

Department für Nachhaltige Agrarsysteme

Institut für Landtechnik

Technische Möglichkeiten der Elektrifizierung im Weinviertler Ackerbau

Masterarbeit

an der Universität für Bodenkultur

Masterstudium: Nachhaltiges Energiemanagement

vorgelegt von

Jürgen Summerer BSc

betreut von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Andreas Gronauer

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Alexander Bauer

Dipl.-Ing. Dr. Norbert Barta

Wien, 13.02.2020

Eidesstattliche Erklärung

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Jürgen Summerer

Kurzfassung

Elektrofahrzeuge als Alternative zu Dieselfahrzeugen werden auch in der Landwirtschaft vermehrt diskutiert. Die ersten Hersteller forschen bereits an Lösungen oder bieten diese gar schon an. Der Einsatzmöglichkeiten dieser Fahrzeuge hängen dabei stark von der verbauten Technik und besonders der Speicherkapazität der Batterien ab.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Aspekt, welcher Grad an Elektrifizierung mit dem heutigen Stand der Technik im Weinviertler Ackerbau möglich ist. Dazu wird die erforderliche Energie eines dieselbetriebenen Fahrzeuges für jeden Arbeitsschritt im Jahresverlauf ermittelt. Mit Wirkungsgradketten wird die erforderliche elektrische Energie von batterieelektrischen Fahrzeugen errechnet. Betrachtet wird ein Musterbetrieb im Weinviertel mit einer Fläche von 48 Hektar, der die Kulturen Weizen, Gerste, Körnermais, Zuckerrüben und Kartoffeln anbaut. Das Gros der Arbeiten am Betrieb erfolgt mit einem 102 kW Traktor, der in unterschiedlichen Szenarien durch elektrische Alternativen ersetzt werden soll.

Im Wesentlichen lassen die Ergebnisse dieser Arbeit die folgenden Schlüsse zu: Die Arbeitsschritte im Laufe des Jahres können in drei Gruppen gegliedert werden. Jene Arbeitsschritte der Pflegemaßnahmen und Transportfahrten könnten heute schon elektrifiziert werden. Um jedoch die Ernteverfahren zu elektrifizieren, sind noch große Fortschritte, entweder bei der Batterietechnik oder bei der verwendeten Erntetechnik selbst, notwendig.

Das größte Potential für die Elektrifizierung bieten die Arbeitsschritte der Aussaat und Bodenbearbeitung. Die Elektrifizierung dieser Arbeitsschritte hätte schon heute einen großen Einfluss auf den Energiebedarf eines Weinviertler Ackerbaubetriebs. Einen großen Einfluss haben auch die verwendeten Sä- und Bodenbearbeitungsverfahren an sich.

Auf Basis der durchgeführten Modellrechnung könnte auf dem Musterbetrieb mit einer ambitionierten Elektrifizierungsstrategie der Fahrzeugflotte eine Energieeinsparung von bis zu 34 % im Fuhrpark erzielt werden. Im Vergleich zum derzeitigen Stand der Technik wäre dies aber mit einem deutlichen Verlust an Schlagkraft und einer zeitaufwendigen Ladestrategie verbunden.

Abstract

Nowadays electrical vehicles are discussed as alternative for diesel vehicles even in agriculture. The manufacturers are searching for solutions or even already offer them. If the electrical vehicles can be used mainly depends on the installed technique and on the storage capacity of the batteries.

The present work deals with the aspect of what degree of electrification is possible with today's state of the art in Weinviertler agriculture. For that, the needed amount of energy of a diesel-powered vehicle for every step of work during the year is determined. This is transferred into the necessary amount of electrical energy of battery powered vehicles with the help of efficiency chains. The model farm in Weinviertel with 48 ha cultivates wheat, barley, corn sugar beet and potatoes. For the majority of the workload a 102-kW tractor is used, which should be replaced by an electrical alternative. The main findings of this master thesis are: The working steps during the year can be split up in three groups. Care measures and transport are working steps that can already be electrified easily nowadays. Further improvements are needed to electrify the process of harvesting concerning the technique of the battery or the harvesting technique itself. Tillage and sawing offer the greatest potential for electrification. Electrifying these tasks would have a huge impact on the energy needs of an agricultural business in Weinviertel.

Based on the used model calculation, the electrification of the vehicles in conjunction with little loss of user friendliness can help to save up to 34% of energy over the whole year.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	i
Kurzfassung	ii
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	viii
1 Einleitung	1
2 Problemstellung	3
2.1 Ackerbau und Energie	5
2.2 Historischer Blick auf landwirtschaftliche Antriebssysteme.....	6
2.3 Arten von Elektrofahrzeugen.....	7
2.4 Bereitstellungskonzepte	8
2.5 Batterien als Stromspeicher	9
2.5.1 SESAM Konzept	11
2.5.2 Fendt e100 Vario	12
2.5.3 Rigitrac SKE 50	12
2.5.4 Vollelektrischer Radlader	12
2.6 Direkte Stromversorgung am Feld	13
2.6.1 Erste kabelgebundene Elektrofahrzeuge	15
2.6.2 GridCON Konzept.....	16
2.7 Wasserstoff	17
2.7.1 Wasserstofftraktoren	18
2.8 Elektrifizierte Erntetechnik.....	18
3 Zielsetzung	20
4 Material und Methoden	21
4.1 Musterbetrieb.....	22
4.2 Wirkungsgradketten.....	24
4.3 Mechanisierung am Musterbetrieb und Ermittlung des Energieverbrauchs	26

Inhaltsverzeichnis

4.4	Szenarien der Elektrifizierung	26
4.5	Die betrachteten Szenarien im Überblick	28
5	Ergebnisse und Diskussion.....	30
5.1	Energieverbrauch im Standardszenario	30
5.1.1	Die Verfahren des Standardszenario im Überblick	32
5.1.2	Eingrenzung der betrachteten Arbeitsschritte	36
5.2	Reduktion der Fahrzeugleistung	37
5.3	Auswirkung durch das Anpassungs-Szenario	43
5.3.1	Aussaat von Getreide und Zwischenfrucht	43
5.3.2	Bodenbearbeitung.....	44
5.4	Der Akku am Frontkraftheber	46
5.5	Energieerzeugung und Bereitstellung am Betrieb	49
5.6	Bereitstellung der Energie am Feld	52
5.6.1	Batteriecontainer	52
5.6.2	Schnellladung am Feld	55
5.6.3	Agrophotovoltaik	56
6	Schlussfolgerung	59
6.1	Entwicklungsbemühungen konzentrieren.....	60
6.2	Die Möglichkeiten bestehender Technik nutzen	61
6.3	Strom vor Biosprit	61
7	Ausblick	62
7.1	Roboter und autonome Fahrzeuge	62
7.2	Wasserstoff als Energiequelle	63
8	Zusammenfassung.....	64
9	Literaturverzeichnis	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Elektroschlepper mit mitgeführter Kabeltrommel horizontal (links) und vertikal (rechts) angebracht (Foto: (Almers and Friedrich, 1956)).....	15
Abbildung 2 - Noch in der Entwicklung, der autonome John Deere mit elektrischer Energieversorgung via Kabel Foto: www.topagrar.com	16
Abbildung 3 – grafische Darstellung der Fruchtfolge im Musterbetrieb	23
Abbildung 4 - Lastgangprofil des Musterbetriebes im Standardszenario. x-Achse: Stunden des Jahres, y-Achse links: Dieserverbrauch in Liter pro Stunde, y-Achse rechts: kumulierter Dieserverbrauch des Betriebes in Liter; (ZR Zuckerrübe, Ka Kartoffel, WW Winterweizen, KM Körnermais, SG Sommergerste); eigene Darstellung	30
Abbildung 5 - Energiebedarf ausgewählter Arbeitsschritte in Abhängigkeit der bearbeiteten Fläche. Die farbigen Linien zeigen die Batterieladung von Rigitrac SKE 50 und Fendt E100.	41
Abbildung 6 - Vergleich des Energiebedarfs für ausgewählte Arbeitsschritte in Abhängigkeit der Einsatzzeit, die beiden Linien für Rigitrac SKE 50 und Fendt E100 zeigen die mitgeführte Energiemenge bei 80 %iger Nutzung der Batteriekapazität.	42
Abbildung 7 - Der Energiebedarf der Arbeitsschritte und die gespeicherte Energie in der Frontgewicht-Batterie bestimmt die Fläche, die mit einer Batterieladung bearbeitet werden kann (eigene Darstellung)	48
Abbildung 8 - Vergleich der Energieverbräuche von Diesel- und Elektrofahrzeugen auf dem Standardbetrieb. Die orange Linie zeigt den Jahresverlauf der Solarstromerzeugung einer 14,5 kWp Photovoltaikanlage, die den erforderlichen Energiebedarf der Elektrofahrzeuge deckt. (eigene Darstellung).....	49
Abbildung 9 - Die wichtigsten deutschen Ackerkulturen reagieren unterschiedlich auf partielle Beschattung. Während die Kartoffel vom Schatten profitiert, mindert eine Überdachung aus Photovoltaikpaneelen den Ertrag von Mais; Quelle:(Fraunhofer ISE, n.d.)	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - fünfgliedrige Fruchtfolge des Musterbetriebs mit Vor- und Nachfrucht sowie der jeweiligen Anbaufläche	23
Tabelle 2 - Gegenüberstellung der Wirkungsgrade von Diesel- und Elektrotraktor nach Rautmann (2013)	24
Tabelle 3 - Ebenen der Elektrifizierung in der Landtechnik nach Reinmuth (2013).....	27
Tabelle 4 - Auflistung der Dieserverbräuche der jeweiligen Kulturen am Musterbetrieb. Aufgelistet sind der Gesamtdieselbedarf der Kultur und der Dieselbedarf je Hektar bewirtschafteter Fläche.	31
Tabelle 5 - Die Verfahrenskette im Standardbetrieb für die Fruchtfolge des Musterbetriebs mit einer Anbaufläche von 48 ha. Auflistung der Arbeitsgänge samt Dieserverbrauch in Liter pro Hektar und Flächenleistung nach (KTBL, 2017).....	32
Tabelle 6 - Energieverbrauch im Standardszenario der einzelnen Arbeitsschritte am Musterbetrieb, absteigend gereiht nach dem Gesamtenergiebedarf an Strom oder Wasserstoff im Bewirtschaftungsjahr.	35
Tabelle 7 - Die Verfahrenskette für die Fruchtfolge des Musterbetriebs mit einer Anbaufläche von 48 ha. Auflistung der Arbeitsgänge samt Dieserverbrauch in Liter pro Hektar und Flächenleistung für das 45 kW-Szenario nach (KTBL, 2017)	37
Tabelle 8 - Die Arbeitsschritte im 45 kW-Szenario absteigend gereiht anhand des Gesamtenergiebedarfes für Elektro- und Wasserstofffahrzeuge. Die letzte Spalte zeigt die Veränderung des Energiebedarfes im Vergleich zum Standardszenario (102 kW) aus Tabelle 6	39
Tabelle 9 - Angaben zur Nennkapazität und nutzbaren Kapazität von aktuellen Entwicklungen batterieelektrischer Traktoren. Die nutzbare Kapazität entspricht einer Annahme.....	40
Tabelle 10 - Alternative Bestellverfahren für Getreide und Zwischenfrucht. Unterschiede in Flächenleistung und Energieverbrauch bedingen deren Potential für die Elektrifizierung der Antriebstechnik.	44
Tabelle 11 – Die alternativen Bodenbearbeitungsverfahren weisen Unterschiede in Flächenleistung und Energieverbrauch auf und bedingen deren Potential für die Elektrifizierung der Antriebstechnik.	45

Abkürzungsverzeichnis

AC	.....	Wechselstrom
Ah	.....	Amperestunden
APV	.....	Agrovoltaik/Agrophotovoltaik
CO ₂	.....	Kohlenstoffdioxid
CTF	.....	Controlled Traffic Farming
CVT	.....	Stufenloses Getriebe (Continuously Variable Transmission)
DC	.....	Gleichstrom
EE-Anlagen	.....	Erneuerbare-Energien-Anlagen
EF	.....	Elektrofahrzeug
E-Mobilität	.....	Elektromobilität
GPS	.....	globales Navigationssystem
GWh	.....	Gigawattstunde
H ₂	.....	Wasserstoff
Ka	.....	Kartoffel
KM	.....	Körnermais
kVA	.....	Kilovoltampere
kW	.....	Kilowatt
kWh	.....	Kilowattstunde
kWp	.....	Kilowatt Peak (Spitzenleistung)
Li-Ionen-Akku	.....	Lithium-Ionen-Akkumulator
LKW	.....	Lastkraftwagen
MWh	.....	Megawattstunde
no-till	.....	"Direktsaat, Verzicht auf Bodenbearbeitung"
PS	.....	Pferdestärken
PV	.....	Photovoltaik
RME	.....	Rapsmethylester
SG	.....	Sommergerste
TJ	.....	Terrajoule
UdSSR	.....	Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken
W/kg	.....	Watt pro Kilogramm
Wh/kg	.....	Wattsunde pro Kilogramm
WW	.....	Winterweizen
ZR	.....	Zuckerrübe

1 Einleitung

Elektrifizierung ist ein geläufiges Schlagwort der Gegenwart, wenngleich dabei zumeist von der Elektrifizierung des persönlichen Individualverkehrs die Rede ist. Die Entwicklung von Elektroautos schreitet ungebremst voran und immer mehr Anbieter bieten Produkte in diesem Segment an. Möglich macht dies auch die ständige Weiterentwicklung der Batterietechnik, die für mehr Reichweite der Fahrzeuge sowie geringere Anschaffungskosten sorgt.

Forderungen nach einem nachhaltigeren, dekarbonisierten Verkehrswesen werden immer lauter, was die ersten Kommunen dazu bewegt, die Verbrennungsmaschinen aus ihren Innenstädten zu verbannen (Potor, 2019).

Im Personennahverkehr ist der Einsatz von Elektroantrieben schon länger erprobt, denkt man nur an Züge, Straßenbahnen oder Elektrobusse. Ein relativ junges Forschungsfeld stellt hingegen die Elektrifizierung des Gütertransportes auf der Straße dar. In diesem Sektor werden momentan unterschiedliche Technologien für E-Fahrzeuge entwickelt und auf die Probe gestellt (Siemens AG, 2017, Wüthrich and Schmied, 2015). Einige dieser Technologien könnten auch für den Einsatz in Traktoren und Landmaschinen interessant sein.

Auch in der Landwirtschaft gibt es bereits die ersten Elektrofahrzeuge, wenngleich diese vorerst für Nischenanwendungen entwickelt wurden (Höner, 2018c, Höner, 2018b, Höner, 2018a, Pickel, 2014). Dabei gab es in diesem Sektor bereits eine Phase der Elektrifizierung. Schon einmal wurden Bodenbearbeitungsgeräte von Elektrofahrzeugen über die Felder gezogen, die ersten bereits vor der Erfindung der Verbrennungsmotoren (Frerichs and Thielke, 2015). Letztere setzten sich allerdings rasch durch und dominieren die Feldbewirtschaftung bis heute.

Dabei ist ohne Frage auch in der Landwirtschaft viel Potential für eine zunehmende Elektrifizierung erkennbar. Die Forderungen nach einer Reduktion von Treibhausgasemissionen zur Eindämmung des Klimawandels ist dabei nur eine von vielen Triebfedern.

Die Elektrifizierung der Landwirtschaft bietet Vorteile. Mit Strom als Energiequelle erhalten die Landwirte mehr Krisensicherheit und die Staaten mehr Unabhängigkeit von erdölexportierenden Ländern. Die Bauern bekommen darüber hinaus einfachere Lösungen an die Hand, um die benötigte Energie selbst zu erzeugen. Effizientere und weniger wartungsintensive Maschinen verringern die Kosten im laufenden Betrieb, was sich weiter auf die Attraktivität dieser Technik auswirkt (Christianson et al., 1989, Pickel, 2013).

Einleitung

Zudem bietet die Elektrifizierung viel Einsparungspotential für die immer stärker vom Wettbewerb getriebenen landwirtschaftlichen Erzeugungsbetriebe. Während die aktuellen Entwicklungen im Landtechniksektor mit immer größeren, stärkeren und auch schwereren Maschinen allmählich an einem Punkt angelangen, von dem aus Fortschritt nur noch sehr teuer erkaufte werden kann, bieten Elektromaschinen mit einem eigenen Bordnetz und Datenschnittstellen ganz neue Möglichkeiten für eine Effizienzsteigerung am Feld. Sie ermöglichen eine leistungsstärkere Energieübertragung zwischen Traktor und Maschinen. Aus all diesen Möglichkeiten ergeben sich Potentiale für Energie- und Betriebsmitteleinsparungen. Die Energie- und Dateninfrastruktur wird auch heute schon auf verbrennungsmotorbetriebenen Traktoren und dieselektrischen Hybridfahrzeugen verbaut.

Die Entwicklungen zu vollelektrischen landwirtschaftlichen Fahrzeugen stehen erst am Anfang, dementsprechend wenig Daten gibt es dazu. Die aktuellen Forschungsansätze namhafter Landtechnikhersteller stoßen bei der gängigen ackerbaulichen Praxis noch sehr schnell an ihre Grenzen.

Abzuklären, an welchen Stellschrauben Einfluss darauf genommen werden kann, um den Einsatz vollelektrischer Fahrzeuge im Ackerbau zu optimieren, ist vorrangiges Ziel der vorliegenden Arbeit.

Im Mittelpunkt steht dabei ein Musterbetrieb, der mit seiner bewirtschafteten Fläche und Fruchtfolge einen durchschnittlichen Betrieb im niederösterreichischen Weinviertel repräsentiert. Die Elektrifizierungsszenarien werden dabei aus mehreren Blickwinkeln betrachtet. Beispielsweise erfolgt eine Betrachtung der unterschiedlichen Antriebskonzepte und ihrer Stärken und Schwächen für die jeweiligen Arbeitsschritte im Jahresverlauf. Augenmerk erhalten auch die Bereitstellungskonzepte, die die Elektrifizierungsszenarien restringieren. Ebenso werden auch Eingriffe in die ackerbauliche Praxis eruiert, welche die Einsatzmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen in der modernen Landwirtschaft erhöhen.

2 Problemstellung

Die Elektrifizierung hält längst auch Einzug in die landwirtschaftliche Praxis. Neben den Vorteilen und Potentialen, die dies für die Landwirtschaft selbst bereithält, sind es aber vor allem auch gesamtgesellschaftliche Interessen, denen die Elektrifizierung einen Beitrag leistet.

In einer globalisierten Welt, deren Bevölkerung stetig wächst, muss die Landwirtschaft effizienter werden, um auf der gleichen Fläche ausreichend Nahrungsmittel zu produzieren. Dies gelingt der Landwirtschaft seit vielen Jahrzehnten mithilfe von verstärktem Technikeinsatz und einer Industrialisierung der Landwirtschaft. Die aktuellsten Fortschritte werden durch Entwicklungen in der Digitalisierung möglich, die die landwirtschaftliche Produktion erneut revolutioniert. Fortschritte im Precision Farming werden vermutlich weitere Produktivitätssteigerungen ermöglichen.

Mit verstärktem Einsatz von Technik wurde eine Produktionssteigerung oft auch mit einem Anstieg des Energieeinsatzes abseits von menschlicher und tierischer Arbeitskraft erkaufte. Diese Energie hat seit der industriellen Revolution ihren Ursprung hauptsächlich in fossilen Quellen, mit den bekannten Folgen für Umwelt und Klima. Neben neuen und erneuerbaren Energiequellen böte auch eine Effizienzsteigerung Potentiale für Fortschritt in der agrarischen Produktion.

Starken Einfluss hat die Landwirtschaft auch auf die Klimasituation. Ihr sind hohe CO₂ Emissionen zuzurechnen, die neben dem Humusabbau der Böden auch dem verstärkten Maschineneinsatz geschuldet sind.

Um die selbstauferlegten Klimaziele zu erreichen, sind jedoch große Bemühungen notwendig. Die EU gibt im Klima- und Energiepaket 2030 eine Reduktion der Treibhausgase von 30 % für Emissionen außerhalb des Emissionshandels vor. Dies betrifft auch den Sektor Landwirtschaft. Die Aufteilung der Reduktionsziele auf die einzelnen Mitgliedsstaaten erfolgt im Rahmen einer „Effort-Sharing-Decision“ anhand des Pro-Kopf-BIP der einzelnen Länder. Für Österreich bedeutet dies, die nicht im Emissionshandel berücksichtigten Quellen des Treibhausgasausstoßes von 2005 bis 2030 um 36 % zu reduzieren (Umweltbundesamt, 2019).

Allein die österreichische Landwirtschaft ist mit einem Ausstoß von 8,2 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent (Stand 2017) für 10 % der Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt, 2019).

Problemstellung

Doch die Potentiale für die Treibhausgaseinsparung, die mit der Elektrifizierung landwirtschaftlicher Maschinen einhergehen, werden aktuell noch zu wenig genutzt und sind auch noch nicht zur Gänze absehbar. In keinem produzierenden Wirtschaftssektor wird in so hohem Maße Energie zugleich erzeugt und verbraucht. Als Erzeuger erneuerbarer Energie leistet die Landwirtschaft schon heute einen großen Beitrag durch die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen und landwirtschaftlichen Reststoffen in der Biogasanlage, aber auch durch die Bereitstellung von Flächen für die Produktion von Wind- und Sonnenstrom (Pickel, 2018). Die Elektrifizierung zeigt einen möglichen Weg auf, die eigenerzeugte Energie künftig am Hof leichter und effizienter zu nutzen.

Nimmt man die Landwirtschaft mit in die Pflicht und nützt das zugrundeliegende Potential der Energieeinsparung durch die Elektrifizierung, so bietet dies auch Chancen für die Betriebe selbst. Ein Energiemanagement kann im landwirtschaftlichen Betrieb zu Kostensenkung und wirtschaftlichen Erträgen führen. Vereinfacht sind Energiekosten allgemein wie folgt darzustellen (Mitzlaff, 2018):

$$\text{Energiekosten [€]} = \text{Menge [kWh]} * \text{Preis} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] - \text{Zusatzerlöse [€]}$$

Diese Berechnung ist grundsätzlich auch in landwirtschaftlichen Betrieben anzuwenden. Daraus abgeleitet ergeben sich folgende drei Stellschrauben für die Senkung der Energiekosten.

- Reduktion der Energiemenge, beispielsweise durch effizientere Maschinen und Antriebsformen
- Niedrigere Preise durch Anbieterwechsel oder Eigenerzeugung
- Zusatzerlöse durch Einstieg in den Energiehandel, z.B. mit dem Verkauf von Überschussenergie

Angewendet auf den Ackerbau: Durch Substitution von Dieseltreibstoff mit elektrischer Energie lässt sich auf alle drei Variablen der oben angeführten Formel Einfluss nehmen. Durch effizientere Maschinen und höhere Wirkungsgrade wird die Energiemenge reduziert. Die Wahl des Energieträgers ist verbunden mit geänderten Preisen für die Energie. Zudem erfordert ein elektrifizierter Ackerbau eine neue Form der Infrastruktur. Durch die Installation von (mobilen) Speichern, die allenfalls notwendig werden, um die Fluktuation erneuerbarer Energiequellen auszugleichen, eröffnen sich auch neue Märkte für die Landwirte. So ist der Einsatz von Energiespeichern besonders dann wirtschaftlich optimal, wenn er auch zur Bereitstellung von Primärregelleistung genutzt wird (Stöhr and Hackenberg, 2018).

Problemstellung

Auch aus dem Blickwinkel der Umweltverträglichkeit können vollelektrische Traktoren Vorteile ausspielen. Verglichen mit dem Einsatz von Biotreibstoffen kommen die vollelektrischen Fahrzeuge auf einen geringeren Flächenverbrauch für die Energieerzeugung. Dies ist auf zwei Faktoren zurückzuführen. Zum einen spart die höhere Effizienz rund zwei Drittel der benötigten Energie ein. Zum anderen benötigt die Produktion von Strom aus Wind- und Photovoltaikkraftwerken weit weniger Fläche als der Anbau von Energiepflanzen. Daraus resultiert eine Flächeneinsparung um den Faktor 10 (Pickel, 2013).

Zusammengefasst spricht einiges dafür, die Entwicklungen zur Elektrifizierung von Landmaschinen nicht aus den Augen zu verlieren. Diese bietet einige Vorteile für die Anwender. Die Elektrifizierung hat das Potential zur Schlüsseltechnologie für eine nachhaltige Landwirtschaft der Zukunft. Im Vergleich mit ihren dieselbetriebenen Pendanten weisen die elektrischen Maschinen eine höhere Arbeitspräzision und Leistungsdichte auf und stoßen im Betrieb je nach Grad der Elektrifizierung weniger Abgase aus. Neben der hohen Effizienz spricht auch die gute Steuer- und Regelbarkeit für die Elektrifizierung, die besser als andere Technologien den Zugang zur Nutzung von erneuerbaren Energien öffnet. Und auch die im Vergleich zum Verbrennungsmotor geringeren Betriebskosten bewegen immer mehr Hersteller, elektrifizierte Landmaschinen zu entwickeln (Stöhr and Hackenberg, 2018, Pickel, 2018). Aber es gibt auch klare Nachteile, die an dieser Stelle zu nennen sind. Probleme mit der Energiespeicherung sind noch nicht gelöst, hierzu kommen erst langsam ausgereifte Lösungen auf den Markt. Die relativ lange Ladezeit stellt heute auch noch einen relevanten Einschnitt in der praktischen Nutzbarkeit dieser Technologie dar. Und auch die geringen Betriebskosten dürfen nicht ohne den Kontext der hohen Investitionskosten gesehen werden.

2.1 Ackerbau und Energie

Ackerbau und Energie sind untrennbar miteinander verbunden. Auch die Geschichte zeigt, dass die Verfügbarkeit von Energie die Entwicklung der Landwirtschaft unmittelbar bedingt. Vom körperlichen Einsatz über die Verwendung von Zugtieren bis hin zu modernen Maschinen mit leistungsstarken Motoren war es ein langer Weg.

Laut den Daten der Statistik Austria sind von den im Jahr 2016 insgesamt verbrauchten 6,29 Mio. t Diesel 214.528 t der Land- und Forstwirtschaft zuzurechnen. Der energetische Endverbrauch an Elektrizität der Land- und Forstwirtschaft beträgt 1.180 GWh. In Summe schlägt der Energieverbrauch der Landwirtschaft in der Energiebilanz 2016 mit 21.842 TJ zu Buche (BMNT, 2018). Und dabei kommt der Landwirtschaft eine besondere Rolle zu. Denn nach den Lebensmitteln stellt die Erzeugung von erneuerbaren Energien bereits heute das

Problemstellung

zweitwichtigste Produkt der Landwirtschaft dar (Pickel, 2013). Und sie hat damit ihre Möglichkeiten noch nicht ausgeschöpft. Als Wirtschaftszweig verfügt die Landwirtschaft wie kaum ein anderer Sektor über ein so großes Flächenpotential zur Stromerzeugung aus Wind- und Photovoltaik. Schon alleine deshalb wird künftig die Stromsubstitution eine große Rolle spielen (Gers-Grappenhaus, 2018).

2.2 Historischer Blick auf landwirtschaftliche Antriebssysteme

Auch wenn die Diskussion über eine Elektrifizierung in der modernen Landwirtschaft noch recht jung ist, hat diese Technik schon eine beachtliche Geschichte hinter sich. Denn als die Mechanisierung der Landwirtschaft an Fahrt aufnahm, waren es Elektrofahrzeuge, die noch vollkommen unbeeindruckt von der Entwicklung des Verbrennungsmotors dazu beitrugen, die Landwirtschaft zu revolutionieren. Doch mit der Erfindung des Dieselmotors änderte sich das rasch. Ein Grund dafür ist, damals wie heute, die Leistungsfähigkeit elektrischer Speichertechnologien. Dennoch, bereits im 19. und beginnenden 20. Jahrhundert gab es schon zahlreiche Konzepte und technische Darstellungen dieser elektrifizierten Landwirtschaft (Frerichs and Thielke, 2015). Es wäre vermutlich ein Fehler, diese Entwicklungen bei gegenwärtigen Überlegungen zu einem neuen Energieversorgungssystem der Landwirtschaft außer Acht zu lassen.

In der ehemaligen Sowjetunion gab es sehr früh Bestrebungen, die Feldarbeit mit elektrischer Energie zu bewerkstelligen. In Landtechnik Publikationen der Fünfzigerjahre werden Elektroschlepper mit ihren dieselbetriebenen Pendanten verglichen. Vorteile der Elektroschlepper sah man unter anderem in der erleichterten Bedienung und der besseren Arbeit der Maschinen. Als Nachteil gegenüber dem Dieselschlepper wird die Notwendigkeit eines leistungsfähigen Überlandstromnetzes angeführt (Stschurow, 1956).

Beispiele für diese Elektroschlepper sind die Modelle ET-5 und ChTS-12M, die zwischen 1937 und 1954 vom Unionsforschungsinstitut für die Elektrifizierung der Landwirtschaft (WIESCh) entwickelt wurden. Der Elektroschlepper ChTS-12 M bestand aus einem Elektroraupenschlepper mit einem 44 kW Motor, zwei Kabeln von je 800 Meter Länge, einem Kabelwagen sowie einem fahrbaren Transformator mit einer Leistung von 75 kVA. Die Anwendung der Elektropflüge erforderte glatte Geländeprofile und rechteckige Felder mit einer Fläche von rund 100 ha. Für das Pflügen von bearbeitetem Boden wird ein Energieverbrauch von durchschnittlich 45 – 50 kWh pro Hektar angegeben (Stschurow, 1956). Zum Vergleich: ein 110 PS Traktor mit einem 4-scharigen Drehpflug verbraucht heute

Problemstellung

rund 21 Liter Diesel pro Hektar. Dies entspricht einer Energiemenge von rund 222 kWh pro Hektar (KTBL, 2017).

Das heutige Entwicklungen durchaus Ähnlichkeit mit diesen historischen Fahrzeugen haben, zeigen Konzepte und Innovationen namhafter Landtechnikhersteller, die im Laufe dieses Kapitels noch näher vorgestellt werden.

2.3 Arten von Elektrofahrzeugen

Bevor im Anschluss an diesen Abschnitt eine detaillierte Auseinandersetzung mit den aktuellen Entwicklungen von landwirtschaftlichen Elektrofahrzeugen erfolgt, werden an dieser Stelle die Begrifflichkeiten noch einmal erläutert.

Die bisher verwendeten Begriffe Elektrifizierung und Elektrofahrzeuge (EF) sind unpräzise, denn diese können auf mehrere Arten unterschieden werden. Die untenstehende Aufzählung gliedert die Elektrofahrzeuge in vier verschiedene Typen nach (Christianson et al., 1989):

- Direkt angebundene EF sind an ein Stromnetz gekoppelt. Diese Kopplung kann zum einen mit einem Kabel erfolgen, zum anderen sind auch Stromabnehmer wie bei Zügen möglich. Das Fahrzeug unterliegt dabei den Restriktionen der Infrastrukturanbindung, profitiert allerdings von einer kontinuierlichen Stromversorgung.
- Batteriebetriebene EF sind heute häufig anzutreffen. Elektroautos gehören dieser Gruppe an, aber auch landwirtschaftliche Fahrzeuge wie Stapler und Radlader etablieren sich bereits. Bei diesen EF wird die Energie in einer Batterie gespeichert und auf dem Fahrzeug mitgeführt.
- Auch die Hybrid EF sind aus der Automobilindustrie weithin bekannt. Dabei wird ein Verbrennungsmotor von einem Elektromotor unterstützt. Der Elektromotor ermöglicht es dabei, den Verbrennungsmotor kleiner zu dimensionieren und besser an sein Optimum zu führen. Außerdem kann beim Bremsen Energie rückgewonnen werden und kürzere Strecken auch rein elektrisch absolviert werden.
- Weiters gibt es auch EF, die den Strom direkt am Fahrzeug erzeugen. Dies kann wiederum auf zwei Arten erfolgen. Zum einen kann ein Verbrennungsmotor einen Generator antreiben. Zum anderen sind auch Fahrzeuge, die eine Brennstoffzelle mitführen und aus Wasserstoff elektrischen Strom erzeugen, in diese Kategorie zu zählen.

Weitere Unterscheidungen kann man noch innerhalb der einzelnen Gruppen treffen. So können z.B. die Hybridfahrzeuge in mild- und vollhybride Systeme untergliedert werden.

Problemstellung

Woopen et al. (2018) unterscheiden hierbei, ob das Hybridsystem in einem Traktor in erster Linie dem Downsizing des Verbrennungsmotors dient (Mildhybrid), oder das Fahrzeug dadurch auch zwischenzeitlich vollelektrisch betrieben werden kann, wie dies von Automobilen im Stadtverkehr bekannt ist (Vollhybrid).

Wesentliche Unterschiede zwischen Elektro- und Verbrennungsfahrzeugen gibt es besonders bei der Entwicklung und dem Design der Fahrzeuge. Während Dieselfahrzeuge an die Spitzenleistung angepasst ausgelegt werden, fällt bei batterieelektrischen Fahrzeugen der Fokus auf die zeitkritischen Belastungen der Fahrzeuge. Dies erfordert eine grundlegend neue Herangehensweise an die Konzeption von Fahrzeugen, um eine korrekte Auslegung von Batteriegröße, Motorleistung, Bereifung und Traktorgesamtgewicht zu erzielen (Christianson et al., 1989).

2.4 Bereitstellungskonzepte

Die sowjetischen Elektroschlepper waren noch angewiesen auf die direkte Stromversorgung durch das Stromnetz, da andere Technologien zu dieser Zeit noch nicht entwickelt oder verfügbar waren. In der Zwischenzeit wurden gewaltige Entwicklungsschritte in der Batterieentwicklung gemacht und auch andere Technologien wie Wasserstoffbrennstoffzellen oder eine dezentrale Stromerzeugung mit erneuerbaren Energien konnten teils zur Serienreife gebracht werden. Diese Entwicklungen eröffnen neue Möglichkeiten für die elektrifizierte Landwirtschaft der Zukunft.

Die Landwirtschaft bietet aber auch von sich aus gute Bedingungen für die Nutzung von Elektrizität. Die Wechselwirkung zwischen dem stationären Netz und mobilen Fahrzeugen lässt sich in keinem Sektor so gut gestalten wie in der Landwirtschaft. Die Fahrzeuge kehren in der Regel nach ihrem Feldeinsatz wieder zurück zum Hof, wo die Infrastruktur für eine zentrale Netzanbindung bereits besteht. Ebenso sind bei landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen die notwendigen Hebevorrichtungen, beispielsweise für den Wechsel von Batterien in Batteriewechselsystemen, in den meisten Fällen gegeben (Pickel, 2014).

Nachfolgend werden drei unterschiedliche Energiebereitstellungskonzepte näher vorgestellt. Batterieelektrisch, kabelgebunden oder mit Hilfe von Wasserstoff und Brennstoffzelle - jeder dieser drei Technikpfade weist Vor- und Nachteile auf, die in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben werden. Gefolgt von jeweiligen Beispielen, wie diese Techniken in der Praxis in landtechnischen Maschinen angedacht oder gar verwirklicht sind.

2.5 Batterien als Stromspeicher

Wird im Zusammenhang mit der Elektrifizierung eines Antriebsstranges von Batterien gesprochen, ist in den meisten Fällen eine Lithium-Ionen-Batterie mit einer Vielzahl an Materialkombinationen gemeint. Aufgrund ihrer hohen Zellspannung sowie Energie- und Leistungsdichte gilt sie als vielversprechende Technologie für die E-Mobilität (Tschöke, 2015).

Wie alle anderen Batterien besteht die Lithium-Ionen-Batterie aus zwei Elektroden, einem Separator und einem Elektrolyten. Die Katode besteht dabei meist aus einem Metalloxid, die Anode aus einer Kohlenstoffmodifikation. Beim Laden und Entladen der Batterie findet eine reine Ein-/Auslagerung der Lithium-Ionen in Kristallform statt. Dabei bleibt die Kristallstruktur des Lithium erhalten, was sich positiv auf die Zyklenlebensdauer auswirkt (Tschöke, 2015).

Wichtige Kennzahlen für die Klassifizierung von Batterien sind die gravimetrische und volumetrische Energiedichte (Minßen et al., 2015). Gemeinsam mit der Leistungsdichte wird damit eine Vergleichbarkeit von Batterien ermöglicht.

Die heute eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien im Fahrzeugbereich weisen eine Energiedichte von 160 – 180 Wh/kg¹ auf. Diese Angaben zur Energiedichte beziehen sich auf einzelne Zellen. Durch Verschaltung der Zellen zu Batteriepaketen reduziert sich die Energiedichte mitunter. Mit Lithium-Ionen-Batterien sollen zukünftig Energiedichten von bis zu 300 Wh/kg möglich sein (Tschöke, 2015).

Die Leistungsdichte variiert je nach Einsatzgebiet zwischen 500 W/kg für Elektrofahrzeuge und 3.000 W/kg für Hybridfahrzeuge. Die Auslegung der Batterien, hohe Lade- und Entladeströme aufnehmen zu können, ermöglicht die Schnellladung der Batterien. So sind mit dem in Europa üblichen TYP 2 Combo Ladestecker mit Gleichstrom bis zu 170 kW Ladeleistung möglich (Tschöke, 2015).

Die ersten batterieelektrischen Landmaschinen, die zum Teil schon in Serienreife im Einsatz sind, eignen sich vorerst für Arbeiten in einem kleinen Leistungsbereich und in der Nähe des Ladepunktes. Mögliche Aufgabenbereiche, wo diese Bedingungen erfüllt sind, sind in viehhaltenden Betrieben vorzufinden (Stöhr and Hackenberg, 2018). Elektrifizierte Flurförderfahrzeuge wie Elektrostapler sind schon länger marktreif und im Einsatz. Und mit

¹ Wert aus dem Jahr 2015 nach TSCHÖKE, H. 2015. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. *Basiswissen Springer-Vieweg, Wiesbaden.*

Problemstellung

elektrischen Futtermischwagen und Radladern sind nun weitere Fahrzeuge für den innerbetrieblichen Einsatz verfügbar.

Mit den Radladern von Kramer und Weidemann sind bereits Fahrzeuge am Markt, die sehr gut an ihre Einsatzfelder angepasst sind. Arbeiten in Rinderstallungen und Biogasanlagen sind mit einer Einsatzzeit von bis zu sechs Stunden möglich. Die benötigte Energie kommt aus einem Blei-Säure Akku, der zugleich als Ausgleichsgewicht dient (Aumer, 2018).

Auch bei John Deere sieht man vorerst sehr eingeschränkte Einsatzfelder für batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge. Zufriedenstellende Einsatzmöglichkeiten werden nur bei kleinen Leistungen und wenigen Einsatzstunden pro Tag erwartet (Wilmer, 2018).

Zurückzuführen ist dies auf den heutigen Stand der Batterietechnik, wie auch Rautmann (2013) attestiert. Er hat die Energieverbräuche dreier Fahrzeuge einer Biogasanlage gemessen. Einen Radlader für die Beschickung der Anlage, einen Traktor für den Abtransport von Biomasse vom Feld zur Anlage als Teil der Häckselkette, sowie einen Traktor mit Pflug bei der Bodenbearbeitung nach der Maisernte. Der Radlader ist täglich drei Stunden im Einsatz und verbraucht dabei 47 l Diesel. Der Zubringer verbraucht an einem 16-stündigen Arbeitstag 192 l Diesel und der Traktor für die Bodenbearbeitung setzt in 10 Stunden 262 l Diesel in Zugkraft um.

Bereinigt um die unterschiedlichen Wirkungsgrade der diesel- und elektrischen Antriebssysteme errechnet sich aus den gemessenen Werten der notwendige Energiebedarf, den eine Batterie für den Antrieb bereitstellen muss. Die daraus resultierenden Batteriegröße lässt ausschließlich den vollelektrischen Einsatz des Radladers realistisch erscheinen. Ab einer bestimmten Größe ist der Einsatz von Batterien nicht mehr machbar. In Abhängigkeit des Leistungsbedarfs sowie der Einsatzzeit nehmen Volumen und Gewicht der Batterien zu (Rautmann, 2013).

Allerdings gab es in der Zwischenzeit einen Fortschritt im Bereich der Batterietechnik, besonders bei der Energiedichte, die eine neue Bewertung der möglichen Einsatzfelder erfordert. Trotz der scheinbar noch eingeschränkten Möglichkeiten und Einsatzfeldern für batterieelektrische Fahrzeuge wird bereits in die Entwicklung dieser Fahrzeuge investiert. Anschließend werden einige dieser Entwicklungen vorgestellt, die mit Blick auf eine vollelektrische Landwirtschaft der Zukunft interessante Ideen verfolgen und technologische Lösungen aufzeigen.

Problemstellung

2.5.1 SESAM Konzept

Medial die größten Kreise zog John Deere mit dem SESAM Projekt und einigen neuen Antriebslösungen. Mit dem SESAM Konzept, dieses Akronym steht für „Sustainable Energy Supply for Agricultural Machines“, verfolgte John Deere den Gedanken, alternative Treibstoffe und Antriebe für mobile Maschinen der Landwirtschaft zu entwickeln. Am Beginn standen pflanzenbasierte Treibstoffe im Fokus des Projektes, was zur Entwicklung von marktreifen Multifuel Traktoren führte. Im Jahr 2007 präsentierte das Innovationscenter des Unternehmens die ersten Traktoren, die neben dem Verbrennungsmotor auch einen Generator für die Stromversorgung von Anbaugeräten verbaut hatten. Unter dem Konzeptnamen LIB-Offroad wurde dann zwischen 2009 und 2012 der erste Hybridtraktor entwickelt. Durch eine mitgeführte Lithium-Ionen Batterie wurde ein Boost des Fahrzeuges sowie Rekuperation beim Bremsen möglich (Höner, 2018b).

Bei der SIMA 2017 in Paris stellte John Deere dann den SESAM Traktor vor, der erste vollelektrische batteriebetriebene Traktor. Konzipiert ist dieser für sämtliche Aufgaben in seinem Leistungsbereich. Ausgestattet ist der Traktor mit einem Li-Ionen-Polymerzellen-Akku aus dem LKW-Bereich. Dieser Akku mit einem Volumen von 0,66 m³ stellt eine Kapazität von 130 kWh bei einer Spannung von 700 V zur Verfügung. Das Gesamtgewicht des Traktor wird mit 8.100 kg angegeben (Stöhr et al., 2015, Höner, 2018b). Die Kosten einer Batterie dieser Größe betragen zu diesem Zeitpunkt noch 300 €/kWh, also 39.000 €.

Das Antriebskonzept dieses Traktors baut auf zwei Elektromotoren mit je 140 kW Leistung auf. Einer der Motoren stellt über ein Doppelkupplungsgetriebe den Fahrtrieb zur Verfügung, der andere bedient die Hydraulikpumpen und das Zapfwellengetriebe. Um den gesamten Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 50 km/h abdecken zu können, ohne den Elektromotor überdimensionieren zu müssen, ist dem Fahrtrieb ein Getriebe vorgeschaltet. Aufgrund der doppelten Bestückung mit Elektromotoren für unterschiedliche Fahrzeugkomponenten und der Überlastfähigkeit der Elektromotoren ist ein Vergleich mit einem dieselbetriebenen Traktor nur schwer möglich. Die Einsatzzeit des SESAM gibt der Hersteller mit 3 – 3,5 Stunden unter Teillast, 50 – 60 Kilometer Straßenfahrt oder einer Stunde pflügen an (Höner, 2018b).

Diese Angaben decken sich gut mit den Ergebnissen von Stöhr et al. (2015). Sie haben die Arbeitszeit des SESAM Traktors überprüft und beziffern die Einsatzzeit des Traktors bei Straßenfahrt auf Betonoberfläche mit 3 Stunden und 15 Minuten bei einer zurückgelegten Strecke von 54 km. Beim Einsatz des Schwergrubbers der Fa. Rabe (Typ EG 15, 4-balkig, 3

Problemstellung

m Arbeitsbreite) war eine Arbeitszeit von 1 Stunde und 56 Minuten möglich. Auch der Ladeenergie-zu-Entladeenergie-Wirkungsgrad wurde untersucht und mit 91 % beziffert.

Peter Pickel, selbst an der Entwicklung des SESAM Traktors beteiligt, sieht die Einsatzmöglichkeiten von elektrischen Fahrzeugen zunächst bei planbaren Einsätzen im kleinen Leistungsbereich. Er erkennt zudem einen verstärkten Trend hin zu elektrischen Fahrzeugen, verstärkt durch bessere und günstigere Akkus. Allerdings werden für größere und leistungsfähigere Maschinen langfristig neue Lösungen für die Energieversorgung gefunden werden müssen (Höner, 2018b).

2.5.2 Fendt e100 Vario

Der AGCO Konzern verfügt mit dem Fendt e100 bereits über einen marktreifen Elektroschlepper. Im Traktor ist ein Elektromotor mit einer Nennleistung von 50 kW verbaut, der die erforderliche elektrische Energie aus einer 600 kg schweren Lithium-Ionen Hochleistungsbatterie bezieht (Aumer, 2018, Pickel, 2019). Die Batterie weist eine Nennkapazität von 100 kWh bei einer Spannung von 650 V auf. Geladen werden kann die Batterie entweder über das lokale Wechselspannungsnetz mit einer Leistung von 22 kW oder über eine Gleichstrom Supercharging Option. Letztere ermöglicht eine sehr schnelle Ladung der Batterie. Eine 80 %ige Ladung kann so in 40 Minuten realisiert werden. Geladen wird die Batterie auch beim Bremsen. Unter realen Einsatzbedingungen sollen fünf Betriebsstunden möglich sein (Aumer, 2018).

2.5.3 Rigitrac SKE 50

Auch der Schweizer Hersteller Sepp Knüsel wartet mit einem vollelektrischen Traktor auf. Der Rigitrac SKE 50 ist der Nachfolger des 2011 vorgestellten dieselektrischen Rigitrac EWD 120, der ebenso wie der SKE 50 vier Radmotoren verbaut hat (Göggerle, 2019, Herlitzius, 2014). Der Rigitrac verfügt auch ohne Getriebe über einen Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 40 km/h. Beim Bremsen können die Motoren Energie rückgewinnen und diese für die darauf abgestimmte Klimaanlage und Heizung nutzen. Die Energie bezieht der Rigitrac aus einer 80 kWh Batterie (400 V), die dem Traktor mit seinen 68 PS eine Betriebszeit von 5 bis 6 Stunden ermöglicht. Das Ladegerät ist direkt auf dem Traktor verbaut und ermöglicht eine 80 %ige Ladung der Batterie in ca. drei Stunden (Göggerle, 2019).

2.5.4 Vollelektrischer Radlader

Für den landwirtschaftlichen Einsatz konzipiert, aber für den Ackerbau von untergeordneter Rolle sind Radlader. Diese sind bereits als vollelektrische und serienreife Maschinen am

Problemstellung

Markt verfügbar. Bei diesen Maschinen stellen schwere Akkumulatoren einen Pluspunkt dar, weil diese idealerweise als Ausgleichsgewichte für die Ballastierung der Fahrzeuge genutzt werden können. Mit den Typen 5055e und KL25.5e präsentierte die Firma Kramer die ersten vollelektrischen Radlader. Diese verfügen über zwei Elektromotoren bei einer Nennspannung von 80 Volt. Ein 15 kW Motor stellt den Fahrtrieb zur Verfügung, der zweite Motor mit einer Nennleistung von 22 kW betreibt die Arbeitshydraulik. Die verbaute Blei-Säure-Batterie hält Energie für bis zu sechs Betriebsstunden bereit (Aumer, 2018). Auch Weidemann hat seit 2015 einen elektrischen Hoflader im Programm. Und auch diese beziehen den Strom aus Blei-Säure-Akkumulatoren, die optional mit einer Nennkapazität von 240 oder 310 Ah ausgeliefert werden. Der Hersteller gibt als Einsatzdauer die relativ weite Spanne von zwei bis fünf Stunden an. Der Weidemann Hoflader arbeitet mit einer Nennspannung von 48 Volt. Die Hydraulik des Laders wird von einem 9 kW Motor betrieben, der Fahrtrieb von einem 6,5 kW Motor, der den Lader auf bis zu 15 km/h beschleunigt (Höner, 2018c).

2.6 Direkte Stromversorgung am Feld

Benötigen Arbeitsschritte eine hohe Leistung und sollen lange am Stück ausgeführt werden, so wird es zusehends schwieriger, die Versorgung mit elektrischer Energie aus Batterien sicherzustellen. Für solche Anwendungsfelder müssen andere Lösungen in Betracht gezogen werden. Eine direkte Energieversorgung der Maschinen durch das Stromnetz wäre eine Möglichkeit, die Begrenzung der Batterien mit ihren aktuellen Energiedichten zu umgehen.

Wie die Lösungen aussehen werden, die die Energieversorgung mit Batterien ergänzen oder ersetzen sollen, ist heute noch nicht klar. Die Lösungen, welche die Elektrifizierungsszenarien hervorbringen werden, könnten etwas unkonventionell wirken und dennoch in anderen Anwendungen in ähnlicher Weise vielleicht längst in Verwendung sein. Höner (2018b) schlägt beispielsweise vor, auch bei der kabelgebundenen Energiebereitstellung gedanklich neue Wege einzuschlagen. Zum Beispiel könnte künftig ein Container am Feldrand stehen, der regenerativ erzeugten Batteriestrom zur Verfügung stellt. Die Maschinen sind währenddessen mit diesem Container per Kabel verbunden. Ähnlich wie dies heute schon bei der Gülleverschlauchung üblich ist. Welche Energiemengen und Leistungen mit einem Container zur Verfügung gestellt werden können, wird im Abschnitt 5.6.1 ausführlicher behandelt.

Zumindest dieser Vorschlag zeigt auch, dass für diese Technik nicht zwingend ein Anschluss ans Stromnetz direkt am Feld vorhanden sein muss. Das Gewicht des Batteriespeichers muss kein Hindernisgrund für dessen praktischen Einsatz sein. Und dennoch ist so ein Szenario

Problemstellung

trotz Verwendung von Batteriespeichern zu jenen der direkten Stromversorgung zu zählen, ist hierbei immerhin der Umgang mit dem Kabel während der Feldarbeit die größte Herausforderung, die es zu bewältigen gilt.

Zu diesen Überlegungen der Elektrifizierung gibt es vorerst hauptsächlich Pilotstudien, Pilotprojekte und erste Versuchsfahrzeuge. Eine dieser unkonventionellen Ideen ist auch die Verwendung von Gantry Systemen, Center Pivot und Controlled Traffic Farming zur Infrastrukturbereitstellung.

Die elektrische Feldbewirtschaftung erfordert eine Infrastruktur, wie sie bisher auf den Äckern nicht notwendig war. Sollen Arbeitsschritte mit geringem Energiebedarf elektrisch erledigt werden, sind durchaus batteriebetriebene Maschinen denkbar. Steigt der Energiebedarf der Verfahrensschritte, muss die notwendige Infrastruktur für die Leistungsübertragung geschaffen werden.

Ein Szenario für eine mögliche Lösung stellt die Verwendung von „Center Pivot“, kreisförmiger Bewässerungstechnik, dar. Diese kommen heute bereits zahlreich in einigen Weltregionen zum Einsatz. Neben den heute üblichen Anwendungen wie Bewässerung und Pestizidausbringung könnten diese auch die Aufgabe der Energiebereitstellung übernehmen. Diese Systeme können fest installiert ausgeführt werden und spielen ihre Vorteile aufgrund ihrer Modularität aus. Die Bewirtschaftung in Form von Kreisen ist allerdings aus mehreren Gründen in vielen Regionen nicht möglich. Diese mangelnde Anpassung an topologische Verhältnisse stellt einen klaren Nachteil dieser Systeme dar (Frerichs and Thielke, 2015, Minßen et al., 2015).

Um diesem Problem entgegenzuwirken, scheint auch die Betrachtung anderer Konzepte, wie dem Controlled Traffic Farming (CTF) oder Gantry Konzepten, sinnvoll. Diese Konzepte könnten mit linearen Berechnungssystemen kombiniert werden, die sich dann für unterschiedlichere Feldformen eignen (Frerichs and Thielke, 2015).

Kurz gesagt sind die beiden Systeme wie folgt zu beschreiben. Beim Controlled Traffic Farming fahren alle am Feld eingesetzten Maschinen in den immer selben Fahrspuren, wodurch der Boden zwischen den Fahrspuren locker und unverdichtet bleibt. Gantry- oder Brücken-Konzepte greifen auf speziell dafür entwickelte Maschinen zurück, um Fahrspuren nur in sehr weit auseinanderliegenden Abständen zu haben. Die Bearbeitungsgeräte sind auf den, wie Brücken konzipierten, Fahrzeugen angebaut, der Antrieb der Brücken erfolgt an den äußersten Auflageflächen mit Rädern oder Ketten.

Problemstellung

Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu CTF und Gantry Konzepten findet bereits in Dänemark und Großbritannien statt. Dabei wird in erster Linie versucht, die Produktivität von Ackerflächen zu steigern, weil ein Großteil der Ackerfläche einem verringerten Bodendruck ausgesetzt ist. Zugleich reduziert sich der Rollwiderstand der Fahrzeuge, weil diese nicht mehr den bearbeiteten Boden befahren. Dank der Fortschritte bei der GPS-Technik ist dieses System unkompliziert einsetzbar. Speziell dafür entwickelte Maschinen, wie der ASA Lift, ermöglichen schon heute den Einsatz dieser Technik. Eine weitere Entwicklung in Richtung Elektrifizierung ist denkbar.

2.6.1 Erste kabelgebundene Elektrofahrzeuge

Kabelgebundene Elektroschlepper sind keine neue Erfindung. Wie in Kapitel 2.2 bereits angeführt, waren elektrisch betriebene Traktoren schon vor der Erfindung des Verbrennungsmotors in der Landwirtschaft im Einsatz. Berichte im Magazin „Deutsche Agrartechnik“ aus dem Jahr 1956 bezeugen den Einsatz elektrischer Schlepper auf Kolchosen der UdSSR.

Historisch war man davon abhängig bei der Verwendung eines Elektrofahrzeuges über eine direkte Netzanbindung zu verfügen, da Speichertechnologien mit entsprechender Speicherkapazität und Energiedichte schlichtweg nicht existent waren. Und auch heute gelangen die Speicher schnell an ihre Grenzen, wenn entsprechend hohe Leistungen und lange Einsatzzeiten gefordert werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, kommen die Landtechnikentwickler der Gegenwart den Gedanken ihrer Vorgänger sehr nahe.

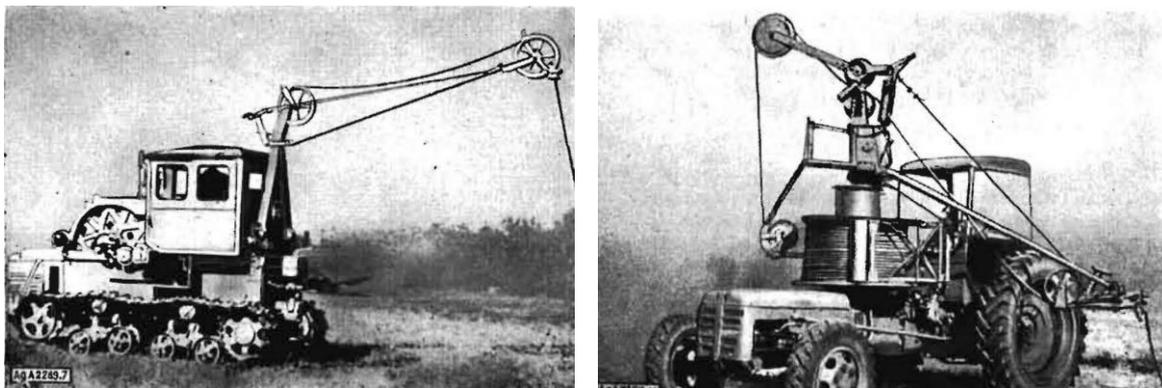


Abbildung 1 - Elektroschlepper mit mitgeführter Kabeltrommel horizontal (links) und vertikal (rechts) angebracht (Foto: (Almers and Friedrich, 1956))

Abbildung 1 zeigt die historischen Elektroschlepper, die auf den sowjetischen Kolchosen für die Bodenbearbeitung eingesetzt wurden. Verglichen mit dem kabelgebundenen John Deere SESAM aus Abbildung 2 sind Ähnlichkeiten in Aufbau und Funktionalität erkennbar.

Problemstellung

2.6.2 GridCON Konzept

Der Elektro-Schlepper aus Abbildung 2 ist ebenso wie der SESAM Batterietraktor Teil des SESAM Konzeptes von John Deere. Diese kabelgebundene Variante des Elektroschleppers aus dem Projekt GridCON ist zum einen ein Gegenstück und zum anderen ein Nachfolger des batteriebetriebenen SESAM Traktors, der für lang andauernde und energieintensive Arbeiten konzipiert ist.



*Abbildung 2 - Noch in der Entwicklung, der autonome John Deere mit elektrischer Energieversorgung via Kabel
Foto: www.topagrar.com*

Der Vorteil der höheren Leistung dieses Fahrzeuges ist verbunden mit dem Nachteil der geringeren Flexibilität und der Notwendigkeit einer Infrastruktur auf dem Feld (Stöhr et al., 2015). Mit Details zu diesem Fahrzeug halten sich die Entwickler noch zurück. Bekannt ist, dass dieser Traktor autonom fährt und das auf einer Spindel mitgeführte Kabel automatisch auslegen und wieder aufnehmen kann. Dazu ist ein hydraulischer Arm frontseitig am Fahrzeug verbaut, der diese Aufgabe übernimmt. Auch die Leistung des Traktors wurde schon bekanntgegeben. Der Fahrtrieb stützt sich auf einen 150 kW Motor, für den Antrieb der Anbaugeräte steht ein weiterer, 200 kW leistungsstarker Motor zur Verfügung (Wilmer, 2018).

Die Kabeltrommel am Fahrzeug stellt eine Reichweite von über 1.000 m zur Verfügung. Über dieses Kabel ist die Übertragung einer Dauerleistung von 300 kW möglich. Allerdings ist dafür ein Wechselstromanschluss mit einer Spannung von 2.500 V erforderlich. Mit einem Leergewicht von 8,5 t ist der Schlepper in etwa so schwer wie andere John Deere in dieser Größenklasse, verfügt aber über die doppelte Leistung. Von Interesse dürften auch die Betriebskosten dieses Fahrzeuges sein. Verglichen mit dem batteriebetriebenen Elektroschlepper sollen diese um 50 % niedriger ausfallen (Eikel, 2018, JD GridCON, o.J.).

2.7 Wasserstoff

Eine weitere Energiebereitstellungstechnologie stellt Wasserstoff dar. Von Wasserstoff in der Verwendung als Energieträger hört man aktuell oft im Zusammenhang mit der Elektrifizierung des Individualverkehrs. Medial wird auch viel darüber diskutiert, ob sich batterie- oder wasserstoffbetriebene Elektrofahrzeuge im Rennen um die Vorherrschaft im Mobilitätssektor der Zukunft durchsetzen werden. Man könnte diesen Streitpunkt auch auf den landwirtschaftlichen Sektor anwenden. Immerhin gibt es neben der Entwicklung von batterieelektrischen Traktoren auch namhafte Hersteller, die sich auf den Wasserstoff als künftigen Energieträger konzentrieren. New Holland stellte bereits 2009 einen fertigentwickelten Wasserstofftraktor vor, der noch genauer vorgestellt wird (Reinmuth, 2013).

Wasserstoff als Energieträger ist besonders deshalb interessant, weil im Unterschied zur Batterietechnik der Energieträger von außen zugeführt wird. Ein schnelleres Aufladen des Energiespeichers ist damit möglich. Verglichen mit der Betankungszeit von Diesel ist allerdings auch der Wasserstoff noch im Nachteil. Jedoch wird künftig auch für Wasserstoff eine Betankungszeit von wenigen Minuten, nahe der Betankungszeit von fossilen Kraftstoffen erwartet (Tschöke, 2015).

Die Attraktivität des Wasserstoffes ist stark davon abhängig, in welcher Form er auf dem Fahrzeug gespeichert werden kann. Wasserstoff weist eine gravimetrische Energiedichte von 33,33 kWh/kg (120 MJ/kg) auf. Druck und Temperatur wirken sich dabei stark auf seine volumetrische Energiedichte und damit auf die speicherbare Energiemenge aus.

Wasserstoff kann zwar in allen drei Aggregatzuständen gespeichert werden, bevorzugte Anwendung findet aktuell aber die Speicherung mit hohem Druck von 350 bis 700 bar. Die Alternative wäre eine Speicherung in flüssiger Form bei -253 °C oder chemisch in Metallhydriden (Remmele et al., 2013).

Die Verwendung von Drucktanks mit einem Druck von 700 bar ist heute technischer Standard. Damit sind aber auch Verluste zum Verdichten des Gases verbunden, die mit 10% des Energieinhaltes beziffert werden. Für 5 kg gespeichertem Wasserstoff muss ein Tanksystem mit rund 125 kg an Gewicht veranschlagt werden (Tschöke, 2015).

Mit einer dezentralen Wasserstofferzeugung über Elektrolyse und Verwendung von Strom aus PV oder Windkraft lässt sich dieser Energieträger auch CO_2 neutral erzeugen. Dieses Szenario ist allerdings aus Kostensicht noch nicht realistisch in der Praxis implementierbar (Remmele

Problemstellung

et al., 2013, Mohrdieck et al., 2017). Auch aus dem Aspekt der Energieeffizienz und der Anforderung an die Infrastruktur gibt es Vorbehalte gegenüber dieser Technik. Weitere Ausführungen zu den Vor- und Nachteilen von Wasserstoff als Energieträger sind in Abschnitt 7.2 angeführt.

2.7.1 Wasserstofftraktoren

Wie erwähnt gibt es auch für die Brennstoffzellentechnologie bereits Pilotprojekte. Zumal noch nicht klar ist, welcher Technologiepfad (batterieelektrisch, kabelgebunden, Wasserstoff) die Anwender überzeugen kann. Die Brennstoffzellentechnologie vermag es, die chemisch gebundene Energie im Wasserstoff direkt in elektrische Energie umzuwandeln. Die Anhänger dieser Technologie versprechen dabei höhere Reichweiten im Vergleich zur Batterietechnik und zugleich kürzere Betankungszeiten.

Die ersten, die einen Traktor mit dieser Antriebstechnologie vorstellten, waren New Holland. Sie ersetzten den Verbrennungsmotor durch Elektromotoren und Brennstoffzelle. Das erste Modell dieser Entwicklung präsentierten sie im Jahr 2009 (Reinmuth, 2013). Dabei handelt es sich um einen wasserstoffbetriebenen Standardschlepper, mit dem alle Arbeiten von der Bodenbearbeitung über den Transport bis hin zur Arbeit mit dem Frontlader möglich sein sollen. Der New Holland NH²™ ist eine Überarbeitung des 2009 vorgestellten Wasserstofftraktors, der über leistungsstärkere Brennstoffzellen und Elektromotoren verfügt. Der Traktor verfügt über drei Elektromotoren für den Fahrantrieb, die Zapfwelle und den Antrieb der Nebenaggregate. Jeder der Motoren hat eine Leistung von 100 kW und ein Dauerdrehmoment von 950 Nm. Die Brennstoffzelle weist eine Leistung von 100 kW auf. Der Wasserstofftank des Fahrzeuges verfügt über ein Fassungsvermögen von 8,2 kg Wasserstoff. Zusätzlich hat dieser Schlepper eine Batterie mit einer Speicherkapazität von 12 kWh und einer Spitzenleistung von 50 kW verbaut. Beim Fahrantrieb greift der Hersteller auf ein stufenloses CVT Getriebe zurück, das den Schlepper auf 50 km/h beschleunigt (Scherr, 2011, Moreda et al., 2016).

2.8 Elektrifizierte Erntetechnik

Neben Traktoren gilt es auch abzuschätzen, ob Erntemaschinen elektrifizierbar sind. Diese sind aufgrund enger Zeitfenster auf eine hohe Schlagkraft und damit auf eine hohe Leistung angewiesen.

Auch für Erntetechnik gibt es Vorbilder aus vergangenen Tagen. Für die Ernte kamen schon in den ehemaligen Sowjetrepubliken die ersten Elektromähdrescher zum Einsatz. Diese bezogen, ebenso wie die Traktoren, ihren Strom über das auf einer Trommel mitgeführte Kabel, dass an eine mobile Trafostation angeschlossen wurde. Der Elektromotor stellte eine

Problemstellung

Spitzenleistung von 42 kW zur Verfügung. In einer Stunde konnte damit ein Hektar Getreide gedroschen werden, was mit einem Energieverbrauch von 18 kWh verbunden war (Almers and Friedrich, 1956).

Die heutigen Forschungen zur Elektrifizierung bei Mähdreschern konzentrieren sich vorerst auf den Fahrtrieb und den Antrieb der Dreschtrommel. Die Entwicklungen dieser beiden Bereiche liefern insofern positive Ergebnisse, dass sie zumindest keine schlechteren Wirkungsgrade aufweisen wie die herkömmlichen Antriebssysteme. So konnte eine Dreschtrommel mit funktionsintegriertem elektrischen Antrieb konzipiert werden, die verglichen mit zahlreichen Serienmähdreschern derselben Leistungsklassen einen identen Wirkungsgrad von 84 % aufweist. Die Entwicklung des elektrischen Fahrtriebes gestaltet sich noch positiver. Der Antrieb mit permanentem Synchronmotor kommt auf einen Wirkungsgrad zwischen 0,72 und 0,82, während sich die hydraulischen Antriebe zwischen 0,40 und 0,68, je nach betrachtetem Modell, bewegen (Aumer et al., 2008, Aumer, 2018).

Diese Entwicklungen des elektrischen Antriebes von Fahrwerk und Dreschtrommel stützen sich auf die Annahme, dass auch künftig die Ernte von Getreide mit Mähdreschern erfolgt, die in nur einem Arbeitsschritt das verkaufsfertige Korn ernten und aufbereiten. Wenn man es künftig schafft, die erforderlichen Energiemengen dem Fahrzeug elektrisch zur Verfügung zu stellen, wird diese Form der Ernte weiterhin interessant bleiben.

Dennoch werden auch andere Herangehensweisen überlegt. Denn die Aufgaben eines Mähdreschers lassen sich auch getrennt voneinander erledigen und in die folgenden Kategorien gliedern: Schneiden und Aufnehmen, Dreschen und Abscheiden, Reinigen und Sammeln sowie Stroh häckseln und verteilen (Minßen et al., 2015). Werden diese Arbeitsschritte voneinander getrennt und von speziellen Maschinen durchgeführt, sinkt der erforderliche Leistungsbedarf. Zudem können einzelne Arbeitsschritte auch stationär erfolgen.

Ob sich eine neue Art der Ernte durchsetzt, wird die Zukunft zeigen. Es ist aber wahrscheinlich, dass die Lösungen, die die Elektrifizierung in Zukunft hervorbringt, heute noch als durchgeknallte Ideen abgetan werden (Höner, 2018b).

3 Zielsetzung

Die Elektrifizierung schreitet in allen Lebensbereichen voran und ist aus dem täglichen Diskurs nicht mehr wegzudenken. Aber hat die Elektrifizierung auch das Potential, um sich in der Landwirtschaft durchzusetzen? Dieser Frage wird in der vorliegenden Arbeit nachgegangen.

Im vorangegangenen Kapitel werden erste elektrische Landmaschinen vorgestellt. Dadurch wird schnell ersichtlich, worin die Grenzen der aktuellen Elektrifizierungsbestrebungen liegen. Die größte Hürde stellt dabei eine ausreichend lange und zugleich flexible Bereitstellung von Energie für die Maschinen dar.

Um eine Aussage darüber treffen zu können, welche Anforderungen an elektrifizierte Nutzfahrzeuge in Hinsicht auf Leistung und Energiemenge künftig gestellt werden, werden die Energieflüsse eines Ackerbaubetriebes ermittelt. Davon ausgehend wird der Energiebedarf für Elektrofahrzeuge errechnet. Diese Werte bilden die Basis für die Beantwortung der Forschungsfrage. Diese ist wie folgt formuliert.

Welcher Grad an Elektrifizierung ist im Weinviertler Ackerbau mit dem heutigen Stand der Technik möglich?

Darüber hinaus wird der Versuch unternommen, mit Adaptierungen der Technologiepfade den Grad der Elektrifizierung zu maximieren. Dazu werden drei Szenarien unterschieden. Ausgehend vom heutigen Stand der Technik, über eine Strategie der Anpassung an elektrische Fahrzeuge, hin zu einer Strategie, bei der die Elektrifizierung im Zentrum der technischen Entwicklung steht, stellt die Abfolge dieser Szenarien dar.

Die ermittelten Daten werden in einen Vergleich gesetzt mit den aktuellen Entwicklungen elektrischer Nutzfahrzeuge, Speichertechnologien und Bereitstellungskonzepten. Die Vorstellung aktueller Entwicklungen am Beginn dieser Arbeit soll dabei eine bessere Einordnung der Ergebnisse ermöglichen. Sie hilft zudem, die Grenzen der einzelnen Technologiepfade zu erkennen. Darüber hinaus werden zusätzliche Lösungspfade überlegt, eine Skalierung der Techniken vorgenommen und deren technische Machbarkeit bewertet.

Angewendet werden die Ergebnisse auf einen Weinviertler Ackerbaubetrieb, wobei der erzielbare Elektrifizierungsgrad maximiert wird. Für die Abschätzung dieses Elektrifizierungsgrades wird ein landwirtschaftlicher Betrieb ganzheitlich betrachtet, das bedeutet, die vorgegebene regionale Situierung, die Fruchtfolge, sowie die Flächenstruktur werden als gegeben und unveränderlich angenommen.

4 Material und Methoden

Am Ausgangspunkt der Betrachtung steht ein Musterbetrieb. Für diesen Betrieb wird die Fruchtfolge, Flächenstruktur und Mechanisierung standardisiert festgelegt, um eine Grundlage für den Vergleich mehrerer Szenarien zu ermöglichen. Der gewählte Betrieb spiegelt die landwirtschaftliche Struktur des Weinviertels wider und schafft damit eine räumliche Eingrenzung.

Zu Beginn wird die Fruchtfolge des Betriebes in die einzelnen Kulturen aufgeteilt und deren Verfahrenskette in die Verfahrensschritte zerlegt. Anschließend wird der Energiebedarf der Verfahrensschritte anhand des Dieserverbrauchs ermittelt. Damit lässt sich der elektrische Energiebedarf von vollelektrischen Fahrzeugen bestimmen.

Aus dem ermittelten Energiebedarf kann man auf die notwendige Speicherkapazität der Batterie, beziehungsweise des Wasserstofftanks im Fahrzeug, schließen. Verglichen mit dem Stand der Technik kann so abgeschätzt werden, ob eine Elektrifizierung in diesem Verfahrensschritt möglich ist.

Der Energiebedarf der einzelnen Verfahrensschritte der Fruchtfolge wird im Lastgangprofil des Betriebs aufsummiert dargestellt. Dieses Lastgangprofil zeigt die zeitkritischen Leistungsspitzen, die im Laufe des Jahres auftreten. Durch die Anpassung von Verfahrensschritten wird versucht, die Leistungsspitzen zu glätten, um einen höheren Grad an Elektrifizierung zu ermöglichen.

Um überhaupt abschätzen zu können, ob ein Verfahren elektrisch durchführbar ist, muss der Energiebedarf des Verfahrens bekannt sein. Die heute verwendeten Maschinen werden mit Dieselmotoren betrieben. Diesel stellt daher den einzigen Energieinput des Fahrzeuges dar.

Berücksichtigt man die Wirkungsgradverluste der einzelnen Fahrzeugkomponenten, erhält man die Energie, die notwendig ist, um beispielsweise einen Pflug über ein Feld zu ziehen oder eine Kreiselegge samt Sämaschine zu betreiben.

In der Praxis werden viele Arbeiten oft mit demselben Traktor verrichtet, die Maschinen sind dabei an den Traktor angepasst. Im Musterbetrieb werden die Arbeiten von einem Traktor mit CVT-Getriebe und einer Leistung von 102 kW verrichtet. Die Energie für die Arbeit in den einzelnen Verfahrensschritten wird mit dem Feldarbeitsrechner von KTBL (2017) ermittelt und mit Wirkungsgradketten in elektrische Energie umgerechnet.

4.1 Musterbetrieb

Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse dient ein Musterbetrieb im Weinviertel mit 48 Hektar. Mit diesem Musterbetrieb sollen in weiterer Folge Szenarien gerechnet werden. Der Musterbetrieb mit der angenommenen Fläche und Fruchtfolge stellt dabei die Konstante im Vergleich der Szenarien dar.

Laut Agrarstrukturerhebung 2016 bewirtschaften in Niederösterreich 38.054 Betriebe eine Fläche von 1.639.878 Hektar Land (Statistik Austria, 2018). Im Durchschnitt bewirtschaftet demnach ein niederösterreichischer Betrieb rund 43 Hektar. Um auch der unterschiedlichen Flächenstruktur in den Vierteln Rechnung zu tragen, wird die Annahme getroffen, dass die bewirtschafteten Flächen im Weinviertel größer sind wie beispielsweise im Wald- und Mostviertel. Für den Musterbetrieb wird daher die Fläche von 48 Hektar festgelegt. Die Schlaggröße der einzelnen Feldstücke wird auf 2 ha festgesetzt.

Ebenso eine Annahme ist die Fruchtfolge des Betriebes. Sie ist zusammengesetzt aus den fünf Kulturen Zuckerrübe, Kartoffel, Winterweizen, Körnermais und Sommergerste. Jene Kulturen spielen eine wichtige Rolle in dieser Region. Die Fruchtfolge basiert auf dem Fruchtfolgegrundriss nach Brinkmann (1942) mit der Bezeichnung Fruchtwechselwirtschaft. Dabei wechseln sich Blattfrucht und Halmfrucht jährlich ab (Diepenbrock, 2016).

Nachfolgend ist die gewählte Fruchtfolge tabellarisch und grafisch dargestellt. In Tabelle 1 sind die Vor- und Nachfrucht, sowie die Anbaufläche der jeweiligen Kultur aufgelistet. Die Grafik in Abbildung 3 verdeutlicht die zeitliche Abfolge der kultivierten Nutzpflanzen.

Material und Methoden

Tabelle 1 - fünfgliedrige Fruchtfolge des Musterbetriebs mit Vor- und Nachfrucht sowie der jeweiligen Anbaufläche

Vorfrucht	Kultur	Nachfrucht	Anbaufläche
WW	ZR	SG	6 ha
WW	Ka	WW	6 ha
Ka/KM	WW	KM/Ka/ZR	18 ha
WW/SG	KM	WW	12 ha
ZR	SG	KM	6 ha

Ka – Kartoffel, WW – Winterweizen, ZR – Zuckerrübe, KM – Körnermais, SG - Sommergerste

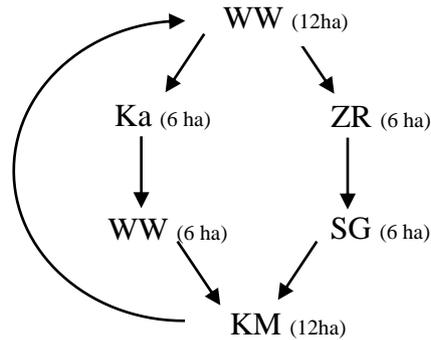


Abbildung 3 – grafische Darstellung der Fruchtfolge im Musterbetrieb

Die Fruchtfolge ist so aufgebaut, dass die Vorfruchtansprüche der Kulturen jeweils günstig oder besonders günstig ausfallen (Diepenbrock, 2016). Die Kultivierung dieser Nutzpflanzen stellt auch eine Mischung aus Getreide, Hackfrüchten und Dammkulturen dar und bildet ein breites Spektrum an ackerbaulichen Verfahren ab. Um sicherzustellen, dass diese Fruchtfolge im Weinviertel zum Einsatz kommen kann, wurde das Gespräch mit einem Praktiker gesucht. Der Landwirt bewirtschaftet selbst einen Ackerbaubetrieb in der Nähe von Stockerau und bekräftigt, dass diese Fruchtfolge möglich und in manchen Betrieben gängige Praxis ist. Unterschiedliche Gewichtungen bei der Anbaufläche der einzelnen Kulturen können dabei über die Jahre wechseln, abhängig von den erzielbaren Preisen für die Ernte und etwaigen Investitionsentscheidungen.

Der betrachtete Musterbetrieb ist bewusst als reiner Ackerbaubetrieb angelegt. Dies wird bei der Wahl einzelner Verfahrensschritte, wie dem Düngen, berücksichtigt, indem beispielsweise der Einsatz von Stallmist und Gülle als Dünger nicht vorgesehen ist.

Der Dieserverbrauch der einzelnen Verfahrensschritte orientiert sich an den Richtwerten des KTBL Feldarbeitsrechner (2017) und der Richtwerttabellen des ÖKL (2018). Die Fahrzeuge und Maschinen, die der Mechanisierung des Musterbetriebes zugrunde gelegt sind, werden im Abschnitt 4.3 genauer erläutert. Der Dieserverbrauch bildet die Basis für die Ermittlung des

elektrischen Energiebedarfs des Betriebes. Die Berechnung dazu erfolgt mit Wirkungsgradketten.

4.2 Wirkungsgradketten

Die Wirkungsgradketten schlagen eine Brücke zwischen dem Dieserverbrauch heutiger Fahrzeuge und dem erforderlichen Energiebedarf von Elektrofahrzeugen. In der heute eingesetzten Technik ist Diesel die einzige Energiequelle zur Bereitstellung von Zugkraft, Drehmoment an der Zapfwelle als auch für den Betrieb der Hydraulik. Daher wird der Dieserverbrauch unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der einzelnen Fahrzeugkomponenten umgerechnet in die notwendige Energie für die Bereitstellung der Arbeit auf dem Feld. Davon ausgehend wird zurückgerechnet, welche verfügbare Energie ein (batterie)elektrisches- oder wasserstoffbetriebenes Fahrzeug bereitstellen muss, um dieselbe Arbeit zu verrichten.

Im Zuge dessen werden die Fahrzeuge in wesentliche Komponenten zerlegt und die Wirkungsgrade der Komponenten zu einem Gesamtwirkungsgrad des Fahrzeuges multipliziert. Keine Berücksichtigung in den Wirkungsgradketten finden dabei jene Komponenten, die sowohl im Dieselfahrzeug als auch im Elektrofahrzeug vorkommen. Ein Beispiel dafür ist die Hydraulikpumpe. Ihr Wirkungsgrad hat keine direkte Auswirkung auf einen Unterschied im Gesamtwirkungsgrad der verglichenen Fahrzeuge. Bei der Verrichtung gleicher Arbeit legt sie den gleichen Widerstand an den jeweiligen Motor.

Die Wirkungsgrade der verglichenen Antriebssysteme sind der Literatur entnommen, besitzen aber keine Allgemeingültigkeit. Denkt man an die zahlreichen Getriebevarianten, die heute am internationalen Traktorenmarkt für Fahrzeuge aller Leistungsklassen angeboten werden, wird schnell klar, dass diese Werte nur als Richtwert dienen.

Tabelle 2 - Gegenüberstellung der Wirkungsgrade von Diesel- und Elektrotraktor nach Rautmann (2013)

<i>Dieseltraktor</i>	<i>Wirkungsgrad</i>		<i>Batterietraktor</i>
<i>Dieselmotor</i>	0,35	0,95	<i>Leistungselektronik</i>
<i>CVT-Getriebe</i>	0,88	0,90	<i>E-Motor</i>
		0,95	<i>Reduzierungsgetriebe</i>
	0,308	0,812	

Eine Wirkungsgradkette ist hier exemplarisch durch einen dieselbetriebenen Traktor dargestellt. Sein Pendant ist ein batterieelektrischer Traktor derselben Leistungsklasse. Die Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten sind von Rautmann (2013) übernommen. Tabelle 2 stellt die Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten gegenüber.

Der Wirkungsgrad eines kabelgebundenen Elektrotraktors ist ident mit dem Wirkungsgrad von batterieelektrischen Traktoren, so die Annahme. Dabei wird davon ausgegangen, dass die verbauten Fahrzeugkomponenten wie Leistungselektronik, Elektromotoren und Reduzierungsgetriebe in diesem Fahrzeug sehr ähnlich ausgeführt sind. Was hierbei selbstverständlich entfällt, ist der Energieverlust für Ladung und Entladung der Batterie, da die Energie während der Arbeit von einem Kabel zur Verfügung gestellt wird².

Für Wasserstofftraktoren wird ein optimistischer Wirkungsgrad von 40 % angenommen. Dieser setzt sich zusammen aus dem Wirkungsgrad der Brennstoffzelle für die Umwandlung von Wasserstoff in Elektrizität, der mit bestenfalls 50 % beziffert wird (Friedrich, 2014). Zudem mindern auch hier die Verluste von Leistungselektronik, E-Motoren und Getrieben (in Summe $\eta = 81,2\%$) den Wirkungsgrad. Wie viel Wasserstoff schlussendlich am Traktor getankt ist, hängt außerdem von der gewählten Speicherform, Druck und Temperatur ab.

Eine weitere wichtige Maschine für den Musterbetrieb ist der Mähdrescher zur Ernte der Getreidekulturen. Auch hier sind die Wirkungsgrade zwischen den heute üblichen und künftig möglichen Fahrzeugen zu unterscheiden. Der Mähdrescher selbst ist eine sehr komplexe Maschine, bestehend aus einer Vielzahl an Komponenten. Es ist aber davon auszugehen, dass viele Komponenten beim Diesel- wie beim Elektromähdrescher ident sind.

Naheliegender ist allerdings, dass Komponenten wie die Dreschtrommel oder der Fahrtrieb in einem Elektromähdrescher elektrisch ausgeführt werden, da dies zumindest für die Wartungsintensität, wie auch für eine bessere Steuerbarkeit von Vorteil ist.

Aumer (2018) hat eine Dreschtrommel mit funktionsintegriertem elektrischen Antrieb konzipiert und mit den Dreschtrommelantrieben zahlreicher Serienmähdrescher unterschiedlicher Hersteller und Leistungsklassen verglichen. Die Wirkungsgrade dieser Antriebe bewegen sich bei den heutigen Serienmaschinen zwischen 0,81 und 0,84. Die

² Es gibt zwar vorerst nur Konzeptstudien zu dieser Möglichkeit der Elektrifizierung, allerdings kann man davon ausgehen, dass auch kabelgebundene Elektrofahrzeuge eine, wenn auch kleinere, Batterie verbaut haben, um die Fahrten von Feld zu Feld, von Kabelanschluss zu Kabelanschluss elektrisch zu bewerkstelligen.

elektrische Dreschtrommel weist einen Wirkungsgrad von 0,84 auf und unterscheidet sich damit kaum von konventionellen Antrieben.

Bei den Fahrantrieben der Mähdrescher sind hingegen größere Unterschiede auszumachen. Während ein hydraulischer Antrieb je nach Modell und Hersteller einen Wirkungsgrad von 0,40 bis 0,68 vorweist, bewegt sich der Wirkungsgrad bei einem Antrieb mit permanenterregten Synchronmotoren zwischen 0,72 und 0,82 (Aumer et al., 2008).

Allerdings ist es schwer abzuschätzen, wie sich die Energieflüsse für die zahlreichen Antriebe im Mähdrescher aufteilen. Diese Unterschiede sind abhängig von der Größe der Maschine, Bauart, Antriebssystem, Dreschsystem und Hersteller. Zur Vereinfachung werden für die Berechnung der Wirkungsgradketten einheitliche Umrechnungsfaktoren, wie in Formel 2 angeführt, verwendet. Diese Annahme trägt zwar der Komplexität der Maschine und künftigen Einsparungspotentialen durch Elektroantriebe im Mähdrescher ungenügend Rechnung, erscheint aber für die gesamtbetriebliche Betrachtung zum Elektrifizierungspotential des Musterbetriebs ausreichend. Dieselbe Begründung wird auch den zur Rübenernte verwendeten selbstfahrenden Fahrzeugen zugrunde gelegt.

4.3 Mechanisierung am Musterbetrieb und Ermittlung des Energieverbrauchs

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Szenarien ist es sinnvoll, eine Standardmechanisierung für den Musterbetrieb festzulegen. Die Berechnung des Energiebedarfs orientiert sich am stärksten Traktor, mit dem der Hauptteil der Arbeiten am Betrieb verrichtet wird.

Weitere Angaben zur verwendeten Technik, wie beispielsweise die Sätechnik oder Bodenbearbeitungsgeräte inklusive der Angabe der Arbeitsbreite und geforderten Traktorleistung, sind im Kapitel 5, gesondert für die jeweiligen Szenarien, aufgelistet.

Der elektrische Energiebedarf in den Szenarien wird anhand des Dieserverbrauchs der einzelnen Arbeitsschritte aller Kulturen der Fruchtfolge ermittelt. Die genauen Arbeitsschritte des Standardszenarios sind im Kapitel 5 „Ergebnisse und Diskussion“ aufgelistet. Die Datengrundlage für den Dieserverbrauch liefert die Dieselbedarfsdatenbank des KTBL (2017) und für den Ernteguttransport die Richtwerttabelle des ÖKL (2018).

4.4 Szenarien der Elektrifizierung

Um den Grad an Elektrifizierung zu maximieren, ist es erforderlich, nicht nur den Energiebedarf zur Bewirtschaftung der einzelnen Kulturen zu betrachten, sondern auch genauer auf die Mechanisierung zu fokussieren. Denn die Mechanisierung kann sich bei der Umstellung

von dieselbetriebenen auf elektrische Fahrzeuge an unterschiedlichen Gesichtspunkten orientieren. Diese Unterschiede werden durch Zuordnung in drei Szenarien ausgearbeitet.

Mit Hilfe der Szenarien wird ein Bezug zum Stand der Technik hergestellt. Allen Szenarien dieser Arbeit gemein ist die Prämisse, dass die Wirtschaftlichkeit keine Entscheidungsgrundlage für die gewählten Techniken und Technologien darstellt. Der Kostendruck würde potenziell technisch mögliche Lösungen von vornherein ausschließen. Daher orientiert sich die Betrachtung ausschließlich an der technischen Machbarkeit.

Bei den verwendeten Begrifflichkeiten und Beschreibungen wird auf die Ausführung von Reinmuth (2013) zurückgegriffen, der diese Szenarien als Ebenen der Elektrifizierung einzelner Landmaschinen beschreibt.

Die Ebenen nach Reinmuth (2013) werden allerdings zu Szenarien ausgeweitet, die neben dem Antriebssystem und Maschinenkonzept auch die ackerbauliche Praxis beinhalten.

Tabelle 3 zeigt die kurze Definition der einzelnen Ebenen, die in dieser Arbeit als Szenarien bezeichnet werden.

Tabelle 3 - Ebenen der Elektrifizierung in der Landtechnik nach Reinmuth (2013)

Ebene	Erklärung
Conversion	Substitution des bisherigen Antriebssystems durch elektrische Antriebe unter Beibehaltung des bisherigen Maschinenkonzeptes und Funktionalität.
Extension	Ausweitung der Maschinenfunktionalität durch den Einsatz von elektrischen Antrieben und Automatisierungsmaßnahmen unter Beibehaltung des bisherigen Maschinenkonzeptes.
Purpose	Anpassung des Maschinenkonzeptes und der Funktionalität an die Charakteristika von elektrischen Antrieben.

Das Conversion Szenario bildet die Basis der Berechnungen in dieser Arbeit. Ergebnis dieses Szenarios ist das Identifizieren jener Arbeitsschritte, die besonders viel Potential für die Elektrifizierung bieten und jener, die noch besser optimiert werden müssen. Dafür wird das Antriebssystem der Maschinen adaptiert, die Arbeitsschritte und verwendeten Maschinen sind ident mit der Bewirtschaftung mit dieselbetriebenen Maschinen. Dieses Szenario nimmt Anleihe an die aktuellen Entwicklung namhafter Hersteller im Bereich der Elektrifizierung. Sowohl die batterieelektrischen Traktoren von John Deere, Fendt und Rigitrac, als auch der mit Wasserstoff betriebene Traktor von New Holland weisen grundsätzlich dieselben Funktionalitäten auf wie ihre Pendanten mit Verbrennungsmotor.

Allerdings mit der Ausnahme, dass die elektrifizierten Fahrzeuge bereits die notwendige Infrastruktur für eine Elektrifizierung der Anbaugeräte integriert haben. Das dafür notwendige Hochvoltnetz lässt sich zwar auch auf einem gewöhnlichen Traktor aufbauen, auf einem Elektrotraktor ist die dafür erforderliche Hochleistungselektronik jedoch bereits vorhanden.

Der Einsatz elektrifizierter Anbaugeräte wäre Teil des Extension Szenarios. Dabei würden neben dem Traktortrieb auch die Anbaugeräte über elektrische Antriebe verfügen, was Vorteile bei Effizienz und Energieverbrauch, aber auch bei der Steuerbarkeit und Präzision der Maschinen mit sich bringt. Im Extension Szenario werden aber auch die Arbeitsschritte der Kulturen überdacht. Beispiele dafür sind eine bessere Skalierung der Maschinenleistung, um den Energieverbrauch zu optimieren, oder der Einsatz alternativer Verfahren, die sparsamer mit der eingesetzten Energie umgehen.

Einen Übergang zwischen Extension Szenario und Purpose Szenario bilden Konzeptstudien, wie der kabelgebundene SESAM Traktor von John Deere. Hier ist zum einen das Energiebereitstellungskonzept bereits angepasst an die elektrische Maschine, zum anderen orientiert sich diese selbst in ihrer Funktion und Arbeitsweise aber sehr stark an den gewöhnlichen Traktoren.

Eine vollkommene Ausrichtung des Fahrzeuges auf die neue Antriebsweise stellen beispielsweise Roboter dar, die verstärkt entwickelt werden, vor allem für den Bereich Pflegemaßnahmen. Sie wären im Purpose Szenario angesiedelt. Weitere Einsatzfelder, aber auch neue Funktionalitäten und eine Anpassung des Ackerbaus an die neuen Maschinen werden in diesem Bereich bestimmt folgen. Dennoch wird diesen Fahrzeugen im Hauptteil dieser Arbeit keine weitere Aufmerksamkeit gewidmet. Die vorliegende Arbeit betrachtet ausschließlich jene Elektrifizierungsszenarien, die mit dem heutigen Stand der Technik im Ackerbau möglich sind. Überlegungen zu Robotern und neuen Antriebsformen und Energieträgern werden im Kapitel 7 „Ausblick“ ausführlicher beschrieben.

4.5 Die betrachteten Szenarien im Überblick

Um einen möglichst breiten Überblick der Elektrifizierungspotentiale zu ermöglichen, sind die Ergebnisse in unterschiedliche Schwerpunkte unterteilt. Am Beginn steht die Betrachtung des gesamten Musterbetriebs in einem Standardszenario. Dieses orientiert sich am aktuellen Stand der Technik und bietet einen Überblick über die Energieflüsse im Jahresverlauf. Es stellt die Basis für alle weitere Vergleiche mit anderen Szenarien dar.

Anschließend werden zwei Adaptierungen des Gesamtsystems betrachtet. In einer ersten, als 45 kW-Szenario bezeichneten, Anpassung wird die Traktorleistung von 102 kW auf 45 kW reduziert. Diese Leistungsklasse entspricht den ersten Pilotprojekten von Fendt und Rigitrac, die diese vollelektrischen Traktoren bereits anbieten. Die Veränderung der Leistungsklasse wirkt sich auf die verwendeten Geräte und damit auf Flächenleistung und Energieverbrauch aus.

Die zweite Adaptierung fokussiert auf die landwirtschaftlichen Verfahrensschritte selbst. Im Zentrum dieses Szenarios steht dabei wieder das Standardszenario mit der Standardmechanisierung durch den 102 kW Traktor. Das unterschiedliche Bodenbearbeitungsschritte und Saatechniken eine Auswirkung auf Energiebedarf und Flächenleistung haben, liegt auf der Hand. Wie sich dies aus dem Blickwinkel der Elektromobilität am Feld verhält, ist die zu beantwortende Frage dieses Abschnittes.

Anschließend wird die, in der Vergangenheit bereits von John Deere behandelte, Idee aufgegriffen, die Energie in einem Akku am Frontkraftheber mitzuführen. Dieser technologische Ansatz gewährleistet einen schnellen Batterietausch. Die Kenndaten dieser John Deere Batterie finden dabei Eingang in den Vergleich mit den Energieverbräuchen auf dem Feld.

Danach wird ein weiterer Aspekt der landwirtschaftlichen Elektromobilität beleuchtet: Die Eigenerzeugung der benötigten Energie direkt am Betrieb. Die unterschiedlichen Wege, diese Energie vom Bezugspunkt in die Fahrzeuge zu bekommen, um dabei sämtliche Restriktionen der technischen Machbarkeit im Auge zu behalten, folgen. Die Bereitstellungskonzepte stellen damit einen abschließenden Baustein dar, um die Potentiale der Elektrifizierung in der Landwirtschaft einschätzen zu können.

5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Teil der Arbeit werden verschiedene Szenarien für eine Elektrifizierung in der Landwirtschaft entwickelt und modellbasiert auf die technische Realisierbarkeit überprüft. Darüber hinaus werden gedanklich neue Wege beschritten, um die gegenwärtige Landwirtschaft für die elektrische Zukunft zu adaptieren.

In Abschnitt 4.5 werden die, den angewendeten Szenarien zugrundeliegenden Überlegungen, bereits ausgeführt. Am Beginn steht das Standardszenario. Es zeigt die Energieintensität jedes einzelnen Arbeitsschrittes im Jahresverlauf auf und lässt eine Gliederung der Arbeitsschritte entsprechend dem Energiebedarf zu. Es ermöglicht zudem, die Energieverbräuche jeweils einer Kultur, aber auch einem speziellen Zeitpunkt zuzuordnen.

5.1 Energieverbrauch im Standardszenario

Die Basis aller Betrachtungen bildet das Lastgangprofil des Musterbetriebes. Dieser wird in Abbildung 4 dargestellt und zeigt den Energiebedarf der einzelnen Arbeitsschritte für jede Stunde des Jahres.

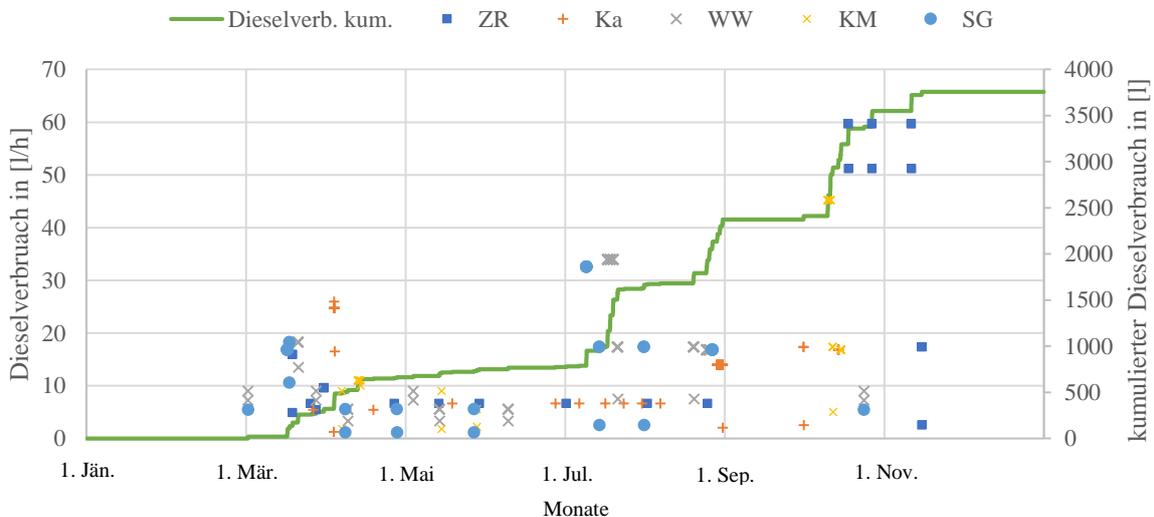


Abbildung 4 - Lastgangprofil des Musterbetriebes im Standardszenario. x-Achse: Stunden des Jahres, y-Achse links: Dieserverbrauch in Liter pro Stunde, y-Achse rechts: kumulierter Dieserverbrauch des Betriebes in Liter; (ZR Zuckerrübe, Ka Kartoffel, WW Winterweizen, KM Körnermais, SG Sommergerste); eigene Darstellung

Der Dieserverbrauch des Betriebs im Standardszenario beträgt 3.754,5 Liter Diesel im Bewirtschaftungsjahr, sowohl für den betriebseigenen Traktor als auch für die überbetrieblich genutzten Maschinen zum Legen der Kartoffel und der Ernte von Getreide, Mais und Zuckerrüben. Der Feldarbeitszeitbedarf der eingesetzten Fahrzeuge beträgt für das gesamte

Ergebnisse und Diskussion

Bewirtschaftungsjahr 242,5 Stunden.³ Der summierte Dieselbedarf für jede einzelne Kultur, bezogen auf die gesamte bewirtschaftete Fläche sowie bezogen auf je einen Hektar der Kultur, sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4 - Auflistung der Dieserverbräuche der jeweiligen Kulturen am Musterbetrieb. Aufgelistet sind der Gesamtdieselbedarf der Kultur und der Dieselbedarf je Hektar bewirtschafteter Fläche.

Kultur	Fläche [ha]	Gesamtdieserverbrauch [l]	Dieserverbrauch/ha [l/ha]
Kartoffel	6	547,4	91,2
Körnermais	12	680,3	56,7
Sommergerste	6	462,8	77,1
Winterweizen	18	1442,7	80,2
Zuckerrübe	6	665,2	110,9

Interessanter ist das Lastgangprofil für die Ermittlung der zeitkritischen Leistungsspitzen, die im Laufe des Jahres auftreten. Um einen höheren Grad an Elektrifizierung zu erreichen, sind zwei Strategien interessant. Zum einen die Reduktion des Energieverbrauchs der einzelnen Verfahren an sich. Zum anderen die Glättung der Leistungsspitzen im Jahresverlauf, die eine Elektrifizierung des Arbeitsschrittes begünstigen. Die notwendigen Anpassungen sehen dazu unterschiedliche Maßnahmen vor:

- die Verringerung der Leistung von Fahrzeugen
- die Verringerung der Arbeitsbreiten und -tiefen
- eine bessere Anpassung der Fahrzeuge an die jeweilige Arbeitsaufgabe
- alternative Verfahrensschritte (z.B. no-till anstelle des Grubbers)

Im Wesentlichen sind vier Leistungsspitzen im Bewirtschaftungsjahr auszumachen. Der erste starke Anstieg des Energieverbrauches findet im Frühjahr statt, maßgeblich getrieben von der Bestellung der Felder. Zwei weitere Spitzen Mitte des Jahres stellen die Ernte der Getreidekulturen sowie die Kartoffelernte dar. Der größte Energieverbrauch findet im Herbst bei der Ernte von Körnermais und Zuckerrüben statt.

Einen besseren Überblick über die Energieverbräuche der einzelnen Verfahrensschritte bietet eine Aufschlüsselung der einzelnen Kulturen. Dieser ist für das Standardszenario ausführlich in Tabelle 5, für das nachfolgende 45 kW-Szenario in Tabelle 7 geboten.

³ Der Arbeitszeitbedarf bezieht sich rein auf die Feldarbeit. Dieser Wert beinhaltet dabei die Hauptarbeitszeit, Wendezeiten, Versorgungszeiten sowie nicht vermeidbare Verlustzeiten am Feld (KTBL, 2017). Nicht mitinbegriffen sind dabei jene Zeiten, die für die Fahrt zwischen Hof und Feld anfallen, sowie die Rüst- und Wartungszeiten am Hof.

Ergebnisse und Diskussion

5.1.1 Die Verfahren des Standardszenario im Überblick

In Tabelle 5 sind die erforderlichen Arbeitsgänge des Standardverfahren aufgelistet. Die schlagkräftige Bearbeitung der Felder garantiert ein Traktor mit einer Leistung von 102 kW. Dieser stellt, wie in Kapitel 4 „Material und Methoden“ bereits erläutert, die Standardmechanisierung auf dem Musterbetrieb dar und ist zugleich der Ausgangspunkt aller Vergleiche.

Für das Legen der Kartoffeln und die Ernte aller Kulturen wird die Technik überbetrieblich eingesetzt, die rechtfertigt die großzügige Auslegung der Geräte und die hohe Antriebsleistung und Schlagkraft. Mit dieser Festlegung wird dem aktuellen Trend, hin zu größeren und stärkeren Maschinen, Rechnung getragen.

Tabelle 5 - Die Verfahrenskette im Standardbetrieb für die Fruchtfolge des Musterbetriebs mit einer Anbaufläche von 48 ha. Auflistung der Arbeitsgänge samt Dieserverbrauch in Liter pro Hektar und Flächenleistung nach (KTBL, 2017)

Arbeitsgänge im 102 kW Szenario		Dieselve rverbrauch [l/ha]	Flächen leistung [ha/h]
Winterweizen – 18 ha			
Aussaat	Kreiselegge-Drillsämaschine, 3m, 102 kW	14,0	1,3
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 1,5 m ³ , 102 kW	0,9	10,0
Walzen	Walze, 8m, 102 kW	4,8	3,8
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 24 m, 1.500 l, 102 kW	1,1	7,1
Mähdrusch	Mähdrescher, 9.500 l, 4,5 m, 225 kW	25,9	1,3
Ernteguttransport	1 Kipper je 24 t, 102 kW	2,4	1,3
Stoppelsturz	Schwergrubber, 3m, 102 kW	9,2	1,9
Aussaat ZF	Kreiselegge-Drillsämaschine, 3m, 102 kW	14,0	1,3
Grunddüngung	Anbauschleuderstreuer, 1,5 m ³ , 102 kW	0,9	10,0
Körnermais – 12 ha			
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 1,5 m ³ , 102 kW	0,9	10,0
Aussaat	Kreiselegge/Mulcheinzelkornsaat, 3m, 102 kW	10,0	1,2
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 24 m, 1.500 l, 102 kW	1,1	7,1
Mähdrusch	Mähdrescher, 9.500 l, 4,5 m, 225 kW	34,7	1,2
Ernteguttransport	1 Kipper je 24 t, 102 kW	2,9	1,2
Grubber	Schwergrubber, 3m, 102 kW	9,2	1,9
Sommergerste – 6 ha			
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 1,5 m ³ , 102 kW	0,9	10,0
Aussaat	Kreiselegge-Drillsämaschine, 3m, 102 kW	14,0	1,3
Walzen	Walze, 8m, 102 kW	4,8	3,8
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 24 m, 1.500 l, 102 kW	1,1	7,1
Mähdrusch	Mähdrescher, 9.500 l, 4,5 m, 225 kW	24,7	1,3
Ernteguttransport	1 Kipper je 24 t, 102 kW	2,4	1,3

Ergebnisse und Diskussion

Stoppelsturz	Schwergrubber, 3m, 102 kW	9,2	1,9
Aussaat ZF	Kreiselegge-Drillsämaschine, 3m, 102 kW	14,0	1,3
Grunddüngung	Anbauschleuderstreuer, 1,5 m ³ , 102 kW	0,9	10,0
Zuckerrübe – 6 ha			
Feingrubber	Federzinkenegge, 4,5 m, 102 kW	6,1	2,6
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 1,5 m ³ , 102 kW	0,9	10,0
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 24 m, 1.500 l, 102 kW	1,1	7,1
Säen	Mulcheinzelkornsaat, 12 Reihen, 102 kW	4,8	2,0
Rüben Roden	Köpfrodebunker, sechsreihig, 30m ³ , 400 kW	65,5	0,7
Ernteguttransport	Doppelzug je 14 t, 102 kW	19,7	0,7
Grubber	Schwergrubber, 3m, 102 kW	9,2	1,9
Kartoffel – 6 ha			
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 1,5 m ³ , 102 kW	0,9	10,0
Pflanzguttransport	Dreiseitenkipper, 14 t, 45 kW	1,1	0,9
Kartoffel legen	Kombifräse, Legen, Dammaufbau, 3m, 157 kW	27,5	0,9
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 24 m, 1.500 l, 102 kW	1,1	7,1
Kartoffel Ernte	Rodebunker, 2-reihig, 6 t, 102 kW	35,5	0,4
Ernteguttransport	Doppelzug je 14 t, 102 kW	4,4	0,4
Grubber	Schwergrubber, 3m, 102 kW	9,2	1,9

Die Auslegung der Maschinen wurde so gewählt, dass mit 102 kW Antriebsleistung die maximale Schlagkraft erzielt wird. Mit der Auswahl der verfügbaren Geräte im Feldarbeitsrechner von KTBL (2017) konnten im Wesentlichen alle Aufgaben abgedeckt werden.

Für eine Analyse des möglichen Elektrifizierungsgrades ist allerdings weniger die separate Betrachtung der Kulturen interessant als vielmehr die einzelnen Arbeitsschritte, die im Laufe des Jahres auf den Feldern durchgeführt werden und oft auch kulturübergreifend erfolgen. Tabelle 6 zeigt den Energieverbrauch der einzelnen Arbeitsschritte, aufsummiert über alle Kulturen. Um die Höhe des Gesamtverbrauches besser einordnen zu können, ist dieser in Relation zur bearbeiteten Fläche gesetzt. Um auch die Leistungsbereitstellung in die Betrachtung miteinzubeziehen, ist die beanspruchte Durchschnittsleistung der Arbeitsschritte angegeben.

Die Berechnung des elektrischen Energiebedarfs auf Basis des Dieserverbrauches erfolgt anhand der in Kapitel 4.2 beschriebenen Wirkungsgradkette. Beispielhaft gezeigt sei dies an der Aussaat der Zwischenfrucht. Die Zwischenfrucht wird im Herbst auf den abgeernteten Getreideflächen angebaut. Der Anbau erfolgt im Anschluss an den letzten Stoppelsturz auf einer Gesamtfläche von 24 Hektar. Dazu kommt die Kreiselegge-Drillsämaschinen Kombination mit drei Meter Arbeitsbreite zum Einsatz. Insgesamt benötigt dieser Arbeitsschritt 336 Liter

Ergebnisse und Diskussion

Diesel. Mit einem angenommenen Gesamtwirkungsgrad des Traktors von 30,8 %⁴ ergibt dies einen Energiebedarf von 1.097 kWh zur Bereitstellung der Arbeit am Feld, wie in Formel 1 gezeigt.

$$336 [l \text{ Diesel}] * 10,6 \left[\frac{kWh}{l \text{ Diesel}} \right] * 0,308 = 1.097 [kWh] \quad (1)$$

Dies beinhaltet den Betrieb des Traktors, den Antrieb der Kreiselegge für die Saatbettbereitung, sowie die Bereitstellung der Zugleistung des Gespanns über das Feld.

Auch Elektro- und Wasserstofftraktoren haben bei der Energieübertragung einen Wirkungsgradverlust, wenngleich dieser dank höherer Effizienz der Fahrzeugkomponenten geringer ausfällt. Dennoch müssen die Fahrzeuge mehr Energie bereitgestellt bekommen, als diese für den Arbeitsschritt tatsächlich benötigen. Es macht dabei wiederum einen Unterschied, ob die Energie für die Elektromotoren über eine Batterie, ein Kabel oder eine Brennstoffzelle bereitgestellt wird.

Abermals wird die Zwischenfrucht herangezogen, um mithilfe von Formel 2 den Energiebedarf für die Aussaat mit einem batterieelektrischen Traktor zu ermitteln.

$$\frac{1.097 [kWh]}{0,812 [\%]} = 1.350 [kWh] \quad (2)$$

Am selben Beispiel der Zwischenfrucht wird der Wasserstoffbedarf wie in Formel 3 ermittelt. Die für den Wasserstoff getroffenen Annahmen werden ebenfalls in Abschnitt 4.2 ausführlich beschrieben.

$$\frac{1.097 [kWh]}{0,4 [\%] * 33,33 \left[\frac{kWh}{kg} \right]} = 82 [kg H_2] \quad (3)$$

In Tabelle 6 sind alle Arbeitsschritte des Standardszenarios aufgelistet. Die Werte beinhalten kleine Unschärfen, wie unten erläutert wird. Sie ermöglichen dennoch einen Vergleich der einzelnen Arbeitsschritte und lassen eine Abschätzung darüber zu, welche Energiemengen in einer elektrifizierten Wirtschaftsweise erforderlich sind. Die größte Unschärfe liegt in jenen Arbeitsschritten, die nicht mit dem Traktor bewerkstelligt werden. Der Wirkungsgrad des Antriebsstranges vom Traktor wurde auch dem Mähdrescher und dem Rübenroder unterstellt. Der Grund dafür wurde bereits in Abschnitt 4.2 näher beschrieben.

⁴ Zugrundeliegende Berechnung in Kapitel 4.2

Ergebnisse und Diskussion

Diese Vereinfachung stellt eine Notwendigkeit dar, die auf der Tatsache fußt, dass auch im Sektor der selbstfahrenden Erntetechnik eine breite Palette an Antriebs- und Maschinenkonzepten angeboten wird. Dieses Angebot zu überblicken und vollständig zu erfassen, steht in keiner Relation zur Notwendigkeit für einen sinnvollen Vergleich. Vor allem auch deshalb, weil es mit großer Unsicherheit behaftet ist, welche Technik sich künftig durchsetzen wird.

Tabelle 6 - Energieverbrauch im Standardszenario der einzelnen Arbeitsschritte am Musterbetrieb, absteigend gereiht nach dem Gesamtenergiebedarf an Strom oder Wasserstoff im Bewirtschaftungsjahr.

Arbeitsschritt	Summe der bearb. Fläche [ha]	Gesamtenergiebedarf Elektrofahrzeug [kWh]	Ø Leistungsbedarf Elektrofahrzeug [kW]	Gesamtbedarf Wasserstofffahrzeug [kg H ₂]
Mähdrusch Getreide	24	2470	137,5	150,5
Grubber	72	1788	69,1	109,0
Mähdrusch Mais	12	1672	160,2	101,9
Rüben Roden	6	1579	192,1	96,2
Aussaat ZF	24	1350	70,3	82,3
Aussaat Getreide	24	1350	70,3	82,3
Kartoffel Ernte	6	1027	61,6	62,6
Pflanzenschutz	168	743	31,4	45,3
Kartoffel legen	6	663	99,5	40,4
Maiseinzelkornsaat	12	482	47,4	29,4
Ernteguttransport Rüben	6	476	57,9	29,0
Walzen	24	442	70,9	26,9
Düngen	102	369	36,2	22,5
Ernteguttransport Getreide	24	232	12,8	14,1
Feingrubber	6	147	63,7	9,0
Ernteguttransport Mais	12	142	13,6	8,6
Rüben Einzelkornsaat	6	116	38,6	7,1
Ernteguttransport Kartoffel	6	106	6,4	6,5
Grunddüngung	24	87	36,2	5,3
Pflanzguttransport	6	26	3,9	1,6

Die in Tabelle 6 angeführten Werte sind absteigend nach dem Gesamtenergiebedarf für Elektro- und Wasserstofffahrzeuge gereiht. Tabelle 6 gibt ebenso wie Abbildung 4 einen Überblick darüber, welche Arbeitsschritte in kurzer Zeit einen großen Energiebedarf

aufweisen. Diese Werte bilden die Grundlage für die Entscheidung, welche Arbeitsschritte anschließend näher betrachtet werden.

Ein Vergleich der einzelnen Arbeitsschritte fällt aber gerade aufgrund der unterschiedlichen Flächenleistungen sehr schwer. Hinzu kommt, dass die Festlegung darauf, welches Ausmaß an bearbeiteter Fläche oder Betriebsstunden bei Verwendung eines elektrischen Fahrzeugs vom Anwender als attraktiv empfunden wird, nur sehr subjektiv möglich ist. So muss jeder Nutzer für sich selbst entscheiden, ob die Bearbeitung von zwei Hektar Boden mit einer Akkuladung attraktiv genug ist, um dafür ein Elektrofahrzeug anzuschaffen, oder ob er dafür ein Vielfaches an Fläche voraussetzt.

Den deutlichsten Schluss darüber, welche Arbeitsschritte elektrisch möglich sind, lässt der Energiebedarf pro Stunde zu. Setzt man diesen Wert in Relation zu den Kenndaten aktueller Entwicklungen, so erhält man ein Bild davon, welche Arbeitsschritte schon möglich und welche mit heutigem Stand der Technik noch nicht realisierbar sind. Auch aus diesem Aspekt heraus werden vorerst nur batterieelektrische Fahrzeuge betrachtet.

Denn die Entwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen für den landwirtschaftlichen Einsatz stockt aktuell. Im Kapitel 7 wird dieser Technologie ein kurzer Exkurs gewidmet.

Fahrzeuge hingegen, die, wie aus dem Schienenverkehr bekannt, permanent über ein Kabel mit Strom versorgt werden, haben kein Problem mit der Energiebereitstellung, sondern eher mit der Leistungsbereitstellung und in erster Linie mit der Verfügbarkeit der notwendigen Infrastruktur. Für diese Bereitstellungskonzepte gibt es wiederum einen eigenen Abschnitt am Ende dieses Kapitels.

5.1.2 Eingrenzung der betrachteten Arbeitsschritte

Aufgrund der großen Bandbreite an Arbeitsschritten ist es sinnvoll, diese einzugrenzen und in Gruppen je nach durchschnittlichen Leistungsbedarf zu untergliedern. In Abhängigkeit des aktuellen Stand der Technik bei batterieelektrischen Fahrzeugen werden sowohl jene Arbeitsschritte, die schon jetzt sehr einfach elektrifizierbar wären (Pfleßmaßnahmen und Düngung), aber auch jene, die aus heutiger Sicht noch nicht realistisch elektrifizierbar sind (sämtliche Ernteverfahren), aus der weiteren Betrachtung ausgeklammert. Für die Elektrifizierung der Erntetechnik wäre ein maßgeblicher Durchbruch, zum einen bei der Speichertechnologie, zum anderen in der Erntetechnik selbst erforderlich. Auch Wasserstoff als Energieträger könnte zukünftig für diesen Schritt eine Möglichkeit darstellen.

Einen Überblick über die wichtigsten Kenndaten aktueller batterieelektrischer Traktoren bietet Tabelle 9 im nächsten Abschnitt. Die verbauten Batteriespeicher dieser Fahrzeuge weisen eine Nennkapazität von 80 bis 130 kWh auf.

Für den nächsten Schritt der Elektrifizierung erscheinen Bodenbearbeitungsmaßnahmen und die Aussaat interessant. Diese Schritte stellen zwar aufgrund teils niedriger Flächenleistung und hohem Energiebedarfs eine Herausforderung für die Energiebereitstellung der Elektrofahrzeuge dar, bieten allerdings auch unterschiedliche Stellschrauben für weiteren Fortschritt.

5.2 Reduktion der Fahrzeugleistung

Aus der Reduktion der Traktorleistung auf 45 kW resultiert in diesem 45 kW-Szenario eine Reduktion der Flächenleistung. Die Leistungsreduktion geht zudem mit einem verringerten Energieverbrauch für die einzelnen Arbeitsschritte einher. Diese Feststellung ist auf die Daten von KTBL (2017) zurückzuführen. Tabelle 7 listet die Arbeitsschritte in diesem Szenario vollständig auf. Diese gibt einen Überblick über die verwendeten Geräten mit Angabe von Dieserverbrauch und Flächenleistung. Erst im Anschluss werden die Pflegemaßnahmen und Erntetechniken ausgeklammert. Der Gesamtdieselbedarf in diesem Szenario beträgt rund 3.277 Liter, die Feldarbeitszeit steigt auf 367,4 Stunden (3.754 l Diesel bei einer Feldarbeitszeit von 242,5 Stunden im Standardszenario).

Tabelle 7 - Die Verfahrenskette für die Fruchtfolge des Musterbetriebs mit einer Anbaufläche von 48 ha. Auflistung der Arbeitsgänge samt Dieserverbrauch in Liter pro Hektar und Flächenleistung für das 45 kW-Szenario nach (KTBL, 2017)

Arbeitsgänge im 45 kW-Szenario		Dieserverbrauch [l/ha]	Flächenleistung [ha/h]
Winterweizen – 18 ha			
Aussaat Getreide	Kreiselegge-Drillsämaschine, 2,5m, 45 kW	9,0	1,0
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 0,8 m ³ , 45 kW	0,6	7,7
Walzen	Walze, 4,5 m, 45 kW	3,5	2,3
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 15 m, 1.000 l, 45 kW	0,9	5,0
Mähdrusch Getreide	Mähdrescher, 8.500 l, 3 m, 200 kW	30,0	0,9
Ernteguttransport Getreide	Doppelzug je 8 t, 45 kW	1,7	0,9
Grubber	Stoppelgrubber tief; 2,5 m; 45 kW	5,4	1,5
Aussaat ZF	Kreiselegge-Drillsämaschine, 2,5m, 45 kW	9,0	1,0
Grunddüngung	Anbauschleuderstreuer, 0,8 m ³ , 45 kW	0,6	7,7
Körnermais – 12 ha			
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 0,8 m ³ , 45 kW	0,6	7,7

Ergebnisse und Diskussion

Feingrubber	Federzinkenegge, 4,5 m, 45 kW	4,3	2,6
Maiseinzelkornsaat	Einzelkornsaat, 4,5m, 45 kW	2,5	2,1
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 15 m, 1.000 l, 45 kW	0,9	5,0
Mähdrusch Mais	Mähdrescher, 9.500 l, 4,5 m, 225 kW	34,7	1,2
Ernteguttransp. Mais	Doppelzug je 8 t, 45 kW	2,6	1,2
Grubber	Stoppelgrubber tief; 2,5 m; 45 kW	5,4	1,5
Sommergerste – 6 ha			
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 0,8 m ³ , 45 kW	0,6	7,7
Aussaat Getreide	Kreiselegge-Drillsämaschine, 2,5m, 45 kW	9,0	1,0
Walzen	Walze, 3m, 45 kW	3,5	2,3
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 15 m, 1.000 l, 45 kW	0,9	5,0
Mähdrusch Getreide	Mähdrescher, 8.500 l, 3 m, 200 kW	28,7	0,9
Ernteguttransport Getreide	Doppelzug je 8 t, 45 kW	1,4	0,9
Grubber	Stoppelgrubber tief; 2,5 m; 45 kW	5,4	1,5
Aussaat ZF	Kreiselegge-Drillsämaschine, 2,5m, 45 kW	9,0	1,0
Zuckerrübe – 6 ha			
Feingrubber	Federzinkenegge, 4,5 m, 45 kW	4,3	2,6
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 0,8 m ³ , 45 kW	0,6	7,7
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 15 m, 1.000 l, 45 kW	0,9	5,0
Rüben Einzelkornsaat	Mulcheinzelkornsaat, 6 Reihen, 45 kW	4,5	1,0
Rüben Roden	Köpfrodebunker, sechsreihig, 24m ³ , 300 kW	57,2	0,7
Ernteguttransport Rüben	Doppelzug je 8 t, 45 kW	17,9	0,7
Grubber	Stoppelgrubber tief; 2,5 m; 45 kW	5,4	1,5
Kartoffel – 6 ha			
Düngen	Anbauschleuderstreuer, 0,8 m ³ , 45 kW	0,6	7,7
Pflanzguttransport	Dreiseitenkipper, 14 t, 45 kW	1,1	0,9
Fräsen	Fräsen, 2,5m, 45 kW	8,0	1,0
Kartoffel legen	2 Reihen, 0,7 Tonnen Bunker, 45 kW	11,5	0,6
Pflanzenschutz	Anbaupflanzenspritze, 15 m, 1.000 l, 45 kW	0,9	5,0
Kartoffel Ernte	Rodebunker, einreihig, 2t, 45 kW	38,0	0,2
Ernteguttransport Kartoffel	Dreiseitenkipper, 14 t, 45 kW	3,5	0,2
Grubber	Stoppelgrubber tief; 2,5 m; 45 kW	5,4	1,5

Rein aus Sicht der zur Anwendung kommenden Arbeitsschritte ist das 45 kW-Szenario nahezu ident mit dem Standardszenario. Lediglich in zwei Arbeitsschritten unterscheiden sich die beiden Annahmen. Zum einen werden die Kartoffeln in zwei separaten Arbeitsschritten

Ergebnisse und Diskussion

gelegt. Zuerst erfolgt eine Saatbettbereitung mit der Fräse, anschließend werden die Kartoffeln gelegt. Beide Arbeitsschritte erfolgen mit dem 45 kW Traktor. Diese Arbeitsschritte ersetzen das Kartoffellegen aus dem Standardszenario, bei dem das Fräsen, das Legen und der Dammaufbau in einem Durchgang mit einem 157 kW Traktor durchgeführt werden. Zum anderen läuft auch der Anbau von Körnermais zweistufig ab. Erst wird der Boden mit einer Federzinkenegge bearbeitet, anschließend erfolgt die Einzelkornsaat.

Tabelle 8 listet auf, wie sich die Energieverbräuche der einzelnen Arbeitsschritte in diesem Szenario ändern. Die letzte Spalte zeigt die jeweilige Veränderung zum Standardszenario.

Tabelle 8 - Die Arbeitsschritte im 45 kW-Szenario absteigend gereiht anhand des Gesamtenergiebedarfes für Elektro- und Wasserstofffahrzeuge. Die letzte Spalte zeigt die Veränderung des Energiebedarfes im Vergleich zum Standardszenario (102 kW) aus Tabelle 6

Arbeitsschritt	Summe der bearb. Fläche [ha]	Ø Leistungsbedarf Elektrofahrzeug [kW]	Gesamtenergiebedarf Elektrofahrzeug [kWh]	Gesamtbedarf Wasserstofffahrzeug [kg H ₂]	Veränderung d. Energiebedarfs zw. den Szenarien [%]
Grubber	72	33,3	1556,9	94,9	-13 %
Aussaat Getreide	24	36,6	869,1	53,0	-36 %
Aussaat ZF	24	36,6	869,1	53,0	-36 %
Kartoffel legen ⁵	6	32,3	468,7	16,9	-29 %
Maiseinzelkornsaat ⁶	12	21,7	122,0	7,4	---
Walzen	24	31,7	334,7	20,4	-24 %
Feingrubber ⁷	18	45,9	314,0	19,1	---
Rüben Einzelkornsaat	6	18,5	107,8	6,6	-7 %

Eine große Veränderung zwischen den beiden Szenarien ist bei der reduzierten Flächenleistung bemerkbar. Logisch erscheint es daher, bei zeitkritischen Arbeitsschritten unter Umständen die Anzahl der Fahrzeuge zu erhöhen. Eine größere Fahrzeugflotte bewirkt allerdings nur einen marginalen Anstieg beim Energieverbrauch, da sich anstelle von nur einem Fahrzeug mehrere zwischen Hof und Feld bewegen. Die Arbeit am Feld hingegen

⁵ In dieser Zeile sind die beiden Arbeitsschritte Beet fräsen und Kartoffellegen kombiniert.

⁶ Die Maisaussaat erfolgt im Standardszenario kombiniert in einem Arbeitsschritt. Dabei wird der Boden mit einer Kreiselegge bearbeitet und noch im selben Arbeitsgang die Saat gelegt. Im 45 kW-Szenario findet die Saatbettbereitung hingegen getrennt von der Aussaat statt. Aus diesem Grund ist eine Angabe über die Veränderung des Energieverbrauches bei beiden Arbeitsschritten nicht aussagekräftig.

⁷ Für den Feingrubber gibt es keinen Vergleichswert, da dieser im 102 kW Szenario nicht zur Anwendung kommt.

Ergebnisse und Diskussion

benötigt dieselbe Energiemenge, da die zu verrichtende Arbeit trotz des Einsatzes weiterer Fahrzeuge konstant bleibt.

Der Vergleich von Standardszenario und 45 kW-Szenario zeigt, dass die Leistungseinsparung zugleich zu einer Energieeinsparung führt, wie anhand des Dieserverbrauchs pro Fläche nach KTBL (2017) in Tabelle 7 ersichtlich ist. Woraus die Energieeinsparung im Zuge der Leistungsreduktion resultiert, kann aus dem Dieserverbrauchskalkulator nicht ausgelesen werden und muss als gegeben angenommen werden.

Dieses Szenario stellt im Hinblick aktueller Entwicklungen eine interessante Basis dar. Im Kapitel 2.5 vorgestellte Traktoren wie der Fendt e100 oder der Rigitrac SKE 50 bewegen sich mit je 50 kW in einem ähnlichen Leistungsspektrum und lassen damit einen Schluss darüber zu, inwieweit einzelne Arbeitsschritte mit vorhandener Technik realisierbar sind. Tabelle 9 fasst die Nennspeicherkapazität dieser batterieelektrischen Fahrzeuge zusammen. Für die Diskussion des 45 kW-Szenarios (Tabelle 8) wird die Annahme getroffen, dass für die Steigerung der Langlebigkeit und Zyklenzahl der Batterie nur 80 Prozent der Nennkapazität genutzt werden. Dieser Wert wird vielfach in der Literatur, aber oft auch in den Angaben von Herstellern verwendet und erscheint daher für die Diskussion passend.

Tabelle 9 - Angaben zur Nennkapazität und nutzbaren Kapazität von aktuellen Entwicklungen batterieelektrischer Traktoren. Die nutzbare Kapazität entspricht einer Annahme.

Entwicklung E-Traktoren	Anzahl Motoren und Leistung [kW]	Batterie Nennkapazität [kWh]	nutzbare Batteriekapazität 80 % [kWh]	
John Deere Sesam ⁸	2 x 140 kW	130	104	(Stöhr et al., 2015, Höner, 2018b)
Fendt e100	1 x 50 kW	100	80	(Aumer, 2018)
Rigitrac SKE 50	50 kW ⁹	80	64	(Göggerle, 2019)

Dadurch lassen sich die Möglichkeiten der aktuellen Technik und die Herausforderungen der Wirtschaftsweise zusammenführen. Für die Diskussion der Ergebnisse in diesem Szenario gilt es, realistische Annahmen über die Betriebsstruktur am Musterbetrieb zu treffen und festzulegen. Allerdings kann kein Schluss daraus gezogen werden, welche bearbeitete Fläche oder

⁸ Beim John Deere Sesam Traktor handelt es sich um einen Konzepttraktor. Dieser ist noch nicht als marktreifes Fahrzeug erhältlich.

⁹ Gesamtleistung; der Traktor verfügt über 4 Radnarbenmotoren für den Fahrantrieb und zwei Elektromotoren für den Betrieb der Zapfwelle (Göggerle, 2019).

Ergebnisse und Diskussion

Einsatzzeit für einen individuellen Praktiker attraktiv ist, um einen Arbeitsschritt elektrisch durchzuführen. Daher erscheint die Darstellung in Abbildung 5 sinnvoll, wie viel Fläche in Abhängigkeit der Batterieladung bei den unterschiedlichen Arbeitsschritten möglich ist.

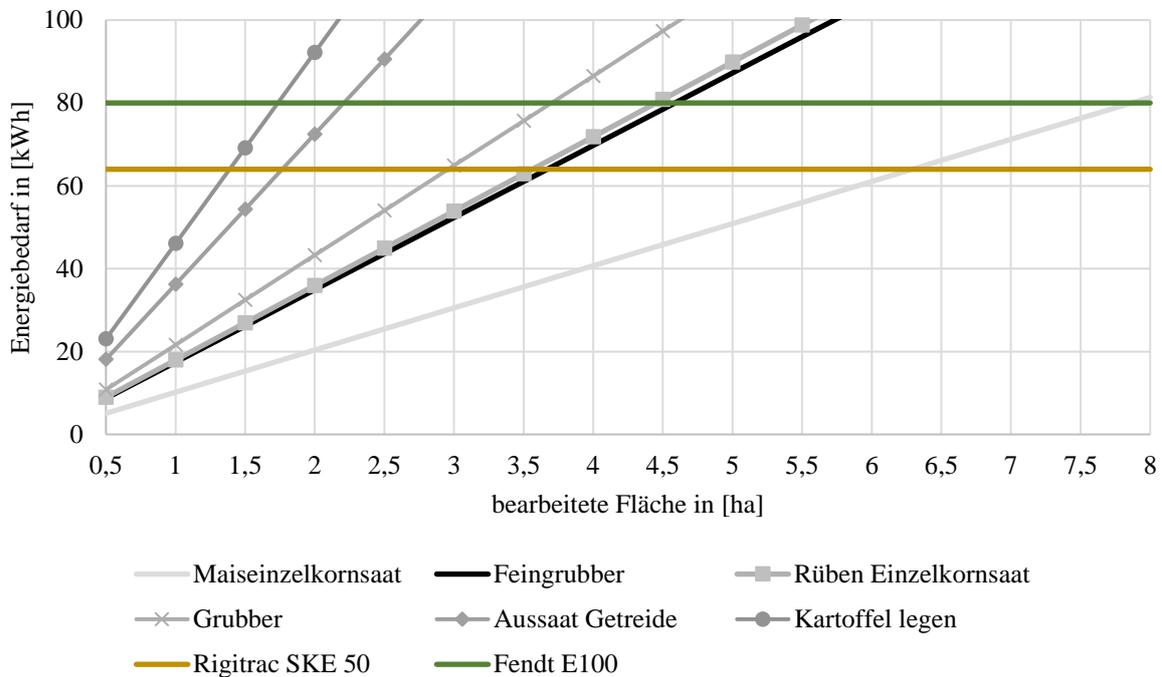


Abbildung 5 - Energiebedarf ausgewählter Arbeitsschritte in Abhängigkeit der bearbeiteten Fläche. Die farbigen Linien zeigen die Batterieladung von Rigitrac SKE 50 und Fendt E100.

Wie die Grafik zeigt, gibt es einige Arbeitsschritte, die auf relativ großer Fläche mit nur einer Batterieladung ausgeführt werden können. Beispielsweise sind mit dem Rigitrac SKE 50 mehr als sechs Hektar Mais einzeln Kornsaat und mehr als 3,5 Hektar mit dem Feingrubber möglich. Hingegen reicht die größere, mit 100 kWh Nennspeicherkapazität verbaute, Batterie des Fendt e100 für lediglich etwas mehr als 1,5 Hektar, um mit diesem Traktor Kartoffeln zu legen. Dies bedeutet aber zugleich, dass der Arbeitsschritt des Kartoffel Legens über fast drei Stunden durchführbar ist, wie aus Abbildung 6 ersichtlich ist.

Ändert man die Betrachtung dahingehend, dass anstelle der bearbeiteten Fläche die Einsatzzeit in den Kontext des Energieverbrauchs gesetzt wird, so erhält man ein anderes Bild. Zurückzuführen ist dies auf die unterschiedliche Flächenleistung.

Einen besseren Überblick darüber, wie lange mit der eingespeicherten Batterieladung tatsächlich gearbeitet werden kann, bietet die Grafik in Abbildung 6.

Ergebnisse und Diskussion

Klar ist, dass einige Arbeitsschritte besser geeignet sind, um sie mit Elektrofahrzeugen zu bewerkstelligen, andere weniger. Wenn sich ein Arbeitsschritt mit heutiger Technik oder Bewirtschaftungspraxis noch nicht einwandfrei elektrifizieren lässt, so gilt es, Lösungen zu finden, um diese Möglichkeit zu verbessern.

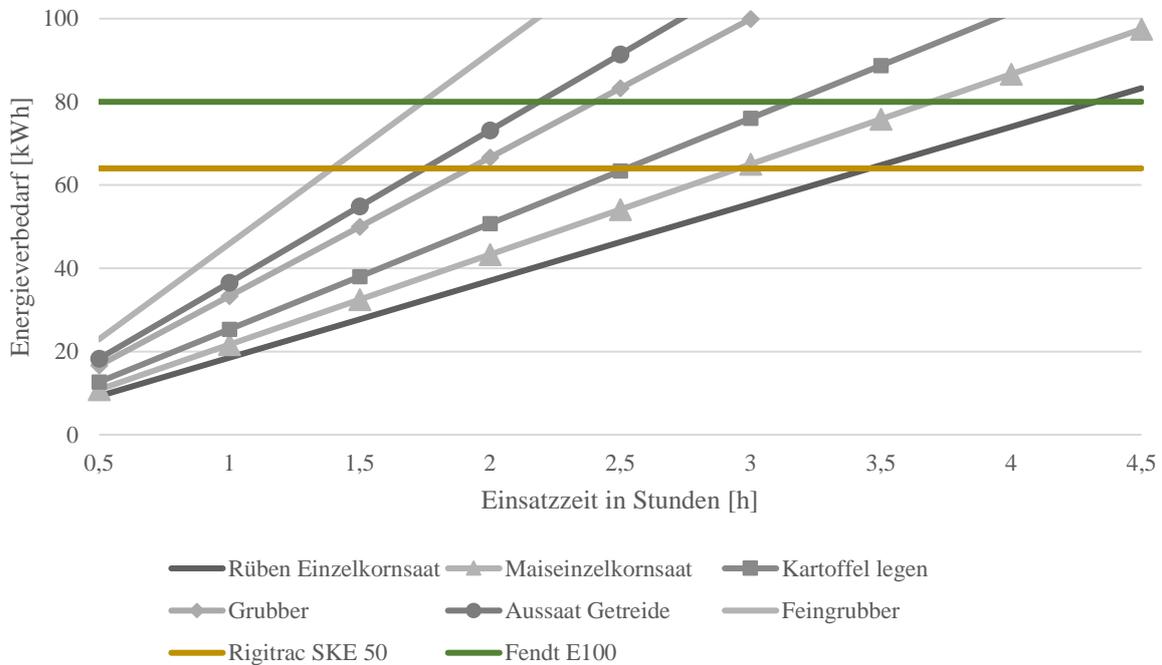


Abbildung 6 - Vergleich des Energiebedarfs für ausgewählte Arbeitsschritte in Abhängigkeit der Einsatzzeit, die beiden Linien für Rigitrac SKE 50 und Fendt E100 zeigen die mitgeführte Energiemenge bei 80%iger Nutzung der Batteriekapazität.

Die Ergebnisse dieses 45 kW-Szenarios zeigen, dass allein durch die Reduktion der Fahrzeugleistung eine Energieeinsparung zu erwarten ist¹⁰. Diese Einsparung erhöht damit bei konstanter Speicherkapazität die zur Bearbeitung mögliche Fläche. Sie sorgt auch für eine größere Anzahl an Arbeitsschritten, die dadurch elektrisch durchführbar werden. Dieses Szenario wirft aber auch die Frage auf, woraus diese Energieeinsparung konkret hervorgeht. Unterschiedliche Faktoren sind denkbar. So haben beispielsweise kleinere Fahrzeuge ein geringeres Eigengewicht, das zusätzlich zum Gerät bewegt werden muss.

Ebenso geht aus den Ergebnissen hervor, dass die verwendete Technik selbst eine große Auswirkung auf den Energieverbrauch aufweist. Die Verwendung der passenden Technik kann dazu beitragen, inwiefern eine Elektrifizierung der Arbeitsschritte möglich ist.

Der nachfolgende Abschnitt behandelt die als Anpassungs-Szenario bezeichneten Überlegungen. Durch die Umstellung auf alternative Techniken im Bereich der Aussaat und Bodenbe-

¹⁰ Diese Feststellung ist im vorliegenden Fall auf die Daten von KTBL (2017) zurückzuführen.

arbeitung soll im Rahmen des Standardszenarios (mit einem 102 kW Traktor) der Energieverbrauch reduziert und die elektrisch bearbeitbaren Flächen und Einsatzzeiten maximiert werden.

5.3 Auswirkung durch das Anpassungs-Szenario

Die Elektrifizierung von Verfahrensschritten lässt sich nicht nur über die Fahrzeug- und Batterietechnik selbst beeinflussen, sondern auch durch eine Adaptierung der Verfahrensschritte selbst. Während aus heutiger Sicht die verwendeten Ernteverfahren relativ alternativlos sind, können bei den Arbeitsschritten der Bodenbearbeitung und Aussaat unterschiedliche Methoden zum Einsatz kommen. Und so unterschiedlich wie deren Funktionsweise ist auch der Energiebedarf für deren Anwendung.

Im Standardszenario orientieren sich die Arbeitsschritte an den am häufigsten anzutreffenden Verfahren im Weinviertel. Die gängigste Form der Getreideaussaat ist die Kombination aus Kreiselegge und Drillsämaschine. Nach der Ernte erfolgen mehrere Stoppelstürze mit dem Grubber.

Alternativ dazu ist auch die Aussaat mit Mulch- und Direktsämaschinen möglich. Der Boden wird dabei weniger bearbeitet. Dies spart Überfahrten und die Aussaat selbst kann energieextensiver durchgeführt werden. Ein unter Umständen gesteigerter Aufwand für Pflanzenschutz hingegen stellt bei dieser Umstellung kein Problem dar. Dieser ist, wie in Abschnitt 5.1.2 erklärt, mit den bereits erhältlichen batterieelektrischen Traktoren bei einem angenommenen Energieverbrauch von 4,4 kWh/ha schon jetzt problemlos möglich.

5.3.1 Aussaat von Getreide und Zwischenfrucht

Für die Bestellungsverfahren exemplarisch wird der Anbau von Getreide und Zwischenfrucht betrachtet und damit die Alternativen zur Bestellkombination aus Kreiselegge und Drillsämaschine. Alle betrachteten Verfahren sind, wie im Standardszenario vorgesehen, mit einer Traktorleistung von 102 kW durchführbar. Die detaillierte Auflistung der Verfahren, deren Energieverbrauch, bezogen auf Stunden und Hektar, sowie die Flächenleistung können Tabelle 10 entnommen werden.

Ergebnisse und Diskussion

Die drei Meter Kombination im Standardszenario benötigt 56,3 kWh/ha elektrische Energie. Dieser Wert stellt die Ausgangsbasis für den Vergleich mit dem Mulch- und Direktsaatverfahren dar. Bei der Verwendung eines Mulchsaatsystems (4,5 m Arbeitsbreite) werden nur noch rund 60 % der Energie pro Hektar benötigt, mit dem Direktsaatsystem (6 m Arbeitsbreite) gar nur noch 32 %. Ein Anstieg hingegen ist jeweils bei der Betrachtung der Energie pro Stunde festzustellen. Dies geht mit der gesteigerten Flächenleistung einher, die die alternativen Anbausysteme gemein haben.

Tabelle 10 - Alternative Bestellverfahren für Getreide und Zwischenfrucht. Unterschiede in Flächenleistung und Energieverbrauch bedingen deren Potential für die Elektrifizierung der Antriebstechnik.

Verfahren	Dieselverbrauch [l/ha]	Flächenleistung [ha/h]	ØLeistungsbedarf [kW]	Energiebedarf [kWh/ha]
Kreiselegge-Drillsämaschine, 3m, 102 kW	14,0	1,3	70,3	56,3
Mulchsaat, 4,5 m; 102 kW	8,0	3,1	100,0	32,0
Direktsaatmaschine; 6m; 102 kW	4,8	3,7	70,9	19,2

Konkret bedeutet dies nun, dass unabhängig von verwendetem Fahrzeug und Technik mit derselben bereitgestellten Energiemenge die dreifache Fläche im Direktsaatverfahren bestellt werden kann. Mit dem Mulchsaatsystem ist so immerhin noch die 1,6-fache Fläche möglich. Dies erhöht die Möglichkeiten zur Elektrifizierung dieser Verfahrensschritte eindeutig.

5.3.2 Bodenbearbeitung

Bei den Bodenbearbeitungsschritten ist die Anzahl der alternativen Verfahrensschritte höher als bei der Aussaat. Jedoch gestaltet sich die Vergleichbarkeit der einzelnen Schritte schwieriger, da sich diese in Art und Anzahl ihrer Anwendungen unterscheiden, oder auch Teil unterschiedlicher Bodenbearbeitungsstrategien sein können. Tabelle 11 bietet einen Überblick über die betrachteten Verfahren.

Es bieten allerdings nur wenige der zahlreichen Alternativen auch Einsparungen beim Energieverbrauch, bezogen auf die bearbeitete Fläche. Als Ausgangspunkt für den Vergleich dient wieder das Verfahren aus dem Standardszenario, der Stoppelgrubber mit einer Arbeitsbreite von 4,5 m.

Energieeinsparungen pro Hektar Fläche sind dabei nur mit den Verfahren Federzinkenegge, Scheibenegge flach und Kurzscheibenegge zu erzielen. Die eingesparte Energiemenge beläuft

Ergebnisse und Diskussion

sich dabei auf maximal 30 % im Vergleich zum Standardszenario. Bezogen auf den Energiebedarf pro Stunde ist auch der Schäl-Drehpflug mit einer Arbeitsbreite von 2,45 m eine interessante Alternative. Er benötigt pro Stunde immerhin nur rund 60% der Energie des Grubbers, bezogen auf die Fläche befinden sich beide Verfahren in einem ähnlichen Spielraum.

Tabelle 11 – Die alternativen Bodenbearbeitungsverfahren weisen Unterschiede in Flächenleistung und Energieverbrauch auf und bedingen deren Potential für die Elektrifizierung der Antriebstechnik.

Verfahren	Diesel- verbrauch [l/ha]	Flächen- leistung [ha/h]	ØLeistungs- bedarf [kW]	Energie- bedarf [kWh/ha]
Stoppelgrubber tief; 4,5 m; 102 kW	6,2	2,8	69,1	24,8
Federzinkenegge, 4,5 m, 102 kW	6,1	2,6	63,7	24,5
Scheibenegge flach; 5m; 102 kW	5,1	3,7	75,7	20,5
Scheibenegge tief; 5m; 102 kW	7,1	3,23	91,7	28,4
Drehpflug; 5 Schare; 102 kW	19,0	0,8	59,6	76,4
Schäl-Drehpflug, 7 Scharre, 2,45 m, 102 kW	6,36	1,6	41,2	25,6
Kurzscheibenegge, 4,5 m; 102 kW	4,2	3,7	62,9	17,0
ECODYN; 3 m; 102 kW	7,4	2,3	69,0	29,6

Die Energieverbräuche der anderen Verfahren fallen, mit Ausnahme des Drehpfluges, nur moderat bis maximal 20 % höher als beim Einsatz des Stoppelgrubbers aus. Der Drehpflug hingegen benötigt auf derselben Fläche mehr als dreimal so viel Energie wie der Grubber.

Wie bereits erwähnt, fehlt hier allerdings eine Gewichtung, wie oft die einzelnen Schritte zur Anwendung kommen. Während die mechanische Behandlung von Ausfallgetreide mit der Federzinkenegge mehrere Überfahrten erforderlich macht, ist derselbe Arbeitsschritte mit einer Bearbeitung mit dem Pflug erledigt.

Hinzu kommt, dass zusätzlich zu den alternativen Bearbeitungsschritten unter Umständen andere Anwendungspraxen für die Herbizid Ausbringung notwendig werden. Diese können den Gesamtenergieverbrauch des Betriebes erhöhen, durchaus aber auch verringern, wenn diese wie im Direktsaatverfahren die Bodenbearbeitungsschritte zur Gänze ersetzen.

Die Herbizidausbringung muss dabei aber auch als Teil der Bodenbearbeitung mitbetrachtet werden. Diese kann beispielsweise den mehrfachen Einsatz von flachen Bodenbearbeitungsverfahren reduzieren und dabei in Summe ein sauberes Feld bei geringerem Gesamtenergieverbrauch erzielen.

5.4 Der Akku am Frontkraftheber

Abseits der vollelektrischen Traktoren von Rigitrac, Fendt und John Deere soll hier nochmal ein Lösungsansatz aufgegriffen werden, wie ihn John Deere während der Entwicklung seiner Hybridtraktoren schon einmal verfolgte. Dabei ist am Frontkraftheber des e-Tour Traktor ein externer Speicher mit einer Kapazität von 50 kWh angebracht (Höner, 2018b). Konkrete Angaben zur Masse dieses Speichers sind nicht zu eruieren, dennoch wird der Versuch unternommen, mit anderen Kenndaten das Gesamtgewicht des Speichers näherungsweise zu schätzen. Das Gesamtgewicht des Speichers ist mit ausschlaggebend für das Potential zur Doppelnutzung als Energiequelle und Frontgewicht.

Um das Gewicht abzuschätzen wird die Batterie des John Deere SESAM Traktors betrachtet¹¹. Über diese Batterie sind relativ viele Kenndaten verfügbar. Die Batteriezellen selbst wiegen beim SESAM Traktor 1.000 kg, weitere 1.010 kg beansprucht die Tragestruktur der Batterie. Die gravimetrische Energiedichte der Zellen liegt zwischen 0,11 und 0,13 kWh/kg (Stöhr et al., 2015).

Trifft man die Annahme, dass für die Abschätzung der Masse des Akkus am Frontkraftheber dasselbe Verhältnis zwischen Zellen und Tragestruktur angewendet werden kann und die Zellen dieselbe gravimetrische Energiedichte aufweisen, so würde die externe Batterie von John Deere am e-Tour Traktor mit einer Kapazität von 50 kWh eine Gesamtmasse von rund 836 kg aufweisen, wie die nachfolgende eigene Berechnung zeigt. Damit befindet sich das Gewicht in einer Größenordnung, wie es auch im praktischen Einsatz am Musterbetrieb zur Anwendung kommen kann.

$$m_{ges} = m_{Batt} + m_{TS}$$

$$m_{Batt} = \frac{E}{w}$$

$$m_{TS} = m_{Batt} * f_{TS}$$

¹¹ Genaue Angaben zum John Deere SESAM Traktor und der verbauten Technik sind in Abschnitt 2.5.1 sowie in Abschnitt 5.2 einzusehen.

Ergebnisse und Diskussion

m_{ges}	Gesamtmasse Frontgewicht [kg]
m_{Batt}	Masse Batterie [kg]
m_{TS}	Masse Tragestruktur [kg]
E	Energieinhalt Batterie [kWh]
w	gravimetrische Energiedichte [kWh/kg]
f_{TS}	Faktor Tragestruktur 1,01 (1.010 kg TS/1.000 kg Batterie)

Für die vorliegende Arbeit von Interesse ist in erster Linie die in der mitgeführten Batterie gespeicherte Energie von 50 kWh. Eine allgemeine Aussage über das optimale Frontgewicht kann an dieser Stelle ohnedies nicht getroffen werden. Dies ist von einigen Variablen abhängig, wie beispielsweise dem durchgeführten Arbeitsschritt, dem Gewicht und der Ausladung des angehängten Gerätes oder auch vom Traktor selbst.

Soll nun die Energie für vollelektrische Arbeitsschritte teilweise oder zur Gänze aus mitgeführten Akkus am Frontkraftheber bereitgestellt werden, können mithilfe dieser Zahlen näherungsweise die möglichen Flächen und Einsatzzeiten abgeschätzt werden.

Bezogen auf die Fläche gibt Abbildung 7 einen Überblick darüber, wie lange der Einsatz mit einer Ladung der John Deere e-Tour Batterie möglich ist. Wie auch schon im Abschnitt 5.2 erläutert, wird auch für diese Batterie eine Nutzung zu 80% angenommen, um die Lebensdauer und die Zyklenzahl des Akkus zu steigern. Demnach sind 40 kWh des Akkus für die Anwendung nutzbar.

Wie auch schon in den vorangegangenen Abschnitten werden auch in diesem Szenario die Arbeitsschritte der Bodenbearbeitung und Aussaat verglichen. Auf jeden Fall interessant bleibt diese Möglichkeit der Energiebereitstellung über den Frontkraftheber auch für die Arbeitsschritte der Pflegemaßnahmen und Düngung mit jeweils unter 20 kWh/ha Energiebedarf. Sowohl die Pestizidausbringung mit der Anbauspritze als auch das Düngen mit Anbaudüngerstreuer kommt zumeist nicht ohne die Verwendung eines Ausgleichgewichtes auf der Fronthydraulik aus.

Die Idee, einen Speicher an der Fronthydraulik des Traktors anzubringen, bringt auch weitere Vorteile, als lediglich zusätzliche Energie zu transportieren und dabei zugleich die Aufgabe der Ballastierung zu erledigen. Durch die Montage direkt an dieser Hubvorrichtung erhält man auch die Möglichkeit eines besonders einfachen und raschen Akkutauses. Zudem dürften auch künftig bei batterieelektrischen Traktoren Frontgewichte für die Ballastierung zum Einsatz kommen. Zwar sind die elektrischen Fahrzeuge aufgrund ihrer Batterien an sich

Ergebnisse und Diskussion

schwer, dennoch kann wegen der schlechten Gewichtsverteilung bei einigen Einsätzen nicht auf den Einsatz eines Frontgewichtes verzichtet werden (Stöhr et al., 2015).

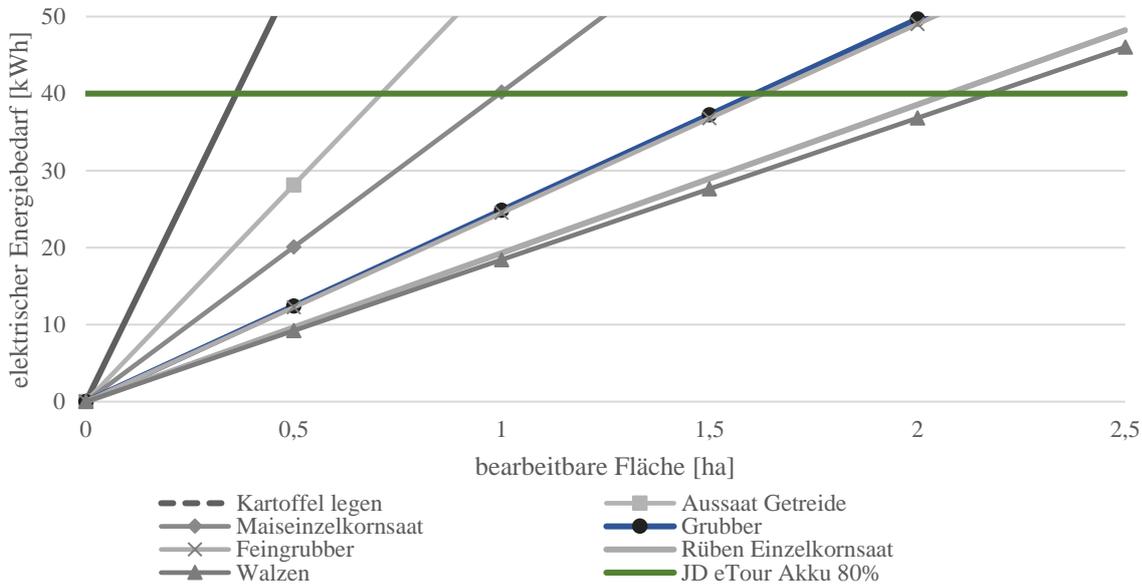


Abbildung 7 - Der Energiebedarf der Arbeitsschritte und die gespeicherte Energie in der Frontgewicht-Batterie bestimmt die Fläche, die mit einer Batterieladung bearbeitet werden kann (eigene Darstellung)

Erfolgt die Montage in herkömmlicher Art und Weise über die Dreipunktaufnahme und der Stromanschluss über eine Kabelverbindung, sollte sich der Akkutauch in wenigen Minuten erledigen lassen. Eine eigens für diesen Einsatz konzipierte Wechsellösung hätte noch weitere Vorteile. Nicht nur, dass der Wechsel vermutlich schneller vonstattengeht, der Fahrer könnte dazu auf seinem Arbeitsplatz verbleiben, was neben mehr Bedienerfreundlichkeit auch ein Plus an Arbeitssicherheit bedeutet.

Im Unterschied zu den vorangegangenen Elektrifizierungsszenarien besteht bei diesem Ansatz eine zweite Möglichkeit, wie diese externen Batterien künftig zur Anwendung kommen können. Sie könnte sowohl als Hauptenergiespeicher, wie auch als zusätzlicher Energiespeicher eingesetzt werden.

Als Hauptenergiespeicher eingesetzt gilt: ist die Batterieladung aufgebraucht, kann das Fahrzeug nicht weiter mit Energie versorgt werden. Wird der Frontgewichtespeicher hingegen als zusätzlicher Speicher eingesetzt, so erweitert er das Energieangebot für die jeweilige Anwendung. Besonders interessant kann diese Einsatzmöglichkeit für die Verwendung auf Hybrid Traktoren sein. Der Range-Extender Hybrid-Traktor kann als Zwischenlösung für das Reichweitenproblem der vollelektrischen Traktoren dienen, bis die Batterietechnik ausreichend für weitere Anwendung vollelektrischer Traktoren entwickelt ist. Der erforderliche Energiespei-

cher wird dabei auf die Front des Traktors ausgelagert oder dort als zusätzlicher Speicher angebracht. Dabei kann die Batterie am Frontkraftheber das Gesamtgewicht des Traktors auch nur im Bedarfsfall erhöhen, da durch diese Lösung die Batterie jederzeit abmontiert werden kann.

5.5 Energieerzeugung und Bereitstellung am Betrieb

Bisher wurden einige Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Elektrifizierung im Ackerbau verstärkt genutzt und vorhandene Potentiale besser ausgeschöpft werden können. Dazu wurden die unterschiedlichen Fahrzeugentwicklungen, aber auch ackerbauliche Methoden verglichen. Zuletzt soll auch die Bereitstellung der Energie für die künftig elektrische Bewirtschaftung der Felder Eingang in die Betrachtung finden.

Dazu wird der Energieverbrauch der elektrischen Bewirtschaftung mit der heute üblichen, dieselbetriebenen, Bewirtschaftung verglichen. Zudem wird der Vergleich in den Kontext der Bereitstellung der benötigten Energie auf dem eigenen Hof gestellt. Die benötigte elektrische Energie soll mit Photovoltaik am eigenen Hof erzeugt werden. Der Vergleich: der Standardbetrieb mit dieselbetriebenen Traktoren ersetzt den fossilen Treibstoff durch Rapsmethylester RME. Den dazu erforderlichen Raps baut der Betrieb auf den eigenen Flächen an.

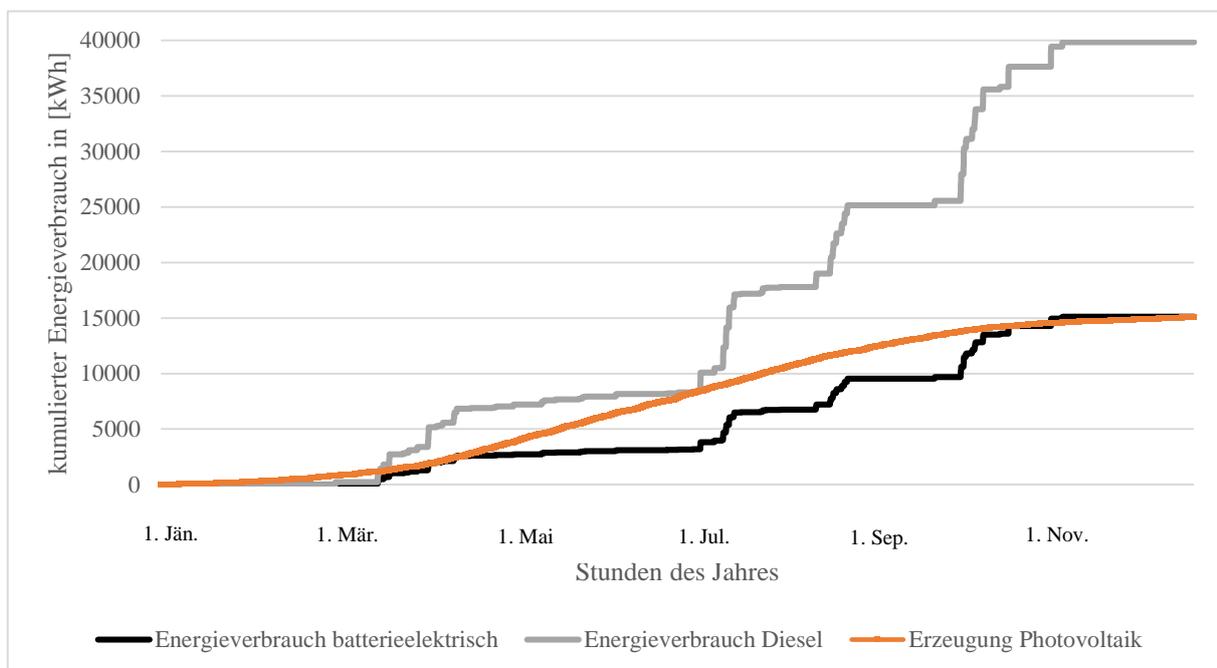


Abbildung 8 - Vergleich der Energieverbräuche von Diesel- und Elektrofahrzeugen auf dem Standardbetrieb. Die orange Linie zeigt den Jahresverlauf der Solarstromerzeugung einer 14,5 kWp Photovoltaikanlage, die den erforderlichen Energiebedarf der Elektrofahrzeuge deckt. (eigene Darstellung)

Ergebnisse und Diskussion

Am Anfang dieses Vergleichs steht der Energiebedarf des Betriebs. Abbildung 8 verdeutlicht den Unterschied je nach eingesetztem Energieträger. So benötigt der Standardbetrieb, der alle Arbeitsschritte mit dieselbetriebenen Fahrzeugen bewerkstelligt, insgesamt rund 39.800 kWh Diesel. Unter der Annahme, dass ausnahmslos alle Arbeitsschritte elektrifiziert werden können, reduziert sich der Gesamtenergiebedarf auf rund 15.100 kWh elektrischen Strom.

Deutlich wird dabei, dass der Gesamtenergiebedarf auf dem Betrieb mit konventionell bewirtschafteter Technik rund drei Mal so hoch ist wie beim elektrischen, zurückzuführen auf den schlechteren Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren. Die im Abschnitt 4.2 vorgestellten Wirkungsgradketten erklären den unterschiedlichen Verlauf der beiden Kurven.

Einen deutlichen Unterschied macht auch die Erzeugungsform selbst. Benötigen die Verbrenner nicht nur an sich mehr Energie als die elektrischen Fahrzeuge, so ist auch das Flächenpotential zur Erzeugung der Energie sehr unterschiedlich.

Bei einem angenommenen Wirkungsgrad der Photovoltaik-Anlage von 18 %, einer optimalen Ausrichtung der Anlage zur Sonne, sowie einer performance ratio von 80 %¹² ist mit der gemessenen Solarstrahlung für Wien (Daten vom Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur Wien, 2018) eine Dachfläche von rund 80 m² erforderlich. Die installierte PV-Anlage benötigt für die Erzeugung der notwendigen Energie im Jahresverlauf eine Leistung von rund 14,5 kWp (Quaschnig, 2013). Anlagenleistung (P_{MPP}) und elektrischer Energieertrag ($E_{elektrisch}$) werden nach Quaschnig (2013) wie folgt berechnet:

$$E_{elektrisch} = \frac{H_{Solar} * f_{Neigung} * P_{MPP} * PR}{1 \frac{kW}{m^2}}$$

$$P_{MPP} = A * \eta * 1 \frac{kW}{m^2}$$

$E_{elektrisch}$elektrischer Energieertrag [kWh]

H_{Solar}solare Bestrahlung¹³ [kWh/m²]

$f_{Neigung}$Faktor für Gewinn oder Verlust durch Neigung und Ausrichtung

P_{MPP}MPP-Leistung¹⁴ [kW]

¹² Die performance ratio beschreibt einen Effizienzvergleich einer realen, netzgekoppelten PV-Anlage und dem theoretisch idealen Ertrag. Der Wert für eine sorgfältig geplante neue Anlage liegt zwischen 80 und 90 % (WIRTH, H. 2019. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.).

¹³ Die solare Bestrahlung liegt als Vektor vor, mit der jeweiligen gemessenen solaren Strahlung jeder Stunde des Jahres 2018. (Daten vom Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur Wien, 2018)

¹⁴ MPP ist eine Abkürzung für „Maximum Power Point“ und bezeichnet jenen Punkt entlang einer Strom-Spannungs-Kennlinien, an dem eine Photovoltaik-Anlage die maximale Leistung erzielt (QUASCHNING, V. 2013. *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*, München, Hanser.).

Ergebnisse und Diskussion

PR.....performance ration¹⁵ [%]
AAnlagenfläche [m²]
 ηModulwirkungsgrad [%]

Die Anlagengröße (A) wird ausgehend von der erforderlichen elektrischen Energie ($E_{\text{elektrisch}}$) optimiert, wobei die Anlagenleistung (P_{MPP}) als veränderbare Variabel herangezogen wird. Die solare Einstrahlung liegt als Vektor von Messerwerten (Wien im Jahr 2018) für jede Stunde des Jahres zugrunde.

Die Grafik in Abbildung 8 zeigt auch: Die produzierte Energie der PV-Anlage liegt nahezu das gesamte Jahr über der benötigten Energie für den Betrieb der elektrischen Fahrzeuge. Bei Betrachtung des vorliegenden Falls, mit der auf den genauen Energiebedarf hin optimierten Anlage, liegt zudem der maximale Speicherbedarf, um die Überproduktion im Jahresverlauf zu puffern, bei rund 5.300 kWh. Dieser Wert ergibt sich aus der Differenz von kumuliertem elektrischen Energiebedarf für die Elektrofahrzeuge und kumulierter photovoltaischer Produktion, die Mitte Juli ihr Maximum erreicht.

Dieser Wert verdeutlicht auch, dass die Speicherung des selbst erzeugten Stroms vorerst wenig sinnvoll ist, wie auch die vorgestellten Großspeicherlösungen in Abschnitt 5.6.1 zeigen. Hierzu ist es nach Möglichkeit vorzuziehen, den selbst erzeugten Strom im Netz zu verkaufen und bei Bedarf die notwendige Energie zum Laden der Fahrzeuge wiederum aus dem Netz zu beziehen, wenn diese benötigt wird. Optimal ist dies, wenn die Preise für ver- und zugekauften Strom nahezu ident sind. Die durch die Elektrifizierung am Betrieb ohnehin vorhandenen elektrischen Speicher in den Fahrzeugen können im Bedarfsfall besser genutzt werden, um Regelleistung zum Ausgleich der Fluktuation der erneuerbaren Energieträger zur Verfügung zu stellen (Stöhr and Hackenberg, 2018).

Bei der Speicherung der Energie über einen längeren Zeitraum ist die Verwendung von RME in Verbrennungsmotoren bevorzugt. Zwar ist der Gesamtenergiebedarf bei der Verwendung von Dieselfahrzeugen höher, der erzeugte Treibstoff aus Rapsöl kann hingegen sehr einfach und kostengünstig über das ganze Jahr gelagert werden. Weniger vorteilhaft erscheint dabei der Flächenverbrauch für die Erzeugung von RME.

Mit einem Heizwert von 37,2 MJ/kg RME und einem Verhältnis von 1.010 kg Rapsöl für 1.000 kg RME, einem Rapsölgehalt zwischen 40 und 45 % sowie einem durchschnittlichen

¹⁵ Siehe Fußnote 12

Hektarertrag von 3.000 kg Raps¹⁶ benötigt der Betrieb rund 3,1 Hektar seiner Fläche zum Anbau des verwendeten Energieträgers (AgrarMarkt Austria, 2019, Rathbauer, 2016).

Während eine PV-Anlage mit einer Leistung von rund 15 kWp auf dem Dach eines durchschnittlichen landwirtschaftlichen Betriebs sehr leicht Platz findet, benötigt der Rapsanbau für die Energiebereitstellung immerhin 6,5 % der Ackerfläche des Betriebs, die für die Produktion anderer Kulturen nicht mehr zur Verfügung stehen.

5.6 Bereitstellung der Energie am Feld

Neben der Eigenerzeugung der Energie am Betrieb soll auch die Bereitstellung der Energie direkt am Feld Eingang in die Betrachtung finden. Dazu sind unterschiedliche Möglichkeiten denkbar. Ein Container, der eine große Batterie beinhaltet, kann von Traktoren auf das Feld gebracht werden, um elektrische Maschinen direkt über ein Kabel mit der notwendigen Energie zu versorgen. Diese Idee wird auch schon in Abschnitt 2.6 aufgegriffen. Weitere Möglichkeiten für eine elektrifizierte Form des Ackerbaus könnten durch Schnellladevorrichtungen oder auch durch die Stromproduktion direkt am Feld unterstützt werden.

5.6.1 Batteriecontainer

Soll als Energieversorgungsquelle am Feld eine mobile Speicherlösung zur Anwendung kommen, die keiner fixen Installation bedarf und unkompliziert an unterschiedliche Orte transportiert werden kann, so eignet sich dafür ein Batteriecontainer. Dem Vorteil, dass dieser Energiespeicher zwischen unterschiedlichen Orten bewegt werden kann, ist aus diesem Grund aber auch der Nachteil gegenüberzustellen: Der Transport des Containers kostet Energie und streng gerechnet reduziert dies den Gesamtwirkungsgrad dieses Bereitstellungskonzeptes. Zur weiteren Erörterung und Diskussion dieser Speicherlösung sind grundlegende Fragen zu klären.

- Wie einfach gelingt der Transport des Containers?
- Wie viel Energie kann mit dem Container transportiert werden?
- Wie viel Energie kostet der Transport des Containers?
- Welche Lade- und Entladeleistungen sind möglich?

Standardisierte Container haben sich im Transportwesen schon lange durchgesetzt. Auch in der Landwirtschaft sind sie schon anzutreffen, besonders in Form von Abrollcontainern auf

¹⁶ Durchschnitt der Jahre 2015 – 2019; (AGRARMARKT AUSTRIA, A. 2019. Getreideernte Pressekonferenz 2019. Wien: AMA.)

Ergebnisse und Diskussion

Hakenliftanhängern. Um Abrollcontainer und Abrollfahrzeuge universell einsetzen zu können, müssen diese einheitlich gefertigt werden. Geregelt werden die Anforderungen an die Fahrzeuge, Container und Wechsellader-Einrichtung in der DIN 30722-1. Wird ein Batteriecontainer entsprechend der Norm gefertigt, steht einem unkomplizierten Transport zwischen Ladestation und Bestimmungsort grundsätzlich nichts im Wege.

Ebenso ist denkbar, dass anstelle eines Containers ein ganzer Anhänger als Batteriespeicher auf das Feld gezogen wird. Dies hat aber zum Nachteil, dass dieser Anhänger ausschließlich als mobiler Batteriespeicher zum Einsatz kommen kann, wohingegen der Hakenliftanhänger nach dem Transport des Batteriecontainers mit anderen Aufbauten noch weiteren Tätigkeiten nachkommen kann.

Um die Frage zu klären, wie viel Energie in einem Container gespeichert werden kann, bietet sich die Betrachtung von am Markt erhältlichen Batteriecontainern an. Diese werden heute als Speicherlösungen für große EE-Anlagen aber auch für die Notstromversorgung angeboten. Gerne werden diese in 20 Fuß Schiffscontainer mit der Abmessung 6.000 x 2.450 x 2.900 mm verbaut. Ebenso werden auch Batteriespeicher in 40 Fuß Containern angeboten, die sich mit einer Abmessung von 12.000 x 2.450 x 2.900 mm aufgrund ihrer Abmessung und des Gewichtes für den Transport auf landwirtschaftlichen Straßen vermutlich nicht mehr eignen. Demgegenüber ist es vorstellbar, dass die Batterietechnik aus 20 Fuß Containern auch in Abrollcontainern platzfinden kann.

Einige Batteriespeicher, die am Markt angeboten werden und mehr oder weniger den Anforderungen als Energiequelle für agrarische E-Mobilität entsprechen, sind hier kurz vorgestellt:

Der Speicher TLC 500 von Tesvolt. Tesvolt bietet Batteriespeicher in unterschiedlichen Größen an. Der TLC 500 ist mit 491,5 kWh der größte Energiespeicher dieser Produktpalette, der aus einem einzelnen Container besteht. Bei einer Entladetiefe von 90 % stellt der Speicher 442,4 kWh Nutzkapazität zur Verfügung. Interessant für den Einsatz als Energiequelle für elektrifizierte Landmaschinen ist auch die Lade- und Entladeleistung des Speichers, die gewissermaßen mitentscheidet, ob ein Elektrifizierungsszenario auch in der Praxis realistisch ist. Die Nennladeleistung wird vom Hersteller mit 72 kW (DC) angegeben. Die Entladeleistung variiert in Abhängigkeit der Zeit. Die Nennentladeleistung beträgt 72 kW

(AC) und kann bei zeitlich begrenztem Einsatz auch höher ausfallen¹⁷. Als Systemwirkungsgrad wird 90 % angegeben. Der Speicher samt Container weist ein Gesamtgewicht von 10 Tonnen auf (Tesvolt, 2015).

Ein anderes Beispiel ist die PowerStore™ Station 20' von ABB. Ebenfalls in einem 20 Fuß Container verbaut speichert dieser Batteriecontainer 730 kWh Strom. Die Nennleistung dieser Batterie beträgt 180 kW. ABB bietet dieses Batteriespeichersystem auch in weiteren Ausführungen an. Eine kleinere Lösung stellt der 10 Fuß Container mit einer gespeicherten Energie von 365 kWh und einer Nennleistung von 60 kW dar, eine größere der 40 Fuß Container mit mehr als 2 MWh Speicherkapazität und einer Nennleistung von 580 kW (ABB, 2017).

ViZn ENERGY bietet einen Batteriespeicher an, der ohne Lithium auskommt (ViZn ENERGY, 2016). Belectric wiederum hat 40 Fuß Batteriecontainer mit einer Speicherkapazität von bis zu 4.016 kWh im Sortiment. Deren primäre Anwendungsbereiche sind Netzdienstleistungen wie Frequenzkontrolle, Peak Shaving und die Bereitstellung von Primär- und Sekundärregelleistung (Belectric, 2018). Kurz gesagt verfügen diese Container über mehr Leistungselektronik und Steuerung als für die Ladung eines Elektrofahrzeuges notwendig ist.

Für weitere Betrachtungen wird die Annahme getroffen, dass der Einsatz eines Batteriespeichercontainers in der Auslegung als Abrollcontainer sowohl aufgrund seiner Masse als auch Abmessung möglich ist. Eine Speicherkapazität von 500 kWh bei einer Nennleistung von rund 70 kW kann vorausgesetzt werden.

Der Transport des Containers selbst gestaltet sich nicht weiter schwierig. Für landwirtschaftliche Zugmaschinen geeignete Hakenlader werden von vielen Herstellern angeboten und auch die zu transportierende Masse ist in der Landwirtschaft üblich. Der Energiebedarf zum Transport des Batteriecontainers ist ein Punkt, der an dieser Stelle noch umrissen werden soll. Im Allgemeinen macht es keinen Unterschied, ob Getreide, Erde oder eine Batterie transportiert wird. Der Energiebedarf ist vereinfacht abhängig von der Masse des zu transportierenden Gutes, der Fahrtstrecke, dem Rollwiderstand und der Geländestruktur. Die letzten beiden Variablen sind in jedem Fall speziell zu beurteilen, weshalb sie vernachlässigt werden. Masse und Fahrtstrecke finden Berücksichtigung, wodurch sich mithilfe der Näherungsformel aus der ÖKL Richtwerttabelle (2018) der Kraftstoffverbrauch für den Transport wie folgt berechnen lässt:

¹⁷ 96 kW (30 min), 109 kW (5 min), 132 kW (30 sec)

Ergebnisse und Diskussion

$$0,09 \text{ [l/km]} * \text{Masse [t]} * \text{Distanz [km]} = \text{Kraftstoffbedarf}$$

Der oben angeführte Container mit 500 kWh Speicherkapazität und einer angenommenen Gesamtmasse von 10 Tonnen bringt mitsamt Hakenlader ein Gesamtgewicht von rund 16 Tonnen auf die Waage¹⁸. Der Treibstoffbedarf liegt bei 1,44 l/km. Wird der Batteriecontainer von einem Elektrotraktor auf das Feld gezogen, benötigt er auf der fünf Kilometer Strecke¹⁹ rund 29 kWh Strom. Beim Hin- und Rücktransport (10 km) zum Feldeinsatz werden demnach 58 kWh Strom benötigt, dies entspricht mehr als elf Prozent der Batteriespeicherkapazität.

Die vollständige Ladung des Speichers benötigt bei einer Ladeleistung von 70 kW rund sieben Stunden. Eine vollständige Ladung des Containers sollte allerdings nicht oft der Fall sein, benötigen doch die meisten Tätigkeiten lediglich einen Teil der eingespeicherten Energie.

Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass der Energietransport mit Containern zwar eine technisch mögliche Lösung darstellt, aber praktisch wenig sinnvoll erscheint. Dies hängt vor allem stark mit der Energiedichte dieser Speicherlösung zusammen. Bedenkt man, dass für den Transport derselben Energiemenge in Form von Diesel nur rund 50 l Tankvolumen erforderlich sind, erschließt sich der Aufwand für diesen Transport.

5.6.2 Schnellladung am Feld

Egal ob die Energie via Batteriecontainer oder Netzanschluss am Feld bereitgestellt wird, die Standzeit für die Ladung der Fahrzeuge muss gering sein. Dies könnte auf unterschiedliche Weise gelöst werden. Einerseits könnte ein Fahrzeug während der Arbeit am Feld zeitweise oder gänzlich an die Energiequelle gekoppelt sein. Aber auch eine Supercharging Option wäre denkbar, die es ermöglicht binnen sehr kurzer Zeitspannen die erforderliche Energie zu übertragen.

Für den städtischen Nahverkehr hat ABB einen batteriebetriebenen Elektrobus konzipiert, der seine Batterien entlang der Fahrtstrecke an mehreren Ultra-Schnell-Ladestationen mit hoher Leistung zwischenlädt. In 15 Sekunden bekommen die Batterien einen Energieschub von 600

¹⁸ Als Beispiel für einen Hakenliftanhänger wurde der T286 des polnischen Herstellers PRONAR gewählt. Dieser eignet sich zum Aufbau eines 6 Meter lange Containers und weist eine Nutzlast von 17.000 kg auf. Der Anhänger verfügt über ein Eigengewicht von 5.900 kg. (PRONAR. 2019. *Anhänger PRONAR T286* [Online verfügbar]. Pronar Sp. z o.o. Available: <http://pronar.pl/de/produkt/anhangen-pronar-t286/> [Zugriffsdatum 05.02.2019].)

¹⁹ Die Strecke von fünf Kilometer entspricht der durchschnittlichen Feld-Hof-Entfernung, die in den Szenarien zur Berechnung des Spritverbrauches angenommen wurde.

kW. Der Bus benötigt zudem weniger als eine Sekunde, um sich mit dem Ladepunkt zu verbinden. Befindet sich der Bus im Terminal, kann binnen vier bis fünf Minuten die Batterie vollständig geladen werden (Patey et al., 2016).

Gelingt es, Anwendungsfelder zu finden, bei denen kurze (prozessbedingte) Zwischenstopps genutzt werden können, um die Batterien zwischenzuladen, erhöht dies die Einsatzmöglichkeit von batterieelektrischen Fahrzeugen im Feldeinsatz. Können beispielsweise die Zeiträume zum Entladen des Kartoffelroders genutzt werden, innerhalb der sich das Fahrzeug nur auf einer kleinen Fläche bewegt, so kann unter Umständen eine beträchtliche Menge Energie geladen werden, die ein kontinuierliches Roden über den ganzen Tag hindurch ermöglicht.

5.6.3 Agrophotovoltaik

Eine weitere Form der Energiebereitstellung ist die direkte Produktion von Energie am Feld. Eine Möglichkeit bestünde darin, einen Teil des Feldes mit Photovoltaikpaneelen zu verbauen, die den Strom für die Bewirtschaftung der restlichen Fläche produziert. Dies würde allerdings bedeuten, dass man diese Fläche für die landwirtschaftliche Produktion verliert und diese zudem gepflegt werden muss. Die Agrophotovoltaik (kurz APV) würde jenes Problem umgehen.

Die APV kombiniert die landwirtschaftliche Produktion mit der Erzeugung von Strom, indem Photovoltaikpaneele auf Gerüsten über der Ackerfläche angebracht werden, so dass die Durchfahrt unter der Anlage selbst mit großen Maschinen noch möglich ist. Die Paneele selbst haben einen weiteren Abstand zueinander, damit ausreichend Licht auf die darunterliegenden Pflanzen trifft.

Welche Pflanzen davon profitieren, dass sie im Laufe des Tages zeitweise beschattet sind und welche Pflanzen dadurch in ihrem Wachstum und Ertrag beeinträchtigt werden, erforscht das Fraunhofer Institut (n.d.) im Zuge des Projektes APV-RESOLA. Während Mais und Weizen weniger geeignet sind für den Anbau unter APV-Anlagen, profitieren Kartoffel und Salat von der Beschattung. Abbildung 9 bietet einen Überblick über die wichtigsten deutschen Ackerkulturen und den Einfluss von Schatten auf ihr Wachstum.

Ergebnisse und Diskussion

Ebenso wird die Wirtschaftlichkeit dieser Energieerzeugungsform erforscht. So wird davon ausgegangen, dass durch die Doppelnutzung der Fläche eine Wertschöpfung für die Landwirtschaft möglich ist, weil beide Erzeugungsformen gemeinsam einen höheren Ertrag erwirtschaften.

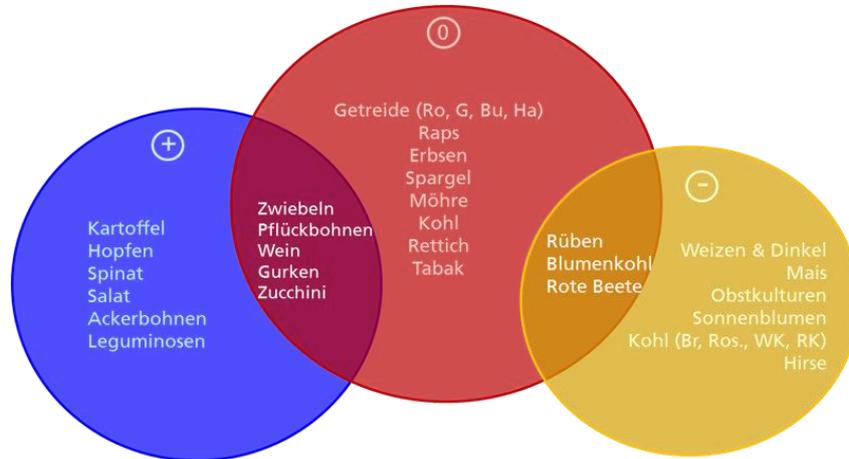


Abbildung 9 - Die wichtigsten deutschen Ackerkulturen reagieren unterschiedlich auf partielle Beschattung. Während die Kartoffel vom Schatten profitiert, mindert eine Überdachung aus Photovoltaikpaneelen den Ertrag von Mais; Quelle:(Fraunhofer ISE, n.d.)

Aus Sicht der Elektrifizierung des Ackerbaus ist die APV deshalb interessant, weil sie neben der Energieerzeugung direkt am Bestimmungsort auch die notwendige Infrastruktur bereitstellt. Der Netzanschluss für die Einspeisung der Energie kann umgekehrt auch für die Ladung von E-Fahrzeugen oder Speichern genutzt werden. Zudem interessant ist die Aufständigung der APV als Halterung für Ultra-Schnell-Ladestationen oder auch zum Führen von Oberleitungen. Aufgrund der linearen Auslegung der Fahrstreifen unter der Anlage könnten sich außerdem Symbiosen mit CTF oder Gantry Systemen²⁰ ergeben.

Einen bedeutsamen Aspekt stellt auch die Relation zwischen Produktion und Verbrauch vor Ort dar. Dabei sollte am Beginn der Planung festgelegt werden, welches Ziel mit der Anlage verfolgt wird. Dient sie der Stromproduktion und Bereitstellung von Infrastruktur, so sollte sie das ganze Feld überspannen. Fokussiert man auf die Stromversorgung der Fahrzeuge, die die darunterliegenden Kulturen bewirtschaften, so reicht es auch aus, nur Teile der Fläche zu verbauen. Dabei kann es sinnvoll sein, Anlagenleistung einzusparen und in Speicherkapazität vor Ort zu investieren.

Um eine Aussage darüber zu treffen, ob sich eine APV für die Energiebereitstellung am Musterbetrieb eignet, werden die Ergebnisse der Szenarien dem Energiebedarf der einzelnen Ackerkulturen der Produktion der Anlage gegenübergestellt. Von den fünf betrachteten

²⁰ Siehe dazu Abschnitt 2.6

Ergebnisse und Diskussion

Ackerkulturen weist die Zuckerrübe den höchsten Energiebedarf auf. Im Standardszenario benötigt die Bewirtschaftung mit Elektrofahrzeugen dabei 458 kWh, im 45 kW-Szenario immerhin 392 kWh pro Jahr und Hektar.

Die Versuchsanlage des Projektes APV RESOLA in Heggelbach stellt die realen Werte der Anlage auf einer eigenen Homepage²¹ zur Verfügung. Demnach lieferte die Anlage im Jahr 2018 insgesamt 302.856,9 kWh Strom²² pro Hektar Ackerfläche. Diese Energiemenge entspricht einem Vielfachen dessen, was die Bewirtschaftung derselben Fläche benötigt. Eine Skalierung der notwendigen Anlagengröße sollte allerdings nicht anhand der gesamt produzierten Strommenge erfolgen. Eine Festlegung der Anlagengröße sollte sich vielmehr am Strombedarf für die Feldbearbeitung anhand deren zeitlicher Notwendigkeit orientieren. Vorteilhaft hierbei ist allerdings, dass wie bei der Kultivierung der betrachteten Feldfrüchte auch bei der APV Produktion die größten Energiemengen in der sonnenreichen Jahreszeit anfallen. Nur die Ernteverfahren von Körnermais und Zuckerrüben weichen hier von der PV-Stromerzeugung ab.

²¹ <http://www.ise.solar-monitoring.de/system.php?system=apvh&untersystem=0&date=2018-06-15&lang=de>
[abgerufen am 07.02.2019]

²² Die Versuchsfläche in Heggelbach beträgt 2,5 Hektar, wovon ein Drittel mit der APV-Anlage überdeckt ist (FRAUENHOFER ISE, F.-I. F. S. E. n.d.)

6 Schlussfolgerung

Welcher Grad an Elektrifizierung ist im Weinviertler Ackerbau mit dem heutigen Stand der Technik möglich? Diese in der Problemstellung definierte Forschungsfrage lässt sich nicht eindeutig mit einer simplen Zahl oder Feststellung beantworten. Die Probleme, die die Beantwortung dieser Frage begleiten, wurden im Verlauf der Arbeit an vielen Stellen angeführt.

Wirtschaftliche Betrachtungen der Elektrifizierung wurden von Beginn an ausgeschlossen. Die Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugen hängt unter anderem von ihrem Anschaffungspreis ab und Preise sind volatil und schwer zu prognostizieren. Es wurde bewusst die technische Machbarkeit von Lösungen in den Vordergrund gestellt, da ökonomische Gesichtspunkte technisch machbare und interessante Lösungen von vornherein ausschließen würden.

Nimmt man die Ergebnisse des Standardszenarios zur Hand, so stellen sich die Chancen der Elektrifizierung wie folgt dar. Der betrachtete Musterbetrieb mit einer bewirtschafteten Gesamtfläche von 48 ha benötigt im Jahresverlauf 3.754,5 l Diesel. Dies entspricht einer Energiemenge von rund 39.800 kWh.

Die wenigen, heute schon entwickelten batterieelektrischen Traktoren wie der Fendt e100 und der Rigitrac SKE 50 würden sich theoretisch jetzt schon dafür eignen, vereinzelte Aufgaben am Betrieb zu erledigen. Mit einer Batterieladung wären beispielsweise bereits die Transportaufgaben während der Ernte, aber auch Pflegemaßnahmen, Einzelkornsaat und die Düngung der Felder über mehrere Stunden möglich. Würden allein diese Aufgaben elektrifiziert, würde dies in einer Energieeinsparung von 13 % pro Jahr rein für den Antrieb der Fahrzeuge resultieren.

Einen Schritt ambitionierter ist die Einbeziehung von Bodenbearbeitung sowie Aussaat mit kombinierter Saatbettbereitung. Es wird ausschließlich die Ernte der Kulturen mit Diesel bewerkstelligt. Dadurch können ganze 2.119,6 l Diesel eingespart und durch elektrische Energie ersetzt werden. Bezogen auf die Antriebsenergie der Fahrzeuge spart dies insgesamt bis zu 34,6 % an Energie im Laufe des Jahres.

Heute utopisch, aber der Vollständigkeit halber angeführt, sollte die Annahme sein, dass der gesamte Betrieb elektrifiziert wird. Das beinhaltet die Arbeitsschritte von Transportfahrten und Pflegemaßnahmen über Bodenbearbeitung und Aussaat bis hin zur Ernte. Dies wäre mit einem Energiebedarf für die elektrischen Fahrzeuge von 15.267 kWh verbunden, einer Energieeinsparung von 62 % gegenüber der Verwendung von Dieselfahrzeugen.

Schlussfolgerung

Die weiteren Szenarien, wie das 45 kW-Szenario, aber auch das Conversion-Szenario zeigen, dass durch gezielte Adaptierungen der Fahrzeugflotte, der verwendeten Geräte, sowie durch den Wechsel auf energieextensivere Verfahren im Ackerbau, die Attraktivität der Elektrifizierung im Ackerbau gesteigert werden kann.

Man kann davon ausgehen, dass mit fortschreitender Forschung und Entwicklung Fahrzeuge auf den Markt kommen, die einen beachtlichen Teil der Arbeiten auf einem Hof elektrisch bewerkstelligen können und dies, ohne große Einbußen an Bedienerfreundlichkeit oder Flexibilität für die Anwender. Besonders für die Ernte von Feldfrüchten mit heutiger Technik, aber auch sehr energieintensive Arbeiten wie Pflügen werden auch in näherer Zukunft noch auf Dieselfahrzeuge angewiesen sein. Diese Schritte zu elektrifizieren erfordert gezielte Forschung und visionäre Ansätze, die den Raum des Möglichen um heute noch unvorstellbare Konzepte erweitern. Das John Deere GridCON Konzept, bei dem ein Traktor permanent über ein Kabel mit Strom versorgt wird, geht in diese Richtung. Diese Vision hat aber für eine breite Marktdurchdringung noch zahlreiche Schwierigkeiten zu überwinden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit führen zu drei weiteren Erkenntnissen, die nachfolgend erläutert werden.

6.1 Entwicklungsbemühungen konzentrieren

Die Arbeitsschritte auf dem Musterbetrieb lassen sich in drei Gruppen unterteilen. Jene der Pflegemaßnahmen ist so energieextensiv, dass ihre elektrische Durchführung schon heute mit den wenigen serienmäßig erhältlichen elektrischen Traktoren durchführbar und vorteilhaft ist. Auch von weiteren Entwicklungen, besonders im Bereich der Roboter-Technologie, kann erwartet werden, dass diese vorerst für Aufgaben im Bereich der Kulturpflege zur Anwendung kommen.

Die Erntetechnik wiederum fällt in eine Gruppe, die so energieintensiv ist, dass ihre Elektrifizierung noch verstärkter Entwicklungsanstrengungen bedarf. Sie ist nicht nur jene Gruppe, die die meiste Energie benötigt, sondern zusätzlich auch jene mit dem engsten Zeitfenster.

Auf beide Gruppen, Pflegemaßnahmen und Erntetechnik, sollte kein vorrangiger Forschungsschwerpunkt gelegt werden, viel eher auf die Arbeitsschritte Bodenbearbeitung und Aussaat. Diese sind zwar auch energieintensiv, aber meist nicht so zeitkritisch wie die Ernte. Die große Bandbreite an möglichen Sä- und Bodenbearbeitungstechniken bietet

Schlussfolgerung

Potential für eine Elektrifizierung dieser Arbeitsschritte. In dieser Gruppe sind die größten Fortschritte für Energieeinsparung durch Elektrifizierung im Ackerbau zu erwarten.

6.2 Die Möglichkeiten bestehender Technik nutzen

Namhafte Landtechnikhersteller forschen schon an der Elektrifizierung der Landwirtschaft und einige können bereits erste serienreife Maschinen vorweisen. Besonders jene Traktoren im Leistungsspektrum um die 50 kW eignen sich mittlerweile für den Einsatz auf einem durchschnittlichen Weinviertler Betrieb, wie er für diese Betrachtung definiert wurde.

Ein weiterer Fortschritt in der Batterietechnik könnte einen Einsatz, wie im 45 kW-Szenario gezeigt, auch in höheren Leistungsklassen ermöglichen. Zumindest aber würde der Komfort für den Bediener steigen, wenn die Reichweiten und Einsatzzeiten steigen und die Ladezeiten sinken.

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass durch die Adaption von Verfahrensschritten, sofern dies ackerbaulich möglich oder sinnvoll ist, auch mit der bestehenden Technik vermehrt die Anwendung elektrischer Fahrzeuge möglich ist. So können Szenarien angedacht werden, wie die Bodenbearbeitung vor der Aussaat zu verringern, auf Mulch- oder Direktsaatverfahren zu setzen und dem Beikrautdruck mit Pflanzenschutzmaßnahmen zu begegnen. Dabei kann bei jedem Arbeitsschritt Energie eingespart und eine attraktive Flächenleistung erzielt werden. Überlegungen wie diese können für viele Arbeitsschritte, die am Betrieb im Laufe des Jahres anfallen, angestellt werden.

6.3 Strom vor Biosprit

Wie im Abschnitt 5.5 erläutert, hat elektrischer Strom auch aus Sicht der Eigenerzeugung einen Vorteil gegenüber anderen erneuerbaren Energieträgern. Soll eine Dekarbonisierung der Landwirtschaft stattfinden, die unweigerlich auch bei der energieintensiven Mechanisierung ansetzen muss, ist die Substitution von Diesel durch andere Energieträger ein unverzichtbarer Schritt. Biotreibstoff RME hat den großen Vorteil, dass er unkompliziert über das ganze Jahr hinweg am Betrieb gelagert werden kann. Allerdings benötigt er zur Herstellung größere Flächen, als dies beispielsweise bei der Verwendung von Strom aus Photovoltaik der Fall ist. Photovoltaik als Energiequelle ist selbstverständlich obligatorisch, Strom aus Windkraft, Biogas oder Wasserkraft kann genauso zur Anwendung kommen. Photovoltaik punktet allerdings mit ihrer Einfachheit und Zuverlässigkeit. Sie kann unkompliziert auf den Dächern von landwirtschaftlichen Betrieben montiert werden und ist in dieser Form erprobt.

7 Ausblick

Die Elektrifizierungsszenarien, wie sie in dieser Arbeit betrachtet werden, orientieren sich in erster Linie an der etablierten Landtechnik. Die auf Elektroantriebe umgerüsteten Traktoren ähneln in ihrem Aufbau und ihrer Arbeitsweise den heute mehrheitlich verwendeten Dieseltaktoren. Und auch die angewendeten Geräte und Arbeitsschritte im Laufe des Betriebsjahres sind meist ident mit den heute angewendeten. Der Grund dafür ist die Annahme dieser Arbeit, die Elektrifizierung in unmittelbarer Zukunft zu betrachten. Dennoch gibt es auch andere mögliche Wege, eine Transformation der Landwirtschaft vom Diesel hin zu elektrischen Maschinen zu erreichen.

7.1 Roboter und autonome Fahrzeuge

Ein Ansatz, der als vielversprechende Zukunftstechnologie diskutiert wird, sieht Roboter als zentralen Bestandteil von künftigen landwirtschaftlichen Betrieben. Neben dem Vorteil, dass diese autonom arbeiten und in ihrer Anzahl leicht zu skalieren sind, ist für diese Arbeit besonders der Aspekt interessant, wie diese angetrieben werden. Schon allein für eine präzise Steuerung dieser Fahrzeuge ist die Verwendung von Elektroantrieben vorteilhaft.

Mittlerweile werden auch schon Traktoren als autonome Fahrzeuge entwickelt. Manche Hersteller verzichten gar auf den Einbau einer Fahrerkabine, da diese Maschinen vollständig von außen gesteuert werden. Wenn an dieser Stelle von Robotern gesprochen wird, sind allerdings jene Fahrzeuge gemeint, die für einen speziellen Arbeitsschritt konzipiert sind. Diese Entwicklungen sind vorerst eher im Gemüse und Weinbau denn im Ackerbau anzutreffen. Dennoch bietet auch der Ackerbau Anwendungsmöglichkeiten für diese Technologie. Interessant erscheint ein Einsatz besonders in Reihenkulturen, wie dies bei Hackfrüchten erforderlich ist.

Der künftige Einsatz von Robotern beschränkt sich dabei allerdings nicht auf Arbeiten wie hacken oder säen, ist aber aus heutiger Sicht schwer vorhersagbar, welche Anwendungen sich konkret hierfür durchsetzen werden. Von Minßen et al. (2015) gibt es dazu eine umfangreiche Studie, die sich mit autonomen Fahrzeugen im Pflanzenbau beschäftigt. Die Autoren überlegen und präsentieren darin, wie Roboter die Arbeitsschritte auf einem Betrieb, von Bodenbearbeitung, Aussaat, Pflegemaßnahmen und Düngung bis hin zur Ernte übernehmen können. Abschließend sei dazu gesagt, dass diesen neuen Entwicklungen viel Potential zugeschrieben wird. Wie diese Fahrzeuge jedoch konkret ausgestaltet sein werden, welche Aufgaben sie übernehmen können und wie lange es dauert, bis sie den Markt durchdringen, ist heute noch unbekannt.

7.2 Wasserstoff als Energiequelle

Eine weitere Technologie, die den Umstieg von fossilen auf elektrische Bewirtschaftungsweisen ermöglichen soll, ist der Einsatz von Wasserstoff, der mithilfe von Brennstoffzellen direkt am Fahrzeug in elektrischen Strom umgewandelt wird. Wasserstoff als Zukunftshoffnung der Elektromobilität erfreut sich steter medialer und politischer Aufmerksamkeit. Auch wenn sich diese Hoffnung in der Praxis weniger optimistisch darstellt. Die Fakten zum wasserstoffbetriebenen Individualverkehr lassen sich im Wesentlichen auch auf die Anwendung in landwirtschaftlichen Fahrzeugen anwenden.

Den bedeutendsten Vorteil von Wasserstoff gegenüber den batterieelektrischen Fahrzeugen stellt die Möglichkeit einer raschen Betankung dar. Dies ist zugleich aber auch ein großer Nachteil. Die Tankstelleninfrastruktur ist quasi nicht vorhanden, deren Errichtung mit hohen Investitionen verbunden.

Auch die Fahrzeuge selbst, speziell im landwirtschaftlichen Sektor beschränken sich auf ein paar wenige Entwicklungen. Der von New Holland vorgestellte Wasserstofftraktor wird in Kapitel 2.7.1 näher vorgestellt. In diesem konkreten Fall sind seit rund zehn Jahren keine weiteren Entwicklungsfortschritte bekannt.

Einen klaren Nachteil hat Wasserstoff gegenüber den batterieelektrischen Fahrzeugen bei der Effizienz. Prof. Schrödl von der TU Wien hat dies anhand des Individualverkehrs durchgerechnet. Die Ergebnisse lassen sich grundsätzlich auch auf die landwirtschaftlichen Fahrzeuge anwenden. Bei einer klimafreundlichen, CO₂ neutralen Erzeugung des Wasserstoffs aus Windkraft und Photovoltaik benötigt das Wasserstoffauto für dieselbe Fahrdistanz 2,4-mal so viel Energie wie das Elektroauto. Dieses Ergebnis verschlechtert sich, wenn man anstelle des „grünen Wasserstoffs“ mit „grauem Wasserstoff“ rechnet, welcher heute zu 90 % genutzt und aus fossilem Erdgas erzeugt wird. Dieser benötigt von der Lagerstätte bis zum gefahrenen Kilometer rund 2,8-mal so viel Energie wie das Batteriefahrzeug. Zusätzlich ist diese Form der Wasserstoffherzeugung weder klimafreundlich (CO₂ Ausstoß bei der Erzeugung), noch energieeffizient in der Herstellung (Aigner, 2019).

Dem Energieträger Wasserstoff soll hier allerdings nicht sein Potential für zukünftige Nutzung abgesprochen werden. Der Vorteil der Betankung kann speziell in Anwendungen, die einen hohen Energiebedarf aufweisen, ausgespielt werden. Beispielsweise um später auch die Erntetechnik zu elektrifizieren und dabei auf überdimensionale und schwere Batteriespeicher zu verzichten.

8 Zusammenfassung

Es ist heute unumstritten, dass die Gesellschaft vor großen Herausforderungen durch den menschengemachten Klimawandel steht. Diese Herausforderungen verlangen Anstrengungen aller Wirtschaftssektoren. Die Landwirtschaft, die die Folgen des Klimawandels bereits jetzt zu spüren bekommt, ist aber nicht bloß Opfer, sondern verursacht den Klimawandel maßgeblich mit.

Chancen für eine klimafreundlichere Landwirtschaft werden, wie auch im Individualverkehr, in einer Elektrifizierung der Fahrzeuge gesehen. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich eingehend mit den Potentialen einer elektrifizierten Landwirtschaft am Beispiel eines Weinviertler Ackerbaubetriebs. Auf 48 Hektar werden auf diesem Musterbetrieb Weizen, Gerste, Körnermais, Zuckerrüben und Kartoffeln angebaut. Die Standardmechanisierung sieht einen 102 kW Traktor vor, mit dem der Großteil der Arbeiten am Betrieb durchgeführt wird. Ziel ist es, den Betrieb maximal zu elektrifizieren. Dies erfolgt innerhalb mehrerer Szenarien, die die Fahrzeuge selbst, aber auch die Arbeitsschritte im Betrieb und die Energiebereitstellung in die Betrachtung miteinbeziehen und optimieren.

Anhand des Dieserverbrauchs der Fahrzeuge wird der Energiebedarf am Betrieb ermittelt. Mit einer Wirkungsgradkette wird davon ausgehend der Energiebedarf für batteriebetriebene Elektrotraktoren berechnet. Dabei wird sowohl der gesamte Betrieb im Jahresverlauf als auch die einzelnen Arbeitsschritte für die Kultivierung der Feldfrüchte betrachtet. Die Daten variieren innerhalb mehrerer Szenarien. So wird der Energiebedarf auch bei reduzierter Fahrzeugleistung ermittelt. Betrachtung findet zudem die verwendete Technik für einzelne Arbeitsschritte der Aussaat und Bodenbearbeitung. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in den Kontext der bereits erhältlichen, batterieelektrischen Fahrzeugentwicklungen gesetzt, um die gegenwärtigen Potentiale und künftigen Erfordernisse besser abschätzen zu können. Um den Bezug zu den bereits in Entwicklung befindlichen oder erhältlichen Elektrofahrzeugen besser herstellen zu können, wurde dieser Teil den Ergebnissen vorangestellt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen die Gliederung der Arbeitsschritte am Musterbetrieb in drei Gruppen sinnvoll erscheinen. Die Berechnung der Wirkungsgradketten hat gezeigt, dass die Arbeitsschritte der Ernte mit dem heutigen Stand der Technik batterieelektrisch nicht sinnvoll zu bewerkstelligen sind. Aus diesem Grund entfällt eine weitere Vertiefung auf diese Arbeitsschritte. Jene Arbeitsschritte der Pflegemaßnahmen, aber auch der Transport von landwirtschaftlichen Gütern vom Feld zum Hof fallen in eine Gruppe von Arbeitsschritten,

Zusammenfassung

die bereits mit den heute erhältlichen batterieelektrischen Traktoren problemlos zu bewerkstelligen wären. Daher liegt der Fokus bei jenen Arbeitsschritten, die besonders hohes Potential für weitere Entwicklungen aufweisen. Darunter fallen besonders die Arbeitsschritte von Aussaat und Bodenbearbeitung. Würden diese Arbeitsschritte gemeinsam mit jenen energieextensiven Arbeitsschritten von Pflege und Transport elektrifiziert werden, könnten am Betrieb rund 34,6 % der benötigten Energie eingespart werden.

Starken Einfluss darauf, wie attraktiv ein Arbeitsschritt elektrisch durchführbar ist, haben besonders Dauer und Flächenleistung, die mit einer Batterieladung möglich sind. Dies lässt sich unter anderem stark durch die verwendete Bearbeitungstechnik beeinflussen. Hieran setzt ebenso ein Teil dieser Arbeit an.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass mit ambitionierten Maßnahmen die Elektrifizierung eines Weinviertler Ackerbaubetriebs mit einer Einsparung von rund einem Drittel der im Jahresverlauf benötigten Energie verbunden ist. Diese Werte orientieren sich an der Substitution von dieselbetriebenen Traktoren durch batterieelektrische. Findet die Transformation tiefgreifender statt, indem sämtliche Arbeitsschritte im Betrieb an der elektrifizierten Bewirtschaftung ausgerichtet sind, so sind höhere Grade an Elektrifizierung möglich.

Wird beispielsweise die Agrartechnik radikal neu gedacht, Trends wie Autonomisierung und Robotertechnik weisen in diese Richtung, sind vollelektrische Betriebe in Zukunft denkbar. Ob und wann sich solche Trends durchsetzen, lässt sich nur schwer abschätzen. Elektrifizierungsstrategien abseits von batterieelektrischen Lösungen sind heute jedenfalls noch so abwegig, dass sie keiner näheren Betrachtung in dieser Arbeit unterzogen wurden. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass auch andere Technologiepfade rasch zu brauchbaren und interessanten Lösungen beitragen, um auch in der Landwirtschaft eine Transformation vom fossilen ins elektrische Zeitalter zu vollziehen.

9 Literaturverzeichnis

- ABB. 2017. *Microgrid Solutions, PowerStore™* [Online verfügbar]. s.l.: ABB India. Available: https://library.e.abb.com/public/8bd69ca75089410394f70ed8ec271e95/ABB_PowerStore_A4_Global_Brochure_2017_Web.pdf [Zugriffsdatum].
- AGRARMARKT AUSTRIA, A. 2019. Getreideernte Pressekonferenz 2019. Wien: AMA.
- AIGNER, F. 2019. *Mit Wasserstoffautos sind die Klimaziele nicht zu erreichen* [Online verfügbar]. Wien: TU Wien. Available: <https://www.tuwien.at/tu-wien/aktuelles/news/news/mit-wasserstoffautos-sind-die-klimaziele-nicht-zu-erreichen/> [Zugriffsdatum 04.11.2019].
- ALMERS, H. & FRIEDRICH, J.-H. 1956. Elektrifizierung der Landwirtschaft in der Sowjetunion. Teil II. *Deutsche Agrartechnik*, 6.
- AUMER, W. 2018. Forschungen und Entwicklungen zu elektrischen Antrieben in Landmaschinen. *Funktionsintegration elektrischer Antriebe in mobilen Arbeitsmaschinen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- AUMER, W., LINDNER, M., GEIBLER, M., HERLITZIUS, T. & BERNHARDT, G. 2008. Konzeptioneller Vergleich von elektrischen und hydrostatischen Fahrtrieben im Mähdrescher. *LANDTECHNIK–Agricultural Engineering*, 63, 88-89.
- BELECTRIC. 2018. *Netzfremdliche Großspeicher - BELECTRIC LION EBU®* [Online verfügbar]. Kolitzheim: Belectric GmbH. Available: https://belectric.com/wp-content/uploads/2018/06/BEL_EBU-Lion_datasheet_2018-03-14_DE_ebook.pdf [Zugriffsdatum 30.01.2019].
- BMNT, B. F. N. U. T. 2018. Grüner Bericht 2018. Wien: Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus.
- CHRISTIANSON, L. L., ALCOCK, R., JAHNS, G. & SESHASI, K. L. 1989. Electric Vehicles in Agriculture. In: STOUT, B. A. (ed.) *Energy in world agriculture*. Amsterdam: Elsevier.
- DIEPENBROCK, W. 2016. *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung*, Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer.
- EIKEL, G. 2018. *John Deere GridCON: E-Traktor am Kabel* [Online verfügbar]. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH. Available: <https://www.profi.de/news/John-Deere-GridCON-E-Traktor-am-Kabel-10136501.html> [Zugriffsdatum 11.06.2019].
- FRAUENHOFER ISE, F.-I. F. S. E. n.d. *APV-RESOLA; Agrophotovoltaik Ressourceneffiziente Landnutzung* [Online verfügbar]. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Available: <http://www.agrophotovoltaik.de> [Zugriffsdatum 18.12.2018 2018].

Literaturverzeichnis

- FRERICHS, L. & THIELKE, L. 2015. Neue Konzepte der Energieversorgung landtechnischer Systeme. *LANDTECHNIK–Agricultural Engineering*, 70, 167-176.
- FRIEDRICH, K. A. 2014. Batterie oder Brennstoffzelle - was bewegt uns in Zukunft? *Wissensforum Rathaus*. Rathaus Stuttgart, Deutschland.
- GERS-GRAPPENHAUS, C. 2018. Neue Randbedingungen für die dezentrale Erzeugung von Strom *KTBL-Tagung*. Bayreuth: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- GÖGGERLE, T. 2019. *Sepp Knüsel baut elektrisch angetriebenen Rigitrac* [Online verfügbar]. Hannover: Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH. Available: <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/Traktor-Rigitrac-elektrischer-Antrieb-550945> [Zugriffsdatum 18.01.2019 2019].
- HERLITZIUS, T. 2014. Rigitrac EWD120. *Technische Universität Dresden Department of Agricultural Systems Technology*, http://www.reo-it.de/Stammbaum_Daten/Rigitrac_EDW120_en.pdf, last Zugriffsdatum January, 22.
- HÖNER, G. 2018a. Akku-Energie für drei Futtertage. *top agrar*, 45, 85-86.
- HÖNER, G. 2018b. Hirsche mit Akku. *top agrar*, 45, 106-108.
- HÖNER, G. 2018c. Roter Stromer. *top agrar*, 45, 80-81.
- JD GRIDCON. o.J. *Kabelgeführter mobiler und autonomer Maschinenverband - GridCON2 führt eine Vielzahl von Einzelentwicklungen zusammen* [Online verfügbar]. Available: <http://www.gridcon-project.de/Beschreibung.html> [Zugriffsdatum 11.06.2019].
- KTBL 2017. *Feldarbeitsrechner*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., KTBL.
- MINßEN, T.-F., URSO, L.-M., GAUS, C.-C. & FRERICHS, L. 2015. Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen. *ATZoffhighway*, 8, 6–11.
- MITZLAFF, F. 2018. Energiemanagement im landwirtschaftlichen Betrieb *KTBL-Tagung*. Bayreuth: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- MOHRDIECK, C., VENTURI, M. & BREITRÜCK, K. 2017. Mobile Anwendungen. In: TÖPLER, J. & LEHMANN, J. (eds.) *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- MOREDA, G. P., MUÑOZ-GARCÍA, M. A. & BARREIRO, P. 2016. High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – A review. *Energy Conversion and Management*, 115, 117-131.

Literaturverzeichnis

- PATEY, T., FLUECKIGER, R., POLAND, J., SEGBERS, D. & WICKI, S. 2016. Laden wie der Blitz. *ABB review*. Baden-Dättwil: ABB Group R&D and Technology.
- PICKEL, P. 2013. Sustainable energy supply for agricultural machinery, The Sesam Vision. In: DEERE, J. (ed.) *19th International Farm Management Congress*. Warshaw, Poland: ifmaonline verfügbar.org.
- PICKEL, P. 2014. Wege zu einer energie-autonomen Landwirtschaft. *BDM aktuell*. Freising: Bundesverband Deutscher Milchviehhalter e.V.
- PICKEL, P. 2018. Elektrifizierung in der Landwirtschaft – wo und wofür? . *KTBL-Tagung*. Bayreuth: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- PICKEL, P. 2019. Electricity for tractors and tractor-implement systems. *Club of Bologna*. Hannover (Germany).
- POTOR, M. 2019. Tschüss, Verbrenner! Hier atmest du bald saubere Luft. *mobilitymag.de* [Online verfügbar]. Available from: <https://mobilitymag.de/verbot-verbrennungsmotor-uebersicht-laender/> [2020].
- PRONAR. 2019. *Anhänger PRONAR T286* [Online verfügbar]. Pronar Sp. z o.o. Available: <http://pronar.pl/de/produkt/anhaenger-pronar-t286/> [Zugriffsdatum 05.02.2019].
- QUASCHNING, V. 2013. *Erneuerbare Energien und Klimaschutz*, München, Hanser.
- RATHBAUER, J. 2016. Biogene Brenn- & Kraftstoffe. Wieselburg: BLT Wieselburg.
- RAUTMANN, H. 2013. *Elektromobilität in der Landwirtschaft*.
- REINMUTH, F. 2013. *Ermittlung der Potentiale zur Elektrifizierung von Landmaschinen*, Aachen, Shaker.
- REMMELE, E., ECKEL, H. & WIDMANN, B. A. 2013. *Alternative Energieträger und Antriebskonzepte für mobile Maschinen in der Land-und Forstwirtschaft: Zusammenfassung der Ergebnisse; KTBL/TFZ-Fachgespräch 20. bis 21. März 2013 in Straubing*, KTBL.
- SCHERR, M. 2011. *Neuer New Holland NH²™ Traktor* [Online verfügbar]. Graz: Landwirt.com GmbH. Available: <https://www.landwirt.com/Neuer-New-Holland-NH2%E2%84%A2-Traktor,,11046,,Bericht.html> [Zugriffsdatum 10.10.2018].
- SIEMENS AG 2017. eHighway - Elektrifizierter Straßengüterverkehr. München: Siemens AG.
- STATISTIK AUSTRIA 2018. Agrarstrukturerhebung, Besitzverhältnisse 2016 - Gesamtfläche. In: AUSTRIA, S. (ed.). Wien.

Literaturverzeichnis

- STSCHUROW, S. W. 1956. Fragen der Elektrifizierung ortsveränderlicher Feldarbeiten. *Deutsche Agrartechnik*, 6, 351-352.
- STÖHR, M., GIGLMAIER, S. & BERLET, R. 2015. Folgenabschätzung zum Einsatz batteriebetriebener vollelektrifizierter Landmaschinen.
- STÖHR, M. & HACKENBERG, B. 2018. Elektrische Landmaschinen und Photovoltaik: mehr Klimaschutz mit Batterie *KTBL-Tagung*. Bayreuth: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).
- TESVOLT. 2015. *Schlüsselfertiges Lithium-Batterie-System (EES)* [Online verfügbar]. Lutherstadt Wittenberg: Tesvolt GmbH. Available: <https://mitzner-energie.de/datenblatt/402017.pdf> [Zugriffsdatum 30.01.2019].
- TSCHÖKE, H. 2015. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. *Basiswissen Springer-Vieweg, Wiesbaden*.
- UMWELTBUNDESAMT. 2019. *Treibhausgase* [Online verfügbar]. Wien: Umweltbundesamt GmbH. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/treibhausgase/> [Zugriffsdatum 23.05.2019].
- VIZN ENERGY. 2016. *Z20 Product Sheet* [Online verfügbar]. Available: <https://www.viznenergy.com/products-z20/> [Zugriffsdatum 30.01.2019].
- WILMER, H. 2018. Der Dieselmotor wird bleiben! *Profi Magazin für professionelle Agrartechnik*. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH.
- WIRTH, H. 2019. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- WOOPEN, T., GRONWOLD, A., ADAM, H. & HAMMES, S. 2018. Marktfähige elektrische Antriebskonzepte für kleinere Traktoren. *ATZoffhighway*, 11, 8-13.
- WÜTHRICH, P. & SCHMIED, M. 2015. Elektrifizierung des Strassengüterverkehrs in der Schweiz. Bern: Bundesamts für Umwelt (BAFU).
- ÖKL 2018. Kraftstoffverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft *In: ÖSTERREICHISCHES KURATORIUM FÜR LANDTECHNIK, Ö. (ed.) ÖKL-Richtwerte 2018*. Wien.