

Einsatz von E-Traktoren in der Landwirtschaft

Eine ökonomische Analyse mittels Total-Cost-of-Ownership-Methode

Bachelor-Thesis
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering
im Studiengang Umwelttechnik und Ressourcenmanagement

Eingereicht von:

Mona Kampe
Matr.nr. 299921
mona.kampe@htwg-konstanz.de

Betreuung an der HTWG Konstanz:

Prof. Dr. rer. nat. habil Benno Rothstein
benno.rothstein@htwg-konstanz.de

Betreuung am Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH:

Hannes Bluhm
hannes.bluhm@ioew.de

Eingereicht am:

19.04.2024 in Konstanz

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich besonders dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) dafür danken, mir die Möglichkeit gegeben zu haben, meine Bachelorarbeit im Rahmen des Projektes „Landgewinn“ zu schreiben. Ich bedanke mich für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit und für die großartige Arbeitsatmosphäre am IÖW. Es war eine einzigartige Bereicherung und wichtige Erfahrung für meine berufliche und persönliche Entwicklung. Mein besonderer Dank gilt dabei meinem Betreuer Hannes Bluhm, der mir immer mit wertvollen Ratschlägen zur Seite stand. Mein Dank gilt auch dem Fördermittelgeber, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), ohne den die Durchführung des Projektes nicht möglich gewesen wäre.

Weiterhin möchte ich mich bei meinem betreuenden Professor Benno Rothstein für die bereichernden Gespräche und die ständige Bereitschaft für Rückfragen danken.

Nilas Stockmayer, Kim Kampe und Louis Türk danke ich für das gründliche Korrekturlesen dieser Arbeit sowie für die Motivation während des Schreibprozesses. Darüber hinaus möchte ich meinen Eltern von ganzem Herzen danken, dass sie mir meinen Bildungsweg auf diese Art und Weise ermöglicht haben und mich jederzeit unterstützen.

Mona Kampe, Freitag, den 19. April 2024

Inhaltsverzeichnis

Abstract	IV
Zusammenfassung	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Formelverzeichnis	IX
Anhangsverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung.....	2
1.2 Forschungsfragen	4
1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit.....	5
2 Theoretischer Hintergrund	7
2.1 Klimaschutz in der Landwirtschaft.....	7
2.2 Landwirtschaftliche Betriebskonzepte und Antriebssysteme	8
2.3 Rolle alternativer Antriebstechnologien	11
2.4 Rolle der Elektrifizierung mobiler Landmaschinen	16
3 Stand von Forschung und Praxis	21
3.1 Technische Forschungsprojekte	22
3.2 Marktübersicht.....	23
3.3 Aktuelle Herausforderungen.....	24
3.4 Literaturübersicht.....	27
4 Vorstellung der Untersuchungsobjekte	31
4.1 Definition der untersuchten E-Traktoren	31
4.2 Definition der Referenzobjekte	33
5 Studiendesign	34
5.1 Methodik.....	34
5.2 Durchführung.....	35
5.2.1 Datenzusammenstellung.....	36
5.2.2 TCO-Methode	40
5.2.3 Zusammenfassung der Kostenparameter.....	41

6	Ergebnisse	44
6.1	Marktdaten.....	44
6.2	Kostenstruktur	48
6.2.1	Investitionskosten.....	48
6.2.2	Fixkosten.....	52
6.2.3	Variable Kosten.....	52
6.3	Gesamtkosten	56
6.4	Sensitivitätsanalyse.....	61
6.5	THG-Einsparpotential.....	67
7	Interpretation und Diskussion	69
7.1	Interpretation der Ergebnisse	69
7.2	Limitationen	75
8	Fazit und Ausblick	78
	Literaturverzeichnis	81
	Anhang	97
	Eidesstattliche Erklärung	117

Abstract

In agriculture, the predominant use of conventional diesel fuel leads to harmful environmental impacts and a significant dependency on energy imports. In the face of energy policy developments and growing climate awareness, the search for alternative drive options for agriculture is intensifying. Although the use of electrical energy instead of fossil fuels poses challenges such as limited energy storage capacities, it also offers advantages such as improved energy efficiency and reduced environmental impacts.

The aim of this thesis is to evaluate the current state of the market for electric tractors (e-tractors) and to conduct a thorough analysis of the Total Cost of Ownership (TCO) compared to their conventional diesel counterparts. The specific challenges and most influential cost parameters of e-tractors are identified and based on this, recommendations for the commercialization of e-tractors are established. The knowledge gained in the study is intended to support the consistent further development and improvement of concepts for battery-electric agricultural machinery in order to enable emission-free farming. The methodological approach of the study includes a quantitative market analysis to assess supply, demand and pricing. In addition, the Total Cost of Ownership method was used to calculate and compare the total costs of electric and diesel tractors in order to make well-founded statements about their economic viability. A sensitivity analysis was used not only to identify significant parameters, but also to reduce and equalize the influence of uncertainties.

Results show that electric tractors at the lower power range are already available on the market. Due to their low energy, maintenance and repair costs, they can be more cost-effective over their operational lifetime than comparable diesel tractors. However, there is also scepticism on the part of farmers regarding the range, resale value and longevity of electric tractors. Furthermore, electric tractors in the power range above 55 kW are not sufficiently ready for the market. This is due to the high investment costs, which means that the TCO are significantly higher than those of diesel tractors. Creating incentives for technology development is an important instrument for driving forward the expansion of the product range and closing the economic efficiency gap compared to conventional drives. Considering the urgency of the decarbonization of agriculture, support and subsidy programmes are required on the demand side to provide financial support to customers.

Zusammenfassung

In der Landwirtschaft führt die dominierende Verwendung von konventionellem Dieseldieselfkraftstoff zu schädlichen Umweltauswirkungen und einer signifikanten Abhängigkeit von Energieimporten. Angesichts der energiepolitischen Entwicklung und des steigenden Klimabewusstseins wird verstärkt nach alternativen Antriebsmöglichkeiten für die Landwirtschaft gesucht. Die Nutzung von elektrischer Energie anstelle fossiler Brennstoffe birgt zwar Herausforderungen wie begrenzte Speicherkapazitäten, bietet jedoch auch Vorteile wie eine verbesserte Energieeffizienz und geringere Umweltauswirkungen.

Das Ziel dieser Arbeit ist, den Stand des Marktes von Elektrotraktoren (E-Traktoren) zu evaluieren sowie eine gründliche Analyse der Gesamtbetriebskosten im Vergleich zu ihren konventionellen Diesel-Pendants durchzuführen. Die spezifischen Herausforderungen und einflussreichen Kostenparameter von E-Traktoren werden identifiziert und darauf aufbauend Empfehlungen für eine Marktdiffusion von E-Traktoren formuliert. Die in der Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse sollen die konsequente Weiterentwicklung und Verbesserung von Konzepten für batterieelektrische Landmaschinen unterstützen, um ein emissionsfreies Wirtschaften in der Landwirtschaft zu ermöglichen. Das methodische Vorgehen der Arbeit umfasst eine quantitative Marktanalyse zur Bewertung von Angebot, Nachfrage und Preisgestaltung. Darüber hinaus wurden die Gesamtkosten von E- und Diesel-Traktoren mithilfe der Total-Cost-of-Ownership-Methode aufgestellt und verglichen, um fundierte Aussagen über deren Wirtschaftlichkeit zu treffen. Eine Sensitivitätsanalyse diente einerseits dazu, signifikante Parameter zu identifizieren und andererseits dazu, den Einfluss von Unsicherheiten zu reduzieren und auszugleichen.

Die Ergebnisse belegen, dass E-Traktoren im niedrigeren Leistungsniveau bereits auf dem Markt verfügbar sind. Aufgrund ihrer niedrigen Energie- sowie Wartungs- und Reparaturkosten können sie über die Nutzungsdauer gesehen kostengünstiger sein als vergleichbare Diesel-Traktoren. Es besteht jedoch Skepsis vonseiten der Landwirt*innen bezüglich Reichweite, Wiederverkaufswert und Langlebigkeit von E-Traktoren. Die Marktreife von E-Traktoren im Leistungsbereich über 55 kW ist außerdem noch nicht gegeben. Dies ist auf die hohen Investitionskosten zurückzuführen, wodurch die Gesamtkosten deutlich über denen von Diesel-Traktoren liegen. Das Schaffen von Anreizen zur Technologieentwicklung stellt ein bedeutendes Instrument dar, um eine Erweiterung des Produktangebots voranzutreiben und die Wirtschaftlichkeitslücke im Vergleich zu konventionellen Antrieben zu schließen. Angesichts der Dringlichkeit der Dekarbonisierung der Landwirtschaft sind auf der Nachfrageseite Förder- und Subventionsprogramme zur finanziellen Unterstützung der Abnehmer*innen erforderlich.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1. THG-Emissionen aus der Landwirtschaft nach Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (UBA, 2023a, S. 1).....	2
Abb. 2. Dieselbedarf verschiedener Arbeitsvorgänge in der Landwirtschaft. Eigene Darstellung nach Eckel et al. (2023, S. 14).	10
Abb. 3. Anteile der verschiedenen Leistungsklassen am Gesamtbestand land- und forstwirtschaftlicher Zugmaschinen in Deutschland im Jahr 2022. Eigene Darstellung nach KBA (2022, S. 54f.).	11
Abb. 4. Übersicht der Technologieoptionen von Antrieben auf Basis erneuerbarer Ressourcen. Eigene Darstellung nach Eckel et al. (2023, S. 16).....	12
Abb. 5. Bewertung verschiedener Energieträger. Eigene Darstellung nach Dögnitz et al. (2023a, S. 264), Eckel et al. (2023, S. 29f.) und Remmele et al. (2020, S. 87f.).	15
Abb. 6. Funktionsweise eines batterieelektrischen Antriebs. Darstellung verändert nach Tadus (2023, S. 1).....	17
Abb. 7. Einordnung und Bewertung von elektrischen Antrieben im Vergleich zur Diesel-Variante. Eigene Darstellung nach Remmele (2020, S. 87f.).....	19
Abb. 8. Übersicht der Kostenstruktur für die TCO-Analyse. Eigene Darstellung nach BEUC (2021, S. 3ff.) und Noorbakhsh et al. (2018, S. 437).....	37
Abb. 9. Regressionsanalyse der Preise von E-Traktoren auf dem Markt in Abhängigkeit von der Batteriekapazität. Eigene Darstellung nach Angaben siehe Anhang 14... 46	
Abb. 10. Regressionsanalyse der Preise von E-Traktoren auf dem Markt in Abhängigkeit von der Leistung. Eigene Darstellung nach Angaben siehe Anhang 14 und KTBL (2022).	47
Abb. 11. Kostenabschätzung für Li-Ionen-Akkus für E-Fahrzeuge. Eigene Darstellung nach Daten des U.S. Department of Energy (2023).	49
Abb. 12. Ladestecker für batterieelektrische Fahrzeuge. Interchargers (2022).....	51
Abb. 13. Durchschnittliche Strom- und Dieselpreise in Deutschland zwischen 2014 und 2023 mit jeweiliger CAGR. Eigene Darstellung nach Daten des Statistischen Bundesamtes (2024, S. 1), des BDEW (2022, S. 309) und von Statista und en2x (2024).	54
Abb. 14. Gesamtkosten der vier verschiedenen Traktor-Varianten. Eigene Darstellung nach Ergebnissen der TCO-Analyse.....	57
Abb. 15. Gegenüberstellung des Energiebedarfs der vier betrachteten Varianten. Eigene Darstellung.	58
Abb. 16. Jährliche Kosten der vier verschiedenen Traktor-Varianten. Eigene Darstellung nach Ergebnissen der TCO-Analyse.....	59
Abb. 17. Zeitlicher Kostenverlauf der Gesamtkosten der Traktoren. Eigene Darstellung nach Ergebnissen der TCO-Analyse.....	60
Abb. 18. Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter der TCO des ET-K. Eigene Darstellung.	61
Abb. 19. Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter der TCO des DT-K. Eigene Darstellung.	62
Abb. 20. Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter der TCO des ET-G. Eigene Darstellung.	63
Abb. 21. Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter der TCO des DT-G. Eigene Darstellung.	64

Abb. 22. Vergleich der Sensitivität der Investitionskosten. Eigene Darstellung.....	65
Abb. 23. Vergleich der Sensitivität der Jahresarbeitszeit von leistungsschwächerem E- und Diesel-Traktor. Eigene Darstellung.	66
Abb. 24. Jährliches CO ₂ -Einsparpotential der Umstellung von Diesel- auf E-Traktoren. Eigene Darstellung nach Daten von Fendt (2024).	67
Abb. 25. CO ₂ -Emissionen der verschiedenen Traktorvarianten einschließlich der Batterieproduktion. Eigene Darstellung.....	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für landwirtschaftliche Anwendungen bis 2030. Ausgewählte Energieträger des KTBL (Eckel et al., 2023, S. 19, 31; Remmele et al., 2020, S. 87).	14
Tabelle 2. Literaturübersicht zu ökonomischen Analysen von E-Traktoren. Eigene Darstellung.	28
Tabelle 3. Definition der E-Traktoren für den Vergleich inklusive technischer Spezifikationen. Eigene Darstellung (AGCO GmbH, 2023; Knecht B.V., 2023e; KTBL, 2022; L. von Stillfried, persönliche Kommunikation, 8. Januar 2024). .	32
Tabelle 4. Definition der Diesel-Traktoren für den Vergleich inklusive technischer Spezifikationen. Eigene Darstellung nach MaKost-Rechner (KTBL 2024b). ..	33
Tabelle 5. Befragung von Vertreter*innen von herstellenden, entwickelnden und distribuierenden Unternehmen. Eigene Darstellung.....	39
Tabelle 6. Eingabeparameter für die TCO-Berechnung der leistungsschwächeren, kleineren Traktorvarianten. Eigene Darstellung.....	42
Tabelle 7. Eingabeparameter für die TCO-Berechnung der leistungsstärkeren, größeren Traktorvarianten. Eigene Darstellung.....	43
Tabelle 8. Preisentwicklungen für die TCO-Berechnung. Eigene Darstellung.	44
Tabelle 9. Ergebnisse der Marktanalyse: Übersicht der E-Traktoren. Eigene Darstellung nach Hersteller*innenangaben siehe Anhang 14	45
Tabelle 10. Anschaffungspreise abhängig von der Batteriekapazität auf Basis der Regressionsanalyse. Eigene Darstellung.....	47
Tabelle 11. Ergebnisse der TCO-Kalkulation. Eigene Darstellung.	56

Formelverzeichnis

Formel 1. TCO-Berechnung. Verändert nach Badouard et al. (2020, S. 12).....	35
Formel 2. CAGR nach United Nations ESCAP (2015, S. 2).....	41

Anhangsverzeichnis

Anhang 1. Dieselbedarf für typische Arbeitsvorgänge in der Landwirtschaft am Beispiel der Erzeugung von Silomais (Pflug, gezogene Saatbettbereitung, Saat, Schlaggröße 10 ha, mittleres Ertragsniveau, mittlerer Boden, 102-k+H19W-Mechanisierung, Hof-Feld-Entfernung 2 km). Eigene Darstellung nach Eckel et al. (2020, S. 14).....	97
Anhang 2. Summe des Dieselbedarfs in der pflanzlicher Erzeugung Deutschlands im Jahr 2021 bei einer Anbaufläche von 14.086.000 ha. Eigene Darstellung nach Eckel et al. (2023, S. 12).	97
Anhang 3. Bereitstellungsoptionen erneuerbarer Kraftstoffe für den Verkehrssektor, inklusive der jeweiligen Ressourcen, Herstellungsverfahren, der Technologiereife (TRL) und resultierender Energieträger. Darstellung verändert nach Dögnitz et al. (2023b, S. 1).....	98
Anhang 4. Beschreibung weiterer alternativer Antriebstechnologien.	101
Anhang 5. Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für landwirtschaftliche Anwendungen bis 2045. Ausgewählte Energieträger des KTBL (Eckel et al., 2023, S. 19, 31; Remmele et al., 2020, S. 87).	103
Anhang 6. Bewertung der Technologie verschiedener Energieträger. Eigene Darstellung nach Dögnitz et al. (2023a, S. 264), Eckel et al. (2023, S. 29f.) und Remmele et al. (2020, S. 87f.).....	104
Anhang 7. Literaturübersicht zur Elektrifizierung der Landwirtschaft. Eigene Darstellung.	105
Anhang 8. Literaturübersicht zur Umweltauswirkungen von E-Traktoren. Eigene Darstellung.	105
Anhang 9. Literaturübersicht zur Weiterentwicklung der Technologien von E-Traktoren. Eigene Darstellung.	106
Anhang 10. Literaturübersicht zu politischen und gesellschaftlichen Aspekten des Einsatzes von E-Traktoren. Eigene Darstellung.	107
Anhang 11. IÖW-Fragebogen zur Abfrage von Daten für die Ökobilanzierung von E-Traktoren im BMWK-geförderten Forschungsvorhaben.....	108
Anhang 12. Werkzeuge zur Validierung eigener Berechnungen, Annahmen und Ergebnisse. Eigene Darstellung.	111
Anhang 13. Übersicht der E-Traktoren mit technischen Angaben der Hersteller*innen und Berechnungen von Performance und Funktionalität des elektrischen Systems. Eigene Darstellung nach Hersteller*innenangaben siehe Anhang 14.....	111
Anhang 14. Quellenverzeichnis der E-Traktoren. Eigene Darstellung.	113
Anhang 15. Übersicht der Steigerung der CO ₂ -Kosten. Eigene Darstellung.	114
Anhang 16. Sensitivitätsanalyse ausgewählter Faktoren der Gesamtkosten von E-Traktoren. Eigene Darstellung.....	115
Anhang 17. Sensitivitätsanalyse ausgewählter Faktoren der Gesamtkosten von Diesel-Traktoren. Eigene Darstellung.....	115
Anhang 18. Fördermöglichkeiten für den Einsatz von E-Traktoren.	116

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AC	Wechselstrom (Alternating Current)
Ah	Amperestunden
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz
CNG	Komprimiertes Methan aus Erdgas oder Biogas (Compressed Natural Gas)
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ eq	Kohlendioxidäquivalent
DC	Gleichstrom (Direct Current)
Destatis	Deutsches Statistisches Bundesamt
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DT-G	Diesel-Traktor groß (hier: leistungsstärker)
DT-K	Diesel-Traktor klein (hier: leistungsschwächer)
€	Euro
E85	Benzin mit einem Anteil von 85 % Ethanol
E-Fuels	Synthetische Kraftstoffe
E-Traktor	Elektrotraktor
ET-G	E-Traktor groß (hier: leistungsstärker)
ET-K	E-Traktor klein (hier: leistungsschwächer)
FAME	Fettsäuremethylester (Biodiesel)
h	Stunde
H ₂	Wasserstoff
ha	Hektar

KBA	Krafftahrt-Bundesamt
kg	Kilogramm
km	Kilometer
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
l	Liter
LCC	Lebenszykluskosten (Life Cycle Cost)
LCOE	Stromgestehungskosten (Levelised Cost of Energy)
Li-Ionen	Lithium-Ionen
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Verflüssigtes Methan aus Erdgas oder Biogas (Liquefied Natural Gas)
LW	Landwirtschaft
MaKost-Rechner	Maschinen- und Reparaturkostenrechner
Mio.	Millionen
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt
o. A.	ohne Angabe
ÖKL	Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung
PS	Pferdestärke
PV	Photovoltaik
s. o.	siehe oben
TCO	Gesamtkosten über die Haltedauer (Total Cost of Ownership)
THG	Treibhausgas
TRL	Technologiereifegrad (Technology Readiness Level)
u. a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
USD	US-Dollar

V	Volt
v. a.	vor allem
z. B.	zum Beispiel

1 Einführung

Die Hälfte der Fläche Deutschlands, rund 18 Millionen Hektar (ha), wird landwirtschaftlich genutzt. Diese Flächen werden bewirtschaftet, um Nahrung zu produzieren und den Grundbedarf der Menschen zu decken. Neben Lebens- und Futtermitteln werden auf deutschen Feldern auch Energiepflanzen angebaut. Die Kultivierung von Nutzpflanzen zur Ernährungssicherung und der Gewährleistung einer zuverlässigen und bezahlbaren Energieversorgung auf gegebener Fläche stehen in Konkurrenz mit begrenztem fruchtbarem Ackerland und Prozessen wie der Urbanisierung, Wohnungsbau und Klimawandel. Verschärft wird dieser Konflikt durch politische Entscheidungen und die Notwendigkeit der Transformation der Energiewirtschaft sowie Veränderungen landwirtschaftlicher Strukturen und der Landnutzung. Diese dynamischen Prozesse bringen immer neue Dimensionen von Landnutzungs-, sowie politischen, sozialen, ökologischen und ökonomischen Konflikten mit sich. Die intensive Nutzung landwirtschaftlicher Flächen und die kontinuierliche Steigerung der Produktionsmengen gehen mit Konsequenzen für die Umwelt, das Klima und den Naturhaushalt einher. Gleichzeitig stehen die Landwirtschaft und der ländliche Raum vor großen Herausforderungen durch demographische Veränderungen, globale Wettbewerbsbedingungen, Klimawandel und gesellschaftliche Erwartungen an eine umweltverträgliche, ressourcenschonende und tiergerechte Landwirtschaft mit unbelasteten Produkten. Eine Neuausrichtung der Landwirtschaft, die Lösungen zur Minimierung der Umweltauswirkungen und zur Bewältigung der aktuellen Unsicherheiten bereithält, ist daher dringend erforderlich. Der von der Politik angestrebte Wandel hin zu regenerativen Energiequellen und umweltfreundlichen Technologien beeinflusst auch den Landwirtschaftssektor und darunter die Landtechnik zunehmend (Ketzner, 2020, S. 3; Pascher et al., 2023, S. 67; Pfaffmann et al., 2021, S. 79; Schneider et al., 2023, S. 2f.; UBA, 2023c, S. 1).

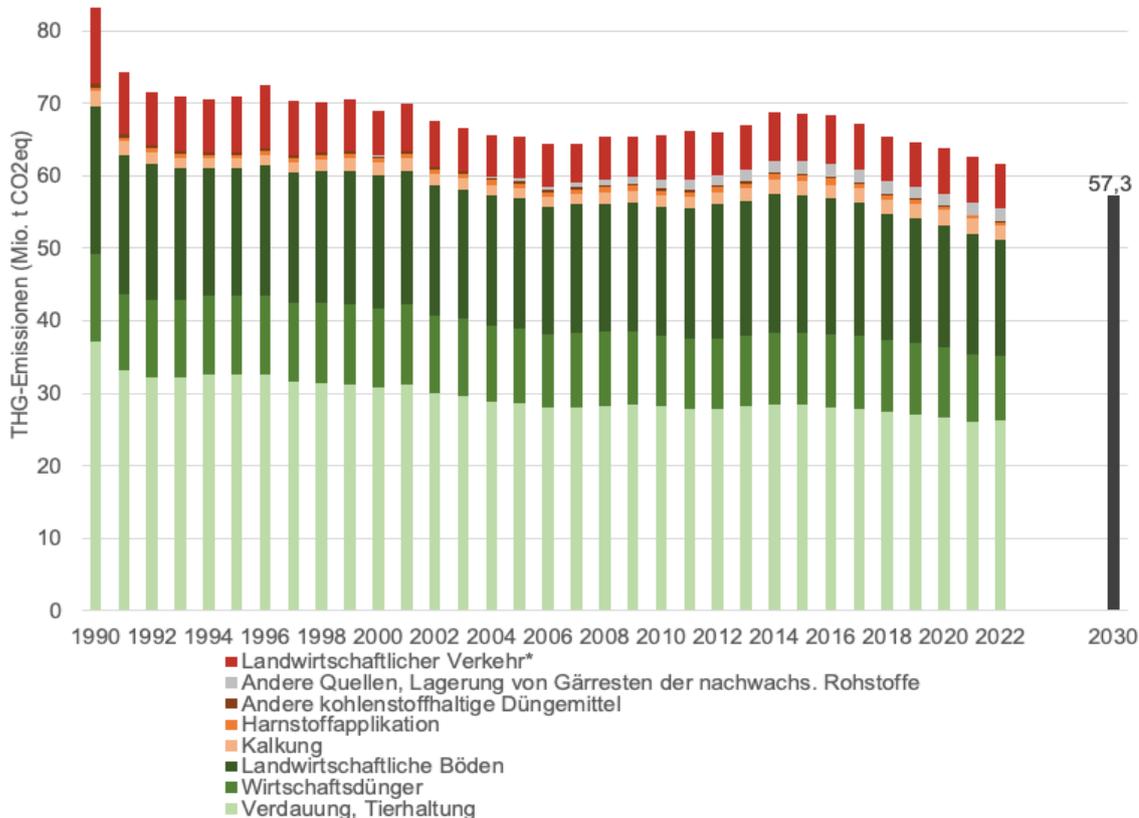
Die moderne Landwirtschaft ist technologisch geprägt durch den Einsatz schwerer Maschinen. Dies ermöglichte einerseits eine Intensivierung der Landwirtschaft, führte jedoch andererseits zu vermehrtem Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln zur Förderung des Pflanzenwachstums, um höhere Erträge zu erzielen. Der Trend zu immer leistungsfähigeren Maschinen bewirkte eine Bewirtschaftung immer größerer Felder, was wiederum die Homogenisierung der Agrarlandschaften mit sich brachte. Dieses „Trilemma“ zwischen Nahrungsmittelproduktion, Energiebedarf und Umweltbeanspruchung verdeutlicht die Notwendigkeit einer nachhaltigen Land- und Energiewirtschaft und einer entsprechenden Agrar- und Energiepolitik. Klimawandel und

Biodiversitätsverluste forcieren die Menschen dazu, ihre Methoden zur Erzeugung und Nutzung von Nahrungsmitteln und Energie, nachhaltig zu verändern. Im Zuge verschärfter Gesetze und Vorgaben bezüglich THG-Emissionen, Lärmbelastung und Schadstoffausstoß steht die Landwirtschaft vor der Herausforderung, innovative Wege einzuschlagen, um den Zielen einer ressourcenschonenden und nachhaltigen Praxis gerecht zu werden (Pfaffmann et al., 2021, S. 79; Schneider et al., 2023, S. 2).

1.1 Problemstellung

In Deutschland werden in Land- und Forstwirtschaft jährlich zwei Milliarden Liter Diesel für den Betrieb von Motoren verbraucht. Pro Liter fallen 2,65 Kilogramm Kohlendioxidäquivalent (kg CO₂eq) an, somit ergeben sich in Summe Emissionen von 6,2 Millionen Tonnen CO₂eq pro Jahr (Mio. t CO₂eq/a). Berücksichtigt werden hier Emissionen aus Ölförderung, Kraftstoffproduktion und -transport. Abb. 1 zeigt die THG-Emissionen der Landwirtschaft nach verschiedenen Sektoren zwischen 1990 und 2022 (Eckel et al., 2020, S. 5; Europäisches Parlament, 2018, S. 155; Pascher et al., 2023, S. 75f.; UBA, 2023c, S. 1).

Abb. 1. THG-Emissionen aus der Landwirtschaft nach Sektoren des Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Eigene Darstellung nach Umweltbundesamt (UBA, 2023a, S. 1).



Anmerkung: Die Emissionen zum landwirtschaftlichen Verkehr enthalten hier auch mobile und stationäre Feuerungen der Land- und Forstwirtschaft und der Fischerei. Grau = Prognose 2030.

Alternative Antriebskonzepte und ein Verzicht auf Diesel als primäre Energiequelle rücken in den Fokus von Politik und Wissenschaft. Insbesondere das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BLE) sowie das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) setzen auf diese technologische Strategie. Eine Verwendung von Biokraftstoffen und erneuerbarem Strom für land- und forstwirtschaftliche Maschinen erscheint sowohl im Hinblick auf Klima-, Umwelt- und Ressourcenschutz als auch im Kontext volkswirtschaftlicher Vorteile als sinnvoll. Letztere beziehen sich besonders auf Beschäftigungseffekte und die Vermeidung von Folgeschäden, die durch den Einsatz fossiler Energieträger entstehen können. Im Rahmen dieser Transformation spielt regenerativer Strom in batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten eine entscheidende Rolle. Die Landwirtschaft bringt indessen die Möglichkeit mit sich, regenerative Energie selbst bereitzustellen und diese lokal für elektrische Antriebe von Maschinen zu nutzen. Entsprechende technische Lösungen werden seit mehreren Jahren von herstellenden Unternehmen wie Fendt und John Deere entwickelt und werden mittlerweile in den Markt eingeführt. Deren batterieelektrische Traktoren zeigen, wie der Austausch von Dieselmotoren und Kraftstofftanks durch Batterien einen Beitrag zur Umsetzung einer ressourcenschonenden Landwirtschaft leisten kann, sofern der eingesetzte Strom aus Erneuerbaren Energien stammt (BMEL, 2021, S. 4; Eckel et al., 2020, S. 8; Engström & Lagnelöv, 2018, S. 182; Frerichs & Buck, 2022, S. 1f.; Neumann, 2024, S. 1; Pfaffmann et al., 2021, S. 79).

Neben nachhaltiger Energiegewinnung ist auch der Energiebedarf eine wichtige Stellenschraube auf dem Weg zur Dekarbonisierung. In der Agrarwirtschaft bieten nachhaltige Antriebssysteme für Landmaschinen die Möglichkeit, den Kraftstoffverbrauch durch verbesserte Effizienz zu senken und gleichzeitig auf alternative Energieträger umzusteigen. Nach Beschluss des EU-Parlaments dürfen Landmaschinen ab 2045 nicht mehr mit fossilen Kraftstoffen betrieben werden (Europäisches Parlament, 2023, S. 1). Eine solche Umstellung funktioniert bei Privatfahrzeugen und leichten Nutzfahrzeugen vor allem (v. a.) über Elektrifizierung. Dies stellt jedoch eine Branche, die von schweren Nutzfahrzeugen dominiert ist, vor Herausforderungen. Fragen zur Herkunft regenerativer Energieträger, Einsatzkonzepten und Maschinen mit adäquater Kapazität und Leistung, welche in der Lage sind, sämtliche Arbeiten den Anforderungen entsprechend auszuführen, sind unzureichend geklärt (Albatayneh et al., 2020, S. 669f.; Engström & Lagnelöv, 2018, S. 182; Schneider et al., 2023, S. 2).

In dieser Arbeit wird der Einsatz von batterieelektrischen Traktoren oder auch Elektrotraktoren, als Elektrifizierungs- und somit Dekarbonisierungsmaßnahme in der

Landwirtschaft näher untersucht. Die folgenden Unterkapitel dienen der Erläuterung der aus der beschriebenen Problemsituation resultierenden Forschungsfragen sowie der Erarbeitung der Zielsetzung dieser Bachelorarbeit und geben einen Überblick über die methodische Vorgehensweise.

1.2 Forschungsfragen

Aus dem Problemaufriss wird deutlich, warum die Dekarbonisierung der Landwirtschaft und damit die Elektrifizierung von Landmaschinen in den Fokus rückt. „Letztlich werden Kosten und Geschäftsmodelle über die Zukunft von Elektroantrieben entscheiden“ (Pickel, 2020, S. 56). Die Wahl der Antriebstechnologie erfolgt in erster Linie anhand der Kosten, wobei ökologische oder soziale Aspekte eine untergeordnete Rolle spielen. Daher stellt die Erforschung dieser Aspekte einen wichtigen Ansatzpunkt dar, um die Technologie großflächig einsetzbar zu machen. Aus dieser Notwendigkeit heraus, die Landwirtschaft ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltiger zu gestalten, resultieren folgende Fragestellungen, die in dieser Arbeit beantwortet werden sollen (Eckel et al., 2020, S. 7; Pfaffmann et al., 2021, S. 78):

- In welchem Umfang sind E-Traktoren bereits auf dem Markt verfügbar und welche Leistungs- und Kapazitätsbereiche sind dabei repräsentiert?
- Wie unterscheiden sich die Gesamtkosten (Total Cost of Ownership, TCO) von E-Traktoren im Vergleich zu konventionellen Diesel-Traktoren und welche spezifischen Kostenfaktoren beeinflussen diese signifikant?
- Welche Handlungsempfehlungen können auf Basis der gesammelten Daten und der Analyseergebnissen für die weitere Marktdiffusion von E-Traktoren abgeleitet werden?

Zur Beantwortung der Fragen dient eine Marktanalyse und eine Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von E-Traktoren im Vergleich zu konventionellen Traktoren. Die in der Untersuchung mithilfe der Total-Cost-of-Ownership-Methode gewonnenen Erkenntnisse sollen einerseits aktuelle Hindernisse und dadurch Optimierungspotentiale zur Weiterentwicklung der Konzepte aufzeigen. Andererseits sollen sie belegen, dass die Ermittlung dieser ökonomischen Kenngrößen eine belastbare Entscheidungsgrundlage für die Anwender*innen darstellt. Auf der Anwendungsseite soll eine optimale Implementierung der elektrifizierten Traktoren gefördert werden. Damit kann der Weg zu einem nachhaltigen und effizienten Umgang mit den vorhandenen Ressourcen geebnet werden. In dieser Arbeit wird somit die Forschungslücke zum Einsatz von E-Traktoren in der Praxis mit besonderem Schwerpunkt auf die Wirtschaftlichkeit angegangen. Zu E-Traktoren ist bislang nur eine geringe Anzahl an Forschungsarbeiten vorhanden. Existierende Studien und Wirtschaftlichkeitsanalysen basieren meist auf Annahmen, Simulationen und älteren

Publikationen, die den neuesten Stand des Marktes nicht berücksichtigen. Dank der Weiterentwicklung von Technologien, volatiler Strom- und Energiekosten sowie sich laufend ändernder Gesetzgebung und Regelungen, gibt es wenige aktuelle Studien, die den Einsatz von E-Traktoren repräsentativ untersuchen. Aktuelle Forschung zu Gesamtkosten von elektrischen Traktoren gibt es bisher nur vereinzelt. Die Berechnungsgrundlagen dieser Studie basieren auf zeitgemäßen Marktdaten, um angemessene Informationen zur Dringlichkeit des Themas zu bündeln und zu projizieren. Der Fokus der Arbeit basiert einerseits auf einer Forschungslücke im Bereich der landwirtschaftlichen Elektromobilität und deren Wirtschaftlichkeit, andererseits auf der Arbeit im Projekt „Landgewinn“. In Projektvorarbeiten wurde die Technologie von batterieelektrisch betriebenen Traktoren für eine genauere Analyse ausgewählt (Basma et al., 2021, S. 2f.; Lagnelöv, Dhillon, et al., 2021, S. 359).

1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist das Erstellen einer Marktübersicht von E-Traktoren und deren Analyse im Hinblick auf technische Eigenschaften. Ein Weiteres Ziel ist die Identifizierung von Kosteneinsparungen oder zusätzlichen Kosten, die beim Einsatz von E-Traktoren in der Landwirtschaft anstelle von herkömmlichen Diesel-Traktoren anfallen. Daraus hervorgehend sollen Chancen und Angriffspunkte für eine Umsetzung der Elektrifizierung von Agrarmaschinen identifiziert werden, um THG-Emissionen des Sektors langfristig zu reduzieren. Der Vergleich des Einsatzes von E-Traktoren mit Diesel-Traktoren in der Landwirtschaft soll mögliche ökonomischen Effekte für Landwirt*innen aufzeigen. Die Akzeptanz und Verbreitung von neuen Konzepten hängen letztendlich von den Kosten ab. Daher ist es entscheidend, dass die Elektrifizierung landwirtschaftlicher Maschinen in Anschaffung und Betrieb wirtschaftlich ist. In dieser Arbeit sollen die ausschlaggebenden Einflussfaktoren auf die Gesamtkosten von E-Traktoren ausfindig gemacht und somit eine Basis zur Ableitung von Maßnahmen geschaffen werden. Hierzu werden aktuelle Entwicklungen, Herausforderungen und Perspektiven der Elektrifizierung mobiler Maschinen in der Landwirtschaft beleuchtet, um einen Beitrag zur Weiterentwicklung dieser zukunftsweisenden Technologien zu leisten (Schwaderlapp, 2017, S. 90).

Um die aktuelle Marktsituation widerzuspiegeln, wird eine Marktanalyse erstellt und um die Einflussfaktoren auf die Kosten ausfindig zu machen, wird der Ansatz der Gesamtkostenrechnung verwendet. Die Datenbasis bilden aktuelle technische und wirtschaftliche Marktdaten auf Grundlage einer Befragung von Hersteller*innen, veröffentlichter Hersteller*innenangaben und Literaturdaten. Inhaltlich können mithilfe der Berechnung der Gesamtkosten und einer Sensitivitätsanalyse spezifischer Kostenfaktoren die

Gemeinsamkeiten und Unterschiede des Einsatzes von E- und Diesel-Traktoren identifiziert und interpretiert werden. Dabei sollen ökologische, sowie finanzielle und soziale Auswirkungen und Aspekte mit aufgegriffen werden. Der Vergleich von E-Traktoren mit Diesel-Traktoren dient hierbei einer wissensbasierten und wertneutralen Einschätzung.

Die vorliegende Arbeit wird im Rahmen des Forschungsprojektes "Landgewinn" des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) verfasst. Das Projekt wird gefördert durch Mittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Ziel des Projekts ist die Analyse von Dekarbonisierungstechnologien an der Schnittstelle von Land- und Energiewirtschaft. Eine der untersuchten Technologien sind batterieelektrische Traktoren als Strategie zur Dekarbonisierung von Landmaschinen (FYI Landgewinn, 2023).

Die Arbeit ist in sieben Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt führt in die Thematik ein und liefert Grundwissen, darauf folgt eine Übersicht des aktuellen Stands von Forschung und Markt. In Kapitel vier werden die Untersuchungsobjekte vorgestellt und in Kapitel fünf wird die Methodik erläutert. Im sechsten Kapitel werden die Ergebnisse der Markt- und TCO-Analyse vorgestellt und im siebten Kapitel werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und diskutiert. Abschließend folgt ein Ausblick mit Anregungen zu möglichen Maßnahmen für die Zukunft. Die Arbeit enthält außerdem eine Liste von Anhängen, in denen unter anderem (u. a.) alle Daten und Annahmen zusammengefasst sind, die zur Quantifizierung der TCO verwendet wurden.

2 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zum Verständnis der Arbeit und zur Beleuchtung der weiteren Schritte gelegt. Zunächst wird in die Thematik des Klimaschutz in der Landwirtschaft eingeführt, es folgt Grundwissen über landwirtschaftliche Betriebskonzepte und Maschinen, eine allgemeine Übersicht über die Grundlagen alternativer Antriebstechnologien landwirtschaftlicher Maschinen und anschließend einige Grundkenntnisse zur Elektrifizierung von Landmaschinen.

2.1 Klimaschutz in der Landwirtschaft

Im Klimaschutzplan 2050 (BMUV, 2016) konkretisiert die Bundesregierung die angestrebten THG-Minderungsziele für verschiedene Sektoren. Bis zum Jahr 2030 soll die Landwirtschaft ihre THG-Emissionen auf 58 bis 61 Mio. Tonnen CO₂eq reduzieren, was einer Verringerung um 31 bis 34 % im Vergleich zum Bezugsjahr 1990 entspricht. Zur Umsetzung des Klimaschutzplans hat die Bundesregierung ein Klimaschutzprogramm mit verschiedenen Maßnahmen aufgestellt. Neben allgemeinen Maßnahmen wie der Steigerung der Energieeffizienz und der Elektrifizierung im Zusammenhang mit klimafreundlichem regenerativem Strom und der CO₂-Bepreisung, wurden einzelne Sektorziele festgelegt. Finanzielle Anreize sollen helfen diese Ziele zu erreichen. Ein wichtiges Instrument zur Zielerreichung im Agrarsektor ist die Energieeffizienz, welche im Bundesprogramm für Energieeffizienz in Landwirtschaft und Gartenbau befördert wird (BMUV, 2016, S. 8, 105, 118; Eckel et al., 2020, S. 4).

Im Bestreben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), die THG-Emissionen aus mobilen Anwendungen der Landwirtschaft zu reduzieren, wird die Einführung eines Klimaschutzprogramms mit zwei integrierten Schwerpunkten vorgeschlagen. Die Energieeffizienz im mobilen Sektor soll gesteigert werden, während gleichzeitig ein Förderprogramm zur Eigenstromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in landwirtschaftlichen Betrieben etabliert wird. Aus jüngsten Diskussionen und Veröffentlichungen geht hervor, dass weitere Einschränkungen bei den THG-Emissionsvorschriften für landwirtschaftliche Anwendungen zu erwarten sind. Besonders im Fokus der Klimaszutzziele ist hierbei die Substitution von Diesel durch regenerativ gewonnenen Strom. Das BMUV will den Einsatz Erneuerbarer Energien umfassend fördern (BMUV, 2019, S. 118f.; Prüfling & Langer, 2022, S. 364).

Ein weiteres Steuerungsinstrument der EU-Kommission ist der Strategieplan der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP), mit dem Klimaschutzleistungen in der Agrarlandschaft gefördert werden sollen. In der aktuellen Förderperiode von 2023 bis 2027 stehen dafür

EU-weit jährlich 55 Mrd. € und in Deutschland 6,1 Mrd. € zur Verfügung. Im Green Deal der EU-Kommission wurden Klimaschutz und -anpassung als zentrale Politikziele erklärt. Ferner hat der Bundestag zur Einhaltung der nationalen und europäischen Klimaziele ein Bundes-Klimaschutzgesetz verfasst, um im Einklang mit dem Pariser Klimaabkommen den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf idealerweise 1,5 Grad Celsius zu beschränken und dabei ökologische, soziale und ökonomische Aspekte zu berücksichtigen. Im Agrarsektor ist das konkrete Ziel für 2030 laut dem KSG eine Reduzierung der jährlichen Emissionen auf 56 Mio. Tonnen, was auf dem Ziel beruht, die Jahresemissionen im Vergleich zu 1990 um mindestens 65 % zu reduzieren und bis 2040 um mindestens 88 %. Im Jahr 2020 lag die Grenze noch bei 70 Mio. Tonnen. Da die THG-Emissionen in der Landwirtschaft jedoch größtenteils auf natürlichen physiologischen Prozessen, wie zum Beispiel (z. B.) Verdauungsvorgängen oder der Kalkung von Böden, beruhen, ist deren Minderung durch technische Maßnahmen nur begrenzt möglich (BMUV, 2019, S. 103; Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), 2019, S. 2f., 10; Pascher et al., 2023, S. 75f., 80; UBA, 2023c, S. 1; Wiegmann et al., 2023, S. 13, 17).

Ein Handlungsspielraum für technischen Umweltschutz liegt im Bereich der THG-Emissionen aus Verbrennungsvorgängen. Bei einem konventionellen landwirtschaftlichen Traktor fallen die größten Umweltauswirkungen in der Nutzungsphase an, genauer gesagt durch den Dieserverbrauch und die Abgase. Deshalb ist die Substitution der fossilen Energieträger und ein Umstieg auf erneuerbare Energieträger, worunter auch die Elektrifizierung landwirtschaftlicher Maschinen fällt, hierbei maßgeblich. Den oben genannten Gesetzen, Regelungen und Maßnahmen zufolge, müssen Landmaschinen ab 2045 ohne fossile Brennstoffe betrieben werden. Die Elektrifizierung von Traktoren ist hierbei aus Sicht von John Deere, einem führenden herstellenden Unternehmen von Landmaschinen, eine zentrale Strategie „Als wesentlicher anfänglicher Schritt auf dem Weg zu einer generellen Elektrifizierung von Landmaschinen“ (Pickel, 2020, S. 51, [Manager External Relations bei John Deere]) (Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), 2019, S. 3; Engström & Lagnelöv, 2018, S. 182; Frerichs & Buck, 2022, S. 2; Pickel, 2020, S. 51).

2.2 Landwirtschaftliche Betriebskonzepte und Antriebssysteme

In der Landwirtschaft gibt es verschiedene Bereiche und Betriebskonzepte. Betriebe können in zahlreichen individuellen Aspekten, wie z. B. Betriebsgröße oder durchschnittliche Feldgröße, variieren. Darüber hinaus ist beim Betriebskonzept zwischen konventioneller und biologischer Landwirtschaft zu unterscheiden, was Unterschiede in Anbau- und Bearbeitungsform mit sich bringt. Als weiterer betrieblicher Einflussfaktor ist die

Energieversorgung zu betrachten. Hier kann zwischen Eigen- und Fremdversorgung differenziert werden. Innerhalb der beschriebenen Faktoren erfolgt die Strukturierung des Prozess- und Maschinenkonzepts durch verschiedene Faktoren wie Prozessablauf, Mobilitätsarten und -konzept, Energieversorgung der Maschine und Automatisierungsgrad. Die Berücksichtigung der unterschiedlichen Strukturen erfordert eine Vielfalt an land- und forstwirtschaftlichen Maschinen (Frerichs & Buck, 2022, S. 3).

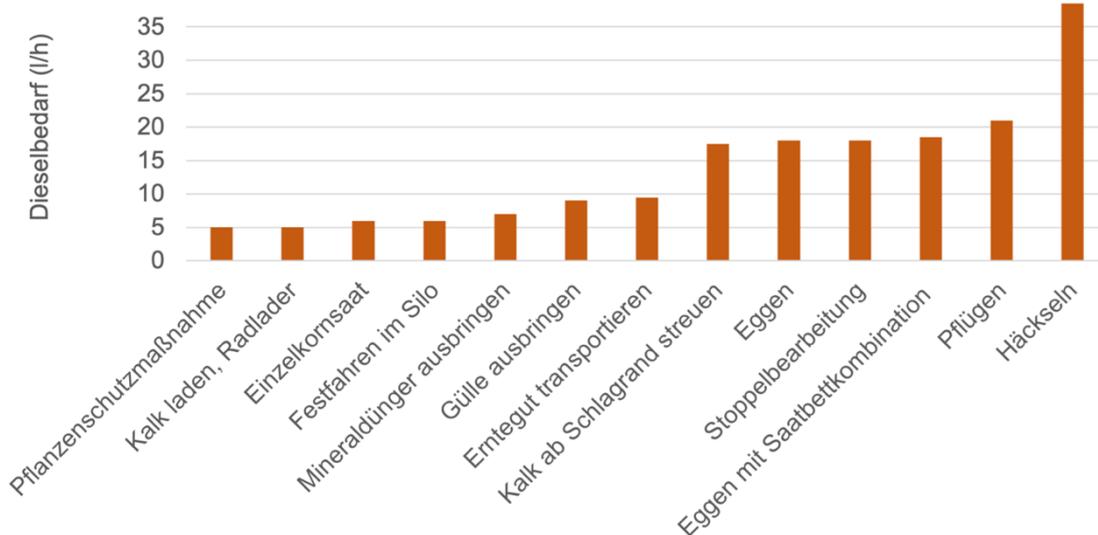
Das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) charakterisiert Fahrzeuge, „die nach ihrer Bauart und Ausrüstung auch zum Schieben, Tragen oder Antreiben von auswechselbaren Geräten für land- oder forstwirtschaftliche Arbeiten bestimmt [sind]“ (KBA, 2022, S. 102) als land- oder forstwirtschaftliche Zugmaschinen auf Rädern. Es gibt zahlreiche verschiedene Traktormodelle, darunter fallen Standard-, Kompakt-, Schmalspurtraktoren und Lader. Diese werden zum Laden und Transport von verschiedenen Gütern verwendet. Kompakttraktoren sind Traktoren mit einem kleineren Fahrgestell, geeignet zum Ziehen von leichten Anhängern oder für den Einsatz bei beschränkten Platzverhältnissen. Schmalspurtraktoren sind ebenso kleine Traktoren von geringer Breite für den Einsatz bei besonders schmalen Platzverhältnissen. Die meisten Traktoren sind Allradtraktoren (Antrieb auf allen vier Rädern) und werden mit Diesel betrieben. Kohle, Erdöl, Erdgas und einige weitere Rohstoffe werden als fossile Energieträger oder, nach deren Weiterverarbeitung zu Diesel und Benzin, als fossile Brennstoffe bezeichnet. Bei deren Verbrennung wird Energie freigesetzt und Kohlenstoffdioxid (CO₂) an die Luft abgegeben. Verbrennungsmotoren sind Maschinen zur Umwandlung von chemischer Energie in mechanische Energie. Meist werden dabei Benzin oder Diesel als Kraftstoffe verwendet. Energieträger sind Substanzen, deren Energiepotential durch Umwandlungsprozesse genutzt werden kann. Der Begriff bezieht sich in dieser Arbeit auf Kraftstoffe sowie Strom. Erneuerbare Energieträger umfassen sämtliche Energieträger, die aus erneuerbaren Ressourcen stammen, darunter Biokraftstoffe, regenerativer Strom, durch Elektrolyse gewonnener Wasserstoff (H₂) und E-Fuels. Letztere sind Treibstoffe, die durch die Herstellung mithilfe von Elektrolyse aus Strom, Wasser und gegebenenfalls anderen Ressourcen wie CO₂ entstehen (Benlafqih, 2022, S. 1; Dögnitz et al., 2023a, S. 267; GoClimate, 2021, S. 1; Schreiner, 2017, S. 1).

Nach dem KSG (Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), 2019, S. 2) sind THG neben CO₂, Methan, Distickstoffoxid, Schwefelhexafluorid, Stickstofftrifluorid, teil- und perfluorierte Kohlenwasserstoffe. THG-Emissionen sind demzufolge „die anthropogene Freisetzung von THG in Tonnen Kohlendioxidäquivalent, wobei eine Tonne CO₂eq eine Tonne CO₂ oder die Menge eines anderen THGs ist, die in ihrem Potential zur Erwärmung der

Atmosphäre einer Tonne Kohlendioxid entspricht“ (Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), 2019, S. 2). CO₂eq ist eine Maßeinheit, die die Klimawirkung verschiedener THG über einen bestimmten Zeitraum vereinheitlicht (Dögnitz et al., 2023a, S. 267).

Im Sektor Landwirtschaft ist eine Kategorie der THG-Emissionsquellen die „Verbrennung von Brennstoffen“ (Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), 2019, S. 10), also die Kraftstoffverbrennung. Der Kraftstoffverbrauch in der Landwirtschaft ist zu drei Vierteln der pflanzlichen Erzeugung zuzuordnen, je ein Drittel leichten Arbeiten mit einem geringen Kraftstoffverbrauch (weniger als 5 Liter pro Hektar (l/ha)), ein Drittel mittelschweren Arbeiten (5 bis 15 l/ha) und ein Drittel schweren Tätigkeiten (über 15 l/ha). Das folgende Diagramm führt einige dieser Tätigkeiten mit deren durchschnittlichen Dieselbedarf auf, in diesem Fall bezogen auf die Arbeitszeit in Stunden. Sichtbar wird, dass Vorgänge wie die Düngung (Mineraldünger ausbringen) und der Pflanzenschutz deutlich weniger Kraftstoff benötigen als die Bodenbearbeitung (Eggen, Stoppelbearbeitung, Pflügen) oder die energieintensive Ernte (Erntegut transportieren, Häckseln). Weitere Informationen zum Dieselbedarf landwirtschaftlicher Maschinen finden sich in Anhang 1 und zum gesamten landwirtschaftlichen Dieselbedarf in Deutschland in Anhang 2 (Eckel et al., 2023, S. 6, 13, 15).

Abb. 2. Dieselbedarf verschiedener Arbeitsvorgänge in der Landwirtschaft. Eigene Darstellung nach Eckel et al. (2023, S. 14).



In direkter Relation zu Diesel- beziehungsweise (bzw.) Energieverbräuchen stehen die Leistungen der eingesetzten Maschinen. Die nachfolgende Übersicht zeigt den Bestand land- und forstwirtschaftlicher Zugmaschinen in Deutschland im Jahr 2022.

Abb. 3. Anteile der verschiedenen Leistungsklassen am Gesamtbestand land- und forstwirtschaftlicher Zugmaschinen in Deutschland im Jahr 2022. Eigene Darstellung nach KBA (2022, S. 54f.).

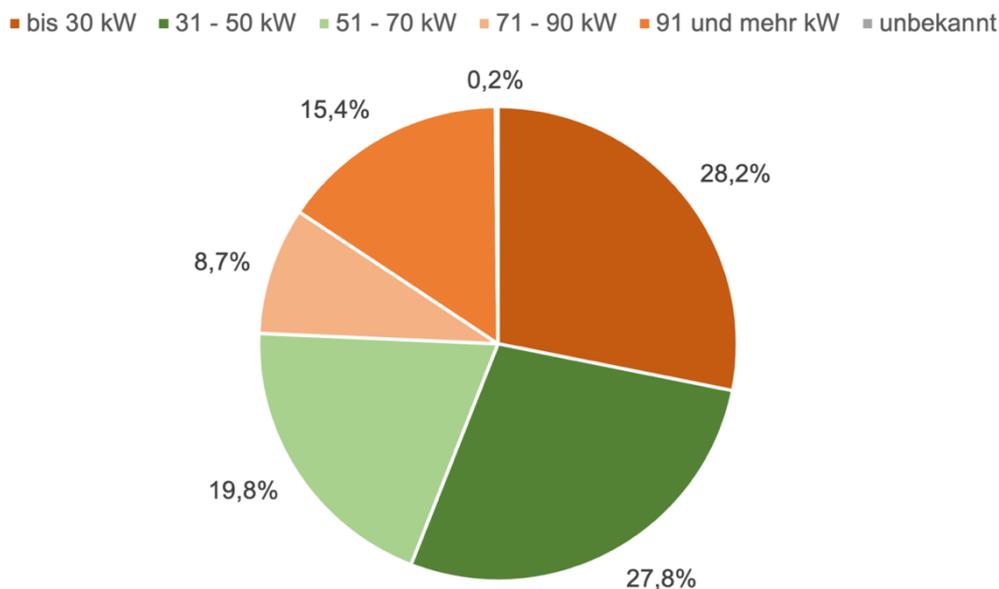


Abb. 3 zeigt, dass kleineren Zugmaschinen in Deutschland im Jahr 2022 über die Hälfte des Bestands ausmachen. Etwa 28 % des Gesamtbestands sind Maschinen mit einer Leistung bis 30 Kilowatt (kW) und weitere 28 % sind Maschinen mit 31 bis 50 kW Leistung. Größere, leistungsstärkere Maschinen machen einen wesentlich kleineren Anteil von rund 15 % aus. Zahlen des KTBL zufolge nimmt jedoch die Anzahl an Zulassungen größerer Traktoren, mit Leistungsklassen über 90 kW zu, wohingegen Traktorzulassungen mit Leistungen zwischen 30 und 59 kW abnehmen. Die Relevanz einer schnellen, gut geregelten Umstrukturierung der Landwirtschaft wird bei der Betrachtung der Lebenszeiten von Traktoren sichtbar. Etwa 66 % der land- und forstwirtschaftlichen Zugmaschinen haben ein Fahrzeualter von 15 oder mehr Jahren. Investitionen, die aktuell getätigt werden, prägen die Branche somit bis über 2035 hinaus (Eckel et al., 2023, S. 23f.; KBA, 2022, S. 30f., 54f.).

In Kapitel 2.3 werden verschiedene alternative Energieträger und Antriebstechnologien vorgestellt, um einen Überblick über die Möglichkeiten der Dekarbonisierung landwirtschaftlicher Maschinen zu schaffen.

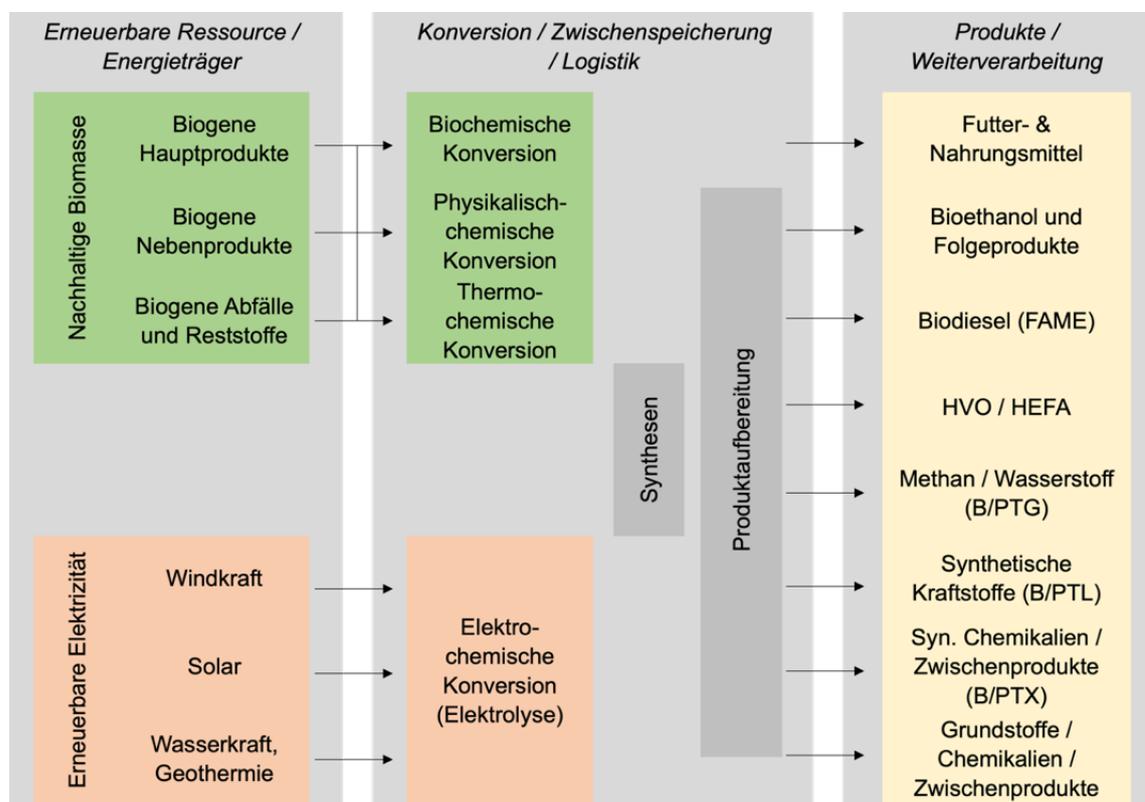
2.3 Rolle alternativer Antriebstechnologien

Um erneuerbare Antriebstechnologien sinnvoll in der Landwirtschaft einsetzen zu können, müssen verschiedene Grundbedingungen erfüllt werden. Die Antriebssysteme müssen aktuellen und zukünftigen Anforderungen an Funktion und Leistung bezüglich

der Bewirtschaftungsformen, Betriebsstrukturen und Betriebsgrößen von landwirtschaftlichen Maschinen gerecht werden. Außerdem ist es entscheidend, dass sie auf landwirtschaftlichen Betrieben sowie bei landwirtschaftlichen Dienstleister*innen für die herkömmlichen Arbeitsvorgänge einsetzbar sind. Die Kosten müssen dabei in dem für die Akteur*innen realistischen Rahmen liegen, was bedeutet, um Produktpreise halten zu können, darf der Einsatz nicht teurer sein als der von herkömmlichen Diesel-Systemen. Zudem müssen die Systeme eine hohe Resilienz gewährleisten, um in der Nahrungs-, Rohstoff- und Energieproduktion nutzbar zu sein. Es muss stetiger, ausfallfreier und wartungsarmer Betrieb garantiert sein. Neben dem direkten Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen werden derzeit verschiedene flüssige und gasförmige Kraftstoffe in Betracht gezogen. Diese werden üblicherweise, gemeinsam mit anderen, in erneuerbaren (Bio-)Raffinerien produzierten Koppel- und Nebenprodukten oder mittels Elektrolyse von Wasser hergestellt (Eckel et al., 2023, S. 8, 16; Thuneke & Remmele, 2021, S. 32).

Abb. 4 stellt eine vereinfachte Übersicht der Technologien und möglicher Synergien zwischen biomasse- und strombasierten Technologien dar. Stoffflüsse von CO₂, Sauerstoff und Wasserstoff sind in Anhang 3 genauer aufgeführt.

Abb. 4. Übersicht der Technologieoptionen von Antrieben auf Basis erneuerbarer Ressourcen. Eigene Darstellung nach Eckel et al. (2023, S. 16).



Anmerkung: FAME = Fettsäuremethylester; HVO/HEFA = Hydroprozessiertes Pflanzenöl/Ester und Fettsäuren; B/PTG = Biomass-/Power-to-Gas; B/PTL = Biomass-/Power-to-Liquids; B/PTX = Biomass-/Power-to-X.

Für die landwirtschaftliche Praxis stehen diverse alternative Antriebstechnologien zur Wahl, welche sich in ökologischen und ökonomischen Aspekten unterscheiden. Der Agrarsektor steht vor der Herausforderung, geeignete und nachhaltige Antriebskonzepte für Maschinen zu identifizieren. Die Schwierigkeit liegt hier v. a. auf der mobilen Maschinerie. Aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit ist eine Vorstellung verschiedener Antriebstechnologien nur in Anhang 4 zu finden.

In Tabelle 1 werden die wichtigsten alternativen Energieträger für Landmaschinen nach deren technologischen Entwicklungsstand, dem TRL (Technology Readiness Level), Wirkungsgrad und Umsetzbarkeit verglichen. Der TRL kann zwischen Stufe 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) bis Stufe 11 (Marktstabilität) variieren. Konventioneller Diesel wird mit TRL 11 eingestuft und hat einen vergleichsweise mittleren Wirkungsgrad von 32 %. Statt dem Volumen von einem Liter (l) Diesel mit einem Gewicht von 0,83 kg als Vergleichsgröße und 9,9 Kilowattstunden (kWh) Energie, die im Tank vorhanden ist, werden für denselben Arbeitsvorgang etwa 5,58 l und 0,2 kg Wasserstoff oder 12,79 l und 20,08 kg elektrische Batterie benötigt. Wasserstoff ist in der Mitführung auf einem Fahrzeug somit leichter, aber benötigt mehr Lagervolumen und speichert 6,4 kWh Energie im Tank. Mitgeführte Batterien sind deutlich schwerer und größer als ein herkömmlicher Diesel-Tank und führen nur 3,9 kWh Energie mit. Entscheidend ist hierbei jedoch noch der Wirkungsgrad des Antriebssystems, welcher bei Batterien mit Elektromotor mit 81 % deutlich höher liegt als bei konventionellen Dieselmotoren, wo dieser bei 32 % liegt (Eckel et al., 2023, S. 14).

Tabelle 1. Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für landwirtschaftliche Anwendungen bis 2030. Ausgewählte Energieträger des KTBL (Eckel et al., 2023, S. 19, 31; Remmele et al., 2020, S. 87).

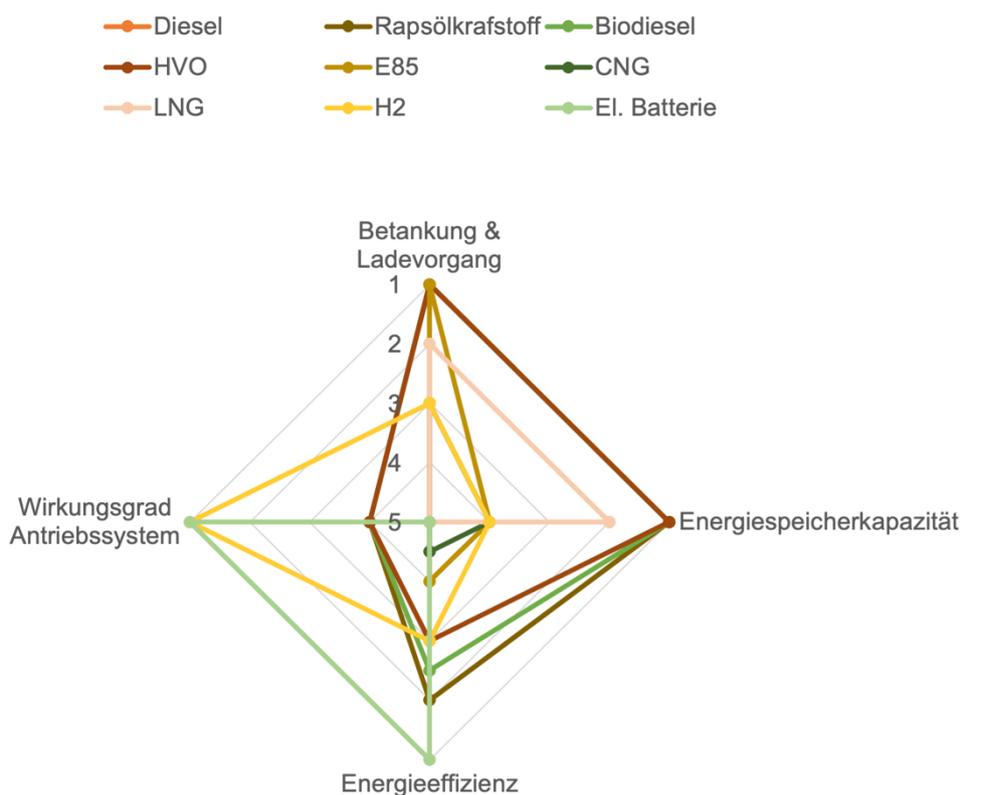
2030	TRL	Wirkungs- grad	Leichte Arbeiten	Mittelschwere Ar- beiten	Schwere Arbeiten
Antriebsleistung		%	≤ 80 kW	40 - 200 kW	≥ 150 kW
Energieträger Antriebsform					
Regenerativer Strom Batterie (Li-Ionen-Akku) und Elektromotor	11	81 (hoch)			
Pflanzenöl Verbrennungsmotor	11	32 (mittel)			
Biodiesel Verbrennungsmotor	11	32 (mittel)			
HVO-Diesel Verbrennungsmotor	9 bis 11	32 (mittel)			
FT-Diesel Verbrennungsmotor	6 bis 7	32 (mittel)			
CNG (Methan) Verbrennungsmotor	6 bis 7	24 (niedrig)			
LNG (Methan) Verbrennungsmotor	6 bis 7	24 (niedrig)			
Wasserstoff Brennstoffzelle und Elektromotor	9 bis 11	49 (mittel)			

Anmerkung: Li-Ionen-Akku = Lithium-Ionen-Akkumulator; CNG = Komprimiertes Methan aus Erdgas oder Biogas (Compressed Natural Gas); LNG = Verflüssigtes Methan aus Erdgas oder Biogas (Liquefied Natural Gas). Grün = umsetzbar, orange = teilweise umsetzbar, grau = Geeignete erneuerbare Energieträger und dazu passende Antriebe sind nicht verfügbar. Ausführliche Erläuterung der Farbmarkierung in Anhang 5.

Wichtiger Gesichtspunkt bei der Auswahl einer Antriebstechnologie ist der Kostenfaktor. Aufgrund mangelnder Marktangebote und Nachfrage sind aktuell wenige verlässliche Marktpreise für Maschinen mit erneuerbaren Antriebsenergien bekannt. Investitions- und Umrüstkosten variieren je nach Antriebsart, wobei Maschinen mit elektrischem Antrieb etwa 30 bis 40 % teurer sind als konventionelle Vergleichsmaschinen. Kosten für Lagerung und Betankung sind für flüssige Kraftstoffe vergleichbar, während Anlagen für gasförmige Kraftstoffe wie CNG, LNG und Wasserstoff wesentlich teurer sind und zusätzliche Sicherheitsprüfkosten mit sich bringen können. Bei der Betrachtung von Umweltauflagen werden, v. a. je strenger diese sind, Pflanzenölkraftstoff, Biodiesel, Methan, Wasserstoff und Strom bevorzugt. Letztere sind besonders geeignet, wenn luftschadstofffreie Anwendungen erforderlich sind. Die Europäische Union weist hohe Anlagenkapazitäten für Pflanzenöle, Biodiesel, hydrierte Pflanzenöle und Biomethan auf. Zukünftige Trends hängen stark vom rechtlichen Rahmen und den internationalen Märkten ab (Dögnitz et al., 2023a, S. 237; Eckel et al., 2023, S. 19f., 23, 29, 32; Thuneke & Remmele, 2021, S. 31).

Abb. 5 vergleicht die Antriebstechnologien bzw. Energieträger bezogen auf verschiedene Aspekte mit Bewertungskriterien von 1 bis 5, wobei 1 der höchste und somit beste und 5 der, entsprechend der Kategorie, schlechteste Wert ist. Weitere Kriterien werden in Abbildungen in Anhang 6 dargestellt.

Abb. 5. Bewertung verschiedener Energieträger. Eigene Darstellung nach Dögnitz et al. (2023a, S. 264), Eckel et al. (2023, S. 29f.) und Remmele et al. (2020, S. 87f.).



Anmerkung: Betankung & Ladevorgang: 1 = schnell, große Energiemenge, 5 = langsam, geringe Energiemenge; Wirkungsgrad Antriebssystem: 1 = hoch, 5 = niedrig; Energiespeicherkapazität: 1 = hoch, 5 = gering; Energieeffizienz: 1 = hoch, 5 = niedrig. Sind die Linien nicht visuell unterscheidbar, liegt eine Überschneidung vor.

Die Bewertung von Diesel liegt für Betankung und Ladevorgang bei hoch (1), für die Energiespeicherkapazität bei hoch (1), für die Energieeffizienz bei relativ hoch (2) und für den Wirkungsgrad des Antriebssystems bei relativ niedrig (4). Neben den in der Abbildung genannten Aspekten sind viele weitere dafür entscheidend, ob eine Technologie zukunftsfähig und im großen Stil einsetzbar wäre. Zu den Faktoren, die berücksichtigt werden müssen, gehören u. a. die Verfügbarkeit der benötigten Rohstoffe, der elektrischen Energie, der Technologien für die Bereitstellung der erforderlichen Energieträger sowie die Präsenz dieser Energieträger auf dem Markt. Ebenfalls wichtig ist die Frage, inwieweit die Maßnahmen zeitlich umsetzbar sind. Bei der Bewertung dieser Aspekte sollte auch der Gesamtwirkungsgrad beziehungsweise die möglichen Verluste

einbezogen werden, da diese einen direkten Einfluss auf die Betriebskosten haben. LNG und H₂ sowie die entsprechenden Technologien zur Bereitstellung sind derzeit noch limitiert verfügbar. Am Markt mangelt es an Angebot von E85 (Benzin mit einem Anteil von 85 % Ethanol), CNG, LNG und H₂, das Angebot von Strom und Diesel hingegen ist groß. Im Kontext vermehrter Anwendung einer Technologie, ist der spezifische Flächenverbrauch zu beachten, da dies ein begrenzender Aspekt sein kann. Die batterieelektrischen Antriebe schneiden hierbei am besten ab, wobei entscheidend ist, aus welcher Form der Erneuerbaren Energien der Strom bezogen wird, da diese auch sehr flächenintensiv sein können (Eckel et al., 2023, S. 87f.; Schmid, 2023, S. 41).

Die Entscheidung für einen Energieträger wird, neben den Kosten, maßgeblich von den THG-Emissionen beeinflusst. Biodiesel und HVO, die aus Altspeiseölen und Fettsäurereste hergestellt werden, E85 aus Stroh, sowie Bio-CNG, hergestellt aus Rest- und Abfallstoffen, und regenerativ gewonnener Wasserstoff verursachen die geringsten THG-Emissionen beim Einsatz in Antriebssystemen. Laut Remmele et al. (2020, S. 98) ist es ratsam, die Weiterentwicklung von Antriebstechnik stets unter dem Aspekt der THG-Emissionen zu bewerten. Der konstruktive Wettbewerb zwischen verschiedenen Systemen wird zeigen, welche zukunftsfähig für die Landwirtschaft sind. Energieeinsparung bleibt dabei ein grundlegendes Ziel. Im folgenden Kapitel wird näher auf den Einsatz von Strom als Energieträger eingegangen (Remmele et al., 2020, S. 96f.).

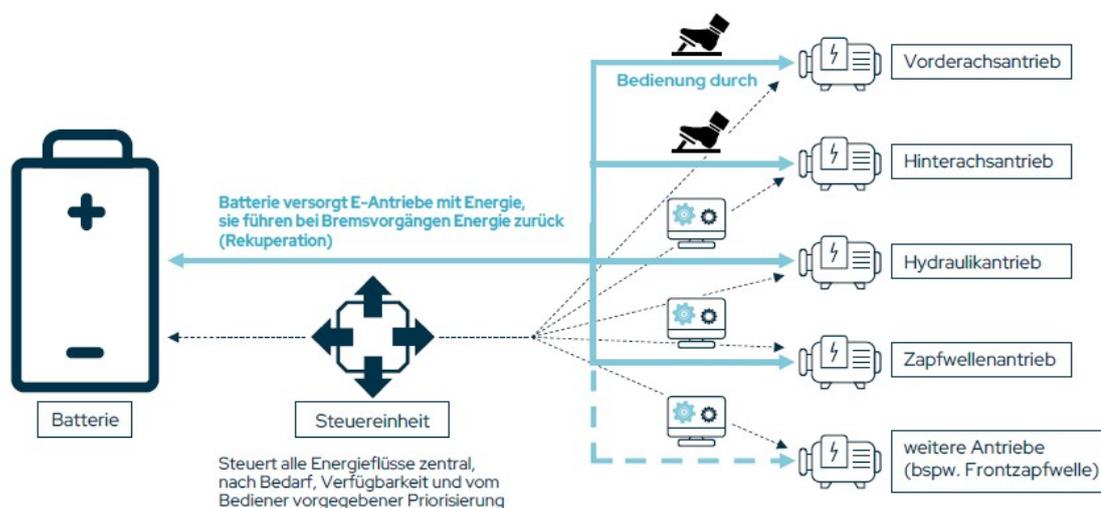
2.4 Rolle der Elektrifizierung mobiler Landmaschinen

Gemäß des KTBL (2023, S. 31f.) wird die Elektrifizierung von Antrieben bevorzugt, wo dies technisch sinnvoll und praktisch umsetzbar ist. Der Einsatz von regenerativem Strom gilt dabei aufgrund seines hohen energetischen Wirkungsgrades und der, insbesondere bei Eigenstromnutzung, niedrigen Energiekosten als bevorzugte Option. Dies ermöglicht eine gezieltere Verwendung der begrenzten und energiedichteren flüssigen Kraftstoffe in Bereichen, in denen keine Elektrifizierung nicht möglich ist (Pickel, 2020, S. 57).

E-Traktoren des aktuellen Stands der Technik unterscheiden sich in der Fahrzeugstruktur aus Gründen der Simplizität meist nicht wesentlich von herkömmlichen Diesel-Traktoren. Der Diesel-Motor und dessen Komponenten werden durch den zentralen Elektromotor, dessen Traktionsbatterieeinheit und der zugehörigen Leistungselektronik ersetzt. Bei elektrischen Antrieben kann zwischen verschiedenen hybriden, vollelektrischen, elektrisch-mechanischen und dieselektrischen Modellen, Generatorkonzepten,

Batterie- und Brennstoffzellen-Antrieben unterschieden werden. Bei den hybriden Modellen unterstützt ein Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle die Batterie und kann somit die Reichweite der Fahrzeuge vergrößern. Vollelektrische Konzepte setzen statt Verbrennungsmotor einen oder mehrere Elektromotoren ein. Anstelle eines Kraftstofftanks kommt eine Batterie zum Einsatz, deren begrenzte Energiedichte jedoch die Betriebsdauer beschränkt und bei steigenden Leistungen hohe Gewichte der Batterien und somit auch große Volumina mit sich bringt. Daher ist der Einsatz batterieelektrische Ansätze bisher hauptsächlich bei kleineren Fahrzeugen mit niedrigen Leistungsanforderungen möglich (DLG, 2023, S. 1; Eckel et al., 2023, S. 31f.; Remmele et al., 2020, S. 58; Stirnimann, 2020, S. 48).

Abb. 6. Funktionsweise eines batterieelektrischen Antriebs. Darstellung verändert nach Tadus (2023, S. 1).



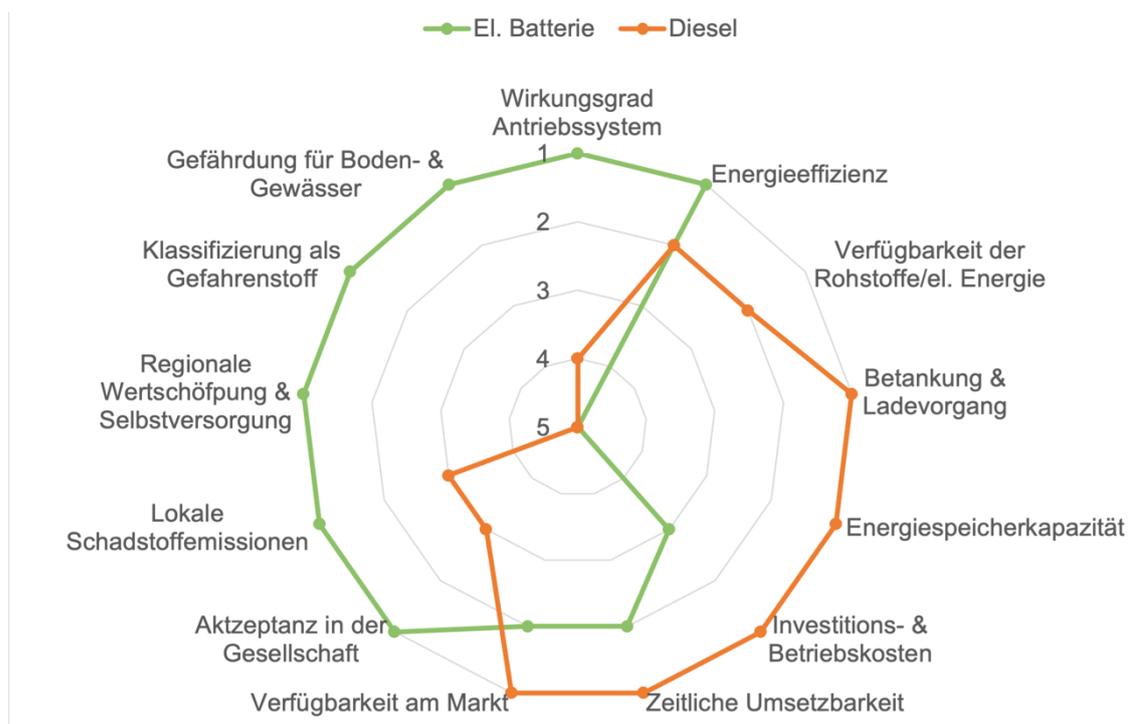
Wie in Abb. 6 erkenntlich, besteht ein batterieelektrisches Antriebssystem aus ein oder mehreren Elektromotoren, bisher einer Traktionsbatterie und der Leistungselektronik. Je nach Fahrzeugaufbau werden die Antriebseinheiten unterschiedlich angesteuert. Fahrtrieb, Zapfwellen und Hydraulik haben hier jeweils einen Motor vorgeschaltet. Die Batterie wird normalerweise extern aufgeladen und die Anbaugeräte erhalten ihren Antrieb entweder über eine Gelenkwelle oder durch direkte elektrische Leistungszufuhr. Funktionen wie Lenken und Bremsen werden von einem Hydrauliksystem übernommen (Tadus, 2023, S. 1; Woopen, 2018, S. 32; Woopen et al., 2019, S. 24, 35f.)

Elektrische Antriebe bieten die Möglichkeit, lokal emissionsfrei und geräuscharm zu arbeiten. Folglich entfallen toxische Emissionen, wie Ruß, Kohlenwasserstoffe, Kohlenstoffmonoxid und -dioxid und Stickoxide, aber auch umweltschädliche Öl- und Fettausstritte werden vermieden. Dies ist förderlich für den präventiven Boden- und Gewässerschutz. Die Reduktion von Lärmemissionen ist nicht nur für Menschen und Umwelt

vorteilhaft, sondern auch für die Tierhaltung. Das Potential zur Minderung von THG-Emissionen, in diesem Fall v. a. CO₂, während der Nutzung ist beträchtlich, allerdings geht mit der Produktion der Batterien eine erhebliche Emissionsbelastung einher. Die Recycling-Infrastruktur für Batterien befindet sich noch im Aufbau, und zusätzlich müssen die Umweltauswirkungen der Bereitstellung von seltenen Erden für die Batterieproduktion berücksichtigt werden. Elektromotoren zeichnen sich, über die Emissionsreduktion hinaus, durch eine geringere Produktion von Abwärme, ihre präzise Steuer- und Regelbarkeit und den hohen Wirkungsgrad, sprich die Effizienz, aus. Dies führt zu wartungsarmen Betriebsabläufen und somit einer geringen Verschleiß- und Reparaturanfälligkeit. Auch weniger bewegliche und somit verschleißanfällige Teile im System tragen dazu bei. Der Zugang zu Erneuerbaren Energien und die Möglichkeit der Verwendung selbst gewonnenen Stroms ist ein weiterer Vorteil elektrisch betriebener Maschinen, der zudem mit Kosteneinsparungen einhergeht. Allerdings ist die begrenzte Energiedichte von Batterien eine Herausforderung und beschränkt die Reichweite sowie die ununterbrochene Einsatzdauer, insbesondere bei schweren Arbeiten. Was bei Privatfahrzeugen durch Elektrifizierung substituierbar ist, wird bei schweren mobilen Maschinen, wie z. B. Traktoren, komplizierter. Es ist eine Herausforderung, ein adäquates mobiles Maschinenkonzept zu entwickeln, das schwere Arbeiten ohne Verbrennungsmotor ausführen kann (DLG, 2023, S. 1; Eckel et al., 2023, S. 3; Oppenhäuser, 2023, S. 1; Pickel, 2020, S. 56; Remmele et al., 2020, S. 71, 93; Schneider et al., 2023, S. 2; Wochinger, 2023, S. 48).

Abb. 7 vergleicht den Einsatz von Strom in elektrischen Batterien als Antriebssysteme mit dem Einsatz von Diesel bezogen auf verschiedene Aspekte mit Bewertungskriterien von 1 bis 5, wobei 1 der höchste und somit beste und 5 der schlechteste Wert ist. Die Gegensätzlichkeit der beiden Systeme kann hier deutlich gemacht werden.

Abb. 7. Einordnung und Bewertung von elektrischen Antrieben im Vergleich zur Diesel-Variante. Eigene Darstellung nach Remmele (2020, S. 87f.).



Anmerkung: 1 = hoch, 5 = niedrig; weitere Erläuterungen in Anhang 6.

Die Substitution fossilen Dieselmotors durch erneuerbare Kraftstoffe oder regenerativen Strom in Traktoren und anderen mobilen Maschinen kann, neben gesteigerter Energieversorgungssicherheit, auch die Nahrungsmittelproduktion sicherstellen und die regionale Wertschöpfung fördern. Agrarbetriebe können die Abhängigkeit von Importen fossiler Brennstoffe reduzieren, was zusätzlich lokale Wirtschaftskreisläufe fördert und Arbeitsplätze schafft. Die Elektrifizierung von Landmaschinen ist herausfordernder als bei Privatautos, v. a. wegen des höheren Energiebedarfs während kurzer Zeiträume wie der Feldarbeit und Ernte. Daher stellt sich die Frage nach der Akzeptanz dieser Technologie durch Landbesitzer, Landwirte und die Gesellschaft (Eckel et al., 2020, S. 3; Schneider et al., 2023, S. 2).

Die Nutzung von elektrischem Strom erscheint aufgrund des hohen Wirkungsgrads zunächst vorteilhaft. Allerdings relativiert sich dieser Vorteil aufgrund des aktuell hohen Aufwands für die Batterieproduktion sowie des noch überwiegend nicht erneuerbaren Strommix. Perspektivisch sind jedoch Verbesserungen durch Klimaschutzvorgaben und die Umstellung auf Erneuerbare Energien zu erwarten. Die direkte Versorgung elektrisch betriebener Maschinen aus eigenen erneuerbaren Energiequellen wird als ökologisch und ökonomisch sinnvoll und nachhaltig betrachtet. Zusätzlich mitgeführte Batterien können zur Pufferung und möglicher Netzstabilisierung dienen, was beim Umstieg auf

Erneuerbare Energien erstrebenswert ist, da Energiegewinnung und -nutzung eine zeitliche Differenz aufweisen und Pufferspeicher zunehmend erforderlich sind. Somit wäre es möglich, dass auch größere landwirtschaftliche Betriebe am Primärregelleistungsmarkt teilnehmen. Externe, zusätzlich mitgeführte Batterien könnten auch anstelle von Ballastgewichten eingesetzt werden, wodurch sich die Betriebsdauer von Fahrzeugen durch die Möglichkeit des Batteriewechsels vor Ort erhöhen ließe (Remmele et al., 2020, S. 96f.).

Elektromotoren angetrieben mit regenerativem Strom haben im Vergleich zu Dieselmotoren einen geringen CO₂-Ausstoß von etwa 52 kg CO₂eq pro Gigajoule (GJ) bei dem Strommix von 2019 oder 1 bis 3 kg CO₂eq/GJ, wenn der Strom aus Erneuerbaren Energien stammt. Sie schneiden allerdings im Vergleich zu anderen erneuerbaren Antriebsmethoden bei der Effizienz des Ladevorgangs und bei der Energiespeicherkapazität schlechter ab. Die Themenbereiche Ladeinfrastruktur, Investitions- und Betriebskosten sowie Akzeptanz bei Anwender*innen bedürfen noch einer weiteren Entwicklung, um einen großflächigen Einsatz zu ermöglichen (Eckel et al., 2023, S. 29; Remmele et al., 2020, S. 88).

Finanzielle Aspekte und darunter vor allem die Anschaffungskosten sprechen, nach der aktuellen Entwicklungs- und Marktsituation, noch gegen batterieelektrische Antriebe in der Landwirtschaft. Die hohen Investitionskosten für E-Fahrzeuge können jedoch teilweise durch steuerliche Anreize und höhere Restwerte gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ausgeglichen werden. Die potenziellen Einsparungen während des Betriebs der E-Fahrzeuge ergeben sich aus der Tatsache, dass der benötigte Strom für die gleiche Arbeit gegenwärtig kostengünstiger ist als die entsprechend benötigte Menge Diesel. Zusätzlich sind die Strompreise weniger volatil im Vergleich zu den Ölpreisen und für landwirtschaftliche Betriebe auch unempfindlicher gegenüber Preisschwankungen (Chauhan et al., 2023, S. 2ff.).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Elektrifizierung von Traktoren zur Dekarbonisierung der Landwirtschaft beitragen kann. Im Vergleich zum Status quo, bei dem überwiegend mit Diesel betriebene Landmaschinen eingesetzt werden, weisen E-Traktoren eine hohe Energieeffizienz und gute Steuer- und Regelbarkeit auf und ermöglichen den Zugang zur Nutzung Erneuerbarer Energien in der Landwirtschaft. Generell steht „Der Einsatz von E-Traktoren [...] noch ganz am Anfang, bisher sind nur kleinere Traktoren praxisreif.“ (Wochinger, 2023, S. 48). Deshalb wird im nachfolgenden Kapitel der aktuelle Stand der Forschung in Bezug auf Kostenanalysen, die Marktsituation und Maßnahmen zum optimalen Einsatz von E-Traktoren analysiert.

3 Stand von Forschung und Praxis

Schon im 19. Jahrhundert gab es elektrisch betriebene Agrarmaschinen wie kabelgebundene Pflüge. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts verdrängten aufkommende Verbrennungsmotoren den elektrischen Antrieb in mobilen Maschinen weitgehend, da Verbrennungsmotoren durch ihre Kompaktheit und die einfache Energiespeicherung mittels eines Kraftstofftanks entscheidende Vorteile für die fortschreitende Mechanisierung im Ackerbau boten. Aufgrund zunehmender gesellschaftlicher und politischer Forderungen zur Bekämpfung des Klimawandels wird erwartet, dass der konventionelle, auf fossilen Energieträgern basierende Antriebsstrang mobiler Maschinen durch umweltfreundlichere Alternativen ersetzt wird, um THG-Emissionen zu reduzieren. Diese steigenden gesellschaftlichen Erwartungen fördern die Entwicklung und Verbesserung der Elektrifizierungsmaßnahmen (Pickel, 2020, S. 50).

Trotz dieser Fortschritte stehen Einbußen im Bereich der Energiedichte von Batterien im Vergleich zu konventionellen Energieträgern in der Kritik. Besonders im Hinblick auf Betriebszeiten von 8 bis 12 Stunden unter Voll- und Teillastbedingungen, wie sie bei vielen landwirtschaftlichen Tätigkeiten gewöhnlich sind, sind noch weitergehende Entwicklungen und Forschungsanstrengungen erforderlich. Die heutigen mobilen Landmaschinen und die Verfahren sind auf die hohe Energiedichte von Dieselmotoren abgestimmt, so dass die für einen ganzen Arbeitstag erforderliche Energiemenge auf den Maschinen mitgeführt werden kann. Wie zukünftige Landmaschinenkonzepte ohne den fossilen Energieträger Diesel aussehen werden, darüber sind sich Experten aus Landwirtschaft, Industrie und Wissenschaft noch uneinig. Wenn dieser als Energieträger nicht mehr zur Verfügung steht, insbesondere wenn der Einsatz von Verbrennungsmotoren verboten wird, ist es ratsam, auch die bestehenden Konzepte und Verfahren für Landmaschinen zu überdenken und bei der Entwicklung zukünftiger Maschinenkonzepte einen alternativen Ansatz zu wählen. Die Energiedichte zukünftiger Batterien liegt bestenfalls bei drei Prozent der Energiedichte von Diesel. Das impliziert, dass die meisten aktuellen großen Landmaschinen nicht in der Lage wären, ausreichend elektrische Energie für einen vollständigen Arbeitstag bereitzustellen. Dies ist verbunden mit Einschnitten in der Flexibilität der Anwender*innen und Ertragsverlusten (Eckel et al., 2020, S. 8; Engström & Lagnelöv, 2018, S. 182; Frerichs & Buck, 2022, S. 1f.; Neumann, 2024, S. 1; Pfaffmann et al., 2021, S. 79).

In den folgenden Unterkapiteln wird Forschungsstand im Hinblick auf Forschungsprojekte, insbesondere im Bereich der technischen Forschung, den aktuellen Stand des E-Traktor-Marktes sowie vorhandene Literatur und Studien untersucht.

3.1 Technische Forschungsprojekte

Das Landmaschinen herstellende Unternehmen John Deere GmbH stellte 2016 das erste batteriebetriebene Traktormodell "SESAM" vor und nahm somit eine führende Position im Innovationsprozess elektrisch betriebener Agrarmaschinen ein. Mit dem Projekt GridCON und GridCON2 ergründete John Deere die Herausforderungen im Bereich der begrenzten Energiespeicherkapazität von E-Traktoren und der hohen Batteriekosten. Im Jahr 2022 präsentierte das Unternehmen mit dem Modell „SESAM II“ einen 500-kW-Traktor mit einer Batteriekapazität von 1000 kWh, der auch autonom arbeiten kann. In weiteren Projekten forscht John Deere an autonomen Schwarmeinheiten, kabelgebundenen Lösungen und Fahrzeugen zur Stromverteilung. Diese batterieelektrischen Traktoren, die bestimmte Anforderungen erfüllen, um auch als Energieverteilungsfahrzeuge eingesetzt werden zu können sind aktuell noch in der Entwicklung. Wesentliche Anforderungen an die Maschinen sind Geländegängigkeit, eine hohe Batteriekapazität und ein Kabelanschlussmodul für die Übertragung des Stroms, zu anderen Maschinen (Clausen, 2020, S. 25; Deininger, 2022, S. 14; Kissel et al., 2022, S. 24; Pickel, 2020, S. 55; Prüfling & Langer, 2022, S. 366; Sohst, 2022, S. 2; VDI Wissensforum, 2022, S. 11f.).

Für das Projekt Gen.Farm der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) und der University of Rwanda-College of Science and Technology wurde der Prototyp eines 20-kW-E-Traktors entwickelt. Die Volkswagen AG baute für den Einsatz in Ruanda einen Traktor mit wechselbarer Li-Ionen-Batterie, welche vor Ort mit Solarstrom aus einer Photovoltaik-(PV-)Anlage aufgeladen werden kann. Die Li-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 32 kWh soll nach weiteren Erprobungen, aufgrund niedrigerer Kosten und verbesserter Robustheit, durch einen Lithium-Eisen-Phosphat-Speicher ersetzt werden (GIZ, 2021, S. 1; Knecht, 2021, S. 1).

Auf der „Agritechnica“ im November 2023, der Agrarfachmesse, präsentierten Forscher*innen der Technischen Universität München einen Entwicklungsbaukasten für E-Traktoren. Der TUMtrac beinhaltet modular aufgebaute Komponenten für unterschiedliche Anwendungen und optional eine Art Powerbank als austauschbaren Akku. Aktuell beträgt die Batteriekapazität des vorgestellten Traktors 24 kWh und ein Wechselbatteriesystem eröffnet die Möglichkeit, erweiterte Reichweiten und längere Betriebszeiten abzudecken. Dies reduziert das Gesamtgewicht des Fahrzeugs, da nur die aktuell benötigte Energiemenge mitgeführt wird. Die externe Batterie kann abgekoppelt und auch als Energiequelle für andere Geräte verwendet werden. Damit besteht die Option, eine PV-Anlage sowohl am Hof als auch auf dem Feld zu positionieren, um die Batterie aufzuladen (Korbinian Goetz, 2023, S. 1; Michael Stang & Clemens Pizzinini, 2024).

3.2 Marktübersicht

Angetrieben durch strenge CO₂-Vorschriften und Klimaschutzziele tritt die Elektrifizierung für Automobilanwendungen bereits in eine neue Marktphase ein. Eine deutliche Verschiebung des Schwerpunkts für elektrifizierte Fahrzeuge über alle Anwendungen hinweg ist zu beobachten. Aktuell erfolgt eine Verlagerung weg von technologischen Machbarkeitsnachweisen, Premium-Fahrzeugen und Kleinserienentwicklung hin zur Massenproduktion, zu Technologie-Kommerzialisierung und folglich zu größeren Stückzahlen, erschwinglicheren und technologisch optimierten Fahrzeugen (Kissel et al., 2022, S. 24; Prüfling & Langer, 2022, S. 366).

Derzeit gibt es herstellende Unternehmen aus Europa, Indien, Türkei, Japan und den USA, die neben konventionellen Traktoren auch E-Traktoren entwickeln und produzieren. Knapp 20 Unternehmen arbeiten zurzeit an der Umsetzung der Technologie. Auf der „Agritechnica“, der Weltleitmesse für Landtechnik, wurden v. a. im Jahr 2022 und 2023 mehrere E-Traktormodelle von verschiedenen Unternehmen vorgestellt. Dabei werden primär niedrige Leistungsklassen abgedeckt, die Arbeit mit bis zu 55 kW verrichten können. Modelle über 55 kW sind noch nicht marktreif, Prototypen sind jedoch vorhanden und deren Serienproduktion in Planung. In höheren Leistungsklassen (> 100 kW) sind bisher noch keine Modelle verfügbar. In der Regel werden kleine Allradtraktoren mit Li-Ionen-Batterien angeboten, die für den Einsatz für leichtere Arbeiten konzipiert sind. Bisher sind E-Traktoren noch teurer als Diesel-Traktoren, was laut Leo von Stillfried, Director der Product Management Platform bei der AGCO GmbH, maßgeblich an die Batteriepreisentwicklung gekoppelt ist. Bei Fendt (Untermarke von AGCO) wird mit einer Entwicklung in Richtung günstigerer Batterien gerechnet. Einschätzungen hinsichtlich der TCO werden bisher noch vorsichtig behandelt. Von Stillfried kann sich vorstellen, „dass ein batterieelektrischer Traktor günstiger ist“ (Agrarzeitung, 2022, S. 1) im Vergleich zu konventionellen Diesel-Traktoren, berechne man die Lebenskosten (Agrarzeitung, 2022, S. 1; DLG, 2022, S. 1; Mönch, 2022, S. 14; Stirnimann, 2023, S. 1).

Neben der Funktion des vollelektrischen Fahrens ist bei E-Traktoren die Einbindung der Nebenverbraucher im Interesse der Käufer*innen. Dazu gehören beispielsweise Hydraulikpumpen und Lüfter. Eine weitere Komponente bei der Systemumsetzung ist die Integration in die Systemumgebung, was in diesem Fall Ladestrategie und Leistungsversorgung der Umgebung betrifft (Cellestial, 2024; Fudex Landmaschinen GmbH, 2024; Kubota GmbH, 2023a; TADUS GmbH, 2023).

3.3 Aktuelle Herausforderungen

Mit der Einführung von E-Traktoren sind auch technische Herausforderungen verbunden. Für landwirtschaftliche Arbeiten werden leistungsstarke Motoren und dementsprechend hohe Energiespeicherkapazitäten benötigt. Logischerweise wäre es sinnvoll, zunächst die Arbeitsschritte zu elektrifizieren, die besonders energieintensiv sind. Allerdings benötigt die Speicherung von Strom in Li-Ionen-Akkumulatoren bei gleicher Energiemenge ein signifikant größeres Volumen als die Speicherung von Diesel in Tanks. In der Praxis sind größere Batterien aber nur begrenzt umsetzbar. Die E-Traktorvariante benötigt ein größeres Tankvolumen und entsprechend ein höheres Gewicht, um die gleiche Feldarbeit über denselben Zeitraum zu bewältigen. Andersherum kann ein E-Traktor mit gleichem Speichervolumen wie ein Diesel-Traktor die gleiche Arbeit für kürzere Zeit erledigen, bevor er wieder aufgeladen werden muss. Vor allem in der Erntesaison sind jedoch Arbeitszeiten von bis zu 14 Stunden pro Tag erforderlich.

Frerichs und Buck (2022, S. 7) erläutern einige Möglichkeiten, wie Prozessschritte durch alternative Verfahren ersetzt werden können, um die Elektrifizierung trotz hoher Leistungsanforderungen möglich zu machen. Darunter zählen automatisiertes Fahren, die Aufteilung kombinierter Verfahrensschritte auf verschiedene Maschinen und der stationären Auslagerung von Arbeitsschritten auf den Hof. Des Weiteren könnten große, leistungsstarke Maschinen weitgehend durch mehrere kleine batteriebetriebene ersetzt werden. Lange Ladezeiten können Fortschritt von Ernte und Planung beeinträchtigen, insbesondere wenn nur begrenzte Ladestrukturen zur Verfügung stehen. Probleme wie Aufladezeiten und Verzögerungen in Ernte oder anderen Arbeitsvorgängen können teilweise ausgeglichen werden durch die Kombination von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen mit autonomer Steuerung. Eine weitere Lösungsmöglichkeit sind austauschbare Batteriepacks als Ersatzbatterien. Der Vorteil ist hier, dass keine Ladezeiten anfallen, und das Laden der Batteriepacks zu günstigen Preisen und Spitzenlastzeiten erfolgen kann. Nachteil hier sind die zusätzlichen Investitionskosten. Bei E-Traktoren kann der Raum, der bei konventionellen Modellen für Verbrennungsmotor und Getriebe genutzt wird, für die Unterbringung weiterer Batterien genutzt werden. Diese Umstrukturierung des Fahrzeugaufbaus verhindert jedoch eine Nutzung und Umrüstung von Bestandsmaschinen, wie es beim Einsatz anderer alternativer Kraftstoffe möglich ist. Wenn das Ziel die vollständige Elektrifizierung mobiler Maschinen in der Landwirtschaft ist, sind alternative Maschinen- und Systemkonzepte erforderlich. Eine weitere Herausforderung ist, dass die handelsüblichen Traktoren nicht genügend Strom für den Betrieb elektrifizierter Anbaugeräte erzeugen. Eine Lösung dieses Problems ist die Montage eines externen

Stromgenerators an der vorderen Dreipunktaufhängung des Traktors, der von der Zapfwelle gespeist wird (Engström & Lagnelöv, 2018, S. 182f.; Frerichs & Buck, 2022, S. 6f.; Prüfling & Langer, 2022, S. 364; Remmele et al., 2020, S. 67ff.; Schwaderlapp, 2017, S. 90; Shao & Anup, 2022, S. 9; Stirnimann, 2020, S. 49; Varani et al., 2022, S. 381).

Voraussetzung für die Verbreitung von E-Traktoren in der Landwirtschaft ist eine gleichbleibende oder positive Veränderung der betrieblichen Wirtschaftlichkeit durch deren Einsatz. Die derzeit hohen Anschaffungskosten sind auf mangelnde Produktverbreitung und Technologieentwicklung zurückzuführen. Zu weiteren Hindernissen gehören die erheblichen finanziellen und zeitlichen Aufwendungen für die Aufrüstung von Betriebshöfen, die Einholung von Genehmigungen und die Koordinierung mit Versorgungsunternehmen. Insbesondere für kleinere Unternehmen stellt das eine Problematik dar. Aktuell werden zudem Bedenken von Betreiber*innen bezüglich der Spitzenlastgebühren auf den Strommärkten geäußert. Diese könnten die Kosten erhöhen, wenn versucht wird, Fahrplanung und Ladebedarf aufeinander abzustimmen. Zudem könnte suboptimale Ladep Praxis den Restwert von batterieelektrischen Fahrzeugen beeinträchtigen, da Qualität und Lebensdauer der Batterien im Laufe der Zeit nachlassen. Außerdem erfordern Schulungen des Wartungspersonals im Rahmen eines Umstellungsprozesses zusätzliche Kosten. Darüber hinaus befürchten die Betreiber*innen, dass die Produktivität der Fahrer*innen zumindest zu Anfang der Implementierung von E-Traktoren sinken könnte, da sie längere Schichten einlegen müssen, um die Ladevorgänge zu integrieren, bevor die Routenoptimierung verfeinert und die Ladegeschwindigkeit erhöht ist (Chauhan et al., 2023, S. 4f.).

Zu den ökologischen Herausforderungen der Marktakzeptanz von E-Traktoren zählen an erster Stelle die Verdichtung des Bodens durch das hohe Gewicht von E-Traktoren und die Ökobilanz der Batterien. Diese Aussagen sind in Zukunft mit Praxiserfahrungen zu ergänzen. Negative Umweltauswirkungen von Batterien sind bislang noch nicht ausreichend erforscht, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass bisher wenige in elektrischen Fahrzeugen verbaute Batterien schon ihr Lebensende erreicht haben. In jedem Fall sind Investitionen in Forschung und Entwicklung von Batterierecycling sinnvoll und empfehlenswert. Neben den Herausforderungen für die E-Traktoren selbst ist fraglich, welche erneuerbare Energiequelle in ausreichender Menge zur Verfügung steht, um E-Traktoren zu betreiben und wie diese Energie der Maschine zugeführt werden kann. In der Landwirtschaft besteht die Möglichkeit Erneuerbare Energien bereitzustellen (PV, Windkraft und Biogasanlagen) und diese zur Versorgung von elektrischen

Landmaschinen zu nutzen. Dies stellt einen entscheidenden ökologischen, aber auch ökonomischen Vorteil der Elektrifizierung dar (Schneider et al., 2023, S. 2).

Neben Chancen für die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit, birgt die Elektrifizierung im Agrarsektor auch diverse Risiken und Herausforderungen im sozioökonomischen Bereich. Es muss weiter untersucht werden, inwieweit sozioökonomische und soziotechnische Faktoren einer Umstellung auf E-Traktoren entgegenstehen. Landwirt*innen sind stärker von Klimaveränderung betroffen als Personen, die in anderen Sektoren beschäftigt sind und könnten durch die Elektrifizierung selbst zum Klimaschutz beitragen. Tiefere Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen auf Arbeitsbedingungen, Arbeitszufriedenheit und gesellschaftlicher Akzeptanz von E-Traktoren sind zusätzlich in Entscheidungsprozesse mit einzubeziehen. Es sollten Möglichkeiten der Unterstützung und Entlastung von Landwirt*innen durch die Gesellschaft untersucht werden. Aus Sicht von Landwirt*innen kann Autarkie ein Argument für den Einsatz von E-Traktoren sein. Die Möglichkeit zur eigenen Energieversorgung auf dem Hof ist vorteilhaft. Gegenposition dazu ist, dass Innovationen in landwirtschaftlichen Prozessen eine höhere Relevanz haben als Produktinnovationen. Der alleinige Kauf von E-Traktoren ist demnach mit innovativen und angepassten Prozessen zum optimalen Einsatz zu kombinieren. Oft wird argumentiert, dass die Branche bei der Adaption von Technik-Innovationen träge und tendenziell konservativ eingestellt ist. Innovationsdynamiken laufen meist langsam an und es bedarf Vorbildern, bei denen sich neue Technologien bewähren. Ergebnisse neuerer Studien zeigen, dass Landwirt*innen durchaus Innovationsbereitschaft zeigen. Theoretisch steht die Innovations- und Adaptionfähigkeit von Landwirt*innen dem Einsatz von E-Traktoren somit nicht im Wege. Wenn höhere Kosten jedoch nicht an Verbraucher*innen weitergegeben werden können und Landwirt*innen die Mehrkosten somit alleine tragen müssen und/oder wenn die Funktionalität noch nicht ausreichend belegt ist, ist es unwahrscheinlich, dass eigenständige Initiative ergriffen wird (A. Bünger & Schiller, 2020, S. 73, 75f., 87; Wochinger, 2023, S. 48).

Die Umstellung von Diesel- auf E-Traktoren kann durch regulatorische Vorgaben, Unterstützungsmaßnahmen und politische Rahmenbedingungen beeinflusst werden. Die Agrarwirtschaft ist einem ständigen Wandel, immer neuen Vorgaben und Gesetzen und sich ändernder Nachfrage ausgesetzt. Innerhalb dieser Inkonsistenz müssen bei der Planung alle Aspekte der Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. Daher ist es sinnvoll, zukünftige Anbausysteme und Maschinenkonzepte nach angepassten Zielgrößen auszurichten. Beispielsweise sind die Umwelt und gegenseitige Abhängigkeiten zwischen sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Faktoren zu berücksichtigen.

3.4 Literaturübersicht

Die Lebenskosten oder Gesamtbetriebskosten alternativer Fahrzeugtechnologien waren in den letzten Jahren Gegenstand umfangreicher Forschungen und Untersuchungen. Studien unterscheiden sich stark in ihren Inputdaten – zu denen die Energieeffizienz der Fahrzeuge, Restwert, Lebensdauer, die jährliche Einsatzzeit der Fahrzeuge sowie die Länge des Analysezeitraums gehören – sowie in den fallspezifischen Inputdaten wie Energiekosten, Diskontsätze, Instandhaltung und Infrastrukturkosten, da all diese Parameter von Fall zu Fall unterschiedlich sind. Schätzungen sind fallorientiert und können nicht verallgemeinert werden. Zu elektrisch betriebenen Lastkraftwägen (Lkw), welche lange Strecken zurücklegen müssen, die der Motorleistung wegen jedoch vergleichbar mit Traktoren sind, gibt es bereits zahlreiche ökonomische Studien. In verschiedenen Veröffentlichungen wurden die TCO verschiedener Lkw-Klassen und für verschiedene Anwendungen bewertet, v. a. in der Europäischen Union und in den Vereinigten Staaten, wobei der Schwerpunkt auf zwei oder mehr Fahrzeugtechnologien lag und alternative Lkw-Technologien auf der Grundlage ihrer wirtschaftlichen Leistung mit Diesel-Lkw verglichen wurden (Basma et al., 2021, S. 2f.; Lagnelöv, Dhillon, et al., 2021, S. 359).

Um nicht nur ökonomische Aspekte aus vorangegangenen Studien zu betrachten, sollen in dieser Arbeit die wichtigsten Ergebnisse aus Untersuchungen und wissenschaftlichen Arbeiten zur Elektrifizierung von landwirtschaftlichen Maschinen, vor allem zur Einführung von E-Traktoren, herangezogen werden. Es folgt eine Übersicht und Zusammenfassung ausgewählter, repräsentativer Publikationen, die sich mit den vielfältigen Aspekten einer Implementierung von E-Traktoren befassen. Da es vor allem zu ökonomischen Analysen nahezu keine Studien vor 2021 gibt und die Technologiereife und zentrale Kostenfaktoren sich seitdem wesentlich weiterentwickelt haben, werden in diesem Bereich keine älteren Studien mit einbezogen. Sichtbar ist die genannte Entwicklung neben dem hohen TRL von 11 (Marktstabilität) an der erreichten Bandbreite an Modellen, die derweil auf dem Markt sind oder im Jahr 2024 noch in Serienproduktion gehen sollen (Dögnitz et al., 2023a, S. 250; Eckel et al., 2023, S. 19; Mönch, 2022, S. 14; Stirnimann, 2023, S. 1).

In der wissenschaftlichen Forschung zur Elektrifizierung in der Landwirtschaft im Allgemeinen stehen verschiedene Aspekte im Fokus. Ein bedeutender Bereich betrifft den Energiebedarf elektrischer Maschinen, insbesondere im Vergleich zu herkömmlichen Traktoren, wie in Untersuchungen von Frerichs und Buck (2022, S. 6) dargestellt. Diese Untersuchungen legen nahe, dass die Elektrifizierung in der Landwirtschaft voranschreitet. Sie trägt zur Steigerung der Produktivität und des Einkommens bei und ermöglicht

den Einsatz fortschrittlicher landwirtschaftlicher Technologien. Die Literatur zur Elektrifizierung der Landwirtschaft wird untersucht, um eine Basis für die Analyse der Gesamtkosten von E-Traktoren sowie deren Auswirkungen auf die nachhaltige Entwicklung zu schaffen und später fundierte, ganzheitliche Empfehlungen ableiten zu können (Ghobadpour et al., 2022, S. 843, 859; Scolaro et al., 2021, S. 164520).

Zur Untersuchung ökonomischen Auswirkungen von E-Traktoren, wurden Studien betrachtet, die diverse Aspekte der Wirtschaftlichkeit berücksichtigen und deren Analysen mehrheitlich Betriebskosten der E-Traktoren im Vergleich zu konventionellen Modellen erforschen. Hierbei werden Investitionskosten, Amortisationszeiten sowie potenzielle Subventionen und Anreize für den Einsatz von E-Traktoren in der Landwirtschaft bewertet. Allerdings schließen viele Studien zu den Gesamtkosten von E-Traktoren die Anschaffung von Ladeinfrastruktur nicht mit ein. Generell existieren bis dato nur wenige umfassende Studien bezüglich der TCO von E-Traktoren.

Tabelle 2. Literaturübersicht zu ökonomischen Analysen von E-Traktoren. Eigene Darstellung.

Studie Ort	Untersuchungsgegenstand / Methode / Vorgehensweise	Wichtigste Ergebnisse
Ali et al. (2023) USA	<p>Entwicklung eines techno-ökonomisches Modells für E-Traktoren /</p> <p>TCO-Analyse von E-Traktoren und Vergleich mit Diesel-Traktor /</p> <p>Untersuchung empirischer und realer Daten, Ermittlung der Betriebsbedingungen, unter denen E-Traktoren kostengünstiger sind als Diesel-Pendants, Unterstützung von Landwirt*innen und Agrarindustrie bei der Identifikation günstiger Anwendungsfälle für die Einführung elektrischer Landmaschinen</p>	<p>Mit steigender Jahresarbeitszeit steigt die Differenz der Gesamtbetriebskosten zwischen E- und Diesel-Traktor hin zu attraktiverer Wirtschaftlichkeit von E-Traktoren. Geringere Motorlasten führen ebenfalls zu höherer TCO-Differenz und begünstigen elektrische Antriebsstränge. Die Kostenaufschlüsselung zeigt, dass bei niedriger Motorlast die Anschaffungskosten eines E-Traktors einen beträchtlichen Anteil ausmachen, während bei höherer Nutzung die Kraftstoffkosten eines Diesel-Traktors dominieren. In einem Szenario mit 400 Arbeitsstunden/Jahr (Ah/a) sind die TCO des E-Traktors 14 % höher als beim Diesel-Traktor, während sie bei 1200 h/a 18 % günstiger sind. Diese Ergebnisse sind für Ingenieure, politische Entscheidungsträger und Landwirte relevant, welche die Elektrifizierung landwirtschaftlicher Maschinenflotten planen.</p>
Beligoj et al. (2022) Italien	<p>Wirtschaftliche Machbarkeitsanalyse der Elektrifizierung des Antriebsstrangs bei landwirtschaftlichen Traktoren /</p> <p>Lebenszykluskostenanalyse (LCC) der wirtschaftlichen Machbarkeit der Traktor-Elektrifizierung und Vergleich mit Diesel-Traktor/</p> <p>Analyse von Fallstudien zu Obstbau-, mittelschweren und schweren Reihenkulturtraktoren, Schätzung und Simulation von Kraftstoff- und Energiebedarf, Bewertung von Emissionsfaktoren für Diesel und Strom sowie Batterieproduktion, Bewertung von Betriebskosteneinsparungen für verschiedene Traktorkategorien und Betriebszyklen</p>	<p>Betriebskosteneinsparungen bei E-Traktoren nehmen ab, wenn diese leistungsintensivere Arbeiten ausführen. Spezielle Obstbautraktoren weisen erhebliche (8 %) Einsparungen auf, während mittelschwere Traktoren für Reihenkulturen geringere (3 %) und schwere Traktoren vernachlässigbare (0,5 %) Einsparungen aufzeigen. Die Elektrifizierung von Hochleistungsschleppern führt möglicherweise nicht zu signifikanten Kosteneinsparungen. Die Traktorkategorie und Betriebszyklen sind somit bedeutend bei der wirtschaftlichen Machbarkeitsbewertung von E-Traktoren. Die Sensitivitätsanalyse zeigt die Rentabilitätsgrenze und die Auswirkungen von Preisvariationen auf die wirtschaftliche Rentabilität in verschiedenen Szenarien. Individuelle Sensitivitätsanalysen sind fundamental für Wirtschaftlichkeitsbewertungen, da die Komponenten in ihren Kosten stark variieren, die Energiepreise volatil sind und eine Risikobewertung auf variablen Parametern basiert.</p>

<p>Lagnelöv et al. (2021) Sweden</p>	<p>Wirtschaftlichkeitsbewertung eines autonomen batterieelektrischen Traktorsystems /</p> <p>TCO-Analyse von E-Traktoren, Sensitivitätsanalyse und Vergleich zu Diesel-Traktor /</p> <p>Simulation, Untersuchung von Timeliness (siehe Kap. 6.2.3), Batteriealterung sowie damit verbundenen Kosten, Entwicklung und Durchführung eines Modells für Kostenberechnungen, Sensitivitätsanalyse für relevante Variablen wie Komponentenkosten, Ladegeräteleistung, Autonomiegrad und Batteriegröße, -lebensdauer und -kosten</p>	<p>Hohe Ladegeschwindigkeiten beschleunigen die Batteriealterung, was entscheidend für die Kostenabschätzung des Batteriewechsels und die Gesamtlebensdauer des Systems ist. Im Vergleich zu bemannten Diesel-Traktoren können autonome E-Traktoren längere Verzögerungen durch das Aufladen aufweisen, was die Bedeutung des Timeliness Faktors hervorhebt. Autonome batterieelektrische Antriebssysteme weisen gleichwertige oder niedrigere jährliche Kosten auf, im Vergleich zu dieselbasierten Systemen, v. a. aufgrund geringerer Kraftstoff- und Wartungskosten sowie effizienterer Energieverwendung. Die Bedeutung der Betriebskosten im Vergleich zu den Investitionskosten für die Gesamtwirtschaftlichkeit von E-Traktoren ist erheblich. Das zeigt, dass niedrigere Betriebskosten die höheren Anfangsinvestitionen überwiegen können. Batteriealterung wird als relevanter Kostenfaktor identifiziert, wobei größere Batterien oder Mehrfachbatterien die Lebensdauer verlängern können. Insgesamt könnten autonome E-Traktoren eine kosteneffiziente und wettbewerbsfähige Option in der Landwirtschaft (LW) darstellen, wenn Faktoren wie Betriebskosten, Autonomie und Batteriemangement im Vergleich der Gesamtkosten berücksichtigt werden.</p>
<p>Proctor (2022) USA</p>	<p>Gesamtkostenabschätzung eines batterieelektrischen Kompakttraktors verglichen mit Diesel-Pendant /</p> <p>TCO-Analyse von E-Traktoren und Vergleich zu Diesel-Traktor /</p> <p>Kombination von Simulation und realen Daten, Vergleich zwischen 30 Pferdestärken (PS) Sol-electrac Compact Electric Tractor (CET) und dem 32 PS John Deere 2032R, Analyse der Betriebskosten inklusive Erstanschaffungspreis, Finanzierungskosten, Energiekosten, Wartungs- und Reparaturkosten, Analyse dreier Betriebsszenarien mit unterschiedlichen Nutzungsintensitäten</p>	<p>E-Traktoren verursachen im Vergleich zu Diesel-Traktoren erheblich weniger THG-Emissionen, während Gesamtbetriebskosten vergleichbar sind. Je nach Strombedarfsintensität und Betriebszeit können Gesamtbetriebskosten des E-Traktors von etwas höher bis niedriger als die des Diesel-Traktors sein. Sensitivitätsanalysen zeigen, dass E-Traktoren weniger empfindlich auf Materialkostenänderungen reagieren und mit zunehmender Betriebszeit kosteneffizienter werden.</p>
<p>Shao und Anup (2022) Indien</p>	<p>Wirtschaftlichkeitsbewertung der Elektrifizierung von landwirtschaftlichen Traktoren /</p> <p>TCO-Analyse und Vergleich zu Diesel-Traktor/</p> <p>Kombination von Simulation und realen Daten, Untersuchung von Anreizen für Elektrifizierung landwirtschaftlicher Traktoren in Indien, Analyse verschiedener politischer Maßnahmen, um Kostendifferenz zwischen E- und Diesel-Traktoren zu überbrücken und Wettbewerbsfähigkeit von E-Traktoren langfristig zu verbessern</p>	<p>Die Kostendifferenz zwischen E- und Diesel-Traktoren kann durch gezielte Anreize überwunden werden, was zu vergleichbaren oder sogar niedrigeren Gesamtbetriebskosten für E-Traktoren führen kann. Frühzeitige Kaufanreize, vergünstigter Agrarstrom, Unterstützung für Ladeinfrastruktur und landwirtschaftliche Finanzierungen können die Kostendifferenz erheblich reduzieren. Politische Maßnahmen und Anreize können die Gesamtbetriebskosten langfristig ausgleichen und E-Traktoren wettbewerbsfähiger machen. Die Nutzung bestehender Subventionen für Agrarstrom sowie Anreize für den Einsatz von Elektrogeräten können Kosten senken und die Einführung von E-Traktoren in der indischen LW fördern.</p>

Die herangezogene Literatur verdeutlicht, dass E-Traktoren trotz höherer anfänglicher Umrüstungskosten langfristig wirtschaftlicher sein können. Sie ermöglichen Einsparungen bei den Lebenszykluskosten, bieten eine höhere Effizienz und geringere Betriebskosten (Beligoj et al., 2022, S. 28853; Bessette et al., 2022, S. 1, 12; Chen et al., 2022, S. 1; Liu et al., 2021, S. 1, 9f.; Mao et al., 2022, S. 1; Varani et al., 2021, S. 1, 17f.).

Die wichtigsten Resultate und Erkenntnisse der weiteren betrachteten Studien werden in Anhang 7 bis Anhang 10 zusammengefasst. Neben ökonomischen Veränderungen

werden die Umweltauswirkungen von herkömmlichen Landwirtschaftsmaschinen im Vergleich zu E-Traktoren beleuchtet. Dabei steht die Bewertung von THG-Emissionen und anderen Umweltfaktoren im Kontext des landwirtschaftlichen Betriebs im Fokus. Die vorliegenden Studien deuten an, dass die Integration von E-Traktoren in landwirtschaftliche Betriebe erheblich zur Reduktion der Umweltauswirkungen beitragen kann. Dies beinhaltet Aspekte wie THG-Emissionen, Energiebedarf sowie Schadstoffe wie Stickoxide und Feinstaub. Diese Verringerung resultiert aus der verbesserten Energieeffizienz und der Reduktion des Verbrauchs fossiler Kraftstoffe im Vergleich zu herkömmlichen Traktoren mit Verbrennungsmotor. Technologische Innovationen im Bereich der E-Traktoren werden anhand von Literatur über die neuesten Entwicklungen, Zuverlässigkeit, Leistung und Effizienz dieser Technologie betrachtet. Die Erntesaison stellt hierbei für E-Traktoren eine Herausforderung dar, insbesondere wenn sie ununterbrochen arbeiten müssen. Dies könnte durch den Austausch von Batterien, die Anmietung eines zweiten Traktors oder andere Ansätze gelöst werden, wie von Shao und Anup (2022, S. 9) diskutiert. Die Studien deuten darauf hin, dass E-Traktoren die Energieeffizienz verbessern, den Kraftstoffverbrauch senken, die Arbeitsqualität und den Fahrer*innenkomfort erhöhen und sich auch für Kleinbäuer*innen eignen, da die Entwicklung hier in Richtung autonomen Fahren geht. Große Bedenken gibt es hier v. a. hinsichtlich des Energiebedarfs und der Reichweite, die im Moment als größter hemmender Faktor beschrieben wird (Baek et al., 2022, S. 1, 15; Bagire et al., 2022, S. 1, 4f.; Chen et al., 2022, S. 1; Lagnelöv, Larsson, et al., 2021, S. 1, 20f.; Scolaro et al., 2021, S. 164520).

Politische und rechtliche Rahmenbedingungen, die den Einsatz von E-Traktoren beeinflussen können, werden durch spezifische Studien sowie durch Analysen von Normen und Richtlinien erforscht. Herauszuarbeiten ist hierbei zusätzlich, welchen Einfluss der politische und rechtliche Rahmen auf die Akzeptanz von E-Traktoren in der Landwirtschaft hat und ob die Studien und Analysen zu diesen Aspekten ausreichend sind für ein umfassendes Verständnis. Bisher besteht zu diesen Themen wenig aussagekräftige Literatur. Auch zukünftigen Entwicklungen und Perspektiven des E-Traktoreinsatzes werden von der Literatur beleuchtet. Die Forschung suggeriert, dass diese Technologie vielversprechend ist, da sie potenzielle Vorteile wie modulare und autonome Systeme, gesteigerte Energieeffizienz und verbesserte Arbeitsqualität bieten kann. Da der Einsatz jedoch noch kein Standard ist, sind Prognosen schwierig und unsicher. Die Literaturrecherche dient als Basis für weiteres Vorgehen, welches im folgenden Methodik-Teil dieser Arbeit erläutert wird und des Weiteren zur anschließenden Diskussion und kritischen Bewertung der eigenen Ergebnisse (Chen et al., 2022, S. 1; Herlitzius et al., 2021, S. 316, 323; Scolaro et al., 2021, S. 164520; Vogt et al., 2021, S. 1, 14).

4 Vorstellung der Untersuchungsobjekte

Derzeit werden verschiedene Elektrifizierungsmöglichkeiten erforscht, darunter die batterieelektrischen Antriebssysteme landwirtschaftlicher Maschinen, welche sich dank Fortschritten in der Batterietechnologie immer weiterentwickeln und verbessern. Die in dieser Arbeit vorgestellte Gesamtkostenanalyse fokussiert sich auf batteriebetriebene E-Traktoren im Vergleich zu Diesel-Traktoren, die in landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt werden. In den folgenden Abschnitten werden, die der Analyse zugrundeliegenden Rahmenbedingungen und die betrachteten Traktoren genauer erläutert. Die Analyse bezieht sich auf den Anwendungsbereich in Deutschland, da die deutsche Gesetzgebung, Förderinstrumente sowie Steuerpolitik und Energiepreise als Rahmen für die Arbeit festgelegt werden, aber auch sozialpolitische und gesellschaftliche Aspekte aus Deutschland mit aufgenommen werden sollen. Literaturrecherche und Marktanalyse sind jedoch international ausgelegt und enthalten daher auch Informationen aus weiteren Ländern, u. a. Schweden, Indien und den USA.

Als Anfangsjahr der Betrachtung gilt 2024 und die Bewertung erfolgt aus der Perspektive der kommerziellen Erstbenutzer*innen über einen Zeitraum von 12 Jahren, wie im Maschinen- und Reparaturkostenrechner (MaKost-Rechner) der KTBL (2022) definiert. Der MaKost-Rechner ist eine Web-Anwendung zur Berechnung von Anschaffungskosten, der Abschreibung, den fixen und variablen Kosten, dem kumulierten Energieaufwand und weiteren technischen Daten von verschiedenen landwirtschaftlichen Maschinen. Die Berechnungen basieren auf Daten des KTBL aus dem Jahr 2022 und sollen der Abschätzung von Kosten und der Investitionsbewertung dienen. Liegt der Fokus der maschinellen Energieversorgung auf elektrischen Lösungen, ergibt sich ein Katalog an technischen Möglichkeiten. Auf den Vergleich mit weiteren alternativen Antriebsmöglichkeiten und Fahrzeugmodellen, kabelgebundener und elektrischer Schwarmlösungen sowie solarbetriebener Varianten wurde infolge von Einschränkungen im Umfang dieser Bachelorarbeit jedoch abgesehen. Es wird eine elektrische Energieversorgung der mobilen Arbeitsmaschine über Batterien untersucht. Für die TCO-Kalkulation wird das Modell eines E-Traktors im folgenden Unterkapitel definiert.

4.1 Definition der untersuchten E-Traktoren

Traktoren sind universelle mobile Antriebs- und Zugmaschinen, die für verschiedene landwirtschaftliche Arbeitsschritte konzipiert sind. Abhängig von Einsatzzweck, zurückzulegenden Entfernungen zum Einsatzort, Häufigkeit und Dauer der Nutzung variiert das Leistungsprofil und somit der Energiebedarf der Maschinen. Der Begriff „E-Traktor“

bezeichnet in dieser Arbeit einen vollelektrischen, batteriebetriebenen Traktor, sofern nicht anderweitig deklariert. Für die Untersuchung wurden zwei Varianten mit unterschiedlicher Größe und Leistung ausgewählt. Dadurch kann der Einfluss von Leistung und Kapazität auf die Kosten fundierter untersucht werden. Auch Unterschiede in der technischen Reife sollen damit beleuchtet werden, da aktuell mehr kleinere Traktormodelle auf dem Markt sind als große. Tabelle 3 fasst die zu vergleichenden E-Traktoren sowie ausgewählte technische Spezifikationen zusammen (Eckel et al., 2023, S. 5).

Tabelle 3. Definition der E-Traktoren für den Vergleich inklusive technischer Spezifikationen. Eigene Darstellung (AGCO GmbH, 2023; Knecht B.V., 2023e; KTBL, 2022; L. von Stillfried, persönliche Kommunikation, 8. Januar 2024).

Modell	Leistung	Batteriekapazität	Mittlerer Energiebedarf	Volladezyklen	Batterietyp
E-Traktor klein (ET-K)	40 kW	43 kWh	~ 10 kWh/h	3500	Li-Ionen
E-Traktor groß (ET-G)	55 kW	100 kWh	~ 35 kWh/h	3000	Li-Ionen

Um eine bessere Vergleichbarkeit und die Berücksichtigung aktueller Marktbedingungen zu gewährleisten, wurden für die Analyse Traktoren in unteren Leistungsbereichen ausgewählt. Die Zulassungszahlen für Traktoren zeigen, dass ein Großteil der jährlichen Neuzulassungen im unteren Leistungsbereich liegt, auch wenn die Zulassungen größerer und leistungsstärkerer Traktoren zunehmen. Im Jahr 2021 wurden in der Leistungsklasse bis 38 kW knapp 10.000 Zugmaschinen neu zugelassen und wiesen damit die höchste Zulassungszahl innerhalb von 7 verschiedenen Klassen auf. In der Leistungsklasse von 39 kW bis 59 kW wurden über 4.000 Zugmaschinen neu zugelassen. Die tägliche Einsatzzeit von Traktoren kann je nach Anwendung stark variieren. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die Auslegung von Energiespeichersystemen für Traktoren, da der Energie- bzw. Strombedarf und damit der Verkaufspreis variieren. In der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss einer Variation dieser Faktoren genauer untersucht. Der Energiebedarf von E-Traktoren schwankt normalerweise zwischen 4 und 60 kWh/h, je nach Modell und getätigter Arbeit. Die Einsatzgebiete des kleinen Traktors belaufen sich auf Sektoren wie den Gartenbau, Reitsport, Sportanlagen, Baumschulen und Viehzuchtbetriebe. Der größere Traktor ist v. a. für den Wein- und Obstbau geeignet und kann hierbei für Laubarbeiten sowie Bodenpflege, mechanische Unterstockpflege und Erntelogistik eingesetzt werden. Der ET-K mit einer Kapazität von 43 kWh benötigt bei 3 bis 5 Stunden Arbeitszeit durchschnittlich 10 kWh/h. Gemäß Angaben eines Unternehmensvertreters benötigt der ET-G mit einer Kapazität von 100 kWh durchschnittlich 35 kWh/h (Mittelwert aus angegebener Spanne von 10 bis 60 kWh/h) (AGCO GmbH,

2024, S. 1; V. Bragulla, persönliche Kommunikation, 23. November 2023, S. 1; Eckel et al., 2023, S. 24; Frerichs & Buck, 2022, S. 6; Knecht B.V., 2024, S. 1; L. von Stillfried, persönliche Kommunikation, 8. Januar 2024, S. 1).

4.2 Definition der Referenzobjekte

Um den Untersuchungsgegenstand „E-Traktor“ mit dem aktuellen Status quo der Antriebstechnologien in der Landwirtschaft zu vergleichen, wird hierfür als Referenzobjekt ein herkömmlicher Diesel-Traktor herangezogen. Die Verwendung von Dieseldieselkraftstoff in Verbrennungsmotoren gilt als Standard für landwirtschaftliche Antriebe. Für die Berechnungen wurden Daten des KTBL (2022) von Diesel-Traktoren der Leistungsklasse 34 bis 40 kW und der Leistungsklasse 49 bis 59 kW verwendet. Da die herangezogenen E-Traktoren Allradtraktoren sind, werden technische Angaben entsprechender Diesel-Traktoren für weitere Berechnung herangezogen. Um ein größeres Spektrum verschiedener Traktormodelle abzubilden, wird der Median verschiedener Traktoren berechnet, darunter Schmalspur- und Standardtraktoren mit stufenlosem, Schaltgetriebe oder Lastschaltgetriebe. Folgende Referenz-Traktoren werden definiert.

Tabelle 4. Definition der Diesel-Traktoren für den Vergleich inklusive technischer Spezifikationen. Eigene Darstellung nach MaKost-Rechner (KTBL 2024b).

Modell	Leistung	Anschaffungspreis	Volllaststunden
Diesel-Traktor klein (DT-K)	34 – 40 kW	35.000 €	8.000 h
Diesel-Traktor groß (DT-G)	49 – 59 kW	47.000 €	9.000 h

Der Strombedarf von E-Traktoren und der Dieselbedarf von Diesel-Traktoren sollen verglichen werden. Für die Abschätzung des Dieselbedarfs werden Daten des KTBL herangezogen, wie sie auch in Abb. 2 zu sehen sind. Der Heizwert von einem Liter Diesel liegt bei 9,96 kWh (BAFA, 2024a, S. 9; Basma & Rodríguez, 2023, S. 4).

In Kapitel 5 wird das Studiendesign dieser Arbeit erläutert, einschließlich des methodischen Ansatzes, der Durchführung sowie der genauen Beschreibung der Datengrundlage der wirtschaftlichen Aspekte.

5 Studiendesign

Die übergeordneten Ziele sind neben der Erstellung einer Marktübersicht, einflussreiche Kostenfaktoren des Einsatzes von E-Traktoren zu identifizieren und einen differenzierten Kostenvergleich zwischen dem Einsatz von E-Traktoren und Diesel-Traktoren aufzustellen. Zu diesem Zweck wird mithilfe einer quantitativen Analyse des Marktes und einer literarischen Inhaltsanalyse eine Datengrundlage geschaffen, die zur Berechnung der Total Cost of Ownership von E-Traktoren dient. Ergebnisse dieser Kostenanalyse werden mittels einer Sensitivitätsanalyse und ergänzenden Marktdaten auf Plausibilität und Sinnhaftigkeit überprüft. Die Datengrundlage bilden Marktdaten und Daten aus direkten Befragungen von Marktvertreter*innen sowie Studiendaten aus der Literaturrecherche. Der quantitative Forschungsansatz bedient die Anforderungen der Forschungsfragen, welche die Gesamtkosten von E-Traktoren und den Einfluss spezifischer Kostenfaktoren auf die Gesamtkosten untersuchen. Zunächst wird die Methodik konkretisiert.

5.1 Methodik

In der quantitativen Forschung werden Verfahrensweisen der numerischen Darstellung von empirischen Sachverhalten ausgeführt. Daten einer quantitativen Forschung müssen objektiv, verlässlich und valide sein. Die Methodik einer Marktanalyse umfasst das Bewerten verschiedener Faktoren, die die Leistung eines Marktes beeinflussen. Darunter zählen die Gestaltung von Angebot und Nachfrage, Preisgestaltung sowie Verbraucher*innenverhalten. Ziel ist es, an Informationen zu Markttrends zu gelangen, Chancen und Herausforderungen ausfindig zu machen und Einblicke in die Wettbewerbsfähigkeit des Marktes zu erhalten. Die Informationsbeschaffung kann hier mithilfe von Fragebögen, dem Durchführen von Fokusgruppen, der Untersuchung von Angeboten und Preisen und der Analyse von Branchenberichten, Nachrichten und Studien erfolgen. Der Zweck dieser Methodik besteht darin, eine möglichst genaue Einschätzung des Marktes zu erhalten, um auf Basis dessen weitere Analysen durchführen zu können, welche die Realität bestmöglich abbilden (Hussy et al., 2013, S. 20, 23; OECD, 2017, S. 2, 39).

Eine umfassende ökonomische Betrachtung von E-Traktoren als Investitionsgüter erfordert die Inkludierung der Betriebs-, Investitions- und Umrüstkosten der Maschine, ebenso wie die Betankungs- und Ladeinfrastrukturkosten. Laufende Kosten während des Betriebs und der Restwert nach Ende der Einsatzzeit werden zusätzlich berücksichtigt. Die TCO-Methode zur Berechnung der Gesamtkosten über die Haltedauer, erfasst alle Kosten, die über den gesamten Lebenszyklus einer Investition anfallen und nimmt somit eine ganzheitliche strategische Perspektive ein. Die TCO stellen eine fundierte,

wirtschaftliche Entscheidungshilfe dar. Mit dem Ziel, Kostensenkungen zu ermöglichen, können hierbei Kostentreiber identifiziert werden. Eine Einschränkung der Methode liegt darin, dass nur die Kosten berücksichtigt werden, welche die zu treffende Entscheidung beeinflussen. Externalisierte Kosten und solche, die nach dem Ende der Lebensdauer z. B. für Entsorgung anfallen, werden hier nicht berücksichtigt. Außerdem erfordert die Methode ein individuelles Vorgehen, dass auf jede Entscheidungsfindung angepasst werden muss. Risikofaktoren werden bei der Methode nicht einkalkuliert. Die folgende Formel, abgeleitet aus der Berechnungsformel für Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Energy, LCOE), wurde für die Analyse verwendet. Die LCOE-Methode bemisst die Gesamtbetriebskosten geteilt durch die Energieproduktion und berechnet somit den Gegenwartswert der Gesamtkosten über eine festgelegte Lebensdauer. Dies ermöglicht den Vergleich verschiedener Technologien mit ungleicher Lebensdauer, unterschiedlichen Kapitalkosten und Risiken (Badouard et al., 2020, S. 12; Eckel et al., 2023, S. 7; Fraunhofer ISI, 2023, S. 13; Hanson, 2011, S. 627f., 639; Roda & Garetti, 2014, S. 216, 222; U.S. Department of Energy & Office of Indian Energy, 2015, S. 3).

Formel 1. TCO-Berechnung. Verändert nach Badouard et al. (2020, S. 12).

$$TCO = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{Investition + Betriebskosten_t + Fixkosten_t + Variable\ Kosten_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Bezugsgröße\ Arbeitsstunden_t}{(1+i)^t}} - RW_n$$

Anmerkung: Mit t als Betrachtungsjahr, n als erwartete Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer, dem Zinssatz i und RW als Restwert.

5.2 Durchführung

Im Rahmen der übergeordneten Zielsetzung, Kosteneinsparungen oder zusätzliche Kosten zu identifizieren, die mit dem Einsatz von E-Traktoren in der Landwirtschaft verbunden sind, und der anschließenden Evaluation von Maßnahmen zur Förderung der Einführung von E-Traktoren, werden die oben beschriebene Methoden angewandt. Induktiv orientiert sich diese Arbeit somit daran, den aktuellen Marktstand und die Wirtschaftlichkeit von E-Traktoren zu erforschen. Aus vorangegangener qualitativer Literaturrecherche werden zusammengefasste Ergebnisse mit theoretischen Annahmen und Werten aus der Praxis verglichen, um eine quantitative Kostenanalyse mithilfe der TCO-Methode durchzuführen. Da Technologie und Entwicklungsstand komparabel sind, wurden zunächst nicht nur Studien zu Traktoren, sondern auch zu alternativen Antriebssträngen für Lkw in die Literaturrecherche aufgenommen. Dies erscheint sinnvoll, um im Fortlauf dieser Arbeit mehr Vergleichs- und Erfahrungswerte zu erhalten und die Ergebnisse der TCO-Berechnung auf deren Korrektheit überprüfen zu können.

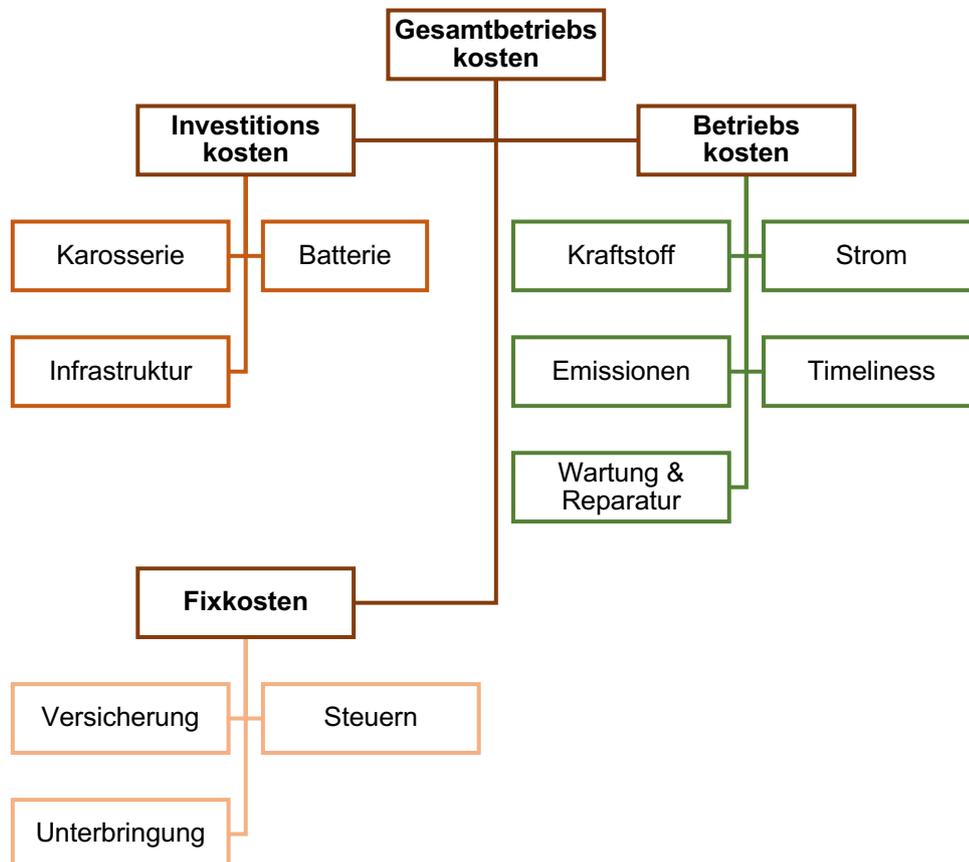
Die methodische Vorgehensweise basiert auf einer Literaturrecherche als Ausgangspunkt, einschließlich der Analyse vorhandener Studien, Berichte und wissenschaftlicher Artikel zur Wirtschaftlichkeit von E-Traktoren. Daraufhin aufbauend folgt eine Marktanalyse. Diese beinhaltet vor allem eine Wettbewerbsanalyse, bei der Daten zu Wettbewerber*innen des Marktes und zu deren Produktangebot gesammelt werden. Außerdem werden Markttrends sowie aufkommende Chancen und Bedrohungen identifiziert, die Auswirkungen auf den Markt haben könnten. Es folgt eine detaillierte Kostenanalyse, welche den Vergleich von Anschaffungs- und Betriebskosten der E-Traktoren zu konventionellen Traktoren einschließt. Die ökonomische Untersuchung bewertet die betrieblichen Auswirkungen des E-Traktoreinsatzes einschließlich möglicher finanzieller Einsparungen oder zusätzlicher Kosten. Die infrastrukturellen und regulatorischen Voraussetzungen werden identifiziert, um notwendige Lademöglichkeiten und andere Anforderungen für einen erfolgreichen E-Traktoreinsatz auf landwirtschaftlichen Betrieben zu klären. Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse werden mögliche Entwicklungen und Veränderungen im landwirtschaftlichen Betrieb durch den Einsatz von E-Traktoren unter Berücksichtigung von Unsicherheiten und Risiken abgeschätzt. Als Ergänzung zu den Ergebnissen der Kostenanalyse dienen Ergebnisse eines Fokusgruppen-Gesprächs innerhalb des „Landgewinn“-Projekts als Quelle. Das Fokusgruppen-Gespräch ist Instrument der qualitativen Forschung und zielt darauf ab, eine Gruppe von Expert*innen zu Ihren Erfahrungen und Meinungen zu einem bestimmten Thema zu befragen (Fitzpatrick & Mayer, o. J., S. 2). Schlussendlich erfolgen eine ganzheitliche Bewertung und Diskussion, die die Ergebnisse zusammenführt, um eine umfassende Einschätzung der Eignung von E-Traktoren für verschiedene landwirtschaftliche Betriebe zu ermöglichen.

5.2.1 Datenzusammenstellung

Zur Beantwortung der Forschungsfragen sind detaillierte Informationen der Untersuchungs- und Referenzobjekte gefordert. Hierbei handelt es sich um quantitative technische und ökonomische Daten. Da die Daten auf verschiedenen Annahmen basieren, sind sie mit Unsicherheiten behaftet, was in der Interpretation und Diskussion berücksichtigt wird. Für die Berechnung der TCO ist der diskontierte Barwert von Betriebskosten, Fixkosten und variablen Kosten benötigt, damit die Kosten des Produktes über die gesamte Nutzungsdauer inkludiert werden. Weiterhin sind Angaben zum Abzinsungssatz und zur Dauer der Betrachtung notwendig. Folgende Kostenkomponenten sind bei der Betrachtung von Traktoren relevant und werden für die Berechnung mit aufgenommen (Fraunhofer ISI, 2023, S. 13). Investitionskosten des Fahrzeugs und der Ladeinfrastruktur, Restwert nach Ablauf der Nutzungsdauer, jährliche Energie-, Wartungs-,

Reparatur- und Instandhaltungs-, Kfz-Versicherungs-, Kfz-Steuerkosten, jährliche Kosten der THG-Emissionen. Abb. 8 schafft eine Übersicht über die Kostenstruktur für die Berechnung der TCO.

Abb. 8. Übersicht der Kostenstruktur für die TCO-Analyse. Eigene Darstellung nach BEUC (2021, S. 3ff.) und Noorbakhsh et al. (2018, S. 437).



Eine internationale Marktanalyse stellt technische sowie Marktwert-Informationen für nachgehende Berechnungen zur Verfügung. Neben öffentlich zugänglichen Informationen und Angaben wurden Hersteller*innen und Verkäufer*innen von E-Traktoren sowie Diesel-Traktoren kontaktiert. In vorangegangenen Projektphasen von „Landgewinn“ wurde ein Fokusgruppen-Gespräch geführt, zu denen Akteur*innen aus dem Agrarsektor vor Ort waren. Neben Landwirt*innen mit Erfahrungswissen zum Einsatz von elektrischen Landmaschinen und Vertreter*innen der Forschung, waren auch Hersteller*innen von elektrischen Landmaschinen, Vertreter*innen der Forschung und der Arbeitsgruppe „Alternative Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen“ des KTBL geladen, um einen differenzierten Austausch zu ermöglichen. Die Diskussion in der Fokusgruppe wurde am 4. Juli 2023 online und mit 16 Teilnehmenden durchgeführt. Der Fokus der Online-Veranstaltung lag einerseits auf dem aktuellen Stand der Technologie einschließlich Erfahrungen und Hindernisse mit Blick auf die Planung, Umsetzung, Anwendung

und gegebenenfalls dem Recyclingoptionen von E-Mobilität in der Landwirtschaft. Die Gesichtspunkte sollten aus technischer, wirtschaftlicher, rechtlicher, ökologischer und sozialer Sicht diskutiert werden. Andererseits wurde der Blick auf die Zukunft gelenkt, um Handlungsbedarfe für eine breitere Anwendung und die Implementierung der Technologie zu diskutieren. Auch diese Aspekte sollten aus technischer, wirtschaftlicher, rechtlicher, ökologischer und sozialer (Akzeptanz-)Sicht beleuchtet werden. Die Erkenntnisse des Fokusgruppen-Gesprächs werden in Hinsicht auf die Beantwortung der Forschungsfrage bezüglich Handlungsempfehlungen als zusätzliche Quelle verwendet. Das Fokusgruppen-Gespräch brachte qualitative Erkenntnisse über Nutzen und Hemmnisse der Elektrifizierung für die Landwirtschaft, über technische Anwendbarkeit und Rahmenbedingungen sowie Handlungsbedarfe und -möglichkeiten zentraler Akteur*innen. Diese qualitativen Daten tragen der Beantwortung der dritten Forschungsfrage bezüglich Handlungsempfehlungen für den Einsatz von E-Traktoren bei. Genauer sind, neben politischen und gesetzlichen Informationen zu Rahmenbedingungen, auch subjektive Meinungen und Erfahrungswerte von Landwirt*innen und Anwender*innen der Technologien erforderlich, damit diese in das Erarbeiten von Empfehlungen einfließen können.

Für die anschließende Zusammenstellung der technischen Daten der E-Traktoren wurden zunächst herstellende Unternehmen und deren Modelle identifiziert. Bei bekannten Unternehmen wurde nach E-Traktormodellen gesucht und Unternehmen, die sich auf die Entwicklung von E-Traktoren spezialisiert haben, wurden ausfindig gemacht. Auch weniger etablierte Hersteller*innen konnten identifiziert werden, indem Berichte von Agrarfachmessen und Nachrichten durchsucht wurden. Konnten E-Traktoren erfasst werden, wurden zugehörige Datenblätter und technische Informationen gescannt und bei fehlenden Daten direkte Anfragen an die Unternehmen gestellt. Anschließend wurde im Dezember 2023 der in Anhang 11 beigelegte Fragebogen an acht Vertreter*innen von Unternehmen geschickt, die E-Traktoren entwickeln, herstellen und/oder verkaufen. Drei bearbeitete Fragebögen konnten zur Auswertung herangezogen werden und weitere Informationen wurden im persönlichen Kontakt bis Ende Februar 2024 mit fünf Personen aus verschiedenen herstellenden Unternehmen per Mail oder Telefon gewonnen. Trotz geringer Rückmeldung konnten so die wichtigsten Daten für die Kostenanalysen zusammengetragen werden. Diese unterliegen teilweise jedoch Unsicherheiten, da z. B. voraussichtliche Preisspannen statt endgültigen Marktpreisen übermittelt wurden. In Tabelle 5 ist eine Übersicht der direkten Quellen gegeben.

Tabelle 5. Befragung von Vertreter*innen von herstellenden, entwickelnden und distribuierenden Unternehmen. Eigene Darstellung.

Unternehmen	Datum	Fragebogen
AGCO / Fendt	14.11.2023 bis 08.01.2024	Erhalten zu Modell e107 V Vario, einzelne Informationen per Mail und Telefonat
Farmtrac / Fudex	14.11.2023 bis 15.01.2024	Keine Rückmeldung
John Deere	14.11.2023 bis 15.01.2024	Keine Rückmeldung, einzelne Informationen per Mail
Knegt	14.11.2023 bis 20.02.2024	Keine Rückmeldung, einzelne Informationen per Telefonat
Kubota / Fudex	14.11.2023 bis 15.01.2024	Keine Rückmeldung
Rigitrac	14.11.2023 bis 06.12.2024	Keine Rückmeldung, einzelne Informationen per Mail
Tadus	16.11.2023 bis 06.12.2024	Erhalten zu Modell Batterieelektrischer Tadus
Weidemann	14.11.2023 bis 03.01.2024	Erhalten zu Modell 1190e, einzelne Informationen per Mail

Die Daten für die Kostenanalyse wurden quantitativ erhoben, um exakte Werte für die Berechnung vorliegen zu haben. Somit wurden Daten aus direkten Quellen mit entsprechenden Daten aus der Marktrecherche ergänzt. Als Referenzen und zur Prüfung von Validität und Reliabilität wurden Studien verwendet, die den Einsatz von E-Traktoren oder anderen elektrisch angetriebenen Fahrzeugen untersuchen. Zusätzlich wurden Online-Tools und Rechner mit in die Erhebung aufgenommen, um die Richtigkeit der Berechnungen sicherzustellen. Auf diese Weise konnten auch Annahmen oder Mittelwerte gegengeprüft werden. Eine Auflistung der hinzugezogenen Werkzeuge ist in Anhang 12 dargestellt. Die Berechnungen der TCO und der Sensitivitätsanalyse dienen einem Vergleich des Untersuchungsobjektes „E-Traktor“ mit dem Referenzobjekt „Diesel-Traktor“ zur Auswertung des Technologieeinsatzes. Für die anschließende Bewertung und Ausarbeitung von Zukunftsperspektiven im politischen, gesellschaftlichen und ökologischen Kontext, waren qualitative Informationen notwendig, die v. a. aus der Literaturrecherche und einer Betrachtung aktueller Gesetzgebungen und politischer Regelungen stammen. Diese wurden ergänzt mit Erfahrungswerten und Praxiswissen aus Beiträgen des Fokusgruppen-Gesprächs. Um die Aktualität der Thematik zu berücksichtigen, werden laufend Nachrichten und Artikel themenspezifischer Zeitschriften und Magazine mit einbezogen. Gegenwärtige Entwicklungen fließen in die Interpretation der Daten mit ein.

Um exaktere Ergebnisse zu erhalten, müssten ökonomische Daten inflationsbereinigt werden. Die der Berechnung und dem Vergleich zugrunde liegenden Daten sind jedoch nicht inflationsbereinigt, da dies im vorliegenden Fall nicht zu entscheidend präziseren Ergebnissen führen würde. Alle Daten der E-Traktoren wurden in einem kurzen Zeitraum, von November 2023 bis Februar 2024, erhoben. Daten zu den Diesel-Traktoren entstammen dem MaKost-Rechner (KTBL, 2022) und sind somit aus dem Jahr 2022. Die Preise haben sich seitdem nicht mehr wesentlich geändert. Sonstige Annahmen

unterliegen bereits Ungenauigkeiten und deutlich größeren Unsicherheitsfaktoren, weshalb auf die Inflationsbereinigung verzichtet wird. Die Daten der Marktanalyse sind teilweise aufzubereiten, da einheitliche Daten für Kalkulation und Vergleich notwendig sind. Angaben zu Listenpreisen von Traktoren in US-Dollar (USD) sind mit dem durchschnittlichen Wechselkurs von 2023 von 1,0813 USD = 1 € gemäß der Wechselkursstatistik der Deutschen Bundesbank (2024, 13) in Euro umgerechnet. Sind lediglich Leistungsangaben in Kilowatt (kW) vorhanden, werden diese der Vollständigkeit halber in PS umgerechnet und umgekehrt. Die Umrechnung liegt bei 1 kW = 1,36 PS. Fehlt die Angabe der Batteriekapazität in Kilowattstunden (kWh), kann diese aus der Multiplikation von Kapazität in Amperestunden (Ah) mit der Spannung in Volt (V) berechnet werden. Wurden aus direkten Quellen Preisspannen der Investitionskosten gewonnen, sind diese als gemittelter Endpreis angegeben. Für die Marktübersicht sind alle derzeitig vorgestellten Modelle aufgestellt. Bei der Regressionsanalyse von Investitionskosten und weiterer Definition der Untersuchungsobjekte sind nur noch Modelle inkludiert, für welche ein Anschaffungspreis angegeben ist, da dies Voraussetzung der Methode ist. Datenlücken werden mit „o. A.“ (ohne Angabe) oder „-“ markiert. Teils sind mehrere Angaben zur Batteriekapazität eines Traktormodells angegeben, da verschiedene Batterieoptionen möglich sind. Hier wird für weitere Berechnungen die gemittelte Option verwendet. Zur Quantifizierung des Energiebedarfs wird die maximale aufgeführte Arbeitszeit verwendet. Der Bedarf liegt somit am unteren Rand des potenziellen Bereiches. Für die Ermittlung durchschnittlicher Werte wird die Berechnung des Medians herangezogen, um Ausreißer auszugleichen. Modelle ohne Angaben werden hierbei ausgeschlossen. Bei der Abschätzung von verursachten THG-Emissionen und deren Kosten werden Durchschnittswerte gebildet, da jede landwirtschaftliche Arbeit mit einem unterschiedlichen Energiebedarf verbunden ist und dementsprechend die Emissionsmenge variiert. Die Berechnung soll dennoch als Annäherung mit aufgenommen werden, da die CO₂-Kosten in dieser Thematik zunehmend an Relevanz gewinnen (Bundesregierung, 2024a).

5.2.2 TCO-Methode

Basierend auf der Datenzusammenstellung wird eine rechnerische Kostenanalyse der E- und Diesel-Traktoren erarbeitet. Die Kalkulationen werden mit Microsoft Excel (Version 16.82) in selbst erstellten Datenblättern durchgeführt und die Ergebnisse in Excel-Diagrammen und -Tabellen dargestellt. Mithilfe von Formel 1, werden die gesamten, auf die Nutzungsdauer bezogenen TCO berechnet und daraus streckengebundenen bzw. einsatzgebundenen TCO aller Traktorvarianten. Zunächst werden hierfür Investitions-, Betriebs- und Fixkosten aufgestellt. Die Investitionskosten des Fahrzeugs sowie der

Ladeinfrastruktur werden für die TCO-Berechnung mit dem definierten Marktzins über die gesamte Nutzungsdauer diskontiert. Um den Restwert einzukalkulieren, wird dieser von den resultierenden TCO abgezogen. Der Restwert der E-Traktoren wird hier analog zum Restwert der Diesel-Traktoren berechnet. Eine Änderung des Batteriepreises wird nicht miteinberechnet, die Steigerung des Diesel- und Strompreises konnte wiederum genauer und mit aktuellen Werten belegt werden und wird deshalb einberechnet. Für eine Kalkulation der Strom- und Dieselpreisentwicklung werden Daten der letzten zehn Jahre verwendet, um daraus die jährliche Wachstumsrate (Compound Annual Growth Rate, CAGR) zu berechnen. Bei dieser Methodik wird nur der erste und der letzte Wert innerhalb eines definierten Zeitraums verwendet und nutzt dabei das geometrische Mittel (Kästner & Kießling, 2015, S. 11; United Nations ESCAP, 2015, S. 2).

Formel 2. CAGR nach United Nations ESCAP (2015, S. 2).

$$CAGR = \left(\frac{\text{Endwert}}{\text{Startwert}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Anmerkung: Mit n als Anzahl der Perioden.

Die anschließende Sensitivitätsanalyse wird im selben Excel-Dokument ausgeführt und bezweckt die Untersuchung der Auswirkungen von Veränderungen und Unsicherheiten der Eingangsparameter der Kalkulation. Es wird die Empfindlichkeit der TCO auf Schwankungen verschiedener Variablen geprüft. Auf den Ergebnissen dieser Rechenmethode begründet kann ein Vergleich der Traktorvarianten angesetzt werden, welcher als Basis für Evaluation und Diskussion dient. Werte zu Umweltkosten aus der Literatur, ebenso wie Praxiserfahrungen von Landwirt*innen und weitere soziale, politische und ökologische Aspekte werden dafür berücksichtigt. Die nachstehende TCO-Analyse von E- und Diesel-Traktoren anhand der in Kapitel 4 definierten Objekte soll Aufschluss über die Gesamtkosten und den Zeitpunkt der Kostenparität der beiden Fahrzeuge geben.

5.2.3 Zusammenfassung der Kostenparameter

Die Berechnungsgrundlagen für alle Traktorvarianten sind 667 Jahresarbeitsstunden (h/a), die angenommene Nutzungsdauer (Betrachtungszeitraum) von 12 Jahren und der Abzinsungssatz (Diskontsatz) von 3 %. Die mittlere jährliche Fahrleistung landwirtschaftlicher Zugmaschinen beträgt laut KBA (2021, 9) 481 km. Für die TCO-Kalkulation von ET-K und DT-K werden in Tabelle 6 dargestellte Daten angenommen, als Ausgangswerte, die mithilfe der Sensitivitätsanalyse und anschließender Interpretation und Diskussion überprüft werden. Unterschieden wird zwischen Daten des Untersuchungs- und des Referenzobjekts.

Tabelle 6. Eingabeparameter für die TCO-Berechnung der leistungsschwächeren, kleineren Traktorvarianten. Eigene Darstellung.

Fahrzeugmodell		ET-K	DT-K	Anmerkungen
FAHRZEUGKOSTEN				
Fahrzeug	€	39.950	35.000	Angaben von Knecht B.V. (2023e) zu 404G2E Traktor; Definition Referenztraktor aus MaKost-Rechner der KTBL (2022)
Restwert	%	20	20	Quelle: MaKost-Rechner der KTBL (2022); 20 % des Anschaffungswertes
BATTERIE & MOTOR				
Batteriekapazität	kWh	43	-	Angaben von Knecht B.V. (2023e) zu 404G2E Traktor
Motorleistung	kW	40	34 – 40	Angaben von Knecht B.V. (2023e) zu 404G2E Traktor; Definition Referenztraktor aus MaKost-Rechner der KTBL (2022)
Batteriepreis	€/kWh	130	-	Quelle: Balakrishnan und Neef (Fraunhofer ISI, 2023)
Batterie Lebenszeit	a	8	-	Quelle: U.S. Department of Energy (2023)
INFRASTRUKTUR				
Ladeinfrastruktur	€	7.500	-	Quelle: Schulze (2022) für Ladesäule Typ 2
ENERGIEBEDARF				
Kraftstoffbedarf	L/h	-	4,3	Definition Referenztraktor aus MaKost-Rechner der KTBL (2022)
Strombedarf	kWh/h	10	-	10 kWh/h gemittelter Wert aus Hersteller*in-nendaten
Ladeverluste		0,13	-	Quelle: Reick et al. (2021)
Ladeeffizienz		0,87	-	Quelle: Reick et al. (2021)
ALLG. ANNAHMEN				
Fahrleistung	km/a	481	481	Quelle: KBA (2021)
Durchschnittliche Geschwindigkeit	km/h	7,7	7,7	Quelle: Kubota (2023)
KRAFTSTOFF & ENERGIE				
Kraftstoffart		Batterieel.	Diesel	
Kraftstoffpreis	€/L	-	1,5012	Quelle: Statistisches Bundesamt mit Abzug der Steuervergünstigung (Destatis & en2x, 2024)
Strompreis	€/kWh	0,3306	-	Quelle: Bundesnetzagentur (2023), Eurostat (2023)
EMISSIONEN				
CO ₂ -Emissionen pro Liter Diesel	t CO ₂ /L	-	0,0027	Quelle: BAFA (2024b) 0,266 t/MWh mit 9,96 kWh/l
CO ₂ -Preis	€/t	-	45	Quelle: BAFA (2023); CO ₂ -Preis unterliegt Änderungen
WARTUNG & REPARATUR				
Kostenfaktor O/M	€/h	2,95	4,10	Quelle: E-Traktor: 72% nach Lagnelöv (2021); Definition Referenztraktor aus KTBL MaKost-Rechner (KTBL, 2022)
VERSICHERUNG				
Kfz-Haftpflichtversicherung	€/a	195	195	Quelle: KTBL MaKost-Rechner (2022)
STEUERN				
Kfz-Steuern	€/a	0	0	Landwirtschaftliche Fahrzeuge sind von Kfz-Steuern befreit.
INFRASTRUKTUR				
Unterbringung	€/a	89	89	Quelle: KTBL MaKost-Rechner (2022)

Für die Kalkulation der TCO von ET-G und DT-G werden folgende Daten angenommen, welche anschließend mit den Daten der kleineren Leistungsklasse verglichen werden.

Tabelle 7. Eingabeparameter für die TCO-Berechnung der leistungsstärkeren, größeren Traktorvarianten. Eigene Darstellung.

Fahrzeugmodell		ET-G	DT-G	Anmerkungen
FAHRZEUGKOSTEN				
Fahrzeug	€	205.800	47.000	Angaben von Knecht B.V. (2023e) zu 404G2E Traktor; Definition Referenztraktor aus KTBL MaKost-Rechner (KTBL, 2022)
Restwert	%	20	20	Quelle: MaKost-Rechner der KTBL (2022); 20 % des Anschaffungswertes
BATTERIE & MOTOR				
Batteriekapazität	kWh	100	-	Angaben von Knecht B.V. (2023e) zu 404G2E Traktor
Motorleistung	kW	55	49 – 59	Angaben von Knecht B.V. (2023e) zu 404G2E Traktor; Definition Referenztraktor aus KTBL MaKost-Rechner (KTBL, 2022)
Batteriep Preis	€/kWh	130	-	Quelle: Balakrishnan und Neef (Fraunhofer ISI, 2023) (2023), 120 \$
Batterie Lebenszeit	a	8	-	Quelle: U.S. Department of Energy (2023)
INFRASTRUKTUR				
Ladeinfrastruktur	€	7.500	-	Quelle: Schulze (2022) für Ladesäule Typ 2
ENERGIEBEDARF				
Kraftstoffbedarf	L/h	-	6,30	Definition Referenztraktor aus KTBL MaKost-Rechner (KTBL, 2022)
Strombedarf	kWh/h	35	-	10 kWh/h gemittelter Wert aus Hersteller*in-nendaten
Ladeverluste		0,13	-	Quelle: Reick et al. (2021)
Ladeeffizienz		0,87	-	Quelle: Reick et al. (2021)
ALLG. ANNAHMEN				
Fahrleistung	km/a	481	481	Quelle: KBA (2021)
Durchschnittliche Geschwindigkeit	km/h	7,7	7,7	Quelle: Kubota (2023)
KRAFTSTOFF & ENERGIE				
Kraftstoffart		Batterieel.	Diesel	
Kraftstoffpreis	€/L	-	1,5012	Quelle: Statistisches Bundesamt mit Abzug der Steuervergünstigung (Destatis & en2x, 2024)
Strompreis	€/kWh	0,3306	-	Quelle: Bundesnetzagentur (2023), Eurostat (2023)
EMISSIONEN				
CO ₂ -Emissionen pro Liter Diesel	t CO ₂ /L	-	0,0027	Quelle: BAFA (2024b) 0,266 t/MWh mit 9,96 kWh/l
CO ₂ -Preis	€/t	-	45	Quelle: BAFA (2023); CO ₂ -Preis unterliegt Änderungen
WARTUNG & REPARATUR				
Kostenfaktor O/M	€/h	3,82	5,30	Quelle: E-Traktor: 72% nach Lagnelöv (2021); Definition Referenztraktor aus KTBL MaKost-Rechner (KTBL, 2022)
VERSICHERUNG				
Kfz-Haftpflichtversicherung	€/a	340	340	Quelle: KTBL MaKost-Rechner (2022)
STEUERN				
Kfz-Steuern	€/a	0	0	Landwirtschaftliche Fahrzeuge sind von Kfz-Steuern befreit.
INFRASTRUKTUR				
Unterbringung	€/a	112	112	Quelle: KTBL MaKost-Rechner (2022)

In Kapitel 6 werden zunächst die Ergebnisse von Literaturrecherche und Marktanalyse und dann die Ergebnisse der TCO- und Sensitivitätsanalyse vorgestellt.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden Ergebnisse der in Kapitel 5 vorgestellten Forschungsmethoden vorgestellt. Diese gliedern sich in die Ergebnisse der Markt- und Literaturrecherche mit den Basisdaten und Annahmen für die Gesamtkostenbetrachtung, der Berechnung der Gesamtkosten und die darauf aufbauende Sensitivitätsanalyse.

6.1 Marktdaten

Die Marktdaten sind Ergebnisse der Marktanalyse und Grundlage für weitere Berechnungen. In Tabelle 8 sind die grundlegenden Berechnungskomponenten dieser aufgelistet.

Tabelle 8. Preisentwicklungen für die TCO-Berechnung. Eigene Darstellung.

Preisentwicklungen	Wert	Quelle
	%/a	
Batteriepreisentwicklung	o. A.	Fraunhofer ISI, -6,7 % nach Mareev et al. (2017)
Kraftstoffpreisentwicklung	2,76	Statistisches Bundesamt (2024), Mareev et al. (2017)
Strompreisentwicklung	2,46	Destatis (2023), Eurostat (2023)
CO ₂ -Preisentwicklung	Spezifische Steigerung	BEHG (Brennstoffemissionshandelsgesetz, 2022, S. 9)

Neben laufenden Forschungsprojekten gibt es E-Traktor-Modelle, die schon auf dem Markt zur Verfügung stehen oder deren Serienproduktion für die nahe Zukunft geplant ist. In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Marktanalyse dargestellt. Die wichtigsten Unternehmen und deren E-Traktor-Modelle sind aufgelistet und spezifiziert. Die Tabelle zeigt auch eine Übersicht der Anschaffungskosten der E-Traktoren, für die Informationen verfügbar sind. Die vorliegenden Preise sind exklusive Mehrwertsteuern angegeben. Es wird davon ausgegangen, dass Landwirt*innen keine Mehrwertsteuern für die Traktoren bezahlen oder sich diese zurückerstatten lassen können (Heinemann & Kemper, 2024, S. 2). Für die nachfolgenden Kalkulationen liegen weitere Preise aus direkten Quellen vor, die nicht explizit veröffentlicht werden dürfen. Diese Preise werden jedoch anonymisiert in die Berechnungen einbezogen. Es handelt sich um zwei Modelle im unteren Leistungssegment mit Kosten von 67.500 € und 198.000 € und ein Modell im höheren Leistungssegment mit Kosten von 300.000 €. Eine Übersicht weiterer technischer Parameter der E-Traktoren findet sich in Anhang 13.

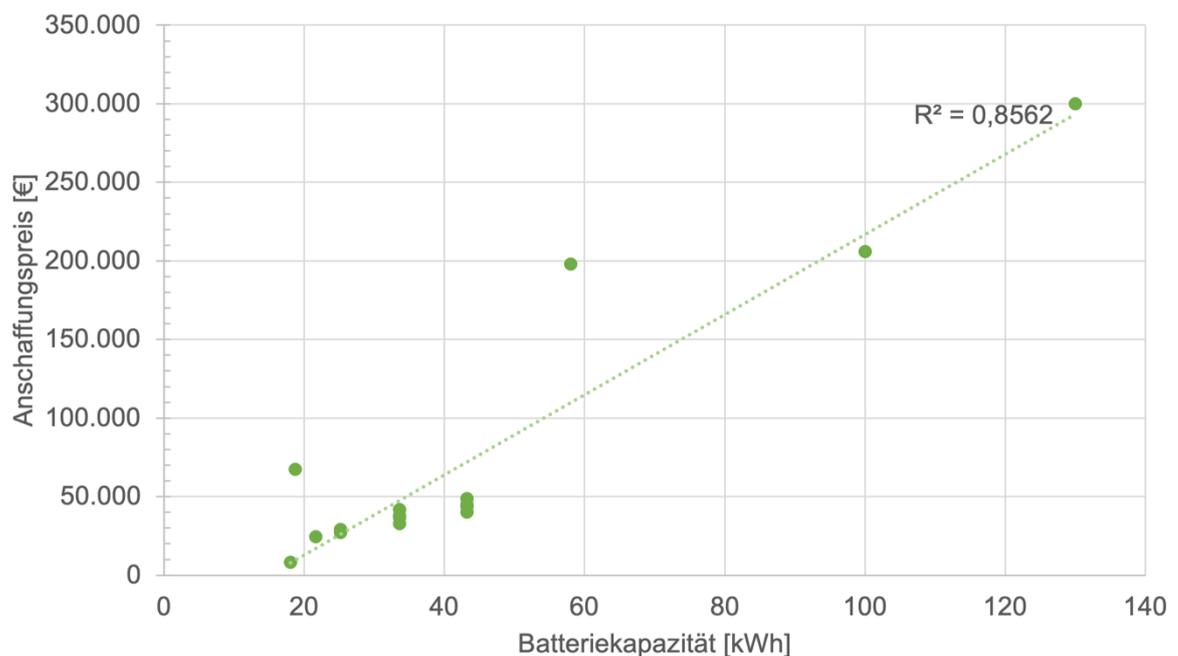
Tabelle 9. Ergebnisse der Marktanalyse: Übersicht der E-Traktoren. Eigene Darstellung nach Hersteller*innenangaben siehe Anhang 14.

Unternehmen	Modell	Art (Antriebsart / Typ)	Leistung	Kapazität	Entwicklungsstand / Preis	Batterie (Zellchemie / Spannung / Kapazität)
			kW	kWh		
Case IH	Farmall 75C Electric	Allrad / -	55	95	Auf dem Markt / -	- / - / -
Cellestial	27 HP Tractor	Allrad / -	13,5	18	Auf dem Markt / 8.166,10 €	- / - / 150 Ah
Farmtrac	25G	- / Kompakttraktor (Rasentraktor)	18,4	21,6	Auf dem Markt / 24.604,00 €	- / - / -
Fendt	e100 V Vario / e107 V Vario	- / Schmalspurtraktor	55	100	2017 vorgestellt, Se- rienproduktion ab 2024 / 205.800,00 €	Li (NMC) / 700 V / -
John Deere	SESAM	- / -	130	-	Prototyp 2016 vor- gestellt (ab 2026 auf dem Markt, nicht SESAM, aber ein vollelektrischer Trak- tor mit 100 PS und autonom) / -	Li / - / -
	SESAM 2	- / Autonomer Groß- traktor	500	1000	Prototyp 2022 vor- gestellt / -	Li / - / -
Knecht	304G2e	Allrad / -	33	-	Auf dem Markt in verschiedenen Vari- anten / 32.950,00 €	Li / - / -
	404G2E	Allrad / -	40	-	Auf dem Markt in verschiedenen Vari- anten / 39.950,00 €	Li / - / -
Kubota	Lxe-261	- / Kompakttraktor	12	25	Auf dem Markt seit April 2023 / -	- / - / -
	RT220-2e	- / Kompaktraktor	12	12,5 / 18,7 / 25,0	Auf dem Markt / -	Li / 48 V / 260 Ah
	RT210-2e	- / Kompaktraktor	12	12,5 / 18,7 / 25,0	Auf dem Markt / -	Li / - / -
Monarch	MK-V	Allrad / -	30	-	Auf dem Markt / 91.500,00 €	- / - / -
New Holland	T4 Electric Power	Allrad / -	48	110	Ab Anfang 2024 auf dem Markt / -	- / - / -
Onox	Onox	Allradtraktor / -	50	30	Noch nicht auf dem Markt / -	- / - / -
Rigitrac	SKE 50 Electric	Allrad / Schmalspur- traktor	40	58	Auf dem Markt / -	Li / - / -
Solectrac	e25G Gear	- / Kompakttraktor	19	25,2	Auf dem Markt in verschiedenen Vari- anten / 27.049,85 €	Li (NMC) / - / -
	e25H Hyd- rostatic	- / Kompakttraktor	19	25,2	Auf dem Markt in verschiedenen Vari- anten / 29.130,68 €	Li NMC / - / -
	eUT+ Narrow	- / Schmalspurtraktor	55	-	Ab Anfang 2024 auf dem Markt / -	- / - / -
Tadus	Batterie- elektri- scher TADUS	Allrad / -	100	130	Prototyp, Serienpro- duktion geplant ab Mitte 2025 / -	Li / - / -
Weidemann	Hoftrac 1390e	- / Lader	33,1	14,1 / 18 / 28	Auf dem Markt / -	Li / 96 V / -
	Hoftrac 1190e	- / Lader	8,5	14,1 / 18,7 / 23,4	Auf dem Markt / -	Li / 48 V / -
ZY Elektrikli Traktör	ZY Elekt- rikli Traktör	- / -	96	155	Massenproduktion ab 2024 / -	- / - / -

Anmerkung: Ah = Amperestunden, Li = Lithium Ionen, NMC = Nickel-Mangan-Kobalt, „-“ = ohne Angabe, V = Volt.

Um die Beziehung zwischen Anschaffungspreis und Batteriekapazität der E-Traktoren zu untersuchen, wird in Abb. 9 eine lineare Regressionsanalyse dargestellt. Das mit R^2 beschriebene Bestimmtheitsmaß „gibt an, wie stark die unabhängige Variable durch die verwendeten Einflussgrößen bestimmt ist und wie stark die Variable von anderen Faktoren beeinflusst wird, die im Regressionsmodell nicht berücksichtigt wurden“ (Ring et al., 2006, S. 608). Je näher das Bestimmtheitsmaß an eins liegt, desto besser bestimmt die Regression die Zielgröße. R^2 liegt bei oben beschriebenem Regressionsmodell bei 0,8562. Ein R^2 in diesem Bereich deutet darauf hin, dass das Modell die Daten mit hoher Wahrscheinlichkeit ausreichend gut beschreibt. Es kann jedoch nicht ausreichend geklärt werden, ab welchem Wert das Bestimmtheitsmaß genügend oder sogar gut ist. Diese Bewertung unterliegt gewissen Unsicherheiten und weiteren Einflussfaktoren. Kapazität und Leistung korrelieren miteinander, je höher die Kapazität ist, desto höher ist auch die Leistung.

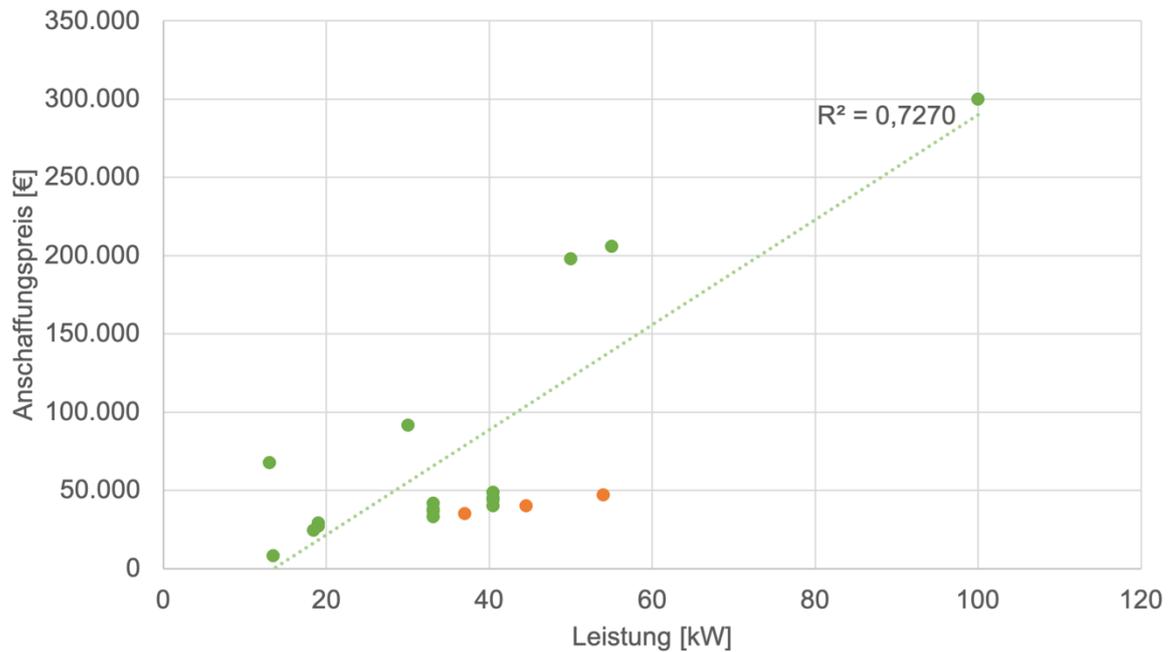
Abb. 9. Regressionsanalyse der Preise von E-Traktoren auf dem Markt in Abhängigkeit von der Batteriekapazität. Eigene Darstellung nach Angaben siehe Anhang 14.



Anmerkung: Unabhängige Variable = Batteriekapazität, abhängige Variable = Anschaffungspreis.

Der Anschaffungspreis in Abhängigkeit von der Leistung wird von einer linearen Regression jedoch weniger genau erklärt. Das Bestimmtheitsmaß liegt nur bei 0,7270, siehe Abb. 10. Es wurden die durchschnittlichen Anschaffungspreise von Diesel-Traktoren (nach KTBL (2022)) bei den entsprechenden Leistungen als Vergleichswert mit aufgenommen. Die Kosten liegen unter der Regressionsgeraden der E-Traktoren.

Abb. 10. Regressionsanalyse der Preise von E-Traktoren auf dem Markt in Abhängigkeit von der Leistung. Eigene Darstellung nach Angaben siehe Anhang 14 und KTBL (2022).



Anmerkung: Unabhängige Variable = Leistung, abhängige Variable = Anschaffungspreis. Die orangene Werte entsprechen den Daten der Diesel-Traktoren.

Mit der Regressionsanalyse der Investitionskosten im Zusammenhang mit der Batteriekapazität können die Anschaffungspreise von E-Traktoren wie folgt angenommen werden.

Tabelle 10. Anschaffungspreise abhängig von der Batteriekapazität auf Basis der Regressionsanalyse. Eigene Darstellung.

Batteriekapazität	Anschaffungspreis
<i>kWh</i>	€
40	65.000
60	115.000
80	165.000
100	215.000
120	265.000

Der für die TCO-Analyse verwendete Anschaffungspreis des E-Traktors mit 43 kWh liegt mit 39.950 € um 44,51 % unter dem hier berechneten Wert, wohingegen der Anschaffungspreis des E-Traktors mit 100 kWh und 205.800 € nur 4,72 % unter dem der Regressionsanalyse liegt. Die Abweichung der gewählten Werte wird später über die Sensitivitätsanalyse adressiert.

6.2 Kostenstruktur

Die kostenseitigen Annahmen fundieren auf Literaturrecherche und Marktanalyse. Unterteilt wird in Investitionskosten, welche einmalig getätigt werden, und Fixkosten, welche unabhängig von Betriebsvorgängen über den Betrachtungszeitraum hinweg gleichbleibend sind. Des Weiteren gibt es Betriebskosten, welche die variablen Kosten bezeichnen, die abhängig sind von der Nutzungsintensität über den gesamten Betrachtungszeitraum. Im Folgenden werden die Kosten für die betrachteten Traktormodelle einzeln erläutert und aufgeführt. Sie sind unterteilt in die drei Kategorien, da diese Abgrenzung für die anschließende Berechnung der TCO zweckmäßig ist.

6.2.1 Investitionskosten

Zu den Investitionskosten zählen alle Kosten, die zu Anfang des Betrachtungszeitraums getätigt werden und nicht jährlich wiederkehren. Es können weitere Investitionskosten während der Betrachtungsdauer hinzukommen, haben z. B. einzelne Fahrzeugteile kürzere Lebensdauern und müssen ausgetauscht werden. Es zählen somit die Anschaffungskosten der Fahrzeuge und im Fall der E-Traktoren gegebenenfalls Kosten zusätzlicher Batterien und die Kosten der Ladeinfrastruktur hinzu (Basma et al., 2022, S. 4f.).

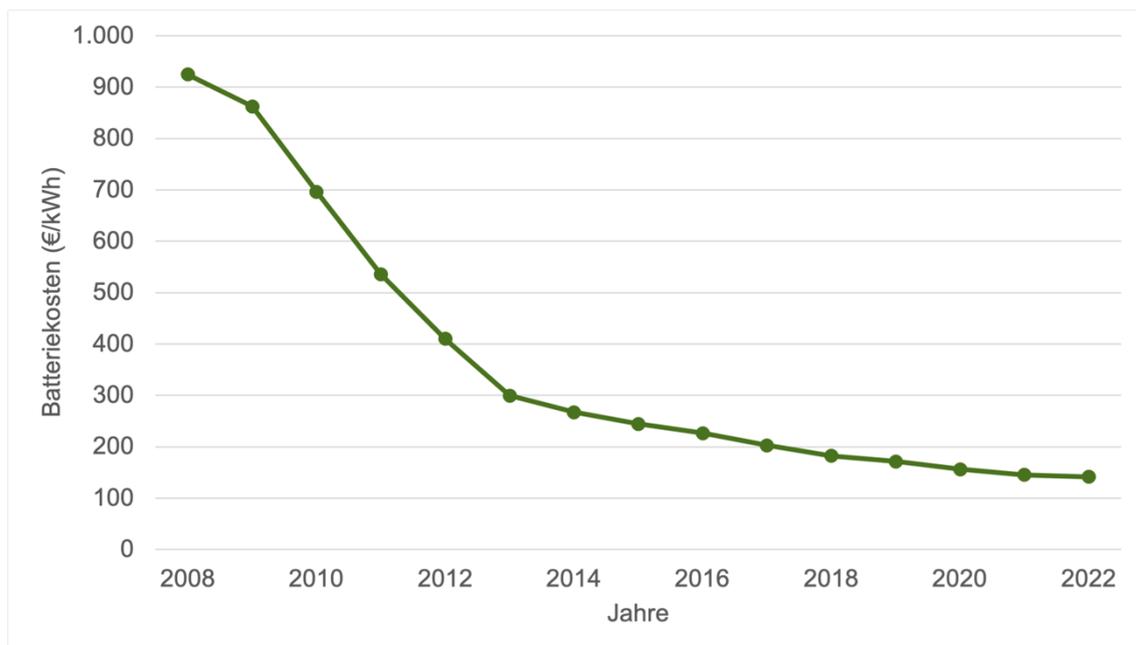
Fahrzeuge

Die Anschaffungspreise für die Diesel-Traktoren liegen bei 35.000 € (DT-K) und 47.000 € (DT-G). Anschaffungskosten der E-Traktoren, die schon marktreif sind oder in naher Zukunft verfügbar sein sollen, sind in Tabelle 9 dargestellt. Um die Ungenauigkeit einer Durchschnittsbildung zu vermeiden, werden für die erste TCO-Kalkulation Daten eines repräsentativen Traktormodells verwendet. Das Modell „404G2E“ der Firma Knecht aus den Niederlanden wird mit einer Leistung von 40 kW und der Batteriekapazität von etwa 43 kWh für einen Netto-Preis von 39.950 € verkauft. Das Modell „e107 V Vario“ von Fendt wird mit einer Leistung von 55 kW und der Batteriekapazität von 100 kWh für einen Netto-Preis von 205.800 € verkauft. Die Analyse der Investitionskosten vergleichbarer Traktormodelle zeigt, dass E-Traktoren in der Anschaffung teurer sind als konventionelle Diesel-Traktoren. Bei den betrachteten Modellen beläuft sich die Differenz zwischen E- und Diesel-Traktor auf 35,57 % bis 353,83 % höhere Investitionskosten. Der Restwert der Traktoren wird entsprechend dem MaKost-Rechner des KTBL (2022) mit 20 % des anfänglichen Investitionspreises berechnet. Die Lebensdauer wird hier mit 12 Jahren angesetzt, denn in der Landwirtschaft Nutzungsdauern von 12 und mehr Jahren üblich (Eckel et al., 2023, S. 24).

Batterie

Die Batteriekosten sind relevant für den Fall eines Austausches während der Nutzungsdauer. Batterie-Paket-Preise variieren und werden bezogen auf deren Kapazität (in kWh) angegeben. In Phadke et al. (2021, S. 17) wird eine Li-Ionen-Batterie mit einer Kapazität von 375 kWh beschrieben. Der Batteriepreis lag hier bei 118 €/kWh. Nach Mareev et al. (2017, S. 20) ist anzunehmen, dass Batteriepreise für elektrisch angetriebene Fahrzeuge in Zukunft dank Skaleneffekten und Verbesserung der Effizienz sinken und die Entwicklung dafür bei -6,7 %/a liegt. Das U.S. Department of Energy schätzt Kosten für Li-Ionen-Akkus, wie in Abb. 11 sichtbar. Das Fraunhofer ISI (Balakrishnan & Neef, 2023, S. 1) prognostiziert jedoch, dass nach starken Schwankungen des Preisniveaus innerhalb der letzten 5 bis 6 Jahre, in naher Zukunft kein eindeutiger Preisrückgang wahrscheinlich ist.

Abb. 11. Kostenabschätzung für Li-Ionen-Akkus für E-Fahrzeuge. Eigene Darstellung nach Daten des U.S. Department of Energy (2023).



Anmerkung: Euro pro kWh nutzbarer Energie, nicht an die Inflation angepasst. Basisdaten in US-Dollar, Umrechnung mit durchschnittlichem Wechselkurs aus 2023 (Deutsche Bundesbank, 2024, S. 13).

Der Materialpreis ist stark beeinflusst von Marktfaktoren wie Angebot und Nachfrage, wobei geopolitische Fragen und Wechselkurse den Preisbildungsprozess zusätzlich komplexer machen. In den letzten Jahren haben außerdem Faktoren, wie die weltweite Konjunkturabschwächung, Effekte des Kriegs in der Ukraine und weitere, die Preisbildung maßgeblich beeinflusst. Es ist weiterhin mit Preisen über 100 USD/kWh zu rechnen. NMC-Batterien, eine typische Art der Li-Ionen-Batterie, lagen im Jahr 2023 bei

130 €/kWh. Die Lebenszeit einer Batterie beträgt nach Phadke et al. (2021, S. 17) etwa 7 Jahre, hängt dabei aber wesentlich von den Ladezyklen ab. Die Technologie entwickelt sich auch in diesem Bereich stetig weiter und heutige Batterien elektrischer Personenkraftwagen haben laut Hersteller*innenangaben eine Lebensdauer von mindestens 8 Jahren. Die oben beschriebene Batterie mit 375 kWh hat eine Lebensdauer von 2.000 Vollladezyklen bei einer jährlichen Fahrstrecke von 125.000 km, was eher einem Langstrecken LKW als einem Traktor entspricht. Die Kapazität von E-Traktoren liegt jedoch weit unter der von LKW. Die Lebensdauer der Li-Ionen-Batterien von E-Traktoren auf dem Markt liegt heutzutage durchschnittlich bei rund 3.500 Zyklen (Balakrishnan & Neef, 2023, S. 1; Mareev et al., 2017, S. 20; Phadke et al., 2021, S. 17; Rudschies, 2022, S. 1; U.S. Department of Energy, 2023, S. 1).

Ladeinfrastruktur

Unterschieden wird zwischen Normalladepunkten mit bis zu 22 kW Ladeleistung und Schnellladepunkten, deren Leistung über 22 kW betragen kann. Typischerweise ist der Netzanschluss auf maximal 22 kW (3-Phasen-System mit 32 A) begrenzt, häufiger vertreten sind Ladepunkte mit 11 kW. Eine maximale Leistung von 22 kW kann selbst mit On-Board-Chargern erreicht werden. Diese sind eine im Fahrzeug verbaute Verbindung, die es ermöglicht E-Fahrzeuge direkt vom Stromnetz mit AC-Spannung zu laden und diese in DC-Spannung umzuwandeln. Der Typ-2-Stecker (Abb. 12, links) ist die gesetzliche Norm (Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, 2014, S. 16) und mittlerweile der europäische Standard für das normale Laden mit Wechselstrom. Die meisten europäischen Fahrzeuge, darunter auch aktuell verfügbare E-Traktoren, und öffentlichen Ladestationen sind heute mit einem Typ-2-Stecker ausgestattet. Für die Errichtung von Normal- und Schnellladepunkten mit DC-Lademöglichkeit ist die Ausstattung jedes Ladepunktes mit Combo 2-Steckverbindern (Abb. 12, rechts) vorgeschrieben. Der Combo-Charge-System-Stecker (CCS), mit welchem sehr hohe Leistungen übertragen werden können, ist der gesetzliche Standard. Der CCS-Combo-2-Stecker wird in Deutschland voraussichtlich das dominierende Steckersystem für Fahrzeuge werden (Prüfling & Langer, 2022, S. 375; Schulze, 2022, S. 75f., 78; Yuan et al., 2021, S. 51501).

Abb. 12. Ladestecker für batterieelektrische Fahrzeuge. Interchargers (2022).



Die Investitionskosten für Ladeinfrastruktur sind stark variabel und weisen sowohl innerhalb der Technologien als auch zwischen den verschiedenen Technologieoptionen große Preisunterschiede auf. Kosten einer privaten Wallbox variieren nach Schätzungen aus der Literatur von Büniger et al. (2019, S. 24) von 1.650 € inklusive Hardware-, Netzanschluss- und Installationskosten bis 5.200 € nach Auf der Maur et al. (2020, S. 23). Diese Werte stimmen mit aktuellen Marktzahlen überein, hier werden für private Wallboxen Anschaffungspreise von 1.400 bis 6.700 € genannt (Wolfer, 2024, S. 1). Für einen 11/22 kW (AC) Ladepunkt 2.500 € für die Hardware, bis zu 2.000 € Gebühren für den Netzanschluss, 1.000 € für die Genehmigung, welche für Anschlüsse über 11 kW notwendig ist und 2.000 € für Installation. Insgesamt wird somit mit bis zu 7.500 € gerechnet (U. Büniger et al., 2019, S. 24). Für einen 11 kW (AC) Ladepunkt inklusive Leistungselektronik sowie Installation werden in einer Studie der Agora Verkehrswende (2022, S. 20) 4.000 € plus 500 € Netzanschlusskosten angegeben. Schulze (2022, S. 93) beschreibt die Kosten für öffentliche Ladepunkte mit 3.250 € für eine Wallbox des Typ 2, 15.900 € für eine Ladesäule des Typ 2 mit zwei 22 kW Ladepunkten und 46.150 € für eine Ladesäule (DC) CCS/CHAdeMo/Typ 2, jeweils inklusive aller anfallenden Kosten. Für die TCO-Kalkulation wird mit Investitionskosten von 7.500 € für die Ladeinfrastruktur gerechnet. Dabei wird von 7.500 € von Normalladepunkten mit einer Leistung bis 22 kW ausgegangen.

6.2.2 Fixkosten

Zu den fixen Kosten zählen all jene, die unabhängig von gefahrenen Kilometern bzw. Stunden des Fahrzeugs sind. Dazu zählen Versicherungskosten, Steuern und laufende Kosten für Infrastruktur. Bei den Versicherungskosten handelt es sich vordergründig um die Kfz-Haftpflichtversicherung, welche abhängig von der Leistungsklasse ist. Das KTBL (2022) gibt die jährlichen Kosten für die Leistungsklasse von 34 bis 40 kW mit 195 € und für die Leistungsklasse von 49 bis 59 kW mit 340 € an. Da die Versicherungskosten für E- und Diesel-Traktoren gleich sind, werden diese Werte für die Berechnungen verwendet. Nach § 3 Nummer 7 Kraftfahrzeugsteuergesetz (KraftStG) können landwirtschaftliche Zugmaschinen von der Kraftfahrzeugsteuer (KFZ-Steuer) befreit sein, sofern sie bestimmte Anforderungen erfüllen. Hierzu gehört die ausschließliche Nutzung der Fahrzeuge für landwirtschaftliche Zwecke. Demnach werden keine Steuerabgaben in die Berechnung mit aufgenommen. Zu Fixkosten der Infrastruktur gehören die jährlich wiederkehrenden Kosten der Unterbringung, wie Stellplätze oder Parkgebühren. Das KTBL berechnet 89 € pro Jahr für die kleineren Traktoren und 112 € pro Jahr für die größeren Traktoren. Diese Werte werden analog für die Berechnung der TCO genutzt (Basma et al., 2022, S. 4; KTBL, 2022; Maschinenring Tirol, 2023; Vaupel, 2020, S. 88).

6.2.3 Variable Kosten

Die Betriebskosten von E-Traktoren sind variabel, da sie in direktem Zusammenhang mit der Fahrleistung stehen. Außerdem können sie, je nach Alter des Traktors und dessen Nutzung, unterschiedlich ausfallen. Unter die Betriebskosten fallen Kosten für Wartung und Reparatur, Timeliness Kosten sowie Kosten für Betriebsstoffe und Emissionen (Basma et al., 2022, S. 8; KTBL, 2022; Shao & Anup, 2022, S. 8).

Wartung und Reparatur

Nach Lagnelöv et al. (2021) liegen die Reparaturkosten eines E-Traktors bei 72 bis 81 % der Reparaturkosten eines Diesel-Traktors. Laut Todus (2023, S. 1) liegen Reparaturkosten batterieelektrischer Traktoren sogar bei nur 50 % der Reparaturkosten eines konventionellen Pendants. Nach Schätzungen von Proctor (2022, S. 8) und basierend auf einem Bericht des US-Büros für Energieeffizienz und Erneuerbare Energien (US Energy Efficiency and Renewable Energy Office) aus dem Jahr 2021, liegen die Wartungskosten für mittlere und schwere batterieelektrische Nutzfahrzeuge etwa 40 % unter denen vergleichbarer Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Da E-Traktoren über deutlich weniger bewegliche Teile verfügen, ist es plausibel anzunehmen, dass die Wartungskosten deutlich niedriger sind als für Diesel-Traktoren. Die geringere Komplexität des

Antriebsstrangs sorgt für weniger Verschleiß. Es werden die mittleren Reparaturkosten der in Kapitel 4.2 definierten Referenz-Traktoren des MaKost-Rechners des KTBL (2022) betrachtet, welche sich somit auf 4,00 €/h belaufen. Die entsprechenden Kosten der E-Traktoren liegen damit bei 2,88 €/h, wird mit einem Prozentsatz von 72 % gerechnet, um von einem relativ hohen Stand der Technik von E-Traktoren auszugehen, da die Daten von Lagnelöv von 2021 sind und die Technik sich schnell weiterentwickelt (KTBL, 2022; Proctor, 2022, S. 8).

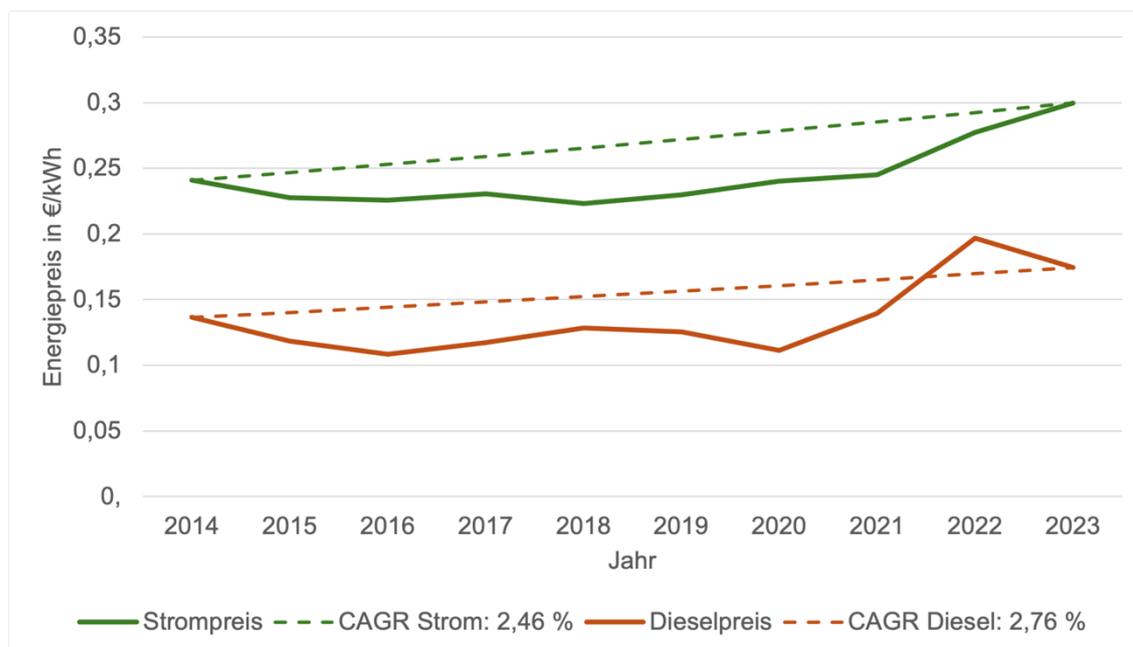
Energiekosten

Der Energiebedarf von Landmaschinen kann stark variieren. Einflussfaktoren ergeben sich aus den individuellen betrieblichen Gegebenheiten und den Produktionsabläufen. Darunter zählen u. a. die Boden- und Klimaregion, angebaute Kulturen und deren Fruchtfolge, die eingesetzte Verfahrenstechnik, dazugehörige Geräte und Maschinen und der Einsatz von präzisen Landwirtschaftstechnologien. Die Energiekosten der E-Traktoren setzen sich aus Strompreis und Strombedarf zusammen. Die Strompreise in Deutschland zeigten im Zeitraum von 2019 bis 2022 eine starke Volatilität. Der Strompreis für Nicht-Haushalte mit einem Energiebedarf von 20 bis unter 500 MWh stieg im Zeitraum zwischen dem zweiten Halbjahr von 2018 bis zum ersten Halbjahr von 2023 von 0,2256 €/kWh auf 0,2997 €/kWh an. Im Jahr 2023 war eine leichte Entspannung der Strompreisentwicklung zu verzeichnen. Der mittlere Anstieg des Strompreises, die CAGR, liegt bei +2,46 %, wie in Abb. 13 sichtbar. Da eine positive oder negative Entwicklung des Strompreises schwer abzusehen ist, wird dieser gemittelte Wert als Faktor in die TCO-Kalkulation aufgenommen. Landwirtschaftliche Betriebe können eine Steuerentlastung für Strom, welcher nach § 3 des Stromsteuergesetzes (StromStG, 2023, S. 3) versteuert wurde, beantragen. Wird dieser allerdings für Elektromobilität genutzt, wird die Entlastung nicht gewährt. Landwirtschaftliche Betriebe sind verpflichtet, den üblichen Gewerbestrompreis zu bezahlen. Für die Berechnung wird ein Strompreis von 33,06 ct/kWh verwendet. Der Strombedarf der E-Traktoren variiert stark, je nach Leistungsanforderung (vgl. Dieselbedarf verschiedener Arbeitsvorgänge in Abb. 2), Batteriekapazität und weiteren Faktoren. Für die TCO-Berechnung ist ein festgelegter Durchschnittswert notwendig, weshalb hier der entsprechende Wert von 10 kWh/h für ET-K verwendet wird und 35 kWh/h für ET-G. Ladeverluste, die beim Aufladen der Batterie entstehen und auf den Strombedarf anfallen, werden zusätzlich einberechnet. In einer Studie von Reick et al. (2021, S. 736) lagen die Ladeverluste der getesteten E-Fahrzeuge mit vergleichbarem Ladetyp (3 Phasen, 16 A) bei 12,79 %. Daraus ergibt sich eine

mittlere Ladeeffizienz von 87,21 % (Destatis, 2023, S. 1; Eckel et al., 2023, S. 23; Shao & Anup, 2022, S. 8; Strom-Report, 2024a, S. 1, 2024b, S. 1).

Die Energiekosten der Diesel-Traktoren setzen sich aus Dieselpreis, Kraftstoffverbrauch und der anfallenden CO₂-Bepreisung zusammen. Nach § 2 des Energiesteuergesetzes (EnergieStG, 2022, S. 7) wird Diesel mit 470,40 € pro 1.000 l Gasöl versteuert. Jedoch können nach § 57 ebendieses Gesetzes eine Steuerentlastung von 214,80 € pro 1.000 l Gasöl beantragt werden. Somit verbleiben 255,60 € zu zahlender Steuer pro 1.000 l Gasöl (EnergieStG, 2022, S. 45f.). Dieser steuerlich begünstigte Diesel wird auch Agrardiesel genannt. Laut dem Statistischen Bundesamt (2024, S. 1) lag der Dieselpreis im deutschlandweiten Mittel in 2024 bei 1,7160 €/l. Nach Abzug der Steuerentlastung, welche als Rückzahlung verrechnet wird, beträgt der Dieselpreis noch 1,5012 €/l. Nach Mareev et al. (2017) sowie dem Statistischen Bundesamt (2024, S. 1) liegt die Dieselpreisentwicklung bei +2,3 %/a. Wird die Betrachtung jedoch auf die vergangenen 5 Jahre reduziert, beläuft sich die Entwicklung auf +11,15 %/a (CAGR), was auch die extreme Änderung innerhalb der letzten Jahre deutlich aufzeigt. Um einen mit der Strompreisentwicklung vergleichbaren Wert zu erhalten, wird sich auf die Betrachtung von 2014 bis 2023 beschränkt. Hier beläuft sich die CAGR auf +2,76 %, wie in Abb. 13 sichtbar.

Abb. 13. Durchschnittliche Strom- und Dieselpreise in Deutschland zwischen 2014 und 2023 mit jeweiliger CAGR. Eigene Darstellung nach Daten des Statistischen Bundesamtes (2024, S. 1), des BDEW (2022, S. 309) und von Statista und en2x (2024).



Für den Kraftstoffverbrauch muss ebenfalls ein Durchschnittswert angenommen werden, um die TCO ermitteln zu können. Diese werden nach Daten des KTBL MaKost-Rechners

(2022) gemittelt und in Kap. 4.2 für die untersuchten Maschinen mit 4,10 l/h (DT-K) und 6,30 l/h (DT-G) definiert. Getrennt von der Dieselpreis wird die CO₂-Bepreisung berechnet. Seit dem 1. Januar 2024 liegt der offizielle CO₂-Preis bei 45 €/t CO₂. Dieser soll bis 2025 auf 55 €/t CO₂ schrittweise gesteigert werden, im Jahr 2026 zwischen 55 und 65 €/t CO₂ liegen und für die Folgejahre sind noch keine spezifischen Werte festgelegt. Sicher ist jedoch, dass der Preis weiter steigen wird, deshalb wird für die Berechnung ab 2027 eine Steigerung von 5 €/a angenommen. Eine Übersicht über die Preissteigerung ist in Anhang 15 zu finden. Da die Emissionskosten beim Tanken an der Tankstelle schon im Preis inbegriffen sind, wird die Preissteigerung erst ab dem zweiten Jahr mit einberechnet. Diesel hat einen CO₂-Faktor von 0,266 t CO₂/MWh und einen Heizwert von 9,96 kWh/l. Die CO₂-Emissionen von Diesel liegen somit bei 0,0265 t/l (BAFA, 2024a, S. 9, 2024b, S. 9f.; Brennstoffemissionshandelsgesetz, 2022, S. 7; EnergieStG, 2022, S. 7, 45f.; Bundesregierung, 2024a, S. 1; Destatis & en2x, 2024, S. 1; Eckel et al., 2023, S. 22; Prack, 2024, S. 1).

Timeliness Kosten

Die fiktiven Timeliness Kosten, also Pünktlichkeitskosten, sind Opportunitätskosten, die entstehen, wenn die Maschinen zu wenig Kapazität haben und ein Vorgang verzögert wird. Diese Kosten werden in der Landwirtschaft berechnet, um die wirtschaftlichen Folgen der Durchführung einer landwirtschaftlichen Tätigkeit zu einem anderen Zeitpunkt als dem optimalen zu berechnen. Sie stellen die Wertminderung der Ernte dar, die durch Steigerung der Maschinenkapazität verringert werden kann. Unterschiede in Timeliness Kosten resultieren aus geringeren Erträgen und erhöhten Produktpreisen. Bei dem Timeliness Modell nach Gunnarsson und Hansson (2003) werden Verzögerungen (Stunden oder Tage) bei den wichtigsten Arbeitsvorgängen in Kosten umgewandelt. Dieses Segment umfasst auch die Modellierung von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Vorgängen. Ausgegangen wird vom optimalen Tag, an dem ein spezifischer Arbeitsschritt den höchsten Ertrag erbringt. Alle Zeit, die über diesen Tag hinausgeht, führt daher zu Ertragsverlusten. Da dieses Modell die Simulation eines Arbeitsprozesses einschließlich der Berechnung des optimalen Tages, des optimalen Preises und des entsprechenden Ertrags voraussetzt, wird es nicht in die TCO-Berechnung einbezogen. In bisherigen Studien zu E-Traktoren wurde der Timeliness Faktor noch selten angewandt, es ist jedoch davon auszugehen, dass die Timeliness Kosten von E-Traktoren höher sind als die von Diesel-Traktoren durch kürzere Arbeits- und längere Ladezeiten. In Lagnelöv et al. (2021, S. 366) liegen die Timeliness Kosten von E-Traktoren 53,6 % und 184,5 % über denen von zwei verschiedenen Diesel-Traktorvarianten (Engström &

Lagnelöv, 2018, S. 183; Gunnarsson, 2008, S. 3; Lagnelöv, Dhillon, et al., 2021, S. 362; Shao & Anup, 2022, S. 11).

6.3 Gesamtkosten

Die TCO-Analyse resultiert in quantitativen Ergebnissen bezüglich der Gesamtkosten, welche aus getroffenen Annahmen und Ergebnissen aus Literatur- und Marktrecherche für Investitionskosten, variable und fixe Kosten stammen. Eine systematische Präsentation der Ergebnisse ist in diesem Kapitel tabellarisch und grafisch aufgestellt. Mit den vordefinierten Eingangswerten und der Betrachtungsdauer von 12 Jahren liegen die Gesamtkosten des ET-K bei **88.879,28 €** und entsprechend die des DT-K bei **102.292,91 €**. Der E-Traktor hat in diesem Fall 13,11 % geringere Gesamtkosten. Betrachtet man die leistungsstärkeren Varianten, belaufen sich die Gesamtkosten des ET-G auf **292.807,14 €** und die des DT-G auf **142.050,68 €**. Der E-Traktor hat 106,13 % höhere Gesamtkosten.

Tabelle 11. Ergebnisse der TCO-Kalkulation. Eigene Darstellung.

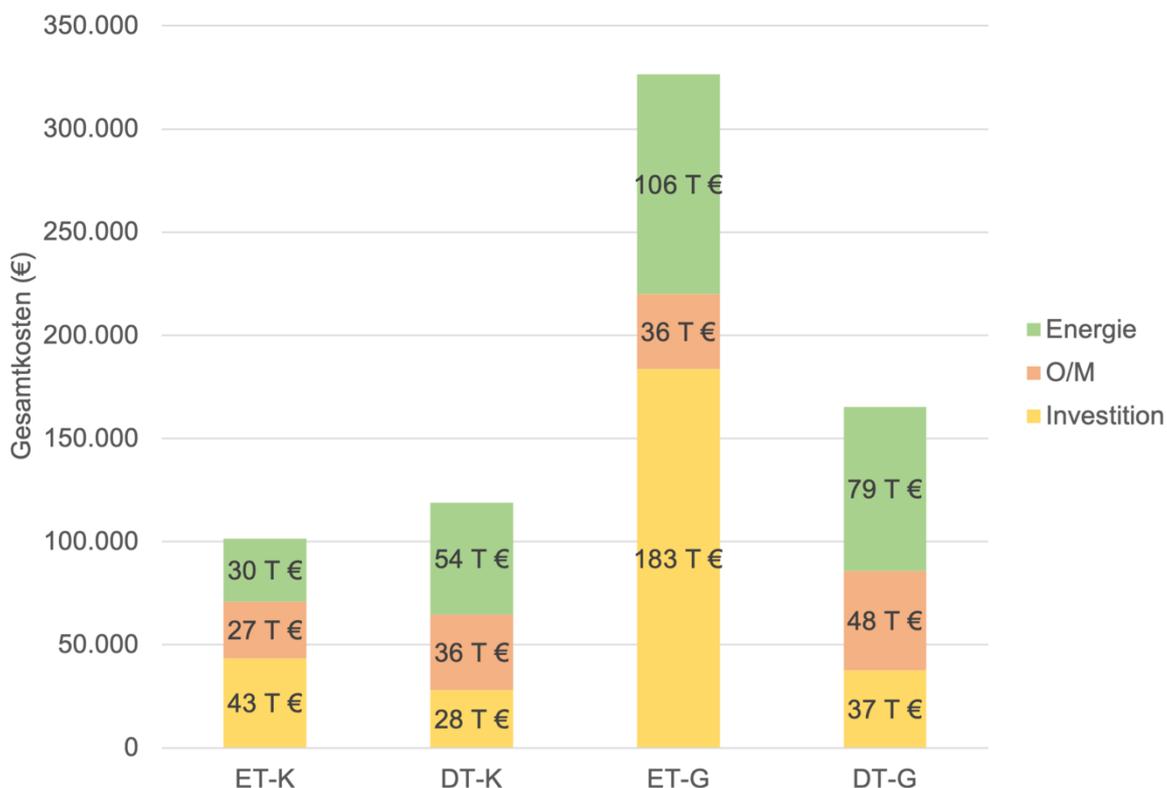
INVESTITIONSKOSTEN					
Fahrzeugmodell		ET-K	DT-K	ET-G	DT-G
Investitionskosten gesamt	€	47.450	35.000	213.300	47.000
BETRIEBSKOSTEN					
KRAFTSTOFF & ENERGIE					
Bedarf	kWh/a oder L/a	7.998	2.868	27.993	4.202
Kosten Kraftstoff & Energie	€/a	2.644,17	4.305,59	9.254,58	6.308,19
EMISSIONEN					
CO ₂ -Emissionen pro h	t CO ₂ /h	0	0,01	0	0,02
CO ₂ -Preis	€/t	45	45	45	45
Kosten CO ₂ -Emissionen	€/a	0	341,94	0	500,98
WARTUNG & REPARATUR					
Kosten O/M	€/a	2.009,00	2.774,72	2.585,29	3.575,12
FIXKOSTEN					
Fixkosten gesamt	€/a	284	284	452	452
LEBENSENDE					
Restwert	€	9.490	7.000	42.660,00	9.400,00
TOTAL COST OF OWNERSHIP					
TCO	€	88.879,28	102.292,91	292.807,14	142.050,68
TCO/km	€/km	18,56	21,36	61,16	29,67
TCO/Arbeitsstunde	€/h	13,39	15,41	44,10	21,40

Datenvergleich

In folgenden Diagrammen werden die Gesamtkosten, sowie die jährlichen Kosten und der Energiebedarf der beiden Antriebsvarianten verglichen. Die einzelnen Kostenanteile

der Gesamtkosten für die begutachteten Traktoren sind, wie in Abb. 14 dargestellt, verteilt. Auf der linken Seite sind die Kosten der leistungsschwächeren Maschinen eingetragen, auf der rechten Seite die der leistungsstärkeren.

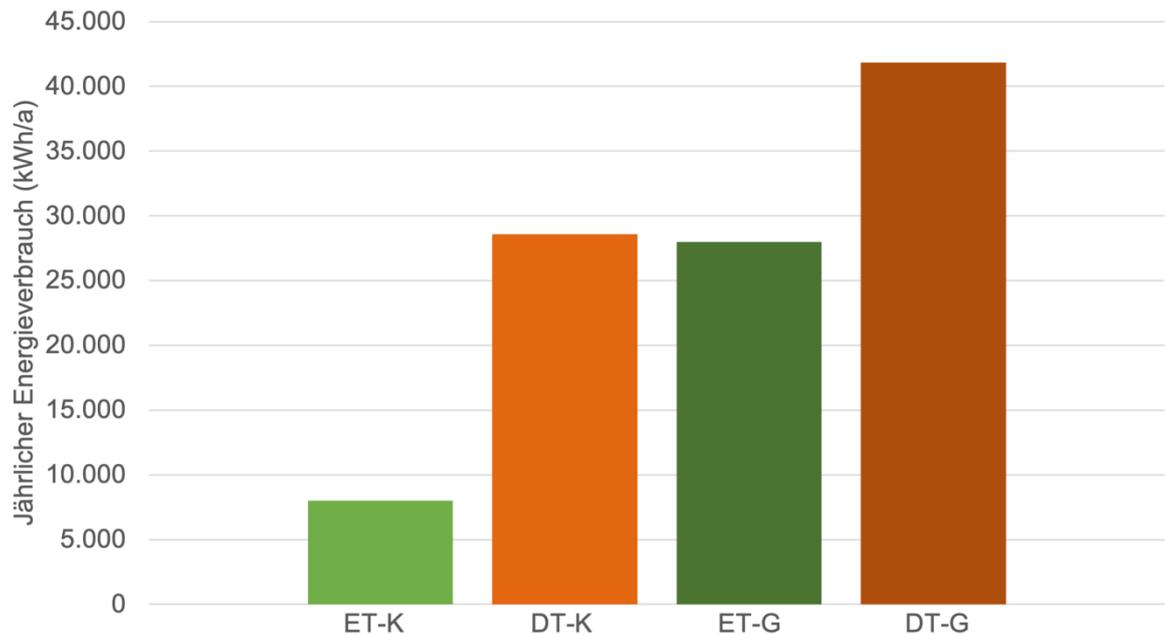
Abb. 14. Gesamtkosten der vier verschiedenen Traktor-Varianten. Eigene Darstellung nach Ergebnissen der TCO-Analyse.



Anmerkung: O/M = Operation/Maintenance; engl.: Wartung/Reparatur; T = Tausend.

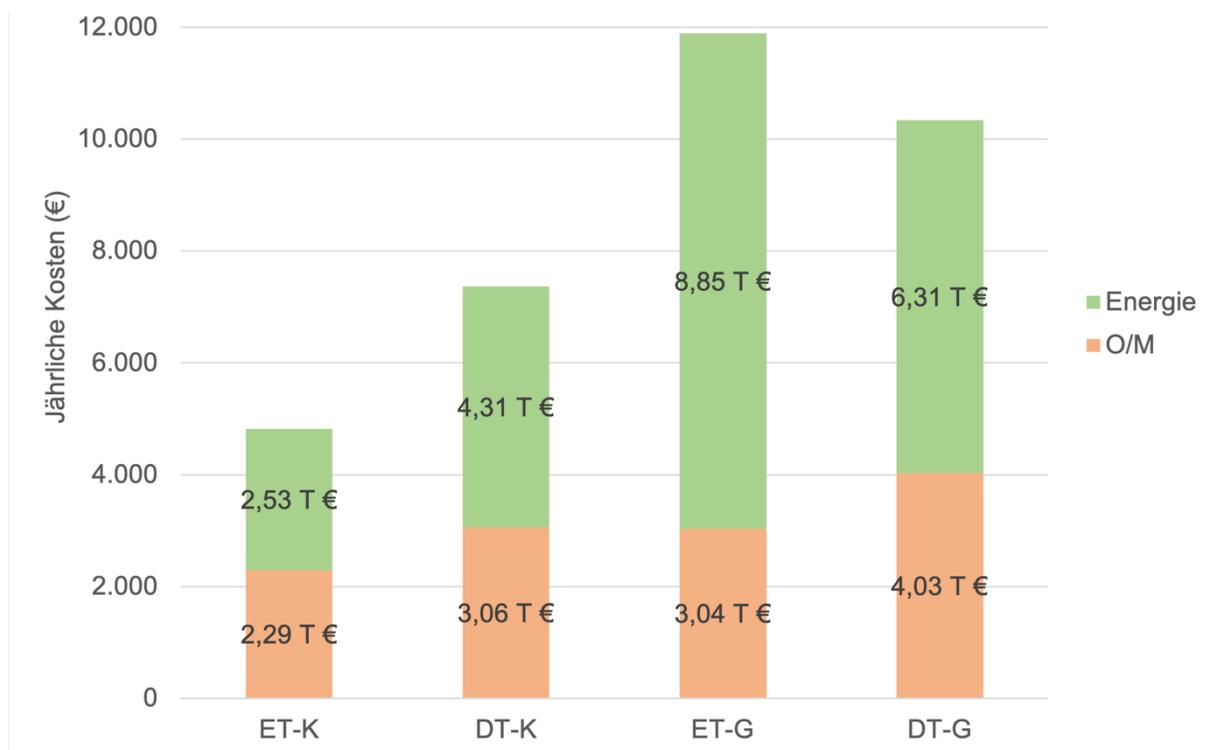
Die größten Kostenkomponenten bei Dieselmotoren sind die Energiekosten, die Diesel- und CO₂-Kosten umfassen, gefolgt von den Wartungs- und Reparaturkosten und den Investitionskosten für den Traktor selbst. Bei den batteriebetriebenen Maschinen sind die größten Kostenkomponenten die Investitionskosten und darin enthalten auch die wiederkehrenden Kosten für den Batterieersatz, gefolgt von den Stromkosten und zuletzt den Wartungs- und Reparaturkosten. Es wird sichtbar, dass die Investitionskosten der Diesel-Variante deutlich unter denen der batterieelektrischen Variante liegen. Die laufenden Kosten der DT-K liegen über denen der ET-K. Den größeren Faktor machen hierbei die Energiekosten aus, also Kraftstoff- und Emissionskosten. Die Energie- und Investitionskosten des DT-G sind niedriger als die des ET-G, nur die Wartungs- und Reparaturkosten des ET-G sind niedriger. In Abb. 15 wird der Energiebedarf der betrachteten Traktor-Varianten vergleichend aufgestellt.

Abb. 15. Gegenüberstellung des Energiebedarfs der vier betrachteten Varianten. Eigene Darstellung.



Der Energiebedarf eines kleinen E-Traktors mit einem Energiebedarf von etwa 10 kWh/h summiert sich auf 7.998 kWh/a. Bei dem kleinen Diesel-Traktor wird der Kraftstoffverbrauch von 4,3 l/h auf 2.868 l/a hochgerechnet, was mit dem Heizwert von 9,96 kWh/l einen Vergleichswert von 28.566 kWh/a ergibt. Der Energiebedarf des ET-K beträgt somit 28,00 % des Energiebedarfs des DT-K. Der Energiebedarf eines größeren E-Traktors mit einem Energiebedarf von etwa 35 kWh/h summiert sich auf 27.993 kWh/a und der eines größeren Diesel-Traktors auf 41.853 kWh/a. Der Energiebedarf des ET-G beträgt somit 66,89 % des Energiebedarfs des DT-G. Aus der Aufstellung des Energiebedarfs lassen sich die jährlich anfallenden Kosten berechnen, welche in Abb. 16 aufgezeigt sind. Diese werden für die TCO-Berechnung noch über die Jahre diskontiert. Die Abbildung dient hier nur dem Vergleich der beiden Varianten.

Abb. 16. Jährliche Kosten der vier verschiedenen Traktor-Varianten. Eigene Darstellung nach Ergebnissen der TCO-Analyse.



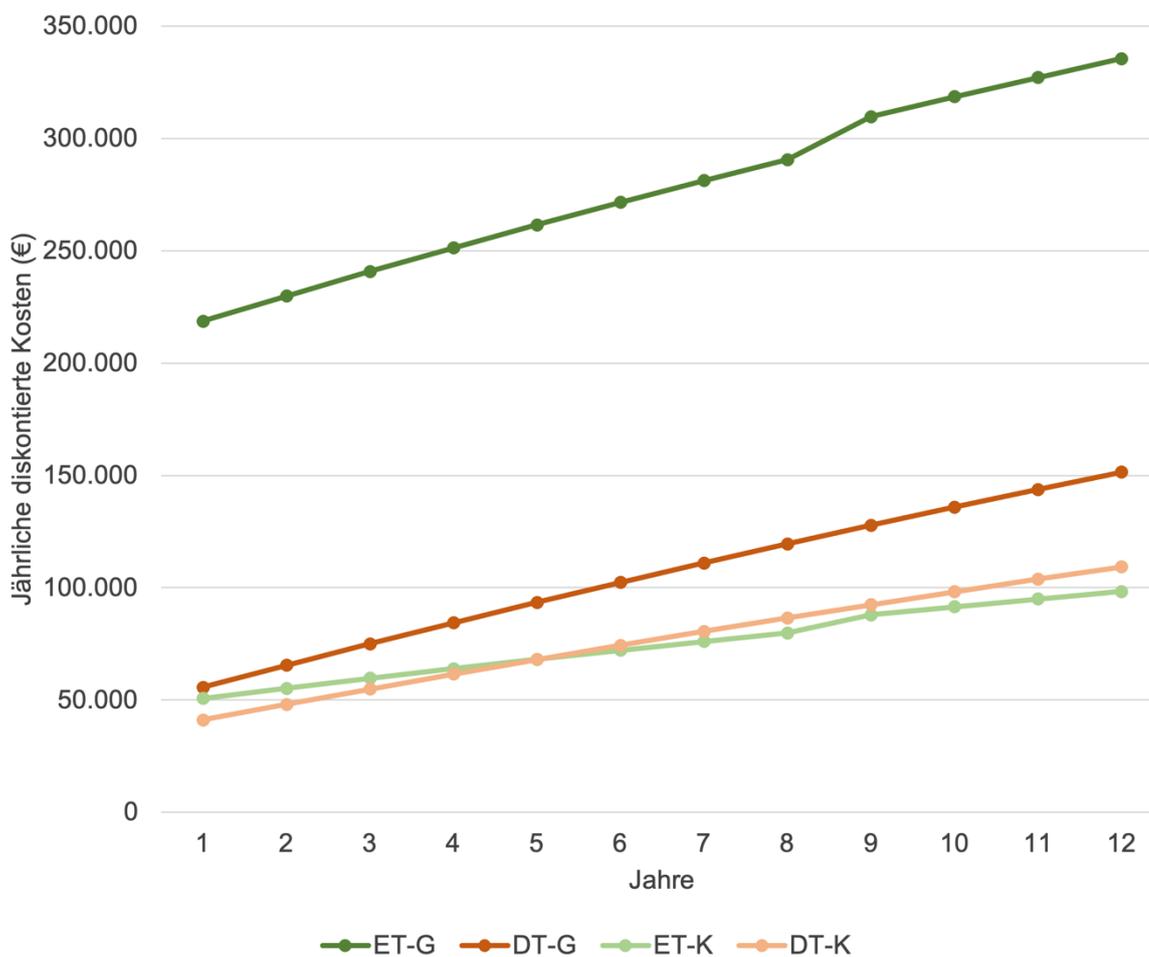
Anmerkung: O/M = Operation/Maintenance; engl.: Wartung/Reparatur; T = Tausend.

Sichtbar wird hier, dass die jährlichen Kosten der leistungsstarken Traktoren höher sind und hierbei v. a. die Energiekosten im Vergleich zu den leistungsschwächeren Traktoren ansteigen. Die jährlichen Kosten des DT-K sind um 52,74 % höher als die des ET-K. Bei den größeren Varianten liegt die Kostenänderung vom E-Traktor zum Diesel-Traktor bei -13,05 %. Wartungs- und Reparaturkosten des DT-K sind nahezu gleich groß, wie die des ET-G.

Kostenparität

Die Identifizierung des Zeitpunkts der Kostenparität liefert die Information, ab wann sich die Investition in E-Traktoren anstelle von Diesel-Traktoren lohnt. Der Zeitpunkt, an dem die Gesamtkosten des E-Traktors und des Diesel-Traktors gleich sind, ist somit der Zeitpunkt der Kostenparität. Abb. 17 zeigt den Verlauf der Gesamtkosten der vier Varianten über den Betrachtungszeitraum hinweg. Die Investition wird im ersten Jahr des Betrachtungszeitraums getätigt. Der Schnittpunkt der Linien der Kostenverläufe von ET-K und DT-K definiert den Zeitpunkt der Kostenparität.

Abb. 17. Zeitlicher Kostenverlauf der Gesamtkosten der Traktoren. Eigene Darstellung nach Ergebnissen der TCO-Analyse.

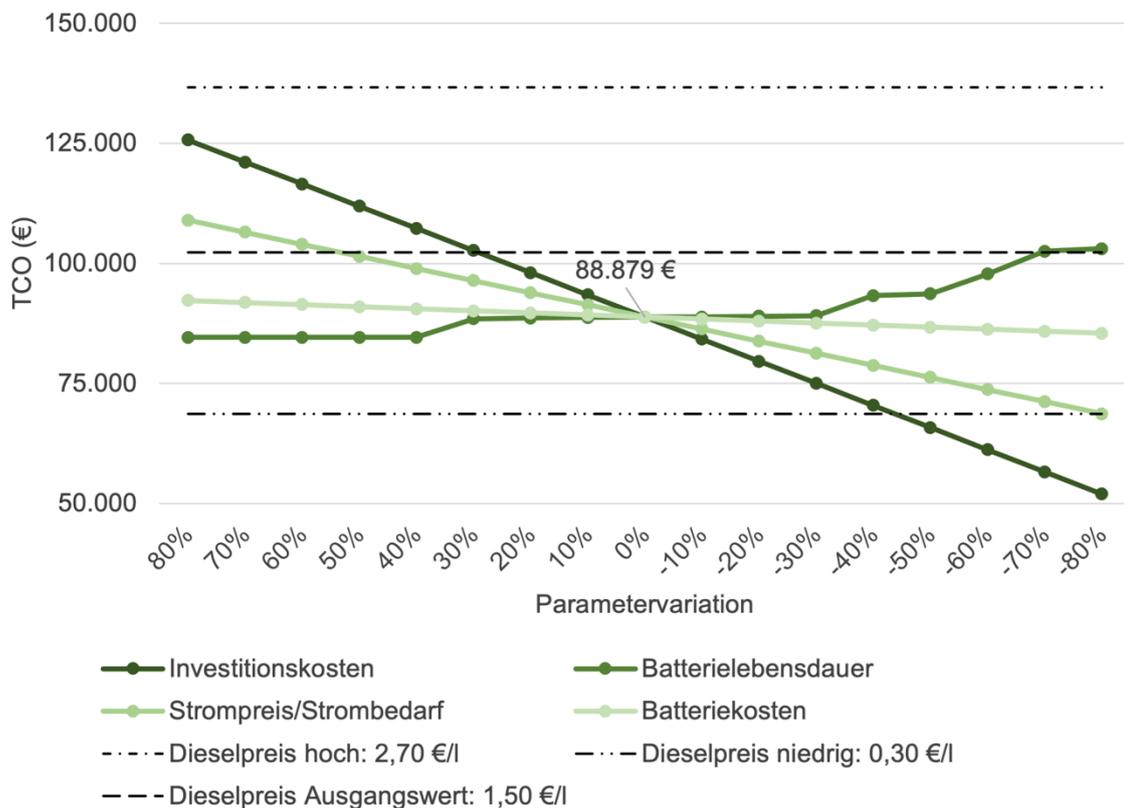


In der Abbildung wird deutlich, dass die Kosten von ET-K zunächst über denen von DT-K liegen, bis im fünften Jahr Kostenparität eintritt. Die Kostenkurve des DT-K steigt stärker als die des ET-K und liegt deshalb nach dem fünften Jahr bis zum Ende der Betrachtung über dieser. Im Kostenverlauf des ET-K ist im achten Jahr eine Steigung erkennbar, welche die erneute Investition in eine Batterie markiert. Die Verlaufslinien von ET-G und DT-G weisen keinen Schnittpunkt auf und die Linie des ET-G liegt, innerhalb des Betrachtungszeitraums, dauerhaft über der des DT-G. Es kommt nicht zu Kostenparität. Auch in der Verlaufslinie des ET-G ist die Investition in eine neue Batterie im achten Jahr anhand des Anstiegs sichtbar. Der große Unterschied des ET-G basiert hier nicht auf einem steilen Anstieg der Verlaufslinie, sondern auf dem hohen Anfangspunkt. Da die gewählten Eingangsparameter für die TCO-Berechnung mit diversen Unsicherheiten behaftet sind, wird im Folgenden eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

6.4 Sensitivitätsanalyse

Um die Sensitivität des Modells zu untersuchen, wurden mehrere Szenarien simuliert, bei denen verschiedene Eingangskennzahlen verändert wurden. Bei der Simulation der TCO für E-Traktoren wurden Investitionskosten sowie Batterielebensdauer, Strompreis und Batteriekosten variiert. Bei den Diesel-Traktoren wurden die Investitionskosten, Kraftstoffpreis und CO₂-Preis variiert. Die Variation der Faktoren beläuft sich von -80 % bis +80 % Änderung. Für den Strom- und den Kraftstoffpreis sind jeweils die TCO bei Extremwerten eingezeichnet, welche sich auf -80 % bzw. +80 % des Ausgangspunktes beziehen. In Abb. 18 und Abb. 19 werden die Sensitivitäten für die niedrigere Leistungs-kategorie dargestellt, in Abb. 20 und Abb. 21 die Sensitivitäten für die höhere Leistungs-kategorie.

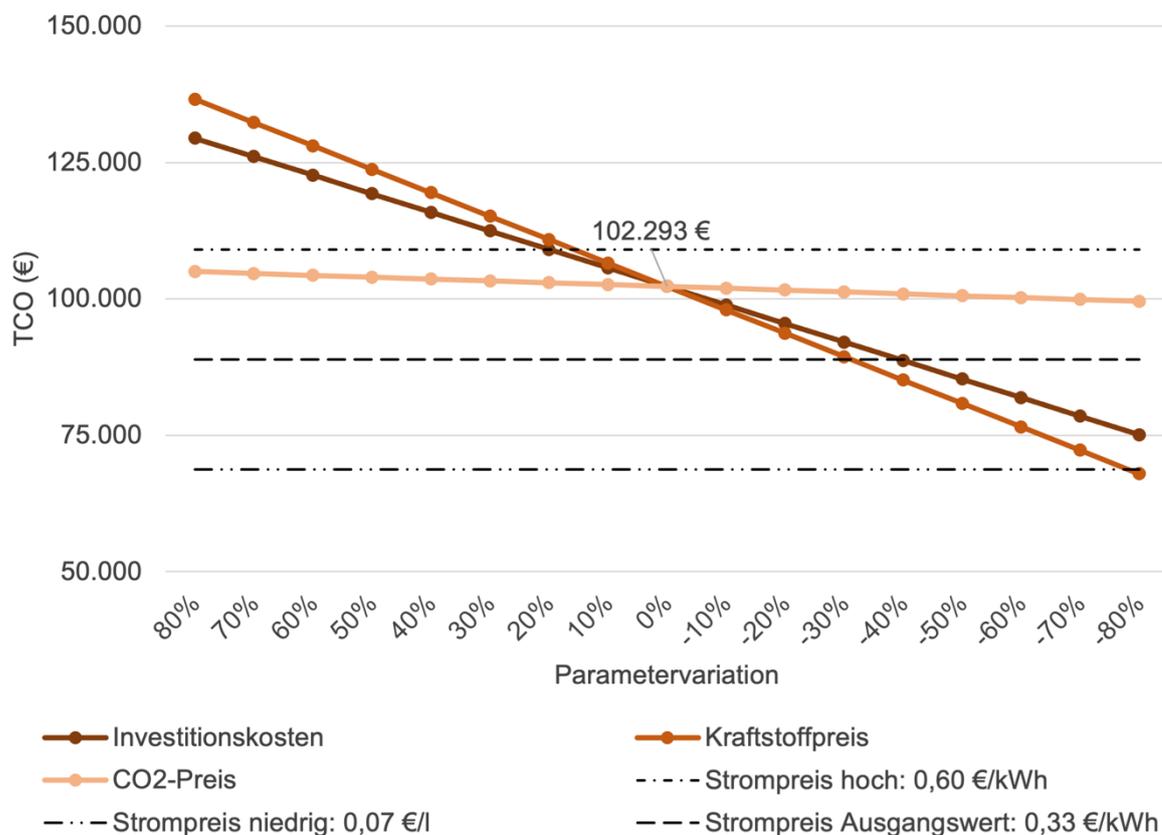
Abb. 18. Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter der TCO des ET-K. Eigene Darstellung.



Die stärkste Änderung der TCO wird durch die Variation der Investitionskosten verursacht. Die TCO-Kurve hat eine negative lineare Steigung von 4,63 %. Im Vergleich hierzu sinken die TCO bei einer Variation des Strompreises bzw. des Strombedarfs um 2,65 % und bei einer Variation der Batteriekosten um 0,43 %. Die Verkürzung der Batterielebensdauer verursacht eine nicht-lineare Steigerung der TCO. Die Gerade des hohen Dieselpreises beschreibt die TCO des DT-K bei einem Dieselpreis von 2,70 €/l.

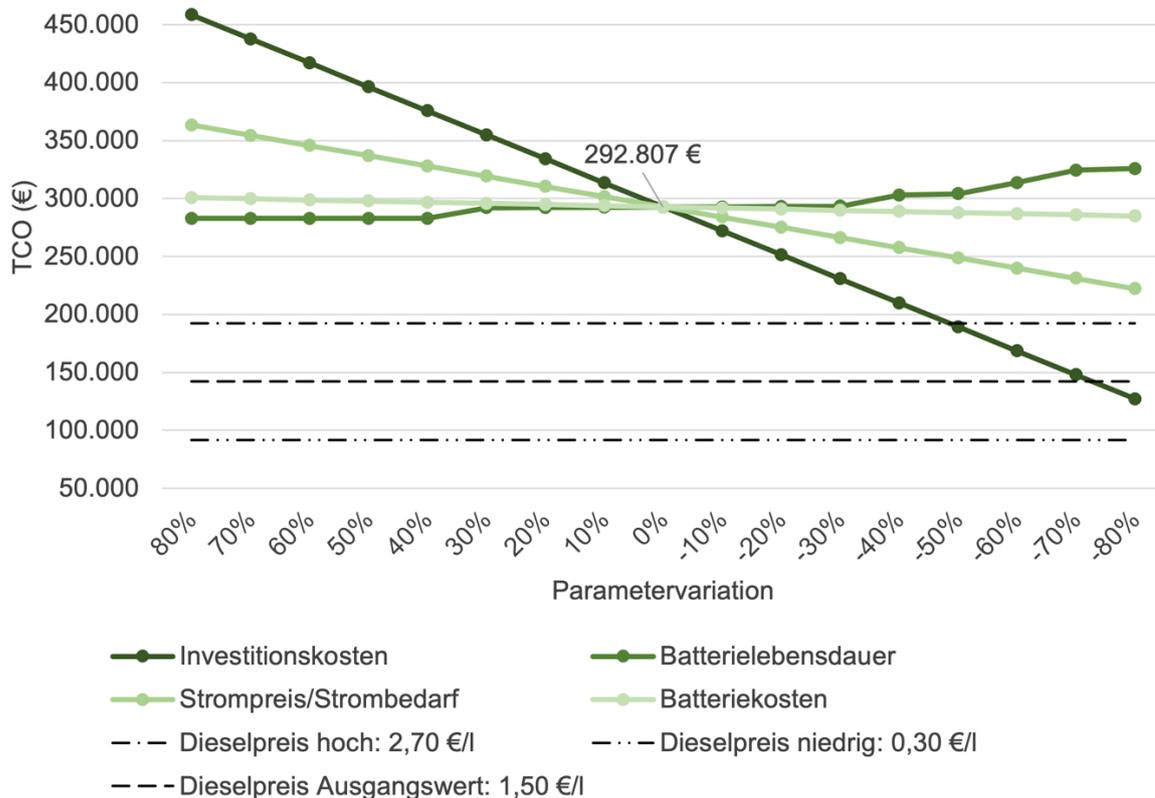
Diese zeigt keinen Break-even-Punkt mit der Sensitivitätsanalyse des ET-K. Bei einem Dieselpreis von 1,50 €/l ist der Break-even-Punkt erreicht, werden entweder die Investitionskosten um 20 % gesteigert, der Strompreis um 50 % gesteigert oder die Batterielebensdauer um 70 % gesenkt. Folgende Abbildung zeigt die Analyse der Sensitivitäten der leistungsschwächeren Diesel-Traktorvariante. Eingezeichnet sind zusätzlich die TCO bei zwei Extremwerten des Strompreises und beim Ausgangswert der TCO-Berechnungen der E-Traktor-Varianten.

Abb. 19. Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter der TCO des DT-K. Eigene Darstellung.



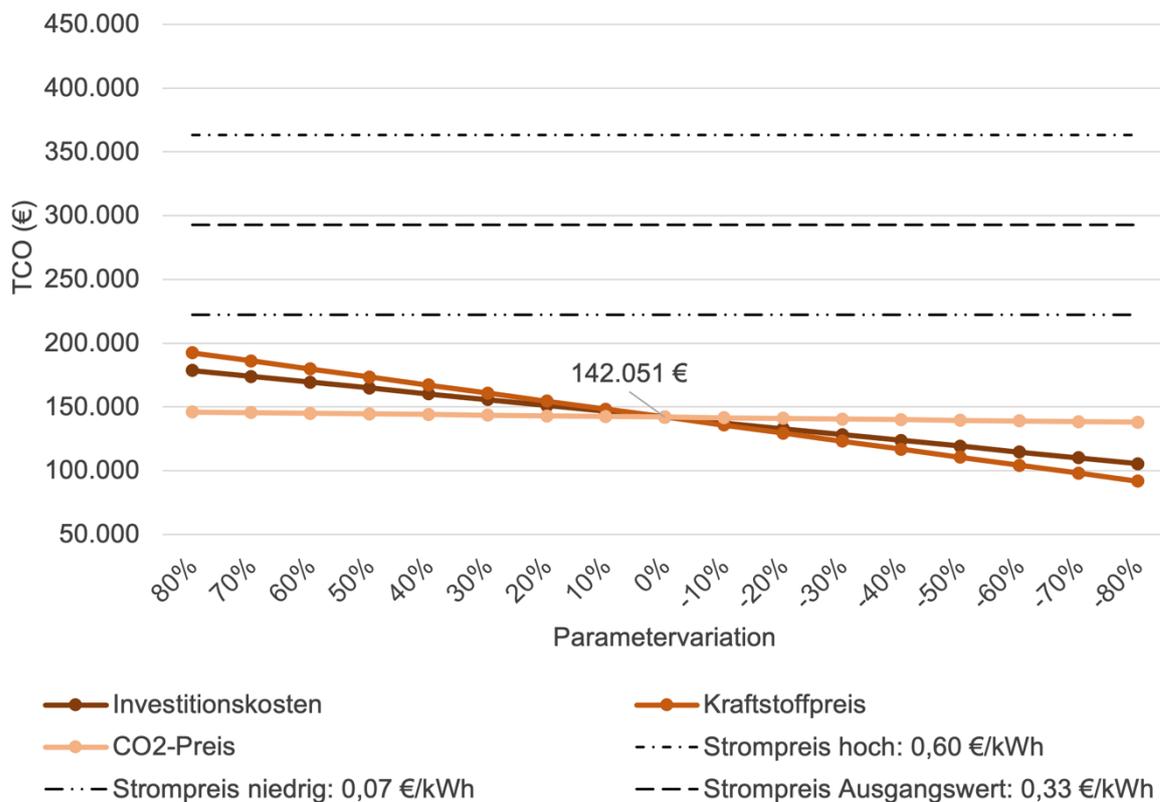
Es ist zu sehen, dass die größte negative Steigung durch eine Variation des Kraftstoffpreises hervorgerufen wird. Die TCO-Kurve hat eine negative Steigung von 3,93 %. Bei einer Variation der Investitionskosten liegt eine negative Steigung von 3,11 % vor und bei einer Variation des CO₂-Preises von 0,31 %. Alle Steigungen sind linear abfallend. Die Gerade des hohen Strompreises beschreibt die TCO des ET-K bei einem Strompreis von 0,60 €/kWh. Diese zeigt einen Break-even-Punkt mit den TCO des DT-K bei einer Steigerung der Investitionskosten um 10 % oder des Kraftstoffpreises um etwa 5 %. Die folgende Abbildung zeigt die Analyse der Sensitivitäten der großen E-Traktorvariante inklusive der TCO bei einem hohen und einem niedrigen Extrem-Dieselpreis und beim Ausgangswert der TCO-Berechnungen der Diesel-Varianten.

Abb. 20. Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter der TCO des ET-G. Eigene Darstellung.



Sichtbar wird, dass die Variation der Investitionskosten beim ET-G eine stärkere negative Steigung hervorruft als beim ET-K. Die TCO-Kurve hat eine negative lineare Steigung von 6,10 %. Bei einer Variation des Strompreises bzw. des Strombedarfs sinken die TCO um 2,72 % und bei einer Variation der Batterielebensdauer um 0,29 %. Die Verkürzung der Batterielebensdauer verursacht eine nicht-lineare Steigerung der TCO. Die Gerade des hohen Dieselpreises beschreibt hier die TCO des DT-G bei einem Dieselpreis von 2,70 €/l. Diese zeigt nur dann einen Break-even-Punkt mit den des ET-G, wenn die Investitionskosten um knapp 50 % gesenkt werden. Beim aktuellen Dieselpreis von 1,50 €/l müssten die Investitionskosten sogar um mehr als 70 % gesenkt werden. Folgende Abbildung stellt die Analyse der Sensitivitäten der großen, leistungsstärkeren Diesel-Traktorvariante dar. Die TCO bei den Extrem-Strompreisen sind analog zur kleineren Diesel-Traktorvariante eingezeichnet.

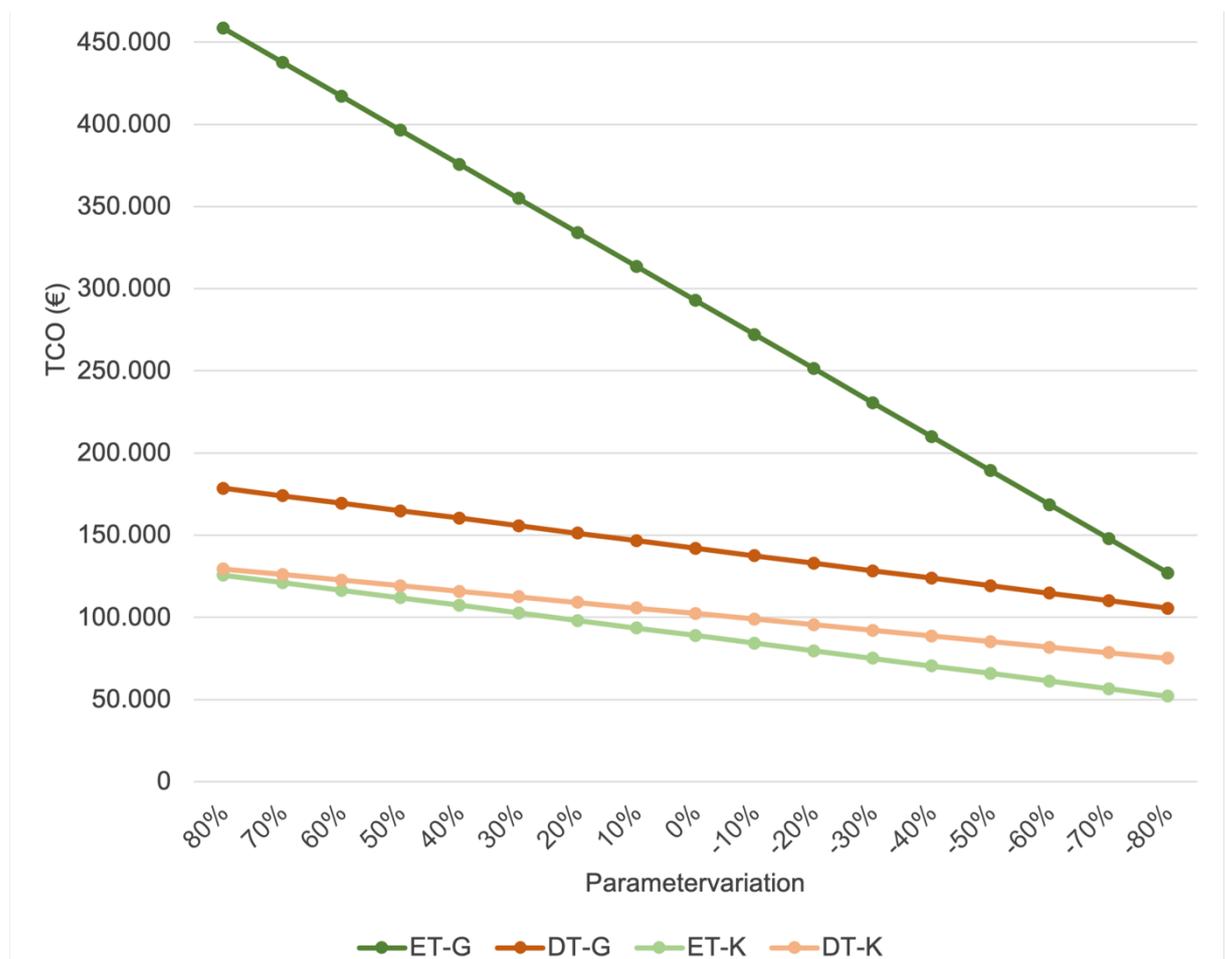
Abb. 21. Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter der TCO des DT-G. Eigene Darstellung.



Sichtbar ist, dass auch bei der leistungsstärkeren Variante die größte Änderung der TCO-Kurve aufgrund der Veränderung des Kraftstoffpreises verzeichnet ist. Die negative Steigung liegt bei 4,15 %. Eine Variation der Investitionskosten hat eine negative Steigung von 3,01 % in der TCO-Kurve zur Folge und eine Variation des CO₂-Preises eine negative Steigung von 0,33 %. Alle Steigungen sind linear abfallend. Die Gerade des Strompreises zeigt keinen Break-even-Punkt mit der Sensitivitätsanalyse des DT-G. Selbst ein sehr niedriger Strompreis von 0,07 €/kWh führt nicht dazu, dass der ET-G sich im Vergleich zum DT-G rentiert, wenn sonst keine anderen Kostenfaktoren verändert werden und die Rahmenbedingungen die gleichen sind.

In Anhang 16 und Anhang 17 ist die prozentuale Auswirkung der Veränderung verschiedener Eingangskennzahlen auf die Gesamtkosten von E- bzw. Diesel-Traktoren dargestellt. Abb. 22 zeigt, wie sich die Änderung der Investitionskosten auf die TCO auswirken. Ausgangsdaten sind die in Kapitel 4 definierten Modelle und für den E-Traktor damit Investitionskosten von 47.450 € und für den Diesel-Traktor 35.000 € in der Leistungsklasse von 34 bis 40 kW. In der Leistungsklasse von 49 bis 59 kW belaufen sich die Ausgangsdaten der Investitionskosten des E-Traktors auf 205.800 € und die des Diesel-Traktors auf 47.000 €.

Abb. 22. Vergleich der Sensitivität der Investitionskosten. Eigene Darstellung.

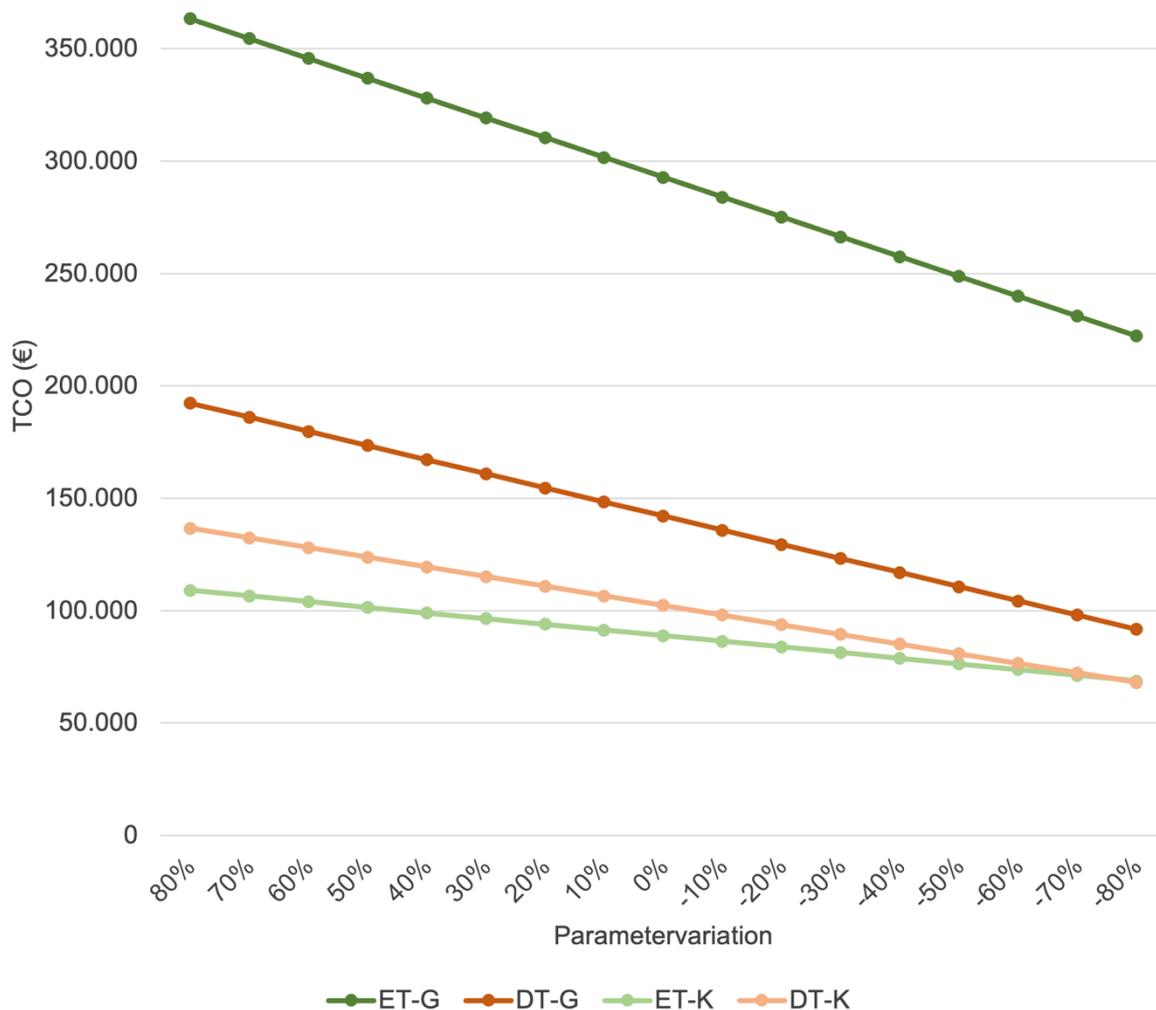


Die TCO nehmen bei ET-K und DT-K mit abnehmenden Investitionskosten linear ab, die des E-Traktors geringfügig stärker als die des Diesel-Traktors. Bei einer Änderung von 80 % der Investitionskosten sind die TCO der beiden Varianten nahezu auf gleichem Niveau. Je mehr die Variation ins Negative geht, desto größer ist die Differenz der beiden Traktor-Varianten. Die Steigung ist jeweils linear abfallend mit sinkenden Investitionskosten und die Differenz nimmt zu. Die TCO von ET-G nehmen deutlich schneller ab als von DT-G. Die anfängliche Differenz ist hier jedoch deutlich größer als bei den leistungsschwächeren Modellen. Beide TCO-Linien fallen linear ab mit sinkenden Investitionskosten und nähern sich bei negativ werdender Parametervariation an.

Weiterer Faktor, der in der Landwirtschaft, je nach Anwendungsfeld, sehr variabel ist, ist die jährliche Nutzungsdauer bzw. die Jahresarbeitszeit. Die Angaben von Hersteller*innen für E-Traktoren variieren zwischen 250 und 700 Arbeitsstunden pro Jahr. Große Traktoren werden laut dem KTBL (2022) aktuell bis über 800 Stunden eingesetzt. Um die Variation abzubilden und deren Sensitivität zu untersuchen, sind in dem folgenden

Diagramm Jahresarbeitszeiten zwischen 133 und 1200 h/a abgebildet. 133 h/a entsprechen einer Parametervariation von -80 % und 1200 h/a entsprechen +80 %.

Abb. 23. Vergleich der Sensitivität der Jahresarbeitszeit von leistungsschwächerem E- und Diesel-Traktor. Eigene Darstellung.

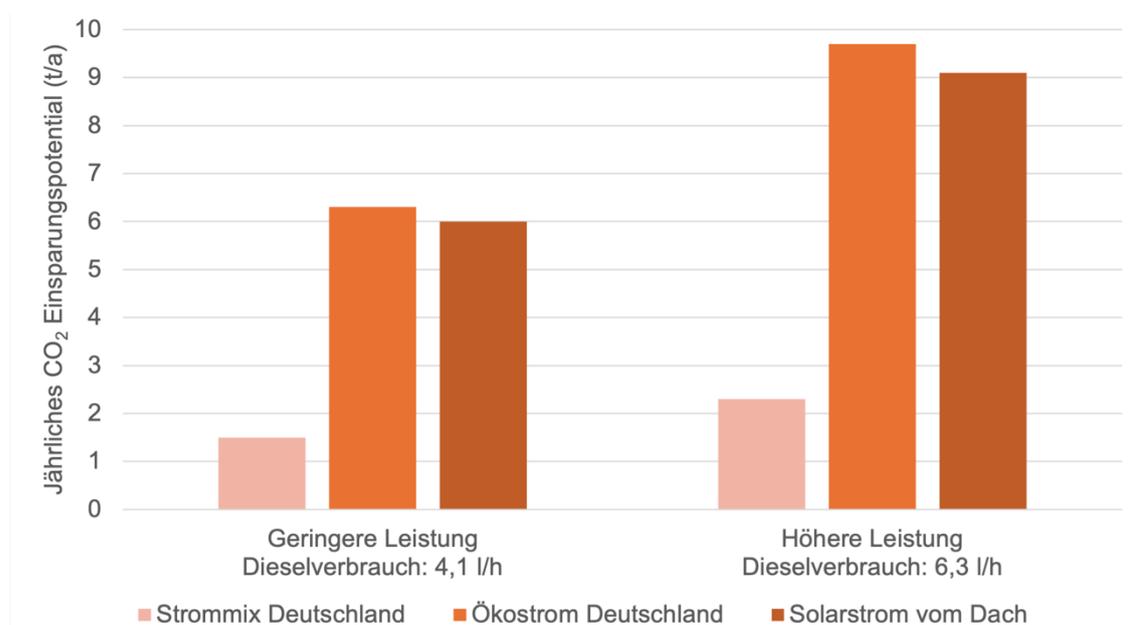


Bei höherer jährlicher Nutzungsdauer liegen die TCO des DT-K deutlich über den TCO des ET-K. Je kürzer die Nutzungsdauer ist, desto mehr gleichen sich die zwei Antriebstechnologien an und unter einem Einsatz von 200 h/a liegen die TCO des E-Traktors über denen des Diesel-Traktors. Beide TCO-Kurven sind linear abfallend mit sinkender Jahresarbeitszahl. Die TCO des Diesel-Traktors reagieren sensibler auf die Änderung der Jahresarbeitszeit als die des E-Traktors. Bei den leistungstärkeren Varianten liegen die TCO des ET-G dauerhaft über den TCO des DT-G. Bei beiden Varianten sinken die TCO mit sinkender Jahresarbeitszahl und die Differenz ist nahezu gleichbleibend. Die Sensibilität der TCO ist bei beiden Varianten ähnlich stark.

6.5 THG-Einsparpotential

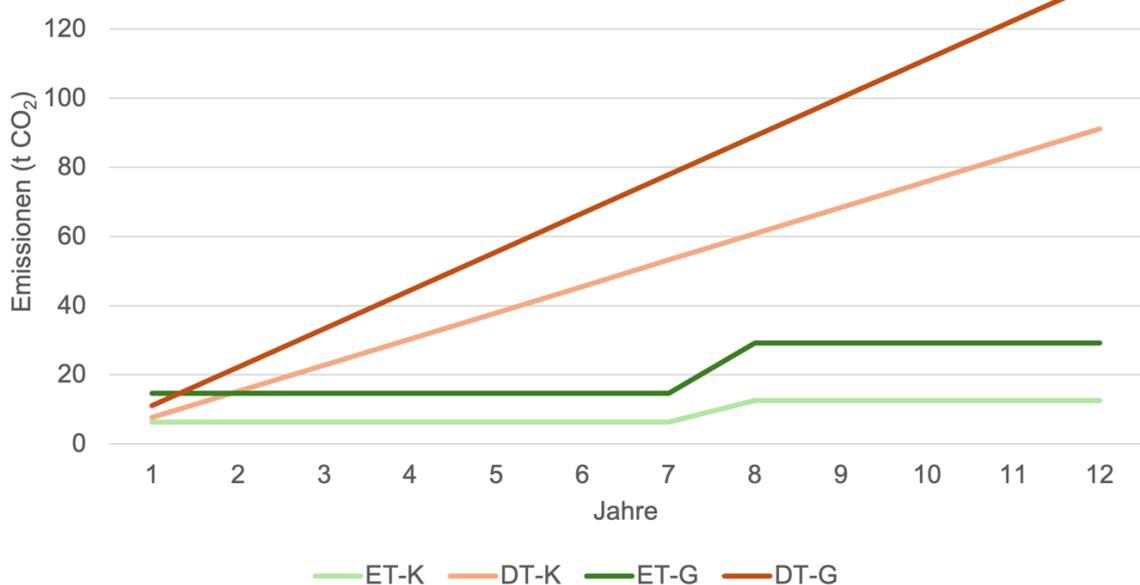
Neben den ökonomischen Ergebnissen der TCO-Berechnung, sind ökologische Aspekte nicht außer Acht zu lassen, da diese ebenso Einfluss auf die Einstellung von Landwirt*innen gegenüber E-Traktoren haben. Maßgeblicher Grund für eine Umstellung auf einen batterieelektrischen Antriebsstrang ist das Potential zur Verringerung des CO₂-Fußabdrucks bei der Nutzung eines solchen Traktors. Ein Vergleich der THG-Emissionen und deren Kosten ist deshalb sinnvoll. Bei dem DT-K fallen im genannten Szenario 7,60 t CO₂/a und somit Kosten von 341,94 €/a an. Bei DT-G sind es 11,13 t CO₂/a und Kosten von 500,98 €/a. Bei den elektrischen Varianten wird im Ausgangsszenario davon ausgegangen, dass keine CO₂-Emissionen anfallen. Werden diese jedoch miteinberechnet, ergeben sich für den Strommix von 2019, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, Emissionen von 1,25 t CO₂/a für ET-K und für Strom aus Erneuerbaren Energien 0,07 t CO₂/a für ET-K. Bei ET-G ergeben sich Emissionen von 4,37 t CO₂/a und für Strom aus Erneuerbaren Energien 0,25 t CO₂/a. Die CO₂-Kosten sind im Strompreis schon enthalten. Bei einem Wechsel von Diesel- auf E-Traktoren sind während der Nutzung CO₂-Einsparungen zu erwarten. Mithilfe des CO₂-Rechners von Fendt (2024) lässt sich das Einsparpotential verschiedener Szenarien berechnen. In Abb. 24 werden die CO₂-Einsparungen, die erzielt werden können, wenn von einem herkömmlichen Diesel-Traktor auf einen E-Traktor umgestellt würde. Das Potential ist für einen Einsatz von jährlich 667 Arbeitsstunden und die zwei bisher betrachteten Leistungsvarianten dargestellt (Besette et al., 2022, S. 12; Emilsson & Dahllöf, 2019, S. 5).

Abb. 24. Jährliches CO₂-Einsparpotential der Umstellung von Diesel- auf E-Traktoren. Eigene Darstellung nach Daten von Fendt (2024).



Es wird sichtbar, dass das jährliche Einsparpotential am höchsten ist, wenn von einem konventionellen Diesel-Traktor auf einen E-Traktor gewechselt wird, der mit deutschem Ökostrom betrieben wird. Das zweithöchste Einsparpotential kann bei dem Wechsel auf einen E-Traktor, betrieben mit Solarstrom aus eigener Erzeugung erzielt werden. Die absolute Differenz zwischen der Einsparung beim Einsatz vom deutschen Strommix zu deutschem Ökostrom liegt bei der kleinen Variante bei 4,8 t/a und bei der großen Variante bei 7,4 t/a. Vor Einsatzbeginn fallen bei beiden E-Traktoren jedoch schon CO₂-Emissionen in der Produktion an. V. a. die Emissionen der Batterieproduktion sind bedeutend, da E-Fahrzeuge deshalb nicht als gänzlich CO₂-neutral bezeichnet werden können. Diese Emissionen variieren zwischen 61 und 106 kg CO₂/kWh und sind in Abb. 24 nicht inbegriffen. Abb. 25 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO₂-Emissionen von E-Traktor und Diesel-Traktoren über die Lebenszeit hinweg. Die Emissionen werden hier mit dem Maximalwert von 146 kg CO₂/kWh berechnet (Emilsson & Dahlöf, 2019, S. 5).

Abb. 25. CO₂-Emissionen der verschiedenen Traktorvarianten einschließlich der Batterieproduktion. Eigene Darstellung.



Die Abbildung zeigt, dass sich die Emissionen der Batterieproduktion schon vor Beendigung des zweiten Jahres mit den jährlichen Emissionen von Diesel-Traktors ausgleichen. Da die E-Traktoren während des Einsatzes kein CO₂ emittieren, bleibt deren Emissionslinie auf dem Niveau der anfänglichen Emissionen aus der Batterieproduktion. Zu beachten ist, dass im achten Jahr ein Austausch der Batterie erfolgt, weshalb erneut die CO₂-Emissionen der Produktion berücksichtigt werden müssen. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Marktanalyse, der TCO-Analyse und der Sensitivitätsanalyse im Kontext der Zielsetzung und der Fragestellungen interpretiert und diskutiert.

7 Interpretation und Diskussion

In dieser Arbeit wird eine Analyse der aktuellen Verfügbarkeit von E-Traktoren auf dem Markt und der repräsentierten Leistungs- und Kapazitätsbereiche durchgeführt. Neben dieser Leitfrage werden spezifische Kostenfaktoren untersucht, die einen hohen Einfluss auf die Gesamtkosten von E-Traktoren im Vergleich zu Diesel-Traktoren haben und darunter, wie eine Veränderung dieser Faktoren zur Erreichung von Kostenparität beitragen könnte. Außerdem sollen Maßnahmen für die weitere Marktdiffusion von E-Traktoren definiert werden. Die Datenanalyse untersucht die Auswirkungen der Umstellung von Diesel- auf E-Traktoren, insbesondere im Hinblick auf ökonomische Aspekte. Mithilfe der Interpretation und Auswertung der Forschungsergebnisse sollen in diesem Kapitel die in Kapitel 1.2 aufgestellten Forschungsfragen beantwortet werden. Anschließend soll der Forschungsprozess der Arbeit kritisch reflektiert und die Ergebnisse diskutiert werden.

7.1 Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden im Kontext der Forschungsfragen beleuchtet. Um die Ergebnisse auf Objektivität und Reichweite zu prüfen, ist deren Interpretation in den Kontext von Auswertungen aus anderen Studien und Expert*innenmeinungen eingebettet worden. Zur Einordnung werden die Forschungsfragen hier noch einmal wiederholt.

In welchem Umfang sind E-Traktoren bereits auf dem Markt verfügbar und welche Leistungs- und Kapazitätsbereiche sind dabei repräsentiert?

Insgesamt stellten bereits 15 herstellende Unternehmen 22 Modelle vor, von denen 14 schon auf dem Markt sind. Der Leistungsbereich ist aktuell begrenzt auf 12 bis 55 kW. Bis 2025 ist die Serienproduktion von Modellen mit einer Leistung von bis zu 100 kW geplant. Die Batteriekapazitäten der marktreifen Modelle reichen derzeit von 21 bis 155 kWh. Die Serienproduktion größerer Modelle ist in naher Zukunft noch nicht absehbar, die Entwicklung eines Prototyps mit 1000 kWh Kapazität und 500 kW Leistung weist jedoch in die Richtung der Erschließung dieses Marktsegments. In der Landwirtschaft ist ein zunehmendes Interesse an einer Etablierung von E-Traktoren anstelle von herkömmlichen Diesel-Traktoren zu beobachten. Damit geht auch der wachsende Fokus auf nachhaltige Technologien in der Branche einher. Indessen wird auch der Mangel an leistungsstarken E-Traktoren (> 55 kW) auf dem Markt deutlich. In der Regressionsanalyse der Anschaffungspreise von E-Traktoren sind nur wenige Modelle mit höherer Batteriekapazität vertreten. Deshalb ist davon auszugehen, dass selbst wenn diese Modelle zeitnah auf den Markt kommen würden, deren Anschaffungspreis im Bereich ab 125.000 € läge und damit deutlich höher als der eines Diesel-Pendants. Nach einer

aktuellen Umfrage von Chauhan et al. (2023, S. 2) nennen mehr als 50 % der Fuhrparkbetreiber Infrastrukturinvestitionen und Fahrzeugkosten als wesentliche Hindernisse für die Einführung batteriebetriebener Fahrzeuge. Eine vollständige Umstellung von Diesel-Traktoren auf E-Traktoren, ohne Veränderung des landwirtschaftlichen Systems und der Einsatzprofile, wäre derzeit aufgrund des Mangels an leistungs- und kapazitätsstarken Traktoren nicht möglich. Dieser ist jedoch nicht nur auf die hohen Investitionen zurückzuführen, sondern auch auf andere Probleme, wie z. B. das steigende Gewicht der Maschinen bei größeren Batterien. Auch Dipl.-Ing. Roger Stirnimann vom Verein Deutscher Ingenieure sieht die Marktlücke an größeren Maschinen und deshalb die Notwendigkeit zusätzlicher alternativer Kraftstoffe in diesem Leistungsbereich sowie weiterer Innovationen und Technologieentwicklungen (Agrarzeitung, 2024, S. 1). An Schwarmeinheiten mit mehreren autonomen Kleintraktoren und kabelgebundenen Lösungen wird bereits geforscht (Pfaffmann et al., 2021, S. 78ff.). Analog hierzu definieren Basma et al. (2021, S. 1) vier Säulen, auf die sich die Dekarbonisierung der Landwirtschaft stützt: ein ausreichendes Angebot an emissionsfreien Fahrzeugen durch die Hersteller*innen, ein angemessener Ausbau der Infrastruktur, eine robuste Nachfrage nach diesen Technologien und gezielte politische Maßnahmen zur Beschleunigung der Technologieeinführung. Auf Informationen des KTBL gestützt, kann die Annahme getroffen werden, dass die Elektrifizierung von leichten Maschinen bis 2030 teilweise möglich ist, mit einer potenziellen Vollständigkeit bis 2045. Neue technologische Konzepte, wie die Aufteilung von Prozessen auf mehrere kleinere Maschinen, könnten das Elektrifizierungspotential erhöhen (Eckel et al., 2023, S. 32).

Wie unterscheiden sich die Gesamtkosten von E-Traktoren im Vergleich zu konventionellen Diesel-Traktoren und welche spezifischen Kostenfaktoren beeinflussen diese signifikant?

Die Ergebnisse der TCO-Methode zeigen, dass bei den kleineren Traktorvarianten eine Umstellung von Diesel- auf E-Traktoren kostenneutral oder sogar lukrativ sein kann. Bei den größeren Traktorvarianten ist die Diesel-Option deutlich kostengünstiger, da deren Investitionskosten einen viel geringeren Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Bei den E-Traktoren reagieren die resultierenden TCO vor allem auf die Variation der Investition empfindlich. Bereits eine Variation von 20 % resultiert in Abweichungen der TCO von 10 bis 14 %. Wie schon in der Analyse der Kostenstruktur sichtbar, sind die Investitionskosten die größte Kostenkomponente der TCO der E-Traktoren und somit wichtiger Ansatzpunkt für Maßnahmen, wenn eine Verbesserung der TCO im Vergleich zu Diesel-Traktoren erzielt werden soll. Die Information des Zeitpunktes der Kostenparität ist relevant für den Kaufentscheidungsprozess der Landwirt*innen. Bei den kleineren 40-kW-

Traktormodellen kommt es zu Kostenparität innerhalb des Betrachtungszeitraums. Die Investition in einen E-Traktor dieser Leistung anstelle eines Diesel-Traktors lohnt sich in diesem Szenario demnach ab einer Haltedauer von sechs Jahren. Bei den größeren Traktormodellen lohnt sich die Anschaffung eines E-Traktors anstelle eines Diesel-Traktors aus wirtschaftlicher Betrachtung unter den gegebenen Bedingungen nicht.

Der Preis der einzelnen Traktorkomponenten unterliegt Skaleneffekten und wird somit stark von der Nachfrage beeinflusst. Bei höheren Stückzahlen kann sich dieser Wert deutlich verringern. Die hohen Investitionskosten können teilweise durch Eigenstromnutzung kompensiert werden. Landwirtschaftliche Betriebe verfügen meist über einen Energieüberschuss und stehen damit vor der Herausforderung, diese Energie gezielt bereitzustellen. Ergebnisse des Fokusgruppen-Gesprächs zeigen, dass die Bereitstellung von Ladeinfrastruktur durch oder für die Betreibe ökonomisch sinnvoll sein kann, wenn die Spotmarktpreise für Strom negativ sind. Außerdem kann die Elektrifizierung in Kombination mit Automatisierung vielerlei Vorteile haben. Neben verbesserter Effizienz kann körperliche Arbeit verringert, die Tiergesundheit gefördert und die Attraktivität des Arbeitsplatzes erhöht werden. Bei größeren Höfen und eigener Energiegewinnung rentiert sich elektrifizierte Automatisierung eher als bei kleineren Höfen. Schwarmroboterlösungen sind in Zukunft für Sonderkulturen und Gewächshauslandwirtschaft denkbar (Fokusgruppen-Gespräch, persönliche Kommunikation, 4. Juli 2023).

Zu den Investitionskosten der E-Traktoren gehören auch die Kosten der Batterien. Da die Investitionskosten proportional ansteigen, je höher die Kapazität ist, sind veränderbare Kostenfaktoren zu identifizieren. Der Preis wird von Entwicklungen auf dem Batteriemarkt beeinflusst, welche nur schwer vorhersehbar sind. Neben Skaleneffekten ist vor allem die Lebensdauer relevant und bedarf technologischer Weiterentwicklung und verbesserter Anwendung. Dies deckt sich mit Erkenntnissen von Khizbullin et al. (2022, S. 504, 509). Die Tiefenentladung wird als großer Einflussfaktor auf die Lebensdauer erwähnt. Die Batterie kann mehr Ladezyklen durchlaufen, wenn sie regelmäßig nur bis zu einem geringen Prozentsatz entladen wird, als wenn sie immer bis zur maximalen Entladetiefe entladen wird. Mehr Ladezyklen bedeuten eine längere Lebenszeit. Eine Verkürzung der Batterielebenszeit um mehr als 30 % wirkt sich mit einer TCO-Steigerung von 5 % bis 21 % deutlich negativ auf die TCO aus. Eine Erhöhung der Batterielebenszeit hat dagegen nur sehr geringe Auswirkungen auf die TCO (maximal -5 % bei einer Parametervariation von 80 %). Obwohl der Batteriepreis einen großen Anteil an den Investitionskosten von E-Traktoren beträgt, hat die Änderung des Batteriepreises, entgegen der Annahmen, nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die TCO.

Die Fixkosten als Anteil der Gesamtkosten der Fahrzeuge sind für beide Varianten gleichbleibend und sind daher für die Gegenüberstellung irrelevant. Energie- sowie Wartungs- und Reparaturkosten der E-Traktorvarianten sind jeweils niedriger als die der entsprechenden Diesel-Traktorvariante. Wartungs- und Reparaturkosten sind nur schwer direkt zu beeinflussen. Derzeit liegen keine spezifischen Daten aus der Praxis über die zu erwartenden Wartungskosten von E-Traktoren vor. Daher wurde für die TCO-Analyse ein konservativer Ansatz gewählt. Energiekosten sind leichter zu beeinflussen. Die Unterschiede im Energiebedarf zwischen elektrischen und dieselbetriebenen Varianten resultieren aus dem höheren Wirkungsgrad und der höheren Energieeffizienz des batterieelektrischen Antriebs. Die Sensitivitätsanalyse der Diesel-Traktoren zeigt, dass eine Änderung des CO₂-Preises keine große Wirkung auf die resultierenden TCO hat. Der Kraftstoffpreis stellt hier den größten Hebel dar. Schwankungen des Dieselpreises wirken sich stärker auf die TCO aus als Schwankungen des Strom- und Batteriepreises. Dieser Aspekt der E-Traktoren ist für Landwirt*innen vorteilhaft, denn sie sind damit unabhängiger von Preisschwankungen und haben mehr Planungssicherheit bezüglich ihrer Kosten. Auf Seiten der Diesel-Traktoren ist der Kraftstoffpreis eine wichtige Stellenschraube, die selbst bei geringer Veränderung große Effekte erzielen kann. Auf lange Sicht ist das Sinken des Dieselpreises den Entwicklungen nach nicht realistisch, ebenso wenig das Sinken des Strompreises. Nach den angenommenen Preisentwicklungen ist bis 2035 lediglich mit einer Steigerung des Strompreises um 0,27 % und des Dieselpreises um 0,30 % zu rechnen. Diese Änderung allein reicht nicht aus, um einen Break-even-Punkt zu erreichen.

Des Weiteren reagieren die TCO beider Antriebsvarianten sensibel auf eine Änderung in der jährlichen Nutzungsdauer der Traktoren. Bei einer Variation um 20 %, ergeben sich Abweichungen zwischen rund 6 % bei E-Traktoren und rund 8 bis 9 % bei Diesel-Traktoren. Von den Sensitivitätskurven ist abzuleiten, dass Nutzungsdauer und Strom- bzw. Dieselpreis als Faktoren die gleiche Auswirkung auf die TCO haben, denn je mehr die Traktoren eingesetzt werden, desto mehr Energie wird benötigt. Die jährliche Nutzungsdauer der Maschinen ist ein kritischer Punkt der Wirtschaftlichkeit. Einerseits ist eine hohe Auslastung erforderlich und wirtschaftlich sinnvoll, andererseits erhöht sich der Bedarf eines Batterieaustauschs.

Welche Handlungsempfehlungen können auf Basis der gesammelten Daten und der Analyseergebnisse für die weitere Marktdiffusion von E-Traktoren abgeleitet werden?

Die Handlungsempfehlungen basieren auf verschiedenen Aspekten, die aus dem Fokusgruppen-Gespräch sowie aus den gesammelten Daten und Analyseergebnissen hervorgehen. Technologische Maßnahmen, wie die Optimierung des Lademanagements zur Maximierung der Batterielebensdauer und die kontinuierliche Weiterentwicklung der E-Traktoren-Technologie, stehen neben ökonomischen Maßnahmen im Vordergrund. Aktuelle Zahlen von Tadás (2023, S. 1) bestätigen, dass neuere und bessere E-Traktor-Technologien zu niedrigeren Wartungs- und Reparaturkosten (50 % weniger als bei Diesel-Traktoren) führen. Anreize für eine verstärkte technologische Weiterentwicklung sind somit wichtig für eine weitere Marktdiffusion von E-Traktoren. Ergänzende ökonomische Maßnahmen können aus den Ergebnissen von Markt-, TCO- und Sensitivitätsanalyse abgeleitet werden.

Subventionen und Förderprogramme sind sinnvolle Methoden, um einen finanziellen Ausgleich und einen Investitionsanreiz für die Landwirt*innen zu schaffen. Insbesondere um die anfänglichen Mehrausgaben bei E-Traktoren auszugleichen und Skaleneffekte zu nutzen. Diese können vorangetrieben werden, indem einerseits das Angebot und andererseits die Nachfrage gesteigert wird. Die Notwendigkeit, eine hohe Nachfrage zu kreieren, spiegelt sich in Aussagen einer Vertreterin von herstellenden Unternehmen wider (J. Baier, persönliche Kommunikation, 27. November 2023, S. 1). Auch die Ladeinfrastruktur trägt maßgeblich zu den hohen Investitionskosten bei und erfordert ebenfalls Subventionen. Darüber hinaus können die Vorteile niedrigerer Energie-, Wartungs- und Reparaturkosten gegenüber den konventionellen Traktoren ausgebaut werden, um den Kostenunterschied zu vergrößern und die Attraktivität der batterieelektrischen Varianten zu steigern. Zu den politischen Maßnahmen zur Schaffung von Anreizen für den Erwerb von E-Traktoren gehören neben Subventionen z. B. ermäßigte Steuern und Stromtarife für die Landwirtschaft. Die vorliegende Notwendigkeit nach Förderprogrammen deckt sich mit literarischen Studiendaten (Remmele et al., 2020, S. 126; Shao & Anup, 2022, S. 7). Des Weiteren werden erforderliche politische Voraussetzungen und strukturelle Rahmenbedingungen genannt. Shao und Anup (2022, S. 4ff.) präsentieren verschiedene Strategien und Maßnahmen, um das Preisgefälle zu überbrücken und langfristig ein günstigeres Preisniveau für E-Traktoren zu erreichen, um deren Kostenwettbewerbsfähigkeit zu verbessern. In diesem Kontext werden vorausgehende Regierungsmaßnahmen zur Schaffung von Kaufanreizen sowie staatliche Kaufanreize, eine Senkung der Mehrwertsteuer für E-Traktoren und Ladeinfrastruktur und die Preissenkung von

Versicherungsbeiträgen vorgeschlagen. Z. B. könnte die Steuerentlastung für Strom auf Elektromobilität ausgeweitet werden. Außerdem werden Unterstützung für den Ausbau von Ladeinfrastruktur und landwirtschaftliche Kredite mit reduzierten Zinssätzen empfohlen.

Energiekosten als einflussreichen Kostenfaktoren können direkt über eine Hebung oder Senkung der Preise beeinflusst werden. Auf Seiten der Energiebereitstellung sind Förderungen von Eigenstromversorgung, wie z. B. PV-Anlagen, sinnvoll. Außerdem thematisierten Teilnehmende des Fokusgruppen-Gesprächs die Notwendigkeit einer Verbesserung der Kooperation von Netzbetreibern und Landwirt*innen. Um die Betriebskosten von Diesel-Traktoren auf der anderen Seite zu erhöhen und diese somit unattraktiver zu machen, können Dieselpreise erhöht werden, z. B. durch den Abbau der Steuerbegünstigung für Agrardiesel. Die Abschaffung dieser Beihilfe ist von der Bundesregierung bereits bis 2026 vorgesehen (BMEL, 2024, S. 1). Analog dazu wird in Ali et al. (2023, S. 3f.) und Engström und Lagnelöv (2018, 187) das Ziel geäußert, Diesel-Kraftstoffkosten und somit die TCO der Diesel-Varianten zu erhöhen, um die hohen Anschaffungskosten der elektrischen Traktoren auszugleichen. Die Erhöhung der CO₂-Bepreisung trägt zusätzlich zu steigenden Dieselpreisen bei und kann ausgeweitet werden. Die eigentlichen Klimakosten (gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen) von THG-Emissionen liegen laut dem Umweltbundesamt (UBA, 2023b, S. 1) ohnehin deutlich über der bisherigen Bepreisung von 45 €/t CO₂ (im Jahr 2024) und sind vielmehr mit mindestens 237 €₂₀₂₂/t CO₂ zu berechnen.

Die Ergebnisse der Analyse stehen im Einklang mit den jüngsten Veröffentlichungen zur Elektrifizierung von Landmaschinen. Der großflächige Einsatz von E-Traktoren birgt diverse Herausforderungen und für Wirtschaftlichkeit sind verschiedene Voraussetzungen erforderlich: Die Marktreife von Modellen in höheren Leistungssegmenten muss ausgebaut werden und die Technologien müssen weiterentwickelt werden, um einerseits Leistungen und Kapazitäten erhöhen zu können, Wartungs- und Reparaturkosten weiter zu senken und technische Nachteile wie das erhöhte Gewicht im Vergleich zu Diesel-Traktoren abzubauen. Um bestehende finanzielle Hindernisse zu senken, müssen politische Maßnahmen ergriffen werden. Die Gesamtkosten von Diesel-Traktoren müssen einerseits durch Erhöhung der einzelnen Kostenparameter gehoben werden und die Gesamtkosten von E-Traktoren gesenkt werden. Hierbei können verschiedene Förderprogramme von Nutzen sein, um die einzelnen Kostenparameter zu adressieren. Für die Gestaltung zukünftiger Förderprogramme ist zu beachten, dass diese in der Landwirtschaft langfristig und mit möglichst wenig bürokratischen Hürden gestaltet werden

sollten. Teilnehmende der Fokusgruppe merken an, dass bei Förderangeboten auch die Berücksichtigung von Sonderfällen eingegliedert werden sollte, damit keine Wettbewerbsnachteile für einige Betriebe entstehen. Elektrifizierung stellt eine politische Prioritätsentscheidung dar. Soll die nachhaltige Landwirtschaft im Vordergrund stehen, ist es erforderlich, einen verlässlichen und langfristigen politischen Rahmen zu etablieren. Dieser Rahmen muss Landwirt*innen die nötige Sicherheit bieten, um in Elektromobilität zu investieren.

7.2 Limitationen

In diesem Kapitel werden die Limitationen dieser Forschungsarbeit aufgezeigt, um die Kreditabilität der Ergebnisse darzulegen. Der Forschungsfokus beschränkt sich auf das ausgewählte Konzept und repräsentiert mit den beiden betrachteten Traktorvarianten nur einen kleinen Bereich der Landwirtschaft. Für umfassendere Ergebnisse und eine breite Übertragbarkeit sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um die theoretische Berechnung durch praktische Ergebnisse und Erfahrungen zu verifizieren. Somit könnten Erkenntnisse über die Probleme und Möglichkeiten bei der Arbeit mit den E-Traktoren gewonnen werden. Die Auswahl der Investitionspreise der E-Traktoren basiert auf Modellen, die auf dem Markt vorhanden sind. Die Regressionsanalyse zeigt, dass beide Preise unter der Regressionsgeraden liegen. Die Preise sind damit zwar nicht konservativ angesetzt, jedoch ist zu erwarten, dass die Kurve in absehbarer Zeit sinkt, da die E-Traktoren mit steigenden Verkaufszahlen preiswerter werden. Dieser Effekt ist insbesondere in den höheren Leistungssegmenten vorzusehen, da es sich hier aktuell noch um hohe Markteinführungspreise handelt. Die Auswahl der Investitionspreise, welche auf Daten zweier vorhandener Modelle basiert, führt zu spezifischen Resultaten, welche für die Übertragung auf den gesamten Markt generalisiert werden müssen. Die dadurch entstandenen Unsicherheiten sollen mithilfe der Sensitivitätsanalyse ausgeglichen werden. Die Investitionspreise, wie sie aus der Regressionsanalyse hervorgehen, werden über die Variation in der Sensitivitätsanalyse abgedeckt. Zu erwähnen ist auch, dass der DT-K mit 34 bis 40 kW und dem entsprechenden Preis im unteren Preisrahmen liegt, da der ET-K eine Leistung von 40 kW hat. Diesel-Traktoren im nächst höheren Leistungsniveau haben laut dem KTBL (2022) Anschaffungskosten von 40.000 €. Des Weiteren wurde der Restwert aller Modelle mit demselben Prozentsatz berechnet. Derzeit ist jedoch noch unklar, mit welchem Restwert am Ende der Lebensdauer von E-Traktoren zu rechnen ist.

Die Aussagekraft des Vergleichs zwischen E- und Diesel-Traktoren hängt maßgeblich von der Ähnlichkeit der zu vergleichenden Modelle ab. Ferner können Skalen-, aber auch

Lerneffekte einen positiven Einfluss auf die TCO haben. Diese sind schwer abzuschätzen und bisher wenig untersucht. Vermutungen wurden angestellt, dass diese zuträglich für die Senkung der TCO von E-Traktoren sind, quantitativ ist dies bisher jedoch nicht belegbar oder abschätzbar. Die Individualität und Vielfalt innerhalb des landwirtschaftlichen Sektors und dessen unterschiedlichen Einsatzbereiche für landwirtschaftliche Maschinen kann nicht vollständig abgebildet werden. Die Ergebnisse der TCO-Analyse sind stark beschränkt auf die getroffenen Annahmen und die festgelegten Werte. Sie bilden somit ein bestimmtes Szenario ab, welches mithilfe der Betrachtung zweier verschiedener Leistungssegmente, der Regressions- und der Sensitivitätsanalyse übertragbar gemacht wird. Timeliness Kosten wurden in der TCO-Analyse nicht berücksichtigt und könnten die Bewertung der Technologie beeinflussen. Außerdem fehlen aktuelle Daten zu Wartungs- und Reparaturkosten aus der Praxis sowie Emissionsdaten für die Energiegewinnung, die Produktion der Traktoren und Batterien und deren Entsorgung. Um sicherzustellen, dass dieser wichtige Vorteil von E-Traktoren gegenüber Diesel-Traktoren angemessen berücksichtigt wird und um die Aussagen der Interpretation zu stützen, ist eine umfassende Datenerhebung und Analyse erforderlich. Unsicher ist zudem, ob die Preise der Ersatzbatterien in der TCO-Analyse möglicherweise zu niedrig angesetzt wurden. Diese machen neben den Traktorkosten einen Großteil der Kosten aus, aber bisher sind wenige Informationen dazu vorhanden. Batteriezellen sind zwar die zentralen Bauteile von Batterien, aber auch die Leistungselektronik, das Batteriemanagementsystem, die Temperaturregelung und Sicherheitssysteme sind fester Bestandteil. Deswegen ist der Preis für die Zellen nicht gleichzusetzen mit dem Preis für die fertige, einsetzbare Batterie. Angesichts des eingeschränkten Kenntnisstandes bezüglich des tatsächlichen Energiebedarfs von E-Traktoren, können Unsicherheiten die numerische Abschätzung der Gesamtkosten beeinflussen. Die Analyse basiert auf der angenommenen durchschnittlichen Nutzung über das gesamte Jahr, jedoch kann der Energiebedarf der Traktoren je nach Jahreszeit, Größe und geografischem Standort variieren. Über den Rahmen dieser Arbeit hinaus ist anzumerken, dass bei der Analyse von einer ausreichenden Stromversorgung ausgegangen wird. In vielen Agrarstaaten stellen Stromknappheit und Stromausfälle ein großes Problem dar, wodurch der Einsatz von E-Traktoren beschränkt sein kann. Elektrifizierung könnte somit einerseits nur eingeschränkt möglich sein, andererseits könnte dies ein Anreiz sein, auf nachhaltige Energieversorgung umzusteigen. Nicht im Fokus dieser Arbeit lagen die unterschiedlichen Ladeverhalten und -typen, die für E-Fahrzeuge möglich sind. Diese können für weitere Forschung jedoch interessant sein und, bei optimaler Anwendung, zu einem verbesserten Einsatz von E-Traktoren beitragen. Kritisch zu betrachten ist zudem die Berechnung der CAGR von Diesel- und

Strompreisentwicklungen über die letzten Zehn Jahre. Da hier nur der erste und letzte Wert in die Berechnung mit einfließt, werden alle Entwicklungen innerhalb dieser Zehn Jahre nicht berücksichtigt. Vor allem erwartete Ereignisse und Krisen können jedoch einen akuten Einfluss auf die Diesel- und Strompreise haben und somit zu erheblichen Unterschieden in den TCO führen. Des Weiteren wurden dynamische Strompreise und deren Einfluss auf die Gesamtkosten sowie die Eigenversorgung mit Strom aus PV- oder Biogasanlagen auf dem Betrieb selbst nicht in die Analyse mit einbezogen. Darüber hinaus kann die Nutzung von E-Traktoren für Systemdienstleistungen untersucht werden. Die Netzstabilität könnte verbessert werden und es könnten Einnahmen bzw. veränderte Kosten erzeugt werden, die hier nicht mit in die Kalkulation aufgenommen wurden. Um das Ziel der Dekarbonisierung der Landwirtschaft als Ganzes zu betrachten, sollte außerdem ein Vergleich mit weiteren alternativen Antriebskonzepten und Energieträgern angestellt werden und Konzepte für ergänzende Systeme entwickelt werden.

Methodische Limitationen dieser Arbeit liegen in der Beschränkung auf die TCO-Analyse. Für tiefergehende Kostenanalysen und -prognosen müssten weitere Wirtschaftlichkeitsanalysen herangezogen und ausgewertet werden. Außerdem müssten die Ergebnisse mit unterjährigen Analysen der Energie- und Geldflüsse ergänzt werden, um eine bessere Planungssicherheit zu garantieren. Darüber hinaus sollten Expert*inneneinschätzungen herangezogen werden, um z. B. die Parametrisierung zu validieren und Unsicherheiten in der Kalkulation somit abzubauen.

8 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der derzeitigen Marktsituation von E-Traktoren sowie der Gesamtkosten und ihrer spezifischen Kostenfaktoren im Vergleich zu Diesel-Traktoren. Deutlich wird, dass E-Traktoren bisher nur in unteren Leistungssegmenten marktreif sind. Darüber hinaus fehlt es für eine Umstellung von konventionellen Diesel-Traktoren auf E-Traktoren in Leistungsbereichen über 55 kW an serienreifen, adäquaten Modellen. Im Weiteren zeigten die Ergebnisse der TCO-Analyse, dass das kleinere E-Traktormodell geringere Gesamtkosten aufweist als dessen Diesel-Pendant, das größere E-Traktormodell jedoch deutlich kostenintensiver ist als ein entsprechendes Diesel-Pendant. Aktuell sind E-Traktoren in der Anschaffung teurer als Diesel-Traktoren. Vor allem in höheren Leistungsniveaus geht die Differenz der Anschaffungskosten noch weiter auseinander, weshalb sich die Gesamtkosten über die Nutzungsdauer hinweg nicht amortisieren. Der Strompreis und die jährliche Nutzungsdauer wurden neben den Investitionskosten als entscheidende Faktoren für die Gesamtkosten identifiziert. Für Diesel-Traktoren hingegen spielen der Dieselpreis und die jährliche Nutzungsdauer eine größere Rolle als die Investitionskosten. Je größer der Einfluss einer Veränderung der Kostenfaktoren ist, umso größer die daraus resultierende Wirkung. Um einen vergleichsweise großen Effekt zu erzielen, muss die Veränderung folglich nur gering ausfallen.

Die Umstellung landwirtschaftlicher Arbeitsprozesse auf E-Traktoren ist im Rahmen der Dekarbonisierung der Landwirtschaft sinnvoll. Um dies zu erreichen ist es zweckmäßig, Kostenparameter, die in die Gesamtkosten von E-Traktoren einfließen zu senken. Dazu können technologische Verbesserungen und Fördermaßnahmen dienen. Im Vordergrund stehen Förderprogramme, um Kaufanreize zu schaffen. Im Gegenzug machen auch Kostensteigerungen auf Seiten der Diesel-Traktoren den Einsatz von E-Traktoren attraktiver. An wichtigster Stelle steht hier die Erhöhung von Diesel- und CO₂-Kosten. Anstatt Geld in die Agrardieselbegünstigung zu investieren, könnte dasselbe Geld für Subventionen nachhaltiger Antriebsformen genutzt werden. Aktuell steht im Agrardiesel-Konflikt die Abschaffung der Begünstigungen zur Diskussion. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass der Ölpreis in den vergangenen Jahren aufgrund von Krisen und Kriegen, wie beispielsweise in der Ukraine und Russland, angestiegen ist. Dies hat wiederum einen Anstieg des Dieselpreises zur Folge. Durch diesen Anstieg werden die TCO von E-Traktoren verhältnismäßig attraktiver (Agrarzeitung, 2022, S. 1; Bundesregierung, 2024b, S. 1; Pauli et al., 2015, S. 48).

Landwirt*innen können die Mehrkosten, die bei der Anschaffung von E-Traktoren anfallen, überwiegend nicht an die Verbraucher weitergeben. Da Traktoren sehr lange

eingesetzt werden, ist die Zurückhaltung von Landwirt*innen groß, in elektrische Maschinen zu investieren, von denen es noch keine Erfahrungswerte zu Wiederverkaufswerten und Langlebigkeit gibt. Aufgrund der langen Lebensdauer landwirtschaftlicher Maschinen erfolgt ein langsamer Austausch der Fahrzeugflotte. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Kaufentscheidungen auf umweltfreundliche Maschinen umzulenken. Obwohl der Weg zu einer vollständig dekarbonisierten landwirtschaftlichen Mobilität komplex und risikoreich ist, können die Kostenvorteile die Trägheit überwinden, wenn anfängliche Investitionskosten entsprechend bezuschusst und gefördert werden. Es ist zudem wichtig, mögliche betriebliche Anpassungen, die für die Optimierung des Einsatzes von E-Traktoren erforderlich sind, zu erforschen. Dabei müssen auch mögliche Veränderungen in Bewirtschaftungsmethoden in Betracht gezogen werden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist kein universelles Konzept für den Einsatz von E-Traktoren in Sicht (Chauhan et al. 2023, 6; Eckel et al. 2023, 7; Frerichs und Buck 2022, 8; Pickel 2020, 56; Shao und Anup 2022, 10).

Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung von Traktoren steigt auch die Nachfrage nach elektrifizierten Anbaugeräten, v. a. für Arbeitsschritte, die hohe Zugkräfte erfordern, da diese normalerweise mit Diesel angetrieben werden. Einem Traktor wird hierbei z. B. ein Pflug angehängt, Tests solcher Anbaueinheiten weisen Einsparungen von einem Drittel des Zugkraftbedarfs nach. Um die Umweltauswirkungen des Traktoreinsatzes weiter zu minimieren ist außerdem die Wiederverwendung von Batterien in anderen Anwendungen zu erforschen. Somit könnte die Restkapazität von Batterien nach Lebensende noch ausgenutzt werden. Um weitere Informationen zu Umweltauswirkungen des Einsatzes von E-Traktoren zu erhalten, ist die Erarbeitung einer Ökobilanz verschiedener Modelle sinnvoll (Wiecha et al., 2021, S. 105).

Mit Blick auf die Zukunft ist ein Erfolg der Elektrifizierung und damit eine langfristige Verdrängung der Verbrennungsmotoren realisierbar, wenn gleichwertige Maschinen auf dem Markt verfügbar sind. Bei batteriebetriebenen Traktoren mit Leistungen über 100 kW ist dies nicht absehbar. Es liegen jedoch Chancen in kabelgeführten, teilhybriden Traktoren und Lösungen jenseits der Elektrifizierung sowie im ganzheitlichen Denken und Strukturwandel in der Landwirtschaft. Die Klimabilanz, insbesondere der CO₂-Fußabdruck, von Produkten gewinnt an Relevanz, was sich positiv auf die Akzeptanz der mit E-Traktoren verbundenen Mehrkosten auswirken kann. Als wichtigste Rahmenbedingung für die Kaufentscheidung erwähnt die Fraunhofer ISI (2023, S. 14) dennoch den Preis. In Anbetracht der vorliegenden Erkenntnisse ist es von entscheidender Bedeutung, gezielte Maßnahmen zu ergreifen, um die Verbreitung und Akzeptanz von E-

Traktoren in der Landwirtschaft zu fördern. Auf diese Weise kann ein bedeutender Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung des Agrarsektors geleistet werden (Fokusgruppen-Gespräch, persönliche Kommunikation, 4. Juli 2023; Remmele et al., 2020, S. 96).

Literaturverzeichnis

- AGCO GmbH. (2023). *Voll Batterie-elektrisch: Der Fendt e100 V Vario*. Fendt. <https://www.fendt.com/at/voll-batterie-elektrisch-der-fendt-e100-v-vario>
- AGCO GmbH. (2024). *Fendt e100 V Vario: Zukunft der Landwirtschaft*. <https://www.fendt.com/de/landmaschinen/traktoren/fendt-e100-v-vario>
- Agora Verkehrswende. (2022). *Schnellladen fördern, Wettbewerb stärken. Finanzierungsmodelle für den Aufbau von öffentlich zugänglicher Ladeinfrastruktur für Pkw*. Agora Verkehrswende. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2022/Ladeinfrastruktur/Agora-Verkehrswende_Schnellladen-foerdern-Wettbewerb-staerken.pdf
- Agrarzeitung. (2022). E-Traktoren: Der kleine Stromer aus Marktoberdorf. *agrarzeitung.de*. powered by GENIOS. https://www.wiso-net.de/document/AGWN__AGWN_99848
- Agrarzeitung. (2024). Es muss nicht immer Diesel sein. *agrarzeitung*, 8, 10. https://www.wiso-net.de/document/ED__20240223659061
- Albatayneh, A., N. Assaf, M., Alterman, D., & Jaradat, M. (2020). Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles. *Environmental and Climate Technologies*, 24(1), 669–680. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0041>
- Ali, D., de Castro, R., Ehsani, R., & Vougioukas, S. (2023, Juni 14). Identifying Practical Pathways for Electrification of Agricultural Vehicles through Techno-Economic Analysis. EVS36. International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Sacramento, USA. http://evs36.com/wp-content/uploads/finalpapers/FinalPaper_de%20Castro_Ricardo.pdf
- Auf der Maur, A., Brüggeshemke, N., & Kutschera, M. (2020). *Lade-Report—Entwicklung der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität sowie Vergleich der Ladetarife in Deutschland*. EnBW Energie Baden-Württemberg AG. https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-01/20200207_prog-nos_lade-report_2020.pdf
- Badouard, T., Moreira de Oliveira, D., Yearwood, J., & Torres, P. (2020). *Final Report Cost of Energy (LCOE)*. Consortium. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-10/final_report_levelised_costs_0.pdf
- Baek, S.-Y., Baek, S.-M., Jeon, H.-H., Kim, W.-S., Kim, Y.-S., Sim, T.-Y., Choi, K.-H., Hong, S.-J., Kim, H., & Kim, Y.-J. (2022). Traction Performance Evaluation of

- the Electric All-Wheel-Drive Tractor. *Sensors*, 22(785). <https://doi.org/10.3390/s22030785>
- BAFA. (2024a). *Merkblatt zur Ermittlung des Gesamtenergieverbrauchs*. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/ea_ermittlung_gesamtenergieverbrauch.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- BAFA. (2024b). *Informationsblatt CO2-Faktoren*. BAFA. https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_infoblatt_co2_faktoren_2024.html
- Bagire, F., Tennakoon, S. B., & Kamuhinda, S. (2022). *Analysis of A Fully Electric Tractor Performance Through Field Trials in Rwanda*. 2022 IEEE 7th Southern Power Electronics Conference (SPEC).
- Baier, J. (2023, November 27). *BMWK-Projekt LANDGEWINN: Fragebogen für Ökobilanzierung von E-Traktoren* [Persönliche Kommunikation].
- Balakrishnan, A., & Neef, C. (2023, August 24). *Preisschwankungen bei Batterie-Rohstoffen: Wie die Automobilindustrie reagiert und welche Auswirkungen sie auf die Zellkosten haben*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update/batterie-rohstoffe-preis-schwankungen-wie-reagiert-automobil-industrie-auswirkungen-zellkosten.html>
- Basma, H., & Rodríguez, F. (2023). *A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/11/ID-54-%E2%80%93-EU-HDV-TCO-paper-working-paper-28-A4-50145-v2.pdf>
- Basma, H., Saboori, A., & Rodríguez, F. (2021). *Total Cost of Ownership for Tractor-Trailers in Europe: Battery Electric Versus Diesel*. International Council on Clean Transportation.
- Basma, H., Zhou, Y., & Rodríguez, F. (2022). *Fuel-Cell Hydrogen long-haul Trucks in Europe: A total Cost of Ownership Analysis*. International Council on Clean Transportation.
- Baumaschinen Aschauer. (2024). *FARMTRAC 25G*. Kleintraktoren Österreich. <https://xn--farmtrac-sterreich-l3b.at/index.php/product/farmtrac-25g/>
- BDEW. (2022). *Verkehr in Zahlen 2022/2023*. Kraftfahrt-Bundesamt. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2022-2023-pdf.pdf?__blob=publicationFile
- Beligoj, M., Scolaro, E., Alberti, L., Renzi, M., & Mattetti, M. (2022). *Feasibility Evaluation of Hybrid Electric Agricultural Tractors Based on Life Cycle Cost Analysis*.

- IEEE Access*, 10, 28853–28867. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157635>
- Benlafqih, M. (2022, April 6). *Kaufratgeber für Traktoren*. Buying Guides AgriExpo. <https://guide.agriexpo.online/de/kauftratgeber-fuer-traktoren/>
- Besette, D., Brainard, D., Srivastava, A., Lee, W., & Geurkink, S. (2022). Battery Electric Tractors: Small-Scale Organic Growers' Preferences, Perceptions, and Concerns. *Energies*, 15(8648). <https://doi.org/10.3390/en15228648>
- BEUC. (2021). *Electric Cars: Calculating the Total Cost of Ownership for Consumers*. BEUC. https://www.beuc.eu/sites/default/files/publications/beuc-x-2021-039_electric_cars_calculating_the_total_cost_of_ownership_for_consumers.pdf
- BLE. (2023). *Merkblatt Einzelmaßnahmen Teil A*. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/BuPro_Energieeffizienz/Merkblatt_Einzelmassnahmen_A.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- BMEL. (2021). *Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/energieeffizienz-landwirtschaft-gartenbau.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- BMEL. (2024, Januar 4). *Özdemir zur Einigung über Änderungen zur Aufstellung des Haushaltes 2024* [Pressemitteilung]. BMEL. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/001-haushalt-2024-aenderungen.html>
- BMUV. (2016). *Klimaschutzplan 2050*. Bundesregierung. https://un-fccc.int/sites/default/files/bmub_klimaschutzplan_2050_kurzf_deutsch.pdf
- BMUV. (2019). *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050*. Bundesregierung. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Landwirtschaft/Klimaschutz/Klimaschutzprogramm2030.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Bragulla, V. (2023, November 23). *BMWK-Projekt LANDGEWINN: Fragebogen für Ökobilanzierung von E-Traktoren* [Persönliche Kommunikation].
- Brennstoffemissionshandelsgesetz (2022). <https://www.gesetze-im-internet.de/behg/>
- Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) (2019). <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>
- Bundesregierung. (2024a, Januar 1). CO₂-Preis steigt auf 45 Euro pro Tonne. *Bundesregierung*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/co2-preis-kohle-abfallbrennstoffe-2061622>
- Bundesregierung. (2024b). *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU - Streichung der Agrardiesel-Steuerentlastung sowie der*

- Kfz-Steuerbefreiung in der Landwirtschaft durch die Bundesregierung.*
<https://dserver.bundestag.de/btd/20/100/2010026.pdf>
- Bünger, A., & Schiller, D. (2020). Innovations- und Adaptionsfähigkeit von Landwirten. In *Sustainability Transitions in der Lebensmittelproduktion* (S. 73–92). Universitätsverlag Göttingen. <https://library.open.org/bitstream/handle/20.500.12657/41601/1/SusTrans.pdf>
- Bünger, U., Nicolai, S., Zerhusen, J., Monsalve, C., Kharboutli, S., Michalski, J., Ruhe, S., & Albrecht, U. (2019). *Infrastrukturbedarf E-Mobilität* [Bericht zum Forschungsprojekt der Ludwig-Bölkow-Stiftung]. https://stiftung.adac.de/app/uploads/2019/06/IBeMo_Abschlussbericht_final_190625_LBST_Zerhusen.pdf
- Carz4Sale. (o.A.). *Celestial E-Mobility 27 HP Tractor price, specs, mileage, colours, photos and reviews.* Carz4Sale. <https://www.carz4sale.in/details/celestial-e-mobility/tractor/27-hp-tractor/>
- Case IH. (2023a). *Farmall Electric Tractor.* Farmall Electric Tractor | Case IH. <https://www.caseih.com/en-us/unitedstates/products/tractors/farmall-series/farmall-electric-tractor>
- Case IH. (2023b). *Farmall Electric Tractor.* Farmall Electric Tractor | Case IH. <https://cnhi-p-001-delivery.sitecorecontenthub.cloud/api/public/content/5fde91d7b1cf4223b34039279b86348c?v=c66c2707>
- Celestial. (2024). *Celestial Electric Tractor Models.* <https://www.celestial.com/electric-tractor-models/>
- Chauhan, S., Hans, M., Rittstieg, M., & Zafar, S. (2023). *Why the economics of electrification make this decarbonization transition different.* McKinse & Company. https://www.mckinsey.com/~/_/media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/why%20the%20economics%20of%20electrification%20make%20this%20decarbonization%20transition%20different/why-the-economics-of-electrification-make-this-decarbonization-transition-different-vf.pdf?shouldIndex=false
- Chen, Y.-C., Chen, L.-W., & Chang, M.-Y. (2022). A Design of an Unmanned Electric Tractor Platform. *Agriculture*, 12(112). <https://doi.org/10.3390/agriculture12010112>
- Clausen, J. (2020). *Innovationspolitik für den Ökolandbau.* Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/innovationspolitik_oekolandbau_2020-02-28_fin.pdf
- Deiningner, O. (2022). OEMs steigen in Elektro ein. *agrarzeitung*, 77(37), 14–14. <https://doi.org/10.51202/1869-9707-2022-37-014>

- Destatis. (2023). *Strompreise für Nicht-Haushalte: Deutschland, Halbjahre, Jahresverbrauchsklassen, Preisarten* [dataset]. <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/beta/statistic/61243/table/61243-0005>
- Destatis & en2x. (2024, Februar 16). *Dieselpreisentwicklung bis 2024*. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieselmotoren-seit-dem-jahr-1950/>
- Deutsche Bundesbank. (2024). *Wechselkursstatistik*. Deutsche Bundesbank. <https://www.bundesbank.de/re-source/blob/808928/192894dccc2a1ef87db8a4a627d00717/mL/wk1d1213-data.pdf>
- DLG. (2022). *Angemeldete Neuheiten 2022—AGRITECHNICA*. <https://www.agritechnica.com/de/awards/innovation-award/angemeldete-neuheiten-2022>
- DLG. (2023). *Agritechnica 2023: Alternative Antriebe für Traktoren*. <https://www.agritechnica.com/de/presse/aktuelle-meldungen#!/news/alternative-antriebe-fuer-traktoren-auf-der-agritechnica-2023>
- Dögnitz, N., Costa de Paiva, G., Hauschild, S., Meisel, K., Etzold, H., Nieß, S., Köchermann, J., Görsch, K., Cyffka, K.-F., Müller-Langer, F., Remmele, E., Thuneke, K., Neuling, U., Zitscher, T., Bauer, C., & Sacchi, R. (2023a). *Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr* (44; DBFZ Report, S. 338). Deutsches Biomasseforschungszentrum. https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_44_DE.pdf
- Dögnitz, N., Costa de Paiva, G., Hauschild, S., Meisel, K., Etzold, H., Nieß, S., Köchermann, J., Görsch, K., Cyffka, K.-F., Müller-Langer, F., Remmele, E., Thuneke, K., Neuling, U., Zitscher, T., Bauer, C., & Sacchi, R. (2023b, Januar 16). *Verfahrensrouten zur Bereitstellung erneuerbarer Energieträger für den Verkehrsbereich*. Deutsches Biomasseforschungszentrum. https://www.dbfz.de/fileadmin/Monitoring_EE/Abbildung-3-1_g.png
- Eckel, H., Hörner, R., Peter Pickel, Rathbauer, J., Reinhold, G., Remmele, E., Stirnimann, R., & Uppenkamp, N. (2020). *Kraftstoffnutzung in der Landwirtschaft*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Eckel, H., Remmele, E., Frerichs, L., Hipp, J., Müller-Langer, F., & Schröder, J. (2023). *Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Emilsson, E., & Dahllöf, L. (2019). *Lithium-Ion Vehicle Battery Production—Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling*. Swedish Energy Agency. <https://www.ivl.se/english/ivl/publications/publications/lithium-ion-vehicle-battery-production----status->

- 2019-on-energy-use-co2-emissions-use-of-metals-products-environmental-foot-print-and-recycling.html
- Energiesteuergesetz (2022). https://www.gesetze-im-internet.de/energiestg/_57.html
- Engström, J., & Lagnelöv, O. (2018). An Autonomous Electric Powered Tractor—Simulation of All Operations on a Swedish Dairy Farm. *Journal of Agricultural Science and Technology A*, 8(3). <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2018.03.006>
- Europäisches Parlament. (2018). *Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates*. Europäische Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>
- Europäisches Parlament. (2023, Juli 3). *EU-Verkaufsverbot für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 – Was bedeutet das?* <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20221019STO44572/verkaufsverbot-fur-neue-benzin-und-dieselfahrzeuge-ab-2035-was-bedeutet-das>
- Eurostat. (2023). *Electricity prices for non-household consumers—Bi-annual data (from 2007 onwards)* [dataset]. https://doi.org/10.2908/NRG_PC_205
- Fendt. (2024). *Fendt CO2 Rechner*. Fendt. <https://www.fendt.com/de/landmaschinen/traktoren/fendt-e100-v-vario>
- Fitzpatrick, J., & Mayer, S. (o. J.). Fokusgruppen. In *Handbuch Politische Kommunikation*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Abgerufen 11. April 2024, von https://doi.org/10.1007/978-3-658-26242-6_50-1
- FNR. (2014). *Biokraftstoffe* (4. Aufl.). FNR. https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2015/mediathek/brosch_biokraftstoffe_web.pdf
- Fokusgruppen-Gespräch. (2023, Juli 4). *E-Mobilität in der Landwirtschaft* [Persönliche Kommunikation].
- Fraunhofer ISI. (2023). *Factsheet TCO*. NOW GmbH. https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/03/NOW_Factsheet_Vergleich-Antriebsarten-Pkw.pdf
- Fraunhofer-Gesellschaft. (2020). *Kompetenz für das Wasserstoff-Zeitalter*. <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschung/artikel/2020/Wasserstoff/Kompetenz-fuer-das-Wasserstoff-Zeitalter.pdf>
- Frerichs, L., & Buck, L. (2022). *Structuring of electrified agricultural machine systems* (2395; VDI-Berichte). VDI-MEG. <https://doi.org/10.51202/9783181023952>
- Fudex Landmaschinen GmbH. (2024). *Farmtrac 25G Basis*. Fudex Landmaschinen GmbH. <https://www.fudex.eu/farmtrac/farmtrac-25g/6403/farmtrac-25g-basis>
- FYI Landgewinn. (2023, Dezember 7). *FYI Landgewinn Insights*. FYI Landgewinn. <https://fyi-landgewinn.de/>
- Ghobadpour, A., Monsalve, G., Cardenas, A., & Mousazadeh, H. (2022). Off-Road Electric Vehicles and Autonomous Robots in Agricultural Sector: Trends,

- Challenges, and Opportunities. *Vehicles*, 4, 843–864. <https://doi.org/10.3390/vehicles4030047>
- GIZ. (2021, November 16). *Rwanda: First electric tractor goes into operation*. GIZ Mediacenter. <https://www.giz.de/en/mediacenter/103149.html>
- GoClimate. (2021, Juni 1). *Fossile Brennstoffe einfach erklärt*. <https://www.goclimmate.de/glossar/fossile-brennstoffe/>
- Göggerle, T. (2022). *Neuer Elektro-Traktor von John Deere mit fast 700 PS!* [Zeitungsartikel]. *agrarheute.com*. <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/neuer-elektro-traktor-john-deere-fast-700-ps-592632>
- Göggerle, T. (2023a, April 15). *John Deere: Vollelektrischer Traktor soll 2026 kommen* [Text]. *agrarheute*. <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/john-deere-vollelektrischer-traktor-2026-kommen-605742>
- Göggerle, T. (2023b, Oktober 21). *Ehepaar entwickelt 160-PS-Traktor mit Elektroantrieb: Ziel Serienreife* [Text]. *agrarheute*. <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/ehepaar-entwickelt-160-ps-traktor-elektroantrieb-ziel-serienreife-612175>
- Gunnarsson, C. (2008). *Timeliness Costs in Grain and Forage Production Systems* [Doktor, Swedish University of Agricultural Sciences]. https://www.researchgate.net/profile/Carina-Gunnarsson-2/publication/30073159_Timeliness_costs_in_grain_and_forage_production_systems/links/0c96053189599211b5000000/Timeliness-costs-in-grain-and-forage-production-systems.pdf
- Gunnarsson, C., & Hansson, P.-A. (2003). Optimisation of field machinery for an arable farm converting to organic farming. *Agricultural Systems*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2003.06.005>
- Hanson, J. D. (2011). Differential method for TCO modelling: An analysis and tutorial. *International Journal of Procurement Management*, 4(6). <https://doi.org/10.1504/IJPM.2011.043003>
- Heinemann, F., & Kemper, J. (2024). *Die Begünstigung für Agrardiesel und die Kfz-Steuerbefreiung in der Land- und Forstwirtschaft: Subventionspolitische Beurteilung*. Bundestag. <https://www.bundestag.de/resource/blob/985808/b7a9168132debad9e71f8aba5a98a910/06-Heinemann.pdf>
- Herlitzius, T., Hengst, M., Grosa, A., & Fichtl, H. (2021). Fieldswarm technology for tillage and crop care. *Automatisierungstechnik*, 69(4), 316–324. <https://doi.org/10.1515/auto-2020-0127>

- Hussy, W., Schreier, M., & Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor*. Springer Berlin Heidelberg.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-34362-9>
- ICLEI. (2014). *Clean Fleets Life Cycle Cost (LCC) Tool* [Rechentool]. Iclei Europe.
<https://iclei-europe.org/publications-tools/?c=search&uid=0IKEKnVb>
- Interchargers. (2022, Juni 2). *EV Plug Type—CCS Type 2 (SAE J3068)*. <https://interchargers.com/ev-plug-type-ccs-type-2-sae-j3068/>
- Kästner, T., & Kießling, A. (2015). Einmaleins der Energiebegriffe. In *Energiewende in 60 Minuten* (S. 9–15). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-11561-6_2
- KBA. (2022). *Fahrzeugzulassungen (FZ) (25)*. https://www.kba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ25/fz25_2022_pdf.jsessionid=209472A9D52E0B874555487AA530BC21.live11312?__blob=publicationFile&v=8
- Ketzer, D. (2020). *Land Use Conflicts between Agriculture and Energy Production* [Doktor, Stockholm University]. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:su:diva-177399>
- Khizbullin, R., Chuyvkin, B., & Kipngeno, R. (2022). *Research on the Effect of the Depth of Discharge on the Service Life of Rechargeable Batteries for Electric Vehicles*. ICIEAM. <https://ieeexplore.ieee.org/stampPDF/getPDF.jsp?tp=&arnumber=9787251&ref=aHR0cHM6Ly9pZWVleHBsb3JlLmllZWUub3JnL2RvY3VtZW50Lzk3ODcyNTE=>
- Kissel, M., Tarasinski, N., Klein, A., Kegel, V., & de Moraes Boos, F. (2022). *Fully electric Tractor with 1000 kWh battery capacity (2395; VDI-Berichte)*. VDI-MEG.
<https://doi.org/10.51202/9783181023952>
- Knecht, J. (2021, Juli 23). *Gen.Farm Elektro-Traktor für Ruanda*. Auto Motor Sport.
<https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/alternative-antriebe/gen-farm-elektro-traktor-ruanda-herbert-diess/>
- Knegt B.V. (2023a). *Knegt 304G2E - Knegt Tractors*. <https://knegt-international.de/produkt/de-knegt-304g2-elektro-traktor/>
- Knegt B.V. (2023b). *Knegt 304G2E Fahrerhaus—Knegt Tractors*. <https://knegt-international.de/produkt/knegt-304g2e-kabine/>
- Knegt B.V. (2023c). *Knegt 304G2E Frontlader—Knegt Tractors*. <https://knegt-international.de/produkt/knegt-304g2e-frontlader/>
- Knegt B.V. (2023d). *Knegt 304G2E Kabinenfrontlader—Knegt Tractors*. <https://knegt-international.de/produkt/knegt-304g2e-cab-frontlader/>

- Knegt B.V. (2023e). *Knegt 404G2E - Knegt Tractors*. <https://knegt-international.de/produkt/knegt-404-g2e/>
- Knegt B.V. (2023f). *Knegt 404G2E Fahrerhaus—Knegt Tractors*. <https://knegt-international.de/produkt/knegt-404g2e-kabine/>
- Knegt B.V. (2023g). *Knegt 404G2E Frontlader—Knegt Tractors*. <https://knegt-international.de/produkt/knegt-404g2e-frontlader/>
- Knegt B.V. (2023h). *Knegt 404G2E Kabinenfrontlader—Knegt Tractors*. <https://knegt-international.de/produkt/knegt-404g2e-cab-frontlader/>
- Knegt B.V. (2024). *Sektoren—Knegt Tractors*. Knegt International. <https://knegt-international.de/sektoren/>
- Knüsel, M. (2023, November 18). *BMWK-Projekt LANDGEWINN: Fragebogen für Ökobilanzierung von E-Traktoren* [Persönliche Kommunikation].
- Korbinian Goetz. (2023). *TUMtrac Research Project*. TUM. <https://www.mos.ed.tum.de/ftm/labs/electric-vehicle/tumtrac-forschungstraktor/>
- KTBL. (2022). *MaKost* [Online Rechentool]. Maschinen- und Reparaturkosten. <https://daten.ktbl.de/makost/#main?language=de-DE>
- KTBL. (2024). *Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau* [Online Rechentool]. Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. <https://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html>
- Kubota GmbH. (2023a). *Abgasfreier Traktoreinsatz in Pariser Parkanlagen*. Kubota. <https://kdg.kubota-eu.com/blog/news/abgasfreier-traktoreinsatz-in-pariser-parkanlagen/#agriculture>
- Kubota GmbH. (2023b). *Fully automated electric tractor*. KUBOTA FUTURE CUBE | Kubota Global Site. <https://www.kubota.com/futurecube/tractor/>
- Kubota Group Solutions Hub. (2023, August 22). *Kubota—RT210-2e und RT220-2e*. Kubota Elektrische Kompakt-Radlader. <https://kubota-group.eu/de/kubota-elektrische-kompaktradlader/>
- Lagnelöv, O., Dhillon, S., Larsson, G., Nilsson, D., Larsolle, A., & Hansson, P.-A. (2021). Cost analysis of autonomous battery electric field tractors in agriculture. *Biosystems Engineering*, 204, 358–376. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.02.005>
- Lagnelöv, O., Larsson, G., Larsolle, A., & Hansson, P.-A. (2021). Life Cycle Assessment of Autonomous Electric Field Tractors in Swedish Agriculture. *Sustainability*, 13(20), 11285. <https://doi.org/10.3390/su132011285>
- Leckel, D. (2009). Diesel Production from Fischer-Tropsch: The Past, the Present, and New Concepts. *Energy & Fuels*, 23, 2342–2358. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef900064c>

- Liu, J., Xia, C., Jiang, D., Shang, G., Han, J., & Sun, Y. (2021). Determination and Application of Maximum Efficiency Curve of Crawler Electric Tractor Motors. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1310926. <https://doi.org/10.1155/2021/1310926>
- Mao, Y., Wu, Yi., Yan, X., Liu, M., & Xu, L. (2022). Simulation and experimental research of electric tractor drive system based on Modelica. *PLoS ONE*, 17(11)(0276231). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276231>
- Mareev, I., Becker, J., & Sauer, D. (2017). Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation. *Energies*, 11(1), 55. <https://doi.org/10.3390/en11010055>
- Maschinenring Tirol. (2023). *Maschinenkosten* [Online Rechentool]. Maschinenkostenrechner. <http://maschinenkosten.tirol/maschinenkostenrechner.html>
- Maschinenringe Deutschland GmbH. (2023a, Juli 26). *Von diesen Förderprogrammen profitierst du*. [maschinenring.de. https://www.maschinenring.de/blog/von-diesen-foerderprogrammen-profitierst-du](https://www.maschinenring.de/blog/von-diesen-foerderprogrammen-profitierst-du)
- Maschinenringe Deutschland GmbH. (2023b, Oktober 19). *E-Mobilität fördern lassen*. [maschinenring.de. https://www.maschinenring.de/blog/e-mobilitaet-foerdern-lassen](https://www.maschinenring.de/blog/e-mobilitaet-foerdern-lassen)
- Maschinenringe Deutschland GmbH. (2023c, Dezember 15). *Energie-Jahr 2024: Ausblick*. [maschinenring.de. https://www.maschinenring.de/blog/energie-jahr-2024-ausblick](https://www.maschinenring.de/blog/energie-jahr-2024-ausblick)
- Michael Stang & Clemens Pizzinini. (2024, Januar 19). *E-Traktoren—Münchener Projekt forscht an einer Zukunft ohne Agrardiesel*. <https://www.deutschlandfunk.de/e-traktoren-muenchener-projekt-forscht-an-einer-zukunft-ohne-agrardiesel-dlf-9a8689ce-100.html>
- Michel-Berger, S., & Göggerle, T. (2022, Februar 17). *E Traktor von Fendt: Serienproduktion e100 Vario startet 2024* [Text]. <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/e-traktor-fendt-serienproduktion-e100-vario-startet-2024-590427>
- Monarch. (2023). *MK-V an Autonomous Electric Tractor | Monarch Tractor*. <https://www.monarchtractor.com/mk-v-electric-tractor>
- Mönch, O. (2022). OEMs steigen in Elektro ein. *agrarzeitung*, 77(37), 14. <https://doi.org/10.51202/1869-9707-2022-37-001>
- Neumann, H. (2024, Januar 19). *Landmaschinen unter Strom: Lader und Traktoren mit Batterieantrieb*. top agrar online. <https://www.topagrar.com/energie/news/landmaschinen-unter-strom-lader-und-traktoren-mit-batterieantrieb-a-13545861.html>
- New Holland. (2023, September 26). *New Holland präsentiert auf der Agritechnica 2023 den T4 Electric Power*. New Holland präsentiert auf der Agritechnica 2023

- den T4 Electric Power | New Holland DE. <https://agriculture.newholland.com/de-de/europe/die-new-holland-welt/news/2023/new-holland-prasentier-auf-der-agritechnica-2023-den-t4-electric-power>
- New Holland. (2024). *Elektrischer Traktor T4* | New Holland DE. Elektrischer Traktor T4 | New Holland DE. <https://agriculture.newholland.com/de-de/europe/produkte/traktoren/t4-electric-power>
- Noorbakhsh, A., Boehl, C., & Brown, K. (2018, November 12). *Assessing Total Cost of Ownership: Effective Asset Management Along the Supply Chain*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-95711-1_43
- OECD. (2017). *Methodologies for Market Studies*. <https://deliverypdf.ssrn.com/delivery.php?ID=938092084120118010083125103069019102026042088063059044010123009074096003081106107073002099029107038015047086085027104083099027040035002039034127087018080005067122096029003077112007097070094085028068020088105065076089074098028106004083089107023099104120&EXT=pdf&INDEX=TRUE>
- Onox. (2023). *ONOX*. <https://www.onox.de/>
- Oppenhäuser, G. (2023, April 3). *Neue Antriebskonzepte für mobile Maschinen: Die Systems & Components 2023 rückt die Elektrifizierung des Antriebstrangs in den Mittelpunkt*. Agritechnica. <https://www.agritechnica.com/de/presse/aktuelle-meldungen#!/news/neue-antriebskonzepte-fuer-mobile-maschinen>
- Pascher, P., Hemmerling, U., & Stork, S. (2023). *Situationsbericht 2023/24* (50; Situationsbericht). Deutscher Bauernverband e.V. <https://www.situationsbericht.de/>
- Pauli, M., Beckmann, J., Suter, S., & Brügger, A. (2015). *Markt- und Nutzermonitoring Elektromobilität (MANUEL)*. Bundesamt für Strassen. https://www.swiss-emobility.ch/de-wAssets/docs/infothek/20150821_120828_52744_21553_1509_Inhalt.pdf
- Peter Pickel. (2023, November 21). *BMWK-Projekt LANDGEWINN: Fragebogen für Ökobilanzierung von E-Traktoren* [Persönliche Kommunikation].
- Pfaffmann, S., de Moraes Boos, F., Tarasinski, N., & Kegel, V. (2021). *Agricultural Swarm Unit with integrated Energy Distribution*. Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-29717-6_7
- Phadke, A., Khandekar, A., Abhyankar, N., Wooley, D., & Rajagopal, D. (2021). *Why Regional and Long-Haul Trucks are Primed for Electrification Now*. Lawrence Berkeley National Laboratory. https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/updated_5_final_ehdv_report_033121.pdf

- Pickel, P. (2020). *Ackerbauliche Elektromobilität – mobile Maschinen am Netz*. KTBL. https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Allgemeines/Download/Tagungen_2020/Energie/Energie_2020.pdf#page=52
- Prack, N. (2024, Februar 21). *Tanken: Dieselpreis gibt nach, Benzinpreis nahezu unverändert*. ADAC. <https://www.adac.de/news/aktueller-spritpreis/>
- Proctor, K. (2022). *Total Cost of Ownership of a Compact Battery Electric Agricultural Tractor*. NEWAg Laboratory. https://static1.squarespace.com/static/5eab584a296dca09a66e85a6/t/627946f6c12c786debe434c7/1652115191705/TCO_report_May+2022.pdf
- Prüfling, S., & Langer, B. (2022). *Latest technology solutions for Charging and e-Machines – how off-road and agriculture applications can benefit from automotive innovations* (2395; VDI-Berichte). VDI-MEG. <https://doi.org/10.51202/9783181023952>
- Reick, B., Konzept, A., Kaufmann, A., Stetter, R., & Engelmann, D. (2021). Influence of Charging Losses on Energy Consumption and CO2 Emissions of Battery-Electric Vehicles. *Vehicles*, 3, 736–748. <https://doi.org/10.3390/vehicles3040043>
- Remmele, E., Eckel, H., Pickel, P., Rathbauer, J., Reinhold, G., Stirnimann, R., Hörner, R., & Uppenkamp, N. (2020). *Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
- Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, 2014/94/EU (2014). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02014L0094-20211112>
- Rigitrac Traktorenbau AG. (2023a). *Rigitrac SKE 40 Electric*. Rigitrac Traktorenbau. <http://www.rigitrac.ch/produkte-1/rigitrac-ske-40-electric/>
- Rigitrac Traktorenbau AG. (2023b). *Rigitrac SKE 40 ELECTRIC*. https://sbe34ea44f039a521.jimcontent.com/download/version/1704726533/module/12037741177/name/Prospekt%20Rigitrac%20SKE%2040_2023_WEB.pdf
- Ring, C., Ryll, A., & Gaus, W. (2006). Das Bestimmtheitsmaß R² bei linearen Regressionsmodellen mit und ohne Intercept – die Tücken der Statistikprogramme. *WiSt*, 11, 607–612. <https://doi.org/10.15358/0340-1650-2006-11-607>
- Roda, I., & Garetti, M. (2014). TCO Evaluation in Physical Asset Management: Benefits and Limitations for Industrial Adoption. In B. Grabot, B. Vallespir, S. Gomes, A. Bouras, & D. Kiritsis (Hrsg.), *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World* (S. 216–223). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44733-8_27

- Rudschies, W. (2022, Oktober 25). *Elektroauto-Batterie: Haltbarkeit, Garantie, Reparatur*. ADAC. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-batterie/>
- Schmid, G. (2023). *Batterie-Eletrische Antriebe in der Landwirtschaft*. TU Wien. <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/189626> <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/189626/1/Schmid%20Gerhard%20-%202023%20-%20Batterie-Elektrische%20Antriebe%20in%20der%20Landwirtschaft.pdf>
- Schneider, A.-K., Klabunde, F., Buck, L., Ohlhoff, M., Reis, L., Olvermann, M., Kaufeld, S., Engel, B., Glatzel, G., Schröder, B., & Frerichs, L. (2023). Drawing transformation pathways for making use of joint effects of food and energy production with biodiversity agriphotovoltaics and electrified agricultural machinery. *Journal of Environmental Management*, 335. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117539>
- Schreiner, K. (2017). *Verbrennungsmotor—Kurz und bündig* (Springer Vieweg, Hrsg.). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-19426-0_1
- Schulze, O. (2022). *Elektromobilität – ein Ratgeber für Entscheider, Errichter, Betreiber und Nutzer*. Springer Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32611-1>
- Schwaderlapp, M. (2017). Dekarbonisierung in der Landwirtschaft. *ATZoffhighway*, 10(4), 90–90. <https://doi.org/10.1007/s35746-017-0046-z>
- Scolaro, E., Beligoj, M., Perez Estevez, M., Alberti, L., Renzi, M., & Mattetti, M. (2021). *Electrification of Agricultural Machinery: A Review*. IEEE Vehicular Technology Society Section. <https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/9312710/09648206.pdf?tp=&arnumber=9648206&isnumber=9312710&ref=aHR0cHM6Ly9pZWVleHBsb3JlLmlIZWUub3JnL2RvY3VtZW50Lzk2NDgyMDY=>
- Shao, Z., & Anup, S. (2022). *Incentives for electrifying agricultural tractors in India*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/10/india-hvs-evs-incentives-elec-tractors-India-oct22.pdf>
- Sohst, M. (2022). *John Deere Sesam 2: Neuer elektrischer und autonomer Traktor*. profi.de. <https://www.profi.de/aktuell/neuheiten/john-deere-sesam-2-neuer-elektrischer-und-autonomer-tractor-28988.html>
- Solectrac by Ideanomics. (2023a). *E25 Hydrostatic Electric Tractor | Solectrac*. <https://solectrac.com/e25h-electric-tractor-hydrostatic/>
- Solectrac by Ideanomics. (2023b). *e25G Gear | Solectrac | Compact Electric Tractor*. <https://solectrac.com/cet-electric-tractor/>

- Solectrac by Ideanomics. (2023c). *eUT+ | Solectrac | Narrow Electric Tractor*.
<https://solectrac.com/narrow-electric-utility-tractor/>
- Stirnemann, R. (2020). *Elektrifizierung von mobilen Maschinen – wo steht die Landtechnik?* Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL).
https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Allgemeines/Download/Tagungen_2020/Energie/Energie_2020.pdf#page=52
- Stirnemann, R. (2023, November 2). *Trends bei Traktoren*. Pressedienst DLG e.V.
https://www.agritechnica.com/de/presse/aktuelle-meldungen#!/news/trends-bei-traktoren_2023
- Strom-Report. (2024a, Februar). *Gewerbestrompreis: Günstiger Strompreis für Gewerbe*. STROM-REPORT. <https://strom-report.com/strompreis-gewerbe/>
- Strom-Report. (2024b, Februar 26). *Strompreisentwicklung* [Strom-Report]. STROM-REPORT. <https://strom-report.com/strompreise/strompreisentwicklung/>
- Stromsteuergesetz, Pub. L. No. § 3 (2023). https://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/__3.html
- Tadus. (2023). *Die Innovation: Das elektrische Tadus Antriebssystem*. Tadus.
<https://www.tadus.com/tadus-antriebssystem/>
- TADUS GmbH. (2023). *Batterie-elektrischer TADUS – TADUS E-Traktoren*.
<https://www.tadus.com/traktoren/batterie-elektrischer-tadus/>
- Thuncke, K., & Remmele, E. (2021). Klimafreundliche Antriebe für Landmaschinen. *Schule und Beratung*, 5-6/2023, 29–32. https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/publikationen/sonstiges/dateien/21_5-6_sub_klimafreundliche_antriebe_fuer_landmaschinen_a.pdf
- Troncon, D., & Alberti, L. (2020). Case of Study of the Electrification of a Tractor: Electric Motor Performance Requirements and Design. *Energies*, 13(2197).
<https://doi.org/doi:10.3390/en13092197>
- UBA. (2023a). *Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft nach Sektoren des KSG*. Umweltbundesamt. d
- UBA. (2023b, August 10). *Gesellschaftliche Kosten von Umweltbelastungen* [Text]. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen>
- UBA. (2023c, August 14). *Treibhausgas-Emissionen der EU-27 nach Kategorien* [Image]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/bild/tab-treibhausgas-emissionen-der-eu-27-nach>
- United Nations ESCAP. (2015). Average growth rate: Computation methods. *Stats Brief*, 7. https://www.unescap.org/sites/default/files/Stats_Brief_Apr2015_Issue_07_Average-growth-rate.pdf

- U.S. Department of Energy. (2023, Januar 9). Electric Vehicle Battery Pack Costs in 2022 Are Nearly 90% Lower than in 2008, according to DOE Estimates. *Energy.Gov*. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1272-january-9-2023-electric-vehicle-battery-pack-costs-2022-are-nearly>
- U.S. Department of Energy & Office of Indian Energy. (2015). *Levelized Cost of Energy (LCOE)*. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/LCOE.pdf>
- Varani, M., Mattetti, M., Fiorati, S., Lenzini, N., & Montanari, M. (2022). *Tractor equipped with an external electric generator combined with electric powered Sprayer and Mulcher performances evaluation* (2395; VDI-Berichte). VDI-MEG. <https://doi.org/10.51202/9783181023952>
- Varani, M., Mattetti, M., & Molari, G. (2021). Performance Evaluation of Electrically Driven Agricultural Implements Powered by an External Generator. *Agronomy*, 11(1447). <https://doi.org/10.3390/agronomy11081447>
- Vaupel, M. (2020). *Landwirtschaftliche Fahrzeuge im Straßenverkehr 2020* (24. Aufl.). Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE).
- VDI Wissensforum. (2022, Februar 24). *LAND.TECHNIK 2022*. LAND.TECHNIK 2022. <https://doi.org/10.51202/9783181023952>
- Vogt, H. H., Regis de Melo, R., Daher, S., Schmuelling, B., Marcelo Antunes, F. L., Alves dos Santos, P., & Albiero, D. (2021). Electric tractor system for family farming: Increased autonomy and economic feasibility for an energy transition. *Journal of Energy Storage*, 40(102744). <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102744>
- von Stillfried, L. (2024, Januar 8). *BMWK-Projekt LANDGEWINN: Fragebogen für Ökobilanzierung von E-Traktoren* [Persönliche Kommunikation].
- Weidemann. (2024). *Hoftrac 1390e*. <https://www.weidemann.de/produkte/hoftrac/1390e>
- Weidemann GmbH. (2024). *Hoftrac 1190e*. Hoftrac 1190e - Think Electric. <https://www.weidemann.de/produkte/hoftrac/1190e>
- Wiecha, J., Ziegler, K., & Bernhardt, H. (2021). Draft force reduction by an electrification unit on implements. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 3(72), 105–111. <https://content.sciendo.com/view/journals/boku/boku-overview.xml>
- Wiegmann, K., Scheffler, M., Schneider, C., Lakner, S., Sommer, P., & Meyer-Jürshof, M. (2023). *Klimaschutz in der GAP 2023 -2027* (Studie 103/2022). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/103_2023_texte_klimaschutz_in_der_gap.pdf
- Wochinger, M. (2023). Betrieb unter Strom. *Maschinenring*, 01.2023, 46–48.

- Wolfer, J. (2024, Februar 22). *Wallbox-Kosten | Wie teuer ist eine Wandladestation?* mobile.de. <https://www.mobile.de/magazin/artikel/elektromobilitaet/wallbox-kosten>
- Woopen, T. (2018). Wie der E-Traktor der Zukunft aussehen könnte. *Mobile Maschinen*, 4, 30–33. https://www.wiso-net.de/document/MOM__37d1f341870d1022ac4216c35791e78e7789b853
- Woopen, T., Hammes, S., & Sander, P. (2019). Entwicklung und Aufbau eines E-Traktors. *Mobile Maschinen*, 6, 24–27. https://www.wiso-net.de/document/MOM__b038c8aa2506bc30a9c56116bb0cbd5f0c038425
- Yuan, J., Dorn-Gomba, L., Dorneles Callegaro, A., Reimers, J., & Emadi, A. (2021). A Review of Bidirectional On-Board Chargers for Electric Vehicles. *IEEE Access*, 9. <https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/9312710/09389559.pdf?tp=&ar-number=9389559&isnumber=9312710&ref=aHR0cHM6Ly9pZWVleHBsb3JlLmliZWUub3JnL2Fic3RyYWN0L2RvY3VtZW50LzkzODk1NTk=>
- ZY Elektrikly Traktör. (2020). *ZY Elektrikli Traktör*. <https://www.zyelektrikli.com/>

Anhang

Anhang 1. Dieselbedarf für typische Arbeitsvorgänge in der Landwirtschaft am Beispiel der Erzeugung von Silomais (Pflug, gezogene Saattbettbereitung, Saat, Schlaggröße 10 ha, mittleres Ertragsniveau, mittlerer Boden, 102-k+H19W-Mechanisierung, Hof-Feld-Entfernung 2 km).

Eigene Darstellung nach Eckel et al. (2020, S. 14).

Feldarbeiten

Mineraldünger ausbringen	Pflügen	Eggen	Gülle ausbringen	Eggen mit Saattbettkombination	Einzelkornsaat	Pflanzenschutzmaßnahme	Häckseln	Kalk ab Schlagrand streuen	Stoppelbearbeitung
l/h	l/h	l/h	l/h	l/h	l/h	l/h	l/h	l/h	l/h
7	21	18	9	18,5	6	5	38,5	17,5	18

Lade- und Transportarbeiten

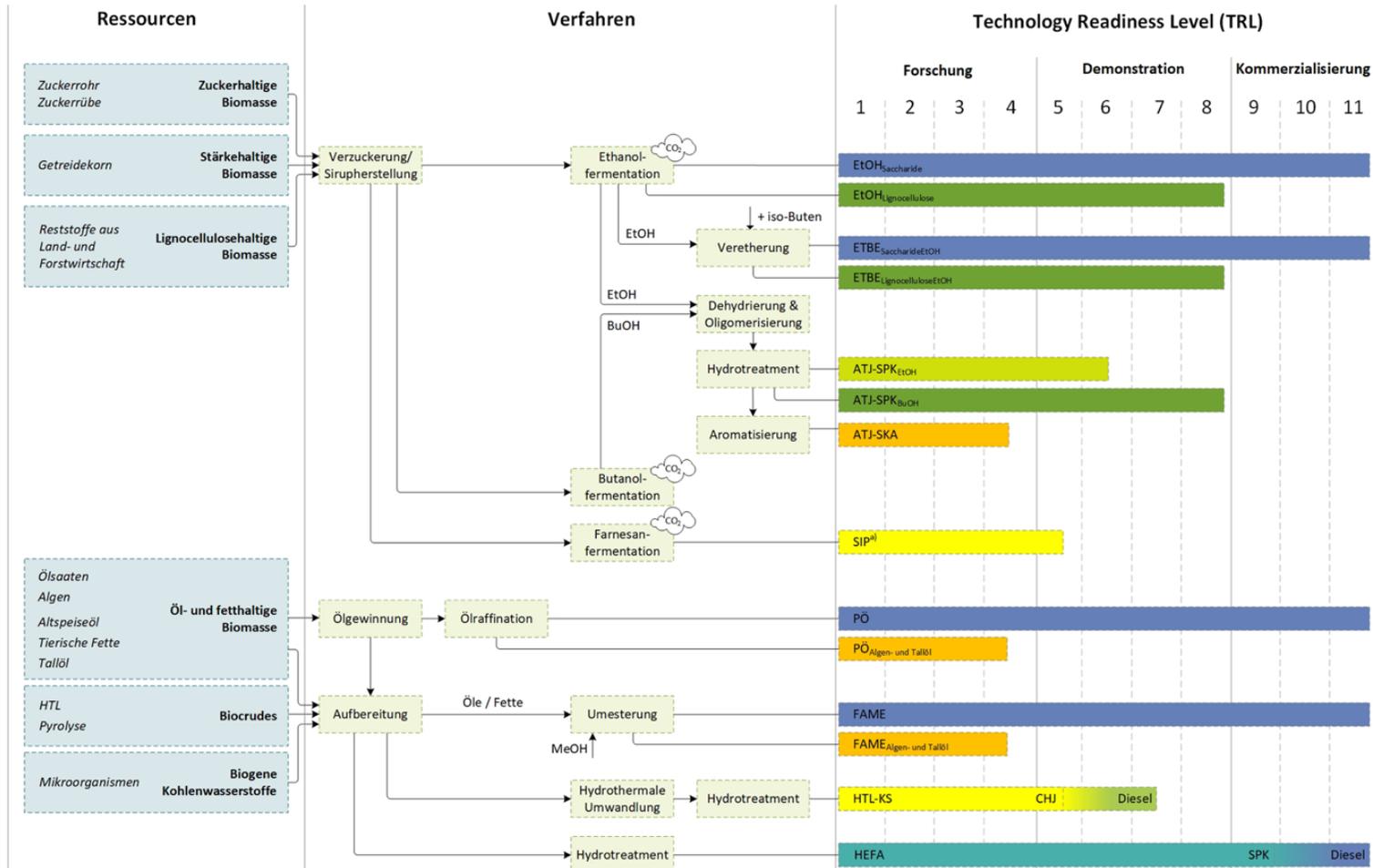
Kalk laden, Radlader	Erntegut transportieren	Festfahren im Silo
l/h	l/h	l/h
5	9,5	6

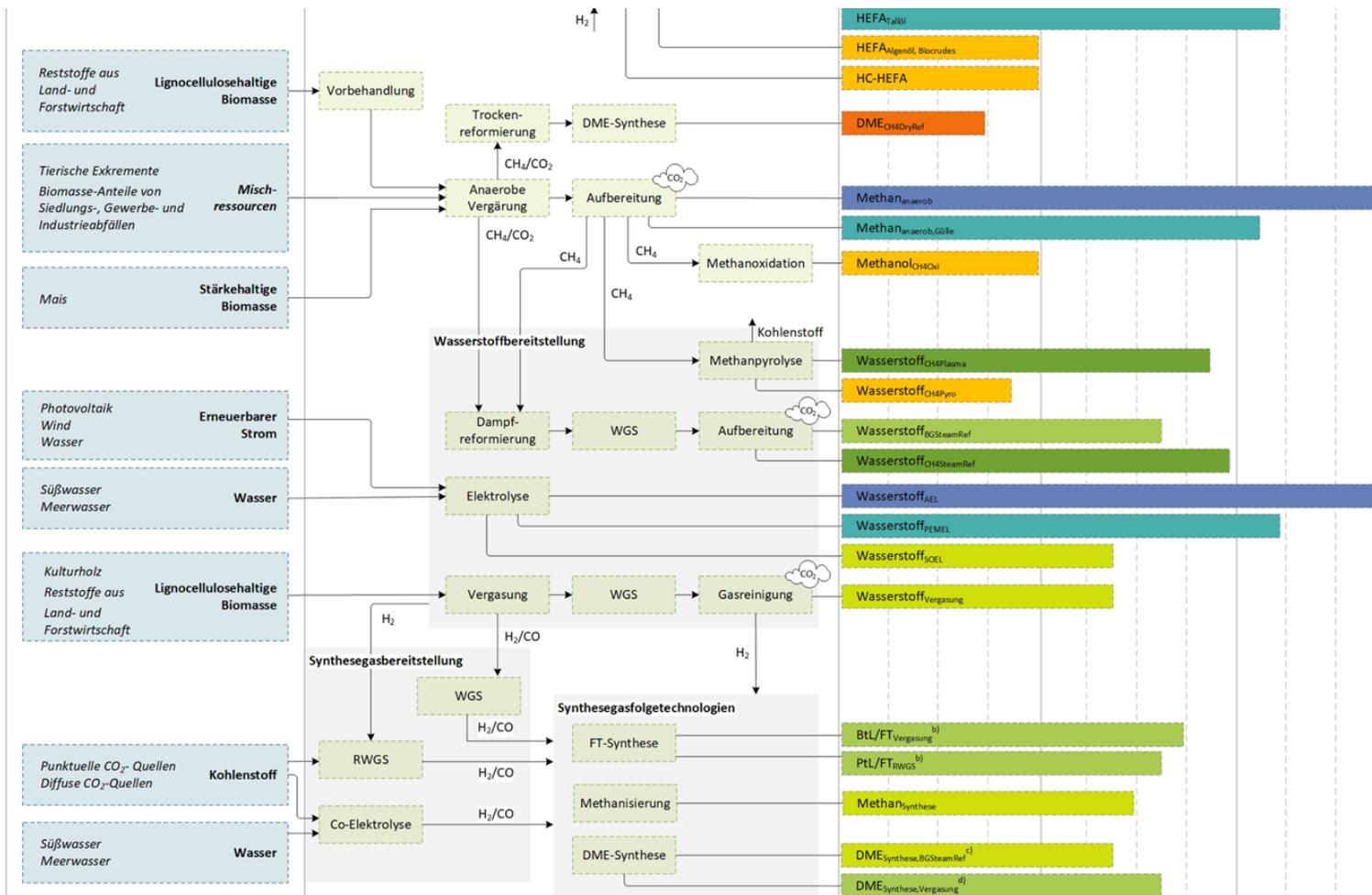
Anhang 2. Summe des Dieselbedarfs in der pflanzlicher Erzeugung Deutschlands im Jahr 2021 bei einer Anbaufläche von 14.086.000 ha.

Eigene Darstellung nach Eckel et al. (2023, S. 12).

Leichte Arbeiten		Mittelschwere Arbeiten		Schwere Arbeiten	
bis 5 l/ha		5-15 l/ha		über 15 l/ha	
428.000.000 l/a	30 %	555.000.000 l/a	39 %	454.000.000 l/a	32 %

Anhang 3. Bereitstellungsoptionen erneuerbarer Kraftstoffe für den Verkehrssektor, inklusive der jeweiligen Ressourcen, Herstellungsverfahren, der Technologiereife (TRL) und resultierender Energieträger. Darstellung verändert nach Dögnitz et al. (2023b, S. 1).





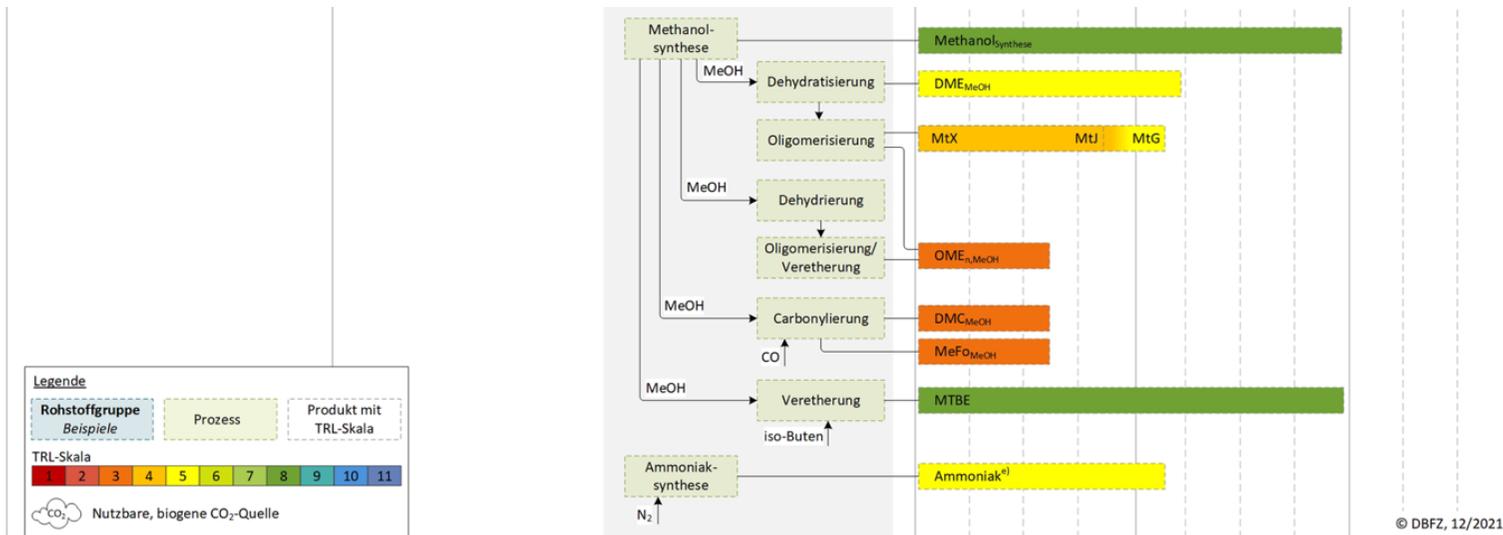


Abbildung ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

- Die Firma Amryis verkaufte 2017 ihren Produktionsstandort in Brasilien. SIP wird seitdem nicht mehr produziert.
- Verfahrensrouten basierend auf anderen SynGas-Bereitstellungspfaden weisen einen geringeren technischen Entwicklungsstand als die zugrunde gelegten Optionen. Der FT-Syntheseschritt kann mit einem TRL 9 bewertet werden.
- Demonstriert durch eine Pilotanlage der Firma Oberon Fuels/USA.
- Im wesentlichen durch das Projekt „BioDME“ vorangetrieben, Verfahrenskonzept seitdem nicht weiterentwickelt.
- TRL-Einschätzung unabhängig von der Herkunft des Wasserstoffs.

AEL: Alkalische Wasserelektrolyse | ATJ: Alcohol-to-Jet | BGSteamRef: Biogas-Dampfreformierung | BTL: Biomass-to-Liquid | CHJ: Catalytic Hydrothermolysis Jet | CH4DryRef: Methan-Trockenreformierung | CH4Oxi: Methanoxidation | CH4Plasma: Methanplasmalyse | CH4Pyro: katalytische oder thermische Methanpyrolyse | CH4SteamRef: Methan-Dampfreformierung | DMC: Dimethylcarbonat | DME: Dimethylether | ETBE: Ethyltertiäbutylether | EtOH: Ethanol | FAME: Fettsäuremethylester bzw. Biodiesel | FT: Fischer-Tropsch | HC-HEFA: Kohlenwasserstoff-basiertes HEFA | HEFA: Hydroprozessierte Ester oder Fettsäuren | HTL-KS: Kraftstoff aus der Hydrothermalen Verflüssigung | MeFo: Methylformiat | MeOH: Methanol | MTBE: Methyltertiäbutylether | MtG: Methanol-to-Gasoline | MtJ: Methanol-to-Jet | MTX: Methanol-to-X | OME: Oxymethylenether | PEMEL: Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse | PTL: Power-to-Liquid | PÖ: Pflanzenölkraftstoff | RWGS: Reverse Wassergas-Shift-Reaktion | SIP: synthetisierte iso-Paraffine von hydroprozessierten fermentierten Zuckern bzw. Farnesan | SKA: synthetisches Kerosin mit Aromaten | SOEL: Festoxidelektrolyse | SPK: synthetisches paraffinisches Kerosin | TRL: Technology Readiness Level | WGS: Wassergas-Shift-Reaktion

Anhang 4. Beschreibung weiterer alternativer Antriebstechnologien.

Biogene Energieträger wie Pflanzenölkraftstoffe, Biomethan, Bioethanol (E85) und Biodiesel, auch FAME genannt, gelten kurz- und mittelfristig als bevorzugte Energieträger für, aufgrund zu hoher Leistungsanforderungen, nicht elektrifizierbare Arbeiten (bei geforderten Arbeitszeiten von bis zu 12 h/Tag). Ihre Eignung hängt von gesetzlichen Rahmenbedingungen und technologischer Entwicklung ab. **Pflanzenölkraftstoff**, vor allem aus Rapsöl, stellt eine kostengünstige und genormte Option unter den Biokraftstoffen dar. Die Gestehungskosten belaufen sich auf 20 bis 30 €₂₀₂₀/GJ. Im Vergleich dazu liegen die Gestehungskosten von Diesel zwischen 10 und 20 €₂₀₂₀/GJ und bilden damit das untere Ende der Preisspanne von Energieträgern. Die Motor- und Abgastechnik ist weitgehend erprobt, und einfache Lagerung sowie Betankung über Hoftankstellen machen ihn zu einer unkomplizierten Wahl. Durch den Anbau von Ölsaaten in der Landwirtschaft steigt die regionale Wertschöpfung, und die Erzeugung von Rapsöl unterstützt die Versorgung mit heimischen Eiweißfuttermitteln. Zusätzlich vermindert der Einsatz von Rapsölkraftstoff Boden- und Gewässerverunreinigungen und reduziert die THG-Emissionen im Vergleich zu Dieselmotoren um mindestens 65 % (Dögnitz et al., 2023a, S. 234; Eckel et al., 2023, S. 32; Remmele et al., 2020, S. 50f., 97).

Biodiesel ist ebenfalls ein kostengünstiger Biokraftstoff, mit Gestehungskosten zwischen 15 und 35 €₂₀₂₀/GJ, der größtenteils gesetzlich erlaubt ist für die Verwendung in älteren Maschinen. Der genormte Kraftstoff bietet gleichbleibend hohe Qualität, Motor- und Abgastechnik sind erprobt und eine unkomplizierte Lagerung und Betankung, auch über Hoftankstellen, ist möglich. Biodiesel weist eine vergleichbare Energiedichte wie Dieselmotoren auf. Trotz hoher Produktionskapazitäten kann der Einsatz als Reinkraftstoff durch fehlende Hersteller*innenfreigaben für neue Maschinen erschwert werden (Remmele et al., 2020, S. 53f.; Thuneke & Remmele, 2021, S. 30).

Regeneratives **Methan** kann aus verschiedenen Rohstoffen oder durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom gewonnen werden. Biogas, mit einem Methangehalt von 50-65 %, kann als **CNG** (Compressed Natural Gas, komprimiertes Methan) oder **LNG** (Liquefied Natural Gas, verflüssigtes Methan) genutzt werden, wobei beide normiert und in gleichbleibender Qualität verfügbar sind. Bisher fehlen jedoch seriengefertigte Maschinen. Für die gleiche Energiemenge benötigt CNG etwa das fünffache Tankvolumen im Vergleich zu Diesel. Biomethan aus Rest- und Abfallstoffen ermöglicht eine erhebliche THG-Minderung im Vergleich zu Diesel. Obwohl CNG-Tankstellen teurer in der Errichtung sind als solche für flüssige Kraftstoffe, kann durch lokale Biogaserzeugung und -nutzung als Kraftstoff die regionale Wertschöpfung gesteigert werden, was vorteilhaft ist, um die lokale

Wirtschaft zu fördern und Unabhängigkeit zu gewähren (Dögnitz et al., 2023a, S. 192; Eckel et al., 2023, S. 32; Remmele et al., 2020, S. 56f.; Thuneke & Remmele, 2021, S. 31).

Eine weitere Option der E-Fuels ist die Nutzung von **Wasserstoff**, der mithilfe der Elektrolyse gewonnen wird, im Zusammenschluss mit Brennstoffzellen, insbesondere wenn dieser aus Überschussstrom aus Erneuerbaren Energien gewonnen wird. Jedoch sind die wirtschaftliche Tragfähigkeit und der vergleichsweise geringe Wirkungsgrad der Elektrolyse von Wasserstoff zu berücksichtigen. Derzeit ist der Einsatz von Wasserstoff für den Antrieb von Fahrzeugen technisch machbar, aber keine bevorzugte Option, da dieser nur im mittleren Leistungsbereich eingesetzt werden kann. Die geringe Energiedichte von Wasserstoff und komplexe Infrastrukturanforderungen, z. B. für sicheren Transport und Lagerung, erschweren eine großflächige Anwendung. Die bisher begrenzte Verfügbarkeit von Wasserstoff ist ebenfalls ein potenzielles Hindernis für den Einsatz bei in der Landwirtschaft (Eckel et al., 2023, S. 32; Fraunhofer-Gesellschaft, 2020, S. 12f.).

E-Fuels, also synthetische Kraftstoffe, bieten ebenfalls alternative Perspektiven, jedoch gehen ihre Herstellung mit hohen Kosten einher. Die Investitions- und Betriebskosten liegen über denen von Pflanzenölkraftstoffen und Biodiesel. Die Verbreitung dieser Optionen ist aus heutiger Sicht ungewiss. Zu den synthetischen Kraftstoffen gehören paraffinische Dieselmotorkraftstoffe wie hydriertes Pflanzenöl (**HVO**) und Fischer-Tropsch-Diesel (**FT-Diesel**), welche für bestehende dieselmotortriebene Fahrzeuge geeignet sind. Bei den HVO wird das Pflanzenöl durch Zugabe von, im besten Fall grünem, Wasserstoff und mithilfe einer katalytischen Reaktion in Kohlenwasserstoffe umgesetzt. Bei FT-Diesel wird Synthesegas aus Kohlenstoffmonoxid und ebenfalls (grünem) Wasserstoff hergestellt und daraufhin mittels des Fischer-Tropsch-Verfahrens ein paraffinischer Kraftstoff hergestellt. Aktuell haben paraffinische Dieselmotorkraftstoffe wie HVO- und FT-Diesel (Stand Juni 2023) noch keine allgemeine Zulassung. Für landwirtschaftliche Anwendungen wurden Freigaben der Fahrzeughersteller*innen vor allem für paraffinischen Dieselmotorkraftstoff, Methan, Biodiesel und teilweise Pflanzenölkraftstoff erteilt (Dögnitz et al., 2023a, S. 237; Eckel et al., 2023, S. 19f., 29, 32; FNR, 2014, S. 41; Leckel, 2009, S. 2342).

Anhang 5. Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für landwirtschaftliche Anwendungen bis 2045. Ausgewählte Energieträger des KTBL (Eckel et al., 2023, S. 19, 31; Remmele et al., 2020, S. 87).

2045	Leichte Arbeiten	Mittelschwere Arbeiten	Schwere Arbeiten
Antriebsleistung	≤ 80 kW	40 - 200 kW	≥ 150 kW
Energieträger Antriebsform			
Regenerativer Strom Batterie (Li-Ionen-Akkumulator) und Elektromotor			
Pflanzenöl Verbrennungsmotor			
Biodiesel Verbrennungsmotor			
HVO-Diesel Verbrennungsmotor			
FT-Diesel Verbrennungsmotor			
CNG (Methan) Verbrennungsmotor			
LNG (Methan) Verbrennungsmotor			
Wasserstoff Brennstoffzelle und Elektromotor			

Anmerkung: Erläuterung der Farbmarkierung:

	Umsetzbare bevorzugte Optionen: Maschine und Energieträger sind am Markt verfügbar, eignen sich für die jeweiligen landwirtschaftlichen Arbeiten, sind kostengünstig, der Ressourceneinsatz ist effizient. Eine regionale Bereitstellung der Energieträger ist möglich.
	Umsetzbar: Maschine und Energieträger sind am Markt verfügbar und eignen sich für die jeweiligen landwirtschaftlichen Arbeiten.
	Teilweise umsetzbar: Maschine und Energieträger sind am Markt unter optimistischen Annahmen verfügbar, die Eignung für die jeweiligen landwirtschaftlichen Arbeiten ist teilweise gegeben.
	Umsetzbar: Es sind aber besser geeignete Alternativen verfügbar.
	Geeignete erneuerbare Energieträger und dazu passende Antriebe sind nicht verfügbar.

Anhang 6. Bewertung der Technologie verschiedener Energieträger. Eigene Darstellung nach Dögnitz et al. (2023a, S. 264), Eckel et al. (2023, S. 29f.) und Remmele et al. (2020, S. 87f.).



Anmerkung: 1 = hoch, 5 = niedrig; Ausnahmen bei Folgenden: Verfügbarkeit der Rohstoff/el. Energie: 1 = nicht limitiert, 5 = stark limitiert; Betankung & Ladevorgang: 1 = schnell, große Energiemenge, 5 = langsam, geringe Energiemenge; Investitions- & Betriebskosten: 1 = gut machbar, 5 = hoch; Zeitliche Umsetzbarkeit: 1 = kurzfristig umsetzbar, 5 = nicht kurzfristig umsetzbar; Verfügbarkeit am Markt: 1 = großes Angebot vorhanden, 5 = kein Angebot vorhanden; Lokale Schadstoffemissionen: 1 = keine Belastung, 5 = hohe Belastung; Regionale Wertschöpfung & Selbstversorgung: 1 = gut machbar, 5 = nicht machbar, Klassifizierung als Gefahrenstoff: 1 = keine Warnhinweise, 5 = viele Warnhinweise; Gefährdung für Boden & Gewässer: 1 = hohe Gefährdung, 5 = niedrige Gefährdung. Sind die Linien nicht visuell unterscheidbar, liegt eine Überschneidung vor.

Anhang 7. Literaturübersicht zur Elektrifizierung der Landwirtschaft. Eigene Darstellung.

Studie	Vorgehen	Wichtigste Ergebnisse
Scolaro et al. (2021)	Überblick über Elektrifizierung von Landmaschinen, Beschreibung der Fahrzeugbesonderheiten, Herausforderungen der Elektrifizierung vorgestellt, Analyse von elektrifizierten Layouts aus Literatur und Hersteller*innen, Präsentation von Beispielen, Berücksichtigung von Traktionsanforderungen und zusätzlichen Lasten	Landwirtschaftliche Elektrifizierung ist noch in den Anfängen und deren Entwicklung ist stark abhängig von politischen Maßnahmen, wirtschaftlicher Analysen und Bewertungen sowie von gesellschaftlicher Akzeptanz. Eine Berücksichtigung dieser Aspekte z. B. mittels unterstützender Richtlinien und Marktanreize ist förderlich für die Einführung elektrifizierter Landmaschinen.
Ghobadpour et al. (2022)	Diskussion der Herausforderungen landwirtschaftlicher E-Fahrzeuge, Analyse der Notwendigkeit und Vorteile der Agrarkultur 5.0, Herausarbeiten erfolgreicher Anwendungen in der Landwirtschaft, Möglichkeiten und Innovationen für die Agrarkultur 5.0	Zukünftige Forschung für autonome Elektrofahrzeuge und Roboter in der LW sollte folgende Aspekte berücksichtigen: Verbesserte Energiespeicher- und Aufladetechnologien, Definition neuer Standards, Einsatz von leichten Fahrzeugen in Gruppen zur Kostenreduktion und Kundenakzeptanz, sowie die Entwicklung moderner Technologien und intelligenter Systeme.

Anhang 8. Literaturübersicht zur Umweltauswirkungen von E-Traktoren. Eigene Darstellung.

Studie	Vorgehen	Wichtigste Ergebnisse
Bagire et al. (2022)	Analyse und Bewertung der Leistungsfähigkeit und Realisierbarkeit eines E-Traktors in Ruanda / Literaturrecherche zur Ermittlung der Relevanz der Mechanisierung der LW, E-Traktor Feldversuche und Analyse inklusive Analyse der Betriebskosten	Ein E-Traktor bringt ökologische Vorteile und kann die Mechanisierung der LW verbessern. Die Betriebskosten sind um 25 % niedriger als die eines konventionellen Diesel-Traktors, bei Vergleich des Energiebedarfes und die Umweltverträglichkeitsanalyse zeigt, dass ein 30-PS-E-Traktor weniger als 150 Arbeitsstunden benötigt, um die CO ₂ -Emissionen auszugleichen. Der Diesel-Traktor emittiert hier 1236 kg pro 50 h Pflügen. Unter der Annahme, dass E-Traktor während des Pflügens keine CO ₂ Emissionen verursacht, fällt nur eine CO ₂ -Schuld von 3392 kg aus dem Herstellungsprozess der Batterie an.
Beligoj et al. (2022)	Siehe oben (s.o.)	Neben Emissionen während des Betriebs ist es maßgeblich die Emissionen aus Batterieproduktion und Energieerzeugung mit in eine Evaluation aufzunehmen. Eine umfassende Bewertung, die wirtschaftliche sowie ökologische Faktoren bei der Einführung von E-Traktoren berücksichtigt, ist notwendig. Die Emissionsfaktoren belaufen sich auf 3.92 kgCO ₂ /kg Diesel, 0.33 kgCO ₂ /kWh el. Energie und 100 kgCO ₂ /kWh Batterie. Somit reduzieren sich die gesamten CO ₂ -Emissionen für E-Traktoren zwischen 0,5 bis 9,7 % im Vergleich zur Diesel-Variante.
Lagnelöv et al. (2021)	Ökobilanz für zwei batterieelektrische Traktoren und Vergleich mit konventionellem Traktor / Bestimmung der Umweltauswirkungen auf Getreidebetrieb (Analyse von 11 mittleren Charakterisierungsfaktoren, 3 Schadenskategorien und einem gewichteten Einzelwert)	E-Traktoren weisen im Vergleich zu Diesel-Traktoren eine um 35 % niedrigere THG-Emissionen auf (cradle-to-grave). Batterieherstellung und der Strombedarf sind kritische Punkte. Das elektrische Antriebssystem zeigt geringere Auswirkungen auf Klimawandel, Eutrophierung, Versauerung, Feinstaub und fossile Ressourcenknappheit. Auswirkungen in Bereichen wie Verknappung mineralischer Ressourcen, krebserregende Toxizität und Süßwasser- und terrestrische Ökotoxizität größer als bei der Diesel Variante. Lange Lebensdauer, energieintensive Nutzungsphase und hohe Recyclingrate begünstigen E-Traktoren. Die Stromwahl für die Nutzung ist marginal und kann die gesamten Auswirkungen auf das globale Erwärmungspotential reduzieren. Die cradle-to-grave Analyse zeigt, dass der E-Traktor deutlich geringere Auswirkungen auf menschliche Gesundheit, Ökosystem und Ressourcenknappheit hat.

Anhang 9. Literaturübersicht zur Weiterentwicklung der Technologien von E-Traktoren. Eigene Darstellung.

Studie	Vorgehen	Wichtigste Ergebnisse
Baek et al. (2022)	Konzeption, Entwicklung und Bewertung der Zugleistung und der landwirtschaftlichen Arbeitsleistung eines E-Traktors, Durchführung eines Traktionstests, Überprüfung der landwirtschaftlichen Arbeitsleistung, Berechnung der Zugkraft, Bewertung der Zugkraftleistung	Der E-Traktor hat eine bessere Traktionsleistung bei hoher Auslastung. Daraus folgt, dass in Zukunft eine Verbesserung des elektrischen Antriebssystems und der Motorsteuerung sinnvoll ist, um die Leistung den Anforderungen landwirtschaftlichen Bedingungen anzupassen. Der E-Traktor hatte ein niedrigeres dynamisches Verhältnis als der konventionelle Traktor, was bedeutet, dass die Ausgangsleistung pro Gewicht nicht ausreichend ist. Deshalb muss der Algorithmus zur Leistungsbegrenzung des E-Motors verbessert werden, um die Leistung für tatsächliche landwirtschaftliche Aufgaben zu erbringen.
Chen et al. (2022)	Entwicklung eines leichten, energiesparenden E-Traktors für Kleinbauern mit Konzeption und Fertigung, schadstoffarme Konstruktion, Einsatz autonomer Technologie und Multifunktionen, Ziel: Unterstützung bei landwirtschaftlichen Arbeiten und Potential für autonomen Betrieb analysieren, Anpassung an die Bedürfnisse von Kleinbauern, Fokus auf Effizienz und Vielseitigkeit	Traktoren sind relevant für das Ziehen nicht angetriebener Maschinen. Hohe Geschwindigkeiten sind nicht wichtig, die Ladekraft dagegen schon. Die Anpassungsfähigkeit des Traktors zeigt sich in verschiedenen Betriebsarten, abhängig von angebrachten Geräten wie Pflügen oder Eggen. Ergebnisse betonen die Notwendigkeit sicherer, umweltfreundlicher Landmaschinen, um den Arbeitsaufwand zu verringern und den Arbeitskomfort für eine effiziente Produktion zu erhöhen. Hierfür wird ein Konzept für einen leichten, energieeffizienten und umweltfreundlichen E-Traktor vorgelegt.
Scolaro et al. (2021)	s. o.	Die Zuverlässigkeit der Technologie ist entscheidend für eine Marktakzeptanz von E-Traktoren, da Landwirte dann bereit sind, mehr für die Anschaffung zu bezahlen. E-Traktoren bieten verbesserte Leistung, besonders in Drehmomentabgabe und Effizienz. Die Effizienz von E-Traktoren zeigt sich in deutlichen Energieeinsparungen Vergleich zu einem Diesel-Traktor von 46 – 70 %, verbunden mit geringeren Wartungskosten aufgrund reduzierter mechanischer Komplexität und der Möglichkeit, erneuerbare Energiequellen zum Aufladen zu nutzen.
Herlitzius et al. (2021)	Untersuchung von Entwicklungstrends in der Landwirtschaftstechnik, v. a. den Übergang von "Bigger, Faster, Wider" zu "Smart, Connected und Modular", Herausarbeitung von Herausforderungen im Zusammenhang mit Dimensionen und Gewichten von Traktoren und Fokus auf nachhaltigen, effizienten und umweltfreundlichen landwirtschaftlichen Systemen	Fokus auf smarter, vernetzter und modularer Technologie ist notwendig. Landwirtschaftliche Praktiken müssen nachhaltiger, effizienter und umweltfreundlicher werden. Die steigende Bedeutung von Automation, Präzisionslandwirtschaft und intelligentem Farming wird betont, ebenso wie die Chancen und Herausforderungen, die die Digitalisierung in der LW mit sich bringt.
Troncon und Alberti (2020)	Untersuchung der Elektrifizierung von Spezialtraktoren im Wein- und Obstbau und den Herausforderungen und Anforderungen, Experimentelle Messungen an traditionellem Spezialtraktor, Fokus auf Elektromotor und Leistungsanforderungen, Ergebnisvalidierung durch thermische Simulation unter realen Arbeitsbedingungen	Zukünftige Entwicklung sollte auf der Optimierung von Elektromotoren für intermittierende Drehmomentanforderungen und der Verbesserung der Gesamtsystemarchitektur für eine effizientere Integration in spezielle landwirtschaftliche Anwendungen liegen, damit eine erweiterte Anwendung und Skaleneffekten ermöglicht werden können. Kosteneffizienz und breite Akzeptanz können durch die Nutzung bewährter Komponenten und innovative Fertigungstechnologien gefördert werden.

Anhang 10. Literaturübersicht zu politischen und gesellschaftlichen Aspekten des Einsatzes von E-Traktoren. Eigene Darstellung.

Studie	Vorgehen	Wichtigste Ergebnisse
Bessette et al. (2022)	Untersuchung von Wahrnehmung, Bedenken und Bereitschaft von Landwirt*innen E-Traktoren anzuschaffen und einzusetzen, Führen von qualitativen, strukturierten Interviews mit 14 Biobauern im Mittleren Westen der USA, Bearbeiten von Fragen zu Beweggründen und bestehenden Traktor-Nutzungsmustern, Bewertung verschiedener Konfigurationen eines E-Traktors	Interesse der Kleinbäuer*innen an E-Traktoren ist vorhanden, v. a. aufgrund geringerer Umweltauswirkungen und persönlicher Sicherheitsvorteile. Bedenken hinsichtlich langfristiger Batterieleistung und -kosten, Wartung sowie der Auswirkungen von Wetterbedingungen bestehen. Präferenzen der Landwirt*innen basieren auf praktischen und funktionalen Gründen, was die Relevanz der Bewältigung von Leistungsproblemen betont. Weitere Forschung ist notwendig, um repräsentativere Erkenntnisse zu gewinnen und die Akzeptanz von E-Traktoren zu fördern.
Schneider et al. (2023)	Bewertung und Modellierung von Energieerzeugung und -bedarf, Fokus auf Nutzung von Kabelstrom und Batteriespeichern, Befragung von Landwirt*innen zu Agrophotovoltaik, Herausarbeitung potenzieller Vorteile für nachhaltige LW, Herausforderungen für nachhaltigen Einsatz der Technologien	Akzeptanz der Landwirt*innen kann mittels quantifizierter Fakten und Informationen von Bildungseinrichtungen, beratenden Behörden sowie landwirtschaftlicher Beratungsgruppen verbessert werden. Die Ergebnisse betonen die Relevanz politischer und sozialer Gesichtspunkte, wie regulatorischer Rahmenbedingungen und gemeinschaftlicher Ansätze für die Einführung von E-Traktoren.
Scolaro et al. (2021)	s. o.	Politische Maßnahmen und wirtschaftliche Bewertungen sind maßgeblich für die Marktdurchdringung von E-Traktoren. Langfristig können diese vorherrschende Technologie im Agrarsektor werden, getrieben u. a. durch Fortschritte in der autonomen LW. Politische Maßnahmen können neben regulatorischer Unterstützung, finanzielle Anreize, Unterstützung in Forschung und Entwicklung und die Organisation von Bildungs- und Aufklärungskampagnen sein. Bewertungen können diese Maßnahmen dann auf ihre Wirksamkeit prüfen.

Anhang 11. IÖW-Fragebogen zur Abfrage von Daten für die Ökobilanzierung von E-Traktoren im BMWK-geförderten Forschungsvorhaben.

Fragebogen / Questionnaire

Der Fragebogen besteht aus drei Seiten. Bitte nutzen Sie die grauen Felder für Ihre Angaben. Ein Abkürzungsverzeichnis befindet sich am Ende des Dokumentes. /

The questionnaire consists of three pages. Please use the gray fields for your data. A list of abbreviations can be found at the end of the document.

Kontaktdaten / Contact information

Bitte geben Sie hier Ihre Kontaktdaten an. Die persönlichen Daten dienen nur zur Kontaktaufnahme bei Rückfragen zu dieser Erhebung bzw. für eine Freigabe der erhobenen Daten im Falle einer geplanten Veröffentlichung und werden nicht an Dritte weitergegeben. /

Please enter your contact details here. The personal data will only be used to contact you in the event of further inquiries about this survey or for a request to authorize the release of the collected data in the event of a planned publication. Data will not be passed on to third parties.

Vor- und Zuname / First and surname	
Unternehmen / Betrieb / Company	
Straße / Street	
Postleitzahl / Postal code	
Ort / City	
Telefonnr. (für Rückfragen) / Phone number	
Emailadresse / E-mail address	

Traktor / Tractor - Allgemeine Angaben / General information

Kenngröße / Property	Wert / Value	Einheit / Unit	Hinweise / Notes	Ihr Kommentar / Your comment
Modell / Model		-	Name	
Leistung / Power		kW	-	
Gewicht (inkl. Reifen und Batterie) / Weight (incl. tyres and battery)		kg	-	
Gewicht (exkl. Reifen und Batterie) / Weight (excl. tyres and battery)		kg	-	
Typische Benutzungsstunden pro Jahr / Typical hours of use per year		h	-	
Lebensdauer insgesamt / Total lifetime		a	-	
Stromverbrauch im Betrieb / Electricity consumption during operation		kWh/h	h = Benutzungsstunde / hour of use	

Traktor / Tractor - Gewicht nach Komponenten (ohne Batterie) / Weight according to components (w/o battery)

Bauteil / Component	Gewicht / Weight		Lebensdauer* / Lifetime*		Ihr Kommentar / Your comment
	Wert / Value	Einheit / Unit	Wert / Unit	Einheit / Unit	
Fahrerkabine / Cab		kg		a	
Rahmen / Frame		kg		a	
Karosserie / Chassis		kg		a	
Reifen & Felgen / Tyres & wheels		kg		a	
Elektronik / Electronics		kg		a	
Elektro-Motor / Electric motor		kg		a	
Andere Komponenten / Other components	-	-	-	-	
-		a	
-		a	
-		a	
-		a	
-		a	
-		a	

* falls anders als Traktorlebensdauer) / if different to total lifetime of tractor

Batterie / Battery

KenngroÙe / Property	Wert / Value	Einheit / Unit	Hinweise / Notes	Ihr Kommentar / Your comment
Modell / Model		-	Name	
Typ / Type		-	z.B. / e.g. NMC 111	
Leistung / Power		kW	-	
Kapazität / Capacity		kWh	-	
Effizienz / Efficiency		%	kWh geladen / loaded vs. kWh Input	
Gewicht / Weight		kg	-	
Lebensdauer / Lifetime		Vollladezyklen / Full load cycles	-	

Lebensdauer / Lifetime		a	-	
Typische Nutzungsintensität / typical usage intensity		Vollladezyklen pro Jahr / full load cycles per year	-	

Ladestation / Charging station

KenngroÙe / Property	Wert / Value	Einheit / Unit	Hinweise / Notes	Ihr Kommentar / Your comment
Modell / Model		-	Name	
Typ / Type		-	AC, DC Unidirectional, bidirectional	
Leistung / Power		kW	-	
Effizienz / Efficiency		%	kW Output vs. kW Netzbezug / input from grid	
Gewicht / Weight		kg	-	
Lebensdauer / Lifetime		a	-	

Herzlichen Dank für Ihre Unterstützung!

Thank you very much for your support!

Abkürzungsverzeichnis / List of abbreviations:

a = Jahr / year
AC = Wechselstrom / alternating current
DC = Gleichstrom / direct current
h = Stunde / hour;
kg = Kilogramm / kilogram
kW = Kilowatt / kilowatt
kWh = Kilowattstunde / kilowatt-hour
NMC = Nickel-Mangan-Kobalt-Batterie / Nickel Manganese Cobalt battery

Anhang 12. Werkzeuge zur Validierung eigener Berechnungen, Annahmen und Ergebnisse. Eigene Darstellung.

Werkzeug	Beschreibung	Quelle
Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau	Online-Rechner	KTBL (2024)
Clean Fleets Life Cycle Cost (LCC) Tool	MS Excel Life Cycle Cost Rechner	ICLEI (2024)
MaKost – Maschinen- und Reparaturkostenrechner KTBL	Online-Rechner	KTBL (2022)
Maschinenkostenrechner ÖKL	Online-Rechner	Maschinenring Tirol (2023)
Electric truck model spreadsheet	MS Excel Dokument zu TCO-Berechnung	Phadke et al. (2021)

Anhang 13. Übersicht der E-Traktoren mit technischen Angaben der Hersteller*innen und Berechnungen von Performance und Funktionalität des elektrischen Systems. Eigene Darstellung nach Hersteller*innenangaben siehe Anhang 14

Unternehmen	Land	Modell	Batterietyp	Ladetyp	Ladezyklen	Leistung	Leistung	Kapazität	Arbeitszeit	Energiebedarf
						<i>kW</i>	<i>PS</i>	<i>kWh</i>	<i>h</i>	<i>kWh/h</i>
Case IH	US	Farmall 75C Electric	-	Level 1 (AC), Level 2 (AC), Level 3 (DCFC)	-	55	75	95	4	23,8
Cellestial	IN	27 HP Tractor	NMC, 150 Ah	-	-	14	18	-	-	-
Farmtrac	AT	25G	-	-	-	18	25	21,6	-	4,3
Fendt	DE	e107 V Vario / e100 V Vario	Li NMC, 700 V	Typ 2 22 kW (AC) oder 80 kW (DC) oder Schnellladen, CCS2 Steck- dose	3000	55	75	100	bis 5	20,0
John Deere	DE	SESAM	Li-Ionen	-	-	130	177	0	-	-
	DE	SESAM 2	Li-Ionen	-	-	500	680	1000	-	-
Knegt	NL	304G2e	Li-Ionen	-	3500	33	45	33,6	3 bis 5	6,7
	NL	304G2e CAB	Li-Ionen	-	3500	33	45	33,6	3 bis 5	6,7
	NL	304G2e FORA- DER	Li-Ionen	-	3500	33	45	33,6	3 bis 5	6,7
	NL	304G2e KA- BINE & FRONTLADER	Li-Ionen	-	3500	33	45	33,6	3 bis 5	5,6
	NL	404G2E	Li-Ionen	-	3500	40	55	43,2	3 bis 5	8,6
	NL	404G2E CAB	Li-Ionen	-	3500	40	55	43,2	3 bis 5	8,6

	NL	404G2E FORADER	Li-Ionen	-	3500	40	55	43,2	3 bis 5	8,6
	NL	404G2E KABINE & FRONTLADER	Li-Ionen	-	3500	40	55	43,2	3 bis 5	8,6
Kubota	DE	Lxe-261	-	-	-	12	16	25	4	6,3
	DE	RT210-2e	Li-Ionen	400 V oder 220 V	-	12	16	12,5 / 18,7 / 25,0	-	-
	DE	RT220-2e	Li-Ionen, 48 V, 260 Ah	400 V oder 220 V	-	12	16	12,5 / 18,7 / 25,0	-	-
Monarch	US	MK-V	-	Typ 1, bis 80 A, Level 2 (AC)	-	30	41	-	bis 7 oder bis 14	-
New Holland	US	T4 Electric Power	-	CCS (DC), J1772 (AC)	-	48	65	110	-	7,3
Onox	DE	Onox	-	0	-	30	68	30	-	1,9
Rigitrac	CH	SKE 50 Electric	Li-Ionen	Typ 2, max. 22 kW	-	50	54	58	4 bis 6	9,7
Solectrac	US	e25G Gear	Li NMC	83 V oder 220 V AC	2500	19	25	25,2	bis 8	-
	US	e25H Hydrostatic	Li NMC	83 V (DC) oder 220 V (AC) oder 110 V (AC)	2500	19	25	25,2	bis 8	-
	US	eUT+ Narrow	-	220 V (AC)	-	55	75	-	bis 8	-
Tadus	DE	Batterie-elektrischer TADUS	Li-Ionen	Typ 2 CCS (AC und DC)	-	100	135	130	3 bis 5	26,0
Weidemann	DE	Hoftrac 1190e	Li-Ionen, 48 V	Typ 2 und weitere, Ladegerät Onboard bis 6 kW (AC)	-	13	18	14,1 / 18,7 / 23,4	bis 7,3	2,6
	DE	Hoftrac 1390e	Li-Ionen, 96 V	Typ 2 und weitere, Ladegerät Onboard 3 bis 6 kW,	-	54	74	14,1 / 18 / 28	bis 5,3	3,4
ZY Elektrikli Traktör	TR	ZY Elektrikli Traktör	-	-	-	96	130	155	5 bis 7	22,1

Anmerkung: AC = Wechselstrom, DC = Gleichstrom.

Anhang 14. Quellenverzeichnis der E-Traktoren. Eigene Darstellung.

Unternehmen	Modell	Quelle
Case IH	Farmall 75C Electric	Case IH (2023a, 2023b)
Cellestial	27 HP Tractor	Cellestial (o. A.), Deininger (2022, S. 14), Carz4Sale (o. A.)/19/24 12:46:00 PM
Farmtrac	25G	Farmtrac (2024), Baumaschinen Aschauer (2024), Fudex Landmaschinen GmbH (2024)
Fendt	e107 V Vario / e100 V Vario	Fendt (2022), Michel-Berger und Göggerle (2022), Von Stillfried (persönliche Kommunikation, 8. Januar 2024)
John Deere	SESAM	Göggerle (persönliche Kommunikation, 21. November 2023), Pickel (persönliche Kommunikation, 21. November 2023)
John Deere	SESAM 2	Göggerle (2022, 2023a)
Knegt	304G2e	Knegt (2023a)
Knegt	304G2e CAB	Knegt (2023b)
Knegt	304G2e FORADER	Knegt (2023c)
Knegt	304G2e KABINE & FRONTLADER	Knegt (2023d)
Knegt	404G2E	Knegt (2023e)
Knegt	404G2E CAB	Knegt (2023f)
Knegt	404G2E FORADER	Knegt (2023g)
Knegt	404G2E KABINE & FRONTLADER	Knegt (2023h)
Kubota	Lxe-261	Kubota GmbH (2023a)
Kubota	RT210-2e	Kubota Group Solutions Hub (2023), Kubota GmbH (2023b)
Kubota	RT220-2e	Kubota Group Solutions Hub (2023), Kubota GmbH (2023b)
Monarch	MK-V	Monarch (2023)
New Holland	T4 Electric Power	New Holland (2023, 2024)
Onox	Onox	Onox (2023)
Rigitrac	SKE 50 Electric	Rigitrac Traktorenbau (2023a, 2023b), Knüsel (persönliche Kommunikation, 18. November 2023); Preis von direkter Quelle
Solectrac	e25G Gear	Solectrac by Ideanomics (2023b)
Solectrac	e25H Hydrostatic	Solectrac by Ideanomics (2023a)
Solectrac	eUT+ Narrow	Solectrac by Ideanomics (2023c)
Tadus	Batterie-elektrischer TADUS	Baier (persönliche Kommunikation, 27. November 2023), Göggerle (2023b); Preis von direkter Quelle, zwischen 250.000 und 350.000 €
Weidemann	Hoftrac 1190e	Bragulla (persönliche Kommunikation, 23. November 2023), Weidemann (2024); Preis von direkter Quelle, zwischen 60.000 und 75.000 €
Weidemann	Hoftrac 1390e	Weidemann (2024)
ZY Elektrikli Traktör	ZY Elektrikli Traktör	ZY Elektrikli Traktör (2020)

Anhang 15. Übersicht der Steigerung der CO₂-Kosten. Eigene Darstellung.

Jahr	Datum	CO2 Preis in €/Tonne
1	2024	45
2	2025	55
3	2026	65
4	2027	75
5	2028	80
6	2029	85
7	2030	90
8	2031	95
9	2032	100
10	2033	105
11	2034	110
12	2035	115
13	2036	120
14	2037	130
15	2038	125

Anhang 16. Sensitivitätsanalyse ausgewählter Faktoren der Gesamtkosten von E-Traktoren. Eigene Darstellung.

ET-K		TCO-Veränderung	
	Ausgangswert	+50 % vom Ausgangswert	+80 % vom Ausgangswert
Investitionskosten [€]	47.450,00	26 %	41 %
Strompreis [€]	0,33	14 %	23 %
Batteriekosten [€]	129,76	2 %	4 %
Batterielebensdauer [a]	8	-5 %	-5 %
Nutzungsdauer [h]	667	13 %	21 %
ET-G		TCO-Veränderung	
	Ausgangswert	+50 % vom Ausgangswert	+80 % vom Ausgangswert
Investitionskosten [€]	213.300,00	35 %	57 %
Strompreis [€]	0,33	15 %	24 %
Batteriekosten [€]	129,76	2 %	3 %
Batterielebensdauer [a]	8	-3 %	-3 %
Nutzungsdauer [h]	667	15 %	24 %

Anhang 17. Sensitivitätsanalyse ausgewählter Faktoren der Gesamtkosten von Diesel-Traktoren. Eigene Darstellung.

DT-K		TCO-Veränderung	
	Ausgangswert	+50 % vom Ausgangswert	+80 % vom Ausgangswert
Investitionskosten [€]	35.000,00	17 %	27 %
Dieselpreis [€]	1,50	21 %	34 %
CO ₂ -Preis [€]	45,00	2 %	3 %
Nutzungsdauer [h]	667	21 %	34 %
DT-G		TCO-Veränderung	
	Ausgangswert	+50 % vom Ausgangswert	+80 % vom Ausgangswert
Investitionskosten [€]	47.000,00	16 %	26 %
Dieselpreis [€]	1,50	22 %	35 %
CO ₂ -Preis [€]	45,00	2 %	3 %
Nutzungsdauer [h]	667	22 %	35 %

Anhang 18. Fördermöglichkeiten für den Einsatz von E-Traktoren.

Aktuell existieren einige wenige Fördermöglichkeiten für Landwirt*innen, die hauptsächlich auf Maßnahmen des BMEL und des BLEs basieren. Die Maßnahmen zielen darauf ab, bis 2030 jährlich 16 Millionen CO₂eq im Vergleich zu den Emissionen in 2014 einzusparen. Die Förderung des „Bundesprogramms zur Steigerung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau“ nach Richtlinien der Einzelmaßnahmen A kann in Betracht gezogen werden. Es werden „alternative Antriebssysteme für Landmaschinen zur Nachrüstung einer bereits vorhandenen Maschine oder als Ausstattung beim Neukauf einer Maschine technologieoffen gefördert“ (BLE, 2023, S. 3, 6; BMEL, 2021, S. 2; Frerichs & Buck, 2022, S. 2; Maschinenringe Deutschland GmbH, 2023a, S. 1, 2023b, S. 1; Wochinger, 2023, S. 48). Förderfähig sind hiernach elektrifizierte landwirtschaftliche Maschinen, wie Traktoren, als direkte Alternative zu Verbrennungsmotoren. Das Maximum einer Förderung liegt bei 600.000 € pro Unternehmen und Investitionsvorhaben. Außerdem gibt es eine Förderung des BLE: Das „Programm zur Steigerung der Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau“ gewährt eine Förderquote von 40 % auf den Unterschied zum Anschaffungswert einer dieselbetriebenen Referenzmaschine. Landwirtschaftliche Betriebe können von verschiedenen weiteren Fördermechanismen profitieren. KfW-Förderprogramme wie "Solarstrom für Elektroautos" unterstützen Erneuerbare Energien und Elektromobilität. Der Umweltbonus fördert den Kauf von Elektrofahrzeugen für private Halter*innen, inklusive landwirtschaftlicher Betriebe. Zusätzlich können landwirtschaftliche Betriebe Fördermittel für nicht-öffentliche Schnellladepunkte beantragen, wobei die Förderhöhe von der Unternehmensgröße abhängt, und durch eine Obergrenze begrenzt wird. Zusätzlich gibt es regionale Förderprogramme, die je nach Bundesland und Region variieren. (BLE, 2023, S. 3, 6; BMEL, 2021, S. 2; Frerichs & Buck, 2022, S. 2; Maschinenringe Deutschland GmbH, 2023a, S. 1, 2023b, S. 1; Wochinger, 2023, S. 48).

Im vergangenen Jahr wurde angekündigt, die reduzierte Steuer auf Agrardiesel und die Vergünstigung der Kraftfahrzeugsteuer für Forst- und Landwirtschaft zu streichen. Dies wird zu einer erheblichen finanziellen Mehrbelastung für deutsche Landwirte führen und steht aktuell in Kritik vieler Landwirt*innen (Maschinenringe Deutschland GmbH 2023c, 1).

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Mona Kampe, geboren am 27.05.1999 in Filderstadt, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe Dritter erbracht und noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegt habe.

Die in der Arbeit verwendeten Quellen und Hilfsmittel insbesondere auch die verwendeten IT-Werkzeuge und die Art Ihrer Verwendung habe ich mit dem*der Betreuer*in und den Prüfer*innen abgesprochen. Im Literaturverzeichnis bzw. im Verzeichnis der verwendeten Hilfsmittel sind alle verwendeten Quellen und Hilfsmittel (einschließlich IT-Werkzeugen) angegeben und ich habe keine anderen als die dort aufgelisteten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Beim Einsatz von IT-Werkzeugen habe ich durchgehend eigenständig und steuernd gearbeitet.

Die Stellen der Arbeit (einschließlich Tabellen, Karten, Abbildungen etc.), die anderen Werken und Quellen (auch Internetquellen) dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind oder von IT-Werkzeugen generiert wurden, habe ich in jedem einzelnen Fall als Entlehnung mit exakter Quellenangabe kenntlich gemacht.

Mir ist bewusst, dass Täuschungen bzw. schon deren Versuch nach der für mich gültigen Studien- und Prüfungsordnung sanktioniert werden. Diese Sanktionen können neben dem Nichtbestehen der Prüfungsleistung weitreichende Folgen bis hin zur Ungültigkeit der Bachelor- / Masterprüfung für mich haben.

Berlin, den 19.04.2024



Mona Kampe