Garching, 10.07.2025

Schlussbericht II zum Teilprojekt „SolChargE“

„Zuwendungsempfänger“
im Projekt

„LEAP RE“

Förderkennzeichen: 03SF0679

Projektlaufzeit: 01.04.2022 bis 30.06.2025

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Teil II: Durchgeführte Arbeiten

Referenzen zu den erarbeiteten Ergebnissen

Veröffentlichungen (Journal & Konferenz)	Konferenzen	Betreute Studienarbeiten	Teilnehmer am Studierendenaustausch zwischen Afrika und Deutschland	Öffentlichkeits-beiträge
5	3	>26	>15	>5

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten wurden durchgehend dokumentiert und einem wissenschaftlichen als auch breiten Bevölkerung zur Verfügung gestellt. Neben fünf wissenschaftlichen Veröffentlichungen, drei Konferenzen, wurde der elektrische Traktor der Öffentlichkeit auf der Messe *Agritechnica 2023* vorgestellt. Die Feldeinsätze wurden in mehreren Newslettern geschildert und veröffentlicht (leap-re.eu/solcharge/), und die finalen Ergebnisse des TUMtrac und des DTH in Äthiopien durch Video dokumentiert (youtube.com/@tum-ftm).
Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine Vielzahl an Studierenden in Abschlussarbeiten ausgebildet und ermöglicht am Projekt mitzuarbeiten. Der Austausch zwischen den beteiligten Projektpartnern wurde durch einen Studierendenaustausch zwischen Südafrika und Deutschland gefördert.

Veröffentlichungen:

Götz, K., Rosner, P., Froissart, I., Lienkamp, M.: The potential of electric agriculture and mobility for the least-cost rural electrification strategy in Sub-Saharan Africa, Energy for Sustainable Development, Volume 83, 2024, 101581, ISSN 0973-0826, https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101581.

Götz, K., Mailhammer, S., Mayr, L., Ettl, J., Lienkamp, M.: Simulative investigation of an electric drivetrain for tractors using real load cycles, Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Institutsteil Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima) Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer, 2025, ISSN 2510-7275

Pizzinini, C.; D'Amico, E.; Götz, K.; Lienkamp, M. Driving Sustainable Development: The Power of Vehicle-Based Services in Rural Sub-Saharan Africa. *Sustainability* **2023**, *15*, 11834. https://doi.org/10.3390/su151511834

Götz, K., Pizzinini, C., Strauss, J., Tennakoon, S., Menelaos, M., Booysen, T., Lienkamp, M., Conception of an electric tractor for farming in sub-Saharan Africa, 7th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2023), Copenhagen, Denmark, 2023, pp. 221-227, doi: 10.1049/icp.2023.2708.

Pizzinini, C., Rosner, P., Ziegler, D., Lienkamp, M., (2024). Enhancing Rural Agricultural Value Chains through Electric Mobility Services in Ethiopia. 10.48550/arXiv.2401.09285.

Konferenzen:

CIRP Design 2025, Patras, Griechenland

Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen 2025, Karlsruhe, Deutschland

7th E-Mobility Power System Integration Symposium EMOB 2023, Copenhagen, Dänemark

Messeauftritte:

Agritechnica 2023

Der folgende Abschnitt schildert und begründet die Notwendigkeit der wichtigsten durchgeführten Arbeiten, zudem die Nennung der Art der Aufwände.

Folgende Projektergebnisse auf der Seite der TUM sind zu betonen und wurden aus dem gesamten Projekt ausgewählt, um sie im Detail zu erläutern, da sie über den wissenschaftlichen Stand hinaus gehen und zu äußerst positiver Rückmeldung geführt haben.

Pilotstudie: Erfolgreicher Aufbau des zirkulären DTH in Äthiopien mit Pilotphase des elektrischen Fahrzeugs *EVUM aCar* nahe Hidi, Bishoftu

Hintergrund und Zielsetzung

Das SolChargE-Forschungsprojekt verfolgt das Ziel, nutzerorientierte, nachhaltige Elektromobilität in ländlichen Regionen Subsahara-Afrikas (SSA) mithilfe eines Decentralized Transportation Hubs (DTH) zu ermöglichen. Der Hintergrund dieser Initiative ist der hohe Bedarf an zuverlässigen, emissionsfreien Mobilitätslösungen, besonders angesichts der Tatsache, dass nahezu 80 % der Bevölkerung in SSA aktuell keinen Zugang zu Elektrizität besitzen. Politische Entscheidungsträger in der Region betrachten Elektromobilität als Schlüsseltechnologie, um sowohl die lokalen CO2-Emissionen zu reduzieren als auch einen Beitrag zur Erreichung der nachhaltigen Entwicklungsziele (SDGs), insbesondere SDG 7 (erschwingliche und saubere Energie), zu leisten. Das zentrale Ziel von SolChargE ist daher die Errichtung eines netzunabhängigen, solarbetriebenen Ladestationssystems inklusive geeigneter Elektrofahrzeuge, um den Mobilitätsbedarf nachhaltig zu decken.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Verlauf des Vorhabens wurde ein Prototyp des DTH in Hidi bei Bishoftu, Äthiopien, erfolgreich realisiert. Dieses System umfasst Photovoltaik-Module, eine stationäre Batterie, einen AC-Typ-2-Lader sowie ein robustes, allradgetriebenes Elektrofahrzeug (EVUM Motors aCar) mit einer Nutzlast von einer Tonne. Das Fahrzeug wurde in einem operativen Modell getestet, welches einerseits landwirtschaftliche Transporte erleichtert und andererseits die individuelle Mobilität der Landbevölkerung verbessert. Bislang werden vergleichbare Transporte meist mit Tieren wie Eseln oder Kamelen durchgeführt, deren Kapazität stark begrenzt und deren Einsatz ungeeignet für zeitkritische Produkte ist.

In Südafrika wurde parallel ein weiterer Prototyp einer mobilen, solarbetriebenen Ladestation

entwickelt. Diese Konstruktion, bestehend aus Batterie und Ladestation auf einem verschiebbaren Gestell, erlaubt die flexible Nutzung an verschiedenen Standorten und ist speziell auf das Elektrofahrzeug Mellowvan abgestimmt.

Zur Unterstützung der ASTU beim Aufbau erfolgte eine intensive Koordination mit lokalen Partnern. Im Rahmen des Projekts wurden drei Feldforschungsreisen nach Äthiopien durchgeführt. Die erste Reise im Jahr 2022 diente der Anforderungsanalyse an den DTH und beinhaltete Interviews mit lokalen Stakeholdern wie Bauern, Mechanisierungsanbietern und Organisationen wie der GIZ. Es fanden zudem Präsentationen bei lokalen Partnern sowie die Identifikation geeigneter Studienorte statt, insbesondere bei Solagrow in Hidi. Die zweite Reise im Jahr 2023 umfasste die Versorgung mit Ersatzteilen, Trainingsmaßnahmen für ASTU-Personal am Fahrzeug, Instandhaltungsarbeiten sowie einen Workshop zum Feldeinsatz des aCars, bei dem auch das Operations- und Geschäftsmodell evaluiert wurde. Die letzte Reise im Jahr 2024 beinhaltete einen Abschlussworkshop zum Feldeinsatz gemeinsam mit Solagrow, ASTU und der lokalen Bevölkerung sowie die Vereinbarung zur weiteren Verwertung des Standorts und Betriebs.

Parallel zu den Aktivitäten in Äthiopien fanden drei Reisen nach Stellenbosch, Südafrika, statt. Im Jahr 2022 erfolgte das Projekt-Kickoff. Im Jahr 2023 wurde ein Studierendenaustausch („globaldrive“) organisiert, bei dem der elektrische Traktor als geeigneter Bestandteil des DTH identifiziert wurde. Im Jahr 2024 schloss ein Forschungsaufenthalt das Projekt ab.

Um den praktischen Nutzen und die technischen Anforderungen zu validieren, wurden Workshops und intensive Befragungen mit lokalen Akteuren, hauptsächlich Kleinbauern und Einwohnern der Projektregionen, durchgeführt. Dabei konnten die wesentlichen Mobilitätsbedürfnisse identifiziert und die Akzeptanz sowie mögliche Hemmnisse bei der Einführung der Technologie analysiert werden. Die teilnehmenden Bauern zeigten ein hohes Interesse daran, ihre landwirtschaftlichen Transporte zu motorisieren und perspektivisch auch ihre Produktion mechanisiert zu gestalten.

Die Ergebnisse der Projektarbeit zeigten, dass die Technologie des DTH technisch zuverlässig funktioniert und effektiv zur Deckung lokaler Transportbedürfnisse eingesetzt werden kann. Allerdings stellen die hohen initialen Investitionskosten für Elektrofahrzeuge und Solaranlagen sowie die Inflation und hohen Zinsraten in den Zielländern aktuell noch erhebliche Barrieren für eine flächendeckende Einführung dar.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die geleisteten Projektarbeiten erwiesen sich als notwendig und angemessen, da sie direkt auf die in SSA bestehenden infrastrukturellen und sozioökonomischen Herausforderungen zugeschnitten waren. Die Umsetzung der Teststandorte und die Schulungen der lokalen Betreiber stellten sicher, dass die entwickelte Technologie praxisnah und anwenderorientiert konzipiert wurde. Die Rückkopplungsschleifen mit den Stakeholdern halfen, die technischen Lösungen auf lokale Bedürfnisse anzupassen und die Akzeptanz bei der Zielgruppe zu sichern.

Zahlenmäßiger Nachweis wesentlicher Positionen

Die Hauptkostenpositionen des Vorhabens umfassten die Hilfe bei der Entwicklung und den Aufbau der Solarladestation, Beschaffung und Modifikation der Fahrzeuge (aCar und

Mellowvan), Reisekosten für Feldforschung, Stakeholder-Workshops sowie Schulungen der zukünftigen Betreiber. Weitere wesentliche Positionen waren Kosten für wissenschaftliches Personal, das in den Forschungsreisen und Feldkampagnen unterstützte.

Verwertbarkeit und voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse des Projekts haben das Potenzial, direkt zur nachhaltigen wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung in ländlichen Regionen von SSA beizutragen. Der Prototyp des DTH dient als Blueprint für zukünftige Implementierungen in ähnlichen Kontexten.

Der aufgebaute Standort wird von dem privatwirtschaftlichen Unternehmen Solagrow (LOI liegt vor) gemeinsam mit der ASTU weiterbetrieben und dient als Beispielprojekt. Konkrete Planungen der ASTU umfassen die Skalierung der Technologie auf weitere Standorte, die Entwicklung maßgeschneiderter Finanzierungsmodelle zur Überwindung wirtschaftlicher Hürden sowie die strategische Zusammenarbeit mit lokalen Unternehmern und internationalen Förderinstitutionen. Perspektivisch könnten auch weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Senkung der Investitionskosten beitragen.

Wissenschaftlicher und technologischer Fortschritt bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des Projekts wurden andere Initiativen beobachtet, die ähnliche dezentrale Lösungen und Elektromobilität in SSA vorantreiben. Lokale staatliche Forschungseinrichtungen und internationale Geberorganisationen arbeiten verstärkt an Bildungsinitiativen für Kleinbauern, um Akzeptanz zu schaffen. Jedoch fehlt es bisher an skalierbaren nachhaltigen Konzepten zur langfristigen Wartung, Ersatzteilversorgung und wirtschaftlichen Tragfähigkeit.

Abbildung 1: EVUM aCar als elektrisches Transportfahrzeug für den DTH, der durch eine autarke Solaranlage gespeist wird.

Bewertung des ökonomischen, ökologischen und sozialen Einflusses von dezentralen Energiesystemen mit Elektromobilität und Mechanisierung

Im Rahmen des SolChargE-Projekts übernahm die TUM die zentrale Rolle bei der systemischen Bewertung des Potenzials des DTH. Während der Projektlaufzeit wurde deutlich, dass die praktische Umsetzung des DTH durch den lokalen Partner ASTU mit erheblichen Herausforderungen konfrontiert war, die eine intensive Unterstützung durch die

TUM erforderlich machten. Um das Gesamtziel des Projekts dennoch zu erreichen, wurde parallel eine umfassende, quantitative Modellstudie durchgeführt, die das Potenzial für skalierbare Anwendungen des DTH auf nationaler Ebene analysiert. Ziel war es, den Beitrag des DTH zur kosteneffizienten Elektrifizierung und nachhaltigen Mobilität in ländlichen Regionen Subsahara-Afrikas zu bewerten.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die von der TUM koordinierte Studie wurde im Journal Energy for Sustainable Development veröffentlicht (https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101581). Sie untersuchte in 40 Ländern Subsahara-Afrikas die Auswirkungen zusätzlicher Elektrifizierungsbedarfe aus Elektromobilität und landwirtschaftlicher Mechanisierung auf die optimale Elektrifizierungsstrategie. Basierend auf hochaufgelösten georeferenzierten Daten zu Bevölkerung, Siedlungsstruktur, Ackerlandnutzung sowie bestehender Energieinfrastruktur wurde mittels techno-ökonomischer Modellierung der kosteneffizienteste Elektrifizierungsansatz für jede Rasterzelle bestimmt.

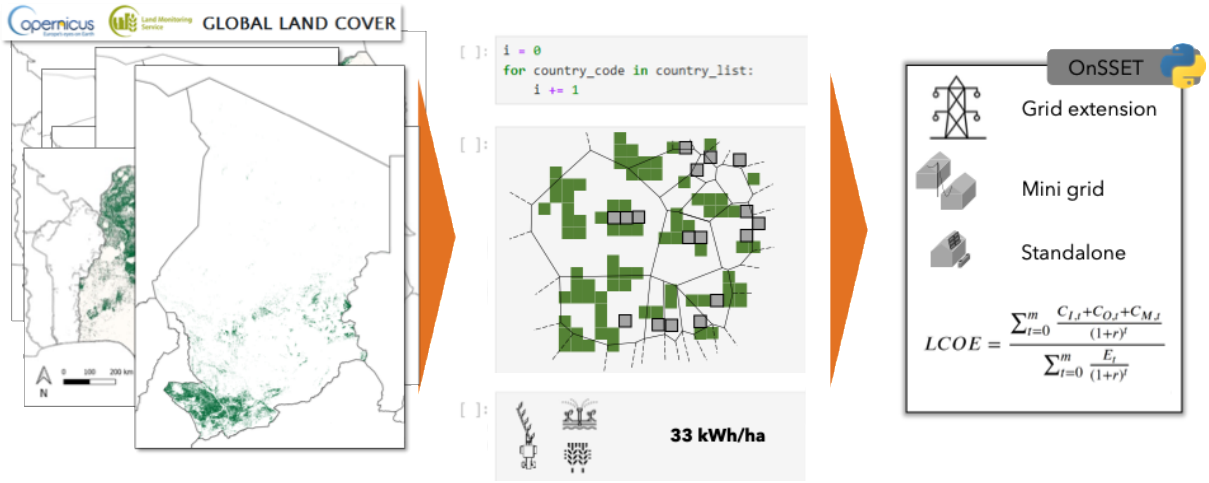

Abbildung 2 Methodik zur Bestimmung der Elektrifizierungsstrategie

Die Studie zeigte, dass in einem Basisszenario ohne produktive Nutzung (z. B. Elektromobilität und Mechanisierung) viele ländliche Regionen ökonomisch nicht elektrifizierbar sind. Sobald jedoch zusätzliche Bedarfe berücksichtigt werden, verändert sich das Bild erheblich: In 60 % der betrachteten Rasterzellen sinkt der Levelized Cost of Electricity (LCOE) im Median um bis zu 40 %. Dadurch werden vormals unwirtschaftliche Regionen erstmals als wirtschaftlich erschließbar identifiziert. Dies unterstreicht das Potenzial des DTH als kosteneffiziente dezentrale Lösung für ländliche Räume.

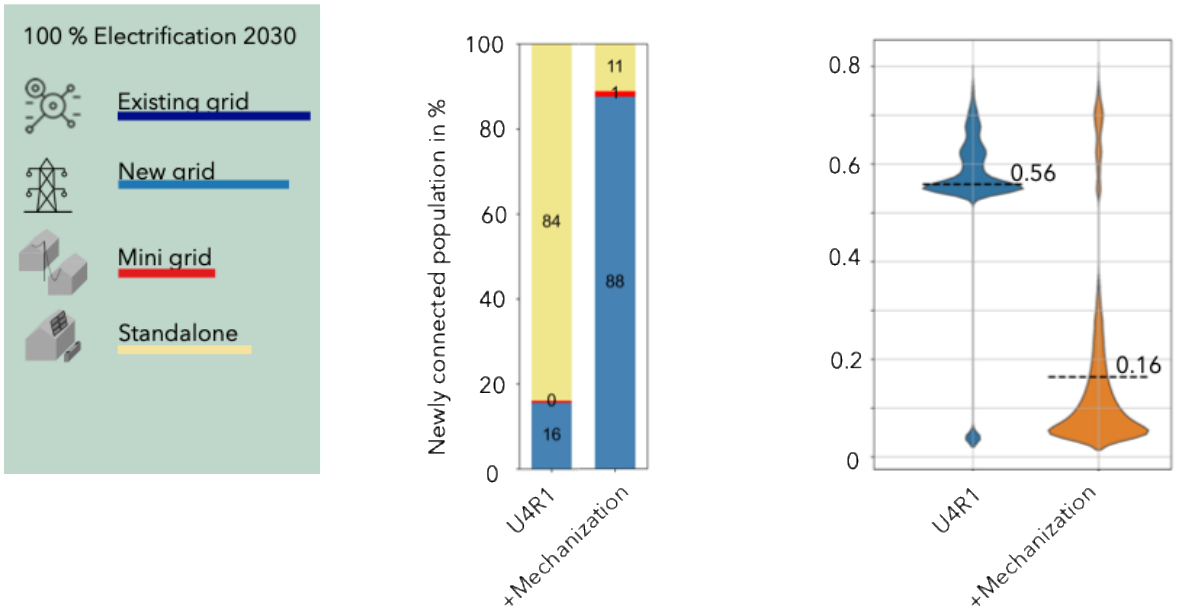

Abbildung 3 Elektrifizierungsstrategie mit und ohne Mechanisierung und Auswirkungen auf die LCOE in Ruanda.

Besonders eindrücklich zeigen sich diese Effekte in Abbildung 4, wie insbesondere die Länder in Ostafrika profitieren können.

Neben der reinen Wirtschaftlichkeit wurde auch das sektorübergreifende Potenzial der Elektrifizierung analysiert. Es zeigte sich, dass Regionen mit über 50 % Cropland-Anteil besonders stark von einem DTH profitieren. Die modellierte Annahme, dass jede Hektar Ackerfläche jährlich 33 kWh elektrischen Energiebedarf erzeugt, führte in zahlreichen Regionen zur Erhöhung des Anschlusswerts und somit zur strategischen Aufwertung im Kontext nationaler Elektrifizierungspläne.

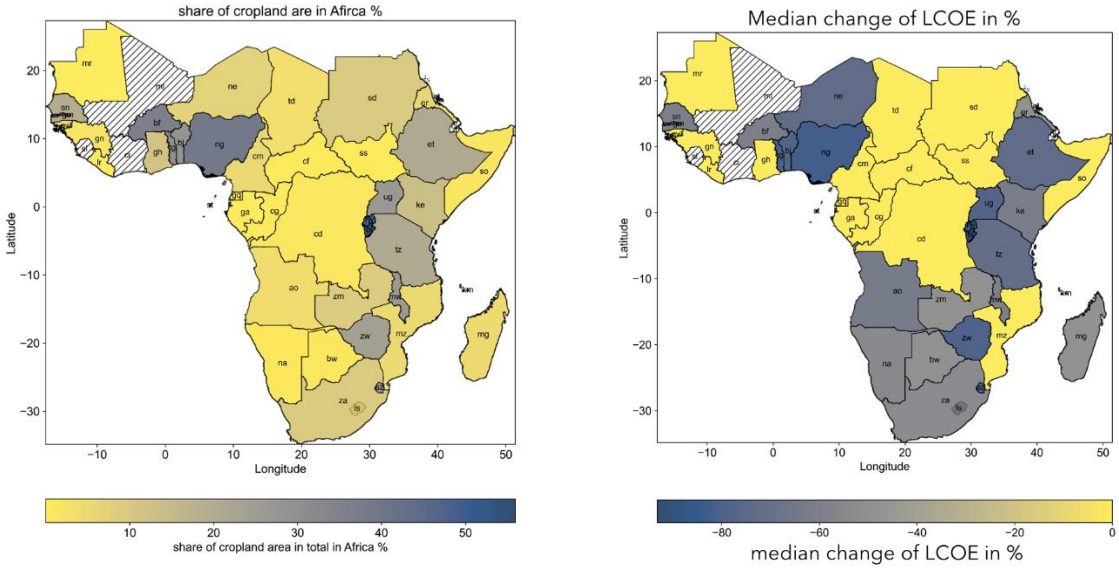

Abbildung 4 LCO mit und ohne Mechanisierung auf dem afrikanischen Kontinent

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die wissenschaftlichen Arbeiten der TUM erwiesen sich als unverzichtbar für den Gesamterfolg des Projekts. Aufgrund der Herausforderungen bei der lokalen Umsetzung des DTH in Äthiopien konnten die Projektziele nur durch die zusätzliche analytische Fundierung auf regionaler Ebene erreicht werden. Die Modellierungsstudie stellte sicher, dass der DTH nicht nur als Einzelmaßnahme, sondern als systemisch integrierbares Konzept bewertet wurde. Damit wurde ein wesentlicher Beitrag zur Skalierbarkeit und strategischen Einbettung der Projektidee geleistet.

Zahlenmäßiger Nachweis wesentlicher Positionen

Die zentralen Ausgaben im Rahmen der TUM-Arbeiten umfassten Personalkosten für die wissenschaftliche Durchführung der Modellierungsarbeit, Softwarelizenzen (z. B. ArcGIS, Python-Bibliotheken), Reisekosten im Rahmen von Projektkoordination und Abschlussveranstaltungen sowie Publikationsgebühren für die Veröffentlichung im Open Access. Darüber hinaus wurden Mittel für die Vernetzung mit Projektpartnern sowie für Dissemination und Ergebnistransfer eingesetzt.

Verwertbarkeit und voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse der TUM-Analyse liefern fundierte Entscheidungsgrundlagen für politische Akteure, Netzplaner sowie Entwicklungsorganisationen. Durch die Integration produktiver Strombedarfe in Elektrifizierungsmodelle lassen sich Regionen mit hohem DTH-Potenzial identifizieren und gezielt fördern. Insbesondere der DTH bietet eine flexible Zwischenlösung zwischen Standalone-Systemen und vollständiger Netzintegration, was ihn für dynamische Entwicklungsregionen besonders attraktiv macht. Die Ergebnisse wurden bereits in internationalen Strategiepapiere und Fachgremien rezipiert.

Wissenschaftlicher und technologischer Fortschritt bei anderen Stellen

Die durch die TUM geleistete Studie schließt eine bestehende Forschungslücke, indem sie produktive Stromnutzung nicht isoliert, sondern im Kontext gesamtwirtschaftlicher Elektrifizierungsstrategien betrachtet. Frühere Ansätze fokussierten ausschließlich auf Grundbedarfe von Haushalten. Die Integration von Elektromobilität und landwirtschaftlicher Mechanisierung als strategische Treiber eröffnet neue Perspektiven. Die Veröffentlichung der Ergebnisse hat bereits internationale Beachtung gefunden und wurde mehrfach zitiert. Zudem ist es der Plan die Ergebnisse in Folgeprojekte zur netzunabhängigen Energieversorgung einfließen zu lassen.

Identifizierung des Traktors als elementaren Bestandteil eines nachhaltigen DTHs und die Entwicklung des TUMtrac

Hintergrund und Zielsetzung

Ein zentrales Ziel des SolChargE-Projekts war die Förderung des Austauschs zwischen afrikanischen und europäischen Partnern. Im Fokus standen die Wissensvermittlung, der Aufbau nachhaltiger Mobilitätslösungen und der Beitrag zu einer resilienten landwirtschaftlichen Entwicklung in Subsahara-Afrika. Der Bereich der landwirtschaftlichen Mechanisierung weist dabei besonders hohes Entwicklungspotenzial auf. Die Landwirtschaft trägt in vielen afrikanischen Ländern etwa 30 Prozent zur gesamten Wirtschaftsleistung bei, ist jedoch von einem geringen Mechanisierungsgrad geprägt. Dies wirkt sich negativ auf Produktivität, Arbeitsbelastung und Ernährungssicherheit aus. Im Rahmen des Studierendenaustauschs zwischen Südafrika und Deutschland im Projekt SolChargE wurde daher die Vision entwickelt, das bestehende Konzept des DTH um ein elektrisch betriebenes landwirtschaftliches Fahrzeug zu erweitern. Ziel war es, Mobilität, Elektrifizierung und landwirtschaftliche Mechanisierung in einem integrierten System zu vereinen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Rahmen des globaldrive-Programms analysierten Studierende aus Südafrika und Deutschland gemeinsam die sozialen, ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen ländlicher Regionen. Der Fokus lag auf der Frage, wie der DTH nicht nur Mobilität, sondern auch agrartechnische Wertschöpfungsketten nachhaltig unterstützen kann. Ergebnis dieser Analyse war die Entscheidung, das bestehende Konzept um ein elektrisch betriebenes Traktionsfahrzeug zu erweitern. Gemeinsam mit wissenschaftlichen Mitarbeitenden der Technischen Universität München wurde daraufhin ein erster funktionsfähiger Prototyp eines elektrischen Traktors entwickelt, der die im DTH erzeugte Solarenergie nutzen kann.

Der Traktor mit dem Namen TUMtrac basiert auf einem modularen Plattformkonzept mit robustem Leiterrahmen. Die elektrische Energieversorgung erfolgt über ein austauschbares Batteriesystem, das mit Standardtyp-2-Schnittstellen bidirektional betrieben werden kann. Die beiden Einzelachsenantriebe ermöglichen einen geländegängigen Allradbetrieb und sorgen für hohe Effizienz bei Traktionsanwendungen. Ein integrierter AC-Ausgang erlaubt die Nutzung externer Verbraucher wie Wasserpumpen oder Maschinen. Die Zugkraftübertragung erfolgt über eine mechanische Dreipunktaufhängung der Kategorie I, die mit elektrifizierten Anbaugeräten kombinierbar ist. Der TUMtrac wurde mit einfach zugänglichen Komponenten konzipiert und kann lokal gewartet werden.

Im November 2023 wurde der TUMtrac auf der internationalen Landtechnikmesse Agritechnica in Hannover vorgestellt. Die Resonanz war äußerst positiv: Fachbesucherinnen und -besucher aus Industrie, Forschung und Landwirtschaft bestätigten die hohe Relevanz des Konzepts insbesondere für netzferne, kleinstrukturierte Agrarregionen. Mit dem TUMtrac steht ein Beispiel für angepasste, skalierbare Elektrifizierungs- und Mechanisierungstechnologie zur Verfügung, das vollständig in das dezentrale

Versorgungskonzept des SolChargE-Projekts integriert ist.

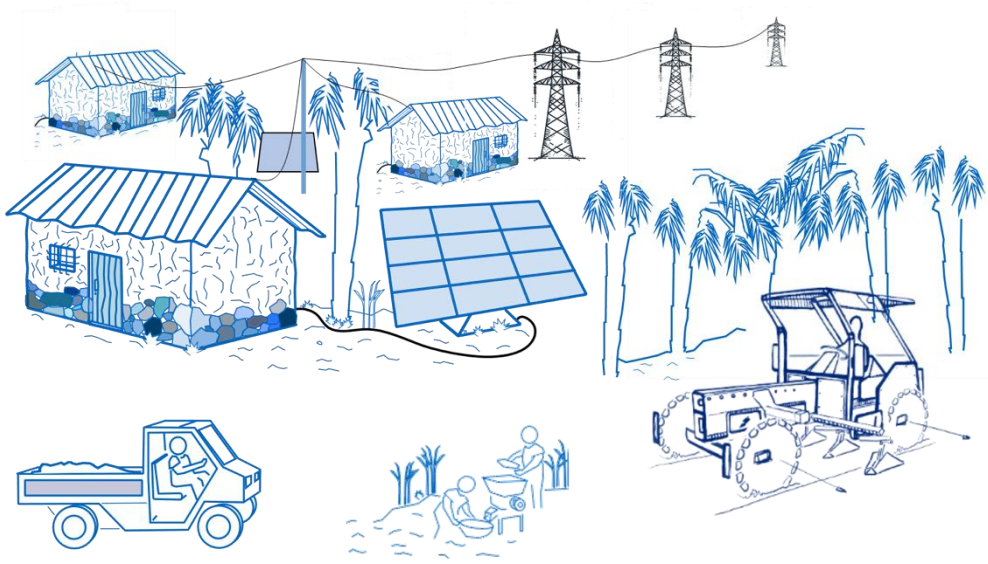

Abbildung 5 Skizzierung des Konzeptes des DTH mit Elektromobilität und elektrischen Traktoren.

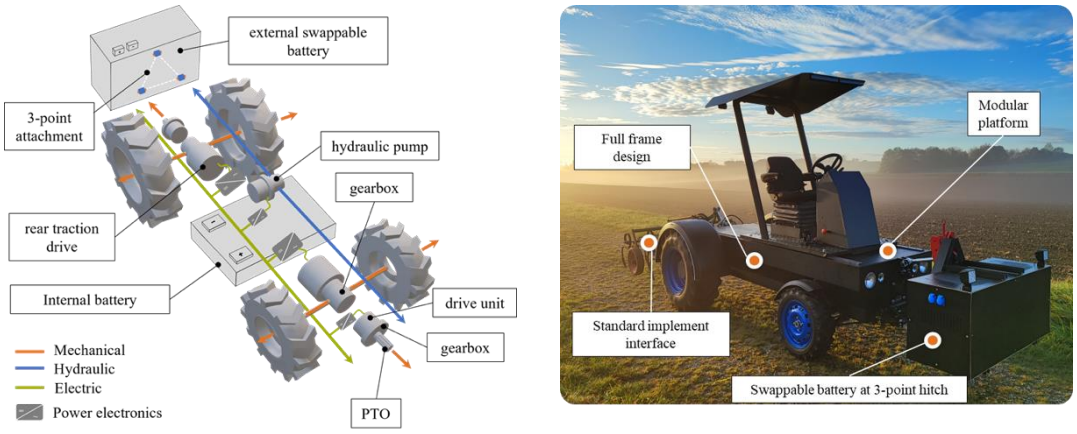

Abbildung 6 Das Konzept des erarbeiteten elektrischen Traktors TUMtrac.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Rahmen dieses Teilprojekts durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die aus dem Austauschprogramm hervorgegangenen Erkenntnisse in ein konkretes, praxisnahes Produkt umzusetzen. Die Integration eines elektrischen Traktors in das DTH-System wurde als Schlüssel zur Realisierung einer breitenwirksamen Elektrifizierungs- und Mechanisierungsstrategie identifiziert. Die Angemessenheit der Arbeiten ergibt sich aus der direkten Anbindung an die Projektziele, der engen Abstimmung mit Praxispartnern sowie der hohen Akzeptanz der entwickelten Lösung bei potenziellen Anwenderinnen und Anwendern. Die Umsetzung als Open-Source-orientierter Prototyp ermöglichte zudem eine breite Dissemination der gewonnenen Erkenntnisse. Zudem war der Elektrotraktor die Möglichkeit,

das Projekt weit über den aktuellen Stand der Technik zu bringen.

Zahlenmäßiger Nachweis wesentlicher Positionen

Für die Umsetzung des Prototyps fielen wesentliche Kosten für die Beschaffung und Verarbeitung von Komponenten, Antriebssystemen, Batteriemodulen und Rahmenelementen an. Weitere zentrale Ausgaben umfassten die Reisekosten für die Teilnahme am globaldrive-Programm und die Durchführung des Messeauftritts auf der Agritechnica. Zudem wurden Personalkosten für die wissenschaftliche Betreuung und technische Entwicklung abgerechnet.

Verwertbarkeit und voraussichtlicher Nutzen

Der entwickelte TUMtrac besitzt ein hohes Potenzial für die Weiterverwertung in Forschung, Entwicklung und praktischer Anwendung. Aufgrund seiner modularen Auslegung und offenen Dokumentation kann das System in verschiedenen Kontexten adaptiert und weiterentwickelt werden. Die vollständige Integration in das DTH-System macht ihn zu einem flexiblen Baustein für eine skalierbare Elektrifizierungsstrategie in netzfernen Regionen. Darüber hinaus leistet der TUMtrac einen Beitrag zur Reduktion körperlicher Belastung in der Landwirtschaft und zur Steigerung der Produktivität kleinbäuerlicher Betriebe. Perspektivisch wird eine Weiterentwicklung in Richtung Serienreife durch Industriepartner angestrebt.

Wissenschaftlicher und technologischer Fortschritt bei anderen Stellen

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurde bekannt, dass Volkswagen ein ähnliches Traktorkonzept entwickelt hat, das auf elektrifiziertem Allradantrieb und modularer Bauweise basiert. Im Unterschied zum TUMtrac handelt es sich jedoch nicht um ein Open-Source-Konzept, sondern um ein industriegetriebenes Entwicklungsprojekt ohne bisherige Pläne zur breiten Anwendung oder Veröffentlichung wissenschaftlicher Erkenntnisse. Die Arbeiten der TUM leisten somit einen eigenständigen Beitrag zur wissenschaftlichen Weiterentwicklung elektrifizierter Landtechnik mit Fokus auf Nachhaltigkeit, Zugänglichkeit und Systemintegration.

Erarbeitung der eines Businessmodels für den DTH

Hintergrund und Zielsetzung

Das Forschungsprojekt SolChargE verfolgt das Ziel, nachhaltige Mobilitäts- und Mechanisierungslösungen für ländliche Regionen in Subsahara-Afrika zu entwickeln. Ein zentrales Element dieser Initiative ist die Integration elektrisch betriebener Traktoren in das Konzept des dezentralen Transporthubs (DTH). Während die Kostenstrukturen für erneuerbare Energietechnologien und konventionelle elektrische Fahrzeuge bereits in zahlreichen Studien untersucht wurden, ist das wirtschaftliche Potenzial elektrisch betriebener Traktoren in Subsahara-Afrika bislang nur unzureichend erforscht. Angesichts der strategischen Bedeutung der Landwirtschaft, die durchschnittlich etwa 30 Prozent des

Bruttoinlandsprodukts in vielen afrikanischen Ländern ausmacht, liegt in der Elektrifizierung der Landwirtschaft ein erhebliches Entwicklungspotenzial. Ziel dieses Arbeitspakets war es, ein transparentes, belastbares Kostenmodell für elektrische Traktoren zu entwickeln und eine auf realistischen Annahmen basierende Bewertung der Lebenszykluskosten – auch als Total Cost of Ownership (TCO) bezeichnet – vorzunehmen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden umfangreiche Stakeholderinterviews mit Landwirten, Kooperativen, Mechanisierungsdienstleistern und lokalen Behörden in Äthiopien durchgeführt. Ziel war es, realistische Nutzungsszenarien für elektrische Traktoren zu erfassen. Diese qualitative Datenerhebung wurde durch reale Feldversuche mit dem aCar sowie durch die technische Konzeptentwicklung des elektrischen Traktors TUMtrac ergänzt. Basierend auf den gesammelten Daten wurde ein detailliertes, skalierbares Bottom-up-Kostenmodell entwickelt. Dieses Modell bildet sämtliche Lebenszyklusphasen des Fahrzeugs ab, von der Herstellung über Betrieb und Wartung bis hin zum Restwert nach der Ausmusterung.
Die Ergebnisse des Modells zeigten, dass bei einer jährlichen Nutzung von 860 Betriebsstunden die Gesamtkosten pro Betriebsstunde für einen elektrischen Traktor zwischen 7 bis 21 % geringer sind, als ein vergleichbarer Dieseltraktor. Daraus ergibt sich ein massives Einsparpotenzial über den gesamten Lebenszyklus hinweg, obwohl die Anschaffungskosten in den meisten Szenarien wesentlich höher sind. Zum wirtschaftlichen Betrieb ist günstiger Strom aus eigener Photovoltaik-Erzeugung notwendig.

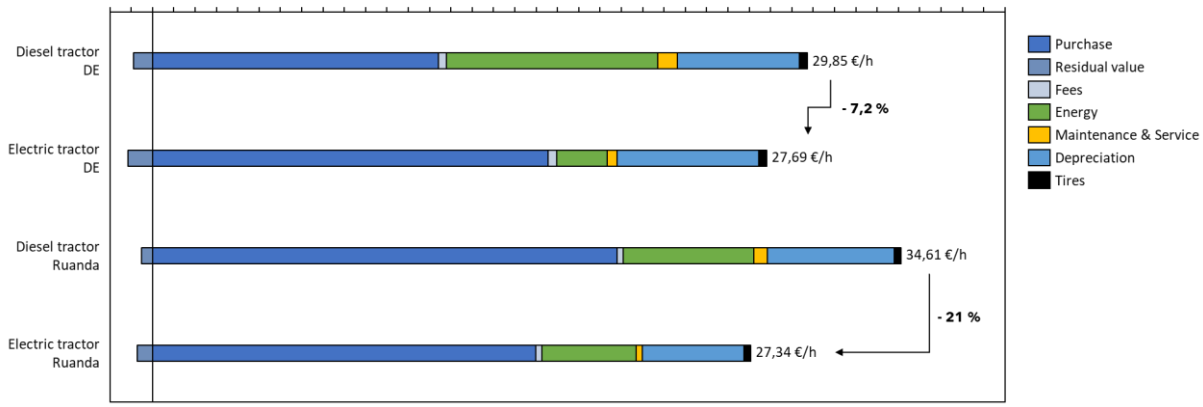

Abbildung 7: Total Cost of Ownership of the Diesel tractor compared to the Electric Tractor.

Ein wesentlicher Vorteil elektrischer Antriebe besteht in den reduzierten Wartungs- und Energiekosten. Die Energiekosten sind häufig nur ein Drittel von Dieseltraktoren. Elektrische Traktoren benötigen deutlich weniger regelmäßige Wartung, da Verschleißteile wie Kupplung, Auspuffanlage oder Getriebe entfallen. Die modellierten Wartungskosten lagen im Durchschnitt bei etwa 25 Prozent derjenigen eines Dieseltraktors. Zusätzlich wurde im Modell berücksichtigt, dass die Batteriekosten bei zukünftigen Produktionsserien weiter sinken könnten. Durch diese Parametrisierung lassen sich Aussagen zur Wirtschaftlichkeit

auch für unterschiedliche regionale Märkte und technische Konfigurationen treffen.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Durchführung der TCO-Analyse war notwendig, da bislang keine auf Kleinbauern in Subsahara-Afrika zugeschnittenen Kostenmodelle für elektrische Traktoren existierten. Während in Europa und Nordamerika bereits entsprechende Studien vorliegen, sind diese nicht ohne Weiteres auf afrikanische Rahmenbedingungen übertragbar. Die erstellten Projektarbeiten schließen diese Lücke, indem sie reale Arbeitsprofile, lokale Preisniveaus, Finanzierungsmöglichkeiten und Energiequellen berücksichtigen. Die Angemessenheit der Projektarbeiten ergibt sich aus dem konkreten Nutzen für Investitionsentscheidungen öffentlicher und privater Akteure im Bereich nachhaltiger Landtechnik.

Zahlenmäßiger Nachweis wesentlicher Positionen

Die wichtigsten Kostenpositionen umfassten die Personalkosten für wissenschaftliche Mitarbeiter an der Technischen Universität München, die an der Entwicklung, Modellierung und Validierung der Analyse beteiligt waren. Für Reisen zu Stakeholderinterviews und Feldversuchen in Äthiopien wurden Reisekosten aufgewendet. Die Softwareentwicklung und Datenmodellierung verursachten zusätzliche Kosten. Insgesamt wurden über 35 Komponenten des elektrischen Traktors in das Modell integriert, darunter Batteriesysteme, Elektromotor, Leistungselektronik, Antriebsstrang, Fahrgestell sowie Ladeinfrastruktur. Die Kostenmodelle wurden mit realen Marktpreisen für Komponenten aus der Industrie und Forschungsprojekten abgeglichen.

Verwertbarkeit und voraussichtlicher Nutzen

Das entwickelte TCO-Modell bietet eine fundierte Entscheidungsgrundlage für politische Entscheidungsträger, Entwicklungsorganisationen sowie Hersteller und Investoren im Bereich elektrischer Landtechnik. Durch die modulare Struktur kann das Modell auf verschiedene Fahrzeugtypen und Marktregionen angewendet werden. Simulationen im Rahmen des Projekts zeigen, dass Investitionen in elektrische Traktoren in Verbindung mit solarer Eigenstromerzeugung innerhalb von sechs bis acht Jahren wirtschaftlich amortisierbar sind, vorausgesetzt eine jährliche Auslastung von mindestens 800 Betriebsstunden wird erreicht. Das Modell wurde bereits zur strategischen Planung weiterer Pilotprojekte in Ostafrika herangezogen und bietet Potenzial für die Skalierung nachhaltiger Mechanisierungskonzepte.

Wissenschaftlicher und technologischer Fortschritt bei anderen Stellen

Weltweit beschäftigen sich zunehmend Forschungsinstitute und Unternehmen mit dem Thema elektrischer Traktoren. Während Unternehmen wie Monarch oder John Deere in Europa und den USA erste Prototypen und Serienfahrzeuge präsentieren, ist der afrikanische Markt bislang wenig erschlossen. Ein bemerkenswerter Vergleich kann mit einem jüngst vorgestellten Konzept der Volkswagen AG gezogen werden, das ebenfalls auf

elektrische Traktoren für Schwellenländer abzielt. Im Gegensatz zur offenen Forschungsarchitektur des SolChargE-Projekts verfolgt Volkswagen jedoch einen geschlossenen Entwicklungsansatz. Eine wissenschaftliche Nachnutzung der dort entwickelten Technologien ist derzeit nicht vorgesehen. Die im Rahmen von SolChargE entwickelte Methodik stellt somit einen eigenständigen Fortschritt dar, insbesondere durch die Kombination von Technologieentwicklung, Kostenmodellierung und regionaler Anpassung an afrikanische Bedingungen.