

ABSCHLUSSBERICHT

POST-FOSSILE LANDWIRTSCHAFT

Ein FARMfuture-Projekt

Verfasser: Prof. Dr. Maximilian Schüler

Beteiligte: Katharina Nitsche, Tobias Mulsow, Zeyu Lan, Yuxuan Zhu, Qinlei Chen,
Christopher Mund, Xinyuan Wang, Tianao Zhao, Zaorui Chen, Hongjun Zhu,
Duanqi Huang, Marie Diers

Datum: 2026-09-14

Ort: Lünebeck

Projektlaufzeit: 01.07.2022 bis 31.12.2024

Projektleiter: Prof. Dr. Maximilian Schüler

Adresse: Mönkhofer Weg 239, 23562 Lünebeck

Telefon: +49 451 300 5554

E-Mail: maximilian.schueler@th-luebeck.de

Kooperationspartner: Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG,
Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum
Futterkamp

Netzwerkpartner: Kompetenzzentrum Erneuerbare Energien und Klimaschutz

Fördermittelgeber: Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH)

Förderprogramm: Hochschule-Wirtschaft-Transfer (HWT) Energie und Klimaschutz

Projekt: Post-fossile Landwirtschaft – FARMfuture

Projektnummer: 8/12-59



**Landwirtschafts-
kammer
Schleswig-Holstein**

EKSH
Gesellschaft für
Energie und Klimaschutz
Schleswig-Holstein

WESTHOF BIO®

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt FARMfuture untersucht, wie landwirtschaftliche Betriebe ihre Abhängigkeit von fossilen Energieträgern verringern und ihre Energieversorgung in Richtung post-fossiler Systeme transformieren können. Als Referenzbetriebe dienten die Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb und das Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp als Milchviehbetrieb. Die beiden Betriebe repräsentieren unterschiedliche landwirtschaftliche Produktionssysteme und ermöglichen so die Untersuchung stationärer und mobiler Energiebedarfe sowie der daraus resultierenden Transformationsanforderungen. Methodisch wurden betriebliche Primär- und Verbrauchsdaten mit KTBL-Daten, Literatur- und Hintergrunddaten sowie mit Energie- und Stoffstrommodellen verknüpft. Ergänzend kamen Energie- und Exergieanalysen, zeitliche Modellierungen, dynamische Simulationen sowie technische Technologievergleiche zum Einsatz. Die einzelnen Untersuchungen bilden gemeinsam einen modellbasierten Proof-of-Concept für unterschiedliche Bausteine post-fossiler landwirtschaftlicher Energiesysteme.

Die Analyse des Ist-Zustands zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Referenzbetrieben. Am Westhof entfallen innerhalb der betrachteten Gesamtbilanz rund 47 % des Energieeinsatzes auf elektrische Energie, insbesondere für die Verarbeitung, rund 36 % auf Diesel bzw. Benzin für Transportprozesse und rund 7 % auf Diesel für die landwirtschaftliche Kultivierung. Innerhalb der Feldprozesse sind insbesondere die Bodenbearbeitung, Düngung und Ernte relevante Energie-Hotspots. Der berechnete Maschinenenergiebedarf ist stark saisonal geprägt und weist insbesondere im Juni und September hohe Bedarfsspitzen auf. Futterkamp zeigt dagegen einen kontinuierlicheren elektrischen Energiebedarf der Milchviehhaltung. Der aus Betriebsdaten ermittelte Stromverbrauch beträgt rund 125.500 kWh/a; Beleuchtung, Milchkühlung und Lüftung verursachen zusammen rund 51 % dieses Verbrauchs. Für die untersuchte Futterproduktion wurde ein Dieselbedarf von rund 8.687 L/a berechnet, von dem rund 77 % auf Erntearbeiten entfallen. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl Energie-Hotspots als auch zeitliche Bedarfsstrukturen stark betriebspezifisch sind.

Aufbauend auf dieser Ist-Analyse wurden verschiedene Transformationspfade untersucht. Dazu gehören Photovoltaik (PV), Batteriespeicher und Biogas sowie batterieelektrische, wasserstoff- und methanbasierte Optionen für mobile Anwendungen. Für Futterkamp wurden mit Polysun dynamische Szenarien zur Kopplung von PV-Erzeugung, elektrischem Verbrauch, Batteriespeicherung und

Wasserstoffproduktion modelliert. Für den Westhof wurden insbesondere quantitative Substitutionsrechnungen zum fossilen Maschinenenergiebedarf durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass keine einzelne Speicher- oder Antriebstechnologie alle betrieblichen Anforderungen abdeckt. Batteriespeicher eignen sich vor allem für kurzfristige Lastverschiebungen, während Wasserstoff und Methan eine längerfristige Speicherung bzw. die Versorgung mobiler Anwendungen ermöglichen können, jedoch zusätzliche Umwandlungs- und Infrastrukturbedarfe verursachen. Entscheidend für die Systemauslegung ist daher neben der jährlichen Energiemenge insbesondere die zeitliche Übereinstimmung zwischen Energiebedarf und erneuerbarer Erzeugung.

Die Umweltwirkungen der Transformation wurden ergänzend anhand direkter CO₂-Minderungspotenziale sowie des Material- und Rohstoffbedarfs ausgewählter Technologien betrachtet. Für die untersuchten Feldarbeiten des Westhofs wurde ein Dieselbedarf von rund 89.900 L/a ermittelt, der den direkten verbrennungsbedingten Emissionen von rund 236 t CO₂/a entspricht. Für die betrachtete Futterproduktion in Futterkamp ergeben sich rund 26 t CO₂/a, davon fallen rund 20 t CO₂/a allein für die Erntearbeiten an. Insgesamt werden damit innerhalb der jeweils untersuchten Systemgrenzen rund 262 t direkte CO₂-Emissionen pro Jahr adressiert, wenn der betrachtete fossile Diesel vollständig substituiert wird. Die tatsächliche Netto-Treibhausgasminderung hängt jedoch vom jeweiligen Transformationspfad und den vorgelagerten Aufwendungen für Strombereitstellung, Energieträger und technische Infrastruktur ab.

Die Untersuchungen zur Wasserstoffbereitstellung zeigen zudem, dass eine postfossile Energieversorgung neue Material- und Rohstoffanforderungen mit sich bringt. Mögliche Elektrolysetechnologien unterscheiden sich hinsichtlich des Energiebedarfs, des Betriebsverhaltens und der Rohstoffkritikalität. Zudem können Recycling und Kreislaufführung den Bedarf an Primärrohstoffen reduzieren. Damit erweitert FARMfuture die energetische Betrachtung um eine Ressourcen- und Kreislaufperspektive. Ergänzend wurde am Versuchsbetrieb Wulmenau die Elektrifizierung der landwirtschaftlichen Wärmebereitstellung mittels einer Sole/Wasser-Wärmepumpe als weiterer Anwendungsfall untersucht.

Neben den technischen Untersuchungen wurde der Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und landwirtschaftlicher Praxis gestärkt. Die Zusammenarbeit zwischen der Technischen Hochschule Lübeck, dem Westhof, der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein und dem EKSH wurde durch fachlichen

Austausch, Veranstaltungen und Kommunikationsaktivitäten begleitet. Zahlreiche wissenschaftliche Abschlussarbeiten vertieften Teilfragen des Projekts und überführten betriebliche Fragestellungen in wissenschaftliche Analysen, deren Ergebnisse in die Gesamtbewertung von FARMfuture einfließen.

Insgesamt zeigt FARMfuture, dass die Transformation landwirtschaftlicher Energiesysteme wesentlich von der Produktionsstruktur, der zeitlichen Lastverteilung und der vorhandenen Infrastruktur abhängt. Jahresenergiebilanzen allein reichen für die Auslegung post-fossiler Versorgungssysteme nicht aus. Erforderlich ist eine betriebs- und prozessspezifische Abstimmung zwischen erneuerbarer Erzeugung, Speicherung und Endanwendungen. Die Ergebnisse stellen insgesamt technisch plausible Potenziale und Größenordnungen dar, jedoch noch keine vollständig validierten Versorgungskonzepte. FARMfuture schafft damit eine empirische und methodische Grundlage für weiterführende Arbeiten mit hochaufgelösten Betriebsdaten, integrierten Energiesystemmodellen, technoökonomischen und lebenszyklusbasierten Bewertungen sowie Pilot- und Demonstrationsvorhaben unter realen Betriebsbedingungen.

Schlüsselwörter: Post-fossile Landwirtschaft, erneuerbare Energiesysteme, Energiespeicher, Energieeffizienz, alternative Antriebe, Dekarbonisierung

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	9
1 Einleitung und Projektziele.....	10
2 Methodik.....	13
2.1 Beschreibung der Arbeitspakete.....	14
2.2 Vorstellung der Referenzbetriebe.....	16
2.3 Übersicht der wissenschaftlichen Arbeiten.....	18
3 Projektergebnisse.....	20
3.1 Ist-Analyse und betriebliche Energieeffizienz (AP1).....	20
3.1.1 Datengrundlage und methodische Einordnung.....	21
3.1.2 Energiebilanz und Energieverbrauch.....	26
3.1.3 Betriebliche Energieversorgung.....	29
3.1.4 Betriebliche Energie-Hotspots.....	32
3.1.5 Lastprofile und Verbrauchsmuster.....	36
3.1.6 Energieumwandlung und Effizienzpotenziale.....	40
3.2 Transformation der Betriebe (AP2).....	44
3.2.1 Methodischer Ansatz und Transformationspfade.....	44
3.2.2 Erneuerbare Energieversorgung und Speicherung.....	48
3.2.3 Alternative Antriebssysteme und Kraftstoffe.....	53
3.2.4 Rohstoffbedarf und Kreislauffähigkeit der Wasserstoffbereitstellung.....	57
3.2.5 Übertragbarkeit: Wärmeversorgung Wulmenau.....	61
3.2.6 Umweltauswirkungen und THG-Minderungspotenziale.....	63
3.3 Netzwerkaufbau und Wissenstransfer (AP3).....	66
3.3.1 Wissenstransfer und Kommunikation.....	67
3.3.2 Transfer in Forschung und Lehre.....	67
3.3.3 Anschlussfähigkeit und weiterführender Transfer.....	67
4 Bewertung und Diskussion.....	69

4.1	Einordnung der Referenzbetriebe	70
4.2	Aussagekraft und Grenzen der Modellierung.....	72
4.3	Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick.....	74
5	Fazit	77
	Literaturverzeichnis.....	79
	Anhang	81
	A.1 – Systemgrenzen Feldfruchtbetrieb.....	81
	A.2 – Prozentualer Energiebedarf Milchviehbetrieb.....	82
	A.3 – Energiebedarf Beleuchtung Milchviehbetrieb	83
	A.4 – Kältebedarf Feldfruchtbetrieb	84
	A.5 – Batterieparameter.....	85
	A.6 – Materialbedarf Elektrolyseure	86
	A.7 – Materialrückgewinnung Elektrolyseure	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Workflow zur Dieselbedarfsberechnung (aus Zeyu Lan, 2023, Abbildung 2).....	22
Abbildung 2: Umberto-Modell der Energiebilanz für Futterkamp (aus Qinlei Chen, 2023, Abbildung 4-5)	24
Abbildung 3: Umberto-Modell zur Analyse des Dieserverbrauchs Futterkamp (aus Qinlei Chen, 2023, Abbildung 4-6)	24
Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Sankey-Diagramm für den Stromverbrauch Futterkamp (vgl. Qinlei Chen, 2023, Abbildung 4-7).....	25
Abbildung 5: Verteilung des bilanzierten Energieeinsatzes nach Energieträgern und betrieblichen Anwendungen am Westhof (vgl. Yuxuan Zhu, 2023, Abbildung 17).....	27
Abbildung 6: Übersicht der Energieflüsse des Westhofs (vgl. Yuxuan Zhu, 2023, Abbildung 3)	30
Abbildung 7: Betriebsgelände Futterkamp mit Stallgebäuden, bestehender PV-Fläche, Güllesilo und Fahrsilo (vgl. Christopher Mund, 2023, Abbildung 2)	32
<i>Abbildung 8: Verteilung des Energieeinsatzes auf die Kultivierungsprozesse am Westhof (vgl. Yuxuan Zhu, 2023, Abbildung 9)</i>	<i>33</i>
Abbildung 9: Anteile des elektrischen Energieverbrauchs nach Prozessgruppen in Futterkamp (vgl. Qinlei Chen, 2023, Abbildung 4-3)	34
Abbildung 10: Monatliche Verteilung des berechneten Dieselbedarfs für die untersuchten Feldarbeiten am Westhof (vgl. Zeyu Lan, 2023, Tabelle 3)	37
Abbildung 11: Monatlicher elektrischer Energieverbrauch nach Prozessen und Gesamtstromverbrauch in Futterkamp (vgl. Qinlei Chen, 2023, Abbildung 5-1).....	38
Abbildung 12: Saisonale Verteilung des berechneten Dieselbedarfs für Düngung und Pflanzenschutz in Futterkamp (vgl. Qinlei Chen, 2023, Abbildung 5-5).....	39
Abbildung 13: Sankey-Diagramm der Energieumwandlung bei der Bodenbearbeitung am Westhof (vgl. Xinyuan Wang, 2023, Abbildung 2-6).....	41
Abbildung 14: Standardisiertes tägliches Verbraucherprofil „Landwirtschaft 2“ als Grundlage der Polysun-Simulation (vgl. Christopher Mund, 2023, Abbildung 4).....	46
Abbildung 15: Sankey-Diagramm der Biogasproduktion am Westhof (vgl. Xinyuan Wang, 2023, Abbildung 2-10).....	48

<i>Abbildung 16: Monatlicher Verlauf der simulierten Wasserstoffproduktion für unterschiedliche PV- und Verbrauchsszenarien in Futterkamp (vgl. Christopher Mund, 2023, Abbildung 14)</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf des simulierten Energiedefizits der Wärmeversorgung am Versuchsbetrieb Wulmenau (vgl. Marie Diers, 2024, Abbildung 15).....</i>	<i>62</i>
<i>Abbildung 18: Systemgrenzen und berücksichtigte Inputgrößen der Energiebilanzierung ausgewählter Kulturen des Westhofs (nach Yuxuan Zhu, 2023, Abbildung 1).....</i>	<i>81</i>
<i>Abbildung 19: Prozentuale Veränderung des Stromverbrauchs im Laufe eines Jahres (vgl. Qinlei Chen, 2023, Abbildung 5-2)</i>	<i>82</i>
<i>Abbildung 20: Der Stromverbrauch der Beleuchtung im Laufe eines Jahres (vgl. Qinlei Chen, 2023, Abbildung 5-3)</i>	<i>83</i>
<i>Abbildung 21: Modellierte Energieflüsse und Lastkomponenten der Kaltlagerung von Möhren am Westhof (nach Xinyuan Wang, 2023, Abbildung 2-7).</i>	<i>84</i>
<i>Abbildung 22: Prozessablauf zur Rückgewinnung und Wiederverwendung von Protonenaustauschmembran, Platin und Iridium aus gebrauchten PEM-Elektroden (vgl. Duanqi Huang, 2023, Abbildung 3-3)</i>	<i>87</i>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchungsgegenstand und Beitrag wissenschaftlicher Abschlussarbeiten zu FARMfuture	18
Tabelle 2: Datengrundlage und methodische Einordnung der in Arbeitspaket 1 verwendeten Analyseergebnisse	26
Tabelle 3: Elektrischer Energieverbrauch nach Prozessgruppen in Futterkamp (aus Qinlei Chen, 2023, Tabelle 11)	35
Tabelle 4: Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf den mit KTBL berechneten Strombedarf von Futterkamp (aus Qinlei Chen, 2023, Tabelle 8)	42
Tabelle 5: Vergleich der im Projekt untersuchten Speicher- und Energieträgeroptionen (eigene Darstellung nach Tianao Zhao, 2023)	51
Tabelle 6: Berechneter Energiebedarf alternativer Antriebspfade für die landwirtschaftlichen Feldarbeiten des Westhofs (nach Zeyu Lan, 2023)	54
Tabelle 7: Vergleich der im Projekt untersuchten alternativen Antriebspfade für landwirtschaftliche Maschinen (eigene Synthese nach Zeyu Lan, 2023; Tianao Zhao, 2023; Zaorui Chen, 2023)	56
Tabelle 8: Elektrolyseleistung und daraus abgeleiteter Bedarf relevanter Rohstoffe für die untersuchten Wasserstoffversorgungspfade von Westhof und Futterkamp (nach Hongjun Zhu, 2023)	58
Tabelle 9: Vergleichende Einordnung der energetischen Charakteristika und Transformationsanforderungen der Referenzbetriebe Westhof und Futterkamp	71
Tabelle 10: Batteriesysteme, Jahresdaten wesentlicher Batterieparameter in kWh. Autarkie in % (aus Christopher Mund, 2023, Tabelle 6)	85
Tabelle 11: Materialbedarf kombinierter Elektrolysekonfigurationen (aus Hongjun Zhu, 2023, Tabelle 9 und 10)	86

1 Einleitung und Projektziele

Die Landwirtschaft in Schleswig-Holstein steht vor der Herausforderung, Treibhausgas-(THG-) Emissionen zu senken und ihre Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu verringern. Neben Methan- und Lachgasemissionen aus landwirtschaftlichen Produktionsprozessen trägt der Einsatz fossiler Energieträger zu den energiebedingten Emissionen bei. Dies betrifft insbesondere Dieselmotoren für landwirtschaftliche Maschinen sowie die Energieversorgung stationärer Produktions-, Verarbeitungs- und Versorgungsprozesse. Gleichzeitig bestehen in Schleswig-Holstein erhebliche Potenziale für die Nutzung erneuerbarer Energien aus Wind, Photovoltaik (PV) und Biomasse. Landwirtschaftliche Betriebe nehmen dabei eine besondere Stellung ein, da sie sowohl Energieverbraucher als auch potenzielle Erzeuger und Speicher erneuerbarer Energie sein können.

Die Transformation landwirtschaftlicher Energiesysteme stellt eine komplexe Systemaufgabe dar. Landwirtschaftliche Energiebedarfe entstehen in unterschiedlichen stationären und mobilen Anwendungen und weisen teilweise ausgeprägte tageszeitliche und saisonale Schwankungen auf. Während die Tierhaltung, Kühlung oder Verarbeitung kontinuierliche bzw. regelmäßig wiederkehrende Energiebedarfe verursachen, konzentriert sich der Energieeinsatz landwirtschaftlicher Maschinen auf bestimmte Arbeitsgänge und Zeiträume. Eine zunehmende Versorgung dieser Anwendungen mit erneuerbarer Energie erfordert daher die gemeinsame Betrachtung von Energiebedarf und -effizienz, Energieerzeugung, zeitlichen Verbrauchsstrukturen, Energiespeicherung und Energieträgern.

Vor diesem Hintergrund untersuchte das Projekt FARMfuture Möglichkeiten zur Transformation landwirtschaftlicher Betriebe hin zu einer post-fossilen Energieversorgung. Im Mittelpunkt stand die Frage, wie betriebliche Energieflüsse systematisch erfasst und analysiert werden und darauf aufbauend technisch plausible Optionen zur Verringerung oder Substitution fossiler Energiebedarfe entwickelt werden können. Hierzu wurden betriebliche Daten und technische Kennwerte mittels Berechnungs- und Modellierungsansätzen verknüpft. Die Untersuchung konkreter landwirtschaftlicher Betriebe bildete die empirische und methodische Grundlage des Projekts für die Analyse betrieblicher Energieflüsse und darauf aufbauender Effizienz- und Transformationsoptionen.

Als Referenzbetriebe dienten die Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb und das Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb. Mit den beiden Referenzbetrieben wurden unterschiedliche landwirtschaftliche

Produktionssysteme und damit unterschiedliche energetische Ausgangssituationen in das Projekt einbezogen. Die Untersuchungen umfassten stationäre und mobile Energieanwendungen sowie deren Einbindung in die jeweiligen betrieblichen Produktionsabläufe. Auf dieser Grundlage wurden Energieverbräuche und Energie-Hotspots analysiert, zeitliche Bedarfsstrukturen untersucht und unterschiedliche Optionen für Energieeffizienz, erneuerbare Energieversorgung, Energiespeicherung sowie die Substitution fossiler Energieträger betrachtet. Der vorliegende Abschlussbericht konzentriert sich auf die einzelbetriebliche Untersuchung der Referenzbetriebe sowie auf die Analyse konkreter betrieblicher Energiesysteme und ihrer Transformationsoptionen. Überbetriebliche bzw. landesweite Betrachtungen sind nicht Gegenstand der hier dargestellten einzelbetrieblichen Analysen.

Die technischen Untersuchungen umfassten insbesondere PV und Biogas als erneuerbare Energiequellen, Batteriespeicher zur zeitlichen Verschiebung elektrischer Energie sowie Wasserstoff und Methan als speicherbare Energieträger. Für mobile landwirtschaftliche Anwendungen wurden darüber hinaus verschiedene alternative Antriebspfade untersucht. Ergänzende Arbeiten betrachteten die Dimensionierung und den Rohstoffbedarf von Elektrolysetechnologien, Recycling- und Kreislaufaspekte sowie die Übertragbarkeit einzelner Transformationsansätze auf weitere landwirtschaftliche Anwendungen. Die unterschiedlichen Untersuchungen bilden gemeinsam einen modellgestützten Ansatz zur Beschreibung möglicher Entwicklungspfade post-fossiler landwirtschaftlicher Energiesysteme.

Die Hauptziele des Projekts waren:

- Erfassung und Analyse betrieblicher Energieverbräuche und fossiler Energiebedarfe,
- Identifikation relevanter Energie-Hotspots sowie zeitlicher Verbrauchs- und Laststrukturen,
- Entwicklung und Untersuchung von Transformationsszenarien unter Einbeziehung erneuerbarer Energieerzeugung, Energiespeicherung und alternativer Energieträger,
- Abschätzung der für die Substitution fossiler Anwendungen erforderlichen Energie-, Speicher- und Infrastrukturbedarfe,
- Entwicklung eines modellbasierten Proof-of-Concept als Grundlage für zukünftige Pilot- und Demonstrationsvorhaben sowie
- Aufbau und Stärkung eines Netzwerks zwischen Wissenschaft, landwirtschaftlicher Praxis und dem Transfer von Projektergebnissen in Forschung und Lehre.

Damit verbindet FARMfuture die Analyse bestehender betrieblicher Energieflüsse mit der Entwicklung möglicher Transformationspfade. Die Referenzbetriebe ermöglichen es, technische Optionen unter unterschiedlichen Produktionsbedingungen zu untersuchen und die Bedeutung betrieblicher und zeitlicher Randbedingungen für deren Auslegung herauszuarbeiten. Die Ergebnisse schaffen damit eine empirische und methodische Grundlage für die weitere Entwicklung, Bewertung und praktische Erprobung post-fossiler Energiekonzepte in der Landwirtschaft.

Der vorliegende Abschlussbericht folgt dem Aufbau des Forschungsprojekts. Kapitel 2 beschreibt die methodische Vorgehensweise, die Arbeitspakete sowie die beiden Referenzbetriebe. Kapitel 3 stellt die Projektergebnisse entlang der drei Arbeitspakete dar: die Analyse des Ist-Zustands und der betrieblichen Energieeffizienz (AP1), die Untersuchung betrieblicher Transformationsoptionen (AP2) sowie den Netzwerkaufbau und den Wissenstransfer (AP3). Kapitel 4 ordnet die Ergebnisse vergleichend ein, diskutiert die Aussagekraft und die Grenzen der verwendeten Modellierungsansätze und leitet daraus den weiteren Forschungsbedarf ab. Kapitel 5 fasst die zentralen Schlussfolgerungen des FARMfuture-Projekts zusammen.

2 Methodik

FARMfuture verfolgt einen einzelbetrieblichen und anwendungsorientierten Forschungsansatz. Konkrete landwirtschaftliche Betriebe dienten als Referenzsysteme, um Energieverbräuche und betriebliche Prozesse zu analysieren und darauf aufbauend Optionen für eine post-fossile Transformation zu untersuchen. Mit dem Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb und dem Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb wurden zwei unterschiedliche landwirtschaftliche Produktionssysteme betrachtet. Die einzelbetriebliche Perspektive ermöglichte es, technische Transformationsoptionen mit konkreten Produktionsabläufen, Energiebedarfen und betrieblichen Randbedingungen zu verknüpfen.

Die Datengrundlage setzte sich aus betrieblichen Primär- und Verbrauchsdaten, Betriebsaufzeichnungen und technischen Informationen sowie ergänzenden Kennwerten aus Datenbanken und der Literatur zusammen. Hierzu gehörten insbesondere Betriebstagebücher, Energieverbrauchsdaten, Informationen zur eingesetzten Landtechnik sowie Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL). Abhängig von der Datenverfügbarkeit und dem Untersuchungsgegenstand wurden dokumentierte Verbräuche unmittelbar ausgewertet oder Energiebedarfe anhand technischer Kennwerte und Modellannahmen berechnet. Dadurch konnten auch Prozesse untersucht werden, für die keine vollständigen direkten Verbrauchsmessungen vorlagen.

Methodisch wurden unterschiedliche Analyseebenen miteinander verknüpft. Zunächst wurden Energieverbräuche und betriebliche Energieflüsse erfasst, bilanziert und wesentliche Energie-Hotspots identifiziert. Ergänzend wurden zeitliche Verbrauchsstrukturen und saisonale Bedarfsmuster untersucht. Darauf aufbauend erfolgten Potenzial- und Szenarioanalysen zur erneuerbaren Energieversorgung, zur Energiespeicherung sowie zu alternativen Energieträgern. Je nach Fragestellung kamen energietechnische Berechnungen, Energie- und Exergieanalysen, statistische bzw. zeitliche Modellierungsansätze sowie dynamische Simulationen zum Einsatz. Ergänzende Untersuchungen betrachteten technische Auslegungsparameter, Rohstoffbedarfe sowie Recyclingaspekte ausgewählter Technologien.

Die einzelnen Untersuchungen stellen keine einheitliche Gesamtsimulation beider Referenzbetriebe dar. Vielmehr wurden unterschiedliche Teilaspekte des betrieblichen Energiesystems mit jeweils geeigneten Methoden untersucht und anschließend im Gesamtzusammenhang von FARMfuture

zusammengeführt. Dieses Vorgehen ermöglichte es, sowohl die energetische Ausgangssituation als auch unterschiedliche technische Transformationspfade sowie deren Randbedingungen zu analysieren. Die Ergebnisse bilden einen modellbasierten Proof-of-Concept und eine Grundlage für die weitere technische, wirtschaftliche und ökologische Bewertung sowie für eine spätere Validierung unter realen Betriebsbedingungen.

Die methodische Bearbeitung wurde entsprechend der drei Arbeitspakete des Projekts strukturiert und durch mehrere wissenschaftliche Abschlussarbeiten vertieft. Die folgenden Abschnitte beschreiben zunächst die Arbeitspakete, anschließend die Referenzbetriebe und schließlich die wissenschaftlichen Arbeiten sowie deren methodischen Beitrag zum Gesamtprojekt.

2.1 Beschreibung der Arbeitspakete

Die Bearbeitung von FARMfuture erfolgte in drei miteinander verknüpften Arbeitspaketen. AP1 schuf durch die Analyse des Ist-Zustands die Datengrundlage für die Untersuchung betrieblicher Transformationsoptionen in AP2. AP3 ergänzte die technisch-wissenschaftlichen Arbeiten um den Netzwerkaufbau, den Wissenstransfer sowie die Einbindung der Ergebnisse in Forschung und Lehre. Damit folgt die Projektstruktur einer Abfolge von der betrieblichen Bestandsaufnahme über die Entwicklung post-fossiler Transformationspfade bis zum Transfer der gewonnenen Erkenntnisse.

Arbeitspaket 1: Analyse des Ist-Zustands und betriebliche Energieeffizienz

AP1 umfasste die Erfassung, Berechnung und Analyse der Energieverbräuche der beiden Referenzbetriebe. Untersucht wurden die elektrischen, thermischen und fossilen Energiebedarfe sowie deren Zuordnung zu den betrieblichen Prozessen. Abhängig von der verfügbaren Datengrundlage wurden betriebliche Verbrauchsdaten unmittelbar ausgewertet oder mithilfe technischer Kennwerte und KTBL-Daten ergänzt. Die Ergebnisse wurden zu betrieblichen Energiebilanzen und -flüssen zusammengeführt.

Neben der Höhe des Energieverbrauchs wurden dessen betriebliche und zeitliche Strukturen untersucht. Dazu gehörten die Identifikation wesentlicher Energie-Hotspots, die Analyse saisonaler Verbrauchsmuster sowie ausgewählte Betrachtungen zur Energieumwandlung und zu Effizienzpotenzialen. Die Analyse von Energieflüssen, Energie-Hotspots und zeitlichen Verbrauchsstrukturen schafft zugleich eine Datengrundlage für die Weiterentwicklung des betrieblichen

Energiemanagements. AP1 schuf damit die empirische und quantitative Grundlage für die in AP2 untersuchten Transformationspfade.

Arbeitspaket 2: Untersuchung und Modellierung post-fossiler Transformationspfade

Aufbauend auf den in AP1 analysierten Energiebedarfen wurden in AP2 verschiedene Szenarien für eine zunehmende Substitution fossiler Energieträger entwickelt. Hierzu wurden erneuerbare Energiequellen, Speichertechnologien sowie alternative Energieträger und Antriebssysteme hinsichtlich ihrer möglichen Einbindung in die betrieblichen Energiesysteme untersucht. Berücksichtigt wurden insbesondere PV, Batteriespeicherung, betriebliche Biogaspotenziale sowie batterieelektrische, wasserstoff- und methanbasierte Transformationspfade.

Die methodischen Ansätze unterschieden sich je nach Fragestellung. Für Futterkamp wurden unter anderem mit Polysun dynamische Simulationen verschiedener Kombinationen aus PV, Batteriespeichern und Wasserstoffbereitstellung durchgeführt. Polysun ist eine Simulationsumgebung zur Modellierung gekoppelter Energiesysteme und wurde unter anderem im Rahmen vergleichender Untersuchungen von PV-Simulationswerkzeugen (Milosavljević et al., 2022) evaluiert. Andere Untersuchungen griffen auf Energieäquivalenz- und Substitutionsrechnungen, technische Auslegungsparameter oder vergleichende Technologieanalysen zurück. Ergänzend wurden für die Wasserstoffbereitstellung unterschiedliche Elektrolysetechnologien hinsichtlich der Dimensionierung, des Materialbedarfs und der Rohstoffkritikalität betrachtet und die Recyclingmöglichkeiten untersucht. Mit der Modellierung einer Sole/Wasser-Wärmepumpe am Versuchsbetrieb Wulmenau wurde zudem ein ergänzender Anwendungsfall zur Elektrifizierung der landwirtschaftlichen Wärmebereitstellung berücksichtigt.

AP2 führte damit unterschiedliche methodische Teiluntersuchungen zu einem modellbasierten Proof-of-Concept für post-fossile landwirtschaftliche Energiesysteme zusammen. Im Mittelpunkt standen die technisch relevanten Größenordnungen und Randbedingungen möglicher Transformationspfade als Grundlage für die weiterführende Auslegung, Bewertung und praktische Erprobung.

Arbeitspaket 3: Netzwerkaufbau und Wissenstransfer

AP3 flankierte die technisch-wissenschaftlichen Untersuchungen durch den Aufbau und die Stärkung eines Netzwerks zwischen Wissenschaft, landwirtschaftlicher Praxis und weiteren relevanten Akteuren.

Ziel war der fachliche Austausch zu Umweltbewertung, landwirtschaftlicher Verfahrenstechnik und Energiemanagement sowie die Schaffung von Anschlussmöglichkeiten für weiterführende Forschungs- und Umsetzungsprojekte. Die Zusammenarbeit der Technischen Hochschule Lüneburg mit dem Westhof und dem Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp ermöglichte die Verknüpfung wissenschaftlicher Methoden mit betrieblichen Fragestellungen und praktischen Erfahrungen. Ergänzend begleitete die EKSH das Projekt als Fördermittelgeber.

Der Wissenstransfer umfasste projektinternen fachlichen Austausch sowie Workshops, Vorträge, Fachveranstaltungen, Informations- und Kommunikationsaktivitäten und die Verbreitung der Projektergebnisse. Eine weitere Transferkomponente bestand in der Integration zahlreicher Fragestellungen in die studentischen Abschlussarbeiten. Dadurch wurden betriebliche Problemstellungen wissenschaftlich vertieft und die daraus gewonnenen Methoden und Ergebnisse wiederum in das Gesamtprojekt zurückgeführt.

2.2 Vorstellung der Referenzbetriebe

Die Untersuchung konkreter Referenzbetriebe bildete den Kern des methodischen Ansatzes von FARMfuture. Westhof und Futterkamp repräsentieren unterschiedliche landwirtschaftliche Produktionssysteme und unterscheiden sich hinsichtlich Produktionsprozessen, Energieverbrauchern und zeitlichen Bedarfsstrukturen. Dadurch konnten post-fossile Transformationsoptionen unter unterschiedlichen betrieblichen Ausgangsbedingungen untersucht werden. Die einzelbetriebliche Betrachtung war bereits als empirische und methodische Grundlage des Projekts konzipiert.

Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb

Der Westhof wurde als Referenzsystem für einen großflächigen ökologischen Feldfruchtbetrieb mit angeschlossenen Verarbeitungs- und Logistikprozessen betrachtet. Die Untersuchungen umfassten sowohl landwirtschaftliche Feldarbeiten als auch – abhängig von der jeweiligen Fragestellung – weitere betriebliche Energieflüsse. Eine wesentliche Datengrundlage bildeten betriebliche Aufzeichnungen zu Kulturen, Arbeitsgängen und eingesetzter Landtechnik. Da die Dieserverbräuche nicht vollständig den einzelnen Arbeitsgängen zugeordnet werden konnten, wurden für die entsprechenden Prozessanalysen ergänzend KTBL-basierte Verbrauchswerte verwendet.

Auf dieser Grundlage wurden unter anderem Energieflüsse und Energie-Hotspots, zeitliche und saisonale Strukturen des Maschinenenergiebedarfs sowie Möglichkeiten zur Substitution des Dieseleinsatzes untersucht. Weitere Arbeiten betrachteten Energieumwandlung und Exergie, betriebliche Biogaspotenziale, unterschiedliche Speicher- und Energieträgerpfade sowie die Dimensionierung von Elektrolysetechnologien. Dadurch wurde der Westhof aus mehreren methodischen Perspektiven betrachtet, die von der betrieblichen Energiebilanz bis zur technischen Auslegung ausgewählter Transformationsoptionen reichen.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb

Futterkamp diene als Referenzsystem für einen Milchviehbetrieb mit stationären Energieverbrauchern der Tierhaltung sowie für die saisonalen, mobilen Energiebedarfe des Futterbaus. Die Datengrundlage umfasste insbesondere betriebliche Stromverbrauchsdaten sowie Informationen zu landwirtschaftlichen Arbeitsprozessen und zum Dieseleinsatz. Ergänzend wurden KTBL-basierte Berechnungen sowie technische Kennwerte herangezogen.

Die Untersuchungen umfassten die Analyse des elektrischen Energiebedarfs einzelner Prozesse der Milchviehhaltung, die Quantifizierung des Dieselbedarfs für ausgewählte Arbeiten der Futterproduktion sowie die Identifikation wesentlicher Energie-Hotspots. Darauf aufbauend wurden alternative Antriebssysteme sowie unterschiedliche Speicher- und Energieträgeroptionen betrachtet. Ergänzend erfolgte eine dynamische Modellierung von PV-, Batterie- und Wasserstoffsystemen. Für diese Simulation wurde aufgrund begrenzter hochaufgelöster betrieblicher Messdaten ein standardisiertes landwirtschaftliches Lastprofil verwendet und auf einen angenommenen Jahresverbrauch skaliert. Diese methodische Abgrenzung wird bei der Interpretation der Simulationsergebnisse berücksichtigt.

Die beiden Referenzbetriebe wurden somit nicht als unmittelbar quantitativ vergleichbare Systeme modelliert. Ihre gemeinsame Betrachtung ermöglicht stattdessen die Untersuchung verschiedener energetischer Ausgangssituationen und Transformationsanforderungen in landwirtschaftlichen Produktionssystemen.

2.3 Übersicht der wissenschaftlichen Arbeiten

Ein wesentlicher Bestandteil des methodischen Ansatzes von FARMfuture war die Vertiefung einzelner Forschungsfragen in wissenschaftlichen Abschlussarbeiten. Dadurch konnten unterschiedliche Komponenten betrieblicher Energiesysteme mithilfe spezifischer Methoden detailliert untersucht werden. Die Arbeiten reichen von Energieverbrauchs- und Lastanalysen über dynamische Energiesystemsimulationen und Technologievergleiche bis hin zu Material-, Kritikalitäts- und Recyclingbetrachtungen.

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeiten wurden für FARMfuture nicht isoliert betrachtet, sondern entsprechend ihren jeweiligen Systemgrenzen und methodischen Ansätzen in die übergreifende Analyse eingeordnet. Tabelle 1 gibt einen Überblick über den Untersuchungsgegenstand sowie über den Beitrag der im Projektzusammenhang herangezogenen wissenschaftlichen Arbeiten.

Tabelle 1: Untersuchungsgegenstand und Beitrag wissenschaftlicher Abschlussarbeiten zu FARMfuture

Arbeit	Anwendungsfall	Untersuchungsgegenstand	Beitrag zu FARMfuture
Christopher Mund (2023)	Futterkamp	Dynamische Polysun-Modellierung von PV, Batteriespeichern und Wasserstoffbereitstellung	Untersuchung der zeitlichen Kopplung von erneuerbarer Erzeugung, Verbrauch und Speicherung
Duanqi Huang (2023)	Elektrolyse-technologien	Recycling von Materialien aus Elektrolysesystemen	Einordnung von Rohstoffrückgewinnung, End-of-Life und Kreislauffähigkeit
Hongjun Zhu (2023)	Westhof und Futterkamp	Dimensionierung von Elektrolysesystemen und Analyse des Rohstoffbedarfs	Technische Auslegung der Wasserstoffbereitstellung sowie Bewertung von Materialbedarf und Rohstoffkritikalität
Marie Diers (2024)	Wulmenau	Simulation einer Sole/Wasser-Wärmepumpe zur Wärmeversorgung eines Abferkelstalls	Ergänzender Anwendungsfall zur Elektrifizierung landwirtschaftlicher Wärmebereitstellung
Qinlei Chen (2023)	Futterkamp	Analyse des Strom- und Dieserverbrauchs eines Milchviehbetriebs	Quantifizierung elektrischer und fossiler Energiebedarfe sowie Identifikation von Energie-Hotspots und Effizienzpotenzialen
Tianao Zhao (2023)	Westhof und Futterkamp	Untersuchung von Batterie-, Wasserstoff- und Methanspeicherung	Vergleich unterschiedlicher Speicher- und Energieträgerpfade

Xinyuan Wang (2023)	Westhof; ausgewählte Prozesse Futterkamp	Energie- und Exergieanalyse sowie Untersuchung betrieblicher Biogaspotenziale	Analyse von Energieumwandlung, Effizienz-potenzialen und erneuerbarer Energiebereitstellung
Yuxuan Zhu (2023)	Westhof	Analyse und Modellierung des betrieblichen Energiebedarfs	Bilanzierung von Energieflüssen und Identifikation wesentlicher Energiebedarfe und Energie-Hotspots
Zaorui Chen (2023)	Futterkamp	Vergleich elektrischer, methan- und wasserstoffbasierter Alternativen zum Dieselantrieb	Untersuchung technischer und betrieblicher Randbedingungen alternativer Antriebssysteme
Zeyu Lan (2023)	Westhof	Analyse des Maschinenenergiebedarfs und quantitative Abschätzung der Dieselsubstitution durch Strom, Methan und Wasserstoff	Zeitliche Charakterisierung des Dieselbedarfs und Quantifizierung alternativer Energiebedarfe

Die wissenschaftlichen Arbeiten bilden gemeinsam eine methodische Kette von der Analyse des betrieblichen Ist-Zustands über die zeitliche Charakterisierung des Energiebedarfs bis hin zur Untersuchung möglicher Erzeugungs-, Speicher- und Antriebstechnologien. Ergänzende Arbeiten zu Elektrolyse, Rohstoffbedarf, Recycling und Wärmeversorgung erweitern diese energetische Betrachtung um technische und ressourcenbezogene Aspekte. Auf diese Weise wurde die einzelbetriebliche Analyse durch unterschiedliche wissenschaftliche Methoden vertieft und zu einer integrierten Betrachtung post-fossiler Transformationsoptionen zusammengeführt.

3 Projektergebnisse

Die im Projekt FARMfuture durchgeführten Untersuchungen umfassen die Analyse betrieblicher Energie- und Stoffströme sowie die Entwicklung von Ansätzen für eine postfossile Energieversorgung landwirtschaftlicher Betriebe. Als Referenzbetriebe dienten der Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb und das Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein. Anhand dieser unterschiedlichen Produktionssysteme wurden betriebliche Energiebedarfe analysiert, Energie- und Effizienzpotenziale identifiziert und darauf aufbauend technische Transformationsoptionen untersucht.

Die zusammenfassende Darstellung der Projektergebnisse folgt den Arbeitspaketen des Vorhabens. Zunächst werden die energetische Ausgangssituation sowie die betrieblichen Effizienzpotenziale der Referenzbetriebe betrachtet. Darauf aufbauend werden Möglichkeiten zur erneuerbaren Energieversorgung, zur Speicherung und zur Substitution fossiler Energieträger untersucht. Abschließend werden die Aktivitäten zum Netzwerkaufbau und zum Wissenstransfer dargestellt. Die Ergebnisse verschiedener im Projekt durchgeführter wissenschaftlicher Arbeiten werden entsprechend ihrem jeweiligen Beitrag in die einzelnen Arbeitspakete eingeordnet.

3.1 Ist-Analyse und betriebliche Energieeffizienz (AP1)

Grundlage für die Entwicklung post-fossiler Versorgungskonzepte ist zunächst ein belastbares Verständnis der bestehenden betrieblichen Energiesysteme. In Arbeitspaket 1 wurden daher die Energieverbräuche der beiden Referenzbetriebe systematisch erfasst und hinsichtlich der eingesetzten Energieträger, der wesentlichen Verbrauchsprozesse sowie ihrer zeitlichen Verteilung untersucht. Ergänzend wurden Energieumwandlungsprozesse sowie mögliche Effizienzpotenziale analysiert.

Die Untersuchungen unterscheiden zwischen betrieblich dokumentierten bzw. gemessenen Verbräuchen, berechneten Energiebedarfen und modellierten Energieflüssen. Nach der Einordnung der zugrunde liegenden Daten und Methoden werden zunächst die Energiebilanzen und die bestehende Energieversorgung der Referenzbetriebe dargestellt. Anschließend werden betriebliche Energie-Hotspots, zeitliche Lastprofile und Effizienzpotenziale untersucht. Die Ergebnisse bilden die Ausgangsbasis für die in Arbeitspaket 2 entwickelten Transformationspfade.

3.1.1 Datengrundlage und methodische Einordnung

Die Analyse des Ist-Zustands der beiden Referenzbetriebe basiert auf einer Kombination aus betrieblichen Primärdaten, standardisierten landwirtschaftlichen Berechnungsansätzen und ergänzenden Sekundärdaten. Hierzu wurden insbesondere betriebliche Aufzeichnungen zu Produktionsabläufen, Flächen, eingesetzter Landtechnik und Energieverbräuchen mit Daten und Berechnungsverfahren des KTBL verknüpft (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), o. J.-b, o. J.-c, o. J.-a):

- Betriebsinterne Datensätze: Betriebstagebücher mit Informationen zu eingesetzter Landtechnik, Lastgangdaten und Energieabrechnungen
- KTBL-Datenbank: Verfahrensrechner Pflanze, Energiebedarfsrechner Tierhaltung und Dieselbedarfsrechner für die Maschinenlaufzeiten und Energiebedarfskennzahlen

Ergänzend kamen je nach Untersuchung Literaturdaten, ecoinvent-Datensätze sowie Energie- und Stoffstrommodelle zum Einsatz (Wernet et al., 2016). Abhängig von der jeweiligen Systemgrenze wurden dabei neben den unmittelbar im Betrieb eingesetzten Energieträgern auch ausgewählte indirekte Energieaufwendungen, beispielsweise für Betriebsmittel und vorgelagerte Prozesse, berücksichtigt. Da sich Datengrundlage, Systemgrenze und methodischer Ansatz zwischen den einzelnen Untersuchungen unterscheiden, ist im Folgenden zwischen betrieblich dokumentierten bzw. gemessenen Verbräuchen, berechneten Energiebedarfen und modellierten Energieflüssen zu unterscheiden.

Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb

Für den Westhof wurden betriebliche Daten zu Anbauflächen, Kulturen, Arbeitsgängen und eingesetzter Landtechnik mit verschiedenen Berechnungs- und Hintergrunddaten verknüpft. Die Arbeit von Yuxuan Zhu (2023) untersuchte den Energieeinsatz des Betriebs innerhalb einer vergleichsweise breiten Systemgrenze, die neben der landwirtschaftlichen Kultivierung auch Verarbeitungsprozesse sowie ausgewählte vor- und nachgelagerte Prozesse umfasste. Hierfür wurden betriebliche Primärdaten durch KTBL-, ecoinvent- und Literaturdaten sowie bereits vorliegende Informationen zur Verarbeitung ergänzt. Die Energie- und Stoffströme wurden mit Umberto 11 modelliert und unter anderem anhand des Cumulative Energy Demand (CED) ausgewertet.

Für die detailliertere Untersuchung des fossilen Maschinenenergiebedarfs wurden in Zeyu Lan (2023) Betriebsinformationen zu den landwirtschaftlichen Arbeitsgängen mit dem KTBL-Dieselbedarfsrechner und dem KTBL-Verfahrensrechner Pflanze kombiniert. Dabei wurden unter anderem bewirtschaftete Flächen, spezifische Dieselbedarfe der jeweiligen Arbeitsverfahren sowie die energetischen Eigenschaften des Kraftstoffs berücksichtigt. Da den einzelnen Arbeitsgängen keine vollständig gemessenen Dieselverbräuche zugeordnet werden konnten, handelt es sich bei den daraus resultierenden Werten um berechnete Bedarfe. Für die zeitliche Charakterisierung des Maschinenenergiebedarfs wurde insbesondere der gut dokumentierte Betriebsdatensatz des Jahres 2022 herangezogen und mit den für die jeweiligen Kulturen angesetzten Arbeitszeiträumen verknüpft. Der grundlegende Berechnungsablauf ist in Abbildung 1 dargestellt. Ergänzend leitete Yuxuan Zhu (2023) aus monatlichen Bedarfswerten mittels Monte-Carlo-Simulation tägliche Energiebedarfsprofile ab. Diese stellen eine statistische zeitliche Modellierung und keine gemessenen täglichen Lastgänge dar.

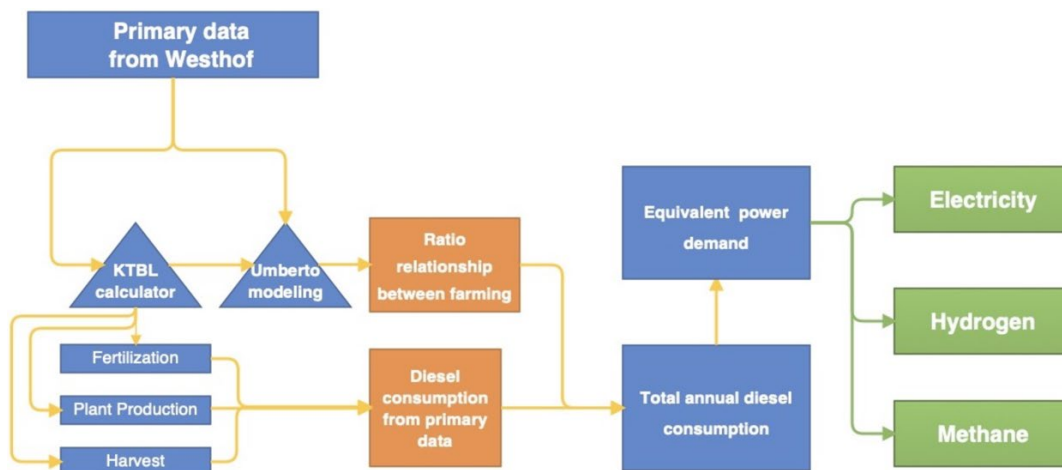


Abbildung 1: Workflow zur Dieselbedarfsberechnung (aus Zeyu Lan, 2023, Abbildung 2)

Die Arbeiten wurden durch Energie- und Exergieanalysen ausgewählter Prozesse von Xinyuan Wang (2023) ergänzt. Dabei wurden insbesondere energetisch und thermodynamisch relevante Prozesse hinsichtlich ihrer Energieumwandlung und auftretender Verluste untersucht.

***Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp –
Milchviehbetrieb***

Für Futterkamp standen betriebliche Daten zu Produktionsabläufen, Flächen, Maschinen und Energieeinsätzen aus den Jahren 2020 bis 2023 zur Verfügung. Für die elektrischen Verbraucher wurden die tatsächlichen Verbrauchsdaten einzelner Geräte und Prozesse ausgewertet. Die Datensätze enthielten teilweise zeitliche Lücken, die im Rahmen der Datenaufbereitung durch vollständige Tagesprofile sowie durch vergleichbare benachbarte Zeiträume ergänzt wurden.

Neben der Auswertung des tatsächlichen Stromverbrauchs wurde mit dem KTBL-Energiebedarfsrechner ein theoretischer Strombedarf auf Basis der betrieblichen Konfiguration unter anderem für Melksystem, Milchkühlung, Lüftung, Fütterung und Entmistung berechnet. Dieser wurde anschließend dem betrieblich erfassten Verbrauch gegenübergestellt, um den Energieeinsatz und mögliche Effizienzpotenziale einzuordnen.

Für die mobilen Feldarbeiten wurde der Dieselbedarf auf Basis betrieblicher Angaben zu Flächen, Maschinen und Arbeitsgängen mit dem KTBL-Dieselbedarfsrechner berechnet. Die Berechnung umfasst die untersuchten Arbeiten der Futterproduktion, insbesondere Düngung, Pflanzenschutz und Ernte, und stellt keinen gemessenen Gesamt-Dieserverbrauch des Betriebs dar. Die Aussaat wurde aufgrund der begrenzten Datengrundlage nicht in die Berechnung einbezogen.

Zur integrierten Darstellung der betrieblichen Energie- und Stoffströme wurde das in Qinlei Chen (2023) entwickelte Umberto-Modell herangezogen. Es bildet zentrale Prozesse von der Futterproduktion über die Fütterung bis zur Milchproduktion und -kühlung ab und wurde zur Bewertung des Energieeinsatzes, des Energiebedarfs und der Energieeffizienz verwendet. Soweit betriebliche Primärdaten nicht verfügbar waren, wurden einzelne Modellparameter durch Literatur- und Sekundärdaten ergänzt. Ergänzend wurde der Energieeinsatz auf die produzierte Menge energiekorrigierter Milch (Energy Corrected Milk, ECM) bezogen, um spezifische Energiekennzahlen für die Milchproduktion abzuleiten. Die in Abbildung 2 bis Abbildung 4 dargestellten Umberto-Modelle veranschaulichen die untersuchten Energie- und Stoffströme des Milchviehbetriebs sowie die gesonderte Betrachtung des Diesel- und Strombedarfs.

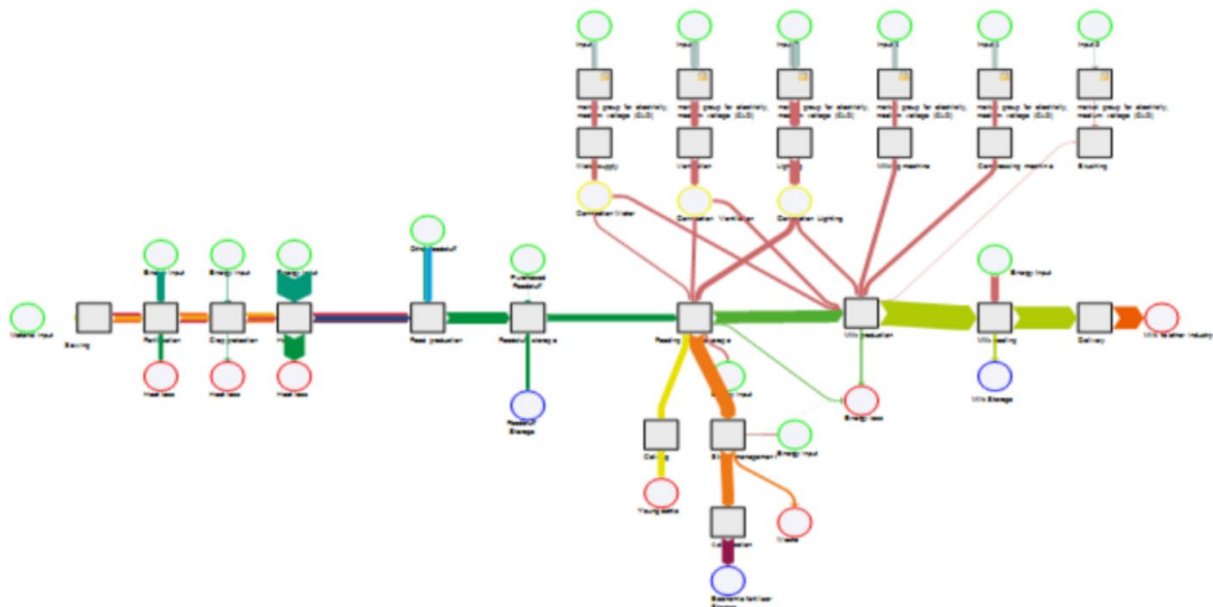


Abbildung 2: Umberto-Modell der Energiebilanz für Futterkamp (aus Qinlei Chen, 2023, Abbildung 4-5)

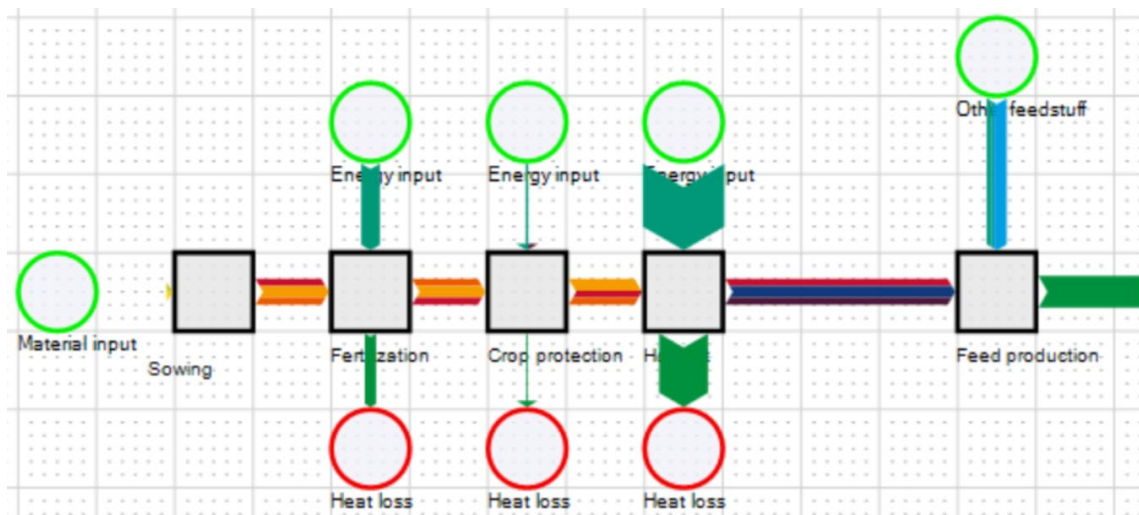


Abbildung 3: Umberto-Modell zur Analyse des Dieselverbrauchs Futterkamp (aus Qinlei Chen, 2023, Abbildung 4-6)

Die Untersuchungen in Arbeitspaket 1 basieren damit auf unterschiedlichen Datengrundlagen und methodischen Ansätzen. Neben betrieblich dokumentierten bzw. gemessenen Verbrauchsdaten wurden KTBL-Daten, ecoinvent-Datensätze, technische Literaturwerte sowie modellgestützte Berechnungen herangezogen. Für die Interpretation der nachfolgenden Ergebnisse ist daher zwischen betrieblich dokumentierten bzw. gemessenen Verbräuchen, berechneten Energiebedarfen und modellierten Energieflüssen zu unterscheiden. Tabelle 2 fasst die wesentlichen Datengrundlagen sowie die methodische Einordnung der in Arbeitspaket 1 verwendeten Ergebnisse zusammen.

Tabelle 2: Datengrundlage und methodische Einordnung der in Arbeitspaket 1 verwendeten Analyseergebnisse

Untersuchung	Datengrundlage	Ergebnisart	Einordnung
Energiebilanz Westhof	Betriebsdaten, KTBL, ecoinvent, Sekundärdaten	Bilanzierung / Modellierung	Teilweise abgeleitet; Primärdaten durch Sekundärdaten ergänzt
Dieselbedarf und Lastverteilung Westhof	Betriebsdaten zu Arbeitsgängen und Flächen, KTBL	Bedarfsrechnung / zeitliche Modellierung	Kein vollständig gemessener Jahresverbrauch; zeitliche Verteilung teilweise modelliert
Strom Futterkamp	Betriebliche Verbrauchsdaten 2020–2023, ergänzend KTBL	Verbrauchsauswertung / Bedarfsrechnung	Fehlende Verbrauchsdaten teilweise ergänzt; tatsächlicher Verbrauch und theoretischer Bedarf getrennt betrachtet
Feldarbeit Futterkamp	Betriebsdaten zu Maschinen, Flächen und Arbeitsgängen, KTBL	Dieselbedarfsberechnung	Bezieht sich auf untersuchte Futterproduktion; kein Gesamt-Dieserverbrauch des Betriebs
Energie-/Exergieanalyse	Betriebs- und Prozessdaten, ergänzend technische Literaturwerte	Energie-/Exergiemodellierung	Ergebnisse abhängig von Systemgrenzen, Datenbasis und Modellannahmen

Auf Grundlage dieser Datensätze und Modellierungsansätze wurden zunächst die Energiebilanzen der beiden Referenzbetriebe bestimmt, anschließend zentrale Energieverbraucher und zeitliche Laststrukturen identifiziert und schließlich betriebliche Effizienzpotenziale untersucht.

3.1.2 Energiebilanz und Energieverbrauch

Aufbauend auf der in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Datengrundlage wurden die Energieverbräuche und -bedarfe der beiden Referenzbetriebe bilanziert. Aufgrund der unterschiedlichen Produktionssysteme und Datengrundlagen unterscheiden sich dabei sowohl die relevanten Energieformen als auch die Systemgrenzen der zugrunde liegenden Untersuchungen. Die Ergebnisse dienen daher zunächst der quantitativen Beschreibung der betrieblichen Energieströme.

Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb

Für den Westhof wurde in Yuxuan Zhu (2023) eine Energiebilanz erstellt, die neben der landwirtschaftlichen Kultivierung auch die Verarbeitung der erzeugten Produkte sowie die betrieblichen Transportprozesse berücksichtigt. Innerhalb dieser Systemgrenze wurden direkte Energieeinsätze wie

Strom, Diesel, Benzin, Erdgas und Wärme sowie ausgewählte indirekte Energieaufwendungen bilanziert. Die Bilanzierung erfolgte auf Grundlage betrieblicher Daten sowie ergänzender KTBL-, ecoinvent 3.9- und Literaturdaten. Eine detaillierte Darstellung der Systemgrenzen, der berücksichtigten landwirtschaftlichen Prozessschritte sowie der zugehörigen Betriebs- und Energieinputs ist in Anhang A.1 – Systemgrenzen Feldfruchtbetrieb dargestellt.

Die Energiebilanz von Yuxuan Zhu betrachtet die untersuchten Kulturen als eine funktionale Einheit von 1 t verzehrfähigem Produkt und umfasst neben der Kultivierung auch die Verarbeitung und den Transport sowie ausgewählte vor- und nachgelagerte Prozesse. Innerhalb dieser Betrachtung weisen insbesondere die Verarbeitung mit rund 3.420 MJ/t und der Transport mit rund 3.450 MJ/t vergleichsweise hohe spezifische Energieaufwendungen auf.

Die Energiebilanz zeigt, dass elektrische Energie den größten Anteil am bilanzierten Energieeinsatz ausmacht. Rund 47 % entfallen auf Strom, der innerhalb der betrachteten Systemgrenze insbesondere zur Verarbeitung eingesetzt wird. Weitere rund 36 % werden Diesel bzw. Benzin für Transportprozesse zugeordnet. Diesel für die landwirtschaftliche Kultivierung trägt rund 7 % zum bilanzierten Energieeinsatz bei. Rund 6 % entfallen auf Strom und Wärme aus Biogas und Kraft-Wärme-Kopplung (combined heat and power, CHP) sowie rund 4 % auf Erdgas in der Verarbeitung. Die Verteilung des bilanzierten Energieeinsatzes nach Energieträgern und betrieblichen Anwendungen ist in Abbildung 5 dargestellt.

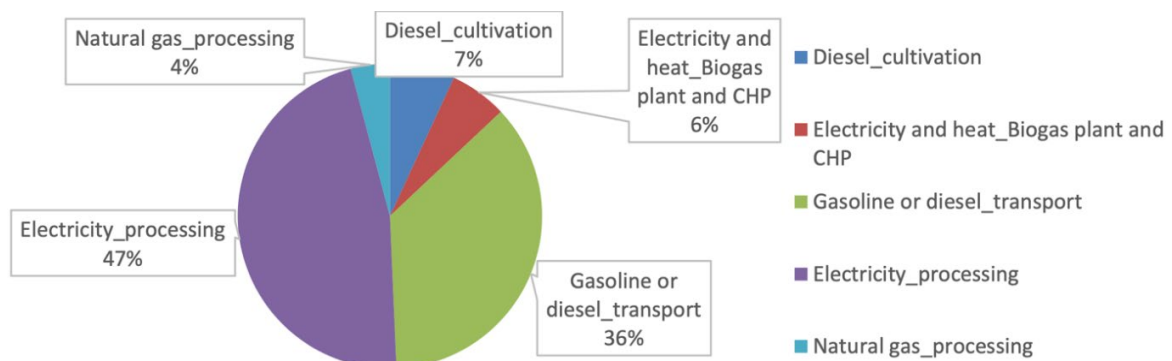


Abbildung 5: Verteilung des bilanzierten Energieeinsatzes nach Energieträgern und betrieblichen Anwendungen am Westhof (aus Yuxuan Zhu, 2023, Abbildung 17)

Die Energiebilanz verdeutlicht damit die Größenordnung und Zusammensetzung der innerhalb der untersuchten Systemgrenze auftretenden Energieflüsse. Eine weitergehende Bewertung der besonders energieintensiven Prozesse erfolgt in Abschnitt 3.1.4.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb

Die Energiebilanz des Lehr- und Versuchszentrums Futterkamp wurde in Qinlei Chen (2023) untersucht. Dabei wurden der elektrische Energiebedarf und -verbrauch der Milchviehhaltung sowie der Dieselbedarf der untersuchten Futterproduktion getrennt bestimmt. Für den Strom liegen zwei unterschiedliche Größen vor: ein mit dem KTBL-Energiebedarfsrechner ermittelter theoretischer Energiebedarf und ein aus betrieblichen Verbrauchsdaten abgeleiteter tatsächlicher Stromverbrauch.

Auf Grundlage der betrieblichen Konfiguration mit 303 Tieren ergibt die KTBL-Berechnung einen jährlichen Strombedarf von 408 kWh je Kuh bzw. insgesamt 123.718 kWh pro Jahr. Demgegenüber ergibt die Auswertung der betrieblichen Verbrauchsdaten einen jährlichen Stromverbrauch von rund 125.487 kWh. Dies entspricht 414,15 kWh je Kuh und Jahr bzw. rund 0,0394 kWh je kg ECM. Der aus den Betriebsdaten abgeleitete Stromverbrauch liegt damit um rund 1.769 kWh, bzw. um etwa 1,4 %, über dem mit KTBL berechneten Bedarf. Beide Ergebnisse liegen somit in einer ähnlichen Größenordnung, beruhen jedoch auf unterschiedlichen methodischen Ansätzen und werden im weiteren Bericht entsprechend getrennt als berechneter Energiebedarf und als betrieblicher Verbrauch ausgewiesen.

Neben dem Strombedarf wurde für die untersuchten Feldarbeiten der Futterproduktion ein jährlicher Dieselbedarf von rund 8.687 L berechnet. Die Berechnung basiert auf Betriebsdaten der Jahre 2021 und 2022 und umfasst die betrachteten Arbeiten für Grünland, Mähwiesen und Silomais. Sie bildet damit einen definierten Teil des mobilen Energiebedarfs ab und stellt keinen gemessenen Gesamt-Dieserverbrauch des Betriebs dar.

Qinlei Chen (2023) überführte die berechneten Energiemengen zusätzlich in eine gemeinsame energetische Bezugsgröße. Für den berechneten Strombedarf von 123.718 kWh/a wurden 699.007 MJ und für den berechneten Dieselbedarf von 8.686,86 L/a 353.381 MJ angesetzt. Bezogen auf die produzierte Menge Milch entspricht dies 0,216 MJ/kg ECM für Strom und 0,111 MJ/kg ECM für Diesel. Für die in dieser Untersuchung berücksichtigten direkten Energieinputs ergibt sich damit ein

Energiebedarf von insgesamt 0,327 MJ/kg ECM. Diese Kennzahl bezieht sich ausschließlich auf die in der Untersuchung bilanzierten Strom- und Dieselbedarfe.

Die Energiebilanzen der beiden Referenzbetriebe bilden damit die quantitative Ausgangsbasis für die weiteren Analysen. Während beim Westhof eine breitere Systemgrenze mit landwirtschaftlicher Produktion, Verarbeitung und Transport betrachtet wurde, konzentriert sich die Futterkamp-Analyse auf den elektrischen Energieeinsatz der Milchviehhaltung sowie auf den berechneten Dieselbedarf für ausgewählte Arbeiten der Futterproduktion. Ein unmittelbarer quantitativer Vergleich der bilanzierten Gesamtenergiemengen beider Betriebe ist aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen und Datengrundlagen nur bedingt möglich.

Die bestehende Energieversorgung der Referenzbetriebe wird im nachfolgenden Abschnitt betrachtet; die Identifikation der wesentlichen betrieblichen Energieverbraucher erfolgt anschließend in Abschnitt 3.1.4.

3.1.3 Betriebliche Energieversorgung

Neben der Höhe und Zusammensetzung des Energiebedarfs ist entscheidend, wie die benötigte Energie im bestehenden Betrieb bereitgestellt wird. Im Folgenden wird daher die Ausgangssituation der Energieversorgung beider Referenzbetriebe betrachtet. Berücksichtigt werden die eingesetzten Energieträger sowie bereits vorhandene Anlagen zur Erzeugung, Umwandlung und Speicherung erneuerbarer Energien. Die Darstellung beschränkt sich auf die bestehende betriebliche Infrastruktur; die im Projekt untersuchten zusätzlichen Versorgungs-, Speicher- und Substitutionsoptionen werden anschließend in Arbeitspaket 2 behandelt.

Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb

Die bestehende Energieversorgung des Westhofs wurde im Rahmen der Energiebilanz von Yuxuan Zhu (2023) erfasst. Sie ist durch die Kombination verschiedener erneuerbarer Energieträger sowie die Kopplung von landwirtschaftlicher Produktion, Gemüseverarbeitung und Energieerzeugung gekennzeichnet. Elektrische und thermische Energie werden unter anderem durch PV und Biogas bereitgestellt und durch weitere erneuerbare Strombezüge ergänzt. Auch der Westhof selbst beschreibt die betriebliche Energieversorgung als Kombination aus Solarenergie, Windkraft und Biogas.

Ein wesentlicher Bestandteil des betrieblichen Energiesystems ist die Biogasanlage. In dieser werden organische Reststoffe aus den landwirtschaftlichen und verarbeitenden Betriebsbereichen verwertet. Dazu gehören unter anderem Klee gras und Blühwiesenschnitt sowie nicht weiterverwertbare Reststoffe aus der Gemüseverarbeitung. Das erzeugte Biogas wird zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt. Die bei der Vergärung verbleibende Biomasse wird wiederum als Dünger auf den landwirtschaftlichen Flächen eingesetzt. Damit ist die Energieversorgung zugleich in den betrieblichen Stoffkreislauf eingebunden.

Für die energieintensive Gemüseverarbeitung wird zudem erneuerbarer Strom eingesetzt. PV-Anlagen liefern einen Teil der elektrischen Energie. Eine weitere Komponente der Energieversorgung ist die Speicherung elektrischer Energie in Form von Prozesswärme. Hierzu wird elektrische Energie in einem Hochtemperatur-Stahlspeicher in Wärme umgewandelt und zeitlich versetzt als Hochtemperaturwärme bzw. als Dampf für die Produktionsprozesse bereitgestellt (vgl. Yuxuan Zhu, 2023). Die Speicherung ermöglicht damit eine zeitliche Entkopplung zwischen der Bereitstellung elektrischer Energie und dem Wärmebedarf der Verarbeitung. Die Gesamtstruktur der betrieblichen Energie- und Stoffströme ist in Abbildung 6 dargestellt.

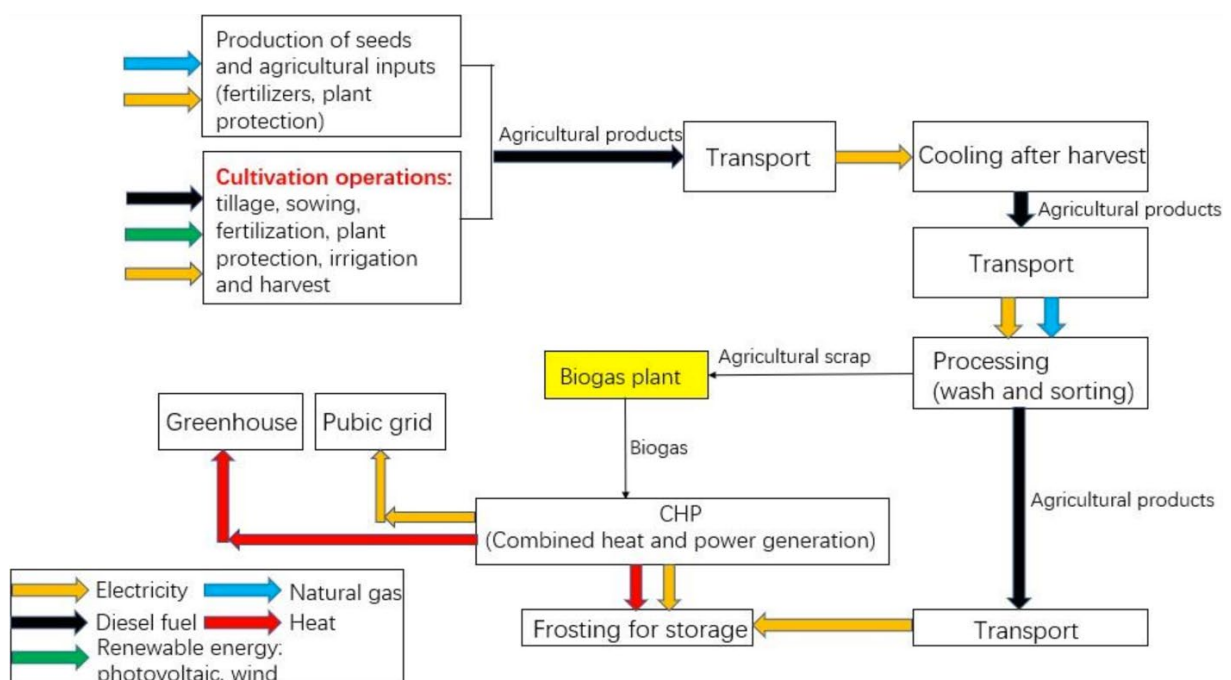


Abbildung 6: Übersicht der Energieflüsse des Westhofs (aus Yuxuan Zhu, 2023, Abbildung 3)

Die Darstellung verdeutlicht die bereits bestehende Kopplung zwischen landwirtschaftlicher Produktion, Verarbeitung und Energieversorgung. Organische Reststoffe werden energetisch verwertet, während erneuerbarer Strom und die Speicherung von Prozesswärme weitere Bestandteile des Versorgungssystems bilden. Damit verfügt der Westhof bereits über mehrere Elemente eines integrierten betrieblichen Energiesystems. Die im Projekt untersuchten Möglichkeiten zur weiteren Substitution fossiler Energieträger werden in Arbeitspaket 2 getrennt betrachtet.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb

Die bestehende Energieversorgung des Lehr- und Versuchszentrums Futterkamp wurde insbesondere in den Arbeiten von Qinlei Chen (2023) und Christopher Mund (2023) betrachtet (siehe Abbildung 7). Sie umfasst die elektrische Versorgung der stationären Prozesse der Milchviehhaltung, eine bereits vorhandene PV-Anlagen sowie den Einsatz von Dieselmotoren für mobile landwirtschaftliche Anwendungen.

Elektrische Energie wird insbesondere für die technischen Prozesse der Milchviehhaltung eingesetzt. Dazu gehören Melk- und Vakuumsysteme, Milchkühlung, elektrisch beheiztes Wasser für Reinigungsprozesse, Stalllüftung, Beleuchtung, Fütterung, Wasserversorgung sowie Pumpen und weitere Einrichtungen des Güllemanagements. Für diese Verbraucher lagen betriebliche Verbrauchsdaten vor, die von Qinlei Chen (2023) ausgewertet wurden. Welche dieser Verbraucher den Stromverbrauch besonders stark beeinflussen, wird in Abschnitt 3.1.4 betrachtet.

Neben der elektrischen Versorgung über das Stromnetz befindet sich auf einem der Betriebsgebäude eine PV-Anlage. Christopher Mund (2023) dokumentierte die vorhandene PV-Fläche in seiner Bestandsaufnahme des Betriebsgeländes und schätzte deren Größe und Ausrichtung anhand von Satellitendaten. Da keine vollständigen technischen Anlagendaten vorlagen, wurden für die anschließenden Simulationen weitere Anlagenparameter mittels Modellannahmen ergänzt. Die daraus berechneten PV-Erträge sind daher nicht als gemessene Erzeugungsdaten der bestehenden Anlage zu verstehen.



*Abbildung 7: Betriebsgelände Futterkamp mit Stallgebäuden, bestehender PV-Fläche, Güllesilo und Fahrsilo
(aus Christopher Mund, 2023, Abbildung 2)*

Für mobile landwirtschaftliche Anwendungen wird weiterhin Diesel als fossiler Energieträger eingesetzt. Qinlei Chen (2023) untersuchte diesen Energieeinsatz bei ausgewählten Feldarbeiten der betrieblichen Futterproduktion. Die Berechnung umfasst insbesondere Düngung, Pflanzenschutz sowie die Ernte von Grünland, Mähwiesen und Silomais. Die quantitative Höhe des daraus berechneten Dieselbedarfs wurde bereits in Abschnitt 3.1.2 dargestellt.

Die Ausgangssituation der beiden Referenzbetriebe unterscheidet sich damit deutlich. Beim Westhof besteht bereits eine vergleichsweise starke Kopplung zwischen der Erzeugung erneuerbarer Energien, der energetischen Nutzung betrieblicher Reststoffe, der Speicherung und der Verarbeitung. In Futterkamp stehen demgegenüber die elektrische Versorgung der stationären Prozesse der Milchviehhaltung, eine vorhandene PV-Anlage und der weiterhin fossile Energieeinsatz bei mobilen Feldarbeiten nebeneinander. Diese unterschiedlichen Versorgungsstrukturen bilden zusammen mit den in Abschnitt 3.1.2 bestimmten Energiebedarfen die Grundlage für die Identifikation der betrieblichen Energie-Hotspots sowie der anschließend in Arbeitspaket 2 untersuchten Transformationspfade.

3.1.4 Betriebliche Energie-Hotspots

Auf Grundlage der zuvor dargestellten Energiebilanzen wurden für beide Referenzbetriebe die Prozesse identifiziert, die einen besonders hohen Anteil am jeweiligen Energieeinsatz ausmachen. Die Analyse dient dazu, zentrale Ansatzpunkte für Effizienzmaßnahmen sowie zur Substitution fossiler Energieträger

zu identifizieren. Dabei werden die Energie-Hotspots innerhalb der jeweiligen Systemgrenzen betrachtet; aufgrund der unterschiedlichen Produktionssysteme und Datengrundlagen ist ein unmittelbarer quantitativer Vergleich zwischen Westhof und Futterkamp nur eingeschränkt möglich.

Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb

Die Arbeit von Yuxuan Zhu (2023) untersucht die Verteilung des Energieeinsatzes über verschiedene Prozesse der landwirtschaftlichen Kultivierung und zeigt deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Arbeitsgängen und Kulturen. Innerhalb der untersuchten Kultivierungsprozesse stellt die Bodenbearbeitung mit rund 46 % den größten Beitrag zum Energieeinsatz dar (siehe Abbildung 8). Auf die Düngung, einschließlich der in der Untersuchung berücksichtigten vorgelagerten Bereitstellung von Düngemitteln, entfallen rund 21 %, auf die Ernte weitere rund 17 %. Aussaat, Bewässerung und Pflanzenschutz weisen demgegenüber geringere Anteile auf.

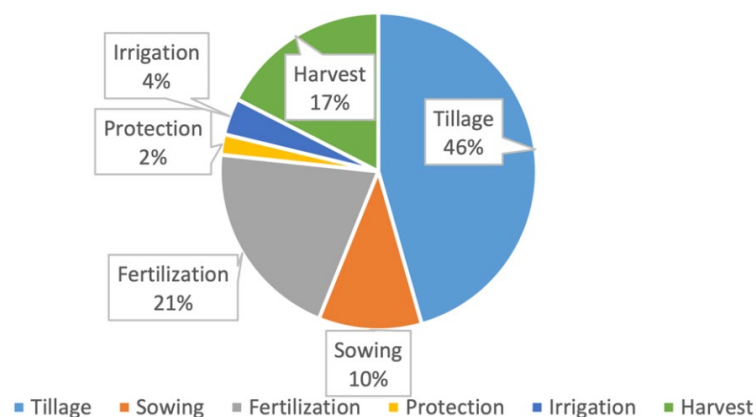


*Abbildung 8: Verteilung des Energieeinsatzes auf die Kultivierungsprozesse am Westhof
(aus Yuxuan Zhu, 2023, Abbildung 9)*

Für Erbsen wird innerhalb der untersuchten Kultivierungsprozesse ein spezifischer Energieeinsatz von rund 140 MJ/t verzeichnet. Aufgrund des vergleichsweise geringen Ertrags liegt dieser nach Zhu etwa um den Faktor zehn über den übrigen betrachteten Kulturen

Damit konzentriert sich ein wesentlicher Teil des Energieeinsatzes bei der landwirtschaftlichen Kultivierung auf die Bodenbearbeitung, Düngung und Ernte. Diese Prozesse stellen folglich zentrale Energie-Hotspots der untersuchten landwirtschaftlichen Produktion dar. Aufgrund des Einsatzes landwirtschaftlicher Maschinen ist insbesondere bei der Bodenbearbeitung und der Ernte zugleich eine Verbindung zum fossilen Dieselbedarf des Betriebs gegeben.

Die Ergebnisse unterscheiden sich zugleich zwischen den untersuchten Kulturen. Insbesondere für Erbsen weist Yuxuan Zhu (2023) aufgrund des vergleichsweise geringen Ertrags einen deutlich höheren spezifischen Energieeinsatz je Tonne Erntegut aus als für die übrigen betrachteten Kulturen. Dieser Befund verdeutlicht, dass die energetische Bewertung nicht allein vom absoluten Energieeinsatz eines Arbeitsprozesses, sondern auch vom jeweiligen Produktionsertrag abhängt.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb

Für Futterkamp identifizierte Qinlei Chen (2023) die wesentlichen Energieverbraucher sowohl innerhalb der stationären elektrischen Prozesse der Milchviehhaltung als auch innerhalb der untersuchten dieselbetriebenen Feldarbeiten der Futterproduktion.

Beim elektrischen Energieverbrauch entfallen die größten Anteile auf Beleuchtung mit rund 18 %, Milchkühlung mit rund 17 % und Lüftung mit rund 16 % (siehe Abbildung 9). Zusammen verursachen diese drei Prozessgruppen rund 51 % des ausgewerteten elektrischen Energieverbrauchs und stellen damit die zentralen elektrischen Energie-Hotspots des Betriebs dar. Weitere relevante Verbrauchsbereiche sind Milchproduktion, Wasserversorgung, Entmistung und Fütterung.

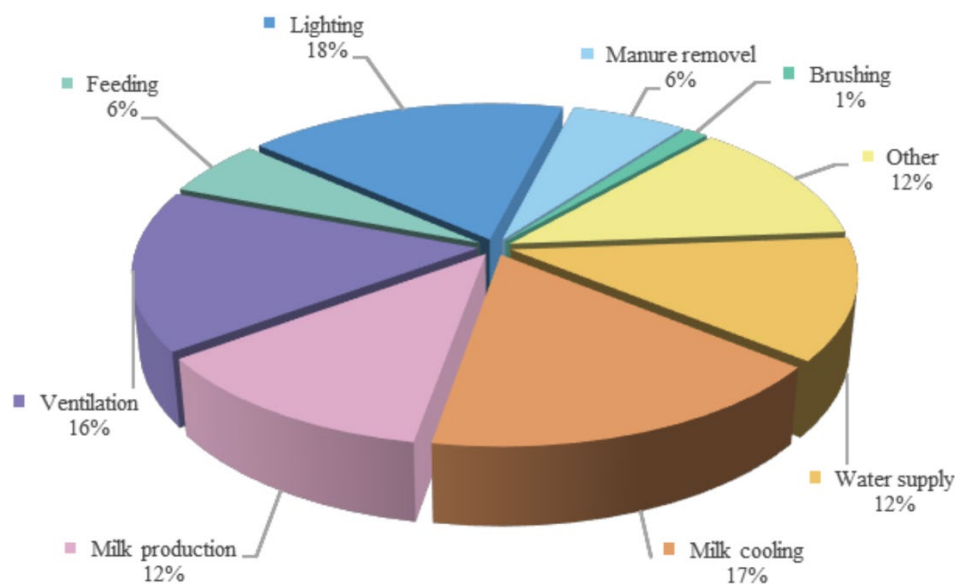


Abbildung 9: Anteile des elektrischen Energieverbrauchs nach Prozessgruppen in Futterkamp
(aus Qinlei Chen, 2023, Abbildung 4-3)

Die Zuordnung der Verbrauchsdaten zu den einzelnen Prozessgruppen ermöglicht eine weitergehende Differenzierung der elektrischen Energie-Hotspots. Tabelle 3 stellt hierzu die absoluten jährlichen Verbräuche sowie die auf Kuh und ECM bezogenen spezifischen Verbrauchswerte dar.

Tabelle 3: Elektrischer Energieverbrauch nach Prozessgruppen in Futterkamp (aus Qinlei Chen, 2023, Tabelle 11)

Prozess	kWh/a	kWh/cow-a	kWh/kg ECM-a
Beleuchtung	21.265,51	70,18	0,0067
Milchkühlung	20.584,75	67,94	0,0065
Lüftung	19.290,30	63,66	0,0061
Sonstige	14.865,19	49,06	0,0047
Milchgewinnung	14.809,70	48,88	0,0047
Wasserversorgung	14.623,83	48,26	0,0046
Entmistung	7.696,67	25,40	0,0024
Fütterung	6.821,97	22,51	0,0021
Bürsten	1.549,90	5,12	0,0005
Gesamtverbrauch	125.486,67	414,15	0,0394

Neben den stationären elektrischen Verbrauchern wurde in Qinlei Chen (2023) der Dieselbedarf der untersuchten Feldarbeiten nach Arbeitsprozessen differenziert. Dabei entfällt mit rund 77 % der mit Abstand größte Anteil auf die Ernte. Die Düngung verursacht rund 20 % und der Pflanzenschutz rund 3 % des berechneten Dieselbedarfs. Die Ernte stellt damit innerhalb der untersuchten Futterproduktion den dominierenden fossilen Energie-Hotspot dar. Die KTBL-Datenbasis differenziert den Dieselbedarf landwirtschaftlicher Produktionsverfahren ebenfalls nach einzelnen Arbeitsgängen und bildet damit die methodische Grundlage für eine solche prozessbezogene Betrachtung.

Die Hotspot-Analyse zeigt damit für Futterkamp zwei unterschiedliche Ansatzpunkte: Bei den stationären Prozessen konzentriert sich ein erheblicher Teil des Stromverbrauchs auf Beleuchtung, Milchkühlung und Lüftung, während bei den mobilen Feldarbeiten insbesondere die Ernte den Dieselbedarf bestimmt. Für die betriebliche Praxis folgt daraus, dass Effizienz- und Transformationsmaßnahmen vorrangig an den jeweils dominierenden Verbrauchsprozessen ansetzen sollten. Während beim Westhof insbesondere die energieintensiven Feldarbeiten relevant sind, liegen in Futterkamp wesentliche Ansatzpunkte sowohl bei der Futterernte als auch bei den größten elektrischen Verbrauchern der Milchviehhaltung. Die zeitliche Verteilung dieser Energiebedarfe wird im folgenden Abschnitt untersucht.

3.1.5 Lastprofile und Verbrauchsmuster

Neben der Höhe des jährlichen Energiebedarfs ist für die Entwicklung einer post-fossilen betrieblichen Energieversorgung dessen zeitliche Verteilung von zentraler Bedeutung. Insbesondere bei einer Versorgung durch fluktuierende erneuerbare Energien müssen Energieerzeugung und -bedarf zeitlich aufeinander abgestimmt bzw. durch geeignete Speichertechnologien entkoppelt werden. Für die beiden Referenzbetriebe wurden daher saisonale bzw. monatliche Verbrauchsmuster untersucht.

Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb

Für den Westhof untersuchte Zeyu Lan (2023) die zeitliche Verteilung des Energiebedarfs der landwirtschaftlichen Feldarbeiten. Hierzu wurden die Zeitpunkte der jeweiligen Arbeitsgänge mit den zugehörigen Dieselbedarfen und den bewirtschafteten Flächen verknüpft. Bei den daraus resultierenden Werten handelt es sich entsprechend der in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Datengrundlage um berechnete bzw. zeitlich zugeordnete Bedarfe und nicht um gemessene monatliche Dieselverbräuche.

Der in Abbildung 10 dargestellte Monatsverlauf zeigt eine ausgeprägte saisonale Konzentration des Maschinenenergiebedarfs. Die höchsten berechneten Dieselbedarfe treten im Juni mit rund 32.206 L und im September mit rund 28.336 L auf. Weitere erhöhte Bedarfe ergeben sich im März mit rund 17.567 L und im Oktober mit rund 12.741 L. Demgegenüber fällt für Januar und Dezember innerhalb der betrachteten Feldarbeiten kein Dieselbedarf an; im Februar liegt der berechnete Bedarf bei lediglich rund 26 L.

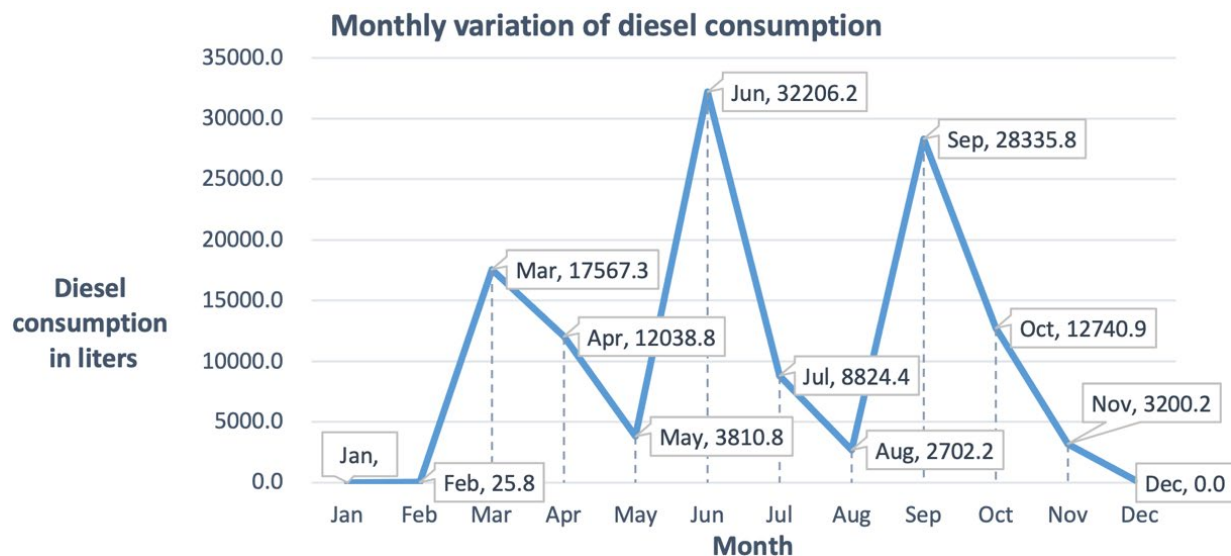


Abbildung 10: Monatliche Verteilung des berechneten Dieselbedarfs für die untersuchten Feldarbeiten am Westhof
(aus Zeyu Lan, 2023, Tabelle 3)

Abbildung 10 verdeutlicht damit eine zentrale Anforderung an die Transformation der mobilen Energieversorgung des Westhofs: Der Energiebedarf der Feldarbeiten ist nicht gleichmäßig über das Jahr verteilt, sondern konzentriert sich auf einzelne Zeiträume mit hohen Bedarfsspitzen. Eine allein auf dem Jahresenergiebedarf basierende Dimensionierung einer post-fossilen Energieversorgung würde diese zeitliche Struktur nicht ausreichend berücksichtigen. Für die in Arbeitspaket 2 untersuchten alternativen Antriebs-, Erzeugungs- und Speicheroptionen sind daher neben der insgesamt benötigten Energiemenge insbesondere die saisonalen Bedarfsspitzen relevant.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb

Für Futterkamp analysierte Qinlei Chen (2023) die zeitliche Entwicklung des elektrischen Energieverbrauchs der Milchviehhaltung sowie des Dieselbedarfs ausgewählter Feldarbeiten. Im Gegensatz zum stark saisonal geprägten Maschinenenergiebedarf des Westhofs weist die Milchviehhaltung kontinuierliche elektrische Grundlasten auf, deren Zusammensetzung sich jedoch im Jahresverlauf verändert.

Abbildung 11 stellt sowohl den monatlichen Gesamtstromverbrauch als auch die Beiträge der einzelnen betrieblichen Prozesse dar. Der Gesamtstromverbrauch erreicht dabei im Sommer seine höchsten Werte. Gleichzeitig zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Verbrauchsbereichen.

Milchproduktion, Milchkühlung und Fütterung weisen über das Jahr vergleichsweise konstante Verläufe auf, während insbesondere die Lüftung stark saisonal geprägt ist. Qinlei Chen stellt zudem einen leichten Anstieg des Energiebedarfs der Milchkühlung mit steigenden Außentemperaturen fest. Die Anteile der Stromverbraucher sind dem Anhang A.2 – Prozentualer Energiebedarf Milchviehbetrieb zu entnehmen.

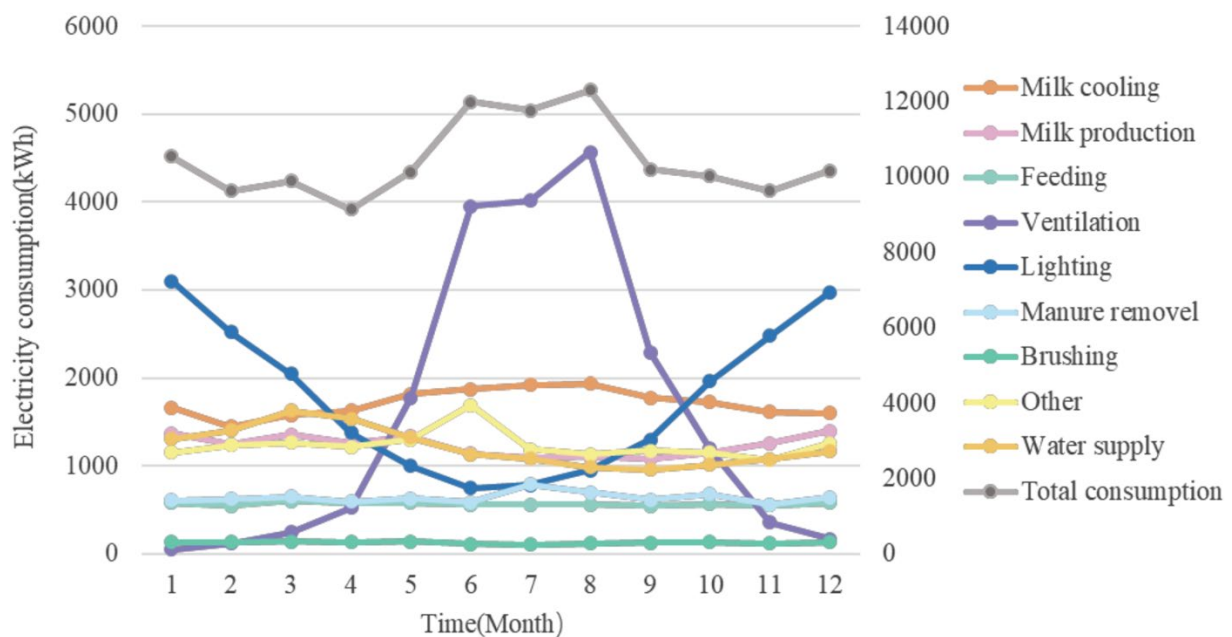


Abbildung 11: Monatlicher elektrischer Energieverbrauch nach Prozessen und Gesamtstromverbrauch in Futterkamp
(aus Qinlei Chen, 2023, Abbildung 5-1)

Die Darstellung macht deutlich, dass die saisonalen Veränderungen des Gesamtstromverbrauchs insbesondere durch temperatur- und tageslichtabhängige Verbraucher geprägt werden. Die Lüftung weist im Winter einen geringen Energieverbrauch auf und steigt im Sommer deutlich an. Nach der detaillierteren Geräteauswertung von Qinlei Chen wird die Stalllüftung im Wesentlichen zwischen März und Oktober betrieben und erreicht im August einen monatlichen Stromverbrauch von mehr als 3.700 kWh. Demgegenüber steigt der Strombedarf der Beleuchtung in den Wintermonaten aufgrund der kürzeren Tageslichtdauer an (siehe auch Anhang A.3 – Energiebedarf Beleuchtung Milchviehbetrieb).

Damit bestehen in Futterkamp einerseits relativ kontinuierliche elektrische Verbraucher, insbesondere im Zusammenhang mit der Milchproduktion, und andererseits ausgeprägt saisonale Verbraucher wie

Lüftung und Beleuchtung. Für die Auslegung einer erneuerbaren Stromversorgung ist diese Unterscheidung wesentlich: Nicht allein der jährliche Stromverbrauch, sondern die zeitliche Übereinstimmung zwischen dem betrieblichen Lastprofil und der erneuerbaren Stromerzeugung bestimmt, in welchem Umfang Strom unmittelbar genutzt werden kann und welcher Bedarf an Speicherung oder ergänzendem Netzbezug entsteht. Diese Fragestellung bildet einen unmittelbaren Anknüpfungspunkt für die in Arbeitspaket 2 untersuchten PV- und Speichersysteme.

Neben dem elektrischen Verbrauch untersuchte Qinlei Chen die saisonale Verteilung des berechneten Dieselbedarfs für Düngung und Pflanzenschutz. Da für diese Arbeitsgänge konkrete Durchführungszeitpunkte in den betrieblichen Ausgangsdaten vorlagen, konnte der entsprechende Dieselbedarf einzelnen Monaten zugeordnet werden. Abbildung 12 zeigt die daraus abgeleitete saisonale Entwicklung.

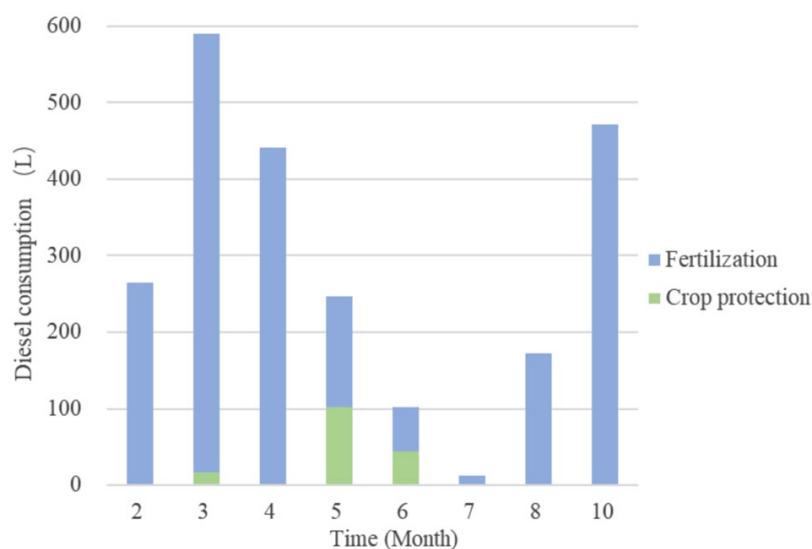


*Abbildung 12: Saisonale Verteilung des berechneten Dieselbedarfs für Düngung und Pflanzenschutz in Futterkamp
(aus Qinlei Chen, 2023, Abbildung 5-5)*

Der berechnete Dieselbedarf für Düngung und Pflanzenschutz ist ebenfalls deutlich saisonal geprägt. Für die Düngung ergeben sich erhöhte Bedarfe insbesondere im Frühjahr sowie erneut im weiteren Jahresverlauf, während der Dieselbedarf des Pflanzenschutzes im Sommer seinen Schwerpunkt erreicht. In den Wintermonaten fallen für die betrachteten Feldarbeiten keine entsprechenden Bedarfe an.

Die Darstellung bildet allerdings nicht den vollständigen zeitlichen Verlauf des in Abschnitt 3.1.2 ausgewiesenen Dieselbedarfs der Futterproduktion ab. Insbesondere die Ernte – die gemäß Abschnitt 3.1.4 mit rund 77 % den größten Anteil am berechneten Dieselbedarf verursacht – ist in Abbildung 12 nicht vollständig enthalten, da für die Ernte keine entsprechend konkreten Datumsangaben in den Primärdaten vorlagen. Qinlei Chen ordnet die Ernte deshalb anhand der fünf Schnitte bzw. des angenommenen Erntezeitpunkts des Silomaises saisonal ein. Für Grünland und Mähwiesen werden dabei höhere Dieselbedarfe für die ersten drei Schnitte als für den vierten und fünften Schnitt ausgewiesen; die Silomaisernte wird dem Herbst zugeordnet.

Insgesamt zeigen beide Referenzbetriebe, dass Jahresenergiemengen allein keine ausreichende Grundlage für die Auslegung post-fossiler landwirtschaftlicher Energiesysteme darstellen. Beim Westhof entstehen ausgeprägte saisonale Bedarfsspitzen durch die Feldarbeiten. In Futterkamp überlagern sich dagegen kontinuierliche elektrische Lasten der Milchviehhaltung mit saisonalen Stromverbräuchern sowie saisonal auftretenden mobilen Energiebedarfen der Futterproduktion. Für die in Arbeitspaket 2 untersuchten Transformationspfade folgt daraus, dass erneuerbare Energieerzeugung, Speicher und alternative Antriebssysteme nicht allein hinsichtlich ihrer jährlichen Energiebereitstellung, sondern insbesondere hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur zeitlichen Deckung dieser unterschiedlichen Laststrukturen bewertet werden müssen.

3.1.6 Energieumwandlung und Effizienzpotenziale

Neben der Identifikation energieintensiver Prozesse wurde untersucht, in welchem Umfang die eingesetzte Energie tatsächlich für die jeweiligen betrieblichen Prozesse nutzbar gemacht wird und wie technische bzw. betriebliche Parameter den Energiebedarf beeinflussen. Während für den Westhof insbesondere die Energieumwandlung bei dieselbetriebenen Feldarbeiten betrachtet wurde, wurden für Futterkamp unterschiedliche technische Konfigurationen der Milchviehhaltung hinsichtlich ihres elektrischen Energiebedarfs untersucht. Die Analysen ergänzen damit die zuvor dargestellten Energie-Hotspots um die Frage, an welchen Stellen Effizienzverbesserungen innerhalb der bestehenden Produktionssysteme möglich sind.

Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb

Xinyuan Wang (2023) untersuchte die Energieumwandlung ausgewählter Prozesse des Westhofs mittels energie- und exergiebasierter Betrachtungen. Ein Schwerpunkt lag auf der Bodenbearbeitung, die

bereits in Abschnitt 3.1.4 als wesentlicher Energie-Hotspot innerhalb der Kultivierung identifiziert wurde. Dabei wurde die Umwandlung der im Dieseldraftstoff enthaltenen Energie entlang der Prozesskette bis zur tatsächlich verrichteten Bodenbearbeitungsarbeit betrachtet.

Die in Abbildung 13 dargestellte Prozesskette zeigt, dass auf mehreren Stufen Umwandlungsverluste auftreten. Nur ein Teil der chemischen Energie des Dieseldraftstoffs wird zunächst in mechanische Energie des Traktors überführt. Weitere Verluste entstehen bei der Übertragung auf das Anbaugerät und schließlich bei der eigentlichen Bodenbearbeitung. Bezogen auf die ursprünglich eingesetzte Dieselenergie werden in der Analyse rund 0,4 % der Energie der letztlich betrachteten Bodenverlagerung zugeordnet.

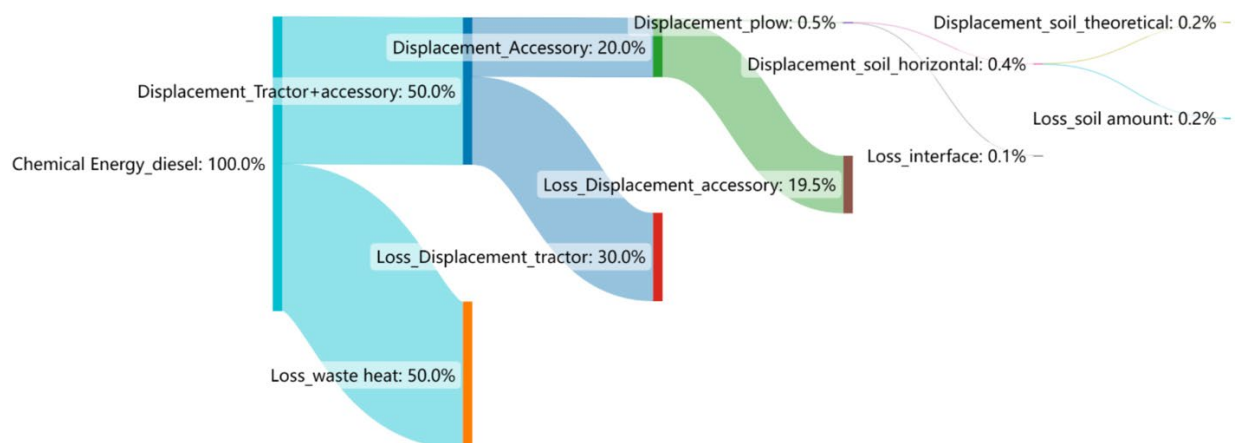


Abbildung 13: Sankey-Diagramm der Energieumwandlung bei der Bodenbearbeitung am Westhof
(aus Xinyuan Wang, 2023, Abbildung 2-6)

Der Wert von rund 0,4 % ist dabei nicht als Wirkungsgrad des Traktormotors zu interpretieren, sondern beschreibt den Nutzungsgrad der gesamten in der Untersuchung betrachteten Umwandlungskette bis zur definierten Bodenbearbeitungsarbeit. Die Analyse verdeutlicht damit, dass die energetische Bewertung landwirtschaftlicher Feldarbeiten nicht allein vom Kraftstoffverbrauch abhängt, sondern auch von den Verlusten entlang der Energieumwandlung und -übertragung. Für die weitere Transformation ergibt sich daraus grundsätzlich ein Potenzial sowohl durch effizientere Arbeitsverfahren und Maschinen als auch durch Antriebssysteme mit anderen Energieumwandlungsketten. Die Untersuchung alternativer Antriebssysteme erfolgt darauf aufbauend in Arbeitspaket 2.

Die thermodynamische Untersuchung beschränkte sich nicht auf die Bodenbearbeitung. Für die Kaltlagerung von Möhren modellierte Xinyuan Wang eine erforderliche Wärmeabfuhr von insgesamt rund 305 kW. Davon entfallen rund 190 kW bzw. 68,6 % auf produktbezogene Kühllasten, rund 69 kW auf Infiltration und technische Einrichtungen und rund 18 kW auf Wärmeübertragung durch die Gebäudehülle; zusätzlich wurde ein Sicherheitszuschlag von 10 % angesetzt. Die Werte stellen eine modellbasierte Lastabschätzung und keine gemessene Anlagenleistung dar. Die modellierten Energieflüsse der Kaltlagerung sind im Anhang A.4 – Kältebedarf Feldfruchtbetrieb dargestellt.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb

Für Futterkamp untersuchte Qinlei Chen (2023), wie unterschiedliche technische Ausgestaltungen der Milchviehhaltung den berechneten Strombedarf beeinflussen. Ausgangspunkt war die in Abschnitt 3.1.2 beschriebene Betriebskonfiguration mit einem mit dem KTBL-Energiebedarfsrechner bestimmten Bedarf von 408 kWh je Tierplatz (TP) und Jahr bzw. 123.718 kWh/a für 303 Tiere. Anschließend wurden einzelne Parameter des Produktionssystems variiert, während die übrigen Randbedingungen jeweils beibehalten wurden (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Einfluss ausgewählter Prozessparameter auf den mit KTBL berechneten Strombedarf von Futterkamp (aus Qinlei Chen, 2023, Tabelle 8)

ECM	kWh/(TP·a)	kWh/a	Abweichender Prozess	Ausprägung
10505	408	123.718	Ausgangskonfiguration	–
10505	419	127.018	Lüftung	Hohe Intensität: 850 m ³ / (TP·h)
10505	402	121.903	Fütterungssystem	Totale Mischraktion
10505	452	136.914	Melksystem	Automatisches Melksystem
10505	493	149.431	Milchkühlung	Ohne Vorkühlung
10505	424	128.499	Milchkühlung	Mit Eiswasserkühlung
10505	419	127.081	Milchkühlung	Mit Wärmerückgewinnung
10505	398	120.627	Entmistung	Spaltenboden, autom. Reinigung

Die Parameteranalyse zeigt, dass die technische Konfiguration einzelner Prozesse den berechneten Strombedarf deutlich beeinflussen kann. Gegenüber der Ausgangskonfiguration sinkt der modellierte Bedarf beispielsweise bei der angesetzten automatischen Bodenreinigung auf 398 kWh/(TP·a) und bei der untersuchten Fütterungsvariante auf 402 kWh/(TP·a). Demgegenüber steigt der Bedarf bei höherer Lüftungsintensität auf 419 kWh/(TP·a), bei Eiswasserkühlung auf 424 kWh/(TP·a) und beim

automatischen Melksystem auf 452 kWh/(TP·a). Den höchsten Wert der untersuchten technischen Varianten weist die Milchkühlung ohne Vorkühlung mit 493 kWh/(TP·a) auf.

Insbesondere die Milchkühlung erweist sich damit nicht nur aufgrund ihres in Abschnitt 3.1.4 identifizierten Verbrauchsanteils als relevant, sondern auch hinsichtlich der technischen Ausgestaltung des Systems. Die KTBL-Modellierung weist für eine Konfiguration ohne Vorkühlung einen deutlich höheren Strombedarf aus als für die Ausgangskonfiguration mit Vorkühlung. Auch die Wahl des Melk- und Lüftungssystems beeinflusst den modellierten Bedarf. Damit zeigen die Ergebnisse, dass Effizienzpotenziale nicht ausschließlich durch eine Reduzierung der Betriebszeiten einzelner Verbraucher erschlossen werden können, sondern bereits in der technischen Konfiguration der Produktionsprozesse liegen.

Die Ergebnisse der Parameteranalyse sind allerdings als modellgestützte Sensitivitätsbetrachtung und nicht als gemessene Einsparungen am Referenzbetrieb zu interpretieren. Zudem weist Qinlei Chen darauf hin, dass einzelne technische Maßnahmen nicht allein anhand ihres elektrischen Energiebedarfs bewertet werden können. So können beispielsweise Wärmerückgewinnung oder bestimmte Kühlungskonzepte trotz eines höheren Strombedarfs andere energetische oder wirtschaftliche Vorteile aufweisen. Eine abschließende Bewertung von Effizienzmaßnahmen erfordert daher die Betrachtung des jeweiligen Gesamtsystems und nicht ausschließlich des Stromverbrauchs eines einzelnen Prozesses.

Qinlei Chen ergänzte die direkten Energiebedarfe um eine literaturbasierte Abschätzung indirekter Energieinputs aus Saatgut, Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln. Für diese Kategorien wurden zusammen rund 401 GJ/a bzw. 0,126 MJ/kg ECM abgeschätzt. Mit rund 380 GJ/a dominiert dabei die Düngemittelbereitstellung.

Die Untersuchungen beider Referenzbetriebe zeigen damit unterschiedliche Ansatzpunkte zur Steigerung der betrieblichen Energieeffizienz. Beim Westhof weisen die Verluste entlang der Energieumwandlungskette dieselbetriebener Feldarbeiten auf Potenziale bei Maschinen, Antrieben und Arbeitsverfahren hin. In Futterkamp beeinflusst insbesondere die technische Ausgestaltung stationärer Prozesse wie Milchkühlung, Melken, Lüftung, Fütterung und Entmistung den elektrischen Energiebedarf. Für die betriebliche Transformation folgt daraus, dass zunächst vermeidbare Energieverluste und Effizienzpotenziale adressiert werden sollten, bevor Erzeugungs-, Speicher- und Antriebssysteme für die verbleibenden Energiebedarfe dimensioniert werden. Ein reduzierter bzw.

effizienter bereitgestellter Energiebedarf kann die erforderlichen Kapazitäten und damit den technischen Aufwand der in Arbeitspaket 2 untersuchten Transformationssysteme verringern.

3.2 Transformation der Betriebe (AP2)

Aufbauend auf den in Arbeitspaket 1 untersuchten Energiebedarfen, Energie-Hotspots und zeitlichen Verbrauchsstrukturen wurden in Arbeitspaket 2 technische Optionen für eine post-fossile Energieversorgung der Referenzbetriebe untersucht. Im Mittelpunkt standen die Substitution fossiler Energieträger, die Nutzung erneuerbarer Energie sowie die zeitliche Kopplung von Energieerzeugung, Verbrauch und Speicherung.

Hierzu wurden unterschiedliche Transformationspfade betrachtet. Diese umfassen insbesondere PV und Batteriespeicher zur elektrischen Energieversorgung, elektrische sowie wasserstoff- und methanbasierte Alternativen für mobile landwirtschaftliche Anwendungen sowie die Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energieträger. Die einzelnen Untersuchungen wurden mit unterschiedlichen Modellierungs- und Berechnungsansätzen durchgeführt und stellen daher keine einheitliche Gesamtsimulation beider Referenzbetriebe dar; es wurden hingegen ausgewählte technische Fragestellungen anhand der jeweiligen betrieblichen Ausgangssituation untersucht.

Die Ergebnisse werden im Folgenden zunächst hinsichtlich der verwendeten methodischen Ansätze eingeordnet. Anschließend werden die untersuchten Optionen zur erneuerbaren Energieversorgung und Speicherung, alternative Antriebssysteme, die Rohstoff- und Kreislaufaspekte der Wasserstoffbereitstellung sowie ergänzende betriebliche Anwendungsfälle dargestellt.

3.2.1 Methodischer Ansatz und Transformationspfade

Die Untersuchungen in Arbeitspaket 2 knüpfen an die in Arbeitspaket 1 identifizierten Energiebedarfe und betrieblichen Energie-Hotspots an. Aufgrund der unterschiedlichen Produktionssysteme und verfügbaren Datengrundlagen wurden für Westhof und Futterkamp jedoch unterschiedliche methodische Ansätze verfolgt. Die Ergebnisse sind deshalb als betriebspezifische Potenzial- und Szenarioanalysen zu verstehen und nicht als einheitlich parametrisierte Simulation einer vollständigen Energieversorgung beider Betriebe.

Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb

Für den Westhof lag der Schwerpunkt auf der Substitution des fossilen Energieeinsatzes der landwirtschaftlichen Feldarbeiten. Aufbauend auf den ermittelten bzw. modellierten Dieselbedarfen wurden unterschiedliche alternative Antriebspfade quantitativ untersucht.

Zeyu Lan (2023) berechnete zunächst einen für das Jahr 2022 abgeschätzten Dieselbedarf von rund 89.914 L für die landwirtschaftlichen Feldarbeiten. Darauf aufbauend wurde bestimmt, welche Energiemengen bei einer Substitution durch elektrische, methan- oder wasserstoffbasierte Antriebssysteme erforderlich wären. Für die untersuchten Annahmen ergeben sich unter anderem rund 411 MWh elektrische Energie, rund 48.272 m³ Methan bzw. rund 18.035 kg Wasserstoff als rechnerische Äquivalente des betrachteten Maschinenenergiebedarfs.

Die Berechnungen stellen vereinfachte Substitutionsszenarien dar. Sie beruhen auf angenommenen Wirkungsgraden und Heizwerten der jeweiligen Antriebspfade und dienen primär dazu, die Größenordnung des Energiebedarfs alternativer Energieträger abzuschätzen. Eine dynamische Simulation des vollständigen betrieblichen Energiesystems erfolgte für den Westhof nicht.

Ergänzend untersuchte Tianao Zhao (2023) Batterie-, Wasserstoff- und Methanspeicher als unterschiedliche Möglichkeiten zur Speicherung bzw. Bereitstellung erneuerbarer Energie. Diese Arbeiten erweitern die Betrachtung von der reinen Substitution des Dieselmotors um die Frage, wie erneuerbare Energie zeitlich bereitgestellt und für mobile bzw. stationäre Anwendungen verfügbar gemacht werden kann.

Damit wurden für den Westhof insbesondere drei grundlegende Transformationspfade betrachtet:

1. direkte Elektrifizierung landwirtschaftlicher Maschinen,
2. Bereitstellung von Wasserstoff für brennstoffzellenbasierte Antriebe,
3. Bereitstellung von Methan bzw. Biomethan für verbrennungsmotorische Antriebssysteme.

Die entsprechenden technischen Potenziale und Randbedingungen werden in Abschnitt 3.2.3 vertieft.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb

Für Futterkamp wurde die Untersuchung um eine dynamische Energiesystemssimulation erweitert. Christopher Mund (2023) entwickelte hierzu in Polysun unterschiedliche Systemkonfigurationen aus PV-Erzeugung, elektrischen Verbrauchern, Batteriespeichern und einer optionalen Wasserstoffproduktion.

Für die Simulation standen keine ausreichend hochaufgelösten betrieblichen Lastdaten zur Verfügung. Daher wurde das in Polysun hinterlegte standardisierte Verbraucherprofil „Landwirtschaft 2“ eingesetzt. Das ursprüngliche Profil mit einem Jahresverbrauch von 1.000.000 kWh wurde für das Ausgangsszenario auf einen angenommenen Jahresverbrauch von 20.000 kWh skaliert. Das standardisierte Profil weist zwei tägliche Lastspitzen auf und variiert im Jahresverlauf, bildet jedoch keinen gemessenen Lastgang des Referenzbetriebs Futterkamp ab.

Abbildung 14 veranschaulicht damit die zeitliche Struktur des in der Simulation verwendeten Verbraucherprofils. Die dargestellten Lastspitzen dienen der dynamischen Modellierung von Verbrauch, PV-Erzeugung und Speicherbetrieb.

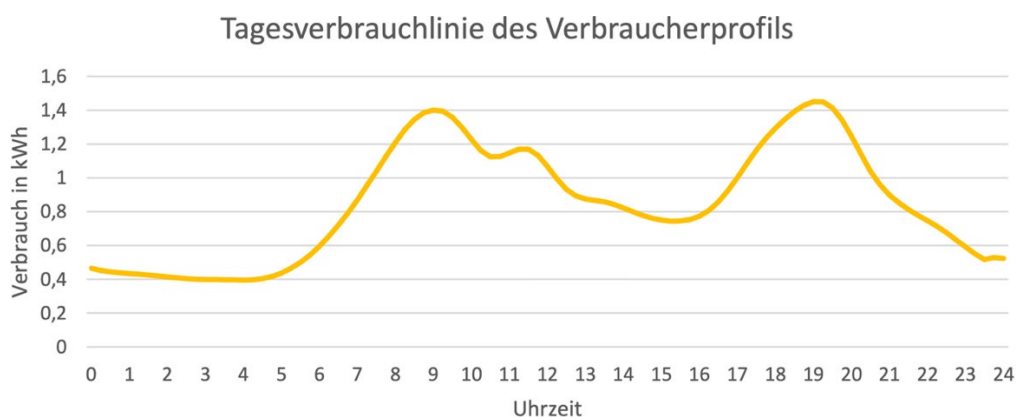


*Abbildung 14: Standardisiertes tägliches Verbraucherprofil „Landwirtschaft 2“ als Grundlage der Polysun-Simulation
(aus Christopher Mund, 2023, Abbildung 4)*

Neben dem Ausgangssystem variierte Christopher Mund insbesondere die PV-Fläche, den Jahresstromverbrauch sowie die Ausgestaltung der Batteriespeicher. Für die Batteriespeicher wurden unterschiedliche Kapazitätsklassen betrachtet, darunter Systeme im Bereich von etwa 60 kWh, 200 kWh

und 400 kWh. Zusätzlich wurden Systeme mit einer oder zwei Batterien sowie unterschiedliche Kopplungs- und Steuerungsstrategien untersucht.

Für die Untersuchung der Sensitivität wurden unter anderem Systeme mit vergrößerter bzw. verkleinerter PV-Fläche sowie höheren und niedrigeren Stromverbräuchen simuliert. Das Ausgangssystem verwendet eine angesetzte PV-Fläche von rund 792 m² und einen Verbraucher mit 20.000 kWh/a; Vergleichsszenarien variieren diese Größen auf etwa 1.583 bzw. 396 m² PV-Fläche sowie 40.000 bzw. 7.500 kWh/a Stromverbrauch.

Zusätzlich wurde untersucht, in welchem Umfang überschüssiger PV-Strom für die Produktion von Wasserstoff genutzt werden könnte. Hierzu wurde in Polysun ein vereinfachtes Wasserstoffspeichermodell hinterlegt. Christopher Mund setzt für die Elektrolyse einen Wirkungsgrad von 60 % an; der erzeugte Wasserstoff wird in dieser Modellierung zunächst als gespeicherte Energiemenge betrachtet.

Die Polysun-Untersuchungen stellen somit eine dynamische Szenarioanalyse der zeitlichen Wechselwirkungen zwischen erneuerbarer Stromerzeugung, elektrischem Verbrauch, Batteriespeicherung, Netzbezug und Wasserstoffproduktion dar. Aufgrund des standardisierten und skalierten Lastprofils sowie weiterer technischer Annahmen sind die Ergebnisse als Potenzialanalyse von Futterkamp zu interpretieren.

Methodische Einordnung

Die Arbeiten in AP2 umfassen damit unterschiedliche, sich ergänzende Betrachtungsebenen. Für den Westhof stehen quantitative Substitutionsrechnungen und die Bewertung alternativer Energieträger und Speicheroptionen im Vordergrund. Für Futterkamp ergänzt eine dynamische Polysun-Modellierung diese Analysen um die zeitliche Kopplung von PV-Erzeugung, elektrischem Verbrauch, Batteriespeichern und Wasserstoffproduktion. Weitere Arbeiten untersuchen die technischen Randbedingungen alternativer Antriebssysteme sowie die Bereitstellung von Wasserstoff und die damit verbundenen Rohstoffanforderungen.

Die einzelnen Untersuchungen bilden insgesamt einen modellbasierten Proof-of-Concept für unterschiedliche Bausteine einer post-fossilen betrieblichen Energieversorgung. Die nachfolgenden

Abschnitte führen diese Bausteine nach Energieversorgung und Speicherung, alternativen Antrieben sowie weiteren technologischen und ökologischen Randbedingungen zusammen.

3.2.2 Erneuerbare Energieversorgung und Speicherung

Die Substitution fossiler Energieträger setzt nicht nur die Bereitstellung ausreichender Mengen erneuerbarer Energie voraus, sondern auch deren zeitliche Anpassung an die betrieblichen Lasten. Im Projekt wurden deshalb Optionen zur erneuerbaren Strom- und Wärmebereitstellung sowie zur kurz- und längerfristigen Speicherung untersucht. Die Arbeiten umfassen insbesondere Biogas, PV und Batteriespeicher sowie wasserstoff- und methanbasierte Speicherpfade.

Biogaspotenziale

Für den Westhof untersuchte Xinyuan Wang (2023) das Potenzial zur Bereitstellung von Strom und Wärme aus Biogas. Grundlage waren verschiedene im Betrieb bzw. im betrachteten System verfügbare Substratströme, darunter pflanzliche Reststoffe und Silagen sowie Gülle. Die ermittelten Stoff- und Energieflüsse sind in Abbildung 15 dargestellt.

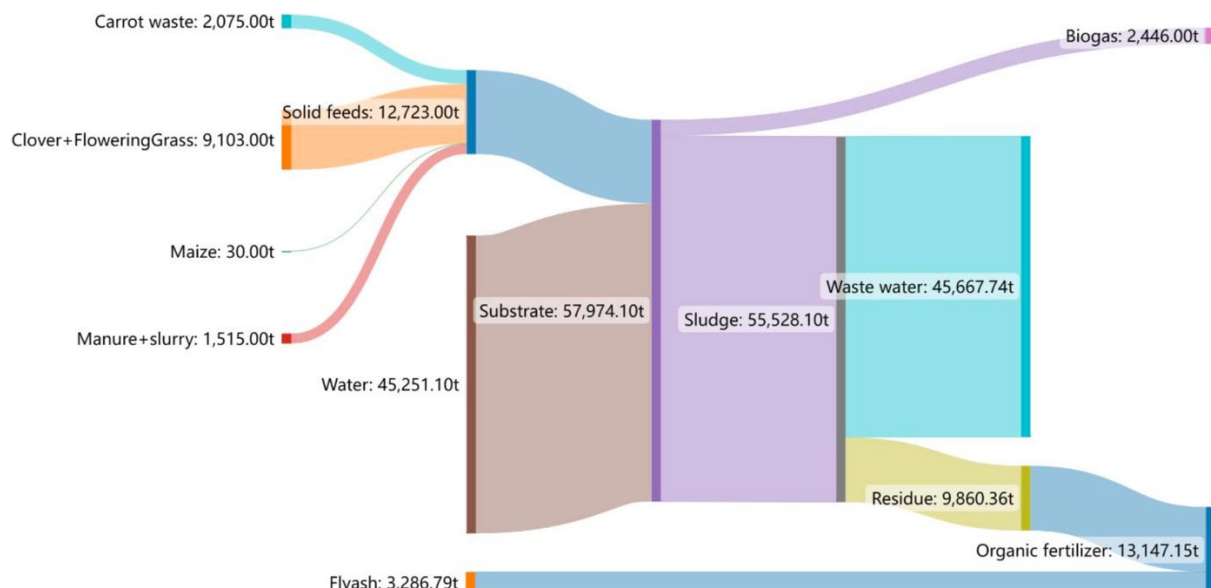


Abbildung 15: Sankey-Diagramm der Biogasproduktion am Westhof (aus Xinyuan Wang, 2023, Abbildung 2-10)

Innerhalb der verwendeten Systemgrenze wurde ein theoretisches jährliches Stromerzeugungspotenzial von rund 5,60 GWh und ein Wärmeerzeugungspotenzial von rund 3,92 GWh bestimmt. Dem wurden jährliche Bedarfe von rund 2,37 GWh Strom und 2,28 GWh Wärme gegenübergestellt.

Rechnerisch entspricht das geschätzte Biogasangebot damit rund 236 % des angesetzten Strombedarfs und 172 % des Wärmebedarfs.

Diese Gegenüberstellung stellt jedoch eine Jahresenergiebilanz dar. Aus dem bilanziellen Überschuss lässt sich weder eine jederzeitige Deckung des Energiebedarfs noch eine freie Verfügbarkeit der überschüssigen Energie für weitere Anwendungen ableiten. Wang weist zudem darauf hin, dass ein Teil der betrachteten Gülle als externer Input zu bewerten ist und dass die Betriebsweise der vorhandenen Kraft-Wärme-Kopplung durch mehrere betriebliche Anforderungen beeinflusst wird. Dazu zählen insbesondere der Wärme- und CO₂-Bedarf des Gewächshauses sowie Anforderungen der Netzstützung.

Die Untersuchung zeigt damit vor allem, dass Biogas innerhalb des Westhof-Energiesystems ein relevantes steuerbares erneuerbares Energiepotenzial darstellt. Für eine weitergehende Integration in eine post-fossile Energieversorgung ist jedoch die zeitliche Abstimmung von Substratverfügbarkeit, Biogasproduktion, Blockheizkraftwerk-(BHKW-)Betrieb und Strom- bzw. Wärmebedarf entscheidend.

Für Futterkamp führte Xinyuan Wang ergänzend eine vereinfachte Abschätzung des Biogaspotenzials aus den vorhandenen Tierbeständen durch. Dabei weist der Kuhmist ein wesentlich höheres Energiepotenzial auf als der Schweinemist. Unter den verwendeten idealisierten Annahmen entspricht der betrachtete jährliche Strombedarf von rund 125 MWh etwa 78 % des aus Kuhmist abgeschätzten Stromerzeugungspotenzials. Allerdings kann die stark wasserhaltige Flüssigfraktion der Gülle das tatsächlich nutzbare Biogaspotenzial reduzieren. Xinyuan Wang weist deshalb darauf hin, dass gegebenenfalls zusätzliche organische Substrate erforderlich wären.

Photovoltaik und Batteriespeicher in Futterkamp

Christopher Mund (2023) untersuchte für Futterkamp unterschiedliche Kombinationen aus PV, elektrischem Verbrauch und Batteriespeichern in Polysun. Das als „System Normal“ bezeichnete Ausgangssystem basiert auf einer abgeschätzten PV-Fläche von rund 791,6 m². In den Simulationen wurden sowohl die PV-Fläche und der angenommene Stromverbrauch als auch unterschiedliche Batteriespeicher variiert.

Die untersuchten Batteriesysteme wurden unter anderem in Größenklassen von etwa 60 kWh, 200 kWh und 400 kWh eingeteilt. Zusätzlich wurden Ein- und Zwei-Batteriesysteme sowie unterschiedliche Kopplungs- und Steuerungskonzepte betrachtet. Die Simulationen zeigen, dass nicht allein die

nominale Speicherkapazität, sondern auch Entladeleistung, Steuerungsstrategie und Zusammenspiel mit der PV-Erzeugung den Netzbezug und den erreichbaren Autarkiegrad bestimmen. Christopher Mund weist beispielsweise darauf hin, dass selbst bei ausreichender Kapazität Netzstrom benötigt werden kann, wenn die Batterie die auftretende Leistungsspitze nicht bereitstellen kann.

Die Batteriespeicher übernehmen dabei insbesondere eine kurzfristige zeitliche Verschiebung von PV-Erzeugung und Stromverbrauch. Überschüssiger Solarstrom kann tagsüber gespeichert und zu späteren Zeitpunkten, insbesondere außerhalb der PV-Erzeugungszeiten, genutzt werden. Die Simulationen zeigen zugleich, dass unterschiedliche Systemkonfigurationen zu deutlich unterschiedlichen Autarkiegraden führen. Einzelne Systeme erreichen hohe Werte von über 90 %, teilweise bis nahe 99 %. Eine detaillierte Übersicht der simulierten Batteriesysteme und wesentlichen Jahreskennwerte ist im Anhang A.5 – Batterieparameter dargestellt.

Für die Projektfragestellung ist damit weniger ein einzelner maximaler Autarkiewert entscheidend als die grundsätzliche Erkenntnis, dass die zeitliche Kopplung von erneuerbarer Stromerzeugung und Verbrauch einen wesentlichen Einfluss auf die benötigte Speichergröße und den verbleibenden Netzbezug hat.

Vergleich unterschiedlicher Speicher- und Energieträgerpfade

Tianao Zhao (2023) betrachtete ergänzend Batterie-, Wasserstoff- und Methanpfade und ordnete deren potenzielle Funktion innerhalb landwirtschaftlicher Energiesysteme ein. Die betrachteten Optionen unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich ihrer zeitlichen Speicherfunktion und der möglichen Endanwendungen (siehe Tabelle 5).

Die Gegenüberstellung verdeutlicht unterschiedliche systemische Rollen. Batteriespeicher eignen sich insbesondere zur kurzfristigen Verschiebung elektrischer Energie. Wasserstoff erweitert die Speicherdauer und ermöglicht grundsätzlich die Kopplung erneuerbarer Stromerzeugung mit mobilen Anwendungen, ist jedoch mit zusätzlichen Umwandlungsschritten und Infrastruktur verbunden. Methan bzw. Biogas bietet ebenfalls eine speicherbare Energieform und kann dort besonders relevant sein, wo geeignete organische Stoffströme und entsprechende Erzeugungs- und Nutzungsinfrastrukturen vorhanden sind.

*Tabelle 5: Vergleich der im Projekt untersuchten Speicher- und Energieträgeroptionen
(eigene Darstellung nach Tianao Zhao, 2023)*

Technologie	Funktion im betrieblichen Energiesystem	Typische zeitliche bzw. betriebliche Funktion	Wesentliche Randbedingungen
Batteriespeicher	Speicherung erneuerbar erzeugten Stroms	Kurzfristige Lastverschiebung und Versorgung elektrischer Verbraucher	Kapazität, Leistung, Wirkungsgrad, Lebensdauer, Kosten
Wasserstoff	Speicherbarer Energieträger aus erneuerbarem Strom	Längerfristige Speicherung und potenzielle Versorgung mobiler Anwendungen	Elektrolyse, Speichertechnik, Infrastruktur, Sicherheit, Umwandlungsverluste
Methan/Biogas	Speicherbarer gasförmiger Kraft- und Energieträger	Flexible stationäre und mobile Nutzung; potenzielle betriebliche Erzeugung aus organischen Stoffströmen	Substratverfügbarkeit, Erzeugung/Aufbereitung, Speicherung und Betankung

Photovoltaiküberschüsse und Wasserstoffproduktion

Als weitere Speicheroption untersuchte Christopher Mund (2023), in welchem Umfang überschüssiger PV-Strom zur Wasserstoffproduktion eingesetzt werden könnte. Die simulierte Wasserstoffproduktion weist dabei einen deutlich saisonalen Verlauf auf. In den Sommermonaten steigt die verfügbare Überschussenergie stark an, während sie im Winter deutlich geringer ausfällt (siehe Abbildung 16).

Für das betrachtete Normalsystem wurde eine theoretische jährliche Wasserstoffenergie von rund 135,5 MWh ausgewiesen. Wird anschließend der von Mund angesetzte Brennstoffzellenwirkungsgrad von 60 % berücksichtigt, verbleiben rechnerisch rund 81,3 MWh nutzbare Energie. Damit liegt die Jahresenergiemenge in einer ähnlichen Größenordnung wie der in der Untersuchung abgeschätzte mechanische Energiebedarf der betrachteten dieselbetriebenen Feldarbeiten.

Entscheidend ist jedoch auch hier die zeitliche Dimension. Die Wasserstoffproduktion konzentriert sich auf Monate mit hoher PV-Erzeugung, während der Maschinenenergiebedarf durch die landwirtschaftlichen Arbeitsgänge bestimmt wird. Eine bilanzielle Deckung des Jahresenergiebedarfs bedeutet daher nicht automatisch, dass die Energie zu den benötigten Zeitpunkten zur Verfügung steht. Christopher Mund weist entsprechend darauf hin, dass für eine belastbarere Bewertung zeitlich aufgelöste Daten des Dieselbedarfs erforderlich sind.

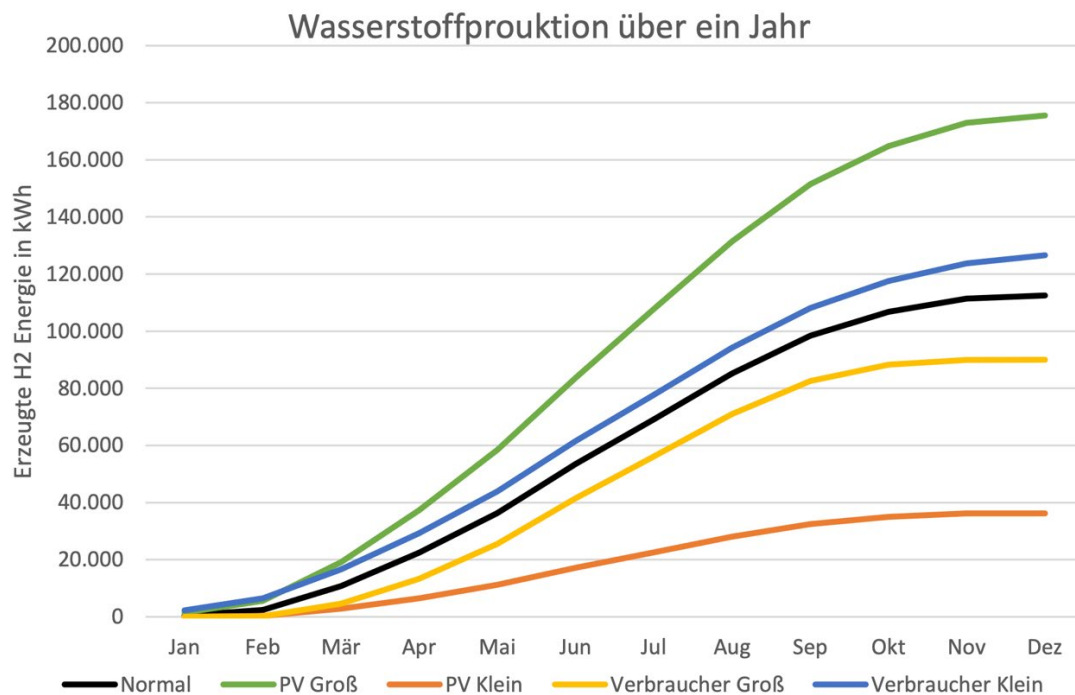


Abbildung 16: Monatlicher Verlauf der simulierten Wasserstoffproduktion für unterschiedliche PV- und Verbrauchsszenarien in Futterkamp (aus Christopher Mund, 2023, Abbildung 14)

Die Sensitivitätsanalysen verdeutlichen zudem den starken Einfluss der verfügbaren PV-Leistung. Bei einer Halbierung der PV-Fläche geht die simulierte Wasserstoffproduktion erheblich zurück; Christopher Mund weist beispielsweise für das Szenario „PV-Klein“ deutlich niedrigere jährliche Wasserstoffenergiemengen aus und zeigt zugleich einen ausgeprägten Produktionsschwerpunkt im Sommer.

Vereinfachte Abschätzung von Batteriespeicherbedarfen

Tianao Zhao (2023) führte zusätzlich vereinfachte Speicherrechnungen durch. Diese sind von der dynamischen Polysun-Simulation von Christopher Mund zu unterscheiden. Für den durchschnittlichen stationären Stromverbrauch Futterkamps von 9.378 kWh pro Monat ergibt Tianao Zhao bei angenommener Speichereffizienz von 80 % für Blei-Säure-Batterien einen rechnerischen Speicherbedarf von rund 11.723 kWh und bei 88 % für Lithium-Ionen-Batterien rund 10.657 kWh. Für die rechnerische Substitution des untersuchten Dieselbedarfs setzt Tianao Zhao eine elektrische Jahresenergiemenge von rund 107,6 MWh an. Bei gleichmäßiger Monatsverteilung ergeben sich daraus rechnerisch rund 11,21 MWh für ein Blei-Säure-System bzw. 10,19 MWh für ein Lithium-Ionen-System.

Diese Werte resultieren aus einer vereinfachten Division des durchschnittlichen Monatsverbrauchs durch einen angenommenen Wirkungsgrad, vernachlässigen aber die tatsächliche zeitliche Erzeugung und Last, Lade- und Entladeleistungen sowie die Häufigkeit der Speicherzyklen. Die Berechnung dient daher primär der Größenordnungseinordnung und ist nicht mit den dynamisch ermittelten Speicherkapazitäten der Polysun-Simulation gleichzusetzen.

Innerhalb des von Tianao Zhao vorgenommenen Technologievergleichs werden Lithium-Ionen-Batterien aufgrund ihrer angenommenen höheren Effizienz, Lebensdauer und wirtschaftlichen Eigenschaften günstiger eingeordnet als Blei-Säure-Systeme.

Einordnung für die betriebliche Transformation

Die Untersuchungen zeigen, dass für eine post-fossile Energieversorgung keine einzelne Speichertechnologie alle betrieblichen Anforderungen gleichermaßen abdeckt. Batteriespeicher können insbesondere kurzfristige Unterschiede zwischen Stromerzeugung und -verbrauch ausgleichen. Biogas bzw. Methan bietet eine steuerbare und speicherbare Energieform, sofern geeignete Substrate und Infrastruktur vorhanden sind. Wasserstoff kann größere zeitliche Verschiebungen und mobile Anwendungen ermöglichen, erfordert jedoch zusätzliche Umwandlungs-, Speicher- und Bereitstellungsschritte.

Für die betriebliche Planung folgt daraus, dass Erzeugungs- und Speicherkapazitäten nicht allein auf Grundlage aggregierter Jahresenergiemengen dimensioniert werden sollten. Erforderlich ist vielmehr eine zeitlich aufgelöste Betrachtung von Energiebedarf und erneuerbarer Erzeugung unter Berücksichtigung der jeweiligen Endanwendung. Über die betriebliche Lastverschiebung hinaus besitzen Speichertechnologien grundsätzlich auch Bedeutung für die Kopplung landwirtschaftlicher Energiesysteme mit übergeordneten Energieversorgungsstrukturen. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für die im folgenden Abschnitt betrachteten alternativen Antriebssysteme.

3.2.3 Alternative Antriebssysteme und Kraftstoffe

Ein wesentlicher Ansatzpunkt für die Substitution fossiler Energieträger liegt bei den mobilen landwirtschaftlichen Anwendungen, die in beiden Referenzbetrieben weiterhin wesentlich auf Dieselkraftstoff angewiesen sind. Im Projekt wurden daher batterieelektrische sowie methan- und wasserstoffbasierte Antriebspfade untersucht. Die Arbeiten dienten zunächst der Abschätzung der für

eine Substitution erforderlichen Energiemengen und anschließend der Einordnung technischer und betrieblicher Randbedingungen der jeweiligen Antriebssysteme.

Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb

Zeyu Lan (2023) überführte den für die landwirtschaftlichen Feldarbeiten des Westhofs abgeschätzten Dieselbedarf des Jahres 2022 in äquivalente Energiebedarfe für unterschiedliche alternative Antriebspfade. Hierzu wurde zunächst die mechanisch nutzbare Energie des Dieselantriebs abgeschätzt und anschließend anhand angenommener Wirkungsgrade und Heizwerte der Bedarf für elektrische, methan- und wasserstoffbasierte Antriebssysteme bestimmt (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Berechneter Energiebedarf alternativer Antriebspfade für die landwirtschaftlichen Feldarbeiten des Westhofs (nach Zeyu Lan, 2023)

Substitutionspfad	Bedarfseinheit	Berechneter Wert	Quelle
Batterieelektrischer Traktorbetrieb	kWh Strom	411.207	Lan Zeyu, 2023, Kapitel 3.5
Methanbasierter Traktorbetrieb	m ³ Methan	48.272	Lan Zeyu, 2023, Kapitel 3.6
Wasserstoffbasierter Traktorbetrieb	kg Wasserstoff	18.035	Lan Zeyu, 2023, Kapitel 3.7

Die Werte sind als energetische Äquivalentrechnungen und nicht als gemessene Bedarfe real eingesetzter alternativer Traktoren zu interpretieren. Zeyu Lan setzt für den elektrischen Antrieb beispielsweise einen Wirkungsgrad von 75 % an, während die Methan- und Wasserstoffpfade auf jeweils eigenen Annahmen zu Umwandlungswirkungsgraden und Heizwerten beruhen.

Andere im Projekt durchgeführte Arbeiten kommen unter abweichenden Modellannahmen zu teilweise anderen Größenordnungen. Tianao Zhao (2023) ermittelt bei einem angenommenen Wirkungsgrad des Elektromotors von 93 % einen Strombedarf von rund 297,8 MWh für die Substitution des betrachteten Westhof-Dieselbedarfs. Hongjun Zhu (2023) verwendet für die weitere Auslegung von Elektrolysesystemen einen Wasserstoffbedarf von 16.066 kg/a. Diese Unterschiede verdeutlichen, dass die absoluten Substitutionsbedarfe wesentlich von den zugrunde gelegten Systemgrenzen, Wirkungsgraden und technischen Annahmen abhängen. Für die Bewertung der Transformationspfade sind daher weniger einzelne exakte Bedarfswerte als vielmehr deren Größenordnung und die damit verbundenen Anforderungen an Energieerzeugung, Speicherung und Infrastruktur entscheidend.

Für den methanbasierten Pfad besteht am Westhof ein zusätzlicher betrieblicher Bezug zur vorhandenen Biogaserzeugung. Wie in Abschnitt 3.2.2 dargestellt, weist die Untersuchung von Xinyuan Wang (2023) innerhalb ihrer Systemgrenze ein erhebliches rechnerisches Biogaspotenzial aus. Daraus folgt grundsätzlich die Möglichkeit, einen gasförmigen Energieträger aus betrieblichen organischen Stoffströmen bereitzustellen. Nicht untersucht wurde jedoch abschließend, welcher Anteil dieses Potenzials nach Deckung der bestehenden Strom- und Wärmebedarfe tatsächlich für mobile Anwendungen verfügbar wäre. Eine direkte Gleichsetzung des ausgewiesenen Biogaspotenzials mit verfügbarem Traktorkraftstoff wäre daher nicht gerechtfertigt.

Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb

Für Futterkamp untersuchte Zaorui Chen (2023) die Substitution des berechneten Dieselbedarfs der Futterproduktion durch elektrische, methan- und wasserstoffbasierte Antriebssysteme. Ausgangspunkt war ein mittlerer fossiler Energieeinsatz von rund 336 GJ bzw. etwa 7,38 t Diesel für die untersuchten Feldarbeiten der Jahre 2021 und 2022. Daraus wurden unter vereinfachten Annahmen äquivalente Bedarfe für alternative Energieträger abgeleitet.

Die Untersuchung ist insbesondere hinsichtlich der betrieblichen Einsatzbedingungen relevant. Für den batterieelektrischen Pfad wird beispielhaft ein Traktor mit 100-kWh-Batterie betrachtet. Zaorui Chen nimmt an, dass diese Batterie vollständig entladen und zweimal täglich genutzt bzw. geladen wird. Damit wird deutlich, dass nicht nur der Jahresenergiebedarf, sondern auch Batteriekapazität, mögliche Betriebsdauer und verfügbare Ladefenster die praktische Nutzbarkeit bestimmen.

Für methanbasierte Antriebe besteht der Vorteil in einem speicherbaren Kraftstoff und einer im Vergleich zu batterieelektrischen Systemen prinzipiell einfacheren Entkopplung von Energieerzeugung und Einsatzzeitpunkt. Gleichzeitig sind jedoch Gasaufbereitung, Speicherung, Betankung und geeignete Maschinen erforderlich. Bei wasserstoffbasierten Antrieben kommen zusätzlich die Bereitstellung durch Elektrolyse sowie Anforderungen an Speicherung und Betankung hinzu. Die Arbeiten zu Wasserstoff wurden deshalb im Projekt durch gesonderte Untersuchungen zur Auslegung von Elektrolyseuren und zum Rohstoffbedarf ergänzt.

Die Ergebnisse von Zaorui Chen sind ebenfalls als vereinfachte Potenzialrechnung zu verstehen. Die Arbeit verwendet Literaturwerte und exemplarische Maschinenkonfigurationen und bildet keinen praktisch erprobten Austausch des vorhandenen Maschinenparks ab. Dies gilt insbesondere für die wasserstoffbasierte Variante, für die zum Untersuchungszeitpunkt nur eine begrenzte Datengrundlage zu landwirtschaftlichen Serienmaschinen vorlag.

Vergleich untersuchter Antriebspfade

Die untersuchten Alternativen unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Energieumwandlung als auch hinsichtlich der betrieblichen Infrastruktur und zeitlichen Flexibilität. Tabelle 7 fasst die wesentlichen im Projekt identifizierten Eigenschaften zusammen.

*Tabelle 7: Vergleich der im Projekt untersuchten alternativen Antriebspfade für landwirtschaftliche Maschinen
(eigene Synthese nach Zeyu Lan, 2023; Tianao Zhao, 2023; Zaorui Chen, 2023)*

Antriebspfad	Wesentlicher Vorteil	Zentrale betriebliche Restriktion
Batterieelektrisch	Direkte Nutzung erneuerbaren Stroms und vergleichsweise geringe Umwandlungsverluste	Batteriekapazität, Ladeleistung und -zeiten sowie Verfügbarkeit geeigneter Maschinen
Methanbasiert	Speicherbarer Kraftstoff; potenzielle betriebliche Bereitstellung aus Biogas	Aufbereitung, Speicherung und Betankungsinfrastruktur sowie Verfügbarkeit geeigneter Maschinen
Wasserstoffbasiert	Speicherbarer Energieträger mit Potenzial für mobile Anwendungen	Elektrolyse, Speicherung und Betankung sowie zusätzliche Umwandlungsverluste und begrenzte praktische Datengrundlage

Die Untersuchungen sprechen grundsätzlich für einen energetischen Vorteil der direkten Elektrifizierung, da zwischen erneuerbarer Stromerzeugung und elektrischem Antrieb weniger Umwandlungsschritte erforderlich sind als bei der Bereitstellung von Wasserstoff oder Methan. Daraus folgt jedoch nicht automatisch, dass batterieelektrische Antriebe für alle landwirtschaftlichen Anwendungen die betrieblich geeignetste Lösung darstellen. Gerade bei langen Einsatzzeiten, hohen Leistungsanforderungen und saisonal konzentrierten Feldarbeiten können Speichergröße, Ladeleistung und Maschinenverfügbarkeit die praktische Einsatzfähigkeit begrenzen.

Methan und Wasserstoff bieten demgegenüber die Möglichkeit, Energie in Form eines speicherbaren Kraftstoffs zeitlich von ihrer Erzeugung zu entkoppeln. Dafür entstehen zusätzliche Anforderungen an

Erzeugungs-, Umwandlungs-, Speicher- und Betankungsinfrastruktur. Welcher Pfad für einen konkreten Betrieb geeignet ist, hängt daher neben dem Jahresenergiebedarf insbesondere von Leistungsanforderungen, Einsatzdauer und -zeitpunkt, vorhandener Infrastruktur sowie der betrieblichen Verfügbarkeit erneuerbarer Energie ab.

Für FARMfuture ergibt sich damit kein einzelner universell überlegener Antriebspfad. Die Ergebnisse zeigen vielmehr, dass die Substitution des Dieselkraftstoffs als integrierte Systemfrage betrachtet werden muss, bei der Maschinen, Energieerzeugung, Speicher und betriebliche Lastprofile gemeinsam berücksichtigt werden. Die in den Projektarbeiten berechneten Energieäquivalente bilden hierfür eine erste quantitative Grundlage, stellen jedoch noch keinen Nachweis der praktischen technischen oder wirtschaftlichen Umsetzbarkeit dar.

3.2.4 Rohstoffbedarf und Kreislauffähigkeit der Wasserstoffbereitstellung

Wasserstoff wurde im Projekt neben der direkten Nutzung erneuerbaren Stroms als speicherbarer Energieträger und als mögliche Option zur Substitution fossiler Kraftstoffe untersucht. Die hierfür erforderliche Elektrolyse erweitert das betriebliche Energiesystem jedoch um zusätzliche technische Komponenten und damit verbundene Materialbedarfe. Hongjun Zhu (2023) untersuchte daher für beide Referenzbetriebe unterschiedliche Elektrolysetechnologien hinsichtlich ihrer Dimensionierung und des Bedarfs an potenziell kritischen Rohstoffen. Duanqi Huang (2023) ergänzte diese Betrachtung um Möglichkeiten zur Rückgewinnung und Kreislaufführung der eingesetzten Materialien.

Dimensionierung der Elektrolysesysteme

Ausgehend von den in den Projektarbeiten angesetzten Wasserstoffbedarfen untersuchte Hongjun Zhu (2023) alkalische Elektrolyse, Proton-Exchange-Membrane-Elektrolyse (PEM) und Hochtemperaturelektrolyse mittels Solid Oxide Electrolysis Cells (SOEC). Für den Westhof ergibt sich bei den jeweils angesetzten spezifischen Energiebedarfen eine erforderliche Elektrolyseleistung von rund 345,6 kW für die alkalische Elektrolyse, 361,8 kW für PEM und 243,0 kW für SOEC. Für Futterkamp liegen die entsprechenden Werte bei 47,9 kW, 50,2 kW und 33,7 kW.

Der geringere elektrische Leistungsbedarf der SOEC resultiert aus dem in der Arbeit angenommenen geringeren spezifischen Strombedarf der Hochtemperaturelektrolyse. Ein Teil der für die Wasserspaltung erforderlichen Energie kann hierbei thermisch bereitgestellt werden. Dadurch ergeben

sich grundsätzlich Möglichkeiten zur Kopplung mit vorhandenen Wärmeströmen. Gleichzeitig weist Hongjun Zhu darauf hin, dass SOEC zum Untersuchungszeitpunkt hinsichtlich verfügbarer Systemgrößen und Technologiereife gegenüber alkalischer und PEM-Elektrolyse eingeschränkt war. Während alkalische und PEM-Systeme bereits in größeren Leistungsklassen verfügbar waren, war die für den Westhof berechnete SOEC-Leistung von rund 243 kW nach der zugrunde gelegten Datengrundlage nicht mit einem einzelnen kommerziellen System abbildbar.

Neben der Nennleistung ist für die Kopplung mit fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung auch das Betriebsverhalten der Elektrolyseure relevant. Hongjun Zhu hebt insbesondere Mindestlast, Teillastfähigkeit und Kaltstartverhalten hervor. PEM-Systeme weisen in der verwendeten Datengrundlage den breitesten Lastbereich und vergleichsweise kurze Kaltstartzeiten auf und können daher bei schwankender Strombereitstellung Vorteile bieten.

Rohstoffbedarf der untersuchten Elektrolysepfade

Die drei Technologien unterscheiden sich deutlich hinsichtlich der für die Elektrolyseure benötigten Materialien. Auf Basis technologiespezifischer Materialintensitäten leitete Hongjun Zhu die in Tabelle 8 dargestellten Rohstoffbedarfe für die beiden Referenzbetriebe ab.

Tabelle 8: Elektrolyseleistung und daraus abgeleiteter Bedarf relevanter Rohstoffe für die untersuchten Wasserstoffversorgungspfade von Westhof und Futterkamp (nach Hongjun Zhu, 2023)

Referenzbetrieb	Elektrolysetechnologie	Erforderliche Elektrolyseleistung	Ermittelte relevante Rohstoffbedarfe
Westhof	Alkalische Elektrolyse	345,6 kW	Nickel: 145,2 kg
Westhof	PEM-Elektrolyse	361,8 kW	Platin: 119,4 g; Iridium: 361,8 g; Titan: 149,8 kg
Westhof	SOEC	243,0 kW	Nickel: 9,4 kg; Zirkonium: 9,7 kg; Yttrium: 1,26 kg; Scandium: 2,43 kg
Futterkamp	Alkalische Elektrolyse	47,9 kW	Nickel: 20,1 kg
Futterkamp	PEM-Elektrolyse	50,2 kW	Platin: 16,6 g; Iridium: 50,2 g; Titan: 20,8 kg
Futterkamp	SOEC	33,7 kW	Nickel: 1,30 kg; Zirkonium: 1,35 kg; Yttrium: 175,2 g; Scandium: 337 g

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die untersuchten Wasserstoffbereitstellungspfade nicht nur hinsichtlich des Energieeinsatzes und der Dimensionierung unterscheiden, sondern jeweils spezifische Rohstoffabhängigkeiten erzeugen. Bei der alkalischen Elektrolyse dominiert in der betrachteten

Materialauswahl Nickel. PEM-Systeme weisen insbesondere Bedarfe an Platin, Iridium und Titan auf, während bei SOEC neben Nickel und Zirkonium insbesondere Yttrium und Scandium relevant sind.

Die Transformation von fossilen zu wasserstoffbasierten Energiesystemen verschiebt damit einen Teil der Abhängigkeiten von fossilen Energieträgern hin zu technologiespezifischen Materialien und Komponenten. Die Bewertung eines Wasserstoffpfads sollte deshalb neben Energiebedarf und technischer Betriebsweise auch die Rohstoffverfügbarkeit und mögliche Materialkreisläufe berücksichtigen.

Vergleichende Rohstoffkritikalität

Zur vergleichenden Einordnung der Materialbedarfe entwickelte Hongjun Zhu (2023) einen sogenannten „Criticality Value“. In diesen Indikator fließen unter anderem Versorgungssicherheit, wirtschaftliche Bedeutung, Importabhängigkeit, End-of-Life-Recyclinganteile und wirtschaftliche Instabilität ein.

Unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Instabilität ergeben sich für den Westhof Criticality Values von rund 21.162 für die alkalische Elektrolyse, 20.256 für PEM und 30.038 für SOEC. Für Futterkamp liegen die entsprechenden Werte bei rund 2.933, 2.811 und 4.165. Innerhalb dieser Bewertungsmethodik weist die SOEC damit für beide Referenzbetriebe den höchsten Wert auf.

Hongjun Zhu führt dies insbesondere auf den Beitrag von Yttrium und Scandium zurück. Zugleich zeigt die Analyse, dass bei PEM trotz der hohen Bedeutung von Platin und Iridium innerhalb des verwendeten Indikators Titan den größten Beitrag zum Criticality Value liefert. Bei der alkalischen Elektrolyse ist der vergleichsweise hohe Nickelbedarf von Bedeutung.

Der Criticality Value ist jedoch ausdrücklich als vergleichender Indikator innerhalb der Arbeit und nicht als allgemein etablierte Kritikalitätskennzahl zu verstehen. Hongjun Zhu weist darauf hin, dass die theoretische Fundierung und Datengrundlage des Indikators begrenzt sind, dass einzelne Eingangsdaten teilweise auf Annahmen beruhen und dass sich Materialintensitäten zwischen verschiedenen Literaturquellen erheblich unterscheiden können. Eine Bewertung der Rohstoffkritikalität erfordert daher ergänzend eine qualitative Betrachtung.

Hongjun Zhu untersuchte darüber hinaus vier Kombinationen verschiedener Elektrolyseverfahren hinsichtlich ihres Materialbedarfs und ihrer Rohstoffkritikalität. Betrachtet wurden insbesondere

Kombinationen aus alkalischer und PEM-Elektrolyse sowie Konfigurationen mit zusätzlichen SOEC-Anteilen. Für den Westhof liegen die berechneten Criticality Values dieser kombinierten Systeme zwischen rund 20.709 und 22.571, für Futterkamp zwischen rund 2.869 und 3.142. Innerhalb des verwendeten Bewertungsansatzes kann insbesondere die Kombination von alkalischer und PEM-Elektrolyse zur Diversifizierung der Rohstoffabhängigkeiten beitragen, da sich die jeweils dominierenden Materialbedarfe unterscheiden. Mit zunehmendem SOEC-Anteil steigt dagegen der errechnete Criticality Value, insbesondere aufgrund der berücksichtigten Yttrium- und Scandiumbedarfe. Die Materialbedarfe der vier untersuchten Elektrolysekonfigurationen sind für Westhof und Futterkamp im Anhang A.6 – Materialbedarf Elektrolyseure dargestellt.

Kreislauffähigkeit und Recycling von Elektrolysesystemen

Duanqi Huang (2023) erweiterte die Betrachtung um das Lebensende der Elektrolysesysteme und untersuchte anhand einer Literaturschau Möglichkeiten zur Rückgewinnung und Wiederverwendung der eingesetzten Materialien. Für PEM-Systeme ist insbesondere die Rückgewinnung der eingesetzten Edelmetallkatalysatoren relevant. Duanqi Huang verweist dabei auf Platin und insbesondere Iridium, dessen begrenzte globale Bereitstellung bei einem starken Ausbau der PEM-Elektrolyse zu einem relevanten Engpass werden kann. Ein in der Arbeit betrachteter Recyclingpfad umfasst die getrennte Rückgewinnung und Wiederverwendung der Protonenaustauschmembran sowie von Platin und Iridium; der zugehörige Prozessablauf ist im Anhang A.7 – Materialrückgewinnung Elektrolyseure dargestellt.

Für SOEC-Systeme bestehen aufgrund ihres keramischen und metallischen Aufbaus andere Recyclinganforderungen. Untersuchte Ansätze umfassen zunächst die mechanische Zerlegung und Trennung der Stack-Komponenten und anschließend die Aufbereitung einzelner Metall- und Keramikfraktionen. In der von Duanqi Huang ausgewerteten Literatur werden beispielsweise Nickeloxid (NiO) und yttriumstabilisiertes Zirkoniumoxid (YSZ) getrennt zurückgewonnen. Für einen untersuchten Prozess werden Rückgewinnungsraten von mehr als 92 % für die NiO- und YSZ-Materialien berichtet.

Duanqi Huang ordnet Recycling insgesamt als wichtigen Ansatz zur Verringerung des Primärrohstoffbedarfs von Elektrolysesystemen ein. Die Rückgewinnung von Metallen, Katalysatoren und keramischen Komponenten kann potenziell dazu beitragen, Materialkreisläufe zu schließen und die Abhängigkeit von neu gewonnenen Rohstoffen zu reduzieren. Gleichzeitig bestehen weiterhin

Forschungsbedarfe hinsichtlich Materialtrennung, Rückgewinnungsraten, Wiederverwendung der gewonnenen Materialien sowie der energetischen und ökologischen Bewertung der Recyclingprozesse.

Einordnung für FARMfuture

Die Arbeiten von Hongjun Zhu und Duanqi Huang erweitern die in den vorherigen Abschnitten betrachtete energetische Perspektive um die Ressourcen- und Kreislaufdimension. Eine wasserstoffbasierte Substitution fossiler Kraftstoffe erfordert nicht nur erneuerbaren Strom, Elektrolyse-, Speicher- und Betankungsinfrastruktur, sondern auch zusätzliche Materialien, deren Verfügbarkeit und Rückgewinnung bei einer umfassenden Bewertung berücksichtigt werden sollten.

Für die betriebliche Transformation folgt daraus, dass ein technisch geeigneter Wasserstoffpfad nicht allein anhand von Wirkungsgrad und Wasserstoffbedarf bewertet werden kann. Die Wahl der Elektrolysetechnologie beeinflusst sowohl den Energiebedarf und das Betriebsverhalten als auch Art und Umfang der erforderlichen Rohstoffe. Recycling und Materialrückgewinnung können diese Rohstoffabhängigkeiten langfristig verringern, ersetzen jedoch nicht die Notwendigkeit einer integrierten Bewertung von Energie-, Material- und Infrastrukturbedarf.

3.2.5 Übertragbarkeit: Wärmeversorgung Wolmenau

Ergänzend zu den Untersuchungen der Referenzbetriebe Westhof und Futterkamp wurde in einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit ein zusätzlicher landwirtschaftlicher Anwendungsfall betrachtet. Marie Diers (2024) untersuchte für den Versuchsbetrieb Wolmenau die Möglichkeit, den Wärmebedarf eines Abferkelstalls mithilfe einer Sole/Wasser-Wärmepumpe bereitzustellen. Hierzu wurde die Wärmeversorgung in Polysun modelliert und sowohl hinsichtlich der zeitlichen Bedarfsdeckung als auch hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit gegenüber der bestehenden elektrischen Wärmeversorgung untersucht. Die Arbeit erweitert die in FARMfuture betrachteten Transformationsoptionen damit um die Elektrifizierung der betrieblichen Wärmebereitstellung in der Schweinehaltung.

Der modellierte Wärmebedarf basiert auf 20 Abferkelbuchten mit einer Gesamtfläche der Ferkelnester von weniger als 26 m². Für die Simulation wurde Vollbelegung angenommen. Im Winter wird die Fußbodenheizung für zwei Wochen mit 100 % und anschließend für vier Wochen mit 50 % angesetzt; im Sommer wird eine einwöchige Volllastphase zugrunde gelegt.

Die Simulation basiert auf dem Wärmebedarf der Ferkelnester und bildet sechs Heizperioden im Jahresverlauf ab. Sie zeigt, dass die untersuchte Wärmepumpenkonfiguration den Wärmebedarf grundsätzlich weitgehend bereitstellen kann, allerdings zeitlich begrenzte Deckungsdefizite auftreten. Zu Beginn jeder Heizperiode erreicht das simulierte Energiedefizit kurzfristig rund 2,5 kW für etwa vier Stunden und sinkt anschließend auf rund 0,4 kW (siehe Abbildung 17). Während der längeren Heizperioden im Januar und November reduziert sich der Fehlbedarf nach etwa zwei Wochen weiter auf rund 0,05 kW.

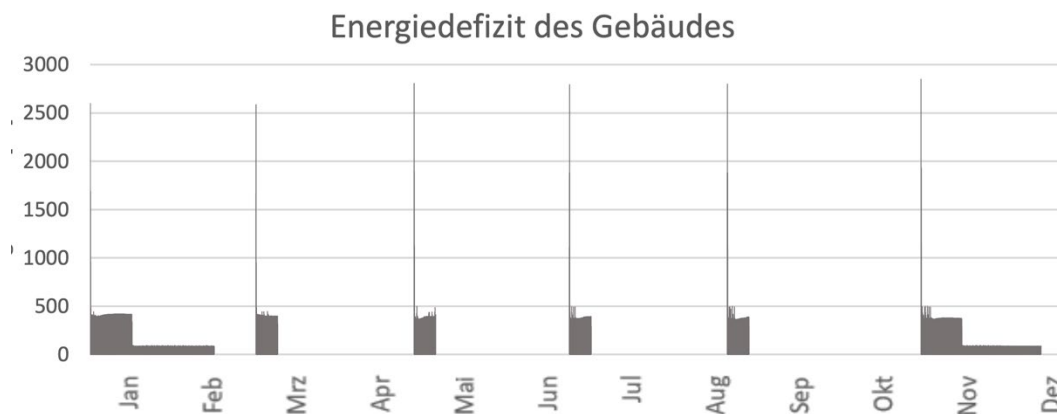


Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf des simulierten Energiedefizits der Wärmeversorgung am Versuchsbetrieb Wulmenau (aus Marie Diers, 2024, Abbildung 15)

Die Ergebnisse verdeutlichen damit ein bereits bei den Referenzbetrieben identifiziertes Grundprinzip: Für die Auslegung post-fossiler Energiesysteme reicht eine Betrachtung der jährlichen Energiemenge allein nicht aus. Auch bei der Wärmeversorgung bestimmen kurzfristige Lastspitzen und deren zeitliche Lage, ob ein System den betrieblichen Bedarf vollständig decken kann. Für Wulmenau betrifft dies insbesondere den Beginn der Heizperioden. Marie Diers bewertet die verbleibenden Energiedefizite im Verhältnis zum gesamten Wärmebedarf als gering und nennt eine ergänzende Wärmebereitstellung, beispielsweise durch Infrarotstrahler, als mögliche Option zur Absicherung dieser Spitzen.

Ergänzend wurde die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpenversorgung gegenüber der bestehenden elektrischen Wärmebereitstellung abgeschätzt. Für die beiden auf den Wärmebedarf Wulmenaus bezogenen Szenarien ergeben sich Amortisationszeiten von 21,28 bzw. 22,40 Jahren. In einem weiteren Szenario mit verdoppeltem Wärmebedarf reduziert sich die berechnete Amortisationszeit auf 11,20 Jahre. Die drei berechneten Amortisationszeiten liegen damit unterhalb der in der Arbeit

angesetzten durchschnittlichen Lebensdauer der Sole/Wasser-Wärmepumpe von 27 Jahren; für Erdsonde und Fußbodenheizung werden noch längere Lebensdauern angenommen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist als orientierende Szenarioanalyse einzuordnen. Marie Diers verwendet durchschnittliche Kostenansätze; die Berechnung soll ausdrücklich eine Größenordnung dafür liefern, unter welchen Bedingungen sich die Installation einer Wärmepumpe gegenüber einer direkten elektrischen Wärmeversorgung wirtschaftlich darstellen kann. Die Ergebnisse zeigen dabei eine deutliche Abhängigkeit von der Auslastung: Mit zunehmendem Wärme- bzw. Strombedarf der konventionellen Vergleichsversorgung verkürzt sich die berechnete Amortisationszeit der Wärmepumpe.

Der Anwendungsfall Wulmenau zeigt damit, dass die in FARMfuture verfolgte Betrachtung von Energiebedarf, zeitlicher Laststruktur und technischer Versorgung auch auf die Wärmebereitstellung in weiteren landwirtschaftlichen Produktionssystemen übertragen werden kann. Gleichzeitig verdeutlicht die Untersuchung, dass technische Deckung und wirtschaftliche Eignung betriebsspezifisch bewertet werden müssen. Insbesondere Lastprofil, erforderliches Temperaturniveau, vorhandene Wärmeverteilung, Investitionsbedarf und Auslastung beeinflussen die Eignung eines Wärmepumpensystems.

3.2.6 Umweltauswirkungen und THG-Minderungspotenziale

Die in FARMfuture untersuchten Transformationspfade ermöglichen insbesondere eine Verringerung der direkten energiebedingten THG-Emissionen durch die Substitution fossiler Kraftstoffe und die Nutzung erneuerbar erzeugten Stroms. Da im Projekt keine vollständige vergleichende Lebenszyklusbewertung der Transformationspfade durchgeführt wurde, können keine abschließenden betrieblichen THG-Minderungsraten angegeben werden. Aus den ermittelten Energiebedarfen lassen sich jedoch konkrete Größenordnungen der unmittelbar adressierbaren verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen ableiten.

Der größte unmittelbar quantifizierbare Hebel liegt in der Substitution des Dieseldieselkraftstoffs landwirtschaftlicher Maschinen. Für die untersuchten Feldarbeiten des Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetriebs wurde für das Jahr 2022 ein Dieselbedarf von 89.914,1 L ermittelt. Zeyu Lan (2023) setzt hierfür eine Dieseldichte von 0,8445 kg/L und einen unteren Heizwert von 42 MJ/kg an. Daraus ergibt sich ein chemischer Energieinhalt des eingesetzten Diesels von rund

3,19 TJ/a. Unter Anwendung des vom Umweltbundesamt (UBA) für Dieselkraftstoff angegebenen energiebezogenen CO₂-Emissionsfaktors von rund 74,0 t CO₂/TJ ergeben sich daraus rund 236 t direkte CO₂-Emissionen pro Jahr. Das UBA verwendet diesen Faktor zur Berechnung der verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen fossiler Dieselkraftstoffe (Juhrich, 2016).

Da im Projekt alternative Antriebspfade für die vollständige energetische Substitution dieses Dieselbedarfs untersucht wurden, stellen diese rund 236 t CO₂/a die Größenordnung der unmittelbar adressierbaren verbrennungsbedingten Emissionen der betrachteten Feldarbeiten dar. Die tatsächliche Netto-THG-Minderung fällt abhängig vom gewählten Transformationspfad geringer aus, sobald die Bereitstellung von Strom, Wasserstoff oder Methan sowie die Herstellung und Nutzung der zusätzlich erforderlichen Infrastruktur berücksichtigt werden.

Für das Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb wurde für die untersuchte Futterproduktion ein Dieselbedarf von 8.686,86 L/a ermittelt. Qinlei Chen (2023) verwendet hierfür einen Energieinhalt von 40,68 MJ/L und berechnet einen jährlichen Dieselenergieeinsatz von 353.381,46 MJ bzw. rund 0,353 TJ. Unter Anwendung des UBA-Emissionsfaktors von 74,0 t CO₂/TJ entspricht dies rund 26,2 t direkten CO₂-Emissionen pro Jahr.

Davon entfallen rund 77 % des Dieserverbrauchs auf Erntearbeiten. Für die hierfür eingesetzten 6.724,1 L Diesel ergibt sich bei demselben in Qinlei Chen verwendeten Energieinhalt ein fossiler Energieeinsatz von rund 0,274 TJ/a und damit eine Größenordnung von rund 20,2 t CO₂/a. Die Ernte stellt somit nicht nur den größten Dieserverbraucher der betrachteten Futterproduktion dar, sondern auch den dominierenden Ansatzpunkt zur Verringerung der damit verbundenen direkten CO₂-Emissionen (Qinlei Chen, 2023).

Über beide Referenzbetriebe ergeben sich innerhalb der jeweils untersuchten Systemgrenzen damit rund 262 t direkte CO₂-Emissionen pro Jahr, die mit dem betrachteten Dieselenergieeinsatz verbunden sind. Dieser Wert beschreibt die Größenordnung der verbrennungsbedingten CO₂-Emissionen, die durch die in FARMfuture untersuchten alternativen Antriebskonzepte prinzipiell adressiert werden können.

Ein weiterer THG-Minderungspfad liegt in der erneuerbaren Strombereitstellung. In den Polysun-Simulationen für Futterkamp durchgeführt von Christopher Mund (2023) wird für PV-Konfigurationen mit einer jährliche Wechselstromproduktion von rund 250 MWh eine modellierte CO₂-Einsparung von

rund 134 t CO₂/a ausgewiesen. Dieser Wert ist als simulationsinterne Umweltkennzahl einzuordnen. Christopher Mund dokumentiert zudem, dass einzelne Vergleichssysteme mit einem PV-Ertrag von rund 250,1 MWh berechnet wurden, während das System „Normal“ einen simulierten Ertrag von 229,8 MWh aufweist. Die Ergebnisse zeigen dennoch, dass neben der Substitution fossiler Kraftstoffe auch die erneuerbare Bereitstellung elektrischer Energie einen relevanten Beitrag zur Verringerung energiebedingter CO₂-Emissionen leisten kann.

Die ökologische Bewertung könnte sich jedoch verändern, sobald die vorgelagerten Anforderungen der Transformationssysteme berücksichtigt werden. Dies wird insbesondere beim Wasserstoffpfad sichtbar. Während die Nutzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle keine direkten CO₂-Emissionen am Fahrzeug verursacht, erfordert dessen Bereitstellung zusätzliche Stromerzeugung, Elektrolyse, Verdichtung, Speicherung und Betankung. Gleichzeitig entstehen zusätzliche Rohstoffbedarfe für die Elektrolysesysteme.

Die in FARMfuture durchgeführte Kritikalitätsanalyse zeigt beispielsweise, dass der von Hongjun Zhu (2023) entwickelte Criticality Value für SOEC-Systeme mit rund 30.038 für den Westhof und 4.165 für Futterkamp deutlich über den entsprechenden Werten der alkalischen Elektrolyse von rund 21.162 bzw. 2.933 und der PEM-Elektrolyse von rund 20.256 bzw. 2.811 liegt. Innerhalb des verwendeten Bewertungsansatzes wird damit ein möglicher Zielkonflikt sichtbar: Die Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen kann neue Abhängigkeiten von technologiespezifischen und teilweise kritischen Rohstoffen erzeugen.

Eine Kreislaufführung dieser Materialien kann diesen Effekt teilweise reduzieren. Die von Duanqi Huang (2023) ausgewertete Literatur weist für einen Recyclingprozess von Solid-Oxide-Zellen Rückgewinnungsraten von über 92 % für die betrachteten NiO- und YSZ-Materialien aus. Eine post-fossile Energieversorgung ist aus Umweltsicht daher nicht allein durch die Substitution fossiler Energieträger gekennzeichnet, sondern erfordert zusätzlich eine möglichst ressourceneffiziente und kreislauffähige Gestaltung der dafür eingesetzten technischen Infrastruktur.

Insgesamt lassen sich aus den FARMfuture-Ergebnissen damit für die betrachteten mobilen Anwendungen direkte verbrennungsbedingte CO₂-Emissionen von rund 236 t/a für die untersuchten Feldarbeiten des Westhofs und rund 26 t/a für die betrachtete Futterproduktion in Futterkamp ableiten. Innerhalb Futterkamps entfallen davon allein rund 20 t CO₂/a auf die Erntearbeiten. Diese rund

262 t CO₂/a bilden die Größenordnung des direkten CO₂-Minderungspotenzials, das bei einer vollständigen Substitution des betrachteten fossilen Diesels adressiert werden kann.

Wie groß die tatsächliche Netto-THG-Minderung der einzelnen Transformationspfade ist, kann aus den Projektarbeiten jedoch nicht abschließend bestimmt werden. Hierfür wäre eine vergleichende Lebenszyklusbewertung erforderlich, die insbesondere die Bereitstellung von Strom, Wasserstoff und Methan, die Herstellung und Lebensdauer von Batterien und Elektrolyseuren sowie Rohstoffgewinnung, Recycling und End-of-Life-Prozesse berücksichtigt.

3.3 Netzwerkaufbau und Wissenstransfer (AP3)

Neben der Analyse und Modellierung betrieblicher Energiesysteme zielte FARMfuture auf den Aufbau eines interdisziplinären Netzwerks und den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und landwirtschaftlicher Praxis. Mit der Technischen Hochschule Lübeck, der Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co. KG und dem Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein wurden wissenschaftliche, betriebliche und institutionelle Perspektiven miteinander verbunden. Die Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) begleitete das Vorhaben als Fördermittelgeber.

Westhof und Futterkamp dienten dabei als betriebliche Referenzsysteme für die gemeinsame Bearbeitung konkreter Fragestellungen. Informationen zu Produktionsabläufen, Energieverbräuchen, Maschinen und technischen Randbedingungen bildeten die Grundlage der Analysen in AP1 und AP2. Umgekehrt wurden die wissenschaftlichen Ergebnisse auf konkrete betriebliche Transformationsfragen zu Energieeffizienz, erneuerbarer Energieversorgung, Speicherung und der Substitution fossiler Energieträger zurückgeführt.

Der institutionelle Austausch setzte bereits zum Projektstart ein. Bei der Förderbescheidübergabe am Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp kamen Vertreter der TH Lübeck, der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein, des Westhofs und der EKSH zusammen. Dabei wurden betriebliche Energieerzeuger und -verbraucher betrachtet und Möglichkeiten einer zukünftigen post-fossilen Energieversorgung diskutiert. Insbesondere die Einbindung des Lehr- und Versuchszentrums Futterkamp schuf eine Schnittstelle zwischen Forschung, Versuchswesen, Beratung und landwirtschaftlicher Praxis.

3.3.1 Wissenstransfer und Kommunikation

Der Wissenstransfer erfolgte sowohl innerhalb des Projektverbunds als auch über fachliche und kommunikative Aktivitäten nach außen. Nach der Projektdokumentation umfassten diese Workshops, Vorträge und Fachveranstaltungen, Informationsmaterialien, die Kommunikation bzw. Publikation von Forschungsergebnissen sowie ein Abschlusssymposium. Ergänzend wurden Projektziele und Forschungsansatz über die Kommunikationskanäle der beteiligten Institutionen öffentlich vermittelt.

Die Formate dienten nicht nur der Verbreitung von Ergebnissen, sondern auch dem Austausch zwischen wissenschaftlicher Analyse und betrieblicher Praxis. Projektbegleitende Feedback- und Evaluationsprozesse ermöglichten es, betriebliche Erfahrungen und Rückmeldungen in die weitere Bearbeitung einfließen zu lassen. Wissenstransfer wurde damit als wechselseitiger Prozess zwischen Forschung und Anwendung verstanden.

3.3.2 Transfer in Forschung und Lehre

Eine wesentliche Transferfunktion bestand in der Einbindung studentischer Abschlussarbeiten. Im Projektzeitraum wurden zahlreiche Fragestellungen von FARMfuture in wissenschaftlichen Qualifizierungsarbeiten vertieft. Diese behandelten unter anderem betriebliche Energieverbräuche und Lastprofile, Energieeffizienz, PV- und Batteriesysteme, alternative Antriebskonzepte, Wasserstoffbereitstellung und Elektrolysetechnologien sowie Rohstoffbedarf und Recycling.

Dadurch wurden betriebliche Fragestellungen in eigenständige wissenschaftliche Untersuchungen überführt und deren Methoden und Ergebnisse wiederum für das Gesamtprojekt nutzbar gemacht. FARMfuture fungierte damit zugleich als Forschungs- und Lernumgebung für die wissenschaftliche Bearbeitung praxisbezogener Transformationsfragen.

3.3.3 Anschlussfähigkeit und weiterführender Transfer

Die im Projekt aufgebaute Verbindung zwischen Hochschule, landwirtschaftlichen Betrieben und Landwirtschaftskammer schafft eine Grundlage für weiterführende Forschungs- und Transferaktivitäten. Die auf Ebene der Referenzbetriebe entwickelten Methoden und Ergebnisse sind insbesondere für Fragestellungen anschlussfähig, die unterschiedliche landwirtschaftliche Produktionssysteme, Energiebedarfe und Transformationsoptionen vergleichend untersuchen.

Darüber hinaus besitzen die Projekteinhalte Anschlussfähigkeit an wissenschaftliche, bildungsbezogene und landwirtschaftspolitische Diskurse zur Elektrifizierung landwirtschaftlicher Prozesse, zu alternativen Kraftstoffen, erneuerbarer Energieversorgung sowie Speicher- und Versorgungsinfrastruktur. Die Ergebnisse können damit künftig sowohl in weiterführende Forschungsarbeiten als auch in den Austausch zwischen Landwirtschaft, Wissenschaft, Beratung, Wirtschaft und Politik einfließen.

4 Bewertung und Diskussion

FARMfuture verfolgte das Ziel, den fossilen Energiebedarf konkreter landwirtschaftlicher Betriebe zu analysieren und darauf aufbauend Optionen für eine post-fossile Energieversorgung zu entwickeln. Die Untersuchungen an Westhof und Futterkamp zeigen, dass hierfür technisch grundsätzlich mehrere Transformationspfade zur Verfügung stehen. Für wesentliche fossile Anwendungen konnten alternative Energiebedarfe quantifiziert, erneuerbare Versorgungs- und Speicheroptionen modelliert und deren technische Randbedingungen untersucht werden. Damit wurde ein modellbasierter Proof-of-Concept für die Transformation ausgewählter betrieblicher Energieanwendungen entwickelt. Ein technisch, wirtschaftlich und ökologisch vollständig validiertes Gesamtsystem für die beiden Referenzbetriebe wurde dagegen nicht realisiert.

Eine zentrale Erkenntnis des Projekts ist, dass der Übergang zu einer post-fossilen Energieversorgung nicht primär durch die jährliche Energiemenge, sondern durch die Struktur des jeweiligen betrieblichen Energiesystems bestimmt wird. Westhof und Futterkamp unterscheiden sich erheblich hinsichtlich Produktionsverfahren, Verbraucherstruktur und zeitlicher Verteilung des Energiebedarfs. Dies beeinflusst unmittelbar, welche Transformationsoptionen technisch sinnvoll sind und welche Anforderungen an Erzeugungsleistung, Speicher und Infrastruktur entstehen. Die einzelbetriebliche Betrachtung erweist sich damit als wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung belastbarer Transformationsstrategien.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse eine zweite übergeordnete Schlussfolgerung: Eine rein mengenbasierte Substitution fossiler Energie ist für die Systemauslegung nicht ausreichend. Insbesondere saisonal konzentrierte Feldarbeiten erzeugen hohe Energie- und Leistungsbedarfe zu bestimmten Zeitpunkten, während erneuerbare Stromerzeugung zeitlich davon abweichen kann. Auch bei stationären Anwendungen bestimmen Lastspitzen und zeitliche Verbrauchsmuster den erforderlichen Umfang von Erzeugungs-, Speicher- und Netzkapazitäten. Die zeitliche Kopplung von Energiebedarf und Energieangebot ist deshalb neben der Jahresenergiebilanz eine zentrale Auslegungsgröße post-fossiler landwirtschaftlicher Energiesysteme.

Aus den untersuchten Technologiepfaden lässt sich kein universell überlegener Transformationspfad ableiten. Direkte Elektrifizierung reduziert die Anzahl notwendiger Energieumwandlungen und ist daher energetisch grundsätzlich vorteilhaft, wird bei mobilen Anwendungen jedoch durch Batteriekapazität,

Ladeleistung und Maschinenverfügbarkeit begrenzt. Wasserstoff und Methan erlauben eine zeitliche Entkopplung von Energieerzeugung und Nutzung, verursachen jedoch zusätzliche Umwandlungsverluste und Infrastrukturbedarfe. Die Projektergebnisse sprechen daher für eine funktionale Kombination verschiedener Technologien entsprechend der jeweiligen Anwendung statt für die vollständige Umstellung eines Betriebs auf einen einzelnen Energieträger.

Auch die Umweltbewertung unterstützt diese Systemperspektive. Die Substitution der in FARMfuture betrachteten Dieselverbräuche adressiert direkte verbrennungsbedingte CO₂-Emissionen in einer Größenordnung von rund 236 t CO₂/a für die untersuchten Westhof-Feldarbeiten und rund 26 t CO₂/a für die betrachtete Futterproduktion in Futterkamp. Gleichzeitig verursachen alternative Versorgungssysteme zusätzliche Material- und Infrastrukturbedarfe. Der Übergang zu einer post-fossilen Landwirtschaft verschiebt damit einen Teil der Umweltwirkungen von der Nutzung fossiler Kraftstoffe auf die Herstellung von PV-Anlagen, Batteriespeichern, Elektrolyseuren und weiterer Infrastruktur. Die Ergebnisse zu Rohstoffkritikalität und Recycling verdeutlichen deshalb, dass eine vollständige ökologische Bewertung über die betrieblichen direkten Emissionen hinausgehen muss.

4.1 Einordnung der Referenzbetriebe

Die beiden Referenzbetriebe repräsentieren unterschiedliche energetische Ausgangssituationen. Am Westhof stehen neben Verarbeitung und Transport insbesondere saisonal konzentrierte Feldarbeiten im Mittelpunkt der fossilen Energienutzung. Der daraus abgeleitete Dieselbedarf schwankt im Jahresverlauf stark. Für eine post-fossile Transformation entstehen deshalb insbesondere Anforderungen an die Bereitstellung hoher Energiemengen für mobile Anwendungen innerhalb begrenzter saisonaler Zeitfenster.

Futterkamp weist dagegen eine Kombination aus kontinuierlicher stationärer Stromnachfrage der Milchviehhaltung und saisonalem Dieselbedarf der Futterproduktion auf. Damit ergeben sich zwei unterschiedliche Transformationsaufgaben: Für die stationären Verbraucher ist insbesondere die zeitliche Abstimmung von Stromverbrauch, erneuerbarer Erzeugung und kurzfristiger Speicherung relevant. Für die mobilen Anwendungen treten dagegen vergleichbare Fragestellungen wie beim Westhof hinsichtlich Energieträger, Maschinenleistung und saisonaler Bedarfsspitzen auf.

Diese Unterschiede bestätigen die in FARMfuture gewählte einzelbetriebliche Herangehensweise. Allgemeine landwirtschaftliche Energiekennwerte reichen für die Dimensionierung post-fossiler Systeme nur eingeschränkt aus. Entscheidend sind vielmehr Produktionsstruktur, Prozesse, saisonaler Arbeitskalender und vorhandene Energieinfrastruktur. Gleichzeitig zeigen beide Referenzbetriebe eine gemeinsame Grundstruktur: Stationäre und mobile Energieanwendungen stellen unterschiedliche Anforderungen und sollten daher nicht zwangsläufig mit derselben Technologie transformiert werden.

Tabelle 9 fasst die daraus abgeleiteten Unterschiede hinsichtlich Energiebedarfsstruktur, fossiler Anwendungen, Transformationsoptionen und wesentlicher Modellierungsgrenzen vergleichend zusammen.

Tabelle 9: Vergleichende Einordnung der energetischen Charakteristika und Transformationsanforderungen der Referenzbetriebe Westhof und Futterkamp

Zentraler Aspekt	Westhof	Futterkamp
Charakteristische Energiebedarfsstruktur	Stark saisonal geprägte Feldarbeiten; zusätzlich Verarbeitung und Transport	Kontinuierliche elektrische Lasten der Milchviehhaltung; zusätzlich saisonaler Futterbau
Fossile Anwendung	Diesel für Feldarbeiten und Transport	Diesel für die untersuchten Feldarbeiten des Futterbaus
Transformationsoptionen	Elektrifizierung, PV, Biogas/Methan, Wasserstoff und Batteriespeicherung	PV und Batteriespeicherung für stationäre Lasten; alternative Antriebe sowie Wasserstoff bzw. Methan für mobile Anwendungen
Speicheranforderung	Überbrückung saisonal konzentrierter mobiler Energiebedarfe und zeitliche Kopplung mit erneuerbarer Erzeugung	Kurzfristige Lastverschiebung bei stationären Verbrauchern; zusätzliche Speicher- bzw. Kraftstoffbereitstellung für mobile Anwendungen
Modellierungsgrenze	Feldarbeitsbedarfe teilweise aus Betriebsdaten und KTBL-Werten abgeleitet; keine vollständig gemessenen Lastgänge	Stationäre Last teilweise über Standardlastprofile modelliert; mobile Bedarfe teilweise vereinfachend berechnet
Schlussfolgerung	Saisonale mobile Energiebedarfe sind ein wesentlicher Auslegungsfaktor der Transformation	Stationäre Dauerlasten und saisonale mobile Bedarfe erfordern unterschiedliche Versorgungslösungen

4.2 Aussagekraft und Grenzen der Modellierung

Die im Projekt eingesetzten Modelle ermöglichen eine systematische Untersuchung technisch möglicher Transformationspfade, sind jedoch nicht als belastbare Prognosen des realen Betriebs zu verstehen. Die Ergebnisse hängen teilweise wesentlich von Annahmen zu Verbrauchsprofilen, Wirkungsgraden, Speicherkapazitäten, Anlagenparametern und technologischen Eigenschaften ab. Dies ist insbesondere dort relevant, wo keine hochaufgelösten betrieblichen Primärdaten vorlagen und daher KTBL-Daten, Literaturwerte, Standardprofile oder vereinfachte Modellannahmen verwendet werden mussten. Die Methodik von FARMfuture verbindet damit reale betriebliche Fragestellungen mit modellgestützten Potenzialanalysen, weist jedoch je nach Untersuchungsgegenstand unterschiedliche Unsicherheiten auf.

Besonders wichtig ist die Unterscheidung zwischen dokumentierten bzw. gemessenen Energieverbräuchen und daraus abgeleiteten oder simulierten Bedarfen. Am Westhof konnte der Dieselverbrauch nicht unmittelbar einzelnen Arbeitsgängen zugeordnet werden. Die Verbrauchswerte auf Prozessebene wurden daher mithilfe des KTBL-Dieselbedarfsrechners abgeleitet und zeitlich den landwirtschaftlichen Arbeitsabläufen zugeordnet. Die daraus entwickelten zeitlichen Verbrauchsprofile sind entsprechend als modellierte Bedarfsprofile zu interpretieren.

Eine vergleichbare Einschränkung besteht bei der Modellierung der PV- und Batteriesysteme für Futterkamp. Für die elektrische Last wurde mangels ausreichender Messdaten ein standardisiertes landwirtschaftliches Verbraucherprofil verwendet und auf einen angenommenen Jahresverbrauch skaliert. Die in einzelnen Szenarien erreichten hohen Autarkiegrade zeigen daher, welche Systemzustände unter den jeweiligen Modellannahmen technisch darstellbar sind. Sie stellen keinen Nachweis dafür dar, dass diese Autarkiegrade unter den realen betrieblichen Lastbedingungen von Futterkamp tatsächlich erreicht würden.

Auch die Berechnungen der alternativen Antriebspfade sind primär als Größenordnungsschätzungen einzuordnen. Die zugrunde liegenden Arbeiten verwenden teilweise unterschiedliche Annahmen zu Wirkungsgraden, Heizwerten und Systemgrenzen und gelangen dadurch für vergleichbare Fragestellungen zu unterschiedlichen absoluten Energiebedarfen. Diese Unterschiede verdeutlichen die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber technischen Annahmen. Für die Projektbewertung sind deshalb insbesondere die Größenordnungen und die daraus resultierenden Anforderungen an

Energieversorgung, Speicherung und Infrastruktur aussagekräftig; einzelne Bedarfswerte stellen dagegen keine validierten Auslegungsgrößen dar. Insbesondere lässt sich aus den energetischen Äquivalenten noch nicht ableiten, welche landwirtschaftlichen Arbeitsgänge mit verfügbaren elektrischen Maschinen unter realen Einsatzbedingungen tatsächlich abgedeckt werden können.

Aus dieser methodischen Struktur ergibt sich zugleich eine Stärke von FARMfuture. Durch die Verbindung betrieblicher Daten, technischer Kennwerte und unterschiedlicher Modellierungsansätze konnten Energie-Hotspots, zeitliche Laststrukturen und alternative Versorgungspfade systematisch untersucht werden. Die Ergebnisse sind daher als Szenarien und Potenzialabschätzungen zu verstehen. Sie liefern einen modellbasierten Proof-of-Concept, jedoch keinen Nachweis der technischen oder wirtschaftlichen Machbarkeit eines vollständig post-fossilen Betriebs.

Auch wirtschaftliche Schlussfolgerungen lassen sich aus den vorhandenen Arbeiten nur eingeschränkt ableiten. Einzelne der im vorliegenden Bericht ausgewerteten Untersuchungen enthalten orientierende Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen; eine konsistente technoökonomische Bewertung der hier zusammengeführten Transformationspfade liegt jedoch nicht vor. Für betriebliche Investitionsentscheidungen wären zusätzlich Investitions-, Betriebs-, Wartungs- und Infrastrukturkosten über die jeweilige Lebensdauer zu berücksichtigen. Hinzu kommen Energiepreise, Auslastungsgrade, Netzanschlussbedingungen, Förderinstrumente und die reale Verfügbarkeit geeigneter landwirtschaftlicher Maschinen.

Auch die ökologische und stoffliche Bewertung bleibt auf Teilaspekte begrenzt. Zwar wurden direkte fossile Emissionen sowie Materialbedarf, Rohstoffkritikalität und Recycling ausgewählter Technologien untersucht, eine konsistente Lebenszyklusbewertung der Transformationspfade und ihrer zusätzlichen Material- und Infrastrukturbedarfe erfolgte jedoch nicht. Damit können mögliche Verlagerungen von Umweltwirkungen sowie zukünftige Material- und Recyclingströme der Transformation bislang nicht vollständig bewertet werden.

Darüber hinaus beeinflussen systemische Rahmenbedingungen die tatsächliche Umsetzbarkeit. Dazu gehören insbesondere Technologiereife und Marktverfügbarkeit alternativer Landmaschinen, regulatorische Anforderungen, Netz- und Infrastrukturbedingungen sowie betriebliche Akzeptanz und organisatorische Einbindung. Diese Aspekte lagen außerhalb des Schwerpunkts der überwiegend

energetisch-technischen Untersuchungen, sind für die praktische Umsetzung einer post-fossilen Landwirtschaft jedoch wesentlich.

4.3 Weiterer Forschungsbedarf und Ausblick

Aus den identifizierten Modellierungsgrenzen ergibt sich zunächst Forschungsbedarf hinsichtlich der betrieblichen Datengrundlage. Für mobile Anwendungen sollten Maschinenleistung, Energieverbrauch und Einsatzzeiten mit höherer zeitlicher Auflösung erfasst werden. Für stationäre Verbraucher sind reale Lastgangmessungen erforderlich. Erst dadurch lassen sich kurzfristige Leistungsspitzen und saisonale Bedarfsstrukturen belastbar mit erneuerbarer Energieerzeugung und Speichersystemen koppeln.

Auf dieser Grundlage sollten die bislang teilweise getrennt betrachteten Technologien künftig in integrierten dynamischen Energiesystemmodellen zusammengeführt werden. PV, Batteriespeicher, Netzbezug, Elektrolyse, Wasserstoffspeicherung, Biogas bzw. Methan und gegebenenfalls Wärmesysteme sollten gemeinsam modelliert werden. Ziel sollte dabei eine technisch, energetisch, wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Systemkonfiguration unter realen betrieblichen Randbedingungen sein.

Besonderer Forschungs- und Validierungsbedarf besteht bei den mobilen Anwendungen. Die im Projekt berechneten Energieäquivalente zeigen, dass eine Substitution des betrachteten Dieselbedarfs energetisch grundsätzlich darstellbar ist. Weiterführend sollte untersucht werden, welche landwirtschaftlichen Arbeitsgänge mit verfügbaren bzw. absehbaren elektrischen Maschinen tatsächlich abgedeckt werden können. Dabei sind insbesondere Maschinenleistung, Batteriekapazität, Reichweite, Ladeleistung und -zeiten, Fahrzeuggewicht, Maschinenverfügbarkeit sowie die Integration in saisonal eng begrenzte Arbeitsfenster zu berücksichtigen. Für wasserstoff- und methanbasierte Systeme kommen Anforderungen an Erzeugung, Speicherung, Aufbereitung und Betankungsinfrastruktur hinzu. Die modellierten Transformationspfade sollten deshalb in Pilot- und Demonstrationsvorhaben unter realen landwirtschaftlichen Bedingungen validiert und mit den bisherigen Modellannahmen abgeglichen werden.

Parallel dazu ist eine vertiefte technoökonomische Bewertung erforderlich. Die technische Darstellbarkeit eines Transformationspfades ist für dessen betriebliche Umsetzung allein nicht

ausreichend. Zukünftige Analysen sollten deshalb Investitions-, Betriebs-, Wartungs- und Infrastrukturkosten über die jeweilige Lebensdauer berücksichtigen. Ebenso relevant sind Energiepreise, Eigenverbrauch, Netzeinspeisung, Auslastungsgrade sowie Förder- und Finanzierungsszenarien. Insbesondere für Wasserstoff und andere alternative Energieträger sollte untersucht werden, unter welchen betrieblichen Randbedingungen eine dezentrale Erzeugung gegenüber einer externen Versorgung wirtschaftlich sinnvoll sein kann.

Auch die ökologische und stoffliche Bewertung sollte über die im Projekt quantifizierten direkten fossilen Emissionen hinaus erweitert werden. Die zunehmende Nutzung von PV-Anlagen, Batteriespeichern, Elektrolyseuren und elektrischen Antriebssystemen führt zu zusätzlichen Material- und Infrastrukturbedarfen. Für eine belastbare Bewertung der Transformationspfade bietet sich daher eine Kopplung von Stoffstromanalyse und Lebenszyklusbewertung an. Damit könnten sowohl die durch die Transformation ausgelösten Materialbedarfe und zukünftigen Recyclingströme als auch mögliche Verlagerungen von Umweltwirkungen systematisch erfasst werden. Besondere Aufmerksamkeit sollte dabei kritischen Rohstoffen, Recyclingpfaden und der Kreislauffähigkeit der eingesetzten Technologien gelten.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus der Übertragbarkeit der einzelbetrieblichen FARMfuture-Perspektive auf unterschiedliche landwirtschaftliche Produktionssysteme. Aufbauend auf den Referenzbetrieben könnten weitere Kulturen, Betriebsgrößen und Betriebstypen untersucht und mit Agrarstatistiken sowie betrieblichen Planungsdaten verknüpft werden. Dadurch ließen sich überbetriebliche bzw. regionale Szenarien für zeitlich aufgelöste Energie-, Speicher- und Infrastrukturbedarfe entwickeln und unterschiedliche Pfade zur weiteren Substitution fossiler Energieträger untersuchen. Eine solche überbetriebliche bzw. landesbezogene Modellierung stellt einen möglichen nächsten Forschungsschritt dar.

Eng damit verbunden ist die Frage, wie erneuerbare Energie in landwirtschaftlichen Betrieben zeitlich verfügbar gemacht und möglichst effizient genutzt werden kann. Neben der Dimensionierung stationärer Speicher sind dabei die Kopplung mit Ladeinfrastruktur für landwirtschaftliche Maschinen, flexible Ladezeiten sowie betriebliche und gegebenenfalls überbetriebliche Speicherlösungen relevant. Damit verschiebt sich die Fragestellung von der reinen Bereitstellung erneuerbarer Energie hin zu ihrer bedarfsgerechten Integration in landwirtschaftliche Betriebsabläufe.

Eine Verknüpfung von Energiespeicherung und landwirtschaftlichen Stoffströmen stellt darüberhinaus einen weiteren Forschungsansatz dar. Aufbauend auf den Untersuchungen zu Batteriespeichern sowie Materialbedarf und Kreislauffähigkeit sollte untersucht werden, inwieweit landwirtschaftliche Rest- und Nebenströme als Rohstoff für Speichertechnologien nutzbar sind. Ein relevanter Ansatz ist die Herstellung von Hard Carbon für Natrium-Ionen-Batterien aus lignocellulosehaltiger Biomasse, beispielsweise Holz aus der Knickpflege. Daraus ergeben sich neue Forschungsfragen zu regionalen Stoffkreisläufen und industriellen Symbiosen zwischen Landwirtschaft und Energiespeichertechnologien.

Insgesamt liegt der wesentliche Beitrag von FARMfuture damit in der methodischen und quantitativen Strukturierung der Transformationsaufgabe. Das Projekt zeigt, wo fossile Energie eingesetzt wird, welche Größenordnungen bei einer Substitution entstehen, welche technischen Optionen grundsätzlich zur Verfügung stehen und welche zeitlichen, infrastrukturellen und ressourcenbezogenen Randbedingungen bei ihrer Auslegung berücksichtigt werden müssen. Der nächste Entwicklungsschritt besteht darin, diese Potenzialanalysen mit hochaufgelösten Betriebsdaten, integrierten Modellen, technoökonomischer und lebenszyklusbasierter Bewertung sowie realer technischer Erprobung zu validierten Transformationskonzepten weiterzuentwickeln. Die zunehmend zeitlich aufgelöste Erfassung von Energiebedarf und -bereitstellung schafft darüber hinaus eine Grundlage für zukünftige digitale, optimierungs- oder durch künstliche Intelligenz (KI) gestützte Energiemanagementsysteme.

5 Fazit

FARMfuture untersuchte anhand der beiden Referenzbetriebe Westhof Bio-Gemüse GmbH & Co.KG – Feldfruchtbetrieb und Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein Lehr- und Versuchszentrum Futterkamp – Milchviehbetrieb, wie betriebliche Energieflüsse erfasst und fossile Energieträger durch erneuerbare Versorgungskonzepte substituiert werden können. Aufbauend auf betrieblichen Daten, technischen Kennwerten und modellgestützten Analysen wurden Energie-Hotspots und zeitliche Bedarfsstrukturen identifiziert sowie Transformationsoptionen für stationäre und mobile Anwendungen untersucht. Damit wurde ein modellbasierter Proof-of-Concept für die Entwicklung post-fossiler landwirtschaftlicher Energiesysteme erarbeitet. Die im Projekt entwickelten Methoden und Ergebnisse wurden zudem in Forschung und Lehre eingebunden und bilden eine Grundlage für weiterführende wissenschaftliche und anwendungsorientierte Arbeiten.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Transformation wesentlich von der Struktur des jeweiligen Betriebs abhängt. Während am Westhof insbesondere saisonal konzentrierte Feldarbeiten sowie Verarbeitung und Transport den Energiebedarf prägen, kombiniert Futterkamp kontinuierliche elektrische Verbraucher der Milchviehhaltung mit saisonalen Energiebedarfen des Futterbaus. Für beide Referenzbetriebe stehen grundsätzlich unterschiedliche erneuerbare Versorgungs-, Speicher- und Antriebsoptionen zur Verfügung. Eine zentrale Erkenntnis ist jedoch, dass weder Jahresenergiebilanzen noch einzelne Technologien allein eine belastbare Transformationsstrategie ergeben. Entscheidend sind die zeitliche Kopplung von Energiebedarf und erneuerbarer Erzeugung sowie eine an stationäre und mobile Anwendungen angepasste Kombination von Erzeugungs-, Speicher- und Antriebstechnologien.

Für die in FARMfuture betrachteten mobilen Anwendungen lässt sich zugleich ein konkretes direktes CO₂-Minderungspotenzial quantifizieren. Der untersuchte fossile Dieselenergieeinsatz entspricht verbrennungsbedingten Emissionen von rund 236 t CO₂/a für die Feldarbeiten des Westhofs und rund 26 t CO₂/a für die betrachtete Futterproduktion in Futterkamp. Eine vollständige Substitution würde diese direkten Emissionen adressieren. Die tatsächliche Netto-THG-Minderung der jeweiligen Transformationspfade kann daraus jedoch nicht unmittelbar abgeleitet werden, da Herstellung und Bereitstellung von Energieträgern und technischer Infrastruktur nicht in einer einheitlichen Lebenszyklusbewertung untersucht wurden. Die Analysen zu Elektrolysetechnologien, Rohstoffkritikalität und Recycling verdeutlichen zudem, dass eine post-fossile Energieversorgung neben

der Reduktion fossiler Emissionen auch Energieeffizienz, Materialbedarf und Kreislauffähigkeit berücksichtigen muss. Für die betriebliche Praxis ergibt sich daraus ein schrittweises Vorgehen: Energiebedarfe und zeitliche Laststrukturen erfassen, wesentliche Energie-Hotspots und Effizienzpotenziale identifizieren und darauf aufbauend geeignete Kombinationen aus erneuerbarer Energieerzeugung, Speicherung und post-fossilen Antriebssystemen betriebsspezifisch dimensionieren.

FARMfuture schafft damit eine empirische und methodische Grundlage für die weitere Entwicklung post-fossiler Energiekonzepte in der Landwirtschaft. Die Projektergebnisse zeigen technisch plausible Transformationspfade und deren Größenordnungen auf, stellen jedoch noch keine abschließend validierten Versorgungskonzepte dar. Der nächste Entwicklungsschritt besteht in der Verbindung hochaufgelöster Betriebsdaten mit integrierten Energiesystemmodellen, der Untersuchung der praktischen Elektrifizierung landwirtschaftlicher Maschinen, technoökonomischer und gekoppelter stofflicher und lebenszyklusbasierter Bewertung sowie der Validierung unter realen Betriebsbedingungen. Darüber hinaus können die auf Ebene der Referenzbetriebe entwickelten Ansätze künftig auf weitere Kulturen, Betriebsgrößen und Betriebstypen übertragen und mit Agrarstatistiken sowie betrieblichen Planungsdaten verknüpft werden. Dadurch ließen sich überbetriebliche bzw. regionale Szenarien für Energie-, Speicher- und Infrastrukturbedarfe sowie die damit verbundenen Material- und Umweltwirkungen untersuchen.

Literaturverzeichnis

- Chen, Q. (2023). *Describe the Total Energy Demand, Use and Efficiency of the Current Farming System in Futterkamp* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lüneburg.
- Chen, Z. (2023). *Describe to Alternative Energy of the Current Farming System in Futterkamp* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lüneburg.
- Diers, M. (2024). *Simulation einer Wärmepumpe für den Versuchsbetrieb Wulmenau* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lüneburg.
- Huang, D. (2023). *Recycling of Materials from Electrolysis* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lüneburg.
- Juhrich, K. (2016). *CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Climate Change | 27/2016*, 48.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). (o. J.-a). *Dieselbedarfsrechner*. Abgerufen 14. September 2026, von <https://www.ktbl.de/webanwendungen/dieselbedarfsrechner>
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). (o. J.-b). *Energiebedarfsrechner Tierhaltung*. Abgerufen 14. September 2026, von <https://www.ktbl.de/webanwendungen/energiebedarfsrechner>
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). (o. J.-c). *Verfahrensrechner Pflanze*. Abgerufen 14. September 2026, von <https://daten.ktbl.de/vrpfplanze/home.action>
- Lan, Z. (2023). *Quantitative Estimation of Diesel Substitution by Renewable Energy on Westhof Farm* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lüneburg.
- Milosavljević, D. D., Kevkić, T. S., & Jovanović, S. J. (2022). Review and validation of photovoltaic solar simulation tools/software based on case study. *Open Physics*, 20(1), 431–451. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0042>
- Mund, C. (2023). *Modellierung erneuerbarer Energien in einem landwirtschaftlichen Betrieb* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lüneburg.

Wang, X. (2023). *An exergy and thermodynamic analysis of key processes in the agriculture sector: A case study examining energy utilization and efficiency in crop farming and dairy farming* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lübeck.

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>

Zhao, T. (2023). *Towards a sustainable farm: The feasibility of replacing fossil fuel with renewable energy storage* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lübeck.

Zhu, H. (2023). *Raw Materials for Electrolysis in Farming Context* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lübeck.

Zhu, Y. (2023). *Energy Balance of Vegetable Farm* [Bachelorarbeit]. Technische Hochschule Lübeck.

Anhang

A.1 – Systemgrenzen Feldfruchtbetrieb

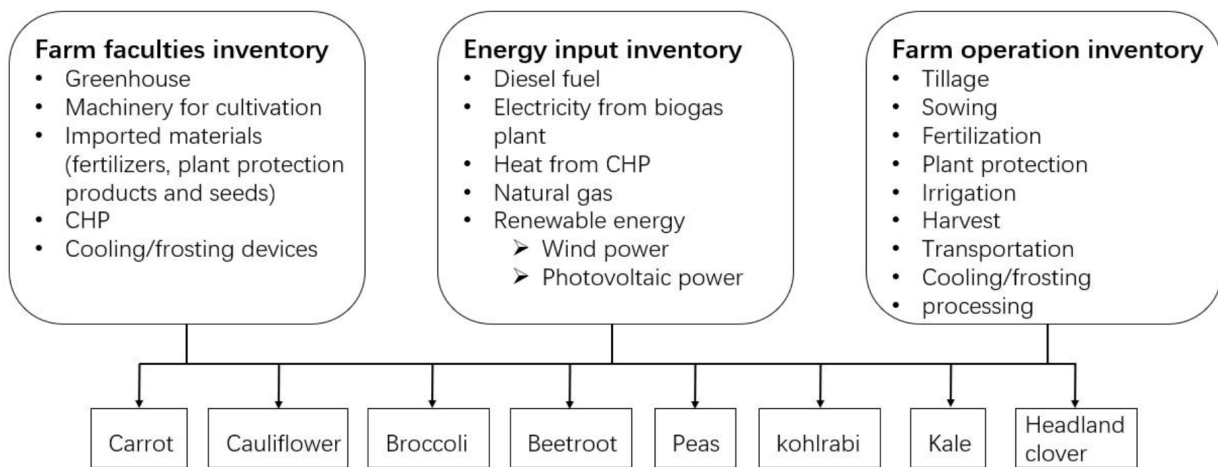


Abbildung 18: Systemgrenzen und berücksichtigte Inputgrößen der Energiebilanzierung ausgewählter Kulturen des Westhofs (aus Yuxuan Zhu, 2023, Abbildung 1).

A.2 – Prozentualer Energiebedarf Milchviehbetrieb

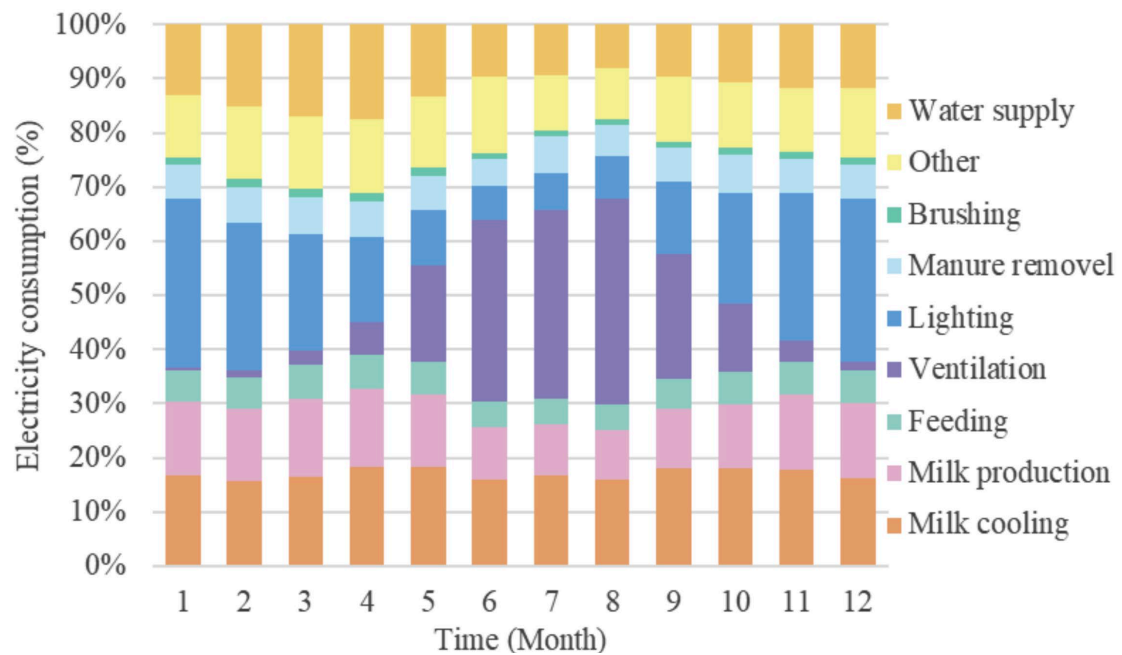


Abbildung 19: Prozentuale Veränderung des Stromverbrauchs im Laufe eines Jahres (aus Qinlei Chen, 2023, Abbildung 5-2)

A.3 – Energiebedarf Beleuchtung Milchviehbetrieb

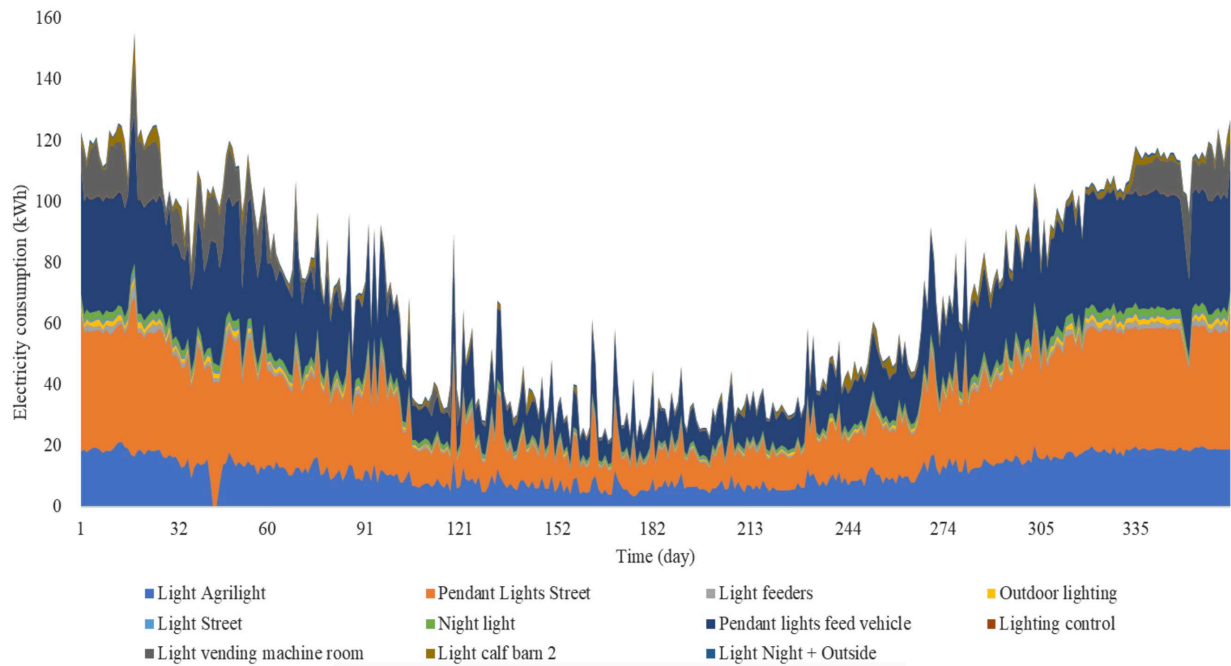


Abbildung 20: Der Stromverbrauch der Beleuchtung im Laufe eines Jahres (aus Qinlei Chen, 2023, Abbildung 5-3)

A.4 – Kältebedarf Feldfruchtbetrieb

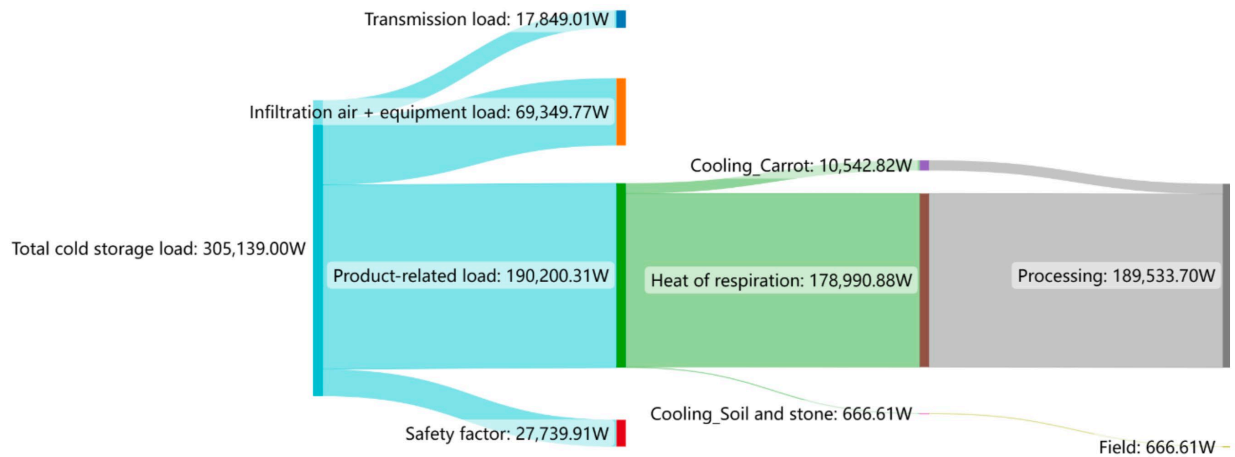


Abbildung 21: Modellierte Energieflüsse und Lastkomponenten der Kaltlagerung von Möhren am Westhof
 (aus Xinyuan Wang, 2023, Abbildung 2-7).

A.5 – Batterieparameter

*Tabelle 10: Batteriesysteme, Jahresdaten wesentlicher Batterieparameter in kWh. Autarkie in %
(aus Christopher Mund, 2023, Tabelle 6)*

	1_Mittel-1	1_Mittel-2	1_Groß-1	1_Groß-2	1_Klein-1	1_Klein-2
Netzbezug	1.005	973	3.937	1.039	3.907	992
Batteriebeladung Netz	50,7	747,5	3.650,6	848,2	3.101	3
Batteriebeladung	30.783,6	25.661,2	53.433,7	40.908,5	17.594,9	13.169,8
Batterieverluste	3.288	2.798	5.478	2.258	2.031	1.145
Batteriewechselrichterverluste	19.031	13.680	38.827	29.314	6.965	3.351
Batterieentladung	8.449	9.177	9.117	9.213	8.597	8.635
Autarkiegrad	95,00	95,10	81,50	94,80	80,50	93,90

A.6 – Materialbedarf Elektrolyseure

Tabelle 11: Materialbedarf kombinierter Elektrolysekonfigurationen (aus Hongjun Zhu, 2023, Tabelle 9 und 10)

Critical materials demand for different combinations in Westhof (g)							
	Nickel	Platinum	Iridium	Titanium	Zirconium	Yttrium	Scandium
Combination 1	72576	59.7	180.9	74893	0	0	0
Combination 2	108864	29.9	90.5	37467	0	0	0
Combination 3	73516	47.8	144.7	59906	972	126.36	243
Combination 4	59925	47.8	144.7	59906	1944	252.72	486

Critical materials demand for different combinations in Futterkamp (g)							
	Nickel	Platinum	Iridium	Titanium	Zirconium	Yttrium	Scandium
Combination 1	10038	8.28	25.1	10391	0	0	0
Combination 2	15120	4.16	12.6	5216	0	0	0
Combination 3	10170	6.63	20.1	8321	136	17.7	34
Combination 4	8327	6.63	20.1	8321	272	35.4	68

A.7 – Materialrückgewinnung Elektrolyseure

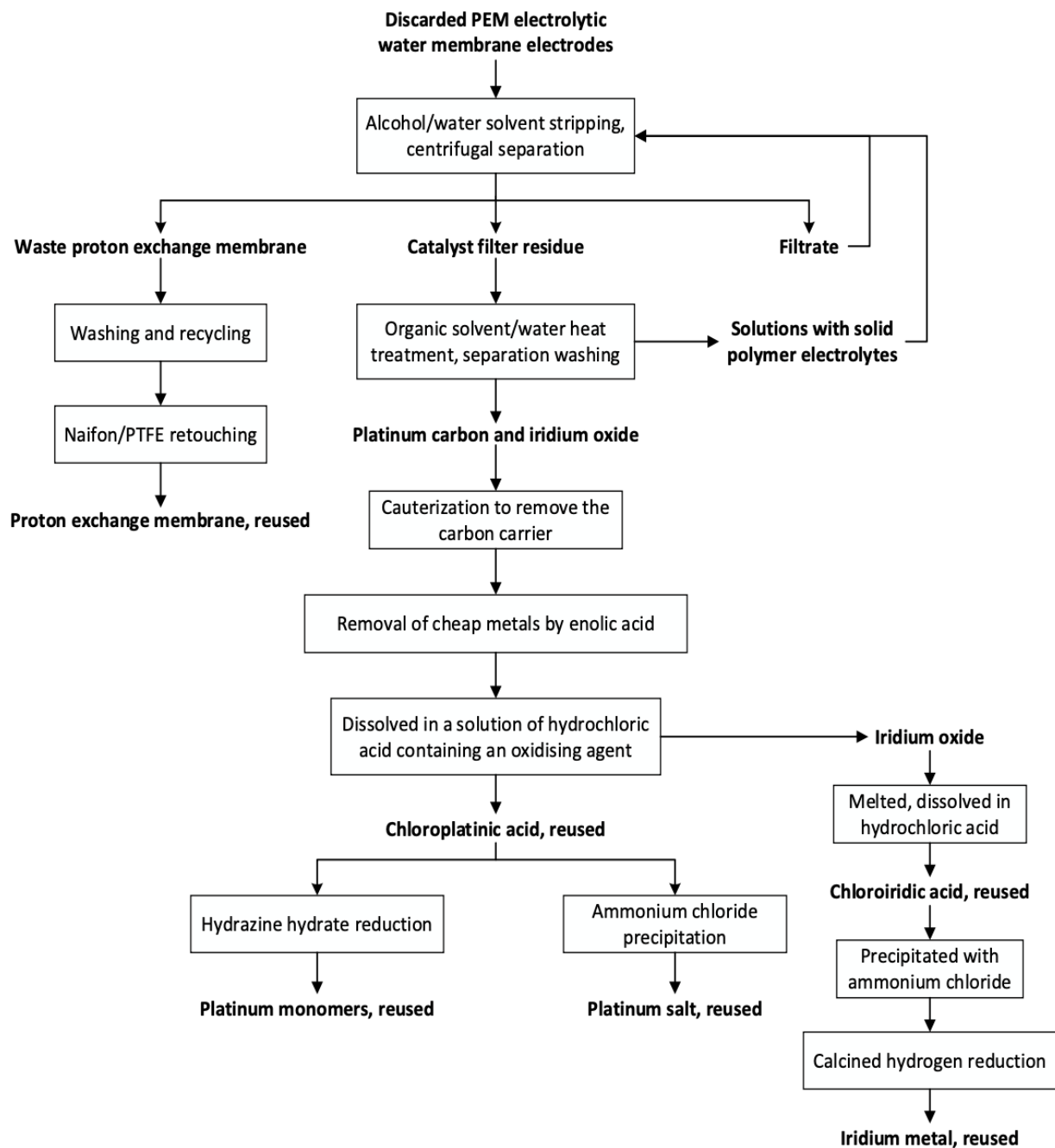


Abbildung 22: Prozessablauf zur Rückgewinnung und Wiederverwendung von Protonenaustauschmembran, Platin und Iridium aus gebrauchten PEM-Elektroden (aus Duanqi Huang, 2023, Abbildung 3-3)