

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema:

**Regenerative Energieversorgung für netzautarke Mobilität durch Biogasanlagen (RegEnerMoBio)**

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: Technische Universität Berlin, Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien (EVUR)**

**Teilvorhaben 2: Technische Universität Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge**

Förderkennzeichen:

**Teilvorhaben 1: 2220NR176A**

**Teilvorhaben 2: 2220NR176B**

Laufzeit:

**01.12.2021 bis 31.01.2024**

Monat der Erstellung:

**02. bis 04. 2024**

Datum der Veröffentlichung:

**25.09.2024**

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.



# Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Kurzbericht</b>	<b>1</b>
1.	Aufgabenstellung	1
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	1
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	3
a)	Arbeitspakete und Meilensteine	3
b)	Zusammenfassung	5
<b>II.</b>	<b>Ausführliche Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>7</b>
1.	Erzielte Ergebnisse	7
	Arbeitspaket 1: Simulation Mobilität Nachfrageseite	7
	AP 1.1 Erstellung der Basisszenarien	7
	AP 1.2 Erstellung der Zukunftsszenarien für 2030 und 2050	11
	AP 1.3 Modellierung verschiedener Antriebstypen	12
	AP 1.4 Szenarienanalyse der Antriebsarten	20
	AP 1.5 Evaluierung der wirtschaftlichen und ökologischen Kennzahlen	21
	Arbeitspaket 2: Simulationen landwirtschaftliche Maschinen Nachfrageseite	23
	AP 2.1 Datenerfassung	23
	AP 2.2 Abbildung Referenzbetriebe Nachfrageseite	24
	AP 2.3 Anpassung Verfahrenssimulation auf Biogas (Verbräuche)	25
	AP 2.4 Erweiterung Verfahrenssimulation für Beschickung Biogasanlage	25
	AP 2.5 Implementierung alternativer Nutzungsarten	25
	Arbeitspaket 3: Simulation Angebotsseite	26
	AP 3.1 Abbildung der Referenzbiogasanlagen	26
	AP 3.2 Modellierung der unterschiedlichen Aufbereitungsoptionen	26
	AP 3.3 Abbildung der Weiterverarbeitungstechnologien	26
	AP 3.4 Implementierung der Wärmebereitstellung	27
	Arbeitspaket 4: Zusammenführung AP 1-3	28
	AP 4.1 Schnittstellendefinition	28
	AP 4.2 Durchführung Simulationen	28
	AP 4.3 Life Cycle Assessment	38
	AP 4.4 Ableitung von Handlungsempfehlungen	42
	Arbeitspaket 5: Einbeziehung des überregionalen Verkehrs	43
	AP 5.1 Ableiten der Überproduktion	43
	AP 5.2 Erstellen von überregionalen Verkehrsprofilen	43
	AP 5.3 Analyse des Beitrages zum Überregionalen Verkehr	45
	Arbeitspaket 6: Entwicklung Softwarepakete	47
	AP 6.1 Entwicklung Softwarepakete	47
	AP 6.2 Bereitstellung von Kenndaten	48
	AP 6.3 Aufbereitung und Ablage	49
	Arbeitspaket 7: Untersuchung von Hindernissen	49
	Arbeitspaket 8: Literaturrecherche	50
	Arbeitspaket 9: Verbreitung der Erkenntnisse	50

2.	Verwertung .....	50
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen .....	50
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	50
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende .....	50
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	51
3.	Erkenntnisse von Dritten .....	51
4.	Veröffentlichungen .....	51
<b>ANHANG .....</b>		<b>52</b>
<b>Teilvorhaben 2220NR176A.....</b>		<b>52</b>
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	52
2.	Bearbeitete Arbeitspakete .....	52
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	53
<b>Teilvorhaben 2: 2220NR176B .....</b>		<b>56</b>
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens .....	56
2.	Bearbeitete Arbeitspakete .....	56
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens .....	58

## **I. Kurzbericht**

### **1. Aufgabenstellung**

Die Aufgabe, die im Rahmen des Forschungsprojekts bearbeitet wurde, ist die Untersuchung des Potentials der Biogasanlage als dezentraler Energieversorger für die rurale Mobilität und die für den Betrieb der Biogasanlage erforderlichen landwirtschaftlichen Maschinen unter Berücksichtigung bestehender Wärmelieferverträge. Zur Konkretisierung dieser Aufgabenstellung werden die einzelnen Unteraufgaben im Folgenden detaillierter aufgelistet und erläutert:

- Untersuchung des Energiebereitstellungspotential der Biogasanlage für unterschiedliche alternative Energieträger. Dazu zählen elektrische Energie, Bio-CNG, Bio-LNG, Wasserstoff und durch Fischer-Tropsch-Synthese bereitgestellte Kraftstoffe.
- Ermittlung des Energiebedarfs der ruralen Mobilität im Einzugsgebiet der Biogasanlage in 2023 und in den Zukunftsszenarien 2030 und 2050. Als Energieträger werden Bio-CNG und Wasserstoff sowie elektrische Energie untersucht.
- Untersuchung des überregionalen Verkehrs und den Beitrag den Biogasanlagen für diesen Sektor leisten können. Der relevante alternative Energieträger für den Fernverkehr ist Bio-LNG.
- Ermittlung des Energiebedarfs der zum Betrieb der Biogasanlage erforderlichen landwirtschaftlichen Maschinen in 2023 und in den Zukunftsszenarien 2030 und 2050. Dazu werden umfangreiche Simulationen zur Ermittlung des Bio-CNG-Bedarfs der Landmaschinen durchgeführt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse folgt eine Ableitung des Wasserstoffbedarfs wasserstoffbetriebener Landmaschinen.
- Abschätzung des Umwelteinflusses der Energiebereitstellung für rurale Mobilität und landwirtschaftliche Maschinen durch die Biogasanlage als dezentralen Energieversorger.
- Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Bereitstellung alternativer Energieträger seitens der Biogasanlage und dem Einsatz alternativer Energieträger in landwirtschaftlichen Maschinen, basierend auf den erarbeiteten Simulationsergebnissen.
- Veröffentlichung der Projektergebnisse auf geeigneten Wegen und Bereitstellung der durchgeführten Arbeiten im Rahmen eines Softwarepakets.

### **2. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Zur Erreichung der Projektziele wurden insgesamt neun Arbeitspakete definiert, die in der Tabelle unter 3a aufgeführt sind.

Im Arbeitspaket (AP) 1 wird durch das Fachgebiet EVUR die Nachfrageseite des motorisierten Individualverkehrs abgebildet. Grundlage dafür sind vorhandene Informationen zur Mobilität und zum Mobilitätsverhalten in Deutschland, die beispielsweise vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), sowie von Forschungsinstitutionen zur Verfügung gestellt werden. Anhand dieser Informationen erfolgt seitens des EVUR die Energieverbrauchsanalyse.

Darüber hinaus werden literaturbasierte Annahmen über die Entwicklung der Mobilität und des technischen Fortschritts der verschiedenen Antriebstechnologien gemacht und der Energiebedarf für die Jahre 2030 und 2050 für jede Antriebsform bestimmt.

Um Biogasanlagen für die Energiebereitstellung des Individualverkehrs nutzen zu können, bieten sich synthetische Kraftstoffe in Otto- und Dieselmotoren, Umrüstung dieser auf Gasbetrieb, Nutzung von Elektromobilität, Brennstoffzellenfahrzeuge oder Hybridsysteme an.

Im zweiten Arbeitspaket (AP 2) werden landwirtschaftliche Maschinen auf der Nachfrageseite betrachtet. Es soll im weiteren Projektverlauf ermittelt werden, wie hoch der Energiebedarf zum Betrieb alternativ angetriebener landwirtschaftlicher Maschinen ist, um diesen später mit der Angebotsseite abgleichen zu können. Seitens des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) der TU Braunschweig erfolgt diese Analyse durch eine Simulation des Maschineneinsatzes während der regionalen landwirtschaftlichen Produktion. Ein inhaltlicher Schwerpunkt soll dabei auf dem notwendigen Maschineneinsatz für den gesamten Betrieb der Biogasanlage liegen.

Hierzu kann das IMN auf die im Rahmen des EkoTech-Projekts entwickelte und in folgenden Projekten weitergeführte landwirtschaftliche Verfahrenssimulation zurückgreifen. Es handelt sich dabei um eine agentenbasierte Simulation, die den Maschinenpark und Feldstrukturen abbildet und mit der die gesamten landwirtschaftlichen Verfahren untersucht werden können. Im Rahmen des zweiten Arbeitspakets werden alle, zur Realisierung der Simulationen notwendigen Anpassungen, im Quellcode der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation durchgeführt.

Neben der Analyse der Verbraucherseite bildet die modellhafte Abbildung und Evaluierung der Energiebereitstellung für Mobilitätsw Zwecke durch eine Biogasanlage einen weiteren zentralen Punkt des

Vorhabens (Arbeitspaket 3). Wie oben in Abschnitt I.1 bereits dargestellt, gibt es verschiedene Möglichkeiten, mit denen Biogasanlagen den Mobilitätssektor erschließen können. Der heute üblicherweise genutzte Weg ist der Biogaseinsatz im BHKW für die Strom- und Wärmebereitstellung. In diesem Vorhaben werden neben diesem Weg auch die Weiterverarbeitungspfade der Trocknung, Methanisierung, Reformierung und die Fischer-Tropsch-Synthese betrachtet. Eine weitere Möglichkeit stellt die Änderung des Produktgases durch Hinzufügen von Zusatzstoffen (geänderte Einsatzstoffe) dar, beispielsweise die Zugabe von Wasserstoff für Erhöhung der Ausbeute von Methan. Sowohl die verschiedenen Weiterverarbeitungspfade als auch die Möglichkeit der Beeinflussung durch geänderte Eingangsstoffe werden in diesem Vorhaben betrachtet.

Das Arbeitspaket 4 (AP 4) dient der Zusammenführung der Simulationen bzw. der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1-3. Um diesen Prozess effektiv zu gestalten, wurden bereits zu Projektbeginn Schnittstellen definiert, die im Zuge der Arbeiten in AP 1-3 hergestellt werden. Für die Produktnutzung sind die Bereiche der Wärmelieferung und der Herstellung von Kraftstoffen sowohl für den Individual-, als auch den landwirtschaftlichen Verkehr vorgesehen. Durch eine Analyse der regionalen Energie- und Kraftstoffverbräuche wird zuvor der temporäre Bedarf in Form von Zeitreihen ermittelt. Um die Umweltauswirkungen der einzelnen Konzepte abschätzen zu können, wird ein Life-Cycle Assessment auf Basis einer Literaturstudie durchgeführt.

Sollten sich bei den unterschiedlichen Technologieoptionen Überproduktionen ergeben, können diese dem überregionalen Verkehr bereitgestellt werden (Arbeitspaket 5). Um diesen Aspekt abschätzen zu können, müssen zuallererst die Überproduktionen je Szenario bestimmt werden. Anschließend erfolgt auf Basis aktueller Veröffentlichungen eine Abschätzung, welche Antriebskonzepte zukünftig im überregionalen Verkehr ihren Einsatz finden. Die entsprechenden Verkehrsprofile werden im Modell implementiert und es folgt die Analyse, welcher Beitrag zum überregionalen Verkehr möglich ist.

Die gesammelten Erkenntnisse sollen schlussendlich in einem offenen Daten- und Softwarepaket (Arbeitspaket 6) zusammengeführt werden. Dies ermöglicht, nach Eingabe der Randparameter der Energienutzung, der Marktpreise und der Biogasanlage selbst, verschiedene Nutzungspfade zu vergleichen und eine erste ökonomische Abschätzung der verschiedenen Nutzungswege zu liefern.

Im siebten Arbeitspaket (AP 7) sollen die rechtlichen und regulatorischen Aspekte, die sich durch die erarbeiteten Konzeptideen ergeben, anhand der bestehenden ordnungspolitischen und regulatorischen Rahmenbedingungen durch die Projektpartner evaluiert werden.

Das Arbeitspaket 8 umfasst sämtliche Literaturrecherchen, die im Rahmen des Projekts erfolgen. Beispielsweise müssen Informationen zur ruralen Mobilität und möglicher Zukunftsszenarien, Daten zu Biogasanlagen-Betrieben und -Betreibern sowie insbesondere auch für die rechtlichen und regulatorischen Aspekte in AP 7 zusammengetragen werden. Das Arbeitspaket läuft über die gesamte Projektdauer, da die erforderlichen Informationen teilweise erst im Projektverlauf identifiziert und ggf. aktualisiert werden müssen.

Die Verbreitung der Ergebnisse ist im Arbeitspaket 9 zusammengefasst.

Das Projekt hatte eine geplante Projektlaufzeit von 24 Monaten und ist am 01.12.2021 gestartet. Insgesamt wurden in dem Projekt neun Arbeitspakete durch die Technische Universität Berlin, Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien (EVUR) und die Technische Universität Braunschweig, Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) bearbeitet. Während der Projektlaufzeit waren vier Meilenstein zu erreichen. Eine detaillierte Auflistung der einzelnen Arbeitspakete bzw. der Meilenstein ist dem dritten Kapitel des Kurzberichts zu entnehmen. Im Folgenden werden Änderungen des Projektverlaufs (Zeitplanung), die sich während der Bearbeitungszeit ergeben haben, kurz erläutert.

Gegenüber der in der Vorhabensbeschreibung angestrebten Zeitplanung haben sich seitens des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge einige Änderungen im Projektverlauf ergeben. Die Änderungen werden im Folgenden aufgelistet:

- Infolge fehlender Personalkapazitäten wurde der geplante Projektstart vom 01.12.2021 auf den 01.02.2022 verschoben. Die Bearbeitung erfolgt zunächst bis zum 01.05.2022 in Teilzeit.
- Ab 01.05.2022 erfolgte eine Bearbeitung des Projekts in Vollzeit. Der Mitarbeiter wurde zusätzlich unterstützt, sodass der Projektverzug auf zwei Monate abgemildert werden konnte.
- Infolge des zweimonatigen Projektverzugs wurde eine kostenneutrale Verlängerung beantragt, wodurch sich das Projektende vom 30.11.2023 auf den 31.01.2024 verschiebt.

Die Änderungen in der Projektlaufzeit wurden mit dem Projektpartner, dem Fachgebiet für Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien (EVUR) der TU Berlin, abgesprochen. Infolge von Projektverzögerung durch eine fehlende studentische Hilfskraft seitens des EVUR wurde die kostenneutrale Verlängerung gemeinsam beantragt, sodass es zu einem gemeinsamen Projektende kommt.

### 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

#### a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
<p><b>AP 1</b> Simulation Mobilität Nachfrageseite</p>	<p>12.2021 – 11.2022</p>	<p><b>AP 1.1</b> Erstellung der Basisszenarien</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Erstellung der verschiedenen Szenarien anhand der MiD Daten für die Ermittlung der jährlichen Bedarfe</li> <li>- Jährliche Bedarfe werden durch Standard-Fahrzyklen oder durch die Profile der JERICHO-E Datenbank zeitlich aufgelöst</li> </ul> <p><b>AP 1.2</b> Erstellung der Zukunftsszenarien für 2030 und 2050</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abbildung der Zukunftsszenarien im Modell auf Basis von definierten Szenarien aus Publikationen</li> </ul> <p><b>AP 1.3</b> Modellierung verschiedener Antriebstypen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modellierung von batterieelektrischen, mit Wasserstoff angetriebenen Fahrzeugen und Fahrzeugen mit Gasantrieb erfolgt</li> </ul> <p><b>AP 1.4</b> Szenarienanalyse der Antriebsarten</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die zuvor modellierten Antriebstechnologien wurden hinsichtlich der gebildeten Basis- und Zukunftsszenarien analysiert</li> </ul> <p><b>AP 1.5</b> Evaluierung der wirtschaftlichen und ökologischen Kennzahlen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ableiten von Kennzahlen für die spätere wirtschaftliche und ökologische Analyse</li> </ul>
<p><b>AP 2</b> Simulation landwirtschaftliche Maschinen Nachfrageseite</p>	<p>12.2021 – 01.2023</p>	<p><b>AP 2.1</b> Datenerfassung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Liebherr L550 Radlader zur Beschickung der Biogasanlage wurde mit einem Datenlogger ausgestattet</li> <li>- Fendt 722 Vario Traktor als Abfahrgepann wurde in der Maisernte mit einem Datenlogger ausgestattet</li> </ul> <p><b>AP 2.2</b> Abbildung der Referenzbetriebe in der Verfahrenssimulation:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Betriebshof, Silo, Felder und Maschinen des Abwasserverbands Braunschweig wurden in der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation abgebildet</li> <li>- Abbildung unterschiedlicher Verfahrensschritte zur Validierung der Simulationsergebnisse</li> </ul> <p><b>AP 2.3</b> Anpassung Verfahrenssimulation auf Biogas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulative Ermittlung des Biogasbedarfs (CNG) für die eingesetzten Maschinen möglich</li> </ul> <p><b>AP 2.4</b> Erweiterung Verfahrenssimulation für Beschickung der Biogasanlage: Anpassungen im Front und Back End der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation erforderlich</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anpassung grundlegender Datenstruktur</li> <li>- Erweiterung der agentenbasierten Simulation um Agenten „Silo“ und „Radlader“</li> <li>- Anpassung des Graphical User Interface zur Bedienung der Verfahrenssimulation</li> </ul> <p><b>AP 2.5</b> Implementierung alternativer Nutzungsarten Implementierung batterieelektrischer,</p>

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
		wasserstoffbetriebener und biogasbetriebener Fahrzeuge in der Verfahrenssimulation
<b>AP 3</b> Simulation Angebotsseite	08.2022 – 11.2022	<p><b>AP 3.1</b> Abbildung der Referenzbiogasanlagen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abbildung literaturbasierter Referenzanlagen</li> <li>- Abbildung der Anlagen der assoziierten Partner</li> </ul> <p><b>AP 3.2</b> Modellierung unterschiedlicher Aufbereitungsoptionen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- In der Analyse und im Modell wurden die mechanischen, chemischen und biologischen Aufbereitungsoptionen betrachtet</li> <li>- Am vielversprechendsten ist aktuell die Einspeisung von Wasserstoff</li> </ul> <p><b>AP 3.3</b> Abbildung der Weiterverarbeitungstechnologien</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abgebildet wurde die Biogas-Aufbereitung, die Dampfreformierung und die Fischer-Tropsch Synthese</li> </ul> <p><b>AP 3.4</b> Implementierung der Wärmebereitstellung Abbildung der Wärmebereitstellung durch Generierung von synthetischen Wärmelastprofilen in ländlicher Bebauung</p>
<b>AP 4</b> Zusammenführung AP 1-3	12.2021 – 06.2023	<p>Durch die Zusammenführung der Simulationen der ersten drei Arbeitspakete konnten folgenden Inhalte in den unterschiedlichen Arbeitspaketen erarbeitet werden.</p> <p><b>AP 4.1</b> Schnittstellendefinition Absprache in welcher Form die Daten übergeben werden.</p> <p><b>AP 4.2</b> Durchführung Simulationen Während der Simulationsdurchführung konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ermittlung des Energie-Bedarfs (durchgeführt für CNG) der erforderlichen landwirtschaftlichen Maschinen zum Betrieb der Biogasanlage</li> <li>- Ableitung des Wasserstoffbedarfs, basierend auf den zuvor durchgeführten Simulationen für CNG</li> <li>- Bestimmung der Produktionskapazität der Biogasanlagen für CNG, Dieselkraftstoffe hergestellt durch Fischer-Tropsch und Elektrizität</li> <li>- Kraftstoffbedarfe der verschiedenen Antriebstechnologien der ruralen Mobilität</li> </ul> <p><b>AP 4.3</b> Life Cycle Assessment Im LCA wird das Emissionsreduktionspotential durch die Verwendung der Biogasanlage als Produzent alternativer Energieträger und deren Einsetzung in Landwirtschaft und Mobilität ermittelt.</p> <p><b>AP 4.4</b> Ableitung von Handlungsempfehlungen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Basierend auf den erarbeiteten Simulationsergebnissen wurden Handlungsempfehlungen für die Erweiterung der Biogasanlagen und den Einsatz alternativer Antriebskonzepte erarbeitet</li> <li>- Auf Basis der durchgeführten Simulationen konnten aus den Ergebnissen Handlungsempfehlungen für den Einsatz alternativ angetriebener Landmaschinen abgeleitet werden.</li> </ul>
<b>AP 5</b> Einbeziehung des überregionalen Verkehrs	04.2023 – 06.2023	<p><b>AP 5.1</b> Ableiten der Überproduktion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anhand der Arbeitsergebnisse aus AP 4 kann die Überproduktion durch die Biogasanlagen bestimmt werden</li> </ul> <p><b>AP 5.2</b> Erstellen von überregionalen Verkehrsprofilen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bedarfsermittlung durch Analyse des</li> </ul>

<b>Arbeitspakete (AP)</b> (lt. Planung im Antrag)	<b>Bearbeitungszeitraum</b> (lt. Balkenplan im Antrag)	<b>Zielerreichung</b>
		überregionalen Verkehrssektors unter Beachtung neuer Antriebskonzepte <b>AP 5.3</b> Analyse des Beitrages zum überregionalen Verkehr - Ökologische und ökonomische Analyse
<b>AP 6</b> Entwicklung Softwarepakete	04.2023 – 10.2023	<b>AP 6.1</b> Entwicklung Softwarepaket - Zusammenfügen aller Teile, mit Erarbeitung einer GUI für Kenndateneingabe externer Nutzer <b>AP 6.2</b> Bereitstellung von Kenndaten - Aufarbeitung der Kenndaten hat bereits in AP 4 sattgefunden <b>AP 6.3</b> Aufbereitung und Ablage
<b>AP 7</b> Untersuchung von Hindernissen	06.2022 – 11.2023	Durch die unterschiedlichen Bedürfnisse der verschiedenen Mobilitätssektoren werden andere Antriebstechnologien präferiert. Zudem kann die ökologische Betrachtung aktuell nur anhand von Literaturwerten und Normen abgeschätzt werden. Eine Softwarebasierte Betrachtung ist aufgrund fehlender frei verfügbarer Software mit ausreichender Betrachtungstiefe nicht möglich.
<b>AP 8</b> Literaturrecherche	12.2021 – 11.2023	Die Ergebnisse der Literaturrecherche sind kontinuierlich in die Bearbeitung der anderen Arbeitspakete einglossen. Auf die Quellen wird an entsprechender Stelle verwiesen.
<b>AP 9</b> Verbreitung der Erkenntnisse	06.2022 – 11.2023	Auf der AgEng LAND-TECHNIK 2023 Koferenz in Hannover wurde ein Vortrag gehalten und im zugehörigen Tagungsband ein Konferenzpaper veröffentlicht. Zudem werden die erarbeiteten Ergebnisse im Rahmen eines Softwarepakets durch das EVUR der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

<b>Meilensteine (M)</b> (lt. Planung im Antrag)	<b>Fälligkeit</b> (lt. Balkenplan im Antrag)	<b>Zielerreichung</b>
<b>M 1</b> Abschluss AP 1-3	31.01.2023	Erreicht – Modelle der APs 1-3 wurden erfolgreich erstellt, sodass das Vorhaben weitergeführt wurde.
<b>M 2</b> Abschluss AP 4	30.06.2023	Erreicht – Die Modelle aus den APs 1-3 wurden erfolgreich zusammengeführt und Simulationen durchgeführt. Zudem wurden die Optionen mittels Life Cycle Assessment betrachtet und Handlungsempfehlungen abgeleitet.
<b>M 3</b> Abschluss AP 6	31.10.2023	Erreicht – Die Modelle wurden für die Veröffentlichung aufbereitet und eine GUI für Kenndateneingaben erstellt.
<b>M 4</b> Projektabschluss	30.11.2023	Erreicht

## b) Zusammenfassung

Die erzielten Projektergebnisse werden entsprechend der Arbeitspakete im Folgenden stichpunktartig zusammengefasst:

- In AP 1 wurden Modelle zur Beschreibung des ländlichen Individualverkehrs sowohl zum aktuellen Zeitpunkt als auch für Zukunftsszenarien entwickelt. Dadurch lassen sich Mobilitätsbedarfe für verschiedene Regionen in Deutschland oder für ganz Deutschland aktuell oder zukünftig ableiten. Weiterhin ist eine Unterteilung in die verschiedenen Antriebstechniken möglich.
- In AP 2 wurden zum einen die erforderlichen Anpassungen im Quellcode der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation durchgeführt und zum anderen mit Hilfe von Datenloggern Verbrauchsdaten landwirtschaftlicher Maschinen aufgenommen, die im Anschluss in die landwirtschaftliche Verfahrenssimulation integriert wurden.
- In AP 3 wurde die Angebotsseite durch Modelle beschrieben. Die Daten der unterschiedlichen Biogasanlagen waren durch assoziierte Partner oder durch die Daten des Biogasmessprogramms III gegeben. Es wurden neben diesen Anlagen unterschiedliche Aufbereitungsoptionen und

Weiterverarbeitungstechnologien betrachtet und im Model abgebildet. Durch die Zusammenführung der ersten drei Arbeitspakete konnten unterschiedliche Simulationen durchgeführt werden, in denen verschiedene Antriebsoptionen getestet wurden.

- In AP 4 wurden die Simulationen der Angebots- und Nachfrageseite zusammengeführt. Auf der Angebotsseite wurde die Biogasanlage als dezentraler Energieversorger in Form von Wasserstoff und Bio-CNG abgebildet. Auf der Nachfrageseite wurde für das Referenzjahr 2023 der Bio-CNG-Bedarf der ruralen Mobilität und der landwirtschaftlichen Maschinen simuliert und für das Zukunftsszenario 2050 der Wasserstoffbedarf der ruralen Mobilität und der landwirtschaftlichen Maschinen. In beiden Fällen ist zu sehen, dass besonders der Energiebedarf der landwirtschaftlichen Maschinen starken saisonalen Schwankungen unterliegt. In 2023 ist aufgrund der geringen Verbreitung CNG-betriebener PKW (rurale Mobilität) ein Überangebot des Bio-CNG vorhanden, welches für den überregionalen Verkehr zur Verfügung gestellt werden kann. Im Zukunftsszenario 2050 übersteigt, infolge gesteigener Verbreitung wasserstoffbetriebener PKW, die Nachfrage- die Angebotsseite. Abschließend wurde der Umwelteinfluss der alternativen Energieträger in ruraler Mobilität und den landwirtschaftlichen Maschinen mit Hilfe eines Life-Cycle-Assessments untersucht. Im Bereich der landwirtschaftlichen Maschinen können durch den Einsatz alternativer Energieträger mindestens 46 % der durch dieselbetriebene Maschinen verursachten CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen eingespart werden. In der ruralen Mobilität variiert das Einsparpotential stark nach der genutzten Antriebsart und durch welche Biogasanlage der Energieträger bereitgestellt wird. Für die hier betrachteten Biogasanlagen liegen die Einsparpotentiale im Bereich von -16,45 gCO<sub>2</sub>-eg./MJ und -119,46 gCO<sub>2</sub>-eg./MJ.
- In AP 5 wurde der Beitrag zum überregionalen Verkehr analysiert. Bei einigen Weiterverarbeitungspfaden des Biogases ergaben sich Überproduktionen, da in der Region die Abnahme des jeweiligen Energieträgers nicht hoch genug ist. Diese Überproduktionen können dem überregionalen Verkehr zugeführt werden. Dafür wurden die unterschiedlichen Antriebsarten der überregionalen Verkehrs betrachtet und der Beitrag zu deren Energieversorgung analysiert.
- In AP 6 wurden die Modelle derart überarbeitet, sodass keine sensiblen Daten von Partner veröffentlicht werden. Zudem wurde eine GUI erstellt, um externe Daten eingeben zu können. Die Unterlagen wurden auf der Plattform Git Hub unter dem Projektnamen RegEnerMoBio abgelegt.
- In AP 7 wurden die Hindernisse untersucht. Zum einen zeigte sich, dass durch die unterschiedlichen Bedürfnisse der verschiedenen Mobilitätssektoren andere Antriebstechnologien präferiert werden. Zum anderen kann die ökologische Betrachtung aktuell nur anhand von Literaturwerten und Normen abgeschätzt werden. Eine Softwarebasierte Betrachtung ist aufgrund fehlender frei verfügbarer Software mit ausreichender Betrachtungstiefe nicht möglich.

## II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

### 1. Erzielte Ergebnisse

#### Arbeitspaket 1: Simulation Mobilität Nachfrageseite

##### AP 1.1 Erstellung der Basisszenarien

Ziel dieses APs ist die generische Beschreibung der ländlichen Siedlungsstrukturen und damit verbunden des ländlichen Individualverkehrs, um Energiebedarfsanalysen zu erstellen.

Relevant sind hierbei Datensätze, die das Mobilitätsverhalten in der Bundesrepublik Deutschland im Zusammenhang mit der räumlichen Verortung analysieren. In Frage kommen hauptsächlich flächendeckende Haushaltsbefragungen zum Verkehrsverhalten, wie zum Beispiel das „Mobilitätspanel Deutschland“ (MOP) [1], die „Fahrleistungsbefragung“ (FLE) [2], der „Kraftfahrzeugverkehr Deutschland“ (KiD) [3] oder „Mobilität in Deutschland“ (MiD) [4]. Nach einer tiefgehenden Recherche der genannten und weiteren Studien bzgl. des Mobilitätsverhaltens in Deutschland können Erhebungen wie bspw. der KiD aufgrund versetzter Schwerpunkte, wie dem Fokus auf gewerblich genutzte Fahrzeuge (Wirtschaftsverkehr) oder einer zu grobmaschigen Befragung als geeignete Datengrundlage ausgeschlossen werden. Der MiD stellt die derzeit aktuellste und zuverlässigste Haushaltsbefragung zum Mobilitätsverhalten in Bezug auf den Individualverkehr im ländlichen Raum dar.

Weiterhin wurde auch das JERICHO-E Modell [5], welches bereits in Python existiert und auf GitHub publiziert ist, untersucht. Dieses Modell liefert Energiebedarfszeitreihen für die Sektoren Haushalte, Handel und Dienstleistungen, Industrie und Mobilität. Die Daten sind auf NUTS-2 Level aggregiert und bieten dadurch für einzelne Regionen, wie z.B. Brandenburg, nur eine unzureichende Auflösung. Die Energiebedarfszeitreihen des Mobilitätssektors werden auf Basis des Straßentyps (städtisch und nicht städtischer Verkehr) und den verschiedenen Fahrzeugtypen erstellt. Die unterschiedlichen Fahrzeugtypen sind PKWs, LKWs, straßengebundene Fahrzeuge des öffentlichen Nahverkehrs, Motorräder und andere Fahrzeuge. Zuerst wird die spezifische Fahrleistung je Fahrzeug- und Straßentyp berechnet. Für die zeitliche Auflösung werden fahrzeugspezifische Fahrprofile, je nach Straßentyp, auf die ermittelte Fahrleistung angewendet. Da dieses Vorgehen konsistent für ganz Deutschland angewendet wird, ergeben sich zwar Unterschiede aufgrund der örtlichen Fahrzeug- und Personendurchdringung, es wird jedoch kein unterschiedliches Mobilitätsverhalten, je nach Region in Deutschland, unterstellt. Jedoch wurde im MiD gezeigt, dass sich das Mobilitätsverhalten mit der Einkommensstruktur ändert, welche in dem AP nicht als konstant angenommen werden soll. In diesem Vorhaben wird aus dem JERICHO-E Modell lediglich der Ansatz der temporalen Profile verwendet, um zeitlich aufgelöste Bedarfsstrukturen zu generieren.

Die MiD Daten sind in folgender örtlicher Genauigkeit gegeben:

- |                 |   |   |
|-----------------|---|---|
| - RegioStaRGem5 | - | Zusammengefasster Regionalstatistischer Gemeindetyp |
| - RegioStaRGem7 | - | Regionalstatistischer Gemeindetyp                   |
| - RegioStaR2    | - | Regionalstatistischer Regionstyp                    |
| - RegioStaR4    | - | Differenzierter Regionalstatistischer Regionstyp    |
| - RegioStaR7    | - | Zusammengefasster Regionalstatistischer Raumtyp     |
| - RegioStaR17   | - | Regionalstatistischer Raumtyp                       |

Im implementierten Modell wird für die Kartierung die allgemeine Gemeindeklassifizierung zusammen mit den RegioStaR2 Daten verwendet. Die RegioStaR2 Daten sind ausreichend, da im Vorhaben lediglich ländliche Regionen betrachtet werden und dieser Raumtyp die Abgrenzung zwischen städtischen und ländlichen Regionen gewährleistet.

In der Studie „Mobilität in Deutschland 2017: Regionalisierung von MiD-Ergebnissen“ [6] wird eine Methodik vorgestellt, in der mittels eines statistischen Schätzverfahrens zentrale Mobilitätskennzahlen, wie die MiD Daten, auf kleinräumiger, ländlicher Ebene abgeschätzt werden können. Folglich können auf diese Weise exaktere Mobilitätsgrößen ermittelt werden, als dies allein durch die Raumklassifizierung möglich wäre. Das in der Studie verwendete statistische Schätzverfahren wird Small-Area-Schätzung genannt. Klassische Schätzverfahren stoßen bei Schätzungen von Mobilitätsdaten auf kleinräumiger Ebene an ihre Grenzen, da es zu nicht akzeptablen Standardfehlerbereichen kommt. „Der Grund für die hohen Standardfehler liegt darin, dass der Stichprobenumfang auf die Schätzung des Gesamtwerts ausgerichtet wird und der Stichprobenplan somit nur auf der übergeordneten Ebene die gewünschte Genauigkeit garantiert, während die Stichprobenumfänge in der Subpopulation gering [...] und im Fall von Untergruppen überdies noch zufallsabhängig sind.“ [6]. Das Konzept der Mobilitätsstudie 2017 erlaubt damit grundsätzlich keine statistische Schätzung von kleinräumigen Verkehrszahlen. Für derartige Schätzungen sind detailliertere Personen- und

Wegestichproben notwendig. Mit der Einbindung von zusätzlichen externen Daten (siehe Tabelle 1) der Subpopulation gelingt es, mit der Small-Area-Methode Verteilungen mit angemessener Genauigkeit auf kleinräumiger Ebene abzuschätzen.

*Tabelle 1: Beschreibung der Hilfsvariablen für das Small-Area-Verfahren*

Hilfsvariable der Small-Area-Schätzung	Stichprobenvariable	Datenquelle
Alter	Alter in Jahren	Regionaldatenbank Deutschland
Geschlecht	1 = weiblich 0 = männlich	Regionaldatenbank Deutschland
Erwerbstätigkeit	1 = berufstätig 0 = nicht berufstätig	Zensus 2011
Haushaltsgröße	1 = Person lebt in Einpersonenhaushalt 0 = sonst	Zensus 2011
Pkw-Ausstattung	Anz. Pkw im Haushalt / Anzahl Personen im Haushalt	Regionaldatenbank Deutschland
Haushaltseinkommen	Haushaltseinkommen / Anzahl Personen im Haushalt	Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung des BBSR
Wohneigentum	1 = Person lebt im Eigentum 0 = Person lebt im Mietverhältnis	Zensus 2011
Raumtyp	Zugehörigkeit der Gemeinde, in der die Person wohnt, zum Raumtyp (RegioStaR 4)	RegioStaR 4 (BMVI)

Zentrale Mobilitätskennwerte für die Schätzung des Energiebedarfs stellen die Tagesstrecke pro Person sowie der Anteil an Fahrern im motorisierten Individualverkehr an der Verkehrsleistung dar. Die Schätzungen der Tagesstrecke für die Kreise in der Bundesrepublik Deutschland ergibt einen Wertebereich von 31,55 bis 48,77 Tageskilometer pro Person. Im Mittel werden pro Person über die gesamte Bundesrepublik hinweg circa 40,49 Kilometer am Tag pro Person zurückgelegt. Die Tagesstrecke pro Person in besonders verstärkten Kreisen, wie in Berlin, Hamburg oder Köln ist mit unter 38 Kilometern am Tag gering. In ländlichen Regionen werden mehr Tageskilometer pro Person zurückgelegt als in städtischen Regionen. Dieser Zusammenhang deckt sich grundsätzlich mit den Umfrageergebnissen der MiD Studie.

Der Endenergieverbrauch wird innerhalb der Tank-to-Wheel Systemgrenze modelliert und beschreibt damit den Kraftstoffverbrauch in Litern im regulären Fahrzeugbetrieb.

Als Angabe der Antriebsartverteilung fundiert die Aussage des Kraftfahrtbundesamtes [7] mit einer Durchdringung von 66,2 % Benzin-Pkw, 32,2 % Diesel-Pkw, 1,1 % Flüssiggas-Pkw, 0,29 % Hybrid-Pkw, 0,2 % Erdgasfahrzeuge und 0,057 % Elektrofahrzeuge. Die über sämtliche Fahrzeugklassen gemittelten Verbrauchswerte für die unterschiedlichen Antriebsarten werden wie folgt angenommen:

*Tabelle 2: Durchschnittliche Kraftstoffverbrauchswerte je 100 km*

Antriebsart	Gemittelter Verbrauch je 100 km	Quelle
Benzin	7,7 l	[8]
Diesel	6,8 l	[8]
Flüssiggas	9,4 l	[9]
Hybrid	55 kWh	[10]
Erdgas	4,3 kg	[11]
Elektro	17 kWh	[10]

Unter Verwendung von Faktoren werden die oben genannten Verbrauchsdaten in eine einheitliche Einheit, in diesem Fall Megajoule (MJ), umgerechnet. Das Vorgehen dient dazu, Ergebnisse gemäß der Norm EN 16258 zu standardisieren. In Deutschland enthalten Diesel 7 Vol.-Prozent und Benzin 5 Vol.-Prozent oder 10 Vol.-Prozent Beimischung von Biokraftstoffen [12]. Innerhalb der Modellierung werden die mehrheitlich in Deutschland genutzten Kraftstoffe Benzin E5 und Diesel D7 verwendet und mit Hilfe der nachfolgend aufgeführten Faktoren umgerechnet.

Tabelle 3: TTW-Energiefaktoren

Antriebsart	TTW-Energiefaktor	Quelle
Benzin	32 MJ/l	[13]
Diesel	35,7 MJ/l	[12]
Flüssiggas	24,5 MJ/l	[14]
Hybrid	3,6 MJ/kWh	
Erdgas	45,1 MJ/kg	[12]
Elektro	3,6 MJ/kWh	

Der allgemeine Energiebedarf des motorisierten Individualverkehrs berechnet sich somit wie folgt:

$$E_{TTW} = FC_{Benzin} * e_{TTW,Benzin} + FC_{Diesel} * e_{TTW,Diesel} + FC_{Flüssiggas} * e_{TTW,Flüssiggas} + FC_{Hybrid} * e_{TTW,Hybrid} + FC_{Erdgas} * e_{TTW,Erdgas} + FC_{Elektro} * e_{TTW,Elektro}$$

Mit:  $E_{TTW}$  = Tank-to-Wheel-Energieverbrauch [MJ]

$FC_i$  = Ermittelter Verbrauch für die Antriebstechnologie i [z.B. in l]

$e_{i,TTW}$  = Energiefaktoren nach Tabelle 3 je Antriebstechnologie i [z.B. in MJ/l]

Der Kraftstoffverbrauch je Antriebstechnologie wird mit Hilfe der ermittelten Strecke aus dem Small-Area-Verfahren und den in Tabelle 2 gezeigten durchschnittlichen Verbräuchen wie folgt bestimmt:

$$FC_i = S_{ij} * k_i$$

Mit:  $S_{ij}$  = geschätzte zurückgelegte Strecke je Antriebsart i und Kreis j pro Tag [km]

$k_i$  = Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch je km und je Antriebsart i [z.B. in l/km]

Die Modellvariablen  $S_{ij}$  geben die gesamte zurückgelegte Strecke in Kilometern des motorisierten Individualverkehrs, differenziert nach den verschiedenen Antriebsarten, innerhalb eines Kreises an. Die Weglängen basieren auf den Schätzergebnissen des Small-Area-Verfahrens. Innerhalb der Schätzergebnisse des Regionalisierungsverfahrens wird nicht zwischen den verschiedenen Antriebstechnologien unterschieden. Um dennoch eine Differenzierung durchzuführen, wird die oben bereits aufgeführte Unterteilung des Kraftfahrtbundesamtes verwendet. Somit ist es mit Hilfe des Small-Area-Verfahrens möglich durchschnittlich zurückgelegte Strecken für die 402 Stadt- und Landkreise zu bestimmen und mit Hilfe der Angaben des Kraftfahrtbundesamtes erfolgt die Unterteilung in die verschiedenen Antriebsarten.

Zur Beschreibung des motorisierten Individualverkehrs wird innerhalb des Small-Area-Schätzverfahrens zwischen dem „MIV-Fahrer-KM“-Anteil und dem „MIV-Mitfahrer-KM“-Anteil differenziert. Als Mitfahrer werden beispielsweise Kinder gezählt, die mit ihren Eltern unterwegs sind. Daraus resultiert, dass Mitfahrer keinen eigenen Kraftstoffverbrauch generieren. Aus diesem Grund wird in dieser Betrachtung nur der „MIV-Fahrer-KM“-Anteil für die Ermittlung der Tagesstrecke mit einbezogen. Diese berechnet sich wie folgt:

$$S_j = MIV_j * TKM_j$$

Mit:  $S_j$  = geschätzte zurückgelegte Strecke MIV je Kreis j pro Person und Tag [km]

$MIV_i$  = Anteil der von Fahrern im motorisierten Individualverkehr (MIV) zurückgelegten Wegstrecke [%]

$TKM_i$  = mittlere Tagesstrecke pro Person und Tag je Kreis [km]

Damit ergibt sich:

$$S_{ij} = S_j * a_i * BV$$

Mit:  $a_i$  = Anteil der Antriebstechnologie nach Angabe des Kraftfahrtbundesamtes [%]

$BV$  = Bevölkerungsanzahl je Kreis

Zur Visualisierung des Energiebedarfs in vorrangig ländlichen Räumen wurden Intervalle herangezogen, wobei überdimensionale, städtische Energiebedarfe in breiten Intervallen zusammengefasst sind und niedrige Wertebereiche in mehreren Intervallen untergliedert sind. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine mögliche Intervallunterteilung für Deutschland über den Zusammenhang zwischen Energiebedarf und Lage der Gemeinden.

Tank-to-Wheel Energiebedarf [GJ] - Gemeindeebene

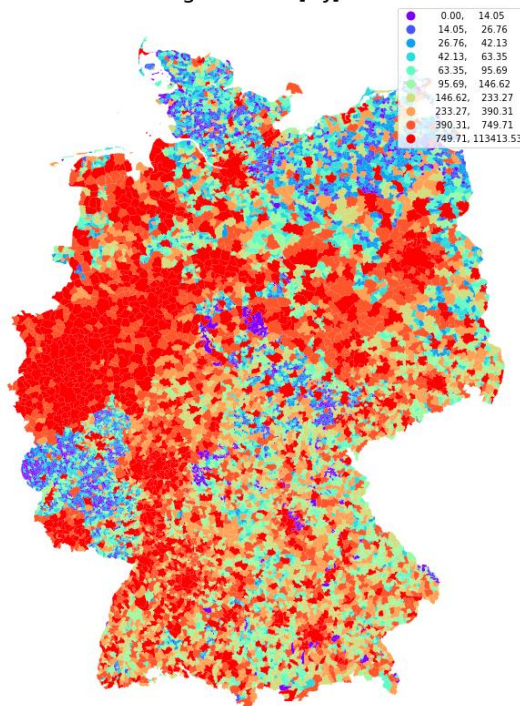


Abbildung 1: Energiebedarf [GJ] für die Gemeinden in Deutschland

Es ist zu erkennen, dass Stadtregionen konsequent durch höhere Energiebedarfe, gekennzeichnet durch die rote Markierung, auffallen. Der erhöhte Energiebedarf ergibt sich jedoch nicht nur für Städte, sondern auch für Stadtregionen. Um die ländlichen Regionen besser visualisieren zu können, folgt eine Darstellung von ausschließlich ländlichen Regionen, indem durch die RegioStar2 Daten alle Stadtregionen ausgeblendet werden und die Intervalle entsprechend angepasst werden.

TTW-Energiebedarf in GJ ländlicher Regionen

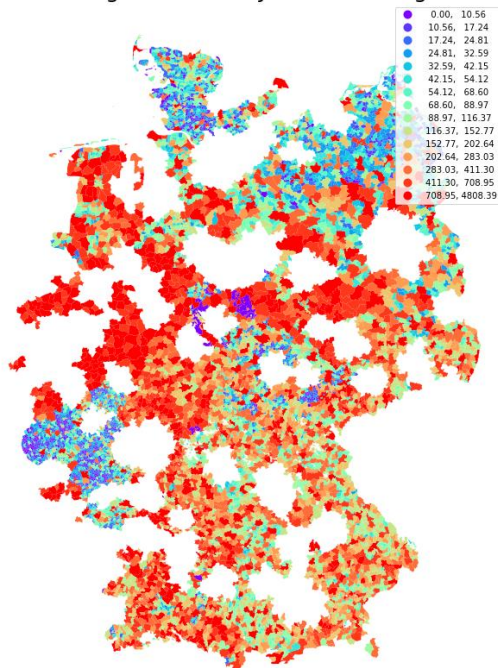


Abbildung 2: Energiebedarf [GJ] für die Gemeinden in Deutschland ohne Stadtregionen

## AP 1.2 Erstellung der Zukunftsszenarien für 2030 und 2050

Für die Erarbeitung der Zukunftsszenarien kommen die Ergebnisse verschiedener Studien zum Einsatz.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gab beim Institut für Politikevaluation die Studie „Automobile Wertschöpfung 2030/2050“ in Auftrag [15]. Ziel war es, die Änderung der Wertschöpfung zu evaluieren. Dies erfolgte anhand der Änderung des Verkehrsverhaltens. Da die MiD Daten auch Informationen zu anderen Mobilitätsformen als den Individualverkehr enthalten, kann diese Verhaltensänderung auch auf das hier gezeigte Modell angewendet werden. Dafür müssen die restlichen Mobilitätsformen mit eingelesen werden und es ergibt sich eine prozentuale Aufteilung, die mit den publizierten Werten aus der Studie für das Jahr 2017 übereinstimmen. Die Studie selbst unterscheidet folgende drei Szenarien:

- Das Referenzszenario: stellt die Entwicklung des automatisierten Fahrens und neuer Mobilitätskonzepte dar, die auf Basis bestehender regulatorischer Maßnahmen und Ziele sowie aktueller technologischer Trends und Kostenentwicklungen zu erwarten ist.
- Das kontrafaktische Szenario: in welchen Level 4-Fahrfunktionen wie im Referenzszenario erst nach 2030 in den Markt eingeführt werden. Im Unterschied zum Referenzszenario kommt es jedoch nicht zu einer weiteren Verbreitung neuer Mobilitätskonzepte oder Shared Mobility über den heutigen Stand hinaus.
- Das Szenario der verstärkten Automatisierung: in welchem es aufgrund von Technologiesprüngen zu einer früheren Einführung von automatisierten Fahrfunktionen als im Referenzszenario kommt. Ein beschleunigter Ausbau der digitalen Infrastruktur sowie ein progressives Voranschreiten der Gesetzgebung beeinflussen dieses Szenario positiv.

Da in der Studie nur Werte bis 2030 und danach eine Tendenz gegeben ist, werden damit lediglich die Szenarien für 2030 erstellt. Im kontrafaktischen Szenario bleibt der Anteil des Individualverkehrs mit dem privaten Pkw konstant. Somit ergibt sich keine Änderung in den Verbräuchen, die im vorherigen Abschnitt berechnet wurden. Das Referenzszenario sieht 2030 eine Senkung des Pkw gebundenen Individualverkehrs um 5,8 % im Vergleich zu 2017 vor. Das Szenario der verstärkten Automatisierung berechnet sogar eine Reduzierung um 9,8 %. Mit diesen Werten erfolgt die Anpassung der jährlichen Verbräuche. Die Verteilung der unterschiedlichen Antriebsarten (siehe Abbildung 3) ist ebenfalls in der Studie publiziert und wird in dem hier beschriebenen Modell übernommen.

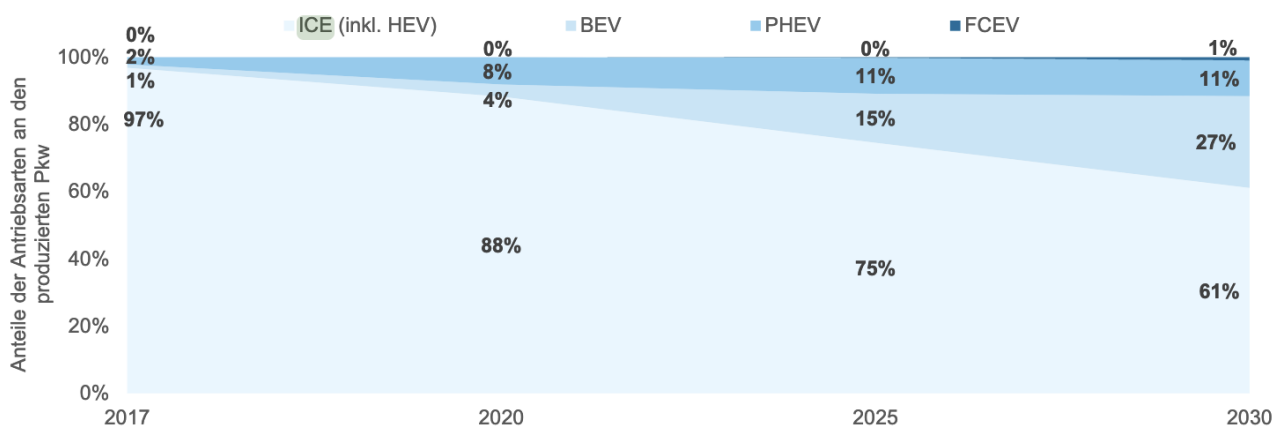


Abbildung 3: Änderung der Pkw-Produktion nach Antriebsarten [15]

Neben den oben dargestellten Szenarien wird ein weiteres Szenario auf Basis der Verkehrsprognose 2030 [16] im Modell abgebildet, um damit auch ein Szenario darzustellen, welches von einer Steigerung des motorisierten Individualverkehrs bis 2030 ausgeht. In diesem Szenario wird eine Steigerung von 4,6 % mit 0,2% pro Jahr von 2010 bis 2030 unterstellt. Die Studie geht dabei nicht auf die Verteilung der Antriebsarten ein, weshalb die in Abbildung 3 aufgezeigte Verteilung angenommen wird.

Die Prognose für 2050 wird auf Basis von [17] entwickelt. Diese Studie geht von vier unterschiedlichen Szenarien aus:

- Das Referenzszenario: hier wurde bis 2030 die Entwicklung nach der zuvor vorgestellten Verkehrsprognose 2030 [16] hinterlegt. Anschließend wird davon ausgegangen, dass einerseits die Anzahl der Wege pro Person und Verkehrsmittel konstant bleiben und sich der zwischen 2010 und 2030 zu verzeichnende Trend zur Zunahme der Wegelängen je Verkehrsmittel nach 2030 im gleichen Maß fortsetzt.

- Das Szenario „neue Individualmobilität“ (NIM): in diesem Szenario wird angenommen, dass der private Pkw weiterhin das am stärksten genutzte Mobilitätsmedium bleibt. Unabhängig von Alter, Gesundheit und Führerschein steht den meisten Menschen ein autonom fahrendes Auto zur Verfügung.
- Das Szenario „neue Dienstleistungen“ (NDL): Auch in diesem Szenario bleibt das Auto das wichtigste Verkehrsmittel, es wird jedoch sehr häufig über Sharing-Dienste bereitgestellt. Auch das autonome Fahren wird als stark entwickelt angenommen, sodass Autos nach der Bestellung beim Sharing-Anbieter selbstständig zum Nutzer kommen.
- Das Szenario „neue Mobilitätskultur“ (NMK): Wo möglich werden anderen Verkehrsmittel, wie z.B. zu Fuß, mit dem Rad oder den öffentlichen Verkehrsmitteln, genutzt. Es wird unterstellt, dass dies möglich ist, da immer mehr Menschen sich in Ballungsgebieten ansiedeln.

Die Verkehrsleistung im Personenverkehr ändert sich für die beschriebenen Szenarien wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Änderung in der privaten Pkw Nutzung ist für die vier Szenarien im Modell hinterlegt, sodass sich hieraus andere jährliche Energiebedarfe ergeben. Ebenso wird die Änderung in der Neuzulassung je Antriebsart betrachtet (siehe Abbildung 5). Auch diese Information wird, wie oben beschrieben, dem Modell zur Verfügung gestellt.

Es konnten keine Informationen gefunden werden, wie sich die zeitlichen Verläufe 2030 und 2050 verhalten werden. Aus diesem Grund wird die gleiche temporale Auflösung wie in AP 1.1 angenommen.

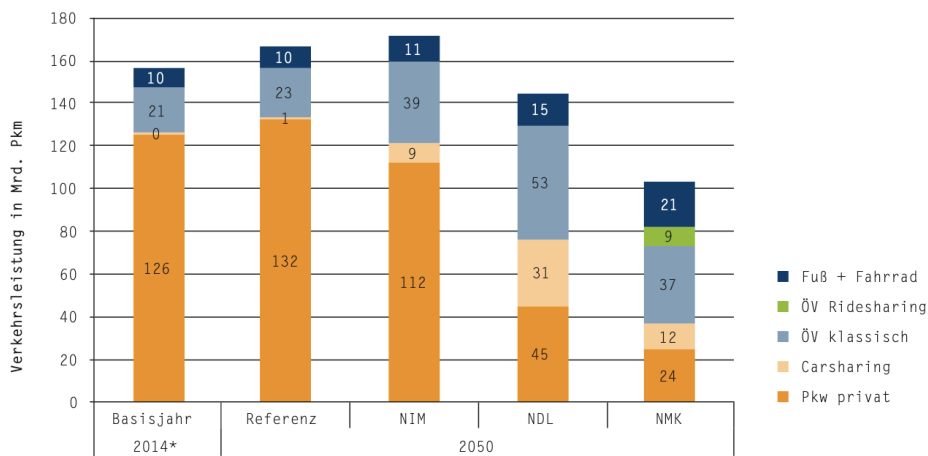


Abbildung 4: Verkehrsleistung im Personenverkehr in den verschiedenen Szenarien [17]

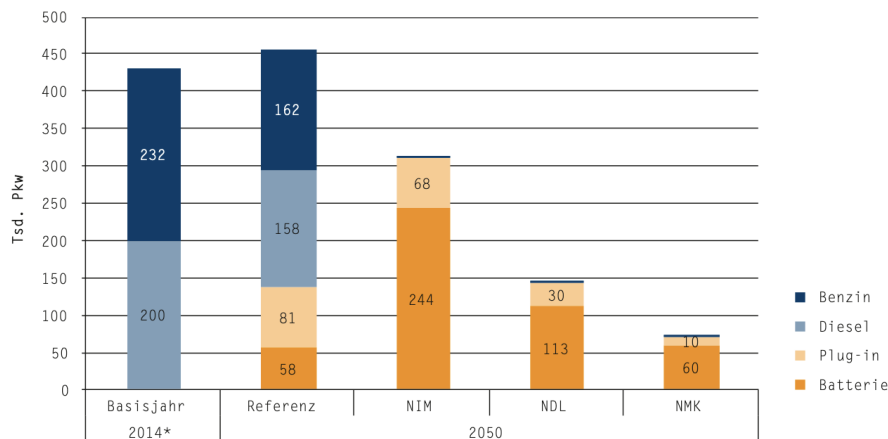


Abbildung 5: Neuzulassungen Pkw nach Antriebsart in den verschiedenen Szenarien [17]

### AP 1.3 Modellierung verschiedener Antriebstoppen

**Batterieelektrische Fahrzeuge:** Für die Simulation von batterieelektrischen Fahrzeugen existieren hauptsächlich zwei Methoden. Zum einen die energiebasierte Simulation, bei welcher lediglich die Energieflüsse, also die Leistungen jedes Zeitschritts der Simulation, berechnet werden. Zum anderen die elektrische Simulation, bei welcher für jeden Simulationsschritt Spannung und Strom berechnet werden und somit das elektrische, dynamische Verhalten abgebildet wird. Da in diesem Vorhaben die Anwendbarkeit der Technologie untersucht werden soll, sind vor allem die Energieflüsse, also die Leistungen, interessant. Auch der wesentlich geringere Rechenaufwand der energiebasierten Simulation macht diese Methode für den



Daran zeigt sich, dass dieses wiederum aus einzelnen Teilmodellen besteht. Die Überwachung und Regelung von Terminalleistung  $P_T$  und Temperatur  $T$  erfolgen durch das Batteriemanagementsystem (BMS) und das Batterietemperaturmanagementsystem (BTMS). Die Modelle beider Komponenten verursachen Verluste. Durch das stationäre Modell wird die Verlustleistung der Batterie, in Abhängigkeit von Temperatur und Terminalleistung, bestimmt. Die Leistung in der Batterie  $P_{Bat} = P_T - P_{loss}$  wird an das Ladezustandsmodell weitergegeben, welches über eine Energiebilanz den SOC (State of Charge) der Batterie bestimmt. Das thermische Modell berechnet auf Basis einer allgemeinen Energiebilanz die Temperatur der Batterie. Der Kapazitätsverlust der Batterie durch zyklische Belastung und kalendarische Alterung wird im Alterungsmodell bestimmt. Damit wird auch der SoH (State of Health) der Batterie berechnet. Für das Temperaturmodell wird die Temperatur des betrachteten Zeitraums benötigt. Die auf [22] bereitgestellten Daten für Berlin Tempelhof werden in einer ersten Näherung verwendet, können aber im weiteren Verlauf noch auf den spezifischen Standort angepasst werden.

Ladeinfrastruktur: Die Ladeinfrastruktur muss auf die abrufbare Leistung ausgelegt sein. Diese ändert sich je nach Anwendungsfall. Aufgrund der gewählten Modellierungsart in Klassen, kann im weiteren Verlauf der spezifische Fall einfach geändert werden. Im Nachfolgenden ist nur die Vorgehensweise für eine Ladeinfrastruktur mit einer Leistung von 1 MW beschrieben. Entsprechend [23] ist dafür ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz notwendig. Der Anschluss kann an die 10 kV- oder 20 kV-Netzebene erfolgen. Ein Anschluss an das 20 kV-Netz wird angenommen. Dafür wird ein Transformator mit einer Nennscheinleistung  $S_N = 1,5$  MVA ausgewählt [24]. Der Transformator besitzt netzseitig eine Nennspannung von 22 kV und anlagenseitig von 433 V.

Für die Modellierung des Transformators werden die in [25] beschriebenen Gleichungen verwendet. Der Wirkungsgrad ist entsprechend Gleichung (1) das Verhältnis aus aufgenommener zu abgegebener Leistung. Die aufgenommene Leistung lässt sich auch als Summe von abgegebener Leistung und Verlustleistung ausdrücken.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (1)$$

Die für die Leistungsübertragung relevanten Verluste sind Kupfer- und Eisenverluste. Die Eisenverluste sind hauptsächlich spannungsabhängig und bleiben mit steigender Leistung konstant. Die Kupferverluste sind stromabhängig und steigen mit der Leistung quadratisch. Die Verlustleistung kann, wie nachfolgend dargestellt, ausgedrückt werden.

$$P_{loss} = P_{Fe} + x^2 \cdot P_{Cu} \quad (2)$$

Dabei ist  $x$  der Lastfaktor, das Verhältnis aus Teilscheinleistung  $S$  zu Bemessungsscheinleistung  $S_N$ . Mit  $S = \frac{P}{\cos \phi}$  gilt:

$$x = \frac{S}{S_N} = \frac{P}{\cos \phi \cdot S_N} \quad (3)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (2) und (3) in die Wirkungsgradgleichung ergibt sich

$$\eta = \frac{x \cdot S_N \cdot \cos \phi}{x \cdot S_N \cdot \cos \phi + P_{Fe} + x^2 \cdot P_{Cu}} \quad (4)$$

welche hier als Modellgleichung des Transformators dienen soll. Eisen- und Kupferverluste können aus dem Datenblatt des ausgewählten Transformators entnommen werden.

Aufgrund der Möglichkeit einer Beladung von vielen Fahrzeugen oder der Beladung der landwirtschaftlichen Maschinen, bei denen eine hohe Kapazität der Batterien angenommen wird, sollten Ladestationen mit möglichst hohen Leistungen angestrebt werden. Es wird sich daher für die Szenarien mit AC-Ladung in Mode-3 entschieden. Dementsprechend werden für jedes Fahrzeug ein EVSE mit 44 kW und zwei AC-Ladegeräte (AC-Onboard-Charger) mit jeweils 22 kW benötigt. Vereinfachend werden die beiden AC-Onboard-Charger als ein 44 kW Ladegerät zusammengefasst. Für die Szenarien mit DC-Ladung wird zuerst eine Ladestation mit einer Leistung von 100 kW angenommen. Onboard-Ladegeräte müssen dabei nicht berücksichtigt werden. In einer ersten Näherung wird angenommen, dass die Ladeleistung über die gesamte Ladedauer konstant ist. Eigentlich existiert ein exponentieller Verlauf der Leistung ab dem Erreichen der Ladeschlussspannung. Dieser wird hier erst einmal vernachlässigt. Es wird ein Abbruch des Ladevorganges bei Erreichen der oberen SOC-Grenze unterstellt. Für die Modellierung der Komponenten AC-Ladegerät, DC-Ladegerät und EVSE wird das in [26] beschriebene Modell verwendet. Dieses physikalisch motivierte Verlustmodell wurde für Frequenzrichter entwickelt.

Mit der oben vorgestellten Art der Modellierung ergibt sich der in Abbildung 8 dargestellte Wirkungsgradverlauf.

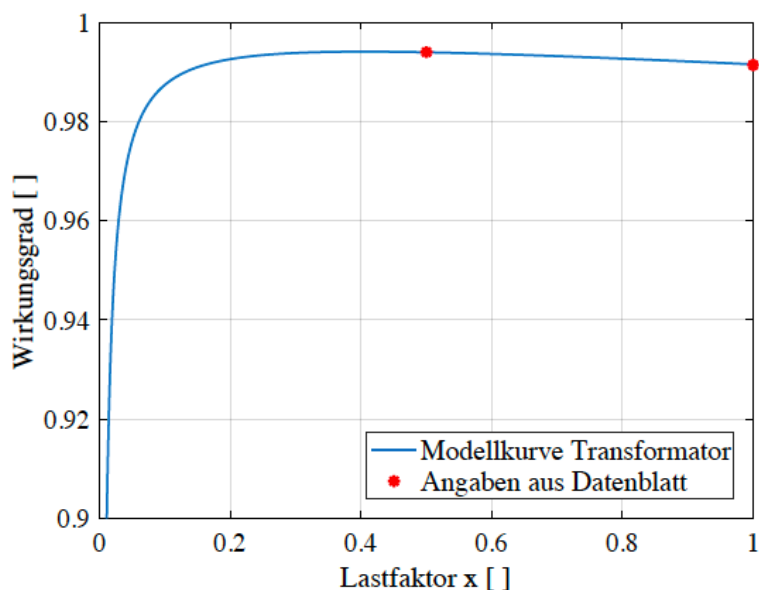


Abbildung 8: Im Modell genutzter Wirkungsgradverlauf des Transformators

Zur Evaluation des Transformators können nur die im Datenblatt angegebenen Wirkungsgrade unter Vollast und bei 50 % Last verwendet werden. Beide Datenpunkte liegen direkt auf der Kurve, weshalb ein ausreichender Zusammenhang angenommen wird. In allen Simulationen wird ein Leistungsfaktor  $\cos \phi = 1$  angenommen.

Eine erste Parametrisierung eines AC-Ladegerätes erfolgt mit einem 3,3 kW Ladegerät publiziert in [27] und die daraus abgelesenen Datenpunkte und Modellkurven sind in der Abbildung 9 dargestellt.

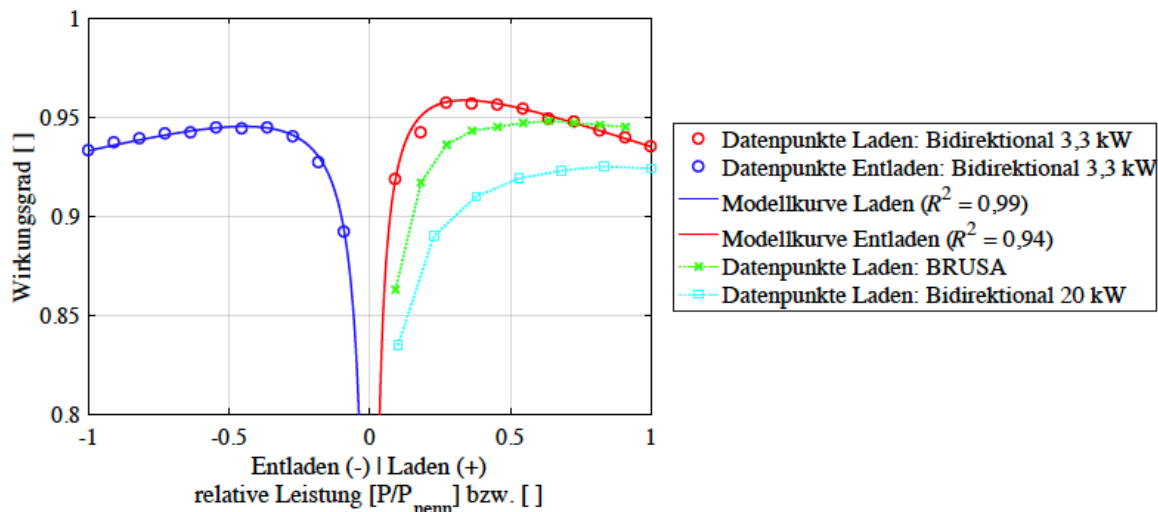


Abbildung 9: Im Modell genutzter Wirkungsgradverlauf des AC-Ladegerätes

Der Wirkungsgradverlauf für die Ladung wird mit dem Verlauf aus [28] (Bidirektional 20 kW) verglichen. Auch der Wirkungsgrad eines für elektrische LKW üblichen Ladegerätes (BRUSA) ist zum Vergleich in das Diagramm eingetragen [29]. Das Ladeverhalten eines LKWs wurde als erste Approximation von landwirtschaftlichen Maschinen angenommen. Um den Unterschied zwischen den Datenpunkten deutlicher darzustellen, ist im Diagramm lediglich der Bereich  $0,8 < \eta < 1$  abgebildet.

Für die Parametrisierung der DC-Schnelladesäulen wird auf die Ergebnisse aus [30] zurückgegriffen. Hierin ist eine bidirektionale DC-Schnelladestation (60 kW) von Coritech vermessen worden. Zum Vergleich wird der Verlauf mit dem einer DC-Schnelladesäule (50 kW) ohne Vehicle2Grid-Funktion aus [31] verglichen. Die Referenzdatenpunkte und die Modellkurven sind in Abbildung 10 gezeigt.

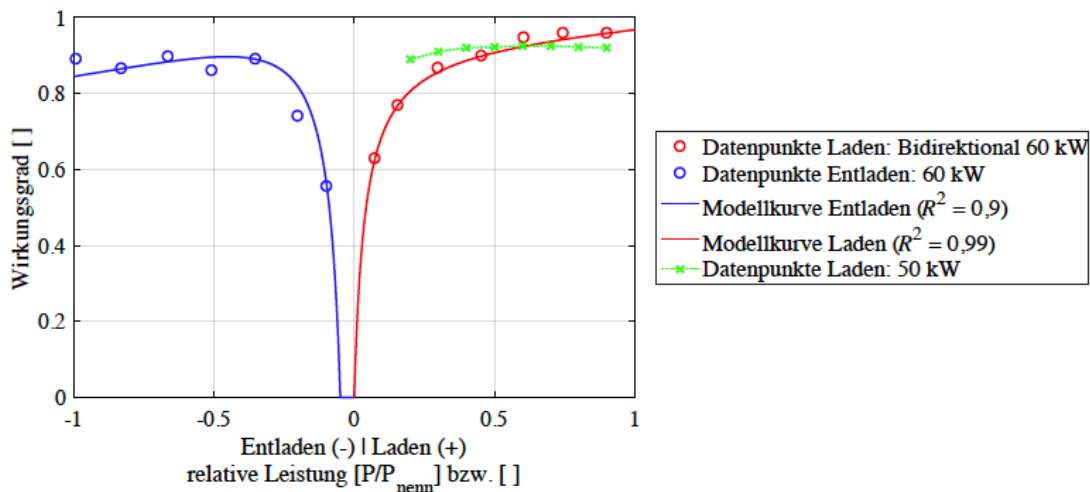


Abbildung 10: Im Modell genutzter Wirkungsgradverlauf des DC-Ladegerätes

Die Parametrisierung ergibt im Falle der Entladung einen hohen Eigenverbrauch. Da dieser Bereich in der späteren Simulation jedoch nicht verwendet wird, wird diese Abweichung toleriert.

Wasserstoff-Fahrzeuge: Wasserstoff-Fahrzeuge besitzen neben einer Brennstoffzelle einen Druckspeichertank, einen Elektromotor und eine Batterie. Für die Beschreibung der Batterie kann das zuvor dargestellte Batteriemodell verwendet werden. Es wird lediglich in einem kleineren Maßstab parametrisiert. Je nach Anwendung und Druckspeicherniveau sind vier Wasserstoffspeichertypen zu unterscheiden:

- Typ I.: Diese Flaschen bestehen aus Stahl und eignen sich für niedrige bis mittlere Drücke. Sie bieten eine hohe Sicherheit und sind zudem ein Standardprodukt. Nachteilig ist das hohe Eigengewicht.
- Typ II.: Dieser Speicher besteht ebenfalls aus Metall (Stahl oder Aluminium), das für die Gasdichtigkeit sorgt. Die Stabilität wird durch eine Faserbewicklung in einigen Bereichen des Behälters gewährleistet. Diese Umwicklung wird am äußeren Teil der Speicherflasche angebracht.
- Typ III.: Diese Flaschen verfügen über eine vollständige Verstärkung durch Kohlenstofffaser. Wie im Typ II besteht die Speicherflasche selbst aus Metall, dieses Mal ist die Faserbewicklung jedoch im gesamten Bereich um die Flasche angebracht.
- Typ IV.: Diese Flaschen sind ähnlich zu Typ-III, jedoch besteht deren Behälter (innerer Teil) aus Kunststoff und die äußere Schicht aus Glas- und/oder Kohlenstofffasern.

Für Automobilanwendungen werden Typ III und Typ IV verwendet, weil diese für sehr hohe Drücke ausgelegt sind [32, 33]. Es ist jedoch davon auszugehen, dass zukünftig aufgrund des geringeren Gewichtes Behälter vom Typ IV gewählt werden [34].

Es existieren folgende Brennstoffzellen, die jeweils aus verschiedenen Materialien zusammengesetzt sind und damit unterschiedliche Betriebseigenschaften besitzen:

- AFC – Alkaline Fuel Cell
- PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell
- PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell
- MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell
- SOFC – Solid Oxid Fuel Cell

Die unterschiedlichen Betriebseigenschaften sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 4: Betriebseigenschaften verschiedener Brennstoffzellen

Typ	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
<b>Elektrolyt</b>	Kalilauge	Festpolymer-Membran	Phosphorsäure	Karbonatschmelze	Dotiertes Zirkonoxid
<b>Betriebstemperatur (°C)</b>	80 (20 – 90)	80 (60 – 120)	160 – 220	600 – 650	800 – 1000
<b>Elektrischer Wirkungsgrad (%)</b>	70 (O <sub>2</sub> ) 55 (Luft)	70 (O <sub>2</sub> ) 50 (Luft)	53 (Luft)	55 – 65 (Luft)	52 – 55 (Luft)
<b>Betriebsweise</b>	variabel	variabel	eher stationär	stationär	eher stationär

Für die Anwendung in Fahrzeugen ist die PEM Brennstoffzelle aufgrund der genannten Eigenschaften besonders geeignet. Zudem besitzt sie eine gute Kaltstartfähigkeit [26]. Da in der üblichen Triebstranganordnung nach der Brennstoffzelle ein Elektromotor angeordnet ist, definiert dieser die notwendige Spannungsanforderung (maximale und minimale Spannung). Somit sind auch auf Einzelzellenebene die Stromdichte und die Spannung bekannt. Ein Brennstoffzellenstack ist aus mehreren Einzelzellen aufgebaut, welche „gestapelt“ und elektrisch in Serie verbunden sind.

Die Modellierung des Wasserstoff-Fahrzeuges erfolgt auf Basis von Messdaten des Toyotas Mirai (2016). Dieses Fahrzeug besitzt folgende Spezifikationen [35]:

- Fahrzeuggewicht: 1928 kg
- PEMFC mit 370 Zellen im Stack
- Nickel-Metall-Hydrid Batterie

Für die Effizienzbetrachtung des gesamten Brennstoffzellensystems müssen zuvor die Wirkungsgradkurven der Einzelkomponenten bekannt sein. Die vermessenen Werte für den Toyota Mirai (2016) sind der Publikation Lohse-Busch et. al. [35] zu entnehmen. Die Einzelwerte wurden in die Software Origin 2021 übernommen und nach einer geeigneten Fiterfunktion gesucht. Dabei stellte sich heraus, dass der Effizienzverlauf des Boost Converters am besten durch folgende Boltzmann Funktion beschrieben wird.

$$\eta_{boost\ converter} = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(P_{fuel\ cell\ stack} - x_0)/x_1}} + A_2 \quad (5)$$

$$A_1 = 92,25524$$

$$A_2 = 0,95973$$

$$x_0 = -429782,77983$$

$$x_1 = 55382,34799$$

Das Bestimmtheitsmaß gibt mit  $R^2 = 0,95271$  eine ausreichend gute Beschreibung der Fitfunktion im Vergleich zu den Messpunkten an.

Nach dem gleichen Ansatz wurde die Funktion für den Verdichter bestimmt. Dieser Verdichter ist notwendig, um die Brennstoffzelle ausreichend mit Luft zu versorgen. Die Abbildung 11 zeigt, dass die Leistung der Brennstoffzelle durch eine Druckerhöhung gesteigert werden kann. Dies geschieht jedoch nicht proportional. Der Effekt der Druckerhöhung nimmt mit steigendem Druck ab. Es existiert folglich ein Optimum zwischen Leistungszuwachs der Brennstoffzelle und Leistungsaufnahme des Luftverdichters.

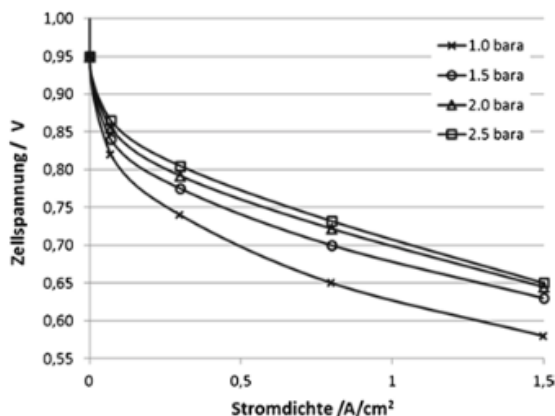


Abbildung 11: Einfluss des Luftbetriebsdrucks auf die Spannung der Brennstoffzelle [25]

Es zeigt sich, dass die Hill Funktion eine geeignete Art der Beschreibung der Messwerte für den Verdichter ist. Das Bestimmtheitsmaß dieser Funktion liegt bei  $R^2 = 0,99307$ . Es ergibt sich folgende Funktion:

$$P_{compressor} = V_{max} \cdot \frac{P_{fuel\ cell\ stack}^n}{k^n + P_{fuel\ cell\ stack}^n} \quad (6)$$

$$V_{max} = 28382,25616$$

$$k = 203245,37192$$

$$n = 2,72591$$

Weiterhin wird eine Beschreibung der Pumpe für die Zirkulation des Kühlmittels benötigt. Die Messwerte wurden ebenfalls in Origin 2021 eingelesen und mit einer linearen Funktion beschrieben. Hier zeigt sich ein schlechteres Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,74739$ . Die Beschreibung mit einer linearen Funktion wird trotzdem gewählt, weil eine Beschreibung mit anderen Funktionen noch schlechtere Übereinstimmungen verursacht hat. Dies ist auch in der unten aufgeführten Abbildung 12, in der die Messwerte in Schwarz und die Funktion in Rot gezeigt sind, ersichtlich. Die Funktion und die Parameter lauten wie folgt:

$$P_{pump} = a + b \cdot P_{fuel\ cell\ stack} \quad (7)$$

$$a = 19,41163$$

$$b = 0,00888$$

Die Brennstoffzelle wurde in [35] ebenfalls vermessen. Ein Vergleich der verschiedenen Fitfunktionen mit den Messwerten in Origin 2021 ergibt die Asym2Sig Funktion als geeignetste Funktion mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,95632$ . Es ergibt sich für die Brennstoffzelle folgende Beschreibung:

$$\eta_{fuel\ cell\ stack} = y_0 + A \cdot \frac{1}{1 + e^{\frac{P_{fuel\ cell\ stack} - x_c + w_1/2}{w_2}}} \cdot \left( 1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{P_{fuel\ cell\ stack} - x_c - w_1/2}{w_3}}} \right) \quad (8)$$

$$y_0 = 22,55007$$

$$x_c = 63,86124$$

$$A = 64,67945$$

$$w_1 = 126,60496$$

$$w_2 = 1,46478$$

$$w_3 = 179,61904$$

Alle beschriebenen Funktionen sind im Nachfolgenden mit den dazugehörigen Messwerten aufgezeigt.

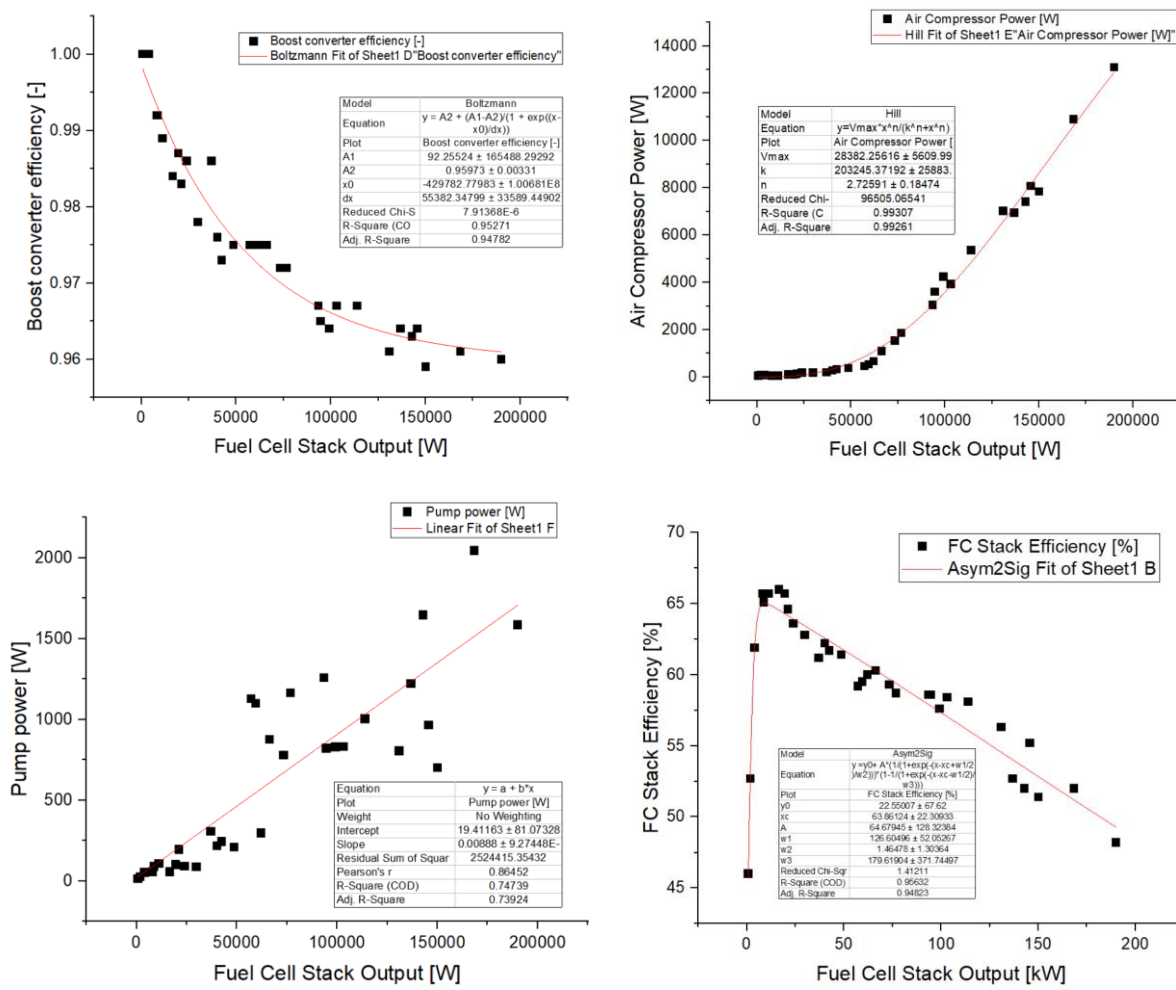


Abbildung 12: Leistungs- und Wirkungsgradverläufe der Pumpe, des Verdichters, des Boost Converters und des Brennstoffzellenstacks

Wasserstoffbetankungsvorgang: Da Wasserstoff im gasförmigen Zustand während eines Betankungsvorganges bei sehr hohem Druck vorliegt, können sich viele relevante Probleme ergeben. Die Verdichtung von Wasserstoff im Fahrzeugtank sowie die Real-Gas-Effekte, wie der Joule Thomson Effekt (JTE), können während einer Betankung zu einem hohen Temperaturanstieg führen [36, 37]. Bei hohen Temperaturen entsteht einerseits das Risiko einer negativen Beeinflussung von Eigenschaften der verbauten Materialien, andererseits steigt die Explosionsgefahr an. Gleichzeitig leisten sie einen Beitrag zum Druckanstieg im Fahrzeugtank und verringern somit die nutzbare Speicherkapazität. Parameter, wie die Betankungsrate, die thermische Eigenschaften des Fahrzeugtanks sowie sein Startdruck, die Umgebungstemperatur und die Vorkühlungstemperatur von Wasserstoff an der Tankstelle können die Temperaturerhöhung im Fahrzeugtank stark beeinflussen und müssen, um einen sicheren Betankungsvorgang zu gewährleisten, beachtet werden [38, 39].

Daher hat die Society of Automotive Engineers (SAE) Betriebsgrenzen einer Wasserstoffbetankung festgelegt und Betankungsprotokolle für die Einhaltung dieser Grenzen entwickelt. Die Betankungsnorm für leichte Nutzfahrzeuge heißt SAE J2601 [39]. Diese umfasst Standard-Betankungstabellen für Betankungsvorgänge sowohl für 350- als auch für 700-bar-Fahrzeuge, mit unterschiedlichen Drucksystemgrößen in dem Bereich von ca. 50-250 l. Die Betankungen können sowohl mit Kommunikation als auch ohne Kommunikation stattfinden. Der Unterschied liegt darin, ob Informationen über das Fahrzeugtankvolumen und seinen Startdruck vorhanden sind oder nicht. Die Vorkühltemperatur des Wasserstoffes an der Tankstelle wird laut SAE J2601 in drei Kategorien unterteilt: T40 mit einer Lieferungstemperatur im Bereich von -40 °C bis -33 °C, T30 im Bereich von -33 °C bis -26 °C und T20 im Bereich von -26 °C bis -17,5 °C. Je nach Betankungstyp können aus den entsprechenden Betankungstabellen der erzielbare Enddruck und die Druckrate (MPa/min) bzw. Average Pressure Ramp Rate (APRR) für den Druckanstieg an der Tankstelle abgelesen werden. Die abgelesene APRR ist so ausgelegt, dass die Betriebsgrenzen des Fahrzeugtanks während einer Betankung im Durchschnitt nicht überschritten werden. Die Betriebsgrenzen für ein leichtes Nutzfahrzeug laut SAE J2601 sind in der Abbildung 13 dargestellt. Obwohl der nominale Betriebsdruck der Fahrzeuge mit 350 und 700 bar angegeben wird, darf der Druck 1,25-mal höher sein, um einen SOC von mindestens 95 % zu erreichen. Somit nimmt der maximale Betriebsdruck einen Wert von 87,5 MPa an.

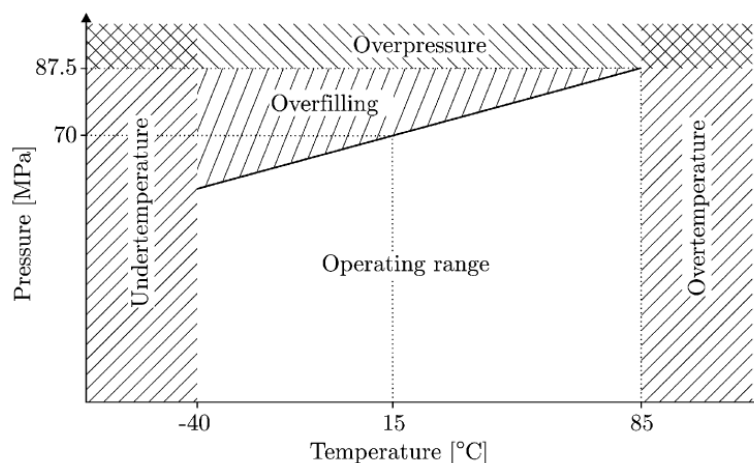


Abbildung 13: Betriebsgrenzen eines Fahrzeugtanks [40]

Die maximale Temperatur im Fahrzeugtank darf den Wert von 85 °C nicht überschreiten. Der maximale Massenstrom während einer Betankung darf den Wert von 3,6 kg/min nicht überschreiten. Als Referenzbetankung laut SAE J2601 ist eine Betankung mit Kommunikation, mit einer Vorkühltemperatur der Kategorie T40 und mit einem erzielbaren SOC zwischen 95 bis 100 % innerhalb von 3 Minuten bei Referenzumgebungstemperatur vorgesehen. Dem Fachgebiet liegen aus früheren Untersuchungen Informationen zu der Wasserstofftankstelle am Flughafen BER vor. Diese werden zusammen mit den Vorgaben der SAE J2601 genutzt, um den Wasserstoffbetankungsvorgang und die dafür notwendige Infrastruktur abzubilden. An der Wasserstofftankstelle am Flughafen BER können sowohl Pkw mit 700-bar-Behälter als auch Fahrzeuge mit 350-bar-Behälter (Pkw und Busse) an den jeweiligen Zapfsäulen betankt werden.

Da es sich in der Simulation um eine Tankstelle mit Kommunikation handelt, ist der erste Schritt einer Betankung, den Zieldruck und die APRR an der Tankstelle zu definieren. Das ist unter den Angaben des Druckes, der Umgebungstemperatur und des Tankvolumens möglich. Danach wird der Fahrzeugtank an das Kaskadenspeichersystem angeschlossen und die Betankung findet in einer Reihenfolge des aufsteigenden Druckes an der Tankstelle statt. In jedem Rechenschritt wird überprüft, ob der Druck des verwendeten Druckspeichers höher als der von der APRR vorgesehene Druck an der Tankstelle ist.

Zuerst erfährt der zu tankende Wasserstoff eine Expansion von dem hohen Druckniveau des Speichertanks auf das niedrigere Druckniveau der Tankstelle. Wegen des JTE erfährt der Wasserstoff eine Temperaturerhöhung. Als nächstes wird er in einem Wärmeübertrager auf eine gezielte Temperatur (T40) abgekühlt. Die Vorkühlung ist in der Simulation isobar. Aufgrund des Druckunterschieds zwischen der Tankstelle und dem Fahrzeugtank erfährt der Wasserstoff einen zweiten Druckabfall und eine Temperaturerhöhung, wiederum durch den JTE. Der Ablauf des Wasserstoffbetankungsvorganges ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Wenn der Druck nicht mehr hoch genug ist, wird die Betankung auf das nächste Druckniveau des Kaskadenspeichersystems umgeschaltet. Die Betankung ist abgeschlossen, wenn der Zieldruck erreicht ist.

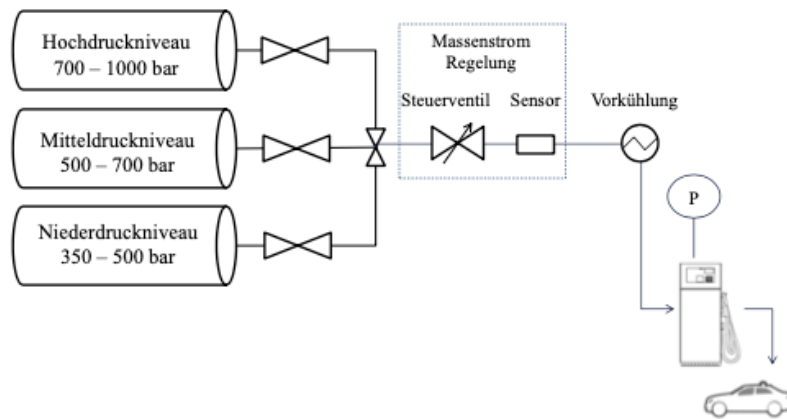


Abbildung 14: Im Modell genutztes Kaskadenmodell für die Betankung

#### Fahrzeuge mit Gasantrieb:

Die Modellierung erfolgt auf Basis der in [41] publizierten Daten eines 1,0 Liter Erdgasmotors. Dieser Motortyp basiert auf dem von der Opel AG vorgestellten 3-Zylinder „Opel Ecotec Compact“ Benzinmotor. Für die Datenerhebung in der zuvor genannten Publikation war der Motor in einem Astra Caravan H verbaut. Das Gesamtgewicht des Fahrzeuges beträgt 1626 kg und es hat folgende Abmaße:

- Länge: 2703 mm
- Breite: 1753 mm
- Höhe 1500 mm

Für die Simulation des Energiebedarfs wird ein Wirkungsgradfeld benötigt, welches mit Hilfe der Software Origin 2021 und der oben genannten Publikation erzeugt wird.

#### AP 1.4 Szenarienanalyse der Antriebsarten

Mit den zuvor beschriebenen Modellen können nun die Verbrauchsmuster für die verschiedenen Antriebsarten und für die verschiedenen Regionen in Deutschland erstellt werden. Im hier dargestellten Bericht wird die Biogasanlage Hillerse genutzt, um das Vorgehen und die Funktion des Models beispielhaft aufzuzeigen. Die Region um diese Biogasanlage wird durch das Kürzel DE914 gekennzeichnet und ist zur besseren Einordnung nachfolgend durch die Abbildung 15 aufgezeigt.



Abbildung 15: Kennzeichnung der Region DE914 in der sich die Biogasanlage Hillerse befindet

Wird nun die Szenarienanalyse beispielhaft für die Region durchgeführt, können sämtliche Verbräuche sowohl für das Basisszenario als auch für die zuvor aufgezeigten Zukunftsszenarien dargestellt werden. Diese Art der Analyse ist durch das entwickelte Model nicht nur für diese Region, sondern für sämtliche Regionen in Deutschland möglich.

Wird nun diese Analyse beispielhaft für die Region DE914 und den Elektrizitätsbedarf durch den Individualverkehr für unterschiedliche Szenarien durchgeführt, ergeben sich die folgenden Verbräuche. Bei der Szenarienbenennung wird auf die oben aufgeführte Szenarienbeschreibung verwiesen, dort werden die unterschiedlichen Szenarien erklärt. Die erste Ziffer steht immer für die angenommene Reduzierung des motorisierten Individualverkehrs. Danach folgt das eigentliche Szenarion und das Bezugsjahr.

*Tabelle 5: Jährlicher Kraftstoffbedarf in der Region DE 914 für unterschiedliche Szenarien*

<b>Szenario</b>	<b>Jährlicher Energiebedarf in kWh</b>
0_2017	149014
0_TN Strom 2030	46743467
0_TN H2 2030	37698031
0_TN PtG_PtL 2030	30744025
0.098_TN Strom 2030	42162607
0.098_TN H2 2030	34003624
0.098_TN PtG_PtL 2030	27731111
0.03968_TN PtG_PtL 2050	74764265
0.03968_TN Strom 2050	194065739
0.03968_TN H2 2050	150256591
0.7143_TN PtG_PtL 2050	22242743
0.7143_TN Strom 2050	57735527
0.7143_TN H2 2050	44702087

### **AP 1.5 Evaluierung der wirtschaftlichen und ökologischen Kennzahlen**

Das österreichische Umweltbundesamt gab im Jahr 2021 einen sehr umfassenden Bericht zu der Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential und Energieeinsparung heraus [42]. Dieser dient als wesentliche Grundlage für die im Vorhaben genutzten ökologischen Kennzahlen. In der nachfolgenden Abbildung ist beispielhaft das CO<sub>2</sub> Äquivalent für die verschiedenen Antriebstechniken dargestellt.

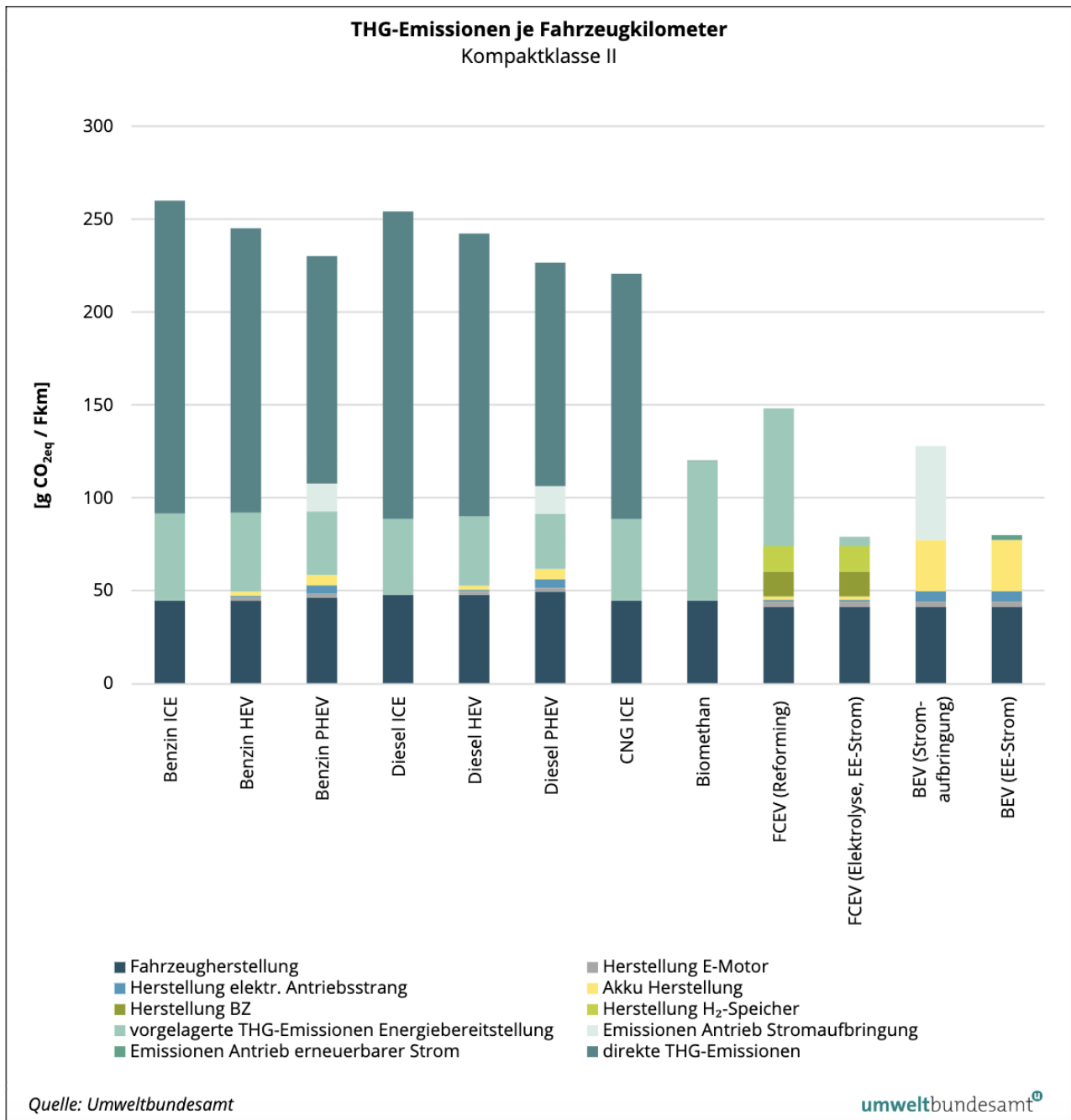


Abbildung 16: Treibhausgasemissionen je Fahrzeugkilometer [42]

Die ökonomischen Kennzahlen beziehen sich auf die Fahrzeugtypen, die in den jeweiligen Antriebsstrangmodellierungen genutzt wurden. Für die Modellierung des Gasantriebes wurden die Daten des Opel Astran Caravan H angenommen. Dies ist ursprünglich ein Fahrzeug mit Benzin Antrieb und kann auf ein Gasantrieb umgerüstet werden. Nach [43] belaufen sich die Kosten für ein Umrüstung auf ca 5000 €. Die Investitionskosten für den Opel Astra Caravn H sind mit 20.695 € gegeben [44]. Die Reparatur- und Wartungskosten eines CNG-Antriebes werden in [45] mit 0,057 €/km angegeben.

Für die Modellierung des Wasserstofffahrzeuges wurden die Daten des Toyota Mirais genutzt. Dieser besitzt einen Anschaffungspreis von ca 70.000 € [46]. Die Reparatur- und Wartungskosten liegen laut [47] unter den eines Dieselfahrzeuges und laut [48] über denen eines Elektroautos. Da durch die Literturrecherche kein genauer Wert gefunden wurde, wurde der Mittelwert zwischen Diesel und Elektro genommen. Beide Preise sind in [45] gegeben und somit wird ein Preis von 0,042 €/km angenommen.

Die Modellierung der Elektrofahrzeuge ist nicht an einem einzigen Typen erfolgt, sondern objektorientiert angelegt, da für dieses Fahrzeugtyp mehrere Daten zur Verfügung standen. Es ergeben sich folglich die folgenden Investitionskosten.

Tabelle 6: Investitionskosten der verwendeten Elektrofahrzeuge

Fahrzeug	Investitionskosten	Quelle
Model 3	43.000 €	[49]
ID.3	40.000 €	[50]
Kona	42.000 €	[51]
Zoe	37.000 €	[52]

Nach [45] besitzen Elektroautos die geringsten Reparatur- und Wartungskosten mit 0,034 €/km.

Ebenfalls in [45] sind die Relative Versicherungskosten im Verhältnis zu den Anschaffungskosten mit 5 % gegeben.

## Arbeitspaket 2: Simulationen landwirtschaftliche Maschinen Nachfrageseite

Die Betrachtung landwirtschaftlicher Maschinen auf der Nachfrageseite wird durch die landwirtschaftliche Verfahrenssimulation am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge durchgeführt. Die landwirtschaftliche Verfahrenssimulation wurde am Institut im „EkoTech“-Projekt entwickelt und wird aktuell neben dem „RegEnerMoBio“-Projekt in drei weiteren Projekten kontinuierlich weiterentwickelt. Die zu Projektstart des „RegEnerMoBio“-Projekts vorhandene Funktionsweise wird in dargestellt. Bei der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation handelt es sich um ein agentenbasiertes Simulationsmodell.

Das Grundmodell ist in zwei Einzelmodelle aufgeteilt. Durch das Maschinenmodell werden unter Berücksichtigung der Eingangswerte auf Basis von Wirkungsgraden und Kennfeldern für die Leistungsbedarfe einzelner Maschinen zeitbezogene Kraftstoffbedarfe für quasistatische Zustände berechnet. Dem gegenüber steht das Verfahrensmodell, mit dem die Zeitanteile einer Maschinenkombination für die simulative Abbildung der Verfahrenskette auf dem Betrieb bestimmt werden. Durch die Kombination der Zeitanteile für die unterschiedlichen Arbeiten mit den zugehörigen Kraftstoffverbräuchen lassen sich Kraftstoffverbräuche für die unterschiedlichen Prozessschritte berechnen.

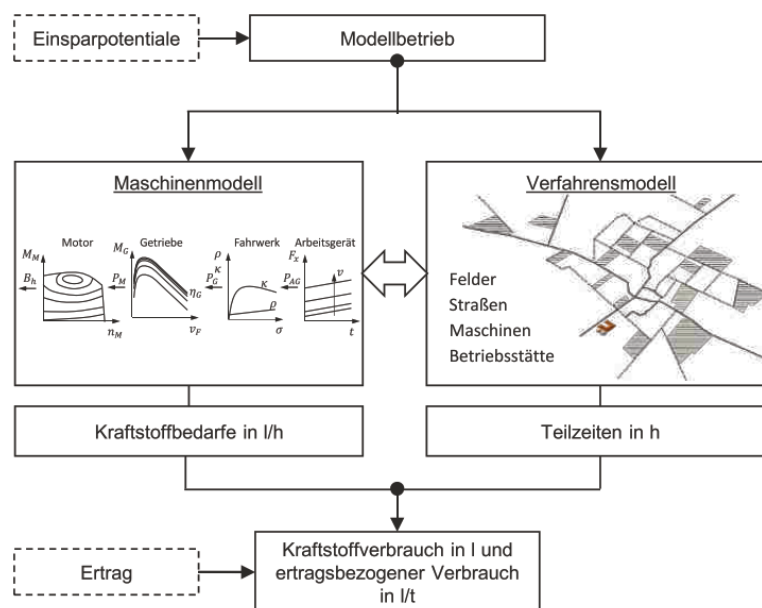


Abbildung 17: Struktur der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation [53]

Da der Fokus bisheriger Forschungsprojekte am Institut auf den Arbeiten auf dem Feld (siehe Abbildung 17) und nicht auf den hofnahen Prozessen lag, ist eine Implementierung der hofseitigen Infrastruktur und der hofnahen Prozesse im zweiten Arbeitspaket erforderlich.

Das zweite Arbeitspaket des Projekts beinhaltet die simulative Abbildung landwirtschaftlicher Maschinen auf der Nachfrageseite. Die Ergebnisse der einzelnen Unterarbeitspakete werden in den einzelnen Abschnitten vorgestellt.

### AP 2.1 Datenerfassung

Im Rahmen des Projekts wurde zur Datenerfassung ein Liebherr L550 Radlader und ein Fendt 722 Vario Traktor mit einem Datenlogger ausgestattet. Der Radlader wird zur Beschickung der Biogasanlage und der

Traktor als Abfahrer in der Silomaisernnte eingesetzt. Das Vorgehen der Datenerfassung wird im Folgenden detaillierter beschrieben.

Die geplante Installation des institutseigenen Datenloggers auf dem Liebherr L550 Radlader des Abwasserverbands Braunschweig konnte aufgrund der verschlüsselten CAN-Signale des Radladers nicht durchgeführt werden. Stattdessen wurde in Kooperation mit Liebherr ein Datenlogger auf der Maschine installiert. Zusätzlich zu dem Datenlogger wurde im Führerhaus der Maschine eine Kamera installiert. Die Kamera dokumentierte (mit Zeitstempel) die durchgeführten Arbeiten, sodass im Nachgang eine Zuordnung von durchgeführter Arbeitsaufgabe und gemessenen Kraftstoffbedarf möglich ist.

Während der Silomaisernnte wurde der Fendt 722 Vario mit dem institutseigenen Datenlogger ausgestattet. Aufgrund der langen Arbeitszeit konnte der Traktor nicht wie der Radlader mit der Kameratechnik ausgestattet werden. Stattdessen wurde während der Arbeitsverrichtung ein Fahrtenbuch durch eine studentische Hilfskraft geführt.

Die aufgezeichneten Messdaten wurden im Anschluss mit Hilfe einer in Matlab programmierten Auswerteroutine ausgewertet. Die ausgewerteten Daten können direkt in die Datenbank der Simulation integriert und als Grundlage entsprechender Simulationen verwendet werden.

## AP 2.2 Abbildung Referenzbetriebe Nachfrageseite

Als Referenzbetrieb zur Validierung der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation werden die durch den Abwasserverband Braunschweig bewirtschafteten Flächen verwendet. Die betrachtete durchschnittliche Flächengröße liegt bei 8,2 ha und die durchschnittliche Entfernung zwischen Hof und Feld liegt für die betrachteten Flächen bei 8,3 km. Abgebildet wurden für die Validierung das Grubbern, das Pflügen, die Aussaat, der Pflanzenschutz und die Ernte auf den Flächen. Der Vergleich von Messdaten und Simulationsergebnissen der genannten Verfahrensschritte wird in Abbildung 18 dargestellt. Verallgemeinernd kann gesagt werden, dass die Abweichungen zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen mit <1 bis 2% als sehr gering eingestuft werden können und die Simulationsergebnisse der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation valide sind. Eine detaillierte Vorstellung der Ergebnisse erfolgt in folgenden Abschnitten.

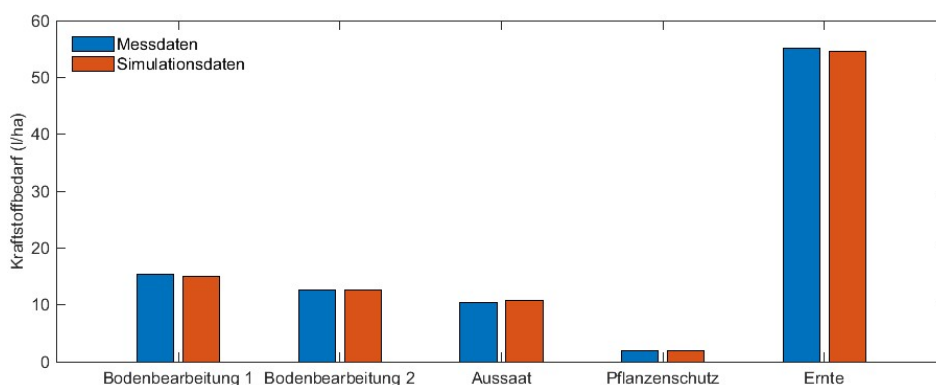


Abbildung 18: Vergleich zwischen Messdaten und Simulationsergebnissen

Bei der Bodenbearbeitung 1 wurden 60,62 ha bearbeitet. Für das Grubbern wurde ein Traktor mit einer Leistung von 110 kW und ein Grubber mit Nachläufer und einer Arbeitsbreite von 3 m verwendet. Die Bearbeitungstiefe lag bei 25 cm. Der gemessene Kraftstoffbedarf liegt bei 15,3 l/ha, der simulierte Kraftstoffbedarf bei 15,01 l/ha. Die Abweichung zwischen Simulationsergebnis und Messdaten ist somit kleiner als 2 %.

Bei der Bodenbearbeitung 2 wurden 46,37 ha bearbeitet. Es wurde ebenfalls ein Traktor mit einer Leistung von 110 kW verwendet. Als Bodenbearbeitungsgerät wurde ein 4-Schar-Volldrehpflug mit Nachläufer bei einer Bearbeitungstiefe von 28 cm eingesetzt. Basierend auf den erstellten Datenbankeinträgen konnte ein Kraftstoffbedarf von 12,53 l/ha simuliert werden. Der gemessene Kraftstoffbedarf liegt bei 12,55 l/ha. Die resultierende Abweichung ist kleiner 1 %.

Bei der Ernte wurden auf 14 Felder insgesamt 87 ha Silomais geerntet. Die 87 ha wurden an zwei Tagen durch eine Häckselkette abgeerntet. Die Häckselkette bestand aus einem Feldhäcksler und 6 Abfahrgepannen, bestehend aus Traktoren variierender Leistungsklassen in Kombination mit 40 m<sup>3</sup> Häckselguttransportwagen. Der in der Ernte gemessene Kraftstoffbedarf liegt bei 55,05 l/ha und der simulierte Kraftstoffbedarf für die identischen Flächen bei 54,57 l/ha. Die Abweichung zwischen Messdaten und Simulationsergebnis liegt bei weniger als einem Prozent.

Abschließend können die Simulationsergebnisse als valide bewertet werden. Folglich zeigt sich, dass die landwirtschaftliche Verfahrenssimulation zuverlässig Kraftstoffverbräuche für unterschiedliche Verfahrensschritte bei variierenden Einsatzbedingungen (Hof-Feld-Entfernung und Feldgröße) ermitteln kann.

### AP 2.3 Anpassung Verfahrenssimulation auf Biogas (Verbräuche)

Neben dem Dieselkraftstoffbedarf soll in der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation auch der Bedarf an Biogas, Wasserstoff und elektrischer Energie simulativ ermittelt werden können. Um den Bedarf der unterschiedlichen Energieträger möglichst flexible bestimmen zu können, wird statt des Bedarfs der Energieträger der Energiebedarf simulativ ermittelt. Das Funktionsschema dieser Ermittlung wird in Abbildung 19 dargestellt.

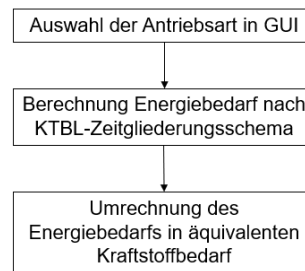


Abbildung 19: Schema zur Bestimmung des Kraftstoffbedarfs

Zu Beginn der Simulation kann der Energieträger ausgewählt werden. Zur Verfügung stehen Diesel, Wasserstoff, Biomethan (im Folgenden verkürzt Bio-CNG bezeichnet) und batterieelektrische Energie. In Abhängigkeit des gewählten Energieträgers wird ebenfalls die Tank-/Batteriegröße individuell eingestellt. Anhand des gewählten Energieträgers und der Tankgröße wird mit Hilfe des Heizwertes des Energieträgers die mitgeführte Energiemenge ermittelt. Im Anschluss erfolgt die Ermittlung des Energiebedarfs für die unterschiedlichen Maschinen und Verfahrensschritte anhand der maschinenspezifischen Bedarfskennfelder.

Nach der Energiebedarfsbestimmung durch die landwirtschaftliche Verfahrenssimulation kann mit Hilfe des Heizwertes der Bedarf des ausgewählten Energieträgers für die Verrichtung des gewählten Verfahrensschritts errechnet und ausgegeben werden. Die flexible Wahl des Energieträgers ermöglicht somit den Vergleich unterschiedlicher Energiebedarfe bei wechselnden Energieträgern, bedingt durch beispielweise zusätzliche Betankungen.

### AP 2.4 Erweiterung Verfahrenssimulation für Beschickung Biogasanlage

Zur simulativen Abbildung der Beschickung der Biogasanlage ist eine umfangreiche Erweiterung der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation erforderlich. Zunächst muss die Verfahrenssimulation um die Biogasanlage erweitert werden. Diese wird in der Simulation im Wesentlichen durch eine tägliche Beschickungsmenge an Silage charakterisiert. Da die simulative Beschickung der Biogasanlage, wie in der Realität, durch einen Radlader dargestellt werden soll, muss die agentenbasierte Simulation um den Radlader-Agenten erweitert werden. Dieser transportiert bei Erteilung des Auftrags zur Beschickung der Biogasanlage die Silage aus dem Silo zur Biogasanlage. Das Silo wurde ebenfalls als eigener Agent der Verfahrenssimulation hinzugefügt. Somit kann dieses individuell in Größe, Kapazität und Lage positioniert werden.

Zur Validierung der Erweiterungen in der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation wurde die Biogasanlage des Abwasserverbands Braunschweig in Hillerse simulativ abgebildet. Simuliert wurde die Beschickung der Biogasanlage mit 50 t Silage aus einem anliegenden Silo. Für die Beschickung musste der Radlader die Schaufel am Silo befüllen, eine Transportfahrt in beladenem Zustand durchführen, die Schaufel entleeren und eine Transportfahrt in unbeladenem Zustand zurück zum Silo durchführen. Dieser Zyklus wurde für die 50 t Beschickungsmenge insgesamt 16-mal wiederholt. Die Abweichungen zwischen Simulations- und Messergebnissen sind für die Beschickung kleiner 5 %. Die Erweiterungen in der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation zur Beschickung der Biogasanlage können somit als valide eingestuft werden.

### AP 2.5 Implementierung alternativer Nutzungsarten

Aufgrund der in Abschnitt 2.3 beschriebenen variablen Gestaltung der Verfahrenssimulation konnte eine Implementierung alternativer Nutzungsarten durchgeführt werden. Wie bereits erwähnt besteht nun neben der simulativen Ermittlung von Dieselkraftstoff die Möglichkeit den Bedarf an Bio-CNG, Wasserstoff und elektrischer Energie simulativ zu bestimmen. Neben der Nutzungsart kann die entsprechende Energiespeicherkapazität variable dem gewählten Energieträger angepasst werden. Somit kann im weiteren Projektverlauf der Einfluss aller genannten Energieträger auf die Arbeitsverrichtung simulativ untersucht werden.

## Arbeitspaket 3: Simulation Angebotsseite

### AP 3.1 Abbildung der Referenzbiogasanlagen

Im Modell sind verschiedene Referenzbiogasanlagen nach zwei unterschiedlichen Methodiken abgebildet. Zum einen erfolgt die Abbildung von Referenzbiogasanlagen durch Anlagen die in der Literatur hinreichend genau dargestellt sind. Zum anderen werden die Biogasanlagen der assoziierten Partner im Modell hinterlegt. Die Beschreibung der literaturbasierten Biogasanlagen erfolgt in SQLite, einem Datenbanksystem, welches auch aus Python heraus einfach zu organisieren und auszulesen ist. Als literaturbasierte Referenzanlagen werden in dem Vorhaben die publizierten Daten des Biogas Messprogrammes III [54] verwendet. Die Nutzung des Datenbanksystems SQLite und klassenbasierte Modellierung in Python ermöglichen es, nach der ersten Implementierung weitere Biogasanlagen einfach hinzuzufügen. Dafür muss für eine neue Biogasanlage lediglich die Datenbank um diese Anlage erweitert werden.

### AP 3.2 Modellierung der unterschiedlichen Aufbereitungsoptionen

Neben der Abbildung der Biogasanlage fand auch eine Analyse verschiedener Aufbereitungsoptionen statt. Ziel dabei war es, die Potentiale derzeit verfügbarer oder sich in der Erprobung befindenden Vorbehandlungsmethoden zu evaluieren. Mechanische Vorbehandlungen sind bereits weitestgehend in Großanlagen etabliert. Die sehr effektiven chemischen Verfahren sind hingegen oft mit hemmenden Nebenprodukten oder einer Verschiebung des pH-Wertes verbunden, welche die Stabilität der anaeroben Vergärung negativ beeinflussen können. Biologische Ansätze haben zweierlei Vorteile gegenüber chemischen Verfahren. Zum einen sind sie weitaus schonender für die mikrobiellen Populationen und deren Milieubedingungen und zum anderen profitieren sie von einer vergleichsweise günstigen Durchführung. Die aktuell wohl vielversprechendste Methode den Methangehalt im Biogas auf > 90 % zu erhöhen ist die Einspeisung von Wasserstoff in den Biogasreaktor. Das optimale stöchiometrische Verhältnis im Biogasreaktor von H<sub>2</sub> zu CO<sub>2</sub> wurde in mehreren Studien als 4:1 bestätigt [55, 56, 57]. Bei Verhältnissen > 4:1 und somit einem geringeren Anteil von CO<sub>2</sub> im Reaktor, steigt der pH-Wert, was wiederum mit prozesshemmenden Effekten verbunden ist, da die methanogene Aktivität abnimmt [55, 56] und die durch CO<sub>2</sub> gebotene Pufferkapazität ebenfalls gesenkt wird [58].

### AP 3.3 Abbildung der Weiterverarbeitungstechnologien

Neben den zuvor aufgezeigten Aufbereitungsoptionen werden im Vorhaben auch folgende Weiterverarbeitungstechnologien betrachtet:

- Biogas-Aufbereitung
- Dampfreformierung
- Fischer-Tropsch Synthese

Bei der Biogas-Aufbereitung werden folgende Prozesse betrachtet:

- Aminwäsche (AW)
- Membranverfahren, mit zwei Membranen (M1 & M2) die eine unterschiedliche Effizienz, Kosten und Methanverluste aufweisen
- Druckwasserwäsche (DWW)
- Druckwechseladsorption (DWA)
- Physikalische Adsorption (PA)

Je nachdem, welche dieser Aufbereitungstechnologien zum Einsatz kommt, ändert sich die Reinheit des Biomethans und es treten unterschiedliche Verluste auf (siehe Tabelle 7).

*Tabelle 7: Methanreinheit und -verluste der unterschiedlichen Aufbereitungstechnologien*

Aufbereitungsmethode	Methanreinheit [%]	Methanverluste [%]
AW	95	0,1
M1	97	0,3
M2	97	0,5
DWW	96	1,0
PA	97	0,5
DWA	97	2,2

Für die Analyse der Weiterverarbeitung des Biogases zu Wasserstoff mithilfe der Dampfreformierung kann nicht auf reale Anlagendaten in Verbindung mit Biogasnutzung zurückgegriffen werden, da diese in der Kombination aktuell nicht vorhanden sind. Die Simulation aus [59] hat unterschiedliche

Dampfreformierungsoptionen auf Basis von Biogas untersucht und verschiedene Wasserstoffträge gefunden (siehe Abbildung 20). Mit den Daten aus dieser Publikation werden die Wasserstoffträge für die unterschiedlichen Biogasanlagentypen berechnet. Die Berechnungen von [59] berücksichtigen bereits eine teilweise Verbrennung von Biogas, um die Wärmebereitstellung für die Dampfreformierung zu gewährleisten. In der Simulation müssen die unterschiedlichen Reinheiten der verschiedenen Biogasanlagen berücksichtigt werden. Falls notwendig, muss die Anlage im Modell um eine Entschwefelungsanlage und eine Filtereinheit ergänzt werden.

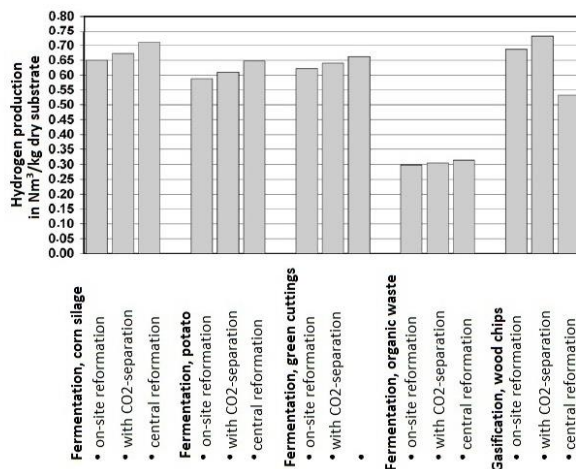


Abbildung 20: Wasserstofftrag abhängig von dem eingesetzten Substrat und der verwendeten Methode [48]

Ebenso wie bei der Dampfreformierung existiert aktuell kein Projekt in dem ein Fischer-Tropsch-Verfahren auf Basis von Biogas durchgeführt wird. Als Datenbasis dient die Publikation von Herz und Reichelt [60]. Im Modell wird das Synthesegas durch die Dampfreformierung, die im vorherigen Abschnitt erläutert wurde, erzeugt. Entgegen der vorherigen Betrachtung muss das Produkt der Dampfreformierung, CO und H<sub>2</sub>, nun nicht nachgelagert weiterverarbeitet werden, sondern dient direkt dem Edukt der Fischer-Tropsch-Synthese. Da der Prozess der Fischer-Tropsch-Synthese endotherm ist wird die benötigte Wärme durch die Verbrennung des Biogases im Modell abgebildet.

### AP 3.4 Implementierung der Wärmebereitstellung

Da die assoziierten Partner des Projektes keine Biogasanlage mit einem Wärmeliefervertrag besitzen, wurde der Wärmebedarf anhand verschiedener Szenarien synthetisch nachgebildet. Basierend auf der Kategorisierung der Siedlungsstruktur sowie Gebäudetypen in [61], wird als imaginäre ländliche Siedlung eine Kombination aus einem Straßen- und Kreuzdorf herangezogen, dass sich durch freistehende Einfamilienhäuser charakterisiert. Als durchschnittlicher Abstand zwischen den Hausanschlüssen werden 22,5 m angegeben, während die Gebäude durchschnittlich 4m von der Straße entfernt sind. Das gewählte Referenzdorf besitzt 135 Einwohner. Repräsentativer Gebäudetyp für Siedlungen im ländlichen Raum sind Einfamilienhäuser in Form von Bungalows [61]. Daher werden in der folgenden Modellierung ausschließlich Einfamilienhäuser berücksichtigt, während Mehrfamilienhäuser vernachlässigt werden. Auch werden Wärmeabnehmer wie Schulen oder Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) außer Betracht genommen. Jedoch wird in der Dimensionierung des Wärmenetzes und Erzeugungsstruktur zwischen zwei energetischen Gebäudezuständen der Einfamilienhäuser unterschieden. Dabei wird basierend auf [62] als Referenzgebäude ein Einfamilienhaus der Baualtersklasse 1958 - 1978 herangezogen, dass als geeignete Altersklasse zur Darstellung des Status Quo im ländlichen Raum eingestuft wird. Dem gegenüber wird ein Einfamilienhaus derselben Baualtersklasse betrachtet, welches nach EH 55 saniert wurde. Dabei wird für die Szenariendarstellung angenommen, dass entweder keines der 50 Einfamilienhäuser saniert wurde oder dass flächendeckend alle Gebäude energetisch modernisiert wurden. Für die Bestimmung der stündlichen Wärmenachfrage der Einfamilienhäuser werden im Modell die parametrisierten Standardlastprofile nach [63] verwendet. Damit ergibt sich folgender jährlicher Wärmebedarf für ein Einfamilienhaus.

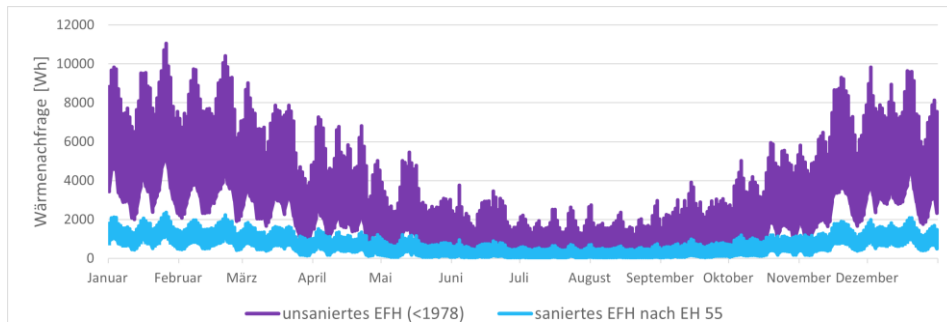


Abbildung 21: Wärmelast eines sanierten und unsanierten Einfamilienhauses

## Arbeitspaket 4: Zusammenführung AP 1-3

### AP 4.1 Schnittstellendefinition

In AP 4 sollen die Ergebnisse aus den AP 1-3 zusammengeführt werden. Um diesen Prozess effektiv zu gestalten, wurden in ersten Austauschrunden die Schnittstellen zwischen den Teilmodellen bzw. Ergebnissen des EVUR und des IMN besprochen. Wesentliche inhaltliche Abstimmungen erfolgten hinsichtlich:

- der erforderlichen Daten selbst
- der jeweiligen Einheiten und Bezugsgrößen
- der zeitlichen Auflösung der Daten

### AP 4.2 Durchführung Simulationen

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist die simulative Ermittlung des Bereitstellungspotentials konventioneller und alternativer Energieträger durch die Biogasanlage und die Untersuchung des Nutzungspotentials dieser Energie in der ruralen Mobilität und für den Einsatz in landwirtschaftlichen Maschinen. Hierfür wird zum einen auf der Angebotsseite das Potential der Biogasanlage zur Energiebereitstellung ermittelt und zum anderen auf der Nachfrageseite der Bedarf durch die rurale Mobilität und die landwirtschaftlichen Maschinen. Begonnen wird mit der Ermittlung des Energiebedarfs landwirtschaftlicher Maschinen.

Als alternativer Energieträger wird aufgrund der größten Serienreife zunächst das Compressed Natural Gas (CNG) verwendet. Basierend auf dem simulativ ermittelten CNG-Bedarf landwirtschaftlicher Maschinen erfolgt aufgrund der Entwicklung eines wasserstoffbetriebenen Prototypentraktors durch Fendt eine Abschätzung des Wasserstoffbedarfs landwirtschaftlicher Maschinen. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wird auf die Ermittlung des Energiebedarfs elektrisch angetriebener Fahrzeuge verzichtet. Infolge der aktuell geringen fahrzeugseitige Energiespeicherkapazität bedarf es für den Betrieb elektrisch angetriebener Landmaschinen umfangreiche Ladekonzepte bzw. Konzepte zu alternativen Energieversorgungsmöglichkeiten. Die Entwicklung und simulative Abbildung dieser würde den Rahmen dieses Projekts übersteigen. An dieser Stelle wird jedoch auf die Projektergebnisse des Forschungsprojekts Energy-4-Agri verwiesen, in dem der Einsatz elektrisch angetriebener Landmaschinen umfangreicher untersucht wurde. [64]

Zur Untersuchung des Einsatzes wasserstoffbetriebener Landmaschinen erfolgt infolge des aktuellen Prototypenstatus dieser Maschinen eine erste Abschätzung des erforderlichen Wasserstoffbedarfs auf Grundlage der zuvor ermittelten CNG-Bedarfe.

In Vorbereitung auf das Arbeitspaket 4.3 Life Cycle Assessment werden sämtliche durchgeführten Simulationen ebenfalls mit dieselbetriebenen Fahrzeugen durchgeführt. Dies dient zusätzlich der Plausibilitätsbewertung der Simulationsergebnisse, kann jedoch auch zur Bedarfsberechnung synthetisch hergestellter Dieselmotorkraftstoffe herangezogen werden (siehe AP 4.3). Aufgrund der besonders energieintensiven Herstellung aus Biogas (siehe AP 3.3) mittels Fischer-Tropsch-Synthese und der daraus resultierenden Verluste wird dieser Ansatz jedoch nicht weiterverfolgt.

### Ermittlung des CNG-Bedarfs der Biogasanlage

Die Ermittlung des CNG-Bedarfs der für den Betrieb der Biogasanlage erforderlichen landwirtschaftlichen Maschinen erfolgt simulativ mit Hilfe der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation. Dazu wird die Biogasanlage in Hillerse mit allen erforderlichen Verfahrensschritten als Referenzanlage abgebildet. Die dafür erforderlichen Schritte werden in folgenden Abschnitten detaillierter erläutert. Begonnen wird mit der Flächenverteilung, gefolgt von der simulativen Abbildung CNG-betriebener landwirtschaftlicher Maschinen.

Anschließend erfolgt die Beschreibung des Vorgehens zur simulativen Ermittlung des CNG-Bedarfs im Jahresverlauf für das Referenzjahr 2023 am Beispiel des Silomaisanbau und weiterer für die Fruchtfolge erforderlicher Nutzpflanzen.

### Flächenverteilung der Referenzbiogasanlage

Da Mais auf Dauer nicht in Selbstfolge angebaut werden kann, müssen auf den Flächen neben der Maispflanze weitere Nutzpflanzen in einer Fruchtfolge angebaut werden. Dies muss bei der simulativen Ermittlung des Energiebedarfs im Rahmen einer Flächenverteilung berücksichtigt werden.

Die für die Gesamtfläche (circa 1000 ha) erstellte und im Folgenden erläuterte Flächenverteilung für den Anbau der unterschiedlichen Nutzpflanzen orientiert sich an der vom Abwasserverband Braunschweig in Eigenleistung bearbeiteten Fläche (circa 150 ha). Die Flächenverteilung wird in Tabelle 8 dargestellt. Unterschieden wird in Mais, Grünroggen und Getreide.

*Tabelle 8: Zugrundeliegende Flächenverteilung zum Betrieb einer Biogasanlage*

Nutzpflanze	Anbaufläche in (ha)
Mais	717
Grünroggen	203
Getreide	80

Mais und Grünroggen (Winterroggen als Ganzpflanzensilage) werden gehäckselt und anschließend siliert. Die Biomasse dient zur Beschickung der Biogasanlage. Unter Getreide wird Winterroggen, Wintergerste und Sommergerste zusammengefasst. Hier wird das Korn geerntet und vermarktet.

Zusätzlich zu den Nutzpflanzen werden auf den Flächen Zwischenfrüchte angebaut. Auf circa 45 % der Nutzfläche wird Senf und auf circa 25 % der Nutzfläche Gras nach der Ernte angebaut.

### Simulative Abbildung CNG-betriebener Maschinen

Um die biomethanbetriebenen landwirtschaftlichen Maschinen simulativ abbilden zu können, werden Annahmen zu Energieverbräuchen und Tankvolumina getroffen. Die getroffenen Annahmen werden in den folgenden Abschnitten detaillierter erläutert.

Da in der Literatur bisher keine umfangreichen Untersuchungen bezüglich des Energiebedarfs biomethanbetriebener Traktoren durchgeführt wurden, wird der Biomethanbedarf aus dem Dieselmotorkraftstoffbedarf äquivalenter Maschinen abgeleitet. Diese Ableitung unterliegt der Annahme, dass die Verbrennungskraftmaschinen in beiden Fahrzeugkonzepten grundsätzlich über einen gleichen bzw. ähnlichen Wirkungsgrad verfügen.

Die Tankvolumina der landwirtschaftlichen Maschinen leiten sich aus dem konzeptionellen Aufbau des bisher am Markt verfügbaren biomethanbetriebenen Traktor T6.180 METHANE POWER von New Holland ab. Dieser wurde vom dieselbetriebenen New Holland T6.180 abgeleitet und unterscheidet sich lediglich durch die Biomethan-Verbrennungskraftmaschine und den CNG-Tank inklusive Range-Extender (Zusatztank) von dem herkömmlichen Fahrzeugkonzept. Die maximale fahrzeugseitige Energiespeicherkapazität beträgt bei dieser Maschine 79 kg CNG. Aus dem Verhältnis von maximalem Dieseltankvolumen zu CNG-Tankkapazität lassen sich ebenfalls für weitere landwirtschaftliche Maschinen die Energiespeicherkapazitäten ableiten (siehe Tabelle 9).

*Tabelle 9: CNG-Speicherkapazität landwirtschaftlicher Maschinen*

Maschine	Bio-CNG Tankvolumen in 2023
Traktor	79 kg
Feldhäcksler	330 kg
Mähdrescher	330 kg

### Entwicklung der Zukunftsszenarien 2030 und 2050 (IMN)

Um den Energiebedarf der landwirtschaftlichen Maschinen zum Betrieb der Biogasanlage in den Jahren 2030 und 2050 abschätzen zu können, muss der Einfluss neuer Technologien auf den Energieverbrauch quantifiziert werden. Eine solche Quantifizierung wurde von Trösken et al. (2020) für unterschiedliche Technologien unter Idealbedingungen (Erzielung des maximalen Energieeinsparpotentials) für das Jahr 2030 durchgeführt. Im Rahmen des hier bearbeiteten Projekts wird diese Quantifizierung als Grundlage der Ermittlung des Energiebedarfs für die Zukunftsszenarien verwendet. Verwendet wird jeweils die Technologie,

die für den betreffenden Verfahrensschritt das höchste Einsparpotential verspricht. Die ausgewählten Technologien und das Einsparpotential sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Quantifizierung von Einsparpotentialen ausgewählter Technologien [53]

Verfahrensschritt	Maschine; Technologie	Einsparpotential
Grundbodenbearbeitung	Traktor; Optimierung der Traktion durch Maßnahmenpaket aus Ballastierung, Bereifung und Reifendruckregelanlage	14,9 %
Stoppelbearbeitung	Ersatz des Grubbers durch Kurzscheibenegge	29,6 %
Aussaat	Traktor; Load-Sensing-Arbeitshydraulik	13,3 %
Pflanzenschutz	Traktor; ECO-Zapfwelle	20,7 %
Düngung	Schleuderstreuer; Arbeitsbreite 6 m erhöht	10,1 %
Ernte – Weizen	Mähdrescher; Automatische Maschinenoptimierung	7,0 %
Ernte – Mais	Feldhäcksler; Automatische Maschinenoptimierung	9,8 %

Da die Energieeinsparpotentiale unter Idealbedingungen ermittelt wurden, werden diese im Rahmen dieses Projektes angepasst. Es wird angenommen, dass 2030 75 % der in Tabelle 10 dargestellten Einsparpotentiale realisiert werden können. Im Zukunftsszenario 2050 können 125 % der Einsparpotentiale realisiert werden. Zusätzlich zu den dargestellten Einsparpotentialen wird für die Zukunftsszenarien ebenfalls die Energiespeicherkapazität und Energieüberladeleistung der Maschinen angepasst. In Zukunftsszenario 2030 erhöht sich die Energiespeicherkapazität um 25 % bzw. in 2050 um 50 % zum Referenzjahr 2023. Die Energieüberladeleistung für CNG wird von 3 kg/min auf 4 kg/min in 2030 und auf 5 kg/min in 2050 erhöht.

### Ergebnisauswertung Referenzjahr 2023 und Zukunftsszenarien 2030 und 2050

Basierend auf den zuvor dargestellten Rahmenbedingungen kann mit Hilfe der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation der Energiebedarf der für den Betrieb der Biogasanlage erforderlichen landwirtschaftlichen Maschinen ermittelt werden. Betrachtet wird zunächst die Umstellung von dieselbetriebenen auf biomethanbetriebene Landmaschinen. Das Vorgehen zur Ermittlung des gesamten CNG-Bedarfs im Jahresverlauf der Biogasanlage wird am Beispiel des Silomaisanbaus beschrieben. Dieses Vorgehen kann identisch auf die weiteren Nutzpflanzen (Winterroggen, Getreide sowie die Zwischenfrüchte) angewendet werden. Die Ergebnisdarstellung folgt im Anschluss.

#### Silomaisanbau

Da die simulative Abbildung der gesamten Maisanbaufläche von circa 700 ha aufgrund der daraus resultierenden hohen Rechenzeit nicht praktikabel ist, wird zunächst eine kleinere Referenzfläche von circa 50 ha (aufgeteilt in fünf Felder mit einer Feldgröße zwischen 2 ha und 18 ha und einer durchschnittlichen Hof-Feld-Entfernung von circa 6,2 km) simulativ untersucht. Basierend auf der Referenzfläche können für die durchgeführten Verfahrensschritte Kennzahlen ermittelt werden, auf Grundlage derer der gesamte Energiebedarf für die insgesamt zu bearbeitenden 700 ha ermittelt werden kann. Das beschriebene Vorgehen wird im Folgenden detaillierter dargestellt. Begonnen wird mit der Darstellung der durchzuführenden Prozessschritte, gefolgt von der Bestimmung der Kennzahlen zur Arbeitszeitbedarfsermittlung und Energiebedarfsermittlung (CNG). Anhand dieser Kennwerte kann im Anschluss der Zeit- und Energiebedarf für die gesamte Maisanbaufläche ermittelt werden.

Zum Silomaisanbau muss im Jahresverlauf eine Vielzahl unterschiedlicher Prozessschritte durchgeführt werden. Die durchzuführenden Verfahrensschritte, eingesetzten Maschinen bzw. Maschinenkombinationen und Startzeitpunkte der Arbeitserledigung sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Erforderliche Verfahrensschritte zum Silomaisanbau

Verfahrensschritt	Maschinenkombination / Maschineneinsatz	Startzeitpunkt
Stoppelsturz	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Kurzscheibenegge (4,5 m)	01.10.2022
Organische Düngung	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe) mit Tankwagen (16.000 l) und Schleppschlauchverteiler (15 m), 3 Standardtraktoren (112-129 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe) mit Gülletransportwagen (18.000 l)	26.03.2023

Gülleearbeitung	Standardtraktor (93-111 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Grubber (3 m)	05.04.2023
Mineralische Düngung 1	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Schleuderstreuer (33 m, 3000l)	11.04.2023
Mineralische Düngung 2	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Schleuderstreuer (33 m, 3000l)	13.04.2023
Grundbodenbearbeitung	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Grubber (3m)	25.04.2023
Aussaat	Standardtraktor (148-167 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Einzelkornsämaschine (8-reihig, 560l)	01.05.2023
Pflanzenschutz	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Pflanzenschutzspritze (27m, 4000l)	25.05.2023
Ernte	Feldhäcksler (Selbstfahrer, 7,5 m), 6 Abfahrgespanne (Standardtraktoren variierender Leistungsklassen kombiniert mit 40 m <sup>3</sup> Häckselguttransportwagen), 3 Standardtraktoren (Standardtraktoren variierender Leistungsklassen, ballastiert, Schiebeschild)	08.09.2023

Basierend auf den dargestellten Rahmenbedingungen können zwei Kennwerte für die unterschiedlichen Verfahrensschritte ermittelt werden. Der erste Kennwert beschreibt die benötigte Arbeitszeit in h/ha und der zweite Kennwert den benötigten CNG-Bedarf in kg/ha, dargestellt in Tabelle 5. Ein Vergleich des spezifischen Zeitbedarfs für die verschiedenen Prozessschritte zeigt, dass die Bearbeitung der Felder mit CNG-betriebenen Landmaschinen zu gleichem oder erhöhtem Zeitbedarf führt. Dieser Anstieg ist auf die zusätzliche Betankung der Maschine aufgrund der geringeren maschinenseitigen Energiespeicherkapazität zurückzuführen. Bei besonders energieintensiven Arbeitsschritten, wie der Bodenbearbeitung, bedeutet dies, dass an einem zehnstündigen Arbeitstag rund 5 Hektar weniger bearbeitet werden können. Der maximale CNG-Bedarf pro Tag fällt bei der Ernte an. Hier benötigt allein die Erntekette während eines achtzehnstündigen Arbeitstages circa 1500 kg CNG.

Tabelle 12: Kennwerte Kraftstoff- und Zeitbedarf für den Silomaisanbau

Verfahrensschritt	Kraftstoffbedarf		Zeitbedarf in h/ha	
	Diesel in l/ha	CNG in kg/ha	Diesel	CNG
Stoppelsturz	5,36	4,18	0,23	0,27
Organische Düngung	10,99	10,46	0,81	1,21
Einarbeitung org. Dünger	7,98	6,06	0,43	0,49
Mineralische Düngung	1,11	0,82	0,08	0,08
Grundbodenbearbeitung	12,43	9,78	0,44	0,57
Aussaat	5,73	4,41	0,28	0,32
Pflanzenschutz	1,91	1,41	0,14	0,17
Ernte	53,54	41,33	0,45	0,51

Bei Multiplikation dieser Kennwerte mit der zu bearbeitenden Maisanbaufläche kann der gesamte Zeit- und Energiebedarf ermittelt werden. An dieser Stelle muss auf eine Besonderheit bezüglich der zu bearbeitenden Maisanbaufläche hingewiesen werden. Da durch den Abwasserverband Braunschweig lediglich 150 ha der 700 ha Maisanbaufläche durch eigene Maschinen bearbeitet werden, richtet sich der Zeitbedarf nach dem Zeitbedarf der für die Bearbeitung der 150 ha erforderlich ist. Es wird angenommen, dass die Landwirte der Region die verbleibenden 550 ha im selben Zeitraum wie der Abwasserverband Braunschweig bearbeiten. Daher wird der gesamte CNG-Bedarf zur Bearbeitung der 700 ha auf die benötigten Tage zur Bearbeitung der 150 ha durch den Abwasserverband umgelegt. Eine weitere Besonderheit stellt die Silomaisernte dar. Diese wird vollständig durch den Abwasserverband Braunschweig durchgeführt. Daher erfolgt die Berechnung des Zeitbedarfs anhand der gesamten Maisanbaufläche von 700 ha. Zusätzlich zu dem Energiebedarf müssen bei der Silomaisernte die Traktoren auf dem Fahrsilo berücksichtigt werden. Da eine Implementierung dieses Arbeitsgangs nicht realisiert werden konnte, wird der Energiebedarf aus gemessenen Kraftstoffdaten dieselbetriebener Fahrzeuge abgeleitet. Dieser liegt bei circa 325 kg CNG am Tag. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Prozessschritte sind in Tabelle 13 dargestellt.

Table 13: Terminplanung Silomaisanbau Referenzjahr 2023

Verfahrensschritt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt	CNG-Bedarf	Zeitbedarf	Arbeitszeit
Stoppelsturz	01.10.2022	04.10.2022	746 kg/Tag	115 h	8 h/Tag
Organische Düngung	26.03.2023	10.04.2023	350 kg/Tag	128 h	8 h/Tag
Gülleearbeitung	05.04.2023	10.04.2023	724 kg/Tag	349 h	8 h/Tag
Mineralische Düngung 1	11.04.2023	11.04.2023	660 kg/Tag	61 h	8 h/Tag
Mineralische Düngung 2	13.04.2023	13.04.2023	660 kg/Tag	61 h	8 h/Tag
Grundbodenbearbeitung	25.04.2023	02.05.2023	877 kg/Tag	408 h	8 h/Tag
Aussaat	01.05.2023	04.05.2023	722 kg/Tag	207 h	8 h/Tag
Pflanzenschutz	25.05.2023	26.05.2023	567 kg/Tag	143 h	8 h/Tag
Ernte	08.09.2023	27.09.2023	1807 kg/Tag	368 h	18 h/Tag

Das vorgestellte Vorgehen kann analog auf den Anbau von Winterroggen (Ganzpflanzensilage), Getreide und Zwischenfrüchte sowie auf die Zukunftsszenarien 2030 und 2050 angewendet werden.

### Winterroggen

Im Folgenden werden die simulativen Ergebnisse für den Winterroggenanbau in Tabelle 14 dargestellt. Dieser wird auf den betrachteten Flächen sowohl für die Biomasseproduktion für die Biogasanlage als Ganzpflanzensilage aber auch als Korn geerntet. Bei letzterem können die Ergebnisse auf andere Getreidesorten, wie beispielweise Wintergerste, übertragen werden. Hier variieren die Zeitpunkte der erforderlichen Verfahrensschritte.

Table 14: Erforderliche Verfahrensschritte für den Anbau von Winterroggen

Verfahrensschritt	Maschinenkombination / Maschineneinsatz	Startzeitpunkt
Grundbodenbearbeitung	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Grubber (3m)	15.09.2022
Aussaat	Standardtraktor (148-167 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Mulchsämaschine (3 m, 1800 l)	30.09.2022
Pflanzenschutz 1	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Pflanzenschutzspritze (27m, 4000l)	15.10.2022
Pflanzenschutz 2	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Pflanzenschutzspritze (27m, 4000l)	15.11.2023
Mineralische Düngung 1	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Schleuderstreuer (33 m, 3000l)	26.02.2023
Mineralische Düngung 2	Standardtraktor (130-147 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), Schleuderstreuer (33 m, 3000l)	28.02.2023
Ernte – Körner	Mähdrescher (Selbstfahrer, 7,5 m), 2 Abfargespanne (Standardtraktor (168-184 kW, Allradantrieb, Stufenloses Getriebe), 2 Dreiseitenkipper (18 t)	20.07.2023
Ernte – GPS	Feldhäcksler (Selbstfahrer, 7,5 m), 6 Abfargespanne (Standardtraktoren variierender Leistungsklassen kombiniert mit 40 m <sup>3</sup> Häckselguttransportwagen), 3 Standardtraktoren (Standardtraktoren variierender Leistungsklassen, ballastiert, Schiebeschild)	25.07.2023

Die dargestellten Ergebnisse für Grundbodenbearbeitung, Pflanzenschutz und mineralische Düngung sind nicht erneut simulativ bestimmt worden und somit identisch zu denen des Silomaisanbaus, sie werden der Vollständigkeit halber dennoch dargestellt. Die quantitativen Ergebnisse für Aussaat, Körnerernte und GPS-Ernte decken sich mit den zuvor dargestellten Ergebnissen des Silomaisanbaus. Auch hier ist zu erkennen, dass sich mit steigendem Energiebedarf eine Erhöhung der benötigten Arbeitszeit bei Umstellung auf CNG-betriebene Maschinen ergibt.

Tabelle 15: Kennwerte Kraftstoff- und Zeitbedarf für den Anbau von Winterroggen

Verfahrensschritt	Kraftstoffbedarf		Zeitbedarf in h/ha	
	Diesel in l/ha	CNG in kg/ha	Diesel	CNG
Grundbodenbearbeitung	12,43	9,78	0,44	0,57
Aussaat	10,43	7,81	0,43	0,50
Pflanzenschutz	1,91	1,41	0,14	0,17
Mineralische Düngung	1,11	0,82	0,08	0,08
Ernte – Körner	28,27	25,03	0,49	0,54
Ernte – GPS	48,42	36,02	0,29	0,38

Das für den Silomaisanbau beschriebene Vorgehen kann analog auf den Getreideanbau übertragen werden. Mit Hilfe der bestimmten Kennwerte und der zu bearbeitenden Fläche kann der Kraftstoffbedarf und der Zeitbedarf für die Bearbeitung errechnet werden. Die Ergebnisse werden in folgender Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Terminplanung für den Anbau von Winterroggen – Referenzjahr 2023

Verfahrensschritt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt	CNG-Bedarf/Tag	Zeitbedarf in h	Arbeitszeit in h/Tag
Grundbodenbearbeitung	15.09.2022	16.09.2022	994	17,03	8
Aussaat	30.09.2022	30.09.2023	794	14,98	8
Pflanzenschutz 1	15.10.2022	15.10.2022	321	5,99	8
Pflanzenschutz 2	15.11.2023	15.11.2022	321	5,99	8
Mineralische Düngung 1	26.02.2023	26.02.2023	187	17,26	8
Mineralische Düngung 2	28.02.2023	26.02.2023	187	17,26	8
Ernte – Körner	20.07.2023	21.07.2023	498	42,97	10
Ernte – GPS	25.07.2023	28.07.2023	1790	77,27	18

### Zwischenfrucht

Neben dem bereits betrachteten Anbau von Silomais, Winterroggen und weiterem Getreide werden auf den Flächen im Verlauf des Jahres weitere Zwischenfrüchte angebaut, durch die ebenfalls ein nicht unerheblicher Bedarf an Kraftstoff für den Betrieb der erforderlichen Maschinen verursacht wird. Aufgrund der bereits durchgeführten umfangreichen Ergebnispräsentation für Silomais und Winterroggen wird an dieser Stelle aufgrund gleicher Simulationsergebnisse für Zwischenfrüchte auf eine erneute Ergebnisdarstellung verzichtet. An dieser Stelle werden im Folgenden die erforderlichen Verfahrensschritte aufgezählt. Kraftstoff- und Zeitbedarf können den Tabellen 5 und 8 entnommen werden.

Für den Anbau der Zwischenfrüchte sind folgende Verfahrensschritte erforderlich:

- Organische Düngung
- Einarbeitung des organischen Düngers
- Grundbodenbearbeitung
- Aussaat.

Werden die Kraftstoffbedarfe aller Verfahrensketten und durchgeführten Arbeiten über das Jahr kumuliert, kann der CNG-Bedarf der Biogasanlage mit einer täglichen Auflösung ausgegeben werden. Auf eine Ergebnisdarstellung der täglichen Auflösung für das gesamte Jahr 2023, 2030 und 2050 wird aus Gründen des Umfangs und der Übersichtlichkeit verzichtet. Stattdessen wird im Folgenden der Gesamtjahresbedarf der drei Szenarien miteinander verglichen.

### Hofnahe Prozesse zum Betrieb der Biogasanlage

Zur Ermittlung des CNG-Bedarfs der für den Betrieb der Biogasanlage erforderlichen hofnahen Prozesse wurde im Rahmen des Projekts der auf der Biogasanlage eingesetzte dieselbetriebene Radlader mit einem Datenlogger ausgestattet und die durchgeführten Arbeiten videodokumentiert. Anhand der geloggtten Daten konnten Kraftstoffbedarfe für unterschiedliche Arbeiten abgeleitet und diese mit Hilfe der in Arbeitspaket 2.4 implementierten Erweiterungen der Landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation genutzt werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen und die Auswertung der geloggtten Daten hat ergeben, dass der

tägliche Kraftstoffbedarf des eingesetzten Radladers so gering ist, dass es durch den alternativen Einsatz einer CNG-betriebenen Maschine zu keinem geänderten Einsatzverhalten infolge täglich erforderlichen zusätzlichen Tankvorgängen kommt und eine simulative Ermittlung detaillierter Kraftstoffbedarfe nicht sinnvoll ist. Infolge dessen wird der tägliche CNG-Bedarf des Radladers aus den Daten des Datenloggers abgeleitet. Dieser beinhaltet das Beschicken der Biogasanlage mit Silage, Verladearbeiten, Räumarbeiten auf dem Betriebsgelände, Reinigungsarbeiten auf dem Betriebsgelände und das Verladen von Gärresten. Der gemittelte tägliche CNG-Bedarf für die genannten Arbeiten liegt bei 25 kg/Tag.

### Kraftstoffbedarf im Jahr 2023 und den Zukunftsszenarien 2030 und 2050

Die Ermittlung des Kraftstoffbedarfs für das Referenzjahr 2023 basiert auf den zuvor dargestellten Simulationsergebnissen. Der Kraftstoffbedarf der Zukunftsszenarien 2030 und 2050 basiert auf den in Tabelle 10 identifizierten Einsparpotentialen. Zur Ermittlung dieser wurden sämtliche Kraftstoffbedarfe der unterschiedlichen Verfahrensschritte entsprechend der identifizierten Einsparpotentiale angepasst und die Simulationen erneut durchgeführt.

Der Vergleich der Referenzjahres 2023 und der Zukunftsszenarien ist in Tabelle 17 dargestellt. Es ist zu sehen, dass durch den Einsatz neuer Technologien der Gesamtbedarf von 109.018 kg CNG um 6,0 % auf 102.446 kg in 2030 und in 2050 um 8,3 % auf 99.992 kg CNG gesenkt werden kann.

*Tabelle 17: CNG-Einsparpotential in den Zukunftsszenarien – Silomaisanbau*

Jahr	CNG-Bedarf in kg	Einsparpotential zu 2023
2023	109.018	0
2030	102.446	6,0 %
2050	99.992	8,3 %

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass diese mit großen Unsicherheiten verbunden sind und diese daher lediglich einen Trend des Kraftstoffverbrauchs infolge zu erwartender Technologienentwicklungen abbilden.

### Abschätzung des BtL-Bedarfs landwirtschaftlicher Erntemaschinen

Die Simulationsergebnisse des Betriebs CNG-betriebener Maschinen zeigen, dass es besonders bei sehr energieintensiven Verfahrensschritten zu starken Steigerungen der benötigten Arbeitszeit infolge zusätzlicher Tankungen kommt. Infolgedessen wird im Folgenden eine Kombination unterschiedlicher Antriebskonzepte für die erforderlichen Ernteketten untersucht. Dieses betrifft die Silomaisernte und Grünroggenernte als Ganzpflanzensilage, in denen die Erntekette aus einem Feldhäcksler und einer variablen Anzahl an Abfahrspannen besteht und die Roggenernte, in der ein Mähdrescher mit einer variablen Anzahl an Abfahrspannen eingesetzt werden. In den Abfahrspannen werden CNG-betriebene Maschinen eingesetzt.

In beiden Ernteketten wird die Erntemaschine mit BtL-Kraftstoff (englisch: biomass to liquid) betankt. Es wird angenommen, dass das Konzept der Erntemaschine unverändert bleibt und die Verbrennungskraftmaschine den Wirkungsgrad beibehält. Der wesentliche Unterschied gegenüber Dieselmotoren besteht in dem geringeren Heizwert, wodurch einer Liter BtL-Kraftstoff äquivalent 0,94 Liter Diesel ist [65].

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen werden in den folgenden zwei Tabelle detaillierter dargestellt. In Tabelle 21 wird zunächst der Einfluss BtL- und CNG-betriebener Ernteketten auf die benötigte Arbeitszeit untersucht. Hier ist in allen drei Ernteketten der gleiche Trend zu erkennen. Der Einsatz BtL-betriebener Erntemaschinen führt zur Reduzierung der benötigten Arbeitszeit.

*Tabelle 18: Ernteketten mit variierendem Energieträger – Zeitbedarfe*

Verfahrensschritt	Zeitbedarf in h/ha		
	Diesel	CNG + BtL	CNG
Silomaisernte	0,45	0,49	0,51
Winterroggenernte – Körner	0,49	0,50	0,54
Winterroggenernten – GPS	0,29	0,30	0,38

Um eine mögliche Abschätzung des benötigten Kraftstoffbedarfs durchführen zu können, werden in Tabelle 22 die Kraftstoffbedarfe pro geerntetem Hektar Silomais bzw. Winterroggen dargestellt.

Table 19: Ernteketten mit variierendem Energieträger – Kraftstoffbedarfe

Verfahrensschritt	Kraftstoffbedarfe		
	Diesel in l/ha	CNG in kg & BtL in l	CNG in kg
Silomaisernte	53,54	28,91 & 19,39	41,33
Winterroggenernte – Körner	28,27	17,01 & 8,83	25,02
Winterroggenernten – GPS	48,42	28,26 & 16,20	36,02

Die Untersuchung des Einsatzes BtL-betriebener Erntemaschinen hat gezeigt, dass mit zunehmender Energiespeicherkapazität alternativ angetriebener Landmaschinen die Konkurrenzfähigkeit zu konventionell angetriebenen Landmaschinen steigt. Bei der Winterroggenernte (Körner) kann die Erhöhung der Arbeitszeit beispielweise von 31 % auf 4 % reduziert werden. Bei der Silomaisernte kann die zusätzlich erforderliche Arbeitszeit auf 9 % reduziert werden.

### Abschätzung des Wasserstoffbedarfs landwirtschaftlicher Maschinen

Um den Wasserstoffbedarf landwirtschaftlicher Maschinen mit Hilfe der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation simulativ ermitteln zu können, wären umfangreiche Informationen über alle Wirkungsgrade der verbauten Komponenten in wasserstoffbetriebenen Maschinen erforderlich. Da diese im Rahmen dieses Projekts nicht vorliegen, wird der Wasserstoffbedarf aus dem Bedarf CNG-Bedarf abgeleitet.

Die Ableitung des Wasserstoffbedarfs basiert auf den von Fendt und der TU Braunschweig veröffentlichten Projektergebnissen des öffentlich geförderten Forschungsprojekts H2Agrar im Artikel „HELIOS – A hydrogen-electric operated tractor system“. In dieser Veröffentlichung wird der von Fendt entwickelte wasserstoffbetriebene Prototypentraktor Fendt Helios vorgestellt. Der Helios ist ein 100 kW elektrisch betriebener Brennstoffzellentraktor. Maschinenseitig sind fünf Wasserstofftanks montiert, in denen 20 kg Wasserstoff bei 700 bar gespeichert werden können. [66]

Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der verbauten Komponenten wird in dem genannten Artikel der Wasserstoffbedarf der Maschine für Feldarbeiten mit 5,5 kg/h abgeschätzt. Unter Berücksichtigung der installierten Tankkapazität ergibt dies eine Einsatzdauer von circa 3,65 h. Wird diese Berechnung analog für die CNG-betriebene Maschinen durchgeführt (Tankkapazität: 79 kg, Kraftstoffbedarf Grubbern: 17,15 kg/h (siehe Tabelle 12)), ergibt dies eine Einsatzdauer von 4,6 h. Da die installierte Energiespeicherkapazität beider Maschinenkonzepte ähnlich ist, wird davon ausgegangen, dass das Einsatzverhalten der Maschinen ebenfalls ähnlich ist. Im Folgenden wird anhand der Heizwerte der CNG-Bedarf der Maschinen (tägliche bzw. jährliche Auflösung) in einen äquivalenten Wasserstoffbedarf umgerechnet.

$$Faktor_{H_2-CNG} = \frac{Heizwert_{CNG}}{Heizwert_{H_2}} = \frac{13,3 \text{ kWh/kgCNG}}{33,33 \text{ kWh/kgH}_2} = 0,4 \frac{\text{kgH}_2}{\text{kgCNG}}$$

Für den simulativ ermittelten CNG-Jahresbedarf von circa 110.000 kg im Jahr 2023 würde dies einen Wasserstoffbedarf von circa 44.000 kg ergeben. Das Maximum des Wasserstoffbedarfs würde bei circa 1100 kg liegen. Dieser Peak tritt Ende September auf, während die Häckselkette zur Silomaisernte und Traktoren zur energieintensiven Bodenbearbeitung im Anschluss an die Ernte parallel betrieben werden.

Die dargestellten Ergebnisse dienen nur als Abschätzung des Wasserstoffbedarfs und können bei Anpassung der Maschinenkonzepte deutlich variieren.

### Energiebereitstellung durch die Biogasanlage

Das Energiebereitstellungspotential durch die Biogasanlage in Hillerse wird nachfolgend beispielhaft für den Zeitraum vom 15. August bis zum 15. September aufgezeigt. Dieser Zeitraum wird aufgrund seiner starken Schwankungen auf der Nachfrageseite ausgewählt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden für die Biogasproduktion nur folgende drei Aufbereitungsoptionen und die jeweiligen sich ergebenden Stromverbräuche (SV) aufgezeigt:

- Aminwäsche (AS)
- Ein Membranverfahren (M1)
- Druckwasserwäsche (PWS).

Die Stromverbräuche ergeben sich aus der notwendigen Verdichtung des Gases für den Betankungsvorgang. Im Model wird die Verdichtung analog zum Vorgehen in [67] mittels einer 3-stufigen Verdichtung mit Zwischenkühlung abgebildet und nachfolgend dargestellt. Die Kühlung erfolgt durch eine Kältemaschine, die ein COP von 2,5 besitzt. Der Isentropenexponent wird als konstant angenommen ( $\kappa_{CH_4} = 1,31$ ). Die spezifische Gaskonstante ist  $R_{CH_4} = 518,4 \frac{J}{kg K}$ .

Die 3 Verdichtungsstufen sind wie folgt definiert:

- 1 bar auf 6,6 bar
- 6,6 bar auf 43 bar
- 43 bar auf 275 bar.

Zwischen jeder Stufe erfolgt eine Kühlung auf  $T_1 = 298 \text{ K}$ . Die einzelnen Verdichtungsstufen werden als isentrope Verdichtung mit isentropen Wirkungsgraden betrachtet. Die spezifische Verdichtungsarbeit je Stufe ist wie folgt definiert:

$$w_{isent,CH_4} = \frac{R_{CH_4} * T_1}{\kappa - 1} * \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

$$w_{real,CH_4} = \frac{w_{isent,CH_4}}{\eta_{isentrop}}$$

Der isentrope Wirkungsgrad wird mit 0,9 angenommen [68]. Um den Energieaufwand der Zwischenkühlung berechnen zu können, muss die Temperatur nach jeder Verdichtungsstufe bekannt sein. Diese Temperatur wird durch ein Stoffmodell [69] bestimmt. Da nun die Temperatur nach der Verdichtung und die Zieltemperatur der Kühlung  $T_1$  bekannt sind, kann mit Hilfe von  $c_p$  auf dem jeweiligen Druckniveau die spezifische Kühlenergie berechnet werden:

$$q_i = c_p(p_i) * \Delta T$$

Der sich aus der Kühlung ergebene Strombedarf kann mit Hilfe des COPs der Kältemaschine bestimmt werden:

$$w_q = \frac{q_1 + q_2 + q_3}{COP}$$

Neben dem Strombedarf für die Verdichtung des Gases existiert auch ein Strombedarf für die unterschiedlichen Aufbereitungstechnologien. Diese Bedarfe werden durch die Modelle der unterschiedlichen Technologien berechnet, weshalb schlussendlich jede Technologie mit anschließender Gasverdichtung unterschiedliche Strombedarfe generiert. Die in der nachfolgenden Tabelle gezeigten Strombedarfe beinhalten sowohl die 3-stufige Gasverdichtung inklusive Zwischenkühlung als auch die Strombedarfe der Technologie selbst. Bei den drei hier aufgezeigten Technologien generiert das Membranverfahren den höchsten und die Aminwäsche den geringsten Strombedarf.

*Tabelle 19: Strombedarf der unterschiedlichen Aufbereitungstechnologien*

Tag	Biogas [m <sup>3</sup> /d]	AS [kg/d]	SV AS [kWh/d]	M1 [kg/d]	SV M1 [kWh/d]	PWS [kg/d]	SV PWS [kWh/d]
15.08	21777	8080	4982	7897	9051	7923	7972
16.08	15945	5916	3647	5782	6627	5801	5837
17.08	19604	7273	4485	7109	8148	7133	7177
18.08	18374	6817	4203	6663	7637	6685	6726
19.08	20846	7734	4769	7559	8664	7584	7631
20.08	22513	8352	5150	8164	9357	8191	8241
21.08	23754	8813	5434	8614	9873	8643	8696
22.08	24814	9206	5676	8998	10313	9028	9084
23.08	24067	8929	5505	8727	10003	8756	8810
24.08	21701	8051	4964	7870	9020	7896	7944
25.08	24582	9120	5623	8914	10217	8944	8999
26.08	26505	9833	6063	9611	11016	9643	9703
27.08	23317	8651	5334	8456	9691	8484	8536
28.08	28403	10538	6497	10300	11805	10334	10398
29.08	26965	10004	6168	9778	11207	9811	9871
30.08	24601	9127	5628	8921	10225	8951	9006

31.08	25081	9305	5737	9095	10424	9125	9181
01.09	26234	9733	6001	9513	10903	9545	9603
02.09	26243	9736	6003	9517	10907	9548	9607
03.09	27550	10221	6302	9991	11451	10024	10085
04.09	26086	9678	5967	9460	10842	9491	9549
05.09	26201	9721	5994	9501	10890	9533	9591
06.09	22227	8246	5085	8060	9238	8087	8137
07.09	23597	8755	5398	8557	9808	8585	8638
08.09	26161	9706	5985	9487	10873	9518	9577
09.09	26029	9657	5954	9439	10818	9470	9528
10.09	29904	11095	6841	10844	12429	10880	10947
11.09	20624	7652	4718	7479	8572	7504	7550
12.09	24393	9050	5580	8846	10138	8875	8930
13.09	24104	8943	5514	8741	10018	8770	8824
14.09	24983	9269	5715	9060	10384	9090	9146
15.09	21011	7795	4806	7619	8733	7645	7692

Die durchschnittliche tägliche Strombereitstellung des kleinen ortsnahen BHKWs der Biogasanlage Hillerse unter aktuellen Betriebsbedingungen betrug in dem betrachteten Zeitraum  $9983 \frac{kWh}{d}$ . Wird dieser Wert mit den Strombedarfen der Aufbereitungstechnologien verglichen wird ersichtlich, dass die CNG-Bereitstellung mittels Aminverfahren mehr als die Hälfte des eigentlich generierten Stroms benötigen würde. Währenddessen benötigt die CNG-Bereitstellung mit Aufbereitung durch ein Membranverfahren die gesamte Strommenge.

### Vergleich der Angebots- und Nachfrageseite

Schließlich wird der CNG-Bedarf bzw. Wasserstoffbedarf der landwirtschaftlichen Maschinen und der ländlichen Mobilität mit der potenziellen Bio-CNG-Produktion bzw. der Wasserstoffproduktion der Biogasanlage verglichen. Dieser Vergleich wird in zwei Zeiträumen durchgeführt. Der erste Zeitraum im Januar ist durch einen geringen Energiebedarf der Landmaschinen gekennzeichnet, der durch die Fütterung der Biogasanlage verursacht wird. Der zweite Zeitraum im September ist durch einen hohen Energiebedarf der landwirtschaftlichen Maschinen gekennzeichnet, der durch die Silomaisenernte verursacht wird. Die ländliche Mobilitätsnachfrage wird aus der NUTS-3-Region DE914 abgeleitet. Die Ergebnisse sind in den folgenden zwei Abbildungen dargestellt.

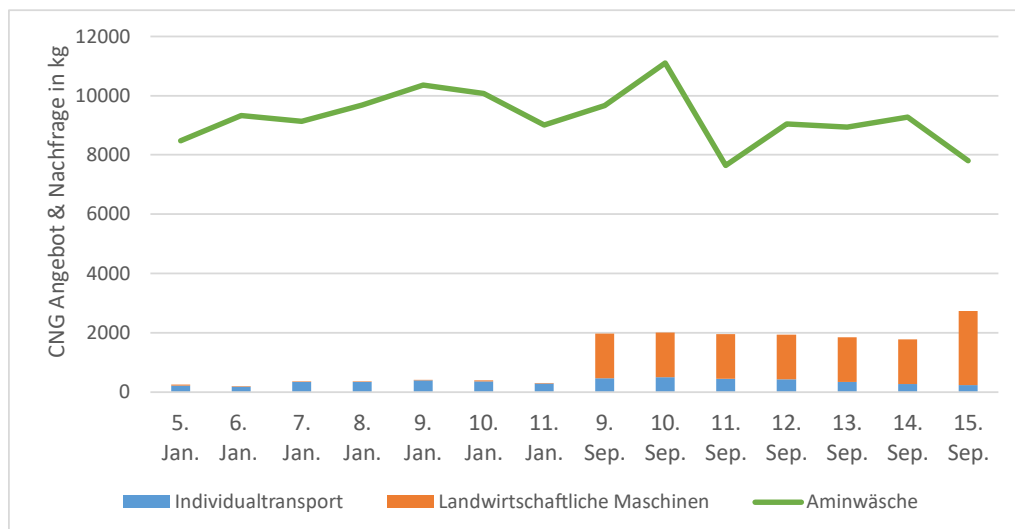


Abbildung 22: Bio-CNG Angebot und Nachfrage in Januar und September 2023

Das Bio-CNG-Angebot wird aus der realen Biogasproduktion für Januar und September 2022 abgeleitet. Die durchschnittliche Menge an Bio-CNG, die in den betrachteten Zeiträumen produziert wird, beträgt etwa

9250 kg. Das Bio-CNG wird mit der Aminwäsche-Aufbereitungsmethode produziert, die zusammen mit der Verdichtung zu einem durchschnittlichen Energiebedarf von etwa 5790 kWh pro Tag im Januar und 5870 kWh pro Tag im September führt. Dieser Bedarf ist vergleichbar mit 2694 m<sup>3</sup> bzw. 2730 m<sup>3</sup> Biogas pro Tag, mit einer durchschnittlichen Biogaserzeugung von etwa 25320 m<sup>3</sup> pro Tag im Januar und 25670 m<sup>3</sup> pro Tag im September. Die Schwankungen der CNG-Nachfrage für die ländliche Mobilität sind relativ gering und lassen sich durch die Wochenenden und die Jahreszeit erklären. Im Winter ist die Nachfrage mit 140 kg pro Tag am geringsten, während sie im Sommer mit 550 kg pro Tag am höchsten ist. Die Schwankungen des CNG-Bedarfs von Landmaschinen sind dagegen deutlich größer. So werden im Januar durchschnittlich 25 kg CNG pro Tag für die Versorgung der Biogasanlage benötigt, während im September die an der Ernte beteiligten Maschinen (Feldhäcksler, Traktoren mit Häckselguttransportwagen und Traktoren zum Verdichten des Silos) durchschnittlich 1650 kg pro Tag benötigen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bio-CNG-Produktion der Biogasanlage während des Jahres deutlich höher ist als der Bedarf an ländlicher Mobilität im Einzugsgebiet und an landwirtschaftlichen Maschinen, die zum Betrieb der Biogasanlage benötigt werden.

Im Folgenden wird zusätzlich die Angebot- und Nachfrageseite für den Energieträger Wasserstoff betrachtet. Anders als bei der CNG-Betrachtung kann die Bedarfsermittlung der ruralen Mobilität infolge der zum aktuellen Zeitpunkt nicht bzw. kaum vorhandenen Verbreitung von wasserstoffbetriebenen PKW ausschließlich für das Zukunftsszenario 2050 ermittelt werden. Die Ergebnisse der Angebotsseite durch die Biogasanlage als dezentraler Energieversorger und der Nachfrageseite, resultierend aus den für den Betrieb der Biogasanlage erforderlichen landwirtschaftlichen Maschinen und der ruralen Mobilität, sind in Abbildung 23 abgebildet.

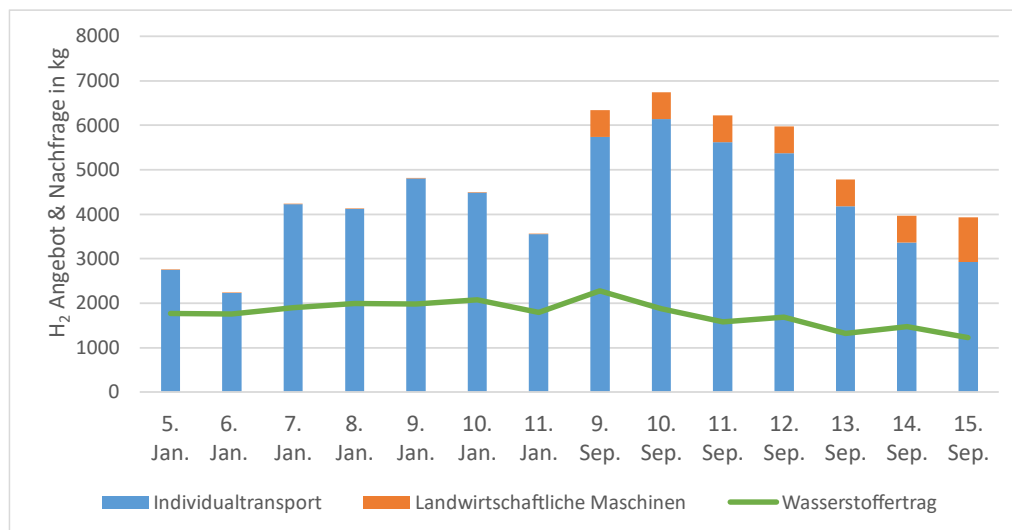


Abbildung 23: Wasserstoff Angebot und Nachfrage in Januar und September 2050

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, übersteigt der Wasserstoffverbrauch 2050 dem Erzeugungspotential der Biogasanlage. Der Modellberechnung nach kann die Biogasanlage im Januar durchschnittlich 1965 kg und im September ca. 1700 kg Wasserstoff pro Tag liefern. Allein der durchschnittliche Wasserstoffverbrauch über alle betrachteten Szenarien im Jahr 2050 für die ländliche Mobilität in der Region DE 914 beläuft sich auf 3900 kg im Januar und 4760 kg im September. Das qualitative Verhalten des Wasserstoffbedarfs der landwirtschaftlichen Maschinen ist identisch zum bereits vorgestellten CNG-Bedarf. Der maximale Wasserstoffbedarf pro Tag liegt bei circa 1000 kg und tritt während der Ernte im September auf.

Anders als bei der Bio-CNG-Bereitstellung der Biogasanlage übersteigt bei der Wasserstoffbereitstellung die Nachfrageseite die Angebotsseite. Dies ist zum einen auf die energieintensive Wasserstoffaufbereitung und dem daraus resultierenden reduzierten Wasserstoffangebot und zum anderen auf den starken Anstieg der Nachfrageseite durch die rurale Mobilität zurückzuführen.

### AP 4.3 Life Cycle Assessment

Die umfassende Bewertung der Umweltauswirkungen des Biogasanlagensystems liefert entscheidende Erkenntnisse über sein Potenzial in der Energiewende. Die Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine Methodik zur Bewertung der Umwelteinwirkung eines Produktsystems über seinen Lebenszyklus. Derzeit werden für LCA-Studien überwiegend teure, kommerziell erhältliche Softwareprogramme eingesetzt. Mit der Popularität dieser Methodik wurden in den letzten Jahren jedoch auch mehrere frei verfügbare Softwaretools entwickelt. Unter den frei verfügbaren LCA-Lösungen ist openLCA aufgrund seiner umfassenden Funktionalitäten die vielversprechendste Option. Es war geplant, im Vorhaben eine dieser frei verfügbaren Lösungen zu nutzen. Während der eingehenden Recherche zu diesem Arbeitspaket, tauchten in der Literatur immer wieder

Diskrepanzen zwischen den unterschiedlichen frei verfügbaren Softwareanwendungen, mit teilweise stark abweichenden Ergebnissen zueinander, auf. Es wurde folglich untersucht, ob eine freie LCA-Anwendung ähnliche Ergebnisse wie eine kommerzielle Software generieren kann, indem eine LCA für ein identisches Biogasanlagensystem unter Verwendung von openLCA und GaBi durchgeführt wurde. Die Education-Version von GaBi ist für viele Studenten und Doktoranden frei erhältlich, besitzt jedoch nur eine limitierte Bibliothek. Die LCA bewertete ein typisches KWK-Biogasanlagensystem basierend auf der Vergärung von Energiepflanzen und Tierdung. Die Ergebnisse zeigen, dass GaBi und openLCA in vielen Wirkungskategorien erhebliche Diskrepanzen erzeugten. Die aus GaBi und openLCA berechneten Auswirkungen des Treibhauspotenzials lieferten die entgegengesetzte Tendenz, was einen bemerkenswerten Einfluss auf die Interpretation der charakterisierten Ergebnisse bedeutet. Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial besaßen eine geringere Sensitivität gegenüber der Auswahl des LCA-Tools. Nach der Untersuchung der Ursachen für die Abweichungen wurde openLCA aufgrund seiner schlechten Datenbankqualität und des häufigen Fehlens von Charakterisierungsfaktoren für entscheidende Elementarströmungen nicht als ideale kommerzielle LCA-Software für den betrachteten Einsatzzweck angesehen. Aber auch die Education-Version von GaBi lieferte aufgrund der limitierten Bibliothek keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da einzelne Teilbereiche aufgrund der Datenlage nicht betrachtet werden konnten. Daher müssten GaBi-Nutzer externe Datensätze erwerben, wenn sie LCA-Studien für Biogasanlagen durchführen wollen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass wissenschaftlich zufriedenstellende Ergebnisse für die Betrachtung von Biogasanlagen aktuell nicht mit frei verfügbaren Anwendungen möglich sind. Aus diesem Grund werden für die Berechnung Literaturwerte und Richtlinien herangezogen, die nachfolgend dargestellt werden sollen.

RED II ist eine Richtlinie der Europäischen Union, die sich auf die Erneuerbare Energien konzentriert. Es handelt sich um eine Aktualisierung der ursprünglichen RED Richtlinie und wurde 2018 verabschiedet. Sowohl RED also auch RED II legen Emissionsreduktionsziele für einzelne Sektoren fest. Bis 2030 soll der Anteil Erneuerbarer Energien am Energieverbrauch auf mindestens 32 % gesteigert werden. Für den Verkehrssektor wurden ein Mindestanteil von 14 % bis 2030 festgelegt. Fortschrittliche Biokraftstoffe, etwa aus tierischem Mist und Abfall, werden explizit mit Mindestquoten gefördert. Dadurch soll auch eine Konkurrenz zur Produktion von Biokraftstoffen aus Rohstoffen vermieden werden. Für die Produktion von Biokraftstoffen werden Nachhaltigkeitskriterien eingeführt. Diese sollen sicherstellen, dass Biokraftstoffe umweltfreundlich sind und soziale Standards einhalten. Darüber hinaus gibt es explizite Vorgaben zur Landnutzung und zur Vermeidung indirekter Landnutzungsänderungen.

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) enthält nähere Festlegungen zur Umsetzung und zu den Mechanismen der Emissionsminderung. Das BImSchG ist jedoch weitaus umfassender und zielt darauf ab, Menschen, Tiere und die Umwelt insgesamt vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen bzw. diese zu minimieren. Das BImSchG legt die erforderlichen Genehmigungsverfahren und technischen Anforderungen für Betreiber von Anlagen fest, die potenziell schädliche Emissionen verursachen können. Dies gilt beispielsweise für Betreiber von CNG- oder LNG-Tankstellen. Für Biomethanproduzenten und -händler ist § 37 a-h von großer Bedeutung, da er die Quoten für Biokraftstoffe und Emissionsminderungen festlegt. Deutschland hat sich dadurch besonders ehrgeizige Ziele gesetzt. RED II verlangt eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>eq)-Emissionen um 14 %, Deutschland strebt jedoch eine Reduzierung um 25 % bis 2030 an. Dabei handelt es sich tatsächlich um eine Reduzierung der spezifischen Emissionen pro Energieeinheit, die im Verkehrssektor eingesetzt wird. Der Referenzwert beträgt 94,1 g CO<sub>2</sub>eq pro MJ und basiert auf den Emissionen von Benzin und Diesel. Bis 2030 sollen die Emissionen daher auf etwa 71 g CO<sub>2</sub>eq pro MJ Energieeinsatz im Verkehr sinken. Für bestimmte Biokraftstoffe gibt es zudem Mindest- und Höchstquoten, siehe Abbildung 24. Biokraftstoffe aus Pflanzen, die auch zur Herstellung von Tierfutter oder Nahrungsmitteln verwendet werden können, sind für den gesamten Zeitraum bis 2030 auf 4,4 % (Energieanteil) begrenzt. Darüber hinaus gibt es eine Obergrenze für Biokraftstoffe aus Altspeiseölen und tierischen Fetten (RED II, Anhang IX, B), die für den gesamten Zeitraum bis 2030 auf 1,9 % festgelegt ist. Um dieses Risiko indirekter Landnutzungsänderungen (ILUC) zu minimieren, wurde Palmöl von der Treibhausgasquote ausgenommen. Die fortschrittliche Biokraftstoffquote in RED II in Anhang IX, A ist für die Biomethanversorgung am Relevantesten. Die höchsten Treibhausgaseinsparungen können durch den Einsatz von Abfallstoffen und Tiermist erzielt werden, da diese ohne den Einsatz in Biogasanlagen ihren Zersetzungsprozess durchlaufen hätten und dabei alle Zersetzungsgase, wie z. B. Methan, in die Atmosphäre freisetzen würden. Für diese Mengen gibt es eine Mindestquote. Ist diese erfüllt, können die zusätzlichen Mengen zur Doppelzählung (double counting - DC) herangezogen werden. DC muss extra beantragt werden und im Falle einer Genehmigung werden diese Mengen auch für das nächste Jahr gutgeschrieben. DC ergibt sich somit aus der Anrechnung über zwei Jahre. Explizit zugelassen sind jedoch nur Biokraftstoffe, die deutlich höhere THG-Reduktionen als herkömmliche Biokraftstoffe erzielen und deren Produktion nicht im Widerspruch zu ILUC steht, wie etwa Gülle und Mist.

Quota & options		Specification		2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
GHG quota (CO2e reduction)	Minimum CO2e reduction	7%	8%	9.25%	10.5%	12%	14.5%	17.5%	21%	25%		
Advanced biofuels (RED2 Annex IX, A)	Minimum energetic share, double counting for quantities above the minimum share	0.2%	0.3%	0.4%	0.7%	1.0%			1.7%			2.6%
Conventional biofuels from feedstocks	Maximum energetic share	4.4%										
Biofuels from used cooking oils (UCO) and animal fats (RED2 Annex IX, B)	Maximum energetic share	1.9%										
Palm oil	Forbidden from 2023 on	0.9%		0.0%								
UER measures	Upstream emission reduction	Applicable until 2026										

Abbildung 24: Mindest- und Höchstquoten im Verkehrssektor [70]

Jeder Verteiler fossiler Brennstoffe unterliegt der oben gezeigten Quote. Die Erfüllung des Kontingents kann durch den Händler selbst erfolgen oder durch den Einkauf der benötigten Mengen. Das physische Produkt und das zugehörige Treibhausgaszertifikat können somit separat gehandelt werden. Durch diese Quotenerfüllung durch Dritte ist der Markt für THG-Quoten entstanden, der eine wichtige Rolle bei der Finanzierung der deutschen Biokraftstoffproduktion spielt [71]. Aber auch Dritte aus dem Ausland können die Quote erfüllen, indem sie Biokraftstoffe nach Deutschland exportieren und hier vermarkten. Dabei ist die gegenseitige Anerkennung von Zertifizierungsstellen und Standards relevant. Der Quotenhandel wird durch die deutschen Zollbehörden überwacht [72].

Nach dem oben dargestellten Verfahren mit den minimalen CO<sub>2</sub> Einsparquoten wurde das Einsparpotenzial für jede hier betrachtete Biogasanlage berechnet. Die in der Tabelle 20 gezeigten Biogasanlagen mit Nummerierung beziehen sich auf Biogasanlagen aus dem Biogasmessprogramm III mit der gleichen Kennzeichnung. Einfluss auf das Einsparpotential hat neben den Substraten vor allem die Bauweise und Ausstattung der Biogasanlage. Entscheidend ist hierbei, ob es sich um eine offene oder geschlossene Bauweise handelt und ob die Biogasanlage eine Nachbrennung besitzt.

Tabelle 20: CO<sub>2</sub> Einsparungen der verschiedenen betrachteten Biogasanlagen

Biogasanlagen	Gülleanteil in %	Festmistanteil in %	Getreide-Grasanteil in %	CO <sub>2</sub> -Einsparungen in gCO <sub>2</sub> -eq. / MJ
1	0,00	0,00	100,00	-56,57
3	15,00	0,23	84,76	-21,36
4	17,83	0,00	82,17	-22,67
6	0,00	0,00	100,00	-56,57
8	7,68	0,00	92,32	-66,56
9	20,73	4,42	74,85	-84,19
10	16,18	3,25	80,57	-78,09
11	0,00	3,91	96,09	-57,16
14	30,67	5,55	63,77	-52,27
16	21,62	21,16	57,23	-53,43
18	8,80	12,80	78,40	-51,62
22	0,00	21,12	78,89	-25,82
27	0,00	4,95	95,04	-16,45
28	0,00	17,96	82,04	-59,27
29	22,30	0,00	77,70	-24,95
31	0,00	19,10	80,90	-24,65
33	11,02	0,07	88,91	-40,22
35	0,00	0,00	100,00	-56,57
37	0,00	0,00	100,00	-34,57

40	26,13	0,00	73,88	-47,90
42	48,38	0,00	51,62	-119,46
43	36,23	0,00	63,78	-53,05
47	11,09	4,93	83,98	-71,73
48	13,35	4,99	81,66	-23,27
51	0,00	19,19	80,81	-59,45
52	8,92	0,00	91,08	-47,16
54	9,30	0,92	89,79	-39,65
56	10,40	0,00	89,60	-70,09
57	15,74	41,87	42,39	-45,89
59	52,95	0,00	47,05	-104,41
Assoz. Partner 1	89,82	4,79	5,39	-82,15
Assoz. Partner 2	0,00	0,00	100,00	-34,57

Um das Emissionsreduktionspotential Bio-CNG-betriebener Landmaschinen bewerten zu können, wird am Beispiel der Biogasanlage in Hillerse das CO<sub>2</sub>-Äquivalent für den Betrieb der erforderlichen dieselbetriebenen und CNG-betriebenen Landmaschinen bestimmt und miteinander verglichen. Die Ermittlung des kumulierten Jahresbedarfs wurde bereits umfangreich erläutert.

### Einsparpotential von THG-Emissionen landwirtschaftlicher Maschinen

Basierend auf dem Jahresbedarf von Bio-CNG und Diesel können mit Hilfe eines Treibhausgasemissionsfaktors die THG-Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalente ermittelt werden. Der Treibhausgasemissionsfaktor für Diesel wird dem Berechnungstool von Treibhausgasemission verschiedener Energieträger des Umweltbundesamts [73] und dem Berechnungstool CO<sub>2</sub>-Äquivalenter-Emissionen des Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz [74] entnommen. Der THG-Emissionsfaktor für das durch die Biogasanlage bereitgestellte CNG wird einer Veröffentlichung des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle und dem Umweltbundesamt entnommen [75-77]. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass in den aufgeführten Quellen mehrere CO<sub>2</sub>-Äquivalente angeführt werden. Hier ist darauf zu achten, dass die Systemgrenzen korrekt gewählt werden. In der folgenden Betrachtung werden die Vorketten zur Bereitstellung des Kraftstoffs berücksichtigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird für das CO<sub>2</sub>-Äquivalent von Bio-CNG 0,152 kgCO<sub>2</sub>/kWh gewählt. In Kombination mit dem Heizwert von Bio-CNG von 13,3 kWh/kg ergibt sich der in Tabelle 21 angegebene THG-Emissionsfaktor.

Tabelle 21: THG-Emission CNG- und dieselbetriebener Landmaschinen

Energieträger	Jahresbedarf	THG-Emissionsfaktor	THG-Emission in CO <sub>2</sub> -Äquivalent
Diesel	128811 l	3,13 kgCO <sub>2</sub> /l	403693 kg
Bio-CNG	109018 kg	2,02 kgCO <sub>2</sub> /kg	220216 kg

Ein Vergleich der THG-Emissionen zeigt, dass durch die Umstellung der zum Betrieb der Biogasanlage erforderlichen landwirtschaftlichen Maschinen von Diesel auf durch die Biogasanlage produziertes CNG 183,477 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente eingespart werden können. Das Einsparpotential, gemessen an dem CO<sub>2</sub>-Äquivalent, liegt somit bei circa 46 %.

Zur Beurteilung des THG-Emissionsreduktionspotentials wird zunächst der THG-Emissionsfaktor für Wasserstoff ermittelt. Dieser schwankt stark in Abhängigkeit des verwendeten Produktionsverfahrens und der eingesetzten Energie (fossil oder regenerativ). Im Kontext der Biogasanlage handelt es sich um Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen, genauer um türkisen Wasserstoff, der mittels Methanpyrolyse (thermische Aufspaltung von Methan in Wasserstoff und Kohlenstoff) in Wasserstoff und festen Kohlenstoff aufgespalten wird. Bei Betrachtung sämtlicher Vorketten der Wasserstoffproduktion aus Biomasse (hier Mais) resultiert dies in einem negativen CO<sub>2</sub>-Äquivalent [78]. Vereinfachend wird das CO<sub>2</sub>-Äquivalent in weiteren Quellen als 0 kgCO<sub>2</sub>/kWh angegeben [79]. Infolgedessen könnten die Emissionen, verursacht durch dieselbetriebene Fahrzeuge, durch den Einsatz wasserstoffbetriebener Landmaschinen vollständig eingespart werden.

#### AP 4.4 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Da die Bearbeitungszeiträume in der Landwirtschaft häufig durch die Vegetationsphasen der Pflanzen und äußerliche Witterungseinflüsse zeitlich stark begrenzt sind, ist die Schlagkraft der eingesetzten landwirtschaftlichen Maschinen von zentraler Bedeutung. Um die Schlagkraft alternativer Antriebskonzepte bewerten zu können, wird im Folgenden ein Vergleich zwischen der Schlagkraft biomethanbetriebener Landmaschinen (CNG) und dieselbetriebener Fahrzeuge am Beispiel des Silomaisanbaus durchgeführt.

Wie in den zuvor dargestellten Untersuchungen wird für die im Silomaisanbau relevanten Verfahrensschritte die Bearbeitung von circa 50 ha auf fünf Feldern mit variierender Feldgröße und -geometrie und einer durchschnittlichen Hof-Feld-Entfernung von 6,2 km durchgeführt. Das Ergebnis des Arbeitszeitvergleichs zwischen dieselbetriebenen und biomethanbetriebenen Fahrzeugen wird in Tabelle 22 dargestellt. Der Arbeitszeitbedarf in h bezieht sich dabei auf die kumulierte Arbeitszeit aller an der Arbeitsverrichtung beteiligten Fahrzeuge.

*Tabelle 22: Vergleich des Arbeitszeitbedarfs von diesel- und biomethanbetriebenen Maschinen*

Verfahrensschritt	Arbeitszeitbedarf (Diesel)	Arbeitszeitbedarf (CNG)	Arbeitszeitsteigerung durch CNG-betriebene Maschinen
Stoppelsturz	11,64 h	13,98 h	19 %
Organische Düngung	39,86 h	46,59 h	17 %
Gülleearbeitung	21,86 h	24,97 h	14 %
Mineralische Düngung	4,16 h	5,22 h	25 %
Grundbodenbearbeitung	22,75 h	29,19 h	28 %
Aussaat	14,15 h	16,23 h	15 %
Pflanzenschutz	7,41 h	10,15 h	37 %
Ernte	121,38 h	168,35 h	39 %

Es ist zu erkennen, dass der Einsatz biomethanbetriebener Fahrzeuge in allen untersuchten Verfahrensschritten zu einer Erhöhung der Arbeitszeit führt. Diese Erhöhung liegt zwischen 14 % bei der Gülleearbeitung und 39 % bei der Silomaisernte. Der starke Anstieg der benötigten Arbeitszeit bei der Silomaisernte ist auf die Wartezeiten des Feldhäckslers bzw. der Abfahrgespanne bei Tankvorgängen des Feldhäckslers bzw. der Abfahrgespanne zurückzuführen. Dieser Anstieg könnte durch den zusätzlichen Einsatz weiterer Abfahrgespanne abgemildert werden.

Weitere in AP 4.2 durchgeführte Untersuchungen alternativer Energieträger (BtL) haben gezeigt, dass der Anstieg der erforderlichen Arbeitszeit mit steigender maschinenseitiger Energiespeicherkapazität reduziert werden kann. Diesbezüglich wurden zu Projektende weitere Entwicklungen seitens CNG-betriebener Traktoren durch New Holland auf der Agritechnica veröffentlicht. Infolge der Projektfortschritts können diese Neuerungen nicht mehr in die durchgeführten Simulationen integriert werden, da dies eine vollständige, erneute Wiederholung aller Simulationen bedeuten würde.

Dennoch wird der energieintensivste Verfahrensschritt, die Silomaisernte, erneut simulativ betrachtet und der Einfluss der vorgestellten Technologieentwicklung auf die Arbeitsverrichtung untersucht. Dazu werden aus den veröffentlichten Informationen und denen auf der Agritechnica erlangten Informationen folgende Annahmen abgeleitet:

- Tankkapazität Traktor: 219 kg CNG
- Tankkapazität Feldhäcksler: 750 kg CNG
- Überladeleistung CNG Traktor: 25 kg/min
- Überladeleistung CNG Feldhäcksler: 40 kg/min.

Basierend auf den getroffenen Annahmen können die in Tabelle 23 dargestellten Simulationsergebnisse erzielt werden. Hier ist ein deutlicher Rückgang der benötigten Arbeitszeit der CNG-betriebenen Häckselkette zu erkennen. Durch die angepassten Annahmen kann die Erhöhung der Arbeitszeit von 39 % auf 9 % gegenüber der dieselbetriebenen Häckselkette reduziert werden.

*Tabelle 23 Darstellung des Einflusses neuer Technologieentwicklungen auf die CNG-betriebene Silomaisernte*

Verfahrensschritt	Arbeitszeitbedarf (Diesel)	Arbeitszeitbedarf (CNG)	Arbeitszeitsteigerung durch CNG-betriebene Maschinen
Silomaisernte	121,38 h	131,89 h	9 %

Auf Basis der durchgeführten Simulationen lassen sich einige Handlungsempfehlungen für den Einsatz alternativer Antriebskonzepte in landwirtschaftlichen Maschinen ableiten. Diese werden im Folgenden aufgezählt:

- Maschinen mit geringer maschinenseitiger Energiespeicherkapazität sollten hofnah und oder bei Verfahrensschritten mit geringem Energiebedarf eingesetzt werden.
- Bei besonders energieintensiven Verfahrensschritten sollten Maschinen mit besonders hoher maschinenseitiger Energiespeicherkapazität eingesetzt werden.
- Zur Reduzierung des zusätzlichen Zeitbedarfs durch den Einsatz alternativer Antriebskonzepte könnten zusätzlich Tankkonzepte, wie beispielsweise die Feldbetankung durch einen Tankwagen oder feldnahe Tankcontainer, in Betracht gezogen werden.

## **Arbeitspaket 5: Einbeziehung des überregionalen Verkehrs**

### **AP 5.1 Ableiten der Überproduktion**

Wie Abbildung 22 zeigt, existiert bei der CNG Produktion am Standort Hillerse eine erhebliche Überproduktion. Die durchschnittliche Produktionsrate liegt bei ca. 8500 kg täglich und steht einem jährlichen Verbrauch von ca. 132250 kg für den Individualverkehr gegenüber. Dies ist jedoch nicht zu pauschalisieren und stellt sich für jede Anlagen und Regionskombination anders dar. Ebenso besitzt die Kraftstoffart einen entscheidenden Einfluss auf das Vorhandensein von Überproduktionen. In der betrachteten Region (DE 914) sind im Referenzjahr Diesel- und Bezinverbäuche von 12.531.645 Liter und 78.388.651 Liter allein für den Individualverkehr zu verzeichnen. Auf Grund der hohen Verbräuche ergeben sich für diese Kraftstoffarten keine Überproduktionen. Die Fischer-Tropsch-Synthese erzeugt ein breites Spektrum an Produkten, die zu Rohbenzin oder Fischer-Tropsch-Diesel weiterverarbeitet werden können. Sie stellt jedoch auch den Weiterverarbeitungspfad mit den meisten Umwandlungsverlusten dar und generiert folglich den geringsten Energieoutput. Der Elektrizitätsbedarf in der Region beträgt ca. 149010 kWh und kann komplett von der Anlage gedeckt werden. Die jährliche Elektrizitätsbereitstellung des kleinen BHKWs der Biogasanlage beträgt 1.804.560 kWh. Somit kann in diesem Szenario im Referenzjahr sowohl der Elektrizitätsbedarf des Individualverkehrs gedeckt als auch der Wärmeliefervertrag erfüllt werden.

Diese zuvor aufgezeigte Analyse lässt sich nicht nur für die Beispielregion und die Biogasanlage Hillerse durchführen, sondern auch für jeden anderen Anlagen und Regionskombination.

### **AP 5.2 Erstellen von überregionalen Verkehrsprofilen**

Mehrere alternative Kraftstoffe im Vergleich zum Diesel sind bereits im Einsatz. Einige befinden sich noch im experimentellen Stadium, andere sind bereits weit verbreitet. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über aktuelle Technologien und Ansätze gegeben, die für dieses Vorhaben in Betracht kommen:

- Batterieelektrisch: Batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) sind nicht ideal für den Transport großer Mengen über weite Strecken. Die Batterie als Energiespeicher hat eine deutlich geringere Energiedichte als alle Kohlenwasserstoffe. Die Batterie eines 40-Tonnners für den Fernverkehr würde daher viele Tonnen wiegen, was die Nutzlast des Lkw deutlich reduzieren würde. Ein weiteres Problem ist die Ladezeit. Selbst die heutige Ladetechnik mit mehreren hundert kW Ladeleistung würde mehrere Stunden zum Laden benötigen und die Stabilität des Stromnetzes stark belasten. Aufgrund dieser Eigenschaften sind batterieelektrische Fahrzeuge für den Schwerlasttransport über große Entfernungen ungeeignet. Allerdings sind BEVs für den Verteilerverkehr mit kleineren Lkw vielversprechend und werden bereits vereinzelt eingesetzt [80].
- Wasserstoff (H<sub>2</sub>): Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge lassen sich weiter nach der Form der Wasserstoffumwandlung und -speicherung differenzieren. H<sub>2</sub> kann als Gas in einem modifizierten Verbrennungsmotor genutzt oder in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt werden. Generell wird H<sub>2</sub> als Gas im Fahrzeug gespeichert, bei den meisten Nutzfahrzeugen bei 350 bar. Es gab Versuche H<sub>2</sub> in einem kryogenen Zustand zu speichern, jedoch hat H<sub>2</sub> einen Siedepunkt von -252 °C, wodurch sich dies als sehr schwierig darstellt. Wasserstoffbetriebene Lkw werden bereits in Serie produziert, allerdings beträgt die Reichweite mit vollem Tank etwa 400 – 500 km, was für schwere Langstreckentransporte nicht optimal ist. Die Anzahl der Lkw ist noch sehr begrenzt [81].
- (Bio)Methan: Methanfahrzeuge sind seit den 1990er-Jahren im Einsatz, seit 2008 können sie das auch in Deutschland mit Biomethan betankt werden. Als CNG kommt es vor allem im Pkw und im gewerblichen Regionalverkehr zum Einsatz. Als kryogenes LNG kommt es ausschließlich im Nutzfahrzeugbereich zum Einsatz. LNG-Fahrzeuge sind hinsichtlich Reichweite und Leistung mit Dieselfahrzeugen vergleichbar [82].

Der erste große Methan-Boom im Kraftstoffsektor beschränkte sich auf das Pkw-Segment und wurde unter positiven Umwelt- und Kostenaspekten vorangetrieben. Allerdings ist die Zahl der CNG-Tankstellen in Deutschland seit 2016 rückläufig und erreichte im Jahr 2022 den niedrigsten Stand seit 2008. Dieser Rückgang

hängt mit der Ankündigung des VW-Konzerns zusammen, die Produktion neuer CNG-Fahrzeuge ab Mitte 2023 einzustellen. Derzeit sind in Deutschland rund 81.000 CNG-Fahrzeuge zugelassen. Die Zahl der Neuzulassungen ist bereits gesunken. Von 4.000 Fahrzeugen im Jahr 2021 wurden im Jahr 2022 nur noch 1.800 CNG-Fahrzeuge zugelassen [83].

Allerdings ist der CNG-Markt nicht unbedingt ein endender Markt. In den letzten Jahren kam es zu einer Umstellung auf der Tankstellenseite. Stationen mit geringer Verdichter- und damit geringer Füllkapazität sowie Stationen in Regionen mit geringem Volumen wurden geschlossen. Stationen in der Nähe von Autobahnen oder kommunalen Verbrauchern wurden neu aufgebaut. Einer der Vorteile von CNG-betriebenen Abfallsammelfahrzeugen besteht darin, dass diese leiser sind als Dieselfahrzeuge. Dadurch können sie über längere Zeiträume genutzt werden, beispielsweise während der gesetzlichen Ruhezeiten am Morgen. Darüber hinaus können Stadtwerke, die auch organische Abfälle verwerten, daraus Biogas und Biomethan erzeugen.

Diese Umstellung wurde durch die Einführung von Mautbefreiungen für methanbetriebene Lkw im Jahr 2019 noch verstärkt [84]. Die Mautbefreiung brachte zudem den Boom von LNG-Fahrzeugen mit sich. Die Vorteile sind bei beiden Antrieben gleich, jedoch können mit LNG-Antrieben die gleichen Reichweiten wie mit Dieselfahrzeugen erreicht werden. Dies war der Beginn steigender Nutzungszahlen von Methanfahrzeugen für den Schwerlastferntransport. Infolge der russischen Invasion in der Ukraine stiegen 2022 die Preise. Der Marktführer OrangeGas verkaufte CNG für 99,9 Cent/kg, während der Marktpreis für Erdgas allein auf 3,50 Euro pro kg stieg, siehe Abbildung 25 [85]. Dieser Preis galt bis Anfang Oktober 2022 und wurde durch den langfristigen Einkauf von Biomethan und den Erlösen aus dem damals hohen Treibhausgasquotenpreis erreicht. Der darauffolgende Anstieg der LNG-Preise setzte dem LNG-Ausbau erst einmal ein Ende, siehe Abbildung 25. Dieses Beispiel zeigt, wie volatil der Markt auf Preisänderungen reagiert, sodass ein eindeutiger Pfad für den überregionalen Verkehr aktuell schwer abzuschätzen ist.



Abbildung 25: CNG und LNG Preise für 2022

Die Mautbefreiung spart Spediteuren durchschnittlich etwa 2.000 Euro pro Monat an Mautkosten. Dadurch konnten die zusätzlichen Kosten für LNG nicht einmal annähernd ausgeglichen werden. Viele Unternehmen haben den ursprünglich eingeschlagenen Weg des LNG-Ausbaus nicht weiterverfolgt und sind bei Dieselfahrzeugen geblieben. Gleichzeitig kamen im Jahr 2023 die ersten großen Mengen Bio-LNG auf den Markt, siehe Abbildung 26 [86]. Ein Vorteil von Bio-LNG bzw. Bio-CNG besteht darin, dass die Preise langfristig fixiert werden können und daher planbarer sind als bei fossilen Brennstoffen, wie sich beim OrangeGas-Angebot gezeigt hat. Die LNG-Infrastruktur und der Vertrieb haben sich in den letzten Jahren positiv entwickelt. Von Januar 2021 bis März 2022 verdoppelte sich der Absatz auf knapp 15.000 Tonnen pro Monat. Das Netzwerk der LNG-Tankstellen ist in den letzten Jahren stetig gewachsen und deckt mittlerweile alle wichtigen Autobahnstrecken in Deutschland ab. Wären die Preise nicht gestiegen, hätte sich diese Entwicklung fortsetzen können. Im Oktober letzten Jahres lag der LNG-Absatz wieder auf dem Niveau von Januar 2021.

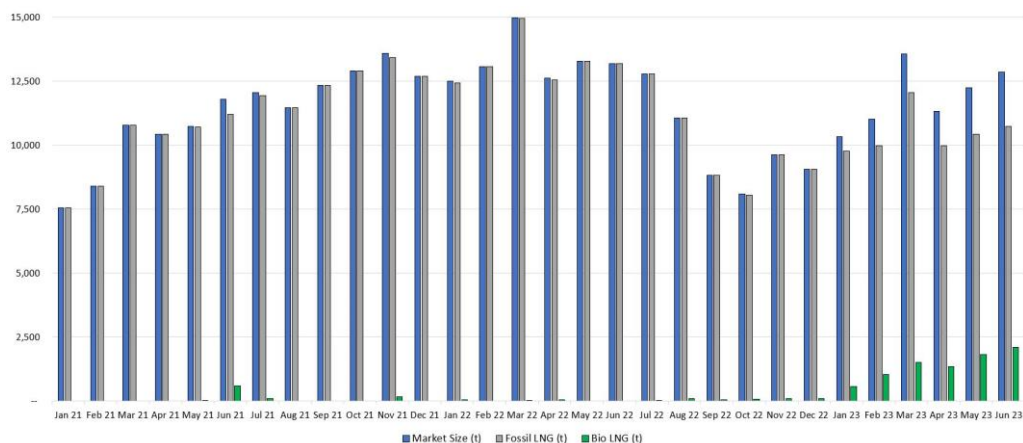


Abbildung 26: Verkauftes LNG-Volumen in Deutschland

Um Biogas folglich in den überregionalen Verkehr einzubringen, bietet sich ein Einsatz als BIO-LNG gefolgt von BIO-CNG an. Durch die Verflüssigung des Methans entspricht der Energiegehalt pro Volumen dem einer Verdichtung des Bio-CNG auf 600 bar. Dabei ist jedoch zu beachten, dass für die Verflüssigung eine Kühlung auf  $-160^{\circ}\text{C}$  erfolgen muss. Der Verflüssigungsprozess ist leicht zu skalieren und wird aktuell häufig für den Export von Methan verwendet. Prozesse, die für die Verflüssigung verwendet werden können, sind:

- Umgekehrtes Brayton Verfahren
- Linde Verfahren
- Umgekehrtes Ranking Verfahren
- Offenes oder geschlossenes Claude Verfahren
- Umgekehrtes Stirling Verfahren
- Kryogene Flüssigkeitsverdampfung

In der hier gezeigten Betrachtung wird das umgekehrte Stirling Verfahren verwendet. Die Daten stammen von der ViGo Bioenergy GmbH und sind dem Fachgebiet über eine Abschlussarbeit, die am Fachgebiet angefertigt wurde, bekannt. Sie dürfen jedoch nicht direkt veröffentlicht werden. Die Verflüssigungsanlage kann bis zu 6000 Tonnen pro Jahr produzieren. Bei Volllast entspricht dies ca. 17 Tonnen pro Tag.

### AP 5.3 Analyse des Beitrages zum Überregionalen Verkehr

Generell sind LKW je nach Transportaufgabe sehr unterschiedlich. Grob kann zwischen städtischem oder regionalem Verteilerverkehr und nationalem oder internationalem Fernverkehr unterschieden werden. Da für den Verteilerverkehr bereits verschiedene Alternativen zum Dieselmotor verfügbar sind oder in naher Zukunft verfügbar sein werden, etwa batterieelektrischer Antrieb oder CNG, wird LNG vermutlich eher eine Rolle im Fernverkehr spielen. Darüber hinaus gilt die Mautbefreiung für Methangasfahrzeuge bis Ende 2023, wodurch LNG-Fahrzeuge auf Strecken mit hohem Autobahnanteil am kostengünstigsten sind [84]. Je nach Konfiguration haben LNG-Lkw eine Reichweite von bis zu 1.700 km und können in wenigen Minuten betankt werden [87]. Derzeit bieten drei Lkw-Hersteller LNG-Fahrzeuge für den europäischen Markt an: IVECO, Scania und Volvo. Sie bieten fünf verschiedene Modelle an, allesamt Sattelschlepper mit einer Motorleistung und Reichweite vergleichbar mit Dieselfahrzeugen [87-89]. Die fünf Modelle sind im Nachfolgenden aufgezeigt und werden in dieser Arbeit verwendet.

Tabelle 24: In der Modellierung verwendete LNG-Fahrzeuge

Model	Leistung in PS	Max. Reichweite in km
IVECO S-Way Natural Power	460	1600
Scania P/G LNG	280-410	1700
Scania G LNG	280-410	1700
Volvo FM LNG	420-510	1000
Volvo FH LNG	420-510	1000

Der Einkaufs- und Verkaufspreis von Diesel- und LNG-Lkw geht aus einem Interview mit Fabian Paul, dem ehemaligen Geschäftsführer der Wellkawe Service-Center GmbH B+R Autohaus Aalen, einem Händler und Servicepartner mehrerer Lkw-Hersteller, darunter IVECO und VOLVO Trucks, hervor. Die Preise beziehen sich auf einen fabrikneuen IVECO S-WAY mit Diesel- oder LNG-Antrieb in Serienausstattung, gelten ab Oktober 2023 und sind nachfolgend aufgeführt.

Tabella 25: Modellparameter für die Fahrzeuge

Kostenbestandteile	Einheit	Diesel	LNG
Einkaufspreis	Euro	98.000	117.800
Verkaufspreis	Euro	36.000	42.000
Betriebsjahre	a	3	3
Kilometer pro Jahr	km	120.000	120.000
Diesel pro 100 km	l	25,44	
LNG pro 100 km	kg		24,28
Jährlicher Kraftstoffbedarf	l oder kg	30.533	29.133
AdBlue Bedarf	%	5	
Versicherungskosten	Euro / a	4.000	4.000
Wartungskosten	Euro / a	5.040	6.000
Dieselpreis (ohne MwSt)	Euro / l	1,3933	
AdBlue Preis (ohne MwSt)	Euro / l	0,90	
LNG-Preis (ohne MwSt)	Euro / kg		2,0208

Bei einem derart angenommenen LNG-Preis wird das LNG-Fahrzeug wettbewerbsfähig zum Diesel Fahrzeug, wie die nachfolgende Tabelle mit der Total Cost of Ownership (TCO) Berechnung zeigt.

Tabella 26: TCO-Berechnung für ein Diesel und ein LNG LKW

Kostenbestandteile	Einheit	Diesel	LNG
Einkaufspreis	Euro	98.000	117.800
Verkaufspreis	Euro	36.000	42.000
Treibstoffkosten	Euro	127.627	176.620
AdBlue-Kosten	Euro	4.122	
Versicherungskosten	Euro	12.000	12.000
Wartungskosten	Euro	15.120	18.000
TCO-Betriebszeit	Euro	220.869	282.420
TCO pro Jahr	Euro / a	73.623	94.140
TCO per km	Euro / km	0,614	0,785
Mautkosten	Euro / km	0,19	
Anteil Mautstraßen	%	90	90
Länge Mautstraße	Km / a	108.000	108.000
Mautkosten	Euro / a	20.520	
TCO-Betriebszeit mit Maut	Euro	282.429	282.420
TCO pro Jahr mit Maut	Euro / a	94.143	94.140
TCO per km mit Maut	Euro / km	0.7845	0.7845

Für die Verflüssigung dienen die Daten der ViGo Bioenergy GmbH, welche sich auf den gesamten Prozess, genauer Biogasaufbereitung und -verflüssigung, beziehen. Die Daten stammen aus einem Projekt mehrerer Biogasanlagen mit unabhängiger Biogasaufbereitung durch Druckwechseladsorption. Die Anlagen haben eine Leistung von 800 kW bis 2200 kWel. Die Verflüssigungsanlage nutzt den umgekehrten Stirling-Prozess und ist auf eine Produktion von rund 6000 Tonnen pro Jahr ausgelegt. Aus Gründen der Vertraulichkeit können die Daten nur als Kosten pro kWh, gemittelt über die Jahre 2023 bis 2030, ausgewiesen werden und umfassen alle Betriebs- und Investitionskosten. Sie beinhalten sowohl den Teil der Aufbereitung als auch der Verflüssigung und wurden auf die Biogasanlagen, die hier im Vorhaben betrachtet wurden, bezogen. Der

Durchschnittspreis aller Anlagen beträgt 19,197 ct pro kWh Bio-LNG, ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Vermarktung.

Mit dieser Information und den Werten aus Tabelle 20 lässt sich nun berechnen, welche Einnahmen pro kg Bio-LNG mit Quotenerlösen erzielt werden können. Die hier verwendeten Quotenpreise wurden am 17. Oktober 2023 von OLYX, einer Börse für den Quotenhandel, abgerufen. Das Handelsvolumen der Quoten war zuletzt relativ gering, so dass es zu Spreads von bis zu 30 % kam. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde der Durchschnittswert zwischen Gebots- und Nachfragepreis als Quotenpreis gewählt. Für den Zeitraum bis 2030 wurde von einer jährlichen Erhöhung des Quotenpreises entsprechend der Erhöhung der THG-Minderungsverpflichtungen ausgegangen. Bei den Quotenpreisen wird zwischen konventioneller und fortschrittlicher Biomasse unterschieden. Bei fortschrittlicher Biomasse, die über die gesetzlich vorgeschriebene Mindestquote hinaus genutzt wird, kann diese Quote doppelt angerechnet werden (Doppelanrechnung). Bei den Quotenerlösen je kg Bio-LNG werden nun die Einsparungen je kg Bio-LNG entsprechend ihrem Anteil konventioneller und fortgeschrittener Herkunft mit den Quotenpreisen verrechnet. Durchschnittlich können alle Anlagen im Jahr 2023 36,8 ct/kg bei Einzelanrechnung und 45,9 ct/kg bei Doppelanrechnung erzielen. Da sich die Preise über die Zeit ändern, ergeben sich für 2030 76,8 ct/kg bei Einzelanrechnung und 98,9 ct/kg bei Doppelanrechnung. Für die allgemeine Betrachtung aller Anlagen ergibt sich bei einem Anteil von 10 % Einzelanrechnung und 90 % Doppelanrechnung ein Preis von 65,5 ct/kg im Durchschnitt für die Jahre 2023 bis 2030.

Es stellt sich nun die Frage, ob die Preise die Biogasanlagenbetreiber erzielen müssen, damit ihre Anlagen wirtschaftlich sind, und die Preise die der überregionale Verkehr benötigt um eine Umstellung der Fahrzeugflotte durchzuführen deckungsgleich sind. Vom oben genannten Preis von 2,0208 Euro/kg müssen nun noch die weiteren Steuern und Abgaben abgezogen werden, sodass sich ein Preis von 0,744 Euro/kg ergibt. Die durchschnittlichen Produktionskosten über alle Anlagen betragen 2,928 €/kg. Unter Beachtung des durchschnittlichen Quotenpreises (2023 bis 2030), der Produktionskosten und des angestrebten LNG-Preises ergibt sich eine Marge von -1,529 €/kg. Dieser negative Wert bedeutet, dass es für Biogasanlagenbetreiber aktuell nicht wirtschaftlich Bio-LNG für den überregionalen Verkehr bereitstellen kann, sodass der Flottenbetreiber am Ende einen Preis erhält, der eine Umstellung der Flotte rechtfertigt. Wie im ersten Teil des Kapitels gezeigt, ergeben sich durchaus Überproduktionen bei den Anlagen, wenn lediglich der Individualverkehr und der landwirtschaftliche Verkehr betrachtet werden. Es ist aus wirtschaftlicher Sicht unter den aktuellen Marktbedingungen jedoch schwierig, diese Mengen in den überregionalen Verkehr einzubringen.

## **Arbeitspaket 6: Entwicklung Softwarepakete**

### **AP 6.1 Entwicklung Softwarepakete**

Im Rahmen dieses Arbeitspaket werden die zuvor erarbeiteten Projektinhalte in Form eines Softwarepakets zusammengefasst. Das Softwarepaket wird im Anschluss an das Projekt der Allgemeinheit auf geeignete Weise zur Verfügung gestellt.

Für die Modellierung der Angebotsseite stellt sich für das Fachgebiet die Herausforderung, dass Daten von externen Partnern in die Modelle eingearbeitet wurden, die nicht veröffentlicht werden dürfen. Diese Daten sind dem Fachgebiet z.B. durch Abschlussarbeiten oder anderen Kooperationen zugänglich. Deshalb wurde für die Veröffentlichung ein Modell entworfen, welches im Wesentlichen mit Kennzahlen rechnet. Diese Kennwerte beziehen sich hauptsächlich auf veröffentlichte Literaturwerte. Somit konnte für die Allgemeinheit ein Tool geschaffen werden, in dem der generelle Ablauf der Modellierung veröffentlicht ist. Das Tool wurde in der Programmierumgebung Python geschrieben. Es ist mit einer GUI ausgestattet, in der der Nutzer eigene Parameter eingeben kann. Anhand dieser Parameter wird anschließend eine vergleichbare Anlage aus den modellierten Anlagen ausgewählt und diese Modellergebnisse präsentiert. Neben der GUI kann der versierte Nutzer auch direkt den Python-Code nutzen und hat dadurch eine bessere Möglichkeit die Modellierung auf die eigenen Anforderungen anzupassen.

Da sich im Projektkonsortium die Frage gestellt wurde, inwieweit eine solches Python Modell von externen, nicht versierten Nutzern verwendet werden kann, wird zusätzlich eine sehr grobe Abschätzung der Biogasanlagen des BMP III inklusive Quotenhandel in Form einer Excel Berechnung zur Verfügung gestellt. Aus Übersichtsgründen bezieht sich diese Berechnung auf nur eine Weiterverarbeitungstechnologie und die Nutzung im überregionalen Verkehrssektor. Da es sich jedoch um einfache Excel Berechnungen handelt ist die Vorgehensweise klar ersichtlich und externe Nutzer könne diese für die eigene zu betrachtene Situation schnell anpassen.

Die Veröffentlichung eines Softwaretools zur Bestimmung des Bedarfs unterschiedlicher Energieträger für den Betrieb landwirtschaftlicher Maschinen ist aufgrund der Komplexität der Bestimmung dieser Konzepte nicht machbar. Infolgedessen werden die im Rahmen dieses Projekts erzielten Simulationsergebnisse in das Simulationsmodell des EVUR integriert. Dies geschieht zunächst im Rahmen einer Energieträgerbedarfsrechnung für CNG-betriebene Fahrzeuge. Basierend auf den in diesem Bericht dargestellten Annahmen, kann der Wasserstoffbedarf ebenfalls abgeschätzt werden.

Der Anwender kann in dem Simulationsmodell angeben, auf wie viel Fläche insgesamt Silomais, Winterroggen als Ganzpflanzensilage, sonstiges Getreide und Zwischenfrüchte angebaut werden. Um die Nachvollziehbarkeit der durchgeführten Berechnung zu erhöhen, werden die berücksichtigten Verfahrensschritte im Folgenden näher erläutert. Energiebedarfe und Zeitbedarfe pro Hektar werden den entsprechenden Tabellen, dargestellt in Arbeitspaket 4, entnommen.

Für den Silomaisanbau werden die folgenden Verfahrensschritte berücksichtigt.

- Stoppelsturz
- Organische Düngung
- Einarbeitung org. Dünger
- 1. Mineralische Düngung
- 2. Mineralische Düngung
- Grundbodenbearbeitung
- Aussaat
- Pflanzenschutz
- Ernte

Anmerkend ist zu erwähnen, dass der Energiebedarf der Maschinen auf dem Fahrsilo während der Ernte ebenfalls in der Berechnung berücksichtigt wird. Dies gilt auch für die Berechnung des Energiebedarfs von Ganzpflanzensilage.

Zur Berechnung des Energiebedarfs von Winterroggen als Ganzpflanzensilage bzw. zur Körnerernte werden folgende Verfahrensschritte berücksichtigt.

- Grundbodenbearbeitung
- Aussaat
- 1 Pflanzenschutz
- 2 Pflanzenschutz (nur bei Körnerernte)
- 1 Mineralische Düngung
- 2 Mineralische Düngung
- Ernte

Zur Berechnung des Energiebedarfs von sonstigem Getreide werden die bereits für den Anbau von Winterroggen zur Körnerernte erforderlichen Verfahrensschritte verwendet.

Als Zwischenfrucht werden Gras oder Senf angebaut. Die erforderlichen Verfahrensschritte werden im Folgenden zusammengefasst:

- Organische Düngung (nur bei Gras)
- Einarbeitung org. Dünger (nur bei Gras)
- Grundbodenbearbeitung
- Aussaat.

Zusätzlich wird zur Berechnung des jährlichen Energiebedarfs der hofnahen Prozesse, wie bereits im vierten Arbeitspaket beschrieben, ein täglicher Grundbedarf berücksichtigt.

Die Modellierung des Energiebedarfs der landwirtschaftlichen Maschinen wurde so in das Modell integriert, dass der Anwender den Bedarf unabhängig von der Biogasanlagenbetrachtung ermitteln kann.

## **AP 6.2 Bereitstellung von Kenndaten**

Die Bereitstellung von Kenndaten eignet sich im Wesentlichen für die durchgeführten Untersuchungen bezüglich der landwirtschaftlichen Maschinen. Diese Ergebnisse wurden zum einen im Rahmen des Softwaretools veröffentlicht und zum anderen in dem auf der AgEng LAND.TECHNIK 2023 vorgestellten Konferenzpaper. Zudem werden sämtliche Simulationsergebnisse detailliert im Rahmen dieses Abschlussberichts in vierten Arbeitspaket in Form von Kenndaten für die Zeit- und Kraftstoffbedarfe konventionell und alternativ betriebener landwirtschaftlicher Maschinen aufbereitet und präsentiert.

### AP 6.3 Aufbereitung und Ablage

Für die Veröffentlichung wurde ein Model entworfen, welches im Wesentlichen mit Kennzahlen rechnet, um sensible Daten der Partner zu schützen. Dabei handelt es sich zum einen um die Daten der assoziierten Partner, zum anderen wurden die Modelle der Weiterverarbeitungstechnologien mit externen Daten erstellt, die dem Fachgebiet durch Abschlussarbeiten oder anderen Kooperationen zugänglich sind. Somit konnte für die Allgemeinheit ein Tool geschaffen werden, in dem der generelle Ablauf der Modellierung veröffentlicht ist. Das Tool wurde in der Programmierumgebung Python geschrieben. Da sich im Projektkonsortium die Frage gestellt wurde, inwieweit eine solches Python Modell von externen nicht versierten Nutzern verwendet werden kann, wird zusätzlich eine sehr grobe Abschätzung der Biogasanlagen des BMP III inklusive Quotenhandel in Form einer Excel Berechnung zur Verfügung gestellt. Die Unterlagen wurden auf der Plattform Git Hub unter dem Projektnamen RegEnerMoBio abgelegt. Die Modelle sind unter der Lizenz CC BY-NC-SA 4.0 Deed veröffentlicht. Diese Lizenz erlaubt es den Nutzer das Material in jedwedem Format oder Medium zu vervielfältigen oder weiterzuverbreiten. Zudem darf der Nutzer das Material verändern und darauf aufbauen. Dafür muss der Nutzer jedoch folgende Bedingungen einhalten:

- Namensnennung: Es müssen angemessene Urheber- und Rechteangaben gemacht, ein Link zur Lizenz beifügen und angegeben werden ob Änderungen vorgenommen wurden. Diese Angaben dürfen in jeder angemessenen Art und Weise gemacht werden, allerdings nicht so, dass der Eindruck entsteht, der Lizenzgeber unterstütze gerade den Benutzer besonders.
- Nicht kommerziell: Das Material darf nicht für kommerzielle Zwecke genutzt werden.
- Weitergabe unter gleichen Bedingungen: Wenn das Material verändert oder anderweitig direkt darauf aufbauen genutzt wird, darf dies wiederum nur unter derselben Lizenz wie das Original geschehen.

### Arbeitspaket 7: Untersuchung von Hindernissen

Problematisch sind die unterschiedlichen Bedürfnisse der verschiedenen Mobilitätssektoren. Es hat sich gezeigt, dass Antriebsformen die in einem Sektor hohe Effizienzen aufweisen in anderen Mobilitätssektoren häufig durch bestimmte Restriktionen nicht priorisiert werden. So ist die Elektromobilität im individuellen Verkehrssektor die präferierte Antriebstechnologie, sie wird auf Grund der zu geringen Kapazität und sich damit ergebenden logistischen Aufwänden nicht für landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge oder den überregionalen Verkehrssektor priorisiert. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es nicht sinnvoll an einem Biogasstandort unterschiedliche Treibstoffalternativen zu produzieren. Folglich müssen Biogasanlagenbetreiber genau die vorhandene Bedarfsstruktur analysieren. Dieser Aspekt verliert an Bedeutung je weiter die Verbreitung der alternativen Antriebstechnologien fortgeschritten ist.

Weiterhin ist die ökologische Bewertung aktuell nur anhand vorhandener Literatur oder Normen möglich. In dem Vorhaben wurde versucht eine LCA-Betrachtung für eine Biogasanlage mit Hilfe frei verfügbarer Software durchzuführen. Die Lebenszyklusanalyse (LCA) ist eine Methodik zur Bewertung der Umweltleistung eines Produktsystems über seinen Lebenszyklus. Dies ermöglicht eine viel genauere Bewertung als dies durch Literaturwerte oder Abschätzungsverfahren, die in der Norm dargestellt sind, möglich ist. Derzeit werden für LCA-Studien überwiegend teure, kommerziell erhältliche Softwareprogramme eingesetzt. Mit der Popularität dieser Methodik wurden in den letzten Jahren jedoch auch mehrere frei verfügbare Softwaretools entwickelt. Unter den frei verfügbaren LCA-Lösungen ist openLCA aufgrund seiner umfassenden Funktionalitäten die vielversprechendste Option. Es war geplant, im Vorhaben eine dieser frei verfügbaren Lösungen zu nutzen. Während der eingehenden Recherche zu diesem Arbeitspaket, tauchten in der Literatur immer wieder Diskrepanzen zwischen den unterschiedlichen frei verfügbaren Softwareanwendungen, mit teilweise stark abweichenden Ergebnissen zueinander, auf. Es wurde folglich untersucht, ob eine freie LCA-Anwendung ähnliche Ergebnisse wie eine kommerzielle Software generieren kann, indem eine LCA für ein identisches Biogasanlagensystem unter Verwendung von openLCA und GaBi durchgeführt wurde. Die Education-Version von Gabi ist für viele Studenten und Doktoranten frei erhältlich, besitzt jedoch nur eine limitierte Bibliothek. Die LCA bewertete ein typisches KWK-Biogasanlagensystem basierend auf der Vergärung von Energiepflanzen und Tierdung. Die Ergebnisse zeigen, dass GaBi und openLCA in vielen Wirkungskategorien erhebliche Diskrepanzen erzeugten. Die aus GaBi und openLCA berechneten Auswirkungen des Treibhauspotenzials lieferten entgegengesetzte Tendenz, was einen bemerkenswerten Einfluss auf die Interpretation der Ergebnisse bedeutet. Lediglich Versauerungs- und Eutrophierungspotenzial besaßen eine geringere Sensitivität gegenüber der Auswahl des LCA-Tools. Nach Untersuchung der Ursachen für die Abweichungen wurde openLCA aufgrund seiner schlechten Datenbankqualität und des häufigen Fehlens von Charakterisierungsfaktoren für entscheidende Elementarströmungen nicht als idealer Ersatz für kommerzielle LCA-Software angesehen. Aber auch die Education-Version von GaBi lieferte aufgrund der limitierten Bibliothek keine zufriedenstellenden Ergebnisse, da einzelne Teilbereiche aufgrund der Datenlage nicht betrachtet werden konnten. Daher müssten GaBi-Nutzer externe Datensätze erwerben, wenn sie LCA-Studien für Biogasanlagen durchführen wollen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass wissenschaftlich zufriedenstellende Ergebnisse für die Betrachtung von Biogasanlagen aktuell nicht mit frei verfügbaren Anwendungen möglich sind.

## **Arbeitspaket 8: Literaturrecherche**

Die Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche sind in die Erarbeitung der Ergebnisse der vorherigen Arbeitspakete eingeflossen und an entsprechender Stelle gekennzeichnet worden. Auf eine erneute Darstellung sämtlicher Ergebnisse der Recherche wird an dieser Stelle aus Gründen des Umfangs des Abschlussberichts verzichtet.

## **Arbeitspaket 9: Verbreitung der Erkenntnisse**

Während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurden Projektergebnisse im Rahmen der AgEng LAND.TECHNIK Konferenz (November 2023) veröffentlicht. Die Veröffentlichung fand im Rahmen eines öffentlichen Vortrags mit anschließender Diskussionsrunde im Rahmen der Konferenz statt. Zusätzlich zu dem Vortrag wurden die Projektergebnisse im Rahmen eines Konferenzpapers zusammengetragen und im Tagungsband veröffentlicht.

Zusätzlich wurde die Projektergebnisse in dem oben genannten Softwaretool veröffentlicht.

## **2. Verwertung**

### **a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen**

Es sind weiterhin keine Schutzrechtsanmeldungen geplant.

### **b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Durch die Veröffentlichung der Projektergebnisse wird das Bereitstellungspotential der Biogasanlage als dezentraler Energieversorger dargestellt. Zudem kann der Betreiber, basierend auf den durchgeführten Simulationen mit Hilfe der Landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation abschätzen, welchen Einfluss die Anschaffung alternativ angetriebener Landmaschinen, speziell der bereits am Markt verfügbaren CNG-betriebenen Maschinen, auf seine Arbeitsverrichtung hat und in welchen Verfahrensschritten diese bereits heute anstelle der dieselbetriebenen Maschinen eingesetzt werden können. Dies kann zur Steigerung der Akzeptanz neuer Antriebskonzepte und einer Anschaffung solcher Maschinen führen.

### **c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Zur Untersuchung des Potentials der Biogasanlage als dezentralen Energieversorger wurde die am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge entwickelte Landwirtschaftliche Verfahrenssimulation eingesetzt und weiterentwickelt. Diese Weiterentwicklungen bestehen einerseits aus fachlichen Implementierungen, beispielsweise der für die simulative Abbildung einer Häckselkette mit mehr als zwei Abfahrern erforderlichen Logik, aber auch aus Weiterentwicklungen bezüglich des Frameworks der Verfahrenssimulation. Infolge der teils sehr aufwändigen Implementierung zusätzlicher Logiken wurde an den entsprechenden Stellen eine Umstrukturierung des Quellcodes vorgenommen, durch die die Integration weiterer Anpassungen mit deutlich geringerem Aufwand realisiert werden kann.

Infolge des parallelen Einsatzes der Verfahrenssimulation in zwei weiteren öffentlich geförderten Forschungsprojekten, H2Agrar und Energy4Agri, konnten die Implementierungen bereits während der Projektlaufzeit einen Zugewinn zu anderen Forschungsprojekten erzielen.

Zusätzlich zum Einsatz in öffentlich geförderten Forschungsprojekten wird die Landwirtschaftliche Verfahrenssimulation im Rahmen der Dissertationen einiger Mitarbeiter des Instituts als Simulationswerkzeug eingesetzt. Im Anschluss an das Forschungsvorhaben wird ebenfalls eine Dissertation des bearbeitenden Mitarbeiters angestrebt, die sich thematisch an dem Forschungsvorhaben orientiert. Infolgedessen werden sämtliche Arbeiten, die im Rahmen des Projekts durchgeführt wurden, im Anschluss weiterverwendet.

Im Rahmen des angestrebten Promotionsvorhabens sind weitere Veröffentlichungen geplant, die thematisch an das Forschungsvorhaben anschließen. Zur Erreichung dieser Ziele werden weiterhin studentische Arbeiten ausgegeben, die bei der Bearbeitung der Thematik unterstützend eingesetzt werden können.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden am Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien unterschiedliche Modelle erarbeitet. Diese Modelle werden, soweit sie keine sensiblen Daten von externen Partnern enthalten, dem wissenschaftlichen Umfeld zur Verfügung gestellt. Im Vorhaben stellten sich die Partner die Frage, ob eine Veröffentlichung der Python

Modelle zielführend ist. Biogasanlagenbetreiber haben meist nicht die Erfahrung, diese Modelle zu bedienen. Für die Wissenschaft ermöglicht die Veröffentlichung der Python Modelle jedoch Optionen, diese Modelle zum einen zu nutzen und zum anderen weiterzuentwickeln. Allein durch die Veröffentlichung können die Modelle in weiterführenden Projekten verwendet und ausgebaut werden, dadurch kann eine größere Nutzeranzahl adressiert werden als dies lediglich bei der Verwendung direkt am Fachgebiet möglich ist.

Zudem wurden am Fachgebiet EVUR einige Abschlussarbeiten durchgeführt die sich zum Teil mit einzelnen Aspekten des Forschungsvorhabens beschäftigen, teilweise aber einige Ausschnitte auch sehr detailliert betrachten. Die Studierenden haben durch die Abschlussarbeiten einen tieferen Einblick in die Thematik bekommen und können diese in ihrem späteren Arbeitsleben nutzen.

#### **d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Zum aktuellen Zeitpunkt wurden noch keine Forschungslücken identifiziert, die zu einem Folgeprojekt ausgearbeitet werden könnten.

### **3. Erkenntnisse von Dritten**

Im Rahmen der Agritechnica 2023 (12.-18. November 2023) wurde von New Holland der neu entwickelte Traktor T7.270 Methane Power CNG vorgestellt. Der CNG-betriebene T7.270 verfügt über einen knapp 200 kW starken 6,7 l NEF Methangasmotor und eine Tankkapazität von 219 kg CNG. Im Vergleich zu der kleineren Maschine T6.180 Methane Power CNG ist dies eine Steigerung der Tankkapazität um 178 %, wodurch die Reichweite aber auch das Einsatzverhalten der Maschine stark beeinflusst wird. Infolge der zusätzliche Tankkapazität nähert sich das Einsatzverhalten des T7.270 Methane Power CNG dem dieselbetriebenen Äquivalent an. [90]

Im Rahmen der Agritechnica konnten ebenfalls Expertengespräche mit Mitarbeitern der Firma Bauer Kompressoren durchgeführt werden. Bauer Kompressoren ist an der Entwicklung des maschinenseitigen Tanksystems des T7.270 Methane Power CNG und der Entwicklung der CNG-Tankstelle für die Traktoren maßgeblich beteiligt. Im Rahmen der durchgeführten Gespräche konnte festgestellt werden, dass die im Rahmen der durchgeführten Simulationen angenommenen CNG-Überladeleistungen von 3 kg/min für Systeme gültig sind, bei denen das Tanksystem des Fahrzeugs und das der Tankstelle nicht aufeinander abgestimmt sind. Ist dies jedoch der Fall, können deutlich größere Überladeleistungen realisiert werden. Diese werden laut Mitarbeiter jedoch nicht veröffentlicht.

Infolge der starken Steigerung der Tankkapazität des neu vorgestellten Traktors und der neuen Informationen bezüglich der Tankvorgänge sollten die für die simulative Ermittlung des CNG-Bedarfs getroffenen Annahmen in weiteren Untersuchungen weiterentwickelt werden.

### **4. Veröffentlichungen**

Während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurden Projektergebnisse im Rahmen der AgEng LAND.TECHNIK Konferenz (November 2023) veröffentlicht. Die Veröffentlichung fand im Rahmen eines öffentlichen Vortrags mit anschließender Diskussionsrunde im Rahmen der Konferenz statt. Zusätzlich zu dem Vortrag wurden die Projektergebnisse im Rahmen eines Konferenzpapers zusammengetragen und im Tagungsband veröffentlicht.

# ANHANG

## Teilvorhaben 2220NR176A

### 1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Ziel des Teilvorhabens 2220NR176A ist einerseits die Darstellung der ländlichen Individualmobilität und andererseits die Abbildung der Erzeugerseite durch Modellierung verschiedener Biogasanlagen und entsprechenden Weiterverarbeitungspfaden. Für die ländliche Individualmobilität werden zuerst die aktuellen Energieverbräuche und anschließend in der Prognose für 2030 und 2050 ermittelt. Anschließend erfolgt die genaue Abbildung der unterschiedlichen Antriebstechnologien im Modell. Die Modellierung der verschiedenen Biogasanlagen erfolgt einerseits auf Basis von Literaturwerten und andererseits durch die von den assoziierten Partnern bereitgestellten Daten. Weiterhin wurde der überregionale Verkehrssektor analysiert und der LNG-Treibstoff als geeigneter Energieträger identifiziert. Es fand eine Bewertung statt, ob eine Umstellung sowohl für LkW-Flottenbetreiber als auch für Biogasanlagenbetreiber sinnvoll ist.

### 2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Unterarbeitspakete
<b>AP 1</b> Simulation Mobilität Nachfrageseite	12.2021 – 11.2022	<b>AP 1.1</b> Erstellung der Basisszenarien <b>AP 1.2</b> Erstellung der Zukunftsszenarien für 2030 und 2050 <b>AP 1.3</b> Modellierung verschiedener Antriebstypen <b>AP 1.4</b> Szenarienanalyse der Antriebsarten <b>AP 1.5</b> Evaluierung der wirtschaftlichen und ökologischen Kennzahlen
<b>AP 3</b> Simulation Angebotsseite	08.2022 – 11.2022 Neuer Zeitplan: 2 Monate Verzug	<b>AP 3.1</b> Abbildung der Referenzbiogasanlagen <b>AP 3.2</b> Modellierung unterschiedlicher Aufbereitungsoptionen <b>AP 3.3</b> Abbildung der Weiterverarbeitungstechnologien <b>AP 3.4</b> Implementierung der Wärmebereitstellung
<b>AP 4</b> Zusammenführung AP 1-3	12.2021 – 06.2023 Neuer Zeitplan: 2 Monate Verzug	<b>AP 4.1</b> Schnittstellendefinition <b>AP 4.2</b> Durchführung Simulationen <b>AP 4.3</b> Life Cycle Assessment <b>AP 3.4</b> Ableitung von Handlungsempfehlungen
<b>AP 5</b> Einbeziehung des überregionalen Verkehrs	04.2023 – 06.2023 Neuer Zeitplan: 2 Monate Verzug	<b>AP 5.1</b> Ableiten der Überproduktion <b>AP 5.2</b> Erstellung von überregionalen Verkehrsprofilen <b>AP 5.3</b> Analyse des Beitrages zum überregionalen Verkehr
<b>AP 6</b> Entwicklung Softwarepakete	04.2023 – 10.2023 Neuer Zeitplan: 2 Monate Verzug	<b>AP 6.1</b> Entwicklung Softwarepakete <b>AP 6.3</b> Aufbereitung und Ablage
<b>AP 7</b> Untersuchung von Hindernissen	06.2022 – 11.2023 Neuer Zeitplan: 2 Monate Verzug	Durch die unterschiedlichen Bedürfnisse der verschiedenen Mobilitätssektoren werden andere Antriebstechnologien präferiert. Zudem kann die ökologische Betrachtung aktuell nur anhand von Literaturwerten und Normen abgeschätzt werden. Eine Softwarebasierte Betrachtung ist aufgrund fehlender frei verfügbarer Software mit ausreichender Betrachtungstiefe nicht möglich.
<b>AP 8</b> Literaturrecherche	12.2021 – 11.2023 Neuer Zeitplan: 2 Monate Verzug	Erfolgte während den unterschiedlichen Arbeitspaketen
<b>AP 9</b> Verbreitung der Erkenntnisse	06.2022 – 11.2023 Neuer Zeitplan: 2 Monate Verzug	Vortrag auf der LAND.TECHNIK AgEng Tagung 2023 in Hannover

### **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

#### **Arbeitspaket 1: Simulation Mobilität Nachfrageseite**

##### **AP 1.1** Erstellung der Basisszenarien

- Erstellung der verschiedenen Szenarien anhand der MiD Daten für die Ermittlung der jährlichen Bedarfe
- Jährliche Bedarfe werden durch Standard-Fahrzyklen oder durch die Profile der JERICO-E Datenbank zeitlich aufgelöst

##### **AP 1.2** Erstellung der Zukunftsszenarien für 2030 und 2050

- Abbildung der Zukunftsszenarien im Modell auf Basis von verschiedenen Szenarien aus Publikationen

##### **AP 1.3** Modellierung verschiedener Antriebstypen

- Modellierung von batterieelektrischen, CNG und mit Wasserstoff angetriebenen Fahrzeugen erfolgt
- Modellbildung inklusive der Betankungsvorgänge

##### **AP 1.4** Szenarioanalyse der Antriebstypen

- Analyse der verschiedenen Antriebstypen hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit anhand der Szenarien aus AP 1.1 und AP 1.2

##### **AP 1.5** Evaluierung der wirtschaftlichen und ökologischen Kennzahlen

- Abbildung der wirtschaftlichen Bewertung der verschiedenen Antriebsstränge (Anschaffungskosten, Verbrauchskosten, etc.)
- Recherche und Abbildung hinsichtlich der CO<sub>2</sub> Einsparungen der verschiedenen Antriebstechnologien

#### **Arbeitspaket 3: Simulation Angebotsseite**

##### **AP 3.1** Abbildung der Referenzbiogasanlagen Abbildung literaturbasierter Referenzanlagen (auf Basis der Daten des Biogasmessprogrammes III)

- Zusätzlich zu den literaturbasierten Anlagen erfolgte die Abbildung der Biogasanlagen der assoziierten Partner

##### **AP 3.2** Modellierung der unterschiedlichen Aufbereitungsoptionen. Es sind folgende Aufbereitungsoptionen im Model abgebildet:

- Chemische Aufbereitung
- Biologische Aufbereitung
- Einspeisung von Wasserstoff

##### **AP 3.3** Abbildung der Weiterverarbeitungstechnologien

- Es sind folgende Weiterverarbeitungstechnologien im Model abgebildet:
  - Biogas-Aufbereitung
  - Dampfreformierung
  - Fischer-Tropsch Synthese
- Bei der Biogas-Aufbereitung werden folgende Prozesse betrachtet:
  - Aminwäsche (AW)
  - Membranverfahren, mit zwei Membranen (M1 & M2) die eine unterschiedliche Effizienz, Kosten und Methanverluste aufweisen
  - Druckwasserwäsche (DWW)
  - Druckwechseladsorption (DWA)
  - Physikalische Absorption (PA)

##### **AP 3.4** Implementierung der Wärmebereitstellung

- Modellierung eines synthetischen Wärmebedarfes (als imaginäre ländliche Siedlung eine Kombination aus einem Straßen- und Kreuzdorf herangezogen mit vorwiegender Bebauung durch Einfamilienhäuser)
- Es wird in der Dimensionierung des Wärmenetzes zwischen zwei energetischen Gebäudezuständen der Einfamilienhäuser unterschieden
- Für die Bestimmung der stündliche Wärmenachfrage der Einfamilienhäuser werden im Modell parametrisierten Standardlastprofile verwendet

## **Arbeitspaket 4: Zusammenfassung AP 1-3**

### **AP 4.1 Schnittstellendefinition**

- Es erfolgte zu Beginn des Vorhabens ein tiefergehender Austausch mit dem IMN um die geplante Modellierweise des Instituts zu verstehen und Schnittstellen zu definieren

### **AP 4.2 Durchführung Simulationen**

- Auf Basis der in AP 4.1 erstellten Schnittstellen wurden alle Modellteile zusammengefügt
- Es handelt sich um eine klassenbasierte Modellierung, weshalb verschiedene Klassen miteinander kombiniert werden können

### **AP 4.3 Life Cycle Assessment**

- Evaluierung möglicher kostenfreier Software-Tools für die Durchführung eines Life Cycle Assessment
- Durchführung von LCA mit den Tools GaBi und openLCA, mit sehr divergierenden Ergebnissen
- Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Einsparungen auf Basis aktueller Gesetze und Richtlinien

### **AP 4.4 Ableitung von Handlungsempfehlungen**

- Die Handlungsempfehlungen sind stark abhängig von Umsetzbarkeit und der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Antriebstechnologien für den landwirtschaftlichen Sektor und den ländlichen Individualverkehr
- Allgemein lässt sich sagen, dass Umwandlungstechnologien mit weniger Umwandlungsschritten zu bevorzugen sind. Z.B. ergaben sich für keine Biogasanlage positive Ergebnisse für eine Fischer-Tropsch Synthese

## **Arbeitspaket 5: Einbeziehung des überregionalen Verkehrs**

### **AP 5.1 Ableiten der Überproduktion**

- Gerade bei Biogasanlagen ohne Wärmelieferverträge und nicht stark genutzten Energieträgern für den ländlichen Individualverkehr ergeben sich teilweise hohe Überproduktionen

### **AP 5.2 Erstellen von überregionalen Verkehrsprofilen**

- Unterschiedliche Antriebskonzepte wurden für den überregionalen Sektor analysiert
- LNG stellte sich als konkurrenzfähig zum Diesel heraus
- Mögliche Verflüssigungsverfahren wurden analysiert

### **AP 5.3 Analyse des Beitrages zum Überregionalen Verkehr**

- Anhand von Partner bereitgestellten Daten wurde die Umrüstung von Biogasanlagen zur LNG-Bereitstellung und dann die Einbringung in den überregionalen Verkehr analysiert
- Es erfolgte eine wirtschaftliche Bewertung unter Beachtung aktueller Quoten und Marktpreise

## **Arbeitspaket 6: Entwicklung Softwarepakete**

### **AP 6.1 Entwicklung Softwarepakete**

- Es erfolgte einerseits eine Aufarbeitung der Modelle, um sensible Daten von Projektbeteiligten nicht zu veröffentlichen
- Das Python Modell für die Betrachtung der Biogasanlagen wurde um eine GUI erweitert
- Das Python Modell für den ländlichen Individualverkehr wurde ebenfalls überarbeitet und als separates Paket gestellt, damit dies unabhängig der Biogasanlagenbetrachtung genutzt werden kann

### **AP 6.2 Bereitstellung von Kenndaten**

- Bereitstellung von Kenndaten bezieht sich im Wesentlichen auf die Ergebnisse der simulativen Untersuchung landwirtschaftlicher Maschinen mit Hilfe der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation
- Kenndaten wurden im Konferenzpaper und im Abschlussbericht veröffentlicht und im Softwaretool integriert

### **AP 6.3 Aufbereitung und Ablage**

- Die Unterlagen wurden auf der Plattform Git Hub unter dem Projektnamen RegEnerMoBio abgelegt
- Die Modelle sind unter der Lizenz CC BY-NC-SA 4.0 Deed veröffentlicht

## **Arbeitspaket 7: Untersuchung von Hindernissen**

Verschiedene Hindernisse und Hemmnisse wurden an verschiedenen Stellen analysiert und werden in den verschiedenen Arbeitspaketen benannt.

**Arbeitspaket 8:** Literaturrecherche

Auf eine Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche wird an dieser Stelle verzichtet. Zum einen wurden diese bereits in einem vorherigen Zwischenbericht umfangreich dargestellt, zum anderen wurden die Ergebnisse bereits in die zuvor dargestellten Arbeitspakete integriert.

**Arbeitspaket 9:** Verbreitung der Erkenntnisse

Wesentliche Projektergebnisse wurden im Rahmen eines Vortrags auf der LAND.TECHNIK AgEng Tagung 2023 in Hannover präsentiert. Zusätzlich zu dem Vortrag wurde ein Paper in dem Tagungsband veröffentlicht.

## **Teilvorhaben 2: 2220NR176B**

### **1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens**

Das Ziel im Rahmen des Forschungsvorhabens seitens der TU Braunschweig war die Ermittlung des Energiebedarfs landwirtschaftlicher Maschinen, speziell in dem für in den Betrieb der Biogasanlage erforderlichen Verfahrensschritten. Basierend auf den Einzelbedarfen der Verfahrensschritte kann im Anschluss ein Tagesbedarf bzw. Jahresbedarf kumuliert und eine Abschätzung getroffen werden, ob der Energiebedarf für alternativer Energieträger auch in Perioden mit besonders hohen Bedarfen abgedeckt werden kann.

Zur Erzielung dieser Ergebnisse mussten zunächst einige Implementierung im Quellcode der Landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation durchgeführt und landwirtschaftliche Maschinen mit Datenloggern ausgestattet werden. Basierend auf den durchgeführten Implementierungen und Messungen konnte im Anschluss simulative Untersuchungen zum Einsatz alternativer Energieträger in landwirtschaftlichen Maschinen durchgeführt werden. Da eine simulative Abbildung aller Verfahrensschritte auf allen für den Betrieb der Biogasanlage erforderlichen Flächen simulationstechnisch nicht realisierbar ist, wurde eine reduzierte Fläche simulativ abgebildet und aus den Simulationsergebnissen Kennzahlen für den Zeitbedarf und den Energiebedarf zur Bearbeitung eines Hektars abgeleitet. Basierend auf den ermittelten Kennzahlen können im Anschluss die Zeit- und Energieträgerbedarfe für variierende Flächengrößen ermittelt werden.

### **2. Bearbeitete Arbeitspakete**

#### **AP 2.1 Datenerfassung (abgeschlossen)**

Zur Datenerfassung wurden zwei Maschinen des Abwasserverband Braunschweigs mit Datenloggern ausgestattet. Zum einen ein Liebherr L550 Radlader (Beschickung der Biogasanlage), zum anderen ein Fendt 722 Vario (Abfahrtespann in der Maisernte). Mit Hilfe von Fahrtenbüchern und aufgezeichneten Videoaufnahmen (mit Zeitstempel) konnten aus den Daten Kraftstoffverbräuche für die unterschiedlichen Arbeitsvorgänge der Maschinen abgeleitet werden. Diese Kraftstoffverbräuche wurden im Anschluss in eine Datenbank integriert und dienen als Simulationsgrundlage für die landwirtschaftliche Verfahrenssimulation.

#### **AP 2.2 Abbildung Referenzbetriebe in Verfahrenssimulation (abgeschlossen)**

Um die in der Verfahrenssimulation implementierten Änderungen validieren zu können wurde als Referenzbetrieb die Biogasanlage des Abwasserverband Braunschweigs abgebildet. Die Simulation enthält:

- Betriebshof
- Silo
- Felder
- Maschinen und Anbaugeräte.

Mit der abgebildeten Infrastruktur des Betriebs konnten die Verfahrensschritte Grubbern, Pflügen, Aussaat und Ernte simuliert und die ermittelten Kraftstoffbedarfe mit gemessenen Kraftstoffbedarfen des Abwasserverband Braunschweigs verglichen werden. Die Abweichungen lagen in allen Verfahrensschritten unter 5%. Infolgedessen können die Simulationsergebnisse als valide betrachtet werden.

#### **AP 2.3 Anpassung der Verfahrenssimulation auf Biogas (abgeschlossen)**

Die landwirtschaftliche Verfahrenssimulation wurde um die Möglichkeit erweitert, den Biogasverbrauch landwirtschaftlicher Maschinen simulativ zu ermitteln. Basierend auf der Literaturrecherche wird angenommen, dass die Biomethan-Verbrennungskraftmaschine über den gleichen Wirkungsgrad wie die Diesel-Verbrennungskraftmaschine verfügt. Infolgedessen können bei der Kraftstoffbedarfsermittlung die zur Verfügung stehenden Energiebedarfskennfelder verwendet werden.

#### **AP 2.4 Erweiterung der Verfahrenssimulation für die Beschickung der Biogasanlage (abgeschlossen)**

Grundlage der Erweiterung für die Beschickung der Biogasanlage sind umfangreiche Erweiterungen im Front und Back End der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation. Durchgeführt wurden

- Anpassungen des Graphical User Interface (GUI), sodass der Nutzer den betrieblichen Gegebenheiten Silos hinzufügen kann
- Anpassungen in grundlegenden Datenstrukturen, um die in der GUI erstellten Silos in der Verfahrenssimulation abspeichern zu können
- Erstellung eines zusätzlichen Agenten Silo in der agentenbasierten landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation
- Erstellung eines zusätzlichen Agenten Radladers zur Beschickung der Biogasanlage aus dem Silo
- Abbildung einer Häckselkette, bestehend aus einem Häcksler und sechs Abfahrtespannen.

#### **AP 2.5 Implementierung alternativer Nutzungsarten (erledigt)**

Neben der Abbildung biogasangetriebener Landmaschinen können nun in der landwirtschaftlichen Verfahrenssimulation ebenfalls batterieelektrische und wasserstoffangetriebene Fahrzeuge simulativ abgebildet werden. Aufgrund der individuell einstellbaren Energiespeicherkapazitäten der unterschiedlichen Antriebskonzepte kann im weiteren Projektverlauf der Einfluss der Energiespeicherkapazität auf die Arbeitsverrichtungsdauer für unterschiedliche Prozessschritte simulativ ermittelt werden.

#### **Arbeitspaket 4: Zusammenführung AP 1-3**

##### **AP 4.1 Schnittstellendefinition**

In AP 4 sollen die Ergebnisse aus den AP 1-3 zusammengeführt werden. Um diesen Prozess effektiv zu gestalten, wurden in ersten Austauschrunden die Schnittstellen zwischen den Teilmodellen bzw. Ergebnissen des EVUR und des IMN besprochen. Wesentliche inhaltliche Abstimmungen erfolgten hinsichtlich:

- der erforderlichen Daten selbst
- der jeweiligen Einheiten und Bezugsgrößen
- der zeitlichen Auflösung der Daten

##### **AP 4.2 Durchführung Simulation**

In diesem Arbeitspaket wurde der Gesamtbedarf an CNG für den Betrieb der Referenzbiogasanlage des Abwasserverbands in Braunschweig simulativ für das Referenzjahr 2023 und die Zukunftsszenarien ermittelt. Dazu wurden zunächst Annahmen für die Flächenverteilung, dem konzeptionellen Aufbau biomethanbetriebener Landmaschinen und der Technologieentwicklung in den Jahren 2030 und 2050 getroffen. Basierend auf diesen Annahmen konnte der CNG-Bedarf für die unterschiedlichen Verfahrensschritte, die zum Anbau der Nutzpflanzen erforderlich sind, für eine Referenzfläche von circa 50 ha bestimmt werden. Anhand dieser Referenzfläche wurden Kennwerte ermittelt, mit Hilfe derer im Anschluss der CNG-Bedarf für die Bearbeitung der gesamten 1000 ha Nutzfläche bestimmt werden konnten.

Es konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz neuer Technologien und Anpassungen der Tankgrößen biomethanbetriebener Landmaschinen der jährliche CNG-Bedarf in 2030 um 6 % (Basis ist der Verbrauch im Jahr 2023) und in 2050 um 8,3 % reduziert werden kann.

Da sich die Entwicklung wasserstoffbetriebener Landmaschinen zum aktuellen Zeitpunkt noch im Prototypenstadium befindet, wurde der wasserstoffbedarf der landwirtschaftlichen Maschinen aus dem zuvor ermittelten CNG-Bedarf abgeleitet. Diese Ableitung dient als erste Bedarfsabschätzung.

Um den Einfluss steigender Energiespeicherkapazität zu untersuchen, wurde eine Häckselkette mit CNG-betriebenen Abfahrgespinnen und BtL-betriebener Erntemaschinen abgebildet. Hier konnte festgestellt werden, dass sich der Zeitbedarf teils deutlich durch den Einsatz BtL-betriebener Erntemaschinen reduzieren lässt.

##### **AP 4.3 Life Cycle Assessment**

Zur Untersuchung des Umwelteinflusses alternativ betriebener Landmaschinen wird das THG-Reduktionspotential bestimmt. Hierzu wird die erforderliche Energie zum Betrieb landwirtschaftlicher dieselbetriebener und CNG-betriebener Maschinen am Beispiel der Biogasanlage in Hillerse bestimmt. Basierend auf den bestimmten Bedarfen kann im Anschluss mit Hilfe von Treibhausgasemissionsfaktoren das CO<sub>2</sub>-Äquivalent für beide Energieträger bestimmt und miteinander verglichen werden. Basierend auf den THG-Emissionsfaktoren für Diesel und CNG aus Biogas konnte ein Emissionsreduktionspotential von circa 46 % ermittelt werden.

Durch den Einsatz türkisen Wasserstoffs in landwirtschaftlichen Maschinen könnten die Emissionen vollständig eingespart werden.

##### **AP 4.4 Ableitung von Handlungsempfehlung**

Auf Basis der durchgeführten Simulationen lassen sich einige Handlungsempfehlungen für den Einsatz alternativer Antriebskonzepte in landwirtschaftlichen Maschinen ableiten. Diese werden im Folgenden aufgezählt:

- Maschinen mit geringer maschinenseitiger Energiespeicherkapazität sollten hofnah und oder bei Verfahrensschritten mit geringem Energiebedarf eingesetzt werden.
- Bei besonders energieintensiven Verfahrensschritten sollten Maschinen mit besonders hoher maschinenseitiger Energiespeicherkapazität eingesetzt werden.
- Zur Reduzierung des zusätzlichen Zeitbedarfs durch den Einsatz alternativer Antriebskonzepte könnten zusätzlich Tankkonzepte, wie beispielsweise die Feldbetankung durch einen Tankwagen oder feldnahe Tankcontainer, in Betracht gezogen werden.

### **Arbeitspaket 6: Entwicklung Softwarepakete**

Da eine Veröffentlichung des Simulationsmodells aufgrund der besonders hohen Komplexität und der fehlenden Anwenderfreundlichkeit nicht möglich ist, werden die Simulationsergebnisse in das Simulationsmodell des EVUR integriert. Dazu kann der Anwender angeben, wie groß die Flächen sind, auf denen Silomais, Winterroggen (GPS), Getreide und die Zwischenfrüchte Senf und Gras angebaut werden. Basierend auf den angegebenen Flächen wird im Anschluss der Jahresbedarf von Bio-CNG berechnet und daraus der Jahresbedarf an Wasserstoff zum Betrieb der landwirtschaftlichen Maschinen abgeleitet.

Zudem wurden Kennzahlen landwirtschaftlicher Fahrzeuge die für den Betrieb der Biogasanlage erforderlich sind in Rahmen eines Konferenzpapers und dieses Abschlussberichts veröffentlicht.

### **Arbeitspaket 8: Literaturrecherche**

Auf eine Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche wird an dieser Stelle verzichtet. Zum einen wurden diese bereits in einem vorherigen Zwischenbericht umfangreich dargestellt, zum anderen wurden die Ergebnisse bereits in die zuvor dargestellten Arbeitspakete integriert.

### **Arbeitspaket 9: Verbreitung der Erkenntnisse**

Wesentliche Projektergebnisse wurden im Rahmen eines Vortrags auf der LAND.TECHNIK AgEng Tagung 2023 in Hannover präsentiert. Zusätzlich zu dem Vortrag wurde ein Paper in dem Tagungsband veröffentlicht.

## **3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens**

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen werden im Folgenden stichpunktartig zusammengefasst:

- Durch den Einsatz CNG-betriebener Fahrzeuge kommt es infolge geringerer maschinenseitiger Energiespeicherkapazität zu erhöhtem Arbeitszeitbedarf infolge zusätzlicher Tankvorgänge.
- Diese Erhöhung kann durch den Anstieg der maschinenseitigen Energiespeicherkapazität reduziert werden. Die Erhöhung der Energiespeicherkapazität führt ebenfalls zu einer Reduzierung Gesamtenergiebedarfs, infolge des Wegfallens zusätzlicher Tankungen und damit einhergehender Fahrten.
- Durch den Einsatz CNG-betriebener Landmaschinen können circa 46 % der durch den Betrieb dieselbetriebener Landmaschinen verursachter Emissionen (gemessenen am CO<sub>2</sub>-Äquivalent) eingespart werden.
- Der Bedarf wasserstoffbetriebener Fahrzeuge wird aus dem Energiebedarf CNG-betriebener Landmaschinen abgeleitet. Diese Ableitung basiert auf ersten Veröffentlichungen bzgl. eines wasserstoffbetriebenen Traktors und dient lediglich einer groben Abschätzung des potentiell erforderlichen Wasserstoffbedarfs.
- Durch den Einsatz wasserstoffbetriebener Landmaschinen und die Bereitstellung des Wasserstoffs durch die Biogasanlage könnten die Emissionen, gemessen am CO<sub>2</sub>-Äquivalent, vollständig eingespart werden können.
- Der Bedarf synthetisch hergestellter Dieselmotorkraftstoffe wurde ermittelt.

## Literaturverzeichnis

- [1] Ecke, L.; Chlond, B.; Magdolen, M.; Vallée, J.; Vortisch, P.; Deutsche Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung Bericht 2020/2021: Alltagsmobilität und Fahrleistung. Karlsruher Institute für Technologie (KIT).2021
- [2] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Fahrleistungserhebung (FLE) – Erhebung der Fahrleistung der deutschen Kraftfahrzeuge und der Gesamtfahrleistung auf deutschen Straßen. URL: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/fahrleistungserhebung.html>
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010). URL: <https://daten.clearingstelle-verkehr.de/240/9/KiD2010-Schlussbericht.pdf>
- [4] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Mobilität in Deutschland (MiD) – Ergebnisbericht. URL: [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017\\_Ergebnisbericht.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf)
- [5] Jan Priesmann. Jericho-e-usage data package, 02 2022.
- [6] Bäumer, M.; Hautzinger, H.; Pfeiffer, M.: Mobilität in Deutschland 2017: Regionalisierung von MiD-Ergebnissen Small-Area-Methoden zur Schätzung von Verkehrskennzahlen in kleinräumiger Gliederung. [https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017\\_Bericht\\_Regionalisierung\\_MiD-Ergebnisse\\_Small\\_Area-Verfahren\\_1218.pdf](https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Bericht_Regionalisierung_MiD-Ergebnisse_Small_Area-Verfahren_1218.pdf)
- [7] Kraftfahrtbundesamt: Pressemitteilung Nr. 8/2016 – Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2016. [https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2016/pm8\\_fz\\_bestand\\_pm\\_komplett.html](https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2016/pm8_fz_bestand_pm_komplett.html)
- [8] Destatis: Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch der privaten Haushalte mit Personenkraftwagen. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/Tabellen/fahrleistungen-haushalte.html>
- [9] Alternativ Mobil: Autogas (LPG – Liquefied Petroleum Gas). <https://www.alternativmobil.info/alternative-antriebe/autogas-lpg>
- [10] Umweltbundesamt: Ökobilanz alternativer Antriebe. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0572.pdf>
- [11] ADAC: Erdgas: Hat der CNG-Antrieb Zukunft? <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/erdgas/>
- [12] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV – Leitfaden zur Anwendung der europäischen Norm EN 16258. [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/energieverbrauch-treibhausgasemission-oePNV.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/energieverbrauch-treibhausgasemission-oePNV.pdf?__blob=publicationFile)
- [13] Kuchling, T.; Awgustow, A.; Kureti, S.: Treibhausgasreduzierte Energieträger – Herstellung und anwendungstechnische Eigenschaften. [https://dgmk.de/app/uploads/2019/09/eek\\_19\\_07-08\\_305-315\\_Treibhausgasreduzierte-Energietr%C3%A4ger.pdf](https://dgmk.de/app/uploads/2019/09/eek_19_07-08_305-315_Treibhausgasreduzierte-Energietr%C3%A4ger.pdf)
- [14] Flüssiggas.de: Heizen mit Flüssiggas. <https://fluessiggas.de/wissen/fluessiggas/heizen/#wie-hoch-ist-der-heizwert-von-fluessiggas>
- [15] Institut für PolitikEvaluation: Automobile Wertschöpfung 2030/2050 – Zusatzauftrag zu Beschäftigungsentwicklung aufgrund neuer Mobilitätsdienstleistungen. URL: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050-zusatzauftrag.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/automobile-wertschoepfung-2030-2050-zusatzauftrag.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- [16] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Verkehrsverflechtungsprognose 2030. URL: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?__blob=publicationFile)
- [17] Baden-Württemberg Stiftung gGmbH: Mobiles Baden-Württemberg – Wege der Transformation zu einer nachhaltigen Mobilität. URL: [https://www.bund-bawue.de/fileadmin/bawue/Dokumente/Themen/Mobilitaet/Mobilitaet\\_Studie\\_Mobiles\\_BW\\_Langfassung.pdf](https://www.bund-bawue.de/fileadmin/bawue/Dokumente/Themen/Mobilitaet/Mobilitaet_Studie_Mobiles_BW_Langfassung.pdf)
- [18] Arancibia, A.; Strunz, K.: Modeling of an electric vehicle charging station for fast DC charging. In: 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference [115], S. 1-6. URL: <https://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183232>.
- [19] Apostolaki-Iosifidou, E.; Codani, P.; Kempton, W.: Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. In: Energy 127 (2017), S. 730 – 742. ISSN 0360-5442. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.015>.

- [20] Winzer, J.: Auslegungs- und Betriebsoptimierung von Offgrid PV-Speicher-Wasseraufbereitungssystemen unter Berücksichtigung dynamischer und hochaufgelöster Einflussfaktoren, Technische Universität Berlin, Fachgebiet: Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien, Masterthesis, 2017.
- [21] Winston (Hrsg.): Thunderr Sky Winston WB-LYP40AHA. Winston, 2011. URL: <http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp40aha>.
- [22] Deutscher Wetterdienst: Klimadaten Deutschland – Stundenwerte (Archiv). [www.dwd.de](http://www.dwd.de), URL: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivstunden.html>.
- [23] Stromnetz Berlin: Technische Anforderungen für den Anschluss an das Mittelspannungsnetz Berlin. [www.stromnetz.berlin](http://www.stromnetz.berlin), 2019. URL: [https://www.stromnetz.berlin/globalassets/dokumente/technischeanschlussbedingungen/ta-mittelspannung-2019/ta\\_mittelspannung\\_berlin.pdf](https://www.stromnetz.berlin/globalassets/dokumente/technischeanschlussbedingungen/ta-mittelspannung-2019/ta_mittelspannung_berlin.pdf).
- [24] ABB Australia Pty Limited (Hrsg.): Transformer Technical Data Sheet. ABB Australia Pty Limited, 2011. 1LAP016417.
- [25] Giersch, H.-U.: Elektrische Maschinen: Leistungselektronik, elektrische Antriebe. 6. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel, 2014 (Bibliothek des technischen Wissens). ISBN 9783808546451.
- [26] Schmidt, H; Sauer, D.: Wechselrichter-Wirkungsgrade – Praxisgerechte Modellierung und Abschätzung. [116], S. 550-557. Band I.
- [27] Kwon, M.; Jung, S.; Choi, S.: A high efficiency bi-directional EV-charger with seamless mode transfer for V2G and V2H application. In: 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) [119], S. 5394-5399.
- [28] Escoda, J.; Fontanilles, J.; Biel, D.; Repecho, V.; Cardoner, R.; Grino, R.: G2V and V2G operation 20 kW battery charger. In: 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27) [118], S. 1-5.
- [29] BRUSA Elektronik AG (Hrsg.): NLG664 – On Board Fast Charger. BRUSA Elektronik AG, 2018. URL: [https://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA\\_DB\\_EN\\_NLG664.pdf](https://www.brusa.biz/fileadmin/template/Support-Center/Datenbl%C3%A4tter/BRUSA_DB_EN_NLG664.pdf).
- [30] Simpson, M.: SPIDERS Bi-Directional Charging Station Interconnection Testing / National Renewable Energy Laboratory. 2013 (NREL/TP-5400-60222). Forschungsbericht. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/60222.pdf>.
- [31] Genovese, A.; Ortenzi, F.; Villante, C.: On the energy efficiency of quick DC vehicle battery charging. In: World Electric Vehicle Journal 7 (2015), Nr. 4, S. 570-576. ISSN 2032-6653. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj7040570>.
- [32] Hirscher, M. (Hrsg.): Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Storage. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA.
- [33] Clean Energy Partnership: H2 Infrastruktur. URL: <https://cleanenergypartnership.de/h2-infrastruktur/tankstellennetz/?scroll=true>.
- [34] Töpler, J.; Lehman, J. (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle – Technologien und Marktperspektiven. Springer Vieweg, 2. Auflage, 2017.
- [35] Lohse-Busch, H.; Stutenberg, K.; Duoba, M.; Liu, X.; Elgowainy, A.; Wang, M.; Wallner, T.; Richard, B.; Christenson, M.: Automotive fuel cell stack and system efficiency and fuel consumption based on vehicle testing on a chassis dynamometer at minus 18° c to positive 35° c temperatures. International Journal of Hydrogen Energy, 45(1):861-872, 2020.
- [36] Olmos, F.; Manousiouthakis, V.I.: Hydrogen car fill-up process modeling and simulation. In: International Journal of Hydrogen Energy 38 (2013), S.3401-3418.
- [37] Liu, Y.-L.; Zhao, Y.-Z.; Zhao, L.; Li, X.; Chen, H.; Zhang, L.-F.; Zhao, H.; Sheng, R.-H.; Xie, T.; Hu, D.-H.: Experimental studies on temperature rise within a hydrogen cylinder during refueling. In: International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010), apr, Nr. 7, 2627-2632. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.04.042>. DOI 10.1016/j.ijhydene.2009.04.042.
- [38] Bourgeois, T.; Ammouri, F.; Weber, M.; Knapik, C.: Evaluating the temperature inside a tank during a filling with highly pressurized gas. In: International Journal of Hydrogen Energy 40 (2015), S.11748-11755.
- [39] Society of Automotive Engineers: Surface Vehicle Standard. Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles. SAE J2601. 2010. – Forschungsbericht.
- [40] Maus, S.; Hapke, J.; Ranong, C. N.; Wüchner, E.; Friedlmeier, G.; Wenger, D.: Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks. In: International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008),

- sep, Nr. 17, 4612–4621. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.052>. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2008.06.052.
- [41] Boland, D.: Wirkungsgradoptimaler Betrieb eines aufgeladenen 1.0 l Dreizylinder CNG Ottomotors innerhalb einer parallelen Hybridarchitektur. <https://d-nb.info/1011213516/34>
- [42] Umweltbundesamt: DIE ÖKOBILANZ VON PERSONENKRAFTWAGEN: Bewertung alternativer Antriebskonzepte hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential und Energieeinsparung. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0763.pdf>
- [43] Scholwin, F.; Grope, J.: Durchführbarkeitsstudie – Biogas als Kraftstoff aus landwirtschaftlichen und kommunalen Reststoffen in Neukirch/Lausitz. [https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Durchfuehrbarkeitsstudie\\_Biogas\\_als\\_Kraftstoff\\_in\\_Neukirch2017.pdf](https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Durchfuehrbarkeitsstudie_Biogas_als_Kraftstoff_in_Neukirch2017.pdf)
- [44] ADAC: Opel Astra Caravan 1.6 Edition (10/07 – 12/09). <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/opel/astra/h-facelift/211901/>
- [45] Wietschel, M.; et al.: Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>
- [46] ADAC: Es gurgelt und summt: Der Toyota Mirai im ADAC Test. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/toyota/toyota-mirai/>
- [47] ElektroMobilitätNRW: Wasserstoff-Fahrzeuge – Elektromobilität für die Langstrecke. <https://www.elektromobilitaet.nrw/unternehmen/wasserstoff/>
- [48] Vattenfall: Sind Wasserstoffautos eine Alternative zu Elektroautos? <https://www.vattenfall.de/infowelt-energie/e-mobility/wasserstoffautos>
- [49] ADAC: Tesla senkt erneut die Preise – diesmal beim Model Y. <https://www.adac.de/news/tesla-senkt-preise/>
- [50] ADAC: Test VW ID.3: So viel besser ist er seit dem Facelift. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/vw/vw-id-3/>
- [51] ADAC: Hyundai Kona Elektro 2023: Wie gut fährt die zweite Generation? <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/hyundai/hyundai-kona-elektro/>
- [52] ADAC: Renault Zoe im Test: So weit kommt er wirklich. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/renault/renault-zoe/>
- [53] Trösken, Lennart; Meiners, Arwid; Frerichs, Ludger; Böttinger, Stefan: Modellbasierte Berechnung von Kraftstoffverbräuchen landwirtschaftlicher Verfahrensketten.
- [54] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Biogas-Messprogramm III. 1st edition, 2021. URL: [https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/bmp\\_2020\\_web\\_stand2021.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/bmp_2020_web_stand2021.pdf).
- [55] Bassani, I.; Kougias, P. G.; Treu, L.; Angelidaki, I.: Biogas Upgrading via Hydrogenotrophic Methanogenesis in Two-Stage Continous Stirred Tank Reactors at Mesophilic and Thermophilic Conditions. In: Environmental Science and Technology Vol. 49 (2015)
- [56] Lou, G.; Angelidaki, I.: Co-digestion of manure and whey for in situ biogas upgrading by the addition of H<sub>2</sub>: process performance and microbial insights. In: Applied Microbiology and Biotechnology Vol. 97 (2013)
- [57] Agneessens, L. M.; M.Ottosen, L. D.; Voigt, N. V.; Nielsen, J. L.; Jonge, N. de; Fischer, C. H.; Kofoed, M. V. W.: In-situ biogas upgrading with pulse H<sub>2</sub> additions: The relevance of methanogen adaption and inorganic carbon level. In: Bioresource Technology Vol. 233 (2017)
- [58] Wahid, R.; Mulat, D. G.; Gaby, J. C.; Horn, S. J.: Effects of H<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> ratio and H<sub>2</sub> supply fluctuation on methane content and microbial community composition during in-situ biological biogas upgrading. In: Biotechnology for Biofuels Vol. 12 (2019)
- [59] Angela Miltner. Techno-ökonomische Analyse der regenerativen Produktion von Wasserstoff für den Einsatz in Fahrzeugen. PhD thesis, Technischen Universität Wien, 2010.
- [60] Matthias Jahn Gregor Herz, Erik Reichelt. Design and evaluation of a Fischer-Tropsch process for the production of waxes from biogas, 2017. Energy Journal, Vol. 132, p. 370-381 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217308587>.
- [61] Weisenstein, M.; Wellssow, W. H.; Ma, H.; Röhrenbeck, S.; Rui, H.; Benzarti, A.: Synthetische NS Netzmodelle für wissenschaftliche Untersuchungen. (2018)

- [62] Weiss, J.; Prah, A.; Neumann, A.; Schröder, A.; Bettgenhäuser, K.; Hermelink, A.; John, A.; Manteuffel, B. v.; ecofys (Hrsg.): Kommunale Wertschöpfungseffekte durch energetische Gebäudesanierung. IÖW, 2014  
[https://www.ioew.de/publikation/kommunale\\_wertschoepfungseffektedurch\\_energetische\\_gebaeudesanierung\\_koweg/](https://www.ioew.de/publikation/kommunale_wertschoepfungseffektedurch_energetische_gebaeudesanierung_koweg/)
- [63] Hellwig, Mark: Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standardlastprofile, Technische Universität München, Diss., Mai 2003. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/601557/601557.pdf>
- [64] Buck, L.; Frerichs, L.: Kontinuierliche Energieversorgung von elektrischen Landmaschinen über Wide-Span-Systeme. In: LANDTECHNIK Bd. 78 (2023), S. 221-237.
- [65] Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V.: BtL – Biomass to Liquid (2024). URL: <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/btl-biomass-to-liquid> (Zugegriffen am 11.01.2024 um 16:34).
- [66] Brey, W.; Reuter, L.: Helios – A hydrogen-electric operated tractor system. In VDI-Berichte Nr. 2402: Powertrain Systems in Mobile Machines (2022).
- [67] Bang, H. J.; Khadem, J.; Stockar, S.; Muratori, M.; Rizzoni, G.: Modeling and Analysis of a CNG Residential Refueling System. In: Proceedings of the ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference (2014)
- [68] Bloch, H. P.: A Practical Guide to Compressor Technology, 2nd ed., New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006, pp. 1-27
- [69] peace software: Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen von Methan. URL: <https://www.peacesoftware.de/einigewerte/methan.html>
- [70] Amtsblatt der Europäischen Union: Renewable Energy Directive II. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>.
- [71] Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.): Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG. <https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/>. Version:07.10.2023
- [72] Generalzolldirektion (Hrsg.): Erfüllung, Nichterfüllung und Übertragung der Quotenverpflichtung. [https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Treibhausgasquote-THG-Quote/Quotenverpflichtung/Erfuellung-Quotenverpflichtung/Erfuellung-Nichterfuellung-Uebertragung-Quotenverpflichtung/erfuellung-nichterfuellung-uebertragung-quotenverpflichtung\\_node.html](https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Steuern/Verbrauchssteuern/Treibhausgasquote-THG-Quote/Quotenverpflichtung/Erfuellung-Quotenverpflichtung/Erfuellung-Nichterfuellung-Uebertragung-Quotenverpflichtung/erfuellung-nichterfuellung-uebertragung-quotenverpflichtung_node.html).
- [73] Österreichisches Umweltbundesamt. Berechnung von Treibhausgas (THG)\_Emissionen verschiedener Energieträger, 2022. URL: <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html> (Zugegriffen am 22.06.2023, 15:59).
- [74] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz: Berechnungstool CO<sub>2</sub> äquivalenter Emissionen (2018). URL: [https://www.umweltpakt.bayern.de/download/xls/co2-emissionen\\_berechnung\\_lfu\\_102018.xlsx](https://www.umweltpakt.bayern.de/download/xls/co2-emissionen_berechnung_lfu_102018.xlsx) (Zugegriffen am 11.01.2024 um 16:43).
- [75] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Informationsblatt CO<sub>2</sub>-Faktoren, 2021.
- [76] Umweltbundesamt: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger (2022). URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-12-09\\_climate-change\\_50-2022\\_emissionsbilanz\\_erneuerbarer\\_energien\\_2021\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-12-09_climate-change_50-2022_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2021_bf.pdf) (Zugegriffen am 29.06.2023, 8:15).
- [77] Umweltbundesamt: Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm) (2016). URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-der-eingangsdaten-emissionsbilanzen> (Zugegriffen am 11.01.2024, 16:22).
- [78] DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Institut für Technologie: Ökologische Bewertung der Wasserstoffbereitstellung (2022). URL: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202148-abschlussfolien-thg-emissionen-H2.pdf> (Zugegriffen am 11.01.2024 um 16:25).
- [79] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Informationsblatt „CO<sub>2</sub>-Faktoren“ (2023). URL: [https://www.wettbewerb-energieeffizienz.de/WENEFF/Redaktion/DE/PDF-Anlagen/informationsblatt-co2-faktoren-rili23.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.wettbewerb-energieeffizienz.de/WENEFF/Redaktion/DE/PDF-Anlagen/informationsblatt-co2-faktoren-rili23.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (Zugegriffen am 11.01.2024 um 16:28).
- [80] Siebenpfeiffer, W.: Mobilität der Zukunft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-61352-8> – ISBN 978–3–662–61351–1
- [81] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI: Status Quo und Zukunft von Wasserstoff im Verkehrssektor. <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2022/status-quo-und-zukunft-h2-Verkehrssektor.html>.

- [82] Hermeling, W.: Handbuch für den LNG- und CNG-Praktiker: Liquefied Natural Gas in der Anwendung. Wiesbaden and Heidelberg: Springer Vieweg, 2020. – ISBN 9783658285500
- [83] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V.: Das Erdgasangebot schrumpft: Gibt es bald kein CNG mehr an Tankstellen? <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/cng-tankstellen/>.
- [84] Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.): Bundesfernstraßenmautgesetz - BFStrMG. <https://www.gesetze-im-internet.de/bfstrmg/>.
- [85] energate GmbH: Gasumlage macht CNG-Tanken teurer. <https://www.energate-messenger.de/news/226775/gasumlage-macht-cng-tanken-teurer>.
- [86] Grant Thornton AG: LNG-Absatzmengen 2023-Q2. [www.grantthornton.de](http://www.grantthornton.de)
- [87] Scania Deutschland: Lkw mit Gasmotor. <https://www.scania.com/de/de/home/products/trucks/gas-truck.html>.
- [88] Volvo Group Trucks Central Europe GmbH (Hrsg.): VOLVO- Trucks mit Gasantrieb. <https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/alternative-antriebe/lng-lkw.html>.
- [89] IVECO Group (Hrsg.): IVECO S-WAY | Gewöhnen Sie sich an Ihren neuen S-WAY OF LIFE. <https://www.iveco.com/germany/neufahrzeuge/pages/iveco-sway-gas.aspx#overview>.
- [90] New Holland: New Holland präsentiert T7.270 Methane Power CNG als neue Traktorgeneration mit alternativem Antrieb. URL: <https://agriculture.newholland.com/de-de/europe/die-new-holland-welt/news/2023/new-holland-prasentiert-t7-270-methane-power-cng> (Zugegriffen am 11.01.2024 um 17:19).