

EIGENVERSORGUNG DER BAYERISCHEN LANDWIRTSCHAFT MIT ERNEUERBARER ENERGIE FÜR DEN EINSATZ IN MOBILen MASCHINEN

Abschlussbericht zum Projekt EigenKraftBayern

– Kurzfassung –



Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im
Abteilung Systembewertung Nachwachsende Rohstoffe
Janine Mallast, Daniela Dressler, Norman Siebrecht

Straubing, 31.10.2025

Inhalt

1	Einleitung und Zielstellung.....	6
2	Stand des Wissens	6
3	Vorgehen und angewandte Methoden.....	8
3.1	Bedarfsanalyse - Ermittlung der regionalisierten Kraftstoffbedarfe.....	10
3.2	Optionen zur Substitution	11
3.3	Potenziale und Soll-/Ist-Analyse der Substitute	12
3.4	Szenarien	12
3.5	Substitutionsgrad, THG-Emissionen und Klimaschutzeffekte.....	13
4	Ergebnisse und Diskussion.....	13
4.1	Kraftstoffbedarfe für den Einsatz in mobilen Maschinen in Bayern.....	13
4.2	Substitutionsbedarfe	17
4.3	Soll-/Ist-Analyse der Substitute im Status Quo und der Szenarien	18
4.4	Eigenversorgung mit regional substituierbaren Antriebsenergien.....	20
4.5	THG-Emissionen und Klimaschutzeffekte der Substitution	21
5	Schlussfolgerungen und Anschlussfähigkeit	24
6	Literaturverzeichnis	28

Zusammenfassung

Der Abschlussbericht zum Projekt "EigenKraftBayern" thematisiert die Eigenversorgung der bayerischen Landwirtschaft mit erneuerbaren Energien für den Einsatz in mobilen Maschinen. Mit dem Projekt wurden Grundlagen erarbeitet, um fossile Kraftstoffe (Diesel), zu substituieren. Dadurch ließen sich Treibhausgasemissionen reduzieren und die Energieunabhängigkeit der Landwirtschaft fördern. Der Bericht gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Antriebsoptionen, beschreibt Methoden zur Ermittlung des Kraftstoffbedarfs, die Analyse der Substitutionsmöglichkeiten und eine Auswertung der Klimaschutzeffekte der Substitution.

Einblick in die Kapitel des Berichts

1. Einleitung und Zielstellung

Für den Klimaschutz in der Landwirtschaft ist die Substitution fossiler Energieträger von zentraler Bedeutung. Der Einsatz von Dieselkraftstoff verursacht etwa 10 % der nationalen Treibhausgasemissionen in Deutschland. Das Projekt untersucht Antriebsoptionen wie Biodiesel, Pflanzenöl und Elektrifizierung, um die Unabhängigkeit der landwirtschaftlichen Produktionssysteme zu erhöhen. Dabei wird betont, dass regionale Unterschiede in der bayerischen Landwirtschaft berücksichtigt werden müssen, da die technischen Anforderungen und Substitutionsmöglichkeiten räumlich variieren.

2. Stand des Wissens

Dieser Abschnitt bietet einen Überblick über den aktuellen Wissensstand zu den Kraftstoffbedarfen der bayerischen Landwirtschaft, den Möglichkeiten zur Substitution fossiler Antriebsenergien und den Klimaschutzeffekten.

3. Vorgehen und angewandte Methoden

Der Bericht beschreibt das entwickelte sechsstufige Vorgehen zur Analyse der Kraftstoffbedarfe und der Substitutionsmöglichkeiten. Es umfasst eine Bedarfsanalyse, die Zuordnung der Energiebedarfe zu den Substitutionsoptionen, die Analyse der Eigenversorgungspotenziale, einen Vergleich der Substitutionsbedarfe mit den Potenzialen, die Entwicklung von Szenarien zur Verbesserung der Bereitstellungsmöglichkeiten sowie eine Auswertung der Treibhausgasemissionen und der Klimaschutzeffekte.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass der Kraftstoffbedarf für den Einsatz in mobilen Maschinen in Bayern regional variiert. Der Gesamtbedarf für das Jahr 2024 beträgt 399,4 Millionen Liter, wovon etwa 75 % auf die Pflanzenproduktion und 25 % auf die Rinderhaltung entfallen. Die Analyse der Substitutionsbedarfe zeigt, dass etwa 59 % des Gesamtbedarfs durch regional erzeugbare Substitute wie Strom, Pflanzenöl und Biomethan gedeckt werden können. Die restlichen 41 % müssten durch nicht-regional erzeugbare Substitute wie Biodiesel oder HVO bereitgestellt werden. Die Klimaschutspotenziale der Substitution sind erheblich. Durch eine vollständige Substitution des Diesels könnten die Treibhausgasemissionen um bis zu 78 % reduziert werden. Die Analyse zeigt jedoch auch, dass die regionale Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien und die Zugänglichkeit zu Tankstellen für die Umsetzung der Substitution entscheidend sind.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Bericht schlussfolgert, dass die Eigenversorgung der bayerischen Landwirtschaft mit erneuerbaren Energien machbar ist und erhebliche Klimaschutzpotenziale bietet. Die Ergebnisse des Projekts können als Grundlage für die Entwicklung von Förderangeboten zur Eigenversorgung mit Energieträgern genutzt werden. Zukünftige Arbeiten sollten sich auf die Verbesserung der regionalen Verfügbarkeit von Substituten und die Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen für die Umsetzung konzentrieren.

Summary

The final report on the project "EigenKraftBayern" focuses on Bavarian agriculture's self-sufficiency in renewable energies for use in mobile machinery. The project laid the groundwork for substituting fossil fuels (diesel). This would reduce greenhouse gas emissions and promote energy independence in agriculture. The report provides an overview of the status of drive options, describes methods for determining fuel requirements, analyses substitution options, and evaluates the climate protection effects of substitution.

An overview of the chapters of the report:

1. Introduction and Objectives

Replacing fossil fuels is key to climate protection in agriculture. The use of diesel fuel causes about 10 % of national greenhouse gas emissions in Germany. The project examines drive options such as biodiesel, vegetable oil, and electrification in order to increase the independence of agricultural production systems. It emphasizes that regional differences in Bavarian agriculture must be considered, as technical requirements and substitution options vary spatially.

2. Current state of Knowledge

This section provides an overview of the current knowledge on fuel requirements in Bavarian agriculture, the possibilities for substituting fossil fuels, and the effects on climate protection.

3. Approach and methods applied

The report describes the six-step process developed to analyze fuel requirements and substitution options. It includes a demand analysis, the allocation of energy requirements to substitution options, an analysis of self-supply potential, a comparison of substitution requirements with potential, the development of scenarios for improving supply options and an evaluation of greenhouse gas emissions and climate protection effects.

4. Results and Discussion

The results show that the fuel demand for use in mobile machinery varies across Bavaria. The total demand for 2024 amounts to 399.4 million liters, of which around 75 % is accounted for crop production and 25 % by cattle farming. Analysis of substitution requirements shows that around 59 % of the total demand can be met by regionally producible substitutes such as electricity, vegetable oil and biomethane. The remaining 41 % would have to be provided by non-regionally producible substitutes such as biodiesel or HVO. The climate protection potential of substitution is significant. Complete substitution of diesel could reduce greenhouse gas emissions by up to 78 %. However, the analysis also shows

that the regional availability of renewable energies and access to filling stations are crucial for the implementation of substitution.

5. Conclusions and Outlook

The report concludes that self-sufficiency of Bavarian agriculture with renewable energies is feasible and offers considerable potential for climate protection. The results of the project can be used as a basis for developing support programs for self-sufficiency in energy sources. Future work should focus on improving the regional availability of substitutes and creating suitable framework conditions for implementation.

1 Einleitung und Zielstellung

Die Substitution fossiler Energieträger ist auch in der landwirtschaftlichen Produktion von zentraler Bedeutung für den Klimaschutz. Aus dem Einsatz von Dieselkraftstoff für mobile landwirtschaftliche Antriebssysteme resultieren derzeit circa 10 % der nationalen Treibhausgasemissionen Deutschlands (Umweltbundesamt 2024). Zur Substitution dieses Kraftstoffs und zur Reduktion der damit verbundenen Emissionen sind verschiedene Antriebsoptionen und alternative Energieträger in der Diskussion, wie zum Beispiel Biodiesel, Pflanzenöl oder die Elektrifizierung von Antriebssystemen (Eckel et al. 2023).

Mit dem Vorhaben „EigenKraftBayern“ wurde ein methodischer Ansatz entwickelt und angewendet, um Kraftstoffbedarfe mobiler Maschinen regional- und standortspezifisch für die Bayerische Landwirtschaft zu erfassen, assoziierte Effekte wie den Klimaschutzbeitrag zu bewerten und Aussagen zur Eigenversorgung der Landwirtschaft zu treffen. Für die Analysen wurden verfügbare Daten (z. B. Agrarstatistische Daten) genutzt, interpretiert und mit bestehenden Methoden (z. B. KTBL-Verfahrensrechner) und Tools (z. B. QGIS) prozessiert.

Das Vorhaben umfasst folgenden Teilziele:

1. Regionaldifferenzierte Berechnung des Kraftstoff- und Strombedarfs (Bedarf Antriebsenergie)
2. Ermittlung der bestehenden Substitutionspotenziale und Eigenversorgungsanteile für den Status quo der Bayerischen Landwirtschaft
3. Entwicklung von Szenarien zum Ausbau der Eigenversorgung mit alternativen Energieträgern zur Substitution des fossilen Kraftstoffbedarfs
4. Ableitung von Schlussfolgerungen zur Förderung der Eigenversorgung der bayerischen Landwirtschaft mit alternativen Kraftstoffen und Strom

Mit den Ergebnissen soll ein Beitrag geleistet werden, um erneuerbare Kraftstoffe und alternative Antriebssysteme in die breite Anwendung zu bringen und die Eigenversorgung der Energiebereitstellung in der Landwirtschaft auszubauen. Mit dem Projekt werden zudem Datengrundlagen erarbeitet, um dem Ziel "energieautarke Bauernhöfe" näher zu kommen und um Grundlagen für die Etablierung möglicher Förderangebote zur Eigenversorgung mit Energieträgern zu entwickeln.

2 Stand des Wissens

Der Kenntnisstand zu den Energie- bzw. Kraftstoffbedarfen der Bayerischen Landwirtschaft, möglichen Antriebsoptionen zur Substitution der fossilen Antriebsenergien und zu den möglichen Treibhausgasemissionen für diesen Bereich wird hier stark verkürzt dargestellt. Detailliertere Ausführungen sind der Langversion des Abschlussberichts zu entnehmen.

Kraftstoffbedarfe der Bayerischen Landwirtschaft

Für die Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Flächen wird im Mittel ein durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch zwischen 110 und 120 Liter Diesel pro Hektar angenommen (i.m.a 2023). Bei Thuneke et al. (2024) wurde für die Bayerische Landwirtschaft ein mittlerer Kraftstoffbedarf von ca. 101 Liter pro Hektar ermittelt. Der Wertebereich variiert zwischen 74 l/ha (Raps) bis 140 l/ha (Silomais, Ackergras). Insgesamt wurde ein Gesamtbedarf von ca. 399 Millionen Liter Dieselkraftstoff für den Betrieb mobiler Maschinen zur Erzeugung der Hauptkulturen und für die Rinderhaltung berechnet.

Antriebsoptionen für die Substitution fossiler Antriebsenergie

Für die Substitution von Dieselkraftstoff stehen unterschiedliche Kraftstoffe und Antriebsoptionen zur Verfügung. In der Ktbl-Sonderveröffentlichung "Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen" (Eckel et al. 2023) werden diese vorgestellt und umfassend diskutiert.

Zu betonen ist, dass es von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig ist, welche Substitute für unterschiedliche Bereiche geeignet sind. Zu nennende Aspekte sind Nutzungsprofile der Maschinen, die tatsächliche Verfügbarkeit des erneuerbaren Kraftstoffs bzw. Stroms oder die Leistungsanforderungen der Verfahrensschritte. Daraus folgt, dass es nicht eine einzige Lösung zur Substitution gibt, sondern unterschiedliche Antriebsoptionen im Mix zur Anwendung kommen können. Schematisch wird diese in Abbildung 1 dargestellt.

	Leicht (< 5 l/ha)	Mittel (5-15 l/ha)	Schwer
Strom* (Batterie)	bevorzugt	umsetzbar	keine passenden Antriebe verfügbar
Pflanzenöl* (Rapsölkraftstoff)	umsetzbar, bessere Alternative	bevorzugt	bevorzugt
Biodiesel (FAME)	umsetzbar, bessere Alternative	bevorzugt	bevorzugt
Paraffinischer Biodiesel (HVO)	umsetzbar, bessere Alternative	umsetzbar	umsetzbar
Paraffinischer Biodiesel (Fischer Tropsch)	umsetzbar, bessere Alternative	teilweise umsetzbar	umsetzbar
Methan* (CNG)	umsetzbar, bessere Alternative	teilweise umsetzbar	teilweise umsetzbar
Methan* (LNG)	keine passenden Antriebe verfügbar	teilweise umsetzbar	keine passenden Antriebe verfügbar
Wasserstoff (FC/ICE)	keine passenden Antriebe verfügbar	keine passenden Antriebe verfügbar	keine passenden Antriebe verfügbar

Abbildung 1: Einschätzung technisch möglicher Antriebsoptionen in Abhängigkeit der Arbeitserfordernisse (verändert nach Eckel et al. 2023). Für die mit „*“ gekennzeichneten Optionen ist theoretisch eine Bereitstellung in Eigenversorgung möglich.

Klimaschutzeffekte der Substitution fossiler Antriebsenergien

Ausgehend von den rund 399 Mio. Liter Dieselkraftstoff für das Jahr 2021 von Thuneke et al. (2024), lassen sich die verfahrenstechnischen Treibhausgasemissionen (THG) ausweisen. Hierbei ist die verwendete Methodik bzw. der genutzte Ansatz zu berücksichtigen. Zu unterscheiden sind Emissionen nach dem Ansatz „Tank-to-Wheel“ und „Well-to-Wheel“. Während der „Well-to-Wheel-Ansatz“ alle lebenszyklusbasierten THG-Emissionen inklusive der Vorketten (von Gewinnung und Bereitstellung aller erforderlichen Roh- und Einsatzstoffe bis zur Energieumwandlung) umfasst, bildet der „Tank-to-Wheel-Ansatz“ nur die Emissionen ab, die bei der Verbrennung des Kraftstoffs entstehen.

Ausgehend von dem berechneten Dieselkraftstoff würden sich für die Bayerische Landwirtschaft jährliche Treibhausgasemissionen in Höhe von 1,0 Mio. Tonnen (Tank-to-Wheel) bzw. 1,3 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalenten (Well-to-Wheel) ergeben. Die mögliche Emissionsreduktion, die sich durch die Substitution des fossilen Kraftstoffs ergibt, kann nicht pauschal angegeben werden, da diese von der Wahl bzw. Mischung der Antriebsoptionen und deren Anteile abhängig ist. Bei Thuneke et al. (2024) wurden drei Szenarien erstellt, die eine Reduktion der THG-Emissionen um ein Viertel bis zu 90 % gegenüber der Nutzung des Dieselkraftstoffs ermöglichen könnten.

3 Vorgehen und angewandte Methoden

Für die Bearbeitung der Fragestellungen wurde ein sechsstufiges Vorgehen¹ entwickelt, dass die Grundlage aller weiterer Arbeitsschritte ist.

1. Bedarfsanalyse



Die Bedarfsanalyse ist eine regionalisierte Berechnung der Kraftstoff- bzw. Energiebedarfe für mobile Maschinen in der Landwirtschaft (Außenwirtschaft) einschließlich der tierbezogenen Bedarfe. Die Ergebnisse sind jahres- und regionsspezifische Kraftstoffbedarfe der Landwirtschaft Bayerns. Die Bedarfsanalyse umfasst Auswertungen zur Arbeitsschwere (leichte bis schwere Arbeitsverfahren), um Antriebsoptionen zur Substitution zuordnen zu können.

2. Optionen



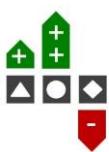
Im 2. Arbeitsschritt erfolgte eine Zuordnung der ermittelten Energiebedarfe zu den Substitutionsoptionen. Mit Hilfe eines definierten Verteilungsschlüssels der Antriebsoptionen (Abbildung 5) wurden die Substitutionsbedarfe der jeweiligen Antriebsoption berechnet. Der genutzte Verteilungsschlüssel basiert auf einer Expertenabschätzung.

3. Potenziale



Der 3. Arbeitsschritt umfasst eine Analyse der Potenziale der Eigenversorgung der aktuellen Landwirtschaft zur Bereitstellung der Antriebsenergien. Berücksichtigt werden nur solche Antriebsoptionen, die durch die Landwirtschaft bzw. in einer landwirtschaftlichen Wertschöpfung bereitgestellt werden können. Hierzu gehören Strom sowie pflanzenöl- und biogasbasierte Kraftstoffe.

4. Soll/Ist



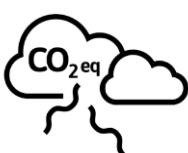
Der Soll/Ist-Vergleich stellt die energetischen Substitutionsbedarfe den Potenzialen zur Bereitstellung der Substitutionsoptionen gegenüber. Die Ergebnisse sind dimensionslose Zahlen, die den Substitutionsgrad angeben. Werte = 0 zeigen keine Substitution, Werte >0 - <1 zeigen eine teilweise mögliche Substitution und Werte ≥ 1 zeigen eine vollständige Substitution mit Überschuss (Substitutionsgrad >1) an.

5. Szenarien



Mit Szenarien wurden mögliche Entwicklungen erstellt, die die Eigenversorgung bzw. die Bereitstellung alternativer Energieträger verbessern sollen. Dies wurde beispielweise durch die Ausweitung der Potenziale (Ausweitung des Anbaus), die räumliche Umverteilung (Anpassung von Angebot und Nachfrage) oder die Optimierung der Zugangsmöglichkeiten (z.B. durch das Tankstellennetz) erreicht.

6. Effekte



Im 6. Arbeitsschritt erfolgte die Abschätzung der Effekte der Substitution des fossilen Dieselkraftstoffs für den Status Quo und für die erstellten Szenarien. Dies umfasst die Analyse der Treibhausgasemissionen, die Berechnung der Einsparpotenziale und die Ermittlung möglicher Klimaschutzeffekt. Je höher die Emissionsreduktion zu den Emissionen fossiler Kraftstoffe ausfällt, desto ausgeprägter ist der Effekt.

Zur Umsetzung des skizzierten Vorgehens wurde ein technischer Ansatz etabliert, durch den unterschiedliche Funktionalitäten (von der Datenerfassung, -verwaltung, -verarbeitung bis hin zur Aufbereitung und Ausgabe) genutzt und kombiniert werden konnten. Prinzipiell wurde dazu ein Datenbanksystem und ein Geografisches Informationssystem kombiniert angewandt (Abbildung 2).

¹ Bildnachweis: Tabelle von Sukjun Kim; Tacho von Muhammad Shabraiz; Szenario von Soremba; CO2eq von Francesca Ameglio

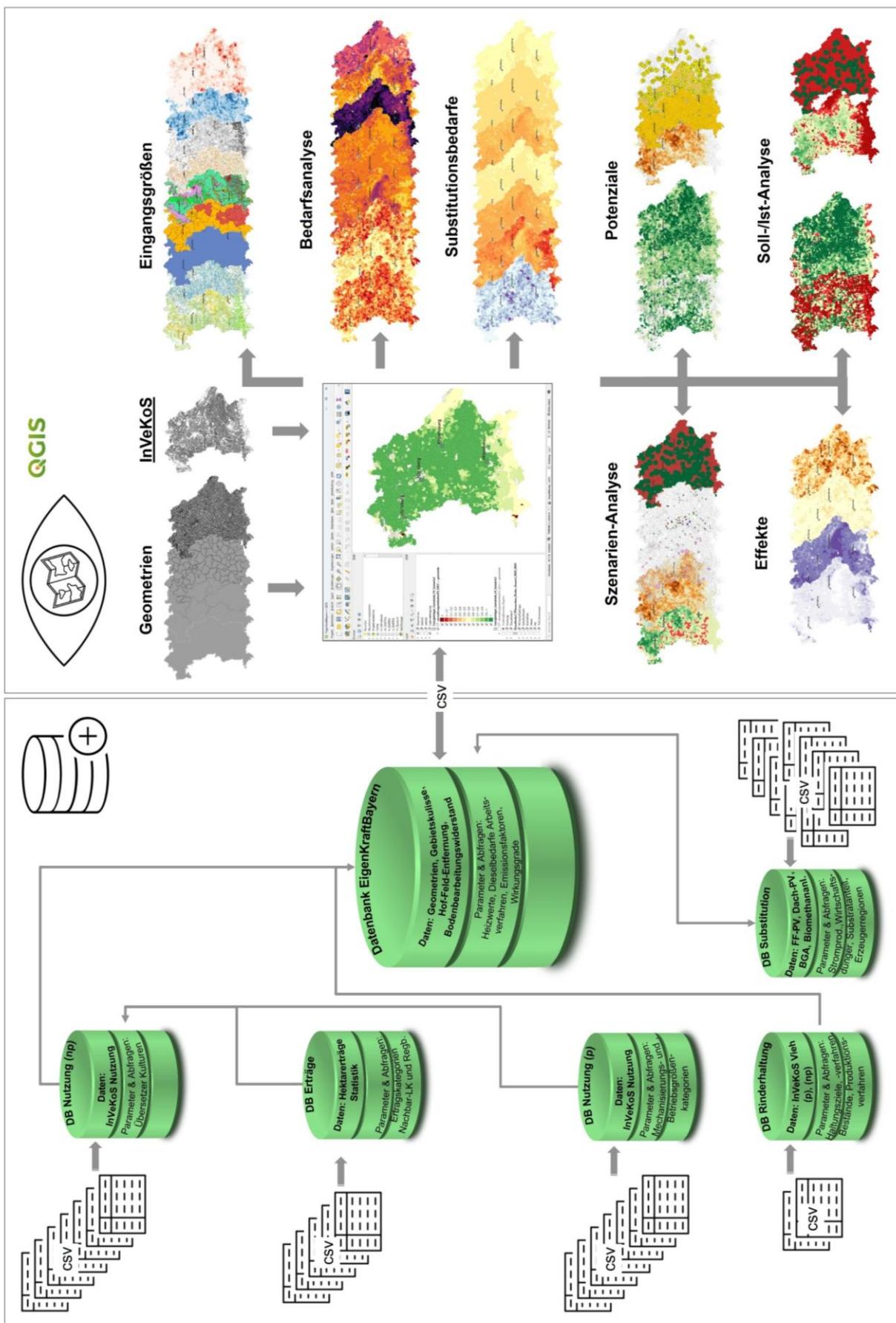


Abbildung 2: Schema zur technischen Umsetzung der Methoden (Bildnachweis: Datenbank von Nimal Raj; Auge von Natalia; Karte von Fraes; Tabelle von Sukjun Kim / thenounproject.com CC BY 3.0)

3.1 Bedarfsanalyse - Ermittlung der regionalisierten Kraftstoffbedarfe

Im Rahmen des Projektes wurde der „Verfahrensrechner Pflanze“ (KTBL 2025) genutzt, um die Kraftstoffbedarfe für mobile Maschinen in der Landwirtschaft zu berechnen. Generell basiert der Ansatz darauf, dass Arbeitsverfahren mit sieben Eingangsgrößen unterschiedlicher Ausprägung für eine Fläche beschrieben werden, anhand derer die Berechnung des Dieselbedarfs erfolgt (Abbildung 3).

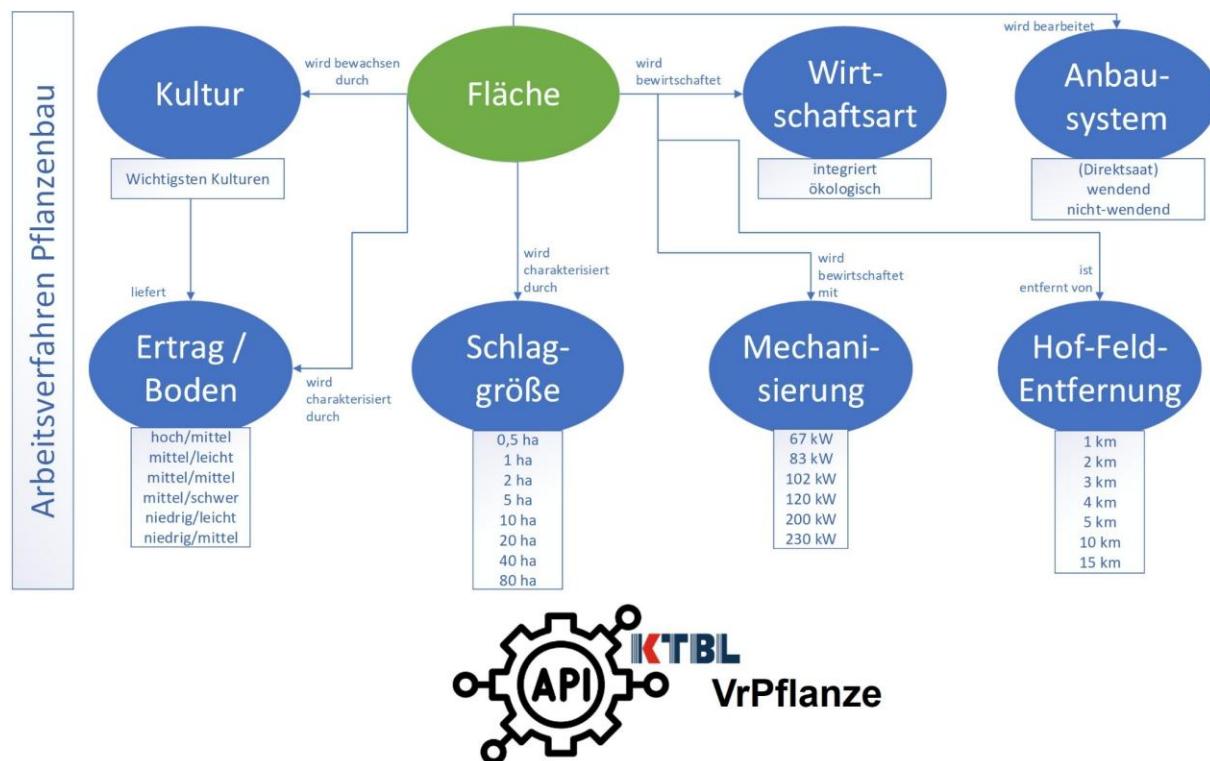


Abbildung 3: Schemata des Vorgehens „KTBL-Arbeitsverfahren Pflanzenbau“ zur Berechnung der Kraftstoffbedarfe; Ellipsen symbolisieren die Variablen des Ansatzes, rechteckige Kästen mögliche Ausprägungen der jeweiligen Variable (Bildnachweis: API von SAM Designs / theonounproject.com CC BY 3.0)

Die Input-Variablen umfassen die Fläche mit der jeweiligen Kultur, für die der Kraftstoffbedarf berechnet werden soll, die Wirtschaftsart, das Anbausystem, den Ertrag / Boden, die Schlaggröße, die Mechanisierung und die Hof-Feld-Entfernung (s. blaue Ovale, Abbildung 3). Jede der Variablen kann spezifische Ausprägungen (siehe Kasten neben dem Oval) einnehmen und muss für die Berechnung ausgewählt bzw. angepasst werden. Zur Bestimmung der Ausprägung dieser Variablen in Abhängigkeit regionaler Unterschiede wurden für das Vorhaben verschiedene Datengrundlagen ausgewertet, anhand derer sich die Betriebs- und Anbaustrukturen sowie die Standortmerkmale in Bayern abbilden lassen können. Durch die Ausprägung der Variablen und die Kombinationsmöglichkeiten wurden insgesamt 225.000 Arbeitsverfahren definiert, für die anhand einer durch das Ktbl zur Verfügung gestellten Schnittstelle („API VrPflanze“²) die Kraftstoffbedarfe berechnet werden konnten.

Neben dem Pflanzenbau wurde die Tierhaltung abgebildet. Zur Berechnung der Kraftstoffbedarfe für die Tierhaltung (Schwerpunkt Rinderhaltung) wurde das Vorgehen des Ktbl-Arbeitsverfahren

² Für die Möglichkeit der Nutzung möchten wir uns explizit bei Herrn Jens Grube, Team Pflanzenbau/Gartenbau/Weinbau, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Ktbl bedanken.

Rinderhaltung³ genutzt. Hierbei wird der Dieselbedarf berechnet, der sich aus dem Arbeitsaufwand z. B. aus Futtervorlage, Einstreu und Entmistung ergibt. Im Ansatz wird davon ausgegangen, dass sich der Kraftstoffbedarf u.a. durch den täglichen mehrstündigen Einsatz der Maschinen rund ums Jahr ergibt und tierzahlabhängig ist. Die Ermittlung des Dieselbedarfs basiert im KTB-L-Arbeitsverfahren Rinderhaltung auf Variablen für die Anzahl der Tiere, den Haltungszielen sowie dem Haltungsverfahren mit Stallsystem in Form von Gülle- oder Festmistsystemen (Abbildung 4).

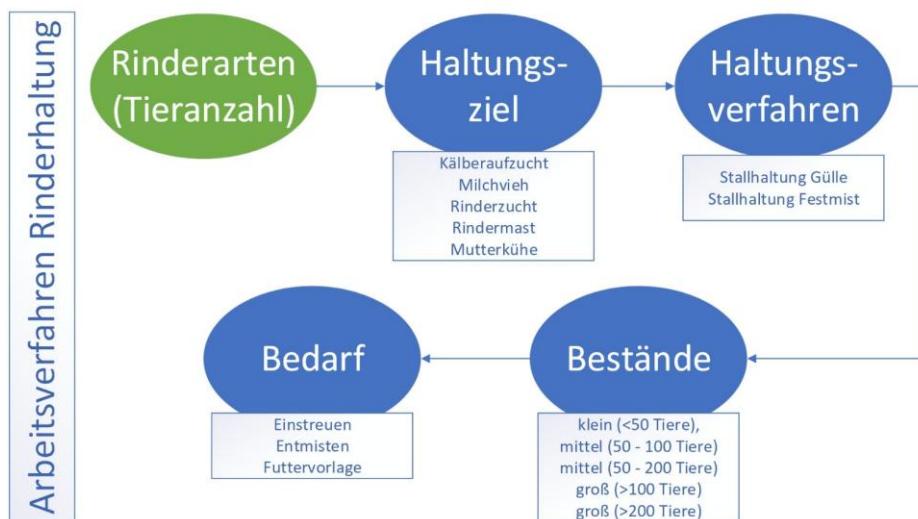


Abbildung 4: Schemata zum KTB-L-Arbeitsverfahren Rinderhaltung

Für die Berechnung der Dieselbedarfe wurden alle Variablen aus den nicht-personenbezogenen InVe-KoS-Daten Vieh für die Jahre 2020 bis 2024 abgeleitet und anschließend der Gesamtbedarf berechnet.

3.2 Optionen zur Substitution

Zur Berechnung der Substitutionsbedarfe für erneuerbare Kraftstoffe wurden die Arbeiten von Eckel et al. (2023) und Thuneke et al. (2024) zur Perspektive 2045 für ausgewählte Energieträger und Antriebe heranzogen. Als Substitutionsoptionen wurden Strom (Batterie mit elektrischen Antrieben), Rapsölkraftstoff (pflanzenölbasierter Kraftstoff, Pöl), Biomethan (in Form von CNG), Biodiesel (FAME), paraffinischer Diesel (HVO) und paraffinischer Diesel (Fischer Tropsch – FT) betrachtet. Die Antriebsoptionen zur Substitution des fossilen Dieselkraftstoffs wurden in Anlehnung an Thuneke et al. (2024) aufgeteilt (Abbildung 5). Bei den Betrachtungen wurde ein Fokus auf die Substitute Strom, Pflanzenöl und CNG (Biomethan) gelegt, da diese regional und dezentral in der bayerischen Landwirtschaft produziert werden können (daher „regional erzeugbare“ Substitute). Biodiesel und HVO können zwar auf bayerischer Anbaubiomasse (Pflanzenöl) bzw. auf Rest- und Abfallstoffen basieren, die Produktion von Biodiesel erfolgt jedoch zentral in zwei Anlagen in Bayern. Produktionsanlage für den paraffinischen Kraftstoff HVO fehlen derzeit in Bayern. Für die Herstellung des paraffinischen Kraftstoffs FT-Diesel wird Energie in Form von Strom benötigt. Der hierfür benötigte Strom könnte aus der bayerischen Landwirtschaft stammen. Produktionsanlagen bestehen noch keine.

³ Bei Herrn Henning Eckel, Teamleiter Energie, Emissionen und Klimaschutz beim Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. KTB möchten wir uns an dieser Stelle das zur Verfügung stellen der Berechnungsgrundlagen Rind bedanken.

	Leicht (< 5 l/ha)	Mittel (5-15 l/ha)	Schwer (>15 l/ha)
Strom* (Batterie)	90 %	50 %	-
Pflanzenöl* (Rapsölkraftstoff)	-	20 %	35 %
Biodiesel (FAME)	5 %	20 %	35 %
Paraffinischer Biodiesel (HVO)	5 %	5 %	15 %
Paraffinischer Biodiesel (Fischer Tropsch)	-	-	10 %
Methan* (CNG)	-	5 %	5 %
Methan* (LNG)	-	-	-
Wasserstoff (FC/ICE)	-	-	-

Abbildung 5: Verteilungsschlüssel der Antriebsoptionen (verändert nach Eckel et al. 2023, in Anlehnung an Thuneke et al. 2024), durch mit „*“ gekennzeichneten Optionen ist theoretisch eine Bereitstellung in Eigenversorgung möglich. FT und HVO-Kraftstoffe sind gegenseitig substituierbar (Kraftstoffmerkmale identisch).

3.3 Potenziale und Soll-/Ist-Analyse der Substitute

Mit Potenzialen werden vereinfacht Möglichkeiten zur Bereitstellung alternativer Antriebsenergien zur Substitution des fossilen Kraftstoffs durch die Landwirtschaft beschrieben. Diese bilden zunächst die derzeitige Situation der Bayerischen Landwirtschaft in Form des IST-Stands (Status quo) ab. Die grundsätzliche Fragestellung ist, inwiefern diese Potenziale (als „Angebote“ zu sehen) mögliche Bedarfe zur Substitution decken können. Ausgehend von ermittelten Bedarfen an unterschiedlichen Antriebsoptionen, wurde eine Soll-/Ist-Analyse durchgeführt, bei der die Potenziale den Bedarfen gegenübergestellt wurden. Diese Auswertung erlaubt Aussagen zu etwaigen Überschüssen oder Situationen der Unterversorgung. Die Ergebnisse werden als einheitloses Verhältnis ausgegeben. Dabei entsprechen Werte = 0 einer Situation, die keine Substitution erlaubt. Werte zwischen 0 - <1 bedeuten, dass eine Substitution möglich ist, die Substitution aber unvollständig ist. Mit Annäherung an den Wert 1 steigt der Substitutionsgrad an, Werte >= 1 beschreiben Situationen mit vollständiger Substitution. Dabei gilt, je größer die Zahl, desto größer ist der potenzielle „Überschuss“.

3.4 Szenarien

Mit Szenarien werden Erweiterungs-/Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt, um den Bestand (Status quo) bzw. die Potenziale für die Bereitstellung von Strom, Pflanzenölen und Biomethan zu verbessern. Wie dies erfolgt, ist vom Substitut (Strom, Pflanzenöl und Biomethan) und dessen Merkmalen abhängig. Generell wurden zwei „Ausgangssituationen“ unterschieden:

- Potenziale (Energiemengen) sind vorhanden, aber es besteht ein Ungleichgewicht zwischen dem räumlichen Angebot und der Nachfrage der möglichen Substitute. Eine Optimierung kann hierbei zum Beispiel durch eine Umverteilung erfolgen, bei der aus Regionen mit „Übersorgung“ an Biomassen bzw. Energieträgern ein Ausgleich in Regionen mit „Unterversorgung“ vorgenommen wird.

- Potenziale (Energiemengen) werden durch den Ausbau bzw. die Erweiterungen in der Bereitstellung bzw. durch Ergänzungen im Anlagenbestand erhöht. Dies führt dazu, dass die bestehenden Angebote ausgeweitet und mehr Energie für die unterschiedlichen Substitute bereitgestellt werden könnten.

3.5 Substitutionsgrad, THG-Emissionen und Klimaschutzeffekte

Der Substitutionsgrad gibt an, in welchem Maß alternative Energieträger Dieselkraftstoff ersetzen. Um den Aspekt der Eigenversorgung betrachten zu können, wurde vor allem die in Eigenversorgung realisierbaren Antriebsoptionen Strom und batterieelektrische Antriebsoptionen, Pflanzenölkraftstoff und Biomethan vorrangig betrachtet (Abbildung 1). Diese Prämisse führt allerdings dazu, dass Substitutionsgrade im Vergleich zur Nutzung aller Antriebsoptionen, geringer ausfallen. Für Substitute deren Energiebedarf nicht zu 100 Prozent gedeckt werden kann, wurde die fehlende Energiemenge durch fossilen Diesel ausgeglichen. Angaben zu den Treibhausgasemissionen enthalten somit die THG-Emissionen aus dem jeweiligen Substitut, als auch ggf. erforderlichen Restmengen für erforderlichen fossilem Diesel und dessen THG-Emissionen. Die Quantifizierung der THG-Emissionen basiert auf dem „Well-to-Wheel-Ansatz“ (WtW), es wurden die in Tabelle 1 angegebenen Emissionsfaktoren genutzt. Für die Berechnung der THG-Emissionen wurden diese in die Datenbank aufgenommen. Für jede Antriebsoption wurden anschließend die benötigten Energiemenge gemäß des Aufteilungsschlüssels (siehe Abbildung 5) ermittelt und die sich daraus ergebenen THG-Emissionen berechnet und ausgewertet.

Tabelle 1: Emissionsfaktoren für die betrachteten Antriebsoptionen (WtW)

Energieträger	Emissionsfaktor	Einheit	Quellen
Fossiler Dieselkraftstoff	94	g CO ₂ eq/MJ	EU 2018, EU 2023
Pflanzenöl (Rapsölkraftstoff)	32,13	g CO ₂ eq/MJ	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) 2024
Biodiesel (FAME)	16,59	g CO ₂ eq/MJ	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) 2024
Paraffinischer Diesel (HVO)	16,03	g CO ₂ eq/MJ	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) 2024
Paraffinischer Diesel (FT)	0,44	kg CO ₂ eq/kWh	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) 2024
Methan (CNG)	-3,56	g CO ₂ eq/MJ	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) 2024
Strom (Batterie) – Bereitstellung durch Biogasanlagen (Anteil 44,7 %)	0,10655 29,597	kg CO ₂ eq/kWh g CO ₂ eq/MJ	Wernet et al. 2016
Strom (Batterie) – Bereitstellung durch PV-Anlagen (Anteil 55,3 %)	0,11198 31,105	kg CO ₂ eq/kWh g CO ₂ eq/MJ	Wernet et al. 2016

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Kraftstoffbedarfe für den Einsatz in mobilen Maschinen in Bayern

Die Auswertung der Kraftstoffbedarfe kann durch das etablierte Vorgehen in Abhängigkeit der Fragestellung differenziert und auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. Ergänzend zu aggregierten Aussagen auf der bayernweiten Ebene sind fruchtartenspezifische, raumbezogene und verfahrensbezogene Auswertungen möglich. Mit dem vorliegenden Kurzbericht werden entsprechende Inhalte lediglich exemplarisch dargestellt.

Ergebnisse der Bayernweite Auswertung

Unter Berücksichtigung aller Kulturen, Anbauverfahren und der Tierhaltung mit dem Schwerpunkt Rind betrug der berechnete Bedarf für Bayern im Jahr 2024 eine Gesamtmenge von **399,4 Mio. l Dieselkraftstoff**. Diese teilt sich in etwa zu **75 %** auf die **Pflanzenproduktion** und zu **25 %** auf die Produktionsrichtung **Rinderhaltung** auf (Abbildung 6). Betrachtet man die Anbaufläche, so ergibt sich für die Pflanzenproduktion Bayerns ein durchschnittlicher Dieselbedarf von rund **103 Liter pro Hektar**.

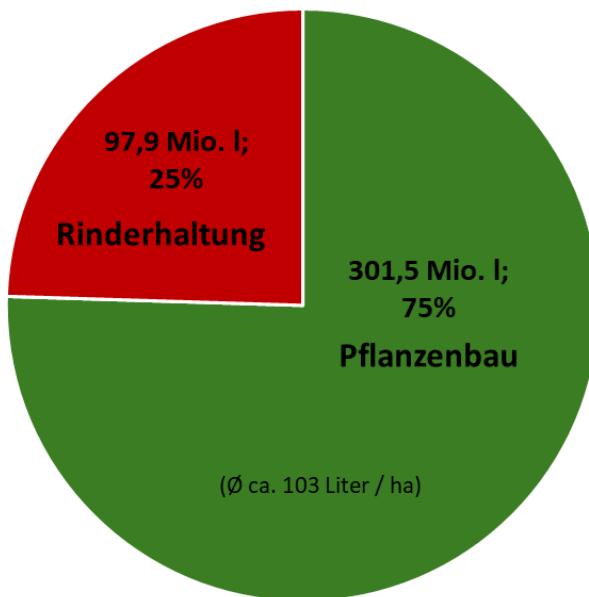


Abbildung 6: Aufteilung des Dieselkraftstoffbedarfs Bayerns (2024) für die Bereiche Pflanzenbau und Tierhaltung (Rind)

Raumbezogene Auswertung

Der Kraftstoffbedarf zeigt bei der raumbezogenen Auswertung innerhalb Bayerns ein differenziertes Bild. Die Muster für diese räumliche Verteilung werden vor allem durch den Pflanzenbau geprägt (Abbildung 7 a). Bedarfe aus der Rinderhaltung wirken insbesondere regional, z. B. in den südlichen Regierungsbezirken Schwaben, Ober- und Niederbayern sowie der Oberpfalz, da hier die Tierhaltung entsprechend stärker ausgeprägt sind. Demgegenüber zeigt Unterfranken einen eher geringen Dieselkraftstoffbedarf aus der Rinderhaltung (Abbildung 7 b).

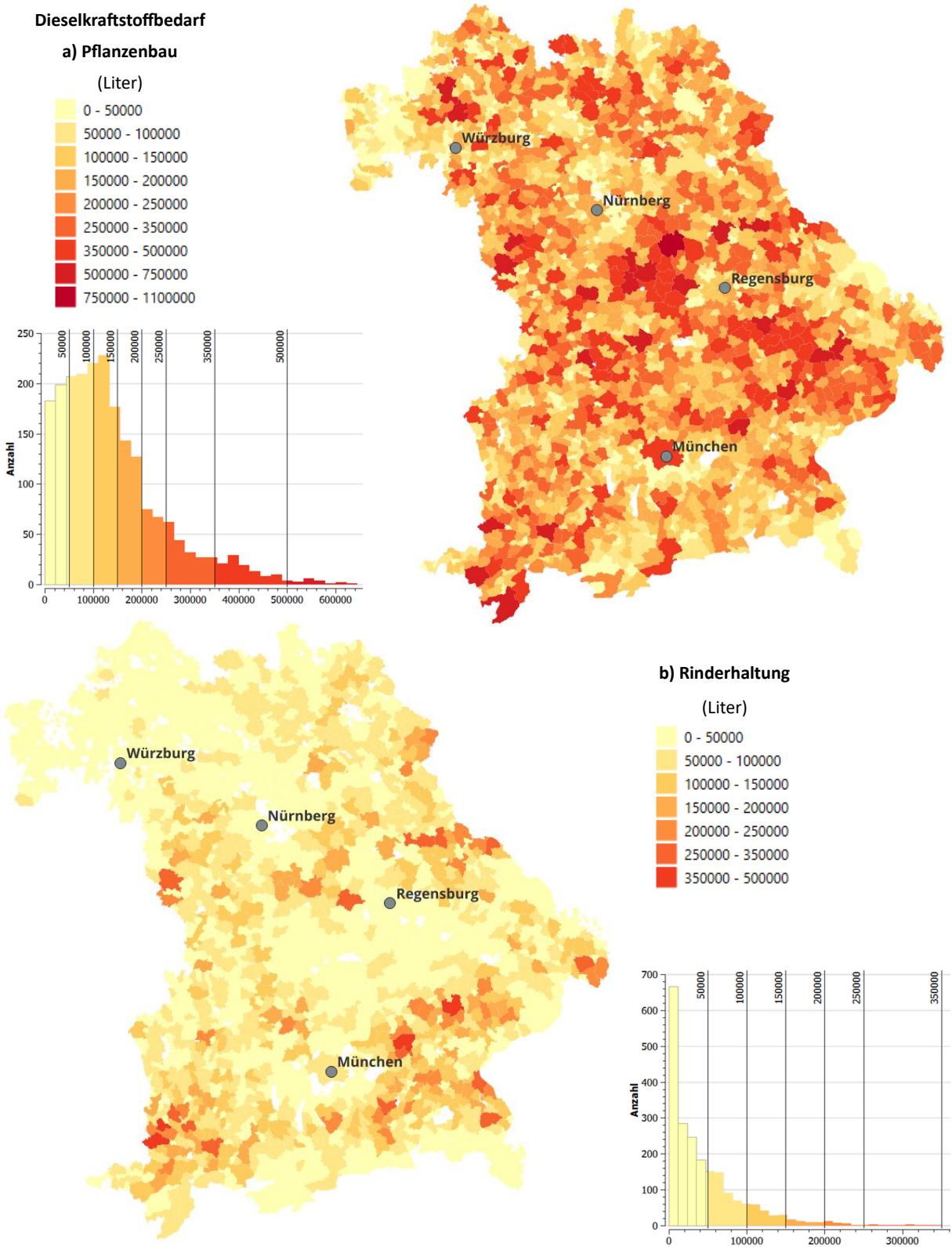


Abbildung 7: Regionalisierter Dieselkraftstoffbedarf in Bayern für Pflanzenbau (a) und Rinderhaltung (b), Jahr 2024

Fruchtartenspezifische Auswertung

Ein Teil des räumlichen Musters der Kraftstoffbedarfe im Pflanzenbau lässt sich durch die im Anbau befindlichen Kulturen und die regionalen Anbaustrukturen erklären. Ursächlich hierfür sind bestimmte

Kulturen mit höheren Arbeitsintensitäten und damit höheren Anteilen schwerer Arbeitsverfahren. Abbildung 8 stellt ausgewählte Kulturen dar, zeigt den Gesamtbedarf und die Aufteilung nach Arbeitsschwere. Zu erkennen ist beispielsweise, dass Getreide (inkl. Körnermais) und Hackfrüchte einen hohen Kraftstoffbedarf haben, insbesondere im Bereich der schweren Arbeitsverfahren (Anteile > 50 Prozent). Aufgrund der gewählten Methodik wird dieser „Kulturarteneffekt“ durch das Ertragsniveau verstärkt. Verallgemeinernd bedeutet dies, dass vor allem ertragsstarke Ackerbauregionen mit hohen Anbauanteilen dieser arbeitsintensiveren Kulturen auch die höchsten Kraftstoffbedarfe haben.

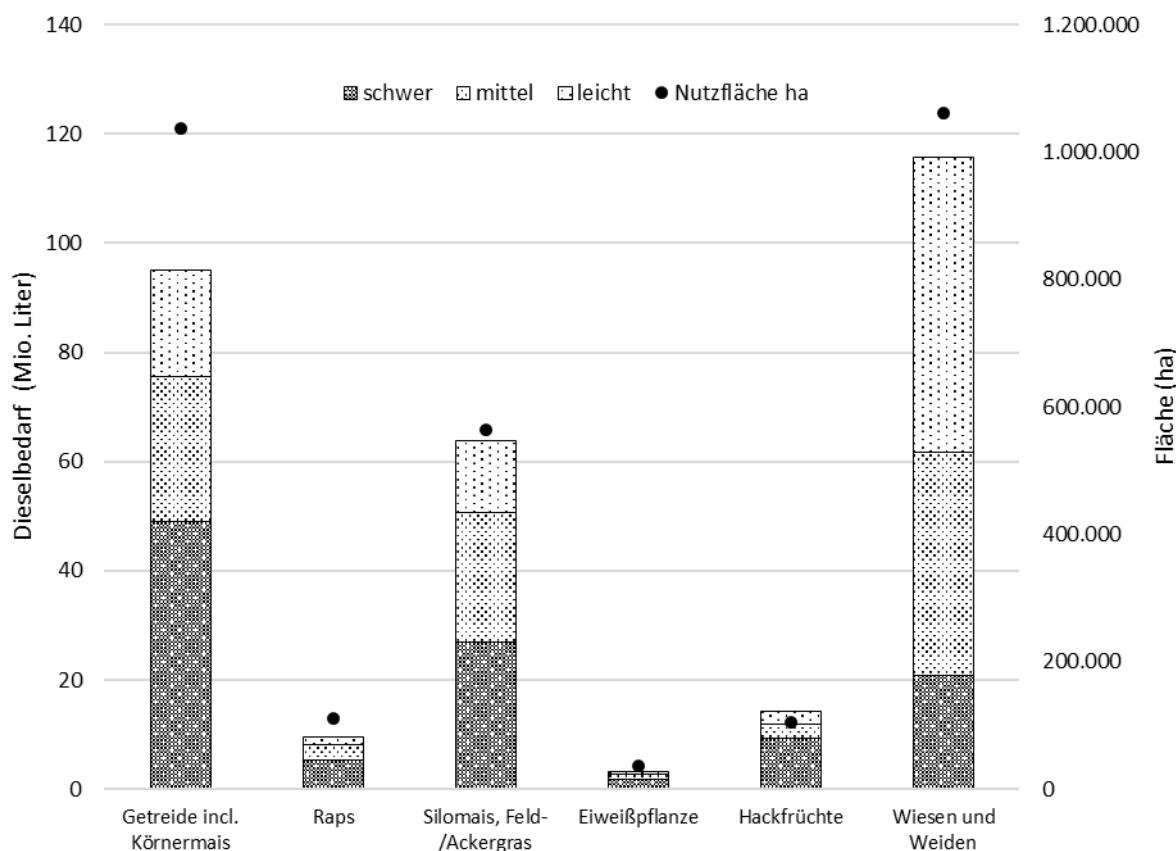


Abbildung 8: Dieselkraftstoffbedarf aus Pflanzenbau nach Ackerkulturen und Arbeitsschwere, Jahr 2024

Verfahrensbezogene Auswertung - Arbeitsschwere

Die Unterschiede der Kraftstoffbedarfe nach Arbeitsschwere werden besonders gut bei der Betrachtung der relativen Anteile der Kraftstoffbedarfe sichtbar (Abbildung 9). Deutlich zu erkennen sind die Gäubodenregion und die Ackerbauregion im Nordwesten mit höheren Bedarfen im Bereich schwerer Arbeitsverfahren.

Die regionalisierten Kraftstoffbedarfe wurden zusätzlich zur räumlichen Auswertung auch zeitlich ausgewertet. Ergebnisse hierzu werden aber ausschließlich in der Langversion des Abschlussberichts vor gestellt.

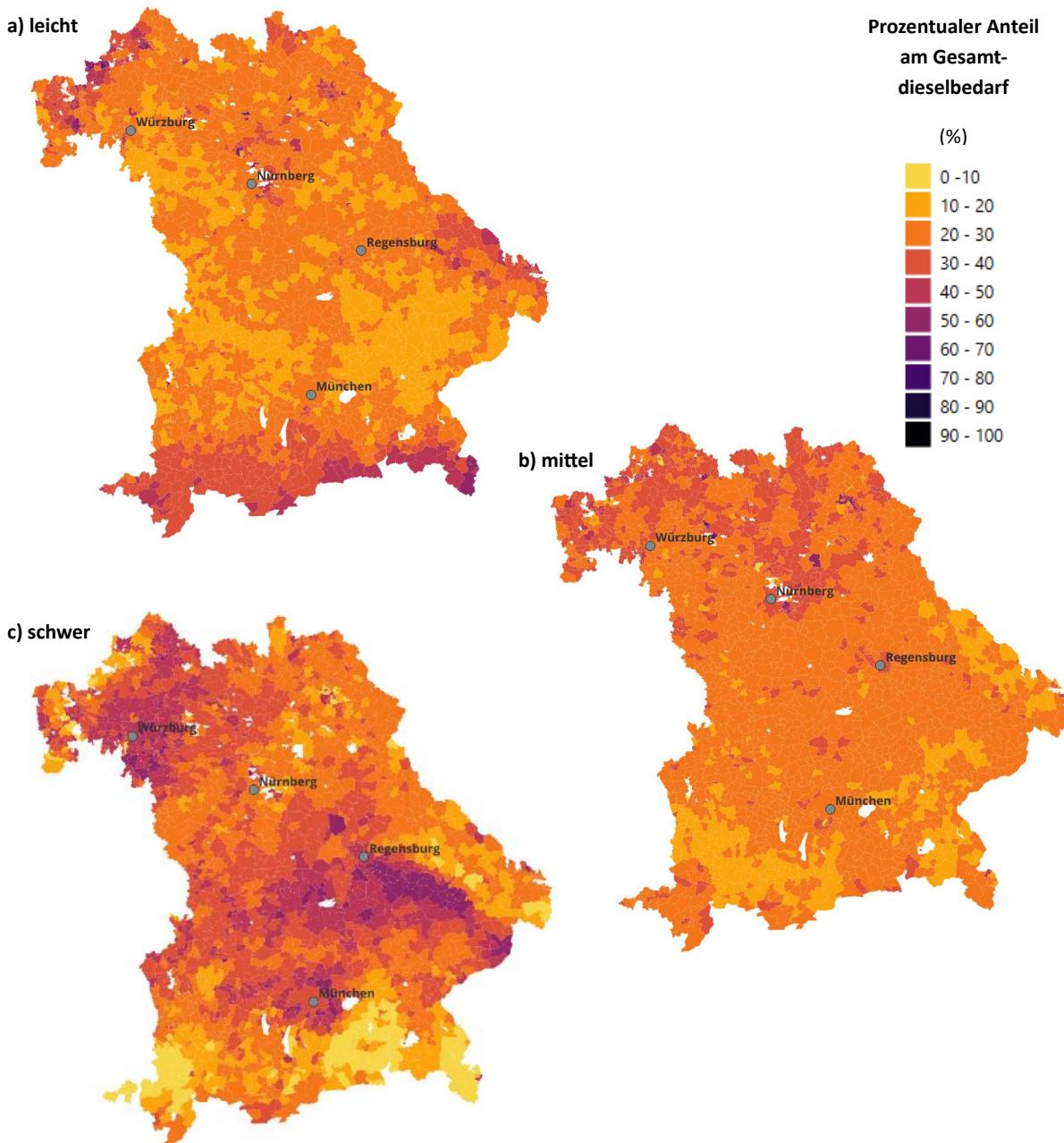


Abbildung 9: Prozentualer Anteil am Gesamtdieselkraftstoffbedarf leichte Arbeiten (a) mittelschwere Arbeiten, (b) schwere Arbeiten (c) aus dem Pflanzenbau, Jahr 2024

4.2 Substitutionsbedarfe

Der Energiebedarf wurde den unterschiedlichen Substituten Strom, Pflanzenöl, Biomethan (CNG) sowie Biodiesel, HVO und FT-Kraftstoff gemäß dem definierten Verteilungsschlüssel (Abbildung 5) anteilig zugeordnet und Aussagen zur möglichen Eigenversorgung abgeleitet (Abbildung 10). Zentrale Ergebnisse sind, dass die regional erzeugbaren Substitute ca. 59 % des Gesamtbedarfs decken könnten (Substitutionsgrad in Eigenversorgung = 59 %!). Rund 32 % des Gesamtsubstitutionsbedarfs ließen sich durch Strom bereitstellen (ca. 859,4 Mio. kWh), größere Anteile ließen sich ebenfalls durch Biodiesel (FAME, 25 %) und Pflanzenölkraftstoff (22 %) ersetzen. Die restlichen 41 % müssten hingegen durch nicht-regional erzeugbare Substitute wie Biodiesel (FAME) und Paraffinische Diesel (HVO, FT) bereitgestellt werden.

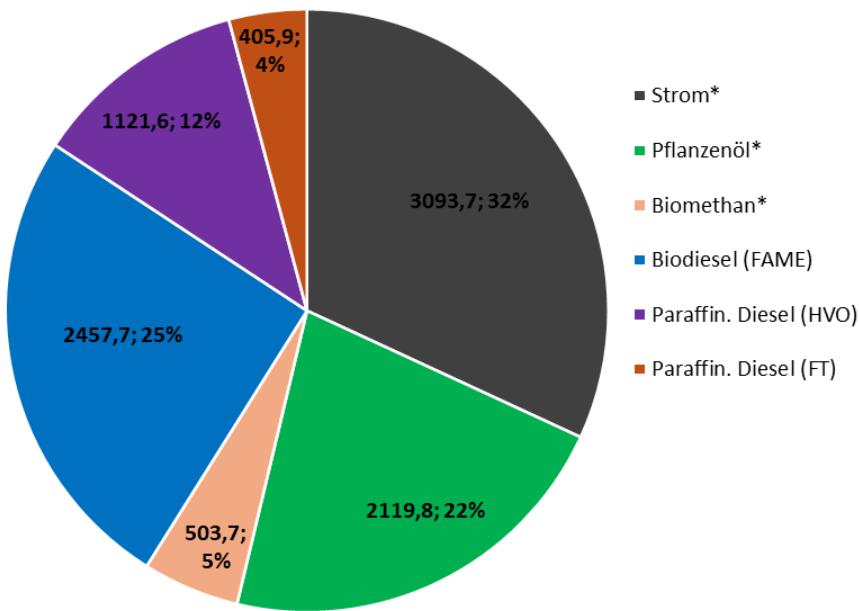


Abbildung 10: Aufteilung der substituierten Energiemengen zu den unterschiedlichen Substituten inklusive deren relative Anteile; die mit * gekennzeichneten Substitute sind regional erzeugbar und können somit in Eigenversorgung bereitgestellt werden

4.3 Soll-/Ist-Analyse der Substitute im Status Quo und der Szenarien

Die Soll-/Ist-Analyse repräsentiert das Verhältnis aus dem Bestand des Substituts (Status quo) zum Bedarf des Substituts. Die Visualisierung der Auswertung für das Verhältnis wird immer mit demselben Farbschema dargestellt: Grün weist eine Deckung des Bedarfs aus. Je dunkler das Grün, desto höher ist der Überschuss, d.h. der Bestand ist größer als der Bedarf. Rot gekennzeichnete Gemeinden haben hingegen nur eine teilweise Deckung des Bedarfs. Dunkelrote Farbe symbolisiert demgegenüber, dass keine Bedarfsdeckung gegeben ist und ein Defizit besteht. Im Kurzbericht werden ausschließlich Ergebnisse der Soll-/Ist-Analysen für die Szenarien und deren Auswirkungen vorgestellt. Hierbei erfolgt eine Gegenüberstellung der Analyse des Status quo mit dem Bestandserweiterungen der Szenarien.

Bereitstellung von Strom (Batterieelektrische Antriebsenergie)

Unter der Annahme der beschriebenen Erweiterungen würde die Stromproduktion von insgesamt 14.220,0 Mio. kWh auf 26.749,3 Mio. kWh steigen. In der Folge würde die Versorgung ausgedrückt durch die Bedarfsdeckung (Verhältnis zwischen Bestand und Bedarf) von 16,5 auf 31,1 zunehmen. Insbesondere Gemeinden mit Defiziten in der Bedarfsdeckung könnten damit reduziert werden. Die unversorgte Fläche ließe sich auf ca. 700 ha reduzieren, die sich auf wenige Standorte in Bayern verteilen.

Pflanzenölbereitstellung

Die Analyse des Szenarios zur Optimierung der Pflanzenölbereitstellung zeigt ebenfalls eine deutlich positive Entwicklung. Dabei ist hervorzuheben, dass dieses Szenario die zwei Aspekte I) die Umverteilung bestehender Ölsaaten (Ausgleich zwischen Überschussregionen zu unversorgten) im regionalen Kontext und II) die Ausweitung der Bereitstellungskapazitäten (Erhöhung der produzierten Mengen) umfasst. Durch die Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass eine Deckung des Bedarfs (61,3 Mio. l)

durch Umverteilung aus den Überschussgemeinden in die Gemeinden ohne eigene Versorgung bereits deutlich verbessert werden könnte (Abbildung 11) und durch die Ausweitung des Rapsanbaus deutliche Steigerungen zulassen würde. Auf Ebene Bayerns könnte die Bedarfsdeckung durch die Szenarien auf einen Wert von 3,9 gesteigert werden.

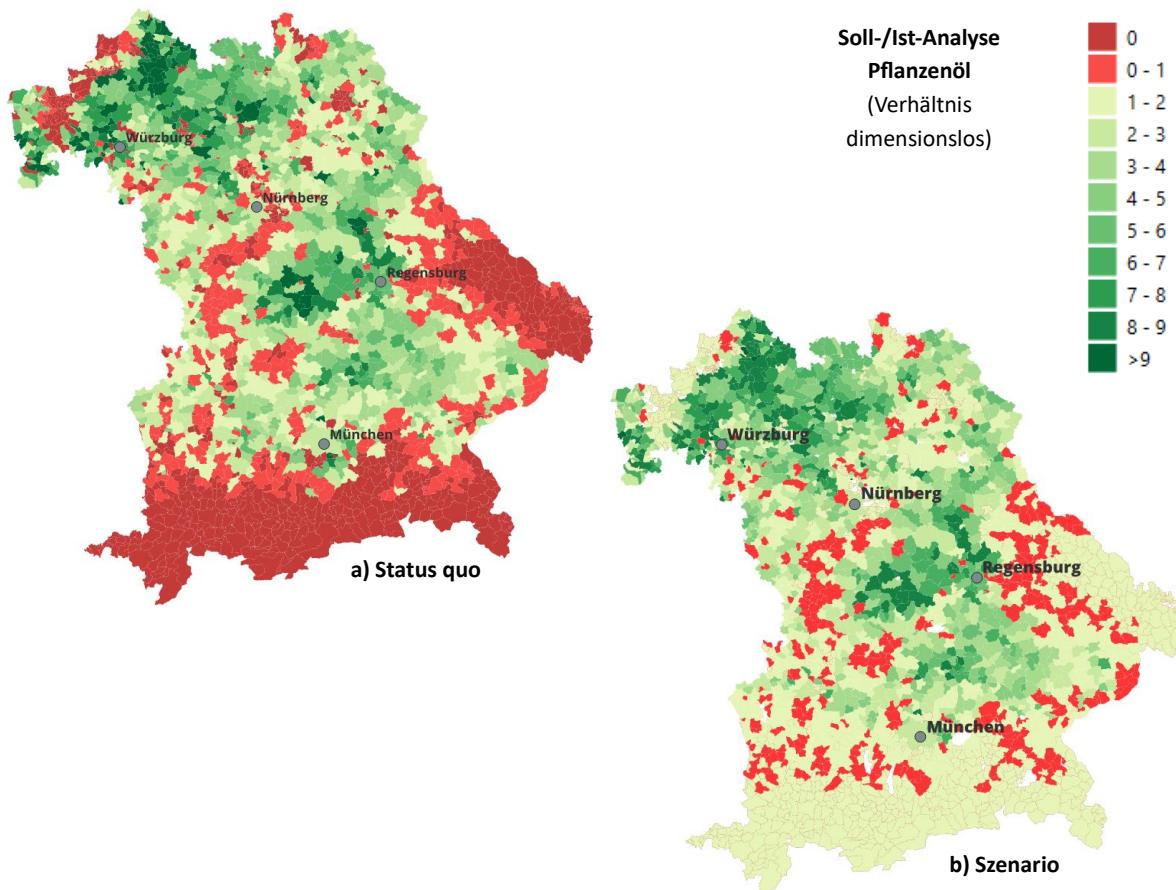


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Soll-Ist-Analyse für die Ölbereitstellung im Status quo und dem Szenario

Biomethanbereitstellung

Mit dem Ziel, die Zugänglichkeit zum Tankstellennetz zu optimieren, wurde im Szenario ein Ausbau von größeren Bestandsanlagen (BGA) sowie von Clustern kleinerer BGA (Verbundanlagen) zur Biomethanaufbereitung bzw. Biomethan-Tankstellen (CNG) simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Zugang generell verbessert werden konnte (Abdeckung von 57,3 %), dieser in vielen Regionen aber noch immer nicht gegeben wäre (Abbildung 12). Ausgehend von der Analyse wären für einen flächendeckenden Zugang zu CNG zusätzlich rund 95 weitere Anlagen notwendig (fehlende Fläche/314,16 km² bei einem 10 km Radius). Um die Nutzung von CNG als Alternative zum Dieselkraftstoff in der Praxis zu fördern, sollte die Errichtung (und Förderung) von CNG-Tankstellen vor allem in Gebieten ohne Zugang priorisiert und nach Bedarf neue Anlagen errichtet werden.

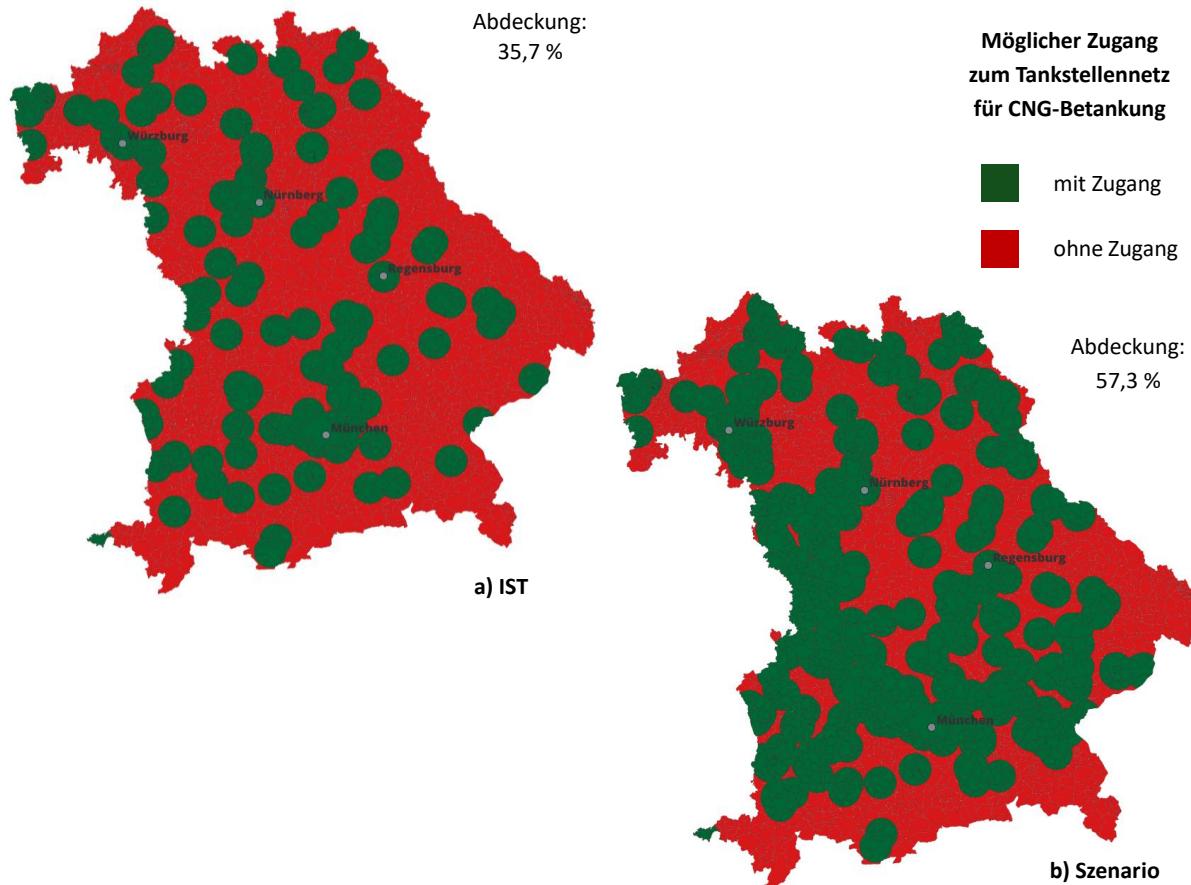


Abbildung 12: Gegenüberstellung der Auswertung des Zugangs zu CNG (Biomethan) mit dem Anlagenbestand (a) und dem Ausbauszenario (b)

4.4 Eigenversorgung mit regional substituierbaren Antriebsenergien

In den vorangegangenen Kapiteln wurde analysiert, inwieweit Dieselkraftstoff durch Strom, Pflanzenöl und Biomethan als regional erzeugbare Alternativen substituiert werden kann und welche Effekte sich durch die Entwicklungen der Szenarien ergeben würden. Abbildung 13 zeigt nun den Grad der Eigenversorgung der bayerischen Gemeinden in der Gegenüberstellung des Status quo zu den Szenarien.

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass durch die Szenarien die Eigenversorgung insgesamt deutlich verbessert werden konnte, d.h. der maximale Grad der Eigenversorgung könnte von 70 % auf über 90 % der Flächen in Bayern angehoben werden.

Der Ausbau der Strombereitstellung durch landwirtschaftsbezogene PV-Anlagen kann die Eigenversorgung verbessern, da insbesondere regionale Defizite reduziert werden. Die Umverteilung der regionalen Überschüsse in der Bereitstellung von Pflanzenölen verbessert die Eigenversorgung in Gebieten der Voralpen, der Alpen und des Bayerischen Waldes. Dies führt dazu, dass lediglich ca. 7,5 % der landwirtschaftlichen Gesamtfläche unzureichend mit Pflanzenöl als Kraftstoffalternative versorgt sind. Die Versorgung mit CNG wird durch den Ausbau und die Erweiterung des Anlagenbestands verbessert. Es bleiben jedoch noch immer „CNG-Lücken“ bestehen die aber nicht mengenlimitiert, sondern zugangslimitiert sind (durch fehlende Tankstellen).

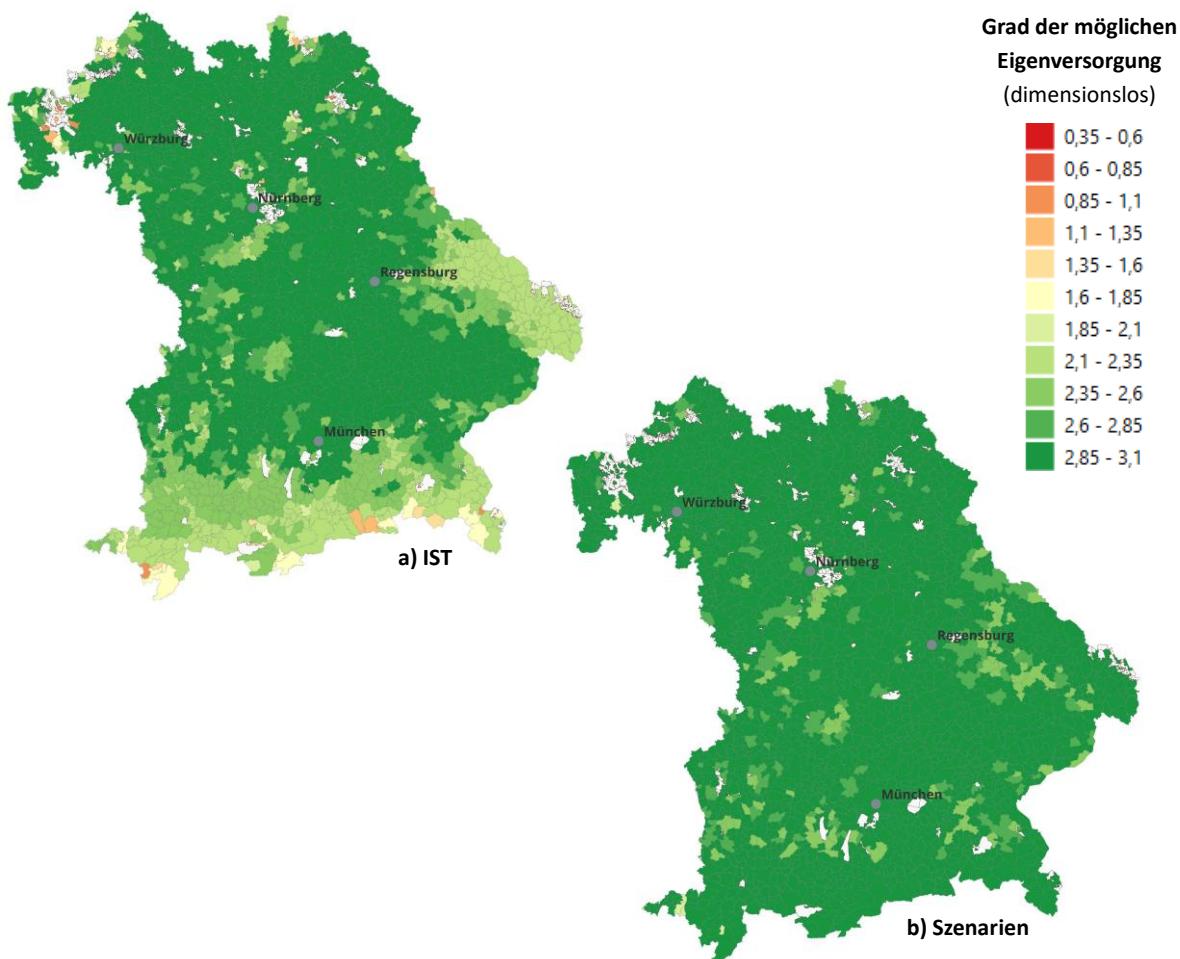


Abbildung 13: Gegenüberstellung der Auswertung des regionalisierten Eigenversorgungsgrades mit Antriebsenergie für landwirtschaftliche Maschinen der Gemeinden auf Basis der Soll-/Ist-Analysen des Status quo (a) und den Szenarien (b)

4.5 THG-Emissionen und Klimaschutzeffekte der Substitution

Ausgehend vom berechneten Kraftstoffbedarf (399,4 Mio. Liter Dieselkraftstoff) Bayerns wurden für das Jahr 2024 **Treibhausgasemissionen** in der **Gesamthöhe von 1.345.475 t CO₂eq** berechnet. Durch die Substitution dieser Energiemenge mit alternativen Antriebsoptionen lassen sich diese Emissionen reduzieren, das Ausmaß dieses Klimaschutzeffektes ist jedoch vom angenommenen Mix der Antriebsoptionen abhängig. Im Vorhaben wurden dazu drei Substitutions-Mixe generiert und die Effekte berechnet.

- Substitutions-Mix A (unlimitiert): Die Substitution des Dieselkraftstoffs erfolgt über alle Antriebsoptionen auf Basis des Verteilungsschlüssels (Abbildung 5), regionale Unterschiede in den Verfügbarkeiten bzw. Zugänglichkeiten zu den Antriebsoptionen werden nicht berücksichtigt.
- Substitutions-Mix B: Hierbei wurde „Mix A“ angepasst, um die vergleichsweise hohen THG-Emissionen des paraffinischen Diesels (FT) zu reduzieren. Dazu wurde die Energiemenge des Substituts durch Pflanzenölkraftstoff ersetzt und der Bedarf an Pflanzenölkraftstoff erhöht.
- Substitutions-Mix C (limitiert): Dieser Mix bildet gegebene Limitationen des Bedarfs und des Bestands gemäß den räumlichen Unterschieden ab. Regionale Versorgungsdefizite bzw. unzureichender Zugang wurden nicht durch andere Antriebsoptionen ausgeglichen, erforderliche Energiemenge werden weiterhin durch fossilen Dieselkraftstoff bereitgestellt.

Abbildung 14 bildet die Effekte der unterschiedlichen Substitutions-Mixe ab. Aus der vollständigen Substitution des Dieselkraftstoffs würden sich THG-Emissionen in Höhe von 600.807 t CO₂eq. ergeben (Emissionsreduktion rund 55 %). Wird ausgehend von diesem Substitutionsmix der FT-Kraftstoff ersetzt, könnten dadurch die Emission um rund 369.000 t CO₂eq. reduziert werden (rund 83 %). Insgesamt würden durch die Substitution (Strom, Pflanzenöl, CNG, Biodiesel und HVO) THG-Emissionen in Höhe von 232.255 t CO₂eq entstehen. Betrachtet man wie im Substitutions-Mix C zusätzlich regionale Gegebenheiten und Limitationen, könnten bis zu 78 % der THG-Emissionen eingespart werden.

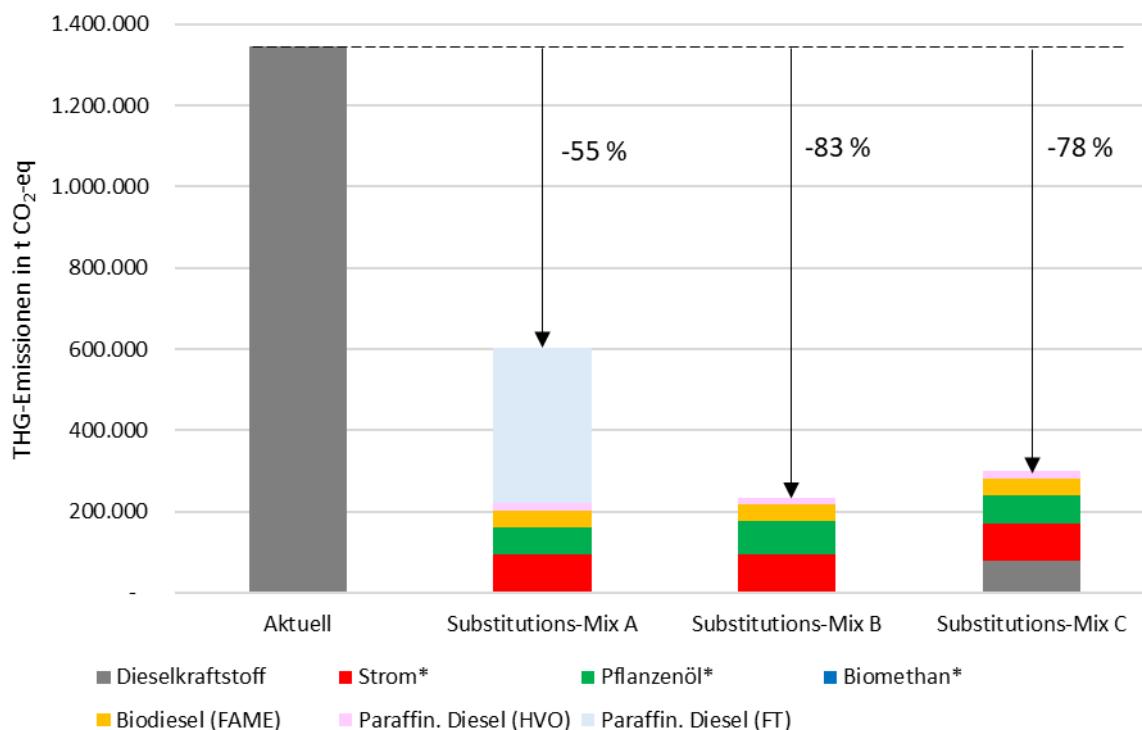


Abbildung 14: THG-Emissionen der Substitutionsoptionen und Klimaschutzeffekte unterschiedlicher Substitutionsmixe

Die Klimaschutzeffekte der Substitution wurden ebenfalls räumlich ausgewertet (Abbildung 15). Neben der deutlichen Reduktion der THG-Emissionen sind einzelnen „Hotspots“ zu erkennen (z. B. südöstlich von Nürnberg und Regensburg), in denen geringfügig höhere Emissionen vorzufinden sind und die Reduktion der Emissionen gegenüber den Status quo damit geringer ausfällt. Gründe hierfür sind bestehende Einschränkungen in der Bereitstellung verfügbarer Alternativen zur Substitution des fossilen Kraftstoffs.

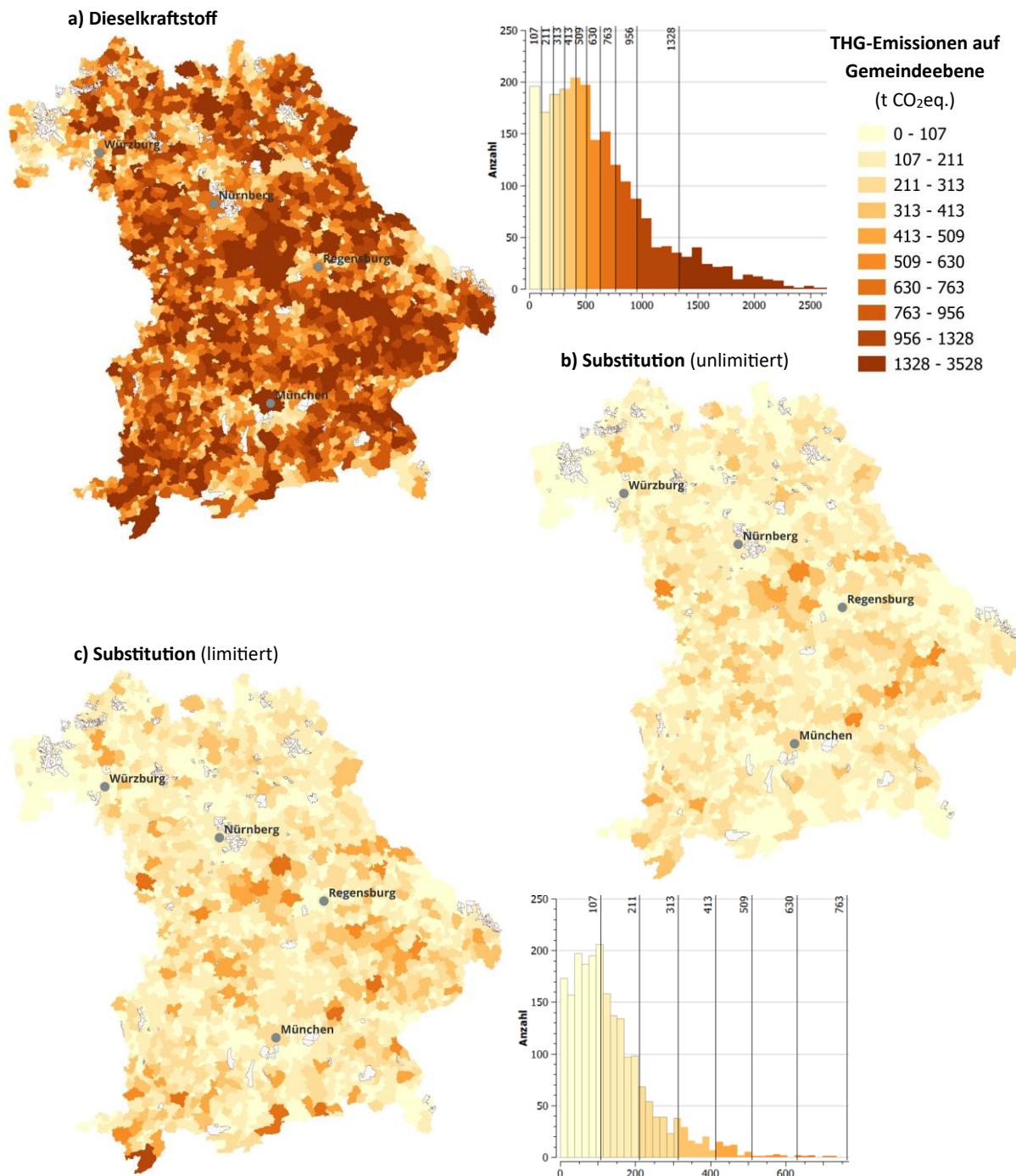


Abbildung 15: Treibhausgasemissionen für (a) fossilen Dieselkraftstoff, (b) den unlimitierten „Substitutions-Mix B“ und den limitierten „Substitutions-Mix C“

5 Schlussfolgerungen und Anschlussfähigkeit

Die Analyse zur Eigenversorgung der bayerischen Landwirtschaft mit erneuerbaren Energien für den Einsatz in mobilen Maschinen konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

Mit dem Projekt konnte gezeigt werden, wie sich eine regionalisierte Analyse zu dieser Fragestellung gegenüber einer bayernweiten Betrachtung realisieren lässt und welche Ergebnisse daraus abgeleitet werden können.

- Bei der regionalisierten Analyse ist der Kraftstoffbedarf um 14,3 Mio. Liter geringer als bei der bayernweiten Betrachtung. Die Unterschiede lassen sich nicht auf einen Aspekt zurückführen, sondern ergeben sich sowohl durch z.B. höhere Bedarfe in der Getreideproduktion bei der regionalisierten Betrachtung als auch durch geringere Bedarfe, z. B. in der Rinderhaltung oder Grünlandbewirtschaftung.
- Die Aufteilung des Kraftstoffs nach Arbeitsschwere zeigt relevante Unterschiede zwischen beiden Ansätzen. Eine Zunahme an schweren Arbeitsverfahren kann über alle Ackerkulturen und Dauergrünland (außer bei Silomais/Feldgras) im regionalisierten Ansatz ausgewiesen werden. Das heißt im Vergleich zur bayernweiten Analyse steigt der Anteil der schweren Arbeitsverfahren um 9 %, die leichten Arbeiten nehmen um 3 % zu und die mittelschweren Arbeiten um 6 % ab. Diese Veränderungen sind bedeutend, da insbesondere schwere Arbeitsverfahren weniger leicht zu substituieren sind.
- Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen und den Klimaschutzeffekt ergeben sich zunächst aus dem reduzierten Dieselkraftstoffbedarf (- 14,3 Mio. l im regionalisierten Ansatz) und den damit assoziierten geringeren Treibhausgasemissionen. Aus der Differenz ergibt sich eine Verringerung der Treibhausgasemissionen in der Höhe von 48.122 t CO₂eq. im Vergleich zum bayernweiten Ansatz.
- Ein direkter Vergleich der THG-Emissionen aus den beiden Ansätzen der Substitution ist nur bedingt möglich, da im bayernweiten Ansatz Vereinfachungen vorgenommen werden mussten. Um dennoch einen Vergleich zu ermöglichen, wurden Teilergebnisse und Methoden angepasst. Vergleicht man die Ergebnisse der THG-Emissionen der Substitution für das Szenario „2040 B“ (optimistischer Ausbau) aus dem bayernweiten Ansatz mit denen des „Substitution-Mix B“ (regionalisierter Ansatz), so ergibt sich eine Zunahme der Emissionen um ca. 6 %, was THG-Emissionen in Höhe von 6.176 t CO₂eq. entspricht.
- Grundsätzlich ist festzuhalten, dass durch die Substitution des fossilen Dieselkraftstoffs ein signifikanter Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen für den Sektor Landwirtschaft geleistet werden könnte: mit dem „Substitutions-Mix C“ lassen sich bis zu 78 % der THG-Emissionen reduzieren, was einer Einsparung von ca. 1.046.739 t CO₂eq. entspricht.
- Im Projekt wurde eine weitgehende Substitution des fossilen Dieselkraftstoffs realisiert. Dabei konnten 59 % des Gesamtbefehrs der Kraftstoffe in Eigenversorgung (Strom, Pflanzenöl und CNG), durch regional erzeugbare Antriebsoptionen aus der Landwirtschaft selbst bereitgestellt werden. 41 % des Energiebedarfs müssten z.B. durch Biodiesel (FAME), paraffinischen Diesel (HVO) oder paraffinischen Diesel (FT) substituiert werden.
- Das Projekt hat gezeigt, dass der regionalisierte Ansatz Vorteile gegenüber bayernweiten Betrachtungen für die Fragestellung der Substitution von fossilem Diesel durch alternative Antriebsoptionen hat: Es können räumliche Verteilungsmuster mit Limitationen, Verschiebungseffekten, Potenzialen und spezifischen Möglichkeiten identifiziert werden, die bei pauschalen bayernweiten Aussagen verborgen bleiben. Dieser Aspekt ist insbesondere bei praxisorientierten und

transformativen Betrachtungen agrarrelevanter Fragestellungen essenziell, da diese die Variabilität der bayerischen Landwirtschaft wesentlich prägen.

Für eine mögliche Umsetzung der Ergebnisse zur Substitution und für den Klimaschutz in der Praxis lässt sich folgendes zusammenfassen:

- Die Ausschöpfung der identifizierten Minderungspotentiale für verfahrensbedingte THG-Emissionen im Bereich der landwirtschaftlichen Maschinen setzt eine Implementierung der Substitution in der Praxis voraus. Diese „Transformation“ ist mit Herausforderungen verbunden und verschiedene Aspekte müssen dabei Berücksichtigung finden:
 - Technisch: erforderliche Produktionsstätten und -kapazitäten, der gegebene Maschinenbestand der bayerischen Landwirtschaft (inkl. deren Eignung zur Nutzung alternativer Energieträger),
 - Ökonomisch: Investitionskosten für etwaige Neumaschinen sowie Energiekosten,
 - Räumlich: identifizierte regionale Unterschiede und Gegebenheiten in Form z. B. der Potenziale inkl. Unter- und Überversorgungssituationen
 - Die Umstellung landwirtschaftlicher Maschinen von fossilem Dieselkraftstoff auf andere Antriebsenergie und -optionen setzt voraus, dass nutzbare und attraktive Möglichkeiten technisch verfügbar und ökonomisch konkurrenzfähig sind. Dies kann durch gezielte ordnungs-politische Steuerung und geeignete Anreizmechanismen unterstützt werden.
- Die Transformation könnte auch durch eine gezielte Anpassung bzw. Erweiterung in den Bereichen Förderung, Beratung und Wissenstransfer unterstützt werden.
 - Die Daten und Ergebnisse des Vorhabens EigenKraftBayern könnten kontinuierlich aktualisiert, aufbereitet und zugänglich gemacht werden, so dass diese als „Orientierungswerte“ im regionalen Kontext anwendbar sind. Dies könnte z. B. in Form einer vereinfachten Ermittlung der Kraftstoffbedarfe anhand regionaler Daten und der Ausgabe alternativer Antriebsoptionen sowie deren mögliche Klimaschutzwirkungen erfolgen. Betriebsleiter könnten z. B. ihre Betriebslage (Position) charakterisieren, eine Auswahl der dort typischen Kulturen erhalten, erwartete Variablen zur Bestimmung der Kraftstoffbedarfe angezeigt und unterschiedliche Antriebsoptionen zur Auswahl angeboten bekommen. Diese „Erstanalyse“ könnte Grundlage einer detaillierteren Beratung sein.
 - Bei der Weiterentwicklung von Förderansätzen für die Substitution fossiler Energieträger und zur Verbesserung des Klimaschutzes in der Landwirtschaft könnten aufgeworfene Fragestellungen beachtet werden. Zentral wäre, dass für künftige Förderprogramme und Anreizmechanismen Betrachtungen zur räumlichen Variabilität einbezogen werden, um die Transformation zu fördern. Konkrete Inhalte wären z. B. die Verteilung der Pflanzenölbereitstellung im regionalen und überregionalen Kontext, die Etablierung von dezentralen Verarbeitungskapazitäten zur Bereitstellung von Kraftstoffen inkl. der Clusterung von Biogasanlagen zur Biomethanbereitstellung, die Verwertung bestehender (ungenutzter) Biomassepotenziale für Biogasanlagen und die Weiterentwicklung der Betreiberkonzepte (→ BioMeth Regio im Sinn einer verbesserten CNG-Zugänglichkeit über optimal verortete Anlagen).
- Die Ergebnisse aus EigenKraftBayern zu den Effekten der Substitution umfassen bereits Analysen und Ergebnisse zu den THG-Emissionen und zum Klimaschutz. Bei der tatsächlichen Implementierung in der Praxis sollten aber auch weitere Effekte und Wechselwirkungen im betrieblichen und regionalen Kontext berücksichtigt werden. Hierzu ist ein umfassenderer Ansatz anzustreben, der

weitere Wirkungsbereiche abbildet. Hierzu könnten z. B. Methoden der Ökobilanzierung und der Stoffstromanalyse im räumlichen Kontext angeschlossen werden.

- Perspektivisch sollten in Betrachtungen zur Substitution des Dieselkraftstoffs auch Wechselwirkungen und Chancen zu assoziierten Bereichen wie weiteren agrarpolitischen Zielen und Herausforderungen beachtet werden. Beispiele hierfür sind die Entwicklung „Energieautarker Bauernhof“, die Eiweißinitiative Bayern (Rapspresskuchen in Fütterung und zu Eiweißversorgung), aber auch Ziele, die sich z.B. aus der Ackerbaustrategie zur Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes ergeben (Raps als PSM-intensive Kultur, Nutzung von Alternativen⁴ wie Mischfruchtanbau von Ölsaaten) oder Entwicklungen, die zur Förderung und Erhaltung der Biodiversität beitragen. Anzudenken wäre auch, dass Inhalte des Klimaschutzprogramms der Bayerischen Staatsregierung (Aktionsfeld 1 - Erneuerbare Energien und Stromversorgung) im Titel „Energetische Umstellung der land- und forstwirtschaftlichen Maschinen der landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Betriebe“ auszuweiten und als Ziel zu formulieren.

Zur angewandten Vorgehensweise bzw. der entwickelten Methodik wurden ebenfalls Kernaussagen abgeleitet. Diese sollen eine Einordnung ermöglichen, Limitationen aufzeigen und Entwicklungsperspektiven verdeutlichen.

- Mit dem Vorhaben konnte demonstriert werden, dass eine räumlich differenzierte (regionalisierte) Methode zur Abschätzung der Kraftstoffbedarfe, für die Identifikation von Substitutionsmöglichkeiten bis hin zur Berechnung raumbezogener THG-Emissionen realisiert werden kann.
- Die Methode basiert auf verfügbaren und jährlich aktualisierbaren Daten (InVeKoS) und es werden bestehende Werkzeuge und Funktionalitäten angewandt. Eine Nutzung des Vorgehens für andere agrarrelevante Fragestellungen sollte geprüft werden.
- Die Nutzung der Projektergebnisse und deren detaillierte Bearbeitung ist derzeit ausschließlich durch Projektmitarbeiter möglich. Die Nutzung in einer interaktiven Form durch Dritte wäre anzustreben, entsprechende Entwicklungen sind in Vorbereitung.

Im Vorgehen hat sich gezeigt, dass trotz einer generell guten Datenbasis zum Teil Informationsdefizite zu relevanten Merkmalen, z. B. zur räumlichen Verbreitung unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme in Bayern, bestehen. Diese wurde durch Annahmen und Vereinfachungen abgeleitet und in den Berechnungen verwendet. Daraus ergibt sich eine gewisse Unsicherheit, aber auch die Möglichkeit weiter zu optimieren. Beispiele hierfür sind die Zuordnung der produzierenden PV-Anlagen zur Landwirtschaft, die Charakterisierung regionaler Ertragsleistungen oder die Berücksichtigung von Transportprozessen.

- Grundsätzlich ist hervorzuheben, dass das entwickelte Vorgehen einen nennenswerten Wissens- und Methodengewinn für die Kraftstoffbedarfe der Landwirtschaft Bayerns und deren Substitution darstellt. Dies ist bisher deutschlandweit einmalig.

Perspektive und Anschlussfähigkeit

Während der Projektbearbeitung wurden unterschiedliche Fragestellung aufgeworfen, die im Rahmen der Bearbeitungszeit nicht weiterverfolgt werden konnten. Zu diesen gehören zum Beispiel:

⁴ „Nutzung von Leindotteröl in Mischungen mit anderen Pflanzenölen als Sonderkraftstoff“ (FKZ 22009507)

- Wie müsste der entwickelte Ansatz weiterentwickelt werden, um verfügbare und regelmäßig aktualisierbare Daten (jährlich) einzubinden und welche Möglichkeiten bestehen, um Ergebnisse für weitere Akteure interaktiv zugänglich, auswertbar und weiterverwertbar zu machen
- Können die Verteilungsschlüssel für die Zuordnung der verschiedenen Antriebsoptionen zur Substitution des Dieselkraftstoffs mit Hilfe eines adaptiven Ansatzes an regionale Gegebenheiten auf Basis vorhandener Daten und Informationen weiterentwickelt werden und welche Effekte würden sich hieraus ergeben
- Wie kann der Bestand der landwirtschaftlichen Maschinen in Bayern charakterisiert werden, um Eignung bzw. Freigaben zur Nutzung alternativer Antriebsenergien und Möglichkeiten zur Umrüstung zu evaluieren und dies mit den Betrachtungen zu verbinden

Eine weitere Fragestellung war, wie sich eine umfassendere ökonomische Auswertung mit möglichen Bereitstellungskosten auf die Aussagen des Projektes auswirken würden und ob detailliertere Ansätze zur Treibhausgasbilanzierung, bei denen z.B. Emissionsfaktoren regional ermittelt werden, Vorteile bringen und umzusetzen sind. Zur Bearbeitung dieser letztgenannten Punkte konnte mit „KlimaKraftBayern“ ein Folgeprojekt initiiert werden, das diese Fragestellungen aufnimmt und beantworten soll.

Das Projekt „KlimaKraftBayern“

Das Projekt „Klimaschutzzpotenziale der Bayerischen Landwirtschaft durch die regionalisierte Substitution fossiler Antriebsenergien“ (KlimaKraftBayern) baut im Wesentlichen auf dem Vorhaben EigenKraftBayern auf und nutzt hier entwickelte Methoden, Ergebnisse und Szenarien. Ausgehend von der räumlichen Variabilität der Bayerischen Landwirtschaft soll im Vorhaben für die standortspezifischen Kraftstoffbedarfe und deren Substitutionsmöglichkeiten georeferenzierte THG-Bilanzen sowie ökonomische Bewertungen erstellt werden. Die Szenarien werden hierbei genutzt, um regionsspezifische Emissionsfaktoren zur THG-Bilanzierung in Anlehnung an die Methodiken der Ökobilanzierung und der Richtlinie (EU) 2018/2001 regionsspezifisch zu berechnen. Die Ergebnisse werden in Form regionalisierter Klimaschutzeffekte ausgewertet, ergänzt werden regionalspezifische Schlussfolgerungen zur kosteneffizienten Reduktion von Treibhausgasemissionen.

6 Literaturverzeichnis

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2024): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2022. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. Hg. v. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Referat 523 - Nachhaltige Biomasse, EU-Düngeprodukte. Bonn. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2022.pdf;jsessionid=52A37D25897CE3D3972FB896150C97AF.internet971?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 10.10.2024.

Eckel, Henning; Remmele, Edgar; Frerichs, Ludger; Hipp, Johannes; Müller-Langer, Franziska; Schröder, Jörg et al. (2023): Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen: Ktbl eV Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.

EU (2018): Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates: Europäische Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF>.

EU (2023): Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates: Europäische Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF>.

i.m.a (2023): Der Treibstoff, der die Landwirtschaft am Laufen hält. Hg. v. information.medien.agrar e.V. Online verfügbar unter <https://www.ima-agrar.de/wissen/nachrichten/1159-der-treibstoff-der-die-landwirtschaft-am-laufen-haelt>, zuletzt geprüft am 07.10.2025.

Ktbl (2025): Ktbl Kosten- und Leistungsrechner: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.

Thuneke, Klaus; Siebrecht, Norman; Dressler, Daniela; Remmele, Edgar (2024): Bericht zum Dringlichkeitsantrag “Keine neue Tank-Teller-Diskussion – Biokraftstoffe vernünftig für die Landwirtschaft nutzen”. Dringlichkeitsantrag Bayerischer Landtag Drucksache 19/1532 (2024). Hg. v. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Straubing.

Umweltbundesamt (2024): Sonderauswertung zum THG-Inventar: Energiebedingte Emissionen in der Landwirtschaft (Quellgruppe 1.A.4.c). unveröffentlicht.

Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *The international journal of life cycle assessment* 21 (9), S. 1218–1230.