



Einsatz von E-Traktoren in der Landwirtschaft

Eine Kosten- und Umweltanalyse

Kurzstudie

*Mona Kampe, Hannes Bluhm und Louis Kleespies
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
(IÖW)*

Ca. 6 % der landwirtschaftlichen Emissionen gehen zurück auf die Dieselkraftstoffnutzung in Landmaschinen. Zur Dekarbonisierung der Maschinennutzung werden alternative Antriebsmöglichkeiten entwickelt. Erste Modelle für elektrische Traktoren sind bereits am Markt verfügbar. Die Anschaffungskosten sind im Vergleich zu Dieseltraktoren jedoch noch hoch und anfallende Betriebskosten und Umweltauswirkungen bisher wenig untersucht. Auf Basis aktueller Marktdaten untersucht die vorliegende Kurzstudie die Vor- und Nachteile von E-Traktoren aus Kosten- und Umweltsicht. Die Ergebnisse zeigen, dass kleinere E-Traktoren (40 kW Leistung) über ihre Lebensdauer bereits heute Kostenvorteile aus Perspektive der Fahrzeughalter*innen erzielen können. Größere Modelle (55 kW Leistung) befinden sich erst in einer Markteinführungsphase und verursachen im Vergleich zu Dieseltraktoren (noch) ca. doppelte so hohe Kosten. Die Treibhausgasemissionen von E-Traktoren sinken bei einem geladenen Strommix mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien. Ab einem Anteil von ca. 60 % am öffentlichen Strommix, der voraussichtlich Mitte der 2020er Jahre erreicht wird, oder einer hoffnahen Biogasverstromung können gegenüber Dieseltraktoren Vorteile erzielt werden. Der mineralische Ressourcenverbrauch von E-Traktoren ist im Vergleich zu Dieseltraktoren deutlich höher. Die Batterieproduktion ist hierbei zentraler Hebel, um den Impact zu reduzieren.

Hintergrund

In der Landwirtschaft führt die überwiegende Verwendung von konventionellem Dieselkraftstoff zu negativen Umweltauswirkungen und einer signifikanten Abhängigkeit von Energieimporten. Durch den Dieserverbrauch entstehen rund 3,8 Mio. t CO₂-Äquivalente (Eckel et al., 2023). In 2023 belief sich damit der Anteil an den Gesamtemissionen der Landwirtschaft in Deutschland auf ca. 6 % (UBA, 2024).

Um die deutschen und globalen Klimaschutzziele zu erreichen, werden verschiedene Wege zur Dekarbonisierung der Landwirtschaft diskutiert. Dazu gehören auch alternative Antriebsmöglichkeiten für Landmaschinen wie Traktoren. Eine Möglichkeit ist die Elektrifizierung des Antriebsstranges mit Hilfe von Elektromotor und Batterie. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Optionen wie z.B. dem Einsatz synthetischen Diesels ist der hohe energetische Wirkungsgrad von der Produktion bis zum Einsatz in den Traktoren. Weitere Vorteile: Elektrische Antriebe bieten die Möglichkeit, lokal emissionsfrei und geräuscharm zu arbeiten, sind präzise steuer- und regelbar und zeichnen sich durch eine geringe Verschleiß- und Reparaturanfälligkeit aus. Andererseits sind dem Einsatz durch geringere Betriebsdauern und ein vergleichsweise hohes Gewicht der Batterien aktuell Grenzen gesetzt (Eckel et al., 2023; Remmele et al., 2020).

Aktuell nimmt die Zahl auf dem Markt verfügbarer Modelle für elektrische Traktoren (E-Traktoren) zu, die Anschaffungskosten sind im Vergleich zu Dieseltraktoren jedoch noch hoch und anfallende Betriebskosten und Umweltauswirkungen bisher wenig untersucht. Für die weitere Marktdiffusion von E-Traktoren ist die Adressierung dieser Punkte in Form von Analysen, die die Vor- und Nachteile auf Basis aktueller Daten aufzeigen, zentral.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Landgewinn“ (siehe Information auf Seite 13) wurden daher eine Markt- und eine Kostenanalyse sowie eine Ökobilanzierung für E-Traktoren durchgeführt. Ziel der Marktanalyse war es, derzeit am Markt verfügbare E-Traktormodelle inkl. Preisen und technischen Kenngrößen zu erfassen. In der tiefergehenden Kostenanalyse mittels Total-Cost-of-Ownership-Methode (TCO) wurden spezifische Faktoren untersucht, die einen hohen Einfluss auf die Gesamtkosten von E-Traktoren im Vergleich zu Diesel-Traktoren haben sowie Faktoren, die zur Erreichung einer Kostenparität beitragen können. Die Analysen sind Teil einer Bachelorarbeit und einer Datenzusammenstellung, die auf der Landgewinn-Projektwebseite zum Download zur Verfügung stehen. Ziel der Ökobilanzierung ist die Bestimmung des Dekarbonisierungspotenzials eines E-Traktor-Modells im höheren Leistungs- und Kapazitätsbereich im Vergleich zu Dieseltraktoren mit unterschiedlichen Kraftstoffinputs. Die Analyse dient ferner der Identifikation von kritischen Lebensabschnitten.

Die Ergebnisse der drei Analysebausteine sind in dieser Kurzstudie zusammengefasst. Die Erkenntnisse sollen aktuelle Hindernisse und Optimierungspotentiale zur Weiterentwicklung von E-Traktoren aufzeigen. Außerdem sollen die Informationen Akteur*innen in Politik und Praxis bei der zukünftigen Ausgestaltung der Rahmenbedingungen für die weitere Marktdiffusion und den Einsatz von E-Traktoren unterstützen.

Methodisches Vorgehen

Marktanalyse

Grundlage der Marktanalyse sind frei verfügbare Daten von E-Traktor- und Dieseltraktor-Anbietern (Produktflyer, Webseiten) sowie gezielte Anfragen per Telefon und E-Mail. Die Daten wurden im Zeitraum zwischen Dezember 2023 und März 2024 erfasst. Eine Regressionsanalyse der Anschaffungskosten von E-Traktoren im Zusammenhang mit Leistungen und Batteriekapazitäten dient der Veranschaulichung aktueller Marktbedingungen und der Identifizierung grundlegender Zusammenhänge in der Preisgestaltung.

Gesamtkostenanalyse

Die TCO-Methode zur Berechnung der Gesamtkosten über die Haltedauer erfasst alle Kosten, die über den gesamten Lebenszyklus einer Investition aus Sicht der Halterin oder des Halters anfallen und nimmt somit eine ganzheitliche Perspektive ein (Badouard et al., 2020; Hanson, 2011).

Als Datengrundlage für die eigene Analyse dienen technische Informationen zu zwei E-Traktormodellen in zwei Leistungsklassen (siehe Definition auf Seite 5), ergänzt mit weiteren Daten und Annahmen aus wissenschaftlichen Studien und Veröffentlichungen. Die ökonomische Betrachtung von E-Traktoren umfasst die Investitions-, Fix- und Umrüstungskosten der Maschine, ebenso wie die Betankungs- und Ladeinfrastrukturkosten. Laufende Kosten während des Betriebs und der Restwert nach Ende der Einsatzzeit werden zusätzlich berücksichtigt. Zu den Betriebskosten zählen Ausgaben für Kraftstoff bzw. Strom, CO₂-Preis sowie Wartung und Reparatur. Zu den Fixkosten zählen Kosten für Versicherung, Steuern und Unterbringung. Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse wird darüber hinaus der Einfluss möglicher Entwicklungen von relevanten Parametern Unsicherheiten abgeschätzt und Annahmunsicherheiten abgeschätzt. Als Bezugsjahr wurde das aktuelle Jahr 2024 festgelegt.

Ökobilanzierung

Zur Abschätzung der Umweltwirkungen von E-Traktoren im Vergleich zu Dieseltraktoren wird eine Screening-Ökobilanz in Anlehnung an die ISO-Normen 14040/44 (DIN EN ISO 14040, 2009; DIN EN ISO 14044, 2006) durchgeführt.

Insgesamt werden drei E-Traktor- sowie vier Diesel-Traktor-Szenarien betrachtet, die sich auf unterschiedliche Energieträgerbereitstellungen beziehen. Im Fall von E-Traktoren sind dies Szenarien für die direkte Nutzung des öffentlichen Strommixes 2022 (47 % Anteil an erneuerbaren Energien an der Erzeugung auf Basis von Bundesnetzagentur (2024)) sowie für eine angenommene Strombereitstellung über ein Biogas-Blockheizkraftwerk (BHKW) am Ort des Ladens. Für den Dieseltraktor werden die Fälle der fossilen Kraftstoffnutzung und der synthetischen Dieselnutzung über zwei Wasserstoff-Fischer-Tropsch-Routen analysiert (untersucht werden die Strommixe 2022 sowie ein Wind/PV-Strommix). Ein Wind/PV-Mix wird für den E-Traktor nicht untersucht, da hierfür ein weiterer stationärer Batteriespeicher vor Ort notwendig, um den Strom bedarfsgerecht zum Ladezeitpunkt bereitstellen zu können. Alternativ wird deswegen die Variante mit Biogas-Blockheizkraftwerk betrachtet.

Als funktionelle Einheit, auf die alle Material- und Energieflüsse sowie Ergebnisse bezogen werden, dient eine Traktorbetriebsstunde (h). Für die Systemgrenzen wird ein Cradle-to-Gate-Ansatz zzgl. Nutzungsphase gewählt. Enthalten sind somit die Produktionsphase der Traktoren und der Wallbox im E-Traktorfall sowie die Bereitstellung der Energieträger (Strom und Diesel) und Aufwände für Wartung und Reparatur.

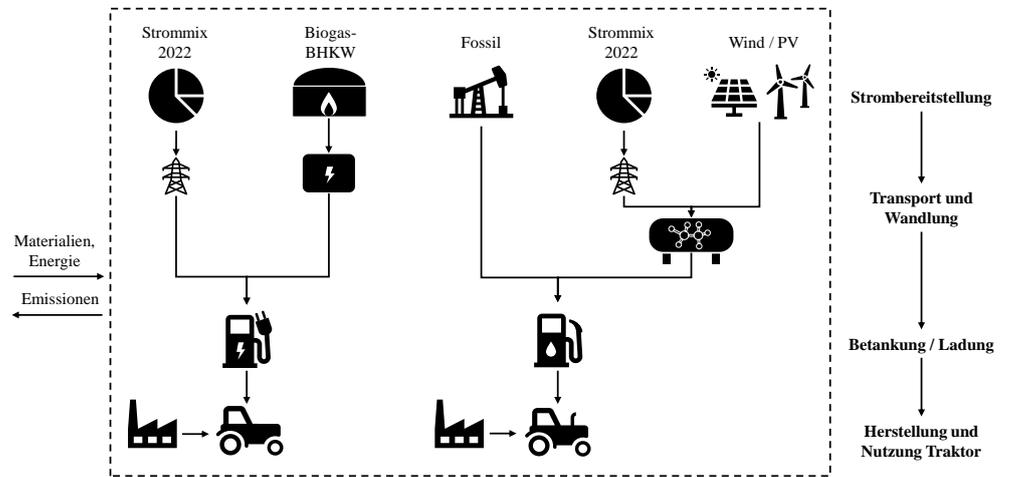


Abbildung 1: Systemgrenzen und Szenarien der Ökobilanzierung.
Quelle: Eigene Darstellung.

Zentrale Datengrundlage für die Produktionsphase des E-Traktors ist ein Massemmodell für generische Ökobilanzen von E-Lastkraftwagen nach Wolff et al. (2020). Lastkraftwagen und Traktoren weisen in gewissem Ausmaß Ähnlichkeiten im Aufbau auf (Un-Noor et al., 2022). Vorangegangene Ökobilanzen von Traktoren greifen ebenfalls auf Sachbilanzen von Lastkraftwagen zurück (Lagnelöv et al., 2021a; Pradel, 2023).

Unter der vereinfachenden Annahme der Übertragbarkeit wird das Modell für einen E-Traktor angepasst und beispielhaft mit Herstellerangaben (Masse, Leistung, Batteriekapazität) für das Modell „e107 V Vario“ vom Hersteller Fendt skaliert. Eine ausführliche Sachbilanz für die vorliegende Analyse ist im Anhang der Studie zu finden.

Die Wirkungsabschätzung erfolgt für die zwei Wirkungskategorien Treibhauspotenzial (in Kilogramm CO₂-Äquivalenten (kg CO₂eq)) und mineralischer Ressourcenverbrauch (in Kilogramm Kupfer-Äquivalente (kg Cueq)) nach ReCipe 2016 (H) (Huijbregts et al., 2017). Für Hintergrunddaten wird die LCA-Datenbank Ecoinvent 3.9 (Wernet et al., 2016) verwendet und die Lebenszyklusmodellierung erfolgt mit der Software SimaPro Flow.

Definition der Traktormodelle für Kosten- und Ökobilanzanalysen

Als Untersuchungs- und Vergleichsobjekte wurden zwei generische E-Traktoren und zwei Diesel-Traktoren der Leistungsklassen von 40 kW und 55 kW definiert, um verschiedene Leistungsbereiche in der Gesamtkostenanalyse abzudecken (siehe Tabelle 1). Fokus der Ökobilanz ist ausschließlich die höhere Leistungsklasse.

Basis für die technischen Größen der generischen Modelle sind reale Daten des E-Traktormodells „e107 V Vario“ des herstellenden Unternehmens Fendt für den zu untersuchenden leistungsstärkeren E-Traktor (55 kW) sowie des Modells „404G2E“ von Knecht für das zu untersuchende leistungsschwächere E-Traktor-Modell (40 kW). Für die dieselbetriebenen Referenzmodelle dienen Daten des

Maschinen- und Reparaturkostenrechners (MaKost) des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL, 2022).

Der direkte Vergleich zwischen E- und Diesel-Traktoren ist stark vereinfacht, da technische Unterschiede z.B. in Bezug auf die Nutzungsdauer, Lärmentwicklung oder Bodendruck vernachlässigt werden. Andererseits wird somit eine direkte Gegenüberstellung für jene Aufgaben ermöglicht, die von E- und Dieseltraktoren gleichermaßen erfüllt werden können.

Tabelle 1 fasst die wesentlichen technischen Merkmale der generischen Traktormodelle sowie deren Berücksichtigung in den Analysen zusammen. Alle weiterführenden Annahmen für die Kosten- und Ökobilanzanalysen sind im Anhang der Kurzstudie zu finden.

Größe	Einheit	Klein		Groß	
		Elektrisch	Diesel	Elektrisch	Diesel
Leistung	kW	40	34 - 40	55	49 - 59
Kapazität	kWh	43	-	100	-
Benutzungsstunden	h/a	667	667	667	667
Verbrauch	kWh/h, l/h	10	4,3	35	6,3
Ladeeffizienz	%	87,21	-	87,21	-
Lebensdauer/ Betrachtungszeitraum	a	12	12	12	12
Betrachtung in Analysen					
Gesamtkostenanalyse	-	x	x	x	x
Ökobilanzierung	-	-	-	x	x

Tabelle 1: Technische Merkmale und Annahmen der generischen Traktormodelle.
Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Die angenommenen Anschaffungspreise als zentrale Größe für die TCO-Analyse betragen im Fall des kleinen E-Traktors (40 kW) 39.950 € und für den großen E-Traktor (55 kW) 205.800 €. Beide Angaben basieren auf Herstellerangaben zu den oben genannten E-Traktormodellen. Die Anschaffungspreise für die entsprechenden Dieseltraktoren stammen aus dem MaKost-Rechner der KTBL (2022) und betragen 35.000 € (40 kW) bzw. 47.000 € (55 kW).

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Marktanalyse, Gesamtkostenanalyse und Ökobilanz dargestellt und diskutiert. Detaillierte Annahmen und Ergebnisse sind im Anhang ab Seite 16 zu finden.

Marktanalyse

Im Rahmen der Marktanalyse wurden 22 E-Traktormodelle von 15 verschiedenen herstellenden Unternehmen identifiziert. 14 dieser Modelle sind bereits heute auf dem Markt verfügbar. Für weitere Modelle wurden Prototypen vorgestellt oder die Serienproduktion ist für die kommenden Jahre in Planung.

Der Leistungsbereich ist aktuell auf 12 bis 55 kW begrenzt. 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 1.000 kWh Kapazität und 500 kW Leistung weist jedoch in die Richtung der Erschließung dieses Marktsegments. Indessen wird auch der Mangel an leistungsstarken E-Traktoren (> 55 kW) auf dem Markt deutlich.

Die Regressionsanalyse der Anschaffungspreise von E-Traktoren (Abbildung 2) basiert auf Daten 17 verschiedener E-Traktormodelle. In der Regressionsanalyse 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 deutlich über dem von einem Diesel-Pendant läge.

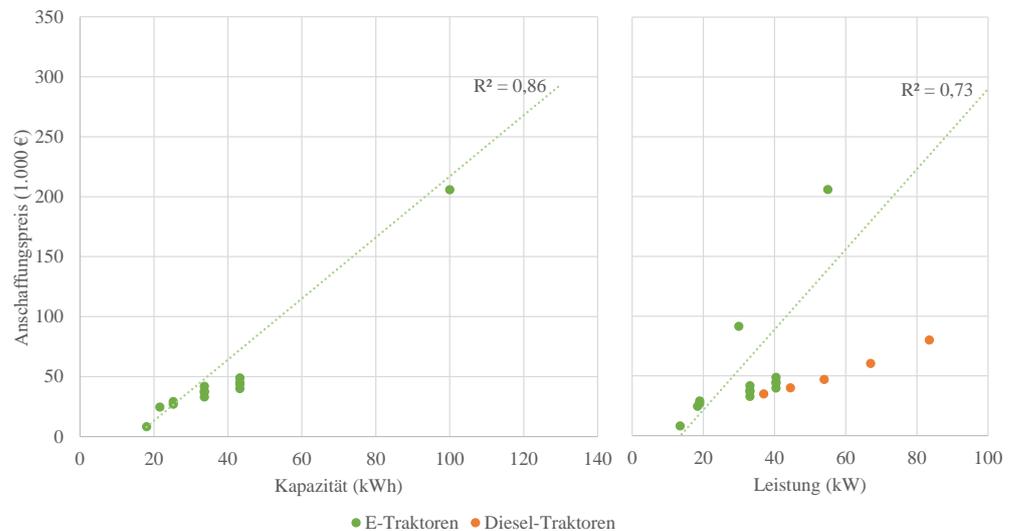


Abbildung 2: Regressionsanalyse der Preise von E-Traktoren auf dem Markt in Abhängigkeit von Kapazität (links) und Motorleistung (rechts).
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf öffentlichen Angaben, Rückmeldungen der E-Traktor Hersteller und MaKost-Rechner der KTBL (2022).
Anmerkung: Für drei der analysierten Traktormodelle stammen Preisinformationen aus direkten Quellen und dürfen nicht veröffentlicht werden. Die Daten fließen aber in die Regressionsanalyse ein.

Gesamtkostenanalyse

Die Ergebnisse der Gesamtkostenanalyse (siehe Abbildung 3) zeigen, dass die Umstellung von Diesel- auf E-Traktoren bei der kleinen Traktorvarianten (40 kW) kostengünstiger sein kann (-13 %), während die Dieselvariante bei den großen Traktoren (55 kW) aufgrund geringerer Investitionskosten deutlich kostengünstiger ist (-51 %). Bei der kleinen Traktorvariante, ergibt sich innerhalb von sechs Jahren Kostenparität zwischen E- und Diesel-Traktoren, während sich für die größeren Modelle die Anschaffung eines E-Traktors unter den gegebenen Bedingungen wirtschaftlich nicht rentiert.

Die Investitionskosten machen den größten Anteil der Gesamtkosten von E-Traktoren aus (46 % bzw. 60 %) und sind somit wichtiger Ansatzpunkt für Maßnahmen, wenn eine Verbesserung der TCO im Vergleich zu Diesel-Traktoren erzielt werden soll. So ist etwa mit fallenden Batteriepreisen zu erwarten, dass in Zukunft auch die Investitionskosten der E-Traktoren sinken. Die Reparatur- und Wartungskosten von E-Traktoren sind wiederum niedriger als die entsprechender Diesel-Traktoren (-18 %). Hintergrund ist, dass E-Traktoren über deutlich weniger bewegliche Teile verfügen. Die geringere Komplexität des Antriebsstrangs sorgt für weniger Verschleiß, weshalb die Reparatur- und Wartungskosten geringer sind als bei Diesel-Traktoren (Proctor, 2022).

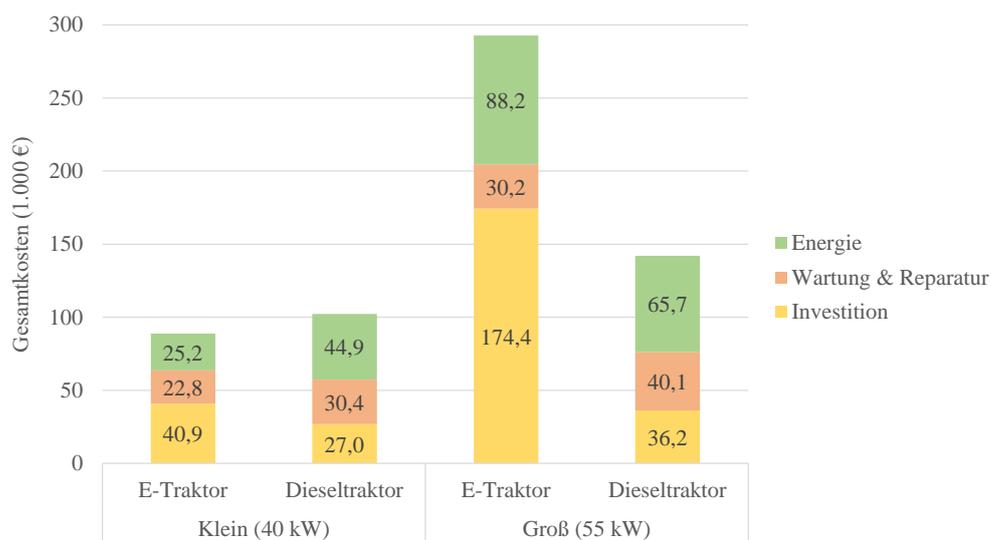


Abbildung 3: Vergleich der Gesamtkosten von leistungsschwächeren und leistungsstärkeren E- und Diesel-Traktoren.

Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Beantwortung der Frage, wie bei der großen Traktorvariante (55 kW) Kostenparität hergestellt werden kann, zeigt die Sensitivitätsanalyse in Abbildung 4 den Einfluss zentraler Kostenfaktoren auf die TCO sowie den Abstand zur Kostenparität unter verschiedenen Dieselpreisszenarien. Gleichzeitig wird der Einfluss unsicherer Annahmen durch die Analyse deutlich. Demnach stellt eine Änderung der Investitions- bzw. Anschaffungskosten den größten Hebel für eine Änderung der TCO dar. Allerdings führt hier nur die Kombination aus 50% niedrigeren Investitionskosten und einem hohen Dieselpreis (2,70 €/l) zu TCO auf gleichem Niveau. Eine Änderung der jährlichen Nutzungsdauer hat ebenfalls signifikante Auswirkungen auf die TCO. Eine hohe Benutzungsdauer der E-Traktoren ist einerseits wirtschaftlich sinnvoll, erhöht jedoch andererseits den Batterieaustauschbedarf.

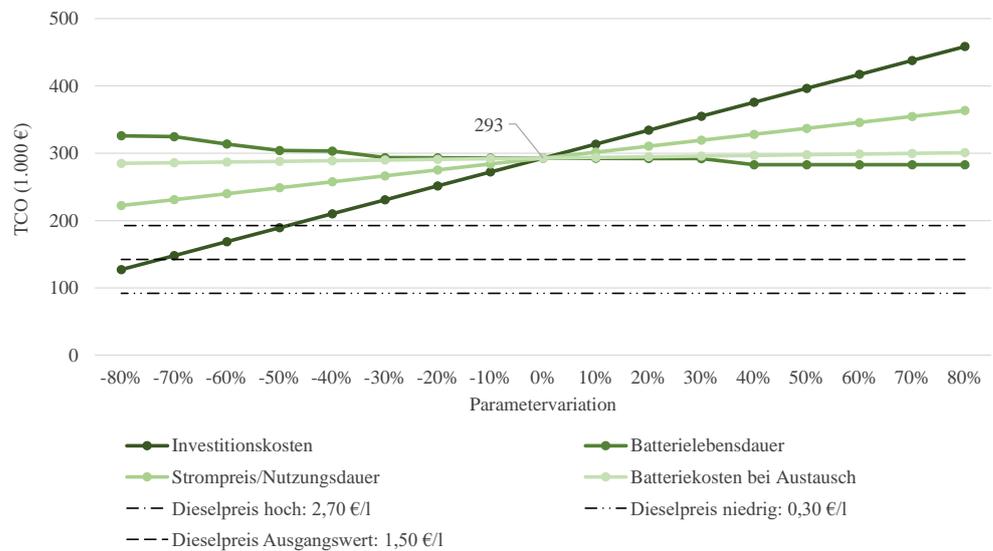


Abbildung 4: Sensitivitätsanalyse der TCO für großen E-Traktor (55 kW)
 Anmerkung: Die Variation von Strompreis und Nutzungsdauer resultiert in derselben Änderung der TCO, da mit höherer Nutzung mehr Strom benötigt wird.
 Quelle: Eigene Darstellung.

Ökobilanzierung

Das Ökobilanzergebnis (Abbildung 5) für das Treibhauspotenzial macht deutlich, dass E-Traktoren nur im Fall einer Stromversorgung mit hohem Anteil an erneuerbaren Energien Umweltvorteile gegenüber dieselbetriebenen Traktoren aufweisen. So wird bei Verwendung des Strommixes 2022 16 % mehr im Biogas-Fall 35% weniger Treibhauswirkung verursacht. Eine Sensitivitätsberechnung zeigt außerdem, dass bei einem Anteil von erneuerbarer Energie von ca. 60 % bereits rund 7 % Treibhausgasemissionen eingespart werden. Da der politisch anvisierte Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch mindestens 80 % im Jahr 2030 betragen soll, ist ein 60 prozentiger Anteil voraussichtlich Mitte der 2020er Jahre zu erwarten. Die Fischer-Tropsch-Route führt im Vergleich zu E-Traktoren wiederum zu deutlich mehr Treibhausgasemissionen bei Verwendung des öffentlichen Strommixes 2022 (+232 %). Hintergrund sind die höheren Energieverluste bei Energieträgerherstellung und -anwendung. Im Fall eines rein erneuerbaren Wind/PV-Mixes ist die Einsparung über alle Routen hinweg am größten (-62 %).

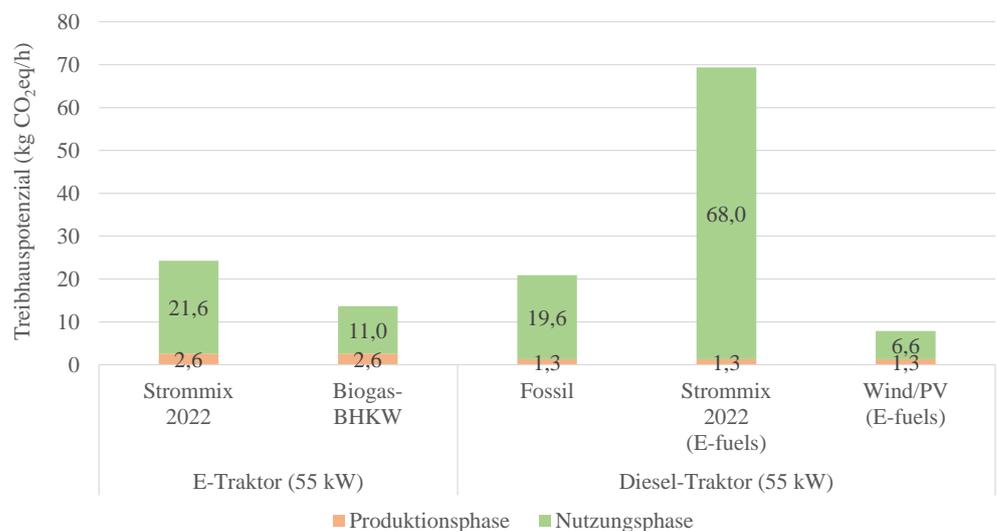


Abbildung 5: Treibhauspotenzial von E-Traktor- und Dieseltraktorszenarien.
 Quelle: Eigene Darstellung.

Die Produktionsphase des E-Traktors hat einen vergleichsweise kleinen Einfluss auf das Treibhauspotenzial (11 bis 19 %). Im Vergleich zum Dieseltraktor ist die Wirkung mit 2,6 kg CO₂eq/h in etwa doppelt so groß. Haupteinfluss auf das Ergebnis hat somit die Nutzungsphase.

Eine weitere Reduktion des Treibhauspotenzials von E-Traktoren in der Nutzungsphase könnte durch eine Nutzung von Wind- und/oder PV-Strom realisiert werden. Technisch wären hierfür aber weitere stationäre Batteriespeicher notwendig, um den Strom bedarfsgerecht zum Ladezeitpunkt bereitstellen zu können.

Der mineralische Ressourcenverbrauch (Abbildung 6) ist in den E-Traktorszenarien am höchsten und 3,4 bis 3,6-mal so hoch wie beim Einsatz von fossilem Dieselmotorkraftstoff in Traktoren. Auch in den Dieselmotorszenarien mit FT-Kraftstoff liegt der mineralische Ressourcenverbrauch höher (2,4 bis 3,4-mal so hoch). Das höhere Niveau im Vergleich zum fossilen Dieselmotorkraftstoff ist v.a. auf die Anteile erneuerbarer Energien bei der notwendigen Strombereitstellung und auf die Wirkungsgradverluste bei Wandlung und Nutzung zurückzuführen.

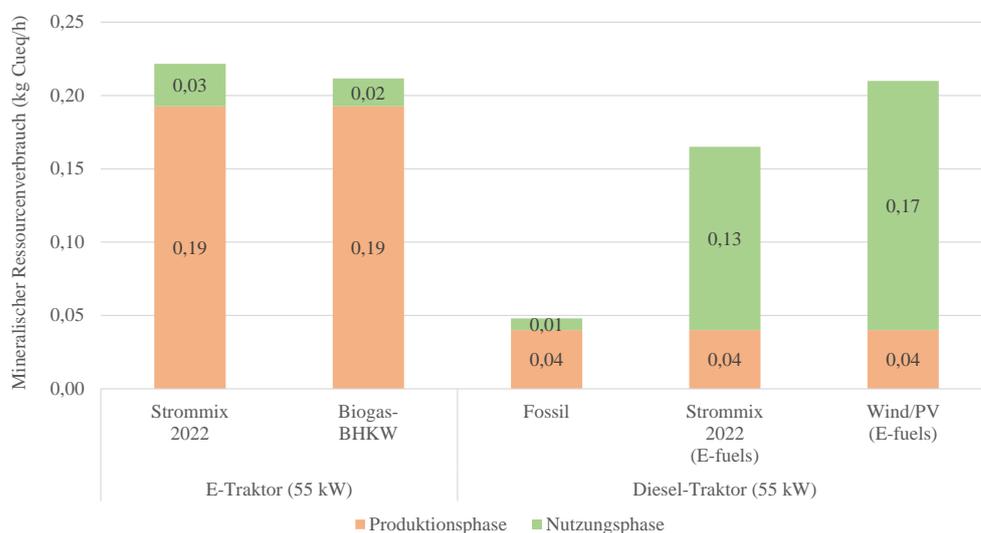


Abbildung 6: Mineralischer Ressourcenverbrauch von E-Traktor- und Dieselmotorszenarien.
Quelle: Eigene Darstellung.

Anders als beim Treibhauspotenzial macht die Produktionsphase die Hauptwirkung bei den E-Traktoren aus (87 bis 91 %). Abbildung 7 zeigt, dass hierfür v.a. die Batterieherstellung Ursache ist, gefolgt von der Herstellung von Glider (Traktorfahrgestell mit Rahmen, Achsen, Kabine, Bremsen) und verbauter Elektronik.

Für eine Verringerung des mineralischen Ressourcenverbrauchs ist also der Batterielebenszyklus der größte Hebel. Längere Lebensdauern, weniger energieintensive und auf erneuerbaren Energien basierte Produktion, veränderte Zellchemie sowie Recycling- und Second-Life-Konzepte sind hierfür diskutierte Optionen (Das et al., 2023; Wu et al., 2023). Aber auch für die übrigen Traktorkomponenten spielt die Kreislauffähigkeit eine wichtige Rolle zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs.

Bei der Ergebnisinterpretation ist zu berücksichtigen, dass mit der gesetzten Cradle-to-Gate-Systemgrenze Verwertungsverfahren nicht berücksichtigt worden sind. Für viele mineralische Ressourcen wie Metalle findet aber bereits eine Verwertung statt, deren Einbeziehung in die Ökobilanzierung das Ergebnis positiver ausfallen lassen würde.

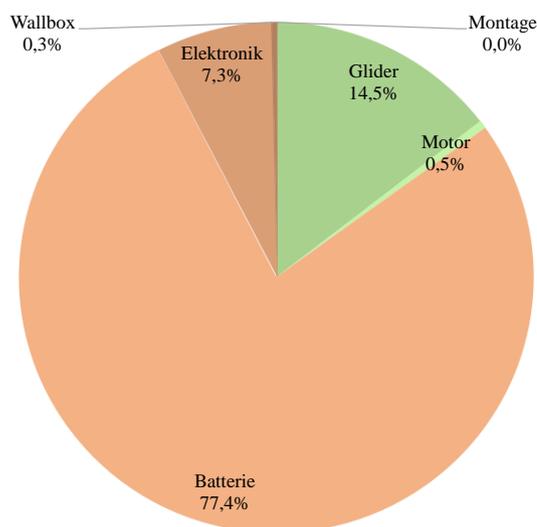


Abbildung 7: Mineralischer Ressourcenverbrauch der Produktionsphase des E-Traktors (inkl. Wallbox).
Quelle: Eigene Darstellung.

Fazit

Die Ergebnisse der Marktanalyse zeigen, dass E-Traktoren bisher nur in niedrigeren Leistungsbereichen (12 bis 55 kW) marktreif und verfügbar sind, während für leistungsstärkere Modelle noch serienreife Varianten und technische Lösungen fehlen. Die Kostenanalyse hat ergeben, dass kleinere E-Traktoren geringere Gesamtkosten aufweisen können als ihre Diesel-Pendants. Bei größeren E-Traktoren hingegen sind die Kosten deutlich höher. Die typischerweise niedrigeren laufenden Kosten von E-Traktoren können die höheren Anschaffungskosten bei größeren Traktoren über die Lebensdauer nicht ausgleichen – zumindest unter den gegebenen Annahmen und Rahmenbedingungen.

Für die Einführung größerer E-Traktormodelle und somit für die Dekarbonisierung der Antriebe in der Landwirtschaft müssen die Kosten aus Sicht der Halter*innen gesenkt werden. Dies kann beispielsweise durch Anschubfinanzierungen in der Markteinführungsphase erreicht werden. Die dadurch zu erwartende steigende Nachfrage lässt die Entwicklungskosten der Hersteller pro Maschine sinken und führt wiederum zu niedrigeren Anschaffungspreisen. Niedrigere Stromkosten können bspw. durch die Eigenproduktion von erneuerbarem Strom auf dem Hof (typischerweise PV-Strom oder Strom aus einem Biogas-Blockheizkraftwerk) oder die Nutzung dynamischer Stromverträge erzielt werden.

Die Erhöhung der Kosten für Dieseltraktoren kann ebenfalls die Umstellung auf E-Traktoren unterstützen, birgt jedoch zumindest im Fall wegfallender Subventionen Akzeptanzrisiken, wie die Proteste von Landwirt*innen zu Beginn 2024 nach der Ankündigung der Kürzung von Agrardiesel-Vergünstigungen gezeigt haben. Die Kraftstoffkosten für Dieseltraktoren werden sich allerdings auf jeden Fall über die steigende CO₂-Preis nach Brennstoffemissionshandelsgesetz bis 2026 erhöhen (Preiskorridor von 55 bis 65 €/t CO₂). Ab 2027 ist die Entwicklung aufgrund der Überführung in den europäischen Emissionshandel ungewiss, allerdings wird von einer weiteren Erhöhung der Preise ausgegangen (Kalkuhl et al., 2023).

Die Ökobilanzierung macht deutlich, dass die Nutzung von E-Traktoren aus Treibhauspotenzialsicht sinnvoll ist, vorausgesetzt dass ein hoher Anteil an erneuerbaren Energien am geladenen Strommix sichergestellt werden kann. Eine rein

erneuerbare Versorgung wäre zu bevorzugen, aber auch das Laden mit dem öffentlichen Strommix kann mit sinkendem Emissionsfaktor voraussichtlich ab Mitte der 2020er Jahre Vorteile erzielen. Eine Betankung von Dieseltraktoren mit synthetischem Diesel bzw. E-fuels ist wiederum nur bei rein erneuerbarem Strommix vorteilhaft und führt bei Nutzung des öffentlichen Strommixes zu deutlichen Mehremissionen im Vergleich zu fossiler Dieselnutzung.

Herausforderung für die Umweltbilanz ist der mineralische Ressourcenverbrauch der genutzten Lithium-Ionen-Batterie. U.a. verbesserte Zellchemien und zukünftige Recyclingquoten werden entscheidend für die Reduktion des Ressourcenverbrauchs sein. Für einen tiefergehenden Umweltvergleich zwischen E- und Dieseltraktoren wären beispielsweise Auswertungen zu Feinstaubemissionen oder Lärmbelastungen zu begrüßen.

Die reine Kostengegenüberstellungen und Umweltbilanzierung lässt weiterführende Faktoren für eine erfolgreiche Markteinführung von E-Traktoren außer Acht: z.B. fehlen Erfahrungswerte zu Wiederverkaufswerten und Langlebigkeit, es herrscht Unsicherheit darüber ob höhere Kosten an Verbraucher*innen weitergegeben werden können und die Umstellung auf umweltfreundliche Maschinen ist aufgrund eines anderen Handlings komplex. Solche Aspekte sollten daher bei der zunehmenden Verbreitung von E-Traktoren begleitend analysiert werden. Zudem ist aufgrund von Leistungsgrenzen von E-Traktoren zu erwarten, dass zukünftig ein Portfolio an alternativen Antriebskonzepten für die Dekarbonisierung landwirtschaftlicher Maschinen benötigt wird.

Das Projekt Landgewinn

Das Forschungsprojekt ‚Landgewinn‘ hat zum Ziel, den deutschen Landwirtschaftssektor in Interaktion mit anderen Sektoren im Energiesystem umfassend zu bewerten. Neben der Analyse nachhaltiger Antriebskonzepte für Landmaschinen auf der Energienachfrageseite, untersucht der Forschungsverbund die Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohle als Kohlenstoffsенke und Agri-Photovoltaik von Seiten der Energiebereitstellung.

Die Leitung des Forschungsprojekts liegt bei der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien Offenburg, in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg im Breisgau, der Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl und dem Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) in Berlin. Gefördert wird das Vorhaben durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms.

Weitere Informationen sowie die Bachelorarbeit „Einsatz von E-Traktoren in der Landwirtschaft – Eine ökonomische Analyse mittels Total-Cost-of-Ownership-Methode“, die Datenzusammenstellung zu E-Traktoren „Electric tractors: Market data and literature on cost and life-cycle analyses“ sowie ein Infosheet „Elektrische Antriebe in der Landwirtschaft: Klimaschutz und erneuerbare Energieversorgung koppeln“ finden Sie auf www.fyi-landgewinn.de.

Literaturverzeichnis

- 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
- Bundesnetzagentur. (2019). *Bedarfsermittlung 2019-2030 – Bestätigung Netzentwicklungsplan Strom*. https://data.netzausbau.de/2030-2019/NEP/NEP2019-2030_Bestaetigung.pdf
- Bundesnetzagentur. (2024). *Energiemarkt aktuell – Der Strommarkt im Jahr 2022*. <https://www.smard.de/page/home/topic-article/207548/209624>
- Das, P. K., Bhat, M. Y., & Sajith, S. (2023). Life cycle assessment of electric vehicles: A systematic review of literature. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(1), 73–89. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30999-3>
- DIN EN ISO 14040. (2009). *Umweltmanagement—Ökobilanz—Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 14044. (2006). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- 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).
- Hanson, J. (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>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & Van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Kalkuhl, M., Kellner, M., Bergmann, T., & Rütten, K. (2023). CO₂-Bepreisung zur Erreichung der Klimaneutralität im Verkehrs- und Gebäudesektor: Investitionsanreize und Verteilungswirkungen. *Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (Kalkuhl et al.), Berlin*.
- Katner, J., & Bluhm, H. (2022). *Umweltauswirkungen von Power-to-Gas und Power-to-Liquid-Technologien – Lebenszyklusanalyse ausgewählter Prozesse für eine Produktion in Deutschland und Nordafrika* [Diskussionspapier des IÖW 74/22].
- KTBL. (2022). *MaKost* [Online Rechentool]. Maschinen- und Reparaturkosten. <https://daten.ktbl.de/makost/#main?language=de-DE>
- Lagnelöv, O., Larsson, G., Larsolle, A., & Hansson, P.-A. (2021a). Life Cycle Assessment of Autonomous Electric Field Tractors in Swedish Agriculture. *Sustainability*, 13(20), 11285. <https://doi.org/10.3390/su132011285>
- Lagnelöv, O., Larsson, G., Larsolle, A., & Hansson, P.-A. (2021b). Life Cycle Assessment of Autonomous Electric Field Tractors in Swedish Agriculture. *Sustainability*, 13(20), 11285. <https://doi.org/10.3390/su132011285>
- Nemecek, T., & Kägi, T. (2007). *Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems*. 15.

- Nordelöf, A., Grunditz, E., Tillman, A.-M., Thiringer, T., & Alatalo, M. (2018). A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine— Part I: Design and composition. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(1), 55–69. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1308-9>
- Pradel, M. (2023). Life cycle inventory data of agricultural tractors. *Data in Brief*, 48, 109174. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109174>
- 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
- 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(4), 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).
- UBA. (2024). *Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft>
- Un-Noor, F., Wu, G., Perugu, H., Collier, S., Yoon, S., Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2022). Off-Road Construction and Agricultural Equipment Electrification: Review, Challenges, and Opportunities. *Vehicles*, 4(3), 780–807. <https://doi.org/10.3390/vehicles4030044>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Wohlschlager, D., Haas, S., & Neitz-Regett, A. (2022). Comparative environmental impact assessment of ICT for smart charging of electric vehicles in Germany. *Procedia CIRP*, 105, 583–588. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.097>
- Wolff, S., Seidenfus, M., Gordon, K., Álvarez, S., Kalt, S., & Lienkamp, M. (2020). Scalable Life-Cycle Inventory for Heavy-Duty Vehicle Production. *Sustainability*, 12(13), 5396. <https://doi.org/10.3390/su12135396>
- Wu, W., Cong, N., Zhang, X., Yue, Q., & Zhang, M. (2023). Life cycle assessment and carbon reduction potential prediction of electric vehicles batteries. *Science of The Total Environment*, 903, 166620. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166620>

Anhang

Marktanalyse

Unternehmen	Modell	Art (Antriebsart / Typ)	Leistung	Kapazität	Entwicklungs- stand / Preis	Batterie (Zelleche- mie / Spannung / Kapazi- tät)
			kW	kWh		
Case IH	Far- mall 75C Electr ic	Allrad / -	55	95	Auf dem Markt / -	- / - / -
Celless- tial	27 HP Trac- tor	Allrad / -	13,5	18	Auf dem Markt / 8.166,10 €	- / - / 150 Ah
Farmtrac	25G	- / Kompakt- traktor (Ra- sentraktor)	18,4	21,6	Auf dem Markt / 24.604,00 €	- / - / -
Fendt	e100 V Vario / e107 V Vario	- / Schmal- spurtraktor	55	100	2017 vorge- stellt, Seri- enproduktion ab 2024 / 205.800,00 €	Li (NMC) / 700 V / -
John Deere	SESAM	- / -	130	-	Prototyp 2016 vorgestellt (ab 2026 auf dem Markt, nicht SESAM, aber ein vollelektri- scher Traktor mit 100 PS und autonom) / -	Li / - / -
	SESAM 2	- / Autonomer Großtraktor	500	1000	Prototyp 2022 vorgestellt / -	Li / - / -
Knekt	304G2e	Allrad / -	33	-	Auf dem Markt in verschie- denen Varian- ten / 32.950,00 €	Li / - / -
	404G2E	Allrad / -	40	-	Auf dem Markt in verschie- denen Varian- ten / 39.950,00 €	Li / - / -
Kubota	Lxe- 261	- / Kompakt- traktor	12	25	Auf dem Markt seit April 2023 / -	- / - / -
	RT220- 2e	- / Kom- paktraktor	12	12,5 / 18,7 / 25,0	Auf dem Markt / -	Li / 48 V / 260 Ah
	RT210- 2e	- / Kom- paktraktor	12	12,5 / 18,7 / 25,0	Auf dem Markt / -	Li / - / -
Monarch	MK-V	Allrad / -	30	-	Auf dem Markt / 91.500,00 €	- / - / -
New Hol- land	T4 Electr ic Power	Allrad / -	48	110	Ab Anfang 2024 auf dem Markt / -	- / - / -
Onox	Onox	Allradtraktor / -	50	30	Noch nicht auf dem Markt / -	- / - / -
Rigitrac	SKE 50 Electr ic	Allrad / Schmalspur- traktor	40	58	Auf dem Markt / -	Li / - / -
Solectrac	e25G Gear	- / Kompakt- traktor	19	25,2	Auf dem Markt in verschie- denen Varian- ten / 27.049,85 €	Li (NMC) / - / -

	e25H Hydro- static	- / Kompakt- traktor	19	25,2	Auf dem Markt in verschie- denen Varian- ten / 29.130,68 €	Li NMC / - / -
	eUT+ Narrow	- / Schmal- spurtraktor	55	-	Ab Anfang 2024 auf dem Markt / -	- / - / -
Tadus	Batte- rie- elektr- ischer TADUS	Allrad / -	100	130	Prototyp, Se- rienproduk- tion geplant ab Mitte 2025 / -	Li / - / -
Weidemann	Hof- trac 1390e	- / Lader	33,1	14,1 / 18 / 28	Auf dem Markt / -	Li / 96 V / -
	Hof- trac 1190e	- / Lader	8,5	14,1 / 18,7 / 23,4	Auf dem Markt / -	Li / 48 V / -
ZY Elekt- rikli Traktör	ZY Elekt- rikli Traktö- r	- / -	96	155	Massenproduk- tion ab 2024 / -	- / - / -

Tabelle A1: Übersicht der Ergebnisse der Marktanalyse inklusive technischer Informationen.

Quelle: Eigene Darstellung.

Gesamtkostenanalyse

Eine detaillierte Darstellung der Annahmen und Ergebnisse ist in der Bachelorarbeit „Einsatz von E-Traktoren in der Landwirtschaft – Eine ökonomische Analyse mittels Total-Cost-of-Ownership-Methode“ auf der Landgewinn-Website zu finden: <https://fyi-landgewinn.de/publikationen/>.

	Einheit	E-Traktor (55 kW)	Dieseltraktor (55 kW)	E-Traktor (40 kW)	Dieseltraktor (40 kW)
INVESTITIONSKOSTEN					
Traktor	€	205.800	47.000	39.950	35.000
Wallbox	€	7.000	-	7.000	-
Investitionskosten Gesamt	€	213.300	47.000	47.450	35.000
BETRIEBSKOSTEN					
KRAFTSTOFF / ENERGIE					
Verbrauch	kWh/a, l/a	2.6769	4.202	7.648	2.868
Energiepreis	€/kWh, €/l	0,3306	1,5012	0,3306	1,5012
Kosten Energie	€/a	8.850	6.308	2.529	4.30
EMISSIONEN					
CO ₂ Emissionen pro h*	t CO ₂ /h	-	0,02	-	0,01
CO ₂ Preis	€/t	45	45	45	45
Kosten CO ₂ Emissionen	€/a	-	501	-	342
WARTUNG / REPARATUR					
Kosten O/M	€/a	2.585	3.575	2.009	2.775
FIXKOSTEN					
Fixkosten Gesamt	€/a	452	452	284	284
LEBENSENDE					
Restwert	€	42.660	9.400	9.490	7.000
TOTAL COST OF OWNERSHIP					
TCO	€	292.807	142.051	88.879	102.293
TCO/km	€/km	61	30	19	21
TCO/Arbeitsstunde	€/h	44	21	13	15

Tabelle A2: Annahmen und Ergebnisse der TCO-Kalkulation der E-Traktor- und Diesel-Traktormodelle.

Quelle: Eigene Darstellung.

*Die CO₂-Emissionen, die durch den genutzten Strommix entstehen, werden der Stromerzeugung zugerechnet und nicht dem Traktorbetrieb.

Sachbilanz

Bei dem E-Traktor wurde zur Datenbeschaffung ein Massenmodell für LKWs genutzt (Wolff et al., 2020). Dabei wurde das Modell über Herstellerdaten zu dem Traktor Fendt e107 V Vario auf dessen Gewicht skaliert und für die Batterie der Ecoinvent Datensatz: „Battery, Li-Ion, NMC 111, rechargeable, prismatic“ verwendet. Die Energiedichte der Batterie aus dem Datensatz liegt bei 0,143 kWh/kg, während vom Hersteller eine Angabe von 0,164 kWh/kg gemacht wurde. Trotz dessen wurde sich an die Gewichtsangabe des Herstellers gehalten. Für die Wartung des Traktors wurden Berechnungen aus Ecoinvent Report Nr. 15 (Nemecek & Kägi, 2007) auf den zu untersuchenden Fall angepasst. Dabei wurden, da es sich um einen E-Traktor handelt, nur Reifen- und Hydraulikölaustausch berücksichtigt (Lagnelöv et al., 2021b). Außerdem wurde ein Reparaturfaktor von 0,2 (die Materialien des Traktors werden über die Lebenszeit zu 20% ersetzt) angenommen (Nemecek & Kägi, 2007). Dieser Ansatz wurde ausschließlich auf den Glider angewendet, da man davon ausging, dass die Batterie nicht über die vollen Ladezyklen belastet wird und der Motor die gesamte Lebensdauer überdauern wird. Für die Ladeinfrastruktur wurden die Sachbilanz für eine AC Wallbox nach Wohlschlager et al. (2022) zugrunde gelegt.

Die anhand der Herstellerdaten errechneten Massen der verschiedenen Traktorteile sind in Tabelle A3 beschrieben.

Bauteil	Einheit	Wert	Hintergrund	Sachbilanz-Quelle
Glider	kg	2.924	Eigene Berechnung auf Basis von Herstellerangabe Fendt	Nach Wolff et al. (2020)
Batterie	kg	610	Herstellerangabe Fendt	Ecoinvent 3.9
Elektronik	kg	90	Eigene Annahme auf Basis von Wolff et al. (2020)	Ecoinvent 3.9
Motor	kg	26	Eigene Annahme auf Basis von Nordelöf et al. (2018)	Nach Wolff et al. (2020)
Gesamte Masse	kg	3.650	Herstellerangabe Fendt	-

Tabelle A3: Massen der verschiedenen Traktorteile. Quelle: Siehe Tabelle. Quelle: Eigene Darstellung.

Es wurde für den E-Traktor und die Wallbox mit einer Lebenszeit von 12 Jahren gerechnet. Dabei hat der Traktor 667 Stunden Einsatzzeit pro Jahr bzw. 8.004 Einsatzstunden über die gesamte Lebensdauer. Der Stromverbrauch von 35 kWh/h wurde aus dem Mittel der Verbrauchsangaben des Herstellers Fendt angenommen. Außerdem wurde von einem Lade-Wirkungsgrad von 87,21 % ausgegangen (Reick et al., 2021). Der reale Stromverbrauch beträgt somit 26.769 kWh/a bzw. 40,13 kWh/h.

Für den Dieseltraktor wurde ein Datensatz aus der Ecoinvent-Datenbank verwendet: „tractor production, 4-wheel, agricultural“ mit geographischem Bezug auf Schweiz und dieser über einen mittleren Massewert verschiedener Dieseltraktorenmodelle mit einer Leistung von 55 kW skaliert. Für die Dieselverbrennung wurde der Datensatz: „Diesel, Burned In Agricultural Machinery“ genutzt und die nicht für das zu modellierende Szenario geeigneten Flüsse entfernt.

Bei dem Dieseltraktor ist im Datensatz eine gesamte Betriebsdauer von 7.000 h angegeben. Daraus ergibt sich eine Lebenszeit, bei 667 Stunden jährliche Nutzung, von ca. 10,5 Jahren. Der angenommene durchschnittliche Kraftstoffverbrauch beträgt 6,3 l/h (KTBL, 2022). Der im Ecoinvent-Datensatz angegebene Reparaturfaktor beträgt 0,74. Die Ökobilanzmodellierung basiert auf einer Studie nach Katner und Bluhm (2022).

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgeber:

**Institut für ökologische Wirt-
schaftsforschung (IÖW) GmbH, ge-
meinnützig**

Potsdamer Str. 105
D-10785 Berlin
Tel. +49-30-884594-0
Fax +49-30-8825439

www.ioew.de

Autor*innen:

Mona Kampe

Hannes Bluhm

Email: hannes.bluhm@ioew.de

Louis Kleespies

Datum:

Juni 2024

