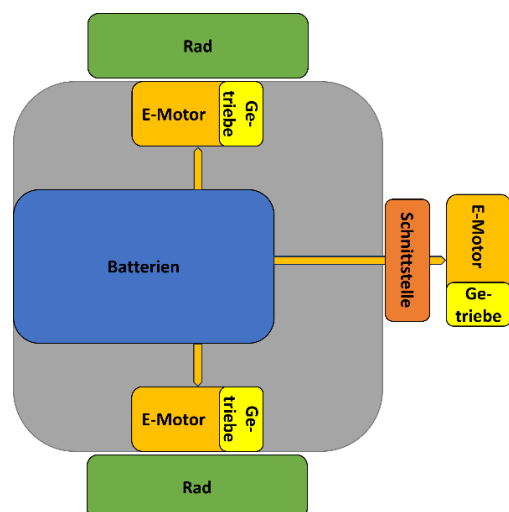


Abbildung 4: Funktionsschema mit ePTO



2.2 Grundmaschine

2.2.1 Chassis



Abbildung 5: Chassis

- Die Grundkonstruktion des Chassis ist eine Blechkonstruktion. Dies hat den Vorteil, dass es kostengünstiger ist in der Fertigung, verglichen mit komplexeren Geometrien, welche gefräst oder gar gegossen werden müssen. Die Anzahl Schweißnähte ist aus Kostengründen und wegen der Festigkeit, ebenfalls auf ein Minimum reduziert worden.
- Das Chassis wurde so konzipiert, dass einzelne Batterien und andere Komponenten, im Wartungsfall schnell ausgetauscht werden können.
- Diverse Aufhäng- und Befestigungspunkte wurden ins Chassis integriert. Eine einfache und schnelle Ladungssicherung beim Transport (z.B. auf dem Anhänger) und ein Anheben für Wartungsarbeiten, sind damit möglich.
- Auf der Rückseite befindet sich ein Ablagefach für oft benötigte Werkzeuge, oder persönliche Gegenstände.
- Bei der Entwicklung wurde die Kabelführung bereits definiert und Befestigungspunkte integriert, um sicherzustellen, dass genügend Platz vorhanden ist.



2.2.2 Radmotoren



Abbildung 6: Radmotoren auf jeder Seite montiert

- Das Gehäuse ist eine Blech- und Schweisskonstruktion. Bewusst wurde auf Lüftungsschlitze für die Motorbelüftung verzichtet, da erwartet wird, dass sich in diesem Bereich Gras um die Motoren wickeln kann. Mit dem Verzicht auf spitze Winkel und scharfe Kanten, soll dies verhindert werden.
- Die Motoren sind 48VDC und haben 3kW Dauerleistung. Pro Rad ist ein Motor verbaut, womit eine Antriebsleistung von ~6kW erreicht wird. Die Motoren kommen mit einem angebaute Getriebe mit einer grossen Untersetzung, was ein sehr hohes maximales Drehmoment ergibt.
- Bei einer allfälligen Veränderung der Gewichtsverteilung, können die Radmotoren in verschiedenen Positionen montiert werden. Dabei bewegt sich der Radmotor näher zum Anbaugerät, oder weiter nach hinten. Dies kann bei gewissen Anbaugeräten die Handhabung der Maschine erleichtern.
- Schutzbleche schützen die Kabel vor Abnutzung, vom Motor bis zum Inverter.



2.2.3 Holmen

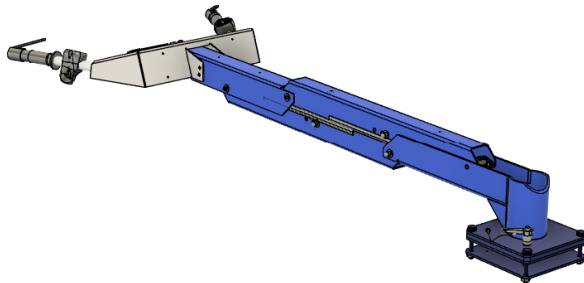


Abbildung 7: Holmen ausgefahren

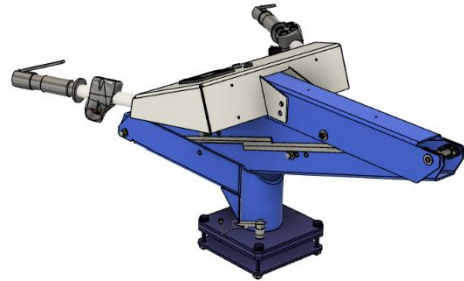


Abbildung 8: Holmen eingefahren

- Damit eine Höhenverstellung und das einklappen zu der Mitfahrposition möglich ist, wurde ein Parallelogramm-Mechanismus realisiert.
- Ebenfalls kann der Holmen in beide Richtungen gedreht werden und dabei in mehreren Positionen eingerastet werden. Dies ist beim Arbeiten im steilen Gelände hilfreich.
- Erreichbare Holmenstellungen
 - Arbeitsstellung ausgefahren
 - In dieser Stellung befindet sich der Bediener/in gehend hinter der Maschine. Der Hebelarm ist dabei am grössten und ermöglicht das Anheben von Anbaugeräten
 - Mitfahr-Stellung
 - Wenn der Holmen ganz eingefahren wird, kann der Bediener/in auf dem optionalen Trittbrett mitfahren. Dabei gleicht diese Holmenstellung die Höhendifferenz des Trittbretts aus.
 - Transportstellung
 - Die Kombination, Holmen komplett eingefahren und zusätzlich zur Seite geschwenkt, eignet sich besonders gut für den Transport, da so der Holmen auf keiner Seite über die Maschine ragt.
 - Stellung für Bodenfräse
 - Arbeitet man mit einer Bodenfräse, so muss der Holmen um 180° gedreht werden, damit man hinter der Bodenfräse her gehen kann. Der Sicherheitsabstand von 600mm gemäss EN12733 ist dabei gewährleistet.
- Das Bedienelement kann in verschiedenen Neigungspositionen montiert werden, um sich optimal an die Bedürfnisse der Bediener/innen anzupassen.
- Beide Handgriffe besitzen einen Totmann-Schalter. Dies ermöglicht eine Einhandbedienung, sprich eine Hand kann jeweils während der Fahrt vom Griff gelöst werden.
- Bedienelemente und Handgriffwinkel wurden ergonomisch gestaltet und so angeordnet, dass die während der Arbeit relevanten Eingaben, mit dem Daumen getätigt werden können.



2.2.4 ePTO



Abbildung 9: ePTO

- Bei der Schnittstelle zu einem Anbaugerät mit externem elektrischem Antrieb, wurde eine Zusammenarbeit mit der Firma Beat Walser GmbH und deren Produkt Bewaloc aufgebaut.
- Mechanisch wurde ein Kippen des Anbaugeräts ermöglicht, um Geländeunebenheiten auszugleichen.

2.2.5 Verschalung



Abbildung 10: Verschalung

- Die Verschalung hat die Funktion, die darunter liegenden elektronischen Bauteile zu schützen und die Maschine optisch aufzuwerten.
- Wird die Verschalung entfernt, sind die elektronischen Komponenten frei und leicht zugänglich.
- Um die Sicherheit bei Wartungsarbeiten zu erhöhen, ist die PDU mit einer separaten Abdeckung versehen. Die 48VDC Anschlüsse liegen damit beim Entfernen der Hauptverschalung nicht direkt frei.
- Die Stecker für den Anschluss eines Anbaugerätes liegen leicht zugänglich auf der vorderen Seite.



2.2.6 Elektronik



Abbildung 11: Elektronik

- Es können mehrere Batterien mit einer Gesamtkapazität von bis zu 24kWh verbaut werden.
- Die restlichen Komponenten sind im oberen Bereich der Maschine, verteilt um die Batterien, angebracht. Dies ermöglicht eine einfache und kurze Kabelführung. Die Kabelarchitektur besteht aus einer Hauptleitung, welche um die Maschine geführt wird und kurzen Stichleitungen zu den jeweiligen Komponenten.
- Um Dauerbelastungsschäden zu minimieren, werden die Batterien auf vibrationsdämpfenden Elementen montiert.
- Ein Ladegerät ist fest auf der Maschine verbaut. Mit diesem können die Batterien direkt an einer 230V Steckdose geladen werden. Optional wird ein externes Schnellladegerät mitgeliefert.
- Ausstattungsoptionen sind bereits im Kabelbaum implementiert. Somit ist jeder Kabelbaum mit allen Optionen kompatibel und können nachgerüstet werden.
- Optional kann auch ein 230V Wechselrichter verbaut werden.



2.3 Anbaugeräte / Einsatzgebiete

Die nachfolgenden Bilder zeigen verschiedene Anbaugeräte und Einsatzgebiete. Wie der herkömmliche Einachsgeräteträger kann auch der neu entwickelte vollelektrische Einachser für verschiedene Anwendungen eingesetzt werden. Die zwei wichtigsten Einsatzgebiete sind die Landwirtschaft und der Kommunalbereich. Sowohl Sommer als auch Winteranwendungen sind problemlos möglich



Abbildung 12: monotrac mit eMesserbalken



Abbildung 13: monotrac mit Kehrbesen



Abbildung 14: monotrac mit Mulcher



Abbildung 15: monotrac mit Bodenfräse



Abbildung 16: monotrac mit Schneefräse



2.4 Technische Spezifikationen

Gesamtgewicht	335 kg (ohne Anbaugerät und ohne Räder)
Breite	108 cm (ohne Anbaugerät und ohne Räder)
Länge	85 cm (ohne Anbaugerät und eingefahrenem Holmen)
Höhe	85 cm (ohne Anbaugerät und ohne Räder)
Leistung pro Rad	3 kW
Leistung am Anbaugerät	9.6 kW
Systemspannung	48 VDC
Batteriekapazität	Bis zu 24 kWh



3 Vorgehen und Methode

Vorgehen beim Projektmanagement

- In einem wöchentlich abgehaltenen Teammeeting wurden die Fortschritte der Teilaufgaben aufgenommen und mit dem Zeitplan abgeglichen. Als Erfolgskontrolle diente auch die wiederholte Kontrolle, ob alle Punkte des Pflichtenhefts erfüllt werden, bzw. ob eine Anpassung des Pflichtenhefts nötig und/oder möglich ist.

Vorgehen bei der Konzeptionierung:

- Die gesammelten Ideen zu den definierten Funktionen wurden in einen morphologischen Kasten gefügt (siehe Beispiel in Abbildung 17). Anhand dessen konnten verschiedene Kombinationen erstellt und daraus Konzepte abgeleitet werden. Diese Konzepte durchliefen einen Bewertungsprozess und wurden in der Runde diskutiert, was dann schlussendlich zur Findung des geeignetsten Konzepts führte.
- Das beschriebene Vorgehen wurde zur Findung des Gesamt-, wie auch einzelner Teilkonzepte angewendet.

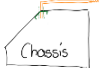
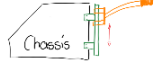
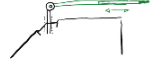
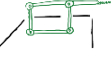
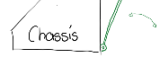
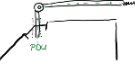
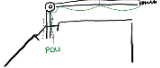
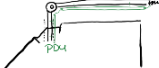
Funktion	Teillösungen 1	Teillösungen 2	Teillösungen 3	Teillösungen 4	Teillösungen 5
seitlich schwenken	 Axiallager; "Teiler"	 Zwei Radiallager	 "Rohr im Rohr"; mit Buchse	 Holmen rausziehen, drehen, und in Rückwärtsrichtung wieder "einklinken" (F1 Steuerrad)	
Drehung arretieren (obere Funktion)	 Bolzen + Lochbild (stufenweise, Formschlüssig)	 Klemmen mit Schnellspanner oder Schrauben (stufenlos, Kraftschlüssig)	 Zahn-dreh-gelenk (formschlüssig)		
am Chassis befestigen	 Lagereinheit in Chassisträger (grün) verschweisst	 Lagereinheit an Chassiwange verschraubt			
An Bedienungsgrösse anpassen (Höhenverstellung)	 Drehgelenk(rot)	 Linearverschiebung (grün)	 Linearverschiebung bei Drehpunkt		
Hebellänge anpassen	 Hohlprofile (Innenseite)	 Kabelbinder (Aussenseite)	 Führungsschläuche/-rohre (Aussenseite)		
Kabel führen					

Abbildung 17: Vorgehen bei Konzeptionierung



Vorgehen bei der Komponentenauswahl:

- Für jede Komponente wurde ein Anforderungsprofil erstellt und mit den Datenblättern aus der Komponentenrecherche abgeglichen.
- Nebst dem Anforderungsprofil für die Komponenten wurden auch die Hersteller/Lieferanten auf einige Kriterien geprüft. Für uns wichtige Kriterien sind geographische Nähe, Hersteller/Lieferant von erfolgreich im Einsatz getesteter Komponenten, Verlässlichkeit bezüglich Lieferung und Konstanz bei der Qualität.

Vorgehen bei der Konstruktion:

- Bei der Entwicklung der mechanischen Bauteile, wird iterativ verfeinert und damit der Detailierungsgrad erhöht. Bei diesen Iterationen wird die Konstruktion schrittweise auf die Einkaufsteile angepasst und gleichzeitig die Struktur mittels FEM-Berechnungen auf ihre Belastbarkeit überprüft. Dies immer unter Berücksichtigung des zugrundeliegenden DesignSpaces.
- Am Ende der Konstruktionsphase wird eine abschliessende FEM-Berechnung der gesamten Baugruppe durchgeführt.

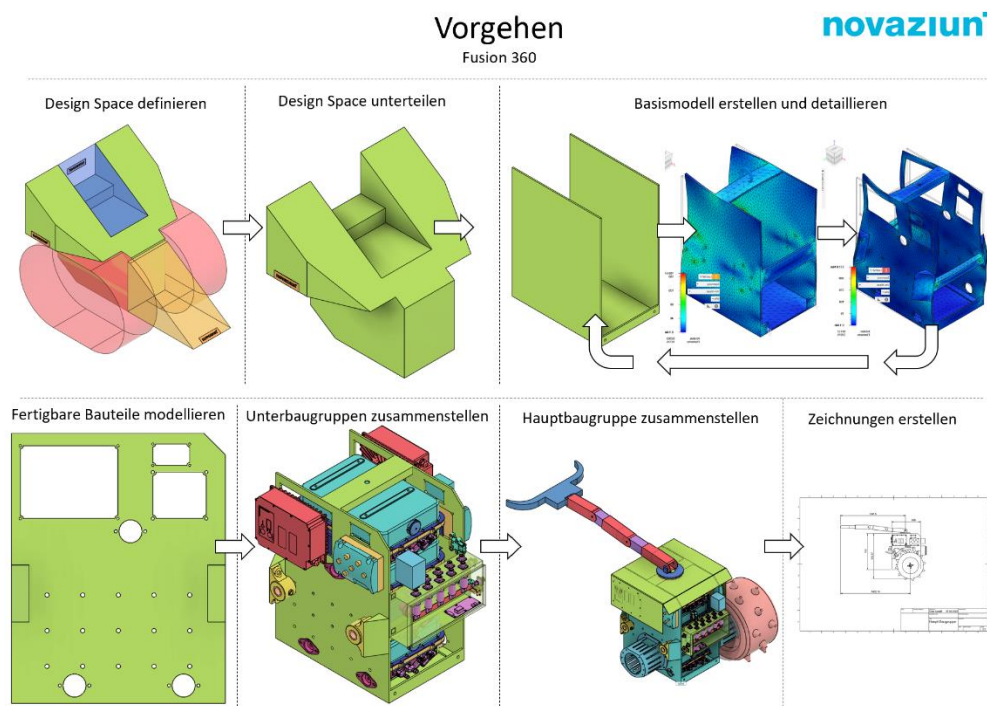


Abbildung 18: Vorgehen bei Konstruktion



Vorgehen beim Monitoring

- Während der gesamten Testphase werden vorab definierte Daten, mithilfe eines Datenloggers aufgezeichnet. Der Datenlogger ist dabei mit dem Internet verbunden, was das Sichten und Sammeln der Daten aus der Ferne ermöglicht.
- Aufgezeichnet werden folgende Daten:
 - Gefahrene Distanz
 - Position
 - Ladezustand der Batterien
 - Motordaten von allen drei Motoren (Drehzahl, Leistung, Strom, Temperatur)
 - Inverterdaten (Temperatur, Fehlercodes)
- Anhand dieser Daten können während der Testphase allfällig nötige Optimierungen in der Steuerung bereits erkannt und implementiert werden.
- Am Ende der Testphase wird basierend auf den gesammelten Daten eine umfängliche Auswertung gemacht.
- Ein besonderes Augenmerk wird auf die Effizienz im Vergleich zu der ePowerUnit (elektrisch-hydraulischer Antrieb) und zu einem herkömmlichen Einachser (thermisch-hydraulischer Antrieb) gelegt.



4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Das Projekt vollelektrischer Einachsgeräteträger startete am 01.03.2022. Die Entwicklung, Herstellung und Erprobung der Prototypen ist Abgeschlossen und es wird bereits an der Nachfolgemaschine gearbeitet.

Arbeitspakete		2022 Q2	2022 Q3	2022 Q4	2023 Q1	2023 Q2	2023 Q3	2023 Q4	2024 Q1	2024 Q2	2024 Q3
Entwicklung	Klären	01.03.2022									
	1.1 Konkurrenzanalyse / Zielmärkte / Zielkunden definieren	x									
	1.2 Projektbasis (Pflichtenheft erstellen)	x									
	1.3 Normenstudium	x									
	Belastbares Pflichtenheft erstellt	Ende Q2 2022									
	Konzipieren										
	2.1 Systemauslegung		x								
	2.2 Toleranz Konzepte Erstellen, Mechanisch, Elektrisch, Steuerungstechnik		x								
	2.3 Komponentenauswahl vorbereiten, Marktrecherche (Liste möglicher Lieferanten für Hauptkomponenten)		x								
	Konzepte sind erstellt und bewertet, Favorit ist zur Konstruktion bereit	Ende Q3 2022									
Entwicklung	Entwerfen										
	3.1 Mechanische Konstruktion		x	x	x	x					
	3.2 Elektrische Planung			x	x	x					
	3.3 Softwarespezifikation			x	x						
	3D CAD Modell, Elektroschemas & Softwarespezifikation sind erstellt					Ende Q3 2023					
	Ausarbeiten										
	4.1 Mechanische Konstruktion Optimierungen						x				
	4.2 Fertigungsunterlagen erstellen						x				
	4.3 Softwareentwicklung			x	x	x	x		x		
	Dokumente zum Bestellen des Materials bereit					Ende Q3 2023					
Herstellung	5.1 Bestellung Komponenten						x				
	5.2 Aufbau Prototypen						x	x			
	Alle Prototypen fertiggestellt							Ende Q4 23			
Erprobung	6.1 Test Validation Plan aufsetzen							x			
	6.2 Datenerfassungssystem aufsetzen und erproben			x			x		x		
	6.3 Geeignete Feldversuchspartner eruiieren							x			
	6.4 Feldversuche durchführen								x	x	x
	6.5 Daten Auswerten								x	x	x
	6.6 Berichte Kommunikation										x
	Projektende										30.09.2024

Abbildung 19: Terminplan

In der Projektphase «Klären», wurde ein umfangreiches Pflichtenheft erstellt, basierend auf einer Konkurrenzanalyse, den gesammelten Erfahrungen im Zusammenhang mit unserem bestehenden Produkt ePowerUnit, Gesprächen mit bestehenden Kunden Innen und einem Normenstudium.

Eine Kernpunkte aus dem Pflichtenheft:

Zutreffende Normen	EN12733, Maschinenrichtlinie 2006/42/EG
Berücksichtigte Normen	DIN EN 614 DIN EN 894-1 bis 894-4 DIN EN ISO 12100 DIN EN ISO 13857 DIN EN ISO 14738 ISO 3864-1 CR 1030-1 DIN ISO 11688-1, 11688-2
Leistungsklasse	10-15kW
Akkukapazität	>15kWh
Systemspannung	48VDC
Transportlänge mit/ohne Anbaugerät	2m / 1m
Fahrgeschwindigkeit vorwärts/rückwärts	9km/h / 4.5km/h
Mehrere Achspositionen	
Erreichbare Holmen-Positionen	hinter Maschine laufen



Mitfahrplattform

Auf Podest mitfahren

Position Bodenfräse (180° gedreht, 600mm
Sicherheitsabstand gemäss EN12733)

Höhenverstellung und Drehbar

Klappbar

Daraus wurde in der Projektphase «Konzipieren» der DesignSpace abgeleitet, welcher die Basis für die konstruktive Entwicklung bildet. Da nun die gewünschten Systemanforderungen wie Antriebsleistung, Batteriekapazität, Einsatz- und Bedienmöglichkeiten definiert waren, konnte auch eine Komponentenrecherche durchgeführt werden.

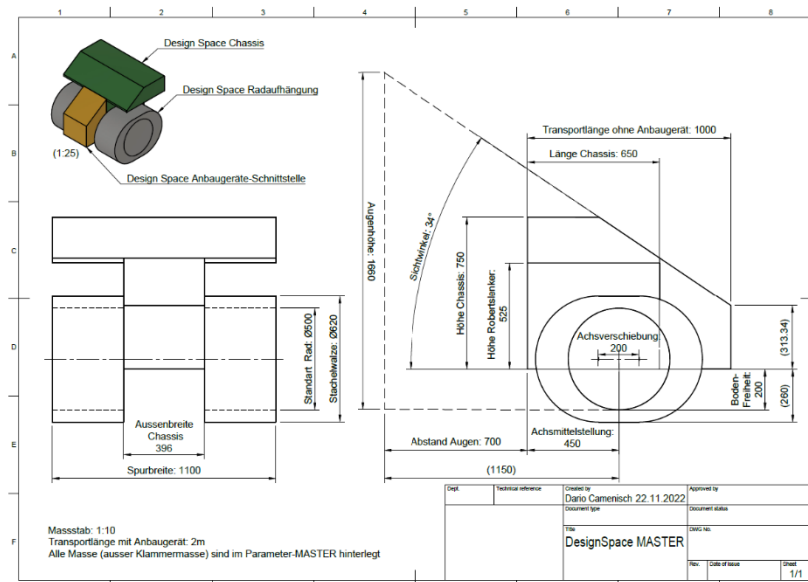


Abbildung 20: DesignSpace

Mit der Komponentenvorauswahl und dem Designspace als Vorgaben, entstanden 7 Gesamt- und weiter Teilkonzepte, welche nach einem Kriterienkatalog bewertet und verglichen wurden. Es kristallisierte sich eine Lösung mit übereinanderliegenden Akkus, separat angetriebenen Rädern und einem Holmen mit einem Parallelogramm als Verstellmechanismus heraus.

Das Konzept für die Bedieneinheit wurde ebenfalls erstellt. Wir entschieden uns für eine Bedienung mittels Joystick und Taster, welche auf beiden Seiten identisch aufgebaut sind. Dies ermöglicht, dass eine Vielzahl an Bedienmöglichkeiten und Fahrmodi auf die Bedieneinheit programmiert werden können. Der Joystick bietet zudem den Vorteil der stufenlosen Bedienung. Fahrmodi und Tastenbelegung sollen vom Bediener/in selbst bestimmt werden können. Ebenfalls beinhalten wird die Bedieneinheit einen Display, Schlüsselschalter, Start/Stop-Schalter, Totmannschalter und einige optionale Bedienelemente.

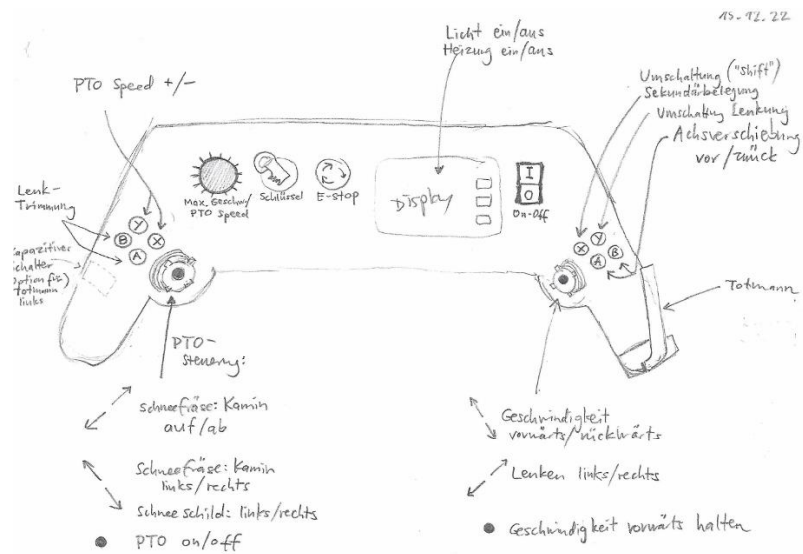


Abbildung 21: Konzept Bedieneinheit

In der darauffolgenden Projektphase «Entwerfen», galt es das beste Konzept aus der Konzeptstudie zu verfeinern. Parallel zur mechanischen Weiterentwicklung, lief die elektrische Planung und die Spezifikation der Software. Dies beinhaltet das Erstellen des Elektroschemas und die Definition der Bauräume für die Komponenten und Verkabelung.



Abbildung 22: Kartonmodell

Ein vereinfachtes Kartonmodell des Konzepts gab einen ersten Eindruck für die realen Proportionen.

In der Projektphase «Ausarbeiten» befand sich die mechanische Konstruktion in den letzten Optimierungsiterationen und Erstellung von fertigbaren Teilen. Dies in enger Zusammenarbeit mit den Fertigungsbetrieben, um möglichst fertigungsoptimierte Bauteile zu gestalten. Einfach herzustellende Bauteile sind kostengünstiger, haben eine kürzere Laufzeit und sind deshalb erstrebenswert. Wenn alle Bedingungen bezüglich Herstellung, Montage, Festigkeit, Funktion erfüllt waren, wurden 3D-Zeichnungen für die Herstellung und Montage erstellt.

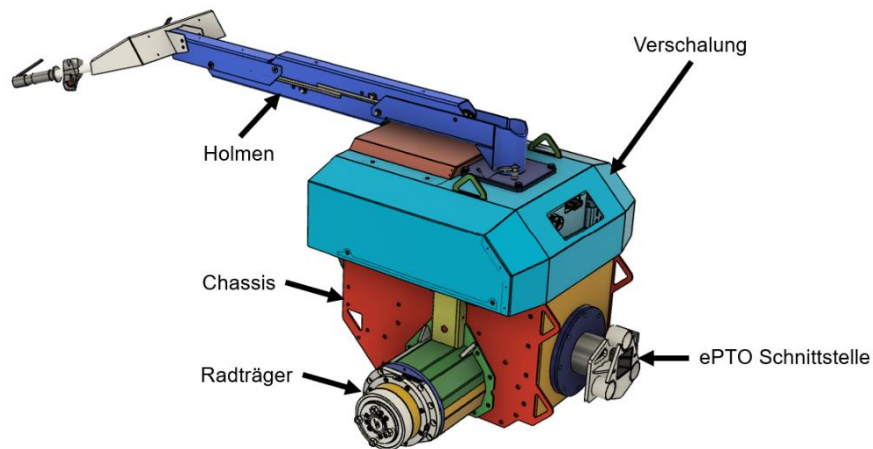


Abbildung 23: 3D-Gesamtmodell

Gleichzeitig zur mechanischen Entwicklung, lief auch die Softwareentwicklung. Erste Komponenten wurden bestellt und damit ein Prüfstand aufgebaut. Auf diesem konnten die einzelnen Komponenten und die Software getestet werden. Der Prüfstand ermöglichte es die Ausarbeitung der Mechanik, Elektronik und der Software parallel voranzutreiben. Eine reale Abbildung bietet der Prüfstand nicht und es konnten auch nicht alle späteren Funktionen getestet werden, dennoch liess sich die Grundsätzliche Funktion der Software und die Kompatibilität und Funktionalität der einzelnen Komponenten testen.

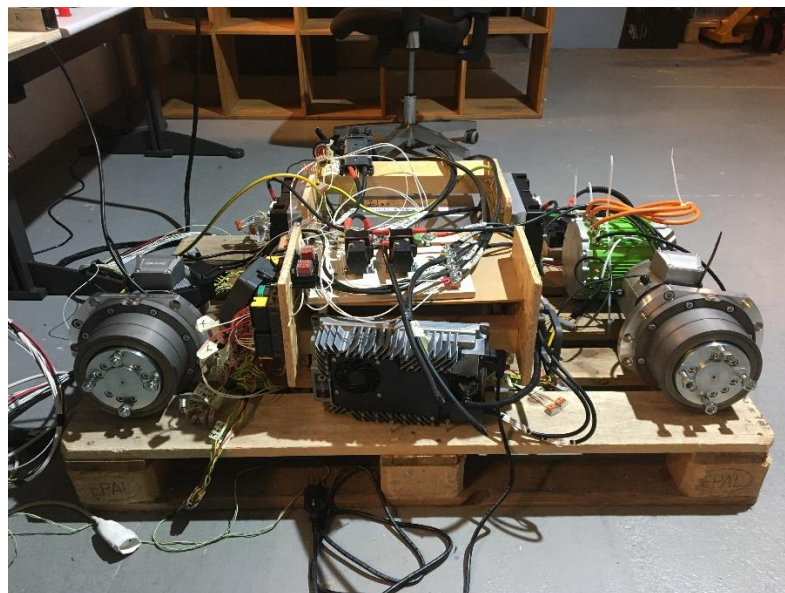


Abbildung 24: Prüfstand

Der Aufbau der ersten Prototypen und damit der Startschuss zur Projektphase «Herstellung», begann Anfang Mai 2023. Dank der sauberen Vorarbeit in den vorangegangenen Projektphasen, lief der Aufbau der Prototypen mehrheitlich Reibungslos und es waren keine grösseren mechanischen Anpassungen nötig.



4.1 Aufbau Prototypen

Der Aufbau der ersten Prototypen und damit der Startschuss zur Projektphase «Herstellung», begann Anfang Mai 2023. Dank der sauberen Vorarbeit in den vorangegangenen Projektphasen, lief der Aufbau der Prototypen mehrheitlich reibungslos.

Es gab einige Qualitätsmängel von Seiten des Blechlieferanten. Diese waren jedoch nicht schwerwiegend und die Bauteile konnten nach Nacharbeiten trotzdem verbaut werden. Konstruktionsfehler gab es ebenfalls nur geringe, welche die Montage nicht beeinträchtigten. So war es möglich, dass bereits knappe zwei Monate nach Beginn der Montage, die erste Maschine einsatzbereit war und eine erste Testfahrt unternommen werden konnte.



Abbildung 25: Aufbau Prototyp

Als alle Komponenten montiert waren, begann die Fertigung des Kabelbaumes. Es wurde auf ein Kabelbaumkonzept mit Knotenpunkten gesetzt. Bei diesem Konzept gibt es ein paar zentral platzierte Knotenpunkte, von welchen aus die Kabelstränge zu den Komponenten und den anderen Knotenpunkten gezogen werden. Dieses Design hat den Vorteil, dass viele Kabel zusammengefasst werden können und der Kabelbaum dadurch einfacher zu verlegen und übersichtlicher wird. Der Nachteil liegt darin, dass die gesamten Kabelmeter mehr werden, da die einzelnen Kabel über die Knotenpunkte geführt werden und nicht direkt vom Ausgangs- zum Zielort verlegt werden.



Gefertigt wurden die Kabelbäume mithilfe eines Nagelbretts. Parallel dazu sind Kabellisten erstellt worden für die spätere Serienfertigung. Diese beinhalten Informationen über Start, Ziel, Länge, Querschnitt, Farbe, Signal und Stecker-/Pintyp.

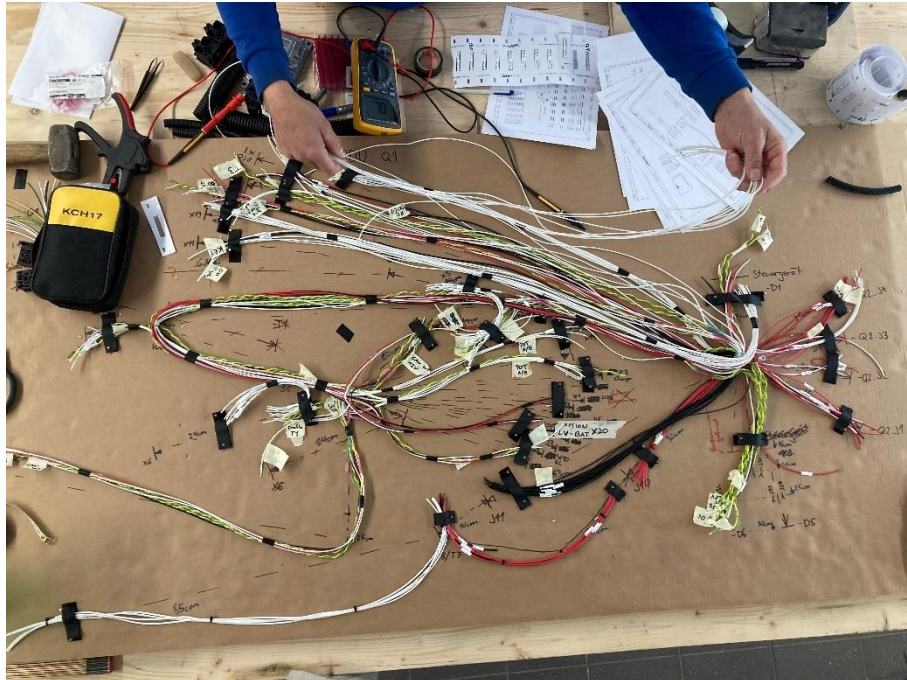


Abbildung 26: Kabelbaumfertigung

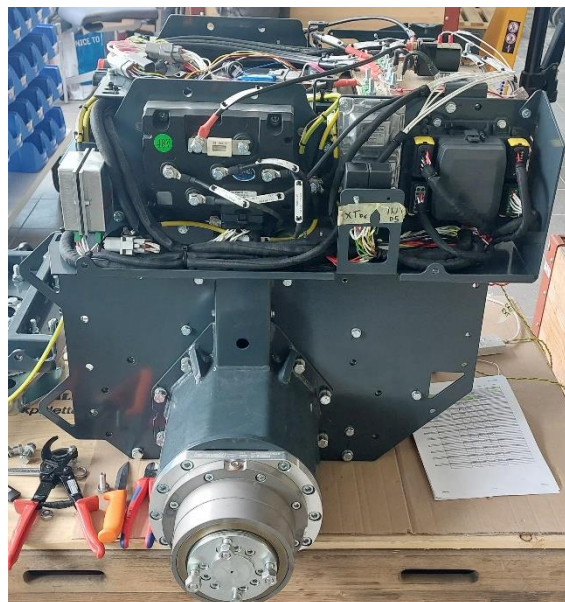


Abbildung 27: Prototyp verkabelt

Auf die Fertigung und Montage der Kabel folgte die Inbetriebnahme. Einige Komponenten benötigten eine Aktualisierung auf eine passende Firmware und das Erstellen eines passenden Parametersatzes. Die Software für die Steuerung war dank des Prüfstands bereits auf einem lauffähigen Stand.



4.2 Überarbeitung Holmen

4.2.1 Rückblick

Auf eine Schwierigkeit sind wir bei dem ursprünglichen Holmenkonzept gestossen. Das Konzept des Parallelogramms funktionierte gut, aber die Lage des Federelements hatte sich als ungünstig erwiesen, da das Übersetzungsverhältnis zwischen Hub am Bedien- und Federelement in gewissen Position sehr gross war. Dies führte dazu, dass der gesamte Holmen in diesen kritischen Positionen zu viel Bewegungsfreiheit in vertikaler Richtung besass. Deshalb wurde bei den ersten Prototypen die Gasdruckfeder durch eine Metalllasche ersetzt und zusätzliche Bohrungen gebohrt. Durch diese Massnahme ist das Spiel aufgehoben, jedoch war die einfache und stufenlose Verstellung nicht mehr vollumfänglich möglich. Es konnten 5 Positionen arretiert werden. Ein Testbetrieb war damit ohne grössere Einschränkungen möglich.

4.2.2 Holmen 2.0

Es musste eine neue Lösung gefunden werden, welche die definierten Anforderungen erfüllt und die oben genannten Schwierigkeiten behebt.

Anforderungen an Holmen:

- Höhenverstellung
- Neigungseinstellung der Bedieneinheit
- Mitfahrposition (Bedienende Person steht dabei auf Trittbrett)
- Umkehrstellung (Arbeiten mit Bodenfräse)
- Transportstellung (Holmen soll nicht über Maschine ragen)
- Wechsel zwischen Positionen soll schnell und einfach möglich sein
- Arretierung, damit sich der Holmen auf keinen Fall während dem Arbeiten lösen kann
- Automatische Erkennung der Umkehrstellung
- Ergonomische Bedieneinheit

Mit dem gesammelten Wissen aus dem ersten Holmenkonzept, wurde noch einmal auf dem leeren Blatt Papier begonnen, auf der Suche nach einem neuen, besseren Konzept.

Man entschied sich für eine Lösung mit nur zwei Gelenken und einer Kette, welche die Ausrichtung des Bedienelements beim Verstellen des Holmens sicherstellt.

Tests mit dem Holmen 2.0 laufen bereits. Die Probleme bezüglich zu viel Bewegungsfreiheit sind nicht mehr vorhanden und alle Anforderungen konnten erfüllt werden.

Im Zuge der Überarbeitung, ist auch der Display auf der Bedieneinheit zu einem grösseren geändert worden. Es zeigte sich, dass der ursprünglich verwendete Display zu klein war und die Anzeigemöglichkeiten zu sehr einschränkte.



Abbildung 28: Holmen 2.0



4.3 Feldtests

Viele Stunden Feldtests folgten der Inbetriebnahme der Monotracs. Es galt herauszufinden wie sich die Maschine in verschiedensten Situationen mit unterschiedlichen Anbaugeräten verhält und wo es Verbesserungsbedarf gibt. Dazu gab es die von uns selbst durchgeführten Feldtests und nebenbei hatten wir drei Testfahrer in der Landwirtschaft, welche den Monotrac bei ihrer täglichen Arbeit einsetzten, ausgiebig testeten und uns wertvolle Rückmeldungen lieferten.

Die Aufzeichnung und Auswertung der Messdaten erfolgte auf verschiedenen Kanälen. Einerseits wurde bei Testfahrten ein Logger an der Maschine angeschlossen, welcher die gesamte CAN-Kommunikation aufzeichnete, was detaillierte Auswertungen ermöglichte. Andererseits verfügten alle Maschinen über ein mit dem Internet verbundenes Gateway, das Daten aufzeichnete und auf eine Cloud-Plattform lud. Somit war auch eine Fernüberwachung möglich. Und nicht zuletzt gab es noch die Wahrnehmung von der bedienenden Person. Besonders das Fahrverhalten wurde basierend auf den Rückmeldungen verfeinert.

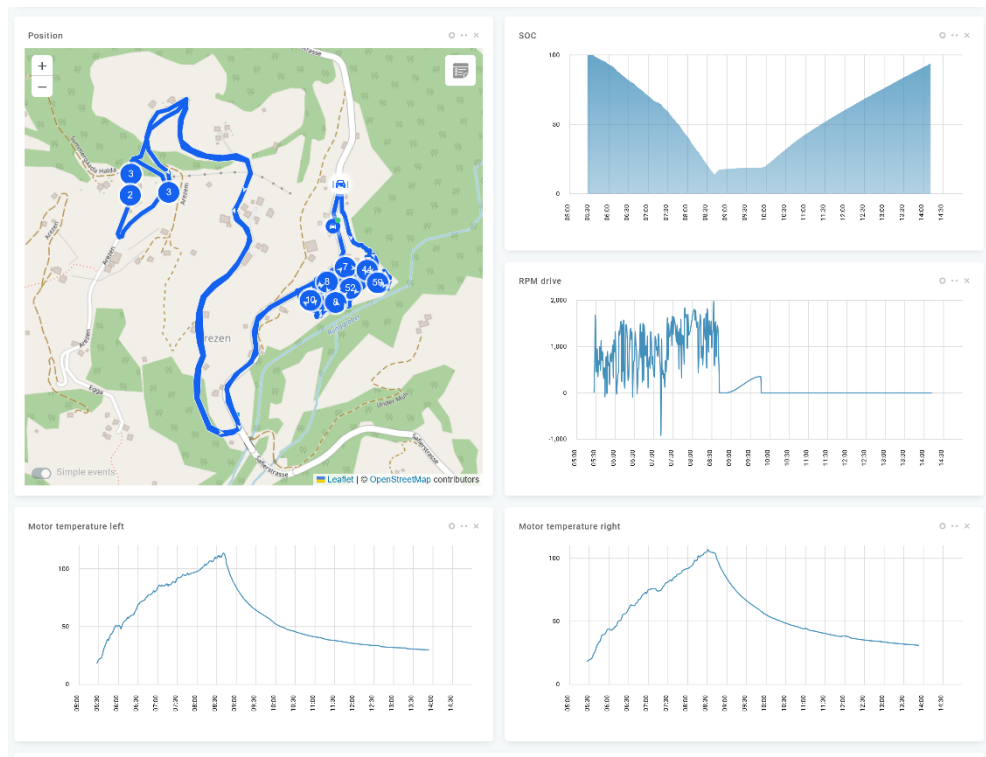


Abbildung 29: Cloud-Plattform

4.3.1 Fahrverhalten

Entscheidend für ein positiv empfundenes Fahrverhalten, ist eine einfache, intuitive und präzise Bedienung. Der Grundstein um diese Anforderungen zu erfüllen wurde bereits bei der Konzipierung der Bedieneinheit gelegt und während der Testphase in der Steuerung verfeinert.

Als erste Priorität wurde die grundsätzliche Fahrdynamik angegangen. Dies betrifft die Beschleunigungs- und Abbremsrampen, Verarbeitung des Joystick-Eingangssignals, Verhalten der mechanischen Bremsen, Verhalten des Tempomats, Fahrverhalten in steilem Gelände und das Verhalten in Notsituationen (Loslassen der Totmann Griffe, oder drücken des Notaus Knopfes). Zu jedem Thema waren viele Tests nötig, um die beste Abstimmung der Parameter zu finden.



Abbildung 30: Test in steilem Gelände

Zweite Priorität hatten programmierte Extras, welche das Arbeiten mit der Maschine verbesserten. So wurden beispielsweise digitale Gänge programmiert, welche die Maximalgeschwindigkeit begrenzen. So kann man im für die Anwendung passenden Gang angenehm arbeiten. Weiter gibt es drei Dynamikstufen die das Fahrverhalten der Maschine beeinflussen, eine Blockiererkennung für das Anbaugerät, Einstellmöglichkeit für das maximale Drehmoment der Fahrentriebe und des Anbaugeräteantriebs, einen Modus bei welchem das Anbaugerät nur läuft, wenn man vorwärts fährt und einige mehr.

4.3.2 Spezifikation der Monotracs

Auch die mechanische Abstimmung der Maschine mit verschiedenen Ausstattungen wurde verfeinert. Variable Grössen waren die Art der Bereifung, Position der Radmotoren, verwendetes Anbaugerät, Batteriekapazität, verschiedene Mitfahrplattformen und das Anwendungsgebiet. Mit den gesammelten Ergebnissen, können Empfehlungen an Kunden abgegeben werden, welches die passende Spezifikation für das jeweilige Anwendungsgebiet ist. Es zeigte sich auch, was aus mechanischer Sicht bei der Weiterentwicklung der Maschine verbessert werden kann.

Im Sommer 2023 war der Fokus bei den Feldtests auf der Landwirtschaftlichen Anwendung mit den Anbaugeräten Messerbalken, Weidepflieger und Silopflug. Im Herbst und Winter 2023/2024 stand dann vermehrt die kommunale Anwendung im Fokus mit den Anbaugeräten Fingermesserbalken, Schneefräse, Schneepflug, Kehrmaschine und Mulcher. Die Anforderungen im kommunalen Bereich unterscheiden sich von denen in der Landwirtschaft. Deshalb bedurfte es erneut vieler Teststunden mit verschiedensten Spezifikationen und Fachpersonen aus der kommunalen Anwendung.



Abbildung 31: Test mit Schneefräse



4.4 Vergleichsmessungen

Zur Ermittlung der Effizienzsteigerung des vollelektrischen Einachsers gegenüber eines vergleichbaren Einachsers mit thermischem Antrieb, wurden Verbrauchsmessungen durchgeführt. Auch wurden Messungen mit einem elektrisch-hydraulischen Einachser (ePowerUnit) gemacht. Somit kann zusätzlich die Effizienzsteigerung von einem elektrisch-hydraulischen, zum vollelektrischen Antriebskonzept ermittelt werden.

Tabelle 1: Gegenüberstellung Maschinen für Vergleichsmessungen

			
Hersteller	Novazium AG	Novazium AG	Aebi
Typ	monotrac	ePowerUnit	CC56
Leistung	13 kW (Peak: 23 kW)	Nominal: 8 kW (Peak:15 kW)	Nominal: 12 kW
Energie	18kWh	6kWh	3.6 Liter Benzin
Antrieb	Vollelektrisch	Elektro-hydraulisch	Verbrenner

Beim Monotrac und der ePowerUnit wird während dem Mähen ein Logger installiert. Anhand der Loggerdaten kann dann rausgelesen werden, wieviel Batteriekapazität verbraucht wurde.

Der Aebi mit Verbrennungsmotor wird vor dem Test vollgetankt und nach dem Test erneut aus einem Massbecher vollgetankt, was den Benzinverbrauch ergibt. Damit die Daten verglichen werden können, wird der Heizwert von Benzin mit 8.72 kWh/l angenommen. (BFE, 2021)

Beim Vergleichstest mit den Mähbalken wurde zusätzlich zu der Verbrauchsmessung eine Vibrations- und Schallpegelmessung durchgeführt.

Zur Ermittlung der auftretenden Vibrationen wurde als Messgerät ein Recovib Feel¹ verwendet. Dieser wurde bei allen Maschinen in der Nähe der Handgriffe angebracht. Die Auswertung wurde in Anlehnung an Hand-Arm-Schwingungen DIN 45675 durchgeführt.

Die Messung der Schallbelastung wurde mit einem Smartphone und der App «dB Meter – Pro»² durchgeführt. Gemessen wurde jeweils während der Fahrt in Ohrennähe. Die Auswertung wurde in Anlehnung an Schalleistungspegel EN ISO 3744 & Schalldruckpegel EN ISO 11201 durchgeführt.

Es wurde versucht, die Testbedingungen für alle Maschinen möglichst gleich zu gestalten.

¹ <https://micromega-dynamics.com/products/recovib/#>

² <https://decibelpro.app/>



4.4.1 Mähen



Abbildung 32: Vergleichsmessung Mähen
Monotrac



Abbildung 33: Vergleichsmessung Mähen
ePowerUnit



Abbildung 34: Vergleichsmessung
Mähen Verbrenner

Alle drei Maschinen wurden mit denselben Rädern und einem 3 Meter Doppelmesserbalken ausgestattet. Beim Monotrac ist dies ein Doppelmesserbalken vom Hersteller Erni Landmaschinen AG und bei der ePowerUnit und dem Aebi CC56, vom Hersteller Köppl GmbH.

Basierend auf den Ergebnissen der Verbrauchsmessungen, kann die Flächenleistung pro Ladung bzw. Tankfüllung berechnet werden.

Daten für Flächenleistungsberechnung:

Fassungsvolumen Kraftstofftank von Aebi CC56	11l
Max. nutzbare Kapazität Monotrac	15.6kWh
Max. nutzbare Kapazität ePowerUnit	5.2kWh



Abbildung 35: Vergleichsmessung Mähen Versuchsfeld

Das Versuchsfeld wies auf der gesamten Fläche einen sehr gleichmässigen Grasbestand auf. Zudem ist es eben und Rechteckig, so dass es gut in gleich grosse Flächen eingeteilt werden konnte.



Mit jeder Maschine wurden auf demselben Feld je 6 Bahnen a ~230m gemäht.
Die 6 Bahnen entsprechen einer Fläche von ~4000m² bzw. 0.4ha.

Tabelle 2: Vergleichsmessung Mähen Ergebnisse

		Monotrac	ePowerUnit	Verbrenner
Verbrauch	Verbrauch	1.2 kWh	1.6 kWh	9.2 kWh (1.05l)
	Mähdauer	~20 min	~23 min	~25 min
	Flächenleistung	~5.2 ha	~1.3 ha	~4.2 ha
	Einsatzdauer	~4h20min	~1h15min	~4h20min
Vibrationen	Mittelwert	1.06 m/s ²	4.30 m/s ²	5.69 m/s ²
	Max. Amplitude	3.06 m/s ²	15.03 m/s ²	17.92 m/s ²
Lärm	Mittelwert	80 dBa	88 dBa	88 dBa
	Maximalwert	87 dBa	94 dBa	96 dBa



4.4.2 Mulchen



Abbildung 36: Vergleichsmessung
Mulchen Monotrac



Abbildung 37: Vergleichsmessung
Mulchen ePowerUnit



Abbildung 38: Vergleichsmessung
Mulchen Verbrenner

Alle drei Maschinen konnten mit demselben Mulcher des Herstellers Cerruti und denselben Reifen bestückt werden.



Abbildung 39: Vergleichsmessung Mulchen Versuchsfläche

Als Versuchsfläche für das Mulchen diente eine Strassenböschung, welche genug breit ist, dass man drei Bahnen abfahren konnte. Die gemulchte Fläche kann weniger genau ermittelt werden wie beim Mähen, die Flächenleistung ist daher Fehlerbehaftet. Ungefähre gemulchte Fläche: 400m² / 0.04ha.

Tabelle 3: Vergleichsmessung Mulchen Ergebnisse

		Monotrac	ePowerUnit	Verbrenner
Verbrauch	Verbrauch	0.6 kWh	0.8 kWh	5.2 kWh (0.6l)
	Mulchdauer	~10 min	~11 min	~12 min
	Flächenleistung	~1ha	~0.25ha	~0.75ha
	Einsatzdauer	~4h20min	~1h12min	~3h40min



4.4.3 Schneefräsen



Abbildung 40: Vergleichsmessung
Schneefräsen Monotrac



Abbildung 41: Vergleichsmessung
Schneefräsen ePowerUnit



Abbildung 42: Vergleichsmessung
Schneefräsen Verbrenner

Alle drei Maschinen konnten mit einer baugleichen Schneefräse des Herstellers Köppl bestückt werden. Die Bereifung war nicht dieselbe, aber bei allen Maschinen waren Reifen montiert mit fast identischem Durchmesser.



Abbildung 43: Vergleichsmessung Schneefräsen Versuchsfläche

Da keine genügend grosse ebene Fläche mit gleichmässiger Schneedecke auffindbar war, fand die Vergleichsmessung auf einem Parkplatz auf dem Lukmanierpass statt. Dort wurde mit jeder Maschine dieselbe Bahn gefräst, wobei der gefräste Schnee auf die daneben liegende Bahn gefräst wurde, um anschliessend denselben Schnee erneut fräsen zu können. Damit wurde immer dieselbe Menge an Schnee hin und her gefräst. Für alle Maschinen herrschten somit fast identische Bedingungen. Ungefähre gefräste Fläche: 0.02ha / 200m²

Tabelle 4: Vergleichsmessung Schneefräsen Ergebnisse

		Monotrac	ePowerUnit	Verbrenner
Verbrauch	Verbrauch	1.4 kWh	1.7 kWh	10.9 kWh (1.25l)
	Fräsdauer	~25 min	~25 min	~25 min
	Flächenleistung	~2200m ²	~600m ²	~1760m ²
	Einsatzdauer	~4h39min	~1h16min	~3h40min



4.4.4 Fahren

Als letzter Vergleichstest mass man den Verbrauch beim Fahren, ohne arbeitendes Anbaugerät. Die Maschinen waren ausgestattet wie beim Mulchen-Vergleichstest. Gefahren wurde eine Strecke von 1 km Länge, auf asphaltierter Strasse.

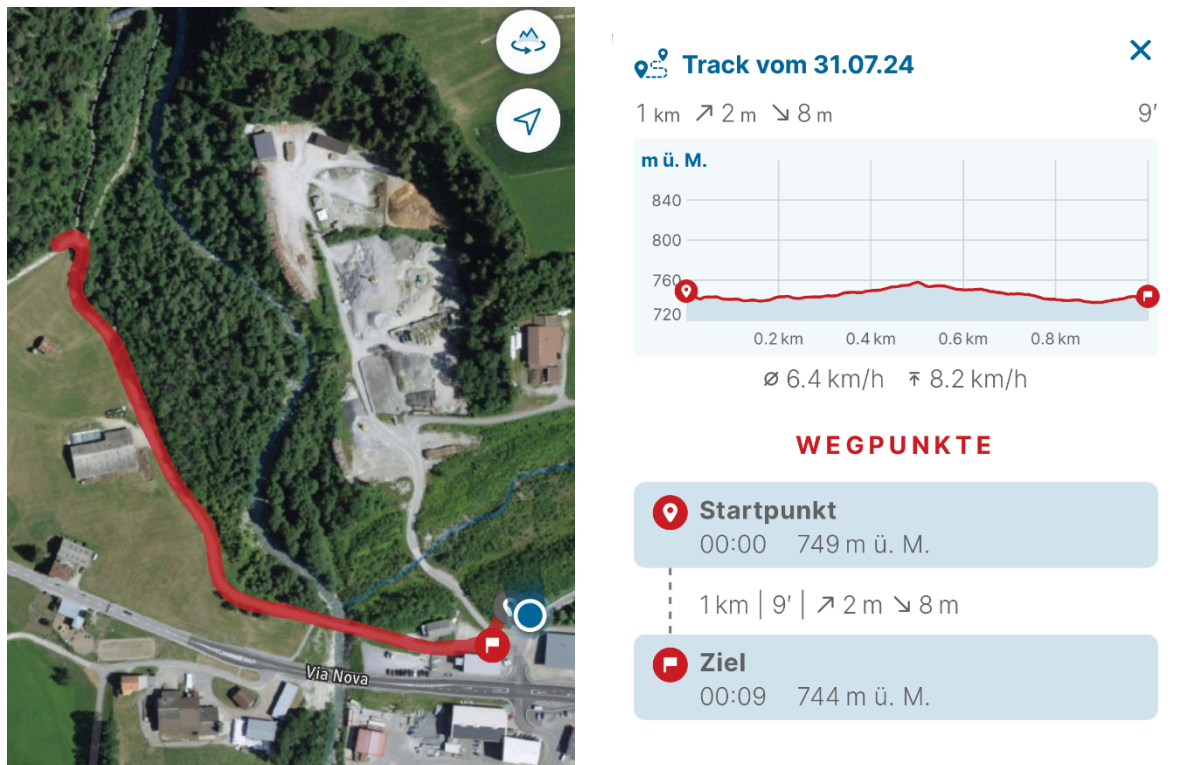


Abbildung 44: Vergleichsmessung Fahren Teststrecke

Tabelle 5: Vergleichsmessung Fahren Ergebnisse

		Monotrac	ePowerUnit	Verbrenner
Verbrauch	Verbrauch	0.4 kWh	0.5 kWh	3.0 kWh (0.35l)
	Fräsdauer	~10 min	~10 min	~10 min
	Reichweite	~39km	~10km	~31km
	Einsatzdauer	~6h30min	~1h44min	~5h14min



4.5 Auswertung der Vergleichsmessungen

Den durchgeführten Messungen liegen einige Messunsicherheiten zugrunde. Um diese auf ein Minimum zu reduzieren, wurde versucht die Bedingungen und Messungen bei allen drei Maschinen möglichst identisch zu halten.

4.5.1 Vibrations- & Schallpegelmessungen

Besonders das unterschiedliche Mähwerk hat bei den Vibrations- und Schallpegelmessungen einen messbaren Einfluss.

Im Stillstand mit laufendem Mähwerk und laufendem Motor zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Maschinen. Da an den beiden Aebis dasselbe Mähwerk montiert war, kann darauf geschlossen werden, dass dieses Mähwerk deutlich stärkere Vibrationen auslöst. Der laufende Verbrennungsmotor am Aebi steigert die gemessenen Vibrationen zusätzlich. Den Hauptanteil der Differenz zum Monotrac kann somit auf das Mähwerk zurückgeführt werden und einen kleineren Teil auf die fehlenden Vibrationen vom Verbrennungsmotor.

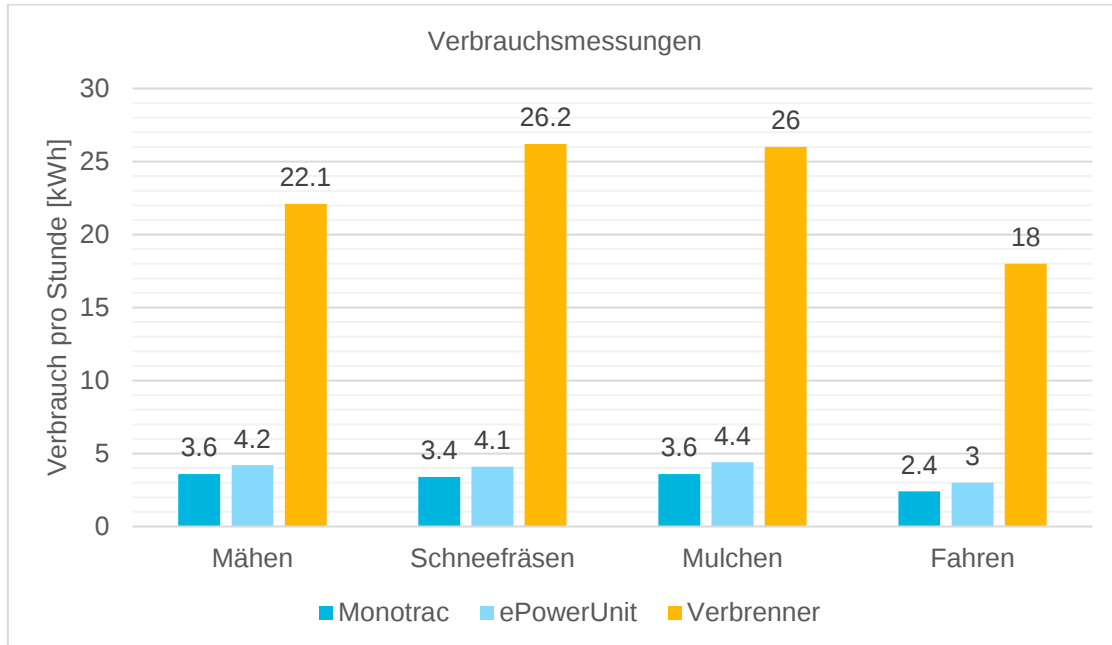
Bei der Schallpegelmessung erkennt man einen Einfluss des Mähwerks und des Antriebes, ähnlich wie bei der Vibrationsmessung. Das Mähwerk der Aebis scheint einen deutlich höheren Schallpegel zu generieren. Die zusätzliche Lärmbelastung durch den Verbrennungsmotor ist nur gering höher als beim Aebi mit e-PowerUnit.

Alles in allem schneidet der Monotrac bei der Schallpegelmessung, wenig überraschend, deutlich besser ab. Eine Reduktion von 8 dBA gegenüber dem Verbrenner sind gemessen worden, was ein Arbeiten ohne Gehörschutz ermöglicht. Dies wurde von den Nutzern als sehr positiv empfunden. Insbesondere bei Arbeiten an Strassenböschungen erhöht dies die Sicherheit, das ohne Gehörschutz der herannahende Verkehr besser wahrgenommen wird.

Nach den Vergleichsmessungen, wurden die Antriebsdrehmomente der beiden Mähwerke gemessen und diese lagen bei beiden Mähwerken im Bereich von 5 Nm. Daraus wird geschlossen, dass das unterschiedliche Mähwerk keinen grossen Einfluss auf die Verbrauchsmessungen hatte.



4.5.2 Verbrauchsmessungen



Die Signifikanz der erhobenen Daten zwischen monotrac und ePowerUnit ist nicht hoch genug, um daraus eine grosse Effizienzsteigerung abzuleiten. Was man diesen Messungen jedoch abgewinnen kann, ist die Aussage dass die ePowerUnit gegenüber einem Verbrenner deutlich effizienter ist, durch das Ersetzen des Verbrennungsmotors mit einem Elektromotor und, dass das reinelektrische Antriebskonzept nochmals eine Effizienzsteigerung mit sich bringt, gegenüber einem elektrisch-hydraulischen Antriebskonzept. Weitere Vorteile vom vollelektrischen Antrieb gegenüber dem elektrohydraulischen Antrieb sind: optimaler Schwerpunkt, längere Laufzeit, weniger Verschleiss und Wartung, optimale Drehzahl des Anbaugeräts, weniger Lärm und weniger Vibrationen.

Reduktion des Energieverbrauchs:

- ePowerUnit gegenüber Verbrenner → ~81-84%
- Monotrac gegenüber ePowerUnit → ~17-20%
- Monotrac gegenüber Verbrenner → ~84-87%

Die anhand dieser Daten errechneten ungefähren Wirkungsgradsprünge, sind in einer zu erwartenden Grössenordnung, was für die Plausibilität der Messungen spricht.

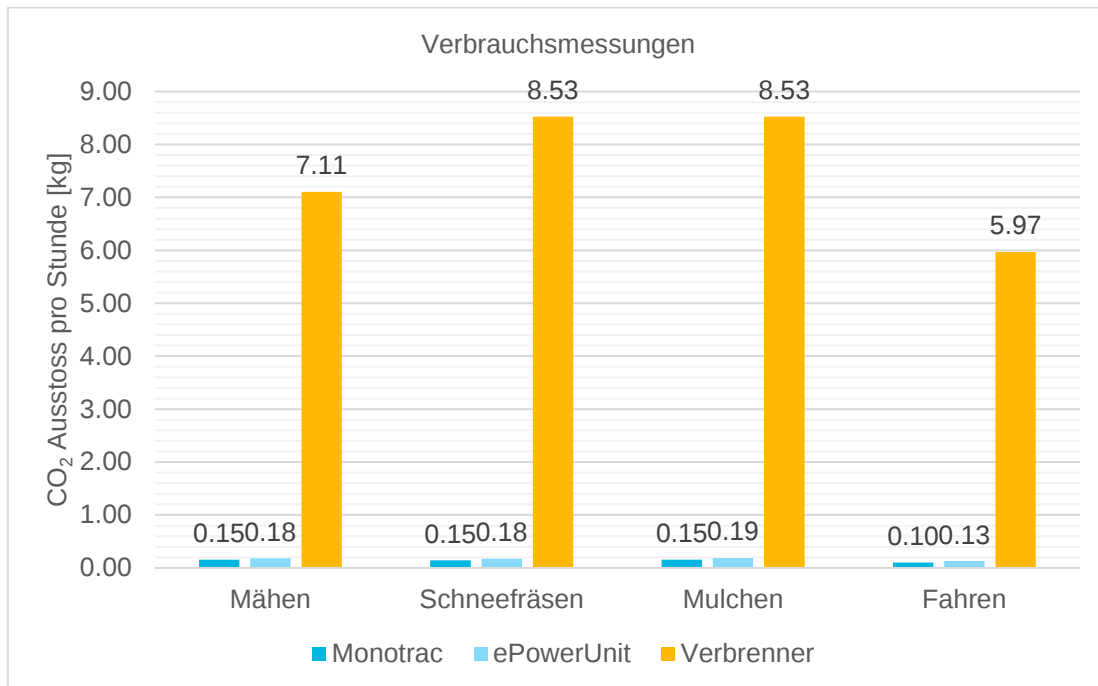
Eine weitere Plausibilitätsprüfung wurde anhand des hochgerechneten Verbrauchs pro Stunde des Verbrenners durchgeführt. Hochgerechnet erhält man einen Verbrauch beim Mähen von 2.5 l/h. Dieser Wert korreliert mit Erfahrungswerten von Anwendern und auch mit dem in der Literatur erwähnten Wert von 2.4 l/h. (2)

Bei Anwendungen mit hohem Leistungsbedarf, wie das Schneefräsen, lag der Verbrauch bei 3 l/h. Im Gegensatz dazu steht das reine Fahren mit 2.1 l/h. Beide Werte sind ebenfalls in einem plausiblen Bereich.

Weiter Auffällig ist, dass der Monotrac beim Mähen deutlich schneller ist als der Verbrenner und die ePowerUnit. Dies ist auf das Antriebskonzept zurückzuführen. Mit dem separaten Elektromotor für das Anbaugerät kann die Drehzahl des Anbaugeräts optimal an die Geschwindigkeit angepasst werden und



mit den einzelradantrieben sind schnellere Wendemanöver möglich, was eine höhere Flächenleistung pro Stunde zulässt.



Berechnet man den CO₂-Ausstoss zeigt sich ein deutliches Bild. Es wurde nur der CO₂-Ausstoss durch die verbrauchte Menge an Energie in Form von Benzin oder Elektrizität berechnet. Grundlagen für die Berechnungen sind folgende Werte:

- CO₂-Ausstoss pro Liter verbranntem Benzin → 2.34 kg CO₂/L (3)
- CO₂-Ausstoss der Bereitstellung von Benzin → 0.502 kg CO₂/L (3)
- CO₂-Ausstoss des Verbrauchsstroms (Angaben BFE)
 - Strom mit PV-Paneelen aus chinesischer Produktion → 0.043 kg CO₂/kWh

Reduktion des CO₂-Ausstosses:

- ePowerUnit gegenüber Verbrenner → ~98%
- Monotrac gegenüber ePowerUnit → ~17-23%
- Monotrac gegenüber Verbrenner → ~98%

CO₂-Ausstoss pro Jahr bei 400 Stunden

- Verbrenner → 2842 kg CO₂
- ePowerUnit → 72 kg CO₂
- Monotrac → 60 kg CO₂



4.5.3 Nutzerrückmeldung

Wenn die Vorführungen und Feldabende mitgezählt werden, haben mehr als 100 Personen den monotrak bedient. Der Grossteil hat sich sehr schnell (wenige Minuten) an das Bedienkonzept gewöhnt und waren positiv überrascht über die Leistungsfähigkeit des monotracs. Hier sind einige Rückmeldungen von den Nutzern, welche längere Zeit mit dem monotrak gearbeitet haben:

Andrea (hat ca 300h mit dem monotrak gearbeitet):

«Ich benutze nur noch den Elektromäher und keinen Benziner mehr, auch sehr anspruchsvolles Gelände ist möglich mit dem monotrak»

«Ich habe beim Heuschieben deutlich mehr Leistung»

Paul (hat ca 400h mit dem monotrak gearbeitet):

«Ich nutze den monotrak als Ersatz für den Traktor»

«Ich kann sogar die Vögel beim mähen hören»

Marcus (hat ca 300h mit dem monotrak gearbeitet):

«Ich kann den monotrak als Zwischenspeicher für meine PV-Anlage nutzen»

Thomas (hat ca 150h mit dem monotrak gearbeitet):

«Ohne Pamier fahren ist ein Traum»

«Verstehe nicht, warum nicht alle einen monotrak wollen»

Erwin (hat ca 40h mit dem monotrak gearbeitet):

«Schneefräsen ist problemlos möglich»

«meine Honda Schneefräse ist ein Spielzeug dagegen»

Weitere Rückmeldungen von Benutzern:

«Im Kommunalbereich ist Sicherheit das oberste Gebot, mit dem monotrak können die Arbeiter, welche Strassenböschungen mähen, den sich annähernden Verkehr wahrnehmen und zu Seite stehen.»

«Bei schlechtem Boden macht sich das Mehrgewicht bemerkbar»

«Die Kosten schrecken noch ab – Es gibt sicherlich Förderungen dafür»

«Ideal um am Frühen morgen die Anlage von Laub zu befreien»

« Von Griffheizung über Licht, an alles für den Wintereinsatz gedacht»

«Trittbrettfahren macht spass»

«mit der schmalen Bereifung ist der Einsatz in der Gemeinde denkbar»



4.6 Energiespeichersystem

Die Verwendung des Monotracs als Speichersystem ist bei Interessenten und Interessentinnen sehr gefragt. Deshalb und weil es die Wirtschaftlichkeit des Monotracs erhöht, wurden zwei Systeme von unterschiedlichen Herstellern erfolgreich getestet und in Betrieb genommen worden.

Einachsgeräteträger stehen bei den meisten Betrieben nicht das ganze Jahr über täglich im Einsatz. Eine Zweitnutzung als Energiespeicher bietet sich aufgrund dessen an. Steht zusätzlich eine Photovoltaikanlage zur Verfügung erhöht dies die Relevanz weiter. Das untenstehende Beispiel zeigt, wie überschüssiger Solarstrom, welcher ohne Speicher in das Netz gespiesen würde, in den Batterien des Monotracs gespeichert wird. Übersteigt der aktuelle Stromverbrauch die Solarstromproduktion, so wird die gespeicherte Energie aus den Batterien genutzt und damit der Verbrauch vom Stromnetz reduziert.

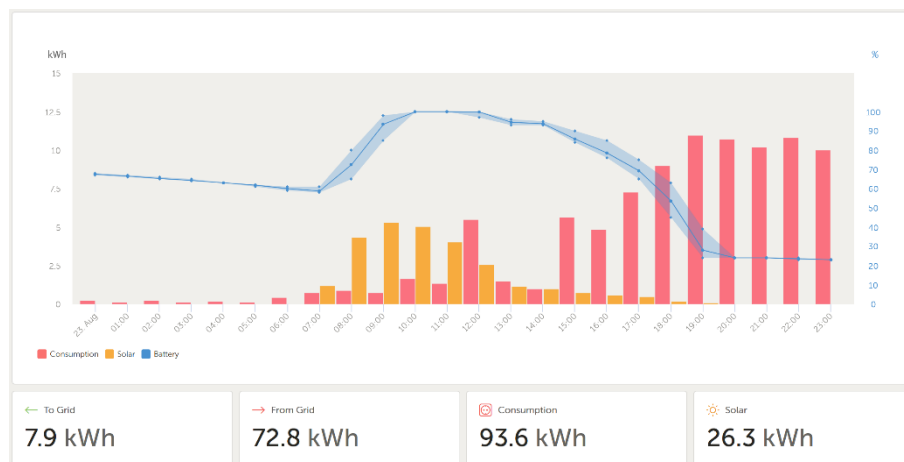


Abbildung 45: Beispiel Energiespeicher



Abbildung 46: Monotrac als Energiespeicher



4.7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die folgende Kostenrechnungen basieren auf der Basis einer Kleinserie vom monotrac von 20 Stück.

4.7.1 Beispielrechnung Landwirtschaftsbetrieb

Berechnungsgrundlage

Maschinenstunden pro Jahr	200 h
Effiziente Tage als Energiespeicher	250 Tage
Nutzbare Speicherkapazität für Solarspeicher	12 kWh
Differenz zwischen Einspeise- und Kaufpreis	15 Rp/kWh
Berechnungszeitraum	10 Jahre

	Monotrac	Monotrac mit Speichernutzung	Verbrenner
Kaufpreis Grundmaschine	CHF 50'000.00	CHF 50'000.00	CHF 38'000.00
Option Speichersystem		CHF 5'000.00	
Nichtanfallende Anschaffungskosten eines 12kWh Hausspeichers		CHF 10'000.00	
Verbrauch pro Stunde	3.50 kWh	3.50 kWh	2.50 l
Strompreis/Benzinpreis [CHF/kWh] [CHF/l]	CHF 0.20	CHF 0.20	CHF 1.85
Betriebskosten pro Jahr	CHF 140.00	CHF 70.00	CHF 925.00
Betriebskosten Berechnungszeitraum	CHF 1'400.00	CHF 700.00	CHF 9'250.00
Wartungskosten pro Jahr	CHF 500.00	CHF 500.00	CHF 2'000.00
Wartungskosten Berechnungszeitraum	CHF 5'000.00	CHF 5'000.00	CHF 20'000.00
Reduktion durch Speichernutzung pro Jahr		-CHF 450.00	
Reduktion durch Speichernutzung Berechnungszeitraum		-CHF 4'500.00	
Anschaffungskosten	CHF 50'000.00	CHF 45'000.00	CHF 38'000.00
Betriebskosten	CHF 1'400.00	CHF 700.00	CHF 9'250.00
Wartungskosten	CHF 5'000.00	CHF 5'000.00	CHF 20'000.00
Einsparung durch Speichernutzung		-CHF 4'500.00	
Gesamtkosten über Berechnungszeitraum	CHF 56'400.00	CHF 46'200.00	CHF 67'250.00

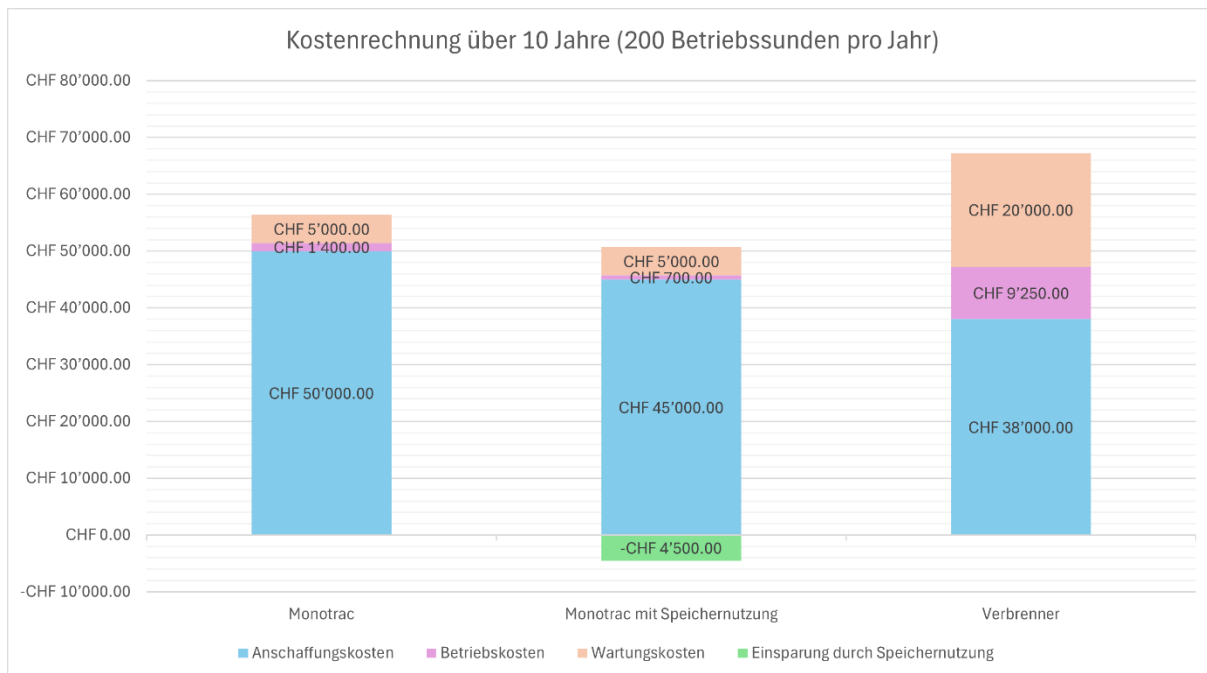


Abbildung 47: Kostenrechnung Landwirtschaftsbetrieb

Es zeigt sich, dass über einen Zeitraum von 10 Jahren, die Gesamtkosten eines Monotracs tiefer sind als bei einem vergleichbaren Verbrenner. Noch besser sieht die Kostenrechnung aus, wenn der Monotrac zusätzlich als Energiespeicher verwendet wird. Die Zusatzkosten die dafür anfallen, werden durch die eingesparten Stromkosten aufgehoben.

Der Berechnung liegt die Annahme zu Grunde, dass der Monotrac als direkter Ersatz für eine vergleichbare Maschine mit thermischem Antrieb genutzt wird. Es ist jedoch denkbar, mit dem Monotrac Arbeiten zu verrichten, welche bisher mit kleinen Traktoren ausgeführt wurden. Falls dies Umgesetzt wird, verbessert sich die Bilanz des Monotracs nochmals deutlich.



4.7.2 Beispielrechnung Kommunalbetrieb

Berechnungsgrundlage

Maschinenstunden pro Jahr
Berechnungszeitraum

400 h
10 Jahre

	Monotrac	Verbrenner
Kaufpreis Grundmaschine	CHF 44'000.00	CHF 25'000.00
Verbrauch pro Stunde	3.50 kWh	2.50 l
Strompreis/Benzinpreis [CHF/kWh] [CHF/l]	CHF 0.20	CHF 1.85
Betriebskosten pro Jahr	CHF 280.00	CHF 1'850.00
Betriebskosten Berechnungszeitraum	CHF 2'800.00	CHF 18'500.00
Wartungskosten pro Jahr	CHF 500.00	CHF 2'000.00
Wartungskosten Berechnungszeitraum	CHF 5'000.00	CHF 20'000.00
Anschaffungskosten	CHF 44'000.00	CHF 25'000.00
Betriebskosten	CHF 2'800.00	CHF 18'500.00
Wartungskosten	CHF 5'000.00	CHF 20'000.00
Gesamtkosten über Berechnungszeitraum	CHF 51'800.00	CHF 63'500.00

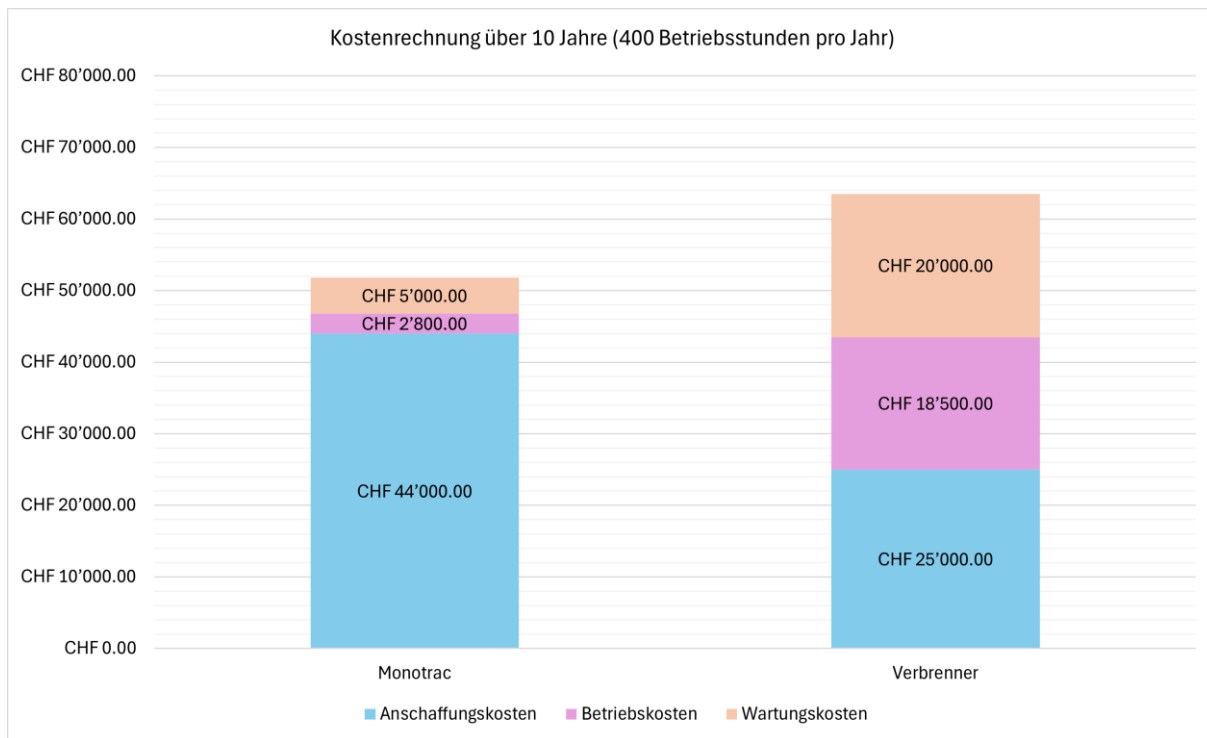


Abbildung 48: Kostenrechnung Kommunalbetrieb

Im Kommunalen Bereich werden oft kleinere Maschinen eingesetzt als in der Landwirtschaft, da mit kleineren Anbaugeräten gearbeitet wird. Deshalb wurde bei dieser Berechnung ein Monotrak bestückt mit 2 Akkus (12kWh Batteriekapazität) einem kleineren Verbrenner gegenüber gestellt.

Bei kommunalen Betrieben werden meist deutlich mehr Betriebsstunden absolviert, weshalb die Betriebskosten deutlich mehr ins Gewicht fallen. Aufgrund der vielen Betriebsstunden, macht bei den meisten Betrieben eine Zweitnutzung als Energiespeicher weniger Sinn als in der Landwirtschaft. Auf eine Berechnung mit Berücksichtigung eines Energiespeichersystems wurde daher verzichtet.



5 Schlussfolgerungen

Es hat sich gezeigt, dass der Monotrac alle Arbeiten verrichten kann, welche ein vergleichbarer Einachsgeräteträger verrichtet. Vorteile bringt der Monotrac bei der geringeren Lärmbelastung, das Ausbleiben von Abgasen und ein höheres Drehmoment der Antriebe, was sich besonders bei Arbeiten in steilem Gelände und bei Kraftintensiven Anwendungen positiv bemerkbar macht. Durch die tiefen Betriebs- und Wartungskosten kann es für Betriebe finanziell interessant sein, Arbeiten welche bisher mit einem Kleintraktor ausgeführt wurden, nun mit dem Monotrac zu erledigen. Dies würde sich auch positiv auf die Bodenbelastung und die Biodiversität auswirken. Dies sind insbesondere das Mähen und die Weidpflege nachdem die Weide durch Tiere abgegrast wurde.

Ein wichtiges Thema ist die Einsatzdauer. Hier unterscheiden sich die drei untersuchten Antriebsarten (vollelektrisch, elektrohydraulisch und Verbrenner) am deutlichsten. Die elektrohydraulische Variante hat eine kurze Einsatzdauer, da die Batteriekapazität bei diesem Konzept stark eingeschränkt ist und durch die Hydraulik die Effizienz nicht optimal ist. Der Verbrennungsmotor hat eine fast unendliche Einsatzdauer, wenn von dem Nachtanken abgesehen wird. Bei der vollelektrischen Variante hat sich herausgestellt, dass eine Einsatzdauer von 4 bis 6 Stunden ein Optimum bezüglich Gewicht/ Grösse/ Kosten und Laufzeit darstellt. Daher sind besonders Tätigkeiten mit einer Einsatzdauer bis maximal 6 Stunden ohne Nachlademöglichkeit für den vollelektrischen Einachsgeräteträger geeignet. Insbesondere im Kommunalbereich gibt es vielen Anwendungen (Mähen, Mulchen, Reinigen, Schneeschieben usw.) welche nicht mehr als 6 Stunden am Stück laufen.

Nachteile des Monotracs und von jedem rein Batteriebetriebenen Einachsgeräteträger zeigen sich bisher nur bei dem Gesamtgewicht und der zum Aufladen nötigen Stromnetzanbindung. Das Gesamtgewicht macht sich bei den allermeisten Arbeiten kaum bemerkbar, kann aber in gewissen Fällen einen negativen Einfluss haben. Die nötige Stromnetzanbindung zum Aufladen verlangt eine Umgewöhnung im Arbeitsablauf, da der Monotrac nicht wie eine Maschine mit thermischem Antrieb, am Einsatzort betankt werden kann. Die Laufzeit ist jedoch ausreichend lang und das Aufladen mittels Schnellladegerät schnell genug, um gewohnte Arbeitsleistungen zu erreichen. Dies wurde auch von externen Fachpersonen und Anwender, welche den Monotrac über längere Zeit getestet haben, bestätigt.

5.1 Wirtschaftlichkeit

Zwar liegt der Anschaffungspreis von Batteriebetriebenen Einachsgeräteträgern über einem vergleichbaren Einachsgeräteträger mit thermischem Antrieb, doch die Gesamtkosten über die Lebensdauer sollten geringer oder gleich ausfallen durch die tieferen Wartungs- und Betriebskosten. Besonders der Elektromotor ist in der Regel deutlich wartungsärmer als sein thermischer Verwandter. Und da der grösste Teil der anfallenden Wartungskosten bei Einachsgeräteträgern mit thermischem Antrieb auf das Antriebsmodul fallen, zeigt sich eine deutliche Kostenreduktion. Auch kleinere aber häufig aus zu führende Wartungsarbeiten, wie die Reinigung der Öl- und Kraftstofffilter entfallen komplett.

Die Reduktion der Betriebskosten entsteht aufgrund der Differenz zwischen Strom- und Kraftstoffpreisen und wegen des viel geringeren Energieverbrauches.

Bei den Materialkosten sind die sensitiven Komponenten die Batterien, gefolgt von den Elektromotoren, Gateway, Ladegerät und Umrichter. Bei steigender Stückzahl werden diese Kosten tiefer ausfallen. Auch ist zu erwarten, dass die Batteriepreise in Zukunft noch weiter sinken werden. Dies wirkt sich positiv auf die Anschaffungskosten aus und die Amortisationszeit sinkt deutlich auf unter 5 Jahre.



5.2 Erreichung der gesteckten Ziele

CO₂ Reduktion

Geht man von jährlich 400 Betriebsstunden aus, ergibt sich eine Einsparungspotenzial von 2782 kg CO₂ pro Jahr. Grundlage für die Berechnung sind die Daten aus den Verbrauchsmessungen während dem Mähen.

CO₂-Ausstoss während 400 Betriebsstunden:

- Monotrac → 60 kg CO₂
- Verbrenner → 2842 kg CO₂

Rein elektrischer Antriebsstrang

Es hat sich gezeigt, dass das Konzept eines rein elektrischen Einachsgeräteträgers funktioniert. Alle Funktionen wie Fahrantriebe, Antrieb der Anbaugeräte und Aktuatoren für Zusatzfunktionen, können mit elektrischen Komponenten umgesetzt werden.

Die meisten mit Einachsgeräteträgern gängigen Anbaugeräte konnten erfolgreich getestet und betrieben werden. Bei Anbaugeräten mit integriertem Antrieb (ePTO) muss der bestehende Antrieb durch einen elektrischen ersetzt werden.

Ein Verzicht auf die Hydraulik bringt folgende Vorteile:

- Weniger Wartung
- Weniger Verschleisssteile
- Weniger Bauteile
- Effizienter → höhere Einsatzdauer
- Leiser und weniger Vibrationen
- Neue Features möglich (Verstopfung von Schneefräse lösen, Drehen auf der Stelle, optimale Drehzahl vom Anbaugerät...)

Aus diesen Gründen ist bei einer Neuentwicklung einer Maschine in dieser Grösse der vollelektrische Ansatz dem elektrohydraulischen Ansatz vorzuziehen.

Steigerung der Energieeffizienz

Der Vergleich des rein elektrischen mit dem elektrisch-hydraulischen Antrieb zeigt, dass die Energieeffizienz um ~17-20% gesteigert werden konnte.

Diese Effizienzsteigerung des rein elektrischen Antriebsstrangs, bringt eine grössere Flächenleistung und längere Einsatzdauer mit sich. Dies wiederum macht Einachsgeräteträger mit rein elektrischem Antriebskonzept attraktiver und konkurrenzfähiger zu gängigen Einachsgeräteträger mit thermischem Antrieb macht.

Bei den Prototypen wurden drei Batterien verbaut mit einer gesamten nutzbaren Kapazität von 15.6 kWh. Diese Menge hat sich als angemessene Grösse für den Landwirtschaftlichen Einsatz erwiesen. Man erreicht damit ähnliche oder sogar höhere Flächenleistungen als eine vergleichbare Maschine mit thermischem Antrieb. Auch die Testfahrer haben bestätigt, dass der Monotrac angemessene Laufleistungen erreicht. Für den kommunalen Einsatz könnten zwei Batterien mit einer nutzbaren Kapazität von 10.4 kWh ausreichend sein, da dort die Arbeiten meist mit kleineren Anbaugeräten verrichtet werden und die Anwendungen weniger Energieintensiv sind. Der Test mit einer Maschine mit nur zwei Batterien steht jedoch noch aus.

Komfortsteigerung für den BedienerIn

Die erste Reaktion von Personen welche das erste Mal den Monotrac bedienen, ist meist, dass das Arbeiten sehr angenehm sei durch die viel geringere Lärmbelastung und das Ausbleiben von Abgasen.



Lärmmessungen haben ergeben, dass der Monotrac während dem Mähen um 8dBa leiser ist, als der Verbrenner. Die Lärmbelastung von 80dBa bedeutet, dass gemäss SUVA keine Lärmschutz-Massnahmen zu treffen sind (der Grenzwert liegt bei 85 dBa). (4)



6 Weiteres Vorgehen

6.1 Entwicklung

Bereits während der Erprobungsphase würden Gedanken zur Weiterentwicklung einer Überarbeiteten Version des Monotracs gemacht. Obwohl die Prototypen sehr zuverlässig und zufriedenstellend funktionieren, gibt es ein paar Details zu verbessern. Die laufenden Überarbeitungen sind:

- Schwerpunkt optimieren und die Gesamtabmasse der Maschine zu verringern
- Anpassungen an Grundkonstruktion, um Montage zu erleichtern
- Überarbeitung des Kabelbaums und damit Einbindung zusätzlicher Funktionen
- Erweiterung und Überarbeitung der Steuerung
- Erweiterung des Anbaugerätesortiments
- Verwendung als stationärer Speicher

Mit der Überarbeiteten Variante wird dann die Serienfertigung anlaufen. Parallel dazu werden diverse Vorführungen und Feldabende durchgeführt, um den Monotrac der Öffentlichkeit zu präsentieren und interessierten Personen zu ermöglichen die Maschine zu testen.

Nebst der Weiterentwicklung des Monotracs laufen parallel dazu Entwicklungen von damit in Verbindung stehender Systeme, wie eine eigene Cloud-Plattform, ein End-of-line Prüfstand und die Anbindung von Zusatzsystemen.

Die Eigenentwickelte Cloud-Plattform soll die Fernwartung der Monotracs ermöglichen und auch für andere Anwendungen kompatibel sein.

Der End-of-line Prüfstand wird für die anstehende Serienproduktion aufgebaut. Ist ein neuer Monotrac fertig montiert und inbetrieb genommen, soll der Prüfstand alle Funktionen automatisiert durchtesten und allfällige Fehler bereits vor dem Verlassen der Produktion aufspüren. Mögliche weitere Anwendungen des Prüfstandes könnten sein, Nachstellung von Situationen bei welchen ein Fehler aufgetreten ist und das Durchführen von Dauertests.

Es sind bereits einige Zusatzsysteme angebunden worden und weitere werden folgen. Die Anbindung einer Fernbedienung wurde bereits vollführt und es laufen erste Tests dazu. Dies wird weitere Einsatzmöglichkeiten ermöglichen, beispielsweise Arbeiten in gefährlicher Umgebung.

Weiter ist die Anbindung eines Systems welches einen Teil- oder Vollautonomen Betrieb ermöglichen würde denkbar.

Die Verwendung des Monotracs als stationärer Batteriespeicher wird immer wieder von potenziellen Kunden verlangt. Systeme von zwei verschiedenen Herstellern wurden erfolgreich getestet und in Betrieb genommen und weitere werden folgen. Besonders in der Landwirtschaft ist diese Anwendung sehr gefragt und auch sinnvoll, da der Monotrac dort meist nur einige Wochen im Jahr genutzt wird und die restliche Zeit als Energiespeicher genutzt werden kann. Zudem verfügen viele Landwirtschaftliche Betriebe über eine Photovoltaikanlage, was die Attraktivität eines stationären Speichers weiter steigert. Die zusätzliche Verwendung des Monotracs als Batteriespeicher erhöht zusätzlich dessen Wirtschaftlichkeit, da die Stromkosten reduziert werden und der Kauf eines exklusiven Speichersystems entfällt.

6.2 Vermarktung

Verkaufsstrategie

Der Verkauf soll über zwei unterschiedliche Kanäle laufen. Einerseits über Direktvermarktung, da der Monotrac eine innovative Marktneuheit darstellt und der Markt teilweise erst aufgebaut werden muss. Neben der Direktvermarktung wird ein Händlernetzwerk aufgebaut, was die Reichweite erhöht und ein Netz an Servicestandorten ermöglicht.



Kundensegmente

Es gibt vorwiegend die zwei Kundensegmente Landwirtschaft und kommunale Betriebe. Die Maschine wurde so konzipiert, dass sie den Anforderungen beider Kundensegmente gerecht wird. Mit einer auf das jeweilige Segment abgestimmten Spezifikation (Bereifung, Anbaugeräte, optionale Extras) wird der Monotrac optimal auf den Einsatz zugeschnitten ausgerüstet. Diese Spezifikationsvielfalt verbreitert das Kundensegment.

Es gibt auch noch Nischenanwendungen, welche für uns interessant sind. Der Einsatz in diesen muss aber erst noch getestet werden. Namentlich sind das die Pflege von Naturschutzgebieten und der Unterhalt von Solarparks.

Verkaufsmärkte

Zu Beginn wird vor allem der Verkauf und ein Händlernetzwerk in der Schweiz aufgebaut. Etwas verzögert soll auch in die Nachbarländer expandiert werden. Gebiete mit einem grossen Potenzial sind Österreich und das Südtirol in Italien. In einem nächsten Schritt soll der Einstieg in den deutschen Markt versucht werden.



7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit nationalen Unternehmen ermöglicht einfache Absprache, persönliche Besuche und genaues Controlling. Diese Vorteile sind im aktuellen Stadium der Prototypenentwicklung enorm hilfreich und lassen viele Unklarheiten zeitnah abstimmen. Der Standort Schweiz ist auch für den Einkauf von Komponenten, dank der Gewährleistung von hoher Qualität und Sicherheit, sehr interessant.

Mit folgenden Lieferanten oder Partnern besteht eine weiterführende Zusammenarbeit:

- Paul Forrer AG
 - Paul Forrer, als markenunabhängiger Landmaschinenhändler, soll unser Vertriebspartner werden. Das Unternehmen verfügt über ein sehr grosses Händlernetzwerk und ist daher ein wertvoller Partner für die kommende Serienproduktion.
- Hydac Engineering AG
 - Von Hydac Engineering AG beziehen wir die elektronischen Hauptkomponenten und pflegen eine enge Zusammenarbeit. Einige Komponenten wurde auf unsere Bedürfnisse massgeschneidert.
- Köppl Motorgeräte GmbH
 - Mit Köppl Motorgeräte GmbH arbeiten wir zusammen, da wir ihre Anbauschnittstelle beim mPTO verwenden. Dank ihrer Schnittstelle kann eine sehr breite Palette an Anbaugeräten von verschiedenen Herstellern verwendet werden.
- Beat Walser GmbH
 - Die Antriebslose Geräteschnittstelle der Firma Beat Walser GmbH, verwenden wir bei unserem ePTO. Ihr Produkt Bewaloc wurde auf unsere Bedürfnisse angepasst und ergänzt unser Produkt mit einer bewährten Schnittstelle bei Einachgeräteträgern.



8 Kommunikation

Der Monotrac erweckt immer stärker das Interesse der Öffentlichkeit. Er wurde mehrfach öffentlich ausgezeichnet sowie an diversen Messen und verschiedenen Veranstaltungen ausgestellt beziehungsweise thematisiert. Weiter erschienen in Medien (gedruckt und digital) Medienmitteilungen, Artikel und Interviews zu dem Monotrac. (genauere Angaben auf Anfrage)

- Messen
 - Energietag Maschinenring GR 09/2023
 - Agrialp Bozen 11/2023
 - Tier & Technik St. Gallen 02/2024
 - Agrimesse Thun 03/2024
 - BEA Bern 05/2024
- Feldabende
 - Röthenbach i.E 07/2023
 - Grosswangen 08/2023
 - Arezen 08/2023
 - Urnäsch 08/2023
 - St. Antönien 08/2023
 - Röthenbach i.E 06/2024
 - Mühlrüti 06/2024
 - Davos 07/2024
- Auszeichnungen
 - Gewinner Stratfeld Diamant 2024 der SGKB
 - Gewinner Alp Innovation Trophy 2024
 - Finalist Jungunternehmerforum Graubünden
 - Finalist CSEM digital journey



9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aebi	9
Abbildung 2: Anbaugeräte Rapid	9
Abbildung 3: Funktionsschema mit mPTO	13
Abbildung 4: Funktionsschema mit ePTO	13
Abbildung 5: Chassis.....	14
Abbildung 6: Radmotoren.....	15
Abbildung 7: Holmen ausgefahren	16
Abbildung 8: Holmen eingefahren	16
Abbildung 9: ePTO	17
Abbildung 10: Verschalung	17
Abbildung 11: Elektronik.....	18
Abbildung 12: eMesserbalken	19
Abbildung 13: Vorgehen bei Konzeptionierung.....	22
Abbildung 14: Vorgehen bei Konstruktion	23
Abbildung 15: Terminplan	25
Abbildung 16: DesignSpace	26
Abbildung 17: Konzept Bedieneinheit	27
Abbildung 18: Kartonmodell	27
Abbildung 19: 3D-Gesamtmodell	28
Abbildung 20: Prüfstand	28
Abbildung 21: Aufbau Prototyp.....	29
Abbildung 22: Kabelbaumfertigung	30
Abbildung 23: Prototyp verkabelt	30
Abbildung 24: Holmen 2.0	32
Abbildung 25: Cloud-Plattform	33
Abbildung 26: Test in steilem Gelände	34
Abbildung 27: Test mit Schneefräse	35
Abbildung 28: Vergleichsmessung Mähen Monotrac	37
Abbildung 29: Vergleichsmessung Mähen ePowerUnit	37
Abbildung 30: Vergleichsmessung Mähen Verbrenner	37
Abbildung 31: Vergleichsmessung Mähen Versuchsfeld	37
Abbildung 32: Vergleichsmessung Mulchen Monotrac	39
Abbildung 33: Vergleichsmessung Mulchen ePowerUnit	39
Abbildung 34: Vergleichsmessung Mulchen Verbrenner	39
Abbildung 35: Vergleichsmessung Mulchen Versuchsfläche	39
Abbildung 36: Vergleichsmessung Schneefräsen Monotrac	40
Abbildung 37: Vergleichsmessung Schneefräsen ePowerUnit	40
Abbildung 38: Vergleichsmessung Schneefräsen Verbrenner	40
Abbildung 39: Vergleichsmessung Schneefräsen Versuchsfläche	40
Abbildung 40: Vergleichsmessung Fahren Teststrecke	41
Abbildung 41: Beispiel Energiespeicher.....	46
Abbildung 42: Monotrac als Energiespeicher.....	46



10 Verweise

1. **BFE, Bundesamt für Energie.** *Energieetikette für Personenwagen: Umweltkennwerte 2021 der Strom- und Treibstoffbereitstellung.* 2021.
2. **Josephinum, HBLuFA Francisco.** *Prüfbericht Motormäher AEBl CC66.*
3. **BFE, Bundesamt für Energie.** *Energieetikette für Personenwagen: Umweltkennwerte 2023 der Strom- und Treibstoffbereitstellung.* 2023.
4. **suva.** Grenzwerte am Arbeitsplatz. <https://www.suva.ch/1903.d>. [Online]
5. **BFE/ASTRA, Bundesamt für Energie, Bundesamt für Strassen.** *Einführung WLTP in der Schweiz.* 2018.