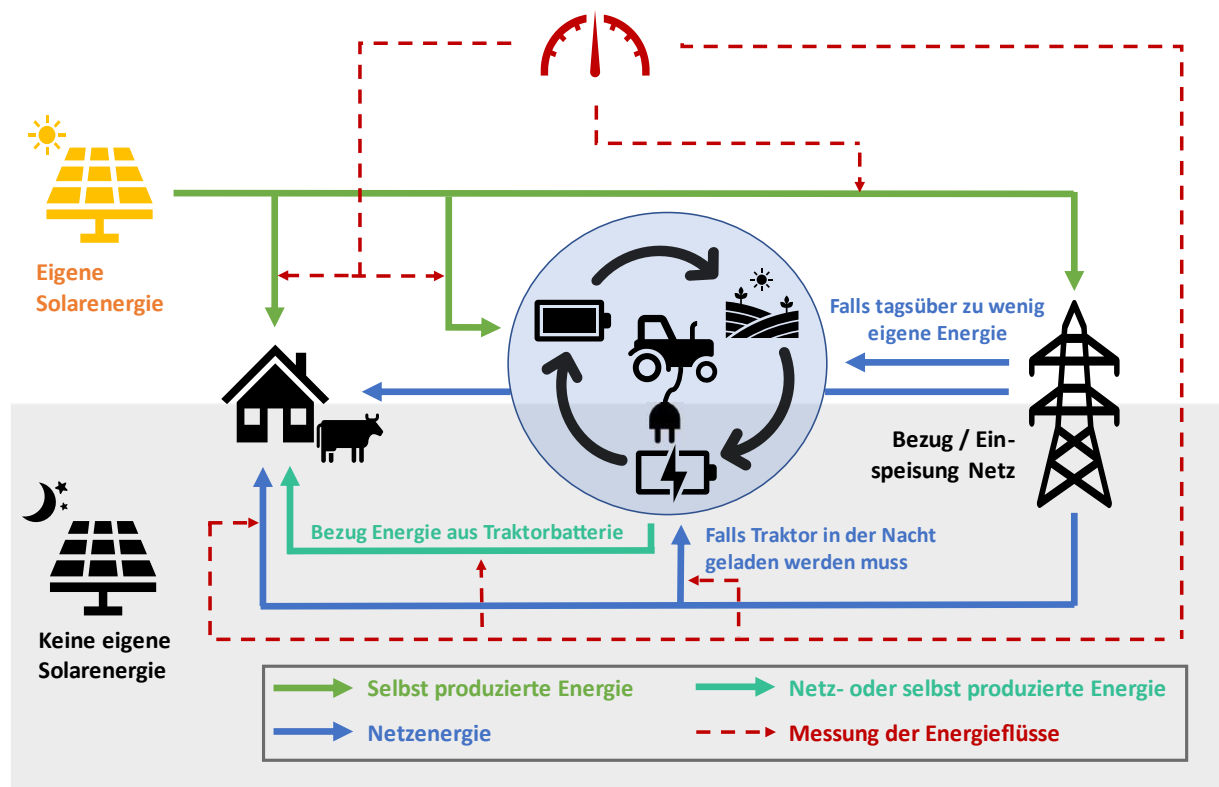




Zwischenbericht November 2024

AgElectricPowerPlus

Energieeffizienz-Steigerung auf Landwirtschaftsbetrieben mit batterieelektrischen Traktoren



Quelle: BFH-HAFL 2022



Datum: 20. November 2024

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

Rigitrac Traktorenbau AG
Aahusweg 2
6403 Küssnacht am Rigi

Berner Fachhochschule BFH-HAFL
Länggasse 85
3052 Zollikofen

Autor/in:

Roger Stirnimann, BFH-HAFL, roger.stirnimann@bfh.ch
Theres Beutler-Knüsel, Rigitrac Traktorenbau AG, tk@rigitrac.ch

BFE-Projektbegleitung:

Karin Söderström, BFE, karin.soederstroem@bfe.admin.ch
Luca Castiglioni, BFE, luca.castiglioni@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502406-01

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



Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes «AgElectricPowerPlus» soll ein batterieelektrischer Traktor für die Landwirtschaft entwickelt und gebaut sowie passende Anbaugeräte von hydraulischen auf elektrische Antriebe umgerüstet werden. Bei der anschliessenden Erprobung unter Praxisbedingungen soll untersucht werden, welche Energieeinsparpotenziale bei einer Gesamtbetrachtung solcher Traktor-Geräte-Kombinationen auf Landwirtschaftsbetrieben mit eigener Stromproduktion (Photovoltaikanlagen) möglich sind.

Seit dem Projektstart im Juni 2022 konnten von der BFH-HAFL in Zusammenarbeit mit Rigitrac Traktorenbau AG Lastprofile von verschiedenen Arbeitsgeräten unter Praxisbedingungen gemessen werden. Aus den Messungen ging u.a. hervor, dass die Lastspitzen bei landwirtschaftlichen Einsätzen im Vergleich zu solchen im Kommunalbereich wesentlich höher und von längerer Dauer sind. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde die Auslegung der E-Komponenten des neuen Traktors angepasst (v.a. Elektromotoren, Leistungselektronik und Batterie).

Parallel dazu wurden auf dem ausgewählten landwirtschaftlichen Partnerbetrieb erste Grobanalysen betreffend Stromanfall und Strombedarf gemacht, um Informationen für die Planung von weiterführenden Analysekonzepten zu generieren. Es zeigte sich, dass der Stromertrag von PV-Anlagen je nach Wetter und Jahreszeit sehr stark variiert, womit sich bei der Nutzung der Traktorbatterie als Stützbatterie ein hohes Potenzial ergeben könnte, um mehr vom selbst produzierten Strom zu nutzen.

Basierend auf den Lastenheftanforderungen und Lastprofilmessungen arbeitete Rigitrac Traktorenbau AG an der Konstruktion des neuen Traktors sowie an der Komponentenauslegung/-auswahl weiter. Letzteres erwies sich aufgrund der aktuell sehr vollen Auftragsbücher der Lieferanten allerdings als sehr schwierig und führt im Projekt zu erheblichen Zeitverzügen. Die Arbeiten liegen aktuell fast zwei Jahre hinter dem ursprünglichen Zeitplan, womit sich der Aufbau des Traktors entsprechend verzögert.

Zwei Kundentraktoren SKH 75 (Dieselmodelle) wurden 2024 mit Datenloggern ausgestattet, um die Nutzung auf landwirtschaftlichen Betrieben zu analysieren (Arbeitsarten, Einsatzdauer, Energieverbräuche usw.). Die Auswertungen haben gezeigt, dass mit der für den neuen E-Traktor vorgesehenen Batteriekapazität ein Grossteil der Arbeitstage ohne Nachladen abgedeckt werden könnte.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
1.1 Ausgangslage	6
1.2 Projektmotivation	6
1.3 Projektziele	7
2 Ausgangslage	8
2.1 Entwicklung E-Traktor	8
2.2 Elektrifizierte Anbaugeräte	10
2.3 Landwirtschaftlicher Pilotbetrieb	10
3 Vorgehen und Methode	11
3.1 Durchgeführte Messungen	11
3.2 Messequipment	11
4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	12
4.1 Drehmomentmessungen von Anbaugeräten	12
4.1.1 Praxismessungen mit Mischwagen	12
4.1.2 Praxismessungen mit Säkombination	13
4.1.3 Praxismessungen mit Scheibenmähdwerken ohne/mit Aufbereiter	14
4.1.4 Praxismessungen mit Doppelmessermähwerk	15
4.2 Volllastmessungen mit Referenztraktor Rigitrac SKH 75	16
4.3 Zugkraftmessungen mit Referenztraktor Rigitrac SKH 75	17
4.4 Volllastmessungen mit Rigitrac SKE 40 Electric	18
4.5 Zugkraftmessungen mit Rigitrac SKE 40 Electric	19
4.6 Strombedarf/-anfall auf dem Oescherhof	20
4.7 Analyse der Betriebsdaten Rigitrac SKH 75	22
4.7.1 Dieserverbrauch pro Tag	22
4.7.2 Energieverbrauch pro Tag	23
4.7.3 Ermittelter elektrischer Energieverbrauch pro Tag	24
4.8 Stand der Entwicklung Rigitrac SKE Projekt 112	25
5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse	26
6 Weiteres Vorgehen	27
7 Nationale und internationale Zusammenarbeit	28



Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current /Wechselstrom
DC	Direct Current / Gleichstrom
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt peak
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PSM	Permanentmagnet Synchronmotor
PV	Photovoltaik
SoC	State of charge
i_{FZW}	Übersetzungsverhältnis Frontzapfwelle
i_{HZW}	Übersetzungsverhältnis Heckzapfwelle
U_{HZW}	Drehzahl Frontzapfwelle
U_{H2W}	Drehzahl Heckzapfwelle



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Herausforderungen im Zusammenhang mit der weltweiten Klimaerwärmung erfordern ein Wegkommen von fossilen Energieträgern und die Suche nach Alternativen. Die Landwirtschaft wäre für die Selbstversorgung mit Energie eigentlich prädestiniert, da sich hier viele Möglichkeiten bieten: Biogasproduktion aus Pflanzenmaterial und Hofdüngern (Verstromung, Wärmenutzung, Aufbereitung zu Fahrzeugtreibstoff), Erzeugung von Solarenergie auf grossen Dachflächen, Produktion von Pflanzenölen (in Kombination mit Eiweissfuttermitteln) sowie kleinere Wind- und Wasserkraftanlagen. Nichtsdestotrotz ist die Landwirtschaft - wie andere Branchen auch – immer noch stark von fossilen Energieträgern abhängig.

Vom Bundesamt für Energie (BFE) gab es 2021 die Feldstudien-Ausschreibung «Markterprobung von innovativen elektrischen Fahrzeugen und Maschinen». Die Rigitrac Traktorenbau AG in Küsnacht am Rigi und die Berner Fachhochschule (BFH) beteiligten sich mit dem Projekt «AgElectricPowerPlus» an dieser Ausschreibung und erhielten hierfür den Zuschlag.

Im Zentrum des Projektes steht ein komplett neuer, batterieelektrischer Landwirtschaftstraktor, welcher von Grund auf so konzipiert wird, dass sich die Vorteile der Elektrifizierung konsequent nutzen lassen. Durch das Antriebskonzept mit mehreren E-Motoren werden nicht nur neue Funktionalitäten ermöglicht, sondern auch bessere Wirkungsgrade erzielt. Dank elektrischen Schnittstellen lassen sich zudem hydraulisch angetriebene Anbaugeräte durch solche mit elektrischen Antrieben ersetzen, was auch eine höhere Effizienz des Gesamtsystems «Traktor-Gerät» erwarten lässt. Auf typischen Schweizer Landwirtschaftsbetrieben mit Photovoltaikanlagen liessen sich nach Einschätzung des Projektteams dank batterieelektrischen Traktoren überdies der Nutzungsgrad von eigenem Strom erhöhen und CO₂-Emissionen vermindern. Weitere Energievorteile könnten eventuell durch Nutzung der Batterie(n) als Puffer während Randzeiten erzielt werden.

1.2 Projektmotivation

Es gibt kaum marktverfügbare Fahrzeuge mit alternativen Antriebssystemen, das Interesse an solchen Fahrzeugen wäre in der Praxis aber vorhanden und innovative Landwirte/Unternehmer mit eigener Energieproduktion signalisieren immer wieder Kaufbereitschaft.

Im Rahmen dieses Projektes soll der Traktor entwickelt und gebaut sowie passende Anbaugeräte von hydraulischen auf elektrische Antriebe umgerüstet werden. Mit den erfassten Daten von Dieselfahrzeug, Solaranlage, Nutzungsprofil soll in Verbindung mit der Speichergrosse untersucht werden, welche Energieeinsparpotenziale bei einer Gesamtbetrachtung solcher Traktor-Geräte Kombinationen auf Betrieben mit eigener Stromproduktion möglich sind.

Ziel ist es, einen landwirtschaftstypischen Traktor zu entwickeln, welcher in den alltäglichen Anwendungen eingesetzt werden kann.



1.3 Projektziele

Entwicklung/Aufbau/Erprobung des neuen E-Traktors

- Wie sehen die Leistungsflüsse (Fahrtrieb, Zapfwelle, Hydraulik) und die Gesamtenergieverbräuche bei einem 75kW-Traktor mit Dieselmotor bei typischen Arbeiten auf einem Milchwirtschaftsbetrieb aus (Grundlage für die technische Auslegung des neuen Batterietraktors)?
- Wie müssen die Antriebskomponenten (Fahrtrieb, Zapfwelle, Hydraulik) ausgelegt werden, damit es beim E-Traktor gegenüber der Dieselvariante möglichst wenig Nutzungseinschränkungen gibt?

Auslegung/Umbau/Erprobung von geeigneten E-Anbaugeräten

- Welche Anbaugeräte eignen sich für die Elektrifizierung (Aufwand/Nutzen, Wirtschaftlichkeit)?
- Wie sollen die Anbaugeräte elektrifiziert werden (E-Motor-Typen, Anordnung der Wechselrichter, Schnittstellen usw.)?

Einsatz des E-Traktors für typische Arbeiten unter realen Bedingungen, Erfassen der Energieverbräuche, Berechnen der CO₂-Reduktionspotenziale

- Welche Energieeinspar- und CO₂-Reduktionspotenziale können bei der Elektrifizierung von Traktor-Geräte-Kombinationen in der Aussenwirtschaft erreicht werden?

Ermitteln der Auswirkungen auf den Nutzungsanteil von eigenem PV-Strom durch E-Traktor-Einsatz in der Aussenwirtschaft

- Wie hoch ist der Strombedarf eines typischen Milchwirtschaftsbetriebes (unter Berücksichtigung der Tagesverläufe, Jahreszeiten, Wetterverhältnisse usw.)?
- Wie viel dieses Bedarfes kann durch eigene PV-Anlagen typischerweise gedeckt werden (Überschüsse/Defizite)?
- Um wie viel kann der Nutzungsanteil von eigenem PV-Strom mit einem E-Traktor auf solchen Betrieben erhöht werden?

Ermitteln der Auswirkung auf den Nutzungsanteil von eigenem PV-Strom durch Verwendung des E-Traktors als «Stützbatterie» für innenwirtschaftliche «Verbraucher» (Melkanlage, Kühlsysteme, Heubelüftung, Lüftungsanlagen, Licht, Rührwerke...)

- Wann und wie kann PV-Überschussstrom am besten genutzt werden (Einsatzplanung, Ladezeiten/-leistungen, Ladearten AC/DC usw.)?
- Welche Effekte können durch Nutzung des E-Traktors als «Stützbatterie» in Kombination mit bidirektionalen Ladestationen erzielt werden?
- Könnten diese Effekte durch den Einsatz von Wechselbatterien weiter erhöht werden?

Wirtschaftlichkeitsberechnungen

- Könnte die Wirtschaftlichkeit weiter verbessert werden, wenn Verbrauchsspitzen während Hochtariifphasen gebrochen werden (z.B. auch Laden ab Netz während Niedertarifphasen)?
- Wie viel höher darf der Anschaffungspreis eines E-Traktors sein, damit sich dieser gegenüber einem herkömmlichen Diesel-Traktor mittel- und längerfristig lohnt?
- Einsatzplanung/Energiemanagement: Mit welchen Strategien lassen sich die Nutzungsanteile von eigenem PV-Strom und die Wirtschaftlichkeit am besten erhöhen?



2 Ausgangslage

2.1 Entwicklung E-Traktor

Der neue E-Traktor soll konsequent als batterieelektrisches Fahrzeug ausgelegt werden, womit er sich von Traktoren mit klassischer Antriebstechnik grundlegend unterscheidet. Das Grundkonzept, basierend auf dem bereits entwickelten kommunalen Kleintraktor Rigitrac SKE40 ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Der Fahrtrieb erfolgt über einen zentralen E-Motor, der an ein zweistufiges Fahrbereichsgetriebe angeflanscht ist. Dieses Getriebe fungiert gleichzeitig als Verteilergetriebe für Vorder- und Hinterachse und beinhaltet auch die Allradkupplung. Die beiden Zapfwellen (vorne/hinten) werden ebenfalls über E-Motoren angetrieben, was die neuen Eigenschaften «variable Drehzahl» und «variable Drehrichtung» ermöglicht. Ein weiterer E-Motor ist für die Arbeitshydraulikpumpe vorgesehen. Trotz einfacher Pumpentechnik (Zahnradpumpe) kann über die E-Motor-Drehzahl ein variabler Förderstrom für ein Load-Sensing-System dargestellt werden. Neben den klassischen Leistungsabgabemöglichkeiten Räder, Zapfwellen und Hydrauliksteuergeräte kommt beim E-Traktor noch eine neue, vierte Möglichkeit dazu: Die «elektrischen Schnittstellen» vorne und hinten (Powerbus). Die Kühlung/Heizung der Kabine sowie das «Batterie-Thermomanagement» erfolgen über ein effizientes Wärmepumpensystem mit elektrisch angetriebenem Kompressor. Die Energie für diese Antriebsmotoren kommt aus einer 400-V-Hochleistungsbatterie.

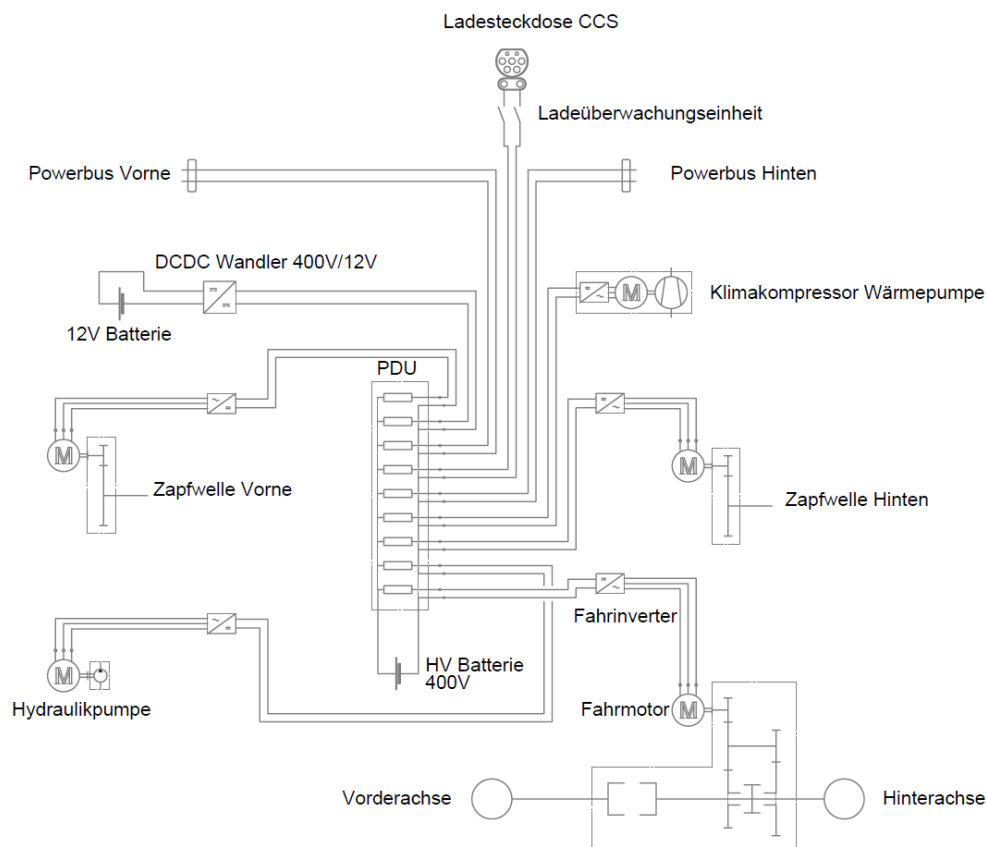


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Antriebssystems des E-Traktors



Eine weitere Besonderheit bei batterieelektrischen Antriebskonzepten stellt das Laden der Batterien dar. Hierfür stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung: Schnellladen mit Gleichstrom (DC) über eine fest installierte Ladestation oder batterieschonendes Laden mit Wechselstrom (AC) über ein On-Board-Ladegerät. Hinter diesen Ladearten stehen unterschiedliche Ladeleistungen, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Ladedauer haben. Die möglichen Ladeleistungen hängen wiederum von der verfügbaren Netzinfrastruktur und vom State-of-Charge (SoC) der Batterie(n) ab. Letzteres kann in Form von Ladekennlinien berücksichtigt werden, die sich mit anderen Fahrzeugen vergleichen lassen.

Aus Abbildung 1 gehen die zahlreichen Möglichkeiten für traktorinterne Energie-Messstellen hervor. Damit können u.a. die Energieverbräuche von typischen Funktionen wie «Fahren», «Zapfwellenantrieb» und «Hydraulikantrieb» gemessen werden.

Die nachstehende Auflistung beinhaltet wichtige «Eckdaten» aus dem Pflichtenheft:

- Baugrösse ähnlich wie Dieseltraktor Rigitrac SKH75
- Standardtraktorkonzept mit Pendelachse/Achsschenkelenkung vorne (im Gegensatz zum Rigitrac SKH75, der auf einem Trac-Konzept mit vier gleich grossen Rädern, Allradlenkung und Mitteldrehgelenk basiert)
- Grösste Bereifung hinten 540/65R28 (Aussendurchmesser ca. 1.45 m), grösste Bereifung vorne 440/65R24
- Fahrtrieb: Wassergekühlter E-Motor (PSM) mit noch zu bestimmender Leistung (im Rahmen dieses Projektes), 2-stufiges Fahrbereichsgetriebe mit mechanischer Schaltung und integrierter Allradkupplung, maximale Zugkraft 35 kN, maximale Fahrgeschwindigkeit 40 km/h
- Zapfwelle hinten: Stufenloser Antrieb mit wassergekühltem E-Motor (PSM) mit noch zu bestimmender Leistung (im Rahmen dieses Projektes), ausgelegt auf Geräte-Normdrehzahlen von 540 und 1000 1/min
- Zapfwelle vorne: Stufenloser Antrieb über wassergekühlten E-Motor (PSM) mit noch zu bestimmender Leistung (im Rahmen dieses Projektes), ausgelegt auf Geräte-Normdrehzahl 1000 1/min
- Traktionsbatterie: Lithium-Ionen-Technologie, Nennspannung 400 V, ein Modul mit 50 kWh in der Grundausrüstung, ein zweites 50-kWh-Modul als Option, Lebensdauer 3000 Zyklen
- Thermomanagement für Batterie(n) / Leistungselektronik / E-Maschinen und Kabine über Wärmepumpensystem mit elektrisch angetriebenem Kompressor
- 3-Punkt-Hubwerke in Front und Heck
- Load-Sensing-Arbeitshydraulik mit Zahnradpumpe (Q_{\max} 60 l/min, p_{\max} 180 bar und P_{\max} 21 kW), variables Fördervolumen durch stufenlosen Antrieb über E-Motor (PSM)
- Elektrische Schnittstellen (Powerbus) vorne und hinten (optional)
- Integriertes AC-Ladegerät, optional DC-Schnellladen über externes Ladegerät
- Beleuchtung LED



2.2 Elektrifizierte Anbaugeräte

Die Elektrifizierung von Traktor-Anbaugeräten ist vor allem bei solchen mit tiefem/mittlerem Antriebsleistungsbedarf sinnvoll. Typische Beispiele auf Schweizer Grünlandbetrieben sind Doppelmesser-Mähwerke oder alternative Schwadersysteme (z.B. Kammschwader oder Bandrechen). Diese sind heute oft mit mechanisch-hydraulischen Antrieben ausgestattet: Über die Zapfwelle wird eine Hydropumpe angetrieben, welche die mechanische in hydraulische Leistung umwandelt. Die hydraulische Leistung wird über Leitungen/Ventile zu einem Hydromotor geführt, wo sie wieder in mechanische Leistung für den eigentlichen Geräteantrieb umgewandelt wird (z.B. Messerbalken). Mit einem E-Motor, der über elektrische Schnittstellen am Traktor mit Energie versorgt werden kann, könnte die mehrfache, verlustbehaftete Energieumwandlung vermieden werden. Aus diesem Grund soll ein Doppelmesser-Mähwerk von «BB-Umwelttechnik» auf E-Antrieb umgerüstet werden.

2.3 Landwirtschaftlicher Pilotbetrieb

Wie in der Einleitung erwähnt, liessen sich mit batterieelektrischen Traktoren auf typischen Schweizer Landwirtschaftsbetrieben mit Photovoltaikanlagen nach Einschätzung des Projektteams weitere Effekte erzielen, die zu einer effizienteren Energienutzung und weiteren Vorteilen führen können (Nutzung der Batterien als Puffer während Randzeiten, Erhöhen des Nutzungsgrades von eigenem Strom usw.).

Diese Effekte sollen am Beispiel eines typischen Schweizer Landwirtschaftsbetriebes mit eigener PV-Anlage ermittelt und quantifiziert werden. Mit Markus Hugi aus Niederösch konnte ein innovativer Partner gefunden werden, der bereit ist, die notwendigen Informationen (z.B. 24h-Strombedarf/-anfall bei Schön-/Regenwetter, im Sommer/Winter usw.) zur Verfügung zu stellen und bei Bedarf auch zusätzliche Zähler installieren zu lassen.

Weitere Informationen über den «Oescherhof» von Markus Hugi gibt es auf der betriebseigenen Website: <https://oescherhof.ch/>



3 Vorgehen und Methode

Die E-Traktoren von Rigitrac sind von Grund auf so konzipiert, dass sich die Vorteile der Elektrifizierung konsequent nutzen lassen. Hieraus ergeben sich aber auch gewisse Herausforderungen/Fragestellungen, die von klassischen Traktoren mit Verbrennungsmotor und auch von anderen E-Traktorkonzepten mit zentralem E-Motor her nicht bekannt sind. Das betrifft beispielsweise die Auslegung und Regelung der E-Motoren für den Fahrantrieb und die Zapfwellen (Front/Heck).

Aus diesem Grund wurden die erforderlichen Antriebsmomente für verschiedene Anbaugeräte analysiert. Im Weiteren wurden Vollast- und Zugkraftmessungen mit dem Referenztraktor Rigitrac SKH75 und dem elektrischen Kleintraktor Rigitrac SKE40 (Kommunaltraktor) durchgeführt.

3.1 Durchgeführte Messungen

Folgende Messungen wurden im Berichtsjahr durchgeführt:

- Messung der erforderlichen Zapfwellen-Antriebsdrehmomente bei Arbeitsgeräten: Mischwagen, Säkombination mit Kreiselegge, Scheibenmäherwerke mit/ohne Aufbereiter und Doppelmessermäherwerk.
- Vollastmessungen mit Referenztraktor Rigitrac SKH 75 an der Zapfwellenbremse (Front- und Heckzapfwelle)
- Messung der Zugkräfte/-leistungen des Referenztraktor Rigitrac SKH 75 auf fester Fahrbahn
- Vollastmessungen mit Rigitrac SKE 40 Electric an der Zapfwellenbremse (Front- und Heckzapfwelle)
- Messung der Zugkräfte/-leistungen des Rigitrac SKE 40 Electric auf fester Fahrbahn

Die Antriebsdrehmomente, die für den Betrieb von Mischwagen und Säkombinationen mit Kreiselegge erforderlich sind, konnten im Sommer/Herbst 2022 auf drei verschiedenen Landwirtschaftsbetrieben gemessen werden. Die übrigen Messungen – Antriebsdrehmomente bei Scheibenmäherwerken mit/ohne Aufbereiter und bei einem Doppelmessermäherwerk sowie die Vollastmessungen auf dem Zapfwellenprüfstand und auf der Testbahn – wurden im Frühjahr 2023 durchgeführt.

Bei den Messungen des Rigitrac SKE40 ging es einerseits um die Ermittlung der effektiven Leistungswerte des sich mittlerweile in der Serienfertigung befindenden Kleintraktors, andererseits aber auch um das Verstehen von Zusammenhängen bei der Leistungselektrik (Spannung, Stromstärke, «State of Charge» usw.).

3.2 Messequipment

Für die Messung der Antriebsdrehmomente von Anbaugeräten im Praxiseinsatz, sowie die Vollastmessungen wurde der Drehmomentsensor «Manner MW_B_3kNm» verwendet. Die Zugkraftmessungen wurden mit dem 3-Achsen Kraftsensor «ME-Messsysteme K3D300» durchgeführt.



4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Arbeiten/Ergebnisse beispielhaft dargestellt, detailliertere Informationen sind in Zusatzdokumenten (intern) aufgeführt.

4.1 Drehmomentmessungen von Anbaugeräten

4.1.1 Praxismessungen mit Mischwagen

Mischwagen für die Futteraufbereitung erfordern einerseits hohe Antriebsleistungen, könnten andererseits aber auch für den Antrieb mit E-Traktoren prädestiniert sein, insbesondere im Winter. Aus diesem Grund wurden zwei Mischwagen gemessen, einer mit liegenden und einer mit stehenden Walzen.

Der Mischwagen BvL Mix Plus 20H-2 S mit stehenden Walzen, der am 09. September 2022 in Geltwil/Muri AG als Messobjekt diente wurde von einem John Deere 5100R über die 540er-Zapfwelle angetrieben. Genauere Informationen zu den Mischkomponenten sind in Zusatzdokumenten (intern) aufgeführt.

Abbildung 2: Drehmomentmessschrieb für eine der zwei Messungen mit BvL-Mischwagen beinhaltet den Messschrieb mit den Antriebsdrehmomenten über der Zeit in gefilterter Form. Sehr gut zu erkennen sind die hohen Schwankungen und der mit zunehmender Füllung ansteigende und dann auf hohem Niveau verbleibende Drehmoment-/Leistungsbedarf. Der Mischwagen war am Schluss fast komplett gefüllt, die Futterkomponenten wurden aber alle lose hineingegeben. Mit einer Zugabe in Ballenform wären die Drehmomentspitzen noch wesentlich höher gewesen. Die mittlere Leistung des Traktors betrug 45 kW.

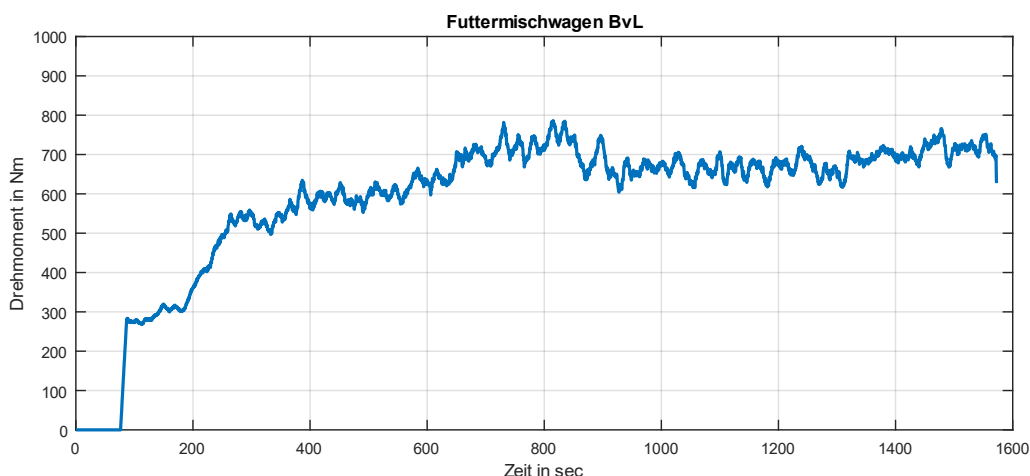


Abbildung 2: Drehmomentmessschrieb für eine der zwei Messungen mit BvL-Mischwagen

Der STORTI Boxer MT 150 Mischwagen mit zwei liegenden Walzen wurde am 23. September 2022 in Grafenried BE durchgemessen. Genauere Informationen über die Mischkomponenten und den Befüllvorgang sind ebenfalls in Zusatzdokumenten (intern) aufgeführt. Angetrieben wurde der Mischwagen mit einem Traktor Fendt 514 Vario mit 540E-Zapfwelle. Bei 1700 Motorumdrehungen kamen 610 Umdrehungen am Zapfwellenstummel an. Der Mischwagen wurde zuerst mit einer Rundballe Heu (in aufgelöster Form) beschickt und die Zapfwelle erst danach eingeschaltet. Dies führte zu einer Anlaufdrehmomentspitze von rund 400 Nm, Abbildung 3: Drehmomentmessschrieb für die Messung mit STORTI-Mischwagen. Nach kurzer Zeit kam eine Silageballe in kompletter Form dazu, was eine kurzzeitige Drehmomentspitze von über 800 Nm zur Folge hatte. Nach einer Mischdauer von ca. 600 Sekunden gab der Landwirt noch eine Raigras-Luzerne-Balle in mehreren Tranchen dazu, was zu



weiteren, aber kleineren Drehmomentspitzen führte. Die mittlere Leistung betrug 25 kW, zu beachten ist aber, dass der Mischwagen am Schluss nur zur Hälfte gefüllt war.

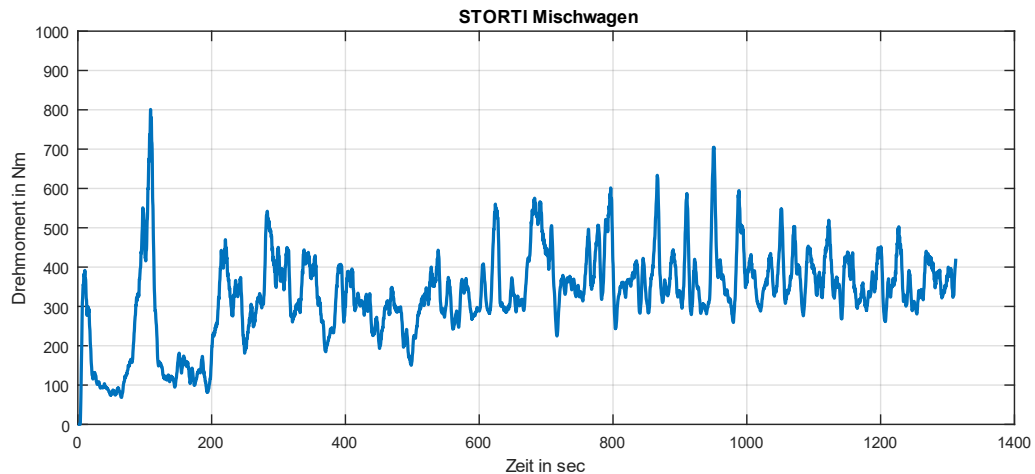


Abbildung 3: Drehmomentmessschrieb für die Messung mit STORTI-Mischwagen

4.1.2 Praxismessungen mit Säkombination

Zapfwellenbetriebene Bodenbearbeitungsgeräte erfordern je nach Bodenverhältnissen und Arbeitstiefen ebenfalls hohe Antriebsdrehmomente, weshalb am 12. Oktober 2022 in Niederörsch BE Messungen mit einer 3m-Säkombination (Kreiselegge mit Sämaschine) gemacht wurden. Gesät wurde in ein abgeerntetes und gegrubbertes Kartoffelfeld unter trockenen Bedingungen mit einem Traktor Fendt Farmer 309 (540er-Zapfwelle).

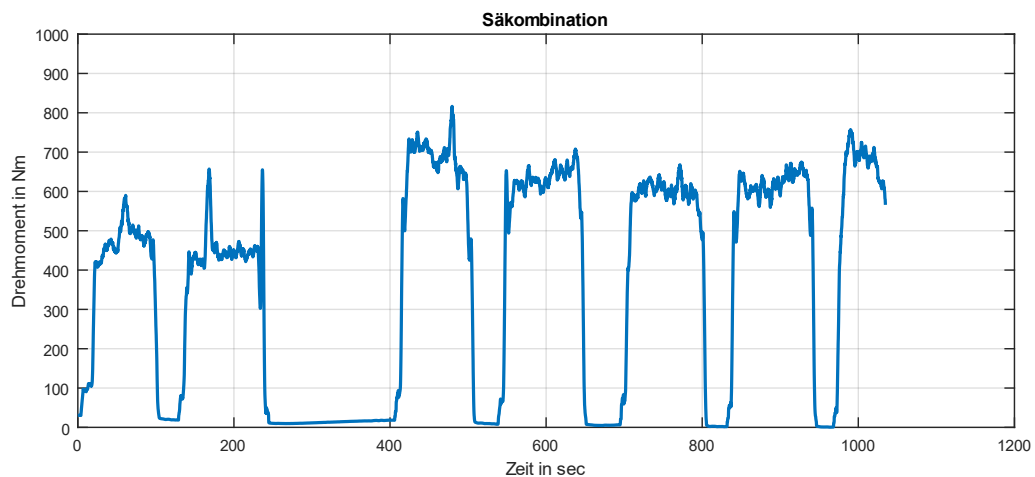


Abbildung 4: Drehmomentmessschrieb für den Feldeinsatz mit der 3m-Säkombination

Abbildung 4 beinhaltet wiederum einen Drehmomentmessschrieb über der Zeit. Im Zeitabschnitt von 30 bis 240 Sekunden gut zu erkennen ist eine Hin- und Herfahrt mitsamt Wendemanöver. Nach Anpassung der Arbeitstiefe (Vergrößerung) ging es bei rund 400 Sekunden mit weiteren Hin- und Herfahrten und entsprechend höheren Antriebsmomenten weiter. Die Schwankungen waren hier nicht mehr so stark wie bei den Mischwagen, die Drehmomente lagen wegen der Leistungsübertragung mittels 540er-Zapfwelle (grösseres Übersetzungsverhältnis und damit höhere Drehmomente) aber ebenfalls auf einem relativ hohen Niveau. Weil Leistung das Produkt aus Drehmoment und Drehzahl ist, resultieren daraus letztlich auch hohe (Dauer)Antriebsleistungen von 35 kW.



4.1.3 Praxismessungen mit Scheibenmähwerken ohne/mit Aufbereiter

Die Praxismessungen mit den Scheibenmähwerken wurden Ende Mai 2023 in Küssnacht SZ auf einer ertragreichen Kunstwiese (Klee-Raigras-Mischung) durchgeführt. Ausgewählt wurden hierfür zwei Scheibenmähwerke mit 3 m Arbeitsbreite, eines mit und eines ohne Aufbereiter. Neben den Drehmomentwerten des Manner-Sensors wurden auch CAN-Bus Daten des Dieseltraktors Rigitrac SKH 75 aufgezeichnet.

Der Messschrieb für eine Hin- und Herfahrt mitsamt Wendemanöver mit dem Scheibenmähwerk ohne Aufbereiter ist in Abbildung 5 zu sehen. Das aufgebrauchte Drehmoment betrug durchschnittlich 200 Nm (Fahrgeschwindigkeit ca. 8 km/h). Die aufgenommenen CAN-Bus Daten zeigen, dass der Gesamtleistungsbedarf bei der ersten Teilfahrt bei rund 50 kW lag, der Antriebsleistungsbedarf für das Mähwerk bei rund 20 kW.

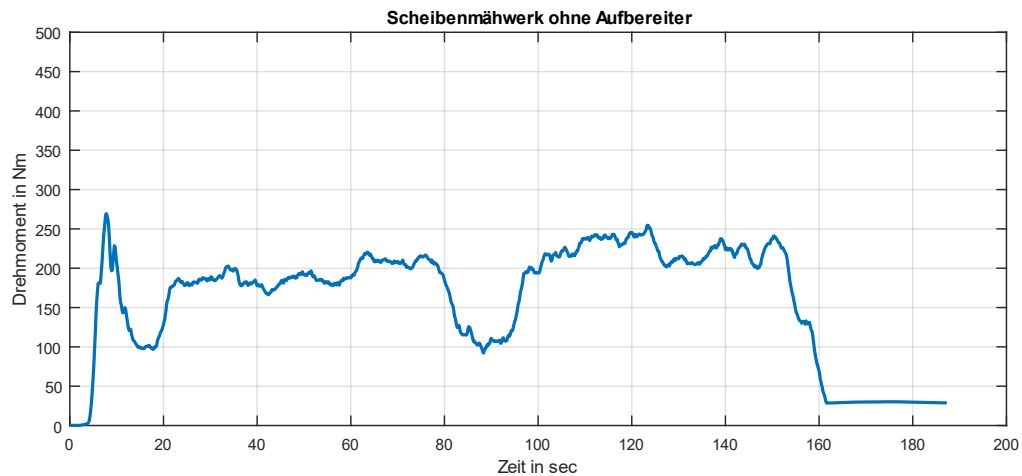


Abbildung 5: Drehmomentmessschrieb für eine Hin- und Herfahrt mitsamt Wendemanöver mit Mähwerk ohne Aufbereiter

Abbildung 6 zeigt zwei Hin- und Herfahrten mitsamt Wendemanövern mit dem Scheibenmähwerk mit Aufbereiter. Das maximal aufgebrauchte Drehmoment liegt bei 480 Nm. Bei Fahrgeschwindigkeiten von wiederum rund 8 km/h lag der Gesamtleistungsbedarf hier bei durchschnittlich rund 65 kW mit Spitzen von über 80 kW, gemäss CAN-Bus Daten. Der Antriebsleistungsbedarf für das Mähwerk bei rund 40 kW mit Spitzen bis 55 kW. Die Messung hat auch ergeben, dass die Leerlaufleistung des Mähwerkes mit Aufbereiter bereits 22 kW beträgt.

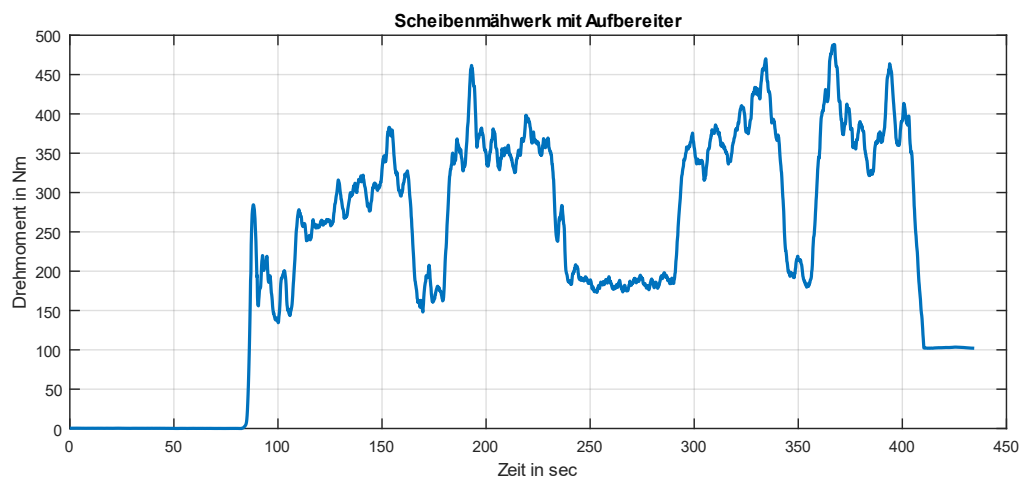


Abbildung 6: Drehmomentmessschrieb für zwei Hin- und Herfahrten mitsamt Wendemanövern mit Aufbereitermähwerk



4.1.4 Praxismessungen mit Doppelmessermähwerk

Am gleichen Tag, auf derselben Wiese und mit der gleichen Messtechnik wie bei den Scheibenmähwerken wurden auch die Messungen mit dem Doppelmessermähwerk durchgeführt.

Abbildung 7: Drehmomentmessschrieb für eine Fahrt mit dem Doppelmessermähwerk BB Seco Duplex 310 F ECO beinhaltet einen Messschrieb für das Doppelmessermähwerk, allerdings nur für eine Fahrt ohne Wendemanöver. Das erforderliche Drehmoment lag deutlich unter 100 Nm. Die SOLL-Geschwindigkeit von 8 km/h wurde hier erst im letzten Drittel erreicht, weshalb nur dieser Bereich mit den beiden vorstehenden Messschrieben verglichen werden kann. Aus den CAN-Bus Daten zeigt sich aber deutlich, dass der Dieselmotor für die Überwindung aller Fahr- und Antriebswiderstände lediglich 30 bis 35 kW bereitstellen musste und die Antriebsleistung für das Mähwerk bei maximal 6 bis 7 kW lag. Hieraus resultierten dann auch Treibstoffverbräuche von weniger als 10 l/h, was im Vergleich zum Mähen mit den Scheibenmähwerken wesentlich tiefer ist.

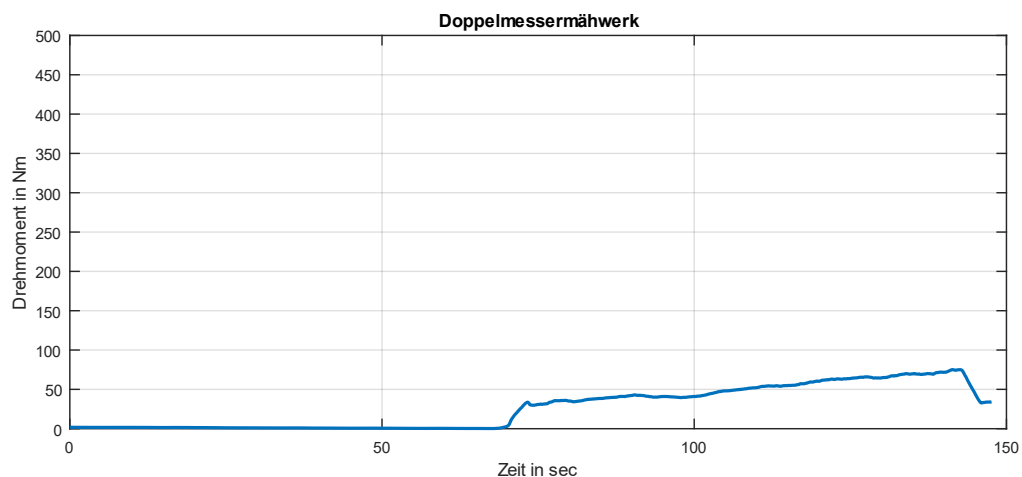


Abbildung 7: Drehmomentmessschrieb für eine Fahrt mit dem Doppelmessermähwerk BB Seco Duplex 310 F ECO



4.2 Volllastmessungen mit Referenztraktor Rigitrac SKH 75

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, soll der neue E-Traktor ähnliche Leistungswerte und Abmessungen aufweisen wie der Rigitrac SKH75. Dieser Traktor dient in diesem Projekt als «Referenz» und wurde deshalb Volllastmessungen an der Zapfwellenbremse unterzogen. Im Weiteren wurden auf einer Testbahn in Küssnacht SZ Zugkraftmessungen durchgeführt.

Bei den Messungen an der Zapfwellenbremse war der Manner-Drehmomentsensor installiert, um einen Messwertabgleich mit den CAN-Bus Daten vornehmen zu können. Zwischen den Messwerten gab es nur sehr geringe Unterschiede.

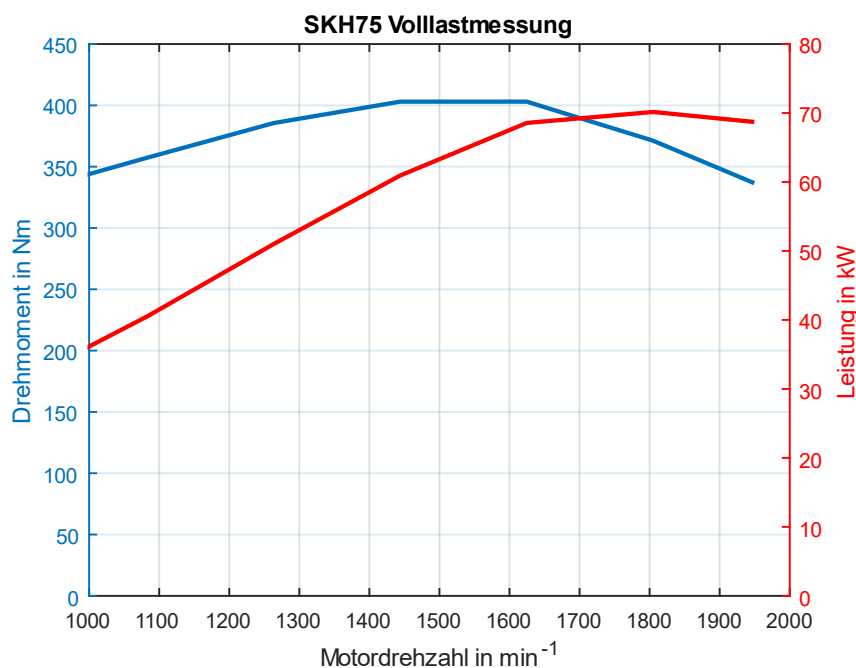


Abbildung 8: Volllastmessung am SKH75 mit ermitteltem Drehmoment in Nm und Leistung in kW

Wie aus Abbildung 8 hervorgeht, konnte am Heckzapfwellenstummel eine Maximalleistung von 70.2 kW bei einer Motordrehzahl von rund 1800 1/min gemessen werden, womit der 4-Zylinder-Dieselmotor von Deutz eine leicht ausgeprägte Überleistungscharakteristik aufweist. Diese resultiert aus der Kombination von rund 25% Drehmomentanstieg und rund 20% Drehzahlabfall. An der Frontzapfwelle konnte eine Maximalleistung von 72 kW gemessen werden. Unter Annahme eines Volllastwirkungsgrades von 0.89 dürfte der Dieselmotor so eine Netto-Maximalleistung von rund 80 kW (ca. 110 PS) aufweisen, was den Herstellerangaben entspricht.



4.3 Zugkraftmessungen mit Referenztraktor Rigitrac SKH 75

Mit dem gleichen Traktor wurden am gleichen Tag auch Zugkraftmessungen durchgeführt. Ein geeigneter Strassenabschnitt hierfür (asphaltiert, flach, wenig Verkehr) konnte in unmittelbarer Nähe des Rigitrac Firmengeländes gefunden werden. Für diese Messungen wurde der Rigitrac SKH 75 mit dem 3-Achsensensor ausgestattet. Für die Messung wurde ein schwerer Bremstraktor gezogen, der mit fest vorgegebenen Fahrgeschwindigkeiten fuhr. Diese Geschwindigkeiten wurden mit den bei Lastschaltgetrieben typischen Stufensprüngen von 1.2 festgelegt. Abbildung 9 zeigt die Zugkraftmessschriebe für die Fahrgeschwindigkeiten 5, 6 und 7.3 km/h.

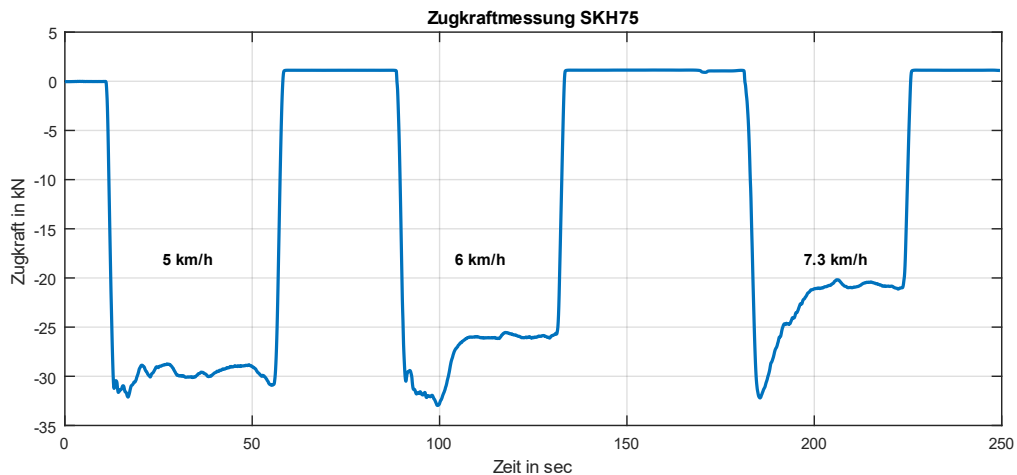


Abbildung 9: Zugkraftsensor-Messschrieb bei Fahrgeschwindigkeiten von 5, 6 und 7.3 km/h (SKH75)

Da bei jeder Messung aus dem Stand heraus angefahren wurde, sind die Zugkräfte zu Beginn hoch, nehmen im ersten Drittel ab und pendeln sich bei Erreichen der SOLL-Geschwindigkeit auf relativ konstantem Niveau ein. Mit den Durchschnittswerten hinter diesen «Plateaus» und den jeweiligen Fahrgeschwindigkeiten wurden dann die Zugleistungen berechnet.

Die maximale Zugkraft lag bei 34.75 kN, die maximale Zugleistung bei 41.7 kW. Die Gesamtwirkungsgrade von Antriebsstrang (Hydrostat-/Fahrbereichsgetriebe und Achsen bis Radnaben) und Fahrwerk (Reifen) lagen unter Annahme einer Netto-Motorleistung von 80 kW über einen relativ grossen Geschwindigkeitsbereich (4 bis 15 km/h) im Bereich von 0.5. Bei einem auf Asphalt oder Beton üblichen Fahrwerkswirkungsgrad von 0.85 resultieren daraus Volllastwirkungsgrade für den Antriebsstrang von rund 0.6, was für direkte Hydrostatgetriebe eine übliche Grössenordnung ist. Diese Eckwerte sollen mit dem neuen E-Traktor ebenfalls erreicht oder sogar übertroffen werden.



4.4 Volllastmessungen mit Rigitrac SKE 40 Electric

Auch mit dem Rigitrac SKE 40 Electric wurden Volllastmessungen nach dem gleichen Prozedere wie beim SKH 75 gemacht. Zusammen mit den CAN-Bus Daten konnten daraus wertvolle Informationen für die Entwicklung des neuen E-Traktors und von elektrischen Fahrzeugen allgemein gewonnen werden.

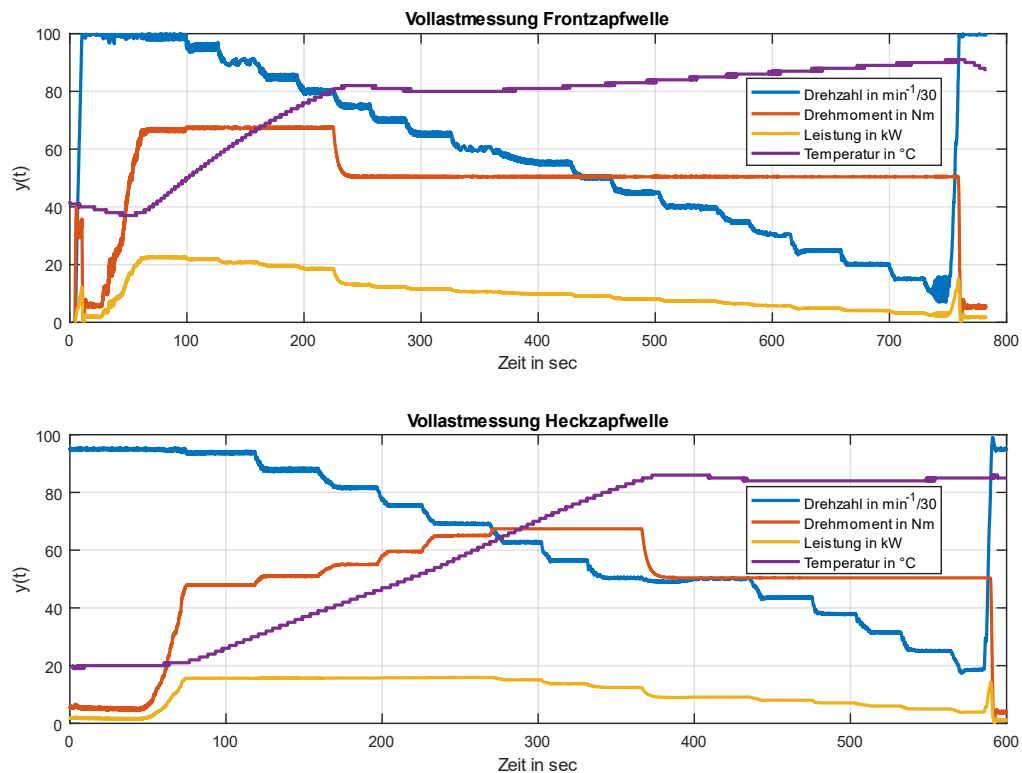


Abbildung 10: Volllastmessung an der Front- und Heckzapfwelle des SKE40 mit berechnetem Drehmoment in Nm (äquivalentes Drehmoment), Leistung in kW des E-Motors, Motordrehzahl in min^{-1} und Motortemperatur in Grad Celsius.

Gut zu erkennen ist das sogenannte «de-rating» bei Kühlmitteltemperaturen von mehr als 82 °C, Abbildung 10. Damit es nicht zu einer Überhitzung des Motors kommt, wird das Drehmoment zu diesem Zeitpunkt von 68 Nm auf 50 Nm reduziert. Beim Vergleich mit den Messwerten an der Frontzapfwelle, stellte sich heraus, dass der E-Motor der Heckzapfwelle trotz Baugleichheit im oberen Drehzahlbereich nicht die gleiche Leistung erbrachte. Das Problem konnte durch Anpassung eines Parameters in der Leistungselektronik behoben werden. Bei einer Motordrehzahl von 0 - 3000 min^{-1} wird der Motor bei korrekter Kühlung ein gleichbleibendes Drehmoment von 68 Nm und somit einen linearen Anstieg der Leistung aufweisen.

Bei diesen Messschritten ist zu beachten, dass bei einer Zapfwellenvolllastmessung bei Höchstdrehzahl gestartet und dann stufenweise der Widerstand erhöht wird, somit verringert sich die Drehzahl. Daraus ergibt sich bei gleichbleibendem Drehmoment ein Leistungsabfall.



4.5 Zugkraftmessungen mit Rigitrac SKE 40 Electric

Auch mit dem Rigitrac SKE 40 Electric wurden Zugkraftmessungen durchgeführt. Die Messergebnisse sind in Abbildung 11 zu sehen, die parallel dazu aufgezeichneten CAN-Bus Daten in Abbildung 12.

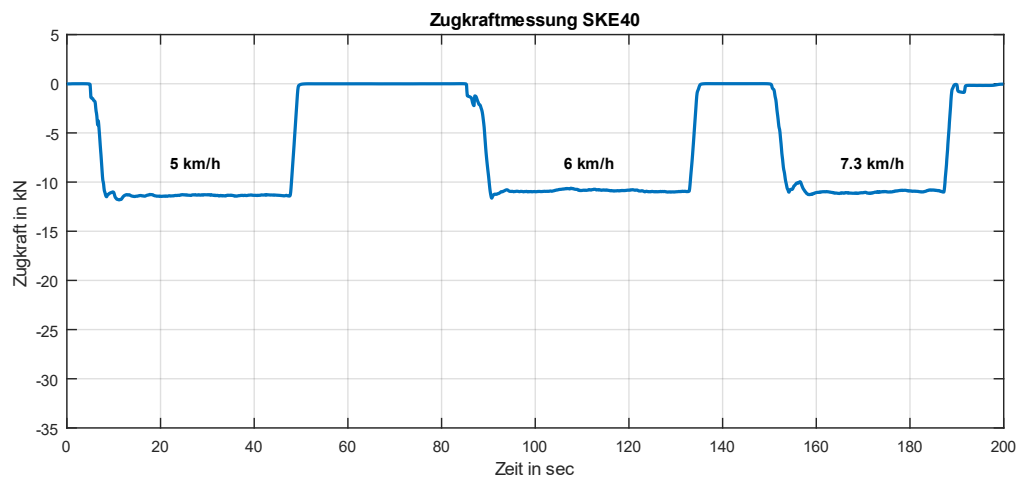


Abbildung 11: Zugkraftsensor-Messschrieb bei Fahrgeschwindigkeiten von 5, 6 und 7.3 km/h (SKE40)

Bei der Messung mit dem elektrisch angetriebenen Traktor ist deutlich zu sehen, dass das volle Drehmoment bereits bei niedrigen Drehzahlen zur Verfügung steht. Somit zeigen sich beim Anfahren kaum Zugkraftspitzen und die Zugkraft bleibt über die Zeit konstant. Die Zugkraft beträgt bei allen Geschwindigkeiten rund 11 kN.

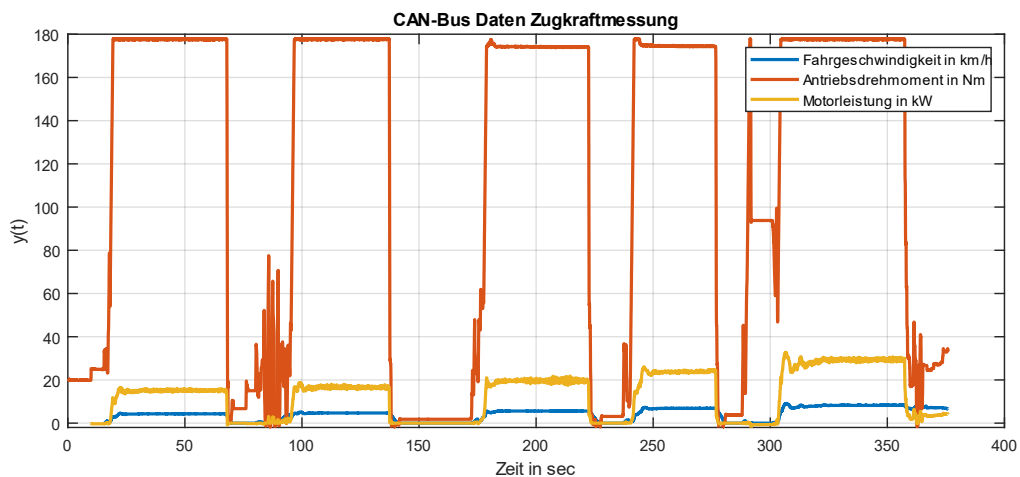


Abbildung 12: Darstellung von CAN-Bus Informationen über der Zeit während der Zugkraftmessung.



4.6 Strombedarf/-anfall auf dem Oescherhof

Auf dem Landwirtschaftsbetrieb von Projektpartner Markus Hugi in Niederösch konnten erste Grobana-lysen bezüglich 24h-Strombedarf des Gesamtbetriebes inkl. Haushalt und dem Stromertrag der eigenen 30 kWp-Photovoltaikanlage gemacht werden. Eine Besonderheit dieser Anlage ist die Westausrichtung auf dem Scheunendach, was dazu führt, dass an Sonnentagen erst in der zweiten Vormittagshälfte Strom produziert wird. Am Abend ist die Anlage dafür umso länger produktiv.

Abbildung 13 zeigt ein 24h-Profil des Stromertrags/-verbrauch des Betriebs am 24.08.2023. Der hellrote Kurvenverlauf stellt den Gesamtverbrauch dar. Über Nacht gibt es normalerweise eine «Grundlast» von rund 3.5 kW, was hauptsächlich mit den Umwälzpumpen der Fischbecken zu tun hat. In dieser Nacht, am Morgen von 7:30 Uhr bis 9:30 Uhr sowie am Nachmittag lief zudem die Heubelüftung. Das Melken am Morgen ab ca. 05:30 Uhr führt jeweils zu einem Anstieg auf rund 7 kW, die Warmwasseraufbereitung für die anschliessende Melkanlagenreinigung erhöht den Verbrauch kurzzeitig auf 30 bis 35 kW. Das gleiche passiert beim abendlichen Melken/Reinigen. Um ca. 07:30 Uhr begann die PV-Anlage Strom zu produzieren. Um 16:00 zogen an diesem sonnigen Tag Wolken auf und die Stromproduktion fiel ab, was zu Ertragseinbussen führte. Der Stromertrag lag an diesem Tag bei 99.02 kWh, der Gesamtstromverbrauch durch den Betrieb der Heubelüftung bei hohen 250.32 kWh. Daraus resultierten eine Eigenverbrauchsquote von 76.03 % und ein Autarkiegrad von 39.56 %.

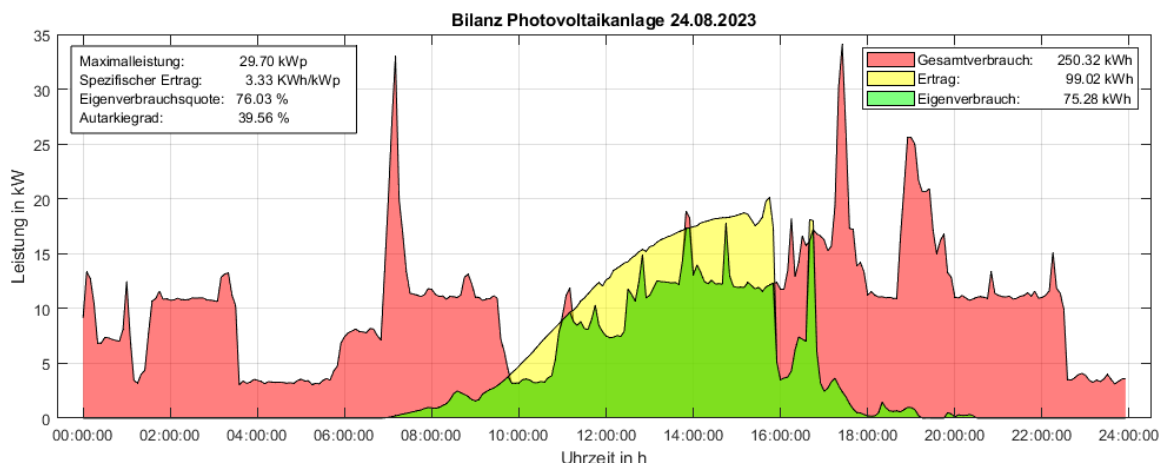


Abbildung 13: Stromverbrauch und Ertrag der Photovoltaikanlage am 24.08.2023. Hohe Grundlast von mehr als 10 kW (Fischbecken, Heubelüftung, allg. Verbraucher). Der gelbe Graph zeigt die produzierte Strommenge der PV-Anlage, der grüne die intern verbrauchte Menge an Solarstrom



Am 28.08.2023 war das Licht diffus und der Stromertrag fiel um rund zwei Drittel ab, Abbildung 14. Auch hier ist die höhere Last während dem Melken und dem anschliessenden Spülen mit dem Waschautomaten klar erkennbar. Bei der höheren Last zwischen 11:00 und 12:00 Uhr handelt es sich um die Warmwasseraufbereitung des Boilers, dieser ist darauf abgestimmt, während den Sonnenstunden den Strom von der PV-Anlage zu beziehen. Am Nachmittag wurde im Haushalt gewaschen, dies führte zu den erhöhten Verbrauchsspitzen zwischen 13:00 und 20:00 Uhr. Die Eigenverbrauchsquote lag bei hohen 83.13 % und der Autarkiegrad damit nur bei 26.59 %.

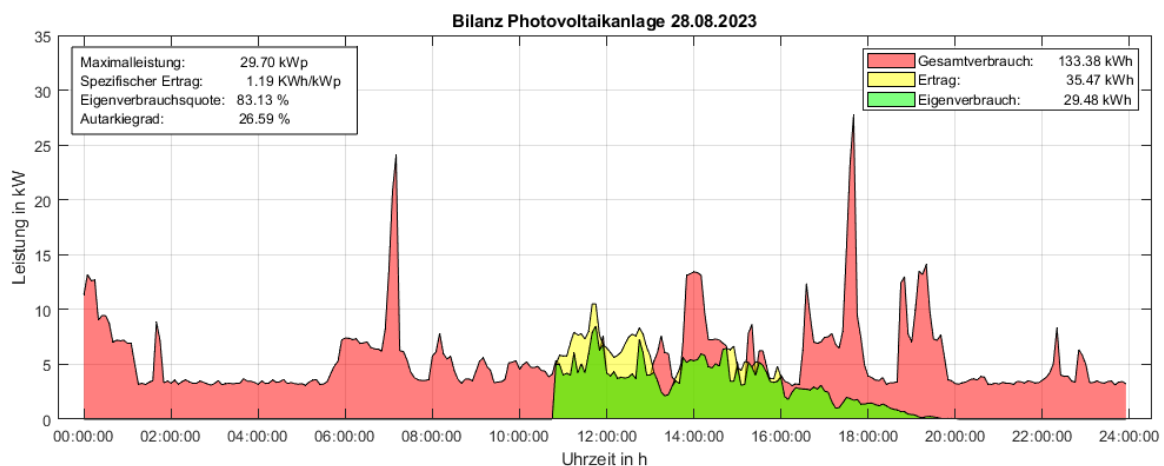


Abbildung 14: Stromverbrauch und Ertrag der Photovoltaikanlage am 28.08.2023. Grundlast von weniger als 5 kW, die Heubelüftung war an diesem Tag nicht in Betrieb. Der gelbe Graph zeigt die produzierte Strommenge der PV-Anlage, der grüne die intern verbrauchte Menge an Solarstrom

Aus den betrachteten Profilen geht hervor, dass die Stromerträge abhängig vom Wetter sehr stark variieren. Weitere Auswertungen haben ergeben, dass auch die Jahreszeiten eine wesentliche Rolle spielen. Die Analyse der verschiedenen Lastprofile zeigte, dass es durchaus sinnvoll wäre die Verbrauchsspitzen mit der Traktorbatterie als Zwischenspeicher abzudecken.

In einem weiteren Schritt müssen die Stromverbräuche und -erträge unter Berücksichtigung vom Wetter, von sporadischen «Verbrauchern» usw. noch genauer analysiert werden. Zudem muss untersucht werden zu welchen Tageszeiten der Traktor für Feldarbeiten zur Verfügung stehen muss und sich kein Konflikt zwischen der Abgabe von Strom in das interne Netz und dem Laden der Traktorbatterie besteht.



4.7 Analyse der Betriebsdaten Rigitrac SKH 75

Für die Abschätzung der Energieverbräuche von elektrisch betriebenen Traktoren auf landwirtschaftlichen Betrieben werden Daten von realen Einsätzen benötigt. Zwei Kundentraktoren Rigitrac SKH 75 (Dieselmodelle) wurden deshalb mit Datenloggern ausgestattet (Teltonika FMC650).

Seit August 2024 werden damit folgende Fahrzeugparameter aufgenommen:

- Datum
- Zeit
- GPS-Koordinaten
- Betriebsstunden
- Geschwindigkeit
- Dieserverbrauch pro Stunde
- Gesamtverbrauch Diesel
- Fahrsignal

Im folgenden Abschnitt sind einige der ausgewerteten Betriebsdaten von einem der beiden Traktoren aufgeführt (Logger mit der Identifikationsnummer FMC650_#0003).

4.7.1 Dieserverbrauch pro Tag

Alle Betriebsdaten (Fahrzeugdaten und Arbeitsjournal) der Monate August, September und Oktober 2024 wurden zusammengetragen und die Dieserverbräuche den Betriebsstunden der jeweiligen Tage gegenübergestellt. Mit dem Traktor wurden in dieser Zeit hauptsächlich Grünlandarbeiten ausgeführt. Die durchschnittliche Betriebszeit an aktiven Tagen betrug 2.23 Stunden. Der durchschnittliche Dieserverbrauch lag bei 3.96 l/h. Auffallend waren die höheren Dieserverbräuche von 6.97 l/h am 22.08.2024 respektive 8.09 l/h am 26.08.2024. An diesen Tagen wurde der Traktor zum Mähen von Wiesen mit Front- und Heckscheibenmäherwerk verwendet, welche hohe Antriebsleistungen erfordern. An den restlichen Tagen wurden weniger energieintensive Arbeiten wie Grünfutteraufbereitung oder Frontlader- und leichte Transportarbeiten ausgeführt.

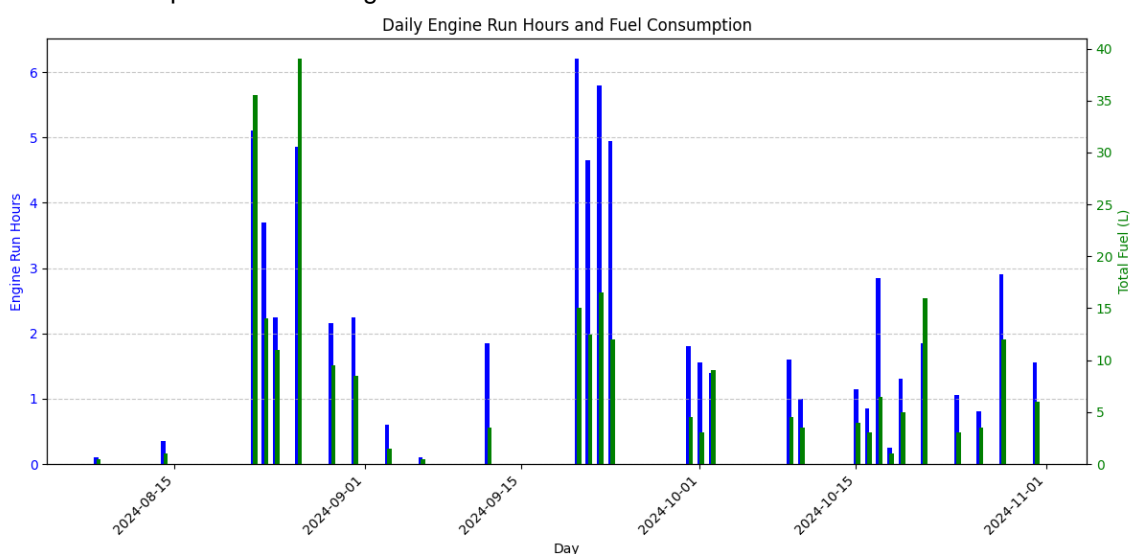


Abbildung 15: Log-Daten der Betriebsstunden und des Dieserverbrauchs der Monate August, September und Oktober 2024.



4.7.2 Energieverbrauch pro Tag

Ein Liter Diesel enthält eine Energiemenge von 35.7 MJ/l respektive 9.9 kWh/l. Multipliziert mit dem Verbrauch in l/h und der Einsatzdauer ergibt sich die Brutto-Energiemenge in kWh. An arbeitsintensiven Tagen lagen die benötigten Dieselenergiemengen beim betrachteten Traktor zwischen 350 und 400 kWh, siehe Abbildung 16.

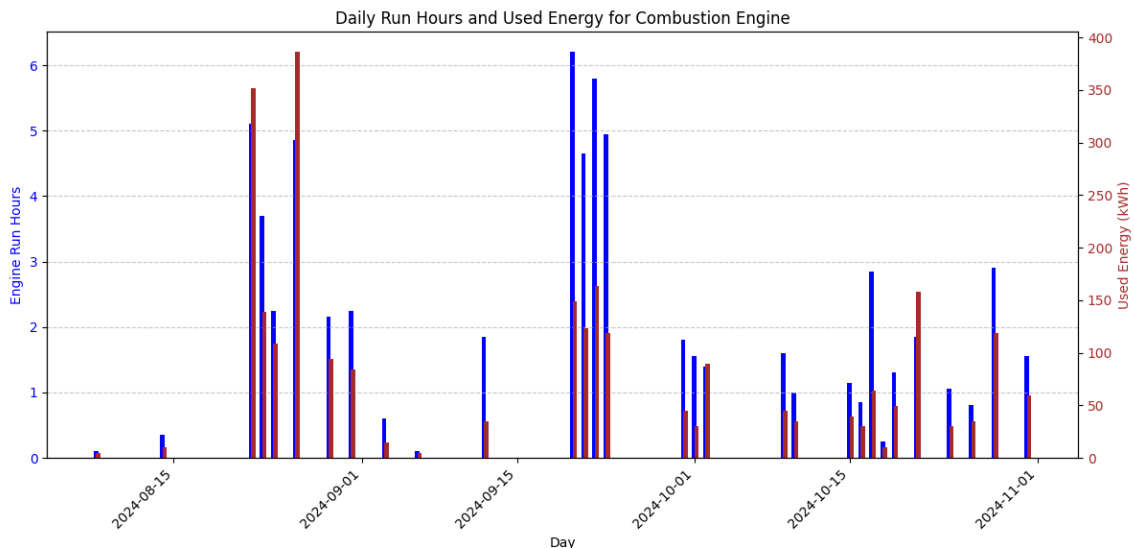


Abbildung 16: Log-Daten der Betriebsstunden, sowie die verbrauchte Energie in kWh pro Tag. Spitzenwert am 26.08.2024 mit 383 kWh.

Weil Fahrzeuge mit klassischem Antriebsstrang (Verbrennungsmotor) wesentlich geringere Wirkungsgrade aufweisen als solche mit batterieelektrischem Antrieb, muss diese Energiemenge zuerst in die Netto-Energiemenge an den Arbeitsabtrieben umgerechnet werden. Die Energiemenge, die für die gleiche Arbeit von der Batterie des E-Traktors zur Verfügung gestellt werden müsste, lässt sich anschliessend mit den entsprechenden Wirkungsgradwerten berechnen. Diese Überschlagsrechnungen sind in den folgenden Abbildungen schematisch dargestellt. Der Einfachheit halber wurde jeweils nur der Fahrtrieb bis zu den Radnaben berücksichtigt (ohne Zapfwelle und Hydraulik).

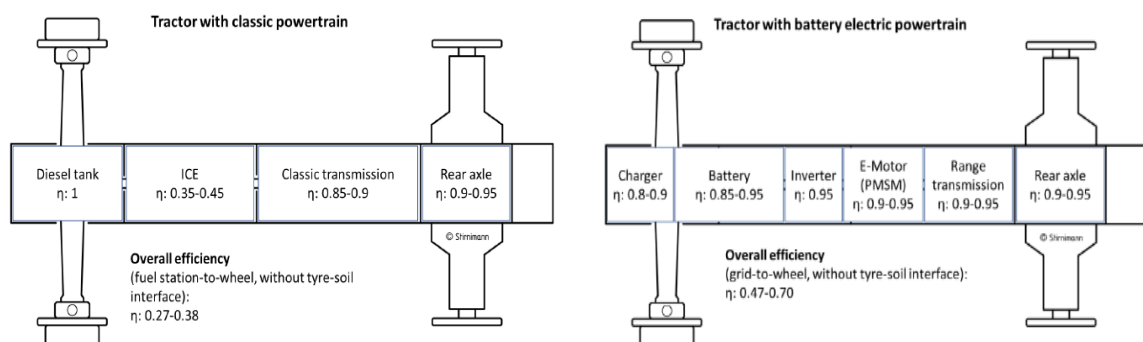


Abbildung 17: Theoretische Wirkungsgrade eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor (links) und einem batterieelektrischen System (rechts) [R. Stirnimann]



Beim klassischen Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor liegt der geschätzte Gesamtwirkungsgrad vom Kraftstofftank bis zur Radnabe zwischen 27 und 38%. Der batterieelektrische Antriebsstrang weist mit geschätzten 47 bis 70% einen wesentlich höheren Wirkungsgrad auf, selbst unter Berücksichtigung der Ladeverluste. Die Streubereiche ergeben sich u.a. aus unterschiedlichen Auslastungen.

Für die Umrechnung im folgenden Unterkapitel 4.7.3 wurden die Wirkungsgradfaktoren $\eta_{\text{Diesel}} = 0.27$ und $\eta_{\text{Elektro}} = 0.68$ gewählt. Weil der Traktor Rigitrac SKH 75 im Betrachtungszeitraum vorwiegend leichte Arbeiten verrichtete, wurde beim klassischen Antriebsstrang bewusst der untere Wert aus dem Wirkungsgradband herangezogen. Beim batterieelektrischen System liegen hingegen die mittleren Komponentenwirkungsgrade zu Grunde. Zu beachten ist hier zudem, dass nur bis zur Batterie zurückgerechnet wurde (ohne Berücksichtigung des Ladewirkungsgrades).

4.7.3 Ermittelter elektrischer Energieverbrauch pro Tag

Der höhere Wirkungsgrad des batterieelektrischen Systems führt zu beträchtlich tieferen Energiemengen, die für die jeweiligen Arbeiten benötigt würden. Die errechneten Werte ergeben einen Verbrauch von 135 kWh am 22.08.2024 respektive 150 kWh am 26.08.2024. Mit den für den neuen E-Traktor vorgesehenen Batterien mit einer Brutto-Gesamtkapazität von 130 kWh (netto ca. 117 kWh) hätte die Arbeit an diesen beiden Tagen nicht abgedeckt werden können, ohne diesen nachzuladen. Die übrigen Tage im Betrachtungszeitraum zeigen aber auf, dass die vorgesehenen Batterien für die getätigten Arbeiten ausgereicht hätten.

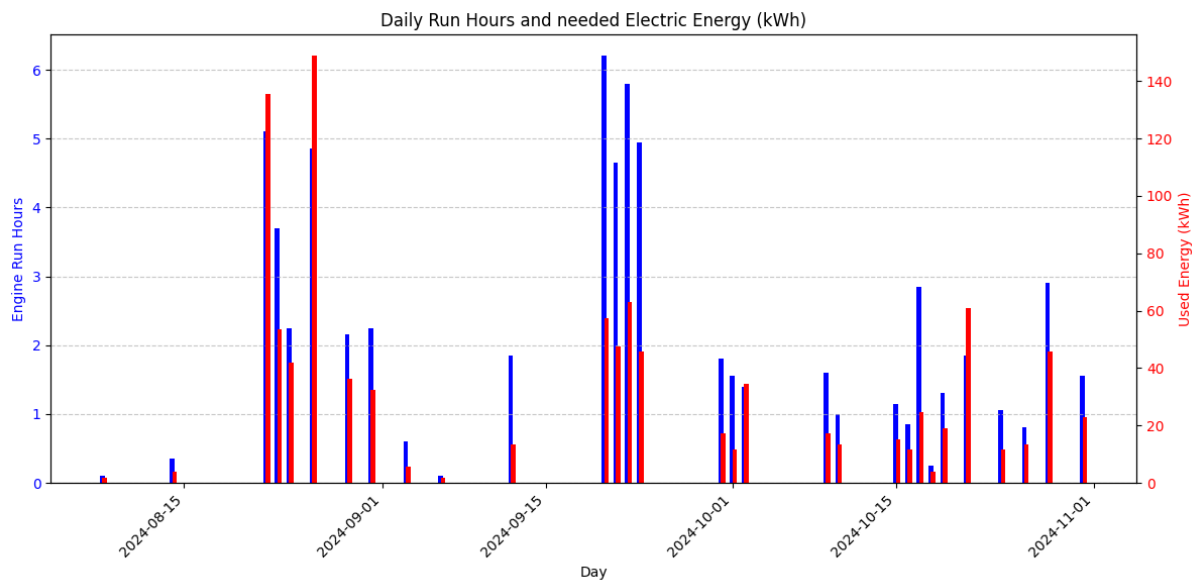


Abbildung 18: Benötigte elektrische Energie in kWh, um die getätigten Arbeiten mit einem batterieelektrischen Fahrzeug auszuführen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Traktor an den energieintensivsten Tagen nicht ohne Unterbruch betrieben wurde. Die nächsten Schritte beinhalten die Analyse des Bewegungsprofils und die getätigten Arbeiten. Damit kann ermittelt werden, wann und wo grössere Pausen während der Arbeit eingelegt wurden und ob die Möglichkeit besteht, während diesen das Fahrzeug nachzuladen. Die erforderlichen Daten wurden bereits akquiriert und werden laufend ergänzt.



4.8 Stand der Entwicklung Rigitrac SKE Projekt 112

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick zum Stand der Entwicklung der Hauptkomponenten des neuen Elektrotraktors.

Baugruppe	Stand 09/2023	Stand 10/2024
Achsen/Fahrwerk	In Bearbeitung	Bestellt, Lieferung 12/2024
Chassis	In Bearbeitung	Bestellt, Lieferung 12/2024
Fahrantriebsstrang	In Bearbeitung	Bestellt, Lieferung 01/2025
Zapfwellen	In Bearbeitung	Bestellt, Lieferung 01/2025
Hydraulik	In Bearbeitung	In Bearbeitung
Hubwerk	In Bearbeitung	Bestellt, Lieferung 01/2025
Kabine	In Bearbeitung	Bestellt, Lieferung 10/2025
Bremsanlage	In Bearbeitung	In Bearbeitung
Wärmemanagement	In Bearbeitung	In Bearbeitung
Batterie	In Bearbeitung	Bestellt, Lieferung 01/2025
Batterieladetechnik	In Bearbeitung	In Bearbeitung
HV-LV Netz	In Bearbeitung	In Bearbeitung
Geräteschnittstellen	In Bearbeitung	In Bearbeitung
Design	In Bearbeitung	In Bearbeitung

Die Auswahl der Achsen hat das Projekt verzögert, weil die Achsspezifikationen (Übersetzungen, Sperren, Bremsen) erst durch mehrfache Evaluationsschritte mit einem Lieferanten bestimmt werden konnten. Darauf basierend konnte das Chassis konstruiert und bestellt werden.

Die Evaluation und die Konstruktion der PTO-Getriebe und des Fahrgetriebes (ebenfalls fahrzeugspezifische) konnte abgeschlossen werden. Die Auswahl der Elektromotoren des Fahrtriebes und der PTO ist erfolgt.

Für die Kabine konnte ein Konstruktionsentwurf erstellt werden. Die Suche nach einem Kabinenlieferanten gestaltete sich aufgrund der geringen Stückzahlen schwieriger als erwartet, dennoch wurde ein geeigneter Kabinenlieferant gefunden und mit der Entwicklung und Herstellung der Kabine beauftragt.

Die Auslegung des Kühlkonzeptes mit Wärmepumpe ist noch nicht abgeschlossen, die Details sind abhängig von der Lieferantenauswahl.

Ein geeignetes Hydraulikaggregat wurde ermittelt. Damit kann die Auslegung des Hydrauliksystems fertiggestellt werden.

Der Beginn der Prototypenmontage ist aktuell auf März 2025 vorgesehen.



5 Bewertung der bisherigen Ergebnisse

Die bisherigen Arbeiten im Projekt AgElectricPowerPlus führten u.a. zu folgenden Erkenntnissen:

- Landwirtschaftliche Arbeiten sind mit kommunalen nicht direkt vergleichbar. Durch unregelmässige Ertragsdichten bei den Wiesen oder unterschiedliche Beschickung der Mischwagen können sehr hohe Drehmomentspitzen entstehen. Im Weiteren beeinflusst das sehr stark schwankende Drehmoment bei solchen Arbeiten den Antrieb zusätzlich.
- Wegen den hohen Anlaufmomenten und den hohen Lasten über längere Phasen (z.B. bei Mischwagen) müssen die E-Motoren auf höhere Drehmomente ausgelegt werden als bisher geplant. Die verschiedenen Lastprofilmessungen waren für die Komponentenauslegung deshalb sehr wichtig.
- Bei Kommunalgeräten (Mähwerke, Grasaufnahmen mit Gebläse usw.) gibt es ebenfalls hohe Anlaufmomente, dank dem mit E-Motoren möglichen «Sanft-Anlauf» stellen diese hier aber kein Problem dar.
- Die Messungen mit dem Doppelmessermähwerkes zeigten wie erwartet auf, dass die Antriebsdrehmomente/-leistungen sehr gering sind. Somit kann die Auslegung des E-Motors des zukünftigen elektrifizierten Doppelmessermähwerkes definiert werden.
- E-Motoren mit höheren Drehmomenten erfordern auch stärkere Fahrbereichsgetriebe und das bisher vorgesehene Getriebe vom kleineren SKE40 kann deshalb nicht verwendet werden. Auf dem Komponentenmarkt sind keine passenden Standardgetriebe erhältlich, weil diese in der Regel auf das Drehzahlniveau von Verbrennungsmotoren ausgelegt sind.
- Die für E-Motoren typische Drehmomentcharakteristik spiegelte sich bei den Zugkraftmessungen wider. Das konstant hohe Drehmoment steht dadurch bereits beim Anfahren und danach über einen weiten Geschwindigkeitsbereich zur Verfügung.
- Die Regelungsstrategien für E-Motoren müssen angepasst werden: Wenn das Drehmoment bei E-Motoren über den «Peak» steigt, fällt die Drehzahl sehr schnell ab (keine Reserve in Form eines Drehmomentanstieges wie beim Verbrennungsmotor).
- Die in der Landwirtschaft höheren Drehmomente-/ Leistungsanforderungen führen zu einem höheren Energiebedarf, welcher bei der Batterieauslegung berücksichtigt werden muss. Wegen den bei Traktoren knappen Platzverhältnissen und dem zusätzlichen Gewicht der Batterien muss das optimale Verhältnis (Energiedichte/Einsatzzeit) neu eruiert werden.
- Der Stromertrag von PV-Anlagen variiert sehr stark, womit sich bei der Nutzung der Traktorbatterie als Stützbatterie ein hohes Potenzial ergibt, um mehr vom eigenen Strom zu nutzen.
- Aus den zwei letztgenannten Punkten kann gefolgert werden, dass das Nutzerverhalten mit einem E-Traktor angepasst werden muss. Ganztägige Einsätze sind mit der heutigen Batterietechnologie nur durch regelmässiges Nachladen möglich, was eine angepasste Einsatzplanung erfordert.
- Aus heutiger Sicht eignen sich batterieelektrische Antriebe deshalb nur für Fahrzeuge im unteren Leistungsbereich mit tiefen/mittleren Lastanforderungen und eher kurzen Einsatzzeiten.
- Die gesammelten Daten auf zwei Traktoren haben gezeigt, dass ein Grossteil der Arbeitstage mit einer Batterieladung abgedeckt werden können. An den restlichen Tagen muss mit einem Ladezyklus, am besten über den Mittag (Überproduktion Solaranlage), gerechnet werden.



6 Weiteres Vorgehen

Als weitere Schritte sind u.a. folgende geplant:

- Weitere Daten aufzeichnen (Lastanforderungen, Fahrgeschwindigkeiten, Einsatz-/ Standzeiten usw.). Parallel wird ein Einsatzbuch geführt, um zusätzliche Informationen über die ausgeführten Arbeiten zu erhalten.
- Analyse des Bewegungsprofils und der Betriebszeiten des Traktors, um das Lademanagement zu optimieren.
- Analyse der Daten der Stromproduktion und theoretische Herleitung, wie der Eigenstromverbrauch gesteigert werden kann. Vorschläge zur Optimierung des Eigenverbrauchs ausarbeiten.
- Erstellen eines Messkonzeptes für das Zusammenspiel einer (Stütz)Batterie mit einer bidirektionalen Ladestation.
- Intensive Weiterentwicklung und Aufbau des E-Traktors sowie definitive Auswahl der letzten Komponenten.
- Definition der Ladearten (AD/DC) und Ladeleistungen.
- Analyse der Stromanschlüsse auf Landwirtschaftsbetrieben im Hinblick auf das DC-Schnellladen und eruieren von Möglichkeiten bei zu schwachen Anschlüssen.
- Geeignete Schnittstelle für Geräte-Elektrifizierung bestimmen (ISO-Normen sind noch nicht abschliessend definiert!).



7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Über die BFH-HAFL ist das Projekt AgElectricPowerPlus mit folgenden Organisationen/ Arbeitsgruppen verknüpft:

- OECD Tractor Test Code Community
- OECD Subworking Group "Electric Tractors"
- DLG-Arbeitsgruppe "PowerMix"