



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 100 | Ausgabe 1

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Herstellung und wirtschaftliche Bewertung synthetischer Kraftstoffe zum Antrieb von Verbrennungsmotoren in der Landwirtschaft

Von Clemens Fuchs, Drees Meyer und Axel Poehls

1 Einleitung

Um das gesteckte Ziel der Europäischen Union zur Erlangung der Klimaneutralität bis 2050 und damit die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 – 2 °C laut dem Pariser Klimaschutzabkommen von 2015 sicherzustellen (UNFCCC, 2017), müssen die meisten Länder, auch Deutschland, noch große Anstrengungen in der Nutzung von erneuerbaren Energien leisten. Die Überführung von Wind- und Sonnenenergie, die in großen Mengen auf der Erde verfügbar sind, in elektrische Energie ist durch technische Entwicklung der letzten Jahrzehnte praktikabel, kostengünstig und gut vorangeschritten. In Deutschland wird dies seit dem Jahr 2000 gefördert durch das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2000, mit größeren Revisionen in 2004, 2009, 2012, 2014, 2017). Die Herausforderung besteht darin, die erneuerbare Stromproduktion deutlich zu erhöhen und in die beiden Sektoren Wärme und Mobilität zu überführen, um fossile Energieträger zu verdrängen.

Auch die Landwirtschaft muss ihren Beitrag zur Energiewende in zweierlei Hinsicht leisten. Zum einen haben landwirtschaftliche Betriebe gute Voraussetzungen für die Produktion von erneuerbaren Energien, vor allem von Strom, durch ihre Dächer und Freiflächen für die Errichtung von PV-Anlagen und Windrädern. Zum anderen ist der größte Anteil am Energieverbrauch in landwirtschaftlichen Betrieben der Kraftstoffbedarf der Außenwirtschaft in Form von Diesel. Hier stellt sich die Frage, ob die Antriebsenergie für den Acker mittels Power to Liquid wieder selbst erzeugt werden kann, wie vor 80 Jahren der Hafer für die Pferde.

Grundsätzlich kann die zukünftige CO₂-neutrale Mobilität durch batterie-basierte Elektrofahrzeuge oder durch Verbrennungsmotoren, letztere betrieben mit synthetischen Kraftstoffen erfolgen. Im Hinblick auf die Landwirtschaft ist eine Elektrifizierung der Traktoren für die Feldarbeit aufgrund der dafür benötigten großen und schweren Batterien (derzeit) nicht praktikabel. Außerdem sind die Einsatzzeiten der Traktoren infolge des wechselnden Wetters schwer planbar und bei Einsatzspitzen

ist eine sehr schnelle Betankung erforderlich. Eine weitere Möglichkeit ist die Umwandlung von grünem Strom, Wasser und CO₂, letzteres aus der Luft, in synthetische Kraftstoffe für die Außenwirtschaft. In einem speziellen Elektrolyseverfahren wird CO₂ und Wasserdampf mittels Stroms chemisch aufgespalten und das sogenannte Synthesegas erzeugt, ein Gasgemisch aus Wasserstoff (H₂) und Kohlenstoffmonoxid (CO). Es dient als Grundlage für die Fischer-Tropsch-Synthese, die daraus unterschiedliche lange Kohlenwasserstoffketten bildet, vergleichbar mit den fossilen Kraftstoffen. Nach einem weiteren Bearbeitungsschritt können die gebildeten Kohlenwasserstoffketten als flüssiger synthetischer Kraftstoff in herkömmlichen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Zudem können die Vorteile der Kraftstoffe, z.B. die hohe Energiedichte oder schnelle Betankung genutzt werden.

Der Druck zur Adaption neuer nachhaltiger Technologien kommt nicht nur aus der Politik, sondern auch vom Markt, d.h. den Verarbeitern und den Verbrauchern. So hat die Molkerei Arla Foods bereits im Jahr 2020 einen Klima-Check auf Milchviehbetrieben durchgeführt, um CO₂-Einsparpotenziale aufzudecken. Bis 2050 soll die Milch mit Netto-Null-CO₂-Emissionen produziert werden und die Bezahlung könnte sich an der jeweiligen CO₂-Bilanz orientieren. Am Beispiel eines typischen Lieferanten dieser Molkerei, der in Norddeutschland angesiedelt ist, wird die eigene Produktion und Speicherung von elektrischer Energie sowie Kraftstoff simuliert und ökonomisch bewertet. Der betreffende Milchviehbetrieb mit 235 ha Gesamtfläche und 150 Milchkühen hat einen jährlichen Energieverbrauch von etwa 80.000 kWh Strom und 35.000 l Diesel mit einem Energiegehalt von etwa 350.000 kWh. Im Jahr 2008 wurde die erste Photovoltaikanlage auf Dächern des Betriebes installiert und 2019 kam eine weitere auf dem Milchviehstall mit Batteriespeicher dazu, so dass sich der Betrieb bereits im Stall, d.h. in der Innenwirtschaft bilanziell selbst mit Strom versorgt. Noch nicht gelöst ist der Ersatz des fossilen Diesels in der Außenwirtschaft, d.h. auf dem Acker und im Grünland durch synthetische Kraftstoffe aus Erneuerbaren Energien, was die wesentliche Forschungsfrage in diesem Artikel darstellt. Quelle für alle Erneuerbaren Energien für die Innen- und Außenwirtschaft im landwirtschaftlichen Betrieb ist zunächst der elektrische Strom aus Wind und Sonne. Da der gewählte Betrieb typische Produktionstechnologien einsetzt, können die Ergebnisse auch auf andere Betriebsgrößen skaliert werden.

1.1 Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist zum einen die Darstellung der technischen Möglichkeiten der eigenen Produktion von synthetischen Kraftstoffen im landwirtschaftlichen Betrieb, zum anderen die ökonomische Beurteilung, indem der Break-even für die entsprechenden Investitionen ermittelt wird. Die Analyse der synthetischen Kraftstoffversorgung soll in einem ersten Schritt als Insellösung für einen

Betrieb erfolgen, wobei am Ende diskutiert wird, wie Economies of Scale durch Skalierung oder genossenschaftliche Organisation erreicht werden könnte.

Das technische Energiesystem (Massenmodell) umfasst die erneuerbare Stromerzeugung für den gesamten Betrieb, die Deckung des Stromverbrauches im Kuhstall, die Batteriespeicherung, die Produktion synthetischer Kraftstoffe und eine Eingliederung ins öffentliche Stromnetz. Ziel ist es, eine selbständige und regenerative Energieversorgung zur Deckung des Eigenbedarfes an Strom und Kraftstoff mit dem Modell möglichst realitätsnah zu simulieren. Tages- und jahreszeitabhängige Schwankungen werden beim Strom in 15-Minuten Zeitintervallen und beim Kraftstoff pro Kalenderwoche jeweils für ein Jahr berücksichtigt.

Für die ökonomische Zielsetzung werden in Szenarien die Kosten der Energieversorgung ermittelt und durch den Vergleich mit dem Status quo (fossile Energiequellen) der Break-Even für Investitionen in die Erneuerbare Energieerzeugung berechnet. Daraus sollen Chancen und Risiken eines betrieblich autarken Energiesystems abgeleitet, die weitere Entwicklung abgeschätzt und Empfehlungen gegeben werden, wie die Landwirtschaft durch die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen zum Klimaschutz beitragen könnte. Im Ausblick soll erläutert werden, inwieweit tatsächlich einzelbetriebliche Lösungen oder doch kooperative bzw. überbetriebliche Ansätze notwendig wären, um eine CO₂-neutrale Energieversorgung zu erreichen.

1.2 Stand der Forschung/Literaturübersicht

Kernaufgabe der Landwirtschaft ist die Produktion von hochwertigen und nachhaltigen Lebensmitteln zur Sicherstellung der Ernährung der Bevölkerung. Durch die Abhängigkeit von biologischen Prozessen, die unter anderem vom Wetter beeinflusst werden, ist die landwirtschaftliche Produktion unmittelbar vom Klimawandel betroffen. Neben der Anpassung von Produktionsverfahren an die Auswirkungen des Klimawandels, um die Ernährungssicherheit zu gewährleisten, stellt die Politik gleichzeitig Anforderungen an die deutsche Landwirtschaft zur Reduktion der freigesetzten Treibhausgase zur Abmilderung des Klimawandels. Im Jahr 2020 war die deutsche Landwirtschaft entsprechend einer ersten Schätzung für insgesamt 60,4 Millionen Tonnen (Mio. t) Kohlendioxid (CO₂)-Äquivalente verantwortlich (UBA, 2021). Laut Klimaschutznovelle vom Juni 2021 soll der Ausstoß von Klimagasen in der Landwirtschaft so verringert werden, dass sie bis 2030 nur noch 56 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente gegenüber 1990 ausstoßen darf (BMEL, 2021). Im Unterschied zum sekundären und tertiären Sektor stößt die Landwirtschaft nicht ihren Hauptteil der Emissionen durch die Verbrennung von Brennstoffen zur Energiegewinnung aus, sondern die größten Emissionsquellen sind landwirtschaftliche Böden und die Verdauung der Wiederkäuer. Hier ist jedoch nicht das CO₂ das

vornehmliche Problem, sondern es sind die Gase Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) mit den hohen CO_2 -Äquivalenten von 23 bzw. 296 (IPCC, 2001, p. 388). Der landwirtschaftliche Verkehr, der hauptsächlich mit Dieselmotoren betrieben wird, stößt nur etwa 10 % der gesamten landwirtschaftlichen CO_2 -Emissionen aus (UBA, 2019b). Ein Ersatz des fossilen Dieselmotors durch regenerative Energieträger, wie z.B. synthetischen Dieselmotors, würde einen erheblichen Teil zur Erreichung des politisch vorgegebenen Minderungsziels von 20% der landwirtschaftlichen Gesamtemissionen beitragen (BMU, 2019). Der fossile Dieselmotorsverbrauch von Motoren kann auf die vier Handlungsebenen Maschinen-Effizienz, Prozess-Effizienz, Bediener-Effizienz sowie alternative Kraftstoffe und Antriebe reduziert werden, wobei letztere einen CO_2 -neutralen Betrieb ermöglicht. Wo geeignet, z.B. bei Hoflader oder Futtermischwagen, können aber auch Elektromotoren mit ihren hohen Wirkungsgraden und stufenloser Steuerung Verwendung finden (VDMA, 2019).

Die Einführung der technischen Neuerungen wird durch politische Initiativen und veränderte Rahmenbedingungen, z.B. den Green Deal der EU (European Commission, 2021) und nationale Initiativen beschleunigt oder erst möglich gemacht. Regenerative Kraftstoffe finden sich in der im Juni 2020 veröffentlichten Wasserstoffstrategie der deutschen Bundesregierung wieder, wobei „grüner Wasserstoff“ als Energiespeicher, Grundstoff für die Industrie und als wesentliches Element der Sektorenkopplung dienen soll. Der notwendige Markthochlauf wird seit 2021 durch die CO_2 -Abgabe unterstützt (BMW, 2020).

Synthetische Kraftstoffe können mit verschiedenen Methoden in unterschiedlichen Verfahren hergestellt werden. Darauf soll in diesem Beitrag nicht näher eingegangen werden. Einen guten Überblick bezüglich grüner synthetischer Brennstoffe, einschließlich Wasserstoff und Erdgas, über die gesamte Versorgungskette hinweg hinsichtlich Produktion, Transport, Lagerung und Endverbrauch von synthetischen Kraftstoffen, geben Rozzi et al. (2020). Es wird auch dargelegt, in welcher Weise thermochemische, elektrochemische und photochemische Prozesse in relevanten Technologien genutzt werden. Ein Schwerpunkt in der Forschung zu Power to Liquid (PtL) ist die Produktion und der Einsatz von E-Fuels im Verkehr. Das PtL-Verfahren bietet unter anderem eine mögliche Lösung für die dezentrale Produktion von synthetischem Kerosin. Meurer und Kern (2021) beschreiben die grundlegende Entwicklung eines vereinfachten Anlagenlayouts, das die spezifischen Herausforderungen der dezentralen Kerosinproduktion adressiert sowie den Einfluss der Fischer-Tropsch-Synthese auf den PtL-Prozess anhand eines stationären Reaktormodells darstellt. Die Ergebnisse belegen den maßgeblichen Einfluss des Fischer-Tropsch-Reaktors auf den PtL-Prozess. Samavati et al. (2018) beschreiben die Integration der Festoxid-Koelektrolyse von Wasserdampf und Kohlendioxid mit dem Fischer-Tropsch-Verfahren zur Umwandlung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen in Fischer-Tropsch-Diesel als ein vielversprechendes Mittel zur Speicherung

erneuerbarer Energie. Kritisch eingeschätzt wird unter anderem der niedrige Kapazitätsfaktor in Anbetracht der Unregelmäßigkeiten bei der Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen sowie die Wirtschaftlichkeit gegenüber herkömmlichem Dieselkraftstoff. Darüber hinaus wird ein neuartiges integriertes System zur Herstellung von Fischer-Tropsch-Diesel aus verschiedenen erneuerbaren Energiequellen vorgeschlagen.

In einer Studie von Özcan et al. (2021) wird die thermodynamische und wirtschaftliche Machbarkeit der Nutzung von Mitteltemperatur-Abwärme aus einem Eisenhüttenwerk zur Herstellung synthetischer Brennstoffe durch CO₂-Wasserstoffabscheidung untersucht. Das Verfahren wird vorgestellt und im Ergebnis festgestellt, dass die zum Einsatz gekommene Methanolproduktionsanlage unter optimalen Bedingungen einen Wirkungsgrad von bis zu 19 % bei Methanolkosten von \$ 532 pro Tonne und einer täglichen Methanolkapazität von 3,69 Tonnen erreichen konnte und damit wettbewerbsfähig war mit anderen Anlagen zur Herstellung sauberer synthetischer Kraftstoffe. Es wird darauf hingewiesen, dass hier beschriebene Konfigurationen für große Mengen an Kohlenstoffabscheidung und -verwertung skaliert werden können.

Nicht nur die Politik, sondern auch die Unternehmen ergreifen Maßnahmen für eine zukünftige CO₂-neutrale Wirtschaftsweise. Zum Beispiel hat die Molkereigenossenschaft Arla Foods diesen Weg im Jahr 2019 eingeschlagen und beschloss eine Nachhaltigkeitsstrategie für ihre Milchviehwirtschaft mit dem langfristigen Ziel, 2050 Netto-Null-CO₂-Emissionen zu erreichen. Das Ziel bis 2030 ist, dass jeder Betrieb seine Emissionen um 30 % reduziert. Dazu führen externe Beratungsinstitutionen Gespräche mit den Milchviehbetrieben, um betriebsindividuelle Möglichkeiten für THG-Einsparungen aufzuzeigen. 93 % der Genossenschaftslandwirte nehmen an dem Programm teil und erhalten aktuell einen Zuschlag von 1 ct/kg abgelieferter Milch (Arla Foods, 2020).

Eine wirtschaftliche Bewertung der Auswirkungen der vorgeschlagenen Änderungen der EU-Mechanismen für die Biokraftstoffpolitik auf die Landwirtschaft am Beispiel Polen wird in dem Beitrag von Gradziuk, P. et al. (*Energies* 2021, 14, 6982) vorgenommen, wobei unter anderem die wirtschaftlichen Vorzüge von Ölsaaten, vornehmlich von Raps, in der Anbaustruktur hervorgehoben werden. Dem Haupt-Argument für die Abkehr der Politik zur Förderung des Biokraftstoffsektors -die Konkurrenz mit der Nahrungsmittelwirtschaft- könnten nach Auffassung der Autoren weitere hinzugefügt werden, wenn ein Vergleich der Biokraftstoffproduktion mit der Produktion von synthetischen Kraftstoffen vorgenommen würde. Zu nennen wäre unter anderem der geringere Flächenverbrauch für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen gegenüber beispielsweise Biodiesel aus Rapsöl; hierbei beträgt der Flächenverbrauch selbst bei Freiland-Photovoltaikanlagen nur 10% einer vergleichbaren Pflanzenölproduktion.

Bei den anstehenden Innovationen der Energieversorgung nehmen auf der technologischen Ebene intelligente Stromnetze, sogenannte Smart Grids, mit ihrem Last- und Erzeugungsmanagement eine wichtige Rolle ein (Klausmann; Zhu, 2018). In Smart Grids sind die einzelnen Komponenten des Energiesystems durch Informations- und Kommunikationstechnologie miteinander verknüpft. Hierbei werden von der Erzeugung, dem Transport, der Speicherung, der Verteilung und dem Verbrauch Informationen an die Netzbetreiber weitergegeben und diese können Erzeugung, Netzbelastung und Verbrauch zeitgenau und weitgehend automatisiert aufeinander abstimmen. Gut aufeinander abgestimmte Komponenten von intelligenten Stromnetzen können dazu beitragen, den teuren Strombedarf in Spitzenlastzeiten zu verringern, die Stromnetze besser auszulasten und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten (BMW, 2021). Einen weiteren wichtigen Bestandteil von Smart Grids stellen Microgrids dar. Microgrids sind kleine Stromversorgungssysteme, die mit dezentralen Energieerzeugungsanlagen ausgestattet sind, um sich mit entsprechender Regelungstechnik selbst versorgen zu können, ohne zwingend mit dem Übertragungsnetz verbunden zu sein. Microgrids stimmen die lokale Energieerzeugung und den lokalen Energieverbrauch aufeinander ab und tragen dazu bei, Spitzenlasten zu vermeiden und Verluste zu reduzieren. (Klausmann; Zhu, 2018). Inzwischen gibt es eine vergleichbare Pilotanlage für die Produktion von CO₂-neutralem Kerosin in Werlte, Emsland, Germany (NDR, 2021; DLR 2016). Die jährliche Leistung dieser Anlage reicht jedoch lediglich für drei Flüge von Europa nach Singapur und zurück.

2 Methodik

2.1 Modellbeschreibung

Der betrachtete landwirtschaftliche Betrieb aus Norddeutschland strebt in Zukunft die Nutzung von regenerativer Energie zur Deckung seines Strom- und Kraftstoffbedarfes an. Die benötigte Stromproduktion und Umwandschritte sollen im Betrieb stattfinden. Das Energiesystem umfasst die erneuerbare Stromerzeugung, die Deckung des Stromverbrauches im Kuhstall, die Batteriespeicherung für Zeiten mit keiner Stromerzeugung, die Produktion synthetischer Kraftstoffe und eine Eingliederung ins öffentliche Stromnetz (Abb. 1). Die Anlage zur synthetischen Kraftstoffproduktion wird nicht in einem konstanten Lastbereich betrieben, sondern passt sich der schwankenden Strombereitstellung aus Wind- und Sonnenenergie an. Somit hat das lokale Energiesystem Eigenschaften eines Microgrids. Für dieses geplante Energiesystem wurde ein Modell im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel (2016) entwickelt, das die Abläufe und Stromflüsse für ein Jahr simuliert. Eine Jahressimulation ist notwendig, da es in der Stromerzeugung durch Wind- und Sonnenenergie sowie im Kraftstoffbedarf eines landwirtschaftlichen Betriebes saisonale

Schwankungen gibt. Anhand der Simulation können notwendige elektrische Leistungen der technischen Anlagen z.B. für die Strom- oder Kraftstoffproduktion bestimmt werden. Des Weiteren werden die Auslastung der technischen Anlagen und die Stromflüsse dargestellt, die abschließend eine ökonomische Bewertung zulassen. Diese beinhaltet die maximalen Investitionskosten in einer Anlage zur synthetischen Kraftstoffproduktion sowie die dafür notwendigen Betriebskosten vorwiegend in Form von regenerativem Strom.

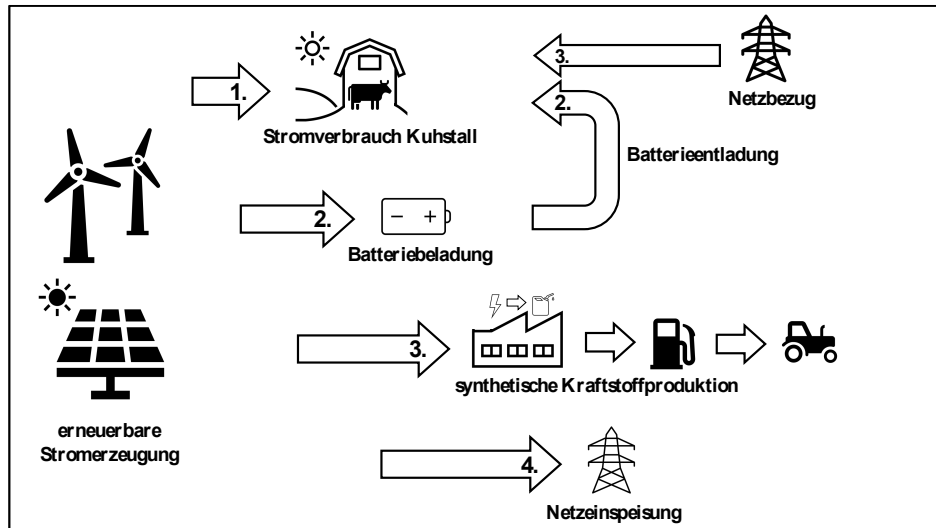


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer regenerativen Energieversorgung aus eigener Stromerzeugung im Milchviehbetrieb

Im Modell ist die Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik der Ausgangspunkt. Die Erzeugungswerte sind im 15 Minutenintervall für das ganze Jahr hinterlegt. Die Größen der einzelnen Komponenten im Modell kann mit Skalierungsfaktoren verändert werden, so dass das Modell flexibel für Simulations- bzw. Planungszwecke eingesetzt werden kann. Der Stromfluss im Modell und damit im Energiesystem erfolgt kaskadenförmig. Das bedeutet, dass der erzeugte Strom zur ersten Stufe des Verbrauches fließt und die dort nicht benötigte Energie fließt zur nächsten Stufe. Auf der ersten Stufe steht der Milchviehstall mit seinem Strombedarf für Licht, Fütterung, Melken mit Melkroboter und Entmistung (Abb. 2). Kann der Strombedarf des Stalles nicht aus eigener Erzeugung direkt gedeckt werden, wird die Batterie entladen oder der Strom aus dem Netz bezogen.

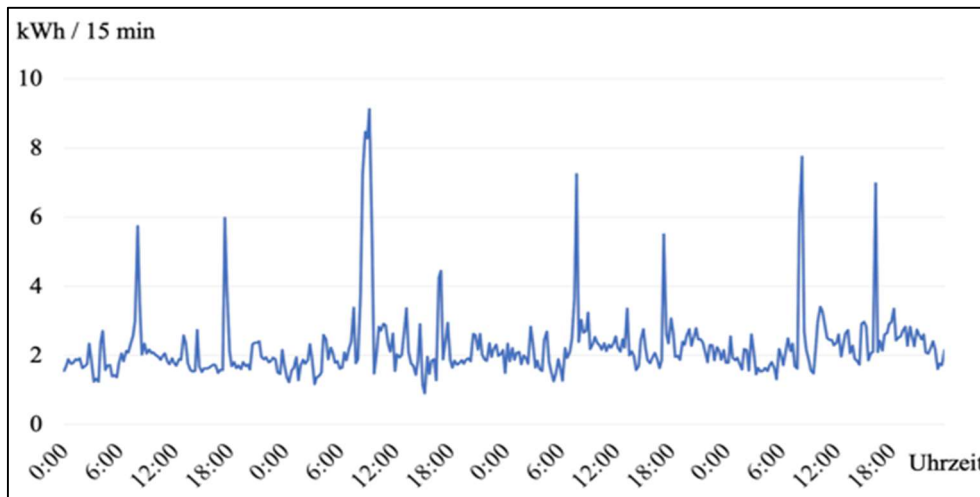


Abbildung 2: Tageslastkurven des Stromverbrauches im Milchviehstall mit Melkroboter an vier aufeinander folgenden Tagen

Quelle: Eigene Erhebungen im Untersuchungsbetrieb

An zweiter Verbrauchsstelle steht die **Batterieladung** bei Stromüberschuss aus der ersten Stufe. Ist der Batteriespeicher vollgeladen, steht der nicht verbrauchte Strom für die nächste Stufe zur Verfügung. Die **Batterieentladung** erfolgt, wenn die erneuerbare Stromerzeugung den direkten Verbrauch des Kuhstalles nicht decken kann. Die Energie der Batterie wird ausschließlich für die Deckung des Strombedarfes im Kuhstall genutzt, vorausgesetzt es ist genügend Strom eingespeichert. Zur Bewirtschaftung der Felder benötigen Fahrzeuge wie Traktoren, Mähdrescher, Häcksler, Radlader, LKW usw. Kraftstoff. Der jährliche Dieselbedarf im Beispielbetrieb weist jahreszeitliche Schwankungen auf (Abb. 3) und liegt bei ca. 35.000 l (ca. 150 l/ha) mit einem Brennwert von etwa 350.000 kWh. Damit ist der Energiebedarf etwa dreimal so hoch wie der Strombedarf in der Innenwirtschaft mit ca. 80.000 kWh. Im Status quo betragen die jährlichen Kosten für Energie aus fossilen Ressourcen 24.128 € für den Strombezug (Marktpreis 0,30 € pro kWh) und 45.066 € für den Dieselbezug (Marktpreis 1,25 € pro Liter). In der Break-Even-Rechnung für die Szenarien mit erneuerbaren Ressourcen sollte der Summe dieser beiden Beträge, 69.194 €, durch die Wertsuche der maximalen Investition für die synthetische Kraftstoff-Produktionsanlage gegenübergestellt werden.

Für die **synthetische Kraftstoffproduktion** wird der selbsterzeugte Strom genutzt, der nicht auf den Stufen des Direktverbrauches und der Batterieladung abgeflossen ist. Der Input der technischen Anlage zur Produktion von synthetischem Kraftstoff ist Strom in kWh. Der Output ist der hergestellte synthetische Kraftstoff, dessen Einheit auch in kWh angegeben wird. Der Kraftstoff wird bis zum Verbrauch in einem Kraftstofflager zwischengespeichert. Das Modell sieht vor, dass nur so viel Energie wie nötig in Kraftstoff umgewandelt wird und es zu einer möglichst gleichmäßigen Auslastung der synthetischen Kraftstoffproduktionsanlage kommt. Um dies zu gewährleisten ist der Kraftstoffbedarf

eines landwirtschaftlichen Betriebes mit Acker- und Futterbau für die einzelnen Wochen des Jahres im Modell hinterlegt (Abb.3).

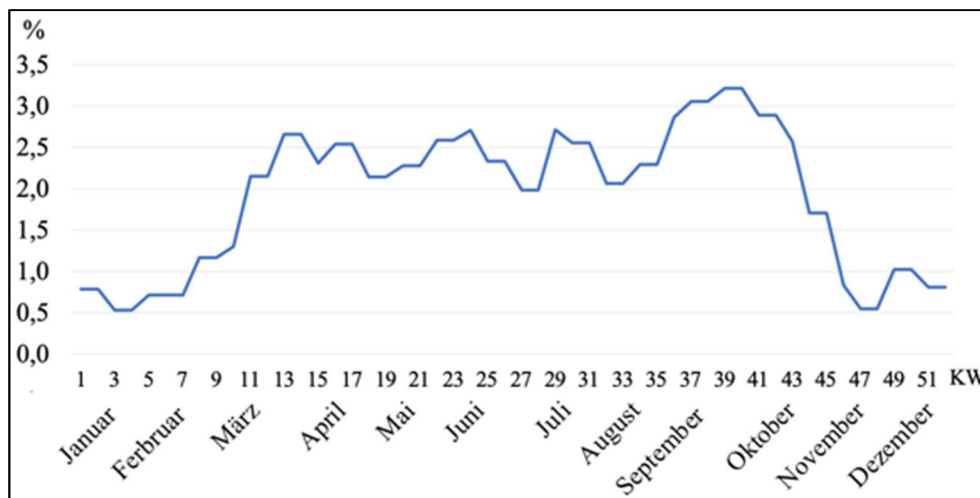


Abbildung 3: Jahresverteilung des Kraftstoffbedarfes in einem Milchviehbetrieb mit Futter- und Ackerbau

Quelle: Eigene Erhebungen im Untersuchungsbetrieb

Erst wenn die Stromerzeugung die Summe der Leistungsabnahme vom Kuhstall, Batterieladung und Kraftstoffproduktion übersteigt, findet eine **Netzeinspeisung** ins öffentliche Stromnetz statt. Zu einem **Netzbezug** aus dem öffentlichen Stromnetz kommt es nur, wenn der Strombedarf des Kuhstalles nicht durch die erneuerbare Stromerzeugung und die Batterieentladung gedeckt werden kann. Strom aus dem öffentlichen Netz wird im Modell nicht für die Batterieladung oder synthetische Kraftstoffproduktion verwendet. Ausfall- oder Wartungszeiten der gesamten technischen Anlagen des Energiesystems werden im Modell nicht berücksichtigt.

Neben dem flexiblen Stromverbrauch für die Kraftstoffproduktion wird auch der konstante Stromverbrauch im Kuhstall im Modell betrachtet, da sich so die Nachteile der erneuerbaren Stromerzeugung aus Wind und Sonne verringern, die Energieeffizienz steigen und die gesamten Energiesystemkosten sinken können. Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen erzeugen nicht gleichmäßig Strom, sondern sind von sich ändernden Umwelteinflüssen abhängig. Damit kann die Stromerzeugung nicht dem Stromverbrauch angepasst werden. Am effizientesten wird der erzeugte Strom genutzt, wenn er direkt verbraucht wird, da es keine Speicher- und Umwandlungsverluste gibt. In dem beschriebenen Modell des Energiesystems profitiert der konstante Stromverbraucher (z.B. der Kuhstall) von den zusätzlichen geschaffenen Kapazitäten für den flexiblen Stromverbraucher (z.B. die synthetische Kraftstoffproduktion), der sich an die fluktuierende Stromerzeugung anpasst. Der flexible Verbraucher hat einen zusätzlichen Gesamtstrombedarf im Jahr. Um diesen zu decken, müssen

größere erneuerbaren Energieanlagen zur Stromerzeugung installiert werden. Diese größere Leistung kann auch bei weniger Sonnenschein oder Wind den Strombedarf des konstanten Verbrauchers decken und erhöht hierdurch den Autarkiegrad des Energiesystems und senkt den Netzbezug inklusive deren Kosten. Der höhere Autarkiegrad ist aber nicht teuer erkaufte, da bei einer Stromerzeugung oberhalb des konstanten Verbrauchs die Erzeugungsanlage nicht gedrosselt wird, sondern sinnvoll vom flexiblen Verbraucher genutzt werden kann. Durch diese Zusammenhänge und Interaktionen im Energiesystem lassen sich die benötigten Energieerzeugungskapazitäten nicht genau den einzelnen Verbrauchern zuordnen, daher werden in der ökonomischen Bewertung (Kapitel 2.4) die gesamten Energiekosten beachtet.

2.2 Technische Beschreibung der synthetischen Kraftstoffproduktion

Die Technik von Photovoltaik- und Windkraftanlagen sowie von Batterien inklusive ihrer Wirtschaftlichkeit wurde an anderer Stelle (Fuchs et al., 2021) bereits dargestellt, so dass im Folgenden lediglich die technischen Komponenten für die synthetische Kraftstoffproduktion erläutert werden. Für die Modellkalkulation dieser Arbeit wird angenommen, dass der landwirtschaftliche Betrieb in eine Anlage zur Produktion von synthetischem Kraftstoff investiert. Diese steht dezentral am Ort der Stromerzeugung und somit auf dem Betriebsgelände. Der zur Herstellung notwendige Kohlenstoff wird aus der Luft gewonnen. Auf dem Gelände des Energy Lab 2.0 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wird die Anlage zur Produktion von CO₂-neutralen flüssigen Kraftstoffen erprobt (KIT, 2019). In der Containeranlage (Abb. 4) können in einer integrierten Prozesskette bis zu 10 l Kraftstoff am Tag produziert werden. Die Prozesskette mit täglich ca. 200 l Output entsteht in der laufenden zweiten Phase des Kopernikus-Projektes am Energy Lab 2.0 des KIT. Die Prozesskette ist hierbei noch nicht vollständig aufgebaut, wenngleich die Syntheseanlage bereits vorhanden ist (KIT, 2021). Durch die modulare Bauweise ist sie für eine zukünftige industrielle Nutzung skalierbar.



Abbildung 4: Containeranlage zur Produktion von synthetischem Kraftstoff am KIT
Quelle: KIT (2019)

Verschiedene Firmen liefern die benötigten Module der Prozesskette (Abb. 5). Die Firma Climeworks stellt das Direct-Air-Capture Verfahren bereit, um CO_2 als notwendigen Ausgangsstoff aus der Atmosphäre zu filtern. Für diesen Prozessschritt wird unter anderem Strom für das Ansaugen von Umgebungsluft benötigt. Die Luft wird durch einen speziellen Filter geleitet, der die CO_2 -Moleküle einfängt. Zum Herauslösen der CO_2 -Moleküle wird zudem noch Wärme benötigt. Der Filter wird auf 95 C erhitzt, um reines CO_2 zu erhalten.

Beim nächsten Schritt kommt die Hochtemperatur-Co-Elektrolyse der Firma Sunfire zum Einsatz. Als Grundstoffe dienen H_2O und CO_2 . Es wird Energie in Form von Wärme und Strom benötigt. Mittels Wärme wird Wasserdampf erzeugt und zusammen mit CO_2 in das Elektrolysesystem eingeleitet. Eine Elektrolysezelle besteht aus einer Kathode, einer Anode und einer Membran dazwischen. Durch das Anlegen von Strom wird an der Kathode Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid in Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid gespalten. Das dabei entstehende Gasgemisch aus H_2 und CO wird als Synthesegas bezeichnet und ist Ausgangsstoff für synthetische Kraftstoffe sowie weitere Stoffe in der chemischen Industrie. Die entstandenen Sauerstoff-Ionen gelangen durch die Membran zur Anode und werden zu Sauerstoffmolekülen.

Im dritten Prozessschritt erfolgt die Fischer-Tropsch-Synthese in einem mikrostrukturierten Reaktor der Firma Ineratec GmbH. Hier werden aus dem Synthesegas Kohlenwasserstoffe mit unterschiedlicher Kettenlänge gebildet. Die Reaktion findet am Katalysator statt, der innovative innere Aufbau des Reaktors (Mikrostrukturierung) ermöglicht die effiziente Auskopplung der entstehenden

Reaktionswärme in Form von Dampf. Die freiwerdende Wärme wird abgeführt und kann in der Hochtemperatur-Co-Elektrolyse genutzt werden.

Das entstandene Produktgemisch aus unterschiedlich langen Kohlenwasserstoffketten bedarf noch einer Aufbereitung, um als synthetischer Kraftstoff eingesetzt werden zu können. Denn die kurzen Kohlenwasserstoffketten sind bei Umgebungstemperatur gasförmig und die langen in einem festen Aggregatzustand.

Der Reaktor für die Umwandlung der kurzen in lange Kohlenwasserstoffketten wurde von dem Institut für Mikroverfahrenstechnik des KIT entwickelt. Bei der sogenannten hydrierenden Spaltung, dem 'Hydrocracking', werden mithilfe von Wasserstoff und einem Katalysator die langen Wasserstoffketten gespalten. Die folgende 'Isomerisierung' sorgt für die Bildung der Isomere; die hier entstehenden Kohlenwasserstoffketten sind dann (a) kürzer und (b) teilweise verzweigt. Die Eigenschaften des Katalysators und die Betriebsbedingungen erlauben eine Steuerung des Produktspektrums hin zum gewünschten Kraftstoff. Durch anschließende Destillation lassen sich Benzin, Diesel oder Kerosin gewinnen (ZML, 2020).

Die beschriebene dezentrale Containeranlage zur Produktion von synthetischem Diesel kann ca. 57 % des eingesetzten Stroms im Kraftstoff speichern. 90 % des gewonnenen Kohlenstoffs aus der Luft befindet sich im flüssigen Endprodukt. Im Gegensatz zum fossilen Kraftstoff sind im synthetischen Kraftstoff keine Aromate und Schwefelverbindungen. Daher verbrennt der synthetische Kraftstoff sauberer.

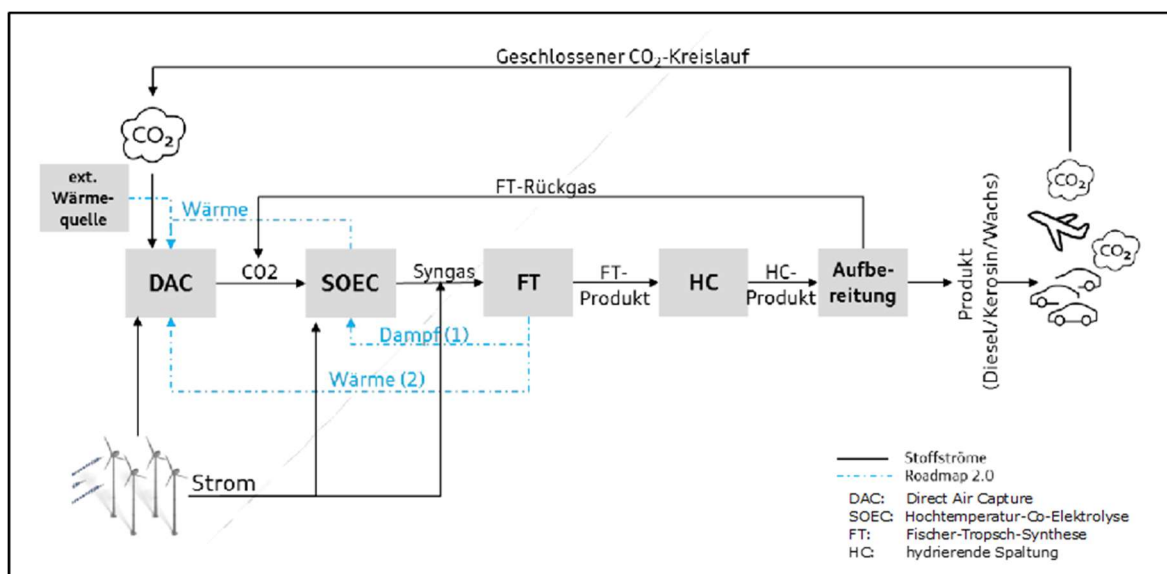


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Bereitstellung synthetischen Diesels

Quelle: In Anlehnung an Forster (2019)

2.3 Investitionsbedarf

Einzelne Komponenten des im Modell vorgestellten Energiesystems, insbesondere die Energieerzeugungsanlagen, sind bereits als bewährte Technologien weit verbreitet im Einsatz. Ihre Investitionskosten (A_0) sind daher bekannt. In Tabelle 1 sind neben dem Anschaffungswert auch die angenommene Nutzungsdauer, der Zinssatz zur Finanzierung und die jährlichen Kosten für Unterhalt und Wartung dargestellt. Die Anschaffungskosten betragen bei PV-Anlagen zwischen 800 und 1000 EUR/kWp, bei Kleinwindkraftanlagen ca. 2.000 EUR/kW, während für Großwindkraftanlage nur ca. die Hälfte davon aufgebracht werden müssen und Anlagen zur Batteriespeicherung ca. 900 €/kWh kosten (Betriebsdaten 2020, Wendel (2019), Kost et al. (2018)). Für alle benötigten Anlagen zur Energieerzeugung und -speicherung wird eine Nutzungsdauer von 20 Jahren angenommen sowie eine Fremdkapitalfinanzierung zu einem jährlichen Zinssatz von 2%. Die jährlichen Kosten für Unterhaltung und Wartung sind als sonstige Kosten in Höhe prozentualer Anteile der Anschaffungskosten ebenfalls in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1:
Kosten für Anlagen zur Energieerzeugung, -speicherung und -umwandlung

	Anschaffungswert (A_0)	Nutzungsdauer in Jahren	Zinssatz in % p.a.	sonstige Kosten in % von A_0
Photovoltaikanlage auf dem Dach	975 €/kWp	20	2,0 %	1,0 %
Photovoltaikanlage im Freiland	800 €/kWp	20	2,0 %	1,0 %
Kleinwindkraftanlage	2.000 €/kW	20	2,0 %	2,5 %
Großwindkraftanlage	1.100 €/kW	20	2,0 %	2,5 %
Batteriespeicher	900 €/kWh	20	2,0 %	1,0 %
Synthetische Kraftstoffproduktion	siehe Tab. 2	20	2,0 %	3,0 %

Quelle: Betriebsdaten 2020, Wendel (2019), Kost et al. (2018)

Die Anlage zur synthetischen Kraftstoffproduktion (s. o. Abb. 4) existiert in Karlsruhe, Germany, zur Zeit erst als Pilotanlage. Eine weitere Pilotanlage für die Produktion von synthetischem Kerosin ist im Oktober 2021 in Wertle, Emsland, Germany, in Betrieb genommen worden (NDR 2021). Die in der Literatur genannte Bandbreite für die Investitionshöhe (A_0) reicht beim Preisniveau im Jahr 2020 von 3.840 €/kW bis über 4.000 €/kW. Für das Jahr 2050 werden leichtniedrigere Anschaffungskosten (Frontier Economics, 2018) zwischen dann 2.335 €/kW und 3.235 €/kW angenommen (Tab. 2).

Tabelle 2:**Investitionskosten aus der Literatur für Anlagen zur synthetischen Kraftstoffproduktion in €/kW**

Jahr:	2020		2050	
	min	max	min	max
CO ₂ -Gewinnung aus der Luft mittels Temperature Swing Adsorption-Technologie	2.231	2.231	1.635	1.635
Hochtemperaturelektrolyse	877	969	400	800
Fischer-Tropsch-Synthese + Upgrading	732	843	300	800
Summe:	3.840	4.043	2.335	3.235

Quelle: In Anlehnung an Frontier Economics (2018)

2.4 Kostenkalkulation und Break-Even-Berechnung

Der landwirtschaftliche Betrieb muss den Strom- und Kraftstoffbedarf decken und möchte dies selbständig aus erneuerbaren Energiequellen gewährleisten. Die in Kapitel 2.1 beschriebenen Vorteile zur effizienten Nutzung der Wind- und Sonnenenergie mittels einem (täglich) konstanten und einem in Jahresablauf flexiblen Stromverbraucher lassen sich nicht trennen und daher werden in der folgenden ökonomischen Bewertung die Energiekosten des Betriebes für den Strom- und Kraftstoffbedarf zusammengefasst.

Ziel ist es die benötigten Betriebsmittel (Diesel und Strom) selber zu erzeugen. Bei der anschließend durchgeführten Break-Even-Analyse soll der selbsterzeugte Diesel/Strom nur so teuer werden, wie ein Zukauf herkömmlicher fossiler Betriebsmittel wäre. Daher sollen die maximalen Investitionskosten für eine Kraftstoffproduktionsanlage bestimmt werden.

Für das Energiesystem wird eine Kosten-Leistungsrechnung erstellt. Mit Hilfe der approximativen Kalkulation und der angenommenen Werte aus Tabelle 1 werden die jährlichen Kosten (K_j) für die Investitionen in erneuerbare Stromerzeugung, Batteriespeicherung und synthetische Kraftstoffproduktion berechnet (Formel 1). Sie setzen sich aus Abschreibung für Abnutzung (AfA), Zinsansatz und sonstigen Kosten (Wartung, Reparatur, Versicherung usw.) zusammen.

Formel 1: Approximative Kalkulation der jährlichen Kosten

Jährliche Kosten = Abschreibung für Abnutzung + Zinsansatz + sonstige Kosten

$$K_j = \frac{(A_0 - R_w)}{N} + \frac{(A_0 + R_w)}{2} * p \% + A_0 * s.K. \%$$

mit: K_j = jährliche Kosten
 A_0 = Anschaffungswert
 R_w = Restwert (bei allen Kalkulationen wird Null angenommen)
 N = Nutzungsdauer
 p = Zinssatz
 $s.K.$ = sonstige Kosten

Mit Hilfe der Kosten-Leistungsrechnung in Formel 2 werden die maximalen jährlichen Kosten, die für eine Investition in die synthetische Kraftstoffproduktion zur Verfügung stehen, berechnet. Das Ziel ist, dass der selbstständig erzeugte Strom und synthetische Kraftstoff die gleichen Kosten verursacht wie ein fossiler Kraftstoffzukauf und kompletter Strombezug aus dem öffentlichen Netz. Um den Break-Even-Point zu bestimmen, fließen zunächst die jährlichen Kosten für einen kompletten Strom- und Kraftstoffzukauf in die Kosten-Leistungsrechnung ein. Da die genannten Kosten im Betrieb ersetzt werden sollen, gehen sie als Leistung in die Rechnung ein. Von ihnen werden die jährlichen Kosten für die Photovoltaik- und Windkraftanlage sowie dem Batteriespeicher abgezogen. Des Weiteren fließen die Zahlungen für die Erneuerbare-Energien-Gesetz-Umlage (EEG-Umlage) in Höhe von 6,5 ct/kWh, die bei Eigenstromverbrauch derzeit 40 % der EEG-Umlage beträgt, mit ein. In der Novelle des Erneuerbare-Energien- Gesetzes aus dem Jahr 2021 wird festgelegt, dass die EEG-Umlage bei der Produktion von Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen zukünftig entfallen soll (EEG 2021). Insbesondere bei der Anlage zur Herstellung von synthetischem Kraftstoff werden keine Betriebskosten für Strom berücksichtigt, da diese mit elektrischer Energie aus hofeigenen PV-Anlagen oder Windkraftanlagen betrieben wird. Als Leistung ist der Jahresertrag (E_j) für den Verkauf von Strom zu berücksichtigen, der bei Überschuss in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird. Das Ergebnis der Kalkulation sind die maximalen jährlichen Kosten, die für die Herstellung synthetischer Brennstoffe zur Verfügung stehen, um die gleichen Kosten für das Gesamtsystem zu haben wie für einen fossilen Brennstoffbezug und einen vollständigen (Kohle-)Strombezug aus dem öffentlichen Netz (Formel 2).

Formel 2: Ermittlung der max. K_j für die synthetische Kraftstoffproduktion zum Break-Even mit der Ausgangssituation/Status quo/Einsatz fossiler Energien

$+K_j$ kompletter Stromzukauf aus dem öffentlichen Netz $+K_j$ fossiler Kraftstoffzukauf	} ohne EE (Status quo)
$-K_j$ Photovoltaik $-K_j$ Windkraft $-K_j$ Batteriespeicher $-K_j$ Anteil EEG-Umlage $-K_j$ Stromzukauf $+E_j$ Stromverkauf	} mit EE (Strom aus PV und Wind)
= max. K_j synthetische Kraftstoffproduktion	<i>Saldo (Kostenanteile aus AfA, Zins und Wartung; ohne Stromkosten)</i>

Das wirtschaftliche Ziel besteht darin, den Break-Even-Punkt zu ermitteln, bei dem die Kosten der Herstellung von synthetischem Kraftstoff den bisherigen Kosten von fossilem Diesel entsprechen würden (Formel 3). Als veränderliche Größe wird der anteilige Investitionsbetrag A_0 der Kraftstoffproduktionsanlage so verändert, dass die dann resultierenden jährlichen Kosten K_j für die Herstellung von synthetischem Kraftstoff (Formel 1) gleich dem maximalen K_j für die Herstellung von synthetischem Kraftstoff (Formel 2) sind.

Formel 3: Kalkulation zur Ermittlung des maximalen Investitionsbetrages A_0 für die synthetische Kraftstoffproduktion

Zielwert: K_j synth. Kraftstoffproduktion (Gl. 2) = Zielzelle: K_j synth. Kraftstoffproduktion (Gl. 1)

Die Aufgliederung der Gesamtkosten für den Energieverbrauch des landwirtschaftlichen Betriebs in Kosten pro kWh verbrauchtem Strom ohne Brennstoffherzeugung und pro kWh erzeugtem Brennstoff ist in den Formeln 4a und 4b dargestellt. Diese Berechnung zeigt am Ende (Abb. 8), wie sich die Relationen zwischen Stromkosten und Dieselpreisen verschieben, wenn Erneuerbare Energien zum Einsatz kommen würden.

Formel 4: Rechengang zur Aufteilung der Gesamtkosten pro kWh für selbst erzeugten Strom und für synthetischen Brennstoff:

$+K_j \text{ Photovoltaik}$ $+K_j \text{ Windkraft}$ $-E_j \text{ Stromverkauf}$ <hr/> $= K_j \text{ Stromstehungskosten des im Betrieb verbrauchtem Stroms}$	
<p>* Anteil des Stromverbrauches ohne Kraftstoffproduktion am gesamten Stromverbrauch aus eigener Erzeugung</p> $+K_j \text{ Batteriespeicher}$ $+K_j \text{ Anteil EEG-Umlage}$ $+K_j \text{ Stromzukauf}$ <hr/> $= K_j \text{ Strom}$ <p>/ jährlichen Stromverbrauch in kWh</p> <hr/> $= \text{Stromkosten/kWh}$	<p>* Anteil des Stromverbrauches der Kraftstoffproduktion am gesamten Stromverbrauch aus eigener Erzeugung</p> $+K_j \text{ synthetische Kraftstoffproduktion}$ <hr/> $= K_j \text{ synthetischer Kraftstoff}$ <p>/ jährliche synthetische Kraftstoffherzeugung in kWh</p> <hr/> $= \text{synthetische Kraftstoffkosten/kWh}$
Formel 4a	Formel 4b

3 Verschiedene Szenarien

Der Aufbau einer selbstständigen und regenerativen Energieversorgung eines landwirtschaftlichen Betriebes hängt neben den beschriebenen technischen Möglichkeiten auch von betrieblichen Gegebenheiten ab. Gibt es eine ausreichend große Flächenverfügbarkeit für Photovoltaikanlagen oder ein bestehendes Windrad? Um einerseits verschiedene betriebliche Ausgangssituationen und andererseits mögliche zukünftige (Preis-) Entwicklungen abbilden zu können werden zwei Szenarien für unterschiedliche technische Lösungen der erneuerbaren Stromerzeugung betrachtet. In Szenario 1 erfolgt die Stromproduktion mit einer Photovoltaikanlage auf dem Dach und einer Windkraftanlage. Das Szenario 2 produziert den erforderlichen Strom nur mit Photovoltaikanlagen, die sich auf den Dächern und im Freiland befinden. Weiterhin werden für beide Szenarien Sensitivitätsanalysen mit aktuellen und steigenden für Strom- und Dieselpreisen simuliert. Beide Szenarien werden mit dem Status quo verglichen, wobei Energie ausschließlich aus fossilen Ressourcen gewonnen wird und die jährliche Kosten 69.194 € betragen (Tabelle 3).

Szenario 1:

In Szenario 1 wird in eine PV-Anlage auf dem Dach (125 kWp), in eine Kleinwindkraftanlage (250 kW) und in die synthetische Kraftstoffproduktion (210 kW) investiert (Tab. 3). Auch wird zusätzlich die Investition in eine Batterie (2 kWh) erwogen, was sich jedoch bei vorhandenen Windrädern als nicht notwendig erweist (Fuchs et al. 2021). Neben der Kleinwindanlage wurde auch die Beteiligung an einer Großwindkraftanlage geprüft, da die Stromgestehungskosten hier nur halb so groß sind wie bei einer Kleinwindkraftanlage. Diese Variante wird jedoch aus Platzgründen nicht ausführlich dargestellt, sondern vielmehr in den Schlussfolgerungen aufgegriffen.

Für alle Szenarien und Betrachtungsvarianten wird analysiert, wie sich Steigerungen der Marktpreise für Strom von 0,30 €/kWh auf 0,45 €/kWh und für Diesel von 1,25 €/l auf 2,00 €/l auswirken würden, denn mit steigenden Energiepreisen sollte die Rentabilität einer eigenen Energieversorgung zunehmen.

Die Kapazitäten der technischen Anlagen des **Szenarios 1** wurden wie folgt hergeleitet:

Der Betrieb hat einen jährlichen Kraftstoffbedarf von 350.000 kWh, der durch die eigene Kraftstofferzeugung gedeckt werden soll. Um mögliche jährliche Erzeugungsschwankungen der Sonnen- und Windenergie von +/- 15 % ausgleichen zu können wird eine Sicherheitsreserve in gleicher Höhe berücksichtigt. Daher wird von einem Kraftstoffbedarf i. H. v. 402.500 kWh ausgegangen. Bei einem Wirkungsgrad der Umwandlung von Strom in synthetischen Kraftstoff von 60 % ergibt sich für die Stromerzeugung ein Bedarf von ca. 670.000 kWh im Jahr. Bezieht man noch den direkten Eigenverbrauch an Strom des Kuhstalls und die Batteriebeladung ein, wird von einer Jahresgesamststromerzeugung in Höhe von 742.000 kWh ausgegangen. Um diesen erneuerbaren Strom bereitzustellen ist eine Kleinwindkraftanlage an dem Standort mit einer Leistung von 250 kW und eine Dachphotovoltaikanlage mit einer Leistung von 125 kWp erforderlich. Darüber hinaus ist zur Kraftstoffherstellung in Szenario 1 eine maximale elektrische Leistung der Anlage von 210 kW notwendig. Der Einsatz eines Batteriespeichers wurde auch in diesem Szenario 1 geprüft. Da die dabei ermittelte Batteriegröße lediglich 2 kWh beträgt, wird darauf nicht weiter eingegangen.

Tabelle 3:
Vergleich der technischen Parameter der installierten Systeme und ihrer Leistung (Status quo, Szenario 1 & Szenario 2)

Szenario	Status quo (fossile Energieressourcen)	Szenario 1 (PV + Wind)		Szenario 2 (PV auf Dach und Freiland)	
A) Bezug von Energie aus fossilen Ressourcen					
... Strom (Preis 0,30 €/kWh)	80,000 kWh; 24.128 €	—	—	—	—
... Diesel (Preis 1,25 €/l)	350,000 kWh; 45.066 €	—	—	—	—
B) Investitionen in erneuerbare Energiesysteme		installierte Leistung	Erzeugung / Entladung / Verbrauch	installierte Leistung	Erzeugung / Entladung / Verbrauch
PV auf dem Dach		125 kWp (~1.250 m ² Dachfläche)	118.722 kWh	200 kWp (~2.000 m ² Dachfläche)	189.995 kWh
PV im Freiland		—	—	520 kWp (~5.200 m ² Freifläche)	552.045 kWh
Klein- oder Großwindkraftanlage		250 kW	623.278 kWh	—	—
Batteriespeicher		2 kWh	607 kWh	105 kWh	31.945 kWh
Synthetische Kraftstoffproduktion		210 kW	600.887 kWh	385 kW	600.918 kWh
Summe der Energieerzeugungskapazitäten		587 kW		1.210 kW	

Szenario 2:

Im **Szenario 2** soll der Strom ausschließlich durch Photovoltaikanlagen produziert werden. Da auf dem Dach des Kuhstalles nur eine PV-Anlage mit einer maximalen Leistung von 200 kWp installiert werden kann, wird für die darüber hinaus benötigte Leistung eine PV-Anlage im Freiland in der Nähe des Stalles installiert. Die Kapazität der Photovoltaikanlagen wird zur besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Szenarien so gewählt, dass jeweils eine Jahresgesamterzeugung von 742.000 kWh erreicht wird. Die Leistung der PV-Anlagen beträgt somit für die auf dem Dach 200 kWp und für die im Freiland 520 kWp. Die nutzbare Speicherkapazität des Batteriesystems ist mit 105 kWh größer gewählt. Die Anlage zur Kraftstofferzeugung muss eine maximale Leistungsabnahme von 385 kW haben, um im Jahr ca. 600.000 kWh elektrischen Strom in synthetischen Kraftstoff umwandeln zu können. Die installierte elektrische Leistung der Anlagen im Szenario 2 ist höher im Vergleich zum Szenario 1 da der gleiche Energiebedarf aufgrund der nur am Tage zur Verfügung stehenden Sonnenenergie mit weniger Volllaststunden gedeckt werden muss.

4 Ergebnisse der Modellsimulationen

Die Untersuchung zeigt die technischen und wirtschaftlichen Unterschiede zwischen den beiden Szenarien, d. h. der Stromproduktion mit Wind und PV-Anlagen (Szenario 1), bzw. ausschließlich mit PV-Anlagen, auf den Dächern des Kuhstalles und auf angrenzenden Flächen im Freiland (Szenario 2).

4.1 Erzeugung und Verbrauch der Strommengen sowie des synthetischen Kraftstoffs

Die Mengen an Strom, die benötigt werden, um den Betrieb mit Strom und Kraftstoffen aus Erneuerbaren Quellen zu versorgen, wurden in Tabelle 3 dargestellt. In beiden Szenarien wird zusätzlich der Bedarf i. H. von 10.000 kWh aus dem öffentlichen Stromnetz berücksichtigt. Dieser wird zur Deckung des Stromverbrauches des Kuhstalls in Zeiten mit keiner eigenen erneuerbaren Stromproduktion benötigt. Somit hat der Netzbezug am Gesamtstromverbrauch des Kuhstalls einen Anteil von ca. 13 %. Das bedeutet, dass der übrige Strombedarf von den eigenen erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen gedeckt wird und der Autarkiegrad des Kuhstalles bei beiden Szenarien bei ca. 87 % liegt.

In der Abbildung 6 werden die prozentualen Anteile der Erzeugung und des Stromverbrauchs dargestellt. Den größten Teil der Stromerzeugung übernimmt in Szenario 1 das Windrad mit 84 % und in Szenario 2 die PV-Anlage im Freiland mit einem Anteil von 74 %. Die ergänzende Stromproduktion erfolgt jeweils durch die PV-Anlagen auf dem Dach.

Die Verwendung des selbst erzeugten Stroms ist in beiden Szenarien gleich. 9 % werden ins öffentliche Netz eingespeist, da zum Zeitpunkt der Erzeugung keiner der nachfolgenden Verbraucher den Strom abnehmen kann. Die synthetische Kraftstoffproduktion hat mit 81 % den größten Anteil am Stromverbrauch. In der Innenwirtschaft wird 10 % des erzeugten Stroms verbraucht und dies hauptsächlich im Kuhstall. Letzteres teilt sich im Szenario 2 nochmals auf in Strom, der direkt verbraucht und Strom, der zunächst zwischengespeichert wird. 5 % werden zum Zeitpunkt der Erzeugung auch im Kuhstall verbraucht. Die anderen 5 % werden erst zum späteren Zeitpunkt, überwiegend in der Nacht, verbraucht und werden vorübergehend in der Batterie gespeichert.

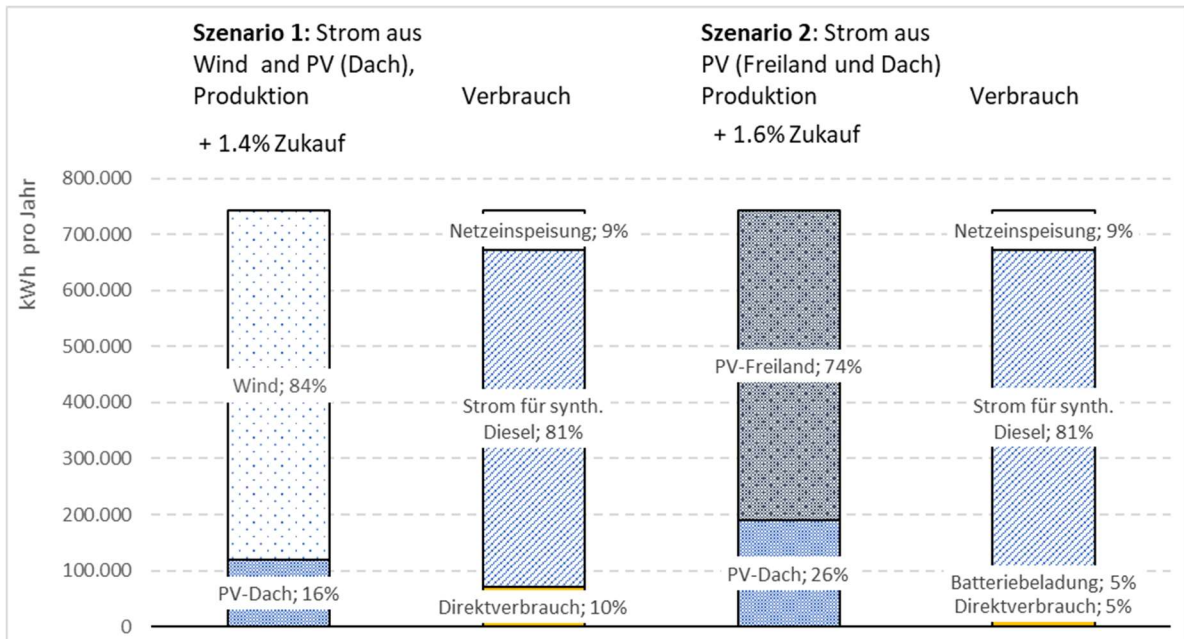


Abbildung 6: Jahresstromerzeugung und Verbrauch des erzeugten Stroms im Vergleich (Szenario 1 & Szenario 2)

Welchen Einfluss die verschiedenen Eigenschaften der Stromerzeugungsanlagen im Jahresverlauf auf das Kraftstofflager, die Netzeinspeisung und den Netzbezug im Energiesystem haben, ist der Abbildung 7 zu entnehmen. Die blauen Linien zeigen für das Szenario 1 (PV + Wind) und Szenario 2 (ausschließlich PV) jeweils den aktuellen Lagerbestand an synthetischem Kraftstoff im Verlauf eines Jahres. Die beiden Graphen zeigen die wöchentliche Kraftstoffentnahme für Traktoren in der Außenwirtschaft. Einem stärkeren Rückgang des Lagerbestandes, folgt dessen Aufbau durch die synthetische Kraftstoffproduktion im Betrieb in den nachfolgenden Tagen. Der Dieserverbrauch ist von März bis Oktober auf einem konstant hohen Niveau (Abb. 3).

In Szenario 1 führt die durch ein geringeres Windaufkommen eingeschränkte Stromproduktion in den Sommermonaten bei gleichzeitig hohem Kraftstoffverbrauch zu einem sich ständig abbauenden Kraftstofflagerbestand in den Monaten von April bis in den November hinein. Im Dezember steigt der Lagerbestand wieder stark an, sodass Anfang des Jahres Strom ins öffentliche Netz eingespeist werden kann, da der angestrebte Mindestvorrat des Kraftstofflagers erreicht ist. Der Netzbezug ist über das gesamte Jahr ähnlich gering. Deutlich wird, dass im Szenario 1 gegenüber Szenario 2 eine Kraftstoffreserve über die Wintermonate angelegt werden muss, um Ende des Herbstes noch ausreichend Diesel für die Maisernte im Lager zu haben (Abb. 7).

Im Szenario 2 führt die erhöhte Stromproduktion der Photovoltaikanlage in den Sommermonaten selbst bei dem gleichzeitigen Hauptverbrauch des Diesels zu einem ansteigenden Kraftstofflagerbestand. Es zeigt sich, dass eine Kraftstoffreserve über die Sommermonate angelegt werden muss, um Anfang März die Feldarbeiten beginnen zu können. Die dargestellte Netzeinspeisung

bis zu einem Lastgang von ca. 50 kWh/15 min ist durch Spitzenlastzeiten der Photovoltaikanlage über die Mittagszeit bedingt. Die erzeugte Stromleistung übersteigt die installierte Abnahmeleistung der synthetischen Kraftstoffproduktion. Im Juli gibt es eine hohe Einspeisung von ca. 120 kWh/15min, da die Anlage zur Kraftstoffproduktion keinen Strom verbraucht. Das Kraftstofflager ist zu dem Zeitpunkt ausreichend gefüllt. Von April bis September gibt es einen geringen Netzbezug aufgrund des Strombezugs aus dem Batteriespeicher. In den Wintermonaten fällt dieser auf Grund der verringerten Stromproduktion stärker aus.

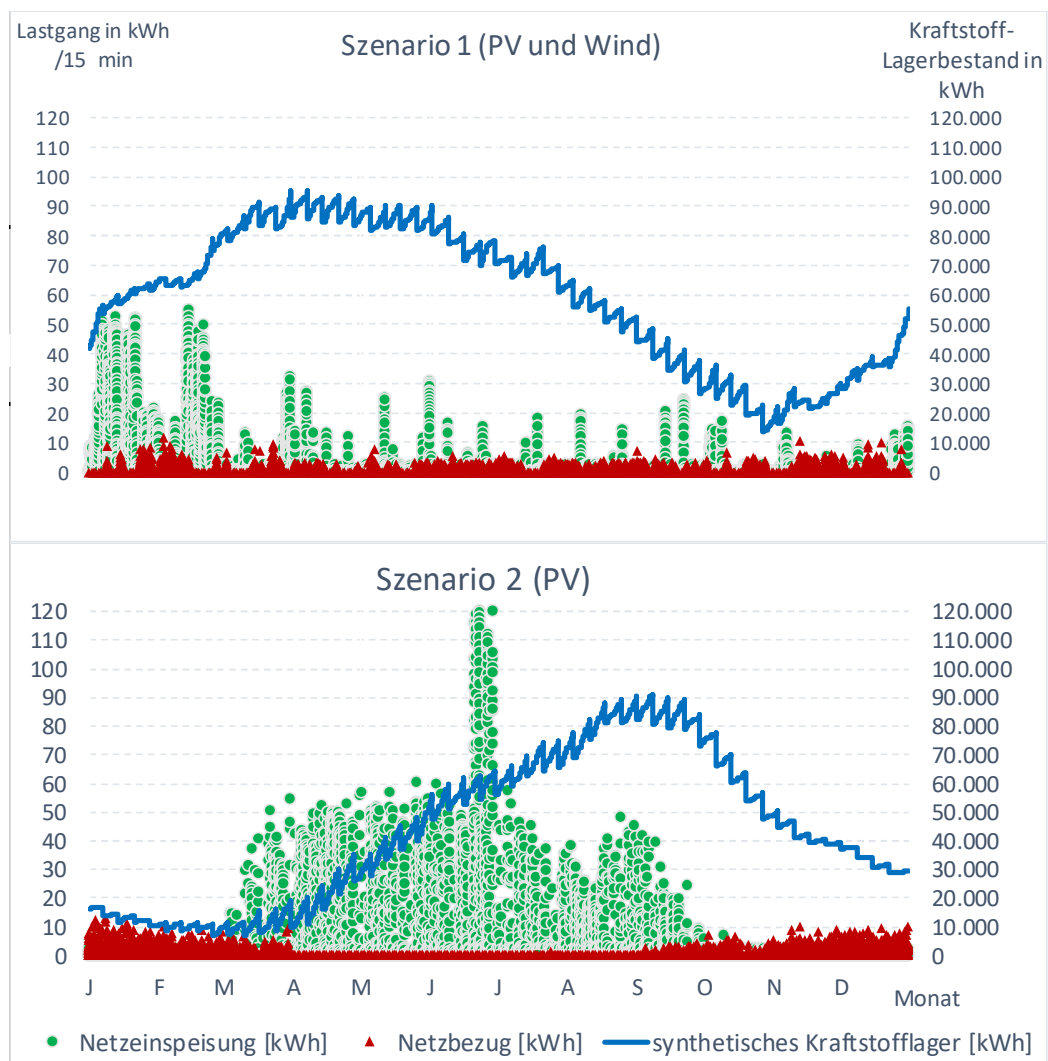


Abbildung 7: Lastgang von Netzeinspeisung und Netzbezug sowie Lagerbestände der synthetischen Kraftstoffe beider Szenarien im Jahresverlauf

Die geringeren Laststunden einer Photovoltaikanlage pro Jahr erfordern nicht nur einen größeren Batteriespeicher, sondern auch Energieerzeugungs- und Energieumwandlungsanlagen, wenn in der Summe des Jahres eine ähnliche Energiemenge wie mit Windkraftanlagen genutzt werden soll (Tab. 3). Die Energieerzeugungsanlagen in Szenario 2 (PV) haben mit 720 kW eine fast doppelt so hohe Leistung

wie in Szenario 1 (PV + Wind) mit 375 kW (Tab. 3). Ähnliche Differenzen in der installierten Leistung gibt es zwischen den Anlagen zur synthetischen Kraftstoffproduktion.

4.2 Kosten der Energieversorgung und Break-Even für Investitionen

Die Energieversorgung des Beispielsbetriebes erfolgt zunächst vollständig durch Strom, der dann durch Sektorenkoppelung in synthetischen Kraftstoff umgewandelt wird. Hierbei wird Strom hauptsächlich bei der Hochtemperatur-Co-Elektrolyse benötigt. Aufgrund des hohen Strombedarfs für diesen Umwandschritt stellen die Stromentstehungskosten einen großen Teil an den Gesamtkosten für synthetischen Kraftstoff dar. Die jährlichen Kosten für die erneuerbare Energieerzeugung werden stufenweise berechnet:

- A) jährliche Kosten für die gesamte Stromproduktion auf dem Betrieb (Strombedarf in der Innenwirtschaft und für Diesel),
- B) maximale jährliche Kosten für die Investition der synthetischen Kraftstoffproduktionsanlage (ohne Strombedarf) zur Deckung der jährlichen Gesamtkosten wie im Status quo und
- C) die Umverteilung der Kosten gemäß Formel 4, wobei die jährlichen Kosten der synthetischen Dieselproduktion die Anlageninvestitionen und den Strom beinhalten.

Die Stromerzeugung in einer Kombination aus PV-Dachanlage und Kleinwindenergieanlage (Szenario 1) kostet ca. 53.000 € p.a. und entspricht damit in etwa der von PV-Anlagen in Kombination mit einer Batterie (Szenario 2) (Tabelle 4, Teil A). Wenn der Strom aus einer großen Windkraftanlage günstiger bezogen werden kann, würden die jährlichen Kosten (K_j) auf ca. 35.000 € sinken, was eine Differenz und damit jährliche Kosteneinsparungen von ca. 20.000 € bedeutet.

Tabelle 4:**Kapazitäten und jährliche Kosten der Stromversorgung und der Produktionsanlage für synthetische Kraftstoffe, zusätzlich die Einnahmen aus dem Überschussstromverkauf**

Szenario	Status quo (fossile Energieressourcen)	Szenario 1 (Wind & PV)	Szenario 2 (PV)
A) Stromerzeugungssystem (Strom zur direkten Nutzung und zur synthetischen Dieselerzeugung)			
K _j Photovoltaik Dach		125 kWp: 8.523 €	200 kWp: 13.636 €
K _j Photovoltaik Freiland		—	520 kWp: 29.120 €
K _j Kleinwindkraftanlage ¹⁾		205 kW: 42.500 €	—
K _j Batteriespeicher		2 kWh: 126 €	105 kWh: 6.615 €
K _j Anteil EEG-Umlage		1.851 €	1.875 €
K _j Stromzukauf (-)		3.478 €	4.013 €
E _j Stromverkauf (+)		2.797 €	2.758 €
Zwischensumme Jahreskosten K _j für die Stromproduktion (für Szenario 1 mit Kleinwindenergieanlage)		53.681 €	52.501 €
B) Herstellungssystem für synthetischen Kraftstoff Kapazität			
Kapazität		210 kW	385 kW
Break-Even-Anschaffungswert (€/kW) für die synthetische Kraftstoffanlage zur Deckung der jährlichen Gesamtkosten K _j wie im Status quo		821	482
Zwischensumme Jahreskosten K _j für Anlagen zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe (ohne Stromkosten)		15.513 €	16.694 €
Jährliche Gesamtkosten K _j für die Erzeugung erneuerbarer Energien auf Betriebsebene	69.194	69.194	69.194
C) Umverteilung der jährlichen Kosten K_j (nach Formel 4)			
K _j von Strom für die Innenwirtschaft (Gebäude und Tierhaltung)	Kohle-Strom	Grüner Strom	Grüner Strom
- Jährliche Kosten	24.128 €	10.564 €	16.790 €
- Kosten pro kWh	0,30 €	0,130 €	0,146 €
K _j Strom plus Investition für die synthetische Kraftstoffanlage	Fossiler Diesel	E-Diesel	E-Diesel
- Jährliche Kosten	45.066 €	58.630 €	52.404 €
- Kosten pro l Diesel	1,25 €	1,63 €	1,45 €
Jährliche Gesamtkosten K _j	69.194 €	69.194 €	69.194 €

1) Alternative: Geringere Kosten bei Einsatz einer Großwindkraftanlage statt einer Kleinwindkraftanlage,

Verbrauchsanteil 250 kW: dann reduzierte Jahreskosten K_j auf 23.375 € (Differenz: -19.125 €).

Im Status quo (fossile Energieressourcen) mit einem Strompreis von 0,30 €/kW und einem Dieselpreis von 1,25 €/l hat der Betrieb Energiekosten von insgesamt rund 70.000 €, wovon rund zwei Drittel für den Einkauf von Diesel aufgewendet werden müssen. Beim Umstieg auf Erneuerbare Energien würden die durchschnittlichen Stromkosten auf 0,13 €/kWh (Szenario 1) bzw. 0,16 €/kWh (Szenario 2) sinken. Grund für die Kostensenkungen gegenüber der Ausgangssituation (0,30 €/kWh) sind die zusätzlichen Investitionen in PV-Anlagen oder Windkraftanlagen, die unter anderem für die synthetische Kraftstoffherstellung notwendig sind. Im Gegensatz dazu steigen die Kosten für synthetischen Diesel. Um zu vermeiden, dass die jährlichen Gesamtkosten den Betrag von ca. 70.000 € übersteigen, darf die Investition in Anlagen zur Produktion synthetischer Kraftstoffe nicht höher sein als 821 €/kW (Szenario 1) bzw. 482 €/kW (Szenario 2). Dieser Betrag liegt weit unter den aktuellen Investitionskosten für solche Anlagen von rd. 4.000 €/kW (Tabelle 2). Daher die Einschätzung am Ende des Artikels, dass solche Systeme derzeit wirtschaftlich nicht vertretbar wären.

Die Zwischensumme der jährlichen Kosten für Anlagen zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe (ohne Stromkosten) beträgt 15.513 € für Szenario 1 und 16.694 € für Szenario 2 (Tabelle 4, Teil B). Die beiden Teilsummen von A) und B) ergeben zusammen dann wieder den Betrag von ca. 70.000 € Energiekosten für den gesamten Betrieb wie im Status quo.

Im direkten Vergleich mit Szenario 1 darf die Anlage in Szenario 2 deutlich weniger kosten, obwohl die jährlichen Kosten, die für die synthetische Kraftstoffproduktion zur Verfügung stehen, bei beiden Szenarien annähernd gleich hoch sind. Grund für den Unterschied in den Anschaffungskosten ist, dass in Szenario 2 die Anlage zur Kraftstoffproduktion eine fast doppelt so hohe elektrische Leistung hat. Diese wird benötigt, um eine ähnliche Menge an synthetischem Kraftstoff zu produzieren trotz deutlich geringerer Laststunden einer Photovoltaikanlage gegenüber einer Windkraftanlage. Die geringeren Laststunden einer Photovoltaikanlage wirken sich auch auf die nachfolgenden Stromverbraucher, da an weniger Stunden im Jahr elektrischer Strom zur Verfügung. Wird das höchste Energiepreisniveau von 45 ct/kWh für Strom und 2,00 €/l für fossilen Diesel erreicht, gestattet das Szenario 1 maximale Anschaffungskosten von 2.798 €/kW für die Anlage zur Kraftstoffproduktion. In Szenario 2 sind es lediglich 1.552 €/kW (Abb. 8).

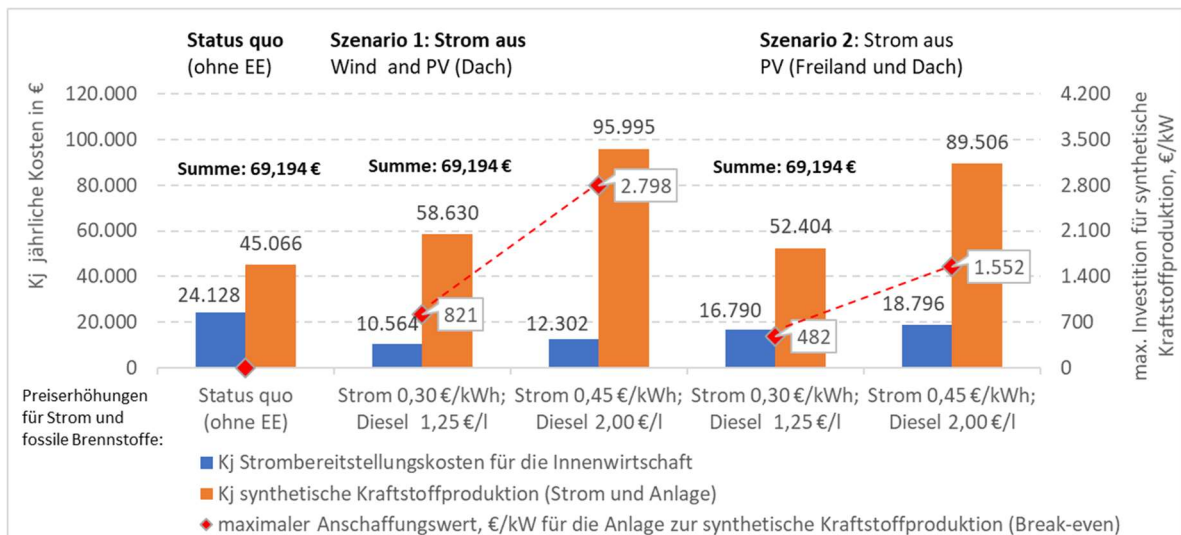


Abbildung 8: Simulationsergebnisse der maximalen Anschaffungswerte (€/kW) für die synthetische Kraftstoffproduktionsanlage und deren jährlichen Kosten

Aufgrund der geringeren Stromgestehungskosten erlaubt das Szenario „Große Windkraftanlage“ einen maximalen Preis von 1.833 €/kW für die synthetische Kraftstoff-Produktionsanlage auf dem niedrigsten Energiepreisniveau. Beim höchsten Energiepreis können bis zu 3.810 €/kW für die Anlage zur synthetischen Kraftstoffherzeugung aufgewendet werden, um das Energiesystem des Milchviehbetriebes autark und regenerativ mit Strom und Kraftstoff in Höhe der Kosten von Kauf von fossilem Diesel und Strom zu betreiben.

Aufgrund der niedrigeren Stromgestehungskosten erlaubt das Szenario „Großwindrad“ im niedrigsten Energiepreisniveau einen maximalen Preis von 1.833 €/kW für die synthetische Kraftstoffproduktionsanlage. Beim höchsten Energiepreis kann bis zu 3.810 €/kW für die Anlage zu synthetischen Kraftstoffproduktion ausgegeben werden, um das Energiesystem des Milchviehbetriebes selbständig und regenerativ mit Strom und Kraftstoff in Höhe der Kosten für einen Zukauf von fossilem Diesel und Strom zu versorgen. Dieser berechnete Break-Even der maximalen Investitionskosten liegt nicht mehr weit oder sogar unter den erwarteten Investitionskosten für Anlagen zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe, die für das Jahr 2050 prognostiziert werden (Tab. 2). Bei steigenden Preisen für fossilen Diesel wären grundsätzlich höhere Anschaffungskosten gerechtfertigt, um die Gewinnschwelle zu erreichen.

5 Diskussion und Empfehlung

Die von einem landwirtschaftlichen Betrieb benötigte Energie in Form von Strom, Diesel oder Wärme weist nicht den höchsten Anteil an den Treibhausgasemissionen, die aus der Landwirtschaft stammen, auf. Die größten Emissionsquellen sind landwirtschaftliche Böden und die Verdauung der Wiederkäuer

(BMU, 2019). Zum Erreichen der Klimaziele und zur Begrenzung der Erderwärmung auf möglichst 1,5 C muss an mehreren Stellschrauben gedreht werden. Darunter fällt auch der Ersatz des fossilen Dieselkraftstoffes durch synthetische Kraftstoffe. Laut der nationalen Wasserstoffstrategie der deutschen Bundesregierung soll ein großer Anteil Wasserstoff und synthetischer Kraftstoffe in der Zukunft importiert werden, da die Erzeugungskapazitäten für erneuerbare Energien in Deutschland begrenzt sind.

Die vorliegende Arbeit weist klare Vorzüge aus, dass die Effizienz des betrieblichen Energiesystems durch eine synthetische Kraftstoffproduktion innerhalb des landwirtschaftlichen Betriebs erhöht werden kann. Dadurch kann eine selbstständige und regenerative Energieversorgung gewährleistet werden. Für das dargestellte kleine Energiesystem des Milchviehbetriebes ist es positiv, einen flexiblen, aber notwendigen Stromverbraucher, wie z.B. in Form einer synthetischen Kraftstoffproduktion, zu nutzen, um den konstanten Stromverbrauch des Milchviehstalles mit einem sehr hohen Anteil aus erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen zu decken. Des Weiteren ist eine Kopplung zwischen den Sektoren Strom und Mobilität in dem in dieser Arbeit vorgestellten landwirtschaftlichen Betrieb notwendig. Dieses Erfordernis gilt allerdings grundsätzlich für die gesamte deutsche Landwirtschaft, da der Kraftstoffbedarf die größte Energieposition darstellt und sich der mobile Energiebedarf der Traktoren nicht praktikabel elektrifizieren lässt.

Die Modellberechnungen des in dieser Arbeit vorgestellten Energiesystems für einen Standort in Norddeutschland zeigen, dass die Stromerzeugung im optimalen Fall durch eine Windkraftanlage mit Ergänzung einer Photovoltaikanlage erfolgt. Damit wird in dem Großteil der Stunden im Jahr selbst Strom produziert und 87 % des gesamten Strombedarfs des Kuhstalls kann auf diese Weise durch den direkten Verbrauch des selber hergestellten Stromes gedeckt werden. Auch die Anlage zur synthetischen Kraftstoffproduktion kann hierdurch eine gute Auslastung aufweisen.

Andere Ergebnisse zeigt das vorgestellte Energiesystem, wenn ausschließlich mit Photovoltaikanlagen Strom erzeugt wird. Hierbei ist ein großer Batteriespeicher notwendig, damit der konstante Stromverbrauch des Kuhstalles zu einem großen Teil durch den selbst erzeugten Strom gedeckt wird. Das Energiesystem des Milchviehbetriebes kann durch den flexiblen Stromverbraucher in Form der synthetischen Kraftstoffproduktion auch in den erhöhten Erzeugungszeiten der Photovoltaikanlage den Strom sinnvoll nutzen und es führt nicht zu einer Spitzenlast in der Erzeugung im öffentlichen Netz über die Mittagszeit.

Die Auswertung des Szenario 2 (PV) dieser Arbeit zeigt, dass es aus ökonomischer Sicht sehr teuer ist, die Phasen der hohen Erzeugungslast einer Photovoltaikanlage mit einem flexiblen Verbraucher zu nutzen, da die Laststunden zu gering sind aufgrund fehlender Stromproduktion in der Nacht. Die

synthetische Kraftstoffanlage darf bei Energiepreisen von 30 ct/kW für Strom und 1,25 €/l für fossilen Diesel maximal 482 €/kW installierter Leistung kosten.

Um die gleiche Menge an synthetischem Kraftstoff zu produzieren, bei ähnlich hohen Strombereitstellungskosten, darf die Kraftstoffproduktionsanlage im Szenario 1 (PV + Wind) maximal 821 €/kW kosten, da nur knapp die Hälfte der Anlagenleistung gegenüber Szenario 2 benötigt wird. Teurer wird der flexible Verbraucher in Szenario 2, da die Kosten je kW installierter Leistung der synthetischen Kraftstoffproduktionsanlage gleich hoch sein werden, unabhängig von der Art der erneuerbaren Stromerzeugung. Somit fallen in Szenario 2 (PV) deutlich höhere Anschaffungskosten für die Kraftstoffproduktionsanlage für die gleiche Menge erzeugten Kraftstoffs an, was sich auch in höheren Kosten pro kWh/l Kraftstoff widerspiegelt. Dem entgegenzuhalten ist, dass eine Anlage mit weniger Laststunden pro Jahr dafür vielleicht einige Jahre länger hält, was in der Formel 1 zur Berechnung der jährlichen Kosten nicht berücksichtigt wurde.

Die maximalen Investitionskosten in € je kW für eine synthetische Kraftstoffproduktionsanlage würden laut Literatur im Jahr 2020 ca. 4.000 €/kW installierter Leistung betragen. Nach dem jetzigen Stand wären diese Anschaffungskosten selbst für das Szenario 1 mit einer Großwindkraftanlage bei dem höchsten Energiepreisniveau von 0,45 ct/kW Strom und 2,00 €/l Dieselmotorkraftstoff nicht rentabel. Sie dürften maximal bei 3.810 €/kW liegen.

Aufgrund einer erhöhten Nachfrage und damit einem erhöhten Produktionsvolumen nach Anlagen zur synthetischen Kraftstoffherstellung könnten sich bis zum Jahr 2050 die Anschaffungskosten auf 3.000 €/kW reduzieren. In diesem Fall könnte das Szenario 1 (großes Windrad) schon bei einem Energiepreisniveau von 0,40 ct/kW Strom und 1,75 €/l Dieselmotorkraftstoff selbstständig synthetischen Kraftstoff zur Deckung des Eigenbedarfes rentabel produzieren. Im Szenario 1 mit einer Kleinwindkraftanlage und im Szenario 2 mit ausschließlicher Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen ist es unter den gegebenen Umständen selbst bei dem höchst angenommenen Energiepreisniveau nicht rentabel synthetischen Kraftstoff im Betrieb zu erzeugen.

Da bei dem heutigen Energiepreisniveau in keinem der Szenarien rentabel synthetischer Kraftstoff produziert wird, kann keine Empfehlung für den Milchviehbetrieb ausgesprochen werden, in eine selbstständige und regenerative Energieversorgung zu investieren, wie es das vorgestellte Energiesystem vorsieht. Ebenso spricht dagegen, dass die Containeranlagen zur synthetischen Kraftstoffproduktion noch keine Marktreife erreicht haben. In ein paar Jahren könnte die mögliche Investition rentabel sein, wenn das Energiepreisniveau wie angenommen stark steigt und der benötigte erneuerbare Strom kostengünstig durch eine Großwindkraftanlage produziert werden kann. Bei einer Nutzung einer alten Großwindkraftanlage, bei der die 20-jährige EEG-Förderung ausläuft,

sollte beachtet werden, dass die Restlaufzeit der Anlage ausreichend lang für die Abschreibung der Kraftstoffproduktionsanlage ist.

Die Marktreife der Kraftstoffproduktionsanlagen und deren Preise sollten in den nächsten Jahren beobachtet werden, ebenso die die Anschaffungskosten der Stromerzeugungsanlagen.

Für eine Weiterentwicklung des vorgestellten Energiesystems ist eine stärkere Einbindung in das öffentliche Energienetz denkbar. Für die synthetische Kraftstoffproduktion könnten so z.B. nicht nur die Erzeugungsanlagen aus dem lokalen Energiesystems berücksichtigt werden, sondern auch ein Strombezug aus dem öffentlichen Netz. Dieser könnte zu Zeiten mit einer hohen Belastung des öffentlichen Netzes aufgrund eines großen Stromangebotes oder zu Zeiten mit günstigen Strompreisen bezogen werden. Auch könnte eine genossenschaftliche Lösung die Economies of scale auszunutzen. Ziel der weiteren Forschungsarbeit sollte sein, dass die aus erneuerbaren Quellen erzeugte Energie so effizient und kostengünstig wie möglich eingesetzt werden kann.

Als ein weiterer Aspekt soll die temporäre autarke Energieversorgung zur Krisenabsicherung angemerkt werden. Mit dem produzierten synthetischen Diesel ist es denkbar einen Dieselgenerator für eine regenerative Notstromversorgung im Betrieb zu nutzen. Sollte es zu einem Stromausfall z.B. im öffentlichen Stromnetz kommen, können wichtige Stromverbraucher wie die Milchtankkühlung und der Melkroboter oder Lüftungsanlagen in Schweine- und Hühnerställen weiterbetrieben werden. Ein solcher Stromausfall würde auch auftreten, wenn das öffentliche Netz und damit die Anbindung an überörtliche Windparks oder PV-Anlagen wegen Reparaturarbeiten zeitweise abgeschaltet werden. Ein Notstromaggregat ist bei größeren Viehhaltungsanlagen sogar gesetzliche Vorschrift.

Ein weiterer Vorteil der vorgestellten Technologie ist der geringere Flächenverbrauch im Vergleich zur Produktion von Bio-Kraftstoffen, z.B. Bio-Diesel aus Rapsöl. Hier beträgt der Flächenverbrauch selbst bei Freiland-Photovoltaikanlagen nur 10% einer vergleichbaren Pflanzenölproduktion.

Zusammenfassung

Herstellung und wirtschaftliche Bewertung synthetischer Kraftstoffe zum Antrieb von Verbrennungsmotoren in der Landwirtschaft

Eine klima-freundliche und CO₂-neutrale Energieversorgung von landwirtschaftlichen Betrieben ist Gegenstand der Untersuchung. Sie umfasst die Betrachtung der Innenwirtschaft (Gebäude und Tierhaltung) ebenso wie die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen für die Außenwirtschaft (Bewirtschaftung der Felder).

Gefordert wird dies nicht zuletzt von den Abnehmern der landwirtschaftlichen Erzeugnisse wie, z.B. der Molkereigenossenschaft Arla Foods, deren Ziel die Erzeugung von Kuhmilch mit Netto-Null-CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 ist.

Das betrachtete betriebliche Energiesystem umfasst die erneuerbare Stromerzeugung, die Deckung des Stromverbrauches im Kuhstall, die Batteriespeicherung für Zeiten ohne Stromerzeugung, die Produktion synthetischer Kraftstoffe und eine Einspeisung ins öffentliche Stromnetz. Tages- und jahreszeitabhängige Schwankungen werden beim Strom in 15-Minuten Zeitintervallen und beim Kraftstoff pro Kalenderwoche jeweils für ein Jahr berücksichtigt. Das Ziel ist die Ermittlung der notwendigen Kapazitäten an erneuerbaren Energieerzeugungs- und Produktionsanlagen für den synthetischen Kraftstoff sowie eine ökonomische Bewertung mit Berechnung der Energiekosten pro kWh und des Break-Even bei den Investitionskosten. Zur Deckung des jährlichen Stromverbrauches von ca. 80.000 kWh in der Innenwirtschaft und 35.000 l Dieserverbrauchs, entsprechend 350.000 kWh, in der Außenwirtschaft wurden zwei verschiedene Szenarien entwickelt. Szenario 1 benötigt zur Sicherstellung der Energieversorgung eine Photovoltaikanlage auf dem Dach mit 125 kWp Leistung, eine 250 kW große Kleinwindkraftanlage, eine Batterie mit einem Speichervermögen von 2 kWh und eine synthetische Kraftstoffproduktion mit einer Leistung von 210 kW. In Szenario 2 erfordert es eine 200 kWp Photovoltaikanlage auf dem Dach und eine 520 kWp Photovoltaikanlage im Freiland, eine Batterie mit 105 kWh Speicherkapazität und eine 385 kW große synthetische Kraftstoffproduktion zur Deckung des betrieblichen Energiebedarfs.

Im Ergebnis wird gezeigt, dass die eigene Stromproduktion derzeit bereits rentabel ist, die eigene Produktion von synthetischem Kraftstoff jedoch noch vergleichsweise hohe Kosten verursacht und damit nicht noch rentabel ist. Weitere technische Fortschritte, steigende Preise für fossile Kraftstoffe und Skaleneffekte, z.B. größere genossenschaftlich betriebene Anlagen könnten der neuen Technologie zum Durchbruch zu verhelfen.

Abstract

Production and economic evaluation of synthetic fuels for powering internal combustion engines in agriculture

This study investigates the climate-friendly and CO₂-neutral energy supply of agricultural operations. This refers to the indoors (buildings and livestock farming) but also to the production of synthetic fuels for the outdoors (cultivation of fields). It is not least customers who make such requirements, e.g., Arla Foods dairy cooperative, who aim to produce cow's milk with net zero CO₂ emissions by 2050. The operational energy system under consideration encompasses renewable electricity generation, coverage of electricity consumption in the cowshed, battery storage for periods when there is no power generation, production of synthetic fuels, and the feeding into the public grid. Fluctuations which depend on the time of day and time of year, are accounted for in 15-minute time intervals in the case of electricity, and in the case of fuel per calendar week for one year at a time. The objective is to determine the required capacities of renewable energy production facilities and production facilities for synthetic fuel, as well as an economic evaluation including the calculation of energy costs per kWh and the break-even point on investment costs. To cover annual indoors electricity consumption of approx. 110,000 kWh and 35,000 l of outdoors diesel consumption, which corresponds to 350,000 kWh, two different scenarios have been devised. To ensure energy supply scenario 1 requires a photovoltaic system on the roof with a 125 kWp capacity, a 250-kW small wind turbine, a battery with a storage capacity of 2 kWh, and synthetic fuel production with a power level amounting to 210 kW. Scenario 2 requires a 200 kWp photovoltaic system on the roof and a 520 kWp photovoltaic system in the open, a battery with 105 kWh storage capacity, and 385 kW of production of synthetic fuel to cover the operational energy requirements. The result shows that the farm's own electricity production is currently already profitable while its own production of synthetic fuel still incurs comparatively high costs and therefore does not yet achieve profitability. Further technical progress, rising prices of fossil fuels and economies of scale, e.g., larger installations run by cooperatives, could assist the new technology's breakthrough.

Schlüsselwörter:

synthetische Kraftstoffe, Verbrennungsmotoren, Photovoltaik, Windrad, Batterie, Landwirtschaft, Wirtschaftlichkeit, Break-Even

Literatur

1. ARLA FOODS (2020): Corporate Responsibility Report 2020 [Online]. URL: https://www.arla.com/492ee1/globalassets/arla-global/company---overview/responsibility/csr-reports/2020/de_csr_arla_2020.pdf#page=12 [Stand: 17.06.2021].
2. BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (2021) Bundeskabinett beschließt neues Klimaschutzgesetz - Pressemitteilung Nr. 86/2021 vom 12. Mai 2021 [Online]. URL: <https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/086-neues-klimaschutzgesetz.html;jsessionid=8A203A72F563B5F28D8F2298A8236EOC.live852> [Stand: 11.12.2021].
3. BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 [Online]. URL: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1> [Stand: 09.06.2021].
4. BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2021): Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen [Online]. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#emissionsentwicklung> [Stand: 21.06.2021].
5. BMWI (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie [Online]. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html> [Stand: 15.06.2021].
6. BMWI (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2021): Intelligente Netze [Online]. URL: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/intelligente-netze.html> [Stand: 06.07.2021].
7. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) (2016) Biokerosin und EE-Kerosin für die Luftfahrt der Zukunft – von der Theorie zu Pilotvorhaben. Leipzig, München, Berlin, Heidelberg, 11/2015; aktualisierte Zusammenfassung 07/2016. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/biokerosin-eekerosin-luftfahrt.html> (16.10.2021)
8. EEG 2000 (2000) Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes vom 29. März 2000 (BGBl. I S. 305); hat das Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) zum 1. April 2000 abgelöst
9. EEG 2021 (2021) Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zu-letzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 16. Juli 2021 (BGBl. I S. 3026) geändert worden ist". . https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html (14.11.2021)
10. European Commission (14 July 2021) A European Green Deal https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en (Accessed 02 October 2021)
11. FORSTER, S. (2019). Bereitstellung und Nutzung von FT-Diesel. Technischer Anhang 2. Roadmap des Kopernikus-Projektes „Power-to-X“. DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. [Online]. URL: https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/BOED1438B6123754E0537E695E86A220/live/document/Power-toX_Roadmap_2.0_Anhang.pdf [Stand: 04.04.2021].

12. FRONTIER ECONOMICS (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende. In Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und Frontier Economics (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe [Online]. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn-_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf [Stand: 23.07.2021].
13. Fuchs, C.; Poehls, A.; Skau, K.; Kasten, J. (2021) Economics of Battery Use in Agriculture: Economic Viability of Renewable Energy Complemented with Batteries in Agriculture. *Energies* 2021, 14, 2430. <https://doi.org/10.3390/en14092430>
14. Gradziuk, P.; Jonczyk, K.; Gradziuk, B.; Wojciechowska, A.; Trocewicz, A.; Wysokinski, M. An Economic Assessment of the Impact on Agriculture of the Proposed Changes in EU Biofuel Policy Mechanisms. *Energies* 2021, 14, 6982. <https://doi.org/10.3390/en14216982>
15. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): Third Assessment Report „Climate Change 2001“ – The Scientific Basis. <https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg1/> (Zugriff 14.11.2021)
16. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2019) Kohlendioxidneutrale Kraftstoffe aus Luft und Strom. Presseinformation 107/2019 [Online]. URL: https://www.kit.edu/kit/pi_2019_107_kohlendioxidneutrale-kraftstoffe-aus-luft-und-strom.php (29.11.2021)
17. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2021) Synthetische Kraftstoffe: Containeranlage am KIT im gekoppelten Betrieb erfolgreich. Presseinformation 069/2021 [Online]. URL: https://www.kit.edu/kit/pi_2021_069_synthetische-kraftstoffe-containeranlage-am-kit-im-gekoppelten-betrieb-erfolgreich.php (11.12.2021)
18. KLAUSMANN, F.; ZHU, L. (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation) (2018): Technologiestudie Microgrid - Markt- und Technologieübersicht für Komponenten eines Microgrids [Online]. URL: https://www.muse.iao.fraunhofer.de/content/dam/iao/muse/de/documents/Labore/Technologi_estudie%20Microgrid_final_190221.pdf [Stand: 02.07.2021].
19. KOST, C., SHAMMUGAM, S., JÜLCH, V., NGUYEN, H.-T.; SCHLEGL, T. (Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme) (2018): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien [Online]. URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf [Stand: 08.07.2021].
20. Microsoft Excel (2016)
21. Meurer, A.; Kern, J. (2021) Fischer–Tropsch Synthesis as the Key for Decentralized Sustainable Kerosene Production. *Energies* 2021, 14, 1836. <https://doi.org/10.3390/en14071836>
22. NDR (2021) Emsland: Anlage in Werlte produziert CO₂-neutrales Kerosin. [https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/osnabrueck_emsland/Emsland-Anlage-in-Werlte-produziert-CO₂-neutrales-Kerosin,werlte224.html](https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/osnabrueck_emsland/Emsland-Anlage-in-Werlte-produziert-CO2-neutrales-Kerosin,werlte224.html) (16.10.2021)
23. Özcan, H.; Kayabasi E. (2021) Thermodynamic and economic analysis of a synthetic fuel production plant via CO₂ hydrogenation using waste heat from an iron steel facility. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114074>
24. Rozzi, E.; Minuto, F.D.; Lanzini, A.; Leone, P. (2020) Green Synthetic Fuels: Renewable Routes for the Conversion of Non-Fossil Feedstocks into Gaseous Fuels and Their End Uses. *Energies* 2020, 13, 420. <https://doi.org/10.3390/en13020420>
25. Samavati, M.; Martin, A.; Santarelli, M.; Nemanova, V. (2018) Synthetic Diesel Production as a Form of Renewable Energy Storage. *Energies* 2018, 11(5), 1223; <https://doi.org/10.3390/en11051223>
26. UBA (Umweltbundesamt,) (2019): Landwirtschaft und Umwelt - Wo stehen wir? Wo wollen wir hin? Vortrag Dirk Messner [Online]. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/vortrag_dirk_messner.pdf [Stand: 09.06.2021].

27. UNFCCC. (2017). United Nations framework convention on climate change: The Paris Agreement. Retrieved from http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php (07.11.2020)
28. VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.) (2019): Mehr Ertrag, weniger CO₂ - Diesel sparen mit innovativer Landtechnik [Online]. URL: https://lt.vdma.org/documents/18374/0/158404VDMA_Leitfaden_EKoTech_Screen_de.pdf/084cad3d-0f4d-ffcc-3d30-52dcc29888a3 [Stand: 13.06.2021].
29. WENDEL, M. (E.ON Energie Deutschland) (2019): Autarke Stromversorgung in lokalen Netzen mit speichergestützten Kleinwindanlagen [Online]. URL: https://www.smart-systems-conference.de/wp-content/uploads/2020/01/E.ON-SmartEnergy2019_MWE.pdf [Stand: 06.04.2021].
30. ZML (Zentrum für Mediales Lernen am Karlsruher Institut für Technologie) (2020): Power-to-X: CO₂-neutrale E-Fuels aus regenerativem Strom und CO₂ aus der Luft [Online]. URL: https://www.youtube.com/watch?v=KOawGRRJFY&feature=emb_logo [Stand: 04.04.2021].

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Clemens Fuchs,
M. Sc. Drees Meyer und
Prof. Dr. Axel Poehls,

Hochschule Neubrandenburg
Brodaer Straße 2
17033 Neubrandenburg

E-Mail: cfuchs@hs-nb.de

Danksagung

Die Autoren danken der Hochschule Neubrandenburg für die Unterstützung im Rahmen der hochschulinternen Forschungsförderung im Jahr 2020 unter dem Projekttitel „Die Nutzung der Wasserstofftechnologie für die Speicherung von grüner Energie im ländlichen Raum in Mecklenburg-Vorpommern“.