

## **Energieerzeugung und –bereitstellung im landwirtschaftlichen Kontext**

Henning Eckel, Jens Grube, Wilfried Hartmann

### **Kurzfassung**

Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2045 Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen. Dazu muss die Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen vollständig auf erneuerbare Quellen umgestellt werden. Die Landwirtschaft spielt dabei eine wesentliche Rolle. Aktuell wird insbesondere die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für Freiflächen-Photovoltaik-Anlagen oder auch Agri-PV-Anlagen sowie der weitere Umgang mit Bioenergietechnologien diskutiert. Die verlässliche Energieversorgung für landwirtschaftliche Maschinen ist eine wesentliche Grundlage für eine krisenfeste Nahrungs- und Futtermittelversorgung. Für den notwendigen Umstieg von fossilem Dieselmotorkraftstoff auf erneuerbare Antriebsenergien gibt es für landwirtschaftliche Maschinen unterschiedliche Optionen. Dazu zählt der Einsatz verschiedener Biokraftstoffe oder synthetischer Kraftstoffe, sowie die Elektrifizierung von Antriebssystemen. Die Praxiseinführung dieser Optionen erfordert stabile Rahmenbedingungen, insbesondere hinsichtlich der Besteuerung von Energieträgern und sollte durch eine zielgruppenorientierte Kommunikationsstrategie begleitet werden.

### **Schlüsselwörter**

Erneuerbare Energien, Photovoltaik, Kraftstoff, Antriebssysteme

## **Energy production and supply in an agricultural context**

### **Abstract**

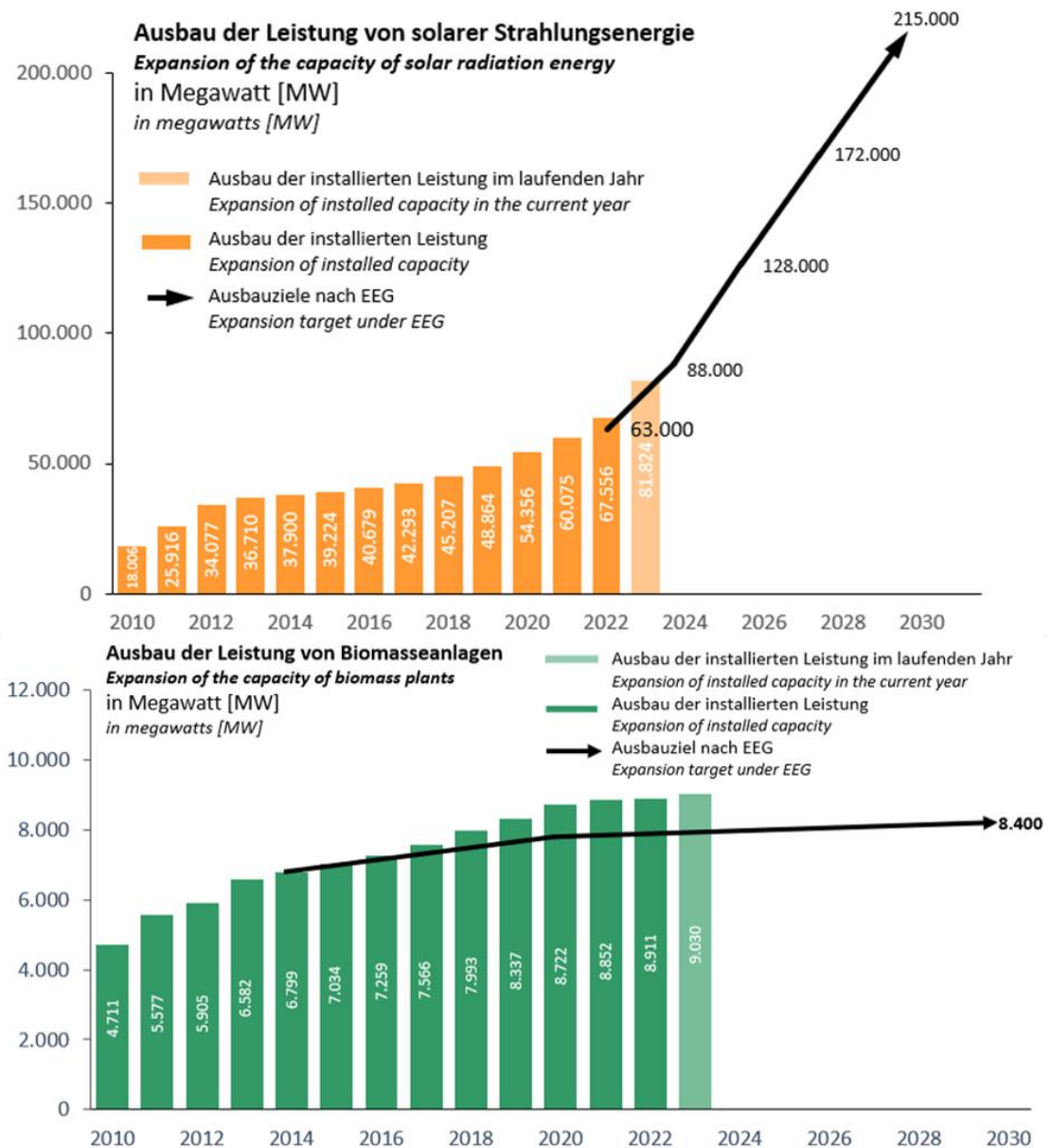
Germany has set itself the goal of achieving net greenhouse gas neutrality by 2045. To achieve this, the supply of electricity, heat and fuels must be completely converted to renewable sources. Agriculture plays a key role in this. In particular, the use of agricultural land for ground-mounted photovoltaic systems or agri-photovoltaic systems and the further use of bioenergy technologies are currently being discussed. A reliable energy supply for agricultural machinery is an essential basis for a crisis-proof food and animal feed supply. There are various options for agricultural machinery to make the necessary switch from fossil diesel fuel to renewable drive energies. This includes the use of various biofuels or synthetic fuels, as well as the electrification of drive systems. The practical introduction of these options requires stable framework conditions, particularly with regard to the taxation of energy sources, and should be accompanied by a target group-orientated communication strategy.

### **Keywords**

Renewable energies, photovoltaics, fuel, drive systems

**Einführung:**

Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 65% weniger Treibhausgase gegenüber 1990 zu emittieren [1] und einen Anteil von Erneuerbaren Energien von mindestens 80% am Bruttostromverbrauch zu erreichen [2]. Bis 2045 soll Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden. Dazu ist ein starker Ausbau der Stromerzeugungskapazitäten notwendig. Dies ist zum einen durch den Ersatz aktuell mit fossilen Energieträgern betriebener Kraftwerke durch die Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Quellen, zum anderen durch den zusätzlichen Strombedarf durch die Elektrifizierung zahlreicher Anwendungen bedingt. Hier sind insbesondere industrielle Prozesse wie beispielsweise die Stahlerzeugung, die Elektrifizierung im Straßenverkehr und die Wärmebereitstellung durch elektrische Wärmepumpen zu nennen.



**Bild 1:** Ausbau und -ziele der Leistung von Photovoltaik- und Biomasseanlagen.

**Figure 1:** Expansion and targets for the output of photovoltaic and biomass systems.

Der Ausbaupfad des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) beschreibt eine Steigerung der installierten Leistung von Erneuerbare Energien Anlagen von aktuell 159 GW [3] auf 338 GW im Jahr 2030. Die Leistung von Photovoltaikanlagen soll auf 215 GW ausgebaut werden, während die Leistung von Bioenergieanlagen auf 8,4 GW beschränkt bleiben soll (Bild 1). Zusätzlich sollen bis 2030 30 GW an installierter Leistung von Windenergieanlagen auf See verfügbar sein [4]. Im Jahr 2023 sind bis einschließlich November insgesamt nochmal 16,2 GW an Kapazitäten für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen hinzugekommen. Davon entfallen 81 % auf Photovoltaikanlagen, 18 % auf Windenergieanlagen und nur 1 % auf Bioenergieanlagen [3].

Die Energiebereitstellung im landwirtschaftlichen Kontext nimmt eine dynamische Entwicklung, insbesondere im Bereich Photovoltaik. Landwirtschaftliche Betriebe haben einen erheblichen Anteil an den installierten Erzeugungskapazitäten. Bei Photovoltaikanlagen betrug der Anteil im Jahr 2019 16%, bei Biogasanlagen 74% [5], wobei bei letzterem kein wesentlicher Zubau zu verzeichnen ist. Der Ausbau der Bioenergie stockt derzeit auf Grund ungünstiger Rahmenbedingungen. Hier liegen die Ausbauziele unterhalb der aktuell installierten Leistung.

### **Photovoltaik auf landwirtschaftlichen Flächen**

Der im Jahr 2023 zu verzeichnende Zubau an Photovoltaikanlagen verteilt sich mit 9,1 GW auf bauliche Anlagen (Gebäude und Lärmschutzwände) und 4,0 GW auf Freiflächenanlagen [3]. Letzteres entspricht, eine installierte Leistung von  $1\text{MW}_{\text{peak}}$  pro Hektar vorausgesetzt, einer Fläche von 4.000 ha. Dabei sind sowohl landwirtschaftliche als auch andere Flächen wie Deponien, Konversionsflächen oder Parkplätze erfasst. Es werden in der Literatur aber auch Werte von bis zu  $2.2\text{ha}/\text{MW}_{\text{peak}}$  angegeben [6], was zu einem entsprechend höheren Flächenbedarf führt.

Vielerorts sind Diskussionen um die Nutzung von landwirtschaftlichen Flächen zur Stromerzeugung entstanden, die bisher der Nahrungs- und Futtermittelerzeugung dienen. Die Abschätzung des Flächenbedarfs für die Realisierung der PV-Ausbauziele ergibt eine Spanne von 0,3 bis 4% der landwirtschaftlich genutzten Fläche [6]. Auf regionaler und insbesondere einzelbetrieblicher Ebene können sich deutlich stärkere Effekte ergeben, insbesondere dort, wo Betriebe auf Pachtflächen wirtschaften und so wesentliche Teile der bewirtschafteten Fläche verlieren könnten. Um Konflikte um die Flächennutzung zu entschärfen, werden zunehmend Agri-PV-Konzepte diskutiert, die eine Stromerzeugung mit einer landwirtschaftlichen Flächennutzung kombinieren. Hier kommen sowohl hochaufgeständerte Anlagen in Fragen, unter denen gewirtschaftet werden kann, als auch vertikal aufgeständerte Anlagen mit bifazialen Modulen, die beidseitig für die Stromerzeugung genutzt werden. In der DIN SPEC 91434 „Agri-Photovoltaik-Anlagen –Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung“ [7] werden Agri-PV-Anlagen nach zwei Kategorien eingeteilt: Agri-PV-Anlagen mit Aufständigung mit lichter Höhe von mindestens 2,10 m (Kategorie I) und Agri-PV-Anlagen mit einer bodennahen Aufständigung (Kategorie II). Der Verlust an landwirtschaftlich nutzbarer Fläche darf höchstens 10% (Kategorie I) bzw. 15% (Kategorie II) betragen. Für die landwirtschaftliche Hauptnutzung werden verschiedene Kriterien festgelegt, die neben technischen Vorgaben zur Aufstän-

derung, pflanzenbaulichen Anforderungen an Licht- und Wasserverfügbarkeit und Bodenschutzaspekten auch eine minimale Landnutzungseffizienz beschreiben. Der Ertrag der auf der Agri-PV Fläche angebauten Kultur darf nicht unterhalb von 66% eines Referenzertrags liegen.

Vorteilhaft aus Sicht landwirtschaftlicher Betriebe ist insbesondere, dass die Flächen weiterhin in landwirtschaftlicher Hand bleiben und nach der GAP-Direktzahlungen-Verordnung – förderfähig sind [8]. Auf die Festlegungen der DIN SPEC 91434 wird hier explizit Bezug genommen.

Offene Forschungsfragen betreffen insbesondere die Wirkung von Agri-PV-Anlagen auf die Erträge, auf den Wasserhaushalt, die Wirkung der Beschattung, die Bodenerosion oder auch Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz [9; 10]. Übersichten über Anlagenkonzepte bieten Publikationen des sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie sowie des Fraunhofer ISE [9; 11]. Erläuterungen zum Genehmigungsverfahren sind im TFZ-Leitfaden zu Agri-Photovoltaik zu finden [12], eine Übersicht über aktuelle Forschungsvorhaben auf der Website des Fraunhofer ISE [13].

### **Biogas in der Landwirtschaft**

Biogasanlagen spielen bei der Bereitstellung von Strom, Wärme und Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen eine wichtige Rolle. Außerdem können mit der Vergärung von Gülle klimarelevante Methanemissionen vermieden und damit ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden [14]. Aufgrund der ungünstigen Rahmenbedingungen fand 2023 nur noch ein geringer Nettoanlagenzubau statt. Damit setzt sich der Trend der vorherigen Jahre fort [15]. Mit Stand August 2023 waren 9.900 Biogasanlagen in Betrieb, mit einer installierten elektrischen Leistung von 5.900 MW. Etwa 75% der Anlagen sind in landwirtschaftlicher Hand [5]. Viele der Anlagen stehen vor dem Ende ihrer 20-jährigen EEG-Vergütungsdauer. Damit stellt sich die Frage, wie ein weiterer Anlagenbetrieb gestaltet werden kann, oder ob eine Stilllegung erfolgen muss. Neben der Frage der Vergütung des erzeugten Stroms kommen auch weitere Anforderungen auf die Biogasanlagenbetreibenden zu, insbesondere die Nachhaltigkeitszertifizierung auf Basis der Erneuerbare Energien Richtlinie der EU (RED II, RED III) [16].

Weiterhin wird durch die Begrenzung des Einsatzes von Mais und Getreidekorn in Biogasanlagen die Frage einer Substratumstellung wichtiger. Eine Hilfestellung zur Substratumstellung, beispielsweise den Ersatz von Silomais durch Maisstroh, bietet der „Substratanpassungsrechner Biogas“ des KTBL [17], der im Rahmen des Projekts „Lignoflex“ entwickelt wurde [18]. Diskutiert wird auch eine Ertüchtigung von Biogasanlagen zur verstärkten Nutzung von Rest- und Abfallstoffen, um den flächenintensiven Einsatz von Anbaubiomasse in Biogasanlagen zu reduzieren.

Neben der Substratumstellung sind weitere Optionen für die Sicherung eines zukünftigen Anlagenbetriebs denkbar. Dazu zählt eine Flexibilisierung der Stromerzeugung, um gezielt in Zeiten einer geringen Strombereitstellung aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen die Stromerzeugung steigern zu können. Eine weitere Option ist die Aufbereitung von Biogas zu Biometan, entweder zur Einspeisung in das Erdgasnetz oder zur Kraftstoffbereitstellung [19]. Für letztere Variante stellt derzeit der THG-Quotenhandel einen starken Anreiz dar. Hier können

zusätzlich zum Erlös aus dem Kraftstoffverkauf auch Einnahmen aus dem Verkauf der THG-Quote generiert werden. Damit können Inverkehrbringer von Kraftstoffen ihre Emissionsminderungsverpflichtungen erfüllen [20]. Die im Jahr 2023 neu entwickelte KTBL Webanwendung „Biogasrechner – Bestandsanlagen“ [21] und das KTBL Fachportal „Zukunft Biogas“ [22] bieten hier vertiefte Informationen und Hilfestellungen.

### **Energiebereitstellung für mobile Maschinen in der Landwirtschaft**

Der Kraftstoffbedarf der land- und Forstwirtschaft beträgt etwa 2,1 Mrd. Liter pro Jahr, davon sind etwa 88% der Landwirtschaft zuzuordnen [23]. Damit sind Treibhausgasemissionen von mindestens 3,8 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten verbunden [14]. Bis zum Zieljahr 2045, in dem Klimaneutralität in Deutschland erreicht werden soll [1], müssen diese Emissionen auf „null“ gesenkt werden.

Zur Aufrechterhaltung der Nahrungs- und Futtermittelerzeugung ist eine bedarfsgerechte Energiebereitstellung für mobile Maschinen eine entscheidende Voraussetzung. Hier sind je nach Einsatzzweck der Maschinen sehr unterschiedliche Anforderungen an die Energieträger und Antriebssysteme zu stellen. Die Leistungsanforderungen und Einsatzzeiten variieren stark zwischen hofnahen Einsätzen und schweren Feldarbeiten wie Pflügen oder Ernteverfahren. Es ist die Frage zu stellen, welche Kraftstoffmengen in welchen Anwendungen in der Landwirtschaft verwendet werden, um die richtigen Weichen in der Technologieentwicklung stellen zu können.

Das KTBL hat eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, die sich dieser Thematik annimmt und im September 2023 ihre Ergebnisse vorgelegt hat, die im Folgenden kurz zusammengefasst wiedergegeben werden [23].

Auf Basis der KTBL-Produktionsverfahren [24] wurde eine Auswertung der in der Landwirtschaft verwendeten Kraftstoffmengen differenziert nach Einsatzzweck vorgenommen. Als Maßstab für die Analyse wurde der hektarbezogene Kraftstoffbedarf für die notwendigen Arbeitsvorgänge herangezogen. Diese wurden in drei Stufen (leicht < 5 l/ha, mittel 5-15 l/ha, schwer >15 l/ha) eingeordnet. Diese Werte wurden mit den Anbauflächen für die jeweilige Kultur aus der Agrarstatistik [25] verrechnet (**Tabelle 1**). Die so erfassten Kulturen decken etwa 90% der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland ab.

Außerdem wurde der Kraftstoffbedarf in der Tierhaltung, speziell der Fütterung in der Rinderhaltung, anhand typischer Haltungsverfahren analysiert. Bedingt durch die täglichen Laufzeiten der Futtermischwagen bzw. der Traktoren, die hier eingesetzt werden, ergibt sich ein Kraftstoffbedarf von durchschnittlich 38 l/Tierplatz und Jahr mit einer Spanne von 8-70 l/Tierplatz und Jahr. Insgesamt werden jährlich rund 418 Mio. Liter Kraftstoff für die Rinderfütterung benötigt. Dies entspricht 24% der gesamten in der Landwirtschaft eingesetzten Kraftstoffmenge.

**Bild 2** zeigt die Verteilung des Kraftstoffbedarfs auf leichte, mittlere und schwere Feldarbeiten sowie den Anteil der Tierhaltung am Gesamtbedarf.

**Tabelle 1:** Dieselbedarfsverteilung in der pflanzlichen Produktion.

**Table 1:** Diesel demand distribution in plant production.

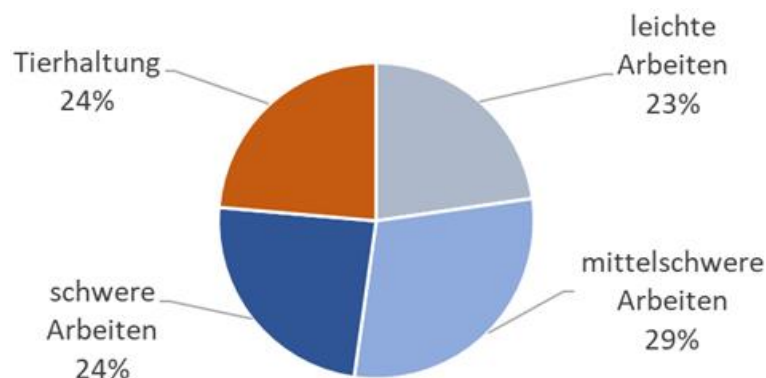
| Einsatzgebiet 2021 - Pflanzenbau<br><i>Field of application 2021</i>  | Anbau-<br>fläche<br><i>cultivation<br/>area</i> | Spezifischer<br>Dieselbedarf<br><i>specific<br/>diesel<br/>demand</i> | Verteilung des Dieselbedarfs <sup>2)</sup><br><i>Distribution of diesel demand<sup>2)</sup></i> |  |   |
|---|---|---|---|--|---|
|   |   |   | leichte<br>Arbeiten<br><i>light work</i><br>< 5 l/ha  | mittelschwere<br>Arbeiten<br><i>medium work</i><br>5-15 l/ha | schwere<br>Arbeiten<br><i>heavy work</i><br>> 15 l/ha |
|   | 1.000 ha  | l/ha  | %   | %  | %   |
| Getreide <sup>1)</sup><br>inklusive Körnermais<br><i>Cereals<sup>1)</sup></i><br><i>including grain maize</i> | 6.064   | 78  | 16  | 37   | 47  |
| Raps<br><i>rapeseed</i>   | 997   | 74  | 18  | 32   | 50  |
| Silomais, Feldgras, Ackergras<br><i>Silage maize, field grass, arable grass</i>                               | 2.543   | 138   | 14  | 33   | 53  |
| Ackerkulturen gesamt<br><i>arable crops total</i>   | 9.604   | -   | 15  | 35   | 49  |
| Wiesen und Weiden<br><i>meadows and pastures</i>  | 4.482   | 108   | 55  | 45   | -   |
| Summe pflanzliche Erzeugung<br><i>total plant production</i>  | 14.086  | -   | 30  | 39   | 32  |

1) Winterweizen stellvertretend für alle Getreidearten.

1) Winter wheat representing all cereals.

2) Abweichungen der Summenwerte durch Rundung sind möglich.

2) Deviations of the total values due to rounding are possible.



**Bild 2:** Verteilung des Kraftstoffbedarfs in der Landwirtschaft auf Feldarbeiten und Tierhaltung [23].

**Figure 2:** Distribution of fuel demand in agriculture between field work and livestock farming [23].

### **Energieträger für den Einsatz in mobilen Maschinen**

Standardkraftstoff ist derzeit fossiler Dieselmotorkraftstoff nach DIN EN 590 der Qualitäten B0 bis B7. Bei den Alternativen zum Dieselmotorkraftstoff muss insbesondere der Umfang der notwendigen Motoranpassung und die Verfügbarkeit des jeweiligen Energieträgers betrachtet werden. Eng damit verbunden ist die Frage der Kosten, die auf landwirtschaftliche Betriebe bei der Umstellung auf erneuerbare Antriebsenergien zukommen. **Tabelle 2** zeigt eine Übersicht über mögliche Alternativen zu fossilem Diesel.

Eine umfangreiche Bewertung, die auch Aspekte von Ressourcenverfügbarkeit, technischem Entwicklungsstand, Praktikabilität für den landwirtschaftlichen Betrieb und Kosten berücksichtigt, ist in [26; 27] dargestellt. Grundsätzlich stehen flüssige und gasförmige Energieträger für Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen zur Verfügung, zudem batterieelektrische Antriebe. **Bild 3** zeigt eine Auswahl der betrachteten Kriterien. Sie lassen sich nach technischen, ökonomischen umweltbezogenen Kriterien gliedern. Dazu kommen Aspekte der Praktikabilität auf landwirtschaftlichen Betrieben. Dargestellt sind jeweils die Einschätzungen für die Jahre 2030 und 2045.

**Tabelle 2:** Übersicht über die betrachteten Kraftstoffe.

**Table 2:** Overview of the considered fuels.

| <b>Kraftstoff</b><br><i>Fuel</i>  | <b>Rohstoff</b><br><i>Raw material</i>   | <b>Herstellungsprozess</b><br><i>Production process</i>  |
|---|--|--|
| Pflanzenölkraftstoff<br><br><i>vegetable oil fuel</i>   | Ölsaaten, meist Rapssaat<br><br><i>Oil seeds, mostly rapeseed</i>  | Pressung, Filtration<br>Koppelprodukt: Presskuchen<br><br><i>Pressing, Filtration</i><br><i>Co-product: press cake</i>   |
| Biodiesel<br><br><i>biodiesel</i>   | Pflanzenöle oder Altspeiseöle/-fette<br><br><i>Vegetable oils or used cooking oils/fats</i>  | Reaktion von Triglyceriden mit Methanol<br><br><i>Reaction of triglycerides</i>  |
| HVO (hydrierte Pflanzenöle) „HVO-Diesel“<br><br><i>HVO (hydrogenated vegetable oils)</i>  | Pflanzenöle oder Altspeiseöle/-fette/ Tierische Fette, Wasserstoff<br><br><i>Vegetable oils or used cooking oils/fats /animal fats, hydrogen</i> | Katalytische Beaufschlagung der Öle/Fette mit Wasserstoff<br><br><i>Catalytic treatment of oils/fats with hydrogen</i>   |
| Flüssige Fischer-Tropsch-Kraftstoffe (PtL, Power-to-Liquid) „FT-Diesel“<br><br><i>Liquid Fischer-Tropsch-fuels (PtL, Power-to-Liquid) "FT Diesel"</i> | Wasser, Strom aus erneuerbaren Quellen, CO <sub>2</sub><br><br><i>Water, electricity from renewable sources, CO<sub>2</sub></i>                  | Wasserstoffgewinnung, CO <sub>2</sub> -Bereitstellung, Synthesegasherstellung, Kraftstoffsynthese<br><br><i>Hydrogen production, CO<sub>2</sub> supply, synthesis gas production, fuel synthesis</i> |
| CNG (erneuerbar)<br><br><i>CNG (renewable)</i>  | Biomasse (Anbaubiomasse oder Rest- und Abfallbiomasse)<br><br><i>Biomass (arable biomass or residual and waste biomass)</i>                      | Vergärung (Biogasanlage), CO <sub>2</sub> Abtrennung, Verdichtung<br><br><i>Fermentation (biogas plant), CO<sub>2</sub> separation, compression</i>  |
| LNG (erneuerbar)<br><br><i>LNG (renewable)</i>  | Biomasse (Anbaubiomasse oder Rest- und Abfallbiomasse)<br><br><i>Biomass (cultivated biomass or residual and waste biomass)</i>                  | Vergärung (Biogasanlage), CO <sub>2</sub> Abtrennung, Verdichtung, Verflüssigung<br><br><i>Fermentation (biogas plant), CO<sub>2</sub> separation, compression, liquefaction</i>                     |
| Wasserstoff (erneuerbar)<br><br><i>Hydrogen (renewable)</i>   | Wasser, Strom aus erneuerbaren Quellen<br><br><i>Water, electricity from renewable sources</i>   | Elektrolyse, Verdichtung<br><br><i>Electrolysis, compression</i>   |





| Criterion  | Combustion engine with:<br>Vegetable oil fuel  |        |        |        | Combustion engine with:<br>Biodiesel generally <sup>1)</sup> |        |        |        | Combustion engine with:<br>HVO paraffinic diesel FT (PtL) |        |        |        | Combustion engine with:<br>CH <sub>4</sub> (CNG) Biogas PtG |        |        |        | Combustion engine with:<br>CH <sub>4</sub> (LNG) Biogas PtG |        |        |        | Electric motor with:<br>H <sub>2</sub> (FC) Electrolysis |        | Power (battery) EE-Power Not assessable |        |        |        |        |        |
|--|--|--------|--------|--------|--|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|--|--------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | Chem. and phys. Properties of the energy source<br>red: very unfavourable; dark green: very favourable | Yellow | Green  | Green  | Green  | Yellow | Green  | Green  | Green   | Yellow | Green  | Green  | Green   | Yellow | Green  | Green  | Green   | Yellow | Green  | Green  | Green  | Yellow | Green                                   | Yellow | Green  | Yellow | Green  |        |
| Raw material potential/potential for electrical energy<br>red: very limited; green: not limited                                | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow                                  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| Availability of a technology for the provision of energy sources<br>red: not available; green: available                       | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Yellow                                  | Green  | Yellow | Green  | Yellow | Green  |
| Availability of energy source on the market<br>red: no offer available; green: large offer available                           | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow                                  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| Energy efficiency Provision of energy sources<br>red: low; green: high   | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Yellow                                  | Green  | Yellow | Green  | Yellow | Green  |
| Drive system efficiency<br>red: low; green: high   | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Yellow                                  | Green  | Yellow | Green  | Yellow | Green  |
| Infrastructure for refuelling or charging (on the farm and in public)<br>red: not available; green: available across the board | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow                                  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| Refuelling or charging<br>red: slow, small amount of energy; green: fast, large amount of energy                               | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Yellow                                  | Green  | Yellow | Green  | Yellow | Green  |
| Energy storage capacity<br>red: low; green: high   | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow                                  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| Availability of machines on the market<br>red: no offer available; green: large offer available                                | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow  | Green  | Green  | Green  | Yellow   | Green  | Yellow                                  | Green  | Yellow | Green  | Yellow | Green  |
| Investment and operating costs<br>red: high; green: low  | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow                                  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |
| Regional value creation and self-sufficiency<br>red: not feasible; green: feasible   | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow   | Yellow | Yellow                                  | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow | Yellow |

Figure 3: Assessment of drive systems in the 2030 perspective and 2045 (from left to right in the table cell in each case) [23].

Abgeleitet aus den obigen Bewertungskriterien lässt sich eine zusammenfassende Einschätzung der betrachteten Antriebssysteme hinsichtlich ihrer Eignung für den landwirtschaftlichen Einsatz ableiten. **Bild 4** zeigt das Ergebnis dieser Abschätzung in Abhängigkeit des Einsatzzweckes und gliedert nach leichten und Intervallarbeiten, mittelschweren Arbeiten und schweren Arbeiten. Die Abgrenzung erfolgt nach dem Dieselbedarf pro Hektar für die entsprechenden Arbeitsvorgänge. Für die Bewertung wurden nur Energieträger betrachtet, die aus erneuerbaren Ressourcen hergestellt werden können. Außerdem wurde die Annahme getroffen, dass im Jahr 2030 heute bereits etablierte Antriebstechniken dominieren. Batterieelektrische Systeme werden aufgrund ihres guten Wirkungsgrads, wo technisch sinnvoll, als prioritäre Option betrachtet. Der erwartete Anteil einer Technologie am Maschinenpark ist nicht Teil der Bewertung. Betrachtet wird nur die erwartete Verfügbarkeit eines Antriebssystems.

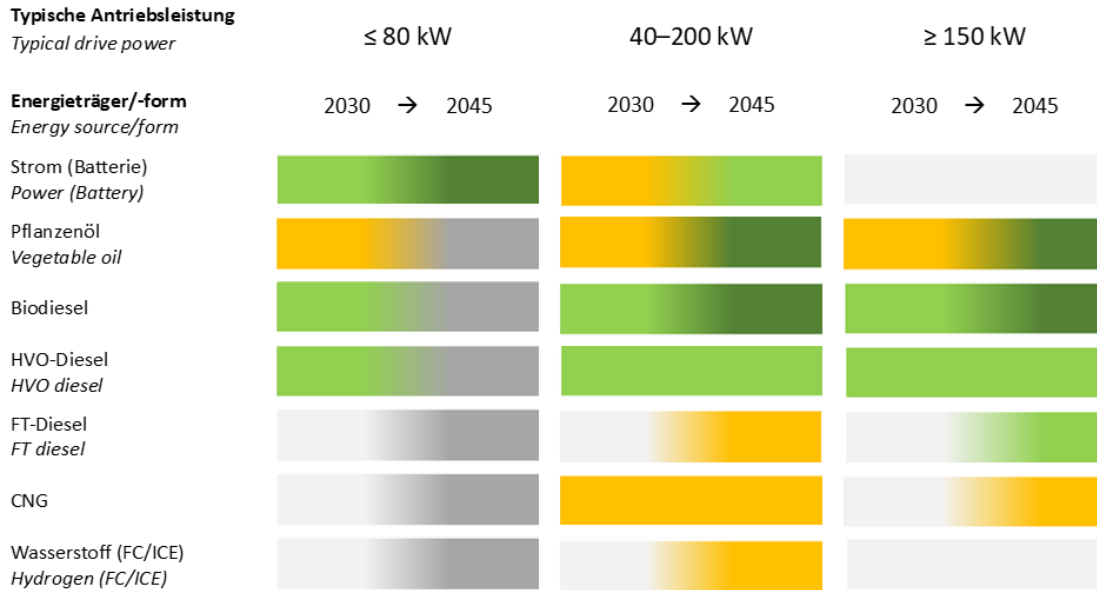
Eine Elektrifizierung für Maschinen, die für leichte oder Intervallarbeiten eingesetzt werden, ist anteilig bereits bis 2030 möglich. Bis zum Jahr 2045 ließe sich durch die Elektrifizierung im kleinen Leistungsbereich und für Intervallarbeiten, bedingt durch den günstigen Wirkungsgrad, der Energiebedarf für die mobilen Maschinen in der Landwirtschaft von aktuell etwa 66 PJ auf 45-52 PJ verringern und dadurch bis zu 1 Mrd. Liter Kraftstoff ersetzen. In der mittleren Leistungsklasse wird für einige landwirtschaftliche Einsatzzwecke eine Elektrifizierung möglich sein, die Weiterentwicklung der Batterietechnik lässt hier eine Ausweitung der Einsatzmöglichkeiten erwarten.

Pflanzenölkraftstoffe und Biodiesel sind besonders geeignet, da sie neben einer hohen Energiedichte auch den Vorteil einer regionalen Bereitstellungsmöglichkeit bieten. Damit können positive Wertschöpfungseffekte ausgelöst werden und es kann ein Beitrag zur Versorgungssicherheit für die landwirtschaftliche Produktion und gleichzeitig zur Futtermittelbereitstellung geleistet werden.

Fischer-Tropsch-Diesel und HVO-Diesel sind sehr gut geeignete Energieträger für Bestandsmaschinen, da sie ohne wesentliche Änderungen am Motor und kraftstoffführendem System eingesetzt werden können. Aufgrund der auch zukünftig zu erwartenden begrenzten Verfügbarkeit und der erwarteten hohen Kosten sollten Neufahrzeuge mit anderen Kraftstoffen betrieben werden, um die Konkurrenz um diese Kraftstoffe zu entschärfen. HVO-Diesel darf seit kurzem als Reinkraftstoff an Tankstellen vertrieben werden, Fischer-Tropsch-Kraftstoffe sind aktuell nicht verfügbar.

**2030 → 2045**

|   |   |   |
|---|---|---|
| <p><b>Leichte Arbeiten</b><br/>                 (Hofarbeiten, Ladearbeiten, Säen, Pflanzenschutz, autonome Arbeiten)<br/> <b>Light work</b><br/>                 (yard work, loading work, sowing, plant protection, autonomous work)</p> | <p><b>Mittelschwere Arbeiten</b><br/>                 (Pflege, Düngung, Grasverbau, leichte Bodenbearbeitung)<br/> <b>Medium work</b><br/>                 (Maintenance, fertilisation, grass cultivation, light tillage)</p> | <p><b>Schwere Arbeiten</b><br/>                 (schwere Bodenbearbeitung, Mähdrusch, Häckseln)<br/> <b>Heavy work</b><br/>                 (heavy tillage, combine harvesting, chopping)</p> |
|---|---|---|



**Legende:**  
**Legend:**

- Bevorzugt und umsetzbar:** Verfügbar, geeignet, kostengünstig, ressourceneffizient, regionale Energieträger  
***Preferred and feasible:** Available, suitable, cost-effective, resource-efficient, regional energy sources*
- Umsetzbar:** Verfügbar, geeignet  
***Feasible:** Available, suitable*
- Teilweise umsetzbar:** Verfügbar (optimistisches Szenario), geeignet  
***Partially feasible:** Available (optimistic scenario), suitable*
- Umsetzbar:** Bessere Alternativen vorhanden  
***Feasible:** Better alternatives available*
- Nicht verfügbar**  
***Not available***

**Bild 4:** Perspektive 2030/2045 möglicher Energieträger in der landwirtschaftlichen Anwendung [24].  
**Figure 4:** Perspective 2030/2045 for possible energy sources in agricultural use [24].

Der Einsatz von gasförmigen Kraftstoffen, insbesondere CNG ist für den mittleren Leistungsbereich ebenfalls eine Option, unter der Voraussetzung, dass eine Biogasanlage mit Betankungsmöglichkeit oder eine CNG-Tankstelle in räumlicher Nähe zum landwirtschaftlichen Betrieb verfügbar ist. LNG bietet den Vorteil einer höheren Energiedichte, hier müssen aber, insbesondere bei Maschinen mit längeren Standzeiten, Probleme mit Methanverlusten aus den Kraftstofftanks gelöst werden.

Wasserstoff als Energieträger für landwirtschaftliche Maschinen ist aus heutiger Sicht aufgrund des hohen Aufwands und der offenen Fragen zur Nutzung von Brennstoffzellen unter anspruchsvollen Bedingungen noch keine bevorzugte Option.

Für die Einführung der oben beschriebenen Alternativen zu fossilem Diesel in die landwirtschaftliche Praxis sind stabile rechtliche Rahmenbedingungen wichtig, die langfristige Planungssicherheit ermöglichen. Dazu zählen insbesondere die Besteuerung und CO<sub>2</sub>-Bepreisung von Kraftstoffen. Auch eine Investitionsförderung zur Unterstützung beim Umstieg auf die derzeit noch teureren alternativen Antriebssysteme ist ein wichtiger Aspekt. Eine zielgruppenorientierte Kommunikationsstrategie, die sich an Landwirte, die Landmaschinenindustrie, Werkstätten, den Kraftstoffhandel sowie Bildungseinrichtungen richtet, sollte zur Begleitung des Umstiegs implementiert werden.

### **Zusammenfassung**

Die Landwirtschaft spielt eine wesentliche Rolle bei der Bereitstellung von Erneuerbaren Energien in Form von Strom, Wärme und Kraftstoffen. Aktuell wird insbesondere die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für Freiflächen-Photovoltaik-Anlagen oder auch Agri-PV-Anlagen diskutiert. Hingegen stockt der Ausbau von Bioenergieanlagen aktuell aufgrund ungünstiger Rahmenbedingungen.

Für den aus Gründen des Klima- und Ressourcenschutzes notwendigen Umstieg von fossilem Dieselmotorkraftstoff auf erneuerbare Antriebsenergien gibt es für landwirtschaftliche Maschinen unterschiedliche Optionen. Dazu zählen Biokraftstoffe und verschiedene paraffinische Kraftstoffe wie hydrierte Pflanzenöle (HVO) oder synthetische Kraftstoffe, die aus erneuerbarem Strom gewonnen werden. Außerdem sind gasförmige Kraftstoffe wie Biomethan aus Biogasanlagen oder synthetisches Methan mögliche Alternativen. Eine wesentliche Komponente einer Umstiegsstrategie ist die Elektrifizierung von Maschinen im kleinen Leistungsbereich und solchen, die für Intervallarbeiten eingesetzt werden. Hier sind zwischen den Maschineneinsätzen ausreichend Ladezeiten realisierbar. Für den Einsatz in landwirtschaftlichen Maschinen im mittleren oder hohen Leistungsbereich, bieten sich insbesondere Biokraftstoffe an, da diese in der Landwirtschaft erzeugt werden können und neben einer gleichzeitigen Bereitstellung von Futtermitteln auch positive regionale Wertschöpfungseffekte aufweisen.

Die Praxiseinführung dieser Optionen erfordert stabile Rahmenbedingungen, insbesondere hinsichtlich der Besteuerung von Energieträgern und sollte durch eine zielgruppenorientierte Kommunikationsstrategie begleitet werden.

## Literatur

- [1] KSG: Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist – KSG (2019), S. 1-10.
- [2] EEG: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (erneuerbare-Energien-Gesetz) – EEG 2023 (2014), S. 1-128.
- [3] N.N.: Statistiken ausgewählter erneuerbarer Energieträger zur Stromerzeugung – November 2023. Bundesnetzagentur (Hrsg.), 2023.
- [4] WindSeeG: Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (Windenergie-auf-See-Gesetz) – WindSeeG.
- [5] AEE: Erneuerbare Energien in Bürgerhand. Verteilung der Eigentümer an der bundesweiten installierten Leistung zur Stromerzeugung aus Erneuerbare-Energie-Anlagen 2019, Agentur für Erneuerbare Energien e. V. (Hrsg.), 2020.
- [6] Böhm, J.; Tietz, A.: Abschätzung des zukünftigen Flächenbedarfs von Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Thünen Working Paper 204, Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hrsg.), Braunschweig 2022.
- [7] N.N.: Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung. DIN SPEC 91434, 2021.
- [8] GAPDZV: Verordnung zur Durchführung der GAP-Direktzahlungen (GAP-Direktzahlungen-Verordnung) – GAPDZV (2022).
- [9] Gerhards, C.; Schubert, L.; Lenz, C.; Wittmann, F.; Richter, D.; Volz, B.; Pommer, R.: Agri-PV - Kombination von Landwirtschaft und Photovoltaik. Schriftenreihe, Heft 1, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden 2022.
- [10] Schaft, J.; Grieb, M.; Fritz, M.: Agri-Photovoltaik – Stand und offene Fragen. Berichte aus dem TFZ, Bd. 73, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing 2021.
- [11] Fraunhofer ISE: Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2023.
- [12] Fritz, M.; Stöppler, M.; Grieb, M.: TFZ-Leitfaden 1 - Agri-Photovoltaik – Planung und Genehmigung. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Straubing 2023.
- [13] Fraunhofer ISE: Agri-Photovoltaik am Fraunhofer ISE – Forschungsprojekte. Fraunhofer ISE, URL: <https://agri-pv.org/de/unser-beitrag/forschungsprojekte/>, Zugriff am: 11.03.2024.
- [14] UBA: Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022 – Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2020. Climate Change, 24/2022, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2022.

- [15] Fachverband Biogas e. V.: Biogas Branchenzahlen 2022 und Prognose der Branchenentwicklung 2023. Fachverband Biogas e. V., URL: [www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE\\_Branchenzahlen](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen), Zugriff am: 08.01.2023.
- [16] Moosmann, D.; Oehmichen, K.; Majer, S.; Rensberg, N.: Leitfaden zur Treibhausgasbilanzierung von Energie aus Biogas und Biomethan für die Nachhaltigkeitszertifizierung unter der RED II. Ergebnisse aus dem Verbundvorhaben ZertGas, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (Hrsg.), Leipzig 2021.
- [17] KTBL: Substratanpassungsrechner Biogas. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) | Darmstadt, URL: [www.ktbl.de/webanwendungen/substratanpassungsrechner-biogas](http://www.ktbl.de/webanwendungen/substratanpassungsrechner-biogas), Zugriff am: 09.01.2024.
- [18] N.N.: Schlussbericht zum Verbundvorhaben. Technisch-betriebswirtschaftliche Evaluation und Validierung eines Prognosemodells zur Abbaukinetik von lignocellulosereichen Einsatzstoffen für die Flexibilisierung des Biogasprozesses in der Praxis (LIGNOFLEX), Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; FNR, 2023.
- [19] Gökgöz, F.; Liebetrau, J.; Nelles, M.: Kombinierte Bereitstellung von Strom und Kraftstoff an Biogasanlagen - Wirtschaftlichkeit von Anschlussszenarien. Landtechnik 75 (2020) H. 3, S. 141–160.
- [20] KTBL: Hintergründe zum Treibhausgasquotenhandel beim Verkauf von Biomethan als Kraftstoff (Option Biomethan und Tankstelle). Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), Darmstadt 2023.
- [21] KTBL: Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas - Bestandsanlagen. URL: [www.ktbl.de/webanwendungen/wirtschaftlichkeitsrechner-biogas-bestandsanlagen](http://www.ktbl.de/webanwendungen/wirtschaftlichkeitsrechner-biogas-bestandsanlagen), Zugriff am: 09.01.2024.
- [22] KTBL: Zukunft Biogas – Ein Fachportal zur Post-EEG-Thematik für landwirtschaftliche Biogasanlagen. URL: <https://www.zukunftbiogas.de/>, Zugriff am: 11.03.2024.
- [23] KTBL: Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (Hrsg.), Darmstadt 2023.
- [24] KTBL: Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) | Darmstadt, URL: <https://www.ktbl.de/webanwendungen/leistungs-kostenrechnung-pflanzenbau/>, Zugriff am: 09.01.2024.
- [25] BMEL: Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten 2021. 65. Auflage, 2021, ISBN: 978-3-8308-1427-6.
- [26] KTBL (Hrsg.): Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) 2020, ISBN: 978-3-945088-73-9.

- [27] Schröder, J.; Naumann, K. (Hrsg.): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. DBFZ Report, Bd. 44, 1. Auflage, Leipzig: Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) 2022.

### **Autorendaten**

Henning Eckel, Dr. Jens Grube und Dr. Wilfried Hartmann sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. in Darmstadt.

### **Bibliografische Angaben / Bibliographic Information**

#### **Empfohlene Zitierweise / Recommended Form of Citation**

Ecker, Henning; Grube, Jens; Hartmann, Wilfried: Energieerzeugung und –bereitstellung im landwirtschaftlichen Kontext. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2023. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2024. S. 1-16

#### **Zitierfähige URL / Citable URL**

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202401171528-0>

#### **Link zum Beitrag / Link to Article**

<https://www.jahrbuch-agrartechnik.de/artikelansicht/jahrbuch-2023/chapter/energiesysteme.html>

Dieser Beitrag wird unter einer CC-BY-NC-ND 4.0 Lizenz veröffentlicht.